

“十二五”国家重点图书出版规划项目
材料科学与工程系列

材料强度学

Strength of Materials

● 张俊善 编著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

“十二五”国家重点图书出版规划项目
材料科学与工程系列

材料强度学

Strength of Materials

● 张俊善 编著

张俊善 编著
张俊善 编著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 提 要

全书由 8 章组成,主要包括:位错的弹性理论,晶体的常温塑性变形和断裂,高温蠕变及蠕变断裂,超塑性变形,材料的循环变形与疲劳,材料的应力腐蚀开裂、腐蚀疲劳、氢脆等。本书深入阐述了材料强度的基本理论、塑性变形和断裂的宏观规律和微观机制,同时还着重介绍了本领域新的理论研究进展。

本书可作为材料科学与工程及相关专业硕士或博士研究生的教材,也可作为从事与材料有关工作的科技人员的参考书

图书在版编目(CIP)数据

材料强度学/张俊善编著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2014.12

(材料科学与工程系列)

ISBN 978-7-5603-5103-2

I. ①材… II. ①张… III. ①材料强度-研究
IV. ①TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 294600 号

责任编辑 张秀华

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂

开 本 787mm×960mm 1/16 印张 24.25 字数 380 千字

版 次 2014 年 12 月第 1 版 2014 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-5103-2

定 价 56.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

过去国内从未编写出版过材料强度方面的研究生参考书,教学中虽然可以参考材料力学性能方面的一些专著,但因出版年代较早,内容上不能满足目前研究生教学研究的要求。因此需要一本能反映材料强度理论最新发展、内容的广度和深度适合的研究生教学用书。本书正是为满足这一要求而编写的。

本书共分8章。第1章位错的弹性理论是贯穿全书的理论基础,以位错应力场为主线,重点介绍位错弹性性质和位错动力学。第2章以位错与各种晶体缺陷和组织(如位错、晶界、固溶原子、第二相粒子等)的交互作用为主线,阐述流变应力、加工硬化和合金强化的微观本质。第3章以断裂力学为主线,介绍断裂的位错理论方面的新进展及其在宏观断裂研究中的应用。第4、第5和第6章的内容是高温强度问题,书中比较详细地阐述了蠕变及蠕变断裂的主要理论模型,以及蠕变理论的最新进展,对蠕变损伤和蠕变寿命及其预测等工程应用问题也做了适当的介绍。第7章和第8章的内容是机械疲劳、高温低周疲劳、腐蚀疲劳和应力腐蚀开裂等力学行为,主要介绍这些力学行为的基本规律和微观机制,以及疲劳断裂和应力腐蚀开裂的断裂力学处理。学习材料强度学,需要弹塑性力学基础知识。考虑到材料专业本科生和研究生多数人没有这方面的基础,本书在第1章的附录中介绍了弹性力学的基本知识。

本书的目的并不是全面介绍各种工程材料的力学性能。作为研究生的教学用书,本书重点阐述材料强度的基本理论和利用位错理论处理材料强度的基本方法,使研究生得到理论上的提高,而不是知识的简单扩充。很多硕士研究生和博士研究生在刚刚步入这一领域时,面对

近百年来的无数文献和文献中复杂的数学力学推导,往往感到无从入手,甚至放弃阅读那些理论上相当复杂、深入的文献。笔者希望本书能给这些研究生提供一条路径,沿着这个路径能够大大缩短通向材料强度研究最新水平的距离,很快进入到材料强度的研究中去。

由于作者的水平所限,书中疏漏及不妥之处在所难免,恳请读者指正。

编者

2013年9月

目 录

绪 论	(1)
第1章 位错的弹性理论	(5)
1.1 位错应力场	(5)
1.2 位错的能量及位错线张力	(9)
1.3 位错在外应力场中所受的力	(11)
1.4 位错与位错间的相互作用	(13)
1.5 位错与溶质原子的交互作用	(18)
1.6 位错与表面的相互作用	(21)
1.7 位错动力学	(22)
1.8 宏观变形与位错运动的关系	(28)
1.9 扩展位错及其运动	(30)
附录 I.1 弹性力学的基础知识	(41)
附录 I.2 刃型位错应力场的计算	(50)
附录 I.3 位错的点阵模型	(56)
参考文献	(60)
第2章 晶体塑性变形	(61)
2.1 概述	(61)
2.2 流变应力	(62)
2.3 流变应力与温度的关系	(69)
2.4 晶体变形与加工硬化	(73)
2.5 固溶体合金的变形——固溶强化	(83)
2.6 复相合金的变形——弥散强化	(90)
2.7 多晶体塑性变形——细晶强化	(93)
2.8 金属间化合物的塑性变形	(97)
2.9 陶瓷材料的塑性变形	(106)

参考文献	(110)
第3章 材料的断裂	(113)
3.1 格里菲斯断裂理论	(113)
3.2 线弹性断裂力学基础	(117)
3.3 弹塑性断裂力学基础	(130)
3.4 断裂韧性测量原理	(135)
3.5 断裂的位错理论	(137)
3.6 韧性(延性)断裂	(146)
3.7 脆性解理断裂	(152)
3.8 韧(延)-脆转变	(159)
附录Ⅲ.1 裂纹尖端应力场计算	(165)
参考文献	(173)
第4章 蠕变	(176)
4.1 概述	(176)
4.2 蠕变的基本特征	(177)
4.3 纯金属回复蠕变理论	(185)
4.4 固溶体合金的蠕变	(197)
4.5 第二相粒子弥散强化材料的蠕变	(205)
4.6 金属间化合物的蠕变	(219)
4.7 陶瓷材料的蠕变	(225)
4.8 扩散蠕变	(228)
4.9 合金和陶瓷蠕变的扩散系数问题	(234)
参考文献	(239)
第5章 蠕变损伤与断裂	(242)
5.1 概述	(242)
5.2 蠕变空洞形核	(243)
5.3 蠕变空洞的长大	(245)
5.4 蠕变裂纹扩展的空洞长大模型	(251)
5.5 控制蠕变裂纹扩展的断裂力学参数	(254)
5.6 持久寿命及其预测	(257)
参考文献	(263)

第 6 章 超塑性	(266)
6.1 变形的稳定性	(266)
6.2 超塑性的一般特征	(271)
6.3 超塑性变形机制	(277)
参考文献	(281)
第 7 章 循环变形与疲劳	(283)
7.1 单晶体金属的循环变形	(283)
7.2 循环变形中位错亚结构的变化	(286)
7.3 实际材料的循环变形	(290)
7.4 疲劳裂纹萌生	(292)
7.5 疲劳裂纹扩展	(298)
7.6 疲劳裂纹扩展的断裂力学问题	(302)
7.7 裂纹闭合	(305)
7.8 高温低周疲劳	(308)
7.9 蠕变疲劳交互作用	(311)
参考文献	(317)
第 8 章 材料的环境强度	(320)
8.1 氢致开裂	(321)
8.2 应力腐蚀开裂的一般特性	(325)
8.3 几种材料的应力腐蚀开裂	(328)
8.4 应力腐蚀开裂机制	(334)
8.5 应力腐蚀开裂的断裂力学	(338)
8.6 腐蚀疲劳的一般特性	(346)
8.7 腐蚀疲劳的断裂力学	(350)
参考文献	(353)
附录	(356)
附录 1 常用计量单位的换算	(356)
附录 2 常用应力强度因子 K_I	(357)
附录 3 钢铁硬度与强度对照表	(366)
附录 4 三点弯曲和紧凑拉伸的计算函数表	(376)

绪 论

工程材料的大部分是结构材料,如各种机械结构及零件和各种建筑结构材料。结构材料在载荷和环境作用下服役,为保证结构件的安全运行,要求材料在所服役的环境下具有足够的强度。随着科学技术的迅猛发展,结构材料的服役条件越来越繁重、苛刻,要求材料具有更高强度。因此,研究材料强度的本质,探索提高材料强度的途径,开发在不同环境下具有更高强度的材料是材料科技人员的重要使命。

何谓强度?强度是材料对变形与断裂的抗力。材料在载荷作用下发生弹塑性变形,弹塑性变形到一定程度发生断裂。用给定塑性变形量或塑性变形速度所对应的应力或断裂前所能承受的最大应力来表示强度,如屈服强度是刚刚发生塑性变形所对应的应力,蠕变强度是一定温度下给定的稳态蠕变速度所对应的应力,疲劳强度是给定的疲劳断裂周次所对应的应力幅,等等。

强度对材料化学成分和微观结构非常敏感,不同的合金强度不同,同一合金不同组织状态(如不同热处理状态),强度也可能有很大差别。材料强度还和环境 and 应力状态有关。例如,一些材料在某些特定腐蚀性介质中发生应力腐蚀开裂,断裂强度大大降低;腐蚀环境促使表面裂纹形成,使疲劳强度降低等。又如,在三向拉应力状态下材料很难发生塑性变形,断裂韧性明显降低。《材料强度学》的任务就是研究材料变形与断裂行为及其与应力、环境等外部因素的关系,探明变形与断裂行为的微观机制,并建立变形与断裂定量理论。

晶体材料的塑性变形是位错运动的结果。位错本身是材料的微观

结构,在外应力作用下大量位错运动产生晶体的宏观变形。晶体中的空位、位错、固溶原子、第二相粒子、晶界等微观结构及缺陷均与运动位错发生交互作用,影响位错运动,进而影响材料宏观变形与断裂行为。因此可以说,位错是将变形与断裂的微观过程(或机制)和宏观力学行为(或性质)联系起来的桥梁。位错是一切变形与断裂理论的出发点,并贯穿整个理论推导过程。所谓材料强度理论就是研究位错运动与材料宏观力学行为之间的定量(或定性)关系。

材料强度的研究始于 19 世纪工业革命时期。由于大量机械的应用,其结构件的变形和破坏受到广泛重视,开始分门别类地研究材料的力学行为。到了 20 世纪 20 年代已初步搞清了蠕变、疲劳、应力、腐蚀、开裂等力学行为的宏观经验规律。这一时期最重要的具有划时代意义的研究成果是格里菲斯断裂理论(1920 年),这个理论把裂纹引入断裂研究,从而产生了断裂力学。

对材料强度进行深入的理论研究是从 20 世纪 30 年代开始的。1934 年, G. Taylor, E. Orowan 和 M. Polanyi 各自独立地提出了位错的概念,开辟了材料强度研究的新纪元。此后 30 多年,利用位错理论系统而深入地研究材料变形与断裂的微观机制,建立了材料强度的基本的理论体系。例如,临界切应力和流变应力的位错理论、加工硬化理论、Weertman 的位错攀移控制蠕变模型等都是这一时期确立的。到了 20 世纪 60 年代,电子显微镜技术的发展和普及使材料强度研究获得了新的推动力。利用电子显微镜能够直接观察位错及其运动,因而能够根据实际观察到的(而不是假定的)位错结构来研究位错与材料微观结构的交互作用,提出更符合实际的微观模型,也能够对理论模型进行修正和验证。例如,根据蠕变的位错结构的观察结果,修正了早先 Weertman 根据位错均匀分布的假定提出的位错攀移控制的蠕变模型,提出考虑亚结构的回复蠕变模型。这一时期弹塑性断裂力学的完善(如 1968 年建立 J 积分理论)进一步推动了材料断裂研究。经过 20 多

年的研究,到 70 年代末 80 年代初基本上形成了比较完整的材料强度理论体系。80 年代中期以后,材料强度的研究继续进行和发展,但材料科学家更多的注意力转移到新材料方面。在研究先进结构材料,如金属间化合物、陶瓷、复合材料、聚合物等材料的强度方面做了大量的工作。

本书力求用有限的篇幅总结这 70 多年来材料强度研究中形成的基本的理论和方法,为此,内容上做了精选。本书以位错作为贯穿全书的主线,研究的对象是晶体材料,包括金属与合金、金属间化合物,以及非金属晶体材料(主要是陶瓷)。本书没有讨论聚合物、水泥一类的材料,因为这些材料的变形与断裂和位错无关,其强度遵循与晶体不同的原理。

本书第 1 章位错的弹性理论是贯穿全书的基础。位错理论内容极为丰富,有很多专著,本书只阐述材料强度理论所要用到的位错弹性性质和位错动力学。第 2 章以位错与各种晶体缺陷和微观结构的交互作用为主线展开。流变应力的本质是材料内部结构对位错运动的阻力。这个阻力包括点阵阻力(派-纳力),晶体中位错应力场所产生的长程内应力,位错在运动中遇到的各种短程障碍,如林位错、固溶原子、第二相粒子等。研究流变应力、加工硬化和合金强化,实际上就是从位错与各种缺陷、组织的交互作用出发计算这些阻力及其与温度及应变速度的关系。第 3 章以断裂力学为主线,重点阐述位错与裂纹的交互作用,以及由此产生的裂尖位错发射,裂尖无位错区的形成等裂纹尖端位错行为,探讨材料的断裂行为,阐明断裂理论。第 4、第 5 和第 6 章是高温强度问题。高温塑性变形的特点是变形引起的加工硬化和回复软化同时发生,处理高温变形与断裂问题时必须考虑时间因素或应变速度因素。高温变形的核心问题是建立应力、温度和应变速度之间的关系,即高温塑性变形的本构方程。考虑到国内各种专著和教材中对这一问题的系统论述比较少,本书用较多的笔墨,重点阐述了蠕变理论的发展

过程、主要模型及最新进展。第7、第8章主要介绍机械疲劳、腐蚀疲劳、应力腐蚀开裂和氢致断裂等脆性断裂问题。这些过程中虽然存在微观塑性,宏观上看基本上属于脆性断裂,因此,主要从裂纹扩展的角度探讨其宏观规律,对微观机制只做一般性介绍(实际上人们至今对这些力学行为的微观机制了解得不多)。

第 1 章 位错的弹性理论

位错是将材料的宏观力学行为与微观结构联系起来的桥梁。晶体材料受到外载荷作用时,载荷在晶体滑移面上产生分切应力,位错在此切应力作用下滑移,导致材料的宏观变形。位错的存在使其周围晶体的晶格产生畸变,产生弹性应力、应变场,即位错应力场。材料的许多力学行为和位错运动时位错应力场与外应力场的交互作用有关。因此,位错应力场以及由应力场产生的位错的种种弹性性质是研究材料力学行为的基础。

1.1 位错应力场

通常采用各向同性均匀连续弹性介质的变形来模拟位错。这种模拟是有局限性的,它不能反映晶格特点,因而无法处理位错线附近原子严重错排的区域。不过对距离位错中心几个原子间距以后的广大区域,能够近似地模拟位错应力场。

应用连续弹性介质模型计算位错应力场时,可以采用下列步骤:

(1) 设想将位错周围严重错排区(距位错中心小于 r_0) 挖去,剩下的晶体视为连续介质。

(2) 根据位错的定义,介质中位移场 $u(x, y, z)$ 沿位错滑移面有一个跃变 b , 即

$$u(M_1) - u(M_2) = b \quad (1.1)$$

式中, M_1 和 M_2 分别为处于滑移面两侧相对应的两点; b 为位错的柏氏矢量。

(3) 沿内外表面的应力分量应等于零。

(4) 求解应力函数 χ 的双调和方程(附录 I.1),即

$$\nabla^4 \chi = 0 \quad (1.2)$$

并使应力满足边界条件。

1.1.1 刃型位错的应力场

设直刃型位错线沿 z 轴,柏氏矢量平行于 x 轴,如图1.1所示。位移的 z 轴方向分量 u_z 为零,且其他两个位移分量 u_x 和 u_y 不随 z 而变化,因此是一个平面应变问题。

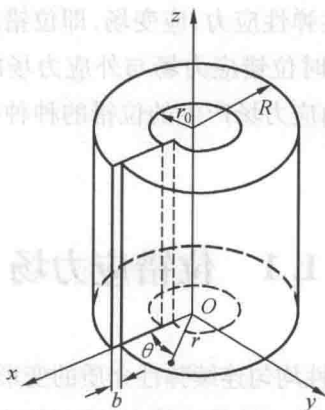


图 1.1 刃型位错应力场计算模型

各应力分量为

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{\partial^2 \chi}{\partial y^2} \\ \sigma_y = \frac{\partial^2 \chi}{\partial x^2} \\ \sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \\ \tau_{xy} = -\frac{\partial^2 \chi}{\partial x \partial y} \end{cases} \quad (1.3)$$

采用圆柱坐标时,式(1.2)变成

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}\right)^2 \chi = 0 \quad (1.4)$$

而各应力分量为

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \chi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \chi}{\partial \theta^2} \\ \sigma_\theta = \frac{\partial^2 \chi}{\partial r^2} \\ \tau_{r\theta} = -\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \chi}{\partial \theta} \right) \\ \sigma_z = \nu(\sigma_r + \sigma_\theta) \end{cases} \quad (1.5)$$

满足双调和方程(1.4)的应力函数 χ 可以用分离变量法求出。设方程式(1.4)的解具有分离变量的形式

$$\chi = rR\Theta \quad (1.6)$$

式中, R 为只包含变量 r 的函数; Θ 为只包含变量 θ 的函数。

将式(1.6)代入式(1.4),经适当的整理和运算可得到关于 r 的和关于 θ 的两个常微分方程。求解这些常微分方程,就可得到方程式(1.4)的一系列解,从中可挑选出满足刃型位错边界条件的应力函数(详见附录 I.2),即

$$\chi = Dr \ln r \sin \theta \quad (1.7)$$

式中, D 为常数。利用式(1.3)和(1.5)可求得各应力分量。刃型位错产生的应力场中不等于零的应力分量有沿三个轴向的正应力 σ_x, σ_y 和 σ_z 以及切应力 τ_{xy} ,即

$$\sigma_x = -\frac{Gb}{2\pi(1-\nu)} \frac{y(3x^2 + y^2)}{(x^2 + y^2)^2} \quad (1.8)$$

$$\sigma_y = \frac{Gb}{2\pi(1-\nu)} \frac{y(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2} \quad (1.9)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \frac{Gb}{2\pi(1-\nu)} \frac{x(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2} \quad (1.10)$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (1.11)$$

用圆柱坐标系时不等于零的应力分量可写成

$$\sigma_r = \sigma_\theta = -\frac{Gb}{2\pi(1-\nu)} \frac{\sin \theta}{r} \quad (1.12)$$

$$\tau_{r\theta} = \tau_{\theta r} = \frac{Gb}{2\pi(1-\nu)} \frac{\cos \theta}{r} \quad (1.13)$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_r + \sigma_\theta) \quad (1.14)$$

1.1.2 螺型位错的应力场

位错线沿 z 轴的螺型位错可通过下列操作形成,如图 1.2 所示,将弹性体沿 xz 面剖开,剖面两侧沿 z 轴产生相对位移 b 后再胶合起来。由于螺型位错的变形是纯剪切的,位移的 x 、 y 分量为零,即 $u_x = u_y = 0$,而 $u_z \neq 0$,所以平衡条件可简化为

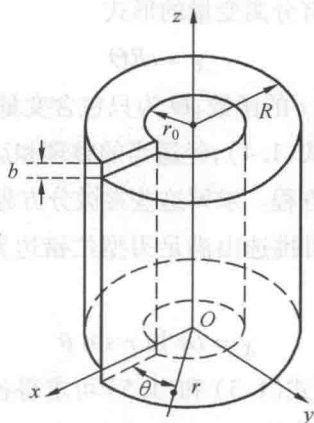


图 1.2 螺型位错应力场计算模型

$$\nabla^2 u_z = 0 \quad (1.15)$$

位移所要满足的螺型位错的边界条件为

$$(u_z)_{\theta=2\pi} - (u_z)_{\theta=0} = b \quad (1.16)$$

很容易求得该方程的解为

$$u_z = \frac{b}{2\pi} \theta = \frac{b}{2\pi} \arctan \frac{y}{x} \quad (1.17)$$

不等于零的应力分量有

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = -\frac{Gb}{2\pi} \frac{y}{x^2 + y^2} \quad (1.18)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \frac{Gb}{2\pi} \frac{x}{x^2 + y^2} \quad (1.19)$$

在圆柱坐标系中,不等于零的应力分量有

$$\tau_{\theta z} = \tau_{z\theta} = \frac{Gb}{2\pi r} \quad (1.20)$$

可以看出,螺型位错没有正应力,所有应力都是径向对称的,与 θ 无关。

1.2 位错的能量及位错线张力

1.2.1 直位错的能量

由于位错周围存在弹性应力场,在晶体中引入单位长度的位错线就会使晶体的能量升高,将这一能量增加定义为位错线的能量。从理论上讲,根据位错周围应力、应变场可计算畸变能密度函数,然后将应变能密度在整个体积内积分就能算出由于位错存在所产生的总畸变能,即位错线的能量^[1,2]。但这个方法很复杂,而计算形成位错时所做的功较为简明。对如图 1.1 所示的刃型位错沿 xz 面剖开,将剖面以上部分移动 b 的距离,计算此过程的功。将剖面分成许多单位长度的面元 dr ,位移是从 0 到 b 逐步进行的,设已作了位移 αb ($0 \leq \alpha \leq 1$),沿面元所加的切力为 $\tau_{r\theta} dr$, $\tau_{r\theta}$ 应等于柏氏矢量为 αb 的位错在面元所在位置产生的应力分量。令 $\cos \theta = 1$,由式(1.12)可得

$$\tau_{r\theta} = \frac{G\alpha b}{2\pi(1-\nu)} \frac{1}{r} \quad (1.21)$$

在此切力作用下位移 $d(\alpha b)$ 所做的功为