

木材断裂韧性测试方法研究

江泽慧¹ 任海青

(中国林业科学研究院 北京 100091)

摘要: 采用不同的试样和方法测定了木材的顺纹断裂韧性 K_{IC} , 并分析了不同试样厚度和裂纹长度对木材断裂韧性的影响。实验表明, 顺纹断裂韧性 K_{IC} 是木材的基本属性。

关键词: 木材 断裂韧性 测试方法

Studies on Determination of Wood Fracture Toughness

Jiang Zehui Ren Haiqing

(Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091)

Abstract: The fracture toughness K_{IC} parallel to the grain of wood was tested with different samples and methods. The effects of the thickness of the sample and the length of the crack for wood fracture toughness were analyzed. The results showed that fracture toughness parallel to the grain of wood is a basic property of wood.

Key words: Wood, fracture toughness, test technique

木材是一种天然材料, 具有明显的正交各向异性的弹性性质, 并在某种受载形式下表现出近似的脆性。同时, 木材又是高度变异性的材料, 强度不仅受其构造特征、化学成分的影响, 木材在生长过程中和加工过程中形成的缺陷如节子、裂纹对其也有重大影响。可见, 强度预测不仅与缺陷的类型有关, 而且和其降低机理有关。为了充分利用木材, 尤其在建筑设计时, 对木材强度的预测是非常重要的。自 Atack el al(1961)和 Porter(1964)首次将线弹性断裂力学应用到木材强度的分析中, 断裂力学概念越来越多地应用到实际问题中如切削加工问题, 也应用到构件尺寸、安全性评估和胶结的机械性质中去(Stanzl-Tschegg, Tan and Tschegg, 1995)。木材的断裂韧性已成为木材及木质复合材料的一个重要性能, 它对评价木材质量、安全设计、改进加工工艺都有相当的意义。因为木材大部分破坏是顺纹扩展, TL、RL 方向的 K_{IC} 具有重要的实践指导意义, 且 TL 方向的裂纹扩展与实际使用中的径裂纹非常相似, 故本文着重研究木材 I 型裂纹断裂韧性的测试原理与测试方法。

1 材料和方法

1.1 实验材料

本次试验选取杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.))和马尾松(*Pinus Massoniana* Lamb.)作为试验材料。每树种采集 5 株, 采自江西省分宜县内的中国林业科学研究院亚热带林业研究中心下属的山下林场。

1.2 实验方法

试材锯解后气干一年, 参照美国标准和国家标准中对金属材料的平面应变断裂韧性的测试原理设计成紧凑拉伸 CT 试样和 WOL 试样, 为检验数据的可靠性, 同时采用能量法中的柔度法, 设计成双悬臂梁 DCB 试样, 由应变能释放率 G_{IC} 确定断裂韧性 K_{IC} 。实验在 INSTRON1803 电液伺服万能液压力学试验机上进行。试样含水率 14%, 测试温度 20⁰C, 相对湿度 65%。

¹第一作者简介: 江泽慧, 1939 年生, 女, 中国林业科学研究院, 教授, 博士生导师。主要从事木材科学与技术方面的研究。电话: 010-62889001; 电子邮件: jiangzehui@forestry.ac.cn

表 1 试材采集情况一览表

Table 1 Information of Tree Samples

树种及编号	枝下高(m)	树高(m)	胸径(m)	树龄(yr)
杉木9820	7.2	16.5	25.4	25
杉木9821	9.3	16.0	26.2	25
杉木9822	6.3	15.6	26.4	25
杉木9823	8.4	16.2	28	25
杉木9824	8.4	18.9	26.7	25
马尾松9835	7.15	13.8	22.2	25
马尾松9836	9.3	17.8	24.8	25
马尾松9837	8.8	16.2	23.6	25
马尾松9838	10.2	16.5	21.6	25
马尾松9839	10.2	16.8	22.4	25

2 结果和讨论

2.1 杉木和马尾松木材 TL 方向的断裂韧性 K_{IC}

从木材承受载时的总体性能而言，木材可看作是正交各向异性弹性体。已有的研究表明，在正交各向异性的带裂纹体中，如果裂纹和弹性对称面无关，则该分析就成为一般各向异性问题。但是，如果裂纹是在弹性对称面内、而载荷又对称地作用在裂纹面上时，应力强度因子就与各材料常数无关，它和由各向同性体断裂力学推导得的K值一样。到目前为止，关于各向异性体的断裂力学，在大多数情况下其应力强度因子正好和各向同性相同，特别是当载荷是对称地作用在裂纹面上时，这个结论对于三种裂纹扩展的模型都适用。本次试验就是在满足上述情况下参照“金属材料平面应变断裂韧性 K_{IC} 试验方法（GB 4161-84）”进行的。

表 2 杉木和马尾松木材的断裂韧性 K_{IC} (Mpa.mm^{1/2})Table 2 Fracture Toughness K_{IC} (Mpa.mm^{1/2}) of Chinese Fir and Masson Pine

树种	个数	平均值	标准离差	标准误差	变异系数	准确指数
马尾松	31	9.667	1.1015	0.1978	0.11394	0.02046
杉木 CT	31	4.812	0.6417	0.11526	0.13336	0.02395
杉木	11	4.689	0.5336	0.1608	0.1138	0.0343
WOL						
杉木	8	4.825	0.56399	0.1994	0.0705	0.0413
DCB						

杉木和马尾松木材 TL 方向的断裂韧性 K_{IC} 分别为 4.812 Mpa.mm^{1/2} 和 9.667 Mpa.mm^{1/2}，二者的变异系数均小于 20%，准确指数均小于 5%，说明实验结果是可靠的。

2.2 不同厚度杉木和马尾松木材 CT 试样的断裂韧性 K_{IC}

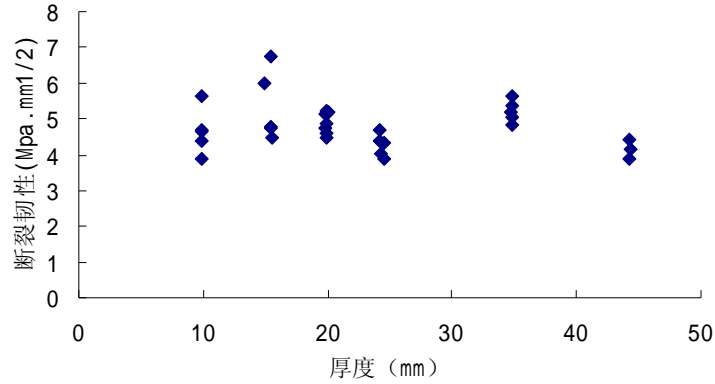


图 1 杉木不同厚度 CT 试样的断裂韧性 K_{IC}

Figure 1 K_{IC} of CT Samples with Different Thickness of Chinese Fir

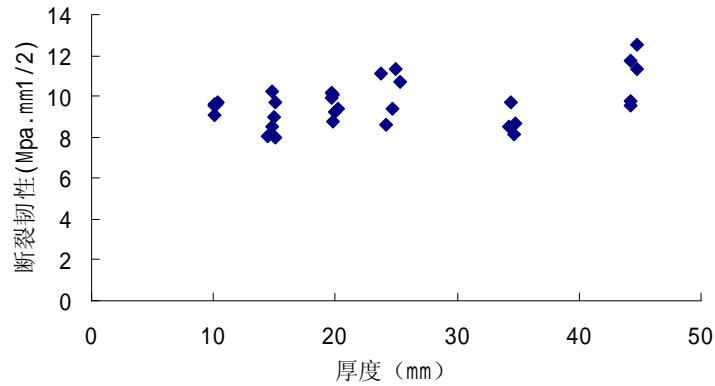


图 2 马尾松不同厚度 CT 试样的断裂韧性 K_{IC}

Figure 2 K_{IC} of CT Samples with Different Thickness of Masson Pine

由图 1、图 2 及方差分析表明，当试件厚度大于 10mm 时，试样厚度对杉木、马尾松木材的断裂韧性没有显著性影响。

2.3 不同裂纹长度下 WOL 试样的断裂韧性 K_{IC}

姚衡在《在断裂力学参数的测试》(1974)一文中，提出一种改进的紧凑拉伸试样—WOL型试件，它比标准CT试样长，因而可以通过由不同的裂纹长度 a 来测定材料的值。WOL试件可以说是紧凑拉伸试件的前期形式。

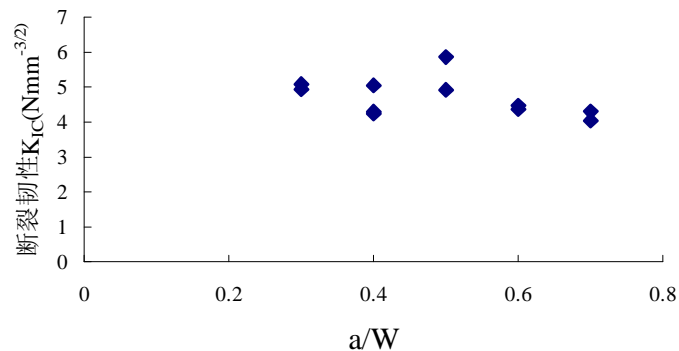


图 3 杉木 WOL 试样的断裂韧性 K_{IC}

Figure 3 K_{IC} of WOL Samples of Chinese Fir

其中 a/W 为试样裂纹长度与宽度之比。

试验测得数据（表 2）的变异系数小于 20%、准确指数为小于 5%，说明测试结果是有效的。试验结果（图 3）显示使用 WOL 试样， a/w 在 0.3—0.7 范围内，所测定的 K_{IC} 值都是比较稳定的，表明了裂纹长度对木材顺纹断裂韧性无显著影响。

2.4 用柔度法标定木材 DCB 试样的断裂韧性 K_{IC}

木材作为正交各向异性材料，裂纹扩展与裂纹平面位置及预制裂纹方向有关，许多研究表明，如果裂纹位于主弹性平面内，且当载荷是对称地作用在裂纹的所在平面上时，其应力强度因子就与各材料常数无关，而与由各向同性材料断裂力学推导得的 K 计算公式一样。所以，我们在前面几节对木材顺纹断裂韧性的测试过程中，借用金属材料平面应变断裂韧性的计算公式，就是基于这一道理。但木材是高度变异性的生物材料，复杂的微观构造决定了实际构件的边界条件、应力状态也是非常复杂，因此上述的计算结果是否就是木材的断裂韧性？虽然，线弹性断裂力学在两维的范畴内，已经发展到比较成熟的阶段，但是，由于实际问题的多样性和复杂性，往往使理论计算遇到极大的困难，在这种情况下，测试方法就成为解决实际问题的主要手段。基于能量原理的柔度标定法，就是一种可以测定各向异性材料应力强度因子的实验方法之一。

Sih(1965)研究了正交各向异性体单一裂纹尖端附近应力场，并指出当裂纹方向与其上一对称平面平行时，由于弹性常数 $S_{16}=S_{26}=0$ ，因而得到只含有四个独立的弹性常数的能量释放率与应力强度因子的关系式：

$$G_I = S \cdot K_I^2 \quad (1)$$

式中：

$$S^* = \left(\frac{S_{11}S_{22}}{2} \right)^{1/2} \left[\left(\frac{S_{22}}{S_{11}} \right)^{1/2} + \left(\frac{2S_{12} + S_{66}}{2S_{11}} \right) \right]^{3/2}$$

$$S_{11} = \frac{1}{E_L} \quad S_{22} = \frac{1}{E_T} \quad S_{12} = \frac{m_{TL}}{E_T} \quad S_{66} = \frac{1}{G_{TL}}$$

Irwin 和 Kies 最早提出，在线弹性裂纹体中，能量释放率 G 可以通过系统的柔度表示出来，从而使得在实验室里方便地标定能量释放率成为可能。

$$K_I^2 = P^2 / 2BW \times dC/d(a/W) \quad (2)$$

根据实验绘出对应不同裂纹长度试样的载荷-位移曲线，计算相应试样的柔度，选用指数函数进行拟合，得到柔度的解析表达式：

$$C = 0.6267 \exp(4.952a/w) \quad (3)$$

柔度标定曲线见图 4，由公式（1），（2）即可计算得到试样的 K_{IC} 值，标定结果见表 3，其中杉木的弹性常数由电测法测得。

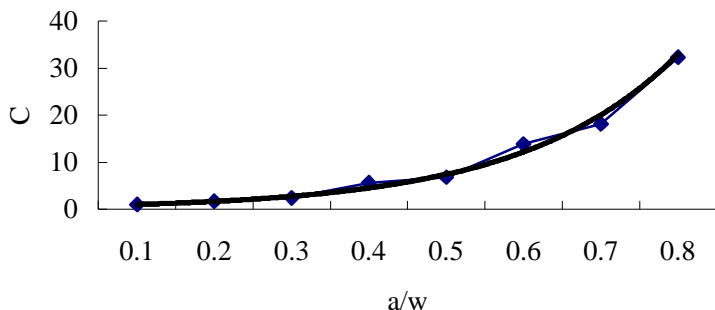


图4 杉木 DCB 试样柔度标定曲线

Figure 4 Compliance Plot Curve Versus a/W

表3 DCB 试样柔度标定曲线的回归结果和 K_{IC} 值计算结果Figure 3 Compliance Plot Result and G_I , K_{IC}

a/w	C 实验值	C 回归值	dC/d(a/w)	G_I	K_{IC}
0.1	1	1.028306	5.092173378	42.78274	4.360143
0.2	1.6892	1.68727	8.355372367	53.53009	4.877142
0.3	2.454	2.76852	13.70971532	54.86171	4.937431
0.4	5.6501	4.54266	22.49526245	36.02991	4.001271
0.5	6.8813	7.45372	36.91081986	42.22844	4.331805
0.6	13.8889	12.23025	60.56424662	56.21977	4.998169
0.7	18.1495	20.0677	99.37541302	68.92679	5.534271
0.8	32.2917	32.92765	163.0577984	69.57133	5.560087

2.5 CT、WOL、DCB 三种试样的测定结果比较分析

从方法上讲，紧凑拉伸试样（CT、WOL）的 K_{IC} 测定，是一种参照金属断裂韧性测定方法（GB 4161-84）的方法；DCB试样的 K_{IC} 测定，是一种基于能量原理的柔度标定方法。前者试样用材少、易加工，实验中只需测得试样在破坏时的载荷即可，简便易行，并且已有成熟的实验标准可以借鉴；后者则是一种对各种材料都适用的方法，普适可靠，但实验条件要求较高，工作量较大，为了能够提高精度，试样尺寸设计得很大，目的是为了增大柔度测定量值。本文的目的之一，就是要通过分析比较上述几种方法，选择一种合理、有效、方便、易行的方法。

表4 CT、WOL、DCB三组试样 K_{IC} 测试结果的方差分析

差异源	平方和	自由度	均方	方差比 F	F crit	差异显著性
组间	0.147944	2	0.073972	0.198643	3.195055	无
组内	17.50217	47	0.372387			
总计	17.65012	49				

表2给出了CT、WOL、DCB三组试样断裂韧性测定结果的统计描述，从表中可见三者的平均值十分接近，最大误差 $<0.136 \text{ MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$ ，最大相对误差 $<2.8\%$ ，并且这三种方式的变异系数

均小于20%，准确指数均小5%，表明三种实验方法的测定结果都是有效的，表4中三组样本的方差分析进一步说明三种试样及试验方法测定的 K_{IC} 值相差无几，无显著性差异。但从试验条件来看，CT试样相对简单，易操作、设备要求不高、试件耗材少，可通过增大试件数量以满足均值的精度。因此，我们认为使用CT试样测定木材顺纹开裂的断裂韧性是可行的和值得推荐的。

3 结论

木材的断裂韧性是材料基本性质，测试方法、裂纹体的几何形状、尺寸对它无显著影响。为保证满足平面应变状态和测定值的稳定性，试件厚度推荐值为20~30mm（视木材年轮宽窄）。

含顺纹理裂纹的木材断裂韧性的测定可选用紧凑拉伸试样（CT、WOL）或柔度法的DCB试样。柔度法是一种基于能量原理的实验标定方法，仅与材料的基本性质有关，它的测定值是真实可信的，但实验要求较高。本次研究证明三种试样所测结果非常接近，建议推荐使用CT试样。

含有TL型裂纹的杉木断裂韧性为 $4.812\text{MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$ ，马尾松的断裂韧性为 $9.667\text{MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$ 。

参考文献

- 1 American Society for Testing and Materials. Standard methods for plane-strain fracture toughness of metallic materials. 1981, ASTM Designation E399-74
- 2 Atack, W. et al. The energy of tensile and cleavage fracture of Black Spruce. Tappi, 1961, 44(8):555-567
- 3 Porter, A.W. On the mechanics of fracture in wood. Forest Products Journal, 1964, 14(8):325-331
- 4 Sih, G.C.; Paris, P.C. and Irwin, G.R. On crack in rectilinear anisotropic bodies using singular isoparametric elements. Int. J. Fracture Mech, 1965, 1:189-203
- 5 Stanzl-Tschegg, S.E., D.M. Tan and E.K.Tschegg. New splitting method for fracture characterization. Wood Sci. Technol, 1995, 29:31-50
- 6 国家技术监督局发布. 中华人民共和国国家标准 GB4161-84, 金属材料平面应变断裂韧度 K_{IC} 试验方法. 北京: 中国标准出版社, 1984
- 7 丁遂栋. 断裂力学. 机械工业出版社, 1997
- 8 胡传焘. 断裂力学及其工程应用. 北京工业大学出版社, 1989