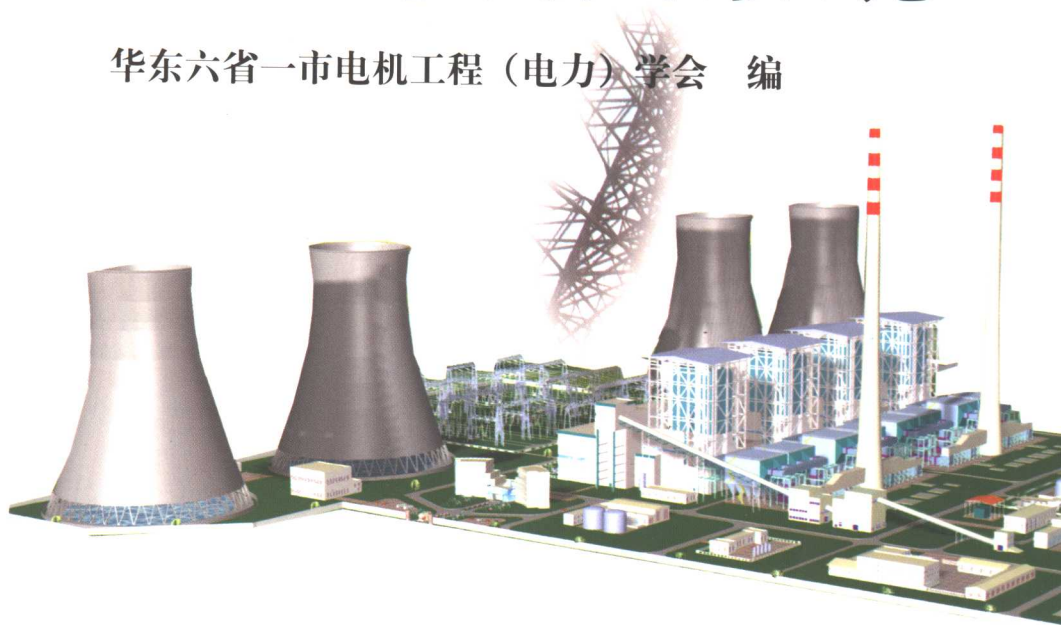


600MW 火力发电机组培训教材(第二版)

600MW HUO LI FA DIAN JI ZU PEI XUN JIAO CAI(DI ER BAN)

锅炉设备及其系统

华东六省一市电机工程(电力)学会 编



- *首套600MW级火电机组的新投产培训、岗位技能培训和职业技能鉴定的理想培训教材
- *突出亚临界、超临界、超超临界压力的600MW机组安装调试、运行维护和检修试验
- *适用于生产人员、工人、技术人员和管理干部等的上岗培训、在岗培训、转岗培训、技能鉴定和继续教育等



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

600MW 火力发电机组培训教材(第二版)

锅炉设备及其系统

华东六省一市电机工程(电力)学会 编

江苏工业学院图书馆
藏书章



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

2000年由华东六省一市电机工程(电力)学会组编的《600MW火力发电机组培训教材》(一套5册)出版以来,已深受了600MW级火力发电机组的生产人员、工人、技术人员和管理干部等上岗培训、在岗培训、转岗培训、技能鉴定和继续教育等的欢迎,为此在目前全国电力系统中600MW发电机组已成为人们认为最佳的主力机组和至今已有50多台投入了电网运行的情况下,决定对本套教材进行全面修订,以适应电力生产人员、工人、技术人员和管理干部认真学习和熟练掌握亚临界、超临界、超超临界压力的600MW级火力发电机组的运行技术和性能特点,更好地满足各类电力生产人员的培训需要。

本书是《600MW火力发电机组培训教材(第二版)》(锅炉设备及其系统)分册,共分四篇14章,主要内容有:第一篇锅炉本体设备,介绍600MW机组锅炉类型和发展概况,600MW控制循环锅炉及蒸发设备及水冷壁,600MW自然循环锅炉及蒸发设备及水冷壁,600MW超临界压力直流锅炉及水冷壁系统特性,锅炉过热器与再热器及其系统;第二篇锅炉燃烧设备,介绍磨煤机及其制粉系统,炉膛、直流煤粉燃烧器、旋流式煤粉燃烧器等燃烧设备以及W形火焰锅炉在国内外发展,点火器及燃烧器点熄火控制,燃烧中炉膛结渣、高温腐蚀和低 NO_x 燃烧技术等问题;第三篇锅炉辅助设备,介绍空气预热器性能规范、部件及构造、启停与维护、低温腐蚀和积灰,送引风机及一次风机的结构特性、调节和运行,锅炉各种阀门的结构、调节控制、运行维护和调整试验,吹灰装置及系统的结构原理、运行维护、调节试验;第四篇锅炉运行,介绍600MW锅炉启动必备条件,控制循环锅炉启动,600MW超临界压力锅炉启动,600MW控制循环锅炉停运,600MW超临界压力直流锅炉停运,锅炉停炉保养,汽包锅炉运行调节,600MW超临界压力直流锅炉运行调节。全书每章后均附上复习思考题。

本书可作为从事亚临界、超临界、超超临界压力的600MW级火力发电机组锅炉设备及其系统的安装调试、运行维护和检修技术等岗位生产人员、工人、技术人员和管理干部的上岗培训、在岗培训、转岗培训、技能鉴定和继续教育等的理想培训教材,也可作为从事300~900MW火力发电机组工作的锅炉设备及其系统生产人员、技术人员、管理干部和大专院校有关师生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

锅炉设备及其系统/华东六省一市电机工程(电力)学会
编. —2版. —北京:中国电力出版社,2006

600MW火力发电机组培训教材

ISBN 7-5083-4173-2

I. 锅… II. 华… III. 火电厂-锅炉-技术培训-教材
IV. TM621.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第018851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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2001年1月第一版

2006年5月第二版 2006年5月北京第五次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 31印张 841千字

印数12121 16120册 定价55.00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)

前言

近 10 多年来,大容量、高参数、高效率的大型发电机组在我国日益普及,由于 600MW 火力发电机组具有容量大、参数高、能耗低、可靠性高、环境污染小等特点,在我国《1994~2000~2010~2020 年电力工业科学技术发展规划》、《电力工业技术政策》及《电力工业装备政策》中都把 600MW 机组的开发研究和推广应用作为一项重要内容。自 1985 年以来,全国已有 100 多台的 600MW 机组陆续地投入了电网运行,它们即将成为我国电力系统的主力机组。为了确保 600MW 机组的安全、稳定、经济运行,600MW 机组岗位运行、技能鉴定和继续教育等培训工作就显着十分重要了。

为适应这一形势发展的需要,使广大生产岗位工人、技术人员和管理干部熟悉、了解和掌握 600MW 火力发电机组的技术性能和特点,经 2004 年 7 月华东地区六省一市电机工程(电力)学会联合编辑工作委员会联席会议认真讨论研究,决定组织修订《600MW 火力发电机组培训教材》(共 5 册),联合编委会根据联席会议精神,在中国电力出版社的积极支持和指导下,启动《600MW 火力发电机组培训教材》(第一版)的修订工作,选择修编专家和审稿专家,着手搜集资料,制订和审查编撰大纲等。2005 年 10 月各分册书稿陆续编写完毕,各负责单位分别对初稿组织专家进行了审查,随即送中国电力出版社编辑加工、出版和整个教材的编审工作,前后共花去了两年多的时间。

本套教材(第二版)共分五个分册,即《锅炉设备及其系统》、《汽轮机设备及其系统》、《电气设备及其系统》、《热工自动化》、《电厂化学与环境保护》,全套教材共约 350 万字。

本套教材(第二版)是以亚临界、超临界压力的 600MW 火力发电机组为介绍对象,并适当增加超超临界压力机组的内容。本套教材(第二版)是在对 600MW 机组各子系统的结构、原理、功能、性能和特点进行详细介绍的基础上,重点突出 600MW 火力发电机组的岗位运行和技能操作特点;在理论阐述和技能深度方面,以岗位运行知识为基础,提高技能操作能力为目的;在语言描述和整体内容方面,力求通俗易懂,深入浅出,并配备操作实例。本教材(第二版)属于 600MW 火力发电机组岗位运行、技能操作和继续教育的培训教材,适用于对具有大中专及以上文化程度的 600MW 火力发电机组生产岗位和技术管理人员培训之用,也可借用于高等院校热能和电力等专业的相关师生参考。

在本套教材的第二版修编过程中,华东地区六省一市电力公司、相关大专院校、发电厂以及有关专家学者和科技人员给予了热情的支持和帮助,我们在此一并表示感谢。我们还要感谢中国电力出版社,在历次联合编委会会议上都派出编辑参加和指导,经常关心编撰工作进度,协助解决疑难问题,对我们的工作给予了全方位的支持和鼓励。

限于编审人员的水平,本套教材第二版的疏漏之处一定不少,恳请广大读者提出宝贵意见,以便今后修订,提高质量,使之能更好地为我国电力工业的建设和发展服务。

华东地区六省一市电机工程(电力)学会

2006 年 2 月

编者的话

华东六省一市电机工程(电力)学会曾于1998年组织编写并出版了一套《600MW火力发电机组培训教材》(共5册),本次是《600MW火力发电机组培训教材(第一版)》(锅炉设备及其系统)分册的修订版,也是《600MW火力发电机组岗位培训教材(第二版)》分册之一。

本次修订基本上保持了原书第一版的分篇格式,但对内容做了较多的增删和更新,改编内容力求反映近10多年来随着我国600MW大型火力发电机组,包括亚临界、超临界和超超临界压力的机组大量建设所带来的锅炉设备及其系统的发展状况和最新技术。

全书分四篇共十四章,内容突出600MW机组锅炉特点,以实际设备、系统及其运行为主要内容,辅以相关的理论。在取材方面,尽量做到能反映我国现有600MW机组锅炉的现状和国外的先进经验、技术。全书系统地介绍了目前国内600MW机组所采用的自然循环锅炉、控制循环锅炉、超临界压力直流锅炉本体系统及其特点,以及机组启停和运行维护等,对相应制粉系统及其设备、送引风机、阀门、吹灰器也做了较为详细的介绍。

本书由上海电力学院章德龙教授编写。

本书由华东电力试验研究院乐长义教授级高级工程师主审,华中理工大学容釜恩教授也在百忙中详细审阅了全部书稿,提出了许多宝贵的意见和建议,使编者在修改过程中得益非浅,特向他们表示深切的谢意。

本书在编写第一版到本次修订的整个过程中,得到了华东电网公司、华东六省一市电机工程学会联合编委会及刘时中等同志的大力支持和帮助,特在此表示衷心的感谢。平圩发电厂、石洞口第二电厂,北仑发电厂、邹县发电厂、太仓发电厂等单位为本书的编写提供了许多宝贵的资料和建议,也一并向他们表示由衷的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有缺点和错误,恳请读者指正。

编者

2006年2月

《600MW 火力发电机组培训教材》(第二版)

编 委 会

组编单位: 山东省电机工程学会
安徽省电机工程学会
江西省电机工程学会
浙江省电力学会
福建省电机工程学会
上海市电机工程学会
江苏省电机工程学会

联合编委会成员:

主任委员:	叶惟辛	江苏省电机工程学会
副主任委员:	林淦秋	上海市电机工程学会
	严行健	江苏省电机工程学会
委 员:	史向东	山东省电机工程学会
	赵家生	安徽省电机工程学会
	张 虹	浙江电力学会
	贾观宝	江苏省电机工程学会
	吕 云	福建省电机工程学会
	陈家湄	江西省电机工程学会

《锅炉设备及其系统》

(第二版)

主 编: 章德龙
主 审: 乐长义 容奎恩

目 录

前言 编者的话

第一篇 锅炉本体设备

第一章 锅炉设备整体介绍	1
• 第一节 600MW 机组锅炉类型和发展概况	1
一、600MW 机组锅炉类型和特性 (1) 二、电站锅炉技术发展动向 (7)	
• 第二节 600MW 控制循环锅炉	8
一、北仑电厂 600MW 控制循环锅炉总体介绍及设计特点 (8) 二、平圩电厂 600MW 机组锅炉设备及其特点 (18)	
• 第三节 600MW 自然循环锅炉	25
一、北仑电厂 600MW 自然循环锅炉总体介绍 (25) 二、邹县电厂 2020t/h 亚临界压力自然循环锅炉 (33)	
• 第四节 600MW 超临界压力直流锅炉	39
一、石洞口第二电厂 600MW 超临界压力直流锅炉 (39) 二、太仓电厂 600MW 超临界压力直流锅炉 (49)	
• 复习思考题	53
第二章 蒸发设备及水冷壁	54
• 第一节 600MW 自然循环锅炉蒸发设备	54
一、亚临界压力自然循环基本特性 (54) 二、FWEC2020/18.1—1 型自然锅炉循环回路特点 (57)	
三、邹县电厂 FWEC2020/18.1—1 型自然循环锅炉汽包结构特点 (60)	
• 第二节 600MW 控制循环锅炉蒸发设备	62
一、水冷壁系统 (以北仑电厂 1 号炉为例) (63) 二、锅水循环泵 (64) 三、控制循环锅炉汽包结构 (71)	
• 第三节 超临界压力锅炉水冷壁系统特性	75
一、超临界参数基本特性 (75) 二、超临界压力螺旋管水冷壁结构及特点 (90) 三、汽水分离器作用和构造 (108)	
• 复习思考题	110
第三章 锅炉过热器与再热器	112
• 第一节 过热蒸汽和再热蒸汽系统	112
一、CE600MW 锅炉过热蒸汽和再热蒸汽系统 (112) 二、石洞口二厂 1900t/h 超临界压力锅炉过热蒸汽及再热蒸汽系统 (115) 三、邹县电厂 FW—2020t/h 自然循环锅炉过热器及再热器系统 (125)	
• 第二节 过热汽温和再热汽温调节	128
一、汽温调节重要性 (128) 二、过热汽温调节 (129) 三、再热汽温调节 (136)	
• 第三节 过热器与再热器热偏差	139

一、热偏差概念 (139) 二、各种型式过热器 (再热器) 热偏差特性 (141) 三、减轻热偏差措施 (143)	
• 复习思考题	144

第二篇 锅炉燃烧设备

第四章 磨煤机及其制粉系统	145
• 第一节 HP、RP 磨煤机结构及其特性	145
一、HP 磨煤机主要部件结构与特点 (146) 二、磨煤机调整 (151) 三、RP—1003 型碗式中速磨煤机 (152)	
• 第二节 MPS 磨煤机结构及其特性	154
一、概述 (154) 二、MPS 磨煤机结构 (155) 三、液压加压装置 (165) 四、MPS 结构特点 (167)	
• 第三节 双进双出钢球磨结构及其特性	169
一、概述 (169) 二、D—10—D 型双进双出球磨机性能结构 (171) 三、D—10—D 型双进双出球磨机主要技术特点 (173) 四、双进双出球磨机运行特点 (176)	
• 第四节 给煤机结构及特性	178
一、给煤机设备规范与设计准则 (178) 二、给煤机结构 (179) 三、电源动力柜和电子控制柜 (181) 四、给煤过程和称重原理 (182) 五、给煤机运行 (184)	
• 第五节 制粉系统及其运行	189
一、制粉系统组成 (189) 二、制粉系统运行 (194)	
• 复习思考题	199
第五章 燃烧设备	200
• 第一节 炉膛	200
一、炉膛设计参数 (200) 二、炉膛与煤种 (202) 三、炉膛与燃烧器 (206)	
• 第二节 直流煤粉燃烧器	207
一、北仑电厂 1 号锅炉燃烧器 (207) 二、平圩电厂 600MW 直流燃烧器特性 (215) 三、石洞口二厂 1900t/h 超临界压力锅炉燃烧器设计特点 (219)	
• 第三节 旋流式煤粉燃烧器	227
一、北仑电厂 2 号炉旋流式燃烧器 (227) 二、CF/SF 低 NO _x 旋流燃烧器 (230) 三、HT—NR3 低 NO _x 旋流式煤粉燃烧器 (236)	
• 第四节 W 形火焰锅炉在国内外发展	240
一、W 形火焰锅炉燃烧技术特点 (241) 二、国外 W 形火焰锅炉应用情况 (243) 三、我国发展 W 形火焰锅炉概况 (245)	
• 复习思考题	247
第六章 点火器及燃烧器点熄火控制	248
• 第一节 点火器	248
一、概述 (248) 二、常规点火燃烧器 (250) 三、点火燃烧器布置方式 (253) 四、点火装置实例 (255)	
• 第二节 火焰检测器	256
一、炉膛中火焰特性和辐射光谱 (256) 二、火焰检测器分类和性能 (257) 三、火焰检测器在锅炉上的应用 (260)	
• 第三节 燃烧器管理系统 (BMS) 运行程序	266
一、锅炉清扫 (266) 二、轻油、重油系统泄漏试验 (267) 三、轻油点火器控制 (268) 四、	

重油枪控制 (269) 五、煤层控制 (270) 六、一、二次风挡板控制 (274) 七、燃料安全系统——燃料跳闸 (275) 八、火焰检测逻辑 (276) 九、火焰检测器探头冷却风机控制 (277)

- 复习思考题 277

第七章 燃烧中问题..... 279

- 第一节 炉膛结渣..... 279
 - 一、煤灰结渣倾向特性 (279) 二、受热面结渣 (285) 三、结渣防止措施 (288)
- 第二节 高温腐蚀..... 288
 - 一、煤灰高温腐蚀机理 (289) 二、煤灰腐蚀性预测 (290) 三、燃料油灰腐蚀 (291)
- 第三节 低 NO_x 燃烧技术..... 292
 - 一、概述 (292) 二、 NO_x 控制措施 (294)
- 复习思考题 300

第三篇 锅炉辅助设备

第八章 空气预热器..... 301

- 第一节 概述 301
 - 一、漏风保证值 (301) 二、性能保证值 (302) 三、回转式空气预热器主要规范 (302)
- 第二节 回转式空气预热器部件及构造..... 303
 - 一、机壳 (303) 二、转子 (306) 三、轴承及润滑油系统 (308) 四、传动装置 (311) 五、密封装置 (312) 六、清洗装置 (320)
- 第三节 回转式空气预热器启停与维护..... 320
 - 一、回转式空气预热器启动 (321) 二、运行监视及维护 (322) 三、回转式空气预热器停用 (323) 四、回转式空气预热器吹灰 (324) 五、回转式空气预热器清洗 (324) 六、预热器常见故障及应采取的措施 (325) 七、红外线检测系统 IDS (327)
- 第四节 回转式空气预热器低温腐蚀和积灰..... 330
 - 一、回转式空气预热器低温腐蚀 (330) 二、回转式空气预热器波纹板上积灰 (334)
- 复习思考题 335

第九章 送引风机及一次风机..... 336

- 第一节 概述 336
 - 一、轴流风机与离心风机相比较主要特点 (336) 二、轴流风机作用原理 (338) 三、轴流风机基本型式 (340)
- 第二节 轴流风机结构特性 341
 - 一、轴流风机型号及参数 (341) 二、轴流式送引风机结构 (343)
- 第三节 轴流送风机调节 349
 - 一、轴流风机性能曲线 (349) 二、风道性能曲线 (351) 三、轴流风机调节 (352) 四、平衡重块 (354) 五、轴流风机主要技术特点 (355)
- 第四节 轴流送风机运行 356
 - 一、旋转失速与喘振 (356) 二、轴流风机并联运行不稳定工况 (359) 三、风机供油装置 (360) 四、轴流送风机启停程序 (363) 五、轴流送风机故障原因及消除 (364)
- 第五节 双吸双速离心式引风机 366
 - 一、双吸双速离心引风机结构设计特点 (366) 二、双吸双速离心引风机结构 (366) 三、离心式风机性能曲线 (367) 四、风机运行 (368)
- 复习思考题 371

第十章 锅炉阀门..... 372

• 第一节 阀门一般知识	372
• 第二节 闸阀	373
• 第三节 截止阀	374
• 第四节 锅水循环泵出口阀	375
一、用途 (375) 二、工作原理 (375) 三、结构特点 (375) 四、阀门调整、运行和维护 (376)	
• 第五节 调节阀	376
一、调节阀类型 (377) 二、调节阀工作特性曲线 (377) 三、喷水减温调节阀 (379)	
• 第六节 电磁泄压阀	381
一、用途 (381) 二、电磁泄压阀结构及工作原理 (381) 三、电气控制装置 (383)	
• 第七节 全量型安全阀	384
一、用途 (384) 二、全量型安全阀结构与工作原理 (385) 三、锅炉水压试验时安全阀注意事项 (388) 四、全量型安全阀现场调整试验 (389)	
• 复习思考题	391

第十一章 吹灰装置..... 393

• 第一节 吹灰器布置及系统	393
一、吹灰器作用 (393) 二、锅炉吹灰器布置及系统 (395)	
• 第二节 吹灰器结构及工作原理	396
一、炉膛吹灰器 (396) 二、烟道长伸缩型吹灰器 (398) 三、IK—AH500 型回转式空气预热器用吹灰器 (402)	
• 第三节 吹灰器运行	403
一、吹灰器试验及运行 (403) 二、吹灰器程序控制 (405)	
• 复习思考题	410

第四篇 锅 炉 运 行

第十二章 600MW 锅炉启动 411

• 第一节 锅炉启动必备条件	411
一、锅炉检修后验收与辅机试转 (411) 二、锅炉连锁保护试验及事故按钮试验 (413) 三、锅炉启动应具备的条件 (415)	
• 第二节 控制循环锅炉启动	415
一、控制循环锅炉启动一般程序 (415) 二、启动中汽包应力分析及控制 (418) 三、锅水循环泵启动 (423) 四、启动过程中受热面保护 (427) 五、洗硅 (429) 六、启动过程中燃烧 (429)	
• 第三节 600MW 超临界压力锅炉启动	430
一、设备简介 (430) 二、机组启动状态划分 (431) 三、锅炉启动旁路系统 (435) 四、锅炉水冲洗 (435) 五、锅炉吹扫 (436) 六、锅炉点火及启动中燃烧器控制 (437) 七、锅炉升温升压 (438) 八、汽水分离器干、湿态转换 (440) 九、锅炉热应力控制 (442) 十、高低压旁路控制 (444)	
• 复习思考题	445

第十三章 600MW 锅炉停炉及保养 446

• 第一节 控制循环锅炉停运	446
一、控制循环锅炉停炉特点 (446) 二、正常停炉步骤 (446) 三、请求停炉步骤 (449) 四、事故停炉 (故障停炉) 步骤 (449) 五、停炉注意事项 (449) 六、北仑电厂 600MW 控制循环锅炉停炉特点 (451)	
• 第二节 石洞口二厂 600MW 超临界压力直流锅炉停运	451

一、石洞口二厂 600MW 超临界压力机组停机特点 (451) 二、 停机操作 (453)

• 第三节 锅炉停炉保养 455

一、防腐方法分类 (455) 二、 湿式保养法 (455) 三、 氮气置换法 (457) 四、 充氮防腐 (457)

• 复习思考题 457

第十四章 锅炉运行调节..... 458

• 第一节 概述 458

• 第二节 汽包锅炉运行调节 459

一、 锅炉汽包水位控制调节 (459) 二、 蒸汽温度控制与调节 (462) 三、 汽压调节 (468) 四、 燃烧调节 (472)

• 第三节 石洞口二厂 600MW 超临界压力直流锅炉运行调节 477

一、 直流锅炉调节特点 (477) 二、 汽温和汽压调节 (478) 三、 石洞口二厂 1900t/h 超临界压力锅炉运行调节 (479)

• 复习思考题 485

参考文献 486

锅炉设备整体介绍

第一节 600MW 机组锅炉类型和发展概况

600MW 级燃煤机组是世界多数工业发达国家重点发展的火电厂主力机组, 在一些国家火力发电机组标准系列中是一个重要的级别。这一容量等级的机组也是目前我国火电建设中将要大力发展的系列之一。从 1985 年我国第一台引进的 600MW 火力发电机组在元宝山电厂投运开始, 我国进入了发展 600MW 火电机组的年代, 先后有安徽平圩电厂两台亚临界压力 600MW 机组、上海石洞口第二电厂两台超临界压力 600MW 机组、浙江北仑电厂两台亚临界压力 600MW 机组、山东邹县电厂亚临界压力 600MW 机组和哈尔滨第三电厂 600MW 亚临界压力机组等相继投产。目前, 国内各锅炉厂引进国外技术分别制造不同类型的 600MW 亚临界、超临界压力锅炉, 该类型的锅炉已成为目前电站发展的主力机组。

一、600MW 机组锅炉类型和特性

(一) 锅炉蒸发系统内工质流动方式

锅炉蒸发系统内工质的流动方式主要有自然循环、控制循环、直流炉及直流复合循环四种。直流炉适合于超临界及亚临界压力参数, 自然循环及控制循环只适宜于亚临界压力参数。目前, 国内 600MW 级锅炉主要有自然循环、控制循环和直流炉三种型式。

1. 自然循环汽包炉

自然循环汽包炉主要特点是流动方式简单、运行可靠, 在以往的电站锅炉中采用自然循环锅炉是相当普遍的。在美国, 为了确保机组的可用率, 20 世纪 70 年代订购的大部分电站锅炉都是亚临界压力汽包炉, 并设计成能超压 5% 运行。目前, 国内已投运的 600MW 级自然循环锅炉设备也是引进拔柏葛公司和福斯特·惠勒公司的。

拔柏葛公司根据其在亚临界压力直流炉上为防止膜态沸腾而采用内螺纹管的经验, 在自然循环汽包炉上亦加用内螺纹管, 以保证循环可靠, 使其成为保证炉膛水冷壁达到充分冷却的最简单、有效及可靠的方法。该公司认为自然循环采用内螺纹管在接近亚临界压力下对防止膜态沸腾是很有效的。自然循环主要依靠下降管内水的平均密度与水冷壁内汽水混合物的平均密度之差而进行的, 由于它们的密度差造成一定的流动压头, 从而使蒸发受热面内工质达到往复循环。随着压力从 15.092MPa 上升至 20.678MPa, 下降管内的水密度仅减少约 10%, 而水冷壁管内的密度则几乎保持不变, 仍能维持足够的有效压头。另外, 由于自然循环锅炉具有能适应炉膛内吸收热量变化而进行自调节的优点, 因此吸收热量最多的管子通过的

水量也最多,可防止传热不均匀现象的产生。自然循环不需循环泵,故投资及运行费用均可减少。

在炉膛高热负荷区域为使管子得到充分冷却并维持核态沸腾,需要一定的质量流速,而这种流速随着汽包运行压力的升高而增加。现已证明,采用光管的自然循环能够达到这种流速,但它防止偏离核态沸腾的能力较小,特别在不稳定工况下更是如此,有可能产生膜态沸腾。虽然可使用辅助循环泵来提高其质量流速以防止膜态沸腾,但可用内螺纹管(不设置循环泵)来提高核态沸腾的可靠性。即使压力达到 20.678MPa 时,其循环可靠性仍然是很好的。

2. 控制循环锅炉

控制循环锅炉是美国燃烧工程公司(CE)的专利,我国哈尔滨锅炉厂和上海锅炉厂也引进此种锅炉的制造技术,第一、二台 600MW 级的控制循环锅炉已在安徽平圩电厂投运。由于引进 CE 的制造技术,已在国内不少电厂安装这种类型 600MW 级的锅炉。

控制循环锅炉的主要特点是在锅炉循环回路的下降管和上升管之间加装循环泵以提高循环回路的流动压头,因此汽包及上升管、下降管可采用较小的直径。但是加装辅助循环泵,运行时需消耗一定的功率,一般情况下循环泵消耗的功率相当于锅炉功率的 0.3%~0.4%。

3. 直流锅炉

直流锅炉也是大容量锅炉发展方向之一。特别是采用超临界参数的锅炉,直流锅炉是唯一能采用的锅炉型式。本生型直流锅炉发源于德国,早期本生型锅炉的炉膛蒸发受热面管子是多次上升垂直管屏,用中间混合联箱与不受热的下降管互相串联。因此每个管屏侧边的管子与相邻管屏中的侧边管子有一定的温差、会产生一定的热应力,对膜式水冷壁的焊缝会起破坏作用。通用压力型锅炉(UP 炉)是拔柏葛公司在本生炉基础上加以改进的一种炉型,所谓通用压力型锅炉是指无论亚临界或超临界参数,均可采用的炉型。上海锅炉厂 300MW 级的直流锅炉采用此种炉型。UP 炉的主要特点是采用全焊膜式水冷壁,工质一次或二次上升,连接管多次混合,每个回路焓增较小,并有较高的质量流速,可保持水冷壁可靠的冷却。采用内螺纹管以防止蒸发段产生膜态沸腾。对于 UP 炉来说一般用于大型超临界压力直流炉,以确保水冷壁管内的质量流速,国内 300MW 级 UP 炉为确保水冷壁管的质量流速,而被迫采用较小水冷壁管径,因而对直流炉水冷壁的安全带来极为不利的因素。

不论本生型直流炉或一次垂直上升的 UP 型直流炉,由于水冷壁系统中有混合联箱,不适应大容量机组变压运行的要求。在变压运行中,随着锅炉压力下降、机组负荷下降,当在低压运行时,蒸发受热面中工质的温差的大幅度变化以及汽水混合物难以从中间混合联箱出口进行均匀分配等问题,使这种直流锅炉管屏型式(垂直上升)不能与之相适应。因此拔柏葛公司、德国斯坦因缪勒公司等人在炉膛的辐射受热面的结构型式上相继采用螺旋型上升管圈。管圈自炉膛底部沿炉膛四周盘旋上升至炉膛折焰角处,炉膛上部管屏改变为垂直上升管屏,以利于管子穿墙及悬吊结构的布置。螺旋管圈除进出口联箱外,中间不设置混合联箱,这种管圈的优点是热偏差小,且因无中间混合联箱,不会产生汽水混合物的不均匀分配的问题,因此可做成全焊接的膜式水冷壁管圈,这是本生型锅炉的一大改革。采用螺旋管水冷壁具有如下的优点:

(1) 蒸发受热面采用螺旋管圈时,管子数目可按设计要求而选取,不受炉膛大小的影响,可选取较粗管径以增加水冷壁的刚度;

(2) 螺旋管圈热偏差小,工质流速高,水动力特性比较稳定,不易出现膜态沸腾,又可防止产生偏高的金属壁温;

(3) 因无中间混合联箱,不会产生汽水混合物不均匀分配的问题;

(4) 带循环泵系统,启动及低负荷运行的热损失较小,可以提高机组的效率。循环泵只在

15%~35%负荷时才使用,故泵的功率消耗较小;

(5) 因启动有汽水分离器,使蒸发受热面与过热受热面有比较明显的分界线,易于处理调节系统;

(6) 螺旋形管圈对燃料的适应范围比较大,可燃用挥发分低、灰分高的煤;

(7) 能变压运行,快速启停,能适应电网负荷的频繁变化,调频性能好。

螺旋管圈虽有以上优点,但它的结构与制造工艺复杂,故制造与安装比较困难,所需工期较长。

目前,国内引进的 600MW 级直流锅炉就是这种型式,从炉底到折焰角部位采用螺旋管圈,炉膛上部采用垂直上升管屏。例如,石洞口第二电厂是引进瑞士苏尔寿公司制造的超临界压力直流锅炉,而元宝山电厂是引进德国斯坦因缪勒公司制造的亚临界压力本生直流炉,而且锅炉采用塔式结构布置型式。

美国燃烧工程公司在瑞士苏尔寿锅炉的基础上,根据控制循环锅炉的经验发展了复合循环直流锅炉,此种炉型在美国、日本等采用较多,主要用于超临界压力参数机组,目前国内还未引进这种型式的直流锅炉。此种类型的直流锅炉的主要特点是在直流锅炉系统中加 1~2 台复合循环泵,在低负荷时将水冷壁出口工质通过混合球,并与从省煤器来的给水在混合球内进行均匀混合,然后再进入循环泵的入口进行再循环。在高负荷(一般在 60%~80%MCR 以上)时则停止再循环,以直流方式运行。而循环泵也可在锅炉系统中串联运行,也可使循环泵停运,给水由循环泵的旁路进入水冷壁系统。复合循环锅炉可保证锅炉在各种负荷时水冷壁中的工质的质量流速差别不大,工作可靠。与一般直流炉相比其优点主要是水冷壁质量流速可按再循环停止时的负荷选取,因此可选用较低的质量流速,以减少流动阻力。启动流量低时,启动系统的容量可按循环泵的工作起始点考虑,相应地可减少投资和启动热损失,锅炉的最低负荷极限可降到 10%左右。由于工质流量变化小,温度变化小,相应地减小了温度应力,有利于在低负荷下运行。由于水冷壁的质量流速可由循环泵容量来保证,可避免采用过小直径水冷壁管,可在锅炉出力很低时启动汽轮发电机,因此可不要保护再热器的旁路系统,简化了启动系统。

(二) 燃烧方式

从目前国内引进的或引进技术制造的 600MW 级锅炉来看,北仑电厂 1 号炉、平圩电厂两台引进技术制造的 600MW 锅炉以及石洞口第二电厂两台超临界压力 600MW 锅炉,它们的燃烧系统都采用 CE 公司的传统设计方法,即为四角布置直流燃烧器的切圆燃烧方式,再热汽温调节采用摆动燃烧器,配置 HP、RP 碗式中速磨煤机的直吹式制粉系统。元宝山电厂的 600MW 锅炉由于燃用褐煤,它配置了 8 套风扇磨煤机的直吹式制粉系统,煤粉燃烧器为八角切圆燃烧方式。而北仑电厂 2 号炉、邹县电厂 600MW 锅炉的燃烧系统则是采用拔柏葛公司和福斯特·惠勒公司的传统设计方法,即采用旋流燃烧器前后墙对冲布置方式,制粉系统采用 MPS 磨煤机或双进双出筒式钢球磨煤机的直吹式系统,再热汽温调节一般采用烟气挡板。

近年来,为了改善低负荷的燃烧稳定性和降低 NO_x 的生成,对 600MW 级锅炉的燃烧器的结构作了不少的改进,概括起来有以下特点。

1. 四角切圆布置的直流燃烧器

(1) 采用高调节比的煤粉喷嘴。为了提高低负荷时燃烧的稳定性,美国燃烧工程公司对一次风喷嘴的结构作了改进。在煤粉喷嘴管内装置水平肋片,并改进了喷嘴头部的装配,使喷嘴出口截面和入口截面相等,而喉口截面积约为入口截面积的 95%,这样使喷嘴出口速度降低。这一改进的主要目的是有意识地利用煤粉气流在一次风管内转弯后煤粉的分离作用,使喷嘴上半部出口气流的煤粉浓度较高,以利于煤粉着火,也适当降低了一次风出口速度。在此基础上,燃烧工

程公司又发展了一种新的一次风喷嘴，并称之为高调节比喷嘴。如图 1-1 所示，喷嘴头部做成可分别摆动的两部分，它们的摆动角相差可以达 24° 。这样，如同在一次风喷嘴出口装有钝体一样，在一次风气流中可以形成一个回流区，进一步提高了着火稳定性。此外，喷嘴出口截面积增加到入口面积的 130%，这种喷嘴的外形见图 1-2。

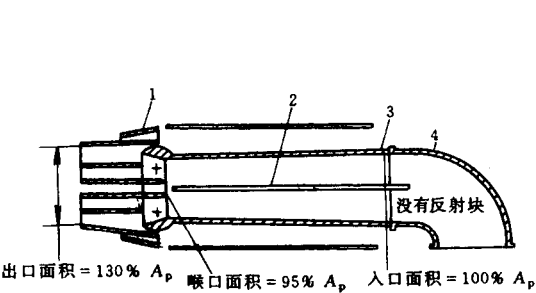


图 1-1 高调节比喷嘴
1—高调节比喷嘴；2—水平肋片；3—喷嘴管；
4—入口弯头（煤粉管道面积 A_p ）

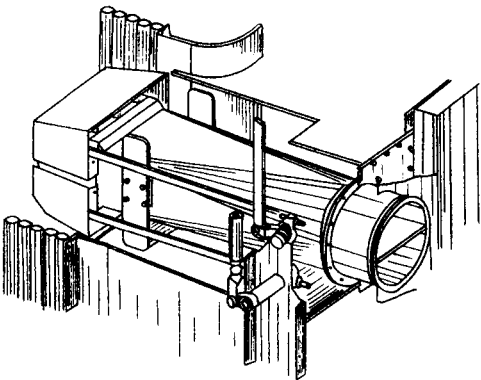


图 1-2 高调节比喷嘴外形图

上述高调节比喷嘴的一个重要缺点是需要两套使喷嘴摆动的传动机构，故增加了造价和维修费用。为此又发展了新的结构，有两种方案：①在图 1-3 所示结构中，在喷嘴出口处设有波形扩锥，将扩锥做成波形可以增加一次风气流和回流烟气的接触面，目前从 CE 引进的设备基本上采用此种结构型式；②在图 1-4 所示结构中则采用了简单的三角形扩锥，但在扩锥出口处有不小的翻边，试验表明，此翻边对增加高温烟气的回流有很大作用，扩锥的角度为 20° 。喷嘴的内部尺寸见图 1-5。在一些电厂的试验表明，上述喷嘴可以在 20% 负荷下不用投油助燃可保持稳定燃烧。

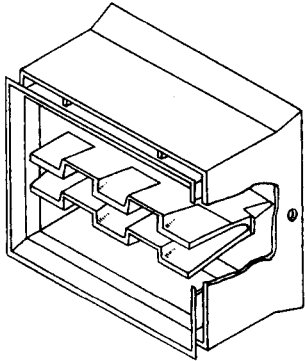


图 1-3 设有波形扩锥的喷嘴

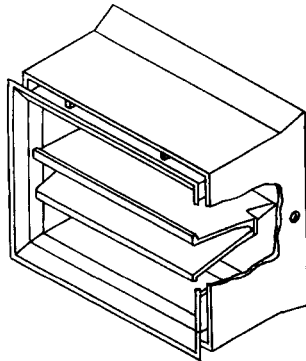


图 1-4 设有带翻边的
三角形扩锥的喷嘴

(2) 低 NO_x 燃烧器。用两级燃烧（或称分级燃烧），即用大约 80% 的空气量从下部燃烧器喷口送入，使下部风量小于完全燃烧所需风量（即富燃料燃烧），从而降低燃烧区段温度，使 NO_x 的反应率下降，此时有些氮得不到氧，复合为 N_2 ， NO_x 就会减少（即燃烧过程延迟），然后从上部燃烧器喷口送入其余约 20% 的空气（即富空气燃烧）以达到风煤燃烧平衡。两级燃烧不但能抑制生

成 NO_x , 而且也能抑制空气中的氮在高温下与氧反应生成的 NO_x , 这是控制 NO_x 较为有效的方法。利用这一原理, 美国燃烧工程公司在大容量煤粉炉上普遍推广采用燃尽风(over fire air, OFA), 即在角置式直流燃烧器喷口的最上端再布置 2~3 层燃尽风喷口, 将大约 10%~25% 总风量的风从此处送进炉膛上部。目前, 从 CE 引进设备或引进 CE 技术制造的 600MW 级锅炉的角置式直流燃烧器的最上方都布置了两层燃尽风喷口。

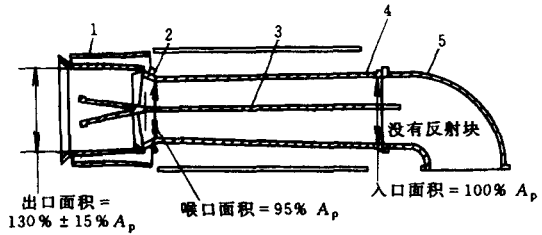


图 1-5 设有三角形扩锥的喷嘴剖面图
1—喷嘴头部;2—密封片;3—水平肋片;
4—喷嘴管;5—入口弯头(煤粉管道面积 A_p)

(3)减少四角切圆燃烧锅炉的炉膛出口水平烟道左右两侧烟温差、流速偏差及防止过热器、再热器局部超温爆管, 对 600MW 以上机组的安全运行有极为重要的意义。

锅炉过热器、再热器各管存在汽温偏差的根本原因在于各管的传热、流动特性不同。通常, 引起汽温偏差的因素包括: 吸热偏差、流量偏差、结构偏差及进口汽温偏差。在四角布置切圆燃烧的锅炉中, 沿烟道宽度各管之间的吸热偏差是造成汽温偏差的最主要的原因之一。

切圆燃烧方式的锅炉, 由于炉膛出口气流残余旋转的影响, 会引起在水平烟道左右两侧存在一定的速度偏差及温度偏差, 从而造成两侧对流传热系数及温压的不同, 这是沿烟道宽度左右两侧存在吸热偏差的最主要原因。随着锅炉容量的增加, 水平烟道中的速度偏差及烟温偏差有增大的趋势。通过对国产 200MW、300MW 及 600MW 机组锅炉炉内空气动力场的模化实验发现, 水平烟道左右两侧平均速度之比分别可达 1.24、2.0 和 2.15。这一增加趋势是锅炉从小容量向大容量发展过程中的内在因素造成的。随着锅炉容量的增大, 炉膛出口水平烟道左右侧烟气流速及烟温偏差增加, 引起烟道中过热器及再热器各管传热温压及对流传热系数的不同, 造成过热器与再热器的吸热偏差。因而, 对于大容量电站锅炉, 特别是 300MW、600MW 机组锅炉, 如何减少过热器与再热器的吸热偏差是个非常重要的问题。

如前所述, 沿烟道宽度各管的吸热偏差是由于炉膛出口气流的残余旋转导致了水平烟道左右侧烟气流速和温度偏差所引起。因此, 降低沿烟道宽度各管之间的吸热偏差的根本途径在于削弱炉膛出口气流的残余旋转。通过适当控制一、二次风动压比和使部分射流风反切, 将一次风或部分二次风、燃尽风射流与主体旋转气流反切, 可以削弱炉膛出口气流残余旋转, 降低水平烟道左右侧烟气流速偏差。另外, 在两级过热器、再热器之间安装混合联箱或左右交叉系统也是十分必要的, 特别是对于再热器(因为再热蒸汽压力低、比热小, 汽温偏差更大)更有必要。

2. 墙式布置旋流燃烧器

(1)采用分级燃烧的方式、降低 NO_x 的生成率。所谓分级燃烧亦常称“偏离化学当量燃烧”, 它是将一部分小于化学当量的空气引入燃烧器, 而将其余空气由二次风口引入或从中间引入燃烧器, 这样可降低燃烧区域的过量氧量, 以减少 NO_x 的生成量。

目前国内引进的 600MW 机组的旋流燃烧器为双调节切向叶片式旋流燃烧器, 在不少资料中也称为低 NO_x 的燃烧器, 其设计的思想是使燃烧过程按二段燃烧方式进行, 达到稳燃和遏制 NO_x 生成量的目的。

燃烧器结构如图 1-6 所示, 在燃烧器的轴心线上为一个断面是圆形、类同文丘里管的煤粉气流通道。来自煤粉管道的煤粉气流从下方经 90° 的弯管进入燃烧器, 首先在通道上部与被称为导向器的挡块相碰撞。流经管道弯曲半径较大处的气流, 由于气流转向使煤粉浓度提高, 能借助于挡块的

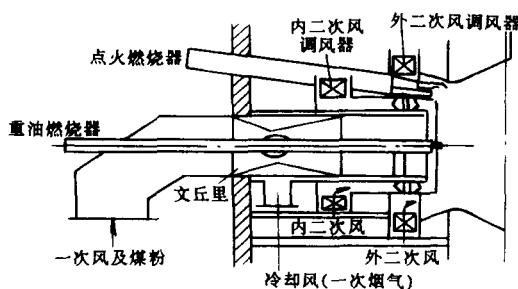


图 1-6 拔柏葛一日立公司的双调节燃烧器结构

撞碰而使之均匀化。其后流经的是位于通道轴心线上的圆锥形扩散器，其作用除进一步使煤粉浓度分布均匀外，同时可对同一层其他燃烧器起均匀煤粉气流流量的作用。

燃烧器出口的二次风被分成内外两部分，热空气通过设置于一次风煤粉中心管的外缘环形通道上的内二次风调节挡板以及内二次风导向叶片、环形通道至燃烧器喷口。挡板可调节内二次风的流量，导向叶片使内二次风获得转动量，并可以调节。外二次

风道使风室内的热空气通过外二次风调节挡板，经 90° 的转向与内二次风平行至燃烧器喷口。外二次风调节挡板是切向可调的，使外二次风的旋转强度可以改变，也同时改变内外二次风量间的相对比例。所说的双调节燃烧器就是指内、外二次风的可调。调节内外二次风的挡板和导向叶片，也就改变了内、外二次风的流量比、旋转强度，改变内外二次风间、二次风与煤粉气流间、以及与已着火煤粉气流间的混合，从而调节着火与火焰形状。关小内二次风导向叶片角和外二次风的切向挡板角，二次风的旋转强度增大，火焰的扩散角增大。其中，尤以内二次风的影响为大。二次风量也是通过风室前的百叶窗调节挡板开度变化进行调节的，它通过风室与炉膛的差压来同时改变同层各旋流燃烧器的内、外二次风流量，同层中任一燃烧器的内、外二次风调节，都会在一定程度上影响同层其他燃烧器。

对于旋流燃烧器来说，它单个燃烧器基本上是一个独立的火焰，燃烧过程都在近燃烧器出口区域基本完成，为使过程按二段燃烧方式进行，就需要在每个燃烧器的火焰区域都形成燃料过浓和过稀的区域，然后两者再进行混合。将二次风分成风量和旋转强度分别可调的二股，其目的即在于此。使内二次风与煤粉气流间的混合以及内、外二次风间的混合可以分别控制。煤粉气流因与内二次风的混合而被带动旋转，形成回流区抽吸已着火前沿的高温介质，构成一个燃料浓度高的内部着火燃烧区域，这一区域内燃烧工况可通过内二次风的旋转强度和风量，亦即内二次风的挡板开度调节。外二次风与内二次风及煤粉气流的混合使在内部燃烧区域的外缘构成一个燃料过稀的燃烧区域，燃尽过程随着两者的混合而进行与完成。混合过程也可通过挡板开度进行控制。 NO_x 及 SO_x 的生成同样因内部燃烧区内的氧气浓度低而受到遏制，也同样因外部燃料过稀区域中温度相对较低而受到遏制。因此，它与直流燃烧器一样，是通过使生成 NO_x 的两个主要因素——氧浓度及温度不同时具备而达到遏制的目的。

(2) 拔柏葛公司对前后墙对冲燃烧方式也作了某些改进，采用一台磨煤机供应沿炉膛宽度方向上的一排燃烧器，这样使炉膛宽度方向上热输入分布均匀，每排燃烧器的风量都可单独控制。当磨煤机出现故障时，可减少风量及燃料分配的不均匀。拔柏葛公司投运的煤粉炉都具备这个特点。

(三) 炉膛结构设计

做好炉膛设计有三个因素。首先炉膛容积应足够大，使燃料完全燃烧，并具有足够的受热面使烟气进入对流烟道前得到充分冷却。燃烧工程公司为了扩大煤种的适应性，所设计的炉膛尺寸逐渐加大，也即炉膛容积热负荷值取得较小。20 世纪 70 年代美国燃烧工程公司设计的 600MW 容量级的锅炉炉膛与 1966 年设计的同容量级的炉膛相比，平均面积增大 14%，有效辐射面积大 10%，容积增大 22%。其次需将 NO_x 的生成量限制到可被接受的程度。最后应使烟气流量保持均匀，使炉膛出口温度维持稳定，以防锅炉对流受热面产生结渣、堵灰及金属超温等问题。

根据大量经验分析，造成炉膛结渣有四个因素，即：每只燃烧器的热输入量、燃烧器与侧墙及灰