

燃煤机组烟气深度冷却 增效减排技术

RANMEI JIZU YANQI SHENDU LENGQUE
ZENGXIAO JIANPAI JISHU

赵钦新 严俊杰 王云刚 著
姜衍更 刘 明 梁志远



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

燃煤机组烟气深度冷却 增效减排技术

RANMEI JIZU YANQI SHENDU LENGQUE
ZENGXIAO JIANPAI JISHU

赵钦新 严俊杰 王云刚 著
姜衍更 刘 明 梁志远



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是一部专门以全链条思维论述燃煤机组烟气深度冷却增效减排基础理论、关键技术及其工程应用的专业著作。

烟气深度冷却是实现燃煤机组节能减排和超低排放的关键技术，其技术核心是将燃煤机组的排烟温度降低到硫酸露点温度以下，深度回收烟气余热，实现节能降耗、节约水资源，协同脱除 SO_3 、PM和 Hg^{2+} 等污染物。本书利用自主研发的检测方法及装置进行了系统研究和工程应用，揭示了烟气深度冷却过程中飞灰中碱性物质、 $\text{SO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$ 蒸汽和液滴的气、液、固三相凝并吸收脱除 $\text{SO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$ 的机理，提出了金属壁温和碱硫比动态调控设计方法，实现了烟气深度冷却器低温腐蚀的有效防控。研发了系列烟气深度冷却器及系统、装置及产品，并实现了大规模工程应用，取得突出的经济社会效益和显著的节能减排效果，其研究成果获2017年度国家科学技术科技进步二等奖。本书所提出的利用飞灰中碱性物质脱除 $\text{SO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$ 抑制低温腐蚀的技术思路也将为我国从事减缓雾霾重建蓝天事业做出贡献的各级人员提供一种崭新的思维模式。

本书主要面向从事燃煤机组烟气污染物超低排放协同综合治理科学技术研究开发的高级学者和烟气深度冷却器系统及其结构设计、加工制造和节能减排运行的高级工程技术人员和运行管理人员，还可供从事燃煤机组烟气深度冷却器的安全生产、监督检查、环境保护、运行管理、热工测试、节能减排管理及相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

燃煤机组烟气深度冷却增效减排技术 / 赵钦新等著. —北京: 中国电力出版社, 2018. 4

ISBN 978-7-5198-0798-6

I. ①燃… II. ①赵… III. ①燃煤机组-烟气-冷却器-研究 IV. ①TM621.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第122518号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 安小丹 董艳荣(010-63412367)

责任校对: 太兴华 李楠

装帧设计: 赵姗姗

责任印制: 蔺义舟

印 刷: 三河市百盛印装有限公司

版 次: 2018年4月第一版

印 次: 2018年4月北京第一次印刷

开 本: 787毫米×1092毫米 16开本

印 张: 36.75

字 数: 913千字

印 数: 0001—2000册

定 价: 165.00元

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

序

烟气深度冷却技术是实现燃煤机组节能减排和超低排放的关键技术，其技术核心是将燃煤机组排烟温度降低到硫酸露点温度以下，深度回收烟气余热，实现节能降耗，节约水资源，协同脱除污染物 SO_3 、PM 和 Hg^{2+} 。

该书的特点首先，在于紧扣国家节能减排的时代发展主题；其次，系统性强，内容涉及燃煤机组热力系统、烟气深度冷却系统、污染物协同治理系统及相关设备；再次，综合性强，从基础理论、关键技术研究到工程应用实现全链条设计实施；最后，支撑性强，该书涉及的工程应用直接来源于企业需求，之后相继得到国家自然科学基金、973 计划、科技支撑计划和重点研发计划等国家重点项目的立项与支持，并进一步得到我国电力集团、电力设计院等行业重点企业的工程成套研究支撑。这说明该书研究内容面向世界科技前沿、面向国民经济主战场、面向国家节能减排的重大需求。该书涉及的技术创新虽然在系统理论研究上始于 20 年前，但其主体关键技术及装备的研发开始于 2009 年，至 2011 年完成第一个示范工程，其后的 6 年间，在著作者们技术研发支撑的基础上，仅青岛达能环保设备股份有限公司就将该技术产品应用于国内 156 家电厂的 196 台套的 125MW 及以上的 300、600MW 及 1000MW 燃煤机组烟气余热梯级利用及超低排放工程，并出口海外，实现了规模生产及工程应用，节约煤炭资源、减少污染气体和细微颗粒物排放，取得显著的经济效益、社会效益和节能减排效果。

该书是西安交通大学能源与动力工程学院热能工程系和热能动力与控制工程系的 5 位老师及 1 位企业技术负责人根据他们多年对燃煤机组烟气深度冷却关键技术研究成果及其工程应用经验的汇集和总结。

我很高兴地向读者推荐该书，不仅是因为其中的多数著作者是我的同事，是热流科学及工程教育部重点实验室热流科学基础理论在节能减排新技术中的应用研究方向的骨干成员，更是有感于他们潜心做事、砥砺前行和以节能减排为责任担当的主人翁精神，正是这种精神使他们齐心协力、攻坚克难，践行了“科学”“技术”和“工程”的全链条的研究开发过程，并使科技成果快速转化为生产力，这种以需求为导向的科研态度和学以致用、学以致用的实践精神是时代寄予我们科技工作者的崭新要求。



2017 年 8 月 9 日
于西安交通大学

前言

2015年,煤炭占我国能源消耗总量的63%。目前我国已探明的煤矿储量超过800Gt,约占我国能源总量的71%。我国76%的发电燃料、75%的工业动力燃料、80%的居民生活燃料和60%的化工原料都来自煤炭,其中,燃煤机组消耗我国煤炭总产量的50%,是我国节能减排的主力。调研发现,燃煤机组排烟温度普遍偏高,不仅消耗大量煤炭,而且排放大量污染物,节能减排潜力巨大。燃煤机组中锅炉排烟热损失是各项热损失中最大的一项,一般为5%~8%,占其总热损失的80%或更高。影响排烟热损失的主要因素是排烟温度,一般情况下,排烟温度每升高10℃,排烟热损失增加0.6%~1.0%。目前我国新设计的超临界、超超临界电站锅炉的排烟温度普遍维持在121~128℃的设计水平,燃用褐煤机组的设计排烟温度更是高达140~150℃,而由于燃煤机组设计煤种和实际燃用煤种存在较大差异,更使燃煤机组的实际运行温度一般维持在130~170℃,因此,深度降低燃煤发电机组的排烟温度具有重大的节能减排潜力。烟气深度冷却技术是实现燃煤机组节能减排和超低排放的关键技术,其技术核心是将燃煤机组的排烟温度降低到硫酸露点温度以下,深度回收烟气余热,实现节能节水降耗,同时协同脱除污染物 SO_3 、PM和 Hg^{2+} ,实现节能减排。自1957年起,世界各国广泛开展了燃煤机组烟气深度冷却技术及装置的应用研究,但工程实践中发现当烟气深度冷却到硫酸露点温度以下时,低温腐蚀严重,造成机组非计划停运,致使该技术无法推广应用。其主要技术难点在于无法准确检测烟气深度冷却过程中的硫酸露点温度,致使低温腐蚀难以控制,同时,由于我国燃煤机组普遍存在煤质、负荷的变动工况,加剧了低温腐蚀和积灰磨损。

本研究团队于2009年提出并申请了“一种锅炉烟气深度冷却余热回收系统”和“一种嵌入式锅炉烟气深度冷却器”的国家发明专利,首次提出了“烟气深度冷却技术”和“烟气深度冷却器”的概念,发明专利提出的技术方案是在燃煤机组静电除尘器前后安装“烟气深度冷却器”余热回收装置,该装置不同于过去的低压省煤器等余热回收利用系统,可以最大程度地将燃煤机组121~170℃的排烟温度深度降低到90℃,低于硫酸露点温度以下。烟气深度冷却器在充分回收利用燃煤机组排烟余热的同时,显著减少脱硫塔为降低烟气温度而引起的喷水冷却水耗,并使烟气温度降低达到最佳脱硫效率状态。烟气深度冷却器所吸收的能量可以用来加热系统凝结水,或通过暖风器加热冷空气,提高助燃空气温度,减轻空气预热器积灰、低温腐蚀和堵塞;低温凝结水经烟气余热加热后进入更高一级低压加热器,排挤汽轮机抽汽,增加汽轮机做功功率,提高机组系统热效率,节约煤炭资源,直接减少污染物排放;同时烟气深度冷却过程中可以有效降低烟尘比电阻,减少烟气体积,降低烟气流速,提高静电除尘效率,降低引风机或增压风机电耗;更重要的是,当烟气深度冷却至低于硫酸露点温度时,烟气中飞灰将与 SO_3 、水蒸气结合,形成硫酸蒸汽或液滴,发生凝并吸收,引起PM发生聚并,有效降低 $\text{PM}_{2.5}$ 含量,并随着后续静电除尘设备而被协同脱除,达到污染物

超低排放的效果，减缓大气中雾霾的形成。另外，在本研究团队提出“烟气深度冷却器”之前，电站锅炉尾部也普遍装备了空气预热器（APH）和烟气湿法脱硫（FGD）装置，其中空气预热器也是一种烟气深度冷却器，因为空气预热器的冷端金属壁温基本处于硫酸露点温度以下；而烟气湿法脱硫装置是一种吸收剂直接接触烟气实现烟气深度冷却的污染物协同脱除装置，湿法脱硫技术发展到今天，我们已经清楚地认识到：FGD不只是单纯脱硫的装置，而是具有脱除 SO_2 、 SO_3 、PM 和 Cl^- 和 F^- 等酸根离子的烟气污染物综合协同脱除装置，其本身更是一个直接接触喷淋冷凝、传热传质的烟气深度冷却装置。本文主要研究间接传热的“烟气深度冷却器”，但是，对于直接喷淋冷凝、传热传质的污染物综合协同脱除装置的烟气深度冷却污染物协同治理功能也有相关论述，以拓展和深化“烟气深度冷却器”的概念。因此，面临日趋严峻的燃煤机组节能环保要求，以烟气深度冷却为核心的燃煤机组污染物协同综合治理关键技术必将成为燃煤发电机组长周期安全高效低排放运行的必然选择。

本书在内容上以基础理论和关键技术研究支撑工程应用，在烟气深度冷却器的材料选型、设计、制造、安装和长周期安全高效运行的各个环节进行了阐述，力求让读者领略到烟气深度冷却器从基本概念、强化传热元件选型、方案设计及优化、高效紧凑换热器结构设计及优化、系统技术集成到工程示范的全过程，使本书满足科学性、系统性和实用性的撰写目标。本书主要面向从事燃煤机组烟气污染物超低排放协同治理和烟气深度冷却系统及结构设计、生产和节能减排运行的高级工程技术人员和运行管理人员，还可供从事烟气深度冷却器的安全生产、监督监察、环境保护、运行管理、热工测试、节能减排管理及相关专业的工程技术人员参考。

本书由西安交通大学能源与动力工程学院赵钦新、严俊杰、王云刚、刘明、梁志远和青岛达能环保设备股份有限公司姜衍更 6 人共同完成，赵钦新教授完成第一章、第二章；严俊杰教授完成第四章第一、二节；王云刚副教授完成第三章第一、四、六节和第五章；刘明副教授完成第三章第二节和第四章第三节；梁志远博士讲师完成第三章第三、五节；赵钦新教授和王云刚副教授共同完成第六章；姜衍更高级工程师完成第七章和第八章。本研究团队的种道彤教授，王存阳、宋修奇高级工程师，陈衡、陈晓露、马海东、李钰鑫、潘佩媛、焦健、王宇、马岳庚等博士研究生，傅吉收、韩栋、谢玲、刘超、张洪涛、张召波等工程师，陈中亚、张咪、马信等硕士研究生也参加了本书相关章节内容的撰写和本书插图及表格等编辑工作，在此一并表示感谢，全书由赵钦新统稿。

本书由西安交通大学能源与动力工程学院热流科学与工程教育部重点实验室主任何雅玲院士主审，著作者对何雅玲院士在审稿中所提出的宝贵意见表示衷心感谢。

限于作者水平，书中不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

2014 年 8 月 30 日草拟于青岛黄岛经济开发区

2015 年 8 月 30 日修订于青岛西海岸新区

2017 年 7 月 18 日定稿于陕西省西安市

目 录

序
前言

第一章 燃煤机组烟气深度冷却技术进展	1
第一节 加热和冷却概述	4
第二节 烟气冷却器概述	16
第三节 烟气深度冷却器	27
参考文献	66
第二章 烟气深度冷却器结构及系统设计	69
第一节 烟气深度冷却器系统结构设计	69
第二节 烟气深度冷却器本体结构设计	75
第三节 烟气通流结构设计及优化	99
第四节 空气预热器结构设计	107
第五节 烟气再热器结构设计	115
第六节 烟气冷凝器结构设计	127
参考文献	133
第三章 烟气深度冷却器关键技术	136
第一节 灰特性、积灰特性及防控技术研究	136
第二节 灰摩擦、磨损特性及防控技术研究	160
第三节 酸露点温度、露点腐蚀特性及防控技术	167
第四节 气、液、固凝并吸收抑制低温腐蚀的关键技术研究	202
第五节 组合型低温腐蚀特性及防控技术研究	210
第六节 传热元件及管束的传热和阻力特性研究	223
参考文献	255
第四章 烟气深度冷却器加热系统与热力系统集成理论	259
第一节 烟气深度冷却器加热系统	259
第二节 烟气深度冷却器加热系统热经济性定量分析理论	270
第三节 烟气深度冷却器加热系统热经济性分析	280
参考文献	296

第五章 烟气深度冷却器的设计计算	297
第一节 热力计算.....	297
第二节 烟气阻力计算.....	315
第三节 水动力计算.....	331
第四节 受压元件强度计算	334
第五节 计算机辅助设计计算.....	335
参考文献.....	358
第六章 以烟气深度冷却为核心的烟气污染物协同治理技术	359
第一节 烟气深度冷却过程中低低温电除尘技术.....	359
第二节 烟气深度冷却过程中脱硫增效技术.....	365
第三节 烟气深度冷却过程中三氧化硫凝并吸收脱除技术.....	378
第四节 烟气深度冷却过程中汞的凝并吸收技术.....	398
第五节 烟气深度冷却过程中氟及逃逸氨协同治理技术.....	409
第六节 烟气更深度冷却余热利用及污染物冷凝预脱除技术.....	424
参考文献.....	442
第七章 烟气深度冷却器制造工艺	449
第一节 焊接基础.....	449
第二节 传热元件焊接生产工艺.....	458
第三节 管屏部装工艺.....	471
第四节 烟气深度冷却器组装工艺.....	479
参考文献.....	491
第八章 烟气深度冷却器系统集成及安全高效低排放运行	492
第一节 烟气深度冷却器系统集成.....	492
第二节 烟气深度冷却器高效运行技术.....	519
第三节 烟气深度冷却器长周期安全运行技术.....	537
第四节 烟气深度冷却器成套技术案例.....	551
参考文献.....	573
后记	575