

RANSHAO

杨林军 著

燃烧源细颗粒物 污染控制技术



化学工业出版社

PANGSHAO

燃烧源细颗粒物 污染控制技术



RANSHAO

杨林军 著

燃烧源细颗粒物 污染控制技术



化学工业出版社

· 北京 ·

本书围绕团聚(凝并)促进预调节和高效除尘两个细颗粒物控制的技术发展方向,系统介绍了声波团聚、磁团聚与磁分离、电凝并、化学团聚、蒸汽相变、热泳沉积等可促进细颗粒物长大(脱除)的预调节技术,以及电袋复合、湿式静电等高效除尘技术,并从实际应用角度分析了现有研究的不足,指出了需解决的关键问题。同时,本书还对燃烧源细颗粒物的形成机理、采样分析方法及柴油车微粒排放控制技术 etc 做了简要介绍。

本书可作为高等院校环境工程、热能工程、化学工程等专业师生的参考书,也可供能源、环境、化工等领域的相关研究人员、工程技术人员和管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

燃烧源细颗粒物污染控制技术/杨林军著. —北京:化学工业出版社, 2011.4

ISBN 978-7-122-10461-8

I. 燃… II. 杨… III. 燃烧产物-粒状污染物-污染控制
IV. X513

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 013248 号

责任编辑:徐娟

文字编辑:荣世芳

责任校对:战河红

装帧设计:杨北

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张16½ 字数437千字 2011年6月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:80.00 元

版权所有 违者必究

前言

细颗粒物通常指空气动力学直径小于 $2.5\mu\text{m}$ 的颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$)，燃烧过程是 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要一次来源，包括以燃煤和生物质为主的固定源和以燃油为主的移动源。目前，国际上总颗粒物控制技术虽已达到很高水平，但对于细颗粒物的捕集率却较低，造成大量细颗粒物排入大气环境，在总悬浮颗粒物 TSP 和可吸入颗粒物 PM_{10} 的总体污染情况有所好转的同时，我国 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量却呈上升趋势。 $\text{PM}_{2.5}$ 污染已成为我国突出的大气环境问题，是导致大气能见度降低、阴霾天气、酸雨和全球气候变化等重大环境问题的重要因素。因此，控制燃烧源细颗粒物排放势在必行。

目前，燃烧源细颗粒物控制技术总体上处于试验和理论探索阶段，尚有许多未探明的、不确定的关键问题需解决，即便是在实际工程中有所应用的电袋复合与湿式静电除尘技术，研究成果也主要见诸于各类期刊、会议、论文及专利文献。为了交流经验，进一步推动燃烧源细颗粒物控制的研究和技术发展，本书介绍了对燃烧源细颗粒物控制有重要参考价值的有关亚微米至微米级颗粒物控制方面的国内外最新研究成果，特别是由清华大学、东南大学、华中科技大学等共同完成的国家 973 计划“燃烧源可吸入颗粒物的形成与控制技术基础研究”(2002CB211600) 在控制基础方面的重要研究成果，为进一步开展燃烧源细颗粒物控制研究奠定了良好基础。

目前燃烧源细颗粒物有效控制的技术发展方向包括：通过不同技术途径使细颗粒物长大后采用传统除尘技术脱除；结合现有污染物控制设备进行过程优化以及多场协同作用提高对细颗粒物的脱除效果。本书围绕上述两个技术发展方向，在第 3~9 章分别系统介绍了声波团聚、磁团聚与磁分离、电凝并、化学团聚、蒸汽相变、热泳沉积等可促进细颗粒物长大(脱除)的预调节技术；第 10 章、第 11 章分别介绍了对细颗粒物有较佳脱除效果的电袋复合、湿式静电等高效除尘技术。同时，本书还对燃烧源细颗粒物的形成机理、采样分析方法及柴油车微粒排放控制技术等做了简要介绍，并从工程应用角度对已有研究进行了分析，指出了其中的不足及需解决的关键问题。

本书具有以下特点。①成果新：书中大部分内容为 20 世纪 90 年代以来的研究成果，特别是在国家 973 计划(2002CB211600)及其他相关项目资助下，本人所在课题组及清华大学、华中科技大学、浙江大学等在声波团聚、磁团聚、蒸汽相变、电凝并、化学团聚、热泳沉积、电袋复合技术等方面的近几年最新研究成果。②针对性强。本书结合燃烧源细颗粒物控制的技术发展方向，专门介绍细颗粒团聚(凝并)长大预调节技术及电袋复合、湿式静电等高效除尘技术，这与已出版的除尘专业书籍有显著差异。③图文并茂。鉴于细颗粒物的控制手段较多，涉及大量试验装置、试验结果，本书运用大量图表，有利于读者理解。

需要特别指出的是，由于受颗粒发生源及其他试验条件的限制，虽然国内外有关亚微米至微米级颗粒物控制技术已有较多研究，但专门针对燃烧源细颗粒物的还较少。因此，本书引用的不少文献资料中，研究采用的颗粒物性质与燃烧源细颗粒物有一定的差异，不过其研究成果对控制燃烧源细颗粒物排放仍较有参考价值。

本书在编写过程中参考和引用了大量国内外相关文献资料，尤其是清华大学姚强教授、杨瑞昌教授、郝吉明院士，华中科技大学徐明厚教授、张军营教授，东南大学沈湘林教授、

赵长遂教授，浙江大学骆仲泐教授，武汉科技大学向晓东教授等所在科研团队的研究成果，在此表示诚挚感谢。在编写过程中得到了东南大学沈湘林教授、赵长遂教授的支持和帮助，东南大学颜金培博士及研究生狄华娟、沙焱、鲍静静等同学帮助完成了书稿的大部分插图和文字整理工作，在此也深表谢意。

由于本人时间和水平有限，加上燃烧源细颗粒物控制还处于探索阶段以及控制手段的多样性、复杂性，书中不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

杨林军

2010年9月于东南大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 细颗粒物对大气环境和人体健康的影响	1
1.2 细颗粒物排放控制的政策法规	2
1.3 污染控制设施脱除细颗粒物的性能	3
1.4 燃烧源细颗粒物控制技术的研究现状及存在的问题	6
1.4.1 团聚(凝并)长大促进预处理技术	7
1.4.2 高效除尘技术	8
1.4.3 存在的问题	9
参考文献	10
第 2 章 燃烧源细颗粒物的形成机理	12
2.1 燃煤细颗粒物	12
2.1.1 亚微米颗粒(PM _{1.0})的形成	12
2.1.2 残灰颗粒的形成	13
2.2 机动车微粒	15
2.2.1 汽油机微粒的生成机理	15
2.2.2 柴油机微粒的生成机理	15
2.3 生物质燃烧细颗粒物	17
参考文献	18
第 3 章 燃烧源细颗粒物采样分析方法	20
3.1 燃烧源细颗粒物的采样方法	20
3.1.1 固定燃烧源细颗粒物的采样方法	20
3.1.2 机动车尾气微物的采样方法	25
3.2 燃烧源细颗粒物的分析方法	26
3.2.1 浓度与粒径分布	27
3.2.2 形貌与元素组成	29
3.2.3 物相组成	29
3.2.4 水溶性离子组分	29
3.2.5 元素组成	30
3.2.6 元素碳和有机碳含量	30
参考文献	30
第 4 章 声波团聚技术	32
4.1 引言	32
4.2 声波团聚机理	33
4.2.1 同向团聚机理	34
4.2.2 流体力学作用	36
4.2.3 声辐射压力作用	37
4.2.4 声致湍流	38
4.3 外加声场中细颗粒物的运动特性研究	38
4.3.1 Hoffmann 的可视化研究	38
4.3.2 东南大学的可视化研究	40
4.4 细颗粒物声波团聚性能	43
4.4.1 低频声波团聚	43
4.4.2 高频声波团聚	54
4.4.3 外加种子颗粒的双模态声波团聚	60
4.5 结语	64
参考文献	65
第 5 章 磁团聚与磁分离技术	68
5.1 引言	68
5.2 燃煤 PM ₁₀ 磁特性	68
5.3 燃煤 PM ₁₀ 磁团聚性能	69
5.3.1 试验装置	69
5.3.2 燃煤 PM ₁₀ 磁团聚性能	71
5.4 高梯度磁场中磁介质捕集细颗粒物的性能	73
5.4.1 高梯度磁分离除尘原理	73
5.4.2 东南大学的高梯度磁分离燃煤 PM ₁₀ 试验	74
5.4.3 美国 Gooding 等的高梯度磁分离磁性粉尘试验	78
5.4.4 广东工业大学的高梯度磁分离除尘试验	79

5.5 结语	80	参考文献	80
第6章 电凝并技术	82		
6.1 引言	82	系统脱除细颗粒物	99
6.2 电凝并理论	83	6.3.6 DBD 预荷电直流收尘的复合式除尘 系统脱除细颗粒物	103
6.3 细颗粒物电凝并性能	84	6.3.7 烟道高流场中细颗粒物荷电 凝并	104
6.3.1 异性性荷电粉尘的库仑凝并	84	6.4 Indigo 凝聚器	108
6.3.2 同性性荷电粉尘在交变电场中的 凝并	86	6.4.1 Indigo 凝聚器技术原理	109
6.3.3 异性性荷电粉尘在交变电场中的 凝并	89	6.4.2 工程应用实例及效果	110
6.3.4 异性性荷电粉尘在直流电场中的 凝并	97	6.5 结语	112
6.3.5 脉冲预荷电直流收尘复合除尘		参考文献	112
第7章 化学及其他团聚促进技术	115		
7.1 引言	115	7.4 热团聚	129
7.2 化学团聚技术	115	7.5 光团聚	130
7.2.1 燃烧中化学团聚	115	7.6 结语	130
7.2.2 燃后区化学团聚	118	参考文献	130
7.3 湍流和梯度(边界层)团聚	129		
第8章 蒸汽相变技术	132		
8.1 引言	132	燃煤细颗粒物的性能	162
8.2 蒸汽相变促进细颗粒物脱除的原理	132	8.5.1 试验系统	162
8.3 细颗粒物异质核化凝结长大	133	8.5.2 应用蒸汽相变促进 WFGD 系统 脱除细颗粒物的原理	163
8.3.1 过饱和水汽在细颗粒物表面的 异质核化	133	8.5.3 细颗粒物分级脱除效率	164
8.3.2 核化粒子的凝结长大	137	8.5.4 蒸汽添加量的影响	165
8.4 蒸汽相变促进细颗粒物脱除 的性能	139	8.5.5 液气比的影响	165
8.4.1 湿式洗涤除尘中应用蒸汽相变促进 细颗粒物脱除	139	8.6 湿式氨法脱硫中气溶胶的形成特性 及其控制	166
8.4.2 湿式洗涤除尘中应用蒸汽相变促进 燃煤与燃油细颗粒物脱除	152	8.6.1 氨法脱硫前后细颗粒特性变化	166
8.4.3 旋风除尘设备中应用蒸汽相变促进 细颗粒物脱除	160	8.6.2 气溶胶颗粒形成机理	167
8.5 应用蒸汽相变促进 WFGD 系统脱除		8.6.3 气溶胶形成的影响因素	168
		8.6.4 氨法脱硫气溶胶的控制	169
		8.7 结语	170
		参考文献	170
第9章 细颗粒物热泳脱除技术	173		
9.1 引言	173	9.3.2 层流或湍流环形通道热泳脱除 细颗粒物	181
9.2 细颗粒物热泳沉积性能	173	9.3.3 步进式短管细颗粒物脱除器	181
9.2.1 热泳系数和热泳沉积率计算式	173	9.3.4 非能动翅片管细颗粒物除尘塔	182
9.2.2 细颗粒物热泳沉积试验研究	174	9.3.5 热泳式旋风分离器	183
9.2.3 清华大学的研究	177	9.3.6 利用热泳效应的湿式静电 除尘器	183
9.3 利用热泳力脱除细颗粒物的技术 途径	180	9.4 冷凝换热器中生物质细颗粒物的	
9.3.1 应用微通道热泳脱除细颗粒物	180		

热泳脱除	183	9.5 结语	187
9.4.1 德国 Messerer 等的研究	183	参考文献	187
9.4.2 奥地利 Best 等的研究	186		
第10章 电袋复合除尘器	189		
10.1 引言	189	10.4.2 粉尘预荷电纤维过滤特性	210
10.2 电袋复合除尘技术发展动态及其主要类型	189	10.5 电袋复合除尘器在燃煤电厂的实际应用	212
10.2.1 电袋复合除尘技术发展动态	189	10.5.1 电袋复合除尘器结构及其工作原理	212
10.2.2 电袋复合除尘器主要形式	199	10.5.2 电袋复合除尘器主要技术特点及需解决的关键问题	213
10.3 电袋复合除尘器性能试验研究	199	10.5.3 电袋复合除尘器在燃煤电厂的应用实例	215
10.3.1 电袋复合与袋式除尘器性能对比试验	199	10.6 结语	218
10.3.2 电袋复合除尘器气流分布特性试验	207	参考文献	219
10.4 静电增强过滤原理	209		
10.4.1 粉尘在单根纤维上的静电沉积	210		
第11章 湿式静电及其他新型除尘器	220		
11.1 引言	220	特点	228
11.2 湿式静电除尘器	220	11.4.2 静电旋风除尘器研究现状	230
11.2.1 WESP 与干式 ESP 的比较	220	11.5 静电增强湿式除尘器	232
11.2.2 WESP 存在的主要问题	221	11.5.1 静电增强湿式除尘原理	232
11.2.3 WESP 国内外应用现状及其性能	222	11.5.2 静电增强湿式除尘器研究现状及其类型	233
11.2.4 WESP 的主要布置方式	224	11.6 旋转填充床湿式除尘器	235
11.2.5 WESP 的结构材料	225	11.6.1 旋转填充床除尘原理	235
11.2.6 WESP 的充电和收集	225	11.6.2 旋转填充床除尘性能	236
11.3 静电颗粒层除尘器	226	11.7 新型电除尘器	237
11.3.1 静电颗粒层除尘器的工作原理和结构形式	226	11.7.1 ESP 除尘效率影响因素	237
11.3.2 静电颗粒层除尘器的除尘性能	227	11.7.2 新型电除尘器	237
11.4 静电旋风除尘器	228	11.8 结语	239
11.4.1 静电旋风除尘器工作原理及其技术		参考文献	239
第12章 柴油车微粒排放控制技术	242		
12.1 引言	242	12.3.1 过滤捕集机理	244
12.2 机内净化技术	242	12.3.2 过滤材料及其结构	245
12.2.1 提高燃油品质及采用替代燃料	243	12.3.3 微粒捕集器再生技术	246
12.2.2 燃油高压喷射技术	243	12.4 非过滤捕集技术	249
12.2.3 进气涡轮增压与中冷技术	243	12.4.1 氧化催化技术	249
12.2.4 匀质混合压缩点火式燃烧技术	244	12.4.2 NO _x /PM 后处理综合控制技术	250
12.2.5 降低机油消耗	244	12.4.3 静电捕集技术	253
12.3 过滤捕集技术	244	参考文献	254

第 1 章 绪 论

可吸入颗粒物 (PM_{10}) 特别是空气动力学直径小于 $2.5\mu m$ 的细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 污染已成为突出的大气环境问题, 并日益引起世界各国的高度重视。人们已经认识到大气颗粒物 (特别是其中的细颗粒物) 是导致人类死亡率上升的主要原因; 同时, 也是导致大气能见度降低、酸雨、阴霾天气和全球气候变化等重大环境问题的重要因素。在总悬浮颗粒物 TSP 和 PM_{10} 排放量持续下降的同时, 我国 $PM_{2.5}$ 排放量及部分城市大气中 $PM_{2.5}$ 浓度均呈上升趋势。以燃煤和生物质为主的固定源和以燃油为主的移动源是大气细颗粒物的主要来源。因此, 控制燃烧源细颗粒物排放是迫切需要解决的关键问题, 也是国家节能减排战略的重大需求。

1.1 细颗粒物对大气环境和人体健康的影响

颗粒物对人体健康的影响与颗粒粒径密切相关, 细颗粒物对人体健康的危害远高于粗颗粒物。有研究表明, 空气动力学尺度大于 $10\mu m$ 的颗粒物, 基本可被阻止于人的鼻腔; 小于 $10\mu m$ 的颗粒物, 可进入人体咽喉, 沉积于呼吸道的各个部位; $PM_{2.5}$ 又称为可入肺颗粒物, 能够进入人体肺泡甚至血液循环系统, 可直接导致心血管等疾病。图 1.1 给出了可吸入颗粒物在人体呼吸系统各部位沉积的比例, 可见, 粒径为 $2.5\sim 10\mu m$ 的颗粒主要沉积于鼻、咽和支气管, 而小于 $2.5\mu m$ 的颗粒则更多地沉积在肺泡部位。因此, 对人体危害最大的主要为 $PM_{2.5}$, 而该粒径段的颗粒也最难清除。

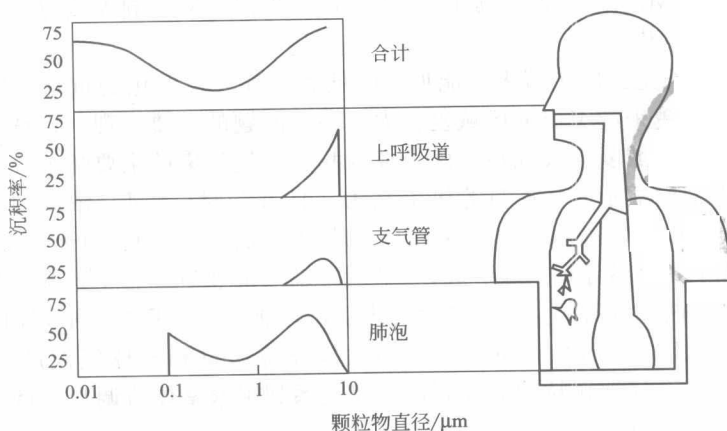


图 1.1 不同粒径的可吸入颗粒物在呼吸道各个部位的沉积率

细颗粒物能长期悬浮于大气环境, 具有很大的比表面积, 易于富集多环芳香烃、多环苯类、病毒和细菌等有毒物质以及痕量有毒元素, 一旦在人体呼吸系统沉积将产生严重的危害。美国环保局 (EPA) 和一些科研机构的研究表明, $PM_{2.5}$ 是影响人类身体健康最主要的污染物之一, 其浓度变化与慢性病、呼吸道疾病以及心脑血管疾病发病率有很大的相关性。2002 年美国纽约大学药学院的研究表明, 细颗粒物与肺癌、心脏病所导致的死亡率紧密相关, 并获得了确切的证据。

细颗粒物除了对人体健康产生不良影响以外，还会对能见度（图 1.2）、酸沉降、云和降水、大气的辐射平衡、平流层和对流层的化学反应等造成严重影响。如大气中的颗粒物减弱了阳光对地面的辐射，影响了地面和大气系统能量收支，改变气候。同时，细颗粒表面吸附的金属氧化物、硫酸盐及氯化物对 SO_2 具有催化作用，在一定条件下可促进 SO_2 氧化而形成硫酸盐等二次污染物。城市中汽车排放的尾气和空气中悬浮的细颗粒物在特定的光辐射条件下，可导致光化学烟雾污染。

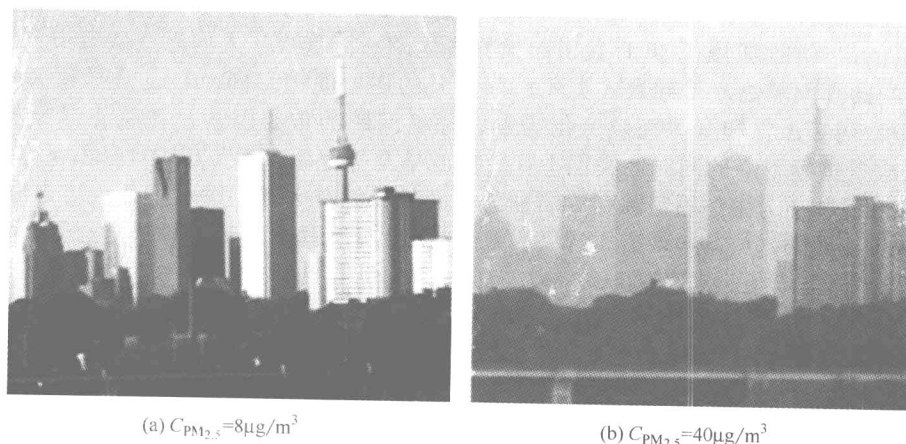


图 1.2 细颗粒物对大气能见度影响示意图

在相当长的时期内，细颗粒物作为我国大气污染首要污染物的基本状况不会改变。在 2007 年我国进行监测的地市级以上的城市中，大气质量达到优的只占 2.4%，而三级及劣于三级的达到 39.5%，70.9% 的城市主要污染物是 PM_{10} ；事实上， PM_{10} 中大部分为 $\text{PM}_{2.5}$ ，以北京、上海和广州等城市为例，目前 $\text{PM}_{2.5}$ 在 PM_{10} 中的比例已经超过 50%。值得注意的是，在总颗粒物和 PM_{10} 排放量持续下降的同时，我国 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量及部分城市大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均呈上升趋势。

$\text{PM}_{2.5}$ 的排放增长是我国区域大气能见度降低和空气质量恶化的重要原因。能见度下降和阴霾是近年来我国越来越突出的区域复合大气污染问题的重要表现，以珠三角、长三角和京津冀为典型地区的区域复合大气污染已经成为我国大气污染的主要特征，而 $\text{PM}_{2.5}$ 是其核心污染物。当环保部门显示空气质量等级仍然为“良好”时， $\text{PM}_{2.5}$ 浓度却可能达每立方米数十微克甚至 $100 \mu\text{g}$ 以上，远远超出美国 EPA 的标准。而且， $\text{PM}_{2.5}$ 对光的散射作用比较强，在不利的气象条件下更容易导致阴霾形成，“蓝天不蓝”的尴尬一幕就这样产生了。为此，我国环保部门正在考虑改变现有的空气质量评价体系，计划今后将 $\text{PM}_{2.5}$ 列入评价指标。

在全球尺度上， $\text{PM}_{2.5}$ 还会对更大区域的大气环境质量和全球气候产生重要影响。因此，大力推进我国对大气细颗粒物的控制，不仅关系到国家整体协调与可持续发展，同时也会对全球环境问题的解决做出贡献。

1.2 细颗粒物排放控制的政策法规

颗粒物对人体健康和大气环境造成的严重危害，已经引起我国政府及有关研究部门的高度重视，我国在 1996 年颁布的《环境空气质量标准》(GB 3095—96) 中明确规定了 PM_{10} 的排放浓度限值，见表 1.1，但目前尚未制定 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放标准。

表 1.1 我国 TSP 和 PM₁₀ 的排放标准

污染物名称	取值时间	排放浓度限值/($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
		一级标准	二级标准	三级标准
总悬浮颗粒物(TSP)	年平均	80	200	300
	日平均	120	300	500
可吸入颗粒物(PM ₁₀)	年平均	40	100	150
	日平均	50	150	250

注：不同地方执行不同的空气质量标准，一类区为自然保护区、风景名胜区和需要特殊保护的地区，执行一级标准；二类区为城镇规划中确定的居住区、商业交通居民混合区、文化区、一般工业区和农村地区，执行二级标准；三类区为特定工业区，执行三级标准。

1970 年美国 EPA 制定了第一个有关颗粒物的环境空气质量标准，最初只针对总悬浮颗粒物 (TSP)，1987 年质量标准增加了 PM₁₀ 的规定：50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (年平均) 和 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24h 最大值)。1997 年美国对环境空气质量标准进行了修订，率先规定了 PM_{2.5} 的质量浓度限值：15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (年平均) 和 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (日平均)，并制定了相应的实施规划 (表 1.2)。同时还计划在全国建立 PM_{2.5} 常规监测网，初期拟建 850 个测点，最终达到 3000 个测点，以便建立全国空气质量实时监测网络。澳大利亚也对 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的浓度限值做出了严格规定：PM₁₀ 为 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (日平均)，PM_{2.5} 为 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (日平均) 和 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (年平均)。

表 1.2 美国 PM_{2.5} 标准实施计划

时 段	实施内容	时 段	实施内容
1997 年	出台新的空气质量标准	2002~2005 年	区域性计划 (达到标准的和未达到的)
1998~2001 年	建立国家监测网络	2005~2008 年	提交执行计划
2001~2004 年	建立前 3 年监测数据库	2008~2017 年	用 10 年时间遵照实施
2002 年	标准出台后 5 年回顾		

欧洲虽目前还没有 PM_{2.5} 标准，但对原有的 PM₁₀ 标准进行了修正，并分两个阶段进行，同时欧洲将 PM_{2.5} 的监测纳入 PM₁₀ 监测系统，明确表示在减少 PM₁₀ 的同时也应包括 PM_{2.5}。

需要指出的是，虽然各国都制定了或正在制定 PM₁₀ 或 PM_{2.5} 的环境空气质量标准，但是燃烧源排放标准目前大多只针对总烟尘制定了相关排放限值，对燃烧源 PM₁₀、PM_{2.5} 排放浓度及其化学组成和毒性尚没有相关规定。

针对重型柴油机微粒排放，我国于 2005 年颁布了最新标准《车用压燃式、气体燃料点燃式发动机与汽车排气污染物排放限值及测量方法》(GB 17691—2005)，2007 年开始在全国实施，其内容基本等同于欧 III、欧 IV 和欧 V 标准。对于轻型柴油车，我国 2001 年制定了《轻型汽车污染物排放限值及测量方法》(GB 18352—2001)，其内容与欧 I 和欧 II 标准相比稍有宽松。2005 年颁布了《轻型汽车污染物排放限值及测量方法 (中国 III、IV 阶段)》(GB 18352—2005)，其内容基本等同于欧 III 和欧 IV 标准，2007 年开始在全国实施。

1.3 污染控制设施脱除细颗粒物的性能

污染控制设施主要为除尘设备和气态污染物控制设备，目前工业上应用的除尘设备主要有机械式除尘器、湿式除尘器、过滤式除尘器和静电除尘器等。机械式除尘器有重力沉降室、惯性除尘器、旋风除尘器，主要利用重力沉降和惯性分离作用脱除颗粒物，处理粗粉尘具有较好效果，而对于微米级和亚微米级微细粉尘，其分离能力较低。湿式除尘器是利用含

尘气体与洗涤液的相互接触，借助液滴和尘粒的惯性碰撞、扩散及其他作用机理实现将尘粒从气流中分离捕集，并可同时脱除部分气态污染物。过滤式除尘器是借助于多孔介质将粒子从气流中分离，用纤维层（滤布、金属绒、滤袋等）或颗粒层（矿渣、石英砂、活性炭等）对气体进行净化处理，但是压力损失较大，滤料抗腐蚀性差，需定期清洁和更换，维护成本较高，在我国应用不多。静电除尘器是在高电压下对粉尘荷电，而后在电场力作用下将荷电粒子捕获，静电除尘效果不仅和颗粒粒径有关，而且还和颗粒的比电阻有关，比电阻过高和过低都不利于颗粒物的清除，对于亚微米级细颗粒，由于不能使其有效荷电，脱除效率相对较低。

机械式除尘器、湿式除尘器、过滤式除尘器和静电除尘器有各自的优缺点和应用场合，除尘效率因处理粉尘的粒径不同均有很大差别。图 1.3 为各种除尘器的分级除尘效率曲线，可以看出，各种除尘器对粒径 $10\mu\text{m}$ 以上的粗颗粒粉尘均有很高的捕集效率，但对于细粉尘，脱除效率显著降低，且存在明显的差别，如对 $1\mu\text{m}$ 粉尘高效旋风除尘器的除尘效率仅为 27%，而电除尘器、布袋除尘器等高效除尘器的除尘效率则相对较高。表 1.3 列出了不同结构形式的湿式除尘器的性能特性，可见，文丘里洗涤器与其他结构形式的湿式除尘器相比具有较佳的除尘效果，但动力消耗比较高。

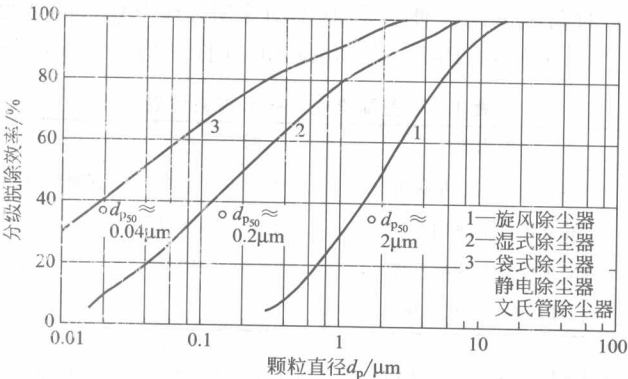


图 1.3 各种除尘器的分级效率曲线

表 1.3 不同结构形式的湿式除尘器的性能特征

分 类	湿式除尘器的形式	可能捕集的 粒径/ μm	含尘气体流速 /(m/s)	液气比 /(L/m^3)	50%分割粒径 / μm	压力损失 / Pa	除尘效率 /%
压力式洗涤除尘器	重力喷雾塔除尘器	5.0~100	1~2	2~3	3.0	100~500	70($d_p=10\mu\text{m}$)
	旋风式洗涤除尘器	1~100	1~2	0.5~1.5	1.0	500~1500	80~90
	喷射式洗涤除尘器	0.2~100	10~20	10~50	0.2	0~1000	90~99
	文丘里洗涤除尘器	0.1~100	60~90	0.3~1.5	0.1	3000~10000	90~99
填料塔洗涤除尘器	填料塔洗涤除尘器	≥ 0.5	0.5~2	1.3~3	1.0	1000~2500	90($d_p\geq 2\mu\text{m}$)
	湍流塔洗涤除尘器	0.5~100	5~6	0.5~0.7	0.5	750~1250	97($d_p=2\mu\text{m}$)

目前，在燃煤烟气除尘中，主要采用静电除尘器和布袋除尘器，特别是静电除尘器，由于具备除尘效率高、设备阻力低（100~300Pa）等诸多优点，我国目前有近 90%左右的火电机组配备了静电除尘器，且几乎所有的新建大中机组均配备静电除尘器，但对细颗粒物的捕集性能不及布袋除尘器。近年来，由于排放标准日趋严格，美国、澳大利亚等发达国家开始转向采用布袋除尘器或电袋复合除尘器，我国也有一些厂家开始采用布袋或电袋除尘器，但应用尚不普遍。

对于燃煤烟气中的颗粒物，静电、布袋除尘器的总除尘效率普遍可以达到 99% 以上。国内外学者测试静电除尘器、布袋除尘器排放颗粒物的粒径分布特性，发现除尘器出口颗粒

物的质量浓度粒径分布呈现典型的双峰形态，颗粒物峰值出现在亚微米和 $3\mu\text{m}$ 附近；并且静电除尘器和布袋除尘器在 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ 的粒径区间内都存在一个颗粒物穿透窗口，在这一区间的捕集效率大多低于 95%，如图 1.4 所示。

清华大学于 2004~2005 年期间在全国范围内选择了 7 家不同的燃煤电厂，实测了各电厂不同类型的污染控制设施对颗粒物的分级脱除效率。测试结果表明，静电除尘器对总烟尘的脱除效率较高，可达到 99% 以上，而对 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{1.0}$ 的脱除效率则相对较低。相比之下，布袋除尘器的脱除效率高于静电除尘器，各粒径段的去除效率均达到 99% 以上，总烟尘的脱除效率达到 99.9% 以上。

颗粒物的捕集过程受到多种力的作用，颗粒物的粒径和种类不同，所受作用力则不同，颗粒物的动力学行为也不同。惯性碰撞、重力等作用力对颗粒物的捕集效率随粒径增大而提高；相反，扩散沉降的捕集效率则随粒径减小而增大（图 1.5）。因此，在多种机理共同作用下，一般在 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ 范围内会出现除尘效率的最低点。图 1.6 为清华大学测得的各电厂除尘器（电厂 4 采用布袋除尘器，其余均为静电除尘器）对 PM_{10} 的分级穿透效率曲线，可见，静电除尘器和布袋除尘器对粗颗粒态的颗粒物脱除效率均较好，最大穿透率均出现在 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ 范围内（图 1.4 也呈现相似的特征）。该粒径区间的颗粒物在静电除尘器中的穿透率为 1.4%~14.2%，峰值达到 31%；在布袋除尘器中穿透率为 0.46%，低于静电除尘器；静电除尘器对亚微米颗粒的荷电性不佳，是造成脱除率较低的主要原因。因此，经过除尘设施之后的颗粒物中，该粒径范围的颗粒物所占份额明显提高，降低该区间颗粒物的穿透率有利于控制细颗粒物的排放。

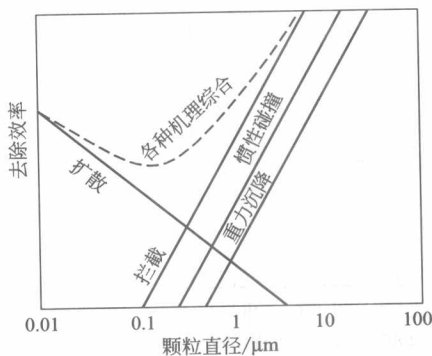


图 1.5 捕集作用与颗粒粒径的关系

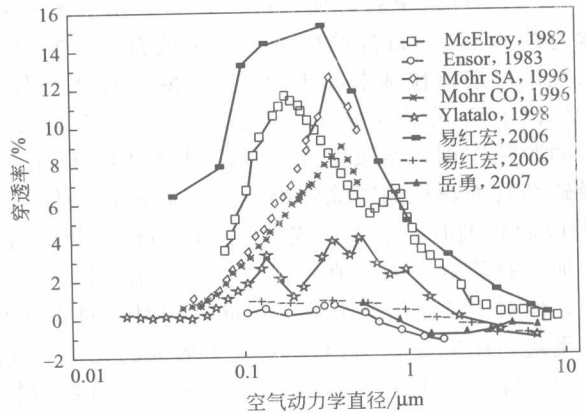


图 1.4 燃煤电站除尘器对 PM_{10} 的分级穿透曲线

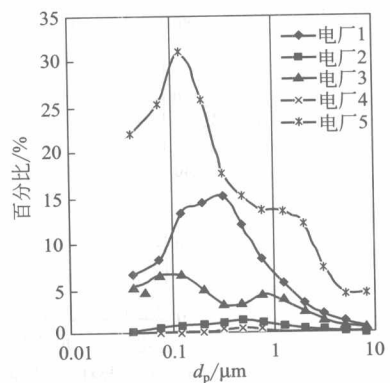


图 1.6 各电厂除尘器对 PM_{10} 的分级穿透曲线

目前，大型燃煤电厂普遍在除尘装置后安装湿法烟气脱硫（WFGD）系统，由于脱硫浆液的洗涤作用，可协同脱除烟气中的颗粒物，并会影响最终排放颗粒的成分。清华大学王琿等采用 Andersen 8 级撞击器测试分析某 300MW 燃煤电厂（测试工况分别为 100% 和 70% 锅炉负荷）WFGD 系统对细颗粒物的脱除作用发现，WFGD 系统虽可有效脱除 SO_2 和粗粉尘，但对 $\text{PM}_{2.5}$ 的捕集效率较低，且随粒径减小脱除效率显著下降（图 1.7）；同时，

经过 WFGD 系统后，细颗粒中 S、Ca 元素含量明显增加，出口细颗粒中除燃煤飞灰外，还含有约 7.9% 的石膏颗粒和 47.5% 的石灰石颗粒。荷兰 Meij 分析发现，石灰石/石膏法脱硫系统出口细颗粒基本属于 $PM_{2.5}$ ，除燃煤飞灰外，还含石膏和未反应的石灰石等组分（占 50% 以上）。东南大学试验测试了石灰石-石膏法、双碱法、氨法等典型 WFGD 工艺对细颗粒的脱除作用，结果发现，脱硫剂对 WFGD 系统脱除细颗粒的性能具有重要影响， $CaCO_3$ 脱硫剂对细颗粒的脱除效果低于相同操作条件下的洗涤水及 Na_2CO_3 脱硫剂；采用 $NH_3 \cdot H_2O$ 脱硫剂时，由于形成大量亚硫酸铵、硫酸铵等无机盐气溶胶，脱硫后细颗粒浓度反而增加，脱除效率为负值，如图 1.8 所示。这表明，WFGD 系统虽可有效捕集烟气中的粗粉尘，但对 $PM_{2.5}$ 的捕集效率较低；同时，对于安装 WFGD 系统的燃煤电厂，不仅需控制燃煤飞灰，还应控制 WFGD 系统中形成的无机盐气溶胶微粒。此外，由于 WFGD 系统对粗颗粒的脱除率高于细颗粒，使得 WFGD 出口颗粒物中 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.0}$ 占总颗粒质量的比例显著提高，最高可达 76% 和 51%，如图 1.9 所示。

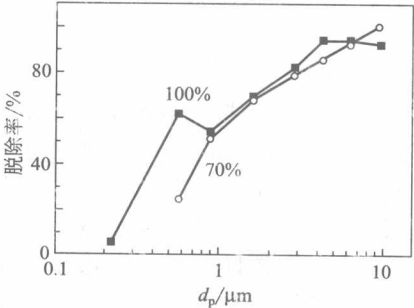


图 1.7 WFGD 系统对颗粒物的分级脱除效率

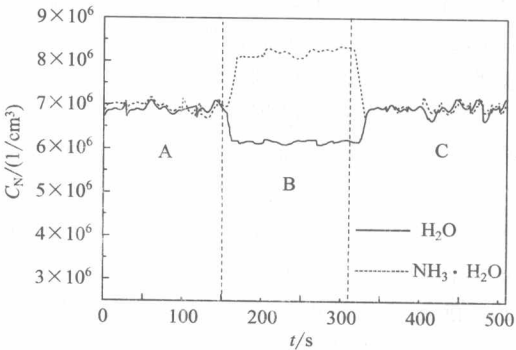


图 1.8 湿法脱硫塔出口细颗粒数量浓度
A—脱硫洗涤前；B—脱硫洗涤后；C—停止脱硫操作

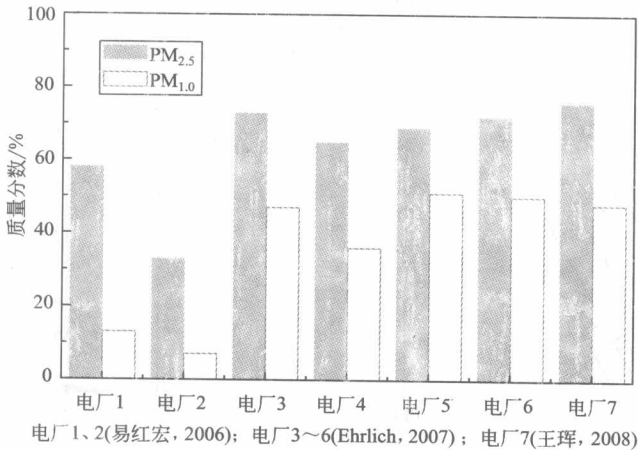


图 1.9 各采样电厂 WFGD 排放颗粒中 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.0}$ 占总颗粒质量的百分比
电厂 1、2(易红宏, 2006); 电厂 3~6(Ehrlich, 2007); 电厂 7(王珏, 2008)

1.4 燃烧源细颗粒物控制技术的研究现状及存在的问题

近 30 年来，世界各国都将颗粒物污染作为大气污染研究的重点，1998 年美国能源部国

家能源技术实验室 (NETL) 启动了细颗粒物研究计划, 开展了新型 $PM_{2.5}$ 控制技术研究。我国 2002~2008 年间实施了 973 项目“燃烧源可吸入颗粒物形成与控制技术基础研究”(2002CB211600), 开展了燃烧源 PM_{10} 形成与控制机理的研究, 并在项目实施后期开始关注脱除难度更高、危害更大的细颗粒物 $PM_{2.5}$ 。总体而言, 目前燃烧源细颗粒物控制技术的研究尚处于实验室探索阶段, 真正可实现工程应用的技术很少。虽然从原理上讲, 可从燃烧过程和燃烧后两个技术方向加以控制, 但迄今关于固体燃料燃烧过程中控制细颗粒物排放的相关研究仅见 Fletcher 报道了在燃煤过程中增加煤粉停留时间、提高燃烧温度、加速炭烟氧化过程可降低细颗粒物的排放。目前国内外正在研究开发的主要为燃烧后控制, 可分为两个技术方向。①团聚 (凝并) 长大促进预处理技术: 包括通过电场、声场、磁场等外场作用及在烟气中喷入少量化学团聚剂等措施增进细颗粒物间的有效碰撞接触, 促进其碰撞团聚长大, 以及利用过饱和水汽在细颗粒物表面核化凝结的凝并长大等, 这些措施各有优缺点及其适用范围。②高效除尘技术: 包括复合式除尘器与传统除尘器的改进。前者将不同的除尘机理有机结合, 使它们共同作用以提高对细颗粒物的脱除效果, 其中多数复合除尘器 (技术) 是利用静电力作用, 如电袋复合除尘器、电旋风除尘器等; 后者主要通过改进传统除尘器的结构以提高其对细颗粒物的脱除效果, 如湿式静电除尘器等。

1.4.1 团聚 (凝并) 长大促进预处理技术

1.4.1.1 声波团聚技术

声波的作用效果主要在于引起颗粒间的相对运动并进而提高它们的碰撞团聚速率, 使颗粒在很短的时间范围内, 粒径分布从小尺寸向大尺寸方向迁移。一般认为, 声波团聚机理包括同向相互作用、流体力学作用、声辐射压力作用、声致湍流等, 其中前两者是主要的声波团聚机理。美国宾夕法尼亚州大学对低声强下声波团聚微粒的可行性及操作参数的影响规律、团聚后微粒的坚固性、双模态声波团聚等方面做了不少研究。西班牙马德里声学研究所从提高声阻抗率、抑制声衰减、提高声振动幅度及指向性等方面研制压电陶瓷换能器型高频声源, 最后开发了一种适合高温 ($100\sim 200^{\circ}\text{C}$) 含尘环境的声源, 并于 20 世纪 90 年代进行了采用高频声波使燃煤细颗粒物团聚长大然后用静电除尘器脱除的中试试验研究。东南大学沈湘林等在 973 计划的资助下, 对燃煤烟气中数量浓度峰值粒径在 $0.07\mu\text{m}$ 附近的超细颗粒物进行了低频声波团聚清除的试验研究。

1.4.1.2 磁团聚技术

磁团聚是指被磁化的颗粒物、磁性粒子在磁偶极子力、磁场梯度力等作用下, 发生相对运动而碰撞团聚在一起, 使其粒度增大, 进而易于后续常规除尘设备脱除; 燃煤细颗粒物的磁特性是影响其磁团聚效果的关键。东南大学赵长遂等在 973 计划的资助下, 对燃煤 PM_{10} 在梯度磁场和均匀磁场中的团聚特性进行了试验和理论研究, 结果表明对于含有铁磁性物质的燃煤 PM_{10} , 采用外加磁场团聚的方法是确实可行的, 通过添加强磁性的磁种颗粒, 可增强燃煤 PM_{10} 的团聚效果, 特别是小粒子; 与均匀磁场比较, 梯度磁场中燃煤 PM_{10} 团聚效率相对较好。

1.4.1.3 蒸汽相变技术

利用蒸汽相变促使细颗粒物凝并长大成较大颗粒后加以脱除是一种重要的技术途径, 其机理是: 在过饱和蒸汽环境中, 蒸汽以细颗粒物为凝结核发生相变, 并同时产生热泳和扩散泳作用, 促使细颗粒物迁移运动, 相互碰撞接触, 使颗粒质量增加、粒度增大, 从而提高惯性捕集作用, 主要适合于烟气中水汽含量较高的过程。美国 Calvert 等进行了在模拟废气中添加蒸汽使之达到饱和状态, 然后用筛板塔洗涤器脱除 Fe_2O_3 微粒 ($d_p < 2\mu\text{m}$) 的研究, 并提出了一种新颖湿式除尘器——流量力/冷凝洗涤器 (Flux Force/Condensation Scrubber)。东南大学杨林军等在 973 及 863 计划的资助下, 针对燃煤湿法烟气脱硫装置中烟气含

湿量较高的特点,进行了 WFGD 系统中应用蒸汽相变促进 $\text{PM}_{2.5}$ 脱除的试验研究。

1.4.1.4 电凝并技术

电凝并是通过提高细颗粒的荷电能力,促进细颗粒以电泳方式到达飞灰颗粒表面的数量,从而增强颗粒间的凝并效应;电凝并的效果取决于粒子的浓度、粒径、电荷的分布以及外电场的强弱,不同粒子的不同速度和振幅导致了细颗粒间的碰撞和凝并。电凝并研究主要可概括为三方面:①异极性荷电粉尘的库仑凝并;②同极性荷电粉尘在交变电场中的凝并;③异极性荷电粉尘在交变电场中的凝并。日本京都大学 Watanabe 等将电凝并技术与常规电除尘技术结合,提出了同极性荷电粉尘在交变电场中凝并的三区式静电凝并除尘器;浙江大学骆仲决等建立了一种脉冲预荷电直流收尘的复合式除尘系统,发现结合传统的直流静电除尘器可以大幅提高对亚微米级颗粒的脱除效率。

1.4.1.5 化学团聚技术

化学团聚是一种通过添加团聚剂(吸附剂、黏结剂)促进细颗粒物脱除的预处理方法,根据化学团聚剂加入位置的不同,又可分为燃烧中化学团聚和燃后区化学团聚。燃烧中化学团聚主要是指在燃烧室中喷入气相吸附剂或在煤中加入固相吸附剂进行燃烧,通过为汽化态细颗粒前驱体提供凝结基核或与其发生化学反应,抑制细颗粒物的形成,进而增大煤燃烧气溶胶粒子的粒度。Zhuang 等进行了通过在煤燃烧区喷入气相吸附剂(异丙氧基钛)的方法团聚汽化状态的亚微米颗粒物,以防止其形成亚微米颗粒基核的研究。燃后区化学团聚是通过在除尘装置入口烟道喷入少量团聚促进剂,利用絮凝理论,增强细颗粒物之间的液桥力和固桥力,促使细颗粒物团聚长大,进而提高现有除尘装置的捕集性能。张军营等研究了不同团聚促进剂对细颗粒的团聚效果,发现适当调节团聚促进剂溶液的酸度、增大团聚促进剂溶液的流量和浓度、提高团聚室温度均可提高细颗粒的团聚效果。

1.4.1.6 热泳沉积技术

热泳沉积就是利用含尘气流的主题温度与管道壁面较低温度所产生的温差而形成的温度梯度,由此推动细颗粒物向壁面运动、沉积。清华大学杨瑞昌等在 973 计划的资助下,对温度梯度场内水平管及垂直管中可吸入颗粒物的运动特性和热泳沉积规律做了不少研究,并提出了应用微通道、层流或湍流环形通道、步进式短管等多种热泳脱除技术方案。

此外,应用热团聚、湍流边界层团聚、光辐射等技术也可不同程度地促进细颗粒长大,但存在较大局限性,目前工业应用价值相对较小。

1.4.2 高效除尘技术

高效除尘技术包括复合除尘和传统除尘技术改进两个方面,其中,最有可能实现有效脱除细颗粒物的是复合除尘技术。对现有除尘设施进行过程优化虽有望达到提高细颗粒物脱除效果的目的,但在日趋严格的细颗粒物排放标准下,采用任何单一除尘技术都难以满足控制细颗粒物的需要,因此发展不同控制方式协同的复合除尘技术日益迫切。所谓复合除尘技术是指结合不同除尘机理,使它们共同作用以提高除尘效率,其中静电与其他传统除尘技术结合的“复合式除尘器”已成为工业除尘发展的一个重要方向,其理论和应用研究对推动固定源细颗粒物的有效控制具有重要意义。

1.4.2.1 电袋复合除尘器

电袋复合除尘器是综合了静电除尘和布袋除尘两种成熟的除尘技术而提出的一种新型除尘设备。最初起源于美国电力研究所 20 世纪 90 年代开发的静电和布袋串联的紧凑型混合颗粒收集器(COHPAC),采用常规静电除尘的第一电场作为一级除尘单元,除去烟气中的粗颗粒烟尘,然后利用布袋作为二级除尘单元除去剩余的微细颗粒。通常,常规静电除尘器第一电场能除去烟气中 80%~90% 的粉尘,剩余电场用来除去剩下的 10%~20% 粉尘。电袋复合除尘技术充分利用了静电除尘器的这一特性,只采用第一电场,余下的细颗粒物则由布