

第三版

电站锅炉 运行 与 燃烧调整

黄新元 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

第三版

电站锅炉 运行 与 燃烧调整

黄新元 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书以 300、600、1000MW 火电机组为重点，系统讲述大型自然循环锅炉、控制循环锅炉和超（超）临界压力直流锅炉的运行技术、控制特点和燃烧调整方法。全书共分八章，主要内容包括锅炉机组启动与停运、锅炉的变工况特性、汽包锅炉运行参数的监督与调节、超（超）临界锅炉运行参数的监督与调节、锅炉的燃烧调整、制粉系统的运行与调整、锅炉受热面的安全运行，以及锅炉机组经济运行等。

本书是为适应大、中型火力发电厂锅炉运行人员及技术管理人员的需要而编写的，其内容也可供有关电力科研部门和设计单位的工程技术工作者阅读和参考。同时，本书还可作为高等院校热能动力类专业本科学生，电力职工大学学生，函授本、专科相关专业学生的选修课教材。

图书在版编目（CIP）数据

电站锅炉运行与燃烧调整/黄新元编著. —3 版. —北京：中国电力出版社，2016. 8

ISBN 978-7-5123-9526-8

I. ①电… II. ①黄… III. ①火电厂-锅炉运行②火电厂-锅炉燃烧-调整 IV. ①TM621. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 152327 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>）

三河市航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2003 年 3 月第一版

2016 年 8 月第三版 2016 年 8 月北京第十次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 24.25 印张 598 千字

印数 23001—25000 册 定价 68.00 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

本书自第二版发行至今，电力工业的发展出现了新的格局。60万千瓦级机组已上升为我国的主力机组，全国火电总装机容量抵近10亿kW，百万千瓦级超超临界机组以每年十余台的速度投入商业运行，迄今已有总装机容量近1亿kW。与此同时，国内各大电力集团公司强化火电机组节能环保意识，出台节能政策，建立技术中心，指导全国电厂的建设、运行和改造。以国家力度推进的环保改造，在实现超低排放的同时，也对电厂（锅炉）的运行管理提出了新要求。

在此期间，作者继续在国内各大电厂巡回培训 [重点是超（超）临界机组]。参与华电国际技术服务中心、国电山东公司等节能技术工作及相关各大电厂的节能剖析活动。在济南、昆明、呼伦贝尔、青岛、淄博等地参加全国性火电机组运行工作会议。此间作者深切感受到国内电力行业前进发展的脉搏，领略着大机组建设及运行的生动实践所散发出的魅力，并从中继续吸收新的丰富的信息、技术、案例、理念。

基于以上事实，作者决定再次对本书进行修订。主要修订内容如下：

(1) 将本书第二版以300、600MW容量级机组作为讲述重点扩展到1000MW机组。

(2) 大篇幅增加超（超）临界机组锅炉运行方面的内容。

(3) 充实、丰富大机组经济、安全运行的相关内容和技术。如锅炉低氮燃烧改造后的燃烧调整技术、炉外管壁金属超壁现象分析及其技术应对、制粉系统防爆、超（超）临界机组的汽温控制方程、中间点过热度定量特性等。

(4) 更新约2/3的热力系统图、性能曲线及其他有关图表，使新版内容贴近电力工业的新发展和技术的新进步。

(5) 新增一章超（超）临界锅炉运行参数的监督与调节（即第四章）。保留原第三章主要内容作为亚临界汽包锅炉运行参数的监督与调节的专述。

(6) 新增第八章锅炉机组经济运行。对电厂锅炉的节能途径和技术方法做全景式总结。其中有关锅炉节能诊断方面的新增知识点、专有方法及实用公式属首次发表，是作者近年来在本领域结合调整实践独立研究的新成果。

(7) 删除了第二版中已相对过时的设备、系统和运行方式的内容，如两班制运行、双蜗壳燃烧器、分级送风直流燃烧器等。

在本书第三版修订过程中，继续得到了西安热工院、山东电力研究院、华电国际技术服务中心、莱州电厂、鄂温克电厂、烟台电厂、邹县电厂、宿州电厂、滕州新源电厂、威海电厂、芜湖电厂等单位的大力支持、协同，为本书提供了丰富的数据资料和在线信息，在此表示衷心的感谢。

在本书的搜资、整理、编撰过程中，还得到了蒋蓬勃、王乃华、苑丽伟、仇元刚、张桂华、李德功等同行好友的支持与帮助，也向他们表达感激之情。

限于作者水平，书中难免有不足与疏漏之处，恳请读者指正。

作者

2016年5月

第一版前言

本书是作者在长期为电厂讲授该课程的基础上，总结国内大容量电厂锅炉的运行经验及燃烧调整的丰富实践而编写的。书中汇集了作者独立研究的部分成果，也引用了近年来国内外相关领域的最新试验研究资料。

本书以 300、600MW 级机组锅炉为重点，阐述有关锅炉运行及调整的主要问题，注重运行基本原理与实用性的结合，将解释、指明隐藏在规程的具体条款背后的原因和道理作为第一要求。燃烧调整的内容，主要从运行调整的角度出发，考虑燃烧调试的问题。但考虑到电厂运行人员的知识水平越来越高，不仅要求探求运行操作的深层原理，同时希望能进行一些代替电力科研试验机构的常规燃烧调整试验，或在配合电力科研试验机构做专项调整试验时，做到心中有数，因此也讲了一些基本的专项调整试验原理、方法，使电厂技术人员能独立做一些简单的调试，以诊断和解决锅炉运行缺陷，提高运行经济性。本书对制粉系统运行及调整所进行的详尽的叙述，也是大多数以前的著作中未曾涉及的。

本书在编写过程中，得到了山东电力集团总公司、西安热工研究院、山东电力研究院、邹县电厂、华德电厂、黄台电厂、日照电厂及十里泉电厂等单位的大力支持和协作，电厂同志为本书的编写组织运行分析座谈会，并提供了大机组运行曲线和在线数据等。山东电力研究院的刘志超高工，为本书无偿提供了大量翔实详尽的第一手燃烧试验数据资料，使本书增色不少。中国华北电力集团公司原总工程师罗挺在百忙之中审阅了本书，并提出了大量宝贵意见。对于以上单位和同志，作者在此表示由衷的感谢。

由于时间仓促，加之作者水平有限，书中难免存在不足和疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

作者

2002 年 10 月

第二版前言

本书第一版出版于2003年4月。在编写中，作者力求全面总结国内大容量电厂锅炉的运行经验及燃烧调整的丰富实践，达到以基本运行理论指导锅炉运行、调整实践的目的。发行三年多来，本书受到国内各大、中型电厂读者的欢迎，不少电厂选择本书作为机组运行的培训教材。第一版历经三次印刷，共发行9000册，基本实现了作者的撰写意图。

在第一版发行期间，作者一方面以本书为教材，继续在山东、河南、海南、山西等省的十余个300MW级和600MW级火电厂从事培训讲学，从中收集了大量电厂一线的运行新知识、新实践、新案例和新技术，大大丰富了本书的内容。另一方面继续进行锅炉运行理论的独立研究，在超临界压力锅炉的汽温变动特性、转态过程分析、制粉系统优化运行、运行指标分析、锅炉参数调整的节能原理等方面提出了一些新的见解和看法。这些也都是本书第一版所需要加以补充的。

自第一版发行至今，国内电力工业出现了两个大的变化，一是超临界压力机组的迅速发展，二是火电机组节能日益受到高度重视。本书再版时充分考虑了这两大变化，增补了相关的内容。

本书第二版除将上面所述对第一版在内容上所做的全部补充和更新充实到原有各章节中之外，还另外单独增加了运行优化与节能分析一章（第七章）。此外，对第一版的个别疏漏之处也一并加以更正。

在直接与电厂数以千计的运行、管理人员的接触中，作者深切地感受到他们对锅炉运行知识的渴求、对运行岗位的挚爱。这当然极大地激发了作者尽快使本书第二版付梓的决心。

在编写本书第二版的过程中，得到了山东电力研究院、新乡宝山电厂（超临界机组）、王曲电厂（超临界机组）、海口电厂、新密电厂、滕州新源电厂、黄岛电厂（超临界机组）等单位的大力支持、协同，为本书提供了大量的数据资料。在此表示衷心的感谢。

限于作者水平，书中疏漏与不足之处在所难免，恳请读者指正。

作者

2007年1月

目 录

前言	
第一版前言	
第二版前言	
第一章 锅炉机组启动与停运	1
第一节 概述	1
第二节 锅炉启停一般程序	3
第三节 启停过程参数控制与调节	13
第四节 启动燃烧过程	22
第五节 锅炉启停过程的安全监督	29
第二章 锅炉的变工况特性	47
第一节 负荷变动特性	47
第二节 过量空气系数变化特性	61
第三节 煤质—运行参数特性	67
第四节 给水温度变化的影响	72
第五节 汽温控制方程	74
第三章 汽包锅炉运行参数的监督与调节	79
第一节 概述	79
第二节 蒸汽压力与负荷的调节	79
第三节 蒸汽温度的调节	87
第四节 汽包水位的调节	105
第四章 超(超)临界锅炉运行参数的监督与调节	109
第一节 概述	109
第二节 蒸汽压力与负荷的调节	109
第三节 煤水比与蒸汽温度调节	115
第四节 超(超)临界机组的变压运行	134
第五章 锅炉的燃烧调整	146
第一节 概述	146
第二节 燃料量与风量的调节	150

第三节	燃烧器的调节及运行方式	157
第四节	燃烧调整试验与经济运行	203
第五节	配煤与掺烧	209
第六节	燃烧故障与事故	217
第七节	风机运行	223
第六章	制粉系统的运行与调整	232
第一节	单进单出钢球磨煤机中储式制粉系统的运行调节	232
第二节	中速磨煤机配正压直吹式系统的运行调节	243
第三节	双进双出钢球磨煤机直吹式制粉系统的运行调节	255
第四节	制粉系统的运行方式	263
第五节	制粉系统的调整试验	265
第六节	制粉系统爆燃及其防止	274
第七节	制粉系统启停中的几个问题	279
第七章	锅炉受热面的安全运行	282
第一节	炉膛结渣	282
第二节	水冷壁的高温腐蚀	286
第三节	超临界压力锅炉水冷壁的金属安全	291
第四节	过热器、再热器金属安全	300
第五节	尾部受热面的磨损、腐蚀、堵灰与漏风	312
第八章	锅炉机组经济运行	322
第一节	运行参数耗差分析	322
第二节	锅炉机组节能剖析	335
第三节	提高锅炉效率的运行途径	345
第四节	锅炉辅机经济运行	367
	参考文献	379

第一节 概 述

一、启动过程安全经济性

锅炉启停过程是一个极其复杂的不稳定的传热、流动过程。启动过程中，锅炉工质温度及各部件温度随时变化。由于受热的不一致，且部件不同部位温度不同，因而会产生热应力，甚至使部件损坏。一般说来，部件越厚，在单侧受热时的内外壁温差越大，热应力也越大。汽包（分离器）、过热器联箱、蒸汽管道和阀门等的壁厚均较大，因此在传热过程中必须妥善控制，尤其是汽包。

启动初期受热面内部工质的流动尚不正常，工质对受热面金属的冲刷和冷却作用是很差的，有的受热面内甚至在短时间内根本无工质流过。如这时受热过强，金属壁温可能超过许用温度。锅炉的水冷壁、过热器、再热器及省煤器均有可能超温。因此，启动初期的燃烧过程应谨慎进行。

炉膛爆燃也是启动过程中容易发生的事故。锅炉启动之初，燃料量少、炉温低、燃烧不易控制，可能会由于燃烧不稳而导致灭火，一旦发生爆燃，将使设备受到严重损害。

启动过程中所用燃料，除用于加热工质和部件外，还有一部分耗于排汽和放水，既造成热损失也有工质损失。在低负荷燃烧阶段，过量空气系数和燃烧损失也较大，锅炉的运行效率要比正常运行时低得多。

总之，在锅炉启动中，既有安全问题也有经济问题，两者经常是矛盾的。例如，为保证受热面的安全，减小热应力，启动过程应尽可能较慢地升温、升压，燃料量的增加也只能缓慢进行。但是，这样一来势必延长启动时间，使锅炉在启动过程中消耗更多的燃料，降低了经济性。锅炉启动的原则是在保证设备安全的前提下，尽可能缩短启动时间、减少启动燃料消耗量，并使机组尽早承担负荷。

二、单元机组的滑参数启停

国内单元机组均采用锅炉与汽轮发电机组联合滑参数方式启动和停运。滑参数启动的要点是：锅炉与汽轮发电机同时进行启动，随着锅炉点火、升压和升温，汽轮发电机组进行冲转、升速、并网及带负荷，待锅炉达到额定参数时，汽轮发电机组达到额定功率。

采用滑参数启动，机组能充分利用低压、低温蒸汽均匀加热汽轮机的转子和汽缸，减少了热应力和启动损失，锅炉过热器、再热器的冷却条件也得到改善。由于锅炉与汽轮发电机组同时启动，缩短了整机启动时间，不仅减少启动能耗量，也可使机组提前发电，增强了机动性。

压力法滑参数启动是最为普遍的滑参数启动方式，它是指待锅炉产生的蒸汽具有一定的压力和温度后才冲转汽轮机。该方法是在锅炉点火后一段时间内汽轮机主汽阀关闭，调速汽阀全开，锅炉送出的蒸汽通过高、低压旁路排入凝汽器，由旁路阀控制流量。待蒸汽达冲转参数（蒸汽压力、蒸汽温度）时冲转汽轮机。在汽轮机冲转、升速、暖机、并网过程中，维持蒸汽参数基本不变，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关闭旁路，机组进入滑压运行。

采用压力法滑参数启动，蒸汽冲转动力大、流量大，易于维持冲转参数的稳定；锅炉可在不增加燃料量、不进行过多调整的情况下，提供足够蒸汽量，满足冲转、升速、迅速跨过临界转速并达到全速的需要，且有一定裕量。当然，该法在汽轮机冲转以前，蒸汽全部排入凝汽器，损失较大。

压力法滑参数的冲转参数与机组容量、启动状态有关。我国火电机组的冷态启动冲转参数如下：300MW级、600MW级机组，多采用中参数冲转，冲转压力为5~8MPa，冲转温度为330~360℃；1000MW级机组，冲转压力为8.5~9.5MPa，冲转温度为380~420℃。热态启动的冲转参数由启动前汽轮机高压内缸的金属温度确定。

三、冲转进汽方式

压力法滑参数启动按照冲动转子时的进汽方式不同，分为高、中压缸联合启动和中压缸启动两种方法。高、中压缸联合启动是指汽轮机冲转时，蒸汽同时进入高压缸和中压缸冲动转子，是我国目前使用较多的一种；中压缸启动是指在汽轮机启动时，高压缸不进汽，而用压力较低的再热蒸汽从中压缸进汽冲动转子，待并网后才逐渐向高压缸进汽。

采用中压缸启动，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，有利于中压缸的均匀和较快加热，减小热应力和汽轮机胀差，同时也可以提高再热器压力和流量，有利于启动初期迅速提升再热汽温，但汽轮机系统较复杂。

四、启动状态的划分

按照机组在启动时的状态不同，锅炉启动分为冷态启动和热态启动。冷态启动是指锅炉在没有压力，其温度与环境温度接近情况下的启动，通常是新锅炉、锅炉经过检修或较长时间的备用后的启动。热态启动是指锅炉在保持一定压力且温度高于环境温度下的启动。根据机组停运的时间不同，大型锅炉又进一步将热态启动划分为温态启动、热态启动和极热态启动三种。具体划分是依据汽轮机在启动时的温度水平进行的。国内外各制造厂所取的温度界限不尽相同。国产某1000MW超超临界机组启动状态划分及启动时间见表1-1，表1-1中温度是指汽轮机高压调节级处内缸壁温。

表 1-1 国产某 1000MW 超超临界机组启动状态划分及启动时间

项目	冷态启动	温态启动	热态启动	极热态启动
温度 (°C)	<320	320~420	420~445	>445
停机时间 (h)	>72	8~32	1~8	<1
启动持续时间 (h)	10~11	4~5	3~3.5	<3

了解启动状态的划分有助于掌握机组各种状态下的启动特点。如冷态启动时，机组温度

水平低,为使其均匀加热,不至于产生较大的热应力,锅炉升温、升压以及升速、升负荷都应缓慢进行。而热态、极热态启动时,机组各部件处于较高的温度状态,为不使高温部件受到蒸汽冷却,就必须尽快使工作参数达到机组部件的温度水平,此时锅炉进水、燃烧率控制、升速升负荷都应明显加快,冲转参数也较高。

第二节 锅炉启停一般程序

一、汽包锅炉启动

(一) 启动系统

启动系统的主要功能是在机组启动、停止和事故情况下,平衡锅炉与汽轮机之间的蒸汽流量,从而与锅炉调节燃烧相配合,起到调节和保护的作用。汽包锅炉的启动系统有锅炉本体汽水系统和疏水系统、过热器旁路系统、汽轮机旁路系统三种类型。图 1-1 所示为自然循环汽包锅炉典型汽水系统与疏放水系统。

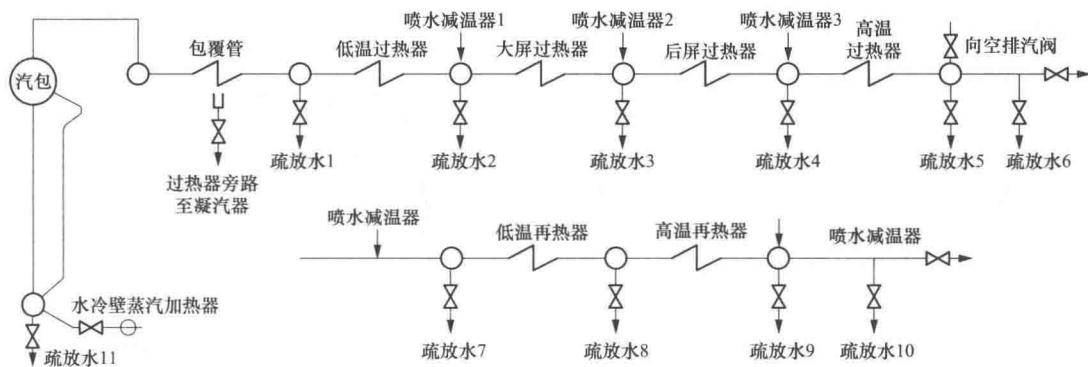


图 1-1 自然循环汽包锅炉典型汽水系统与疏放水系统

控制循环汽包锅炉的汽水、疏放水系统,除在下降管装置锅水循环泵之外,其余与自然循环汽包锅炉相同。

过热器旁路系统是在垂直烟道包覆过热器下环形集箱接出一根管路至凝汽器,并在管路上装设控制阀构成的(见图 1-1 中的过热器旁路)。其设计流量通常为锅炉最大连续负荷的 5%,亦称 5%旁路。我国引进的美国 CE 机组、英国 BEL 机组多采用这种系统。

过热器旁路系统作为锅炉的旁路,启动时通过改变过热器出口的流量来控制汽压、汽温,满足提高运行灵活性、缩短启动时间的要求。

汽轮机旁路系统如图 1-2 所示。图 1-2 (a) 所示为一级大旁路系统。过热器出口蒸汽通过旁路管道经减温减压后,直接排入凝汽器。它的优点是系统简单、运行控制方便、投资低。若大旁路设计容量达到 100%BMCR、同时装设快速启动的减温减压器,则可取代过热器出口安全阀。一级大旁路的两个主要问题:一是在滑参数启动尤其是热态启动时,再热蒸汽温度达到要求值比较困难,这是因为在大旁路情况下,进入再热器入口的只能是蒸汽温度较低的高压缸排汽;另一个问题是在机组启停、甩负荷等情况下,再热器内无工质流过,再热器处于干烧状态,因此冲转前必须控制燃烧率,以限制炉膛出口烟气温度,这样势必减缓

升压、升温速度，延长启动时间。尤其是热态启动，要求较快提升参数，一级大旁路不太适应。

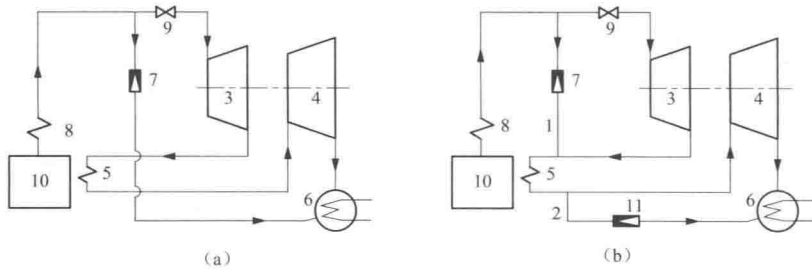


图 1-2 汽轮机旁路系统

(a) 一级大旁路系统；(b) 二级旁路系统

1—高压旁路；2—低压旁路；3—汽轮机高压缸；4—汽轮机中、低压缸；5—再热器；6—凝汽器；
7—高压旁路减温减压阀；8—过热器；9—主蒸汽门；10—锅炉；11—低压旁路减温减压阀

图 1-2 (b) 所示为二级旁路系统。该系统由高压旁路 1 (又称 I 级旁路) 和低压旁路 2 (又称 II 级旁路) 以及相应的旁路阀门所组成。I 级旁路对汽轮机的高压缸进行旁路，II 级旁路对汽轮机的中、低压缸进行旁路。汽轮机冲转前，蒸汽经 I 级旁路、再热器、II 级旁路进入凝汽器。这种系统，既可在启动中调节进入汽轮机的蒸汽参数和蒸汽流量，又可保护再热器。如锅炉冷态或热态滑参数启动时，要求主蒸汽温度和再热蒸汽温度必须高于相应进汽缸的金属温度，并有一定的过热度。为了满足此要求锅炉就必须保持一定的燃料量，此时通过开启 I 级旁路提高再热蒸汽温度和冷却再热器。该系统是目前国内外大型发电机组采用最普遍的一种系统。

(二) 汽包锅炉冷态启动程序

自然循环汽包锅炉的冷态启动包括启动前准备，锅炉点火、升温 and 升压，汽轮机冲转升速、并网及带初负荷，机组升负荷至额定值等几个阶段。

1. 启动前准备

启动准备阶段应对锅炉各系统和设备进行全面检查，并使之处于启动状态；为确保启动过程中的设备安全，所有监测仪表、联锁保护装置（主要是 MFT 功能、重要辅机联锁跳闸条件）及控制系统（主要包括 FSSS 系统和 CCS 系统）均经过检查、试验，并全部投入；锅炉上水完成，水位正常；投用水冷壁下联箱蒸汽加热系统直至汽包起压；上水与加热阶段注意监视汽包上、下壁温差；启动回转式空气预热器、投入暖风器或热风再循环以保护空气预热器；开启引风机、送风机，完成炉膛吹扫程序，防止点火爆燃；原煤仓、粉仓已准备好足够煤量；调整炉膛负压，准备点火。

2. 锅炉点火、升温 and 升压

锅炉点火首先点燃油燃烧器（油枪）或其他节油点火装置，炉温提升后点燃煤粉燃烧器。油枪的点燃从最下排开始，点火前须将燃油和蒸汽的压力、温度调至规定值。点火后注意风量的调节和油枪的雾化情况。逐渐投入更多油枪，建立初投燃料量（汽轮机冲转前所投燃料量）。点火后即开启各级受热面的疏放水阀，用于暖管和放尽积水，待积水疏尽后即应及时关闭，以免蒸汽短路影响受热面的冷却。过热器出口疏水兼有排放锅炉工质、抑制升压速度的作用，可推迟关闭。过热器出口疏水门关闭后即投入汽轮机旁路，其开启方式和开度

视锅炉升压升温控制的需要而定。点火后的一定时期内，过热器和再热器内无蒸汽流量或流量很少，以监视和控制炉膛出口烟气温度的方法来保护受热面和控制燃烧率。若为一级大旁路，则这一控制必须保持到汽轮机进汽之前。点火过程中要注意水冷壁回路的水循环，监视汽包水位和汽包上下、内外壁温差，一旦汽包壁温差超过限值，应立即降低升压速度。锅炉停止给水时应开启省煤器再循环阀，保护省煤器。初投燃料量应保证汽轮机冲转、升速、带初负荷所需要的蒸汽量。通过控制燃烧率和投用受热面旁路、汽轮机旁路等手段来控制锅炉出口过热蒸汽的升压、升温速度并匹配冲转参数。

3. 汽轮机冲转升速、并网及带初负荷

随着燃烧率的增加，当锅炉出口蒸汽压力、蒸汽温度升至汽轮机要求的冲转参数时，汽轮机冲转、升速、并网、带初负荷暖机。这一阶段锅炉的主要任务是稳定蒸汽压力、蒸汽温度，以满足汽轮机的要求。除锅炉控制燃烧外，主要手段是利用高、低压旁路，必要时可投入减温手段和过热器疏水阀放汽。汽轮机冲转后，旁路门即逐渐关小，将蒸汽由旁路倒向汽轮机，以满足汽轮机冲转直至带初负荷对蒸汽量的需要，避免燃烧作过多调整。通常在初负荷暖机以后，汽轮机调速汽阀开启 90% 时，旁路门完全关闭。

4. 机组升负荷至额定值

机组继续升压、升温直至带满负荷。锅炉燃烧主要完成从投粉到断油的过渡。汽轮机带初负荷后，锅炉产汽量已可全部进入汽轮机，炉膛温度和热风温度也已提升到较高数值，易于维持煤粉稳定着火和满足制粉要求，因此可伺机投入制粉系统和煤粉燃烧器，逐渐增加燃料量，加快提升负荷。在该阶段，锅炉燃烧调整是按照升负荷速率控制的要求以及升压、升温曲线进行的。但升负荷速率和升温速率受制于汽轮机而不是锅炉。由于是滑参数启动，所以控制升负荷速率（即燃烧率）也就基本上控制了升压、升温过程。这一阶段，锅炉燃烧率、减温水量（或烟气挡板开度）是改变升压、升温过程的基本手段。当负荷达到 60%~70% 时可根据着火情况，逐渐切除油枪。蒸汽温度比蒸汽压力可能较早地达到额定值，蒸汽压力比负荷也可能较早地达到额定值，后者取决于滑参数增负荷时汽轮机调速汽阀的开度。若蒸汽压力先于负荷达额定值，则应逐渐开大调速汽阀，锅炉继续增加燃料量，在定压情况下将负荷提升到额定值。

（三）冷态启动曲线

某 660MW 亚临界机组 2208t/h 自然循环锅炉的冷态滑参数启动曲线如图 1-3 所示。由图 1-3 可以看出，冷态启动过程经历时间较长（7h），大致可分为三个阶段。

第一阶段从点火开始逐渐升温、升压直到冲转。从点火到起压用去 100min。从起压到冲转用去 150min。在升压的初始阶段，升压速度很低，1h 内蒸汽压力升高仅为 1.1MPa，此阶段升压率只有 0.018MPa/min。以后逐渐加快，冲转前 1h 内蒸汽压力升高为 3.6MPa，升压率为 0.06MPa/min。当压力升到 6.4MPa，主蒸汽、再热蒸汽温度按不变速率升到 350、320℃ 时，开始冲转汽轮机。这一阶段，饱和温度的变化率维持在 1.3℃/min 左右。

第二阶段是从汽轮机开始冲转到并网（即同步），再继续暖机一段时间。此时高压旁路转为定压控制方式。蒸汽压力、蒸汽温度维持在稳定值 6.4MPa、350℃/320℃。锅炉燃料量增至 389t/h 后维持不变，汽轮机调速汽阀渐渐开大增加进汽，高压旁路调阀开至最大开度的 50% 后逐渐减小、关闭（图 1-3 中阴影线部分为旁路流量，阴影线以下部分为汽轮机进汽量），机组进行滑压升负荷。这一阶段，汽轮机主要是升速和暖机，需要 1h 左右。实际运

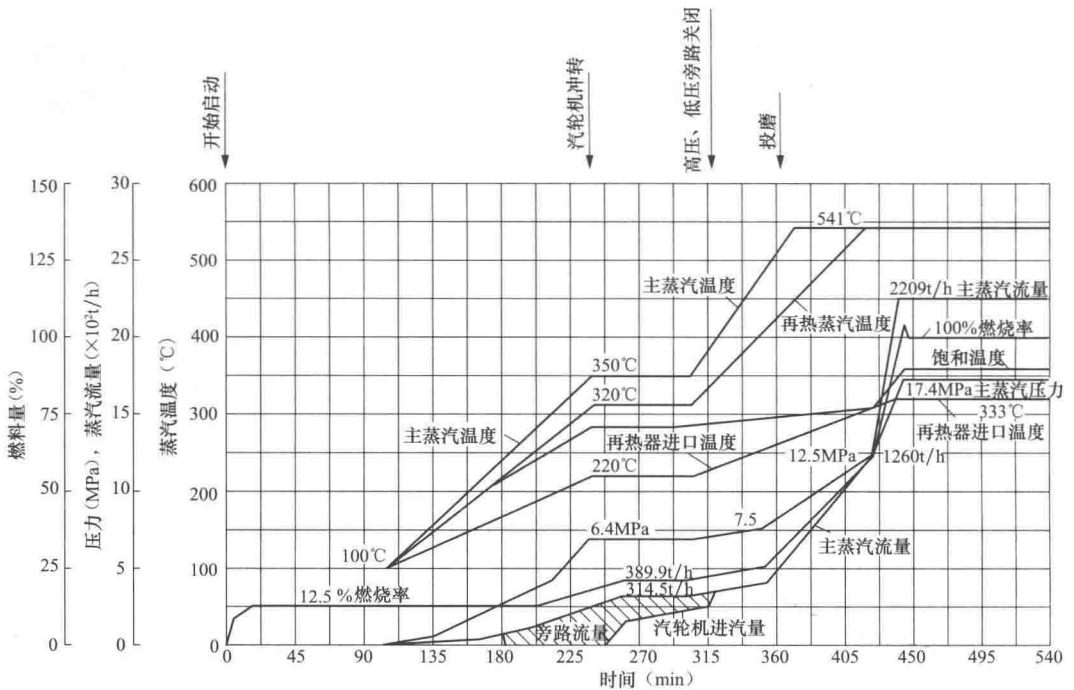


图 1-3 某 660MW 亚临界机组 2208t/h 自然循环锅炉的冷态滑参数启动曲线

行中，根据汽轮机的要求，这一阶段需要的时间可能会长一些。

第三阶段是继续升温、升压并增加负荷。蒸汽温度比蒸汽压力提前达到额定值，蒸汽压力与负荷同时达到额定值。这一阶段中，虽然锅炉和汽轮机都要求限制温度变化率，但来自汽轮机的限制更严，因此在启动时间上起了决定作用。这一阶段的时间为 2h，占启动总时间 1/3~1/4。

控制循环锅炉的冷态启动，除点火前就投入炉水循环泵，保持着水冷壁良好循环流动外，其余启动过程与自然循环锅炉基本相同。

(四) 汽包锅炉热态启动一般程序

锅炉的热态启动过程与冷态启动过程基本相同，但热态启动时锅内存有锅水，只需少量进水调整水位。蒸汽管道与锅内都有余压与余温，升压、升温与暖管等在现有的压力温度水平上进行，因而可更快些。锅炉点火后要很快启动旁路系统，以较快速度调整燃烧，避免因锅炉通风吹扫等原因使汽包压力、蒸汽温度有较大幅度降低。冲转时的进汽参数要适应汽轮机的金属温度水平；冲转前须先投入制粉系统运行，以满足汽轮机较高冲转参数的要求。冲转时锅炉应达到较高的燃烧率，以保证能使汽轮机负荷及时带至与汽轮机缸温相匹配的水平上，避免因燃烧原因使热态启动的机组在冲转、并网、低负荷运行等工况下运行时间拖延，从而造成汽缸温度的下降。机组极热态启动时必须谨慎，启动过程的关键在于协调好锅炉蒸汽温度和汽轮机的金属温度，尽可能避免负偏差，减少汽轮机寿命损耗。

汽轮机启动前后，要采取一切措施防止疏水进入汽轮机。过热器与再热器的出口联箱，后井下联箱以及一、二次蒸汽管道上的疏水阀一直保持开启，再热器紧急喷水门则关闭。上述保持开启的阀门有的在冲转以后，有的则在带初负荷以后才能关闭。在此之前视情况可以关小。并网后，当负荷增加到冷态滑参数启动时汽轮机汽缸壁温所对应的负荷工况时，可按

冷态滑参数启动曲线进行，直到带满负荷。

图 1-4 所示为某 2208t/h 亚临界自然循环汽包炉热态和极热态滑参数启动曲线。由图 1-4 可见，不同启动状态选择了不同的冲转参数。由于热态启动时锅炉部件温度较高且温升幅度较小，所以允许的升压、升温速度比冷态启动快得多，且整个启动时间大为缩短。热态、极热态的启动时间分别为 1.5h 和 1.2h。

二、超临界锅炉冷态启动

(一) 超临界直流锅炉启动特点

1. 启动前清洗

与汽包锅炉不同，直流锅炉给水中的杂质不能通过排污加以排除。其去向有两个：一部分溶解于过热蒸汽带出锅炉，其余部分则都沉积在锅炉的受热面上。因此直流锅炉除了对给水品质严格要求以外，启动阶段还要进行冷水和热水的清洗，以便确保受热面内部的清洁和传热安全。

2. 启动流量的建立

直流锅炉启动时，由于没有自然循环回路，所以直流锅炉水冷壁冷却的唯一方式是从锅炉开始点火就不断地向锅炉进水，并保持一定的工质流量，以保证受热面良好的冷却。该流量应一直保持到蒸汽达到相应负荷（称启动流量），然后随负荷的增加而增加。启动流量的选择，直接关系到直流锅炉启动过程中的安全经济性。启动流量越大，则工质流过受热面的质量流速越大，这对受热面的冷却、水动力的稳定性以及防止汽水分层等都是有利的。但启动流量越大，启动时间越长，启动过程中的工质损失和热量损失都增加；同时，启动旁路系统设计容量也要求增大。相反，如果启动流量过小，则受热面的冷却和水动力的稳定性难以得到保证。因此，在保证受热面可靠冷却和工质流动稳定的前提下，启动流量应尽可能小一些。超临界直流锅炉的启动流量通常为额定蒸发量的 25%~35%。

3. 启动中的工质膨胀

直流锅炉在点火以后，随着炉膛热负荷的增加，水冷壁的工质温度逐渐升高。在不稳定加热过程中，中部某点工质首先汽化，体积突然增大，引起局部压力突然升高，急剧地将其后的工质推向出口，造成锅炉排出量大大超过锅炉给水量。这种现象（称工质膨胀）将持续一段时间，直至出口全部为湿饱和蒸汽为止。

直流锅炉的工质膨胀现象对启动时的安全带来不利影响。如膨胀量过大，将使锅炉内的工质压力和启动分离器水位都一时难以控制。影响工质膨胀的因素主要有启动流量、启动压力、给水温度、燃料的投入速度等。启动流量越大，膨胀量越大。启动压力越低，蒸汽比体积越大，会产生更大排挤压力。给水温度越低，膨胀到来越迟，膨胀量越小。投入的燃料量大，投燃料速度快，工质先达到沸点的位置向下移动，膨胀点后的存水量就多，总的膨胀量大；同时局部压力升高快，因而瞬时的最大排出量也大。

(二) 启动系统

超临界直流锅炉的汽轮机旁路系统与汽包锅炉单元机组相同。但锅炉旁路系统则完全是针对直流锅炉的启动特点（主要是建立启动流量、汽水分离和工质膨胀等）而专门设计的。它的关键设备是启动分离器。启动分离器的作用是在启动过程中分离汽水以维持水冷壁启动流量的循环，同时向过热器系统提供蒸汽并回收疏水的热量和工质。

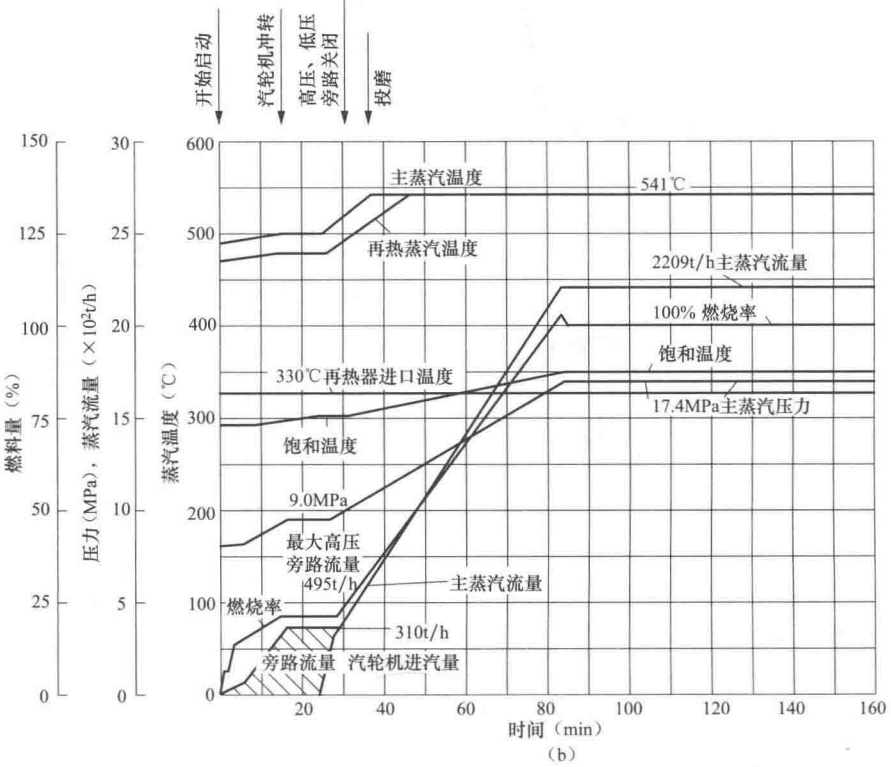
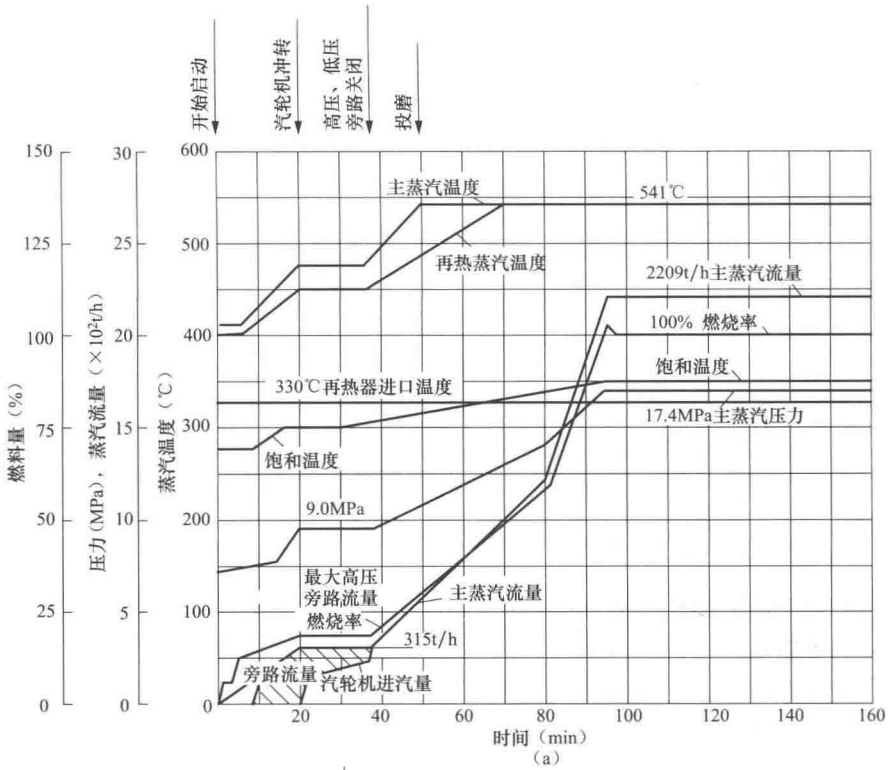


图 1-4 某 2208t/h 亚临界自然循环汽包炉热态和极热态滑参数启动曲线
(a) 热态启动; (b) 极热态启动