



普通高等教育“十二五”规划教材

燃烧理论与技术

李永华 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划

燃烧理论与技术

李永华 编
冉景煜 主审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材，根据高等学校热能工程领域人才培养要求进行编写。

本书是在传统燃烧理论的基础上，结合燃煤电站燃烧技术的实际应用情况编写而成的。主要内容分为两大部分：第一部分介绍燃烧基础理论，包括化学动力学、着火、火焰传播、紊流燃烧、液体燃料和固体燃料燃烧及污染生成机理等内容；第二部分介绍燃煤电站所应用的高效低污染燃烧技术，包括燃烧特性研究、稳燃及强化燃烧技术、污染控制技术、燃烧诊断技术和燃烧优化研究等内容。

本书可作为高等学校热能与动力工程专业的本科生和研究生教材，也可作为燃煤电站运行人员的培训教材，还可供从事锅炉设计、制造和运行工作的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

燃烧理论与技术/李永华编. —北京：中国电力出版社，
2011.8

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 2026 - 0

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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011年8月第一版 2011年8月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 18.125印张 443千字

定价 32.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
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

节能减排已经成为我国的基本国策。我国以燃煤发电为主，燃烧理论与技术是燃煤发电机组节能减排的主要依据。作者长期从事燃烧理论与技术的教学工作，本书参考了国内外燃烧领域的理论著作，结合燃煤电站锅炉的实际情况，充分汲取了教学中的经验，在讲义的基础上编写完成。

华北电力大学是我国电力行业进行电站锅炉技术研究和开发的重要基地，也是为电力行业培养高级技术人才的重要基地之一，在煤与生物质的燃烧、燃烧过程数值模拟、锅炉节能技术的开发等方面进行了深入的研究，取得了大量的研究成果；同时本书中很多材料来自于国内外近期的科学研究成果与论文，这些新技术、新成果在本书中都有所体现。

本书的主要特点是：在燃烧理论基础上，展现电站锅炉燃烧的新技术和实用性，突出电站锅炉的节能减排技术；结合燃煤电站锅炉的实际情况，详细介绍了燃烧的基础理论和实用的燃烧技术等。

本书由华北电力大学李永华教授编写。书中大量引用了华北电力大学同事们的研究资料，参考了大量国内外同行发表的相关论著，在此，向他们表示衷心的感谢！

本书由重庆大学冉景煜教授主审。主审老师提出了许多宝贵的意见，在此表示衷心的感谢！

作者长期工作在教学和科研的第一线，对本书的编写尽了很大努力，但由于水平有限，疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

作 者

2011年6月

目 录

前言	
第一章 概述	1
第一节 燃烧科学的发展及其应用.....	1
第二节 我国燃煤发电概况.....	4
第二章 化学热力学与化学动力学	12
第一节 化学热力学	12
第二节 化学反应速率	18
第三节 影响化学反应速率的因素	19
第四节 链反应	23
第三章 燃烧流体力学	26
第一节 燃烧紊流流动的输运方程	26
第二节 直流燃烧器空气动力特性	28
第三节 旋流燃烧器空气动力特性	38
第四章 着火理论	43
第一节 着火机理和着火方式	43
第二节 热自燃理论	44
第三节 强迫着火理论	48
第四节 煤的着火理论	51
第五章 火焰传播与气体燃料燃烧	54
第一节 火焰传播的基本概念	54
第二节 层流火焰传播	55
第三节 紊流火焰传播	61
第四节 气体燃料层流燃烧	66
第五节 气体燃料紊流燃烧	72
第六章 液体燃料燃烧	79
第一节 液体燃料燃烧特性	79
第二节 液体燃料雾化理论	81
第三节 液体燃料扩散燃烧	88
第四节 液体燃料乳化燃烧	95
第五节 微油点火技术	96
第七章 煤的燃烧理论	98
第一节 煤的热解及挥发分的燃烧	98
第二节 碳及焦炭的燃烧.....	106

第八章 燃烧过程污染生成机理 ·····	115
第一节 硫氧化物生成机理·····	115
第二节 氮氧化物生成机理·····	122
第三节 其他污染物生成机理·····	130
第九章 煤粉燃烧特性研究 ·····	139
第一节 煤粉燃烧模化研究·····	139
第二节 煤粉燃烧实验研究·····	149
第三节 混煤燃烧特性研究·····	153
第四节 煤粉燃烧过程数值模拟·····	156
第十章 稳定着火及强化燃烧技术 ·····	168
第一节 钝体回流区稳燃及强化技术·····	168
第二节 高煤粉浓度稳燃技术·····	178
第三节 安全节能燃烧技术·····	190
第十一章 煤粉燃烧污染控制技术 ·····	193
第一节 低氮燃烧技术·····	193
第二节 燃烧过程脱硫技术·····	199
第三节 烟气处理技术·····	210
第四节 CO ₂ 控制技术·····	218
第十二章 燃烧诊断技术 ·····	225
第一节 光学方法·····	225
第二节 声学方法·····	234
第三节 数字图像处理方法·····	238
第十三章 电站锅炉燃烧优化研究 ·····	241
第一节 燃烧优化的发展过程·····	241
第二节 燃烧优化调整试验研究·····	242
第三节 锅炉燃烧优化控制研究·····	249
第四节 基于检测技术的燃烧优化·····	251
第五节 基于设备改造的燃烧优化·····	252
第六节 基于燃烧数值模拟的燃烧优化·····	255
第十四章 燃烧技术的新发展 ·····	262
第一节 脉动燃烧·····	262
第二节 超声速燃烧·····	266
第三节 爆震燃烧·····	269
第四节 电磁场与燃烧·····	274
第五节 催化燃烧·····	275
第六节 微重力燃烧·····	277
第七节 微尺度燃烧·····	280
参考文献 ·····	283

第一章 概 述

第一节 燃烧科学的发展及其应用

一、燃烧科学发展简史

燃烧是物质剧烈氧化而发光、发热的现象，这种现象也称为着火。燃烧也可定义为一种带有剧烈放热化学反应的流动现象。它包括了流动、传热传质、化学反应，以及它们之间的相互作用。固体、液体、气体燃料（煤，非金属如碳、硅、硼，金属如钨、钾、钠、镁、钛、钨，固体推进剂，石油产品，天然气等）的氧化和类氧化反应（氮化、氯化、分解反应，如联氨分解为氮和氢等）中，有基态和激发态的自由基、原子、电子及离子出现，并伴有光辐射现象者，都可以称为“燃烧”。

燃烧的应用及其发展具有悠久的历史。人类发现燃烧现象，用燃烧的方式利用热能已经有数十万年的历史，火是人类最早征服的自然力。早在远古时期，“燧人氏”发明的钻木取火为人类带来温暖和光明，使人类结束了茹毛饮血的原始生活，创造了最初的文明。在周口店的北京人遗址上，已发现用火的痕迹，说明那时候北京人已经知道利用火，当时的燃料都是草木类生物质。因此恩格斯在《自然辩证法》中指出：“只是人类学会了摩擦取火之后，人才第一次使某种无生命的自然力为自己服务。”

燃烧的历史，也就是人类进步的历史。燃烧的应用在古中国遥遥领先于欧洲。50万年前，周口店北京人开始用火；早在新石器时代的仰韶文化时期，中国人便开始用窑炉烧制陶器；公元前1000年开始利用煤，公元200年开始利用石油，公元808年发明火药；宋代则出现了喷气发动机的雏形——用燃烧产物推动的走马灯；战国时期的齐国将军田单曾经用火牛阵破燕，最早把燃烧技术用于军事领域。

欧洲的燃烧技术应用后来居上。17世纪在英国出现了第一次工业革命，其标志就是蒸汽机的产生。20世纪40年代航空航天技术的发展、20世纪70年代的能源危机，促进了燃烧科学的形成与发展。人类对燃烧的长期认识和经验积累，其结果便是推动人类的物质文明不断进步。

人类在利用火的过程中，也开始了对火的认识。人类早期是以神话的方式来表达对燃烧的认识，如古希腊神话中火是从天上偷来的，我国“燧人氏”发明的钻木取火等。但直至17世纪末以前，燃烧科学发展缓慢，人们对燃烧现象的本质几乎一无所知。

17世纪末，德国的施塔尔提出了燃素论，想解释燃烧现象，虽然后来证明这是唯心的，是完全错误的，但这是让燃烧成为一门科学的最早的努力。按照燃素论，一切物质之所以能燃烧，是因为其中含有被称为“燃素”的物质。当燃素释放到空气中时就引起了燃烧，燃素释放程度越强，就越容易产生高热、强光和火焰。物质易燃或不易燃，区别在于其含有燃素的多少。这一理论看似对燃烧现象有了解释，但并没有对燃素的本质是什么，为什么物质燃烧后质量会增加，为什么燃烧会使空气体积减少等问题作出解答。1772年11月1日，法国科学家拉瓦锡发表了关于燃烧的第一篇论文，其要点是燃烧所引起的质量增加，是由于可燃

物质同空气中的一部分物质化合的结果，认为燃烧是一种化合现象。当时拉瓦锡还没有完全研究清楚空气中这部分物质是什么物质。1774年，普里斯特利发现了氧，并且与拉瓦锡有了接触。1777年，拉瓦锡在实验中证明，这种物质在空气中的比例为 $1/5$ ，并命名这一物质为“氧”（原意为酸之源）。这样，拉瓦锡就建立了燃烧的基本学说，即燃烧是物质的氧化。这也是燃烧理论的萌芽。

19世纪，由于热力学和热化学的发展，燃烧过程开始被作为热力学平衡体系来研究，考察其初态和终态。这是燃烧理论的静态特性研究，阐明了燃烧过程的热力学特性，如燃烧反应热、绝热燃烧温度、着火温度、燃烧产物平衡组分等。20世纪30年代，美国化学家刘易斯和苏联化学家谢苗诺夫等人将化学动力学的机理引入燃烧的研究，形成了燃烧的动态理论，提出了火焰传播的概念。20世纪40~50年代，在发展喷气推进技术的过程中，形成了独立的学科——燃烧学。

第二次世界大战以后，燃烧理论的研究与应用主要沿着两个不同的方向发展。一个方向是研究在严格控制的反应条件下强化燃烧，主要为发展火箭和太空技术服务，美国、苏联、英国、法国，以及我国在这方面取得了巨大的研究成果。另一个方向是围绕常规燃烧方式，为提高燃烧效率、降低污染进行的研究，如电站锅炉的燃烧技术的开发。在常规燃烧技术方面，从20世纪40年代后期开始，在大约30年的时间内，主要在英国两个国立研究院——英国煤炭利用研究院（BCURA）和英国钢铁研究院（BISRA），以及美国一些研究机构和公司的参与下得到了迅速的发展，建立了这一领域的理论骨架，取得了重要的研究成果。现阶段，随着我国电力事业的飞速发展，电站锅炉燃烧技术的研究中心已转移到中国。

20世纪50~60年代，美籍德国人宇航学家冯·卡门和我国力学家钱学森提出用连续介质力学来研究燃烧过程，建立了化学流体力学或称为反应流体力学。20世纪70年代初，大型电子计算机出现，英国帝国理工学院教授斯帕尔丁等人建立了燃烧的数学模拟方法和数值计算方法，形成了计算燃烧学。近30年来，英、美、法、德、苏、波、日等国，以及我国相继开展了燃烧过程数值模拟的研究工作，开发了大量的商用计算机软件，能够对大型电站锅炉、燃气轮机燃烧室、内燃机、火箭发动机、弹膛等装置中的三维、非定常、多相、紊流、有化学反应的实际燃烧过程进行数值模拟，给出热物理参数的分布及其变化，预测装置的燃烧性能及污染排放水平。

燃烧在促进人类文明进步的同时，其燃烧产物的污染和火灾的发生，也给人类带来了极大的伤害。现在燃烧科学的发展，也伴随着污染控制技术和火灾防止技术的发展。污染控制技术主要是低氮燃烧技术、燃烧脱硫技术和低碳技术。

现在，随着激光测量技术等精密测量技术的发展，可以对燃烧过程进行精密测量，更深入全面地研究燃烧过程和机理，使燃烧学在深度和广度上都有了飞速发展。

针对电站锅炉，如何高效低污染地控制燃烧过程，是燃烧科学的重要研究方向。

二、燃烧科学的研究与应用

现代社会的动力来源，主要来自于化石燃料的燃烧，其应用遍及各个领域，如火力发电厂的锅炉、工业用蒸汽、各种交通工具的发动机等，都是以固体、液体和气体燃料的燃烧产生的热能作为动力的。

现代燃烧技术涉及的范围很广。在各种能源动力、工业锅炉、航空发动机、航天火箭发动机等方面，燃烧技术的发展日新月异。现代燃烧技术的发展又促进了燃烧科学与燃烧数值

模拟理论的进一步发展。

世界上化石燃料中煤占主要部分,煤的燃烧理论与技术研究受到燃烧学界的广泛关注。煤的层燃、煤粉制备、煤粉燃烧,以及循环流化床燃烧技术都在不断改进,煤粉燃烧数值模拟也得到很大的发展。在工程技术中广泛应用的各种钢铁冶金炉、有色金属冶金炉、轧钢加热炉、铸造用炉、热处理炉、化工炉、建材工业炉,以及废弃物焚烧炉等,其燃烧技术千变万化。交通领域和各种工程中使用的内燃机,也在不断进行高效低污染改进。航空及发电应用的燃气轮机经历了一代又一代的更替,航天领域也开发了各种液体和固体推进剂的发动机。

火在促进人类文明进步的同时,也给人类带来了灾难。世界上每年都要发生各种情况的火灾,例如森林火灾、建筑物火灾、各种工业火灾和爆炸等,造成了无法估量的生命和财产损失。预防和减少火灾,给燃烧科学研究者提出了新的要求。例如要研究火焰沿各种材料的传播规律、爆燃、多孔介质中的燃烧等。除了研究火灾的起因、火灾的发展规律外,还要研究火势的控制、阻燃原理和阻燃材料、火灾探测和高效灭火技术、火灾的烟气控制技术等。

此外,燃烧对环境产生了污染。燃烧过程的产物 SO_x 、 NO_x 、 CO 、残余烃类、重金属、有毒物质、烟尘粒子等有害物质,以及燃烧噪声,严重危害人类健康, CO_2 对环境的影响日益严重。因此,研究清洁燃烧技术,控制污染排放,成为目前全世界的中心课题。这就要求研究燃烧过程中污染物的生成及控制技术,如脱硫、脱硝以及 CO_2 的治理技术,另外还需要研究垃圾物的高效低污染燃烧技术。

目前,燃烧科学正从一门传统的经验科学成为一门系统的,涉及热力学、流体力学、物理学、化学动力学、传热传质学的,以数学为基础的综合理论学科。重点在于研究燃料和氧化剂进行激烈化学反应的发热发光的物理化学过程及其组织。

燃烧科学的研究可分为两个方面。一方面是燃烧理论方面的研究,主要以燃烧过程涉及的基本过程为研究对象,如燃烧反应的动力学机理,燃料的着火、灭火,火焰传播及稳定,层流和紊流燃烧,预混火焰和扩散火焰燃烧,催化燃烧,液滴燃烧,碳粒燃烧,煤的热解和燃烧,燃烧产物的生成和控制等。

另一方面是燃烧技术研究,主要是应用燃烧理论的研究结果来解决工程技术中的各种实际问题。如燃烧技术的改进,燃烧过程的组织,新的燃烧方法的建立,提高燃烧效率,降低污染排放,拓宽燃料利用范围,燃烧过程的控制等。

由于燃烧过程的复杂性,使燃烧科学的研究方法具有多样性。总体来说,燃烧科学发展的最重要形式是理论的更替,而理论的更替正是科学实践的结果。与一般科学的研究方法一样,燃烧科学的研究是实验研究和理论总结的结合。实验研究、先进测量技术应用、燃烧理论总结,这是目前燃烧科学研究的基本方法。燃烧科学的研究,虽以实验研究为主,但理论和数学模型方法显得越来越重要。

随着科技的进步,燃烧科学也要不断发展。当代社会对燃烧科学提出了更高的要求。

首先是航空航天技术要求燃烧不断强化和趋于更高的能量水平,这就是高能或高温、高压(超临界)、高速(超声速)、强旋流、强紊流和脉动(脉冲爆震)等条件下的燃烧。近年来受到国际上很大重视的超声速燃烧和脉冲爆震燃烧就是这种趋势的反映。

其次是解决能源利用领域的问题,要求高效率,节省燃料,以及燃料替代问题。例如烧汽油的发动机改烧乙醇汽油、天然气等,烧轻油的航空发动机改烧重质燃料,烧油的锅炉改

烧水煤浆等，烧优质煤的锅炉改烧劣质煤等。

另外，燃烧的污染控制越来越重要，如何实现燃煤电站锅炉的污染“零”排放，是今后的研究重点。

随着航天技术和信息技术的发展，研究微重力和微尺度条件下的燃烧，成为国际上燃烧技术研究的新课题。电磁场下的燃烧一直引起很多研究者的关注。

21世纪国际研究热点是3个“O”，即信息科学（INFO）、生物科学（BIO）和纳米科学（NANO）。因此未来燃烧科学的研究应该和这些科学结合起来。例如生物燃烧学，利用燃烧规律研究生命现象，探讨生命起源、疾病的起因与防治；纳米尺度下的燃烧，涉及纳米材料制备等。这些问题有待于进一步研究。

燃烧科学的应用及其广泛，涉及人类生活、工业生产、国防等各个领域。因此，需要培养出一批有志于为燃烧科学的发展和燃烧技术的应用做出持续努力的科学家和工程技术人员。

第二节 我国燃煤发电概况

一、能源结构

在已知各种能源资源中，煤炭资源最为丰富。根据第15届世界能源会议提供的资料，俄罗斯、美国以及我国是世界三大煤炭国家，它们占世界总量的57.4%。按1994年全世界煤炭消耗量44.67亿t计算，煤炭可开采的年限为233年，而我国仅为92年。事实上，我国的煤储藏量被低估了。截至2007年底，全国煤炭保有探明资源储量为11800亿t，可开采200年以上。在消费高速增长的带动下，全球煤炭产量也呈逐年递增趋势，2007年全球煤炭生产总量已经由1997年的2295.8百万吨油当量跃升为3135.6百万吨油当量，其中我国煤炭产量为1289.6万吨油当量，占全球煤炭产量的比例为41.1%，位居第一。2007年我国各行业煤炭消费量达258641.4万t，如表1-1所示。2010年我国煤炭产量为32亿t，进口煤炭1.5亿t。

表 1-1

1990~2007年我国主要年份分行业煤炭消费量

单位：万 t

行 业	1990年	1995年	2000年	2005年	2006年	2007年
农、林、牧、渔、水利业	2095.2	1856.7	1647.7	2315.2	2309.6	2337.8
工业	81090.9	117570.7	119300.7	202609.1	225539.4	245272.5
建筑业	437.6	439.8	536.8	603.6	582.0	565.3
交通运输、仓储、邮政业	2160.9	1315.1	1132.2	815.3	724.8	685.5
批发、零售业、住宿、餐饮业	1058.3	977.4	814.6	874.4	891.5	868.3
其他行业	1980.4	1986.7	661.0	765.9	782.9	811.4
生活消费	16699.7	13530.1	7907.2	8739.0	8386.3	8100.6
消费量合计	105523.0	137676.5	132000.0	216722.5	239216.5	258641.4

我国煤炭资源丰富，储量仅次于美国和俄罗斯，2010年全国新增煤炭储量430.6亿t。我国煤炭储量约占世界总储量的13.5%。相比之下，我国的石油和天然气的储量仅分别占世界总储量的1.3%和1.1%。“富煤贫油”的资源禀赋决定了我国的能源消费结构以煤炭为

主。2007年世界一次能源消费构成中，煤炭占28.5%，石油占35.5%，天然气占23.7%，核电、水电、风电占12.4%。反观我国的一次能源消费构成，煤炭则占76.6%，石油占11.3%，天然气占3.9%，核电、水电、风电占8.2%，相比之下，石油、天然气在我国能源消费中所占比例较低。2007年世界和我国能源消费结构对比如图1-1所示。到2020年，煤炭在我国一次能源消费结构中仍将占到60%左右。

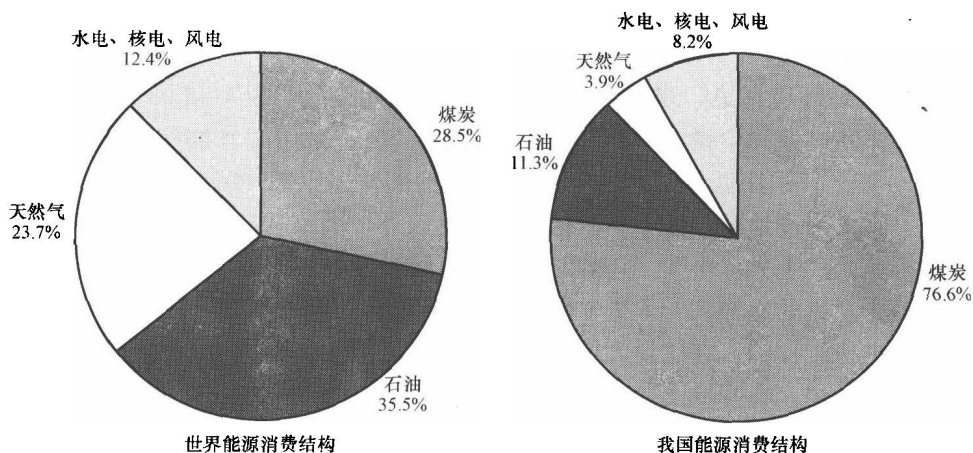


图 1-1 2007 年世界和我国能源消费结构对比

电是最重要的二次能源，现代生活已经离不开电。现在主要的发电方式有火力发电、水力发电、核能发电、新能源发电（太阳能、风能、生物质能、海洋能、小水电等）。截至2010年12月，全国电力装机容量为9.6219亿kW，同比增长10.1%。其中火电7.0663亿kW，占73.4%；水电2.134亿kW，占22.2%；风电3107万kW；核电1082万kW。2010年全国发电量42280.15亿kW·h，同比增长13.8%。其中火电占80.76%，水电占16.23%，核电占1.82%，风电占1.18%。供电煤耗335g/kW·h，同比下降7g/kW·h。电网输电线损6.49%，同比降低0.91%。由于经济的增长，2011年1~2月的发电量同比增长11.7%，火电发电量同比增长9.1%，水电增长32.9%。从这些数据看出，我国的发电是以燃煤发电为主的。

在世界上，以2005年为例，全世界总发电量18.18万亿kW·h，其中美国4万亿kW·h，我国2.47万亿kW·h，日本1.1万亿kW·h，俄罗斯9520亿kW·h，印度6000亿kW·h。2005年在装机容量方面，美国9.8亿kW（51%为燃煤发电），日本2.6亿kW。预计到2020年，美国装机为11亿kW，我国装机可达16亿kW。我国煤电比例为80%，印度为78%，美国、德国为51%。供电煤耗方面，日本290g/kW·h，韩国300g/kW·h，意大利303g/kW·h，美国360g/kW·h，澳大利亚370g/kW·h。

尽管燃煤会产生污染，但我国主要依靠燃煤发电，是由我国的基本国情决定的。我国的能源储备特征是“富煤贫油少气”，这就决定了煤炭是我们的主要一次能源。现在，我国已进入了“重化工业主导型”经济发展阶段，经济的发展决定了能源需求的同步增长，这就决定了在较长时期内煤炭在我国一次能源消费结构中占主导地位的格局将长期保持不变。经济要发展，电力也要发展，一般电力弹性系数大于1，也就是经济增长10%，电力增长要大于10%。按照现在的规模，电力增长10%，就需要增加装机容量约9000万kW，相当于每年

投产 5 座三峡电站, 或 50 座大亚湾核电站, 这个容量只依靠水电、核电等是很难实现的。水电资源分布不均, 且受季节影响很大, 丰水期和枯水期的发电量差别很大, 建设周期很长; 太阳能、风能的不确定性, 对电网影响很大; 生物质能比较分散, 难以大型化; 核电建设周期长, 一般为 5~7 年, 我国的核电技术还需要发展, 核燃料不足, 核废料处理也是难题。相比较下, 燃煤发电机组投资少, 目前为 4000 元/kW (水电为 7000 元/kW, 生物质发电为 7000 元/kW, 风电为 6500 元/kW, 核电约 10 000 元/kW, 太阳能为 75 000 元/kW), 建设周期短 (在 2 年以内)。因此, 我国现阶段的基本国情, 决定了现在要以燃煤发电为主。

煤电的缺点是环境污染, 煤燃烧会产生灰渣固体污染物、 SO_2 和 NO_x 等气体污染物。现代燃煤电站采用高效除尘设备, 除尘效率可达 99.9%; 采用湿法烟气脱硫技术, 脱硫效率可达 95%~99%; 采用低 NO_x 燃烧技术和选择性催化还原烟气脱硝技术, 脱硝效率可达 90%~95%, 最大限度地减少污染物的排放。除此以外, 国家制订了电力工业节能减排发展规划, 主要措施是“上大压小”、节能调度。《国务院批转发展改革委、能源办关于加快关停小火电机组若干意见的通知》(国发〔2007〕2 号) 指出了“上大压小”是指将新建电源项目与关停小火电机组挂钩, 在建设大容量、高参数、低消耗、少排放机组的同时, 相对应关停一部分小火电机组。在降低能耗方面, 单机容量为 100 万 kW 的超超临界机组的供电煤耗约为 270~290g/kW·h, 比 60 万 kW 超临界机组能耗下降 15.3%, 比 30 万 kW 机组能耗下降 18.7%。60 万 kW 的超超临界机组的设计供电煤耗达到 290g/kW·h 以上, 接近单机 100 万 kW 的机组。建设大容量高参数机组, 是节能减排的措施之一。2008 年《节能发电调度办法》已在广东、贵州、四川、江苏、河南等省试点。实行节能发电调度, 使高效、节能、环保机组的优越性能够体现出来, 将使高能耗、高污染的小火电机组逐渐被淘汰出局。随着技术的进步, 燃煤发电的污染将会越来越小, 逐渐实现污染接近“零”排放。由于燃煤机组脱硫装置的大力建设, 我国 SO_2 排放自 2007 年以来持续下降, 到 2009 年已经提前一年实现了“十一五”减排 10% 的目标。

我国火电是“北煤南运”和“负荷中心发电”的产业格局。大体量、大跨度、超负荷的电煤运输, 一旦遭遇自然灾害等不可控因素, 电煤供给就会失去保障, 电力供应体系就会变得十分脆弱。另外, 我国 1993 年进行煤炭价格部分市场化改革, 国家为了确保电价稳定, 设定了国有大型电厂的电煤价格, 从而形成了“计划煤”与“市场煤”之间的价格双轨制, 这也造成了多年来的煤电矛盾。2003 年电力体制改革, 厂网分开后, 国家逐渐放开了发电用煤价格。2006 年, 国家又取消了对重点电煤合同的政府指导价, 让电煤价格完全由市场调节。随着煤炭价格的上涨, 煤炭企业与电力企业的矛盾愈演愈烈。国家有关部门制定了多种措施, 解决煤电矛盾。

(1) 大力建设特高压输电线路, 实现空中输煤, 缓解电煤运输矛盾, 同时可以降低线损; 建设铁路客运专线, 现有的铁路可以增大电煤运输能力。

(2) 实行煤电联动, 电价上调以抵消电力企业的亏损; 增大进口煤量, 平抑国内煤价。2005 年开始实行的煤电联动政策规定, 以不少于 6 个月为一个煤电价格联动周期, 若周期内平均煤价较前一个周期变化幅度达到或超过 5%, 便将相应调整电价。但作为上游重要能源的电力, 其价格一旦上调极有可能导致生产成本提高, 加剧通货膨胀, 因此煤电联动政策的实施受到经济发展的限制。

(3) 煤电联营或煤电一体化措施, 可以缓解煤电矛盾。电力企业兼并重组煤矿, 实现煤

电一体化经营；煤炭企业建设坑口电站，实现煤电一体化。

(4) 电力企业节能减排，以技术进步来降低煤炭的消耗。“十一五”期间，通过各项措施，火电企业的效率不断提高，供电煤耗从2006年的 $367\text{g}/\text{kW}\cdot\text{h}$ 降低到2010年的 $335\text{g}/\text{kW}\cdot\text{h}$ ，相当于2010年节约了1.4亿t标煤。电网输电线损由2006年的6.87%降为2010年的6.49%，相当于2009年再节约了600万t标煤。

因此，我国现阶段电力发展的方向是：以大型高效机组为重点优化发展煤电，在保护生态基础上有序开发水电，积极发展核电，加快发展风能、太阳能、生物质能等可再生能源发电。在相当长的一段时间里，在环境保护的前提下，大力发展高效低污染的燃煤发电机组，这就是有中国特色的燃煤发电发展之路。

二、煤粉的高效燃烧

2010年我国煤炭产量为32亿t，燃煤电站消耗煤炭16亿t。虽然我国的煤炭等资源消耗量很大，但由于人口多，我国的人均能源消耗量仍然很小，只占世界平均人均能源消费水平的1/3。加上我国的能源利用率低，我国仍然是能源匮乏国，对外依存度很高。

和发达国家相比，我国的能源利用水平仍然非常落后。我国的能源利用率仅为33%左右，而欧盟为40%，美国为51%，日本高达75%。也就是说，我们浪费了能源产量的一半。

能源利用率低的原因是多方面的。例如，我国的主要工业产品能量单耗比国外高40%，单位产值能耗是发达国家的3~4倍。其中冶金吨钢耗标准煤1000kg，比国外先进水平高300~400kg；化肥吨合成氨耗标准煤1300kg，比国外高出一倍；工业锅炉和窑炉比国外先进水平多耗煤20%；还有每生产1美元产值的能耗，我国比印度高1.65倍，比美国高2.16倍，比巴西高3.82倍，比法国高4.98倍。

在锅炉效率和发电效率方面，我国也存在较大的差距。例如，我国现有40多万台燃煤工业锅炉，其平均热效率不超过60%，消耗每年煤产量的1/3。13万多台燃煤工业窑炉的平均热效率仅20%~30%，每年消耗15%的煤产量。民用炉灶的热效率更低。电站锅炉的平均热效率可达90%以上，但电力标准煤耗约为 $335\text{g}/\text{kW}\cdot\text{h}$ ，比国外先进水平高30~40g。

我国在用电方面的浪费也比较严重。据世界银行最新统计，发展中国家使用的电力比其应该消耗的电力多20%，也就是说，无论是生产用电还是生活用电的浪费都是非常严重的，节约用电迫在眉睫。例如，上海曾经对有关单位进行调查，仅风机水泵两项年耗电量就占整个工业用电的40%，经对这些设备进行改造，年节电11.3%；电动机是一种量大面广的设备，采用变频调速、设备匹配和节电器等先进技术后，可节电15%~30%；至于新型的节能照明光源，光效高、寿命长，与白炽灯相比可节电80%。可见节电是十分有成效的。

以上情况表明，我国虽是能源大国，但人均消费量不高，且能源利用率低，浪费很大，节能的潜力也很大。节能减排已经成为我国的基本国策。经过不断努力，我国的能源节约效果显著。1980~2005年，我国能源消费以年均5.6%的增长支撑了国民经济年均9.8%的增长。按2005年不变价格计算，万元国内生产总值能源消耗由1980年的3.39t标准煤下降到2005年的1.22t标准煤，年均节能率3.9%，扭转了近年来单位国内生产总值能源消耗上升的势头。能源加工、转换、储运和终端利用综合效率为33%，比1980年提高了8个百分点。单位产品能耗明显下降，其中钢、水泥、大型合成氨等产品的综合能耗及供电煤耗与国际先进水平的差距不断缩小。

在取得以上成绩的情况下,2005年,国家“十一五”规划提出了到2010年,单位GDP能耗要比2005年降低20%左右,主要污染物排放总量减少10%左右的约束性指标。2009年11月,国务院常务会议提出2020年,单位GDP的CO₂排放比2005年下降40%~45%,并作为约束性指标纳入国民经济和社会发展中长期规划。据国务院办公厅2009年7月公布的数据显示,经过近3年的艰苦努力,到2008年底,单位GDP的能耗比2005年下降了10.01%,化学需氧量(水体污染的主要指标)的排放量比2005年下降了6.61%,SO₂的排放总量下降了8.95%。全国主要污染物的减排已基本实现时间过半、完成任务过半,节能减排取得了重大进展。

为推进节能减排工作,有数据显示,在2006~2008年的3年,全国共淘汰小火电机组3421万kW,落后炼铁产能6059万t、炼钢产能4347万t、水泥产能1.4亿t,大量减少了温室气体排放。2009年与2005年相比,电力行业300MW以上火电机组占火电装机容量的比重由47%上升到了69%;钢铁行业1千m³以上大型高炉的比重由21%上升到了34%;电解铝行业大型机配产量的比重由80%上升到了90%;建材行业新型材料比重由56.4%上升到了72.2%。

重点行业主要产品单位能耗均有较大幅度的下降。2009年与2005年相比,火电的供电能耗下降了8.11%,即由2005年的370g下降到了340g;生产每吨钢综合能耗下降了11.4%,即每吨钢消耗的标准煤由694kg下降到了615kg;水泥综合能耗下降了16.77%,乙烯综合能耗下降了16.77%,合成氨综合能耗下降了7.96%,电解铝综合能耗下降了10.06%。根据环保重点城市空气质量检测,2009年,好于二级标准292天以上城市的比例由2005年的69.4%上升到了95.6%。

“十一五”前4年通过节能提高能效,少消耗了4.9亿t的标准煤,减少CO₂排放11.3亿t,赢得了国际社会的广泛赞誉,也树立了我国负责任大国的形象。这些成效的取得是在经济增速大幅度超出预期和应对国际金融危机的情况下取得的,成绩来之不易。“十一五”的前4年,全国单位GDP能耗累计下降了15.61%,主要污染物排放总量减少10%以上。到2010年底,完成了“十一五”的节能减排指标。2006~2010年,我国能源消费总量从24.6亿t标煤增长到32.5亿t标煤,年均增长7.2%,而我国国民经济年均增速为11.2%。

同时,我国还大力发展新能源,2010年太阳能光伏发电达到24万kW,太阳能利用面积为2.6亿m²,居世界第一位;水电和风电装机容量分居世界第一、第四位,核电装机容量提高到1082万kW,在建2000万kW。2010年9月20日,我国电力装机9亿kW标志性机组——岭澳核电站二期工程一号108万kW压水堆核电机组投入商业运行。

到2010年底,我国农村沼气年产量达130多亿m³,减少CO₂排放5000多万t,替代1800万t标煤,生产有机沼肥近4亿t,每年为农民增收节支400多亿元。按照国家规划,到2020年沼气生产能力将达到440亿m³。

此外,我国已成为世界上人工造林最多的国家,森林覆盖率由1980年代初期的12%提高到目前的18.2%。

为了进一步推动节能减排工作,国家制订了“十二五”规划,提出中国非化石能源占一次能源消费比重提高到11.4%,单位GDP能耗和CO₂排放分别降低16%和17%,主要污染物排放总量减少8%~10%,森林蓄积量增加6亿m³,森林覆盖率提高到21.66%。《电

力工业“十二五”规划研究报告》中也提出通过发展非化石能源、降低供电煤耗和线损等途径,与2010年相比,2015年电力工业每年应节约标煤2.64亿t,减排CO₂6.55亿t,减排SO₂565万t,减排NO_x248万t;与2015年相比,2020年电力工业每年应节约标煤2.73亿t,减排CO₂6.76亿t,减排SO₂584万t,减排NO_x256万t。为实现2020年我国非化石能源在一次能源消费中比重达到15%左右和单位GDP CO₂排放量比2005年下降40%~45%的目标作出应有贡献。

从电站锅炉的角度来看,节能减排主要体现为实现煤粉的高效燃烧,因此,提高煤粉的燃烧效率是相当重要的。

煤粉的高效燃烧往往与火焰稳定紧密联系在一起。因为煤粉燃烧时不发生事故就是最大的节约。在煤粉的高效燃烧和火焰稳定方面,国内外近年来进行了较深入的研究并获得较多的成果,这些成果可归纳为以下三个方面。

1. 强化煤粉气流的传热传质

据试验分析和计算,煤粉颗粒以高温烟气回流加热方式,从初始温度加热至着火的时间比辐射加热方式快23倍,而且煤粉越细加热的时间越短,着火和燃烧的时间越快,可以达到高效燃烧和火焰稳定的目的。

从燃烧器的特点看,旋流燃烧器的着火性能要好于直流燃烧器。其原因是旋流燃烧器的气流结构有回流区,强化了煤粉气流的热量和质量交换,有利于煤粉的着火和燃烧。因此,采用一定措施使直流燃烧器的气流也产生回流区,是强化燃烧的主要原理。具体的技术措施如钝体燃烧器、火焰稳定船型燃烧器、大速差射流燃烧器等,就是该原理的应用。

回流区稳定强化燃烧,经过大量的实践验证,效果明显。但在强化燃烧的同时,也为NO_x的生成提供了条件。因此,现代锅炉已很少单独采用回流技术,而是和低NO_x燃烧技术结合使用,以达到高效低污染的目的。

2. 强化煤粉的高浓度聚集

大量试验研究和计算结果表明,如果对煤粉气流进行适当的浓缩,在高浓度煤粉集聚区域内,将产生以下的效果:煤粉的着火温度降低250~300℃(烟煤)或400~450℃(无烟煤),着火时间缩短1/2,火焰温度提高300~350℃,着火距离缩短100~400mm,火焰传播速度加快,煤粉气流的着火热减少55%,NO_x的排放量直线下降。适当的煤粉浓缩使煤粉较快地着火燃烧且火焰稳定,达到了高效燃烧的目的。实现煤粉浓缩的具体技术如下:

(1) 弯管离心流使煤粉浓缩。如日本的PM和PAX燃烧器,美国的WR燃烧器,我国的水平浓淡燃烧器等。

(2) 旋风分离使煤粉浓缩。如W型火焰锅炉旋风分离器,四角布置旋风子水平浓缩燃烧器等。

(3) 叶片惯性流使煤粉浓缩。如叶片连续可调燃烧器,平面叶栅或圆形百叶窗燃烧器和管内旋流子分离浓缩等。

(4) 非对称体撞击使煤粉浓缩。如在弯管或直管内加入撞击块(导向块),以及使用分隔板维持浓淡分离的燃烧器等。

3. 强化燃烧的初始阶段

煤粉高效燃烧和火焰稳定的关键是燃烧的初始阶段。有研究表明,当煤粉刚喷入炉内0.15s时,挥发分析出已超过80%,固定碳烧掉60%;在0.2s时,煤粉已烧去80%,而剩

下的 20% 的煤需要 4 倍时间才能烧完。也就是说, 如果煤粉在炉内逗留时间为 1s, 那么燃烧的初始阶段用 20% 的时间烧去煤粉的 80%, 而剩下的 80% 时间只烧掉煤粉的 20%, 可见强化燃烧过程的初始阶段是至关重要的。具体的技术措施如下:

(1) 有限空间内使煤粉快速加热甚至着火。如旋流或直流预燃室、稳燃腔燃烧器等。少油点火技术也是预燃室的应用。

(2) 强化火焰根部的热量交换和质量交换。如大速度差等组合射流、波纹形钝体、船形体和犁形驻涡燃烧器等。

(3) 强化气固两相流扰动。如扁平射流、交叉射流、逆向射流燃烧器, 加强火焰根部的扰动。

以上为对于电站锅炉煤粉燃烧稳定和强化的“三强原理”, 即强化煤粉气流的传热传质、强化煤粉燃烧的初始阶段和强化煤粉高浓度的聚集。

三、煤粉的低污染燃烧

煤中的有害物质在燃烧过程中会散发出来。煤燃烧产生的污染物有固体灰颗粒、烟气、重金属及噪声等。灰颗粒主要采用高效除尘技术进行处理, 目前主要研究气体污染物的生成机理, 开发相应的污染控制技术。气体污染物主要是 SO_x 、 NO_x , CO_2 和重金属的控制还处于研究阶段。

SO_x 是由煤中可燃硫(元素分析硫)燃烧生成的, 主要成分是 SO_2 。可燃硫易燃, 活化能约 20~100kJ/mol, 和煤的活化能差不多。在碳完全燃烧的条件下, 硫也就完全燃烧了, 燃烧反应机理较简单。因此在燃烧过程中, 没有方法不让 SO_2 产生。其控制的措施主要是燃烧前脱硫和燃烧后脱硫。虽然循环流化床锅炉炉内脱硫称为燃烧脱硫, 但其实质是在燃烧过程中用 CaO 吸收固定烟气中的 SO_2 , 而不是减少硫的燃烧份额而不让其产生 SO_2 。在碳能完全燃烧的前提下, 改变燃烧条件, 不能减少 SO_x , 以及灰、 CO_2 、重金属等污染物的生成量。

NO_x 的生成和燃烧条件关系很大, 不同的燃烧参数, 其生成量会发生变化。因此, 改变燃烧条件, 可以降低 NO_x 的形成。 NO_x 是煤燃烧中唯一可以通过改进燃烧技术而减少的污染物。要控制 NO_x 的排放, 要从其生成机理入手。

从燃烧原理出发, 根据 NO_x 生成机理, 控制 NO_x 生成的理论依据是降低火焰温度, 降低燃烧区域氧浓度。根据这个原理, 各研究机构开发了大量的低 NO_x 燃烧技术, 总结起来可以分成 3 类, 即改进燃烧运行参数、燃烧空气分级技术和燃料分级再燃还原技术。

四、煤粉燃烧的新发展

煤粉燃烧目前存在的问题仍然是低效高污染。尽管采用了各种新技术, 如回流技术、浓淡燃烧技术等, 其结果仍不能令人满意。不断寻求高效低污染燃烧技术, 是今后的研究重点。

1. 催化燃烧

催化是当代化学中的重要分支学科之一, 金属的和非金属的催化剂能够加速煤的化学反应速度, 有些工业废弃物也能起到催化剂的作用, 使煤粉火焰稳定并提高燃烧效率。催化的优点是降低了反应的活化能, 促进挥发分的气相着火和焦炭的固相着火, 提高扩散燃烧速度。

2. 脉动燃烧

这项技术始于 20 世纪初，首先成功地用于导弹上，后来用于加热、采暖，20 世纪 80 年代用于块煤，使燃烧效率高达 98.5%，而且 CO 和 NO_x 大幅度降低。最近用于研究煤粉燃烧，已建立起较好的煤粉燃烧的物理模型和数学模型。实践证明，脉动燃烧会大大降低飞灰含碳量，气流振荡时紊流强度大大增强，使传热过程增强，受热面除灰更干净，但主要问题是噪声和振动严重。

3. 高温燃烧

一般预热空气温度为 300~450℃，最近提出高达 1267℃ 的预热空气温度燃烧。该技术的优点是火焰稳定，燃烧效率提高，NO_x 排放降低，目前已有大量气体和液体燃料的试验结果，可以探索用于煤粉的高效低污染燃烧。

4. CO₂ 循环燃烧

CO₂ 是一种温室气体，它对大气环境和全球变暖有相当大的影响。为了减少 CO₂ 的污染，可从烟气中进行分离，但分离设备复杂，成本高。目前的发展趋势是，先将空气中的 N₂ 分离得到高浓度的 O₂，再和锅炉尾部再循环烟气（约 95% 的 CO₂）混合后作为一次风携带煤粉送入炉膛，还有大部分 O₂ 与其余的 CO₂ 混合后作为二次风使燃料继续燃尽，这就是 O₂/CO₂ 和煤粉的再循环燃烧。实验证明，在 O₂/CO₂ 的环境下，NO_x 的生成量由于 N₂ 的炉前分离而大大减少；在液化处理以 CO₂ 为主的烟气时，SO₂ 同时也被液化回收。这种循环燃烧方式具有向大气零排放的最大特点。

5. 煤和生物质混烧

欧盟国家和日本等国近年来研究了煤和稻草、木材加工废料等生物质的混烧，探索降低 SO_x、NO_x 等污染的途径。我国也在大力发展该技术。

随着技术的进步，煤粉的零污染排放技术会逐步开发并广泛应用，使能源利用领域出现新的革命。