

工程材料的 断裂与疲劳

邓增杰 周敬恩 编著

机械工业出版社

工程材料的断裂与疲劳

邓增杰 周敬恩 编著



机械工业出版社

(京) 新登字 054 号

本书是作者根据多年的教学和科研经验编写的。书中从宏观与微观相结合的角度,系统地介绍了工程材料断裂与疲劳的基本原理、宏观规律、损伤的物理过程,以及断裂与疲劳控制的工程应用技术。作者参考了大量文献资料,对断裂与疲劳学科及其应用的发展和最新成就进行了系统、深入的探讨与分析,并提出了自己的观点,作出了适当的结论。

本书适用于从事力学、冶金学、材料学科的科研人员、工程技术人员,也可供高等院校相应专业的师生参考。

EA09/17

图书在版编目 (CIP) 数据

工程材料的断裂与疲劳/邓增杰、周敬恩编著. --北京:
机械工业出版社, 1995
ISBN 7-111-04571-8

I. 工… I. ①邓… ②周… II. ①工程材料-断裂-研究
②工程材料-疲劳-研究 IV. TB304

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (94) 第 13317 号

出 版 人: 马九荣 (北京市百万庄南街 1 号 邮政编码 100037)
责任编辑: 王 斌 荆宏智 版式设计: 王 颖 责任校对: 贾立萍
封面设计: 肖 晴 责任印制: 路 琳

机械工业出版社印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1995 年 6 月第 1 版·1995 年 6 月第 1 次印刷
787mm×1092mm¹/₁₆·17.5 印张·423 千字
0 001—2 000 册
定价: 20.00 元

序

机械或机构在负荷运转中机件失效，其后果大至机毁人亡，小至停机更换或修补，损失之大是众所周知的。长期以来人们花了大力气寻找克服、防止机件失效的途径和有效措施，在这方面从理论到实践已经取得了长足进展，然而至今仍不断有机件事故发生。随着科学技术的飞跃发展，人们不断创造出新的机构和机器，为了提高效率，延长使用寿命，节约资源和能源，减少环境污染，对机件的要求愈来愈苛刻，如在高载荷、高温、低温、高压、高速、真空、粒子辐照，介质腐蚀、磨损、冲刷、气蚀等及其不同复合条件下长期运转，所用材料也日新月异，这就不断出现新的失效问题，需要不断探索其损坏机理和防止失效的途径。

造成失效的原因是多方面的，其中材料是重要因素。但其他因素的作用是外在的、直观的，而材料因素的作用则是内在的、非直观的，因而有时被忽视，有时也常常被错误地指责。

对机件而言，最严重的失效形式就是断裂，这就意味着材料内部结合力破坏，形成新表面。无论哪种工程材料，金属、非金属、有机高分子以及以它们为基体的各种复合材料，其断裂过程均为在外力或残余应力作用下的裂纹萌生，或已存在的裂纹扩展达到临界尺寸时，导致两部分完全脱开，只是断裂形式有所不同。然而静加载或持续加载与循环加载或反复加载断裂无论是在宏观规律还是在微观机理方面都有显著差异。由于存在这种差异，科学技术界常把前者简称为断裂，后者简称为疲劳，分别进行研究，各成体系。然而两个体系之间又有千丝万缕的联系，殊途同归，最终目的都是解决机件的断裂失效问题。

本书为两位教授多年从事工程材料的断裂与疲劳教学、科研心得体会的综述，是多次以此为题给研究生讲课的讲稿，经不断补充，更新内容并多次修订而成。材料学与工程专业以及相邻专业的研究生听过此课的均认为受益匪浅。

材料断裂与疲劳的文献极为丰富，每年新发表的论文数以千计，有关专著也不少见，然而能提纲挈领、深入浅出、系统全面地论述各种材料在各种损害条件下断裂与疲劳问题并能反映最新研究成果的尚属罕见。本书从材料学、力学、冶金学和机械学等多学科相结合，宏观与微观相结合，理论与工程应用相结合的观点出发，对各种性质不同的工程材料在各种损害作用及其复合的工况下造成的断裂与疲劳均有精辟论述。本书作者参考了大量文献资料，并结合自己和本单位的科研成果，对断裂与疲劳学科及其应用的发展和最新成就进行了系统、深入的探讨与分析，并提出自己的观点，作出适当的结论。本书思路清晰，层次分明，文字简练，有自己的特色，本人已先睹为快，深为作者为有关科技工作者提供了这本全面深入了解材料的断裂与疲劳行为的专著所作的贡献而庆幸，为此乐于为序。

周惠久

1994年2月

前 言

近 30 年来,随着科学技术的发展,断裂和疲劳研究进展十分迅速,有关研究内容的文献报道异常丰富;这些研究成果在断裂事故的控制,产品质量改进,产品的可靠性、安全性提高等方面发挥了巨大作用。纵观断裂和疲劳研究的现状,尽管不同研究者的侧重点有所不同,但力学、冶金学和材料学等不同学科间的互相交叉、互相渗透和结合的趋势愈益明显,研究成果的工程应用愈来愈受到重视。但是迄今为止,一本篇幅紧凑,从力学、冶金学、材料学和工程应用相结合的角度反映断裂与疲劳研究的学术专著尚未见到。

本书是作者根据多年的教学和科研经验编写的,力图从微观和宏观相结合的角度,系统地介绍工程材料断裂与疲劳的基本原理、宏观规律、损伤的物理过程以及断裂与疲劳控制的工程实际应用技术。本书在讲述基本概念时,以阐述物理意义为主,尽量避免繁琐的数学推导;讲述微观破坏过程时,强调实验依据,避免纯粹的理论探讨;在处理宏观规律与微观机制时,两者并重;在理论与工程应用上,则强调后者。本书内容力图反映最新研究成果和研究动向,作者和作者所在单位的研究成果也有选择地予以反映。

尽管不少读者对线弹性断裂问题比较熟悉,但考虑到全书的系统性和前后章节的连贯性,线弹性问题仍以概述形式单独列章予以介绍。

陶瓷、聚合物和复合材料在工程上的应用日趋扩大,但许多读者对这三类材料不象对金属材料那样熟悉,因此在介绍非金属工程材料的断裂和疲劳时,首先对这些材料的结构特点予以简单介绍。

全书共分十三章,第二、三、四、九、十一、十二章由邓增杰执笔,第一、五、六、七、八、十、十三章由周敬恩执笔。

在本书的编著过程中,作者的老师、中国科学院院士周惠久教授给予了热情的支持和鼓励,并为本书作序,在此表示感谢。本书承郑修麟、史耀武两位博士生导师、教授审稿,在此也表示谢意。

由于作者水平所限,书中难免有错误和不当之处,恳请读者批评指正。

编著者

1993 年 10 月于西安

目 录

序

前言

第一章 绪论 1

第一节 工程构件的断裂及其后果 1

第二节 断裂力学与材料强度 2

参考文献 4

第二章 线弹性断裂概述 6

第一节 线弹性断裂的力学参量及 断裂韧性指标 6

一、弹性能释放率(裂纹扩展 驱动力 G) 6

二、应力强度因子 K 及平面应变断裂 韧性 K_{Ic} 7

第二节 裂纹尖端塑性区 10

一、裂纹尖端塑性区的形状和尺寸 10

二、有效裂纹尺寸的修正 14

第三节 复合型载荷作用下的线弹性断裂 14

一、最大正应力理论 15

二、应变能密度理论(比应变能理论) 16

三、能量释放率理论 17

参考文献 19

第三章 弹塑性断裂问题 20

第一节 概述 20

第二节 裂纹尖端张开位移 CTOD 的 基本概念 21

一、线弹性和小范围屈服情况下 的 CTOD 21

二、大范围屈服情况下的 CTOD 及平面 应力断裂的 D-M 模型 22

三、全面屈服情况下的 CTOD 及 CTOD 方法在断裂分析中的应用 23

第三节 J 积分的定义及其基本性质 25

一、 J 积分的定义 25

二、 J 积分与积分路径无关的性质 26

三、 J 积分与裂纹尖端区应力应变场 强度的关系 28

四、 J 和 K 、 G 及 δ 的关系 29

第四节 J 积分和 CTOD 的测试技术 31

一、综述 31

二、CTOD 的测试 32

三、 J 积分的测试 33

第五节 阻力曲线 35

第六节 J 主导的有效性和应力三轴性对 J 主导的影响 39

一、 J 主导的有效性 39

二、应力三轴性对 J 主导的影响 40

第七节 裂纹的 J 控制扩展和裂纹 稳态长程扩展 43

一、综述 43

二、 J 控制扩展理论 43

三、Ernst 修正 45

四、Brust 修正 48

五、应力三轴性对裂纹稳态扩展过程 J 控制有效性的影响 49

第八节 裂纹扩展的失稳, 撕裂模量 的概念 50

第九节 弹塑性状态下的复合型断裂问题 52

一、弹塑性复合受载情况下的裂纹尖端 应力应变场 52

二、复合型受载情况下裂纹的起裂问题 53

三、复合型受载情况下 J 值的确定 与起裂韧性 55

第十节 机件和结构防止断裂的安全 评定工程方法 57

一、综述 57

二、CEGB 双判据法 57

三、EPRI 方法 58

参考文献 61

第四章 断裂过程理论 63

第一节 概述 63

第二节 解理断裂理论 64

一、理论断裂强度与实际断裂强度的 差异 (Griffith 理论) 64

二、屈服现象的位错理论分析

(Hall-Petch 关系)	65	参考文献	118
三、Stroh 的裂纹萌生理论	66	第七章 疲劳裂纹的扩展	121
四、Cottrell 的裂纹萌生理论	67	第一节 疲劳裂纹扩展的宏观规律	121
五、Smith 的解理断裂理论	68	一、Paris 公式和疲劳裂纹扩展全图	121
六、李晶起裂的解理断裂	69	二、疲劳门槛及近门槛区疲劳裂纹 的扩展	123
第三节 解理断裂的最大拉应力准则和 解理断裂应力 σ_F 的测定	70	三、疲劳裂纹的快速扩展	126
第四节 解理断裂单元及特征距离	72	第二节 疲劳裂纹尖端塑性区与裂纹 闭合	127
第五节 纤维断裂的空穴萌生	75	第三节 疲劳裂纹扩展理论、机制 和模型	130
一、综述	75	一、疲劳断口的特征	130
二、空穴形核的临界应变	75	二、滑移分离模型	131
三、形核的临界应力	78	三、累积损伤模型	133
四、应力三轴性对空穴萌生的影响	80	四、疲劳裂纹扩展机制的再讨论	135
第六节 空穴的扩展与连接	82	第四节 疲劳裂纹扩展寿命的估算	139
一、McClintock 的空穴连接模型	82	第五节 疲劳裂纹扩展速率的测试	141
二、Rice 和 Tracey 的宏观应变速率与 空穴扩展速率关系模型	83	第六节 疲劳短裂纹问题	142
三、空穴扩展与连接的试验观察	84	一、疲劳短(小)裂纹的定义、分类 及扩展特性	142
四、临界空穴扩张比与组合功密度 模型的概念	87	二、疲劳短裂纹扩展的宏观规律、机制 和定量描述	143
参考文献	89	参考文献	149
第五章 疲劳概述	90	第八章 变幅疲劳	154
第一节 疲劳问题的范围与研究尺度	90	第一节 材料的变幅疲劳行为	154
第二节 疲劳失效的特点	91	第二节 变幅疲劳裂纹扩展行为的预测	159
第三节 历史的回顾	92	参考文献	161
第四节 疲劳设计准则	93	第九章 低温断裂与疲劳	163
一、无限寿命设计	93	第一节 韧脆转化理论	163
二、安全寿命设计	94	第二节 低温脆断判据	166
三、破损安全和损伤容限设计	95	一、用夏比冲击试验作为低温脆断 判据	167
参考文献	95	二、用断裂韧度作为低温脆断判据	169
第六章 疲劳裂纹的萌生	97	三、接近实际工作条件的低温判据	170
第一节 金属材料的循环变形行为	97	第三节 低温疲劳	174
一、循环应力-应变和循环滞后环	97	一、低温对疲劳强度的影响	174
二、循环硬化和软化	99	二、低温下疲劳裂纹的萌生与扩展	176
第二节 疲劳裂纹的萌生机理	101	参考文献	178
一、单晶体的循环变形及位错亚结构	102	第十章 高温强度	180
二、影响循环变形的因素	104	第一节 静载荷下材料的高温强度和 断裂	180
三、疲劳裂纹的萌生	105	一、高温下材料力学性能的变化	180
第三节 疲劳裂纹萌生期的预测	108		
一、局部应变法	109		
二、断裂力学法	113		
三、局部等量应力幅法	114		
第四节 应用举例	115		

二、蠕变、蠕变极限和持久强度	181	第十二章 环境介质作用下的断裂	
三、蠕变断裂	182	与疲劳	235
四、蠕变断裂机制图	186	第一节 氢损伤	235
第二节 高温疲劳	187	一、氢损伤概况	235
一、材料在高温下的疲劳行为	188	二、环境氢脆过程	236
二、高温疲劳裂纹的扩展	196	三、氢脆对钢的力学性能的影响	238
第三节 应用举例	200	第二节 应力腐蚀	239
参考文献	205	一、应力腐蚀概况	239
第十一章 高速动载断裂与冲击疲劳	209	二、应力腐蚀过程	240
第一节 概述	209	三、应力腐蚀对材料力学性能的影响	241
第二节 裂纹动态应力强度因子 K_I^d 和		第三节 腐蚀疲劳	242
动态断裂韧度 K_{Id}	210	一、综述	242
一、动态应力强度因子和动态断裂		二、腐蚀疲劳的裂纹萌生与扩展	243
韧度的概念	210	参考文献	246
二、动态断裂韧度 K_{Id} 的测量和动态		第十三章 非金属工程材料的断裂	
应力强度因子 K_I^d 的实验测定	211	和疲劳	248
第三节 动态裂纹扩展和止裂	218	第一节 聚合物材料的断裂与疲劳	248
一、裂纹的快速扩展与止裂的		一、聚合物材料的结构特点	248
准静态分析	218	二、聚合物材料的玻璃化转变和力学	
二、裂纹动态扩展断裂韧度 K_{ID} 、静		性能特点	250
态止裂韧度 K_{IA} 和动态止裂韧度		三、聚合物材料的变形和断裂	250
K_{IA}	221	四、聚合物材料的疲劳	252
三、用 DCB 试样测量动态止裂韧度	223	第二节 陶瓷材料的断裂与疲劳	257
第四节 应力波的传播与断裂	225	一、陶瓷材料的结构特点	257
一、冲击载荷的波动性质，一维弹		二、陶瓷材料的变形和断裂	257
性波	225	三、陶瓷材料的疲劳	262
二、塑性应力波的传播	227	第三节 复合材料的断裂与疲劳	263
三、弹性应力波的叠加、反射和透射	228	一、连续纤维增强复合材料的强度	
第五节 冲击疲劳强度	230	和断裂	263
一、综述	230	二、非连续单向短纤维增强复合材料	
二、多次冲击试验的基本规律	230	的强度和断裂	266
三、冲击疲劳裂纹的扩展	232	三、复合材料的疲劳	267
参考文献	233	参考文献	269

第一章 绪 论

第一节 工程构件的断裂及其后果

工程构件的失效方式、相应的材料性能参量和失效判据如表 1-1 所示。

表 1-1 工程构件的失效方式与判据

失 效 方 式	材料的性能参量	失 效 判 据
1. 过量弹性变形	弹性模量 E 切变模量 G	最大变形小于等于许可变形, 例如: 拉伸状态 $\Delta l_{\max} \leq [\Delta l]$
2. 过量塑性变形 常温下屈服	屈服强度 σ_y, τ_y 弹性模量 E , 切变模量 G	最大正应力 $\sigma_{\max} \leq \sigma_y$ 最大切应力 $\tau_{\max} \leq \tau_y$ 最大拉应变 $\epsilon_{\max} \leq \epsilon_y$ 应变能密度 $U_0 \leq \frac{\sigma_y^2}{2E}$ 畸变能密度 $U_{D0} \leq \frac{\sigma_y^2}{6G}$ 最大八面体切应力 $\tau_{oct(\max)} \leq \frac{\sqrt{2} \sigma_y}{3}$
高温蠕变	蠕变极限 σ_t^C / h 或 σ_t^C / τ	应力 $\sigma \leq \sigma_t^C / h$ 或 $\sigma \leq \sigma_t^C / \tau$
3. 断裂		
脆性断裂 (裂纹体)	断裂韧性 $K_{IC} (K_C)$ 和裂纹尺寸 a	应力强度因子 $K_I < K_{IC}$
脆性断裂 (无裂纹)	夏比冲击吸收功 CVN 冷脆转变温度 T_K 无延性转变温度 NDT	工作温度 $> T_K$ 工作温度 $> NDT$
疲劳断裂	疲劳极限 σ_{-1} 疲劳门槛值 ΔK_{th} 疲劳裂纹扩展速率 $\frac{da}{dN}$	工作应力幅 $\frac{\Delta \sigma}{2} \leq \sigma_{-1}$ 应力强度因子范围 $\Delta K \leq \Delta K_{th}$
蠕变断裂	蠕变断裂强度 σ_t^F	工作应力 $\sigma \leq \sigma_t^F$
应力腐蚀开裂	应力腐蚀开裂门槛 K_{ISCC}	工作应力 $\sigma \leq f (K_{ISCC})$
4. 表面损伤		
磨损	摩擦系数 μ 硬度	
腐蚀	电化学势	

在上表的四种失效方式中,断裂是最危险的失效方式。断裂不仅能造成重大的经济损失,而且往往导致机毁人亡的灾难性后果。例如:1973年英国德贝夏马坎山煤矿(Markham Mine)竖井罐笼坠毁失事,死亡18人,失事原因是刹车杆疲劳断裂^[1]。1967年美国西弗吉尼亚一桥梁失事,死亡46人,事故原因是一拉杆孔边缘由于应力腐蚀、疲劳或腐蚀疲劳形成裂纹,随后裂纹扩展造成的脆性断裂^[2]。1982年美国国家标准局估计,断裂在美国每年能造成约1200亿美元的损失。其中很大一部分断裂可以通过现代防断裂技术的应用加以防止,从而可挽回超过600亿美元的损失^[3]。我国每年因断裂造成的损失也十分巨大,仅就大型电站锅炉的过热器、省煤器、水冷壁和再热器管的爆漏一项统计,四管的爆漏导致大型火电机组的停用时间约占非计划停用时间的40%,占锅炉设备非计划停用时间的70%。例如:1989年84台200MW发电机组中,四管爆漏导致机组停用达到21579h,相当于3.5台机组未发挥作用^[4]。

因此,研究断裂的规律和机理,减少和避免断裂的发生,一直是工程技术人员,力学和材料学科工作者努力的目标。断裂力学的建立和发展是近代断裂研究的重大成果之一。

第二节 断裂力学与材料强度

人们对断裂的认识有悠久的历史,在大量研究和长期实践的基础上,建立了各种典型机械产品的设计方法和规范,开发了适用于不同服役条件的具有某些特殊性能或综合优良性能的各类工程材料。传统的设计方法和规范把材料和构件作为连续、均匀和各向同性的受载物体来处理,对其进行力学分析,确定构件危险断面的应力和应变;考虑安全系数后,对材料提出相应的强度和塑性、韧性要求,以保证产品的安全运行,防止断裂或其他失效方式的发生。传统设计方法便于工程应用,有长期实践经验,迄今为止,仍然是大量机械产品的主要设计方法。但是真实材料和真实构件往往存在各种微观和宏观缺陷,是不均匀非连续的;而这些缺陷影响材料和构件的强度和服役性能,这一点已早为人们所认识。早在15世纪,da Vinci测量铁丝的强度时发现,铁丝直径相同时其抗拉强度与长度成反比^[5],因而推测铁丝中的缺陷控制其强度,铁丝愈长,体积愈大,存在缺陷的可能性也愈大,强度也愈低。但缺陷对强度的影响不能够定量化。这也正是传统设计方法的主要弱点,因而按传统方法设计为安全的构件,服役过程中仍然不时地发生断裂。另外,传统的经典强度理论是在不考虑裂纹萌生和扩展的条件下进行强度分析的,并且认为断裂是瞬时发生的,然而实际上无论哪种断裂形式都是一个裂纹萌生、裂纹扩展直至断裂的复杂过程。因此,断裂在很大程度上受控于裂纹萌生抗力和裂纹扩展抗力;而并不总是决定于用断面尺寸计算的名义断裂应力和断裂应变。材料和构件中的裂纹和类似于裂纹的缺陷可能是在外载荷和环境介质的共同作用下,于服役过程中萌生,也可能在生产过程中产生,如大型铸锻件、焊接结构的各种冶金缺陷等。由于断裂是一个裂纹萌生和扩展的过程,该过程早在宏观裂纹出现前即已开始,而又缺乏裂纹形成的统一理论,因而断裂在各个不同尺度上得到了广泛的研究,如图1-1所示^[6]。建立在裂纹扩展基础上的断裂理论,要求在强度与裂纹尺寸之间建立定量关系,这个工作由Griffith于1922年首先完成^[7],从这个意义上讲断裂力学起源于1922年。然而断裂力学作为一个独立的工程学科,应该是起始于1948年Irwin的经典性论文“Fracture Dynamics”的发表^[8]。随后大量的研究集中于线弹性断裂力学。1968年Rice提出了 J 积分^[9],Hutchinson证明 J 积分可以

用来描述弹塑性体中裂纹的扩展,从而可以避免对裂纹扩展进行不连续的非线性过程进行直接描述^[10]。在这之后,弹塑性断裂力学逐步发展起来。

目前,线弹性断裂力学已比较成熟,使用有限元等数值计算方法已能够提供各种复杂情况下裂纹尖端的应力强度因子,从而使线弹性断裂力学在防断裂设计、失效分析等方面得到了愈来愈广泛的应用。弹塑性断裂问题的研究也取得了重大进展。 J 和 CTOD 虽然尚不完善,但已成为解决弹塑性断裂问题的最有希望的断裂力学参量。弹塑性条件下裂纹起裂问题已基本解决,裂纹的稳态扩展、失稳扩展以及止裂问题已经并正在进行着大量深入的研究。

断裂力学的建立促进了疲劳的研究,应用断裂力学已能够对疲劳裂纹扩展进行定量分析,并开始用于疲劳裂纹萌生行为的描述。近年来,疲劳短裂纹、变幅及随机疲劳、疲劳损伤积累的研究日益受到人们的重视。现代机械产品的发展趋势是向大型、大容量、高速和高参量方向发展,构件的服役条件愈来愈苛刻,促使断裂和疲劳的研究愈来愈多地延伸到高速动载、高温蠕变和蠕变断裂、低温及韧脆转化、应力腐蚀和腐蚀疲劳等领域。随着材料学的发展,陶瓷、聚合物和复合材料等非金属材料在工程中的应用日益广泛,这些材料的断裂和疲劳问题的研究正在成为新的热点。

断裂力学的建立为防断裂设计提供了强有力的工具。由于无损检测技术的进步,能够对小尺寸的缺陷和裂纹进行精确的检测,再借助于断裂力学,可以对含裂纹构件

的剩余强度进行可靠的估算,这就意味着构件中存在裂纹和类似裂纹的缺陷并不表明其服役寿命的结束,从而导致新的损伤容限设计准则得以逐步建立。

应用断裂力学法进行防断裂设计与传统的材料强度法有其相似性,但也有区别。这可以用下面的例子说明。图 1-2a 为一端固定的矩形截面悬臂梁,长度为 L , 梁的宽度和厚度为 W 和 B , 自由端承受一载荷 P , 则该梁承受的最大应力 $\sigma_{\max}$ 位于梁的根部, 其值为:

$$\sigma_{\max} = \frac{6PL}{BW^2} \quad (1-1)$$

假设最大应力低于材料的抗弯强度 σ_{by} , 则该悬臂梁不会失效, 若安全系数为 S , 则该梁的安

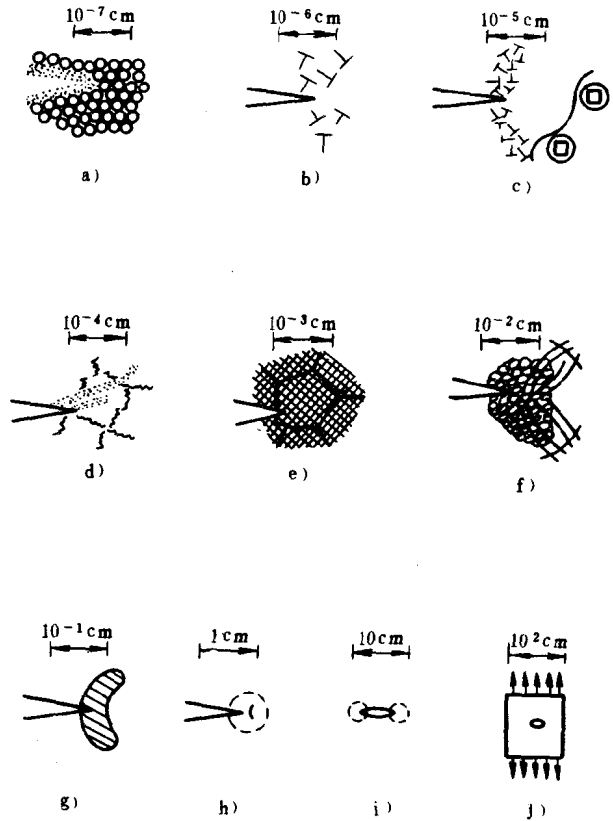


图 1-1 断裂研究尺度示意图 (相应于厚度为 1mm 平板试样的应力状态)

a) 离子和电子气 b) 位错 c) 亚晶界, 弥散沉淀 d) 亚晶粒, 滑移带 e) 晶粒, 夹杂物, 空洞 f) 大范围塑性变形 g) 弹-塑性场 h) 弹性场, 奇异点 i) 过渡区 j) 名义应力

全载荷为:

$$P < \frac{BW^2}{6SL} \sigma_{by} \quad (1-2)$$

如果该梁根部附近的上表面存在一尺寸为 a 的裂纹或类似裂纹的缺陷, 如图 1-2b 所示, 则该裂纹尖端的应力强度因子 K 可表示为:

$$K = 1.12 \sigma_{\max} \sqrt{\pi a} \quad (1-3)$$

按照断裂力学法, 要使悬臂梁不发生脆性断裂, K 必须小于材料的断裂韧性 K_{Ic} (或 K_c), 若安全系数仍为 S , 则其失效判据为 $K < K_{Ic}/S$, 由式 (1-1) 和式 (1-3), 则有:

$$P < \frac{BW^2}{6SL} \frac{K_{Ic}}{1.12 \sqrt{\pi a}} \quad (1-4)$$

式 (1-2) 和式 (1-4) 形式相近, 第一项完全相同, 都以相同的方式包含了构件的几何尺寸和安全系数, 两个关系式都牵涉到材料的性能参量, 材料强度法为 σ_{by} , 断裂力学法为 K_{Ic} ; 两个设计方法的主要区别是断裂力学法引进了新的物理参量——裂纹 (或缺陷) 尺寸 a , 正是该参量控制了构件的强度。

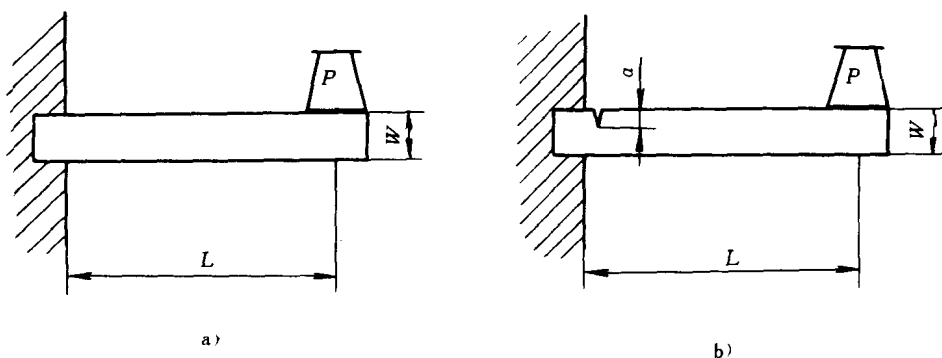


图 1-2 承载悬臂梁示意图
a) 不含缺陷的悬臂梁 b) 根部有缺陷的悬臂梁

参考文献

- 1 Demaid A P A and Lawley A. The Markham mine disaster. in: C M Hudson and T P Rich ed. Case Histories Involving Fatigue and Fracture Mechanics. ASTM STP 918. Philadelphia; ASTM, 1986. 389~416
- 2 Collapse of U. S. 35 Highway Bridge, Point Pleasant, West Virginia, NTSB Report No. NTSB-HAR-71-1. Oct. 4, 1968
- 3 Kanninen M F and Popelar C H. Advanced Fracture Mechanics. Oxford; Oxford University Press, 1985. 9~10
- 4 郑泽民. 我国大型电站锅炉四管爆漏问题分析. 见: 王金瑞, 孙忠孝编. 第三届电站金属构件失效分析与寿命管理学术会议论文集. 西安: 中国电机工程学会金属专业委员会, 1991. 1~10
- 5 Irwin G R. Structural Aspects of Brittle Fracture. Applied Materials Research. 1964, 3: 65~81
- 6 Parton V Z and Morozov E M. Mechanics of Elastic-Plastic Fracture. 2nd ed. New York; Hemisphere Publishing Corporation, 1989. 4
- 7 Griffith A A. The phenomena of rupture and flow in solids. Phil. Trans. Roy. Soc. London, 1921, A221:

163~197

- 8 Irwin G R. Fracture dynamics. in: *Fracturing of Metals*, ASM, 1948. 147~166
- 9 Rice J R. A path independent integral and the approximate analysis of strain concentrations by notches and cracks. *J. Appl. Mech.*. 1968, 35: 379~386
- 10 Hutchinson J W. Singular behaviour at the end of a tensile crack in a hardening material. *J. Mech. Phy. Solids*. 1968, 16: 13~31

第二章 线弹性断裂概述

线弹性断裂是指断裂过程中,裂纹体各部分经历的应力和变形基本上处于线弹性阶段,只有裂纹尖端极小区域处于塑性变形阶段。线弹性断裂问题的研究比较成熟,是断裂力学的基础。为了叙述问题的完整性和讨论弹塑性问题以及疲劳问题和微观机制的需要,这里将线弹性问题做一概括叙述。

第一节 线弹性断裂的力学参量及断裂韧度指标

一、弹性能释放率 (裂纹扩展驱动力 G)

最早对裂纹的断裂过程进行分析的是 Griffith(1920 年),他要解决的问题是解释为什么玻璃一类的脆性材料的实际断裂强度远比理论断裂强度低。他认为实际物体中不可避免地存在缺陷(裂纹)所致。他是从能量平衡角度分析问题的。如图 2-1 所示,假定向厚度为 1 单位的无限大平板施加载荷到应力 σ ,两端固定,然后在板中间垂直于受力方向割一长为 $2a$ 的穿透裂纹。由于割开裂纹,使板的内贮弹性能释放,释放出来的能量是

$$U = \frac{\sigma^2 \pi a^2}{E} \quad (2-1)$$

式中 E ——弹性模量。

在裂纹两端,再划开一个裂纹微量 da ,则进一步释放能量

$$\frac{\partial U}{\partial a} = - \frac{\sigma^2 \pi a}{E} \quad (2-2)$$

释放出来的能量,用于形成新表面所需要的表面能 $4daT$ (T 为单位面积表面能)。

如果

$$\frac{\sigma^2 \pi a}{E} < 4daT \quad (2-3)$$

则必须进一步加力才可使裂纹继续扩展,否则裂纹不再扩展。这种加力就扩展、不加力就不扩展的情况,称为稳定扩展。

如果

$$\frac{\sigma^2 \pi a}{E} > 4daT \quad (2-4)$$

则无需再加力,裂纹将自动扩展,这种情况称为失稳扩展。对于金属,裂纹扩展所释放的能量。用于形成新表面的只是很少一部分,绝大部分用于裂纹开裂时的塑性变形能 p 。因此式(2-3)、(2-4)中的 T 要用塑性变形能 p 来代替。令

$$G = - \frac{\partial U}{\partial a} = \frac{\sigma^2 \pi a}{E} \quad (2-5)$$

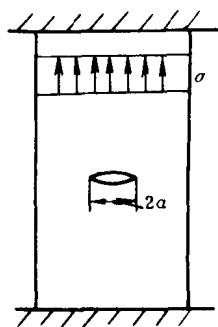


图 2-1 Griffith 平板裂纹

G 即为最早的断裂力学参量, 称为弹性能释放率或裂纹扩展驱动力。当 G 达到临界值 G_c 时, 裂纹开始扩展。 G_c 是材料的性质, 是最早的断裂韧度。 G 的单位是 $\text{MPa} \cdot \text{m}$ 。

上面的结果是在试样两端固定的情况下得到的, 如果试样两端不固定, 也可以得到同样的结果, 下面用图解法予以说明^[1]。

在单位厚度的无限大板中心开一裂纹 $2a$, 加应力到 σ , 两端固定, 其载荷位移曲线如图 2-2 中的 OA , 平板中贮藏的弹性能以面积 OAB 表示, 如果裂纹扩展 da , 则平板刚度下降。如果平板内贮弹性能下降到面积 OCB , 则三角形 OAC 相当于由于裂纹开裂释放出来的弹性能。更为普遍的情况如图 2-3 所示, OA 线为含裂纹 $2a$ 的试样的载荷位移线。如果平板两端不固定, 裂纹在恒载下扩展, 位移增加 Δu , 这时外载做的功为 $P_1 \Delta u$, 等于面积 $ABFC$, 平板所包含的弹性能从 OAC 增加到 OBF , 其增量即为 OAB 。由于面积 $ABFC$ 为面积 OAB 的两倍, 所以剩下来的能量等于 OAB , 略去小三角形 AEB , 即得到 OAB 等于 OAE 。可见, 对上面讨论的两种情况, 裂纹扩展可利用的能量是相同的。

在平板两端固定的情况下, 可利用的能量由弹性能提供; 而在载荷恒定时, 由外载荷提供。因为两者结果相同, 所以 G 可以由弹性能计算, 并均称之为弹性能释放率。

用能量变化率来研究断裂问题, 只着眼于能量平衡, 不能显示断裂的具体过程。Irwin 用 Westergaard 方法对裂纹前沿区域的应力应变分布情况进行了分析, 得到了简单的近似计算公式, 他的理论构成了线弹性断裂力学的基础。

二、应力强度因子 K 及平面应变断裂韧度 K_{Ic}

力学证明, 裂纹体沿裂纹线平面上 y 方向的 (垂直于裂纹面方向的) 应力 σ_y 与所研究点到裂纹顶端距离 r 有如下关系:

$$\sigma_y \propto r^{-\frac{1}{2}} \quad (2-6)$$

当 $r \rightarrow 0$ 时, $\sigma_y \rightarrow \infty$, 表明裂纹前沿、应力场具有 $r^{-\frac{1}{2}}$ 阶奇异性。此式也可写成:

$$r^{\frac{1}{2}} \sigma_y = \text{常数} \quad (2-7)$$

公式右端常数为代表 $r^{-\frac{1}{2}}$ 阶奇异性大小的系数, 表明了裂纹前沿应力场奇异性强度, 可以叫做应力强度因子。现在如果讨论的不是沿 x 轴的应力分布而是沿任一与 x 轴成 θ 角的线的应力分布, 则此式可写成

$$\sigma_y = \text{常数} \cdot r^{-\frac{1}{2}} f(\theta) \quad (2-8)$$

对其他应力分量可写成通式

$$\sigma_{ij} = K r^{-\frac{1}{2}} f_{ij}(\theta) \quad (2-9)$$

显然, 应力强度因子 K 的形式和数值大小, 决定于裂纹的形状、尺寸、位置、外力作用情况和大小等。

Irwin 研究了受力裂纹体裂纹尖端附近应力应变分布情况, 对具有长为 $2a$ 裂纹的无限大

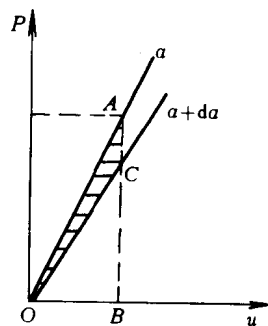


图 2-2 两端固定试样的 Griffith 准则能量关系

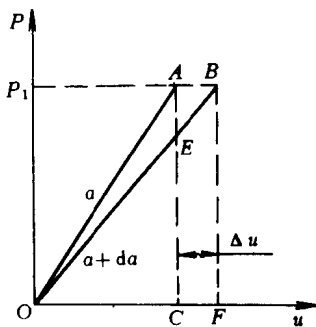


图 2-3 恒载荷的 Griffith 准则能量关系

平板在 I 型均匀拉伸加载情况下裂纹尖端的应力应变情况进行了分析 (如图 2-4 所示), 得出裂纹附近一点 (r, θ) 的应力、位移诸分量为^[2]

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (2-10a)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (2-10b)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (2-10c)$$

$$u = \frac{K_I}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[(2k-1) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right] \quad (2-11a)$$

$$v = \frac{K_I}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[(2k+1) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (2-11b)$$

式中 G 为切变模量。

对平面应力情况

$$k = \frac{3-\nu}{1+\nu} \quad (2-12a)$$

$$w = -\frac{\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y) dz \quad (2-12b)$$

$$\sigma_z = 0 \quad (2-12c)$$

对平面应变情况

$$k = 3 - 4\nu \quad (2-13a)$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (2-13b)$$

$$w = 0 \quad (2-13c)$$

式中 ν 为泊松比。

由于 σ_{ij} 和 u_{ij} 式右端 $f_{ij}(\theta)$ 和 $2\pi r$ 是点的位置的函数, 因此反映裂纹尖端应力强弱程度的是右端的 K_I , 即前边提到的应力强度因子, 因而应力强度因子是描述应力场强弱程度的重要力学参量。上列诸式在 r 很小的裂纹尖端附近才成立, 从数学上 K 可定义为

$$K = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_y(x, 0) \quad (2-14)$$

得出了 K , 就可求得裂纹尖端任意点的应力和位移分量, 但是 K 是什么形式呢? 前已提及, K 应当是载荷类型、大小, 受力物体形状尺寸, 裂纹位置、长短等的函数。Irwin 用 Westergaard 方法分析表明, 对于 Griffith 型裂纹

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2-15)$$

式中 σ 是按无裂纹计算的外加名义应力, a 是裂

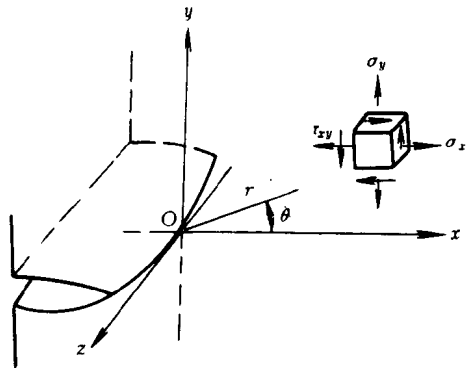


图 2-4 裂纹尖端一点应力、位移的表示

纹半长。如果物体形状大小，裂纹形状尺寸及其所在部位，载荷类型大小不同，则 K 的形式也将有所不同，但总保持 $K=Y\sigma\sqrt{\pi a}$ 的基本形式，其中 Y 是各种因素的综合系数。 K 的单位是 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{\frac{1}{2}}$ 。

随 σ 、 a 或其他因素变化，应力强度因子（例如 K_I ）增加，当 K_I 增加到一定数值时，裂纹扩展，表明 K_I 达到了临界值 K_c ，即 $K_I=K_c$ 。 K_c 是材料性质，称为断裂韧度。这样就可以根据裂纹尖端应力强度因子 K 来判定断裂是否发生，建立应力强度因子判据。

裂纹体受载荷作用，裂纹变形和所受外力的形式可分为三种类型，如图 2-5 所示。

其中 I 型是张开型，II 型是滑开型（平面内剪切型），III 型是撕开型（面外剪切型）。在三种不同类型的受载形式中，以 I 型最危险，促进脆性断裂的倾向最大。相应 I 型的应力强度因子记为 K_I ，II 型的记为 K_{II} ，III 型的记为 K_{III} 。

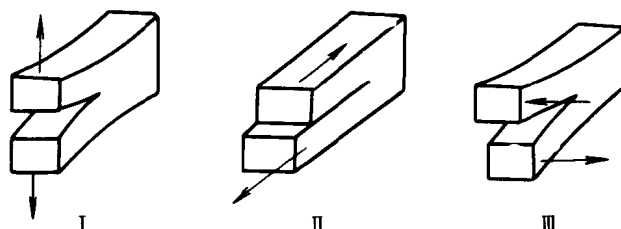


图 2-5 裂纹体受载和变形的类型

现在用断裂力学分析问题广泛应用 K 判据，为此首先需要根据实际情况找出 K 的表达式。 K 的表达式可用力学分析方法、实验标定法、数值计算法来确定，也可以查找有关手册^[3,4]。其次还需测试所用材料的断裂韧度 K_c 。由于 I 型加载是最危险的形式，因此一般实验时，都是采用 I 型加载，这样得到的临界应力强度因子，称为断裂韧度，用 K_{Ic} 表示。试样的厚度对裂纹前沿应力状态的影响很大。如张开型裂纹，受拉伸载荷时，裂纹前沿有很大的拉应力，使试样有沿厚度方向收缩的趋势；但在裂纹前沿的中间地段，因有两边材料的约束，不能自由收缩，结果使该处形成三向拉应力状态，甚至达到平面应变的程度，即沿试样厚度方向的变形等于零，使材料不易发生塑性变形，促使裂纹脆性开裂， K_c 降低。显然，试样愈厚，这种平面应变的部位在整个试样厚度上所占的比例就会愈大， K_c 就愈低。当试样厚到一定程度时， K_c 达到最低值，这时 K_c 称为平面应变断裂韧度。现在符号 K_{Ic} 都是表示平面应变断裂韧度。其中“I”既表示 I 型，也表示平面应变的意思。

图 2-6 表示板形试样厚度 B 与测得的断裂韧度 K_c 的关系。由图可见，只有厚度 B 大到一定程度时， K_c 才降到最低值，并保持恒定，不再随 B 的增加而变化。因此，为测得平面应变断裂韧度 K_{Ic} ，试样必须满足一定厚度要求。

进行断裂韧度 K_{Ic} 试验，还需遵照有关试验标准^[5,6]。

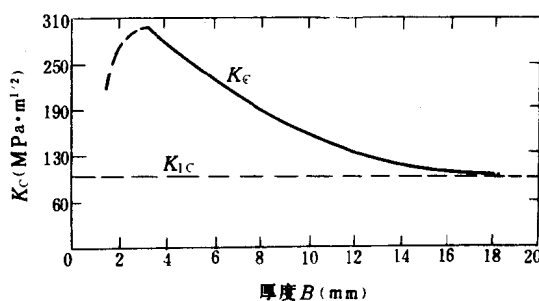


图 2-6 断裂韧度 K_c 与试样厚度 B 的关系

30CrMnSiNi 2A 钢，加热至 900℃，
230℃等温，200℃回火