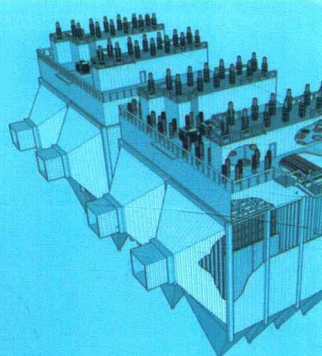
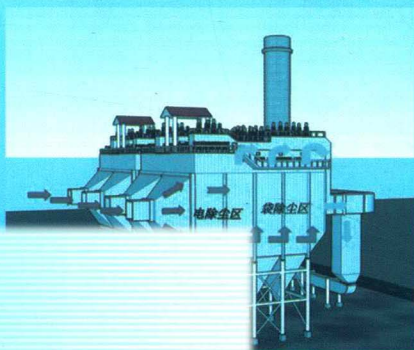
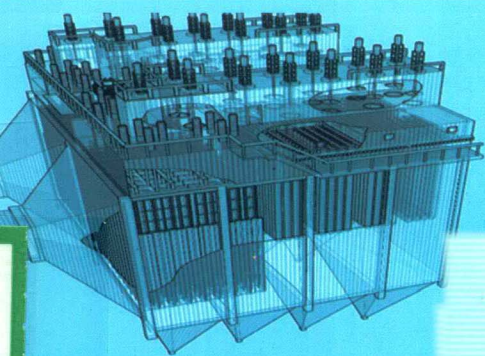


DAXING DIANDAI FUHE CHUCHENQI
YUNXING TEXING YU YOUHUA

大型电袋复合除尘器 运行特性与优化

孙超凡 楼 波 龙新峰 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

DAXING DIANDAI FUHE CHUCHENQI

YUNXING TEXING YU YOUHUA

大型电袋复合除尘器 运行特性与优化

孙超凡 楼 波 龙新峰 于兴鲁 钱 炜 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书总结了最近几年电袋复合除尘技术的研究成果和工程实践。本书共分九章,主要包括大型电袋复合除尘器的研究背景和意义、各种燃煤锅炉除尘技术及特点比较、电袋复合除尘实验、电袋复合除尘实验结果与分析、电袋复合除尘器数值分析的理论基础、600MW 电袋复合除尘器模拟结果与分析、1000MW 电袋复合除尘器数值模拟与分析、电袋复合除尘器 $PM_{10}/PM_{2.5}$ 现场测试、电袋复合除尘器选型。

本书可供发电、能源、环保、冶金、化工、陶瓷等相关行业或领域的科研人员、工程技术人员阅读使用,对从事除尘器设计、制造、运行和管理工作的人员有较强的指导意义,也可供高等院校相关专业的师生阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

大型电袋复合除尘器运行特性与优化 / 孙超凡等编著. — 北京: 中国电力出版社, 2016.8

ISBN 978-7-5123-7100-2

I. ①大… II. ①孙… III. ①滤袋除尘器—运行特性—研究 IV. ①TM925.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 086345 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

三河市万龙印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 8 月第一版 2016 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15.75 印张 387 千字

印数 0001—1500 册 定价 58.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

大气环境保护事关人民群众根本利益，事关经济持续健康发展，事关全面建成小康社会，事关实现中华民族伟大复兴中国梦之实现。当前，我国大气污染形势严峻，以可吸入颗粒物（ PM_{10} ）、细颗粒物（ $PM_{2.5}$ ）为特征污染物的区域性大气环境问题日益突出，损害人民群众身体健康，影响社会和谐稳定。随着我国工业化、城镇化的深入推进，能源资源消耗持续增加，大气污染防治压力继续加大。为切实改善空气质量，有必要为大型燃煤电厂寻找到一种在技术上更加可靠、在经济上更加可行的烟气除尘设备。通过多年努力，人们发现大型电袋复合除尘器在我国的推广应用不失为一种防止大气污染、治理雾霾产生的行之有效的除尘技术设备。

然而，电袋复合除尘技术毕竟还是一种新的除尘技术路线，最近几年发展尤其迅速，因此，我们有必要对其开展更加深入的研究，从除尘机理、数值模拟、理论研究到运行优化等各方面进行更多的研究、实践、推广和应用。为此，我们试着以 600MW 级的电袋复合除尘器为原型，按照一定的缩小比例建立了电袋复合除尘实验台，开展了电袋复合除尘机理实验，对影响电袋除尘的各种因素进行了实验；并借助计算机软件，建立了计算模型，开展了 600MW 级和 1000MW 级电袋复合除尘数值模拟研究；利用烟尘浓度测试仪、 $PM_{2.5}$ 测试仪等先进仪器设备，在现场进行了优化试验研究工作，为进一步开展电袋复合除尘器的设计选型、运行调整积累了一定的数据资料，做了一点基础性的理论与实践研究工作。

通过研究，我们深深体会到，利用电袋复合除尘技术是完全可以达到超净排放目标的，虽然某些理论、机理课题还有待同行们继续努力与探索，某些设计、制造、安装及运行技术还有待进一步完善与优化，但这已不构成影响其继续发展之理由与障碍。因此，编著者根据最近几年来对电袋复合除尘技术的研究和工程实践，编著了此书，以供发电、能源、环保、冶金、化工、陶瓷等相关行业或领域的科研人员、工程技术人员参阅。本书对从事除尘器设计、制造、运行和管理人员有借鉴作用，也可供高等院校动力、环保相关专业的师生参考。倘若读者能从中有所启迪或收益，编著者将不胜荣幸。

本书共分九章，系统、全面地介绍了电袋复合除尘技术发展背景、国内外研究现状；比较了各种除尘技术的优势与不足；探讨了电袋复合除尘技术的除尘机理；对 600MW 级和 1000MW 级电袋除尘器进行了数值模拟研究，较详细地介绍了数值模拟分析理论基础，着重对

影响除尘效率的各种因素进行了分析；对长期以来一直困扰人们的除尘路线选择问题给予了基本解答；结合现场优化调整实验，对最新的电厂燃煤锅炉烟气细微颗粒物 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 的测试技术进行了介绍。

本书是由孙超凡任项目负责人的相关科研项目成果之总结。项目历时数载，是科研团队智慧之结晶。本书由孙超凡、楼波、龙新峰、于兴鲁、钱炜编著。其中，第一章、第二章、第七章、第八章和第九章由孙超凡编写，第三章和第四章以楼波为主进行编写，第五章和第六章主要由龙新峰执笔编写。在编写过程中，由校企联合培养的几位进站研究生也做了不少协助工作。研究生于兴鲁协助数值模拟部分的编写工作，研究生钱炜协助实验及现场测试部分的编写工作。研究生彭泽宏对第七章和第四章的第三节、研究生吴娟对第四章的第二节的编写工作也分别做出了贡献。全书由孙超凡统稿、反复修改、增删及润色，并做最后校对、修订。

本书能得以出版，与广东电网有限责任公司电力科学研究院廖宏楷、刘亚明、苏湛清、沈跃良、李德波等同事在科研过程中给予的支持是分不开的，更得益于中国南方电网有限责任公司专项科研项目资金的资助，在此一并致谢。

受编著者水平所限，加之时间仓促，书中难免存在不妥之处，敬请读者给予批评与指正，编著者将不胜感激。

孙超凡

2016年2月

目 录

前言

第一章 大型电袋复合除尘器的研究背景和意义	1
第一节 颗粒物分类及形成机理	1
第二节 飞灰排放标准的发展	3
第三节 燃煤锅炉除尘工艺概述	4
第四节 电袋复合除尘技术概述	6
第五节 电袋复合除尘技术研究现状	13
参考文献	18
第二章 各种燃煤锅炉除尘技术及特点比较	19
第一节 各种燃煤锅炉除尘技术	19
第二节 各种除尘技术特点比较	29
参考文献	31
第三章 电袋复合除尘实验	32
第一节 国内外电袋复合除尘器实验研究的进展	32
第二节 电袋复合除尘实验台	44
参考文献	57
第四章 电袋复合除尘实验结果与分析	59
第一节 入口工况因素对除尘器效率及性能的影响	59
第二节 腐蚀对滤袋滤料的影响	73
第三节 含湿量对电除尘器 $PM_{2.5}$ 除尘效率的影响规律	82
参考文献	85
第五章 电袋复合除尘器数值分析的理论基础	88
第一节 电袋复合除尘器模型求解的数值方法	89
第二节 基于 Pro/ENGINEER 软件的几何模型构建与转换	94
第三节 电袋复合除尘器的结构与物理模型	97
第四节 电袋复合除尘器内烟气流动的数学模型	103
第五节 网格生成与边界条件	115
第六节 数值计算方法	125
第七节 FLUENT 软件中相关模型的选择	137

第八节 计算方法的可靠性检验	145
参考文献	156
第六章 600MW 电袋复合除尘器模拟结果与分析	159
第一节 布袋渗透率的确定	159
第二节 气流分布板均流布置的确定	162
第三节 操作工况下除尘器模拟结果与现场数据对比	166
第四节 运行条件	168
第五节 颗粒特性	171
第六节 结构特性	174
参考文献	176
第七章 1000MW 电袋复合除尘器数值模拟与分析	177
第一节 数值建模	178
第二节 除尘器模拟结果与现场数据对比	182
第三节 影响除尘效率因素分析	189
参考文献	198
第八章 电袋复合除尘器 $PM_{10}/PM_{2.5}$ 现场测试	200
第一节 $PM_{10}/PM_{2.5}$ 现场测试技术	200
第二节 Z 电厂电袋复合除尘器 $PM_{10}/PM_{2.5}$ 现场测试	205
第三节 其他电厂的 $PM_{10}/PM_{2.5}$ 测试结果及分析	220
第四节 几种除尘器 $PM_{10}/PM_{2.5}$ 测试结果对比	235
参考文献	236
第九章 电袋复合除尘器选型	237
第一节 除尘器选型与改造基本原则	237
第二节 燃煤机组选用电袋复合除尘器	241
第三节 超净电袋复合除尘技术	243
参考文献	246

第一章

大型电袋复合除尘器的研究背景和意义

第一节 颗粒物分类及形成机理

一、雾霾天气

1. 雾霾天气定义

雾霾 (Fog and Haze) 是雾和霾的统称。但是雾是雾, 霾是霾, 雾和霾的区别十分大。雾是由大量悬浮在近地面空气中的微小水滴或冰晶组成的气溶胶系统, 多出现于秋冬季节, 是近地面层空气中水汽凝结 (或凝华) 的产物。雾的存在会降低空气透明度, 使能见度恶化, 如果目标物的水平能见度降低到 1000m 以内, 就将悬浮在近地面空气中的水汽凝结起来, 这种天气现象称为雾 (Fog); 而将目标物的水平能见度在 1000~10 000m 的现象称为轻雾或霭 (Mist)。形成雾时大气湿度是饱和的 (如有大量凝结核存在时, 相对湿度不一定达到 100% 就可能出现饱和)。由于液态水或冰晶组成的雾散射光与波长关系不大, 因而雾看起来呈乳白色或青白色。

霾是由空气中的灰尘、硫酸、硝酸、有机碳氢化合物等粒子组成的。它也能使大气浑浊、视野模糊并导致能见度恶化。如果水平能见度小于 10 000m, 将这种非水成物组成的气溶胶系统造成的视程障碍称为霾 (Haze) 或灰霾 (Dust-haze), 香港天文台称烟霞 (Haze)。

雾霾天气会造成城市出现大面积低能见度的情况。在早上或夜间相对湿度较大的时候, 形成的是雾; 在白天气温上升、湿度下降的时候, 逐渐转化成霾。这种现象既有气象原因, 也有污染物排放原因。

2. 国内雾霾天气状况

空气的严重污染已影响到广大民众的生活和健康, 并引起了国内外的广泛关切。

3. 雾霾天气污染的来源

雾霾天气形成的主要原因是空气中 $PM_{2.5}$ 值含量过高。虽然 $PM_{2.5}$ 只是地球大气成分中含量很少的组分, 但它对空气质量和能见度有重要的影响。二氧化硫、氮氧化物和可吸入颗粒物这三项是雾霾主要组成成分, 前两者为气态污染物, 最后一项颗粒物才是加重雾霾天气污染的罪魁祸首。它们与雾气结合在一起, 让天空瞬间变得灰蒙蒙的。与较粗的大气颗粒物相比, $PM_{2.5}$ 粒径小, 富含大量的有毒、有害物质且在大气中的停留时间长, 输送距离远, 加上空气中的水蒸气小冰晶一类的东西构成了气溶胶。因而对人体健康和大气环境质量的影响更大。同时 $PM_{2.5}$ 降低可见度的能力非常强。

据有关部门统计，雾霾的形成，由机动车带来的路面扬尘、尾气排放占 20%~30%，工业的燃煤排放等占 30%~40%，干洗、餐饮油烟等占 30%~40%。冬季供暖锅炉脱硫设施带出水蒸气与烟气的混合物排放量大，也是形成冬季雾霾天气的主要原因之一。

(1) 工业废气。部分二氧化硫排放均来自火力发电厂以及非金属矿物生产、炼钢、化工制造和有色金属冶炼企业。另外还包括机电制造业的工业窑炉与锅炉以及大量汽修喷漆、建材生产窑炉燃烧排放的废气等。因此，工业排放出的废气是一大要素。

(2) 机动车尾气。中国的汽车行业发展非常迅猛，汽车多必将导致耗油量增大。

(3) 冬季燃煤。燃煤的发电厂、城市垃圾燃烧炉、燃煤的砖窑、燃木材炉、烧秸秆炉及柴油机所释放的黑炭是对气候破坏最大的污染物。黑炭中的煤烟颗粒是城市空气污染物中的主要成分。

(4) 其他。建筑工地和道路交通产生的扬尘，此过程产生的颗粒物大部分大于 $10\mu\text{m}$ ，细颗粒较少，但对空气质量也产生一定程度的影响；地区的地理位置及气象条件也是产生雾霾天气的因素。

4. 雾霾对健康的危害

$\text{PM}_{2.5}$ 的浓度超过 50 即为危险值，300 以上就会对人体造成严重损害。

(1) 雾霾天比吸烟更易致癌。雾霾的组成成分非常复杂，包括数百种大气颗粒物。其中危害人类健康的主要是直径小于 $10\mu\text{m}$ 的气溶胶粒子，它能直接进入并黏附在人体上下呼吸道和肺叶中，引起鼻炎、支气管炎等病症，长期处于这种环境还会诱发肺癌。

(2) 疾病杀手。有研究表明，空气中污染物加重时，心血管病人的死亡率会增高。阴霾天中的颗粒污染物不仅会引发心肌梗死，还会造成心肌缺血或损伤。

雾霾笼罩时气压较低，空气中的含氧量有所下降，这时易感到胸闷。潮湿寒冷的雾和霾，还会造成冷刺激，导致血管痉挛、血压波动、心脏负荷加重等。同时，雾霾中的一些病原体会导致头痛，甚至诱发高血压、脑溢血等疾病。重度污染的空气清洁度低，含有大量的尘埃、污染物、微生物等，可对人的呼吸道产生刺激。

二、 $\text{PM}_{2.5}$ 粉尘颗粒对人体的危害

依据其直径大小，颗粒物可分为总悬浮颗粒物 TSP（空气动力学直径 $D \leq 100\mu\text{m}$ ）和可吸入颗粒物（空气动力学直径 $D \leq 10\mu\text{m}$ ）。而可吸入颗粒物又可细分为细颗粒物 PM_{10} （ $2.5\mu\text{m} \leq D_{10} \leq 10\mu\text{m}$ ）和超细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ （ $D_{2.5} \leq 2.5\mu\text{m}$ ）。大气颗粒污染物主要来自天然污染源和人为污染源。天然污染源主要指土壤粒子、海盐粒子等造成的大气污染，而人为污染源包括汽车尾气排放、水泥和砖瓦厂等产生的颗粒以及燃煤锅炉排放的烟尘等。调查发现：目前，大气中的颗粒物污染主要是由于人为污染造成的，其中汽车尾气排放和燃煤烟尘排放造成的污染最严重，本书重点研究燃煤锅炉产生的颗粒物。

按照大气颗粒物的产生可以将颗粒物分为一次颗粒物和二次颗粒物，其中一次颗粒物主要是指直接排入大气中的颗粒物，而二次颗粒物是由大气中某些气体组分（如 SO_2 、 NO_x 、 C_xH_y ）与大气中的组分（如 O_2 ）之间通过光化学氧化反应、催化氧化反应或其他化学反应转化生成的颗粒物，例如，二氧化硫转化生成硫酸盐。

$\text{PM}_{2.5}$ 是指直径小于 $2.5\mu\text{m}$ 的可吸入悬浮颗粒。 $\text{PM}_{2.5}$ 粉尘是一种固体污染物，直径小于 $2.5\mu\text{m}$ ，最大只有头发丝的 1/30，可以直接通过人的口鼻，进入肺泡和毛细血管。相比三聚氰胺之类的化学品， $\text{PM}_{2.5}$ 的危险性要严重得多，因为它事关每个人的呼吸。

一般而言,直径超过 $10\mu\text{m}$ 的颗粒物,会被挡在鼻子的外面;直径在 $2.5\sim 10\mu\text{m}$ 之间的颗粒物可以进入呼吸道,由于惯性作用可被鼻毛和呼吸道黏液排除,随着吐痰、打喷嚏被部分排出体外;而直径在 $2.5\mu\text{m}$ 以内的细颗粒物,却会顺利通过下呼吸道。小于 $2.5\mu\text{m}$ 的颗粒可进入肺泡之中,并可通过气血交换进入到人体血管。它就像一个运输大队长,可以源源不断朝人体运送有毒有害物质,而且很少有装备可以将它拦在体外。更致命的是, $\text{PM}_{2.5}$ 还有很强的吸附性,容易和有毒有害物质结合。当 $\text{PM}_{2.5}$ 吸附了致癌物,就有致癌效应。 $\text{PM}_{2.5}$ 通过下呼吸道,进入肺的深处,而它携带的有害气体、重金属就溶解在血液里。据分析,有些飘尘微粒表面还附有致癌性很强的芳香族碳氢化合物,尤其是燃煤产生的粉尘是大气中各种毒物的元凶。

世界卫生组织表示,把微粒从 $70\mu\text{g}/\text{m}^3$ 降低至 $20\mu\text{g}/\text{m}^3$,可使死亡人数减少 15%。

鉴于 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 对人体健康的危害及造成的经济损失,2012 年 12 月由环境保护部、发改委和财政部制定的《重点区域大气污染防治“十二五”规划》正式发布。这是我国第一部综合性大气污染防治规划,针对 SO_2 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 等多项污染物实施综合控制,首次将联防联控与属地管理相结合,推进区域各城市间联防联控。

第二节 飞灰排放标准的发展

能源利用主要集中在煤炭和石油,而煤炭和石油的燃烧会排出各种污染物。因为大气中 99% 的 NO_x 、99% 的 CO 、91% 的 SO_2 、78% 的 CO_2 、60% 的粉尘和 43% 的 CH_x 是化石燃料燃烧时产生的,同时燃煤所产生的污染物又占大多数。所以燃煤产生的飞灰是大气污染物的主要来源之一。

1972 年国家建委在上海召开了烟气除尘现场会议,提出防治煤烟型污染。1984 年国务院颁布了《防治煤烟型污染技术政策的规定》,并于 1983 年首次颁布《锅炉大气污染物排放标准》,随着社会经济的飞速发展和人民生活水平的不断提高,环境污染问题也越来越受到社会各界的关注,国家对火力发电厂烟尘排放标准的要求不断提高,新建火力发电厂允许的烟尘排放浓度从 GB 13223—1996《火电厂大气污染物排放标准》中要求的 $200\text{mg}/\text{m}^3$ 提高到 GB 13223—2003《火电厂大气污染物排放标准》的 $50\text{mg}/\text{m}^3$,沿海及经济发达地区要求更加严格,如北京地方标准 DB11/139—2007《锅炉大气污染物排放标准》对新建燃煤电厂锅炉要求的烟尘排放浓度仅为 $10\text{mg}/\text{m}^3$,在用锅炉也不能超过 $20\text{mg}/\text{m}^3$ 。GB 13223—2011 规定:《火电厂大气污染物排放标准》由环境部于 2011 年 7 月 18 日批准,由环境保护部、国家质量监督检验检疫总局于 2011 年 7 月 29 日颁布,于 2012 年 1 月 1 日实施。燃煤锅炉烟尘含量由 $100.50\text{mg}/\text{m}^3$ 降至 $30\text{mg}/\text{m}^3$,重点地区降至 $20\text{mg}/\text{m}^3$ 。以油为燃料的锅炉或燃气轮机组由 $50\text{mg}/\text{m}^3$ 降至 $30\text{mg}/\text{m}^3$,重点地区降至 $20\text{mg}/\text{m}^3$ 。以气体为燃料的锅炉或燃气轮机组,GB 13223—2011 规定:天然气为 $5\text{mg}/\text{m}^3$,其他气体为 $10\text{mg}/\text{m}^3$,重点地区不分什么气体燃料均为 $5\text{mg}/\text{m}^3$ 。2014 年,广州等发达城市还提出了电厂锅炉烟尘排放浓度为 $5\text{mg}/\text{m}^3$ 的要求。在这种严格的环保标准要求下,通常的四电场或五电场静电除尘器较难满足排放达标的要求。为了满足排放要求,一些电厂采用了袋式除尘器。GB 13223—2011 要求烟尘排放浓度降至 $30\text{mg}/\text{m}^3$,从国外经验看,采用电除尘器达到 $30\text{mg}/\text{m}^3$ 以下是有可能的,但国外多采用高品质煤,灰分多为 10%~30%,国内燃煤灰分一般多在 30%~40%及以上,除尘器进口烟尘浓度比国外高,要求除尘效

率也比国外高，因此电除尘器、袋式除尘器选择的面积要比国外大，才能保证达标排放。且电除尘器因为振打二次飞扬问题，难于达到 $20\text{mg}/\text{m}^3$ ，往往要再采用其他辅助手段或措施。另外，袋式除尘器烟尘排放浓度可以达到 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 以下，但袋式除尘器因为阻力偏大、布袋耗损问题，后期运行成本相对较高。

由于火力发电厂目前依然是我国最主要的电源提供方，因此，火力发电厂能否做到安全、高效及经济运行，不断提供优质、稳定的绿色能源，是关系到我国能否顺利实现低碳、高效目标的关键环节之一。而新近开发生产、正在被火力发电厂 600、1000MW 机组应用的大型电袋复合除尘器是锅炉的重要辅机之一，它能否安全、高效及经济运行，对电厂本身乃至全国实现节能减排目标具有重要意义。

大气环境保护事关人民群众根本利益，事关经济持续健康发展。当前，我国大气污染形势严峻，以可吸入颗粒物 (PM_{10})、细颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$) 为特征污染物的区域性大气环境问题日益突出，损害人民群众身体健康，影响社会和谐稳定。随着我国工业化、城镇化的深入推进，能源资源消耗持续增加，大气污染防治压力继续加大。为切实改善空气质量，2013 年 9 月 10 日国务院以国发〔2013〕37 号文形式颁布了《大气污染防治行动计划》。希望到 2017 年，全国地级及以上城市可吸入颗粒物浓度比 2012 年下降 10% 以上，优良天数逐年提高；京津冀、长三角、珠三角等区域细颗粒物浓度分别下降 25%、20%、15% 左右。

第三节 燃煤锅炉除尘工艺概述

一、除尘器分类

除尘器按不同的分类方法可以分成许多不同的类型，适用于不同的粉尘和不同的条件。除尘器的工作原理都是以捕集粉尘的作用力为理论基础的。以除尘作用力原理来分类，除尘器可分为四类。

1. 机械除尘器

机械除尘器包括重力除尘器、惯性除尘器和旋风除尘器等。它的特点是结构简单、维护容易；阻力低；维护费用低、经久耐用；无活动部件、可靠性优良、很少有故障，但它除尘效率低，往往用于要求不高的场合或者作为多级除尘系统的预先除尘。

2. 过滤除尘器

过滤除尘器包括袋式除尘器、颗粒层除尘器、滤筒除尘器等。它特点是都以过滤作为除尘机理，运行稳定，适应性强，不受粉尘比电阻值限制，除尘效率高。

3. 湿式除尘器

湿式除尘器包括低能耗湿式除尘器和高能耗湿式除尘器，它的特点是利用液体与含尘气体相互接触，经过洗涤使尘粒与气体分离，它的结构简单，一般无活动部件，不易发生故障，除尘效率高，但除尘后需对污水进行处理以消除二次污染，粉尘回收困难，容易被酸碱性质气体腐蚀。

4. 电除尘器

电除尘器是以静电力（库仑力）将气体中的粉尘分离出来的除尘设备，它分为干式电除尘器（干法清灰）和湿式电除尘器（湿法清灰），它的特点是能应用于高温、高压气体中；设备阻力低，能耗少；维护检修简单；几乎对各种粉尘、烟雾以及极其微小的颗粒都有很高的

除尘效率。但是电除尘器的除尘效率会受粉尘比电阻的影响较大，实测表明，最适于电除尘器工作的比电阻值为 $10^6\sim 10^{11}\Omega\cdot\text{cm}$ 。在这个数值范围以外，电除尘器的性能将下降。此外，电除尘器占地面积大、钢材消耗多、投资高。

除了单纯按作用力原理划分除尘器外，还出现了各类组合式的除尘器，如电袋复合除尘器。它结合了静电除尘器和布袋除尘器的优点，使除尘效果发挥得更好。

常见除尘器的类型与性能见表 1-1。

表 1-1 常见除尘器的类型与性能表

类型	除尘作用力	设备种类	使用范围				不同粒径效率（%）		
			粉尘粒径（ μm ）	粉尘浓度（ g/m^3 ）	温度（ $^{\circ}\text{C}$ ）	阻力（Pa）	50 μm	50 μm	1 μm
干式	重力	重力除尘器	>15	>10	<400	200~1000	96	16	3
	惯性力	管形除尘器	>20	<100	<400	400~1200	95	20	5
	离心力	旋风除尘器	>5	<100	<400	400~200	94	27	8
	静电力	静电除尘器	>0.05	<30	<300	200~300	>99	99	86
	惯性力、扩散力与筛分	袋式除尘器	>0.1	3~10	<300	800~2000	>900	>99	99
湿式	惯性力、扩散力与凝聚力	自激式喷淋式文氏管	100~0.05	<100 <10 <100	<400 <400 <800	800~1000 1000~5000 5000~1000	100 100 100	93 96 >99	40 75 93
	静电力	湿式电除尘器	>0.05	<100	<400	300~40	>98	98	98

二、燃煤锅炉除尘工艺发展与现状

燃煤锅炉除尘工艺的发展经历了几个阶段。科学技术的进步与社会环保需求的增大促进了除尘工艺的发展。

（1）燃煤锅炉除尘工艺的初级阶段。即 20 世纪 40 年代以前，许多工厂包括电厂应用惯性离心力、重力沉降等原理，进行干法除尘。其除尘器的代表有沉降室、旋风除尘器等。我国的燃煤电厂早期采用水膜、旋风等高水耗或高能耗的低效除尘设备。在这个过程中发展了湿法除尘，其原理是利用液滴和尘粒凝集机理，如洗涤塔、水浴除尘器等。处于初级阶段的除尘设备比较简单，同时除尘效率也较低，除尘效率一般都在 90%以下。

（2）燃煤锅炉除尘工艺的发展阶段。20 世纪 50~70 年代，利用高压静电场对含尘气体进行荷电，并使带电粉尘颗粒在阳板电场力的作用下，使粉尘吸附于阳板板上，当无电压时，粉尘便从阳极板上沉积并掉落在灰斗上。此种技术便是静电除尘器技术。20 世纪 50 年代，发达国家多采用电除尘器来捕集燃煤电厂的烟气粉尘。在此阶段中，静电除尘技术迅速发展起来。另外，利用布袋过滤原理，使粉尘被布袋拦截下来的除尘技术也发展起来了。由于当时国家对飞灰排放浓度的标准要求低，静电除尘器对粗颗粒及中细颗粒物飞灰的除尘效率很高，得到了广泛应用。20 世纪 70 年代，为适应越来越严格的排放标准及解决高比电阻粉尘的排放问题，发达国家开始尝试采用袋式除尘器。而布袋除尘器由于主机设备配套产品如滤料、脉冲阀以及控制技术 etc 仍处于发展阶段，还存在耐高温性以及寿命低等许多问题。此阶段布袋

除尘器除尘工艺的发展速度没有静电除尘器快。

(3) 燃煤锅炉除尘工艺的提高阶段。20 世纪 80 年代以后,一方面,工业技术的飞速发展,促使许多除尘器技术的难题得以解决;另一方面,环保标准要求越来越严格,治理力度不断加大,粉尘排放标准由 $200\text{mg}/\text{m}^3$, 逐渐提高到 100 、 $50\text{mg}/\text{m}^3$, 再到 $20\sim 30\text{mg}/\text{m}^3$, 直至 $5\sim 10\text{mg}/\text{m}^3$ 。因而新的除尘设备、各种新型滤材、脉冲阀以及电控技术不断出现,不断提高耐高温、耐腐蚀、抗结露等适应各种复杂工艺条件的高效除尘器有了长足发展和提高。

在国外,20 世纪 80 年代末,美国已有近 100 套袋式除尘器在燃煤电厂投入使用。在欧洲与澳大利亚,也有许多电厂安装了袋式除尘器或将原有的电除尘器改造为袋式除尘器。至 20 世纪 90 年代,为满足燃煤电厂的微细颗粒物排放要求,同时降低除尘器的设备投资与运行费用,国外开始开发应用新一代除尘设备——电袋复合式除尘器。

在国内,20 世纪 80 年代,有个别小型燃煤电厂开始尝试使用袋式除尘器,但因滤料及其他配套技术等问题,滤袋在短时间除灰后变得破损严重。因此,换袋频繁,多个布袋损坏后,进行维修时的工作条件差,种种的不足致使许多电厂重新将袋式除尘器全部改回电除尘器。直至 21 世纪初,袋式除尘器才又开始在我国燃煤电厂得到应用,随着布袋材质和制造工艺的提升,现在已有部分中小型锅炉机组配置了袋式除尘器,某些 600MW 级机组也开始采用布袋除尘器。

从 2011 年起我国对火力发电厂制定了更加严格的飞灰排放标准,致使很多原先采用静电除尘器的电厂达不到排放标准。因此最近几年,我国也开始开发电袋复合除尘器并使电袋复合除尘技术迅速发展起来,并已达到世界领先水平。电袋复合除尘器是由电场先捕集烟气中 $70\%\sim 90\%$ 的粗颗粒粉尘,再经过滤袋收集剩余微细粉尘。结合静电除尘与布袋除尘的长处,实现不同机理收尘方式的功能集成。在电除尘去除烟气中的大部分粉尘后,袋式除尘的粉尘负荷大大减小,使滤料阻力变小。这不仅降低了设备的阻力,还延长了滤袋的清灰周期,节省清灰能耗,延长滤袋的使用寿命。

第四节 电袋复合除尘技术概述

根据 HJ 2529—2012《环境保护产品技术要求 电袋复合除尘器》对电袋复合除尘器(Electrostatic-fabric Integrated Dust Collector)的定义:在一个箱体内安装电场区和滤袋区(电场区和滤袋区可有多种配置方式),将静电和过滤两种除尘技术复合在一起的除尘器。

作为静电除尘器和布袋除尘器的有机结合,静电布袋复合除尘器充分发挥了两种除尘器各自的优势,主要表现在:

(1) 技术互补,成熟可靠。常规静电除尘器第一电场通常能除去烟气中 $80\%\sim 90\%$ 的粉尘,剩余电场用来除去剩下的 $10\%\sim 20\%$ 的粉尘。复合除尘器充分利用了静电除尘器的这一特性,只采用第一电场,余下的细微粉尘由布袋除尘单元过滤掉,这就发挥了布袋除尘器对超细粉尘除去效率高的特点。同时,静电布袋除尘器利用静电除尘、布袋除尘两种现有的成熟除尘技术,技术可靠性高,研发相对容易。

(2) 除尘效率不受粉尘特性及风量影响,效率稳定,适应性强。常规静电除尘器的除尘效率受煤种、锅炉负荷和工况、粉尘比电阻等诸多因素的影响,造成稳定性差甚至不能正常工作。复合除尘器发挥了布袋除尘单元对煤种适应范围广泛、受锅炉负荷变化及烟气量波动影响小、不受粉尘比电阻影响等特性,使整体除尘效率稳定可靠。

(3) 结构紧凑。与布袋除尘器相比,复合除尘器的静电除尘单元去除了大部分的粉尘,大幅降低了滤袋负荷,因而可以选择较高的过滤风速,所需滤袋数量少,结构紧凑,占地面积减少。同时,可以选择较大的滤袋间距,解决了脉冲布袋除尘器因滤袋较密而在清灰时引起的二次扬尘问题。

(4) 压降小,滤袋寿命长。同布袋除尘器相比,静电布袋复合除尘器的布袋单元负荷低,同时未被静电场完全除去的细微颗粒经过电晕级荷电,沉积在滤袋表面呈现松散的凹凸不平结构,这种松散结构有利于降低气流的通过阻力,压力损失小,因而可以选择较长的清灰周期和较低的喷吹压力,延长滤袋的寿命。

(5) 对微细粉尘分级除尘效率高。电袋复合除尘的除尘效率可达 99.9% 以上,能实现出口粉尘排放浓度低于 $30\text{mg}/\text{m}^3$ 。从运行的电袋复合除尘器来看,粉尘排放浓度可以低于 $10\text{mg}/\text{m}^3$,甚至低于 $5\text{mg}/\text{m}^3$ 。粉尘荷电后,静电力作用增强,对细微粒子的捕集效率也有所增强。

(6) 费用低。在初投资上,静电除尘单元只设一级电场,可以避免静电除尘器高昂的设备费和土建费;布袋除尘单元中,所需滤袋少,滤袋以及相应辅助设施的费用也大大减少。在运行费用上,阻力小,能耗低,滤袋更换周期增长,总的运行费用比同容量的静电除尘器和布袋除尘器都低。在国家环保要求日益严格的背景下,电袋复合除尘器可以很好地满足环保要求。其具有的众多优点,代表着除尘器发展的一种方向与趋势。

一、大型电袋复合除尘器的应用

(1) 世界最大的河南新密电厂 $2\times 1000\text{MW}$ 机组电袋复合除尘器。

机组容量: 1000MW ;

处理烟气量: $530\text{m}^3/\text{h}$;

投运时间: 2012 年 3 月。

(2) 华电新乡宝山电厂 2 号炉电袋复合除尘器。

机组容量: 660MW ;

投运时间: 2009 年 4 月;

清灰周期: 约 400min ;

进出口压差: 约 1000Pa ;

排放浓度: $24\text{mg}/\text{m}^3$ 。

河南新密电厂电袋除尘器如图 1-1 所示,华电新乡宝山电厂电袋除尘器如图 1-2 所示。

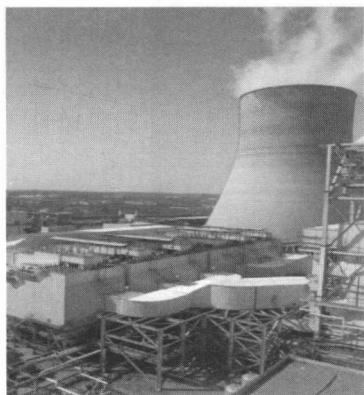


图 1-1 河南新密电厂电袋除尘器



图 1-2 华电新乡宝山电厂电袋除尘器

(3) 安徽平圩电厂 1 号、2 号炉电袋复合除尘器:

- 1) 机组容量: 600MW;
- 2) 投运时间: 2011 年 1 月;
- 3) 清灰周期: 约 720min;
- 4) 进、出口压差: 约 800Pa;
- 5) 排放浓度: $19\text{mg}/\text{m}^3$ 。

安徽平圩电厂电袋除尘器如图 1-3 所示。

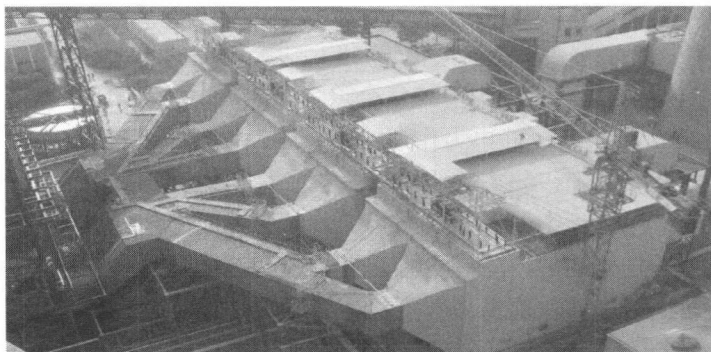


图 1-3 安徽平圩电厂电袋除尘器

(4) 国内火电新建工程首台 600MW 机组电袋复合除尘器, 即江西贵溪电厂 8 号炉电袋复合除尘器:

- 1) 机组容量: 600MW;
- 2) 投运时间: 2011 年 7 月;
- 3) 清灰周期: 约 720min;
- 4) 进、出口压差: 约 700Pa;
- 5) 排放浓度: $14\text{mg}/\text{m}^3$ 。

江西贵溪电厂电袋复合除尘器如图 1-4 所示。

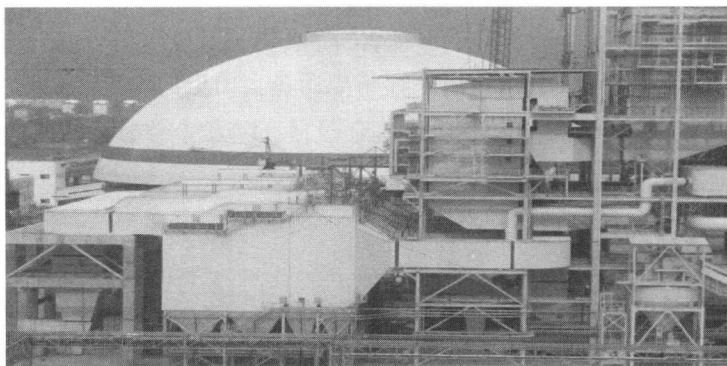


图 1-4 江西贵溪电厂电袋复合除尘器

(5) 华润电力首台 600MW 机组电袋复合除尘器, 即河南登封电厂 3 号炉电袋复合除尘器:

- 1) 机组容量: 600MW;

- 2) 投运时间: 2011 年 11 月;
- 3) 清灰周期: 约 520min;
- 4) 进、出口压差: 约 800Pa;
- 5) 排放浓度: $24\text{mg}/\text{m}^3$ 。

河南登封电厂电袋复合除尘器如图 1-5 所示。

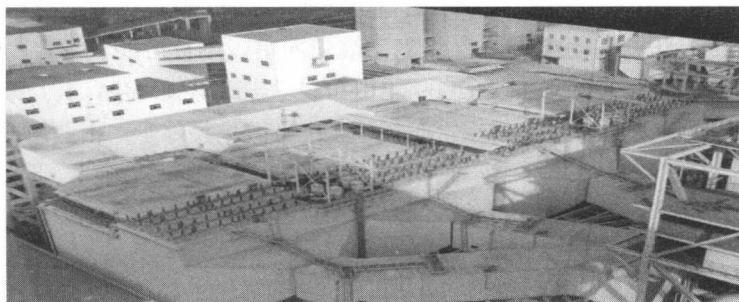


图 1-5 河南登封电厂电袋复合除尘器

(6) 大唐许昌龙岗 2 号炉 350MW 机组电袋项目:

- 1) 投运时间: 2008 年 12 月 7 日;
- 2) 出口排放浓度: $26\text{mg}/\text{m}^3$;
- 3) 运行阻力: 800Pa。

(7) 福建龙岩坑口电厂电袋复合除尘器:

- 1) 机组容量: $2\times 300\text{MW}$;
- 2) 投运时间: 2009 年 12 月~2010 年 1 月;
- 3) 清灰周期: 约 720min;
- 4) 进、出口压差: 约 500Pa;
- 5) 排放浓度: $25\text{mg}/\text{m}^3$ 。

(8) 北京京能(石景山)热电厂 1 号、3 号国内首台锅炉尾部采用了脱硝装置并成功投运的电袋复合除尘器, 滤袋至今零破损。

- 1) 机组容量: $2\times 200\text{MW}$;
- 2) 投运时间: 2008 年 4 月、5 月;
- 3) 清灰周期: 约 600min;
- 4) 进、出口压差: 约 1000Pa;
- 5) 排放浓度: $12\text{mg}/\text{m}^3$ 。

(9) 中电国际姚孟发电厂 2 号炉电袋复合除尘器:

- 1) 机组容量: 300MW;
- 2) 投运时间: 2009 年 9 月;
- 3) 清灰周期: 约 500min;
- 4) 进、出口压差: 约 1000Pa;
- 5) 排放浓度: 小于 $50\text{mg}/\text{m}^3$ 。

(10) 华电内蒙古乌达热电厂电袋复合除尘器:

- 1) 机组容量: 2×150MW;
- 2) 投运时间: 2006 年 10 月;
- 3) 进、出口压差: 约 800Pa;
- 4) 排放浓度: 小于 50mg/m³;
- 5) 复合滤袋寿命: 8 年多, 至今零破损, 预期寿命可达 10 年。

(11) 扬子石化九台电除尘器改电袋复合除尘器, 历时三年; 安徽平圩电厂 600MW 机组 1 号炉改完继续改 2 号炉, 说明电袋复合除尘器维护简单, 运行可靠、稳定; 内蒙古丰泰电厂 200MW 机组: 2003 年新建布袋除尘, 2009 年由布袋除尘改电袋除尘, 其二期直接新建电袋复合除尘器; 内蒙古金桥电厂 300MW 机组: 布袋除尘准备改电袋除尘; 山西河曲电厂 600MW 机组: 一期采用静电除尘器, 二期采用布袋除尘器, 近期改造电袋复合除尘器。跟踪观察国内近 200 台套电袋除尘器运行情况, 有少数几台电袋除尘器出现滤袋破损。破损的原因主要与烟气温度、含硫量、含氮量、气流均布、清灰喷吹结构、安装工艺等因素有直接关系, 与设备中所含的微量臭氧无关, 在以后设计、选型中应特别注意。

国内电力行业 200MW 及以上机组电袋、布袋除尘项目装机容量如图 1-6 所示。

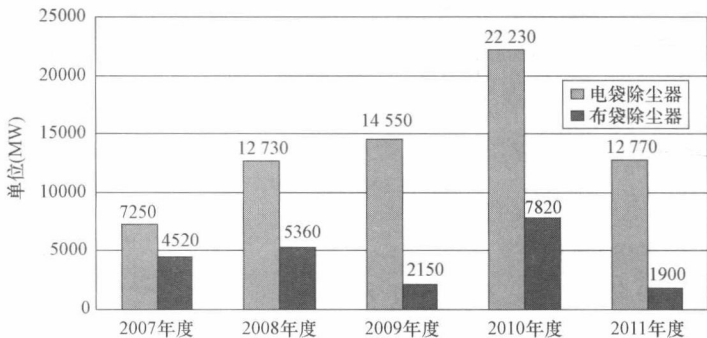


图 1-6 国内电力行业 200MW 及以上机组电袋、布袋除尘项目装机容量

根据中国电力企业联合会统计, 截至 2014 年年底, 火力发电厂安装电袋复合除尘器的机组容量已超过 1.14 亿 kW, 占全国燃煤机组容量的 13.8%, 安装布袋除尘器的机组容量约 0.75 亿 kW, 占全国燃煤机组容量的 9.1%。可见电袋除尘技术发展势头之迅速。

二、600MW 级电袋复合除尘器

2002 年, 福建龙净环保公司在国内率先开发成功电袋复合除尘技术, 并先后在水泥厂、燃煤电厂锅炉的除尘系统中使用。

2006 年初环境保护部会议明确提出“节能减排”, 低排放、高可靠、节能型电袋复合除尘器进一步得到推广应用。

GB 13223—2011《火电厂大气污染物排放标准》推进了电袋除尘器产业发展。

1. 主要技术性能指标

- (1) 烟气量: $\leq 6.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{h}$ 。
- (2) 烟气温度: $\leq 250^\circ\text{C}$ (不超过滤袋允许的使用温度)。
- (3) 入口浓度: $\leq 2000 \text{ g/m}^3$ 。
- (4) 排放浓度: $\leq 10 \sim 20$ (或 30) mg/m^3 。
- (5) 本体阻力: $\leq 700 \sim 1200 \text{ Pa}$ 。