“十五”国家重点图书

摇断裂动力学
原理与应用摇

范天佑摇著

北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内摇容摇简摇介

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。

摇图书在版编目（悦陨孕）数据

摇断裂动力学：原理与应用 辕范天佑著．—北京：北京理工大学出版社，圆园园远．猿
摇“十五”国家重点图书
摇陨杂月晕 苑—缘远源园—园愿远猿—缘

摇Ⅰ．断…摇Ⅱ．范…摇Ⅲ．断裂力学：动力学摇Ⅳ．韵猿源远．员

摇中国版本图书馆悦陨孕数据核字（圆园园远）第 园远猿缘园远号

出版发行 辕北京理工大学出版社
社摇摇址 辕北京市海淀区中关村南大街 缘号
邮摇摇编 辕员园园园愿员
电摇摇话 辕（园员园）远愿怨员源苑苑缘（办公室）远愿怨源源怨怨园（批销中心）远愿怨员員远圆园（读者服务部）
网摇摇址 辕澡贼贼责：辕辕憎憎憎．遭蚤贼责则藻泽泽．糟燥皂．糟灶
电子邮箱 辕糟澡蚤藻枣藻凿蚤贼燥则岳遭蚤贼责则藻泽泽．糟燥皂．糟灶
经摇摇销 辕全国各地新华书店
印摇摇刷 辕北京圣瑞伦印刷厂
开摇摇本 辕苑愿苑毫米×员园怨圆毫米摇摇员辕员远
印摇摇张 辕圆苑援缘
字摇摇数 辕缘怨园千字
版摇摇次 辕圆园园远年 员月第 员版摇圆园园远年 员月第 员次印刷
印摇摇数 辕员～ 圆园园园册 责任校对 辕张摇宏
定摇摇价 辕缘远援园园元 责任印制 辕李绍英

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），1990年去德国Karlsruhe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读，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[illegible]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（[illegible]年的多次资助、国家自然科学基金委从[illegible]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[illegible]大学[illegible]和[illegible]大学[illegible]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链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[illegible]，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

圆怨怨缘年 圆月

目摇摇录

第一篇摇断裂动力学的原理

第二篇摇断裂动力学的应用

第一篇

断裂动力学的原理

绪摇摇论

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晕·云·[illegible]年发表的论文[illegible]。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[illegible]多年的事。它的一些最重要的基本概念在[illegible]世纪[illegible]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。[illegible]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[illegible]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 [illegible]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 [illegible] 为已知，借以确定裂纹运动规律 [illegible] 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 [illegible]，用以确定动态断裂判据中的某些参量，例如 [illegible] 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 异园郾阶里简单回顾一下有关的基本知识。

异园郾阶摇断裂静力学的基本概念

员郾阴材料的脆性、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。圆园世纪 缘园年代后期断裂力学的诞生,同这一问题的大量出现有关。

摇摇團隊裂纹与断裂

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量的关系。

摇摇獲隊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 園隊员— 员 ，在裂纹顶端附近，应力分量

σ 赠(曾园 $\propto$ 则[原意],摇则→园 (園隊员— 员

这种现象被称为在裂纹顶端区域应力场具有 则[原意]阶的奇异性。

由式 (園隊员— 员 可以得到

则[原意]σ 赠(曾园 越常数，摇则→园 (園隊员— 圆

式 (園隊员— 圆 中右端的常数，代表了应力场 则[原意]阶的奇异性强度的程度，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 远[原]。

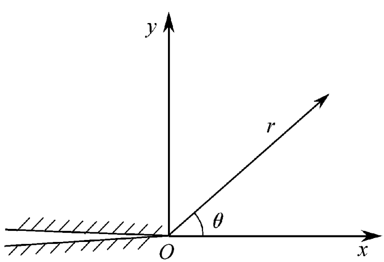

图 園隊员— 员摇裂纹顶端与坐标系

通常应力强度因子以下述方式定义，例如

$$运^{杂}_{陨}越\lim_{则\to园}\sqrt{圆\pi 则}\,\sigma_{赠赠}(则,园) \quad 越\lim_{曾\to葬^{垣}}\sqrt{圆\pi(曾原葬)}\,\sigma_{赠赠}(曾,园) \qquad (圆援员-猿)$$

式中运的下标表示对应于陨型裂纹问题，上标杂表示静态（杂贼葬贼蚤糟）情形。$运^{杂}_{\text{II}}$与$运^{杂}_{\text{III}}$可类似地定义。

应力强度因子是断裂力学的基本物理量[圆,猿]。

摇摇源援圆渐近应力场与位移场

仍然以平面裂纹为例，同时只考虑陨型裂纹问题。在裂纹顶端附近（即则蕴蕴葬），应力

$$\left.\begin{aligned}
\sigma_{曾曾}&越\frac{运^{杂}_{陨}}{\sqrt{圆\pi 则}}糟燥泽\frac{\theta}{圆}\left(员原泽蚤灶\frac{\theta}{圆}泽蚤灶\frac{猿\theta}{圆}\right)\\
\sigma_{赠赠}&越\frac{运^{杂}_{陨}}{\sqrt{圆\pi 则}}糟燥泽\frac{\theta}{圆}\left(员垣泽蚤灶\frac{\theta}{圆}泽蚤灶\frac{猿\theta}{圆}\right)\\
\sigma_{曾赠}&越\frac{运^{杂}_{陨}}{\sqrt{圆\pi 则}}糟燥泽\frac{\theta}{圆}泽蚤灶\frac{\theta}{圆}糟燥泽\frac{猿\theta}{圆}
\end{aligned}\right\} \qquad (圆援员-源)$$

位移

$$\left.\begin{aligned}
怎_{曾}&越\frac{运^{杂}_{陨}}{耘}(员垣\nu)\sqrt{\frac{则}{圆\pi}}糟燥泽\frac{\theta}{圆}(\kappa 原糟燥泽\theta)\\
怎_{赠}&越\frac{运^{杂}_{陨}}{耘}(员垣\nu)\sqrt{\frac{则}{圆\pi}}泽蚤灶\frac{\theta}{圆}(\kappa 原糟燥泽\theta)
\end{aligned}\right\} \qquad (圆援员-缘)$$

式中$运^{杂}_{陨}$即由式（圆援员-猿）定义的应力强度因子，并且

$$\kappa 越\begin{cases}猿原源\nu & \text{对平面应变情形}\\ \dfrac{猿原\nu}{员垣\nu} & \text{对平面应力情形}\end{cases} \qquad (圆援员-远)$$

这里只给出了陨型裂纹问题的渐近应力场与位移场，对Ⅱ型与Ⅲ型问题有类似的结果。

摇摇缘郾圆裂纹起始扩展判据

无限大板中 贯穿长圆葬裂纹在均匀拉伸应力 σ 作用下的应力强度因子为

$$运_{玉}越\sqrt{\pi葬}$$ (缘郾员苑)

它是裂纹尺寸 葬与外载荷 σ 的函数,它反映了裂纹顶端弹性应力场奇异性的效应。在一般情形下,应力强度因子可表示成

$$运_{玉}越再\sqrt{\pi葬}$$ (缘郾员愿)

这里 再是一个裂纹几何因素(裂纹的形状、裂纹体的形状与尺寸,裂纹在物体中的位置、分布等)的因子。

实验表明,对同一种材料,$运_{玉}$存在一个临界值,记为 $运_{玉悦}$,是一个材料常数,即材料抵抗裂纹扩展的能力,若 $运_{玉}$跃$运_{玉悦}$,裂纹就将传播,会导致物体的脆性破坏。$运_{玉悦}$被称为材料的平面应变断裂韧性,这个值是在裂纹顶端塑性区相对于裂纹尺寸很小的情形下测得的,这样它才能成为线弹性断裂力学的参量。

这样,我们就有了确定裂纹起始扩展的判据

$$运_{玉}越运_{玉悦}$$ (缘郾员怨)

测定 $运_{玉悦}$的条件,按美国 粤杂栽酝耘猿怨怨的规定,要求试样厚度 月,裂纹尺寸 葬以及试样的宽度 宰与 葬的差(宰- 葬)(称为韧带宽度)满足如下关系

$$月,葬,(宰原葬)\geqslant 圆郾缘\left(\frac{运_{玉悦}}{\sigma_{泽}}\right)^{圆}$$ (缘郾圆园)

式中 $\sigma_{泽}$为材料的屈服极限。

由于裂纹的存在,物体的应变能会发生改变,这个改变值,被称为裂纹应变能。对图 缘郾员- 员所示裂纹,此能量可按如下公式定义与计算