

高地钩叶藤的主要物理力学性能研究

薛夏, 季必超, 汪佑宏*, 王鹏程

(安徽农业大学林学与园林学院, 合肥 230036)

摘要: 为构建健全的棕榈藤数据库、合理开发利用棕榈藤资源提供理论基础, 以高地钩叶藤为研究对象, 研究其主要物理力学性质及两种方式下的断裂韧性。结果表明, 高地钩叶藤的气干密度、绝干密度和基本密度分别为 0.44、0.46 和 0.36 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。体积气干干缩率和体积全干干缩率的变化范围分别为 2.91%~8.11%和 7.71%~11.36%, 干缩各向异性较大。高地钩叶藤的抗弯弹性模量、抗弯强度、抗压强度、抗剪切强度和冲击韧性分别为 804.10 MPa、49.95 MPa、33.12 MPa、4.77 MPa 和 184.02 $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 。三点弯曲法测得其横纹断裂韧性为 1 870 $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3/2}$, 紧凑拉伸法测得其顺纹断裂韧性为 77.8 $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3/2}$, 说明高地钩叶藤的横纹断裂韧性比顺纹断裂韧性大得多。

关键词: 高地钩叶藤; 物理力学性质; 断裂韧性

中图分类号: S687.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2021)04-0551-04

Study on the main physical and mechanical properties of *Plectocomia himalayana*

XUE Xia, JI Bichao, WANG Youhong, WANG Pengcheng

(School of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

Abstract: In this paper, we chose *Plectocomia himalayana* Griff. as the experimental materials to study the main physical and mechanical properties and fracture toughness of two methods. The results showed that the air-dry density, absolute density and basic density of *Plectocomia himalayana* Griff. were 0.44, 0.46 and 0.36 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, respectively. The volumetric air dry shrinkage rate ranged from 2.91% to 8.11%, the volumetric dry shrinkage rate ranged from 7.71% to 11.36%, and the dry shrinkage anisotropy was large. The flexural modulus, flexural strength, compressive strength, shear strength and impact toughness of *Plectocomia himalayana* Griff. were 804.10 MPa, 49.95 MPa, 33.12 MPa, 4.77 MPa and 184.02 $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$, respectively. The transverse grain fracture toughness measured by three-point bending method was 1 870 $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3/2}$, and the fracture toughness parallel to the grain measured by the compact tensile method was 77.8 $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3/2}$, which indicated that the fracture toughness of the transverse grain is much larger than that of the fracture along the grain.

Key words: *P. himalayana* Griff.; physical and mechanical properties; fracture toughness

棕榈藤 (Rattan) 属棕榈科 (Palmae), 是具有较高经济价值和开发前景的热带和亚热带森林中的单子叶植物资源^[1], 藤茎是仅次于木、竹材的重要非木材产品^[2], 被广泛用于制造家具及工艺品^[3-5]。高地钩叶藤属于省藤亚科钩叶藤属, 为攀援、丛生的藤类, 在我国主要分布于云南一些海拔在 1 450~1 800 m 的竹林和山地常绿阔叶林中; 藤茎质地较粗糙, 一般用于编织较粗糙的藤器或扎栏^[6]。

目前对高地钩叶藤的研究主要集中在微观构

造^[7-10]、细胞壁超微构造^[11-12]和改性处理^[13-15]上, 对高地钩叶藤的部分力学性质研究虽略有涉及, 但也是分别对藤皮、藤芯进行测量^[16-17], 难以真实反应出棕榈藤制品在使用过程中的受力情况。此外, 对高地钩叶藤在家具制作等有显著影响的还是其断裂性质、韧性等。近来, 国内学者对木材和竹材的断裂力学原理进行了一些研究, 如邵卓平等^[18-20]从断裂原理和实验上阐述了木材宏观和微观断裂性质和强韧机理, 也有学者对竹材的断裂韧性进行较为

收稿日期: 2020-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31570553) 资助。

作者简介: 薛夏, 硕士研究生。E-mail: 1553046802@qq.com

* 通信作者: 汪佑宏, 博士, 教授。E-mail: wangyh@ahau.edu.cn

深入的研究^[21-22],而对棕榈藤材断裂韧性的研究鲜有报道。考虑到高地钩叶藤等棕榈藤因藤龄、立地条件等因素造成株间材性差异明显,作者以高地钩叶藤为研究对象,对其韧性等主要物理力学性能进行了系统测试研究;同时,运用两种不同方法对其横纹和顺纹断裂韧性进行了测试,以期为其综合加工利用提供理论基础。

1 材料与方 法

1.1 材 料

高地钩叶藤(*P. himalayana* Griff.)属省藤亚科钩叶藤属,试材采自云南梁河县,海拔1480~1500 m。选取10株健康藤茎齐根伐倒,去除叶鞘,测得藤径13~30 mm,藤茎长16~20 m,节间长165~265 mm,从基部向上每2 m长截断、编号。

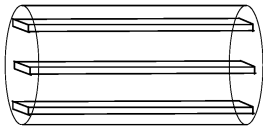


图 1 分层式抗拉试样

Figure 1 Layered samples of tensile test

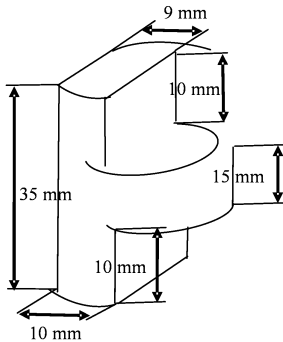


图 2 藤材抗剪性能测试

Figure 2 Shear performance test of rattan

1.2 方 法

参照 LY/T 2220.1—2013 制备试样:在每个取样单元,从基部向上,第1节节间依次截取长度为50 mm的抗压强度试样、35 mm的抗剪试样,第2节截取长为160 mm的抗弯强度试样,第3节截取长为160 mm抗拉强度试样。所有试样在温度为20℃、湿度为65%条件下调节含水率至平衡后,再进行力学试验,所有力学试验均用WDW-100E型万能力学试验机完成。(1)密度及干缩性测试在抗弯强度测试后的破坏试件上,参照国标 GB/T 1933—2009 和国标 GB/T 15780—1995 规定截取长度为2 cm的样品作为密度试件,测定其基本密度、气干密度和绝干密度。藤材干缩性质的测定,参照国家标准 GB/T 1932—2009 中的方法来进行,分别测量轴向、面积

及体积的全干和气干干缩率。(2)抗拉强度及抗拉弹性模量参照国内外棕榈藤材抗拉强度测试方法,设计了顺纹抗拉试样。从长为160 mm的藤径中取藤芯与藤皮的分层抗拉试样如图1,试样尺寸为160 mm(长)×10 mm(宽)×2 mm(厚),两侧的为藤皮拉伸试样,中间为藤芯拉伸试样,破坏处断面为10 mm×1 mm。(3)抗弯强度及抗弯弹性模量参照竹材抗弯弹性模量、抗弯强度测试标准 GB/T 15780—1995,试材取整藤节,长160 mm,即D×160 mm,采用中央加荷,跨距120 mm,以均匀速度加荷,在(60±30) s内使试样破坏。(4)抗压弹性模量及抗压强度参考 GB/T 3356—1999 和 GB/T 1935—2009,根据预试验,确定测试高地钩叶藤的最佳长度为30 mm。(5)抗剪强度参照竹材抗剪强度测试标准 GB/T 15780—1995,设计如图2所示的抗剪试样。(6)冲击韧性参照木材冲击韧性试验标准 GB/T 1940—2009。(7)断裂韧性。横纹断裂韧性采用三点弯曲法进行测试,横纹断裂韧性采用紧凑拉伸法进行测试。三点弯曲方式参照 ASTM-E 399—2012 制成长100 mm、宽为直径、厚度5 mm左右的标准无疵 LR 试件,再沿径向加工出裂纹深度为直径的1/2,如图3A所示。在万能实验机上,按5 mm·min⁻¹匀速加载。记录施加载荷(P)和裂纹张开位移(δ)之间的关系,可以得出裂纹扩展时的临界载荷 P_Q,根据公式(1)可以计算出断裂韧性:

$$K_{Ic} = \frac{P_Q S}{BW^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (1)$$

式(1)中,S为支点跨距,B、W分别为试件的厚度和宽度,P_Q为裂纹初始扩展的临界载荷,a为预制裂纹尺寸,f(a/w)为裂纹尺寸系数,由式(2)定义:

$$f\left(\frac{a}{w}\right) = 3\sqrt{\frac{a}{w}} \cdot \frac{1.99 - \left(\frac{a}{w}\right)\left(1 - \frac{a}{w}\right)\left[2.15 - 3.93\frac{a}{w} + 2.7\left(\frac{a}{w}\right)^2\right]}{2\left(1 + 2\frac{a}{w}\right)\left(1 - \frac{a}{w}\right)^{3/2}} \quad (2)$$

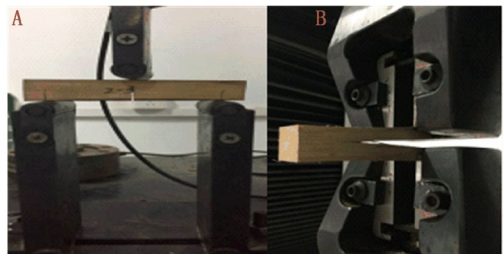


图 3 藤材的断裂韧性测试

Figure 3 Fracture toughness test of rattan

紧凑拉伸方式参照 GB4161—1984 制成试件高度为H=20 mm,长度为L=100 mm,厚度为B=20 mm,预制裂纹深度为a=50 mm的试样,如图3B

所示。万能材料实验机上,记录施加载荷(P)和裂纹张开位移(δ)之间的关系,可以得出裂纹扩展时的临界载荷 P_Q ,由公式(3)(4)计算出断裂韧性:

$$K_{Ic} = \frac{P_Q}{BL^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{L}\right) \quad (3)$$

式(3)中:

$$f\left(\frac{a}{L}\right) = \frac{\left(2 + \frac{a}{L}\right) \left[0.886 + 4.64 \frac{a}{L} - 13.32 \left(\frac{a}{L}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{L}\right)^3 - 5.6 \left(\frac{a}{L}\right)^4\right]}{\left(1 - \frac{a}{L}\right)^{3/2}} \quad (4)$$

2 结果与分析

2.1 物理性质

2.1.1 密度 密度一般包括气干密度、基本密度、生材密度和绝干密度。一般而言,密度与其力学强度存在一定正相关关系,即密度越大,其对应的力学强度往往也越大。由表1可知,高地钩叶藤的气干密度为 $0.44 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,高地钩叶藤的基本密度 ($0.36 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) 平均值与其他藤种如钩叶藤 ($0.33 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)^[23] 和黄藤 (0.39

$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) 相近,低于单叶省藤 ($0.47 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)^[24],可以推断高地钩叶藤具有和一般藤种相近的力学性能。

2.1.2 干缩性 藤材的气干和全干缩率的测定结果(表2)显示,高地钩叶藤的全干干缩率变化:轴向干缩率为 $0.45\% \sim 0.84\%$,面积干缩率为 $5.96\% \sim 12.23\%$,体积干缩率为 $5.77\% \sim 12.63\%$ 。气干干缩率的变化:轴向干缩率为 $0.13\% \sim 0.75\%$,面积干缩率为 $1.54\% \sim 10.96\%$,体积干缩率为 $2.26\% \sim 11.53\%$ 。高地钩叶藤的横向干缩率远大于轴向干缩率,这种差异性可能会对该藤材的加工利用产生影响。

2.2 力学性能

2.2.1 抗拉性能 由表3可知,高地钩叶藤藤皮的抗拉强度和抗拉弹性模量均明显高于藤芯,藤皮分层抗拉强度为 56.93 MPa ,藤芯分层抗拉强度为 23.91 MPa ,由此可见藤皮对高地钩叶藤的抗拉性能有着特殊贡献,这可能是因为藤皮的纤维含量高于藤芯,纤维的胞壁厚度越大,胞壁实质含量越多,机械力学性能越好^[22]。

表 1 高地钩叶藤的 3 种密度

Table 1 Three densities of *P. himalayana* Griff.

指标	平均值/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	最大值/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	最小值/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	标准差/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	变异系数/%
基本密度	0.36	0.41	0.32	0.03	8.32
气干密度	0.44	0.53	0.38	0.05	10.86
绝干密度	0.46	0.55	0.40	0.05	10.12

表 2 高地钩叶藤的气干干缩率和全干干缩率

Table 2 Air-dry shrinkage ratio and oven-dry shrinkage ratio of *P. himalayana* Griff.

指标	平均值	最大值	最小值	标准差	变异系数	%
轴向全干干缩率	0.56	0.84	0.45	0.13	22.82	
面积全干干缩率	9.29	12.23	5.96	1.63	17.51	
体积全干干缩率	9.54	12.63	5.77	1.83	19.16	
轴向气干干缩率	0.36	0.75	0.13	0.20	56.58	
面积气干干缩率	5.17	10.96	1.54	2.58	49.86	
体积气干干缩率	5.53	11.53	2.26	2.58	46.63	

表 3 高地钩叶藤的抗拉强度与抗拉弹性模量

Table 3 Tensile strength and tensile modulus of *P. himalayana* Griff.

指标	平均值/MPa	最大值/MPa	最小值/MPa	标准差/MPa	变异系数/%
藤皮分层抗拉强度	56.93	80.62	37.60	15.63	27.45
藤芯分层抗拉强度	23.91	51.33	12.72	11.44	47.85
藤皮分层抗拉弹模	5 130.06	9 223.56	3 549.81	1 913.14	39.29
藤芯分层抗拉弹模	2 816.51	5 007.75	1 656.28	938.36	33.32

表 4 高地钩叶藤的断裂韧性

Table 4 Fracture toughness of *P. himalayana* Griff.

指标	平均值/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3/2})$	最大值/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3/2})$	最小值/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3/2})$	标准差/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3/2})$	变异系数/%
横纹断裂韧性	1 870.0	2 420.0	1 300.0	320.0	17.2
顺纹断裂韧性	77.8	108.7	50.7	20.8	26.8

2.2.2 断裂韧性 由表4可知,高地钩叶藤的横纹断裂韧性为 $1 870 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3/2}$,顺纹断裂韧性为 77.8

$\text{kN}\cdot\text{m}^{-3/2}$,横纹断裂韧性比顺纹断裂韧性大的多,横纹断裂韧性大约是顺纹断裂韧性的 24 倍,这与高地

钩叶藤纤维的取向密切相关。同时在试样制作时,三点弯曲法对藤皮基本进行了保留,而紧凑拉伸法由于试样限制,大部分藤皮都被除去,这也增加了

两种断裂韧性的差距。因此,在钩叶藤加工使用过程中,要尽可能避免其顺纹断裂。

表 5 高地钩叶藤的部分力学性能

Table 5 Partial mechanical properties of *P. himalayana* Griff.

参数	抗压强度/MPa	抗弯强度/MPa	抗弯弹模/MPa	抗剪切强度/MPa	冲击韧性/(kJ·m ⁻²)
平均值	33.12	49.95	804.10	4.77	184.02
最大值	41.19	62.57	1 137.00	6.37	69.81
最小值	26.90	37.65	398.00	3.08	60.64
标准差	3.09	6.62	209.50	0.83	341.65
变异系数	9.34%	13.26%	26.05%	17.32%	37.93%

2.2.3 其他力学性能 抗弯强度和抗弯弹性模量是藤材重要的力学指标,是藤材材质判断的主要因子。由表 5 可知:高地钩叶藤抗弯强度为 49.95 MPa,低于其他藤种如黄藤(65.52 MPa)、单叶省藤材(68.38 MPa),以及云南省藤(75.46 MPa)^[16],抗弯弹性模量为 804.10 MPa;高地钩叶藤抗压强度为 33.12 MPa,高于黄藤(23.54 MPa)和单叶省藤材(31.59 MPa)^[24],更高于版纳省藤(19.67 MPa)等^[16],由此可知高地钩叶藤抗弯性能较差但抗压性能较好。此外高地钩叶藤的抗剪切强度为 4.77 MPa,冲击韧性为 184.02 kJ·m⁻²。

3 结论

高地钩叶藤气干密度、绝干密度和基本密度分别为 0.44、0.46 和 0.36 g·cm⁻³。体积气干干缩率和体积全干干缩率的变化范围分别为 2.91%~8.11%和 7.71%~11.36%,干缩各向异性较大。高地钩叶藤的抗弯弹模、抗弯强度、抗压强度、抗剪切强度和冲击韧性分别为 804.10 MPa、49.95 MPa、33.12 MPa、4.77 MPa 和 184.02 kJ·m⁻²。高地钩叶藤抗弯性能较差但抗压性能较好。三点弯曲法测得其横纹断裂韧性为 1 870 kN·m^{-3/2},紧凑拉伸法测得其顺纹断裂韧性为 77.8 kN·m^{-3/2},高地钩叶藤的横纹断裂韧性比顺纹断裂韧性大得多,横纹断裂韧性大约是顺纹断裂韧性的 24 倍。总的来看,高地钩叶藤的材性较差,但可通过改性处理提高其相应的性质而加以利用。

参考文献:

- [1] JIANG Z H. Bamboo and Rattan in the World[M]. 北京:中国林业出版社, 2007.
- [2] 王慷林. 中国棕榈藤资源及其分布特征研究[J]. 植物科学学报, 2015, 33(3): 320-325.
- [3] 吴智慧, 顾颜婷. 《藤家具通用技术条件》国家标准解读[J]. 家具, 2020, 41(4): 110-114, 109.
- [4] 袁哲, 强明礼, 杜官本. 云南藤家具业的现状与前瞻[J]. 世界竹藤通讯, 2006, 4(4): 8-10, 26.
- [5] XU B, LIU X G, LV H, et al. Research on the indoor environmental properties of *Calamus Manna* rattan cane[J]. Indoor Built Environ, 2016, 25(3): 459-465.
- [6] 曹积微, 斯泽泽, 袁哲, 等. 高地钩叶藤材性分析及开发利用价值评价[J]. 世界竹藤通讯, 2015, 13(5): 21-24.
- [7] 刘杏娥, 吴明山, 汪佑宏, 等. 高地钩叶藤与钩叶藤组织比量的变异研究[J]. 安徽农业大学学报, 2015, 42(1): 27-30.
- [8] 张菲菲, 李担, 汪佑宏, 等. 高地钩叶藤与大钩叶藤纤维特性[J]. 东北林业大学学报, 2018, 46(1): 76-79.
- [9] 张菲菲, 李担, 汪佑宏, 等. 高地钩叶藤和大钩叶藤维管束与导管变异研究[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(5): 214-218.
- [10] 汪佑宏, 张菲菲, 薛夏, 等. 高地钩叶藤节间与节部导管及维管束形态特征径向变异规律[J]. 安徽农业大学学报, 2019, 46(5): 806-809.
- [11] 张菲菲, 季必超, 汪佑宏, 等. 拉曼光谱对高地钩叶藤纤维 S2 层主要成分的预测[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(1): 179-183.
- [12] 汪佑宏, 张菲菲, 薛夏, 等. X 射线在棕榈藤纤维细胞壁结构研究上的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(5): 1442-1446.
- [13] 曹积微, 袁哲, 强明礼. 微波和汽蒸加热软化棕榈藤材抗弯性能及材色的比较研究[J]. 西南林业大学学报, 2016, 36(4): 158-162.
- [14] 袁哲, 曹积微, 强明礼. 热软化及干燥处理对棕榈藤材色的影响[J]. 西南林业大学学报, 2016, 36(6): 158-163.
- [15] 杨淑敏, 李担, 张菲菲, 等. 脲醛及热处理对钩叶藤、高地钩叶藤主要物理性质的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2016, 43(2): 215-219.
- [16] 曹积微, 袁哲, 强明礼. 云南 3 种棕榈藤材材性分析及开发利用价值评价[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(4): 265-268.
- [17] 曹积微, 袁哲, 强明礼. 云南 4 种棕榈藤材弯曲性能比较[J]. 西部林业科学, 2016, 45(3): 132-136.
- [18] 邵卓平, 任海青, 江泽慧. 柔度法标定木材断裂韧性的研究[J]. 林业科学, 2001, 37(2): 112-116.
- [19] 李启志, 王福利, 邵卓平. 竹材 III 型层间的断裂韧性[J]. 东北林业大学学报, 2017, 45(5): 70-74.
- [20] 邵卓平. 竹材的层间断裂性质[J]. 林业科学, 2008, 44(5): 122-127.
- [21] 刘焕荣. 竹材的断裂特性及断裂机理研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2010.
- [22] 田振农, 张乐文. 木材的宏观力学模型及断裂机理[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(2): 153-156.
- [23] 尚莉莉. 钩叶藤材的基本性能及增强增韧改性研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2014.
- [24] 王传贵, 徐鑫, 汪佑宏, 等. 黄藤和单叶省藤的主要物理力学性质[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(12): 132-133, 136.