

毛竹材抗拉弹性模量及抗拉强度

杨云芳 刘志坤

(浙江林学院, 临安 311300)

摘要 将天然毛竹材视为纤维与基体两种组分材料构成的复合材料, 以一个维管束及周围所辖薄壁组织细胞为分析单元进行微观力学性能分析, 得出以组分材料性能与含量表示的宏观抗拉弹性模量和极限抗拉强度计算式。实验结果表明: 毛竹材组分含量沿壁厚及秆高变异显著; 组分(即纤维与基体)的抗拉弹性模量分别为27.60 GPa和6.06GPa, 抗拉强度分别为547.68MPa和74.60 MPa。毛竹材的宏观抗拉弹性模量及强度同组分材料的数量及分布密度密切相关。

关键词 毛竹; 竹材; 抗张强度; 弹性模量

中图分类号 S781.2

竹材是天然有机高分子聚合物, 其组织结构主要由维管束和薄壁细胞组成。维管束包藏于基本薄壁组织之中, 自表皮向内分布密度逐渐变稀。维管束是竹材的通导组织与强固体组织的综合体, 在维管束之间布满薄壁组织细胞。薄壁细胞比较疏松, 在竹材受载中起缓冲作用。它与维管束紧密结合, 形成刚柔相济的结构特征。因此, 在外观上竹秆表现出良好的弹性。

利用竹材抗拉强度高的特点生产工程用结构材, 其强度和刚度指标完全由实验确定。竹材具高度各向异性, 力学性能变异大, 难以用理论分析法预测竹材本身及其结构的性能, 已成为设计中的难题。竹材的宏观力学性能分散性很大已众所周知, 主要原因是竹材内的强固体组织(亦称机械组织)的分布密度和含量随竹秆高度发生变化。即使是同一竹秆, 不同节间的试材测试结果相差也很大, 不利于在加工、使用中预测其强度。

竹材的强度是由维管束中的纤维束(即机械组织)与薄壁组织共同承载的结果。按照纤维增强复合材料的观点, 将天然竹材结构中的纤维束作为纤维增强组分, 将薄壁组织视为基体组分, 分析各组分材料的微观力学性能, 进而通过纤维束在秆高及垂周向的分布密度较精确地预测竹材的宏观力学性能。本文仅限于抗拉弹性模量及抗拉强度的研究。

1 毛竹材中纤维含量的分布

纤维含量是在竹秆横切面的显微照片上测定的。纤维含量在竹秆不同高度上的分布以离地面的若干节次说明, 在秆壁厚度上的分布以层次编号。从竹秆最外面算起, 弦向地将壁厚径向等分为10层, 依次称为第1层至第10层, 测试结果如表1^[1]。将表1实测数据以层次为自

收稿日期: 1995-10-31

变量, 纤维含量为因变量进行非线性回归并计算回归理论值及衡量回归方程优劣的参数。从这些参数的比较中知回归成双曲线型与实际测试数据拟合最密切。回归方程及相关参数如表 2。理论计算值列入表 1 与实测值相对应。

表 1 各节间不同层次中纤维含量的实测值与理论值

Table 1 Observed values and caculated values from regression of fiber contents between different levels of bamboo joints $dm^2 \cdot m^{-2}$

节次	第 1 层 (x=5)	第 2 层 (x=15)	第 3 层 (x=25)	第 4 层 (x=35)	第 5 层 (x=45)	第 6 层 (x=55)	第 7 层 (x=65)	第 8 层 (x=75)	第 9 层 (x=85)	第 10 层 (x=95)	全断面 纤维含 量密度
2	59.6	39.0	29.2	22.4	17.5	14.3	12.4	11.1	10.0	8.7	223.7
	58.2	38.8	29.8	23.9	19.5	16.0	13.0	10.5	8.3	6.3	224.3
6	68.1	46.0	34.9	27.4	21.9	17.6	15.1	13.1	11.9	9.4	265.4
	67.6	45.4	35.0	28.2	23.2	19.1	15.7	12.9	10.3	8.1	265.5
10	67.9	46.6	35.7	29.3	21.9	17.2	15.0	13.8	12.9	9.0	269.3
	67.9	45.7	35.4	28.6	23.5	19.5	16.1	13.2	10.7	8.4	269.0
14	74.4	51.0	39.6	31.5	24.8	20.1	17.2	15.0	13.0	9.4	296.6
	74.7	50.3	38.9	31.5	25.9	21.4	17.7	14.6	11.8	9.3	296.1
18	74.3	51.5	41.2	31.5	25.5	20.1	16.7	14.6	13.4	9.6	298.4
	75.1	50.6	39.2	31.7	26.1	21.6	17.9	14.7	11.9	9.4	298.2
22	77.5	54.7	42.7	34.1	27.4	23.5	19.5	17.6	14.4	10.3	321.7
	78.5	53.4	41.7	34.0	28.3	23.7	19.9	16.6	13.8	11.2	321.1
26	78.5	58.7	46.7	38.4	31.5	27.6	22.7	21.2	16.8	10.3	352.4
	81.4	56.4	44.8	37.2	31.4	26.9	23.1	19.8	17.0	14.4	352.4
30	82.9	62.6	50.4	41.6	34.4	28.1	23.7	21.0	18.9	9.6	373.2
	86.8	60.0	47.6	39.4	33.4	28.4	24.3	20.8	17.8	15.0	373.3
34	81.5	61.8	49.9	40.1	35.1	31.0	26.6	22.4	20.2	11.3	379.9
	84.7	59.4	47.7	39.9	34.1	29.5	25.7	22.4	19.5	16.9	379.8

注: 表中上行为 12 株不同胸高直径毛竹的实测平均值, 下行为相应的理论值

表 2 各节间不同层次纤维含量的回归方程及回归参数

Table 2 The regression models and parameters of fiber contents between different levels of bamboo joints

节次	回 归 方 程	S_e	$\hat{\sigma}^*$	R^2
2	$\hat{y} = 86.49 - 40.53lgx$	20.87	1.615 2	0.991 3
6	$\hat{y} = 100.08 - 46.52lgx$	9.85	1.109 6	0.996 8
10	$\hat{y} = 100.43 - 46.51lgx$	16.01	1.414 7	0.994 8
14	$\hat{y} = 110.39 - 51.11lgx$	5.83	0.853 7	0.998 4
18	$\hat{y} = 111.04 - 51.37lgx$	8.84	1.051 2	0.997 7
22	$\hat{y} = 115.25 - 52.59lgx$	5.28	0.812 4	0.998 7
26	$\hat{y} = 118.03 - 52.38lgx$	36.82	2.145 3	0.986 9
30	$\hat{y} = 126.01 - 56.11lgx$	66.75	2.888 6	0.985 4
34	$\hat{y} = 127.77 - 53.01lgx$	56.79	2.664 3	0.985 9

注: $S_e = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$, $\hat{\sigma}^* = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum (y_i - \hat{y}_i)^2}$, $R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum y_i^2 - ny^2}$

由表 2 可知，回归曲线拟合良好，真实地反映了各节间不同层次的纤维分布密度。用图形示出如图 1。

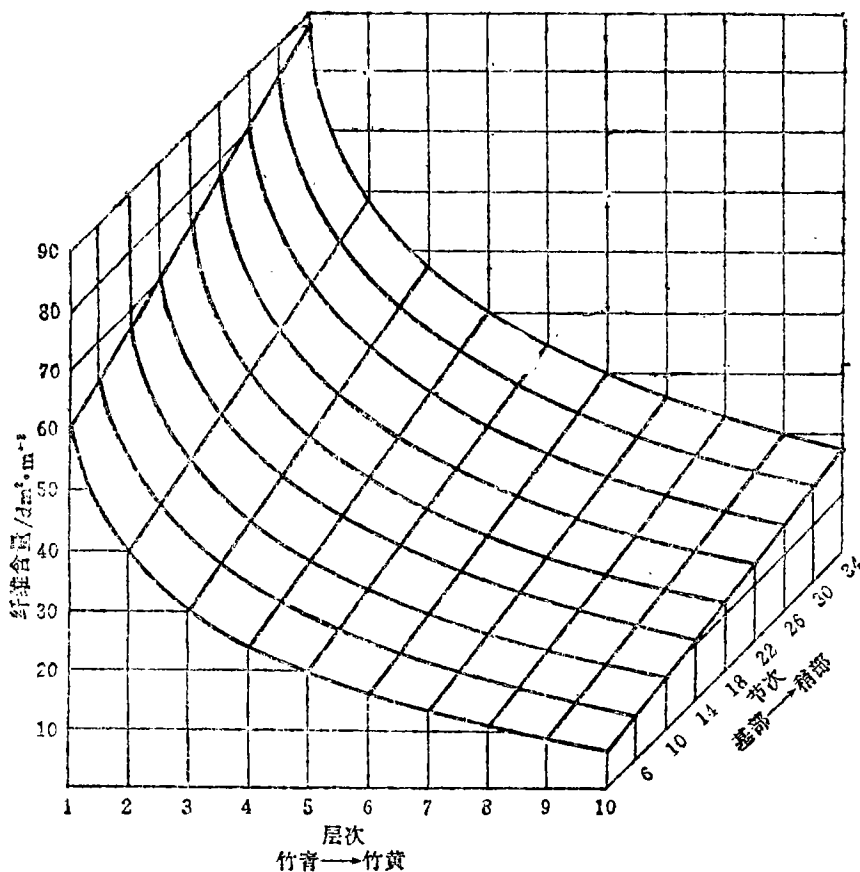


图 1 毛竹秆机械组织(纤维)在各节间不同层内的含量

Fig. 1 The fiber contents of bamboo trunk mechanical tissue between different levels of bamboo joints

2 毛竹材的结构特点及分析模型

竹材横断面的显微结构^[2]表明：从竹青至竹黄维管束的尺寸将由垂周向大于平周向逐渐变为平周向等于或大于垂周向。近表皮处有 1 层或 2 层未分化的维管束。这种未分化的维管束没有筛管和导管，只有纤维束，形状不规则，排列十分紧密。往内具有 1~3 层半分化的维管束，它开始具有输导组织，排列仍然紧密。再往内出现典型维管束，通常位于壁厚断面的中部或中内部，按斜行排列，行数较多。接近内壁的维管束的形态与排列往往出现错乱与倒置的情况。

从全秆内维管束的纵向情况来看，其形状、大小和组织式样随秆高发生显著的变化。根据毛竹材上述结构特点，取秆内任一维管束及其周围所辖薄壁组织细胞为分析单元，

进行微观力学性能分析。单元体的横断面如图 2 所示。将薄壁组织细胞视为基体组分，将维管束视为单一的空心纤维插在基体内，空心部分等效于导管与筛管。将由此组合的材料视为纤维增强复合材料^[3]。该复合材料(竹材)的宏观力学性能是通过纤维和基体两种组分材料的性能及其相互影响表现出来的。竹材是生物体，分析模型中纤维与基体之间的结合是理想而完整粘结的。

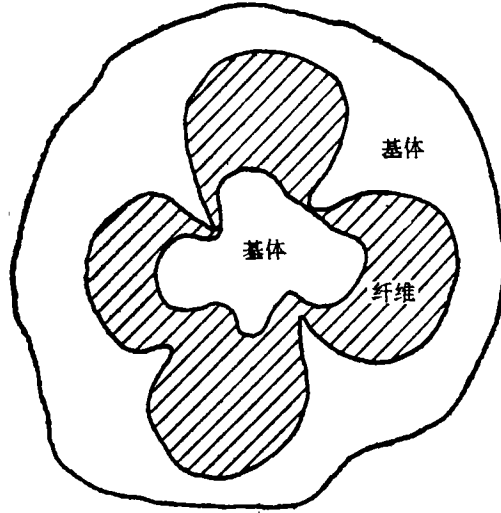


图 2 毛竹材微观力学分析模型
Fig. 2 Bamboo micromechanics analysis model

设纤维的抗拉弹性模量为 E_f ，极限抗拉强度为 $\sigma_{f,max}$ ，基体的抗拉弹性模量为 E_m ，极限抗拉强度为 $\sigma_{m,max}$ ，两组分复合后顺纤维抗拉弹性模量为 E_1 ，极限抗拉强度为 $\sigma_{e,max}$ ，分析单元的体积为 V ，其中纤维所占体积为 V_f ，基体为 V_m (包括导管和筛管空腔)，假定各组分在 1 个竹节长度上纵向尺寸不变，则各组分占总体积的百分数等于横断面上所占面积之比。设 A 为分析单元的总断面积， A_f 为纤维断面积， A_m 为基体断面积，则有

$$\frac{V_f}{V} = \frac{A_f}{A} = F_f, \quad \frac{V_m}{V} = \frac{A_m}{A} = F_m, \quad F_f + F_m = 1 \tag{1}$$

竹材系单向纤维增强复合材料，假设单元中纤维和基体在纤维纵向的应变相同(图 3)。即垂直于 1 轴的截面在承载前是平面，承载后仍是平面。该假设与实验结果相符。顺纹抗伸时线应变 ϵ_1 为：

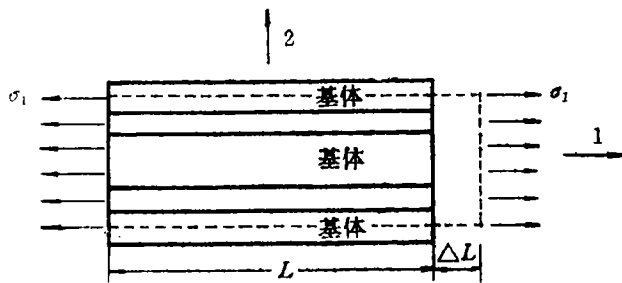


图 3 分析单元的 $\sigma-\epsilon$ 图
Fig. 3 $\sigma-\epsilon$ graph of analysis unit

$$\epsilon_1 = \frac{\Delta L}{L} \tag{2}$$

如果两种组分材料都处于弹性状态，则：

$$\begin{aligned} \sigma_f &= E_f \epsilon_1 \\ \sigma_m &= E_m \epsilon_1 \end{aligned} \tag{3}$$

平均应力 σ_1 作用于横截面 A 上, σ_f , σ_m 分别作用在纤维 A_f 和基体 A_m 上, 单元上的合力 P 为:

$$P = \sigma_1 A = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \quad (4)$$

(3)代(4)并 $\sigma_1 = E_1 \varepsilon_1$, 得:

$$E_1 = E_f F_f + E_m F_m \quad (5)$$

式中 E_1 为单元在 1 方向的宏观弹性模量; F_f , F_m 分别为纤维与基体断面占单元的断面积之比。它们可根据分布密度求得。

竹材顺纹抗拉时, 根据实验中试件破坏的过程和结果分析, 可认为各维管束中的纤维束具有相同的强度, 且比基体脆。试验中随着载荷的逐渐增加, 首先是纤维和基体都发生同步弹性变形。表现在反复加卸载过程中, 当加载至强度极限的 5/7 时, 再卸载, 则变形可基本恢复, 说明在此加载过程中两组分都处于弹性变形阶段。当加载超过强度极限的 5/7 后继续缓慢加载, 纤维开始断裂, 随之发生纤维与基体的撕裂, 呈若帚状散开, 扩展至整体破坏。因此, 竹材的极限抗拉强度系由纤维的变形达到相应的最大极限决定的。设纤维的变形极限为 $\varepsilon_{f, \max}$, 则竹材在极限强度时的应变 $\varepsilon_{o, \max}$ 为:

$$\varepsilon_{o, \max} = \varepsilon_{f, \max}$$

此时竹材强度为:

$$\sigma_{o, \max} = \sigma_{f, \max} F_f + (\sigma_m) \varepsilon_{f, \max} (1 - F_f) \quad (6)$$

式中 $(\sigma_m) \varepsilon_{f, \max}$ 为基体应变等于纤维最大拉伸应变时的基体应力; $\sigma_{f, \max}$ 为纤维的极限拉应力; $\sigma_{o, \max}$ 为竹材的极限抗拉强度。

3 实验与组分材料的性能参数

(5)和(6)式系由组分材料的性能参数表示的整体宏观性能的计算式。式中组分含量随秆高及各层的变化如前述, 但纤维和基体组分的性能参数不像人造复合材料那样容易获得。为此, 实验中先反复测定某一组分含量时各试件的宏观值, 之后再反复测定改变组分含量后的宏观值, 最后根据组分含量和宏观值, 依(5)和(6)式求解得到组分材料的性能参数。实验结果如表 3。

表 3 不同组分含量时气干毛竹材的抗拉弹性模量及极限抗拉强度

Table 3 The elastic reactance modulus and maximum tensile strength of air-dried bamboo at different component contents

试件	试件数	纤维含量 F_f	基体含量 F_m	抗拉弹性模量 /GPa	极限抗拉强度 /MPa
1	12	0.2693	0.7307	11.86	202
2	12	0.5589	0.4411	18.10	339

由(5)式可得:

$$\begin{cases} 0.2693E_f + 0.7307E_m = 11.86 \\ 0.5589E_f + 0.4411E_m = 18.10 \end{cases}$$

解得:

$$\begin{cases} E_f = 27.60 \text{ GPa} \\ E_m = 6.06 \text{ GPa} \end{cases}$$

由(6)式得:

$$\begin{cases} 0.2693\sigma_{f,\max} + 0.7307(\sigma_m)\varepsilon_{f,\max} = 202 \\ 0.5589\sigma_{f,\max} + 0.4411(\sigma_m)\varepsilon_{f,\max} = 339 \end{cases}$$

解得:

$$\begin{cases} \sigma_{f,\max} = 547.68 \text{ MPa} \\ (\sigma_m)\varepsilon_{f,\max} = 74.60 \text{ MPa} \end{cases}$$

4 毛竹材的抗拉弹性模量 E_1 与抗拉强度 σ_c

由上述得到组分材料的相关性能后,即可根据组分含量的变化获得不同部位及不同层次的宏观性能。由表1毛竹各节间的纤维密度可求得相应的宏观力学性能如表4和图4。

由图4可知,毛竹材各节间全壁厚单位面积的抗拉弹性模量 E_1 和极限抗拉强度 $\sigma_{c,\max}$ 随纤维分布密度而相应变化,自基部至梢部因纤维密度增大,使 E_1 和 $\sigma_{c,\max}$ 随之基本呈线性增大。因此,在宏观测试中所取试样部位不同或即使部位完全相同但所取试件在壁厚方向的尺寸不同,则结果相差很大。同种竹材只有同节、同壁厚试样即纤维和基体密度完全相同时测试结果才会相同,否则结果不具可比性。

5 结语

通过精确实验(表3)获得不同组分含量时竹材的宏观 E_1 和 $\sigma_{c,\max}$ 值及各组分含量后,求得组分材料各自的 E 和 σ 。即纤维弹性模量 E_f 为27.60GPa,极限抗拉强度 $\sigma_{f,\max}$ 为547.68MPa;基体弹性模量 E_m 为6.06GPa,相应于纤维达到最大应变时的抗拉强度 $(\sigma_m)\varepsilon_{f,\max}$ 为74.60MPa。

竹材是天然复合材料^[4],纤维含量不仅随秆高发生变化,而且在壁厚的各层内分布极不均匀,导致宏观测试结果分散性很大,

可靠性低。若按复合材料分析法,从微观分析单元着手,在测定试材的组分含量及相应性能指标后,既可省时省力,又能较精确地确定毛竹材不同部位及不同层次的宏观力学性能。因此,复合材料力学分析方法是研究高度各向异性材料力学性能的发展方向。

表4 毛竹各节间全壁厚单位面积抗拉弹性模量 E_1 和极限抗拉强度 $\sigma_{c,\max}$

Table 4 The elastic reactance modulus E_1 and maximum tensile strength $\sigma_{c,\max}$ of all walled thickness per unit between bamboo joints

节次	F_f	F_m	E_1/GPa	$\sigma_{c,\max}$ MPa
2	0.2237	0.7763	10.88	180.4
6	0.2654	0.7346	11.78	200.2
10	0.2693	0.7307	11.86	202.0
14	0.2960	0.7040	12.44	214.6
18	0.2984	0.7016	12.49	215.8
22	0.3217	0.6783	12.99	227.1
26	0.3524	0.6476	13.64	241.3
30	0.3732	0.6268	14.16	251.2
34	0.3799	0.6201	14.24	254.3

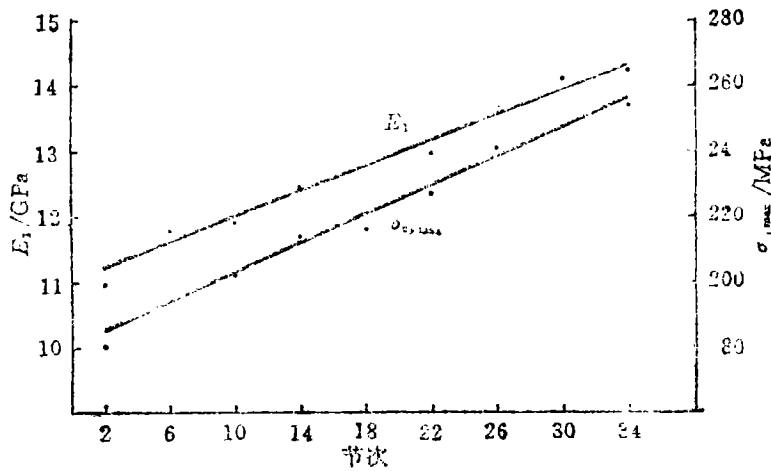


图4 毛竹秆各节间全壁厚单位面积抗拉弹性模量 E_1 及极限抗拉强度 $\sigma_{0,max}$ 变化

Fig. 4 Variety on graph of elastic reactance modulus E_1 and maximum tensile strength $\sigma_{0,max}$ of all walled thickness per unit between bamboo joints

参 考 文 献

- 1 喻成鸿, 张汝炜. 毛竹机械组织的排列. 植物学报, 1963, 11(4): 309~317
- 2 腰希申, 梁景森, 马乃训等. 中国主要竹材微观构造. 大连: 大连出版社, 1992, 151
- 3 [美]R. M. 琼斯著; 朱颐龄译校. 复合材料力学. 上海: 上海科学技术出版社, 1981, 66~67
- 4 洗杏娟, 洗定园. 竹材微观结构及其与力学性能的关系. 竹子研究汇刊, 1990, 9(3), 15

Yang Yunfang (Zhejiang Forestry College, Lin'an 311300, PRC) and Liu Zhikun. *Phyllostachys pubescens* Wood: Tensile Elastic modulus and Tensile Strength. *J Zhejiang For Coll*, 1996, 13(1): 21~27

Abstract: Natural bamboo is considered as a compound material formed by fiber and base. Micromechanics property is analysed to a vascular bundle and thin-walled tissue involved as a unit. The formula of macro elastic reactance modulus and tensile maximum strength are expressed by component material property. Analyses show that there is big variation of component material along the bamboo strunk and wall thickness. Component material (fiber and base) elastic reactance modulus are 27.60 and 6.06 GPa, tensile strength are 547.68 and 74.60 MPa. There is a closed relationship between bamboo macro elastic reactance modulus and number and distribution density of component material.

Key words: *Phyllostachys pubescens*; bamboo wood; tensile strength; modulus of elasticity