

TECHNOLOGY OF FLUE GAS ULTRA-LOW EMISSION
FOR COAL-FIRED POWER PLANT

燃煤电厂 烟气超低排放技术

中国环境保护产业协会电除尘委员会 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

TECHNOLOGY OF FLUE GAS ULTRA-LOW EMISSION
FOR COAL-FIRED POWER PLANT

燃煤电厂 烟气超低排放技术

中国环境保护产业协会电除尘委员会 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

通过采用以低低温电除尘技术或以湿式电除尘技术为核心的烟气协同治理技术路线,可使燃煤电厂烟气污染物排放浓度达到或接近燃气轮机排放标准,即满足超低排放要求,国内已有多套燃煤电厂烟气超低排放机组成功投运。

本书对近年来超低排放的技术路线和相关技术进行了全面的总结,重点阐述了燃煤电厂烟尘超低排放技术,主要包括超低排放的由来、超低排放技术路线、低低温电除尘技术、湿式电除尘技术、电除尘用高压供电及控制技术、电除尘器的高压绝缘技术、超低排放的技术经济性、湿式电除尘器的调试及运行、超低排放测试技术等。此外,本书还对已投运的典型工程案例进行了介绍。

本书可为燃煤电厂实现烟气超低排放提供一定的技术参考,同时可作为该领域的科研人员、工程技术人员及相关专业的大专院校师生学习、了解超低排放技术的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

燃煤电厂烟气超低排放技术 / 中国环境保护产业协会电除尘委员会编. —北京: 中国电力出版社, 2015. 10

ISBN 978-7-5123-8320-3

I. ①燃… II. ①中… III. ①燃煤发电厂-烟气排放-研究
IV. ①TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 229517 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>)

北京博图彩色印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 10 月第一版 2015 年 10 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 10.5 印张 218 千字

印数 0001—3000 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

编 委 会

主 任 舒英钢

副 主 任 刘卫平 罗如生 朱曙荣 边 宇
刘振彪 董志强

主 编 郦建国

编 委 沈志昂 何毓忠 姚宇平 陈招妹
刘含笑 尹得仕 赵金达 汤 丰
赵楼锋 许东旭 陈丽艳 郑国强
庄 柯 李 强 周宝山 陈小明
祝建军 任钱江 解 标

评审专家 王励前 高 翔 朱法华 莫 华
龙 辉 石培根 冯肇霖 黎在时
张德轩 林尤文 蒙 骝 陈焕其
胡汉芳 聂孝峰 林国鑫 廖增安
谢小杰 梁可新 陈宇渊 龙 涛
张滨渭 邱曙光 唐 亮 施小东
谢友金 蒋庆龙 李雄浩 陈贵福
王 坤 郭相生 尉万里



序

中国环境保护产业协会电除尘委员会是中国环境保护产业协会下设的专业委员会之一，是集中我国电除尘行业各路精英的权威组织，由浙江菲达环保科技股份有限公司、福建龙净环保股份有限公司、浙江大学等企业、高等院校及科研院所组成，其主要职责是为国家相关环保法规的制定提供技术支撑，为行业需求及发展提供交流和沟通的平台，促进行业技术进步，规范行业市场秩序，积极促进外引内联，推动新技术、新装备进入国际市场。

近年来，我国的环保法规、排放标准日趋严格。如江苏省、浙江省、广州市、山西省等地已出台相关政策，要求燃煤电厂参考燃气轮机组污染物排放标准限值，即在基准氧含量6%条件下，烟尘、SO₂、NO_x排放浓度分别不高于5、35、50mg/m³。国家发展改革委、环境保护部和国家能源局三部委联合于2014年9月发布了《煤电节能减排升级与改造行动计划（2014—2020年）》，要求东部地区新建燃煤机组排放基本达到燃气轮机组污染物排放限值，即基准氧含量6%条件下，烟尘、SO₂、NO_x排放浓度分别不高于10、35、50mg/m³；对中部和西部地区也提出了要求。达到上述两种排放限值的均称为超低排放。

中国环境保护产业协会电除尘委员会高度重视超低排放技术的推广工作。2013年9~10月，曾用6个整版在《中国环境报》上发表了有关中国电除尘行业的报道，其中低低温、湿式电除尘技术各一个整版；2014年10月和11月，组织召开了全国湿式、低低温电除尘技术和电源技术专题研讨会；2015年1月，组织完成了燃煤电厂烟气超低排放技术报道《超低排放进一步促进煤电绿色发展》，以两个整版的篇幅在《中国环境报》上发表。

为进一步推广并普及超低排放技术及相关知识，中国环境保护产业协会电

除尘委员会组织编写了《燃煤电厂烟气超低排放技术》一书，对超低排放的技术路线和相关技术进行了系统阐述，详细介绍了电除尘用高压供电及控制技术、电除尘器的高压绝缘技术，分析了超低排放的技术经济性，介绍了湿式电除尘器的调试及运行、超低排放测试技术等，为燃煤电厂实施超低排放提供了重要的参考资料。

本书的出版，将进一步推动和引导电除尘行业技术进步，提升行业整体技术水平。本书可为我国燃煤电厂实现超低排放提供一定的技术参考，同时为该领域的科研人员、大专院校相关专业师生及工程技术人员了解最新的电除尘知识提供一定的帮助。值本书出版之际，我代表中国环境保护产业协会电除尘委员会全体同仁，向编纂、评审本书的各位专家以及长期关心和支持电除尘行业发展的社会各界表示衷心的感谢！

一个地球，一片蓝天，环境保护不分国界。“天更蓝、水更清、山更绿”是人类的共同责任与目标，让我们同心协力，与时俱进，为祖国美好的明天，为社会经济的全面协调和可持续发展做出更大的贡献。

中国环保产业协会电除尘委员会

主任委员



2015 年 7 月



前 言

随着燃煤电厂烟气超低排放的呼声越演越烈，人们对实现超低排放技术的关注度也越来越高。通过采用以低低温电除尘技术为核心或以湿式电除尘技术为核心的烟气协同治理技术路线，可使燃煤电厂烟气污染物排放浓度达到或接近燃机标准，即满足超低排放的要求。国内相关环保企业通过自主研发、技术引进和成立合资公司的方式，已掌握其核心技术，且已有多套燃煤电厂烟气超低排放机组成功投运，为燃煤电厂污染物控制提供了重要参考。

我国每年约生产 40 亿 t 原煤，其中 50% 左右为电力所用。而根据国际能源署（IEA）统计，2011 年美国 91% 的煤炭都用于发电，欧盟为 76.2%，印度和俄罗斯也超过 60%，电煤比重均高于我国。燃煤发电是我国煤资源利用之“最清洁”的方式，将煤炭的使用集中于电煤无疑是最正确的选择。超低排放技术在技术成熟度较高的电力行业率先示范，已初见成效，极大地提升了公众对煤炭清洁利用的信心。

国际能源署根据当前的技术发展情况，制定了 2020 年及 2030 年的燃煤电厂污染物排放目标，2020 年目标：烟尘为 $1 \sim 2\text{mg}/\text{m}^3$ ， NO_x 为 $30\text{mg}/\text{m}^3$ ， SO_x 为 $25\text{mg}/\text{m}^3$ ；2030 年目标：烟尘 $<1\text{mg}/\text{m}^3$ ， $\text{NO}_x <10\text{mg}/\text{m}^3$ ， $\text{SO}_x <10\text{mg}/\text{m}^3$ 。

基于上述背景，中国环境保护产业协会电除尘委员会于 2015 年 4 月在南京市召开的六届二次常委会研究决定，以中国环境保护产业协会电除尘委员会的名义，由浙江菲达环保科技股份有限公司负责起草，福建龙净环保股份有限公司等其他单位配合编写适合我国国情的《燃煤电厂烟气超低排放技术》一书并出版。

2015 年 5 月 16 日，初稿形成；5 月 19 日，在南京召开了编制研讨会，并形成会议纪要〔（2015）中环协电字第（005）号〕。编委会根据会议纪要对初稿进行了修改，于 6 月 15 日形成送审稿。6 月 16 日至 7 月 5 日在行业内进行了审查，共收到 15

份单位或专家的回函。收到审查意见后，编委会对其进行汇总、处理，并与相关单位和专家沟通、协商；7月8日在杭州市萧山区召开机械工业环保机械标准化技术委员会大气净化设备分技术委员会2015年度标准审查会期间，临时组织与会相关专家召开了书稿审查意见座谈会，对相关问题进行了讨论并对有关问题达成了一致意见；编委会于7月13日完成“书稿审查意见汇总处理表（初稿）”。为保证书稿质量，又于7月14日至20日组织相关单位和专家对“书稿审查意见汇总处理表（初稿）”征求了意见，相关单位和专家提出了少量修改意见，于7月23日形成了“书稿审查意见汇总处理表（终稿）”，共计处理意见或建议162条，另有总体评价4条，采纳了119条审查意见，部分采纳的有11条，不采纳的有32条，对不采纳和部分采纳的意见，编委会均说明了理由。根据审查意见，编委会于7月27日完成了本书的最终修改。

本书共分九章，内容包括超低排放的由来，超低排放技术路线，低低温电除尘技术，湿式电除尘技术，电除尘用高压供电及控制技术，电除尘器的高压绝缘技术，超低排放的技术经济性，湿式电除尘器的调试及运行和超低排放测试技术等。此外，在附录中列举了酸露点及灰硫比的计算示例，并分别对以低低温电除尘技术为核心及以湿式电除尘技术为核心的烟气协同治理技术路线典型工程进行了介绍。本书重点关注了燃煤电厂烟尘超低排放技术，对于 SO_2 、 NO_x 的超低排放技术未作展开。

本书是对近年来超低排放的技术路线和相关技术的全面总结，反映了当前我国电除尘技术研究的最新进展。本书得到了国内同行、学者、用户的帮助，书中以低低温电除尘技术为核心的烟气协同控制技术路线及低低温电除尘技术部分内容参考了由华能国际电力股份有限公司组织，中国电力工程顾问集团中南电力设计院、西安交通大学、浙江菲达环保科技股份有限公司、浙江浙大网新机电工程有限公司、武汉凯迪电力环保有限公司共同参加完成的“燃煤电厂烟气协同治理关键技术研究”课题的相关成果。福建龙净环保股份有限公司参与了超低排放技术路线、低低温电除尘技术、金属极板湿式电除尘技术等部分的修改，牵头完成了电除尘用高压供电及控制技术部分的编写，参与了超低排放技术经济性分析部分的撰写，并提供了以低低温电除尘技术为核心的烟气协同治理技术路线及金属极板WESP的工程案例；国电环境保护研究院牵头修改了柔性极板湿式电除尘技术部分，参与了导电玻璃钢湿式电除尘技术、超低排放测试技术、电除尘用高压供电及控制技术部分的修改，参与了超低排放技术经济性分析部分的撰写，并提供了导电玻璃钢及柔性极板WESP的工程案例；西安热工研究院有限公司牵头修改了导电玻璃钢湿式电除尘技术部分，并提供了导电玻璃钢WESP工程案例；南京兴泰龙特种陶瓷有限公司主持了电除尘器的高压绝缘技术部分的撰写；上海激光电源设备有限责任公司提供了高频恒流高压直流电源的相关资料，

参与了电除尘用高压供电及控制技术部分的修改；金华大维电子科技有限公司参与了电除尘用高压供电及控制技术部分的修改；安徽意义环保设备有限公司参与了柔性极板湿式电除尘技术部分的修改；浙江南源环境工程技术有限公司提供了金属极板 WESP 的工程案例；浙江大学提供了超低排放技术经济性分析的相关资料；在此一并表示诚挚的谢意。同时感谢浙江菲达环保科技股份有限公司袁伟锋、赵海宝、孙真真、何海涛等同志的辛勤工作。

希望本书能够为我国燃煤电厂实现烟气超低排放提供一定的技术参考，同时为该领域的科研人员、大专院校师生及工程技术人员了解最新的电除尘知识提供一定帮助。

由于编者学识及经验有限，不当之处在所难免，恳请专家、读者批评指正。另外，本书编写过程中还参阅了大量文献、标准资料，未能一一列出，在此谨向有关专家、学者和同仁致谢。

本书由中国环境保护产业协会电除尘委员会组织编写。浙江菲达环保科技股份有限公司负责编写。福建龙净环保股份有限公司、国电环境保护研究院、西安热工研究院有限公司、南京兴泰龙特种陶瓷有限公司、上海激光电源设备有限责任公司、金华大维电子科技有限公司及安徽意义环保设备有限公司参与编写。本书由中国环境保护产业协会电除尘委员会负责解释。

编委会
2015 年 7 月



目 录

序
前言

第一章	超低排放的由来	1
第一节	环保政策及面临的形势	1
第二节	燃煤电厂烟气治理技术路线演变过程	4
第三节	可采用的超低排放技术路线	5
第二章	超低排放技术路线	7
第一节	以低低温电除尘技术为核心的烟气协同治理技术路线	7
第二节	以湿式电除尘技术为核心的烟气协同治理技术路线	10
第三章	低低温电除尘技术	12
第一节	工作原理及组成	12
第二节	技术特点	13
第三节	酸露点及灰硫比	14
第四节	核心问题及应对措施	17
第五节	国内外应用情况	24
第四章	湿式电除尘技术	28
第一节	金属极板湿式电除尘技术	28
第二节	导电玻璃钢湿式电除尘技术	36
第三节	柔性极板湿式电除尘技术	42

第四节	三种型式湿式电除尘技术的对比	46
-----	----------------------	----

第五章	电除尘用高压供电及控制技术	48
------------	----------------------------	-----------

第一节	高频高压直流电源	48
第二节	脉冲高压电源	50
第三节	变频高压电源	51
第四节	高频恒流高压电源	52
第五节	三相高压直流电源	53
第六节	单相工频高压直流电源	54
第七节	恒流高压直流电源	55
第八节	工程应用案例	56

第六章	电除尘器的高压绝缘技术	57
------------	--------------------------	-----------

第一节	直流电场高压绝缘子特性	57
第二节	不同材料绝缘子性能	58
第三节	低低温电除尘器的高压绝缘	60
第四节	湿式电除尘器的高压绝缘	62
第五节	高压绝缘子经济性分析	65
第六节	防雾型绝缘子在燃煤电厂的应用	67

第七章	超低排放的技术经济性	68
------------	-------------------------	-----------

第一节	超低排放的技术可行性分析	68
第二节	超低排放经济性分析	71
第三节	烟气超低排放技术经济效益提升分析	74
第四节	燃煤机组超低排放与“煤改气”、燃气蒸汽联合循环发电的 经济性分析	76

第八章	湿式电除尘器的调试及运行	80
------------	---------------------------	-----------

第一节	调试内容、调试条件及调试前的准备	80
第二节	湿式电除尘器电气系统调试	82
第三节	湿式电除尘器控制系统调试	83
第四节	湿式电除尘器水系统调试	84
第五节	湿式电除尘器冷态调试	86
第六节	湿式电除尘器热态调试	87
第七节	湿式电除尘器的运行	88

第九章	超低排放测试技术	93
第一节	燃煤电厂低浓度烟尘测试方法	93
第二节	燃煤电厂烟气中 $\text{PM}_{2.5}$ 测试方法	100
第三节	燃煤电厂烟气中 SO_3 测试方法	108
附录 A	酸露点及灰硫比计算示例	110
附录 B	以低低温电除尘技术为核心的烟气协同治理技术路线典型工程案例介绍	116
附录 C	以湿式电除尘技术为核心的烟气协同治理技术路线典型工程案例介绍	128
参考文献		153

超低排放的由来

第一节 环保政策及面临的形势

“史上最严”的《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011)已执行,但我国大气污染形势依然严峻,雾霾、酸雨等大气环境问题频发,尤其是京津冀、长三角、珠三角等地,由于国土开发密度较高、环境承载能力较弱、大气环境容量较小,雾霾天气日益增多。

我国的能源结构呈现“富煤、缺油、少气”的特征,在未来相当长时期内,以煤为主的能源供应格局不会发生根本性改变,同时,我国电煤比例将进一步增加。2011年,美国91%的煤炭都用于发电,欧盟为76.2%,印度和俄罗斯也超过60%,而我国仅为49.8%。中国一次能源需求量预测如图1-1所示,煤在总能源中比重很难低于50%。若用燃气电厂来替代燃煤电厂,则面临着天然气气源不足、成本过高的现实问题。而随着我国经济的高速发展以及人民生活水平的不断提高,火电装机容量仍将不断增长。图1-2为中国发电装机容量预测,预计到2020年,全国火电装机容量将达12.2亿kW,新增装机容量约3亿kW。燃煤发电虽已是我国煤资源利用的“最清洁”方式,对大气污染的影响

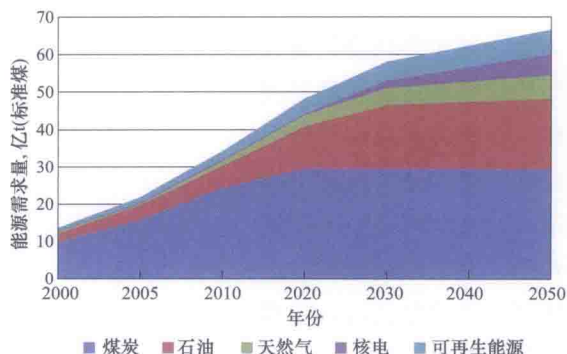


图 1-1 中国一次能源需求量预测 (2009 年第六期《中外能源》)

响远小于钢铁、建材等行业，但因其基数大，仍是我国大气污染的排放源之一，正面临越来越严峻的环境压力。



图 1-2 中国发电装机容量预测

2013 年 9 月 10 日，国务院发布了《大气污染防治行动计划》（国发〔2013〕37 号），简称“国十条”，从总体要求、奋斗目标、具体指标、主要内容等方面进行了详细阐述。

（1）总体要求：以邓小平理论、“三个代表”重要思想、科学发展观为指导，以保障人民群众身体健康为出发点，大力推进生态文明建设，坚持政府调控与市场调节相结合、全面推进与重点突破相配合、区域协作与属地管理相协调、总量减排与质量改善相同步，形成政府统领、企业施治、市场驱动、公众参与的大气污染防治新机制，实施分区域、分阶段治理，推动产业结构优化、科技创新能力增强、经济增长质量提高，实现环境效益、经济效益与社会效益多赢，为建设美丽中国而奋斗。

（2）奋斗目标：经过五年努力，全国空气质量总体改善，重污染天气较大幅度减少；京津冀、长三角、珠三角等区域空气质量明显好转。力争再用五年或更长时间，逐步消除重污染天气，全国空气质量明显改善。

（3）具体指标：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，其中北京市细颗粒物年均浓度控制在 $60\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右。

（4）主要内容：

- 1) 加大综合治理力度，减少多污染物排放；
- 2) 调整优化产业结构，推动产业转型升级；
- 3) 加快企业技术改造，提高科技创新能力；
- 4) 加快调整能源结构，增加清洁能源供应；
- 5) 严格节能环保准入，优化产业空间布局；
- 6) 发挥市场机制作用，完善环境经济政策；
- 7) 健全法律法规体系，严格依法监督管理；
- 8) 建立区域协作机制，统筹区域环境治理；
- 9) 建立监测预警应急体系，妥善应对重污染天气；



10) 明确政府企业和社会的责任, 动员全民参与环境保护。

由于环境容量有限等原因, 江苏省、浙江省、广州市、山西省等地已出台相关政策, 要求燃煤电厂大气污染物排放参考燃气轮机组标准限值, 即在基准氧含量 6% 条件下, 烟尘、 SO_2 、 NO_x 排放浓度分别不高于 $5\text{mg}/\text{m}^3$ ^①、 $35\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $50\text{mg}/\text{m}^3$ 。

2013 年 12 月 31 日, 浙江省人民政府出台的《浙江省大气污染防治行动计划 (2013—2017 年)》中指出, 2017 年底前, 所有新建、在建火电机组必须采用烟气清洁排放技术, 现有 60 万 kW 以上火电机组基本完成烟气清洁排放技术改造, 达到燃气轮机组排放标准要求。

2014 年 1 月 28 日, 广州市发展和改革委员会在《关于广州市燃煤电厂“趋零排放”改造技术方案及造价情况的报告》中指出, 截至 2015 年 7 月 1 日, 全市所有现役燃煤热电联产机组及所有上大压小改扩建燃煤发电机组均须达到“燃气轮机大气污染物特别排放限值”。

2014 年 8 月 25 日, 山西省人民政府出台的《关于推进全省燃煤发电机组超低排放的实施意见》中指出, 到 2020 年, 全省单机 30 万 kW 及以上常规燃煤、低热值煤发电机组大气主要污染物排放确保达到超低排放标准 I、II (超低排放标准 I: 常规燃煤发电机组达到天然气燃气轮机排放标准, NO_x $50\text{mg}/\text{m}^3$ 、 SO_2 $35\text{mg}/\text{m}^3$ 、烟尘 $5\text{mg}/\text{m}^3$; 超低排放标准 II: 低热值煤发电机组基本达到天然气燃气轮机排放标准, NO_x $50\text{mg}/\text{m}^3$ 、 SO_2 $35\text{mg}/\text{m}^3$ 、烟尘 $10\text{mg}/\text{m}^3$)。

2014 年 9 月 12 日, 国家发展和改革委员会、环境保护部、国家能源局联合发布的《煤电节能减排升级与改造行动计划 (2014—2020 年)》(发改能源〔2014〕2093 号文)中指出:

(1) 加强新建机组准入控制。东部地区 (辽宁、北京、天津、河北、山东、上海、江苏、浙江、福建、广东、海南等 11 省市) 新建燃煤发电机组大气污染物排放浓度基本达到燃机标准限值, 即要求在基准氧含量 6% 条件下, 烟尘、 SO_2 、 NO_x 排放浓度分别不高于 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $35\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $50\text{mg}/\text{m}^3$, 中部地区 (黑龙江、吉林、山西、安徽、湖北、湖南、河南、江西等 8 省) 新建机组原则上接近或达到燃机标准限值, 鼓励西部地区新建机组接近或达到燃机标准限值。支持同步开展大气污染物联合协同脱除, 减少三氧化硫、汞、砷等污染物排放。

(2) 加快现役机组改造升级。稳步推进东部地区现役 300MW 及以上公用燃煤发电机组和有条件的 300MW 以下公用燃煤发电机组实施大气污染物排放浓度基本达到燃机标准限值的环保改造, 2014 启动年 800 万 kW 机组改造示范项目, 2020 年前力争完成改造机组容量 1.5 亿 kW 以上。鼓励其他地区现役燃煤发电机组实施大气污染物排放浓度达到或接近燃机标准限值的环保改造。因厂制宜采用成熟适用的环保改造技术, 除尘可采用低

① 本书所规定的烟气浓度均指标准状态下干烟气的数值。标准状态指烟气在温度为 273K、压力为 101 325Pa 时的状态, 简称“标态”。

(低)温静电除尘器、电袋除尘器、布袋除尘器等装置,鼓励加装湿式静电除尘装置;脱硫可实施脱硫装置增容改造,必要时采用单塔双循环、双塔双循环等更高效率脱硫设施;脱硝可采用低氮燃烧、高效率 SCR(选择性催化还原法)脱硝装置等技术。

在执行更严格节能环保标准的前提下,到 2020 年,力争使煤炭占一次能源消费比重下降到 62% 以内,电煤占煤炭消费比重提高到 60% 以上。

环保部印发的《京津冀及周边地区重点行业大气污染限期治理方案》指出,京津冀及周边地区 492 家企业、777 条生产线或机组全部建成满足排放标准和总量控制要求的治污工程,设施建设运行和污染物去除效率达到国家有关规定,要求 2015 年 1 月前 SO_2 、 NO_x 、烟粉尘等主要大气污染物排放总量均较 2013 年下降 30% 以上。并要求 2014 年底前,京津冀区域完成 66 台、1732 万 kW 燃煤机组除尘改造。

燃煤机组排放达到或基本达到燃气轮机组标准排放限值被业内称为超低排放,燃煤电厂烟气超低排放已势在必行。

第二节 燃煤电厂烟气治理技术路线演变过程

我国燃煤电厂烟气治理经历了从“除尘”到“除尘+脱硫”、再到现在的“除尘+脱硫+脱硝”的演变,随着烟气治理设备的增加,系统工艺也发生了较大变化。目前已形成的烟气治理系统主流工艺流程如图 1-3 所示。

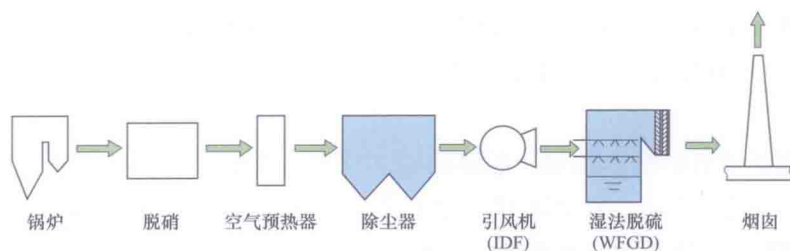


图 1-3 燃煤电厂烟气治理系统主流工艺流程图

我国燃煤电厂现有烟气治理技术路线在实施过程中注重的是单一设备脱除单一污染物,其存在的主要问题有:

(1) 未充分考虑各设备间协同效应。现有烟气治理技术路线未充分考虑各设备间的协同效应,如湿法脱硫装置(WFGD)在设计时往往忽视脱硫塔的除尘效果。国内湿法脱硫的除尘效率一般仅 50% 左右,甚至更低,实际运行中由于除雾器等性能问题使湿法脱硫装置石膏浆液带出,造成湿法脱硫系统协同除尘效果降低,特别是低浓度烟尘情况下除尘效率低于 50%,甚至发生烟尘浓度出口大于入口的情况。

(2) 在达到相同效率情况下,系统投资和运行成本较大。以烟尘治理为例,现有的烟气治理技术路线降低烟尘排放浓度主要采用提高除尘器除尘效率的方式,目前国内绝大部分燃煤电厂采用的是低温电除尘器,为达到较低的出口烟尘浓度限值要求,原电除



尘器需增加比集尘面积和电场数量,投资成本较大,并占用较大的空间,给空间有限的现役机组更是带来挑战。采用电袋复合或袋式除尘技术改造时,存在本体阻力高、运行费用较高、滤袋的使用寿命短、换袋成本高、旧滤袋资源化利用率较低等缺点。

(3) 较难达到超低排放的要求。在当前实际情况下,电厂采用低温电除尘、布袋除尘、电袋复合除尘技术均较难长期稳定地保证设备出口烟尘浓度低于 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 。

第三节 可采用的超低排放技术路线

针对我国燃煤电厂使用的除尘设备 80% 左右为电除尘器这一现状,同时借鉴国外发达国家的先进电除尘技术,为实现燃煤电厂的超低排放要求,可采用“以低低温电除尘技术为核心的烟气协同治理技术路线”或“以湿式电除尘技术为核心的烟气协同治理技术路线”。

目前,国内相关环保企业通过自主研发、技术引进和成立合资公司的方式,掌握了低低温和湿式电除尘的核心技术,电除尘用高压供电及控制技术、电除尘器的高压绝缘技术也得到了长足进步,已在多个项目上得到了成功应用,并取得了显著的减排效果。

在“以低低温电除尘技术为核心的烟气协同治理技术路线”研究方面,我国环保企业从 2009 年开始加大对该技术路线的研究,目前已取得了较大突破,解决了低温腐蚀、二次扬尘、提效幅度及对湿法脱硫系统协同除尘效果的影响等核心问题,并取得一定的工程经验,提出了防止低温腐蚀、二次扬尘的对策措施。2014 年 3 月,完成华能国际电力股份有限公司“燃煤电厂烟气协同治理关键技术研究”除尘设备专题研究,提出了以低低温电除尘技术为核心的烟气协同治理技术路线,从整个电厂系统设计的角度考虑燃煤电厂烟气的治理,充分研究烟气中 PM 、 SO_x 、 NO_x 、 Hg 等污染物、各脱除工艺之间相互影响、相互关联的物理和化学过程,利用现有烟气污染物脱除设备之间存在的协同脱除能力,实现燃煤电厂大气污染物的协同与集成治理设计方案,为我国燃煤电厂烟气污染物超低排放提供了新思路。在此基础上,完成华能国际电力股份有限公司企业标准《燃煤电厂烟气协同治理技术指南(试行)》中除尘相关内容。2015 年 1 月,基本完成华能国际电力股份有限公司《高效超超临界燃煤机组应用技术研究 第九册 低低温电除尘技术应用研究》。此外,国内环保企业已与国际知名的环保公司成立合资公司,在国内推广以低低温电除尘技术为核心的高性能烟气净化系统。

在“以湿式电除尘技术为核心的烟气协同治理技术路线”研究方面,我国环保企业从 2009 年开始进行燃煤电厂湿式电除尘器(WESP)的研究和开发,通过自主研发或引进技术,已掌握核心技术。WESP 的研发也得到国家科技部的高度重视和大力支持,列入国家 863 计划和国家国际科技合作专项,并被列入《国家鼓励发展的重大环保技术装备(2014 年)》和《大气污染防治先进技术汇编(2014 年)》目录。目前,国内已有金属极板 WESP、导电玻璃钢 WESP、柔性极板 WESP 三类技术,均得到了工程应用,并各具特色。