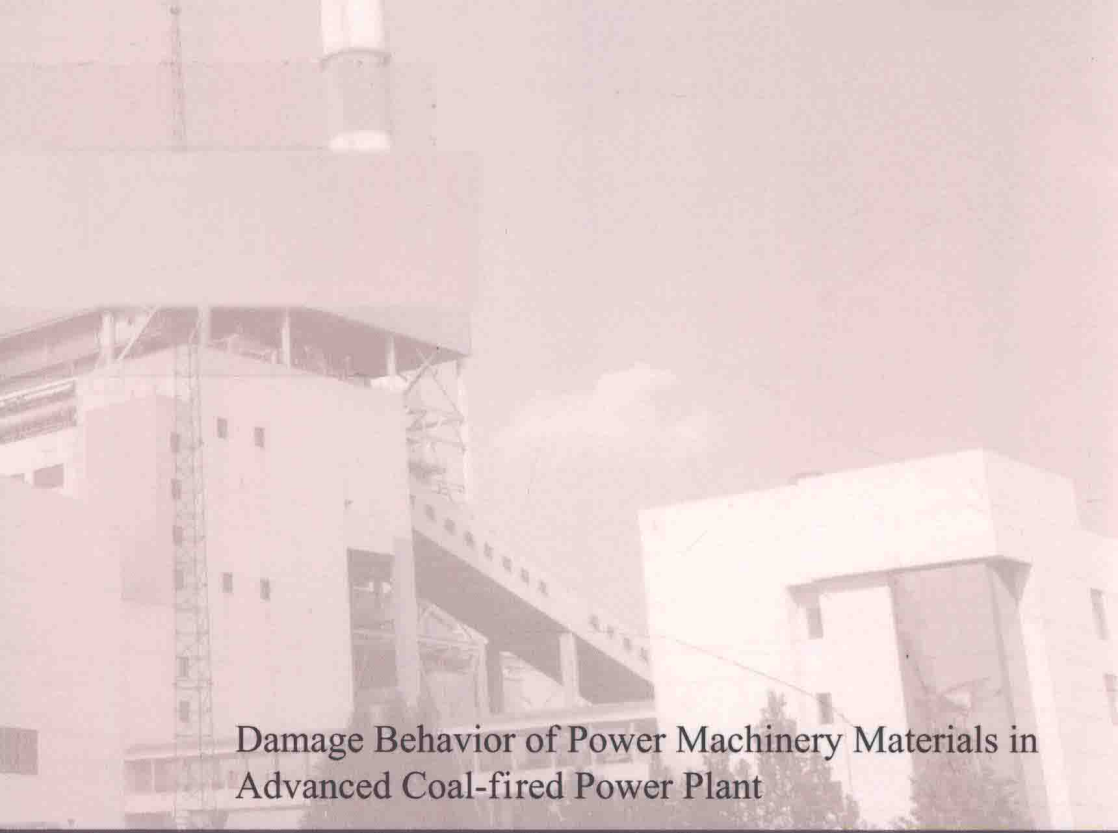




Damage Behavior of Power Machinery Materials in
Advanced Coal-fired Power Plant

先进火力电厂机组 动力机械材料损伤行为

崔璐 王澎/著



科学出版社

先进火力电厂机组动力机械 材料损伤行为

崔璐 王 澎 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书简要介绍了在服役工况下需要频繁启停调峰的火力发电厂设备由热力载荷引起的失效问题,重点论述了机组设备热疲劳失效的宏观规律和微观损伤机理。主要内容包括设备用耐热钢在时间、温度等影响因素下的形变、损伤特性及其宏观描述;在临近工况载荷和实际工况载荷下,特别是伴随温度交变的 TMF 工况下的形变、损伤特性及其宏观描述;工况载荷下两种材料模型的建立、验证和工程应用;从用户角度对所建模型的可复制性、所需工作量、工程适用性和可靠性等方面,做出了评价、说明及建议。

本书可作为材料、机械、结构和强度等学科的本科生、研究生以及工程技术人员的参考书使用。

图书在版编目(CIP)数据

先进火力电厂机组动力机械材料损伤行为/崔璐,王澎著.—北京:科学出版社,2018.11

ISBN 978-7-03-058978-1

I. ①先… II. ①崔… ②王… III. ①火力发电—发电机组—动力机械—损伤(力学)—研究 IV. ①TM621.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第225850号

责任编辑:耿建业 韩丹岫/责任校对:彭 涛

责任印制:张 伟/封面设计:无极书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年11月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018年11月第一次印刷 印张:9 1/2

字数:189 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本书针对调峰工况下火力电厂设备承受的交变载荷,开展设备常用耐热钢热交变载荷(thermomechanical fatigue, TMF)下的形变特性分析和损伤机理研究,建立了相关的材料模型,为机组运行方案的设计与优化、运行监控、热力设备结构设计、剩余寿命的评价等方面提供重要的理论依据。

第1章主要介绍研究背景与工程意义。第2章主要介绍火力电厂设备常用耐热钢在长时运行工况下的基本形变和强度特性,它是机组热力设备进行设计、计算、运行监控等非常重要的前提条件之一。第3章主要介绍交变载荷下火力电厂设备常用耐热钢的基本形变与强度特性,分析研究由温差引起的低周疲劳特性在不同应变速率、保载时长等因素下的特性,叠加高频振动的高低疲劳交互作用特性,以及预载荷后的疲劳损伤特征等。第4章主要介绍随温度交变的TMF工况载荷下的测试技术和方案,设备常用耐热钢的形变与损伤特征,通过简化的临近工况载荷试验和实际工况试验,对比分析温度交变对耐热钢加速形变特征和损伤机理的影响,阐述伴随温度交变下耐热钢失效的原因和机理。第5章简要介绍所建立的两适用于评估机组设备形变与损伤的寿命模型:一种是从“工程”角度出发以描述宏观特征和损伤累积的唯真模型;第二种是以连续介质力学为基础的统一黏塑性本构模型。第6章通过所建两种寿命模型,模拟分析设备关键部位的形变特征和损伤特征,通过反算工况载荷试验并与试验结果的比较,验证两种模型的可靠性,同时通过模拟计算,为机组启动方案优化提供理论依据。第7章从工业应用角度出发,从可移植性、工作量、适用性和可靠性等方面对所建模型进行了评价。第8章对本书的内容进行总结与展望。

本书得到了德国西门子动力公司、瑞士阿尔斯通动力公司、上海电气汽轮机厂以及德国W10研究团队的技术指导,这里对他们提供的研究用试验材料表示感谢。

需要特别致谢的是德国结构材料中心Dr. Berger教授、高温结构材料室主任Dr. Scholz博士、金相研究室主任Dr. Hoche博士、德国西门子动力Dr. Kostenko博士和全体科研人员在2004—2018年对作者研究工作的支持与帮助,同时感谢西安石油大学李臻教授和所有研究生同学的支持。

特别感谢的还有我的父母，他们不仅给予了我接受高等教育的机会，而且还在本书撰写期间承担了很多照顾子女和家务的重任。

另外还要感谢我的丈夫、本书的共同作者王澎博士，在本书的著作过程中，不仅给予了许多建设性的意见，而且承担了研究中的有限元计算工作。在此我诚挚地表达对他的感谢。

本著作获得“西安石油大学优秀学术著作出版基金”和国家自然科学基金“超超临界汽轮机转子 TMF 损伤机理以及与本构模型的耦合”（编号：51305348）以及德国 AVIF 基金项目 A232、A239、A242 的资助，在此深表感谢。

火电厂机组的运行是非常复杂的过程，然而由于作者的理解与知识水平有限，书中不妥和错误之处欢迎广大读者批评指正。

作 者

2018 年 9 月

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
第 2 章 高温恒定载荷下的蠕变特性	4
2.1 高温蠕变力学性能试验	4
2.2 高温蠕变特征	5
2.3 高温蠕变寿命	13
第 3 章 启停工况下与载荷波动的蠕变疲劳行为	15
3.1 高温疲劳力学性能试验	15
3.2 高温低周疲劳行为	16
3.3 叠加高频振动的低周疲劳特性	27
3.4 温度影响下的低周疲劳特性	30
第 4 章 工况载荷下蠕变疲劳特性	33
4.1 工况载荷下试验方案与技术	36
4.2 单轴工况载荷下的蠕变疲劳特性	40
4.3 双轴工况载荷下的蠕变疲劳特性	52
4.4 缺口处的蠕变疲劳特性	58
4.5 工况载荷下损伤特征	63
第 5 章 设备材料模型的建立	79
5.1 材料唯真模型	79
5.1.1 应力应变关系的建立	79
5.1.2 损伤分析及寿命预测	87
5.2 材料本构模型	92
第 6 章 机组设备的损伤描述	98
6.1 临近工况下设备材料特性描述	98
6.1.1 单轴临近工况载荷	98
6.1.2 多轴临近工况载荷	106
6.2 设备部件损伤特征的描述	116

6.3 启停方案优化	126
第 7 章 寿命模型的评价	131
7.1 可移植性和工作量	131
7.2 适用性和可靠性	132
第 8 章 结论与展望	135
参考文献	138

第1章 绪 论

在全球节能减排的目标下，越来越多的新能源开始发电并网。这些新能源(例如光伏、风能等)的间歇式输出模式会给电网带来波动(图 1.1)。因此，在可预知的未来，火力发电^[1]在能源结构中不但将继续发挥其不可替代的作用，而且还将被赋予调峰的职责。调峰过程中机组的频繁启停，会加剧其高温部件的疲劳蠕变损伤，从而缩短机组寿命。随着“厂网分离，竞价上网”的发展趋势，发电企业会在定价策略中主动找到调峰所带来的高额利润和机组寿命损耗的平衡点，从而实现经济效益最大化。因此，无论是引领我国先进火电技术主要方向^[2,3]且具有高效低排特点的大容量超超临界机组(蒸汽温度不低于 593℃或蒸汽压力不低于 30MPa^[4])，还是其他正在运行的机组，都需要在设计、运行、监控等方面考虑调峰功能所带来的寿命损耗。

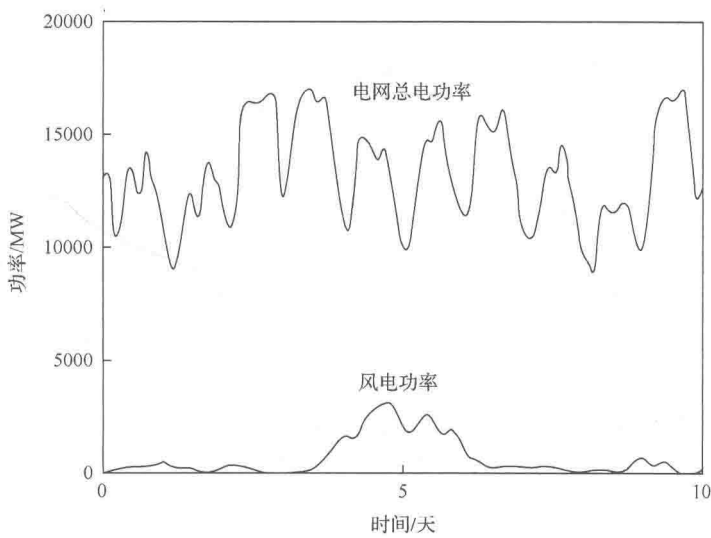


图 1.1 电网供电总负荷和风力供电负荷
图片来源：德国 E.ON 公司

发电机组的关键零部件在服役过程中承受着非常复杂的机械载荷和热载荷等多重载荷，例如汽轮机转子运行工况下的载荷包括由重力、蒸汽压力

和离心力等组成的初级载荷, 以及由启停过程中温度变化和瞬时负荷波动引起的次级载荷^[5](图 1.2)。初级载荷在设备部件材料上表现为应力控制形式, 高温环境中会引起设备材料的蠕变形变和蠕变损伤。次级载荷具有周期性交替的特点, 引起设备材料的低周疲劳形变和低周疲劳损伤^[5](LCF)。与此同时, 转子无论在运行工况高速旋转还是启停的过程中, 重力所引起的弯矩均会在转子表面形成高频率振动, 使设备材料产生高周疲劳损伤^[6](HCF)。这种机组运行过程中的蠕变-疲劳交互作用, 会加速部件表面的开裂。

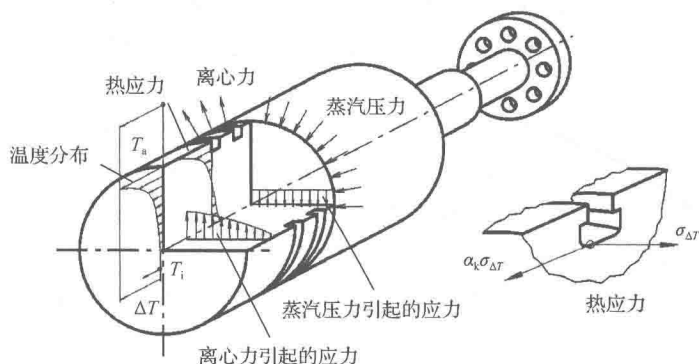


图 1.2 汽轮机转子承受的载荷^[5]

T_a -转子外表温度; T_i -转子心部温度; $\sigma_{\Delta T}$ -由温度引起的热应力; α_k -缺口部位的应力集中系数

耐热钢是发电机组主体用材, 其高温强度是机组热力机械和设备选材的重要参数。选材需要考虑所选耐热钢调制处理后的高温屈服强度、韧性及其抗蠕变性能。通常情况下, 大型火力汽轮发电机组的设计寿命为 30 年, 其中, 热力机械和设备的设计运行时间为 10^5 h (约 11.4 年)^[7], 满足设计寿命的典型耐热钢的蠕变强度如图 1.3 所示。在设计寿命下, 1%~2%Cr 型铁素体和贝氏体结构的耐热钢种的最高服役温度范围为 540~550℃; 9%~12%Cr 型高合金马氏体和奥氏体耐热钢种的最高服役温度范围为 550~600℃。随着全球气候变暖, 节能减排成为当前全球的发展目标。提高运行过程中蒸汽压力和温度是当前火电厂提高效率、减少 CO_2 排放量的最有效途径。目前, 美国、日本和欧洲的一些国家在研发和认证新型超超临界电厂主要高温部件用耐热钢方面仍处于世界绝对领先地位。美国的 EPRI (Electrical Power Research Institute)、欧洲的 COST (European Cooperation in Science and Technology) 项目、ECCC (European Creep Collaborative Committee), 以及日本的 EPDC (Electrical Power Developing Company) 等组织^[8]的研究主要集中于锅炉的热交换器(例如高温过

热器与再热器)、厚截面高温承压部件(例如高温过热器与再热器的进出口集箱、管道及其附件)和汽轮机转子等。研发的材料主要为 9%~12%Cr 铁素体(马氏体)钢和奥氏体钢^[9,10]。奥氏体钢虽然有很好的抗持久、抗腐蚀性能,然而由于它的热导率低、热膨胀系数大、抗疲劳抗力差等特点,并不适用于大型的热动力设备部件(例如汽轮机转子^[11])等)。铁素体钢则具有热导率高、热膨胀系数小、抗疲劳能力高的性能。近年来,发达国家在注重改善奥氏体钢性能的同时,将研发重点转向 9%~12%Cr 铁素体(马氏体)钢^[12-14],以用于锅炉管、锅炉厚截面部件以及汽轮机转子。这类钢种不仅仅是 600℃超超临界火力电厂高温部件的首选钢,而且也是新一代 700℃超超临界火力电厂镍基/耐热钢混合型汽轮机转子的主选钢^[15,16]。

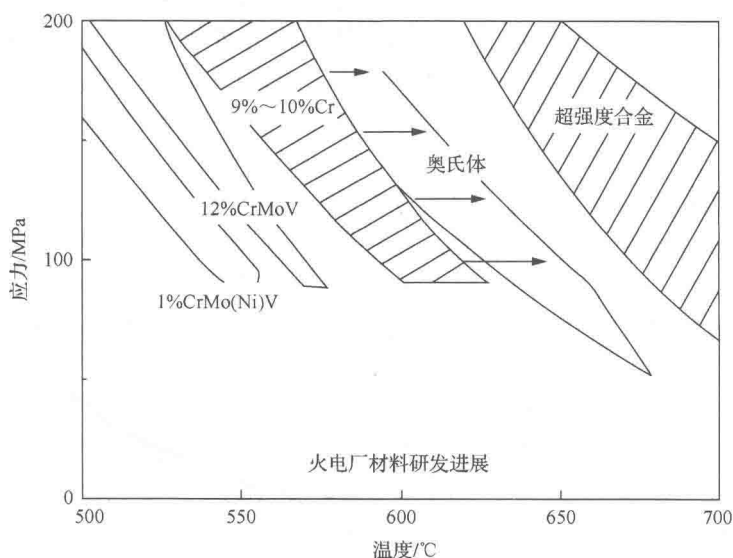


图 1.3 不同高温材料类的 10⁵h 蠕变强度

为了更准确掌握发电机组设备用材的性能,进一步提高设备利用率以及更加准确地评估设备的寿命,以及为发电机组的设计、运行、管理、监控等方面提供理论依据,本书主要研究先进火力电厂调峰运行工况下的机组设备用耐热钢的性能,研究主要从恒定载荷下的蠕变损伤分析、交变载荷下的疲劳损伤分析及蠕变-疲劳交互作用 3 方面展开。

第2章 高温恒定载荷下的蠕变特性

在机组稳定运行工况下,机械设备长时间承受(准)恒定载荷作用。设备材料在长时恒定载荷作用下的强度会随着形变和氧化过程而下降。机组材料的长时形变和强度特性是进行热力设备设计、计算、运行和监控等方面非常重要的前提条件。金属材料在高于其熔化温度 30%~40%的环境中承受恒定载荷时,即使这一载荷远低于它的屈服强度,也会随时间发生塑性形变,这就是所谓的蠕变^[17]。蠕变损伤分析不是本书的研究重点,但为了保证研究的完整性,并为分析蠕变疲劳交互作用,本章将与本研究相关的蠕变研究成果做以简单介绍。

2.1 高温蠕变力学性能试验

在机组稳定运行过程中,设备承受(准)恒定载荷,此时设备材料的力学性能通过高温蠕变试验进行测定。高温环境中材料的力学性能会随着环境的改变而改变,因此,对于不高于 600℃的汽轮机组材料,相关标准(例如 GB/T 2039)规定试验过程中的温度偏差不能超过 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 。控制与调节温度所用的热电偶依据 GB/T 16839 和 DIN 43710 进行选择 and 标定,以减少热电偶引起的误差并确保其在(超)长时试验中的稳定。

依据 ISO 204、GB/T 2039 和 DIN EN 10291 标准,高温蠕变试验分为非中断试验法和中断试验法。非中断试验法指的是在蠕变试验进行过程中,利用安装在试样上的引伸计连续不断地读取试样测试区域总伸长的方法。一般情况下,通过加载恒定砝码方式的单试样试验机或万能试验机上进行的蠕变试验多采用非中断试验法。中断试验法指的是在蠕变试验过程中允许多次周期性人为中断试验以便测量试样伸长量的方法。试验中断后将试样从试验机上卸载取下,规定的环境温度下测量并记录试样伸长,然后再将试样重新装入试验机继续进行试验,重复试验流程直至试样断裂。试样伸长的测量以预先在试样测试区边界处植入的不宜发生高温腐蚀与形变的陶瓷针为基准,借助显微镜和所附带的游标卡尺实现。采用中断型试验法的试样上无需安装引伸计,可以实现多试样串联技术,以降低成本。

采用非中断试验法的蠕变试验,数据采集精度较高,试验成本也较高,时长在 500h 以内的蠕变试验多采用此试验方法。相比之下,采用中断试验方法

的蠕变试验所获取的数据精度较低,但试验成本也较低,因此(超)长时蠕变试验一般采用该方法。耐热钢的蠕变特征曲线可以分为起始状态的非线性区、稳定状态的线性区和失效前的非线性区。依据这一曲线特征,并兼顾蠕变试验的经济性和数据精度,可将两种蠕变试验方法进行结合:蠕变试验进行的初期,蠕变特征曲线起始阶段的非线性区域,在单试样试验机上进行,以保证数据采集的精确度;当进入稳定的线性区域后,采用多试样串联技术,以降低长时试验成本。

2.2 高温蠕变特征

对于需要频繁启动的调峰机组设备的蠕变损伤特征的分析,除了需要设备材料在运行工况温度下的蠕变性能特征外,低于运行温度的蠕变性能曲线也是必不可少的。

依据金属材料在高温持续载荷环境下的微观损伤演变特点,可以将蠕变应变随加载时间的关系曲线划分为阶段Ⅰ、阶段Ⅱ和阶段Ⅲ3个过程区域^[18](图2.1)。

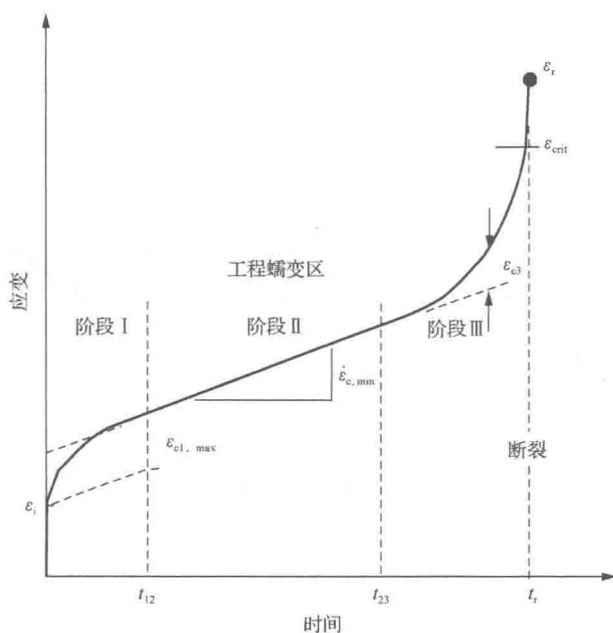


图 2.1 蠕变应变随时间的变化

测试温度: $T=\text{常数}$; 测试应力: $\sigma_0=\text{常数}$

ϵ_i -塑性初应变; $\epsilon_{cl,max}$ -阶段Ⅰ的最大应变; $\dot{\epsilon}_{c,min}$ -最小蠕变速率;

ϵ_{c3} -阶段Ⅲ应变; ϵ_{crit} -临界应变; ϵ_r -断裂应变; t_r -断裂时间

蠕变特性可以通过唯真模型和本构模型描述。唯真模型是将恒定温度和恒定应力下的蠕变特性采用数学方法从现象上进行了描述。本构模型是基于非常复杂的本构关系,将材料形变、强化(软化)特征以及损伤演变耦合于一体。因此模型中所涉及的参数较多,模型建立和系数的确定较为复杂。唯真模型使用简单,且能够较为准确地预测蠕变失效寿命,通常在机组设计和设备监控中所采用。综合考虑蠕变应变速率随蠕变之间的关系和蠕变速率与加载时间之间的关系,可以得出最小蠕变速率与所加载应力之间的关系^[19](图 2.2)。由此可见,蠕变曲线次级区域(图 2.1 中阶段 II 过程区域)中的蠕变速率 $\dot{\epsilon}_{c,\min}$,即最小蠕变速率是唯真蠕变模型中一个非常重要的参数。由于在曲线次级区域中,材料随时间的强化过程与本身受热回复过程达到平衡状态,因此蠕变速率达到最小值。

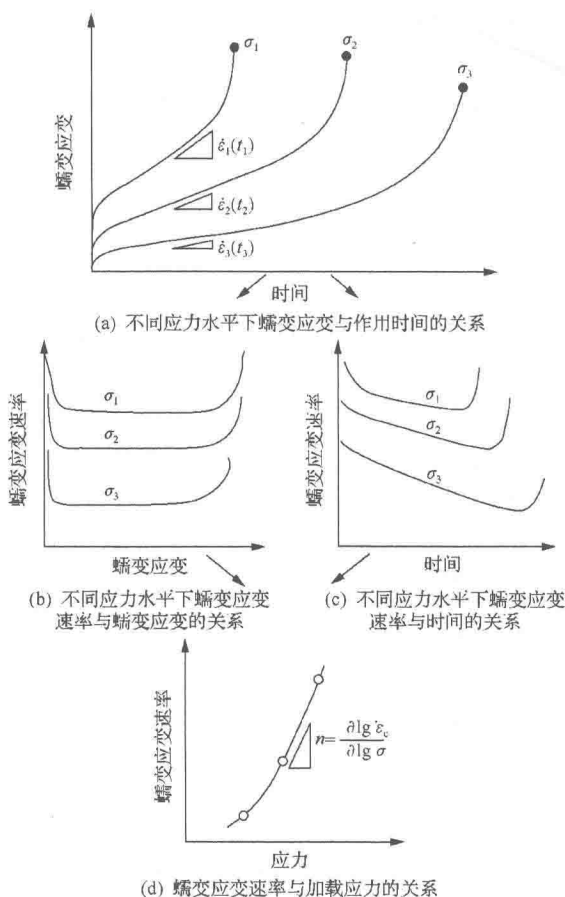


图 2.2 最小蠕变速率与所加载应力之间的关系推导

温度 T = 常量; 应力 $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$

Norton 在 1929 年提出最小蠕变速率与所加载恒定应力之间的关系^[20]:

$$\dot{\varepsilon}_{c,\min} = K \cdot \sigma^n \quad (2.1)$$

式中, $\dot{\varepsilon}_{c,\min}$ 为最小蠕变速率; σ 为加载应力; K 和 n 为与温度有关的材料参数。文献[21]、[22]指出, 应力指数 n 代表了蠕变变形机理。应力指数为 4~7 时为位错蠕变; 应力指数为 1~2 时为延晶蠕变损伤。在加载应力很小或蠕变速率很低的时候, 有可能出现应力指数约为 1 的状态, 此时为扩散蠕变^[17,22,23]。Norton 关系式(式(2.1))是基于最小蠕变速率所建立, 它仅适用于描述蠕变曲线上的阶段 II 区域。但由于它简单易用, 常用于评估设备部件蠕变变形、应力再分配及应力松弛。设备机组在实际运行时由于载荷波动等因素温度不能保持恒定, 而 Norton 关系式是建立在与温度相关的恒定参数的基础之上的, 所以它不能直接用于机组设备蠕变变形的描述。由此可以将蠕变应变 ε_c 描述为^[21]

$$\varepsilon_c = f_1(\sigma)f_2(t) \quad (2.2)$$

式中, ε_c 为蠕变应变; $f_1(\sigma)$ 为与应力相关的函数; $f_2(t)$ 为与时间相关的函数。试验所得蠕变曲线具有幂指数形式的特征。常见的描述上述应力相关的函数有 McVetty 函数^[24]:

$$f_1(\sigma) = A \sin \left(h \frac{\sigma}{\sigma_0} \right) \quad (2.3)$$

Garofalo 函数^[25]:

$$f_1(\sigma) = A \left[\sin \left(h \frac{\sigma}{\sigma_0} \right) \right]^m \quad (2.4)$$

式中, A 、 σ_0 和 m 均为常数; σ 为应力。为了能够描述蠕变曲线的更多阶段, 将仅与应力相关的方程进一步扩展到与时间相关的函数形式。比较常用的与时间相关的函数有 Bailey 方程^[26]:

$$f_2(t) = F \cdot t^m \quad (2.5)$$

Grahm-Walles 方程^[27]:

$$f_2(t) = \sum a_i \cdot t^{n_i} \quad (2.6)$$

Grofalo 方程^[25]:

$$f_2(t) = \Theta_1(1 - e^{-\Theta_2 t}) + \dot{\varepsilon}_{c,\min} \cdot t \quad (2.7)$$

式中, t 为时间; Θ 为 Θ 函数; $\dot{\varepsilon}_{c,\min}$ 为最小蠕变应变速率; F 、 n 和 m 均为常数。

将式 (2.2) 进一步扩充到与温度相关的形式^[21]:

$$\varepsilon_c = f_1(\sigma) \cdot f_2(t) \cdot f_3(T) \quad (2.8)$$

将与应力相关的函数、与时间相关的函数及与温度相关的函数相结合组成新的蠕变描述方法, 可以很好地重现在一定的温度与应力下多个过程区域的蠕变曲线特征, 例如可以同时描述蠕变曲线阶段 I 和阶段 II 过程区域的 Norton-Bailey 方程^[26]:

$$\varepsilon_c = K \cdot \sigma^n \cdot t^m \quad (2.9)$$

式中, K 、 n 和 m 为某一温度下的材料常数; σ 、 t 分别为加载应力和时间。Norton-Bailey 方程由于仅含 3 个常数, 因此被广泛应用于机组设备材料蠕变性能的分析。如果更加完整准确的描述蠕变曲线 3 个过程区域, 则需要设置更多的描述参数。如将式 (2.7) 扩展为^[28]

$$\varepsilon_c = \varepsilon_1 + \Theta_1(1 - e^{-\Theta_2 t}) + \Theta_3(e^{\Theta_4 t} - 1) \quad (2.10)$$

式中, Θ_1 、 Θ_2 、 Θ_3 和 Θ_4 分别为与应力和温度相关的函数, 包含 20 多个参数。这些参数的确定不仅需要大量的蠕变表征试验^[21], 而且参数值的确定比较复杂和困难, 因此在当前机组设备的设计中很少使用。开发简单高效的参数确定方法, 是将蠕变描述理论推广应用的重要桥梁。

对于先进的超超临界机组的调峰工况, 掌握设备材料在低于运行温度环境下的蠕变特征很有必要。由于耐热钢材料在受压与受拉载荷下的蠕变特征没有十分显著的差异(图 2.3), 因此蠕变特征的描述主要以受拉载荷下的蠕变试验为基础。先进机组设备典型耐热钢在不同温度环境下所测得的蠕变曲线如图 2.4 所示, 图中明显地反映了蠕变变形快速增长的阶段 I 和稳定增长的阶段 II 的特征。由于设备设计中通常不考虑趋于断裂前快速增长的蠕变阶段 III, 因此常选用 Norton-Bailey 方程(式 (2.9))描述蠕变特征(图 2.5)。

Norton-Bailey 方程中不直接体现温度相关项，而是将温度影响隐含在材料参数 K 、 m 和 n 中。参数的确定需要考虑其随温度单调递增的物理意义。图 2.5 中分别给出以上三个参数随温度的单调变化关系，以有利于节点中间温度参数的内插取值。除此之外，在双对数坐标下，Norton-Bailey 方程的描述是以参数 m 为斜率的直线束。

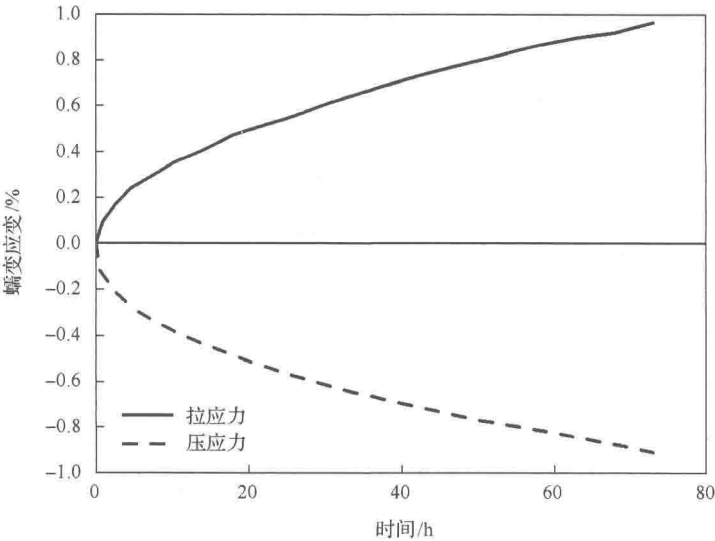
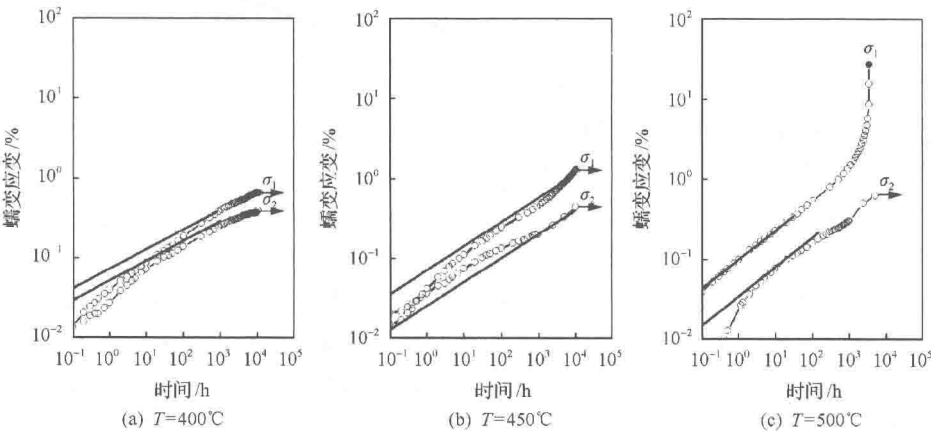


图 2.3 拉应力和压应力作用下的蠕变曲线
材料: 2Cr; 温度: $T=550^{\circ}\text{C}$; 应力: $\sigma_0=314\text{MPa}$



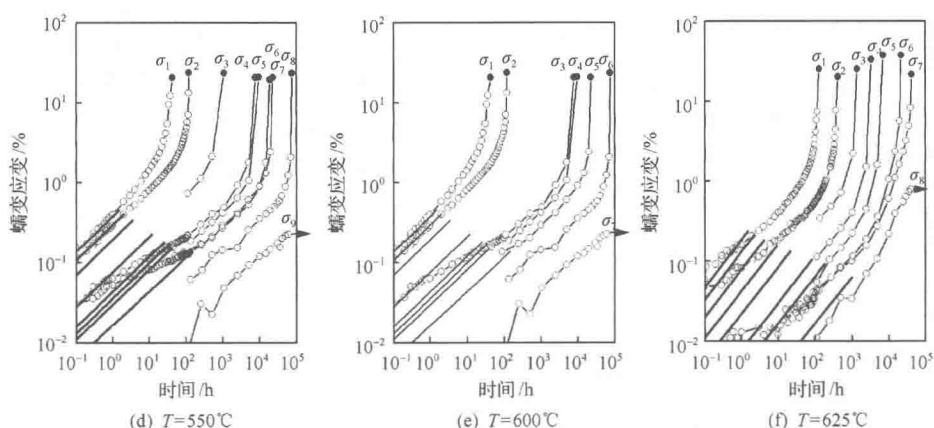


图 2.4 拉应力和压应力作用下的蠕变曲线(材料: 10Cr)

$\sigma_1 \sim \sigma_9$ 为加载的不同应力水平, $\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_9$; —○— 试验值; — Norton-Bailey 拟合

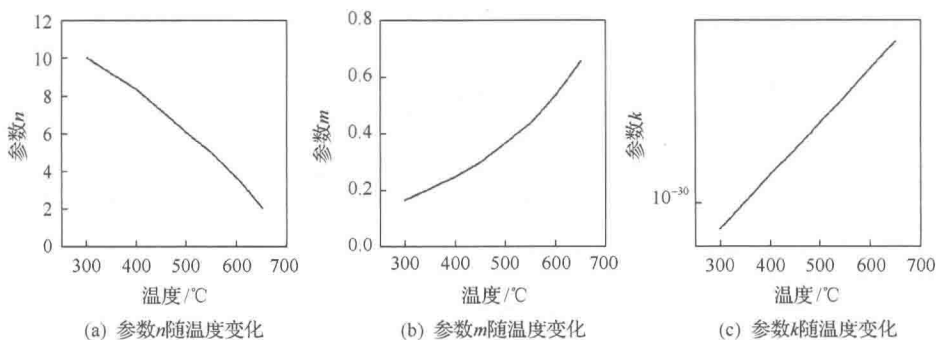


图 2.5 Norton-Bailey 参数随温度的变化(材料: 10Cr)

在高温运行工况下, 与承受恒定应力载荷而产生蠕变形变的部件类似, 设备的某些零部件(例如螺栓)由于设计需要总形变受到约束, 其承受的应力会随时间的增长发生松弛。松弛过程中, 在保持总形变恒定的情况下, 应力会随塑性形变的增加而降低; 蠕变过程中, 在应力保持恒定的情况下, 塑性形变会随时间而增加。高温蠕变与高温松弛虽表现为两种不同的宏观现象, 但会引起设备材料相同的微观损伤机理, 所以在工程中通常使用蠕变试验所获得蠕变曲线来分析设备材料的应力松弛特性。应力松弛过程可近似等效为多个微小时间段蠕变累积引起的应力变化(图 2.6(a))。使用应力恒定的蠕变