

北京林业大学优秀博士论文基金资助丛书

# 木材裂纹扩展及其断裂 行为的研究

王丽宇 著

中国环境科学出版社·北京

## 图书在版编目(CIP)数据

木材裂纹扩展及其断裂行为的研究/王丽宇著. —北京:  
中国环境科学出版社, 2004.10  
(北京林业大学优秀博士论文基金资助丛书)  
ISBN 7-80163-845-X

I. 木… II. 王… III. ①木材—裂纹扩展—研究  
②木材—断裂—研究 IV. S781.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 104187 号

---

出版发行 中国环境科学出版社  
(100062 北京崇文区广渠门内大街 16 号)  
网 址: <http://www.cesp.cn>  
电子信箱: [bjzhouyu@126.com](mailto:bjzhouyu@126.com)  
电话(传真): 010—67112734

印 刷  
经 销 各地新华书店  
版 次 2004 年 10 月第一版 2004 年 10 月第一次印刷  
印 数 1—3000  
开 本 850×1168 1/32  
印 张 4.625  
字 数 120 千字  
定 价 20.00 元

---

【版权所有, 请勿翻印、转载, 违者必究】  
如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

北京林业大学优秀博士论文基金资助丛书

## 编辑委员会

主 任 朱金兆

副主任 尹伟伦 马履一

委 员 (按姓氏笔画)

王礼先 王向荣 任恒祺 张启翔 李凤兰 孟宪宇

罗菊春 赵广杰 顾正平 续九如 翟明普 贾黎明

秘 书 何艺玲 钟 艳

## 序

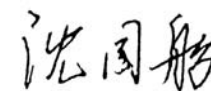
科学技术水平是知识经济时代评价一个国家国力的重要标准。科技水平高则国力强盛，无论在政治、经济、文化、信息、军事诸方面均会占据优势；而科技水平低则国力弱，就赶不上时代的步伐，就会在竞争日趋激烈的国际大舞台上处于劣势。江泽民同志在庆祝北京大学建校 100 周年大会上也强调指出：“当今世界，科学技术突飞猛进，知识经济已见端倪，国力竞争日益激烈。”因此，提高科学技术水平，提高科技创新能力已为世界各国寻求高速发展时所共识。我国将“科教兴国”作为国策也表明了政府对提高科技水平的决心。博士研究生朝气蓬勃，正处于创新思维能力最为活跃的黄金年龄，同时也是我国许多重要科研项目中的中坚力量，他们科研成果水平的高低在一定程度上影响着—一个高校、一个科研院所乃至我国科研的整体水平。国务院学位委员会每年一度的“全国百篇优秀博士学位论文”评选工作是对我国博士研究生科研水平的集体检阅，已被看做是博士研究生的最高荣誉，对激励博士勇攀科技高峰起到了重要的促进作用。北京林业大学不仅积极参加“全国百篇优秀博士学位论文”的推荐工作，还依此为契机每年评选出三篇校级优秀博士学位论文并设立专项基金全额资助论文以丛书形式出版，这是一项非常有意义的工作，对推动学校科研水平的提高将发挥重要作用。

从人才培养的角度来看，如何提高博士研究生的创新思维能力和综合素质，高质量地向社会输送人才备受世人关注。提高培养质量的措施很多，但在培养中引入激励机制，评选优秀博士学位论文并资助出版，不失为一种好方法。博士生和导师可据此证明自

己的学术能力，确立自己的学术地位；也可激励新入学的研究生尽早树立目标，从而在培养的全过程严格要求自己，提高自身的素质。

因学科的特殊性，要想出色完成林业大学的博士学位论文有许多其他学科所不会遇到的困难，如研究周期长，野外条件难于严格控制，工作条件艰苦等等。非常欣慰的是北京林业大学的博士生们不仅克服困难完成了学业，而且已经有人中选“全国百篇优秀博士学位论文”。而该丛书资助出版的“校级优秀博士学位论文”所涉及的研究领域、研究成果的水平也属博士学位论文中的佼佼者，令我欣喜。对这些博士生所取得的成果我表示祝贺，同时也希望他们以及今后的同学们再接再厉，取得更好的成绩报效祖国。

中国工程院副院长、院士



2002 年 8 月 10 日

## 前 言

木材是世界公认的四大材料（钢材、水泥、木材和塑料）之一，而且也是唯一可以再生的生物材料。此外，它又是一种环境材料，具有固碳作用及加工能耗少、环境污染小、可自然降解和循环利用等鲜明的环境特性。木材以其独特的可再生性和环境协调性，日益受到人们的重视，是符合人类当今社会可持续发展的战略构思的理想材料，对人类生存和发展具有不可替代的作用。正因为如此，近年来木材用作结构材料，如建筑用材、车船、室内装饰及木结构房屋材料等在全世界范围内有不断增长的趋势。在北美木材供给中，工程木制材料的市场占有率 1995 年就由 1994 年的 2.8% 增加到 3.6%，1998 年已经达到 4.6%，预计明年将达到 7% 左右。日本是一个木材消费较多的国家，木结构房屋更是人们喜爱的住宅，年竣工面积逐年增长。结构用集成材的生产量和进口量合计继 2000 年突破 100 万  $\text{m}^3$  之后，2001 年已接近 130 万  $\text{m}^3$ 。近几年随着我国国民经济的发展和人民生活水平的提高，尤其是随着我国改革开放的不断深入，出现了国外企业集团争相开发我国木结构房屋市场的局面，例如，美国、加拿大、新西兰、日本、芬兰等国都十分看好中国的木结构房屋市场，他们相继在我国经济较发达的一些沿海城市，旅游胜地，北京、成都等一些大中城市开发建造了许多木结构房屋的示范项目。我国的现代木结构房屋竣工面积也在近几年大幅增长，1998 年之前，每年竣工面积一直徘徊在 2 万  $\text{m}^2$  以下，1999 年为 4 万  $\text{m}^2$ ，2000 年为 8 万  $\text{m}^2$ ，2001 年达到 12 万  $\text{m}^2$ ，预计今年将超过 20 万  $\text{m}^2$ <sup>[1]</sup>。

木材用作结构材料使用的需求如此之大，这无疑将对木材的

强度校核和安全设计提出更高的要求。而依据传统的强度理论进行材料强度校核时，木材被视为均匀、连续的理想固体，忽视其内部存在的初始裂纹，故在使用中可能发生意外断裂现象，无法完全确保木材构件的安全性，甚至造成灾难性事故。木材是一种天然可更新的非均质复合材料，有节疤、劈裂、孔洞等天然缺陷。在干燥过程中，由于木材内存在较大的含水率梯度，干燥过快时，木材外部与内部干缩不一致而产生应力和变形，在天然缺陷的附近产生应力集中的现象。随着应力应变的增加而最终发生断裂。此外，木材经过机械加工后，内部也会产生初始裂纹。因此对含有初始裂纹的木材构件的断裂现象不可忽视。

木材断裂力学是研究有裂纹（缺陷）木构件断裂强度的一门学科。或者说是研究含裂纹木构件裂纹的平衡、扩展和失稳规律，以保证木构件安全工作的一门科学。本书共由九章构成。第一章为引言，主要探讨木材断裂力学的理论研究基础和国内外对木材断裂力学的研究进展状况，并指出本书的目的和意义。第二章介绍木材中的裂纹及其应力强度因子和断裂韧性以及应力强度因子与  $u, v$  位移场的关系。第三章为水分吸着过程中木材的断裂模式，本章开展了水分吸着过程中木材断裂模式的研究工作，总结出不同类型试样，即不同裂纹取向试样的裂纹扩展路径，提出了临界载荷的确定方法，并测定了吸湿过程中木材的断裂韧性以及归纳出水分对它的影响。第四章为水分解吸过程中木材的断裂模式，本章研究旨在对水分解吸过程中木材的断裂模式进行分析，并与前三章一道，共同探寻木材中水分的变迁是否会对木材的断裂造成影响。第五章为裂纹对木材力学性能的影响，本章针对有裂纹和无裂纹的试样作了抗弯强度、抗弯弹性模量、冲击韧性试验，结果证明有裂纹试样的力学强度低于无裂纹试样强度。第六章为木材弹性常数的测定，本章采用电测法，测试了木材的 12 个弹性常数，为下一章应力强度因子的计算提供了必要的参数。第七章为木材的裂纹演化与扩展行为的研究，本章运用数字散斑相关方

法测试了木材裂纹扩展情况，用 DSCM 软件得出裂纹尖端位移场，并编写出程序计算出了裂纹尖端的应力强度因子。第八章为木材断裂面微观形态的研究。第九章为结论，总结了本研究中的主要研究结果。

由于时间仓促，水平有限，书中难免有不当之处，希望读者给予批评指正。

作者

2004年4月15日

## 目 录

1 引言 .....	1
1.1 木材断裂力学的基础理论 .....	1
1.2 木材断裂力学的研究现状 .....	4
1.3 本文研究工作的目的和意义 .....	8
1.4 本书构成 .....	9
2 木材中的裂纹及其应力强度因子和断裂韧性 .....	11
2.1 木材中裂纹的类型 .....	11
2.2 干燥后木材中的裂纹及木材的正交各向异性特征 .....	11
2.3 弹性力学的基本方程 .....	14
2.4 裂纹尖端区域的应力场和位移场 .....	15
2.5 应力强度因子 .....	17
2.5.1 应力强度因子是裂纹尖端应力应变场 强度的度量 .....	17
2.5.2 应力强度因子的确定方法 .....	18
2.6 断裂韧性 .....	18
3 水分吸着过程中木材的断裂模式 .....	19
3.1 序言 .....	19
3.2 试验材料和方法 .....	20
3.2.1 试样制备 .....	20
3.2.2 水分吸着试验 .....	21
3.2.3 断裂试验 .....	21

3.3 结果与讨论 .....	22
3.3.1 水分平衡状态下木材的断裂模式 .....	22
3.3.2 水分吸着过程中木材的断裂模式 .....	30
3.4 小结 .....	33
4 水分解吸过程中木材的断裂模式 .....	35
4.1 序言 .....	35
4.2 试验材料和方法 .....	35
4.2.1 试样制备 .....	35
4.2.2 断裂试验 .....	36
4.2.3 水分解吸试验 .....	36
4.3 结果与讨论 .....	37
4.3.1 第一个解吸阶段 (20°C, f.s.p→20°C, 82.4%RH) 中木材的断裂模式 .....	37
4.3.2 第二个解吸阶段 (20°C, 82.4%→20°C, 35.2%RH) 中木材的断裂模式 .....	46
4.4 小结 .....	57
5 裂纹对木材力学性能的影响 .....	59
5.1 序言 .....	59
5.2 裂纹对抗弯强度的影响 .....	60
5.2.1 计算方法 .....	60
5.2.2 试样的制备 .....	61
5.2.3 试验方法 .....	62
5.2.4 结果与讨论 .....	62
5.3 裂纹对抗弯弹性模量的影响 .....	64
5.3.1 计算方法 .....	64
5.3.2 试验方法 .....	65
5.3.3 结果与讨论 .....	65

5.4	裂纹对木材冲击韧性的影响 .....	66
5.4.1	计算方法 .....	67
5.4.2	试验方法 .....	67
5.4.3	结果与讨论 .....	67
5.5	小结 .....	69
6	木材弹性常数的测定 .....	71
6.1	序言 .....	71
6.1.1	木材的正交各向异性 .....	71
6.1.2	弹性常数的定义 .....	72
6.1.3	弹性常数的研究现状及目的 .....	73
6.2	弹性常数 $E_i$ , $\mu_{ij}$ , $G_{RT}$ 的测定 .....	75
6.2.1	电测法实验原理 .....	75
6.2.2	材料和方法 .....	75
6.2.3	确定试样弹性范围的预试验 .....	79
6.2.4	测试结果与分析 .....	80
6.3	弹性常数 $G_{LR}$ , $G_{TL}$ 的测定 .....	80
6.3.1	材料和方法 .....	80
6.3.2	测试结果与分析 .....	81
6.4	数据合理性的检验 .....	83
6.5	小结 .....	83
7	木材的裂纹演化与扩展行为的研究 .....	84
7.1	序言 .....	84
7.2	数字散斑相关方法 .....	85
7.2.1	测量的基本原理 .....	85
7.2.2	数字散斑相关方法 (DSCM) 的相关运算 .....	88
7.3	试验设备 .....	90
7.4	试验材料与方法 .....	91

7.5	结果与分析 .....	92
7.5.1	裂纹演化及其增长过程的散斑图像 .....	92
7.5.2	裂纹尖端位移场的确定 .....	96
7.5.3	裂纹尖端断裂参数的确定 .....	114
7.6	小结 .....	115
8	木材断裂面微观形态的研究 .....	116
8.1	序言 .....	116
8.2	木材断裂面微观形态的研究现状 .....	116
8.3	材料与方法 .....	118
8.4	观测结果 .....	119
8.5	小结 .....	121
9	主要结论 .....	123
	参考文献 .....	127

# 1 引言

木材在用作结构材料,如建筑用材、车船、室内装饰及木结构房屋等材料使用时,均须按照强度理论进行校核和设计。而依据传统的强度理论进行材料强度校核时,木材被视为均匀、连续的理想固体,忽视其内部存在的初始裂纹,故在使用中可能发生意外断裂现象,无法完全确保木材构件的安全性,甚至造成灾难性事故。木材是一种天然可更新的非均质复合材料,有节疤、劈裂、孔洞等天然缺陷。在干燥过程中,由于木材内存在较大的含水率梯度,干燥过快时,木材外部与内部干缩不一致而产生应力和变形,在天然缺陷的附近产生应力集中的现象。随着应力应变的增加而最终发生断裂。此外,木材经过机械加工后,内部也会产生初始裂纹。

木材是人类应用最多、最基本的原材料,全世界木材的年采伐量约 30 亿吨。按质量计算,木制品仅次于煤和石材产品而位居第三<sup>[18]</sup>。因此对含有初始裂纹的木材构件的断裂现象不可忽视。

## 1.1 木材断裂力学的基础理论

木材断裂力学是研究有裂纹(缺陷)木构件断裂强度的一门学科。或者说是研究含裂纹木构件裂纹的平衡、扩展和失稳规律,以保证木构件安全工作的一门科学<sup>[32]</sup>。木材断裂力学是断裂力学的一个重要分支,要想了解它的历史,还得先从断裂力学说起。断裂力学作为一门真正的学科,还只是近几十年的事。如果从 1957 年 G. R. Irwin 提出应力强度因子概念算起,才四十多年。但

它的发展异常迅速,是目前固体力学中最活跃的一个分支,对于金属物理、冶金学、材料科学以及航空、机械、建筑和地震工程等各工程技术部门都产生了重大的影响,显示出它巨大的生命力,并以被广泛地用来解决各种工程实际问题。那么断裂力学是怎样发展起来的呢?

传统的设计思想以常规强度理论作为基础。要求构件的计算应力满足  $\sigma_{\max} \leq [\sigma]$ , 其中  $[\sigma]$  为许用应力,其值可按  $[\sigma] = \sigma_s / n_s$  或  $[\sigma] = \sigma_b / n_b$  来选取。 $\sigma_s$  和  $\sigma_b$  分别为材料的屈服极限和强度极限, $n_s$  和  $n_b$  为安全系数。

近半个世纪以来,特别是第二次世界大战以后,随着设备和结构的大型化、设计应力的提高、高强度和超高强度材料( $\sigma_s \geq 1000 \sim 1500$  MPa)的使用、焊接工艺的普遍采用以及设备与结构使用条件的严酷化(温度、介质、原子辐射、载荷变动等),常规强度理论发生“失灵”的情况日益增多。按照常规设计思想设计出来的合乎常规强度标准的设备或结构,会在服役期内甚至试压时发生灾难性的破坏<sup>[31]</sup>。这些破坏现象不但使人格外震惊,而且也引起许多科学技术专家的特别重视。

经过分析研究后发现,以材料力学为基础的古典安全设计原理和方法还存在着严重缺点和不足之处,没有从根本上做到彻底地解决工程结构安全强度设计问题。因此基于现代化工程建设的迫切需要,迫使人们不得不去寻求解决工程结构强度设计问题的新途径。从而提出一套崭新的更完善的安全设计原理和方法。

从 20 年代起到 50 年代末,大约经过 40 多年的探索和研究,科技工作者根据大量的断裂现象观测结果和试验研究提出了解决工程结构强度问题的一套新理论和新方法,从而使断裂力学这门崭新的工程强度科学问世了<sup>[33]</sup>。

英国学者 Griffith<sup>[43]</sup>最先用能量法对玻璃、陶瓷等脆性材料进行断裂分析,建立了脆性材料的断裂判据,即

$$\frac{\pi A \sigma^2}{2Et} = 2\gamma \quad (1.1)$$

式中,  $E$ ——弹性模量;

$t$ ——试样厚度;

$\sigma$ ——单位面积上的应力;

$A$ ——表面面积;

$\gamma$ ——表面能密度。

式(1.1)表明,当裂纹扩展单位面积释放的应变能恰好等于形成自由表面所需的表面能时,裂纹就处于不稳定平衡状态;若裂纹扩展单位面积释放的应变能大于形成自由表面所需的表面能时,裂纹就会失稳扩展,断裂就发生了;若裂纹扩展单位面积释放的应变能小于形成自由表面所需的表面能,裂纹就不会扩展,处于静止状态。

Griffith 理论不适用大多数金属材料。Orowan<sup>[89]</sup>指出金属材料裂纹扩展前在其尖端附近会产生一个塑性区,提供裂纹扩展的能量不仅用于形成新表面所需的表面能,还用于引起塑性变形所需的能量,即“塑性功”。Griffith 和 Orowan 的理论构成了断裂力学中能量理论的基础<sup>[31]</sup>。

脆性断裂理论的重大突破归功于 G.R.Irwin<sup>[71]</sup>,1957 年提出了应力强度因子的概念,随后又在此基础上形成了断裂韧性的概念,并建立起测量材料断裂韧性的实验技术。Griffith—Orowan—Irwin 理论的初步形成使线弹性断裂力学有了巨大发展<sup>[34]</sup>。线弹性断裂力学研究裂纹体裂纹尖端地区发生完全弹性变形和小规模屈服的裂纹扩展规律的断裂问题,即研究裂纹体的脆性和准脆性断裂问题;也就是研究裂纹体在断裂过程中没有或很少发生塑性变形的裂纹扩展规律。它为木材断裂力学的研究提供了理论基础。

## 1.2 木材断裂力学的研究现状

木材断裂力学性质是木材力学性质的一个重要方面,是在木材利用中,特别是作为结构材料使用时,首先必须考虑的问题。有关木材力学的研究以欧洲为最早,我们可以在 1707 年及 1708 年《法国科学院的书集》中看到有关木材力学性质的文章<sup>[11]</sup>。长期以来,人们把木材当作连续均匀的理想材料来预测它的强度。但当把木材作为结构材料使用时,常常因为不能正确估价木材的强度而造成木材的巨大浪费,甚至出现灾难性事故。直到近几十年,人们逐渐意识到木材不仅由于生长特性而内部存在节疤、劈裂、孔洞等天然缺陷,而且由于机械加工或经过干燥后,都会使木材内产生初始裂纹,这无疑影响着木材的力学强度。为了定量分析这些因素对木材强度的影响,美国国家科学基金(Grant No.CME-7918170)对科罗拉多州立大学的“木材作为各向异性、不均匀、不连续材料的力学行为的研究”项目予以了资助。此项目的目的是对带有节疤、裂纹等缺陷的木材强度进行预测。

线弹性断裂力学是木材断裂力学的基础。在过去的几十年里,外国的科学家们运用线弹性断裂机理已成功地分析了木材的断裂性质(Valentin and Caumes1989<sup>[107]</sup>; Mall et al.1983<sup>[86]</sup>; Williams and Birch1976<sup>[109]</sup>; Perrerson R.W.and Bodig J.1983<sup>[90]</sup>; Logemann and Schelling1992<sup>[84]</sup>; Boatright and Garrett1980<sup>[49]</sup>)。他们大多数对木材的 I-型断裂进行了研究,认为木材的断裂韧度 KIC 是木材的独立几何材料性能。Atack 等<sup>[44]</sup>和 Porter<sup>[91]</sup>首次将线弹性断裂力学应用到木材强度分析中,国外学者对木材断裂的研究,最初是将木材视为各向同性材料,取得一些满意的结果。

一些科学家认为,各向同性体的应力强度可以作为正交各向异性体的应力强度的合理估计,各向同性体和正交各向异性体的应力强度因子相等<sup>[53,105,109]</sup>。Tomin<sup>[106]</sup>认为在实际情况中,由于存在着有限的边界、材料和几何条件的影响,各向同性体和正交各向异性

体应力强度是不相等的, Bowie and Freese<sup>[50]</sup>和 Ghandi<sup>[67]</sup>在研究具有中心裂纹的正交各向异性体平面拉伸试验时,发现各向同性体和正交各向异性体的应力强度因子相差 10%。Walsh<sup>[113]</sup>应用有限元方法计算应力强度因子时发现,若试样足够长,正交各向异性在单边切口试样的拉伸、弯曲和剪切试验中可以忽略,若试样较短,那么正交各向异性的影响是显著的,在标准拉伸和纯弯曲试验中,正交各向异性体的应力强度因子比各向同性体小 7%。对于开裂试样,正交各向异性对应力强度因子的影响十分巨大。Mandel 等<sup>[87]</sup>研究有边缘裂纹的悬臂梁试样时,认为正交各向异性体和各向同性体的应力强度因子相差 25%。Domel and Smith<sup>[59]</sup>在弯曲试验中发现,正交各向异性体的应力强度因子较各向同性体的应力强度因子小 7%。用各向同性体的应力强度估算正交各向异性体的应力强度取决于问题的类型和准确度。目前,最为广泛地求得正交各向异性体的应力强度因子的计算技术是有限元方法。有限元方法的大量使用基于它在处理复杂几何条件和边界条件问题中的多面性<sup>[6]</sup>。1984 年 P Triboult, Champenoux 等<sup>[104]</sup>在图 1.1 所示试样的基础上,应用奇异裂纹单元在裂纹尖端构建了有限元网路图,如图 1.2 所示,并运用有限元程序计算应力强度因子。

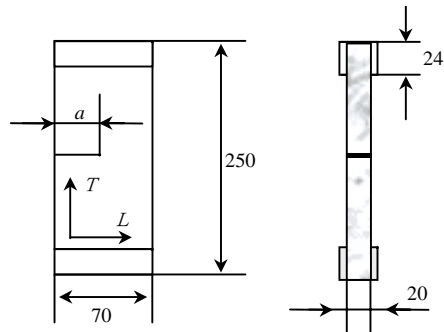


图 1.1 拉伸试样

Fig 1.1 Sent specimen

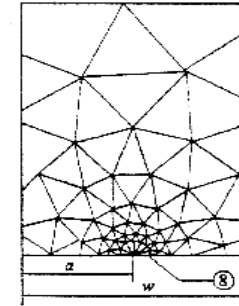


图 1.2 有限元计算网路图

Fig 1.2 Fintie element mesh

日本和法国一些科学家利用裂纹扩展的能量释放率  $G_{IC}$  与构件或试样的柔度  $C$  之间的关系

$$G_{IC} = (P^2 / 2B)(\partial C / \partial a) \quad (1.2)$$

及  $G_{IC} = S^* K_{IC}^2$  的关系来计算  $K_{IC}$ 。

其中,

$$S^* = \left( \frac{S_{11} S_{22}}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \left[ \left( \frac{S_{22}}{S_{11}} \right)^{\frac{1}{2}} + \left( \frac{2S_{12} + S_{66}}{2S_{11}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.3)$$

此外,边界配置法也是一种计算复杂裂纹体强度的有效方法<sup>[12]</sup>。

Robert W. Petterson 等<sup>[95]</sup>对 10 个针叶树材试样进行拉伸断裂试验,对试验数据线性回归分析后得出了木材的断裂韧性的表达式:

$$K_{IC} = 400 S_g b (10)^{-CM} \quad (1.4)$$

其中,  $b$ 、 $c$  是常数,依树种而定,它一方面可以查表,一方面可以通过线性回归得到;  $S_g$  是木材的密度;  $M$  是木材的含水率(低于纤维饱和点)。裂纹扩展在木材断裂力学中是一个非常重要

的课题。近来声发射技术已被应用到跟踪裂纹扩展和判断断裂模式方面<sup>[60,88,103]</sup>，他们的研究表明，声发射技术在描述断裂类型、裂纹扩展位移方面具有很高的价值。Porter<sup>[90]</sup>研究不稳定裂纹扩展的能量释放率时，提出了一个材料常数：应变能释放率，认为试样厚度在 3~25 mm 之间变化时，对  $G_{IC}$  没有影响，试样高度在很大范围内变化时，对  $G_{IC}$  同样没有影响。Barret<sup>[47]</sup>在对南非红松做四点弯曲试验时，指出试样厚度大于 5 mm 时， $K_{IC}$  是一个常数。与 Barret 的观点不同，Ewing and William<sup>[62]</sup>在研究 Scot pine 室干材时，发现试样厚度不同，3、6、12、25、50mm 的厚度对  $K_{IC}$  是有影响的，他认为这是由于干燥过程中的残余应力造成的。Johnson<sup>[74]</sup>认为断裂韧性和裂纹扩展力是木材的基本材料性质，不受试样大小和裂纹大小的影响，但受温度、含水率、应力、应变的影响。

与国外相比，我国对木材力学性质的研究起步较晚，对木材断裂力学的研究才刚刚起步。木材力学性质的研究主要是由李源哲等在五、六十年代主持进行的“中国主要树种木材物理力学性质的研究”<sup>[19]</sup>。此项研究对我国 283 个主要树种的 16 项力学性质进行了大量的试验，为我国木材力学性质的研究打下了坚实基础，它同时也是大规模进行木材力学性质变异性研究的起点。随着木材力学性质变异性研究的深入，许多木材科学家开始将木材的解剖特性与其力学行为联系起来，仔细研究木材的破坏行为和破坏机理与力学强度之间的关系。“八五”期间，木材科学家们对我国主要工业人工林树种的木材力学性质进行了比较系统的研究，其主要结论对工业人工林营林培育和加工利用具有现实的指导意义。但总体来看，目前对木材力学性质的研究还很肤浅，此方面研究的深入要依赖于对木材破坏过程和破坏机理的认识<sup>[12]</sup>。

木材断裂力学是研究有缺陷木材的力学行为或木材加工过程中裂纹扩展，木制品合理利用的一个力学新领域<sup>[12]</sup>。我国的科学工作者对木材断裂力学性质研究甚少，1993 年范文英等<sup>[25]</sup>对木材

断裂韧性的测定方法做了简单研究；1997 年孙艳玲等<sup>[13]</sup>发表了木材断裂力学研究的综述性文章；1988 年鹿振友<sup>[37]</sup>研究了断裂力学在木材加工上的应用；1999 年孙艳玲等<sup>[14]</sup>用有限元计算了水曲柳裂纹尖端应力强度因子；1999 年任海青<sup>[12]</sup>对人工林木材断裂性质进行了研究，其他未见报道。

从以上不难看出，木材科学工作者们大多是从理论上推导木材尖端的应力强度因子，而试验研究较少。影响木材断裂韧性的因素较多，人们多数从试样的厚度或裂纹长度来研究其对木材断裂韧性的影响，却常常忽略水分，特别是水分非平衡态对木材断裂韧性的影响。针对于此，本文将展开探讨与研究工作。

### 1.3 本文研究工作的目的和意义

木材作为建筑用材在我国木材消耗量中占相当比重。农村房舍的结构材料和城市建筑的内部装饰材料也常采用木材。另外，它还被广泛应用于飞机、船舶、矿柱、枕木、家具等<sup>[8]</sup>。木材在技术特性中，存在着某些自然的缺点，如物理、力学性质上的各向异性，干湿变形，在不利条件下变色和腐朽等<sup>[11]</sup>，这就不可避免地在其内部产生初始裂纹。裂纹的演化与增长行为十分复杂，成为木材力学研究领域的前沿课题<sup>[4]</sup>。

一般木材中总是有水分存在的，而水分的存在，特别是吸着水（adsorbed water 或 bound water）的存在会对木材的物理力学性能产生显著影响，甚至影响木材的实际利用。因此，研究木材离不开水分，这也是为什么长久以来木材科学工作者们喜欢研究“水分与木材之间的相互关系”的原因所在吧。木材中的水分是水分存在的一种特殊形式，与普通意义上的水分有区别，同时木材与水分之间的相互作用十分复杂。木材的水分吸着和解吸过程都是经时变化过程，所以在初始平衡状态和终平衡状态之间木材处于水分非平衡状态<sup>[38]</sup>。了解该状态下木材的断裂力学行为极其重

要, 本书将对木材在吸湿和解吸过程中裂纹扩展及断裂行为进行研究。迄今为止, 吸湿和解吸过程中, 即水分非平衡状态下木材断裂力学的研究还处于空白领域, 本书对此将展开研究工作, 这无疑将对于木材断裂力学的研究有一个积极的影响。

本文结合木材的正交各向异性特征, 运用电测法测试了木材的 12 个弹性常数, 目的在于为木材断裂性质的研究提供必要的参数。

随着现代科技的迅速发展, 激光技术和近代光学及计算机技术已在实验力学领域中得到应用<sup>[7]</sup>, 数字散斑相关方法<sup>[27,51,92]</sup>正在成为材料与结构微小变形场测试的重要手段, 它具有非接触、光路简单、精度高、数据处理快、无须对试件表面进行特别的处理等特点。

本书利用数字散斑相关技术对白桦材裂纹的演化与增长的力学行为进行了实验研究, 记录了裂纹尖端局域场形变信息的散斑图像, 经过相关运算得出裂纹尖端的位移场分布图。采用数字散斑相关技术研究木材的断裂力学行为, 这在国内还是第一次。

另外, 本文还研究了裂纹对木材强度的影响。并借助扫描电镜, 研究了木材微观破坏构造, 了解其断裂机理。所有这些工作将对今后木材损伤与断裂力学的基础理论研究和工程实践具有重要的指导意义, 为正确认识木材破坏机理、预测破坏提供参考, 为科学而合理地利用木材提供科学依据。

## 1.4 本书构成

本书共由九章构成。第一章为引言, 主要探讨木材断裂力学的理论研究基础和国内外对木材断裂力学的研究进展状况, 并指出本书的目的和意义。第二章介绍木材中的裂纹及其应力强度因子和断裂韧性以及应力强度因子与  $u, v$  位移场的关系。第三章为水分吸着过程中木材的断裂模式, 本章开展了水分吸着过程中木

材断裂模式的研究工作, 总结出不同类型试样, 即不同裂纹取向试样的裂纹扩展路径, 提出了临界载荷的确定方法, 并测定了吸湿过程中木材的断裂韧性以及归纳出水分对它的影响。第四章为水分解吸过程中木材的断裂模式, 本章研究旨在对水分解吸过程中木材的断裂模式进行分析, 并与前三章一道, 共同探寻木材中水分的变迁是否会对木材的断裂造成影响。第五章为裂纹对木材力学性能的影响, 本章针对有裂纹和无裂纹的试样作了抗弯强度、抗弯弹性模量、冲击韧性试验, 结果证明有裂纹试样的力学强度低于无裂纹试样强度。第六章为木材弹性常数的测定, 本章采用电测法, 测试了木材的 12 个弹性常数, 为下一章应力强度因子的计算提供了必要的参数。第七章为木材的裂纹演化与扩展行为的研究, 本章运用数字散斑相关方法测试了木材裂纹扩展情况, 用 **DSCM** 软件得出裂纹尖端位移场, 并编写出程序计算出了裂纹尖端的应力强度因子。第八章为木材断裂面微观形态的研究。第九章为结论, 总结了本研究中的主要研究结果。

## 2 木材中的裂纹及其应力强度因子和断裂韧性

### 2.1 木材中裂纹的类型

树木生长期间或伐倒之后，由于各种原因（风力、霜冻、心材收缩或生长应力不平衡）而使木材纤维之间分离形成的裂隙，称为裂纹。裂纹是使原木和锯材降等的主要原因之一<sup>[1,21]</sup>。

(1) 径裂 径裂是沿树干半径方向的裂纹，也称心裂。径裂常出现在大树或成熟树干基部，在木材干燥时径裂程度会增大。

(2) 轮裂 轮裂是指沿生长轮走向而开裂的裂纹。轮裂又分为环裂和弧裂，环裂指开裂占生长轮圆周一半以上或整圆；弧裂指开裂占年轮圆周一半以下者。轮裂常发生于宽、窄年轮的交界部位，由于宽、窄生长轮的收缩不均而形成。

(3) 冻裂 冻裂常见于严寒条件下的木材。以阔叶树材居多，常发生于老树基部，为径向开裂。冻裂的出现是由于树干内部和外部的温差应力、风力以及湿材等多种因素促成的。此外，低温（如霜冻）亦能使木材横切面上出现较弱的霜冻轮。

### 2.2 干燥后木材中的裂纹及木材的正交各向异性特征

木材干燥后的裂纹<sup>[3]</sup>，可以分为三种基本状态：即张开型裂纹（I-型）、滑开型裂纹（II-型）和撕开型裂纹（III-型），如图

2.1。每种裂纹模式中，都对应着一个应力强度因子，分别为： $K_I$ 、 $K_{II}$ 、 $K_{III}$ ，应力强度因子是表征裂纹尖端附近应力场强的一个有效参量，可作为判断裂纹是否进入失稳状态的一个指标<sup>[20]</sup>。木材可被看作正交各向异性材料，在纵向（Longitudinal）、径向（Radial）、弦向（Tangential）三个方向有独立的力学性质。纵向平行于纤维方向，径向垂直纹理沿着生长轮（半径）方向，弦向垂直纹理且切于生长轮方向<sup>[55]</sup>。对于其正交各向异性原木或板材，如图 2.2、2.3 所示有六种断裂模式（TR、LR、RT、TL、LT、RL），第一个字母表示裂纹平面的法线方向，第二个字母表示预期的裂纹扩展方向。但是木材在实际干燥后，断裂多发生在 TL、RL 模式中，其 I-型裂纹分别与木材干燥后的径裂和弦裂相类似，且 TL、RL 模式的断裂韧度最小，因此成为木材结构设计的必要因素。

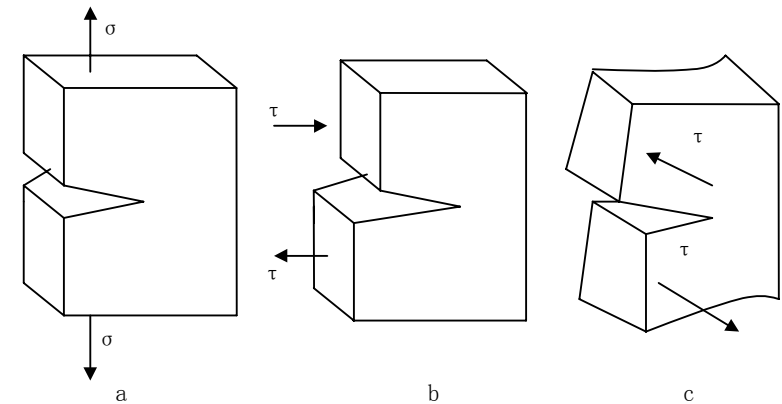


图 2.1 木材裂纹力学特征分类图

a 张开型裂纹（I-型）；b 滑开型裂纹（II-型）；c 撕开型裂纹（III-型）

Fig 2.1 Classification of wood crack according to mechanical characteristic

a. The Opening Mode b. The Edge-Sliding Mode c. The Tearing Mode

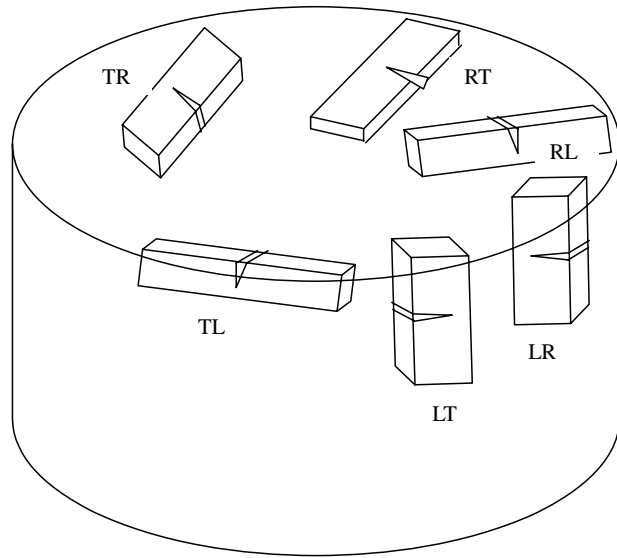


图 2.2 原木中裂纹面取向和裂纹扩展方向的标记规定

Fig 2.2 Crack direction and propagation's mark provision in log

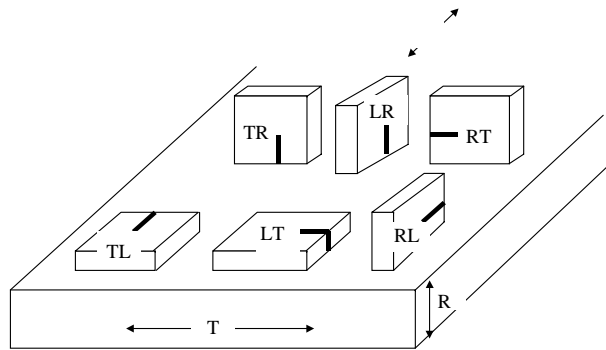


图 2.3 板材中裂纹面取向和裂纹扩展方向的标记规定

Fig 2.3 Crack direction and propagation's mark provision in timber

对含裂纹木材构件进行断裂力学分析时，必须要知道木材的断裂韧性。带有裂纹的木材构件按其受力变形方式，一般情况下，可认为裂纹顶端的塑性区域微小，从而可用线弹性力学来分析裂纹的行为。线弹性断裂力学理论（linear elastic fracture mechanics theory）是木材断裂力学的基础<sup>[95]</sup>。将这一理论应用于木材正在成为日益流行的研究课题，它既适用于脆性材料同时也适用于木材<sup>[66]</sup>。裂纹顶端附近区域的应力应变场皆可由一个参量来表示，它标志着裂纹顶端附近区域应力场强弱的程度，称为应力强度因子。由于 I-型加载是最常见的，也是引起脆性破坏最危险的情况，实际裂纹即使是复合形裂纹，为了更加安全也往往把它作为 I-型处理，因此对 I-型加载研究得最多<sup>[20,39]</sup>。本文只讨论 I-型裂纹的应力强度因子和断裂韧性。

### 2.3 弹性力学的基本方程

对裂纹的应力分析，最重要的是在裂纹尖端附近。运用线弹性理论基本公式可求得裂尖区域任一点处的应力分量和位移分量。为了较好地分析问题，首先阐述弹性力学的基本方程。

在直角坐标系中，各向异性弹性体的平衡微分方程为，

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + f_x &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + f_y &= \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + f_z &= \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (2.1)$$

式中， $\sigma_{ij}$ 为应力分量； $u$ ， $v$ ， $w$ 分别是  $x$ ， $y$ ， $z$  方向的位移分量； $\rho$ 为质量密度， $t$ 是时间； $f_x$ ， $f_y$ ， $f_z$ 是单位体积的体积力分量。

各向异性弹性体的本构方程为

$$\sigma_i = C_{ij} \varepsilon_j \quad (i, j=1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (2.2)$$

其中,  $\varepsilon_j$  为应变分量,  $C_{ij}$  为刚度系数。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{26} \\ S_{61} & S_{62} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.3)$$

平面问题的本构方程可简化为其中,  $S_{ij}$  为柔度系数。

木材是正交各向异性材料(第六章将深入探讨这一问题), 因此木材主轴方向的本构方程为:

$$S_{11}=1/E_1, S_{12}=S_{21}=-\mu_{21}/E_2=-\mu_{12}/E_1, S_{22}=1/E_2, S_{66}=1/G_{12}。$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.4)$$

其中,  $S_{ij}$  可由木材的工程弹性常数确定,

式中,  $E_2$ 、 $E_1$  为杨氏弹性模量,  $G_{12}$  为剪切弹性模量,  $\mu_{21}$ 、 $\mu_{12}$  为泊松比。

## 2.4 裂纹尖端区域的应力场和位移场

图 2.4 所示为裂尖坐标系, 裂尖位于坐标系的原点, 裂纹面位于幅角等于 0 的极坐标轴上。

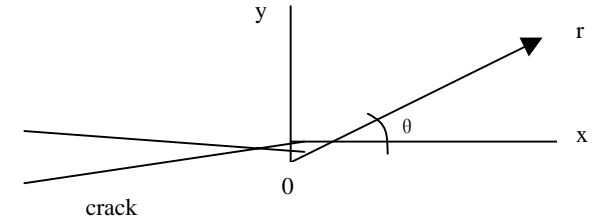


图 2.4 裂尖坐标系示意图

Fig 2.4 Coordinate system at crack tip

在上面坐标系中, 木材平面裂纹尖端附近的应力场和位移场的表达式<sup>[77]</sup>为:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \operatorname{Re} \left[ \frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_1 - \mu_2} \left( \frac{\mu_2}{\sqrt{\cos\theta + \mu_2 \sin\theta}} - \frac{\mu_1}{\sqrt{\cos\theta + \mu_1 \sin\theta}} \right) \right] \\ \sigma_y &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \operatorname{Re} \left[ \frac{1}{\mu_1 - \mu_2} \left( \frac{\mu_1}{\sqrt{\cos\theta + \mu_2 \sin\theta}} - \frac{\mu_2}{\sqrt{\cos\theta + \mu_1 \sin\theta}} \right) \right] \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \operatorname{Re} \left[ \frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_1 - \mu_2} \left( \frac{1}{\sqrt{\cos\theta + \mu_1 \sin\theta}} - \frac{1}{\sqrt{\cos\theta + \mu_2 \sin\theta}} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} u &= K_I \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \operatorname{Re} \left[ \frac{1}{\mu_1 - \mu_2} (\mu_1 P_2 \sqrt{\cos\theta + \mu_2 \sin\theta} - \mu_2 P_1 \sqrt{\cos\theta + \mu_1 \sin\theta}) \right] \\ v &= K_I \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \operatorname{Re} \left[ \frac{1}{\mu_1 - \mu_2} (\mu_1 q_2 \sqrt{\cos\theta + \mu_2 \sin\theta} - \mu_2 q_1 \sqrt{\cos\theta + \mu_1 \sin\theta}) \right] \end{aligned} \quad (2.6)$$

这里,  $\operatorname{Re}$  表示对括号里的结果取实部,  $K_I$  表示 I-型裂纹的应力强度因子。

$P_j=S_{11}\mu_j^2+S_{12}$ ,  $q_j=S_{12}\mu_j+S_{22}/\mu_j$ ,  $j=1,2$ ;  $\mu_j$  是下列特征方程的根:

$$S_{11}\mu^4 + (2S_{12}+S_{66})\mu^2 + S_{22}=0 \quad (2.7)$$

式中,  $S_{ij}$  为 (2.3) 式中的柔度系数。

## 2.5 应力强度因子

设  $\theta=0$  ( $y=0$ ), 即在裂纹延长线上, 由式 (2.5) 可得:

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad (2.8)$$

反之, 若已知应力场, 则可定义  $K_I$ 。

一般来说, 应力强度因子写成如下形式:

$$K_I = f\sigma\sqrt{\pi a} \quad (2.9)$$

其中,  $f$  是形状系数或者叫修正系数, 与试件尺寸、裂纹大小、位置等有关, 一般大于 1;  $a$  是裂纹尺寸。

### 2.5.1 应力强度因子是裂纹尖端应力应变场强度的度量

由上节的公式 (2.5) 可以看出, 对于裂纹尖端前任意一点, 其坐标  $r$ ,  $\theta$  是确定值, 因而该点的应力分量和位移分量完全可以由  $K_I$  决定。 $K_I$  越大, 裂纹尖端附近的应力应变就越大。用应力本身来表征裂纹尖端的应力场是不适宜的。因为当  $r$  趋近于 0 时, 各应力分量都无限增大。而应力强度因子却可以有效地表征裂纹尖端的应力场, 它是判断裂纹是否将进入失稳状态的一个指标。因此, 求裂纹体的应力强度因子是木材断裂力学中很重要的一项工作。

### 2.5.2 应力强度因子的确定方法

在线弹性断裂力学中, 应力强度因子的求解, 尽管有了解析法、数值法, 但由于实际问题的复杂性和多样性, 往往使计算遇到极大的困难, 有时甚至无法解决。在这种情况下, 实验测定不失为一种有用的手段。求解应力强度因子的实测法有柔度标定法, 有限元法, 光弹性法, 云纹法等。

本书采用数字散斑相关方法求解应力强度因子。它首先对两幅散斑图做相关运算, 找到相关系数极值点得到相应的位移, 然后按公式 (2.6) 计算出该点的应力强度因子。第七章有对数字散斑相关方法求解应力强度因子的详细阐述。

## 2.6 断裂韧性

由式 (2.9) 可知, 应力强度因子  $K_I$  与应力和裂纹长度有关, 随着应力的增大或裂纹的慢慢扩展, 裂纹尖端的  $K_I$  将增大。当  $K_I$  增大到足以使木材裂纹尖端分离, 裂纹失稳扩展时, 称为达到临界状态。当木材构件的  $K_I$  达到其临界值时, 就会失稳断裂。 $K_I$  的临界值  $K_{Ic}$ , 就表征了木材阻止裂纹扩展的能力, 是木材抵抗断裂的一个韧性指标, 称为断裂韧性。脆性断裂的应力强度因子判据为  $K_I = K_{Ic}$ 。其中,  $K_I$  是带裂纹构件所承受的载荷、弹性体与裂纹几何形状和尺寸等因素的函数。而  $K_{Ic}$  是材料常数, 可通过实验测定。与材料力学破坏条件相比,  $K_I$  相当于应力,  $K_{Ic}$  相当于屈服极限。

大量试验结果表明, 一般情况下, 木材的  $K_{Ic}$  与试件的厚度、裂纹长度、韧带宽度 ( $W-a$ ) 均有关。此外, 它还受到木材本身如密度和含水率等因素的影响。

本书后面章节将就含水率这一影响因子展开深入的研究。

## 3 水分吸着过程中木材的断裂模式

### 3.1 序言

木材是树木有机体的组成部分。树木生长的全部生命活动及其有机组成，都与水分有着密不可分的关系。树木在生长时，其根部由土壤中吸收含有矿物营养的水分，再由树干的木质部运送到树木的各个器官；同时，叶通过光合作用制造的有机养料由树干的韧皮部输送至树木的各个部分。水分既是树木进行正常生命活动必不可少的物质，又是树木输送矿物质及有机营养物的载体，它在树木生长时期发挥着极为重要的作用。树木伐到后，木材作为一种原材料，其中所含的水分对于木材的物理力学性质有着极大的影响<sup>[8]</sup>。而断裂是木材最重要的力学性质之一，它是木材作为建筑材料，安全设计中必须考虑的一个重要因素。因此，要研究木材的断裂力学性质，就必须重视木材与水分关系的研究。

Larsen and Gustafsson<sup>[85]</sup>对针叶材在垂直纹理方向受拉应力时的断裂能 (fracture energy) 进行了研究，结果表明木材含水率在 10%~20% 之间时对断裂能没有影响。Rug 等<sup>[94]</sup>1990 年在研究欧洲红木试样的断裂能时，为了寻求含水率对木材断裂能的影响，将一系列试样的含水率分别调到 12%、18%、24%，结果发现随着含水率由 12% 到 24% 的增加，95% 的试样断裂能是略微逐渐降低的。Smith and Chui<sup>[99]</sup>在研究加拿大 New Brunswick 地区的红松时发现，当木材含水率从纤维饱和点降到 18% 时，其模式 I 的顺纹断裂能量上升，但当含水率从 18% 继续下降时，其模式 I 的顺

纹断裂能量反而下降。Valentin 等<sup>[108]</sup>认为含水率对断裂韧性有影响，他在书中这样说道：“由于木材的正交各向异性以及含水率对木材断裂性质的影响，有许多试验和理论工作要去做，特别是试验更为重要。”

以上研究在一定程度上说明了木材的断裂性质与水分含量有关，但水分含量究竟对木材的断裂性质有怎样的影响是一个复杂的问题，研究者的结论不尽相同，至今还没有明确的阐述，而且这些研究没有涉及到在水分吸着过程中（水分非平衡状态下）木材的断裂性质。故此，本章开展了水分吸着过程中木材断裂模式的研究工作，总结出不同类型试样，即不同裂纹取向试样的裂纹扩展路径，提出了临界载荷的确定方法，并测定了吸湿过程中木材的断裂韧性以及归纳出水分对它的影响。

### 3.2 试验材料和方法

#### 3.2.1 试样制备

本实验中试材为白桦 (*Betula platyphylla* Suk.)。和白皮松 (*Pinus bungeana*)。它们于 2000 年采自黑龙江，取样方法按照国家标准《木材物理力学试材采集方法》GB1927—91 的规定进行。

试样分 TL、LT、TR 三种类型，几何形状见图 3.1，在试样中心处预制一个垂直于下边界的直缺口裂纹 a(single-edge-notch)，TL 尺寸为 85 (长 L) × 15 (宽 W) × 5 (厚 B) mm，TR 尺寸为 95 (L) × 20 (W) × 10 (B) mm，LT 尺寸为 125 (L) × 25 (W) × 18 (B) mm，LT (白皮松) 尺寸为 120 (L) × 20 (W) × 10 (B) mm。