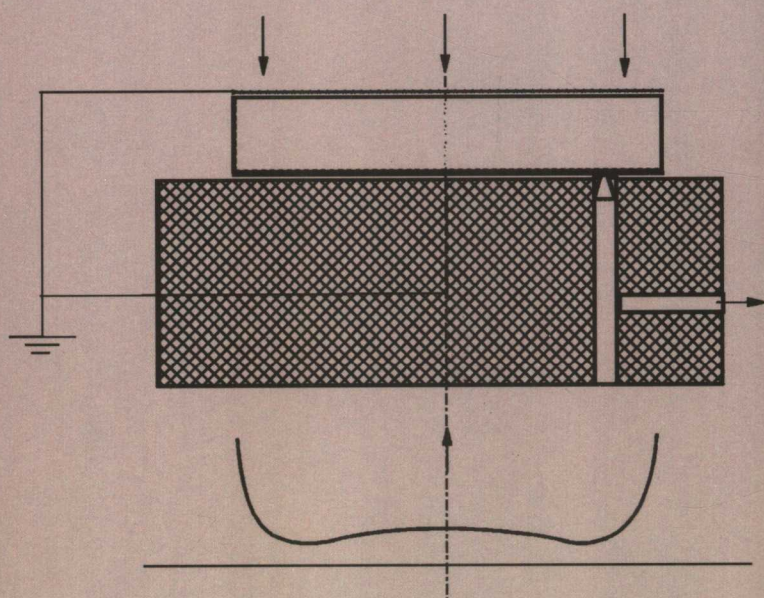


界面力学

The Mechanics of Interface

● 许金泉 著



科学出版社
www.sciencep.com

内 容 简 介

界面是先进材料和结构中普遍存在的异种或同种材料间的结合部,破坏一般从界面或其附近开始,对其分析和评价必须采用新的界面力学理论体系。本书从界面的力学建模、界面问题的分析方法,到结合材料的强度、可靠性评价以及工程应用,系统地介绍了界面力学理论。有关界面力学的研究是目前固体力学、材料科学等学科的研究热点之一。本书以作者近20年来在这方面的系列化研究成果为主要内容,是国内外首部具有较为完整体系的界面力学专著,可以为界面问题的分析和评价提供基本的理论框架和方法。

本书可供力学、机械、材料、船舶及土木等专业的研究生和教师,以及相关的工程技术和实验研究人员参考,也可作为固体力学和其他相关专业本科生的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

界面力学/许金泉著. —北京:科学出版社,2006
ISBN 7-03-017469-0

I. 界… II. 许… III. 界面-力学 IV. 034

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 067512 号

责任编辑:吴凡洁 田士勇 / 责任校对:陈玉凤
责任印制:安春生 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 9 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2006 年 9 月第一次印刷 印张:18 1/4

印数:1—2 500 字数:344 000

定价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

前 言

界面力学是因工程技术发展的需要而发展起来的一个固体力学的学科分支。随着越来越多的各类先进材料被广泛地应用到工程实际中,如金属/陶瓷结合材料、表面改性材料和各类复合材料等,界面问题变得越来越重要,传统的强度分析和评价方法的局限性日益明显。因而,应运而生的界面力学理论,正吸引着更多的科研工作者和工程技术人员的注意。作为工程技术基础理论的研究,较常见的是“打一枪换一个地方”的零散研究,而缺少持之以恒的深度挖掘,故而通常形不成一个完整的理论体系。另一方面,界面问题是如此广泛地存在,以至于现代科学技术已不可能避开它,这就要求必须建立一个较为完善且可统一地处理界面问题的新理论。作者自 20 世纪 80 年代中期开始这方面的研究以来,研究的重心始终放在对一系列的工程实际中存在的界面共性问题的探讨来建立界面力学理论体系方面。1993 年,作者与其攻读博士学位和博士后期间的导师、东京大学教授结城良治先生等合作,编写了国际上第一本具有系统性的《界面の力学》专著(日本培风馆出版)。经过 10 多年来更为深入的研究,界面力学理论已得到了进一步的完善和发展,深感有必要对其进行新的总结和提炼,使其更为完整和系统化。本书是作者近 20 年来的研究成果的总结,力求提供一种分析和评价界面问题的普遍方法和基础理论。虽然书中的某些观点和方法,可能仅是作者的一孔之见,出于体系的完整性和抛砖引玉的考虑,也提出来供广大读者参考。鉴于界面力学理论尚处于发展完善阶段,以及受作者水平所限,书中不当之处在所难免,热忱欢迎广大读者批评指正。

界面力学的基础是弹塑性力学和断裂力学。为了方便对这些基础知识不太熟悉的读者,本书特别设置了一个附录,简要介绍了相关的必要知识。本书的主要对象是力学、机械、材料、船舶及土木等专业的研究生和教师,以及相关的工程技术和实验研究人员,也可作为固体力学专业本科生的学习参考书。

最后,作者要对国家自然科学基金、教育部优秀年轻教师基金和教育部博士点基金表示衷心的感谢。正是他们的多次资助,使得作者在回国后得以继续进行界

面力学理论的体系化研究,本书也才得以成稿。作者还要对国内外多位共同研究者,特别是日本长冈技术科学大学的武藤睦治教授和浙江大学的丁皓江教授等表示感谢,他们对本书的编写,提出了许多宝贵的意见。本书的出版,还得到了上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院,以及上海交通大学 211 工程项目的支持,特此鸣谢。

作 者

2005 年夏于上海交通大学

目 录

前 言

第 1 章 绪论	1
1.1 界面力学的研究对象和任务	1
1.2 界面力学发展史	2
1.3 界面力学的研究方法	4
1.4 界面力学的发展趋势	5
1.5 本书的构成	6
第 2 章 界面的力学模型	9
2.1 界面相、界面层与中间层	9
2.2 力学模型的必要性和合理性	10
2.3 界面的分类	12
2.4 界面问题的特殊性	14
2.5 界面的强度特性与结合材料的强度	16
2.6 界面的其他力学模型简介	17
第 3 章 界面端奇异应力场	20
3.1 Dundurs 参数	20
3.2 平面界面端附近的奇异应力场	24
3.3 常见几何形状界面端的应力奇异性	29
3.4 表面条件对奇异应力场的影响	33
3.5 埋入角点(界面折点)附近的奇异应力场	35
3.6 三维界面端奇异应力场数值分析例	36
3.7 三维界面端应力奇异性的确定方法及其数据库	40
3.8 接触界面端附近的奇异应力场	45
3.9 轴对称界面端的应力奇异性	48
3.10 压电结合材料界面端的奇异性	53
3.10.1 轴对称变形问题(即 $\varphi_4=0$)	56

3.10.2 扭转问题	60
3.10.3 一般压电材料界面端	61
3.11 应力奇异性及应力强度系数的数值决定方法	63
3.12 界面端应力奇异性的实验研究	71
第4章 界面裂纹裂尖奇异应力场	78
4.1 界面裂纹的振荡应力奇异性	78
4.2 界面裂纹的接触模型及特征	80
4.3 无限平面结合材料界面裂纹的理论解	84
4.4 界面裂纹的应力强度因子	86
4.4.1 实际应用中常用的定义	86
4.4.2 理论分析中常用的定义	88
4.4.3 界面裂纹问题中的相似性原理和具有物理意义的应力强度因子的 定义	89
4.5 界面裂纹的势能释放率	93
4.6 应力强度因子的数值计算方法	94
4.7 正交各向异性材料界面裂纹的应力强度因子	96
4.8 III型界面裂纹	103
4.9 三维界面裂纹的应力强度因子	104
4.10 裂尖在界面上的裂尖奇异应力场	107
第5章 界面裂纹及界面端的断裂准则	121
5.1 结合材料界面端的破坏形式	121
5.2 界面裂纹的曲折破坏准则	122
5.2.1 均质材料裂纹的曲折破坏准则	122
5.2.2 界面裂纹的裂尖应力场	124
5.2.3 $\epsilon=0$ 的界面裂纹曲折破坏准则	125
5.2.4 $\epsilon \neq 0$ 时的界面裂纹曲折破坏准则	125
5.2.5 界面裂纹的曲折破坏实验	129
5.3 界面裂纹沿界面破坏的实验评价准则	133
5.4 界面裂纹裂尖屈服域的一次近似	138
5.5 基于最小应变能密度理论的界面裂纹曲折破坏准则	140
5.6 界面破坏椭圆准则的能量依据	142

5.7 界面端破坏准则	144
5.7.1 初始裂纹法	145
5.7.2 基于界面端奇异场的评价方法	148
5.7.3 等价应力强度因子法	150
5.8 界面端附近裂纹的应力强度因子	154
5.9 界面裂纹疲劳扩展规律	157
5.10 关于界面起裂准则的初步考察	162
第6章 结合材料的基本解	165
6.1 镜像点法	165
6.2 无限平面结合材料受集中力作用的问题	166
6.3 平面表面改质材料受表面集中力作用的基本解	169
6.4 两个半无限体结合材料的三维基本解	173
6.4.1 垂直于界面的载荷的解	173
6.4.2 平行于界面的载荷的解	176
6.5 表面改质材料受表面集中力作用的三维基本解	180
6.5.1 垂直于表面的集中力的解	180
6.5.2 平行于表面的集中力的解	183
6.6 理论解的应用举例	188
6.7 讨论	190
第7章 结合残余应力	193
7.1 圆形介在物引起的结合残余应力	193
7.2 结合残余应力的简易弹性数值分析方法	195
7.3 结合残余应力的分布特征	197
7.4 结合残余应力的缓和的方法	201
7.5 结合残余应力的界面端奇异性的数值考察	202
7.6 结合残余应力的界面端奇异性的理论考察	205
7.7 结合残余应力下界面裂纹的应力强度因子	208
第8章 弹塑性界面力学理论	215
8.1 J积分和 HRR 场	215
8.1.1 J积分	215
8.1.2 HRR 场	217

8.2	线性硬化结合材料界面端的奇异应力场	220
8.3	幂硬化结合材料界面端的奇异应力场	225
8.3.1	硬化指数不同时的界面端奇异应力场	227
8.3.2	数值验证及位移匹配法的适用范围	232
8.3.3	硬化指数相同时的界面端奇异应力场	238
8.4	关于弹塑性界面端破坏评价参数及评价方法的考察	241
8.5	陶瓷/金属结合材料的残余应力的弹塑性应力奇异性	242
第9章	界面力学的工程应用	247
9.1	薄膜涂层材料界面结合强度的评价	247
9.2	微动疲劳	253
9.2.1	基于界面力学理论的统一评价方法	254
9.2.2	微动疲劳实验及其评价	256
9.3	搭接板的疲劳强度和寿命的评价	259
9.4	其他应用综述及展望	262
附录	弹塑性力学和断裂力学基础简介	266
A.1	弹性理论简介	266
A.2	塑性理论简介	273
A.3	断裂力学简介	274

第 1 章 绪 论

1.1 界面力学的研究对象和任务

随着各类功能材料、复合材料等先进材料的工业应用范围的不断扩大,由不同材料组成的界面的力学行为,越来越受到了人们的重视。我们把两种不同或者相同的材料,利用某种结合方法连接在一起使用的结构或组合材料,称为结合材料,而其结合部,统称为界面。在现代科技高速发展的今天,无论从宏观还是微观的角度看,可以说界面问题已变得无处不在,它已是科研和工程技术人员必须逾越的技术难关之一。一方面在宏观范围内,各类结构及材料的结合部,如薄膜涂层材料的涂层界面、金属/陶瓷结合界面、异种金属结合界面、功能器件与承载构件的结合界面、复合材料层合板的层间等,对材料或结构整体的力学行为乃至其功能性能有着十分重要甚至是支配性的影响;另一方面在细观范围内,纤维与基体材料等的界面、晶粒界面、颗粒增强体与基体的界面、介在物与基体的界面等的力学行为,对先进材料的性能设计与开发及其结构寿命的精确评价等,具有举足轻重的意义。

从日常生活经验中,我们知道:诸如焊接、粘接等结合材料,总是比较容易在结合处或其附近首先发生破坏。这是因为结合材料界面附近不仅容易存在这样那样的缺陷,导致结合强度的低下,而且会因界面的存在而引发应力集中并产生残余应力等,使界面附近的材料处于较高的应力水平。因此由结合材料构成的结构的强度和寿命,一般取决于界面的强度寿命特性。界面问题有它许多自身固有的特性,在现实生活中,实际上我们总在自觉或不自觉地利用界面的特性。例如,利用粘接界面的抗剥离能力较弱的特性,来设计包装的封口,或引入复合材料中的桥联增韧机构等。在大型结构或岩体的解体工程中,也常常利用结合部位强度较弱的特点。然而,在新材料和新结构的设计开发中,则一般要求界面强度达到一定的要求,甚至为了提高界面强度,而不断进行结合方法、工艺和界面结构的革新。目前国际上有大量的研究人员在从事有关界面问题的研究。例如,为了提高电子产品的寿命和可靠性,国际上已举行多次关于电子封装技术的国际会议,而其关键问题,实质上主要就是一个由于结合界面引起的力学问题。

正是由于这种工程技术上的需要,20 世纪 90 年代初,出现了一个新的固体力学的学科分支——界面力学。这是一门用普遍性的方法分析和评价各类结合界面的力学行为,进而达到结合材料或结构的强度寿命评价及其优化设计的目的的学

科。由于界面问题的特殊性,不仅其应力分析需要相应的技巧和方法,而且传统的强度和寿命评价方法也不适用于结合界面的力学评价。因此需要重新建立一个针对界面问题的理论体系,以适应工程技术的发展需要。国际上一些著名的力学家,都相继进行了界面力学性能方面的研究,为界面力学的建立和发展奠定了基础。由于界面力学是受到工程技术发展的催生而发展起来的,因此许多关于界面问题的研究,是针对特定的结合材料或复合结构的界面进行的。而作为一种具有普遍性的基础理论体系,则必须更多地着眼于界面问题的共性,通过系统性的研究,才能建立一套对各种界面的力学行为行之有效的评价方法。从这个角度出发,界面力学所要解决的关键问题可以总结为^[1]:

- (1) 建立各种界面的力学模型。
- (2) 描述界面力学行为参数的确定及其分析方法。
- (3) 建立评价界面强度寿命特性的准则。
- (4) 提供对制造高性能界面的理论性指导。

作为一门诞生不久的新生学科,界面力学的研究对象和任务,仍处于不断的发展和充实的过程中。除了在宏观(即可以适用连续介质力学概念的范畴)和细观范畴内对界面的力学行为的研究之外,最近国际上也出现了一些从分子层面(纳观范畴)对界面进行研究的文献^[2~4]。这种多尺度的研究,必将极大地丰富界面力学的研究内容,加深我们对界面的力学行为的认识。但是,本书所谓的界面力学,研究对象限定在宏观范畴内,即只介绍采用连续介质力学方法展开的界面力学理论。

1.2 界面力学发展史

人们对界面问题的认识和利用,可以追溯到古代。例如,从竹材中剥取篾片,油漆工艺的改进等。考古学的发现还表明^[5],在 4000 多年前,人们就已开始把不同的材料粘接起来制成工艺品等。令人叹为观止的是,杭州某古寺中的一根立柱,居然是由“刨花”粘接而成的,成为一段千古流传的佳话。但是,在 20 世纪 40 年代以前,采用粘接等手段,直接把材料连接起来使用的部位,一般都是非受力构件。对于承载构件,如飞机机身、船体结构等,都是采用当时认为是最可靠的铆接或螺栓紧固的方法来进行连接的。此后焊接技术得到了高速发展,不但被广泛应用于同种金属材料间,而且也广泛地应用于不同金属材料间的结合,使制造技术得到了一次革命性的飞跃。人们也认识到了焊缝性能对结合可靠性的重大影响。可以说,焊接技术的发展,已给界面力学的孕育,提供了必要的土壤。但是,随之出现的大量的关于焊缝的力学性能分析评价的研究,基本上都是经验性的或半经验性的,实际上并没有抓住界面问题的本质,未能从理论上建立起严密的分析和评价方法。1947 年,英国的 De Bruyne^[6,7] 首先发现,利用树脂胶可以把金属材料连接起来,并

具有较好的强度特性。这种粘接技术很快被应用于飞机机身、船体和车体结构中。20 世纪末,许多更为可靠和有效的结合手段应运而生,如扩散结合、锡焊、激光焊接等等,使得结合界面更为“精致”,甚至出现了结合部位的强度超过被结合的母材的情况。这些新的结合技术,极大地推动了整个工业技术的发展(如锡焊被广泛应用于大规模集成电路的制造技术中,金属/陶瓷结合被应用于高性能发动机等),同时对复合材料的发展和应用,起到了重要的推动作用。这种具有结合构造的材料或构件的大量应用,对结构的强度和可靠性评价,提出了更为复杂的要求:一方面必须对界面的力学性能进行准确的定量分析与评价;另一方面,为了适应特殊工况而发展起来的表面改性技术,如利用等离子喷射、物理蒸镀等方法在金属材料表面涂上一层几个到几百个微米的陶瓷薄膜等,也需对其界面的力学行为的定量评价。界面力学正是在这种强烈的工程应用要求的背景下,迅速发展起来的。

将结合部位理想化为界面,继而进行力学分析的最早的研究,是 1959 年 Williams^[8]的对界面裂纹裂尖进行的关于应力振荡奇异性的研究,包括随后出现的一些界面裂纹的理论解,都只是对界面裂纹裂尖应力场的数学描述,而不涉及如何评价的问题。1966 年, Bogy^[9]发现,在结合界面的端部,在弹性学上,应力可以是无穷大的(称为应力奇异性,即应力集中非常严重),定性地说明了为什么结合材料的破坏,多数是从结合界面端部开始的现象。此时,界面问题中关于应力分布的两个最基本的特征,实际上就已经被发现了。但是,由于振荡应力奇异性不但自身具有奇妙的性质,而且还会导致裂纹面产生相互嵌入的物理矛盾,故而当时多数人认为振荡应力奇异性仅是一个数学上的游戏,在工程实际中难以得到应用。而关于界面端应力奇异性的研究,也遭遇到了断裂力学中裂尖应力奇异性所曾遭遇过的同样的“冷眼”,即认为由于塑性屈服,应力不可能趋于无穷大,故而也无多大现实意义。关于这一点,可在有关研究销声匿迹近 20 年的历史中得到证实。1979 年, Comininou^[10]提出了界面裂纹裂尖附近的裂纹面相互接触的界面裂纹接触模型,消除了裂纹面相互嵌入的不合理现象和应力的振荡性。由于在大多数情况下,在裂纹的两个裂尖中总有一端的接触区域非常小, Dundurs 和 Gaudesen^[11]进一步提出了一端开口而另一端闭口的界面裂纹接触模型。这些理论研究的结果表明,包含相互嵌入这一物理矛盾的界面裂纹经典解,当嵌入区较小时,在振荡区域以外,其裂尖应力分布与消除了这一矛盾后的接触界面裂纹的理论解基本相同。Shih 和 Asaro^[12]采用弹塑性有限元分析方法,发现塑性变形可使应力振荡性和裂纹面相互嵌入的现象消失,并且当屈服区不大时(即小规模屈服),裂尖附近应力场可近似地以具有振荡应力奇异性的弹性解来表示的结论。在这些研究的基础上,1988 年, Rice^[13]明确提出,在小规模屈服条件下,具有振荡应力奇异性的弹性解,可以作为评价界面裂纹断裂的依据的观点,从而结束了关于界面裂纹经典弹性解的有

用性的争论。随后出现了许多关于界面裂纹分析和评价的研究,为线性界面断裂力学的理论体系的确立,提供了丰富的材料。同一时期,由于断裂力学理论的发展和完善,应力奇异性的概念已被广泛接受,因此,关于界面端应力奇异性的研究,也大量涌现出来。人们开始试图以界面端奇异应力场,作为评价界面端强度的依据。从此,界面力学作为一个新兴的学科分支,得到了长足的发展。

1.3 界面力学的研究方法

作为由工程技术的发展所催生的学科,界面力学一方面必须为结合材料的强度和可靠性评价提供必要理论依据,另一方面,也必须为新材料、新结构的设计与开发提供理论指导。由于界面端应力奇异性 and 界面裂纹裂尖的振荡应力奇异性,以及界面本身与母材的强度不同,传统的强度评价方法,如以应力为基本评价参数的材料力学式的方法,和以裂纹应力强度因子为基本评价参数的断裂力学式的方法,都不能直接用来评价结合材料的强度或断裂行为,而必须建立一套专门的理论。为了建立适合于结合材料的强度和可靠性评价方法,必须从以下几个方面展开系统的研究^[14]。

(1) 结合材料的高效、高精度数值分析方法。由于界面的存在,只有极少数界面问题可以理论求解,如无限体结合材料的界面裂纹受远场均布载荷作用的理论解,而且实验测量也难以准确测得界面处的应力。故而,首先必须具备精确数值求解的能力,才能对结合材料,尤其是界面,进行恰当的应力分析。这种数值分析方法,还必须包括如何以数值方法,求取表征界面问题特征的参数,即基本评价参数的部分。

(2) 确定基本评价参数。从本质上讲,界面裂纹裂尖和界面端附近的奇异应力场,对结合材料的破坏,起着支配作用。因此,必须通过理论分析的方法,首先对该奇异应力场有一个全面的把握。然后从该场的特征描述,以及对破坏机理的分析出发,确定具有实用意义的评价参数。

(3) 建立评价准则。借助断裂力学和材料强度学的相关知识,利用基本评价参数,建立具有普遍意义的强度或断裂准则。然后通过实验,验证、修正或完善所建立的评价准则,确定表征界面强度的界面特性值。必须指出,随着人们对材料破坏机理认识的加深,我们已经可以提出一些具有理论依据的评价准则,而不必完全仅靠实验去摸索和建立经验性的评价准则。

(4) 通过将所建立的评价准则和破坏理论应用于工程实际问题,进一步完善评价准则和基本参数的分析方法。

(5) 确立测定界面强度特性值的标准实验方法。这种方法必须简单、可靠,并且必须排除试件几何形状及加载形式的影响。

应该指出,以上各个方面的研究,从建立界面力学理论体系的角度看,并不是相互割裂的,而是紧密联系在一起的。往往需要多次的反复,才能确定合适的评价参数和评价准则。其相互间的关系,可以用图 1.1 来表示。

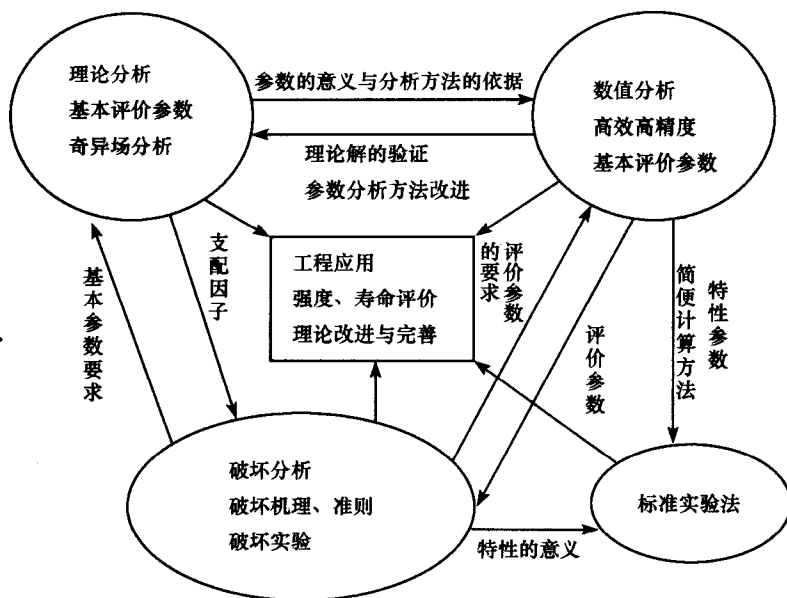


图 1.1 界面力学的研究方法 with 基本思路

1.4 界面力学的发展趋势

到目前为止,绝大多数关于界面的研究,都集中在宏观的线性弹性的范围内,并且其中的绝大多数又只是关于其应力分析的。因此,人们对宏观界面及其对应力分布的影响已有较为清晰的认识。但是应力分析本身并不是我们的最终目的,为了能够对实际的结合材料或结构进行精确的定量评价,有关界面的破坏机理和准则的研究,显得越来越重要。因此,实验界面力学今后必然会取得重大的突破。通过精巧设计的实验,不仅可以弄清楚界面的破坏方式与机理,从而建立起行之有效的评价准则及方法,还可以建立关于界面性能的标准实验法,便于工程实际中的界面质量管理。实际上,目前结合材料的界面力学性能,往往分散性较大,并且也尚没有统一的定量表征方法。从力学的角度看,这是由于人们对造成分散性的原因尚未清楚,对破坏机理的认识不够造成的。要解决这些问题,显然仅凭理论应力分析是不够的,只能通过实验界面力学,去进行探索和实践。从界面质量管理和保障结合材料结构使用安全性的角度出发,实验界面力学还应包括界面损伤的无损

检测方法的研究,而这部分的工作,往往必须对界面(尤其是含缺陷的界面)的动力学响应进行细致的分析,即是与界面动力学理论密切相关的。另外,宏观的工程实际中的结合材料,也有相当一部分会产生较大的塑性变形,如陶瓷/金属结合材料等,虽然目前有一些分析弹塑性奇异性和应力场的理论和方法,但评价准则基本上还是空白,作为弹塑性界面力学理论,仍是不完整的,需要作进一步的研究,以满足工程实际的需要。

另一方面,随着工程制造技术和材料科学的不断发展,各种新的界面形式层出不穷。界面力学理论必须针对这种新形式的界面形式,不断地发展和完善。如在计算机芯片中,硅片与粘接层的厚度已只有微米甚至是纳米的量级,并且多个界面距离很近,其相互作用不只局限于对应力分布等的影响,而且对其破坏形式和破坏准则及界面的力学性能也有显著的影响。要解决这类问题,目前日趋成熟的线性界面力学理论是有很大的局限性的,必须依靠新的微细观乃至纳观界面力学理论。实际上国际上也已有一些学者在开展这方面的研究并取得了一些初步的成果^[2~4]。又如在军工和电子产品中,黏弹性界面(一侧为弹性体,另一侧为黏弹性体)是可以经常观察到的情况。由于应力松弛和材料蠕变,界面对应力分布及材料破坏,以及对界面本身的性能变化和破坏有很大的影响,现阶段可以说尚没有可信的研究成果。因此,黏弹性界面力学理论也是为了满足工程需要而迫切需要建立和发展的内容。再如近几年来正在高速发展的功能材料,实际使用中一般需与其他结构材料结合在一起,此时的界面,不仅对应力场及其对应的机械性能等有影响,也对电场、磁场等功能信号有巨大的影响,而这些影响又是相互耦合在一起的^[15],无论从结构的安全性,还是从功能元器件的可靠性考虑,都必须作多场耦合的分析和评价,即需要多场耦合界面力学理论的支撑。

总之,对于新型的结合材料和界面,需要根据具体情况,利用界面力学的基本概念和相应的实验,不断地完善和发展界面力学理论。换句话讲,关于界面力学的研究,相当一部分领域仍处在不够完善甚至是空白的状态,需要更多的研究者去攻克其中出现的新问题,才能满足工程实际的需要。

1.5 本书的构成

本书第1章简要回顾了界面力学的发展历史,介绍了界面力学的研究对象和任务及其研究方法,并简要介绍了界面力学的发展趋势,以供相关研究者作进一步研究时参考。第2章介绍了界面的力学模型理论、界面的分类及对应的界面边界条件和界面问题的特殊性。建立合理的界面力学模型,是对结合材料进行分析和评价的出发点。第3章从具有任意形状的结合材料界面端着手,介绍了各种界面端奇异性及奇异应力场和相关参数的数值、实验分析方法。第4章介绍了界面裂

纹的裂尖附近应力场及其应力强度因子的定义和分析方法。第5章介绍了界面裂纹和界面端的各种可能的破坏形式以及相应的破坏准则。第6章提出了一种求解结合材料基本解的镜像点方法,并给出了一些常见结合材料的基本解。这些基本解对于精确求解界面应力具有重要的意义。尤其是结合材料具有极薄的中间层或涂层时,常规的数值计算方法往往难以得到满足精度要求的结果,将这些基本解应用于边界元法或作为格林函数,可以大大提高数值计算的精度。第7章分析了对结合材料强度至关重要的结合残余应力,并提出了缓和残余应力的方法。第8章介绍了界面裂纹和界面端附近的弹塑性应力分布特征。第9章介绍了一些利用线性界面力学理论解决工程实际问题的实例。为了便于读者阅读,附录中还简要介绍了学习本书时所必须的一些最基本的弹塑性力学和断裂力学的基础知识。每章末尾提供一些思考题,供有兴趣的读者作进一步的思考。

思 考 题

1. 为什么对结合材料的分析评价必须采用新的理论体系?与均质材料相比,结合材料有哪些特点?
2. 例举一些界面问题,并考察其变形和应力分布特征。
3. 例举一些工程和生活实践中利用界面特性的实例。
4. 要解决工程中出现的新的力学问题,一般需要从哪几个方面进行研究?

参 考 文 献

- [1] 結城,岸本,石川等. 界面の力学. 東京:培風館,1993.
- [2] Ague J A, Gilmore C M. Molecular dynamics simulations of film-substrate interface mixing in the energetic deposition of fcc metals. *Thin Solid Films*, 1996, 272: 244~254.
- [3] Fushino R, Umeno Y, et al. Atomic simulation on mixed mode delamination of nanoscale thin film from interface edge. *Mesomechanics 2003 Conferences*, Japan, 2003.
- [4] 北側隆行, 平方寛之, 山本吉毅. AFMを用いたシリコン基板とタングステン微小材料の界面強度評価. *日本機械学会論文集*, 2003, 69: 1216~1221.
- [5] Schliekelmann R J. *Delijmde metalen constructies*. 林毅訳. 接着金属構造. 東京:日刊工業新聞社, 1977.
- [6] De Bruyne N A. The physics of adhesion. *J Scientific Instrument*, 1947, 24: 29~35.
- [7] Houwink R, Salomon G. *Adhesion and adhesive*. Amsterdam: Elsevier, 1967.
- [8] Williams M L. The stress around a fault or crack in dissimilar media. *Bull Seism Soc Am*, 1959, 49: 199~208.
- [9] Bogy D B. Edge bonded dissimilar orthogonal elastic wedges under normal and shear loadings. *J Appl Mech*, 1966, 35: 146~154.
- [10] Comininou M. The interface crack in a combined tension-compression and shear field. *J Appl Mech*, 1979, 46: 345~352.
- [11] Dundurs J, Gutesen A K. An opportunistic analysis of the interface crack. *Int J Fracture*, 1988, 36:

-
- 151~159.
- [12] Shih C F, Asaro R J. Elastic-plastic analysis of cracks in biomaterial interface. *J Appl Mech*, 1988, 55: 299~316.
 - [13] Rice J. Elastic fracture mechanics concepts for interfacial cracks. *J Appl Mech*, 1988, 55: 98~103.
 - [14] 许金泉. Boundary element analysis of bonded dissimilar materials and its evaluation based on interfacial fracture mechanics. 见: 东京大学博士论文, 1992.
 - [15] 武藤睦治, 许金泉, 宫下幸雄. 接合材界面端特異挙動の実験測定法. 第 33 回応力・ひずみ測定と強度評価のシンポジウム論文集, 東京, 2002, 93~98.

第2章 界面的力学模型

2.1 界面相、界面层与中间层

在物理意义和直观感觉上,界面指的是结合材料的结合部,与力学模型意义上的界面的含义是有区别的。实际的结合材料的结合部,不但可能包含许多微小缺陷,而且其材料特性往往是十分复杂的^[1]。即使像粘接这样的简单结合,由于母材表面的粗糙度、粘接剂厚度等的影响,严格地讲,其结合部也不是一个理想的面。而对于由扩散结合形成的结合部,则更是空间的一个区域,其材料特性在结合部内呈分布型,不仅十分复杂,而且也具有随机性。因此,物理意义上所谓的界面,即材料的结合部,实际上不可能是一个理想的面,而是一个具有十分复杂的力学行为的中间材料所占据的区域,或一层微观上表面不平的粘接剂。我们把材料组织不同于被结合母材的结合部,称为界面层。而把界面层内的中间材料或粘接剂,统称为界面相。界面相材料可以由扩散形成的,也可以是由产生化学反应形成的。由于界面层及界面相对界面的力学性能起决定作用,其性能决定了结合是否牢固,材料学家对其十分重视,不仅采用先进的观察技术对其组织结构进行显微观察和研究,而且也基于定性认识,努力改变界面相的结构和组成,以提高界面的结合强度。但是,由于界面层一般很薄,通常在几个微米,大至数百个微米的量级,并且材料组织分布又很复杂,要定量评价界面相的力学性能几乎是不可能的。因此,在力学分析中考虑界面相,是不现实的。另一方面,工程实际问题中所要求的,通常也不是界面相本身的强度或力学特性,而是结合材料整体的强度行为。由于结合材料存在多种可能的破坏形式,结合材料的强度与界面相的强度一般是不一样的。换句话说,即使能对界面相的力学行为作出定量的描述,也并不意味着能对结合材料整体的强度作出定量的评价。

有时,出于结合工艺的要求,也会在结合部插入另外一种材料^[2]。如在钢材和陶瓷的结合中,往往在中间插入一层铜,其厚度一般在毫米量级。此时,实际上会形成两个界面结合部,即铜与钢材的界面,和铜与陶瓷的界面,而在两个界面结合部间,有一个稳定的铜的区域。我们把这种在相距较近的两个界面之间,而且材料特性相对稳定的层,称为中间层或夹层,以别于界面层。中间层也可以是在结合过程中自然形成的,其材料特性也可以是变化的。例如,在金属/陶瓷的结合中,为了减小残余应力,在结合部引入一层材料特性在一端接近金属,而在另一端接近陶瓷的材料,即所谓梯度材料。梯度材料的材料特性虽然是变化的,但通常是有规律