1650T/D 循环流化床垃圾焚烧锅炉的运行调整

杭州锦江集团　　汉口绿色能源有限公司
方朝军 姜志红 吴正学 王武忠

摘要：结合本公司与兄弟单位循环流化床垃圾焚烧锅炉的运行经验，介绍了通过对垃圾焚烧预处理过程中的破碎、分选及堆酵等措施来改善垃圾着火和焚烧效果，并对运行中床层温度、料层差压、返料温度及一、二次风量、燃料量等参数调整进行了总结说明。

关键词：循环流化床　　垃圾焚烧锅炉　　垃圾预处理　　各种技术参数　　运行调节

1、前言

随着我国社会的不断发展和人民生活水平的提高，最近几年，城市生活垃圾的安全处理，已经成为现代社会发展中的一个突出问题。国内外采用较多的垃圾处理方法有卫生填埋、堆肥、焚烧和综合利用四种。发达国家城市生活垃圾发展的历程表明，垃圾焚烧处理具有无害化、减量化和资源化的优点。经过焚烧处理的垃圾在高温下得以消毒，大大减少了有害气体对环境的污染程度；焚烧处理的垃圾可以减容 70%～90%、减重 50%～80%，垃圾燃烧产生的热能可以用以供汽、发电，既降低了热污染又降低了垃圾处理成本。因此，最近几年循环流化床垃圾锅炉得到迅速的推广与发展。但由于燃料的特殊性，在运行操作时不同与普通的循环流化床，如果运行不当，极易酿成事故。根据几年来从事垃圾锅炉的现场调试和运行管理工作时积累的经验，结合兄弟单位的一些运行经验；对循环流化床垃圾锅炉的运行调整做以下总结归纳。

2、锅炉基本特性

650t / d 垃圾焚烧锅炉为单锅筒、自然循环、全膜式水冷壁结构，垃圾和煤混烧、高温分离的异重流化床锅炉，适用于半露天布置。结构示意图见图 1。

Car %	Har %	Oar %	Nar %	Sar %	Aar %	Mar %	Qnet,ar kcal/kg
26.75	2.78	7.97	0.56	0.07	20.28	41.59	2189

表 1　混合燃料的元素分析与发热值

1- 锅筒；2- 水冷风室；3- 密相区；4- 稀相区；5- 旋风分离器；6-Loopseal 返料装置；7- 低温过热器；8- 高温过热器；9- 减温器；10- 对流蒸发管束；11- 省煤器；12- 二次风空气预热器；13- 一次风空气预热器；14- 主汽集箱；15- 给煤口；16- 给垃圾口。

2.1 设计规范

2.1.1 锅炉额定蒸发量 56t/h，设计处理垃圾量 400t/d；

2.1.2 额定蒸汽压力 3．82MPa，额定蒸汽温度 450℃；

2.1.3 给水温度 150℃，冷空气温度 20℃；

2.1.4 一次风出口温度 164℃，二次风出口温度 201℃，排烟温度 166.5℃。

2.2 设计燃料：

2.2.1 垃圾(80％)十烟煤(20％)

2.2.2 垃圾颗粒度：小于 150mm，不可燃硬物小于 30mm。

2.2.3 煤颗粒度：0—13mm，大于 10mm 颗粒不超过 8%。

混合燃料的元素分析与发热值见表 1。

2.3 锅炉本体基本尺寸

2.3.1 锅筒中心标高 30700mm；

2.3.2 锅炉左右柱中心宽度 7500mm；

2.3.3 锅炉前后柱中心深度 15100mm；

2.3.4 锅炉主汽集箱标高 33100 mm

3、循环流化床垃圾锅炉燃烧及传热特性

循环流化床垃圾锅炉属低温燃烧，为了控制垃圾里有害气体的产生，炉膛温度一般为 900℃左右。燃料由炉前给料系统和给煤系统送入炉膛，送风一般设有一次风和二次风。一次风由布风板下部送人燃烧室，其主要作用是：保证料层流化；供给燃料燃烧所需的一部分氧气。二次风在炉膛后墙多点送入，其主要作用是：增加燃烧室的氧量；增强炉膛内气、固混合物的扰动度，使氧气与燃料颗粒充分接触，便于燃料颗粒充分燃尽；分层布置的二次风在炉内能够产生还原性气氛，从而抑制燃料的氮氧化，减少氮氧化物的生成。

燃烧室内的物料在一定的流化风速作用下，发生剧烈扰动并处于流化状态，部分固体颗粒在高速气流的携带下离开下部密相区进入燃烧室中、上部，其中较大颗粒的物料因重力作用沿炉膛四周的内壁向下回落，一些较小颗粒的物料随烟气飞出炉膛进入物料分离装置，进入分离装置的烟气经过固、气分离后，被分离下来的固体颗粒经分离装置下部的返料装置送回到燃烧室，经过分离后的烟气与对流烟道内的受热面焕热后，离开锅炉。因为循环流化床垃圾锅炉设有高效率的分离装置，被分离下来的物料过返料器又被送回炉膛，使锅炉炉膛内在正常运行状态下保持足够高的颗粒浓度，因此循环流化床垃圾锅炉与常规锅炉炉膛的传热方式有所不同，它不仅有辐射传热而且又对流和传导方式，确保锅炉达到额定出力。

4、循环流化床垃圾锅炉运行调整

4.1 垃圾堆酵提高其热值

我国的城市生活垃圾含水率一般 45%-60%，垃圾中水分蒸发吸收热量，导致床温降低，燃烧工况不稳定，容易造成锅炉熄火和垃圾燃烧不安全。为了降低垃圾焚烧前的水份，对入库的垃圾进行分区堆放 72h，使水份大部份都沥出，从而使垃圾的低位热值，改善锅炉燃烧工况。

根据清华大学与深圳市市政环卫综合处理厂合作的垃圾堆酵模拟试验和实际操作实验结论表明，一般生活垃圾在堆酵开始 48h 后达到减重量最大值，此时垃圾析出水分占可析出水分的 90%，垃圾脱水率超过 10%，垃圾整体减重在 20%上下（2）。对含水率较高的生活垃圾，堆酵后入炉垃圾低位发热值可提高 10% ～18%，堆酵过程中水分的析出是垃圾热值提高的主要因素。垃圾堆料的熟化和适度发酵，一般在 72h 内效果最佳，72h 之后因可去除的内在水分基本沥出，堆酵垃圾的吸、排水分基本达到动态平衡，继续堆酵不会沥出更多水份，相反会使垃圾中大分子有机物质分解成小分子结构，造成厨余类成分纤维链断裂而粉末化，反而影响垃圾在炉内的正常燃烧。

4.2 垃圾的破碎和分选处理

生活垃圾的尺寸和不可燃硬物的比例是影响流化床垃圾焚烧炉流态化燃烧的主要因素。不可燃硬物的比例越少，流化床不容易出现分层现象，垃圾焚烧效果也就越好。生活垃圾组成成分的尺寸越小，单位质量或体积生活垃圾的比表面积越大，生活垃圾与周围氧气的接触面积也就越大，焚烧过程中的传热及传质效果越好，燃烧越完全；反之，传质及传热效果较差，易发生不完全燃烧。因此，生活垃圾被送入焚烧炉之前，对其进行破碎预处理，使垃圾颗粒度：小于 150mm，不可燃硬物小于 30mm，可以改善流化床焚烧炉的焚烧效果。

4.3 床层温度调整

床层温度是指燃烧密相区内流化物料的温度。它是一个关系到锅炉安全稳定运行的关键参数。床层温度的测定一般采用不锈钢套管热电偶作一次元件，布置在距布风板 200mm 燃烧室密相层中，插入炉墙深度 15-25mm，数量不得少于 8 只。在运行过程中要加强对床层温度的监视，一般将床层温度控制在 850—900℃。床层温度控制过高，虽然可以降低不完全燃烧损失，提高传热系数，并减少 CO、N2O 排放，但是床温超过 850℃时，CaO 内部孔隙结构发生烧结而减弱了 CaO 与 SO2 反应的活性，于是导致炉内脱硫效率下降。床层温度控制过低，垃圾量波动时容易灭火，而且也不利于二恶英在炉内分解。在锅炉运行中，当床层温度发生变化时，可通过调节给垃圾量、一次风量、二次风量和给煤量。当床层温度过高时的调整：燃烧高热值水份少的工业垃圾时，应适当减少给垃圾量（燃烧低热值水份多的生活垃圾时，应适当加大给垃圾量），增加一次风量，加大下层二次风量，减少或停止给煤量，使床层温度降低。当床层温度过低时的调整：燃烧高热值水份少的工业垃圾时，应适当加大给垃圾量（燃烧低热值水份多的生活垃圾时，应停止给垃圾量），减少一次风量，减少下层二次风量，加大给煤量，调整炉膛负压为 0-20Pa，使床层温度升高。

4.4 料层差压监视与调整

一般运行时，循环流化床锅炉的料层差压表的取样器经常被床料堵塞，实际是通过风室压力来估算出料层差压。风室静压力是布风板阻力和料层阻力之和，由于一般设计布风板阻力为风室压力的 20%-25%，所以运行中通过风室静压力大致估计出料层阻力。此外，由风室静压力变化情况．可以了解沸腾料层的运行好坏。良好的流化燃烧时，压力表数值摆动幅度较小且频率高；如果数值变化缓慢且摆动幅度加大时，流化质量较差。运行中料层压力过高和过低时，都会影响流化质量，容易发生熄火和结焦。一般运行时，风室压力控制在 8500-9000Pa，料层厚度（通过风室压力估算）可以通过炉底两侧的 2 根Φ325×12 的放渣管排放底料量来控制。当床压高时，应开启冷渣器或人工排渣；当床压低时，应停止冷渣器或人工排渣。

4.5 返料温度监视与调整

返料温度是指通过返料器送回到燃烧室中的循环灰的温度，它可以起到调节料层温度的作用。对于采用绝热高温分离器的循环流化床垃圾锅炉，其返料温度较高，一般控制返料温度高出料层温度 30-50℃，可以保证锅炉稳定燃烧，同时起到调整燃烧的作用。在锅炉运行中必须密切监视返料温度，温度过高有可能造成返料器内结焦，由于垃圾中 K2O 和 Na2O 的含量远大于煤中的 K2O 和 Na2O 的含量，故垃圾的灰熔点比煤的灰熔点低的多，温度控制不好极易发生结焦，运行时应控制返料温度最高不能超过 980℃。返料温度可以通过调整给煤量、垃圾焚烧量、一次风量、二次风量和床温来调节，如返料温度过高，可适当减少或停止给煤量、垃圾焚烧量，适当减少一次风量，增大二次风量，适当降低床层温度。

4.6 一、二次风量调整

4.6.1 一次风量的调节

一次风的主要作用是保证物料处于良好的流化状态，同时为燃料燃烧提供部分氧气。为了保证垃圾焚烧炉的流化正常，一般所需的最低布风板截面风量约 3800-4100(m3/h)/m2。风量过低，物料不能正常流化，影响锅炉负荷，还可能造成结焦；风量过大，不仅会造成煤耗和风机电耗增加，而且使受热面磨损加剧。因此，无论在额定负荷还是在最低负荷，都要严格控制一次风量使其保持在良好的流化风量范围内。在排渣期间,为了使布风板上影响流化的粗大物件更快的排出，应该将布风板截面风量调整为 4500-4800(m3/h)/m2。

4.6.2 二次风在密相床的上部分三层喷入炉膛

二次风的主要作用有：一是补充燃烧所需要的空气；二是起到扰动作用，加强气、固两相混合；三是改变炉内物料的浓度分布；四是分段送风使炉膛下部缺氧燃烧形成还原性气氛，大大降低热力型 NOx 的排放。二次风总风量的调节通常是根据炉膛出口的氧量表来调整；氧量高时应减少二次风量，氧量低时则应增加二次风量。由于中下层二次风口的位置离布风板一般 2m-3ｍ左右，中下层二次风量的调节对床层燃烧影响很大；调节不当不仅会造成煤耗增加，燃烧不完全，还会造成熄火。燃烧高水份的垃圾时，床温受垃圾水份和下层二次风的影响，比较难稳定，此时上中下的三层风量配比应调节成 1/2/3。燃烧低水份的垃圾时，垃圾燃烧和放热快，床温平稳上升，此时上中下的三层风量配比应调节成 3/2/1。

4.7 燃料量调整

循环流化床垃圾焚烧锅炉主要燃料是生活垃圾和工业垃圾，煤是作为稳定焚烧炉燃烧工况的辅助燃料。燃料量调整就是垃圾焚烧量调整和给煤量调整。

垃圾量的调整直接影响到锅炉安全稳定的运行。垃圾的成份十分复杂。垃圾焚烧量过大，垃圾燃烧后产生的金属类和非金属类粗大物件数量就增多，这些粗大物件在炉内移动速度较慢，很难及时的通过排渣方式排除，会致使床层出现分层现象，严重时会发生熄火和结焦。同时垃圾焚烧量过大还会造成飞灰中碱金属含量增大，加剧高温和低温过热器管壁挂焦和腐蚀。垃圾焚烧量过小，炉膛中上部温度会低于床层温度，不利于细小碳粒和挥发份气体的的燃烧，造成锅炉不完全燃烧损失增大，煤耗增加；同时也不利于二恶英在炉内的分解。实践表明垃圾焚烧量在 16-18t/h 时（质量比 80%-85%），锅炉飞灰含碳量少，床层流化正常。

国家规定循环流化垃圾焚烧锅炉搀煤的质量比不得超过 20%，掺少煤量的多少直接关系到锅炉的节能环保达标。在垃圾水分大和热值较低时，床层内燃料燃烧的物理吸热大于化学燃烧放热，床层温度下降，应添加适量的煤辅助燃烧，改善炉内的燃烧工况，使垃圾在炉内稳定、充分的燃烧。此外在垃圾焚烧过程中添加适量的煤对二恶英生成有多种抑制作用。根据浙江大学陆胜勇教授在煤和垃圾的管式燃烧炉上的试验结果：添加煤量比例为 16%时，可以有效抑制 95%二恶英生成（3）。

垃圾焚烧量和给煤量的配比，对锅炉运行非常重要。比例过大或过小都会影响锅炉安全、经常、环保的运行。实际运行中圾焚烧量为 16-18t/h 时（质量比 80%-85%），辅助烧煤量为 2.8-4.8 t/h 时（质量比 15%-20%），锅炉燃烧工况稳定且垃圾燃烧完全，辅助投煤量少，煤耗低，烟气排放达标，经济性好。对垃圾和煤的燃烧调整不是单一量调节，而是热量的相互补给调整。垃圾和煤的燃烧调整以稳定垃圾焚烧量为基础，根据炉膛出口温度、床层温度、含氧量和返料温度等参数变化趋势来调节给煤量的大小。实际运行时，当床层温度有上升趋势，含氧量为 6%—8%之间，返料温度有上升趋势；说明炉内燃料燃烧的化学放热大于物理吸热，给煤量可以适当减少了。当返料温度有下降趋势，含氧量明显上升，说明炉内燃料燃烧的物理吸热大于化学放热，应该马上增加给煤量来稳定燃烧工况。

5、结束语

为了保证垃圾在循环流化床焚烧锅炉内充分稳定的燃烧，在焚烧前对垃圾进行破碎、分选和堆酵是非常关键的。此外在运行中还要结合锅炉自身燃烧特性、煤和垃圾的品质，合理的调整床层温度、料层差压、返料温度及一、二风量、燃料量等参数，将锅炉调整到最佳的安全和经济的运行工况，实现垃圾焚烧的社会效益和经济利益最大化。

参考文献

【1】仲兆平，金保升，兰计香，董长青，周宏仓　　城市生活垃圾与煤混烧过程中二恶英的排放与净化研究 中国电机工程学报　2003.12

【2】吴立，张洪波，城市生活垃圾堆酵实验研究　铁道劳动安全卫生与环保　2002.03

【3】陆胜勇,垃圾和煤燃烧过程中二恶英的生成排放和控制机理研究 博士学位论文　2004.7

A-O-MBR 工艺低温环境对垃圾渗滤液的处理研究

邓冬梅　凌秀远　王玉喜　张万文　蒙立　肖晓　秦国凤　黄春湘
（柳州森淼环保技术开发有限公司，柳州，广西，545616）

摘要：研制处理规模 0.5m³/h 的“A-O-MBR”组合工艺中试装置，在某垃圾填埋场现场，对填埋 5 年的垃圾渗滤液进行处理，研究低温环境下，A-O-MBR 组合工艺处理垃圾渗滤液的可行性及运行规律。研究结果表明，温度<8 ℃时，在进水 COD、NH_3-N 和 TN 分别为 5710 mg/L、1862 mg/L 和 1960 mg/L 的情况下，中试装置对 COD、NH_3-N 和 TN 去除效率分别稳定达到 70%、86%和 55%，初步证实工艺可行。工艺采用的 MBR 为浸没式平板 MBR，污泥浓度较高，对温度和负荷冲击适应性强，及反应池中实现部分短程硝化反硝化，可能是中试装置高去除率的原因。

关键词：垃圾渗滤液；A-O-MBR；低温运行；平板 MBR；短程硝化反硝化

垃圾填埋渗滤液中含有多种难降解有机成分及氨氮，具有污染物浓度高、毒性强，水质水量波动大等特点，属于难降解有机废水。特别在冬季，此时垃圾渗滤液具有晚期垃圾渗滤液特点，产量少，可生化性低，同时低温一定程度上抑制了污泥中功能微生物活性，因此，处理难度更大[2]。传统工艺如氧化沟和 SBR，在冬季气温低时运行，污染物去除率明显降低[3][4]。A-O-MBR 是一项用于垃圾渗滤液处理的新型组合工艺，目前在垃圾渗滤液处理中已有不少应用[5]。但其低温下的运行规律目前尚无深入探讨，此外，目前应用的 MBR 多为外置式 MBR，内置平板式 MBR 应用较少。

本研究采用内置平板式 MBR 膜组件，研发制备采用 A-O-MBR 组合工艺的中试规模实验装置，2010 年 10 月至 2011 年 2 月期间，在某垃圾填埋场现场处理垃圾渗滤液，研究低温环境下 A-O-MBR 组合工艺处理垃圾渗滤液的可行性，考察平板 MBR 对垃圾渗滤液处理的适用性，初步探讨低温环境下 A-O-MBR 的运行规律和机理。

1 实验部分

1.1 实验装置

实验装置为钢结构，总容积 3m×6m×2.8m，分为同容积连体四个池，分别为 A 池、O1 池、O2 池和 MBR 池（图 1）。A 池内设搅拌机搅拌，O 池和 MBR 池内设曝气，从 MBR 池至 A 池设内回流。MBR 膜组件采用森淼环保技术开发有限公司生产平板 MBR 膜组件，膜面积共 70 m²。

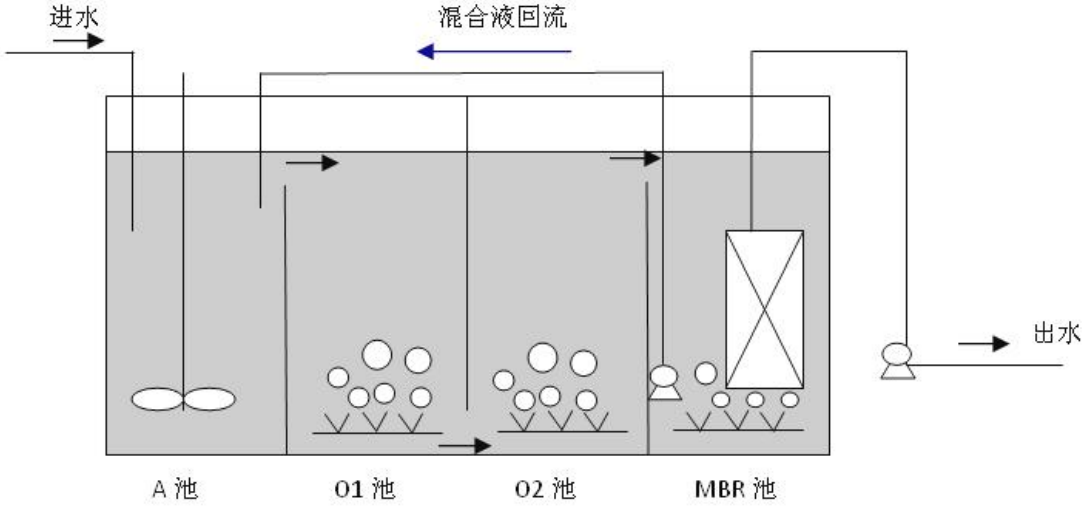


图 1　A-O-MBR 实验装置示意图

1.2 污泥驯化

2010 年 9-10 月进行污泥驯化。以垃圾填埋场渗滤液处理站氧化沟污泥为接种污泥，通过排上

清和重复进泥，浓缩污泥，至 MBR 池 MLSS 在 10000mg/L 左右。闷曝 1 晚后，以垃圾渗滤液调节池出水为进水，在 1/5 设计流量下连续运行，至 COD 去除率稳定达 70%以上，NH_3-N 去除率稳定达到 80%以上，标志污泥驯化初步成熟。然后，逐步提高运行水量至设计流量 0.5m^3/h，COD 和 NH_3-N 去除率无明显降低，标志污泥驯化完成。污泥驯化阶段进水水质如表 1 所示。

表 1 污泥驯化阶段进水水质

水质指标	COD(mg/L)	NH_3-N(mg/L)	pH	水温(℃)
平均值	2185	851	8.3	25
波动范围	1348～3328	628～926	7～9	20～30

1.3 运行过程

2010 年 11 月～2011 年 2 月，除去现场停电等意外情况，设备连续稳定运行 80 天，运行期间，各池污泥浓度维持在 10000mg/L～15000mg/L，DO、pH 和温度等具体情况如表 2，表 3 所示。

表 2 各单元工艺参数控制

参数	A 池	O1 池	O2 池	MBR 池
DO（mg/L）	0.2～0.5	0.5～1	1～2	3～6
pH	7～8	7～8	7～8	6～8

表 3 工艺运行基本参数

运行时间（d）	水温（℃）	进水 pH	内回流比
1～35	22(20～25)	7～9	3:1
36～55	13(10～16)	7～9	3:1
56～80	8(4～11)	7～9	3:1

1.4 实验指标检测

COD：HACH 快速消解，分光光度法测定；NH_3-N：纳氏试剂分光光度法；NO_2^-N：N-（ 1-萘基）-乙二胺光度法；NO_3^-N：紫外分光光度法。由于垃圾渗滤液在调节池中停留时间很长，有机氮含量较少，因此以 NH_3-N、NO_2^-N 和 NO_3^-N 之和计为 TN。试验所用药品均为分析纯。

2 结果与分析

2.1 COD 的去除

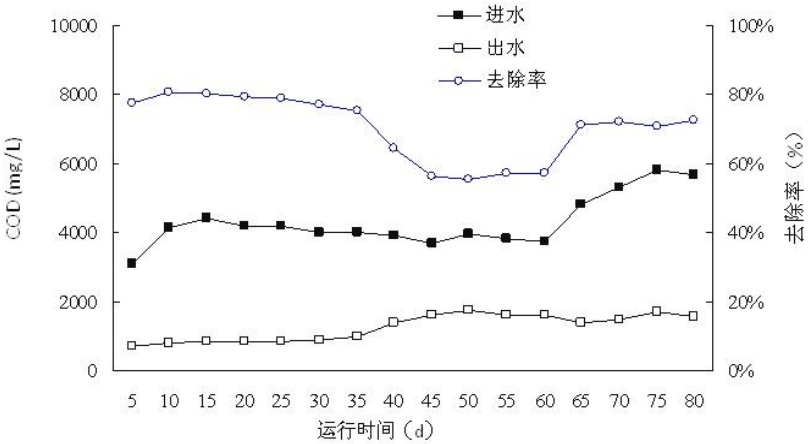


图 1 A-O-MBR 对垃圾渗滤液 COD 的去除

如图 1 所示，系统对 COD 的去除效率受进水成分影响较大。从第 35 天开始，虽然气温和进水 COD 变化不明显，但出水 COD 明显增加，由 1000 mg/L 升至近 2000 mg/L，之后虽有进水水质波动和气温下降，出水 COD 无明显波动。垃圾渗滤液中含有部分灰黄霉酸等生化降解部分，此部分含量随垃圾成分，填埋方式和季节不同而有变化。一般来说，冬季垃圾渗滤液性质类似晚期垃圾渗滤液，可生化性较差，难降解成分相对更多[2]。

在第 III 阶段，平均气温 8℃，MBR 进水 COD 4828～5827 mg/L 时，出水 COD 在 1377～1714mg/L，去除率稳定在 70-75%。同期运行的渗滤液处理站氧化沟二沉池出水 COD 高于 MBR 池出水，说明在低温环境下，相对传统工艺，MBR 工艺对 COD 的去除有优势，可能的原因是，MBR 工艺泥龄较长，对环境冲击如温度，适应性较强，因此即使低温环境下也能达到较高的去除率[5]。在如此低温下，MBR

对 COD 的去除效率未见文献报道，对 A-O-MBR 工艺的工程应用有一定参考价值。

2.2 氨氮的去除

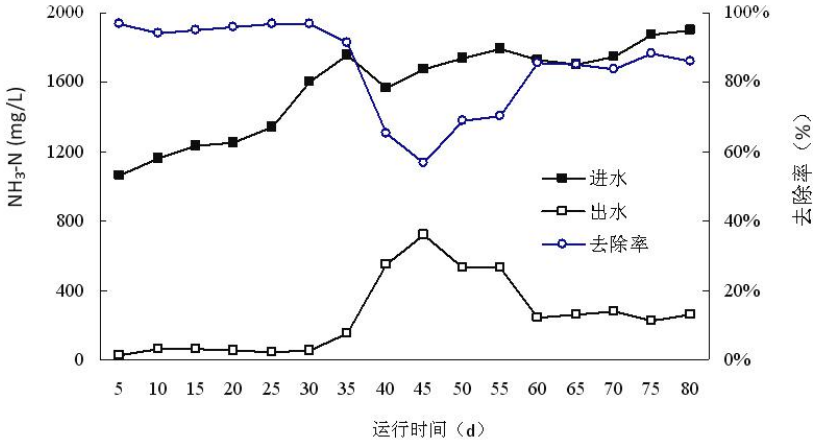


图 2　A-O-MBR 对垃圾渗滤液 NH_3-N 的去除

如图 2 所示，系统对 NH_3-N 的去除受进水 NH_3-N 浓度变化影响较大。运行期间，进水 NH_3-N 逐步上涨，在第 25d～35d，进水 NH_3-N 涨幅最大，由 1305 mg/L 升至 1864 mg/L，之后维持在 1800 mg/L 左右。受此冲击，出水 NH_3-N 由 50 mg/L 升至最高 722 mg/L，之后逐步回落，稳定在 250 mg/L，说明系统对进水 NH_3-N 浓度冲击有较强适应性。

在第 60d～80d，进水 NH_3-N 1700～1826 mg/L 时，出水 COD 在 221～283mg/L，去除率稳定在 84%以上，明显优于同期运行渗滤液处理站氧化沟出水。

2.3 TN 的去除

由于仪器故障，第 21d～50dTN 数据缺失。由图 4 可知，在 1～20d，去除率在 60%～80%。孟了等利用 MBR 处理垃圾渗滤液，运行水温 28℃，C/N 比 3:1 左右时，TN 去除效率 70%，与此结果相符[6]。在第 60d～80d，进水 TN 1926～2104 mg/L 时，出水 TN 在 800mg/L 左右，去除率有一定下降稳定在 55%以上，说明温度低，TN 去除效率受低温影响。研究表明，SBR 工艺处理垃圾渗滤液时，冬季 TN 去除效率为 30%，殷琨等也报道，Orbal 氧化沟处理垃圾渗滤液时，冬季具有去除效率低问题，说明 MBR 工艺对垃圾渗滤液 TN 的去除相对传统工艺有一定优越性[3][4]。

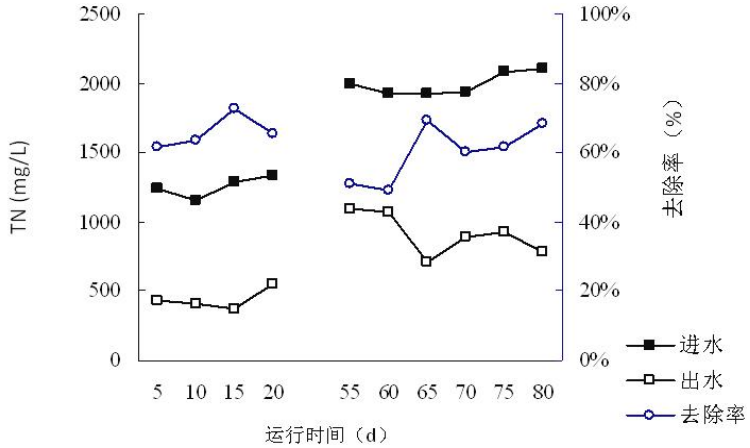


图 4　A-O-MBR 对垃圾渗滤液 TN 的去除

2.4 脱氮机理分析

工艺采用的 MBR 为浸没式平板 MBR，污泥浓度较高，运行过程中维持在 10000mg/L～15000mg/L，高于活性污泥法，也高于浸没式中空纤维 MBR，提高了硝化系统对低温的适应性，在低温下也维持了较高的脱氮效率。

在本研究中，在最后 20d， MBR 池中出水亚硝氮（NO_2^-）波动范围 120 mg/L～277 mg/L，说明形成部分短程硝化反硝化（图 5），短程硝化反硝化，即由 NO_2^-阶段直接进行反硝化阶段，节省 C 源用量和反应空间[6]。而在 1d～20d，MBR 池发生完全硝化反硝化，两个阶段运行相比，除温度外，DO，运行负荷，等参数无明显变化，说明后期形成的部分短程硝化反硝化主要由于温度影响形成。这是因为，低温对硝酸菌抑制程度高于亚硝酸菌[7]。复合式 A /O 工艺、SBR 工艺和 MBR 工艺等处理垃圾

渗滤液时都实现了实现短程硝化反硝化[4][8][9]，但这些研究多是实验室研究，未探讨反应温度的影响。本研究证实了，在低温下 MBR 工艺中，垃圾渗滤液能稳定实现部分短程硝化反硝化，这也是 A-O-MBR 低温下有较高 TN 去除率的原因之一。

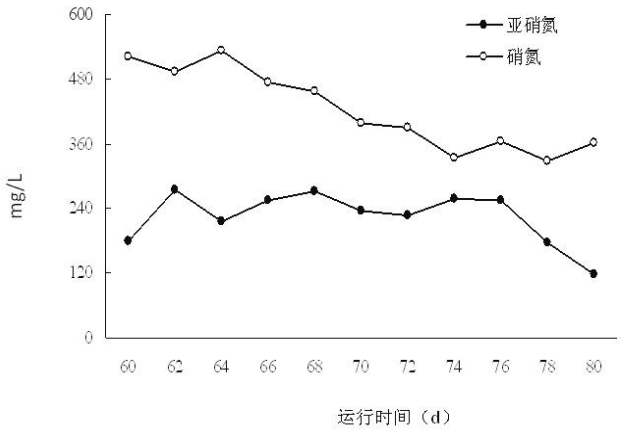


图 5　A-O-MBR 出水亚硝氮和硝氮

3 结论

（1）温度 5℃～15℃时，A-O-MBR 处理垃圾渗滤液，效果较好，初步证实工艺可行。虽然垃圾渗滤液进水污染物浓度增加，可生化性降低，COD、NH_3-N 和 TN 去除率分别达 70%、84%和 55%以上。

（2）工艺采用的浸没式平板 MBR，维持高污泥浓度，此外，系统在低温下稳定实现部分短程硝化反硝化，是工艺能高效去除 COD、NH_3-N 和 TN 等污染物的重要原因。

参考文献

[1] 王坚，季民，李征，等. UASB + MBR 工艺处理城市垃圾填埋场渗滤液试验研究与问题讨论[J]. 城市环境与城市生态，2003，16(6)：215- 217

[2] 李颖，郭爱军. 垃圾渗滤液处理技术及工程实例[M]. 中国环境科学出版社，p28

[3] 殷琨，秦俊芳. UASB/Orbal 氧化沟工艺处理垃圾渗滤液[J]. 中国给水排水，2006，22（12）：74-77

[4] 徐步元，王得楷，方世跃，等. SHARON 法处理垃圾焚烧厂渗滤液[J]. 兰州大学学报(自然科学版)，2008，44（1）：17-24

[5] 陈根荣. 膜生物反应器(MBR)在污水处理中的应用[J]. 科技情报开发与经济，2008，18（6）:123-124

[6] 苏高强，彭永臻. 短程硝化实现方法的研究进展[J]. 工业用水与废水，2010，41（3）：9-13

[7] 李亚新. 活性污泥法理论与技术[M]. 中国建筑工业出版社，p224

[8] 乔文燕，李军，金永祥，等. 复合式A /O工艺处理晚期垃圾渗滤液的脱氮特性[J]. 中国给水排水，2010，26（19）：28-36

[9]孙艳波，周少奇，李伙生，等. SBR法处理垃圾渗滤液与粪水的混合液[J]. 中国给水排水，2009，25（7）:5-8

VonRoll-日立造船垃圾焚烧技术国产化及其应用案例介绍

瞿兆舟　冯波　智瑞敏　印晓彬　周生光　朱晓平　龙吉生
上海康恒环境工程有限公司，上海市乌鲁木齐北路480号万泰国际11层，邮编：200040

摘要：上海康恒环境工程有限公司于2009年初引进VonRoll-日立造船垃圾焚烧技术，完成了国产化消化后，成功应用于国内十几个垃圾焚烧厂。本文在介绍该技术特点的基础上，通过如东县生活垃圾焚烧发电厂的案例详细介绍了技术引进和消化、国产模块化和系列化过程和现状，以及如东项目的调试运行情况。如东项目尽管单台规模为250吨/日，但是采用了卧式锅炉、高温空气预热器和干法烟气处理等技术，达到焚烧效果好的目的。同时，简单介绍了由上海康恒供应主设备的海口垃圾焚烧发电厂的试运行情况。本文通过介绍国产化和应用案例，供同行参考。

关键词：VONROLL 日立造船上海康恒垃圾焚烧国产化

1 前言

VONROLL-日立造船垃圾焚烧炉技术有别于其他焚烧技术之处是炉排以列为单位运动，并且在燃烧段设置了剪切刀以破碎垃圾的结块，改善燃烧状况。

该技术是全世界应用最广泛的垃圾焚烧技术之一。日立造船从VONROLL公司引进该技术并于今年收购了VONROLL公司。上海康恒环境工程有限公司于2009年初成功地从日立造船得到该技术的转让和生产授权，两者同时建立了战略合作关系。本次技术转让具有如下特点：

（1）日立造船保证焚烧线的性能。

（2）日立造船除转让相关资料、图纸外，还包括设计方法、制造方法、调试方法等。

（3）该技术转让对于焚烧炉的规模没有任何限制。

（4）日立造船同步向上海康恒提供其自身新开发的技术，使得该转让的技术具有可持续的先进性。

（5）日立造船随时向上海康恒提供技术支持。

截止目前为止，上海康恒环境工程有限公司在中国大陆已经获得了十几座生活垃圾焚烧厂的业绩，单炉处理规模从75吨/日到600吨/日不等。焚烧炉的加工生产均以模块化方式实施，且于加工厂内将炉排完全组装后出厂。

本文以上海康恒第一个完全单独设计并供应焚烧线主设备的如东县生活垃圾焚烧发电厂为例介绍VONROLL-日立造船垃圾焚烧技术在中国的国产化应用情况，该厂一期设置2条焚烧线，单炉处理规模为250吨/日，二期设置一条500吨/日的焚烧线。本文介绍一期焚烧系统设计、调试和试运行的情况。

2 如东项目焚烧系统设计

如东县生活垃圾中渣土和水分的含量比较大，低位热值较低（4100~4900kJ/kg），本项目设计点的垃圾低位热值为6200kJ/kg。上海康恒针对本项目的实际情况进行了针对性的设计。

图 1 如东入炉生活垃圾照片 1

图 2 如东入炉生活垃圾照片 2

2.1 机械炉排设计

炉排设计有干燥炉排、燃烧炉排、燃烬炉排 3 段，长度分别为 3.61 米、5.61 米、4.81 米，总长 14.03 米，各段炉排宽度均为 3.51 米，总面积为 49.25㎡，额定机械负荷为 212kg/㎡h。每段炉排均设置单独的液压驱动装置，运动速度根据燃烧情况由 ACC 分别进行自动调节。每段炉排之间的垂直落差近 1.3 米，垃圾在跌落时得到破碎和翻转。

各段炉排均设计为列动式结构，活动炉排列和固定炉排列沿焚烧线横向交错布置，各相邻炉排列之间设置有合理的间隙，通过活动炉排列的往复运动将垃圾送往焚烧线下游。燃烧空气除能通过炉排片前端的通风孔送到炉排上方供垃圾焚烧外，还能够通过各相邻炉排列之间的间隙送到炉排上方，活动炉排列与固定炉排列之间的相对运动能完全杜绝燃烧空气堵塞的发生。

在燃烧炉排中间部位的各固定炉排列上设置有一组（共 8 枚/炉）剪切刀，通过剪切刀的往复剪切动作，剪碎、破碎块状垃圾。

2.2 一次风室设计

在干燥炉排下设置 1 个风室，燃烧炉排下沿焚烧线纵向设置 3 个风室，燃烬炉排下沿焚烧线纵向设置 2 个风室，各风室的风量可以根据垃圾燃烧的实际情况通过各风室前风道上单独设置的电动风门进行分别调节。一次风干路风道内风压在设定后，通过一次风机入口处的电动挡板及一次风机的转速控制进行保持。

2.3 燃烧空气系统设计

2.3.1 一次风系统设计

从垃圾坑抽取的一次风首先通过蒸汽预热器加热，蒸汽预热器分为两级，中压级的蒸汽来自汽轮机一段抽汽，高压级的蒸汽来自主蒸汽母管。通过两级加热可以将一次风加热至 220℃以上。经过蒸汽预热器加热后的一次风继续送至炉膛内的高温烟气预热器加热，其温度可被加热至 300℃。

蒸汽预热器和高温烟气预热器均设置有旁路并配备电动风门，ACC 实现一次风温度从常温至 300℃的自动调节。一次风量由 ACC 根据锅炉蒸发量的设定值进行自动调节。

蒸汽预热器的高压级汽源设计为主蒸汽母管中的主蒸汽，对于有 2 条或 2 条以上焚烧线的焚烧厂运行而言具有较大的好处。在 1 号线正常运行，2 号线启炉时，能够用一部分 1 号炉的主蒸汽加热 2 号炉的一次风，使得启炉时间显著缩短，节省燃油费用；在各焚烧线燃烧状况不一时，能够对预热用主蒸汽进行统一调配，使得各炉均达到良好的工况。

本项目焚烧炉还设计有炉墙空气冷却系统，在燃烧炉排上方的左右侧炉墙设置有空冷壁，使得燃烧段炉膛内表面温度不超过 800℃，即使垃圾在燃烧特别旺盛时也不易发生炉墙结焦的事件。冷却空气量可以调节，使得空冷壁出口的温度维持在 90~100℃左右，从空冷壁出来的热空气送到一次风的吸风口，热量得到回收。该系统的设计是为优化炉膛内热量和温度场的分布并防止结焦。

2.3.2 二次风系统设计

二次风从锅炉房抽取，通过蒸汽预热器可加热至 220℃以上，蒸汽预热器分为两级，中压级和高压级的汽源与一次风蒸汽预热器一致。蒸汽预热器设置旁路并配备电动风门，ACC 实现二次风温度的自动调节。二次风量根据炉膛温度由 ACC 进行自动调节。

3 如东焚烧厂主要节点

表 1 如东生活垃圾焚烧厂主要节点

序号	内容	时间	备注
1	土建开工	2009.12	
2	锅炉安装开始	2010.02.28	
3	1、2 号锅炉整体水压试验	2010.08.17	一次性通过
4	1 号炉烘炉	2010.12.24	一次性完成
5	2 号炉烘炉	2011.01.06	一次性完成
6	1 号炉煮炉	2011.01.22	纯垃圾焚烧,一次性完成
7	1 号炉吹管	2011.03.07	纯垃圾焚烧,一次性完成
8	2 号炉煮炉	2011.04.01	纯垃圾焚烧,一次性完成
9	2 号炉吹管	2011.04.09	纯垃圾焚烧,一次性完成
10	汽轮机冲转	2011.04.15	纯垃圾焚烧,一次性完成

目前 1、2 号焚烧线均在连续运行中。

4 如东焚烧厂运行情况和讨论

本厂上海康恒供货的主要设备包括：炉排、余热锅炉（含高温烟气预热器）、蒸汽预热器、液压系统、燃烧器系统、ACC 系统（含硬件和软件、程序）等。

4.1 总体调试情况

调试工作较顺利，炉排、余热锅炉、蒸汽预热器、液压系统、燃烧器系统和 ACC 系统运行正常。和同样采用日立造船-VONROLL 炉排技术的成都洛带垃圾焚烧厂有所区别的是，如东焚烧厂上海康恒根据不同的垃圾特性对推料器参数作了调整，使得垃圾送料均匀且平稳。

4.2 垃圾焚烧效果

总体看来，垃圾焚烧情况良好，炉温、蒸发量以及火焰位置等均正常，达到了设计时的预期。在垃圾焚烧初期，对炉渣热灼减率进行了抽样测试，两个样品的测量值分别为 2.65%、1.95%。

图 3 焚烧炉渣

图 4 炉膛燃烧火焰

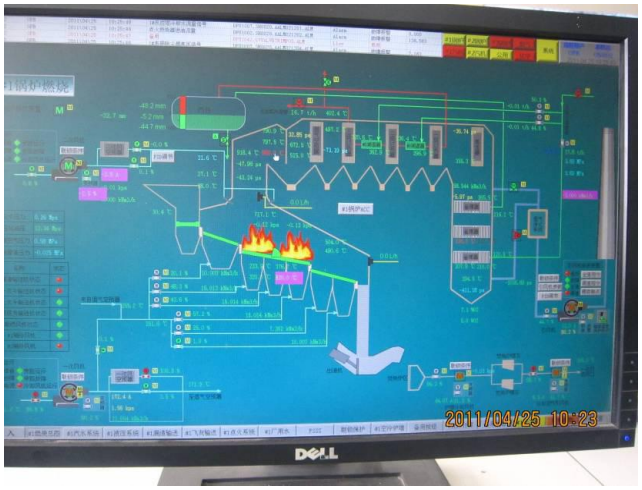


图 5 运行监控画面

1 号、2 号焚烧炉的燃烧情况基本一致，在一次风温度调节为 200℃左右，垃圾处理量为额定值时，燃烧中心位置处于燃烧炉排的中间部位，燃烬段没有明火，二次燃烧室温度在 870℃~910℃之间，单台锅炉蒸发量在 16.1~17.2t/h 之间，省煤器出口含氧量为 6~10%，测算表明锅炉效率在 80%以上。

在调节一次风温度达到 260~300℃后，将垃圾处理量提高至 110%负荷，尽管有时入炉垃圾湿度相当大，但燃烧位置未发现有明显后移，燃烬段没有明火。由于本厂设置了高温烟气空气预热器，一次风温度实现高温化，对于入炉低热值垃圾而言，仍然能够达到良好的干燥效果、提升炉温并保证燃烧状况的正常。

从一段时间的燃烧情况来看，垃圾特性波动明显且无太大的规律性，同在一台炉内的垃圾其性质差别也较大，炉排速度的分段调节以及多燃烧空气风室的设计非常重要，能够很方便地根据变化了的垃圾特性进行燃烧状况的优化和燃烧位置的调节。

燃烧室温度有时会达到1000℃左右，由于本厂在燃烧最旺盛的位置设置了空冷壁，至今还没有发生过炉墙结焦的现象。

在垃圾的运动和焚烧过程中，燃烧炉排上设置的剪切刀对于易结块的低热值垃圾具有良好的剪切、破碎效果。现场观察到，在入炉垃圾湿度特别大时，在干燥段和燃烧段的前段垃圾会有一定程度的结块，这些垃圾块在通过剪切刀之后得到破碎，炉排下的燃烧空气能够轻易穿透剪切后的垃圾并实现垃圾的完全燃烧。

图6 燃烧炉排上的剪切刀

5 海口焚烧厂试运行情况简介

5.1 海口焚烧厂基础条件

海口焚烧厂配备两台600吨/日垃圾焚烧炉及余热锅炉，垃圾设计点低位热值为6910kJ/kg，焚烧工艺与如东焚烧厂基本一致，一次风最高温度为300℃。从入炉垃圾情况来看，目前的热值远远达不到设计点。

图7 海口入炉垃圾照片1

图 8 海口入炉垃圾照片 2

5.2 海口焚烧厂焚烧效果

尽管入炉垃圾中厨余和水果等的含量较大，但由于一次风的高温化和剪切刀的设置，取得了比较好的垃圾焚烧效果，目前在不使用燃烧器的情况下处于稳定、良好运行状态中。

图 9 炉膛火焰

图 10 焚烧炉渣

6 结论

VONROLL-日立造船垃圾焚烧炉技术在成都洛带应用后得到良好的反响。上海康恒引进该技术国产化后成功应用于如东、海口等垃圾焚烧发电厂，如东、海口焚烧厂运行后的结果进一步验证了下述事项。

1）本炉排很适应国内的高水分低热值垃圾；

2）剪切刀的设置对于含水量高的垃圾燃烧结块有明显的破碎效果；

3）将一次风温度加热到 300℃，可以有效地提高垃圾焚烧处理的适应范围；

4）炉排下设置多

5）个风室有利于燃烧空气的调节；

空冷壁的设置有利于防止炉墙结焦。

表面过滤技术在垃圾焚烧发电厂烟气脱酸净化中的作用

孙宏　杨伟才
（戈尔工业品（上海）有限公司，上海，200030）

摘要：随着中国城市的发展，垃圾焚烧工程获得兴起。对焚烧后尾气的处理技术提出了越来越高的要求。基于“表面过滤“理论的Gore®过滤技术，不但为粉尘达到欧盟标准提供了技术保障，而且为脱酸/硫后续反应提供了反应界面，在实际中可以有效节约反应剂。

关键词：烟气净化 垃圾焚烧　袋滤技术 过滤　脱硫

Introduction the Function of Surface Filtration Technology In Incinerators Regarding the Flue Gas Cleaning

Sun　Hong
(Gore Filtration Products (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai, 200030)

Abstract： With the development of China municipal cities, incineration technology is expending quickly. The flue gas purify technology is more and more enhanced. Based on the “Surface Filtration” theory, Gore-Tex® filtration products are used widely not only to ensure the Europe dust emission standard, but also offer the function for saving the consumption of additive.

Keywords：gas purify; waste incinerator; bag filter ;filtration; desulphurization

本世纪头二十年是我国发展的重要战略机遇期，“十一五”是承前启后的重要时期。在这期间，国家将全面贯彻落实科学发展观，建设资源节约型、环境友好型社会，大力发展循环经济,统筹经济社会发展，统筹人与自然和谐发展,实现城市生活垃圾管理可持续发展。根据建设部第27号令《城市生活垃圾管理办法》，《中华人民共和国固体废物污染防治法》（2005年4月1日），及《关于编制“十一五”城市生活垃圾无害化处理设施建设规划的通知》（发改办投资[2005]666号）的精神。“十一五”期间，全国城市生活垃圾无害化率将达到40%；鼓励东部地区经济发展地区选用先进的焚烧处理技术，减少原生生活垃圾填埋量，节省土地资源，东部地区设市城市的焚烧处理率将达到新的高度，而目前，我国的垃圾焚烧率不足7%。因此，城市生活垃圾焚烧处理技术在“十一五”期间在我国将会迎来一个发展期。

从技术上讲，生活垃圾焚烧处理技术具有“无害化“、”资源化“、”减量化“的特点，但焚烧以后的烟气净化技术具有一定难度。目前广泛采用半干法、干法加袋式收尘技术这一经典的路线。实现表面过滤的布袋除尘器，在现代化的垃圾焚烧发电厂中不但起到环保的作用（达到欧盟粉尘排放要求），而且提供一个后续反应的平台，也称为“布袋反应器”，同时节约了反应剂和吸附剂。

1.薄膜滤袋及其性能特点

1.1、薄膜滤袋

由戈尔公司研制的GORE®薄膜滤袋，其过滤表面是一层用戈尔专利生产的“膨体”专利技术制成的多微孔，极光滑的ePTFE(膨体聚四氟乙烯)薄膜。由于薄膜的纤维组织极为细密(能使粉尘粒子无法“穿越”薄膜，而使粉尘排放量接近于零的水平；又由于ePTFE薄膜本身具有不粘尘，憎水和化学性能稳定等特性，因此清灰性能极佳。

1.2、“深层过滤”与“表面过滤”技术

用普通滤料过滤，最初接触滤料的粉尘将会滞留在滤料表面，形成“一次尘”使滤料孔隙率减少而提高过滤效率。“深层过滤”就是利用普通滤料上形成的“一次尘”来达到过滤粉尘的目的。随着过滤的进行，粉尘会顺气流压力不断渗入滤料，导致运行阻力不断上升，系统处理风量下降，能耗增加，并使滤袋工作寿命大大缩短。另外，由于“一次尘”的存在，在处理含湿量大的气体时，滤料就容易“板结”而过早失效。

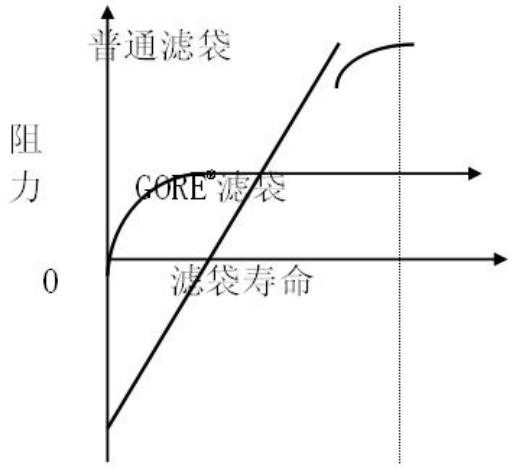
从本质上看，PTFE薄膜滤料就象是一层事先由厂家做好的，质量可控的人造一次粉尘层，也就是利用一张质密而又多孔的薄膜实现使粉尘全部沉积在滤料表面的过滤技术，而且薄膜极易清灰，操作压降较低，称之为“表面过滤”。目前世界上袋式除尘界所推崇的“表面过滤”技术，就是指1974年由戈尔公司发明和倡导的，ePTFE薄膜复合在各种不同基布材料上制成薄膜滤料来实现的一种崭新的过滤技术。

1.3、薄膜滤袋的性能特点

GORE®薄膜滤料的性能曲线

由于其纤维结构极为细密，故初始运行压降要比未经使用的普通滤袋高。又由于其具有极佳的清灰性能，所以能在运行过程中始终保持比普通滤袋低得多的运行阻力。

低运行阻力使GORE®薄膜滤袋的使用寿命大大延长。



GORE®薄膜滤袋的性能特性

过滤效果高

能达到世界上最严格的粉尘排放标准；近于零的排放使空气再循环设备的成本大大降低，并节省了大量能源。

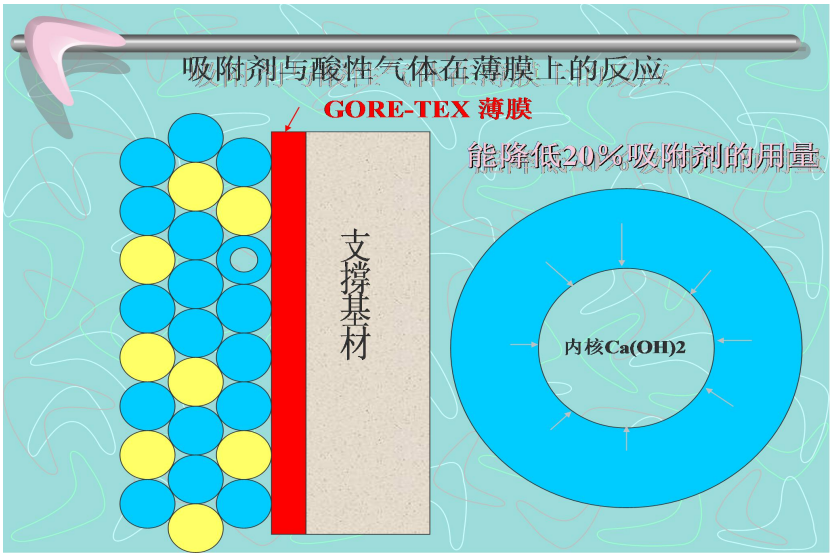
运行阻力低

气流量通常可增加30%以上，从而可大大提高系统的生产效率；过滤风速可比普通滤料提高到1~3倍，从而可使除尘器体积减小，除尘器初投资成本减少；可使滤袋寿命大大延长，从而减少了设备的维护费用和停工时间；降低了系统的风机动力和压缩空气消耗，减少了系统的运行费用。

2．布袋反应器的基本原理

在干法和半干法的系统中，脱酸工艺中$Ca(OH)_2$颗粒与烟气反应后，部分没有完全反应的颗粒在布袋表面因膜的存在而进行再次反应，称为“二次停留“ ，在二次停留时，可以与酸气进行后续反应。所以除酸过程不完全是在前道除酸工艺中进行，有部分在薄膜滤袋的表面进行，最大可以达到30%，因此，此布袋被称为“布袋反应器”。此时，采用能实现表面过滤的薄膜滤袋是十分必要的。因为膜提供了一个未完全反应完的$Ca(OH)_2$颗粒在膜前停留的平台，使得烟气能继续反应，反应完成后在膜前，反应产物全部清掉，新的$Ca(OH)_2$颗粒能再次停留。相反，如果是深层过滤的滤袋，反应完成后，$Ca(OH)_2$变成$CaCl_2$，或者内核仍是$ca(OH)_2$,外壳已成了$CaCl_2$，这些颗粒不能继续反应，并进入滤袋内部纤维，起到堵塞滤袋的作用。

薄膜滤袋能在膜表面提供烟气反应的平台；同时因为膜表面光滑，使得清灰容易，因此在袋收尘应用时薄膜滤袋的清灰周期长，停留在膜表面的反应剂可以充分利用，也就是能节约反应剂10%-30%，其基本原理图如图一。

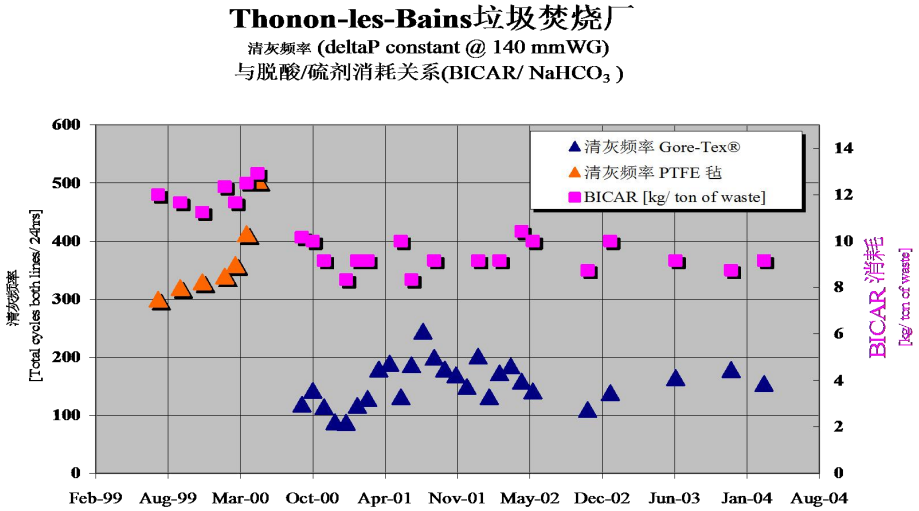


图一：薄膜提供后续反应平台，成为布袋反应器

3．实例

3.1 台湾树林资源利用厂，就是一座日设计生活垃圾处理量1350吨的垃圾焚烧发电厂，由3条日处理450吨的生产线构成。使用马丁(Martin)移动炉排。投产时选用的是PTFE毡滤袋，投产第一年除尘器压力损失上升到35-43 mbar，处理风量由105600 Nm^3/hr下降到93500 Nm^3/hr,第二年工厂不得不决定使用(ePTFE) 薄膜滤袋(Gore®/ Superflex™)，更换PTFE毡滤袋以降低运行阻力，实现系统的设计处理风量。除尘器的运行阻力就从43.2mbar(424 mm H_2O)下降到15.5mbar(152mmH_2O),这就使减少滤袋的清灰成为可能。于是脉冲压缩空气压力从5kg/cm2下降到3.4kg/cm2,清灰周期则从27.7分钟延长到117.7分钟，在满足HCL排放控制的前提下，可减少熟石灰的消耗。清灰频率既要满足焚烧炉系统运行对通风的要求，也要让滤袋表面熟石灰层能满足停留使脱酸性能得到充分利用。通常，每吨垃圾焚烧要消耗14-16公斤熟石灰。滤袋更换前，每吨垃圾平均熟石灰用量为14.6公斤（以24小时平均），安装了Gore®薄膜Superflex滤袋后，熟石灰消耗明显减小，这是因为薄膜滤袋清灰性能很好，每次清灰都将反应生成物粉尘层去除干净，新吸上去的新鲜熟石灰能在清灰间隔停留更长的时间，熟石灰效用得到了充分发挥，薄膜滤袋安装后的数年来，熟石灰的平均消耗为13.8kg/吨，除了熟石灰使用量的减少外，HCL平均排放量也大约从53ppm降低到30ppm左右。

3.2．欧洲Thonon-les-Bains垃圾焚烧厂的实例，如下记录：（图二）



图二：欧洲垃圾电厂反应剂消耗对比试验

该公司1999年使用普通滤袋后，系统清灰频率持续攀升（图中浅色三角表示）。2000年3月换用GORE®滤袋，系统的清灰频率大幅下降（图中深色三角表示）。 图中方块标记真实记录了该厂使用

不同滤袋的脱酸/硫剂消耗量。该厂脱酸/硫剂月耗量有所波动,但在使用GORE®布袋前后系统的清灰频率有明显的变化(上图中浅三角变为深三角)。而实际的脱酸/硫剂月耗量由原先的约12kg /吨垃圾下降为约平均9.5kg/顿垃圾.可见，使用薄膜袋滤技术(Gore®)后，脱酸/硫剂得到了有效的节约。

4．结语

一般来说，垃圾焚烧尾气处理系统由烟气反应（脱酸，除二恶英）及除尘部分组成，这二部分的功能其实不是分离的，使用表面过滤的除尘滤袋（如Gore®）,不但布袋寿命长，稳定风量，粉尘排放严格达到欧标，而且因表面PTFE膜提供继续反应界面，进行“二次吸附”功能，具有“布袋反应器”的作用，所以能极大节约脱酸/硫剂。在我国主要大型生活垃圾焚烧发电厂，比如，上海生活垃圾焚烧厂(1500吨/天)，天津生活垃圾焚烧厂(1200吨/天)，宁波生活垃圾焚烧厂(1000吨/天)，山西生活垃圾焚烧厂(1000吨/天)，深圳生活垃圾焚烧厂(1000吨/天)。苏州生活垃圾焚烧厂(1000吨/天)等均使用了表面过滤技术(Gore®),投产后取得了良好的环保效益，社会效益和经济效益。

参考文献

1.W.L. Gore & Assoicates,Inc. Remedia® Catalogue.2006.

2.Keith J.Fritsky, Gore.John H.Kumm .Combined PCDD/F Destruction and Particulate Control in the Baghouse.EA Engineering Science & Technology.2002.

3.孙宏.戈尔Remedia®二噁英催化过滤技术在现代化焚烧工程上的应用.发电设备.第6期,总第174期，第18卷.2004.

4.粘竺耕等.戴奥辛处理技术探讨.工业污染防治杂志. 台湾.92期.VOL.23,NO.4,OCT,

2004年.

5.徐旭，严建华，岑可法.垃圾焚烧过程二噁英的生成机理及相关理论模型.能源工程.2004年第4期.

6.中国城市环境卫生协会.城市生活垃圾焚烧处理技术与设施建设专题研讨会.论文集.2004.

城市生活垃圾焚烧实用技术

魏祥礼
（成都节能技术服务中心 四川成都 610041）

摘要：本文通过对多条城市生活垃圾焚烧处理系统的设计、施工及生活垃圾焚烧过程的数据统计，总结出城市生活垃圾焚烧的工艺流程以及生活垃圾焚烧设计与控制参数的范围。本文仅对生活垃圾焚烧的实用技术进行介绍。

关键词：生活垃圾焚烧　控制参数　参数计算　工艺流程　实用技术

随着社会经济的发展、人口的不断增多以及人民生活水平的日益提高，城市生活垃圾的产生量也日渐增多。垃圾处理已成为许多国家及城市发展中必须解决的问题。据国家环境保护总局预测，到 2010 年和 2015 年全国城市垃圾产量分别达 1.52 亿吨和 2.1 亿吨。国家“十一五”国民经济和社会发展规划纲要提出：以减量化、资源化、无害化为原则，实施城市生活垃圾无害化处置设施建设规划，新增城市生活垃圾无害化处理能力 24 万吨/日，城市生活垃圾无害化处理率不低于 60%。为了实现这一目标，更好地推广应用城市生活垃圾焚烧技术，本人通过十余年来对多条城市生活垃圾焚烧处理系统的设计、施工及生活垃圾焚烧运行情况的经验积累，总结出城市生活垃圾焚烧处理实用技术。

1. 城市生活垃圾的特点

改革开放以来，我国经济的快速发展导致城市生活垃圾不断增加的同时生活垃圾成分也发生了较大变化，主要表现在：垃圾中的煤渣含量减少，易腐垃圾增加，可燃物（废纸、废塑料、废橡胶）增多；垃圾的应用基低位发热值大都在 Q^{y}_{dw}=1000～1300Kcal / kg 之间；垃圾水分高，含水率一般都在 30～50%之间；垃圾的成分和热值波动大。所以，在垃圾焚烧处理过程中必须考虑城市生活垃圾的特性。

2. 城市生活垃圾焚烧的控制参数

2.1 焚烧温度

焚烧温度是指垃圾在高温下氧化直至分解所需达到的温度。根据多年的实践经验，城市生活垃圾的焚烧温度通常控制在 850~1100℃之间，这也是大多数有机物焚烧温度和一般含毒物质氧化分解的温度范围。但炉内温度分布是不均匀的，不同部位的温度不同，所以，明确炉内焚烧温度的取值，往往是垃圾焚烧的关键。本文确定的炉内焚烧温度是指位于垃圾层上方并靠近燃烧火焰区域内的温度。

2.2 停留时间

停留时间分为焚烧停留时间和烟气停留时间。

焚烧停留时间是垃圾在炉内焚烧氧化分解至残渣排出所需的时间。垃圾在炉内停留时间的长短直接影响垃圾燃烧的完善程度，也是确定炉体容积尺寸的重要因素。

烟气停留时间是垃圾焚烧产生的烟气从垃圾层逸出到排出焚烧炉所需的时间。根据实践，烟气在二次燃烧室的停留时间不小于 2 秒。

2.3 空气过剩系数

在实际燃烧过程中，由于氧气与可燃物不可能达到理想程度的混合及反应，为使燃烧充分完全，仅供给理论计算燃烧的空气量是不能完全燃烧的。所以，实际燃烧的空气量是远大于理论空气量的。实际空气量与理论空气量的比值定义为过剩空气系数。公式为：

$$m = \frac{A}{A_0}$$

A — 实际空气量　Nm^3 / kg

A_0 — 理论空气量　Nm^3 / kg

m — 过量空气系数　（一般 m 的取值范围在 1.6～2）

3.主要焚烧参数计算

3.1 城市生活垃圾发热量的计算

发热量分为高位发热量和低位发热量。

高位发热量是指化合物在一定温度下反应到达最终产物的焓的变化。常用Q^{y}_{gw}表示，单位 Kcal / kg。

低位发热量与高位发热量的意义相同，只是产物的的状态不同，前者水是液态，后者是气态，二者之差就是水的汽化潜热。低位发热量等于高位发热量减去水的汽化潜热。常用Q^{y}_{dw}表示，单位 Kcal / kg。

在常用设计计算中，一般都采用低位发热量作为计算参数。

低位发热量计算公式：

$$Q^{y}_{dw} = [8122C^{y}+34161(H^{y}-\frac{O^{y}}{8})+2508\ S^{y}]-597(9H^{y}+W^{y})$$

Kcal / kg

3.2 燃烧理论空气量的计算

燃烧理论空气量计算公式：

$V_0 = (0.0889C^{y}+0.256H^{y}+0.0333S^{y}-0.0333O^{y})$ Nm^3 / kg

V_0—不含水蒸气的理论干空气容积。当按湿空气计算时，需要在干空气质量上加上水蒸气含量（干空气的含湿量为 10g / kg）。

3.3.理论烟气量的计算

理论烟气量计算公式::

$V_y = 0.001866\ C^{y}+0.007S^{y}+0.008N^{y}+0.111H^{y}+0.0124W^{y}+0.8061V_0$ Nm^3 / kg

在上述计算公式中 C^{y}、H^{y}、O^{y}、N^{y}、S^{y}、 W^{y}分别表示生活垃圾中碳、氢、氧、氮、硫、水的质量百分比。

3.4 实际烟气量的计算

在实际燃烧过程（m>1）中，完全燃烧时产生的烟气量与理论烟气量相比,实际烟气量还包括过剩空气量及由此过剩空气带入的水蒸气 0.0161（m>1）V_0。

实际烟气量计算公式::

$V_{ys} = 0.001866C^{y}+0.007S^{y}+0.008N^{y}+0.111H^{y}+0.0124W^{y}+(1.0161m-.021)V_0$

Nm^3 / kg

3.5 烟风系统的管道计算

据经验，烟风设计流速的取值范围一般在 8～10m / S

3.6 焚烧炉燃烧室热负荷计算

焚烧炉燃烧室热负荷计算公式::

$$Q_v = \frac{F_f \times H_f + F_w \times [Q^{y}_{dw} + AC_P(t_k - t_0)]}{V}$$

Q_v— 热负荷 Kcal / m^3h；（一般取值范围 10×10^4至 13×10^4 Kcal / m^3h 之间）

F_f— 辅助燃料消耗量kg / h

H_f— 辅助燃料低位发热量 Kcal / kg

F_W— 单位时间垃圾焚烧量kg / h

Q^{y}_{DW}— 垃圾低位发热量 Kcal / kg

A — 单位辅助燃料与垃圾空气供给量 kg / kg

C_P— 空气定压热比 Kcal / kg·℃

t_k— 空气预热温度℃

t_0— 大气温度℃

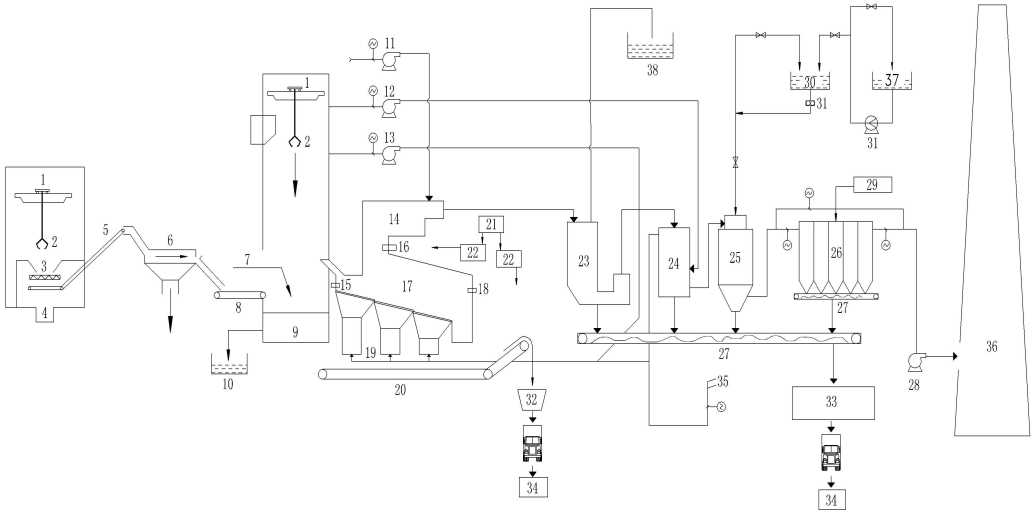
V — 燃烧室容积 m^3

4.城市生活垃圾焚烧的工艺流程

通常人们以为只要焚烧炉体设计结构合理就会得到较好的焚烧处理效果，但实际情况并非如此，好的焚烧设备必须要有与之相应的工艺流程才能发挥出好的效果。一条垃圾焚烧处理系统的好坏，

与每个环节都是密不可分的，忽视了任何一个环节都达不到预想的效果。

一般城市生活垃圾焚烧工艺流程主要由六个系统构成：贮存及进料系统；焚烧炉体、二次燃烧室、液压装置及出渣系统；冷热风及烟气系统；降温换热系统；脱硫除尘系统；飞灰及渗漏液处理系统（如下图所示）。



城市生活垃圾焚烧工艺流程图

1-行车；2-抓斗；3-匀料机；4-排水泵；5-皮带输送机；6-单层滚筒筛；7-分选垃圾；8-皮带输送机；9-垃圾坑；10-渗沥液集液井；11-二次风机；12-一次风机；13-冷风机；14-二燃室；15-推料机；16-助燃燃烧器；17-垃圾焚烧炉；18-点火燃烧器；19-一次风；20-刮板除渣机；21-贮油罐；22-油箱；23-降温装置；24-空气预热器；25-喷雾干燥吸收塔；26-布袋除尘器；27-螺旋输灰机；28-引风机；29-空压机；30-NaOH溶液箱；31-碱泵；32-集渣斗；33-飞灰固化处理；34-填埋场；35-热风放空；36-烟囱；37-NaOH溶解箱；38-生活用水箱。

4.1 贮存及进料系统

本系统主要由贮坑、行车、抓斗、进料斗、推料器组成。负责将垃圾送入焚

烧炉进行燃烧。由于垃圾构成复杂，有时容易在进料斗出现“搭桥”现象。因此，在设计时，可考虑在进料斗侧壁加设由液压油缸或气缸驱动的定时搅动装置，以避免出现“搭桥”现象。

4.2 焚烧炉体、二次燃烧室及液压系统

本系统主要由焚烧炉、二次燃烧室、液压装置，出渣机组成。焚烧炉体的炉排有链条炉排、阶梯往复式炉排、阶梯往复式液压炉排、阶梯反复摇动式炉排、机械反复摇动式炉排等。我们采用的是改进了的阶梯往复三段式液压炉排，该炉排分为干燥段、燃烧段、燃尽段，其特点是可根据炉排某一段燃烧情况的好坏改变某一段炉排的往复运动时间，可有效地提高焚烧炉的燃烧效率，使垃圾充分燃烧、彻底燃尽，减少二噁英类物质前生体生成。二次燃烧室是将燃烧气体进行二次燃烧。在设计时，必须保证燃烧气体在二次燃烧室的停留时间（不小于 2 秒），以使燃烧气体充分燃烧。液压装置主要控制阶梯往复三段式液压炉排的往复运动。出渣机可采用螺旋式或刮板式、链条式等出渣方式。实际操作时应监控燃烧情况，合理调节各段炉排的往复运动时间，促使垃圾充分燃烧燃烬。

4.3 冷热风及烟气系统

本系统分别由一次风机、二次风机、引风机组成。一次风吸入垃圾贮坑内的臭气经换热器预热到 200~250℃之间，分别按比例 10%、20%、70%输入炉排燃尽段、干燥段、燃烧段以干燥助燃。二次风直接送入二次燃烧室，以较高的风压扰乱二次燃烧室内燃烧的气流，形成湍流，使燃烧气体与空气充分接触，增加烟气混合程度。引风机的选择，应在保证引风机风量的前提下，引风机的风压必须大于烟气系统管路各部位及烟气系统各设备的阻力总和并要留有约 5~10%的富余量。同时还应考虑海拔高度的不同对其的影响。

4.4 降温换热系统

本系统由降温喷淋塔及换热器组成。降温喷淋塔将二次燃烧室排出的高温烟气，降温到500℃左右再进入换热器，以保护后续设备。降温喷淋塔还需设置集灰斗，以收集降温时烟气速度减慢沉积下来的飞灰。换热器主要是预热一次风的温度。在设计或选择换热器时，应充分考虑烟气管路的走向及弯头的曲率半径，以避免烟气流速产生的振动频率与换热器自振频率形成共振，影响设备正常运转。同时还应考虑换热器的清灰方便。

4.5 脱硫除尘系统

本系统由脱硫反应塔、袋式除尘器和活性炭吸附装置组成。采取半干法脱硫净化工艺对垃圾焚烧的烟气进行净化处理，以达到《生活垃圾焚烧烟气排放标准GBKW3-2000》。采取袋式除尘器对含微米或亚微米的数量级的粉尘粒子的除尘效率高，一般可达99%，对控制在灰尘中含有的二噁英排出也很有效。配备活性炭吸附装置，提高尾气净化程度。在活性炭吸附有机污染物的同时，也吸附挥发性重金属及其化合物，从而也减少向大气中释放重金属的量。

4.6 飞灰及渗漏液处理系统

本系统由飞灰收集输送贮存装置、飞灰水泥搅拌混合装置组成。将布袋除尘器收集的飞灰和降温塔收集的飞灰及反应塔酸碱反应生成的物质通过各自的螺旋输送机集中到飞灰水泥搅拌混合装置固化处理。渗漏液处理是将垃圾贮坑里的垃圾渗漏液集中后，经高压污水泵和雾化器雾化直接泵入焚烧炉燃烧室燃烧。使有机物分解除臭，达到无害化排放。

4.7 二噁英排放的控制

垃圾在焚烧炉内得以充分燃烧是减少二噁英类生成的根本所在。我们在垃圾焚烧系统的设计、施工和运行中，已经实施了二噁英控制的技术和方法。即保证焚烧炉出口烟气的足够温度(Temperature)、烟气在燃烧室内停留足够的时间(Time)、燃烧过程中适当的湍流(Turbulence)和过剩的空气量(ExcessAir)。这就是是国际上普遍采用的“3T＋E”控制法。由于焚烧炉烟气中的二噁英类物质主要是吸附在飞灰表面，因此只要做到高效除尘，便可以极大减小焚烧设施向大气排放二噁英类物质。

5.城市生活垃圾焚烧有待解决的问题

虽然城市生活垃圾焚烧技术已得到推广运用，从生活垃圾焚烧技术和生活垃圾焚烧的状况看，还有需要提高改进的地方。

5.1 焚烧设备的腐蚀问题

垃圾焚烧过程是个复杂的化合反应过程 。垃圾焚烧生成物中硫和氯及其化合物对换热器产生高温腐蚀；而随着烟气温度的下降，烟气中的氯化氢、二氧化硫等成分于烟道尾部结露形成酸性液，对尾部管道及设备产生低温腐蚀，这是目前国内外大型城市生活垃圾焚烧炉的运行中普遍存在的问题。选择高抗腐蚀性材料，可以在一定程度上解决腐蚀问题。目前我们对换热器高温段的换热管束段采用不锈钢效果明显。低温腐蚀的处理通常采取适当提高排烟温度，保证排烟温度在结露点温度之上。

5.2 提高焚烧余热综合利用

垃圾焚烧余热的综合利用在经济发达的大中型城市做得较好。但在小城市受地域环境和经济发展的限制，尚不能有效地利用，造成了资源的浪费。在当今提倡低碳经济的环境下，如何进一步开发利用焚烧余热是仍值得研究的问题。

参考文献：

李国建.赵爱华.张益.城市垃圾处理工程　北京：科学出版社，2003.

聂永丰.三废处理工程技术手册　北京：化学工业出版社，2001

城市生活垃圾前处理自动分选 SWS-3 工艺技术概论

申吉林 著名环保专家
王玉利 高级工程师 研究员

前言：本工艺技术是对我国垃圾填埋场、焚烧发电厂、综合处理厂配套的，该技术已成功应用于国内多家垃圾处理厂，均取得了显著的经济效益和社会效益。

关键词：生活垃圾前处理自动分选系统、填埋场配套前处理系统、焚烧发电厂配套前处理系统、综合处理厂前处理系统。

一、我国垃圾填埋场、焚烧发电厂、综合处理厂的基本状况

城市生活垃圾是人们日常生活固体废弃物的总称，全世界每年产生生活垃圾约 5 亿吨。生活垃圾以固体废弃物为主，液体、气体相混杂，含有大量有害物质。随着经济建设和城市规模的发展，生活垃圾对生态环境的危害和经济发展的影响将会日益严重，治理城市生活垃圾的必要性和紧迫性受到了各级政府的高度重视，在“十二五”期间，国家加大了生活垃圾投资，尤其 2011 年 3 月 23 日 温家宝总理主持的国务院常务会议及国发〈2011〉9 号文“关于进一步加强城市生活垃圾处理工作意见的通知”，进一步明确了生活垃圾处理的重要性和紧迫性及政策措施，指明了我国当前生活垃圾处理的方向。

1、卫生填埋场现状

随着社会经济的发展，生活垃圾的产量也在逐年增加。中国城市历年的垃圾堆积量高达 66 亿吨，侵占了 5 亿多平方米的土地，而且每年大致以 8%左右的增长率递增，已有 1/4 的城市已发展到无适合场地填埋垃圾的地步，大部分填埋场库容均已告急，垃圾填埋场运行过程中暴露出的问题更是尤为突出：占地面积大、使用时间短，垃圾填埋场造成的二次污染非常严重，垃圾填埋造成了资源的严重浪费，这种浪费土地、二次污染严重、将资源填埋的处理方法，实在是一种无奈的、没有处理的处理方法。

2、焚烧发电厂现状

城市生活垃圾焚烧发电项目，采取对生活垃圾完全焚烧的方式，不论建筑垃圾、渣土、金属、塑料等全部进炉焚烧，而焚烧炉对进炉生活垃圾的热值要求严格（垃圾热值不低于 5000KJ/Kg），在低于焚烧炉设计热值的情况下，需要助燃原料，如流化床垃圾焚烧炉需要添加 20%的助燃煤，炉排炉需要喷助燃油，因此增加了处理成本。生活垃圾焚烧发电厂的运行费用关系到垃圾焚烧发电项目的成败，尤其一些最小城市，不发达城市，渣土含量多，南方城市有机物多，雨季含水率高，这些因素都造成了垃圾热值降低，使焚烧炉焚烧困难，不得不大量添加助燃原料，为了保证垃圾焚烧发电厂的政常运行，就要增加运行费用，政府就要提高补贴垃圾处理费，增加了政府的负担，项目的投资回收期延长，投资利润率降低，项目公司的利益降低。目前国内许多建成的垃圾焚烧发电厂，都面临着生活垃圾热值低，不得不大量添加助燃原料的困境，这也是焚烧发电项目推广的瓶颈。

3、综合处理厂现状

目前我国生活垃圾综合处理厂，前分选基本都是采用机械滚筒式分选配合人工拣选，分选效率低，操作环境恶劣，对工人的身体健康有严重影响，另外，分类不彻底，影响下一步的资源化利用，因此急需高效，没有人工的自动分选工艺技术，提高分选效率，提高资源化利用率，改善工人的操作环境。该技术解决了分选的难题，堆肥产品肥质低劣，难以资源化，堆肥处理厂苍蝇蚊子孳生，损害周边人民群众身体健康的问题。

二、“SWS-3”综合处理工艺技术主要内容

“SWS-3”工艺技术包括：生活垃圾均匀给料、大件垃圾自动分选系统、袋装垃圾自动破袋、自动分选系统、有机物制肥系统、无机物制砖系统、塑料炼油或制粒系统、可燃物焚烧系统和余热利用系统、废气处理系统、污水处理系统、全自动控制系统等。与该工艺技术配套的主要设备获得

多项实用新型专利和发明专利。使用该技术可取得明显的经济效益、社会效益和环境效益，并最大限度地实现了垃圾处理的资源化，为继续深加工利用生产资源化产品创造了有利条件。

“SWS-3”工艺技术遵循“无害化、减量化、资源化”的原则，配套分选处理工艺技术，是自主研发的，专门为垃圾填埋场、焚烧发电厂和综合处理厂配套的。利用该工艺技术成功解决了生活垃圾处理过程中的难题，实现了生活垃圾处理的“无害化、资源化和减量化”。利用该工艺技术建成的生活垃圾填埋场、焚烧发电厂和综合处理厂，具有投资少，投资回收期短，适合多种方式的投资运营，能产生良好的经济效益和社会效益，也较好解决了因地方财政扶持能力不足而给企业运营带来的困扰，有利于我国城乡的环境保护、节能减排、产业化和可持续发展。

1、垃圾处理的无害化

垃圾处理过程中，采取了对恶臭气体治理、污水处理、噪音等二次污染源的防治措施，防止二次污染。工艺设计和设备配置等方面做了技术保证。臭气采用了通风和喷雾设备处理，污水循环利用、废渣和建筑垃圾填埋，没有废水和废渣的外排。废旧电池通过分选多级回收，分选出的电池送危险废物填埋场或放置专用仓库储存，再专业回收处理。所以处理过程不会污染地下水和大气，达到无害化。

2、垃圾处理的资源化

垃圾中的可回收的物质，通过系统设备得到了全面科学的回收利用。垃圾中的有机物制成了有机肥；废旧塑料制成了塑料颗粒或通过炼油设备提炼成油料；回收的可燃物分选出的砖石与焚烧炉渣混合制砖或填埋。金属通过除铁器回收，剩余生活垃圾全部焚烧处理。

3、垃圾处理的减量化

有用物资的回收和资源化，建筑垃圾和渣土分选出来，剩余生活垃圾热值高，燃烧充分，实现了减量化。

三、“SWS-3”前处理自动分选工艺技术对填埋场、焚烧发电厂和综合处理厂的改造应用

1、 填埋场的应用

针对目前我国垃圾填埋场使用时间短、占地面积大、占用时间长、二次污染严重、资源化程度低的现状，提出了一种投资少、效益好，可使原垃圾填埋场延长使用寿命近 5 倍的工艺技术方案，该技术已成功应用于国内多家垃圾处理厂，各厂均取得了明显的经济效益和社会效益。

工艺内容：利用原有填埋场设施，延长原有设施使用时间，在节约投资的前提下，最大限度地实现垃圾处理资源化的原则，工艺路线为：分选、回收、填埋，即垃圾进场后先把垃圾分类，分类后可回收利用的全部回收利用，不可回收利用的垃圾再去填埋，这样既节约了填埋场库容，又实现了垃圾处理的资源化利用。

2、 焚烧发电厂的应用

该技术解决了垃圾焚烧发电工艺运行费用昂贵、焚烧产生的有烟气难以处理的问题；生活垃圾焚烧发电厂配套的分选处理工艺技术，投资少、见效快，经过分选处理后的垃圾热值提高 2～4 倍，保证了正常焚烧过程中不用添加助燃原料。该配套工艺技术同时把垃圾中的有用物资（有机物、金属、塑料等）回收利用，提高了生活垃圾的热值，把垃圾中的建筑垃圾（砖瓦石块）分选出来，减少了对炉膛耐火材料和炉排的磨损，降低了故障率，延长了焚烧炉使用寿命，节约了维修保养费用，生活垃圾中的有害物质（电池）分选出来，焚烧后的飞灰和烟气中重金属降低，使烟气排放更容易达标，减少烟气处理费用。处理分选处理工艺技术和焚烧发电技术的有机结合，做到了优势互补，资源也得到了循环利用，具有明显的经济效益和社会效益，有利于生活垃圾焚烧发电厂的正常运行。

3、综合处理厂的应用

采用自动分选的前处理工艺技术，使综合处理厂分选效率提高，分类彻底，对制砖、制肥、制塑料颗粒的产量和品质显著提高，废物循环利用率高，极大的增加了经济效益，缩短投资回收期，可降低了垃圾处理运行费，有利于实现垃圾处理的产业化，对工人的劳动强度和操作环境明显改善，可实现清洁生产。

（1）工艺技术优点

本工艺技术的开发是针对我国垃圾的成分和特点开发研制的，符合我国的实际情况。项目具有以下优势：

①本工艺是完全按照“无害化、减量化、资源化”方针和产业化的方向对城市生活垃圾进行综合处理的方向研制的。

②工艺先进、自动化程度高，以国产设备为主，性能可靠，经济适用。

③所生产的主要产品有机肥，具有配方科学、养分全面、效果显著、用途广泛、保田沃土、价格低廉等优势，市场前景好，其它产品也以其优质、价廉，具有市场竞争优势。

④所生产的建筑用砖产品符合国家标准。

⑤垃圾处理实现了从只投入到能创收，从纯废弃到出产品，从机械化和人工到自动化，从简单化到高科技的四个转变。

（2）资源化利用产品

根据生活垃圾成份的构成，资源化利用可定为三种产品：

①有机物制肥产品：有机肥、有机—无机复混肥。

②无机物制砖产品：路面砖、标砖和空心砌块等。

③可燃物热能利用：余热锅炉回收的热能产生蒸汽，用于发电、供暖、砖的养护和洗浴等生活用热水。

④废旧塑料可生产塑料颗粒或炼油。

⑤回收金属等。

四、工艺技术实用性强国内领先

生活垃圾前处理分选系统，对填埋、焚烧和综合处理等处理方式的发展起到推动作用，有利于各种处理方式共同发展。

在垃圾处理生产线中，采用多种技术相结合的方式，针对我国城市生活垃圾“量大、混装、有机质高、燃值低、成份复杂”的特点，使用了无害化处理、资源化利用自动化技术设备，以高新技术设备取代人工操作，采用 DCS 集散控制系统实现垃圾无害化、资源化综合处理生产线全程自动化，提高垃圾综合处理国产化成套设备的科技含量，促进垃圾处理产业化的快速发展。

垃圾综合处理，重点是“无害化”，难点在“分选”。人工分选难以达到垃圾综合处理大规模、流水式生产垃圾分选的精度和速度。

生产线自动化保证了各生产线环节工艺参数的精度，将有效保证终端产品的质量；由于分选精度和速度的提高，资源化产品的种类会增多，能带来多方面的经济效益，为垃圾处理行业产业化发展起到推动作用。

把计算机 PLC 控制和 DCS 系统应用到生产线，实现生产过程自动化，改善了工人的操作环境和劳动强度，减少了人员，降低了成本，提高了效率。

我们具有完善的成套设备生产制造基地，运用技术合作、设备配套、交钥匙工程等多种模式进行合作，为城市生活垃圾资源化处理新兴产业做出新贡献。恳请联系。

城市生活垃圾综合处理技术介绍

曹俊斌　陈建国　张益　李智
北京通用能源动力公司　2 广东星湖股份公司

摘要：本文介绍了一种以循环流化床焚烧技术为核心的垃圾综合处理方法。首先对垃圾通过筛分、磁选设备进行分类，然后将垃圾按不同类别进行分类处置。文中重点介绍了中科院工程热物理研究所研制的北京市海淀区上庄垃圾场 200t/d 垃圾综合处理系统，并根据国情提出了几种适合不同城市规模的垃圾综合处理方案模块。

和平与发展是当今世界的两大主题，但是随着社会的发展、人民生活水平的日益提高，城市垃圾产量不断增加，成份日趋复杂，其危害也越来越严重，垃圾作为世界性公害已成为全球关注的焦点。为缓解城市垃圾污染，世界各国都致力于垃圾的综合治理和利用的研究工作。

城市生活垃圾的处理有填埋、堆肥、焚烧等多种方式。发达国家处理城市固态垃圾的主要趋势是采取焚烧法，从资源再生利用的角度看，这是一种较佳的选择。垃圾焚烧后，体积和重量分别为原来的 5%和 15%，灰渣还可用于制砖或铺路；垃圾经过焚烧消除了有毒物质和病原体，降解绝大部分有机氯化合物，在焚烧过程中通过烟气净化装置处理可防止空气污染环境；此外，垃圾在焚烧过程中产生的热量，经回收装置处理后，可用于供热和发电。

我国绝大多数城市的垃圾采取卫生填埋和填埋的方式，少数城市也采用筛下物堆肥，筛上物填埋的方式，这些垃圾处理方式解决了城市垃圾短期内的处置问题，但同时也造成了大量土地的报废，城市地下水受到垃圾渗滤液的污染，长此下去垃圾将无地可埋。为解决这种情况，垃圾处理宜采取大型化垃圾焚烧电站和大型卫生填埋场相结合的策略，并逐渐由现在的卫生填埋为主过渡到垃圾焚烧发电为主，保留适当规模的卫生填埋场。

近年来，我国也涌现出了许多种垃圾焚烧炉，垃圾焚烧处理也被广泛认可，但真正能做到垃圾处理减量化、无害化、资源化的比较少。垃圾焚烧带来的新的污染问题受到社会各界的广泛关注，尤其是一些土法焚烧方式和一些无污染控制手段的焚烧炉，带来的问题比较多，其尾气排放和灰渣处置难以达到国家标准，这并不是我国垃圾焚烧的发展方向。对现有垃圾处理技术去粗取精，将多种垃圾处理技术进行组合是我国垃圾处理技术发展的方向。

1996 年中国科学院将城市固体废弃物的处理作为院重中之重和院特别支持项目，以研制 100t/d 循环流化床垃圾焚烧炉为核心，对垃圾的焚烧、预处理、尾气净化及控制、等技术进行攻关，于 1998 年研制出了适合中国垃圾特点和经济发展水平并达到世界先进技术水平的城市固体废弃物焚烧设备和尾气净化设备，及相应的自动化控制软、硬件。

循环流化床垃圾焚烧炉采用一定粒度范围的石英砂或炉渣作为热载体，通过底部布风板鼓入一定压力的空气，将砂粒吹起、翻腾、浮动，被吹出炉膛的高温固体颗粒通过分离器和返料器被回送到炉膛，形成了炉内物料的平衡。流化床内气－固流体混合强烈，燃烧反应温度均匀，具有极好的着火条件，垃圾入炉后即和炽热的石英砂迅速处于完全混合状态，垃圾受到充分加热、干燥，有利于垃圾完全燃烧。

循环流化床垃圾焚烧技术具有如下突出优势：

1、能够有效控制垃圾焚烧过程中有害气体的产生

由于垃圾焚烧温度可非常均匀的控制在 850℃－950℃之间，NO_x 生成量非常低。当燃烧温度>1300℃时 NO_x 才会大量生成。

2、循环流化床垃圾焚烧技术还可有效抑制二恶英的产生

垃圾焚烧二恶英产生条件：

(1)、燃烧不稳定。

(2)、炉膛燃烧温度不均匀。

(3)、燃烧温度<850℃。

(4)、金属催化。(垃圾焚烧前要对金属分检，既可实现资源回收，又可减少二恶英生成条件)

循环流化床稳定的燃烧工况和大于 850℃燃烧温度有效的遏制了二恶英的生成。

3、炉内加石灰石可有效脱硫

在 Ca/S 为 1:2 时，脱硫效率大于 85%，尾部喷水和石灰粉可有效脱除垃圾燃烧过程中产生的 HCl、HF、SO_2等有害气体。

4、燃烧彻底

垃圾中有机物可 100%烧掉，焚烧后垃圾可减量 70%，减容 90%以上，灰渣无臭味，可直接填埋，也可用于生产地面砖。(垃圾焚烧产生的细灰中含有 Hg、Cr 等重金属，不宜用作水泥填料和建筑用砖)

5、焚烧产生的热能可用于供热、生产蒸汽、发电等。

6、循环流化床垃圾焚烧炉无炉排等转动部件，设备故障少，维修工作量小，设备投资低。

北京市海淀区上庄 200 吨/日循环流化床垃圾综合焚烧厂是由中科院工程热物理研究所、北京通用能源动力公司出资和北京市海淀区环卫局共同兴建的国内首座循环流化床垃圾焚烧试验厂，是中科院重点项目的主体工程。

厂区主要包括垃圾预处理部分、垃圾焚烧车间、尾气净化部分和循环冷却水部分。按照系统功能分，可分为：垃圾予处理系统、垃圾进料系统、焚烧炉本体系统、尾气净化除尘系统、管网及热能转换系统、输配电系统及电器控制系统、仪表及计算机数据采集系统、灰处理系统。

垃圾在焚烧前需先经过垃圾预处理系统的处理，垃圾预处理的目的是尽量将垃圾中的可回收有用东西先行回收，如金属、腐植质及垃圾中的不可然物如砖瓦、混凝土等，这样可减少垃圾焚烧量，节约能源，提高垃圾焚烧炉的燃烧稳定性，减少有害气体的排放。其中腐植质可用于堆肥，金属可回收利用，砖瓦、砂石等可直接添埋或造砖。

筛分后的垃圾进入垃圾仓后，经过翻倒、沥水处理后，由垃圾抓斗抓入储料斗，进入储料斗的垃圾量会由电子称自动计量并累计重量。垃圾仓的储量可供焚烧炉燃烧 4 天，垃圾仓下部有自动排水系统，因为垃圾在垃圾仓里停留时间长，垃圾热值会因水份降低而提高，利于垃圾充分燃烬。

进入循环流化床垃圾焚烧炉内的垃圾在炉内高温气流和介质的强烈掺混下发生了剧烈的氧化反应，有害物质和可燃物得到彻底分解和充分燃烧。进入炉内的垃圾燃烧产物会由水冷滚筒式出渣机排出炉外。循环流化床垃圾焚烧炉是以石英沙为介质在炉内进行循环，在排渣的过程中会有大量高温石英沙被排除炉外，如果这些石英沙不被有效回收，炉内物料将无法平衡，会造成燃烧不稳定和熄火。水冷滚筒式出渣机除具备冷却炉渣连续稳定排渣的作用外，还具备粗细颗粒筛分功能，它可将炉渣中的石英沙（<5mm）和大颗粒不可染燃物有效分离，石英沙通过多斗提升机返回炉膛，大块不可燃物被输出焚烧车间。

焚烧产生的含尘烟气离开焚烧炉后首先进入尾气净化装置，尾气净化装置为半干式有害气体脱除装置，形式为循环流化床。该装置附属设备有活性碳微量给料机、C－石灰粉加料机、超细雾化喷嘴、喷吹风管。在烟气中喷入活性碳可有效吸附二恶英，每吨垃圾需加 1kg 活性碳，二恶英的含量可降到 1ng/m^3以下，C－石灰粉加料机可均匀连续将石灰粉喷入尾气净化装置，每吨垃圾需加石灰粉 10－20kg，烟气中的 HCL 可降到 50mg/m^3以下。

烟气经尾气净化装置处理后进入布袋除尘器，尾气净化装置吸收的二恶英颗粒和含 HCL 等的尘粒及烟尘被有效过滤，有害气体可以被有效脱除，灰尘被有效收集，垃圾焚烧的污染降到最低。

布袋除尘器收集的灰尘中含有重金属、二恶英等有害物质，必须进行安全稳定化处理，可以将灰尘、水、速凝剂混合挤制成颗粒，不仅可以用作修路材料，也可以安全填埋。

焚烧炉的余热锅炉为热水锅炉，出力为 4Mw，锅炉出水温度为 90℃，回水温度为 70℃，每小时生产 140 吨热水，可供 6 万 m^2住宅采暖。

整个焚烧系统设备电容量为 300kw/h，电气控制采用常规电器系统，鼓风机和引风机由变频调速器控制，给料和排渣等采取无级调速。系统的数据采集采用常规仪表和计算机采集两套系统，垃圾焚烧过程可实现计算机自动控制。

北京市海淀区上庄 200 吨/日循环流化床垃圾综合焚烧系统为全套国产化技术及设备，采用循环流化床燃烧技术焚烧垃圾为国内首创，其技术已达到国际先进水平，其投资远低于进口设备。该系

统经国家环境分析测试中心测试，各项技术数据符合国家生活垃圾焚烧污染物控制标准 GWKB3－2000。

我国人口众多，城市规模大小不一，垃圾产量不同，可以创建不同规模的垃圾综合处理系统模块，将其组合可适合不同城市垃圾处理的需要。根据北京市海淀区上庄垃圾场的垃圾物性情况，我们创建了 100t/d、200t/d、300t/d、400t/d、600t/d 五种垃圾综合处理模块，各个城市可根据该市具体情况选择不同模块或模块组合。建议 10－20 万人口的城市可选择 100t/d、200t/d 模块，20－50 万人口城市可选择 200t/d、300t/d 模块，50－100 万人口城市可选择 300t/d、400t/d、600t/d 模块及其组合，如 100 万人口城市可选择 4×300t/d、3×400t/d 或 2×600t/d 组合，100 万人口以上城市可选择 n×400t/d、n×600t/d 模块组合。对于 200t/d 以上的循环流化床垃圾焚烧炉可以设计为发电锅炉。垃圾焚烧炉不仅可以及时消纳垃圾，还可以将焚烧产生电能的 80%并入电网为企业创造经济效益，减轻政府负担。

我国中等城市多，垃圾处理主要采用填埋的方式，但是随着城市的发展，填埋场已不能满足需求。开发新的垃圾填埋场不仅垃圾运距远，而且土地占用量大。垃圾渗虑液将污染地下水和江水。为此，垃圾处理需寻求新的出路。

为解决困扰我国中等城市目前和今后 15 年内的垃圾处理问题，对于 400t/d 垃圾规模可以选择 2×300t/d 模块。建设日处理垃圾 500 吨，装机 12MWe 的垃圾电站，彻底解决垃圾处理问题，并真正做到垃圾处理的资源化、无害化、减量化。

7、垃圾电站的工艺技术路线：

焚烧炉型式：循环流化床垃圾焚烧炉。
焚烧炉数量：2 台
单台处理垃圾量：250－300t/d
过热蒸汽温度：450℃
过热蒸汽流量：35t/h×2
过热蒸汽压力：3.82Mpa
汽轮发电机：6MWe×2
尾气排放符合国际先进国家标准
无灰渣、污水、臭气、噪声二次污染
厂区绿化率>40%。

8、技术成熟可靠程度：

(1)、设备运行可靠，故障点少。

循环流化床垃圾焚烧发电锅炉与马丁炉排、回转窑垃圾焚烧设备比较，焚烧炉本体无炉排或其它转动设备，物料循环靠气流输送，设备故障少，炉本体无机械维修量，根据北京上庄焚烧炉近两年的运行情况，炉本体未作修理。

(2)、设备抗腐蚀能力强

由于采取了外置式换热器技术，高温过热器置于外置式换热器中（换热器中 HCL 含量<15ppm），高温过热器避开了高温烟气中 HCL 的腐蚀(烟气中 HCL 含量>500ppm)，过热器寿命可与常规循环流化床燃煤锅炉相同，蒸汽温度可提高到 450℃，发电设备可采用常规设备，发电效率比马丁炉排、回转窑（过热蒸汽温度<400℃）等高 3－5%。，过热器寿命长 2－3 倍，是非常可靠的垃圾焚烧发电设备。

(3)、常规技术设计的可靠性

循环流化床垃圾焚烧发电锅炉除垃圾给料、排渣、过热器布置与常规循环流化床燃煤锅炉相比有所调整，其余技术均相同，是循环流化床燃烧技术用于焚烧城市固体废弃物的成功范例，本项技术获得国家实用新型专利。

(4)、设备加工的可靠性

循环流化床垃圾焚烧发电锅炉可完全由国内锅炉厂生产，无需特殊材料和工装，同已运行的数百台燃煤循环流化床发电锅炉加工要求相同，无设备加工制造质量风险。

1、 市政府的配套政策

(1)、解决发电上网问题。
(2)、协调上网电价。
(3)、每吨垃圾给与适当补贴。
(4)、将垃圾运抵垃圾电厂。
(5)、协调各政府职能部门的关系。

总之，垃圾处理是一项功在当代，利在千秋的大事，需要国家政策支持，应在社会资金投入、投资规模等方面给予不同的政策支持。建立垃圾综合处理管理企业集团，对垃圾焚烧发电进行集中管理，对焚烧厂的烟气、水、灰渣排放进行在线联网监控，并与环保局联网，不达标可及时关停。

城市有机废弃物联合厌氧发酵工艺

王银河　赵玉柱　夏晓华
（内蒙古鄂尔多斯市东胜区传祥垃圾处理有限公司，鄂尔多斯，017000）

摘要：本文详细介绍了现今城市垃圾处理的现状及存在问题，并提出了一种新的垃圾处理方法——城市有机废弃物联合厌氧发酵工艺，通过传祥公司的实际运行效果来看，本工艺具有广阔的应用和推广前景。

关键词：垃圾处理　城市有机废弃物 厌氧发酵

Urban Bioorganic Wastes Anaerobic Fermentation Technology

Wang Yinhe　Du Peiqing　ZhaoYuzhu　Xia Xiaohua
(Chuanxiang Garbage Disposal Limited Liability Company,ordos,017000)

Abstract：This paper presented the current status and problems of the Urban Solid Wastes disposal, and proposed anew method of Urban Solid Wastes disposal—Urban Bioorganic Wastes Anaerobic Fermentation Technology. based on the actual effects of the Chuanxiang Garbage Disposal Limited Liability Company's operating, this technology possesses wide application and popularizing prospects.

Keywords：Solid Waste disposal, Urban Bioorganic Wastes, Anaerobic Digestion

0 前言：

随着经济的发展和城市化水平的不断提高，我国城市生活垃圾的产生量迅速增加，给现有填埋场带来巨大的压力，有的填埋场甚至垃圾过量未及时处理造成垃圾堆山的现象。由于土地资源的匮乏，建立新填埋场的土地问题难以解决。为了缓解填埋场的压力，减小填埋垃圾的体积问题，先后出现了多种处理手段如，在填埋以前加上分选前处理尽量减少填埋体积、焚烧、堆肥等，然而因为技术和运行成本等问题的限制推广的范围很小。

根据城市生活垃圾和有机废弃物的处理现状我公司进行了城市生活垃圾和有其它机废弃物联合厌氧发酵工艺的探索，并取得了成功。该工艺将生活垃圾中的有机物和其它有机废弃物（污水处理厂剩余污泥和餐厨垃圾）、粪便，通过不同的途径和处理后送进厌氧发酵罐，进行联合厌氧发酵。通过控制这三种物料的反应周期，从而达到降低生活垃圾和有机废弃物中有机物含量的目的。处理过程中还能产生大量的有机肥料和沼气，肥料在改造沙漠方面效果明显，沼气被用于燃烧发电。该工艺填补了卫生填埋和焚烧的不足，解决了有机废弃物的处理难问题，不产生二次污染，更好的达到了垃圾的减量化、资源化、无害化的目的。

1. 我国城市生活垃圾和其它有机废弃物的处理现状。

城市生活垃圾和有机废弃物的特点是：有机质含量较高，可生物降解的物质可达 70%以上，而这些可生物降解物具有体积大、含水率高、热质低、季节变化明显，易于腐化，腐化后臭气严重污染环境等特点。现阶段对这些城市生活垃圾的处理一般采用卫生填埋和焚烧，而污水处理厂剩余污泥、餐厨垃圾、粪便，一般不经过处理直接倾到或者为不法分子所利用，这就造成了严重的环境污染，甚至影响到生态环境中的食物链结构，很容易引发各种疾病，如 2008 年的手足口病。

1.1 城市生活垃圾填埋处理和处制的问题。

有机垃圾处理的历程当中填埋是最先出现的，当时的生活垃圾堆放处臭气漫天，容易滋生传染性疾病。后来为了掩盖臭气和防止流行疾病的传播就出现了垃圾填埋，填埋有几种类型，生活垃圾的填埋一般用的是土地卫生填埋。

卫生填埋的优点：填埋处理操作简便，在一定程度上阻止了生活垃圾臭味向空气中散佚的程度，阻断了以垃圾为源头的疾病传播过程，解决了陆地生活垃圾无处堆放的问题，部分填埋单位还收集填埋气进行发电，可以说在很大程度上解决了生活垃圾对环境的污染。所以生活垃圾的填埋处理在现代的垃圾处理中仍占相当大的比例。

卫生填埋存在的问题：

第一：占地面积要求大，根据：V=365WP/D+C，假设一个城市人口 10 万，每人每天生产 1 公斤垃圾，覆土与垃圾之比为 1/4，填埋后压实密度为 600Kg/m³，那么一年填埋垃圾的体积为 76041m³，如果填埋高度为 7. 5 m，每年占地面积为 10138.8 平方米，运行 20 年，填埋厂的占地面积为 202776 平方米。在土地紧缺的地方比如上海，加上人口数量大的问题这么大的土地是很难解决的。

第二：被填埋的垃圾要经过一定的前处理，选出其中的塑料、金属等物质，如果塑料存在过多容易引起垃圾堆体的塌陷。

第三：选址要求比较严格，填埋场选址应选在地下水位较低的地方。填埋堆体的底部防渗漏层与地下水的距离不得小于 1.5 米，避免污染地下水源。

第四：存在安全隐患。安全隐患包括填埋气的燃烧爆炸，渗滤液与地下水的混合等问题。填埋气包括：硫化氢、甲烷、二氧化碳、硫醇、硫醚等气体，是在厌氧的情况下厌氧菌降解有机物产生的，甲烷是可燃气体，容易引发火灾和爆炸事故，在近几年当中垃圾填埋场的事故中有绝大多数是爆炸和火灾。而且填埋场气道堵塞也是引起爆炸的原因之一。此外硫化氢、硫醚、硫醇都是恶臭气体由于填埋场占地面积大臭气不易收集，造成了臭味污染环境。甲烷的排放也为地球的温室效应做了很大的贡献。

1.2 生活垃圾焚烧处理中存在的问题。

由于填埋处理存在着诸如占地面积大、臭味无法控制、环境污染严重等问题，生活垃圾的焚烧处理开始出现了。焚烧可以在很大程度上降低填埋处理的占地面积缓解填埋场的压力，而且如果有良好后续处理，不会产生二次污染。在焚烧方面丹麦和瑞典做的比较好，有 60％～70％的生活垃圾用于焚烧处理，焚烧完的灰杂送入填埋场进行填埋，大大减小了填埋体积。

城市生活垃圾的焚烧处理要取决于生活垃圾的三分（水分、灰分、可燃分）和低位热值。要使垃圾维持燃烧，就要求其燃烧释放出来的热量足以使入炉废物达到燃烧温度所需要的热量和发生燃烧反应所需要的活化能。否则需要添加助燃物质，比如喷油。

我国的生活垃圾含水率高，一般在 60％左右，而且城市化水平不高的地区烧煤区的比例较大，造成了生活垃圾中的灰分元素所占的比例较大在 15％左右。这样可燃分的比例相对较少，燃烧难度较大，一般需要助燃剂，提高了垃圾的焚烧成本高。

生活垃圾的焚烧处理还需要较高水平的过程控制和后续处理，如：要求燃烧室出口温度在 850～950℃，停留时间 2 秒，目的是避免二噁英等有害物质产生和加速燃烧、臭气物质的分解。燃烧温度过高又会产生过多的氧化氮而且会使垃圾熔融结块堵塞交换管道和烟道。后续处理主要有焚烧烟气冷却系统和焚烧烟气处理系统。有机垃圾焚烧后会产生氮气、氧气、烟尘、酸性气体（二氧化硫、氯化氢）氮氧化物、一氧化碳、碳氢化合物、二噁英等有害气体，所以后续处理的要求也很高。

由此可以得出焚烧处理的成本高，过程控制和后续处理水平要求较高投入也较大。

1.3 我国堆肥处理生活垃圾的现状及问题

堆肥是在氧存在的条件下，生活垃圾中可溶性有机质透过好氧微生物的壁和膜为微生物吸收。固体和胶体有机质先附着在微生物体外，由生物所分泌的胞外酶分解为可容性物质，再渗入细胞。微生物通过自身的生命活动，如氧化还原和生物合成过程，把一部分所吸收的有机物转化成简单的无机物，并放出微生物生长、活动需要的能量，把另一部分转化为合成新的细胞物质，使微生物生长繁殖产生更多的生物体。

在堆肥过程当中，有机质降解会产生热量，如果这部分热量大于堆肥向环境的散热，堆肥的温度会上升，根据堆肥的升温过程可将其分为三阶段：起始阶段、升温阶段、熟化阶段。

堆肥用于生活垃圾的处理中降低了生活垃圾中有机物的含量，减轻了在其他处理手段当中的后处理压力，堆肥产品还可以出售，是一种比较经济、环保的垃圾处理手段。但是堆肥过程当中由于垃圾的量大腐熟程度不够在堆肥产品出厂时候夹杂着生肥料，而且其中的有机塑料含量较高，容易造成堆肥过程的厌氧化——产生大量的臭气污染化境。另外生活垃圾的成分比较复杂其中有一些对土壤和生物有危害的物质，影响堆肥产品的销路，致使很对生活垃圾堆肥厂倒闭。由于以上种种原因生活垃圾的堆肥处理未能的到推广。

1.4 污水处理厂剩余污泥的处理现状

生活污水经过氧化曝气处理，处理过程中会生长出很多活性污泥，一部分用于回流，剩余的部分叫剩余污泥。剩余污泥处理是污水处理过程当中的一个难点，目前的处理方法一般是经过厌氧，结絮形成颗粒，然后絮凝、脱水，最后填埋或者焚烧。所以填埋和焚烧是剩余污泥的最终处置手段。

脱水后的污泥送入填埋厂的最大问题是：填埋场沼泽化，所以现在大多填埋场的不接受污泥入场。在没有办法的情况下选择了焚烧，但是绝大部分污泥的含水率在75%以上导致了焚烧的运行成本极高，所以很多污水处理厂都是偷偷将浓缩污泥倒掉，但是这个东西倒在那里污染在那里，污泥倾倒过的地方三年之内是不会生长植物的，因为它的氨氮等离子浓度太高，植物脱水而死。

1.5 粪便和餐厨垃圾处理现状

粪便历来是不进行处理的，最初都用作肥料施到耕地里面了，随着城市化水平的不断提高，水冲厕所的数量逐渐增加和化学肥料的普遍使用，有机肥使用逐渐淡化，需要处理的粪便量也在不断的增加，粪便处理多采用化粪池处理，通过三格化粪池消化的粪水排入了城市生活污水处理系统。粪便的氨氮和化学需氧量等都很高虽然经过化粪池仍然不能将其降下，给生活污水处理系统增加了处理压力。

餐厨垃圾的危害：食堂和饭店的餐厨垃圾为弱势者或不法分子收集饲养垃圾猪或生产地沟油，垃圾猪肉可能引发10余种传染疾病，而且有害物质容易在食物链中积累，危害生态环境。地沟油有强烈的致癌效果，毒性是砒霜的100倍。在国外一般处理方法是将油脂提出制作了生物柴油，剩余物经过发酵制作饲料。

2. 提出有机废弃物联合厌氧发酵的背景

传统的垃圾处理方法有这样那样的缺撼：其中生活垃圾中的有机物含量少有的地方一般在15%~25%，单独进行厌氧发酵的有机物量不足。随着“粪农”的消失，粪便处理的迫切性日显突出，而且粪便是很多疾病的传播源。如“手足口”病。另外中小城市财力不足，单独上粪便处理系统的资金难以解决。餐厨垃圾和粪便为不法所利用或随意倾倒会造了成多种疾病的蔓延。而且餐厨垃圾的成功处理在我们国家的报告较少。随着生活质量的提高和人们对食品安全的日益重视，餐厨垃圾的单独收集和处理势在必行。现在污水处理厂基本普及，而水处理工艺中的爆气环节必然产生活性污泥，除回流部分的剩余污泥必然要经过无害化处理。

这样，人们自然就想到了变单独处理为联合处理或综合处理几种废弃物搭配后厌氧发酵，既能增加发酵底物，又能调整C/N和N/P，以增加有机物的降减量化，更好的实现了城市生活有机废弃物的三化效果，另外增加了沼气产量和有机肥产量。

3. 有机废弃物的联合厌氧发酵的生物学原理及技术可行性

3.1 厌氧发酵的生物学原理

厌氧发酵也叫厌氧消化、沼气发酵、甲烷发酵，是将复杂有机物在无氧条件下利用厌氧微生物发酵性细菌、产氢产乙酸菌、耗氢耗乙酸菌、食氢产甲烷菌、食乙酸产甲烷菌等降解成N、P等无机化合物和甲烷、二氧化碳等气体。

厌氧处理在废弃物处理上大多用于水处理，在生活垃圾的处理上用的较少尤其是我国。厌氧处理方法无论是在水处理还是有机垃圾处理发面原理都是一样的，都存在三阶段理论。

第一阶段为水解发酵阶段，是指复杂的有机物在微生物胞外酶的作用下进行水解和发酵，将大分子物质破链形成小分子物质如：单糖、氨基酸等为后一阶段做准备。

第二阶段为产氢、产乙酸阶段，该阶段是在产酸菌如胶醋酸菌、部分梭状芽孢杆菌等的作用下分解上一阶段产生的小分子物质，生成乙酸和氢。这一阶段产酸速率很快，致使料液pH值迅速下降，使料液具有腐烂气味。

第三阶段为产甲烷阶段，有机酸和溶解性含氮化合物分解成氨、胺、碳酸盐和二氧化碳、甲烷、氮气、氢气等。甲烷菌将乙酸分解产生甲烷和二氧化碳，利用氢将二氧化碳还原为甲烷，在此阶段pH值上升。

这三个阶段当中有机物的水解和发酵为总反应的限速阶段。一般来说，碳水化合物的降解最快，其次是蛋白质、脂肪，最慢的是纤维素和木质素。联合厌氧发酵的这几种原料当中粪便是反应最快的物质几乎看不到酸化过程，剩余污泥次之，因为剩余污泥经过了污水处理的过程，这就相当于给了它一个预处理过程，接下来是生活垃圾当中分离出来的有机物，反应最慢的是厨余物。这就要求我们联合的过程当中寻找一个契合点让各种物料都完成水解和酸化的步骤，一同进入产甲烷阶段，最终同时完成甲烷发酵。为了解决这以问题我们进行了两相厌氧发酵，将产酸和产甲烷的过程分离，让难降解的有机物在产酸阶段停留的时间较长一些以便跟上反应较快的粪便和剩余污泥。我们厂生活垃圾经过分选、餐厨垃圾经过前处理后混合进入水解池，搅拌加温到35℃ 水解时间为10天左右

然后和粪便、剩余污泥混合一同进入甲烷发酵罐进行甲烷发酵。

3.2 有机废弃物的联合厌氧发酵的技术可行性

国内外学者的研究成果表明联合厌氧发酵是可行的。而且剩余污泥、生活垃圾、餐厨垃圾混和发酵效果优于各种物料单独发酵的相加效果。而且各种以上各种物料单独厌氧发酵又有很多成功的经验可以借鉴。我国农村几十年的实践已经总结出成熟的经验：人畜粪便、秸秆、生活垃圾等混和发酵的发酵效果优于单一原料的发酵。

4.城市有机废弃物联合厌氧发酵的应用情况以及前景。

4.1 传祥公司背景

传祥公司从2004年起步开始从事城市生物质垃圾综合处理的研究，先后考察了世界各国的城市有机废弃物的处理工艺，并进行了不同规模和不同工艺组合的试验研究，于2007年成功开发了“城市有机废弃物联合厌氧发酵”工艺，首次集成了城市有机废弃物的系统处理工艺。2008年6月试生产到目前已达到生活垃圾400T；粪便200T；剩余污泥50T；餐厨垃圾60T的处理能力，工艺技术上基本成熟。

其中的生活垃圾分选过程可以选出占总垃圾比例90%的有机物，另外可以选出磁性材料和玻璃、塑料等物质，一方面增加了厌氧发酵的有机物含量，另一方面回收了大部分的资源，在一定程度上解决了资源紧缺的问题。而且大大的缩小了卫生填埋体积，缓解了填埋场的压力。

在厌氧消化过程中可以产生大量的沼气，沼气可以用来发电，或者供暖。在发酵过程中产生的沼杂可以用来制作有机肥料，这种有机肥料在保水保肥的方面效果极佳。沼液还可以做液态肥料。

4.2 “三化”程度比较高，取得了较好的社会效益。

因为在处理过程中做了多处分选，包括磁选、人工分检、重力分选等程序，大大的减少了填埋体积；分拣出来的塑料、纸质、玻璃等又被回收利用，而且发酵的副产物沼气是一种清洁燃料，这样就实现了垃圾的资源化目的；因为除去分选以外的部分都是在密闭的条件下实现的所以对环境没有污染。

4.3 相对其它处理方法，有效好的经济效益。

首先，节约了建设费用和运行成本，在一座处理厂的基础上实现了有机垃圾和粪便、剩余污泥、餐厨垃圾等的处理，省下了建设其它垃圾处理厂的费用和运行成本。其次，经过分选可以选出占垃圾总量0.2%的金属；1%的塑料；3%的纸浆；2%的玻璃；生产10T有机肥料和6000m³的沼气再转化为8000度电。

经过几年的不断探索和实践以及在传祥垃圾厂的示范成功，引起了各级领导及有关部门的重视，并获的一系列荣誉，“城市有机废弃物联合厌氧发酵”工艺获得国家发明专利，成为国家“十一五”科技支撑计划“新型高效规模化沼气示范工程”唯一中标企业，被自治区评为2008年“十大科技进展”，在2009年北京“国际节能减排和新能源科级博览会”上得到党和国家领导人的高度评价。

总之，联合厌氧发酵的优势有以下几方面：第一，将数座生活垃圾处理厂合并为一，减少了运行成本和维护费用。工厂环境较好无异味，可实现花园式工厂的要求。第二，充分考虑了垃圾作为资源进行回收利用，产生大量的沼气和有机肥，实现了最大限度的资源化的目的，降低了垃圾处理的成本。第三，由于采用水选过程进行分选，可有效选出可生化有机物中的其他杂质，使肥料的安全性得到保证，加速了发酵的速率。第四，垃圾进厂后分别进行资源化利用消纳率在80～90％ 。第五，污水循环使用和处理后达标排、放噪音控制、废气处理达标，整个工厂无二次污染。

通过以上叙述可以看出城市有机废弃物联合厌氧处理具有广阔的前景和推广价值。

参考文献

[1] 解强，边炳鑫，赵由才.城市固体废弃物能源化利用技术.北京:化学工业出版社，2004

[2] 席北斗，魏自民，刘洪亮等.有机固体废弃物管理与资源化技术.北京:国防工业出版社，2006

[3] 国家环保总局污染控制司.城市固体废物管理与处理处置技术.北京:中国石化出版社，2000

[4] 刘芳，陈季华，奚旦立等.上海城市生活垃圾处置及污染防治对策研究.中国资源综合利用，2005，(5):13 一 15

[5] 吴满昌.城市有机生活垃圾高温厌氧消化工艺及沼渣综合利用研究.昆明:昆明理工大学，2005

[6] 陈朱蕾，唐赢中.我国城市粪便的可持续利用研究.城市环境与城市生态，1999，12(2):42一44
[7] 李金红，何群彪.欧洲污泥处理处置概况.中国给水排水，2005，21(1):101~103
[8] 邹绍文，张树清，王玉军等.中国城市污泥的性质和处置方式及土地利用前景.中国农学通报，2005，21(1):198一201
[9] 张于峰，邓娜，李新禹等.城市生活垃圾的处理方法及效益评价.自然科学进展，2004，14(8):863一869
[10] 王华.二恶英零排放化城市生活垃圾焚烧技术.北京:冶金工业出版社，2001
[11] 刘会友，王俊辉，赵定国.厌氧消化餐厨垃圾的工艺研究.能源技术，2005，26(4)150一154
[12] 谭启玲，胡承孝，赵斌等.城市污泥的特性及其农业利用现状.华中农业大学学报，2002，21(6):587一592
[13] De Baere，L.Anaerobic digestion of solid waste: State of the art Water Scienee and Technology，2000，41(3):283一290
[14] 胡纪翠，周孟津，左剑恶等.废水厌氧生物处理理论与技术.北京:中国建筑工业出版社，2003
[15] 吕炳南，陈志强.污水生物处理新技术.哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社，2004
[16] 周少奇.有机垃圾厌氧处理的微生物作用原理.华南理工大学学报(自然科学版)，1999，27(9):81一84
[17] 周少奇.环境微生物.北京:科学出版社，2003
[18] 杨宏毅，卢英方.城市生活垃圾的处理和处置.北京:中国环境出版社，2006
[19]BraberK.Anaerobicdigestionofmunieipalsolidwaste:amodernwastedisposal Option onVerge of breakthrough.Biomass and Bioenergy，1995，9(1一5):365~376
[20] 张爱军，陈洪章，李佐虎.有机固体废物厌氧消化处理的研究现状与进展.环境科学研究，2002，15(5):52一54
[21] 乔玮.城市垃圾厌氧消化处理技术研究.长沙:湖南大学，2004
[22] 安思科.城市垃圾的处理与利用技术.北京:化学工业出版社，2006

创新环保科技　提倡绿色焚烧

上海龙阳机械厂厂长：丁跟元
上海季明环保设备有限公司“LJ”五化技术发明人：杨计明

摘要：本文针对目前我国垃圾焚烧发电厂，因垃圾成分复杂、含水量大、热值低不易焚烧，不得不加煤或喷油，致使运行费用昂贵，垃圾分选不彻底、焚烧量大、二次污染严重、资源化程度低的现状，提出了一种减少垃圾焚烧量、减轻二次污染、最大限度地实现垃圾处理资源化的技术方案，该技术已成功应用于国内多家垃圾处理厂，各厂均取得了明显的经济效益和社会效益。

关键词：“LJ”五化　大件垃圾分选机　破袋破碎机　综合风选机 焚烧发电　水解水热氧化

一、目前我国垃圾焚烧发电厂的基本状况

据原建设部2006年资料统计：截止至2005年底，全国661个设市城市中建有各类生活垃圾处理场479座，每天处理能力为25.7万吨/日，每年集中处理量为8049万吨，集中处理率为47.35%。其中：生活垃圾填埋场365座，每天处理能力为21.3万吨，每年处理量为6924万吨；生活垃圾堆肥厂46座，每天处理能力为1.18万吨，每年处理量为345万吨；生活垃圾焚烧发电厂66座，日处理能力为3.22万吨，年处理量为780万吨。请注意该组数据，66座垃圾焚烧发电厂，加起来日处理能力为每天3.22万吨，那么年处理能力应该为1175.3万吨，剩下的395.3万吨那里去了？该数据不是笔误，更不是统计失误，而是大部分垃圾焚烧发电厂根本就没有能力完全消化这些垃圾，只有去填埋掉了。可以说，没有一座垃圾焚烧发电厂没有配置垃圾填埋场。究其原因，主要是因为我国垃圾成分复杂、水分大、热值低，到了垃圾焚烧发电厂分类又不彻底，导致垃圾焚烧发电厂即使加煤、喷油也无法完成设计处理能力，剩下的垃圾只有去填埋，这是其减量化程度。再看其资源化程度：所有垃圾全部焚烧，造成了资源的严重浪费，“混合是垃圾，分开是资源”，已是许多仁人志士的共识。以日处理2000吨的垃圾焚烧发电厂烧掉的塑料为例，塑料在我国垃圾总量所含的平均比例是10%，上海地区可达15%。就按含量10%、分选率90%计算的话，每天大约有180吨塑料被烧掉，计算其价值，就按市场价最低价格每吨600元计算的话，则日收入为10.8万元，年收入为3942万元，如果炼油或制粒其价值就更不用说了，也就是说一个日处理2000吨的垃圾焚烧发电厂，每年至少把约3500万元烧掉了，而180吨塑料焚烧后又能发出多少电、创造出多少价值呢？加上塑料焚烧产生的有害气体的处理费用，实在是得不偿失。再看其经济效益，所有的垃圾焚烧发电厂，没有一家不是在靠政府的高额补贴生存的，目前我国的垃圾焚烧发电厂的政府补贴最低的是每吨80元，最高的达每吨200多元，平均都在每吨120多元，还有焚烧发电厂每度电0.25元的上网补贴，大部分垃圾焚烧发电厂都给政府背上了沉重的经济包袱。另外，垃圾焚烧产生的有害气体，已经严重地污染了大气，特别是塑料焚烧产生的有害气体更是难以处理，1992年在日本东京的垃圾处理厂，因为焚烧技术处理不当产生的呋喃类物质，使焚烧厂0.5公里半径之内的老百姓出现了癌症的高病发率。我国垃圾焚烧发电厂周边人民群众集体上访事件也经常发生。世界许多发达国家都在叫停垃圾焚烧，我国的专家也在呼吁，那么我国的垃圾处理出路到底在那里？在资源逐渐枯竭、能源日趋紧张的当今时代，我们国家更是提倡建设资源型、节约型社会，而这种二次污染严重、将资源焚烧掉的处理方法，实在是一种得不偿失、以一种污染形式转换成另一种污染形式、以牺牲环境换取眼前效益的一种处理方法。

二、“L J”五化技术介绍

城市生活垃圾“快速化、无害化、无剩余化、资源循环利用化、产业化”处理技术，简解“LJ五化”技术。该技术主要解决了垃圾焚烧发电厂运行费用昂贵、资源化程度低、焚烧产生的有害、有毒气体难以处理的问题；垃圾填埋场占地面积大、使用时间短、占用时间长、污染地下水、污染土壤、污染大气的问题；堆肥产品肥质低劣难以资源化、堆肥处理厂苍蝇蚊子孳生，损害周边人民群众身体健康的问题。

该技术历经十几年研发实践,现采用的是新一代生产线，按花园式工厂规划设计，立体布局，中央集中控制、电脑管理、可视监控，物料封闭输送、气体完全净化后排放，固体废物、污水实现零排放，达到清洁生产，进来是垃圾,出去是产品,各项指标均达到国家有关标准。

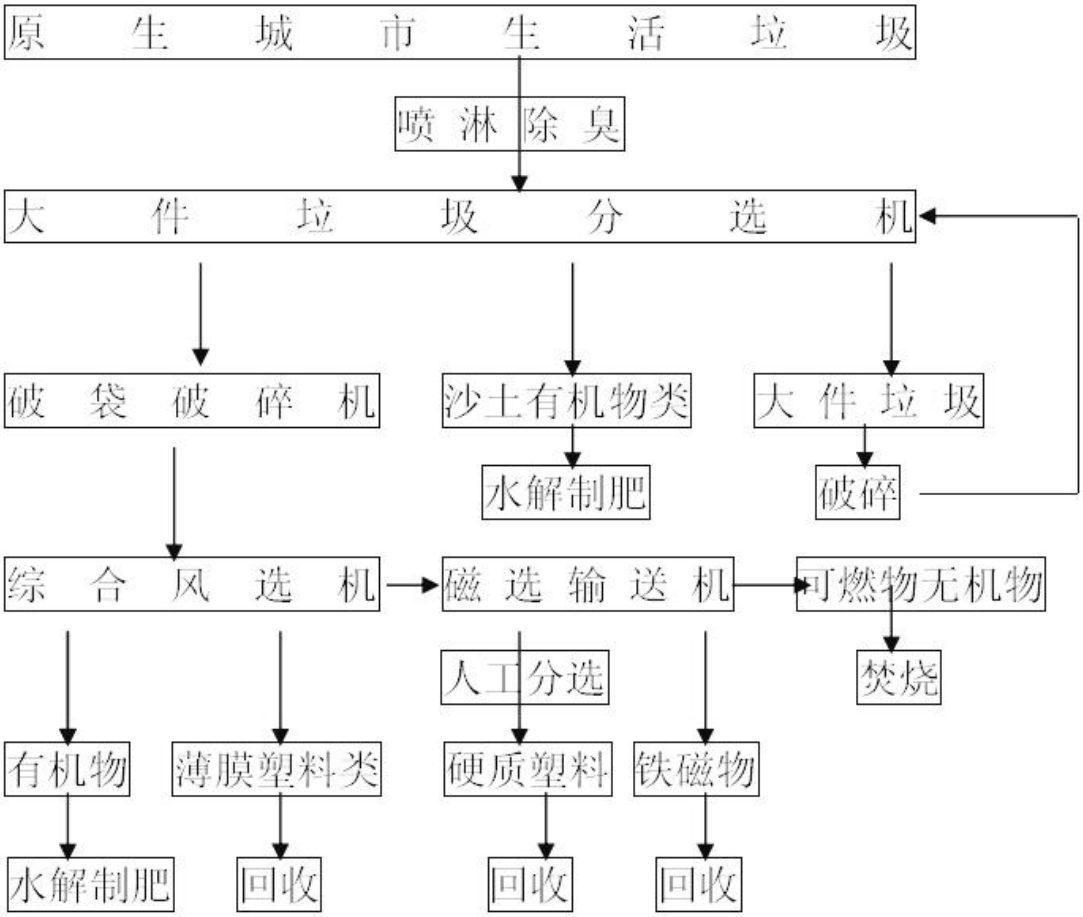
2.1：该技术主要专利：

2.1.1 发明专利：生活垃圾分选方法。
中华人民共和国专利号：20071008946.7；
技术发明人:杨计明；
2.1.2 发明专利：一种用于处理生活垃圾的破袋破碎机。
中华人民共和国专利号：200710038947.1；
技术发明人：杨计明；
2.1.3 发明专利：一种综合风选机。
中华人民共和国专利号：200710038946.2；
技术发明人：杨计明；
2.1.4 实用新型专利：一种用于处理生活垃圾的破袋破碎机。
中华人民共和国专利号：200720068555.5；
技术发明人：杨计明；
2.1.5 实用新型专利：一种综合风选机。
中华人民共和国专利号：200720068554.0；
技术发明人：杨计明；
2.1.6 发明专利：生活垃圾处理方法。
中华人民共和国专利号：200710039019.7；
技术发明人:杨计明；
2.1.7 发明专利：有机垃圾处理方法。
中华人民共和国专利号：200710039020.X；
技术发明人:杨计明；

三、“LJ”五化处理技术建设、改造垃圾焚烧发电厂主要工艺

“LJ”五化处理技术的核心是零排放无剩余、完全资源化，但是针对已建成的、或已立项垃圾焚烧发电厂，按完全资源化处理方案建设需重新申报项目，按完全资源化处理方案改造，则资金投入相对较大。所以该方案本着：尽量减少资金投入，减少垃圾焚烧量（主要目的是减少有毒、有害气体的产生与排放量），无需加煤或喷油，彻底解决原设施运行费用昂贵、无法完成设计处理能力的问题，在节约投资的前提下，经方案优化比较，确定本方案工艺路线为：分选、回收、资源化处理、焚烧，即垃圾进场后先把垃圾分类，分类后塑料、铁磁物等回收利用，有机物利用焚烧炉尾气烘干后再焚烧或者水解水热氧化处理后制有机肥，剩下的高热值可燃物类垃圾才去焚烧，这样既减少了垃圾焚烧量，提高了垃圾的热值（由原生垃圾不足 800kcal/kg，提高到 2500kcal/kg--3500kcal/kg 以上），节约了运行费用，从源头减少了有害有毒气体的产生与排放量，大大降低了垃圾焚烧发电厂对周边环境的二次污染，又实现了垃圾处理的资源化利用，可谓一举多得，利国利民。

3.1：主要工艺流程：



3.2 全封闭、机械化垃圾分选系统：

“LJ”五化技术前处理系统通过垃圾均匀给料、大件垃圾自动分选、破碎系统、袋装垃圾自动破袋、大块有机物自动破碎系统、全封闭机械化风选系统等工艺处理后，可将城市生活垃圾分选为：

3.2.1：无机物类；

3.2.2：有机物、砂土类；

3.2.3：不可回收可燃物类；

3.2.4：薄膜塑料类；

3.2.5：铁磁物类；

以上垃圾，分选纯度均可达到85%以上，薄膜塑料类垃圾分选率可达到90%以上，为下工序垃圾处理的“资源化、产业化”打下了坚实基础，同时也可使垃圾焚烧量减量近三分之二，也不用加煤或喷油，焚烧炉产生的余热用以发电，尾气提供给水解罐处理有机物，或直接用尾气把有机物烘干后焚烧，用垃圾处理垃圾，所节约的运行成本相当可观。

3.3 垃圾分选系统工艺流程介绍：

生活垃圾经垃圾运输车运入，经地磅过重后，垃圾运输车进入垃圾车回转车间，将垃圾卸料在垃圾暂存车间，卸料时同时喷淋除臭剂。

大件垃圾分选机

经桥式双梁抓吊上料到均匀给料机，经均匀给料机将物料输送至大件垃圾分选机。该机可将垃圾中的大件垃圾全部分离出来（分选率 99%），将垃圾中的沙土分离出 90%以上，有机物类垃圾分离出 50%左右，同时可将体积较大的袋装垃圾的袋子破袋 90%以上，分选出的大件垃圾经大件垃圾破碎机破碎至 300 毫米以下后，去向垃圾暂存坑参加二次分选；分选出的砂土、有机物或制肥或烘干后焚烧；其余可处理垃圾去向破袋破碎机。

破袋破碎机

该机可将垃圾中未打开的袋装垃圾的袋子全部撕开，并将粘在塑料上的杂物打散，将粒径大于 60mm 的有机物全部打碎至 60mm 以下。

经破袋破碎机处理后的垃圾自然下落至综合风选机，并与整流后的扁平气流垂直相遇。根据比重不同、落点不同，破碎后垃圾粒径不同、成分不同的原理，通过风选装置、粒选装置、磁选装置，

可将城市生活垃圾分选为：铁磁物（包括电池类）、有机物、不可回收类可燃物、薄膜塑料类等。

综合分选机

3.4：垃圾分类后的主要处理方法：

3.4.1：有机物、砂土类垃圾，水解水热氧化处理后制肥或利用焚烧炉尾气烘干后再焚烧。

3.4.2：塑料类，回收或制塑料制品或炼重油；

3.4.3：铁磁物类，主要以回收为主；

3.4.4：不可回收可燃物类，焚烧发电；

3.4.5：无机物、炉渣类垃圾填埋或制砖；

3.5：有机物高温高压水解水热氧化、制肥系统：

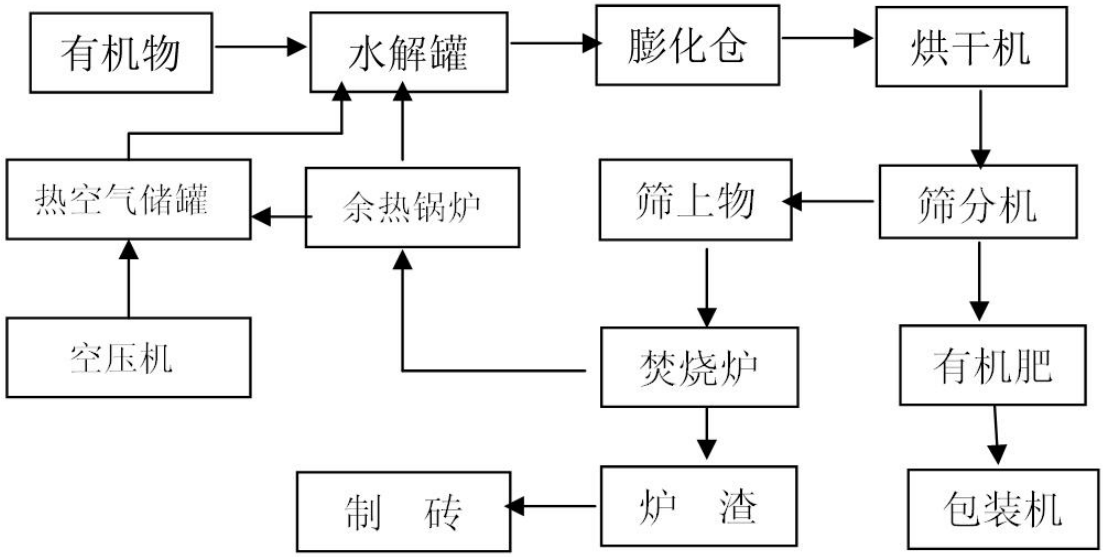
3.5.1：工艺介绍：

前处理系统分选出来的有机物，经高温高压水解水热氧化釜在温度 193℃、压力 1.25Mpa 的条件下，反应 2 小时，彻底消灭了病虫害和杂菌，并使有机物中的大分子链断成易于农作物吸收的小分子链，由于有机物在高温高压反应过程中，产生了大量的糖分和腐殖酸，所以该肥料养分充足，是绿色食品的必用肥料。根据市场需求，配入其它养分即可生产出各种高效有机无机复混生态农作物专用肥。

水解水热氧化釜

以有机物为主的垃圾，经过 2 个小时左右的“水解”处理后，其中，95%以上的有机垃圾在水解喷爆过程中被膨化成棕褐色粉末，降解为有益于农作物生长的优质有机肥，然后经过烘干、筛分，把有机质粉末与其它未降解物彻底分离。该工序能将不可降解的无机物与有机物彻底分选开来，所以也叫“热选”。该工序所需热能来自垃圾焚烧系统的余热锅炉，能源循环利用，以垃圾处理垃圾，大大地降低了垃圾处理成本。高温高压水解水热氧化技术的作用是：（1）把大分子链断为短分子链。（2）加速糖类、腐殖酸的转换，提高有机肥的质量。（3）灭菌彻底，完全实现了无害化处理。

3.5.2：水解制肥系统工艺流程



3.5.3：化学催化水解工艺参数

3.5.3.1：温度：145℃-193℃

3.5.3.2：压力：0.8Mpa-1.25Mpa

3.5.3.3：反应时间：1h-2h

3.5.4：“LJ”高养分纯生态有机肥主要质量指标控制（符合中华人民共和国农业部农业行业标准）

3.5.4.1：外观：呈褐色粉末状无恶臭和异味。(可制成颗粒)

3.5.4.2：N+P+K 总量≥5%

3.5.4.3：有机质含量≥30%

3.5.4.4：含水量≤20%

3.5.5：“LJ”高养分生态有机复合肥特点：

3.5.5.1：养分高，总养分大于或等于 5%。

3.5.5.2：提高土壤肥力，克服土壤板结。

3.5.5.3：促早熟，增产增收。

3.5.5.4：抗病害，可减少或不用化学农药。

3.5.5.5：提高农产品质量，口感好。

3.5.5.6：施肥方法简单，减轻农民劳作强度。

3.5.5.7：长效肥，提高肥料利用率。

3.6：“LJ”五化处理技术主要特点：

3.6.1：快速：当天垃圾，当天处理，达到日产日清。

3.6.2：无害：全封闭作业，故无臭气外溢；处理快速，渗滤液产生少。

3.6.3：占地面积小：是堆肥法的四分之一，填埋法的六分之一。

3.6.4：资源化、产业化程度高：因前分选分类彻底、故可回收物资全部再生利用，同时减少了焚烧量，也减少了废气产生量（减量近三分之二）。

3.6.5：“LJ”生态有机肥市场前景好：绿色产品必用肥料。

3.6.6：设备先进：主要设备大部分为经多年现场经验凝练、升华而研制的专利设备，故障率低，使用效果好，特别适合中国国情城市生活垃圾的处理。

四、项目概况及效益概算

4.1：项目概况

4.1.1：建设规模

4.1.1.1：年处理城市生活垃圾：73 万吨；

4.1.1.2：日处理城市生活垃圾：2000 吨。

4.1.1.3：每小时处理能力：125 吨。

4.1.1.4：日处理时间：16 小时。

4.1.2：垃圾成分(暂按，此数据仅为估计)

4.1.2.1：有机物 48%；

4.1.2.2：无机物类 7%；

4.1.2.3：铁磁物类 1%；

4.1.2.4：塑料类 10%；

4.1.2.5：不可回收可燃物类 25%；

4.1.2.6：砂土类 7%；

4.1.2.7：污泥类 1%；

4.1.2.8：渗滤液 1%。

4.1.3：主要产品（产品产量随垃圾成分的变化而变化）

4.1.3.1：年产“LJ”高养分生态有机肥 20.8 万吨

4.1.3.2：年回收废旧塑料 6.57 万吨(90%分选率),或年产再生塑料粒子 2.628 万吨,或年产重油 2.628 吨（按 40%成粒率、出油率计算）。

4.1.3.5：年回收废旧金属 7300 吨

4.1.3.5：年需焚烧可燃物类垃圾 24.09 万吨，日需焚烧可燃物类垃圾 660 吨。

4.1.4：建、构筑物占地面积

建筑面积：12000M^2；

4.1．5：工程总投资（18000 万元）

4.1．5．1：土建工程投资：1200 万元。（不含征地费用）。

4.1．5．2：机电设备总投资：16800 万元

4.1．5．2．1：前处理系统：12400 万元;

3.1．5．2．4：有机物水解水热氧化制肥系统：4400 万元;

4.1．5．3：总电量： 1800KW。（含生活用电）

4.2：效益概算

4.2．1：预处理成本核算（2000 吨/日计算）

序号	项目内容	单 耗	每吨成本	备 注
1	电耗	11.5 度	5.7 元/吨	电价：0.5 元/度；开机率：0.8；
2	水耗	0.1 吨	0.35 元/吨	水价：3.5 元/吨
3	人工费		3.6 元/吨	72 人 X3000 元/月
4	折旧费、递延资产		17 元/吨	13 年折旧，残值 10%
5	年维修费		3.7 元/吨	维修系数：0.015
6	除臭费		1 元/吨	
7	管理费		2 元/吨	
8	总 计		33.35 元 / 吨	

4.2．2：基本收益

4.2．2．1：按年产“LJ”高养分生态有机肥 20.8 万吨计算

20.8 万吨 X200 元=4160 万元

扣除生产成本 100 元/吨,利润为 2080 万元;

4.2．2．2： 年回收废旧塑料 6.57 万吨(90%分选率),或年产再生塑料粒子 2.628 万吨,或年产重油 2.628 吨（按 40%成粒率、出油率计算）。

若回收,其收益为:

6.57 万吨 X600 元=3942 万元;

若炼油,其收益为:

2.628 万吨 X4600 元=12088.8 万元;

扣除每吨制造成本 1600.00 元，年收益 7884 万元。

4.2．2．4：日发电：另计

4.2．2．5：年回收废旧金属 7300 吨

7300X1000 元=730 万元;

4.2．2．6：年处理成本

2000 吨 X365 天 X33.35 元=2434.55 万元

4.2．2．8：年实际收益(塑料按回收计算)

2080 万元+3942 万元+730 万元-2434.55 万元=4317 万元，可按年实际收益 4000 万元计算。即投资回收期大约为 4.5 年。

4.2．2．9：年实际收益(塑料按炼油计算)

2080 万元+7884 万元+730 万元-2434.55 万元=8259.45 万元，可按年实际收益 8000 万元计算。即投资回收期大约为 2.25 年。

以上数据仅为粗略估算。

4.2．2．10：年减少焚烧量

73 万吨-24 万吨=49 万吨

4.2．2．11：年节约处理费用（焚烧处理成本按每吨 60 元）

49 万吨 X60 元=2940 万元

4.2．2．12：年节约燃煤费（按焚烧 1 吨垃圾加 0.05 吨煤计算）
73 万吨 X0.05 吨 X800 元=2920 万元

五、市场分析

5.1：塑料市场分析

塑料是石油产品，在能源日趋紧张、石油大幅涨价的的当今时代，塑料的市场价格也在逐节攀升。经市场调查及垃圾成分分析，塑料在垃圾中的含量均达 10%以上，有的地区高达 15%以上，目前混合废旧塑料的市场价格已达每吨 700 元以上，分类较好的塑料市场价格均达每吨千元以上。而垃圾中分选出来的塑料大部分以薄膜塑料为主，此类塑料再生次数少，品质较好，是塑料炼油或制粒最理想的原料，因其价格、品质优势，市场供不应求。在本项目经济效益分析中，其含量仅按 10%计算，其价格仅按每吨 600 元的回收价格计算，因此该产品具有极强的抗风险能力。

5.2：“LJ”生态有机肥市场分析

我国是农业大国，我国农民自古就有使用农家肥的习惯，而垃圾中选出的有机物制成的“LJ”生态有机肥不仅具有农家肥的所有特点，而且比农家肥营养更全面更充分。与使用化肥相比较，其优势更是显而易见，——改良土壤、克服土壤板结、改善农产品口感、产出远大于投入。另外，由于人民生活水平不断提高、人民的生态意识、保健意识的日益增强，对于无化肥、农药污染的粮食、蔬菜、肉类及其它绿色食品的需求越来越大，作为绿色食品主要肥料的“LJ”生态有机肥，其市场前景必将越来越广阔。在本项目经济效益分析中，其收益仅按每吨 200 元计算，而任何一种化肥，其价格都在 1000 元以上，另外由于使用化肥造成的农产品质量问题，越来越被人民大众所重视，其销售量正在逐年下降，所以“LJ”生态有机肥以其价格、质量优势，必将逐渐取代化肥，市场前景也必将越来越光明，因此也就不存在市场风险问题。

六、结论

综上所述，用“LJ”五化技术建设垃圾焚烧发电厂，把塑料分选出来资源化利用，最大限度地减少了有害气体的产生与排放量，从源头解决了二次污染的问题；把有机物分选出来制成有机肥，减少了垃圾焚烧量，彻底解决了因有机物含水量大，需加煤或喷油才能燃烧，致使运行费用昂贵的问题。用该技术建设的垃圾焚烧发电厂，所焚烧的仅仅是不可回收、高热值的可燃物，日处理 2000 吨的垃圾处理厂，其焚烧量不超过 660 吨，而且极少有塑料焚烧，所以也称作“绿色焚烧”。

该方案技术成熟、工艺可靠，经济效益显著，项目投资小，建设周期短，回收时间快，主要设备以国产专利设备为主，性能可靠，经济适用。“LJ”五化技术处理厂生产的产品，因其价格、质量等因素，市场前景无比广阔，彻底改变了以往垃圾处理厂“为了处理而处理”的概念，实现了“混合是垃圾，分开是资源”，以及资源循环利用的理念。该技术的成功应用，必将为改善人类生存环境、为我国社会主义新农村建设、资源型节约型社会建设，以及循环经济的发展做出更大的贡献。

戈尔 Remedia®二恶英催化过滤技术在医疗废物和危险废物焚烧工程上的应用

孙宏
（戈尔过滤产品（上海）有限公司，上海，200030）

摘要：随着医疗废物和危险废物焚烧工程的兴起，对尾气中二恶英的控制处理提出了严格的要求。美国戈尔公司基于“表面过滤”及“催化过滤”理论，开发的 Remedia®覆膜催化滤袋产品，为医疗废物和危险废物焚烧工程中最严格的粉尘排放控制及二恶英的控制提供了新的技术。

关键词：二恶英　烟气净化 医疗废物和危险废物焚烧　过滤

Introduction of Remedia® Filtration Bags Technology In Medical Waste Incinerator PCDD/F Controlling

(Gore Filtration Products (Shanghai) Co., Ltd.,Shanghai,200030)

Abstract： With the medical waste incinerator project widely setting up recent years, the PCDD/F control regulation is tightly observed. Based on the “Surface Filtration Theory ”,and “Catalyst Theory”, W.L.Gore & Associates, Inc has developed Remedia® brand membrane filtration catalyst bags, which can reach Europe PCDD/F control regulation and the lowest emission rate. The Remedia® bags offer the higher PCDD/F control performance and longer bag life in medical waste incineration application.

Keywords： DIOXIN ; gas purify; medical waste incinerator; filtration

一．总论

“非典“以后，各地对医疗废物和危险废物焚烧引起了足够的重视。国家环保总局发布环办[2004]54 号文件《危险废物和医疗废物处置设施建设项目复核大纲（试行）》，并要求各级环保部门会同当地计委严格审查复核规划内项目的环评报告，可研报告和初步设计，建设一些布局集中，处理合格，无二次污染的焚烧装置。在我国只有环保严格达标的单位，才可申请危险废物和医疗废物经营许可证。根据第 408 号国务院令，颁布了《危险废物经营许可证管理办法》。

我国近年来开始引进焚烧技术并有多个大型焚烧厂投入运行。比如宁波枫林绿色能源开发有限公司，是我国第一个投入运行的 1000T/ D 级的现代化的焚烧电厂。自 2001 年投运至今产生了良好的生态效益、社会效益及经济效益。焚烧技术推向市场的开始，其焚烧烟气处理技术一直受到政府，环保部门及有关科技人员的关注。针对 2003 年 6 月国家《医疗废物管理条例》的贯彻，《医疗废物焚烧炉技术要求》(GB19128-2003)，《危险废物焚烧污染控制标准》(GB184 84- 2001)，《医疗废弃物焚烧环境卫生标准》(GB/T18773-2002)等国家标准相继施行，对粉尘及二恶英的排放作了严格的要求。发达国家对焚烧工程中的二恶英的排放标准控制为 0.1ng TEQ/Nm^3。

二．二恶英及戈尔 Remedia®技术

在我国能源再生行业著名的天津泰达、宁波枫林、杭州新世纪滨江工程、上海江桥等大型现代化的焚烧工程都有有效的控制二恶英达到欧洲标准的科学系统办法，来确保环保的实现。

二恶英（DIOXIN，缩写为 PCDD）是两个苯核由两个氧原子结合，苯核中的一部分氢原子被氯原子取代所产生计有七十多种形式。通常在焚烧过程中伴随着 PCDD 的产生，还能合成 130 多种二苯呋喃（FURAN，缩写为 PCDF）。一般 PCDD 与 PCDF 统称为二恶英，其毒性大于氰化钾一千倍。[4]

废物中含有氯源有机物，因此焚烧尾气中含有大量的二恶英。传统的二恶英处理办法称为 PAC 法。其核心是控制炉膛内废物燃烧温度高于 850°C，烟气停留时间大于 2 秒，O_2浓度大于 6%，在烟气进布袋前喷射活性碳进行吸附。活性碳的特点在于其具有极大的比表面积，因此只要喷入一定量的活性碳，并保证与烟气 均匀混合及混合的时间就可以达到较高的吸附净化的效率，吸附后的颗粒通过袋式收尘器来收集。世界上许多大型现代化的焚烧厂都采用这种办法。

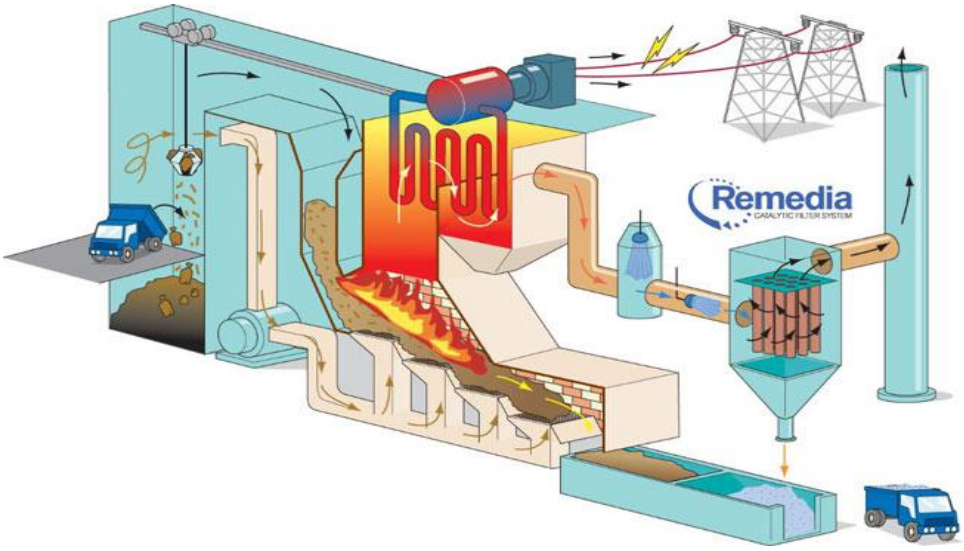


图 1　　Remedia®　技术的系统流程

传统的办法需要昂贵的活性碳喷射装置，而且每天需要消耗活性碳。美国戈尔公司 1998 年首创 Remedia®工艺，发明用催化滤袋解决垃圾焚烧中的二恶英控制，成为一种新的技术（见图 1）。这种办法与传统的 PAC 法相比较具有以下特点[2]：

1. 气态的二恶英被彻底分解而不是被吸附在固体颗粒表面通过转移仍然存在；
2. 系统不再需要化学物质（活性碳）及喂料装置；
3. 新技术实施非常简单，不需要改造已有机械设备；
4. 减少了二恶英再合成的潜在可能；
5. 系统集成了极高粉尘捕集率，低过滤压降，长机械寿命等戈尔 ePTFE 薄膜滤袋的优势。

三．催化过滤系统的描述[1][2]

这种系统实际上是集成了两种技术：“催化过滤”技术与“表面过滤”技术。系统由 ePTFE 薄膜与催化底布所组成。底布是一种针刺结构，纤维是由膨体聚四氟乙稀复合催化剂所组成。这种覆膜的催化毡材料能够把 PCDD/F 在一个低温状态（180°C~ 260°C）通过催化反应来进行彻底摧毁，即在催化介质表面二恶英被分解成 CO_2, H_2O 和 HCL。（见图 2）

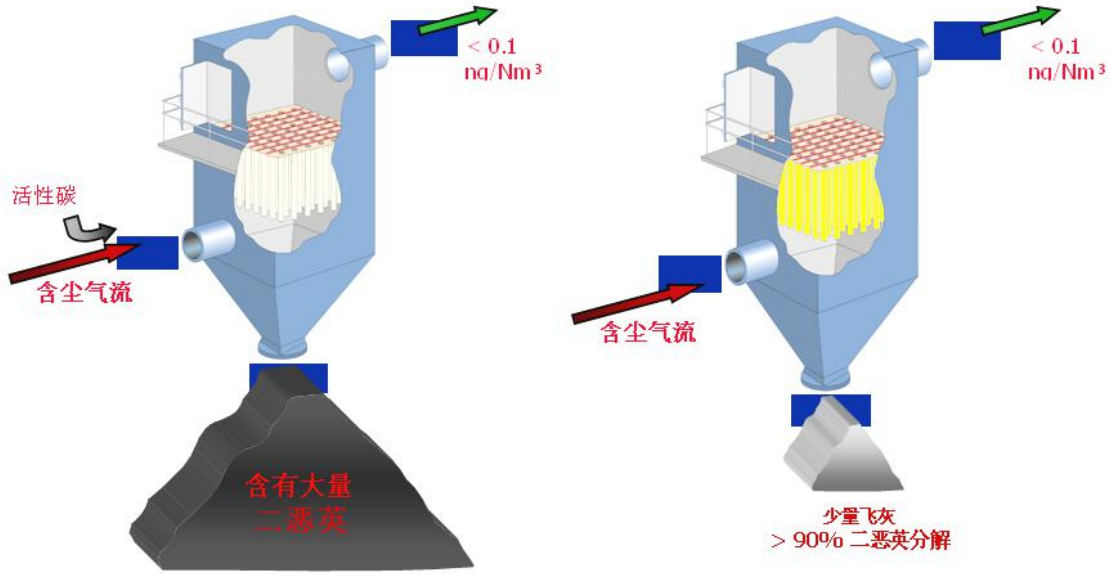


图 2　　传统去二恶英的方法与 Remedia®　技术

这种滤袋表面仍然有 ePTFE 的膜来捕集亚微粉尘，这种膜就是 Gore-Tex®薄膜，能阻挡任何细微的颗粒穿透到底布中。就这样，表面的薄膜承担了阻挡任何吸附了 PCDD/F 的颗粒的功能，气态的 PCDD/F 穿过薄膜进入催化毡料被有效分解，其原理图如下[1]：（见图 3）

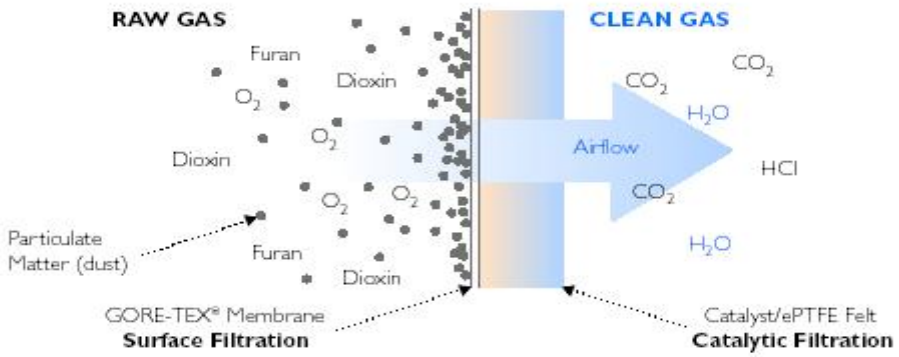


图 3　表面过滤与催化过滤原理

四．案例

世界上有许多个危险废物和医疗废物焚烧厂成功地运用戈尔的催化技术来控制废弃物焚烧尾气中的二恶英，保证环保标准的实现。现举一个实例。

工厂类型：　医疗废物焚烧
工艺描述：　焚烧炉-余热锅炉-干法除酸-袋收尘
生产线数：　2
工厂地址：　美国
每条线负荷：　68 吨/天
每线气流量：　50,000 Nm^3/h
入口温度：　180-200 °C
过滤面积：　1177 m^2
安装日期：　1999。5。
使用效果：　-排放< 1 mg/Nm^3 (12% O_2)
-PCDD/F < 0.1 ng TEQ/Nm^3 (11% O_2)
（见图 4）

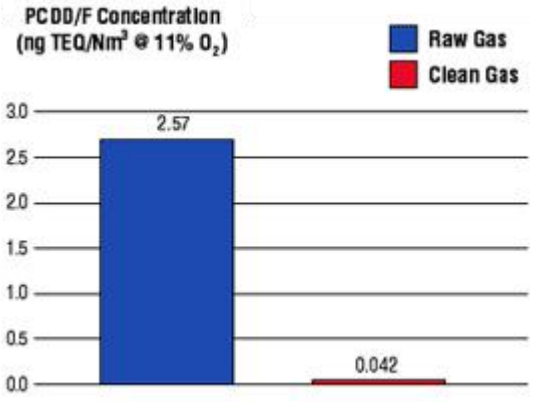


图 4　二恶英的摧毁

五．结论

戈尔公司提出了 Remedia®催化技术来分解焚烧中的二恶英，这种技术不需要改造已有设备，只需更换滤袋。是“表面过滤”技术与“底布催化”技术的复合技术。与传统的活性碳吸附技术相比，它是对气态二恶英的摧毁与分解而不是转移，节省了活性炭及其喷射装置并能完全达到欧洲标准。

它适合于干法除酸工艺中对二恶英的控制。在中国武汉新技术开发区，将投运戈尔 Remedia®技术的焚烧工程。

参考文献

1.Remedia catalogue. Gore, 2001.

2.Combined PCDD/F Destruction and Particulate Control in the Baghouse.Keith J.Fritsky, Gore.John H.Kumm, EA Engineering Science & Technology,

3.《城市垃圾处理工程》李国建等，科学出版社，2003

4.《生活垃圾焚烧技术》张益，赵由才主编，化学工业出版社，2000

5.《第二届城市固体废物管理与处理技术国际研讨会》论文集。2003。

机械炉排垃圾焚烧炉的稳定燃烧调整控制

柏杰
（张家港金州再生能源有限公司，江苏 215616）

摘要：垃圾焚烧锅炉以城市生活垃圾和无毒无害的工业垃圾为燃料，由于我国生活垃圾未经过分拣，从而造成垃圾的热值和干、湿度等变化较大，致使垃圾焚烧锅炉的稳定燃烧调整控制难度增大！本文就目前生活垃圾焚烧主流炉型——机械炉排焚烧炉的稳定燃烧调整控制作一下简述，以供运行人员参考。

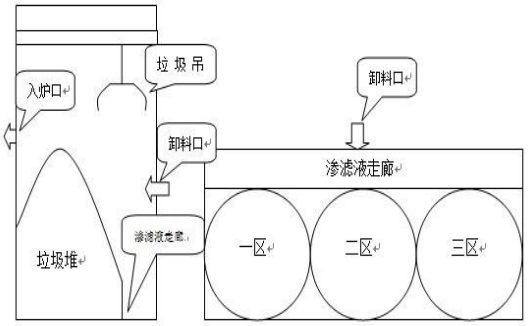
关键词：垃圾焚烧锅炉　机械炉排　垃圾　料层　燃烧调整

1 引言

要确保垃圾焚烧炉稳定燃烧，必须控制入炉垃圾的合理的堆料、合理的发酵时间、合理的拌料配料、合理的燃烧料层厚度、合理的燃烧配风、合理的燃烧火床长度、合理的炉温等要素。主要从以下几个方面入手：

2 入炉垃圾的管理

2.1、入炉垃圾品质对稳定燃烧起着至关重要的作用。所以要求垃圾存储库垃圾的合理堆放和管理。按经验，垃圾存储库一般分为：入库堆料区、发酵区、入炉投料区三个大区，简图[1]如下所示：



发酵区和投料区的卸料门下通道必须保证畅通，即发酵区和投料区的卸料门侧约一个抓斗宽的垃圾一定要及时抓干净到库底，一般在停止堆料 2 天后（时间过短抓取时附近的堆料会滑料）就可以抓取通道，从而确保垃圾池渗沥液隔栅前通畅，便于渗沥液的及时排出，这一项特别重要。

2.2、入炉垃圾必须经过充分的发酵（渗沥液析出、垃圾温度升高以及垃圾热值变高[2]）：一般在 4～7 天以上。即：炉排风室一次风压头在 400Pa 以上时：入炉垃圾发酵 3～4 天即可[3]；炉排风室一次风压头在 200Pa 以下时：入炉垃圾则需要发酵 6～7 天以上[4]，经过试验证明，并非发酵的时间越长越好。

2.3、入炉垃圾的正确选择：投料时投中、下部垃圾，这是因为顶部和底部的垃圾水分很大（垃圾因发酵而升温，中下部的垃圾水分蒸发出来后集结在顶部垃圾上，垃圾发酵为厌氧发酵，而且顶部垃圾直接和外界接触，发酵不佳），垃圾抓吊司机应把顶部（约 3～5m）的垃圾抓到发酵区去继续发酵，其下的垃圾才能作为入炉投料。

2.4、正确的拌料、配料：入炉垃圾需要经过松散拌料后方可入炉，拌料时应该控制合理的松散高度（约 5m），高度太低会导致料松散不开，太高又会因为重力的惯性冲击反而把料压实；由于底部垃圾较为潮湿，故底部垃圾和中上部垃圾应进行合理的掺烧（一般按 1:1 或者 1:2 掺混搭配）。

2.5、给锅炉料斗投料的时候也有讲究，应该投在料斗的中间位置。这样做不但可以防止料斗搭桥，而且还便于垃圾经过推料进入炉膛后，铺在焚烧炉排上时两边的料层相对中间的要薄，而从炉排下穿出来的风量也是两边的相对于中间的要小，这样对燃烧有利，而且料斗内尽量保持略低料位[5]（料太多就容易压的太实，到炉排上不利于风的穿透和松散；料太少又容易造成料斗串风）。

2.6、垃圾抓吊司机与锅炉司炉间应加强联系。当司炉发现入炉垃圾热值变化较大时，应及时通知垃圾吊司机，调整入炉垃圾热值配比。垃圾吊司机在换区、换料时应提前通知司炉做好调整。

3 焚烧料层厚度的控制

3.1、根据垃圾质量调整料层厚度：

垃圾重时：料层应控制为稍薄，主燃烧区料层推荐控制厚度 400～500㎜（炉排风室一次风压头在 400Pa 以上时），而炉排风室一次风压头在 200Pa 以下时控制料层厚度为 300㎜ 左右（垃圾重指：灰分较多的垃圾，压在中底部的垃圾，水份较多的垃圾）。

垃圾轻时：料层应控制为稍厚，主燃烧区料层推荐控制厚度 450～600㎜（炉排风室一次风压头在 400Pa 以上时），而炉排风室一次风压头在 200Pa 以下时控制料层厚度为 350～400㎜ 左右（垃圾轻指：灰分少，堆在中上部的垃圾）。

3.2、火床上的垃圾偏厚时的调整

一般将焚烧炉排分为：干燥预燃区、主燃烧区、燃尽区三个大区[6]。炉排风室一次风压头在 400Pa 以上时：一区料层厚度在 900 ㎜以上，二区 700㎜ 以上均为料层偏厚；炉排风室一次风压头在 200Pa 以下时：一区料层厚度在 700 ㎜以上，二区 500㎜ 以上均为料层偏厚）（料层厚、一次风无法穿透、火孔少、垃圾无法烧透、炉温下降：

调整方法：推料和焚烧炉排改为手动控制，停给料，曾大一次风量，只运行焚烧炉排，推荐采取如下方法：①就西格斯炉排炉类型而言：先想办法把二区的料层拉薄至正常燃烧料层（采取先运行主燃烧区后部（#4）焚烧炉排及其后的燃尽区（#5、#6）炉排，待#4 焚烧炉排和前部（#3）焚烧炉排间有明显的空隙的时候再一起运行二区（#3、#4）焚烧炉排，以此来保证#4 炉排上的料被推至#5 炉排上能松散开，#3 到#4 也是如此），根据火床长短，着火情况，确定运行、停止时间。同样一区（#1、#2 焚烧炉排）也采用此法控制，当第二区燃烧趋于正常燃烧，一区垃圾也开始着火后，给料器动作，行程适当缩短或者适当降低给料量，按正常燃烧控制。②就杭州新世纪炉排炉类型而言：先将顺推炉排料层拉薄，然后将逆推炉排反向交叉运行，将部分垃圾拉至顺推炉排上，以此来将厚料层拉薄。而且炉排的运行速度和频率也应该比正常燃烧时减慢，一但料层正常燃烧后应及时恢复炉排的正常运行，并及时补料，以及适当将炉排运行速度和频率加快，防止料层因长时间的烘干而大面积着火燃尽后造成脱火。

3.3、料层偏薄的调整

料层薄，垃圾主燃烧区在一区和二区前半区或者是只在一区，但火床短，炉温也不高）。

调整方法：适当加快给料频率或者加长工给料行程，幅度要小，逐步增加，到合适的厚度为止，特殊情况是可以手动给料一次（火床越来越短时）；适当降低风量以减缓焚烧速度，防止造成严重脱火；同时加快焚烧炉排的运行频率，尽快恢复正常的火床。

4 就地观察火床

目的是观察当前垃圾着火情况，为燃烧正确调整提供依据。

4.1、看料层厚度

①炉排风室一次风压头在 200Pa 以下时：第一区为干燥预燃区，控制料层厚度为 500～600㎜；第二区为主燃区，料层厚度为 300㎜ 左右；第三区为燃尽区，料层厚度控制在 300～400㎜。②炉排风室一次风压头在 400Pa 以上时：第一区为干燥预燃区，控制料层厚度为 600～800㎜； 第二区为主燃区，料层厚度为 500～600 ㎜ 左右[7]；第三区为燃尽区，料层厚度控制在 300～400㎜。

4.2、看火床：正常的火孔分布情况：

火孔前移，火床偏短；火孔后移，火床偏长，燃烬区剩余可燃物焚烧不彻底或者跑红渣。

4.3、看火渣情况

燃烧残渣控制 300～400㎜ 厚度，以落入落渣竖井的灰渣不跑生料和红渣为宜：灰渣太薄，容易串风，太厚影响前部料层运动或者造成炉排过负荷卡死。

5 炉排速度、给料行程、给料速度的调整和风门调整

5.1、给料行程，给料速度，给料频率，应与焚烧炉排运行速度、频率配合，以保证料层厚薄适当，火床到位燃烧正常。

①当给料行程、速度和频率一定时，焚烧炉排速度或者运行频率快越，料层就变得越来越薄，反之，焚烧炉排速度或者频率越慢，料层越厚。②当炉排速度一定时，给料行程长短，给料速度快慢影响料层厚薄。

含氧量低时，风门适当开大，增大送风量。反之适当减小送风量；料层厚时，适当增大送风量，料层薄时，适当减小送风量。配风应根据具体情况配风，正常运行时一区为干燥预燃区，二区为主燃烧区，三区为燃尽区，这三个区可以按 3:5:2 配比，也可按 3:6:1 配比。主要根据主燃烧区位置和火床长短来灵活调配的，带额定负荷（250～300 吨/日的机械炉排焚烧炉）时所需的送风量在 22000～25000Nm^3/h 左右。

6 炉排间隔停止时间的整定

6.1、干燥预燃区到主燃烧区焚烧炉排（即焚烧炉排#1～#4）间隔停止时间应该依次减小，而燃尽区焚烧炉排（即#5～#6）间隔停止时间依次增大。防止出现料层堆厚情况发生。

6.2、给料器给料频率由炉排上料层厚度来确定。可以给料器的停留时间或者给料器的速度来调整给料量。

6.3、焚烧炉排停止时间根据料层厚度、火床上垃圾燃烧情况、火床长短　　来确定。当火床过长时，应适当延长停留时间，但不能太长，因为停留时间过长，容易造成大面积着火烧烬，火床迅速缩短，新的垃圾进来后，干燥时间不够，着火慢，造成脱火。脱火对锅炉况影响很大，炉温急剧下降，其它参数相应变化。脱火的防止与处理方法：（一）轻微脱火：炉温下降在 50℃～100℃之间，当火床到位后，炉温又上去。原因：①、火床上垃圾着火情况很好，炉温也高，燃烧调整不及时，给料没跟上，造成火床偏短，新料进来后，着火慢，造成炉温下降。②、垃圾品质轻微变化。（二） 严重脱火：炉温下降＞100℃，二区只有零星火孔。原因：①、火床严重偏短，新料进来后，将一区火孔压灭。②、垃圾品质变化大，特别是最底部垃圾，水份高、品质重。

要防止脱火，保持稳定燃烧，首先火床一定要到位，即主燃区垃圾着火最旺，其次保持料层厚薄适当，垃圾品质变化时及时调整。

7 结束语

运行值班人员监盘时应密切关注火焰监视画面、氧量、炉排风室一次风压、炉排的运行状态、汽温、汽压、主蒸汽流量等重要参数的变化，燃烧工况发生变化时氧量变化最先体现。正常情况时尽量避免大幅度的调整操作，异常情况时视情况可做大幅度的调整。总之燃烧调整应做到超前调节，勤调整，方可确保稳定燃烧运行。

参考文献

1 沈锋.垃圾电厂不分拣垃圾收集池的运营管理[J] .华东电力,2009,37(3) ：0512-0513.
2 吴立,张洪波.城市生活垃圾堆酵实验研究[J] .铁道劳动安全卫生与环保,2002, (03)：30-32.
3 廖红星.垃圾焚烧炉稳定燃烧技术探讨[J] .江苏锅炉,2004,(01) ：22-24.
4 汪玉林.垃圾发电技术及工程实例[M] . 北京：化学工业出版社, 2003：44-47.
5 柏杰.垃圾焚烧锅炉的燃烧调整[J] .中国电力教育,2008,(s1)：277-278.
6 赵由才，张益.生活垃圾焚烧技术[M]. 北京：化学工业出版社, 2000：15-20. 71-76.
7 易碧丹.垃圾焚烧炉稳定燃烧的控制与调整[J] .中国环保产业,2006,(9) ：40-44.

垃圾处理与循环流化床垃圾焚烧炉

陈力　刘化才(济南锅炉集团有限公司，山东　济南　250023)

摘要：目前垃圾污染越来越严重，用循环流化床垃圾焚烧炉处理垃圾不失为绿色处理方式，既保护环境避免产生二恶英这样的剧毒气体，还能变废为宝。着重对循环流化床垃圾焚烧炉的可行性设计及应用的经济性进行系统的论证。

关键词：垃圾污染；焚烧处理；焚烧锅炉；洁净环境

1、前言

据新华社长沙 2000 年 12 月 24 日电文“经济的高速发展导致我国城市垃圾量迅猛上升，同时垃圾回收行业却在萎缩。我国的城市已陷入垃圾的包围之中，据统计，我国历年垃圾的堆存量达 60 多亿吨，占用的土地面积超过 5 亿平方米，近 200 座城市发展到无适合场所堆放垃圾，导致不少城区城乡结合带生态环境恶化。”

改革开放 20 年来，我国的国民经济有了长足进展，城市规模迅速扩张。工业化进程的不断推进创造了空前巨大的社会财富，但是同时也制造了越来越多的垃圾。1999 年全国城市生活垃圾产量已经超过 1 亿 t，预计 2000 年以后将达到 1.2 亿～1.4 亿 t。垃圾对城市的污染愈演愈烈，成为现代城市亟待解决的一项难题。城市处理垃圾的传统方式是填埋。在城市规模较小时，垃圾产量有限，填埋显然是最简便易行的处理方式，因而也是目前大多数城市处理垃圾的方式。但是这一方式现在日益面临着越来越大的困难。

(1)随着人口的增长、城市的扩张，土地的价格越来越昂贵，而垃圾填埋需要占用大量宝贵的土地资源；

(2)仅靠垃圾自己的腐化反应来使垃圾逐渐减少、消失，垃圾处理周期长；

(3)容易导致垃圾渗滤液和挥发气体污染地下水、空气，导致土壤沙化。

焚烧处理城市生活垃圾与填埋相比，其优势是非常明显的。

(1)占用土地有限；

(2)处理周期短；

(3)采用先进的燃烧方式和工艺设备，可以将环境污染物的排放控制在一定的水平内；

(4)将垃圾中的热能转化为生活和工业中能够利用的二次能源，节约了能源，为城市的可持续发展提供支持；

(5)垃圾焚烧后转化成灰渣，对于燃烧方式，比如循环流化床锅炉，燃烧生成的灰渣具有很好的活性，可以作制造建筑材料的原料，从而实现了物资的再生利用。

综上所述，如果能够使用合适的燃烧方式和工艺设备，将会变废为宝，实现绿色环境工程，使因垃圾产生的问题得到圆满解决。

2、城市生活垃圾的成分和热能

城市生活垃圾泛指一切生活废弃物，包括食品垃圾、废纸、废布、塑料、木头、金属、玻璃、陶瓷、灰渣 、废砖瓦、废器具、建筑废弃物，以及动植物残体、医院垃圾、地下水沟道污泥、公共交通带来的各种废弃物等，包罗万象，种类繁多，其构成主要受城市的规模、地理环境、燃料结构、居民生活水平和生活习惯、自然季节等的影响。

我国城市生活垃圾成分与全球平均值的对比情况列于表 1 中。城市生活垃圾的可燃成分是其中的有机物，各种有机垃圾的热值列于表 2 中。从表 2 可以看出，各种有机垃圾本身热值很高，有很大的能源利用价值。从表 1 可以看出，我国城市生活垃圾成分与全球平均值相比，炉渣等无机物成分比较高，因而发热值较低。但随着城市燃气普及率逐年上升，纸及塑料等高热值可燃物比例的增大，生活垃圾热值呈逐年递增的趋势。表 3 示出了广州市 1991～1996 年垃圾成分的变化情况，从中可以看出此趋势。

按我国城市居民 4 亿人计，平均每人每天产生 1kg 生活垃圾，平均每千克垃圾的热值为 4 000 kJ，则每年废弃在垃圾中的热能/kJ·a－1 为：即每年废弃在城市生活垃圾中的热能约折合标准煤 20Mt

3、城市生活垃圾焚烧的条件

城市生活垃圾不仅发热值低，无机物及水分含量比较高，而且具有非均匀性，其组成会随着季节的变化和收集地点的不同而有很大差异，且含有金属、砖瓦等不可燃物，因此，要想保持焚烧过程能够稳定而彻底的进行，具有一定的难度。虽然从环境保护和能源节约的角度来讲，用焚烧来处理城市生活垃圾有着巨大的优越性，但是这种方式能否大规模应用，仍然取决于其在既定社会条件下的经济成本。

联合国环境组织(UNEP)综合考察了世界经济的发展情况，提出了焚烧城市生活垃圾来发电的标准，认为符合以下条件的城市应大规模采用垃圾发电。

(1)平均每人每天产生垃圾 0.5～1.0kg 以上；

(2)垃圾中有机质份额大于 40%；

(3)垃圾含水量份额小于 50%；

(4)垃圾平均高位发热量在 3 349.44～7 117.5kJ/kg 以上；

(5)考虑实施减量，重复使用，回收再利用措施的成本和可行性之后，仍然不能将垃圾的产量削减 35%。垃圾处理与循环流化床垃圾焚烧炉 来自: 第一范文网

可见，要采用焚烧城市生活垃圾来发电，其垃圾中必须含有一定的热值。参照此标准，我国的一些大城市，如上海、北京、天津、重庆、珠海、深圳等，已经具备大规模焚烧生活垃圾发电的条件。在国务院发布的《中国二十一世纪议程——中国 21 世纪人口、环境与发展白皮书》中，明确表示要建设有害废物焚烧示范厂作为有害废物管理和处理、处置的样板，并要建设一批垃圾示范工程，还指出有条件的地方要发展焚烧处理技术。发展城市生活垃圾焚烧发电是一项涉及能源、环保、环卫、城建等等诸多部门的市政系统工程，应该综合考虑。从经济上说，城市生活垃圾焚烧发电能否得到发展，取决于其产生的利润(处理垃圾、供热、售电获得收益)能否在可接受的年限内弥补其投入的成本。在既定的社会经济条件下，其成功与否，取决于具体的操作者和具体的操作过程。

4、垃圾处理的各种方法

垃圾处理问题是随着城市的出现而产生的，并随着城市的扩大而日益成为一个严重的问题。由于人口的急剧增长，城市规模的迅速膨胀，在我国的东南沿海经济发达地区和内地的大中城市，人们的生产生活空间变得日益狭窄，垃圾能否得到有效而彻底的处理，已经是一个直接影响人们生产生活的急迫问题，是一个影响城市可持续发展的重要因素。目前，人们处理垃圾的方式有以下几种。

4.1 简单填埋

很明显，这种方法适用于我国人口密度相对较稀少的中西部的小城镇、小城市。

4.2 堆肥

垃圾堆肥会造成二次污染，并且肥料品位低，内含玻璃渣多。这一方法可以用于处理某些行业或生产过程中产生的高水分、富含有机物的垃圾，不适用于城市生活垃圾的处理。

4.3 炉排炉焚烧

多年以来，人们已经使用炉排炉来焚烧垃圾，目前使用的垃圾焚烧设备基本上是各种炉排炉。但是炉排炉垃圾焚烧设备有很大的缺点，难以胜任目前大中城市迅速增多的大规模垃圾处理工作。主要问题如下：

(1)我国的城市垃圾不可燃物质含量大，发热值低，平均不超过 4 186.8kJ/kg，纯粹的垃圾无法在炉排炉中进行燃烧，必须喷油助燃，在原油价格涨升后，运行费用高的惊人。如深圳两台炉排垃圾焚烧炉，日处理垃圾共 300t，一年需要烧掉 4 700 万元的燃油。

(2)炉排炉的燃烧方式，决定了垃圾与助燃空气的混合作用很弱，远达不到将垃圾进行彻底燃烧的要求。

(3)炉排炉垃圾焚烧容易导致二次剧毒污染物二恶英的产生。二恶英，即四氯二苯，是日前所知的最毒的物质之一。垃圾中含有苯环的有机物与含氯物质在高温下可以生成二恶英。研究表明，在 400～600℃的温度区间内，在氧气供应不充分的情况下，含有苯环的有机物与含氯物质(如塑料)燃烧不完全，其中的挥发性物质在烟气中易于发生二恶英的合成反应。当烟气温度超过 1 000℃时不产生二恶英；当烟气温度超过 780℃，并且在炉内停留时间超过 2s 时，不易产生二恶英。炉排炉炉膛中的烟气温度和烟气成分很不均匀，和投入助燃油的多少密切相关，有些炉排炉炉膛的出口烟气温度仅在 400℃左右，因此，在炉排炉的炉膛中极易生成二恶英。

(4)炉排炉燃烧产生的炉渣活性差，难以综合利用。

4.4 循环流化床垃圾焚烧锅炉燃烧

这正是要着重讨论的问题。根据这几年的工作经历，认为从技术经济上看，循环流化床垃圾焚烧锅炉是我国目前和以后大中城市进行垃圾处理的性能最优秀的设备与技术。

5、循环流化床垃圾焚烧锅炉

自 1989 年第一台循环流化床锅炉在山东明水热电厂通过国家鉴定以来，济南锅炉厂一直致力于循环流化床锅炉技术的进步和发展，并且取得了长足的进步。目前，其生产的 35t/h、75t/h 循环流化床炉在国内居于主导地位，市场占有率超过 50%，到目前累计销售了 400 余台。根据有关用户的实践经验，其 75t/h 循环流化床锅炉能够很好的燃用热值为 7 326.9kJ/kg 的煤矸石并持续稳定运行。考虑到各方面的实际情况，按如下条件来发展循环流化床垃圾焚烧锅炉。

我国大中城市目前产生的垃圾的平均热值不超过 4 186.8kJ/kg，通常在 3 768.12～4 186.8 kJ/kg 之间，在设计中取其热值等于 3 977.46kJ/kg。

用煤做助燃燃料，其价格远远低于石油，仅为石油的 1/10。考虑到通常不会把低热值的煤矸石和劣质煤运往大中城市使用，在垃圾焚烧厂中，应当使用高热值的优质煤。在工程设计中，取煤的热值等于 25 120.8kJ/kg，这是符合经济社会的运行规律的。

垃圾处理与循环流化床垃圾焚烧炉 来自: 第一范文网

从以下 3 个方面来考虑能够在循环流化床锅炉中进行稳定燃烧的垃圾－煤混合物的最低热值。

(1)根据济南锅炉厂在设计制造循环流化床锅炉方面的经验和有关电厂在使用循环流化床锅炉燃烧劣质煤的实践，在炉膛绝大部分水冷壁曝光的情况下，燃料最低热值为 7 326.9kJ/kg。

(2)清华大学在垃圾焚烧方面所作的研究认为：在炉膛全部覆盖耐火混凝土的情况下，要保证燃烧稳定，垃圾－煤混合物的最低热值应不小于 5 024.16kJ/kg。

(3)垃圾中比热容最大的物质是 H2O,H2O 从 0℃升温到 900℃，需要吸收的热能为 4 396.14kJ/kg。由此，在设计中取垃圾－煤混合物的热值为 5 442.84kJ/kg，设每燃烧 1kg 垃圾需要加入 xkg 煤可以得出，x=0.074 468。

下面来设计一座日处理垃圾 1 000t 的垃圾焚烧设备（目前国内已有花费巨资兴建的大型垃圾焚烧场其日处理垃圾一般不超过 1 000t/d)。

燃烧 1 000t 垃圾需要加入 74.468t 煤，垃圾与煤含有的总热量/kJ·kg－1 为：(1 000＋74.468)×1 000×1 300×4.186 8=5 848 157 409.12 将这个热量作为所研究热力系统的输入热量，折合功率为 67.687MW，估计循环流化床垃圾焚烧炉的总热效率 η 在 80%～90%之间，设计中取 η=85%，则热力系统的输出功率为 57.544MW，与一台 75t/h 中温中压锅炉的热功率相当。

关于工质(H2O)的参数，可以从以下 3 方面考虑：

(1)低参数的蒸汽可以用于工业生产和供暖。很显然，垃圾焚烧场生产的蒸汽不可能用于工业生产；垃圾焚烧场是全年进行工作的，其生产的蒸汽作为供暖的热源也是不合适的。

(2)用于发电。高参数的蒸汽，其热－电转换效率高，但是，高温高压的蒸汽，其水蒸气过热阶段需要吸收大量的热量，需要布置复杂的过热器系统和减温系统。垃圾焚烧产生的烟气复杂多变，其中 H2O 含量最高可达 50%，烟气具有很强的腐蚀性，高温高压锅炉的过热器工作在非常恶劣的工况下，发生故障的概率很大。

(3)中参数的蒸汽用于发电。热力循环仍然具有较高的循环效益——实际上，在我国日前广为存在的大量中小厂，使用的绝大部分为中参数锅炉。中温中压蒸汽锅炉(温度 t=450℃，压力 P=3.82MPa)或者次高温次高压蒸汽锅炉(温度 t=485℃，压力 P=5.29MPa)，其过热器系统仅布置两级受热面和一级减温水即可。其发生故障的概率远低于高温高压锅炉的过热器系统。因此，将垃圾焚烧炉设计成中参数蒸汽锅炉，并且用于发电是最好的选择。

根据以上思路绘制了日焚烧垃圾 1 000t 的循环流化床垃圾焚烧锅炉的方案图，该方案是在总结燃煤循环流化床锅炉的基础上提出的，对锅炉的主要结构尺寸提出了详细的数据，因而已经离工业化产品非常接近了。下面对其主要的特点加以说明。

(1)此锅炉的炉膛特别高，通常情况下，75t/h 中温中压煤粉炉的炉膛高度在 15～16m，220t/h(或 230t/h)高温高压煤粉炉的高度在 23～24m，燃煤循环流化床锅炉的炉膛高度在 22m 左右，而本设计方案取定的炉膛高度为 25～28m。之所以把炉膛设计这样高，主要是基于以下 2 个方面的考虑：1 垃圾－煤混合物中不可燃成分含量很大，在流化床燃烧的过程中，自燃烧室(密相区)披上升的烟气携带的固体颗粒比燃煤循环流化床锅炉成倍增加，加高的炉膛将使炉膛的内分离作用显著增强，从而

使炉膛山口的烟气固体携带率大大降低，避免旋风分离器的剧烈磨损。实践经验表明，炉膛的内分离作用主要是依靠固体颗粒的自身重量来实现的，分离出来的固体颗粒沿膜式壁内表面滑落返回流化床内，不存在对水冷壁的正向冲击力，这样就在降低了旋风分离器磨损的同时，并不增加对水冷壁的磨损。2 高达 25～28m 的炉膛使烟气在炉膛内停留时间达到 4s 以上，从而使烟气中的可燃气体得到充分燃烧，杜绝二恶英的产生。

(2)炉膛的内表面全部焊上销钉，覆盖上耐火混凝土，防止水冷壁吸收太多热量，保证燃烧的稳定性。

(3)配风。一次风与二次风分立布置，各占总风量的 50％，这样可使运行中配风很方便，并考虑将二次风的一部分(20％左右)作为三次风在炉膛中部引入。

(4)给料。垃圾和煤可以分别送入炉膛，也可以混合后一起送入炉膛，对给料装置的基本要求是能够连续均匀稳定的将物料送入炉膛。垃圾具有恶臭，整个垃圾输送系统必须是全封闭的。

(5)受热面的配置。方案图中，受热面的配置类似于中温中压燃煤锅炉，垃圾燃烧产生的烟气成分与煤燃烧产生的烟气有很大不同，传热特性变化很大，在具体的项目设计中，应通过实验取得烟气成分的可靠数据，然后进行传热计算，对各受热面的面积进行相应增减。

垃圾处理与循环流化床垃圾焚烧炉 来自：第一范文网

6、经济效益与市场前景预测

在上面设计的日处理 1 000t 生活垃圾，热功率与 75t/h 中温中压锅炉相当的循环流化床垃圾焚烧炉系统中，主要的收益来自垃圾处理费和供电。

(1)供电收益。此系统可配 15MW 的汽轮发电机，实际对外供电功率不会低于 12MW（1.2 万 kW），每度电按 0.7 元计算，设备每年运行 8 000h，则售电收益 6 720 万元。

(2)垃圾处理费。按处理垃圾 500 元/t·h 收费，系统每年运行 330d，则收入 16 500 元。

日常运营成本主要为燃煤采购费、垃圾收集运输费、系统维护和辅助材料费。

(1)按每吨煤送至焚烧炉炉前的完全成本为 300 元/t，则每年的燃煤费用约为 737 万元。

(2)现在的大中城市都存在着原有的垃圾收集、输送组织，其主要成本为环卫人员的工资，短途运输费，做最大的估计，也不会超过上面的燃煤成本，按每年 700 万元计算。

(3)由于垃圾焚烧系统是全自动的，需要人员有限，系统的维护费用、辅助材料费、人员工资可参考现存的火电厂，最大的情况下不会超过燃煤成本，按每年 700 万元。则一年的运行成本为 2 137 万元。则整个垃圾焚烧厂的全年利润大致为 21 083 万元。

投资。根据有关方面的估计，并参考当前新建火电厂的投资，建一座包括 3 套循环流化床垃圾焚烧炉发电装置的垃圾处理厂一三炉两运，1 台备用，以保证系统运行的可靠性、稳定性，其总投资不会超过 10 亿元；建成后，每年的利润为 4 亿元，2 年半则可收回投资。

7、结束语

随着社会的进步，生产工具的改进，人们生活水平的提高，各种物质财富和商品不断丰富；但是各种对环境的污染和垃圾的迅速增多成了困扰人们的当务之急。人们日常可感受到的，如汽车尾气，噪声，冒黑烟的烟囱，混浊的空气，污秽的河流；最多的，亦是最令人厌恶的，是城市里的垃圾。许多城市正日益沦陷在垃圾的包围之中。人们渴望在物质不断丰富的同时，更想拥有碧水蓝天、清新的空气、洁净的环境。这里所讨论的循环流化床垃圾焚烧炉系统，其社会与经济的价值都是很高的，把近 1 年多来思考的东西写出来，不讳其浅陋，仅供对城市环保和相关问题感兴趣的同仁参考，以抛砖引玉。

垃圾焚烧发电 BOT 项目的关键风险

大连理工大学工商管理学院　　大连理工大学公共管理与法学学院
宋金波　宋丹荣　孙岩

摘要：随着 BOT 模式在各地垃圾焚烧发电项目中的广泛应用，此类项目建设和运营中存在的许多风险逐渐凸显，并迅速成为社会公众关注的热点。本文选取了我国东、中、西部 15 座城市具有代表性的垃圾焚烧发电 BOT 项目展开研究，采用多案例研究的方法识别、归纳出我国垃圾焚烧发电 BOT 项目的 8 项关键风险，进一步从关键风险的关联性、我国生活垃圾的复杂特性、专业技术与管理人才匮乏三个方面分析了关键风险的内在规律和产生原因，并提出风险应对策略。

关键词：BOT；垃圾焚烧发电；关键风险；风险应对策略

问题提出与文献综述

20 世纪 80 年代以来，随着全球经济的发展和生活垃圾数量的不断增加，能源与土地资源日趋紧张。采用填埋和堆肥的方式处理垃圾，不仅占用了有限的土地资源，而且使环境遭受了严重的二次污染。相比之下，焚烧处理可使垃圾重量减轻 80％、体积减少 90％以上[1]，还可以用于发电和供暖。在此背景下，日、美、德、比利时等发达国家的垃圾焚烧技术发展迅速，垃圾焚烧处理量也达到了垃圾总量的 30%-75%，而我国仅为 15%左右[2]。自 2006 年《中华人民共和国可再生能源法》实施以来，我国在《节能减排综合性工作方案的通知》、《中国应对气候变化国家方案》、《关于加强生活垃圾处理和污染综合治理工作的意见》等条文中明确提出“鼓励垃圾焚烧发电和供热”、“大力研究开发和推广利用先进的垃圾焚烧技术”、“鼓励在经济发达与土地资源稀缺地区建设垃圾焚烧发电厂”等相关的条款[3]。在可再生能源政策的激励下，北京、上海、深圳、广州和大连等许多地区都在筹建和运作垃圾焚烧发电厂。

由于我国垃圾处理行业起步较晚、垃圾焚烧处理技术基础薄弱，加之各级政府财力有限，因而采用 BOT（Build-Operate-Transfer）模式吸收社会资本建设和运营垃圾焚烧发电厂就成为了发展趋势。据“十五”期末统计，在全国 56 个已建及在建的垃圾焚烧发电厂中，41 个采用 BOT 模式运作，所占比例达到 73%[4]。然而，由于决策失误、技术不成熟、缺乏操作经验等原因，导致出现了北京六里屯、广州番禺和江苏吴江等不少失败的项目。识别和认清影响垃圾焚烧发电 BOT 项目的关键风险是目前亟待解决的问题。

Darrin 等[5]将 BOT 项目的风险划分为全过程风险和局部风险，其中，全过程风险包括政治风险、法律风险、商业风险、环境风险和不可抗力风险；局部风险包括技术风险、建造风险、运营风险、金融风险和收入风险。亓霞等[6]通过对我国 PPP 项目案例的汇总分析，认为造成 PPP 项目失败的风险主要有法律变更风险、申请延误风险、政治决策失误/冗长风险、政治反对风险、政府信用风险、不可抗力风险、融资风险、市场收益不足风险、项目唯一性风险、配套设备服务提供风险、市场需求变化风险、收费变更风险和腐败风险。Wang 等[7]通过对深圳沙角 B 电厂和广西来宾 B 电厂等案例的研究，将 BOT 项目的风险分为政治风险、施工风险、运营风险、市场与收益风险、金融风险和法律风险。陈海滨等[8]将垃圾处理项目的风险划分为技术风险、工程风险、经济风险、信誉风险、配套风险和外部环境风险 6 类。徐晓霞等[9]通过对大连市垃圾焚烧发电 BOT 项目案例的分析，提出政府方应承担招标风险、固定资产投资总额真实性风险、技术风险、行政审批风险、生活垃圾供应风险和法律变更风险，投资方应承担技术风险、建设期延误风险、运营及维护风险和支付不及时风险。

在垃圾焚烧发电 BOT 项目的诸多风险中，项目运营阶段对周边环境与居民生活安全的影响引起了学者们的重点关注。Denison 等[10]通过对垃圾焚烧的污染物、直接吸入路径、对健康的影响等方面的研究，讨论了开展垃圾焚烧项目风险评估工作的重要性。Ostry 等[11]提出了风险认知的社区模式，采用实证研究方法探讨了公众对城市生活垃圾焚烧风险认知的差异，得出“将焚烧技术向社区公众公开有助于增加项目可接受性”的结论。Petts[12]研究了英国公众对垃圾焚烧担忧的来源和影响，对项目选址决策的重要性、风险的可接受性等方面

加以了分析，并提出应加强风险沟通与教育的建议。Schuhmacher 等[13]运用蒙特卡洛模拟方法，比较了食物摄取和接触垃圾焚烧排放物两种途径对周边居民寿命产生影响的风险程度，并对垃圾焚烧给周边居民带来的非致癌风险和致癌风险等不确定因素进行了量化分析。

从已有文献的研究可以看出，垃圾焚烧发电 BOT 项目的风险作为政府与项目公司关注的重要内容，对项目运作的成败有着重要影响。然而，在我国实际运作的垃圾焚烧发电 BOT 项目中究竟存在哪些关键风险、分别如何加以应对，目前仍缺乏深入的研究。为此，本文对我国垃圾焚烧发电 BOT 项目的典型案例进行了系统的调研与总结，运用多案例研究方法分析归纳出项目的关键风险，并提出相应的风险应对策略，以期为政府部门和项目公司运作此类项目提供决策参考。

研究方法

本研究可以用“圾焚烧发电 BOT 项目的风险是怎样的”这样一个研究问题来表示，而案例研究最适合“怎么样”和“为什么”两类研究问题[14，15]。与其它研究方法相比，案例研究能够对案例中凸显的风险进行详尽的描述和系统的解释[16，17]，多案例研究则能够进一步深层次的描述在诸多情境下潜在风险的影响程度和影响结果[18，19]。但 Eisenhardt[20]也指出，采用案例研究的方法构建结论至少需要选取 4 个以上的案例，否则结论不能使人信服。因此，本研究拟采用多案例研究方法分析已有的实践结果，探讨我国垃圾焚烧发电 BOT 项目的关键风险。

1、案例选择

本研究的目的是探讨我国垃圾焚烧发电 BOT 项目的关键风险，因此选择的案例必须符合如下标准：（1）属于垃圾焚烧发电领域，采用 BOT、BOO、TOT 等模式运作，涉及到政府部门和项目公司两类利益主体，具有一定的代表性和可借鉴性；（2）项目案例取自于我国多个省市或地区；（3）项目案例所呈现的风险因素复杂且对项目的运作具有重要影响，并且应该满足如下条件：部分案例具备相似的背景因素使得项目发生相同的风险；部分案例背景因素完全不同使得项目发生不同的风险；部分案例介于二者之间。

为了保证推导得出的结论具有说服力和全面性，本研究对满足上述标准的案例进行了归纳与整理，最终选取了北京六里屯、天津双港、山东菏泽、山东枣庄、江苏吴江、宁波枫林、深圳平湖、深圳南山、深圳盐田、广州番禺、广州李坑、中山中心组团、郑州荥锦、许昌天健、武汉汉口北、安徽芜湖、重庆同兴以及昆明五华共 18 个垃圾焚烧发电 BOT 项目进行案例研究[21-28]。

2、数据收集

为了保证案例资料的可靠性，本研究采用了一手资料采集和二手资料收集两种方法[29]。经济与金融一手资料的采集方法包括：（1）本研究团队成员到样本垃圾焚烧发电厂进行实地考察与调研，获得特许经营协议、相关文件与草案等；（2）与垃圾焚烧发电厂的领导层和项目所在地的政府部门（投资主管部门、建设主管部门和财政主管部门）负责人进行访谈。

二手资料的收集方法包括：（1）直接从垃圾焚烧发电厂获得的材料，特别是撰写的内部文章或书籍，以及发表过的相关演说和内部刊物等；（2）在运作垃圾焚烧发电 BOT 项目的整个过程中，公开的有关垃圾焚烧发电项目的文章、新闻报道和多媒体资料等；（3）正式出版的有关该行业、该项目的论文或书籍；（4）行业参考资料，如年度报告、行业分析报告等。关键风险识别与定义

首先，对上述 18 个案例资料进行整理分析，列出每一个案例中出现的问题、描述对应的风险事件并进行风险归类，关键风险的提取过程如表 1 所示。

注：北京六里屯垃圾焚烧发电项目在决策阶段终止，尚未确定具体运营模式，不影响对案例风险事件的分析；广州李坑垃圾焚烧发电项目二期采用 BOT 模式。

在此基础上，汇总出 18 个案例中出现的风险并加以聚类，归纳出政府决策风险、技术风险、运营风险、垃圾供应风险、费用支付风险、收益与成本变化风险、变更风险和政策法规风险共 8 个我国垃圾焚烧发电 BOT 项目的关键风险，对得出的关键风险进行逐项定义，并对各个风险出现的频次加以统计，结果如表 2 所示。

3、政府决策风险

政府决策风险是指由于政府缺乏 BOT 项目运作经验、产生官僚作风或腐败行为等原因而造成的项目决策失误。本研究在整理案例的过程中发现，由于政府缺乏科学的统筹规划和运作经验，很多垃圾焚烧发电 BOT 项目都出现了前期规划不合理、选址不当、技术论证不到位和投资回报不合理等

决策问题，直接导致项目运营受阻、特许经营协议被迫变更等情况的发生。例如武汉汉口北垃圾焚烧发电厂的选址问题：武汉市城市规划管理局明确要求该厂应建在主城区外围即三环线以外，以避免对人口密集地区的环境以及经济发展产生不利影响；在此要求下，2005 年 7 月武汉市发改委批准该项目选址在比较偏僻的盘龙城刘店村，周边均为工业用地、距离居民区较远；然而，项目经过两年时间才相继通过规划、环保、水利等部门审批，最后在 2008 年底才正式动工，在此期间盘龙城城市化进程发展迅速，在项目选址周边已经建成了部分居民区，由此导致该项目在开工建设时，遭到了周边居民的强烈反对。北京六里屯垃圾焚烧发电厂的建设也存在这一问题，

1994 年海淀区政府向北京市政府上报“关于将六里屯砖瓦厂取土坑开辟为垃圾消纳场的紧急请示”，文件叙述该区域两公里范围内无村庄，是较为理想的垃圾销纳场，但 1995 年北京市环保局批复的环境影响评价报告书阐述该坑周围存在较多敏感点、两公里范围内约有居民 1 万多人，尽管在项目选址问题上存在异议，但北京市环保局还是批准了海淀区政府的请示，结果导致发生群体性事件，2007 年国家环保总局下令予以缓建，项目处于停滞状态。广州番禺和江苏吴江等垃圾焚烧发电 BOT 项目也都因政府规划失误，使得项目遭到周边居民的强烈反对，影响到项目的建设与运营。

4、技术风险

技术风险是指由于项目技术方案不成熟、垃圾焚烧设备无法满足预期的要求或者与生活垃圾特性不相符而导致项目运营困难甚至失败的风险。例如在昆明五华垃圾焚烧发电 BOT 项目中，美国再生资源公司（投资方）的技术设备只能处理经分类收集后的垃圾，而当地居民根本无法做到对生活垃圾的分类投放，因此项目设备面临“水土不服”的问题，导致项目在 2005 年奠基后迟迟没有开工，2006 年美方不得已撤资。山东菏泽垃圾焚烧发电 BOT 项目采用国产技术和设备投资建设，但由于国产锅炉技术不成熟、无法消化当地成分混乱的生活垃圾，导致项目投产运营后一直处于干干停停、修修补补的状态，运营的 4 年内累计亏损达 1500 多万元，作为项目主要投资方的杭州锦江集团无奈退出该项目。在许昌天健、山东枣庄等垃圾焚烧发电 BOT 项目中也存在垃圾焚烧技术与垃圾特性不相符等类似的情况，导致高额投资的项目陷入困境。

5、运营风险

运营风险是指项目在运营过程中发生设备故障、安全生产事故、污染物排放超标或重大环境污染事故等情况，给项目或社会环境带来危害的风险。例如在广州李坑垃圾焚烧发电厂，由于塑料袋等垃圾燃烧后产生的酸性物质腐蚀垃圾焚烧设备，导致多次发生焚烧炉水冷壁管道破裂现象，从炉渣通道喷出的水蒸气和锅炉水造成工人受伤。深圳南山垃圾焚烧发电厂因南山电网电压不稳定，使得进口的烟气处理系统无法正常运转，如果强行运行该系统可能会烧坏设备内价值数百万元的进口配件，不得已将垃圾焚烧产生的有毒废气未经处理直接排放到空气中。宁波枫林垃圾焚烧发电厂因排污管道管径较小，不能及时将废水输送至污水处理厂，导致臭气严重影响周围环境，而且垃圾运输车在运输过程中存在滴、漏现象，致使路面受到污染，沿路臭气严重。

与其他行业的 BOT 项目显著不同，垃圾焚烧发电 BOT 项目在运营过程中必须严格控制臭气和二恶英等有毒有害物质的排放，如何使其达到环保要求、不影响周边居民的正常生活、不受周边居民反对，这是此类项目在运营中应重点关注的问题。北京六里屯、广州番禺、江苏吴江和深圳平湖等垃圾焚烧发电厂都因周边居民对项目的环境影响产生强烈质疑和抗议，而不得不缓建或终止项目。

6、垃圾供应风险

垃圾供应风险是指政府供应的生活垃圾未能达到规定数量、质量或所供应生活垃圾的年度总热值未达到基准值，造成发电量下降或运营成本增加等情况的风险。例如中山市中心组团垃圾焚烧发电厂经常发生建筑废弃物、铁片等非生活垃圾卡住焚烧炉的状况，必须要由工人钻进焚烧炉中清理卡在焚烧炉内的杂物，这一过程通常要消耗半天甚至两三天时间，在投产运营的 4 个月时间里，电厂非技术性停机达 10 余次，严重影响到项目的正常运营；此外，垃圾中含有灰土、建筑垃圾等无机物杂质，导致项目焚烧时产生的热值只有设计标准的五分之四左右，焚烧垃圾产生的渣土也超出了设计标准。重庆同兴垃圾焚烧发电厂采用了德国马丁公司的逆推式炉排焚烧技术，日处理垃圾量 1200 吨，需要具备垃圾中转站、大型密闭运输车等配套设施与设备，但在项目的实际运营过程中，由装载能力只有 5 吨左右的普通卡车、甚至是拖拉机运送垃圾；因运费、油费、过路费较高的原因，市政管理委员会、市环境卫生局所供应的垃圾量明显不足，高额投资引进的两台焚烧炉只能运行一台，

产生的电量连厂内自用都不足。在郑州荥锦、宁波枫林等垃圾焚烧发电 BOT 项目中，也出现了垃圾供应的数量或质量未达到预定标准导致项目运营出现困难的情况。

7、费用支付风险

费用支付风险是指政府有关部门未按时、足额向项目公司支付垃圾处理补贴费或上网电费，从而给项目运营带来的风险。垃圾焚烧发电 BOT 项目的收益主要来源于垃圾处理补贴费和上网电费两部分，如果不能落实政府补贴和其他优惠政策，项目将面临较大的资金缺口，甚至导致项目的中止或失败。例如昆明五华垃圾焚烧发电 BOT 项目出现的费用支付问题，按照规划，该项目建成后主要处理昆明市五华区和建成区居民产生的生活垃圾，但是五华区垃圾处理费的收缴率不足五成，而且政府和项目公司之间一直未就垃圾处理费调整、收缴以及电力上网等事宜达成一致。在深圳南山、深圳盐田等垃圾焚烧发电 BOT 项目中也遇到了政府有关部门的补贴未能落实而使得项目公司面临费用支付风险的问题。

8、收益与成本变化风险

收益与成本变化风险是指由于 CPI、垃圾处理补贴费、运输费、上网电价及电量、煤炭价格和项目运营标准等因素的变化导致项目收益或成本发生变化的风险，使政府和社会公众的利益受损或者使项目公司的利益受损。例如建在荥阳市的荥锦垃圾焚烧发电厂距离郑州市中心仅有 20 多公里，建设该项目的主要目的就是为了处理郑州市产生的大量生活垃圾，然而项目投入运营后，郑州市与荥阳市之间增设了一个收费站，运输垃圾的车辆过往收费口需缴纳 70 到 80 元的费用，荥锦垃圾焚烧发电厂和有关部门进行多次协调仍未能解决该问题，荥阳市政府为此出资 700 多万元修建了一条垃圾绿色通道，但由于绕行增加了运输费用。许昌天健垃圾焚烧发电 BOT 项目在建设过程中，煤价在一年内由 180 元/吨上涨到 350 元/吨，而电价却未做出任何相应的调整；在实际运营过程中，垃圾成分不稳定和易腐蚀性导致设备寿命缩短、运营费用增加，由于项目公司经营困难以及银行控制贷款等因素的影响，项目出现了资金困境。山东枣庄等项目直接将煤焚炉改造为垃圾焚烧炉，由于垃圾热值低、掺烧煤的成本过高，导致项目运营艰难。

9、变更风险

变更风险是指由于前期设计不到位、标准规范变化、合同变化、政府或项目公司的需求变化等原因引发的变更，导致实际项目总投资、项目范围与质量等发生变化的风险。例如在深圳平湖垃圾焚烧发电 BOT 项目中，设计烟囱高度要达到 120 米，实际建成高度仅为 80 米，该厂建设时承诺技术标准与澳门垃圾焚烧处理厂一致，但实际投资并未达到预期标准，造成刺鼻的臭气在社区上空弥漫、噪音影响周边居民睡眠、排出的废水及粉尘等有害物质污染附近水库的情况。此外，山东枣庄、菏泽等垃圾焚烧发电 BOT 项目以煤充当垃圾，将垃圾焚烧发电厂违规变成国家明令禁止的小火电厂，既获得了垃圾处理补贴费，又同时享受上网电价优惠的政策。

10、政策法规风险

政策法规风险是指现有垃圾焚烧发电 BOT 项目的相关政策及法律法规不完善、可操作性不强，或者原先承诺的政策和法律法规在项目运营期间发生变化而带来的风险。例如在安徽芜湖垃圾焚烧发电 BOT 项目中，上网电价为每千瓦时 0.393 元，远低于周边省份的上网电价，比同城的常规发电企业的上网电价还要低，而在进行设备启动、检修和维护时从电网消耗电量却需要按照工业用电价格支付电费，不能利用自身的并网发电量来抵扣；此外，项目用煤无法享受常规大发电企业的重点合同优惠，掺烧的煤每吨要多支出 150 元左右，虽然政府将垃圾处理补偿标准由 8 元/吨提高到 16 元/吨，但依然无法弥补项目公司的运营亏损。在天津双港、山东菏泽、深圳南山、深圳盐田和昆明五华等项目中，也存在政府政策法规不完善、政府承诺发生变化等状况。

关键风险分析

通过对上述案例的综合分析，总结出我国垃圾焚烧发电 BOT 项目关键风险发生的内在规律和产生原因如下：

（1）垃圾焚烧发电 BOT 项目的风险因素虽然复杂多样，但是却相对集中的凸显出政府决策风险等 8 个关键风险，并且关键风险之间具有一定的关联性。例如政府决策失误可能会导致项目选址不

当，从而引发周边居民反对、环境污染等问题，使项目公司面临着运营风险；当发生垃圾供应风险、费用支付风险和技术风险时，由于政策法规不完善导致项目发生收益与成本变化风险，项目公司出现亏损却无从追责，致使部分垃圾焚烧发电 BOT 项目变更原有的技术方案，产生变更风险。

此外，根据表 2 的统计结果可以看出，运营风险出现的频次最高。在调研与访谈的过程中发现，其原因包括主观和客观两方面。主观原因是，政府本应负有垃圾焚烧发电 BOT 项目投资、建设、运营、服务等全过程的监管责任，然而在实践操作中，政府过多地关注项目的投资和建设这两个环节，往往忽视了对项目运营过程、服务质量和绩效的监管，社会公众也缺乏对项目实际运营情况进行监督的有效手段，在项目运营过程中存在监管主体缺位、监管失效的潜在漏洞。客观原因是，在垃圾焚烧处理过程中会产生 SO2、NO、H2S、HCL、重金属、飞灰及有机氯（如氯化二苯并二恶英、氯化二苯并呋喃等）等污染物[30]，其中的铅、汞、镉等重金属以及二恶英、呋喃等均为剧毒化合物，对净化系统的技术水平、效率和运行管理的要求很高，处理成本也相对较高，因此，这是垃圾焚烧发电 BOT 项目运营中的一项关键技术问题。受上述两方面原因的影响，导致运营风险发生的频次最高。

（2）在 8 个关键风险中，技术风险、运营风险、垃圾供应风险、收益与成本变化风险、变更风险均与我国生活垃圾构成复杂、水分高、热值低这一客观条件有关。我国在垃圾焚烧发电技术的研发和应用方面起步较晚，对生活垃圾的特性与规律缺乏长期跟踪研究，目前主要引进国外的焚烧技术与设备。为了保证垃圾焚烧余热具有良好的发电效益，大多数国外设备都要求垃圾必须满足可燃成分比重大、热值高的要求。然而，受经济发展水平所限，加之居民对生活垃圾分类意识薄弱，致使我国生活垃圾的低位热值普遍位于 4000kJ/kg 以下，不利于进行焚烧发电。盲目上马垃圾焚烧发电 BOT 项目，很容易导致政府在垃圾供应质量上难以达到预期标准，项目不得已要添加大量的辅助燃料才能使垃圾稳定燃烧，因此使得项目运营成本增加，并由此进一步导致发生上述多种风险。

（3）我国垃圾焚烧发电 BOT 项目的专业技术和管理人才匮乏，导致运作此类项目时容易发生政府决策风险、政策法规风险、费用支付风险和运营风险。现有人员大多是从热电和管理专业转岗而来，由于缺乏运作经验、缺少专业技术，导致许多项目出现了选址决策不当、项目审批不合理、政策法规存在漏洞、政府拖欠垃圾处理费、项目运营失控等问题，这也是导致项目发生多种风险的一个重要原因。

结论与风险应对策略

本研究采用多案例研究的方法对我国垃圾焚烧发电 BOT 项目的关键风险进行了分析，识别出导致我国运作此类项目出现问题的 8 个关键风险，分别为政府决策风险、技术风险、运营风险、垃圾供应风险、费用支付风险、收益与成本变化风险、变更风险以及政策法规风险。综合案例调研与访谈的结果，本研究认为，政府和项目公司在运作此类项目的过程中，应当从以下 5 个方面规避和应对风险：

（1）发挥政府相关部门的宣传教育与管制作用，建立垃圾分类收集体系。目前，我国大多数生活垃圾都没有进行分类收集，直接造成垃圾综合利用率低、垃圾焚烧热值低的状况。为此，政府相关部门应从以下渠道着手：一是加强宣传教育，采取多种形式推广普及垃圾减排和分类知识，树立“垃圾处理、人人有责”的观念，鼓励全民参与；二是加大投入，对居民住宅区提供必需的垃圾分类收集及清运设施，建立并完善先进、完整的废旧物品回收、利用和处理体系；三是制定具有可操作性的政策法规，如生活垃圾分类收集管理制度及监督措施、垃圾处理费收缴标准、包装物强制回收管理办法等，约束居民的生活垃圾分类投放行为，培养居民的分类收集习惯，同时防止过度包装、减少包装废弃物的产生；四是将垃圾分类处理的末端工作精细化，降低垃圾中有毒有害物质的焚烧率，尽最大可能从源头减少垃圾焚烧发电项目对环境的污染。

（2）提高准入标准、严把技术关，增强政府的前期项目决策能力。根据目前我国执行的生活垃圾焚烧污染控制标准（GB18485-2001 版），每标准立方米的二恶英类毒性当量不超过 1.0 纳克（1.0ng-TEQ/Nm3），远高于欧盟 0.1 纳克的标准。在当今可持续发展目标的导向下，我国对焚烧技术的控制标准也应当逐步提高。在此背景下，我国必须加大对适合我国生活垃圾特性的焚烧发电技术的研发扶持力度，通过招标选择有资质、有经验的企业进入该领域，新技术和新工艺要有完整的生产性实验报告与专门技术报告并报经有关部门审查通过后才能推广应用。此外，政府在发起垃圾焚烧发电 BOT 项目时，应多方面了解和掌握类似项目的运作特点及经验，加强项目选址、建设方案、

技术、经济等方面的论证，通过走访调查、座谈会、听证会等方式征集公众的意见，避免发生群体性事件。

（3）加强垃圾焚烧发电 BOT 项目的透明、公开工作，落实社会公众的监督权。随着我国垃圾焚烧发电事业的快速发展以及居民环境意识的增强，项目的环境影响越来越受到关注。这就要求项目公司在日常运营中，应严格按照有关标准对大气污染物、炉渣、飞灰、污水、厂界噪声和区域环境振动等方面进行控制和处理，并加以实时监测。作为决策方和监管方，政府相关部门应将“能否做到运营全过程的透明公开”作为批准垃圾焚烧发电 BOT 项目的重要参考指标，同时在项目运营过程中，应将项目污染物排放数据实时联网以加强监督与管理，公众可依法申请查阅项目的相关数据资料。此外，垃圾焚烧发电 BOT 项目应该向整个社会，特别是向作为潜在受害者的周边居民开放，自觉接受全社会的监督。

（4）鼓励提高垃圾焚烧发电专业的技术水平。一方面，通过官产学研相结合的方式，加强垃圾焚烧发电专业技术研究工作、污染物防治技术研究工作和人才培养工作，积极组织开展经验交流，提升我国垃圾焚烧发电行业的整体技术与管理水平。另一方面，政府相关部门应当对该专业领域科研成果的转化制定专门的优惠政策和措施，鼓励项目公司积极开展技术创新工作。

（5）完善相关的经济政策。我国现阶段绝大多数垃圾焚烧发电 BOT 项目是从国外引进的焚烧发电技术与设备，因此建设投资相对较高；项目收益主要来自垃圾处理补贴费和上网电费两项，而垃圾焚烧发电的经济效益是诸多发电方式中较差的一种，因此政府补贴对于此类项目的运营具有重要的影响。目前，发达国家均针对本国情况制定了相应的补贴优惠政策，例如德国处理每吨垃圾补贴 180 马克、法国补贴 870 法郎、荷兰补贴 70 荷兰盾、比利时补贴 100 美元[31]，而我国每吨垃圾的处理补贴费仅为 10 到 243 元[32]。因此，我国应尽快完善垃圾焚烧发电 BOT 项目相关的投资、税收、补贴政策体系，重视项目收益与成本的测算工作，为项目提供合理的垃圾处理补贴、为周边居民提供适当的经济补偿，避免盲目给予承诺或承诺不兑现、政绩透支等情况的发生。

最后需要说明，本研究仅是针对垃圾焚烧发电 BOT 项目的关键风险进行了分析，并不代表其它的风险因素可以忽略，在实践中仍需要根据具体的项目情况加以具体分析，而每一项风险的具体应对策略也是今后需要深入研究的问题。

参考文献：

[1]曾祥耙.城市生活垃圾焚烧发电前景乐观[J].环境卫生工程,2007,15(4):35-36

[2]宋志伟,吕一波,梁洋等.国内外城市生活垃圾焚烧技术的发展现状[J].环境卫生工程,2007,15(1):21-24

[3]中国固废网.我国垃圾焚烧发电黄金时期将至[EB/OL].http://news.solid waste.com.cn/k/2009-4/20094262312397836.shtml,2009-04-26

[4]中国固废网.全国“十五”期间已建及在建生活垃圾焚烧厂统计表[EB/OL].http://forum.solid waste.com.cn /onload/20083111048469288.doc,2008-03-11

[5]DarrinG.,Mervyn K.L.Evaluating the Risks of Public Private Partner ships for Infrastructure Projects[J]. International Journal of Project Management,2002,20(2):107-118

[6]亓霞,柯永健,王守清.基于案例的中国 PPP 项目的主要风险因素分析[J].中国软科学,2009,(5):107-113

[7]Wang S.Q., TiongR.L.K., Ting S.K., Ashley D.Evaluation and Management of Foreign Exchange and Revenue Risks in China’s BOT Projects[J]. Construction Management and Economics,2000,18(2):197-207

[8]陈海滨,潘绮,章程.生活垃圾处理项目风险分析与对策研究[J].江苏环境科技,2006,19(6):46-48

[9]徐晓霞,李宝发.生活垃圾焚烧项目采取 BOT 方式的风险因素分析[J].科技创新导报,2008,(28):113

[10]Denison R.A.,Silbergeld E.K. Risks of Municipal Solid Waste Incineration: An Environmental Perspective[J] .Risk Analysis,1988,8(3):343-355

[11]Ostry A. S., Hertzman C., Teschke K.Risk Perception Differences in a Community with a Municipal Solid-Waste Incinerator[J]. Canadian Journal of Public Health,1993,84(5):321-324

[12]Petts J. Incineration Risk Perceptions and Public Concern: Experience in the UK Improving Risk Communication[J]. Waste Management & Resarch, 1992,10(2):169-182

[13]Schuhmacher M., Meneses M.,Xifro A.et al. The Use of Monte-Carlo Simulation Techniques for Risk Assessment: Study of a Municipal Waste Incinerator[J]. Chemosphere, 2001, 43(4-7): 787-799

[14]Yin R.K. Case Study Research: Design and Methods(2nded.)[M]. Beverly Hills:Sage Publications, 1994

[15]毛基业,张霞.案例研究方法的规范性及现状评估———中国企业管理案例论坛(2007)综述[J].管理世界,2008,(4):115-121

[16]Weick K.E.The Generative Propertiesof Richness[J]. Academy of Management Journal,2007,50(1):14-19

[17]Tsui A.S.Taking Stock and Looking Ahead:MOR and Chinese Management Research[J]. Management and Organization Review,
2007,3(3):327-334

[18]Miles M.B.,Huberman A.M.Qualitative Data Analysis:An Expanded Sourcebook[M]. London:Saga,1994

[19]李晓燕,毛基业.基于心理契约关系的 IT 外包项目控制模式建构:多案例研究[J].南开管理评论,2009,12(4):71-82

[20]Eisenhardt K.M.Building The ories from Case Study Research[J].Academy of Management Review,1989,14(4):532-550

[21]中国新闻网.广州番禺垃圾焚烧厂 2011 年再启动[EB/OL].http://www.chinanews.com.cn/qxcz/news/2009/12-11/2012460.shtml,2009-12-11

[22]中国经济网.北京市六里屯垃圾焚烧厂引发争议[EB/OL].http://www.ce.cn/bjnews/zhengzhi/news/200704/19/t20070419_11086361_1.shtml,2007-04-19

[23]环卫科技网.记者调查:江苏吴江平望垃圾发电厂停建始末[EB/OL].http://www.cn-hw.net/html/china/200910/12077.html,2009-
10-29

[24]千龙网.武汉市汉口北垃圾焚烧污染发电厂引发环保争议[EB/OL].http://qy.qianlong.com/7440/2010/01/21/4722@5455661.htm,2010-01-21

[25]21CN 网.广州李坑垃圾焚烧发电厂锅炉爆炸 5 人重伤[EB/OL].http://news.21cn.com/guangdong/guangzhou/2010/01/08/7249591.shtml,2010-01-08

[26]徐壮,奚修斌,盛鲁鼎等.山东省垃圾发电情况调研与思考[J].节能与环保,2006,(8):44-47

[27]中国农村电气化信息网.同兴垃圾焚烧发电厂喊“饿”[EB/OL].http://www.chinarein.com/ndgl/detail.asp?id=9623,2005-04-12

[28]何志武,帅建强,唐龙.垃圾焚烧发电产业 BOT 运作模式的政策评估———以重庆同兴垃圾发电厂为例[J].重庆科技学院学报
(社会科学版),2009,(2):101-102

[29]李飞,王高,杨斌.高速成长的营销神话———基于中国 10 家成功企业的多案例研究[J].管理世界,2009,(2):138-151

[30]李诗媛,别如山.城市生活垃圾焚烧过程中二次污染物的生产与控制[J].环境污染治理技术与设备,2003,4(3):63-67

[31]陈宗器.我国垃圾电厂现状与发展[J].电器工厂设计,2005,32(2):35-42

垃圾焚烧与克服二噁英

泉州锦田机械有限公司 吴谦信

摘要：垃圾焚烧的主流炉型炉排炉属国外设计商的专利产品，垄断世界垃圾焚烧行业，进口设备昂贵，建一座垃圾焚烧厂均以亿元计位，而且技术、工艺、设备常患“水土不宜”。国内垃圾焚烧厂排放不能稳定达标的“神秘化”，扼制公众的知情权，造成人们的恐惧与不安，威胁到社会的安定与和谐。其实只要垃圾充分燃烧，杜绝产生二恶英的物质条件，就能克服二恶英，持续稳定达标排放，实践证明根据国情，走自主创新的路，燃烧法的净化效果最好，不会二次污染。

我国城市环境已不堪垃圾重负。各城市历年填埋在城郊附近的垃圾，累积堆存的总量超过 70 亿吨，占地超过 75 万亩，相当于我国每万亩耕地就有近 4 亩被占用堆放垃圾，全国 1/4 城市已无垃圾填埋场地。我国是人均可耕土地资源极其贫乏的国家。

垃圾围城占地，污染水体，污染环境，传染疾病，严重威胁了人们的生存，诱发民众的集体抗议甚至过激行为时有发生，严重威胁社会的和谐与安定，已成为严重的社会问题。据世界银行发表的中国环境报告中指出中国快速的经济发展，忽略了对环境资源的有效保护和利用，每年环境污染给中国大陆地区造成的经济损失几乎抵消经济增长量。

走自主创新的路

城市生活垃圾处理一直是一个困扰人类社会的世界性难题。垃圾焚烧处理方法减量化显著，无害化彻底和资源化循环再利用，在美国尤其是欧洲与日本依然流行，普遍采用，成为垃圾处理的主要手段。他们已实施了上百年的历史，积累了丰富的经验与焚烧技术，严格控制污染物的排放标准，二噁英限值 0.1ng/m^3，也垄断了世界环卫行业，但是垃圾性质与我国差异很大（表 1）。从国外进口的技术、工艺、设备一般都“水土不宜”，且价位很高，广大的中国城市都无力承受。

表 1 发达国家与我国生活垃圾性质及处置比较

	美 国	日 本	法 国	德 国	意大利		哈尔滨	北 京	上 海	广 州	中小城市
热 值 (KJ/kg)	11670	11720	7750	7750	7320		5330	4300	5440	4400	2000-3800
水 份(%)	25	23	5	35	30		40	40	45	50	40-60
灰 份(%)	5	5	5	5	5		21	15	15	17	25-35
质 性	分类收集	分类收集	分类收集	分类收集	分类收集		混合收集	混合收集	混合收集	混合收集	混合收集
主 要 处理方法	焚 烧	焚 烧	焚 烧	焚 烧	焚 烧		填埋	填埋	填埋	填埋	填埋
主要炉型	炉排炉	炉排炉	炉排炉	炉排炉	炉排炉						
	旋转炉	旋转炉									

注:①国内外均选用旋转炉焚烧医疗垃圾和危险废物。

②国务院批复环保部的《全国危险废物和医疗废物处置设施建设规划》的要求，优先采用对废物种类适应性强的回转窑焚烧技术（环发【2004】16 号）。

泉州锦田机械有限公司历经七年多的研发，采用国际通行的“3T”规定及自主创新“一种封闭旋转式垃圾焚烧设备”（专利号：ZL200420080119.6）和自主原始创新发明专利“给氧装置”（专利号：CN201010219648.X），成功创造出一种环保性能良好、适应性强的封闭旋转式垃圾焚烧处理设备。运行实践证明，本自主创新的技术、工艺、设备采用燃烧法净化垃圾，效果很好。垃圾在旋转的炉膛内高温燃烧的全过程获得氧化反应所需要的适量而及时的氧化剂，确保高温氧化全过程占主导地位，保证焚烧炉膛的垃圾充分燃烧，既消纳了垃圾又克服了二噁英。经国家 CMA、CAPM、CNAS 及 ilac-MRA 机构四次现场采样、检测结果，废气中危害最大的污染物二噁英的排放浓度均达到优于国家限值标准的良好效果。（表 2）

表 2　HBL 系列焚烧炉排放检测结果与国家标准和欧洲标准比较

序号	检测项目		单　位	数值含义	国家控制标准	HBL 旋转式焚烧炉检测结果		欧洲标准
1	烟尘	TD	mg/m³	测定均值	80	33		30
2	一氧化碳	CO	mg/m³	小时均值	150	28		60
3	氮氧化物	NOx	mg/m³	小时均值	400	133.6		200
4	氯化氢	HCl	mg/m³	小时均值	75	3.33		10
5	二氧化硫	SO2	mg/m³	小时均值	260	67		50
6	汞	Hg	mg/m³	测定均值	0.2	0.0013		0.05
7	镉	Cd	mg/m³	测定均值	0.1	未检出		0.05
8	铅	Pb	mg/m³	测定均值	1.6	未检出		0.5
9	烟气黑度	TOC	格林曼黑度，级	测定值	1	＜1 级		10
10	二噁英类	PCDD/Fs	ngTEQ/ m³	测定均值	1.0	上海市检测中心	0.048	0.1
						中国检科院检测中心	0.080964693	
							0.161077199	
							0.125566043	

有关专家先后多次到我司和运行现场考察及审阅检测、评审、查新等相关报告的原件时称：本科技创新产品是城市生活垃圾处理的一个里程碑，摆脱发达国家在环卫行业的垄断，走中国自己的路，走自主创新的路，为克服二噁英这一世界性难题交上了令人满意的答卷。

2011 年 4 月 12 日经省级环保产品推荐专家评审会评审合格，作为“福建省环保产品推荐”，并发给“福建省环保产品证书”（证书号 XCP-2011-006）。

垃圾焚烧炉的核心技术与关键工艺

垃圾焚烧确实产生了一级污染物二噁英和重金属污染物，引起了人们的恐惧与不安。但二噁英和重金属等污染物是能够克服的。垃圾焚烧过程中必然排放废气，其中含有烟尘、HCL、SO_2、NO_X、HF 等酸性气体和未完全燃烧的 CO、H/C 以及氯苯、氯酚有机氯化合物、二噁英类物质、恶臭物质等，是有毒有害的物质。因此垃圾焚烧必须有足够可靠的技术支持，不然会产生二次污染。其核心技术是燃烧技术，充分搅拌扬料，适量供氧，充分混合，良好的湍流度，燃烧温度≥850℃，燃烧时间≥2S，达到世界通行的“3T+E（Temperature、Time、Turbulence 和 Excess oxygen)”的规定，实现充分燃烧。垃圾处理采用燃烧法的净化效果非常良好，可以非常有效的克服二噁英，杜绝二次污染。本产品为自主创新的旋转式垃圾焚烧设备，已获专利四项，其中发明专利 1 项，实用新型专利 2 项，外观专利 1 项。旋转式垃圾焚烧炉的径向多级给氧装置随炉膛旋转及时充分给氧，保证满足垃圾在高温的炉膛内剧烈的氧化反应所需要的氧化剂，垃圾与氧气连续充分搅拌与混合，并连续撒落于炉膛中成为悬浮燃烧，形成螺旋型骄阳色的燃烧火焰，非常有效的延长了垃圾烟气在≥850℃环境中的燃烧时间，实现充分氧化反应，充分燃烧，既彻底消毁病毒菌源，又彻底烧毁有毒有害的物质，燃烧法净化不会产生二次污染。经 4 次运行现场采样，检测结果，完全优于国家限值标准，达标排放。

产品关键工艺是给氧工艺，吸入式的经过加温的空气确保垃圾在炉膛内的氧化反应全过程占主导地位，使垃圾在炉膛内燃烧的全过程获得及时而足量的氧化剂，实现充分氧化反应。二是干燥段与焚烧段分开设计，独立运行，先“干柴”后“烈火”，经干燥后筛分的垃圾，成为松散的易燃物，提高了垃圾热值，确保焚烧段不需要添加辅助燃料能稳定自燃，持续高温燃烧≥850℃，经燃烧净化

后，再经重力除尘与袋式除尘过滤净化，废气排放完全达到国家限值标准，也因此提高了处理量和降低运行成本。

由于核心技术与关键工艺的支撑，保证垃圾在高温≥850℃的炉体内持续稳定燃烧，彻底消毁病毒菌源和有毒有害物质，扼制二噁英与重金属污染物的生成，消除二次污染。旋转式焚烧炉是处理危险废物与医疗垃圾的首选炉型，也公认为处理生活垃圾较好的炉型，在日本、美国、丹麦等均为首选炉型。

旋转炉给氧装置

本原始创新发明专利“旋转式垃圾焚烧炉的给氧装置”，专利号 CN201010219648.X。本给氧装置是旋转式垃圾焚烧炉吸入式的径向多级给氧装置。根据焚烧炉体的长度而确定级数，每一级绕炉体外周开设给氧窗。根据炉体直径的大小而确定每级给氧窗的个数，给氧窗的大小和个数与炉膛容积成正比。本发明保证垃圾在炉膛内燃烧的全过程能够充分而及时获得氧化反应所需要的供气量即二次风，为充分燃烧，高温燃烧（≥850℃）创造了良好的条件。因为独立运行的旋转式烘干与分筛装置利用尾气余热预烘干和剥离附着于垃圾的泥沙，使垃圾成为干燥而松散的易燃物，提高了热值，为稳定、持续燃烧、充分燃烧提供了可靠的物质基础。又因为炉体旋转获得连续拔火，使垃圾连续撒落于炉膛中，形成悬浮燃烧，轻质悬浮燃烧的垃圾与吸入的径向多级二次风充分混合，形成活跃的湍流度，圆形旋转的炉膛没有燃烧的死角。在旋转作用力的带动下，轴向给氧和经过给氧环加温的径向多级二次风，使炉膛内燃烧的火焰成为螺旋型骄阳色的火龙，非常有效的延长了烟气在≧850℃环境的燃烧时间达≥4.3s。足够的技术支持和良好的燃烧工况，为充分燃烧（高温氧化）和达标排放提供了可靠的保证。

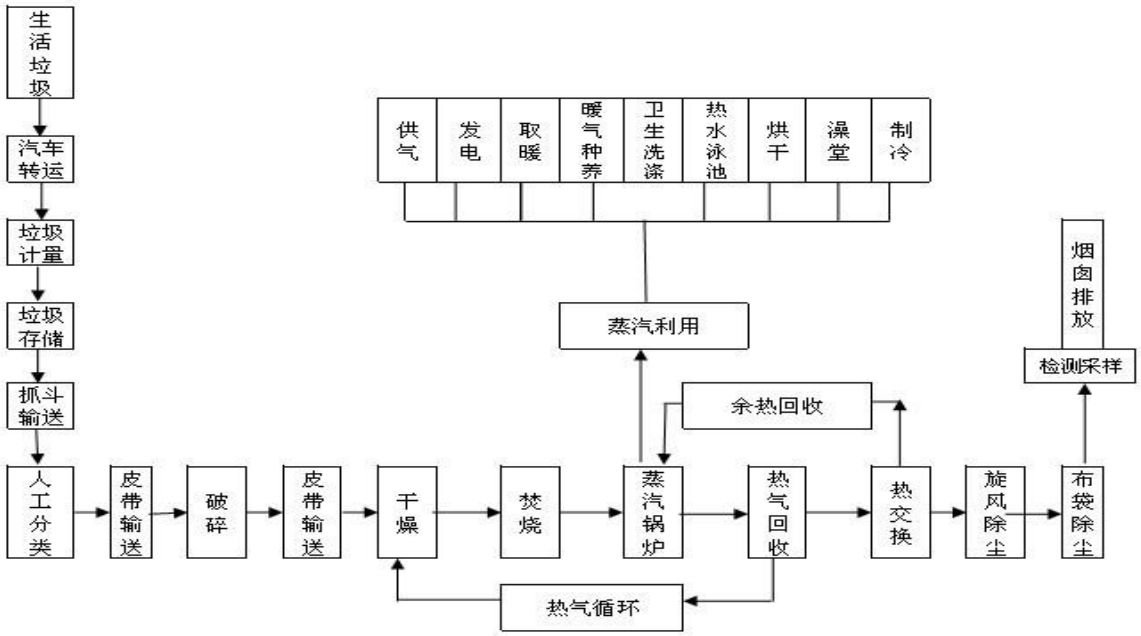
本专利已实施转化为产品，在实践运行中经国家 CMA 及 CNAS 机构，现场采样检测结果完全优于国家排放标准。2009 年 11 月 25 日上海市检测中心检测结果（采样地点泉州市），二噁英排放浓度为国际毒性当量 WHO-ETQ48.293pg/ m^3；2011 年 2 月 11 日经中国检验检疫科学研究院综合检测中心采样 3 次（采样地点永安市）检测结果，二噁英排放浓度为国际毒性当量 WHO-ETQ0.1256ng/m³、0.081ng/m³、0.1611ng/m³（附上二噁英检测报告 4 份）。

本技术、工艺、设备为自主创新专利，产品全部国产化制造，价格仅进口产品的 1/3-1/6，运营成本低廉≤55 元/T。设备本土化制造，不仅大幅度降低投资，促进了相关行业的生存与发展，还大幅度地节约外汇，大幅度地减少设备检修备件和配件费用，大幅度地提高我国环卫环保产业的经济与技术实力，以及提高我国在国际环保界的地位和声望。

本发明采用自然工艺，吸入式及时而足量给氧，达到垃圾与空气充分混合，实现充分氧化反应。以燃烧法净化，彻底消毁产生二噁英类的物质，使其没有再生成的条件，不需要吸附装置和添加吸附剂，就能使废气排放控制在低于国家限值标准。对一些毒性颇高的微量污染物二噁英及重金属有效的净化，对人类不产生危害，消除人们对垃圾焚烧处理的不安与恐惧感。垃圾焚烧处理具有减量化显著，无害化彻底和资源循环再利用，省地、快速、安全、长效的优势。

本自主创新产品经济效益、社会效益和环境效益显著。我国“十二五”期间规划，城市生活垃圾无害化处理率不低于 80%，新增垃圾焚烧处理能力 15 万吨/日。环保产业是环境污染少的战略性新兴产业。为保护环境，为生活垃圾焚烧处理提供适应、经济、高效、安全的技术、工艺和设备，任重而道远，市场巨大而看好。

附图：HBL 旋转炉垃圾焚烧处理工艺流程图



利用蒸汽蓄热器解决垃圾焚烧厂蒸汽波动

圣火科技（河南）有限责任公司　李志鹏

1 前言

垃圾经过焚烧，在减容的同时释放出热量——焚烧余热。在垃圾焚烧厂里，若不对此余热加以回收利用是不合理的，同时也不符合我国有关余热利用标准规定。但由于垃圾成分的复杂性，性质的多样性，密度的不均匀性，地域的差异性，以及垃圾焚烧厂操作方式的不同，用户需求量的变化，致使垃圾焚烧厂余热锅炉的汽压和汽量经常出现不均衡的状况。为此，只有装设了蒸汽蓄热器以蓄存求平衡，才能有效地解决垃圾焚烧厂余热利用系统工作的稳定性和可靠性。

2 在垃圾焚烧厂装设蒸汽蓄热器的必要性

2.1 垃圾特性的影响

垃圾特性主要包括垃圾的物理特性如组分、容重、颗粒度、空气阻力、灰分熔点和垃圾的化学特性，如含水率、挥发分、固定碳、灰分、炉渣热灼减率、元素、热值。由于垃圾特性不同的影响，必然造成一定程度的燃烧不稳定性，这种燃烧的不稳定性极易造成炉温的波动，锅炉蒸发量的变化，从而对垃圾焚烧余热的稳定回收造成极为不利的影响。

2.2 操作方式的影响

由于中小型垃圾焚烧厂多采用批次方式或准连续式的操作方式处理垃圾，致使垃圾焚烧厂余热锅炉间断性、周期性产汽，因此锅炉汽量和汽压是极不均衡的，从而造成余热回收系统工作的不稳定性，严重时就根本无法工作。即使大型垃圾焚烧厂具有规模经济效果而采用连续式的操作方式处理垃圾，但由于种种原因，如垃圾特性的影响及用汽热负荷的变化等，致使余热锅炉的风、料、水调整很难配合准确及时，同时也会使垃圾焚烧厂余热资源的热负荷出现不稳定的情况。

2.3 对热用户的影响

垃圾焚烧厂向外供热时，由于企业生产班制的不同，用热设备工艺程序的变化，其它可预测和不可预测用汽的影响，致使供热用户耗汽量有了很大的变化，再加上现代锅炉为了经济节约，其锅筒水容量越来越小。以上这些因素的影响，从而对垃圾焚烧厂余热利用系统工作的稳定性、可靠性带来了极为不利的状况。

为了及时有效地解决垃圾焚烧厂余热利用系统工作的稳定性、可靠性，只有装设了蒸汽蓄热器，以蓄存求平衡才能更好地适应客观生产变化的需要。

3 蒸汽蓄热器的构造及其工作原理

3.1 蒸汽蓄热器的构造

蒸汽蓄热器的结构型式一般有卧式、立式两种。卧式蓄热器蒸发面积大，装置高度低，安装检修方便，但占地面积大。由于蒸汽蓄热器要求有较大的蒸发面积，所以采用卧式的较多。

蒸汽蓄热器的构造如图 1 所示。由壳体部分，内部装置及附件等组成。

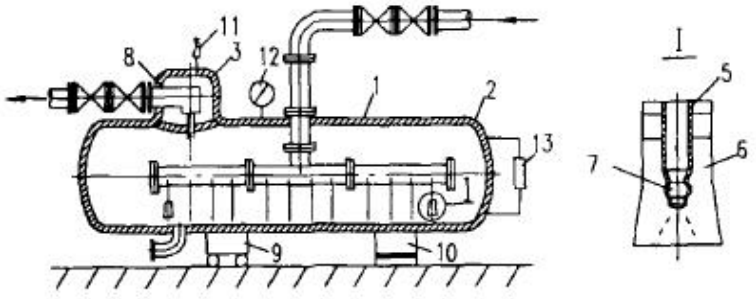


图 1 卧式蒸汽蓄热器

1. 筒体, 2. 封头, 3. 集汽包, 4. 蒸汽分配总管, 5. 蒸汽分配支管，6. 换流管，7. 喷咀，8. 汽水分离器，9. 活动支座, 10. 固定支座, 11. 安全阀, 12. 压力表, 13. 水位表

3.2 蒸汽蓄热器的工作原理

蒸汽蓄热器与热源引出的供汽干管相连接，当热负荷减少时，蒸汽供过于求，供汽干管内的汽压必将相应升高，此时干管内的蒸汽通入水中加热水，使容器内水的温度和压力升高，形成具有较高压力的饱和水，这个过程叫充热过程，充热过程可一直进行到蓄热器内压力升高到接近供汽干管内的压力为止；而当热负荷增加时，蒸汽供不应求，供汽干管内的汽压亦会相应降低，此时蓄热器内的压力高于干管内的压力，于是饱和水变成过热水，立即沸腾而蒸发产生蒸汽，这个过程叫放热过程，放热过程可一直进行到蓄热器内的压力降低到接近供汽干管内的压力为止。这是以水为载热体来间接蓄存蒸汽的装置。

4 蒸汽蓄热器在垃圾焚烧厂的系统设计

4.1 装设蒸汽蓄热器的基本技术条件

垃圾焚烧厂在研究装设蒸汽蓄热器时，要注意下列的基本技术条件：

①供热系统热负荷有频繁的大幅度波动，这种波动有一定的周期性或呈现交变出现的峰值与低谷负荷；

②汽源压力必须高于部分或全部用汽设备所需的汽压。一般要求有 0.3 MPa 以上的压差；

③汽源供汽能力必须略大于一昼夜平均用汽负荷；

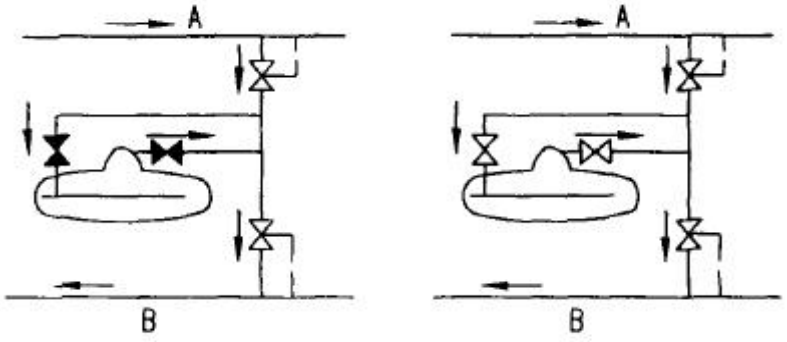
④具备装设蒸汽蓄热器的场地。

4.2 蒸汽蓄热器的容积计算

由于蓄热器使用场合不同或用户负荷变化的性质不同，必需蓄热量的计算有不同的方法，如积分曲线法、分段积分曲线法、高峰负荷计算法及充热时间计算法等，根据蓄热量设计计算蒸汽蓄热器容积。

4.3 蒸汽蓄热器连接系统

蒸汽蓄热器的连接系统大致可分为并联和串联两种，如图 2 所示。



(a)并联系统　　(b)串联系统

图 2 蒸汽蓄热器连接系统

① 并联系统。图 2(a)为并联系统。图中 A 为高压供汽干管，B 为低压蒸汽干管，分别向各种高、低压用汽设备供汽。假如当 A 管内蒸汽过剩时，就按箭头方向流入蓄热器，从而保持 A 管内汽压一定。又如 B 管内蒸汽不足时，蓄热器内的蒸汽也可自动流出补充。这种系统使用较为普遍，为常用方式。

② 串联系统。图 2(b)为串联系统。它与并联系统的不同之处是高压蒸汽干管与低压蒸汽干管必须经过蓄热器串联连接，B 管所需蒸汽全部通过蓄热器供应。这种系统适用于脉冲式间断供汽或低压用户不允许使用过热蒸汽的场合。

③ 蒸汽蓄热器与热电联供装置的配合。新建的垃圾焚烧厂都不可能在规划时做到有很理想和很可靠的供热用户以及稳定供热。但又必须按量按时地处理掉垃圾。因此一个理想可行的方式就是蒸汽蓄热器与热电联供装置的有机配合，尽可能按需供热，垃圾焚烧厂以供热为第一满足并以发电作为补充，优先供热以取得最大的经济效益，将多余热量用于发电，使垃圾余热得到最大限度的利用，同时也使垃圾焚烧厂获得最大的经济效益。

4.4 蒸汽蓄热器的热工控制

蒸汽蓄热器的热工控制系统图如图 3 所示。

在垃圾焚烧厂，蒸汽蓄热器的充热和放热过程应采用自动调节装置。这是因为在垃圾焚烧厂运行过程中，由于汽源及用户的压力参数不断变化，造成蓄热器的充热和放热过程不断变化，这种变化十分频繁，以致用人工操作时，往往跟不上这种变化的频率，不仅操作人员劳动强度大，而且往往影响蓄热器的正常运行，使蓄热器不能充分发挥作用，造成设计的失败。所以充热和放热过程的自动调节对蓄热器的运行非常重要。蓄热器自动调节的冲量是充汽、放汽压力，因此，蓄热器充热、放热过程自动调节系统实质上是以压力为调整对象的自动调节系统。

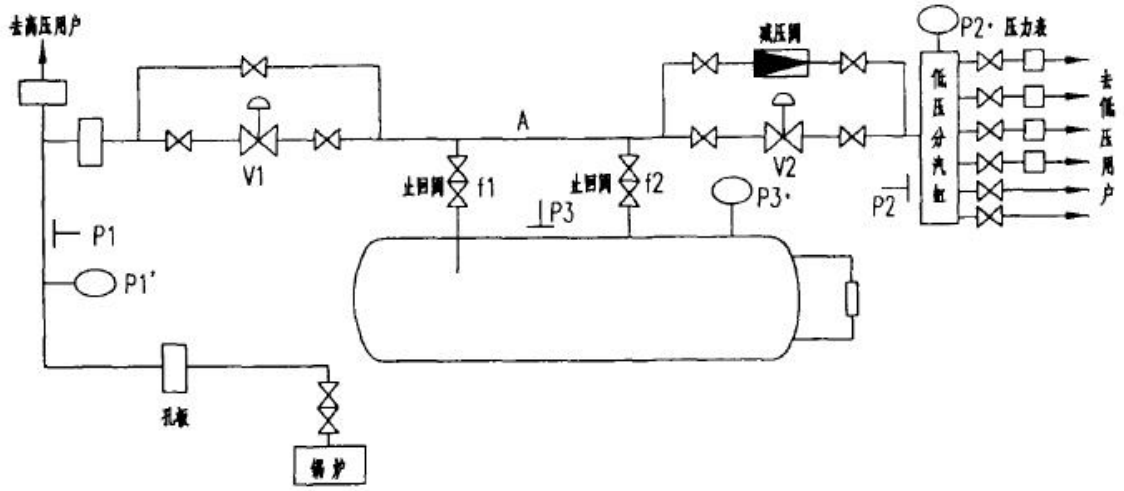


图 3 蒸汽蓄热器热工控制系统图

P1、P2--调节系统压力测点，经压力变送器，送至调节器；

P3--蓄热器压力测点，经压力变送器送至指示记录仪；

P’1、P’2、P’3--就地指示压力表；

V1、V2--调节阀；f1、f2--止回阀。

在垃圾焚烧厂，蒸汽蓄热器采用自动调节，主要是维持余热锅炉蒸汽母管的压力及低压分汽缸的压力符合要求。图 3 中，V1、V2 为调节阀，当低压用汽负荷未变，而高压用汽量增大时，锅炉母管压力会下降，此时，V1 阀自动关小，以维持锅炉母管压力不变，同时 A 管段压力下降，止回阀 f2 自行打开，蓄热器内贮存的蒸汽就释放出来供给低压用汽之不足。当低压用汽负荷不变，而高压用汽量减少时，锅炉母管压力上升，此时，V1 阀就自动开大，以维持锅炉母管压力不变，同时，A 管段压力不升，止回阀 f1 打开，f2 关闭，多余的蒸汽进入蓄热器贮存，以维持低压用汽压力不变。同样，当低压用汽量增减时，阀也随着开大或关小，以维持低压分汽缸的压力稳定。

5 垃圾焚烧厂装设蒸汽蓄热器的优点

(1) 垃圾焚烧厂余热锅炉热负荷波动时，蒸汽蓄热器能及时自动吸收或产生蒸汽，省去启动备用锅炉或调整锅炉燃烧此类的麻烦；

(2) 部分中小型垃圾焚烧厂由于采用批次方式或准连续式的操作方式处理垃圾，余热锅炉是间断性、周期性产汽，汽量和汽压是极不均衡的，为此只有装设了蒸汽蓄热器才能满足热用户用汽的需求；

(3) 能减少锅炉容量或运行台数，减少备用锅炉台数；

(4) 使锅炉效率提高，节约燃料。一般可节约能源 3%～20%；

(5) 减轻司炉劳动强度和危机感；

(6) 使供汽压力、干度稳定，防止汽水共腾现象，能使锅炉汽压平衡，有利于延长锅炉寿命；

(7) 可改善锅炉燃烧工况，能有效控制负荷剧烈变化时燃烧调整过程中产生的烟气污染，有利于环境保护；

(8) 当锅炉发生事故紧急停炉时，蓄热器可在一定时间内连续供汽，确保事故时不因断汽而危及工艺设备安全或产品质量；

(9) 当热用户深夜用汽量很少时，可以不烧锅炉而以蒸汽蓄热器替代供应。

6 结语

蒸汽蓄热器是以蓄存求平衡，能够有效解决垃圾焚烧厂余热稳定回收问题，同时具有技术可行、经济合理、安全环保、高效节能的特点。因此，蒸汽蓄热器在垃圾焚烧厂的应用，必将在我国得到大范围的推广。

技术拥有企业简介：

圣火公司前身为郑州百瑞节能技术有限公司，成立于 1993 年，是 2004 年成立的中国节能服务产业委员会首批会员（编号 No.0043），河南第一家会员；圣火公司同时是国家发改委财政部审核备案的第一批节能服务公司。公司主要从事余热回收方向节能业务，长期致力于高温锅炉渣、高温硫铁矿渣、高温有色金属渣、高温钢铁渣等高温物料的余热回收技术开发，在本行业有近 20 年的专业经验。高温物料余热回收——冷渣器有 10 余项专利，其中液态高温渣余热回收：干熄渣技术——钢铁（有色）液态渣不耗水干法处理和余热回收技术，被北京钢研总院院长、中国工程院院士干勇称为本世纪钢铁行业 4 大最具潜力节能环保技术之一。同时开发了适合民营企业使用的经济型的干熄焦（兰炭）技术。

生活垃圾焚烧技术的比较及选择

潘忠刚　朱珂
中国科学院工程热物理研究所
北京中科通用能源环保有限责任公司

摘要：本文结合对我国城市生活垃圾的特性和垃圾处理现状的描述，对机械炉排焚烧炉和循环流化床焚烧炉这两种主要技术的工艺过程和应用于焚烧处理我国混合收集的原生垃圾时的技术、经济和环境（特别是遏制二噁英生成的能力）特点进行了比较，以期为技术选择提供有实际意义的参考。

关键字：生活垃圾；焚烧；机械炉排炉；循环流化床炉

A comparison and Selection Consideration of MSW Incineration Technology

Pan Zhonggang　(Institute of Engineering Thermophysics, CAS)

Abstract: Following a brief description of the MSW management status and the composition characters in China, this paper analyses two mainstream incineration technologies for unclassified MSW disposal, namely the mechanical grate incinerator and CFB incinerator, in terms of the general process behavior, the technical, economical and environmental performance, especially the capability to prevent PCDD/Fs formation. It is expected to provide a realistic assistance to whom involved in selection of an incineration technology,

Key Words: municipal solid waste (MSW)；incineration；grate；CFB

1 我国生活垃圾处理概况

近年来，随着国民经济的持续高速发展和城市化进程加快，我国城市生活垃圾产生量增长很快，特别在东南部经济发达、人口密集、土地资源特别紧缺的地区，传统的填埋、堆肥等工艺已经不能满足日常垃圾处理的要求，而作为最具减量化、无害化和资源化优势的焚烧处理工艺成为不少城市解决垃圾围城问题的首选方案。

1.1 我国城市生活垃圾的特性

由于经济发展水平、居民生活习惯和垃圾收集管理方式的差异，我国城市生活垃圾的特性同欧美等发达国家相比具有较大的不同（参见表 1）。

表 1 中国与一些发达国家城市生活垃圾成分的比较　（%）

组 分	美国	德国	法国	中　国			
				上海	北京	哈尔滨	南宁
金属	8.5	5	4	0.53	0.8	0.88	0.47
玻璃陶瓷	12	13	9	2.05	10.75	2.56	4.52
厨余垃圾	13	16	15	42.7	49.77	16.62	14.58
纸张	51	31	34	1.61	4.17	3.6	1.83
纺织品	3	2	3	0.47	1.46	0.5	0.6
塑料	4	4	4	0.4	0.61	1.46	0.56
其他可燃物质	3	7	—	–	–	–	–
惰性物质	5	22	22	52.24	32.44	74.38	77.44
其他	–	7	9	–	–	–	–

我国集中处置的生活垃圾主要具有以下特点：

1）未经有效的分类收集，生活垃圾组分复杂，随地区和季节变化大；

2）厨余垃圾和渣土等是主要组成部分，垃圾热值低，一般在 4000—4800kJ/kg 左右；

3）垃圾含水率高，一般在 40—60%左右。

1.2 垃圾焚烧处理发展概况

20 世纪 80 年代后期，从日本引进了逆推式机械炉排焚烧炉技术，拉开了我国城市生活垃圾现代化焚烧处理的序幕。此后的 20 年间，又有一些不同炉型的焚烧炉相继从国外引进，国内也开发出了很多不同容量、不同工作原理的生活垃圾焚烧炉。垃圾焚烧处理在我国的应用正在稳步增长。

由于垃圾焚烧技术是每个城市生活垃圾处理产业的核心技术，恰当的选择适合本城市、本地区的焚烧技术和装备，对于确保垃圾处置项目的长期、可靠和安全运营，解决好城市的环境和发展问题，具有十分重要的意义；而当前多种技术并存、评价不一的局面，颇使建设者和投资人有目不暇接、难以取舍的困惑。因此，有必要从技术的基本特性和应用实践两个层面，对当前垃圾焚烧技术的主要流派进行分析和比较。

2 主要垃圾焚烧技术分析

目前垃圾焚烧技术市场上可见的主要装备有炉排型焚烧炉、流化床（鼓泡型及循环流化床型）焚烧炉、回转窑焚烧炉和热解气化炉等多种。回转窑和热解气化炉单炉处理量较小，难以满足大中城市现代化大型垃圾焚烧厂的建设需要；早期开发的固定炉排焚烧炉不适于产业化连续处理，焚烧效果和环境性能都很差，现在已很少使用。在后面的分析比较中不再把它们列入讨论的范围。

2.1 机械炉排焚烧炉技术

炉排型焚烧炉的主要特征是被处理的垃圾堆放在炉排上，焚烧火焰从垃圾堆料层的着火面向未着火的料堆表面及内层传播，形成一层一层燃烧（层燃）的过程。在炉排上，沿料堆行进方向，可以区分出预热干燥、主燃和燃尽三个温度不等的区段，以及由不同区段产生的气体在炉排上方形成不同炉膛温区，是这种炉型的共同特点（如图 1 所示），而且沿炉膛高度方向温度也有明显下降。

炉排上垃圾燃料堆层的着火燃尽情况，很大程度上取决于炉膛的结构设计是否与燃料的理化特性相适应。对于任一特定性质的燃料，原则上都应进行专门的设计，以求达到尽快着火、彻底燃烧而又不超温烧结的目的。用于焚烧有相当热值、品质比较均匀稳定的垃圾燃料，有较好的效果。

机械炉排炉所用的炉排有很多种（如图 2 所示），它们在推送垃圾的同时对堆层进行翻搅，以使垃圾堆层尽可能地烧透，是当前欧美地区采用较多的炉型，已有 30～40 年的应用和发展历史。

2.1.1 炉排焚烧炉的优势

（1）炉排燃烧炉型已有近百年的发展历史，用于焚烧生活垃圾也已有 40 多年的经验，技术成熟度高，设备配套性好，性能稳定可靠，可选择的供应商较多；

（2）垃圾进料和底渣排出设备比较简单，系统运行操作易于掌握；

（3）在技术原产国，用于焚烧处理经过分类收集的垃圾，热值较高、品质比较均匀稳定，有较好的焚烧效果。

2.1.2 炉排焚烧炉在我国应用时出现的问题

在引进了发达国家发展的炉排焚烧炉后，供应给它们的都是混合收集的原生垃圾，热值低、含水率和不可燃组分含量高，致使在运行效果上与在原产国的应用有很大差距。主要问题包括：

（1）对于混合收集的垃圾，因为水分高、堆积密度大、发热量低，无论是那种炉排，都有垃圾料堆内层燃烧不充分的问题，排出的底渣甚至仍有恶臭，热灼减率一般偏高；

（2）为降低垃圾含水率、提高进炉垃圾热值。常常将垃圾存在储坑中“堆酵”数天，沥出大量垃圾渗沥液；在焚烧炉排下方也会沥洒出垃圾沥出液。需要专门投资进行污水处理；

（3）入炉垃圾的组成和燃烧特性随时间变化很大、很频繁。在炉排上的燃烧状态总是偏离设计情况。炉排和它上方炉膛温度的分布和燃烧条件都很不稳定和很不均匀，造成局部低温区和局部超温区，对充分燃尽和污染控制都很不利；

（4）在炉排炉技术原产国，垃圾热值一般按 8000kJ/kg 左右设计[1]，而我国生活垃圾热值低，除需将垃圾“堆酵”外，还需要向焚烧炉膛喷入辅助燃料油，消耗量大；

（5）通常原生生活垃圾中含氯化物较常用燃料多，焚烧烟气对生产蒸汽的锅炉管束金属材料具有更强的高温腐蚀性。为了设备安全，通常需要降低所生产的蒸汽的温度和压力，导致发电效率降低。若采用更加耐酸腐蚀的材料制造。就会提高设备建造和维护费用，二者都会使发电成本提高；

（6）各种炉排炉的复杂运动的炉排，对材质、加工条件、安装精度和日常维护都有更高的要求。前述各项造成投资和运行成本居高不下，阻碍了这类技术的应用和发展[2]。

2.2 循环流化床垃圾焚烧技术

流化床焚烧与层燃方式完全不同，它主要依靠炉膛内高温流化床料的高热容量、强烈掺混和传热的作用，使送入炉膛的垃圾快速升温着火，形成整个床层内的均匀燃烧。自上个世纪 60 年代以来，这种技术已经成功地被用于劣质燃料及各类废弃物的燃烧处置和热能利用。但早期发展的流化床燃烧炉，属于“鼓泡流化床”燃烧模式，也有多种炉型（包括一些所称有内循环功能的焚烧炉），采用的流化风速较低，主要的燃烧过程发生在下部流化床层内，上部稀相空间的燃烧份额很小。因此沿炉膛高度温度下降很快，限制了燃料挥发分气体的燃尽和对污染物的控制。

循环流化床燃烧是近 30 年才发展起来的一个新技术分支。它继承了一般流化床燃烧固有的对燃料适应性强的优点，同时提高了流化速度、增加了物料循环回路（如图 3 所示）。大量的物料被烟气带到炉膛上部燃烧，经过内、外循环的多个途径再返回炉膛下部，提高了炉膛上部的燃烧放热份额，增强了炉膛上下部之间的物料交换，使整个炉膛处于均匀的高温燃烧状态，确保烟气在高温区的有效停留时间。能保证垃圾各组分的充分燃尽，使有毒有害物质的分解破坏更为彻底；也防止了

局部超温的出现，对常量污染物（SO_2、NOx 等）的控制更为有力。因此，循环流化床燃烧技术一出现就被能源环境界公认为是一种环境友好型的焚烧方式。

国内在开发循环流化床垃圾焚烧技术方面投入力量较大，在焚烧处理混合收集的原生垃圾方面具有独到之处。为了确保炉膛内物料持续均匀流化，国外主要通过将垃圾可燃组分制成“垃圾衍生燃料”（RDF）均匀颗粒来实现；国内技术则主要借助完善流化供风和原生垃圾给料系统，加速包括不可燃物在内的炉渣的排出，以及积极维持循环物料的平衡等手段，只需要辅之以对超大尺寸组分入炉的限制，来解决问题。这种炉型的开发，为焚烧技术和我国焚烧产业的发展注入了新的活力。以中国科学院、浙江大学和清华大学等为代表的研发成果为基础，已经建设了 20 多个循环流化床垃圾焚烧发电工程项目。

2.2.1 循环流化床垃圾焚烧炉的优势

针对我国混合收集的生活垃圾发展的循环流化床垃圾焚烧技术，已经达到了商业化应用的阶段，并日趋成熟，形成了不同处理能力的系列化产品。给料、排渣、燃烧控制、尾气处理设备已有较好配套，入炉垃圾不需要复杂的前处理，产汽与常规汽轮发电设备参数配套，具有显著的环境和经济效益。

（1）适于焚烧处理我国一般混合收集的原生垃圾，燃尽完全，残渣热灼减率＜1～2%；

（2）可以焚烧处置固形垃圾和其他气态或液态、热值悬殊的燃料和废弃物，垃圾堆放、储存过程中产生的垃圾渗沥液都可以直接送入炉膛焚烧处置；

（3）为避免入炉垃圾品质变化及差异过大对焚烧状态的影响，可以向炉内添加适量的辅助燃料煤，而不必用油。价廉易得，添加量较少；

（4）系统设备配套研发，对垃圾的分选和预处理要求很低，不需要复杂的预处理工艺，运行稳定。炉内没有复杂的运动机构，设备故障率低；

（5）单炉处理量较大。目前已形成单炉处理能力从 100－500 吨/日的产品系列，能够适应大型垃圾焚烧厂的建设要求；

（6）可以把过热器布置在这类焚烧炉型所特有的物料循环通道中，隔绝与焚烧烟气的接触，避免高温 HCl 腐蚀；所生产的过热蒸汽温度达到常规热电系统参数，提高垃圾发电效率；

（7）焚烧炉膛内各处温度均匀，并采用了分级供风及炉内添加石灰石等措施，能彻底分解有毒有害物质，有效控制 NO_x、SO_x等的生成，实现了环境友好。

2.2.2 循环流化床垃圾焚烧技术的不足

（1）与机械炉排炉相比，发展历史不长，系统配套，特别是与原生垃圾不作分选处理相关的给料、排渣设备还需长期考验，不断完善；

（2）虽然从技术发展到生产制造，均立足于国内，设备维护和技术更新都更加方便、经济、快捷，但对在设计准则和加工工艺等方面，仍需积累经验、形成实用可行的行业标准，不断完善；

（3）一般循环流化床焚烧炉飞灰比例较高，灰量较大。按照我国目前有关法规，焚烧炉飞灰需按危险废弃物作专门处置，处置成本较高。需要从减少飞灰量和降低飞灰毒性两个方面入手，探求解决方案，采用多渠道排灰和发展相应排灰安全处置的技术。

3 焚烧过程中二噁英的生成及控制

在防止生活垃圾焚烧处理过程发生新的二次污染的问题上，二噁英无疑是最受关注的一种毒性物质。

近年来的研究表明，在垃圾焚烧过程中二噁英生成的两个主要部位是焚烧炉膛，和焚烧烟气停留过的烟道低温区段。在焚烧炉膛内，如果燃烧组织的不好，既可能直接释放二噁英或生成二噁英，也可能为低温烟道区的再合成提供二噁英的前驱物。关于低温烟道区二噁英的再合成或者以“从头合成”的方式生成二噁英，有学者将这主要归结为飞灰表面的催化作用。

因此，对焚烧烟气二噁英排放的控制，需要采取多管齐下的措施：优化焚烧过程以减少不完全燃烧的二噁英及其前驱物的生成；尽可能避开二噁英烟道再合成的条件，特别是减少烟道飞灰积蓄或遏制其催化作用；在烟气净化装置中，对二噁英进行吸附控制。很显然，优化焚烧过程，能够对二噁英的生成起到釜底抽薪的效果。

3.1 不同焚烧技术对燃烧过程中二噁英生成的控制

近年来，焚烧炉炉膛设计和运行的“3T”原则已被公认为是控制二噁英生成的有效手段，这也符合高效燃烧装置的一般原则。从这一原则出发，我们不难对炉排焚烧炉和循环流化床焚烧炉控制二噁英生成的能力作出比较和判断。

前面的分析已经说明，炉排焚烧炉烟气的特点是湍流度低，炉膛内温度分布比较不均匀：炉排燃烧区正上方温度最高，越往上温度越低；炉排前端垃圾预热区上方温度明显地低于燃烧区上方的温度。在焚烧低品质垃圾时，炉膛内温度不均匀的偏差超过 400～500℃的情况很普遍，“3T”原则只是在平均参数的意义上得到实施。由此引起不完全燃烧和可能生成过量的二噁英类物质，造成焚烧炉初始排放浓度过高[3]，炉排炉烟道后面捕获的飞灰二噁英浓度较高[4]，就是例证。因此，炉排焚烧炉对控制二噁英的生成不力。

与炉排焚烧炉形成强烈对照的是，不同品质的垃圾在循环流化床焚烧炉中都能够得到充分燃烧。在高流化速度及高物料循环流率的共同作用下，紊流度高，沿炉膛高度和各个横截面内温度均匀，温差不大于 100℃，850℃以上的高温区充满整个炉膛上部空间和绝热高温气固分离器，燃烧所需空气供应均匀，烟气在锅炉高温区内的停留时间达到 3～4 秒以上，“3T”原则得到充分实现。因此，循环流化床垃圾焚烧工艺可以有效遏制二噁英类物质产生，垃圾中原来可能存在的二噁英能够完全被分解。典型的飞灰取样分析研究表明，循环流化床焚烧炉飞灰二噁英含量比炉排炉的飞灰低 1 个数量级[5]。国内已建的循环流化床垃圾焚烧项目的焚烧尾气中二噁英类物质的排放浓度均远远低于现行国家有关标准《生活垃圾焚烧污染控制标准》（GB18485-2001）的规定值 1.0 ngTEQ/m^3。

3.2 控制焚烧锅炉尾部二噁英再合成的措施

二噁英可能在烟气离开燃烧区后 250～450℃的低温区段从二噁英前驱物或者直接通过“从头合成”的途径产生。在这一温度区段烟气的停留时间长短和飞灰的催化作用是两个关键因素。对于缩短烟气在相应温度区段停留时间的问题，在焚烧炉设计阶段已经给予了充分重视和保证。对于弱化或抑制飞灰催化作用的问题，一些研究认为，飞灰中的过渡金属氯化物（例如 $CuCl_2$ 和 $FeCl_2$）是关键的催化剂。对运行的焚烧炉的调研还发现，焚烧垃圾时掺烧少量的煤炭，可以减少焚烧炉二噁英的排放。还有，如果向炉内喷石灰石粉进行炉内脱硫，也能显著降低焚烧炉二噁英的排放量。究其原因，是因为煤中少量硫分造成烟气中 SO_2 的存在，或者脱硫后多余活性钙基氧化物的存在，都可能破坏 $CuCl_2$ 和 $FeCl_2$ 的存蓄，进而阻断二噁英在低温合成的条件[6]。因此，向垃圾焚烧炉内掺少量煤助燃和向炉内添加石灰石脱硫，都是抑制焚烧锅炉尾部二噁英低温合成的有效措施。这对于我国循环流化床垃圾焚烧炉已是一种常规运行模式，不增加额外的设备和消耗；对于炉排焚烧炉而言，其实实行起来也不应有任何障碍。

4 技术经济性的综合比较

机械炉排焚烧和循环流化床焚烧技术，都已成功地进入了我国国内城市生活垃圾焚烧处理行业。由于技术本身和发展目标、产业化历史以及应用要求的不同或变化，总体说来两种技术在应用于我国城市生活垃圾焚烧处理时的各项技术经济性能方面也都存在一些差异。表 2 是参照一些文献评述及应用实践，综合考虑技术的先进性、设备可靠性、环境友好程度、技术成熟程度、操作易掌握程

度、市场易获得程度，以及投资强度和运行成本等因素，对这两种市场主流技术的比较，作为对前述技术性能对比的补充，可供项目建设时参考。

表 2　循环流化床焚烧和机械炉排焚烧用于我国城市生活垃圾处理的技术经济性比较

项 目	循环流化床焚烧炉技术	机械炉排焚烧炉技术
单台处理能力	已有 100～500t/d 系列产品	引进设备大、中、小型均有
技术先进性	技术先进：燃料适应性广，对低品质燃料尤具优势。燃尽程度高，热能回收利用发电效率高	燃料适应性较广，垃圾一般不必破碎
成熟程度	发展历史较短，已实现商业化实用；系统及配套工程设计尚待完善和规范	历史悠久，系统成熟；唯对低品质垃圾的燃尽及污控问题，仍待完善
可靠性	炉膛内无运动部件，运行可靠性主要受制于垃圾给料和排渣设备	总体可靠性高；但炉排易损，维护工作量大
环保性能	环境友好：能有效控制 NOx、SO_2和二噁英的生成；飞灰量较大，但能够实现安全处置	对二噁英和其他污染性气体控制力弱，飞灰中二噁英含量高，垃圾渗滤液需另作处理
市场供应情况	我国有自主开发的核心技术，已有成套的制造、建设能力	技术经引进吸收，设备基本实现国产化；唯机械炉排的知识产权仍属外方
技术复杂程度	设备简单，易于生产制造，运行操作要求较高，运行操作人员须经严格培训	炉排制造及运行维护要求严格，运行操作容易掌握
焚烧设备占地	燃烧强度高，占地面积小	炉排燃烧强度低，占地面积大
单位投资强度	4-6 亿元/1000 吨日处理量	6-9 亿元/1000 吨日处理量
运营维护费用	50-100 元/处理 1 吨垃圾	100-200 元/处理 1 吨垃圾

5 结论和建议

1）垃圾焚烧工艺在实现城市生活垃圾的减量化、无害化和资源化处理的目标上有明显优越性，特别是对于土地紧张、经济发达、垃圾处理矛盾突出的城市和地区，具有良好的发展前景。

2）我国混合收集的生活垃圾具有成分复杂多变、热值低、含水率高的特点，所选择的垃圾焚烧技术必须与这些特性相适应。始于引进国外技术的炉排焚烧技术，经过多年的适应性开发，已能连续稳定地焚烧国内垃圾，在国内市场应有一定的地位；同时经过多年自主研发和工程应用，循环流化床垃圾焚烧技术已经走向成熟，实用中显现出燃料适应性广、焚烧充分、二次污染控制力强等优点，具有广阔的应用前景。

3）综合考虑技术的社会、环境和经济效益，鼓励发展具有自主知识产权的先进技术，或引进技术再开发，避免单纯地重复引进技术，这对加强综合国力，提高地区及国家的国际竞争力具有长远的意义。

4）建议加强对焚烧炉飞灰危险毒性监测和鉴别、开发安全有效的资源化处置技术。在这些方面，国际、国内均已有相当工作基础。

参考文献

[1] 高亮，周立，吴树桐. 赴欧洲垃圾焚烧厂考察报告[J].环境卫生工程, 2001，9（2）：84-88.

[2] 苏萍，王国华. 城市生活垃圾焚烧技术发展现状[J]，能源研究与信息，20022，18（3）：134-149.

[3] 刘劲松，刘维屏，罗瑜等. 炉排型城市生活垃圾焚烧炉排气中二污染状况及存在问题[J]，中国环境监测，2005，21（4）：46-48.

[4] 陈彤，李晓东，严建华等. 垃圾焚烧炉飞灰中二噁英的分布特性[J]，燃料化学,2004，32（1）：59-64.

[5] 杨志军，倪余文，张智平等，不同垃圾焚烧炉产生的 PCDD/Fs 和 PCBs 同类物的分布[J]，环境化学,2005，24（1）：63-67.

[6] 钱永，郑明辉，刘文彬等，钙化合物对前生体生成二噁英类的阻滞作用[J]，环境化学，2005，24（6）：633-637.窗体底端

生活垃圾卫生填埋渗滤液处理进展

赵由才
同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室，上海 200092

一、我国生活垃圾填埋场、堆放场渗滤液处理现状

我国现有 700 座中等规模以上的城市，2400 多座县城，以及 31000 座小镇。在这些城镇里，居住着 3.5 亿居民。按照每天每人日产生活垃圾 1 千克计，每天可产生 35 万吨生活垃圾，而 1 年就是 1.3 亿吨。如果加上市郊居民，城市居民人口估计有 4 亿以上，每天产生活垃圾 40 万吨，年产生活垃圾超过 1.5 亿吨。生活垃圾经过适当压缩后，比重在 0.8 吨/立方米。因此，1.5 亿吨生活垃圾相当于 1.9 亿立方米。

根据作者的估算，这些生活垃圾平均每天可产生渗滤液 12 万吨以上。据建设部 2002 年统计，我国 90％以上的生活垃圾采用填埋或堆放的方法处置。就填埋场来讲，目前我国有生活垃圾填埋场 712 座（其数量还在迅速增加），日产渗滤液 4－8 万吨，如果按照 COD 计算，这些渗滤液相当于 80－160 万吨生活污水，其中经过处理而达到国家二级排放标准(COD ＜ 300 mg/L)的渗滤液比例不高于 10％，达到国家一级排放标准(COD ＜100 mg/L)的渗滤液比例不高于 1％（只有 6 个填埋场达到一级排放标准，其采用的深度处理方法有反渗透或活性炭吸附等），绝大部分填埋场没有建设渗滤液处理设施，渗滤液任意排放到周围环境中去，严重污染土壤、地表水和地下水。

然而，即使那些少数建设了渗滤液处理设施的填埋场，由于渗滤液处理所用的是生活污水的处理工艺而不适合于渗滤液的特点，流程长，管理复杂，处理效果差，运行困难，处理成本偏高，填埋场难于接受，大部分处理设施处于停顿状态。近 2 年来所建设的大部分生活垃圾填埋场基本上缓建渗滤液处理设施，已经有渗滤液处理设施的填埋场，也急需对现有设施进行改造。

可以认为，我国生活垃圾填埋场渗滤液处理率极低，对填埋场周围环境污染严重，问题很多，渗滤液处理难已经严重制约我国生活垃圾处理技术的发展，严重影响填埋场的正常运行。可以认为，全国各地的填埋场均等待着高效、低成本的渗滤液处理方法的诞生。

二、渗滤液的危害

根据赵由才教授的研究结果，即使渗滤液的 COD<100 mg/L，其毒性仍然非常大。亚急性和亚慢性试验结果表明，垃圾渗滤液能诱发小鼠骨髓嗜多染红细胞微核的形成，且呈现明确的浓度（CODCr）-效应关系。垃圾渗滤液可诱发小鼠骨髓嗜多染红细胞微核的形成，在亚急性染毒条件下，其 CODcr 阈值为 10mg/L；在亚慢性染毒条件下，其阈值降至 5mg/L。在低 CODcr 浓度（5mg/L）下，随着处理时间的延长，染毒组小鼠的微核率和微核细胞率均有非常显著的增加，说明垃圾渗滤液与机体接触的时间越长，引起细胞遗传损伤所需的浓度就越低。短期低浓度垃圾渗滤液对微核的诱发未见性别异常，但短期较高浓度或长期低浓度垃圾渗滤液诱发微核的效应存在性别差异。雌性小鼠的微核率和微核细胞率均显著高于雄性小鼠，表明雌性小鼠对垃圾渗滤液的敏感程度高于雄性小鼠。据此推测，如果人与动物长期饮用受低浓度垃圾渗滤液污染的水，就有可能引起体内靶组织和靶细胞遗传物质损伤。且这种损伤由于性别的不同而呈现一定的差异。具体来讲，把 COD 为 5 mg/L 的渗滤液喂养小老鼠，5 天后，小老鼠就发疯，直至死亡。

垃圾渗滤液对鲫鱼肝脏中的 CAT 和 SOD 活性的综合作用效果对渗滤液 CODcr 浓度和染毒时间具有双重依赖性。短时间或者较长时间低浓度暴露，对 CAT 和 SOD 的活性均会产生诱导，此时说明水体已经受到渗滤液的污染，但污染还达不到对鱼类的生存造成危害的程度；随着染毒时间的延长或浓度的增加，上述诱导作用会减弱，此时鱼类自身的防御机制开始遭到破坏，对鱼类开始产生危害，但并不影响其正常生存；当高浓度长时间暴露时，酶活性受到抑制，鱼类自身的防御机制遭到不可逆的破坏，此时渗滤液对鱼类产生了危害。因此，通过鱼肝脏 CAT 和 SOD 活性的变化，不仅可提示环境污染物的作用机理，而且可以作为垃圾渗滤液在对水生生态系统早期污染和轻度污染发生时的警示。总的来讲，渗滤液 COD>40 mg/L 时，1 周以后，鲫鱼的生长就受到严重影响，直至死亡。

垃圾渗滤液对大麦的毒性作用与渗滤液中有机污染物的含量（CODcr）有直接的关系，相关系数 R 在 0.82-0.99 之间。垃圾渗滤液及其不同工艺出水 CODCr 值与其对大麦种子萌发的毒性、根尖细胞分裂的抑制作用及诱发大麦根尖细胞的遗传损伤程度呈正的线性相关。而大麦幼苗生长状况与

CODCr 值呈负的线性相关。COD 为 100 mg/L 的渗滤液浇灌大麦种子，发芽率等指标严重受到影响。

就不同工艺渗滤液出水对大麦各生物学指标产生毒效应的 CODcr 阈值进行等级划分，通过综合分析可知，经过有机膨润土和曝气处理后的渗滤液对植物的毒性较低，而活性炭处理出水对植物的毒性较大，渗滤液原水或经过厌氧处理后的出水对植物的毒性介于二者之间。上述结果说明有机膨润土和曝气处理这两种处理工艺可有效降低能够引发植物毒性的有机污染物，有利于降低渗滤液的毒性。而活性炭虽然可以有效的降低渗滤液的 CODcr 值，但是对水中具有植物毒效应的有机污染物的去除效果并不理想。厌氧处理对水中的有机污染物基本没有去除效果。

渗滤液臭味大，任意排放将导致受接触的农作物枯萎或死亡。由于渗滤液污染而引起的群众纠纷越来越多。福建泉州、重庆万州等生活垃圾填埋场渗滤液污染周围水体引起群众不满和纠纷就是典型例子。在重庆万州生活垃圾填埋场，由于渗滤液调节池太小，夏季暴雨季节导致渗滤液外溢流入填埋场下游河流，致使饮用该河流的群众出现严重皮肤疾病。这种例子很多。

三、渗滤液处理方法

（一）与城市生活污水合并处理

根据国家有关标准，渗滤液处理到 COD<1000 mg/L, BOD<600 mg/L, SS<400 mg/L 时，即可排入城市生活污水处理厂合并处理。但不同的城市，对进入生活污水处理厂的渗滤液水质要求差别较大，如要求 COD<300 mg/L, BOD<150 mg/L, SS<200 mg/L（即国家二级排放标准）。

由于渗滤液处理长期无法解决，许多城市花巨资建设渗滤液输送管道，把渗滤液送入城市生活污水处理厂，如福州、成都等城市。

渗滤液处理方法根据是否可以就近接入城市生活污水处理厂处理，相应分成两类，即合并处理与单独处理。所谓合并处理就是将渗滤液引入附近的城市污水处理厂进行处理，这也可能包括在填埋场内进行必要的预处理。这种方案以在填埋场附近有城市污水处理厂为必要条件，若城市污水处理厂是未考虑接纳附近填埋场的渗滤液而设计的，其所能接纳而不对其运行构成威胁的渗滤液比例是很有限的。通常认为加入渗滤液的体积不超过生活污水体积 0.5%时都是安全的，而根据不同的渗滤液浓度，国外研究证明这个比例可以提高到 4－10%，最终的控制标准取决于处理系统的污泥负荷，只要加入渗滤液后污泥负荷不超过 10%就是可以接受的。

虽然合并处理可以略微提高渗滤液的可生化性，但由于渗滤液的加入而产生的问题却不容忽视，主要包括污染物质如重金属在生物污泥中的积累影响污泥在农业上的应用，以及大部分有毒有害难降解污染物质如 TOX 等并没有得到有效去除而仅仅是稀释过程后重新转移到排放的水体中，进一步构成对环境的危胁。因此目前国外相当一部分专家不提倡合并处理，除非城市生活污水处理厂增加三级深度处理的工艺。

（二）渗滤液单独处理

绝大部分填埋场远离市区，铺设专门管道是不现实的，因此，渗滤液独立处理是最重要的方式。

渗滤液单独处理方案按照工艺特征又可分为生物法、物化法、土地法以及不同类别方法的综合，其中物化法又包括混凝沉淀、活性炭吸附、膜分离和化学氧化法等，混凝沉淀主要是用 Fe^{3+}或 Al^{3+}作混凝剂；粉末活性炭的处理效果优于粒状活性炭；膜分离法通常是运用反渗透技术；化学氧化法包括用诸如臭气、高锰酸钾、氯气和过氧化氢等氧化剂、高温高压条件下的湿式氧化和催化氧化（例如臭氧的氧化率在高 pH 和有紫外线辐射的条件下可以提高）。

与生物法相比，物化法不受水质水量的影响，出水水质比较稳定，对渗滤液中较难生物降解的成份，有较好的处理效果；土地法包括慢速渗滤系统（SR）、快速渗滤系统（RI）、表面漫流系统（OF）、湿地系统（WL）、地下渗滤处理系统（UG）及人工快渗处理系统（ARI）等多种土地处理系统，主要通过土壤颗粒的过滤、离子交换吸附、沉淀及生物降解等作用去除渗滤液中的悬浮固体和溶解成分。土地法由于投资费用省，运行费用低，从生命周期分析的角度来看是最有价值去大力研究开发的处理方法。

垃圾填埋场产生的渗滤液之处理一直是世界上公认的难题。生物法是渗滤液处理中最常用的一种方法，由于它的运行处理费用相对较低，有机物被微生物降解主要生成二氧化碳、水、甲烷以及微生物的生物体等对环境影响较小的物质（甲烷气体可作为能量回收），不会出现化学污泥造成二次污染的问题，所以被世界各国广泛采用。生物法处理渗滤液的难点是氨氮的去除。本文认为，沿用传统的生活污水处理工艺处理渗滤液是很困难的，继续朝着这个方向研究渗滤液处理技术也是很难取得突破性进展的。以下重点介绍几种有发展前景的生物处理方法。

1　矿化垃圾生物反应床处理法

我国在填埋场和堆场填入的垃圾达几千万吨。当中的一些垃圾经多年的降解后,基本上达到了稳定化状态，因而被称为矿化垃圾。这些矿化垃圾的资源非常充足，其利用对于垃圾资源化和填埋场土地利用均有重要意义。矿化垃圾中的微生物就可以用来降解和处理外来有机物，这些微生物的生存和降解能力非常强，可降解诸如纤维素、半纤维素、多糖和木质素等难降解有机物，没有恶臭味道，可自然晾干而不产生渗滤水。外观特征类似于腐殖质，呈微颗粒状，质地疏松，具有无数极微孔隙，具有很大的表面积，因此是一种性能非常优越的生物介质，只要条件合适，完全可用来降解废水中的有机物。矿化垃圾中微生物数量高于一般肥沃黑土壤1000倍以上。

自 1995 年以来，同济大学赵由才课题组就利用矿化垃圾含有大量的具有很强生存和降解能力的微生物的特性，以矿化垃圾为生物填料制造出矿化垃圾生物反应床，并用这种反应床处理渗滤液、畜禽废水等。采用矿化垃圾生物反应床可有效处理渗滤液，COD 从 2000-10000 mg/L、BOD 1000-10000 mg/L、NH_3-N 250-1500 mg/L、BOD/COD0.2-0.7 分别降低到 300－500、60-150、0-25 mg/L，去除率达到 90-99%以上。表 1 是矿化垃圾生物反应床处理 100 吨/天渗滤液的典型出水。通过对机理的研究，发现有机污染物先被矿化垃圾的表面和内表面吸附，在微生物的作用下，被吸附的有机物发生降解，腾出的表面又吸附有机污染物。如此循环下去，从而达到了渗滤水的净化效果。矿化垃圾生物反应床的最大处理量就是保持吸附和降解达到平衡所允许的废水进水量。

表 1　　各级矿化垃圾生物反应床处理渗滤液的典型结果

进水水质	COD_{Cr} (mg/L)	10100－12000
	BOD_5/COD_{Cr} 值	0.21－0.35
	氨氮 (mg/L)	1010-1800
连续运行时间		3.8 年
第一级出水水质	COD(mg/L)	2580－3200
	BOD_5/COD_{Cr} 值	0.20－0.34
	氨氮 (mg/L)	348-450
第一级 COD 去除率 (%)		70-75
第一级氨氮去除率 (%)		61-65
第二级出水水质	COD_{Cr} (mg/L)	550-750
	BOD_5/COD_{Cr} 值	0.15-0.23
	氨氮 (mg/L)	100-120
第二级 COD 累计去除率 (%)		75－82
第二级氨氮累计去除率 (%)		66－85
第三级出水水质	COD_{Cr} (mg/L)	250-350
	BOD_5/COD_{Cr} 值	0.10-0.20
	氨氮 (mg/L)	10-20
第三级 COD 累计去除率 (%)		97－98
第三级氨氮累计去除率 (%)		95－99

矿化垃圾生物反应床处理渗滤液技术已经在全国得到应用，包括上海市老港填埋场（100吨/天渗滤液和400吨/天渗滤液两座反应床）、山东即墨生活垃圾填埋场（70吨/天渗滤液）、山东蓬莱生活垃圾填埋场（70吨/天渗滤液）等。越来越多填埋场正在准备采用本技术处理渗滤液。

矿化垃圾生物反应床处理渗滤液的吨投资2万元，吨运行费4元（二级国家排放标准）或2元（国家三级排放标准）。运行管理十分简单方便。

2　厌氧生物处理法

处理渗滤液的生物法可以分好氧处理和厌氧处理两大类，具体的方法有稳定塘、生物转盘、厌氧生物滤池、上流式厌氧污泥床等。厌氧生物处理法只能作为渗滤液预处理方法，其出水远未达到二级排放标准。

（1）上流式厌氧污泥床（UASB）

UASB 反应器的反应区一般高 1.5～4m，其中充满高浓度和高生物活性的厌氧污泥是其高效工作的基础。反应区内厌氧微生物分别以游离污泥、絮状污泥和颗粒污泥三种形态存在。正常的 UASB 反应器内，反应区的污泥沿高程呈两种颁布状态：下部 1/3～1/2 的高度范围内，主要堆集着颗粒污泥和絮状污泥，即便因进水水力作用使污泥粒子以紊动的形式存在，但相互之间距离很近，几乎呈搭接之势。在这个区域内的污泥浓度高达 40～80gVSS/L，通常称为污泥床层。污泥床层是去除污水中可生物降解的有机物的主要场所，约占去除总量的 70～90%。污泥床层以上约占反应区总高度 2/3-1/2 的区域内悬浮着粒径较小的絮状污泥和游离污泥，污泥粒子之间保持着较大的距离，相应污泥浓度也较小，平均约 5～25gVSS/L。这个区域通常称为污泥悬浮层，它是防止污泥粒子流失的缓冲层，其生物处理的作用并不明显，被降解的有机物约占去除总量的 10～30%。在污泥床层和悬浮污泥层之间通常存在着一个浓度突变的分界面，被称为污泥层分界面，它的存在及高低和废水的种类。出水及出气等条件有关。

（2）厌氧生物滤池

厌氧生物滤池是世界上最早的废水厌氧生物处理构筑物之一，是厌氧生物膜法的代表工艺之一。它是利用附着在载体表面的厌氧微生物所形成的生物膜净化废水中有机物的一种生物处理方法。

厌氧生物滤池根据进水点位置的不同，分为升流式厌氧生物滤池和降流式厌氧生物滤池两种。无论哪种厌氧生物滤池其构造均类似于好氧生物滤池，包括池体、滤料、布水设备及排水（泥）设备等。不同之处在于厌氧生物滤池内部是一个封闭的系统，其中心构造是滤料，滤料的形态、性质及其装填方式对滤籽的净化效果及运行有着重要的影响。对于滤料不但要求结构坚固、耐腐蚀，而且要求有较大的比表面积。因为滤料是厌氧微生物形成和固着的部位，所以要求滤料表面应当比较粗糙便于挂膜，又要有一定的孔隙率以便于污水均匀地流过，同时通过近年来厌氧生物滤池的运行实践表明，滤料的形状及其在生物滤池中的装填方式等对运行效能也的很大的影响。

厌氧生物滤池的工作原理与好氧生物滤池的也相似，只不过发挥作用的是厌氧微生物而不是好氧微生物。在厌氧生物滤池的工作过程中，有机废水通过挂有厌氧生物膜的滤料时，废水中有机物扩散到生物膜表面，并被生物膜中的厌氧微生物降解产生生物　气。净化后的废水通过排水设备排至池外，所产生的生物气被收集。由于厌氧生物滤池的种类不同，其内部的流态也不尽相同。升流式厌氧生物滤池的流态接近于平推流，纵向混合不明显。降流式厌氧生物滤池一般采用较大回流比操作，因此其流态接近于完全混合。

厌氧生物滤池中存在着大量兼性厌氧菌和专性厌氧菌。除此之外还会出现不少厌氧原生动物。这些原生动物中主要有 Metopus, Saprodinium, Urozona, Trimyema 及微小的鞭毛虫等。研究结果表明，厌氧原生动物约占厌氧生物滤池中生物总量的 20%。厌氧原生动物的作用主要是捕食分散的细菌，这样不仅可以提高出水水质，而且能够减少污泥量。

3　好氧生物处理法

渗滤液厌氧处理后，一般再经过好氧处理以进一步降低污染物浓度。大量实践经验表明，渗滤液经过厌氧处理——好氧处理后，无论好氧处理段的曝气时间多长，出水 COD 600-800 mg/L 左右，很难再下降。也许，COD 600-800 mg/L 是渗滤液生物处理的极限，进一步削减就必须依靠反渗透或活性炭吸附等技术。

（1）稳定塘

稳定塘俗称氧化塘，包括厌氧塘、兼性塘、曝气塘和好气塘。稳定塘最初用于城市生活污水的处理，在生活垃圾渗滤液处理中运用稳定塘技术也取得了较好的效果。

厌氧塘水深通常 3－5m，主要利用厌氧微生物降解水中的有机物，其表面负荷可以是好氧塘的几十倍，但出水水质不好。厌氧微生物降解有机物的过程大体上可分为产酸阶段和产甲烷阶段。大分子有机物首选被产酸菌分泌的胞外酶水解之后变成小分子，再被微生物摄取进入体内，代谢之后形成有机酸排出体外，即所谓产酸阶段；在产甲烷阶段先由产氢产乙酸菌将有机酸转化成氢气和乙酸，然后再由专性的甲烷菌利用乙酸和氢气生成甲烷气体，完成有机物的碳化过程，厌氧塘中部分有机物因转化成甲烷气体释放到空气中去而被去除；兼氧塘一般深度为 1.0～1.5m，水体上层生活着好氧菌和藻类，中层生活着可在有氧和无氧两种情况下生活的兼性菌，底层生活着绝对厌氧的细菌，在它们的共同作用下，可以更有效地降解有机物；曝气塘则通过人工强化的曝气过程提高污水的溶解氧，在好氧微生物的作用下加速污染物的去除。有机物代谢后生成二氧化碳和水，部分转变成微生物的细胞物质，或者沉入塘底形成底泥，或者随出水排出；好气塘是一类完全依靠藻类光合作用供氧的塘。为了使阳光透射到池塘底部，以便藻类在整修塘内维持光合作用，所以好气塘通常

都是一些很浅的池塘，塘深一般为30～40cm，常用水力停留时间为3～5天。

（2） 生物转盘

生物转盘是所谓固定生长系统生物膜法中的一种，运用于常规的污水处理中可有效地解决活性污泥法的污泥膨胀问题，并且由于膜上生物量大，生物相丰富，既有表层的好氧微生物，又有内层的厌氧微生物，所以还具有脱氮作用。

（3）活性污泥法

传统活性污泥法处理渗滤液时会遇到NH_4^+－N、影响活性污泥正常生长的问题。低氧－好氧两段活性污泥法处理填埋场垃圾渗滤液，最终出水COD_{cr}、BOD_5和SS的平均值分别达到226.7 mg/l、13.3 mg/l和27.8 mg/l，总去除率分别为96.4%、99.6%和83.4% 。两段法的负荷分别达到：低氧段1.34kg COD_{cr}/kgMLSS/d，0.76kg BOD_5/kgMLSS/d；好氧段0.31 kg COD_{cr}/kgMLSS/d，0.07 kg BOD_5/kgMLSS/d，明显优于普通的活性污泥法。

通过镜检可以观察到低氧段内活性污泥生物相的主体是夹杂有丝状菌的菌胶团，但也发现少量不活泼的钟虫和钟虫游泳体，这可能是由于溶解氧的波动偏高形成的。好氧段内污泥生物机与传统活性污泥法相似，除有多种菌团外，原生动物有草履虫、变形虫、楯纤虫等种类相对较少但数量很多；后生动物有轮虫和线虫，数量也很多。

4 生物法评述

利用生物法处理渗滤液不能照搬生活污水生物法处理的方法，其自身特性要引起高度重视：

（1）渗滤液水质和水量变化大。

（2）曝气处理过程中会产生大量的泡沫。

（3）由于渗滤液浓度高，生物处理过程需要较长的停留时间，由此引起的水温低的问题会对处理效果产生较大影响。

（4）渗滤液输送过程中某些物质的沉积有可能造成管道堵塞。

（5）渗滤液中磷的含量较低。

（6）在老的填埋场中BOD_5较低而NH_4－N较高，所以通常的作法是先通过吹脱去除高浓度的NH_4－N再利用生物法去除有机物。

（7）氯代烃的存在可能对处理效果产生影响。

渗滤液作为高浓度难降解的污水，要达到日益严格的排放标准，单纯用生物法是很难达到目的的。一般是将生物法作为后序工艺的预处理，先去除大部分可生化降解有机物，再与絮凝沉淀或活性炭吸附或膜分离工艺结合，才能达到排放标准。

生物法中，好氧工艺的活性污泥法和生物转盘的处理效果最好，停留时间较短，但工程投资大，运行管理费用高，相比来说稳定塘工艺比较简单，投资省，管理方便，只是停留时间长，占地面积大，但作为一项成熟的渗滤液处理技术，由于能够把厌氧和好氧塘相结合，分别发挥厌氧微生物和好氧微生物的优势，是应该优先考虑的好氧生物处理工艺。厌氧处理工艺近年来发展很快，特别适合于高浓度的有机废水，它的缺点是停留时间长，污染物的去除率相对较低，对温度的变化比较敏感，但通过研究表明厌氧系统产生的气体可以满足系统的能量需要，若将这部分能量加以合理利用，将能够保证厌氧工艺有稳定的处理效果，还能降低处理费用，是很有前途的处理工艺，特别是UASB工艺，由于负荷率大幅提高，停留时间缩短，也是一种优选的生物预处理工艺。

5 絮凝沉淀工艺

大量研究证明，生物预处理后的渗滤液利用絮凝沉淀工艺时（利用铁盐或铝盐作絮凝剂），COD_{cr}的去除率可以达到50%，反应过程中最佳的pH值对于铁盐和铝盐分别为4.5－4.8和5.0-5.5，而且这两种絮凝剂的去除效率以及不同的搅拌方式之间没有明显的差异。最小的加药量在250-500g(Fe或Al)/m^3渗滤液之间，其中铁盐的加药量与理论加药量很接近。

硫酸铝、氯化铝、七水合硫酸亚铁、三氯化铁、聚合硫酸铁（PFS）、聚合氯化铝（PAC）、聚合铝铁处理生物处理后的尾水，结果见表2。这些混凝剂的浓度均为1000 mg/l。

表2 不同种类无机混凝剂处理低浓度渗滤液作用的对比（原水COD_{cr}=444.5mg/l）

混凝剂	PAC	PFS	聚合铝铁	硫酸铝	硫酸铁	三氯化铝	三氯化铁
COD_{cr}（mg/l）	375.0	361.2	363.3	425.8	425.8	378.9	359.4

注：未调节pH值

表2数据显示无机高分子混凝剂和无机低分子混凝剂对经过生物预处理后的低浓度渗滤液的处理效果相似，而高分子混凝剂的价格远远高于低分子混凝剂，所以推荐选择低分子无机混凝剂三氯

化铁，它形成的絮体沉降性能好，处理低温水和低浊水的效果比铝盐好，但处理后水的色度比铝盐高。另外，虽然混凝剂的投加剂量很大，但 COD_{cr} 的去除率并不高，这主要是因为经过生物预处理后的低浓度渗滤液中悬浮颗粒含量很低，而混凝剂主要去除含悬浮颗粒的胶体溶液，对溶解性有机物的去除效果较差。当调节原水 pH 在最佳的 5 左右时，以及三氯化铁的最佳投加量 1200 mg/l 时，COD_{cr} 的去除率可以达到 48%，与国外研究者所得结论基本相同。

三氯化铁混凝剂的作用机理以静电中和以及卷扫作用为主，当胶体浓度很低时，常以卷扫机制去除水中胶粒。生物预处理后的低浓度渗滤液以溶解性有机物为主，浊度很低，所以卷扫机制发挥主要作用，三氯化铁的投加量必须超过氢氧化物的溶度积，由水合铁离子在水解聚合生成氢氧化物沉淀过程中的中间产物，即铁的单核或多核羟基配离子引起胶体脱稳，然后再由铁的氢氧化物沉淀的卷扫作用将其去除。

为了提高去除效率，尝试用阴离子型聚丙烯酰胺（PAM）作助凝剂，当 PAM 的投加量为 1 mg/l 时 COD_{cr} 的去除率从 21.9%提高到 29.2%，升高了 7.3%。而当 PAM 的投加量继续增加时，COD_{cr} 的去除率反而下降，这是由于过量的 PAM 使高聚物的线性结构相互缠绕，反而减少了线性结构上的活性吸附位点，吸附架桥作用相应削弱。

通过对比阳离子有机高分子絮凝剂（阳离子型聚合胺，商品名 Dyeflock-EF，由希腊 Aristotle 大学提供）与普通无机低分子混凝剂三氯化铁的处理效果证实，两者对低浓度难降解渗滤液中溶解性有机物的最高去除率相似，均在 25%左右，但在相同 COD_{cr} 去除率下，阳离子型聚合胺的投加量远远低于三氯化铁（前者的最佳投加量为 360 mg/l 而后者则需要投加 1200 mg/l）。另外阳离子聚合胺还据有较好的脱色作用，表 3 反映投药量与出水色度之间的关系。

表 3　　投药量与出水色度（原水色度为 200 倍）

阳离子型聚合胺（mg/l）	120	240	360	480	600
色度	110	90	75	55	40

当阳离子型聚合胺的投加量为 600 mg/l 时，色度的去除率可达到 80%，但考虑到投加量过高反而使 COD_{cr} 的去除率下降，所以推荐的投加量为去除 COD_{cr} 的最佳投加量 360 mg/l。

絮凝沉淀工艺的不足之处是会产生大量的化学污泥；出水的 pH 值较低，含盐量高；氨氮的去除率较低。所以即使有可观的处理效率，在选用时还是要慎重考虑。

7　膜分离工艺

渗滤液后处理中经常采用反渗透工艺，因其能够去除中等分子量的溶解性有机物，早期利用醋酸纤维膜进行的试验表明，COD 的去除率可以超过 80%，虽然在运行过程中存在膜污染问题，但反渗透工艺作为后处理工艺设在生物预处理后或物化法之后，负责去除低分子量的有机物、胶体和悬浮物，可以提高处理效率和膜的使用寿命。

一级反渗透工艺可使 COD、BOD 和 AOX 的去除率 80%，但是氨氮和氯离子的去除率要达到较高水平则至少需要二级反渗透工艺。表 4 为 A-G 不同填埋场的渗滤液经过一级或二级反渗透处理后各种污染物的浓度。

表 4　　一级或二级反渗透处理后各污染物的浓度

参量（mg/L）		平行试验						
		A	B	C	D	E	F	G
COD	进水	4855	8620	2690	1540	7340	1990	7300
	一级出水	29.5	570	64	42		128	130
	二级出水		<10		<5		33	15
BOD_5	进水	300	2760		147	2700	540	2100
	一级出水	<10	51		4	135	67	28
	二级出水		<20		<2	27	15	<5
AOX	进水	5.2	1.4	1.6	1.2	27	1.02	1.5
	一级出水	0.11	0.15	<0.1	0.22	1.4	0.22	0.2
	二级出水		<0.05		<0.05	0.2	0.05	
NH_4	进水	1708	620	834	680	5200	795	1300
	一级出水	88	135	201	240	1800	245	270
	二级出水		<20		40	180	63	<10

C1	进水		1050		1960			3010
	一级出水		285		940			620
	二级出水		<20		18			<20

总之，反渗透工艺因其在渗滤液处理方面的高效性、模块化和易于自动控制等优点，应用得越来越多，但其如下缺点也要引起重视：

（1）小分子量的物质的截留效率还不尽人意（例如氨、小分子的 AOX 物质等）。

（2）高浓度的有机物或无机可沉降物容易造成污染膜或在膜表面结垢等问题。

（3）由于操作压力很高（30－50ba）造成能耗很高。

（4）反渗透浓液的处理是最大的困难，将其回灌到填埋场中已经不可取了，因为浓液的污染物浓度很高，非常危险的废物。目前多采用蒸发和干燥的方法，但费用很高。

8 化学氧化工艺

化学氧化工艺可以彻底消除污染物，而不会产生絮凝沉淀工艺中形成的污染物被浓缩的化学污泥。该工艺常用于废水的消毒处理，而很少用于有机物的氧化，主要是由于投加药剂量很高而带来的经济问题。对于渗滤液中一些难控制的有机污染物，化学氧化工艺可以考虑使用。

常用的化学氧化剂有氯气、次氯酸钙、高锰酸钾和臭氧等。用次氯酸钙作氧化剂时 COD 的去除率不超过 50%；用臭氧作氧化剂时，没有剩余污泥的问题，COD 的去除率也不超过 50%，而且对于含有大量的有机酸的酸性渗滤液使用臭氧作氧化剂不是很有效的，因为有机酸是耐臭氧的,相应就需要很高的投加剂量和较长的接触时间。过氧化氢作氧化剂时因为可以去除硫化氢而主要用来除臭气，加药量一般每一份溶解性的硫要投加 1.5-3.0 份的过氧化氢。

两种常见的氧化剂高锰酸钾和次氯酸钠处理生物预处理后低浓度渗滤液的效果见表 5。

表 5　氧化剂投加量与渗滤液出水的色度（原水色度为 200 倍）

高锰酸钾		次氯酸钠	
投加量（mg/l）	出水色度（倍）	投加量（CODcr）	出水色度（倍）
100	100	10	4
200	60	15	3
300	40	20	2
400	35	25	1
500	25	30	1

当高锰酸钾投加量为 500 mg/l 时，色度的去除率可达 87.5%，然而当高锰酸钾投加量过高时，其在渗滤液中的残留会对色度造成一定的影响。次氯酸钠的脱色作用则更佳，其处理后的出水接近自来水的色度，随着次氯酸钠投加量的增加，色度的去除率也增加，当投加市售有效氯浓度为 5.2%的次氯酸钠 10ml 时，原水色度为 200 倍的低浓度渗滤液色度的去除率高达 98%，投加量达到 25ml 时色度的去除率则达到 99.5%，可见次氯酸钠完全可以解决渗滤液排放的色度问题。

高锰酸钾作为氧化剂处理低浓度渗滤液时，并不是将有机物全部氧化成二氧化碳和水，而是将一部分如腐殖质类的复杂有机物氧化成分子量较小的有机物。高锰酸钾在酸性介质中是强氧化剂，而在中性、碱性介质中都为弱氧化剂。生物预处理后低浓度的渗滤液属于中性和弱碱性，因此高锰酸钾氧化时的产物是二氧化锰。由于二氧化锰在水中的溶解度很低，因此产物以水合二氧化锰胶体的形式从水中析出，正是由于水合二氧化锰胶体的作用，使其在中性条件下具有很高的除微污染物的效能，所以在处理这类低浓度渗滤液时高锰酸钾虽不能发挥坚强的氧化作用，但由于水合二氧化锰胶体的形成，仍能取得较好的效果：一方面，二氧化锰是许多反应的催化剂，有试验表明，对高锰酸钾氧化有机物的催化作用也很明显。另一方面，新生成的水合二氧化锰胶具有很大的表面积，能吸附水中的有机物，所以水合二氧化锰胶体对大多数污染物，应该兼有催化氧化和吸附两种作用。对某种易被氧化的小分子量的有机物而言，催化氧化的去除作用可能大一些，而对大分子量不易被氧化的有机物则吸附的作用会大一些。实验表明采用高锰酸钾作氧化剂处理生物预处理后低浓度的渗滤液时，CODcr 的去除量与高锰酸钾投加量之间存在线性关系，即高锰酸钾与有机物之间的反应为一级反应，每 1mg 高锰酸钾可与 0.3mg CODcr 反应。

次氯酸钠的浓度常用有效氯的浓度来表示，经换算，1g 次氯酸钠等于有效氯 0.953g。实验表明次氯酸钠的投加量与 CODcr 的去除量之间也存在线性关系，投加 1mg 次氯酸钠相应可以去除 0.3mg 的 CODcr，与高锰酸钾去除 CODcr 的量相当。而在相同投加量的条件下，次氯酸钠转移电子的量是高锰酸钾的 1.5 倍，可以推测，在次氯酸钠的氧化过程中有一部分大分子的有机物仅仅被分解成小

分子的有机物，未被彻底去除。次氯酸根离子在被还原的过程中，极易得到电子，溶液中次氯酸根离子与氢离子结合，形成很小的次氯酸中性分子，而次氯酸的氧化性远高于次氯酸根（它们的电极电位分别是 1.49V 和 0.9V）。

湿式氧化法的基本原理是废水在高温（350℃）和高压（250bar）的条件下与氧气反应，氧化能力随着温度的增加而增加。主要的问题是处理费用太高。

9　组合工艺

前面分别论述的渗滤液处理技术（生物法、物化法以及土地法）均有各自的特点，但也存在不足之处：生物法虽然运行成本较低，工程投资也可以接受，但系统管理相对复杂，且对渗滤液中难降解有机物无能为力，所以一般用作高浓度渗滤液的预处理；物化法则能有效去除难降解有机物，但有的工艺工程投资极高（如膜分离的反渗透工艺），有的工艺处理成本较高（如化学氧化法），同时还存在化学污泥和膜分离浓液的二次污染问题，因此常用作生物预处理后的渗滤液后处理；土地法具有投资省，运行管理简单，处理成本低等诸多优点，但因其最终出水难以达标，仍然需要与其它工艺组合后应用。所以新建填埋场渗滤液处理处理厂一般采用组合工艺形式。

在国外一些国家，填埋场作为最终处置的方法，是无更好的处理方法而不得已采取的最后的一种方法。如欧洲（瑞士），则禁止有机物含量＞5%的废物进入填埋场。而结合我国国情，由于它的建设投资少、技术要求不高等优点，仍是较实际可行的处置方式。

由于在场底防渗、渗滤液处理和垃圾覆盖等方面存在问题，国内许多填埋场还没有达到严格意义上的卫生填埋。通过前面介绍的几类有代表性的渗滤液处理工艺，我们可看出，处理渗滤液的关键问题是解决水质水量变化大、NH_3-N 含量高、有机污染物含量高和含大量难以生物降解的有机物等问题。大部分的垃圾渗滤液处理技术是以生化处理为主，生化与物化相结合的。在一定程度上解决了渗滤液的污染问题，但是由于渗滤液水质水量变化大的特点，使出水达不到排放标准，这是较普遍的状况，也是较难解决的问题。可通过设置一些构筑物如较大容量的雨水调节池或雨污分流等来减少降水的渗入量，从而减少渗滤液的产生量。

目前卫生填埋场面临的最大挑战是如何降低居高不下的渗滤液处理成本和提高处理效率的问题。渗滤液初始浓度 COD 达 10000 －50000 mg/L，而国家排放标准为 COD<100 mg/L (一级)或 COD<300 mg/L （二级）。全国绝大部分填埋场的渗滤液处理均未达到国家二级排放标准。而许多城市要求渗滤液处理应该达到一级排放标准。据有关资料统计，要使渗滤液处理达到一级国家排放标准，吨处理费用至少在 50～100 元以上。

渗滤液是世界公认的较难处理的高浓度有机废水之一，因各地的水质千差万别，成份极为复杂，很难有通行世界的渗滤液处理技术和工艺。组合工艺虽然能使渗滤液在处理后达到或接近日益严格的渗滤液处理排放标准，但高额的费用对于不发达的地区仍然很难接受，发展以土地法为基础的简单经济实用的渗滤液处理技术将具有重大的现实意义。

需要指出的是，渗滤液与生活污水混合处理技术的应用在不同地区是持不同态度的。许多研究结果已经证明，由于停留时间太短（4-5 小时），渗滤液中的难降解有机物在生活污水处理厂也是无法降解的。因此，把渗滤液混入生活污水中，实际上是一种稀释作用

四、渗滤液处理国内外发展动态

对于正常的渗滤液，任何传统的生物处理方法均无法达表 6 的国家标准《生活垃圾填埋污染控制标准》(GB16889-1997）规定的一级和二级数值。

表 6　生活垃圾渗滤液排放限值（GB16889-1997）

项　　目	一　级	二　级	三　级
悬浮物（mg/ L）	70	200	400
BOD_5（mg/ L）	30	150	600
COD_{cr}（mg/ L）	100	300	1000
氨氮（mg/ L）	15	25	——

目前，重庆、青岛、广州三个填埋场采用反渗透法处理渗滤液，吨渗滤液投资达 5 万元，吨渗滤液运行费 50－60 元，这是一般填埋场难于承受的。渗滤液经过反渗透方法处理后，80％渗滤液成了净化水（完全达到一级排放标准），但有 20％的渗滤液的浓度被浓缩 5 倍，成了危险废液，根本无法处理，目前是倒回填埋场（回灌），问题很多。

另一个方法是同济大学赵由才课题组发明的矿化垃圾生物反应床处理渗滤液技术。该技术处理

渗滤液后的出水达到二级排放标准，吨投资和运行费是目前所有得到工程应用的方法中最低的，极有发展前景。

参考文献

赵由才，方建民，秦峰，龙燕，唐红侠，张乾飞，周海燕，楼紫阳，牛冬杰，王艳明，可持续生活垃圾填埋处置及资源化研究与应用，上海市2008年科技进步奖一等奖

赵由才，吴军，牛冬杰，徐迪民，柴晓利，刘富强，矿化垃圾生物反应床处理生活垃圾渗滤液工艺及工程应用，2007年高等学校科学技术奖技术发明二等奖

赵由才，赵爱华，黄仁华，方建民，侯惠奇，史家墚，柴晓利，牛冬杰，秦峰，吴　军，大型滩涂型生活垃圾填埋场填埋与运营关键技术研究，上海市2004年科技进步二等奖

赵由才，黄仁华，柴晓利，牛冬杰，周海燕，矿化垃圾资源化循环利用关键技术与应用，上海市2007年技术发明三等奖

赵由才，黄仁华，周海燕、徐迪民，王立、吴军、王罗春，大型垃圾填埋场封场后的土地利用技术研究，上海市2003年科技进步三等奖

赵由才，赵爱华，黄仁华，陆正明，周乃杰，上海市老港填埋场垃圾稳定化工程研究，上海市2000年科技进步三等奖

赵由才，张承龙，蒋家超编著，《碱介质湿法冶金技术》，冶金工业出版社，北京，2009年4月（32万字），ISBN 978-7-5024-4822-6

赵天涛，阎宁，赵由才等编，《温室气体减排与控制技术丛书－环境工程领域温室气体减排与控制技术》，化学工业出版社，北京，2009年3月（23万字），ISBN 978-7-122-04186-9

王星，徐菲，赵由才等编，《温室气体减排与控制技术丛书－清洁发展机制开发与方法学指南》，化学工业出版社，北京，2009年2月（23万字），ISBN 978-7-122-03922-4

唐红侠，韩丹，赵由才等编，《温室气体减排与控制技术丛书－农林业温室气体减排与控制技术》，化学工业出版社，北京，2009年2月（19万字），ISBN 978-7-122-03858-6

梅娟，范钦华，赵由才等编，《温室气体减排与控制技术丛书－交通运输领域温室气体减排与控制技术》，化学工业出版社，北京，2009年1月（21万字），ISBN 978-7-122-03921-7

蒋家超，李明，赵由才等编，《温室气体减排与控制技术丛书－工业领域温室气体减排与控制技术》，化学工业出版社，北京，2009年2月（24万字），ISBN 978-7-122-03886-9

王罗春、张萍、赵由才等编著，《电力工业环境保护》，化学工业出版社，北京，2008年8月（25万字），ISBN 978-7-122-02627-9

宋立杰，，赵由才主编，《冶金过程污染控制与资源化丛书——冶金企业废弃生产设备设施处理与利用》，冶金工业出版社，北京，2009年2月(33万字)。ISBN 978 - 7 - 5024 - 4792 - 2

唐平，曹先艳，赵由才，《冶金过程污染控制与资源化丛书——冶金过程废气污染控制与资源化》，冶金工业出版社，北京，2008年9月(35万字)。ISBN 978 - 7 - 5024 - 4608 - 6

钱小青，葛丽英，赵由才主编，《冶金过程污染控制与资源化丛书——冶金过程废水处理与利用》，冶金工业出版社，北京，2008年1月(26万字)。ISBN 978 - 7 - 5024 - 4398 - 6

李鸿江，刘清，赵由才主编，《冶金过程污染控制与资源化丛书——冶金过程固体废物处理与资源化》，冶金工业出版社，北京，2008年1月(33万字)。ISBN 978 - 7 - 5024 - 4377 - 1

马建立，郭斌，赵由才主编，《冶金过程污染控制与资源化丛书——绿色冶金与清洁生产》，冶金工业出版社，北京，2007年6月(43万字)。ISBN 978 - 7 - 5024 - 4247 - 7

孙英杰，孙晓杰，赵由才主编，《冶金过程污染控制与资源化丛书——冶金过程污染土壤和地下水整治与修复》，冶金工业出版社，北京，2007年6月(25万字)。ISBN 978 - 7 - 5024 - 4416 - 7

蒋家超，招国栋，赵由才主编，《冶金过程污染控制与资源化丛书——矿山固体废物处理与资源化》，冶金工业出版社，北京，2007年11月(22万字)。ISBN 978 - 7 - 5024 - 4391 - 7

赵由才等著，《环境卫生工程丛书——可持续生活垃圾处理与处置》，化学工业出版社，北京，2007年1月(39万字)，ISBN 9787-5025-9542-5

赵由才，宋玉主编，《生活垃圾处理与资源化技术手册》，冶金工业出版社，北京，2007年5月（186万字），ISBN 978-7-5024-4197-5

牛冬杰，马俊伟，赵由才主编，《电子废弃物处理处置与资源化》，冶金工业出版社，北京，2007年6月(27万字)。ISBN 978 - 7- 5024 - 4192 - 1

牛冬杰，孙晓杰，赵由才主编，《工业固体废物处理与资源化》，冶金工业出版社，北京，2007年1月(35万字)。ISBN 978 - 7- 5024 - 4166 - 1

楼紫阳，赵由才，张全编著，《渗滤液处理处置技术与工程实例》，化学工业出版社，北京，2007年1月(56万字)。ISBN 9787 - 5025 -9226 -6

牛冬杰，秦峰，赵由才主编，《环境卫生工程丛书——市容环境卫生管理》，化学工业出版社，北京，2007年1月(31万字)。ISBN 978-7-5025-9371-1

王罗春，赵爱华，赵由才主编，《环境卫生工程丛书——生活垃圾收集与运输》，化学工业出版社，北京，2006年7月(25万字)。ISBN 7-5025-8554-0

金龙、赵由才主编，《固体废物处理与资源化丛书——计算机与数学模型在固体废物处理与资源化中的应用》，化学工业出版社，北京，2006年8月(29万字)。ISBN 7 - 5025 - 8992 - 9

祝优珍，王志国，赵由才主编，《实验室污染与防治》，化学工业出版社，北京，2006年1月（31万字)。ISBN 7 - 5025 - 7700 - 9

王罗春，何德文，赵由才主编，《危险化学品废物的处理》，化学工业出版社，北京，2006年2月（34万字)。ISBN 7 - 5025 - 7689 - 2

赵由才、张全、蒲敏主编，《固体废物处理与资源化丛书——医疗废物管理与污染控制技术》，化学工业出版社，北京，2005年1月(40万字)。ISBN 7 - 5025 -6226 -5

边炳鑫、赵由才主编，康文泽副主编，《固体废物处理与资源化丛书——农业固体废物的处理与综合利用》，化学工业出版社，北京，2005年1月(53万字)。ISBN 7 - 5025 - 6211 - 7

边炳鑫， 解强，赵由才主编，《固体废物处理与资源化丛书——煤系固体废物资源化技术》，化学工业出版社，北京，2005年5月(47万字)。ISBN 7-5025-6787-9

柴晓利，赵爱华，赵由才主编，《固体废物处理与资源化丛书——固体废物焚烧技术》，化学工业出版社，北京，2005年12月(40万字)。ISBN 7-5025-7620-7

柴晓利，张华，赵由才主编，《固体废物处理与资源化丛书——固体废物堆肥原理与技术》，化学工业出版社，北京，2005年2月(57万字)。ISBN 7 - 5025 -7483 - 2

赵由才、龙燕、张华主编，《固体废物处理与资源化丛书——生活垃圾卫生填埋技术》，化学工业出版社，北京，2004年2月(67万字)。ISBN 7 - 5025 -5274 -X/X 397

边炳鑫、张鸿波、赵由才主编，《固体废物处理与资源化丛书——固体废物预处理与分选技术》，化学工业出版社，北京，2004年8月(58万字)。ISBN 7 - 5025 - 6049 - 1

王罗春, 赵由才主编，《固体废物处理与资源化丛书——建筑垃圾处理与资源化》，化学工业出版社，北京，2004年7月(57万字)。ISBN 7-5025-5845-4

解强主编，边炳鑫、赵由才副主编，《固体废物处理与资源化丛书——城市固体废弃物能源化利用技术》，化学工业出版社，北京，2004年7月(43万字)。ISBN 7 - 5025 - 5456 - 4/X 447

赵由才主编，《危险废物处理技术》，化学工业出版社，北京，2003年9月(54万字)，ISBN 7-5025-4725-8/X.325

赵由才主编，《环境工程化学》，化学工业出版社，北京，2003年7月(56万字)。ISBN 7 - 5025 - 4466 - 6（2次印刷）

赵由才、牛冬杰主编，《湿法冶金污染控制技术》，冶金工业出版社，北京，2003年4月(39万字)。ISBN 7 - 5024 - 3168 - 3

赵由才主编，《实用环境工程手册 - 固体废物污染控制与资源化》，化学工业出版社，北京，2002年5月 (131万字，822页)。ISBN 7 - 5025 - 3757 - 0

赵由才主编，《生活垃圾资源化原理与技术》，化学工业出版社，北京，2002年1月(38万字) 。ISBN 7 - 5025 - 3491 - 1（2次印刷）

赵由才，黄仁华主编，《生活垃圾卫生填埋场现场运行指南》，化学工业出版社，北京，2001年2月（27万字)。ISBN 7 - 5025 - 3091 - 6

张益，赵由才主编，《生活垃圾焚烧技术》，化学工业出版社，北京，2000年8月（38万字)。ISBN 7 - 5025 - 2894 - 6 （4次印刷）

赵由才，朱青山主编，《城市生活垃圾卫生填埋场技术与管理手册》，化学工业出版社，北京，1999年8月（20万字)。ISBN 7 - 5025 - 2599 - 8（2次印刷）

刘遂庆，赵由才主编，《1998中-瑞固体废物技术管理学术会议文集》，同济大学出版社，上海，1999年8月。ISBN 7 - 5608 - 2095 - 6

Zhao Youcai, MSW Management and Technology in China, Chapter 2, pp 34-42; Development Towards Sustainable Waste Management in China, Chapter 8, pp 502-506, in《Municipal Solid Waste Management - Strategies and Technologies for Sustainable Solutions》 (Editors: Christian Ludwig, Stefanie Hellweg, and Samuel Stucki), Springer, Germany, September 2002.ISBN 3 - 5404 - 4100 - X

生物质垃圾与煤混烧污染特征的研究

任福民　张玉磊　牛牧晨　高明　于敏
（北京交通大学土木建筑工程学院，北京 100044）

摘要：对不同配比复合垃圾衍生燃料做实验试烧，并对燃烧产生的 NO_X、SO_2 等燃烧排放污染物进行了监测。利用扫描电镜（SEM）和能谱（EDX）结合联用技术观察了生物质垃圾与煤混合压制燃料的燃烧颗粒的微观形态特征。结果表明，随着生物质比例的加大，发现飞灰颗粒有细化的现象。Cl 元素的排放主要出现在燃烧初期。钾的主要存在形式是氯化钾。飞灰颗粒的所有能谱分析中并没有检测到重金属元素的存在。

关键词：生物质；污染特征；扫描电镜-能谱分析；

Pollutants Emission character analysis of Co-combustion of Biomass With Coal

REN Fumin　ZHANG Yulei　NIN Muchen　GAO Ming　YU Min
（School of Civil Engineering ＆ Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China）

Abstract：Combustion characteristics and RDF pollutants emission of the railway solid wastemixture with coal have been studied. Pollutants mechanism as well as the corresponding control has also been investigated.The microstructure characteristic and the major elements analysis of the fly ash from co-combustion of biomass with coal was conducted by using scanning electron microscope (SEM) and X-ray energy dispersive microanalysis (EDX). The results show that the shape of fly ash particles is various. Most particles are irregular. The phenomenon of particle adsorption existed among different grain sizes. Potassium was detected in EDX analysis of all fly ash particle.Experimental result showed that the primarily existent form of potassium is potassium chloride in co-combustion of biomass with coal.Heavy metals was not detected in EDX analysis of all fly ash particle.

Keywords：biomass; Pollutants Emission character ， SEM-EDX;

生物质能源是一种可再生能源，如果充分利用可减少环境污染和降低CO_2的排放，目前世界各国相继兴起开发和利用生物质能的新技术热潮。由于生物质的热值较低，单独利用效率也较低，为此，一些欧美发达国家近年来采取了将部分生物质与煤混合燃烧发电的新措施。

刘咸德等人对生物质燃烧颗粒物的定量分析和化学形态开展系统研究[1]，徐明厚等人对生物质与煤混烧时可吸入颗粒物中的矿物质元素演变规律进行研究[2]，并探讨煤与生物质的混烧特性及对可吸入颗粒物排放的影响[3,4]。

我国铁路站、车垃圾成分相对简单，除去垃圾中塑料后，主要以食物残渣、废纸、瓜子果核和木筷等生物质为主，不可燃物含量相对较少。由于垃圾成分的特殊性和与燃烧过程中与煤发生多种形态的物理和化学反应。因此，对铁路站、车生物质垃圾与煤燃烧的污染特征研究就显得十分必要。本文作者对此进行了实验研究。

1 实验与样品采集分析

本实验在将垃圾经分选去除塑料后干燥、破碎，与煤掺混压制成具有一定形状的生物质衍生燃料，在此基础上对不同配比复合垃圾衍生燃料做实验试烧，并对燃烧产生的 NO_X、SO_2 等燃烧排放污染物进行监测。燃烧试验时收集生物质衍生燃料燃烧飞灰进行扫描电镜和能谱分析。

1.1 实验材料与设备

燃烧实验中 C-RDF 采用北京西站垃圾转运站收集的垃圾和门头沟煤为原料进行制备；垃圾主要是经人工分选出塑料后，利用环锤式破碎机破碎。首先对垃圾和煤进行工业分析和元素分析，结果如表 1 所示。

表 1 实验材料的工业分析和元素分析

Fig. 1 Proximate and ultimate analysis of experimental materials

燃料	工业分析（空气干燥基）/%				元素分析（空气干燥基）/%					低位发热量 MJ/kg
	挥发成分 V_{ad}	灰分 A_{ad}	固定碳 FC_{ad}	水分 M_{ad}	C_{ad}	H_{ad}	N_{ad}	$S_{t,ad}$	O_{ad}	
垃圾	52.43	27.62	15.12	4.83	38.76	3.82	1.07	0.24	23.66	12.59
煤	10.39	27.74	58.49	3.38	66.40	1.03	0.14	0.29	1.02	20.01

燃烧设备为经保温改造的带鼓风计量的民用蜂窝煤炉，采用德国德图（testo）XL-350 烟气分析仪连续自动监测，精度为 1×10^{-6}。同时为适应炉型，将复合垃圾衍生燃料压制成蜂窝状，进行燃烧试验。燃烧示意图如图 1 所示。

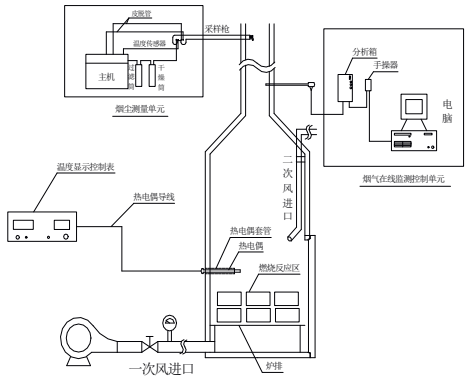


图 1 燃烧装置示意图

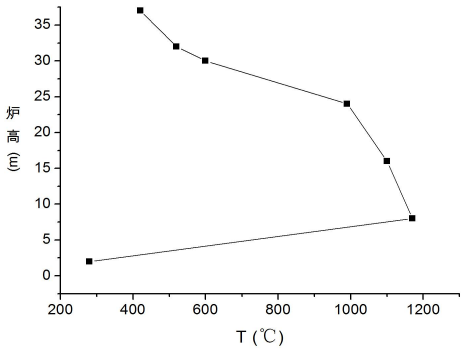


图 2 炉体温度分布图

Fig. 1 Diagram of combustion installment

Fig. 2 Temperature distribution curve of combustion body

1.2 实验过程及样品采集及分析

对不同配比复合垃圾衍生燃料做实验试烧，并对燃烧产生的 NO_X、SO_2 等燃烧排放污染物进行了监测。实验分别对纯煤样，RDF 样，以及垃圾配比为 10%和 50%的混合燃料的进行了燃烧污染物排放监测。燃烧过程中利用鼓风机向燃烧室内供氧。在烟气出口处（见图 1 所示），架设德图烟气分析仪的探头，仪器自动监测并记录烟气中 O_2、CO、SO_2、NO、NO_2 的浓度。

单颗粒扫描电镜-能谱（SEM-EDX）分析样品为生物质衍生燃料燃烧飞灰。实验利用烟尘采样器对不同掺混比例复合垃圾衍生燃料的燃烧飞灰进行了收集。烟尘采样器为青岛崂山产的 3012H 型自动烟尘气应用分析仪。

利用扫描电镜（SEM）和能谱（EDX）结合联用技术直观地观察了单个颗粒物大小、几何形状和元素分析等。对随机选定的单颗粒进行 X 射线能谱分析，并使用能谱仪自带的软件对获得颗粒物的元素成分和含量自动进行 ZAF 校正。

为增加样品的导电性，实验前对样品表面进行喷金处理。实验中用到的扫描电镜为日立公司生产的 S-4700 型扫描电镜。该电镜是冷场发射型扫描电子显微镜。它的加速电压是 0.5～30kV，15kV 下分辨率小于等于 1.5nm，1kV 下分辨率小于等于 2.1nm，并配有 EDS 能谱附件，可以检测到 Be~92U 之间的所有元素。实验用该型号电镜观察了飞灰颗粒表面及断面的微观形态，用 EDX 分析了其组成元素。

2 实验结果与分析

2.1 燃烧炉内温度分布

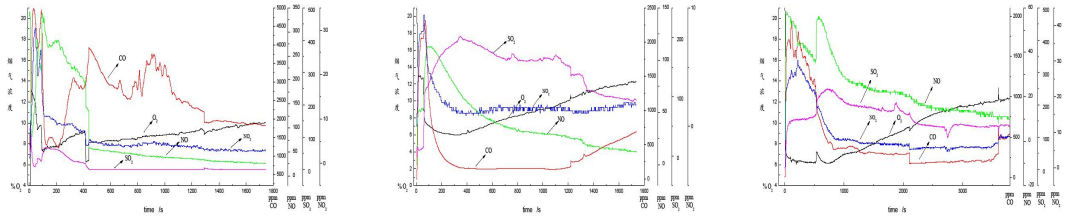
图 2 给出了 C-RDF(垃圾掺混比例为 75%条件下)燃烧实验中炉内的温度分布。根据图中显示，在炉体底部为自然通风或强制鼓风区域，进入燃料燃烧区后，由于 C-RDF 中固定碳和挥发分的燃烧，温度迅速升高并稳定在 990～1170℃之间，说明固定碳含量能够满足燃料反应温度要求.由于本燃烧反应采用底部加热引燃方式，在反应区底部 C-RDF 燃烧放热量和散热基本区域平衡，温度下降不太明显；随着反应区高度的上升，温度迅速降低，这主要是由于反应器上部隔热保温效果不好，火焰反应区距离烟道口距离过近，造成局部散热增大和上部燃料的挥发分及烟气带走大量热量，使产热

和散热失衡 。

通过对不同配比复合垃圾衍生燃烧炉温的监测发现，垃圾配比在 0%～30%左右时对燃烧装置炉体温度的影响不太明显。

2.2 燃烧污染物排放结果分析

实验监测了煤和垃圾配比分别为 0%、50%和 90%的 3 组 C-RDF 样品，并进行了比较分析。3 组 C-RDF 样品的燃烧污染物排放浓度实时监测数据图如图 3 所示。



（a）50% 垃圾　　(b) 10%垃圾　　(c) 煤

图 3 不同垃圾配比 C-RDF 燃烧污染物排放监测图

Fig. 3 Monitoring curves of pollutants emission of C-RDF refuse and coal (a) 50% refuse, (b) 10% refuse , (c) coal

2.2.1 CO排放特性

从图 3 可以看出，纯煤燃料与 RDF 燃烧时，CO 生成量较大，而且波动幅度较大，这是由于 C-RDF 中垃圾挥发分远高于煤，而实验中炉子高度有限，并且炉体上部散热量大，温度较低，同时炉体上部火焰区距烟道距离较短，造成挥发分析出后反应时间短，燃烧不完全。由图 3 比较可知，当氧含量为 15%左右，CO 浓度在 15×10^{-4} 左右，而当氧含量减少到 7%左右时，CO 浓度高达 50×10^{-4}。因此，使炉膛内氧含量充足，有助于 C-RDF 的完全焚烧，CO 浓度随空气比的增加而降低。

CO 及烃类的排放主要是由于燃料的不完全燃烧造成的，而不完全燃烧主要与供氧量不足、燃烧温度不够、滞留时间短及混合不充分等因素引起。C-RDF 燃烧中 CO 及烃类的排放主要是挥发分未完全燃烧的结果，所以随着空气过剩系数的增加，燃烧更加完全，因此 CO 及烃类的排放浓度降低，但当氧含量超过一定程度时，烟气中的氧浓度对 CO 及烃类浓度的影响减弱，同时空气过剩系数增加导致燃烧温度降低，从而影响了 CO 及烃类的完全燃烧。

2.2.2 SO_2排放特性

由表 1 中元素分析可知，垃圾原料中 S 元素含量比煤中的少。因此，混烧时随着含煤比例的递减，SO_2排放浓度应呈下降趋势。表 3 中的实验结果验证了这一特征，C-RDF 比例为 10%时，SO_2平均浓度为 723.73 mg/m^3，而 C-RDF 比例为 90%时，SO_2平均浓度为 102.84 mg/m^3，减少了近 86%。

2.2.3 NO_X排放特性

从图 3 中均可看到，随着时间推移，NO 浓度曲线呈下降趋势，而 NO_2浓度曲线呈上升趋势，并且两条曲线有交叉。

元素分析表明，垃圾原料中 N、O 以及挥发分的含量分别是 1.07%，23.66%和 52.43%，均比煤中含量高。监测结果表明，在 C-RDF 掺混比例小于 50%时，NO_X排放浓度呈下降趋势，在 C-RDF 掺混比例大于 50%时，NO_X排放浓度呈上升趋势，在 C-RDF 掺混比例为 90%左右时出现极值。这主要是因为垃圾含量较少时，垃圾中的高挥发分起主导作用。高挥发分使燃烧着火速度快，烃类物质及含 N 的中间产物析出量高，炉内还原性气氛较强，利于中间产物向 N_2的转化。而当垃圾成分继续增加，其中的高 N 含量开始起主要作用，大量的 N 和 O 的存在，必然使 NO_x的浓度增加。同时，随着氧含量的增加，NO 浓度相应增加，这是由于燃料氮经过中间产物 HCN 阶段，HCN 再被氧化为 NCO，然后进一步转化为 NO 或 N_2O，而燃烧中的氧具有促进 HCN 氧化的作用，因此空气过剩系数提高能引起到增加 NO 转化率的作用。

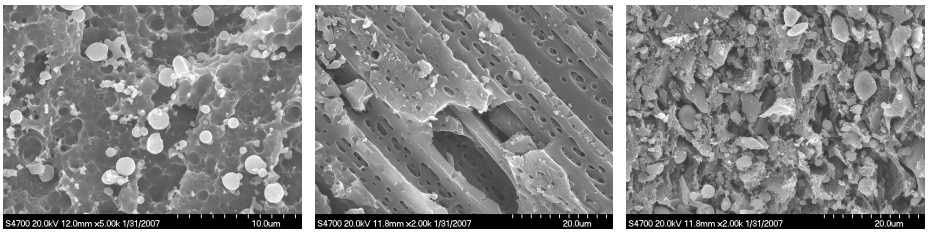
2.2.4 与标准的比较

将试验数据与《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB18485-2001)中大气污染物排放限值相比得知，除了 CO 基本不符合标准外，在一定的掺混比例下 SO_2和 NO_X均符合标准的要求。而 CO 含量超标的主要原因是实验室的炉膛小，很难提供良好的氧化环境，相信在实际运行的铁路车站锅炉内可以解决这个问题。

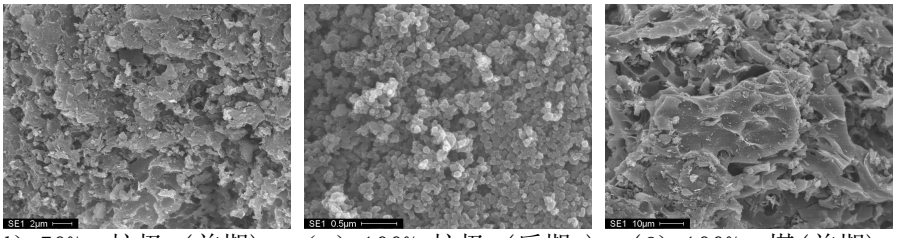
由上述分析可知，在保证燃烧环境中空气含量充足的前提下，选择 30%C-RDF 与 70%煤的比例最佳，进行混烧时气体污染物排放浓度最低。

2.3 单颗粒扫描电镜-能谱（SEM-EDX）分析

实验对不同掺混比例生物质与煤混样不同燃烧时期（初期、中期、后期）的燃烧飞灰进行了收集，进行了扫描电镜形态特征和能谱分析。不同配比燃料飞灰颗粒的形貌特征分析及能谱分析结果见图 4。



（a）10%垃圾（中期）　（b）40%垃圾（前期）　（c）40%垃圾（后期）



（d）50%　垃圾（前期）　（e）100% 垃圾（后期 ）　（f）100%　煤(前期)

图 4　不同垃圾含量 C-RDF 飞灰颗粒扫描电镜图像

Fig.4　SEM images of fly ash particles come from differ content refuse C-RDF (a)10% refuse(median period　),(b)40% refuse(first period),(c)40% refuse(last period),(d)50% refuse(first period　),(e)100% refuse(last period),(f)100% coal (first period　)

2.3.1. 10%垃圾飞灰颗粒分析

燃烧初期，飞灰颗粒以未燃尽炭粒为主，飞灰形态为多孔海绵状炭粒，如图 4（a）所示，随着燃烧过程的进行，海绵状炭粒逐渐减少消失，飞灰颗粒以粉煤灰为主。

在生物质掺混比例较少的情况下，出现了 K、Na 元素。但是没有发现氯元素。在对飞灰中的小球颗粒的能谱分析发现有大量 C 的存在，这可能是由于背景海绵状炭基质的影响。

通过对垃圾复合衍生燃料飞灰颗粒的扫描电镜图片和能谱分析，发现当生物质掺混比例较小(10%)时，飞灰颗粒主要以海绵状空心炭粒和脱离的小球颗粒为主，这种脱离现象可能是由于煤中矿物质颗粒与炭粒密度不一（矿物质颗粒密度大于炭粒），在燃烧过程中脱落导致。

2.3.2　40%生物质垃圾复合衍生燃料飞灰颗粒分析

在该配比飞灰颗粒的观察中发现了空心纤维状炭粒，见图 4（b），这可能是植物质炭纤维中挥发分挥发后，残留的炭质纤维。同时在生物质掺混 40%的燃烧后期飞灰颗粒图谱中发现，海绵状炭粒消失，主要以碎屑状的密实炭粒，见图 4(c)。

实验发现，在该配比燃料燃烧初期飞灰中出现了氯元素，含量较高。飞灰主要粉煤灰的形式存在。

2.3.3　50%生物质垃圾复合衍生燃料飞灰颗粒分析

通过对 50%生物质掺混比例的燃烧飞灰的电镜和能谱分析发现，粉煤灰与炭粒在颗粒形态上出现分离，粉煤灰以无定形絮状颗粒为主，炭粒以“金刚石”形态为主，见图 4(d)（在纯煤燃烧飞灰颗粒中，也发现了上述现象，不同的是还发现了多孔小球状空心炭粒）。在燃烧初期，飞灰颗粒以未燃尽炭粒为主。

2.3.4　纯生物质垃圾飞灰颗粒分析

实验观察了单一生物质垃圾燃烧飞灰的表面扫描电镜图像，见图 4(e)。从图中看出，该颗粒形状为絮状集合体。从图 4(e)中可以看出该飞灰颗粒是由大量不规则的粒径范围

100nm 左右的密实球状颗粒堆积组成，其主要组成元素质量和原子分数见表 2。

表 2 4(e)细颗粒主要组成元素质量和原子分数

Tab.2 Major elements mass/atomic fraction of fine particles in (4e)

元 素	C	O	Na	Si	S	Cl	K
质量%	38.02	06.75	11.85	00.27	02.75	25.44	14.92
原子分数%	59.76	07.97	09.73	00.18	01.62	13.55	07.20

生物质燃烧颗粒物的一个主要特征是钾含量高，人们把钾作为其示踪元素[1, 6-7]。在本实验观察的所有飞灰颗粒的能谱分析中均发现了 K 元素的存在。元素分析结果表明，生物质与煤混烧排放钾的主要存在形式是氯化钾。在对 50 组飞灰颗粒的能谱分析中，没有发现重金属元素的存在，这可能与生物质垃圾的特殊构成（以食物残渣、木筷和瓜子果皮为主），及燃料制备时人工分选去除了垃圾中的金属物质有关。

通过对纯垃圾衍生燃料燃烧飞灰的电镜分析发现，燃烧飞灰颗粒分布比较均匀，颗粒比较细化，主要为大量粒径 50～100nm 小球聚集而成的絮状颗粒。

3 结论

1）相对于煤来说，C-RDF 的挥发分含量高，受炉体上部温度较低影响，由于 C-RDF 中大量挥发分和未燃烬成分的析出，在自然通风条件下，C-RDF 燃料比煤要有更高的未燃烬气体 CO 浓度。

2）通过对不同掺混比例生物质与煤混烧飞灰样品的电镜和能谱分析发现，随着生物质比例的加大，飞灰颗粒有细化的现象。不同粒径颗粒之间存在逐级吸附的现象，即粗颗粒（粒径>2.5um）表面吸附细颗粒，而细颗粒表面吸附粒径更小的颗粒物。在生物质掺混比例达到 40%时，在燃烧飞灰颗粒中检测到有氯元素的存在。Cl 元素的排放主要出现在燃烧初期。钾的主要存在形式是氯化钾。

3）C-RDF 是一种新兴的人造复合固体燃料，它具有热值高、燃烧稳定、易于运输和储存、二次污染低等特点。试验说明，利用铁路客运站车垃圾制成 C-RDF 是可行的，但由于该垃圾组分特点，其含 N 量较高，因此将其以 30%的比例与煤进行混烧，既实现了废物资源化，又不给车站造成燃烧尾气处理的负担。C-RDF 是一种投资少、收益快而又比较简便的洁净燃烧技术，具有较好的推广应用前景。

参考文献

[1] 刘咸德，李玉武，董树屏. 生物质燃烧颗粒物的定量分析和化学形态[J]，环境化学，2002，21（3）：209-217.

Liu Xian-de,Li Yu-wu,Dong Shu-ping, Quantitative analysis and Chemical Speciation of Biomass burning Particles. Environmental Chemistry,2002,21(3):209-217.

[2] 王权斌，徐明厚，夏永俊.煤与生物质混烧时可吸入颗粒物中的矿物质元素演变研究[J] . 中国电机工程学报，2006，26（16）：103-108

Wang Quan-bin,Xu Ming-hou,Xia Yongjun .et al. Experimental Study on Transformation of Mineral elements of Inhaled Particulate matters during Co-Combustion Coal with Biomass .Proceeding of the CSEE.2006,26(16):103-108

(in chinese)

[3] 王权斌，徐明厚，姚洪，等. 生物质与煤的混烧特性及其对可吸入颗粒物排放的影响[J] . 中国电机工程学报，2007，27（5）：7-12.

Wang Quan-bin,Xu Ming-hou,Yao hong.et al.Co-Combustion Characteristics of Biomass with Coal and Its effect on Inhaled Particulate Maters Emission.Proceeding of the CSEE.2007,27(5):7-12.(in chinese)

[4] 夏永俊,徐明厚，姚洪. 生物质与煤混烧时 PM_{10} 中痕量元素分布的研究.煤炭转化,2006,29(2):33-38

Xia Yongjun ,Xu Ming-hou, Yao hong .et al. Study on Disturbution of Trace Elments in PM_{10} during Co-Combustion of Biomass and Coal .Coal Conversion.2006,29(2):33-38.(in chinese)

[5] 孙俊民,韩德馨,姚强,徐旭常.燃煤飞灰的显微颗粒类型与显微结构特征[J].显微电子学报,2001,20(2):140-147.

Sun Jun-min,HaoDe-xin,Yao Qing.etal.,Classification and Characteristication of micro-particles in fly ash from coal-fired power plants.Journal of Chinese Electron Microscope Socitey.2001,20(2):140-147.

[6] HeinK P G,Bemtgen J M.EU Clean Coal Technology-co-combustion of Coal and Biomass[J].Fuel Processing Technology,1998,54:159-169.

[7] Cachier H, Liousse C, Buat-Ménard P, et al. Particulate Content of Savanna Fire Emissions. Journal of Atmospheric Chemistry, 1995, 22(1):123-148.

新型垃圾焚烧双尾气处理系统论述

创冠环保（中国）有限公司　邱才娣

编者按：生活垃圾焚烧产生的飞灰极易粘结在余热锅炉各受热面上，降低余热利用效率，同时加大对余热锅炉各受热面的磨损，并增加尾气处理系统的负荷，而且飞灰中有毒有害物含量高，处理成本高。针对此问题，创冠环保研发了新型的垃圾焚烧尾气处理系统，对常规的尾气处理系统进行技术改进，在垃圾余热锅炉的烟气通道上增加预除尘装置，预除尘装置一般设置在250~350℃或600~850℃温度段内，可在垃圾焚烧产生的烟气中分离并收集大部分有毒有害物含量低的飞灰，降低垃圾焚烧发电厂飞灰的处理成本；同时提高热效率，减少烟气净化系统的负荷，延长垃圾焚烧炉的使用时间。

1.研发背景

随着社会经济的发展，焚烧已成为生活垃圾处理的主要手段之一。垃圾焚烧产生的飞灰产生量大、处理成本高，成为生活垃圾焚烧发电厂控制二次污染的热点和难点。研究显示，焚烧一吨生活垃圾，产生的飞灰量约为9~45kg（不含用于净化烟气的石灰），一般机械炉排垃圾焚烧炉在余热锅炉出口烟气中的飞灰含量约为2~10g/Nm3。

飞灰对生活垃圾焚烧发电厂的余热利用系统造成以下问题：（1）锅炉出口烟气中的飞灰含量非常高，给烟气处理系统带来难度，且增大烟气处理系统及飞灰处置系统的运行成本。（2）垃圾焚烧产生的飞灰，在500~800℃时，极易粘结在各受热面上，降低烟气传热的效率，必须采用各种清灰方式进行受热面清灰。而现有的清灰系统频繁使用，会造成受热面腐蚀、金属焊接处漏泄、清灰系统故障频发等问题。（3）在对受热面清灰期间，烟气中的飞灰含量会突然增大，对尾气处理系统冲击较大。目前垃圾焚烧发电厂的尾气处理工艺飞灰主要通过布袋除尘器去除。我国生活垃圾焚烧处理厂主流的尾气处理工艺为“半干法脱酸+活性炭吸附+布袋除尘器”。该工艺存在两个问题：一是布袋除尘器的滤料疲劳损伤大，清灰频率高。二是飞灰产生量大，飞灰处理成本高。

针对上述问题，创冠环保对常规的尾气处理系统进行技术改进，研发了新型垃圾焚烧尾气处理系统，在垃圾余热锅炉的烟气通道上增加预除尘装置，改进后的尾气处理工艺为“预除尘器+半干法脱酸+活性炭吸附+布袋除尘器”。

2.技术关键

创冠环保研发的新型尾气处理系统相比原有技术，关键点是在余热锅炉的烟气通道中设置预除尘装置。垃圾焚烧余热回收锅炉包括锅炉主体和由水冷壁形成的烟气通道；烟气通道中设有蒸发器、过热器和省煤器，其特征在于：烟气通道中还设有烟气预除尘装置。预除尘装置可设于余热锅炉的低温段或高温段，即低温段预除尘装置或高温预除尘装置。

2.1 低温段预除尘装置

低温段预除尘装置设在烟道烟气温度为250~350℃的区段内，预除尘装置的形式可为静电除尘器、机械式除尘器或离心式除尘器。由于余热锅炉的形式分为立式和卧式，低温段预除尘装置根据不同的余热锅炉形式有不同的布置。

2.1.1 立式余热锅炉预除尘装置的布置

立式余热回收锅炉，其第一通道下部是炉排和绝热炉膛。垃圾焚烧后产生的烟气依次通过第一、二、三通道，第一、二、三通道四周布满了膜式水冷壁。第三通道布置了对流蒸发器和三级过热器。第四烟道布置了省煤器或烟气空气预热器（如图1所示）。

低温段预除尘装置设置在立式余热锅炉第四通道的下部，第四通道至尾部烟道的水平过渡段中，即烟气温度在250-350℃之间的区段（如图2所示）。该除尘装置可为静电除尘器、机械式除尘器或离心式除尘器。除尘装置下部设置积灰斗。烟气中的飞灰经过第一、二、三、四通道的水冷空腔或受热面（过热器、省煤器），被设置在水平通道的除尘装置收集在除尘装置下面的灰斗中，由底部输灰机排至灰仓或与炉渣一并排出。

2.1.2 卧式余热锅炉预除尘装置的布置卧式余热回收锅炉在燃烧室后部设有垂直的膜式水冷壁组成的烟气通道，第一、第二和第三通道均为空腔冷却通道，过热器和蒸发器、省煤器布置在第四水平通道。蒸发器及过热器悬吊在水平烟道顶部（如图 3 所示）。低温段预除尘装置设置在卧式余热锅炉的第四水平烟道中，烟气温度为 250~350℃的区段内（如图 4 所示）。该除尘装置可为静电除尘器、机械式除尘器或离心式除尘器，其下部设置有积灰斗。过热器、省煤器和除尘器下设置积灰斗，灰斗下部设置输灰机。输灰机将灰输送至灰仓或炉渣出口下渣槽。烟气在通过第四水平烟道时，除部分吸附在过热器和省煤器上的飞灰靠自重沉降到灰斗内以外，大部分飞灰由除尘装置收集到除尘装置下面的灰斗。

2.1.3 低温段预除尘装置的效果

研究表明，飞灰粒径呈近似正态分布（如图 5 所示），其粒径均值为 79um，d50 为 56um。38.5～74um 粒径的飞灰约占总量的 50%，粒径>154um 和<30um 的飞灰较少，分别占总量的 11% 和 8% 。

低温段预除尘装置的形式可为静电除尘器、机械式除尘器或离心式除尘器。低温段预除尘器分离出的飞灰颗粒较大，比表面积较小，二噁英及重金属不易吸附在飞灰上，因此，低温段预除尘装置除下的飞灰中有毒物质含量大大降低。由前文分析可知，粒径<30um 的飞灰只占总量的 8%，而大颗粒飞灰占绝大多数，因此，大部分飞灰已被低温段预除尘器分离出来，而分离出的飞灰中有毒物质含量低，故极大地降低了飞灰处置成本。

2.2 高温段预除尘装置

2.2.1 高温段预除尘装置的布置

高温段预除尘装置要求锅炉形式为机械式炉排焚烧余热回收锅炉，预除尘装置为高温旋风除尘器，安装于垃圾焚烧炉第一通道（二燃室）出口。该高温旋风除尘器设在烟气温度 600~850℃的区段内（如图 6 所示）。高温旋风分离器下设置灰斗，灰斗出口设置锁气排灰装置，将灰排到炉排下渣口。垃圾燃烧产生的烟气与炉膛水冷壁受热面进行热交换后，离开炉膛二燃室并夹带大量颗粒状的飞灰经过高温旋风分离器，绝大部分飞灰被旋风分离器分离下来，经锁气排灰装置排到下渣口。烟气则进入后部的烟道。

该高温旋风除尘器，可以最大程度地缓解垃圾焚烧过程产生的飞灰对余热锅炉受热面的冲刷、腐蚀和结垢的问题。同时大大减轻了烟气处理系统的负荷，延长设备使用寿命，提高设备的可靠性，降低垃圾焚烧厂飞灰处理成本，提高经济效益。高温旋风除尘器，使烟气中绝大部分颗粒状的飞灰经过高温旋风除尘器时被分离下来，不仅最大程度地降低了烟气中的飞灰含量，而且解决了飞灰粘结在受热面的问题。

2.2.2 高温段预除尘装置的效果

二噁英熔点为303～306℃，500℃开始分解，800℃时2秒内完全分解。二噁英中以2,3,7,8-四氯-二苯并-对-二噁英（2,3,7,8-TCDD)毒性最强（其物理性质如下表所示）。由于飞灰从烟气中分离出来时，烟气的温度为600~850℃，由表可知，烟气中二噁英以气态的形式存在，不易吸附在飞灰上，因此，此处分离出的飞灰含二噁英含量大大降低。

飞灰中常见的重金属及其化合物熔/沸点性质如图7所示。飞灰从烟气中分离出来时，烟气的温度为600~850℃，从图7可以看出，大部分重金属及其氯化物已呈气态形式，不易吸附在飞灰上。因此，高温段预除尘器分离出来的飞灰含重金属含量很低。

此外，与低温段预除尘装置相同，高温段预除尘器分离出的飞灰颗粒较大，比表面积较小，二噁英及重金属不易吸附在飞灰上。

综上所述，高温段预除尘装置除下的飞灰中有毒物质含量极低。

3.工程应用

改进的尾气处理工艺以其独特的优势已成功应用于创冠环保（黄石）生活垃圾焚烧发电项目。该项目垃圾处理规模为1200t/d，采用炉排炉焚烧技术，在垃圾焚烧炉第一通道（二燃室）出口设置了高温预除尘装置，烟气处理工艺流程如图8所示。该工艺能克服现有技术存在的缺点，在垃圾焚烧产生的烟气中分离并收集大部分有毒有害物含量低的飞灰，最大限度地减少飞灰中的二噁英、重金属等有害物质含量，降低垃圾焚烧发电厂难处理危险废弃物飞灰的处理成本，同时提高余热锅炉的热效率，减少烟气净化系统的负荷，延长垃圾焚烧炉的使用时间。

图 8　烟气处理工艺流程图

双尾气系统能较大程度提高烟气的排放标准，创冠环保研发部门经过理论研究及计算，预期排放效果可达到下表值：

4. 技术效果

改进后的尾气处理工艺为“预除尘器+半干法脱酸+活性炭吸附+布袋除尘器”，在垃圾余热锅炉的烟气通道上增加预除尘装置，具有以下优势：

（1）将常规的余热锅炉在最合适的温度区域增加一套预除尘装置，对烟气进行预除尘，降低余热锅炉出口烟气中的飞灰含量。

（2）可降低最终产生的飞灰处理成本。预除尘器分离出的飞灰颗粒较大，比表面积较小，二噁英及重金属不易吸附在飞灰上，因此预除尘装置除下的飞灰中有毒物质含量大大降低。此外，高温段预除尘装置设置在 600~850℃温度段内，有毒污染物基本上以气态形式存在于烟气中，不会大量吸附于预除尘器飞灰中，仅会吸附于最终的布袋除尘器的飞灰中。因此，双尾气的设置大大减少了布袋除尘器飞灰产生量，也最大限度地降低了飞灰的处理难度和成本。

（3）烟气中的飞灰量减少后，减少了后部烟道和各受热面的磨损，延长了余热锅炉受热面和其它附属设备的使用寿命。

（4）烟气中的飞灰量降低后可以减少烟气处理的负荷，同时避免清除受热面管壁积灰时，对烟气净化系统造成的冲击，使烟气处理系统的布袋除尘器的除尘效率更高，大大地减轻了滤袋的压力，

可以使滤袋清灰的时间间隔从几分钟延长到几个小时，减轻了滤料的疲劳损伤，有效延长滤袋寿命，保证烟气排放安全达标。

（5）由于除尘装置形成的预处理系统除去了部分飞灰，烟气中飞灰的含量降低，可以缓解烟气处理系统中反应塔结垢和冲刷磨损的问题。

（6）初步经济测算：根据除尘装置的效率，布置于余热锅炉烟道内的预除尘装置可在烟道中除去烟气中至少 60%~90%左右的飞灰。以除尘效率按最低 60%计，烟气经过除尘器后，飞灰含量降低至 0.8~4 g/Nm3 左右，相当于焚烧一吨生活垃圾产生属于危险废物的飞灰 3.6~18kg（不含用于净化烟气的石灰）。即焚烧每吨生活垃圾，可减少飞灰产量 5.4~27kg。若以目前国内飞灰处理成本每吨 500 元计（稳定化处理），每吨垃圾处理成本可减少 2.6~15 元。以一个中等规模的垃圾焚烧处理厂，日处理量为 1000 吨为例，仅考虑飞灰处理费用一项，每年即可节省处理成本 90 万~500 万。如果在垃圾焚烧处理行业广泛使用，或采用更高效的除尘器，直接经济效益十分可观。窗体底端

烟气脱硝技术在垃圾焚烧发电厂中的应用

中国航空规划建设发展有限公司
陈晓峰　姜鹏　吴坤

摘要：北京首钢生物质能源项目垃圾焚烧烟气脱硝采用 SCR+SCNR 的联合工艺，联合工艺可将垃圾焚烧烟气 NOx 排放浓度控制在 100mg/Nm3 以下，远远优于现行标准要求，可适应未来更加严格的 NOx 排放限值要求。本文重点介绍了首钢项目烟气脱硝工艺流程及 SCR 系统的优化设计。通过首钢项目，分析了垃圾焚烧工程烟气脱硝系统设计需要重点关注的几个问题。

关键词：生活垃圾焚烧电厂　环境污染　NOx SNCR　SCR　催化剂　烟气加热

1 序言

氮氧化物为空气中的主要污染物之一，随着人们的环境保护意识日益强烈，对 NOx 污染的治理也越来越受到重视。垃圾焚烧过程中产生的氮氧化物一部分来源垃圾中含 N 有机物的分解转化，另一部分来源空气中的氮在氧化气氛和高温条件下产生的。

降低 NOx 排放可分为一次措施和二次措施两种方式。一次措施是通过各种技术手段降低燃烧过程中的 NOx 生成量，即低 NOx 燃烧技术；二次措施是将已经生成的 NOx 通过技术手段从烟气中脱除，即烟气脱硝技术。低氮燃烧技术的脱硝效率比较低，仅靠这种技术难以适应日益严格的环保法规。烟气脱硝技术将是今后一个阶段的重点[1]。在众多的烟气脱硝技术中，选择性催化还原技术(SCR 技术)和选择性非催化还原技术(SNCR 技术)是烟气脱硝的主流技术。目前，国内垃圾焚烧工程大多数采用 SNCR 脱硝工艺，随着 NOx 排放要求日趋严格目前新建项目大多采用 SCR 工艺以满足排放标准要求。随着环境问题越来越多受到人们的关注，采用何种脱硝工艺以满足日益严格的排放要求是一个需要重点关注的问题。

2 工程概况

首钢生物质能源项目位于北京市门头沟区东南部的潭柘寺镇鲁家滩村，现北京首钢鲁矿南区厂区内，厂址距市中心（西三环）42km、距门头沟区石门营环岛 15km。本项目建设总用地面积 313196m2，采用往复式机械炉排炉焚烧处理城市生活垃圾，设计日处理垃圾 3000t（4×750t/d），4 台垃圾焚烧炉—余热锅炉配 2 套直接空冷抽汽凝汽式汽轮发电机组，机组额定装机容量 2×30 MW。垃圾焚烧发电除本厂自用外，多余电能并入外网。目前本工程处于竣工调试阶段，预计 2013 年 9 月底投产。

本项目接收的垃圾主要来源于北京市海淀区、石景山区、门头沟区、丰台区的筛上物垃圾。市容环境卫生管理部门负责用垃圾收集车以及垃圾中转车运入厂内。

垃圾焚烧烟气污染物主要以气态或固态形式存在，一般可以分为四类：酸性气态污染物、不完全燃烧的产物、重金属污染物和颗粒污染物。首钢项目锅炉出口即烟气净化系统入口设计点：烟气量 180000Nm3/h(湿基)，烟气温度 210℃，含水量 15.88vol%，含氧量 7.98 vol%（湿基），入口烟气负荷可在 60～110%之间及烟气温度在 170～10℃之间正常运行。余热锅炉出口烟气污染物成分如表 1 所示。

3 脱硝工艺

SNCR 工艺以炉膛作为反应器，将还原剂在适合温度下与 NOx 反应，从而完成脱硝过程。该工艺投资低，运行维护费用低，但脱硝效率低，通常只能达到 20％～50％的脱除效率[2]。

SCR 工艺在一定温度和催化剂的作用下，有选择的将烟气中的 NOx 去除，生成 N2。该工艺脱硝效率较高，可达 80%以上的脱硝效率[2]。SCR 工艺系统建设运营费用较 SNCR 工艺要高出很多，但是随着环保要求的逐步提高 SCR 工艺正逐步取代 SNCR 工艺应用在垃圾焚烧烟气处理中。

目前，国家标准《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB18485-2001)及北京地方标准(DB11/502-2008)对 NOx 的排放限值均为 250mg/Nm3。对于本项目，目前只采用 SCR 工艺可将 NOx 排放控制在 250mg/Nm3 以下，满足标准的排放限值要求。考虑到未来排放要求将趋于更加严格，以及本项目作为国内技术领先垃圾焚烧示范工程的定位，本工程采用了 SNCR+SCR 联合工艺，近期投入 SNCR 工艺，远期采用 SNCR+SCR 联合工艺，即在焚烧炉适当位置设置 SNCR 脱硝工艺设备，在引风机后烟道设置 SCR 脱硝工艺设备，联合工艺可达到 90%以上的脱硝效率。联合工艺可以达到高效的脱硝效率，也可一定程度的降低 SCR 工艺系统的运行维护费用，但是初投资较高。

首钢项目 SNCR 工艺在炉膛温度为 850～1100℃的区域，把浓度约 20%的尿素溶液通过设置在炉墙上的若干组喷嘴喷入炉膛，尿素溶液迅速热分解生成 NH3 并与烟气中的 NOx 进行 SNCR 反应生成 N2。

尿素还原 NOx 的主要反应为：

$$2NO + CO(NH_2)_2 + O_2 \rightarrow 2N_2 + CO_2 + 2H_2O$$

图 1　选择性非催化还原烟气脱硝技术（SNCR）示意图

首钢项目 SCR 工艺 SCR 反应塔设置于引风机之后的烟道，还原剂是以气态 NH3 的型式喷入 SCR 反应塔前面的烟道,在催化剂的作用下利用氨(NH3)对氮氧化物(NOx)的还原功能，将 SNCR 系统初步脱硝后的烟气残余 NOx 进一步还原为对大气无害的氮气和水 。其主要的化学反应方程式如下：

4NO+4NH3+O2 →4N2 + 6H2O

6NO+4NH3 →5N2 + 6H2O

6NO2+8NH3 →7N2 + 12H2O

2NO2+4NH3+O2→3N2 + 6H2O

本项目中焚烧炉系统已设置 SNCR 炉内脱硝系统，脱硝还原剂采用尿素，考虑到运行维护方便，SCR 系统使用统一的尿素制品作为还原剂。在 SNCR 脱硝系统中，设置 20%浓度的尿素溶解及溶液储罐，根据尿素热解的需要设置所需浓度的尿素溶解和溶液储罐，并配置相关输送泵、尿素溶液溶解罐至尿素绝热分解室的输送设备等。

从配置好浓度的尿素溶液溶解罐经由供液泵、计量与分配装置、雾化喷嘴等进入绝热热解炉，稀释风经加热后也进入热解炉。雾化后的尿素液滴在热解炉内分解，生成的分解产物为 NH3、H2O 和 CO2，尿素热解后产生浓度小于 5%的氨气，经由氨喷射系统 AIG 送入 SCR 系统烟气中。

稀释风机所送稀释风抽自 SCR 脱硝系统后烟气。尿素热解工艺流程如图 2 所示。

4 SCR 系统的优化设计

SCR 系统必须设置在脱硫除尘系统后以保证催化剂的正常运行，但由于脱硫除尘后烟气温度为150℃，而 SCR 系统催化还原反应的最佳温度窗口为 200℃～250℃，因此必须增加烟气加热系统来对烟气进行加热。同时，由于烟气排放温度增加，热损失也会增加。因此 SCR 烟气系统设置既要考虑催化还原反应的彻底性，又要使热损失尽可能小。

在方案确定中，考虑加热系统可采用 SGH(蒸汽/烟气换热器)或 DGH(直接烟气加热器)，热回收系统采用 GGH(气/气换热器)。

SGH（蒸汽/烟气换热器）：蒸汽和烟气换热的热交换器；

DGH（直接烟气加热器）：采用燃料给烟气加热（轻柴油或天然气)；

GGH（气/气换热器）：烟气和烟气换热的热交换器。

最终确定了 3 个可行的 SCR 烟气脱硝方案如下：

方案 1:（SGH，无热回收）

通过对三个方案的对比分析（见表 2），本项目采用 SGH + GGH 热回收 SCR 烟气脱硝工艺流程，烟气系统工艺流程如图 2、图 3 所示。经过布袋除尘器及引风机后的烟气温度按照 150℃设计，SCR 反应塔前采用烟气-烟气换热器（GGH）+蒸汽-烟气加热器(SGH)对烟气进行升温，GGH 的吸热侧烟气出口温度升至 180℃，其余温差经由蒸汽-烟气加热器补充，最终将烟气加热至 230℃后进入 SCR 反应塔内进行脱硝反应，SCR 反应塔的出入口温差不大于 5℃，SCR 出口烟气进入 GGH 放热侧，充分回收利用烟气余热，而后进入烟囱排放

本项目设计中采用给烟气中补入热空气的方式作为防白烟的措施，每条烟气处理线在进入烟囱前的主烟道前通入约 200℃的热空气，以降低烟气的绝对湿度，达到防白烟的目的。每条烟气处理线设置一台防白烟空气风机和一台 SAH（空气/蒸汽加热器），由锅炉来的过热蒸汽加热烟气。

在设计点烟气含水量 15.88vol%的条件下，烟气排放温度 190℃，此时不需要运行防白烟系统。

防白烟的大气温度/湿度条件：

- 环境温度 ： 5℃
- 环境相对湿度 ： 60%

5 脱硝系统的保证值

烟气经过 SNCR+SCR 联合脱硝系统的处理后，烟气污染物浓度保证值如表 3 所示：

6 总结

1.垃圾焚烧烟气脱硝采用 SNCR+SCR 的联合脱硝工艺可达到 90%以上的高脱硝效率，可以适应未来更加严格的 NOx 排放限值要求。炉膛处设置 SNCR 系统对烟气预处理，可以一定程度上减小后续 SCR 系统的容量节省投资及运行维护费用。

2.SNCR 工艺的还原剂主要为尿素和氨，氨是以气态形式喷入炉膛，而尿素是以液态喷入。SCR 工艺的还原剂为氨气，氨气可直接来源于液氨，也可通过氨水或者尿素间接制备。垃圾焚烧项目一

般均位于城市里或其边缘，尿素相对氨而言，运输和贮存更安全且能更好地在烟气中分散，因此选择尿素作为还原剂更为合适。

3. SCR 系统必须设置在脱硫除尘系统后以保证催化剂的正常运行，SCR 系统催化还原反应的最佳温度窗口为 200℃～250℃，脱硫除尘后烟气温度较低，必须增加烟气加热系统来对烟气进行加热。因此确定 SCR 烟气加热方案时，在保证催化还原反应彻底性的前提下，应从减少系统热损失，降低系统复杂性、降低运行维护费用等方面进行充分论证。

4.SCR 系统，烟气中残存的微量 SO3、HCl 和细微颗粒物等在换热器的换热元件上易生成硫酸铵盐和氯化铵盐黏性物质，由于黏性物质易堵塞 SCR 换热元件之间的通道，增加系统阻力增加引风机功耗，严重时甚至威胁引风机的安全运行，进而威胁整个垃圾焚烧厂可靠连续运行。因此，在 SCR 系统设计及运行时应注意以下几个方面：

（1）换热元件选用合适的板型；

（2）电控系统设计时应充分考虑事故处理应急措施，实现完全自动化，并接入机组 DCS。

（3）采用高效的吹灰器，加强吹灰频率。

（4）充分考虑氨逃逸的控制手段和措施，严格控制氨的逃逸率。

（5） 对于容易损耗、磨损或出现故障并因此影响装置运行性能的所有设备，应有备用件，且应设计成易于更换、检修和维护的部件。（6）所有设备和管道，包括烟道、膨胀节等在设计时考虑设备和管道发生故障时能承受最大的温度热应力和机械应力。

（7）设计选用的材料适应实际运行条件，包括考虑适当的腐蚀余量，特别是使用两种不同钢材连接时采取适当的措施。

参考文献

[1] 烟气脱硫脱硝技术手册，化学工业出版社，2006 年。

[2] 火电厂烟气脱硝技术及工程应用，化学工业出版社，2006 年。

[3] 燃煤氮氧化物排放控制技术，化学工业出版社，2004 年。

[4] 生活垃圾焚烧厂脱硝技术探讨，环卫科技网，2011 年。

一种基于实时监控及定位的环境卫生监管系统

辜晓川
青岛高校信息产业股份有限公司

摘要：本文基于对车辆定位、作业实时状态的监控采集，实现了一种环境卫生数字化监管系统。该系统包括环卫基础信息的管理、机械化作业的管理、各类垃圾的管理以及业绩考评、统计、分析等功能，覆盖了城市环境卫生监管的各方面。其中基于精确定位和作业实时监控实现环卫工作的数字化考核，革新了环卫监管的手段，提升了监管的效率。

关键词：实时监控 定位 环境卫生监管

An Environmental Sanitation Supervision System Based on Real-time Monitoring and Positioning

Abstract： Based on the real-time monitoring and acquisition of vehicle location and job operation status, a digital monitoring system for environmental sanitation is implemented in this paper. The functionalities of the system include basic information management, sanitation mechanization job management, kinds of waste management and performance evaluation, statistics and analysis, which cover the aspects of the city environmental sanitation supervision. The digital assessment by means of precise positioning and real-time job operation innovates environmentalsanitation supervision means and improves regulatory efficiency.

keywords： real-time monitor positioning environmental sanitationsupervision

一、引言

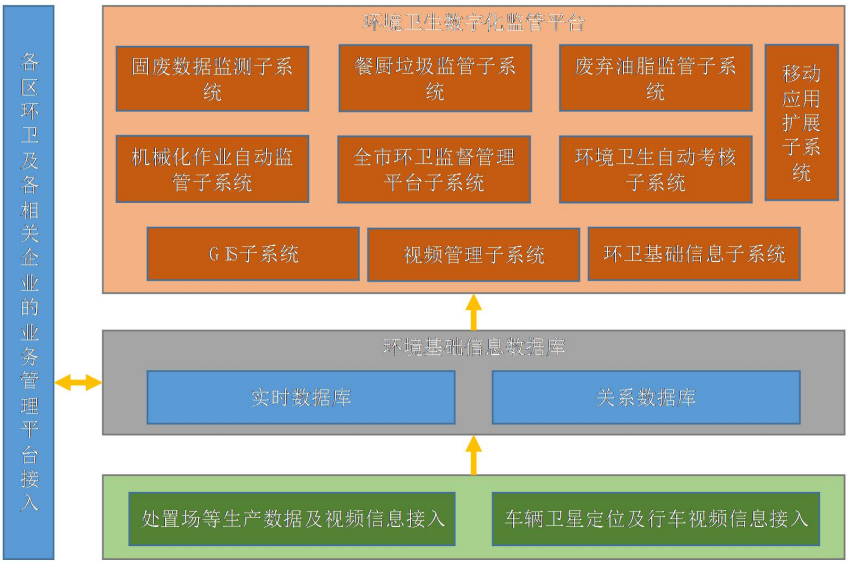
环境卫生是一座城市的脸面，环境卫生的好坏与市民百姓的生活质量息息相关。 随着我国城市化进程的不断推进,城市规模、数量及城市化人口急剧膨胀,城市建筑垃圾、生活垃圾也随之呈现出了惊人的增长速度,1987 年我国城市垃圾量为 5397 万吨,1990 年达 7000 多万吨,1995 年约 1.1 亿吨,2000 年 1.5 亿吨,全国城市垃圾的年平均增长率达到 8%-10.8%。

由于城市建筑垃圾、生活垃圾的产生、收集、运输和处置具有分散性、动态性、全时性和多样性等特点，在整个过程中极易造成环境再次污染，因此需要通过现代化的信息管理手段实现对建筑垃圾、生活垃圾进行实时、全程、可塑的监管，这已成为环境卫生监管日常的管理工作，同时它是数字城管的重要组成部分，也是智慧城市建设的一项重要应用。

环境卫生数字化监管平台系统由多个子系统组成，包括：

环卫基础信息子系统
机械化作业自动监管子系统
餐厨垃圾监管子系统
废弃油脂监管子系统
固废数据监测子系统
GIS 子系统
视频管理子系统
全市环卫监督管理平台子系统
环境卫生自动考核子系统
移动应用扩展子系统

其体系结构如下图所示。它是建立在通用的 Internet/Intranet 基础之上，专门为基于双向多媒体通信网络的综合管理而提供全面服务的软件系统。



本系统的功能特点在于：

1，使用车载北斗/GPS 设备实现车辆的实时定位，并根据车辆所处的位置和移动/停止状态，并结合当时的工作计划，判断车辆的工作状态，并实时更新工作任务进度；

2，在作业车辆、环卫设施上安装感知设备，以机械化作业车辆的动作、以及车辆与垃圾箱等其他环卫设施的接触为触发条件，实时记录和更新工作任务进度和已服务环卫设施的状态；

3，通过开放数据接口，实现与城市数字化城管、建委、环保、等多个部门数据的对接，收集多方面的智慧城市数据，为智慧城市建设时的数据互通提供基础保障。

二、系统功能

1.环卫基础信息子系统

本子系统建立基础信息，包括环境卫生的人员、车辆、设施等信息，同时对环卫的作业、收运、处置等环节建立电子台帐，为业务功能提供数据支撑。

设施数据

按照市、区、街道对辖区内的环卫设施信息进行管理。各类环卫设施除基本数据外，还包括环卫设施的考核成绩、巡查历史、地图位置标注、视频图像链接等关联信息。明细页面可以自定义显示列并能调整顺序，具备按照区、街道进行分类、搜索，按考核成绩、星级、巡查问题数量等排名功能。

设施种类包括：公厕、转运站、监控工地、处置场等。

车辆信息

对环境卫生的作业、收运等车辆信息进行管理，按照市、区、作业公司、街道的所属情况对辖区内的设施信息进行管理。各类环卫车辆除基本信息外，还包括环卫车辆的设备号、巡查历史、视频图像链接等关联信息。信息具备按照区、街道进行分类、搜索，按考核成绩、设备运营商、巡查问题数量进行排名等功能。

车辆种类包括：机械化作业车辆、垃圾收运车辆、餐厨垃圾车辆、废弃油脂车辆、建筑垃圾车辆等。

道路及路边垃圾桶基础信息

对环境卫生的相关的主次干道、背街小巷、过街天桥、垃圾桶情况进行信息管理，按照市、区、街道的所属情况对信息进行基本分类。除基本信息外，还包括道路范围划分、等级划分、等关联信息。信息具备按照区、街道进行分类、搜索，按考核成绩、主次等级、巡查问题数量进行排名等功能。

信息种类包括：主次干道、过街天桥、垃圾桶等。

保洁清运台账

按照市、区、街道的所属情况对环境卫生的保洁、清运作业台账信息进行管理。除基本信息外，

还包括保洁车辆、路段、时间的对应信息，收运路线、时间等关联信息。信息具备按照区、街道进行分类、搜索，按考核成绩、作业时间、主次等级、巡查问题数量进行排名等功能。

台账种类包括：机械化清扫台账、道路洒水台账、道路冲洗台账、机械化保洁作业路线台账、收运作业路线台账等。

数据备份

具有数据定时备份功能，能按期将数据库文件导出到备份服务器进行备份，服务器出现问题造成系统无法访问时，立即启动备份服务器，避免数据丢失延误工作。

2.机械化作业自动监管子系统

本子系统通过定位设备，对机械化作业车辆每天的作业完成情况进行自动获取、自动计算、自动监管，按照区域、道路、保洁情况进行统计、分析。

城市保洁情况展示

将市区内机械化保洁情况以地图形式展示，主次干道、保洁道路根据保洁情况进行分色显示，点击道路显示作业车辆及完成率。

保洁情况实时统计

对市区内正在进行作业的机械化车辆在地图中进行显示，并将每辆车时速，作业情况进行标记，将道路的完成情况进行分色显示，实时计算当前作业车辆的作业路线和作业道路。

作业情况考核

根据机扫、洒水、机械化保洁车辆的道路作业台账，对作业情况进行考核，算出道路的作业车辆、时间、作业趟数、平均速度等情况，并生成统计报表。对考核的车辆为达到标准标记为红色未达标，每条道路作业情况可以点击查看，进行道路台账和实际作业路线的比对和展示操作，便于人工进行排查

周、月、年汇总考核

按照周、月、年度为时间段对道路、车辆的作业情况进行汇总，生成报表，点击每条数据能展示出计算明细数据。

3.餐厨垃圾监管子系统

本子系统是专门针对餐厨垃圾进行的监管，包括餐饮企业信息、对餐厨垃圾的处理、考核等功能。

餐厨基本信息管理

包括产生单位管理、收运单位管理、餐厨垃圾处理场管理、协议登记备案管理、收运计量模块、计量数据管理、收运考核模块、执法检查模块、检查考核管理、经费拨付管理、分类数据管理、以及区域街道管理等功能。

处置场监管

包括处置场实时监测、处置场生产运行数据和生产现场视频接入、考核管理、综合查询统计等功能。

4.废弃油脂监管子系统

废弃油脂基本信息管理

包括产生单位管理、收运单位管理、废油处置企业信息管理、协议登记备案管理、执法检查管理、收运量登记管理、交接量登记管理、运行监测管理、计量数据管理、监管信息管理、分类数据管理、区域街道管理、运输企业场区视频监控等功能。

考核管理

考核类型包括：收运单位日常考核、收运单位年度考核、收运单位评估结果

综合查询统计

对废弃油脂的产生情况及处理情况，根据产生单位、运输单位、处置场分类进行统计查询，包括按区域签约数统计，展示签约数量和统计分析结果，以及按收运单位收运量统计，展示收运数量和统计分析结果。

5.固废数据监测子系统

通过建立固废处置厂（焚烧、中转站、填埋场、生化、渗沥液等厂区）工况数据监控系统，对处置数据进行实时监控、数据预警、生成报表。通过专线连接，直接抓取处置厂区设备运行数值、出入量、污染物、耗材、环保、环境等数据，建立数据校准、分析系统，建立数学模型，对厂区运行情况进行全面分析。对处置终端产物，废渣、飞灰等的流通去向进行统计。

子系统内功能包括：运行工况展示、设备数据信息、出入量管理、污染物管理、环保数据管理、厂区报表管理。

子系统具有现场采集功能，可将现场的气体分析仪等检测设备产生的数据远传到服务器端。

6.GIS 子系统

子系统集成 GIS 系统，具备地图的加载、定位、搜索功能，增加图层、标记、展示、分颜色的支持，实现系统数据与地理信息展示的有机结合。

通过专用设备，对 GPS（或北斗）等定位信号进行接收，从而增加定位、跟踪、回放、路线规划、导航、信息列表等功能。

基础地理信息管理

根据环卫设施、道路等基础信息、电子台账等基础数据划分基础图层，展示在地图中。包括：

基础图层管理

根据环卫设施、道路等基础信息、电子台账等基础数据的图形划分、修改、标记、删除、查询等功能。图层具备地图部件搜索（即基本信息数据库搜索）、地图一般搜索（类似百度地图搜索）、标记文字、标记颜色、多级显示功能。

分级显示：地图显示范围较大时，显示区域内设施数量，地图拉近时显示设施位置，点击显示设施明细。

网格化图层管理

对于网格化巡检过程中的图层进行划分，具备修改、标记、删除、查询等功能。图层具备地图部件搜索、地图一般搜索、标记文字、标记颜色。关联巡检历史和巡检人员。

自定义图层管理

用于一般图层管理，可在临时调度、地图展示、功能说明中起到解释说明、功能辅助的作用，具备图层添加、修改、删除、标记点、画多边形、折线、标记文字、标记颜色、地图部件搜索、地图一般搜索、标记文字、标记颜色功能。

车辆管理

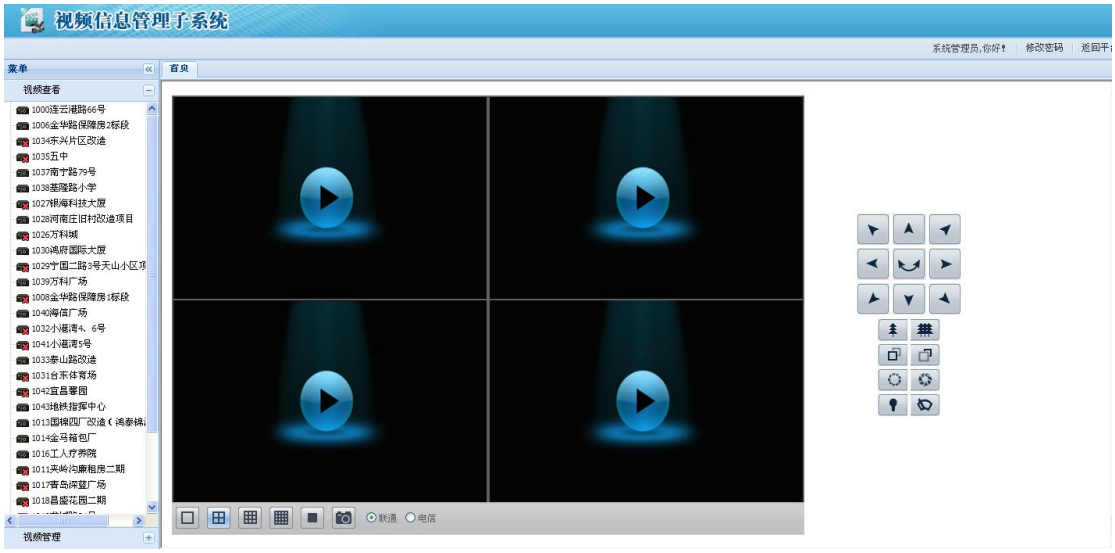
对 GPS（或北斗）等定位信号进行接收，每天显示车辆在线情况，对离线车辆及时报警提醒。

功能包括：车辆地图展示、车辆定位搜索、车辆跟踪、车辆轨迹回放、禁行区域、路线规划、车辆导航、区域内轨迹查询以及基本信息维护。

7.视频管理子系统

搭建视频管理系统，统一采取专线连接，接入内容生产现场视频。主要完成功能：视频播放与读取，监控点信息管理，视频录制和云台控制；

搭建视频查看权限体系，允许各区市自行查看各地区的现场视频。



8. 全市环卫督查管理平台子系统

通过建立全市环卫督查管理平台，实现与各区问题转办，事件跟踪与考核评估；

子系统功能包括：车辆状态查看、视频监控查看、建筑垃圾信息查看、考核信息管理、网格化巡检信息、网格管理、任务指派、问题转办、网格统计等。

9. 环境卫生自动考核子系统

对环境卫生考核内容，按照道路、楼院、转运站、公厕、处置厂等内容按照区域和筛选条件进行随机抽取，生成考核方案，考核使用客户端或人工进行考核情况的录入（人工仅为客户端上传出现问题时微调修正），自动生成考核成绩。

子系统功能包括：考核内容管理、考核计划查看、考核成绩查看与修正、考核报表及分析、建筑垃圾专项考核等。

10. 移动应用扩展子系统

通过对巡检客户端进行升级，支持安卓与苹果手机，强化其地理位置搜索、导航、查询功能，方便进行巡查计划查看、问题地点定位、当前位置可视化显示、上传数据查看、作业车辆查看等功能，提高一线巡检人员的工作效率。

子系统功能包括：地图展示（包括设施、任务、考核项目等）、问题回访与查询、巡检导航等。

三、结论

通过将实时监控（视频、定位、环保监测等）技术引入环卫系统，构建了环境卫生数字化监管系统，该系统快速高效地解决了传统环卫监管的问题，取得了很好的应用效果，得到实际使用单位的认同。通过该系统，也使我们认识到，将最新的信息化技术引入到城市监管领域，可以产生崭新的监管模式，给管理者和实施者带来巨大的效率提升。

参考文献

[1] 胥晓光. 济南市环卫数字化信息管理系统的构建[J]. 环境卫生工程. 2010(04)

[2] 孟祥湖. 新时期环卫车辆技术升级及作业规范化发展[J]. 中国高新技术企业. 2014(17)

[3] 陈丰照. 环卫系统智能管理监控系统解决方案探究[J]. 中国管理信息化. 2015(07)

以废旧锂离子电池为原料制备δ-MnO_2及其去除水中亚甲基蓝的研究

沈棒　袁海平　朱南文　顾卫星　徐波
1.上海交通大学大学环境科学与工程学院上海 200240，　2.上海巨浪环保有限公司上海 201711

摘要：本文以废旧锂离子电池的正极材料为原料制备MnO_2，通过废旧电池人工拆解、热剥离、酸浸以及过硫酸铵氧化等步骤制备MnO_2，对温度、pH、反应时间以及烘干温度因素的分析，以产物晶型和生成量作为指标，确定最佳制备条件。结果表明，在80℃、pH=4、反应时间为4h，$S_2O_8^{2-}$浓度为0.05mol/L时，所制的MnO_2属于δ-MnO_2，亚甲基蓝降解实验结果表明，在pH=4，反应时间为6h，200mg/L所制备的δ-MnO_2降解浓度为20mg/L的亚甲基蓝溶液的效率可达到50%，表明从废旧锂离子电池中回收制备的MnO_2有着较好的催化降解性能，因此实现了以废治废的理念，同时为锂离子电池的回收利用提供了新的思路。

关键词：锂离子电池，二氧化锰，降解，亚甲基蓝

Study on Methylene Bule removal by δ-MnO_2recovered from spent Lithium-ion batteries

SHEN Bang　YUAN Haiping　ZHU Nanwen　GU Weixing　XU Bo
(1.School of Environmental Science and Engineering，Shanghai Jiaotong University，Shanghai，200240，China；2.Shanghai Julang Protection Environment Co.Ltd.，　Shanghai，201711，China)

ABSTRACT： In this paper, MnO_2 was synthesized by cathode material from spent li-ion batteries. The process includes manual dismantle, high-temperature separation, acid leaching and oxidation by ammonium persulfate etc. The result shows thatδ-$MnO_2$is successfully produced at 80°C with pH value is 4 and the concentration of $S_2O_8^{2-}$ is 0.05mol/L. Moreover, δ-MnO_2 is an efficient catalyst for removing Methylene Bule(MB), the recovered δ-$MnO_2$was applied in MB degradation test, and suggested that after 6h 50% 20mg/L Methylene Bule could be degraded with 200mg/L recovered δ-MnO_2 at ambient temperature. This indicates δ-$MnO_2$with effective degradation performance can be produced under special conditions, which conducts the idea of 'waste treat waste' and provide a new way to recover spent li-ion batteries.

Keywords： li-ion batteries, MnO_2, degradation, Methylene Bule

1 前言

随着电子产品的快速发展，锂离子电池在世界范围内广泛使用，自Sony和A&T公司先后于1991和1992年将其商业化之后[1]，锂离子电池在小型仪器设备（相机、手机、笔记本电脑等）中得到普遍应用。由于锂离子电池的清洁高效以及目前世界范围内的能源和环境污染现状，全世界都在推进锂离子电动汽车的发展。据工信部数据显示，2015年10月，我国生产新能源汽车5.07万辆，同比增长8倍，在锂离子电动汽车数量快速增长的同时，动力锂离子电池的回收问题也将浮出水面。研究表明，一般的动力锂离子电池的循环使用次数为1700-5300，这意味着电池的寿命在4.5-14.5年[2]，也就是说，中国在未来10年里可能会面临着大量动力电池报废的情况，不及时处理将会对人体和环境造成损害。

动力锂离子电池主要由正极、负极、电解液以及隔膜四部分组成，其中正极是决定电池性能的主要部分，一般采用插锂化合物（如$LiMn_2O_4$、$LiMPO_4$（M=Co，Ni，Mn，Fe等））[3]。目前常见的动力汽车正极材料有$LiCoO_2$，$LiNi_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}O_2$,不难看出正极材料中含有大量的金属离子（Co、Ni、Mn、Li等），由于Co元素价格昂贵，近年来，以$LiNi_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}O_2$为正极活性物质的电池开始渐渐取代$LiCoO_2$正极电池，呈现出增加锰含量减少钴含量的趋势，因此为了有效充分地利用正极材料中的锰金属，研究如何回收Mn元素将会很有价值。

锰氧化合物是自然界中常见的氧化剂，研究表明锰氧化合物能氧化自然界中多种无机或有机化

合物且对金属离子和有机物有较强的吸附能力[4]。MnO_2是最常见的锰氧化合物之一，其有多种晶型，比较常见的为α、β、γ、δ四种[5]，蔡冬鸣[6]研究了这四种不同结构的MnO_2对亚甲基蓝的处理效果，结果显示，相对于其他三种晶型的MnO_2而言，δ-MnO_2的处理效果最好，并且认为其原因之一是δ-MnO_2独有的层状结构的吸附能力要强于α、β、γ-MnO_2的隧道结构。

本文以废旧三元锂离子电池（正极活性物质为$LiNi_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}O_2$）为原料，通过前期预处理（人工拆除、破解等）、正极材料热剥离、活性物质酸浸以及过硫酸铵氧化，制备出δ-MnO_2（标记为cathode-MnO_2），分别考察了反应温度、时间、pH以及烘干温度对制备产物的影响，采用XRD等技术对回收所得cathode-MnO_2进行表征，并且以亚甲基蓝为研究对象，研究cathode-MnO_2对不同pH下的亚甲基蓝的催化降解效果。

2 实验部分

2.1 主要实验材料

本实验中所用的废旧三元锂离子电池来自于上海巨浪环保有限公司，其正极材料为$LiNi_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}O_2$，型号为Samsung-CS0400R0003E，所用过硫酸铵$(NH_4)_2S_2O_8$、碳酸钠Na_2CO_3、硫酸H_2SO_4均为国药分析纯，实验过程中使用的水均为去离子水。

2.2 Cathode-MnO2的制备及表征

实验中先将电池人工拆解，得到正极材料，之后在400℃高温热处理得到黑色活性物质，对活性物质进行酸浸处理，酸浸过程可参考PratimaMeshram的研究[7]。取100ml酸浸液于250ml烧杯中，加入50ml 0.1mol/L$(NH_4)_2S_2O_8$溶液，采用1mol/LNa_2CO_3溶液调节到特定pH。烧杯在水浴锅中加热一定时间，自然冷却到室温之后离心所得沉淀，并洗涤数次直至上清液为中性。然后将所得的黑棕色沉淀物放于55℃下烘干24h，称量并进行表征。

X射线衍射分析（XRD）能够方便测量出晶体的结构，本实验中测试条件为CuKα（λ=0.15406）辐射，管压40kV，管流30mA，扫描范围为5°-90°，速度为10°/min。通过扫描电镜（JSM-6390LV，日本电子）来观察产品的微观形貌。亚甲基蓝的降解效率使用紫外分光光度计测量。

2.3 亚甲基蓝催化降解实验

降解实验在250ml锥形瓶中进行，亚甲基蓝初始浓度为20mg/L，cathode-MnO_2浓度为200mg/L，室温条件下通过1mol/LH_2SO_4调节pH，并在振荡器中振荡计时，反应一定时间后取出5ml反应液，经12000r/min离心2min，然后用5ml比色管在664nm下测量其吸光度。通过标准曲线换算出亚甲基蓝浓度，其去除率的计算公式如下：

$E=(c-c_0)/c\times100\%$

式中：c、c_o分别表示处理前、后亚甲基蓝的浓度。

3 结果与讨论

3.1 Cathode-MnO2的制备及表征

3.1.1 反应pH的影响

实验中，剥离出的活性物质由1mol/L的H_2SO_4进行酸浸处理，本部分实验主要考察在温度为90℃，反应时间为1h，在105℃下烘干4h，当pH=0.36、1、4、7、10时（0.36是酸浸液和过硫酸铵之后混合后的pH值）所制得的cathode-MnO_2的。图3.1为在不同pH值下的制得MnO_2的XRD图。

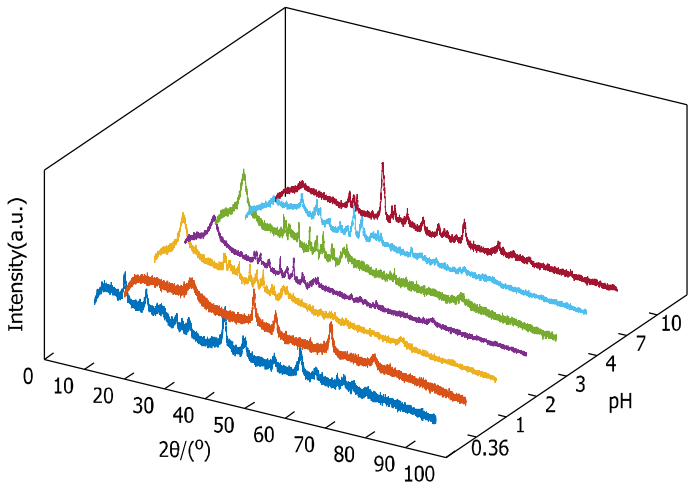


图 3- 1 不同 pH 值下的回收物 XRD 图（T=90℃，t=1h，105℃ 下烘干 4h）

从图中可以看出在 pH=0.36、1、7、10 时，XRD 的峰位各不相同，说明 pH 对所制得产物的晶型结构影响很大，而在 pH=2、3、4 时，在 2 θ=11.9、36.8、65.8 时具有明显的相同峰位，图 3.2 可更加清楚地对比这三个 XRD 图谱，另外，图 3.2 中的标准 δ-MnO_2 的制备方法来自于 Gang Zhu[8]。从图中可以看出在回收所制备的产品的 XRD 谱图中，2 θ=11.9、36.8、65.8 处的峰与标准的 δ-MnO_2 对应峰重合，基本确定所制得的产品即为 δ-MnO_2，但是在 2 θ=22-35° 之间出现了明显的杂峰，XRD 分析结果显示这些杂峰是其他晶型的锰氧化合物以及钴氧化合物。

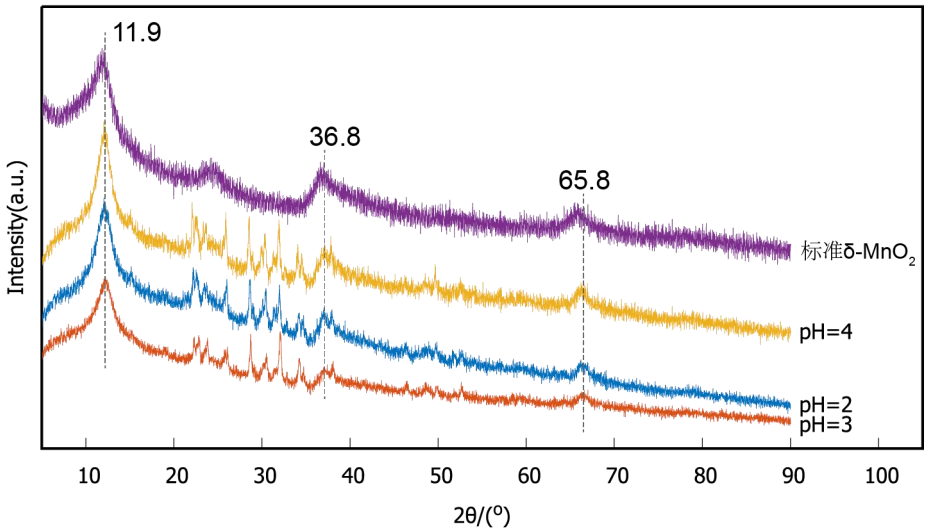


图 3- 2pH=2、3、4 时制得产品与 δ-MnO_2 的对比

3.1.2 烘干条件的影响

考察在 pH=2、3、4 下不同烘干条件下的所回收的 cathode-MnO_2 晶型的不同，烘干条件选为 50℃，24h 以及 105℃，4h。图 3- 3 表示的是 90℃ 下，pH=3 和 4 时分别在两种不同的烘干条件下所得的产物晶型。由图可见，在 pH=3 时，两种烘干条件下所制得的 MnO_2 都有杂峰，这说明 pH=3 条件下不能制得 δ-MnO_2，然而，在 pH=4，55℃ 下烘干 24 小时所得的产物晶型与图 3- 2 中的标准 δ-MnO_2 晶型基本一致，因此可认为在 pH=4，55℃ 下烘干 24 小时可以制得 δ-MnO_2，而在 pH=3 时以及 105℃ 下烘干都将产生大量的杂峰。

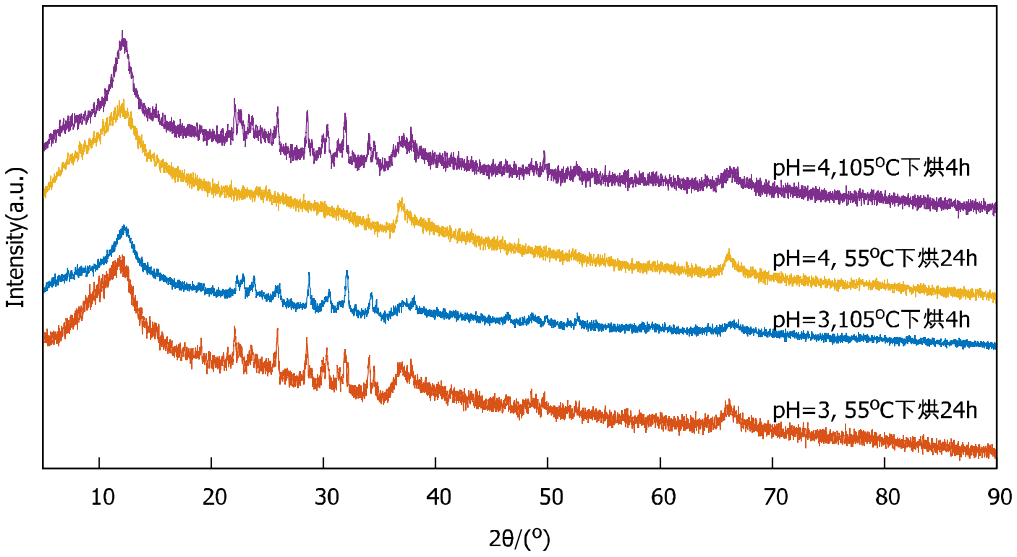


图 3- 3 不同烘干温度下晶型对比

3.1.3 反应温度的影响

本实验中同时考察了反应温度（60℃、70℃、80℃）对结果的影响，同样取 100ml 的酸浸液，在 pH=4 时反应 2h，在 55℃ 烘干 24 小时，为不同温度下所制得 MnO_2 的 XRD 图。其中在 60℃、70℃ 下所得沉淀经离心过滤烘干后质量分别为 55.1mg 和 96.6mg，可见在这两种温度下反应并不能完全进行，因此会造成大量的 Mn 离子流失，而在 80℃ 可制得 585mg，锰的回收率大大提高，同时，从 80℃ 下反应制得的 MnO_2XRD 图（图 3- 3）中可以看出，其晶型和 δ-MnO_2 基本一致，所以认为在本方法中最适宜的反应温度为 80℃。

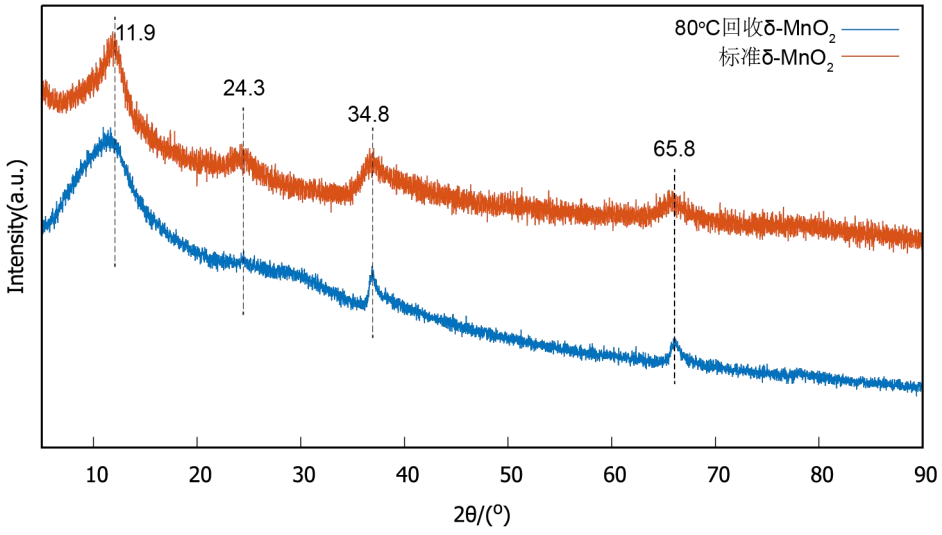


图 3- 480℃ 下所得 MnO_2 与标准 δ-MnO_2 的 XRD 对比图

3.1.4 反应时间的影响

实验考察了反应时间对所得产物的影响，反应时间分别为 1h、2h、3h 和 4h，其他条件为 pH=4、反应温度为 80℃，烘干温度为 55℃，其结果图 3- 5。左图表示的是在四种时间条件下所得的 MnO_2XRD 图，从图中可以看出，除 3h 反应结果外，其他条件下所制得的均为 δ-MnO_2，具有较高的稳定性。右图表示的是四种时间条件下所得 MnO_2 的质量，可见，随着反应时间的增加，所得产物的质量也不断增加，意味着 Mn 元素的回收率也在不断地增加，因此，本部分实验认为当反应时间为 4h 时，能够采用本文中的制备方法从锂离子正极材料的酸浸液中制备 δ-MnO_2，且 Mn 离子回收率较高。

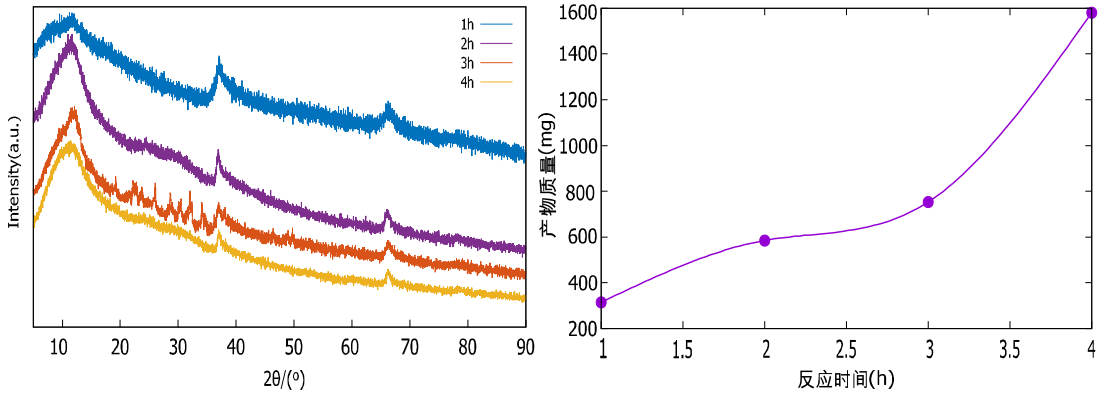


图 3- 5 不同反应时间下所得产物的晶型（左图）及质量（右图）对比图

3.2 亚甲基蓝催化降解实验

通过前一部分的探讨发现，在 pH=4、反应温度 80℃、反应时间 4h、烘干温度为 55℃ 条件下能够制得 δ-MnO_2，本部分选择在该实验条件下所制备的 MnO_2 进行催化降解亚甲基蓝实验，并且与标准的 δ-MnO_2。降解实验分别在 pH=4 和 6 下进行，其他详细反应过程可参见 2.3 节。从图 3- 6 中可以看出，pH=6 时候的降解效果要比 pH=4 差，这是由于在 pH 值较低时，锰氧化物表面有大量的自由羟基，溶液中的自由质子增多可分离 MnO_2 表面的 Mn^{2+}，从而增加了其表面的活性位点，吸附能力增强，最终加快亚甲基蓝降解速度[9]。对比标准 MnO_2 和回收所得的 MnO_2 可以发现，在两种不同的 pH 反应条件下，回收所得的 MnO_2 的降解效果都要差于标准的 MnO_2，pH=4 时，反应 6 小时之后，回收所得的 MnO_2 对亚甲基蓝的处理率可达到 50%，pH=6 时使用标准 MnO_2 降解率为 60%，两组实验降解率仅相差 10%，这说明在达到相似的处理效果时，回收 MnO_2 亚甲基蓝降解实验的反应 pH 要低于标准 MnO_2，而在锂离子电池回收过程中会产生大量的废酸，这些废酸能够用于调节亚甲基蓝废液的 pH 值，从而减少污染，降低回收成本又能够资源利用。

4 结论

本文通过研究在不同条件（反应温度、pH、时间以及烘干条件）下制备 MnO_2，研究结果发现 pH 对所制的 cathode-MnO_2 晶型影响最大，在 pH=4 时分别能够得到 δ-MnO_2，反应温度和反应时间对其晶型的影响不大，但是随着温度的升高以及时间的增加，反应所得的 MnO_2 不断上升。综合考虑各种因素，确定最佳反应条件为：反应温度 80℃、反应时间 4 小时、pH=4、55℃ 下烘干 24h，并采用在此条件下所制备的 δ-MnO_2 进行亚甲基蓝催化降解实验，结果发现所制备的 cathode-MnO_2 能够有效催化亚甲基蓝，在 pH=4 的条件下催化效果可以达到 50%，与标准 δ-MnO_2 pH=6 时候的处理效果（60%）接近。

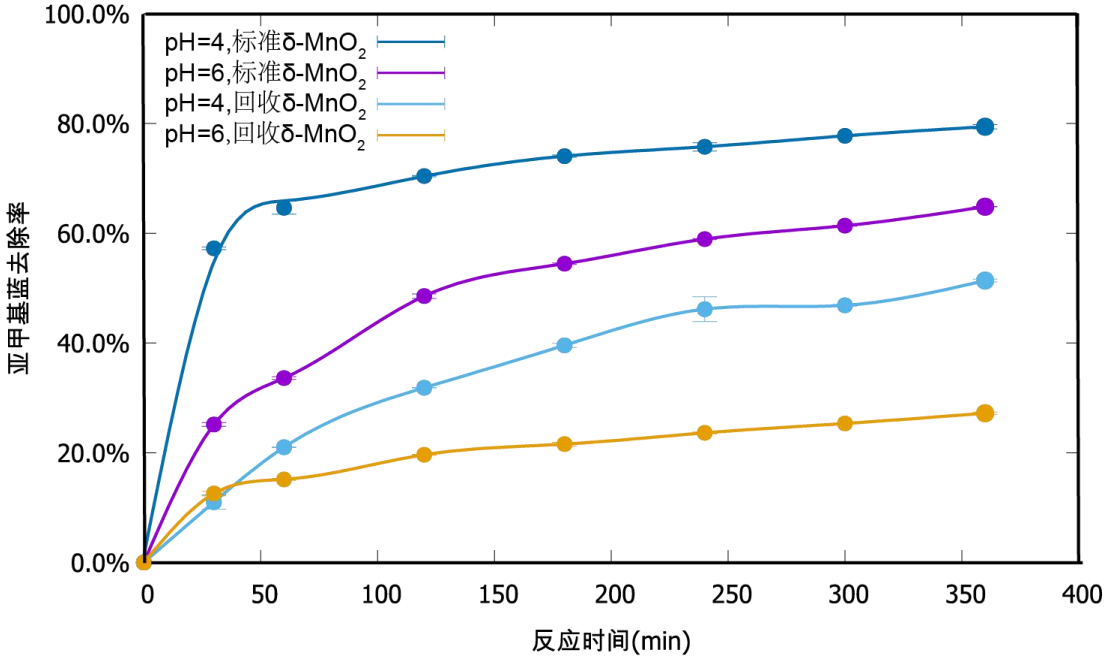


图 3- 6 回收及标准 δ-MnO_2降解亚甲基蓝效果对比

致谢

感谢：上海张江国家自主创新示范区专项发展资金重点项目，名称：废旧锂离子电池回收与资源化关键技术研究及工程示范(No.21505-QP-B108-006)

参考文献：

[1].义夫正树，拉尔夫·J.布拉德，小泽昭弥. 锂离子电池—科学与技术[M]. 北京：化学工业出版社，2014.

[2].Millner A. Modeling lithium ion battery degradation in electric vehicles[A]. In Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply (CITRES), 2010 IEEE Conference on[C], 2010: 349-356.

[3].王刚，赵光金. 动力锂电池梯次利用与回收处理[M]. 中国电力出版社，2014.

[4].Lin K, Liu W, Gan J. Oxidative removal of bisphenol A by manganese dioxide: efficacy, products, and pathways[J]. Environmental science & technology, 2009, 43(10): 3860-3864.

[5].Devaraj S, Munichandraiah N. Effect of crystallographic structure of MnO2 on its electrochemical capacitance properties[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2008, 112(11): 4406-4417.

[6].蔡冬鸣，任南琪. 不同晶型锰氧化物去除水中亚甲基蓝染料的研究[J]. 环境科学学报，2006，26(12)：1971-1976.

[7].Meshram P, Pandey B D, Mankhand T R. Hydrometallurgical processing of spent lithium ion batteries (LIBs) in the presence of a reducing agent with emphasis on kinetics of leaching[J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 281418-427.

[8].Zhu G, Li H, Deng L, etc. Low-temperature synthesis of δ-MnO 2 with large surface area and its capacitance[J]. Materials Letters, 2010, 64(16): 1763-1765.

[9].彭波，陈若愚，程晓迪，etc. 纳米酸性水钠锰矿去除亚甲基蓝的研究[J]. 环境工程，2015，33(02)：48-52.