

断裂物理基础



哈宽富 著

科学出版社



内 容 简 介

本书主要从微观的晶格层次出发描述金属的断裂现象、机制及其相应的理论。作者尽可能地收集至今已发表的有关主要文献,对断裂物理作了全面系统的叙述。

本书可作为大专院校有关专业师生的教学用书或参考书籍,也可供从事材料科学研究的工作人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

断裂物理基础/哈宽富著.-北京:科学出版社,1999.

ISBN 7-03-006694-4

I. 断… II. 哈… III. 断裂-理论 IV. O346.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 09101 号

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

2000年1月第一版 开本:850×1168 1/32

2000年1月第一次印刷 印张:14 5/8

印数:1 1 500 字数:380 000

定价:30.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈北燕〉)

序 言

断裂问题的研究从 Griffith 时代算起至今已有 70 多年的历史, 很长一个时期进展十分缓慢。直到 50 年代初连续发生了多次震惊工程技术界的低应力脆断事故, 在寻求对策中慢慢地形成了断裂力学这一分支学科。60 年代前后可以说断裂力学已建立起自己完整的学术体系, 提出了断裂韧性这一新概念, 强调工程设计中的强韧结合, 材料发展的强韧化。70 年代初断裂力学传入我国, 当时掀起一阵断裂力学热, 也为断裂力学在我国生根打下基础。但纵观近年来国内外发展的趋势, 看来以连续介质为基础来研究断裂是不够的, 所谓宏观与微观结合的老提法重新受到人们的关注。

另一方面, 几乎与此同时, 作为固体力学性质微观基础的位错理论也正处于艰难曲折的发展阶段。直到位错的存在为实验证实, 力学性质是结构敏感的这一概念深入人心后, 位错理论才被人们接受。但这并不等于问题已经解决, 相反地, 对于像力学性质中加工硬化这个十分基本的现象至今位错理论也没给出最后的答案, 所以就更不能奢谈断裂了。即令如此, 可以说国内外对断裂机制的研究一直没有间断过, 不过它们的内容十分分散, 目的性不强, 多出自自发而无系统性, 并且多数属半微观或细观层次。近十多年情况有所改变, 断裂机制的研究在断裂力学发展的影响下, 已取得很大进展。譬如, 晶格力学已渗入固体的断裂问题中; 断裂力学中的 J -积分可以从能量动量张量中找到它的物理根源, 并进而求出裂尖应力强度因子与位错分布函数间的关系; 本来在断裂力学中缺乏理论基础的裂纹尖端张开位移在 BCS 理论中找到了它的微观含义; 裂尖结构的研究同解决力学性质的位错群体

结构最小能量原理的提出等都已取得很大进展；最近甚至已开始用严格的多体问题的理论方法对晶体中一些缺陷的结构进行计算。所有这些都说明对断裂机制的研究已不是奢谈，而是对微观力学工作者起着柳暗花明又一村的作用。

从国际学术动态来看，影响较大的国际断裂会议（ICF）自从1965年在日本 Sendai 召开以来虽已举行了6次，但现在以各种题目讨论断裂机制的小型会议却十分活跃。早在1987年美国能源部、材料科学分部、材料科学委员会召开的专家小组会所公布的执行总结中已明确强调断裂微观过程研究的重要性。这些情况都足以指出断裂问题研究的新动向。

本书基于这种势态企图把最近已发表的主要资料收集起来，在断裂物理的思想基础上把它们系统化，给读者一个整体的概念。这样做既方便初学者入门，又能使今后的研究工作方向明确，有更高的自觉性；也有利于从事材料宏观与微观力学性质的人的相互了解，彼此接近，促进宏观与微观断裂问题研究的结合。

作者在多年的教学工作中一直注意收集这方面的资料。至于结构安排，最后基本上按1992年在加拿大多伦多大学冶金与材料科学系给研究生讲授固体的力学性质Ⅰ的教学大纲为蓝本。内容主要是以晶格层次为背景阐明材料的断裂机理，故将书名定为断裂物理基础。全书共分五部分：第一部分为预备篇，扼要地介绍断裂力学及其有关的位错理论的基本知识；第二部分介绍断裂现象同宏观的断裂理论；第三部分介绍微观的断裂理论；第四部分介绍断裂理论的应用；第五部分介绍非金属材料的断裂。对于微观力学前辈陈能宽同张兴铃两位院士悉心推荐本书申请“优秀研究成果专著出版基金”，以及沈阳金属研究所材料疲劳断裂实验室主任王中光研究员组织人力细心审阅本书，在此一并表示衷心感谢。

在此书行将出版之际，作者谨向为此书的出版工作付出艰辛劳动的中国科学院金属研究所徐永波研究员、吉林大学材料科学

系刘玉梅教授、赵竹第副教授、王春忠先生致以深切的谢意。

由于作者水平有限，书中难免会有错误和不妥之处，请读者批评指正。

哈宽富

1994. 4. 于长春

目 录

序言

第一篇 预备篇

第一章 断裂力学基础简介	(1)
§ 1.1 缺口断裂力学	(1)
§ 1.1.1 缺口敏感性	(2)
§ 1.1.2 应力集中	(3)
§ 1.1.3 应变集中	(5)
§ 1.1.3.1 小范围屈服	(5)
§ 1.1.3.2 整体屈服	(9)
§ 1.2 裂纹断裂力学	(10)
§ 1.2.1 Griffith 理论	(11)
§ 1.2.2 线弹性断裂力学	(13)
§ 1.2.2.1 应力强度因子	(13)
§ 1.2.2.2 裂纹扩展力	(17)
§ 1.2.2.3 裂纹长的塑性区校正	(19)
§ 1.2.2.4 断裂判据与断裂韧性	(21)
§ 1.2.3 弹塑性断裂力学	(22)
§ 1.2.3.1 J 积分	(23)
§ 1.2.3.2 裂纹尖端张开位移 (C.O.D)	(26)
§ 1.2.3.3 阻力曲线 (R 曲线)	(27)
§ 1.3 小结	(29)
第二章 三种典型结构金属中的位错组态及其形变特点	(30)
§ 2.1 扩展位错	(30)

§ 2.1.1 F.C.C. 结构中的扩展位错	(31)
§ 2.1.2 H.C.P. 结构中的扩展位错	(33)
§ 2.1.3 B.C.C. 结构中的扩展位错	(36)
§ 2.2 形变的不对称性	(39)
§ 2.3 形变亚结构	(45)
§ 2.3.1 形变机制的微观特征	(45)
§ 2.3.2 胞化现象	(46)
§ 2.4 屈服前形变	(50)
§ 2.5 小结	(51)

第二篇 断裂现象及其宏观理论

第三章 不同结构金属及合金的断裂现象	(53)
§ 3.1 单相固溶合金的断裂	(54)
§ 3.1.1 F.C.C. 结构合金	(55)
§ 3.1.2 B.C.C. 结构合金	(55)
§ 3.1.3 H.C.P. 结构合金	(63)
§ 3.2 弥散强化合金的断裂	(64)
§ 3.2.1 F.C.C. 结构合金	(65)
§ 3.2.2 B.C.C. 结构合金	(65)
§ 3.2.3 H.C.P. 结构合金	(67)
§ 3.3 有序合金的断裂	(68)
§ 3.3.1 交滑移控制的脆断	(70)
§ 3.3.2 杂质控制的脆断	(73)
§ 3.4 金属间化合物的断裂	(73)
§ 3.5 难熔金属的断裂	(76)
§ 3.5.1 间隙合金元素对断裂的影响	(77)
§ 3.5.2 置换合金元素对断裂的影响	(78)
§ 3.5.3 高温断裂	(79)
§ 3.6 小结	(81)

参考文献	(82)
第四章 断裂的宏观理论	(83)
§ 4.1 断裂方式	(83)
§ 4.2 Griffith 理论在金属中的应用	(86)
§ 4.3 断裂过程中裂尖的行为	(91)
§ 4.3.1 裂尖的加工硬化	(91)
§ 4.3.2 裂尖的塑性松弛	(94)
§ 4.4 影响金属断裂行为的外部因素	(98)
§ 4.4.1 受力状态的影响	(98)
§ 4.4.2 形变温度的影响	(100)
§ 4.4.3 形变速度的影响	(104)
§ 4.4.4 试样几何形状的影响	(106)
§ 4.5 小结	(111)
第五章 断口分析	(112)
§ 5.1 常规断口分析	(112)
§ 5.2 分形	(124)
§ 5.2.1 规则分形	(124)
§ 5.2.2 随机分形	(127)
§ 5.3 分形的应用	(127)
§ 5.3.1 实验方法	(128)
§ 5.3.2 研究结果综述	(128)
§ 5.4 小结	(130)
参考文献	(131)

第三篇 断裂的微观理论

第六章 裂纹的成核与长大	(133)
§ 6.1 单晶中裂纹的成核与长大	(133)
§ 6.1.1 裂纹的成核	(133)
§ 6.1.2 裂纹的长大	(137)

§ 6.2 多晶中裂纹的成核与长大	(140)
§ 6.2.1 裂纹的成核	(141)
§ 6.2.2 裂纹的长大	(144)
§ 6.3 沿晶断裂	(146)
§ 6.4 小结	(148)
参考文献	(149)
第七章 金属中裂纹尖端地区的结构	(150)
§ 7.1 裂纹尖端地区结构的实验观察	(151)
§ 7.1.1 薄膜试样的结果	(151)
§ 7.1.2 大块试样的结果	(154)
§ 7.2 裂纹模型	(157)
§ 7.2.1 弹性裂纹模型	(157)
§ 7.2.2 塑性裂纹模型 (BCS 模型)	(159)
§ 7.2.3 弹塑性裂纹模型 (Ohr 模型)	(161)
§ 7.3 小结	(171)
参考文献	(172)
第八章 裂纹的失稳扩展与断裂判据	(175)
§ 8.1 形变的不均匀性与裂纹的失稳扩展	(175)
§ 8.2 断裂判据	(177)
§ 8.2.1 应力判据	(177)
§ 8.2.2 应力强度因子同裂纹扩展力	(178)
§ 8.2.3 J -积分同 COD (δ)	(181)
§ 8.2.4 RKR 模型	(181)
§ 8.2.5 统计模型	(184)
§ 8.3 小结	(186)
参考文献	(187)
第九章 裂纹的稳态扩展	(189)
§ 9.1 裂纹稳态扩展的力学处理	(192)
§ 9.2 裂纹稳态扩展的位错机制	(195)

§ 9.3 裂纹稳态扩展的原子过程	(201)
§ 9.4 裂纹稳态扩展的动力学及止裂现象	(209)
§ 9.5 小结	(212)
参考文献	(214)
第十章 延性断裂	(216)
§ 10.1 延性断裂现象	(216)
§ 10.1.1 单晶的延性断裂	(217)
§ 10.1.2 多晶的延性断裂	(217)
§ 10.2 形变不稳定性与颈缩	(221)
§ 10.3 影响延性断裂的因素	(223)
§ 10.4 延性断裂的机制与判据	(228)
§ 10.5 小结	(236)
参考文献	(237)
第十一章 金属的延脆转变	(239)
§ 11.1 热激活理论	(240)
§ 11.1.1 Stroh 理论	(240)
§ 11.1.2 Petch 理论	(241)
§ 11.1.3 无位错 Si 单晶的最近研究成果	(242)
§ 11.2 临界位错密度理论	(245)
§ 11.3 能量损耗率理论	(247)
§ 11.4 Thomson 理论	(250)
§ 11.5 小结	(251)
参考文献	(252)

第四篇 断裂理论的应用

第十二章 氢脆	(255)
§ 12.1 氢在金属中的固溶度 (混乱分布)	(258)
§ 12.2 氢在金属中的扩散与捕获现象	(261)
§ 12.3 不可逆氢脆与可逆氢脆	(265)

§ 12.3.1 不可逆氢脆	(265)
§ 12.3.2 可逆氢脆	(271)
§ 12.4 氢的脆化理论	(273)
§ 12.5 氢原子在金属中的状态	(277)
§ 12.6 小结	(279)
参考文献	(279)
第十三章 蠕变断裂	(283)
§ 13.1 蠕变空洞的成核	(285)
§ 13.2 蠕变空洞的长大	(290)
§ 13.2.1 形变控制模型	(290)
§ 13.2.2 扩散控制模型	(292)
§ 13.2.3 形变与扩散耦合控制模型	(295)
§ 13.3 小结	(299)
参考文献	(300)
第十四章 疲劳断裂	(302)
§ 14.1 低应变疲劳断裂	(307)
§ 14.1.1 F.C.C. 结构金属疲劳的位错结构	(307)
§ 14.1.1.1 PSB 的形成	(307)
§ 14.1.1.2 疲劳裂纹的成核与长大	(315)
§ 14.1.2 B.C.C. 结构金属疲劳的位错结构	(324)
§ 14.1.3 H.C.P. 结构金属疲劳的位错结构	(327)
§ 14.1.4 层错能对疲劳位错结构的影响	(329)
§ 14.2 高应变疲劳断裂	(334)
§ 14.3 疲劳断裂理论	(338)
§ 14.3.1 疲劳裂纹扩展速率与 ΔK 的关系	(339)
§ 14.3.2 塑性钝化理论 (Tomkins 理论)	(340)
§ 14.4 短裂纹疲劳	(341)
§ 14.4.1 短裂纹疲劳的特点	(344)
§ 14.4.2 短裂纹的扩展	(349)

§ 14.5 疲劳和蠕变的交互作用·····	(354)
§ 14.6 小结·····	(357)
参考文献·····	(359)

第五篇 非金属材料的断裂

第十五章 陶瓷材料的断裂 ·····	(365)
§ 15.1 完全脆性陶瓷单晶中的裂纹成核、长大 同扩展·····	(368)
§ 15.2 半脆性陶瓷单晶中裂纹的成核、长大同 扩展·····	(372)
§ 15.3 延性陶瓷的断裂·····	(379)
§ 15.4 影响陶瓷材料断裂因素的讨论·····	(380)
§ 15.5 脆性陶瓷材料的增韧·····	(384)
§ 15.6 小结·····	(386)
参考文献·····	(387)
第十六章 高分子聚合物的断裂 ·····	(388)
§ 16.1 聚合物的结构·····	(388)
§ 16.1.1 化学结构 ·····	(391)
§ 16.1.2 物理结构 ·····	(397)
§ 16.2 聚合物的断裂机制·····	(400)
§ 16.2.1 聚合物断裂的一般特点 ·····	(401)
§ 16.2.2 高分子材料的断裂 ·····	(411)
§ 16.3 小结·····	(415)
参考文献·····	(416)
第十七章 复合材料的断裂 ·····	(417)
§ 17.1 长纤维增强的复合材料·····	(419)
§ 17.2 短纤维增强的复合材料·····	(423)
§ 17.3 纤维增强复合材料的断裂·····	(427)
§ 17.4 复合材料中的界面·····	(433)

§ 17.5 粒子增强的复合材料.....	(438)
§ 17.6 小结.....	(443)
参考文献.....	(444)
结束语.....	(446)

第一篇 预 备 篇

第一章 断裂力学基础简介

大量实验事实告诉我们材料所表现出来的强度远低于它应有的或理论预期的强度，它们之间的差别高达两三个数量级。这一千真万确的事实困惑了人们很长一个时期，直到认识力学量具有严重的结构敏感性，问题才得到原则性的解决，即材料实际强度的降低与存在于其中的缺陷关系密切。目前我们习惯上将所谓的缺陷分成两大类，第一类为宏观缺陷，包括缺口、孔洞、裂纹等；第二类为结构缺陷，包括点缺陷、位错、晶界、相界等。断裂力学的任务是从连续介质出发，用宏观力学的方法来研究第一类缺陷与断裂的关系。

由于目前论述断裂力学的专著有很多，所以本章只想讲清楚断裂力学中一些问题的提出、处理方法和结论，有关证明的细节部分同实验方法就从略了。下面分缺口断裂力学和裂纹断裂力学两部分作一简介。

§ 1.1 缺口断裂力学

从日常生活知道任何材料你要想弄断它最好先在其表面开一缺口，材料就易于在缺口处断开，因为缺口的引入使其根部附近的应力产生集中。并且此缺口越尖其效果越明显，当缺口根部曲率半径为零时，缺口就变成裂纹了。所以讨论缺口断裂力学不但有实际意义，对学习裂纹断裂力学也有好处。下面分缺口敏感性、应力集中和应变集中三部分作一简介。

§ 1.1.1 缺口敏感性

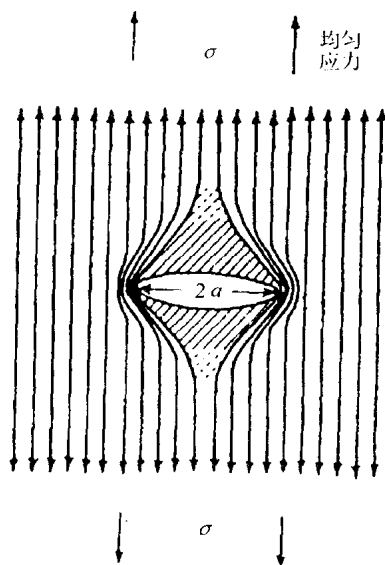


图 1.1 裂纹附近力线的分布

为了直观起见人们常用力线的疏密表示材料中应力的_{大小}，图 1.1 为均匀应力作用下平板中一长为 $2a$ 的椭圆裂纹附近力线的分布示意。如上所述，由于缺口本质上同裂纹一样，所以裂尖的情况定性地与缺口相似。可以清楚地看出离裂尖稍远的地方为一均匀拉伸区，裂纹两侧面划阴影的地方由于不承受拉应力，没有应变，也没有弹性应变能所以就划力线。此时这一区域在无裂纹条件下应承担的应力、应变和能量都集中在裂尖附近了。

由于上述缺口的敏感性便导致脆断趋势的增加，为了解释这一现象我们用图 1.2 所示结果作如下说明。此系一单向拉伸带缺口圆棒的线弹性解示意，因为缺口的存在，沿轴向的拉伸应力 σ_L 在缺口顶端最大，离开顶端则迅速下降，并很快达到标称应力 σ ，产生所谓的应力集中效应。伴随 σ_L 的这种变化便产生相应的应变 ϵ_L ，并离缺口顶端越远 ϵ_L 就越小。 ϵ_L 的这种变化使径向应变 ϵ_R 也发生相应的改变。如无其他约束，这将使圆棒沿径向产生内部分离，为了保持试样的连续性就必须有径向应力 σ_R 的存在。在缺口顶端又由于边界条件的关系 $\sigma_R = 0$ ，故 σ_R 沿径向的变化应如图 1.2 中所示，位于缺口前方某处要出现一极大值。在平面应变状态下还存在如同图中所示的切向应力 $\sigma_T = \gamma (\sigma_L + \sigma_R)$ 。这就是缺口试样单轴拉伸时出现的三向应力状态。

设无缺口时的轴向应力为 σ_L' ，由于试样本身的屈服强度 τ_s 不因有无缺口而异，根据最大切应力判据（Tresca yield criterion）应有如下关系

$$\tau_s = \frac{\sigma_L - \sigma_R}{2} = \frac{\sigma_L' - 0}{2} \quad (1.1)$$

故知 $\sigma_L > \sigma_L'$ ，表现出缺口试样屈服应力的上升，这便是缺口敏感所引起的应力强化的实质。今定义

$$Q = \frac{\sigma_{Lmax}}{2\tau_s} \quad (1.2)$$

为应力强化系数，其值与缺口的几何形状有关。Q 值越大， $Q\tau_s$ （即 $2Q\tau_s$ ）越接近强度极限 σ_b ，因此脆断判据可写作

$$Q\tau_s \geq \sigma_b \quad (1.3)$$

总之，缺口会引起弹性应力、应变的集中，产生三向应力，使塑性形变受到约束，提高了材料发生整体屈服的能力，增加脆断趋势。因为一般 σ_b/σ_s 约为 2，而 Q 值接近 3，如再考虑加工硬化后其值可达 5，故由 (1.3) 式看出脆断应力可小于材料的屈服强度。此外，缺口还能提高延脆转变温度。

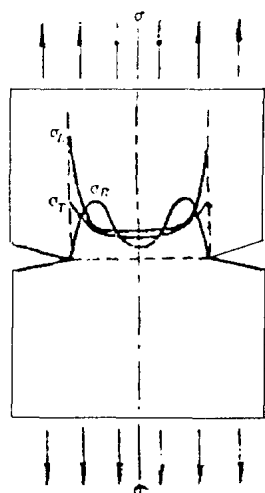


图 1.2 单向拉伸缺口圆棒中的应力

§ 1.1.2 应力集中

应力集中最简单而又典型的问题是单轴拉伸带中心圆孔薄板的应力分布。沿与拉伸应力垂直的截面上应力 σ_θ 、 σ_r 的分布如图 1.3 所示。在圆孔左右两顶端的 $\sigma_{\theta max}$ 高达 3σ ， σ 为试样的标称应力，即净截面积除拉伸力。因此圆孔造成的应力集中可用

$$K_t = \frac{\sigma_{\theta max}}{\sigma} = 3 \quad (1.4)$$

表示。由于 $\sigma_{\theta max}$ 不超过材料的弹性极限，故 K_t 称为几何的弹性应

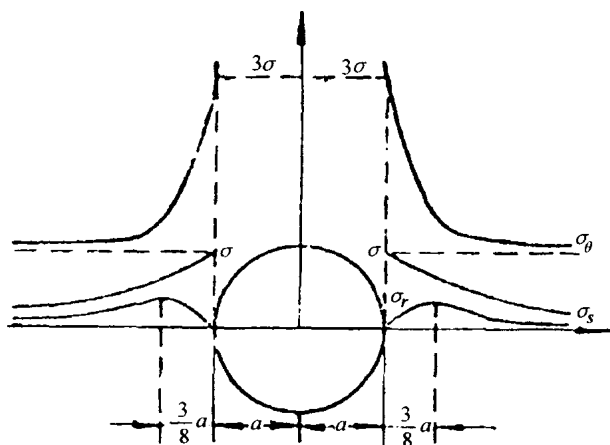


图 1.3 拉伸中心圆孔薄板中的应力

力集中系数，它只与缺口的形状有关。

由于边界条件的限制，当 $r=a$ 时， $\sigma_r=0$ ；当 $r=\sqrt{2}a$ 时， σ_r 达到极大值 $\frac{3}{8}\sigma$ ，最后逐渐趋于零，如图 1.3 所示。如板较厚材料处于平面应变状态，遂有 $\sigma_z (= \gamma (\sigma_r + \sigma_\theta))$ 的出现，其值随 r 的变化亦画在图 1.3 中。总之，由于保持形变时材料的连续性，在圆孔顶端也必然产生三向应力状态，这对理解材料的力学性质是很重要的。

模拟真实裂纹往往用椭圆孔较圆孔更为合适，如单轴拉伸方向系沿椭圆的 b 轴，则椭圆 a 轴顶端沿外载方向的应力可表为

$$\sigma_{yy} = \sigma(1 + 2 \frac{a}{b}) \quad (1.5)$$

即

$$K_t = 1 + 2 \frac{a}{b} \quad (1.6)$$

显然 $\frac{a}{b}$ 越大，即椭圆越扁 K_t 就越大，当 $a=b$ 时， $K_t=3$ ，这与前述圆孔的情况完全一样。故一般缺口顶端的应力分布常用图 1.4 表示，此图与图 1.3 可以说很相似。如果用椭圆主轴前端的曲率