

DUANLIE

断裂力学

LIXUE

白秉三 编著

辽宁大学出版社

ISBN 7-5610-1884-3

0·65 定价：4.60元

断裂力学

白秉三 编著

辽宁大学出版社

一九九二年·沈阳

(辽) 新登字第 9 号

断 裂 力 学

白秉三 编著

*

责任编辑 王德年

封面设计 刘桂湘

责任校对 杨东升

*

辽宁大学出版社出版发行 (沈阳市崇山中路 66 号)

沈阳工业大学印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 1/32 印张: 7.625 字数: 190 千

1992 年 8 月第 1 版 1992 年 8 月第 1 次印刷

印数: 1—2000

*

ISBN 7-5610-1884-3

0.65 定价: 4.60 元

内 容 提 要

本书是断裂力学的入门和普及书籍,介绍断裂力学的基本概念和基本理论,包括弹性力学的基本概念和裂纹尖端附近弹性应力场,线弹性断裂力学和弹塑性断裂力学的主要理论,复合型裂纹、疲劳裂纹、断裂韧性测试和断裂力学的应用等内容。

本书适合作为工程技术人员的自学读物,也可以作为工科类研究生和高年级本科生的教材或教学参考书。

前 言

断裂力学是研究带裂纹固体的强度和裂纹传播规律的科学。工程材料和结构不可避免地存在缺陷或微小裂纹，由于传统安全设计思想没有考虑这个问题，因而出现了许多无法解释的灾难性的低应力脆断事故。断裂力学弥补了这一不足，提出了新的安全设计思想，因此受到国内外广泛重视而迅速发展。它的理论和实验已经越来越多地被应用到工程实际中，成为安全设计思想的重要组成部分。由于断裂力学是本世纪 50 年代以后发展起来的一门新兴学科，许多高等工科院校没有把它列为学生的必修或选修课程，因此很多直接从事材料和结构设计的工程技术人员对断裂力学的理论和方法还很陌生。同时，专门系统地介绍断裂力学的入门书籍也很少。作者在为工科高年级学生讲授断裂力学课程时，就感到很难为学生选到一本合适的教材和参考书。

为了适应普及断裂力学基础知识的需要，我们从 1986 年开始就自编《断裂力学》讲义，为大学本科生和研究生讲授。多年来不断完善，三次修改原稿，力求作到概念清晰，理论完整，深入浅出，便于自学。编写中注意避免繁杂的数学推导，也注意基本理论和方法的介绍，使具备材料力学知识的读者在学完本书后能够掌握断裂力学的基本理论和方法，达到在工程实际中应用的目的。

考虑到这是一本断裂力学的入门书籍，本书只介绍断裂力学的基本概念和基本理论，并注意与工程实际相结合。在推导裂纹尖端附近应力场时，没有采用通常的复变函数的解法，而是用一种最简单的解法——半逆解法。这种解法简单明瞭，十

分适合初学者。对 J 积分的理论推导没有进行深入的展开。本书最后介绍了提高材料断裂韧性的途径、应力腐蚀开裂和断裂力学在压力容器上的应用等三个工程方面的应用问题。

本书在编写工作中得到沈阳工业大学俞秉义副教授的大力支持。书中第二章裂纹尖端附近弹性应力场的半逆解法就是俞秉义同志尚未公开发表的论文,他毫无保留地提供给作者使用,并对书中许多章节提出了宝贵的意见。书中反映了沈阳工业大学近年来在教学和研究工作中的部分成果,并参考了国内外已出版的许多断裂力学方面的著作和论文,作者在此表示深切的感谢。

由于作者水平有限,书中可能存在不少缺点和错误,热诚盼望有关专家和读者批评指正。

作 者

1992年4月

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 从材料力学到断裂力学.....	1
§ 1.2 裂纹的分类及其扩展形式.....	5
一、裂纹的分类	5
二、裂纹扩展的三种基本形式	5
§ 1.3 应力强度因子和断裂韧性.....	6
一、应力强度因子	7
二、断裂韧性	9
§ 1.4 裂纹失稳扩展的条件——断裂判据	10
习题	12
第二章 弹性力学与裂纹尖端附近的弹性应力场	13
§ 2.1 弹性力学的某些概念	13
一、应力分量.....	13
二、平面应力问题与平面应变问题.....	14
§ 2.2 弹性力学平面问题的基本方程	16
一、平衡微分方程.....	16
二、应变分量 几何方程 相容条件.....	18
三、物理方程.....	20
§ 2.3 按应力求解弹性力学平面问题	22
一、用应力表示相容条件.....	23
二、应力函数.....	24
三、极坐标中的应力分量和相容方程.....	26
§ 2.4 裂纹尖端附近弹性应力场的半逆解法	26
一、无限大板 I 型裂纹问题.....	27
二、无限大板 II 型裂纹问题.....	29
三、无限大板 III 型裂纹问题.....	30
四、直角坐标中裂纹尖端附近的应力场和位移场.....	31
习题	34
第三章 线弹性断裂力学	35
§ 3.1 应力奇异性和应力强度因子	35

§ 3.2 关于应力强度因子的一些结果	38
一、二维问题	39
二、三维问题	46
§ 3.3 叠加原理的应用	53
§ 3.4 光弹性实验测定应力强度因子	57
一、向径法	59
二、面积法	59
三、弧长法	60
§ 3.5 裂纹前缘的塑性区 K_I 的修正	60
一、屈服判据	61
二、裂纹前缘的塑性区	62
三、应力松弛对塑性区大小的影响	69
四、 K_I 的塑性区修正	71
§ 3.6 裂纹扩展的能量原理	75
一、弹性系统的总位能	76
二、Griffith—Orowan 理论	77
三、裂纹扩展能量释放率	83
四、Irwin—Kies 关系	86
五、裂纹扩展的阻力 (R) 曲线	89
习题	91

第四章 弹塑性断裂力学

§ 4.1 概述	96
一、研究对象及其主要应用领域	96
二、主要的弹塑性断裂理论和分析方法	98
§ 4.2 COD 理论	99
一、小范围屈服条件下的 δ 判据	99
二、大范围屈服条件下的 δ 判据 $D-M$ 模型	101
三、全面屈服条件下的 δ 判据	106
四、容许裂纹尺寸 a_c 的计算	108
§ 4.3 J 积分理论	109
一、 J 积分的定义及其守恒性	110
二、 J 积分与裂纹尖端附近应力应变场强度的关系	111

三、 J 积分的变形功率定义	113
四、弯曲类型试件的 J 积分	116
五、 J 积分和 COD 的关系	118
§ 4.4 裂纹的稳定扩展	120
习题	122
第五章 复合型裂纹的脆性断裂	125
§ 5.1 复合型裂纹问题概述	125
§ 5.2 最大拉应力理论	126
§ 5.3 能量释放率理论	129
§ 5.4 应变能密度因子理论	134
§ 5.5 工程上应用的近似断裂判据	140
习题	142
第六章 疲劳裂纹扩展	144
§ 6.1 疲劳裂纹扩展规律	144
一、疲劳强度极限	144
二、裂纹扩展特性	146
三、疲劳裂纹的扩展机理	149
§ 6.2 疲劳裂纹扩展速率 da/dN	150
一、 da/dN 与 ΔK 的关系	150
二、 da/dN 的表达式	151
三、影响 da/dN 的因素	157
§ 6.3 疲劳裂纹扩展寿命估算	159
§ 6.4 低周疲劳	165
一、低周疲劳的特点	165
二、低周疲劳的裂纹扩展寿命	166
习题	169
第七章 断裂韧性测试	171
§ 7.1 平面应变断裂韧性 K_{Ic} 的测试	171
一、试件	172
二、试验装置	180
三、试验步骤	182

四、试验结果的处理	184
§ 7.2 临界 J 积分的测试	186
一、测试原理	186
二、装置	191
三、试验步骤	191
四、试验结果的处理	194
§ 7.3 临界 COD 的测试	195
一、测试原理	196
二、装置和试验步骤	198
三、试验结果的处理	199
§ 7.4 疲劳裂纹扩展速率 da/dN 的测定	200
一、试件的形式和尺寸	201
二、测量裂纹长度的方法	203
三、试验步骤	204
四、试验结果的处理	205
习题	210
第八章 断裂力学的应用	211
§ 8.1 断裂韧性	211
一、铁基合金的冷脆性	211
二、冶金质量的影响	213
三、组织结构的影响	215
四、加工工艺的影响	217
§ 8.2 应力腐蚀	217
一、应力腐蚀临界应力强度因子 K_{ISCC}	218
二、应力腐蚀裂纹扩展速率 da/dt	220
三、应力腐蚀构件的安全性和寿命估算	222
§ 8.3 压力容器	222
一、缺陷的简化	222
二、各种工况下的临界裂纹尺寸计算	224
三、压力容器在各种条件下的强度计算	226
四、压力容器的疲劳强度计算	233
习题	233

第一章 绪 论

断裂力学是50年代以来发展起来的一门新兴学科,它针对固体材料和构件不可避免地会存在缺陷或裂纹这一事实,利用弹性力学和塑性力学的分析方法,研究带裂纹固体材料和结构的强度和裂纹传播规律。由于它与材料或工程结构的安全设计直接有关,因此受到国内外广泛重视而迅速发展,它的实验和理论已经越来越多地应用到生产实际中。

§ 1.1 从材料力学到断裂力学

按照传统的设计思想,一般是用材料力学的方法,对机器零件或结构物进行强度计算,以保证构件在使用中不会发生破坏。

用材料力学的方法进行强度计算可以概括如下:首先,根据构件的尺寸、形状和承受外载荷情况,计算出构件的工作应力 σ (或相应强度理论的相当应力)。其次,用试验方法确定所选用材料的极限应力 σ_s 。在不同条件下, σ_s 分别表示材料的屈服极限 σ_s ,强度极限 σ_b 或持久极限 σ_{-1} ,于是建立如下的强度条件

$$\sigma \leq [\sigma] = \begin{cases} \sigma_s/n & \text{—对塑性材料} \\ \sigma_b/n & \text{—对脆性材料} \\ \sigma_{-1}/n & \text{—对交变应力情形} \end{cases} \quad (1-1)$$

式中 n 为规定的安全系数,引起构件破坏的是工作应力 σ ,而衡量材料力学性能的是强度指标 σ_s 或 σ_b 。若构件在工作中满足上式,则认为设计是安全的,这就是传统的强度计算方法。值得指出的是,在建立计算工作应力的理论公式时,是假定构件的

材料均匀、连续、不存在空隙和裂纹等缺陷；此外，用试验方法确定极限应力时，一般选用的也是材质均匀、表面光滑的小试样。至于一些难以控制的因素，如计算方法之不尽完善，材料组成未必那么均匀、连续，载荷估计不甚准确，工作环境条件影响等等，都在确定安全系数 n 时，予以综合考虑。用上述强度计算的方法设计出来的构件在一般情况下是可行的，对一般中、低强度钢制成的小型零部件，只要保证 $\sigma \leq [\sigma]$ ，通常是安全可靠的。

随着现代工业的发展，高强度和超高强度材料 ($\sigma_s \geq 1400\text{MPa}$) 的使用越来越多，焊接工艺普遍化，工程结构构件大型化，用上述传统设计观念——材料力学的设计方法无法解释的灾难性的脆性断裂事故时有发生，而且越来越多。

十九世纪以来，由于金属材料应用大为增多，使偶然不测事故的数量达到几乎数不清的程度。例如，1898年12月13日发生的纽约市大贮气罐破裂，使许多人死亡和受伤，并毁坏了周围大量财物；1913年1月3日，波士顿一个高压水管破裂，使该地区被淹。以后，随着全焊接设计的引进，又开始了一个新的结构破坏事故时期。据统计，1938年~1942年间，世界上有40座焊接铁桥，事先未见任何异常现象，却发生了突然断裂而倒塌。第二次世界大战期间美国建造的近5000艘全焊接船“自由轮”中，连续发生1000多起脆断事故，其中238艘完全破坏，有的甚至折成二段。1943年1月在码头交付使用时突然断裂成两段的一艘油船，据研究，当时的气温为 -5°C ，断裂时船体所受拉应力仅为 70MPa ，而船体钢材的屈服强度约为 250MPa ，抗拉强度为 $400\sim 500\text{MPa}$ 。再如1949年美国俄亥俄煤气公司的圆柱形液化天然气罐发生爆炸，使周围的市区变为一片废墟。尤其引人注意的是50年代美国的北极星导弹固体燃料发动机壳，是用屈服极限 σ_s 达 1400MPa 的高强钢D6AC制造的，经传统方法检查合格，但在试验发射时发生爆炸事故，而破坏应力却不到 σ_s 的一半。

这些事故发生时，破坏非常突然，事前并无明显预兆，以

致造成重大损失。特别是发生事故时的应力低于材料的屈服极限 σ_s ，这是用传统的材料力学观点无法解释的，因而引起了人们的高度重视。

人们对这些事故进行大量的调查研究，发现无论是中、低强度材料还是高强度材料，都可能发生脆性断裂，并具有以下几个特点：

(1) 破断时的工作应力较低，通常不超过材料的屈服极限，甚至还低于常规设计的许用应力。尽管材料是塑性的，却以脆性方式断裂。所以常常将这类事故统称为低应力脆断。

(2) 脆性断裂总是从构件内部存在的宏观尺寸（从肉眼可见的 0.1 毫米到 1 厘米以上）的裂纹源扩张引起，这种宏观裂纹源可能是加工过程及加载过程，或是在使用过程中产生的。

(3) 裂纹源一旦超过一定尺寸（临界尺寸），脆性裂纹将以极高的速率扩展，直至断裂。

(4) 中、低强度钢的脆性事故一般发生在较低的温度（15℃ 以下），而高强度钢则没有明显的温度效应。

综合上述特点表明，在常规的设计中虽然考虑了应力、材料的一般强度指标以及构件中的台阶、突角和孔洞处的应力集中系数等，但却没有考虑所有材料不可避免地总存在某种缺陷或裂纹（例如冶炼、铸造、焊接、热处理、冷加工等造成的缺陷和裂纹，使用中因疲劳、腐蚀造成的裂纹等等）。正是由于这些缺陷、裂纹的存在，使得材料在不处于塑性状态时，例如，材料在接近或低于它的脆性转变温度下工作、或应变速率很高（像冲击）以及应力状态复杂等，就可能在较低的应力下发生破坏。由此可见缺陷或裂纹是引起低应力脆断的根源。为了保证带有缺陷或裂纹的构件能安全使用，就需要分析缺陷或裂纹附近局部地区的特性，寻找能够反映裂纹扩展特性的新的力学指

标,从而建立新的断裂判据,防止低应力脆断事故。于是,作为传统设计方法的发展,研究裂纹扩展的条件和规律的一门新学科——断裂力学应运而生。如果说,从研究不含宏观裂纹构件的强度、刚度和稳定性出发逐渐形成了材料力学这门学科的话,那么,为了研究含有宏观裂纹构件的安全性就逐渐形成了断裂力学。

对于工程中应用广泛的宏观断裂力学,有线弹性断裂力学与弹塑性断裂力学之分。描述裂纹的脆性力学行为,用线弹性力学方程作为基本方程,把裂纹的存在视为边界条件,这样分析出来的结果具有较好精确性,因而形成了断裂力学的最初分支——线弹性断裂力学。然而,对于金属材料,裂纹前缘总是存在塑性区的,若出现较小的塑性区(小范围屈服),那么引入塑性区的修正,则线弹性断裂力学仍然适用。但对于工程中常用的中、低强度材料的一般厚度而尺寸又不大的构件,由于受力后裂纹前缘出现大范围屈服,这时线弹性断裂力学的结论不再成立,即使引入所谓塑性区修正,线弹性断裂力学的方法也不能用于大范围屈服断裂分析,必须在塑性力学基础上进行分析,近二十多年来,在这方面开展了大量工作,形成了断裂力学的另一分支——弹塑性断裂力学。

50年代在分析构件低应力脆断事故基础上发展起来的断裂力学,不仅圆满地解释了传统设计观点不能理解的破断现象,而且也为了避免这类事故指出了努力的方向。断裂力学的出现,促使许多部门的设计思想发生改变,也为发展新材料、新工艺提出方向。但是必须指出,断裂力学并不能说已经取代传统的设计方法,一来它本身还是一门年青的学科,无论基本理论或试验方法都尚待进一步完善;再者,也并非所有的破坏现象都属于低应力脆断,对于那些不是因为低应力条件下裂纹发生快

速扩展而引起破坏的构件，按照材料力学方法进行强度计算的一整套理论和计算公式仍然是当前结构设计规范中所依据的可靠基础，只是对于有可能在低于容许应力的工作应力下发生脆性断裂的结构物或构件，才需进行断裂力学的分析计算。所以断裂力学的方法提出来之后，并没有也不可能全面否定常规的强度条件在结构设计中的应用，而只是补充了过去的强度计算之不足，从而使问题考虑得更周全。

§ 1.2 裂纹的分类及其扩展形式

一、裂纹的分类

由前面的讨论可知，裂纹是引起断裂的主要因素，一般说，构件中常见的裂纹可分为穿透裂纹（图 1-1a）、表面裂纹（图 1-1b）及埋藏裂纹（图 1-1c）。

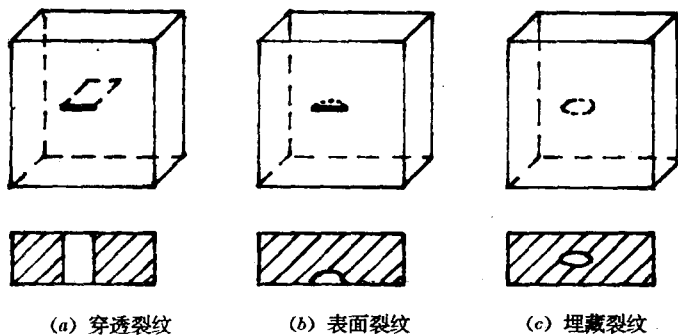


图 1-1 裂纹的分类

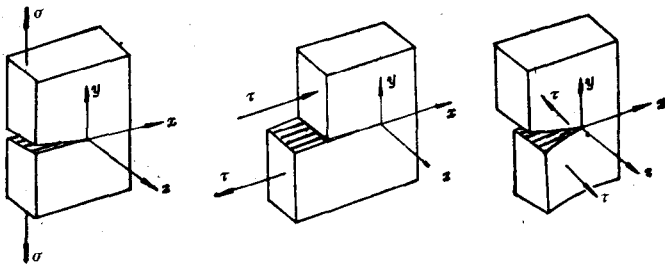
二、裂纹扩展的三种基本形式

裂纹在外力作用下扩展时，根据构成裂纹上、下两个面的相对位移，把裂纹扩展形式分成三种基本类型：

(1) 张开型 (I 型): 在垂直于裂纹面的拉应力作用下, 使构成裂纹的两个面的位移相对离开 (图 1-2a)。

(2) 滑开型 (II 型): 在平行于裂纹表面而垂直于裂纹前缘的剪应力作用下, 使构成裂纹的两个面的位移是相对滑动, 且滑动方向垂直于裂纹前缘 (图 1-2b)。

(3) 撕开型 (III 型): 在平行于裂纹表面, 且平行于裂纹前缘的剪应力作用下, 使构成裂纹的两个面的位移也是相对滑动, 但滑动方向是平行于裂纹前缘 (图 1-2c)。



(a) 张开型 (I 型)

(b) 滑开型 (II 型)

(c) 撕开型 (III 型)

图 1-2 裂纹扩展的三种基本形式

以上是裂纹扩展的三种基本类型, 其中张开型最为常见且最危险, 通常多研究这种类型的断裂问题。

如果裂纹同时受到正应力和剪应力作用, 则裂纹同时存在 I 型和 II 型扩展形式 (或 I 型和 III 型), 这时我们称为复合型裂纹问题。

§ 1.3 应力强度因子和断裂韧性