



普通高校“十二五”规划教材

郦正能 张纪奎 编著

# 工程断裂力学



北京航空航天大学出版社  
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



普通高校“十二五”规划教材

# 工程断裂力学

郇正能 张纪奎 编著

福建师范大学  
图书馆  
藏书印

1042797



T1042797

北京航空航天大学出版社

## 内 容 简 介

本书系统论述了断裂力学的基本概念、理论基础、基本方法以及断裂力学的试验测定和工程应用。其中,简单介绍了断裂力学的历史背景和发展前景,重点介绍了线弹性断裂力学和疲劳裂纹扩展与断裂,同时介绍了当今先进的设计思想理念,即结构完整性设计(重点介绍损伤容限设计)方法和断裂力学在金属结构中的应用。

本书可作为本科生教材,亦可作为非力学专业研究生教材,并可供从事航空、土建、机械和交通等工程领域的科技人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

工程断裂力学 / 酆正能, 张纪奎编著. —北京 :  
北京航空航天大学出版社, 2012. 12  
ISBN 978 - 7 - 5124 - 1015 - 2

I. ①工… II. ①酆… ②张… III. ①断裂力学  
IV. ①O346.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 266046 号

版权所有, 侵权必究。

## 工程断裂力学

酆正能 张纪奎 编著

责任编辑 张冀青

\*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: [bhpress@263.net](mailto:bhpress@263.net) 邮购电话:(010)82316936

北京兴华昌盛印刷有限公司印装 各地书店经销

\*

开本: 787×960 1/16 印张: 14.75 字数: 330 千字

2012 年 12 月第 1 版 2012 年 12 月第 1 次印刷 印数: 2 000 册

ISBN 978 - 7 - 5124 - 1015 - 2 定价: 35.00 元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题, 请与本社发行部联系调换。联系电话: (010)82317024

## 前言

断裂力学作为固体力学的一个重要分支,是近几十年来蓬勃发展的一门新兴学科,主要研究含裂纹体的力学行为,以及固体中裂纹的产生、传播和快速扩展的规律。它在生产中被广泛应用,并已经扩展到许多技术领域。

自 20 世纪 70 年代起先后发展起来的结构安全可靠性和经济性设计技术,就是以断裂力学为主要理论基础的。因此,对于从事飞行器结构工程、船舶工程、机械工程、土建工程以及桥梁和交通运输工程等研究工作的科技人员来说,掌握一定的断裂力学知识是非常必要的。

本书作为高等院校的教材,以工程设计专业的本科生为主要对象,也可以选取其中的主要章节作为其他专业本科生或研究生选修课教材。由于断裂力学所涉及的范围甚广,所以本书主要介绍断裂力学的基本概念、基本原理和基本方法,以断裂力学的基础理论和分析方法为主,同时介绍一些断裂力学在工程结构分析和设计中的应用,以期读者今后从事结构分析和设计以及有关断裂力学方面专门课题的科学研究工作打下初步基础。

为了既能阐明断裂力学的基本原理又不使篇幅过大,书中尽量不引入繁杂而冗长的数学推导过程,以便于读者用更多的精力掌握主要内容。何庆芝、郦正能编写的《工程断裂力学》(1993)教材在教学过程中得到了好评,近期出版的郦正能主编的《应用断裂力学》(2012)引入了一些国内外研究新成果,故本书以《工程断裂力学》和《应用断裂力学》为基础,增加和补充了近年来断裂力学的最新研究成果,力求反映当前国内外断裂力学研究的新水平,同时为了便于自学还适当增加了一些例题。

本书内容精练,重点突出。全书共分 7 章。第 1 章介绍断裂力学兴起的背景和发展历史,以及断裂力学研究的对象和内容;第 2 章介绍线弹性断裂力学的基本概念和基本理论;第 3 章介绍复合型脆性断裂的三种主要理论;第 4 章介绍弹塑性断裂力学的基本概念和基本理论;第 5 章介绍断裂力学的材料性能和某些物



理参量的实验测定方法;第6章介绍疲劳裂纹扩展特性和疲劳寿命的计算方法;第7章简单介绍断裂力学在航空结构(金属结构)、焊接结构、压力容器结构等中的应用。

参加本书撰写工作的有郇正能(第1、3、4章,第2、6、7章部分)和张纪奎(第5章,第2、6、7章部分)。本书撰写中参考了国内外大量文献资料以及中外断裂力学教材和专著,在此向有关参考文献的作者和教授深表感谢。

由于编者的水平有限,书中难免有不足之处。编者至诚希望读者和专家们能够及时指正。

编者

2012年5月于北京

# 目 录

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 第 1 章 绪 论                       | 1  |
| 1.1 断裂力学的产生和发展                  | 1  |
| 1.2 断裂力学的研究对象                   | 6  |
| 1.3 断裂力学的研究内容                   | 7  |
| 参考文献                            | 8  |
| 第 2 章 线弹性断裂力学                   | 10 |
| 2.1 线弹性裂纹尖端场                    | 11 |
| 2.1.1 含裂纹体平面问题的复变函数解法           | 11 |
| 2.1.2 无限大板含中心裂纹时的应力场和位移场        | 14 |
| 2.2 应力强度因子                      | 18 |
| 2.2.1 应力强度因子的定义和物理含义            | 18 |
| 2.2.2 应力强度因子的计算方法               | 21 |
| 2.2.3 有限尺寸对应力强度因子的影响            | 25 |
| 2.3 能量原理                        | 28 |
| 2.3.1 能量释放率                     | 28 |
| 2.3.2 能量释放率 $G$ 的计算或确定          | 31 |
| 2.3.3 能量释放率 $G$ 与应力强度因子 $K$ 的关系 | 33 |
| 2.4 脆性断裂的 $K$ 准则                | 34 |
| 2.4.1 断裂韧度                      | 34 |
| 2.4.2 脆性断裂与准脆性断裂                | 35 |
| 2.5 裂纹顶端的塑性区                    | 38 |
| 2.5.1 Irwin 塑性区模型               | 38 |
| 2.5.2 应力松弛的修正                   | 39 |
| 2.5.3 等效裂纹长度与应力强度因子的修正          | 40 |
| 2.5.4 Dugdale 模型                | 41 |
| 2.5.5 塑性区形状                     | 43 |
| 2.5.6 平面应力状态和平面应变状态的对比          | 47 |



|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 2.5.7 塑性约束系数                       | 49 |
| 2.5.8 厚度效应                         | 51 |
| 2.6 平面应力断裂和 $R$ 曲线                 | 54 |
| 2.7 平面应力问题的工程概念                    | 57 |
| 2.7.1 表观断裂韧性                       | 57 |
| 2.7.2 Feddersen 分析方法               | 58 |
| 习 题                                | 60 |
| 参考文献                               | 60 |
| 第 3 章 复合型脆性断裂                      | 61 |
| 3.1 最大环向拉应力理论                      | 61 |
| 3.2 能量释放率理论                        | 64 |
| 3.3 应变能密度因子理论                      | 67 |
| 3.3.1 拉伸载荷 (I 型)                   | 69 |
| 3.3.2 面内剪切载荷 (纯 II 型)              | 70 |
| 3.3.3 离面剪切 (纯 III 型)               | 72 |
| 3.3.4 复合型                          | 73 |
| 3.4 复合型脆性断裂的工程判据                   | 74 |
| 3.4.1 直线型                          | 75 |
| 3.4.2 二次曲线 (椭圆) 型                  | 75 |
| 3.4.3 高次曲线型                        | 75 |
| 习 题                                | 76 |
| 参考文献                               | 77 |
| 第 4 章 弹塑性断裂力学                      | 78 |
| 4.1 $J$ 积分理论                       | 78 |
| 4.1.1 $J$ 积分定义及其守恒性                | 79 |
| 4.1.2 线弹性条件下 $J$ 积分与 $K$ 和 $G$ 的关系 | 81 |
| 4.1.3 $J$ 积分的能量表达式                 | 83 |
| 4.1.4 裂纹尖端弹塑性场——渐近解                | 90 |
| 4.1.5 $J$ 主导和 $J$ 控制裂纹扩展           | 91 |
| 4.1.6 $J$ 积分准则及其应用                 | 93 |
| 4.2 裂纹顶端张开位移 (COD)                 | 94 |
| 4.2.1 COD 定义                       | 95 |



|              |                         |            |
|--------------|-------------------------|------------|
| 4.2.2        | COD 准则                  | 96         |
| 4.2.3        | 按 Irwin 塑性区求 COD        | 97         |
| 4.2.4        | Dugdale 模型与裂纹张开位移       | 97         |
| 4.2.5        | COD 设计曲线                | 100        |
| 4.3          | $J$ 积分与 COD 的关系         | 102        |
| 4.4          | 稳定扩展的裂纹                 | 102        |
| 4.4.1        | $J$ 阻力曲线和撕裂模量           | 103        |
| 4.4.2        | 裂纹尖端张开角                 | 107        |
|              | 习 题                     | 109        |
|              | 参考文献                    | 110        |
| <b>第 5 章</b> | <b>断裂力学实验</b>           | <b>112</b> |
| 5.1          | 平面应变断裂韧度 $K_{IC}$ 的测试   | 112        |
| 5.1.1        | 测试原理和方法                 | 112        |
| 5.1.2        | 试样和试验装置                 | 113        |
| 5.1.3        | 试验程序                    | 115        |
| 5.1.4        | 试验结果处理和 $K_{IC}$ 有效性判断  | 115        |
| 5.2          | 表面裂纹断裂韧度 $K_{Ic}$ 的测试   | 116        |
| 5.2.1        | 测试原理和方法                 | 117        |
| 5.2.2        | 试 样                     | 118        |
| 5.2.3        | $K_{Ic}$ 有效性判断          | 119        |
| 5.2.4        | $K_{Ic}$ 的应用            | 119        |
| 5.3          | 平面应力断裂韧度 $K_C$ 的测试      | 119        |
| 5.3.1        | [COD] 法                 | 120        |
| 5.3.2        | $R$ 曲线法                 | 121        |
| 5.4          | 应力强度因子 $K$ 的柔度标定法       | 123        |
| 5.4.1        | 柔度标定法的原理                | 123        |
| 5.4.2        | 柔度标定法的具体步骤              | 124        |
| 5.5          | 临界裂纹张开位移 $\delta_c$ 的测试 | 125        |
| 5.5.1        | 测试原理和方法                 | 125        |
| 5.5.2        | $V$ 和 $\delta$ 的换算关系    | 125        |
| 5.5.3        | 临界点的确定                  | 126        |
| 5.5.4        | 确定起裂点的电位法               | 127        |
| 5.6          | 临界 $J$ 积分值 $J_{IC}$ 的测定 | 128        |



|       |                                     |     |
|-------|-------------------------------------|-----|
| 5.6.1 | 单试样法测试 $J_{IC}$                     | 128 |
| 5.6.2 | $J_R$ 阻力曲线法                         | 130 |
|       | 习 题                                 | 133 |
|       | 参考文献                                | 134 |
| 第 6 章 | 疲劳裂纹扩展                              | 135 |
| 6.1   | 概 述                                 | 135 |
| 6.1.1 | 疲劳破坏的特点                             | 135 |
| 6.1.2 | 疲劳裂纹扩展机理和裂纹扩展过程                     | 135 |
| 6.2   | 恒幅疲劳载荷下裂纹的扩展规律                      | 137 |
| 6.2.1 | 疲劳裂纹扩展速率的概念                         | 137 |
| 6.2.2 | 疲劳裂纹扩展规律                            | 138 |
| 6.2.3 | 疲劳裂纹扩展速率的实验研究                       | 138 |
| 6.2.4 | 疲劳裂纹扩展速率的表达式                        | 139 |
| 6.3   | 影响疲劳裂纹扩展的主要因素                       | 141 |
| 6.3.1 | 应力比 $R$ (或平均应力 $\sigma_m$ ) 的影响     | 141 |
| 6.3.2 | 环境影响                                | 145 |
| 6.3.3 | 加载频率的影响                             | 147 |
| 6.3.4 | 材料厚度的影响                             | 147 |
| 6.3.5 | 应力强度因子变程 $\Delta K$ 很高和很低时裂纹扩展速率的特点 | 148 |
| 6.3.6 | 超载的影响                               | 149 |
| 6.4   | 变幅载荷下裂纹扩展分析                         | 149 |
| 6.4.1 | 变幅载荷下疲劳裂纹扩展的特点                      | 149 |
| 6.4.2 | 考虑超载迟滞效应的计算模型                       | 153 |
| 6.4.3 | 裂纹扩展寿命的计算                           | 160 |
| 6.5   | 小裂纹疲劳扩展的特点                          | 160 |
| 6.5.1 | 小(短)裂纹的定义和疲劳裂纹扩展的特点                 | 160 |
| 6.5.2 | 小裂纹扩展速率的工程估算方法                      | 162 |
| 6.5.3 | 疲劳全寿命预测方法简介                         | 165 |
| 6.6   | 应力腐蚀和腐蚀疲劳裂纹扩展                       | 168 |
| 6.6.1 | 应力腐蚀                                | 168 |
| 6.6.2 | 腐蚀疲劳裂纹扩展                            | 172 |
| 6.6.3 | 腐蚀疲劳裂纹扩展速率的计算公式                     | 175 |
| 6.6.4 | 腐蚀疲劳裂纹扩展寿命的计算                       | 178 |



|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| 6.7 应变疲劳 .....                        | 178        |
| 习 题 .....                             | 179        |
| 参考文献 .....                            | 180        |
| <b>第7章 断裂力学在金属结构设计中应用 .....</b>       | <b>182</b> |
| 7.1 飞机结构损伤容限设计 <sup>[1-3]</sup> ..... | 182        |
| 7.1.1 损伤容限设计概念 .....                  | 183        |
| 7.1.2 结构损伤容限设计要求和损伤容限结构类型 .....       | 185        |
| 7.1.3 损伤容限设计内容和步骤 .....               | 189        |
| 7.1.4 损伤容限设计实例 .....                  | 197        |
| 7.2 焊接结构断裂安全设计 <sup>[4,5]</sup> ..... | 208        |
| 7.2.1 焊接结构的特点 .....                   | 208        |
| 7.2.2 焊接结构脆断的断裂力学分析 .....             | 211        |
| 7.2.3 焊接结构(零件或构件)疲劳裂纹扩展寿命估算 .....     | 215        |
| 7.2.4 焊接结构的脆断温度 .....                 | 215        |
| 7.3 压力容器与管子的断裂安全设计 .....              | 217        |
| 7.3.1 压力容器的脆性断裂 .....                 | 218        |
| 7.3.2 压力容器的韧性断裂 .....                 | 221        |
| 7.3.3 断裂前渗漏设计 .....                   | 222        |
| 习 题 .....                             | 226        |
| 参考文献 .....                            | 226        |

# 第1章 绪论

## 1.1 断裂力学的产生和发展

断裂力学是20世纪初期才发展起来的一门新兴学科。它和其他学科一样,是在生产实践中产生和发展的。任何材料和工程结构都不可避免地存在着类似于裂纹的缺陷。它们可能是结构材料中固有的,或者是制造加工或使用过程中造成的损伤。这些缺陷的存在和扩展,降低了结构的承载能力,甚至使之失效。然而,人们认识到这一点,却经历了一个很长的时期。

20世纪初期,在工程结构设计时,为了保证结构安全性首先考虑结构的静强度要求。在设计中采用设计载荷法,设计载荷等于使用载荷乘以安全系数。静强度设计准则为结构的破坏载荷大于或等于设计载荷,或者是元件的极限应力大于或等于设计应力。设计时为了补偿由于外载荷计算、分析方法、材料特性等一系列不确定因素引起的误差,采用了大于1的安全系数以保证结构的安全。静强度设计方法是结构设计的基本方法,一直沿用至今。但是,在工程结构使用中曾出现过意外的失效事故,造成很大的损失。从下面的典型例子中可以看出按静强度设计的不足之处。

第二次世界大战期间,美国建造约5 000艘货轮和油轮,至少有13艘油轮和3艘货轮由于船体结构上的裂纹扩展而断裂为两半,如1943年1月16日T-2油轮Schenectady在内河码头停泊时拦腰折断;还有1/3以上的轮船在服役3年内在结构中有1 450块焊接钢板产生裂纹。到1948年,其中238艘船因损伤严重而报废。对以上断裂的船舶进行的强度分析表明,在它们破坏时所承受的应力都远小于船体材料的屈服应力(有的不到屈服应力)。进一步的研究表明,由于船体采用焊接结构,在焊缝附近存在着缺陷和残余应力,在生产中未能检测出来,而在使用期间结构中的缺陷(裂纹)扩展最终导致低应力脆断。

1954年,英国的de Havilland公司研制的双喷气发动机带增压舱的旅客机“彗星”I号(Comet I),在印度上空热带风暴中失事;接着又有两架客机连续在罗马附近上空失事,客机的灾难性事故给人的印象特别深。事后,飞机的大部分残骸被回收,并对其进行了分析研究。很明显,座舱顶部窗口边缘的一个微小裂纹在增压舱重复载荷下扩展引起的爆裂是飞机失事的主要原因。后来又用已停飞的飞机座舱进行模拟试验,重现了座舱爆裂的过程,当时,尚无法解释如此微小的裂纹何以会导致断裂。

1958年,美国“北极星”导弹固体燃料发动机壳体在试车时发生意外爆炸;1969年底,F-111A飞机在投弹拉起时左翼脱落,致使飞机撞地坠毁,机翼破坏时载荷低于设计极限,经故障分析,得出结论是机翼枢轴在离枢轴中心线67 mm处有锻造引起的缺陷(内部椭圆裂



纹)。至今仍有飞机在使用期间出现裂纹事情,2010年新加坡航空公司在检修 A—380 客机的发动机时,偶然发现机翼蒙皮和翼肋的连接元件在连接处产生裂纹,随后进一步的检查发现,多架飞机在类似零件上有上千条裂纹,因此初步规定,飞机在 1 800 个飞行起落后需要全部更换此零件。

我国也存在类似故障,如 1971 年在苏家屯对火车机车检查时,发现有 50% 机车的车轴有横向裂纹;随后上海锅炉厂生产的 1010 氨合成塔内 11 层焊接钢板中有 6 层发现上千条裂纹(故障分析认为结构刚性大,其原因是焊接收缩时存在相当大的残余应变引起的);在 20 世纪 70 年代,空军的歼五飞机机翼大梁螺栓孔处、轰五机翼壁板、直五旋翼桨轴等均产生过裂纹;严重的是歼七飞机前起落架支柱接连产生两起折断事故,故障分析得出的结论是由于支柱的充气嘴处有 2 mm 左右的角裂纹(角裂纹的尺寸已经达到临界裂纹尺寸)。

由上述例子可以看出,建立在材料力学、结构力学和弹性力学基础上的静强度设计方法,不能反映含裂纹结构的强度特点,因此必须发展一门研究含裂纹体力学特性的学科——断裂力学。断裂力学是应用固体力学的成就,主要研究含缺陷的材料和结构的破坏问题。由于该学科与材料和结构的安全直接相关,尽管它出现的时间很短,但在理论和实验方面均有迅速的发展,并已成为生产服务。例如,在航空结构设计中提出损伤容限设计,在重大机械产品设计中采用防断裂设计,这些措施都是为了保证产品的安全性和可靠性,避免重大损失。

为了说明断裂力学的发展过程,有必要回顾一下在断裂力学(作为固体力学的一个分支)建立以前的一些有关历史情况。

有关断裂问题的记载,首次是在 15 世纪由杰出的工程师和艺术家达·芬奇在试验中发现的,在直径一定的情况下,铁丝的断裂载荷与其长度成反比,但当时没能作出合理的解释。当然,在目前看这个现象很容易理解。当时生产铁丝的工艺水平较低,铁丝越长,其内部存在缺陷(例如微裂纹)的可能性越大,因而其强度亦越低。

1913 年,Inglis<sup>[1]</sup>发表了无限大板中含有一个穿透板厚的椭圆孔的弹性力学精确分析解(称 Inglis 解),他是用椭圆坐标计算的,在形式上比较复杂,当椭圆孔的短轴趋于零时,它退化成一个长度为  $2a$ (椭圆长轴)的穿透裂纹。1919 年俄国的 Колосов 在发表的博士学位论文中关于无限大板中含一个椭圆孔时应力集中的问题与他的解相同,在“板”受各向均匀应力时,椭圆孔长轴端的最大应力为

$$\sigma_{\max} = 2\sigma \frac{a}{b} \quad (1-1)$$

而当该板受单轴拉应力且垂直于长轴时,孔长轴端的最大应力为

$$\sigma_{\max} = \sigma \left( 1 + 2 \frac{a}{b} \right) \quad (1-2)$$

式中: $\sigma$ ——外加应力;

$a$  和  $b$ ——椭圆孔的半长轴和半短轴长度。



由式(1-1)和式(1-2)可以看出,当椭圆孔的半短轴  $b \rightarrow 0$  时,椭圆孔变成了裂纹,此时有

$$\sigma_{\max} = \lim_{b \rightarrow 0} \sigma \left( 1 + 2 \frac{a}{b} \right) \rightarrow \infty$$

这意味着带有裂纹的构件,根本承受不了任何载荷,显然这是与实际不符的。Griffith 在 1921 年发表的论文解答了这一疑题<sup>[2]</sup>。

Griffith 为了解释晶体的拉伸强度远小于其理论强度这一事实,对脆性材料的断裂问题进行了研究,他提出一个大胆创新思想:当构件中存在裂纹时,也就是固体材料中出现了一个新表面,如假想裂纹扩展一个微量,构件将释放出一定量的应变能,系统所释放出来的应变能的一部分转化为表面能;而要使裂纹扩展,则需要克服阻力(所需表面能),也就是说要作一定量的功。当能量释放率或裂纹扩展单位长度所释放出来的应变能(亦称裂纹扩展力)大于阻力时,裂纹才会发生扩展。根据上述准则,可得到含裂纹构件发生断裂时的应力,即

$$\sigma_t \propto \sqrt{\frac{2E\gamma}{a}} \quad (1-3)$$

式中:  $\gamma$ ——材料的表面能;

$a$ ——裂纹长度;

$E$ ——材料的弹性模量。

由式(1-3)可以看出,断裂应力随着结构内部所含裂纹长度的增大而降低。

Griffith 理论的成功,是把宏观缺陷在几何上理想化之后,把它作为连续介质力学中的一种边界条件,则连续介质力学的方法在分析含缺陷的材料强度和韧性问题上仍然有效,所以 Griffith 是连续介质力学断裂理论的奠基人。尽管 Griffith 理论对脆性材料较合适,对金属材料应用误差较大,但其在断裂力学的发展上无疑是很重要的一步。然而,在论文发表后的 20 多年里,一直未被人们重视。首先,在那个时期,表现为纯脆性断裂的工程材料并不是很多;其次,对广泛使用的大多数金属材料,Griffith 理论不能得出满意的预测。对断裂问题的研究,在这段时间里也只是出于科学上的兴趣而未能应用于工程设计。

第二次世界大战前后,由于发生了一系列严重的断裂事故,为了分析这些事故的原因,断裂研究重新引起人们极大的兴趣。为了将前述的 Griffith 理论转化为一门工程科学,Irwin 和 Orowan 各自独立将 Griffith 理论加以补充,以适用于金属材料。1948 年 Orowan<sup>[3]</sup>指出,裂纹扩展时,不仅要消耗能量于表面能,而且相当大一部分能量转化成裂纹附近的塑性变形功。这样将塑性变形功加入后,得到断裂应力为

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{E(2\gamma + \gamma_p)}{\pi a}} \quad (1-4)$$

式中:  $\gamma_p$ ——裂纹尖端向前扩展单位长度时的塑性变形功。

Orowan 估计,对于同一种金属材料,  $\gamma_p$  大约比  $\gamma$  高 3 个数量级。对于塑性较好的材料,表面能甚至可以略去不计。这一事实使人们认识到,对于金属材料而言,裂纹附近的塑性形变



功是阻止裂纹扩展的实际抗力。

1948年, Irwin<sup>[4]</sup>经过10年的艰苦探索, 提出对Griffith理论的修正, 引进一个新参量 $G$ , 称为能量释放率, 或者称为裂纹扩展力, 它是断裂力学的另一个重要物理参量。进而Irwin建议

$$G = G_c \quad (1-5)$$

作为裂纹临界平衡状态的判据, 其中 $G_c$ 代表 $G$ 的临界值, 为一材料常数, 由实验测定。Irwin判据的提出发展了Griffith理论, 是线性弹性断裂力学诞生的一个标志, 因为 $G_c$ 不仅仅局限于代表材料的表面能, 也适用于金属材料的脆性破坏(材料破坏前, 在裂纹顶端附近有相当范围的塑性变形区)。

在20世纪50年代, 许多力学家和应用数学家相继发现裂纹顶端附近应力的奇异性, Irwin<sup>[5]</sup>分析了这种渐近性质, 并在1957年提出一个新的物理量, 即应力强度因子 $K$ 。 $K$ 是一个仅与裂纹尖端局部相关的参量, 它的确定比 $G$ 相对容易。1960年Irwin用石墨做实验, 测出裂纹开始扩展时的 $K$ 值, 此值称为石墨的断裂韧性 $K_{Ic}$ 。当然, 这些参量能否成为控制断裂的量, 还在于它能否通过实验直接或间接地测定出来; 并且要证明它确实同裂纹的扩展有关。对含裂纹试件的一些断裂试验表明, 对一定的材料, 在脆断情况下, 确实有一个临界应力强度因子, 它只与材料有关, 而与试件的几何形状、尺寸以及外加载荷形式无关。这个临界应力强度因子称为材料的断裂韧度, 它表征材料抵抗裂纹扩展的能力。因此, Irwin提出新的脆性断裂的判据(或断裂条件), 即

$$K_I \geq K_{Ic} \quad (1-6)$$

式中: $K_I$ ——应力强度因子(推动裂纹扩展的力);

$K_{Ic}$ ——材料的断裂韧度。

Irwin对于断裂力学的重要贡献是将Griffith理论的能量释放率概念与一个更便于计算的裂纹顶端的参量——应力强度因子 $K$ 联系起来, 从而为线弹性断裂力学奠定了理论基础。从1920年经典的Griffith理论提出, 到1960年前后线弹性断裂力学的建立, 经历了40年艰苦的探索, 说明科学的进步是很不容易的。

线弹性断裂力学(因为应力强度因子或能量释放率概念的建立及应用都是以线弹性力学为基础的, 故称之为线弹性断裂力学)的建立, 为分析含裂纹结构的强度提供了新的工具。线弹性断裂力学从应力强度因子和能量释放率两方面描述含裂纹体的力学行为, 从材料实验中测定材料对裂纹扩展的抗力(断裂韧度), 这种抗力由材料内部属性决定, 其提出的断裂准则实际上是传统强度理论的补充和革新, 也可称其为含裂纹体的强度理论。线弹性断裂力学不仅用于含裂纹体承载能力的预测, 还扩充到预测含裂纹体在疲劳载荷下的扩展行为, 从而可以计算结构从初始裂纹扩展到临界裂纹尺寸的疲劳寿命。对裂纹运动规律的(包括裂纹在准静态载荷下的开裂和扩展以及在疲劳载荷下的扩展)了解, 有助于比较合理地评定结构安全可靠, 为抗断裂设计和断裂控制提供了理论基础。



线弹性断裂力学着重研究断裂时在裂纹尖端附近具有小范围塑性变形的情况,也就是说,外加应力要低于净截面屈服应力。但是,随着生产技术的发展,许多工程结构(如用韧性很好的结构材料做成的高压容器、核电站结构中的一些构件)由于材料的韧性足够大,在载荷增大时,伴随着裂纹扩展的塑性区已经达到裂纹尺寸、试件尺寸的同一数量级,显然,小范围塑性变形条件已不能满足,线弹性的假设已不成立,所以必须发展弹塑性断裂力学。

最早考虑裂纹尖端塑性区效应的方法是在线弹性断裂力学的基础上加以修正的,这是1958年由 Irwin<sup>[6]</sup>首先提出的,即认为裂纹尖端的塑性区存在,使结构的刚度比完全按线弹性分析所得的结果要“弱”一些;这相当于使裂纹长度稍微增大一点的效果。在计算应力强度因子时用增大了的当量裂纹长度。用这种修正方法以扩大线弹性断裂力学的应用范围。

非线性断裂力学要考虑材料非线性(非弹性)效应,在裂纹顶端大范围内应力与应变呈非线性关系。1963年, Wells<sup>[7]</sup>提出了裂纹张开位移(COD)作为控制裂纹扩展的参量。它不仅可用于线弹性情况,也可以用于弹塑性情况。裂纹顶端的张开位移值(CTOD)是裂纹顶端塑性变形的一种度量,对一定材料可测定其临界值,从而提出一个新的断裂判据。随后许多研究者发展了一套分析含裂纹结构的 COD 工程方法。

1968年, Rice 和 Hutchinson<sup>[8-10]</sup>等人基于全量塑性理论(相当于非线性弹性理论)得到一个与裂纹顶端路径无关的积分,后来被称为  $J$  积分,此积分值是裂纹顶端应力、应变状态的一种综合度量。他们的工作为  $J$  积分方法奠定了理论基础。同年, Hutchinson<sup>[11]</sup>、Rice 和 Rosengren<sup>[12]</sup>建立了著名的 HRR 奇异性场, HRR 奇异性场表征了弹塑性材料裂纹尖端应力应变场的主要特征,而  $J$  积分表示了 HRR 奇异性场强度。Begley 和 Landes 的工作使  $J$  积分作为弹塑性断裂力学主要参量的体系得以建立。在此基础上,在随后的年代里,  $J$  积分理论及其应用成为弹塑性断裂力学中一个最为活跃的研究领域,并取得了丰硕的成果。1972年以后, Begley 和 Landes<sup>[13]</sup>等人的许多实验表明,在一定条件下,  $J$  积分的临界值是一个材料常数,当  $J$  值超过这个临界值时,裂纹开始扩展,可用此临界值作为韧性材料裂纹起始扩展的判据。至此,弹塑性断裂力学得到快速发展,并且迅速用于工程实践。例如,美国的电力研究院(EPRI)还编写了一套可应用于工程结构的以  $J$  积分和 COD 为控制参量的弹塑性断裂分析手册,可用于压力容器,特别是核电站容器的断裂分析。

20世纪50年代初期关于焊接船体断裂事故的分析、关于“彗星号”旅客机的疲劳断裂分析以及其他一些重大断裂事件的分析,都明确地表明:大多数材料和工程中不可避免地存在宏观裂纹,宏观裂纹扩展导致材料破坏。分析裂纹在疲劳载荷下扩展至临界尺寸的过程是非常必要的。在众多的描述裂纹扩展速率的公式中, Paris<sup>[14]</sup>等在1961年提出的以应力强度因子变程作为控制裂纹扩展速率的主要参量的公式,具有明显的优越性。但由于疲劳裂纹扩展速率受到许多因素的影响,它们不是简单的 Paris 公式所能概括的。随后的研究工作中,提出了许多改进了的疲劳裂纹扩展速率公式,以考虑不同因素的影响;同时对谱载荷作用下疲劳裂纹行为也进行了大量的研究工作。在断裂力学基础上发展起来的“损伤容限设计原理”是近十几



年来在结构设计方面的一个重大进展,为航空航天飞行器结构设计所广泛采用。

1979年,Hutchinson和Paris<sup>[15]</sup>以 $J$ 积分为控制参量,分析裂纹扩展,提出 $J_R$ 阻力曲线概念。在 $J$ 积分作为单参数断裂准则时,精细的数值计算表明,裂纹尖端的应力应变场难以用HRR场表征,而临界 $J$ 积分值( $J_c$ )的测定依赖试样几何尺寸和加载方式。从1986年开始,王自强等人建立了裂纹尖端弹塑性高阶场的基本方程,为弹塑性断裂双参数断裂准则提供了理论基础。20世纪90年代,针对裂纹起始扩展提出 $J-Q$ 和 $J-K$ 双参数准则。近年来关于弹塑性断裂力学中裂纹尖端场和扩展问题受到一些科学家的重视(有关这方面内容可参阅参考文献[16])。

对动态断裂的定量分析是由Mott<sup>[17]</sup>在1948年作出的;1951年Yoffe<sup>[18]</sup>也提出了裂纹动力学(动态断裂力学)的解。以后,围绕着裂纹的扩展(如动态载荷下裂纹起始扩展、界面动态裂纹扩展)、动态裂纹止裂、裂纹分叉、快速断裂的起裂点、动态能量释放率、动态断裂韧度等课题进行了大量理论分析和实验工作。断裂动力学是研究惯性效应不能忽略的那些断裂力学问题。但迄今的断裂动力学仍是一门不很成熟的学科,例如它不能处理加载速率很高的动态断裂现象,也不能处理裂纹传播速度较大的扩展裂纹。非线性断裂动力学尚未真正建立起来。

在断裂力学发展的初期和以后相当长的一段时间内,研究重点都是针对金属材料的;但由于大量非金属材料逐渐引入工程结构,人们也试图将断裂力学理论扩展到非金属材料、复合材料结构的分析中去。近年来,对纤维增强复合材料、高分子聚合物、陶瓷材料以及岩石等方面的断裂力学的研究,日益引起研究者的兴趣,并取得了许多成果,例如各向异性材料断裂力学、界面裂纹问题等,甚至在采矿、地震和破冰等领域也得到了应用。

近年来,将概率和统计学与断裂力学结合形成了概率断裂力学分支,应用这种理论和方法进行耐久性和可靠性设计,成为机械产品安全性和可靠性的重要设计方法之一。细观断裂力学、纳观断裂力学和宏观与微观断裂力学等呈蓬勃发展趋势。但是,断裂力学还是一门年轻的学科,它还很不成熟,还有大量有待于深入研究和探讨的问题。

## 1.2 断裂力学的研究对象

断裂学科是从金相学、金属物理和化学等观点研究断裂的微观机理及物理本质,以及从力学观点研究断裂的宏观现象和微观机理等的学科,统称断裂学科。断裂力学是研究材料和结构在含有裂纹情况下的力学特性的学科。

断裂力学是以弹性力学、塑性力学和粘弹性力学等理论为基础的一门固体力学分支,其研究对象是含裂纹的材料和结构。断裂力学的研究应包括宏观的断裂现象和微观的结构破坏机理。断裂力学从力学的侧面研究宏观的断裂现象,包括宏观裂纹的生成、扩展、失稳开裂、传播和止裂。微观结构破坏机理属于断裂物理的研究范围。但是,宏观断裂现象应该和微观断裂过程联系起来,它们之间的分界线不是很明显。

从工程应用角度看,断裂力学与材料力学类似,是材料力学的发展与充实。断裂力学是在



大量实验的基础上研究带裂纹材料的断裂韧度(属于广义的材料强度范围),研究带裂纹构件在各种工作条件下裂纹的扩展、失稳和止裂的规律,并应用这些规律进行设计,以保证产品的构件安全可靠。

在断裂力学出现以后,人们对宏观断裂规律有了进一步的认识,对传统的设计思想进行了改善与补充。不仅对有缺陷构件进行剩余强度和寿命分析,以保证产品安全可靠,或制定合理的检验损伤标准,例如飞机设计就从传统的疲劳寿命设计逐渐发展为结构完整性设计(包含结构疲劳寿命设计、损伤容限设计和可靠性设计)。而且,断裂力学在选材、改善工艺、制造新材料等方面的研究中,也在逐渐地发挥作用,提出的断裂韧性的概念为设计选材提供了参考,为发展新材料、新工艺指明了方向。

按照所研究对象和观点的不同,断裂力学可分为微观断裂力学和宏观断裂力学。微观断裂力学是研究原子位错等晶粒尺度内的断裂过程,根据对这些过程的了解,建立起支配裂纹扩展和断裂的判据。宏观断裂力学是在不涉及材料内部的断裂机理的条件下,通过连续介质力学分析和实验做出断裂强度估算与控制。本书主要介绍宏观断裂力学(以下简称断裂力学)。

### 1.3 断裂力学的研究内容

断裂力学的目的是定量地研究承载体由于含有一条主裂纹发生扩展(包括静载下扩展及疲劳载荷下的扩展)而产生失效的条件。因此,它必须能定量地确定促使裂纹扩展的“推动力”、材料(或结构)阻止裂纹扩展的“阻力”以及在什么条件下结构发生失效,也就是要建立断裂准则。用什么参量表征裂纹“推动力”以及如何计算它的数值是断裂力学研究中极为重要的一个课题。线弹性断裂力学中应力强度因子  $K$  (或其等效参量——能量释放率  $G$ ) 概念的提出,是线弹性断裂力学的奠基工作。科学工作者为寻找研究应力强度因子的计算方法(包括解析公式及数值解法)付出了艰苦的劳动,至今他们仍为计算复杂结构在复杂载荷作用下非穿透裂纹的应力强度因子的方法进行着大量的研究工作。而  $J$  积分和 COD 等参量的提出,为弹塑性断裂力学的研究开辟了广阔的道路。

研究材料或结构的裂纹扩展阻力,更多地依靠实验。 $K_{IC}$  或  $J_{IC}$  的测定以及这些材料特性常数受到哪些因素的影响及其定量关系,也就是说,对于材料研制,应如何提高材料的断裂韧度和临界  $J$  积分值;对于结构设计,应如何综合选择材料,即材料性能的  $K_{IC}$  和  $J_{IC}$  的选择,这些都要进行大量实验研究才能获知。

对断裂准则的适用范围和适用条件的研究,是将断裂力学基本原理应用于工程结构分析的先决条件。

把断裂力学应用于复杂结构的分析,是一个很重要的研究课题。例如,航空结构中广泛采用组合形式(铆接、胶接)的加筋平板、加筋曲板或筒壳。这些结构在产生裂纹后,各元件之间的相互影响,或者多裂纹之间的相互影响,使断裂分析变得复杂。在结构设计中研究如何利用裂纹之间的相互影响,减小裂纹顶端的应力强度因子,或改变裂纹的扩展方向。又如核电站