

《二氧化碳捕集系统用胺气溶胶捕集装置》编制说明

（征求意见稿）

一、工作简况

1. 任务来源

本项目是 2022 年 1 月 10 日“中国工业节能与清洁生产协会团体标准立项的通知”进行制定，项目名称“二氧化碳捕集系统用胺气溶胶捕集装置”，本文件由中国工业节能与清洁生产协会提出并归口。组织单位：中国工业节能与清洁生产协会，标准起草牵头单位：浙江大学，计划完成时间为 2022 年 7 月。

2. 主要工作过程

起草阶段：2021 年 1 月 10 日，接到计划下达任务后，由中国工业节能与清洁生产协会组织成立标准起草工作组。工作组在广泛收集国内外二氧化碳捕集系统用胺气溶胶捕集装置环境保护、清洁生产的相关政策、法律法规、技术导则和标准等文献，选择典型企业开展系统深入的实地调研和数据统计，结合我国二氧化碳捕集系统用胺气溶胶捕集行业现状，在全面系统研究的基础上，于 2022 年 4 月 11 日完成团体标准《二氧化碳捕集系统用胺气溶胶捕集装置》（初稿）及编制说明。

2022 年 4 月 12 日~4 月 22 日，对团体标准《二氧化碳捕集系统用胺气溶胶捕集装置》（初稿）及编制说明进行了标准制定组内部及相关专家函审，共发送征求意见函 16 家单位。收到 6 家单位回函，其中 10 家单位无意见，共提出 32 条修改意见。其中，采纳 29 条，部分采纳 1 条，未采纳 2 条。根据各位专家提出的建议，对标准“草稿”进行修改和完善，于 6 月 16 日形成团体标准《二氧化碳捕集系统用胺气溶胶捕集装置》（研讨稿）及编制说明。

于 2022 年 6 月 20 日~6 月 22 日，在杭州萧山组织召开团体标准《二氧化碳捕集系统用胺气溶胶捕集装置》（研讨稿）研讨会，根据会议意见，对标准“研讨稿”进行修改和完善，于 7 月 4 日形成团体标准《二氧化碳捕集系统用胺气溶胶捕集装置》（征求意见稿）及编制说明。

征求意见阶段：

审查阶段：

报批阶段：

3. 主要参加单位和工作组成员及所做的工作等

本文件起草单位：浙江大学、浙江菲达环保科技股份有限公司、浙江天洁环境科技股份有限公司、福建龙净环保股份有限公司、华电电力科学研究院有限公司、华电科工集团有限公司、国电环境保护研究院有限公司、哈尔滨锅炉厂有限责任公司、浙江天地环保科技股份有限公司、国能龙源环保有限公司、中国矿业大学、浙江德创环保科技股份有限公司、上海袋式除尘配件有限公司、张家口宣化昌通环保设备有限公司、武汉凯迪电力环保有限公司、西安热工研究院有限公司、浙江大学嘉兴研究院等。

本文件主要起草人：

所做的工作：。

二、标准编制原则、主要内容和解决的主要问题

1. 标准编制的原则

标准制、修订遵循“面向市场、服务产业、自主制定、适时推出、及时修订、不断完善”的原则，标准的制、修订与技术创新、试验验证、产业推进、应用推广相结合，统筹推进。本文件编制主要依据以下两条原则：

a) 编写结构及格式按《标准化工作导则第1部分：标准化文件的结构和起草规则》(GB/T 1.1-2020)的规定。

b) 技术内容主要以《湿法烟气脱硫设备 除雾器》(JB/T 10989—2020)、《丝网除沫器》(HG/T 21618—1998)、《电除尘器》(GB/T 40514—2021)、《热交换器》(GB/T 151—2014)、《低低温电除尘器用烟气冷却器》(JB/T 14090—2020)和《湿式电除尘器性能测试方法》(GB/T 40505—2021)等标准作为基础。

2. 标准主要内容

2.1 适用范围

本文件规定了二氧化碳捕集系统用胺气溶胶捕集装置的术语和定义，要求，试验方法，检验规则，标志和文件，包装、运输和贮存。本文件适用于燃煤锅炉烟气二氧化碳捕集系统用胺气溶胶捕集装置的制造。燃油锅炉、燃生物质锅炉、燃气锅炉、掺烧其他燃料的燃煤锅炉以及钢铁、有色冶炼、建材、化工、船舶等行业需要采用胺气溶胶捕集装置时可参考执行。

2.2 规范性引用文件

本文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

2.3 术语和定义

本文件对胺气溶胶捕集设备的术语和定义进行系统梳理，同时为方便采标，确定了 8 个术语和定义。结合《燃煤烟气二氧化碳捕集装备》(JB/T 12909-2016)对“二氧化碳捕集装备”“吸收塔”；《大气气溶胶观测术语》(GB/T 31159-2014)对“气溶胶”；《湿法烟气脱硫设备 除雾器》(JB/T 10989-2020)和《丝网除沫器》(HG/T 21618—1998)对“丝网除雾器”“折板除雾器”等术语和定义进行修改调整。

2.4 技术要求

2.4.1 基本要求

结合《丝网除沫器》(HG/T 21618—1998)、《湿法烟气脱硫设备 除雾器》(JB/T 10989-2010)、《电除尘器》(GB/T 40514-2021)、《热交换器》(GB/T 151-2014)和《低低温电除尘器用烟气冷凝器》(JB/T 14090)等相关标准规范要求，对胺气溶胶捕集装置的设计基础参数、设计使用寿命、装置可用率等给出基本要求。同时进一步结合除雾器、烟气冷凝器、湿式电除尘器等胺气溶胶捕集设备特点给出了胺气溶胶捕集设备设计选型基础数据和典型工艺流程图附录。

2.4.2 性能要求

对氨气溶胶捕集装置总颗粒物浓度和脱除效率，压力降等，为应检验项目；电能消耗量、水消耗量等为按需检验项目；同时对烟气冷凝器和湿式电除尘器漏风率进行规定。

2.4.3 除雾器

(1) 本文件中除雾器结构包括折板除雾器和丝网除雾器，已发布《丝网除沫器》(HG/T 21618—1998) 标准，技术成熟，可直接引用，因此本文件中关于除雾器材料、操作流速、除雾器叶片间距等相关规定直接进行引用。已发布的《湿法烟气脱硫设备 除雾器》(JB/T 10989-2020)，具有一定的借鉴意义，但是由于应用场景的差异，需要对关键参数进一步界定分析。

(2) 折板除雾器作为惯性场脱除颗粒物具有脱除较大粒径颗粒的效果，同时内部扰动有助于发生团聚。波纹板是惯性脱除颗粒物的常用方式，常用于湿法脱硫除雾器内。由于有机胺气溶胶物性参数与水滴等存在差异，因此为探究除雾器对气溶胶的捕集效果，有必要对气溶胶在波纹板内的运动特性进行分析。选取两种常见的波纹板结构形式：带钩波纹板与普通波纹板采用 COMSOL 软件进行仿真研究。

选用普通波纹板与带钩波纹板进行对照，模型如下所示。两种波纹板内部速度，如图 1 所示，入口速度均为 3m/s。普通波纹板内部速度变化较小，无剧烈变化，最大速度为 5.2m/s，位置处于正中间内侧凹陷处。带钩波纹板内部速度变化剧烈，远大于普通波纹板，最大速度为 10.8m/s，位置处于钩片与出口之间外侧处。由于内部钩片的存在，通道流通截面积突然缩小，而流量保持不变，因此速度激增。

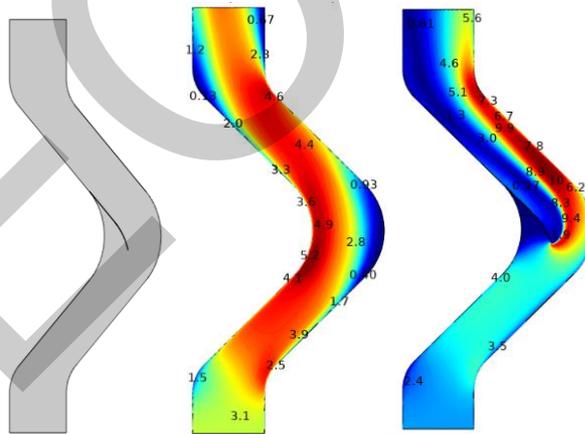


图 1 波纹板建模图与速度大小（左为模型图，右为速度大小图）

在内部压力分布方面，由于出口设置为 0Pa，普通波纹板进出口压降为 5Pa，带钩波纹板压降为 43Pa，远大于普通波纹板，如图 2 所示。由此可见，波纹板内部结构的变化对内部压力分布影响很大，为防止过多能量损耗，在工业应用中应综合考虑脱除效率与压降之间的关系，择选合适的形状结构。

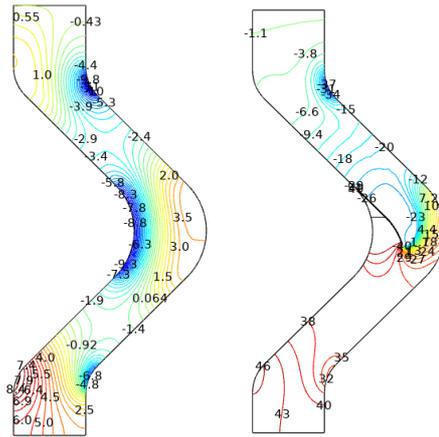


图2 波纹板内部压力大小（左图为普通波纹板，右图为带钩波纹板）

对于两种波纹板，其对气溶胶颗粒物的脱除效率均随粒径增加而减小，这是由于随粒径增大，颗粒物惯性力也增大，由于松弛时间 t 与粒径平方成正比，因此脱除效率增大。如图3所示，普通波纹板对 $25\mu\text{m}$ 以上颗粒具有较好的脱除效果，而带钩波纹板对 $10\mu\text{m}$ 以上颗粒效果较好。钩片结构的增加尽管增加了内部气流场的扰动，增强对颗粒物的控制效果，但其压损更大，无疑增加了气流通过惯性场的阻力，不易于工业经济性。因此本文件选用普通折板除雾器。

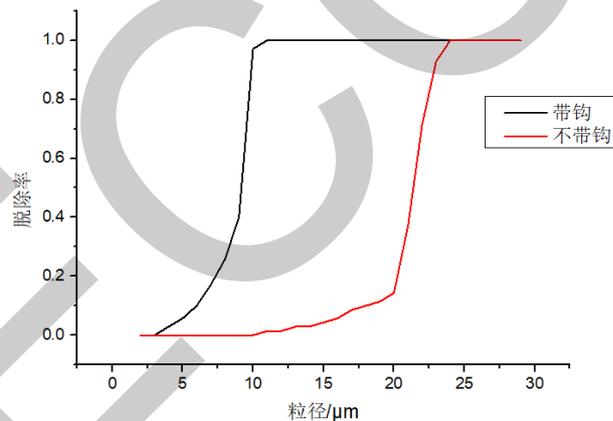


图3 带钩波纹板与普通折板除雾器脱除效率对比

当气流流速由 3m/s 增大至 5m/s 时，波纹板对气溶胶的脱除效率有明显提升，这是因为速度增大，运动过程中颗粒所受离心力增加，在弯曲通道附近气体流速方向不易改变，因此易于碰到壁面从而被捕集，有利于气液分离。如图4所示。

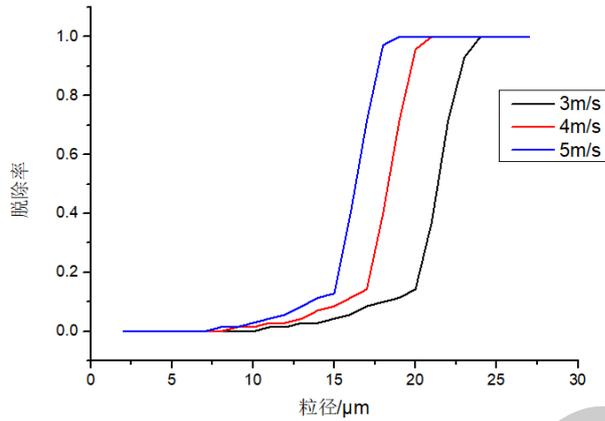


图 4 气溶胶脱除率与流速、粒径之间的关系

然而随着流速增加，当流速过高时容易造成气体二次带水，从而降低脱除效率；同时压降增大，如下图 5 所示：流速为 3m/s 时，管道内压力最大 6.3Pa，最低处-11.1Pa，相差 17.4Pa；流速 4m/s 时，管道内压力最大 11.1Pa，最低为-20.1Pa，相差 31.2Pa；流速为 5m/s 时，管道内压力最大为 17.11Pa，最小为-31.68Pa，相差 48.79Pa。由此可见，流速变大使脱除效率增加的同时，也会带来管道内压力的变化，在实际应用中，综合考虑脱除效率与压力损失的影响，保证脱除效率的同时降低能量消耗。同时考虑到捕集塔内空塔流速通常较低约 1.0m/s，除雾器流速过大不易于现场安装布置，因此，建议除雾器流速宜不大于 3m/s。

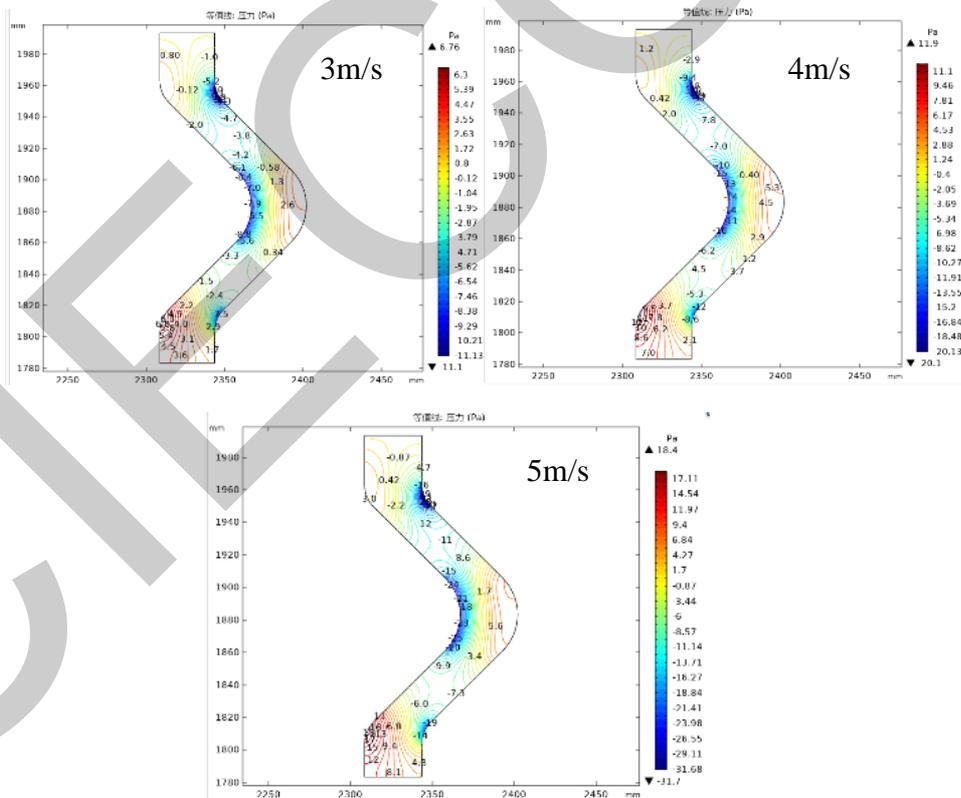


图 5 三种流速下波纹板内压力变化

波纹板板间距改变时，其脱除效率也会发生变化。图 6，为间距 25mm、35mm、45mm 对应的脱除效率，随着间距减小，脱除效率明显增大。这是因为颗粒在通道内的流通面积变

小，气流速度方向趋于急变，从而颗粒对气流的跟踪性变差，易于随着气流撞击在通道内壁上被捕集，增大脱除效率。与之对应，间距变小时，其压力损失也变大。

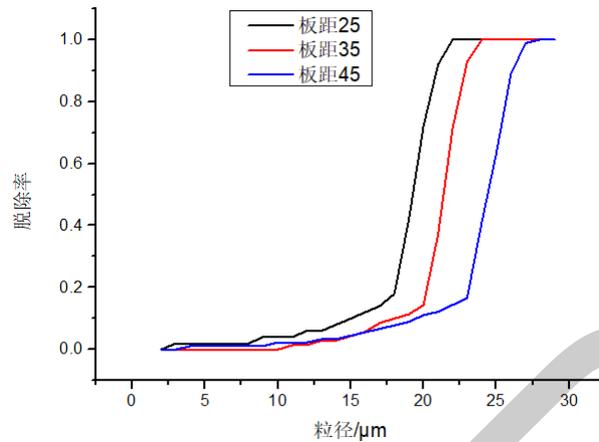


图 6 气溶胶脱除率与板距、粒径之间的关系

综合以上，本文件对平板除雾器的二次夹带临界速度宜不大于 3.0 m/s，除雾器叶片间距范围宜为 20mm~30mm。在有效清洗的条件下，单级折板除雾器的压力降宜在 50 Pa ~100 Pa，丝网除雾器的压降宜在 100 Pa ~150 Pa。

2.4.4 烟气冷凝器

烟气冷凝器主要由换热装置、管路系统、清灰装置、壳体和烟温自适应控制单元等组成。换热装置可分为单排结构设计及模块化结构设计，宜采取模块化结构设计，宜采用卧式型式布置，实际应用时应结合场地条件进行选取。

(1)《锅炉、热交换器用不锈钢无缝钢管》(GB/T 13296-2013)，技术成熟，可直接引用，因此本文件中关于换热管应采用高效传热的无缝钢管，管材相关要求可以直接引用该标准。

(2)《低低温电除尘器用烟气冷却器》(JB/T 14090—2020)中规定换热工质平均流速宜为 0.5 m/s~2 m/s，换热工质压力降不宜大于 0.2 MPa。烟气冷却器与烟气冷凝器中换热工质情况类似，流速可参考选择。水压损失方面，由于烟气冷凝器吸收汽化潜热的特殊性，一般换热工质采用大流量而流程数较少，因此水压损失应更低。综合以上，选取换热工质平均流速宜为 0.5 m/s~2 m/s，水压损失应不大于 0.1 MPa。

(3)应合理设置换热器管间烟气流速和烟气压力降。在烟气冷却器中，烟气流速较高时，积灰概率减小，积灰速率也减小，同时，较高的烟气流速也有利于提高管外换热系数，从而提高总换热系数。《低低温电除尘器用烟气冷却器》(JB/T 14090—2020)中规定换热装置的烟气平均流速宜为 8 m/s~10 m/s，烟气压力降不宜大于 500 Pa。但烟气冷凝器与烟气冷却器有很大不同，这是由于烟气冷凝器管外为相变换热，管外换热系数很高，提高烟气流速对总换热系数的影响较小。此外，烟气进入烟气冷凝器前，已经过脱硫、脱硝、除尘、二氧化碳捕集处理，烟气中粉尘含量很低，且饱和湿烟气将在烟气冷凝器中不停凝结，换热管外表面将形成液膜并不停集聚成大液滴脱落，有良好的自清洁作用。此外，烟气流速过高时，增加烟气压力降的同时，还会过早破坏液膜的发展。因此，烟气冷凝器的烟气流速选择一般低于烟气冷却器的烟气流速，烟气冷凝器的烟气压力降要求也应低于烟气冷却器。综合以上，选取换热装置的烟气平均流速宜为 4 m/s~6 m/s，烟气压力降不宜大于 400 Pa。

(4)《低低温电除尘器用烟气冷却器》(JB/T 14090—2020)中规定换热装置的设计换热

面积应留有 10% 以上的裕量。本文件参考该数值，选择换热装置的设计换热面积应留有 10% 以上的裕量。

(5) 清灰装置的设计。清灰装置的设计。目前，烟气冷却器常使用的吹灰方式包括蒸汽吹灰、声波吹灰、燃气激波吹灰和压缩空气吹灰。蒸汽吹灰的原理是，利用一定温度的压力蒸汽，通过缩放喷头提高出口流速，产生更大的冲击力，吹扫换热表面的灰尘。蒸汽吹灰的效果较好，但耗能量大、增加了烟气湿度。声波吹灰的原理是以压缩空气为动力，产生低频高强度的振动声波，在有积灰堆积的空间内形成一个共振声场，细小的灰粉吸收声能会产生振动脱离附着表面，随烟气被带走，或靠重力下落被收集，从而达到清灰作用。声波吹灰对松散型积灰效果较好，对粘附性积灰效果有限。燃气脉冲激波吹灰的原理是采用乙炔或其他可燃气体与空气混合，进行不稳定燃烧并限制在一定的空间内，以在输出管的喷口处发射强烈的爆炸性冲击波，使受热面上的积灰受冲击而脱落。燃气脉冲激波吹灰效果较好，但系统相对复杂、有一定安全风险。压缩空气吹灰的原理是以一定压力的空气作为吹灰介质，在特制的激波效应发生器中，通过瞬间高速释放（速度在 2 倍音速以上）产生爆发爆炸性冲击波，使受热面上的积灰受冲击而脱落。压缩空气吹灰系统简单，但在穿过换热管管束时能量衰减很快，多排管束时后排管道吹灰效果较差。几种烟气冷凝器吹灰方式的对比见表 1。

表 1 典型吹灰方式的技术对比

条目	声波吹灰	燃气脉冲激波吹灰	压缩空气吹灰
吹灰机理	声波震动清灰	激波冲击、声波震动、热清洗、高速气体动能吹扫	激波冲击、声波震动、高速气体动能吹扫
吹灰介质	蒸汽或空气	可燃气体、空气	空气
声波能级	140~150 分贝	160~170 分贝	160~170 分贝
设备结构	简单	复杂	简单
运行情况	可靠性较高，能耗低	可靠性较高，能耗较低	可靠性高，能耗低
安全风险	有管束共振风险	有燃气泄漏、烟道爆炸风险	无
吹灰效果	一般	较好	一般
适用范围	松散型积灰	粘附型积灰和松散型积灰	粘附型积灰和松散型积灰

清灰装置设计方面，烟气冷凝器也与烟气冷却器有很大不同。首先，烟气进入烟气冷凝器前，已经过脱硫、脱硝、除尘、二氧化碳捕集处理，烟气中粉尘含量很低；其次，由于饱和湿烟气将在烟气冷凝器中不停凝结，换热管外表面将形成液膜并不停集聚成大液滴脱落，烟气冷凝器具有良好的自清洁作用；再次，烟气冷凝器中的积灰显然为湿态，而上述烟气冷却器吹灰方式多针对干态积灰。工程应用中，应采用喷淋系统进行辅助清灰。喷淋系统控制单元应能实现自动、手动运行方式，并能实现分区操作控制。

(6) 《低低温电除尘器用烟气冷却器》(JB/T 14090—2020) 中对烟气冷凝器中管路系统和烟温自适应控制单元相关内容进行规定，本文件在编制时进行直接引用。同时结合《天然气锅炉管式烟气冷凝器技条件》(DB 41/T 1487—2017)、《低低温电除尘器用烟气冷却器》(JB/T 14090—2020) 对壳体的规定，本文件进行借鉴引用。

2.4.5 湿式电除尘器

(1) 《电除尘器》(GB/T 40514-2021)、《燃煤烟气湿法脱硫后湿式电除尘器》(JB/T 12593—2016)、《电除尘器 阳极板》(JB/T 5906—201)、《电除尘器 阴极线》(JB/T 5913—201)、《湿式电除尘器 导电玻璃钢阳极》(JB/T 13842) 标准，技术成熟，可直接引用，因此本文件中关于湿式电除尘器中关于阳极、阴极、喷淋系统和高压供电装置等相关规

定直接进行引用。

(2) 经过实验对比, 在同工况下, 两者对 $0.1\ \mu\text{m}\sim 1\ \mu\text{m}$ 颗粒的脱除效果随电压变化如图 7 所示。可以看到两种极线对有机胺气溶胶脱除率均随电压升高而增加, 且均为非线性变化。芒刺线的起晕电压相比圆形线低 1kV , 更易起晕, 这是因为相同电压下芒刺周围更易发生电离反应, 使得附近颗粒荷电。当电压在 $1\text{kV}\sim 6\text{kV}$ 之间时, 电压的改变对脱除效率影响不大, 这与上文分析一致, 但芒刺线脱除效果优于圆形线 10% 左右, 且随着电压变大, 两者差值逐渐减小。这是由于芒刺尖端的存在一方面使极线到极板距离缩小, 颗粒相同时间内运动到极板的时间减小, 脱除效率更高; 另一方面尖端附近电晕放电效果更强烈, 相比圆形线有更多数量的粒子被电离, 从而使颗粒荷电, 形成离子风, 进而加速尖端附近空气扰动, 增大带电粒子运动速度, 提高脱除效率。当电压增大时, 电晕放电逐渐增强, 此时电晕放电的影响大于不同极线种类对电场的影响。

当电压位于 $6\text{kV}\sim 12\text{kV}$ 时, 芒刺线与圆形线两者差值随电压升高而变大, 电压 6kV 时两者相差 2% ; 12kV 时芒刺线脱除效率达到 87% , 对应的圆形线效率为 69% , 两者相差 18% 。这是由于随着电压升高, 电场内电晕放电稳定性起主要作用。芒刺线由于尖端的存在放电为点状放电, 使得电流密度更加均匀, 颗粒荷电运动规律更稳定, 同时电压越大, 尖端附近形成的离子风扰动越强, 有效防止电晕封闭的影响, 相比圆形线放电不稳定, 芒刺线对气溶胶颗粒物的脱除效率更高。总的来说, 芒刺线对应电场中放电稳定, 起晕电压低, 脱除效率高, 在有机胺气溶胶颗粒物脱除方面, 其比普通圆形线脱除效率更佳, 如图 7 所示。

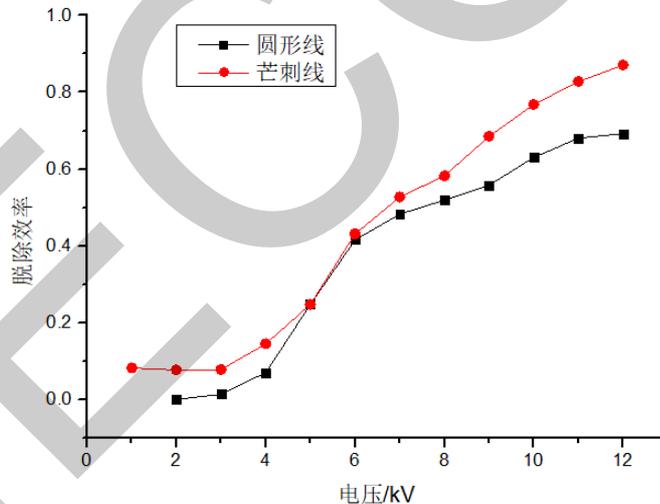


图 7 电场对圆形线与芒刺线脱除效率区别

(3) 研究者通过在吸收塔后加装氟塑料冷凝换热器, 实现高湿烟气迅速降温, 从而促进烟气中水汽在颗粒表面异相凝结, 使得温度调控后颗粒长大, 如图 8 (a) 所示, 当烟气温度降达到 $4.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 颗粒的平均粒径增加了 58.2% ; 同时, 由于换热壁面液膜的拦截作用, 大量颗粒物在流动过程中被捕集从而使得温度调控区颗粒浓度大幅下降, 图 8 (b) 所示, 最终实现在运行的过程中颗粒出口浓度始终保持低于 $3\text{ mg}/\text{m}^3$, 最高脱除效率可达 77.4% 。长大后的颗粒更易于被湿式电除尘器等除尘设备捕集, DCS 数据表明, 结合湿式电除尘器可实现颗粒排放浓度低于 $1\text{ mg}/\text{m}^3$ 。

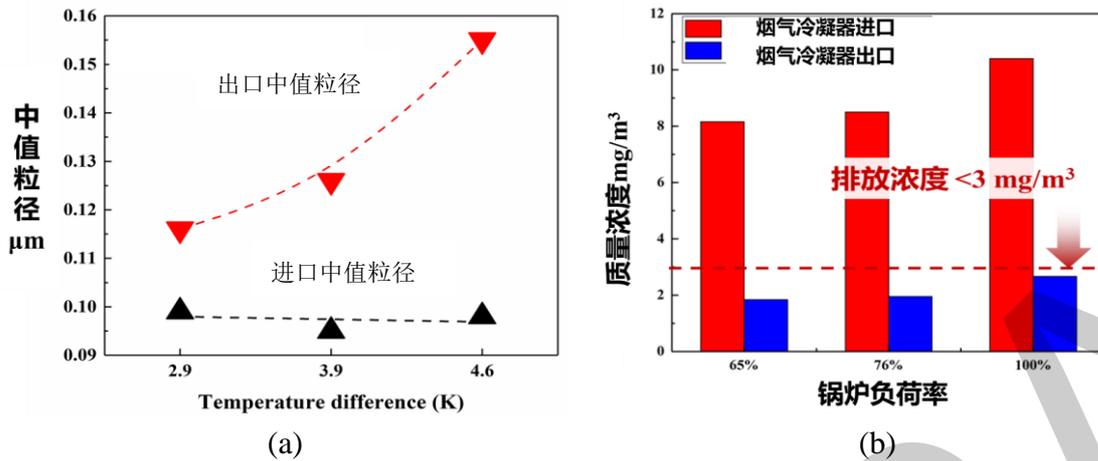


图 8 温度调控强化颗粒凝结长大及脱除

2.4.6 其他要求

结合《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》中的规定：在起草标准文件时，如果有些内容已经包含在现行有效的其他文件中并且适用，或者包含在文件自身的其他条款中，那么应通过提及文件编号和/或文件内容编号的表述形式，引用、提示而不抄录所需要的内容。因此，本文件编制时直接引用相关文件号。

二氧化碳吸收剂对气溶胶捕集设备具有不同程度的腐蚀和磨蚀性。因此，气溶胶捕集装置材料的选择应满足工艺要求，针对不同设备不同部位的腐蚀及磨损情况，选用不同种类的金属或非金属材料。在材料使用时，应充分了解材料的性质和适用性，使用成熟可靠的材料，也可使用经证实的新材料和新工艺。《锅炉、热交换器用不锈钢无缝钢管》(GB/T 13296-2013)、《燃煤烟气湿法脱硫后湿式电除尘器》(JB/T 12593—2016)和《湿法烟气脱硫设备 除雾器》(JB/T 10989-2020)等标准中对除雾器、烟气冷凝器和湿式电除尘器的材料选择进行了规定，结合《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》中的规定，本次修订时直接引用。

2.4 试验方法

按现行合适的标准给出试验方法，并按相应标准执行。

2.5 检验规则

本文件的各项技术要求分别从出厂检验、安装检验以及性能检验三个阶段提出相应的检验规则，各检验项目的技术要求（除基本要求外）、试验方法、检验规则一一对应。

2.6 标志、随行文件、包装、运输和贮存

针对设备的标志、随行文件、包装、运输和贮存等已发布《标牌》(GB/T 13306)和《机电产品包装通用技术条件》(GB/T 13384)等标准，本次修订时可直接引用。

3. 标准解决的主要问题

目前，针对气溶胶的脱除，主要采用预荷电等强化细颗粒荷电、采用壁面冷凝的方式促进颗粒凝结长大，以及采用湿式静电除尘等实现气溶胶颗粒的深度脱除。上述技术已经在燃煤烟气中气溶胶的治理上实现广泛应用，但是针对二氧化碳捕集系统用胺气溶胶捕集装置尚无统一、规范的技术标准，为规范和加强相关企业对二氧化碳捕集系统用胺气溶胶捕集装置设计、制造、安装及运行维护的管理，促进和引导我国碳捕集技术进步和可持续发展，提高

企业的国际竞争力，制定二氧化碳捕集系统用胺气溶胶捕集装置的标准势在必行。本文件的各项指标和要求适应国家产业技术发展水平，符合国家节能减排产业政策，能指导设计和生产，使生产制作合理化，促进规模发展，在二氧化碳捕集系统用胺气溶胶捕集装置应用方面具有推广意义。

三、是否有对应的国家标准或行业标准

本文件没有对应的国家标准或行业标准。

本文件关键指标值选取时，对比了以下标准：

国家标准《电除尘器》（GB/T 40514-2021）、《热交换器》（GB/T 151—2014）、；

行业标准《湿法烟气脱硫设备 除雾器》（JB/T 10989—2020）、《丝网除沫器》（HG/T 21618—1998）、《低低温电除尘器用烟气冷却器》（JB/T 14090—2020）和《湿式电除尘器性能测试方法》（GB/T 40505—2021）等。

四、主要试验（或验证）情况分析

国内外众多研究结果表明，细颗粒（ $<1\mu\text{m}$ ）相较于大颗粒，其脱除难度显著增加。随着除尘装备及超低排放技术的不断提高，可过滤颗粒物浓度不断降低，但是对于细颗粒尤其是气溶胶颗粒的总体脱除效果仍旧不高，进而使细颗粒浓度占总颗粒物浓度的比例明显增加。国内外研究学者表示，通过促进细颗粒长大，使其粒径增大变成较大颗粒是实现细颗粒高效脱除的一种有效手段。但是采用单一物理场，如使用电场、惯性场等方式控制气溶胶颗粒物存在能耗较高或细颗粒物脱除效率较差等问题，由于 CO_2 化学吸收塔出口有机胺气溶胶既包含液滴，也包含凝结核等固体颗粒物，因此多场协作脱除气溶胶颗粒物具有一定前景与指导意义。

细颗粒物在多种物理场共同作用下脱除，其技术实现方式有多种：如惯性场、电场、湿度场和温度场等。学者们对各种物理场脱除细颗粒物均有一定的研究，如波纹板结构作为除雾器的基础结构具有制作简单、造价低等优点，但对 $10\ \mu\text{m}$ 以下颗粒物分离效果较差。折流板内液滴逃逸的具体原因，设计钝体结构与折流板相结合，通过增加流场的涡流效果进而增大除雾器脱除效率，研究发现当液滴直径改变时，除雾器效率也随之改变；同时除雾器内流体速度达到一定值时，流体中液滴产生二次携带问题，对气液脱除不利。

目前研究较多的联合脱除颗粒物主要以电场作用为基础，湿式静电除尘器是将湿度场与电场相结合，在减小二次扬尘的同时，通过在电场中增加水汽提高空间电荷密度，同时液桥力使得水滴与颗粒物更易团聚，提高整体的脱除效果。通过将颗粒在湍流场中的捕集效果与在电场运动的电场捕集效果相结合，设计出一种新型凝聚器，湍流结构使颗粒物更易发生碰撞凝并，具有预团聚作用，长大后的颗粒物更易被电场力作用捕集脱除。研究者设计水雾联合电场脱除颗粒物的结构，在深入研究荷电机理的情况下，通过调节水雾使用量来应对不同负荷下烟气情况。

多场协同作用相对单物理场有脱除效率更高的优点，针对有机胺气溶胶等污染物，本文

件将结构简单但对细颗粒物脱除效果不高但液滴捕集效果好的除雾器、促进颗粒团聚长大强化颗粒脱除的烟气冷凝器及细颗粒脱除效果好湿式电除尘器相结合，提出惯性力耦合温-湿-电场力控制气溶胶污染物的方法，即包括吸收塔内除雾器-吸收塔尾端烟气冷凝器-湿式电除尘器的胺气溶胶捕集设备。胺气溶胶捕集装置主要由除雾器、烟气冷凝器和湿式电除尘器组成；可根据除雾器除雾效率和总颗粒物浓度排放设计要求，选择是否设置烟气冷凝器。胺气溶胶捕集装置安装于二氧化碳捕集塔尾端，含胺气溶胶烟气经除雾器后实现大粒径颗粒拦截捕集，进一步再烟气冷凝器和湿式电除尘器作用下实现气溶胶颗粒的高效脱除。除雾器、烟气冷凝器和湿电除尘器的喷淋装置对除雾器进行定期冲洗，因喷淋或凝结排出的吸收剂溶液进入收集箱，作为碳捕集溶液进行回收循环使用。胺气溶胶捕集装置典型工艺流程图如图 9 所示。

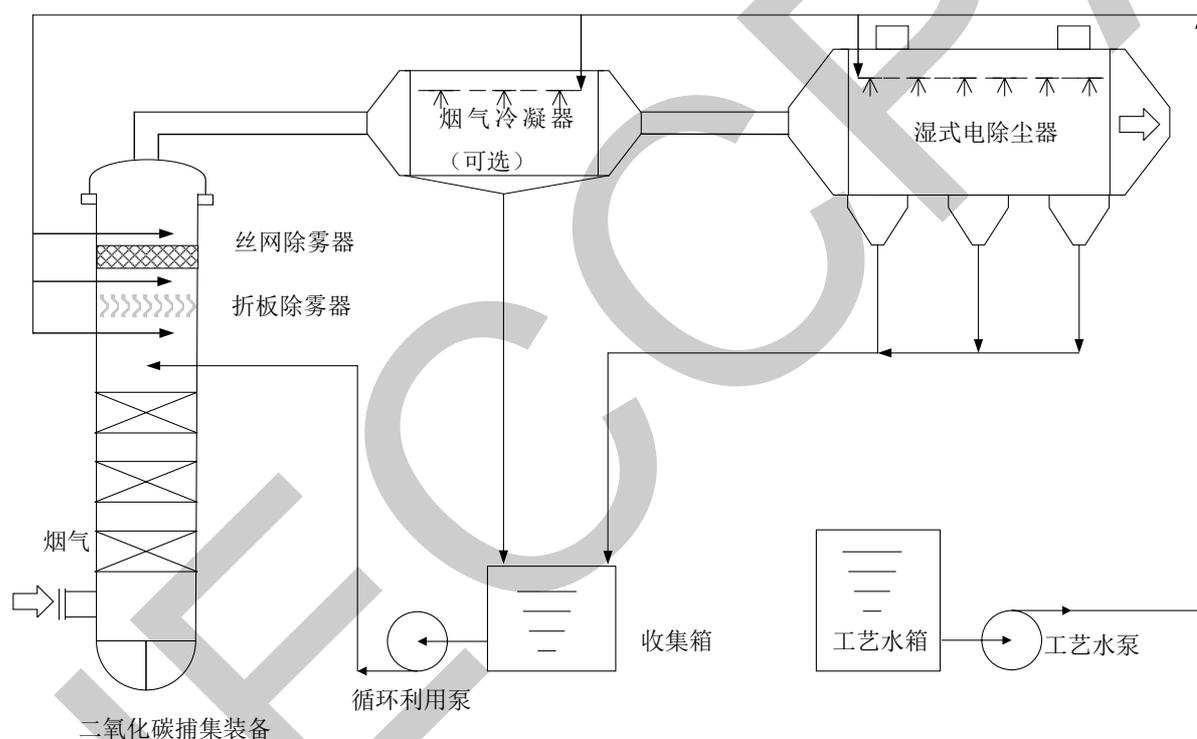


图 9 胺气溶胶捕集装置典型工艺流程图

除雾器既要考虑脱除效率也要考虑压降的影响，一般与如下因素有关：气溶胶在流道内流速、板叶片结构选择和叶片间距大小等，进出口压降越大，能量损失越高。气溶胶流速过大时，容易产生气体二次带水现象，使已经被波纹板捕集的液体再次回到烟气中，同时增加装置压降，造成额外能耗；烟气流速过低时，烟气与气溶胶不易分离，因此不利于提高除雾效率。因此，选取烟气流速宜不大于 3 m/s。对于叶片间距的选择，间距越大时，除雾效率随之降低，气液分离效果较差；其过小时，不仅造成能耗增加，冲洗效果也有所下降，结合试验得知波纹板对水滴、MEA 脱除效率相差较小，因此选取板间距 35mm。当吸收剂组成为 AMP 时，由于其对于 25 μm ~35 μm 粒径脱除效率差于水滴和 MEA 约 10%，为保证达到相同的脱除效率，应适当减小板间距为 30 mm。考虑到带钩波纹板相比普通流线波纹板会极大增加压降，因此选用普通波纹板。根据研究结果，此时其临界分离粒径为 20 μm ~25

μm。

湿式电除尘器安装于烟气冷凝器后方，一方面由于惯性作用去除大粒径颗粒，使得电除尘器负荷减小，进而减小能耗；另一方面波纹板内部颗粒如 MEA 液滴，由于其动力粘度较大，有更强的液桥力，会发生一定团聚作用，同时烟温降低进一步强化了颗粒团聚，有利于电场内颗粒物脱除。

针对二氧化碳捕集系统气溶胶排放控制建议作如下设计考虑：

(1) 吸收塔出口烟气含高浓度（数量浓度最高可达 $1 \times 10^7 \text{cm}^{-3}$ ）、小粒径（根据实验结果，峰值粒径集中在 $0.01 \mu\text{m} - 0.04 \mu\text{m}$ ，气溶胶浓度集中在 $0.01 \mu\text{m} - 1.0 \mu\text{m}$ ）的有机气溶胶，其荷电难、迁移速率低，易导致电晕封闭等现象的产生，建议采用放电强度高的电极，同时适当降低阴极线阳极板间距。

(2) 针对小粒径气溶胶荷电难的问题，建议采用优化极配型式提升放电强度，提升气溶胶荷电量。

(3) 对于高湿烟气中小粒径气溶胶脱除强化，建议采用冷凝换热/温度调控的方式促进气溶胶凝聚长大，提高脱除效率。

(4) 吸收塔出口气溶胶主要组分为挥发的胺吸收剂，其固有的高粘性会使得气溶胶易在收尘极板上附着。因此，建议通过优化增加喷淋清洗频率、设计极板水膜等方式，及时将气溶胶捕集回收；另外可以采用水洗段循环水、冷凝段回收水进行清洗，降低系统水耗。

(5) 由于湿电清洗水、冷凝回收水、水洗段循环水中吸收剂浓度小但含有胺盐组分，可以考虑在多次循环富集后，经过解吸系统实现吸收剂再生回收。

五、标准中涉及专利的情况

本文件不涉及专利情况。

六、预期达到的社会效益、对产业发展的作用等情况

团体标准《二氧化碳捕集系统用胺气溶胶捕集装置》是在系统调研、性能测试数据统计分析和反复论证的基础上完成的。标准不仅汲取了发达国家的成熟经验，还紧密结合国内现状与发展需求。技术要求设置合理、实践可行、可操作性强。本文件的各项指标和要求适应国家产业技术发展水平，符合国家节能减排产业政策，能指导设计和生产，使生产制作合理化，促进规模发展，在二氧化碳捕集系统用胺气溶胶捕集装置应用方面具有推广意义。

七、采用国际标准和国外先进标准情况

本文件没有采用国际标准和国外先进标准。

本文件在制定过程中未查到同类国际、国外先进标准。

本文件制定过程中未测试国外的样品和样机。

本文件技术水平为国内先进水平。

八、与现行相关法律、法规、规章及相关标准，特别是强制性标准的协调性

本文件与现行相关法律、法规、规章及相关标准协调一致。

九、重大分歧意见的处理经过和依据

无重大分歧意见。

十、标准性质的建议说明

建议本文件为推荐性团体标准。

十一、贯彻标准的要求和措施建议

建议本文件批准发布 1 个月内实施。

十二、其他应予说明的事项

无其他应予说明的事项。

CIEC CCRPA