

大型热电联产机组技术丛书

大型热电机组运行与管理

张磊 廉根宽 编著 王广金 主审



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

■ 大型热电联产机组技术丛书

大型热电机组运行与管理

张磊 廉根宽 编著 王广金 主审



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是根据目前国内 200MW、300MW 热电联产机组的运行实践为基础编写的。全书共分五章，主要讲述热电联产机组的启动和停运、热电联产机组的运行调节、热电联产机组的控制与保护、热电联产机组的事故与处理、热电联产机组的运行管理等运行维护知识。

本书可作为热电联产机组集控运行的培训教材，也可供从事热电联产机组工作的工程技术人员参考。

图书在版编目（C I P）数据

大型热电机组运行与管理 / 张磊, 廉根宽编著. —
北京 : 中国水利水电出版社, 2010. 8
(大型热电联产机组技术丛书)
ISBN 978-7-5084-7741-1

I. ①大… II. ①张… ②廉… III. ①热电厂—机组
—运行②热电厂—机组—管理 IV. ①TM621

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第149023号

书 名	大型热电联产机组技术丛书 大型热电机组运行与管理
作 者	张磊 廉根宽 编著 王广金 主审
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@waterpub. com. cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 21.5 印张 510 千字
版 次	2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	48.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

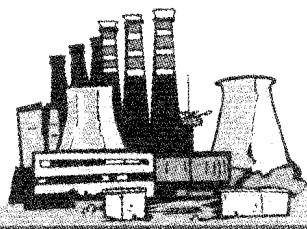
丛 书 编 委 会

主 任 张 磊 刘树昌

成 员 单志栩 廉根宽 叶 飞 王学训 卢志鹏
陈 媛 由 静 郑云宁 马明礼 冯恩福
王广金 代云修

顾 问 魏毓璞

序 一



近年来，热电机组装机容量大幅剧增，热、电供应紧张、短缺局面渐趋缓和，热电企业要求降低运营成本换取最大利润的心声则日益迫切，决心为低碳经济的发展贡献更大的力量。为此，各热电企业均在节能降耗方面深挖潜力，以更加积极务实的措施全面展开。经过同类型、同行业之间一轮又一轮的“对标考核竞赛”，我们渐渐发现摆在我们面前最现实的问题是：在运行环境中，实际负荷状态机组供电煤耗究竟应该是多少？机组节能的潜力究竟还有多大？节能降耗还能走多远？针对这种状况，为了更好地总结节能降耗的成功经验，切实做好机组节能降耗的技术管理，山东省电力学校等组织编写了《大型热电联产机组技术丛书》，全套丛书共分四个分册：《大型热电机组运行与管理》、《大型凝汽机组供热改造》、《大型热网运行和管理》、《大型热电机组节能减排》，对大型热电机组职工培训将起到积极作用。

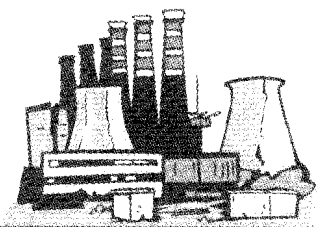
2010年5月，国务院办公厅转发《关于推进大气污染联防联控工作改善区域空气质量的指导意见》中明确规定在地级城市市区禁止建设除热电联产以外的火电厂，积极发展热电联产是2010年电力工业的三大重点任务之一。所以，热电联产是节能降耗的大势所趋。我想，通过《大型热电联产机组技术丛书》的出版发行，必将大力推动节能降耗工作在发电企业的长期有效开展，为节能降耗工作奠定坚实的技术基础。

感谢丛书作者为热点产业的发展作出的新贡献。

王振铭

2010年6月16日于北京

序 二



在我国发展热电冷联产是实现节能减排的最成熟的技术路线之一。

热电冷联产主要是通过建设在城市外围的火力发电厂同周边的工厂以及城镇内的住宅楼、商务写字楼、办公楼等通过统一规划、集中布局，按不同品位的热能分级供应（即高品位的热能用于发电，中品位的热能用于工业用汽，低品位的热能用于集中采暖供热及夏季制冷），以取得能源最大利用效率。热电冷联产的能源利用效率比单纯发电约提高一倍以上。大力发展热电冷联产不但节约能源、改善环境、提高了能源的利用效率，还是发展低碳经济、提高供热质量、增加电力供应等综合效益有效途径之一。西方和北欧国家发展热电联产已达较高水平，热电厂装机容量占火电总装机容量的30%，机组热效率达到了70%以上。与此相比我国还有一定的差距。

可喜的是，目前我国已投运或在建拟建的300MWe供热机组（单抽、双抽）已有近200台套，其中包括同时采用循环流化床锅炉清洁燃烧技术和直接空冷节水技术的供热机组。300MWe级纯凝机组改供热的机组已经达到了100台（单抽）以上，300MWe供热机组的容量达到了1亿kW，占火电总装机容量的15%。

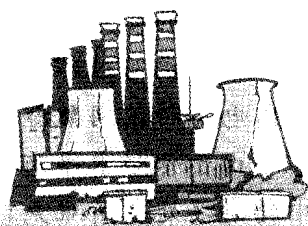
为了使300MWe级供热机组的运行检修人员熟练掌握大型供热机组运行技术，实现300MWe级供热机组安全高效经济运行，山东省电力学校同国内有关单位合作组织编写了《大型热电联产机组技术丛书》，对300MWe级供热机组运行与管理、大型热网运行与管理、300MWe级纯凝机组供热改造、热电机组节能减排进行了翔实的论述，对热电机组的经济运行提供了有益的参考。

本丛书紧密结合300MWe级供热机组实际情况，内容丰富、数据充分，可供300MWe级供热机组的技术人员、高校师生、工程技术人员、制造、设计人员参考。本丛书的出版发行将为我国热电冷联产健康发展起到积极作用。

尧国富

2010年6月6日于北京

总前言



热电联产集中供热工程是国家发改委发布的《节能中长期专项规划》中明确的十项重点工程之一。近年来，我国经济社会快速发展，城镇化步伐进一步加快，节能减排问题突出，如何解决节能减排与民众生活质量要求的提高被提到议事日程，于是热电联产被推到了前台。鉴于热电联产是一种能源利用效率高、经济效益好、环境保护友好的采暖供热方式，许多地区纷纷向发改委申报了大量的热电联产项目，热电联产在发电、供热行业所占比重越来越大。热电机组也从原来的高压、超高压小机组发展成为亚临界、超临界的大型环保机组，目前进入了以 300MW 级为主力机型的大型热电联产时代。

热电联产不仅已成为国家实施节能减排的重点工程，又是关系国计民生的重要行业；既是解决区域环境污染的有效途径，又是解决工业和居民采暖用热的供应渠道。2010 年 5 月，国务院办公厅转发《关于推进大气污染联防联控工作改善区域空气质量的指导意见》中明确规定在地级城市市区禁止建设除热电联产以外的火电厂。所以，热电联产是大势所趋。笔者通过调研，目前热电联产方面的专著较少，不能满足热电行业的需求。为切实做好热电联产机组的技术管理，由山东省电力学校和中国华电山东分公司等组织编写了《大型热电联产机组技术丛书》，全套丛书共分四个分册：《大型热电机组运行与管理》、《大型凝汽机组供热改造》、《大型热网运行和管理》、《大型热电机组节能减排》。

该丛书编委会主任为山东省电力学校张磊和中国华能山东公司刘树昌。

全套丛书由山东省电力学校张磊统稿。

中国电机工程学会热电专委会高级顾问王振铭和中国电机工程学会热电专委会委员、中国电力联合会尧国富作序。

本丛书内容力求介绍新原理、新技术、新知识，同时尽量做到内容全面、理论实际相结合。

本套丛书为大型热电机组培训教材，同时也可以作为热电机组有关工程

技术人员的参考资料。

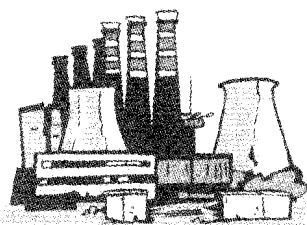
本书编写过程中得到了山东各发电分公司的大力支持，对此表示感谢。
中国电力科技网魏毓璞为该套丛书顾问。

由于作者水平有限，时间仓促，难以全面概括大型热电机组新技术，其中错误之处在所难免；恳请读者批评指正。

编委会

2010年7月

前言



本书是《大型热电联产机组技术丛书》之一。国家“十一五”发展规划明确提出建设资源节约型、环境友好型社会，节能和环保是“十一五”规划明确提出的约束性指标之一。与传统的热电分产相比，热电联产具有显著的节能环保效益。热电联产机组范围广、品种多，不仅包括非再热的背压机、抽凝机等各种传统机型，而且新上和改造了一大批 300MW、200MW 等级的再热供热机组，这种大机组供热在节能和环保两个方面效益显著。

本书是根据目前国内 300MW、200MW 热电联产机组的运行实践为基础编写的。全书共分五章，第一章阐述了热电联产机组的启动停运的方式、启动停运的基本过程及注意事项；第二章介绍了热电联产机组运行维护及参数调节等知识；第三章阐述了热电联产机组自动控制系统的原理及机组的主要保护等知识；第四章介绍了热电联产机组的典型事故的现象、事故原因、处理措施及案例分析；第五章阐述了热电联产机组的运行管理知识。

本书由山东省电力学校张磊和廉根宽编写，由华能曲阜发电厂总工程师王广金主审。

本书可以作为热电厂培训教材使用，也可以作为有关热电工程人员的参考书籍。

本书在编写过程中，得到了华能济宁发电厂、莱芜电厂的大力支持，并采用了大量的技术资料，在此表示衷心的感谢。

由于时间仓促，加之水平所限，错误之处在所难免，请读者批评指正。

编者

2010 年 7 月

目 录

序一

序二

总前言

前言

第一章 热电联产机组的启动和停运	1
第一节 热电联产机组启动方式的分类及特点	1
第二节 锅炉启动过程的热力特性和受热面保护	4
第三节 汽轮机部件的热应力、热膨胀和热变形	8
第四节 配汽包锅炉的热电联产机组冷态滑参数启动	16
第五节 配直流锅炉的热电联产机组冷态滑参数启动	33
第六节 热电联产机组的热态及极热态启动	44
第七节 热电联产机组的停运	48
第八节 机组停运后的维护保养	60
第二章 热电联产机组的运行调节	64
第一节 蒸汽温度的控制与调节	64
第二节 蒸汽压力的控制与调节	69
第三节 汽包水位的控制与调节	74
第四节 锅炉燃烧的调节	77
第五节 制粉系统的运行	109
第六节 空气预热器的运行	123
第七节 风机的运行	126
第八节 空气压缩机及其运行	137
第九节 锅炉吹灰系统的运行	141
第十节 汽轮机运行的监视和调整	144
第十一节 发电机和主变压器的监视	152
第十二节 凝汽设备及系统的运行	156
第十三节 凝结水系统和给水系统的运行	166
第十四节 回热系统及设备的运行	172
第十五节 轴封系统和旁路系统的运行	180

第十六节	发电机密封油与冷却系统的监视及维护	183
第十七节	单元机组的调峰运行	191
第十八节	热电联产的主要经济指标	197
第三章	热电联产机组的控制与保护	201
第一节	自动控制概述	201
第二节	单元机组协调控制系统 (CCS)	203
第三节	炉膛安全监控系统 (FSSS)	214
第四节	汽轮机数字电液调节系统 (DEH)	222
第五节	发电机组自动控制系统	232
第四章	热电联产机组的事故与处理	237
第一节	热电联产机组的事故特点及处理原则	237
第二节	锅炉的汽包水位事故	238
第三节	锅炉受热面的损坏事故	242
第四节	锅炉的燃烧事故	245
第五节	制粉系统的故障	251
第六节	锅炉主要辅机的常见故障	256
第七节	汽轮机动静部分的摩擦、振动及大轴弯曲	260
第八节	汽轮机的水击事故	262
第九节	汽轮机的叶片损坏与脱落	266
第十节	汽轮发电机轴瓦乌金的熔化或损坏	269
第十一节	汽轮机的真空下降	271
第十二节	调节、保安和油系统的故障处理	273
第十三节	发电机事故	277
第十四节	电力变压器异常运行及事故处理	282
第十五节	厂用电故障及处理	286
第五章	热电联产机组的运行管理	289
第一节	运行岗位一般工作程序	289
第二节	机组异常状态参数分析制度	303
第三节	运行部现场记录管理制度	306
第四节	运行部专业分析管理办法	308
第五节	工作票管理制度	309
第六节	培训管理制度	314
第七节	运行部巡检员岗位培训计划	318
第八节	运行部缺陷管理制度	321
第九节	运行部管理人员到岗制度	325
第十节	运行部文明生产制度	326
参考文献		329

第一章 热电联产机组的启动和停运

热电联产机组的启动是指锅炉点火、升温、升压，蒸汽参数达到要求，汽轮机进行暖管、冲转、暖机、定速，发电机并网带基本负荷，升负荷（到一定负荷后抽汽供热），锅炉逐渐撤油枪、投煤粉直到满负荷的过程。其实质是火焰、烟气及蒸汽向锅炉和汽轮机金属部件传热的复杂交换过程，属于不稳定的导热过程，其不稳定的启动工况带来了设备的热应力的变化。由此看来，研究机组的启动方式，是寻求机组合理的加热过程，也就是在启动过程中保证发电机组各部分温差热应力、热变形以及转子与汽缸之间胀差和转动部分的振动均维持在较高水平，以减少效应力、热变形及热膨胀。在保证安全的基础上，尽量缩短启动时间，减少损失，提高其经济性。

第一节 热电联产机组启动方式的分类及特点

一、热电联产机组启动方式

汽轮机的启动方式较多，归纳起来有四种分类方法。

（一）按启动前汽轮机金属温度（内缸或转子表面温度）水平分类

1. 冷态启动

启动前，当汽轮机高压缸调节级汽室的金属温度低于维持汽轮机空转时蒸汽温度，其金属温度在 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ 以下时，称为冷态启动。

2. 温态启动

金属温度在 $200\sim 370^{\circ}\text{C}$ 时的启动，称为温态启动。

3. 热态启动

金属温度在 $370\sim 450^{\circ}\text{C}$ 时的启动，称为热态启动。

4. 极热态启动

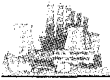
金属温度在 450°C 以上时的启动，称为极热态启动。

以上的启动标准是在部颁《电力工业技术管理法规》中规定的，另外，有的国家也按停机时间来划分，停机时间大于 72h 为冷态，停机 8~72h 为温态，停机 8h 为热态，停机 2h 为极热态。

（二）按新蒸汽参数分类

1. 额定参数启动

额定参数启动时，在整个启动过程中，从冲转至并网带负荷的全过程，汽轮机主汽阀



前的蒸汽参数（如压力、温度）始终维持额定参数，这种启动方式称为额定参数启动。额定参数启动时蒸汽的压力、温度相当高，它与汽缸转子等金属部件的温差很大，而发电机组启动又不允许有过大的温升速度，为了设备的安全，在这种条件下只能将进汽量控制在很小值，这样节流损失增加，同时汽轮机必须延长升速和暖机的时间，致使经济性降低。汽轮机调节级后温度变化剧烈，零部件受到很大的热冲击，热应力也大，以及各部件受热不均易产生热弯曲，另外，锅炉还需将蒸汽参数达到额定值后，汽轮机才能冲转。在整个启动过程中将损失大量的燃料、降低发电厂的效益，所以额定参数启动仅适用于母管制的汽轮机，而不适用于单元制的发电机组。

2. 滑参数启动

滑参数启动是指汽轮机主汽阀前的蒸汽参数（如压力、温度）伴随汽轮机的转速和负荷的升高而升高，直至启动结束，蒸汽参数达到额定值的启动过程。

滑参数启动克服了额定参数启动时由于蒸汽参数高，对汽轮机部件产生热冲击，进汽流量小，暖机和启动时间长，以及冲转前为了提高蒸汽参数而锅炉燃料和汽水浪费大等缺点，因此在单元制大容量发电机组启动中得以广泛应用。

滑参数启动有真空法和压力法两种。

（1）真空法滑参数启动。在启动前全开电动主汽门、自动主汽门和调汽门、真空区一直到锅炉汽包。锅炉点火后炉水在真空状态下汽化，在不到 0.1MPa 的汽压下就可以冲动汽轮机。随着锅炉燃烧的增强，一方面提高汽温、汽压，另一方面汽轮机升速、定速、并网。但真空法滑参数启动存在一定的缺点，如疏水困难，蒸汽过热度低，依靠锅炉热负荷控制汽轮机转速不太容易，容易引起水冲击，安全性较差。对于中间再热式发电机组，由于高压汽缸排汽温度相应较低，再加上再热器一段布置在烟气低温区，使再热器出口汽温很难提高，可导致中、低压汽缸内蒸汽湿度增大。

真空法滑参数启动时真空系统庞大，启动过程中抽真空也较困难。因此目前真空法滑参数启动应用较少，真空法启动是利用低参数来暖管、暖机、升速和带负荷。由于汽温是从低到高逐渐上升，所以允许通汽流量较大，既有利于暖管和暖机，又可使过热器、再热器充分冷却，促进锅炉水循环及减小汽包壁的温差，同时还使锅炉产生的蒸汽得以充分利用。所以，这种方法比较经济，对锅炉又比较安全。

（2）压力法滑参数启动。汽轮机真空只抽到高压主汽阀，启动冲转参数选用适当压力和温度的过热蒸汽（过热度不小于 50℃），从冲转到汽轮机达额定转速的全过程，蒸汽参数基本维持不变。只是通过控制汽轮机进汽量来达到控制汽轮机转速的目的。相比于真空法，压力法便于控制转子转速，可避免中、低压转子叶片的水蚀。由于压力法启动参数足够高，故整个启动过程中操作简单、控制方便，但也存在一定的问题，如冲转时蒸汽温度与金属温度的匹配不理想，有一定程度的热冲击，降低了汽轮机的寿命，定速后缸温水平不高，需要在低负荷下长时间暖机。

一些国外发电机组在启动前采用盘车暖机预热高压汽缸，启动参数较高，一般为 4~6MPa，300~350℃，称为中参数启动，仍属于压力法滑参数启动，这种方式便于计算机按程序进行控制。



（三）按冲转时进汽方式分类

1. 高、中压缸启动

高、中压缸启动时，蒸汽同时进入高压缸和中压缸冲动转子，对高、中压缸合缸的发电机组，这种启动方法可使分缸处加热均匀，降低热应力，缩短启动时间。

2. 中压缸启动

在汽轮机启动冲转过程中，高压缸不进汽，只向中压缸进汽冲动汽轮机转子，待机组达到一定转速或带到一定负荷后，再切换为高、中压缸共同进汽的方式，直至机组带满负荷运行。这种启动方式称为中压缸启动。

中压缸启动方式与高、中压缸启动方式相比，高压缸采用倒暖方式，中压缸全周进汽，使得汽缸加热比较均匀，温升较为合理。在机组启动初期，减少了高压缸热应力和胀差对机组启动速度的影响和限制。由于高压缸在启动初期不进汽做功，在同样的工况下，进入中压缸的蒸汽量大，使得暖机更加充分、迅速，从而缩短了机组启动持续时间。但采用此种方式启动，控制方法较复杂。

（四）按控制进汽流量的阀门分类

1. 调汽门启动

启动时电动主闸门和自动主汽门处于全开位置，进入汽轮机的蒸汽流量由调速汽门控制。

2. 用自动主汽门或电动主闸门的旁路门启动

启动前调汽门全开，用自动主汽门或电动主闸门的旁路门控制蒸汽流量。

二、滑参数启停方式的主要优点

现代热电联产机组的启停均采用滑参数启停方式而不采用额定参数启停方式，在滑参数启停的整个过程中，蒸汽参数是滑变的（滑升或滑降），这种启停方式的优点可表现在下列方面。

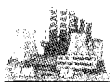
1. 安全可靠性好

滑参数启动时，整个机组的加热过程是从较低参数开始，因而各部件的受热膨胀比较均匀。对锅炉而言，滑参数启动可使水循环工况得到改善，汽包壁温差减小，过热器冷却条件变好。对汽轮机，开始启动时进入的是低压、低温蒸汽，其容积流量大，容易充满汽轮机，而且流速也可增大，使汽轮机各部件加热均匀而温升平稳，故热应力不均的情况可以改善，增加了安全可靠，并可延长设备寿命。

滑参数停机时，由于蒸汽流量大，对汽缸冷却较均匀，使汽轮机热变形和热应力较小。

2. 经济性高

滑参数启动时，因主蒸汽管道上所有的阀门全开，减少了节流损失，主蒸汽的热能几乎全部用来暖管、暖机；自锅炉点火至发电机并网发电的时间短，可多发电，辅机耗电也相应减少；锅炉不必向空中大量排汽，减少了工质和热量的损失，从而也减少了燃料消耗；叶片可以得到清洗，使汽轮机效率得到提高。



滑参数停机比额定参数停机经济，凝结水可全部回收，余汽、余热可用来发电。

3. 提高设备的利用率和增加运行调度的灵活性

采用滑参数启动，可缩短启动时间，提前并网发电。采用滑参数停机，余汽、余热可被用来发电，同时也加速了汽轮机的冷却过程，所以可以提前揭缸，缩短检修工期，增加了设备利用小时数。这样就提高了设备利用率，增加了运行调度的灵活性。

4. 操作简化并易于程控

在滑参数启动过程中，当汽轮机采用全周进汽时，调节阀门处于全开位置，操作调节简单，而且给水加热也可随主机进行滑参数运行，简化了操作。随着计算机技术的应用，整个滑参数启动过程可采用顺序控制系统（SCS），它可以完成对机组自动启停的控制，如对引风机、送风机、给水泵、盘车装置等辅机进行开、关，启、停或程序控制，也可以对常用的阀门和挡板进行顺控（遥控）等。

5. 改善发电厂的环境条件

由于减少了蒸汽排放所产生的噪声，故改善了电厂周围的环境。

第二节 锅炉启动过程的热力特性和受热面保护

一、锅炉汽包的热应力保护

（一）锅炉汽包的温差和热应力

1. 锅炉上水工况

机组冷态启动时，在锅炉汽包上水之前，汽包温度接近于环境温度。一定温度的给水进入汽包后，内壁温度随之升高，因汽包壁较厚（一般为 100mm 左右），外壁（外表面）温升较内壁温升慢，从而形成内、外壁温差。由于汽包内、外壁温差的存在，温度高的内壁受热，力图膨胀，温度低的外壁则阻止膨胀，因此，在汽包内壁产生压缩热应力，外壁产生拉伸热应力。温差越大，产生的应力也越大，严重时会使汽包内表面产生塑性变形。此外，管子与汽包的接口也会由于过大的热应力而受到损伤。为此，锅炉运行规程中一般规定，启动过程中的进水温度一般不超过 $90\sim 100^{\circ}\text{C}$ ，进水时间根据季节的变化控制在 $2\sim 4\text{h}$ 。热态上水时，水温与汽包壁的温差不能大于 40°C 。另外，为安全起见，要求锅炉进常温水时，上水温度必须高于汽包材料性能所规定的脆性转变温度 33°C 以上。

2. 锅炉升压工况

一般自然循环锅炉在启动过程中，汽包壁温差是必须控制的重要安全性指标之一。在启动开始阶段，蒸发区内的自然循环尚不正常，汽包内的水流动很慢或局部停滞，对汽包壁的放热很少，故汽包下部金属温度升高不多。汽包上部与饱和蒸汽接触；蒸汽对金属凝结放热，放热系数比汽包下部大好几倍，当升压速度越快时，饱和温度增加越快，汽包上、下壁温差就越大。故汽包上部金属温度较高，汽包上下产生了温差应力，汽包有产生弯曲变形的倾向，如图 1-1 所示。这时由于上壁温度高、膨胀量大，而下壁温度低、膨胀量小，因而汽包上壁受压缩热应力，下壁则受到拉伸热应力。但是，与汽包连接的很多管子将约束汽包的自由变形，这样就产生很大的附加应力，严重时可能会使联箱、管子弯



曲变形和管座焊缝产生裂纹。由于受与汽包连接的各种管子对变形的限制,这种温差应力将使汽包上部金属受压应力,汽包下部金属受拉应力,汽包趋向于拱背状变形。另外,在启动过程中,汽包金属从工质吸收热量,其温度逐渐升高并由内向外散热。因此,汽包壁由于内外存在温差而产生应力。为了防止过大的热应力损坏汽包,目前国内各高压和超高压锅炉的汽包上、下壁温差及汽包筒体任意两点的温差均控制在 50°C 以下。汽包壁上下及内外温差的大小在很大程度上取决于汽包内工质的温升速度,速度越大则温差越大。一般规定汽包内工质温升的平均速度不超过 $1.5\sim 2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

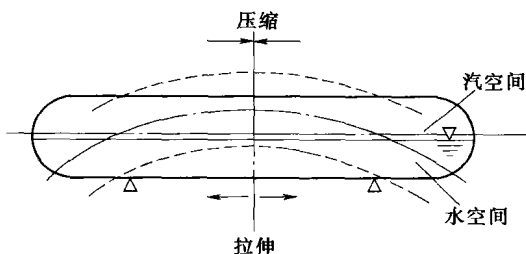


图 1-1 汽包上下部壁温差产生的热应力和热变形

(二) 汽包的保护

在锅炉启动过程中,防止汽包壁温差过大的主要措施有:

(1) 严格控制升压速度,尤其是低压阶段的升压速度要尽量缓慢,这是防止汽包壁温差过大的根本措施。为此,在升压过程中应严格按照规定的升压曲线进行。在升压过程中,若发现汽包壁温差过大,应减慢升压速度或暂停升压。控制升压速度的主要手段是控制好燃料量。此外,还可加大排汽量或开大旁路系统调节门的开度。

(2) 启动中对汽包壁温差的监督和控制。我国一般规定,汽包金属的上、下壁温差和内、外壁温差均不允许超过 40°C 。这个限制主要是考虑到理论上对启动热应力做精确计算的困难以及损伤汽包的严重性而制定的。

对汽包壁温差的监视,通过在汽包壁上沿长度方向装设上、下壁温度的若干组测点进行。由于汽包内壁金属温度无法直接测量,以饱和蒸汽引出管外壁温度代替汽包上部的内壁温度,以汽包下集中下降管外壁温度代替汽包下部的内壁温度。计算表明,上述代替所引起的壁温误差不会超过 $3\sim 5^{\circ}\text{C}$ 。在监督和控制温差时,按以下方法计算壁温差:以最大的引出管外壁温度减去汽包上部外壁最小温度,差值即为汽包上部内、外壁最大温差。

(3) 尽快建立正常水循环。水循环越强,上升管出口的汽水混合物以更大流速进入并扰动水空间,使水对汽包下壁的放热系数提高,从而减小上、下壁温差。

(4) 初投燃料量不能太少,炉内燃烧、传热应均匀。初投燃料量太少,水冷壁产汽量少,水流动慢,初投燃料量与控制升压速度的矛盾,可用开大旁路系统调门的方法解决。如炉内热负荷不均匀,有可能部分水冷壁处于无循环或弱循环状态,相应的汽包长度区间上、下壁温差增大。因此保持均匀火焰是启动燃烧调整的重要任务。

二、锅炉受热面的保护

(一) 水冷壁

自然循环锅炉在点火过程中,特别在升温升压的初始阶段,水冷壁受热不多,管内工质含汽量很少,故水循环还不正常。又因这时投入油枪或燃烧器的数量少,故水冷壁受热和水循环的不均匀性较大。因此,同一联箱上的水冷壁管之间存在金属温差,产生一定的



热应力，严重时会使下联箱变形或管子损伤。

大型锅炉的水冷壁都是膜式水冷壁，管子间为刚性连接，不允许有相对位移。故邻管之间的温差会产生很大的热应力。理论上，应限制相邻管子间的壁温差不得超过 50°C 。对于平行工作的水冷壁管，加热不均（如火焰偏斜）就会造成同回路不同管子间的壁温偏差，而管内流动不均则会加剧吸热不均的影响。

启动过程还有水循环问题。水循环正常时，有一定的水量进入水冷壁管口，且边流动边产汽，内壁周围有水膜，这是最好的冷却工况。但受热不均时，个别受热弱管（或管组）水流动很慢，甚至停止，入口基本无水量流入。此时管内汽泡易在水冷壁转弯处、焊缝或水平段积聚，形成汽环，使该处管壁局部过热产生鼓包、胀粗或爆管。这也要求启动之初均匀加热，否则个别受热很弱的管子也容易出问题。

各水冷壁管因受热而产生的膨胀差异将使下集箱下移的数值不同。因此，水冷壁的受热均匀性可以通过膨胀量（膨胀指示器）进行监督。启动中，若发现膨胀受阻等异常，则应暂缓升压，待查明原因处理后，方可继续升压。

升压过程中保护水冷壁的措施包括：.

(1) 均匀炉内燃烧沿炉膛四周均匀地或对称地投入喷燃器并定时切换运行。在符合升压曲线，汽包金属温差不大的情况下，可适量多投一些喷燃器，以求得炉膛热负荷的均匀。

(2) 尽快建立正常水循环。正常的水循环可保证水冷壁内有均匀、较大的循环流量，冷却受热面。锅炉启动过程中可从以下几个方面促使正常水循环的尽快形成：

1) 加强水冷壁下联箱的放水，水冷壁下联箱定期或连续放水可将汽包下部温度较高的水、汽引到水冷壁管底部用热水代替冷水，增加水冷壁产汽区的长度，促进水循环。实践证明，这个措施对促进水循环的建立，减小汽包壁温差也是十分有效的。

2) 采用邻炉蒸汽加热，在锅炉点火前，从各水冷壁下联箱均匀地通入适量的蒸汽，加热各个循环系统，待水达饱和温度并有一定产汽量后，再进行点火。

3) 启动时可适当早开、开大排汽门，提高燃烧率，在不加快升压速度的情况下，增大产汽量。

4) 启动初期较慢地升压对尽快建立正常水循环也是有利的。燃料热量中，一部分用于提升金属壁温和水温，增加蒸发系统的蓄热量，其余才用于产汽。所以升压速度低，用来增加水和金属蓄热的热量少，用于产汽的多；同时，低压下饱和温度低，管子壁温低，辐射换热量大，产汽多、汽水密度差大，循环动力大。

(二) 过热器和再热器

1. 过热器

锅炉正常运行时，过热器被高速蒸汽所冷却，管壁金属温度与蒸汽温度相差无几。在启动过程中，情况就与此大不相同。在冷炉启动之前，屏式过热器一般都有凝结水或水压试验后留下的积水。点火以后，这些积水将逐渐被蒸发，或被蒸汽流所排除。但在积水全部被蒸发或排除以前，某些管内没有蒸汽流过，管壁金属温度近于烟气温度。即使过热器内已完全没有积水，如蒸汽流量很小，管壁金属温度仍较接近烟气温度。因此，一般规定，在锅炉蒸发量小于 $10\% \sim 15\%$ 额定值时，必须限制过热器入口烟温。