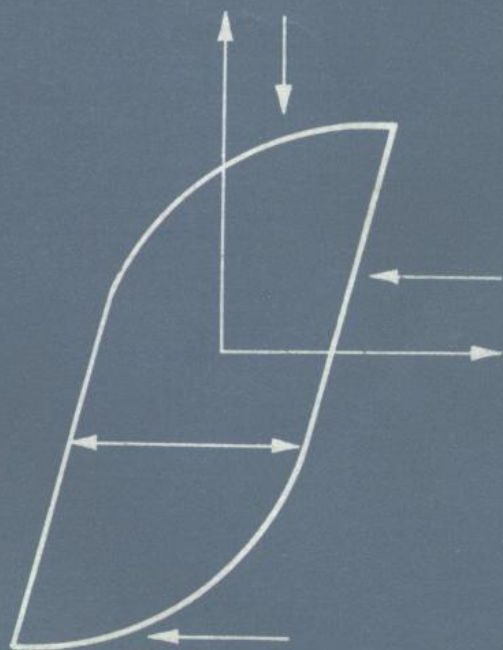


材料科学丛书

金属高温强度及试验

上海科学技术出版社

杨宜科 吴天禄 江先美 朱景鹏 等编著



材料科学丛书

金属高温强度及试验

杨宜科 吴天禄 江先美 朱景鹏等 编著

上海科学技术出版社

《材料科学丛书》

金属高温强度及试验

杨宜科 吴天禄 江先美 朱景鹏等 编著

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 上海商务印刷厂印刷

开本 850×1156 1/32 印张 12.25 字数 317,000

1986年6月第1版 1986年6月第1次印刷

印数 1—3,500

统一书号: 15119·2454 定价: 3.00 元

174-28/13

内 容 提 要

金属高温强度学是一门研究金属材料在高温受载条件下的失效规律的学科。本书全面阐述金属高温强度的宏观规律及有关实验技术,包括高温短时拉伸试验、高温硬度试验、蠕变与持久试验、松弛试验、复杂应力下的蠕变与持久试验、高温疲劳试验、热疲劳试验,以及近期比较活跃的研究领域——高温低周疲劳试验和高温断裂力学等。书中对金属高温强度的微观理论也作了适当介绍,还引述了金属高温强度及寿命试验的统计知识。本书系统性强,理论联系实际,内容深入浅出。

本书主要读者对象是:金属材料强度科研及试验人员,金属构件强度设计人员,以及高等院校有关专业师生。

《材料科学丛书》序

无论在发展农业、工业、国防和科学技术方面,还是在人民生活方面,材料都是不可缺少的物质基础。材料的品种、数量和质量无疑是国家现代化程度的标志之一。随着材料的广泛生产和研究工作的不断深入,以及与材料有关的基础学科的日益发展,对材料的内在规律有了进一步了解,对各类材料的共性初步得到了科学的抽象,从而诞生了“材料科学”这个新的学科领域。

材料科学主要研究材料的组分、结构与性能之间的相互关系和变化规律,它是介于基础科学与应用科学之间的一门应用基础科学,与物理、化学、化工、电子、冶金、陶瓷等学科相互交叉、彼此渗透。热力学、动力学、固体物理、固体化学、化学物理等基础学科为材料科学提供理论基础,而材料科学又为应用科学提供发展新材料、新工艺和新技术的途径。

从当前来看,材料科学的发展大致有下列几方面的趋势:

(1) 高分子材料原料丰富、性能优良,在结构材料中所占的位置日益重要。塑料、合成橡胶和合成纤维比其他传统材料将有更大的发展。

(2) 功能材料显示广阔的发展前景。半导体的广泛应用,集成电路的发展,红外、激光和超导材料的发现和应用,使功能材料犹如异军突起,建立奇功。

(3) 在新能源材料方面,随着太阳能的利用,磁流体发电等的进展,出现了各种换能和储能材料,并已普遍受到重视。

(4) 对结构材料和耐磨、耐蚀等材料提出更高的要求,包括严酷的使用条件、更长的使用寿命等。

(5) 复合材料、定向结晶材料、钢化陶瓷、定向石墨以及各种类型的表面处理与涂层的利用,使材料的效能进一步得到发挥。

(6) 探索材料在极端条件下的性能,例如玻璃态金属、超低温下的金属及金属氢都具有优越的性能。

(7) 改进制备工艺,提高质量,改进设计,更有效地使用材料。

(8) 对材料科学的基础研究趋向于更加深入和细致。尤其在表面,非晶态,原子象,固态中的杂质与缺陷,一维与二维结构,非平衡态,相变的微观机制,变形、断裂和磨损等的宏观规律和微观过程以及点阵结构的稳定性等领域,探索性研究正日益活跃。

人们期望,对材料基本规律的掌握将有助于按预定性能设计材料的原子或分子组成以及结构形态等。

我国在1978~1985年科学技术发展规划中把材料科学列为重点之一。我们必须十分重视和大力发展材料科学。

为了及时传播材料科学的基础理论,总结研究成果并扩大其工程应用,以有助于更快、更广泛地提高我国材料科学技术的水平,我们成立了《材料科学丛书》编辑委员会,由上海科学技术出版社出版这套丛书。

本丛书分为金属材料、无机非金属材料和高分子材料三个方面,选题包括材料科学的基础理论,研究方法和测试技术,研究成果,以及实际应用等方面。热忱地期望我国广大科学工作者,共同策进本丛书的编辑、出版工作,努力为我国早日实现四个现代化贡献力量。

《材料科学丛书》编辑委员会

一九七九年十二月

《材料科学丛书》编辑委员会

金属材料方面

主任委员 周志宏

无机非金属材料方面

主任委员 严东生

高分子材料方面

主任委员 钱宝钧

委员(以姓氏笔划为序)

马龙翔 王之玺
王启东 田庚锡
师昌绪 孙珍宝
许顺生 李恒德
汪 显 沈华生
吴自良 陈新民
杜鹤桂 张文奇
张沛霖 邹元炳
邵象华 周行健
周宗祥 周惠久
郁国城 林栋梁
柯 俊 胡为柏
钱临照 徐采栋
徐祖耀 郭可信
顾翼东 黄培云
傅元庆 童光照
葛庭燧 谭庆麟
魏寿昆

委员(以姓氏笔划为序)

丁子上
干福熹
江作昭
苏 锵
吴中伟
袁润章
盛绪敏
黄蕴元
程继健

委员(以姓氏笔划为序)

于 翹
王孟钟
方柏容
孙书棋
吴人洁
吴祥龙
李世璠
范 棠
张承琦
姚锡福
徐 僊
钱人元
郭钟福

前 言

随着动力、航空、化工及冶金工业的发展,我国金属高温强度领域的试验研究工作已有了很大进展。在这方面从事试验研究工作的同志迫切希望有一本适合国情的系统介绍金属高温强度及试验技术的参考书。在原第一机械工业部系统第三届高温强度学术会议的建议下,由上海发电成套设备设计研究所、东方锅炉厂、上海材料研究所及上海交通大学等四个单位的八位同志共同编写了本书。各章的编写分工如下:

绪论 杨宜科 吴天禄

第一章 黄松怀

第二章 杨忠涛

第三章 吴天禄

第四章 曹锦标

第五章 江先美

第六章 朱景鹏

第七章 凌树森

第八章 朱景鹏

第九章 杨宜科

杨宜科、吴天禄、江先美及朱景鹏作了最后审定。

限于编者水平,本书在内容及观点上都可能存在错误和不足之处,敬希读者批评指正。

编 者

一九八四年十一月

目 录

绪论	1
第一章 高温短时拉伸试验	8
1.1 高温短时拉伸试验	8
1.1.1 拉伸曲线	8
1.1.2 试验设备及规范	11
1.1.3 试样	11
1.2 应力-应变曲线	12
1.2.1 条件应力-应变曲线	12
1.2.2 真实应力-应变曲线	14
1.2.3 修正的真实应力-应变曲线	16
1.3 拉伸性能指标及其测定	17
1.3.1 强度性能指标的测定	17
1.3.1.1 比例极限 σ_p	17
1.3.1.2 弹性极限 σ_e	19
1.3.1.3 屈服极限 σ_s	19
1.3.1.4 条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$	20
1.3.1.5 抗拉强度 σ_b	21
1.3.1.6 断裂强度 S_k	21
1.3.2 塑性指标及其测定	22
1.3.2.1 延伸率 δ	22
1.3.2.2 断面收缩率 ψ	23
1.3.3 刚性指标及其测定	25
1.3.3.1 弹性模量 E	25
1.3.3.2 高温弹性模量测量法	25
1.3.4 塑性强化指标及其测定	27
1.3.4.1 强化系数 D	27
1.3.4.2 强度、塑性、韧性与强化系数之间的关系	27
1.3.4.3 形变强化指数 n	28
1.4 应力、应变与温度的关系	30

1.4.1	应力-温度曲线	30
1.4.2	应变-温度曲线	32
1.5	影响试验结果的因素	33
1.5.1	应变速度及加载时间的影响	33
1.5.2	应变速度对强度-温度曲线的影响	34
1.5.3	应变速度对材料塑性的影响	37
1.5.4	试验温度的影响	37
1.5.5	晶粒度的影响	38
1.5.6	位错密度的影响	38
1.6	试验结果的统计处理	39
1.7	高温快速拉伸试验	47
	参考文献	47
第二章	高温硬度试验	48
2.1	试验方法	48
2.1.1	布氏硬度试验法	48
2.1.2	维氏硬度试验法	51
2.1.3	克努普(Knoop)硬度试验法	52
2.1.4	显微硬度试验法	53
2.1.5	相互压入法	55
2.1.6	回跳法	56
2.2	金属高温硬度的一般规律	56
2.2.1	高温硬度与温度的关系	56
2.2.2	高温硬度与保载时间的关系	59
2.3	影响高温硬度的若干因素	60
2.3.1	压头材料的影响	60
2.3.2	压头预热的影响	62
2.3.3	保载时间的影响	62
2.4	高温硬度的应用	62
2.4.1	用高温硬度估算物理性能	62
2.4.2	用高温硬度估算高温短时机械性能	63
2.4.3	用高温硬度估算高温持久强度	65
2.4.4	用高温硬度测定蠕变激活能	70
2.4.5	用高温硬度测定金属同素异晶转变	72

2.4.6	用高温硬度研究金属时效过程	73
2.4.6.1	研究时效动力学	73
2.4.6.2	测定应变时效敏感性	75
2.4.7	高温硬度在热加工中的应用	76
2.4.7.1	在热处理中的应用	76
2.4.7.2	确定工具钢最佳热处理规范及最佳工作温度	77
2.4.8	高温硬度在金属物理研究中的应用	80
2.4.8.1	研究位错的运动	80
2.4.8.2	测定滑移系统的变化	81
	参考文献	83
第三章	蠕变及持久强度	84
3.1	蠕变及蠕变断裂现象	84
3.1.1	蠕变现象的研究	84
3.1.2	蠕变曲线	85
3.1.3	蠕变强度及持久强度	86
3.2	蠕变试验方法	87
3.2.1	蠕变试验规程	87
3.2.2	影响试验结果的因素	88
3.2.2.1	温度的影响	88
3.2.2.2	载荷的影响	90
3.2.2.3	试样受力偏心的影响	91
3.2.2.4	试样尺寸因素的影响	92
3.2.2.5	试样表面氧化的影响	95
3.3	蠕变的经验规律及试验结果的整理	96
3.3.1	蠕变曲线方程的分析	96
3.3.1.1	蠕变的时间律	97
3.3.1.2	蠕变的温度律	99
3.3.1.3	蠕变的应力律	101
3.3.2	稳态蠕变速度与应力之间的关系	101
3.3.3	稳态蠕变速度与温度之间的关系	103
3.3.4	蠕变试验数据的外推	103
3.4	蠕变的结构理论	103
3.5	持久强度试验方法	106
3.5.1	持久强度试验	106
3.5.2	影响试验结果的因素	107

3.5.2.1 温度的影响	107
3.5.2.2 氧化的影响	108
3.5.3 蠕变及持久强度数据的统计分布规律	108
3.6 持久强度试验数据的外推	111
3.6.1 外推方法的发展	111
3.6.2 持久强度数据的外推方法	113
3.6.2.1 解析法	113
3.6.2.2 图解法	120
3.6.3 持久强度外推中的计算方法	123
3.6.3.1 最小二乘法	123
3.6.3.2 回归分析法	124
3.6.3.3 站函数计算法	136
3.6.3.4 统计分布法	139
3.7 蠕变及蠕变断裂过程中金属性能的变化及影响因素	142
3.7.1 组织结构和物理性能的变化	142
3.7.2 组织因素和冶金因素对蠕变的影响	144
3.8 蠕变断裂机制	153
3.8.1 应力集中理论	153
3.8.2 空位聚集理论	154
参考文献	157
第四章 复杂应力下的蠕变和持久强度	159
4.1 概述	159
4.2 材料在纯弯曲和纯扭转时的蠕变	159
4.2.1 高温纯弯曲蠕变试验	159
4.2.1.1 梁的应力分析	159
4.2.1.2 梁的挠度	161
4.2.1.3 弯曲蠕变试验	162
4.2.2 纯扭转蠕变	163
4.3 复杂应力下的蠕变速度方程	165
4.3.1 基本假设	165
4.3.2 蠕变速度方程	167
4.3.3 试验验证	172
4.4 复杂应力状态下的持久强度	173
4.4.1 破坏的控制因素	173

4.4.1.1	Mises 等效应力控制说	173
4.4.1.2	最大主应力控制说	174
4.4.1.3	其他控制说	174
4.4.2	复杂应力状态下的持久强度试验	176
4.4.2.1	小口径管内压持久爆破试验	176
4.4.2.2	确定任意应力状态下的持久强度	179
4.5	缺口试样的蠕变和持久强度试验	180
4.5.1	缺口部位的应力分布	181
4.5.2	缺口敏感性系数	181
4.5.3	影响缺口敏感性的因素	184
4.5.3.1	试验温度的影响	184
4.5.3.2	缺口形状及尺寸的影响	184
4.5.3.3	热处理工艺的影响	186
4.5.4	缺口持久强度试验	186
	参考文献	187
第五章	高温应力松弛	188
5.1	应力松弛现象和松弛曲线	188
5.2	应力松弛理论	190
5.3	应力松弛试验方法	193
5.3.1	拉伸松弛试验	193
5.3.2	弯曲松弛试验	195
5.3.3	螺旋形弹簧松弛试验	199
5.4	各种因素对松弛标准的影响	201
5.4.1	重复加载的影响	201
5.4.2	试样尺寸与形状的影响	202
5.4.3	初应力的影响	206
5.5	应力松弛与蠕变的关系	207
5.6	应力松弛过程中金属的损伤	209
5.7	试验数据的整理与外推	211
	参考文献	211
第六章	高温疲劳	213
6.1	高温疲劳的工程意义	213
6.2	高温疲劳试验	214

6.3 疲劳数据的整理	215
6.3.1 疲劳曲线的绘制及疲劳极限	215
6.3.2 旋转弯曲疲劳极限与拉压疲劳极限的关系	219
6.3.3 疲劳强度与抗拉强度的关系	221
6.4 影响高温疲劳性能的主要因素	222
6.4.1 试验温度的影响	222
6.4.2 频率的影响	223
6.4.3 应力集中的影响	225
6.4.4 平均应力的影响	227
6.4.5 表面状态的影响	228
6.4.6 气氛介质的影响	230
6.5 高温疲劳断裂	233
6.5.1 疲劳裂纹的萌生	233
6.5.2 疲劳裂纹的扩展	234
6.5.3 高温疲劳断口	236
参考文献	241
第七章 高温低周疲劳	242
7.1 高温低周疲劳研究的工程意义	242
7.2 高温低周疲劳的试验方法	243
7.2.1 试样	245
7.2.2 试验设备	246
7.3 高温低周疲劳寿命的估计方法	250
7.3.1 Coffin-Manson 方法	251
7.3.2 通用斜率法	252
7.3.3 10% 规则	253
7.3.4 应变范围划分法	255
7.3.4.1 应变范围的划分	255
7.3.4.2 应变范围与寿命的关系	256
7.3.4.3 寿命估计式	258
7.3.5 累积损伤法	259
7.4 影响高温低周疲劳寿命的因素	262
7.4.1 保持时间的影响	262
7.4.1.1 保时松弛	263

7.4.1.2 保时蠕变	264
7.4.1.3 混合型保时	264
7.4.2 频率的影响	265
7.4.3 缺口的影响	266
7.4.4 温度的影响	268
7.4.5 热处理的影响	268
7.4.6 环境的影响	270
参考文献	272
第八章 热疲劳	274
8.1 概述	274
8.2 典型的热疲劳损坏现象	274
8.3 热应力与热应变	277
8.4 应力-应变曲线	279
8.5 热疲劳试验方法	281
8.5.1 实物模拟的热疲劳试验(Full-Scale Trails)	281
8.5.2 自约束型热疲劳试验	281
8.5.3 外约束型热疲劳试验	282
8.5.4 有机应变重叠的热疲劳试验	283
8.5.5 试验要点及结果整理	285
8.5.6 热疲劳与机械疲劳的区别	286
8.6 影响热疲劳强度的因素	288
8.6.1 温度的影响	288
8.6.2 温度循环与高温保持时间的影响	289
8.6.3 环境气氛的影响	291
8.6.4 试样或零件形状的影响	292
8.6.5 显微组织的影响	293
参考文献	296
第九章 高温断裂力学	297
9.1 引言	297
9.2 蠕变条件下的裂纹扩展	298
9.2.1 裂纹长度与时间的关系曲线	298
9.2.2 裂纹的开裂	300
9.2.3 裂纹的扩展速度	301

9.2.3.1	裂纹的扩展速度与应力强度因子 K_I 的关系	301
9.2.3.2	裂纹的扩展速度与净截面应力 σ_{net} 的关系	304
9.2.3.3	修正 J 积分 C^* 在蠕变裂纹扩展分析中的应用	306
9.2.3.4	等效应力在蠕变裂纹扩展分析中的应用	308
9.2.3.5	蠕变裂纹扩展速度与温度的关系	309
9.2.4	裂纹体的蠕变断裂	312
9.2.5	试样的型式及应力强度因子	314
9.2.6	影响蠕变裂纹扩展的因素	323
9.2.6.1	显微组织的影响	323
9.2.6.2	晶粒尺寸及晶界形态的影响	325
9.2.6.3	试样厚度及类型的影响	326
9.2.7	在蠕变条件下对裂纹长度的测量	327
9.2.7.1	电位法	328
9.2.7.2	电阻法	331
9.2.7.3	表面直读法	334
9.2.8	修正 J 积分 C^* 的测定及 C^*-da/dt 关系曲线的建立	334
9.2.9	净截面应力的计算	338
9.2.10	蠕变裂纹的扩展机制	340
9.3	高温疲劳条件下的裂纹扩展	343
9.3.1	高温疲劳裂纹亚临界扩展的控制参量	344
9.3.1.1	疲劳裂纹扩展速度 da/dN 与应力强度因子的幅度 ΔK 的关系	344
9.3.1.2	裂纹扩展速度 da/dN 与净截面应力幅度 $\Delta\sigma_{net}$ 的关系	347
9.3.1.3	裂纹扩展速度 da/dN 与 J 积分幅度 ΔJ 的关系	348
9.3.1.4	裂纹扩展速度 da/dN 与塑性应变幅度 $\Delta\epsilon_p$ 及全应变幅度 $\Delta\epsilon$ 的关系	351
9.3.2	影响高温疲劳裂纹扩展的因素	352
9.3.2.1	平均应力或应力比的影响	352
9.3.2.2	环境的影响	354
9.3.3	高温疲劳裂纹扩展的测试方法	355
9.3.3.1	柔度法	356
9.3.3.2	切口张开位移法	357
9.3.4	高温疲劳裂纹的扩展机制	360
9.4	周期加载条件下的裂纹扩展	362
9.4.1	周期加载条件下的裂纹扩展特性	362
9.4.2	在周期加载条件下裂纹扩展速度的控制参量	365
9.4.2.1	应力强度因子的应用	366

9.4.2.2 裂纹尖端张开位移的应用	367
9.4.2.3 修正 J 积分 C^* 的应用	367
9.4.3 周期加载条件下的裂纹扩展机制	368
附表 9.1 应力强度因子常用单位换算表	368
附表 9.2 一些镍基合金的化学成分	369
附表 9.3 一些钢种的化学成分	370
附表 9.4 一些铝合金的化学成分	370
参考文献	370