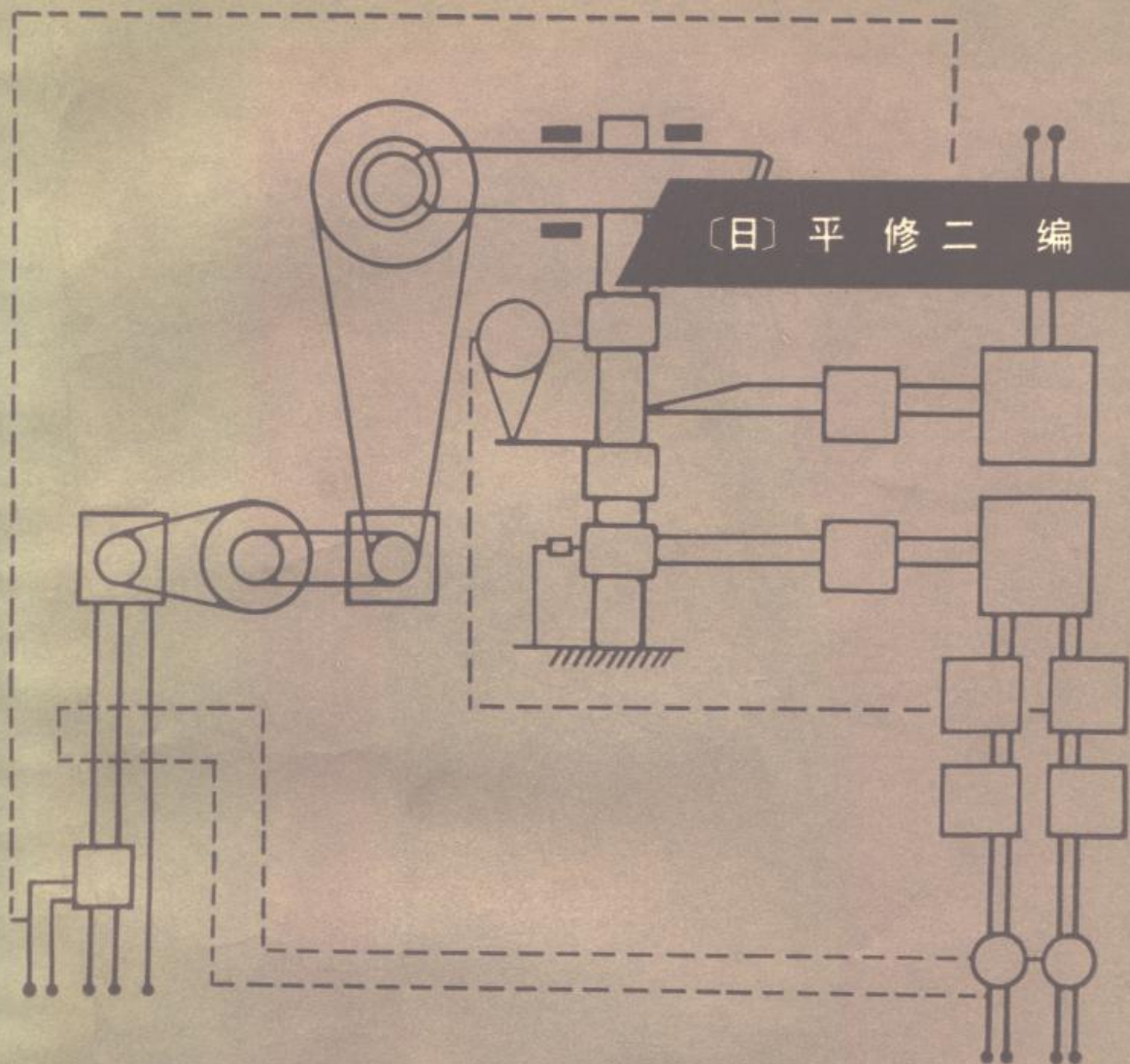


〔日〕 平 修 二 编



金属材料的高温强度

理论·设计

金属材料的高温强度 理论·设计

〔日〕平 修二 编

郭廷玮 李安定 徐介平 译

梁振和 张质贤 校

科学出版社

内 容 简 介

本书从论述金属的蠕变强度入手,介绍了蠕变的金属物理,影响蠕变强度的各种因素,各种材料的蠕变强度,着重阐明了一维和多维应力下的蠕变强度,交变应力、变动温度下的蠕变以及动态蠕变,特殊条件下和特殊材料的蠕变,并对松弛、高温疲劳、热疲劳、高温抗拉强度特性作了充分的论述。

本书可供动力、机械、化工、冶金等方面从事高温结构研究、设计、制造的科研技术人员阅读,以及大专院校有关专业高年级学生和研究生参考。

执 笔 者

平修二 田中吉之助 三好荣次 山本俊二 大南正瑛
小寺泽良一 铃木房幸 佐佐木良一 大谷隆一

平 修二 编

理論・設計

金属材料の高温強度

養賢堂, 1968

金属材料の高温強度

理論・設計

〔日〕平 修二 编

郭廷玮 李安定 徐介平 译

梁振和 张质贤 校

责任编辑 顾锦梗

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1983 年 7 月 第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1983 年 7 月 第一次印刷 印张: 17 1/4

印数: 0001—7,800 字数: 449,000

统一书号: 15031·507

本社书号: 3154·15—2

定价: 3.20 元

译 序

随着原子动力、火箭技术、高速飞机、燃汽轮机以及高温高压化学反应装置的飞速发展,考虑高温强度因素进行结构设计日益重要,为此,许多国家的科学工作者都对金属材料的高温强度理论进行了大量的研究工作。本书编者平修二(日本材料学会高温强度委员会委员长)等从事高温强度研究多年,他们的有关热疲劳和高温疲劳等方面的许多优秀研究报告,在世界上颇有声誉。本书就是根据他们的研究成果,广泛地搜集其它国家在这一领域的成果和资料,系统而概括地总结了金属材料的蠕变、松弛、高温疲劳、热疲劳以及高温抗拉强度特性等理论编成的,是一本关于金属材料高温强度理论的专著。

本书从论述蠕变强度入手,详细地介绍了蠕变的金属物理,影响蠕变强度的各种因素,各种材料的蠕变强度以及蠕变数据的整理和处理方法,着重阐明了一维和多维应力下的蠕变强度,交变应力、变动温度下的蠕变以及动态蠕变,特殊条件下和特殊材料的蠕变,并对松弛、高温疲劳、热疲劳、高温抗拉强度特性以及它们与蠕变的关系作了充分的论述。对于每一高温强度问题,本书一般都概括地介绍了比较成熟的几种理论、实验结果、各种理论的优缺点及其比较,有的还用实例加以说明,这是本书的特点。因此,本书不仅对从事金属材料高温强度理论的研究人员,而且对从事各种高温结构的设计人员均有参考价值。

由于时间比较匆促,加上译者水平有限,译文中难免有疏漏之处,谨请读者批评指正。

译者

原 序

关于金属材料高温强度的知识,在原动机和化学反应装置的设计、制造以及其它工业部门,在处理日常所遇到的许多技术问题中,是普遍需用的基本知识。编者在着手研究这一问题之初,首先对金属材料的蠕变发生了兴趣,不久认识到,蠕变特性只是有关强度特性之一,无论从性能或从实用方面来看,它与松弛*、高温疲劳、热疲劳以及高温抗拉强度特性也彼此相关,有必要将这些问题综合起来加以考虑。十余年前,曾梦想出现一部概括所有这些问题的著作。但是,有关这些强度特性的研究,正像笔者在“我国蠕变研究十年的进展”** 一文中指出的,在我国非常迟缓,在国外也尚未达到有组织的研究阶段,所以,期望出现这样的读物比较困难。在恩师——京都大学名誉教授西原利夫先生的指导下,编者决心在上述认识的基础上,进一步推动金属材料高温强度的综合研究工作。实在感到幸运的是,这一工作得到了许多出色的合作者。本书的笔者长期相互协作,分别承担了各个项目的调查研究工作,并且记述了专心研究的成果,作为长期合作研究的成果,使这本书出版问世,是编者最大的喜悦。

这方面的学问、技术,随着时代的要求而日新月异。可以预料,本书的内容,几年之后,亦须加以更新。但作为该书的最初版本,如能受到人们重视,编者将感到不胜荣幸。

另外,作为本书的姊妹篇,《金属材料的高温强度资料集》的第一篇——低合金钢;第二篇——不锈钢,已由养贤堂出版。第三篇——碳钢,铸铁,焊接材料等预计也将陆续发行。这些资料被收集在日本学术振兴会第 129 届委员会第三分科会编的《高温强度》

* 松弛,也称弛豫。——译者注

** 详见本书日文原著(ii)页“クリープ研究十年の歩み”。——译者注

(调查主任：平修二)中，在本书所述各问题付诸实际应用时，它提供了特定材料高温强度的具体数据。

本书的出版，与上述资料集一样，皆系养贤堂及川锐雄先生对高温强度给予了充分理解的结果，在此深表谢意。

平 修二

科学出版社

材料科学及测试技术丛书

电子衍射图在晶体学中的应用	郭可信、叶恒强、吴玉琨
金属材料热力学	徐祖耀
马氏体相变与马氏体	徐祖耀
现代功能材料导论	温树林编著 严东生等审阅
钢中的非金属夹杂物	李代锺
光学金相摄影技术	田白玉、杨体强

* * * * *

编辑委员会

主 编:	李 薰		
副 主 编:	柯 俊	颜鸣皋	
编辑委员:	冯 端	刘嘉禾	孙珍宝
	许顺生	严东生	萧纪美
	李恒德	范 棠	柯 成
	钱人元	郭可信	郭慕孙
	葛庭燧		章守华
			师昌绪
			沈华生
			徐祖耀

目 录

第一章 蠕变强度和试验方法	1
§ 1.1 蠕变.....	1
§ 1.2 蠕变强度及其求法.....	4
§ 1.2.1 蠕变极限.....	5
§ 1.2.2 蠕变断裂强度.....	7
§ 1.3 蠕变试验装置和试验方法.....	8
参考文献.....	14
第二章 蠕变现象	16
§ 2.1 蠕变曲线的表示.....	16
§ 2.1.1 应变及应变速度与时间的关系.....	16
§ 2.1.2 应变及应变速度与温度的关系.....	17
§ 2.1.3 应变及应变速度与应力的关系.....	17
§ 2.1.4 简单通式.....	17
§ 2.2 最小蠕变速度和断裂时间.....	20
§ 2.3 应力、温度、断裂时间.....	21
§ 2.4 固态方程及其它状态式.....	23
§ 2.4.1 固态方程.....	24
§ 2.4.2 辅助变量法.....	25
§ 2.4.3 延迟理论.....	26
§ 2.4.4 其它理论.....	26
参考文献.....	27
第三章 蠕变的金属物理	28
§ 3.1 序言.....	28
§ 3.2 纯金属的蠕变.....	30
§ 3.2.1 蠕变的各种机理占有的比例.....	30
§ 3.2.2 蠕变中的组织变化.....	31

(1) 变形的不均匀性	32
(2) 晶界的性质	33
(3) 亚晶粒的形成	36
§ 3.3 用位错理论解释蠕变现象	38
§ 3.3.1 加工硬化	38
(1) 位错交互作用的应力	38
(2) 位错交截引起的硬化	39
(3) 科特雷尔-洛默不动位错引起的硬化	39
§ 3.3.2 应力下的回复现象	39
(1) 上升运动	40
(2) 交叉滑移	41
§ 3.3.3 过渡蠕变理论	41
(1) 消耗理论	42
(2) 安德雷德蠕变	44
§ 3.3.4 稳态蠕变理论	45
§ 3.4 合金的蠕变	46
§ 3.4.1 高温下固溶原子的影响	46
(1) 科特雷尔效应	47
(2) 堆垛层错	48
(3) 莫特和纳巴罗理论	48
(4) 有序点阵中的硬化	48
§ 3.4.2 多相合金的蠕变	49
(1) 莫特和纳巴罗的硬化理论	49
(2) 奥罗万的硬化理论	51
(3) 费希尔、哈特、普赖的理论	51
(4) 其它分散析出物的影响	52
§ 3.5 第三阶段蠕变	52
参考文献	54
第四章 蠕变强度和金属组织	56
§ 4.1 影响蠕变强度的各种因素	56
§ 4.1.1 晶体结构	56
§ 4.1.2 晶粒大小	58

§ 4.1.3 固溶元素	60
(1) 对扩散常数的影响	61
(2) 与位错弹性的相互作用	61
(3) 科特雷尔效应	63
(4) 关于堆垛层错能的影响	65
(5) 化学相互作用(铃木效应)	66
(6) 短程有序性	67
§ 4.1.4 析出物	67
(1) 析出硬化型合金和分散强化型合金	68
(2) 析出合金的蠕变	71
(3) 析出物的粗化	73
(4) 晶界的析出物	74
§ 4.1.5 热处理	75
§ 4.1.6 冷加工	77
§ 4.2 各种材料的蠕变强度	78
§ 4.2.1 低合金钢	78
§ 4.2.2 不锈钢和耐热合金	92
(1) 12~27Cr 钢	92
(2) 奥氏体不锈钢	94
(3) 耐热合金	97
§ 4.2.3 碳钢	107
§ 4.2.4 非铁金属	113
(1) 铅和铅合金	114
(2) 锌和锌合金	114
(3) 锡和锡合金	114
(4) 镁和镁合金	115
(5) 铝和铝合金	117
(6) 铜和铜合金	119
(7) 钛、锆及其合金	123
参考文献	124
第五章 蠕变数据的整理和处理方法	133
§ 5.1 蠕变数据的整理方法和经验公式	133

§ 5.1.1	蠕变曲线	133
§ 5.1.2	应变速度-时间曲线	134
§ 5.1.3	应变-应变速度曲线	135
§ 5.1.4	过渡蠕变速度-稳态蠕变速度曲线	136
§ 5.1.5	稳态蠕变速度(最小蠕变速度)-断裂时间曲线	138
§ 5.1.6	蠕变强度-温度曲线	138
§ 5.1.7	设计数据图	139
§ 5.2	蠕变数据的外推	140
§ 5.2.1	设计数据图法	140
§ 5.2.2	拉森-米勒法	141
§ 5.2.3	曼森-哈弗尔特法	144
§ 5.2.4	多恩法	146
§ 5.3	蠕变资料	147
	参考文献	148
第六章	松弛	150
§ 6.1	概论	150
§ 6.2	松弛的试验方法	153
§ 6.2.1	松弛试验机	153
	(1) 纳戴伊和博伊德(Boyd)的试验机	153
	(2) 国外其他类型的试验机	154
	(3) 平, 铃木等的试验机	154
	(4) 莫歇尔(Mochel)的松弛试验机	158
§ 6.2.2	降压试验(step down test)	158
§ 6.2.3	松弛试验标准	160
§ 6.3	松弛特性	162
§ 6.3.1	松弛曲线	162
	(1) 初始加载速度的影响	164
	(2) 加热方法的影响	165
§ 6.3.2	松弛的塑性应变速度	166
§ 6.3.3	松弛和蠕变的相互关系	170
§ 6.4	松弛的残余应力分析	173
§ 6.4.1	基于蠕变资料的分析	173

(1) 以稳态蠕变为对象的分析	173
(2) 以过渡蠕变为对象的分析	175
§ 6.4.2 基于松弛特性的分析	178
(1) 忽略第一阶段松弛的情况	178
(2) 包括第一阶段松弛在内的情况	179
§ 6.5 再紧固对松弛的影响	179
§ 6.5.1 多次再紧固后的松弛	180
§ 6.5.2 简单拉伸松弛与再紧固后的松弛的相互关系	186
§ 6.6 变截面棒的松弛	190
§ 6.6.1 变截面棒的等效应力	190
(1) 基于应变硬化理论的等效应力	190
(2) 基于时间硬化理论的等效应力	194
§ 6.6.2 阶梯形棒的松弛	196
(1) 等效应力和平均应力	196
(2) 不考虑阶梯形棒大直径部分蠕变的情况	198
§ 6.7 动态松弛	202
§ 6.7.1 依赖循环数的动态松弛	202
§ 6.7.2 依赖时间的动态松弛	204
§ 6.8 多维应力下的松弛	210
§ 6.8.1 松弛条件	210
§ 6.8.2 一维拉伸松弛和拉伸-扭转复合应力松弛的相互关系	212
(1) 等效总应变恒定的情况	212
(2) 轴向总应变保持恒定的情况	214
(3) 总剪应变保持恒定的情况	215
§ 6.9 松弛的实际问题	217
§ 6.9.1 高温螺栓接合	217
(1) 初应力对松弛的影响	218
(2) 螺母、垫圈和法兰对松弛的影响	218
§ 6.9.2 管道的伸缩环	221
§ 6.9.3 热配压力的松弛	223
§ 6.9.4 消除应力退火	226

§ 6.10	各种材料的高温松弛性质	227
§ 6.11	常温下预应力混凝土钢丝的松弛	235
§ 6.11.1	预处理对松弛的影响	236
§ 6.11.2	预应力混凝土钢丝的长时间松弛	237
§ 6.11.3	预应力混凝土钢丝松弛和蠕变的关系	240
§ 6.11.4	拉伸对松弛的影响	244
§ 6.11.5	弯曲预应力混凝土钢丝的松弛	247
	参考文献	249
第七章	一维和多维应力下的蠕变强度	251
§ 7.1	一维应力下的蠕变强度	251
§ 7.1.1	一维应力下蠕变中的应力-应变速度关系	251
	(1) 稳态蠕变速度	251
	(2) 时间硬化和应变硬化	252
§ 7.1.2	弯曲蠕变	253
§ 7.1.3	圆棒的扭转蠕变	257
§ 7.2	多维应力下蠕变变形的理论基础	259
§ 7.2.1	基本法则	260
	(1) 基本假定	260
	(2) 等效应力、等效蠕变应变速度、等效蠕变应变	261
	(3) 流动法则	262
	(4) 应力-蠕变应变速度关系	263
§ 7.2.2	各种多维蠕变理论的特征	264
§ 7.3	关于多维应力下的蠕变实验	269
§ 7.3.1	与多维蠕变理论有关的基本实验	269
	(1) 诺顿、索德贝尔格的实验	269
	(2) 马林、福贝尔 (Faupel)、赫 (Hu) 的实验	269
	(3) 约翰逊的实验	269
	(4) 肯尼迪、哈姆斯(Harms)、道格拉斯(Douglas)的实验	271
§ 7.3.2	多维应力下的蠕变断裂	274
	(1) 西格弗里德 (Siegfried) 的研究	275
	(2) 约翰逊等的研究	275
	(3) 沃里斯 (Voorhees) 等的研究	276

(4) 肯尼迪等的研究	277
(5) 库伊斯特拉 (Kooistra) 等的研究	278
(6) 罗氏等的研究	278
(7) 平氏等的研究	280
§ 7.3.3 非稳态应力下的多维蠕变	280
(1) 约翰逊等的研究	281
(2) 平氏等的研究	282
(3) 大南等的研究	284
§ 7.4 多维应力下蠕变的实例	284
§ 7.4.1 内压圆筒	284
(1) 内压圆筒的蠕变变形	285
(2) 内压厚壁圆筒的应力分布	300
(3) 内压圆筒的蠕变断裂及高温高压管的设计公式	304
(4) 径向有温度梯度时内压圆筒的蠕变	309
(5) 加轴向载荷时内压圆筒的蠕变	311
(6) 断续施加循环变动内压时圆筒的蠕变	312
§ 7.4.2 旋转圆板	314
§ 7.4.3 其它	316
(1) 圆板的蠕变弯曲	316
(2) 法兰盘的蠕变	319
(3) 铆接接头	320
参考文献	323
第八章 变动应力、变动温度下的蠕变	327
§ 8.1 概述	327
§ 8.2 蠕变中应力和温度变动时的瞬变现象 (蠕变中应 力和温度经历的影响)	328
(1) 固态力学方程理论	329
(2) 拉伯特诺夫理论	330
(3) 蠕变回复理论	332
(4) 蠕变回复理论的推广	333
(5) 肯尼迪理论	338
(6) 多恩理论	339

(7) 成核理论	340
(8) 应变回复理论	341
(9) 寿命消耗率理论	342
(10) 其它	343
§ 8.3 根据静态蠕变强度估算变动应力和变动温度下的蠕变强度	344
§ 8.3.1 变动应力下的蠕变(温度恒定)	344
(1) 间歇载荷 (Intermittent stressing)	347
(2) 阶式载荷 (Step-stressing)	350
(3) 周期性载荷 (Cyclic stressing)	351
§ 8.3.2 变动温度下的蠕变(载荷应力恒定)	352
(1) 固态力学方程法(等效恒定温度法)	353
(2) 多恩法	358
(3) 鲁宾逊法	358
(4) 史密斯-豪斯顿法	358
(5) K 因子法	359
§ 8.3.3 应力和温度同时变动时的蠕变	360
§ 8.4 根据静态蠕变断裂寿命估算变动应力、变动温度下的蠕变断裂寿命	362
§ 8.5 变动温度下蠕变所引起的材质变化	369
§ 8.6 结束语	371
参考文献	372
第九章 动态蠕变和高温疲劳	376
§ 9.1 概述	376
§ 9.2 试验装置	377
§ 9.3 动态蠕变和高温疲劳试验结果的整理方法	380
§ 9.4 典型数据和起影响的各种因素	382
§ 9.4.1 动态蠕变曲线	382
§ 9.4.2 时间强度线图上的典型倾向	384
§ 9.4.3 应力循环速度的影响	386
§ 9.4.4 断裂形式	393
§ 9.4.5 缺口效应	394

§ 9.4.6 组织回复的影响和其它	397
§ 9.5 动态蠕变和高温疲劳强度的估算方法	397
§ 9.5.1 动态蠕变断裂和高温疲劳	398
(1) 动态蠕变断裂	398
(2) 高温疲劳断裂	400
§ 9.5.2 动态蠕变	404
§ 9.5.3 拉伸反复弯曲动态蠕变和断裂	407
§ 9.5.4 多维动态蠕变	410
参考文献	413
第十章 热疲劳	415
§ 10.1 概述	415
§ 10.2 热疲劳试验装置和热疲劳试验结果的整理方法	416
§ 10.2.1 交变热疲劳试验及其结果	416
§ 10.2.2 恒应变高温疲劳试验及其结果	426
§ 10.3 影响热疲劳强度的各种因素	432
§ 10.3.1 温度循环和材料的韧性	432
§ 10.3.2 应变集中	436
§ 10.3.3 循环速度	440
§ 10.3.4 预加工	441
§ 10.3.5 晶粒大小,非金属杂质,热处理及气氛	442
§ 10.3.6 试样形状	443
§ 10.3.7 试验机的刚度	444
§ 10.4 根据其它高温强度性质来估算热疲劳强度	445
§ 10.4.1 与恒应变高温疲劳强度的关系	445
§ 10.4.2 与静态拉伸强度的关系	449
§ 10.4.3 与热冲击强度的关系	450
§ 10.5 实际工作条件下的热疲劳强度	452
§ 10.5.1 与机械应力叠加时的热疲劳强度	452
(1) 有静态平均应力时的热疲劳强度	460
(2) 与交变机械应力叠加时的热疲劳强度	563
(3) 与局部拉伸机械应力叠加的热疲劳强度	464

§ 10.5.2 多维热应力下的热疲劳强度	465
(1) 温度分布	467
(2) 热应变范围	468
(3) 发生龟裂的循环次数	470
(4) 热应变约束率	471
§ 10.6 热疲劳断裂的防御措施	475
§ 10.7 结束语	478
参考文献	479
第十一章 特殊条件下和特殊材料的蠕变	483
§ 11.1 切口蠕变断裂和特殊蠕变	483
§ 11.1.1 切口强化和切口弱化	483
§ 11.1.2 切口形状和尺寸的影响	483
§ 11.1.3 热处理、析出硬化对切口断裂强度的影响	486
§ 11.1.4 涡轮叶片嵌入部的强度	488
§ 11.1.5 压缩蠕变, 支承蠕变, 剪切蠕变	490
§ 11.2 焊接区的蠕变断裂	490
§ 11.2.1 熔焊区的冶金学问题	490
§ 11.2.2 熔敷钢的蠕变断裂特性	491
§ 11.2.3 焊接接头的蠕变断裂特性	494
§ 11.3 特殊气氛中的蠕变	497
§ 11.3.1 在 CO、CO ₂ 、N ₂ 、H ₂ 、O ₂ 、Ar 中的蠕变	499
§ 11.3.2 真空中的蠕变特性	501
§ 11.3.3 高温高压氢气中的蠕变	502
§ 11.3.4 在 Na 中的蠕变	504
§ 11.4 耐热合金和高熔点合金的蠕变强度	505
§ 11.4.1 Ni 基耐热合金	505
§ 11.4.2 Co 基耐热合金	506
§ 11.4.3 高熔点金属及其合金的蠕变强度	508
参考文献	510
第十二章 钢的高温拉伸特性	512
§ 12.1 设计应力的选定	512
§ 12.2 关于钢铁材料高温拉伸试验方法的标准	515