

力学

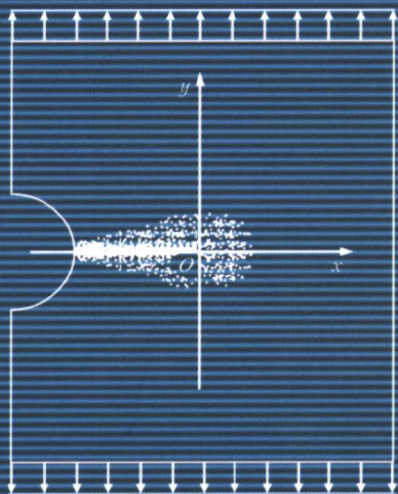


# 断裂与损伤力学

张行 主编

崔德渝 孟庆春 王奇志 编

赵军 胡卫平 杨继运



北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社

国防科工委「十五」规划专著



国防科工委“十五”规划专著·力学

# 断裂与损伤力学

张 行 主编

崔德渝 孟庆春 王奇志  
赵 军 胡卫平 杨继运 编

**北京航空航天大学出版社**

北京理工大学出版社 西北工业大学出版社  
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

## 内容简介

《断裂与损伤力学》是反映作者科研成果的学术专著。其内容包括:二维驻止裂纹断裂力学解析变分解法;三维驻止裂纹断裂力学能量差率闭合解法;扩展裂纹断裂力学问题的损伤力学分析;材料抗断裂性能中尺寸效应的理论分析;复合材料层合结构分层问题的断裂力学分析。此外,为了方便读者,本书还扼要介绍了断裂力学与损伤力学的基本原理。以上关于断裂力学方面的创新成果曾获国家级科技进步三等奖与部委级科技进步一、二等奖。

本专著适用于从事飞行器及地面设备结构损伤容限与耐久性设计的工程技术人员、科研人员以及固体力学、航空航天与机械等专业的研究生。

## 图书在版编目(CIP)数据

断裂与损伤力学/张行主编. —北京:北京航空航天大学出版社,2006.4

ISBN 7-81077-631-2

I. 断… II. 张… III. ①断裂力学②损伤力学  
IV. O346

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 124987 号

## 断裂与损伤力学

张行 主编

崔德渝 孟庆春 王奇志 编

赵军 胡卫平 杨继运

责任编辑 刘晓明

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话:010-82317024

<http://www.buaapress.com.cn>

E-mail: bhp@263.net

北京市松源印刷有限公司印装 各地书店经销

开本:850×1168 1/32 印张:21.375 字数:575千字

2006年4月第1版 2006年4月第1次印刷 印数:2000册

ISBN 7-81077-631-2 定价:52.00元

# 国防科工委“十五”规划专著编委会

(按姓氏笔画排序)

主任：张华祝

副主任：陈一坚 屠森林

编委：王文生 王泽山 卢伯英 乔少杰

刘建业 张华祝 张近乐 张金麟

杨志宏 杨海成 肖锦清 苏秀华

辛玖林 陈一坚 陈鹏飞 武博祎

侯深渊 凌 球 聂 武 谈和平

屠森林 崔玉祥 崔锐捷 焦清介

葛小春



## 总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就;研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了

一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育,特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影晌。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版200种国防



特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家、学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的100多位专家、学者,对经各单位精选的近550种教材和专著进行了严格的评审,评选出近200种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与技术、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入21世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展



阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝





# 前 言

作者编写《断裂与损伤力学》一书的宗旨是希望它能成为一部可以作为固体力学与结构设计专业研究生教学参考的学术专著。

断裂力学可分为：驻止裂纹断裂力学与扩展裂纹断裂力学(这是分类方法之一)。

驻止裂纹断裂力学的研究已处于高级阶段。问题的关键在于创立出计算效率高、适用范围广的分析方法。然而扩展裂纹断裂力学的研究尚处于初级阶段,属于破坏过程的研究领域。这是固体力学中的一大难题(可与流体力学中的湍流问题相提并论)。

本书作者认为,引入损伤力学是研究扩展裂纹断裂力学问题的一种有效途径。这也就是我们编写这部学术专著的原因。

本书共有18章,除前3章外,后15章均为本书主编及其合作者的研究成果。其内容可以大致分为以下5类:

- ① 二维驻止裂纹断裂力学的解析变分解法;
- ② 三维驻止裂纹断裂力学的能量差率闭合解法;
- ③ 扩展裂纹断裂力学的损伤力学研究;
- ④ 材料抗断裂性能的固体力学研究;
- ⑤ 复合材料层合结构分层力学研究。

由于以上研究成果比较系统、全面,因此这部专著可以作为固体力学、结构与机械设计等有关专业研究

生的参考书。

驻止裂纹断裂力学的研究方法大体上可以分为：解析解法、数值解法、解析-数值解法与工程闭了解法。

众所周知，解析解法的优点是计算结果准、计算效率高，其缺点是适用范围窄；而数值解法的优点是适用范围宽、计算精度高，其缺点是计算效率低。

本书作者在研究二维驻止裂纹断裂力学中，提出了一种解析数值解法，也可称为解析变分解法。这种解法兼有解析解法与数值解法的优点，即计算精度高，计算效率高，而且适用范围宽。

本书作者在研究三维驻止裂纹断裂力学中提出了一种工程闭了解法，这就是能量差率闭了解法。这种解法的优点是充分利用二维成果求解三维问题。它的计算效率相当高，计算精度在多数情况下满足工程需求，同时其适用范围随二维成果的丰富而不断扩大。

扩展裂纹断裂力学的研究虽然已经取得了显著成果，但尚远不及驻止裂纹的情况。目前，在工程上还是依靠实验手段与经验公式的方法解决实际问题。

本书作者在损伤力学基本理论研究中还提出了一种描述各向异性损伤的结构力学模型，并由此建立了计及各向异性损伤耦合效应的本构关系以及损伤演化方程，形成了损伤力学新的理论体系。

本书作者在扩展裂纹的损伤力学研究中，进行了裂纹尖端场耦合渐近分析，并得到了重复加载与单调加载下裂纹扩展速率的解析表达式，使裂纹扩展速率的研究由经验公式的水平上升到理论分析的高度。



在材料抗断裂性能的研究中,首次建立了考虑断裂韧度与裂纹扩展阻力曲线厚度效应的力学模型,并通过实验研究与理论分析分别提出了含裂纹板当量平面应变区相对厚度的经验公式与理论公式,大量地节省了实验费用与工作量。在这一研究中,还提出了疲劳裂纹萌生寿命与扩展寿命预估的损伤力学——有限单元附加载荷数值解法,将疲劳裂纹萌生与扩展寿命的预报统一在损伤力学理论框架之内。

在复合材料层合结构分层力学的研究中,作者发展了在金属材料断裂力学研究中所提出的解析变分方法与能量差率闭合解法,分别用于求解二维与三维分层问题的断裂力学参量,并给出了系统的计算结果。

本书主编张行负责全书内容的统筹安排,崔德渝承担部分章节的校验工作。本书第1章至第4章以及第9章由张行编写;第5章、第6章由崔德渝编写;第7章、第8章由王奇志编写;第10章至第12章由赵军编写;第13章至第15章由张行与杨继运编写;第16章至第18章由孟庆春与胡卫平编写。

本书主编与有关参编人员对吴建国与刘亮两位博士生在本书编写过程中所提供的帮助表示感谢。

作者

2005年3月

# 目 录

## 第 1 章 二维线弹性断裂力学分析的解析方法

1.1 弹性理论平面问题力法支配方程 .....	1
1.1.1 平衡方程、相容方程与本构关系 .....	1
1.1.2 应力函数与力法支配方程 .....	3
1.2 弹性理论平面问题的复变函数通解 .....	5
1.2.1 应力函数的复变函数表达式 .....	5
1.2.2 应力分量的复变函数表达式 .....	5
1.2.3 位移分量的复变函数表达式 .....	6
1.3 含内部裂纹有限大板的通解 .....	8
1.3.1 满足裂纹表面静力边界条件的解答 .....	8
1.3.2 满足围绕裂纹位移单值条件的解答 .....	12
1.3.3 裂纹尖端近场解与应力强度因子 .....	14
1.4 含内部裂纹无限大板的特解 .....	19
1.4.1 满足无限远处静力边界条件的解答 .....	19
1.4.2 应力分量的全场解 .....	21
1.4.3 位移分量的全场解 .....	22
1.4.4 应力强度因子的表达式 .....	24
1.5 含内部裂纹的反平面问题 .....	27
1.5.1 反平面问题位移法支配方程与通解 .....	28
1.5.2 满足裂纹表面静力边界条件的解答 .....	30
1.5.3 满足围绕裂纹位移单值条件的解答 .....	32
1.5.4 裂纹尖端近场解与应力强度因子 .....	33
1.5.5 无限大棱柱体特解 .....	35
参考文献 .....	37



## 第 2 章 二维应力强度因子的能量差率解法

2.1 能量差率及其与应力强度因子的关系	38
2.1.1 应变能差率与总势能差率	38
2.1.2 能量差率与应力强度因子的关系	41
2.2 均匀受载含内部裂纹无限大板能量差率解法	46
2.2.1 能量差率解法支配方程	46
2.2.2 应力强度因子的求解	49
2.3 任意受载含内部裂纹能量差率解法	50
2.3.1 对称情况下应力强度因子的解法	50
2.3.2 非对称情况下应力强度因子的解法	53
2.4 双悬臂梁应力强度因子能量差率解法	57
2.4.1 不计根部效应的情况	57
2.4.2 计及根部效应的情况	58
2.5 平面问题应力强度因子的刚度导数解法	65
2.5.1 张开型裂纹情况	65
2.5.2 复合型裂纹情况	67
参考文献	68

## 第 3 章 二维应力强度因子边界配位解法

3.1 平面问题极坐标系分离变量解法	70
3.1.1 平面问题极坐标系基本方程	70
3.1.2 极坐标系基本方程通解	73
3.2 含边缘裂纹有限大板的通解	74
3.2.1 满足裂纹表面边界条件的解答	74
3.2.2 应力分量的全场解与近场解	77
3.3 应力强度因子的边界配位解法	80
3.3.1 裂纹以外的边界条件	80
3.3.2 应力强度因子的边界配位解法	84
3.4 标准试样应力强度因子的表达式	87
3.4.1 三点弯曲试样	87



3.4.2 紧凑拉伸试样 .....	88
参考文献 .....	90
<b>第4章 二维应力强度因子的解析变分解法——各向同性板</b>	
4.1 各向同性平面问题位移法支配方程及其通解 .....	91
4.1.1 平面问题位移法支配方程 .....	91
4.1.2 支配方程的复变函数通解 .....	92
4.2 含边缘裂纹有限大板的解析变分解法 .....	95
4.2.1 满足裂纹表面边界条件的解答 .....	95
4.2.2 含边缘裂纹板的应力场 .....	97
4.2.3 含边缘裂纹板的位移场 .....	100
4.2.4 以位移法为基础的总势能原理 .....	103
4.2.5 应力强度因子的解析变分解法 .....	105
4.2.6 边缘裂纹情况解析变分解法 .....	106
4.3 含内部裂纹有限大板的解析变分解法 .....	108
4.3.1 满足裂纹表面边界条件的解答 .....	108
4.3.2 满足位移单值条件的解答 .....	109
4.3.3 应力强度因子的解析变分解法 .....	112
4.4 含孔边单侧裂纹有限大板的解析变分解法 .....	114
4.4.1 含孔边单侧裂纹板应力场与位移场 .....	114
4.4.2 应力场与位移场解析变分解法 .....	119
4.5 含孔边双侧不等长裂纹有限大板解析变分解法 .....	125
4.5.1 含孔边双侧裂纹板应力场与位移场 .....	125
4.5.2 应力场与位移场最小二乘解法 .....	127
4.5.3 收敛试验 .....	129
4.5.4 计算结果 .....	130
参考文献 .....	133
<b>第5章 二维应力强度因子的解析变分解法——含边缘裂纹各向异性板</b>	
5.1 各向异性平面问题支配方程及其复变函数通解 .....	134



5.1.1 各向异性平面问题支配方程 .....	134
5.1.2 通解的复变函数表达式 .....	136
5.2 含边缘裂纹有限大板的解析变分解法 .....	139
5.2.1 满足裂纹表面边界条件的解析解 .....	139
5.2.2 满足绕钉孔位移单值条件与合力边界条件的解析表达式 .....	147
5.2.3 应力强度因子的解析变分解法 .....	149
5.2.4 数值计算的实例与系统结果 .....	153
5.3 含边缘裂纹有限大板的解析广义变分解法 .....	160
5.3.1 广义变分方法 .....	160
5.3.2 数值计算的实例与系统结果 .....	164
5.4 含边缘裂纹有限大板的解析分区广义变分解法 ..	169
5.4.1 分区广义变分方法 .....	169
5.4.2 数值计算的实例与系统结果 .....	173
参考文献 .....	182
<b>第6章 二维应力强度因子的解析变分解法——含内部裂纹各 向异性板</b>	
6.1 单块平板孔边裂纹情况 .....	184
6.1.1 单块平板孔边裂纹问题的支配方程 .....	184
6.1.2 单块平板孔边裂纹情况的解析变分解法 .....	191
6.1.3 单块平板孔边裂纹情况的数值计算实例和系统计算结果 .....	194
6.2 加劲平板孔边裂纹情况 .....	205
6.2.1 被加劲板的一般表达式 .....	205
6.2.2 加劲环的一般表达式 .....	208
6.2.3 加劲平板孔边裂纹情况的解析变分解法 .....	211
6.2.4 各向异性理论应用于各向同性情况的研究 .....	214
6.2.5 铆接加劲平板孔边裂纹问题的解法 .....	216
6.2.6 解析变分方法的收敛性验证 .....	219



6.2.7 加劲平板孔边裂纹情况的系统数值计算结果 .....	226
参考文献 .....	231
<b>第7章 三维应力强度因子能量差率闭合解法——张开型裂纹</b>	
7.1 含全椭圆裂纹无限大体应力强度因子能量差率 闭合解法 .....	235
7.1.1 裂纹张开位移与三维应力强度因子 .....	235
7.1.2 广义裂纹张开位移的基本微分方程式 .....	236
7.1.3 基本方程的封闭解法 .....	237
7.2 含对称裂纹三维有限大体应力强度因子能量差 率闭合解法 .....	238
7.2.1 裂纹张开位移与三维应力强度因子 .....	238
7.2.2 裂纹张开位移的基本微分方程式 .....	239
7.2.3 基本方程的封闭解法 .....	240
7.2.4 裂纹张开位移模态 .....	242
7.2.5 典型算例 .....	254
7.3 含偏心裂纹三维有限大体应力强度因 子能量差率闭合解法 .....	257
7.3.1 裂纹张开位移与三维应力强度因子 .....	257
7.3.2 广义裂纹张开位移的基本微分方程式 .....	259
7.3.3 基本方程的封闭解法 .....	261
7.3.4 裂纹张开位移模态 .....	262
7.3.5 典型算例 .....	264
7.4 含孔边裂纹圆管应力强度因子能量差率闭合解法 .....	266
7.4.1 裂纹张开位移与三维应力强度因子 .....	266
7.4.2 裂纹张开位移幅值的基本微分方程式 .....	268
7.4.3 基本方程的封闭解法 .....	271
7.4.4 裂纹张开位移模态 .....	273
7.4.5 典型算例 .....	277





参考文献	279
<b>第8章 三维应力强度因子能量差率闭合解法——剪切型裂纹</b>	
8.1 含全椭圆剪切型裂纹无限大体应力强度因子能量差率闭合解法	281
8.1.1 裂纹表面位移与三维应力强度因子	281
8.1.2 广义裂纹表面位移幅值的基本微分方程式	283
8.1.3 基本方程的封闭解法	284
8.2 含剪切型裂纹三维有限大体应力强度因子能量差率闭合解法一般原理	285
8.2.1 裂纹表面位移与三维应力强度因子	285
8.2.2 广义裂纹表面位移幅值的基本微分方程式	287
8.2.3 基本方程的封闭解法	288
8.2.4 裂纹表面位移模态	290
8.2.5 典型算例	293
8.3 含偏心裂纹三维有限大体应力强度因子能量差率闭合解法	294
8.3.1 裂纹表面位移与三维应力强度因子	294
8.3.2 广义裂纹表面位移幅值的基本微分方程式	296
8.3.3 基本方程的封闭解法	298
8.3.4 裂纹表面位移模态	299
8.3.5 典型算例	301
8.4 含孔边裂纹圆管应力强度因子能量差率闭合解法	303
8.4.1 裂纹表面位移与三维应力强度因子	303
8.4.2 广义裂纹表面位移幅值的基本微分方程式	305
8.4.3 基本方程的封闭解法	308
8.4.4 裂纹表面位移模态	311
8.4.5 典型算例	314
参考文献	317