

邵卓平 著

植物材料(木、竹) 断裂力学



科学出版社

植物材料（木、竹）断裂力学

邵卓平 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地阐述了植物材料(木、竹)的断裂破坏行为和强韧性机理,内容涉及木材构造的力学特征及应力应变关系、木材顺纹理断裂、木材横纹理断裂、木材裂尖应力场的有限元分析和开裂方向预测、木材损伤断裂过程的声发射特性分析与 Felicity 效应、竹结构的力学特征与组分力学性质、竹材的层间断裂性质以及竹材横向断裂的物理模型与能量吸收机制。

本书可供材料科学与工程专业、木材科学与工程专业的本科生、研究生学习使用,也可供相关领域的研究人员、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

植物材料(木、竹)断裂力学 / 邵卓平著. —北京:科学出版社, 2012. 4
ISBN 978-7-03-033790-0

I. ①植… II. ①邵… III. ①木材 - 断裂力学 - 研究②竹材 - 断裂力学 - 研究 IV. ①S781. 2②S781. 9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 040255 号

责任编辑:牛宇锋 / 责任校对:郑金红

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 4 月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2012 年 4 月第一次印刷 印张: 11

字数: 206 000

定价: 48.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

木材和竹材是植物中能够用作结构材料的两种天然材料，也是世界上使用最久远并且目前仍用得最为广泛的天然结构材料。今天，这两种天然材料的世界产量与钢铁大致相当，每年大约为 10 亿 t，其中有许多用于结构方面。因此，研究木、竹材的强度和刚度，认识其破坏行为，对于木、竹结构的设计和安全评价非常重要。

木材和竹材也是具有明显细观结构、可在多尺度下研究的天然复合材料，由于非均匀、各向异性和“天然”存在的微观甚至宏观的缺陷或损伤（裂纹），受载荷后这些初始缺陷或损伤的不规则演化行为决定着木、竹材的宏观力学行为。木材和竹材在微观上同属由多层胞壁组成的胞体植物材料，但由于宏、细观构造上的差异使两种材料不仅在破坏机制上有所差异，在对破坏的研究方法上也不相同。因此，应用断裂力学和细观力学去分析木、竹材的断裂破坏行为，了解生物材料受荷后内部微细结构的变化，并沟通其与宏观力学响应之间的联系，对于木、竹结构的设计选材和结构安全分析具有重要意义，同时也对研发能够克服生物材料缺点、具有特殊强韧性能的新型生物质复合材料具有指导作用。

本书重点反映了作者近十年对于木材和竹材的断裂破坏行为和植物材料强韧性机制的研究工作。为了能比较全面地探究植物材料的损伤断裂行为和强韧机制，本书选择了多个树种木材为实验对象开展研究，如针叶材有杉木（*Cunninghamia lanceolata*）、樟子松（*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.）、鱼鳞云杉（*Picea jezoensis* var. *microsperma*）、落叶松（*Larix gmelinii*）等，并且因早晚材或缓或急变化不同，4 个树种生长轮花纹依次明晰；阔叶材有杨树（*Populus* spp. I-69）、红锥（*Castanopsis hystrix*）、甘巴豆（*Koompassia* spp. *Koompassia malaccensis*）、楝树（*Melia azedarach*）等，兼顾了散、环孔，木射线粗细，纹理交错等构造方面的差异。竹材则以毛竹（*Phyllostachys pubescens*）为主。在方法上，对每种损伤断裂模式的研究采用理论推导和实验相结合，并在研究过程中应用了多种数学工具和试验手段。

全书共分 9 章，内容涉及木材构造的力学特征及应力应变关系、木材顺纹理

断裂、木材横纹理断裂、木材裂尖应力场的有限元分析和开裂方向预测、木材损伤断裂过程的声发射特性分析与 Felicity 效应、竹结构的力学特征与组分力学性质、竹材的层间断裂性质、竹材横向断裂的物理模型与能量吸收机制。其中许多内容属首次研究。由于作者水平和专业知识所限，书中难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

本书的出版得到了国家自然科学基金“基于细观结构演化的木材损伤断裂机制与宏观力学行为（30571452）”和“竹细胞、组织力学行为与材料强韧功能的关系研究（11072001）”的资助，在此表示衷心的感谢。

邵卓平

2011 年 10 月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 断裂力学产生简史	1
1.2 材料力学与断裂力学	2
1.3 木材断裂力学及研究进展	3
1.3.1 对木质材料强度的预测	3
1.3.2 断裂力学结合声发射技术在分析木材裂纹扩展机制上的应用	5
1.3.3 国内在木材断裂力学领域的研究进展	6
1.3.4 竹材断裂性质的研究	6
1.4 本书的主要内容	7
参考文献	8
第2章 木材构造的力学特征及应力应变关系	12
2.1 木材构造的力学特征	12
2.2 固体材料的应力应变关系	13
2.3 工程弹性常数	15
2.4 木材的工程弹性常数	16
2.5 平面应力与平面应变的概念	17
2.5.1 等厚平板与平面应力	17
2.5.2 长柱体与平面应变	18
2.5.3 平面问题的应力应变关系	18
2.6 木材弹性系数的测定	20
2.6.1 电测法测试木材弹性系数简介	20
2.6.2 数字散斑相关方法测试木材弹性系数简介	22
2.6.3 弹性常数的限制	24
参考文献	25

第3章 木材顺纹理断裂	27
3.1 引言	27
3.2 线弹性断裂力学的原理	27
3.2.1 裂纹及特征	27
3.2.2 应力强度因子 K 及 K 准则	28
3.2.3 能量释放率 G 及 G 准则	30
3.2.4 K 与 G 关系	31
3.3 各向异性材料断裂力学	34
3.4 线弹性断裂力学在木材中应用的特殊性	37
3.5 木材顺纹理断裂应力强度因子 K_{IC}	39
3.5.1 测试应力强度因子的基本方法	39
3.5.2 不同厚度下 CT 试件的 K_{IC}^{TL}	41
3.5.3 不同裂纹长度下 WOL 试样的 K_{IC}^{TL}	44
3.6 能量法测试木材顺纹断裂韧性 G_{IC}^{TL}	45
3.6.1 试材与试样	46
3.6.2 DCB 试验与结果	46
3.6.3 木材顺纹开裂能量释放率 (G_{IC}) 与临界应力强度因子 (K_{IC}) 的关系	49
3.7 应用分形理论研究木材顺纹理断裂	54
3.7.1 引言	54
3.7.2 分形原理	54
3.7.3 实验与分析	56
3.7.4 顺纹理断面分维数与断裂韧性的关系	59
3.8 木材顺纹理Ⅲ型断裂性质	60
3.8.1 引言	60
3.8.2 试材与方法	61
3.8.3 实验与结果	62
3.9 本章小结	63
参考文献	64
第4章 木材横纹理断裂	67
4.1 引言	67
4.2 木材横纹理裂纹尖端应力场分析	68

4.3	横纹理裂纹开裂方向	73
4.4	木材启裂时临界应力强度因子的测试	74
4.4.1	试材和测试方法	74
4.4.2	启裂断裂韧性 K_{IC}^{LT} 的测试与计算结果	75
4.5	横纹理裂纹对木材常规强度的影响	78
4.5.1	含垂直纹理裂纹时的抗弯强度	79
4.5.2	含垂直纹理裂纹时的冲击韧性	81
4.5.3	含垂直纹理裂纹时的顺纹抗拉强度	83
4.6	木梁 I 型层裂和木胶合板弯曲脱层损伤中的应变能释放率	85
4.7	本章小结	88
	参考文献	89
第 5 章	木材裂尖应力场的有限元分析和开裂方向预测	90
5.1	材料与方法	90
5.1.1	材料与基础数据	90
5.1.2	断裂分析模型	91
5.2	裂纹尖端应力场	92
5.2.1	Mises 应力场	92
5.2.2	垂直和平行原裂纹面的 σ_y 、 σ_z 应力场	93
5.2.3	开裂方向预测	96
5.3	对木材界面强度与韧性的讨论	99
5.4	本章小结	101
	参考文献	101
第 6 章	木材损伤断裂过程的声发射特性分析与 Felicity 效应	102
6.1	引言	102
6.2	木材损伤与木材细观损伤基本构元	103
6.3	材料、设备与方法	105
6.3.1	试材与试样	105
6.3.2	设备	105
6.3.3	AE 研究方法	106
6.4	实验结果与分析	106
6.4.1	弯曲试验	106
6.4.2	产生纯 I 型层间损伤的 DCB 试验与产生胞壁屈曲与塌溃损伤的压	

缩试验	112
6.4.3 木材不同损伤类型的声发射特征	112
6.5 Felicity 效应	113
6.6 本章小结	114
参考文献	115
第7章 竹结构的力学特征与组分力学性质	117
7.1 引言	117
7.2 竹结构的力学特征	118
7.3 竹材组分的力学性质	120
7.3.1 混合律方法	120
7.3.2 单束纤维测试方法	123
7.3.3 拉伸破坏的断口分析	126
7.4 毛竹节间材与节部材的构造与强度差异研究	127
7.4.1 材料与方法	127
7.4.2 竹节与节间材的结构差异	128
7.4.3 竹节与节间材的强度差异	129
7.5 本章小结	133
参考文献	134
第8章 竹材的层间断裂性质	135
8.1 引言	135
8.2 竹材的Ⅰ型层裂性质	135
8.2.1 试验原理	135
8.2.2 试样与方法	136
8.2.3 结果与分析	138
8.2.4 Ⅰ型断面分析	140
8.3 竹材的Ⅱ型层间断裂	141
8.3.1 试验原理	141
8.3.2 试材与方法	143
8.3.3 结果与分析	145
8.4 本章小结	147
参考文献	147

第9章 竹材横向断裂的物理模型与能量吸收机制	150
9.1 引言	150
9.2 竹材横向断裂的特征	151
9.3 竹材韧性断裂的能量吸收机制	153
9.3.1 对增强体的力学简化	154
9.3.2 基本组织的变形和开裂	155
9.3.3 界面脱黏分离	155
9.3.4 纤维断裂及断后应力重新分布	157
9.3.5 竹纤维束抽拔	158
9.3.6 实例计算	159
9.4 横断面分析	162
9.5 本章小结	162
参考文献	163

第 1 章 绪 论

木材和竹材是植物中能够用作结构材料的两种天然材料，同时也是世界上使用最久远并且目前仍用得最为广泛的天然结构材料。今天，这两种天然材料的世界产量与钢铁大致相当，每年大约为 10 亿 t，其中有许多是用于结构方面的，如承受载荷的梁、棚架、地板和支撑体。竹材也是一种优良的工程结构材料，它强度大、刚度好、耐磨损，很早人们就用竹材建造竹楼，用作建筑脚手架、竹梯。因此，研究它们的强度和刚度，认识其破坏行为，对于木、竹结构的设计和安全评价非常重要。断裂是材料或结构最危险的失效形式，在很多情况下可能会产生灾难性的后果。所以，研究材料和构件断裂的机理、控制和减少断裂事故的发生，一直是材料科学工作者和工程技术人员的重要课题之一^[1]。

木材和竹材也是具有明显细观结构、可在多尺度下研究的天然复合材料，由于非均匀、各向异性和天然存在的微观甚至宏观的缺陷或损伤（裂纹），受载荷后这些初始缺陷或损伤的不规则演化行为决定着木、竹材的宏观力学行为。因此，用断裂力学的理论和方法去分析木、竹材的断裂破坏行为，了解生物材料受载荷后内部微细结构的变化，并沟通其与宏观力学响应之间的联系，对于木、竹结构的设计选材和结构安全分析具有重要意义，同时也对研发能够克服生物材料缺点、具有特殊强韧性能的新型生物质复合材料具有指导作用。

1.1 断裂力学产生简史

早在 1920 年，Griffith 曾对玻璃、陶瓷等理想脆性材料的断裂问题进行过研究，得到了一些关于材料强度的新观念^[2]。但在当时这些脆性体不作为工程结构材料，其他结构材料表现为脆性断裂的也为数甚少，因此他的理论并未引起广泛的重视。

自第二次世界大战以来，随着高强度钢的广泛应用，人们建造了许多大型焊接结构物，结果发生的大事故明显增多。尽管这些结构物都满足传统的设计要求，但常在低应力水平下突然发生脆性断裂，而且在发生前没有预兆，所以常会造成灾难性破坏。例如，在 1938 ~ 1940 年，连续发生了 40 座焊接桥梁的突然倒

塌；在第二次世界大战期间，有两千多艘焊接舰船出现了一千多次的断裂事故，238 艘报废，有的万吨轮会在风平浪静中突然断裂成两半；1965 年英国海上钻井平台因支柱的拉杆发生脆断，平台沉没；1965、1968 年，美、日分别出现巨型压力容器的爆炸，美国一巨型液糖罐破裂，竟淹死了 35 人；1969 年美国连续发生 F-111 战斗机、C-56 军用机因机翼转轴脆断坠毁等。这些重大破坏的频繁发生震惊整个工程界，因为这些结构物的破坏都是在满足传统强度设计要求的情况下发生的。人们感到这不再是偶然因素的作用，一定是传统的设计思想忽略了什么。通过大量的调查研究，人们发现许多事故的直接破坏原因是结构中有裂纹存在。

近五十多年来，人们对含裂纹体的破坏进行了大量的理论和试验研究，产生了断裂力学这门新的学科，为结构和构件的安全设计提供了新的思想和方法，并广泛用于金属材料、无机非金属材料、高分子材料、木材及复合材料中。因此，可以说断裂力学是一门研究裂纹体强度的科学，它的产生与发展是与工程重大破坏事故的发生有密切的关系。

1.2 材料力学与断裂力学

防止断裂是材料力学这门学科的主要任务之一。按照材料力学的设计思想^[3,4]，对每种材料要求测定四项机械性能指标：

$$\begin{array}{l} \text{强度指标} \left\{ \begin{array}{l} \text{屈服极限 } \sigma_s \\ \text{强度极限 } \sigma_b \end{array} \right. \\ \text{韧性指标} \left\{ \begin{array}{l} \text{延伸率 } \delta \\ \text{冲击韧性 } K_a \end{array} \right. \end{array}$$

传统的设计方法：

$$\sigma_{\text{构件}} \leq [\sigma]$$

式中，塑性材料 $[\sigma] = \frac{\sigma_s}{n}$ ，脆性材料 $[\sigma] = \frac{\sigma_b}{n}$ ，其中 $n > 1$ ，为安全系数。并且，对于承受冲击的构件和压力容器须校核韧性。

上述传统的设计思想的基础是建立在材料的连续均匀性假设之上的，认为材料中没有裂纹和缺陷存在。实际上，工程材料中的裂纹和缺陷是不可避免的。但并不是说存在裂纹就一定发生断裂，是否会发生断裂，除了与裂纹长度、外力大小等因素有关外，还与材料对裂纹的敏感度——“断裂韧度”有关^[4]。

断裂力学抛弃了物体的连续性假设，它以弹、塑性力学为理论工具，给出了含裂纹体的应力场和位移场，并据此确定出决定裂纹扩展的物理量——断裂韧

度,并给出了全新的强度设计观念,通过试验测定出材料抵抗裂纹扩展的能力(即断裂韧度 K_c 、 G_c),从而建立新的强度准则——断裂判据,如针对材料脆性断裂的准则:

$$K \text{ 准则: } K = K_c$$

$$G \text{ 准则: } G = G_c$$

材料力学方法是一种直观、经验的处理方法,表述简单,易于应用,但忽视了材料固有缺陷的影响。断裂力学则是对传统设计概念的不足和不合理提供了补偿,并因此对整个材料制造业带来具有重要指导意义的影响,如界面弱化的增韧机制即为断裂力学原理在人工复合材料设计中得到很好应用的一个范例^[5]。

1.3 木材断裂力学及研究进展

1.3.1 对木质材料强度的预测

将断裂力学原理应用于木质材料中,始于 Porter 的首篇论文“On the mechanics of fracture in wood”^[6],Porter 基于能量平衡,将线弹性断裂力学理论成功地应用于美国西部白松在 LT 和 LR 平面的张开型断裂。该研究提出了一种确定木材断裂参数(应变能释放率)的方法,研究表明,开裂过程中的应变能释放率 G_{Ic} 是独立于试件几何尺寸和裂纹长度的, G_{Ic} 也代表着材料对于顺纹理裂纹扩展的阻力,通过对 G_{Ic} 的了解可以提供对应力和裂纹长度综合值的预测,该值将导致裂纹快速扩展并导致最终断裂。继此篇研究论文之后,各国木材科学研究人员在这方面做了大量的工作,提出了各种木材断裂模式以及断裂韧性的测试方法和各种断裂判据,并应用断裂力学原理在解决木材及木结构的一些实际问题取得了初步结果。

截至目前,用于木质材料的宏观断裂准则大致可分为两类:一类是具有热力学意义、基于沉入裂纹尖端过程区能量的准则,如能量释放率 G 准则^[7,8];另一类是具有力学意义、基于裂尖过程区范围强度的准则,如应力强度因子 K 准则^[9,10]。但由于木材具有许多不同于其他正交异性材料的明显特点,从而也给应用线弹性断裂力学带来了困难,从木材的组成与构造来看,其三个主方向间的高度异性是主要问题^[11]。各向异性情况的复杂性在于裂纹并不一定沿其初始方向以平面的形式扩展,由于在处理与主方向成一定夹角的裂纹时所存在的数学困难太大,所以到目前为止,关于木质材料的断裂问题,大多数都是讨论裂纹以自相似扩展时的情况。

木材断裂性质的早期研究主要集中在 TL 、 RL 型裂纹体上,这是因为木材在

树木生长过程中和加工过程中形成的裂纹和缺陷大都在纤维方向上,而木材又在沿纤维方向上抵抗裂纹扩展的阻力最小。线弹性断裂力学原理用于裂纹沿木材顺纹扩展的断裂问题是成功的,并已取得了大量的研究成果。而近几年的研究工作则集中在 TR 、 RT 裂纹体的扩展模式和木材的界面机制上(后者是与 LR 、 LT 裂纹体有关)。木材在刚度和强度方面展示了强烈的各向异性性质,由外部施加的载荷或由周围环境条件(如湿度和温度)瞬变而引起的张力,对在垂直纤维方向是非常不利的,实验中的 TR 裂纹扩展与木材的径裂、 RT 裂纹扩展与木材的轮裂非常相似,所以,在木材中沿纹理面上由张力而形成并扩展的裂纹,自然一直是木材断裂力学研究领域中活跃的课题。

Wu 最早将正交各向异性模型应用于木材之上^[12,13],并应用线弹性断裂力学(LEMF)预测了含裂纹木材横纹抗拉强度和顺纹抗剪强度,同时还提出了一个在混合应力模式下的预测破坏的经验模型。此后,各国学者如 Mindness 等^[14]、Barrett 和 Foschi^[15]、Schnewind^[16]、Smith 和 Penny^[17]、White 和 Green^[18]应用线弹性断裂力学在预测木材强度方面做了大量的工作。Triboulot 和 Pluvinaige^[19]在 1984 年进一步应用有限元法对实验结果进行了比较,证实将木材假定为正交各向异性体和弹性体以及将断裂力学的概念用于木材中是可行的。

木材由于树节、切口、裂缝或其他不连续性引起应力集中,断裂力学可以对其起裂进行合理的预测。例如,对于包含树节的板材强度,Boatright 和 Garrentt 用“等量裂纹长度 L_e ”代替树节^[20], L_e 表示与含树节试样发生初始开裂相同的应力水平的无疵试样产生断裂的裂纹长度,但此方法仅适用于顺纹拉伸荷载。Murphy 应用断裂力学原理对含有树节、切口、边裂或端裂的板材的抗弯强度进行估算,即使在顺纹应力状态下,裂纹沿与切口垂直的方向扩展,断裂力学依然能够预测带切口试件的强度^[21]。1976 年, Foschi 和 Barrett^[22]在研究不同断裂长度对木梁抗弯强度的影响时,得到不影响短期强度的最大允许断裂长度,此项研究成果被加拿大标准协会在《木材工程结构设计》中采用^[23]。

应用断裂力学对于木材及木质构件的强度设计和安全预测,目前有许多研究工作在深入开展。法国木材科学研究所应用断裂力学原理与方法,预测因生长应力的积累与释放而使木材开裂的方向和开裂深度,是在研究思路上的全新探索和突破。近几年木材断裂破坏的研究正通过和微观相结合来探索木材的强韧机制。例如,Stefanie 和 Stanzl^[24]在 2006 年通过置于环境扫描电子显微镜的断裂试验,研究了承载木材的微结构演化和断裂力学响应,同时还分析了 I 型裂纹启裂时的断裂韧性 K_{IC} 和相应的断裂能量 G_I 的关系,以及 K_{IC} 和 G_I 相对应不同木材种类(硬木和软木材)、取向和密度、湿度间的关系。

1.3.2 断裂力学结合声发射技术在分析木材裂纹扩展机制上的应用

美国的 Porter 教授首先在 1964 年将声发射 (acoustic emission, AE) 技术应用在木材断裂研究^[6], 并在 1972 年由 Knuffel 提出了木材断裂可以分为三个阶段: 启裂、生长和最终破坏, 根据他们的观点, 把破坏看作非单一的事件, 而是一个连续的过程, 并且每一个阶段声发射呈现不同的特征^[25]。以后有人利用声音在木材中传播的特点和用声发射预测木材的弹性模量。1982 年 Ansell 研究三种软材的拉伸性质时发现 AE 应变曲线的形状受早晚材率的影响^[26]。1984 年 Sato 和 Fushitani 也研究了在拉伸实验中的 AE 行为发现 AE 总数与强度有负相关关系, 并区别了同微裂纹穿过年轮扩展有关的慢速 AE 和同宏观裂纹穿过年轮扩展有关的快速 AE^[27]。Ogino 等于 1986 年试图建立 AE 与开裂的关系, 发现 AE 能 (由振幅峰值的平方计算得到) 在第一个微裂纹发生后不久即迅速增加, 通过频谱分析表明在开裂之前会出现高频分量, 一旦开裂, 频率就会减低, 而低的频率仅出现在已经开裂之后, 发自木材干燥的 AE 信号的频谱可以分为四种模式, 可以通过观察, 如果其中的两种模型出现, 则可以作为开裂的预警信号^[28]。1987 年 Suzuki 和 Schniewind 研究了断裂韧性和用不同黏结剂的木质材料的声发射^[29], 发现断裂韧性与单位裂纹区域上的 AE 总数之间存在线性关系。1990 年 Rice 和 Skarr 研究了在横向力弯曲下的红桦板材的声发射, 发现生材与干材两者是有差别的^[30]。1992 年 Niemz 和 Luhmann 研究了声发射在不同的负荷下和不同木材的关系, 他们并没有发现 AE 参数与材料强度之间的关系并给出 AE 测量值具有很高分散性的报告^[31]。同年 Ando 等采用单边裂纹试样研究了断裂韧性与声发射之间的关系, 并指出纹理角度的影响^[32]。1996 年 Schniewind 等记录了木材在不同含水率和温度时 I 型与混合型断裂试验中的 AE 信号, 发现在混合型试验中 AE 活动特别频繁, 而且还应用聚类分析发现了 AE 性质与木材断裂仅存在很小的相互关系, 但又发现在远远超过木材极大荷载的载荷下的声发射与在很低的载荷下的声发射有明显的不同^[33]。1998 年 Aicher 和 Dill-langer 将 AE 用于定位在垂直纤维受拉伸中胶合板的裂纹源^[34]。2000 年 Reiteres 等结合声发射监测装置对三种硬材、两种软材的 I 型断裂过程进行了研究, 所用试样为 RL 裂纹扩展系统试样。发现槽口拉伸强度与密度相关, 断裂比能和特征长度则显示在软材和硬材之间存在差别, 软材多以延性方式断裂, 硬材多以线弹性方式断裂, 这一特征得到 AE 测试结果的支持, 硬材 AE 总数很少表明硬材较少有微裂纹形成, 并且“纤维桥连”(fiber bridging)的影响也不大, 从而解释硬材具有更多的脆性性质^[35]。Ando 等基于声学发射特征和断裂表面分析, 研究了新旧木材在剪切断裂过程中微观行

为,发现在低负荷时发生的 AE 积累数在旧木材中比在新木材中多,根据声学发射振幅分布分析,发现旧木材在承载过程中比新木材更易发生小振幅 AE 信号^[36]。

1.3.3 国内在木材断裂力学领域的研究进展

我国对木材断裂力学性质的研究开始较晚。鹿振友教授在 1988 年发表了国内首篇介绍国外在该领域的研究进展的综述文章^[37],5 年后范文英和徐虹^[38]在实验室采用单边切口的三点弯曲试件对杉木横纹断裂韧性 K_{IC}^T 做了测试,同时也探讨了试件厚度的影响。1999 年孙艳玲和鹿振友应用有限元计算了水曲柳 I 型断裂时裂纹尖端的应力场及应力强度因子^[39],并通过对数据进行后期处理,绘制出裂纹尖端附近的应力强度因子分布图。江泽慧和胡一贯在 2000 年运用同步辐射光源,对杉木和马尾松径、弦向切片在拉应力作用下的破坏过程进行了观察^[40],发现木射线和纹孔对裂纹扩展起阻碍和终止作用。2001 年,任海青和江泽慧^[41]应用线弹性断裂力学理论测试了人工林杉木、马尾松的断裂韧性,并使用扫描电子显微镜观察了杉木、马尾松横纹拉应力、顺纹拉应力及冲击载荷作用下的破坏表面,认为木材的微观构造影响其断裂过程。王丽宇和鹿振友在 2002 年以白桦为研究对象,利用数字散斑相关技术对白桦 I 型裂纹的演化、增长的力学行为作了实验研究,记录了裂纹尖端局域场形变信息的散斑图像^[42],通过对位移场分布图的分析表明,裂纹尖端附近有较大变形,应力集中明显。费本华和张东升在 2003 年运用数盒子法对裂纹发育带在二维平面内的分布进行了分形特征研究^[43],表明木材裂纹的分形维数在 1.2~1.5,并认为裂纹的分形维数随着裂纹的扩展呈增加的趋势。此后费本华又以不同手段测量了木材横断破坏断口的分维数^[44,45]。

作者也在近几年中较系统地研究了木材断裂力学行为,并就线弹性断裂力学原理应用于木材断裂的特殊性^[11]、实验方法^[46,47]、木材横纹断裂强度的设计准则和强韧性机制^[48]、木材中不同方位裂纹的裂尖应力场和开裂方向预测^[49]、木材细观损伤基本构元的界定^[50],以及揭示木材抗顺纹理断裂性能与木材细观构造的内在联系等^[51]方面均有着独立的见解。但从总体而言,由于国内在木材断裂力学领域里的研究起步晚,研究的范围和深度还不及国外广泛深入。

1.3.4 竹材断裂性质的研究

竹材是我国林业资源的重要组成部分,素有“第二森林”之称,并具有生

长周期短、成材早、更新易、产量高、再生能力强、用途广、经济价值高等优点。竹林种类也比较繁多,其中以毛竹(*Phyllostachys pubescens*)分布最广,广泛分布在长江流域,且竹竿通直,具有刚度好、强度大等优良的力学性能,竹材的静曲强度、抗拉强度、弹性模量及硬度等数值均很高,约为一般木材的2倍。

竹子经过数亿年的演化,形成了特殊的构造,这种构造与竹子主要受风雪等引起的弯曲载荷相对应,使竹材具有很高的抗横向弯折能力和刚度。相比较而言,竹子的顺纹向抗劈裂和抗剪能力较差,竹筒在干燥时常出现沿轴向开裂现象。关于竹材的一般力学性质已有许多报道,如曾其蘊等在1992年研究了竹节对竹材力学强度影响^[52];2005年,Ahmad和Kamke^[53]分析研究了印度加尔各答竹村(calculate bamboo)的物理力学性质,Obataya等在2007比较分析了毛竹材与木材的弯曲性质^[54]。但与木材断裂研究相比,人们对于竹材的断裂行为的研究几乎是空白,通过文献检索,仅见有两篇关于竹材断裂性质的研究文献^[55,56],内容是采用金属材料断裂韧度试验方法测试竹材横向断裂韧性 K_{IC} ,但这是一种名义韧性,其物理意义有限,因为纤维复合材料的断裂问题不宜采用应力强度因子法。

在宏观力学行为上,竹材是一种典型的长纤维增强的单轴向生物复合材料,并在强度和刚度方面展示了强烈的各向异性性质。竹材沿顺纹向的拉伸强度可达150~300MPa,但层间抗拉强度和层间剪切强度却非常低,仅为前者的1/85和1/20^[52]。因此,由外部施加或因环境条件变化而引起的横向张力与剪切力极易引发竹材构件沿顺纹方向层裂的起始,随后分层的传播不是由横纹方向的强度控制,而是由竹材的层间断裂韧性控制^[57]。并且,即便是垂直纹理的裂纹或缺陷,竹构件在承载作用下,裂纹也常发生偏转而改沿顺纹向扩展,并因此影响其后的力学性质。但由于工业化加工利用竹材的历史较短,人们对竹材材性的认识还仅限于一些常规性质,还缺乏对竹材的包括断裂在内的许多基础性质及其机理的更广泛、深入的研究。

总之,木材断裂力学已有40多年的研究历史,虽各国学者在该领域做了许多研究工作,但目前尚未见有同类专著能够全面系统地阐述包括木、竹材在内的植物材料断裂力学的理论。木材和竹材在微观上虽同属由多层胞壁组成的胞体生物材料,但由于宏、细观构造上的差异使两种材料不仅在破坏机制上有所差异,在研究方法上也不相同。木材断裂在研究方法上是将木材视为宏观均质正交各向异性体,但竹材属纤维增强复合材料,其增强体具有明显非均匀分布的特征,因此须采用细观力学方法,通过建立细观模型的方法来研究竹材的断裂韧性。

1.4 本书的主要内容

为了能比较全面地探究植物材料的损伤断裂行为和强韧机制,本书选择了多