大气污染防治除尘技术评价方法

Evaluation method of dust removal technology for air pollution control

大气污染防治技术评价系列

南开大学　主编

2021 年 6 月

目　　录

1 总则 1

1.1 适用范围 1

1.2 评价目的 1

1.3 评价原则 1

1.4 工作程序 1

2 术语和定义 2

2.1 生命周期评价 Life Cycle Assessment（LCA） 2

2.2 层次分析法 Analytic Hierarchy Process（AHP） 2

3 除尘系统生命周期评价 3

3.1 系统边界 3

3.2 清单分析 3

3.3 影响评价 5

4 除尘系统环境绩效评价 6

4.1 环境正效益 6

4.2 环境负效应 7

4.3 环境绩效系数 7

5 除尘技术综合评价 8

5.1 评价指标与权重 8

5.2 评分体系 9

5.3 综合评价计算 11

6 评价结论 12

1 总则

1.1 适用范围

大气污染防治除尘技术评价方法适用于具有烟气除尘需求的工业企业，通过评价，工业企业能够对除尘设备系统中能耗高或耗材多或污染大的部分进行优化改进；此外，通过对比不同除尘技术的评价结果，可为工业企业选用除尘设备提供参考。

1.2 评价目的

为分析我国当前大气污染防治除尘技术存在的问题和短板，淘汰和改进落后的技术和产品，为新技术创新和开发应用提供方法手段，制定大气污染防治除尘技术评价方法。

1.3 评价原则

本方法实施过程中应符合以下原则：（1）科学性原则；（2）实用性原则；（3）先进性原则。

1.4 工作程序

（1）通过调查接受评估的除尘系统，统计技术参数和各阶段耗材耗能情况，确定研究范围，在生命周期评价计算软件中建立模型，得出各阶段能源消耗清单、主要资源消耗清单、主要污染物排放清单，通过清单分析可找出耗能较大、消耗能源较大、污染物排放量较大的环节；此外，在模型计算结果中也可得到各环境影响指标，用于评价污染物排放对各类环境问题的影响。

（2）参考除尘设备工艺参数，可得出除尘系统对环境的正效益；参考生命周期评价主要污染物排放清单，可得出除尘系统对环境的负效应；通过正负效应比值关系，得出环境绩效指数，用于比较两种除尘系统针对环境的影响。

（3）对除尘技术建立了关于经济、技术、环境、资源等各方面综合性评价

方法，采用层次分析法建立了三个层次的指标体系，调查所得各类指标取值情况，按照评分体系计算得出综合评分，从而对除尘系统实现综合评价。

（4）从生命周期评价、环境绩效评价、综合评价三个维度对除尘系统评估，实现对除尘技术各阶段、环境绩效、综合绩效的考量，形成大气污染防治除尘技术评价结论。

大气污染防治除尘技术评价技术流程见下图：

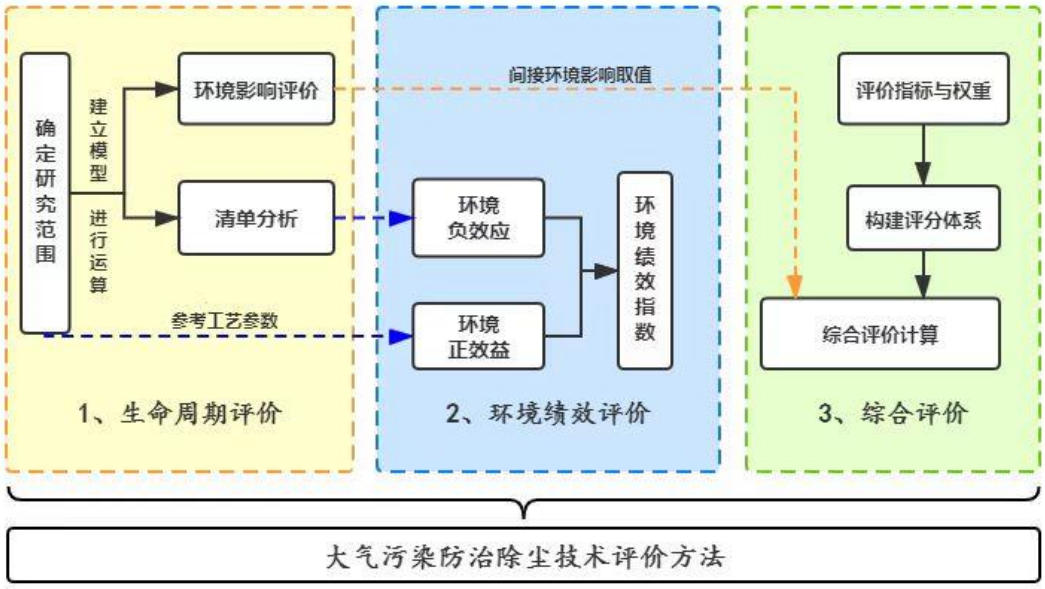

图 1.1 大气污染防治除尘技术评价技术流程图

2 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

2.1 生命周期评价 Life Cycle Assessment（LCA）

量化分析和评估各种产品及技术在生命周期全过程（即生产消费全过程）的资源环境效率及潜在影响，从而为全过程协同改进和持续改进（即生命周期管理LCM）提供分析方法、数据和决策支持。

2.2 层次分析法 Analytic Hierarchy Process（AHP）

根据问题的性质和要达到的总目标，将问题分解为不同的组成因素，并按照

因素间的相互关联影响以及隶属关系将因素按不同层次聚集组合，形成一个多层次的分析结构模型，从而最终使问题归结为最低层(供决策的方案、措施等)相对于最高层(总目标)的相对重要权值的确定或相对优劣次序的排定。

3 除尘系统生命周期评价

3.1 系统边界

在生命周期评价中，研究范围的确定即界定产品系统边界。规定除尘过程系统边界如下：

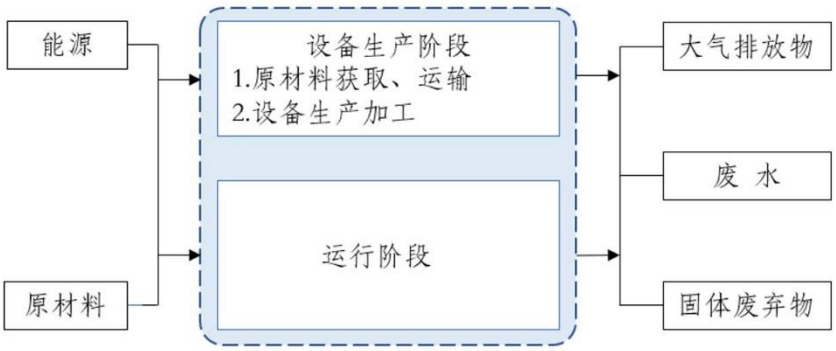

图 3.1 除尘技术系统边界

此外，需统计除尘系统相关工艺参数，并列入下表：

表 3-1 除尘系统工艺参数统计表

工艺参数	单位	数值
额定烟气处理量	Nm^3/h	
入口颗粒物浓度	mg/Nm^3	
出口颗粒物浓度	mg/Nm^3	
除尘效率	%	
年运行时间	h	
设备寿命	年	

选择功能单位为除尘系统运行 1 年。

3.2 清单分析

统计除尘系统生产、运行阶段消耗的能源和原材料以及排放的污染物，对

设备生产阶段和运行阶段分别列表：

表 3-2 除尘系统清单分析表

序号	原材料	消耗量/kg	年消耗量/kg
1			
2			
…			
序号	能源	消耗量/kwh	年消耗量
1			
2			
…			
序号	污染物	排放量	年排放量
1			
2			
…			

根据以上调查结果，在 LCA 应用软件（如 GaBi、WebLCA）中对设备生产阶段和运行阶段分别建立计算模型，输出各阶段耗能清单、主要资源消耗清单和主要污染物排放清单：

表 3-3 除尘系统耗能清单

设备生产阶段	原料能耗	运输能耗	生产加工能耗
能耗/MJ			
总计/MJ			
运行阶段	运行能耗		
能耗/MJ			

表 3-4 除尘系统主要资源消耗清单

序号	物质名称	设备生产阶段消耗量/kg	运行阶段消耗量/kg
1			
2			
…			

表 3-5 除尘系统主要污染物排放清单

类别	序号	物质名称	设备生产阶段排放量/kg	运行阶段排放量/kg
向大气中排放的物质	1			
	2			
	…			
向水中排放的物质	1			
	…			
向土壤中排放的物质	1			
	…			

3.3 影响评价

清单分析的过程侧重于定量呈现评价对象在评价范围内的输入和输出，而影响评价是对清单结果的整理和分析，通过量化和分类环境影响负荷，系统地呈现影响情况。主要步骤有影响分类，特征化，归一化和加权评估。

影响分类的依据是按照 CML-2001 评价法中的环境影响指标，将系统各阶段的环境排放归为以下几类，包括：

不可再生资源消耗（Abiotic Depletion ，简称 ADP）

全球变暖（Global Warming Potential，简称 GWP）

酸化效应（Acidification Potential，简称 AP）

水体富营养化（Eutrophication Potential，简称 EP）

新鲜水水生生态毒性（Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential，简称 FAETP）

人体健康损害（Human Toxicity Potential，简称 HTP）

海洋生态毒性（Marine Aquatic Ecotoxicity Potential，简称 MAETP）

臭氧层破坏（Ozone Layer Depletion Potential，简称 ODP）

光化学烟雾形成（Photochemical Ozone Creation Potential，简称 POCP）

陆地生态毒性（Terrestric Ecotoxicity Potential，简称 TETP）

环境影响中的各种因素采用一种影响特征因素进行衡量和表达的步骤称为特征化。在 LCA 应用软件中打开平衡表，可获得除尘系统各阶段环境潜值表。各类环境影响潜值除以选定基准值计算得出归一化结果，可采用的基准值有特定范围内人均排放总量或资源消耗总量、特定范围内排放总量和资源消耗量等。本

文表格中按照 Gabi 软件提供的 2000 年全球人均排放总量为基准值计算。加权评估是通过对环境影响类型赋予不同的权重从而让不同环境影响类型可以相互比较大小。本文表格中所示权重是由 Gabi 软件根据前面所选择的基准值提供的。

表 3-6 除尘系统环境影响潜值表

环境影响指标	单位	生产阶段	运行阶段	环境影响潜值
ADP （elements）	kg Sb-Equiv.			
ADP（fossil）	MJ			
AP	kg SO_2-Equiv.			
EP	kg Phosphate-Equiv.			
FAETP	kg DCB-Equiv.			
GWP	kg CO_2-Equiv.			
HTP	kg DCB-Equiv.			
MAETP	kg DCB-Equiv.			
ODP	KgR11-Equiv			
POCP	kg Ethene-Equiv.			
TETP	kg DCB-Equiv.			

表 3-7 环境影响潜值归一化及加权过程

环境影响指标	单位	环境影响潜值	标准化基准	标准化结果	权重因子	加权结果
ADP （elements）	kg Sb-Equiv.		3.61×10^{8}			
ADP（fossil）	MJ		3.8×10^{14}			
AP	kg SO_2-Equiv.		2.39×10^{11}			
EP	kg Phosphate-Equiv.		1.58×10^{11}			
FAETP	kg DCB-Equiv.		2.36×10^{12}			
GWP	kg CO_2-Equiv.		4.22×10^{13}			
HTP	kg DCB-Equiv.		2.58×10^{12}			
MAETP	kg DCB-Equiv.		1.95×10^{14}			
ODP	KgR11-Equiv		2.27×10^{8}			
POCP	kg Ethene-Equiv.		3.68×10^{10}			
TETP	kg DCB-Equiv.		1.09×10^{12}			

对加权后的环境影响指标进行排序，得出对环境影响最大的指标。

4 除尘系统环境绩效评价

4.1 环境正效益

对于除尘系统而言，尽管其有减少 NO_x、SO_2、$PM_{2.5}$ 等多种污染物排放的环保功能，但其主要功能为减少颗粒物排放，因此以颗粒物为标准环境因子进行评估。除尘系统对环境产生的正向影响，称作环境正效益，应按式（1）计算。

$$EI^{+} = (c_1 - c_2) \times Q \times t \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中：

EI^{+} —除尘系统每年产生环境正效益（kg）；

c_1 —除尘系统入口颗粒物浓度（mg/Nm³）；

c_2 —除尘系统出口颗粒物浓度（mg/Nm³）；

Q —烟气处理量（Nm³/h）；

t —除尘系统年运行时间（h）。

4.2 环境负效应

除尘系统在生产和运行过程中投入大量的资源、能源，排放大量污染物，对于环境产生不可忽视的负面影响。根据 3.2 生命周期评价清单分析，可得到除尘系统各阶段颗粒物总量即为环境负效应 EI^{-}。

4.3 环境绩效系数

除尘系统对环境产生的正效益超过负效应的倍数大小，可用于度量除尘系统的环境影响，从而评价系统减排效果。建立评价环境绩效的主要参数——环境绩效系数 R，即除尘系统的环境正影响与环境负影响的比值，按式（2）计算。

$$\mathrm{R} = \frac{EI^{+}}{EI^{-}} \quad (2)$$

式中：

EI^{+}——除尘系统在运行周期内因减排颗粒物造成的环境正效益（kg 颗粒物）；

EI⁻——除尘系统在运行周期内因投入资源、能源造成的环境负效应（kg 颗粒物）。

环境绩效系数 R 属于正向指标，其值越大说明除尘系统的环境绩效越高，量纲为 1，研究认为较好的除尘系统应具有更大的颗粒物减排量，而因其资源、能源投入造成的环境负影响应尽可能小。

5 除尘技术综合评价

5.1 评价指标与权重

指标体系按层次分析法分为三级，间接环境影响权重由 5.3 节得出，其他指标权重采用层次分析法中九层标度原则结合 Delphi 专家调查法计算得出，见表 5-1。

表 5-1 除尘技术综合评价指标与权重

一级指标	二级指标	三级指标	权重
经济指标	生产成本	原辅材料成本↓	0.0187
		能源成本↓	0.0114
		人工成本↓	0.0114
		设备折旧费↓	0.0040
	运行维护成本	设备运行成本↓	0.0454
技术指标	技术性能	压力损失↓	0.0744
		漏风率↓	0.0248
		比电耗↓	0.0248
		除尘效率↑	0.1488
	适用范围	烟气含尘量↑	0.0341
		处理气量↑	0.1023
		烟气温度↑	0.0341
		烟气湿度↑	0.1023
环境指标	直接环境影响	PM 2.5 排放量↓	0.0454
		SO_2 排放量↓	0.0909
		NOx 排放量↓	0.0454
	间接环境影响	全球变暖（GWP）↓	0.0075
		酸化效应（AP）↓	0.0113
		水体富营养化（EP）↓	0.0105
		新鲜水水生生态毒性（FAETP）↓	0.0101
		人体健康损害（HTP）↓	0.0097
		海洋生态毒性（MAETP）↓	0.0101
		臭氧层破坏（ODP）↓	0.0111
		光化学烟雾形成（POCP）↓	0.0106
		陆地生态毒性（TETP）↓	0.0101
资源指标	资源指标	水资源消耗量↓	0.0227
		矿产资源消耗潜值（ADP，elements）	0.0227
	能源指标	化石燃料消耗潜值（ADP，fossil）↓	0.0454

注：表中“↑”代表正向指标，即指标值越高越好；“↓”代表负向指标，指标值越低越好。

5.2 评分体系

一级指标中，经济指标和技术指标视为定性指标，采用图 5.1 所示标准进行赋值。对于正向指标，指标值越高，指标所赋数值越大；对于负向指标，赋值情况则相反。

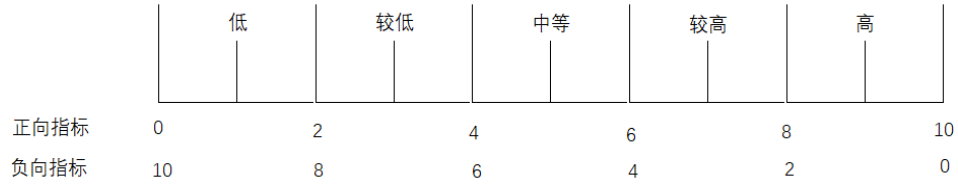

图 5.1 定性指标赋值表

环境指标中直接环境影响指标采用九级标度法，赋值区间划分如下：

表 5-2 直接环境影响指标赋值表

指标	9—7	6—4	3-1
$PM_{2.5}$ 排放量（mg/Nm^3）	≤20	20—50	≥50
SO_2 排放量（t）	≤10	10—100	≥100
NO_x 排放量（t）	≤50	50—500	≥500

对于间接环境影响以及化石燃料和矿产资源消耗潜值指标，其数值由生命周期评价软件计算得到，根据数量级进行赋值区间划分。

表 5-3 环境影响潜值指标赋值表

赋值区间	9-7	6-4	3-1
指标值区间	≤E-06	E-02～E-06	≥E-02

对于水资源消耗指标，其数值为除尘系统在整个生命周期（一年）直接以及间接消耗的水资源的数值，由生命周期评价软件计算得出，同样根据数量级进行划分。

表 5-4 水资源消耗指标赋值表

赋值区间	9-7	6-4	3-1
指标值区间	≤E+05	E+05～E+10	≥E+10

5.3 综合评价计算

根据 5.2 对所选除尘技术进行各项评分，如下表：

表 5-5 除尘技术综合评价评分表

指标	评分	指标权重
原辅材料成本		0.0187
能源成本		0.0114
人工成本		0.0114
设备折旧费		0.0040
设备运行成本		0.0454
压力损失		0.0744
漏风率		0.0248
比电耗		0.0248
除尘效率		0.1488
烟气含尘量		0.0341
处理气量		0.1023
烟气温度		0.0341
烟气湿度		0.1023
PM 2.5 排放量		0.0454
SO_2 排放量		0.0909
NOx 排放量		0.0454
全球变暖（GWP）		0.0075
酸化效应（AP）		0.0113
水体富营养化（EP）		0.0105
新鲜水水生生态毒性		0.0101
人体健康损害（HTP）		0.0097
海洋生态毒性		0.0101
臭氧层破坏（ODP）		0.0111
光化学烟雾形成		0.0106
陆地生态毒性		0.0101
水资源消耗量		0.0227
矿产资源消耗潜值		0.0227
化石燃料消耗潜值		0.0454

最后对各指标评分进行加权计算，按式（3）：

$$Ez = \sum e_i w_i \qquad (3)$$

式中：

Ez —综合加权值；

e_i —各指标评分值；

w_i —各指标权重。

6 评价结论

评价结论是对评价工作成果的归纳和总结，应明确、简洁、清晰。

在大气污染防治除尘评价结论中应重点明确以下内容：

（1）除尘系统在设备生产阶段、运行阶段的能耗清单、主要资源消耗清单、主要污染物排放清单、各类环境影响潜值，分析能源消耗、资源消耗、污染物排放的主要过程和环境影响潜值较大的指标，以明确除尘技术改进方向。

（2）两种以上除尘技术的环境绩效系数进行比较，明确各种除尘技术环境影响相对大小。

（3）两种以上除尘技术的综合评价总评分进行比较，明确各种除尘技术经济、技术、环境、资源四个方面的综合性能相对强弱。

（4）结合以上三个维度的分析，对除尘技术提出改进方案，为新技术研发与利用提供新思路。