

木材断裂解离分形特征与分形断裂力学模型研究

许威^{1,2}, 曹军¹, 花军^{1*}, 陈光伟¹

(1.东北林业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150040; 2.哈尔滨商业大学 轻工学院, 哈尔滨 150028)

摘要: **目的** 以椴木为研究对象, 研究冲击载荷作用下椴木试件的断裂解离形貌特征和断裂力学特性, 建立适用于木材原料断裂解离的分形断裂力学模型, 并对其断裂解离力学行为进行描述。**方法** 对椴木试件进行冲击加载试验, 分析试件断口的形貌特征和断裂力学特性, 构建适用于木材原料断裂解离的分形断裂力学模型。**结果** 椴木试件横向冲击断裂断口裂纹形状和断口形貌特征比纵向冲击复杂, 横、纵向冲击断裂断口均具有分形特征; 椴木试件纵向冲击断裂韧性均值是横向冲击断裂韧性均值的 1.112 倍, 椴木试件横、纵向冲击断口的分形维数均值分别为 2.063 5 和 2.075 1, 椴木试件横、纵向冲击韧性与其断口分形维数之间存在线性正相关关系, 拟合优度分别为 0.778 7 和 0.812 2; 构建的木材原料断裂解离临界解离应力和断裂韧性的分形断裂力学模型也适用于脆性材料。**结论** 在木材原料冲击断裂解离时, 木材原料初始裂纹长度越短, 断裂解离断口越粗糙复杂, 木材原料断裂解离所需要的能量越大; 当裂纹沿着与冲击加载力方向垂直成大约 1.055 rad 方向扩展时所需的能量最小, 木材原料最易沿该方向进行断裂解离。

关键词: 木材原料; 断裂解离; 分形特征; 分形维数; 分形断裂力学模型

中图分类号: S781; TS624 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)21-0070-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.21.009

Fractal Characteristics of Fracture Dissociation and Fractal Fracture Mechanics Model of Wood

XU Wei^{1,2}, CAO Jun¹, HUA Jun^{1*}, CHEN Guang-wei¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;

2. College of Light Industry, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China)

ABSTRACT: The work aims to take basswood as the research object to study the fracture dissociation morphology and fracture mechanics characteristics of specimen under impact load and then establish a fractal fracture mechanics model suitable for fracture dissociation of wood raw material and describe its mechanical behavior in fracture dissociation. Impact load was applied to the basswood specimen, the morphology characteristics and fracture mechanics properties of the specimen were analyzed and the fractal fracture mechanics model suitable for the fracture dissociation of wood raw material was constructed. The transverse and longitudinal impact fracture of basswood specimen had fractal characteristics, but the crack shape and fracture morphology of transverse impact fracture were more complex than those of longitudinal impact fracture. The mean value for longitudinal impact fracture toughness of basswood specimen was 1.112 times that of the mean value of transverse impact fracture toughness. The mean values of transverse and longitudinal impact fracture dimensions for basswood specimen were 2.063 5 and 2.075 1, respectively. There was a linear positive correlation between

收稿日期: 2023-07-14

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(博导类)课题(20130062110005); 黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划(UNPYSCT-2020216)

the transverse and longitudinal impact toughness of basswood specimen and its fracture fractal dimension, and the goodness of fit was 0.778 7 and 0.812 2, respectively. The critical dissociation stress model of wood raw material fracture dissociation and the fractal fracture mechanics model of fracture toughness were also applicable to brittle materials. When the wood raw material dissociates under the impact load, the shorter the initial crack length of wood raw material, the rougher and more complex the fracture dissociation fracture, the greater the energy required for the fracture dissociation of wood raw material. The energy required for the crack to propagate along the direction of about 1.055 rad perpendicular to the direction of the impact load force is the smallest, and the wood raw material is most likely to be broken and dissociate along this direction.

KEY WORDS: wood raw material; fracture dissociation; fractal characteristics; fractal dimension; fractal fracture mechanics model

木纤维是以木材为原材料,在研磨设备施加连续的冲击载荷作用下木材原料发生断裂解离而生成的纤维板等人造板的原材料^[1]。实际生产中主要采用热磨法生产木纤维,将软化后的木材原料经进料螺旋运输至热磨机磨片之间,在磨片磨齿与木材原料之间发生剧烈的相互冲击作用下木材原料发生开裂、裂纹扩展直至断裂,并最终被解离成木纤维^[2]。因此,热磨机磨片齿形结构参数的优化设计必须结合木材原料的断裂解离机理^[3-4]。纤维解离时,木材原料受冲击载荷作用解离的断裂力学特性及其力学模型研究是木材原料断裂解离机理研究的重要内容之一。Griffith 最早应用能量法提出了完全脆性材料裂纹失稳扩展的条件,该条件将裂纹和裂纹表面均看成是光滑、平整的曲线和曲面^[5]。但木材原料断裂解离时,裂纹和断口表面是凹凸不平的曲线和曲面^[6-7]。因此,Griffith 能量平衡理论并不适用于木材原料断裂解离的情况。分形理论是描述和定量分析具有自相似性的复杂不规则几何体的重要工具,材料断裂裂纹具有不规则、非线性等特征。许多学者利用分形理论对材料断裂问题进行了研究,并取得了一定的研究成果^[8-11]。木材由于本身优秀的力学性能,经常被直接用作运输包装材料,特别是在机电产品等重型设备的包装上被广泛应用^[12-13]。据统计,全球货物出口使用的运输包装中木材包装大约占 70%,在运输过程中木材包装承受的危险载荷主要是冲击载荷^[14]。许多学者都开展了木材力学相关的研究并建立了理论模型,但对冲击压缩载荷作用下木材发生开裂、裂纹扩展直至断裂过程中所蕴含的断裂力学行为的研究开展较少,也没有较为合适的力学模型对其断裂力学行为进行描述^[15-17]。

本文试图通过对椴木进行冲击加载试验,模拟木材原料断裂解离的过程,测试木材原料断裂解离过程中的力学特性,分析木材原料断裂解离过程中的分形特征;根据 Griffith 能量平衡理论,引入分形理论构建适合的分形断裂力学模型对木材原料断裂解离的断裂力学行为进行描述,为热磨法木纤维生产设备的结构优化设计提供理论支撑,进一步完善木材原料的研磨解离机理,也为木材及木质复合材料在运输包装

中的进一步应用及新型木质包装材料的设计提供理论基础。

1 试验

1.1 材料

选取纤维板生产中常用的阔叶材椴木 (*Tilia Amurensis Rupr.*) 作为试验材料,产自黑龙江省,气干含水率约为 15.41%,气干密度约为 545 kg/m³,参照 GB/T 1927.2—2021、GB/T 1927.17—2021 和纤维板生产中木材原料的尺寸确定冲击断裂试验试件尺寸,如图 1 所示,横、纵向冲击加载试验采用同一尺寸试件。

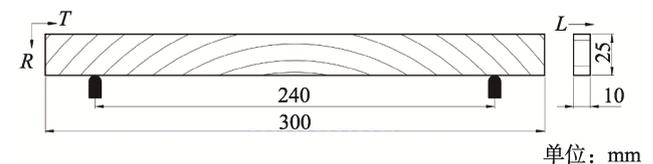


图 1 试件尺寸示意图

Fig.1 Schematic diagram of specimen size

1.2 方法

1.2.1 试件冲击断裂性能测试

冲击断裂试验所用试验机为 MW-4 木材万能力学试验机,济南材料试验机厂。冲击加载过程中试件两支点之间的距离为 240 mm,冲击试验测量试件横、纵向上的冲击断裂功,然后计算试件横、纵向上的冲击韧性,计算见式(1)

$$\alpha_k = \frac{1\,000W}{BH} \quad (1)$$

式中: α_k 为试件的冲击韧性, kJ/m²; W 为冲击断裂功, J; B 为试件宽度, mm; H 为试件高度, mm。

1.2.2 试件冲击断裂断口分形维数

小岛法是计算材料断口分形维数的常用方法,但小岛法计算试件断口分形维数会破坏试件断口。本文

采用小島法利用无损测量方法计算试件冲击断裂断口的分形维数，具体步骤如下^[18]：

1) 利用三维扫描仪，德国 Breuckmann 公司，提取冲击加载后试件断口的形貌特征，得到试件断口形貌特征的三维片体模型。如图 2 所示为榫木横向冲击断裂试件断口三维片体模型。

2) 将试件断口的三维片体模型导入到三维绘图软件（如：UG_NX）中，对试件断口的三维片体模型进行编辑，沿试件断口投影面的法线方向进行实体拉伸得到试件断口的三维实体模型。如图 3 所示为榫木横向冲击断裂试件断口三维实体模型。

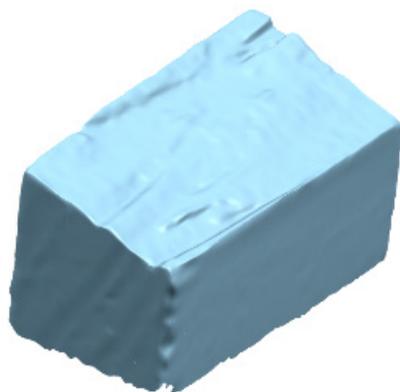


图 2 试件断口三维片体模型
Fig.2 Three-dimensional slice model of specimen fracture surface

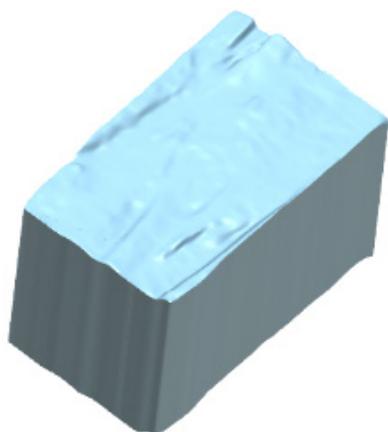


图 3 试件断口三维实体模型
Fig.3 Three-dimensional solid model of specimen fracture surface

3) 建立一个与试件断口投影面相平行的剪切平面，如图 4 所示。设定剪切平面与试件断口实体模型最高点重合的位置为初始位置，初始位置处剪切平面的位移为 0；设定剪切平面与试件断口实体模型最低点重合的位置为终止位置，终止位置处剪切平面的位移为 h 。

4) 确定各剪切平面之间的间距，剪切平面由初始位置至终止位置对试件断口三维实体模型进行 N

次等距截切 ($N \geq 6$)，则相邻 2 次截切时剪切平面之间的距离为：

$$n = \frac{h}{N+1} \tag{2}$$

式中： n 为相邻 2 次截切时剪切平面之间的距离， μm 。 n 舍个位取整数，满足 $n \cdot (N+1) \leq h$ 。

5) 计算剪切平面进行第 i ($i=1, 2, \dots, N$) 次截切时，剪切平面距离初始位置的位移 L_i 和所得截面的面积 S_i 。其中， $L_i=in$ ， S_i 由三维绘图软件直接测量得到，如图 5 所示。

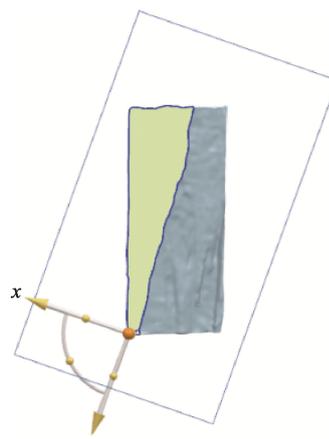


图 4 剪切平面建立
Fig.4 Establishment of shear plane

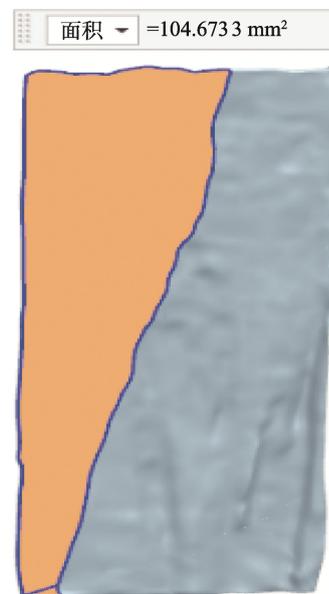


图 5 断口截面面积测量
Fig.5 Measurement of cross-sectional area of specimen fracture surface

6) 计算试件断口的分形维数，以剪切平面距离初始位置的位移 L_i 的对数 $\ln L_i$ 为自变量，与其对应的截面面积 S_i 的对数 $\ln S_i$ 为因变量，拟合得到 $\ln L_i$ 和 $\ln S_i$ 的线性关系式为：

$$\ln S_i = D_s \ln L_i + C \tag{3}$$

式中: D_s 为试件冲击断口的分形维数; C 为拟合常数。

2 试验结果

2.1 试件冲击断裂冲击韧性

每种冲击加载试验重复进行 15 次, 试验测得试件横、纵向冲击断裂功。根据式 (1) 计算得到试件的冲击韧性, 冲击韧性平均值如表 1 所示。由表 1 可知, 椴木纵向冲击加载冲击韧性大于横向, 纵向冲击加载冲击韧性平均值约为横向冲击加载冲击韧性平均值的 1.112 倍。

表 1 椴木冲击韧性结果统计表
Tab.1 Statistics of impact toughness of basswood

冲击加载方向	平均值/ ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$)	标准差	标准误差	变异系数
横向	7.673	0.679	0.175	0.088 5
纵向	8.533	0.909	0.235	0.107

2.2 试件冲击断口的形态特征和断口分形维数

2.2.1 试件冲击断口的形态特征

对冲击加载后椴木试件的断口裂纹扩展路径和断口形貌特征进行观察可以发现:

1) 椴木试件冲击断口的断裂裂纹扩展具有较大随机性, 裂纹形状较为复杂, 但是整体上看纵向加载试件断口的裂纹扩展路径较横向加载复杂、弯曲, 横向加载试件断口更加平直、弯曲小。这主要是由于横、纵向加载时在加载方向上早晚材分别呈并联和串联形式分布。横向加载时裂纹主要沿着加载方向顺着早晚材分界面进行扩展, 而纵向加载时裂纹不但沿着加载方向贯穿早晚材进行扩展, 还会顺着早晚材分界面进行扩展。因此纵向加载裂纹的扩展路径较为复杂、弯曲, 这也是纵向冲击韧性大于横向冲击韧性的主要原因。横、纵向加载试件断口裂纹均呈细小的“锯齿状”或“Z 字状”, 断口裂纹形状具有不规则的自相似性, 具有分形特征, 如图 6 所示。

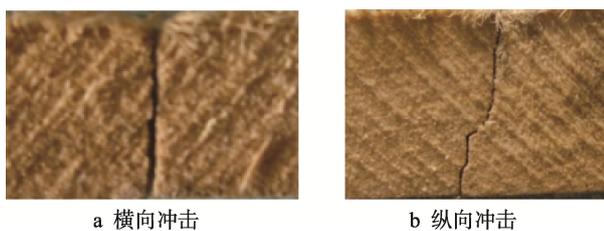


图 6 试件冲击断口裂纹形态
Fig.6 Crack morphology for impact fracture of specimen

2) 椴木试件冲击断口表面凹凸不平, 上下波动较大, 与纵向冲击试件断口相比, 横向冲击断口表面较为光滑、波动小。椴木试件冲击断口各截面形状极不规则, 但具有一定自相似性, 具有分形特征。图 7 为椴木试件横向冲击断口各截面形状变化图, 第 1 个剪切截面位置距零点位置的位移为 $760\ \mu\text{m}$, 相邻两剪切平面之间的距离为 $400\ \mu\text{m}$, 最后 1 个剪切截面距零点位置的位移为 $4\ 360\ \mu\text{m}$, 共截切 10 次。

综上分析可知, 椴木试件冲击加载断口的裂纹扩展路径和断口表面形貌均具有分形特征。

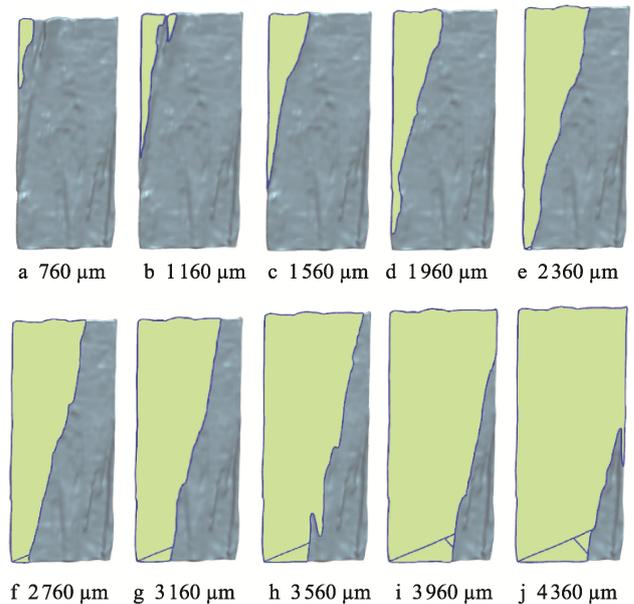


图 7 试件横向冲击断口各截面形状
Fig.7 Cross-section shape of transverse impact specimen fracture

2.2.2 试件冲击断口的分形维数

根据式 (3) 计算得到各组试件冲击断口的分形维数。图 8 是图 7 中各截面的 $\ln L_i$ 和 $\ln S_i$ 的线性拟合

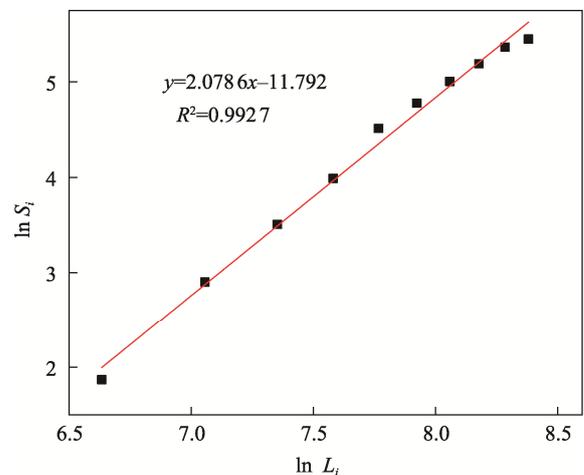


图 8 $\ln L_i$ - $\ln S_i$ 的线性拟合图
Fig.8 Linear fitting graphs of $\ln L_i$ and $\ln S_i$

合图。从图 8 可知，图 7 中椴木试件冲击断口各截面所对应的数据点在图 8 中具有非常明显的线性关系，线性拟合优度为 0.992 7，从理论上证明了椴木试件冲击断口具有分形特征，分形维数为 2.078 6。

各组试件冲击断口分形维数均值见表 2。由表 2 可知，试件纵向冲击断口的分形维数均值大于横向冲击的；试件断口裂纹形态与表面形貌特征越复杂，试件断口的分形维数越大，试件断口分形维数的大小可以定量表达试件断口裂纹形态和表面形貌特征的复杂程度。

表 2 椴木冲击断口分形维数均值
Tab.2 Average fractal dimension for impact fracture surface of basswood

冲击方向	分形维数均值	拟合优度均值
横向冲击	2.063 5	0.952
纵向冲击	2.075 1	0.949

2.3 试件冲击韧性与断口分形维数的关系

将椴木试件横、纵向冲击韧性与其断口分形维数分别进行线性回归分析。由线性回归分析结果可知，椴木横、纵向冲击韧性与其断口分形维数之间存在正相关关系，拟合优度分别为 0.778 7 和 0.812 2，如图 9 所示。

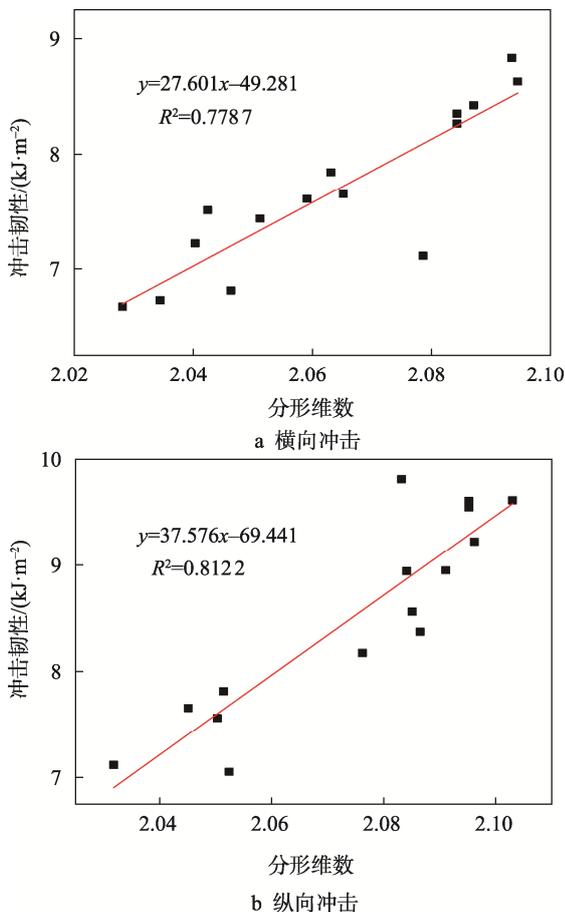


图 9 冲击韧性与分形维数的关系
Fig.9 Relationship of impact toughness and fractal dimension

综上所述可知，木材原料断裂解离断口裂纹形态与表面形貌特征越复杂，木材原料冲击韧性越大，木材原料断口的分形维数越大，木材原料断裂解离所需要的能量消耗越多。

3 木材原料断裂解离分形断裂力学模型建立

根据试验结果可知，木材原料断裂解离的裂纹和断口表面不是光滑的，而是具有一定粗糙性、不规则性和自相似性的分形曲线和曲面。木材原料断裂解离的裂纹长和断口表面面积均远大于经典断裂力学的理论值，经典断裂力学并不适用于木材原料断裂解离的情况。下面将分形理论引入经典断裂力学理论，建立适用于木材原料断裂解离情况的分形断裂力学模型。

3.1 木材原料断裂解离临界解离应力分形模型

根据 Griffith 能量平衡理论，脆性材料断裂生成裂纹时，裂纹开裂过程中释放的应变能 K_y 和裂纹形成两自由表面所需的表面能 K_b 分别为^[19]：

$$K_y = \frac{\sigma^2 L^2 W \pi}{E} \tag{4}$$

$$K_b = 2S\zeta \tag{5}$$

式中： K_y 为材料裂纹开裂释放的应变能，mJ； K_b 为材料裂纹形成自由表面所需的表面能，mJ； S 为材料断口真实表面积， mm^2 ； ζ 为材料表面自由能， mJ/mm^2 ； σ 为外负载，MPa； L 为材料断口裂纹真实长度，mm； W 为材料厚度，mm； E 为材料的弹性模量，MPa。

木材原料断裂解离时断口表面粗糙不规则，其表面积难以测量，这也是经典断裂力学研究完全脆性材料的主要原因。根据分形理论，材料断口表面积与其断口投影面积和材料断口裂纹真实长度与其投影长度的关系分别为^[20-21]：

$$L = L_t^{D_L} \phi^{1-D_L} \tag{6}$$

$$S = S_t \phi^{2-D_S} \tag{7}$$

式中： L_t 为材料断口裂纹的投影长度，mm； S_t 为材料断口投影面积， mm^2 ； ϕ 为测量面元码尺， mm^2 ； D_S 为材料断裂表面的分形维数， $2 \leq D_S \leq 3$ ； ϕ 为测量线元码尺，mm； D_L 为材料断口裂纹的分形维数， $1 \leq D_L \leq 2$ 。

将式（6）、式（7）分别代入到式（4）、式（5）中，得到木材原料断裂解离时裂纹开裂过程中释放的应变能 K_{yD} 和裂纹两自由面所需的表面能 K_{bD} 的分形表达式，分别见式（8）和式（9）。

$$K_{yD} = \frac{\sigma^2 L_t^{2D_L} \phi^{2(1-D_L)} W \pi}{E} \quad (8)$$

$$K_{bD} = 2S_t \phi^{2-D_s} \zeta \quad (9)$$

当木材原料断裂解离的应变能释放值和形成新的断裂面所需的能量值相等时, 木材原料断裂解离达到临界状态, 稍有干扰木材原料就会发生断裂解离, 则可得木材原料断裂解离临界解离应力 σ_1 的分形表达式为:

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{2E\phi^{2-D_s} \zeta}{L_t^{2D_L-1} \phi^{2(1-D_L)} \pi}} \quad (10)$$

实际上材料断口裂纹的粗糙度 $C_L=L/L_t$, 类似地定义断裂表面的粗糙度 $C_S=S/S_t$ 。根据 C_L 与 C_S 的关系可得到线元码尺 φ 和面元码尺 ϕ 之间的关系为^[22]:

$$\frac{\phi^{2-D_s} - 1}{\phi^{1-D_L} - 1} = \frac{4}{\pi} \quad (11)$$

将式 (11) 代入式 (10) 中得到木材原料断裂解离临界解离应力的分形表达式为:

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{2E\phi^{2-D_s} \zeta L_t^{\frac{\ln \beta}{\ln \phi}}}{L_t \beta^2 \pi}} \quad (12)$$

式中: β 为换算系数, $\beta = \frac{\pi(\phi^{2-D_s} - 1) + 4}{4}$ 。

对于脆性材料的光滑裂纹, 分形维数 D_s 为 2, 则式 (12) 可简化为:

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{2E\zeta}{L_t \pi}} \quad (13)$$

式 (13) 与经典断裂力学中的脆性材料临界扩展应力表达式完全相同。可见, 本文建立的木材原料断裂解离临界解离应力分形表达式也同样适用于脆性材料。

下面分析 L_t 和 D_s 对木材原料断裂解离临界解离应力的影响, 假设木材原料的基本参数如下: E 为 820 MPa, ζ 为 0.000 04 mJ/mm^{2[23]}, ϕ 为 0.006 4 mm²。分别取 L_t 为 0.000 2、0.000 4、0.000 6、0.000 8 mm 时, 将上述参数代入式 (12) 中得到 D_s 和木材原料断裂解离临界解离应力之间的关系曲线。由关系曲线可知, 当 D_s 不变时, σ_1 随 L_t 增大而减小; 当 L_t 不变时, σ_1 随着 D_s 的增大而增大, 如图 10 所示。

因此, 在木材原料断裂解离时, 解离断口形貌越复杂, 初始裂纹越短, 木材原料断裂解离所需要的解离应力越大。

3.2 木材原料断裂解离断裂韧性分形模型

3.2.1 模型建立

木材原料断裂解离时, 在与裂纹扩展方向垂直方向上的应力分量可表示为^[24]:

$$\sigma_c = \frac{K_I^D}{(2\pi\rho)^\gamma} \{ \cos(\gamma\theta) + \gamma \sin\theta \sin[(\gamma+1)\theta] \} \quad (14)$$

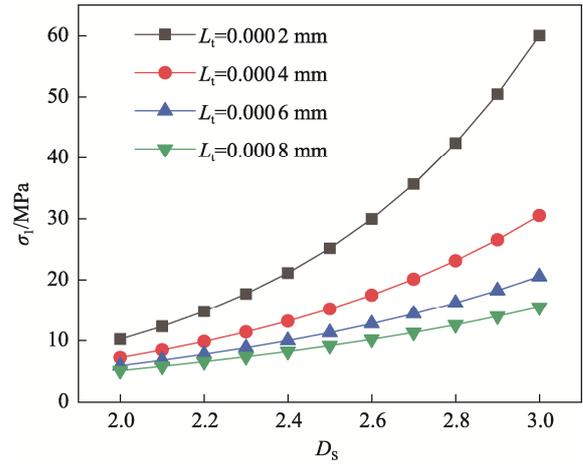


图 10 D_s 和 σ_1 关系曲线
Fig.10 Relationship curve of D_s and σ_1

式中: K_I^D 为分形应力强度因子, $N/mm^{2.5}$; γ 为应力场奇异性阶次, $\gamma = \frac{2-D_L}{2}$; θ 为裂纹极角, rad; ρ 为裂纹极径, mm。

当 $D_L=1$ 时, $\gamma=0.5$, $K_I^D = K_I = \sigma\sqrt{\pi L}$ 。 K_I 为 I 型光滑裂纹的应力强度因子, 则式 (14) 退化为:

$$\sigma_c = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi\rho}} \left[\cos\frac{\theta}{2} + \frac{1}{2} \sin\theta \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] \quad (15)$$

当 $\sigma_1 = \sigma_c$ 时, 分形应力强度因子 K_I^D 等于分形断裂韧性 K_{IC}^D 木材原料发生断裂解离, 由式 (12) 和式 (14) 可得木材原料断裂解离断裂韧性 K_{IC}^D 的分形表达式为:

$$K_{IC}^D = \frac{(2\pi\rho)^\gamma \sqrt{\frac{2E\phi^{2-D_s} \zeta L_t^{\frac{\ln \beta}{\ln \phi}}}{L_t \beta^2 \pi}}}{\cos(\gamma\theta) + \gamma \sin\theta \sin[(\gamma+1)\theta]} \quad (16)$$

3.2.2 初始裂纹长度和裂纹极角对断裂韧性的影响分析

1) 初始裂纹长度 L_t 对断裂韧性 K_{IC}^D 的影响。木材原料基本参数不变, 取 θ 为 0 rad, ρ 为 0.01 mm, L_t 为 0.000 2~0.001 2 mm, D_s 分别为 2.1、2.2、2.3 和 2.4 时, 将上述参数代入式 (16) 中得到 L_t 和 K_{IC}^D 之间的关系曲线。由关系曲线图 11 可知, 木材原料断裂解离的断裂韧性随木材原料初始裂纹长度的增大而减小; 木材原料断裂解离断口分形维数越大, 断裂韧性越大。

2) 裂纹极角 θ 对断裂韧性 K_{IC}^D 的影响。木材原料基本参数不变, 取 θ 为 -2~2 rad, D_s 分别为 2.1、2.2、2.3 和 2.4 时, 将上述参数代入式 (16) 中得到 θ 和 K_{IC}^D 之间的关系曲线。由关系曲线可知: 曲线关于 $\theta=0$ rad 轴对称, 分形维数越小木材原料断裂解离的断裂韧性

越小；当极角的绝对值从 0 rad 开始增加时，断裂韧性随着极角绝对值的增大呈先减小而后增大的趋势，在极角约为 1.055 rad 时，断裂韧性达到最小值，如图 12 所示。

综合上述，对木材原料断裂解离分形断裂力学模型分析可知，木材原料断裂解离时，木材原料断口越粗糙复杂、初始裂纹越短，木材原料断裂解离所需的临界解离应力越大、断裂韧性越大，木材原料断裂解离所需要的能量就越大，这与试验分析结果一致。木材原料裂纹沿着与冲击加载力垂直方向呈约 1.055 rad 方向扩展时，所需要的能量最小，木材原料最易沿该方向进行断裂解离。

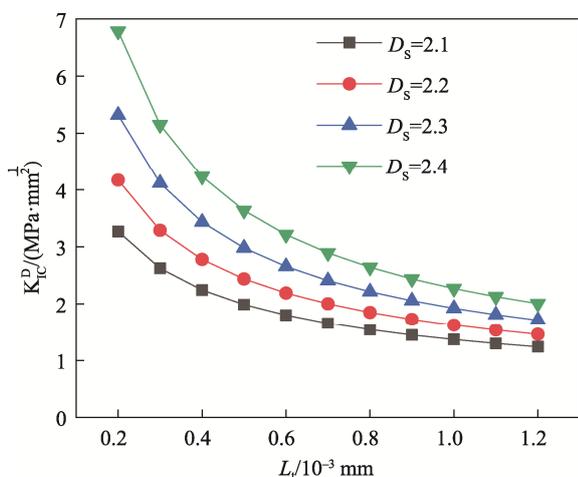


图 11 L_t 与 K_{IC}^D 关系曲线

Fig.11 Relationship curve of L_t and K_{IC}^D

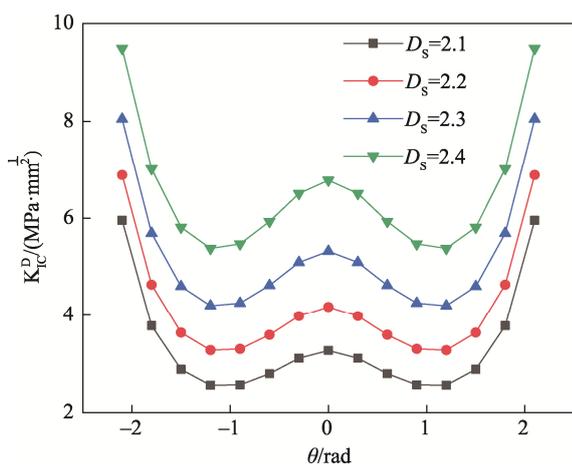


图 12 θ 与 K_{IC}^D 关系曲线

Fig.12 Relationship curve of θ and K_{IC}^D

4 结语

以椴木为试验材料，试验模拟了木材原料受冲击载荷作用断裂解离的过程，获得了试件的断裂力

学性能，分析了试件断口的分形特征，建立了木材原料断裂解离的分形断裂力学模型。结果表明，横向冲击试件断口裂纹和形貌比纵向冲击试件的复杂；断口分形维数的大小反映了试件断口形态特征的复杂程度；试件冲击韧性与其断口分形维数之间存在线性正相关关系；建立的木材原料断裂解离的分形断裂力学模型也适用于脆性材料。本文建立的木材原料断裂解离的分形断裂力学模型有效地将木材原料断裂解离的形貌特征、断裂力学性能和相关影响因素联系起来，进一步完善了木材原料冲击断裂解离机制的理论研究，为热磨法纤维分离设备及磨片齿形结构参数优化设计提供理论指导，也为木材及木质复合材料在运输包装中的进一步应用提供理论参考。但考虑到木材是高度各向异性的多孔材料，对其断裂力学性能的影响因素较多，因此，该模型还有待进一步研究完善，其适用范围还有待进一步拓展。

参考文献：

- [1] 张震宇. 中国纤维板产业发展现状分析[J]. 林业机械与木工设备, 2022, 50(7): 11-15.
ZHANG Zhen-yu. Analysis of the Development Situation of the Fiberboard Industry in China[J]. Forestry Machinery and Woodworking Equipment, 2022, 50(7): 11-15.
- [2] HUA J, CHEN G W, SHI S Q. Effect of Incorporating Chinese Poplar in Wood Chips on Fiber Refining[J]. Forest Products Journal, 2010, 60(4): 362-365.
- [3] 杜建军, 唐莉君. 蝴蝶更新机制的麻雀搜索算法及其在机械优化设计中的应用[J]. 机械设计, 2020, 40(5): 122-127.
DU Jian-jun, TANG Li-jun. Sparrow Search Algorithm Characterized by Butterfly Renewal Mechanism and Its Application in Mechanical Optimization Design[J]. Journal of Machine Design, 2020, 40(5): 122-127.
- [4] RUNKLER T A, GERSTORER E. Modelling and Optimization of a Refining Process for Fiber Board Production[J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(3): 1229-1241.
- [5] 吴翔, 李勇, 徐林, 等. 建筑玻璃的断裂力学[J]. 玻璃, 2023, 50(3): 1-11.
WU Xiang, LI Yong, XU Lin, et al. The Fractography in Architectural Glass[J]. Glass, 2023, 50(3): 1-11.
- [6] 张绍群, 花军, 许威, 等. 木材抗剪强度与分形维数的关系及断口特征[J]. 林业科学, 2015, 51(6): 127-134.
ZHANG Shao-qun, HUA Jun, XU Wei, et al. Fractal Features and Relationship between Wood Shear Strength

- and Fractal Dimension[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, 51(6): 127-134.
- [7] 孙建平, 胡英成, 王逢瑚, 等. 基于图像处理的木材断裂面分形分析[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(12): 2818-2823.
SUN Jian-ping, HU Ying-cheng, WANG Feng-hu, et al. Fractional Analysis of Wood Fracture Surfaces Based on Image Processing[J]. *Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(12): 2818-2823.
- [8] 田威, 高芳芳. 冲击载荷下高温喷淋冷却碳纳米管混凝土破裂分形研究[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(4): 71-80.
TIAN Wei, GAO Fang-fang. A Study on Fracture Fractal of High Temperature Spray Cooled Carbon Nanotube Concrete Under Impact Load[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(4): 71-80.
- [9] LIANG W B, ZHAO J H, LI Y, et al. Research on the Fractal Characteristics and Energy Dissipation of Basalt Fiber Reinforced Concrete after Exposure to Elevated Temperatures under Impact Loading[J]. *Materials*, 2020, 13(8): 1902-1908.
- [10] MECHOLSKY J J, DELELLIS D P, MECHOLSKY N A. Relationship between Fractography, Fractal analysis and Crack Branching[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2020, 40(14): 4722-4726.
- [11] LIANG X, HOU P, XUE Y, et al. Role of Fractal Effect in Predicting Crack Initiation Angle and Its Application in Hydraulic Fracturing[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 56(6): 5491-5512.
- [12] 李继承, 张斌, 谢若泽, 等. 软木材料力学行为及其缓冲吸能特性研究进展综述[J]. *装备环境工程*, 2021, 18(5): 68-78.
LI Ji-cheng, ZHANG Bin, XIE Ruo-ze, et al. Research Advance on the Mechanical Behaviors and Energy Absorption of Soft Wood[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2021, 18(5): 68-78.
- [13] 王洋, 吕九芳. 绿色木质包装创新设计解析[J]. *家具*, 2019, 40(5): 75-78.
WANG Yang, LYU Jiu-fang. Analysis on Innovative Design of Green Wood Packaging[J]. *Furniture*, 2019, 40(5): 75-78.
- [14] 赵彬. 基于木材包装存在的主要问题及对策研究[J]. *包装工程*, 2016, 37(23): 196-202.
ZHAO Bin. Main Problems Existing in Wooden Packaging and Solution[J]. *Packaging Engineering*, 2016, 37(23): 196-202.
- [15] ADALIAN C, MORLIE P. Wood Model for the Dynamic Behavior of Wood in Multiaxial Compression[J]. *Holz Roh-Werkst*, 2002, 60(6): 433-439.
- [16] MARTIN N, JRGEN H, BERNHARD O, et al. Compressive Behavior of Axially Loaded Spruce Wood under Large Deformations at Different Strain Rates[J]. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2011, 69(3): 345-357.
- [17] 许威. 杨木静动态压缩本构模型研究[J]. *包装工程*, 2019, 40(11): 86-93.
XU Wei. Static and Dynamic Compression Constitutive Model of Poplar Wood[J]. 2019, 40(11): 86-93.
- [18] 张绍群, 花军, 许威, 等. 基于三维扫描技术的木材断口分形特征[J]. *林业科学*, 2014, 50(7): 138-142.
ZHANG Shao-qun, HUA Jun, XU Wei, et al. Fractal Feature of Wood Fracture with 3D Scanning Technologies[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2014, 50(7): 138-142.
- [19] 王自强, 陈少华. 高等断裂力学[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 26-30.
WANG Zi-qiang, CHEN Shao-hua. *Advanced Fracture Mechanics*[M]. Beijing: Science Press, 2009: 26-30.
- [20] 杨国伟. 材料断裂表面的真实分维[J]. *湘潭大学自然科学学报*, 1998, 8(2): 43-45.
YANG Guo-wei. Actual Fractal Dimension of Materials Fracture Surface[J]. *Natural Science Journal of Xiangtan University*, 1998, 8(2): 43-45.
- [21] MANDEBROT B B. *The Fractal Geometry of Nature*[M]. New York: W H Freeman and Company, 1983: 1-5.
- [22] UNDERWOOD E E. Directed Measurements and Heterogeneous Structures in Quantitative Fractography[J]. *Acta Stereo Logical*, 1991, 10(2): 149-165.
- [23] 曹金珍, PASCAL K D. 不同水基防腐剂处理的木材的表面自由能[J]. *北京林业大学学报*, 2006, 28(4): 1-5.
CAO Jin-zhen, PASCAL K D. Surface Energy of Wood Treated with Water-Borne Wood Preservatives[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(4): 1-5.
- [24] WNUK M P, YAVARI A. On Estimating Stress Intensity Factors and Modulus of Cohesion for Fractal Cracks[J]. 2003, 70(6): 1659-1674.