

PMUF 树脂复合硼、硅化物改性杨木的性能

刘强强^{1,2}, 柴宇博^{1,2}, 刘君良¹, 吕文华^{1,2}

(1. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091; 2. 中国林业科学研究院林业新技术研究所, 北京 100091)

摘要: 采用苯酚-三聚氰胺脲醛 (PMUF) 树脂及其与硼、硅化物的复合改性剂 (PMUF-B、PMUF-Si) 浸渍处理人工林杨木。结果表明: 与未处理材相比, PMUF、PMUF-B 及 PMUF-Si 三种改性材的密度、抗弯性能、硬度均显著提高, 吸湿率和吸水率显著降低, 抗胀率均在 50% 以上, 冲击韧性略有降低, 氧指数均提高 1 倍以上, 甲醛释放量均 ≤ 0.3 mg/L, 总挥发性有机化合物 (TVOC) 释放率均 ≤ 0.20 mg/(m²·h), 耐腐性能显著提高。

关键词: 杨木; 复合改性剂; 苯酚-三聚氰胺脲醛树脂; 硼化物; 硅化物

中图分类号: S781.7; S792.11; TS65 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654 (2020) 02-0001-05

Properties of Poplar Wood Modified with PMUF Resin and PMUF Compounds

LIU Qiang-qiang^{1,2}, CHAI Yu-bo^{1,2}, LIU Jun-liang¹, LYU Wen-hua^{1,2}

(1. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. Research Institute of Forestry New Technology, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Samples of poplar wood were respectively impregnated with Phenol-Melamine-Urea-Formaldehyde resin (PMUF), PMUF-boron (PMUF-B) compound and PMUF-silicon (PMUF-Si) compound, which were prepared by the authors at their laboratory. Results showed the density, MOE, MOR, hardness of the samples were increased, meanwhile, moisture absorption rate and water uptake rate were reduced. The anti-swelling efficiency of the modified wood samples was above 50%. The impact toughness of the modified wood samples was slightly decreased. The oxygen index of the modified wood samples was above one time higher than the controlled samples. The formaldehyde emissions of the modified wood samples were lower than 0.3 mg/L. The total volatile organic compounds of the modified wood samples were lower than 0.20 mg/(m²·h). The decay resistance of the modified wood samples was significantly improved.

Key words: poplar wood; compound; phenol-melamine-urea-formaldehyde (PMUF) resin; boride; silicide

杨树是我国主要人工林树种之一, 广泛分布于

北方地区, 目前蓄积面积达 800 多万 hm²[1]。但杨树木材存在材质疏松、尺寸不稳定、力学性能较差、易腐朽等问题, 无法替代优质天然林木材用于实木地板、门窗及家具等高附加值产品的加工, 应用范围受限。采用水溶性树脂对木材进行浸渍处理, 其成本较低, 工艺相对简单, 且提高木材密度、尺寸稳定性、强度及硬度的效果显著[2-4], 近年来成为较流行的一种改性方法, 逐渐在生产中推广和应用。

收稿日期: 2019-11-13; 修改日期: 2020-02-04

基金项目: 中国林业科学研究院基本科研业务费专项资金项目“防护型人工林杨木浸渍增强材制造技术”(CAFYBB2017ZD003); 中国林业科学研究院基本科研业务费专项资金项目“二氧化硅木材改性剂制备技术及性能研究”(CAFYBB2018SZ013)。

作者简介: 刘强强 (1994—), 男, 硕士研究生。Email: 1214802312@qq.com

责任作者: 柴宇博, 男, 副研究员。Email: chaiyubo@caf.ac.cn

随着国内外木材改性技术的发展及产品的多样化,市场对多功能改性材的需求日益迫切。通过将水溶性树脂与其他无机功能性助剂复合,可同时赋予木材优良的物理力学、阻燃及防腐性能,是目前实现木材多功能一体化改性的新趋势。鉴于此,笔者在前期研究基础之上^[5-7],研制出苯酚-三聚氰胺脲醛(PMUF)树脂及其与硼、硅化物相复合的新型改性剂(PMUF-B, PMUF-Si),通过对人工林杨木进行浸渍处理,并对改性材各项性能指标进行测定,以期全面了解3种改性剂对人工林杨木的改性效果,为杨木的提质优化与功能拓展开辟新径。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1) 大青杨(*Populus ussuriensis*): 采自吉林省白河林业局。试件规格 1 000 mm×100 mm×30 mm(纵向×径向×弦向),气干密度 0.383 g/cm³,含水率 10.6%,数量 40 块,干燥至绝干备用。

2) 苯酚、三聚氰胺、甲醛、尿素、硼酸、硼砂、硅酸钠溶液等化学试剂,均外购。

3) 菌种:密粘褶菌和彩绒革盖菌,来源于广东省林科院。

1.2 仪器设备

真空加压浸渍罐;电热鼓风干燥箱;数字黏度计;pH计;电子天平;螺旋测微仪;动态水分吸附仪;万能力学试验机;氧指数测定仪。

1.3 试验方法

1.3.1 改性剂制备

1) PMUF 树脂改性剂:以苯酚、三聚氰胺、尿素和甲醛为主要原料,NaOH 为催化剂,在 80~90 ℃的条件下,合成 PMUF 树脂改性剂。

2) PMUF-B 复合改性剂:以苯酚、三聚氰胺、尿素、甲醛、硼酸、硼砂为主要原料,NaOH 为催化剂,一缩二丙二醇为阻聚剂,在 70~85 ℃的条件下,合成 PMUF-B 复合改性剂。

3) PMUF-Si 复合改性剂:以苯酚、三聚氰胺、尿素、甲醛、硅酸钠溶液为主要原料,NaOH 为催化剂,聚乙二醇为阻聚剂,在 65~80 ℃的条件下,合成 PMUF-Si 复合改性剂,硅酸钠溶液质量分数为 50%。

制备的 3 种改性剂的主要性能指标列于表 1,分别加水稀释成质量分数为 30%的改性剂溶液,备用。

表 1 制备三种改性剂的性能指标
Tab.1 Characteristics of three kinds of PMUF-based modifiers

改性剂类别	黏度/mPa·s	固体含量/%	水溶倍数	pH 值	储存期/d
PMUF	26.5	52.3	8	10.2	30
PMUF-B	18.2	54.8	5	9.5	25
PMUF-Si	14.8	55.6	10	11.0	28

1.3.2 改性处理

取 10 块未处理试件作为对比空白样,其余 30 块分成 3 组,每组 10 块,分别采用上述 3 种改性剂进行处理。具体步骤为:

根据前期试验,将试件置于真空加压浸渍罐中,先抽真空至-0.095 MPa,保持 45 min;将药液注入罐中,解除真空后,施压 0.8 MPa 保持 2 h,使试件完全被浸透后卸压取出,气干至含水率 30%以下,再放入干燥箱烘至恒重。

1.4 性能检测

1) 物理性能 ① 测试改性处理前、后试件的绝干质量,按照公式(1),计算改性材的增重率(WPG)。② 按照 GB/T 1933—2009《木材密度测定方法》,测试试件的气干密度。③ 利用动态水分吸附仪,测试试件在相对湿度 0 至 90%过程中的吸湿率变化。④ 按照 GB 1934.1—2009《木材吸水性测定方法》,测试试件经不同时间水浸泡后的吸水率变化。⑤ 按照 GB/T 1934.2—2009《木材湿胀性测定方法》,测试试件从全干到气干(相对湿度 65%、温度 20 ℃)吸湿稳定后,及从全干到吸水稳定后的体积湿胀率,按照公式(2)计算抗胀率(ASE)。

以上各性能指标重复测试 10 个试件。

$$WPG = \frac{m_a - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$ASE = \frac{S_c - S_a}{S_c} \times 100\% \quad (2)$$

式中:WPG—试件的增重率,%; m_0 、 m_a —试件浸渍前、后的绝干质量,g;ASE—改性材试件的抗胀率,%; S_c 、 S_a —改性前、后试件的体积湿胀率,%。

2) 力学性能 按照 GB/T 1936.1—2009《木材抗弯强度试验方法》、GB/T 1936.2—2009《木材抗弯

弹性模量测定方法》、GB/T 1940—2009《木材冲击韧性试验方法》、日本 JIS Z 2101—2009《木材的试验方法》，分别测试抗弯强度（MOR）、抗弯弹性模量（MOE）、冲击韧性及表面硬度。各性能指标重复测试 15 个试件。

3) 阻燃性能 按照 GB/T 2406—2009《塑料 用氧指数法测定燃烧行为》测试试样的氧指数，重复测试 20 个试件。

4) 甲醛释放及 TVOC 释放 按照 GB/T 17657—2013《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》，测试甲醛释放量；按照 HJ 571—2010《环境标志产品技术要求 人造板及其制品》，测试总挥发性有机化合物（TVOC）释放率。各重复测试 10 个试件。

5) 耐腐性能 按照 GB/T 13942.1—2009《木材耐久性能 第1部分：天然耐腐性实验室试验方法》，测试耐腐性，重复测试 30 个试件。

2 结果与分析

2.1 物理性能

1) 增重率和密度

改性剂的填充使木材增重，从而提高木材密度。改性处理前后杨木的增重率和密度变化见表 2。

表 2 杨木改性处理前后的增重率和密度
Tab.2 WPG and densities of untreated and treated wood samples

指标	未处理材	PMUF 改性材	PMUF-B 改性材	PMUF-Si 改性材
增重率/%	—	56.8	57.4	58.2
密度/(g·cm ⁻³)	0.383	0.605	0.612	0.628

由表 2 可知，3 种改性材的平均增重率均在 50% 以上，相对未处理材增重明显，说明 3 种改性剂对木材的渗透性良好，且干燥后能够固着在木材内部。3 种改性材的气干密度均达到 0.60 g/cm³ 以上，比未处理材提高了 56%~64%。

2) 吸湿率和吸水率

在相对湿度从 0 升至 90% 过程中，改性材及未处理材试件吸湿率变化，如图 1 所示。

图 1 显示，无论是改性材还是未处理材，木材吸湿率均随相对湿度的提高而逐渐增大；经过改性处理的试材，吸湿率均显著降低。在相同湿度条件

下，4 类试件的吸湿率由高到低排序为：未处理材 > PMUF-Si 改性材 > PMUF-B 改性材 > PMUF 改性材。

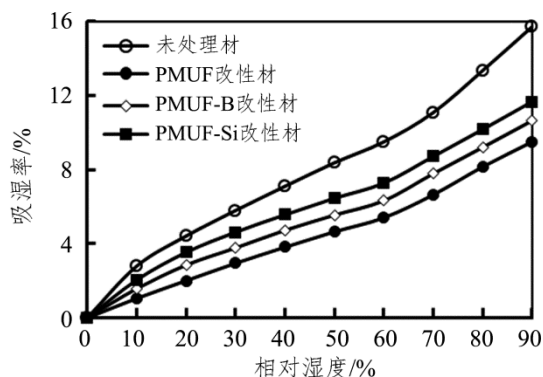


图 1 改性材及未处理材在不同湿度环境中的吸湿率

Fig.1 Moisture contents of treated and untreated wood samples under different humidity conditions

3 组改性材及未处理材试件在不同浸水时间后，吸水率的变化如图 2 所示。

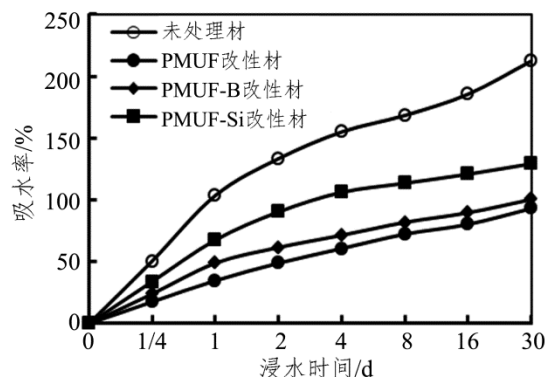


图 2 改性材及未处理材在不同浸水时间后的吸水率

Fig.2 Water absorption rate of treated and untreated wood samples with different soaking time

由图 2 可知，无论是改性材还是未处理材，木材吸水率均随浸泡时间的延长而逐渐增大；改性剂处理的木材，吸水率均显著降低。在相同的浸泡时间条件下，4 类试件的吸水率由高到低排序为：未处理材 > PMUF-Si 改性材 > PMUF-B 改性材 > PMUF 改性材。

木材吸湿或吸水后，引起其细胞壁的膨胀，从而导致木材尺寸不稳定。只有降低木材的吸湿或吸水率，方可提高其抗胀率和尺寸稳定性。

由改性材的抗胀率（图 3）可以看出，从全干到气干（相对湿度 65%、温度 20 ℃）吸湿稳定后，以及从全干到吸水稳定后，3 组改性材的抗胀率均在

50%以上,表现出良好的尺寸稳定性。主要原因是PMUF树脂及其与硅、硼化物的复合改性剂浸入木材后,在干燥过程中,树脂分子间及树脂与木材间发生交联作用,部分树脂包覆硼、硅离子沉积在木材细胞壁表面和细胞腔内,既对木材细胞壁起充胀作用,又可阻塞水分通道,对水分的吸收形成阻碍,同时也抑制了细胞壁的进一步膨胀,从而达到降低木材的吸湿、吸水性,使其抗胀率和尺寸稳定性提高的目的^[8]。

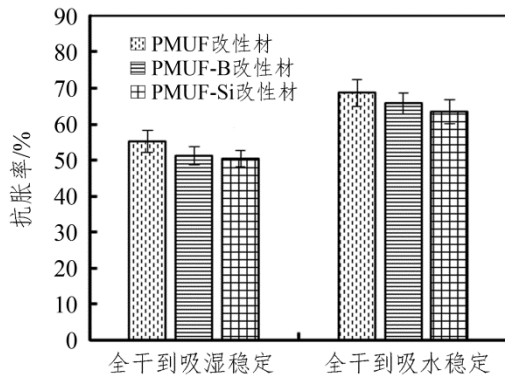


图3 3组改性材的抗胀率

Fig.3 ASE of treated wood samples

另外,由图1~3还可看出,经PMUF-Si和PMUF-B的改性材,其吸湿率和吸水率均大于PMUF改性材,抗胀率均小于PMUF改性材,这主要是由于前两种复合改性材的细胞壁表面,存留部分未被树脂包覆的硼、硅化物,二者容易吸收水分子所致。

2.2 力学性能

1) 抗弯性能

3组改性材及未处理材试件的抗弯性能,见图4。

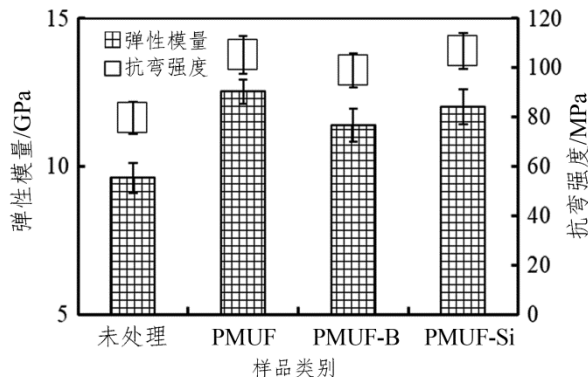


图4 改性材及未处理材的抗弯弹性模量和抗弯强度

Fig.4 MOE and MOR of treated and untreated wood samples

图4显示,与未处理材相比,PMUF、PMUF-B及PMUF-Si 3组改性材的MOE分别提高了30.4%、18.5%、25.1%;MOR分别提高了32.0%、24.0%、33.8%。

说明经过3种改性剂处理后,木材的抗弯性能均有不同程度的提高,主要归因于改性剂的填充对木材的增重、增密作用^[9]。

2) 表面硬度和冲击韧性

3组改性材及未处理材试件的表面硬度和冲击韧性测试结果,如图5所示。

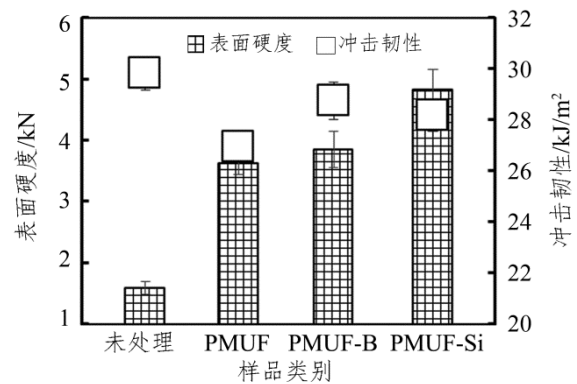


图5 改性材及未处理材的表面硬度和冲击韧性

Fig.5 Hardness and impact toughness of treated and untreated wood samples

图5显示,与未处理材相比,PMUF、PMUF-B及PMUF-Si改性材的表面硬度分别提高了128.3%、141.5%、205.0%。密度增加是木材表面硬度提高的主要原因,沉积在木材内部的PMUF树脂,固化后形成牢固的支化聚合物,具有增强木纤维和树脂预聚物之间附着力和相容性的作用^[10],这种作用协同树脂对木材的增密效应,促成了改性材硬度的大幅度增加。而PMUF-Si改性材的表面硬度增幅最大,是因为硅化物首先提高了PMUF树脂固化后的成膜硬度,二者复合后,进一步加强PMUF对木材的增硬作用。

从图5还可看出,PMUF、PMUF-B及PMUF-Si改性材的冲击韧性分别为26.95 kJ/m²、28.74 kJ/m²、28.16 kJ/m²,比未处理材(29.82 kJ/m²)降低了9.6%、3.6%、5.6%。分析原因是PMUF树脂及其复合改性剂在木材受到外力冲击时,会显著抑制纤维素分子链的相对移动,导致纤维网络的应力集中,从而增加了木材脆性^[11],降低了木材韧性。

2.3 阻燃性能

材料在氧氮混合气流中进行有焰燃烧,所需的最低氧浓度(氧指数)越大,表明材料的阻燃性越好。改性前后杨木的氧指数测试结果显示,未处理材为22.8%。而PMUF、PMUF-B及PMUF-Si改性材的氧指数,分别为46.5%、68.5%和56.3%,较未处理材提高了103.9%、200.4%、146.9%,且3种改性材的氧指数均大于27%。

主要原因是,PMUF树脂中的三聚氰胺属氮系阻燃剂,遇强热分解释放出 N_2 等不可燃气体,稀释了木材表面的氧气浓度,减缓了木材的热解速度,达到良好的阻燃效果^[12];硼化物在木材燃烧时,具有促进成炭的作用,形成的炭层覆盖在木材表面,可有效抑制火焰蔓延^[13],与PMUF复合改性木材,二者的阻燃协同效应进一步提高了木材的阻燃功能;硅化物在高温条件下,会在木材表面形成含有—Si—O—或—Si—C—键的无机隔氧绝热保护层,阻止燃烧分解产物外逸,同时又能抑制木材的热分解^[14],与PMUF复合后,同样可发挥出良好的阻燃协同作用。

2.4 甲醛释放及TVOC释放

改性前后杨木的甲醛释放及TVOC释放测试结果,见表3。

表3 杨木改性处理前后的甲醛释放及TVOC释放

Tab.3 Formaldehyde and TVOC emissions from untreated and treated wood samples

指标	未处理材	PMUF 改性材	PMUF-B 改性材	PMUF-Si 改性材
甲醛释放量/($mg \cdot L^{-1}$)	—	0.3	0.3	0.2
TVOC释放率/[$mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$]	—	0.15	0.10	0.12

由表3可知,3种改性木材的甲醛释放量均 ≤ 0.3 mg/L ;总挥发性有机化合物(TVOC)释放率均 ≤ 0.20 $mg/(m^2 \cdot h)$,达到环境标准HJ 571—2010要求(≤ 0.50 $mg/(m^2 \cdot h)$)。说明PMUF树脂及其与硼、硅化物的复合改性剂,在木材干燥过程中固化充分,有害气体释放水平较低。

2.5 耐腐性能

木材经腐朽菌腐蚀后的质量损失,可体现其耐腐性。改性处理前后杨木的质量损失率测试结果,见图6。

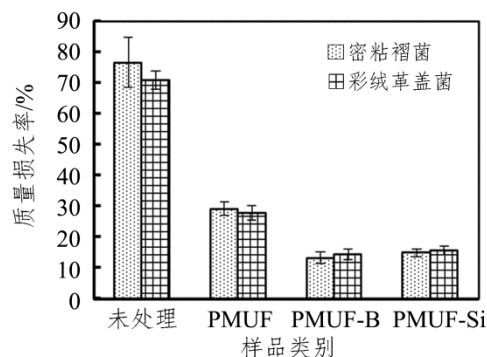


图6 改性材及未处理材经腐朽菌腐蚀后的质量损失率
Fig.6 Mass loss rate of treated and untreated wood samples corroded by fungus

由图6可知,杨木未处理材受到密粘褶菌和彩绒革盖菌腐蚀后,质量损失率均超过70%,试样腐朽严重,属于不耐腐等级IV(质量损失率 $>45\%$)。PMUF改性材受测试菌株腐蚀后,质量损失率分别为29.16%和27.65%,试样小部分腐朽,达到稍耐腐等级III(质量损失率25%~44%)。PMUF-B及PMUF-Si复合改性材受腐蚀后,质量损失率分别为13.18%、14.29%及14.91%、15.51%,试样基本完好,达到耐腐等级II(质量损失率11%~24%)。由此说明,PMUF处理可明显提高木材的耐腐性,而PMUF树脂与硼、硅化物复合后,进一步增强了改性材的耐腐性能。

3 结论

1) 本研究制备的三种改性材,其密度、抗弯性能、硬度均比未处理材显著提高,吸湿率和吸水率显著降低,抗胀率均 $>50\%$;冲击韧性略有降低。

2) 总挥发性有机化合物(TVOC)释放率达到相关标准限值要求;氧指数均提高1倍以上。

3) 耐腐性比未处理材显著提高。PMUF改性材达到稍耐腐等级III,PMUF-B及PMUF-Si改性材达到耐腐等级II。

4) 本研究制备的杨木改性材,具有密度、强度可调控、尺寸稳定、环保、阻燃、耐腐等优点,可广泛用于制造阻燃型实木门、实木家具、地板等高附加值产品,还可用于强度和防腐性能要求较高的核设备用木垫块、铁路货车(平车)底架木地板等特殊产品。

(下转第9页)

参考文献:

- [1] 王德福, 李春风, 刘明利, 等. 热处理与硅酸钠联合改性杨木的物理力学性能[J]. 木材工业, 2016, 30(6): 31-34.
WANG D F, LI C F, LIU M L, et al. Properties of poplar wood modified by a combined process of sodium silicate solution impregnation and heat treatment[J]. China Wood Industry, 2016, 30(6): 31-34.
- [2] 胡拉, 徐慧兰, 冯源恒, 等. 高产脂马尾松间伐材的材性分析[J]. 森林与环境学报, 2018, 38(3): 290-296.
HU L, XU H L, FENG Y H, et al. Analysis on basic properties of *Pinus massoniana* thinning wood with high-yield rosin[J]. Journal of Forest and Environment, 2018, 38(3): 290-296.
- [3] 李家宁, 李民, 李晓文, 等. 热处理橡胶木的有机酸释放量及其对材性的影响[J]. 木材工业, 2012, 26(4): 21-24.
LI J N, LI M, LI X W, et al. Rubber wood properties influenced by organic acid release during heat treatment[J]. China Wood Industry, 2012, 26(4): 21-24.
- [4] 左迎峰, 吴义强, 张新荔, 等. 低分子量酚醛树脂浸渍人工林木材研究进展[J]. 材料导报, 2015, 29(23): 7-11.
- ZUO Y F, WU Y Q, ZHANG X L, et al. Progress on plantation wood impregnated with low molecular weight phenol-formaldehyde resin[J]. Material Guide, 2015, 29(23): 7-11.
- [5] 邓书端. 乙二醛—尿素—甲醛共缩聚树脂的合成、性能及反应机理[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [6] XU Wenfeng, XIONG Shanshan, SHI Yuqing, et al. Addition mechanisms of phenol toward formaldehyde under acidic condition: a theoretical investigation[J]. Chinese Journal Structure Chemical, 2012(6): 821-828.
- [7] 邓书端, 杜官本, 汪进. 乙二醛-尿素树脂的合成、结构与性能研究[J]. 中国胶粘剂, 2014, 23(3): 25-29.
DENG S R, DU G B, WANG J. Study on synthesis, structure and properties of glyoxal-urea resin[J]. Chinese Adhesive, 2014, 23(3): 25-29.
- [8] Loeffler KW, Koehler CA, Paul NM. Oligomer formation in evaporating aqueous glyoxal and methyl glyoxal solutions[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(20): 6318-6321.

(本文编校 孟凡丹、向 琴)

(上接第5页)

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王飞, 刘君良, 吕文华. 改性三聚氰胺脲醛树脂增强人工林杉木的性能[J]. 木材工业, 2017, 31(3): 18-21.
WANG F, LIU J L, LYU W H. Properties of plantation grown Chinese fir enhanced with modified melamine urea formaldehyde resin[J]. China Wood Industry, 2017, 31(3): 18-21.
- [3] 杜兰星, 孙照斌, 张晓燕. 脲醛树脂胶浸注毛白杨木材工艺初步研究[J]. 木材加工机械, 2011, 22(4): 19-22.
DU L X, SUN Z B, ZHANG X Y. Study on impregnation technology using UF resin for *Populus tomentosa* wood[J]. Wood Processing Machinery, 2011, 22(4): 19-22.
- [4] 夏炎, 许俊, 章瑞, 等. 杨木材性对酚醛树脂浸渍改性材的影响[J]. 林业科技开发, 2010, 24(2): 52-54.
XIA Y, XU J, ZHANG R, et al. Effects of wood properties on modified poplar wood by PF resin[J]. China Forestry Science and Technology, 2010, 24(2): 52-54.
- [5] Chai Yubo, Liu Junliang, Zhao Yong, Yan Ning. Synthesis and characterization of phenol formaldehyde resol resins modified by different boron compounds[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, 55(37): 9840-9850.
- [6] 柴宇博, 刘君良, 孙柏玲, 等. 三聚氰胺脲醛树脂复配硼化物改性处理杨木的性能[J]. 木材工业, 2015, 29(3): 5-9.
CHAI Y B, LIU J L, SUN B L, et al. Dimensional stability, mechanical properties and combustion performance of poplar wood modified with a mixture of MUF/boric acid/borax[J]. China Wood Industry, 2015, 29(3): 5-9.
- [7] 王飞, 柴宇博, 刘君良. 树脂型硅酸盐改性剂及改性材的制备工艺与性能分析[J]. 木材加工机械, 2016, 27(4): 33-36.
WANG F, CHAI Y B, LIU J L. Preparation and performance analysis of resin-based silicate modifier and modified wood[J]. Wood Processing Machinery, 2016, 27(4): 33-36.
- [8] Yanhui Huang, Benhua Fei, Rongjun Zhao. Modified mechanism of cell walls from Chinese fir treated with Low-molecular-weight phenol formaldehyde resin[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(12): 3356-3359.
- [9] Yanjun Xie, Qiliang Fu, Qingwen Wang, et al. Effects of chemical modification on the mechanical properties of wood[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2013, 71(8): 401-416.
- [10] 王飞, 刘君良, 吕文华. 增强-阻燃改性人工林杉木的性能研究[J]. 林产工业, 2017, 44(6): 7-11.
WANG F, LIU J L, LYU W H. Study on properties of enhanced-flame retardant plantation Chinese fir[J]. China Forest Products Industry, 2017, 44(6): 7-11.
- [11] Yutao Yan, Youming Dong, Jianzhang Li, et al. Enhancement of mechanical and thermal properties of poplar through the treatment of glyoxal-urea/nano-sio₂[J]. Rsc Advances, 2015, 5(67): 54148-54155.
- [12] Baysal E. Determination of oxygen index levels and thermal analysis of scots pine impregnated with melamine formaldehyde-boron combinations [J]. Journal of Fire Sciences, 2002, 20(5): 373-389.
- [13] 杨丽, 周逸潇, 韩新宇, 等. 阻燃剂阻燃机理的探讨[J]. 天津化工, 2010, 24(1): 1-4.
YANG L, ZHOU Y X, HAN X Y, et al. Discussion on the mechanism of flame retardants[J]. Tianjin Chemical Industry, 2010, 24(1): 1-4.
- [14] 欧育湘, 李建军. 阻燃剂-性能、制造及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 290-291.

(本文编校 孟凡丹、向 琴)