

固体的损伤与破坏

王光钦 高 庆 主编



成都科技大学出版社

固体的损伤与破坏

王光钦 高 庆 主编

成都科技大学出版社

• 1993 •

固体的损伤与破坏

王光钦 高 庆 主编

*

成都科技大学出版社出版发行

成都东方彩印厂激光照排胶印

开本 787×1092 1/16 印张 15.875 插页 3 版面字数 377 千字

版次 1993 年 10 月第一版 印次 1993 年 10 月第一次印刷

印数 1—600 册

ISBN 7-5616-0581-1/O·172

定价:15.00 元

[川]新登字 015 号

内 容 提 要

本书是为庆贺我国著名的力学专家,孙训方教授七十寿辰而出版的有关“固体的损伤与破坏”方面的一本专著。全书包括断裂力学与结构力学;损伤力学与细观力学;材料本构关系;疲劳;计算力学及变分原理;实验力学及其应用;动力系统稳定性等方面的论文共 37 篇。这些论文汇集了国内外一批卓有成就的专家、学者们的研究成果。

本书可作为高等院校有关专业高年级学生的参考,亦为从事力学研究的有关人员提供了极其丰富的资料。

谨以此书
庆贺孙训方教授七十寿辰

编辑委员会

主编	王光钦	高 庆		
编委	戴振羽	王嘉弟	孔祥安	曹天捷
	刘淑珍	胡德麒	赵 华	

献 辞

孙训方教授 1923 年 11 月 27 日生于安徽省寿县,1945 年毕业于昆明西南联合大学土木系,获工程学士学位,1946 年至 1948 年在清华大学担任助教,1948 年至 1949 年在美国哈佛大学工程研究生院应用力学专业学习,获科学硕士学位,同年 9 月回国,任中国交通大学唐山工学院(即后来的唐山铁道学院,内迁四川后,今名西南交通大学)土木系讲师,次年聘为副教授,1978 年晋升为教授,1981 年国务院批准为首批博士生导师。1988 年设立西南交通大学力学博士后流动站,孙训方教授为站内主要专家。

孙训方教授的科研工作广泛涉猎固体力学的各个分支领域,在断裂力学、损伤力学和材料本构理论方面有诸多建树,是我国力学界的知名学者。

孙训方教授早在 1972 年就公开倡议学习断裂力学和应用断裂力学,在全国各地讲学,举办各种讲座和研讨班,编写讲义,翻译断裂力学专著,及时介绍国外最新研究成果;积极支持和参加断裂韧度测试、压力容器缺陷评定等国标和部颁标准的制定工作,并致力于断裂力学在工程实际中的应用,为国民经济建设服务取得了显著的社会效益和经济效益,被誉为“我国断裂力学研究的先驱”。

孙训方教授是我国较早从事损伤力学研究的学者之一。1985 年指导博士生完成了用损伤力学方法研究裂纹扩展的第一篇博士论文。1988 年发表了题为“在连续介质力学框架中如何处理损伤局部性问题”的论文,提出了损伤局部性的概念,并提出要建立一种模型,它既反映出在均匀应力场中不同位置处的构元其损伤程度的不同,也反映出各构元的损伤演变规律间的明显差异。随后又强调了引进概率模型的必要性和不可避免性。在他指导下,已完成了局部损伤模型、有限元分析、损伤量测等系列研究工作,得到了若干有别于连续介质损伤力学的重要结论,正在逐步形成损伤局部性理论新体系。

材料本构理论是孙训方教授的另一个主要研究领域,以研究多轴非比例循环加载下材料变形行为为特点,系统地进行了各种非比例循环试验,积累了国内首批这方面的完整试验数据;在热力学和细观力学基础上,发展和修正了几种强化和软化材料的非比例加载本构模型。

孙训方教授的研究工作得到国家自然科学基金委员会、国家教委博士点基金委员会、铁道部和四川省的资助。先后发表了近 80 篇学术论文,曾获全国科学大会奖、国家教委科技进步奖。

孙训方教授广泛开展国内、外学术交流活动。多次赴美国、日本、加拿大参加国际学术会议。曾应加拿大蒙特利尔大学工学院应用力学研究室邀请赴该校讲学。在国内召开的断裂、结构材料、本构关系等国际学术会议上多次应邀担任组织委员、学术委员或分组主席；还经常在全国性的有关学术会议上作大会邀请报告。

鉴于孙训方教授的学术成就，南京化工学院(1984)、成都科技大学(1984)、大连铁道学院(1986)、东南大学(1988)等校聘其为兼职教授。1982~1986年担任中国力学学会副理事长，1983~1987年聘为四川省首届科技顾问团成员。还先后担任中国反应堆结构力学专业委员会主任、四川省力学学会副理事长、四川省金属学会常务理事、四川省机械工程学会常务理事等职。

孙训方教授从事高等学校教育40余年，先后参编和主编4套《材料力学》(上、下册)教材。他主编的《材料力学》1964年版和1979年版，反映了我国不同发展时期的要求，受到各高等工科院校的广泛欢迎。1979年版《材料力学》还被评为国家教委优秀教材。孙训方教授早在60年代就参加了全国工科力学教材编审委员会工作，1978年担任全国高等学校工程力学课程指导委员会副主任委员，为我国高校力学课程建设做出了贡献。1978年恢复研究生招生制度以来，孙训方教授在教学上主要致力于研究生和博士后培养。他一贯坚持少而精的教学原则，主张启发式的教学方法，注重实践和能力培养。十多年来，已招收培养硕士生20人、博士生15人、博士后9人，其中不少人已成为所在单位的技术骨干。为了表彰他在教育事业中所做的贡献，铁道部(1989)和四川省(1991)分别授予他优秀教师和优秀导师荣誉称号。

孙训方教授几十年如一日，不断追踪学科前沿，开拓新的研究领域，严谨治学，孜孜以求，在科研和教学工作中取得了卓著的成就，对力学学科的发展作出了重要贡献。在孙训方教授七十寿辰之际，孙训方教授在各地的朋友、同行和学生们寄来几十篇近期研究论文，我们将其汇集成《固体的损伤与破坏》一书，以表达作者及关心本书的人们对孙训方教授的钦佩与敬意。

高庆

王光钦

一九九三年六月

目 录

一、中国反应堆结构力学十四年及其未来	谷芳毓 (1)
二、具有 Voigt 型剪切界面层的桥联效应力学分析	伍章健 余寿文 (6)
三、三维理想尖裂纹、纯裂纹和切口问题的统一描述及其数值模拟	张永元 阮国华 (14)
四、裂纹体分析的权函数法与应用	吴学仁 (21)
五、高温管道谱载下 PS (T) 试件的裂纹扩展寿命	成建国 宋建华 黄振仁 (28)
六、桥梁钢厚板对接接头的 J_R 阻力曲线试验研究	张金铎 (34)
七、试样厚度与相对裂纹长度对门槛值的影响	万久长 (41)
八、四边固定矩形厚板的应力分析	王桂芳 (52)
九、ON MESH DEPENDENCE IN LOCAL APPROACH OF CONTINUUM DAMAGE MECHANICS	[中] 刘彦 [日] 村上澄男 (62)
十、疲劳损伤临界值和损伤局部性	戴振羽 (75)
十一、单轴拉伸下蠕变损伤局部性的一种计算模型	曹天捷 高 庆 (82)
十二、随机初始损伤的研究及其计算机模拟	高 庆 钱 蓉 黄正中 (87)
十三、裂纹体与无裂纹体统一损伤断裂理论的研究	郑长卿 (93)
十四、考虑热不协调性的 Ni 基单晶合金细观力学分析	岳珠峰 郑长卿 (97)
十五、一种基于神经网络理论的计算微观力学模型研究	翟 己 (110)
十六、材料在单轴拉伸下的应变局部化分析	宁 杰 (116)
十七、1Cr18Ni9Ti 不锈钢循环特性的温度依赖性	杨显木 高 庆 蔡力勋 (125)
十八、循环软化金属的非比例循环塑性本构关系的描述	袁 珩 (130)
十九、复合材料层板疲劳损伤演变规律的刚度衰退模型	王殿富 (138)
二十、工程实用寿命预测方法	平 安 王德俊 徐 灏 (142)
二十一、疲劳载荷下的强度退化与失效概率模型	谢里阳 林文强 (148)
二十二、基于临界面法的多轴低周疲劳寿命判据	陈 旭 高 庆 (153)
二十三、PREDICTION OF FATIGUE CRACK INITIATION SITES IN A NOTCHED COMPOSITE PLATE	沈国武 (158)
二十四、1Cr18Ni9Ti 钢的单轴低周疲劳特性及其微观结构	何国求 陈成澍 高 庆 (165)
二十五、随机有限元法及其在固体力学中的应用	陈 虬 (170)
二十六、粘弹性体二维滚动接触的基本解及边界元列式	孔祥安 (179)
二十七、非线性弹性大变形体接触问题的一种新算法	赵 华 (186)
二十八、现代力学中的变分问题与最优控制理论	曾 攀 (191)
二十九、正交各向异性变厚度薄板的动力定解方程	洪宝宁 (195)

三十、固体力学的重构方法	徐 铸	(201)
三十一、重建平面应变场的余场补偿法	何小元 徐 铸	(208)
三十二、白光散斑图数字相关法中消除刚体位移的一种处理方法	徐宁光 徐 铸	(213)
三十三、面向对象的 MTS 材料多轴试验软件设计方法研究	蔡力勋 袁 珩 黄大祥	(219)
三十四、应变式径向引伸计	施纪泽 傅增祥 金保森 王智慧	(229)
三十五、铁路铆接桥梁钉孔应力集中实测与分析	朱华满 马骥全 常录喜	(234)
三十六、折叠翼非线性颤振理论分析	杨翊仁	(239)
三十七、多自由度区间动力学系统的稳定性分析	曹登庆	(244)

一、中国反应堆结构力学十四年及其未来

谷芳毓

(中国核动力研究设计院)

人一生难得的是良师益友,孙训方先生就是我的良师和益友。他是力学界的前辈,古稀之年仍然孜孜以求,在推动我国断裂力学和损伤力学的发展中起了先锋的作用,为我国反应堆结构力学完整性的发展作出了重要贡献。我的许多工作也得益于他的指导和帮助。他年长我十五岁,但性格开朗,很好交往。他先后主持反应堆结构力学专业委员会达十年之久,是位在国内外有重要影响的力学家。四年前,经他推荐,我接过了该专业委员会主任委员的班,一直得到他对工作的指点与支持,结成了深厚的友谊。值此孙训方先生七十寿诞之际,仅以此文作为他主持专业委员会工作成就的总结和向他学习而对未来发展的思考。

简短历史概况

自 1978 年 12 月在成都市金牛坝宾馆召开第一届全国反应堆结构力学会议以来,历时已十四年有余,其间已经召开七次学术交流会,列如下表:

第一次	1978	成都	核一院
第二次	1980	成都	核一院
第三次	1983	北京	清 华
第四次	1986	上海	七二八
第五次	1988	夹江	核一院
第六次	1990	北京	核二院
第七次	1992	上海	七二八

会议交流文章五百余篇,其中多有文集,而且从第五次以来,在会前就准备就绪。从 1981 年参加 SMiRT-6 以来,第 7,8,9,10,11 次会议均有相当规模的中国学者参加,交流文章有百余篇。在 SMiRT-8 期间,经本人联系有七名中国学者参加了 IASMiRT,成为国际反应堆结构力学组织委员会成员。在国内有中国反应堆结构力学专业委员会(CASMiRT),它接受中国力学学会和核学会的双重领导和支持,开展了大量工作,为组织和促进 SMiRT 方面的学术交流做了许多有益的工作。

为了促进 SMiRT 在中国的发展,笔者仅就我国 SMiRT 十四年来的主要成就,与国际相比的主要差距及对未来发展谈些浅近的见解,供同行参考。

十四年来的主要成就

反应堆结构力学是工程力学和应用力学的组成部份,是结构力学的充满活力的新分支。它在中国的诞生和发展是与反应堆工程密切相关的,十四年来随着我国核反应堆特别是核动力事业的发展,逐步壮大起来,成长了一支在国际反应堆学术界有所影响的学术队伍,这与它取得下列主要成就是分不开的。

1. 参与反应堆工程设计和安全评审,做了大量工作,主要的工程有:49—3 高通量堆,5Mw 低温供热堆,30 万千瓦核电站,60 万千瓦核电站,其他核动力装置设计、退役及 863 高技术中反应堆的研究开发和先进压水堆的开发工作等。

2. SMiRT 的研究对象比一般意义上结构力学的对象要复杂广泛得多。从自身空间特性上讲从杆系扩大到二、三维体和板壳及组合结构,而且计及损伤时小到细观,大到宏观,极至微观都开展研究;从与环境及内部介质上讲,结构与流体交互作用,飞射物及冲击波对结构的作用,土壤和结构的交互作用等都属于它的研究范畴。

3. 从时间域讲 SMiRT 已服务于反应堆工程从设计到退役的全过程,从分析法设计要求讲已经配备大量的专用程序,引进相当规模的通用程序,CAD 的应用已经开始,为了保证安全运行开展了相应的 NDT 检查和力学评审工作,ES 研制工作已经起步,废物特别是乏燃料的储存和输运的力学问题也开展起来了。

4. 作为计算力学的重要分支,计算反应堆结构力学也取得了长足的进步,主要发展阶段是 70 年代的国产计算机为基础的大量专用软件程序开发,80 年代大量通用程序引入并作了工程应用,90 年代初已发展到专、通用程序引进和开发并举,重点转到大量非线性和耦联化问题相关程序的开发应用;工程用 CAD 已经引入,ES 系统研制已经开始,核电软件中心对 SMiRT 软件开发作了规划并给于推动和支持;核安全局开发和引入一些安全评审的 SMiRT 软件,配合核电设计核动力院、北京二院、上海核工院均引入了一批国外程序。还有一批学者参加国际联合开发,带回了一批 SMiRT 软件。

5. 地震的研究已经发展到自由场运动的传递,土壤和结构的交互作用,各种(非线性)结构响应的分析与试验和地震灾害的减免。与其相应的,飞射物冲击和冲击波的结构响应问题也作出了一批成果。

6. 由于结构完整性的要求,推动了断裂力学、损伤力学的长足发展,相应的 NDT 技术也取得了巨大进步。断裂力学 70 年代以线弹性断裂力学为基础,目前已经发展成包括弹塑性断裂力学在内的成熟的学科分支。LBB 准则方面的研究在国内已经起步;损伤力学以一股强劲之势发展起来;新型材料本构研究也很兴旺。国内已完成了退役反应堆压力容器的自动超声探伤,蒸发器管材的涡流探伤,30 万千瓦的 NDT 检查,并在云天化联合应用超声、电测光测和有限元分析,成功地进行了 NDT 检查和安全评估。

7. 作为寿命期内的安全保证,可靠性分析已经有人问津,低温供热堆压力容器可靠性分析就是一例;作为质保与可维修性的工具,SMiRT 在处理许多不符合项方面进行了有成效的工作。49—3 堆过渡段方案的改变就是其中突出的一例。

8. 辐照损伤及其影响研究受到重视,辐照后反应堆压力壳寿命评估和运行安全限制,元件包壳在役后热室内的力学试验,脉冲堆元件管的高温应变疲劳和材料性能方面的小试件研究都是有特点的成果。

9. 工艺对材料力学性能的影响的研究也很受重视,焊缝区材料的力学性能,不同工艺下蒸发器管材的力学性能,不同热处理条件下材料的力学性能和不同环境和介质条件下运行材料的力学性能(残余应力)研究都有所进展。完成了国产化 A-508 Ⅲ 钢的工艺定型,新 13 号蒸发器管材的选材评定和脉冲堆元件包壳管的工艺选定。

10. 在理论基础和技术基础方面取得了如下的发展:

- 基于能量原理开发了大量的有限元程序,在 80 年代我国接触问题程序在国际上是有影响的;
- 用加权余量法建立有限元模型;对其他算法也进行了大量尝试;
- 有限元的应用推动了离散数学的建立;
- 概率方法在 PRA,断裂力学和可靠性分析方面有所应用;
- 新型本构的研究达到了国际上比较先进的水平;
- 扩大了结构失效模式的研究范围,近代屈曲理论与试验,辐照损伤,疲劳损伤和腐蚀失效等方面均有新的研究成果;
- 计算机数字图形功能的开发为大型程序系统、CAD、ES 系统开发和 CAT 提供了有力工具;
- 噪声技术在结构完整性方面有所应用;
- 力学方法在 NDT 检查中的应用有特点,应变畸变场的应用是个创见;
- 工程隔震的研究工作进展良好,已经制造出性能良好的 $\Phi 250\text{mm}$ 的小隔震子;
- 流固耦合,土壤结构交互作用等成果已经开始工程应用;
- 大应变有限元程序研制工作初有所成;
- 智能化软件研制已起步;
- SMiRT 成果的非核应用方面,在石油化工、生物力学和电子器件等方面都有成功的范例。

与国际相比的主要差距

我国反应堆结构力学的发展与国际上发达国家相比约晚进十年。自 1971 年在柏林召开 SMiRT-1 以来,每两年开一次,今年将在德国举行 SMiRT-12,我们走的路在大方向上是与国际一致的,而且与国际有比较广泛的交流和技术引进,但由于国内政治经济特点和核电发展晚进的约束,比较起来尚存在下列主要差距:

1. 核电工程不多,使得 SMiRT 队伍经验不够丰富,在处理相应工程问题方面还有不少空白点。在可靠性分析,地震负荷及土壤结构交互作用和流固耦合等方面仍显薄弱;
2. 作为分析法设计的基础尚不坚实,专用程序不全,相当一部分通用程序与规范不挂钩,好用的 CAD 不多,ES 研制还没进入实质性阶段;
3. 从计算力学角度上讲,近代算法如美国的任意拉格朗日-欧拉算法,法国的近代屈曲理论在 SMiRT 大会上都曾获奖,而我国则比较落后,多数交流文章尚少新颖性;
4. 由于国内硬件落后,使得相当长一段时间以引入程序应用为主,自己开发程序也不十分注意计算机数字图形方面的成果应用,形成了“吃中段”的局面,许多好程序形不成软件产品;
5. 损伤力学尚处于起步阶段,结合反应堆工程形成完善的体系满足实用要求还有一段

艰难的路要走;

6. 863 计划中快堆、高温气冷堆和混合堆开发中的有关 SMiRT 课题开展更少,高温影响的许多问题有待深入;

7. NDT 检查方面做了不少工作,但作为机器人和 NDT 应用产品的开发基本没有,寿命评估和安全评审也少经验;

8. 由于从事 SMiRT 研究的主要队伍在工程院所,专门从事相关技术基础和理论基础研究的人员和资金都太少,与发达国家不可比;在国内相关学科的分配上也不如发达国家那么受重视,在国际上 SMiRT 是在核电开发中十分受重视,而且活跃发展的一个新兴学科。目前的状况与核电国产化的发展需要很不适应;

9. 地震免灾研究刚起步,晚七、八年,势头比日本、欧美相差太远,这是个影响核电经济性和安全性的大课题;

10. 作为综合性优化设计(性能、结构、工艺、安全可靠和经济性)重要工具的 SMiRT 还没有步入设计适用阶段,设计人员不太熟悉 SMiRT,SMiRT 研究人员也不太熟悉设计,真正用 CAD 完成的设计鲜为人知;

11. 法规基本上是舶来品,相应的大量研究没有开展;

12. 大型实验装置落后,实验应力分析手段落后,创造性的工作不算多。

关于未来发展的若干建议

本世纪末到下世纪初将是电力三大组成部分之一的核能工业在我国大发展的黄金时期,为适应这个形势,SMiRT 也应有所前进,为此特提出如下建议:

1. 分析法设计是反应堆设计的重要组成部分,结构安全是反应堆安全的重要组成部分,反应堆结构力学一身二任,它以反应堆结构设计和结构在全寿期的安全可靠为中心。我国的研究工作者应注意向社会提供相应的软、硬件产品如专用、通用程序、CAD、ES、Robotics,数据库和设计规范等。一定要步出只出文章和实验数据的“科学殿堂”,走入核电这个经济大市场。这种技术产品是相当丰富的,世界各国有不少的力学软、硬件公司;

2. 要特别重视建立 SMiRT 实验研究基地。已经国家批准的 615 工程中结构力学的大型地震台(6×6)、冲击台、竖井和断裂疲劳试验装置等等是十分必要的。而且还要建立一批适合核特殊条件的装置以研究辐照损伤;

3. 以有限元为基础的 SMiRT 专用程序,通用程序和 CAD 是非智能语言支持的三类分析工具,各有其用,不可或缺。专用程序要注意填补空白,攻克难新或建立相应的数据库以支持简易算法;通用程序面临新型本构关系引入后的改造;CAD 要注意推广应用。作为智能化语言产物的专家系统,上述的程序仍然是其可用的分析工具,所以它不仅要建立自己的知识库、数据库,而且要解决与这些已有工具衔接的问题。建议数据库要有失效模式库,知识库要有知识的自身识别与自动更新功能。ES 系统的验证也将是个难题;

4. 继断裂力学之后要推动损伤力学的发展以形成完整性分析的基础;继地震响应分析之后要推动地震隔离技术的发展,以提供提高经济性保证标准设计实施的有力工具;

5. 要在全寿期内对堆结构(部件)进行可靠性分析、寿命预估与风险评价。所以要特别注意运行阶段中的结构力学问题,重视事故早期诊断技术开发,推广应用噪声分析方法,开发新的 NDT 技术并建立相应的评估方法;

6. 在规范制定方面要注意引入断裂力学的新成果,剔除不必要的保守性,但也要注意防止潜在的危险性。断裂力学已经证明 LOCA 中双端断裂的假设是过于保守的,应予否定。相应的 LBB 准则的应用应引起重视;

7. 关于易碎性的研究将进一步克服由于抗震设计引入的颇大的保守性。事故态负荷组合仍然是个没彻底解决的问题;

8. SMiRT 对反应堆设计思想影响最大的可能因素是 LBB 准则的引入和地震隔离技术的应用。这会使反应堆系统的设计标准化、简易并且经济性好;

9. 在非线性研究方面耦联化问题如流固交互作用,土壤结构交互作用和疲劳蠕变交互作用形成了自己的特点(非线性负荷下非线性材料和周围介质的非线性耦合及不同损伤机理的相互耦合);在材料本构研究方面它将把当前只计及几何损伤的工作推广到计及其他物理化学因素造成损伤的阶段,损伤的过程本质上讲就是非线性的;在严重事故态和强冲击负荷下结构的大应变研究也会对非线性力学给以推动;

10. 可以期望到本世纪末下世纪初反应堆结构力学在反问题的研究方面会取得更为长足的进步,它将主要表现在:

- 无损检测技术(射线、超声、涡流、声发射和应变测量方法等)的成熟和普遍应用。用应变畸变判伤(裂纹、缺陷或损伤积累)将被证明是一种有前途的办法;
- 故障诊断和 LBB 技术的成熟和应用。噪声(包括中子噪声、其他声、光、电、压力、温度...等噪声信息)技术将是主要的诊断技术。与 LBB 相关的泄漏探测技术会有发展;
- 模态分析理论和技术的成熟与应用;
- 结构的缺陷控制和损伤力学的成熟与应用(包括工艺和运行过程中缺陷对结构受力的影响和运行限制.....);
- 环境因素控制的成熟与应用(抗辐照脆化设计、地震隔离技术、缓冲设计、LBB 准则应用、介质腐蚀控制及耐压壳抗冲耐压设计);
- 考虑寿命历程的多因素影响下的堆结构的优化设计(要考虑受力种类,材料本构变化、环境影响、可靠性、安全要求等);
- 可靠性数据库(材料库、NDT 库、失效模式库)的建立和可靠性分析技术的推广;
- CAD、CAT 和 CAE 的广泛应用;
- 反应堆结构力学 ES 系统的建立与应用;
- 考虑结构优化和 SMiRT 新成果应用的反应堆综合优化设计(包括结构负荷谱的建立,结构的安全裕度和寿期控制、结构设计新准则建立和结构设计新方案选取等相关因素和其他安全、可靠及经济性因素等)

有了以上发展,要设计出结构上安全可靠,经济上省钱耐用、性能良好的反应堆便有了一个强有力的工具。反应堆事业在加速发展,CASMiRT 已经有了一个良好的基础,实现上述目标是有望的,让我们共同努力,尽早地实现这个目标。

二、具有 Voigt 型剪切界面层的桥联效应力学分析

伍章健 余寿文

(清华大学工程力学系)

【摘要】 本文对含有 Voigt 型粘性剪切界面层的纤维增强复合材料桥联效应进行了详细的力学分析。基于 Castigliano's 定理和界面剪滞 (Shear-lag) 模型,得到了桥联增韧和裂纹张开位移的控制(积分)方程。并在 Laplace 变换域内按照第二类 Fredholm 积分方程的迭代解法,给出张开位移等数值结果。为便于参数分析和 Laplace 逆变换,寻求了控制方程的近似解,讨论了断裂韧性、裂纹张开位移、桥联力等随时间变化规律,得到了界面剪切模量、粘滞系数、裂纹长度、纤维半径、纤维体积分数以及材料性质等参数对含 Voigt 型粘性剪切界面层的纤维增强复合材料桥联效应的影响。

1. 引言

晶须或纤维增强陶瓷以及聚合物基复合材料中,裂纹尾区的桥联是裂纹扩展过程中重要的增韧机理^[1,2],桥联区的存在将减小裂纹尖端的应力强度因子值^[3],从而起到屏蔽裂纹的作用。此外,裂纹扩展过程中桥联区的晶须、纤维或二相粒子夹杂,通过脱粘、拔出、摩擦以及塑性变形等也将耗散部分能量。桥联效应分析的关键是寻求恰当的 $\sigma(x) \sim \delta(x)$ 关系,这里 $\sigma(x)$ 是裂纹张开面 x 点由于桥联存在而施加在裂纹面上的张力, $\delta(x)$ 是该点的裂纹张开位移。近几年来,材料学家和力学家们基于不同的假设方法,提出了许多种理论模型。Rose^[4,5] 提出桥联的线弹簧模型假设,即认为 $\sigma-\delta$ 是一线性关系,Marshall^[6] 和 Llorca^[7] 认为 $\sigma-\delta$ 是平方根关系也就是 $\sigma \propto \delta^{1/2}$,Foote^[8] 等人建议采用桥联应力—张开位移之间的幂函数关系 $\sigma \propto \delta^m$, m 为幂指数, $m=1$ 和 $m=\frac{1}{2}$ 分别就是文[4]和[6]中对应的桥联模型。此外,Budiansky^[9] 和 Li^[10] 分别采用了 $\sigma-\delta$ 的硬化和软化模型 $\sigma = \sigma_0 + \alpha\delta$ ($\delta < \delta_c$),材料一定时, σ_0, δ_c 是常数, σ_0 是桥联未形成前,裂纹尖端纤维初始内应力, δ_c 是桥联作用区裂纹临界张开位移。一旦位移超过 δ_c ,纤维断,桥联作用丧失。 $\alpha > 0$ 表示硬化,而 $\alpha < 0$ 是软化弹簧模型,它们分别对应于不同的材料系统或同一材料不同服役阶段的特性。

但是以上这些模型由于存在未知参数(如幂指数 m ,硬化参数 α)仍具有不确定性^[11],而且也未能考虑界面相存在(尤其是与时间有关的界面相)对复合材料性能的影响。众所周知,界面状况强烈地影响其韧性特征^[12],复合材料在加工工艺过程^[13],服役过程以及人为涂层^[14]等原因,在基体与增强物之间常有与时间有关的玻璃态或粘性界面相产生。如果有这样的界面相存在,则复合材料的 R -阻力曲线以及裂纹张开位移等将是随时间而变化的,同时粘性界面层也将改变复合材料的其他特性^[15]。所以了解这类复合材料性能变化规律,有助于工艺控制、涂层材料的选择以及材料整体性能的改善。Hashin^[12]研究了具有粘性界面层复合材料刚度等性能变化,Nair^[16]考虑了纯粘性剪切界面相($\tau = \mu \dot{\gamma}$)对韧性等影响。本文则

研究剪切界面相为 Voigt 型 ($\tau = G_i \gamma + \mu \dot{\gamma}$) 的情形, 推广了 Wu^[17] 等工作, 从而导出了复合材料桥联增韧和裂纹张开位移的控制方程, 给出了在拉氏变换域内张开位移的数值计算结果。为了避免复杂的拉氏逆变换求解, 在变换域内寻求近似解表达式, 使得参数分析和逆变换成为可能, 并揭示了复合材料韧性及裂纹张开位移等随时间变化规律。

2. 模型分析

2.1 问题提出

单向纤维增强复合材料, 基体裂纹面假定垂直于纤维方向, 沿纤维方向受纤维桥联作用, 纤维经历弹性变形, 由于涂层或工艺处理等方面的原因, 在纤维与基体之间形成一厚度为 h 的粘弹性界面层。实际裂纹长度为 $2a$, 可认为它是位于无限大介质中的中心裂纹如图 2-1 所示。由于问题的对称性, 图中仅示意其中一半。 x 是裂纹中心点起算沿裂纹方向的坐标, 为问题叙述方便, 将其进行无量纲化处理, $\bar{x} = x/a$ 。以后凡是字母头上带有“—”号, 均表示无量纲量。如果复合材料纵向弹性模量和泊松比分别为 E_c 和 ν , 则根据 Castigliano's 定理得^[18]

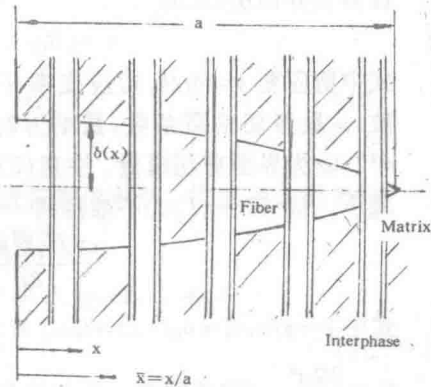


图 2-1 复合材料中心桥联裂纹

$$\delta(\bar{x}, t) = \frac{4(1-\nu^2)a}{\pi g E_c} \int_0^1 \frac{\xi}{(\xi^2 - \bar{x}^2)^{1/2}} \int_0^{\xi} \frac{\sigma_{\infty} - P(\eta, t)}{(\xi^2 - \eta^2)^{1/2}} d\eta d\xi \quad (1)$$

和

$$K(t) = 2 \sqrt{\frac{a}{\pi}} \int_0^1 \frac{\sigma_{\infty} - P(\bar{x}, t)}{(1 - \bar{x}^2)^{1/2}} d\bar{x} \quad (2)$$

无量纲化后得

$$\bar{\delta}(\bar{x}, t) = \int_0^1 \frac{\xi}{(\xi^2 - \bar{x}^2)^{1/2}} \int_0^{\xi} \frac{1 - \bar{P}(\eta, t)}{(\xi^2 - \eta^2)^{1/2}} d\eta d\xi \quad (3)$$

$$\bar{K}(t) = \int_0^1 \frac{1 - \bar{P}(\bar{x}, t)}{(1 - \bar{x}^2)^{1/2}} d\bar{x} \quad (4)$$

其中 $\bar{P} = P/\sigma_{\infty}$, $\bar{K} = K/K_0$, $\bar{\delta} = \delta/\delta_0$, $P(\bar{x}, t)$ 是在桥联情况下, 裂纹面上的纤维对裂纹的作用力, 它取决于裂纹的张开位移 $2\delta(\bar{x}, t)$, σ_{∞} 是复合材料沿纤维方向远场作用力, $K_0 = 2\sigma_{\infty}$

$\sqrt{\frac{a}{\pi}}$, $\delta_0 = \frac{4(1-\nu^2)a}{\pi g E_c} \cdot \sigma_{\infty}$ 。 g 是考虑到复合材料正交各向异性的一个正交性因子, 一般均大于 1, 与材料常数有关, 随纤维与基体模量比值以及纤维体积含量 V_f 的增加而增大^[19,20]。

2.2 剪切滞后分析

方程(3)的求解, 必须要知道 $P(\bar{x}, t)$ 与 $\delta(\bar{x}, t)$ 之间的关系, 这是问题的关键所在。对于纤维基体间存在粘性界面相复合材料, 由于精确分析十分困难^[17], 本小节采用了一种简便的分析方法——剪切滞后法。

考虑在任一 $\bar{x}$ 位置的埋入纤维, 如图 2-2 所示。假定基体是刚性的, 纤维纵向弹性模量为 E_f , 半径为 r 。如果纤维内任一点 y 处的轴向位移和轴向力分别是 $\delta_1(\bar{x}, y, t)$ 和 $F(\bar{x}, y, t)$, 则