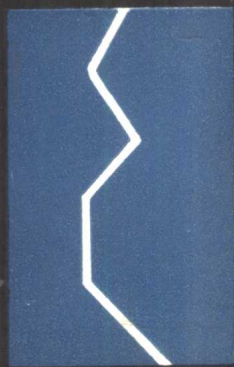
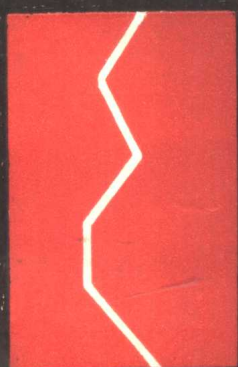


断裂力学及应用



● 杨广里 等 编著



● 中国铁道出版社

断裂力学及应用

杨广里 等 编著

中 国 铁 道 出 版 社

1990年·北京

内 容 简 介

本书以介绍宏观断裂力学为主,其中包括这门学科的基本理论,基本概念,和对裂纹扩展、断裂的分析、疲劳寿命,以及断裂的定性、定量分析等内容。在保持基本理论完整的前提下,侧重于物理概念的阐述及理论的实际应用。本书既为读者解决实际问题提供参考依据,也为初学者向更深的领域学习打下一个较好的基础。

断裂力学及应用

杨广里 等编著

*

中国铁道出版社出版、发行

(北京市东单三条14号)

责任编辑 江新锡 张苍松 封面设计 王毓平

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本: 787×1092 毫米 $\frac{1}{16}$ 印张: 13.625 字数: 309千

1990年6月 第1版 第1次印刷

印数: 1—2000册

ISBN7-113-00624-8/TU·148 定价: 6.45元

前 言

断裂力学是一门新兴的学科，它形成于本世纪50年代后期，但广泛地进行研究并用来解决工程中的实际问题则是近20年来的事。目前，这门学科在航天、航空、造船、交通、机械、冶金、土建、水利、化工、采矿、石油、地质、地震等工程部门的应用日益广泛。为了适应现代化工业生产及科学技术发展的需要，近年来，高等工科院校有关专业陆续地将断裂力学列入研究生与本科生的必修或选修课，不少工程企业单位开办以断裂力学及其应用为主的研讨班，以此达到工程技术人员知识更新的目的。

我们在原来杨广里编著的《工程断裂力学》讲义的基础上，根据多年来在高等学校、工程企业研讨班中的讲稿以及科研工作的总结，并广泛地收集了国内、外有关资料，编写了这本书。

疲劳断裂占一般构件断裂事故的85%以上，所以疲劳断裂一直是人们十分关注的问题。一切构件在工作中难免会遇到工作腐蚀的问题，而腐蚀对断裂有直接的影响，尤其是对于焊接或冷加工后未消除残余应力的情况下其危害更大，构件在腐蚀介质中断裂事故不断发生，已成为工程断裂事故的重要原因之一。

小裂纹的扩展在实际工程中大量存在，目前虽然尚未形成较为成熟的小裂纹扩展理论，但是人们已经预料到这一问题。因此，本书以一章的篇幅加以叙述。断裂韧性的测试在断裂力学中占有极重要的地位，因此本书在第六章以较大的篇幅作了全面、系统的介绍。为了解决构件的断裂问题，还必须

知道材料中形成缺陷（裂纹）的原因，并要探测这些缺陷（裂纹）存在的方位和大小，本书第八章对此作了介绍。

为了便于读者自学，在叙述方面注意到由浅入深，循序渐进。可供科研、设计、工程技术人员使用，也可供高等院校师生以及从事材料科学研究的有关人员参考。

全书共分九章和三个附录。各章分工如下：绪论及第一、二、三、八章以及附录Ⅱ、Ⅲ由杨广里编写；第七章及附录Ⅰ由张平之编写；第四、九章由余肖扬编写；第五、六章由杜彦良编写。全书由杨广里主编并审定。

鉴于作者水平有限，书中可能存在不少缺点和错误，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

绪 论

第一章 线弹性断裂力学

- § 1—1 从传统的强度力学到断裂力学…………… 6
- § 1—2 固体的断裂强度…………… 7
- § 1—3 线弹性断裂力学的基本理论…………… 11
- § 1—4 裂纹尖端应力场…………… 17
- § 1—5 应力强度因子及断裂判据…………… 24
- § 1—6 应力强度因子的计算…………… 28
- § 1—7 边界配位法确定应力强度因子…………… 40
- § 1—8 工程应用举例…………… 45

第二章 弹塑性断裂力学及其工程应用

- § 2—1 裂纹尖端张开位移法 (COD)
及工程应用…………… 60
- § 2—2 J积分理论 …………… 72
- § 2—3 K_c 、 G_c 、 δ_c 和 J_c 等断裂韧性
参数间的关系…………… 79

第三章 疲劳裂纹扩展

- § 3—1 关于疲劳裂纹扩展…………… 88
- § 3—2 裂纹扩展速率及零部件的疲劳寿命…………… 91
- § 3—3 影响裂纹扩展速率的因素 …………… 103
- § 3—4 疲劳裂纹扩展速率的测定 …………… 105
- § 3—5 过载峰对裂纹扩展的延缓效应 …………… 108

第四章 腐蚀断裂

§ 4—1	应力腐蚀开裂	112
§ 4—2	应力腐蚀零部件的安全性与寿命的估算	120
§ 4—3	影响应力腐蚀的因素	122
§ 4—4	K_{ISCC} 和 da/dt 的测试	125
§ 4—5	腐蚀疲劳	133
第五章 小裂纹断裂力学		
§ 5—1	概 述	140
§ 5—2	小裂纹的扩展特性	147
§ 5—3	疲劳小裂纹扩展的微观力学分析	155
§ 5—4	车轴钢疲劳小裂纹扩展特性试验	163
第六章 金属材料断裂韧性测试		
§ 6—1	平面应变断裂韧性 K_{IC} 的测试	185
§ 6—2	表面裂纹断裂韧性 K_{IF} 的测试	198
§ 6—3	平面应力断裂韧性 K_c 的测试	203
§ 6—4	J 积分临界值 J_{IC} 的测试	209
§ 6—5	临界 COD 的测试	217
§ 6—6	疲劳裂纹扩展速率 da/dN 的测试	222
§ 6—7	应力腐蚀断裂韧性 K_{ISCC} 及其裂纹扩展速率的测试	228
§ 6—8	疲劳小裂纹的扩展试验	235
§ 6—9	动态断裂韧性 K_{Id} 、 δ_d 、 J_{Id} 的测试简介	238
§ 6—10	高温断裂韧性 K_{IC} 和 da/dN 测试简介	242
§ 6—11	断裂力学中的光测技术简介	247
§ 6—12	宽板试验简介	260
第七章 焊接结构中的断裂力学应用		

§ 7—1	焊接结构及脆性断裂·····	266
§ 7—2	断裂力学在防止焊接结构脆断设计 中的应用·····	270
§ 7—3	几种焊接情况下断裂韧性的计算与 确定·····	278
§ 7—4	断裂力学在焊接结构疲劳安全设计 中的应用·····	290
§ 7—5	临界转变温度设计原则与断裂力学·····	298
第八章 冶金及加工中的缺陷与检测方法		
§ 8—1	冶金及加工中的缺陷·····	302
§ 8—2	缺陷及裂纹的检测方法·····	314
第九章 防止断裂的措施		
§ 9—1	抗断设计·····	326
§ 9—2	工 艺·····	339
§ 9—3	使用和裂纹检测·····	346
§ 9—4	修 理·····	347
§ 9—5	腐蚀断裂的防护·····	350
附录 I 断裂力学所涉及的弹塑性概念和公式推导		
§ I—1	弹性体的应力、应变和位移·····	353
§ I—2	弹性力学基本方程·····	355
§ I—3	弹性力学解法·····	358
§ I—4	两种平面问题·····	359
§ I—5	弹性平面问题求解中的应力函数 及半逆解法·····	362
§ I—6	平面裂纹体的Williams线弹性力 学解·····	364
§ I—7	弹性力学平面问题的复变函数表示·····	371
§ I—8	Westergaard复应力函数求解平面	

裂纹问题	374
§ I—9 弹塑性体的应力、应变分析	383
§ I—10 屈服条件与屈服曲面；加载条件 与加载曲面	389
§ I—11 理想塑性材料的增量理论	392
§ I—12 简单加载时的全量理论	395
附录 II 断裂力学中常用的几何和物理量的单位名称 和符号	397
附录 III—A 常用的几种裂纹形式的应力强度因子 表达式	398
附录 III—B ϕ^2 值表	404
附录 III—C 表面裂纹修正因子	404
附录 III—D $y\left(\frac{a}{W}\right)$ 因子表	406
附录 III—E $f\left(\frac{a}{W}\right)$ 因子表	412
附录 III—F $y'\left(\frac{a}{W}\right)$ 因子表	417
附录 III—G $Y\left(\frac{a}{W}\right)$ 因子表	423
附录 III—H $F\left(\frac{a}{W}\right)$ 因子表	424

绪 论

一、断裂力学的形成

本世纪以来，各国，特别是发达的工业国家，工业生产突飞猛进，生产力水平高速发展，如船舶、飞机、大型机械、大型焊接结构的制造；原子工业、宇宙航空、火箭与导弹等近代新兴工业的发展；新工艺、新材料、高强度材料、高压、高速、高温与低温的采用等等，使得传统的强度科学如材料力学、结构力学等，无法适应当前新的生产水平提高的需要。按照过去材料力学等强度科学的强度准则与强度条件，设计制造出的各种工程结构及其零件，好象是完全可靠的，可是却往往在载荷或应力低于许可值的低应力状况下发生突然的脆性断裂，有时甚至造成生产上意外的灾难性事故，导致生命财产的巨大损失。例如美国第二次世界大战期间约计5000艘自由轮货船，在使用过程中发生1000多次脆性断裂事故，其中238艘完全报废；又如日本1968年曾发生两起大型球罐爆炸事故，两台球罐直径分别为16100mm和12450mm，爆炸发生在水压试验过程中；再如1973年我国广西使用的日本阪神Z6L27ASH柴油机桂海461*、462*、463*，在两年内连续发生8次中间轴螺旋桨叶片折断事故。从最近几年的情况看，生产中的断裂事故愈来愈多，如不及时加以解决，无疑将会严重地阻碍生产向前发展。

工程结构及其零件的断裂事故，性质是十分严重的，影响也十分广大，几乎涉及到工业建设的一切方面。因此，为了促进工农业生产不断地向前发展，从本世纪20年代起至50

年代末期，在工业发达国家逐渐形成断裂力学这样一门新兴的强度科学。大量破坏断裂事故分析表明，断裂皆起源于构件有缺陷处。在传统的设计思想中存在一个严重问题，即把材料视为无缺陷的均匀连续体，而实际上构件总是存在着形式不同的缺陷，因而实际材料的强度大大低于理论模型的强度。断裂力学恰恰就是为了弥补传统设计思想这一严重不足而产生的。

二、断裂力学研究的基本内容

断裂力学是研究有裂纹（缺陷）构件断裂强度的一门学科。或者说是研究含裂纹构件的裂纹平衡、稳定扩展和失稳扩展的规律；带裂纹构件的强度；估计结构的寿命以及研究延长寿命的方法等。

通过对构件的分析，运用断裂力学的观点、判据，能把构件内部裂纹的大小和构件工作应力，以及材料抵抗断裂的能力（即断裂韧性）定量地联系起来，从而可对含裂纹构件的安全性和寿命给出定量或半定量的估计，这就为工程构件的安全设计、制订合理的验收标准和选材原则提供了新的理论基础，对有危险裂纹的构件必须严禁使用，以免造成灾难性事故。同时又不能把无危险裂纹的构件报废，造成经济损失，断裂力学对此提供了判据。由于断裂力学的深入研究和探讨，长期以来，在人们印象中的那种“有裂必断”的概念得到了澄清，从而对认识断裂失效和解决断裂失效提供了有力的依据。

三、断裂力学的分类

断裂力学的研究系统，大致分为两类：一是宏观断裂力学，二是微观断裂力学。

1. 宏观断裂力学——它是以各向同性、均质的变形固体为研究对象。工程中的断裂问题都在此研究范畴。因此，

这类为本书重点讨论之内容。宏观断裂力学根据所研究的材料性质又可分为；

(1) 线弹性断裂力学——它是以各向同性、均质的变形固体的二维弹性理论作为基础，利用连续体力学分析物体内的裂纹为其中心内容；它又是以研究高强度钢等脆性材料的低应力脆性断裂为主要目的；它也可以用来研究中、低强度钢等塑性材料不出现明显的塑性变形的一些脆性断裂问题。它是宏观断裂力学的主要理论基础。

(2) 非线性断裂力学——也叫做弹塑性断裂力学或全面屈服断裂力学。它研究的物体仍为各向同性均质的变形固体。它的主要任务是研究中、低强度钢等塑性材料在断裂时出现明显的塑性变形的断裂问题。为了对这类问题弄清楚其裂纹扩展的机理，仍要从连续介质力学出发，有时还要用实验方法弄清裂纹尖端塑性区域的形状和大小、塑性区域内应力应变的分布规律、断裂条件等。

非线性断裂力学在理论上有些方面并不成熟，有待进一步研究。

此外，由于工程构件和材料中出现大量的小裂纹问题，曾引起工程界和力学工作者的高度重视，近年来，通过断裂力学工作者大量的实验和研究，发现：有效裂纹长度， $a < 2.5 \cdot (K_{Ic} / \sigma_s)^2$ [注] 时的裂纹（一般小于1mm）其扩展特性与上述宏观断裂力学所建立的模型研究的结果不同，有它自己特有的扩展规律，一般称此为小裂纹断裂力学。由于工程实际的需要，决定了小裂纹研究的生命力。目前，国内外有关的力学工作者正在对小裂纹断裂力学努力探讨。本书收集了国内外有关资料及我们自己研究的成果专设一章讨论。

[注]：a——有效裂纹长度； K_{Ic} ——断裂韧度； σ_s ——屈服应力。

2. 微观断裂力学——它是研究原子位错等晶粒尺寸内的断裂过程。根据对这些过程的了解、建立起支配裂纹扩展和断裂的依据。它是属于固体物理范畴。这一部份内容不在本书讨论的范围之内。

四、断裂力学的应用

断裂力学的应用，从六十年代起就显示了它的巨大作用，从而推动了断裂力学本身的理论和实验技术的发展。近年来，国内外对断裂力学的应用给予了更大的重视，它的应用范围极其广泛，大致可分为以下几方面：

1. 断裂力学对工程材料与工程结构及其零件提出新的强度观点和强度准则，并提出新的材料机械性能及其试验测定的方法，同时也提出工程结构及其零件新的设计方法。

2. 按照断裂力学的基本观点，任何材料和任何工程结构零件总是不可避免地会有缺陷（裂纹或夹杂物），断裂力学便给人们一种判断的准则，判断什么是容许裂纹，什么是不能容许的裂纹。

3. 对于存在缺陷（裂纹）的构件，在外载荷作用下，可以应用断裂力学的理论判断该构件的剩余使用寿命。

4. 应用断裂力学可以判断影响工程材料和工程结构零件的主要断裂因素及其影响的程度和变化规律（例如温度高低、应力腐蚀、残余应力等）。

5. 利用断裂力学的原理，找出延缓裂纹扩展和阻止断裂的方法。

6. 利用断裂力学的原理，研究裂纹、结构、使用条件三者之间的关系和它们变化的规律，确定材料抗断裂性能指标，并以此作为设计依据来确定构件的尺寸，保证在使用寿命期间的安全可靠。

以上问题，是断裂力学当前的主要研究任务。利用断裂

力学来进行安全设计已在许多工业部门得到应用，从而获得了迅速的发展。近几年来，在国内，断裂力学得到了广泛的重视，很多单位应用断裂力学方法，对火箭发动机壳体、飞机结构、压力容器、电站设备、机车车辆、工程机械、桥梁等工程结构进行了事故分析、寿命估算和合理选材，收到了巨大的效益。

第一章 线弹性断裂力学

§ 1—1 从传统的强度力学到断裂力学

近十几年来，由于生产的不断发展，新工艺、新材料以及高压、高速、高温与低温装置被大量采用，各种机械中的断裂破坏事故也屡有发生。古典的强度科学（如材料力学、结构力学、弹性力学等）已无法适应当前生产的需要，按照传统强度科学的准则设计、制造出的各种构件，往往在载荷或者应力低于许可值的低应力状况下发生脆性断裂，有时甚至造成意外的灾难性大事故。近几年来，断裂事故愈演愈烈，于是人们在大量调查研究的基础上，发现传统的方法对断裂问题缺乏基本分析，未抓住裂纹扩展这个关键，因此不能定量地处理这个问题。

传统的强度计算中，零件的强度是以其应力是否达到用光滑试样所测定的材料屈服极限或强度极限为标准来衡量的，其强度条件为

$$\left. \begin{aligned} \sigma \leq [\sigma] &= \frac{\sigma_s}{n_s} \quad (\text{塑性材料}) \\ \sigma \leq [\sigma] &= \frac{\sigma_b}{n_b} \quad (\text{脆性材料}) \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中 $[\sigma]$ ——许用应力；
 σ_s ——屈服极限；
 σ_b ——强度极限；
 n_s ——对应屈服极限的安全系数；

n_b ——对应强度极限的安全系数。

这种传统的强度计算理论是以材料的均匀连续、各向同性假设为前提的，对于材料中的缺陷只是在安全系数中笼统地反映，无法正确考虑缺陷对强度的影响。因此，带有一定的盲目性，不能保证构件使用中的安全。

从大量的事故分析中发现，构件中不可避免地有宏观尺寸的裂纹存在。因为现在的生产工艺水平尚不能保证零件没有裂纹或类裂纹。例如零件在焊接、冷加工、淬火及装配的过程中都有可能产生裂纹。即使零件中过去没有宏观尺寸的裂纹，其内部的微观缺陷（如夹杂、微孔、晶界、相间、位错群等）也会在外加应力的作用下、尤其是在疲劳载荷和腐蚀性介质的作用下发展成为宏观的裂纹。因此，研究机械零件的安全使用问题，必须从材料中不可避免地有宏观裂纹这一事实出发。

由于严重的断裂事故不断发生，使人们逐渐认识到传统的强度理论定有不完备之处。因此，在总结断裂事故的基础上，通过大量的实验，找到了一条从力学角度探讨断裂失效的途径，即断裂力学。

断裂力学为正确考虑缺陷对构件强度的影响提供了理论依据。以断裂力学为依据建立的条件，称为断裂判据。它以缺陷（裂纹）是否会不稳定的扩展导致脆性破坏为根据来判断构件的使用是否安全。

§ 1—2 固体的断裂强度

从微观，即从原子的尺度来分析一下固体的断裂机理，可以使我们对断裂的本质有个基本的了解。

进行理论分析的原子模型如图 1—1 所示。所谓固体的断裂，实质上是指在外力作用下原子平面间的分离。也就是当

垂直于原子平面的拉应力 σ 或平行原子平面的剪应力 τ 达到晶体的理论拉伸断裂强度或剪切断裂强度时，原子平面间的结合键将被解理分离〔图1—1(a)〕或被剪断〔图1—1(b)〕。

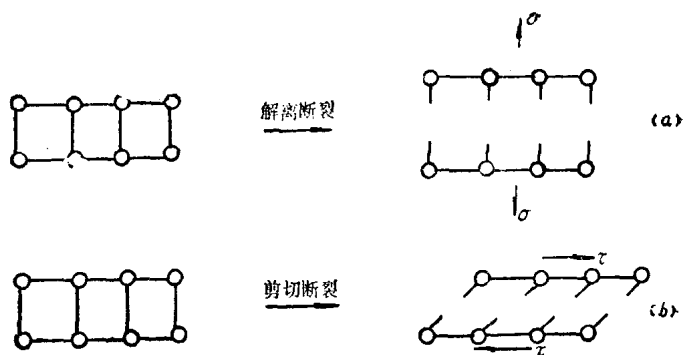


图 1—1 固体断裂的原子模型

固体的理论断裂强度可近似计算，计算过程和结果如下：

1. 理论拉伸断裂强度 (脆性理论强度)

假定固体为理想完整晶体，在不受力的情况下，原子间距为 a_0 ，此时原子间斥力和引力相等，处于平衡状态。若施加拉应力 σ ，原子平面间产生相对位移 x ，原子间的相互作用力最初是随 x 的增加而增大，当达到某一峰值 σ_{max} 后开始下降（如图1—2）。此峰值 σ_{max} 是一临界值 σ_c ，即为理论拉伸断裂强度。

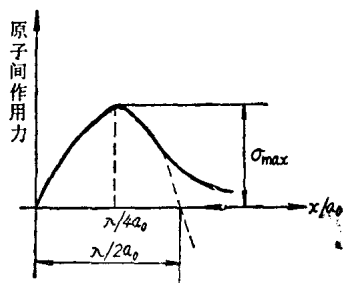


图 1—2 原子间作用力
随原子间距变化