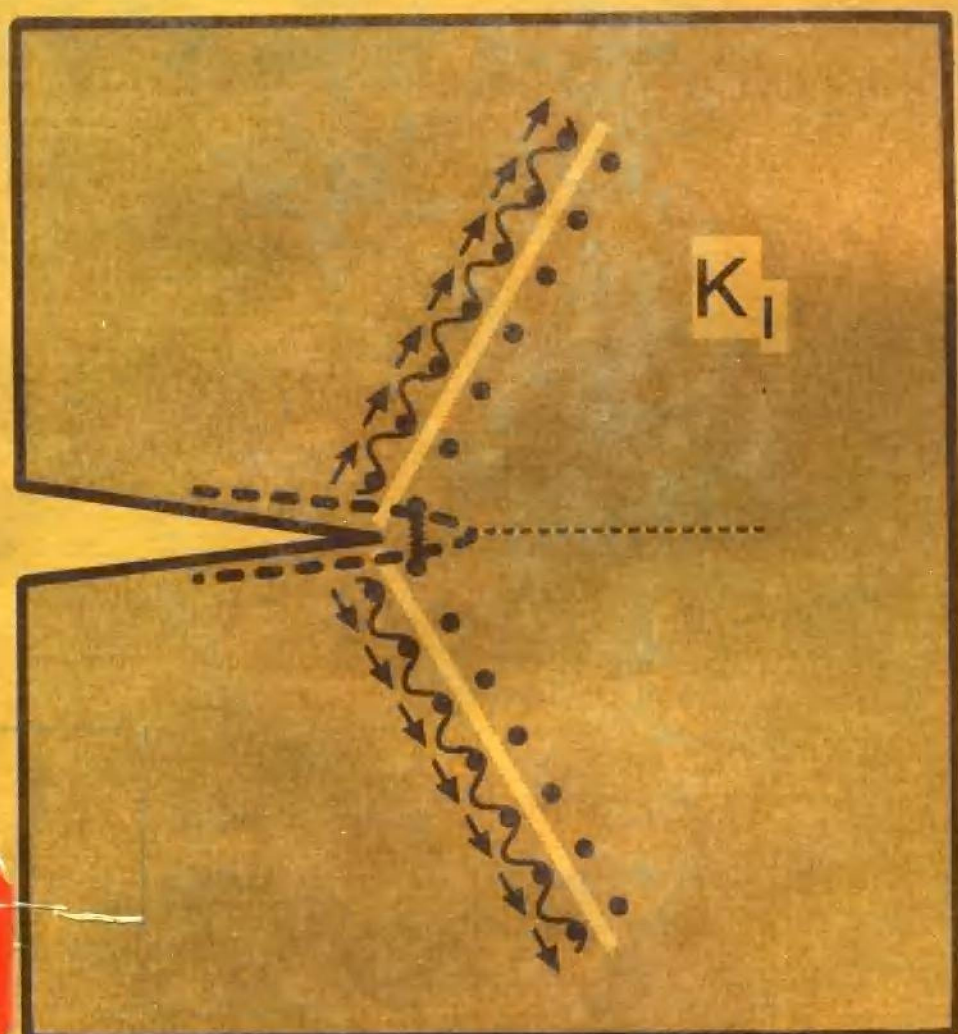


宏微观断裂力学

HONGWEIGUAN DUANLIE LIXUE

杨卫 著



G F G Y G B S

宏 微 观 断 裂 力 学

杨 卫 著

國防工業出版社

• 北京 •

图书在版编目(CIP)数据

宏微观断裂力学/杨卫著. —北京:国防工业出版社,
1995. 9

ISBN 7-118-01426-5

I. 宏… I. 杨… II. 断裂力学-基础理论 N. O346. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 01861 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 12 308 千字

1995 年 9 月第 1 版 1995 年 9 月北京第 1 次印刷

印数:1—3000 册 定价:21.60 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版,随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模		
主任委员	黄 宁		
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允
	曾 铎		
秘 书 长	刘琯德		
委 员	尤子平	朱森元	朵英贤
(按姓氏笔划为序)	刘 仁	何庆芝	何国伟
	何新贵	宋家树	张汝果
	范学虹	胡万忱	柯有安
	侯 迁	侯正明	莫梧生
	崔尔杰		

序

据一些工业化国家的统计,因材料和结构的破坏所造成的损失占国民经济生产总值的 8%~12%。破坏事故还造成人员的伤亡,其后果更是无法估量。我国的情况甚至比西方发达国家还要严重。另一方面,开发新材料还存在很大的潜力。传统的配方(即“炒菜”)与试探(即“试一试”)的方法需要用定量化分析的方法来取代。无论是为了减少破坏事故的损失,还是为了发展材料的潜力与创造新的材料,都要求对断裂的过程有科学的定量化的认识。破坏或断裂是一个从原子键尺度到宏观尺度跨越约 10^7 量级尺度的过程。认识这样一个过程是人类多个世纪以来为之奋斗而远未达到的目标,是对人类科学的严重挑战。断裂过程贯通宏、细、微观多个层次尺度,涉及固体力学、材料科学与物理学的跨学科领域。力学正在采取对同一问题在不同尺度上进行研究的方法。从科学发展的历史与趋势来看,有理由预言首先突破这一难点的非常可能是力学。

杨卫教授自从 1984 年初以优异的成绩获得美国布朗大学博士学位以后,立即投入祖国的科学与教育事业中。他以充沛的精力和深刻的洞察力,在多方的支持下,经过十余年辛勤的努力,数多科研项目在祖国的土壤中开花结果。《宏微观断裂力学》一书便是他研究成果的一个阶段的总结,该书的出版将有利于推动我国断裂学科的发展。我乐于向读者推荐并作序。

清华大学 黄克智

1995 年 4 月 10 日

前 言

唐人魏征言：“欲流之远者，必浚其泉源；求木之长者，必固其根本”。固本浚源，体现了基础研究之重要性。想数千种材料、上百类结构、十余门工程，其破坏行为归根到底，在于那些或明或暗的裂纹。Griffith 和 Irwin 等学者把裂纹的学问上升为“断裂力学”，其应用发展不但为现代社会避免了上万亿元的损失，也为人类征服自然、保护自己提供了工具。

由弥散分布的微裂纹串接为宏观裂纹，再由宏观裂纹演化至灾难性失稳裂纹，这一发展过程称之为断裂过程。了解断裂过程才能阐明裂纹的演变史，才能表达载荷环境氛围与材料断裂的因果关系，才能把断裂学说的应用莫基于科学的背景之上。断裂过程是一个宏微观结合的多层次过程。它既受到以裂尖奇异场为表征的宏观力学氛围之外部推动，又诱发于裂尖原子区动力失稳之内禀过程。因此，单纯从连续介质力学或固态物理角度均无法展示断裂过程的全貌。

以断裂过程的宏微观结合特征可联想至力学研究的宏微观轮回。从牛顿到柯西，固体力学的经典理论建立于粒子模型之上，其研究的物质体系大到天体星球，小到分子原子。力学原为物理学的一支，只是在近一个世纪才由连续介质化的手段脱胎为一门独立学科。由微观到宏观的表述转换导致了应用力学的进展。对大多数工程应用，连续介质往往能比粒子聚集体模型更集中、更概括、更简单地表达研究对象。以有限元为代表的计算力学发展使连续介质的力学求解手段臻于完备。然而，连续介质的模型化过程导致了破坏状态描述的不封闭。本构方程、损坏演化率、断裂准则等概念固然可以半经验性地刻划破坏过程的一些宏观断面，但却缺乏

早期力学大师们那种纵览宇宙万物而追本溯源的精神。作为否定之否定,近二三十年来断裂力学研究由宏观重返微观,导致宏微观结合的断裂力学理论。

断裂过程研究由宏观到微观的发展动力并不完全来自于对科学真理的追求,它在很大程度上亦得益于当代高新技术的发展。这既包含着研究手段的更新,如万亿次的大规模并行计算机和具有原子分辨率的观测与加工设备;也起因于先进材料、微机械工程和精密制造工艺进展的定量化需要。新一代结构材料是如此之精细而昂贵,微结构的设计要素是如此错综复杂,以至于无法用配方试探来加以研制。只有基于宏微观力学的定量化分析方法才能一矢中的,达到高新材料研制的竞争性要求。从微观到宏观,再从宏观到微观,最终走上宏微观结合之路,工业技术水平的提高带来断裂科学发展的峰回路转。

宏微观断裂力学的先兆为细观力学的形成。连续介质力学描述与原子描述之间有着丰富的中间层次,对它们的研究拓展了材料科学。细观力学沟通了宏观与微观层次之间的鸿沟,促进了连续介质与原子研究方法的贯穿。

著者本人的学习与研究经历可由材料与力学结合、宏观与微观结合来表征:从大学期间主修材料热加工转至研究生阶段主修固体力学,从归国后前五年关于宏观断裂力学的研究转至近五年对材料力学行为的研究。材料科学以其丰富的内涵和层出不穷的新鲜问题而引人入胜,力学由其准确、完备的逻辑体系而令人叹服。力学工作者们常说:宇宙之大,基本粒子之小,力无所不在。如何从最根本的物理力学原理,来逐层解开固体材料断裂过程的谜团是我多年铭心向往的一项追求。断裂力学近十年来朝这一目标已经前进了一大步,以至于著者可以写出这样一本不成熟的书来吸引有志于这一领域研究的学者和学生。这一学科在飞速发展,书稿中很多论述会被证实是牵强的、支离破碎的、甚至是谬误的。但著者仅望它能引起从事断裂科学研究的同行们(尤其年轻同行们)的兴趣与关注。以力学之深邃严谨、物理之广博神奇、材料科学之

千变万化,必然能令跨学科的研究者在这一新开辟的园地中收获到丰硕的科学果实。

杨卫

清华大学

破坏力学开放研究实验室

1994年10月

目 录

绪论	1
0.1 破坏力学的三个发展阶段	1
0.2 宏微观断裂力学的理论与应用特征	2
0.3 断裂的宏微观尺度——空间与时间	6
0.4 内容概述	10
参考文献	11

上篇 宏观断裂力学

第1章 线弹性断裂力学	13
1.1 宏观断裂力学发展史	13
1.2 Griffith 脆断理论	15
1.3 弹性力学基本方程	22
1.4 裂纹尖端的二维渐近方程和断裂分类	24
1.5 平面问题和反平面问题的复变函数法	27
1.6 复应力特征展开——I、II、III型	30
1.7 应力强度因子理论	37
1.8 应力强度因子求解	41
1.9 动态扩展裂纹尖端场	49
参考文献	55
第2章 弹塑性断裂力学	58
2.1 小范围屈服理论	58
2.2 裂纹尖端张开位移	65
2.3 J 积分	71
2.4 HRR 场	81
2.5 J 控制扩展	86

2.6 扩展裂纹尖端场	94
2.7 J - Q 理论	99
参考文献	104
第3章 结构缺陷评定	108
3.1 现有结构缺陷评定方法	108
3.2 三级缺陷评定体系	113
3.3 理论断裂阻力曲线	116
3.4 J - T 双参量评定	121
3.5 J - T 评定的表现形式	127
参考文献	131

中篇 细观断裂力学

第4章 细观断裂力学引论	134
4.1 宏观断裂力学的局限性	134
4.2 细观损伤理论——4类损伤基元	136
4.3 损伤与断裂的交互作用	146
参考文献	147
第5章 界面断裂力学与多层介质断裂	150
5.1 界面与多层介质力学	150
5.2 界面断裂奇异场——各向同性双材料	153
5.3 各向异性双材料——Stroh 列式	160
5.4 断裂混合度与界面断裂曲线	163
5.5 亚音速分层力学	167
5.6 跨音速分层力学	173
5.7 界面层断裂理论	182
5.8 材料的界面与界面层设计	186
参考文献	189
第6章 微裂纹的细观损伤理论	193
6.1 微裂纹损伤构形	193
6.2 单裂纹解	194
6.3 随机分布裂纹群	197

6.4	织构张量	201
6.5	有序排列裂纹群	202
6.6	复合材料层合板多重断裂损伤的细观力学分析	206
6.7	微裂纹损伤的其他问题	216
	参考文献	218
第7章	断裂过程区	220
7.1	损伤引致断裂过程区	220
7.2	各向异性损伤演化律	222
7.3	断裂过程的损伤计算力学	225
7.4	裂尖区的离散塑性理论	231
7.5	位错计算力学	232
7.6	材料韧脆判定	238
7.7	内嵌弹性区模型	247
7.8	准解理断裂过程	252
	参考文献	257
第8章	材料增韧的细观力学	260
8.1	引言	260
8.2	强韧增值与能量积分	262
8.3	扩展裂纹的尾区耗散增韧	264
8.4	扩展裂纹的桥联增韧	271
8.5	裂尖形貌与超钝化	276
8.6	场激发微区域转变	280
8.7	表面与界面强韧	285
	参考文献	288

下篇 纳观断裂力学

第9章	纳观力学基础	290
9.1	纳观断裂力学引论	290
9.2	原子间作用势	291
9.3	纳观计算力学方法	298
	参考文献	300
第10章	纳观断裂过程	302

10.1	边界层计算构形	302
10.2	均相固体断裂的纳观过程	303
10.3	理想界面断裂的纳观过程	308
10.4	峰峦界面结构的纳观数值模拟	312
	参考文献	317
第 11 章	宏微观结合	318
11.1	宏观/细观/纳观三重嵌套模型	318
11.2	连续介质——离散粒子的交叠层模型	320
11.3	交叠层力学量传递与力学氛围	323
11.4	位错运行的跨层次传递	329
11.5	宏微观计算实例	336
11.6	加速时间步积分	337
11.7	裂尖原子的混沌运动:解理过程	339
11.8	裂尖原子的混沌运动:位错发射过程	348
	参考文献	359
	致谢	361
	主题索引	362

绪 论

0.1 破坏力学的三个发展阶段

0.1.1 破坏力学概述

固体材料的破坏过程是与湍流相并列的两大力学难题之一,是力学家与材料学家为之奋斗了近一个世纪的多尺度、跨学科命题。破坏力学是当前国内外发展起来的一门概括性学科,它泛指对各种工程结构(如机械结构、土木结构、航空航天结构、核电结构、电子元件结构等)和工程材料(如金属、陶瓷、高分子、岩土、复合材料、生物材料等)破坏行为(包括断裂、损伤、疲劳、腐蚀、磨损)的力学规律研究。虽然破坏行为具有多学科的特点,但破坏力学往往是其最集中、最系统的研究手段。破坏力学具有广延性和学科交叉性,它在现代科学史中的发展是与其他学科融会贯通的一个范例。

力学是自然科学的七大基础科学之一^[1],与八大应用基础学科紧密相联。宇宙之大、基本粒子之小,力无所不在。破坏力学是力学学科中富有革命性和学科渗透性的活跃前沿,它的发展带动了近代力学的发展。举例说明:对土木、钢结构的强度、刚度、稳定性研究导致了变形力学的产生,奠定了机器大工业时代的工程科学基础;对航空、航天、机械、能源等工程结构的断裂研究导致了断裂力学的诞生,使近代破坏力学初具雏形;近年来对强韧材料、微结构元件和制造工艺过程的研究导致了具有宏微观结合特征的现代破坏力学之孕育形成。由学科纵向关系而论,破坏力学研究力学过程的终极阶段,在固体力学理论中占有支配性地位;从诸学科的横向联系而看,破坏力学与材料、能源、国防、土木、机械、信息等重

大工程科学领域密切相关,可对国民经济发展和劳动事故防范产生重大影响。

0.1.2 三个发展阶段

破坏力学的学科发展经历了三个主要的发展阶段。从伽里略^[2]到第二次世界大战前的无缺陷经验理论可视为第一阶段。其主要技术特征在于:①以变形量、塑性屈服等破坏先兆现象作为防范目标,并提出了以强度理论为中心的破坏准则体系;②不引入任何缺陷尺度;③对材料的本构行为采用简单连续介质描述(如虎克定律);④将材料的缺陷和破坏抗力经验地反映于若干材料指标上(如常规的五项强度韧性指标)。上述理论尽管简单,却也曾带动了200年来变形体力学(如弹性力学、塑性力学、连续介质力学等)盛极一时的发展。破坏力学的第二发展阶段是从第二次世界大战结束至今的宏观断裂力学阶段。其主要技术特征在于:①以断裂等破坏终极现象作为防范目标,并提出了以断裂韧性理论为中心的破坏准则体系;②引入宏观缺陷,但不考虑细—微观缺陷;③对材料的本构行为采用较复杂的连续介质描述,但材料构元仍不具有细微观结构;④将材料的破坏抗力唯象地反映在带裂纹标准试件的断裂指标上。宏观缺陷的引入带动了近40年来破坏力学发展成为一门独立学科。破坏力学的第三发展阶段——宏微观理论阶段,正在国内外力学界中展开。这一阶段自80年代萌生,在跨世纪期间将发展成为主要学科方向。其主要技术特征为:①追溯从变形、损伤至断裂的全过程;②引入多层次的缺陷几何结构;③对材料的本构行为采用宏—细—微观相结合的描述,即在材料构元中体现特定的微结构;④材料的破坏抗力体现为可预测的力学指标。

0.2 宏微观断裂力学的理论与应用特征

0.2.1 宏微观断裂力学

以往对固体断裂的研究体现为从宏观和微观两方面并行不悖

的探讨。宏观研究在文献上称之为断裂力学,由 Griffith 所开创^[3],并经 Irwin 发展而形成线弹性断裂力学(LEFM)的构架。在著名固体力学家 Rice、Hutchinson 等的努力下^[4,5],弹塑性断裂力学也趋于完成^[6,7,8]。微观研究称之为断裂物理,它渊源久远,起步于理论断裂强度的研究。由于断裂物理早期研究未曾致力于与宏观力学氛围的定量连接,所以一度进展不及断裂力学迅速。断裂力学的发展在近年来出现了宏观至细观^[9],再由细观至纳观^[10]的势头。断裂力学与断裂物理相结合而形成宏微观断裂力学,已成为跨世纪学科发展的趋势。

0.2.2 理论特征

宏微观断裂力学的出现是当代科学技术发展的必然产物。孕育该理论出现的主要科学技术环境为:①对破坏全过程认识的逐步深化;②与材料科学的交叉渗透,尤其得益于高强韧材料和带有确定微结构材料(如复合材料)的研制;③损伤力学的发展以及对断裂前细微观材料劣化的研究;④现代计算和实验技术的发展。上述科学技术环境的变化产生以断裂过程为主线带动多种材料、微元件和工艺过程的发展,以及开展跨材料的断裂机制比较学研究等学术思想,促使宏微观断裂力学得以应运而生。

宏微观结合的断裂力学使人们对材料力学行为的研究上升到一个新的高度。关于有序微细结构和界面的力学研究使复合材料设计产生了具有革命性的新概念;对精细结构陶瓷中扩展裂纹尖端区的相变、桥联和微裂纹过程区的力学研究使得 80 年代结构陶瓷的增韧理论和韧性指标发生了深刻的变革;对含微缺陷材料的制备工艺的力学研究将为提高材料的服役可靠性奠定理论基础。上述例子明确地表明了宏微观断裂力学对材料科学和技术所产生的正向推动作用。

断裂力学的宏微观理论将引导人类对种种自然和技术性破坏行为产生认识论方面的飞跃。这一认识飞跃体现为:①认识到断裂行为是由宏—细—微诸层次下多种破坏机制相耦合而发生和发展的;②认识到宏观偶然发生的灾难性断裂行为是由细微观尺度内