

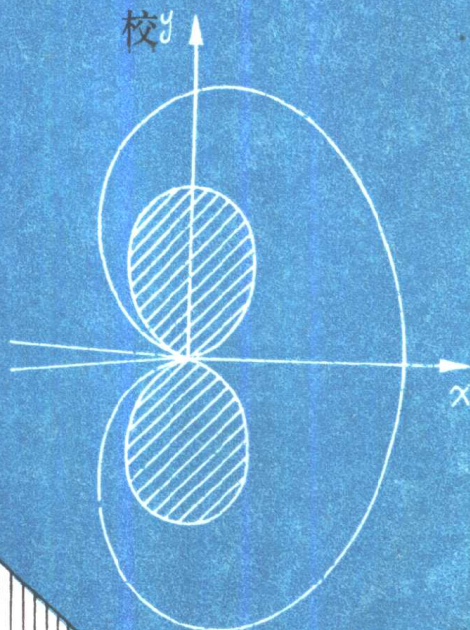
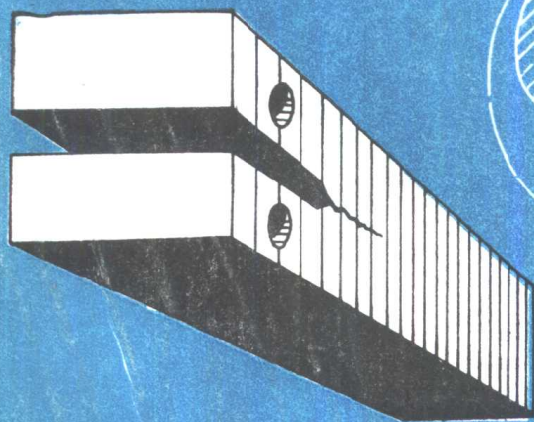
断裂力学

H. L. Ewalds R. J. H. Wanhill 著

朱永昌 浦素云 等译

朱永昌

校



北京航空航天大学出版社

封面设计：朱志强

0346.1

10.7



ISBN 7-81012-071-9/TB · 014

定价：2.90 元

内 容 简 介

本书主要介绍断裂力学的基本概念、原理、测试技术及材料研究和工程应用中的基本问题。内容包括：线弹性断裂力学原理及其测试技术、弹塑性断裂力学原理及其测试技术、疲劳裂纹扩展、持久载荷断裂、动态裂纹扩展和止裂概念、材料的断裂机理及其断裂力学。

本书可作为高等学校有关专业的研究生和大学生的教材，也可供有关从事结构分析和断裂力学研究的工程设计人员、工程应用的工程技术人员、材料科学研究和测试人员、质量检验和结构安全控制人员参考。

断 裂 力 学

DUANLIE LIXUE

朱永昌 浦素云 译

责任编辑 曾昭奇

北京航空航天大学出版社出版

新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经售

朝阳区科普印刷厂印装

850×1168 1/32 印张：13 字数：349千字

1988年11月第一版 1988年11月第一次印刷

印数：3000册 定价：2.90元

ISBN 7-81012-071-9/TB·014

译者序

H.L.Ewalds 和 R.J.H.Wanhill 合著的《断裂力学》出版于1984年。这是一本高等学校的新教材，又是一本论述断裂力学概念、原理、测试技术、断裂判据、材料断裂机理的水平较高的好教材。为此得到好评，例如美国麻省理工学院将原著作为研究生和高年级大学生的教材。

本书全面系统完整地论述了线弹性断裂力学、弹塑性断裂力学、裂纹扩展断裂力学、疲劳裂纹扩展、持久载荷断裂、动态裂纹扩展和止裂等基本概念和原理，而且具体介绍了实验方法、测试技术和步骤。此外，本书还把断裂力学和材料科学联系起来，精练地阐述了实际材料的断裂机理和断裂力学。并且详细介绍了目前世界上断裂力学和材料科学领域内感兴趣和受重视的各种典型断裂机理，例如微空洞聚结的延性穿晶断裂、解理脆性穿晶断裂、疲劳穿晶断裂、沿晶断裂、应力腐蚀断裂、内氢脆和外氢脆断裂、液体金属脆性断裂等等。因此，内容新颖先进、系统完整、精练严密。

本书介绍的基本概念清楚准确、由浅入深、简明扼要、前后连贯、层次清晰、来龙去脉分析透彻。

本书著者在论述断裂力学概念过程中重视应用基本概念回答下列重要的工程断裂问题，例如：（1）剩余强度；（2）最大容限的裂纹尺寸；（3）裂纹孕育期和扩展期；（4）结构的使用寿命；（5）对于结构中的裂纹应该间隔多长时间检查一次。书中还推导和列出了许多著名的广泛应用的 K 、 K_{Ic} 、 K_{ID} 、 J_I 、 J_{Ic} 、 r_y 、 δ_t 、 T_{mat} 、 T_{app} ……等表达式。这就为工程构件的安全设计、制订合理的验收标准、选材原则和断裂事故分析等提供了新的理论

基础，在工程上很有指导意义和实用价值。

由于著者长期从事断裂力学的教学和研究，积累了丰富的经验，书中列举了许多航空航天工业、舰艇造船工业、蒸汽锅炉、压力容器、铁道机车、海洋平台、核反应堆压力容器、各种油、气管道、桥梁、电力工业、化学工业、机械工业中的实例、图表、数据和参考文献。所以，这本书作为上述各工业部门、设计部门和研究部门的科技人员的参考书，是有意义的。

考虑到这是一本好书，受北京航空航天大学出版社的委托，我们将《断裂力学》原著全文译出，希望能对国内从事这方面工作的同志有所帮助。由于我们的水平有限，译文中可能有错误和欠妥之处，欢迎读者批评指正，不胜感谢。

本书各章译者为：第一、二、三章朱永昌，第四、五章王宏，第六、七、八、九章浦素云，第十、十一、十二章朱志强，第十三章、索引刘臣。朱永昌教授对全书作了统一审校。

译 者

1987年12月

序 言

我们在台尔富特工业大学 (Delft University of Technology) 教《断裂力学》课程时就已发现,虽然有了几本优秀教材,但是它们的内容仅仅介绍20世纪70年代初期以前的断裂力学发展情况,没有系统地论述弹塑性断裂力学的概念。而且对裂纹扩展的断裂力学特性的描述,尤其是对持久载荷断裂和失稳动态裂纹扩展的描述需要更新。

在本教材中,我们致力于论述线弹性和弹塑性断裂力学的基本概念,而且专门有三章研究裂纹扩展(包括疲劳裂纹扩展、持久载荷断裂和动态裂纹扩展)的断裂力学特征。

此外还有两章阐述断裂机理和实际材料的性能对裂纹扩展断裂力学特性的影响。读者将会发现,最后的研究课题述及的某些内容已超出本课程的范畴。这是因为,据我们知道还没有任何参考书系统地介绍过这些内容。教师们的结论是必须将这些内容编写在本书中,我们也觉得应该如此。

本教材主要供工科大学生使用。我们希望本书对从事工程应用的工程师也是有用的,因为本教材为几种新的设计方法、选材的判据和焊接缺陷验收准则提供了背景材料。

在编写手稿过程中得到许多同仁的帮助。我们对J. Zuidema表示特别的谢意,在线弹性和弹塑性断裂力学能量平衡法的统一分析方面,他做出了重要贡献;在编写持久载荷断裂一章时得到R. A. H. Edwards的帮助;A. C. F. Hagedorn绘制了前七章的图;VSSD的全体人员(我们的出版者)尽了很大努力而且给予很好的合作。

最后,“国家宇航实验室”(National Aerospace Labor-

atory, NLR) 及“锅炉和压力容器管理局”(Boiler and Pressure Vessel Authority) 为我们完成此书提供了条件, 对此表示衷心感谢。

锅炉和压力容器管理局

H · L · 埃沃尔兹

国家宇航实验室

R · J · H · 汪希尔

1983年9月

目 录

第一部分 绪 论

第一章 综述

§ 1.1	有关本课程的简况	(3)
§ 1.2	历史回顾	(3)
§ 1.3	断裂力学的重要性	(6)
§ 1.4	格里菲思 (Griffith) 能量平衡方法	(9)
§ 1.5	欧文 (Irwin) 对格里菲思理论的修正	(11)
§ 1.6	应力强度方法	(12)
§ 1.7	裂纹尖端的可塑性	(14)
§ 1.8	断裂韧性	(16)
§ 1.9	亚临界裂纹扩展	(17)
§ 1.10	材料行为的影响	(21)

第二部分 线弹性断裂力学

第二章 弹性应力场方法

§ 2.1	前言	(25)
§ 2.2	I型弹性应力场方程式的推导	(26)
§ 2.3	实用的表达式	(31)
§ 2.4	有限试样宽度	(36)
§ 2.5	实际应用的两个重要的辅助解	(40)
§ 2.6	应力强度因子的迭加	(45)
§ 2.7	确定应力强度因子的一些要点	(47)
§ 2.8	著名应力强度因子解的简编	(49)
参考文献		(57)

第三章 裂纹尖端的可塑性

§ 3.1	前言	(58)
§ 3.2	欧文的塑性区尺寸	(59)
§ 3.3	达格戴尔 (Dugdale) 的塑性区尺寸	(63)
§ 3.4	塑性区形状的一次近似式	(67)
§ 3.5	裂纹尖端区内的应力状态	(69)
§ 3.6	应力状态对断裂行为的影响	(74)
§ 3.7	有关确定塑性区尺寸和形状的一些附加注解 ..	(77)
	参考文献	(80)

第四章 能量平衡方法

§ 4.1	前言	(81)
§ 4.2	格里菲思能量平衡方法	(81)
§ 4.3	实际应用的关系式	(87)
§ 4.4	柔度确定的应力强度因子	(90)
§ 4.5	较大延性材料的能量平衡	(93)
§ 4.6	慢稳定裂纹扩展和R-曲线概念	(95)
§ 4.7	上升R-曲线的可能解释	(98)
§ 4.8	裂纹扩展阻力的一种完整的阐述	(100)
	参考文献	(106)

第五章 线弹性断裂力学的测试

§ 5.1	前言	(107)
§ 5.2	平面应变断裂韧性 (K_{Ic}) 的测试	(108)
§ 5.3	平面应力断裂韧性 (K_c) 的测试: 费德森 (Feddersen) 方法	(117)
§ 5.4	R-曲线的测定	(123)
§ 5.5	计算屈服强度和试样厚度对断裂韧性影响的 工程近似式: 安德森 (Anderson) 模型	(129)
§ 5.6	K_{Ic} 、 K_c 和 R-曲线数据的实际应用	(131)

参考文献.....	(134)
-----------	-------

第三部分 弹塑性断裂力学

第六章 弹塑性断裂力学的一些概念

§ 6.1 前言	(137)
§ 6.2 弹塑性断裂力学的发展	(140)
§ 6.3 J 积分	(140)
§ 6.4 J 积分概念的注解	(151)
§ 6.5 裂纹张开位移 (COD) 方法	(152)
§ 6.6 COD 设计曲线	(154)
§ 6.7 COD 方法的进一步注解	(160)
参考文献	(163)

第七章 弹塑性断裂力学的测试

§ 7.1 前言	(164)
§ 7.2 早期的 J_{Ic} 测试方法	(165)
§ 7.3 J 积分的替代方法及其表达式	(166)
§ 7.4 标准 J_{Ic} 测试	(172)
§ 7.5 标准 COD 测试	(179)
参考文献	(185)

第八章 J 积分和 COD 的其它概念

§ 8.1 前言	(186)
§ 8.2 J 和 COD 之间的关系	(186)
§ 8.3 J 和稳定裂纹扩展: 撕裂模量概念	(189)
§ 8.4 撕裂模量概念的有效性和适用性	(197)
参考文献	(202)

第四部分 裂纹扩展的断裂力学概念

第九章 疲劳裂纹扩展

§ 9.1 前言	(205)
----------------	-------

§ 9.2	用应力强度因子描述疲劳裂纹扩展	(206)
§ 9.3	应力比和裂纹尖端塑性的效应: 裂纹闭合	(210)
§ 9.4	环境的影响	(216)
§ 9.5	在恒幅载荷下疲劳裂纹扩展的预测	(218)
§ 9.6	在变幅载荷下的疲劳裂纹扩展	(219)
§ 9.7	在变幅载荷下的疲劳裂纹扩展的预测	(224)
§ 9.8	缺口的疲劳裂纹扩展: 短裂纹问题	(229)
	参考文献	(233)

第十章 持久载荷断裂

§ 10.1	前言	(234)
§ 10.2	破坏所需时间 (TTF) 的试验	(235)
§ 10.3	裂纹扩展速率试验	(238)
§ 10.4	实验问题	(242)
§ 10.5	预测构件破坏的方法	(244)
§ 10.6	持久载荷断裂试验的实际意义	(246)
	参考文献	(250)

第十一章 动态裂纹扩展和止裂

§ 11.1	前言	(251)
§ 11.2	动态裂纹扩展的基本问题	(252)
§ 11.3	裂纹止裂的基本原理	(256)
§ 11.4	快速断裂和裂纹止裂的断裂力学分析	(261)
§ 11.5	动态断裂韧性 (K_{ID}) 的测定	(267)
§ 11.6	动态应力强度因子的测定	(270)
	参考文献	(274)

第五部分 实际材料的断裂机理和断裂力学

第十二章 金属材料的断裂机理

§ 12.1	前言	(277)
§ 12.2	断口的研究	(278)

§ 12.3	滑移、塑性变形和位错.....	(284)
§ 12.4	微空洞聚结产生的延性穿晶断裂.....	(287)
§ 12.5	脆性穿晶断裂 (解理)	(291)
§ 12.6	疲劳的穿晶断裂.....	(295)
§ 12.7	沿晶断裂.....	(301)
§ 12.8	几种持久载荷断裂.....	(304)
参考文献.....		(313)
第十三章 材料性能对断裂力学性能的影响		
§ 13.1	前言.....	(314)
§ 13.2	裂纹尖端几何形状的影响.....	(315)
§ 13.3	断裂途径和显微组织的影响.....	(320)
§ 13.4	断裂力学和断裂机理.....	(327)
参考文献.....		(362)
索 引		(365)

第一部分 绪 论

第一章 综 述

§ 1.1 有关本课程的简况

本课程是为工程用断裂力学基础而开设的。为了编写本课程的内容，我们查阅了几本教科书和许多研究文章。其中下列书籍尤其是有教益的，因此推荐它们为本课程的辅助读物：

- D·布洛克，“基础工程断裂力学”，Martinvs Nijhoff, (1982) The Hague.
- J·F·克纳脱，“断裂力学基本原理”，Butterworths, (1973) 伦敦。
- “断裂力学导论”，机械工程学院，(1978) 伦敦。

正如本教材的目录表中已经指出，本书共分为五个部分。第一部分，即本章，是绪论。第二部分，是介绍线弹性断裂力学 (LEFM) 的内容。第三部分，是介绍较新的弹塑性断裂力学 (EPFM)。第四部分讨论断裂力学概念对裂纹行为的适用性：即在交变载荷（疲劳）或持久载荷作用下的亚临界稳定裂纹扩展，以及发生失稳以后的动态裂纹扩展。最后，在第五部分中，论述实际材料的断裂机理以及材料行为对断裂力学性能的影响。

§ 1.2 历史回顾

承载结构的强度破坏可分为两类：一类是以屈服为主的破坏；另一类是以断裂为主的破坏。缺陷对两类破坏都是重要的，但是对于断裂起头等重要作用的那些缺陷与影响屈服和抗塑变性

能的那些缺陷非常不同。在图1.1中说明了这些差异。

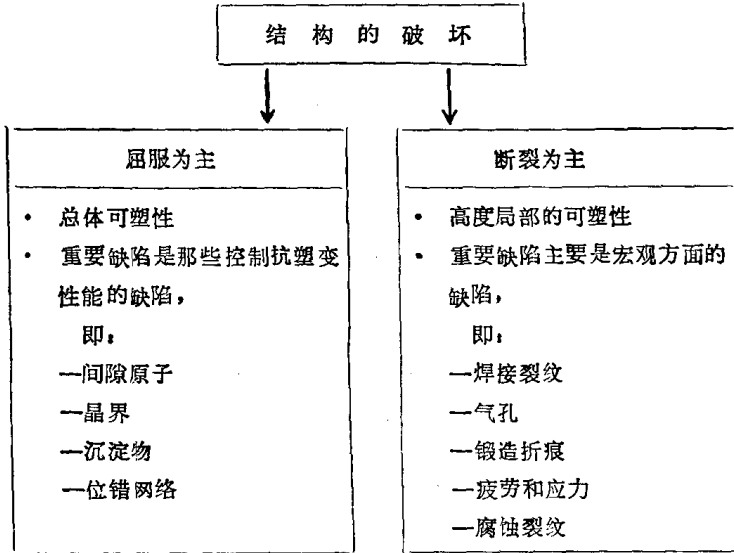


图1.1 结构破坏的类型

对于以屈服为主的破坏，重要的缺陷主要表现在：它们倾向于歪扭和切断晶体晶格平面，因而妨碍位错滑动以及提供塑性变形的阻力，这对于高强度金属来说是必需的。这样缺陷的实例是间隙原子、不同尺寸的置换原子、晶界、共格沉淀物和位错网络。较大的缺陷（如：夹杂物、孔隙、表面划伤和小裂纹）可能影响承受载荷的有效净截面，然而在别的方面对屈服阻力（抗屈服性能）只有小的影响。

对于以断裂为主的破坏（即在净截面上，总体屈服之前的断裂），起首要作用的缺陷，它的尺寸基本上是宏观的，因为没有包括总体可塑性，而只是涉及与缺陷有关的局部应力-应变场。没有直接述及到能够控制塑性变形阻力的、与晶格有关的微小缺陷。从塑性变形阻力方面而言（塑性变形阻力与材料的断裂敏感性有关），它们起着重要作用。

断裂力学是本课程的研究对象，它研究的内容几乎完全是以

断裂为主的破坏。1920年，格里菲思 (Griffith) 首先成功地分析了以断裂为主的破坏问题，当时他研究的是玻璃中脆性裂纹的扩展，并提出一个现在众所周知的概念。这个概念指出，如果体系的总能量降低，则体系中原有的裂纹将扩展。而且他设想，在一个受应力的物体内部，当裂纹扩展时，弹性应变能降低，降低的能量被产生新裂纹表面需要的能量抵消，所以在两者之间有一个简单的能量平衡。他的理论可用于估算脆性固体的理论强度，而且也能给出断裂强度和缺陷尺寸之间的正确关系。

1944年，泽纳 (Zener) 和霍洛蒙 (Hollomon) 首先把格里菲思概念用于金属材料的脆性断裂。不久，欧文 (Irwin) 指出，格里菲思型的能量平衡必须是在 (1) 储存的应变能和 (2) 表面能加塑性变形中做的功之间的能量平衡。欧文也认识到，对于延性大的材料，与塑性变形中所做的功相比较，产生新裂纹表面所需要的能量一般是不大的。而且他把材料性能 G 定义为在裂扩展过程中增加单位裂纹长度和单位厚度所吸收的总能量。 G 称为“能量释放率”或“裂纹驱动力”。

20世纪50年代中期，欧文做出了另一个贡献。他指出，能量方法相当于应力强度 (K) 方法。由此可知，当裂纹尖端前沿达到临界应力分布时，就会发生断裂。所以，控制断裂的材料性能称为临界应力强度 (K_c) 或者称为临界能量值 (G_c)。

G 和 K 之间等效性的证实对线弹性断裂力学 (LEFM) 学科的发展提供了基础。这是因为靠近裂纹尖端周围应力分布的形式总是相同的。因此，对适当形状的试样加载，做测定 K_c 值的试验，有可能确定在已知条件下一个真实结构究竟能容限什么样的裂纹。而且，在断裂可能发生的情况下，能够对材料的效用进行比较。并且还发现，在某种程度上，能够以应力强度方法的试验为基础预测结构对于亚临界裂纹扩展的敏感性，如疲劳裂纹扩展和应力腐蚀裂纹扩展的敏感性。

弹塑性断裂力学 (EPFM) 的起源可追溯到线弹性断裂力学