

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。

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，是热流科学与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

燃煤机组烟气深度冷却技术进展

第一次工业革命开始确立了煤炭替代农耕时期生物质作为主要能源的能源生产和消费体系。第一次工业革命完成之后，燃煤发电技术成为新兴工业和社会发展的基础动力，对提高燃煤发电效率和减少污染物排放的不懈追求成为燃煤发电技术不断突破自身限制达到崭新高度的驱动力。20 世纪 50 年代，美国率先发展超临界、超超临界压力发电机组，显著提高了发电机组的蒸汽压力和蒸汽温度，从而极大地提高了新建燃煤机组的发电效率，尽管当时由于异种钢焊接工艺的限制，新投运的超临界、超超临界压力发电机组并没有按照原设计的主蒸汽压力和温度参数运行，但是，这一探索激发了世界范围内发展超临界、超超临界压力发电机组的信心。因此，经过近 30 多年的坚持不懈的技术研发和商业化准备，在国外解决高温耐热钢强化机理、冶炼和轧制工艺的基础上，世界电力科技工作者又重新审视超临界、超超临界压力发电机组成为主要电力生产的可行性，加快了新一轮发展超临界、超超临界压力发电机组的步伐，我国电力工业界及时抓住时机，引进、消化、吸收再创新，经过 20 多年的发展，使我国奋力跃进而成为世界上拥有超临界、超超临界压力发电机组最多的国家。不仅如此，在我国，新一轮超临界、超超临界压力机组的发展目标和以往不同，在提高蒸汽温度和蒸汽压力、增加发电效率的同时，对深度减少污染物排放也提出了更加严格的苛刻要求，不仅要求新建的超临界、超超临界压力发电机组具有较高的发电效率，如 43%~45%，同时要求新建的燃煤发电机组达到燃气轮机发电机组的污染物排放指标（称为“燃机排放”），即 $\text{PM}/\text{SO}_2/\text{NO}_x$ 达到 10/35/50 mg/m^3 的排放指标；且在国内一些燃煤机组改造后相继实现“燃机排放”的排放效果后，我国相关发电集团公司又进一步提出了燃煤机组的“超低排放”目标，即 $\text{PM}/\text{SO}_2/\text{NO}_x$ 达到 10/20/35 mg/m^3 的排放指标；更有甚者提出： $\text{PM}/\text{SO}_2/\text{NO}_x$ 达到 5/20/35 mg/m^3 排放，从而使我国燃煤发电机组烟气污染物排放指标达到国际领先水平。

更进一步讲，对于燃煤机组而言，仅考察烟囱出口的污染物排放指标仍然是片面的，如电厂输煤系统、制粉系统、燃烧器系统及灰渣处理系统的 PM 排放均不低于 5 mg/m^3 。“超低排放”是指燃煤机组在实现 $\text{PM}/\text{SO}_2/\text{NO}_x$ 达到 5/20/35 mg/m^3 排放指标的基础上增加对 SO_3 和 Hg 的超低排放限制，如华能国际在 2014 年就提出了 $\text{PM}/\text{SO}_2/\text{NO}_x/\text{SO}_3/\text{Hg}$ 达到 5/20/35/5/0.005 mg/m^3 超低排放的燃煤电厂烟气污染物协同治理技术路线，虽然这种排放指标看起来优于 $\text{PM}/\text{SO}_2/\text{NO}_x$ 达到 5/20/35 mg/m^3 常规所说的超低排放指标，但是，烟尘吸收了 SO_3/Hg 等微量污染物后，尽管经后续静电除尘器后基本脱除，但是这些吸收了 SO_3/Hg 等微量污染物后的烟尘的后处理仍然需要关注的，若处理不当就会形成二次污染。同时，在工程实践中会发现，绝大多数燃煤电厂并没有对脱硫塔排出的脱硫废水进行深度零排放处理，脱硫废水依然污染着人们生存的环境。因此，目前我国燃煤机组实际运行所能达

到的最好污染物排放水平，离超低排放还有很大的距离。根据对我国目前燃煤机组实际运行情况的考察认为：我国燃煤机组首先应该实现的环保达标是“绿色工厂”达标，燃煤电厂的“绿色工厂”达标除了进一步细化微量大气污染物排放的限制外，还应该进一步严格控制煤场、输煤系统、渣场、灰场、石灰石粉、石膏场、磨煤机、锅炉所有正压部分的颗粒物排放控制；其次应该进一步加快脱硫废水零排放的改造进程，而不是一味追求只是针对烟囱的超低排放，不应该对已取得污染物部分脱除的小小成就沾沾自喜，特别是在雾霾肆虐的今天，燃煤机组真正要实现超低排放还有很多的路要走，还有更深层次的污染物脱除机理需要揭示，不仅局限在关键技术和工程应用层面，更重要的是在基础研究的层面。

通过对达到“燃机排放”或“超低排放”的燃煤超临界、超超临界压力机组和传统超临界、超超临界压力机组整个系统进行对比可以发现，如图 1-1 所示，具有“燃机排放”或“超低排放”的燃煤机组除需要对选择性催化还原脱硝（Selective Catalytic Reduction, SCR）、静电除尘器（Electro Static Precipitator, ESP）、烟气脱硫（Flue Gas Desulfurization, FGD）系统及设备进行提效和超低排放改造外，在燃煤机组烟气协同治理的技术路线中主要增加了“烟气深度冷却器”关键设备以降低进入 ESP 的烟气温度 [如图 1-1 (b) 所示]，实现低低温除尘增效、脱硫增效及协同脱除 SO_3 和 Hg 污染物的综合功能。也有人将烟气深度冷却器（Flue Gas Deep Cooling, FGDC）称为烟气冷却器-FGC、低压省煤器或低低温省煤器，这正是本书研究和论述的主题。因为其深刻的污染物脱除机理不同，本书使用“烟气深度冷却器”概念进行叙述。

更进一步，根据美国、德国和日本电力公司的使用经验，考虑燃煤机组深度脱除 PM、 SO_3 及消除烟羽、水雾和增加烟气扩散能力的污染物精细化协同治理的要求，相关电力公司还进一步推出了如图 1-1 (c) 所示的污染物深度协同治理系统，但该系统只在某些特殊条件下才具有可行性，如湿式静电除尘器（Wet-ESP, WESP）在燃料上适合中、高硫煤燃料，在除尘模式上适合布袋除尘器的系统，在安装有烟气深度冷却器 FGDC/FGC+ESP 的系统中可不选用 WESP。而烟气再热器（Flue Gas Reheater, FGR）目前尚有争议，从节能的角度来看不需要设置 FGR，而从局部环境和视觉保护的角度来看需要设置 FGR，也有人建议在脱硫塔后布置烟气冷凝器（Flue Gas Condenser, FGCD），代替 FGR 更进一步脱除污染物，使烟气消白或消除烟羽。目前已有将没有经过烟气再热或烟气冷凝的低低温烟气直接排放和雾霾相关联，因为烟气中仍然含有 PM、 SO_3 、 SO_2 、 NO_x 和 H_2O 等雾霾形成物质，所以这是不难理解的，只是需要进一步研究证实其影响的程度和范围，就目前研究水平，我们建议：城市周围的燃煤机组、甚至燃用化石燃料的工业过程的低低温烟气排放应设置烟气再热器 FGR，以缓解其对城市雾霾的影响，这当然也包括城市中燃煤、生物质、垃圾、燃油、燃气锅炉的低低温烟气排放。

由图 1-1 可以看出，以烟气深度冷却器为核心的烟气污染物协同治理技术是实现燃煤电厂“燃机排放”或“超低排放”的关键设备。当然，在燃煤机组烟气污染物深度协同治理技术路线当中，也增加了 WESP 和烟气再热器 FGR，但是烟气深度冷却器实现增效减排的优势不同于 SCR、ESP、FGD、WESP 和 FGR，FGDC 理论成熟、技术可靠、易于实施，实现增效减排的同时不产生二次污染、不产生能耗转移、不增加运行成本，因为其自身增加的烟气流动阻力可由烟气体积减小所获得的引风机动力提升裕度所消纳，其建造成本（设备和安装成本）在运行 2~3 年后可以完全回收，具有明显的技术经济优势和推广价值，尤其是在当今雾霾日

渐影响人们出行和身体健康的条件下,大力推广以烟气深度冷却为核心的燃煤机组(以及燃煤工业过程)烟气污染物综合协同治理技术具有强烈的时代特征和重要的技术进步意义。

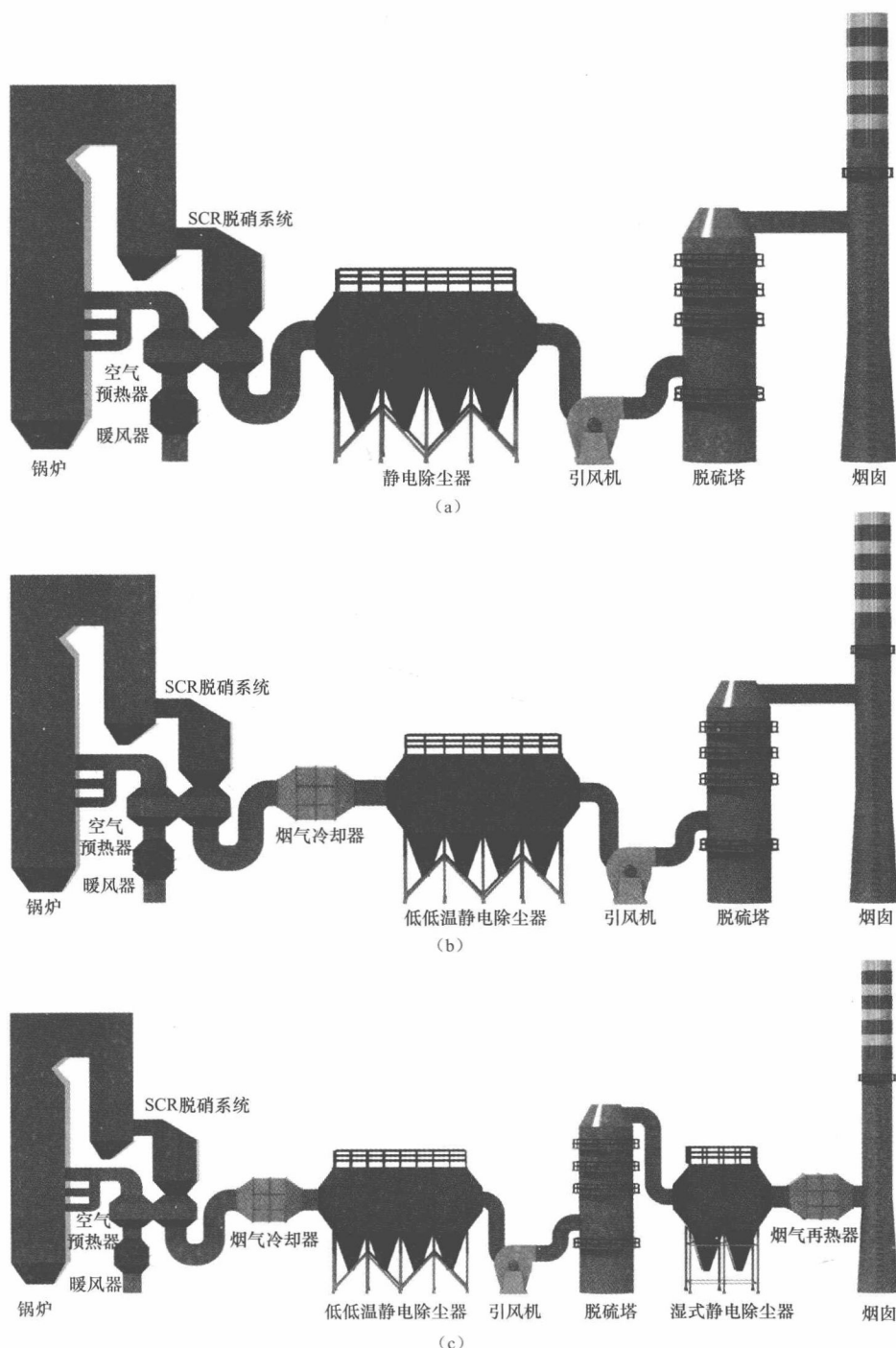


图 1-1 现代燃煤机组烟气污染物控制系统全图

(a) 传统燃煤机组烟气污染物独立治理系统图; (b) 燃煤机组烟气污染物协同治理系统图;

(c) 燃煤机组烟气污染物深度协同治理系统图

第一节 加热和冷却概述

一、古代加热和冷却的历史

太阳系、地球和人类均孕育或起源于混沌之初的热和冷的剧烈变化过程当中，自此才有天地之分、春夏秋冬、风雨雷电和寒暑霜露，四季冷暖带给我们的也是亘古不变的有规律的冷热交替^[1]。

加热和冷却是一对矛盾的统一体，相伴而生，相对发展。“火”的发现和使用，使人类进化的历史产生了第二次质的飞跃，从此，人类告别了茹毛饮血的野蛮生活，进入人类文明的新阶段。目前经考古发现的人类用火遗迹可以追溯到 170 万~180 万年前，开始的时候，人类可能只是用火取暖，后来，懂得了保留火种，可以烘烤食物，再后来，大约距今 1 万年前，人类从石器时代进入陶器时代，随着陶器的发明和使用，人类开始用火加热放置于陶器中的水和食物，开始用火间壁式加热液体的历史，火焰和高温烟气的辐射（也有部分对流）热通过陶器壁面的热传导加热陶器中的水，水通过陶器壁面吸热对火焰和高温烟气进行冷却，可见，间壁式加热和冷却液体的历史十分悠久，应被视为原始“加热冷却”概念的形成，此时，火作为热源称为“炉”，陶器作为容器称为“锅”，已具有开式“锅炉”的基本雏形。为了更好地实现冷却，人们在陶器时代通过改变陶器底部的形状来改变加热的效率，具有朦胧的认识世界和改造世界的创新模式，显示出古代加热和冷却技术的协同进步。图 1-2 示出了尖足陶器、平底陶器和三足中空隔的结构变迁，其辐射加热面积和冷却面积依次增大，平底陶器显著增加了与火焰接触的面积，其加热效率高于尖底陶器，特别是三足中空隔，不仅增加了放置的稳定性，且在同样器型状态下具有最大的加热和冷却面积及加热效率，水也由大空间池沸腾转变成局部小空间池沸腾，汽化核心易于形成，即使以现代的沸腾换热理论，也难以提出比三足中空隔更为合理的结构设计，这是古人类认识加热和冷却基本原理的萌芽智慧的结晶和集中体现。

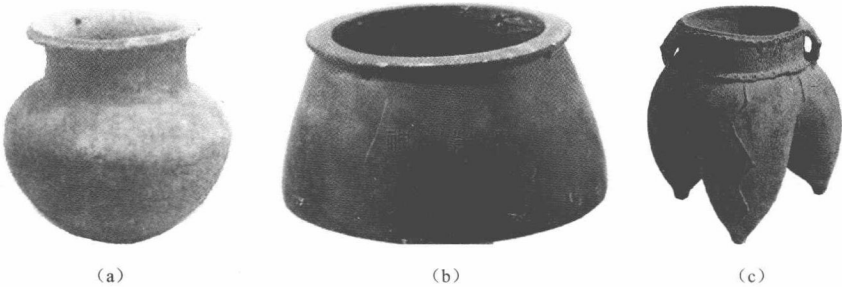


图 1-2 古人的加热和冷却结构

(a) 尖足陶器；(b) 平底陶器；(c) 三足中空隔

二、工业加热和冷却结构的演变

虽然是“开式”炉火加热“开式”容器，却是古人们炉灶结构的原始形态，古人们用泥土或石块将“开式”炉火围拢起来，减少散热损失，提高了火焰和高温烟气加热的热流密度，提高加热效率，这种炉火间壁式加热液体的方式一直持续到第一次工业革命时期（1750 年），只不过，在第一次工业革命开始之时，人们用耐火砖砌筑的炉墙将“开式”炉火包围

起来对铆接的金属密闭容器中的水进行加热生成压力较低的蒸汽用以驱动煤矿的抽水机械，此时，在添加燃料的地方留有炉门，形成炉膛的概念，如图 1-3 (a) 所示，其炉墙的密封性大有提高，增加了烟囱协助克服烟气的流动阻力，和“开式”炉火相比，炉膛有了加热技术的进步，这是重要区别之一；区别之二就是燃料的变化，与古代相比，工业革命时期由陶器时代的生物质（木柴）转变为化石燃料——煤炭；区别之三是由“开式”陶器转变为“密闭”容器，才能经密闭容器汽化蒸发汇集成较低压力的蒸汽，开始的时候，人们并不清楚蒸汽压力升高后，密闭容器会发生爆炸，到后来，“锅”的爆炸此起彼伏，技工或工匠们就开始研制开发安全附件来减少“锅”的爆炸，锅炉 3 大安全附件也经历了很长时间才得以全部解决，首先，具有工程实践经验的英国皇家工程部队的 Thomas Savery (1650—1715 年) 大尉在使用蒸汽动力抽取煤矿积水的过程中发明了锅炉的水位计^[2]，使锅内分成蒸汽和水空间，尽管有水位计，依然无法阻止此起彼伏的“锅”的爆炸；其次，法国物理学家 Denis Papin 博士 1679 年发明了带安全阀^[2]的高压锅，锅盖密不透气，食物在 120℃ 饱和温度下蒸煮，蒸煮食物的时间缩短为常压状态的 1/4；最后，第一次工业革命蒸汽机的改进者 James Watt 于 1890 年发明了压力表^[2]，使蒸汽机的蒸汽供应装备——蒸汽锅炉配套齐全，成为安全可靠的机器^[3]。经过第一次工业革命，锅炉成为一种具有 3 大安全附件的本质安全的压力容器，开启了世界工业文明先河，使“加热”和“冷却”成为一种工业化热量平衡稳定的传递过程，实际上“爆炸”就是加热和冷却不平衡所致。后来，随着蒸汽机由简单的抽水机械转变成给高炉鼓风和纺纱机械提供动力驱动设备，其功率需求逐渐增加，需要不断提高锅炉的热效率，此时，耐火砖砌筑的炉膛也存在散热损失，而且炉墙并不能有效地将吸收的热量传递给工质，因此，缺乏高效冷却的效果，高温烟气不能充分被冷却，燃料释放的热量不能充分被利用，技工和工匠们才把燃料放置于封闭的容器中燃烧，容器壁面可以直接吸热传递给工质并有效冷却烟气，散失于环境中的热量通过容器壁面直接传递给工质，然后就产生了具有炉胆辐射受热面 [受外压，图 1-3 (b) 中 3] 和烟管 [受外压，图 1-3 (c) 中 5] 对流受热面的锅壳式锅炉结构，火焰和高温烟气在炉胆组成的圆筒形金属壁面中被有效地冷却，继之在火筒 [图 1-3 (b) 中 4] 中进一步被冷却，烟气温度降低后，又在直“烟管”管束 [图 1-3 (c) 中 5] 中被强迫流动对流换热并冷却，有效降低了锅炉出口的烟气温度，烟气热损失大大下降，显著提高了锅炉热效率，实际上是提高了加热和冷却效率，第一次工业革命后期，高温烟气不断被冷却到合理的温度水平，促进了煤炭能源有效利用的技术进步。综上所述，加热和冷却是矛盾统一的两个方面，燃料燃烧加热的历史就是烟气冷却技术不断发展的历史。

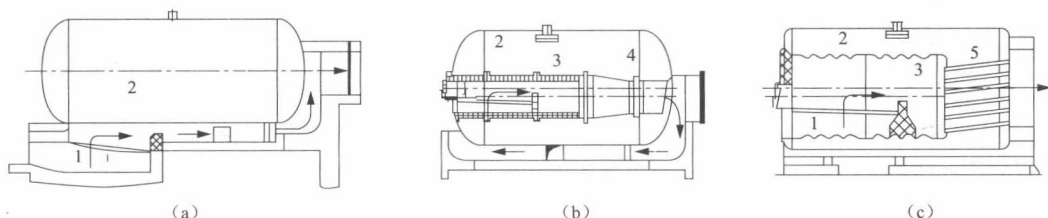


图 1-3 锅壳式锅炉的加热和冷却结构

(a) 容器壁面冷却方式；(b) 容器和炉胆的壁面+火筒冷却方式；(c) 炉胆+烟管冷却方式

1—炉膛（包围炉火空间）；2—盛水容器；3—炉胆；4—火筒；5—烟管

三、现代加热和冷却结构的发展

现代加热和冷却结构是伴随着工业化过程发展起来的。对煤燃烧后的烟气而言，通过设置一定的具有内部工质水冷却的壳体、管屏或蛇形管束对其进行连续地冷却到合理水平；而对工质水而言，在烟气冷却的同时实现了工质连续地被加热到确定的温度。

(一) 以炉胆和烟管冷却为核心的结构

以承受外压为特点的、以炉胆和烟管作为冷却受热面结构的锅壳式锅炉通过第一次工业革命得到了充分发展，到第一次工业革命后期，因火筒〔图 1-3 (b) 中 4〕的冷却能力有限，若再增加烟管受热面，会造成冷却结构沿长度方向过于庞大，为了节省空间，紧凑冷却受热面成为交通运输业发展的巨大需求，此时，回燃室冷却结构的发明成为冷却技术发展的关键转折，图 1-4 示出了锅壳式紧凑冷却型锅炉结构，分别具有干背式〔如图 1-4 (a) 所示〕、半干背半冷却式〔如图 1-4 (b) 所示〕和湿背式〔如图 1-4 (c) 所示〕回燃室结构，燃料在炉胆中或者在炉胆左端燃烧放热，受锅壳内自然水循环冷却的炉胆对高温烟气进行烟气冷却，至炉胆尾部烟气折转 180° (称为烟气回燃) 进入第二回程受管束间自然水循环冷却的烟管对流管束，有时，为了更进一步降低烟气温度，烟气在前管板再折转 180° 进入第三回程烟管对流管束，形成经典的锅壳式三回程结构，该结构曾应用于燃煤、燃生物质、燃油和燃气锅炉，该结构一直发展到今天仍然是市场的主流产品，主要是因为其紧凑的回燃室烟气冷却结构。

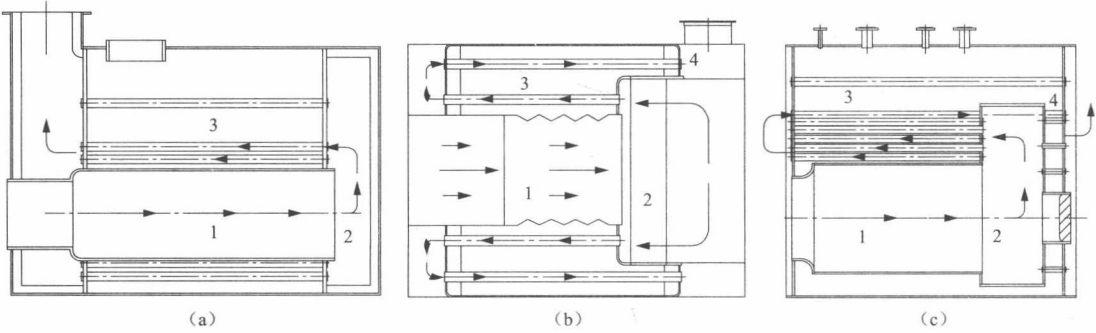


图 1-4 锅壳式紧凑冷却型锅炉结构

(a) 干背式无冷却回燃结构；(b) 半干背半冷却式回燃结构；(c) 湿背式回燃室冷却结构
1—炉胆；2—干背/半干背/湿背；3—第二回程烟管；4—第三回程烟管

(二) 以水管冷却为核心的结构

随着生产发展的需要，其加热功率逐渐增大，蒸汽温度和压力也不断提高，加热功率的增加使炉胆直径也越来越大，为满足强度要求，炉胆壁厚越来越厚，超出了厚钢板的生产能力，这种放置于炉胆中的燃烧方式越来越不满足大工业生产的需要，人们才又逐渐放弃这种把燃料放置于炉胆中进行燃烧的方式，而是采用将燃料放置于耐火砖砌筑的封闭炉膛中燃烧，如图 1-5 所示，燃烧之后的高温烟气冲刷顺列或错列布置的内部充满了水的小口径直水管管束〔如图 1-5 (a)、图 1-5 (b) 中 2 所示〕，之后，因为同样的道理，耐火砖砌筑的炉膛也存在散热损失，而且炉墙并不能有效地将吸收的热量传递给工质，高温烟气不能充分被冷却，由充满了水的小口径光管 (受内压) 沿耐火墙壁排列形成的炉膛的整个壁面〔如图 1-5 (b) 中 3 所示〕构成包围“火”的吸热和冷却的空间。

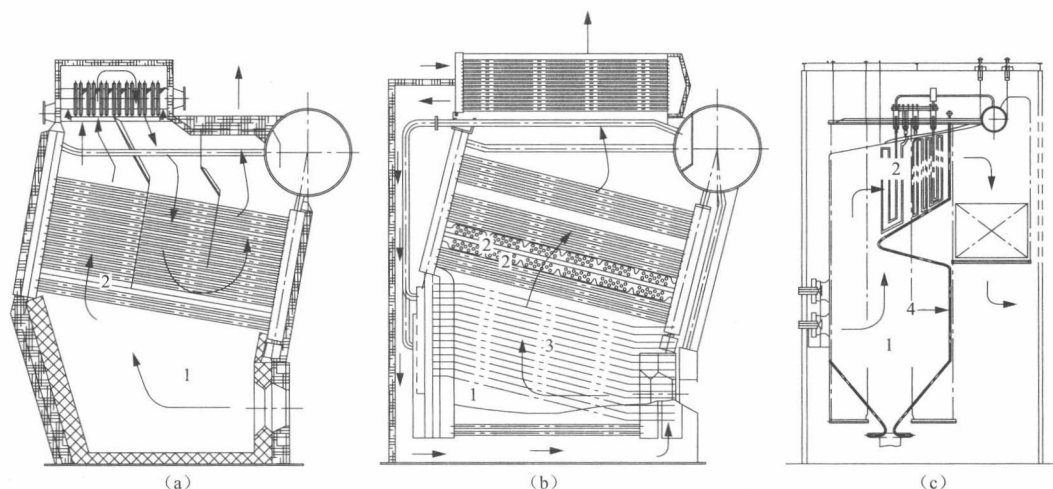


图 1-5 水管锅炉的加热和冷却结构

(a) 耐火炉膛+水管管束冷却；(b) 光管水冷壁+耐火炉膛+水管管束；(c) 膜式水冷壁+敷管炉墙冷却
1—炉膛；2—直水管烟气冷却管束；3—光管水冷壁+直水管冷却管束；4—膜式水冷壁+弯管管束结构

特别是随着技术人员对辐射角系数认识的深入，用扁钢和光管焊接在一起形成“密不透风”的膜式水冷壁〔如图 1-5 (c) 所示〕结构，减小了环境对燃烧以及燃烧对环境的双重影响，同时，小口径光管直径小，强度易于满足，承压能力强，获得了和炉胆一样的吸收辐射热和高温烟气的冷却能力，大大减少了金属消耗，改变了冷却结构的弹性和自由度，提高了冷却结构的安全可靠性，适应了工业大生产对大容量、高参数的发展需求，直接促进了水管锅炉结构的产生，使得加热和冷却的结构形式发生了深刻的质的变化。加热的燃料也从过去采用块状生物质发展到块煤，然后又从燃用块煤发展到燃用粉煤，促成燃烧设备由内燃向外燃的发展，燃烧方式也由层燃发展成室燃，烟气冷却方式也由“水包火”发展到“火包水”。到目前为止，燃用煤粉的室燃燃烧方式仍然是固体燃料燃烧效率最高的方式，极大地促进了加热和冷却器结构形式的巨大变革。

工业加热和冷却起源于第一次工业革命时期蒸汽动力推动工业发展的进步，起源于对锅炉等能源消耗设备提高效率的不断追求，借助于强化传热原理和金属材料研究的不断进步，依靠不断增加各种金属换热受热面将化石燃料燃烧的高温烟气进行持续不断地烟气冷却，并把热量通过金属壁面传递给受热面中的工质，获得一定温度和压力的水蒸气或热水，推动蒸汽轮机做功发电或供热，随着烟气温度的不断下降，锅炉热效率不断提高。因此，锅炉从工质侧吸热可以被称为一种加热水的热能转换装置，而从烟气温度不断降低的趋势来看，锅炉本身，或者说“锅”就是一种烟气冷却器，而“炉”就是一种烟气发生器，燃煤电站锅炉通过炉膛膜式水冷壁、屏式过热器、高温过热器，高温再热器、低温过热器、低温再热器、省煤器、空气预热器等各种受热面将燃料燃烧的高温烟气温度从 1600°C 左右依次降低到 200°C 以下较为合理的水平。不仅如此，第一次工业革命以来，每一次能源或石油危机，技术人员最先想到的工业过程的增效方法和节能技术途径依然是不断降低燃烧设备的排烟温度，因此，烟气冷却器作为一种热交换装置已经成为一种极其重要的节能装备。

在以化石燃料为主的电力工业发展的过程中，烟气冷却技术不断地出现在过程工业的舞台上，涌现出各种烟气冷却器的结构形式，经过大浪淘沙，经典的结构形式依然保留到现

在，如“π”型结构的电站锅炉整体布置结构，如图 1-6 所示，这是一种经过历史优选之后最广泛使用的烟气冷却结构形式。

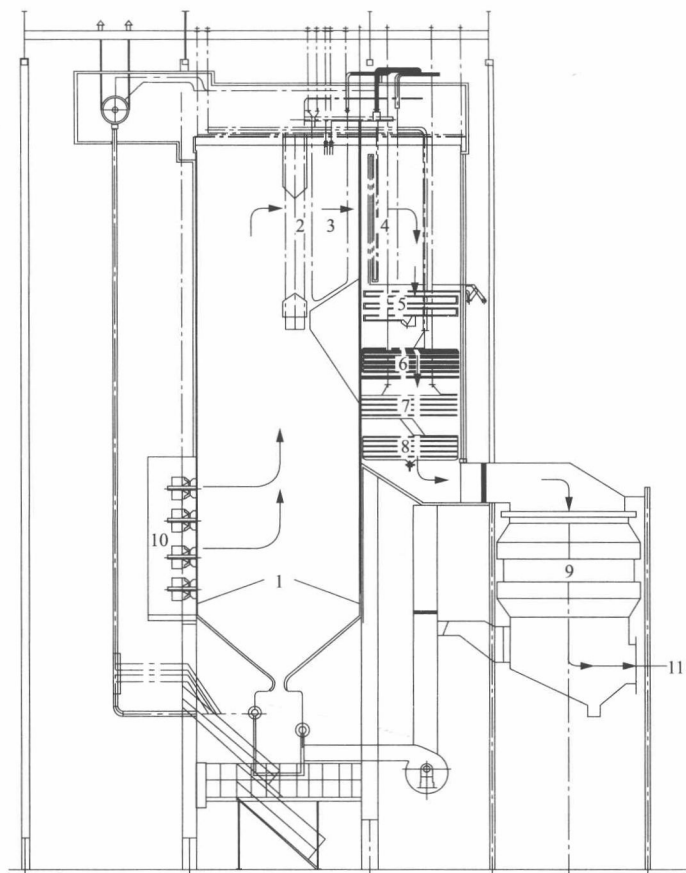


图 1-6 燃用煤粉的现代亚临界压力电站锅炉的各种烟气冷却结构

- 1—膜式水冷壁；2—屏式过热器；3—高温过热器；4—高温再热器；5—低温再热器；6—低温过热器；
7—高温省煤器；8—低温省煤器；9—再生式空气预热器；10—煤粉燃烧器；11—电站锅炉出口

燃料燃烧后的高温烟气在膜式水冷壁构成的炉膛中升腾向上，至炉顶折转 90°在水平烟道中依次冲刷屏式或蛇形管束式高温过热器和高温再热器，然后向下折转 90°依次冲刷蛇形管式低温再热器、低温过热器、省煤器及管式或波纹板式空气预热器受热面，经过静电或布袋除尘器、脱硫塔从烟囱中排放到大气中。近几年，随着对污染物排放控制日趋严格，在省煤器和空气预热器中又增加了脱硝反应器，形成目前燃煤机组锅炉污染物控制的主要烟气净化系统。原则上，将空气预热器的出口定义为锅炉的出口，这样说来，膜式水冷壁、屏式过热器、高温过热器、高温再热器、低温再热器、低温过热器、省煤器及空气预热器都是烟气冷却的受热面，他们都有着各自不同的演变过程^[4]。

1. 水冷壁烟气冷却结构

1920 年以前，所有用于产生蒸汽的煤炭实际上都是在机械加煤锅炉或炉排上燃烧的。炉膛四壁一般都是耐火材料制成的，只有极少数的炉膛采用了水冷炉膛。在水冷炉膛中，主要采用水冷壁吸收火焰和高温烟气的辐射热量，其冷却结构如图 1-7 所示。

图 1-7 (a) 是指早期的绝热炉膛，无冷却受热面，该炉墙被称为重型炉墙，是第一次工业革命早期的产物；图 1-7 (b) 为按一定节距排列的光管水冷壁，内部充满强制流动的水的光管吸收了大量的热量，辐射给耐火材料的热量显著减少，可以明显降低炉墙的厚度；图 1-7 (c) 是内部充满了强制流动的水的光管相切结构，辐射给炉墙的热量大大减少，可以少用或不用耐火材料，只用隔热和保温材料，炉墙壁厚减轻，被称为轻型炉墙，但是，钢管的金属消耗大于图 1-7 (b)，而耐火、隔热保温材料的成本下降；图 1-7 (d) 看起来解决了图 1-7 (c) 的钢管消耗量大的问题，而且火焰和高温烟气的辐射热全部被鳍片管膜式水冷壁吸收了，冷却条件非常好，只需要采用敷管式轻型炉墙就可以满足要求，只是鳍片管的轧制成本升高了；图 1-7 (e) 是现代电站锅炉生产广泛采用的光管和扁钢组合焊接而成的膜式水冷壁，广泛应用于制造亚临界、超临界和超超临界压力锅炉的膜式水冷壁，冷却条件好，制造工艺简单，因此，技术经济性是炉膛冷却结构发展的最佳评价指标，不仅如此，正是由于图 1-7 (e) 结构具有无与伦比的技术经济性，而且非常适合现代焊接机械化、自动化的大工业生产，因此，图 1-7 (e) 结构也成为燃煤工业锅炉、燃生物质或垃圾锅炉、燃油燃气锅炉的冷却火焰和高温烟气的首选结构。

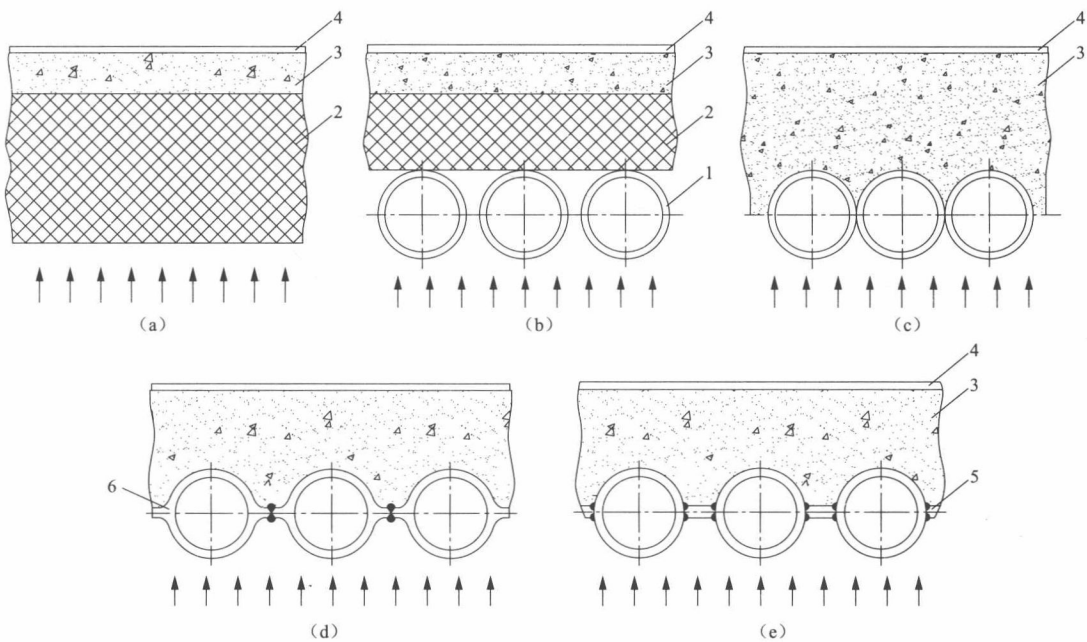


图 1-7 水冷壁冷却结构的演变过程

(a) 早期的绝热炉膛；(b) 光管水冷壁；(c) 光管相切水冷壁；(d) 鳍片管焊接膜式水冷壁；
(e) 光管和扁钢组合焊接而成的膜式水冷壁
1—光管；2—耐火材料；3—隔热和保温材料；4—外墙板；5—扁钢；6—鳍片管

2. 过热器和再热器烟气冷却结构

电站锅炉炉膛出口一般布置过热器冷却受热面，过热器的作用是将锅炉的饱和蒸汽进一步加热到所需的过热蒸汽温度，即依靠管内强制流动的饱和或过热蒸汽冷却高温烟气。过热器一般按传热方式来分类，主要可分为辐射式、半辐射式和对流式 3 种。辐射式过热器布置在炉壁上，结构与水冷壁相似，如包墙管、顶棚管过热器等；半辐射式过热器通常称为屏式过热器。