



普通高等教育“十二五”规划教材

能源动力类专业

大型火电机组 集控运行与事故分析

承红 王金平 编

应用型



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

能源动力类专业

大型火电机组 集控运行与事故分析

承 红 王金平 编
华永明 主审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是普通高等教育“十二五”规划教材。

本书内容主要包括单元机组的运行基本理论、试验、启动与停机、运行调节、负荷控制、辅助系统的顺序控制及运行维护,以及事故及分析。本书选材上注重先进性、实用性和普遍性,素材大都选自300、600MW机组,紧密结合目前国内先进的超(超)临界压力机组的生产实际。

本书可作为普通高等学校能源动力类相关专业的教材,也可作为高职高专电力技术类相关专业的教材,同时可供电厂集控运行技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

大型火电机组集控运行与事故分析/承红,王金平编. —北京:中国电力出版社,2012.7

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-3302-4

I. ①大… II. ①承…②王… III. ①火力发电—发电机—机组—运行—高等学校—教材②火力发电—发电机—机组—事故分析—高等学校—教材 IV. ①TM621.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第162683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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2012年8月第一版 2012年8月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 13.5印张 327千字

定价 25.00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



前 言

大型火力发电机组集控运行是能源与动力工程专业和火力发电厂集控运行专业应掌握和熟悉的重要内容。本书详细地阐述了大型火力发电机组集控运行基本理论、启停、参数调节及大机组事故与分析。

本书选材上结合国内 300MW 亚临界压力机组, 600MW 超临界压力机组的运行实际, 在阐述运行知识时注重实际应用。本书详细地阐述了大型火力发电机组运行的基本理论及试验, 分析了单元机组的启动与停机(简称启停)、单元机组的运行调节、单元机组的负荷控制、辅助系统顺序控制与维护、单元机组事故及分析。本书从大机组运行实际出发, 力求理论与实践相结合, 内容涉及面广, 使学生能从单元机组启停、运行调节、事故分析等方面全面地掌握大机组运行及事故方面的知识, 为今后的工作打下扎实的基础。同时, 对电厂的集控运行人员而言, 本书也是一本能结合实际生产的重要参考书。

本书由承红、王金平合编。承红编写了绪论、第一、二、六章, 并负责全书统稿工作, 王金平编写了第三~五、七章。东南大学华永明副教授担任全书的主审并提出了许多宝贵意见和建议, 在此表示衷心的感谢。

编 者

2012 年 5 月

目 录

前言

绪论	1
第一章 单元机组运行基本理论	5
第一节 锅炉启停过程热力特性分析	5
第二节 汽轮机启停和变工况时的热力特性	9
第三节 汽轮机的寿命管理	16
第二章 单元机组试验	21
第一节 单元机组热力试验	21
第二节 锅炉试验	24
第三节 汽轮机试验	26
第四节 发电机和变压器试验	28
第三章 单元机组的启动与停机	31
第一节 单元机组启动与停机概述	31
第二节 亚临界压力机组(汽包炉)冷态滑参数启动	36
第三节 超临界压力机组的启动	42
第四节 单元机组的热态启动	50
第五节 单元机组的停机	54
第四章 单元机组的运行调节	62
第一节 概述	62
第二节 汽包锅炉的运行调节	63
第三节 超临界直流锅炉的运行调节	81
第四节 汽轮机运行监视和维护	89
第五节 发电机的运行维护	94
第六节 单元机组调峰运行	100
第七节 单元机组的经济运行	104
第五章 单元机组负荷控制	107
第一节 协调控制系统	107
第二节 超临界压力机组的协调控制	114
第三节 汽轮机数字电液控制系统	120
第四节 汽轮机旁路控制	129
第六章 辅助系统的顺序控制及运行维护	134
第一节 概述	134

第二节	锅炉侧辅机的顺序控制·····	136
第三节	汽轮机侧辅机的顺序控制·····	147
第四节	发电机—变压器组及厂用电源的顺序控制·····	160
第五节	汽轮发电机组自启停控制系统·····	162
第七章	单元机组事故及分析·····	170
第一节	概述·····	170
第二节	单元机组热工连锁保护·····	171
第三节	单元机组热工事故分析·····	175
第四节	锅炉燃烧事故及分析·····	178
第五节	锅炉汽水系统事故及分析·····	187
第六节	汽轮机转子弯曲事故及分析·····	195
第七节	汽轮机超速事故及分析·····	199
第八节	汽轮机轴系断裂事故及分析·····	202
第九节	发电机的事故及分析·····	203
参考文献	·····	209



绪 论

随着国民经济的飞速发展和对能源需求的日益增长,我国电力工业迅猛发展,全国发电机组总装机容量不断提高,系统允许的单机容量也相应提高。由于大容量机组的经济性高、单位功率机组成本低、建设速度快,高参数、大容量的火力发电机组已成为电网中的主力机组。目前,新投运的火力发电机组的单机容量基本上在 300MW 以上,已逐步形成大电网、大机组、高参数、高自动化的发展趋势。

大容量机组的系统和设备结构复杂,锅炉、汽轮机和发电机等主设备之间联系密切,为保证机组安全、经济运行,必须采用先进的自动控制系统和集中控制的运行方式。

随着机组容量的增大,火力发电机组从最早的母管制机组发展到单元制机组,其运行控制水平也从早期的就地、手动控制发展到现在的炉、机、电集中控制。作为母管制机组,汽轮机与汽轮机、锅炉与锅炉之间的横向联系密切,炉、机、电一般分别设置控制盘台,分别在自己单独的控制室进行操作控制或就地进行控制。而单元制机组在同一集控室进行炉、机、电集中控制,通过大屏幕显示和 CRT 监视、操作,采用计算机分散控制系统(DCS),实现单元机组的整组控制。依靠日益成熟和更新的计算机技术,不仅提高了机组运行的安全性和经济性,而且可以减轻运行人员的劳动强度,节省劳动力。

一、单元机组的构成和特点

所谓单元机组,即热机和电气系统均为单元制方式,构成炉、机、电纵向联系的独立单元,如图 0-1 所示。在热机方面,锅炉直接向所配合的汽轮机供汽(一机配一炉)的系统,称为单元制;而在电气方面,发电机、变压器直接连接的系统为发电机—变压器组,也称为单元制。因此,单元机组的锅炉直接向所配合的汽轮机供汽,汽轮机驱动发电机所发出的电功率直接经一台升压变压器送往电力系统。这样,同一机组的各设备之间的纵向联系非常密切,各单元机组之间横向联系较弱。正常运行时,各机组本身所需新蒸汽的辅助设备均由本单元的蒸汽总管提供,各机组本身所需厂用电取自本单元发电机电压母线。

大容量机组运行参数高,其主要设备和管道在很高的温度、压力下工作,必须采用昂贵的合金材料,投资明显增加。同样,机组容量增大,发电机电压母线截面积增大,发电机回路的开关电器载流量增大,均导致投资的增加。只有采用单元制机组,才能使系统最简单,管道最短,管道附件最少,发电机电压母线最短,电压回路的开关电器应用得最少。所以单元机组不仅节省了投资,降低了系统本身发生事故的可能性,而且操作方便,适于炉、机、电集中控制。

此外,大容量机组均采用中间再热,主蒸汽管道和再热蒸汽管道往返于汽轮机与锅炉之间,只有采用单元制才能使系统最简单,连接管道最短。在负荷变化过程中,再热蒸汽参数同时受到锅炉和汽轮机的双重影响,参数波动大,只有采用单元制机组才有利于自动控制系统合理调整参数。

与母管制机组相比,单元机组的缺点是运行灵活性较差,由于炉、机、电在生产运行中是一个有机的整体,只要其中任一主要设备发生故障,必然会严重影响整个机组的运行,甚

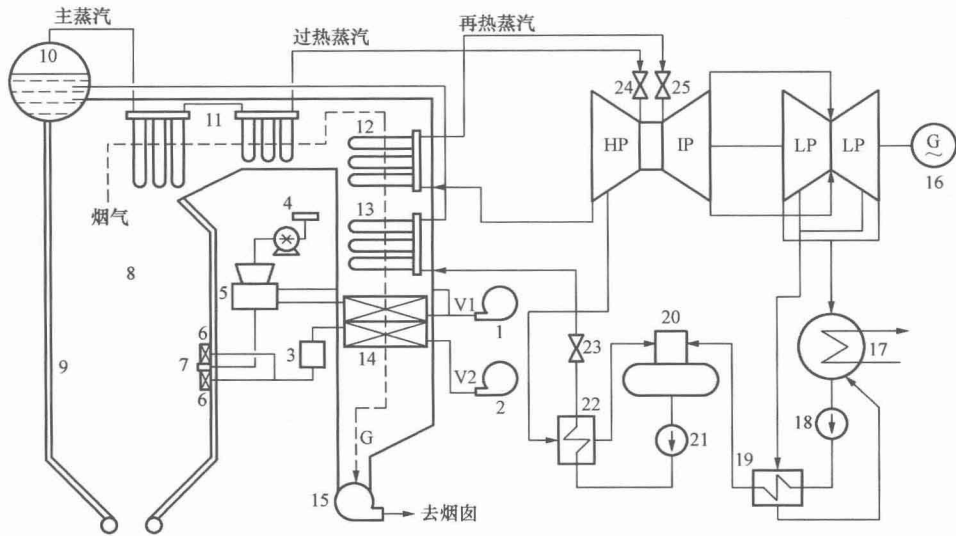


图 0-1 单元机组系统构成简图

1—送风机；2—一次风机；3—二次风挡板；4—给煤机；5—磨煤机；6—二次风；7—燃烧器；8—炉膛；9—水冷壁；10—汽包；11—过热器；12—再热器；13—省煤器；14—空气预热器；15—引风机；16—发电机；17—凝汽器；18—凝结水泵；19—低压加热器；20—除氧器；21—给水泵；22—高压加热器；23—主给水阀；24—高压主汽阀；25—中压主汽阀

至被迫停机。此外，电网频率变化时，汽轮机的调速汽门迅速随之改变，响应速度快，而锅炉由于热惯性大，又没有相邻机组或母管的蒸汽可以利用，必然引起主蒸汽压力的波动，影响机组的稳定运行，所以单元机组对负荷的适应性较差。单机容量较大的单元机组，一旦发生故障停机，不仅本身发电量损失及检修费用大，而且会影响电网的正常供电及稳定运行。因此，不仅对机组的运行、维护、检修水平的要求大大提高，而且对控制方式及自动化程度也提出了新的要求。如何保证机组安全、经济运行，提高设备的可靠性和运行的经济性，是十分重要的问题。

大机组在运行中存在的主要问题有：

1. 锅炉方面

锅炉在运行中如果调整控制不当，容易出现超温现象。而大容量锅炉的工质温度水平高，金属工作条件恶劣，锅炉内金属壁温与金属许用应力接近允许极限，因此，设备寿命损耗较大。同时，随着温度升高，化学反应速度加快，高温腐蚀、氧化现象严重，这也影响了设备寿命，对机组安全运行不利。所以，运行中，应特别重视对蒸汽温度和管壁温度的监视和调整。

此外，大型锅炉蒸汽温度变化复杂，特别是再热蒸汽温度又受汽轮机侧工况变化影响，负荷波动时，蒸汽温度波动较大，因此对运行调整要求较高。

2. 汽轮机方面

大机组汽缸“质面比”比转子大得多，轴向长度比中小型机组大，主蒸汽和再热蒸汽温度高，因此，变工况时温差、胀差和热应力都较大，对汽轮机寿命影响很大。另外，大容量汽轮机由于动静间隙小，易发生碰磨及转子热弯曲事故。机组振动、进水或进冷气造成设备

损坏也是国内大机组运行中的突出问题。

3. 电气方面

大容量发电机运行工况严峻,要求及时、准确地掌握运行参数的变化,对监测和保护装置的可靠性和完善程度要求很高。

大量实践证明,采用先进的自动化控制技术是提高机组安全、经济运行水平的行之有效的措施。

二、机组的运行控制

随着计算机技术的飞速发展,大容量机组的自动化控制水平和运行管理水平大幅度提高。目前,不仅已实现单元机组和辅助控制车间的实时控制,而且还和厂级监控信息系统(SIS)和厂级管理信息系统(MIS)构成了全厂数字式管理网络。

(一) 大型单元机组的控制技术发展经历的三个阶段

(1) 基地式仪表控制系统。使用仪表与被控对象在机械结构上结合在一起,而且仪表的各个部件,包括检测、计算、执行以及简单的人机界面都做成了一个整体,就地安装在被控对象上。

(2) 单元组合式仪表。单元组合式仪表是按照自动调节系统中各组成部分的功能和现场使用要求,分成若干个独立的单元。各单元之间用标准信号联系。在使用时再按一定的要求,将各单元组合在一起。单元组合仪表按工作能源又可分成气动单元组合仪表和电动单元组合仪表。如 DDZ-III 型仪表曾在 20 世纪七八十年代在我国大型火电机组中普遍采用。

(3) 分散控制系统(DCS)。以微型计算机为基础,从综合自动化的角度,按分散控制、集中操作、综合管理和分而自治的设计原则而设计的一种集散型综合控制系统,从 20 世纪 90 年代中期以来广泛用于大中型火力发电厂,尽量将控制所造成的危险性分散,而将管理和显示功能集中。

自 20 世纪 80 年代中、后期,我国从国外引进的大机组自动控制系统大多为分散控制系统。它能较好地适应大型火力发电机组锅炉、汽轮机和发电机以及相应辅机的分散控制、集中管理的要求,因而称为分散控制系统(distributed control system, DCS)。我国近年安装的大型机组都采用了分散控制系统。

一套完整的自动控制系统主要包括:数据采集系统、协调控制系统、炉膛安全监控系统、顺序控制系统、汽轮机数字电液控制系统和汽动给水泵汽轮机数字电液控制系统、旁路控制系统、汽轮机监视仪表和汽轮机紧急跳闸系统、电气控制系统、报警系统等。这些子控制系统都将纳入机组的分散控制系统(DCS)中。大型火力发电机组采用炉、机、电集中控制的运行方式,完备的自动控制系统为实现机组集控运行提供了可靠的保障。

(二) 单元机组运行控制的主要内容

1. 监察测量

机组在启停、正常运行工况下,自动检测运行参数,并进行显示、记录、报警、打印制表,即实现数据采集、数据通信、机组运行监视等功能。

2. 顺序控制

根据值班员指令,自动完成整个机组或局部系统的顺序启停,即实现顺序控制、机组自动启停功能。

3. 自动保护

在机组启停和事故状态下，自动切换设备或系统，使机组保持在有利状态下，保护设备安全，即实现连锁保护、报警功能。

4. 自动调节

自动保持机组在最佳运行参数下运行或满足电力系统对机组的要求，即实现机组协调控制功能。

三、集控运行对运行人员的要求

大型机组自动化程度的提高，使单元机组的主机和辅机之间的运行控制互相渗透、互相牵连，炉、机、电已成为一个有机的整体。由于设备、系统复杂，运行控制的自动化程度高，熟悉和掌握自动化集中控制设备的运行技术，是搞好单元机组集控运行的不可缺少条件。

通过本课程的学习，能熟悉、掌握大型单元机组的启停、运行调整、自动控制和事故处理等方面的理论知识和实际操作经验；加深对锅炉、汽轮机、热力发电厂和热工自动化等课程的理解并进一步消化吸收；为参加电厂设计、安装、调试、运行和检修打下一定的基础，以缩短理论学习和现场实际工作之间的差距，也有利于提高运行人员和检修人员的技术水平，做好大型火电机组集控运行工作。

第一章 单元机组运行基本理论

现代大型火力发电厂,因机组容量增大,蒸汽参数越来越高,主要设备和部件都是在很高的压力、温度下长期工作的。在这样的条件下,金属材料的组织结构将会发生变化,如运行参数控制不当,会严重影响设备的使用寿命,甚至造成事故。锅炉、汽轮机的许多部件都在高温条件下工作,处于高温和一定应力的作用下,随着工作时间的增加,会产生缓慢的塑性变形,这种现象称为蠕变。蠕变不仅与工作温度、应力大小有关,而且和高温下的工作时间有关。温度越高、应力越大,蠕变速度也越快。另外,零部件在高温和应力的长期作用下,若总变形量不变,零件的应力将随时间的增长而逐渐下降,这种现象称为应力松弛。应力松弛发生在高温下工作的紧固件上,如:汽轮机、锅炉中的螺栓、螺母、汽封、紧压弹簧等。当应力松弛到一定程度后,会引起汽缸、阀门漏汽,安全阀过早启座,影响机组正常运行,甚至发生危险。因此,抗应力松弛性能是电厂金属材料的一个重要高温性能指标。

当金属部件在工作中存在温度差时,就会因各部分膨胀和收缩的相互约束而产生附加温度应力,也称热应力。如果这种温差值是周期性变动的,热应力也将随之周期性变动,同时伴随着弹、塑性变形的循环,塑性变形逐渐积累引起损伤,最后导致破裂。金属材料经受多次周期性热应力作用而遭到的破坏称为“热疲劳”破坏。其裂纹一般发生在金属零件的表面,为龟裂状。在火力发电厂的高温零部件中都存在着热应力。由于在单元机组启停过程中,设备部件都要经历温度的大幅度变化,因此,单元机组的启动与停运,实质上是一个对设备部件的加热升温或冷却降温的过程。在启停过程中,锅炉、汽轮机的各个部件以及管道的温度和应力都要发生很大的变化。特别是高参数、大容量机组,由于设备体积庞大,结构复杂,各个部件(如锅炉受热面、汽包、汽管道、汽轮机汽室、汽缸、转子、法兰及螺栓等)所处的条件不同,它们的加热或冷却速度也不同,因而各部件之间或部件本身沿金属壁厚方向产生明显的温差,温差导致设备金属膨胀或收缩不均,而产生热应力。热应力随温差的变化使金属产生疲劳。当热应力超过允许的极限值时,会使部件产生裂纹乃至损坏。同时,加热速度不当还会引起机组部件膨胀不均而导致机组内部的动静间隙改变,甚至发生动静摩擦事故。

第一节 锅炉启停过程热力特性分析

一、锅炉启停过程安全性和经济性

在锅炉启动与停运过程中存在各种矛盾,如由于炉膛温度低引起燃烧不稳定与不经济的问题,各受热部件升温速度与温度均匀性的矛盾,受热面受热与工质对其冷却的矛盾,工质排放与工质热量损失的矛盾等。

在启动与停运过程中,各部件的工作压力和温度随时都在变化,且各部件的加热或冷却是不均匀的,金属体中存在着温度场,就会产生热应力。对汽包、联箱等厚壁部件的上下壁、内外壁温差要严格控制,以免产生过大的热应力而使部件损坏。该温差是随着升(降)

压速度与升（降）负荷速度增大而增大的，为减小热应力，必须限制升（降）压和升（降）负荷速度，然而这样势必增加启、停时间。

锅炉点火后就开始加热各受热面和部件。此时，工质尚处于不正常的流动状态，冷却受热面的能力差，会引起局部金属受热面管壁超温，使汽包等靠工质间接加热的部件发生不均匀的温差场。启动初期，水循环尚未建立的水冷壁、未通汽或汽流量很小的再热器、断续进水的省煤器都可能有管壁超温损坏的危险。

在点火初期，投入的燃料量少，炉膛温度低，燃烧不易控制，容易出现燃烧不完全、不稳定，炉膛热负荷不均匀，可能出现灭火和炉膛爆燃事故。此外，燃烧热损失也较大。炉膛热负荷不均，会使并联管吸热偏差增大，所以，点火后希望快速增加燃料投入量，以加强燃烧，提高炉膛温度，均匀炉膛热负荷，建立稳定、经济的燃烧工况，但是增加燃料投入量受到升温速度与排放损失等的限制。

在启动与停运过程中，所用的燃料除了用以加热工质和部件外，还有一部分消耗在排汽和放水方面，而后者是一种热量损失。如排汽和放水未能全部回收，热量就必然伴随工质的损失而损失。此外，在低负荷燃烧时，不仅过量空气系数较大，而且不完全燃烧损失也较大。这些损失的大小与启动方式、操作方法以及启动持续时间有关。

单元机组启动与停机过程中的运行技术管理工作，就是要处理好启动与停机过程中的各种矛盾，优化各种工况，建立最佳的安全、经济启动及停机指标。

二、汽包温差与热应力

汽包是锅炉的重要部件，在运行中如果操作或管理不当，会使其上下壁、内外壁产生过大的温差和热应力。其机械应力与热应力的合成应力在局部区域的峰值可能接近或超过汽包材料的屈服强度，汽包壁容易形成裂纹，扩展到一定程度时汽包将被损坏。汽包承受的应力主要有蒸汽压力引起的机械应力和温度变化引起的热应力，其中机械应力与其工作压力成正比，在设计中通过强度计算来确定汽包的壁厚、直径和选材等，运行中只要控制不超压运行即可。

（一）汽包进水时的温差和热应力

冷态启动时，汽包在进水前，其金属温度接近环境温度。进水时，一定温度的给水与汽包内壁接触，由于汽包壁较厚（一般约 100mm），其内壁温度升高较快而外表温度上升较慢，因而形成内、外壁温差。另外，汽包壁在汽包水位以下被给水浸没，该部分受热、壁温上升，使汽包下部壁温高于上部。正是由于汽包内、外壁，上、下壁温差的存在，温度高的部位金属膨胀量大，温度低的部位金属膨胀量小，而汽包是一个整体，其各部位间无相对位移的自由，因而汽包内侧和下部受到压缩，外侧和上部受到拉伸。

汽包压缩部位产生压缩热应力，拉伸部位产生拉伸热应力，且温差越大，所产生的热应力也越大。该热应力与温差成正比关系，而温差的大小又取决于金属加热或冷却的速度和金属壁厚。所以在进水时，由于汽包下部的压缩热应力和汽包内、外壁温差使内壁产生的压缩热应力叠加，汽包下部内壁产生的压缩热应力达到最大。为减小该热应力，在进水过程中应限制汽包上下壁、内外壁温差，其方法是限制进水温度和进水速度。一般规定冷态启动时，锅炉进水温度不高于 90~100℃，热态启动时，水温与汽包壁温差不大于 40℃；高压及以上锅炉，进水时间为夏季不少于 2h，冬季不少于 4h。

（二）升压过程中汽包的温差和热应力

对于自然循环锅炉，在升压初期投入的燃料量很少，锅炉内火焰充满程度较差，水冷壁受热不均，工质吸热较少。在低压时工质的汽化潜热较大，这时产生的蒸汽量很少，水循环尚未正常建立，汽包下部的水处于不流动或流动非常缓慢的状态，放热系数很小，使汽包下部金属升温缓慢，而汽包上部接触的是饱和蒸汽，其传热方式为凝结放热，放热系数要比下部缓慢的对流传热大好几倍，所以上部壁温升高较快。当压力升高时，上部壁温很快达到对应压力下的饱和温度，这样就使汽包上部壁温高于下部壁温，形成上高下低的温差，产生热应力。随着压力的升高，温差加大，热应力也随之加大，在汽包上半部产生压缩热应力，而下半部则产生拉伸热应力，使汽包产生拱背变形，严重时损坏汽包，见图 1-1。上、下部壁温差与升压速度有关，升压速度越快，该温差越大，且压力越低时越明显。这主要是由于在低压时，压力升高对应的饱和温度上升较快的缘故。因此，在升压过程中应严格控制升压速度，按照给定的升压曲线来升压，这是

防止汽包壁温差过大的根本措施。通常规定，启动与停运期间汽包上、下部壁温差不允许超过 50°C 。现今高参数、大容量的锅炉汽包均装设上、下部壁温测点若干对，以便于监视，若发现温差过大，应减缓升、降压速度或暂停升、降压。对单元机组采用滑参数启动时，升压速度更应严格控制，因为在低参数启动阶段，若升压太快，则蒸汽对汽包上部内壁的加热更剧烈，引起的温差就更大。在点火后升压的初期阶段，应设法迅速建立正常的水循环，以加强汽包内水的流动，从而减小汽包温差。为此，可在各水冷壁下联箱内设置相邻锅炉蒸汽加热装置。在点火前先预热带压，不仅有利于水循环的建立，而且有利于缩短启动时间。另外，还可通过加强下联箱放水，加快汽包内水的流动。

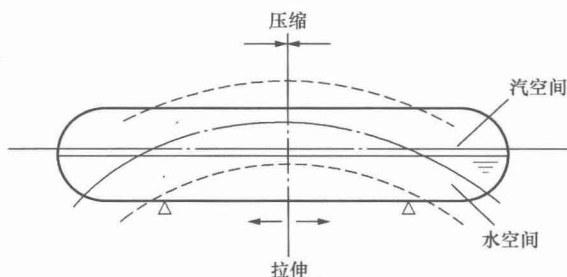


图 1-1 汽包上、下部壁温差产生的热应力及热变形

防止汽包壁温差过大的根本措施。通常规定，启动与停运期间汽包上、下部壁温差不允许超过 50°C 。现今高参数、大容量的锅炉汽包均装设上、下部壁温测点若干对，以便于监视，若发现温差过大，应减缓升、降压速度或暂停升、降压。对单元机组采用滑参数启动时，升压速度更应严格控制，因为在低参数启动阶段，若升压太快，则蒸汽对汽包上部内壁的加热更剧烈，引起的温差就更大。在点火后升压的初期阶段，应设法迅速建立正常的水循环，以加强汽包内水的流动，从而减小汽包温差。为此，可在各水冷壁下联箱内设置相邻锅炉蒸汽加热装置。在点火前先预热带压，不仅有利于水循环的建立，而且有利于缩短启动时间。另外，还可通过加强下联箱放水，加快汽包内水的流动。

（三）停炉时汽包壁温差

在停炉过程中，锅炉部件要从热态过渡到冷态，同样要经历温度与压力的变化，应合理控制冷却速度，防止产生过大的内、外壁温差和热应力。若该热应力与锅炉部件工作引起的机械应力、自重和圆度引起的弯曲应力以及焊接残余应力叠加，会使汽包处在十分复杂的应力状态。在降压过程中，汽包仍会出现上、下部壁温差，因为汽包壁是靠内部工质进行冷却的，冷却不均就出现温差。停炉时，汽包内炉水的压力及对应的饱和温度下降，下汽包壁对炉水放热，使壁面得到较快的冷却，而与汽包上部内壁接触的蒸汽在降压过程中仍呈过热状态，放热系数较低，金属冷却较慢，所以仍会出现上部内壁温度高于下部内壁温度的现象。而且，降压速度越快，该温差越大。应特别注意，当压力降低到较低值时，将出现较大的温差，所以在低压范围内，更应注意严格控制降压速度，一般在最初的 $4\sim 8\text{h}$ 时间范围内应关闭锅炉各处挡板，避免大量冷空气进入。此后如有必要，可逐渐打开烟道挡板及炉膛各门孔，进行自然通风冷却，同时进行一次放水，促使内部水的流动，使各部分冷却均匀。在 $8\sim 10\text{h}$ 内，如有必要加强冷却，可开启引风机通风，并可适当增加进水、放水次数。

(四) 防止汽包壁温差过大的措施

1. 严格控制升压速度

严格控制升压速度是防止汽包壁温差过大的根本措施。为此,升压过程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时,应减缓升压速度或暂停升压,对于单元机组滑参数启动时,升压速度控制更应严格,因为低参数启动阶段,若升压速度太快,则蒸汽对汽包上部内壁的加热更加剧,产生的温差就更大。

控制升压速度的主要手段就是控制燃料量,此外,还可以通过控制排汽量来控制汽压;对于中间再热机组可以通过控制旁路系统的开度来控制汽压。

2. 设法迅速建立正常的水循环

在锅炉点火后尚未建立正常的水循环以前,水与金属的接触传热很差,因此,汽包上、下部壁温差很大。而当水循环逐步建立后,汽包中的水流扰动增大,使水与汽包壁的传热加强,使上、下壁温差减小。因此,是否能尽早地建立起正常的水循环,不仅影响水冷壁受热的均匀性,而且还直接影响到汽包上、下部壁温差的大小。

锅炉启动阶段可以从以下几个方面来促使正常水循环的建立:

(1) 进行水冷壁下部定期放水或连续放水。实践证明,采用水冷壁下部放水的方法,对促进水循环,减小汽包壁温差是很有效的。

(2) 维持燃烧的均匀和稳定,避免由于受热不均而影响正常的水循环的建立。因此,为使炉膛火焰不偏斜,应对称地投用油枪,采用“小油量多油枪”等方法来使炉膛热负荷均匀。此外,升压初期投入的燃料量不能太小,否则,炉膛温度过低,燃烧不易稳定。

(3) 设置外来蒸汽加热装置。在各水冷壁下联箱中设置外来蒸汽加热装置,可使锅炉点火前,先预热带压,有利于缩短启动时间,有利于水循环的建立,使水冷壁均匀受热,减小汽包壁温差。

(4) 启动前的锅炉进水应严格按照规定进行。进水温度不得过高,进水速度不能过快,以免造成温差过大。

此外,有的锅炉在启动时,将汽包水位维持在较高水平,甚至采用全部充水启动,以便在启动过程中尽量减小补充水进水次数,这对控制汽包壁温差有一定作用。

现代大容量高参数汽包锅炉,一般都装设上、下部壁温度测点若干,运行人员在升压过程中应严密监视其壁温的变化。若发现温差过大时,应根据产生的原因和设备情况,采取措施,使温差不超过规定的数值,以保证汽包的安全。

三、启停过程锅炉受热面的保护

1. 水冷壁

自然循环锅炉在点火过程中,特别是在升温、升压的初始阶段,水冷壁受热不多,管内工质含汽量很少,所以水循环还不正常;又因为这时投入的油枪或燃烧器的数量少,所以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之间存在温差,产生一定的热应力,严重时会使下联箱变形或管子损伤。尤其是膜式水冷壁应特别注意其受热不均匀。为此,通过正确的选择和适当地切换点火油枪或燃烧器,可以使水冷壁受热趋于均匀,对于水循环弱,受热较差的水冷壁管,可以从联箱的最低点放水以加速其受热,还可以安装蒸汽加热装置,利用厂用辅助蒸汽,从水冷壁下联箱进行加热,使锅炉点火后的水循环能尽早的建立。

对于强制循环锅炉, 由于使用了强制循环泵进行强制循环, 水流能按照计算设置的各水冷壁管的进口节流孔板进行分配, 因此, 在锅炉启动过程中, 水冷壁的温差较小, 无需采用特殊的措施来改善水冷壁的受热。

2. 过热器和再热器

锅炉正常运行中, 过热器被高速的蒸汽所冷却, 管内金属温度和蒸汽温度相差无几。在启动过程中, 情况就与此大不相同。在冷态启动前, 屏式过热器一般都有凝结水或水压试验后留下的积水。点火后, 这些积水将逐渐被蒸发或被蒸汽流所排出, 但在积水全部被蒸发或排出以前, 某些管道内没有蒸汽流动, 管壁金属温度接近烟气温度。即使管道内没有积水, 此时蒸汽流量很小, 管壁金属温度仍然接近烟气温度。因此, 一般规定蒸汽流量小于 10% 额定值时, 必须限制烟气温度。控制烟气温度的措施主要有限制燃烧率、调整火焰中心位置。另外, 慎重使用减温水, 以防喷水不能全部被蒸发, 使蒸汽带水, 危害汽轮机的安全。此外, 过热器和再热器升温过快时不但会增大厚壁部件的热应力, 而且不利于积水的蒸发, 加剧了过热器和再热器管间加热的不均匀性。因此, 过热器和再热器在启动过程中应该尽可能地均匀加热, 加热过程中可以通过过热器和再热器的出口管壁金属温度, 检查其加热的均匀性。在启动过程中, 再热器的安全主要与旁路系统的形式有关。

第二节 汽轮机启停和变工况时的热力特性

一、汽轮机的热应力

在汽轮机启停和工况变化时, 由于蒸汽与金属的传热条件不同, 汽缸、转子等部件的材料和结构不同, 热传导时间不同, 使汽缸内外壁、法兰内外壁、转子表面与中心孔之间、法兰与螺栓之间、上下汽缸之间、主汽门和调速汽门的阀体内外壁等受热不均出现温差, 从而使汽轮机结构尺寸大的部件产生热应力, 在应力集中的区域或当加热速度很快时, 热应力值可能会超过材料的屈服极限, 使汽轮机零部件产生裂纹损坏。对汽轮机各部件的热应力, 可使用热应力通用计算式计算, 即

$$\sigma_{th} = \frac{\alpha_1 E}{1 - \mu} (t_m - t) \quad (1-1)$$

式中 σ_{th} ——汽缸各部件的热应力, MPa;

μ ——泊桑系数, 一般取 0.25~0.33;

α_1 ——材料的线性膨胀系数, 1/°C;

E ——材料的弹性模量, MPa;

t_m ——部件的平均温度, °C;

t ——部件的任意一点的温度, °C。

对于大型汽轮机转子来说, 由于其承受的总应力为热应力和离心机械应力的总和, 此值更易超过材料的屈服极限值, 所以目前大型机组的寿命管理要以转子为管理对象, 在启停和变工况时, 以转子应力为依据, 决定启停和负荷变化的速度。

1. 汽轮机冷态启动时的热应力

汽轮机冷态启动对汽缸、转子等零部件来说是加热过程, 随着进入汽缸的蒸汽温度不断升高和流量不断增加, 蒸汽传给汽缸和转子的热量也不断增加, 使之温度升高。汽缸被加热

时,汽缸内壁温度高于外壁温度,内壁由于热膨胀受到外壁的制约,产生压缩热应力;而外壁则由于受内壁膨胀的拉伸,产生拉伸热应力。同样,当转子被加热时,转子外表面和中心孔间存在温差,两个表面膨胀不同,温度高的外表面产生压缩热应力,中心孔则产生拉伸热应力,如图 1-2 所示。而且一般冷态启动时,转子表面的最大压缩热应力大于中心孔表面的最大拉伸热应力,如果压缩热应力超过材料的屈服极限,局部地方会产生塑性变形。在初始负荷(在 5%~10%额定负荷)以前,由于塑性变形不能得到恢复,在转子表面会出现残余拉应力,但在高温条件下,由于材料松弛致使残余应力随着时间的增加而逐渐减小。

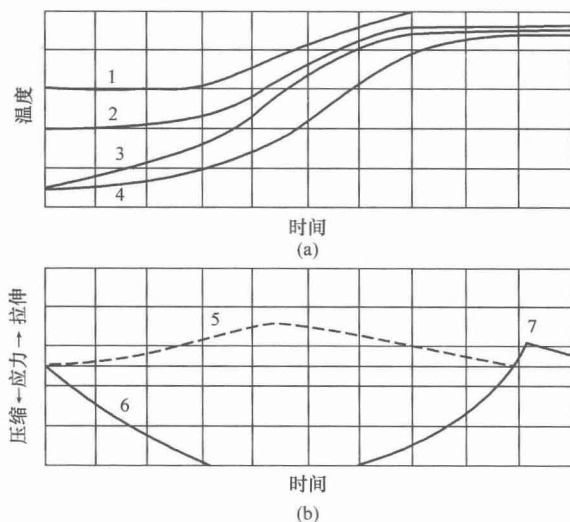


图 1-2 冷态启动时转子温度和热应力

(a) 转子温度; (b) 转子热应力

1—新蒸汽温度; 2—调节级后温度; 3—转子表面温度; 4—转子中心孔温度;

5—中心孔应力; 6—表面热应力; 7—残余应力

2. 汽轮机热态启动时的热应力

在热态启动冲转时,调节级处的蒸汽温度可能低于该区段汽缸或转子的金属温度,会使汽缸和转子产生附加冷却。转子表面和汽缸内壁产生拉伸热应力,而汽缸外壁和转子中心孔壁产生压缩热应力。随着蒸汽温度的升高,调节级后的蒸汽温度开始高于转子和汽缸的金属温度,则转子表面和汽缸内壁由拉伸热应力变为压缩热应力,转子中心孔表面和汽缸外壁由压缩热应力变为拉伸热应力,如图 1-3 所示。进入准稳态时热应力达到最大值,以后又逐渐减小,在稳定工况下运行时,汽缸和转子的热应力趋近于零。由此可知,每一次热态启动,转子表面和中心孔的热应力,刚好完成一个交变应力循环。

汽缸也是如此。这一点与冷态启动不同。如果热态启动时,转子表面热应力超过材料屈服极限,就是在稳定工况下,该处同样会出现残余拉伸热应力和松弛现象,对部件使用寿命极为不利。

二、汽轮机的热变形

汽轮机在启停和变工况运行时,由于各部件受热(或冷却)的程度不同,转子和汽缸在径向和轴向有温差,此时除产生热应力外,还会产生热变形和热膨胀。由于转子和汽缸的热变形及它们之间出现的相对位移,使汽缸通流部分、端部汽封以及隔板汽封的间隙发生变

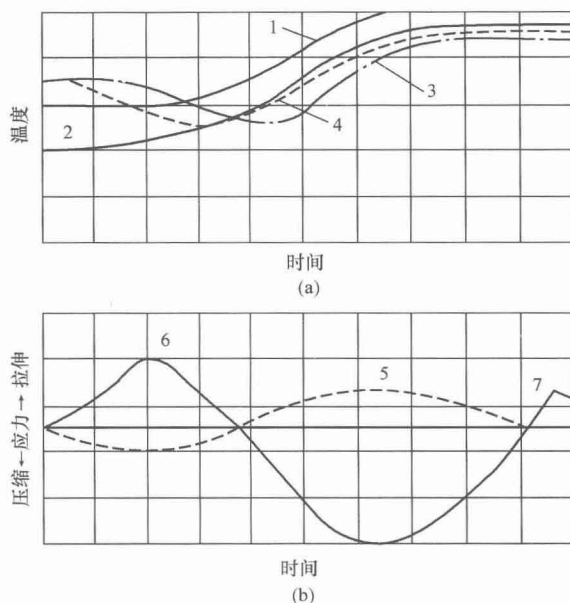


图 1-3 热态启动时转子温度和热应力

(a) 转子温度; (b) 转子热应力

1—新蒸汽温度; 2—调节级后温度; 3—转子表面温度; 4—转子中心孔温度;

5—中心孔应力; 6—表面热应力; 7—残余应力

化。径向间隙和轴向间隙的减小, 是引起汽轮机通流部分和汽封发生卡、磨的主要原因。由于卡、磨, 汽封会磨损。其结果轻者增大汽封漏汽, 降低汽轮机效率, 重者引起叶片断裂, 转子出现残余挠度, 直至整个汽轮机全部损坏。

1. 汽缸的热变形

上、下汽缸存在温差是引起汽缸热变形的主要原因。汽轮机通常是上汽缸温度高于下汽缸温度, 因而上汽缸变形量大于下汽缸, 引起汽缸向上拱起, 发生热翘曲变形, 如图 1-4 所示。一般上、下汽缸温差每差 10°C 将导致汽缸变形弯曲 $0.08\sim 0.13\text{mm}$ 。汽缸的弯曲变形使下汽缸底部径向动、静间隙减小, 甚至消失, 造成动、静部分摩擦, 尤其当转子存在热弯曲时, 动、静部分摩擦的危险更大。汽缸弯曲变形后, 还会引起隔板和叶轮偏离正常所在的垂直平面, 使轴向间隙发生变化, 进而引起轴向磨损。

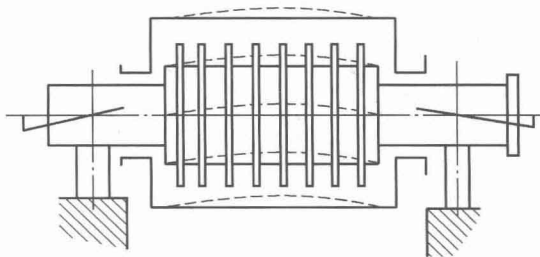


图 1-4 汽缸和转子的热变形

导致上、下汽缸温差的原因有以下几方面:

(1) 下汽缸布置有抽汽管道和疏水管道, 因而下汽缸的散热面积大, 在相同的加热或冷却条件下, 上汽缸温度高, 下汽缸温度低。

(2) 汽缸内部因蒸汽上升, 其凝结水流至下汽缸, 上部的汽流凝结放热大于下部的凝结水放热。

(3) 汽轮机运转平台以上空气温度较高, 汽缸外部冷空气由下向上流动, 致使上汽缸温