

05107
黄作宾·编著

断裂力学 基础

断裂力学基础

黄作宾 编著

中国地质大学出版社

1991.9

断裂力学基础

黄作宾 编著

责任编辑 漆雕世凯

责任校对 熊华珍

中国地质大学出版社出版

(武汉市喻家山)

中国地质大学出版社印刷厂印刷 湖北省新华书店经销

开本 787×1092 1/32 印张 7.25 字数 165 千字

1991年9月第1版 1991年9月第1次印刷

印数 1—2000 册 定价: 2.00元

ISBN 7-5625-0590-X/O·29

内 容 提 要

本书主要介绍断裂力学的基础知识及工程应用。内容包括线弹性断裂力学、弹塑性断裂力学、断裂力学在疲劳裂纹扩展及应力腐蚀中的应用、复合型裂纹问题、金属材料及岩石材料断裂韧度的测试方法等。此外，书后还附有常用应力强度因子的表达式。

本书可作为高等地质院校有关专业研究生及高年级大学生断裂力学课（40—50学时）教材，亦可供有关工程技术人员参考。

前 言

断裂力学是从构件中存在着宏观裂纹出发,利用了弹塑性力学的理论与方法对带裂纹物体的强度及裂纹扩展规律进行研究的一门学科。目前,断裂力学已广泛地应用于许多工程部门。

近年来,我校为不同专业的研究生开设过多次工程断裂力学课,内容着重从基本概念及工程应用方面讲授,本书就是在这门课程讲稿的基础上改编而成。

本书成稿后经中国地质大学(武汉)教授许高燕详细审阅,提出了许多宝贵意见,中国地质大学出版社编辑漆雕世凯在内容与编排方面作了全面细致的工作,全书图件由中国地质大学出版社许玮清绘,在此谨向他们表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中错误与不当之处欢迎读者批评指正。

黄作宾

1991.8.1

目 录

第一章 断裂力学的基本概念..... (1)

§ 1.1 断裂力学的形成过程与研究内容..... (1)

§ 1.2 断裂力学的分类..... (5)

§ 1.3 断裂力学的基本原理..... (6)

1.3.1 固体的理论强度..... (6)

1.3.2 应力集中的影响..... (11)

1.3.3 能量平衡理论 (Griffith 能量理论)
..... (14)

1.3.4 能量释放率的概念..... (19)

1.3.5 裂纹的基本类型..... (21)

1.3.6 应力强度因子的概念..... (22)

1.3.7 材料的断裂韧度与断裂判据..... (26)

第二章 线弹性断裂力学..... (29)

§ 2.1 裂纹前端附近区域的应力场与位移场..... (29)

2.1.1 弹性力学平面问题的应力函数解法
..... (29)

2.1.2 复变函数的主要公式..... (31)

2.1.3 Westergaard 应力函数法..... (32)

2.1.4 无限大平板受双向拉伸 I 型裂纹前
端附近区域的应力场与位移场..... (36)

2.1.5 无限大平板受均匀纯剪切应力时, II
型裂纹前端附近区域的应力场与
位移场..... (43)

2.1.6	无限大平板中Ⅲ型裂纹前端附近区 域的应力场与位移场·····	(45)
§ 2.2	应力强度因子的确定·····	(51)
2.2.1	确定应力强度因子的常用方法·····	(52)
2.2.2	应力强度因子的有关资料·····	(53)
§ 2.3	塑性区及其修正·····	(67)
2.3.1	屈服判据·····	(68)
2.3.2	裂纹前端的塑性区·····	(69)
2.3.3	应力强度因子的修正·····	(77)
第三章	断裂力学在疲劳裂纹扩展中的应用·····	(87)
§ 3.1	引言·····	(87)
§ 3.2	疲劳裂纹扩展特性及其一般规律·····	(89)
3.2.1	疲劳裂纹扩展特性·····	(89)
3.2.2	疲劳裂纹的扩展速率·····	(90)
3.2.3	$\frac{da}{dN}$ 与 ΔK 之间的一般关系·····	(91)
§ 3.3	影响疲劳裂纹扩展的因素·····	(94)
3.3.1	低应力强度因子的影响·····	(94)
3.3.2	平均应力的影响·····	(96)
3.3.3	加载频率的影响·····	(97)
3.3.4	加载方式的影响·····	(99)
3.3.5	过载峰的影响·····	(99)
3.3.6	其他因素的影响·····	(100)
§ 3.4	疲劳裂纹扩展寿命的估算·····	(100)
第四章	断裂力学在应力腐蚀中的应用·····	(104)
§ 4.1	引言·····	(104)

§ 4.2	腐蚀与应力腐蚀理论.....	(105)
§ 4.3	应力强度因子在应力腐蚀中的作用.....	(107)
4.3.1	用断裂力学的观点来研究应力腐蚀 的原因.....	(107)
4.3.2	应力强度因子在应力腐蚀中的 作用	(108)
§ 4.4	应力腐蚀裂纹扩展速率.....	(110)
§ 4.5	静载荷作用下应力腐蚀裂纹扩展.....	(112)
§ 4.6	疲劳载荷作用下应力腐蚀裂纹扩展.....	(115)
§ 4.7	K_{Isc} 及 $\frac{da}{dt}$ 这两个参数在应力腐蚀 设 计中的应用.....	(116)
第五章	复合型裂纹问题.....	(121)
§ 5.1	最大周向拉应力理论.....	(121)
§ 5.2	应变能密度因子理论.....	(128)
§ 5.3	最大能量释放率理论简介.....	(137)
§ 5.4	工程上应用的近似断裂判据.....	(138)
第六章	弹塑性断裂力学基础.....	(142)
§ 6.1	J -积分理论.....	(142)
6.1.1	J -积分的定义.....	(143)
6.1.2	J -积分的守恒性.....	(145)
§ 6.2	J -积分的物理意义.....	(149)
6.2.1	线弹性材料 J -积分的物理 意义... (149)	
6.2.2	弹塑性材料 J -积分的 物理 意义... (154)	
§ 6.3	弹塑性条件下裂纹前端附近的应力场 与 应变场.....	(154)

§ 6.4	J -积分的断裂判据.....	(156)
§ 6.5	COD理论.....	(157)
§ 6.6	COD数值的计算.....	(158)
6.6.1	根据塑性区修正的假设计算 COD	(158)
6.6.2	利用D-M模型来计算COD.....	(159)
§ 6.7	COD与 J -积分之间的关系.....	(162)
§ 6.8	全面屈服时COD的经验公式.....	(164)
§ 6.9	COD理论存在的问题.....	(165)
第七章	断裂韧度测试方法简介.....	(166)
§ 7.1	平面应变断裂韧度 K_{Ic} 的测试.....	(166)
§ 7.2	岩石断裂韧度 K_{Ic} 的测试方法及有 关 数 据.....	(175)
7.2.1	Barker的短棒测试法.....	(176)
7.2.2	厚壁筒内压试验测试法.....	(177)
7.2.3	几种岩石的断裂韧度数值.....	(179)
附录A	弹性力学的基本方程和基本公式.....	(181)
附录B	复变函数的基本知识.....	(190)
附录C	常用应力强度因子表达式.....	(198)
参考文献		(217)
断裂力学习题		(221)

第一章 断裂力学的基本概念

断裂力学作为一门新兴学科，由于生产实践、工程设计等方面的需要，已成为固体力学的一个重要组成部分。目前它已广泛应用于宇航与航空工程、化学工程、机械制造、核能工程、容器管道设计、造船等各个部门。近年来，对岩石这类地质材料的破坏过程与机理的研究也应用了断裂力学的理论与方法，因而在地震地质、工程地质、石油压裂技术、水坝稳定、岩石破碎、土建工程、采矿工程、地质构造等领域，断裂力学的概念与方法亦得到初步应用。正像恩格斯在《自然辩证法》中所指出的：“科学的发生与发展从一开始就是由生产决定的”，断裂力学的发生与发展也是以生产与工程实践的需要为动力的。

本章着重从基本概念方面阐述以下三个问题：

第一，什么是断裂力学？即断裂力学的定义。

第二，为什么要研究断裂力学？即研究断裂力学的目的。

第三，怎样研究断裂力学？即初步概括介绍研究断裂力学的理论与方法。

§1.1 断裂力学的形成过程与研究内容

断裂力学也称为破坏力学，从字面上可理解为用力学的知识特别是弹塑性力学的知识分析研究材料或构件的断裂问

题。但我们都知道研究断裂的目的主要是防止构件断裂，这个任务长期以来人们已积累了丰富的经验，建立了许多强度条件，如我们都熟知的材料力学中就用以下的强度条件作设计构件的依据，以防止断裂事故的。

$$\sigma \leq [\sigma] = \begin{cases} \frac{\sigma_b}{n_b} & \text{对脆性材料} \\ \frac{\sigma_s}{n_s} & \text{对塑性材料} \\ \frac{\sigma_r}{n} & \text{在交变应力作用下} \end{cases} \quad (1-1)$$

式中： σ ——根据外载计算的工作应力；

$[\sigma]$ ——许用应力；

σ_b 、 σ_s 、 σ_r ——由实验得到的不同材料的极限强度、屈服极限、持久极限；

n_b 、 n_s 、 n_r ——对应于 σ_b 、 σ_s 、 σ_r 的安全系数。

按照(1-1)式来设计构件，在相当长的时间内成功地保证了构件的安全，这就是传统的强度设计方法。从(1-1)式可看出，为了防止构件破坏就要选择极限应力(σ_b 、 σ_s 等)数值大的材料，也就是选择强度高的材料以防止构件断裂。这就是为什么近年来为了防止构件的破坏，逐步选择高强度钢甚至超高强度钢的理论根据。但按照这种传统的设计思想去设计构件是否都能达到防止构件断裂的目的呢？

“实践是检验真理的唯一标准”，近几十年来按以上传统设计方法设计的不少工程结构、桥梁、焊接船舶等仍然产生各种形式的断裂与破坏，这就使我们对上述的设计方法的正确性提出了疑问。

一般来讲，用材料力学的强度计算方法是可行的，到目

前为止，我们还一直沿用着这种传统的设计方法。但由于近代机器向高速大功率方向发展，工程结构构件向大型化、全焊接结构发展，尽管采用了高强度与超高强度材料，并严格按传统设计方法进行设计计算，仍然有许多灾难性的断裂事故发生。

据统计，从1938年到1942年，全世界约有40座铁桥发生断裂与倒塌，都是按传统设计方法进行设计计算的。其中在比利时有三座桥是在低温（ -14°C ）下发生脆性断裂破坏，分析原因都是由于桥梁构件上存在裂纹，其中有一条裂纹长达150mm。

在第二次世界大战期间，美国建造的5000艘全焊接的“自由轮”，发生过1000多起脆性破坏，其中238艘船完全报废，分析原因断裂大都是发生在材料缺陷、焊接缺陷、结构不连续、加工制造时的划痕、切口等处，而该处应力集中，材料的冲击韧性 α_k 的数值较低。计算表明，断裂时有的船体构件所受到的拉应力仅为70MPa，大大低于船体材料的屈服极限（250MPa）及强度极限（400—500MPa）。

1950年美国北极星导弹固体燃料发动机机壳在实验发射时爆炸，这事故引起了有关单位的普遍重视，美国组织了二十几个单位进行了详细调查分析。该壳体由D6AC高强度钢制造，屈服极限 $\sigma_s=1400\text{MPa}$ ，但调查表明该机壳破坏时的工作应力不到材料屈服极限数值的一半。这种低于材料屈服极限的低应力脆性断裂是由于壳体上存在着的长0.1—1mm的裂纹扩展所引起的，而该裂纹可能是由于材料冶炼加工制造过程或使用过程（腐蚀、疲劳）中产生的。

以上所说的仅是几个典型事例，实际上还有不少容器爆

炸、大型油罐倒塌、飞机失事、轮船断裂等事故，也都难以用传统强度理论解释。

经过对大量这类事故进行了周密的分析与调查，得到以下几点认识：

(1) 断裂时构件上受到的工作应力较低，一般不超过该材料的屈服极限，有时还低于许用应力，尽管构件是由塑性材料制成，也会出现脆性断裂现象，因而常称之为“低应力脆性断裂”。

(2) 低应力脆性断裂往往是由构件内部或表面上存在着长度为0.1—10mm的裂纹源扩展而引起的。这种宏观裂纹的存在是由于材料冶炼加工时的缺陷、各种焊接的缺陷、或工艺过程中的划痕、凹坑、切口、或使用过程（腐蚀、疲劳）中产生的。

(3) 中、低强度钢的低应力脆性断裂一般发生在较低的温度（15℃以下），高强度钢的脆性断裂不随温度而变化。

由以上分析可知，过去材料力学的传统设计方法虽然也考虑了应力集中系数，但把研究对象当作均匀连续的物体，而没考虑到任何材料或受力构件都不可避免地存在着某种缺陷或裂纹，正是由于这种裂纹或类似裂纹的存在，使构件有可能在较低的应力下遭到断裂。

材料力学与断裂力学的研究目的都是防止构件断裂，但它们之间有区别。断裂力学的研究对象是带裂纹的物体，研究内容是裂纹扩展的规律，其目的不仅是一般地防止构件断裂，特别注重研究构件的低应力脆性断裂。

断裂力学是在分析与解决低应力脆断事故的基础上发展起来的，它的出现促使许多部门的设计思想发生了改变，尤

其是对传统的强度设计思路给予了补充，为发展新的设计方法，选择新的材料提供了理论基础。但是，必须指出断裂力学的产生不能完全取代传统的强度设计方法，这是由于断裂力学是一门年青的学科，无论是理论或实验都有待于进一步完善；另一方面断裂力学主要是从分析低应力脆性断裂发展起来的，对许多复杂的断裂现象及原因，仍需用传统的力学方法与理论来共同分析研究。

§1.2 断裂力学分类

1. 线弹性断裂力学 (Linear Elastic Fracture Mechanics, 简称为LEFM)

线弹性断裂力学是把研究对象当作理想的线弹性体来处理，这种理论是断裂力学中发展得比较早也比较完善的理论。对这理论所得的结果稍加修正，可用于小范围屈服 (Small Scale Yielding) 问题。对大范围屈服问题及全面屈服等情况，不能用此理论。

线弹性断裂力学在实用上虽有一定的局限性，但对断裂力学这门学科来说，它是一个重要的组成部分和必要的理论基础。

2. 弹塑性断裂力学 (Elastic Plastic Fracture Mechanics, 简称为EPFM)

对工程中常用的由中、低强度材料制成的而厚度尺寸又不太大的构件，由于受力后裂纹前端出现大范围屈服，线弹

性断裂力学的结论已不能适用。这时必须对构件进行弹塑性分析。这就是弹塑性断裂力学的任务。近十几年来，弹塑性断裂力学虽有不小的进展，但在许多问题上尚无重大的突破。

目前断裂力学除以上的分类外，还可分为微观断裂力学与宏观断裂力学。一般认为构件上裂纹长度小于 $0.05-0.1\text{ mm}$ 的裂纹扩展阶段称为微观裂纹扩展阶段。而裂纹长度大于 $0.05-0.1\text{ mm}$ 的裂纹扩展阶段称为宏观裂纹扩展阶段。裂纹处于微观裂纹扩展阶段，一般是属于微观断裂力学的研究范围。微观断裂力学主要采用金属物理中位错理论来研究裂纹形成过程与各种微观断裂机理。裂纹在宏观裂纹扩展阶段属于宏观断裂力学研究范围。一般工程断裂力学都属于宏观断裂力学，可以用弹塑性力学为理论基础，解释与分析宏观断裂现象，直接为工程实践服务。

§1.3 断裂力学的基本原理

1.3.1 固体的理论强度

为了阐明固体理论强度的公式，首先介绍有关晶体结构的几个概念。

由X射线研究的结果知，晶体是由原子有规律的排列而成。晶体中微粒（原子）重心排列所成的骨格称为晶格。微粒（原子）重心的位置称为晶格的格点。这些格点的总体称为点阵。

最简单的晶体结构有三类：

(1) 面心立方点阵 这种点阵的晶胞在每个顶角上和每

面的中心上都有一个原子。如图1-1。晶胞中棱边长度称为点阵常数，以埃 $\text{\AA}$ 为单位 ($1\text{\AA}=10^{-10}\text{m}$)。

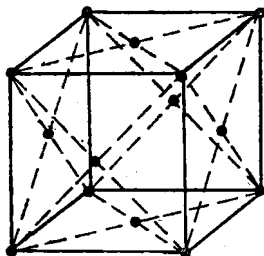


图1-1 面心立方点阵

在立方点阵中只有一个点阵常数 a_0 。 a_0 不是原子间的最近距离。最近原子间距是 d 。 $d = \frac{\sqrt{2}}{2}a_0$

具有面心立方点阵的金属有： $\gamma\text{-Fe}$, Cu , Ag , Pb , Al 等。

如 $\gamma\text{-Fe}$ $a_0 = 3.649\text{nm}$ $d = 2.580\text{nm}$

单位 $1\text{nm} = 1.002037\text{\AA}$

(2) 体心立方点阵 这种点阵在每个顶角上和主体体心上各有一个原子，如图1-2。

具有体心立方点阵的金属有： $\alpha\text{-Fe}$, $\delta\text{-Fe}$, Cr , V , Na 等。

如 $\alpha\text{-Fe}$ $a_0 = 2.8605\text{nm}$ $d = 2.4773\text{nm}$

(3) 密排六方结构如图1-3。

属于这种结构的有： Zn , Cd 等。

为了求得固体的理论强度，必须了解晶体中原子之间的

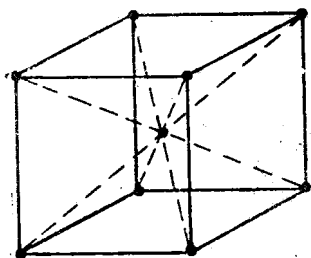


图1-2 体心立方点阵

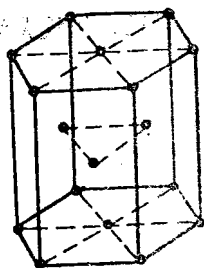


图1-3 密排六方结构

结合力。金属物理学指出“晶体中的原子所以能结合成有一定几何结构的稳定晶体是由于原子间存在着结合力，而这种结合力又与原子的结构有关。尽管各种不同晶体具有不同的结合力类型，但它们的结合力在定性上仍具有普遍的性质。这种普遍性质表现为两原子之间相互作用力能随原子之间的距离而变化。”因此，我们可以利用以上提出的普遍规律来分析固体的理论强度。

现采用一简化模型，从原子间的结合力来讨论结晶体的理论拉伸强度。

考虑晶体中一对原子 c 与 c' 之间的结合力，暂且忽略晶体中其他原子对它们的影响。这是一近似模型，如图1-4。

当物体没受外力时， $\sigma=0$ ，两原子处于平衡位置。原子间距为 b 。

当物体受到外力后，应力 σ 逐渐增加，原子间距由 b 变为 b_1 ，此时绝对伸长量 $x=b_1-b$ ，线应变 $\epsilon=\frac{b_1-b}{b}=\frac{x}{b}$ 。

随着 x 的增大，所需的应力就增加。假设原子间的应力-