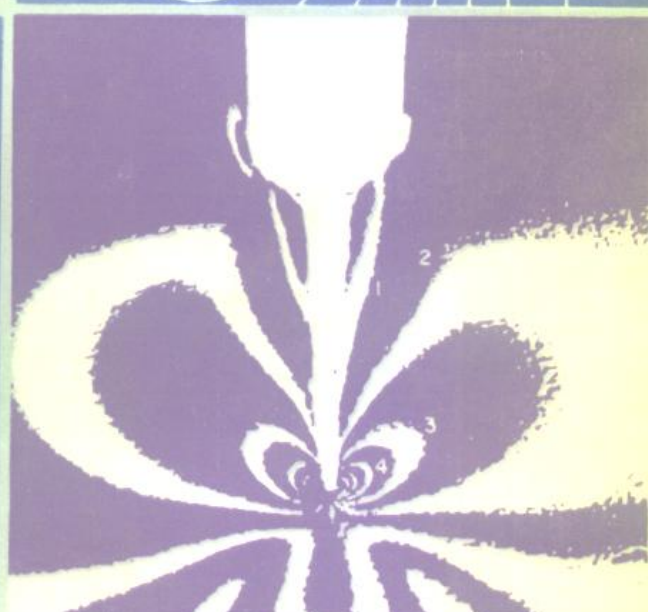
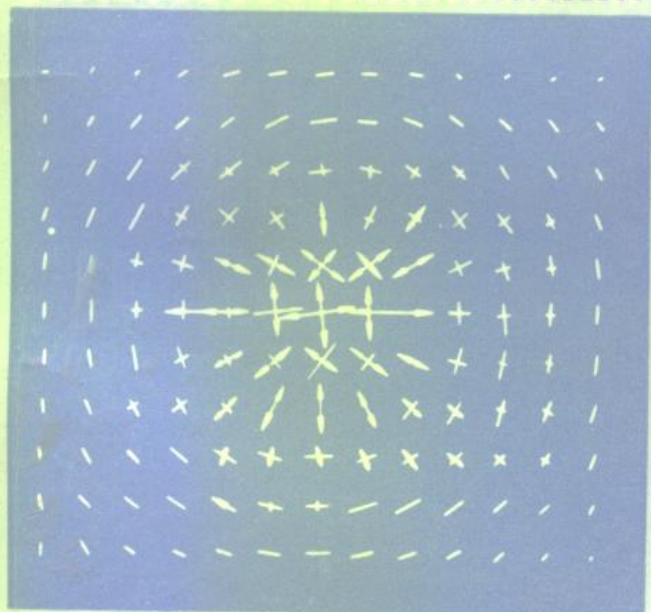
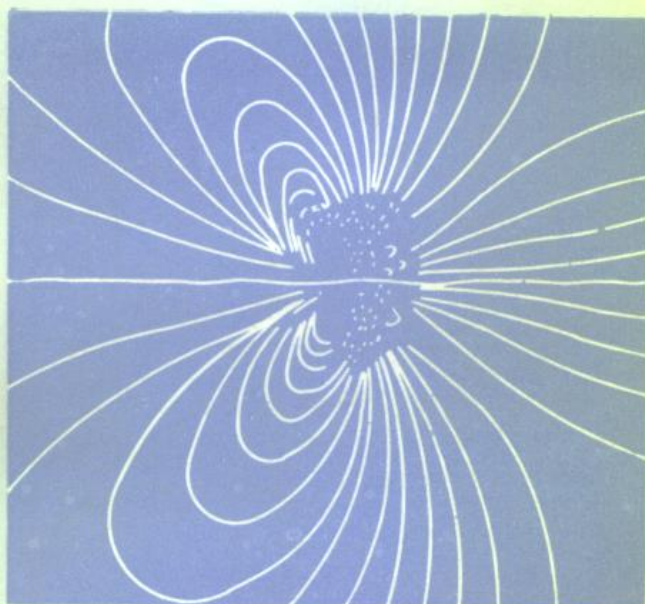


实验断裂、 损伤力学测试技术

MEASURING TECHNIQUE OF EXPERIMENTAL

FRACTURE AND DAMAGE MECHANICS 刘宝琛 编著



机械工业出版社

实验断裂、损伤力学 测试技术

MEASURING TECHNIQUE OF EXPERIMENTAL FRACTURE AND DAMAGE MECHANICS

刘宝琛 编著
黄克智 主审



机械工业出版社
北京 1994

(京)新登字054号

断裂力学和损伤力学是近代材料、结构破坏理论研究的重要领域,无论在理论上或在工程应用上都具有重要意义。其测试技术(含电、光、声、磁测量技术)在各工业部门重要工程中的断裂、损伤参数测量中起重要作用。本书系统地介绍了弹塑性断裂、损伤力学测试技术的基本原理、测试方法及其应用。全书共5篇26章,附有插图300余幅。第1篇介绍了弹塑性断裂、损伤力学基本概念、基本参量和测量标准试样等;第2~5篇分别介绍了电测法、光学测试、声测量法和磁测量法。内容包括基本原理,传感器,静、动态断裂韧度及损伤变量测试方法,测试精度分析以及应用实例等。

本书内容不但系统性强,还综述了近十多年来国内外最新科研成果(其中也包括了作者多年的科研成果)。全书既着重基本概念和测量原理的介绍,又列举了丰富的技术数据和应用实例,其内容新颖、实用。

本书可供科研和工程技术部门从事断裂、损伤力学、材料科学、机械设计研究和应用的科技人员参考使用,也可作为大专院校有关专业师生(本科生、研究生)的教材。

图书在版编目(CIP)数据

实验断裂、损伤力学测试技术=MEASURING TECHNIQUE
OF EXPERIMENTAL FRACTURE AND DAMAGE MECHANICS/刘
宝琛编著. —北京:机械工业出版社, 1994
ISBN 7-111-04067-8

I. 实…

I. 刘…

Ⅰ. 弹塑性断裂力学-实验应力分析

V. 0346

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: 方婉莹 版式设计: 胡金琰 责任校对: 姚培新

封面设计: 郭景云 责任印制: 王国光

机械工业出版社京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1994年9月第1版·1994年9月第1次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·22.75印张·549千字

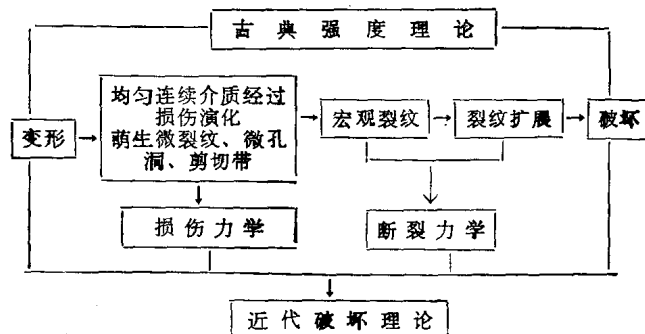
0 001—1 700册

定价: 29.00元

前言

断裂力学作为固体力学发展的新兴学科,从1957年G.R.Irwin提出应力强度因子概念算起,到目前只有30多年的历史,但发展非常迅速。它对金属物理、冶金学、材料科学、航空、机械、建筑和地震地质工程等技术部门都产生了重大影响。线弹性断裂力学目前已获得充分的发展与应用,在解析的、数值的和试验研究方面都取得了许多成果,在有些行业中已作为制定规范和结构安全评定的基础。例如美国机械工程师协会ASME锅炉与压力容器规范、美国B-1轰炸机应用断裂力学进行设计、英国北海油田采油平台支架和美国阿拉斯加的输气管线的缺陷容限评定等,都是线弹性断裂力学应用的典型范例。由于实际工程中经常使用韧性较好的材料(例如机械工业中常用的各种钢材、航空工业中大量应用的各种铝材和其它有色金属以及它们的合金材料),近20年来促进了弹塑性断裂力学的发展。1968年美国的Hutchinson, Rice和Rosengren发表了著名的HRR弹塑性静止裂纹尖端奇异解,被认为是弹塑性断裂力学理论的新起点。之后,大量的数值和试验研究为它的应用创造了条件。许多试验证明:在试样或结构中裂纹尖端被包围在所谓J主导区之中,J积分成为确定裂纹起裂条件的参量。在弹塑性扩展裂纹的理论研究方面,Gao和Hwang于1980年发表了GH扩展裂纹尖端渐近解,其奇异性低于静止裂纹HRR奇异性。目前已进行的数值研究和试验研究,为弹塑性扩展裂纹的实际应用创造了条件。

损伤力学的提出与发展是人们对材料或结构变形直到破坏的认识的深化。它大大地开拓了固体力学学科研究的内容,并将材料科学与固体力学两个学科有机地衔接起来。古典强度理论是研究均匀、连续的介质在外载作用下由变形到破坏的理论;断裂力学是研究均匀、有裂纹的非连续介质在外载作用下的变形行为,直至破坏的规律;损伤力学则是研究均匀、连续的介质在外载作用下,经过损伤演化过程,变成非均匀连续介质,由微观、细观到宏观地出现孔洞、裂纹的。作为近代的破坏理论是研究均匀、连续介质,在外载作用下(广义外载包括力、热……等),经过损伤演化变成非均匀连续体,研究其变形行为和受力状态,直至材料或结构破坏的全过程。



断裂力学和损伤力学是近代破坏理论研究的重要内容,在理论研究、数值分析和试验研究方面都已取得重大进展并已经发表了大量的研究成果和一些理论性书籍。断裂与损伤力学试验技术涉及面广,已在光、电、声、磁测量技术应用于断裂、损伤力学试验研究方面,发

表大量论文, 广泛应用于理论研究和在工程中断裂、损伤参量测量。较系统地介绍与阐述断裂、损伤力学测量技术的基本原理、测试方法与应用, 正是编著本书的目的。

为了使问题叙述清楚、循序渐进, 全书共分5篇。第1篇简介了线弹性断裂力学, 弹塑性断裂力学和脆、韧性损伤最必要的基础与概念; 第2篇介绍了电测断裂、损伤力学试验技术; 第3篇介绍光测断裂、损伤力学试验技术; 第4篇介绍声测量用于断裂、损伤研究工作; 第5篇简介磁测量应用于断裂、损伤的研究。本书在叙述上着重于基本概念、基本原理的阐述, 作为实验断裂、损伤力学测试技术, 所包含范围之广, 领域之多, 使本书对许多问题无法涉及(例如更多的动态、疲劳测量技术等), 作者谨希望在书中所涉及的范围内把问题阐述清楚, 使读者感到对工作有所帮助。作者编著本书的目的就达到了。

本书可作为高等院校力学、机械、材料等专业高年级学生和研究生教材, 也可作为有关固体力学、机械强度、工程结构、化工及核能方面的技术人员、研究人员的参考书。

本书在编写过程中始终得到张维教授、黄克智教授(我国著名力学专家, 均为中国科学院学部委员)的鼓励、关怀与支持。书稿由黄克智教授主审。第1篇经罗学富教授(清华大学力学系)审阅; 第2篇由孙学伟副教授(清华大学力学系)审阅; 第3篇的第11章、第13章由赖曾美教授(机械工业部机械科学研究院)审阅; 第12章、第14章由钟国成副教授(清华大学力学系)审阅; 第15章~第20章由刘荣勋教授(北京化工学院)审阅; 第4篇由金观昌副教授审阅; 第5篇经谢大吉副教授(清华大学力学系)审阅。在评审过程中, 各位专家提出了许多宝贵的指导性意见及技术资料, 为丰富本书内容作出了贡献; 在编审过程中, 得到高级工程师、本书责任编辑方婉莹同志的指导, 对提高本书质量起了很大作用, 在此作者表示衷心的感谢。

本书由刘宝琛主编; 航天部第一研究院总工程师刘宝镛参加了第1篇的编写工作, 北京大学袁守诚教授参加了第4篇和常用技术资料的编写工作。由于作者水平有限, 书中难免还会有不妥或不足之处, 恳切希望读者指正。

刘宝琛 于清华

1994年5月28日

目 录

第1篇 断裂、损伤力学基本概念

物理量符号、名称及单位	1	3. Wells裂纹张开位移公式	22
概述	3	2.3 δ 、 J 与 K 之间关系	22
第1章 线弹性断裂力学	4	1. 弹性范围内 δ 、 J 与 K 之间关系	22
1.1 断裂机理	4	2. 小范围屈服、塑性区修正 δ 、 J 与 K 之间关系	23
1.2 三种裂纹基本型态	4	2.4 弹塑性裂纹尖端场	23
1. Ⅰ型裂纹(张开型裂纹)	4	1. Ⅰ型、静止裂纹、幂硬化材料HRR奇异解	23
2. Ⅱ型裂纹(滑开型裂纹)	4	2. 扩展裂纹、Ⅰ型、幂硬化材料GH奇异性解	24
3. Ⅲ型裂纹(撕开型裂纹)	5	第3章 损伤力学	27
1.3 裂纹尖端附近的应力场和应力强度因子	6	3.1 脆性损伤基本概念	28
1. Ⅰ型平面裂纹尖端应力场和应力强度因子	6	1. 损伤变量 D	28
2. Ⅱ型平面裂纹尖端应力场和应力强度因子	7	2. 损伤变量 D 的测量方法	28
3. Ⅲ型平面裂纹尖端应力场和应力强度因子	8	3.2 脆性损伤模型及演化	30
1.4 裂纹尖端塑性区尺寸与形状和塑性区修正	9	1. 弹性固体中的突然损伤模型	30
1. Von Mises屈服准则的塑性区	9	2. 蠕变损伤裂纹扩展模型	31
2. Irwin塑性区	10	3.3 韧性材料的损伤孔洞模型	32
3. Dugdale塑性区	11	1. 孔洞形核率方程	32
1.5 线弹性断裂韧度和断裂判据	11	2. 孔洞体积比条件	32
1. 材料的断裂韧度 K_{Ic} 、 K_{IIc} 、 K_{IIIc} 及断裂判据	11	3.4 韧性材料的蠕变损伤模型	33
2. 裂纹扩展能量释放率和能量判据	11	1. 孔洞形核率	33
3. Irwin断裂判据	12	2. 损伤演化断裂应变	34
4. 复合型断裂判据	12	3. 无损时最低应变率	34
1.6 阻力曲线及判据	15	4. 断裂时间	34
1.7 疲劳裂纹扩展速率 da/dN	16	5. 蠕变损伤允限	34
第2章 弹塑性断裂力学	18	第4章 断裂力学试验标准试样	35
2.1 J 积分理论及判据	18	4.1 标准三点弯曲试样	36
2.2 裂纹尖端张开位移 δ	21	4.2 标准紧凑拉伸试样	37
1. Dugdale模型	21	4.3 WOL型紧凑拉伸试样	38
2. Paris裂纹张开位移 δ	22	4.4 圆形紧凑拉伸试样	39
		4.5 拱形三点弯曲试样	39
		4.6 短跨距三点弯曲试样	40
		4.7 圆柱切口拉伸试样	40
		4.8 C形拉伸试样	41

4.9 中心穿透裂纹板试样	42	4.12 恒 K_I 试样	45
4.10 双边裂纹板试样	43	4.13 半椭圆表面裂纹拉伸试样	45
4.11 单边裂纹板试样	44	参考文献	46

第2篇 断裂、损伤参量的电测技术

物理量符号、名称及单位	49	8.1 平面应力断裂韧性 K_{Ic} 测量原理	71
概述	51	1. 对试样尺寸的要求	71
第5章 电阻应变测量的基本原理	52	2. 临界裂纹长度 a_c 的确定	72
5.1 电阻应变片	52	8.2 平面应力断裂韧性 K_{Ic} 的测试方法	73
5.2 电阻应变仪的工作原理及应用	53	1. 用COD法测量 K_{Ic}	73
5.3 电测断裂参量所用仪器	54	2. 用阻力曲线法测量 K_{Ic}	74
1. X-Y记录仪	54	3. 用P-V曲线法测定 K_{Ic}	75
2. 载荷传感器(测力器)	54	4. 直接测量法确定 K_{Ic}	75
3. 双悬臂夹式引伸计	54	8.3 动态断裂韧性 K_{Id} 、 δ_{Id} 、 J_{Id} 的测试简介	75
4. 声发射仪	55	1. 用冲击试验机测试 K_{Id}	76
第6章 平面应变断裂韧性 K_{Ic} 测试方法	57	2. 用电液伺服万能试验机测试 K_{Id} 、 δ_{Id} 、 J_{Id}	76
6.1 K_{Ic} 的标准测定方法	57	8.4 止裂断裂韧性 K_{Ic} 的测试	78
1. P_c 点的确定	57	1. 止裂原理	78
2. 裂纹扩展量 Δa 的确定	58	2. 止裂断裂韧性 K_{Ic} 的测试	79
3. 保证平面应变及小范围屈服的 条件	58	第9章 裂纹扩展速率 da/dN 和应力腐 蚀断裂韧性 K_{Isc} 的测试方法	80
4. 试样的准备	59	9.1 疲劳裂纹扩展速率 da/dN 测试的基本 原理	80
5. 加载速度	59	1. 测试疲劳裂纹扩展速率 da/dN 的试样 及标定公式	81
6. 试验有效性校核	60	2. 对试样尺寸的要求	82
6.2 用表面裂纹试样测量 K_{Ic}	60	3. da/dN 的测试原理	82
6.3 测量 K_{Ic} 的其它类型试样	61	9.2 疲劳裂纹扩展速率 da/dN 的测试 步骤	82
第7章 临界COD(σ_c^*)和J积分(J_{Ic}) 测试方法	62	9.3 电阻法测量高温下的 da/dN	83
7.1 临界COD(σ_c^*)的测试	62	9.4 应力腐蚀断裂韧性 K_{Isc} 测试 技术	85
1. COD测试原理	62	1. 恒载荷法测量 K_{Isc} 和 da/dt	85
2. 转动因子 r 的确定	63	2. 恒位移试样测量 K_{Isc} 和 da/dt	87
3. 临界点(裂纹开裂点)的确定	64	3. 恒 K_I 试样测量 da/dt	88
4. 临界COD测试步骤与方法	66	第10章 损伤变量的测量方法	89
7.2 J积分临界值 J_{Ic} 的测试	67	10.1 损伤变量测量的试样和基本设备	89
1. 测量 J_{Ic} 的基本原理	67	1. 试样的形状和尺寸	89
2. 测量 J_{Ic} 对试样尺寸的要求	68	2. 试验设备	89
3. 多试样法测量 J_{Ic} 的步骤	68	10.2 损伤变量 D 的测定	89
4. 单试样法测量 J_{Ic} 的步骤	69		
5. 阻力曲线法确定 J_{Ic}	70		
第8章 平面应力断裂韧性 K_{Ic} 和动态、 止裂断裂韧性测试方法	71		

1. 弹性模量法确定 D	90
2. 塑性应变法确定 D	90
3. 直接测量法确定 D	90
10.3 韧性材料临界空穴扩张比参数的 基本概念	91
1. $V_{\sigma\sigma}$ 的基本概念	91
2. $V_{\sigma\sigma}$ 的物理意义	91
10.4 韧性材料临界空穴扩张比参数 $V_{\sigma\sigma}$ 的 测定	93
1. 测量步骤	93
2. 试验结果计算 $V_{\sigma\sigma}$	93
3. 试验有效性校核	93
参考文献	93

第3篇 光测断裂、损伤力学试验技术

物理量符号、名称及单位	95
概述	97
第11章 光弹塑性法裂纹尖端应力场和 应力强度因子的测量	99
11.1 光弹性法确定应力强度因子的基本 原理	99
1. 普通光弹性基本方法	99
2. 激光全息光弹性法	100
3. 无限体裂纹尖端三维应力场	101
11.2 应力强度因子 K_I 、 K_{II} 的测定	102
11.3 III 型应力强度因子 K_{III} 的测定	104
1. 切片逐次削去法	104
2. 薄切片法测定 K_{III}	105
11.4 三维裂纹体光弹模型研究中的技术 问题	106
1. 三维模型内裂纹的制作方法	106
2. 材料泊松比的修正	106
11.5 三维光弹法确定 SIF 在工程问题中的 应用	106
1. 确定反应堆压力容器接管角裂纹的 SIF	106
2. 均匀拉伸平板表面裂纹形状因子近似 解的评价与选优	106
11.6 光弹性法用于动态断裂的研究	108
1. 用光弹性法确定动态应力强度 因子(SIF)	108
2. 用光弹性法研究动态 SIF 与裂纹扩展 速度的关系	108
11.7 光弹性法确定裂纹尖端应变能密度 因子	108
11.8 光塑性法用于研究弹塑性断裂力学 简介	109
第12章 云纹和云纹干涉法测量裂纹 尖端场和有关断裂韧度	110
12.1 云纹和云纹干涉法的基本原理	110
1. 云纹法	110
2. 云纹干涉法	111
12.2 用云纹或云纹干涉法确定应力强度 因子(SIF)和裂纹尖端张开 位移(CTOD)	112
1. SIF 的测试技术	112
2. COD 的确定	113
12.3 塑性区尺寸 R_p 和 J 积分的确定	113
1. 塑性区尺寸 R_p 的确定	113
2. 用云纹或云纹干涉法确定裂纹体的 J 积分	113
12.4 裂纹尖端奇异场测量和理论解 比较	114
1. 线弹性奇异场分析	114
2. 弹塑性裂纹尖端 HRR 奇异场试验 研究	115
3. 弹塑性扩展裂纹尖端 GH 奇异场的 试验研究	118
12.5 裂纹尖端损伤参量测量	120
12.6 复合型裂纹尖端应变场的测量	121
第13章 格子法在断裂、损伤测量中的 应用	122
13.1 格子法测量的基本原理	122
13.2 裂纹尖端小区域内断裂参量的 测量	123
1. 裂纹尖端拉伸应变 ε_{σ_0} 的测量	123
2. 裂纹尖端张开位移 CTOD 的 测量	124
13.3 裂纹尖端损伤区内变形场的 测量	124
13.4 格子法测量循环加载条件下疲劳 裂纹	124

裂纹扩展	129
13.5 大晶粒试样变形场及晶界滑错测量	130
1. 晶界滑错测量	130
2. 晶界增宽、孔洞形核的观测	131
第14章 光学焦散线方法确定裂纹尖端应力强度因子	132
14.1 光学焦散线法的基本原理	132
1. 屏在试样前光线由前表面反射	133
2. 屏在试样前光线由后表面反射	133
3. 屏在试样后光线透射	133
14.2 裂纹尖端焦散线的特性	134
1. 各向同性材料裂纹尖端焦散线	134
2. I、I、I型裂纹尖端焦散线	138
3. 双折射材料裂纹尖端焦散线	140
4. 各向异性材料裂纹尖端焦散线	141
14.3 裂纹之间相互影响的焦散线	142
14.4 用焦散线法研究分叉裂纹问题	143
14.5 用焦散线法确定内表面裂纹尖端SIF	143
14.6 V型缺口问题的应力强度因子	145
14.7 焦散线法研究动态扩展裂纹问题	146
1. 焦散线法动态测量基本原理	146
2. 光学各向同性材料的焦散线特性及 K_I^* 的确定	147
3. 光学各向异性材料焦散线特性及 K_I^* 的确定	149
4. 动态焦散线确定裂纹止裂韧度 K_{Ic}	149
5. 动态焦散线确定断裂韧度影响因素的讨论	151
14.8 弹塑性材料焦散线	154
1. 弹塑性焦散线的基本特征	154
2. 弹塑性焦散线确定 J 积分	156
14.9 焦散线方法的其它应用	156
第15章 全息和散斑干涉在断裂、损伤参量测量中的应用	157
15.1 全息和散斑方法的基本原理	157
1. 全息干涉法	157
2. 散斑干涉法	159
3. 白光散斑法	161
4. 全息和散斑法测量精度分析	161
15.2 全息和散斑法测量裂纹尖端三维变形场	162
1. 全息、散斑法结合测量I型裂纹尖端三维变形场	162
2. 全息法测量II型裂纹尖端变形场	162
3. 裂纹尖端奇异场分析	164
15.3 全息、散斑法测量断裂力学基本参量	164
1. 应力强度因子 K 的测量	164
2. COD和CTOD的测量	165
3. COA和CTOA的测量	165
4. J 积分的测量	165
15.4 裂纹尖端颈缩区尺寸测量及塑性区分析	167
15.5 全息和散斑法测量裂纹尖端小区变形场	167
15.6 白光散斑技术在断裂参量研究中的应用	169
15.7 全息干涉在工业无损检测中的应用	170
1. 夹层结构未结合区的检查	170
2. 轮胎及其它压层制品缺陷的检查	171
3. 金属零部件内部裂纹的检查	171
第16章 图像信息处理技术和数字散斑相关法在断裂、损伤实验研究中的应用	173
16.1 数字散斑相关法的基本原理	173
1. 物体刚体平移试验	174
2. 悬臂梁自由端加载、测量梁的挠度曲线	174
16.2 相移法基本原理	175
1. 参考光路中加压电陶瓷反射镜实现相移	175
2. 偏振实现相移	176
3. 机械调节实现相移	176
4. 光载波实现相移	176
5. 图像处理技术多次采样实现相移	176
16.3 数字散斑相关法和相移法测量裂纹尖端变形场	176
1. 数字散斑相关法测量裂纹尖端变	

形场.....	176	3. 高放大率、实时加载、显微图像处理系统.....	197
2. 相移法测量裂纹尖端变形场.....	177	18.4 扫描声学显微镜.....	197
16.4 裂纹尖端损伤区内变形场的确定.....	178	1. 扫描声学显微镜原理.....	197
16.5 损伤断裂的分形特征.....	179	2. 声学显微镜的应用.....	197
1. 分形几何基本概念.....	179	第19章 射线法检验与测量.....	201
2. 严格分形与统计分形.....	180	19.1 轴射源.....	201
3. 分形维数的估算.....	180	1. X射线.....	202
16.6 损伤断裂的分形研究.....	182	2. γ 射线.....	202
1. 脆性断裂的分形模型.....	182	3. 中子.....	203
2. 裂纹扩展速率的分形效应.....	183	19.2 电磁辐射的衰减.....	204
3. 断口的分形分析.....	183	19.3 中子束的衰减.....	204
4. 分形维数与脆性损伤断裂.....	184	19.4 射线阴影形成的原理.....	204
5. 裂纹分叉的分形特征.....	185	19.5 射线照相在裂纹及缺陷检测中的应用.....	206
第17章 光导纤维在断裂、损伤测试技术中的应用.....	187	1. X射线或 γ 射线用于简单型材或板材内裂纹和缺陷的检测.....	206
17.1 光导纤维分类和传光原理.....	187	2. 复杂形状试样的检测.....	206
1. 光导纤维分类.....	187	3. 焊接件的检测.....	206
2. 传像束的传像原理及其分辨率.....	188	4. 中子射线照相的应用.....	206
3. 激光束与光纤耦合物镜的选择.....	188	19.6 图像的分析与识别.....	206
17.2 光导纤维和近代光力学方法结合的应用.....	189	1. 铸件中的缺陷.....	206
1. 光导纤维在全息干涉计量中的应用.....	189	2. 焊接件中的缺陷.....	207
2. 光导纤维在散斑干涉计量中的应用.....	190	第20章 激光衍射谱在断裂、损伤测试中的应用.....	208
3. 光导纤维全息、散斑法分析裂纹尖端位移场.....	191	20.1 衍射谱测量理论分析.....	208
4. 光导纤维在云纹法中的应用.....	192	1. 相干光在粗糙表面上的散射.....	208
17.3 光导纤维作为增强材料在损伤力学测量中的应用.....	192	2. 变形前后激光在金属表面上反射衍射谱的变化.....	210
第18章 显微镜在断裂、损伤测试技术中的应用.....	194	20.2 衍射谱法测量多晶金属变形的弹塑性区分界线.....	212
18.1 电子显微镜.....	194	1. 光路与变形尺度.....	212
1. 透射式电子显微镜.....	194	2. 试样和加载.....	212
2. 扫描电子显微镜.....	194	3. 实验内容和方法.....	212
18.2 CT扫描电子显微镜.....	196	20.3 用激光衍射谱变化定义损伤变量 $D(K)$ 及其测量.....	214
18.3 光学显微镜.....	196	1. 基本原理.....	214
1. 连续变倍体视摄影显微镜.....	196	2. 测量方法.....	215
2. 高倍率显微投影仪.....	197	参考文献.....	216

第4篇 声测量在断裂、损伤测试技术中的应用

物理量符号、名称及单位	221	测量	238
概述	222	4. 声弹性测量残余应力	238
第21章 声测量技术的基本原理	223	22.4 声发射技术研究细观断裂	239
21.1 振动与波	223	1. 声发射法评估纤维束的统计特性	239
1. 振动	223	2. 声发射法测量层板的损伤与断裂	239
2. 波动	223	22.5 声全息术及应用	241
21.2 声波的传播	224	1. 液面声全息术	241
1. 波长	224	2. 扫描声全息术	243
2. 波的传播速度	224	3. 声全息的应用	244
3. 声速、波长、频率之间的关系	225	第23章 超声波探伤	246
21.3 超声场	225	23.1 超声波探伤原理及方法	246
1. 近场	225	1. 超声波穿透法探伤	246
2. 远场	226	2. 超声波脉冲反射法探伤	246
3. 声压分布	226	23.2 仪器和探头性能的校验	247
4. 指向角	226	1. 仪器特性	247
21.4 超声波的临界角	227	2. 探头特性	248
21.5 超声波在界面上的反射与透射	228	3. 检验系统特性	249
1. 超声波的反射与透射	228	23.3 超声波探伤图形中回波的判别	250
2. 反射定律与折射定律	228	1. 没有缺陷的探伤图形	250
21.6 超声波的衰减	229	2. 有缺陷时的探伤图形	251
1. 超声波的散射与绕射	229	23.4 回波高度与缺陷大小的评定	251
2. 超声波被吸收	230	1. 回波高度的度量	251
3. 超声波在材料中的衰减	230	2. 缺陷当量的评估	251
第22章 声测量及应用	233	3. 缺陷延伸度的评估	251
22.1 声弹性原理	233	23.5 超声波探伤的应用	252
1. 平面声弹性基本原理	233	1. 超声波探伤检查材料质量	252
2. 超弹性应力-声学效应	234	2. 探测设备中的缺陷	252
3. 表面波应力-声学关系	235	3. 研究疲劳裂纹扩展速率	252
4. 塑性变形对声弹性的影响	235	23.6 标准试块介绍	252
22.2 平面声弹性测量技术	236	1. DIN54120 K_1 标准试块及其在调整与校验脉冲反射式超声波探伤仪中的应用	252
1. 加载系统	236	2. DIN54122 K_2 标准试块及其在调整与校验脉冲反射式超声波探伤仪中的应用	255
2. 超声测量速度系统	236	参考文献	257
3. 换能器系统	236		
4. 主声轴的测定	237		
22.3 平面声弹性测量在应力分析中的应用	237		
1. 带孔板应力集中的测量	237		
2. 声弹性法测定断裂参数	237		
3. 结构体内部三维应力声弹性			

第5篇 磁测量在断裂、损伤测试技术中的应用

物理量符号、名称及单位	259	1. 磁声发射测量装置	279
概述	260	2. 磁声发射测量单晶体在热处理过程中 所发生的结构变化	280
第24章 磁测量的基本原理	261	25.5 漏磁通在磁测量中的应用	281
24.1 磁场的描述	261	1. 漏磁通检测设备	281
1. 磁极	261	2. 漏磁通在检测中的应用	282
2. 磁极之间的力	261	25.6 磁感生声速变化用于无损检测	283
3. 磁场和磁场强度	261	25.7 涡流测量的主要应用	285
4. 磁力线	262	第26章 磁粉无损探伤	277
24.2 磁介质和钢材的磁性	262	26.1 磁粉无损探伤基本原理	287
1. 磁介质	262	1. 磁粉探伤原理	287
2. 钢材的磁性	263	2. 磁粉探伤的特点	287
24.3 磁巴克豪生效应(MBE)	264	26.2 磁粉和悬浮液	288
1. 磁化曲线	264	1. 磁粉	288
2. 磁滞回线	265	2. 磁悬浮液	288
3. 巴克豪生效应(BE)	265	26.3 磁粉探伤基本设备	289
24.4 磁致伸缩和磁声发射	266	1. 磁化电源	289
1. 磁致伸缩	266	2. 工件夹持装置	289
2. 磁致伸缩的逆效应	266	3. 指示装置	289
3. 磁声发射(MAE)	268	4. 磁粉或磁悬浮液喷洒装置	289
4. 应力场对磁感应强度的影响	268	5. 照明装置	289
24.5 漏磁通(MFL)	269	6. 退磁装置	289
24.6 磁感生声速变化(MIVC)	270	7. 标准试块和试片	289
24.7 涡流	270	26.4 磁粉探伤工艺及程序	291
第25章 磁测量在断裂、损伤测试中的 应用	272	1. 连续法和剩磁法	291
25.1 磁巴克豪生效应测试装置	272	2. 干法与湿法	292
25.2 磁巴克豪生效应的应用	273	3. 磁化规范	292
1. MBE在内应力检测中的应用	273	4. 磁痕观察与记录	293
2. MBE检测缺陷、表面损伤和 硬化	273	5. 退磁	293
3. MBE测量晶粒大小和第二相沉积物的 尺寸	274	26.5 磁粉探伤的应用	294
25.3 磁致伸缩及其逆效应用于残余应力 测量	275	1. 焊接件的探伤	294
1. 自平衡型九脚磁探头测量残余应力 分布	275	2. 锻钢件的探伤	294
2. 磁传感器测量平面应力	276	3. 铸钢件的探伤	294
3. 四脚探头测量结构残余应力	279	4. 维修件的探伤	295
25.4 磁声发射(MAE)在结构无损检测 中的应用	279	5. 特殊工件的探伤检验	295
		参考文献	295
		常用技术资料	296
		I、典型结构应力强度因子表达式	296
		II、典型结构 J 积分表达式和临界的裂纹 张开位移	307

Ⅰ、常用工程材料断裂参量	309	关系	344
表 1 常用工程材料断裂韧度	309	表 1 力单位换算	344
表 2 常用铝及铝合金断裂韧度	317	表 2 力矩和转矩单位换算	344
表 3 常用金属材料的 ΔK_{Ic}	322	表 3 压力和应力单位换算	345
表 4 典型材料疲劳裂纹扩展速率	323	表 4 功率单位换算	345
Ⅱ、铝及铝合金中外牌号对照表	324	表 5 运动粘度单位换算	345
表 1 中外 8 个国家(协会)铝合金牌 号对照	324	表 6 动力粘度单位换算	345
表 2 中外 20 个国家(协会)铝及铝合金 牌号对照	329	表 7 能和热量单位换算	345
表 3 中国与国外各厂商的铝合金牌号 对照	333	表 8 比潜热和比热单位换算	346
Ⅲ、国内外常用钢钢号对照表	344	表 9 导热系数单位换算	346
Ⅳ、常用法定计量单位与其它单位换算		表 10 温度换算	346
		表 11 应力强度因子单位换算	346
		技术术语中英文对照表	347

第1篇 断裂、损伤力学基本概念

物理量符号、名称及单位

符 号	名 称	单 位
$\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$	在柱坐标中径向、切向、轴向应力	(Pa, MPa)
E, G	材料的弹性模量、切变模量	(GPa)
ν	材料的泊松比	
$\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$	在直角坐标中平面内正应力, 切应力	(Pa, MPa)
u, v, w	在直角坐标中沿 x, y, z 方向位移分量	(mm)
K_I, K_{II}, K_{III}	张开型(I型)、滑开型(II型)、撕开型(III型)应力强度因子	($\text{N}/\text{m}^{3/2}, \text{Pa}\cdot\sqrt{\text{m}}$)
$a, \Delta a$	裂纹长度、裂纹扩展量	(mm)
R_p	塑性区尺寸	(mm)
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	三个主应力	(MPa)
σ_s	材料的屈服点	(MPa)
$K_{Ic}, K_{IIc}, K_{IIIc}$	材料的I, II, III型断裂韧度	($\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$)
W, U	裂纹的表面能、弹性变形能	($\text{N}\cdot\text{m}$)
G, G_c	裂纹扩展应变能释放率及其临界值	($\frac{\text{N}}{\text{m}}, \frac{\text{kN}}{\text{m}}$)
S	应变能密度因子	($\text{Pa}\cdot\text{m}$)
R	裂纹扩展阻力	(N/m)
da/dN	疲劳裂纹扩展速率	(mm/n)
ΔK_{th}	载荷幅 ΔK 的门槛值	($\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$)
J, J_{Ic}	J 积分及延性断裂韧度	(N/m)
$\delta_t, CTOD$	裂纹尖端张开位移	(mm)
COD	裂纹张开位移	(mm)
$COA, CTOA$	裂纹张开角, 裂纹尖端张开角	(rad)
$\sigma_{ij}(r, \theta)$	在极坐标中平面应力分量	(Pa)
$\varepsilon_{ij}(r, \theta)$	在极坐标中平面应变分量	
$u_i(r, \theta)$	在极坐标中平面位移分量	(mm)
n, a	材料应变硬化指数和材料常数	
$\varepsilon_p^s(r, \theta)$	在极坐标中塑性应变分量	
b	试样韧带宽度	(mm)
Δ	试样加载端位移	(mm)

(续)

符 号	名 称	单 位
l	试样的柔度	(mm/N)
D	材料损伤变量	
A_{ef}	试样的有效面积	(mm ²)
σ_{ef}	有效应力	(Pa)
v	裂纹扩展速度	(m/s)
f, f_0	孔洞体积比及临界值	
Σ_m	宏观静水应力	(Pa)

概 述

作为实验断裂、损伤力学测试技术的理论基础,在本篇介绍了线弹性断裂力学、弹塑性断裂力学和损伤力学的基本理论与概念。为了断裂、损伤参量测量方便,综合介绍了各种断裂、损伤参量测量所需要的试样。

线弹性断裂力学是研究理想脆性材料和构件,当存在裂纹型缺陷时,裂纹尖端应力场和裂纹扩展规律的。线弹性断裂力学目前已获得充分的发展与应用,在解析的、数值的与试验的研究方面,都已取得许多成果。在某些行业中,以线弹性断裂力学作为制定规范和有关结构安全评定的基础。对于弹塑性材料,裂纹尖端周围进入小范围屈服时,线弹性断裂力学经过适当的修正后,仍然可以用于含裂纹材料和构件的断裂分析,即使构件进入大范围屈服时,在弹性区部分,仍然必须用线弹性断裂力学的分析方法。本篇的第1章介绍了线弹性断裂力学裂纹尖端基本解、应力强度因子、能量释放率、裂纹尖端进入小范围屈服时,线弹性断裂力学的修正等重要内容。

弹塑性断裂力学,由于实际工程中对韧性与塑性材料分析的需要,近年来有较快的发展。特别值得提起的是1968年Hutchinson, Rice与Rosengren发表了著名的HRR裂纹尖端奇异解,为弹塑性断裂力学提供了一个理论起点,大量的数值与试验研究为它的应用创造了条件。许多数值与试验的研究证明在许多情况下,静止裂纹尖端存在HRR奇异性,裂纹尖端周围存在 J 主导区,因而 J 就成为决定裂纹起裂条件的参数。在结构安全评定与材料韧性试验中, J 获得了很多应用。对于弹塑性材料,裂纹起裂以后的裂纹扩展问题,在小扩展量条件下,仍受 J 主导区控制,许多学者对扩展裂纹进行了研究并取得了重大进展。1981年Gao与Hwang发表了著名的GH扩展裂纹尖端奇异解,为进一步研究裂纹尖端附近某些物理量(例如裂尖前方的应变或裂纹开口形状等),和近尖端断裂准则创造了条件。本篇的第2章介绍了弹塑性断裂力学的HRR和GH奇异解和弹塑性断裂的基本参量。

损伤力学是继断裂力学之后对材料与结构失效破坏过程及规律的研究。损伤是指在单调加载或重复加载下材料的微缺陷形成,导致其内粘聚力的进展性减弱并导致体积单元破坏的现象。材料损伤的描述模型有脆性损伤和韧性损伤,按其尺寸特征分为微观、细观、宏观三种。微观模型由原子结构层次研究损伤;细观模型略去损伤的物理过程细节,考虑各类型损伤的形状与分布,预测在介质中损伤产生、发展和最后破坏过程;宏观损伤模型,基于宏观尺度把损伤材料看成为含有“微损伤场”的连续体,并引进宏观损伤参量来描述损伤状态。在本篇第3章由细、宏观尺度介绍了脆性、韧性损伤模型及损伤参量。

本篇的第4章综合介绍了测量各种断裂、损伤参量的试样。在试验中所需测试的物理量以及断裂参量计算方法,为后续测试技术中应用提供了较完备的资料。

第1章 线弹性断裂力学

线弹性断裂力学是研究脆性材料或构件,当存在裂纹型缺陷时,裂纹尖端受力状态和裂纹扩展规律的。目前有Irwin^[1]的应力强度因子(SIF)理论和Griffith-Orowan^[2, 3]理论为基础的能量理论。对于弹塑性材料,当裂纹尖端附近出现小范围屈服区时,线弹性断裂力学理论经过小范围屈服修正以后仍然可以应用。所以线弹性断裂力学不仅适用于理想脆性材料(例如玻璃、陶瓷等),还对部分弹塑性材料(例如高强度钢材、原截面的中强度钢构件或在低温下使用的中、低强度钢构件),其裂纹尖端塑性区尺寸与裂纹长度相比很小时,都可用线弹性断裂力学理论分析,因此线弹性断裂力学理论具有较广的应用范围。

1.1 断裂机理

断裂力学研究的关键问题之一是研究局部断裂条件,即断裂准则。而断裂准则是建立在对断裂机理基础研究基础之上。断裂机理通常分解理解理断裂和韧性断裂两种。

解理断裂是发生在结晶材料中脆断的一种断裂形式。是因原子键的简单破裂而沿结晶面直接断开。其主要特征是:断裂通常发生在某个特定的结晶面上。在一个晶粒内解理断裂具有相对的平直性。由于相邻晶粒方位的不同,在晶界面上解理断裂要改变方向。如继续沿解理面扩展,穿过晶粒的平直的解理平面,具有良好的反射特性,因此解理断裂具有闪光特征。解理断裂常发生在体心立方和很多密集的六方晶体结构中。

韧性断裂最常见的形式是拉伸超载,造成典型的杯锥形断裂。在达到最大载荷之后,柱状拉伸试样的塑性变形不均匀了,试样的中部出现颈缩。这种破坏是滑移变形的结果。断口是倾斜的(大约与轴线成45°方向),断裂是在屈服之后发生的。断裂时的应力都超过材料的屈服极限。韧性断裂的机理是由于结晶体中空穴的增长和汇集,与晶体之间位错和滑移相关。由于应力作用在位错同时,伴有一定的塑性变形,导致韧性断裂。

1.2 三种裂纹基本型态

对于任何复杂受力形式的裂纹,总可以分解为三种基本裂纹型态的组合。它们即为I型裂纹,II型裂纹和III型裂纹。

1. I型裂纹(张开型裂纹)

如图1-1a~d所示,外加正应力 σ 和裂纹面垂直。在外加应力 σ 作用下,裂纹尖端张开,且裂纹扩展方向与应力 σ 方向垂直,此种裂纹称为张开型裂纹,也称I型裂纹。平板受均匀拉伸,垂直于拉伸方向,贯穿板厚的裂纹(中心裂纹,边裂纹);受内压的容器或管道壁上有纵向裂纹;旋转的叶轮有径向裂纹等。这些结构中受力方向都与裂纹面垂直,都称I型裂纹。

2. II型裂纹(滑开型裂纹)

如图1-2a~d所示,外加应力方向和裂纹面平行。裂纹受面内剪切而破坏。轮齿或花键