

“十五”国家重点图书

断裂动力学

原理与应用

范天佑 著



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

“十五”国家重点图书

断裂动力学

原理与应用

范天佑 著

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

断裂动力学是一门新学科,研究惯性效应起重要作用情形下固体中裂纹传播的规律。本书由两大部分组成,第一部分讨论它的原理,包括裂纹动态起始扩展和快速传播以及可能的止裂问题,裂纹对波的散射,也介绍了非线性动态裂纹问题、普遍的以及耦合温度场的三维动态裂纹问题、新型材料的动态断裂研究、数值方法和实验方法的原理;第二部分为上述原理的应用,包括动态应力强度因子汇编,材料动态断裂韧性的测试以及在科学与工程中应用实例的讨论。有关章节的附录中给出了某些较复杂数学计算的补充细节。

本书可供高年级大学生、研究生、教学、科研人员和有关工程技术人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

断裂动力学:原理与应用/范天佑著. —北京:北京理工大学出版社,2006.1

“十五”国家重点图书

ISBN 7-5640-0483-5

I. 断… II. 范… III. 断裂力学:动力学 IV. O346.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 111344 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

电子邮箱 / chiefeditor@bitpress.com.cn

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京圣瑞伦印刷厂

开 本 / 850 毫米×1168 毫米 1/32

印 张 / 22.125

字 数 / 552 千字

版 次 / 2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月第 1 次印刷

印 数 / 1~2000 册

定 价 / 50.00 元

责任校对 / 张 宏

责任印制 / 李绍英

图书出现印装质量问题,本社负责调换

新版前言

同断裂理论的其他分支相比,断裂动力学可以说是最不成熟的一个分支。《断裂动力学引论》在1990年出版,著者认为那只是一个粗浅的工作,但由于它在当时属于新学科,出版后较受欢迎,先后荣获两次国家和部门奖励。为了满足读者尤其是在实际生产部门工作的读者的需求,著者编写了一本《应用断裂动力学基础》的薄书,于1993年出版,作为《断裂动力学引论》的一种补充。考虑到以上两本书出版均已超过十年,以及近年来在国内外的工作,尤其是三维问题和新型材料动态断裂研究上的进展,对它们进行修改、补充,出一个新版本,以便更好地为读者服务,是有必要的。

《断裂动力学引论》写作的初衷就是为广大读者服务,以便尽快在我国传播与普及这门新学科。当然也注意到博采众长,对不同学派、学者的贡献都尽可能地给予介绍。不过在它的撰写过程中未曾见到国外类似的专著出版。只是在1990年此书出版后,著者去日本东京大学访问时才见到 Freund 的《动态断裂力学》(1990年出版),1992年去德国 Kaiserslautern 大学访问时才见到 Parton 等的同名著作的英译本(1989年出版,原文为俄文)。由于著者是在《断裂动力学引论》出版之后才见到它们的,自然在写作该书时不可能知道它们的任何内容,更无可能参考它们的内容或表述方法。读者可以比较拙著和以上两本外国作者的著作。显然由于著者们所在国家不同,写作背景不同,拙著同 Freund 与 Parton 等的书存在不少区别,这是很自然的事。现在著者已经拜读过以上两本外国著作,对人家的优点和长处,应该学习与吸取。不过我仍然坚持初衷,尽可能地写得通俗易懂,尽量讨论更多中国读者感兴趣的内容,为广大中国读者服务。在原书中就曾指出,快速运动(或传

播)裂纹问题,计算烦琐冗长,有用的结果又不多,所以它们不是本书讨论的重点,此次新版本中虽然作了一定的补充,但仍坚持上述原则,不去过多涉及。相反,我们加强了对深层次物理现象的讨论和应用问题的分析计算,尤其是对我国工程实践和地震学中出现的断裂动力学问题,给出了较详细的讨论。近10多年来新的实验结果向快速裂纹问题的连续介质模型提出了严峻的挑战,进一步证明了本书这种处理方式的合理性。

考虑到不同读者的需要,这次新版,把著者的前述两本书合并成一本,更名为《断裂动力学:原理与应用》,第一篇为原理部分,大体由《断裂动力学引论》的内容组成,但各章都作了不同程度的补充,同时删掉了在另一本拙著《断裂理论基础》中已经详细讨论过的数学方法,并且把一些同应用有关的内容移至第二篇,此外新写了第八、九两章;第二篇为应用部分,大体上由《应用断裂动力学基础》的内容构成,但补充了相当多的应用实例与分析。由于在介绍各个应用实例时,希望内容比较完整并且保持相对的独立性,因而同第一篇的部分内容以及第二篇的其他实例之间存在少许重复。

著者感谢北京理工大学原领导苏谦益、陈信两位同志的支持与关怀、德国洪堡基金会(Alexander von Humboldt Stiftung)1981—1983,1986,1993年的多次资助、国家自然科学基金委从1986年起的多次资助(包括基金委和中国工程物理研究院的联合资助)、德国Kaiserslautern大学Prof. H. G. Hahn和Bochum大学Prof. J. F. Kalthoff与著者进行的有益的讨论、北京交通大学高玉臣院士赠送的论文、冶金部钢铁研究总院物理研究室汪德根高级工程师提供的一些研究报告和在实验上的帮助以及本书原版责任编辑郑锡铨教授和曾在我组学习的郭瑞平、孙竹凤、李显方、吴祥法等同志的帮助与贡献。原浙江大学研究生林国裕同志起草了第一篇§7.1,第二章附录I为曾在我组学习的研究生马静娴同志所写,原机电部重庆第五九研究所李祖强同志参加第二篇第三章的写作。

由于著者水平和专业知识所限,书中不可避免地存在缺点与错误,尤其对工程应用问题和地震学中问题的讨论中的缺点与错误会更多,希望广大读者和各方面专家多多批评指正!

范天佑

2005 年 2 月

目 录

第一篇 断裂动力学的原理

绪论	(3)
§ 0.1 断裂静力学的基本概念	(5)
§ 0.2 断裂动力学的基本概念	(10)
参考文献	(17)
第一章 力学的预备知识	(20)
§ 1.1 若干弹性动力学体系的基本方程	(20)
§ 1.2 普遍三维弹性动力学基本方程和几点讨论	(32)
参考文献	(36)
第二章 裂纹动态起始扩展问题	(38)
§ 2.1 某些概念和实验结果	(39)
§ 2.2 冲击载荷作用下无限平面中的有限尺寸裂纹	(44)
§ 2.3 更一般的瞬态载荷作用下的无限平面中的有限 尺寸裂纹	(60)
§ 2.4 无限长条中的裂纹对冲击载荷的响应	(63)
§ 2.5 冲击载荷作用下的弯曲板的裂纹问题	(68)
§ 2.6 圆盘状裂纹在轴对称冲击载荷作用下的解	(77)
§ 2.7 有限尺寸裂纹体的动态应力强度因子	(90)
附录 I Fredholm 积分方程的数值解	(94)
附录 II 动态应力强度因子表达式的推导	(97)
附录 III 半无限长裂纹问题的解 —— Wiener - Hopf 方法	(101)
参考文献	(106)

第三章 裂纹的快速传播与止裂问题	(108)
§ 3.1 运动裂纹问题的困难和物理上的考虑	(109)
§ 3.2 渐近展开·裂纹顶端的位移场与应力场	(116)
§ 3.3 关于渐近应力场的进一步讨论	(123)
§ 3.4 裂纹运动速度对动态断裂韧性的影响	(127)
§ 3.5 运动裂纹与传播裂纹问题的某些分析解	(130)
§ 3.6 止裂的概念与原理	(146)
§ 3.7 双悬臂梁(DCB)试样的裂纹传播与止裂的研究	(156)
§ 3.8 双悬臂试样的振动模型	(164)
§ 3.9 快速传播问题的再讨论	(167)
附录 I 求解运动裂纹与快速传播裂纹问题的 复变函数方法	(169)
附录 II 动力相似原理方法	(172)
附录 III 泛函不变解方法	(175)
附录 IV Baker 解	(179)
参考文献	(181)
第四章 裂纹对弹性波的散射	(188)
§ 4.1 弹性波基本概念	(188)
§ 4.2 P 波与 SV 波与裂纹的相互作用	(191)
§ 4.3 SH 波与裂纹的相互作用	(206)
§ 4.4 其他类型的裂纹对波的响应问题	(210)
附录 半无限长裂纹对弹性波的散射	(212)
参考文献	(222)
第五章 材料非线性的动态裂纹问题	(226)
§ 5.1 动态 J 积分	(227)
§ 5.2 基于形变理论的稳定裂纹的动态渐近场	(231)
§ 5.3 运动 Dugdale 模型	(235)
§ 5.4 I 型与 II 型运动 Dugdale 模型/运动 BCS 位错群	(243)
§ 5.5 狭长体中快速传播裂纹的 Dugdale 模型	(248)
§ 5.6 弹性-理想塑性材料中扩展裂纹的	

渐近解(平面应变情形)	(254)
§ 5.7 弹性-理想塑性材料中扩展裂纹的 渐近解(平面应力情形)	(263)
§ 5.8 幂硬化弹塑性材料中扩展裂纹的渐近解	(274)
§ 5.9 黏塑性材料中高应变率裂纹扩展	(281)
§ 5.10 高应变率的黏塑性材料中传播裂纹的其他解	(291)
§ 5.11 非线性断裂动力学的流体弹塑性模型分析 和某些结果	(295)
参考文献	(308)
第六章 断裂动力学的数值分析方法	(313)
§ 6.1 有限元法	(314)
§ 6.2 传播裂纹的有限元分析	(323)
§ 6.3 有限差分法	(327)
§ 6.4 边界积分方程—边界元法	(347)
§ 6.5 三维动态裂纹有限元法	(359)
参考文献	(362)
第七章 断裂动力学的实验研究	(367)
§ 7.1 时间对材料性能和实验装置的效应	(368)
§ 7.2 焦散(斑)法的物理与数学原理	(369)
§ 7.3 Manogg 阴影形式理论——I 型稳定裂纹问题	(373)
§ 7.4 动态加载下的稳定裂纹问题	(380)
§ 7.5 快速传播裂纹问题	(380)
§ 7.6 实验技术与测试原理	(383)
§ 7.7 应用	(388)
§ 7.8 结论	(396)
§ 7.9 一个可能的重要问题	(398)
参考文献	(399)
第八章 普遍的以及耦合温度场的三维动态裂纹问题	(406)
§ 8.1 三维弹性动力学问题解的积分表示	(406)
§ 8.2 具有位移间断面的半空间对称问题	(407)

§ 8.3	二维对偶积分方程和受冲击三维椭圆盘状裂纹问题的分析解	(409)
§ 8.4	卷积定理、第一类 Fredholm 积分方程和受冲击椭圆盘状裂纹问题的分析解	(416)
§ 8.5	受冲击三维椭圆盘状裂纹的有限元分析	(418)
§ 8.6	半无限大物体中半椭圆盘状表面裂纹受冲击载荷作用	(419)
§ 8.7	有限尺寸物体中半椭圆盘状表面裂纹受冲击载荷作用	(422)
§ 8.8	温度场耦合下的三维动态裂纹问题	(424)
	参考文献	(428)
第九章	新型材料的断裂动力学探索	(430)
§ 9.1	一维六方准晶材料动态断裂分析	(430)
§ 9.2	二维十二次对称准晶的动态裂纹问题	(435)
§ 9.3	多胞材料及其连续本构模型	(438)
§ 9.4	开口多胞材料中的运动裂纹	(442)
§ 9.5	压电材料与普通弹性材料界面上的 I 型裂纹对弹性波的散射	(446)
§ 9.6	两种不同压电材料界面上的 I 型运动裂纹问题	(450)
§ 9.7	结论与讨论	(454)
	参考文献	(454)

第二篇 断裂动力学的应用

第一章	引论	(459)
	参考文献	(465)
第二章	动态应力强度因子汇编	(466)
§ 2.1	冲击载荷作用下的稳定裂纹	(466)
	参考文献	(521)
§ 2.2	弹性波作用下的裂纹	(528)

参考文献	(544)
§ 2.3 运动裂纹和传播裂纹	(548)
参考文献	(566)
第三章 动态断裂韧性的测试	(570)
§ 3.1 动态断裂韧性的意义	(571)
参考文献	(575)
§ 3.2 金属材料在冲击载荷作用下的断裂韧性的 测试方法	(575)
参考文献	(594)
§ 3.3 金属材料裂纹快速扩展断裂韧性的测试方法	(595)
参考文献	(608)
第四章 断裂动力学的应用及可能的应用	(610)
§ 4.1 动态断裂分析的主要步骤	(610)
§ 4.2 有关材料动态断裂韧性的测试及结果	(611)
§ 4.3 机械工程和结构工程中的动态断裂事故的分析	(621)
§ 4.4 天然气输送管道中传播裂纹的止裂研究	(637)
§ 4.5 与核结构完整性有关的裂纹止裂问题研究	(646)
§ 4.6 地震断层的不稳定性和地震过程中的低应力降 的分析	(652)
§ 4.7 唐山大地震断裂动力学分析的设想	(664)
§ 4.8 断层间相互作用近似分析探索	(673)
§ 4.9 早炸的机理及相应的抑制措施的探讨	(689)
§ 4.10 讨论与结论	(691)
参考文献	(693)

第一篇

断裂动力学的原理

绪 论

断裂动力学的最早的经典性文献要追溯到英国著名物理学家 N·F·Mott 1948 年发表的论文^[1]。从那时算起,断裂动力学虽然已有半个世纪的历史,然而它真正成为一门科学,只是近 20 多年的事。它的一些最重要的基本概念在 20 世纪 70 年代末才逐渐建立起来,比较系统的分析方法、相对成熟的实验研究方法建立得都较晚。这些情况表明,断裂动力学是断裂力学的一个新的分支。一方面,它还不够成熟,甚至还存在一些模糊不清、逻辑上混乱的地方,应用还不够广泛,我们不能夸大它的作用。另一方面也应该看到,它同许多自然现象与工程实际问题相联系,有着重要的理论与实践上的意义,是一个需要开拓和大有发展前途的领域,应该给予适当的重视。20 世纪七八十年代,在一些科学与技术发达的国家断裂动力学发展迅速,这从一个侧面反映了它受到的重视。但在那之后,由于面临许多困难,发展减缓了。

断裂动力学也被称为动态断裂力学,它们的英文名称分别为 Fracture Dynamics 与 Dynamic Fracture Mechanics。断裂动力学是研究惯性效应不能忽略的那些断裂力学问题。这些问题可以划分为两大类:裂纹稳定而外力随时间迅速变化,例如振动、冲击、波动(爆炸波、地震波等);外力是恒定的而裂纹发生快速传播。对于这两类问题,显然在运动方程中是不能略去惯性效应的。在第一类问题中,通常研究裂纹扩展的起始,称为裂纹动态起始问题,对于第二类问题,通常研究裂纹的传播,称为传播裂纹问题或运动裂纹问题。运动裂纹中止了其运动,这就是所谓止裂,这一现象作为裂纹运动过程的一个特殊阶段,近来已不再把它作为一个单独的问题而是作为传播问题的一部分统一处理,这样比较符合逻辑。在下

面的叙述中,我们将这两类问题严格地分开进行讨论。

本书的绝大部分内容是讨论线性弹性小变形动力学系统的裂纹问题,其基本方程是线性波动方程(或方程组)。

裂纹动态起始问题的数学处理就是求解波动方程(或方程组,而在和温度场相耦合时,则含热传导方程)的初值-混合边值问题,同断裂静力学的裂纹起始问题相比,计算要复杂得多。

裂纹传播-止裂问题,由于边界的一部分——裂纹在运动,一般说来裂纹的运动规律事先是不知道的,它依赖于基本方程的解,而这种解又必须依靠边界条件才能确定,所以即使这一问题的基本方程是线性的,它却成了一个高度非线性的问题。这种问题便是数学物理中的所谓“运动边界问题”。在数学理论上,只对抛物型方程最简单的运动边界问题(即所谓 Stefan 问题)有某些研究,而对断裂动力学中遇到的二阶双曲型方程(或方程组)的运动边界问题尚缺乏研究。因此在早期的断裂动力学文献中,研究者对裂纹的运动提出了种种简化假定,以便能够进行数学分析。这样做是迫不得已的,虽然也已得到了一些积极的结果,然而这些假定又往往使问题失去实际意义。近来研究者多用数值分析方法研究这类问题,常用的方法是有限差分法与有限元法,对新出现的未知量——运动边界,用动态断裂判据去确定。假定动态断裂判据 $K_{ID} = K_{ID}(\dot{a})$ 为已知,借以确定裂纹运动规律 $a = a(t)$ 和止裂点,估计结构的安全性,这是一类问题;相反,假定了裂纹的运动规律 $a = a(t)$,用以确定动态断裂判据中的某些参量,例如 K_{ID} 值,即推断材料的性质,是另一类问题。近来若干实验揭示,裂纹传播问题存在严重困难。

与断裂静力学相比,断裂动力学的问题不仅在数学处理上困难得多,在物理上也复杂得多。有些物理现象如得不到正确认识,数学分析往往会导致错误的结果。物理上的复杂性也使实验研究工作变得困难。例如要测定材料的动态断裂性能,就要测出时间对这一性能的影响,但在测量过程中时间效应对力学装置或电学装置的状态也是有影响的。事实上,这后一影响比时间对材料本身的

影响还要大。如果不能对这两种不同的效应进行正确的处理,就很可能导致错误的测量结果。

为了后面讨论的方便,在绪论部分,我们对有关概念作适当的介绍,并且为了同静态断裂力学(断裂静力学)相比较,在 § 0.1 里简单回顾一下有关的基本知识。

§ 0.1 断裂静力学的基本概念

1. 材料的脆性、韧性和断裂现象

在材料力学中通常以光滑试样的拉伸试验的结果把固体材料划分为脆性的与韧性的两种。前者直到拉断前,不发生塑性变形或仅有很微小的塑性变形。相反,后者在拉断前要发生可观的塑性变形。按上面的划分法,玻璃、陶瓷、石材和水泥等非金属材料以及铸铁等部分金属材料属于脆性材料,而为数众多的金属与合金为韧性材料。

一种材料究竟是脆性材料还是韧性材料,并不是绝对的,这不仅与材质有关,还与外界条件有关(这主要是指温度、应力状态和加载速率)。在不同的外界条件下,同一种材料既可能呈现脆性材料的性质,也可能呈现的是韧性材料的性质。在外部条件中还有一个因素,就是尺寸效应,后面将会讨论。

一般来说,脆性材料对缺陷很敏感,韧性材料对缺陷敏感的程度低一些。但如果温度较低、处于三向拉伸应力状态下以及加载速率较高,韧性材料对缺陷也会敏感,也会发生低应力的脆性破坏。20 世纪 50 年代后期断裂力学的诞生,同这一问题的大量出现有关。

2. 裂纹与断裂

任何材料内部都是包含某些缺陷的。只是由于材质的不同,有的材料对缺陷敏感,有的不敏感。即使是对缺陷不敏感的材料,在某些外部条件的作用下,也会变得对缺陷敏感,若不采取有效措施,缺陷会迅速扩展,导致灾难性断裂事故。从惨重的教训中,人们认识到了缺陷是萌发断裂的缘由。在断裂力学中人们把缺陷理想化为裂纹,其顶端曲率半径等于零。采取这一理想化模型,是为了数学处理简单。

为了对断裂现象作出定量的估计,把材料或结构物当作具有初始裂纹的弹性体或弹塑性体,从弹性力学方程或弹塑性力学方程出发,把裂纹作为一种边界条件,侧重考察裂纹顶端的应力场、应变场和位移场,设法建立这些场与控制断裂的物理参数的关系。

3. 裂纹顶端应力场的奇异性与应力强度因子

由断裂静力学知道,对于平面问题(图 0.1-1),在裂纹顶端附近,应力分量

$$\sigma_{yy}(x,0) \propto r^{-1/2}, \quad r \rightarrow 0 \quad (0.1-1)$$

这种现象被称为在裂纹顶端区域应力场具有 $r^{-1/2}$ 阶的奇异性。

由式(0.1-1)可以得到

$$r^{1/2}\sigma_{yy}(x,0) = \text{常数}, \quad r \rightarrow 0 \quad (0.1-2)$$

式(0.1-2)中右端的常数,代表了应力场 $r^{-1/2}$ 阶的奇异性强弱的程度,因而被称为应力场奇异性强度因子,简称为应力强度因子,记为 K_I^S 。

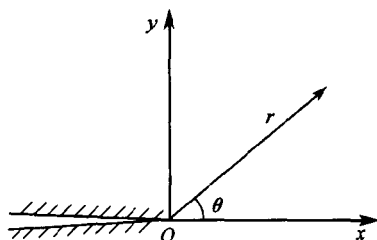


图 0.1-1 裂纹顶端与坐标系