

21 世纪能源与动力系列教材
Textbook Series of Energy & Power for 21st Century

锅炉运行及事故处理

Boiler's Operating Condition and Fault Treatment

◇ 主 编 / 辛洪祥
◇ 副主编 / 芮新红

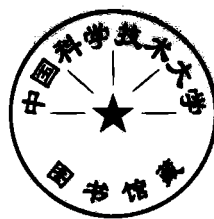


东南大学 出版社

21 世纪能源与动力系列教材

锅炉运行及事故处理

主 编 辛洪祥
副主编 芮新红
主 审 潘效军



东南大学出版社

内 容 提 要

本书主要介绍电厂燃煤锅炉的运行及事故处理。内容包括:锅炉运行概述、汽包锅炉的启动与停运、汽包锅炉的运行特性和参数调节、直流锅炉的启停特点、直流锅炉的运行特性和调节特点、锅炉变压运行、制粉系统启停及运行、循环流化床锅炉及其运行、锅炉事故及其处理。

本书除可以作为高等学校热能动力工程专业(本、专科)必修的专业技术课教材外,也可以作为火力发电厂集控运行专业和热工检测与控制技术专业本、专科学生的选修课教材以及电厂锅炉运行人员的培训教材,还可供从事火力发电厂运行控制的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

锅炉运行及事故处理/辛洪祥主编. —南京:东南大学出版社, 2004. 12

(21 世纪能源与动力系列教材)

ISBN 7-81089-844-2

I. 锅... II. 辛... III. ①锅炉运行—高等学校—教材 ②锅炉事故—处理—高等学校—教材 IV. TK22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 010522 号

东南大学出版社出版发行

(南京四牌楼 2 号 邮编 210096)

出版人:宋增民

江苏省新华书店经销 南京玉河印刷厂印刷

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张:15.25 字数:378 千字

2004 年 12 月第 1 版 2004 年 12 月第 1 次印刷

印数: 1—4000 定价:26.00 元

(凡因印装质量问题,可直接向我社发行部调换。电话:025-83795801)

21 世纪能源与动力系列教材编委会

主任 侯小刚

编委 侯小刚 赵孝保 丁轲轲

徐生荣 张 奕 周 欣

郭恩震 卢 平 余跃进

辛洪祥 李传统 黄庆宏

序

热现象是自然界中最普遍的物理现象。工程热力学、传热学是以热现象为研究对象的学科,主要研究热能与机械能或其他形式能量之间的转换与传递规律,研究热能的合理、有效利用技术及方法。热能的转换、传输、控制、优化与利用的各环节都离不开对流体流动规律的认识与利用,离不开燃烧理论与技术的研究与运用。因此,工程流体力学、工程热力学、传热学、燃烧理论与技术等几门课程成为能源与动力类专业的主要技术基础课。

古人云:巧心、劳力、成器物者曰工。作为工程技术学科的教材,要体现探求规律,认识规律,运用规律,物化成果的要求。针对应用型工程技术专业的实际需要,南京师范大学等院校开展了对能源与动力学科系列课程的建设与改革,在此基础上组织编写了工程流体力学、工程热力学、传热学、燃烧理论与技术等课程教材,作为能源动力类系列教材推出。几本教材既相互联系,又各具特色。随着教育、教学改革的深入,将陆续出版能源动力类系列教材。

工程专业是关于科学知识的开发应用和关于技术的开发应用的,在物质、经济、人力、政治、法律和文化限制内满足社会需要的,一种有创造力的专业。因此,对于工程应用专业人才,需要他们具备宽广的专业面、全面的工程素质。上述几本教材,还可以作为大多数工程技术专业的公共技术基础课程用书,在培养全面发展的工程技术人才方面发挥作用。

侯小刚

2003年10月于南京师范大学

前 言

锅炉运行及事故处理是火力发电厂生产过程中不可或缺的重要环节,也是锅炉原理与现场生产实践相结合的理论产物和专业技术。锅炉型式和容量的不同,其运行方式、运行特性、常见事故的类型及处理方法也有所不同。对于未来的热能动力工程专业应用型高级技术人才,要在现场实践中能更好地从事锅炉运行及事故处理的技术操作和管理工作的,必须先要学习并掌握锅炉运行及事故处理的技术理论和操作技能等。

本书是为热能动力工程专业(本、专科)的专业技术课“锅炉运行及事故处理”的教学而编写的。编写过程中,在总结了编者 20 多年来从事热能动力工程专业基础课和专业技术课(电厂锅炉)教学经验的基础之上,并参考了一些相关文献,尽量体现加强理论与实践相结合的特点,有一定理论深度,但以够用为限,而着重于用理论指导实际的运行操作、调节和事故的分析及处理,以突出培养应用型高级人才的目标和要求。另外,考虑到热能动力工程专业学生近年来的就业去向有所变化及循环流化床锅炉技术应用的增多,本书在主要介绍煤粉锅炉运行的同时,还介绍了层燃锅炉的运行和循环流化床锅炉及其运行等内容,该部分内容可供学生选学或自学之用。

全书共分 9 章,由南京工程学院辛洪祥副教授担任主编,负责全书的统稿,并编写第 1~4 章、第 9 章;南京工程学院芮新红老师担任副主编,并编写第 5~8 章。全书由南京工程学院潘效军教授主审。编者对潘效军教授为本书所付出的心血和汗水深表谢意!在本书的编写过程中,南京工程学院张永涛教授提出了许多宝贵的意见和建议。在此,对所有关心、支持本书出版的专家、学者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中缺点和错误在所难免,恳请所有使用本书的读者批评指正。

编 者

2004 年 10 月于南京

目 录

■ 锅炉运行概述.....	(1)
1.1 锅炉启停的概念和启停方式	(1)
1.1.1 锅炉启动与停运的概念及要求	(1)
1.1.2 启动与停运方式	(2)
1.2 锅炉运行的任务及有关概念	(8)
1.2.1 锅炉运行的任务	(8)
1.2.2 锅炉运行的有关概念	(8)
1.3 锅炉运行管理	(9)
1.3.1 安全生产制度	(10)
1.3.2 岗位责任制	(10)
1.3.3 交接班制度	(12)
1.3.4 巡回检查制度	(14)
1.3.5 设备定期试验、维护、轮换制度	(15)
1.3.6 办理热力机械工作票和设备验收制度	(15)
1.3.7 操作联系制度	(16)
1.3.8 运行分析制度	(17)
1.3.9 经济工作制度	(17)
■ 汽包锅炉的启动与停运程序	(19)
2.1 母管制系统中汽包锅炉的启动与停运步骤.....	(19)
2.1.1 母管制系统中汽包锅炉的启动系统	(19)
2.1.2 母管制系统中汽包锅炉的启动与停运步骤.....	(20)
2.2 单元制机组汽包锅炉的启动与停运程序.....	(26)
2.2.1 单元制机组汽包锅炉启动系统	(26)
2.2.2 单元制机组中汽包锅炉的启动与停运程序.....	(30)
2.3 汽包锅炉启动过程中的保护.....	(34)
2.3.1 汽包启动应力分析及保护.....	(34)
2.3.2 受热面的启动保护	(43)
■ 汽包锅炉的运行特性和参数调节	(46)
3.1 静态特性.....	(46)

3.1.1	燃料量变动的影响	(46)
3.1.2	过量空气系数改变的影响	(48)
3.1.3	燃料成分变动的影响	(49)
3.1.4	其他因素变动的影响	(49)
3.2	动态特性和运行参数调节	(50)
3.2.1	蒸汽压力的变动速度及调节	(50)
3.2.2	汽包水位的变动速度及调节	(53)
3.2.3	蒸汽温度的变动和变动速度及调节	(55)
3.3	燃烧调节	(59)
3.3.1	燃烧调节的任务	(59)
3.3.2	层燃炉的燃烧调节	(60)
3.3.3	煤粉炉的燃烧调节	(62)
■	直流锅炉的启停特点	(65)
4.1	直流锅炉的启停特点	(65)
4.1.1	启动流量和启动压力	(65)
4.1.2	升温速度	(66)
4.1.3	启动水工况及循环清洗	(66)
4.1.4	工质与热量的回收	(67)
4.1.5	受热面区段变化与工质膨胀	(67)
4.2	直流锅炉启动旁路系统特性分析	(69)
4.2.1	直流锅炉机组启动旁路系统的功能	(69)
4.2.2	直流锅炉启动旁路系统的类型及特性分析	(69)
4.3	直流锅炉的启动与停运程序及注意事项	(76)
4.3.1	配置 ESSS 系统的直流锅炉启动与停运程序	(76)
4.3.2	配置 ISSS 系统的直流锅炉启动与停运程序	(78)
4.3.3	直流锅炉启动注意事项	(81)
■	直流锅炉的运行特性和调节特点	(91)
5.1	直流锅炉的运行特性	(91)
5.1.1	燃料量与给水量变动对直流锅炉工况的影响	(91)
5.1.2	直流锅炉的动态特性	(97)
5.2	直流锅炉的运行调节	(100)
5.2.1	直流锅炉运行调节的特点	(100)
5.2.2	直流锅炉的参数调节	(100)
■	锅炉变压运行	(102)
6.1	变压运行的分类	(102)

6.1.1 纯变压运行	(103)
6.1.2 节流变压运行	(103)
6.1.3 复合变压运行	(103)
6.2 变压运行的特点	(104)
6.2.1 变压运行的优点	(105)
6.2.2 变压运行存在的问题	(106)
6.3 变压运行对锅炉的影响	(106)
6.3.1 低负荷时的燃烧稳定性	(106)
6.3.2 各受热区段的重新分配	(106)
6.3.3 再热汽温的保证	(107)
6.3.4 饱和温度的变化	(107)
■ 制粉系统启停及运行	(109)
7.1 概 述	(109)
7.2 制粉系统的启停	(109)
7.2.1 中间储仓式制粉系统的启动与停运	(109)
7.2.2 直吹式制粉系统的启动与停运	(113)
7.3 制粉系统运行调节	(120)
7.3.1 中间储仓式制粉系统的运行调节	(120)
7.3.2 直吹式制粉系统的运行调节	(124)
■ 循环流化床锅炉及其运行	(129)
8.1 循环流化床锅炉的工作原理及特点	(129)
8.1.1 循环流化床锅炉(炉内过程)的工作原理及基本概念	(129)
8.1.2 循环流化床锅炉的特点	(146)
8.1.3 循环流化床锅炉的分类	(149)
8.2 循环流化床锅炉的燃烧系统及设备	(150)
8.2.1 燃烧设备	(150)
8.2.2 物料循环系统	(155)
8.2.3 燃煤制备系统	(163)
8.2.4 风烟系统	(170)
8.3 典型循环流化床锅炉简介	(173)
8.3.1 国外典型循环流化床锅炉	(173)
8.3.2 国内循环流化床锅炉的开发和应用情况	(177)
8.4 循环流化床锅炉的运行	(179)
8.4.1 循环流化床锅炉的启动与停运	(179)
8.4.2 循环流化床锅炉的运行调节	(183)

■ 锅炉事故及其处理	(187)
9.1 概述	(187)
9.1.1 锅炉机组的可用率	(187)
9.1.2 锅炉机组事故处理的原则	(189)
9.2 锅炉水位事故	(190)
9.2.1 缺水事故	(190)
9.2.2 满水事故	(191)
9.2.3 汽水共腾	(192)
9.3 锅炉燃烧事故	(192)
9.3.1 炉膛灭火	(192)
9.3.2 炉膛爆燃	(193)
9.3.3 烟道再燃烧	(197)
9.3.4 锅炉结焦	(198)
9.4 锅炉承压部件爆管及损坏	(199)
9.4.1 锅炉水冷壁爆管	(200)
9.4.2 过热器和再热器爆管	(203)
9.4.3 省煤器管损坏	(207)
9.4.4 减温器损坏	(207)
9.4.5 管道的损坏及安全阀事故	(208)
9.4.6 汽包爆破和裂纹事故	(210)
9.5 尾部受热面运行中的问题	(215)
9.5.1 省煤器的磨损	(215)
9.5.2 空气预热器腐蚀、堵灰及漏风	(217)
9.5.3 回转式空气预热器的机械、电气故障	(221)
9.6 锅炉辅助设备及系统故障	(221)
9.6.1 引风机故障	(221)
9.6.2 制粉系统故障	(225)
9.7 电气系统故障	(230)
9.7.1 厂用电中断事故	(230)
9.7.2 负荷骤减	(230)
参考文献	(231)

■ 锅炉运行概述

广义的锅炉运行包括锅炉启动、正常运行和停运等,而狭义的锅炉运行就是指锅炉的正常运行。本章主要介绍锅炉启停的概念和启停方式、锅炉运行的任务及有关概念等。

1.1 锅炉启停的概念和启停方式

1.1.1 锅炉启动与停运的概念及要求

锅炉由停用状态过渡到正常运行状态的过程称为锅炉启动。相反的,锅炉由正常运行状态过渡到停用状态的过程就称为停运。锅炉启停的实质就在于锅炉燃料的投停和对锅炉的加热与冷却。

锅炉启动按停用状态保持的时间长短可分为冷态启动和热态启动两种。冷态启动是指锅炉经过检修、备用等长时间的停用后,在锅内没有工质压力和炉内近似为环境温度条件下的启动。而热态启动则是指锅炉经过一段不长时间的停用后,在锅内工质仍具有一定压力和温度条件下的启动。冷态启动和热态启动的内容和步骤基本是相同的,只不过热态启动相当于在冷态启动已进行到一定阶段基础之上的启动而已。

锅炉的启动过程是一个加热过程,各部件及工质的温度都是不断升高的,因而也是一个不稳定的过程,这就需要特别注意处理诸如锅炉燃烧不稳定、各部件受热不均匀及各受热面内的工质流动也不稳定等一系列问题。否则,将对锅炉设备的安全性和启动过程的经济性造成很多不利的影响。

锅炉点火后一段时间内,燃料投入量较少,炉内燃烧温度较低,燃烧就不稳定,会导致燃烧热损失增大,而且控制不当时很容易造成炉膛熄火甚至炉膛爆燃事故。同时,炉内燃烧温度也不均匀,会使得水冷壁热负荷不均,并联合热管中的热偏差增大。

锅炉启动初期,水冷壁、过热器、再热器以及省煤器等受热面管内工质的流动工况还不正常,冷却受热面的能力很差,有可能使这些受热面的管壁超温。另外,由于启动初期锅炉工质流动工况的不正常和换热能力差,还会使汽包、外置式汽水分离器等依靠工质间接加热的厚壁部件内外壁之间存在着较大的温差和热应力。

特定的锅炉启动时与正常运行情况相比,启动过程中的热效率相对降低。一是由于燃烧不稳定使得燃烧热损失较大;二是由于对锅炉各部件进行加热需要消耗一定的热量;三是由于为了稳定汽压与冷却受热面需要排放一定量的工质,这些工质要带走一些热量,即所谓的启动热损失。

要处理好上述的锅炉启动过程中有关安全性和经济性的问题,必须对不同型式和容量的锅炉采用不同的启动方式,选择不同的升温升压速度及启动时间的长短。原则上应在确保安全的前提条件下,尽可能缩短启动时间,以节省燃料消耗,减少启动过程中的工质和热

量损失,并使锅炉尽早投入正常运行。

与锅炉的启动过程相反,锅炉的停运过程是一个不稳定的冷却过程,但同样存在着类似的安全性和经济性的问题需要处理,如燃烧不稳定和燃烧热损失较大等。

综上所述,现代电厂锅炉的启停应满足以下要求:

- (1) 尽可能缩短启停时间,以适应机组所承担的负荷性质的要求;
- (2) 尽量稳定燃烧,以减少燃烧热损失;
- (3) 应使蒸汽流量和参数满足汽轮机启停的要求;
- (4) 锅炉各级受热面金属的工作壁温不应超过其材料的允许温度;
- (5) 汽包等厚壁部件升温应均匀,以减少寿命损耗;
- (6) 给水品质和炉水品质合格,防止锅内腐蚀和杂质对阀门、管道及汽轮机叶片的侵蚀;
- (7) 尽量减少工质和热量的排放,并尽最大可能回收工质和热量;
- (8) 技术指令和运行操作应正确无误。

1.1.2 启动与停运方式

电厂锅炉的启动与停运方式,笼统地讲有锅炉单独启停和锅炉与汽轮发电机组联合启停两种。锅炉启停方式的选择,取决于火力发电机组的容量及热力系统(机、炉之间的汽、水连接系统)形式。小型机组或供热机组一般都采用主蒸汽母管制热力系统(如图 1.1),其锅炉的启停一般选择单独启停的方式。而国内 50MW 及以上容量的机组多为单元制机组,多采用单元制热力系统(如图 1.2),其锅炉的启停多选择与汽轮发电机组联合启停方式。

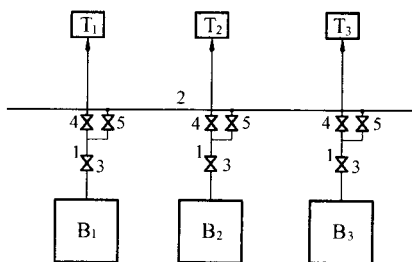


图 1.1 主蒸汽母管制热力系统

B—锅炉;T—汽轮机

1—主蒸汽管;2—蒸汽母管;3—锅炉主汽阀;

4—切换闸阀;5—隔绝阀

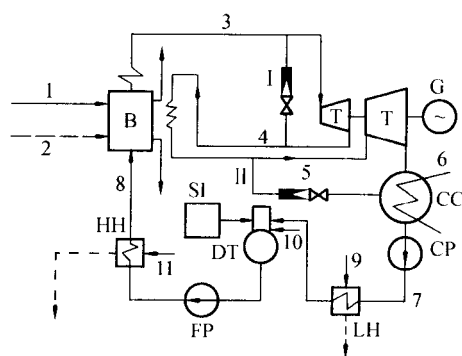


图 1.2 单元制机组原则性热力系统

B—锅炉;T—汽轮机;G—发电机;CC—凝汽器;

CP—凝结水泵;LH—低压加热器;DT—除氧器;

SI—水处理;FP—给水泵;HH—高压加热器;

I—汽轮机一级旁路;II—汽轮机二级旁路

1—燃料;2—空气;3—主蒸汽;4—汽轮机高压缸排汽;

5—再热蒸汽;6—循环冷却水;7—凝结水;

8—锅炉给水;9、10、11—汽轮机抽汽

1) 母管制系统锅炉的启停

(1) 锅炉启动

母管制系统中锅炉启动采用单独启动方式,即在启动过程中,锅炉与蒸汽母管之间由母管前的隔绝阀(门)隔离开来,锅炉点火后单独升温升压并将大部分蒸汽排入大气,与蒸汽母管和汽轮发电机组之间没有联系,待汽温、汽压略低于额定值时再并入母管。启动要点有:检查与准备、进水、点火、升温升压、暖管和并炉等。

锅炉单独启动的特点是,锅炉在启动过程中与汽轮发电机组无关,升温升压过程中的蒸汽参数容易控制,锅炉本身的整体启动时间较短;但在锅炉启动过程最后的并炉操作时必须严格按照规程进行,否则可能危及蒸汽母管及相连的所有机、炉的安全;另外锅炉单独启动过程中的工质和热量损失较大。

(2) 锅炉停运

锅炉停运有正常停运和事故停运之分。把正常工作的锅炉停下来作为备用或准备进行检修,称为正常停运。由于设备或系统发生事故而被迫停运,称为事故停运。按事故的严重程度不同,事故停运又可分为紧急停运和一般事故停运。

母管制系统中锅炉停运采用单独停运方式,即在停运过程中,锅炉先逐渐减负荷至零并熄火后与蒸汽母管解列,再单独进行降温降压。停运过程一般包括停运前的准备、减负荷、停止燃烧、降压和冷却等。

锅炉正常停运和一般事故停运时,应按不同的燃料采取不同的步骤减少和停止燃料供应。如对于煤粉炉,当负荷低于额定值的 50%~70% 时,要投油助燃,以避免突然灭火和爆燃事故的发生。熄火时的锅炉负荷愈低,熄火后系统的压力就愈稳定。熄火后应立即停止送风机,但引风机要继续运行约 5~10 min,借以清除炉膛和烟道中的可燃物。

锅炉紧急停运时,应立即切断燃料供应并停止送、引风机。如果属于锅炉爆管事故紧急停运,则引风机要继续运行,排出炉内烟气和蒸汽。如果因锅炉满水或缺水事故紧急停运,应关闭给水隔绝阀、停止给水泵,严禁向锅炉进水。

2) 单元制机组的启停

(1) 单元制机组的滑参数联合启动

单元制机组中的锅炉启动多采用与汽轮发电机组联合滑参数启动方式,简称单元制机组的滑参数联合启动或滑参数联合启动。在启动过程中,锅炉与汽轮机之间的隔绝阀(门)、调节阀全开或部分开启,锅炉送出参数逐渐升高的蒸汽,供汽轮发电机组暖机、冲转、升速、并网和带负荷之用,直至蒸汽参数达到额定值时,汽轮发电机组带到预定负荷或满负荷。

滑参数联合启动具有以下优点:

① 锅炉与汽轮发电机组同时进行启动,且由于在低参数下启动,机组金属壁面温度低,允许有较大的工作应力,可以提高升温速度。因此,机组启动时间缩短,利用率提高。

② 机组充分利用了锅炉在启运过程中产生的低参数蒸汽及其热量,大大减少了启动热损失。

③ 低参数蒸汽体积流量大,用其加热部件可使汽包、管道、汽缸、转子等受热均匀,升温平稳,能较好地控制各部件的热应力与热变形等。

滑参数联合启动也有一些不足之处,如:启动过程中要求锅炉、汽轮机的工况相互适应配合,还要满足各自的安全、经济运行;锅炉低负荷运行时间较长,不利于稳定燃烧,炉膛热负荷也不均匀;在采用定速或调速范围较小的给水泵时,给水调节阀、减温水调节阀压差过

大,调节特性差,阀门也易损坏等。

现代单元制机组通过对设备、系统及运行操作手段的改进,已在不同程度上弥补了各种不足之处,使滑参数联合启动日益完善。

滑参数联合启动采用的方法也有所不同,如按锅炉点火时主蒸汽管道内工作压力是负压还是正压,可分为真空法和压力法,两种方法各有其特点和适用范围。

① 真空法滑参数联合启动

真空法滑参数联合启动的要点是:先把锅炉与汽轮机之间主蒸汽管道上的阀门全部打开,汽轮机的主汽阀和调节阀也要打开,而汽包和过热器及主蒸汽管道等有关设备上的所有空气阀和直通疏水阀全部关闭;随后用盘车装置转动汽轮机转子,再投用抽气器,从凝汽器抽真空直到汽包,过热器内的积水可通过专设管道疏至凝汽器;当真空达到 0.04~0.053 MPa 时,锅炉开始点火,产生的蒸汽直接进入汽轮机;在主蒸汽管道内的压力呈正压后,开启管道最低点的几个疏水阀直通疏水,同时切断过热器至凝汽器的疏水;当汽压略低于 0.1 MPa(表压)时汽轮机已开始由蒸汽驱动升速,在转速接近临界值时,应关小主蒸汽管道上的一个阀门,等阀门前的汽压适当升高后再把它开大,以使汽轮机快速通过临界转速;在锅炉升压、汽轮机升速过程中,应逐渐关闭直通疏水阀;当新蒸汽参数达到 0.5~0.6 MPa、250℃ 左右时,汽轮机已升至全速并开始带负荷;最后,锅炉继续增加负荷与升压升温,汽轮机也继续升负荷,直至正常运行。图 1.3 是一台高压 50 MW 机组的滑参数冷态启动建议曲线,图中 p_0 、 p 为锅炉出口压力和汽轮机进口压力占其额定压力的百分数,额定压力为 9 MPa; t_0 、 t 为锅炉出口和汽轮机进口的汽温。

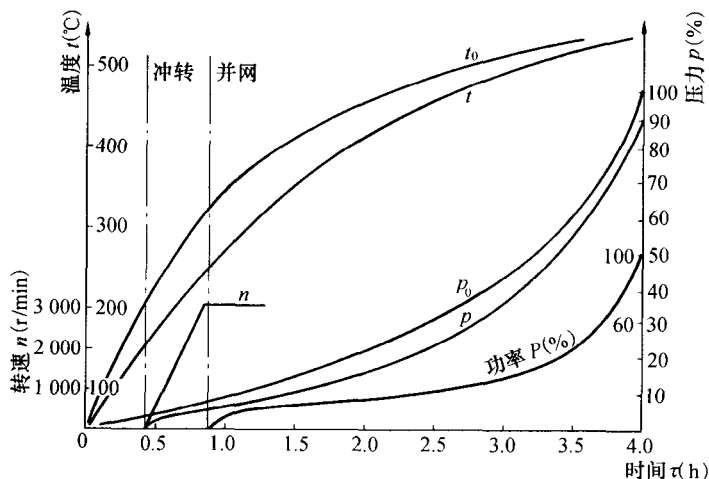


图 1.3 高压 50 MW 机组(汽轮机为 51—50 型)滑参数冷态启动建议曲线

真空法滑参数启动的特点是:低参数的蒸汽有较大的体积流量,既有利于暖管和暖机,又可以使过热器充分冷却,并促进锅炉水循环和减小汽包壁的温差;锅炉产生的蒸汽可以用来暖管、暖机、升速和带负荷,获得了充分利用,减小了启动工质损失和热损失。但由于汽轮机冲转升速时汽压很低,没有足够的控制转速的余地,而且也易引起水击,安全性较差,故真空法滑参数启动目前应用较少,仅见于无中间再热的单元制机组。

② 压力法滑参数联合启动

具有中间再热的单元制机组多数采用压力法滑参数启动。

超高压中间再热机组采用压力法滑参数联合启动时,通常根据汽轮机高压内上缸的内壁金属温度低于还是高于 150°C ,将启动初始状态划分为冷态和热态两种,相应地就有冷态启动和热态启动之分。而亚临界中间再热机组划分更细,并将热态进一步划分为温态、热态和极热态三种。具体地,当汽轮机高压内上缸的内壁金属温度低于 150°C 、在 $150\sim 180^{\circ}\text{C}$ 之间、在 $180\sim 450^{\circ}\text{C}$ 之间及高于 450°C 四个温度范围时分别为冷态、温态、热态和极热态四种启动初始状态,相应地就有冷态启动、温态启动、热态启动和极热态启动之分。这样划分的目的在于,根据不同的启动初始状态,选择适当的冲转蒸汽压力和温度,确定合理的升压升温速度,以控制金属壁的热应力和启动速度。

压力法冷态启动的要点是:凝汽器抽真空时汽轮机主汽阀应关闭,锅炉点火时主蒸汽管道工作压力为大气压力。锅炉点火后产生的蒸汽除暖管、暖机外,可直接通过 I、II 级旁路经减温减压后进入凝汽器;待汽轮机主汽阀前汽压升至 $0.5\sim 1.0\text{ MPa}$ 以上时,才开启主汽阀冲转。在汽轮发电机组升速、并网过程中,为了维持汽压和汽温基本不变,锅炉燃烧不宜做过大调节,多余的蒸汽仍通过旁路排入凝汽器。待主汽阀全开、蒸汽全部进入汽轮机时旁路关闭,机组进入滑压运行,其余步骤与真空法滑参数联合启动相似。

压力法热态启动时,锅炉和汽轮机之间在最初阶段是隔绝的。锅炉点火后产生的蒸汽可经旁路排入凝汽器或直接向空气中排放。直到蒸汽的过热度不小于 50°C ,且比汽轮机进汽端最热部件(高压内缸内上壁金属)的温度还要高 $50\sim 100^{\circ}\text{C}$ 时才能冲转。此时的汽压应低些,如果汽压过高,必须进一步关小汽轮机前的主汽阀才能使汽轮机升速不致过快,这将导致蒸汽的温度因节流而降低很多;而温度太低的蒸汽进入汽轮机后,一方面有可能使原来温度较高的部件反而被冷却,另一方面蒸汽中的水分可能被分离出来并积在汽缸内的下部,从而加大了汽缸上下壁的温差。这两种情况都会延长启动过程。因此,在热态启动中,汽轮机冲转时的汽温、汽压主要决定于汽轮机部件当时的温度和冲转升速能量的要求。对于锅炉而言,一般应采取加大过量空气系数,提高炉内火焰中心位置及排放饱和蒸汽等措施,从而使锅炉出口的汽温升高较快,而汽压提高得不多。

热态启动时,汽轮发电机组从冲转到全速并网的时间一般不长,大约只有 10 min 左右。此后继续增加负荷,汽压最好维持基本不变,使汽轮机前的主汽阀尽早全开,整台机组进入滑参数增加负荷。图 1.4(a)、(b)示出了某 300 MW 机组的冷态滑参数启动曲线和温态滑参数启动曲线。

压力法滑参数联合启动的优点是:锅炉蒸汽参数较易控制;冲转蒸汽动力较大,有利于汽轮机升速和安全通过临界转速;凝汽器抽真空系统范围小等。其缺点是:汽轮机冲转前大部分蒸汽排入凝汽器,热损失较大。

另外,采用压力法滑参数联合启动时,根据汽轮机冲转时的进汽方式不同,还可分为高、中压缸同时进汽冲转和中压缸先进汽冲转两种方式,各有其特点和应用实例。

a. 高、中压缸同时进汽冲转方式的要点是:锅炉点火前及点火后的一段时间内,汽轮机前的主汽阀关闭,而汽轮机调速汽阀全开,全部或大部分蒸汽通过旁路进入凝汽器,并由旁路减压阀控制流量。达到冲转蒸汽参数时高、中压缸同时进汽冲转汽轮机,随后机组升速、并网。待主汽阀全开时关闭旁路,机组进入滑压运行。

若为冷态启动,锅炉点火的同时汽轮机盘车,送轴封汽,凝汽器抽真空、通循环水,少量蒸汽通入汽轮机进行初步暖机。

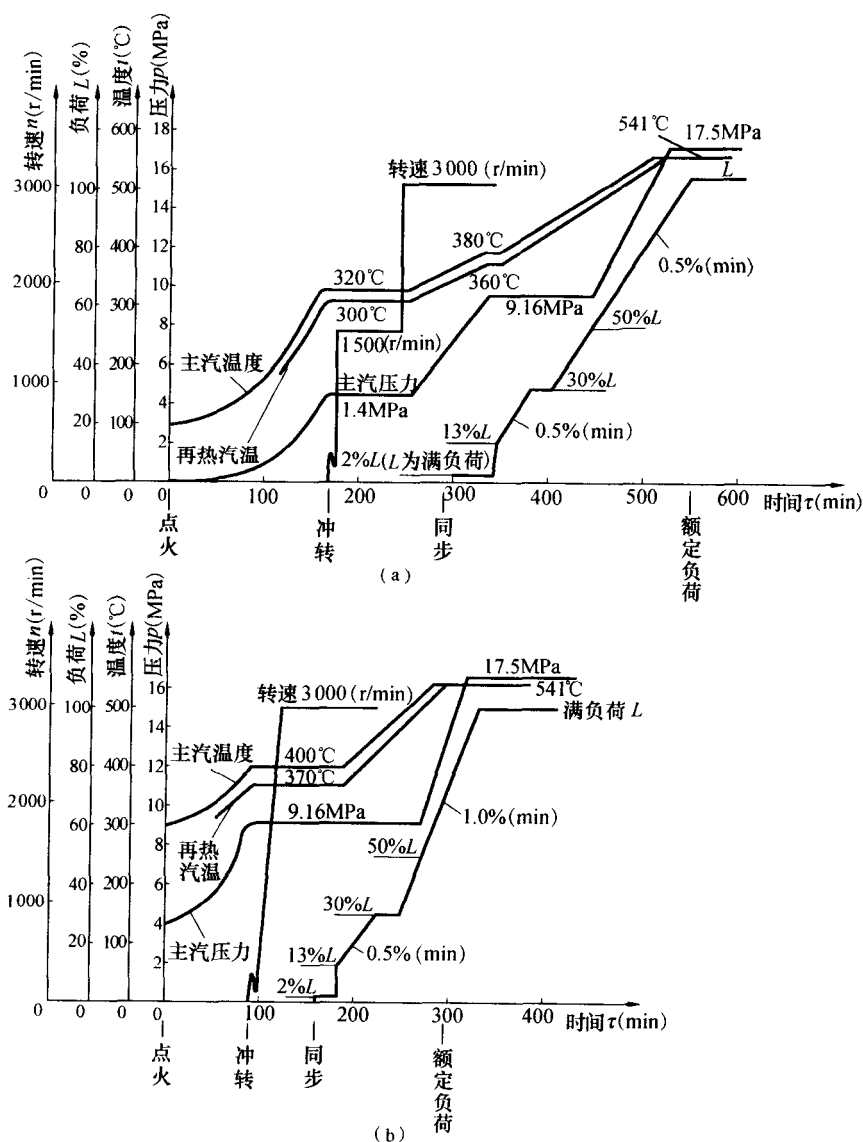


图 1.4 某 300 MW 机组的启动曲线

(a)冷态滑参数启动曲线;(b)温态滑参数启动曲线

对于高、中压缸合缸结构的汽轮机,采用高、中压缸同时进汽冲转方式可使合缸处加热均匀,减少了热应力并能缩短启动时间。我国引进的日本东芝公司 600 MW 汽轮机、ABB 公司 600 MW 汽轮机及国产的高、中压缸合缸结构的汽轮机都采用了高、中压缸同时进汽的冲转方式。

b. 中压缸先进汽冲转方式的要点是:蒸汽参数达到冲转要求时,中压缸先进汽冲转汽轮机,待转速升至 2 000~2 500 r/min 时才开始向高压缸进汽,并网后通过控制高压缸进汽量来控制负荷的增加。美国 WH 公司 600 MW 机组具有中压缸冲转条件。它在高压缸排汽管逆止阀前设置有通往凝汽器的管路和阀门,在中压缸冲转时,用以对高压缸抽真空,改善高压缸的温度状态。还有在再热器冷端接一条小的蒸汽管路通入中压缸,用来冷却中压

缸内叶片的根部。

中压缸先进汽冲转方式的优点是:有利于提高主蒸汽温度和再热蒸汽温度;有利于保护再热器;中压缸进汽压力低,可全周进汽,使汽缸、转子温度较均匀。其缺点是:高压缸进汽后需要较长时间的低负荷暖机,以控制高压缸升温速度,这在冷态启动时尤为明显;从锅炉点火至低负荷暖机过程中的热量损失较大;高压缸进汽参数较高,汽缸与转子的热应力较大,合缸处温差也较大;中压缸进汽阀的尺寸大,升速时转速较难控制。

(2) 单元制机组的停运

在单元制机组中,锅炉停运也有正常停运、一般事故停运和紧急停运之分。但正常停运一般采用滑参数联合停运方式,一般事故停运采用高参数停运方式,而紧急停运与母管制系统中锅炉紧急停运的要求相同,在此不再赘述。

① 滑参数停运

滑参数停运时,应先将负荷降至(80%~85%)MCR;随后进行锅炉降压、汽轮机开大调速汽阀,直至调速汽阀全开;接着机组开始进入滑压运行,锅炉降压、降温使机组降负荷。当锅炉负荷降至最低值时投入汽轮机旁路,将汽轮机进一步降负荷后多余的蒸汽通过旁路排入凝汽器。当汽轮机负荷降至最低值时,一种方法是用手动方式按一下危机保安器关闭主汽阀停机,同时锅炉熄火,汽轮发电机组解列,汽轮机高压内缸内上壁金属温度约为 250℃;另一种方法是锅炉先熄火,利用锅炉余汽继续发电 4~6 min,待发电负荷降至零机组解列后,汽轮机继续利用锅炉余汽空转一段时间,使通流部分进一步冷却,同时采用降低真空的措施快速通过临界转速,最后停机,汽轮机高压内缸内上壁的金属温度可降至 150℃ 以下。图 1.5 示出了某 200 MW 机组的滑参数停运曲线。

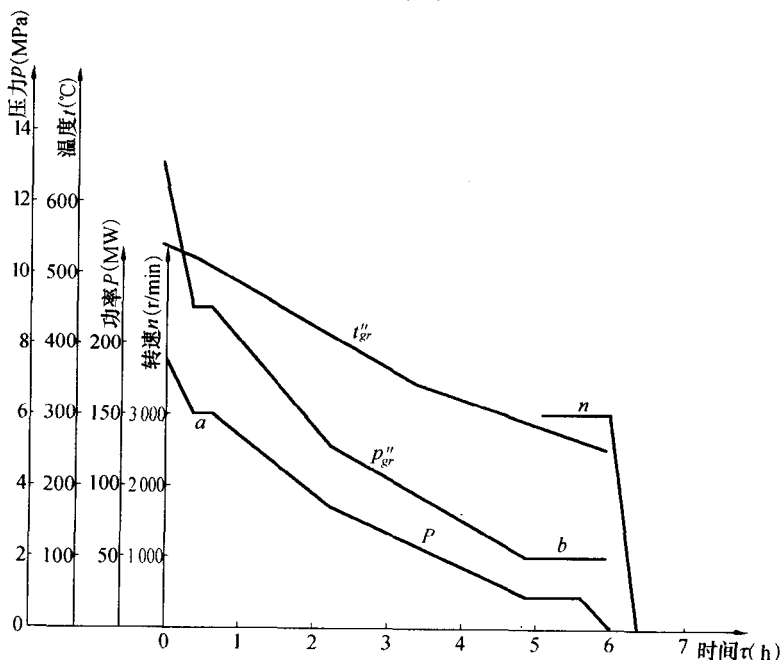


图 1.5 某 200 MW 滑参数停运曲线

p''_{gr} —过热器出口汽压; t''_{gr} —过热器出口汽温; P —汽轮发电机功率;
 n —汽轮机转速; a —调速汽门全开,开始滑压; b —停机、熄火