

岩石断裂力学

[英] B. K. 阿特金森 主编



地震出版社

岩石断裂力学

[英] B.K.阿特金森 主编

尹祥础 修济刚 等译

地震出版社

1992

(京)新登字 095 号

本书是国际上岩石断裂力学领域的第一本权威性专著。书中全面、系统地论述了岩石断裂力学的基本理论(如断裂力学基础,裂纹附近的应力场与位移场,裂纹的启裂、扩展与亚临界扩展,与时间相关的变形与破坏,过程区及非线性等)及其在许多领域中的应用(如地震、构造地质、水压致裂、地热、动态破碎等)。最后一章专述岩石断裂力学的实验方法,并搜集了极为丰富与珍贵的各种岩石与矿物的断裂实验数据。本书既系统地阐述了本学科的基本原理,又反映了该领域的最新进展。

本书可供力学、地学、材料科学、土建、采矿及石油工程的科研人员、工程人员及大专院校师生阅读。

FRACTURE MECHANICS OF ROCK

Barry Kean Atkinson

ACADEMIC PRESS LIMITED(1987)

岩石断裂力学

[英]B.K.阿特金森主编

尹祥础 修济刚 等译

责任编辑: 蒋乃芳

*

地质出版社出版

北京民族学院南路9号

中国地质大学轻印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

*

850×1168 1/32 19印张 485千字

1992年9月第一版 1992年9月第一次印刷

印数 0001-1000

ISBN 7-5028-0896-5/P·557

(1289) 定价: 25.00元

译者前言

本书由岩石断裂力学领域内多位国际上著名的专家撰写而成，从而保证了它的高水平与权威性。据我所知，这也是西方第一本岩石断裂力学的专著。

我和本书主编 B.K.阿特金森博士是在 1982 年他访问我们实验室时初次相识的，以后又在几次国际会议上见面。1988 年，我访问英国时，本想找他商讨将本书译成中文出版的有关事宜，但他那时已热心于现代舞艺术而离开了伦敦大学学院，因而未能会晤，至今引为憾事。幸而在“混凝土与岩石的断裂”国际学术讨论会上遇见了本书的多位撰稿人，与他们讨论过本书的某些内容及翻译问题。后来，当阿特金森博士得知我有意将此书译成中文出版时，给我寄来了为本书中译本写的序。感谢他在此序言中对中国科学家所表达的友好情谊与高度评价。

翻译本书的分工如下：尹祥础，原序、中译本序、第一、二、三、六章及附录；修济刚，第九、十、十一章；尹灿，第四、五章；颜玉定，第七章；尹迅飞，第八章。全书由尹祥础最后审校统稿，虽然尽了努力，但在文风、用词等方面仍然难以完全统一。由于时间仓促，水平有限，译文中如有不妥之处，敬请读者批评指正。

尹祥础

1992 年于北京

中译本序言

我怀着极其愉快的心情为《岩石断裂力学》的中译本作序。回顾往事，当西方国家的地球科学家对断裂力学这门学科的内容及其可能发挥的作用还不甚领会的时候，一些中国的研究小组已经开始将断裂力学应用于地球断裂物理学了。也许由于不少工作在地球物理界中国科学家的影响，中国在这一领域内的研究方向是：在阐明断裂理论的同时，通过岩石主要断裂参数的实验室测定，将断裂力学应用于地球中的断裂现象；而在西方，我们当时还正在积累岩石强度的数据，但是岩石强度是一个意义不大的而且与试验条件关系密切的概念。

1982年对中国的访问，使我更加深信断裂力学概念在地球物理中的广阔应用前景。那时，中国的几个研究小组在将断裂力学应用于地震物理学（这是一门对中国人民有极其重大意义的科学）方面，已经取得了可喜的进展。参观唐山，使我目睹了1976年唐山地震所造成的巨大损害，加深了我对自己工作的神圣使命感，并且坚信我们的终极目标应该着眼于对这一类惨重自然灾害的预报。

本书简明地阐述了断裂力学的概念及其在地球物理某些特定领域中的应用，它不可能是包罗万象、详尽无遗的。我希望本书中文版的出版将有助于这一学科的进一步的研究，还将促进中、英两国在这一领域内的著作的互相翻译。不少用中文发表的优秀著作，由于未能译成西文，对西方研究人员来说，是难以了解的；同样，我想，中国的研究人员在接受英文文献方面也可能存在类似的情况。

感谢尹祥础教授将此书译成中文，这对我是一种激励，我衷心希望本书中文版的出版会推动中国与西方在这一领域的合作。

B. K. 阿特金森

1991年于伦敦

序

本书的研究工作，早在我作为伦敦帝国理工学院的研究员时就已经开始了。那时，我和我的同事们正致力于将断裂力学应用于与时间相关的地震断裂问题。不久后，我就认识到，断裂力学的正确应用，不仅对于地震而且对于所有自然界的断裂现象，将提供有用的见解和知识。当时，在地球物理学中，断裂力学还是一位“灰姑娘”，它在地球中断裂方面的应用还是初步而不完善的，也没有一本高水平的教科书阐明断裂力学可能解决的地球物理中断裂问题的范围和应用。这种景象现在已经改观，断裂力学已经被广泛承认为研究地球断裂的有效方法，尽管“灰姑娘”还没有寻觅到它的“王子”。本书正是对这个过程的一个贡献。

当我开始撰写本书时，断裂力学在地球科学的应用范围已经是如此广泛，以致为了使有关章节保持权威性及高水平，必须邀请多位作者来共同撰写。我衷心地感谢各位撰稿人对我的约稿给予了热烈的响应。

研究工作是需要经费的，我自己的研究工作，多年来一直得到自然环境研究协会和美国地质调查局（在美国国家地震减灾计划项目下）的资助，没有这些单位的支持，岩石断裂力学的大部分实验数据就不可能取得。

虽然本书的撰稿开始于帝国理工学院，但它的完成已是我转到伦敦大学学院任研究员以后的事了。我要特别感谢 Michael Audley-Charles 教授及 Neville Price 教授。感谢他们在我处于困境时的支持。Audley-Charles 教授还慷慨地为我继续我的工作及完成本书的写作提供了便利。

在我的研究生涯中与许多人共过事，他们对我在断裂问题上的深入领悟给予了很大的帮助。他们之中有些是我的同事，有些是我的学生，也有些是我的老师。首先要提到的是 Neville Price 教授，

他在断裂与节理方面的出色的讲课与内容丰富而深刻的分析，对于帝国理工学院一整代构造地质学家与地球物理学家给予了启蒙的影响，并起了奠基的作用。在此，我向他表示最诚挚的谢意。我还要对下列人员表示感谢，因为我曾与他们进行过有启发性的讨论，他们是：Ove Alm, Michael Ashby, Simon Cox, Paul Dennis, Robert Philip Meredith, Miti Ohnaka, James Rice, John Rudnicki, Richard Sibson, Hartmut Spetzter, Michael Swain, 陈禹, 臧绍先以及本书所有的撰稿人。

非常高兴有幸与学术出版社（伦敦）的编辑主任 Conard Guettler 合作。我在此对他、他的同事以及 Philip Meredith 表示谢意，感谢他们在出版本书时给予的帮助。

最后，愿以本书献给我的女儿 Rosic Ellen，在本书出版过程中，我未能抽出时间来陪伴她。

B. K. 阿特金森
于伦敦大学学院

目 录

第一章 引言 —— 断裂力学及其在地球物理学中的应用	(1)
§ 1.1 背景	(1)
§ 1.2 概念、定义及理论	(4)
§ 1.3 关于岩石断裂力学在地球物理学中应用的综述	(20)
§ 1.4 前景	(22)
§ 1.5 本书的安排	(25)
参考文献	(26)
第二章 岩石中的节理与剪切断裂	(30)
§ 2.1 引言	(30)
§ 2.2 历史背景	(30)
§ 2.3 孤立裂纹	(32)
§ 2.4 微观裂纹	(34)
§ 2.5 节理：破裂的记录	(37)
§ 2.6 重裂	(45)
§ 2.7 剪切断裂	(47)
§ 2.8 多重断裂与节理的图象	(55)
§ 2.9 导致节理扩展的加载条件	(65)
§ 2.10 结论	(70)
参考文献	(71)
第三章 岩中石裂纹的萌生与扩展的理论	(76)
§ 3.1 引言	(76)

§ 3.2	裂纹的萌生	(79)
§ 3.3	裂纹的扩展	(97)
§ 3.4	关于应用裂纹萌生与扩展理论时的几点注释	(116)
	参考文献	(118)

第四章	裂纹的亚临界扩展理论及其在矿物与岩石中的应用	(120)
§ 4.1	引言	(120)
§ 4.2	断裂的微观机制	(123)
§ 4.3	亚临界扩展的机制	(126)
§ 4.4	亚临界裂纹扩展的本构模型	(135)
§ 4.5	实验数据概述	(147)
§ 4.6	裂纹亚临界扩展数据外推到地壳环境	(161)
§ 4.7	对进一步研究的要求	(174)
	参考文献	(175)

第五章	依赖于时间的变形和破坏	(180)
§ 5.1	引言	(180)
§ 5.2	微裂纹的扩展	(182)
§ 5.3	依赖速率性质的预测	(194)
§ 5.4	结语	(225)
	参考文献	(226)

第六章	断裂力学应用于水压致裂应力测量	(231)
§ 6.1	引言	(231)
§ 6.2	实验观测	(232)
§ 6.3	断裂力学方法用于水压致裂	(242)
§ 6.4	用断裂力学分析实验结果	(251)
§ 6.5	结论	(253)

参考文献	(254)
第七章 断裂力学应用于热干岩地热能工程	(256)
§ 7.1 引言	(256)
§ 7.2 人工裂纹性态的理论考虑	(257)
§ 7.3 地壳岩体的断裂特性	(264)
§ 7.4 结论	(288)
参考文献	(290)
第八章 岩石中裂纹周围的理论位移与应力场及其对于断层、节理、岩脉、岩墙与溶解面等问题的应用	(292)
§ 8.1 引言	(292)
§ 8.2 弹性断裂力学基础	(296)
§ 8.3 位移场	(310)
§ 8.4 应力场	(323)
§ 8.5 特殊区域内应力场的近似表达	(339)
§ 8.6 在构造地质及大地构造学中某些问题上的应用	(349)
参考文献	(368)
第九章 剪切断裂力学应用于地震区	(371)
§ 9.1 引言	(371)
§ 9.2 剪切断裂力学	(374)
§ 9.3 剪切破裂的滑动弱化模型	(389)
§ 9.4 滑动分布和相互作用	(421)
§ 9.5 概要与结论	(448)
参考文献	(449)
第十章 岩石的动态破碎	(454)

§ 10.1	引言	(454)
§ 10.2	动态断裂强度	(455)
§ 10.3	动态破碎中碎块尺度的预测	(466)
§ 10.4	动态破碎时颗粒尺寸的分布	(479)
§ 10.5	动态断裂与破碎的连续介质模型	(495)
	参考文献	(501)
第十一章 岩石和矿物的断裂力学实验数据		(504)
§ 11.1	引言	(504)
§ 11.2	实验的约束和限制	(504)
§ 11.3	试验方法	(511)
§ 11.4	实验数据	(518)
	参考文献	(540)
附录 建议采用的岩石断裂韧度测定方法		(548)

第一章 引言 —— 断裂力学及其在地球物理学中的应用

Berry Kean Atkinson

(英) 伦敦大学学院 地质科学系

§ 1.1 背 景

直到最近，我们对于脆性及半脆性岩石断裂的了解，远远落后于对地质材料塑性及固态流动的了解。这种情况，部分归因于晶体材料中断裂的复杂性；部分归因于发生在地球这个“自然界实验室”里的脆性现象常常被其它地质过程所湮没或掩蔽。但是，一个确凿而又关键的事实是：大批材料学家、物理学家和工程师，都曾为研究地球与行星内部的固态流动而贡献他们的才智。几十年来，地球物理学家在固态流动方面借用材料科学文献中的思想与概念。这种学科交叉渗透的结果在 Poirier (1985) 的一篇导论性的专著中作了简要综述。在岩石断裂这个领域内，类似的过程现在刚刚起步。

多年来，在岩石断裂实验研究中，“断裂强度”方面的文献大量涌现。但是，断裂强度实际上只是个含义不清的参数。由于在地壳岩石中存在着各种尺度的裂纹与裂隙，当不满足特定的实验条件时，断裂强度这个参数难以应用。实验研究的确发现了粘-滑、扩容及孔隙流体压力作用等重要现象。但是，这只是将注意力集中于室内实验中的那些破坏过程的结果，而没有考虑试验时岩石所能承

受的应力的更为广泛的意义。此外，这些研究在预测地球物理过程（不仅仅是地震）中岩石断裂性质方面是不太成功的，并且严重缺乏实验研究与地壳断裂的模拟分析之间的理论联系。

在数据上反映这种矛盾混乱状态的早期标志是 Price(1966)的专著《脆性与半脆性岩石中断层与节理的发展》的发表。在该书中，作者第一次尝试用理论与实际相结合的方法推断构造运动及地面隆起时岩石的脆性行为。不幸的是，在那时，人们对于岩石断裂的详细力学理论及机制的认识，不如 Price 对于地质环境力学的有洞察力的分析。因此对地球物理过程中断裂的分析被忽视了。直到后来由于地震预报及地壳深部工程(如热能及地下贮存)的推动才使得断裂现象的研究进入了一个新阶段。

由于断裂力学在地球物理中的应用，我们在地壳岩石断裂的理解与洞察方面新近发生了极为重要的变化。就本质上说，断裂力学研究的是由于尖锐裂隙引起的应力集中及裂纹的扩展。人们利用一个有一定物理基础及实验依据的准则来判断裂纹是扩展还是愈合。这与历史上应用弹性位错理论而得到的某些简单结果来研究地震的方法形成鲜明对照。在地震位错理论中，裂纹或间断面两侧介质的相对运动是事先先验性地假定为已知的。至于应力分析或者与裂纹扩展有关的位移，或者裂纹面上的相对位移，两种方法本质上是相同的。

用断裂力学方法进行裂纹问题的分析植根于人们理解下列问题的企图，这些问题包括：玻璃的破坏，金属工程结构的稳定性以及工业陶瓷的断裂等。由于描述这些材料失效所应用的相对简单的断裂准则的成功，断裂力学得以普及。关于断裂力学的基本理论及其在工程材料中的应用，可以在 Knott(1973)及 Lawn 与 Wilshaw(1975)的著作中找到^①。关于基本概念的更加详尽的阐述

^①此书有中译本：脆性固体断裂力学，陈禹贡、尹祥础译，地震出版社，1985——译者注。

请参阅 Liebowitz(1988)主编的多卷论文集。

可以看出,近年来人们对岩石断裂力学的兴趣在以下两个方面有了戏剧性的增长,这就是实验岩石断裂力学及应用断裂力学来解决地球物理学中的断裂问题。这方面的进展是如此迅速,因而 Paterson 在 1979 年已能够发表脆性岩石变形的权威性的著作,在这本著作中将断裂力学问题作为一个附录。断裂力学用于地壳问题的总结性文献较少, Rudnicki (1980), Rice (1980)及 Rossmannith (1983)这几篇都是很有用的资料。

岩石断裂力学研究的巨大进展涉及许多领域,包括:地震力学 (Rice, 1979; Rudnicki, 1980; Das 和 Scholz, 1981), 地震预报 (Crampin 等, 1984), 板块构造学 (Li 与 Rice, 1983) 海洋裂谷的扩张 (Morgan 与 Parmentier, 1985)、岩浆侵入 (Anderson 与 Graw, 1977) 及与此有关的地震 (Julian 与 Sammis, 1985), 地壳岩石的隆起与侵蚀 (Bruner, 1984), 水压致裂原地应力测量 (Abou-Sayed 等, 1978), 热干岩地热能的提取 (Demarrest, 1976; Hayashi 和 Abe', 1982, 1983)、冰隙的穿透与其它的冰川学问题 (Smith, 1976; Miller, 1980), 在地表几乎普遍存在, 通常通过褶皱、隆起及裂开而形成的陡倾断裂的发展问题 (Segall, 1984), 含裂纹岩体中的流体输运问题 (Segall, 1984), 香肠构造 (Lloyd 等, 1982), 缝合线构造 (Fletcher 与 Pollard, 1981), 以及与时间有关的岩石破坏问题的模拟 (Spetzler 等, 1982; Costin 和 Mecholsky, 1983)。另外可参看本书中的各个章节。岩石断裂力学的实验数据以前曾由 Ouchterlony (1982) 及 Atkinson (1982, 1984) 发表过综述性文章。

上述有代表性的论著包括一般性到非常专门的文章。然而,在本书中,我们力图对一些经过选择的、有代表性的问题给予简洁的数理处理,足以使读者利用所附的广泛的参考文献开展进一步的研究。因此,本书是非常广泛、多样的参考文献的总论,这些文献分散在一些不引人注目的有关物理、化学、材料科学、工程学、数学、地质学及地球物理学的专著和期刊中。因而,对那些不熟悉本

领域的读者及那些希望将断裂力学研究开拓到新领域的读者来说，本书应该是一本有益的读物。本书尤其适合于地质学及地球物理学专业的低年级研究生及高年级本科生。我们也希望通过本书激励那些从事混凝土、陶瓷及金属材料断裂问题的科学家，运用他们的学识去研究有关地壳的断裂力学问题。

§ 1.2 概念、定义及理论

断裂力学主要起源于 Griffith(1920)及 Irwin(1958)的两篇经典论文。这两篇论文中都把裂纹作为应力集中源，在控制脆性断裂中给予高度的重视。关于断裂力学主要内容的简要阐述可参看 Atkinson(1979)，Irwin 和 de Wit(1983)及 Liu(1983)等文献。断裂力学对于特殊裂纹系统的应用可参阅 Paris 和 Sih (1965), Sih(1973) 及 Rooke 与 Cartwright(1976)的综述文章。在本节中要介绍的断裂力学概念分成如下小标题：裂纹端部的位移类型，应力强度因子，裂纹扩展力，J 积分，混合型裂纹的扩展，裂纹扩展准则，各种断裂力学参数的等价性，过程区，裂纹端部张开位移，裂纹端部应力状态的约束与简化，裂纹扩展的阻力曲线，动态断裂及特殊裂纹的断裂力学参数的确定。

在本章中不打算对断裂力学作全面而详尽的评述，对于追求这一目标的读者，我们推荐 Liebowitz(1968)及 Francois(1981)所编的专著，以及上面提出的几篇文献。

§ 1.2.1 断裂力学

Irwin 及 de Wit 对断裂力学所下的定义为：“按照应用力学定律描述材料的断裂及材料的宏观性质。在应力分析的基础上，断裂力学提供一种定量方法，把断裂强度与含缺陷构件所荷载荷及其几何参数相关连”。缺陷通常被模拟为裂纹，但它也可能是孔隙或其它非线性缺陷。外载对裂纹扩展的影响可以用某些参数来表述，这些参

数是表征裂纹端部的应力及应变强度的。

断裂力学对断裂何时发生比断裂为什么发生更感兴趣。断裂力学是一个有效而通用的工具，并能够将其领域扩充至裂纹扩展的机制及力学方面(Lawn, 1983)。

§ 1.2.2 裂纹端部的位移型式

我们从理想的裂纹概念开始。理想的裂纹是指平直、端部极其尖锐及厚度为零的裂纹。裂纹端部位移有三种基本的型式(图 1.1)。它们称为 I 型(拉伸型)、II 型(面内剪切型)及 III 型(反平面剪切型)裂纹。将三种基本型式的裂纹迭加就可得到裂纹端部变形及应力场的最普遍的情形。

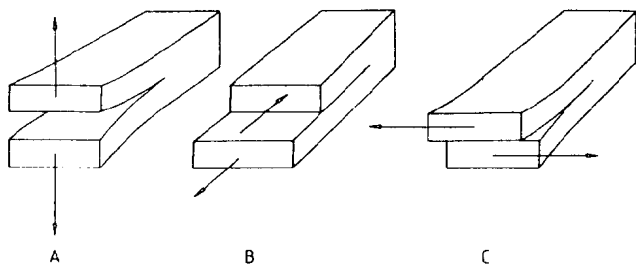


图 1.1 裂纹三种基本型式的示意

A: I 型又称拉伸型或张开型; B: II 型又称面内剪切型或滑开型; C: III 型又称反平面剪切型或撕开型

如果我们设定直角坐标系如图 1.2 所示，则在 $y=0$ 平面上有：

$$\text{I 型} \quad \sigma_x \neq 0, \sigma_y \neq \sigma_z \neq 0, \tau_{xy} = 0$$

$$\text{II 型} \quad \tau_{xy} \neq 0, \sigma_y = 0$$

$$\text{III 型} \quad \tau_{yz} \neq 0, \sigma_y = 0, \tau_{xy} = 0$$

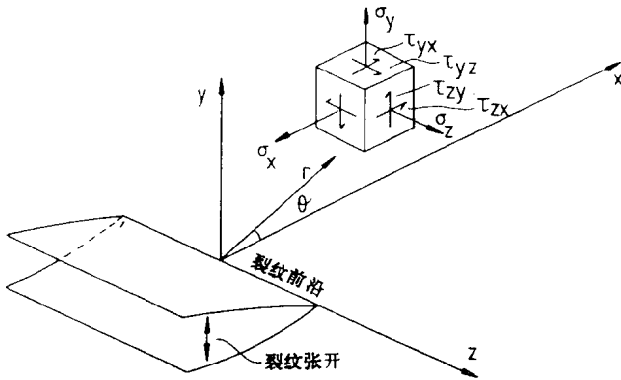


图1.2 分析裂纹端部应力场的坐标系(以 I 型裂纹为例)。图中裂纹的张开程度被夸大了, 因为尖锐的细裂缝是线弹性断裂力学不可分割的组成部分。裂纹前沿的直角坐标分量为 x, y, z , 极坐标为 r, θ

§ 1.2.3 应力强度因子

应力强度分析的目的在于给出作用于裂纹端点的力的度量。它将决定裂纹扩展还是保持稳定, 而这不单单取决于外载条件。

裂纹端部的应力分布建立在经典线弹性理论假设的基础上。如果裂纹端部非线性区比裂纹长度及含裂纹物体的尺度都小得多, 则此假设可以成立。现在已经知道, 对很多材料来说, 在裂纹端部包含非弹性效应及非线性弹性效应。当这些效应很大时, 断裂力学可以用不同的分析方法进行处理, 例如参看 Mc Clintock 与 Irwin(1965)及 Rice(1968a,b)的论文。

图 1.2 中画出了裂纹端部应力场的各个应力分量。在均质线弹性介质中, 裂纹端部的各应力分量均正比于 $r^{-1/2}$, r 是距裂纹端点的距离。 $r^{-1/2}$ 项的系数称为应力强度因子, 它决定于外载荷, 物体形状及裂纹长度。因此, 在均匀线弹性介质中, 对于任一种特定