

▲ 张 磊 彭德振 主编

大型火力发电机组集控运行



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

大型火力发电机组集控运行

▲ 张 磊 彭德振 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是根据目前国内 600MW 及以上大容量火力发电机组的运行实践为基础编写的。全书共分五章,主要讲述 600MW 及以上大容量汽轮发电机组的启动与停运、机组的运行调节及维护、机组的自动控制及保护、机组的典型事故及处理等运行维护知识。

本书可作为 600MW 火力发电机组集控运行的培训教材,也可供从事 600MW 火力发电机组工作的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

大型火力发电机组集控运行/张磊,彭德振主编.
北京:中国电力出版社,2006

ISBN 7-5083-4057-4

I. 大... II. ①张...②彭... III. 火力发电-
机组-集中控制-运行 IV. TM621.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 001223 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>)

航远印刷厂印刷

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 20.75 印张 561 千字
印数 0001—3000 册 定价 32.00 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

全书共分五章。第一章阐述了亚临界 600MW 火力发电机组的启动、停运的方式，启动、停运的基本过程及注意事项；第二章阐述了超临界 600MW 火力发电机组的启动、停运的方式、启动、停运的基本过程及注意事项；第三章介绍了 600MW 及以上火力发电机组的运行维护、运行参数调整等知识；第四章阐述了 600MW 及以上火力发电机组的自动控制系统的原理、控制方式、机组主要保护的原理等知识；第五章主要介绍 600MW 及以上火力发电机组的典型事故的现象、事故原因及处理措施。

本书由张磊、彭德振担任主编，刘玉文担任副主编，时海刚参编。第一章、第五章及第三章的第十一节~第二十一节由山东省电力学校刘玉文编写；第三章的第一节~第十节由山东省电力学校张磊编写；第二章由山东省电力学校彭德振编写；第四章由山东省电力学校时海刚编写。在编写过程中得到邹县发电厂、德州发电厂和聊城发电厂的大力支持，并采用大量的技术资料，在此表示衷心的感谢。

由于时间仓促，收集资料不全，水平有限，错误之处在所难免，请读者提出批评指正。

编 者
2005 年 12 月

目 录

前言

第一章 600MW 亚临界机组的启动与停运	1
第一节 单元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	7
第三节 汽轮机部件的热应力、热膨胀和热变形	10
第四节 单元机组的滑参数启动	18
第五节 热态启动和极热态启动	33
第六节 600MW 亚临界机组停运	36
第二章 600MW 超临界机组启动与停运	49
第一节 超临界压力机组的冷态滑参数启动	49
第二节 机组的热态和极热态启动	60
第三节 机组的停运	62
第四节 机组停运后的维护和保养	68
第三章 机组的运行调节及维护	70
第一节 锅炉的汽水系统	70
第二节 汽包水位的控制与调整	77
第三节 蒸汽温度的控制与调节	80
第四节 蒸汽压力的控制与调整	85
第五节 锅炉燃烧的调整	90
第六节 制粉系统运行	117
第七节 风机运行	130
第八节 空气预热器运行	140
第九节 锅炉吹灰系统	144
第十节 空气压缩机及其运行	146
第十一节 汽轮机运行监视和调整	149
第十二节 汽轮发电机的运行维护	157
第十三节 电力变压器的运行	163
第十四节 凝汽设备及系统的运行	166
第十五节 凝结水系统和给水系统的运行	175
第十六节 回热系统及设备运行	182

第十七节	轴封系统和旁路系统的运行	191
第十八节	汽轮机润滑油系统和抗燃油系统的运行	194
第十九节	发电机密封油和冷却系统的监视和维护	201
第二十节	单元机组的滑压运行	209
第二十一节	单元机组的协调运行和调峰	212
第四章	机组的控制与保护	219
第一节	自动控制概述	219
第二节	分散控制系统 DCS	221
第三节	数据采集系统 DAS	225
第四节	单元机组协调控制系统 CCS	233
第五节	顺序控制系统 SCS	243
第六节	锅炉炉膛安全监控系统 FSSS	247
第七节	汽轮机数字电液控制系统 DEH	254
第八节	电气系统的自动控制	263
第九节	机组自动启停控制系统	271
第五章	机组的事故与处理	285
第一节	机组事故处理的原则	285
第二节	锅炉机组常见事故诊断及处理	286
第三节	汽轮机通流部分常见事故诊断及处理	297
第四节	调节、保安及油系统故障及处理	307
第五节	汽轮发电机轴瓦钨金熔化或损坏	310
第六节	汽轮机真空异常及处理	312
第七节	发电机的常见事故及处理	314
第八节	电力变压器异常运行及事故处理	322
第九节	厂用电系统事故及处理	324
参考文献		325

600MW亚临界机组的启动与停运

单元制发电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，发电机并网带初负荷，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。由此可见，研究单元制发电机组的启动方式，就是寻求发电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好水平，以减少热应力、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。

600MW 机组都属于单元制、大容量、高参数发电机组，是炉、机、电纵向联系的一条完整的生产系统，因此机、炉、电互相联系，互相制约，各环节的操作必须协调一致，互相配合，才能顺利完成发电机组的启停过程。

第一节 单元机组启动方式的分类及特点

一、单元机组启动方式分类及特点

单元机组的启动方式较多，归纳起来有 4 种分类方法。

(一) 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升温速度，为了设备的安全，在这种条件下只能将进汽量控制得很小，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，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机组，而不适用于单元制的大容量发电机组。

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方式。

(1) 滑参数真空法。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。但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少汽包壁的温差,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) 滑参数压力法。机组启动时汽轮机真空只抽到高压主汽阀,启动冲转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。

(二) 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,这种启动方法对高、中压缸合缸的发电机组特别有利,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、中压缸联合启动方式相比,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作功,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。

(三) 按控制进汽流量的阀门分类

1. 调节汽门启动

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

启动前调节汽门全开,用自动主汽门或电动主闸门的旁路门控制蒸汽流量。

(四) 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的蒸汽温度,其金属

温度在 150 ~ 200℃ 以下时，称为冷态启动。

2. 温态启动

金属温度为 200 ~ 370℃ 时的启动，称为温态启动。

3. 热态启动

金属温度为 370 ~ 450℃ 时的启动，称为热态启动。

4. 极热态启动

金属温度为 450℃ 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。

不同厂家生产的 600MW 机组规定的热态启动温度不同，启动参数也不一样。具体规定见表 1-1。

表 1-1 几种典型 600MW 机组启动状态的划分

状态名称		机组产地				
		东芝公司	西屋公司	G/A 公司	ABB 公司	通用公司
冷态启动	高压缸第一级金属温度/℃	< 270	< 121	≤ 190	< 100	< 149
	中压缸第一级金属温度/℃			≤ 150		
温态启动	高压缸第一级金属温度/℃	270 ~ 350		190 ~ 300	> 100	
	中压缸第一级金属温度/℃			150 ~ 290		
热态启动	高压缸第一级金属温度/℃	350 ~ 400	> 121	300 ~ 430	> 350	> 371
	中压缸第一级金属温度/℃			290 ~ 430		
极热态启动	高压缸第一级金属温度	> 400		>		
	中压缸第一级金属温度/℃			>		
备注					高压转子温度	

二、滑参数启停的优点和冲转蒸汽参数的选择

(一) 滑参数启停的优点

现代大容量单元机组的启动均采用滑参数启动方式，而不采用额定参数启动方式，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，故可以改善热应力不均的情况，增加了安全可靠性，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。单元机组滑参数启动时，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，从而可多发电，辅机耗电也相应减少；锅炉不必向空大量排汽，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。

单元机组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,故可改善电厂周围的环境。

(二) 冲转时蒸汽参数的选择

滑参数启动要选择好冲转汽轮机的蒸汽参数,这对机组的可靠性和经济性很重要。要掌握好蒸汽与金属的温差,冲转升速后要使锅炉的动态特性与汽轮机的升速相配合;使汽轮机的升速按预定的曲线进行。

汽轮机的启动过程属于不稳定导热过程,在机组冷态启动之前,汽轮机金属温度较低。在蒸汽进入汽轮机后,蒸汽以对流方式将热量传给汽缸内壁和转子外表面,然后再传至汽缸外壁和转子中心孔。由于金属壁存在热阻,因而在汽缸内外壁之间和转子半径方向上将出现温差,温差值与单位时间内蒸汽传给金属的热量 Φ 成正比。

$$\text{根据对流换热公式} \quad \Phi = \alpha A(t_s - t_m) \quad (1-1)$$

式中 α ——蒸汽的放热系数;

A ——换热面积;

t_s ——蒸汽的温度;

t_m ——金属温度。

当 A 一定时, Φ 与 α 和 $(t_s - t_m)$ 成正比。冲转后如果 $(t_s - t_m)$ 较大,其结果将使金属产生热变形和热应力。启动参数的选择,主要是考虑到金属部件的热应力,而热应力的大小主要是取决于蒸汽与金属部件之间的温差和放热系数,选择适宜的启动蒸汽温度对汽轮机的合理启动具有决定性的意义。因此,为了减缓冲转时产生的热冲击,以减小热应力,要求蒸汽放热系数要小些,而低压过热蒸汽的放热系数 $[\alpha = 58.15 \sim 174.45 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ 较小,它相当于额定参数时的1/10,所以冲转时采用低压过热蒸汽,以便与汽轮机金属温度合理匹配。同时,在保证允许的金属温度变化率的条件下,低参数蒸汽将有较大的流量,使得机组可以很快达到并网带负荷的条件,节约启动时间和启动用燃料。

启动汽压的选择要综合机、炉两方面及旁路系统的因素来考虑,它主要取决于启动汽温。理想的汽温应当是能避免启动初期的热冲击,而在随后的过程中汽温的上升能保证关键零部件的金属(如调节级处汽缸金属)维持某一选定的温升速度。此外,为了保证汽轮机内不致过早出现湿蒸汽区域,一般要求主蒸汽、再热蒸汽有 50°C 以上的过热度。调节汽阀全开时,可以维持机组并网和带少量负荷。对于中间再热机组,特别是高中压合缸的机组,为了防止高中压缸分缸处的温度差和热应力过大,再热蒸汽温度不能低于主蒸汽温度 30°C 。当高中压缸同时进汽启动时,应该尽量保证高中压缸进汽量的均衡。

汽轮机启动时的蒸汽温度和压力升高速度以及转速和负荷的增大速率应根据零部件金属最大温差的大小、温升速度、胀差和振动值等因素来决定。这些监视控制指标应严格控制在允许的范围以内。

美国 GE 公司生产的 660MW 汽轮机的冲转参数的选择如下：冷态启动时主汽温为 304℃，主蒸汽压力为 6.89MPa；热态启动时主蒸汽温度为 454℃，主蒸汽压力为 8.27MPa。法国阿尔斯通公司（GECALSTHOM）生产的 600MW 亚临界机组冷态启动时，冲转参数为主蒸汽温度为 410℃（最高不超过 440℃），主蒸汽压力为 4.6MPa，再热段蒸汽温度为 320~380℃（最高不超过 430℃），再热蒸汽压力为 1.6MPa。

三、中压缸启动的特点

（一）中压缸启动的设计依据及系统配置

1. 合适的启动程序

确定合适的启动程序要符合的准则：

- （1）尽量简化汽轮机的操作程序。
- （2）尽量降低汽轮机受到的热冲击程度，降低热疲劳消耗。
- （3）能够快速启动带负荷。

利用高低压旁路系统直接从中压缸启动汽轮机的办法，可以较好地符合上述准则，这也是世界上许多大公司的成熟经验。

2. 中压缸启动汽轮机的典型系统配置

为实现汽轮机的中压缸启动，其热力管道布置与常规电厂不同，图 1-1 画出了某电厂 600MW 汽轮机的系统配置图。

图 1-1 中各主要装置的作用如下：

（1）高、低压旁路系统的作用。大型汽轮机的热惯性远远大于锅炉。同汽轮机相比，锅炉的冷却速度较快，这是因为用于热交换的传热面积很大，在重新启动前还必须放水排污。600MW 汽轮机达到完全冷却大约需要 7d 时间，锅炉的冷却只要 50h 左右即可，而这时的汽轮机缸温仍可达 350℃左右。因此，短时停运后接着再启动，转子和汽缸仍然处于热态，这时汽轮机在启动期间必须供给温度较高的蒸汽，目的是不使汽轮机冷却。

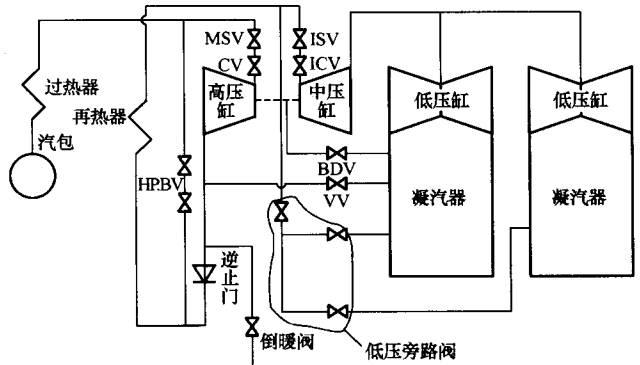


图 1-1 典型机组的启动旁路系统

MSV—高压主汽门；ISV—中压主汽门；CV—高压调节汽门；
ICV—中压调节汽门；VV—高压缸抽真空阀；BDV—紧急排放阀；HP.BV—高压旁路阀

采用高低压旁路系统后既满足了汽轮机对汽温的要求，又保护了再热器，同时使锅炉的燃烧调整变得相当灵活。

（2）高压缸抽真空阀（VV，又称通风阀）的作用。高压缸抽真空阀在汽轮机负荷达到一定水平之前且完全切断高压缸进汽流量之前，用于对高压缸排真空，以防止高压缸末级因鼓风而发热损坏。在冲转及低负荷运行期间切断高压缸进汽以增加中、低压缸的进汽量，有利于中压缸的加热和低压缸末级叶片的冷却，同时也有利于提高再热汽压力，因为再热汽压力过低将无法保证锅炉的蒸发量，从而无法达到所需要的汽温参数。

（3）紧急排放阀（BDV）的作用。BDV 的含义是 Blowdown Valve。高压缸和中压缸之间没有轴承，蒸汽通过转子轴封部件与密封部件相通。当汽轮机带负荷跳闸后，高中压主汽门、调节汽门快速关闭，切断汽轮机进汽以防超速。但是由于中低压部分已是真空状态，积存在高压缸内的高

温高压蒸汽会通过高中压缸间的轴封泄漏，继续膨胀做功，从而引起超速。为防止这种情况发生，安装了一个气动卸载阀（BDV），当中压调节汽门关闭时开启，将大部分泄漏的蒸汽直接引至凝汽器。

BDV由一气源门控制，自动动作。该卸载阀为一提升式蒸汽阀门，内有一弹簧开启式活塞，活塞上部通有压缩空气，克服弹簧力使阀门严密关闭。当气压失去时，该阀内部同轴安装的小旁通首先开启10mm，以建立门后压力，这样，阀门会容易开启，把高压蒸汽引入凝汽器。

(4) 高压缸暖缸阀的作用（又称高压排汽逆止门的旁路阀）及高压缸的预热。暖缸阀是在冷态启动时用于加热高压缸的进汽隔离阀。在汽轮机冲转启动的第一阶段，中压缸内的蒸汽压力很低，因此热量的传递也很慢。在这一阶段，中压转子和汽缸的温度上升较慢，因此尽管蒸汽和金属之间有温差，它们都不会产生过高的应力。

汽轮机高压缸的情况则不同，由于再热器压力已调整到一定的数值，所以蒸汽一进入汽缸，汽缸内的压力就升高了，为此，高压缸在进汽前必须先经过预热。

在启动的最初阶段，当锅炉出口蒸汽达到一定温度时，就可以进行汽轮机的预热。为了使蒸汽能进入高压缸，就需打开暖缸阀。此时，高压缸内的压力将与再热器的压力同时上升，高压缸金属温度将上升到对应于再热汽压力下的饱和温度。运行实践证明，当机组汽温汽压具备冲转条件时，高压缸的预热正好或早已结束。由于高压缸暖缸过程的电动阀控制是自动的，且当机组冲转时高压缸暖缸已经结束，这就产生了用中压缸启动机组的又一优点，即无论是冷态还是热态启动，对运行人员的操作程序和步骤总是相同的。

(二) 中压缸启动的优点

利用旁路并向中压缸进汽来启动汽轮机的方法其优越性可概括如下：

(1) 在启动初期能保持高的再热器压力，因此它允许使用较小的旁路管道就达到所需要的流量。

(2) 使用的蒸汽流量大，锅炉可以维持在稳定的工况下运行，同时能供应足够高的蒸汽温度，因而就能与汽轮机的金属温度相匹配。

(3) 可避免高压缸在低流量下运行，因而减少了高压缸第一级和高压缸排汽口处的热冲击。

(4) 由于在低负荷运行时，高压缸被隔离且处于真空状态，因此，机组可以实现连续带厂用电运行或额定转速下空负荷运行而不受时间限制，但凝汽器的真空必须维持在一个适当值。

(5) 缩短启动时间。由于汽轮机冲转前对高压缸进行倒暖，这样，在启动初期启动速度不受高压缸热应力和胀差的限制；另外，由于高压缸不进汽做功，在同样的情况下，进入中压缸的蒸汽流量大，暖机更加充分迅速，从而缩短了整个启动过程所需时间。

(6) 汽缸加热均匀。中压缸启动时，高中压缸加热均匀，温升合理，汽缸容易膨胀。与常规的高中压缸联合启动相比，虽然多了一个切换操作，但从整体上可提高启动的安全性和灵活性。

(7) 提前越过脆性转变温度。中压缸启动，高压缸倒暖，启动期间中压缸进汽量大，这样可使高压转子和中压转子尽早越过脆性转变温度，提高了机组高转速运转的安全可靠性。

(8) 对特殊工况具有良好的适应性。主要体现在空负荷和低负荷运行方面。机组启动并网过程中，有时遇到故障等待处理，或在并网前进行电气试验时，就常常遇到要在额定转速下长时间空负荷运行的情况。在采用高、中压缸联合启动的传统方法时，即使是冷态启动，也会带来很多问题，比如高压缸超温。然而采用中压缸启动方式，只要关闭高压排汽止回阀，维持高压缸真空，汽轮机就可安全地长时间空负荷运行。

同样采用中压缸进汽方式，只要打开旁路，隔离高压缸，汽轮机就能在很低的负荷下长时间

运行。

在单机带厂用电的情况下，也可以采用该方式运行，这样，一旦事故排除后，就能迅速重新带负荷。

(9) 抑制低压缸尾部温度水平。采用中压缸进汽，启动初期流经低压缸的蒸汽流量较大，这样就能更有效的带走低压缸尾部由于鼓风产生的热量，保持低压缸尾部温度在较低的水平。

第二节 锅炉启动过程的热力特性和受热面保护

一、锅炉汽包的热应力与保护

(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（600MW 机组的汽包一般达 200mm 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，部颁锅炉运行规程中规定，启动过程中的进水温度一般不超过 90~100℃，进水时间根据季节的变化控制在 2~4h。热态上水时，水温与汽包壁的温差不能大于 40℃。另外，为安全起见，要求锅炉进常温水时，上水温度必须比汽包材料性能所规定的脆性转变温度高 33℃ 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，升压速度越快，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 1-2 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℃ 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，速度愈快则温差愈大。一般规定汽包内工质温升的平均速度不超过 1.5~2℃/min。

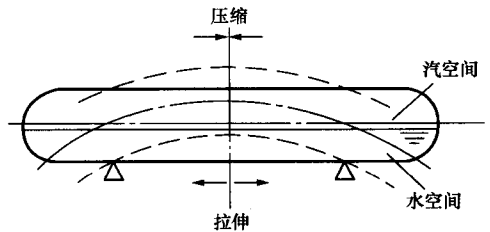


图 1-2 汽包上下部壁温差产生的热应力和热变形

(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时，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。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。我国引进的 BABCOCK 生产的 660MW 机组锅炉对此的规定是：汽包任意两点间壁温差 $\leq 35^{\circ}\text{C}$ ，壁温变化率 $\leq 0.6^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

对汽包壁温差的监视可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，因此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 $3\sim 5^{\circ}\text{C}$ 。在监护和控制温差时，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节汽门的方法解决。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。

我国引进的 BABCOCK 生产的锅炉，为降低汽包上、下壁温差，还在汽包内安装了与汽包同长度的弧形板。上升管来的汽水混合物由汽包的顶部进入，然后经环形夹层向下流动，所以上、下汽包壁都与水接触，没有汽包上壁的凝结放热问题。但由于冲刷汽包上壁的水速较高，上、下壁温差还是存在。但允许的饱和水温升率要大得多。

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偏差不得超过 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。

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，以冷却受热面。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

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，管壁金属温度接近于烟气温度。即使过热器内已完全没有积水，如果此时蒸汽流量很小，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%~15%额定值时，必须限制过热器入口烟温。

控制烟温的方法主要是限制燃烧率（控制燃料）或调整火焰中心的位置（控制炉膛出口温度）。另外，还可使用喷水减温方法，但要注意对喷水量的控制，以防喷水不能全部蒸发，使蒸汽带水，危害汽轮机。

燃烧调整方面应注意两个问题：一是合理安排燃烧器的投入顺序，控制锅炉的左、右侧烟温差不超过30~50℃，以避免过热器个别管子超温；二是增投燃料量应谨慎、缓慢。因为启动过程中锅炉热量的相当一部分是用于加热水冷壁、炉墙和受热面金属的。燃烧率增加过快时，烟量、烟温几乎立即增加，而水冷壁蒸发量的增加相对较慢，因而使过热汽温暂时升高。不仅如此，由于动态过程中管子壁温随烟量、烟温很快增加，也使壁温超过工质温度的差值增大。

启动初期过热器系统的各级疏水阀开启。过热器的各级疏水主要用于疏去积水，待积水疏尽后应及时关闭，以避免蒸汽短路，降低了对受热面的冷却能力，使过热器超温。过热器冷却所必需的蒸汽流量，靠开启高、低压旁路门维持。

启动过程中，再热器的安全主要与旁路系统的型式、受热面所处的烟气温度、启动方式（主要指汽轮机冲转的蒸汽参数）以及再热器所用的钢材性能有关。对于采用串联二级旁路系统的再热机组，启动期间锅炉产生的蒸汽可通过高压旁路站流入再热器，然后经低压旁路站流入凝汽器，使再热器得到充分冷却。对采用一级大旁路的系统，汽轮机冲转前再热器无蒸汽流过，因而应严格控制再热器前的烟温，有的锅炉可使用烟气旁路来控制进入再热器的烟气量。另外，为控制进入再热器的烟温，在条件允许时，汽轮机的冲转参数宜选低一些。

对于再热器，启动初期也要放气和尽可能地彻底疏水。管束内的积水在点火以后亦会逐渐蒸发，当凝汽器开始抽真空时，所有的放气门和疏水门都必须管闭，而从高、低温段再热器管通往

凝汽器的疏水阀则应继续开启，直到机组带上初负荷时方能关闭。某些引进的 600MW 机组的锅炉，其再热器设计是可以干烧的，只要控制炉膛出口烟温在 500℃ 以下，即使再热器内没有蒸汽流过，再热器仍然是安全的。这样的机组同样设置有高、低压旁路，主要是为再热器的启动和事故的应对提供可靠的保护措施。

此外，过热器和再热器升温过快时，不但会增大厚壁元件的热应力，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尽可能均匀地加热，加热过程中可通过监视过热器和再热器出口管的金属壁温来检查其加热的均匀性。

（三）省煤器和空气预热器

在点火后的一段时间内，锅炉不需进水或只需间断进水。在停止给水时，省煤器内局部的水可能汽化，如生成的蒸汽停滞不动，该处的管壁就可能超温。间断进水时，省煤器内的水温也就间断地变化，使管壁金属产生交变应力，导致金属和焊缝产生疲劳。

600MW 机组自然循环锅炉绝大多数采用锅炉汽包与省煤器下联箱连通的措施，可使汽包与省煤器之间形成一个经过省煤器的自然循环回路。当停止给水时，开启再循环管上的再循环门，依靠下降管与省煤器之间水的密度差可维持持续水流冷却省煤器。同时，持续水流使省煤器出水温度降低，减轻了管壁金属产生的交变热应力。

要注意的是，锅炉在上水时要关闭再循环门，否则给水将由再循环管短路进入汽包，省煤器又会因失去水的流动而得不到冷却。上水完毕，在关闭给水门的同时，应打开再循环门。

如果在点火前投用邻炉蒸汽加热系统，则锅炉点火时，汽压已升至 0.5 ~ 0.7MPa，锅炉排气量已相当大，锅炉需连续上水，即使不使用省煤器再循环，也可有效保护省煤器。

省煤器或空气预热器的壁温低于烟气露点时，就会发生低温腐蚀和堵灰。锅炉腐蚀、堵灰发展最快的时期就是在启动过程，特别是在冬季。原因有：①启动时排烟温度低，受热面壁温低，此外烟速也低；②高、低压加热器无排汽，给水温度低使省煤器壁温低；③锅炉点火及 30% 以下负荷时，燃烧轻油。轻油的含硫量高，烟气露点高。

在启动中可采取以下措施减轻低温腐蚀：①全开暖风器的进汽阀门和旁路风挡板，迫使更多空气流过暖风器以提高空气预热器进风温度和热风份额，开大热风再循环风门挡板等；②适当提高热力除氧器的压力，及早投入高压加热器等，以提高给水温度。

为保护回转式空气预热器，点火以前，必须先将其启动，以防止烟气加热不均使空气预热器损坏。在轻油启动期间，空气预热器必须连续吹灰，以避免积灰和二次燃烧。

总之，启动过程中锅炉应该主要注意安全问题。另一方面，锅炉在低负荷燃烧时，不但过剩空气量较大，而且不完全燃烧损失也较大；同时，启动过程中的排汽和放水，也必然伴随着工质的损失。这些损失的大小与启动方式、操作方法以及启动持续时间等有关。所以，锅炉启动的原则是，在确保设备安全的条件下，既要能满足整套机组启动的要求，又要尽量节省工质和燃料，力求在最短时间内让机组投入运行。

第三节 汽轮机部件的热应力、热膨胀和热变形

一、汽轮机启停和变工况时的传热现象

蒸汽在汽轮机内膨胀做功，将热能转变成机械能，同时又以对流传热的方式，将热量传给汽缸、转子等金属部件的表面。热量在汽缸内以导热的方式从内壁传到外壁，最后经保温层散到大气；热量在转子内以导热方式从转子表面传到中心孔，通过中心孔散给周围空间。由于热量在金属内导热需要一定的时间，因而在汽缸内、外壁间以及转子表面和中心孔之间形成温差。

汽轮机在蒸汽参数不随时间变化的稳定工况下运行时，汽缸、转子等金属部件内的温度分布是不随时间变化而变化的。对于汽缸来说，蒸汽以对流方式传递给汽缸内壁的热量，就等于汽缸从内壁传导到外壁的热量，也即等于最终从保温层扩散到大气中的热量。这种热量的传递方式是稳定的，因此称为稳态传热过程。同样，对于汽轮机转子，在汽轮机蒸汽工况稳定的条件下，其温度分布也是不随时间而变的。

在汽轮机启停和工况变化时，由于掠过汽缸、转子等金属部件的蒸汽温度变化，汽缸和转子表面的温度首先发生变化，随后，整个金属部件的温度分布将发生变化。在汽轮机的启动和加负荷过程中，由于蒸汽温度比金属部件温度高，蒸汽将热量传给金属部件，使其温度升高；而在停机和减负荷过程中，蒸汽温度低于金属部件温度，使其冷却，温度下降。

蒸汽与金属部件之间的换热方式主要为对流换热，但在启动的初期，汽轮机本体温度较低，此时的换热方式为凝结换热。由于凝结换热非常剧烈，很容易在汽轮机金属部件内形成很大的温差。为了减小这个温差，大型汽轮机在冲转前多采用盘车预热的方式，即在汽轮机启动前盘车时，通入低压低温蒸汽，使汽缸、转子预热，然后再通入较高参数的蒸汽，冲动转子。

二、热应力

汽轮机在启动、停机和变工况运行中，由于蒸汽与金属各部件的传热条件不同，以及汽缸和转子等部件的材料结构、导热系数、导热时间等因素的不同，使得汽缸内外壁、汽缸和法兰与转子之间、上下缸之间等产生温差，由于温差的存在，使汽轮机部件内部产生热应力。

1. 热应力的基本概念

由于温度变化，引起零部件的变形称为热变形。

热变形受到约束时在物体内部会产生内应力，这种由于温度变化使物体产生的内应力，称为热应力。如果部件温度变化，各点温度分布均匀且产生的热变形未受到任何约束，如图 1-3 (a) 所示，则不会产生热应力，当受到约束时才会产生热应力，物体由于加热膨胀受到约束，如图 1-3 (b) 所示，会产生压缩热应力；而冷却收缩受到约束，则产生拉伸热应力。但是如果部件内部温度变化不均匀时，即使部件没有受到约束，在部件内部也会产生热应力，也就是说温度变化大的部件，要产生一定的膨胀，温度变化小的则膨胀量要相对小，产生拉伸热应力；温度变化量大的部件就要承受压缩热应力。由此可知，当物体内温度变化时，由于其不能自由伸缩或物体内部彼此约束而产生热应力，因此引起热应力的根本原因是在温度变化时，物体变形受到约束。

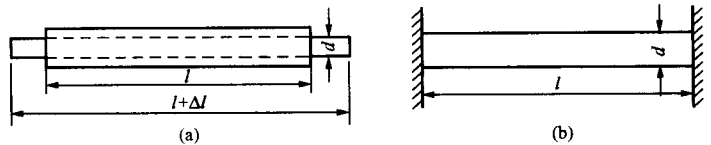


图 1-3 约束对受热物体变形的影响

(a) 自由膨胀；(b) 刚性约束

2. 机组启、停及变工况时的热应力

发电机组启、停和变工况运行将使汽轮发电机组各部件承受较大的热应力，金属各部件的温度、温差的变化也比较剧烈，各部位的热应力水平也不相同，为此现代大型的汽轮机都采用双层缸的结构，以降低汽缸的应力水平。但是无论发电机组是在启动、停机，还是正常运行，汽轮机汽缸各部件的温度不相同，因此各部位产生的热应力也是不同的，产生最大应力的部位是在高压缸调速级处、再热发电机组中压缸进汽区、缸体内外缸壁面、法兰中分面及其内外壁面、法兰螺栓等处。

在启动过程中，汽缸应力变化过程：冷态启动，在开始冲转时，由于蒸汽和金属温度相差较大，造成一个热冲击，使汽轮机各部位的热应力增加到很高；热态启动，蒸汽很可能低于汽缸金