

## 树脂浸渍材热加工特性及相关设备研究进展

王振宇, 何正斌, 赵紫剑, 伊松林  
(北京林业大学, 北京 100083)

**摘要:** **目的** 为了给树脂浸渍木材的热加工特性及相关制造设备研究提供参考, 以提高速生材树脂的浸渍改性效果, 扩大速生材的应用范围。 **方法** 总结归纳树脂浸渍材的热加工特性及设备领域的相关研究成果, 论述组合处理工艺对速生材改性效果的重要影响。 **结果** 合理的浸渍材干燥及高温热处理过程不仅能够实现树脂的完全固化, 而且有助于进一步提高改性材的尺寸稳定性及耐腐蚀性等性能。一体化处理设备能显著降低处理成本, 为工业化提供条件。 **结论** 进行树脂浸渍材的热加工特性及设备研究对提高速生材改性效果影响显著, 具有深入研究价值。

**关键词:** 木材改性; 木材干燥; 高温热处理; 树脂; 一体化设备

**中图分类号:** TB484.2; S781.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)05-0121-06

## Research Progress of Hot-working Characteristics and Equipment of Resin-impregnated Wood

WANG Zhen-yu, HE Zheng-bin, ZHAO Zi-jian, YI Song-lin  
(Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**ABSTRACT:** The work aims to provide reference for the studies on hot-working characteristics of resin-impregnated wood and relevant equipment, so as to improve the resin modification effects and enlarge the application range of fast-growing wood. Research achievements related to hot-working characteristics and equipment of resin-impregnated wood were summarized and the significant influence of combined treatment process on modification effects of fast-growing wood was discussed. Reasonable drying and high-heat treatment process of resin-impregnated wood could not only accomplish the solidification of resin but help further improve the dimensional stability and decay resistance of wood. Integrated equipment could dramatically reduce processing costs, providing probability for the industrialization of production. Studies on hot-working characteristics and equipment of resin-impregnated wood are greatly beneficial for modification effects of fast-growing wood and have in-depth research value.

**KEY WORDS:** wood modification; wood drying; high-heat treatment; resin; integrated equipment

木材作为一种天然、环保、可再生的生物质材料, 具有强重比高、缓冲性能好、易加工等优点, 在包装领域取得了广泛应用<sup>[1]</sup>。我国森林资源贫乏, 存在着总量不足和质量不高等问题<sup>[2]</sup>。为了保护森林资源及生态环境, 天然林禁伐、限伐的措施相继实施, 这在一定程度上导致可利用天然林木进一步减少, 木材供需矛盾日益凸显。面对这一情况, 发展、利用人工速生林成为缓解木材供应不足的重要手段。同天然林相

比, 速生林具有生长周期短、种植面积大、资源丰富等优势<sup>[3]</sup>。20 世纪 60 年代以来, 我国已营造了大面积工业人工林, 预计到 2020 年我国人工林木材供应量可达 2.26 亿 m<sup>3</sup><sup>[4]</sup>。

速生材材质较差, 密度及表面硬度低, 易吸湿, 尺寸稳定性差, 且多项物理力学性能均低于天然林木材, 这在一定程度上限制了其在木质包装领域的应用范围。为了改善速生材的材性、延长使用寿命、扩大

收稿日期: 2016-09-03

基金项目: 林业公益性行业科研专项 (201404502)

作者简介: 王振宇 (1992—), 男, 北京林业大学硕士生, 主攻木材高温热处理。

通讯作者: 伊松林 (1970—), 男, 博士, 北京林业大学教授, 主要研究方向为木材热加工。

使用范围,对速生材进行合理的改性处理势在必行。树脂浸渍处理是众多改性方式中的一种,不仅能够提高木材的密度及硬度,也能使木材的耐腐蚀性及尺寸稳定性得到大幅改善,是一种有效、可行的木材改性方式。相较于其他研究成果,针对浸渍处理后木材热加工特性的研究并不多,但浸渍材热加工特性变化明显,有必要对其进行深入研究。实践证明,对浸渍材进行合理的干燥是提高生产效率、保证生产质量的重要途径。同时,在浸渍处理的基础上对木材进行高温热处理,不仅能够进一步提高木材的尺寸稳定性和耐腐蚀性<sup>[5]</sup>,而且能够使树脂快速而充分地完成固化过程,是一种理想的组合改性工艺。文中结合现阶段树脂浸渍改性的研究进展,重点对树脂处理材的热加工特性及设备进行归纳与讨论,以期对树脂浸渍材及其热加工过程的研究和应用提供一定的技术参考依据。

## 1 树脂浸渍木材的相关研究进展

树脂浸渍改性是指将木材浸泡在水溶性低分子量树脂溶液中,树脂通过扩散进入木材细胞壁,使木材增容,然后经干燥除去水分,最后加热使树脂固化的一种木材改性技术。树脂浸渍改性方法能够明显改善速生材的尺寸稳定性、耐腐蚀性和力学强度等性能。树脂浸渍改性的机理主要包括以下几点:树脂进入木材后,能够与广泛分布于纤维素、半纤维素、木质素上的高活性游离羟基发生反应,形成醚键、酯键或缩醛联结,从而封闭木材结构中的游离羟基,降低木材的亲水性<sup>[6]</sup>;如果树脂能够进入细胞壁,则可对细胞壁起到充胀作用,这也是处理材尺寸稳定性有所提高的重要原因<sup>[7]</sup>;树脂经过加热处理后能够形成立体网状结构,其与木材之间不仅能形成结合力很强的化学键,还存在范德华力和氢键,这导致处理后木材的物理力学性能得到更好的改善<sup>[8-9]</sup>。

长期以来,国内外针对不同树脂浸渍处理的改性效果进行了大量研究。1993年,罗建举等<sup>[10]</sup>将缓冲式脲甲醛预缩液浸注到木材内部后再聚合形成固化脲醛树脂,发现脲醛树脂改性处理可显著提高木材干燥、吸湿和吸水时的尺寸稳定性,并对木材有明显的增硬作用。武国峰等<sup>[11]</sup>利用改性脲醛预聚体浸渍并热压干燥处理木材,结果表明改性材基密度增加了1.06倍,抗弯强度和顺纹抗压强度分别提高了33%和74%,木材吸水性从104%降低到97%。Yu等<sup>[12]</sup>采用脲醛树脂和蒙脱土浸渍速生杨,当脲醛树脂和钠蒙脱土质量分数分别为20%和14%时,速生杨抗弯强度、顺纹抗压强度和抗弯弹性模量均显著提高。Cai等<sup>[13]</sup>采用真空加压方式浸渍三聚氰胺改性脲醛树脂发现,浸渍物与木材之间存在很好的交联作用,处理材物理力学强度及尺寸稳定性得到明显提高。刘君良等<sup>[14]</sup>

使用改性异氰酸酯对美国人工林火炬松进行处理,发现随着树脂浓度的增加,木材的吸水厚度膨胀率和压缩变形恢复率逐渐降低。

酚醛树脂具有良好的耐水耐候性能,适用范围及改性效果均好于脲醛及三聚氰胺树脂。虽然性能尚不及异氰酸酯优良,但其成本远低于改性异氰酸酯。综合考虑多方面因素,酚醛树脂在木材改性中的应用最为广泛<sup>[15]</sup>。刘君良等<sup>[16]</sup>用酚醛树脂浸渍处理人工林杨木、杉木,随着树脂浓度的增加,处理材的增重率、抗胀率和阻湿率也按比例增大,当浓度达到一定量时变化趋于稳定。吴玉章等<sup>[17]</sup>对比了经常压法和真空法向杉木浸渍酚醛树脂的浸注效果及树脂在木材内的分布状态,结果显示,真空浸注填充量可达到理论值的90%以上,远高于常压浸渍,且经真空浸渍处理后树脂注入深度增加。Furuno等<sup>[18]</sup>用低分子量酚醛树脂溶液浸渍日本柳杉,在树脂质量增加量从5.9%上升到62%的过程中,处理材的抗胀率(ASE)从约10%提高到60%左右。王向歌<sup>[19]</sup>分别用固含量为10%,20%,30%的酚醛树脂浸渍处理杉木,结果表明,其尺寸稳定性随树脂固含量的增加逐渐提高,弹性模量分别提高了6.1%,27.5%和48.2%,表面硬度则分别提高了29.8%,63.1%和73.8%,但冲击韧性随着树脂质量的增加而逐渐降低。

## 2 树脂浸渍材的热加工特性

长期以来,木材热加工都是木制品生产环节中的重要一环,木材的热加工特性主要体现在对其进行必要的干燥处理以及通过热处理对材料性能进行改良这两个重要阶段。就树脂浸渍材而言,由于其干燥过程还受树脂固化的影响,远比普通未处理材的干燥过程复杂;另外,浸渍改性与高温热处理在提高木材性能,尤其是提高木材尺寸稳定性和力学性能方面具有辅助协同作用。树脂浸渍及高温热处理的工艺流程具有连续性,可在热处理过程中实现树脂的完全固化,因此,将两者联合起来的一体化改性技术具有极大的发展前景。对树脂浸渍材热加工特性进行深入研究不仅能够保证处理材取得更好的处理效果,也是进一步优化生产工艺、提高生产效率的重要途径。

### 2.1 干燥特性

木材干燥能改善木材品质、提高木材利用率,而其对浸渍改性也有较大影响。通常在进行浸渍前需要对木材进行预干处理,而浸渍处理后的改性材同样需要经过一段时间的干燥并达到一定含水率后方可正常使用。由于相关研究的缺乏,早期对浸渍处理材的干燥多参考未处理材的干燥工艺。显然,浸渍处理材与未处理材两者的干燥过程有明显差异<sup>[20]</sup>,若不考虑

处理材与未处理材两者干燥特性的区别,难免在干燥过程中会造成改性材材性等级的降低。

现已工业化的木材浸渍改性技术大多采用先预干燥,再浸渍,后再干燥的处理工艺。Winandy 和 Boone<sup>[21]</sup>于浸渍处理前分别用高温干燥(112 ~ 137 °C)及常规干燥处理木材,发现经高温预干的木材在浸渍后具有更高的干燥速率。尽管预干燥对浸渍及再干燥有一定促进作用,但预干燥程度不可过深,根据 Booker<sup>[22]</sup>的研究证明,浸渍前过度气干会导致试材部分早材纹孔闭塞,显著降低木材渗透性,影响浸渍效果。Phillips 等<sup>[23]</sup>发现,在含水率下降至纤维饱和点的过程中,纹孔逐渐发生闭合,至纤维饱和点时,几乎所有早材纹孔发生闭塞。同样,Stamm 和 Seborg<sup>[24]</sup>的研究结果也证明被水浸泡的单板比干燥至含水率为 6% 的单板能够得到更好的浸渍效果。

王舒<sup>[25-26]</sup>通过百度试验,制定了酚醛浸渍处理后杉木试材的干燥基准,并与相同初含水率条件下的素材干燥过程进行对比,由于树脂堵住了处理材中的水分通道,导致其干燥速度低于素材。周永东<sup>[20]</sup>将木材浸渍处理前的预干燥与浸渍后的再干燥过程联系起来,较为系统地研究了不同预干燥及再干燥组合处理方法对木材物理力学性质的影响及浸渍材的水分迁移特性。研究结果表明,气干(预干燥)-常规干燥(浸渍后再干燥)组合工艺有利于提高弹性模量(MOE)和静曲强度(MOR)及冲击韧性;高温干燥-常规干燥对木材硬度的提高较为有利;气干-高温干燥对浸渍材尺寸稳定性改善效果较好。张振伟<sup>[27]</sup>提出,为避免干燥过程中位于细胞壁及细胞腔中的树脂固化阻碍水分移动,增加干燥应力,进而导致木材产生皱缩和开裂等干燥缺陷,应保证整个干燥过程中干球温度不能过高,干湿球温差尽量较小。武国峰<sup>[28]</sup>则采用复合型树脂浸渍速生杨木,认为由于树脂增加了木材的塑性,且对木材细胞起充胀作用,避免了在干燥过程中因水分快速挥发造成的皱缩、开裂等缺陷,所以可适当采用高温快速干燥的方法缩短干燥时间。

除常规干燥方式外,许多学者也在浸渍改性和其他干燥的联合方面进行了相关研究,诸如高频干燥、微波干燥、太阳能干燥等特种干燥方式在树脂浸渍材的干燥过程中也有一定的应用价值。尤其在常规能源不断减少、环境压力持续增加的今天,将太阳能作为一种可再生的清洁能源用于浸渍材干燥前的预处理过程,具有良好的发展前景。

## 2.2 热处理特性

通过高温热处理的方式改性木材最早起源于 8 世纪的北欧,现今较为成熟的热处理工艺包括芬兰的 Thermwood 工艺、荷兰的 Plato Wood 工艺、法国的 Rectification 工艺及德国的 OHT 工艺等。尽管在高温

条件下羟基的减少及木材内发生的交联反应能使木材吸湿性明显降低,尺寸稳定性和耐腐性大幅提高,但同时也伴随着木材力学性能的显著下降,这成为制约木材热处理发展的因素之一<sup>[29-30]</sup>。树脂浸渍改性则具有提高木材密度及力学强度的优点,且干燥后的高温处理也有利于树脂实现完全固化。部分学者逐渐加大对树脂浸渍处理与热处理联合改性的关注,并对树脂浸渍材的热处理特性进行了相关研究。

阳财喜<sup>[31]</sup>以粗皮桉为实验材料,将自制 MMFU 树脂浸渍增强处理与热处理相结合,发现联合处理不仅能在热处理的基础上进一步提高木材的尺寸稳定性,还能阻止在热处理过程中木材的强度损失,并在一定程度上改善了处理材的表面润湿性能。徐康<sup>[32]</sup>以人工速生杨木为研究对象,考察了微波预处理条件下经低分子量酚醛树脂浸渍和高温热处理后改性材的物理、力学性能。实验结果表明,经高温热处理后的浸渍材吸湿、吸水性降低,线性、体积湿胀率降低,尺寸稳定性更加优异;当热处理温度小于 200 °C 时,浸渍处理材的抗弯强度和弹性模量受热处理影响不大,仅有小幅降低,且远高于未处理材;当热处理温度达到 200 °C 后,则会造成抗弯强度和弹性模量的急剧下降。

## 2.3 树脂固化

木材浸渍改性过程中,浸渍入木材的低聚合度热固性树脂需在一定的条件下继续进行缩聚反应,使树脂交联固化成体型聚合物,才可实现对木材性能的改善,因此树脂的固化程度及质量对改性材的处理效果也存在重要影响。就酚醛树脂而言,其固化过程存在固化温度高、速度慢的问题<sup>[33]</sup>,造成生产效率的下降和能耗的增加。然而,树脂的固化过程受到众多因素影响,可以通过在热加工过程中施加合适的固化条件缓解现存问题。王健<sup>[34]</sup>指出,在浸渍酚醛树脂时,令其于 140 ~ 150 °C 间固化较为适宜。在该温度段内,不仅固化均匀、耗时较短,而且固化过程易于控制,产品质量稳定。因为树脂固化过程放热,为了对其进行有效控制,在固化阶段应采用较低的升温速率<sup>[35]</sup>。另外,树脂的固化反应速度除了受温度影响外,与材料含水率也有很大关系,当含水率过高时,则会导致树脂固化迟缓<sup>[36]</sup>。可见适宜的干燥及热处理过程不仅能够对树脂的固化提供较为理想的条件,缩短固化时间,而且也是树脂取得良好固化效果、提高处理材性能的重要保证。

## 3 树脂浸渍-热加工一体化工艺及设备研究

结合上述研究不难发现,研究并推广木材浸渍与热加工的联合改性技术,实现两者的优势互补,具有

很高的可行性和必要性,是一种极具潜力的组合改性方法。然而,目前木材浸渍改性及后续热加工过程多分步单独进行,能够实现一体化改性过程的设备、工艺较为少见。这不仅导致设备投资增加,而且试材在不同处理设备间的转换,也使生产工序变多,生产周期变长,提高了改性成本。木材浸渍与热加工一体化技术的应用,能够达到在较少的设备内进行多种木材改性处理的目标,通过减少生产工序、缩短处理时间,实现处理过程中的能耗及成本大幅降低,并提高处理材性能的稳定性。

侯建荣等<sup>[37]</sup>设计开发了应用于核级活性炭的真空浸渍与预干燥一体化设备,该设备具有抽真空、旋转、喷淋、加热等功能,可根据不同的使用要求,变换不同的工作模式,从而实现浸渍与预干燥设备的一体化。罗声涌<sup>[38]</sup>发明了一种木材干燥与防腐一体化处理的方法和装置,该装置由真空处理罐、储液槽和抽真空装置3部分组成,罐体内腔装有用于干燥的风机和加热器,因此同时具有干燥窑、防腐处理罐、蒸汽调节室三者的作用,从而实现木材防腐干燥的一体化处理,但该装置自动化控制程度较低,且处理均匀性有待提高。常建民等<sup>[39]</sup>设计的由正负压力罐、电加热导热油炉、补液罐装置及管道、仪表等辅件组成的木材防腐干燥一体化设备可一次性完成木材的前期真空处理、高压浸渍改性和浸渍材的干燥过程,且相较于早期一体化设备,实现了较高的自动化控制程度,使得木材浸渍及干燥质量得到了有效的保证。

除了将浸渍与干燥过程进行集成,部分学者也对干燥与热处理一体化过程及设备进行了研究。伊松林等发明了一种以植源生物质废弃物为燃料的环保型木材热加工装备,主要用于木材的干燥及高温热处理一体化过程。孙润鹤<sup>[40]</sup>借鉴了木材高温热处理技术,对重组竹的高温干燥、热处理一体化技术进行了相关研究,大大减少了干燥时间,处理材吸水吸湿性也明显降低。

木材浸渍改性及热加工一体化技术的出现,显著降低了组合处理工艺的经济、时间成本,控制了生产加工过程中的能耗,使得大规模的木材改性处理具备了实现条件,必将促进我国木材及其改性行业的发展和技术水平的提升。

#### 4 结语

在速生材资源占木材资源比例不断扩大的今天,对速生材进行功能性改良,扩大其应用范围的必要性日益凸显。将树脂浸渍改性与高温热处理结合的组合作处理工艺能更好地发挥2种处理方法的优点,弥补各自的不足,不仅解决了浸渍材干燥的问题,使浸渍入木材的树脂充分完成固化,减少高温热处理材的力学

强度损失,而且能够更好地发挥多种处理方法,提高速生材尺寸稳定性和耐腐蚀性,故成为一种极具潜力的改性方式。

结合当前发展现状,笔者认为可从以下几个方面继续加深树脂浸渍材热加工特性的研究:重视浸渍材热加工过程中的热质传递及固化规律,建立理论模型;开展针对不同树脂处理材的定向干燥基准及工艺的编制工作;扩大太阳能预干技术在浸渍材干燥过程中的应用范围;不断完善树脂浸渍增强处理与热处理相结合的组合改性技术,并进一步研发树脂浸渍-热加工一体化设备,实现该技术的大规模工业化应用。

#### 参考文献:

- [1] 张方文,于文吉. 木质包装材料的发展现状和前景展望[J]. 包装工程, 2007, 28(2): 27—30.  
ZHANG Fang-wen, YU Wen-ji. Current Status and Development of Wood-Based Packaging Materials[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(2): 27—30.
- [2] 王向歌. 小径级松杉材薄板浸渍增强技术的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2014.  
WANG Xiang-ge. Study on the Impregnation Enhancement of Trail Class Masson Pine and Chinese-fir Sheet[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2014.
- [3] 张冬梅,杨亮庆. 速生杨木改性研究进展[J]. 林业机械与木工设备, 2012(3): 16—20.  
ZHANG Dong-mei, YANG Liang-qing. Research Progress in Modified Fast Growing Poplar Wood[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2012(3): 16—20.
- [4] 谭秀凤. 中国木材供需预测模型及发展趋势研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011.  
TAN Xiu-feng. The Forecast Model and Development Trend for China Timber Supply and Demand[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2011.
- [5] 高伟,罗建举,李荣册,等. 西南桦木包装材料在热处理后的润湿性能研究[J]. 包装工程, 2013, 34(13): 66—70.  
GAO Wei, LUO Jian-ju, LI Rong-ce, et al. Wettability of Betula Alnoides Packaging Materials after Heat Treatment[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(13): 66—70.
- [6] LESAR B, STRAŽE A, HUMAR M. Sorption Properties of Wood Impregnated with Aqueous Solution of Boric Acid and Montan Wax Emulsion[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2011, 120(2): 1337—1345.
- [7] SCHOLZ G, KRAUSE A, MILITZ H. Volltränkung Modifizierten Holzes Mit Wachs[J]. Holz als Roh und Werkstoff, 2010, 70(1): 91—98.
- [8] ATAR M, KESKIN H, KORKUT S, et al. Impact of Impregnation with Boron Compounds on Combustion Properties of Oriental Beech (Fagus Orientalis Lipsky) and Varnishes[J]. African Journal of Biotechnology, 2011, 10(15): 2867—2874.
- [9] HUMAR M, PAVLIČ M, ŽLINDRA D, et al. Performance of Waterborne Acrylic Surface Coatings on Wood,

- Impregnated with Cu-Ethanolamine Preservatives [J]. *Bulletin of Materials Science*, 2011, 34(1): 113—119.
- [10] 罗建举, 向仕龙. 脲醛树脂改性木材的研究[J]. *木材工业*, 1993(2): 19—22.  
LUO Jian-ju, XIANG Shi-long. A Study on UF Prepolymer Modified Wood[J]. *China Wood Industry*, 1993(2): 19—22.
- [11] 武国峰, 姜亦飞, 宋舒苹, 等. 木材/改性 UF 预聚体复合材料制备及性能表征[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(4): 1083—1086.  
WU Guo-feng, JIANG Yi-fei, SONG Shu-ping, et al. Preparation and Properties of Wood/Modified UF Prepolymer Composite Materials[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(4): 1083—1086.
- [12] YU X, SUN D, LI X. Preparation and Characterization of Urea-Formaldehyde Resin-Sodium Montmorillonite Intercalation-modified Poplar[J]. *Journal of Wood Science*, 2012, 57(6): 501—506.
- [13] CAI X, RIEDL B, ZHANG S Y, et al. Effects of Nanofillers on Water Resistance and Dimensional Stability of Solid Wood Modified by Melamine-Urea-Formaldehyde Resin[J]. *Wood & Fiber Science Journal of the Society of Wood Science & Technology*, 2007, 39(2): 307—318.
- [14] 刘君良, 江泽慧, 许忠允, 等. 人工林软质木材表面密实化新技术[J]. *木材工业*, 2002, 16(1): 20—22.  
LIU Jun-liang, JIANG Ze-hui, XU Zhong-yun, et al. New Technology on Surface Compression of Plantation Softwood[J]. *China Wood Industry*, 2002, 16(1): 20—22.
- [15] 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 Ying-feng, WU Yi-qiang, ZHANG Xin-li, et al. Progress on Plantation Wood Impregnated with Low Molecular Weight Phenol-Formaldehyde Resin[J]. *Materials Review*, 2015, 29(23): 7—11.
- [16] 刘君良, 江泽慧, 许忠允. 人工林软质木材表面密实化新技术[C]// 中国科学技术协会, 2001.  
LIU Jun-liang, JIANG Ze-hui, XU Zhong-yun. New Technology on Surface Compression of Plantation Softwood[C]// China Association for Science and Technology, 2001.
- [17] 吴玉章, 松井宏昭, 片冈厚. 酚醛树脂对人工林杉木木材的浸注性及其改善的研究[J]. *林业科学*, 2003, 39(6): 136—140.  
WU Yu-zhang, HIROAKI M, YUTAKA K. Study on the Impregnation of Phenol Resin in Chinese Fir and Its Improvement[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2003, 39(6): 136—140.
- [18] FURUNO T, IMAMURA Y, KAJITA H. The Modification of Wood by Treatment with Low Molecular Weight Phenol-Formaldehyde Resin: A Properties Enhancement with Neutralized Phenolic-Resin and Resin Penetration into Wood Cell Walls[J]. *Wood Science & Technology*, 2004, 37(5): 349—361.
- [19] 王向歌, 金菊婉, 邓玉和, 等. 不同固含量低分子量酚醛树脂浸渍改性杉木板材性能的研究[J]. *西南林业大学学报*, 2014(3): 84—88.  
WANG Xiang-ge, JIN Ju-wan, DENG Yu-he, et al. The Effects of Phenol Formaldehyde Resin Impregnation on the Main Physical and Mechanical Properties of *Cunninghamia Lanceolata* Lumber[J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2014(3): 84—88.
- [20] 周永东. 低分子量酚醛树脂强化毛白杨木材干燥特性及其机理研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009.  
ZHOU Yong-dong. Study on Drying Characteristics and Mechanism of Poplar Lumber Strengthened with Low Molecular Weight Phenol-Formaldehyde Resin[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2009.
- [21] WINANDY J E, BOONE R S. The Effects of CCA Preservative Treatment and Redrying on the Bending Properties of 2 by 6 Southern Pine Lumber[J]. *Wood and Fiber Science*, 2007, 20(3): 350—364.
- [22] BOOKER R E. Changes in Transverse Wood Permeability During the Drying of *Dacrydium Cupressinum* and *Pinus Radiata*[J]. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 1990, 20(2): 231—244.
- [23] PHILLIPS E. Movement of The Pit Membrane in Coniferous Woods, With Special Reference to Preservative Treatment[J]. *Forestry*, 1933, 7(2): 109—120.
- [24] STAMM A J, SEBORG R M. Resin-Treated Plywood[J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1939(1): 897—902.
- [25] 王舒. 浸渍处理人工林杉木干燥特性的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.  
WANG Shu. Study on the Drying Characteristic of Resin-impregnated Chinese Fir[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009.
- [26] 王舒, 魏洪斌, 伊松林, 等. 杉木素材与浸渍处理材尺寸稳定性的比较[J]. *干燥技术与设备*, 2010(1): 25—29.  
WANG Shu, WEI Hong-bin, YI Song-lin, et al. Comparative Research on Dimensional Stability of Resin-impregnated Chinese Fir[J]. *Drying Technology & Equipment*, 2010(1): 25—29.
- [27] 张振伟, 涂登云, 关丽涛, 等. 树脂浸渍处理毛白杨木材的干燥工艺[J]. *木材工业*, 2014, 28(1): 42—44.  
ZHANG Zhen-wei, TU Deng-yun, GUAN Li-tao, et al. Drying Schedule of Chinese White Poplar Lumber Impregnated with Modified Urea-Formaldehyde Resin[J]. *China Wood Industry*, 2014, 28(1): 42—44.
- [28] 武国峰. 速生杨木原位聚合改性技术及机理的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.  
WU Guo-feng. Modification of Fast-Growing Poplar Wood by In-situ Polymerization and Cross-Linking Reaction Mechanism[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.
- [29] STAMM A J, HANSEN L A. Minimizing Wood Shrinkage and Swelling Effect of Heating in Various Gases [J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 2002, 29(4): 831—833.
- [30] TJEERDSMA B F, MILITZ H. Chemical Changes in Hydrothermal Treated Wood: FTIR Analysis of Combined Hydrothermal and Dry Heat-Treated Wood[J]. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2005, 63(2): 102—111.
- [31] 阳财喜. 粗皮桉木材浸渍增强: 热处理工艺研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009.

- YANG Cai-xi. Study on Impregnation Enhancement-Heat Treatment Process of Eucalyptus Pellita Lumber[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2009.
- [32] 徐康. 微波预处理杨木浸渍密实化与高温热处理改性研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2014.
- XU Kang. Modification of Microwave Pretreated Plantation Poplar Wood Performed by Resin-Impregnation and Heat-treatment[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2014.
- [33] 李建章, 周文瑞, 赵俊杰, 等. 木材工业用酚醛树脂胶粘剂的快速固化研究[J]. 中国胶粘剂, 2003, 12(6): 61—63.
- LI Jian-zhang, ZHOU Wen-rui, ZHAO Jun-jie, et al. The Progress of Fast-Setting Phenol-Formaldehyde Resin Wood Adhesives[J]. China Adhesives, 2003, 12(6): 61—63.
- [34] 王健. 二价金属离子催化浸渍纸用快速固化酚醛树脂的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
- WANG Jian. Study on Fast Curing Impregnating Phenol-Formaldehyde Resin Adhesive Catalyzed by Divalent Metal Ions[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2012.
- [35] 宋永忠, 翟更大, 宋进仁, 等. 浸渍用酚醛树脂的流变行为和固化性能的研究[J]. 材料工程, 2007(S1): 212—215.
- SONG Yong-zhong, ZHAI Geng-tai, SONG Jin-ren, et al. Rheological Behaviors and Curing Properties of Phenol Resin[J]. Journal of Materials Engineering, 2007(S1): 212—215.
- [36] 顾继友. 胶黏剂与涂料[M]. 北京: 中国林业出版社, 2012.
- GU Ji-you. Adhesive and Coating[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2012.
- [37] 侯建荣, 史英霞, 丘丹圭, 等. 核级活性炭真空浸渍与预干燥设备设计与应用[J]. 辐射防护, 2014, 34(6): 386—389.
- HOU Jian-rong, SHI Ying-xia, QIU Dan-gui, et al. Design and Application on Impregnation and Drying Process of Nuclear-grade Activated Carbon in Vacuum Condition[J]. Radiation Protection, 2014, 34(6): 386—389.
- [38] 罗声涌. 一种木材干燥与防腐一体化处理的方法及装置: 中国, 200410035838.0[P]. 2006-03-29.
- LUO Sheng-yong. The Method and Equipment of Wood Drying and Anticorrosion Integrated Treatment: China, 200410035838.0[P]. 2006-03-29.
- [39] 常建民, 李瑞, 伊松林, 等. 一种正负压木材改性干燥一体机设备: 中国, 200820000077.9[P]. 2009-04-15.
- CHANG Jian-min, LI Rui, YI Song-lin, et al. Integrated Equipment of Wood Drying and Modification: China, 200820000077.9[P]. 2009-04-15.
- [40] 孙润鹤. 竹材高温干燥与热处理一体化技术研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2013.
- SUN Run-he. The Study on the Integration Technology about High Temperature Drying and Thermal Treatment of Bamboo[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2013.