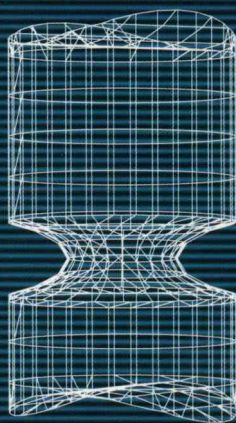
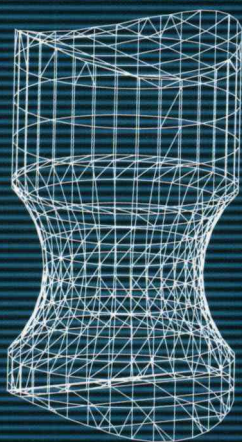


材料科学与工程



切口件的断裂力学

郑修麟 著



西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工程大学出版社

国防科工委『十五』规划专著



国防科工委“十五”规划专著

切口件的断裂力学

郑修麟 著

西北工业大学出版社

北京理工大学出版社 北京航空航天大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书重点研究了钢铁、陶瓷、非铁金属、铸铁、玻璃等材料切口件的低应力脆断准则和强度问题,以及产生低应力脆断的内、外部条件,并试图给出适用于包括切口件、裂纹件和光滑试件的断裂准则,为在结构设计中选用材料和进行强度校核提供了有用的工具,从而也为改善材料的性能提供了依据。

图书在版编目(CIP)数据

切口件的断裂力学/郑修麟著. —西安:西北工业大学出版社,2004.11

国防科工委“十五”规划专著

ISBN 7-5612-1842-7

I. 切… II. 郑… III. 切口-结构构件-断裂力学 IV. TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 105634 号

切口件的断裂力学

郑修麟 著

责任编辑 雷 军 张近乐 责任校对 季苏平

西北工业大学出版社出版发行

西安市友谊西路 127 号(710072) 发行部电话:029-88493844,88491757

<http://www.nwup.com>

西安新华印刷厂印刷 各地书店经销

开本:850×1168 1/32 印张:14.625 字数:351 千字

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月第 1 次印刷 印数:1~2 000 册

ISBN 7-5612-1842-7 定价:30.00 元

国防科工委“十五”规划专著编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任：张华祝

副主任：陈一坚 屠森林

编 委：	王文生	王泽山	卢伯英	乔少杰
	刘建业	张华祝	张近乐	张金麟
	杨志宏	杨海成	肖锦清	苏秀华
	辛玖林	陈一坚	陈鹏飞	武博祎
	侯深渊	凌 球	聂 武	谈和平
	屠森林	崔玉祥	崔锐捷	焦清介
	葛小春			



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。党的十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转



移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济做出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版200种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的100多位专家、学者,对



经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防



科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前 言

对材料失效的研究伴随着材料在工程中的应用而开展。失效的主要形式有过量的变形、断裂、腐蚀与磨损,以及复合材料的分层和脱黏等。研究失效的目的是防止失效,使工程结构能安全可靠地运行。对材料失效的研究包含两个主要方面的内容:失效的微观机理和宏观的失效准则。材料失效微观机理的研究为改善材料的失效抗力和建立宏观的失效模型提供了依据,而失效准则的研究则为结构件的设计和强度验算提供了依据。两者都是为工程应用服务的。

在上述所有失效形式中,结构件的断裂造成的危害最大,损失最为严重。对断裂的研究已有很久的历史,见之于《材料力学》和《材料的力学行为》书中的强度理论,适用于当时工业中使用的低、中强度金属材料。随着工业生产技术和高强度金属材料的应用,提出了新的断裂准则。例如,第二次世界大战中,很多焊接船体沿焊缝发生断裂事故。从断裂的焊接船体中邻近焊缝区域取样,对材料进行分析后,得出了冲击功不得低于 15 呎-磅(20.35 J)的结论。这就是所谓的“15 呎-磅准则”,是以冲击功表示的断裂准则,这虽是一个经验准则,但具有一定的实用性。

20 世纪 50 年代初,超高强度钢焊接的导弹壳体在导弹发射时发生断裂。事后对材料的分析表明,钢的常规



力学性能均符合要求。但进一步的分析发现,在焊缝区发现了裂纹。为解决含裂纹件的断裂与强度问题,科技工作者从三个方面开展了研究,即裂纹尖端的应力分析、材料对裂纹件的断裂抗力,以及裂纹件的断裂应力与结构件几何和裂纹尺寸之间的关系,即应力强度因子表达式。进而提出了裂纹件的断裂准则,形成系统的裂纹件断裂力学,文献中常称之为线弹性断裂力学。此后,对中、低强度材料裂纹件的断裂开展了研究,形成了弹塑性断裂力学。

20世纪50年代,采用切口试件,对高强度金属材料的切口强度进行了大量的实验测定,测定结果以图表的形式汇集在宇航材料手册中。研究者虽然对切口的应力与应变进行了理论分析和实验测定,提出过缺口断裂力学的名称,但未能形成切口件断裂的力学模型,尤其是各类材料切口体的断裂准则。但工程师们可利用手册中的数据和图表,找到结构件设计所需的数据。这也是解决工程问题的常用方法。最近的文献中也出现过“线性切口力学”一词,但其内容仅限于切口的应力分析,分析结果用于疲劳研究,并未能提出切口件的断裂准则。

断裂按其性质可分为延性断裂(或韧性断裂)和脆性断裂两类。两类断裂的宏观表象分别为:在断裂前发生显著的塑性变形即为延性断裂;反之,断裂前不发生塑性变形即为脆性断裂。因为脆性断裂前无明显的征兆,断裂具有突发性,所以脆性断裂也最危险。从断裂的微观机理看,延性断裂要经历微孔形成、长大和连接,最后发生断裂等几个阶段组成的微孔聚合型断裂。而脆性断裂



则有解理和沿晶界断裂两种机理。解理断裂的传播速度很快,因而解理断裂具有突发性。材料和结构件发生延性断裂或脆性断裂不仅取决于材料的微观组织结构和性质等内在特性,也取决于材料受力状态、环境、温度与结构件的几何特征等外部条件。所以对断裂准则的研究,应综合考虑材料特性、试件和结构件的几何特征、力学因素(加载条件和受力状态),以及环境、温度等内、外因素。所以,断裂的宏观表象与微观机理并不总是能一一对应的。有时,断裂的宏观表象看似脆性断裂,而微观机理上为微孔聚合型的延性断裂。但解理断裂和沿晶界断裂时,宏观表象上也为脆性断裂。

对材料强度理论、失效准则以及微观机理的研究,常采用所谓的“光滑”试件。结构件总含有几何不连续性。这种几何不连续性可以看成广义的切口。切口的存在引起应力和应变集中,改变切口根部的应力状态,进而引起断裂性质的变化。因此,应当采用切口件模拟结构件,研究结构件的强度理论或断裂准则。引起断裂的力学因素包括:一次大过载引起的断裂;反复加载引起的疲劳断裂;在腐蚀环境中加载引起的应力腐蚀断裂;以及高温长时加载引起的蠕变断裂等。但不论何种因素引起切口件的断裂,整个过程可分为三个阶段:裂纹在切口根部形成,已形成裂纹以一定的速度进行稳态扩展,裂纹扩展到临界尺寸时发生失稳扩展而导致断裂。所以切口件的最终断裂仍是裂纹件的断裂问题,需要用线弹性断裂力学或弹塑性断裂力学理论和方法进行处理。然而,处理裂纹件断裂问题很成功的线弹性断裂力学或弹塑性断裂力



学,却无法处理切口件中裂纹在切口根部形成的问题。因为线弹性断裂力学或弹塑性断裂力学的基本假设是材料中已存在裂纹,而裂纹是如何形成的则不予考虑。这不能不说是线弹性断裂力学或弹塑性断裂力学的一个固有的缺失。在实际的工程结构中,尤其是主要的承力结构件,一般不允许存在裂纹或对裂纹严格地加以限制。因此,在工程应用中,线弹性断裂力学或弹塑性断裂力学有其局限性。

研究切口件的断裂准则或强度问题,必先研究切口件中裂纹在切口根部形成的问题,这是不可以回避的。切口根部的裂纹实际上是由切口根部局部区域内的材料断裂而形成的。因此,建立裂纹在切口根部形成的力学模型,要涉及与材料断裂相关的力学理论和方法。裂纹在切口根部形成以后,切口件即转变为裂纹件。如前所述,裂纹件的断裂问题,需要用线弹性断裂力学或弹塑性断裂力学理论和方法进行处理。可以认为,将研究切口件的断裂准则或强度问题的著作,定名为《切口件的断裂力学》应是名符其实的。而且,切口件的断裂力学也是在处理裂纹件的断裂问题的线弹性断裂力学或弹塑性断裂力学的发展和补充。

本书重点研究各类材料切口件的低应力脆断准则和强度问题,以及产生低应力脆断的内、外部条件。所谓低应力脆断,是指材料在低于屈服强度或抗拉强度的名义应力下发生的断裂。因为断裂时的名义应力低,因而断裂前不会发生明显的塑性变形,故表现为脆性断裂的形态。在实验研究中,用切口试件模拟含切口的结构件,测



定其断裂强度。因此,切口试件的断裂强度,也可看成是材料的切口强度。但应指出,切口强度不是材料常数。从几何学的角度考虑,当切口根部半径 $\rho \rightarrow \infty$, 则切口试件即转化为光滑试件;当切口根部半径 $\rho \rightarrow 0$, 则切口试件即转化为裂纹试件。所以光滑试件和裂纹试件可看成是切口试件的上、下限,或者将切口件看做是光滑试件和带裂纹试件之间的过渡状态。基于这一考虑,本书试图给出适用于包括切口件、裂纹件和光滑试件的断裂准则,这一断裂准则以所谓“切口强度图”表示。尽管在一些情况下,切口强度图不能给出精确的切口强度值,但可确定切口强度值的下限,这在工程实践中也具有实用意义。切口强度图为结构设计中选用材料和进行强度校核提供了有用的工具,也为改善材料的性能提供了依据。

本书的主要内容来自作者与研究生的关于切口件断裂与强度的研究工作及所取得的结果。20多年前,作者开始研究金属材料切口强度的近似计算公式,随后建立了预测金属材料切口强度和断裂韧性的统一模型,并对文献中的实验结果进行再分析,对所提出的模型和公式做了客观的验证。进入20世纪90年代,作者和研究生先后开展了陶瓷材料、Al-Li合金、铸铁和玻璃材料等切口件的断裂与强度的研究,提出了相应的断裂准则;对材料而言,即为切口强度公式。

应当说明,我们的研究工作曾获得原航空工业部预研课题经费的资助,航空科学基金和国防预研基金的资助。在本书行将完稿之际,谨向先后支持我们研究工作的王公镛、刘才穆、彭艳萍、胡元凯、赵稼祥和周瑞发等先



生和女士表示衷心的感谢!

借此机会,作者向先后参加研究工作的王峰会、孟亮、鄢君辉、赵康、王弘等教授表示由衷的感谢。感谢他们的合作精神,努力学习和钻研精神以及所取得的突出的研究成果。

西安交通大学材料学院邓增杰教授审阅了本书的初稿,提出了许多宝贵的修改意见和建议,并与作者做了多次有益的讨论,在此表示衷心的感谢。

应当注意的是,工业和高科技的发展需要更新型的、高性能的结构材料,以及功能/结构复合型材料。可以说,新结构材料的发展和应用没有止境。新材料的工程应用所需要的断裂准则的研究,也应与新材料的发展相适应地进行,因而也是没有止境的。

人类已进入21世纪。我国的经济建设、科技和教育事业都在快速发展。愿本书的出版,能对我国的经济建设、科技和教育事业的发展有一点贡献。

著 者

2003年8月

目 录

第一章 绪论

1.1 研究失效的目的和意义	1
1.2 研究失效的基本考虑	2
1.3 切口件断裂与强度的研究概况	6
1.4 本书的主要内容	9
1.5 结束语	10

第二章 切口件中裂纹起始与断裂的力学模型

2.1 引言	12
2.2 切口的应力-应变分析	13
2.3 切口件中的裂纹起始准则	21
2.4 切口件的断裂强度表达式	26
2.5 材料切口敏感性的定量评估	27
2.6 切口强度与断裂韧性	29
2.7 切口件的断裂强度图	36
2.8 结束语	40

第三章 钢铁材料的拉伸切口强度与切口敏感性

3.1 引言	42
3.2 切口强度的实验测定与断裂性能的估算	43
3.3 高强度钢的切口强度与切口敏感性	46
3.4 铸铁的切口强度与切口敏感性	51
3.5 钢的断裂韧性	56
3.6 影响钢的切口强度和切口敏感性的因素	64
3.7 结束语	74

第四章 非铁金属材料的拉伸切口强度与切口敏感性

4.1 引言	76
4.2 铝合金的切口强度和切口敏感性	77



4.3	钛合金的切口强度与切口敏感性	87
4.4	镁合金的切口强度与切口敏感性	92
4.5	耐热合金的切口强度与切口敏感性	96
4.6	难熔金属的切口强度与切口敏感性	102
4.7	结束语	106
第五章 铸铁的扭转切口强度与切口敏感性		
5.1	引言	109
5.2	灰铸铁的扭转断裂与扭转切口强度	110
5.3	球墨铸铁的扭转切口强度和切口敏感性	115
5.4	结束语	118
第六章 在单轴应力下陶瓷等脆性材料切口件的断裂与强度		
6.1	引言	119
6.2	陶瓷材料的拉伸切口强度	120
6.3	Al_2O_3 陶瓷材料的弯曲切口强度	125
6.4	脆性材料的扭转切口强度	128
6.5	轴向压缩载荷下陶瓷切口件的断裂与强度	133
6.6	Al_2O_3 陶瓷表观断裂韧性	137
6.7	陶瓷材料切口强度公式的适用性与限制	139
6.8	结束语	140
第七章 陶瓷材料切口件断裂强度的概率分布		
7.1	引言	143
7.2	陶瓷材料弯曲断裂强度的概率分布	144
7.3	陶瓷材料拉伸切口强度的概率分布	147
7.4	陶瓷材料弯曲切口强度的概率分布	157
7.5	陶瓷等脆性材料扭转切口强度的概率分布	162
7.6	陶瓷材料压缩切口强度的概率分布	167
7.7	陶瓷材料拉伸切口强度的归一化及其概率分布	172
7.8	陶瓷材料弯曲切口强度的归一化及其概率分布	179
7.9	陶瓷等脆性材料扭转切口强度的归一化及其概率分布	183
7.10	陶瓷材料压缩切口强度的归一化及其概率分布	187
7.11	结束语	190



第八章 陶瓷材料切口件的带给定存活率的断裂准则

8.1 引言	193
8.2 陶瓷材料切口强度概率分布特征参数的表达式	194
8.3 陶瓷材料拉伸切口强度的概率分布参数表达式的实验验证	197
8.4 陶瓷弯曲强度和弯曲切口强度概率分布参数间的表达式	202
8.5 脆性玻璃扭转强度与扭转切口强度概率分布参数间的表达式	207
8.6 Al_2O_3 陶瓷压缩强度与压缩切口强度概率分布参数间的关系 表达式	210
8.7 陶瓷材料切口强度概率分布的预测	213
8.8 陶瓷材料切口件在拉伸载荷下带存活率的断裂准则的预测	218
8.9 陶瓷材料切口件在弯曲载荷下的带存活率的断裂准则的 预测	225
8.10 陶瓷等脆性材料切口件在扭转载荷下的带存活率的失效 准则	230
8.11 陶瓷材料切口件在压缩载荷下的带存活率失效准则的 预测	233
8.12 结束语	236

第九章 拉-扭复合应力下陶瓷切口件的带存活率的断裂准则

9.1 引言	238
9.2 关于脆性材料拉-扭复合应力下的断裂准则	239
9.3 基于八面体应力的断裂准则	241
9.4 拉-扭复合应力状态下陶瓷等脆性材料切口件的八面体应力 断裂准则	250
9.5 拉-扭复合应力状态下陶瓷等脆性材料带存活率的八面体应力 断裂准则	255
9.6 拉-扭复合应力状态下陶瓷材料的正应力断裂准则	258
9.7 拉-扭复合应力状态下陶瓷等脆性材料切口件的正应力断裂 准则	262
9.8 拉-扭复合应力下陶瓷等脆性材料带存活率的正应力断裂	