

压缩空气微爆破预处理对橡胶木单板染色效果的影响

胡极航, 刘君良

(中国林科院木材工业研究所, 北京 100091)

摘要: 为了提高木材的渗透性, 改善木材染色效果, 采用压缩空气微爆破进行橡胶木单板预处理, 探究微爆破压力、处理次数对单板染色效果的影响; 采用电镜和压汞分析法, 表征处理前后单板表面形貌及微观孔隙。结果表明, 处理压力对单板上染率和表面色深影响显著, 在优化工艺条件下(压力 0.4 MPa、爆破 4 次), 上染率和表面色深值分别提高 22.76%和 19.69%; 处理后木材的孔隙率和平均孔径均明显增大, 比表面积略大, 有利于染料的渗透。

关键词: 橡胶木; 单板; 压缩空气微爆破; 预处理; 木材染色; 上染率; 表面色深值

中图分类号: S781; S794.1; TS653.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-8654 (2019) 05-0011-05

Influence of Compressed-air Explosion Pretreatments on Dyeing Rubber Wood Veneers

HU Ji-hang, LIU Jun-liang

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

Abstract: Compressed-air explosion pretreatments were used to improve the permeability of rubber wood veneers. Dyeing effects of the rubber wood veneer samples before and after treatments were compared. Under different pressure and explosion times, surface characteristics and micro pore of the veneer samples were observed with electron microscopy and mercury intrusion porosimetry.

The results showed that the pressure of the compressed-air explosion treatments had significant effect on dye-uptake and surface darkness of the rubber wood veneer samples. Under optimal pretreatment conditions e.g. 0.4 MPa of air pressure for 4 times, the dye-uptake and surface darkness of the samples increased by 22.76% and 19.69%, respectively. The mercury intrusion porosimetry results showed that the porosity and average pore diameter of the samples increased significantly and the specific surface area was slightly enlarged after the pretreatment, which was useful for dyes to better penetrate into wood.

Key words: Rubber wood; veneer; compressed-air explosion; pretreatment; wood dyeing; dye-uptake; surface darkness

收稿日期: 2018-12-14; 修改日期: 2019-08-07

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金“木质复合材料与化学资源化利用领域增强专项——橡胶木多效防护关键技术”(CAFYBB2017ZX003-04)。

作者简介: 胡极航(1988—), 女, 助理研究员。Email: hujihang88@163.com。

木材的染色、浸渍等性能与木材渗透性密切相关, 提高木材渗透性的方法主要有化学法、生物法和物理法。木材细胞微爆破处理属于绿色环保的物理方法, 是在保持木材本身的物理力学性能和外观完整的条件下, 用高频微波及压缩空气等, 使木材

内的毛细管或纹孔等微观结构全部或者部分打开的一种预处理方法。

采用压缩空气进行微爆破处理过程，是向装有木材的罐体中充高压气体，再瞬间卸压，在木材内外的压差作用下，木材内部的高压气体形成高速气流，从内向外冲击，疏通、击破、击碎被沉淀物堵塞的部位、闭塞纹孔以及孔隙极小的塞缘，从而提高木材的渗透性。

橡胶木中由于有橡胶残留，影响其木材的渗透性，为了改善橡胶木单板的染色效果，笔者采用压缩空气微爆破进行单板预处理，主要探讨压缩空气微爆破次数与压力对单板染色效果的影响，采用模糊数学综合评价优化工艺参数，并通过扫描电子显微镜和压汞分析法，分析处理前后橡胶木单板表面微观结构以及孔隙结构的变化，旨在探究压缩空气微爆破预处理提高木材染色性能的机理，为后续研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1) 橡胶木 (*Hevea spp.*) 单板：采自海南，树龄约 30 a，割胶年限约 20 a，胸径 28~40 cm。随机抽取 50 株树木取材，并加工制成规格为 150 mm×100 mm×1.0 mm(长×宽×厚)的单板试件。气干密度 0.653 g/cm³，含水率 8%~12%，无腐朽、变色、节疤缺陷。

2) 染料：活性艳蓝 X-BR (Reactive Brilliant Blue X-BR)，外购。

3) 助剂：NaCl、Na₂CO₃，均为分析纯，外购。

1.2 主要设备与仪器

压缩空气微爆破设备：北京林业大学自行设计和制造，最大爆破额定压力为 2.0 MPa；高速万能粉碎机，电子天平，双光束紫外可见分光光度计，分光测色计，扫描电子显微镜，比表面积与孔隙率分析仪，压汞仪等。

1.3 试验方法

1.3.1 压缩空气微爆破预处理

将试件放置在密闭的压缩空气微爆破罐中，采用空气压缩机加压，当罐体内压力达到预设压力值后保持 10 min，使木材内部的压力与容器内的气体压力达到平衡，然后瞬间罐体释放压力，木材在内

外压差的作用下完成压缩空气微爆破过程；之后重复升压和卸压操作，直至达到设定的处理次数。

高速气流冲击力的大小和疏通阻塞部位的能力，取决于气流的流速、流体质量和冲击次数^[1-5]。根据文献报道，压力大于 1.0 MPa 或爆破次数超过 16 次，会导致木材的渗透性下降^[6-7]，因此，在压力 ≤1.0 MPa、爆破次数 ≤16 的范围内，设计 2 因素 4 水平的正交试验，参数见表 1。

表 1 正交试验因素及水平
Tab.1 Factors and levels of orthogonal tests

因子	水平			
	1	2	3	4
A 微爆破压力/MPa	0.4	0.6	0.8	1.0
B 微爆破次数	4	8	12	16

1.3.2 染色工艺及效果表征

对经过微爆破预处理试样和未处理对照样，均采用真空（-0.1 MPa、30 min）→加压（1.0 MPa、4 h）的浸渍染色工艺进行染色，染液质量分数为 3.0%、NaCl 用量 40 g/L、木材与染液体积比为 1:20。

每组处理试件数量为 10。

1.4 结果表征

1.4.1 染色性能

1) 上染率 评价染料在木材中上染和固着效果的指标（即染料利用率）^[8]。采用紫外可见分光光度计，分别测试染色后残液与原始染液的最大吸收波长处的吸光度。每组重复测试 3 次。

$$C_t = 100\% \times (A_0 - A_t) / A_0 \quad (1)$$

式中：A₀/A_t—原始染液/染色后残液最大吸收波长处的吸光度。

2) 表面色深 即木材表面颜色的深度。通常通过库贝尔卡—芒克 (Kubela-Munk) 公式(2)计算^[7]，以 K/S 值表征染色单板的表面色深值。K/S 值越大，表示颜色越深，反之颜色越浅。

$$K/S = \frac{(1 - R_\lambda)^2}{2R_\lambda} \quad (2)$$

式中：R—反射率；λ—波长；K—有色物质的反射系数；S—散射系数。

测定染色单板在最大吸收波长处 (λ=450 nm) 的反射率，并计算表面色深值 (K/S)。每组 10 个试件，各测试 5 个点，取其平均值。

1.4.2 木材微观形貌及结构表征

1) 在未处理对照样与压缩空气微爆破处理试样(10 mm×10 mm×10 mm)的径切面,真空离子喷金镀膜,测试电压为10 kV。利用扫描电子显微镜,对处理前后的单板试样进行微观形貌分析。

2) 将试样在(103±2)℃下干燥至绝干,粉碎并筛取60~80目木粉,用压汞法分析试样处理前后大毛细管系统孔隙结构的变化,测量其孔径、孔隙率和累计孔体积等参数。

2 结果与分析

2.1 预处理工艺参数对单板染色效果的影响

不同条件处理单板的上染率和表面色深值计算结果,列于表2。

表2 正交试验结果

Tab.2 Orthogonal experiment results				
试验号	微爆破压力/MPa	微爆破次数	上染率/%	表面色深值
1	0.4	4	21.09	6.14
2		8	22.81	6.13
3		12	23.61	5.35
4		16	23.24	5.30
5	0.6	4	23.00	5.58
6		8	22.28	5.27
7		12	23.77	5.30
8		16	24.57	5.31
9	0.8	4	23.98	5.21
10		8	24.29	5.42
11		12	23.98	5.39
12		16	24.58	5.36
13	1.0	4	24.91	5.20
14		8	24.72	5.14
15		12	23.80	5.21
16		16	24.38	5.20
对照组			17.81	5.13

由表2结果可知,处理试样的上染率和表面色深值均比对照组提高。对正交试验数据进行极差分析和方差分析(表3),其中微爆破压力的影响显著。

2.1.1 预处理工艺参数对单板上染率的影响

单板的上染率随着微爆破压力的增大而增大,如图1所示。这是由于在卸压瞬间,木材内部空气向外释放,对纹孔膜等薄弱部位产生冲击,使其产生裂隙;此外,压缩空气还冲散了附着在纹孔周围的沉积物或者侵填体等物质。以上两种效应共同作

表3 上染率和表面色深正交试验方差分析结果

Tab.3 Analysis of variance for dye-uptake and surface darkness values (K/S)

因素	上染率		表面色深	
	极差 R_i	F 值	极差 R_i	F 值
微爆破压力	0.0177	4.1269*	0.5449	3.3550*
微爆破次数	0.0095	1.0421	0.2360	0.9278

注: $F_{\alpha=0.01}$ 临界值为2.81; *表示显著。

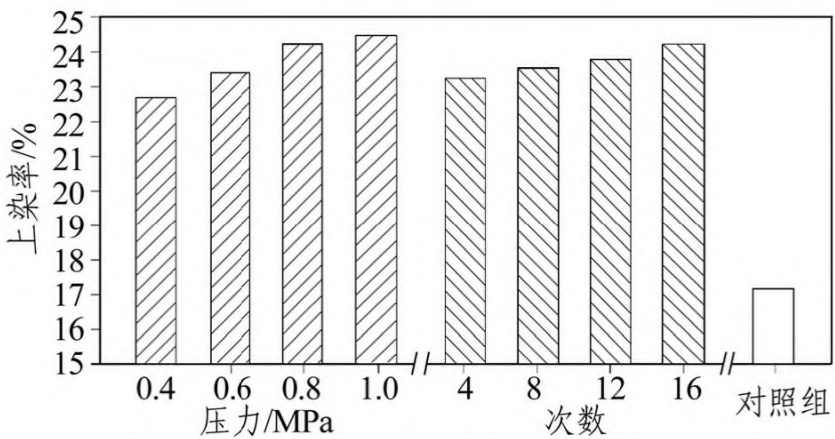


图1 单板上染率随处理压力与次数的变化

Fig.1 Veneer dye-uptake vs. treating pressure and times

用,使木材内部疏导通道更加通畅,从而提高木材的渗透性^[2]。压力越大,渗透性改善程度越大^[1,3]。

随着微爆破处理次数的增加,上染率增加,但增加效果有限。其原因是压缩空气微爆破次数增加到一定程度时,木材内部流体通道已经基本形成,木材内部压力能从已形成的流体通道基本释放。

结合图1和表3中可知,压缩空气微爆破压力对单板上染率的影响显著,而微爆破次数的影响较小。以上染率为目标直观分析结果,可得较优工艺处理参数是:压力1.0 MPa、次数16次。

2.1.2 预处理工艺参数对单板表面色深值的影响

单板表面色深值随着微爆破压力增大而逐渐减小,如图2所示。

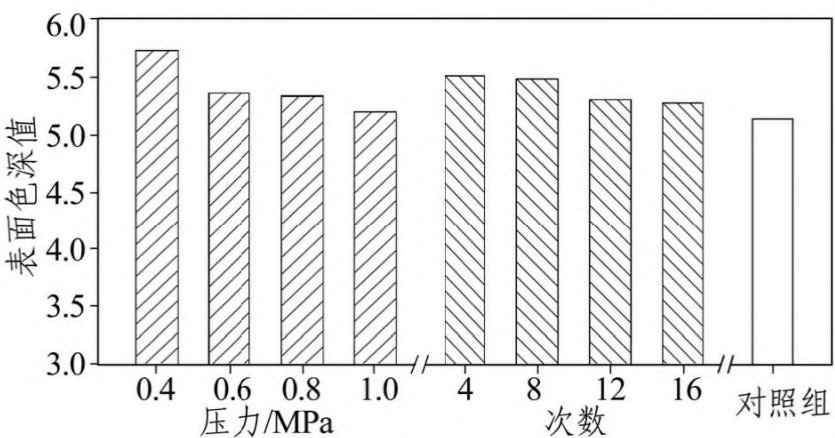


图2 单板表面色深值随处理压力与次数的变化

Fig.2 Veneer surface darkness vs. treating pressure and times

压力为 1.0 MPa 时表面色深值最小,这是因为随着压力的增大,木材内外部的压力差变大,气流速度加快,因此产生的冲击力越大,引起木材细胞壁和纹孔膜的薄弱组织形成的孔隙或裂缝增加,构成新的流体通道^[8],染料更容易进入单板内部。因此,残留在单板表面的染料浓度降低,表面色深值下降。

随着压缩空气微爆破次数的增加,表面色深值略有降低,但变化不明显。这是由于压缩空气微爆破次数的增加,闭塞纹孔和射线薄壁细胞等薄弱组织在不断的气流冲击下破裂的可能性和程度增加^[9],木材内部的结构疏通效果增强,有利于染料进入木材内部。

由图 2 和表 3 中可知,压缩空气微爆破压力对单板表面色深值的影响显著,而微爆破次数的影响较小。以表面色深值为目标的直观分析结果,可得较优工艺参数是:压力 0.4 MPa、次数 4 次。

2.2 压缩空气微爆破工艺参数优化

模糊数学综合评判方法,是利用模糊变化和最大隶属度原则,考虑在多种因素的影响下,对被评价事物进行综合评价。

微爆破处理工艺优化要综合考虑加工成本(上染率)和染色效果(表面色深值)。以上染率和表面色深值为目标函数,运用模糊数学综合评价方法,对微爆破处理单板染色效果进行综合评判和优化,得出最佳微爆破处理工艺参数。评价因子为微爆破压力与次数,评价结果为上染率和表面色深值。

2.2.1 评判与优化矩阵的建立

在建立因子集与评价集后,以每个评价因子对评价集的隶属度建立模糊关系矩阵。将有量纲的数据(上染率和表面色深值)变换成评语等级的隶属度,称为指标值的模糊化。

以微爆破压力因素为例,根据表 2 依次计算 4 个压力水平(0.4、0.6、0.8、1.0 MPa)所对应的上染率平均值,分别为 $k_1=0.2269$ 、 $k_2=0.234$ 、 $k_3=0.2421$ 、 $k_4=0.2446$ 。将 $k_1 \sim k_4$ 加权平均处理,即为:

$$\begin{aligned} k_1+k_2+k_3+k_4 &= 0.9475 \\ r_{11} &= k_1/0.9475=0.2394 \\ r_{12} &= k_2/0.9475=0.2470 \\ r_{13} &= k_3/0.9475=0.2555 \\ r_{14} &= k_4/0.9475=0.2581 \end{aligned}$$

假设压缩空气微爆破压力与次数两个因素关于上染率和表面色深两个指标的评价结果,分别用模糊矩阵 R_1 和 R_2 表示,则 $r_{11} \sim r_{14}$ 构成模糊矩阵 R_1 的第 1 行;按照上述步骤,对压力因素 4 个水平所对应的表面色深均值进行模糊化变换,其结果组成矩阵 R_1 的第 2 行。同理,可求出微爆破次数因素的模糊矩阵 R_2 。

微爆破压力与次数关于上染率和表面色深值 2 个评价指标的模糊矩阵表示为:

$$\begin{aligned} R_1 &= \begin{bmatrix} 0.2394 & 0.2470 & 0.2555 & 0.2581 \\ 0.2650 & 0.2482 & 0.2470 & 0.2398 \end{bmatrix} \\ R_2 &= \begin{bmatrix} 0.2453 & 0.2483 & 0.2511 & 0.2553 \\ 0.2556 & 0.2540 & 0.2457 & 0.2447 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

2.2.2 权重向量的确定

综合评判的关键在于各个评判指标权重向量的确定。本试验采用专家调查法,确定上染率和表面色深值两个评价指标的权重向量^[12]。研究的主要目标是提高单板表面色深值,故将上染率、表面色深值指标的权重向量分别选取为 0.2 和 0.8。

2.2.3 综合评判与工艺优化

假设权重向量 $A=(0.2, 0.8)$ 模糊矩阵 B 是综合评判的结果,则

$$B=A \circ R$$

假设微爆破处理压力的综合评判矩阵用模糊矩阵 B_1 来表示,则:

$$\begin{aligned} B_1 &= \{b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{14}\} \\ b_{11} &= (0.2 \wedge 0.2394) \vee (0.8 \wedge 0.2650) = 0.2650 \\ b_{12} &= (0.2 \wedge 0.2470) \vee (0.8 \wedge 0.2482) = 0.2482 \\ b_{13} &= (0.2 \wedge 0.2555) \vee (0.8 \wedge 0.2470) = 0.2470 \\ b_{14} &= (0.2 \wedge 0.2581) \vee (0.8 \wedge 0.2398) = 0.2398 \end{aligned}$$

对 $b_{11} \sim b_{14}$ 进行加权平均处理,即可得到微爆破处理压力的综合评判结果 B_1 :

$$B_1 = \{0.2650, 0.2482, 0.2470, 0.2398\}$$

选择 B_1 中最大的元素为最优水平,因此,最优微爆破处理压力为水平 1,即压力为 0.4 MPa 时,上染率和表面色深值 2 个综合评价指标为最优。

假设微爆破处理次数的综合评判矩阵用模糊矩阵 B_2 来表示,则:

$$\begin{aligned} B_2 &= \{b_{21}, b_{22}, b_{23}, b_{24}\} \\ b_{21} &= (0.2 \wedge 0.2453) \vee (0.8 \wedge 0.2556) = 0.2556 \end{aligned}$$

$$b_{22}=(0.2 \wedge 0.2483) \vee (0.8 \wedge 0.2540)=0.2540$$

$$b_{23}=(0.2 \wedge 0.2511) \vee (0.8 \wedge 0.2457)=0.2457$$

$$b_{24}=(0.2 \wedge 0.2553) \vee (0.8 \wedge 0.2447)=0.2447$$

对 $b_{21} \sim b_{24}$ 进行加权平均处理, 即可得到微爆破处理次数的综合评判结果 B_2 :

$$B_2=\{0.2556, 0.2540, 0.2457, 0.2447\}$$

选择 B_2 中最大的元素为最优水平, 因此, 最优微爆破次数为水平 1, 即微爆破次数为 4 次时, 上染率和表面色深值 2 个综合评价指标为最优。

综上所述, 综合评价上染率与表面色深值的最优微爆破工艺条件为: 压力 0.4 MPa、次数 4 次, 处理单板的上染率为 21.09%, 表面色深值为 6.14。

2.3 微观形貌和结构表征

选取压缩空气微爆破优化条件 (压力 0.4 MPa, 爆破 4 次) 处理的单板, 与对照单板进行表面形貌观察, 如图 3 所示。

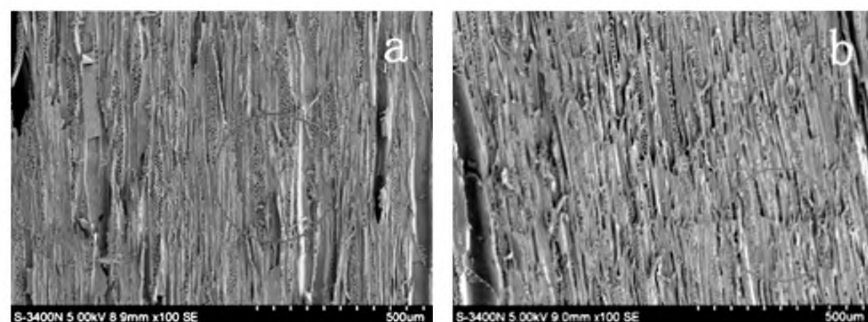


图3 压缩空气微爆破处理前后橡胶木单板表面形貌
Fig.3 Surface characteristics of veneers before and after compressed-air explosion treatments

未处理对照单板表面 (图 3a) 非常平整、光滑, 而处理单板表面 (3b) 纤维间隙变大。这是由于压缩空气微爆破产生高速气流冲击的结果^[3], 为染料提供了更多的附着位点, 增加了染料流通的通道。因此, 预处理单板的上染率和表面色深值均有提高。

未处理对照单板和处理单板的孔隙测试结果, 列于表 4。

表4 微爆破处理前后橡胶木单板压汞分析结果
Tab.4 MIP test results for veneers before and after compressed-air explosion treatments

样品	总孔面积/($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	平均孔径/nm	孔隙率/%
未处理单板	18.257	193.9	54.19
微爆破处理单板	18.878	252.2	62.11

相比未处理单板, 微爆破处理单板的孔隙率提高了 14.62%, 处理单板的总孔面积小幅增加, 平均孔径增大。试件处理前后的孔径分布如图 4 所示。

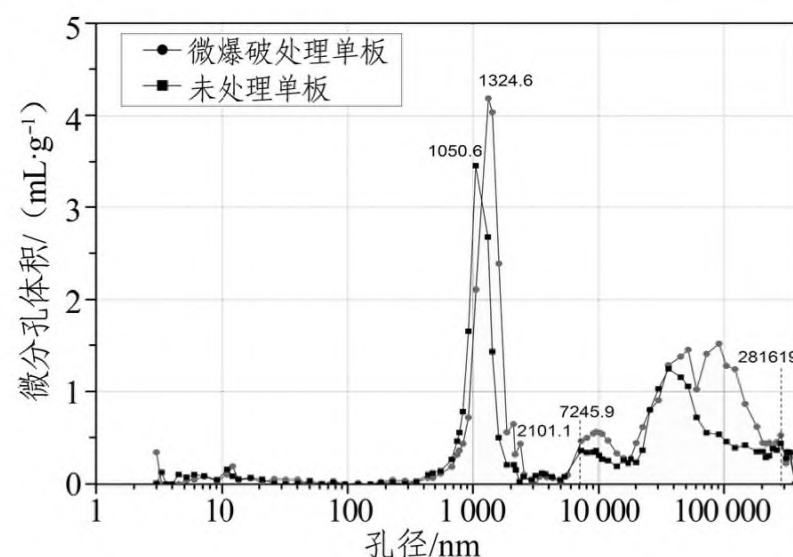


图4 微爆破处理前后的孔径与微分孔体积关系
Fig.4 Log differential intrusion versus pore diameter of veneers before and after compressed-air explosion

处理单板与未处理单板在 7245.9~281 619 nm 范围内, 孔径峰高存在明显差异, 说明在此范围内, 微爆破处理材孔的数量明显多于未处理材, 由于微爆破瞬间释放压力产生的高速气流, 使得橡胶木单板的纹孔和胞间层等薄弱环节产生裂隙或破损, 因而产生了一定量的大孔, 有利于液体在木材中的流通与渗透, 从而改善了木材的液体浸注性能^[13]。

在峰值为 1 050.6 nm (未处理单板) 和 1 324.6 nm (微爆破处理单板) 处孔径分布未发生明显变化, 但是微爆破处理材峰高明显高于未处理材。说明在此范围内, 微爆破处理单板的中孔数量多于未处理单板, 为染料渗透木材提供了更多通道。由于大孔和中孔数量的增加, 使得压缩空气微爆破处理能够有效提高橡胶木单板的染色效果。

3 结论

1) 根据单板上染率和表面色深值, 综合评价最优的压缩空气微爆破工艺条件为: 压力 0.4 MPa, 次数 4 次。此工艺条件下, 橡胶木单板的上染率为 21.09%, 表面色深值为 6.14; 比未处理单板分别提高了 22.76%、19.69%。

2) 微爆破处理后橡胶木单板的孔隙率和平均孔径均明显增大, 比表面积略大于未处理单板, 有利于染料的渗透。

3) 压缩空气微爆破预处理能够有效改善木材的染色效果, 且处理工艺为绿色环保的物理方法, 为今后进一步研究改性木材预处理方法奠定理论基础。

(下转第 24 页)

- [3] 周海宾. 中国木结构产业的现状及发展(一) [J]. 木材工业, 2012, 26(2): 1-5.
ZHOU H B. Current and future status of wood structure in China (Part I) [J]. China Wood Industry, 2012, 26(2): 1-5.
- [4] 任海青, 周海宾, 费本华, 等. 现代木结构住宅在中国的发展机遇和挑战[J]. 木材加工机械, 2006(1): 28-31.
- [5] 任海青, 江泽慧, 费本华, 周海宾. 中国现代木结构住宅未来发展之路[J]. 木材工业, 2006, 20(2): 45-47.
REN H Q, JIANG Z H, FEI B H, ZHOU H B. Future development path of modern wood frame housing in China[J]. China Wood Industry, 2006, 20(2): 45-47.
- [6] 陶以明. 大力发展中国特色的木结构产业[J]. 国际木业, 2017(6): 10-12.
- [7] 龚迎春, 王朝晖, 江京辉, 等. 杉木目测等级规格材足尺抗压和拉伸强度的设计值研究[J]. 林业工程学报, 2017, 2(2): 22-27.
GONG Y C, WANG Z H, JIANG J H, et al. Design values of compressive and tensile strength for visually graded Chinese fir dimension lumber[J]. China Forestry Science and Technology, 2017, 2(2): 22-27.
- [8] 国家林业和草原局. 中国森林资源报告(2014—2018) [M]. 北京: 中国林业出版社, 2019.
- [9] 中国木业发展现状与展望[EB/OL]. <https://news.chinabm.cn/2018/0816468717.shtml> (2018-08-16) [2018-09-18].
- [10] 朱光前. 2017 年中国木材进口及中非木材贸易简况[J]. 国际木业, 2018(2): 14-21.
- [11] 龚迎春, 任海青. 正交胶合木的特性及发展前景[J]. 世界林业研究, 2016, 29(3): 71-74.
GONG Y C, REN H Q. Characteristics and development prospect of cross-laminated timber[J]. World Forestry Research, 2016, 29(3): 71-74.
- [12] 于文吉, 余养伦, 周月, 任丁华. 小径竹重组结构材性能影响因子的研究[J]. 林产工业, 2006, 33(6): 24-28.
YU W J, YU Y L, ZHOU Y, REN D H. Studies on factors influencing properties of reconstituted engineering timber made from small-sized bamboo[J]. China Forest Products Industry, 2006, 33(6): 24-28.
- [13] 环境保护部. 大力推动生活方式绿色化加快推进生态文明建设——解读《关于加快推动生活方式绿色化的实施意见》[J]. 交通节能环保, 2015, 11(6): 1-4.
- [14] 王晓欢, 费本华, 赵荣军, 周海宾. 木结构建筑节能发展与研究现状[J]. 建筑节能, 2008, 36(3): 24-28.
WANG X H, FEI B H, ZHAO R J, ZHOU H B. Development and research status of energy-efficiency of wood construction[J]. Construction Conserves Energy, 2008, 36(3): 24-28.
- [15] 周海宾. 中国木结构产业 2015 年—2020 年市场趋势[J]. 国际木业, 2015(11): 2-7.
- [16] 龚迎春, 蔡芸, 任海青. 我国木结构产业发展机遇与挑战[J]. 林产工业, 2016, 43(7): 6-10.
GONG Y C, CAI Y, REN H Q. Opportunity and challenge of wood structure development in China[J]. China Forest Products Industry, 2016, 43(7): 6-10.
- [17] ZHOU Q, GONG M, YING H C, et al. Measurement of rolling shear modulus and strength of cross laminated timber fabricated with black spruce [J]. Construction and Building Materials, 2014, 64 (30): 379-386.
- [18] 岳孔, 杨会峰, 陆伟东, 等. 拱形胶合木人行桥的设计及制作关键技术[J]. 林业实用技术, 2010(11): 53-54.
- [19] 王希珺, 李征, 何敏娟. 基于承载力的多层钢木混合结构抗震设计方法[J]. 建筑结构, 2017, 47(23): 29-36.
WANG X J, LI Z, HE M J. Seismic design method of multi-story steel-wood composite structure based on bearing capacity[J]. Seismic design method of multi-story steel-wood composite structure based on bearing capacity[J]. Building Structure, 2017, 47(23): 29-36.
- [20] 祝恩淳, 牛爽, 乔梁, 等. 木结构可靠度分析及木材强度设计值的确定方法[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(2): 28-36.
ZHU E C, NIU S, QIAO L, et al. Reliability analysis of wood structures and method for determining design strength value of timber[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(2): 28-36.

(责任编辑 姜征、向琴)

(上接第15页)

参考文献:

- [1] 郭月红. 汽蒸-微爆破预处理对巨尾桉干燥特性的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [2] 白雪, 杨永福, 王天龙, 等. 压缩空气微爆破处理对杨木渗透性的影响[J]. 林产工业, 2012(3): 17-19.
BAI X, YANG Y F, WANG T L, et al. 2012. Effects of compressed air explosion treatment on the permeability of poplar[J]. China Forest Products Industry, 29(3): 17-19, 29.
- [3] 余梦洁. 微爆破预处理对落叶松木材干燥及脱脂效果的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [4] 王海元, 王天龙, 李黎, 等. 微爆破对刺槐干燥速率和渗透性的影响[J]. 林业机械与木工设备, 2013(4): 26-28.
WANG H Y, WANG T L, LI L, et al. Effect of air-compressed explosion on drying rate and permeability of Locust[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2013(4): 26-28.
- [5] 李艳. 微爆破处理对杨木薄板渗透性及软化效果的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [6] 刘江坚. 织物间歇式染色技术[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2012.
- [7] 房宽峻, 王建庆. 染料应用手册[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2013.
- [8] 白雪. 微爆破处理对杨木渗透及力学性能影响的初步研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [9] 王海元. 微爆破预处理对杉木、刺槐渗透性和干燥特性的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [10] 苏宏华, 姚正军. 多指标正交试验的模糊分析法[J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36(1): 29-33.
SU H H, YAO Z J. Fuzzy analysis method for Multi-Index orthogonal test[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2004, 36(1): 29-33.
- [11] 许美君, 李黎, 罗斌. 杨木磨削力的影响因素及最佳磨削参数研究[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(1): 122-126.
XU M J, LI L, LUO B. 2015. Factors affecting sanding force and optimal sanding parameters of Populus[J]. Journal of Beijing Forestry University, 37(1): 122-126.
- [12] 王晖, 陈丽, 陈垦, 等. 多指标综合评价方法及权重系数的选择[J]. 广东药学院院报, 2007, 23(5): 583-589.
- [13] 何盛. 微波处理改善木材浸注性及其机理研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.

(责任编辑 向琴、张鹏)