

断裂力学在木材学中的应用

任海青* 邵卓平**

摘要 本文介绍断裂力学基本概念及其在木材科学中的应用,应力强度因子的测试方法和计算方法以及国内外木材断裂力学的研究现状。

关键词 断裂力学;木材;应力强度因子

Application of Fracture Mechanics Concept in Wood Research

Ren Haiqing

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091)

Shao Zhuoping

(Forest Utilization College, Anhui Agriculture University, Hefei 230036)

Abstract The concepts of fracture mechanics applied to wood and the methods of measuring critical stress-intensity factors are shown in this article. Also the study situation of wood fracture mechanics at home and abroad are given.

Keywords Fracture mechanics; Wood; Stress intensity factor

断裂力学亦称破坏力学,是固体力学的一个重要组成部分,广泛应用于航空航天工程、机械制造、化学工程、核能工程、采矿工程等主要领域。

低应力脆断、疲劳及应力腐蚀是工程断裂事故的3种主要形式,许多重大工程断裂事故均源于裂纹的存在与发展。在制造、加工、安装与使用过程中,构件中产生宏观裂纹是不可避免的,为了防止断裂事故,必须研究裂纹扩展的条件和规律,以便采取相应的设计和技术措施。断裂力学是应用线弹性力学及弹塑性力学的理论,对裂纹进行分析和试验研究,寻求防止材料和构件断裂的方法与措施的一门新兴学科。断裂力学可对构件中裂纹大小、构件的工作应力及材料的抗断裂能力(断裂韧性)进行定量分析,对含裂纹构件的安全性及寿命进行估算,为工程构件的安全设计、选材原则、验收标准、操作与运行的技术规范等提供理论基础和科学依据^[1]。

木材由于节、疤、开裂以及其它不连续的性质易造成应力集中,断裂力学在木结构安全性评价、木材切削加工削片裂纹扩展规律、胶合层抵抗裂纹扩展能

力和各种密度刨花板断裂韧性等方面取得一些进展,随着研究的继续深入,断裂力学将为木材及其制品的合理、安全利用提供更为全面的理论依据。

1 断裂力学基本概念在木材学中的应用

许多材料,包括木材,在形成或加工过程中,由于外界应力条件的改变,在其内部形成裂缝或不连续性,断裂力学正是将材料性质、裂缝的几何形状以及施加载荷与裂纹尖端附近的应力场联系起来的一门学科。研究表明,绝大多数材料有三种基本断裂模式。在木材断裂中,以I型(张开型)和II型(滑开型)最为普遍,III型(撕开型)则经常发生在具有边裂的木梁中,但更多地是发生在木基质材料中,如纸张。木质板材的断裂经常是I型和II型同时发生,因而称为混合断裂模式。

木材具有层次性、多孔性、各向异性及变异性等显著的特点。由于木材的正交各向异性^[2],其裂纹扩展与裂纹平面位置及裂纹扩展方向有关,因而通常采用两个字母标记,第一字母表示裂纹面的法线方向,第二字母表示裂纹预期扩展方向,试样分别表示为RT TR RL LR LT和TL(如图1)。木材的顺纹扩展即TL RL扩展几乎在所有条件下都占主导地位,

收稿日期 1999-03-10

* 中国林科院木材工业研究所博士研究生,北京 100091;

** 安徽农业大学森林利用学院副教授,合肥 230036

因而导致了木材垂直纹理方向的低强度。

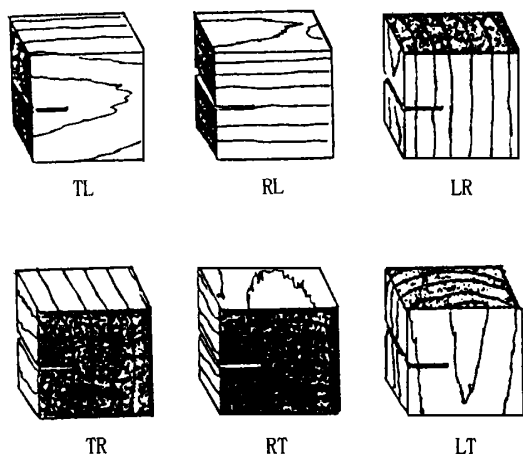


图1 木材中的裂纹排列

Fig. 1 Schema of crack orientation in wood

在短周期拉伸荷载下,气干材具有脆性和线弹性性质,因而可以用线弹性断裂力学研究木材的断裂^[3,4]。根据此理论,在裂纹尖端附近的应力趋于无穷大,但实际情况并非如此,尽管在计算裂纹尖端附近一个非常小区域的应力应变场,线弹性断裂力学是完全适用的,但其依旧不能精确研究木材的受载荷行为,Johns和 Masdsen^[5]进而成功地运用粘弹性断裂力学理论研究板材中载荷对板材断裂的影响。

裂纹扩展取决于距裂纹尖端一定距离处应力水平的下降程度,I型断裂的应力强度因子 K_I 和II型断裂的应力强度因子 K_{II} 就是描述在给定外加载荷情况下,裂纹尖端附近应力强度下降水平的一个参数。在单一断裂模式中,与临界断裂相对应的强度因子被定义为断裂韧性 K_{Ic} 和 K_{IIc} 。断裂韧性与断裂模式和裂纹扩展一一对应,并被定义为材料的基本性质。对于木材而言,断裂韧性是树种的函数,并受木材其它性质的影响,如木材密度、含水率^[6,7]。

断裂计算方法可以运用裂纹扩展力或应变能释放率 G 两种方法,二者等效。应变能释放率即为裂纹扩展单位面积系统能量的下降率。能量公式在许多实际计算中是适用的,但是在混合模式中,由于与每一个断裂模式相对应的能量贡献率不易被区别开来,因而也有很大的局限性。因此,尽管在某些情况下,计算应变能释放率较计算应力强度因子容易,但运用断裂判据计算裂纹扩张仍是不适用的。

断裂力学中规定,若应力强度因子增大到满足断裂判据,则断裂发生。在最简单的I型断裂模式中,断裂判据为:

$$K_I / K_{Ic} = 1 \dots\dots\dots (1)$$

若 $K_I < K_{Ic}$,裂纹不会扩展,若 $K_I \geq K_{Ic}$,则裂纹扩展。在单纯的II型断裂模式中,可以建立与(1)式相似的断裂判据。

在I型和II型断裂同时发生的混合模式中,应分别计算I型和II型断裂模式的应力强度因子,并且根据断裂判据验证,此判据是I型、II型断裂韧性的函数。对木材而言,目前尚无特别的混合模式的断裂判据,但是 Wu^[8]根据实验提出了一个有价值的见解。表达式如下:

$$K_I / K_{Ic} + (K_{II} / K_{IIc})^2 = 1 \dots\dots\dots (2)$$

2 应力强度因子计算

应力强度因子与材料性质、裂纹体的几何形状以及载荷条件具有函数关系,其计算方法在机械工程方面的专著中大量阐述,不过大都针对各向同性材料,其常用形式是:

$$K = f(g) e^{-\overline{c}a} \dots\dots\dots (3)$$

式中: K —应力强度因子; $f(g)$ —试样几何尺寸函数; e —外加应力; a —裂纹长度。此式不适用于有限大的各向异性体。

有学者认为,各向同性体应力强度可以作为正交各向异性体的应力强度的合理近似,各向同性和正交各向异性的无限大体的应力强度因子是相等的。但实际上,由于存在着有限的边界、材料和几何条件的影响,二者的应力强度是不相等的。Walsh^[9]认为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%; Mandel等^[10]研究具有边缘裂纹的悬臂梁试件时表明,正交各向异性体和各向同性体的应力强度因子相差25%; Domel等^[11]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%。因此,用各向同性体的应力强度估算正交各向异性体的值取决于问题的类型和所要求的准确度。目前,有限元法是计算正交各向异性体应力强度因子最普遍的方法。此方法之所以被大量使用是由于其在处理复杂几何条件和边界条件问题中的多面性。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。

在大多数情况下,为了模拟裂纹尖端的应力奇异性,必须设计有限元的计算程序。在有限元方法中,有3种普通技术是非常适用的:

① 计算裂纹张开位移(COD),即裂纹尖端沿裂纹面的位移。对正交各向异性材料,可用断裂力学方程将COD和应力强度因子联系起来^[12],如使用标准单元公式,相应的有限元网格为COD的计算提供了

足够的准确性。

② 能量法 能量释放率与应力强度因子相互关联,可通过裂纹扩展位移增量的变化求得。

目前,日本和法国一些科学家利用裂纹扩展的能量释放率 G_c 与构件或试件的柔度 C 之间的关系来计算 K_{Ic}

$$G_{Ic} = (P^2/2B)(\partial C/\partial a) \dots\dots\dots (4)$$

$$G_{Ic} = S^* K_{Ic}^2 \dots\dots\dots (5)$$

其中:

$$S^* = \left(\frac{S_{11}S_{22}}{2} \right)^{1/2} + \left[\left(\frac{S_{22}}{S_{11}} \right)^{1/2} + \left(\frac{2S_{12} + S_{66}}{2S_{11}} \right)^{1/2} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (6)$$

其中: $S_{11} = \frac{1}{E_L}$, $S_{22} = \frac{1}{E_T}$, $S_{12} = \frac{1}{E_T}$, $S_{66} = \frac{1}{G_{LT}}$

③ 特殊裂纹尖端元的使用。在有限元计算过程中直接决定应力强度因子,尽管计算复杂,但非常精确。

3 极限应力强度因子和相关参数的测量

每一种断裂模式的极限应力强度因子(又称断裂韧性)是各树种的基本性质,受含水率、温度、基本密度和应变率的影响。由于木材大多数断裂表现为模式 I 和 II 型,因此,本文仅讨论这两种断裂模式的断裂韧性 K_{Ic} 和 K_{IIc} 。

木材的 I 型断裂模式研究较多。在纤维饱和点以下,可以用基本密度和含水率为函数预测针叶树材的断裂韧性 K_{Ic} 。尽管断裂韧性是材料的基本性质,几何尺寸仍然影响裂纹宽度或木材抵抗裂纹扩展量的测试^[13]。Barrett^[14]在研究花旗松裂纹纹理扩展的 K_{Ic} 时,将 K_{Ic} 增加频率分布归因于最薄弱联结理论和尺寸效应的共同作用,尺寸影响无疵试样的强度时, K_{Ic} 随着裂纹宽度的增加而减少。Boatright 等^[15]将 K_{Ic} 随着试样厚度增加而下降归因于横过裂纹前端应力变异和引起较薄试样较大 K_{Ic} 的不可回复的变形(细胞皱缩)的存在。但有研究表明,对于不同树种和不同测试方法导致的断裂韧性变异,尺寸效应并不显著。

很多研究指出,有些树种的 TL 和 RL 的 I 型断裂韧性有差异,但是差异随树种而变化。

在研究正交各向异性体的断裂力学时,木材的 K_{IIc} 首次被测定^[8],随后发展了利用有限元法在预制裂纹附近形成一个纯剪切荷载的梁试样测量 K_{IIc} ,用木梁的混合断裂模式推断 K_{IIc} ,在中心裂纹梁上施加对称弯曲载荷以在裂纹尖端形成纯剪切测试 K_{IIc} ^[16]。大量试验表明,不同测试方式(紧凑拉伸、三

点弯曲)对 K_{IIc} 的影响大于对 K_{Ic} 的影响。由于模式 II 经常和模式 I 构成混合断裂模式,因此 K_{IIc} 的测试变异显著地依赖于混合断裂判据的选择。

极限应力强度因子还取决于应变率,但是对于单边切口试样 LT 和 LR 平面(裂纹面和裂纹扩展均垂直于纹理),其载荷速率对断裂韧性的影响不显著,因此,应变率是否影响断裂韧性可能与断裂平面或试样几何形状有关。

4 断裂力学在木材学中的实际应用

4.1 运用断裂力学预测木材的强度

在给定的载荷下,具有裂纹的木构件,其临界裂纹的扩展可以运用断裂力学预测:① 计算应力强度因子;② 测定木材的断裂韧性;③ 选用断裂判据。在许多情况下,若裂纹已经存在,同样可以预测裂纹扩展时的载荷,即强度。

断裂力学可以对木材由于树节、切口、裂缝或其它不连续性引起应力集中进行预测。包含树节的板材强度可用两种方法推算,其一用“等量裂纹长度 l_e ”代替树节^[17], 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,此方法仅适用于顺纹拉伸荷载;其二是直接模拟树节和相应的纹理偏斜,用断裂力学模拟在最大载荷作用下的拉伸断裂。同样,含裂纹板材的横纹抗拉强度也可用 K_{Ic} 进行推算。研究表明, K_{Ic} 的分布与横纹抗拉强度的分布有关,临界裂纹也影响板材的横纹抗拉强度。

含有树节、切口、边裂或端裂的板材的抗弯强度也可以用断裂力学进行推算,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样的强度^[18]。在研究不同端裂长度对木梁抗弯强度影响时,得出不影响短期强度的最大允许端裂长度^[19],此项研究成果已被加拿大标准协会《木材机械设计》引用用于抗剪设计。

断裂力学用于木材强度预测刚刚开始,大量的研究工作需要继续深入。因素简单者易解决,但是复杂的非均质问题则需利用数值表,如有限元方法。

4.2 断裂力学在切削加工上的应用

木材削片(削片、薄片)是木材的基本加工工艺。木材按 Franz I 型和 II 型切削,削片表面质量影响很大^[20]。研究表明,断裂力学可以用来分析径向切削,削片在切削作用下形成规律即削片裂纹扩展规律,从理论上解释 Franz I 型和 II 型切削类型的形成机理,使人们按断裂力学的有关理论,合理设计刀具的几何形状和切削加工参数,以提高削片表面质量和效益。

4.3 断裂力学在胶合工艺上的应用

木材胶合是木制品和家具广泛应用的生产工艺。胶合系统的胶合强度是胶合质量的重要性能指标。并在胶合过程中,往往由于气泡或胶合面的收缩而出现裂纹,并在一定条件下,进一步扩展直至破坏。通过对胶合系统和刨花板断裂韧性的测试^[21],不仅可以评价刨花板质量,而且可以选择优化胶合工艺,保证足够的胶合强度和较好的抵抗裂纹扩展能力。

5 结束语

断裂力学是固体力学与工程实际紧密结合的产物。从提出至今 50年来,研究工作十分活跃,在木材科学中的进展更是引人注目。尽管在理论、测试技术、计算方法上存在争议和不成熟之处,但断裂力学对于木材加工工艺的改进,木材及木制构件的安全性和使用寿命的评价将起着越来越重要的指导作用。

6 参考文献

- 1 胡传炯.断裂力学及其工程应用.北京:北京工业大学出版社, 1989
- 2 孙艳玲.木材断裂力学的研究.北京林业大学学报, 1997, 19(3): 85~ 92
- 3 Parhizgar S, Zachary L W, Sun C T. Application of the Principle of Linear Fracture Mechanics to the Composite Materials. Int. J. Fract., 1982, 20: 3~ 15
- 4 Triboulot P, Jodin P, Pluvinage G. Validity of Fracture Mechanics Concepts Applied to Wood by Finite Element Calculation. Wood Sci. and Tech., 1984, 18: 51~ 58
- 5 John K, Madsen B. Duration of Load Effects in Lumber. Part I: A Fracture Mechanics Approach. Can. J. Civil Eng., 1982, 9(3): 502~ 514
- 6 Smith I, Chui Y H. Factors Affecting Mode I Fracture Energy of Plantation-grown Red Pine. Wood Sci. and Tech., 1994, 28: 147~ 157
- 7 Schniewind A P, Ohgama T, Aoki T, et al. Effect of Specific Gravity, Moisture Content, and Temperature on Fracture Toughness of Wood. Wood Sci., 1982, 15(2): 101~ 109

- 8 Wu E M. Application of Fracture Mechanics to Anisotropic Plates. Am. Soc. Mech. Eng., J. Appl. Mech., 1967, 34(4): 967~ 974
- 9 Walsh P F. Linear Fracture Mechanics in Orthotropic Materials. Eng. Fract. Mech., 1972, 4: 533~ 541
- 10 Mandei J F, McGarry F J, Wann S S, et al. Stress Intensity Factors for Anisotropic Fracture Test Specimens of Several Geometries. J. Composite Mater., 1974, 8: 106~ 116
- 11 Domel D R, Smith F W. Effect of Orthotropic Material Properties on Stress Intensity Factor Calculations. Dept. of Mech. Eng. Colorado State Univ., Ft. Collins. Colo., 1988
- 12 Motoi Yasumura, Laurent Daudeuille. Fracture Analysis of Bolted Timber Joints under Lateral Force Perpendicular to the Grain, 1996, 42(3): 225~ 233
- 13 Stanzl-Tschegg S E, Tan D M, Tschegg E K. New Splitting Method for Wood Fracture Characterization 1995, 29(1): 31~ 50
- 14 Barrett J D. Effect of Crack-front Width on Fracture Toughness of Douglas-fir. Eng. Fract. Mech., 1976, 8(4): 711~ 717
- 15 Boatright S W J and Garrett G G. On the Statistical Approach to Fracture Toughness Variations with Specimen in Wood. Eng. Fract. Mech., 1980, 13: 107~ 110
- 16 Stanzl-Tschegg S E, Tan D M, Tschegg E K. Mode II Fracture Tests on Spruce Wood. Mokuzai Gakkaishi, 1996, 42(7): 642~ 650
- 17 Boatright S W J, Garrett G G. The Effect of Knots on the Fracture Strength of Wood. II: A Comparative Study of Methods of Assessment, and Comments on the Application of Fracture Mechanics to Structural Timber. Holzforschung, 1979, 33(3): 72~ 77
- 18 Murphy J F. Using Fracture Mechanics to Predict Failure of Notched Wood Beams. Proc. 1st Inter. Conf. On Wood Fracture, Banff, Alberta, 1979, 159~ 173
- 19 Foschi R O, Barrett J D. Glued-laminated Beam Strength: A model. J. of the Struct. Div., Am. Soc. Civil Eng., 1980, 106(ST8): 1735~ 1754
- 20 Triboulot P, Asano I, Ohta M. An Application of Fracture Mechanics to the Wood Cutting Process. Mokuzai Gakkaishi, 1983, 29(2): 111~ 117
- 21 Zleewioz L B, Wilson J B. Fracture Mechanics of Particleboard Using Nonlocal Theory. Wood Sci., 1981, 14(2): 65~ 72

(上接第 10页)

3) 24 h 吸水厚度膨胀率由可逆厚度膨胀率和不可逆厚度膨胀率构成,可逆厚度膨胀率可为一个常数。凡能降低不可逆厚度膨胀率的措施都能改善 24 h 吸水厚度膨胀率。

参加本试验的还有王东香、方玉华同志。

4 参考文献

- 1 朱元鼎.我国人造板工业现状与发展趋势.林产工业, 1998, 25(4): 1~ 3
- 2 高桥昭博.木质人造板用异氰酸酯胶粘剂. [J] 木材工业, 51(12): 575~ 576
- 3 冉全印.木材用水基聚氨酯胶粘剂技术进展.粘接, 1994, 15(3): 22~ 24, 38
- 4 陆文达.木材改性工艺学.哈尔滨:东北林业大学出版社, 1993, 52~ 55