

材料的高温变形与断裂

张俊善 著



科学出版社

www.sciencep.com

材料的高温变形与断裂

张俊善 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书内容分两篇共 25 章。上篇为高温变形篇,包括金属与合金蠕变的宏观规律、蠕变位错亚结构、纯金属蠕变、固溶体合金蠕变、第二相粒子强化合金蠕变、扩散蠕变、超塑性以及多轴蠕变等内容,重点论述蠕变过程中位错与各种晶体缺陷的交互作用、蠕变微观机制以及蠕变物理模型和理论。下篇为高温断裂篇,包括蠕变空洞形核和长大、蠕变裂纹扩展、蠕变损伤与断裂的评价与预测、高温低周疲劳断裂、蠕变疲劳交互作用以及材料的高温环境损伤等内容,从微观、宏观和唯象三个层次论述了高温断裂理论及其工程应用。

本书可作为高等院校材料学科研究生教学参考书,也可供材料、固体物理和力学专业教师及科研人员参考。

图书在版编目(CIP) 数据

材料的高温变形与断裂/张俊善著. —北京:科学出版社, 2007
ISBN 978-7-03-017774-2

I. 材… II. 张… III. ①材料-高温变形-研究 ②材料-断裂-研究
IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 090070 号

责任编辑:田士勇 姚庆爽 于宏丽/责任校对:张 琪
责任印制:安春生/封面设计:陈 敬

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>

丽 源 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 1 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)
2007 年 1 月第一次印刷 印张: 33
印数: 1—3 000 字数: 626 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈路通〉)

序

能源、石油化工和航空航天等领域的很多构件是在高温下工作的,对于这些材料,高温强度是最基本的性能要求,所以高温变形与断裂是材料科学与工程学科最活跃的研究领域之一。近二十多年来,陶瓷、金属间化合物和复合材料等新型高温结构材料的发展进一步激活了高温强度的研究,使高温变形与断裂理论有了巨大新的进展。

该书深入系统地总结和阐述了 20 世纪 90 年代以前已基本建立起来的高温变形与断裂的基本理论,同时用较大的篇幅介绍了近二十年来高温变形与断裂研究的新进展以及先进结构材料的高温强度特性,内容全面而精练。该书结构严谨,理论体系清晰。高温变形以位错和扩散作为主线,原子尺度论述变形机制;高温断裂则宏观(断裂力学)、细观(损伤力学)、微观(空洞、微裂纹形核长大)相结合;重点论述将微观机制与宏观性能联系起来的模型与理论。该书对概念和理论的阐述比较严谨,思路清晰,语言简明,可读性较强。

该书作者长期从事材料高温变形与断裂理论研究,在国际上发表了大量论文。书中很多内容是在作者的研究基础上撰写的,特色明显。

国内过去没有出版过材料的高温变形与断裂方面的著作或教材。材料的力学性能方面有一些专著和教材,这些书都以常温性能为主,对高温性能的论述很少,不能全面反映高温强度理论及其近二十年来的新进展。该书是国内第一本关于材料高温强度方面的专著,对高温材料及高温强度研究人员,它是针对性很强的著作,对一般材料研究人员以及力学、物理等专业技术人员亦有较高的参考价值。

在我国,传统高温合金和新型高温结构材料的研究达到了很高的水平,但材料高温强度理论的研究则相对滞后,希望该书的出版将对这方面的理论研究起到一定的促进作用。

中国工程院院士

胡北祺

2006 年 6 月于中科院金属所

前 言

在能源、石油化工和航空航天等工业装置中，很多构件是在高温下工作的。例如，火力发电的蒸汽温度可达到 570℃，飞机涡轮叶片的工作温度高达 1000℃ 以上，制氢转化和乙烯裂解温度分别达到 950℃ 和 1050℃。对这类装置材料的最重要的性能要求是高温强度。

所谓高温强度，是材料对高温变形与断裂的抗力。高温下，材料的塑性变形与断裂行为与常温下有很大的不同。这里所说的高温，是指材料中的原子扩散足够快，以致扩散过程对塑性变形和断裂起重要作用的温度（一般 $T > T_m/2$ 作为高温， T_m 为熔点的绝对温度）。原子扩散是时间相关过程，高温变形和断裂与载荷的持续时间有关，因此，描述高温力学行为时必须引入应变速率和断裂寿命这两个力学、时间参数，而常温下无须考虑时间因素。另外，与常温相比，高温下材料与环境的化学或电化学反应速度加快，环境对高温变形与断裂行为产生很大的影响。高温变形与断裂理论以位错和扩散作为两大理论支柱，并涉及固体物理、金属学、弹塑性力学、断裂力学和损伤力学等诸多学科，是材料科学的一个重要分支学科。

在国际上，高温变形与断裂是材料科学与工程学科最活跃的研究领域之一。从 20 世纪 70 年代以来有关高温变形与断裂的研究取得了巨大进展。一方面，高温变形与断裂的微观模型与理论更加完善；另一方面，对金属间化合物、陶瓷、聚合物、复合材料等新型高温结构材料的变形与断裂行为及其机制进行了大量研究，进一步丰富和深化了高温变形与断裂理论。本书系统地总结了 40 年来国际高温强度领域的研究成果，深入论述高温变形与断裂的宏观规律，从位错与原子尺度探讨高温变形与断裂的微观机制，重点介绍将微观机制与宏观性能联系起来的模型与理论。

本书内容分两篇共 25 章。上篇是高温变形篇，包括金属与合金蠕变的宏观规律、蠕变位错亚结构、纯金属蠕变、固溶体合金蠕变和第二相粒子强化合金蠕变、扩散蠕变、超塑性以及多轴蠕变等内容。高温变形篇从位错与各种晶体缺陷（如位错、固溶原子、第二相粒子以及晶界等）交互作用的微观机制（或模型）出发，分析控制位错运动的各种扩散过程（如体扩散、晶界扩散、位错管道扩散以及固溶体中的互扩散等），从而导出变形速率方程。下篇是高温断裂篇，包括蠕变空洞形核和长大、蠕变裂纹扩展、蠕变损伤与断裂的评价与预测、高温低周疲劳断裂、蠕变疲劳交互作用以及材料的高温环境损伤等内容。高温断裂理论分

为微观理论、宏观理论和唯象理论。高温断裂的微观理论描述空位扩散和蠕变的共同作用下微观空洞形核与长大过程及其速率,宏观理论是根据断裂力学理论描述宏观裂纹扩展直至断裂的过程,而唯象理论则是利用损伤力学理论描述损伤的发展过程和受损伤材料的变形本构方程,导出构件的断裂寿命和断裂延伸率。

我国传统高温材料(耐热钢、高温合金等)和先进高温材料(金属间化合物、复合材料、陶瓷等)的科学研究和生产都有了长足的发展,相应地出版了一些传统高温材料和先进高温材料方面的著作、教材。但是从未出版过材料高温强度方面的书籍,系统论述高温变形与断裂的基础理论的著作更是空白。作者希望本书的出版能够填补这一空白,为今后我国高温材料及高温强度的研究贡献微薄之力。

本书的出版得到了中国科学院科学出版基金的资助。

大连理工大学高守义教授仔细审阅了本书的全部书稿并提出了许多宝贵的修改意见,作者受益匪浅。在收集和整理文献资料方面得到了大连理工大学伯川图书馆权金华女士的大力协作,她的出色工作大大提高了作者的写作效率。大连理工大学材料科学与工程学院徐卫平女士冲印了本书大部分照片。在本书行将出版之际,作者谨向所有为本书出版付出辛勤劳动的同仁致以深切的谢意。

由于作者的水平所限,书中疏漏、不当之处在所难免,恳请读者指正。

张俊善

2006年5月于大连理工大学

目 录

序 前言

上篇 高温变形

第 1 章 蠕变的宏观规律——本构关系	3
1.1 纯金属蠕变的基本特征	3
1.2 稳态蠕变速率与应力、温度的关系	4
1.3 弹性模量对蠕变的影响	10
1.4 层错能对蠕变速率的影响	11
1.5 晶粒尺寸对蠕变速率的影响	12
参考文献	15
第 2 章 蠕变过程中位错亚结构的变化	16
2.1 蠕变位错结构参数及其测量	16
2.2 蠕变过程中位错亚结构的变化	17
2.3 稳态蠕变位错亚结构	20
2.4 不均匀位错结构与长程内应力	22
参考文献	26
第 3 章 高温下位错运动的基本理论	28
3.1 位错的热激活滑移	28
3.2 热激活滑移的实验验证——内应力测量	31
3.3 回复蠕变的实验验证	33
3.4 位错攀移动力学	34
3.5 Orowan 方程及 Bailey-Orowan 方程	38
3.6 动态回复	39
参考文献	42
第 4 章 纯金属的回复蠕变理论	43
4.1 概述	43
4.2 Weertman 模型	44
4.3 考虑亚晶界的模型	45
4.4 基于亚晶内位错网络的模型	51

4.5	割阶非保守运动控制的蠕变模型	54
4.6	本征应力指数	57
4.7	软硬区复合体模型	58
4.8	Harper-Dorn 蠕变	63
	参考文献	69
第5章	固溶体合金的蠕变	72
5.1	位错与溶质原子的交互作用	72
5.2	固溶体合金蠕变的基本特征	77
5.3	位错的黏滞性滑移速率	80
5.4	黏滞性滑移控制的蠕变模型	82
5.5	第一类蠕变行为判据	85
5.6	第二类固溶体合金蠕变	87
	参考文献	89
第6章	第二相粒子强化材料的蠕变	90
6.1	概述	90
6.2	位错攀移越过粒子的蠕变模型	92
6.3	粒子与位错吸引模型	95
6.4	位错切割粒子模型	100
6.5	第二相粒子强化机制	102
6.6	晶界第二相粒子强化	105
6.7	颗粒增强复合材料的蠕变	108
	参考文献	115
第7章	金属间化合物的高温塑性变形	118
7.1	晶体结构、位错与面缺陷	118
7.2	位错芯的结构	121
7.3	金属间化合物的滑移系与流变应力	125
7.4	金属间化合物的蠕变	130
7.5	化合物基 ODS 合金蠕变	137
	参考文献	142
第8章	扩散蠕变	145
8.1	扩散蠕变理论	145
8.2	扩散蠕变的协调-晶界滑动	147
8.3	晶界反应控制的扩散蠕变	150
8.4	扩散蠕变的实验验证	155
	参考文献	157

第 9 章 超塑性	160
9.1 变形的稳定性	160
9.2 超塑性的一般特征	164
9.3 超塑性的显微组织特征	167
9.4 晶界在超塑性变形中的行为	169
9.5 超塑性变形机制	171
9.6 超塑性的最大变形速率	175
9.7 金属与陶瓷的超塑性比较	178
参考文献.....	181
第 10 章 高温变形中的晶界行为	183
10.1 小角度晶界的结构.....	183
10.2 大角度晶界的结构.....	186
10.3 晶界滑动及其协调机制.....	189
10.4 内禀晶界滑动模型.....	193
10.5 外禀晶界滑动.....	197
10.6 其他晶界滑动模型.....	201
参考文献.....	203
第 11 章 高温变形机制图	205
11.1 变形机制图概念.....	205
11.2 变形机制图的建立.....	207
11.3 典型 FCC 金属的变形机制图	208
11.4 Fe 基合金与 Ni 基合金材料的变形机制图	211
参考文献.....	215
第 12 章 多轴蠕变的力学模型	216
12.1 单轴蠕变模型.....	216
12.2 多轴蠕变模型.....	218
12.3 多轴稳态蠕变模型.....	221
12.4 多轴蠕变应力分析.....	222
12.5 应力松弛.....	223
参考文献.....	225

下篇 高温断裂

第 13 章 蠕变空洞形核	229
13.1 概述.....	229
13.2 晶界滑动在空洞形核中的作用.....	230

13.3	空洞形核位置	230
13.4	空洞形核速率	233
13.5	原子键断裂形核理论	235
13.6	热激活形核理论	236
13.7	形核动力学	239
13.8	应力集中与松弛	241
13.9	空洞的尺寸分布	247
	参考文献	249
第 14 章	空洞形核的材料学因素	251
14.1	晶界偏聚与蠕变脆性	251
14.2	焊接热影响区热裂	256
14.3	杂质偏聚理论	258
14.4	杂质偏聚与晶界能	259
14.5	杂质偏聚与晶界结合强度	261
14.6	杂质偏聚与空洞的热激活形核	262
14.7	第二相粒子析出引起的内应力及空洞形核	263
	参考文献	266
第 15 章	蠕变空洞的扩散长大	268
15.1	空位的化学位	268
15.2	空位的形成	269
15.3	Hull-Rimmer 空洞扩散长大模型	272
15.4	Speight-Harris 模型	275
15.5	表面扩散的影响	278
	参考文献	280
第 16 章	扩散与蠕变联合控制的空洞长大	282
16.1	Monkman-Grant 关系	282
16.2	Beer-Speight 模型	283
16.3	Edward-Ashby 模型	286
16.4	表面扩散、晶界扩散和蠕变的耦合	286
16.5	Cocks-Ashby 模型	289
	参考文献	298
第 17 章	蠕变空洞的受约束长大	300
17.1	概述	300
17.2	Rice 模型	301
17.3	Raj-Ghosh 模型	303

17.4 Cocks-Ashby 模型	305
参考文献	308
第 18 章 楔形微裂纹的形核与生长	310
18.1 概述	310
18.2 应力集中及其松弛	311
18.3 楔形裂纹的形核	312
18.4 楔形裂纹扩展	314
18.5 楔形裂纹扩展的空洞长大模型	316
参考文献	318
第 19 章 蠕变裂纹扩展	320
19.1 弹塑性体裂纹尖端应力场	320
19.2 稳态蠕变裂纹尖端应力场	324
19.3 过渡期裂纹尖端应力场	327
19.4 蠕变裂纹尖端应力场的位错模型	331
19.5 存在蠕变门槛应力的情形	334
19.6 蠕变裂纹扩展的实验结果	336
参考文献	345
第 20 章 蠕变损伤力学	347
20.1 损伤力学概述	347
20.2 损伤变量及有效应力	348
20.3 Kachanov 蠕变损伤理论	350
20.4 Rabotnov 蠕变损伤理论	352
20.5 三维蠕变损伤理论	354
20.6 损伤的热力学处理	356
20.7 耗散功率模型	359
参考文献	363
第 21 章 蠕变损伤物理	364
21.1 损伤的物理本质	364
21.2 外截面损失模型	367
21.3 内截面损失模型	368
21.4 组织劣化	370
21.5 氧化损伤模型	376
21.6 持久寿命及其预测	378
参考文献	384

第 22 章 高温低周疲劳	386
22.1 循环变形的力学特性	386
22.2 实际材料的循环变形	389
22.3 循环变形中位错亚结构的变化	396
22.4 疲劳裂纹萌生	400
22.5 疲劳裂纹扩展一般规律	406
22.6 高温低周疲劳裂纹扩展	410
22.7 疲劳裂纹扩展的断裂力学处理	416
22.8 裂纹闭合	419
参考文献	422
第 23 章 蠕变疲劳交互作用	425
23.1 蠕变疲劳波形	425
23.2 蠕变疲劳交互作用的本质	426
23.3 蠕变疲劳断裂机制图	428
23.4 保持时间对蠕变疲劳寿命的影响	429
23.5 蠕变疲劳裂纹扩展的断裂力学	437
参考文献	441
第 24 章 蠕变疲劳寿命预测	443
24.1 线性累积损伤法	443
24.2 应变幅分割法	446
24.3 频率修正 C-M 法	451
24.4 损伤力学方法	454
24.5 损伤函数模型	456
24.6 经验方法	458
参考文献	459
第 25 章 高温环境损伤	461
25.1 氧化	461
25.2 Na_2SO_4 盐膜下的热腐蚀	472
25.3 熔融碳酸盐腐蚀	477
25.4 $\text{LiCl-Li}_2\text{O}$ 熔盐腐蚀	479
25.5 高温氯化腐蚀	486
25.6 渗碳损伤	489
参考文献	495
附录 A 弹塑性力学的基础知识	498
A.1 一点处应力状态的描述	498

A. 2	应变	501
A. 3	广义胡克定律	502
A. 4	弹性应变能	502
A. 5	平面问题	503
A. 6	常用屈服条件	505
A. 7	塑性势	506
A. 8	爱因斯坦求和约定	507
附录 B	位错弹性理论的基本公式	508
B. 1	位错应力场	508
B. 2	位错的能量及位错线张力	509
B. 3	位错在外应力场中所受的力	510

上篇 高温变形

第 1 章 蠕变的宏观规律——本构关系

1.1 纯金属蠕变的基本特征

“蠕变”一词一般是指材料在高温和低于材料宏观屈服极限的应力下发生的缓慢的塑性变形。将试样加热到一定温度后加载,在该温度和恒定应力下记录试样应变 ϵ 随时间 t 的变化,得到如图 1.1 所示的应变-时间关系曲线,即蠕变曲线。

根据蠕变曲线的形状蠕变可分为三个阶段。第一阶段蠕变速率随时间不断降低,称初始蠕变阶段。第二阶段的蠕变曲线为直线,蠕变速率保持不变,称为稳态蠕变阶段。第三阶段蠕变速率随时间加快直至断裂,称加速蠕变阶段。

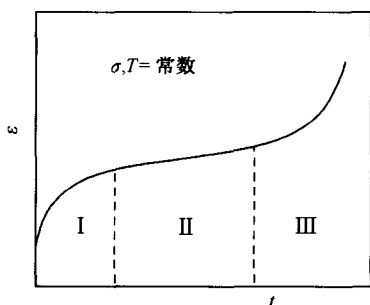


图 1.1 恒应力蠕变曲线

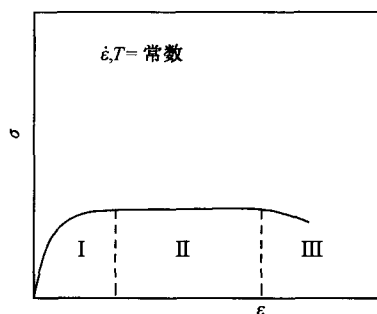


图 1.2 恒应变速率变形曲线

如果以恒定的应变速率拉伸,记录流变应力随试样应变的变化,则得到另一种高温变形曲线,如图 1.2 所示。这个曲线也可分为三个阶段。第一阶段随变形量的增加流变应力增加。第二阶段流变应力保持恒定,第三阶段随变形量的增加流变应力下降。

这两种曲线的形状反映了伴随高温变形的加工硬化和回复软化过程。在蠕变初期变形速率很快(或流变应力很小),说明材料的变形抗力小。随后由于变形引起加工硬化,蠕变速率逐渐降低(或流变应力逐渐增加)。随着加工硬化程度的增加动态回复速率也逐渐增加,最终加工硬化与回复软化过程达到动态平衡,蠕变速率保持恒定(或流变应力保持恒定),进入变形的第二阶段,即达到稳态蠕变。第三阶段蠕变速率上升(或流变应力下降)与试样内部产生蠕变空洞导致应力集中,试样截面积减小和发生颈缩导致实际应力升高,以及材料组织结构变化等因素有关。

这两种高温变形方式都可以称为蠕变。若在恒定应力 σ_1 下蠕变达到稳态时得到该应力相应的稳态蠕变速率 $\dot{\epsilon}_1$, 那么以恒定应变速率 $\dot{\epsilon}_1$ 变形达到稳态时其相应的稳态流变应力是恒定应力 σ_1 。也就是说, 稳态应力/应变速率与变形过程无关(严格地说, 这种变形的状态方程成立是有条件的)。

在工程上这两种高温变形方式对应两种工程应用状态。恒应力蠕变对应材料在高温下的服役状态, 构件在一定(或变动)的已知载荷(应力)下服役时需要知道(测量或预测)材料的应变、应变速率和断裂时间等数据。恒应变速率变形对应材料的塑性加工过程, 在高温轧制、拉拔、挤压等塑性加工时, 材料以一定的速率变形时需要计算变形应力来确定设备的负荷。

最后应指出, 上述蠕变现象是对纯金属和第二类固溶体合金而言的。第一类固溶体合金的蠕变第一阶段显示出与纯金属不同的特征。一些组织结构比较复杂的工程合金, 如有第二相析出的合金可能不出现明显的稳态蠕变阶段, 经过蠕变第一阶段后直接进入第三阶段加速蠕变。在这种情况下, 工程上一般用最小蠕变速率来代替稳态蠕变速率。

本章主要讨论纯金属的蠕变, 关于固溶体合金和第二相析出合金的蠕变问题将在第5章和第6章中讨论。

1.2 稳态蠕变速率与应力、温度的关系

1.2.1 稳态蠕变速率与应力的关系

一般用稳态蠕变速率 $\dot{\epsilon}$ 来表示材料的蠕变性能。稳态蠕变速率的高低除取决于材料本身的特性外, 还和温度 T 、应力 σ 这两个外部变量有关。

关于蠕变速率与应力的关系已经做了多次试验, 尽管有个别的例外, 绝大多数试验结果表明, 在高温下大多数材料在较低的应力下 $\log \dot{\epsilon}$ 与 $\log \sigma$ 成线性关系, 因此 $\dot{\epsilon}$ 与 σ 的关系为

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^n \quad (1.1)$$

式中 A_1 为与材料特性和温度有关的常数, n 称为稳态蠕变速率的应力指数, 其数值可从 $\log \dot{\epsilon} \sim \log \sigma$ 直线的斜率求得。由于式(1.1)中蠕变速率是应力的幂函数, 所以符合式(1.1)的蠕变称为幂律蠕变(power law creep)。图1.3是高纯铝的实验结果^[1], 从图中可以看出, $\log \dot{\epsilon}$ 与 $\log \sigma$ 成线性关系, 直线的斜率 $n=5$ 。从图中还可以看出, 应力升高到一定程度后, $\log \dot{\epsilon}$ 与 $\log \sigma$ 曲线的斜率开始增大且偏离线性关系, 这种现象称为幂律失效(power law breakdown, PLB)。在 PLB(低温、高应力下)阶段的蠕变速率与应力的关系可用指数函数表示

$$\dot{\epsilon} = A_2 \exp(B\sigma) \quad (1.2)$$

式中 A_2 和 B 是与材料特性和温度有关的常数。