



国防特色教材·力学



北京市高等教育精品教材立项项目

应用断裂力学

YINGYONG DUANLIE LIXUE

主编 郦正能

编著

郦正能

王 军

关志东

贺小帆

张纪奎

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工程大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

西北工业大学出版社



国防特色教材·力学



北京市高等教育精品教材立项项目

应用断裂力学

主编 郦正能
编著 郦正能 关志东 张纪奎
王 军 贺小帆



北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 哈尔滨工业大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社

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实验测定和工程应用。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、弹塑性断裂力学、疲劳裂纹扩展以及复合材料的损伤与断裂,同时介绍了应力强度因子计算方法、动态断裂力学、腐蚀疲劳断裂、断裂力学测定以及断裂力学在金属结构中的应用。

本书可作为研究生教材,亦可作为本科生选修课教材,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

应用断裂力学 / 酆正能主编. — 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012. 1

ISBN 978-7-5124-0619-3

I. ①应… II. ①酆… III. ①断裂力学 IV.

①O346.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 208350 号

版权所有,侵权必究。

应用断裂力学

主编 酆正能

编著 酆正能 关志东 张纪奎

王 军 贺小帆

责任编辑 刘晓明

*

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 邮购电话:(010)82316936

北京市媛明印刷厂印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:22.75 字数:510 千字

2012 年 1 月第 1 版 2012 年 1 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-5124-0619-3 定价:69.00 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,它研究含裂纹体的力学行为,研究固体中裂纹的产生、传播和快速扩展的规律。由于它在生产中广泛应用,因此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,以工程设计专业的研究生为主要对象;选取其中的主要章节也可作为本科生选修课教材。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,以断裂力学的理论基础和分析方法为主,同时介绍一些断裂力学在工程结构分析和设计中的应用,以期为读者今后从事结构分析和设计以及进行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而又不使篇幅过大,书中尽量不引入繁杂而又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》教材在教学过程中得到了好评,故本书以《工程断裂力学》一书为基础,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。

本书内容精练,重点突出。全书共分 11 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 章介绍工程分析中常用的几种应力强度因子的计算方法;第 4 章介绍复合型脆性断裂的三种主要理论;第 5 章介绍弹塑性断裂力学的基本概念和基本理论;第 6 章介绍动态断裂力学的基础知识;第 7 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 8 章介绍疲劳裂纹扩展特性和疲劳寿命的计算方法;第 9 章介绍应力腐蚀与腐蚀疲劳裂纹扩展特性;第 10 章简单介绍断裂力学在航空结构(金属结构)、焊接结构、压力容器等结构中的应用;第 11 章介绍复合材料结构中损伤和断裂的特点及初步分析方法。

参加本书撰写工作的有酆正能(第1、4、5章,第2、6、8、10章部分)、关志东(第11章、第2章部分)、张纪奎(第7章,第2、3、6、8、10章部分)、王军(第3、8章部分)、贺小帆(第9章)。酆正能任主编。在撰写本书第3章时得到吴学仁研究员的帮助和指导。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。全书由张行教授、刘莉教授和麦汉超教授等审阅并提出了许多宝贵意见。在此向有关参考文献的作者和张行教授、吴学仁研究员、刘莉教授、麦汉超教授以及张铮副教授深表感谢。

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

2011年8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 引 言	10
2.2 线弹性裂纹尖端场	11
2.2.1 含裂纹体平面问题的复变函数解法	11
2.2.2 无限大板含中心裂纹时的应力场和位移场	14
2.3 应力强度因子	18
2.3.1 应力强度因子的定义和物理含意	18
2.3.2 几种典型裂纹的应力强度因子	21
2.3.3 有限尺寸对应力强度因子的影响	23
2.4 能量原理	26
2.4.1 能量释放率	26
2.4.2 能量释放率 G 的计算或确定	28
2.4.3 能量释放率 G 与应力强度因子 K 的关系	30
2.5 脆性断裂的 K 准则	31
2.5.1 断裂韧度	32
2.5.2 脆性断裂与准脆性断裂	33
2.6 裂纹顶端的塑性区	34
2.6.1 Irwin 塑性区模型	35
2.6.2 应力松弛的修正	35
2.6.3 等效裂纹长度与应力强度因子的修正	36
2.6.4 Dugdale 模型	37
2.6.5 塑性区形状	39
2.6.6 平面应力状态和平面应变状态的对比	43

2.6.7 塑性约束系数	46
2.6.8 厚度效应	47
2.7 平面应力断裂和 R 曲线	50
2.8 平面应力问题的工程概念	54
2.8.1 表观断裂韧性	54
2.8.2 Feddersen 分析方法	55
习 题	57
参考文献	57
第 3 章 应力强度因子的各种计算方法	58
3.1 普遍形式的复变函数法	58
3.1.1 Kolosov - Muskhelishvili 应力函数	58
3.1.2 I、II 复合型裂纹的应力强度因子	59
3.1.3 复变函数法的特点与应用范围	61
3.2 边界配置法	61
3.2.1 Williams 应力函数	62
3.2.2 边界配置过程	63
3.2.3 边界配置法的特点	64
3.3 有限元法	64
3.3.1 直接法	65
3.3.2 间接法	72
3.4 权函数法	73
3.4.1 二维裂纹问题的权函数解法	74
3.4.2 裂纹面位移的求解	74
3.4.3 权函数的确定	76
3.4.4 应力强度因子的求解	77
3.4.5 应用实例	79
3.4.6 三维裂纹问题的权函数解法	81
3.5 能量差率解法	81
3.5.1 应力强度因子与裂纹张开位移的关系	82
3.5.2 能量差率方程	83
3.5.3 微分方程的封闭解	85
3.5.4 裂纹张开位移模态	86
3.6 叠加法和组合法	87

3.6.1 叠加法	88
3.6.2 组合法	89
习 题	91
参考文献	92
第4章 复合型脆性断裂	94
4.1 概 述	94
4.2 最大环向拉应力理论	94
4.3 能量释放率理论	97
4.4 应变能密度因子理论	99
4.5 复合型脆性断裂的工程判据	107
习 题	109
参考文献	110
第5章 弹塑性断裂力学	111
5.1 引 言	111
5.2 J 积分理论	111
5.2.1 J 积分定义及其守恒性	112
5.2.2 线弹性条件下 J 积分与 K 和 G 的关系	114
5.2.3 J 积分的能量表达式	116
5.2.4 裂纹尖端弹塑性场——渐近解	123
5.2.5 J 主导和 J 控制裂纹扩展	125
5.2.6 J 积分准则及其应用	127
5.3 裂纹顶端张开位移(COD)	128
5.3.1 COD 定义	129
5.3.2 COD 准则	130
5.3.3 按 Irwin 塑性区求 COD	131
5.3.4 Dugdale 模型与裂纹张开位移	132
5.3.5 COD 设计曲线	135
5.4 J 积分与 COD 的关系	137
5.5 稳定扩展的裂纹	137
5.5.1 J 阻力曲线和撕裂模量	138
5.5.2 裂纹尖端张开角	142
习 题	144

参考文献	145
第 6 章 动态断裂力学基础	147
6.1 概 述	147
6.2 裂纹扩展速度和动能	147
6.3 裂纹快速扩展的力学参数	149
6.3.1 动态应力强度因子	149
6.3.2 动态能量释放率	151
6.3.3 $G^{\text{dyn}}(t)$ 和 $K^{\text{dyn}}(t)$ 的关系	152
6.3.4 动态围路积分 J_I^{dyn}	153
6.4 裂纹的动态起始扩展	154
6.5 动态断裂韧度和快速扩展断裂判据	156
6.5.1 动态断裂韧度	156
6.5.2 裂纹快速扩展断裂判据	158
6.5.3 裂纹快速扩展的预测	158
6.6 裂纹的分岔	160
6.6.1 能量释放率判据	160
6.6.2 应变能密度因子判据	161
6.6.3 应力强度因子判据	161
6.7 快速扩展裂纹的止裂	162
6.7.1 止裂理论中的动态观点	162
6.7.2 止裂理论中的准静态观点	163
6.7.3 能量的观点	164
习 题	165
参考文献	166
第 7 章 断裂力学实验	168
7.1 平面应变断裂韧度 K_{IC} 的测试	168
7.1.1 测试原理和方法	168
7.1.2 试样和试验装置	169
7.1.3 试验程序	171
7.1.4 试验结果处理和 K_{IC} 有效性判断	172
7.2 表面裂纹断裂韧度 K_{ICe} 的测试	173
7.2.1 测试原理和方法	173

7.2.2 试 样	175
7.2.3 K_{Ic} 有效性判断	175
7.2.4 K_{Ic} 的应用	175
7.3 平面应力断裂韧度 K_{Ic} 的测试	176
7.3.1 [COD]法	176
7.3.2 R 曲线法	178
7.4 应力强度因子 K 的柔度标定法	179
7.4.1 柔度标定法的原理	180
7.4.2 柔度标定法的具体步骤	180
7.5 临界裂纹张开位移 δ_c 的测试	181
7.5.1 测试原理和方法	181
7.5.2 V_c 和 δ_c 的换算关系	182
7.5.3 临界点的确定	183
7.5.4 确定起裂点的电位法	183
7.6 临界 J 积分值 J_{Ic} 的测定	184
7.6.1 单试样法测试 J_{Ic}	184
7.6.2 J_R 阻力曲线法	186
习 题	190
参考文献	190
第 8 章 疲劳裂纹扩展	191
8.1 概 述	191
8.1.1 疲劳破坏的特点	191
8.1.2 疲劳裂纹扩展机理和裂纹扩展过程	191
8.2 恒幅疲劳载荷下裂纹的扩展规律	193
8.2.1 疲劳裂纹扩展速率的概念	193
8.2.2 疲劳裂纹扩展规律	194
8.2.3 疲劳裂纹扩展速率的实验研究	194
8.2.4 疲劳裂纹扩展速率的表达式	195
8.3 影响疲劳裂纹扩展的主要因素	197
8.3.1 应力比 R (或平均应力 σ_m) 的影响	197
8.3.2 环境影响	201
8.3.3 加载频率的影响	203
8.3.4 材料厚度的影响	203

8.3.5	应力强度因子变程 ΔK 很高和很低时裂纹扩展速率的特点	204
8.3.6	超载的影响	205
8.4	变幅载荷下裂纹扩展分析	205
8.4.1	变幅载荷下疲劳裂纹扩展的特点	205
8.4.2	考虑超载迟滞效应的计算模型	209
8.4.3	裂纹扩展寿命的计算	216
8.5	小裂纹疲劳扩展的特点	217
8.5.1	小(短)裂纹的定义和疲劳裂纹扩展的特点	217
8.5.2	小裂纹扩展速率的工程估算方法	219
8.5.3	疲劳全寿命预测方法简介	222
8.6	应变疲劳	225
	习 题	226
	参考文献	227
第9章	应力腐蚀开裂与腐蚀疲劳裂纹扩展	229
9.1	引 言	229
9.2	应力腐蚀开裂和应力腐蚀裂纹扩展的特征	229
9.2.1	历史回顾	229
9.2.2	应力腐蚀开裂	230
9.2.3	应力腐蚀开裂的三要素	230
9.2.4	应力腐蚀裂纹扩展速率	232
9.2.5	应力腐蚀开裂控制措施	238
9.3	腐蚀疲劳裂纹扩展	238
9.3.1	腐蚀疲劳	238
9.3.2	腐蚀疲劳裂纹扩展的特点	239
9.3.3	腐蚀疲劳裂纹扩展速率的计算	243
9.3.4	腐蚀疲劳裂纹扩展寿命的计算	245
9.3.5	腐蚀疲劳裂纹扩展速率试验	246
9.3.6	抗腐蚀疲劳开裂设计	247
	习 题	248
	参考文献	248
第10章	断裂力学在金属结构设计中的应用	249
10.1	飞机结构损伤容限设计	249

10.1.1	损伤容限设计概念	249
10.1.2	结构损伤容限设计要求和损伤容限结构类型	251
10.1.3	损伤容限设计的内容和步骤	256
10.1.4	损伤容限设计实例	263
10.2	焊接结构断裂安全设计	278
10.2.1	焊接结构的特点	279
10.2.2	焊接结构脆断的断裂力学分析	281
10.2.3	焊接结构(零件或构件)疲劳裂纹扩展寿命估算	286
10.2.4	焊接结构的脆断温度	286
10.3	压力容器与管子的断裂安全设计	288
10.3.1	概 述	288
10.3.2	压力容器的脆性断裂	289
10.3.3	压力容器的韧性断裂	292
10.3.4	破裂前渗漏设计	293
10.4	飞机金属结构耐久性设计	297
10.4.1	耐久性设计概念	297
10.4.2	断裂力学在耐久性设计中的应用	299
习 题		305
参考文献		305

第 11 章 复合材料损伤与断裂 306

11.1	复合材料损伤与损伤特性	306
11.2	断裂力学在复合材料中的应用	316
11.2.1	各向异性材料断裂力学	317
11.2.2	各向异性和正交各向异性弹性力学基本方程	317
11.2.3	含裂纹复合材料板裂纹尖端附近应力场和位移场	320
11.2.4	不同材料的界面附近或界面上的裂纹	322
11.2.5	能量释放率 G 及 J 积分	325
11.2.6	复合材料的断裂韧性测定	326
11.3	复合材料结构的剩余强度分析	328
11.3.1	拉伸载荷情况下的结构剩余强度分析	328
11.3.2	复合材料层板冲击损伤及剩余强度估算	331
11.4	分层损伤	336
11.4.1	层间应力	336

11.4.2	层间断裂力学	337
11.4.3	含分层层压板的剩余强度估算	338
11.4.4	分层损伤扩展分析	342
11.5	复合材料结构的疲劳特性	345
11.5.1	复合材料层压板的疲劳特性	345
11.5.2	疲劳寿命估算方法	345
习 题		349
参考文献		349
附 录	动态断裂分析中常用到的弹性波	350

第1章 绪论

1.1 断裂力学的产生和发展

断裂力学和其他学科一样,是在生产实践中产生和发展的,是20世纪初期才发展起来的一门新兴学科。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,或是制造加工和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,人们在生产实践中认识到这一点,却经历了一个很长的时期。

在20世纪初期,工程结构设计首先考虑结构的静强度要求。在设计中采用设计载荷法,设计载荷为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设计方法,故一直沿用至今。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。从下面典型的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,美国建造了约5000艘货轮和油轮,至少有13艘油轮和3艘“自由号”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年以内在结构中共有1450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(有的不到屈服应力的一半)。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而引起的爆裂使飞机失事。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,得出的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(表面裂纹)。

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 氨合成塔内外共 11 层焊接钢板中有 6 层发现上千条裂纹(故障分析认为由于结构刚性大,焊接收缩时存在相当大的残余应力);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,研究含缺陷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,尽管它的出现时间很短,但在理论和实验方面均有迅速的发展,并已为生产服务。例如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,保证了产品的安全性和可靠性,避免了重大损失。

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 15 世纪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,但当时没能做出合理的解释。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^[1]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,其解与 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, σ 为外加应力, a 和 b 分别为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^[2]。

Griffith 为了解释结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应力为

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

式中, γ 为材料的表面能, a 为裂纹长度, E 为材料的弹性模量。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^[3]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

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

式中, γ_p 为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, γ_p 大约比 γ 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,裂纹附近的塑性变形功是阻止裂纹扩展的实际抗力。

1948年, Irwin^[4]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准脆性破坏(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^[5] 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)是

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

式中, K_I 为应力强度因子(推动裂纹扩展的力), K_{IC} 为材料的断裂韧度。

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 年前后线性弹性断裂力学的建立,经历了 40 年艰苦的探索,说明科学的进步是来之不易的。

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(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)的了解,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,这是 1958 年由 Irwin^[6] 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