

现代电站锅炉技术 及其改造

本书编委会

• XIANDAI
DIANZHAN GUOLU JISHU
JIQI GAIZAO



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

现代电站锅炉技术 及其改造

本书编委会



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书广泛收集、整理了大量国内外大型锅炉设计、运行、检修和改造方面的资料,归纳和总结了近十几年来我国大型电站锅炉在检修、改造中的经验和教训,针对各类大型锅炉曾经发生过的问题,从分析原因入手,详尽地叙述了大型锅炉改造的方法和检修中的注意事项。

本书从运行使用单位的角度出发,针对大型锅炉燃烧系统、蒸发受热面、过热器和再热器、省煤器、空气预热器结构特点和运行特点,运用了大量引进型机组和国产化机组典型实例,详细地阐述了以上关键设备改造和检修的技术要点及其使用效果和可能存在的问题,以及大型锅炉金属材料、炉墙、密封、炉衬及保温的特点,选用原则,检修方法和大型锅炉金属焊接工艺。

本书资料翔实可靠、内容丰富新颖、见解精练独到,是目前电站锅炉设计、制造、运行、检修和改造人员一本不可或缺的科技书,也可为大中专院校热能动力专业的学生、教师参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代电站锅炉技术及其改造/《现代电站锅炉技术及其改造》编委会编. —北京:中国电力出版社, 2006

ISBN 7-5083-3771-9

I. 现... II. 现... III. ①火电厂—锅炉—检修②火电厂—锅炉改造 IV. TM621.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 156774 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2006 年 4 月第一版 2006 年 4 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 25.125 印张 548 千字

印数 0001—3000 册 定价 40.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

《现代电站锅炉技术及其改造》

编 委 会

编委会主任：袁 德

副 主 任：于立滨 王 元

主 编：刘武成

副 主 编：侯桂林 张福银 史明武

编 写 人 员

第一章：史明武 韩明辉 孟宪杰 郭万恒 顾兴茂
王 磊

第二章：蒋跃军 孟庆遥 崔 仪 胡树林 高玉新

第三章：张成恩 骆晓光 肖永辉 蒋志庆

第四章：张福银 朱则赤 黄 凯 林 岩 程庆军

第五章：史明武 吴铁山 胡万有 朱振东 赵德秋

第六章：张明坤 卢元军 韩德斌

第七章：刘 崇 李 岩

主 审：张经武

序

《现代电站锅炉技术及其改造》

在诸多从事锅炉专业工作人员五年多的辛勤努力下，由刘武成同志主编的《现代电站锅炉技术及其改造》一书，终于可以付印了，这是值得庆贺的事。

本书的最大特色是它的实用性。改革开放以来，电力工业突飞猛进。作为火力发电厂主要设备的锅炉，容量越来越大，参数越来越高。在此期间，国内大型锅炉从投入到正常运行，经历了不少坎坷：既经历了国产设备的完善化过程，又经历了引进设备适应中国国情和纠正其本身缺陷的过程。本书针对各类大型锅炉曾经发生过的问题，从分析原因入手，详尽地叙述了大型锅炉改造的方法和检修中的注意事项，资料翔实可靠，对从事锅炉运行、检修、改造、安装、配套、设计和制造工作者，会有所裨益。

大机组日新月异的发展，超临界压力、超超临界压力机组的应用，对我们来说是新的课题。面对世界先进水平，需要有个冷静的认识，真正做到“知己知彼”是不容易的事。在本书中，对新技术尽可能多地予以介绍，信息是丰富的、理解是深刻的。这对今后的消化、完善和改进都会起到一定的作用。

我们碰到技术问题，怎样去解决？思考过程中，一般有三个层次：首先想到的是，“有什么现成的经验和教训可以汲取的？”书中的众多实例，是值得对照借鉴的。第二个层次是“为什么要这么做，有没有道理？”，书中将探索其所以然。第三个层次是“还有没有更好的办法？”这个层次是思考的关键，通过举一反三，逐渐融会贯通，但过程可能是漫长的，需要有“路漫漫兮，吾将上下而求索”的精神。

“授人以鱼，不如授人以渔”，仔细琢磨本书中锅炉本体设备的改造思路和在新型金属应用中的经验教训，对提高我们的科学技术水平是会有帮助的。中国的发展，科技是关键，殷切期望我们广大锅炉工作者奋力前进，使锅炉科技的发展和国产的装备，在世界先进之林中能牢牢地站稳脚跟。

童锐刚

2004年10月

前言

《现代电站锅炉技术及其改造》

电力工业在整个国民经济中的地位十分重要。2003 年, 全国发电装机容量已达到 38450 万 kW, 以后, 每年新增装机容量将在 3200 万 kW 以上。我国大机组、大电网的格局已经形成, 电站锅炉也进入大容量、高参数、多样化、高度自动化发展的新时期。到 2003 年为止, 已有 302 台 300~800MW 亚临界压力机组、超临界压力机组投入运行, 其中容量 500~800MW 的机组 39 台。目前, 900MW 机组已投入运行, 1000MW 的超超临界压力机组也在建设之中。就炉型而言, 既有通常采用的 Π 型布置锅炉, 也有大型塔式布置锅炉; 既有采用四角切圆燃烧、墙式燃烧方式的, 也有 U 形和 W 形下射火焰燃烧方式的; 既有固态排渣、液态排渣锅炉, 也有循环流化床锅炉。燃用煤种十分广泛, 从褐煤、烟煤、劣质烟煤、贫煤直到无烟煤。作为煤粉燃烧锅炉机组配置的磨煤机, 特别是中速磨煤机, 如 RP、HP、MPS 和 MBF 等型号, 均已普遍地应用于锅炉, 双进双出钢球磨煤机也得了广泛的应用; 风扇式磨煤机则用于燃用褐煤的锅炉。所有这些设备中, 既有国产的、从国外直接引进的, 也有采用引进国外技术国内制造的。它们的运行可靠性、经济性以及低污染排放等性能都较以前有了较大幅度的提高。据可靠性统计资料表明, 2003 年 808 台 100MW 及以上燃煤火力发电机组的等效可用系数为 91.15%, 比 2000 年高 0.85%, 比 1999 年高 2.09%; 600MW 火电机组近五年的等效可用系数从 1999 年的 84.92%, 上升至 2003 年的 91.41%。大型锅炉的运行经济性也普遍较高, 除了一些难燃的无烟煤锅炉外, 锅炉效率基本上都在 90% 以上, 某些烟煤锅炉的效率达到 94%。在 NO_x 排放控制方面也取得了一些进展, 国产 600MW 机组锅炉的 NO_x 排放浓度最低的在 $300\text{mg}/\text{m}^3$ (O_2 浓度为 6%) 以下, 远低于现行国家标准的规定值。

但是, 也有一些大型锅炉机组仍不同程度地存在着这样或那样的问题。从 1996 年以来, 新投产的 300MW 火力发电机组运行第一年的等效可用系数在逐年提高。但是 2002 年投产后第一年的等效可用系数为 87.38%, 而 2001 年投产的机组的等效可用系数平均为 92.35%。这说明, 近年来新投产机组的可靠性水平又有所降低。

2003 年, 锅炉、汽轮机和发电机三大设备中, 锅炉引起的非计划停机为 1.22 次/(台·a), 占非计划停运总时间的 58.15%。

一些问题的存在曾一度较大地影响了机组运行的可靠性、经济性、可调性和环境保护性能, 甚至影响到满出力运行, 例如: 锅炉承压部件的“四管泄漏”; 燃烧稳定性欠佳, 机组调峰能力差; NO_x 排放量高; 锅炉炉膛及对流受面结渣、沾污和磨损; 回转式空气预热器漏风大, 堵灰严重; 磨煤机出力不足或煤粉达不到要求的细度; 某些 600MW 燃煤机组锅炉存在严重的汽温过热问题等。这将难于满足国民经济的迅速发展和可持续发展, 以

及国家对电力和环境保护的要求。

出现这些问题，既有运行管理方面的原因，也有设计、制造与安装质量方面的原因，还有些是因实际燃煤煤质与设计煤质相差太大（有个别锅炉的设计煤质与校核煤质选择欠妥）造成的。

对于运行管理方面的问题，应通过加强管理来解决；对于安装质量的问题，可以通过检修来解决；对于设计、制造以及煤质方面的问题，则往往需要通过改造来解决。

近年来，国内已有不少成功的改造范例。为解决以上所述问题，运行、调试、研究、设计和制造部门多年来做了不懈的努力，取得了许多经验，也吸取了不少教训。这些经验有的得到了系统的总结，例如，DL/T831—2002《大容量煤粉燃烧锅炉炉膛选型导则》就是从设计上对这方面经验进行系统总结的良好范例。但在运行实践中，从运行维护、技术改造方面集中进行总结、归纳、交流的工作还不够。以致有些问题，仍不能引起各方面的重视。例如：20世纪90年代200MW机组上曾一度大量出现的四角水冷壁管裂纹问题，在目前有的大型超临界压力机组上又重复出现；切向燃烧锅炉，由于锅内系统布置不合理造成热偏差重叠而造成过热器、再热器超温的问题，在部分300、600MW机组上依然存在。

检修质量的好坏也是影响锅炉正常运行的重要原因之一。近十几年来，大型锅炉的检修工作有了很大改进，但一是缺少系统的总结和规范，二是在不同层次、不同程度上存在着以检修论检修，只知道“应该怎样干”，而不知道“为什么要这样干”的问题。

此外，近年来随着超临界压力、超超临界压力机组的大规模引进，先进的低 NO_x 燃烧技术在烟煤锅炉上可以使 NO_x 的排放量达到 $300\text{g}/\text{m}^3$ 以下。采用螺旋管圈的超超临界压力、变压运行直流锅炉和采用垂直管圈、超超临界压力、变压运行直流锅炉都取得了显著的运行业绩。随着压力和温度的升高，Super304、HR3C（TP310HCbH）等新型的高温金属材料被大量使用，这将带来加工和焊接方面的一系列问题。我国亚临界压力技术从引进到成熟，经过了近20年的时间，而近年来，容量600MW以上超临界压力机组每年以近50台的速度投入生产，1000MW超临界压力机组也被大规模引进。2003年，12台超临界压力机组等效可用系数为87.50%，尽管比2000年提高了2.07%，但仍比全国平均水平低3.65%。运行和管理部门都急需了解这方面的信息，使超超临界压力技术在我国尽快消化、成熟。

编写本书的目的，是试图归纳和总结我国大型锅炉在这十几年中检修、改造的经验和教训，一方面可以供已经投入运行的大型电站锅炉检修维护和改造工作参考，另一方面也可以为在今后引进、吸收、消化、改进超临界压力机组锅炉技术作借鉴。正是为了后一目的，编者在本书中尽可能地介绍近年来与国内外公司交流所收集到的部分大型锅炉的新技术资料，特别是它们的设计思路。

对于设备改造部分，本书更多的是从运行使用单位的角度出发，介绍和评价这些改造过程和效果，本着不求理论高深，但求概念清楚的原则，在叙述中力求从介绍原理、设计思想和在实践中碰到的问题入手，着重分析发生原因，介绍改造的技术要点及实施的范例、使用效果和存在的问题，起到介绍改造思路、指出技术关键和提供技术信息的作用。

对于有关的检修部分，本书未进行系统的、面面俱到的介绍，而是只介绍了本体部分

的检修。在介绍中,力求不局限于以检修论检修,而是从锅炉总体的角度出发,深入浅出、概括地介绍、分析锅炉或相关辅助设备的特点,以指导检修工作。对于具体设备及部件,也是从介绍结构和工作原理入手,分析常见故障及其原因,在故障分析时不拘于机械故障,同时分析影响性能参数的原因,从理论上为检修工作做好铺垫,贯彻检修为运行和经营服务的宗旨。本书尽可能少地重复《锅炉检修技术导则》和其他一些检修方面书籍中已有的检修步骤的细节,着重提出判废标准,对某些特殊的工艺要点,不仅定性而且定量地给出必要的关键数据。

本书第一章~第四章主要由刘武成执笔,第五章主要由史明武执笔,第六章主要由刘崇执笔,第七章由张明坤执笔,全书由刘武成主编。

本书成稿后,承蒙张经武同志认真审阅,他对书稿提出了许多颇有见地的宝贵意见,倾注了大量精力。该书的撰稿过程中还得到了郑企仁、关必胜、张勋奎、袁颖、许传凯、毕玉森、相大光、秦裕琨、黄振康、周志强、乐长义、吴少华、徐仁德、史建军、张永兴、金连森、武春生、霍建民、孙平、李琦、张鉴燮、余浩鑫、葛明德、张韵杰、张辉、彭必达、薛国琪、李争起、张问义、邹海丰、张德福、井绪成、张新平等同志的关心、指导和大力支持。此外,近几年来,在技术交流过程中得到了国内锅炉制造厂专家的热情指教。在此一并表示诚挚的谢意。

囿于作者的学识视野和水平,在本书的选材、撰写过程中,疏漏和不足之处在所难免,诚望读者指正。

刘武成

2005年11月

目录

《现代电站锅炉技术及其改造》

序

前言

第一章 燃烧系统..... 1

第一节 概述..... 1

第二节 燃烧器及点火系统的布置

原则和结构特点..... 2

一、切向燃烧及点火系统的布置原则和

结构特点 2

(一) 切向燃烧布置的一般原则 2

(二) 新型切向燃烧方式及直流燃烧器 6

(三) 切向燃烧方式及直流燃烧器的低 NO_x

燃烧技术 11

二、墙式燃烧 19

(一) 墙式燃烧的布置原则和旋流式燃烧器的

结构特点 19

(二) 新型墙式燃烧方式及旋流燃烧器 24

(三) 采用新型旋流燃烧器的注意事项 46

三、W 形火焰燃烧 48

(一) W 形火焰燃烧布置的一般原则 48

(二) 各种 W 形火焰燃烧锅炉的设计和

结构特点 51

(三) 各种 W 形火焰燃烧锅炉的制粉系统

及燃烧器布置、配风特性 58

(四) W 形火焰燃烧锅炉的常见故障 59

(五) W 形火焰燃烧锅炉的适用范围 60

四、锅炉油燃烧器的布置及点火机构 60

第三节 燃烧器的检修 62

一、燃烧器的常见机械故障 62

(一) 调整机构失灵 62

(二) 烧损和磨损 63

(三) 关键结构尺寸发生变化 65

(四) 点火系统的常见故障 66

二、燃烧器的检修工艺 66

(一) 检修前的准备工作 66

(二) 直流燃烧器的检修 66

(三) 旋流燃烧器的检修 72

(四) 点火系统的检修 75

第四节 燃烧器的改造 77

一、燃烧器选用和改造总原则 78

二、以稳燃为主的燃烧技术 79

三、防止结渣技术 88

四、旋流燃烧器的局部改进 93

五、低 NO_x 燃烧器改造 95

(一) 低 NO_x 燃烧器改造实例 95

(二) 低 NO_x 燃烧器改造的

注意事项 100

六、W 形火焰燃烧锅炉的改造方向 103

(一) W 形火焰燃烧方式锅炉的常见

故障 103

(二) 目前 W 形火焰燃烧锅炉燃烧系统的

改进方向 118

七、点火燃烧器的改造——等离子点火

燃烧系统 119

(一) 概述 119

(二) 等离子点火燃烧系统的设计思想

和关键技术 121

(三) 等离子点火燃烧系统设计的其他

要求 133

第二章 蒸发受热面 136

第一节 蒸发受热面的结构型式和

技术特点 136

一、蒸发受热面内工质的流动方式 136

(一) 自然循环锅炉 136

(二) 强制循环锅炉 136

(三) 直流锅炉	137	三、过热器和再热器的运行特点	192
(四) 复合循环锅炉	138	第二节 过热器和再热器的检修	193
二、水冷壁的结构形式	140	一、过热器、再热器常见故障、发生原因及防止方法	193
(一) 水冷壁的一般结构形式	140	(一) 热偏差	193
(二) 直流锅炉水冷壁的设计和布置的特点	142	(二) 磨损	200
第二节 水冷壁常见故障及其处理对策	159	(三) 腐蚀	202
一、自然循环锅炉蒸发受热面的水动力特性和传热恶化	159	(四) 应力损坏	204
(一) 循环停滞和循环倒流	160	(五) 质量失控	206
(二) 汽水分层	160	二、过热器、再热器的检修	206
(三) 下降管带汽	161	(一) 过热器的检修	206
二、强制循环锅炉蒸发受热面的水动力特性和传热恶化	161	(二) 再热器检修	208
三、应力损坏	163	第三节 过热器和再热器的改造	209
四、过热爆管	166	一、过热器和再热器改造的原则	209
五、腐蚀	166	二、过热器和再热器的热偏差带来的安全性问题	210
(一) 工质侧腐蚀	166	三、过热器和再热器改造的实例	224
(二) 向火侧腐蚀	167	四、过热器和再热器改造的注意事项	230
(三) 应力腐蚀	169	第四章 省煤器	234
六、磨损	169	第一节 概述	234
七、疲劳损坏	169	一、省煤器的结构型式	234
八、工艺、质量失控故障	170	二、常见故障及处理措施	235
第三节 水冷壁检修工艺	171	(一) 省煤器的积灰	235
一、水冷壁的检查	171	(二) 省煤器管的腐蚀	235
二、水冷壁换管	171	(三) 省煤器制造及安装 (含检修焊口) 中的问题	236
三、水冷壁检修质量标准	172	(四) 省煤器的磨损	237
第四节 蒸发受热面的技术改造	173	(五) 防止省煤器磨损的措施	240
一、300MW 机组 UP 型锅炉存在的问题	173	第二节 省煤器的检修与维护	242
(一) 结构特点	173	一、省煤器本体的检修	242
(二) 主要问题	175	二、省煤器引水管和再循环管的检修	245
(三) 后果	178	第三节 省煤器的改造	246
二、几种典型的改造模式	178	一、利用鳍化或肋化技术降低烟速	246
第三章 过热器、再热器	190	二、膜式省煤器	246
第一节 概述	190	三、肋片管省煤器	248
一、过热器的结构特点	190	四、H 型省煤器	254
二、再热器的结构特点	192	五、省煤器防磨的其他措施	256

第五章 空气预热器..... 257

第一节 概述..... 257

一、管式空气预热器..... 257

(一) 管式空气预热器的结构与特征..... 257

(二) 管式空气预热器的常见故障及

防止措施..... 258

二、回转式空气预热器..... 263

(一) 概述..... 263

(二) 两种类型回转式空气预热器的

比较..... 265

(三) 回转式空气预热器的常见故障

及其防止措施..... 266

第二节 空气预热器的检修..... 271

一、管式空气预热器的检修..... 271

二、回转式空气预热器的检修..... 273

(一) 回转式空气预热器的检修项目..... 273

(二) 回转式空气预热器的检修工艺和

质量标准..... 274

第三节 空气预热器的改造..... 281

一、管式空气预热器的改造..... 281

(一) 采用热管改造管式空气预热器..... 281

(二) 采用螺旋槽管改造管式空气预

热器..... 294

(三) 采用玻璃管改造管式空气预热器..... 295

二、回转式空气预热器的改造..... 297

(一) 减少漏风的改造..... 297

(二) 防止堵灰的改造措施..... 307

第六章 电站锅炉金属材料 and 焊接

工艺..... 311

第一节 电站锅炉金属材料..... 311

一、有关金属材料的基本知识..... 311

二、国际上电站锅炉参数提升及其用材

概况..... 313

三、国际上电站锅炉耐热钢在研究开发利

用方面的方向和趋势..... 315

四、电站锅炉高温部件设计选材..... 315

五、电站锅炉常用钢材选用原则..... 316

六、锅炉检修、改造中使用代用材料的

原则..... 316

七、电站锅炉用钢..... 317

(一) 亚临界压力及以下电站锅

炉检修常用钢..... 317

(二) 超临界压力、超超临界压力锅炉常

用耐热钢..... 319

八、电站锅炉水冷壁、省煤器、过热

器、再热器用钢实例..... 334

第二节 焊接..... 344

一、焊接工作的特殊要求与管理..... 344

(一) 焊工资格管理..... 344

(二) 电力焊接质量管理..... 344

二、焊接方面的几个基本要点..... 346

三、大型锅炉检修中的焊接..... 347

(一) 目前电站锅炉常用的焊接材料..... 347

(二) 焊接人员..... 347

(三) 焊前准备..... 351

(四) 焊接工艺..... 352

(五) 焊后热处理..... 353

(六) 焊接质量检验..... 354

(七) 焊接质量标准..... 356

四、电站锅炉及辅机金属典型部件

焊接..... 358

(一) 锅炉及辅机设备损坏部件的

补焊修复..... 358

(二) 锅炉及辅机设备防磨堆焊与喷涂..... 360

(三) 大型电站锅炉过热器、再热器更换

管排时异种钢接头焊接问题..... 364

(四) 超临界压力、超超临界压力机组常

用高温用钢的焊接..... 366

第七章 炉墙、密封、炉衬及保温..... 371

第一节 炉墙..... 371

一、大型锅炉炉墙结构及特点..... 371

二、炉墙常见问题及其改进..... 371

三、炉墙的检修..... 373

四、膜式壁的检修要点..... 374

第二节 密封..... 374

一、锅炉密封设计..... 374

二、密封结构..... 375

三、炉顶密封的检修..... 379

四、200MW 机组锅炉炉顶密封的改进	380	六、炉衬检修的注意事项	384
第三节 炉衬	381	第四节 保温	385
一、液态排渣炉炉衬	381	一、对保温材料的基本要求	386
二、卫燃带	382	二、保温结构的检修与改进	386
三、灰渣室内衬	383	第五节 竣工验收	388
四、循环流化床锅炉炉衬（内衬）	384	一、炉墙验收	388
五、抽炉烟管道内衬	384	二、保温验收	388
		参考文献	389

第一章

燃 烧 系 统

第一节 概 述

燃烧器在炉膛上的布置有墙式、角式及顶部布置（即 U 形或 W 形火焰）三种。锅炉燃烧器按其出口气流的流动性，可分为直流式燃烧器和旋流式燃烧器。

切向燃烧（四角、六角、八角）一般采用直流式燃烧器，但也有特例，例如 Walsum 电厂 410t/h 锅炉，即为四角布置，整组燃烧器分为四层，且为双调风旋流燃烧器，因为其射程较长，适合于组织切向燃烧火焰。各角的煤粉气流喷入炉内，受到上游已燃高温火焰的点然而迅速着火，因此着火条件较好；一、二次风均为直流，其射程长，气流衰减慢，炉内的强烈旋转使煤粉气流后期湍流混合仍然十分强烈，煤粉燃尽条件较理想，并可控制一、二次风混合点，以适应不同煤种的要求。基于以上特点，这种燃烧器几乎可用于所有煤种。但后期的余旋也带来烟气温度的场、速度场和浓度场偏斜，因此可能出现受热面管子局部超温、磨损等一些问题。

墙式燃烧一般采用旋流式燃烧器，常采用前墙布置、前后墙对冲或两侧墙对冲布置，组织 L 形火焰燃烧。此种燃烧方式可以避免直流燃烧器切向燃烧余旋所产生的炉膛出口能量不平衡问题的发生，但由于燃烧器间热负荷分配不均、配风不均，也可能导致炉膛出口能量不平衡。旋流式燃烧器着火主要是依靠气流旋转产生的中心回流区卷吸高温炉烟来实现的，因此每个燃烧器具有相对的独立性，各燃烧器之间相互影响小，对炉膛没有严格的要求，不必一定接近正方形，这给锅炉尾部受热面的布置带来极大的方便。燃烧器均匀地布置在前墙或后墙，输入炉膛的热量分布比较均匀，组织燃烧恰当时，减少了炉膛中部燃烧区因温度偏高而造成结渣的可能性；当机组容量增大时，只需相应增加炉膛的宽度及增加燃烧器的只数和排数即可，单只燃烧器的热功率不一定加大。20 世纪 50 年代我国从前苏联引进的 200MW 机组全部是旋流式燃烧器。

20 世纪 80 年代 CE 公司的 300MW 和 600MW 机组锅炉采用切向燃烧直流燃烧器的炉型较多。随着我国电力行业的发展，近年来引进的 600MW 超临界压力机组锅炉，墙式燃烧的旋流式燃烧器的炉型也很多，而且这两种燃烧方式分别应用于超临界 1000MW 机组锅炉，甚至应用于更大容量的锅炉，例如阿莫斯电厂 4420t/h 超临界压力燃煤锅炉（配 1380MW 机组）即采用旋流式燃烧器。

顶部布置（即 U 形或 W 形火焰）可采用直流式燃烧器。近年来，旋流式燃烧器也有用于顶部布置，组织 W 形火焰的，例如山西某电厂 3 号、4 号炉所采用的 EI-XCL 燃烧

器，河北某电厂 1 号、2 号炉采用的 PAX（primarv air exchanger）型燃烧器，就是属于这种类型。

第二节 燃烧器及点火系统的布置原则和结构特点

一、切向燃烧及点火系统的布置原则和结构特点

(一) 切向燃烧布置的一般原则

1. 布置要点和设计参数的确定

直流燃烧器用于切向燃烧时，其最大特点是燃烧过程由各燃烧器共同组织完成。其一、二次风均为直流射流并相切于锅炉炉膛中心形成一个或两个假想切圆，燃烧器可分四角、六角、八角布置。近年来，大型锅炉采用无双面水冷壁的单室炉膛，反向双切向燃烧方式，可获得对称的烟气温度场、速度场，减少沿炉宽烟侧偏差。采用双切圆的半炉膛为方形，其宽/深比（ w/D ） ≈ 1 ，相当于两个正方形的炉膛，对于整个炉膛而言，相当于将锅炉容积减少了一半，有利于组织燃烧。

高效率的组织燃烧和防止结渣，对固态排渣炉来说是必须注意的重要问题。适当的热力参数和炉膛结构，合理地布置燃烧器及组织炉内空气动力场，是防止和减轻结渣的重要手段。

根据《大容量煤粉燃烧锅炉炉膛选型导则》，对于切向燃烧方式的炉膛，选型准则一般可取用以下 4 项主要特征参数：

- 炉膛容积放热强度 q_v （BMCR），kW/m³（上限值）；
- 炉膛断面放热强度 q_F （BMCR），MW/m²（可用值）；
- 燃烧器区壁面放热强度 q_B （BMCR），MW/m²（上限值）；
- 燃尽区容积放热强度 q_v （BMCR），kW/m³（上限值）。

第 4 项特征参数 q_m 也可代之以最上层煤粉喷口至折焰角尖端的垂直距离 h_1 [m（下限值）]。

采用切向燃烧方式的 300MW 和 600MW 容量级锅炉，燃用烟煤（含贫煤、瘦煤）时，其炉膛特征参数（上限值或下限值或可用值）的推荐范围如表 1-1 所示（不含塔式锅炉）。

燃用高水分褐煤（ $M_{ar} > 30\%$ ）采用多角切向燃烧方式的 300MW 和 600MW 容量级锅炉，其炉膛特征参数推荐范围如表 1-2 所示。

表 1-1 切向燃烧方式炉膛特征参数限值推荐范围

设 计 煤 质	$V_{daf} > 25\%$ ， $IT < 700^\circ C$		$V_{daf} < 20\%$ ， $IT > 700^\circ C$	
	300	600	300	600
机组额定容量（MW）	300	600	300	600
q_v （BMCR，上限值，kW/m ³ ）	95 ~ 115	85 ~ 100	85 ~ 105 ^②	(80 ~ 95)
q_F （BMCR，可用值，MW/m ² ）	4.0 ~ 4.8	4.2 ~ 5.1	4.2 ~ 5.0	(4.4 ~ 5.2)

续表

设 计 煤 质	$V_{daf} > 25\%$, $IT < 700^{\circ}C$		$V_{daf} < 20\%$, $IT > 700^{\circ}C$	
q_B (BMCR, 上限值, MW/m^2)	1.2 ~ 1.8	1.3 ~ 2.0	1.2 ~ 1.8	(1.2 ~ 2.0)
q'_V (BMCR, 上限值, kW/m^3) ^①	200 ~ 260		200 ~ 260	(180 ~ 240)
h_1 (下限值, m) ^①	17 ~ 20	18 ~ 21	18 ~ 22	(19 ~ 23)

注 括号内数值为参考值。
① q'_V 和 h_1 两种特征参数可以任选其一。
② 对于低结渣性煤, 如炉膛敷设卫燃带, q_V 上限可增加到 $110kW/m^3$ 。

表 1-2 燃用高水分褐煤的多角切向燃烧炉膛特征参数限值推荐范围

机组额定容量 (MW)	300	600
q_V (BMCR, 上限值, kW/m^3)	80 ~ 90	68 ~ 80
q_F (BMCR, 可用值, MW/m^2)	3.7 ~ 4.7	4.0 ~ 5.0
q_B (BMCR, 上限值, MW/m^2)	1.0 ~ 1.6	
h_1 (下限值, m)	20 ~ 24	22 ~ 26

对于严重结渣性煤, q_V 、 q_F 、 q_B 和 q_m 都宜从表 1-2 及表 1-4 中选其相应的较小值或最小值, 而 h_1 则宜选其较大值或最大值。对于着火性差而低结渣性煤, q_F 宜取较大值。

在一般条件下, 更要留意 q_V 的选值不宜过高或过低。过高会影响燃尽程度, 导致炉膛出口烟温过高以致受热面局部结渣; 过低则会使蒸发与过热受热面分配失衡, 危及锅炉运行性能。

以直流式燃烧器组织切向燃烧时, 为避免结渣, 其所形成的火焰应不偏斜、不刷墙, 火焰充满程度好, 热负荷均匀。一般来说, 相邻两气流间, 上游气流的扰动、射流两侧补气条件悬殊、气流本身动量不足、结构参数不合理 (例如喷口高宽比过大), 或者射流出口处斜切边界条件的影响等, 都可能造成气流的偏斜, 因此, 用于切向燃烧的直流式燃烧器炉膛断面切向燃烧炉膛水平断面的宽/深比 (w/D) 应尽量趋近于 1, 而不宜超过 1.15。

假想切圆直径要适当, 直流燃烧器射流在炉膛内形成假想切圆经验数据。以 HG-670/140 锅炉为例, 燃用无烟煤、贫煤、劣质烟煤的假想切圆直径为 1.0 ~ 1.2m, 燃用优质煤褐煤的假想切圆直径为 0.7 ~ 0.8m。热态下实际假想切圆直径约为假想切圆直径的 5 ~ 10 倍。

近年来为了减少结渣, 假想切圆直径减小。300MW 机组锅炉燃用烟煤, 一般假想切圆直径为 0.5 ~ 0.9m; 燃用贫煤为 0.5 ~ 1.0m。采用烟气热回流稳燃的锅炉取下限值, 或采用对冲布置。华能福州电厂和大连电厂 350MW 等级锅炉, 由于在一次风的背火侧采用了强劲的二次风作为支撑, 大小假想切圆直径采用 1.285, 1.480m (见表 1-3)。

燃烧器的高宽比 h/b 是反映气流抗偏转能力 (刚性) 的重要指标, 它与假想切圆直径大小、炉膛断面形状、燃烧器的布置、各喷口结构尺寸, 尤其是二次风与一次风的动量比有关。为提高气流的“刚性”, 可将整个燃烧器分组布置, 组间距 s 与燃烧器喷口宽度

b 的比值大于 2, 这相当于喷口两侧的压力平衡孔, 而每一组燃烧器的高宽比也可控制在 3.5~5 的范围, 避免射流贴墙。燃烧器分组多层布置还有利于改善炉膛的充满度, 对于大容量瘦高型的炉膛, 在提高断面热强度的同时, 还可使壁面热负荷更均匀, 尤其适合低挥发分煤的燃烧。

表 1-3 部分 300MW 等级机组假想切圆直径

序号	厂名	炉号	大、小假想切圆直径 (m)	煤种	备 注
1	邹县电厂	1.4	0.5, 0.7	烟煤	多功能燃烧器, 后因结渣将其取消, 切圆缩小
2	三门峡电厂	1, 2	0.7, 1.0		
3	汕头电厂				
	曲靖电厂				
4	首阳山电厂	3, 4			
5	靖远电厂	5, 6	0.713, 0.928		
6	大连电厂	1, 2	1.285, 1.480	贫煤	一次风背火侧有二次风作支持
7	福州电厂				
8	德州电厂		1.041		原为同轴燃烧系统二次风与一次风同旋向的切向燃烧方式 (CFS - I), 后将下两层改为双通道燃烧器
9	石门电厂		0.878		双通道燃烧器
10	潍坊电厂		0.5, 0.7		多功能燃烧器

切向燃烧炉膛的配风参数如表 1-4、表 1-5 所示。

表 1-4 配直吹式制粉系统的切向燃烧锅炉配风参数 (BRL 工况)

机组额定容量 (MW)	300	600
一次风喷口只数	16~24 ^①	20~32 ^①
一次风喷口层数	46 ^①	58 ^①
一次风率 (%)	14~30 ^①	
一次风出口速度 (m/s)	22~30 (褐煤 15~25) ^②	
二次风率 (%) ^③	86~70	
二次风出口速度 (m/s)	40~55	
炉膛出口过量空气系数	1.2~1.25	

- ① 高限值相应于褐煤。如褐煤水分较高而仅用热风作干燥剂时, 一次风率可酌情放大到 30%~40%, 此时二次风率相应减小。
- ② 低限适用于高水分褐煤。
- ③ 二次风率中包括上层燃尽风 (OFA), 配风率总和为 100%, 未计入炉膛漏风率 (一般小于 5%)。

表 1-5 300MW 等级配中储式制粉系统的切向燃烧锅炉配风参数 (BRL 工况)

一次风喷口只数	16~24
一次风喷口层数	4~6
一次风率 (%)	12~25 ^②
一次风出口速度 (m/s)	20~28
二次风率 (%) ^①	60~80
二次风出口速度 (m/s)	40~50
制粉乏气风率 (%)	0/ (15~25) ^③
乏气出口速度 (m/s)	50~60
炉膛出口过量空气系数	1.2~1.25

- ① 二次风率中包括上燃尽风 (OFA), 配风率总和为 100%, 未计入炉膛漏风 (一般为 5%)。
- ② 高灰分煤 ($A_d=30\% \sim 40\%$) 采用乏气送粉时可能达上限值。
- ③ 烟煤采用乏气送粉时为 0%; 低挥发分煤采用热风送粉时为 15%~20%; 高灰粉煤采用热风送粉时可能达上限, 具体数值与磨型选择及出力裕量有关。

燃用褐煤,采用风扇磨煤机、多角切向燃烧时,一次风速一般为 $14 \sim 20 \text{ m/s}$,二次风速为 $40 \sim 60 \text{ m/s}$ 。当使用热空气作干燥剂时,一次风率可达 $45\% \sim 50\%$,而采用高温炉烟干燥时其中空气的比例可降到 $10\% \sim 15\%$ 。

燃用褐煤,采用中速磨煤机热风干燥一次风率太高,组织燃烧困难,是当前的一大难题。目前,随着中速磨煤机的改进,即提高磨盘转速、磨辊压力可调、改进磨辊线性,使碾磨效率提高。采用旋转式分离器,分离效率提高,结果循环倍率降低,最后导致在热风干燥时,煤粉水分升高,一次风率降低。当收到基水分在 35% 以下时,煤粉水分可达 18% (老式中速磨煤机煤粉水分低至 $8\% \sim 11\%$),一次风率可以不超过 35% (老式中速磨煤机将达 40% 以上),较有利于组织燃烧。

以上所述配风参数都是以锅炉的额定出力工况 (BRL) 为准的。需要换算到锅炉最大连续出力 (BMCR) 工况时,一、二次风率,乏气风率和炉膛出口过量空气系数一般不变,出口速度应按 BMCR 与 BRL 工况风量比例相应增加。

2. 传统切向燃烧直流燃烧器常见的两种垂直布置形式

所有燃烧器,首先需要解决的问题就是着火和燃烧。配风是解决煤粉着火和燃烧的关键,按照煤种的不同,直流燃烧器所采用的不同的一、二次风布置方式,一般可分为均等配风和集中配风两种形式。

(1) 均等配风直流燃烧器

均等配风直流燃烧器的主要特点:一、二次风口相间布置,即每一个一次风口上下均布置有一个或两个二次风口;一、二次风口的间距相对较近。均等配风可使一、二次风自喷口喷出后很快混合,故适用于挥发分较高的烟煤和褐煤。若用热风送粉,也适用于挥发分较高的劣质烟煤。

(2) 集中配风直流燃烧器

集中配风直流燃烧器的结构特点:一次风口比较集中地布置在一起,能够形成高温燃烧区,以利于着火和燃烧;二次风口分层布置,且与一次风口保持较大的距离,以推迟一、二次风的混合,利于稳定着火;相对集中布置的一次风口大多数做成高宽比较大的直立矩形截面,用来加大煤粉射流与高温烟气的接触面积,增加卷吸高温烟气的能力。

集中配风的直流燃烧器主要用来燃用劣质烟煤和无烟煤。一次风口的高度不宜过大,否则风口截面过分狭长,气流的刚性减弱,射流易偏,易使水冷壁结渣。集中配风的一次风风速不宜过高,否则会使着火区远离喷口,降低燃烧器附近的烟气温度,影响着火的稳定性;风速太低又不利于混合扰动,刚性较差,气流易偏转。

为提高无烟煤、劣质烟煤的着火稳定性,应避免二次风过早混入一次风气流中,在着火初期,可采取分级送风的措施使二次风不与一次风混合,在着火后再逐次送入二次风,使其与燃烧煤粉强烈混合,并提供氧气和强烈混合后所需的扰动。混合先后顺序是先与近距离的二次风混合,再依次由近而远地混合,这样做会造成上二次风口与一次风口的距离较大。由于二次风是在着火后混合的,故需要较高的二次风速,以穿透着火后烟气黏度和焦炭粒子,促进气流扰动。

为保证无烟煤和劣质烟煤稳定着火,还可采用热风送粉,将制粉系统的乏气作为三次