

# 木材干燥后的裂纹与断裂

王丽宇<sup>1</sup>, 鹿振友<sup>1</sup>, 张明辉<sup>1</sup>, 蒋松林<sup>2</sup>

(1. 北京林业大学工学院, 100083 北京; 2. 中国林科院木材工业研究所, 北京 100091)

**摘要:** 按照传统的强度理论, 对干燥后用作建筑或农村房舍结构的木材进行校核和设计时, 常忽视木材内部存在的初始干燥裂纹。本文阐述了木材的正交各向异性特征和其干燥后裂纹, 以及裂纹对木材强度的影响, 并结合木材正交各向特征对其裂纹与断裂力学行为的研究方法提出了初步的构想。

**关键词:** 木材干燥; 裂纹; 断裂

中图分类号: TS652 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654(2002)02-0026-03

## Wood Crack and Fracture after Wood Drying

WANG Li-yu<sup>1</sup>, LU Zhen-you<sup>1</sup>, ZHANG Ming-hui<sup>1</sup>, JIANG Song-lin<sup>2</sup>

(1. College of Forest Products and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract:** According to conventional strength theory, the initial cracks in wood drying were always neglected when dried wood was directly used as architectural or rural-farmhouse configuration materials in the past. In this paper, the authors elaborated the cracks in wood drying, wood ortho-anisotropic characteristics and crack influence on wood strength. Some preliminary ideas were discussed on researching wood crack and fracture behavior with wood ortho-anisotropic characteristics.

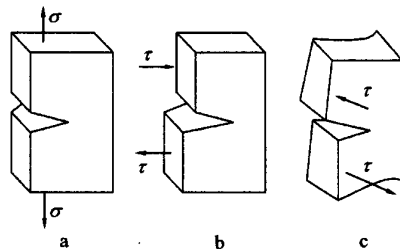
**Key words:** Wood drying; Crack; Fracture

木材干燥后, 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, 忽视了其内部存在的初始干燥裂纹, 故在使用中仍可能发生意外断裂现象, 无法完全确保木材构件的安全性。木材是一种天然可更新的非匀质复合材料, 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, 其外部与内部干缩不一致产生应力和变形, 并集中在木材的天然缺陷附近。随着应力应变的增加而最终发生断裂, 因此木材的初始干燥裂纹不可忽视。

### 1 干燥后木材中的裂纹及木材的正交各向异性特征

木材干燥后的裂纹可以分为张开型(I-型)、滑开型(II-型)和撕开型(III-型)3种状态, 如图1。每种裂

纹模式都对应着一个应力强度因子, 即  $K_I$ 、 $K_{II}$ 、 $K_{III}$ , 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>[1]</sup>。木材可被看作正交各向异性材料, 有3个独立力学性质: 纵向(Longitudinal)、径向(Radial)、弦向(Tangential)。对于具有正交各向异性特征板材或



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

图1 木材裂纹力学特征分类

Fig. 1 Classification of wood crack according to mechanical characteristic

原木,如图 2 所示有六种断裂模式,即  $TR$ 、 $LR$ 、 $RT$ 、 $TL$ 、 $LT$ 、 $RL$ (第 1 个字母表示裂纹平面的法线方向,第 2 个字母表示预期的裂纹扩展方向)。但在实际干燥后,木材断裂多发生在  $TL$ 、 $RL$  模式中,如图 2、3 所示,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。

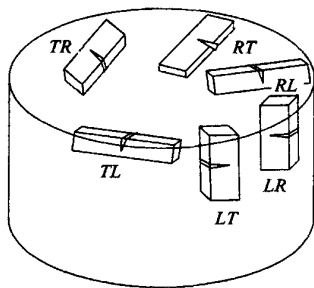


图 2 原木中裂纹面取向和裂纹扩展方向的标记规定

Fig. 2 Crack direction and propagation's mark provision in log

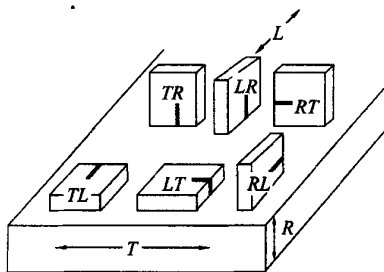
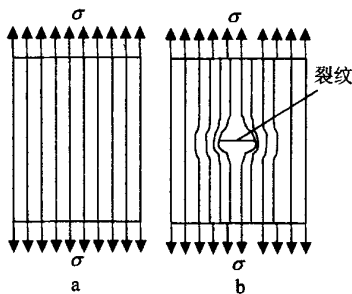


图 3 板材中裂纹面取向和裂纹扩展方向的标记规定

Fig. 3 Crack direction and propagation's mark provision in timber

## 2 裂纹对木材强度的影响

具有裂纹的木材受力以后,在裂纹尖端区域将产生局部应力集中现象。若无裂纹,图 4a 所示的受拉板的应力流线应为均匀分布;存在裂纹时,应力流线在裂纹尖端附近高度密集(图 4b)。但这种集中是局部



a. 无裂纹板受拉;b. 含裂纹板受拉板

图 4 应力流线图

Fig. 4 Stress streamlined figure

性的,离开裂纹尖端稍远处,应力分布又趋于正常。应力集中程度与裂纹尖端的曲率半径有关,裂纹越尖锐,应力集中程度越高。这种应力集中导致木材的实际断裂强度远低于该木材的理论断裂强度。

假设一个“无限大”薄木平板,承受单向均匀拉力,木板中存在贯穿的椭圆形切口,其长轴为  $2a$ ,短轴为  $2b$ ,把木材看成各向同性材料时,按传统强度理论,其断裂的临界应力为:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{E\gamma\rho}{4ab_0}} \dots\dots\dots (1)$$

式中: $E$  为弹性模量; $\gamma$  为木材表面能密度; $b_0$  为木材的原子间距; $\rho$  为长轴端点处的曲率半径, $\rho=b^2/a$ 。

由式(1)可见,当理想尖裂纹( $\rho \rightarrow 0$ )存在木材中时,木材的临界应力  $\sigma \rightarrow 0$ ,这说明木材一旦有了理想尖裂纹就不再有强度,这与事实不符。

当固体材料中的缺陷是尖裂纹时,可用原子间距  $b_0$  代替裂尖曲率半径  $\rho^{[3]}$ ,则式(1)为:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{E\gamma}{4a}} \dots\dots\dots (2)$$

说明当木材有非常尖锐的裂纹存在时,木材的实际断裂强度较理论断裂强度低得多。

## 3 木材断裂行为研究的基础理论

英国学者 Griffith<sup>[4]</sup>最先用能量法对玻璃、陶瓷等脆性材料进行了断裂分析,认为当应变能密度大于形成自由表面所需的表面能时断裂就发生了。Griffith 理论不适用大多数金属材料。Orowan<sup>[5]</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>[6]</sup>。

脆性断裂理论的重大突破归功于 Irwin<sup>[7]</sup>在 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>[8]</sup>,为木材断裂力学的研究提供了理论基础。

## 4 木材断裂行为的研究构想

Atack 等<sup>[9]</sup>和 Porter<sup>[10]</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。木材作为正交各向异性材料,其裂纹尖端附近的应力场和位移场与 Sih 等<sup>[11]</sup>提出的各向异性材料相近,Sih 发展了 Westergaard<sup>[12]</sup>的方法,假定材料

是均匀的、正交各向异性的、在某一给定方向的材性一定,计算了正交各向异性板材在遥远处受拉应力和剪应力作用下,裂纹尖端附近的应力场和位移场,公式(3)为拉应力作用下的裂纹张开位移。

$$v=K_I \frac{r}{2\pi Re} \left[ \frac{1}{\mu_1 - \mu_2} (\mu_1 q_2 \cos \theta + \mu_2 \sin \theta - \mu_2 q_1 \cos \theta + \mu_1 \sin \theta) \right] \dots\dots\dots (3)$$

其中: $v$  是张开位移,  $K_I$  是 I-型应力强度因子;  $Re$  是求实数值,  $\mu$  是下式的复根

$$B_{11}\mu^4 + (2B_{12} + B_{66})\mu^2 + B_{22} = 0 \dots\dots\dots (4)$$

对于木材  $T_L$  模式,

$$B_{11} = (1/E_L) - (\nu_{RL}^2/E_R)$$

$$B_{22} = (1/E_T) - (\nu_{RT}^2/E_R)$$

$$B_{12} = -[(\nu_{TL}/E_T) + (\nu_{RL} \cdot \nu_{RT}/E_R)]$$

$$B_{66} = 1/G_{LT}$$

其中:  $E, \nu, G$  分别表示杨氏模量,泊松比,剪切弹性模量。

无论是各向同性材料,还是正交各向异性材料,处于自动平衡力系下,其应力强度因子都与遥远处施加的应力和裂纹几何形状有关<sup>[11]</sup>。对于具有边缘裂纹且受张应力作用的试样,其强度因子  $K_I$  为:

$$K_I = F \sqrt{\pi a} \dots\dots\dots (5)$$

其中:  $F$  是几何相关因子<sup>[14]</sup>,与裂纹长度  $a$ ,试样宽度  $W$  有关。

$$F = 1.12 - 0.234(a/W) + 10.55(a/W)^2 - 21.72(a/W)^3 + 30.39(a/W)^4 \dots\dots\dots (6)$$

公式(6)是针对各向同性材料,从有限元或边界元法推导出来的,普遍适用于木材。但由于木材早晚材、沿树干高度、横切面射线方向密度不同<sup>[14]</sup>,其断裂韧度变化很大,而且板材在某一点的杨氏模量也随密度和纹理角度变化。因此,在应用理论公式时,应在考虑木材组织结构特征的基础上,将实验结果与理论公式进行比较。

数字相关测量技术是用来测量材料表面位移场

(上接第 21 页)

4) 不加固化剂的刨花板通过热处理可大大提高板材的内结合强度。

5) 刨花板后期热处理宜在板坯中心温度 100℃ 时进行,热处理工艺以温度 80℃,时间 30 min 左右为宜。

参考文献:

[1] Pizzi A. Aminoplastic Wood Adhesives, Chapter 2. in Wood Adhesives Chemistry and Technology[M]. Marcel Dekker, New York, 1983.

的一个有效的工具,该测量技术可获得木材受张应力作用下,裂纹尖端附近的全场位移,结合正交各向异性理论分析、解释木材纹理与密度对应力强度因子的影响。

木材断裂行为研究的构想可重点考虑以下几个方面:

- 1) 用数字相关测量技术结合正交各向异性理论确定木材  $TL, RL$  模式受拉应力作用下的应力强度因子;
- 2) 推导出  $K_I$  的几何相关因子;
- 3) 建立弹性模量与密度、纹理角度的独立关系;
- 4) 建立断裂韧度与木材密度、纹理角度的数学模型。

参考文献:

[1] 李庆芬. 断裂力学及其工程应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1997.

[2] David W Green, et al. Mechanical Properties of Wood. Wood Handbook-Wood as an Engineering Material[M]. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113. USDA Forest Serv., Forest Prod. Lab., Madison, WI, 1999, 463.

[3] 高庆. 工程断裂力学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1986.

[4] Griffith A A. The Phenomenon of Fracture and Flow in Solids [M]. London Phil. Trans. Roy. Soc., 1920, A221, 163 ~ 190.

[5] Orowan E. Fracture and Strength of Solids[M]. Physical Soc. Lond., 1949, 12, 185 ~ 232.

[6] 洪起超. 工程断裂力学基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1987.

[7] Irwin G R. Analysis of Stresses and Strains near the End of a Crack Transversing a Plate[J]. Journal of Applied Mechanics, 1957, 24(4), 361 ~ 384.

[8] 姚学锋. 动态断裂力学中若干重要问题的实验研究[D]. 北京大学博士学位论文, 1996.

[9] Atack W, et al. The Energy of Tensile and Cleavage Fracture of Black Spruce[J]. Tappi, 1961, 44(8): 555 ~ 567.

[10] Porter A W. On the Mechanics of Fracture in Wood[J]. Forest Products Journal, 1964, 14(8): 325 ~ 331.

[11] Sih G C, Paris P C, Irwin G R. On Cracks in Rectilinearly Anisotropic Bodies[J]. International Journal of Fracture Mechanics 1, 1965, 189 ~ 203.

[12] Westergaard H M. Bearing Pressure and Cracks[J]. Journal of Applied Mechanics, 1939, (6), 49.

[13] Triboulot P, Jodin P, Pluinage G. Validity of Fracture Mechanics Concepts Applied to Wood by Finite Element Calculation[J]. Wood Science and Technology, 1984, 8, 51 ~ 58.

[14] 李坚, 等. 木材科学[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1994.

[2] Meyer B. Urea-formaldehyde Resins [M]. Addison-Wesley, Reading, Massachussetts. 1979.

[3] Lu X N, Pizzi A. Curing Conditions Effects on the Characters of Thermosetting Adhesives-bonded Wood Joints Part 1[J]. Holz als Roh-und Werkstoff, 1998, 56(5): 339 ~ 346.

[4] Lu X N, Pizzi A. Hot Postcuring Improvement of UF Particle-boards and its Temperature Fore-casting Model[J]. Holz als Roh-und Werkstoff, 1998, 56(6): 393 ~ 401.

[5] 徐长妍. 喷蒸-真空热压酚醛树脂杨木大片刨花板[D]. 南京林业大学研究生博士学位论文, 2000.

[6] Humphrey P E, Bolton A J. The Hot Pressing of Dry-formed Wood Based Composites. Part 2: A Simulation Model for Heat and Moisture Transfer and Typical Results[J]. Holzforsch., 1989, 43(3): 199 ~ 206.