

● 李庆生 编著

材料强度学

● 山西科学教育出版社

材料强度学

李庆生 编著

•

山西科学教育出版社出版 (太原并州北路十一号)

山西省新华书店发行 山西新华印刷厂印刷

•

开本: 850×1168 1/32 印张: 15.75 字数: 380千字

1990年9月第1版 1990年9月太原第1次印刷

印数: 1—1000册

•

ISBN 7—5377—0298—5

T·59 定价: 8.00 元

内 容 简 介

本书系统阐述包括金属、高分子、复合材料在内的现代工程材料的宏观与微观强度理论。全书共分三篇,分别为强度设计原理、微观强度理论及工程应用。第一篇对准静态载荷下强度设计的基本原理与依据作了全面介绍;微观强度理论篇在扼要叙述材料结构与缺陷的基础上,着重总结了近年来有长足进步的微观屈服强度理论与微观断裂力学理论;第三篇分章讨论了在腐蚀介质、高温、交变应力、应力集中、冲击载荷以及磨损等工程实际条件下,材料的失效原因及强度设计对策。

作为材料科学与固体力学一门新兴边缘学科的介绍,本书可满足机械、建筑、材料、力学等专业科学研究及工程技术人员在强度设计与开发方面的共同需要,本书也可作为上述专业高年级大学生及研究生的教学参考书。

作者系太原工业大学材料科学与工程系副教授,长期从事材料科学与固体力学交叉学科研究,1986年在美国南卡大学(USC)获博士学位,曾任法国巴黎大学(XIII)客座教授。在Eng. Fract. Mech., Scripta Met., Fatigue Fract. Engng Mater. Struct., Int. J. Fract., Acta Met., J. Strain Analysis, 金属学报, 力学学报等国际国内学术杂志发表有关论文30余篇。

前 言

材料强度学研究固体材料力学行为,揭示材料失效机理,阐述强度设计准则。作为一门新兴边缘学科,可以满足从事机械、土木建筑、材料科学研究、工程技术人员深入认识和合理利用材料强度的共同需要。

材料、信息、能源一同被称为当代工程技术的三大支柱。近年来,随着空间技术、军事工业、原子能工业、海洋开发和新兴化工产业的发展,对结构材料强度提出更苛刻、更严格的要求。譬如原子能工业需要能在辐射、腐蚀条件下保持一定强度的结构材料,而空间飞行器必须选用耐高温、比强度高的结构材料。显然,材料强度学研究的深入程度、具备特殊性能的新材料的开发速度成了科学技术进步的一个决定性因素。

材料强度学形成一门独立的学科,其标志在于已经建立了一个相对完整的理论体系。这一体系包括宏观强度理论、微观强度理论和断裂理论三个部分。宏观强度理论基本上是一种实验理论,或称作经验理论。最早的宏观强度理论可以追溯到一个多世纪以前。然而,结合着各种加载伴随条件,用力学参量表征宏观强度理论的研究一直在不断进行,为强度设计提供着简单实用的依据。微观强度理论以位错理论为主体,经过四十多年的发展,已经广泛地用来解释金属材料的变形与断裂,成了理解金属力学行为的钥匙。断裂力学是在研究第二次世界大战以来大量舰艇、桥梁、飞机的灾难性断裂破坏中发展起来的。千里之堤溃于蚁穴,这句民谚生动揭示了缺陷对结构强度的致命性损害。对许多结构材料,断裂韧性和屈服强度此长彼消,这无疑是对片面追求高屈

服强度倾向的批判,对一味扩大安全系数的传统强度设计思想的否定。

材料强度学的形成是多学科相互交叉、渗透的结果。当固体力学、固体物理、化学、统计学同材料科学相结合,应用于强度问题时,便派生出一系列学科分支。然而,在对材料强度学的产生作出贡献的诸学科中,起主导作用的是固体力学和材料科学。这是材料强度本身性质所决定的,材料强度表征了材料承受外加载荷而不发生失效的能力。可以说材料强度学是固体力学与材料科学的边缘学科。国外将相近的学科范畴称为“力学冶金”,正反映了这一特征。然而,力学冶金又确实包含诸如轧制等冶金的力学问题,因此就内容而言又与材料强度学有很大不同。

宏微观相结合的强度学方法论是强度学区别于其它学科的最显著特点。材料强度是组织结构敏感的;精确的强度设计依赖于描述组织结构与缺陷相互作用(如晶界与小裂纹),这些特征决定了建立在连续均匀介质模型上的宏观力学不可能单独奏效,需要采取宏观与微观相结合的方法,在细观范畴上描述变形与断裂之规律,建立强度指标与细观组织参量之间的联系。以此实现外因与内因、力学与机理的统一。

材料强度学另一特点在于注重各种结构材料力学行为及其机制方面的共性,综合地、有比较地研究、阐述强度理论,这既符合人类认识规律,也满足了当代强度设计的要求。

材料强度学涉及的是一独立、完整的理论体系,同时也是一仍在发展的领域。新材料、新实验手段、新理论不断出现。在这种情况下,尽管我们今天所认识的强度学规律比以往任何时候都更丰富,学科雏形已经形成,体系已经确立,但还不能说已经尽善尽美。本书着重介绍比较成熟的理论,对于近年来活跃的分支领域中有代表性的研究成果,也作了介绍。对有关实验方法的内容,本书已压缩到最低限度,具体细节只能从专门书籍中查

找。

杨桂通、蔡其巩、谢锡善、张以增、柳春图教授对本书的编写提出过许多指导性意见，太原工业大学陈秉铨，太原重机学院李志潭、袁荣春、刘渭祈副教授也提出了不少宝贵的意见，在此一并致以诚挚的谢意。

作者

符 号 说 明

A : 截面积。

a : 中心穿透裂纹半长度; 点阵常数。

a_f : 断裂时临界裂纹半长度。

B : 板厚。

b : 位错的柏氏矢量模; 银纹厚度。

C : 常数。

CTOD: 裂纹顶端张开位移。

CTSD: 裂纹顶端滑开位移。

c : 波速。

D : 缺口深度; 滑移距离。

$D(x)$: 位错密度。

d : 晶粒平均直径。

E : 弹性模量。

e : 真实应变; 或自然对数底。

F : 力。

f : 系数; 摩擦力; 频率。

G : 弹性应变能释放率。

g : 函数符号。

H : 硬度; 激活能。

h : 厚度。

i, j : 哑元;

J : 损耗柔量; J 积分。

K : 应变硬化系数; 常数。

K_I : 弹性应力集中系数。

K_I, K_{II}, K_{III} : 分别为 I、II、III 型应力强度因子。

K_C : 临界应力强度因子。

K_{Ic} : 平面应变断裂韧性。
 k : 体积模量, 玻尔兹曼常数。
 L : 位错线长度;
 l, m, n : 某平面的法线相对于 x 、 y 、 z 轴的方向余弦。
 N : 应力循环周次。
 P : 压力, 载荷; 概率。
 n : 硬化指数。
 R : 气体常数, 可靠性。
 R_s : 最小循环应力与最大循环应力之比。
 S : 真实应力。
 s : 秒; 距离、颗粒间距。
 T : 绝对温度; 线张力。
 t : 时间; 厚度。
 U : 弹性应变能; 能量。
 u : 单位体积应变能; 沿 x 方向位移。
 V : 体积。
 v : 沿 y 方向位移; 速度。
 W : 外力做功。
 w : 沿 z 方向位移。
 x, y, z : 直角坐标。
 α : 角度; 系数。
 β : 角度; 系数。
 γ : 单位面积表面能; 剪切应变。
 ε : 名义应变。
 η : 粘性系数。
 θ : 角度。
 λ : 常数; 波长。
 μ : 剪切模量。
 μm : $10^{-6} m$ 。
 ν : 泊松比。
 ξ : 磨损率。

ρ : 密度; 位错密度; 缺口半径。

σ : 名义应力。

σ_s : 屈服应力。

σ_f : 失效力。

σ_{-1} : 疲劳极限。

σ_c : 临界应力。

τ : 剪切应力。

ϕ : 角度; 位向因子。

目 录

第一篇 强度设计原理

第一章 强度与失效	(1)
1.1 强度与失效的概念	(1)
1.1.1 材料失效模式	(1)
1.1.2 材料、构件和结构强度	(5)
1.2 断裂力学和强度设计	(6)
1.3 强度的统计学特征	(10)
1.3.1 基本概念	(10)
1.3.2 可靠性	(12)
1.4 强度设计方法论	(13)
第二章 应力应变关系	(17)
2.1 应力	(17)
2.1.1 一点的应力状态	(17)
2.1.2 主应力	(19)
2.1.3 主剪应力	(21)
2.2 应变	(23)
2.2.1 一点的应变状态	(23)
2.2.2 主应变	(24)
2.3 材料的拉伸变形行为	(25)
2.3.1 拉伸试验	(25)
2.3.2 应力应变曲线	(28)
2.4 真实应力应变曲线	(31)

2.4.1 真应力与真应变	(31)
2.4.2 真应力应变曲线	(33)
2.4.3 缩颈形成条件	(36)
2.5 广义虎克定律	(37)
2.5.1 各向异性弹性体	(38)
2.5.2 各向同性弹性体	(39)
2.6 塑性应力应变关系	(43)
2.7 理想粘弹性体应力应变关系	(47)
2.7.1 粘性流动与粘弹性变形	(47)
2.7.2 粘弹性变形模型	(49)
2.7.3 时间——温度等效原理	(53)
第三章 经典强度理论	(57)
3.1 最大正应力理论	(57)
3.2 最大正应变理论	(58)
3.3 最大剪应力理论	(59)
3.4 畸变能理论	(61)
3.5 莫尔圆在强度设计中的应用	(64)
3.5.1 三维应力状态的莫尔圆	(64)
3.5.2 莫尔失效理论	(65)
3.6 力学状态图	(67)
3.7 强度理论在设计中的应用	(69)
3.7.1 选用合适的强度理论	(70)
3.7.2 选用合适的安全系数	(70)
第四章 断裂韧性	(73)
4.1 裂纹顶端应力	(73)
4.1.1 线弹性裂纹	(73)
4.1.2 应力强度因子	(76)
4.2 裂纹顶端塑性区	(76)

4.2.1 塑性区尺寸的近似计算	(76)
4.2.2 平面应力与平面应变	(78)
4.2.3 变形方式	(79)
4.3 平面应变断裂韧性	(81)
4.3.1 一般概念	(81)
4.3.2 工程材料的断裂韧性	(82)
4.4 韧脆性转变	(83)
4.4.1 韧脆性转变现象	(83)
4.4.2 韧脆性转变温度	(85)
4.5 裂纹扩展能量释放率	(87)
4.5.1 Griffith理论	(87)
4.5.2 能量释放率	(89)
4.6 裂纹顶端张开位移	(91)
4.7 扩展阻力曲线	(93)
4.8 复合型断裂判据	(95)
第五章 断裂控制设计原则	(100)
5.1 选择材料	(100)
5.2 韧脆性转变控制原则	(103)
5.2.1 全厚度屈服准则	(104)
5.2.2 比例分析方法	(105)
5.3 破裂前渗漏原则	(107)
5.4 破损安全	(109)
5.5 断裂控制设计原理	(111)
5.5.1 断裂控制设计内容	(111)
参考文献	(116)

第二篇 微观强度理论

第六章 缺陷与强度	(119)
-----------------	-------

6.1 固体的理论强度	(119)
6.2 晶体缺陷	(121)
6.2.1 位错	(121)
6.2.2 空位和间隙原子	(125)
6.2.3 晶界	(126)
6.3 金属中的非晶体缺陷	(130)
6.4 高分子材料的结构特征	(133)
6.4.1 高分子材料的强化机理	(133)
6.4.2 碳链聚合物	(136)
6.4.3 杂链热塑性聚合物	(138)
6.5 聚合物缺陷	(141)
6.5.1 位错和点缺陷	(141)
6.5.2 链结构缺陷	(141)
6.5.3 银纹	(143)
6.6 内界面变形兼容性原理	(146)
6.7 内耗	(149)
6.8 缺陷对强度影响的两重性	(153)
第七章 微观强度理论	(157)
7.1 位错的基本性质	(157)
7.1.1 位错的弹性性质	(157)
7.1.2 位错间的交互作用	(160)
7.1.3 晶格对位错运动的阻力	(164)
7.1.4 位错的增殖	(164)
7.2 塑性变形方式	(166)
7.2.1 滑移	(166)
7.2.2 孪生	(169)
7.3 屈服现象的位错理论	(170)
7.3.1 屈服应力降落	(170)

7.3.2 延迟屈服和应变时效	(172)
7.4 屈服强度的微观理论	(174)
7.4.1 合金元素含量——屈服强度关系	(174)
7.4.2 分散相颗粒——屈服强度关系	(177)
7.4.3 晶粒大小——屈服强度关系	(179)
7.4.4 位错密度——屈服强度关系	(182)
7.4.5 两相合金的强度	(183)
7.5 高分子材料的变形机制	(184)
第八章 细观断裂力学	(188)
8.1 断裂机制	(188)
8.1.1 断裂类型	(189)
8.1.2 断裂图	(191)
8.2 解理断裂	(195)
8.2.1 解理断裂的亚型	(195)
8.2.2 解理裂纹形成	(196)
8.2.3 解理裂纹扩展	(199)
8.3 韧性断裂	(202)
8.3.1 韧性断裂和第二相颗粒	(202)
8.3.2 空洞形成机理	(204)
8.3.3 空洞生长	(205)
8.4 裂纹的位错模型 (BCS模型)	(208)
8.4.1 位错塞积群与裂纹的相似性	(209)
8.4.2 BCS模型	(211)
8.5 断裂韧性的微观理论	(213)
8.5.1 强度-韧性关系	(213)
8.5.2 RKR模型	(215)
8.5.3 RJ模型	(218)
8.6 高分子材料的断裂	(223)

8.6.1 速率效应	(223)
8.6.2 无定形聚合物的断裂	(224)
8.6.3 晶态与半晶态聚合物断裂	(226)
8.6.4 提高聚合物强度与韧性的途径	(227)
8.7 细观断裂力学方法论	(230)
8.7.1 细观应力与应变	(230)
8.7.2 细观模型	(231)
8.7.3 细观变形测量	(233)
第九章 复合材料强度	(235)
9.1 复合材料简介	(235)
9.2 纤维复合材料	(236)
9.3 层合复合材料和颗粒复合材料	(242)
参考文献	(244)

第三篇 工程应用

第十章 应力腐蚀开裂和环境强度	(248)
10.1 环境脆性特征	(248)
10.1.1 环境作用脆性的分类	(248)
10.1.2 应力腐蚀开裂的一般特征	(249)
10.2 应力腐蚀机理	(253)
10.2.1 阳极溶解型应力腐蚀机制	(253)
10.2.2 氢脆型应力腐蚀机制	(254)
10.3 SCC裂纹形成	(258)
10.4 SCC裂纹扩展	(261)
10.4.1 SCC裂纹扩展方式	(261)
10.4.2 SCC裂纹扩展同应力强度因子的关系	(263)
10.5 高分子材料的环境强度	(265)
第十一章 金属的蠕变和高温强度	(268)

1. 11 蠕变现象	(268)
11.1.1 蠕变曲线	(268)
11.1.2 蠕变类型	(270)
11.2 蠕变律	(271)
11.2.1 蠕变随时间的变化	(272)
11.2.2 应力和温度的影响	(273)
11.3 蠕变机制	(276)
11.3.1 扩散对蠕变的影响	(276)
11.3.2 蠕变机制	(278)
11.4 蠕变断裂	(285)
11.4.1 蠕变断裂类型	(285)
11.4.2 蠕变断裂机制	(286)
11.5 蠕变实验数据的外推	(290)
11.6 三维应力状态下的蠕变	(293)
第十二章 疲劳强度	(297)
12.1 材料的循环变形行为	(297)
12.1.1 循环载荷	(297)
12.1.2 材料的循环变形性质	(298)
12.2 高周疲劳	(302)
12.2.1 P—S—N 曲线	(303)
12.2.2 平均应力的影响	(304)
12.2.3 多轴应力疲劳	(309)
12.3 低周疲劳	(310)
12.3.1 低周疲劳特征	(310)
12.3.2 应变寿命曲线	(311)
12.4 疲劳裂纹形成	(314)
12.4.1 疲劳裂纹形成的一般特征	(314)
12.4.2 夹杂物	(315)

12.4.3 驻留滑移带 (PSB)	(316)
12.5 疲劳裂纹扩展	(319)
12.5.1 Paris公式	(319)
12.5.2 裂纹闭合效应及裂纹顶端屏蔽	(321)
12.5.3 疲劳裂纹扩展机制	(325)
12.6 矢量裂纹顶端位移判据	(328)
12.7 细观组织小裂纹	(332)
12.8 疲劳蠕变交互作用	(338)
12.8.1 交变应力对蠕变行为的影响	(338)
12.8.2 累积损伤方法	(339)
12.8.3 修正的 Coffin—Manson 关系	(340)
12.8.4 分解应变范围方法	(342)
12.9 影响材料疲劳行为的因素	(344)
12.10 高分子材料的疲劳	(348)
12.10.1 热疲劳破坏	(348)
12.10.2 疲劳断裂	(350)
第十三章 缺口强度	(353)
13.1 弹性缺口应力集中	(353)
13.1.1 理论应力集中系数	(353)
13.1.2 缺口顶端弹性应力应变状态	(358)
13.2 缺口塑性变形	(359)
13.2.1 缺口局部屈服	(360)
13.2.2 整体屈服	(362)
13.2.3 Neuber关系	(366)
13.3 缺口断裂	(367)
13.4 缺口疲劳	(370)
13.4.1 缺口疲劳系数	(371)
13.4.2 缺口局部循环应力应变	(373)