

工业设备

节能技术丛书

工业及电厂锅炉 节能技术

沈祥智 吴金星 主编

燃料性质及燃烧方式与节能

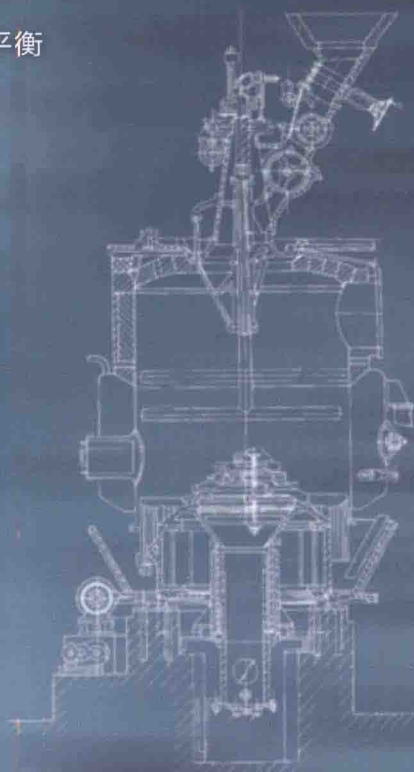
锅炉系统的物质平衡与热平衡

工业燃煤锅炉节能技术

燃油燃气锅炉节能技术

电厂燃煤锅炉节能技术

循环流化床锅炉节能技术



化学工业出版社

工业设备

节能技术丛书

工业及电厂锅炉 节能技术

沈祥智 吴金星 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书介绍了常用锅炉的结构型式、能效状况及节能途径；阐述了锅炉的燃料性质及燃烧方式对节能的影响；分析了锅炉系统的物质平衡及热平衡关系，为实施锅炉节能技术奠定了理论基础。

本书重点介绍了各类工业锅炉和电厂锅炉在工程实践中的具体节能技术，特别介绍了国家重点推广的循环流化床锅炉节能技术。

本书可供从事锅炉设计、运行和检修工作的工程技术人员参考使用，也可作为从事节能工作相关管理人员和工程技术人员的培训教材，还可作为大专院校能源动力类专业的选修课或专业课教材，并可供动力工程及工程热物理学科的教师参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

工业及电厂锅炉节能技术/沈祥智，吴金星主编. —北京：
化学工业出版社，2012.11
(工业设备节能技术丛书)
ISBN 978-7-122-15470-5

I. ①工… II. ①沈…②吴… III. ①工业锅炉-节能②电
厂锅炉-节能 IV. ①TK229②TM621.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 234444 号

责任编辑：戴燕红
责任校对：陶燕华

文字编辑：丁建华
装帧设计：关 飞

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 装：大厂聚鑫印刷有限责任公司
787mm×1092mm 1/16 印张 17¼ 字数 513 千字 2013 年 3 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：68.00 元

版权所有 违者必究

前言

随着煤炭、石油、天然气等常规能源的日益减少,全球能源供应形势日趋紧张,节能降耗越来越受到人们的高度重视。随着我国经济的快速发展,能源供需矛盾更加突出。据统计,2001~2008年间,我国能源生产总量年均增长率是11.6%,而能源消费总量年均增长率达到了14.7%。因此,我国在“十一五”节能减排的基础上,提出在“十二五”期间单位GDP能源消耗再降低16%的目标。可见,我国的“节能降耗”工作任重而道远。

锅炉是一种能源转换设备,通常将煤炭、石油、天然气等化石燃料所具有的化学能转换成热能,通过水、蒸汽、导热油等工作介质向外界供热。锅炉一般是能源利用过程中第一个转换环节,其转换效率的高低对能源利用的总效率具有决定性作用。因此,优化燃料配制和锅炉系统、改进锅炉本体结构、提高炉内燃烧效率和各个受热面的传热效率、回收烟气余热等,都是提高锅炉热效率的有效措施,也是提高能源利用总效率的有效途径。对锅炉本体结构进行改造,实现高效燃烧、强化传热、余热回收及提高锅炉综合性能一直是国内外科技人员研究的热点,也取得了大量的科技成果。目前,先进的锅炉技术已在能源、动力、化工、炼油、冶金、制药、轻工及纺织等领域得到广泛应用。

本书根据作者多年来开展锅炉研究的技术成果和工程实践经验,并结合国内外最新的锅炉技术进步,介绍了常用锅炉的结构型式、能效状况及节能途径,阐述了锅炉的燃料性质及燃烧方式对节能的影响,分析了锅炉系统的物质平衡及热平衡关系,为实施锅炉节能技术奠定了理论基础,重点介绍了各类工业锅炉和电厂锅炉在工程实践中的具体节能技术,特别介绍了国家重点推广的循环流化床锅炉节能技术。

本书可供从事锅炉设计、运行和检修工作的工程技术人员参考使用,也可作为从事节能工作相关管理人员和工程技术人员的培训教材,还可作为大专院校能源动力类专业的选修课或专业课教材,并可供动力工程及工程热物理学科的教师参考。

全书由浙江大学宁波理工学院沈祥智负责章节规划,郑州大学节能技术研究中心吴金星负责统稿。具体编写分工为:第2~4章及第1.2节由沈祥智负责编写,第1.1节及第5章由吴金星负责编写,并负责组织编写和修改第6、7章。第6章由同济大学陈德珍编写,第7章由郑州大学王培萍编写。另外,郑州大学王保东、赵金辉、张力隽等老师,河南机电高等专科学校王任远老师,以及李俊超、郭桂宏、王力等研究生参加了资料收集和部分章节的编写工作。河南力威热能设备制造有限公司贺敏总经理、李国立经理为本书的编写提供了大量技术资料。在编写过程中,郑州大学魏新利教授、王定标教授等提出了很好的修改意见和建议。在此一并表示感谢。在编写过程中参阅了大量的国内外专著、教材和期刊论文,在此谨向这些文献的著者和相关单位表示诚挚的谢意。本书的出版得到浙江大学宁波理工学院、郑州大学化学与能源学院及河南力威热能设备制造有限公司的支持,特此致谢。

由于编者知识水平和经验有限,书中难免出现疏漏和不足之处,敬请读者批评指正。

编者

2012年8月

目 录

1 绪论	1
1.1 锅炉技术概述	1
1.1.1 锅炉的结构及类型	1
1.1.2 锅炉的用能平衡分析及节能方向	3
1.2 我国锅炉的能耗现状及节能途径	5
1.2.1 工业锅炉	5
1.2.2 电厂锅炉	7
参考文献	10
2 燃料性质及燃烧方式与节能	11
2.1 燃料性质与节能	11
2.1.1 固体燃料	13
2.1.2 液体燃料	17
2.1.3 气体燃料	18
2.1.4 三种燃料的比较及天然气的应用	19
2.2 燃烧方式与节能	20
2.2.1 助燃气体	22
2.2.2 层状燃烧	24
2.2.3 悬浮燃烧	27
2.2.4 循环流化床燃烧	29
2.2.5 三种燃烧方式的比较	32
参考文献	35
3 锅炉系统的物质平衡与热平衡	37
3.1 锅炉系统的物质平衡	37
3.1.1 几种炉型的物质流程	38
3.1.2 锅炉系统的物质平衡关系式	44
3.1.3 小结	47
3.2 锅炉系统的热平衡	48
3.2.1 锅炉系统的热平衡及其组成	48
3.2.2 锅炉系统的热效率	48
3.3 锅炉系统的主要热损失及其影响因素分析	50
3.3.1 固体未完全燃烧热损失	50
3.3.2 排烟热损失	54
3.3.3 气体未完全燃烧热损失	54
3.4 锅炉燃烧及热平衡计算示例	56
3.5 循环流化床锅炉系统的热平衡特点	61
3.5.1 循环流化床锅炉外循环特征	62
3.5.2 循环流化床锅炉系统的热平衡	63

3.6 以高位发热量为基准的锅炉系统热平衡及其优点	65
3.6.1 锅炉热效率及各种热损失	65
3.6.2 锅炉系统热平衡中各种热损失的计算	66
3.6.3 两种基准下锅炉系统热平衡的比较	69
3.7 小结	69
参考文献	69
4 工业燃煤锅炉节能技术	71
4.1 工业锅炉节能技术概述	71
4.1.1 工业锅炉的范围及发展	71
4.1.2 工业锅炉的分类	71
4.1.3 工业锅炉的节能改造计划及实施	73
4.2 煤炭加工节能技术	75
4.2.1 煤炭洗选技术	75
4.2.2 配煤与型煤技术	78
4.2.3 水煤浆和水焦浆技术	80
4.3 高效低污染燃烧节能技术	84
4.3.1 型煤燃烧技术	84
4.3.2 分层燃烧技术	88
4.3.3 水煤浆燃烧技术	91
4.3.4 新型高效煤粉燃烧技术	97
4.3.5 富氧燃烧技术	102
4.3.6 高温空气燃烧技术	105
4.3.7 煤炭气化技术	110
4.4 锅炉强化传热节能技术	117
4.4.1 管外与管内强化传热技术	118
4.4.2 受热面上的灰渣清除技术	121
4.4.3 防垢除垢技术	123
4.4.4 保温及密封技术	129
参考文献	136
5 燃油燃气锅炉节能技术	138
5.1 燃油燃气锅炉概述	138
5.1.1 燃油燃气锅炉的类型及特点	138
5.1.2 燃油燃气锅炉的燃烧特性及自动控制	141
5.1.3 燃油燃气锅炉常见的结构型式	144
5.1.4 燃油燃气锅炉的现状与发展趋势	150
5.2 燃油燃气锅炉核心部件节能技术	152
5.2.1 波形炉胆节能技术	152
5.2.2 烟管强化传热节能技术	152
5.2.3 前烟箱冷却节能技术	153
5.2.4 锅炉本体结构布置节能技术	154
5.3 燃油燃气锅炉富氧燃烧节能技术	155
5.3.1 富氧燃烧技术的工作原理	155
5.3.2 富氧燃烧的分类	157
5.3.3 富氧燃烧技术的节能环保特性	157
5.4 烟气余热回收利用节能技术	158

5.4.1	燃油锅炉降低排烟温度的节能潜力	158
5.4.2	燃气锅炉排烟温度的特性分析	159
5.4.3	锅炉烟气余热回收利用设备	160
5.5	燃油燃气锅炉的燃烧器节能技术	161
5.5.1	燃气燃烧器	162
5.5.2	燃油燃烧器	164
5.5.3	燃烧器与炉膛的匹配	166
5.5.4	加装燃油(燃气)节能器	167
5.6	燃油燃气锅炉保温及控制节能技术	167
5.6.1	炉体保温节能技术	167
5.6.2	锅炉运行变频控制节能技术	168
5.6.3	锅炉的先进控制节能技术	169
	参考文献	169
6	电厂燃煤锅炉节能技术	171
6.1	电厂锅炉的工作过程及特点	171
6.1.1	电厂锅炉的工作过程	171
6.1.2	电厂锅炉的特点	172
6.2	电厂锅炉的节能政策及节能途径	174
6.2.1	电力行业的节能政策	174
6.2.2	电厂锅炉节能途径	175
6.3	电厂锅炉节能燃烧技术	176
6.3.1	低 NO _x 燃烧技术	176
6.3.2	节油点火技术	178
6.3.3	富氧燃烧技术	180
6.3.4	电厂锅炉的结渣、积灰及其防治	182
6.3.5	炉内传热的强化技术	185
6.4	电厂锅炉烟气余热利用节能技术	186
6.4.1	空气预热器	186
6.4.2	低温省煤器	193
6.5	用于风机和水泵调节的变频技术	193
6.5.1	风机的变频节能技术	193
6.5.2	水泵的变频节能技术	195
6.6	动力配煤技术在电厂锅炉中的节能应用	196
6.6.1	煤质变化对锅炉正常运行特性的影响	196
6.6.2	动力混煤煤质特性及燃烧特性的计算	198
6.6.3	优化配煤的数学模型和专家系统	201
6.7	粉煤灰综合利用技术	206
6.7.1	粉煤灰的形成和组成	206
6.7.2	粉煤灰的精细化利用	208
	参考文献	210
7	循环流化床锅炉节能技术	212
7.1	循环流化床锅炉及流态化现象	212
7.1.1	循环流化床锅炉概述	212
7.1.2	流态化现象	213
7.2	循环流化床锅炉的工作特性	215

7.2.1	流动特性	215
7.2.2	传热特性	220
7.2.3	燃烧特性	224
7.3	循环流化床锅炉燃烧节能分析	225
7.3.1	循环灰对燃烧效率的影响	225
7.3.2	床底渣含碳量高的原因	228
7.3.3	飞灰含碳量高的原因及控制措施	230
7.3.4	分床分层流化燃烧技术	232
7.3.5	点火节油技术	234
7.3.6	其他燃烧节能技术	237
7.4	循环流化床锅炉的运行节能	238
7.4.1	进煤系统节能分析	238
7.4.2	受热面的磨损与防治	240
7.4.3	机组运行优化调整	245
7.4.4	锅炉运行节能技术	247
7.5	循环流化床锅炉设计的标准化问题	248
7.5.1	循环流化床锅炉的炉型设计	249
7.5.2	循环流化床锅炉的放大设计	250
7.5.3	循环流化床锅炉的标准化设计	252
7.6	循环流化床锅炉的大型化节能型发展	254
7.6.1	我国循环流化床锅炉的完善化改造	254
7.6.2	我国 600MW 超临界循环流化床锅炉的开发	258
7.6.3	我国未来循环流化床锅炉的发展	265
	参考文献	265

1.1 锅炉技术概述

燃烧是目前人类获取能量的一个最主要的手段,通过燃烧矿物燃料(或化石燃料)所获取的能量占世界总能量消耗的90%以上。因此,燃烧过程组织得合理与否在很大程度上影响到能源的利用程度和能耗的降低。在人类大量燃烧矿物燃料的同时,产生了大量的温室气体和酸性气体,是全球环境恶化的重要影响因素。21世纪人类面临的重大课题是能源和环境问题,特别是像我国这样一个人口多、人均资源少,正在发展工业化的发展中国家来说,能源和环境问题更为突出。我国是一个能源并不富裕的国家,节能降耗至关重要。为确立节能的战略地位,我国已经把节约资源提升到基本国策的高度,并努力建设节约型社会,实现可持续发展。鉴于我国的现实情况,矿物燃料消耗量较大,因而迫切需要加强燃烧的理论研究,提高燃烧的技术水平,从而提高锅炉系统的热效率。

锅炉是一种将化石燃料(煤炭、石油、天然气等)、生物燃料(木材、甘蔗渣等)和可燃废物(生活垃圾、危险废物、污水污泥、有机废液等)所储藏的化学能,或者工业生产中的余热,或者太阳能等其他形式的能源,转化为热能并通过蒸汽、热水或其他携带热能的工质向外界输送的能量转换设备。本书所涉及的锅炉是指燃烧化石燃料——煤炭、石油、天然气的锅炉,重点讨论流程性工业生产和电厂使用的锅炉相关节能技术。

锅炉在运行过程中产生的热水或蒸汽可直接为工业生产和人民生活提供所需要的热能,也可通过蒸汽动力装置转换为机械能,或可通过发电机将机械能再转换为电能。提供热水的锅炉称为热水锅炉,主要用于生活,工业生产中也有少量应用;产生蒸汽的锅炉称为蒸汽锅炉(常简称为锅炉)。锅炉产生的高温蒸汽,一般直接应用在冶金、化工、炼油、制药、造纸、食品、纺织、农产品加工等工业部门,这些行业大都以蒸汽作为生产热源。另外,供热通风、空气调节及生活热水供应所需要的热源也是来自高温蒸汽或热水。此外,在我国的电力生产构成中,占70%以上的电能都是通过锅炉生产的高温高压蒸汽推动汽轮发电机组发电而获得的。因此,锅炉已经成为现代社会生产和人民生活不可缺少的、重要的能量转换设备。

1.1.1 锅炉的结构及类型

锅炉机组包括锅炉本体和辅助设备两大部分。辅助设备包括:燃料处理及输送设备(主要指燃煤锅炉)、送风及排烟设备、除灰渣设备(主要指燃煤锅炉)、环保设备(主要指燃煤锅炉)、水的处理及输送设备等。锅炉本体一般包括“锅”和“炉”两部分,如图1-1所示。其中“锅”是指锅炉的汽水系统,由省煤器、锅筒(汽包)、下降管、水冷壁、过热器及各种联箱组成,其作用是吸收炉内燃料燃烧放出的热量;“炉”是指锅炉的燃烧系统,包括燃烧器、炉膛、烟道及炉墙构架等,其作用在于尽可能提供良好的燃烧条件和降低散热损失。其中炉膛和锅筒是锅炉本体中最主要的两个部件。

炉膛又称燃烧室，是供燃料燃烧的空间。按照燃料的供应方式及炉膛中燃料燃烧特点，可将锅炉分为以下类型：将固体燃料放在炉排上，进行火床燃烧的炉膛称为层燃炉，又称火床炉，如图 1-1(a) 所示；将液体、气体或磨成粉状的固体燃料，喷入火室燃烧的炉膛称为室燃炉，又称火室炉，如图 1-1(b) 所示；空气将煤粒托起使其呈沸腾状态燃烧，并适于燃烧劣质燃料的炉膛称为沸腾炉，又称流化床炉；利用空气流使煤粒高速旋转，并强烈燃烧的圆筒形炉膛称为旋风炉。

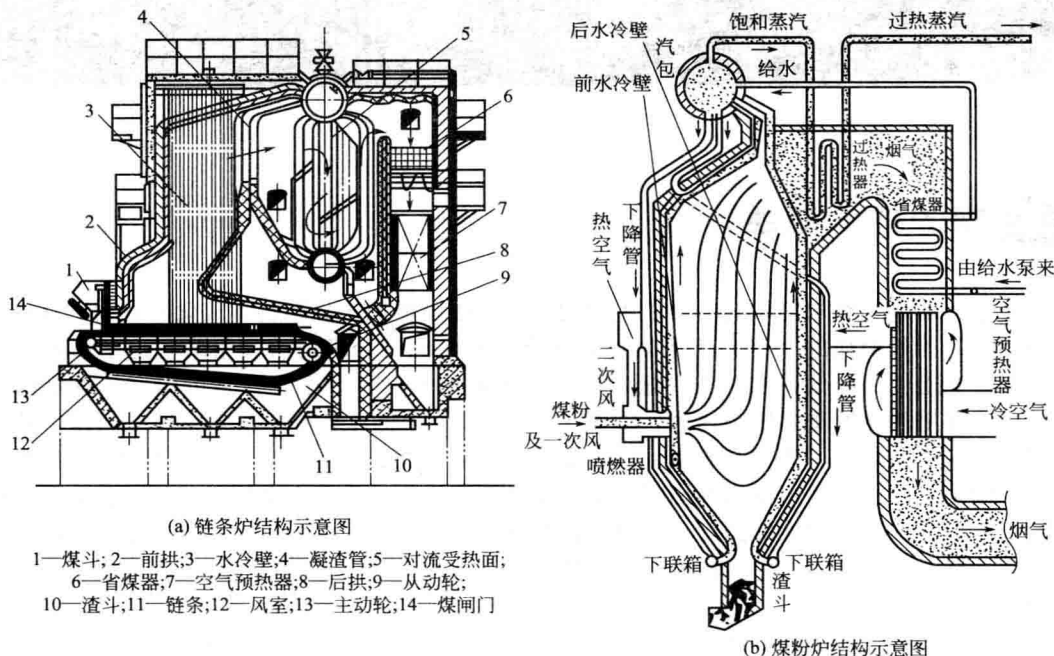


图 1-1 链条炉 (a) 和煤粉炉 (b) 的典型结构示意图

炉膛的横截面一般为正方形或矩形。燃料在炉膛内燃烧形成火焰和高温烟气，所以，炉膛四周的炉墙由耐高温材料和保温材料构成。在炉墙的内表面上常敷设水冷壁管，它既保护炉墙不致烧坏，又吸收火焰和高温烟气的大量辐射热。炉膛设计需要充分考虑使用燃料的特性，因此，每台锅炉应尽量燃用原设计的燃料，燃用特性差别较大的燃料时锅炉运行的经济性和可靠性都可能降低。

锅筒是自然循环和多次强制循环锅炉中，接受省煤器来的给水、联接循环回路，并向过热器输送饱和蒸汽的圆筒形容器。锅筒筒体由优质厚钢板制成，是锅炉中最重要的部件之一。锅筒的主要功能是储水，进行汽水分离，在运行中排除锅水中的盐水和泥渣，避免含有高浓度盐分和杂质的锅水随蒸汽进入过热器和汽轮机中。

锅筒内部装置包括汽水分离和蒸汽清洗装置、给水分配管、加药及排污装置等。其中汽水分离装置的作用是将在水冷壁来的饱和蒸汽与水分离开来，并尽量减少蒸汽中携带的细小水滴。中、低压锅炉常用挡板和缝隙挡板作为粗分离元件；中压以上的锅炉除广泛采用多种型式的旋风分离器进行粗分离外，还用百叶窗、钢丝网或均汽板等进行进一步分离。锅筒上装有水位表、安全阀等监测和保护设施。

锅炉运行时，对于水汽系统，软化水在加热器中加热到一定温度后，经给水管道进入省煤器，进一步加热以后送入锅筒，与锅水混合后沿下降管下行至水冷壁进口联箱；水在水冷壁管内吸收炉膛辐射热形成汽水混合物经上升管到达锅筒中，由汽水分离装置使水、汽分离；分离出来的饱和蒸汽由锅筒上部流往过热器，继续吸热成为一定温度的过热蒸汽（目前大多 300MW 机组主汽温度约为 540℃），然后送往汽轮机。目前，600MW 以上机组的发展趋势是直流锅炉，主汽

温度约为 605℃。

对于燃烧系统，送风机将空气送入空气预热器加热到一定温度。在磨煤机中被磨成一定细度的煤粉，由来自空气预热器的一部分热空气携带经燃烧器喷入炉膛；从燃烧器喷出的煤粉与空气的混合物在炉膛中与其余的热空气混合燃烧，放出大量热量；燃烧后的热烟气顺序流经炉膛、对流受热管束（指层燃炉）、过热器、省煤器和空气预热器后，一般再经过除尘装置和脱硫装置，除去其中的飞灰和二氧化硫（600MW 以上机组还要增设脱硝装置），最后由引风机送往烟囱排向大气。

单位质量或单位容积的燃料完全燃烧时，按化学反应计算出的空气需求量称为理论空气量。为了使燃料在炉膛内有更多的机会与氧气接触而燃烧，实际送入炉内的空气量总要大于理论空气量。虽然多送入空气可以减少不完全燃烧热损失，但排烟热损失会增大，还会加剧硫氧化物腐蚀和氮氧化物生成。因此，应设法改进燃烧技术，争取以尽量小的过量空气系数使炉膛内燃烧完全。

通常，锅炉可按照下列方法进行分类。

- ① 按照用途可分为：民用锅炉、工业锅炉、电厂锅炉及车船用锅炉。
- ② 按照燃料可分为：燃煤锅炉、燃油锅炉、燃气锅炉及生物质锅炉等。
- ③ 按照燃烧方式可分为：层燃锅炉、室燃锅炉和流化床锅炉等。
- ④ 按照工作介质可分为：蒸汽锅炉、热水锅炉及有机热载体锅炉。
- ⑤ 按照工质在蒸发系统的循环方式可分为：自然循环锅炉、强制循环锅炉、控制循环锅炉及直流锅炉（超临界压力以上）等。
- ⑥ 按照主要受热面是水管还是火管（烟管）可分为：火管锅炉与水管锅炉，其中，火管锅炉又称为锅壳锅炉。
- ⑦ 按照出口蒸汽压力可分为：常压锅炉、低压锅炉（表压 $\leq 2.45\text{MPa}$ ）、中压锅炉（表压 $2.94\sim 4.90\text{MPa}$ ）、高压锅炉（表压 $7.84\sim 10.8\text{MPa}$ ）、超高压锅炉（表压 $11.8\sim 14.7\text{MPa}$ ）、亚临界压力锅炉（表压 $15.7\sim 19.6\text{MPa}$ ）、超临界压力锅炉（表压 $22\sim 25\text{MPa}$ ）、超超临界压力锅炉（表压 26MPa 以上）。

1.1.2 锅炉的用能平衡分析及节能方向

锅炉在运行过程中存在着多种形式的能量损失，如排烟热损失、固体不完全燃烧热损失、气体不完全燃烧热损失、炉体散热损失、灰渣物理热损失等，使得锅炉能量转化效率不能达到 100%，甚至差距很大。当前我国在用中小型锅炉约 50 万台，其中 90% 为燃煤锅炉，实际运行热效率 65% 左右，而技术先进的国家锅炉热效率已达到了 85% 左右。如将热效率提高到 80%，年节能潜力约 7500 万吨标准煤。锅炉发展至今已有 100 多年的历史，锅炉产品一直在改进和更新，其主要目的就是减少这些能量损失，提高锅炉的能量转化效率。

锅炉的能量转化效率，一般是指热效率。现有锅炉机组的设计标准也是按照热量分析法来制定的。随着节能理论和节能技术的发展，人们不仅要关注热能“量”的多少，还要关注热能“品质”的高低。也就是说，锅炉技术的进步，不仅要考虑减少能量的“量”的损失，即提高热效率，而且要考虑减少能量的“质”的损失，即提高焓效率。此外，锅炉技术的进步，还要考虑最大限度地减少污染物的排放和灰渣等资源化再利用的问题，保护生态环境，建设循环型社会，实现国民经济可持续发展。

锅炉的用能平衡可用图 1-2 表示。在燃煤锅炉产生蒸汽的体系中，进入体系的总能量应该等于体系输出的总能量（即体系的能量守恒），可用下式表示：

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \quad (1-1)$$

式中， Q 表示燃料燃烧输入锅炉的热量； Q_1 表示锅炉有效利用热，包括锅炉中水或汽吸收的热量； Q_2 表示锅炉的排烟热损失； Q_3 表示气体未完全燃烧热损失； Q_4 表示固体未完全燃烧热损失； Q_5 表示散热损失； Q_6 表示灰渣物理热损失。

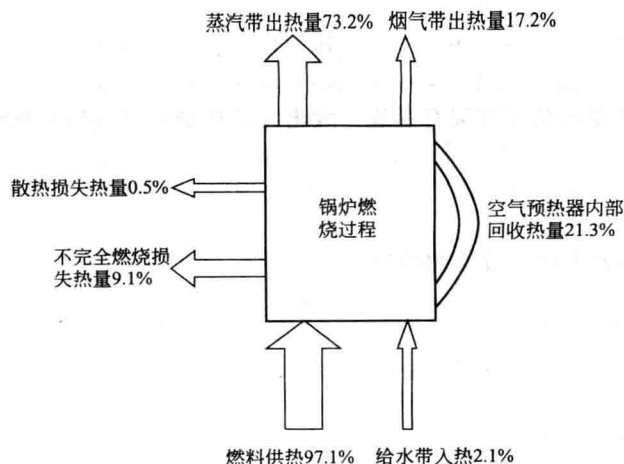


图 1-2 锅炉的用能平衡图

则锅炉的能量有效利用率可用下式计算：

$$\eta = \frac{Q_1}{Q} \times 100 \quad (1-2)$$

可见，煤燃烧产生的能量中只有 73.2% 转移到产生的蒸汽中，也就是说，该锅炉的热效率是 73.2%；另一部分能量约占 26.8% 通过多种形式转移到了环境中去（即损失掉了）。分析发现，损失掉的能量中，17.2% 由锅炉烟气带走，不完全燃烧损失能量 9.1%，锅炉散热损失 0.5%。因此，通过锅炉体系的能量守恒分析，指明了节能的方向：尽量减少那些转移到体系之外（即环境中）的能量。具体节能方法包括以下几种。

① 减少排烟热损失。包括控制适当的空气过量系数，强化对流传热；考虑锅炉系统结构改造，对于小型锅炉，还需增设省煤器或空气预热器；如不方便增设，考虑采取高效烟气余热回收装置，如高效热管换热器，回收烟气余热可用来预热助燃空气，或预热补给软水。但需作全面经济核算，以判断哪种节能措施效果最佳。

② 改进锅炉结构和燃烧方式，以提高燃烧效率，减少不完全燃烧热损失。包括适量的空气，却能与燃料充分接触；有限的空间，燃料在炉内停留时间内却能完全燃尽；炉膛有均匀适度的高温使燃料着火，等等。

③ 加强锅炉隔热保温措施，以减少热损失。

从宏观层面，通过对锅炉运行加强管理和采取高新技术也可实现节能，具体方法如下。

(1) 推行集中供热，发展热电联产新工艺（属于工艺节能方法）

单纯火力发电的能源效率一般只有 40% 左右，而热电（冷）三联产工艺的能源利用效率可提升为 80% 左右，节能效果非常明显。

(2) 加强运行管理、堵塞浪费漏洞（属于管理节能方法）

包括①做好燃料供应工作，尽量供应或配制供应原设计燃料，不同的燃煤锅炉供应不同规格的煤（主要是粒度和含水量，如链条炉供应的煤粒度应为 6~15mm）；②严格给水处理，防止锅炉结垢；③清除受热面积灰（主要指燃煤锅炉），提高锅炉热效率；④防止锅炉超载，保持稳定运行；⑤加强保温、防止漏风、泄水、冒汽；⑥提高入炉空气温度，一般入炉空气温度增加 100℃，可使理论燃烧温度增高 30~40℃，可节约燃料 3%~4%。

(3) 采用新设备新工艺技术（属于设备节能方法或控制节能方法）

包括①锅炉富氧燃烧技术；②链条炉分层燃烧技术；③链条炉宽煤种喷粉复合燃烧技术；④循环流化床锅炉高效低污染燃烧技术；⑤采用蒸汽蓄热器，保证锅炉在最佳工况下运行（可比设置前节能 5%~15%）；⑥设置冷凝水回收装置，减少锅炉一次供水量，节能效果可达 25% 以

上；⑦采用高效热管换热器回收烟气余热，余热回收效率 26％以上，锅炉热效率提高 3.1％；⑧采用真空除氧器，可克服热力除氧器在除氧过程中的能量消耗，真空除氧器比热力除氧器节能 50％以上；⑨采用新型节能保温材料，减少锅炉散热损失。

综上所述，节能与环保是锅炉技术发展的两大主题，也是锅炉科技工作者永恒的课题。因此，锅炉技术发展的总体目标应包括以下内容：

- ① 适应多种燃料的燃烧，尤其是劣质燃料；
- ② 尽可能实现污染物的零排放；
- ③ 提高工质的工作参数（压力和温度）和锅炉额定出力（蒸发量）；
- ④ 提高锅炉运行的自动化水平；
- ⑤ 同时考虑提高锅炉的热效率和烟效率；
- ⑥ 降低单位出力锅炉的金属耗量；
- ⑦ 提高锅炉运行的安全可靠，延长锅炉使用寿命；
- ⑧ 技术上有跨度的新型锅炉的研制。

1.2 我国锅炉的能耗现状及节能途径

我国燃煤设备的平均热效率如表 1-1 所示，可见，电厂锅炉的热效率最高，工业锅炉次之，工业炉窑及民用炉灶的热效率则非常低。电厂锅炉及工业锅炉总装机容量巨大，无论是从我国锅炉工业整体布局来看，还是从单台锅炉本身来看，都有很大的节能潜力，即使是效率最高的电厂锅炉也仍有潜力可挖。

表 1-1 我国燃煤设备的平均热效率

燃煤设备	电厂锅炉	工业锅炉	工业炉窑	民用炉灶
平均热效率/%	>90	60~65	20~30	16

1.2.1 工业锅炉

我国六大行政区域 2003 年在用工业锅炉拥有量状况统计如表 1-2 所示。可见，2003 年我国在用工业锅炉保有量为 52.74 万台、总装机容量为 1254GW；在用热水锅炉保有量为 16.938 万台、

表 1-2 2003 年中国六大行政区域在用工业锅炉总量

序号	地区	工业锅炉总量		热水锅炉	
		台数/万台	容量/GW	台数/万台	容量/GW
1	华北	8.831	21.250	4.885	11.442
2	东北	10.160	25.008	6.880	17.193
3	西北	3.450	27.455	2.015	16.468
4	华东	19.073	34.210	2.077	3.295
5	中南	8.020	13.393	0.511	1.088
6	西南	3.209	4.087	0.570	0.268
全国总计		52.74	1254.0	16.938	497.54
平均单台容量		2.378MW/台		2.937MW/台	
三北地区总计		22.441	73.713	13.780	45.103
三北地区占总量的比例		42.548%	58.781%	81.356%	90.652%
三北地区单台容量		3.285MW/台		3.273MW/台	

注：2004 年的数据统计为工业锅炉的平均热功率为 1.959MW/台，其中，热水锅炉的平均热功率为 2.664MW/台。

总装机容量为 497.54GW。工业锅炉的总装机容量（含热水锅炉）约是电厂锅炉总装机容量的 4 倍以上，但年运行小时数远比电厂锅炉低。这些工业锅炉主要用于工厂动力、建筑采暖等领域，年消耗原煤为 4 亿~5 亿吨，约占当年国内煤炭生产总量的 35%。

2003 年统计表明：全国工业锅炉平均容量为 2.378MW/台、热水锅炉为 2.937MW/台。2004 年又有所下降，分别为 1.959MW/台和 2.664MW/台。可见，我国在用工业锅炉平均容量不高。

从容量分布来看，以中小容量为主。具体地说，小于 35t/h 的锅炉总容量约占所有在用工业锅炉总容量的 98.9%。其中，20t/h 以上的占 18.9%，2~10t/h 的占 75%，1t/h 以下的占 5%。

从燃料分布来看，约 85% 的工业锅炉为燃煤锅炉，燃油、气锅炉次之，另外，还有少量废液、木屑、可燃垃圾的锅炉。

在燃煤工业锅炉中，虽然品种规格较多、炉型各异，但从燃烧方式看，主要是层燃锅炉，其约占燃煤工业锅炉总容量的 95%（其中，链条炉排锅炉约占 65%，往复炉排约占 20%，固定炉排约占 10%），循环流化床锅炉为数不多，占 3%~5%。

总体上看，我国燃煤工业锅炉存在的主要问题是：热效率低，污染严重。锅炉设计效率一般为 72%~80%，而平均运行效率则为 60%~65%。平均运行效率比国外先进水平低 10~20 个百分点，每年多耗原煤 0.6 亿~1 亿吨。另外，工业锅炉因排放大量烟尘以及 SO₂ 和 NO_x 等污染物，而成为我国大气主要煤烟型污染源之一。据估算，燃煤工业锅炉每年约向大气排放烟尘为 800 万吨、SO₂ 为 640 万吨、CO₂ 为 6 亿吨，向地面排放灰渣 8700 万吨，产生的污染约占燃煤污染总量的 1/3。

我国工业锅炉应用中出现上述问题的影响因素分析如下。

(1) 社会因素

计划经济时期，经济建设发展速度很慢，能源生产供应水平较低，虽然强调“多快好省”，而实际应用中必须关注和投入的技术装备、改造措施少而又少。企业或供暖用户的管理者只重视产品质量、材料成本和供热品质，忽略了能源消耗和节能的重要性（当时，能源价格低也是主要原因之一），严重影响了工业锅炉节能技术的发展，节能仅仅是一个“说的多、做的少”的概念。

(2) 政策因素

新中国成立初期及相当长的一段时间，我国完全照搬、使用前苏联的技术和标准。虽然有利于经济快速发展，但同时也导致了过分依赖，技术很难有所突破和创新。从 20 世纪 80 年代开始，国家加大了重点行业和领域的科研和新产品、新技术的投入，同时标准体系也在原有前苏联体系的基础上吸收了西方国家的先进技术，逐步形成适合我国国情的标准化体系。然而，一些传统行业、基础产业的技术进步和标准更新换代则没有太大的改变，工业锅炉就是其中之一。整体上，工业锅炉量大面广，是耗能大户；而就单个项目来看，远不及发电、化工、钢铁、汽车、造船等显得重要，除了作为特种设备在安全监察方面给予高度重视外，政策的关注、支持不够。例如“六五”期间，原国家计委仅为一种在用炉型（KZL 型，即卧式快装链条炉，现已淘汰）的改造就投资 4 亿元，而向工业锅炉行业新产品的研究和技术开发投入经费只有 300 万元。已经使用近 50 年的、对锅炉设计至关重要的热力计算标准（方法），早已不能满足设计需要，但苦于没有经费支持，而迟迟得不到修订。

(3) 技术发展因素

工业锅炉技术和产品的发展，在历史和体制的局限下，进步不大，难以满足社会需求。①长期受到计划经济的影响，工业锅炉“多品种适应多用途”并未得到很好的发挥。统一的标准型号、统一的标准参数、统一的设计煤种，不能做到为用户“量体裁衣”。特别是近年来随着煤炭供应的市场化，煤炭质量不稳定且多变，锅炉使用煤种常常与设计煤种不匹配。②在工程设计理念上，重视供热品质、轻视负荷率，“大马拉小车”现象严重；重视锅炉本体、轻视燃烧设备；重视主机、轻视辅机；重视机械、轻视自控。这样，整个锅炉系统则难以在最佳匹配状态下运

行。③在技术开发及产品设计上，与制造工艺及生产脱节。具有较强实力的科研院所相对缺乏生产实践经验，制造企业很少具有真正意义上的新产品开发能力。国内近千家工业锅炉制造企业中，具有产品设计能力的不足百家。这样，一些新技术、新产品因得不到新工艺、新材料的配合，其性能而大打折扣。此外，工程技术人员在新技术、新产品的开发过程中，往往过分注重新技术、新结构、新炉型，而忽略了辅助系统及仪器、仪表的集成作用，使产品结构单调、调节性能差，运行期间功能适应性差。

(4) 运行管理因素

工业锅炉系统是集机、电、热、水、控制于一体的复杂系统，所涉及的技术较为广泛。要管理和运行这样的系统，应该具有一定的专业知识和操作经验，而实际情况相差甚远。由于传统设计的工业锅炉房环境条件差，再加上企业内部的锅炉系统都属于生产辅助系统，因此，具有较高技术水平的人员很难被安排或愿意从事工业锅炉运行工作。这样，在小型动力或供热锅炉房中，大量使用了没有专业知识和技术水平的临时工、季节工，工作没有连续性，难以做到正确的运行操作和设备保养。这是导致工业锅炉运行效率大大低于鉴定效率的主要原因。

节能是我国经济和社会发展的一项长远战略方针。党的十六届五中全会通过了《国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》，提出了实现单位 GDP 能耗降低 20% 的约束性目标，部署了十大重点节能工程，分别是：燃煤工业锅炉（窑炉）改造工程、区域热电联产工程、余热余压利用工程、节约和替代石油工程、电机系统节能工程、能量系统优化工程、建筑节能工程、绿色照明工程和政府机构节能工程，以及节能监测和技术服务体系建设工程。其中，燃煤工业锅炉（窑炉）改造工程被列为首项重点节能工程。

综上所述，工业锅炉节能应从以下几个方面开展工作。

① 在工业布局方面，需进行结构性调整，使用汽、用热企业集中布置。这样，就可以拆除各个企业的低效小锅炉，建设联片或区域型高效锅炉的热电联产机组。

② 在锅炉机组设计方面，要做到热负荷与锅炉容量匹配，主机与辅机匹配，机械与控制匹配。

③ 在锅炉机组运行方面，要优化配煤，使运行煤种接近设计煤种。抓好锅炉热工试验，摸清低效运行的症结所在，为节能技术改造提供基础数据。

④ 在节能监测和技术服务体系建设方面，近两年国家、省、市节能办陆续审批了一些节能服务机构。通过这些节能服务机构，对新建的或拟技术改造的固定资产投资项目进行节能评估，对已在运行的企业开展能源审计工作，排查企业能量利用效率低下的根源所在，并实施技改项目，使节能工作真正落到了实处。

1.2.2 电厂锅炉

现代电力工业是规模巨大、发展迅速的先行工业。电厂锅炉容量巨大、蒸汽参数（压力、温度）高，要求性能好，是火力发电厂中的主要设备之一。

新中国成立以来，新建大火电机组单机容量不断增大，参数不断提高，供电煤耗也在不断下降，如表 1-3 所示。1960 年的供电煤耗为 600g/(kW·h)，2005 年已下降到 364g/(kW·h)。

表 1-3 全国历年大火电机组的供电煤耗

年份	供电煤耗/[g/(kW·h)]	年份	供电煤耗/[g/(kW·h)]
1960	600	1985	491
1965	518	1990	427
1970	502	1995	412
1975	489	2000	392
1980	431	2005	364

火电机组的容量与供电煤耗等指标的关系，如表 1-4 所示。火电机组的参数（蒸汽压力、温

度)与供电煤耗等指标的关系,如表 1-5 所示。

表 1-4 火发电机组的容量与供电煤耗等指标的关系

项目 \ 机组容量/MW	12	25	50	100	125	300	600	1000
发电煤耗/[g/(kW·h)]	480	440	420	400	375	330	320	273
发电效率/%	25.60	27.92	29.25	30.71	32.76	37.23	38.39	45
厂用电率/%	15	13	12	11	10	7	6	5
供电煤耗/[g/(kW·h)]	552	497.2	470.4	444	412.5	353	339	287
供电效率/%	22.26	24.71	26.12	27.67	29.78	34.79	36.22	42.86

表 1-5 火发电机组的参数(蒸汽压力、温度)与供电煤耗等指标的关系

序号	机组类型	蒸汽压力/at	蒸汽温度/℃	电厂效率/%	供电煤耗/[g/(kW·h)]
1	中压机组	35	435	27	460
2	高压机组	90	510	33	390
3	超高压机组	130	535/535	35	360
4	亚临界机组	170	540/540	38	324
5	超临界机组	250	560/560	41	300
6	高温超临界机组	250	600/600	44	278
7	超超临界机组	300	600/600/600	48	256

注: 1at=98066.5Pa。

可见,为了降低供电煤耗,应十分重视大容量、高参数机组的建设。尤其是改革开放以后,通过引进国外 300MW、600MW 火发电机组的制造技术,并逐步国产化,大大降低了电厂的建设成本,电力工业的整体供电煤耗也一直在降低。

煤炭在我国一次能源结构中一直处于主导地位,受这种条件的影响与制约,我国电力工业燃煤发电的比例也非常高,占 80%以上。电力耗煤比例占煤炭总产量的 50%以上。电厂锅炉每年消耗燃油量 1600 万吨 ($1.6 \times 10^7 \text{t}$),其中锅炉启停耗油约占 60%,低负荷稳燃耗油约占 40%。

我国电力工业不仅是名副其实的耗能大户,同时也是能源利用效率水平相对落后的耗能大户。2005 年全国平均供电煤耗为 374g/(kW·h),发电厂用电率为 5.95%,电网综合线损率为 7.18%,与国外先进水平相比,差距甚大。如日本东京电力公司 1999 年的供电煤耗为 320g/(kW·h),厂用电率为 4%;法国电力公司 1999 年的供电煤耗为 331.6g/(kW·h),厂用电率为 4.47%;德国巴伐利亚电力公司 1999 年的供电煤耗为 332.1g/(kW·h),厂用电率为 5.42%(含脱硫装置用电)。美国、日本和德国 2000 年的电网综合线损率分别为 6.0%、3.89%和 4.6%,意大利 ENEL2004 年的综合线损率为 3.0%。

我国电力工业整体能效水平较低的原因分析如下。

① 工业结构不合理,存在大量效率低下的中小型火电机组。改革开放以后,我国电力工业发展迅速,1999 年底总装机容量已经达到 307GW,居世界前列。其中,总容量的 75%都是火力发电。当时,全国电力工业平均供电煤耗为 399g/(kW·h),供电效率为 30.8%。与先进国家相比,供电煤耗高出 60~70g/(kW·h),其主要原因是中小机组所占比例大。不仅如此,国产 200~300MW 燃煤火电机组供电煤耗也偏高,为 370~390g/(kW·h),而进口的同参数机组则为 330~340g/(kW·h),工业发达国家则已降低到 320g/(kW·h)。按此估算,我国火力发电行业每年多消耗燃料煤 3000 万吨以上。此外,全国尚有总容量约 20GW 的中参数老火电机组,其能耗更高。在锅炉效率方面,与发达国家的差距为:燃用优质煤的为 1%~3%,燃用劣质煤和低挥发分煤的则在 5%~10%之间,按此估算,每年又多消耗燃料煤 1000 万吨以上。

2005 年年底,我国 200MW 及以上容量的机组 708 台,合计容量 221.23GW,占大火电机组总装机容量的 57.59%。但是,当年全国火电机组平均单机容量仅为 60.9MW,单机 100MW 及

以下小火电机组 115GW, 占火电总装机容量的 29.4%。2005 年, 全国发电用原煤 11.1 亿吨, 占煤炭消费总量的近 50%。火电机组的容量不同, 反映在煤耗和污染物排放量上差别很大: 大型高效发电机组供电煤耗为 290~340g/(kW·h), 中小机组则为 380~500g/(kW·h)。50MW 机组其供电煤耗约 440g/(kW·h), 发同样的电量, 比大机组多耗煤 30%~50%。2005 年, 小火电机组的二氧化硫和烟尘排放量分别占电力行业总排放量的 35%和 52%。可见, 过高的小火电机组比重是我国电力工业煤耗高、污染重的主要原因。据测算, 现有的小机组若能够完全由大机组替代, 每年可节约 9000 万吨标准煤, 相应减少二氧化硫排放量 220 万吨, 减少二氧化碳排放量 2.2 亿吨, 分别占 2005 年电力工业二氧化硫和二氧化碳排放总量的 16.6%和 10%。

② 缺乏补偿机制。多年来虽然有关部门一直要求关闭有关小机组, 但效果不明显。其主要原因就是各主体间利益调整不到位, 缺乏补偿机制。

③ 部分时间严重缺电。例如, 2003 年浙江省某些地区冬、夏季出现了电力供应每周“开三停四”的紧张局面。

现在缺电情况已经好转, 并且在不远的将来有富足的电能, 如果能够协调好有关利益, 实施好有关补偿机制, 加上燃料涨价等因素使有些小火电厂经营日益困难, 关闭小火电的时机已经基本成熟。

我国已设置的发电能力至 2006 年年底达到 622GW, 到 2007 年底达到 713.29GW, 到 2010 年我国发电能力达到 900GW。新增发电能力的 80%以上来自燃煤发电厂。

综上所述, 电厂锅炉机组的节能应从以下几个方面开展工作。

① 调整电力工业结构, “上大压小”, 加快关停小火电机组。这是“十一五”规划《纲要》明确提出的要求, 对于节能减排具有十分重要的意义。现阶段“上大压小”的含义是, 建设 300MW 机组应关掉合计 240MW 的小机组, 建设 600MW 机组应关掉合计 420MW 的小机组, 建设 1000MW 机组应关掉合计 600MW 的小机组, 也可按等煤量计算。在“十一五”期间, 在大电网覆盖范围内, 需要关停的小燃煤机组、小燃油机组, 包括企业自备电厂机组和趸(dūn, 整批地买进)售电网机组主要是: 单机容量 50MW 级及以下常规火电机组; 运行满 20 年、单机 100MW 级及以下常规火电机组; 按照设计寿命服役期满的单机 200MW 及以下各类机组; 供电标准煤耗高出 2005 年本省(区、市)平均水平 10%或全国平均水平 15%的各类燃煤机组; 未达到环保排放标准的各类机组; 按照有关法律、法规应予关停或国务院有关部门明确要求关停的机组。实现全国关停小燃煤火电机组 50GW 以上, 包括关停燃油机组 7~10GW 的目标, 这部分电力需求通过建设一批大型高效环保机组和清洁能源、可再生能源发电机组来满足。通过关停小火电机组, 实现节约能源 5000 万吨标准煤以上、减少二氧化硫 160 万吨以上的能力。为确保实现这些节能减排目标, 国家发展和改革委员会于 2007 年 1 月 29 日与地方政府和六大电力电网企业签订责任书, 确保在“十一五”期间关停小火电机组 50GW。实际上, 截至 2009 年 6 月 30 日, 全国已经累计关停小火电机组 7467 台, 总容量达到 54GW, 提前一年半完成了这个关停目标。

如果在未来 15 年内能够逐步淘汰 100~200MW 及以下燃煤、燃油机组, 并以高效环保的超临界 600MW 及以上机组作为替代, 全国每年节省的标准煤总量接近 1 亿吨。我国电力工业的能效水平将大为改观。

② 加快节油、节电技术改造。对火电机组进行采用等离子点火、少油点火、小油枪点火、低负荷稳燃等技术改造, 可以大量减少燃料油的投用; 对低效的风机、水泵、大型电机等电厂辅机进行新型技术改造, 可以大量降低厂用电, 减少资源的无效耗用。

③ 超超临界机组设备的国产化研究。玉环、邹县等 1000MW 超超临界机组的投运, 是我国火力发电技术发展中的一个里程碑, 标志着我国燃煤发电机组已进入“超超临界”时代。这对于积累设计、建设、运行、管理经验, 加速设备的国产化, 降低机组造价, 具有非常重要的意义。

④ 单机 600MW 级燃煤循环流化床锅炉机组的技术开发。循环流化床燃烧技术具有煤种适应性好、负荷调节范围广、燃烧烟损失小、SO₂ 和 NO_x 排放低的优点, 开发单机 600MW 级燃煤循环流化床锅炉, 对于我国这种一次能源以煤炭为主的国家的节能减排工作来说, 具有特殊重要的意义。