

21 世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century



大型火电机组 集控运行指导

DAXING HUODIANJIZU
JIKONGYUNXING ZHIDAO

尹 静 主 编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

21世纪高等学校规划教材

Textbook Series of 21st Century

要 参 容 内



林祥编写尹静主编
 中国电力出版社出版
 北京三里河路8号 100044 电话: 010-63416688
 邮编: 100044 网址: http://jc.cepp.com.cn

大型火电机组 集控运行指导

DAXING HUODIANJIZU
JIKONGYUNXING ZHIDAO

主 编 尹 静
 编 写 林 祥 杨兴森
 丁 颖
 主 审 王立志

中国电力出版社出版
 北京三里河路8号 100044 电话: 010-63416688
 邮编: 100044 网址: http://jc.cepp.com.cn

2007年9月第1版 2007年9月北京印刷厂印刷
 787毫米×1092毫米 16开本 14印张 368千字
 印数: 0001-3000册 定价: 27.00元

告 告 告

本书封面贴有防伪标签, 如有刮损或模糊, 请立即向本社或印刷厂反映, 以便调查。如有印刷质量问题, 本社将负责调换。



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



21世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century

内 容 提 要

本书为21世纪高等学校规划教材。

本书共分七章，主要包括：单元机组系统构成、单元机组启停过程分析、单元机组正常运行监视和调整、单元机组自动控制系统、单元机组运行的安全性和经济性、单元机组故障分析与处理、火电机组仿真培训系统的基本知识等。

本书可作为高等院校热能与动力工程专业相关课程教材，也可作为电厂技术和运行人员的岗位培训用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

大型火电机组集控运行指导/尹静主编. —北京: 中国电力出版社, 2007

21世纪高等学校规划教材

ISBN 978-7-5083-5568-9

I. 大... II. 尹... III. 火力发电—发电机—机组—电力系统运行—高等学校—教材 IV. TM621.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 080268 号

主 编 尹 静
副 编 林 丁
审 定 王 志立
森兴森

中国电力出版社出版、发行
(北京三里河路6号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)
汇鑫印务有限公司印刷
各地新华书店经售

2007年9月第一版 2007年9月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 14印张 338千字
印数 0001—3000册 定价 22.60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

随着我国经济实力的不断增强,电力工业正在迅猛发展,全国发电装机容量 2000 年 4 月突破 3 亿 kW,2004 年 5 月达到 4 亿 kW,2005 年 12 月已达到了 5 亿 kW。据预测,到 2010 年,中国发电装机容量将超过 7 亿 kW,2020 年将达到 11 亿 kW 左右。中国已经成为世界上名副其实的电力生产和消费大国。虽然我国电力建设取得了长足的发展,但与发达国家相比,中国的电力工业仍有差距。2005 年中国的人均电力装机容量仅为 0.38kW,人均用电量约 1800kW·h。大致相当于美国 2001 年水平的 1/8,日本 2002 年水平的 1/5,仅相当于韩国 2002 年水平的 1/3。因此,发展中国电力工业仍然是主要的任务。

我国是以煤炭为主要一次能源的国家,这种能源结构决定了我国发电以煤电(火电)为主的基本格局。2003 年底我国燃煤火力发电装机容量占全国发电总装机容量的 74%,发电量占全国总发电量的 82.6%。为实现节约能源的战略要求,保持电力工业的可持续发展,中国电力的发展重点将转向加快结构调整,在注重发展速度的同时,向高效益、低排放和资源节约型、环境友好型发展。根据国家有关政策,我国目前将优先发展单机容量在 600MW 以上的超临界及超超临界机组,限制发展单机容量在 300MW 以下的纯凝机组。大容量、高参数火力发电机组的比例将不断增加。

大容量、高参数火力发电机组的社会效益和经济效益的可靠实现依赖于机组的安全、经济、稳定运行,而高水平的运行人员又是机组安全经济运行的重要保证。随着机组容量的增大,锅炉、汽轮机、发电机和控制系统之间的联系也越来越紧密,纵向联系的加强使单元机组成为一个独立的整体。这就要求运行人员掌握全面的知识,采用集控运行方式实现机、炉、电运行之间的密切配合,机组的整体监视和控制、协调操作。大容量单元机组相关设备和系统的结构越来越复杂,信息量和操作量极其繁多,加上近几年来超临界及超超临界机组等新技术的发展,对管理和运行人员提出了更高和更新的要求,既要有扎实的理论分析能力,又要有丰富的运行经验,还要加强新技术的学习,在保证机组安全运行的前提下,提高其经济和社会效益。

本书的编写人员既有从事大型火电机组建设和调试运行的科研工作者,又有具备运行经验和仿真培训工作经历的教师,力求将实际工作中积累的经验与理论知识相结合,为电厂运行人员和在读大中专学生及相关技术人员提供帮助。本书着重介绍了大容量火电机组的启动与停止过程、运行调整的策略、相关的控制系统、机组安全和经济运行的理念、故障分析和处理的方法。作为运行人员高效、快速培训方式的仿真培训模式的发展和也是本书介绍的内容之一。本书内容既有理论分析,又有实际应用,便于理解和掌握。

全书共分为 7 章,由山东电力高等专科学校尹静担任主编。第二章、第三章第一节至第

五节、第四章第一节至第五节及第五章的第一、二、三节由尹静编写；第六章、第七章和第一章第三节、第三章第六节、第四章第六节由林祥编写；第一章第一、二节和第五章第五节由杨兴森编写；第五章第四节由丁颖编写，山东电力研究院的王立志教授对原稿进行了仔细地审阅，并提出了许多宝贵的意见。

本书在编写过程中得到了许多电厂技术人员的帮助和支持，在此表示衷心的感谢。由于时间仓促，加之编者水平有限，书中不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

2007年4月

目 录

前言	
第一章 单元机组系统构成	1
第一节 锅炉侧热力系统和设备	1
第二节 汽轮机侧热力系统和设备	13
第三节 电气设备及系统	23
第二章 单元机组启停过程分析	33
第一节 启停过程的热力学分析	33
第二节 冷态滑参数启动	39
第三节 热态滑参数启动	54
第四节 停机和冷却	58
第三章 单元机组正常运行监视和调整	65
第一节 概述	65
第二节 汽包锅炉的运行调整	65
第三节 直流锅炉的运行调整	82
第四节 汽轮机监视仪表系统和运行调节	88
第五节 单元机组运行方式	94
第六节 发变组系统运行监视和调整	98
第四章 单元机组自动控制系统	104
第一节 单元机组分散式控制系统	104
第二节 炉膛安全监控系统	110
第三节 汽轮机数字式电液控制系统	116
第四节 协调控制系统	125
第五节 旁路控制系统	133
第六节 发电机励磁系统	139
第五章 单元机组运行的安全性和经济性	154
第一节 单元机组连锁保护系统	154
第二节 锅炉安全保护系统	156
第三节 汽轮机保护系统	164
第四节 发电机和变压器的保护	169
第五节 单元机组运行经济性分析	176
第六章 单元机组故障分析与处理	184
第一节 单元机组事故特点及事故处理的基本原则	184

第二节	单元机组事故分析与对策	185
第三节	单元机组事故案例	201
第七章	火电机组仿真培训系统的基本知识	210
第一节	仿真技术的应用与发展	210
第二节	火电机组仿真培训系统的基本构成	212
第三节	火电机组仿真培训系统的实际应用	214
参考文献		216

第一章 单元机组系统构成

在火力发电厂中，燃料的化学能通过单元机组中发生的一系列能量转化过程，最终转化成为社会所需要的电能。所谓单元机组，是指由一台锅炉、一台汽轮机、一台发电机组成的基本发电设备系统。按照系统组成，单元机组可以划分为锅炉侧热力系统及设备、汽机侧热力系统及设备、电气系统及设备。

第一节 锅炉侧热力系统及设备

锅炉是火力发电机组中的主要设备之一。在锅炉系统中，燃料的化学能转化成为工质内能。根据工质压力、循环方式等可以把锅炉分为相应的类别。锅炉侧热力系统包括燃料的制备、燃料燃烧的组织、工质加热等部分，大致可以划分为制粉系统、燃烧系统、烟风系统、汽水系统等。

一、锅炉的分类

锅炉有很多的分类方法，电站锅炉常用的类别主要有以下几种。

(一) 按压力等级分类

依据工质压力的高低，从低到高主要分为：低压锅炉、中压锅炉、高压锅炉、超高压锅炉、亚临界（压力）锅炉、超临界（压力）锅炉和超超临界（压力）锅炉，如表 1-1 所示。所谓临界（蒸汽）压力，是指 22.1MPa 的蒸汽压力，此时蒸汽的比容和水的比容相等，水和汽的差别消失，汽化潜热为零，临界（蒸汽）压力对应的饱和温度为 374.12℃。大型火电机组通常配备亚临界、超临界和超超临界锅炉。

表 1-1 电站锅炉按压力等级分类

锅炉种类	蒸汽压力
低压锅炉	<2.5MPa
中压锅炉	2.5~5MPa
高压锅炉	10MPa 左右
超高压锅炉	14MPa 左右
亚临界（压力）锅炉	17MPa 左右
超临界（压力）锅炉	24MPa 左右
超超临界（压力）锅炉	约 25~31MPa

(二) 按循环方式分类

自然循环锅炉：水冷壁管内工质的流动是依靠上升管和下降管之间工质的密度差建立循环压头产生的自然循环，这种锅炉只适用至亚临界压力。

控制循环锅炉：在水冷壁与下降管之间设有循环泵，克服流动阻力确保水循环安全可靠，它适用于亚临界压力。

直流锅炉：从给水到过热蒸汽出口依靠给水泵压力一次通过各受热面的锅炉，它适用于高压以上至超超临界压力。

复合循环锅炉：在直流锅炉的蒸发区段附加可控强制再循环系统的锅炉，使其在低负荷或启动过程中保持水冷壁良好的运行条件，高负荷时进入纯直流运行。

(三) 按通风方式分类

自然通风锅炉：锅炉燃烧空气依靠烟囱引风力自然吸入，均为小型锅炉。

平衡通风锅炉：大型锅炉烟风系统阻力较大，燃烧所需空气由送风机强迫送入，燃烧烟气由引风机抽吸出去，维持烟风道的阻力平衡。

二、制粉系统

制粉系统是把煤磨制成一定细度的煤粉，并输送至储仓或炉膛的设备系统。制粉系统的形式主要有直吹式和中间储仓式两种。磨煤机直接向燃烧器输送煤粉的系统称为直吹式制粉系统，根据磨煤机种类的不同又分为中速磨煤机直吹式制粉系统、高速风扇磨煤机直吹式制粉系统及双进双出钢球磨煤机直吹式制粉系统等。中间储仓式制粉系统是将磨好的煤粉先储存在煤粉仓中，然后根据锅炉运行负荷的需要，从煤粉仓经给粉机送入炉内燃烧。

制粉系统的形式主要根据煤种来选择，对于可磨性系数小、挥发分较低的难磨和难燃煤质，宜采用中间储仓式制粉系统，并配用钢球磨煤机。对于可磨性系数较大、挥发分较高的易磨易燃煤质，宜采用直吹式制粉系统，并配用中速磨煤机或高速磨煤机。由于双进双出钢球磨煤机结构上的特点，在较宽的负荷范围内对锅炉负荷有快速反应的能力，故也应用于直吹式制粉系统中。

（一）中间储仓式制粉系统

中间储仓式制粉系统的生产流程大致为：煤由原煤斗经给煤机送入磨煤机，经空气预热器加热后的热风作为干燥剂送入磨煤机对煤进行干燥，同时携带磨成的煤粉进入粗粉分离器。从粗粉分离器出来的不合格粗粉经回粉管返回到磨煤机中重新再磨，合格的煤粉被热风送入细粉分离器，将绝大部分（约90%）煤粉从中分离出来，送入粉仓，根据燃烧需要由给粉机把煤粉送入气粉混合器中；由一次风将煤粉吹入炉膛燃烧。由细粉分离器上部出来的制粉乏气含有约10%极细的煤粉。在热风送粉系统[如图1-1(b)所示]中，这部分乏气由排粉机提高压头后直接吹入炉膛燃烧，称为三次风。如果是利用排粉机提高压头后的乏气输送煤粉到燃烧器喷入炉内燃烧，这种系统称为乏气送粉系统，参见图1-1(a)。

在排粉机出口至磨煤机入口之间设置有一根连接管，称作再循环管。它用来协调磨煤、干燥和燃烧3个方面所需的风量。当磨煤机需要通过的风量较大而干燥出力较小时（煤挥发分高、水分不大时），可以打开再循环管风门提高磨煤机进口风量，调节磨煤机进口温度和负压，提高磨煤出力。为了更好地控制磨煤机出口热风温度，在磨煤机入口管道上设置有总风门、热风门和冷风门，以调节出口温度。

中间储仓式制粉系统的特点是：因为锅炉和磨煤机之间有煤粉仓，所以磨煤机的运行出力不必与锅炉负荷随时配合，可以一直维持在经济工况下运行。磨煤机的工作对锅炉影响较小，即使磨煤机设备发生故障，煤粉仓内积存的煤粉仍可供锅炉需要。同时其他系统中多余的煤粉也可经过刮板式输送机输送至发生故障系统的煤粉仓中，不致使锅炉停止运行，提高了系统的可靠性。当锅炉负荷变动或当各燃烧器所需煤粉增减时，只需要调节给粉机就能适应需要，既方便又灵活。储仓式系统在较高的负压下工作，不易向外跑粉，但系统部件多、管路长、漏风量较大，会降低磨煤出力，增大制粉电耗。此外，系统初次投资和建筑尺寸也较大，运行中检修维护工作量大，这些是中间储仓式系统的缺点。

（二）直吹式制粉系统

直吹式制粉系统中，完成磨制过程离开磨煤机的煤粉全部送入炉膛燃烧。当锅炉负荷变化时，磨煤机的制粉量也必须相应变化。因此，锅炉正常运行完全依赖于制粉系统的可靠程度。目前较为常见的直吹式制粉系统有中速磨煤机直吹式制粉系统、高速风扇磨煤机直吹式

制粉系统和双进双出磨煤机直吹式制粉系统。图 1-1 (c) 为中速磨煤机直吹式制粉系统的示意图。图 1-1 (d) 为双进双出磨煤机直吹式制粉系统的示意图。

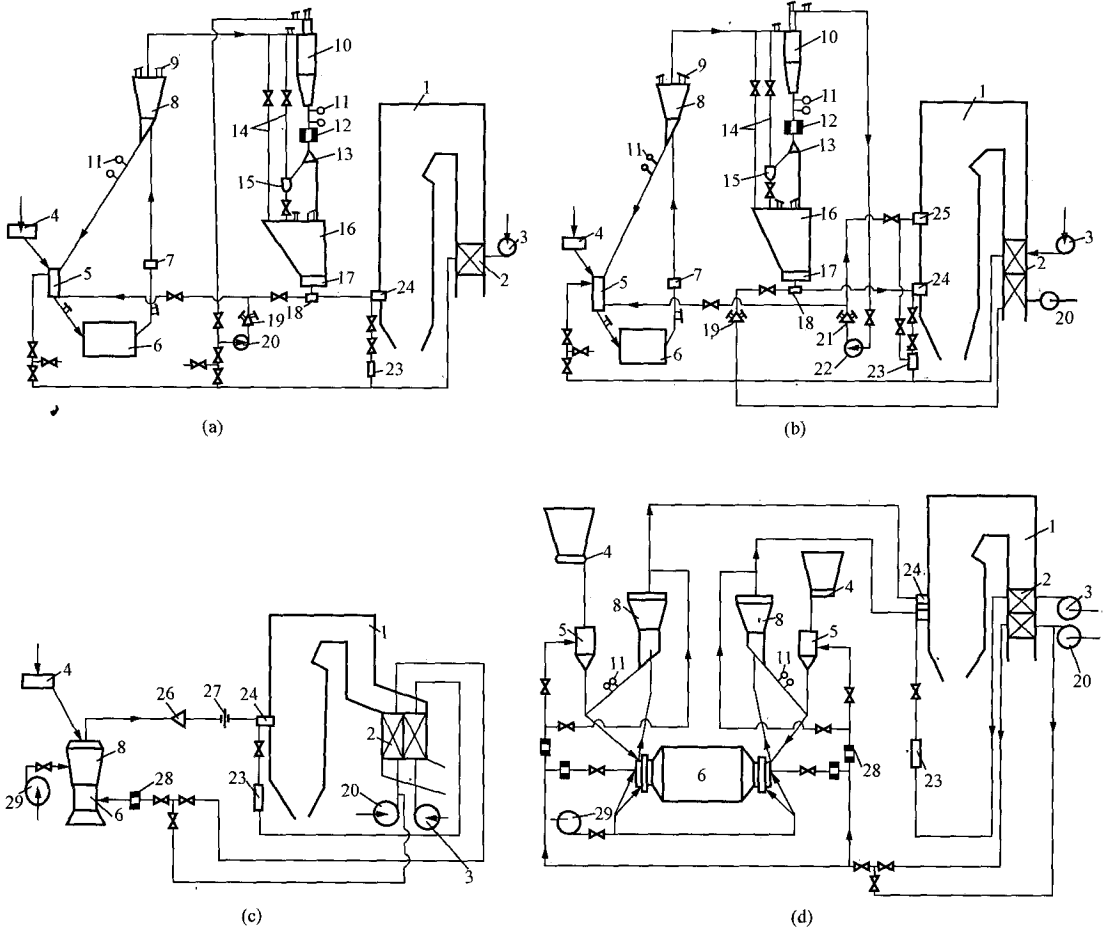


图 1-1 几种制粉系统示意图

- (a) 钢球磨煤机中间储仓式制粉系统 (乏气送粉); (b) 钢球磨煤机中间储仓式制粉系统 (热风送粉);
 (c) 中速磨煤机直吹式制粉系统; (d) 双进双出钢球磨煤机正压直吹式制粉系统
- 1—锅炉; 2—空气预热器; 3—送风机; 4—给煤机; 5—下降干燥管; 6—磨煤机;
 7—木块分离器; 8—粗粉分离器; 9—防爆门; 10—细粉分离器; 11—锁气器;
 12—木屑分离器; 13—换向器; 14—吸潮管; 15—螺旋输粉机; 16—煤粉仓;
 17—给粉机; 18—风粉混合器; 19—一次风箱; 20—一次风机; 21—乏气风箱;
 22—乏气风机 (排粉风机); 23—二次风箱; 24—燃烧器; 25—乏气喷嘴;
 26—煤粉分配器; 27—隔绝门; 28—风量测量装置; 29—密封风机

近年来, 随着机械制造技术的不断进步, 双进双出磨煤机直吹式制粉系统得到较为广泛的应用。双进双出钢球磨煤机磨制煤粉的原理和过程与单进单出钢球磨煤机相似。不同的是, 双进双出钢球磨煤机两端的空心轴既是热风 and 原煤的进口, 又是气粉混合物的出口。从两端进入的干燥介质气流在球磨机筒体内中间部位对冲后反向流动, 携带煤粉从两端空心轴中流出, 进入煤粉分离器, 形成两个相互对称又彼此独立的磨煤回路, 参见图 1-1 (d)。连接筒体的中空轴架在轴承上, 中空轴内有一中心管, 中心管外是原煤进入磨煤机的通道。煤

从给煤机出口落入混料箱，经旁路热风预干燥后落入中空轴，被输送进入磨煤机，由钢球进行磨制。热一次风通过中空轴内的中心管进入筒体，这些热空气既是煤粉干燥剂，又是煤粉输送剂。在热一次风完成对煤的干燥后，按与原煤进入磨煤机的相反方向，通过中心管与中空轴之间的环行通道，将煤粉带出磨煤机。煤粉空气混合物与从混料箱来的旁路风混合，一起进入上部的煤粉分离器。分离出来的粗煤粉经返粉管回落到中空轴入口，与原煤混合，重新进入磨煤机研磨。合格的细粉则随热空气（一次风）经煤粉分配器进入一次风管道，经燃烧器送入炉内燃烧。

双进双出钢球磨煤机正压直吹式制粉系统与中速磨煤机直吹式制粉系统比较，具有以下优点。

(1) 煤种适应性广。特别适用于磨制高灰分、强磨损性的煤种，以及挥发分低、要求煤粉细的无烟煤，同时对煤中杂质不敏感。

(2) 备用容量小。钢球磨煤机结构简单、故障少，在钢球磨损时无需停机即可添加，保证系统正常供粉，不像中速磨煤机需 20% 左右的备用容量。

(3) 响应锅炉负荷变化性能好。系统以调节磨煤机通风量的方法控制给粉量，响应锅炉负荷变化的迟延时间极短。应用双进双出钢球磨煤机直吹式制粉系统的锅炉，负荷变化率可达 20%/min。

(4) 负荷调节范围大。一台磨煤机的两路制粉系统彼此独立，可两路并用或只用一路，大大增加了系统的负荷调节范围。

(5) 钢球磨煤机的煤粉细度稳定，不受负荷变化影响。负荷低时，煤粉在筒内停留时间长，磨制的煤粉更细，能改善煤粉气流着火和燃烧性能，使锅炉能在更低的负荷下稳定运行，锅炉负荷调节范围扩大。

(6) 双进双出钢球磨煤机与中速磨煤机和风扇磨煤机相比，具有较低的风煤比，即一次风的煤粉浓度高，有利于低挥发分煤的燃烧。

(三) 中间储仓式和直吹式制粉系统的比较

(1) 直吹式制粉系统简单，设备部件少，输粉管路阻力小，因而制粉系统输粉电耗较小；而中间储仓式制粉系统由于在较高的负压下运行，漏风量较大，输粉电耗较高。但中间储仓式制粉系统由于有煤粉仓，磨煤机的运行出力不必与锅炉随时配合，磨煤机可一直维持在经济工况下运行。

(2) 中间储仓式制粉系统中，磨煤机的工作对锅炉影响较小，即使磨煤设备发生故障，煤粉仓内的煤粉仍可供锅炉燃烧的需要。同时，各炉之间可用输粉机相互联系，以调剂锅炉间的煤粉需求，从而提高了系统的可靠性，因而磨煤设备的备用容量小一些。相比之下，直吹式制粉系统需要较大的磨煤设备储备裕量。

(3) 中间储仓式制粉系统部件多，管路长，系统复杂，初次投资和系统的建筑尺寸都较直吹式制粉系统大，防爆安全性差。

(4) 当锅炉负荷变动时，储仓式系统只要调节给粉机就能适应需要，方便快速。而直吹式系统要从改变给煤量开始，经过整个系统才能改变煤粉量，因而惰性较大，适应锅炉负荷变动的能力较差。

(四) 制粉系统的主要设备

制粉系统的主要设备及其作用见表 1-2。制粉系统最主要的设备就是磨煤机。根据磨煤

部件的工作转速，电厂磨煤机大致可分为 3 种：①低速磨煤机：转速为 15~25r/min，最常用的如筒式钢球磨煤机；②中速磨煤机：转速为 50~300r/min，最常见的如中速平盘磨煤机、中速环球式磨煤机（又叫 E 型磨）、碗式磨煤机及 MPS 磨煤机；③高速磨煤机：转速为 750~1500r/min，如风扇磨煤机。在各种类型的磨煤机中，球磨机和中速磨较为常见。

表 1-2 制粉系统主要设备

设备名称	设备描述
给煤机	将原煤送入磨煤机并可以调节给煤机给煤量的设备
粗粉分离器	将粗颗粒的煤粉分离出来的设备
细粉分离器	从气粉混合物中分离出煤粉的装置
锁气器	装于细粉分离器底部或粗粉分离器回粉管中能使煤粉（或回粉）排出，但阻止空气等介质倒流的装置
排粉机	在负压直吹式制粉系统中用来输送煤粉的风机
给粉机	将定量的煤粉稳定地给入一次风管路，并可以调节给粉量的设备
一次风机	用于向主燃烧器供给一次风的风机
木屑分离器	在中间储仓式制粉系统中，分离木屑等纤维状杂物的设备
木块分离器	在中间储仓式制粉系统中，装于磨煤机出口用来分离木块的设备
密封风机	供给磨煤机及其部件动静部分密封用的风机
螺旋输粉机	在中间储仓式制粉系统中将煤粉输入其他粉仓的装置
煤粉分配器	装于煤粉管道分叉前可以使煤粉在分叉管道中分配较为均匀的装置

球磨机几乎可磨制所有的煤种，从最难磨的无烟煤到褐煤。双进双出球磨机因为具有许多独有的特点，在大容量机组的制粉系统中得到了越来越多的应用。双进双出球磨机的主要优势有以下几方面。

(1) 可靠性高，可用率高。国外运行情况表明，包括给煤机在内的双进双出球磨机制粉系统的年事故率仅为 1%，且磨煤机本身几乎无事故发生。据称此磨煤机的可靠性高于锅炉本体。

(2) 维护简便，维护费用低。与中、高速磨煤机相比，双进双出球磨机维护最简便，维护费用也最低，只需定期更换大牙轮油脂和补充钢球。

(3) 出力稳定。能长期保持恒定的容量和要求的煤粉细度，不存在磨煤机出力下降的问题。

(4) 能有效地磨制坚硬、腐蚀性强的煤，而这对于中、高速磨是无法适应的。

(5) 储粉能力强。与中、高速磨煤机相比，双进双出球磨机的筒体本身就就像一个大的储煤罐，有较强的煤粉储备能力，大约相当于磨煤机运行 10~15min 的出粉量。

(6) 在较宽的负荷范围内有快速反应的能力。试验表明，双进双出球磨机直吹式制粉系统对锅炉负荷的响应时间几乎与燃油和燃气炉一样快，其负荷变化率每分钟可以超过 20%。双进双出球磨机的自然滞留时间是所有磨煤机中最少的，只有 10s 左右。

(7) 煤种适应能力强。双进双出球磨机对煤中杂物不那么敏感。但应当指出，磨煤机两

端的螺旋输送机对煤中杂物的限制比一般球磨机要严格。

(8) 能保持一定的风煤比。在双进双出球磨机中, 通过磨煤机的风量与带出的煤粉量呈线性关系。当设计的风煤比一定时, 如果要求磨煤机的出力增加, 实际上风量也呈比例增加。

(9) 低负荷时能增加煤粉细度。在低负荷运行时, 由于一次风量减小, 相应地风速也减小, 带走的只能是更细的煤粉, 这对于燃用低挥发分煤的稳燃有利。

(10) 与中速磨煤机相比, 双进双出球磨机省去了石子煤处理系统, 节省了投资, 布置也得到了改善。

(11) 显著的灵活性。对双进双出球磨机而言, 当其在低负荷运行或启动时, 既可全磨也可半磨运行, 被研磨的介质既可以是一种, 也可以是几种混合物料。此外, 当一台给煤机事故或一端煤仓(或落煤管)堵煤时, 磨煤机能照常运行。

除球磨机外, 在煤种适合的情况下, 各种中速磨也被广泛应用。这种磨煤机具有重量轻、占地少、制粉系统管路简单、投资省、电耗低、噪声小等一系列特点。目前国内外采用较多的中速磨煤机有如下 4 种: 辊盘式中速磨, 又称平盘磨(Loesche 式); 辊碗式中速磨, 又称碗式磨(Raymond 或 RP 式); 辊环式中速磨, 又称 MPS 磨; 球环式中速磨, 又称中速球磨或 E 型磨。中速磨都有两组相对运动的碾磨部件, 碾磨部件在弹簧力、液压力或其他外力作用下, 将其间的原煤挤压和碾磨, 最终将其破碎成煤粉。通过碾磨部件旋转, 把破碎的煤粉甩到风环室, 流经风环室的热气流将这些煤粉带到中速磨上部的煤粉分离器, 过粗的煤粉被分离下来重新再磨。在这个过程中, 热风还伴随着对煤粉的干燥。在磨煤过程中, 同时被甩到风环室的还有原煤中夹带的少量石块和铁器等杂物, 它们最后落入杂物箱, 被定期排出。

以上概括地描述了各种制粉系统的组成和部分制粉系统设备的工作原理、特点等内容, 各种磨煤机和制粉系统都有自己的特点, 在实际运行中, 能满足锅炉燃烧需要并能够实现最佳经济性的系统就是最适合的, 制粉系统的经济运行还要靠科学的运行调节来实现。

三、燃烧系统

燃烧系统是组织煤粉燃烧的设备系统, 其作用是合理组织炉内燃烧工况, 保证煤粉燃烧各阶段的温度、氧气供应等条件得到满足。燃烧过程要组织得好, 除煤粉气流能迅速着火和稳定燃烧外, 还要使燃烧的煤粉与空气充分地混合, 才能使煤粉燃烧完全, 提高燃烧效率, 保证锅炉的安全、经济运行。在煤粉炉中, 这一切都与燃烧器的结构与布置有关, 因此, 燃烧器是煤粉锅炉燃烧系统的主要设备。

对煤粉炉燃烧器的基本要求有以下几方面。

- (1) 能使煤粉气流稳定地着火。
- (2) 着火以后, 一、二次风能及时合理混合, 确保较高的燃烧效率。
- (3) 火焰在炉内的充满程度好, 且不会冲墙贴壁, 避免结渣。
- (4) 有较好的燃料适应性和负荷调节范围。
- (5) 能减少 NO_x 的生成, 减少对环境的污染。

煤粉燃烧器按其出口气流特性可分为直流燃烧器和旋流燃烧器两大类。

(一) 直流燃烧器及四角切圆燃烧方式的特点

直流燃烧器是由一组矩形或圆形的喷口组成, 喷出的一、二次风都是不旋转的直流射

流。射流的扩散角比较小、射程远，单股射流的卷吸作用较小，没有中心回流。直流式燃烧器的二次风口与一次风口相对独立，可以在布置上变化出多种形式，控制二次风与一次风混合的迟早，满足不同燃料的燃烧要求。在我国的燃煤电站锅炉中，应用最广的是直流燃烧器四角布置的切圆燃烧方式。

四角布置直流燃烧器的切圆燃烧方式锅炉内的气流流动由四角燃烧器的射流共同形成，总体上组成一个大的旋转气流。燃烧室中部的高温烟气，在旋转作用下可以直接补充到相邻燃烧器射流的根部，帮助下游燃烧器的煤粉气流升温引燃。四角布置切圆燃烧方式的主要特点有以下几方面。

(1) 四角射流互相点燃，使煤粉着火稳定。切圆燃烧方式是以整个炉膛作为整体来组织燃烧的，故燃烧器的工况与整个炉膛的空气动力特性关系十分密切。

(2) 由于四股射流在炉膛内相交后强烈旋转，湍流的热质交换和动量交换十分强烈，能加速着火后燃料的燃尽。

(3) 四角切向射流有强烈的湍流扩散和良好的炉内空气动力结构，烟气在炉内充满程度好，炉内热负荷分布较均匀。

(4) 切圆燃烧时，每角均由多个一、二次风（或有三次风）喷嘴组成，负荷的调节灵活，对煤种适应性强，控制和调节的手段也较多。

(5) 炉膛结构较简单，便于大容量电站锅炉的布置。

(6) 采用摆动式直流燃烧器时，运行中改变上下摆动角度即可改变炉膛出口烟温，达到调节再热汽温的目的。

(7) 便于实现分段送风，组织分段燃烧，从而抑制了 NO_x 的产生。

直流燃烧器四角布置时，在炉膛中心可以画出一个与四角燃烧器中心线的延长线都相切的圆，称为假想切圆。假想切圆的直径应结合燃料的着火性能与结渣性能综合考虑。切圆直径较大时，炉中心火焰旋转强烈，冲刷过来的火焰离风口根部近，甚至可能引起气流贴壁，火焰冲向水冷壁引起结渣；切圆直径太小会使燃烧室中心火焰变小，对燃烧不利。图 1-2 为某 300MW 机组锅炉燃烧器及喷口的布置图。该锅炉采用直流摆动式百叶窗水平浓淡煤粉燃烧器，四角布置，切向燃烧。煤粉燃烧器除顶二次风喷口和三次风喷口能上下摆动 $\pm 15^\circ$ 外，其余各层喷口均可上下摆动 $\pm 30^\circ$ 。风、粉气流从炉膛四角喷进炉膛后，在炉膛中心形成一个假想切圆，假想切圆直径为 $\phi 790\text{mm}$ ，燃烧设备布置见图 1-2 (a)。

每角燃烧器共布置 15 层喷口，包括 5 层一次风喷口，两层三次风喷口，一层顶二次风喷口，7 层二次风喷口（其中 3 层布置有燃油装置），燃烧器喷口布置见图 1-2 (b)。为进一步降低 NO_x 生成量，设置了反切顶部燃尽二次风 (OFA)。

(二) 旋流燃烧器及旋转射流的特点

旋流燃烧器一般可分为蜗壳型旋流燃烧器和叶片型旋流燃烧器两类。旋流式燃烧器常见的布置方式为前墙布置和前后墙对冲或错列布置。在大容量锅炉上，往往又布置成多排多层。在旋流燃烧器中，携带煤粉的一次风和不携带煤粉的二次风是分别用不同的管道与燃烧器连接的。在燃烧器中，一、二次风的通道也是隔开的。二次风射流都是旋转射流，一次风射流可以是旋转射流或不旋转的直流射流，燃烧器总的出口气流是一股绕燃烧器轴线旋转的旋转射流，射流的扩展角较大。

旋转射流有如下的特点：

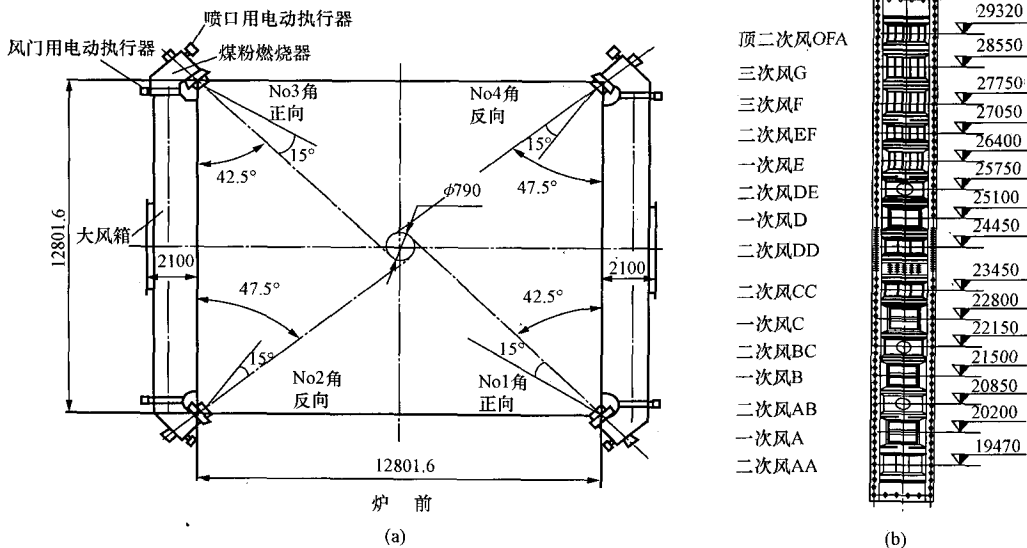


图 1-2 燃烧器及喷口布置图

(a) 燃烧设备布置; (b) 燃烧器喷口布置

(1) 旋转射流不但具有轴向速度，而且具有较大的切向速度，从旋流燃烧器出来的气流既有向前的轴向运动，又有旋转的切向运动，因此，气流初期的扰动非常强烈。由于射流不断卷吸周围气体，而且不断扩展，其切向旋转半径不断增大，切向速度衰减得很快，所以射流的后期扰动不够强烈。轴向速度也由于卷吸周围气体而衰减得很快，因而使旋转射流的射程比较短。

(2) 旋转射流在离燃烧器出口一段距离内轴线上的轴向速度为负值，说明射流有一个中心回流区，能回流高温烟气，帮助煤粉气体着火。因此，旋转射流是从两方面卷吸周围高温烟气的，一方面从回流区回流高温烟气，这对燃烧过程极为重要，因为它意味着回流区卷吸的高温烟气送到火炬根部来加热煤粉空气混合物，对稳定着火极为有利；另一方面旋转射流也从射流的外边界卷吸周围高温烟气，所以旋转射流的着火是从内、外边界开始的。

四、风烟系统

为锅炉连续地送风和排出烟气的过程称为锅炉通风，由此组成的系统称为风烟系统。

锅炉通风的任务是连续不断地供应燃料燃烧时所需的空气，及时排出燃烧后生成的烟气以及克服空气、烟气流动过程中的阻力，维持锅炉正常连续地工作。大型电站锅炉的风烟系统均采用平衡通风方式，既用送风机，又用引风机，使空气进入炉膛前的某一点风压为零，而保持在锅炉炉膛顶部略呈负压下运行。此时，由送风机吸入空气口到燃烧器出口之间的流动阻力由送风机克服，而经由炉膛、各对流受热面、预热器、除尘器，最后一直到烟囱出口的阻力由引风机克服。

送风机出口的空气经空气预热器加热后成为热二次风进入锅炉大风箱，在大风箱中分为辅助风、燃尽风和周界风等进入燃烧器的相应部位，然后进入炉膛参与燃烧，燃烧后的烟气离开炉膛后，经过过热器、再热器、省煤器等受热面，进入空气预热器，再经由静电除尘器被引风机排至烟囱，进入大气。

在一些中储式制粉系统中，干燥热风也来自热二次风。对于直吹式制粉系统，从一次风

机出来的风被分成两部分，一部分经空气预热器加热成热一次风；另一部冷一次风作为调温风，以控制一次风温。调温风和热一次风均流向磨煤机，将煤粉从磨煤机带向燃烧器，送入炉膛燃烧。

风烟系统所包括的主要设备有：送风机、引风机、一次风机、空气预热器、风烟管道等。

空气预热器是利用烟气的热量来加热燃烧所需空气的热交换设备。由于空气预热器工作于烟气温度最低的区域，回收了烟气的热量，从而提高了锅炉效率。同时也由于空气被预热，提高了燃料与空气的初始温度，强化了燃料的着火、燃烧和炉内换热，减少了燃料不完全燃烧损失，进一步提高了锅炉效率。同时，制粉系统磨制煤粉亦需要热空气来烘干原煤和煤粉。因此，在现代大型电站锅炉中，空气预热器已是不可缺少的设备。现代大型火力发电机组多采用二分仓或三分仓结构的回转式空气预热器。回转式空气预热器与管式空气预热器相比，有以下优点。

(1) 回转式空气预热器由于其传热面密度高达 $500\text{m}^2/\text{m}^3$ ，因而结构紧凑，占地面积小，其体积约为同容量的管式空气预热器的 $1/10$ 。

(2) 质量轻，金属耗量少。因管式空气预热器的管子壁厚为 1.5mm ，而回转式空气预热器的蓄热板厚度不过 $0.5\sim 1.25\text{mm}$ ，而且蓄热板布置很紧凑，故回转式空气预热器金属耗量约为同容量管式空气预热器的 $1/3$ 。

(3) 回转式空气预热器布置灵活方便，使锅炉本体容易得到合理的布置方案。

(4) 在同样的外界条件下，回转式空气预热器因其受热面金属温度较高，因而低温腐蚀的危险较管式空气预热器小。

回转式空气预热器的主要缺点是漏风量大。一般管式空气预热器的漏风量不超过 5% ，而回转式空气预热器在状态好时为 $6\%\sim 8\%$ ，密封不良时达 $20\%\sim 30\%$ 。同时，其结构复杂，制造工艺要求高，运行维护工作量大，检修复杂。但由于回转式空气预热器的优点，在 300MW 以上机组锅炉中，一般均采用回转式空气预热器。

五、汽水系统

锅炉汽水系统是指自给水进入锅炉省煤器至产生额定参数过热蒸汽及再热蒸汽的整个汽水流程。它包括锅炉的省煤器系统、水冷壁汽水循环系统和过热、再热蒸汽系统。

各机组汽水系统大同小异，自然循环锅炉汽水系统的一般流程是：汽机给水泵经高压加热器来的给水首先进入省煤器进口集箱，经省煤器加热后从出口集箱引出，经汽包下部的给水分配管进入汽包水侧，然后与汽包中的炉水一起进入大直径下降管。再通过下降管下端的分配器进入水冷壁下集箱，并由此进入水冷壁管子，受到加热，逐渐形成汽水混合物，最后经水冷壁出口联箱引出管引入汽包，在汽包内经旋风分离器和立式波形板干燥器使汽水分离，分离后的炉水再次进入下降管，干蒸汽则引入炉顶进口集箱，进入过热蒸汽系统。为防止锅炉启动过程中省煤器管内产生汽化现象，在锅筒和省煤器进口集箱之间设置了一条省煤器再循环管，管路上装有电动截止阀。在锅炉启动过程中，当上水停止时，必须打开阀门，向省煤器提供足够的水流量，以防止省煤器中的水汽化；而当锅炉正常运行、连续上水时，应关闭这个阀门，以防止给水直接经再循环管进入汽包。

在过热蒸汽系统中，蒸汽依次流过低温过热器、第一级喷水减温器、屏式过热器、第二级喷水减温器和高温过热器，达到额定温度，进入主蒸汽管道引至汽机。第一级减温器的作

用是保护屏式过热器不超温，并作为过热汽温的粗调；第二级喷水减温器的作用是保护末级高温过热器不超温，并作为过热汽温的细调。这样既可以保证过热器的安全，又可以减少延时，提高调节的灵敏度。减温器设计的总喷水量约为锅炉容量的3%~5%。

主蒸汽在汽机高压缸做功膨胀后，又引入到锅炉再热器重新加热。锅炉的再热器一般包括低温再热器、墙式再热器、屏式再热器、末级再热器等部分。再热器一般不宜采用喷水减温。因为再热器喷入的水转化的蒸汽仅在汽机中、低压缸中做功。就如在电厂的高压循环系统中附加一个中压循环系统。由于中压系统热效率较低，因此整个系统的热效率下降。所以再热器常采用烟气侧调节法作为汽温调节的主要手段，而用喷水减温器作为辅助应急调节方法。

为了保证蒸汽系统的安全运行，必须在适当位置布置一定数量的安全阀来实现超压保护功能。例如SG1025t/h亚临界压力自然循环锅炉过热蒸汽系统在过热器出口设置有2只安全阀和1只电磁释放阀(PCV阀)，在再热器的进口/出口分别设置有4只/2只安全阀，在汽包上设置有3只安全阀。

汽水系统的主要设备包括过热器、再热器、省煤器、喷水减温器等。

过热器是锅炉的重要组成部分，过热器的作用是将饱和蒸汽加热成为具有一定过热度的过热蒸汽，并要求在锅炉负荷或其他工况变动时，保证过热汽温的波动处在允许的范围内。

随着蒸汽参数的提高，过热蒸汽及再热蒸汽的吸热量份额增加，过热器受热面在锅炉总受热面中占了很大比例，所以多采用辐射-对流多级布置系统。另外，过热器又是锅炉中工质温度最高的部件，而过热蒸汽的吸热能力较差，尤其是在锅炉低负荷运行时，容易引起过热器管壁超温而损坏，这一点在锅炉运行中必须引起足够的重视。

根据不同的传热方式，过热器可分为对流式、辐射式和半辐射式过热器。对流式过热器布置在锅炉的对流烟道中，主要依靠对流传热从烟气中吸收热量；辐射式过热器布置在炉膛内，主要吸收火焰辐射热；半辐射式过热器布置在炉膛出口处，既吸收火焰辐射热又吸收烟气对流换热。

再热器实际上是一种中压过热器。再热器也是锅炉的重要组成部分，再热器的作用是将汽机高压缸排汽加热，提高蒸汽的过热度，以免蒸汽在汽轮机末级湿度过大，影响汽轮机运行的安全性和经济性。

再热器也是锅炉中工质温度最高的部件，而再热蒸汽由于汽压低、比热小，相对于过热蒸汽而言其吸热能力更差，这就使它们成为锅炉受热面中工作条件最恶劣的部件。

再热器的工作特点如下：

(1) 再热蒸汽的放热系数比过热蒸汽小，对管壁的冷却能力差。同时，为了减少再热器中蒸汽的流动阻力，提高热力系统效率，再热器常采用较小的质量流速，因此，再热器管壁冷却条件更差。

(2) 再热蒸汽压力低、比热小，对汽温偏差比较敏感，即在同样的热偏差条件下，其出口汽温偏差要比过热蒸汽大。

(3) 再热器进口蒸汽温度随负荷变化而变化，因此其汽温调节幅度比过热蒸汽大。

(4) 在锅炉启动、停炉及汽机甩负荷时，再热器中若无蒸汽流过，就很可能被烧坏。为此，在过热器和再热器以及再热器和凝汽器之间分别装有高、低压旁路和减温减压器。在锅炉启动、停炉及汽机甩负荷时，过热蒸汽经高旁减温减压后送入再热器进行冷却，再热器