



大型电站锅炉 安全及优化运行技术

岑可法 周昊 池作和 著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



大型电站锅炉 安全及优化运行技术

岑可法 周昊 池作和 著

电力科技专著出版资金资助项目



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

全书主要内容涵盖了大型电站锅炉启动和停炉优化运行,四角切向燃烧和旋流燃烧的电站锅炉优化运行和调整技术,过热器、再热器的调温方式及防止汽温偏差的方法,锅炉受热面积灰、结渣及防止措施,锅炉受热面磨损机理及防磨措施,锅炉受热面高低温腐蚀及预防措施,制粉系统的优化运行,优化配煤及混煤燃烧技术,锅炉变负荷及调峰运行技术,锅炉安全经济运行技术、事故诊断技术和锅炉低污染运行技术等。

本书适于从事电站锅炉运行的人员使用,也可供高等学校热能专业的师生使用。

图书在版编目(CIP)数据

大型电站锅炉安全及优化运行技术/岑可法,周昊,池作和编.
-北京:中国电力出版社,2002

ISBN 7-5083-1006-3

I. 大… II. ①岑… ②周… ③池… III. 火电厂-锅炉运行-安全技术 IV. ①TM621.2 ②TM288

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第019322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>)

汇鑫印务有限公司印刷

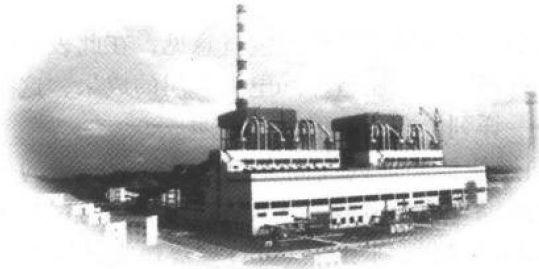
各地新华书店经售

*

2003年2月第一版 2003年2月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 40.25印张 991千字
印数0001—3000册 定价75.00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

qian yan

我国是产煤大国，煤炭资源非常丰富，但煤种特性变化范围很宽。根据我国的能源政策，火力发电厂大多以煤为主要燃料，而且根据可持续发展战略的要求，为获得高的能量转换效率和低的污染物排放率，大型燃煤发电机组日益成为我国火力发电厂的主力机组。但由于现有供煤和配煤系统存在许多不完善之处，电站锅炉燃用煤质难以得到保证，机组容量和参数的提高也对锅炉设计、调试、运行操作和维护提出了新的要求。大型电站锅炉的安全和优化运行技术成为提高机组利用率、安全性、经济性和环保性能的关键技术。

影响大型电站锅炉经济、安全运行的因素错综复杂，涉及到承压部件的应力分析和寿命问题，炉内燃烧过程的优化调整，炉内的积灰、结渣、腐蚀、磨损过程，炉内烟气温度、烟速偏差、汽温偏差，大型电站锅炉参与调峰所带来的新问题，制粉系统及其他辅助系统的安全经济运行技术，煤质的掺配技术及低污染运行技术等。国内外对大型电站锅炉经济、安全运行技术进行了大量的理论研究和实践探索，取得了丰富的研究成果和实践经验，但这些成果和经验散见于各专业杂志、鉴定资料、论文及研究报告中，需要进一步地系统归纳和总结。近年来电力工业发展迅速，大容量机组纷纷投产，大型电站锅炉经济、安全运行技术变得尤为需要，为此，作者结合浙江大学热能工程研究所长期以来在此领域研究所取得的成果，参考国内外相关文献资料，编写了这一专著。

本书共分十一章，内容涵盖了大型电站锅炉启动和停炉优化运行，四角切向燃烧锅炉和带旋流燃烧器的电站锅炉优化运行和调整技术，过热器、再热器的调温方式及防止汽温偏差的方法，锅炉受热面积灰、结渣及其防止措施，锅炉受热面磨损机理及防磨措施，锅炉受热面的高低温腐蚀及预防措施，制粉系统的优化运行，优化配煤及混煤燃烧技术，锅炉变负荷及调峰运行技术，锅炉安全经济运行技术、事故诊断技术和锅炉低污染运行技术。在编写过程中，力图使理论与实践相结合，在分析过程中，引入了计算机辅助优化数值试验方法(Computer Aided Testing, 简称 CAT)，使各种参数变化对锅炉运行的影响过程得以量化。

本书由岑可法、周昊、池作和共同撰写。其中第一章、第三章~第十一章由岑可法、周昊编写，第二章由池作和编写，全书由岑可法担任主编。在撰写过程中，作者逐章逐节进行分析、讨论，相互启发，紧密合作，因此这本书可以说是集体完成的著作。书中引用了浙江大学热能工程研究所教师和研究生的大量研究资料(见参考文献)，并得到他们的许多帮助，为此，要特别感谢樊建人教授、曹欣玉教授、姚强教授、周俊虎教授、赵翔教授、沈璐婵教授、袁镇福教授、黄镇宇教授、刘建忠教授、施正伦高级工程师、周志军博士、蒋啸工程师、李凤瑞博士，上海电力学院的潘卫国教授和朱珍锦副教授，河南省电力试验研究所马淮

军高级工程师。

曹欣玉教授和周俊虎教授担任本书主审，他们对本书提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。此外，本书还引用了国内不少高校、科研单位、制造厂和电力部门的成果，这些成果使本书内容得到进一步充实和完善，恕难一一详列，在此我们一并致谢。

作者承担国家自然科学基金项目“四角切向燃烧锅炉炉内气固多相流动数值试验的研究”、“熔融灰粒迁移、传热、粘附机理与结渣预报综合数学模型”，“八五”攻关项目“催化洁净燃烧及优化配煤技术研究”、国家重点基础研究发展规划项目(973)“煤燃烧过程中污染防治的机理”(项目编号 G1999022204)、全国优秀博士论文专项资金“有机氮释放、迁移机理和可调节煤粉再燃降低劣质煤 NO_x 排放研究”的任务，部分研究成果已反映在本书中，作者在此非常感谢以上基金的支持。最后，作者还要特别感谢电力科技专著出版资金的资助，没有此项资金的资助，本书是很难迅速和读者见面的。

尽管我们在撰写过程中通过试验研究和计算机数值模拟，并结合现场实践，尽可能地做到理论联系实际，解决电站锅炉安全和优化运行问题。但由于锅炉安全优化运行问题内容广泛，极为复杂，很多问题目前尚未得到解决，因此本书中提到的某些分析和计算，不少还属于探索性的。限于我们的水平，错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

作 者

2002年12月于浙江大学求是园



目 录

mu lu

前言

第一章 大型电站锅炉启动和停炉优化运行	1
第一节 概述	1
第二节 锅炉启停时可能出现的应力问题	2
第三节 启停时蒸汽管道的应力分析及计算	11
第四节 启停时联箱应力分析及计算	17
第五节 膜式水冷壁启停时的应力分析	20
第六节 启停时汽包的应力分析	24
第七节 电站锅炉启停时的能量损失	29
第八节 自然循环锅炉的启动优化	34
第九节 直流锅炉的启动优化	47
第十节 复合循环锅炉的启动特点	49
第十一节 锅炉停炉	50
第二章 四角切向燃烧锅炉的优化燃烧和调整	54
第一节 锅炉优化燃烧运行特性	54
第二节 四角切向燃烧锅炉的流动特性	57
第三节 结构参数对四角切向燃烧锅炉优化运行的影响	65
第四节 运行参数对四角切圆锅炉优化燃烧的影响	75
第五节 切向燃烧二次风反切时的运行特性	80
第六节 切向燃烧一次风反切时的运行特性	89
第七节 三次风反切时的运行特点	93
第八节 正反向旋转动量矩的改变对炉内气流流动特性的影响	95
第九节 燃烧器上下摆动时炉内空气动力特性	97
第十节 燃用劣质煤的运行问题	100
第三章 带旋流燃烧器和 W 型火焰的电站锅炉的优化燃烧和调整	108
第一节 旋流燃烧器的运行特性参数	108
第二节 燃烧器旋流强度和烟气回流量的关系	118
第三节 各种结构参数组合的旋流燃烧器运行特性	125
第四节 燃用劣质煤的旋流燃烧器	141
第五节 多个旋流燃烧器运行时的相互作用	143
第六节 W 型火焰锅炉运行时的配风特性	145

第七节	锅炉运行时炉内热负荷分配的不均匀问题	154
第四章	过热器、再热器调温方式及防止汽温偏差方法	168
第一节	影响过热器、再热器汽温变化的原因	168
第二节	运行中从蒸汽侧调节汽温的方法	178
第三节	运行中从烟气侧调节汽温的方法	183
第四节	过热器、再热器热偏差的原因及其后果	189
第五节	运行中炉膛出口烟气速度、温度分布不均匀引起的热偏差及其降低措施	199
第六节	运行中炉膛、过热器、再热器沾污、结渣引起的汽温问题	211
第七节	由于各集箱间流量分配不均引起的热偏差及其降低措施	215
第八节	由于各管屏进口汽温不同引起的热偏差及其降低措施	221
第九节	由热偏差引起的汽温分布及管壁壁温计算方法	221
第五章	锅炉积灰、结渣及其防止措施	232
第一节	锅炉积灰、结渣特性及其对运行的影响	232
第二节	煤灰成分对积灰、结渣的影响	242
第三节	受热面积灰、结渣过程	245
第四节	根据燃料特性对受热面积灰、结渣的预测方法	252
第五节	根据锅炉运行特性对受热面积灰、结渣的预测方法	263
第六节	减少锅炉受热面沾污、积灰、结渣的可能措施	269
第六章	受热面磨损机理及其防磨措施	283
第一节	飞灰对受热面的磨损类型	283
第二节	影响飞灰对受热面磨损速度的各种因素	286
第三节	烟气走廊对磨损的影响及其防止措施	295
第四节	转弯后的尾部烟道烟速不均匀性对磨损的影响及其可能的防磨措施	302
第五节	管束加翅片防磨及强化传热的措施	303
第六节	锅炉受热面磨损的预测	310
第七节	对流受热面防磨的可能措施	313
第八节	管式空气预热器防磨的可能措施	314
第七章	锅炉的高低温腐蚀及预防措施	316
第一节	金属的高温氧化	316
第二节	高温腐蚀原理	320
第三节	水冷壁在运行中的高温腐蚀	325
第四节	过热器的高温腐蚀	326
第五节	防止高温腐蚀的技术措施	328
第六节	炉管内部的腐蚀问题	330
第七节	低温受热面的积灰和腐蚀机理	334
第八节	影响受热面低温腐蚀的各种因素	337
第九节	防止低温受热面积灰腐蚀的技术措施	338
第八章	制粉系统的优化运行	342
第一节	钢球磨煤机的运行特性	342
第二节	中速磨煤机的运行特性	366
第三节	风扇磨煤机的运行特性	384
第四节	煤粉分离器的运行特性及煤粉细度的调节	394

第五节	制粉和燃烧系统调节风粉均匀分布的技术措施	403
第六节	制粉系统安全运行的防爆措施	425
第九章	优化配煤和混煤燃烧技术	432
第一节	煤质变化对锅炉正常运行特性的影响	432
第二节	动力混煤煤质特性及燃烧特性的计算	441
第三节	优化配煤的数学模型和专家系统	453
第十章	锅炉变负荷及调峰运行技术	461
第一节	锅炉变负荷及调峰运行的特点	461
第二节	锅炉变负荷或频繁调峰可能出现的技术问题	478
第三节	电站锅炉低负荷稳燃技术	492
第四节	锅炉变负荷时的定压、变压运行方式	512
第十一章	锅炉安全经济运行及事故诊断	525
第一节	大型电站锅炉经济运行指标分析	525
第二节	电站锅炉安全运行可靠性指标及事故诊断分析方法	531
第三节	锅炉长期运行寿命评估及预测方法	536
第四节	电站锅炉低污染燃烧运行技术	564
第五节	炉内可燃物爆炸的预防	590
第六节	炉管爆破事故动态分析	598
第七节	炉内结渣厚度评价分析方法	608
第八节	炉内掉大渣及其破坏性分析	610
第九节	炽热灰渣掉入渣池引起水蒸发及炉内压力升高动态过程分析	615
第十节	炉膛内爆原因分析	617
参考文献	620

第一章



大型电站锅炉启动和停炉 优化运行

第一节 概 述

锅炉由静止状态变成运行状态的过程称为锅炉启动过程，停炉是启动的反过程，即锅炉由运行状态转变为静止状态的过程。

锅炉的启动方式按启动前锅炉的冷热状态划分，可分为冷态启动和热态启动两种，也可把锅炉启动分为冷态、温态、热态、极热态启动等多种启动方式。所谓冷态启动，是指锅炉在没有表压，其温度和环境温度相近情况下的启动。温态、热态和极热态启动则是指锅炉还保持有一定表压，温度高于环境值情况下的启动。根据启动时温度值，从低到高，依次分为温态、热态和极热态启动，上述是指锅炉经过较短时间停用后的重新启动，启动时的工作内容基本与冷态启动相同，只是启动开始锅炉还具有一定的温度和压力，可以认为是以冷态启动过程中的某一阶段作为启动的起始点，而起始点之前冷态启动的某些工作内容可以省略或简化。

为说明启动过程，先简单介绍一下电站自然循环锅炉的冷态启动过程。点火准备工作完成之后，开始点火，随后蒸发受热面内的介质被加热到沸腾过程，而过热器和再热器暂时仍处于干烧状态。沸腾一开始，蒸发受热面内产生蒸汽，导致系统内的压力上升，但关闭着的高压旁路和汽轮机的主汽门阻止了蒸汽的输出，过热器和再热器仍未被冷却，积存在冷区域内的蒸汽要发生冷凝。当锅炉高压旁路阀前压力达到规定值时，高压旁路阀开启，过热器开始得到冷却，然后蒸汽再流向再热器。在蒸汽流入再热器之前，分出一部分蒸汽送到高压加热器或除氧器去，只有达到低压旁路压力界限之后，才可调节再热器的蒸汽流量。继续提高燃烧器的功率，蒸汽的流量和温度逐步上升，直至可以冲转汽轮机并接带负荷。锅炉启动时间，即升火的持续时间，对母管制锅炉是指从点火到并汽所需的时间，对单元制机组则是指从点火到机组带到指定负荷所需的时间。

启动和停炉过程是一个不稳定的变化过程。锅炉的工况变化很复杂，存在着各种矛盾，如：各部分的工作压力和温度随时在变化，启动时间的长短与启动费用的问题，启动时冷炉的燃烧稳定性，受热面内部的工质流动可靠性，热量回收等，归纳起来，即是启动过程中的安全性和经济性两大问题。

启动过程中，由于各受热部件的加热不可能完全均匀，金属部件内存在着温度差异，会产生热应力，特别是厚壁部件，要重视其温度场的不均匀性，以免产生过大的热应力而使部件损坏。启动过程中，各受热面内部的工质流动尚不正常，易引起局部超温，如水循环尚未正常时的水冷壁、未通汽或汽量很少时的再热器、断续进水的省煤器等，都存在管壁超温破坏的可能性。启动初期，炉膛温度较低，在点火后的一段时间内，燃料投入量少，燃烧不容易控制，容易出现燃烧不完全、不稳定，炉膛热负荷不均匀等较突出的问题。

启动过程中，锅炉利用热量一部分被工质吸收和加热各部件，另一部分则由排汽、放水带走。如何最大限度地利用热量，减少热损失，也是启动过程中的重要问题。

本章将对电站锅炉的启动、停炉过程及其主要矛盾进行分析，针对启停过程中的安全性和经济性问题的讨论，讨论如何实现电站锅炉启停的优化运行。

第二节 锅炉启停时可能出现的应力问题

锅炉设备中存在着大量的承压部件，如汽包、联箱、管子和导管等，它们内部承受着介质压力（内压）的作用。启停时部件内存在温度分布的不均匀性，从而受到很大的热应力作用，同时，这些部件的工作条件恶劣，处于高温高压的环境下。长期实践表明，这些部件由于选材和结构设计不当，焊接、制造和热处理过程中存在问题，安装施工过程中的检验疏忽，以及运行过程中材料受腐蚀介质、交变的机械应力和热应力作用，就会导致出现如低周疲劳破坏、塑性破坏、蠕变破坏、脆性破坏以及各种类型的腐蚀破坏等失效现象。任何一种失效形式都将造成经济损失并危害人身安全。如果导致爆管而被迫停炉、停电和停止供热，以致用户停止生产，就会造成重大的经济损失。锅炉爆炸还会毁坏设备和厂房，造成人身伤亡等灾难性事件。随着锅炉参数和容量的提高，其失效所造成的损失将更大。

一、锅炉元件承受的应力

1. 弹性应力分析

以锅炉受压元件的最普遍形式——圆筒形部件为例，考虑在内压作用下的厚壁无孔圆筒，其内径为 d_1 ，外径为 d_2 ，如图 1-1 所示，其内壁作用有内压 p ，若圆筒很长，可以不计两端封头的影响。圆筒体的几何形状、受力、支承情况沿轴线 z 方向没有变化，筒体沿 z 方向的应变应为常数或者为零，圆筒体任意一个横截面在受力变形后仍为平面，所以可将该圆筒体视作平面应变的轴对称问题。用柱坐标表示圆筒壁内任一点的三个主应力，分别是：沿筒体切线方向的切向应力 σ_θ 、沿筒体轴线方向的轴向应力 σ_z 、沿筒体半径方向的径向应力 σ_r 。

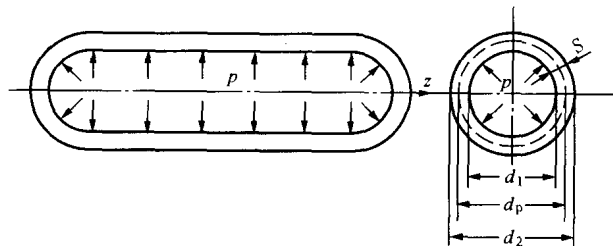


图 1-1 承受内压作用的圆筒

由力学知识，可以获得厚壁圆筒在承受内压时，沿圆筒壁内三个主应力的分布，如图 1-2 所示。由图可知，圆筒受内压作用时，径向应力为压缩应力，且在压力 p 的内表面上达最大值。切向应力为拉应力，也在内表面上达最大值。因此，承受内压作用的圆筒形部件的危险点在内壁处，而且随内压 p 的不断增大，其三个主应力成正比例增加。当内压 p 达到某一数值时，内壁金属首先开始屈服，产生塑性变形。

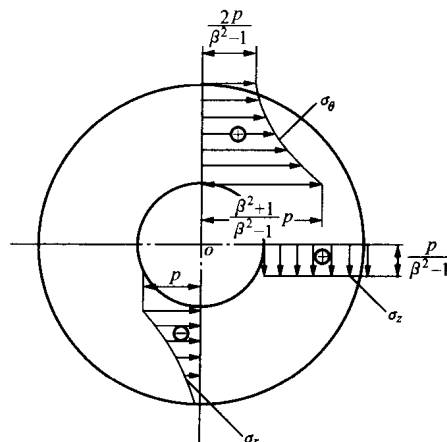


图 1-2 圆筒壁的三个主应力沿壁厚的分布

2. 弹塑性应力分析

内壁金属开始屈服时的压力称为弹性极限压力，用 p_e 表示，这种状态下的壁内应力分布如图 1-3 (a) 所示。若再增加内压，即 $p > p_e$ ，则在圆筒体内壁附近会形成一个环形塑性区。随着内压 p 的增加，这个塑性区会不断地向外层扩展，此时圆筒壁分为两部分：内层的塑性区和外层的弹性区。设弹塑区的分界半径为 r_p ，相应的内压为 p_p ，此状态下的应力分布如图 1-3 (b) 所示。当 r_p 等于圆筒的外半径 r_2 时，圆筒的全部壁厚进入塑性状态，这时称为塑性极限状态，对应于这种状态下的载荷（内压）称为极限载荷（极限压力） p_c 。在极限状态以前，由于外层弹性区的约束，圆筒内侧的塑性变形不可能很大，只能与弹性变形处于同一数量级。但从极限状态开始，上述的这种约束就被解除，圆筒体开始产生较大的塑性变形，称无约束塑性变形。在极限状态以前，可认为圆筒体尚能正常工作，而极限状态以后就不再被认为是正常的工作阶段了，因为内压稍有增加，就能导致圆筒体塑性变形过大而破坏。

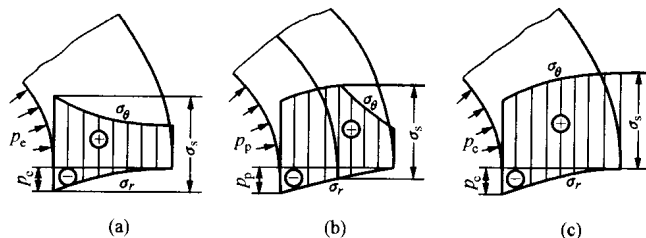


图 1-3 三种状态时厚壁圆筒壁的应力分布

(a) 弹性极限状态；(b) 弹塑性状态；(c) 塑性极限状态

3. 热应力

物体的体积随着温度的升高而膨胀，随着温度的下降而收缩，由温度变化而引起体积变化不受约束时，不产生应力，但是当物体体积变化受到约束时，将会产生内应力。另外，如果物体内有初始应力，则物体温度变化也会使这种初始应力的大小发生变化。具有不同膨胀系数的几种材料组合的构件被加热时，由于膨胀受到相互之间的约束，还会产生内应力。当同一物体内部存在温度分布的不均匀现象时，若取物体的一部分来考虑，则因温度不同的相邻部分的影响，使膨胀和收缩部分地受到约束，也会产生内应力。

以上几种由于温度分布不均或膨胀和收缩受约束而引起的内应力称为热应力。

4. 应力集中

在机械零件和锅炉受压部件的几何形状突然变化的地方，如缺口、键槽、管孔及两零件相连接的地方会发生局部应力增大，即应力集中现象。在交变应力的作用下，应力集中部位容易产生裂纹，最终导致部件失效。应力集中处的最大应力与无应力集中现象时的名义应力之比称为应力集中系数。当在锅炉承压部件上开孔时，应力集中的程度取决于部件的受力状态和孔的形状，应力集中处的最大应力与无应力集中现象时的名义应力之比称为应力集中系数。计算和整理各种形状的孔在不同受力状态下的应力集中系数，采取行之有效的措施，使部件的应力集中得到缓和，这对锅炉部件的安全运行具有十分重要的意义。

二、锅炉受压元件钢材的失效形式

1. 锅炉钢材的短时机械特性

金属材料在外力作用下表现出来的性能，如弹性、塑性、强度、硬度、韧性等，统称为材料的机械或力学性能。锅炉钢材必须具有足够高的综合机械性能。由室温拉伸实验得到的强度极限、屈服极限、伸长率和截面收缩率，以及由室温冲击试验得到的冲击韧性值是锅炉钢材的重要机械性能指标。

钢材的屈服极限和强度极限决定着锅炉元件所能承受的应力及其承载断面尺寸，伸长率和断面收缩率决定着钢材工艺性能的好坏，冲击韧性值表示钢材的韧脆性以及承受冲击载荷的能力。

锅炉承压部件都是在较高温度下工作的，高温下金属的机械性能与常温下的机械性能有所区别，主要有以下几项：

(1) 高温下材料表现出机械性能指标对承载时间的敏感性，高温短时试验数据与高温长时试验数据是不同的。

(2) 高温下材料的强度性能指标有所下降。

(3) 低碳钢在 200~300℃，低合金钢如钼钢和铬钼钢，在 400~500℃出现强度增加、塑性降低的现象，称为钢材的兰脆性。

2. 塑性破坏

塑性破坏是指部件承受载荷超过其最高许用应力值，致使部件塑性变形过大而发生的破坏。锅炉元件的塑性破坏主要有两种，一种是因超压而引起的塑性破坏，一般发生在安全阀和燃烧自动控制设备同时失灵等情况下；另一种是因超温而引起的塑性破坏，发生在受热面冷却条件遭受破坏的情况下。

3. 脆性破坏

锅炉钢材在正常条件下都具有较好的塑性和韧性性能，但在工程中，由于一些外界因素的影响，会导致钢材脆化，从而发生脆性破坏。锅炉启停过程中，温度、压力等参数变化大，防止脆性破坏对保证锅炉启停安全具有非常重要的意义。

(1) 冷脆。钢材在低温条件下呈现的脆性称为冷脆。锅炉受压元件的工作温度较高，在运行条件下具有较好的塑性，但在进行水压试验时，若水温较低，钢材就可能脆化，导致脆性破坏。

(2) 热脆。当钢材长时间停留在 400~500℃，然后冷却到室温时，其冲击韧性值会有明显的下降，这种现象称为钢材的热脆性。蒸汽管道在启动和停炉的低温阶段，由于水冲击和

振动等原因很容易造成热脆破坏。

(3) 氢脆。钢材中的氢会使机械性能脆化，称为氢脆。在冶炼和焊接过程中如不采取严格的措施，将使钢材中的氢含量增加。启动过程中，由于温度交变使保护层产生裂纹，基本金属暴露出来，当金属温度高于 400°C 时，发生 $3\text{Fe} + 4\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{H}_2 \uparrow$ 的反应，氢气就析出了。这种所谓的蒸汽腐蚀会使所产生的氢渗入钢材中。氢脆断裂一般发生在较低温度范围内 ($-100 \sim 150^{\circ}\text{C}$)，温度较高时氢将从钢中逸出。

(4) 苛性脆化。苛性脆化是由于容器水介质内含有浓度很高的苛性钠，使得钢材腐蚀加剧而引起的脆化现象。产生苛性脆化条件为：① 存在很高的局部应力；② 在此部位下与高浓度苛性钠溶液相接触；③ 在一定的工作温度下。

(5) 应力腐蚀。由拉应力与腐蚀介质联合作用而引起的低应力脆断称为应力腐蚀，它在断裂前往往没有先兆，而是突然产生脆断。

4. 疲劳破坏

钢材在远低于其抗拉强度的交变（循环）应力的作用下，经过一定的循环次数之后，材料会发生断裂，这种现象称为疲劳破坏。在静载荷拉伸时呈塑性的材料，在疲劳断裂时看不出显著的塑性变形，而呈现突然断裂的现象，因此材料的疲劳破坏具有更大的危险性。钢材抵抗疲劳断裂的特性在不同的条件下不同，一般可分为以下几种：

(1) 高周疲劳。是指低应力（低于钢材的屈服极限，甚至低于弹性极限）、高寿命（应力循环周数在 10^5 以上）的疲劳。

(2) 低周疲劳。锅炉每发生一次启停，其承压元件都要经受一次交变应力及应变循环。由于某些部位存在着应力集中或残余应力，会使该地区的总应力超过钢材的屈服极限而产生塑性应变。在交变塑性应变作用下造成的破坏称为低周疲劳破坏。低周疲劳断裂时的应力循环周数在 10^5 以下。

(3) 热疲劳。指在温度变化所产生的热应力反复作用下所造成的疲劳破坏。热疲劳与低周疲劳具有相似的应变—寿命规律，因而，其破坏特征相同。

(4) 腐蚀疲劳。指部件在交变载荷和腐蚀介质的共同作用下所产生的疲劳破坏。

5. 蠕变破裂

在高温条件下，承受载荷的钢材不断发生缓慢塑性变形的现象称为蠕变。一定温度 t 和恒定应力 σ 下的变形量 ϵ 随时间 τ 变化的蠕变过程可以用图 1-4 所示的金属典型蠕变曲线来表述。图中 oo' 表示加载的瞬时伸长。一般说来，蠕变曲线包含下列三个典型阶段：① 蠕变的第一阶段 $o'A$ ，蠕变速度 v_c ，即单位时间的蠕变变形量在此阶段中随时间增加而减少，因此也称为减速蠕变阶段。② 稳定阶段 AB ，此阶段内，蠕变速度为常数，且是整个蠕变过程中蠕变速度最小的阶段。试验结果表明，温度愈高，应力愈大，稳定阶段的蠕变速度就愈大。③ 破坏阶段 BC ，在此阶段内，蠕变速度随时间的增长而急剧增加，至 C 点发生断裂，也称为加速蠕变阶段。工程实际中一般认为此阶段的部件已处于危险状态。

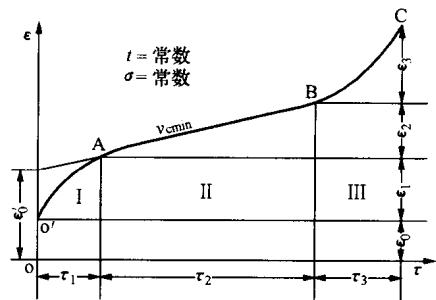


图 1-4 典型蠕变曲线

对于锅炉高温承压元件，蠕变变形本身并不影响

锅炉工作，只要保证元件在使用期内不发生破裂即可，故在强度计算中，通常以钢材的持久强度作为设计的依据。钢材的持久强度是指在高温条件下经过规定时间发生蠕变破裂时的应力，它反映钢材在高温下长期工作的抗断裂能力。

6. 长期在高温下的钢材组织结构的变化

在室温条件下，钢材的金相结构及性能一般较稳定。但是在高温条件下，金属原子的扩散能力增大，在长期工作过程中，钢材的组织结构将不断发生变化，并使其性能变坏，严重时会导致破裂事故。

(1) 珠光体球化。常用的各种锅炉碳素钢和低合金钢大都是珠光体钢，其正常组织是由珠光体和铁素体晶粒组成的，珠光体晶粒内的铁素体和渗碳体均呈片状，称为片状珠光体。片状珠光体是一种不稳定组织，由于在相同体积下，片的表面积大于球，因而在高温下，片状珠光体中的渗碳体有逐渐转变为球状，并聚集成大球团的趋势，这种现象称为珠光体球化。珠光体球化使钢的强度极限、蠕变极限、持久强度等机械性能均下降。

(2) 石墨化。石墨化是钢中渗碳体在长期高温作用下自行分解的一种现象， $\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow 3\text{Fe} + \text{C}$ （石墨），它使钢材的室温和高温机械性能（强度和塑性）均下降，特别使冲击韧性显著降低，使钢材明显变脆，导致脆断。

(3) 合金金属的重新分配。在长期高温下，合金元素从固溶体转移到结构较稳定的碳化物中去，导致钢材强度降低。

7. 锅炉钢材的高温氧化

锅炉的某些高温元件在高温烟气和高温蒸汽的作用下，与烟气或蒸汽中的氧发生氧化反应，生成氧化膜。如果氧化膜不能紧密地包覆在钢材表面而发生脱落，则氧化现象不断发展，导致破坏。

8. 应力松弛

钢材在高温和应力作用下，如果保持总变形量不变，随着时间的延长，应力逐渐降低的现象称为应力松弛。应力松弛过程，实际上是在总变形量不变的情况下，材料中的弹性变形随着时间延长不断转变为塑性变形的过程。当用螺栓压紧两个工件时，应力松弛会造成压紧力减弱，导致密封失效，使容器内部工质泄漏，造成破坏。

三、锅炉管材常用钢材性能

锅炉的过热器、再热器、省煤器和水冷壁管是锅炉本体的主要承压部件，工作条件比较恶劣，通常称它们为锅炉“四管”。锅炉“四管”爆漏是影响锅炉安全经济运行的重要问题。锅炉“四管”的各管段是由性能不同的各种钢材管组成的，一台大型电站锅炉“四管”所需的钢管壁厚为2.0~12.0mm，各种规格管的总长度可达200km。一般在锅炉汽水循环系统中，省煤器进口处温度最低，为150~300℃左右，末级过热器出口处最高温度可能超过566℃。锅炉设计时，既要考虑承压部件的强度要求，同时也要考虑到采用不同性能钢材的经济性，因此往往在锅炉“四管”的不同部位采用不同的钢材。

锅炉常用钢材可分为碳素钢和合金钢两大类，锅炉管子使用何种钢材主要由锅炉设计计算得到的不同部位的管材温度决定。表1-1列出了电厂常用的受热面钢管最高允许温度。

碳素钢是指含碳量小于1.35%，并含有限量的锰、硅、磷、硫等杂质和微量残存元素的铁碳合金。火电厂中使用的碳素钢多为含碳量小于0.25%~0.35%的低、中碳钢，广泛用于工作温度不大于450℃的部件，如20G广泛应用于锅炉水冷壁、省煤器、联箱及主给水

管道等部件。

表 1-1 电厂常用受热面钢管的最高允许温度

锅炉管钢号 (GB 5310—1995)	我国常见的有关国家钢号	最高使用温度 (°C)
20G	St35.8, St45.8 (德), SA106A (美)	500
15CrMo	15Mo3, 16Mo3 (德), T1 (美)	530
12Cr2Mo	10CrMo910 (德), T32 (美)	580~590
12Cr1MoV	12X1MΦ (俄)	580
12Cr2MoWVB (钢研 102)		600
12Cr3MoVSiTb (III1)		600
	X20CrMoV121 (德)	630~650
	T91, T9 (美)	650
1Cr18Ni9	TP304, TP304H (美)	700
1Cr19Ni11Nb	TP347, TP347H (美)	700 (800*)
	TP321 (美)	700 (800*)
	TP316, TP316H (美)	700 (800*)

* 作为受热面管子连续使用可达 700°C, 短期使用可达 800°C。

合金钢按合金元素含量可分为低合金钢 (合金元素总量小于 5%)、中合金钢 (合金元素总量在 5%~10%) 和高合金钢 (合金元素总量大于 10%) 等。如按金相组织分, 则可分为珠光体钢、马氏体钢和奥氏体钢。铁素体钢由于脆性大、强度低和工艺性能差, 不宜用于发电设备承压部件。

锅炉用钢往往采用钢号表示, 如 12Cr1MoV, 其中字母代表钢中所含元素, 数字代表该元素的含量, 含碳量以 1/10000 为单位, 碳的元素符号一般省略, 合金元素以 1% 为单位, 合金元素含量小于 1% 者, 数字省略。如 12Cr1MoV 表示含碳量平均在 12/10000; 含铬量平均为 1.0%; 含钼量小于 1%, 为 0.3%; 含钒量小于 1%, 为 0.15%~0.3%。

珠光体耐热钢是正火后组织为铁素体加珠光体 (包括部分贝氏体或马氏体组织) 的耐热钢, 合金元素总量在 5% 以下, 除低碳钢 20G 外, 常用钢材为含铬、钼、钒等元素的合金钢, 如 15CrMo, 12Cr1MoV, 12Cr2Mo 等, 也有再附加钨、钛、硼等元素的, 如 12Cr3MoVSiTb, 12Cr2MoWVB 等。根据合金化程度不同, 其最高使用温度在 450~600°C。珠光体钢具有良好的价格性能比, 在火电厂使用最为广泛, 如锅炉受热面管子、蒸汽管道、联箱和汽轮机转子、汽缸等。

马氏体耐热钢是正火后组织为马氏体或马氏体加贝氏体 (包括少量铁素体) 的耐热钢, 以含铬 12%~13%, 加有强化元素钨、钼、钒等, 以及含铬 9% 和加入钼、铌、铝、氮的钢为主。12%~13%Cr 基马氏体耐热钢 (如德国 X20CrMoV121 等) 可用于 540~620°C 的受热面管子和蒸汽管道; 强化 9%Cr 钢 (如美国的超 9Cr 钢, 即 SA213T91、SA335P91 和日本的 9Cr2Mo 等) 可用于 550~650°C 的受热面管子和蒸汽管道。

奥氏体耐热钢是在常温下为奥氏体组织或只含有少量铁素体的奥氏体—铁素体复相组织

的耐热钢，合金元素总含量一般在 50% 以下。主要为铬镍和在铬镍基础上加入钨、钼、铌、钛等强化元素的钢及铬锰氮、铬镍锰和铁铝锰奥氏体耐热钢，通常用于工作温度高于 600℃ 的高温部件，如 1Cr18Ni9，1Cr18Ni9Ti 和 1Cr19Ni11Nb 等铬镍奥氏体钢用于亚临界压力锅炉过热器和再热器最高温度部分管子。铬锰氮奥氏体钢如 3Cr18Mn12Si2N 可用于强度要求不高但以抗氧化性为主的锅炉过热器吊挂等。奥氏体钢具有在 600℃ 以上高温使用的高温强度和良好的抗氧化性能，但其热导率低，价格昂贵，膨胀系数大，易产生应力腐蚀裂痕和异种钢焊接时接头寿命短等问题，因此限制了奥氏体钢在火电厂中的大量使用，这也是机组蒸汽参数长期停留在 540~570℃ 温度范围内的主要原因。

以下将简单介绍锅炉“四管”国内常用钢种的性能特点。

(1) 20 号钢。

1) 钢材化学成分见表 1-2。

表 1-2 20 号钢的化学成分 %

国别	牌 号	技术条件	C	Si	Mn	S	P
中 国	20G	GB 5310—1985	0.17~0.24	0.17~0.37	0.35~0.65	≤0.035	≤0.035
美 国	Gr.B	ASTMA 106—85	≤0.3	≤0.1	0.29~1.06	≤0.058	≤0.048
德 国	St45.8/III	DIN 17175—79	≤0.21	0.1~0.35	0.4~1.2	≤0.04	≤0.04
日 本	STB42	JISG 3461—84	≤0.32	≤0.35	0.3~0.8	≤0.035	≤0.035

2) 钢材物理性能见表 1-3。

表 1-3 20 号钢的物理性能

温 度 (°C)	线膨胀系数 $\alpha \times 10^6$ (1/°C) (与 20°C 之间)	导热系数 λ [W/(m·K)]	温 度 (°C)	线膨胀系数 $\alpha \times 10^6$ (1/°C) (与 20°C 之间)	导热系数 λ [W/(m·K)]
100	11.16	50.7	400	13.83	42.3
200	12.12	48.6	500	13.93	38.9
300	12.78	46.1			

3) 钢材许用应力见表 1-4。

表 1-4 20 号钢的许用应力

牌 号	技术条件	σ_s (MPa)	σ_b (MPa)	20°C	250°C	300°C	350°C	400°C	450°C	480°C
20G	GB 5310—1985	226	402	402	148	113	100	87	57	38

4) 钢管持久强度见表 1-5。

表 1-5 20 号钢管持久强度

状 态	$\phi 32 \times 3.5\text{mm}$ (450°C)	$\phi 32 \times 4\text{mm}$ (450°C)	$\phi 38 \times 4\text{mm}$ (450°C)	$\phi 38 \times 4\text{mm}$ (460°C)	$\phi 38 \times 4\text{mm}$ (470°C)
σ_{10^4} (MPa)	106	111	115	105	92
σ_{10^5} (MPa)	82	82	91	82	71

(2) 12Cr1MoV。

1) 钢材化学成分见表 1-6。

表 1-6 12Cr1MoV 钢的化学成分 %

国 别	牌 号	技术条件	C	Si/Mn	S/P	Cr/Ni	Cu/Mo	V/Ti
中国	12Cr1MoV	GB 5310—1985	0.08~0.15	0.17~0.37	≤0.035	0.9~1.2	≤0.25	0.15~0.3
				0.4~0.7	≤0.035		0.25~0.35	0.15~0.3

2) 钢材物理性能见表 1-7。

表 1-7 12Cr1MoV 钢的物理性能

温 度 (°C)	线膨胀系数 $\alpha \times 10^6$ (1/°C) (与 20°C 之间)	导热系数 λ [W/(m·K)]	温 度 (°C)	线膨胀系数 $\alpha \times 10^6$ (1/°C) (与 20°C 之间)	导热系数 λ [W/(m·K)]
20		35.6	400	11.38~13.6	33.5
100	9.36~10.80	35.6	500	12.45~14.15	32.2
200	10.25~12.35	35.6	600	12.8~14.1	30.6
300	11.0~13.35	35.2			

3) 钢材许用应力见表 1-8。

表 1-8 12Cr1MoV 钢的许用应力

牌 号	技术条件	σ_s (MPa)	σ_b (MPa)	20°C	250°C	300°C	400°C	500°C	580°C
12Cr1MoV	GB 5310—1985	255	441	163	156	151	135	118	50

4) 钢管持久强度见表 1-9。

表 1-9 12Cr1MoV 钢管持久强度

状 态	540°C	580°C	600°C
σ_{10^5} (MPa)	118	78	60

(3) 12Cr2MoWVTiB (钢 102)。

1) 钢材化学成分见表 1-10。

表 1-10 12Cr2MoWVTiB 钢的化学成分 %

牌 号	技术条件	C	Si/Mn	S/P	Cr/Ni	Cu/Mo	V/Ti	B/W
12Cr2MoWVTiB	GB 9222—1988	0.08~0.15	0.45~0.75	≤0.035	1.6~2.1		0.28~0.42	≤0.008
			0.45~0.65	≤0.035		0.25~0.35	0.08~0.18	0.3~0.55

2) 钢材物理性能见表 1-11。