

电站锅炉配煤掺烧 及经济运行

陈刚 方庆艳 张成 夏季 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电站锅炉配煤掺烧 及经济运行

陈刚 方庆艳 张成 夏季 著



中国电力出版社

CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 简 介

配煤掺烧是解决电厂燃煤供应紧张,煤种复杂多变,运行安全性、经济性和环保性欠佳的行之有效的办法。国内外在混煤燃烧方面已经开展了众多的基础研究。近年来,以工程应用为目的的配煤掺烧技术研发引起关注,相关技术也得到了应用。本书介绍了燃煤电厂配煤掺烧和燃料管理方法,系统研究了混煤掺烧对电站锅炉流动、燃烧、传热和 NO_x 排放特性的影响,给出了不同煤种和炉型配煤掺烧的优化原则,建立了多煤种配煤掺烧优化智能模型,开发了火电机组配煤掺烧全过程优化系统并成功应用,通过这些系统的应用,火电机组可安全和经济燃用混煤,降低污染物的排放,并取得了良好的经济效益。

本书可作为热能工程及相关专业的教师、研究生和本科生的教学和参考用书,也可供能源、煤炭、电力、环保等行业的科研工程技术和管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电站锅炉配煤掺烧及经济运行/陈刚等著. —北京:中国电力出版社,2013.12

ISBN 978-7-5123-5420-3

I. ①电… II. ①陈… III. ①火电厂—锅炉—配煤(炼焦)—掺烧—研究 IV. ①TM621.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第318751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>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

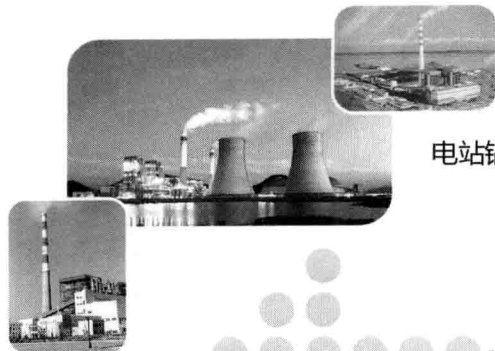
*

2013年12月第一版 2013年12月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 18.5印张 447千字 8彩页
印数0001—3000册 定价48.00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



电站锅炉配煤掺烧及经济运行

前言

我国的能源结构决定了电力生产以煤为主的格局在较长时间内不会改变。提高燃煤发电机组效率和煤炭资源利用率、改善环境质量，是发电行业技术进步的永恒主题。截止到2011年底，我国发电装机容量达到10.56亿kW，其中燃煤发电装机容量达7.66亿kW，占装机总容量的72.5%。预计到2020年，发电装机总容量将达到15亿kW，燃煤发电装机容量仍将占到65%以上。燃煤发电装机容量的增加使碳排放总量不断增加，粉尘、二氧化硫、氮氧化物等污染物的排放量也将有较大幅度的增长。

近年来，由于煤炭生产和调运的问题，加上季节性影响等因素，电煤供需矛盾较为突出，曾导致周期性“煤荒”的出现。这使众多燃煤火电厂煤质偏离设计煤质且不稳定，导致机组发电效率偏低、煤耗偏高、污染物排放超标等，影响了机组运行的安全性和经济性。

配煤掺烧是解决火电厂燃煤供应紧张、煤种复杂多变、运行性能欠佳的行之有效的办法。配煤掺烧通过煤质互补实现了燃料的优化，稳定了入炉煤质，可提高锅炉效率，降低污染物排放，增强锅炉对煤种的适应性，降低燃料成本，对燃煤火电厂优化运行有重要的意义。为了适应煤炭市场的不断变化，越来越多的燃煤火电厂开始掺烧一些非设计煤种。

国内外在混煤燃烧方面已经开展了众多的基础理论研究。近年来，以工程应用为目的的配煤掺烧技术研发引起广泛关注，相关技术也得到了推广应用。配煤掺烧技术应用的难点主要在于：①煤质特性差异对混煤燃烧效果的影响难以控制；②多目标实时优化控制难度大；③工程实现技术较为复杂。鉴于燃煤火电厂混煤掺烧应用普遍性和长期性的特点，以及对机组运行安全性、经济性和环保性等方面要求的不断提升，如何在深入研究多煤种混烧特性理论的基础上，形成一套适用性强、应用面广的配煤掺烧优化技术，使配煤掺烧应用科学化和智能化，提升机组性能指标满足电力生产要求乃至最优，是燃煤火电厂和本领域研究者亟待解决的重要问题。

自2000年以来，作者在广东省节能减排重大科技专项《广东省大型火电机组配煤掺烧及经济运行的研究及应用》（No. 2008A080800029）、广东省沙角C电厂科技合作项目《660MW机组锅炉非设计煤种高效低污染燃烧的研究与优化调整技术开发》（No. SDSC1106457）、广东省金湾电厂科技合作项目《600MW超临界机组锅炉燃煤拓宽适应性高效清洁燃烧的研究与优化调整技术开发》（No. JWH07-0021）等的支持下，坚持不断地在混煤燃烧基础理论、混煤燃烧数值模拟、混煤掺烧方式及智能化配煤掺烧等方面开展了大量坚实、有效的工作。本书是对10多年来相关研究工作的总结，内容包括燃煤火电厂配煤掺烧和燃料管理方法的介绍，基于计算流体力学（CFD）的混煤燃烧优化数值模拟、典型煤种和典型炉型配煤掺烧方式选择及其优化、智能化配煤掺烧系统研发与应用，希望能对本领

域工作者提供一些有益的参考。

本书的特色主要表现在以下几方面：

(1) 建立了混煤燃烧过程模拟方法，对不同类型锅炉开展了流动、燃烧、传热和 NO_x 排放特性数值模拟，为深入研究混煤燃烧过程详细机理信息和实现工程优化应用提供了理论上的指导。

(2) 针对混煤特性、炉型、制粉系统的不同特点，采用“分磨制粉，仓内掺混，炉内掺烧”、“分磨制粉，分仓储存，分层掺烧”、“分磨制粉，炉内掺烧”等不同掺烧方法，开展了低挥发分煤配煤掺烧工业化试验研究，进而提出了以混煤可磨性为依据来选择低挥发分煤配煤掺烧方式及其优化原则。

(3) 针对两种具有代表性的进口煤的燃煤特性，如印尼煤易自燃着火和结渣，越南无烟煤可磨性较差、不易着火和燃尽特性差，开展了系统性配煤掺烧研究，采用相适应的掺烧方法来实现它们的安全、高效和清洁利用。

(4) 建立了多煤种配煤掺烧优化智能模型，开发了火电机组配煤掺烧全过程优化系统，实现了电厂配煤掺烧流程中配煤与上煤方案优化、煤种在线监测、实时燃烧优化以及燃料的科学管理，火电机组可安全和经济燃用混煤，取得了良好的经济效益。

全书由陈刚、方庆艳、张成和夏季共同执笔完成。具体分工如下：陈刚撰写第 1、2、6 章，方庆艳撰写第 5、8、9 章，张成撰写第 3、4 章，夏季撰写第 11、12 章，第 7 章由陈刚和方庆艳共同撰写，第 10 章由陈刚、张成和夏季共同撰写。全书由陈刚和方庆艳统稿。博士研究生谭鹏参与了部分资料的收集与整理工作。

在本书的撰写过程中，得到了华南理工大学马晓茜教授、广东省电力科学研究院沈跃良高级工程师和湖南省电力科学研究院段学农高级工程师以及广东省科技厅、广东省粤电集团沙角 C 电厂、红海湾电厂、珠海电厂、金湾电厂、平海电厂和广州珠江电厂的大力支持和帮助，在此表示衷心的感谢。

配煤掺烧应用是较为复杂的系统工程，有些问题仍需要深入的探究和不断的发展与完善。限于作者的知识水平，书中难免存在疏漏和不当之处，诚望读者指正。

作者

2013 年 12 月

前言

第 1 章 概述	1
1.1 我国能源资源分布与消费特点	1
1.2 我国燃煤火力发电的发展现状	2
1.3 我国火电燃煤供需现状及火电厂配煤掺烧	3
参考文献	4
第 2 章 混煤特性及其对燃烧的影响	5
2.1 混煤煤质特性	5
2.2 混煤燃烧特性	8
2.3 混煤可磨性及其对掺烧方式的影响	10
2.4 混煤燃烧对受热面积灰结渣的影响	12
2.5 混煤燃烧对 SO _x 和 NO _x 排放的影响	14
2.6 混煤燃烧对细微颗粒物排放的影响	15
参考文献	17
第 3 章 配煤掺烧方法	22
3.1 配煤掺烧技术发展现状与趋势	22
3.2 多煤种堆场配煤掺烧	26
3.3 多煤种分层掺烧	28
参考文献	32
第 4 章 燃煤电厂燃料管理	33
4.1 电厂燃料管理概述	33
4.2 煤堆管理	35
4.3 配煤管理	41
4.4 电厂燃煤数字化管理系统	44
参考文献	46
第 5 章 基于 CFD 的锅炉混煤燃烧优化	47
5.1 混煤燃烧数值模拟研究现状	47

5.2	混煤气固湍流燃烧模型	49
5.3	300MW 四角切圆锅炉混煤燃烧优化数值模拟	56
5.4	1000MW 前后墙对冲锅炉混煤燃烧优化数值模拟	62
5.5	300MW W 火焰锅炉混煤燃烧优化数值模拟	71
5.6	210MW 四角切圆锅炉煤粉掺烧煤气燃烧优化数值模拟	78
	参考文献	87
第 6 章	印尼煤混煤燃烧特性与掺烧应用	91
6.1	印尼煤混煤燃烧特性	91
6.2	印尼煤混煤煤焦微观结构与反应特性	104
6.3	印尼煤混煤污染物析出特性	115
6.4	电站锅炉掺烧印尼煤的燃烧优化	125
	参考文献	132
第 7 章	越南无烟煤混煤燃烧特性与掺烧应用	137
7.1	越南无烟煤及其混煤燃烧特性	137
7.2	越南无烟煤混煤最佳配比研究	143
7.3	无烟煤锅炉混煤掺烧设备适应性技术改造	146
7.4	无烟煤锅炉掺烧越南无烟煤燃烧优化	148
7.5	无烟煤锅炉燃烧优化信息库的建立与应用	152
	参考文献	156
第 8 章	仓储式制粉系统四角切圆燃烧锅炉混煤掺烧优化	157
8.1	粉仓与燃烧器及粉仓与粉仓连接布置方式	157
8.2	HG1021/18.2 - WM10 型仓储式制粉系统锅炉混煤掺烧优化	159
8.3	HG1025/18.2 - WM10 型仓储式制粉系统锅炉劣质无烟煤掺烧优化	164
8.4	仓储式制粉系统四角切圆锅炉混煤掺烧优化原则	167
	参考文献	167
第 9 章	W 火焰锅炉无烟煤混煤掺烧优化	168
9.1	W 火焰锅炉特性及存在的问题	168
9.2	B&W - 1025/17.2 - M 型 W 火焰锅炉无烟煤混煤掺烧优化	169
9.3	DG1025/17.4 - II 14 型 W 火焰锅炉无烟煤混煤掺烧优化	172
9.4	W 火焰锅炉混煤掺烧优化原则	175
	参考文献	175
第 10 章	配煤掺烧优化模型	177
10.1	配煤掺烧的约束和目标	177
10.2	动力配煤线性优化模型	181
10.3	动力配煤非线性优化模型	186

10.4	配煤模型的求解算法	204
	参考文献	216
第 11 章	配煤掺烧在线优化技术	218
11.1	配煤掺烧下的煤种在线辨识方法	218
11.2	配煤掺烧效果在线评价模型	224
11.3	基于进化策略的案例推理运行优化方法	233
11.4	基于数据挖掘的规则推理运行优化方法	245
	参考文献	255
第 12 章	配煤掺烧全过程优化决策系统开发及应用	257
12.1	配煤掺烧全过程优化决策系统开发	257
12.2	600MW 超临界压力机组混煤掺烧系统	263
12.3	660MW 亚临界压力机组混煤掺烧系统	271
12.4	300MW 亚临界压力机组混煤掺烧系统	276
12.5	1000MW 超超临界压力机组混煤掺烧系统	282

概 述

能源是人类社会生存和发展的物质基础。人类社会开发利用能源经历了薪柴、煤炭和石油三个时期，形成了包括煤炭、石油、天然气和水与核能在内的一次能源结构。图 1-1（见文末）所示为 1986—2011 年世界一次能源消费量，图 1-2（见文末）所示为 2011 年世界一次能源消费构成^[1]。到 2011 年末，世界一次能源消费的构成中，石油占 33.1%、天然气占 23.7%、煤炭占 30.3%、核能占 4.98%、水电能源占 6.7%、可再生能源占 1.6%。能源消费仍然侧重于化石燃料，其所占份额高达 87%。可再生能源的份额有所提高，但目前仅占全球能源消费量的 1.6%。同时，化石燃料消费结构也在发生变化。尽管石油仍是主导性燃料，但其所占份额已连续 12 年出现下降。2011 年，煤炭消费比上一年增长 5.4%，再次成为增长最快的化石燃料，也是除可再生能源之外增长最快的能源种类。世界能源委员会和国际应用系统分析研究所合作完成的研究报告认为，到 21 世纪下半叶，世界能源系统将转换成以太阳能、生物质能和风能等可再生能源为主体的新能源系统，其构成比例将达到 50%。但在 21 世纪上半叶，化石燃料仍将是世界一次能源构成的主体。2050 年前后，由于石油和天然气资源趋于枯竭，煤的气化和液化技术将获得快速发展，煤炭将是新旧能源系统转化过程中承上启下的重要过渡能源。

1.1 我国能源资源分布与消费特点

我国能源资源蕴藏总量较为丰富。到 2011 年末，我国煤炭资源探明可采储量 11450 亿 t，占世界的 13.3%；石油资源可采储量为 20 亿 t，占世界的 0.9%；天然气资源探明可采储量 3.1 万亿 m³，占世界的 1.5%；中国是世界上水能资源储量最丰富的国家之一，其理论蕴藏量为 6.76 亿 kW，可开发水能资源为 3.78 亿 kW，2011 年我国水电消费量为 224 百万 t 标准煤当量；煤层气资源预测资源量为 35 万亿 m³。我国还有丰富的新能源和可再生能源资源。太阳能资源丰富，具有良好的开发条件和应用价值；风能资源理论储量为 32.26 亿 kW，可开发的风能储量为 2.53 亿 kW；地热资源储量也较丰富，已勘探的 40 多个可直接利用的地热资源储量相当于 31.6 亿 t 标准煤。生物质能资源也十分丰富，农作物秸秆产量每年约 7 亿 t，可用作能源资源的量约为 2.8 亿~3.5 亿 t，薪材的年开采量约 1.8 亿 t；此外，还有大量的可用作生产沼气的禽畜粪便和工业有机废水资源。

我国煤炭资源储量和分布的主要特点如下^[2]：

(1) 总量相对丰富，人均占有量低。我国拥有丰富的煤炭资源，但勘探程度较低。在最新探明的煤炭资源储量中，生产和在建煤矿已利用储量 1868 亿 t，占 18.7%。适于露天开采的储量较少，仅占总储量的 7% 左右，其中 70% 是褐煤，主要分布在内蒙古、新疆和云

南。煤炭资源的人均占有量约为 234.4t，远低于世界的人均水平。

(2) 富煤地区相对集中，分布不平衡。我国煤炭资源分布是北多南少，西多东少。煤炭资源的分布和消费不平衡。以太行山—秦岭为界线，以西的八省区煤炭资源量占全国总储量的 93.6%，以南的西南和华东、中南广大地区仅占 6.4%。而我国经济和工业生产重点则在东南沿海地区，使得煤炭生产和消费呈逆向分布的格局。这种不平衡分布，加之受到长距离运输的制约，对煤炭资源的开发和利用造成了不利影响。

(3) 煤炭资源的结构和品质参差不齐。我国煤炭资源的种类较多，从褐煤到无烟煤各个煤化阶段的煤都有；在现有探明储量中，烟煤占 75%、无烟煤占 12%、褐煤占 13%。其中，原料煤占 27%，动力煤占 73%。动力煤储量主要分布在华北和西北，分别占全国的 46%和 38%，炼焦煤主要集中在华北，无烟煤主要集中在山西和贵州两省。已探明的储量中，灰分小于 10%的特低灰煤占 20%以上，硫分小于 1%的低硫煤占 65%~70%，硫分 1%~2%的煤占 15%~20%。高硫煤主要集中在西南、中南地区。华东和华北地区上部煤层多低硫煤，下部多高硫煤。

图 1-3 (见文末) 所示为 2011 年中国一次能源消费构成，其中，煤炭占 70.4%、石油占 17.7%、天然气占 4.5%、水能占 6.0%、核能占 0.7%、可再生能源占 0.7%。与世界能源消费构成以石油和天然气为主相反，中国能源消费构成以煤炭为主。这是由中国富煤贫油的总能源储量构成决定的，而且这种以煤为主的能源消费构成在短时间内不会改变。

1.2 我国燃煤火力发电的发展现状

随着电力产业结构调整的不断深入，燃煤火力发电在我国发电装机总容量中的比例逐年缓慢降低。但随着经济的发展，社会生产电力需求总量逐年递增，因此，我国煤炭的生产量和电煤消费量仍呈现递增趋势。燃煤火力发电在我国的电力生产结构中仍占有举足轻重的地位。目前，我国燃煤火力发电机组的总体发展趋势可划分为三个层次：一是实现超超临界参数工程设计，完成 600℃参数超超临界压力机组及 700℃参数超超临界压力机组工程设计。二是采用先进的火力发电生产技术，提高现有机组效率，不断降低供电煤耗和污染物排放。三是结合我国燃煤火电机组的实际，分析制约燃煤火电技术发展的主要矛盾，对未来燃煤火电机组的位置、煤源、容量、技术经济指标、环保指标进行预测分析，并基于此制定燃煤火电机组发展战略。

截止到 2011 年底，我国发电装机容量达到 10.56 亿 kW，同比增长 9.36%；其中火电装机容量累计达 7.66 亿 kW，占装机总容量的 72.5%。火力发电量 38975 亿 kWh，比上年增长 14.07%，占全国发电量的 82.54%。预计到 2020 年，中国的发电装机总量将达到 15 亿 kW 以上，燃煤发电装机容量仍将占到 65%以上^[3,4]。

在燃煤火电机组装机容量增加的过程中，碳排放总量不断增加，粉尘、二氧化硫、氮氧化物等污染物的排放量也将有较大幅度的增加。通过新环保标准的实施，我国已基本解决燃煤机组二氧化硫超标排放的问题，并将在“十二五”期间解决氮氧化物超标排放的问题，进一步将通过采用相关的先进技术解决粉尘、重金属的超标排放问题。但由于碳捕捉和封存技术尚在发展之中，因而未来十年内，碳排放量增加将成为制约我国燃煤火电发展的最主要问题。

1.3 我国火电燃煤供需现状及火电厂配煤掺烧

1. 火电燃煤需求与供应现状

2011年我国的煤炭消费总量为35.2亿t,火力发电行业消耗的煤炭占总量的近50%。根据《煤炭工业发展“十二五”规划》预测,到2015年,我国能源需求总量为38.8亿~43.7亿t标准煤,其中煤炭为37.1亿~42亿t。随着国家转变经济发展方式力度的加大,能源需求强度预期会有所下降;核电、水电、风电等非化石能源发展加快,也会适度压低煤炭需求总量。此外,为应对气候变化,到2020年我国非化石能源占一次能源需求要达到15%左右和单位GDP二氧化碳排放要降低40%~45%,因此,必然会进一步加强节能减排的措施,将能源消费总量控制在一定范围之内。按照煤炭占一次能源消费总量65%左右的目标考虑,煤炭需求总量为38亿t,仍然会有较大的增长。

根据《煤炭工业发展“十二五”规划》,我国将大力开发西部煤炭资源,稳步建设大型煤炭基地,使大型煤炭基地成为能源稳定供应的重要保障和调整煤炭产业结构的主要载体,晋北、晋东、陕北、黄陇、蒙东、神东、云贵、新疆、鲁西、两淮、冀中等14个大型煤炭基地将为国家经济命脉输送主要的能源。到2015年,全国煤炭生产企业要形成10个亿吨级和10个5000万吨级大型企业集团,产量占全国煤炭总产量65%以上,承担起稳定国内市场、保障煤炭供应和参与国际竞争的任务。

进口煤已经成为国内火力发电生产燃煤供应的重要补充,印度尼西亚、越南、澳大利亚、俄罗斯等是进口煤的主要来源国。进口煤炭价格低、运输成本较低,在东南沿海地区得到广泛的应用,所占的比重越来越大。印尼煤是我国进口量最大的煤种之一,具有高挥发分、低硫分、低灰分、可磨性好、燃尽性好等特性,但也具有高水分、低发热量和易结渣的特点。在燃用印尼煤时,可能会出现磨煤机自燃着火、受热面结渣等问题,为确保制粉系统和锅炉运行的安全性,需采用混煤掺烧的方法来实现印尼煤高效清洁利用^[5~7]。越南无烟煤也是我国重要的进口煤源之一,但是其可磨性较差,挥发分少且析出温度高,不易着火,燃尽特性也很差。电站锅炉单独燃用越南无烟煤时,往往存在燃烧不稳、负压波动大、煤粉燃尽差、飞灰可燃物偏高的问题,严重影响无烟煤锅炉运行的安全性和经济性。混煤掺烧也是提高锅炉燃用越南无烟煤运行稳定性、安全性和经济性的有效方法^[8,9]。

2. 火电燃煤供应存在的问题

我国社会和经济快速发展,对电力的需求大幅增加,由此带来火电燃煤需求的大幅增加。由于我国部分地区煤炭生产技术更新慢,管理上也存在一些问题,导致近些年来煤炭的生产和供应一直存在着矛盾。2005年煤炭生产年增长率为10.7%,2006年降至7.6%,2007年继续降至6.3%;而2005—2007年火电装机容量增速却分别达到18.9%、23.7%、14.5%,供求明显脱节,导致周期性“煤荒”的出现。

电煤供需矛盾问题既有季节性的短缺原因,也有运力不足的因素。由于我国煤炭资源分布与区域经济发展空间上呈现逆向分布的不均衡关系,山西、内蒙古西部和陕西(三西)地区的煤炭储量占全国总储量的75%,而煤炭的消费主要集中在经济发达的东南沿海地区,导致我国煤炭运输呈现“北煤南运”和“西煤东运”的运输格局。由于煤运通道体系尚未建成,煤炭运力不足的问题较为突出,在很大程度上影响了煤炭市场的健康发展。据统计,

2009年南部通道和北部通道运力利用率在90%以上,中部通道运力利用率为116%,“三西”地区铁路运输能力处于饱和状态。

3. 燃煤火电厂配煤掺烧

上述因素造成了我国众多燃煤火电厂长期存在燃煤煤质偏离设计煤质的问题,导致机组运行存在一些问题:①动力煤品质大部分处于一般或较低水平,远低于国际水平,且呈下滑趋势;②发电效率偏低,供电煤耗比国际先进水平明显偏高;③污染物排放超标。

提高蒸汽参数即提高蒸汽的压力和温度,是提高燃煤发电效率的主要途径。当今世界效率最高的燃煤发电机组为600MW和1000MW等级超(超)临界压力发电机组,净效率可达到48%以上。目前,蒸汽温度为700℃的发电机组已在发展之中,其发电净效率可达到57%,每发1kWh电,标准煤耗不到220g/kWh。超临界、超超临界压力燃煤发电技术是国际上、也是我国燃煤发电机组发展的主导方向,将是未来几十年内洁净煤发电的主流技术。2003年以来,超(超)临界压力燃煤发电技术在我国得到了快速的发展,使得我国燃煤发电效率有了较大幅度的提升。

对于现有燃煤发电机组,研发新技术、改造机组设备和优化运行方法,以提高锅炉和汽轮机的运行效率,也是提高燃煤发电效率的一种途径。在各种技术或方法中,配煤掺烧是一种操作可行、投入较少、却行之有效的办法。为适应煤炭市场的不断变化,国内越来越多的燃煤电厂掺烧一些非设计煤种。随着配煤掺烧方法的应用越来越广泛,发现的问题也越来越多,促使本领域研究者针对配煤掺烧过程中的难点和科学技术问题开展研究,并使之成为了解决因煤质变化导致经济效益降低问题的一个重要方法。

配煤掺烧技术是以煤质测试、煤化学、煤的燃烧动力学等学科和技术为基础,通过将不同类别、不同品质的单煤种通过筛选、破碎、按不同比例混合和配入添加剂等过程,改变单种动力用煤的化学组成、物理性质和燃烧特性,充分发挥单煤种的煤质优点,克服单煤种的煤质缺点,提供可满足不同锅炉燃煤要求的一种简易的成本较低的技术。配煤掺烧通过煤质互补实现了燃料的优化,稳定了入炉煤质,可提高锅炉效率、降低故障率和污染物排放,提高锅炉运行的安全性和经济性;增强锅炉对煤种的适应性,扩大购煤范围,降低燃料成本,对燃煤火力发电厂优化运行有重要的意义。

参 考 文 献

- [1] 徐云. 谁能驱动中国—世界能源危机和中国方略. 北京: 人民出版社, 2006.
- [2] 崔君鸣, 常毅军. 中国能源保障与煤炭新格局的形成. 北京: 煤炭工业出版社, 2010.
- [3] 吴式瑜, 王美丽. 煤炭在中国能源的地位. 煤炭加工与综合利用, 2006, 24(5): 2-8.
- [4] 张晓鲁. 中国的电力结构调整与技术发展趋势. 电气技术, 2006, 6(11): 1-44.
- [5] 李明亮. 珠海发电厂燃煤锅炉印尼煤掺烧运行特性与优化. 锅炉技术, 2006, 37(6): 40-46.
- [6] 章勤, 翁善勇, 周永刚, 等. 印尼煤燃烧特性的改善及在300MW机组的应用研究. 热力发电, 2005, 34(8): 29-33.
- [7] 杨忠灿. 采用掺烧方法解决印尼煤爆炸问题. 电站系统工程, 2010, 26(5): 29-31.
- [8] 赵振宁, 佟义英, 方占岭, 等. 600MW超临界压力机组掺烧印尼褐煤、越南无烟煤试验研究. 热能动力工程, 2009, 24(4): 513-519.
- [9] 孙丹萍. 无烟煤锅炉煤种适应性研究. 武汉: 华中科技大学, 2008.

混煤特性及其对燃烧的影响

混煤掺烧通过煤质互补实现燃料的优化,可稳定入炉煤质,提高锅炉效率,减轻锅炉受热面的结渣、沾污和积灰程度,降低污染物排放,增强锅炉对煤种的适应性,降低燃料成本等。在过去的二十多年里,国内外学者在混煤的燃烧特性研究上开展了大量的工作^[1~10],分析是否能通过组分煤的燃烧特性来预测混煤的燃烧特性。对于二元混煤,其煤质特性呈现可加性,而燃烧特性表现较为复杂,主要受到组分煤煤质和混煤配比的影响^[1~5]。当组分煤煤质相近时,混煤燃烧特性大多呈现可加性。

2.1 混煤煤质特性

煤的水分、灰分、硫的含量、挥发分等煤质特性参数是评价动力煤质量的重要指标,也是动力优化配煤的基础。混煤煤质特性参数的线性可加性对丰富动力配煤理论,建立和优化动力配煤数学模型有着重要的意义。

2.1.1 混煤水分、灰分、硫含量的线性可加性

戴财胜^[11]对 10 种动力配煤的单煤,按照两种煤或三种煤组合,以不同的比例配制成 44 种混合煤,分别进行了煤质特性测试,验证了混煤水分、灰分、硫含量的线性可加性,并获得了线性相关关系方程。10 种单煤煤质特性见表 2-1。

表 2-1 十种动力煤的工业分析

矿名	M_{ad} (%)	A_{ad} (%)	V_{ad} (%)	V_{daf} (%)	$S_{t,ad}$ (%)	$Q_{gr,V,ad}$
义马	6.46	22.92	29.18	41.08	0.13	21.62
新峰	1.95	25.07	24.29	33.23	3.57	24.57
哲学	0.91	8.66	21.23	23.48	0.46	32.36
联合	1.06	23.19	16.83	22.32	0.37	26.65
盛家山	1.96	16.69	29.42	36.16	1.40	27.66
大团结	0.62	57.10	14.68	34.17	0.28	13.82
萍礼	0.73	33.84	11.04	16.92	1.35	22.30
潞水	2.52	25.52	4.14	5.75	0.12	23.09
香山	1.11	28.50	26.07	37.04	0.22	23.36
常村	1.04	19.47	12.13	15.26	0.21	28.17

1. 混煤水分的线性可加性^[11]

煤的分析基水分与空气的相对湿度有关,为防止同一种煤的分析基水分在不同地区、不

同时间内可能存在差异，对所有单煤和混煤分析基水分必须在同一地方、同一时间内进行测定。混煤的分析基水分的实测值 M_{ad} 与理论计算值 M'_{ad} 呈线性相关关系，见图 2-1，回归线性方程为

$$M_{ad} = 1.01 \times M'_{ad} + 0.03(\%) \quad (2-1)$$

式中： M_{ad} 为混煤的分析基水分的实测值，%； M'_{ad} 为混煤的分析基水分的理论计算值，其值是组成混煤的各单种煤的 M_{ad} 按掺配比例的加权平均，%。

煤的分析基水分的实测值 M_{ad} 与理论计算值 M'_{ad} 之差 ($M_{ad} - M'_{ad}$) 的绝对值最大为 0.24%，大于 0.20% 的只有 2 个，占 4.4%，小于或等于 0.20% 的有 42 个，占 95.56%。据 GB/T 211—2007《煤中全水分的测定方法》，当 $M_{ad} < 5\%$ 时，同一化验室水分测定的允许误差为 0.20%，不同化验室水分测定的允许误差为 0.30%。煤的分析基水分的实测值 M_{ad} 与理论计算值 M'_{ad} 之差全部在国家规定的水分测定允许误差范围之内，其中 95% 在同一化验室水分测定的允许误差范围之内，可以用理论计算值 M'_{ad} 代替实测值 M_{ad} ，因此，煤的分析基水分 M_{ad} 是线性可加的。

2. 混煤灰分的线性可加性^[11]

混煤的分析基灰分的实测值 A_{ad} 与理论计算值 A'_{ad} 呈线性相关关系，见图 2-2，其回归线性方程为

$$A_{ad} = 0.99 \times A'_{ad} + 0.27(\%) \quad (2-2)$$

式中： A_{ad} 为配混煤的分析基灰分的实测值，%； A'_{ad} 为混煤的分析基灰分的计算值，其值是组成混煤的各单种煤的 A_{ad} 按掺配比例的加权平均，%。

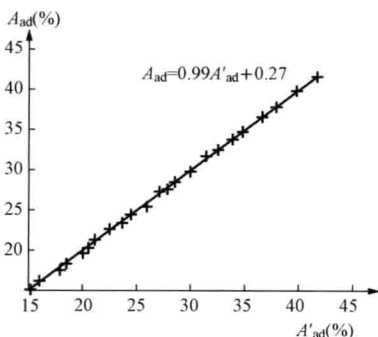
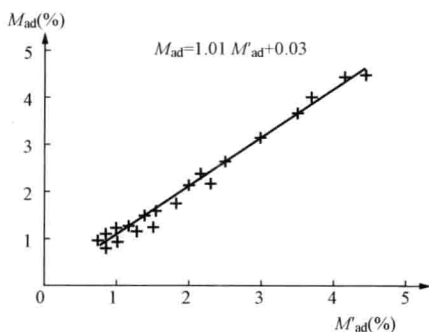


图 2-1 混煤的分析基水分 M_{ad} 与 M'_{ad} 的关系

图 2-2 混煤的分析基灰分 A_{ad} 与 A'_{ad} 的关系

煤的分析基灰分的实测值 A_{ad} 与理论计算值 A'_{ad} 之差 ($A_{ad} - A'_{ad}$) 的绝对值最大为 0.63% ($A_{ad} = 41.43\%$)，据 GB/T 212—2008《煤的工业分析方法》，当 $A_{ad} < 15\%$ 、 $15\% \sim 30\%$ 、 $> 30\%$ 时，同一化验室灰分测定的允许误差分别为 0.20%、0.30%、0.50%，不同化验室灰分测定的允许误差分别为 0.30%、0.50%、0.70%。因此，煤的分析基灰分的实测值 A_{ad} 与理论计算值 A'_{ad} 之差全部在国家规定的灰分测定允许误差范围之内，这说明煤的分析基灰分 A_{ad} 是线性可加的。

3. 混煤硫含量的线性可加性^[11]

混煤的分析基全硫的实测值 $S_{t,ad}$ 与理论计算值 $S'_{t,ad}$ 呈线性相关关系，见图 2-3，其线性回归方程为

$$S_{t, ad} = 1.04 \times S'_{t, ad} - 0.02(\%) \quad (2-3)$$

式中： $S_{t, ad}$ 为混煤的分析基全硫的实测值，%； $S'_{t, ad}$ 为混煤的分析基全硫的计算值，其值是组成混煤的各单种煤的 $S_{t, ad}$ 按掺配比例的加权平均，%。

煤的分析基全硫的实测值 $S_{t, ad}$ 与理论计算值 $S'_{t, ad}$ 之差($S_{t, ad} - S'_{t, ad}$)的绝对值最大为0.11% ($S_{t, ad} = 1.48$)，据 GB/T 214—2007《煤中全硫的测定方法》，当 $S_{t, ad} < 1.5\%$ 、 $1.5\% \sim 4\%$ 、 $> 4\%$ 时，同一化验室硫分测定的允许误差分别为0.05%、0.10%、0.20%，不同化验室硫分测定的允许误差分别为0.10%、0.20%、0.30%。因此，煤的分析基硫分的实测值 $S_{t, ad}$ 与理论计算值 $S'_{t, ad}$ 之差全部在国家规定的硫分测定允许误差范围之内，煤的硫分具有线性可加性。

2.1.2 混煤挥发分的线性可加性^[12]

理论分析表明煤的分析基挥发分 V_{ad} 具有线性可加性，而在一般情况下煤的干燥无灰基挥发分 V_{daf} 是非线性可加的^[11]。为了证实其正确性，测试了44种配混煤的分析基挥发分 V_{ad} 并得到干燥无灰基挥发分 V_{daf} ，对分析基挥发分 V_{ad} 和干燥无灰基挥发分 V_{daf} 的实测值与线性理论计算值进行相关分析如下：

混煤的挥发分的实测值 V_{ad} 与理论计算值 V'_{ad} 呈线性相关，见图2-4，回归线性方程为

$$V_{ad} = 0.99V'_{ad} + 0.30(\%) \quad (2-4)$$

式中： V_{ad} 为混煤的分析基挥发分的实测值，%； V'_{ad} 为混煤的分析基挥发分的计算值，其值是组成混煤的各单种煤的 V_{ad} 按掺配比例的加权平均，%。

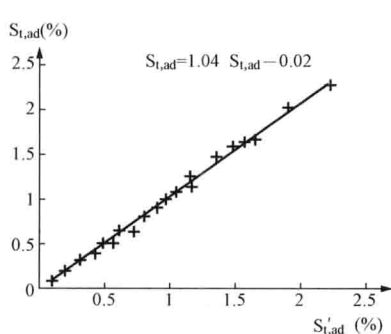


图 2-3 混煤的分析基全硫 $S_{t, ad}$ 与 $S'_{t, ad}$ 的关系

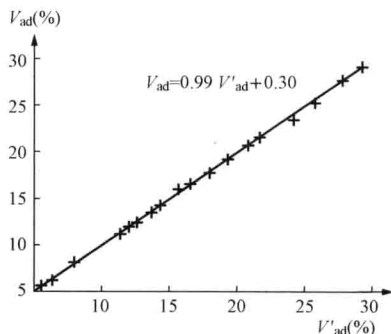


图 2-4 混煤的分析基挥发分 V_{ad} 与 V'_{ad} 的关系

混煤的挥发分的实测值 V_{ad} 与理论计算值 V'_{ad} 之差($V_{ad} - V'_{ad}$)的绝对值最大为0.46 ($V_{ad} = 16.97\%$)，根据 GB/T 212—2008《煤的工业分析方法》，当 $V_{ad} < 20\%$ 、 $20\% \sim 40\%$ 、 $> 40\%$ 时，同一化验室 V_{ad} 测定的允许误差分别为0.30%、0.50%、0.80%，不同化验室 V_{ad} 测定的允许误差分别为0.50%、1.00%、1.50%。因此，煤的分析基挥发分的实测值 V_{ad} 与理论计算值 V'_{ad} 之差全部在国家规定的挥发分测定允许误差范围之内，煤的分析基挥发分具有线性可加性。

煤的干燥无灰基挥发分的实测值 V_{daf} 与理论计算值 V'_{daf} 基本呈线性相关，见图2-5，其线性回归方程为

$$V_{daf} = 0.99 \times V'_{daf} - 0.20(\%) \quad (2-5)$$

式中： V_{daf} 为混煤的干燥无灰基挥发分的实测值，%； V'_{daf} 为混煤的干燥无灰基挥发分的计算

值，其值是组成混煤的各单种煤 V_{daf} 按掺配比例的加权平均，%。

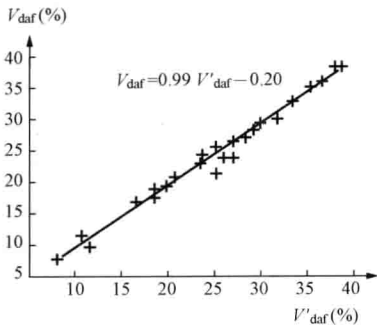


图 2-5 配混煤的干燥无灰基挥发分 V_{daf} 与 V'_{daf} 的关系

从线性回归方程 $V_{daf} = 0.99 \times V'_{daf} - 0.20$ 可以看出，混煤的干燥无灰基挥发分的实测值 V_{daf} 总体上小于理论计算值 V'_{daf} 。当挥发分大致相同的煤配合时，混煤的干燥无灰基挥发分的实测值 V_{daf} 与理论计算值 V'_{daf} 相差不大，一般都在 1% 以下，对燃煤用户来说是可以接受的；而当高挥发分的烟煤与低挥发分的贫瘦煤或无烟煤相配时，混煤的干燥无灰基挥发分的实测值 V_{daf} 与理论计算值 V'_{daf} 相差 2%~4%，就燃煤用户而言，如此大的误差是不可接受的。

2.1.3 混煤发热量的线性可加性

煤的发热量是评价动力配煤质量的一个重要指标，是动力煤销售计价的依据。不同的锅炉对发热量的要求有所不同，因此，发热量是动力配煤优化配比时必须考虑的参数。目前，对发热量是否具有线性可加性说法不一，但在实际的动力配煤过程中都根据煤的发热量的线性可加性来预测混煤的发热量。混煤的理论计算发热量与实测发热量有良好的线性相关关系，其回归线性方程^[13]为

$$Q_{net, ad} = 0.946Q'_{net, ad} + 506 (\text{kcal/kg}) \quad (2-6)$$

式中： $Q_{net, ad}$ 为混煤的实测分析基低位发热量，kcal/kg； $Q'_{net, ad}$ 为混煤的理论计算分析基低位发热量，kcal/kg。

2.2 混煤燃烧特性

2.2.1 混煤着火特性

着火特性是表征煤粉燃烧着火的难易程度，掌握煤的着火特性对锅炉安全、稳定运行十分重要。研究煤粉着火特性的方法主要有热天平法、一维沉降炉燃烧试验和电站锅炉现场燃烧试验。

邱建荣等^[14]利用热天平研究了混煤的燃烧特性，提出用混煤挥发分的释放特性指数来表征混煤的着火特性，发现混煤着火特性与组分煤不同，混煤中组分煤的着火燃烧是交错平行进行的，混煤的挥发分品质较组分煤差，其挥发分释放也比组分煤缓慢，着火性能受组分煤的含量及组分煤种影响。高正阳等^[15]的研究表明：混煤的着火温度在很大程度上取决于烟煤的比例，当烟煤所占比小于 50% 时，烟煤含量越多，混煤的着火温度下降越多；当烟煤占比大于 50% 时，烟煤含量的增加对混煤着火温度的影响不大；混煤的着火性能也可用表观活化能的变化规律来分析，因为活化能从本质上描述煤粉的着火特性。Chamber 等^[16]研究了高挥发分煤和低挥发分煤及其混煤的燃烧特性，发现组分煤种之间存在相互作用，这种相互作用可能来自于组分煤不同的热量释放速率和传热特性。

Zelknowshi^[17]研究了掺混比例和氧浓度变化对混煤着火特性的影响，单煤的掺混比例对混煤的着火特性有一定的影响；低氧环境中，混煤的着火特性随掺混比例变化趋势是不同的；对于粗粒煤，不同的氧浓度下，掺混比例的变化对着火性能的影响较为显著。郭嘉

等^[18]研究了煤粉细度、煤粉浓度和掺烧比例对混煤燃烧特性的影响,结果表明:混煤中的无烟煤煤粉越细,着火温度越低;适当的煤粉浓度有利于混煤着火;无烟煤中掺烧烟煤可以改善混煤着火特性,尤其是烟煤含量低于50%时,改善效果明显。曾汉才等^[19]在小型动态着火试验炉上研究了无烟煤与烟煤组成混煤的着火特性,并提出用等效挥发分来表征混煤的着火特性。

侯栋岐等^[20,21]利用混煤煤粉气流着火指数曲线分析了混煤的着火特性,当组分煤的煤质特性相差较大时,混煤的煤粉气流着火指数不是组分煤种指数的加权平均值,而是明显地靠近易燃组分煤的着火指数。因此,着火特性不同的组分煤掺烧,混煤的着火特性趋近于易着火的组分煤。Artos等^[22]在滴管炉上的混煤燃烧实验也证实了混煤着火温度趋近于高挥发分组分煤的着火温度。

在电站锅炉的实际运行中,混煤的着火特性除了受组分煤种及其掺混比例、煤粉细度等影响外,还与燃烧条件紧密相关。当混煤中组分煤种性能差异较大时,常常因为不能同时满足不同性能的煤对配风的要求,导致着火困难。采取分级配风方式,根据混煤的当量挥发分确定一次风率,参考难燃煤的挥发分确定合适的二次风率,可以较好地解决这个问题。沈跃良等^[23]研究了锅炉运行条件及混煤比对燃烧特性的影响,结果表明:关小周界风、降低一次风速、提高烟煤比例有利于混煤中的烟煤着火,但没有改善无烟煤的着火,甚至使得无烟煤的着火更加滞后。Gunderson等^[24]在燃烧器对冲布置的锅炉上开展了混煤燃烧试验研究,当25%~30%的次烟煤添加到烟煤时,没有观察到组分煤间的相互作用,表明组分煤在燃烧过程中保持一定的独立性。

2.2.2 混煤的燃尽特性

在整个煤粉燃烧过程中,热解及挥发分的燃烧过程是十分迅速的,而煤焦的非均相燃烧过程则缓慢得多,煤焦的燃尽率决定了煤粉的总燃尽率。煤粉的燃尽特性关系到锅炉的燃烧效率、运行经济性和电除尘的效率。反映煤粉燃尽特性的指标主要是燃尽率、燃尽温度和燃尽时间。煤粉燃尽特性与煤质特性和燃烧条件相关。

Peralta^[8,20]等研究表明:混煤燃尽特性不能由组分煤的燃尽特性简单线性加和,而是趋近于难燃尽的组分煤。因此,在难燃尽的组分煤中掺入易燃尽的组分煤来改善其燃尽特性的效果不显著。高正阳等^[15]的研究也表明:混煤燃尽特性主要取决于难燃无烟煤的燃尽温度和含量。Rubiera等^[3]的研究表明,煤质和掺混比对热天平中混煤的燃烧特性影响很大,高挥发分煤在低温区影响大,而低反应性煤则在煤焦燃烧区影响更大。Helle等^[5]研究了混煤燃烧过程中的飞灰含碳量与显微组分的关系,结果表明:混煤的飞灰含碳量偏离于组分煤飞灰含碳量的线性加和,这种差异与组分煤的显微组分以及煤质年代有关,当组分煤的显微组分和镜质组反射率差异较小时,易燃煤可以改善难燃煤的着火和燃尽,提高混煤的燃尽特性,当组分煤的显微组分和镜质组反射率相差较大时,混煤燃尽特性明显偏离组分煤燃尽特性的线性加和,并且比组分煤差。Eduardo等^[25]在管式炉和热重分析仪上研究了显微组分与混煤燃尽特性的关系,得到类似的结论。

邱建荣等^[14]认为无烟煤中掺烧贫煤或烟煤后,如不采取分级燃烧,将使得其燃尽性能变差,即混煤的燃尽性能不如组分煤的燃尽性能,分析认为这是由于烟煤抢风使无烟煤缺氧造成燃尽困难;而采用分级燃烧后,混煤的燃尽性能有所提高,尤其是掺烧烟煤时提高更明显。曾汉才和沈跃良等^[19,23]的研究也表明:混煤着火特性的改善并不意味着燃尽特性能改善,