

材料科学与技术丛书

R. W. 卡恩 P. 哈森 E. J. 克雷默 主编

(第6卷)

材料的塑性 变形与断裂

(德) H. 米格兰比 主编

科学出版社



材料科学与技术丛书

主编 陈国厚 副主编 王人 吕国瑞 吕国瑞

材料的塑性 变形与断裂

陈国厚 主编

科学出版社

001

001

材料科学与技术丛书(第6卷)

R. W. 卡恩 P. 哈森 E. J. 克雷默 主编

材料的塑性变形与断裂

〔德〕H. 米格兰比 主编

颜鸣皋 等 译

科学出版社

1998

图字：01-97-1615 号

图书在版编目(CIP)数据

材料的塑性变形与断裂/[德]米格兰比主编;颜鸣皋等译,-北京:科学出版社,1998.6

(材料科学与技术丛书;第6卷)

书名原文:Plastic Deformation and Fracture of Materials

ISBN 7-03-006413-5

I. 材… I. ①米…②颜… III. ①工程材料-塑性变形 ②工程材料-断裂
N. TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 26668 号

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100017

北京双青印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1998年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16
1998年6月第一次印刷 印张:40 3/4
印数:1—2 600 字数:941 000

定价:92.00 元

Materials science and technology; a comprehensive treatment/ed. by R. W. Cahn...-Weinheim; New York; Basel; Cambridge; VCH.

Plastic deformation and fracture of materials/Vol. ed. ; Häel Mughrabi. -Weinheim; New York; Basel; Cambridge; VCH, 1993

Materials science and technology; Vol. 6

© VCH Verlagsgesellschaft mbH, D-6940 Weinheim (Federal Republic of Germany), 1993

《材料科学与技术》丛书

中文版编委会

主编

师昌绪 国家自然科学基金委员会
柯 俊 北京科技大学
R. W. 卡恩 英国剑桥大学

成员 (以姓氏笔画为序)

丁道云 中南工业大学
干福熹 中国科学院上海光机研究所
叶恒强 中国科学院金属研究所
刘嘉禾 北京钢铁研究总院
朱逢吾 北京科技大学
朱鹤孙 北京理工大学
吴人洁 上海交通大学
闵乃本 南京大学
周邦新 中国核动力研究设计院
柯 伟 中国科学院金属腐蚀与防护研究所
施良和 中国科学院化学研究所
郭景坤 中国科学院上海硅酸盐研究所
徐 僊 四川大学
徐元森 中国科学院上海冶金研究所
黄 勇 清华大学
屠海令 北京有色金属研究总院
雷廷权 哈尔滨工业大学
詹文山 中国科学院物理研究所
颜鸣皋 北京航空材料研究院

总 译 序

20 世纪 80 年代末,英国剑桥大学的 R. W. 卡恩教授、德国哥丁根大学的 P. 哈森教授和美国康乃尔大学的 E. J. 克雷默教授共同主编了《材料科学与技术》(Materials Science and Technology)丛书。该丛书是自美国麻省理工学院于 80 年代中期编写的《材料科学与工程百科全书》(Encyclopedia of Materials Science and Engineering)问世以来的又一部有关材料科学和技术方面的巨著。该丛书全面系统地论述了材料的形成机理、生产工艺及国际公认的科研成果,既深刻阐述了有关的基础理论,具有很高的学术水平,又密切结合生产实际,实用价值较强。

该丛书共 19 卷(23 分册),分三大部分:第 1~6 卷主要阐述材料科学的基础理论;第 7~14 卷重点介绍材料的基本性能及实际应用;第 15~19 卷则着重论述材料的最新加工方法和工艺。

该丛书覆盖了现代材料科学的各个领域,系统而深入地对材料科学和技术的各个方面进行了精辟的论述,并附以大量图表加以说明,使其内容更加全面、翔实,论述也比较严谨、简洁。

有 400 余名国际知名学者、相关领域的学术带头人主持或参加了该丛书的撰写工作,从而使该丛书具有很高的权威性和知名度。

该丛书各卷都附有大量参考文献,从而为科技工作者进一步深入探讨提供了便利。

随着我国科学技术的飞速发展,我国从事与材料有关研究的科技人员约占全部科技人员的 1/3,国内现有的有关材料科学方面的著作远远满足不了广大科技人员的需求。因此,把该丛书译成中文出版,不但适应我国国情,可以满足广大科技人员的需要,而且必将促进我国材料科学技术的发展。

基于此,几年前我们就倡议购买该丛书的版权。科学出版社与德国 VCH 出版社经过谈判,于 1996 年 10 月达成协议,该丛书的中文版由科学出版社独家出版。

为使该丛书中文版尽快与广大读者见面,我们成立了以师昌绪、柯俊、R. W. 卡恩为主编,各分卷主编为编委的中文版编委会。为保证翻译质量,各卷均由国内在本领域学术造诣较深的教授或研究员主持有关内容的翻译与审核工作。

本丛书的出版与中国科学院郭传杰研究员的帮助和支持是分不开的,他作为长期从事材料科学研究的学者,十分理解出版本丛书的重大意义,购买本

丛书版权的经费问题就是在他的大力协助下解决的，特此对他表示感谢。另外，本丛书中文版的翻译稿酬由各卷主编自筹，或出自有关课题组和单位，我们对他们给予的支持和帮助表示衷心的感谢。

我们还要感谢中国科学院外籍院士、英国皇家学会会员 R. W. 卡恩教授，他以对中国人民的诚挚友谊和对我国材料科学发展的深切关怀，为达成版权协议做出了很大努力。

材料是国民经济发展、国力增强的重要基础，它关系着民族复兴的大业。最近几年，我国传统材料的技术改造，以及新型材料的研究正在蓬勃展开。为适应这一形势，国内科技界尽管编著出版了不少材料科学技术方面的丛书、工具书等，有的已具有较高水平，但由于这一领域的广泛性和迅速发展，这些努力还是不能满足科技工作者进一步提高的迫切要求，以及我国生产和研究工作的需要。他山之石，可以攻玉。在我国造诣较深的学者的共同努力下，众煦漂山，集腋成裘，将这套代表当代科技发展水平的大型丛书译成中文。我们相信，本丛书的出版，必将得到我国广大材料科技工作者的热烈欢迎。

为了使本丛书尽快问世，原著插图中的英文说明一律未译，各卷索引仍引用原著的页码，这些页码大致标注在与译文相应的位置上，以备核查。

由于本丛书内容丰富，涉及多门学科，加之受时间所限，故译文中难免存在疏漏及不足之处，请读者指正。

师昌绪

柯俊

1998年3月于北京

译 者 序

材料的塑性变形与断裂是材料最基本和最重要的力学行为,因此,用实验和理论方法确定材料在某一特定条件下发生塑性变形的微观机制,并把微观机制与宏观可测的性能联系起来,是材料科学工作者的一项极其重要的任务。有关材料的塑性变形和断裂行为,不仅是研制具有优良性能材料所不可缺少的知识,而且也是设计人员在零部件设计时优先考虑的内容。正如国际著名教授J. Schijve在1993年国际疲劳会议上所作的报告中指出的:有关新材料的应用不仅要建立在了解有关设计与工艺要求的基础上,而且也要建立在材料在变形和断裂过程中的行为基础上。

本卷既对材料在特定条件下塑性变形和断裂的经典理论进行了描述,又介绍了近年来编著者及各国材料工作者在该领域所取得的最新研究成果。本卷内容丰富、论述系统、深入浅出,具有理论分析、数值计算与试验研究相结合的特点,是材料科学研究领域中的一部重要学术专著。它既可作为高等院校材料专业硕士和博士研究生的教材,也适合于从事材料研制、设计与使用、失效分析与预防研究的教师和工程技术人员参考。

本卷由中国航空工业总公司航空材料研究院颜鸣皋院士和韩雅芳研究员组织翻译。参加本书翻译工作的有:韩雅芳(前言);焦汇胜(第1,4章);于熙泓(第2章);朱知寿(第3,7章);邢占平(第5章);肖程波(第6章);张宏伟(第8章);桂满昌(第9章);唐见茂(第10章);张诗捷(第11章);陶春虎(第12,13章)。

参加本卷审校工作的有:阮中慈、郑运荣(第1章);王乐安(第2章);曹春晓(第3章);陶春虎(第4,7,9,11章);韩雅芳(第5,8章);全宏声(第6章);王山根、习年生(第10章);傅孙靖(第12章);王仁智(第13章)。陶春虎和朱知寿对全书进行了统稿。

颜鸣皋院士和韩雅芳研究员对全书进行了审查与定稿。

由于本卷涉及内容广泛,受时间和水平所限,书中难免存在缺点和不足之处,希望读者批评指正。

丛书序

材料是多种多样的,如金属、陶瓷、电子材料、塑料和复合材料,它们在制备和使用过程中的许多概念、现象和转变都惊人地相似。诸如相变机理、缺陷行为、平衡热力学、扩散、流动和断裂机理、界面的精细结构与行为、晶体和玻璃的结构以及它们之间的关系、不同类型材料中的电子的迁移与禁带、原子聚集体的统计力学或磁自旋等的概念,不仅用来说明最早研究过的单个材料的行为,而且也用来说明初看起来毫不相干的其它材料的行为。

正是由于各材料之间相互有机联系而诞生的材料科学,现在已成为一门独立的学科以及各组成学科的聚集体。这本新的丛书就是企图阐明这一新学科的现状,定义它的性质和范围,以及对它的主要组成论题提供一个综合的概述。

材料技术(有时称材料工程)更注重实际。材料技术与材料科学相互补充,主要论及材料的工艺。目前,它已变成一门极复杂的技艺,特别是对新的学科诸如半导体、聚合物和先进陶瓷(事实上对古老的材料)也是如此。于是读者会发现,现代钢铁的冶炼与工艺已远超越古老的经验操作了。

当然,其它的书籍中也会论及这些题目,它们往往来自百科全书、年报、专题文章和期刊的个别评论之中。这些内容主要是供专家(或想成为专家的人)阅读。我们的目的并非是贬低同行们在材料科学与技术方面的这些资料,而是想创立自己的丛书,以便放在手边经常参考或系统阅读;同时我们尽力加快出版,以保证先出的几卷与后出的几卷在时效方面有所衔接。个别的章节是较之百科全书和综述文章讨论得更为详细,而较之专题文章为简略。

本丛书直接面向的广大读者,不仅包括材料科学工作者和工程师,而且也针对活跃在其它学科诸如固体物理、固体化学、冶金学、建筑工程、电气工程和电子学、能源技术、聚合物科学与工程的人们。

本丛书的分类主要基于材料的类型和工艺模式,有些卷着眼于应用(核材料、生物材料),有些卷则偏重于性能(相变、表征、塑性变形和断裂)。有些题材的不同方面有时会被安排在两卷或多卷中,而有些题材则集中于一专卷内(如有关腐蚀的论述就是编在第7卷的一章中,有关粘结的论述则是编在第12卷的一章中)。编者特别注意卷内与卷间的相互引证。作为一个整体,本丛书完成时将刊出一卷累积的索引,以便查阅。

我们非常感谢 VCH 出版社的编辑和生产人员,他们为收集资料并最后出

书,对这样繁重的任务作出了大量而又高效的贡献。对编辑方的 Peter Gregory 博士和 Deborah Hollis 博士、生产方的 Hans-Jochen Schmitt 经济学工程师表示我们的特别谢意。我们亦感谢 VCH 出版社的经理们对我们的信任和坚定的支持。

R. W. 卡恩 (Cambridge)

P. 哈森 (Göttingen)

E. J. 克雷默 (Ithaca)

1992 年 11 月

前 言

具有各种特殊性能的现代工程材料有着广阔的应用前景。为着种种目的,尤其是机械及航空航天工程的要求,人们需要具有良好塑性变形和断裂抗力的各种高强材料。而在另一极端情况下,即在材料的成形过程中,人们却希望所采用的材料具有足够高的延性,以便在既不太难加工而又能节省能量的方式下产生大变形。除此之外,还希望产品在使用过程中具有足够的强度。必须看到,由于工作应力、温度及环境的恶劣,对工程材料的性能要求在不断提高,同时还要求这些材料及其零件的制作、成形具有低的成本。

研究现代工程材料的主要任务就是与上述要求同步发展,以达到共识。此外,为了寻找工程材料研究的理论背景,更进一步地提高技术水平是必要的。测试技术与计算技术的进步对工程材料的最新发展起了重要作用。本卷的目的就在于提供有关材料的塑性变形和断裂方面的知识和研究现状。作为这一卷的编辑,我十分荣幸地邀请了一批来自不同国家的、国际上著名的学者(我的同事)作为各章的作者。这样,读者将会发现,关于经典的塑性和断裂方面的现代论述已经成熟到用教科书教授的阶段,有关这些主题的研究文献目前仍然是讨论的焦点,它涉及到基础性的且又扩展到技术内涵的内容。在以往的60多年里,有关金属和合金的塑性与断裂现象的研究要比非金属的广泛得多。基于这一事实,本卷对非金属的塑性与断裂的研究不可能像对金属和合金那样竭尽全力去阐述。此外,关于非金属的机械性能更为详细的论述可在本丛书的其它卷,如第9卷《玻璃与非晶体材料》、第11卷《陶瓷结构与性能》、第12卷《聚合物结构与性能》及第13卷《复合材料结构与性能》的某些章节中找到。

本卷前言之后,有关经典的屈服应力和加工硬化的概念,第2章提出了最新的阐述。该章采用位错这一主线把早期的和最近的研究方法统一起来。第3章重点讨论大应变状态下的金属变形与织构,并强调最近10年来这个旧论点的重要意义再次继续受到重视。第4章涉及到一个新型的形象学科“Emerging”,它逐渐得以发展,肯定会更密切地与变形晶体的位错分布的演变旧模式联系起来。

固溶强化是采用合金化来强化金属的一种经典方法,也是一个传统的课题,但其仍具有魅力,故另辟第5章进行综合论述。随后的第6章同样论述到合金,即金属间化合物的变形。这种新型的高强度材料,无论从本质上还是技术上来评估,都认为是具有前景的、高温下使用的候选材料。第7章论述的重点

是从技术上强调了第二相粒子提高强度的重要性,它起到阻碍滑移的作用,目前人们正考虑从实验和理论上对其进行探讨。高温下塑性变形是第8章和第9章的主要议题。其中第8章主要论述在存在动态回复情形下的塑性、应变硬化和软化的基本机制,特别是综合阐述了高温下有关蠕变的含义。如前面的所有章节那样,这一章主要集中讨论材料的变形抗力。而第9章所论述的金属、陶瓷和金属间化合物的超塑性现象,则是由于在高温下细晶粒材料较易产生稳定的塑性流变而允许很大变形所致。由此可见,高蠕变变形抗力在技术上具有重要意义,而且其超塑性变形能力的重要性也是显而易见的。

第10章从新的角度论述非晶体玻璃态材料,介绍由特有的结构特征而不是用位错控制其非弹性变形和断裂行为。第11至第13章从广义上论述过渡的塑性变形,最终导致断裂而使材料失效。其中,第11章涉及到在各种不同的循环载荷下,不同材料与裂纹的萌生和扩展的响应;第12章则完全论述断裂机制,涉及到脆性和延性断裂模型的论题,包括蠕变断裂、受界面控制的开脱以及环境的“腐蚀”作用(是从连续断裂力学和微观结构的观点来论述的);第13章论述了在滚动接触中的材料行为以及由粘着或磨粒磨损而引起的退化变质。这一课题是很重要的,它不仅涉及到轴承的滚动接触,也涉及金属切削过程。

工程材料的力学行为不可能在本卷都得到全面的阐述。这里所探讨的论题均提供了基本机理方面的、概括性的知识背景,从而使读者更好地理解强度、延性、断裂韧度之间,以及各种工程材料塑性变形性能、断裂行为和微观结构之间的相互作用。这种知识逐渐变得如在应变、应力和温度复合状态下作为材料和构件行为的微观结构模型基础那样重要。由于作者很多,要确保各处使用的相同符号具有相同的意义是不可能的。然而,我们力求作到这一点,以避免混淆。同样由于篇幅所限,有几个重要议题,如复合材料的腐蚀开裂、变形与断裂不得不忍痛割爱,或仅仅适当地加以介绍。对此,读者可参考本丛书的第13卷。

希望本卷将有助于从事实际工作的材料科学家、工程师以及大学教师和学生。同样,这里所提供的原理将用于可靠工作的构件的设计和材料工程方面。

最后,我谨向那些作出令人鼓舞和杰出贡献的作者们,以及提供建设性建议和指导的本丛书的主编E. 克雷默教授致以衷心的感谢,同样感谢VCH出版社职工,特别是Christina Dyllick博士和Peter Gregeory博士的大力支持。

H. 米格兰比
Erlangen, 1992年10月

目 录

1	微观结构与力学性能	(1)
2	流变应力与加工硬化	(17)
3	大应变时金属的变形和织构	(80)
4	位错组态	(121)
5	固溶强化	(167)
6	金属间化合物的变形	(222)
7	颗粒强化	(274)
8	晶体的高温变形和蠕变	(319)
9	金属、陶瓷和金属间化合物的超塑性	(362)
10	玻璃态固体的非弹性变形和断裂	(408)
11	循环变形与疲劳	(454)
12	断裂机制	(501)
13	摩擦与磨损	(563)
索 引		(608)

1 微观结构与力学性能

Haël Mughrabi

Institut für Werkstoffwissenschaften, Universität Erlangen-Nürnberg

Erlangen, Federal Republic of Germany

(焦汇胜译 阮中慈 郑运荣校)

目 录

1.1	引言	3
1.2	材料及其进展	3
1.3	材料的强度、塑性和断裂	4
1.4	在拉伸过程中塑性流变的稳定性, 颈缩断裂及超塑性	6
1.5	变形几何学, 滑移晶体学, 取向因子	6
1.6	塑性和加工硬化中的位错概念	7
1.7	微观组织与强度, 主要的强化机制	8
1.8	低温和高温的变形机制、变形机制图	9
1.9	微观组织的不均匀性、不稳定性、局部变形、损伤和失效	11
1.10	基于微观组织的模型化	14
1.11	参考文献	15

符号与缩语表

a	裂纹半长度
a_0	原子间距
b	伯格斯矢量的模
E	杨氏模量
G	剪切模量
$\mathcal{G}$	弹性能释放率
K	应力强度因子
K_c	临界应力强度因子, 断裂韧度
K_{Ic}	平面应变断裂韧度
m	应变速率敏感系数
T	温度
T_m	熔点温度
α	几何常数
γ	分切应变

$\dot{\gamma}$	分切应变率
γ_{eff}	比断裂能
γ_s	表面能
ϵ	拉伸应变
$\dot{\epsilon}$	拉伸应变率
Θ	加工硬化率
λ	滑移方向与载荷轴向的夹角
ρ	位错密度
σ	拉伸应力
σ_c	理论强度
σ_f	断裂强度
σ_y	拉伸屈服强度
τ	分切强度
τ^*	有效剪切屈服强度
τ_G	剪切强度中的非热量部分
τ_{th}	理论剪切强度
τ_y	分切屈服强度
φ	载荷轴向与滑移面法向的夹角
b. c. c.	体心立方
DS	定向凝固
f. c. c.	面心立方
ODS	氧化物弥散强化
PFZ	无沉淀区
PSB	驻留滑移带
TEM	透射电子显微镜

1.1 引言

• p. 3 • ¹⁾

材料的力学行为主要靠支配塑性变形和断裂的那些材料性能来描述。在宏观上,这些性能可以用材料的基本参数来表达,测量这些参数通常无需知道这些性能微观起源方面的详细知识。在微观上,这些性能与过程有关,由过程造成材料微观尺度变化的范围可以从原子尺寸到材料微观组织的典型尺寸,如多晶材料晶粒的尺寸。

因此,对材料工作者来说,一项很重要的工作就是用实验和理论方法来确定某一特定材料性能有关的微观机制,并把微观行为与宏观可测的性能联系起来。对有关材料的性能及知识的了解程度是提高材料性能以及研制具有优良性能的新材料的第一步。在设计零部件选材时优先考虑材料性能,是材料科学技术中主要的一项工作。

本卷主要讨论塑性及断裂中的一些主要问题。正如在前言中所述,本卷的各章节相互关联,共同形成一个统一的整体。这些章节既要根据试验和理论来确定与不同材料力学行为有关的微观机制,又要提供微观行为与工程师能方便测量和使用的宏观性能有关的知识框架。

下面的各章节将根据最近的研究对某些主题作详细的介绍,这里先对材料的塑性变形和断裂作一般性描述。本章所阐述的问题主要是针对晶体材料的,然而许多论及的问题在作修正以后也可用于玻璃态材料,这类日趋重要的玻璃态材料将在第 10 章作详细论述。作为导论,本章参考了一些较久远的文献,以便有助于我们对现状的了解。限于篇幅,在浩瀚的文献中,我们只引用少数切题的文献。要想进一步了解,读者可以参考各章末作者推荐的“一般阅读资料”和“会议文集”。

1.2 材料及其进展

材料科学领域的大部分成果都基于早期冶金学的发展。在翻阅一本经典的教科书,例如 Cottrell 的《理论结构冶金学》(1955),人们就会发现在那时适用于金属和合金的绝大多数概念,今天仍然是有效的;另一方面,这些概念事实上必须进一步地发展和不断地修正才能适用于不断发展的新的和更复杂的金属和非金属材料。当今的材料可大致分为金属材料、陶瓷材料、玻璃材料和聚合物材料以及正在发展中的各种复合材料。

• p. 4 •

涡轮叶片材料的更新过程提供了一个材料发展的典型实例。涡轮叶片材料要在涡轮进口处的高温下承受相当高的应力,叶片的工作温度越高,涡轮发动机的效率和性能就越好。图 1-1 表示了在过去 50 年中,作为涡轮叶片材料的镍基高温合金的承温能力提高了超过 200℃ 的发展过程。图中说明了镍基高温合金材料的产生从锻造到铸造(DS:定向凝固,单晶合金),再到机械合金化粉末冶金(ODS:氧化物弥散强化)的过程。除此之外,原位生成复合材料及承温能力大幅度提高,有潜在应用前景的陶瓷材料也在图中标了出来。金属

1) 为原著页码,仅供参考,下同。——译者注