

我国速生杉木的改性研究进展

徐敏, 马青, 王天龙
(北京林业大学, 北京 100083)

摘要: **目的** 综述我国速生杉木的改性技术, 为我国速生杉木改性的发展与应用提供参考。**方法** 通过对我国速生杉木改性相关研究文献的梳理, 将已有研究从反应型改性和非反应型改性两方面进行分类, 并综合改性方法、改性机理和材性变化, 对杉木改性研究现状进行分析评价。**结果** 归纳总结了速生杉木改性的研究方法和研究现状, 并指出了速生杉木改性今后的发展方向, 以期为杉木改性的进一步研究提供帮助, 从而扩大速生杉木的利用范围。**结论** 近年来, 我国在杉木改性研究方面取得了一定成果, 但仍然缺乏综合性杉木改性技术, 这有待科研工作者的进一步研究。

关键词: 木材改性; 速生杉木; 研究现状

中图分类号: TB484.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)01-0143-06

Research Progress in Modified Fast-Growing Chinese Fir

XU Min, MA Qing, WANG Tian-long
(Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: The work aims to summarize the modification technology for fast-growing Chinese fir to provide references for the development and application of modified Chinese fir. By combing the relevant research literatures on the modification of fast-growing Chinese fir, the existing researches had been classified into reactive modification and non-reactive modification. The research status of Chinese fir modification was analyzed and evaluated by integrating the modification methods, modification mechanism and the changes of wood properties. The research methods and research status of the modified fast-growing Chinese fir were summarized and the future development of Chinese-fir modification was pointed out, for the purpose of providing help for further study on the Chinese-fir modification, so as to expand the application range of fast-growing Chinese-fir. In recent years, China has made some achievements in terms of Chinese-fir modification technology, but still lacks the comprehensive modification technology, which requires further study by the science researchers.

KEY WORDS: wood modification; fast-growing Chinese fir; research status

杉木是中国重要的速生林树种, 杉木人工林蓄积量大、资源丰富^[1]。杉木具有生长速度快、结构均匀、轻而韧、散发特殊香味、抗虫耐腐等优点。速生杉木由于生长周期短, 存在结构疏松、强度和硬度低、尺寸稳定性差等缺点, 限制了速生杉木木材的广泛应用^[2-4]。速生杉木一直未得到充分利用, 尤其是小径级速生杉木, 其实际应用少。木材具有较好的环境适应性, 可用作包装材料使用。在包装行业中,

木质包装材料可用于承载、包装、铺垫、支撑、加固货物, 木包装制品的主要应用方式有大型木包装箱、小型木包装箱、木质底座、木质包装填充辅料^[5]等。木材包装材料具有机械强度大、弹性好、耐腐蚀和易加工等优点^[6-7]。在包装箱及包装托盘等包装中, 要使用具有一定强度的木质材料。而在国际贸易包装中, 除了要考虑木包装的强度以外, 木包装用材的除害情况是否符合要求也对通关起到重要影响^[8]。速生

收稿日期: 2016-06-16

基金项目: 林业公益性行业科研专项 (201404502)

作者简介: 徐敏 (1992—), 女, 北京林业大学硕士生, 主攻木材干燥与改性。

通讯作者: 王天龙 (1964—), 男, 博士, 北京林业大学副教授, 主要研究方向为木材干燥与改性。

杉木蓄积量大、资源丰富,但速生材存在容易吸湿、力学性能不足、耐腐蚀性差和易携带森林病虫害等缺陷^[7]。速生杉木在不同改性方法增强处理后可提高其力学强度、尺寸稳定性、阻燃性等性能,可根据不同的处理方法满足不同包装的使用要求。

根据木材改性时改性剂与木材的纤维素、半纤维素和木素等成分的活性基团发生化学反应时,生成新键或者木材内部活性基团受处理条件影响发生的化学变化来分类,杉木改性可分为反应型改性和非反应型改性;根据杉木的改性处理方法,反应型改性又可分为浸渍反应型改性和非浸渍反应型改性2种,非反应型改性又可分为浸渍非反应型改性和非浸渍非反应型改性2种。文中从这4个方面概述了速生杉木改性研究的进展,总结和分析我国近10年来的杉木改性研究的成果及不足之处,以期对杉木木材改性的进一步研究提供帮助,以扩大杉木的应用范围。

1 反应型改性

1.1 浸渍反应型

浸渍反应型改性是杉木通过浸渍方法进行改性处理,且改性剂能与木材内部活性基团发生化学反应,使木材与改性剂通过化学键结合起来的改性方法。

自20世纪30年代开始,科研工作者就开始了木材的浸渍改性的研究。直到21世纪,木材的浸渍改性研究仍是热门课题。我国科研工作者对速生杉木的浸渍改性进行了广泛的研究。科研工作者采用脲醛和酚醛树脂浸渍剂对杉木进行浸渍处理,研究发现,浸渍材的部分物理力学性能有不同程度的提高,抗弯强度、弹性模量、顺纹抗压强度、硬度等物理力学性能分别提高了0.78%~17.80%,4.38%~48.20%,36.62%~37.26%,29.80%~90.77%^[9-13]。Huang等分别采用低分子量和高分子量酚醛树脂浸渍改性杉木,结果表明,与未处理材相比,低分子量酚醛树脂改性材的弹性模量增大了30.88%,而高分子量酚醛树脂改性材的弹性模量降低了29.84%^[14]。除了常用的酚醛、脲醛浸渍剂,马青、刘喻娟等还分别采用树脂型多功能改性剂、甲基丙烯酸甲酯浸渍剂来浸渍杉木,研究发现,浸渍后杉木的力学性能和尺寸稳定性均得到了提高^[15-16]。此外,张南南、刘干等分别采用水基纳米碳酸钙、 α 相纳米三氧化二铝改性剂浸渍处理杉木,来专门研究杉木的耐磨性,研究得出,杉木表面性能得到显著提高,平均磨损量减少了15.32%~22.45%^[17-18]。木材的干缩湿胀严重影响木材制品的质量,仅仅提高杉木的物理力学性能并不能使速生杉木得到基本的应用。王舒、王燕等分别利用

酚醛树脂、聚乙烯缩甲醛胶复合液浸渍杉木研究其干缩湿胀性,研究发现,从湿材到气干、全干的平均干缩率分别下降了0.05%~1.92%,0.15%~2.69%,从全干、气干到水分稳定状态的平均抗胀率分别下降了0.65%~3.90%,1.00%~2.89%,提高了杉木的尺寸稳定性^[19-21]。

科研工作者除了研究杉木的物理力学性能和尺寸稳定性,还对杉木的防腐性、阻燃性和抗菌性等进行了研究。为了改善杉木的防腐性,刘智采用季铵铜防腐剂处理杉木,发现处理后的杉木达到强耐腐级别^[22],但单纯采用季铵铜防腐剂处理并没有提高杉木的其他性能。王传耀采用季铵铜盐和脲醛树脂混合剂浸渍处理杉木后发现,处理后的杉木达到强耐腐级别,此外硬度、抗弯弹性模量和抗弯强度均提高21%以上^[23]。同时为了改善杉木的阻燃性,罗海采用自制阻燃剂与低分子酚醛树脂混合试剂浸渍改性处理杉木,研究发现,改性材达到了难燃材料的标准^[24]。张彦娟利用丙烯酸酯/硅溶胶复合液处理杉木,研究发现,不但可以提高杉木的阻燃性,抗弯强度、弹性模量也分别提高了10.27%和17.26%,改善了硅溶胶改性材的力学强度不佳的缺陷^[25]。

从以上的研究成果可以看出,目前浸渍反应型改性剂研究使用得最多的是树脂改性剂,除此之外还有其他化学剂改性。木材细胞壁主要是由纤维素、半纤维素和木素组成的复合物聚体,并决定着木材的主要物理化学性能,研究人员采用FIRT,SEM和X-射线荧光光谱仪进行分析,发现树脂类改性剂或树脂类复合改性剂能够进入木材细胞腔内部,部分进入细胞壁与构成木材细胞壁的纤维素、半纤维素和木素上的羟基、羧基和羰基等发生化学反应,形成了酯键、醚键或缩醛键等化学键,使得木材细胞壁上的羟基数量降低,引入新的改性基团,同时改性剂在木材内部固化后形成一个密实的整体,从而提高了木材的部分物理力学性能及其他功能性能^[10,12,15,26]。单一的浸渍剂对杉木的改性效果有限,且存在浸渍材干燥困难等难题。其他类改性剂,如纳米类改性剂的改性机理主要是纳米粒子等小分子物质可以进入木材内部,纳米粒子表面能大,极易与木材发生结合,使木材表面活性基团减少,同时纳米粒子在木材内部起到填充作用,从而提高了木材的性能^[17-18]。

木材浸渍反应型改性的研究主要集中在木材的尺寸稳定性和物理力学性能方面,研究表明,处理后木材的尺寸稳定性和物理力学性能得到提高,但杉木的其他功能性改性研究较少。速生杉木进行浸渍处理后,物理力学性能提高,可用作包装材料。此外,经过浸渍处理后的速生杉木,将化学改性剂注入木材内部,能够杀死木材内部的病虫害,可用作国际贸易中的木质包装材料。

1.2 非浸渍反应型

非浸渍反应型改性是指没有采用浸渍方法而采用其他改性方法处理杉木的反应型改性。常用的方法有热处理、高温汽蒸等。木材的热处理改性方法通常采用160~230℃的高温处理木材,由处理温度变化造成的性能变化非常显著,当热处理温度达到200℃时,杉木纤维素结晶度显著降低,出现了一个特殊的拐点。科研工作者研究了热处理温度低于200℃时木材的材性变化,随着温度的不断升高,杉木最直观的变化是材色的变化,袁佳等分别采用160,180,200℃热处理温度来处理杉木,研究表明,随着温度的不断升高,杉木材色逐渐由浅黄白色向橙黄色变化^[27]。科研工作者还发现,当热处理温度为160℃时,木材半纤维素开始发生分解,热处理温度为180℃时,半纤维素大量分解,热处理温度为200℃时,纤维素也开始发生分解。此外,当热处理温度低于200℃时,随处理温度的升高,处理后杉木的抗弯弹性模量、抗弯强度和顺纹抗压强度等力学性能的降低幅度逐渐增大,尺寸稳定性和防腐性的增加幅度逐渐增大,耐腐性最高可达到耐腐级别^[28-31]。

当热处理温度高于200℃时,随温度的不断升高,纤维素和木素降解程度增大,木材内部成分反应更加剧烈,对木材材性的影响更加显著;处理材材色由橙黄色向黑褐色方向变化,处理杉木的抗弯弹性模量、抗弯强度和顺纹抗压强度等力学性能的降低幅度显著增大,尺寸稳定性和防腐性的增加幅度显著增大,耐腐性最高可达到强耐腐级别^[28-31]。除此之外,江京辉等还研究了水蒸气热处理方式对杉木性能的影响,研究表明,3种热处理后的杉木尺寸稳定性提高,但抗弯弹性模量、抗弯强度、顺纹抗压强度和径面和弦面的硬度均下降^[32]。Cao等研究了高温气蒸处理对杉木尺寸稳定性的影响,以170~230℃的保护气体对杉木分别处理1~5h,结果发现,处理后杉木的尺寸稳定性显著提高,在230℃的温度下处理5h后的杉木心材、边材尺寸稳定性最好,分别比素材提高了73%和71%^[33]。

从以上的研究成果可以看出,非浸渍反应型改性处理主要集中在热处理改性。研究人员采用傅里叶红外光谱仪对热处理过程进行分析发现,与素材相比,处理材随着处理温度的升高和时间的延长,羟基波数吸收峰、乙酰基波数吸收峰、羰基波数吸收峰和木质素苯环波数吸收峰等强度降低,说明随着温度不断升高,木材半纤维素、纤维素和木素逐渐发生分解反应,木材细胞壁中羟基与羟基、羰基与羰基发生反应,乙酰基水解和木质素酯化^[27-29]。由于这些综合作用使木材中吸水性强的羟基数量减少,所以随处理温度的升高和时间的延长,处理材的尺寸稳定性和防腐性的

增加幅度逐渐增大,耐腐性逐步可达到强耐腐级别。由于木材的力学强度与木材细胞壁结构息息相关,而热处理后木材细胞壁的半纤维素、纤维素和木素等发生分解反应,使得处理材细胞壁结构变松散,木材力学强度降低^[27-28]。此外,非浸渍反应型不采用任何化学改性剂进行处理所以不存在化学试剂的污染等问题。

以上木材热处理不仅可以提高木质包装材料的尺寸稳定性,除此之外还满足ISPM 15的要求,处理材中心的最低温度应达到56℃,且至少保持30min,能保证有效灭除各种真菌、昆虫和线虫,是进出口贸易中包装材料的常用除害处理方法。

2 非反应型改性

2.1 浸渍非反应型

浸渍非反应型改性是采用浸渍方法处理木材,但浸渍剂不与木材内部固有活性基团发生化学反应的改性方法。楼超超利用硅溶胶浸渍处理杉木研究其阻燃性,结果发现硅溶胶在木材内部形成凝胶,堵塞了木材的管道和空隙,提高了处理材的比热,使杉木阻燃性显著提高,但是抗弯强度、弹性模量无明显变化^[34]。邓邵平等先采用 Na_2SiO_3 处理杉木,再用 H_3BO_3 与PEG-1000复合液处理杉木,研究发现,由于 Na_2SiO_3 与 H_3BO_3 反应生成的 SiO_2 沉积在杉木内及PEG的充胀作用,使处理材的顺纹抗压强度、硬度和尺寸稳定性均有不同程度的提高^[35]。陈泽君等采用硫酸铝和水玻璃溶液浸渍处理杉木,研究发现,铝离子与硅酸根离子能在木材内部形成硫酸铝沉淀,起到填充木材的作用,处理材的各项力学性能和尺寸稳定性明显提高^[36]。王娜娜采用水热法处理杉木,在杉木表面合成 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 覆层,结果表明,处理后杉木的尺寸稳定性和阻燃性提高,抗光变色能力提高了3倍,处理后杉木的光稳定性显著提高^[37]。Qian等研究了二氧化硅溶胶(SiO_2)对八硼酸钠(DOT)改性材抗流失性的影响,研究表明,DOT杉木改性材的抗流失率小于4.5%,而 SiO_2 与DOT联合浸渍后,改性材的抗流失率为60.64%~88.58%^[38]。Shi等采用烷基烯酮二聚体(AKD)改性杉木,结果发现AKD可以显著增强改性杉木的疏水性^[39]。

从以上的研究成果可以看出,目前浸渍非反应型改性的相关研究较少,主要是因为改性剂没有与杉木活性基团发生化学反应产生新的化学键,仅仅是沉积在细胞壁或细胞腔内起到充胀作用,可以部分提高木材的性能,但改性效果有限,并且容易产生改性剂流失的现象。浸渍非反应型改性同样可以提高杉木木材的物理力学性能,并可通过浸渍有效的化学改性剂来杀死害虫,达到为包装材料除害的目的。

2.2 非浸渍非反应型

非浸渍非反应型改性是既不使用浸渍方法,木材内部成分又不发生化学反应的改性方法,如微波预处理、微爆破、蒸汽爆破和冷冻处理等。微波处理主要是将木材置于微波交变电场中,使处理材中的水分快速生热,在短时间内加快液体的渗透速度,从而提高木材渗透性。朱长庆、何胜和王海元等采用微波工艺处理杉木来研究处理材的渗透性,研究发现,微波处理主要破坏了杉木微观结构中的厚壁细胞壁,使杉木的渗透性提高,但杉木的力学性能降低,抗弯弹性模量和抗弯强度分别下降了35.40%和29.40%;此外,研究还发现不同的微波功率、处理时间、含水率会对杉木的渗透性造成不同影响,并得到了杉木的最佳微波处理工艺,分析了微观结构破坏对杉木浸注性能的影响^[40-42]。微爆破处理主要是通过向木材内部充高压气体,利用瞬间释压时高速气流产生的冲击力,破坏木材内部的纹孔等薄弱部位来提高木材的渗透性。王海元等利用微爆破技术处理杉木,研究含水率、爆破压力和爆破次数对杉木性能的影响,结果表明,微爆破处理后,杉木的干燥速率提高,工艺因素对木材性能的影响大小为初含水率>爆破压力>爆破次数;此外,王海元还利用微爆破技术研究了杉木的渗透性,研究发现,微爆破的试件厚度是影响杉木渗透性的首要因素,对径向和弦向渗透性都有显著影响^[43-44]。汽蒸可以打通木材的部分纹孔膜及被阻塞的流动通道,提高处理材的渗透性。苗平等研究了汽蒸处理对木材渗透性的影响,以90, 100℃对杉木分别汽蒸处理4, 8h,经过汽蒸后的杉木气体渗透性较未处理材提高了2~3倍^[45]。Lu等采用冷冻处理杉木来研究其渗透性,研究表明,杉木经冷冻处理后,纹孔闭塞率降低,具缘纹孔膜裂隙增加,冷冻材的渗透性比气干材得到显著提高^[46]。谢敏芳等利用膨胀型聚氨酯防火涂料涂饰杉木壁板,与未处理材和烤漆材比较阻燃性能,发现处理材着火时间延迟、热释放率最高值显著降低、阻燃性提高^[47]。

从以上的研究成果可以看出,非浸渍非反应型改性的研究主要集中在提高木材的渗透性方面,主要是通过微波、微爆破、蒸汽等方法获得瞬间的力量来破坏木材纹孔膜,从而提高木材的渗透性。非浸渍非反应型改性处理主要通过物理手段进行改性,其改性效果有限,因此多数被用作木材改性的预处理或是辅助处理。

3 结语

改性后的杉木可以弥补速生杉木材性的缺点,赋予速生杉木更好的性能,可满足人们的要求,缓解木材资源的紧缺。现有的杉木改性技术在一定程度上提

高了杉木的木材性能,但在杉木改性研究中仍然存在一些问题需要进一步研究。

反应型改性是木材自身或改性剂发生化学反应生成新键的改性方法,更加稳定有效,但现有的改性技术大部分针对提高木材的单一性能,并且对于改性材的流失性研究较少,仍需进一步研究杉木的综合改性技术。非反应型改性是木材发生物理变化或改性剂在木材内部反应起到充胀作用的改性方法,在木材改性的稳定性及改性效果方面不如反应型改性。现有杉木改性研究多侧重于杉木改性工艺和处理材的尺寸稳定性、物理力学性能,以及少量阻燃性和防腐性的研究,而关于改性对杉木应用过程中相关性能的影响的研究很少,如涂饰性能、流失性和环保性能等,这有待于科研工作者的进一步研究。杉木改性也应加强商业化研究,如减少改性时间、降低能耗及增强环保性等,这有助于研究成果在工业上的应用。

参考文献:

- [1] 国家林业局森林资源管理司. 第7次全国森林资源清查及森林资源状况[J]. 林业资源管理, 2010(1): 1—8. The State Forestry Administration of Forest Resources Management. The Seventh National Forest Resources Inventory and the Status of the Forest Resources[J]. Forest Resources Management, 2010(1): 1—8.
- [2] 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.
- [3] 付昕, 申婷婷. 浅谈木质包装[J]. 河南科技, 2013(10): 71. FU Xin, SHEN Ting-ting. Wood Package[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2013(10): 71.
- [4] 张方文, 于文吉, 哈密提, 等. 入境木质包装材料检疫除害处理现状与分析[J]. 包装工程, 2007, 28(10): 29—32. ZHANG Fang-wen, YU Wen-ji, HA Mi-ti, et al. Current Status and Analysis of the Entry Quarantine Treatments of Wood Packaging Materials[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(10): 29—32.
- [5] 史蕾, 张守攻, 吕建雄, 等. 落叶松木材改性的研究现状及发展趋势[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(4): 210—215. SHI Qiang, ZHANG Shou-gong, LYU Jian-xiong, et al. Research Status and Development Trend of Larch Wood Modification[J]. Chinese Forestry Science & Technology, 2012, 32(4): 210—215.
- [6] 邵亚丽, 安珍, 邢新婷, 等. 落叶松木材力学性质及应用研究进展[J]. 木材加工机械, 2011, 22(3): 46—49. SHAO Ya-li, AN Zhen, XING Xin-ting, et al. Advance on Mechanical Properties and Application of Larix[J]. Wood Processing Machinery, 2011, 22(3): 46—49.
- [7] 彭万喜, 吴义强, 张仲凤, 等. 中国的杉木研究现状与发展途径[J]. 世界林业研究, 2006, 19(5): 54—58.

- PENG Wan-xi, WU Yi-qiang, ZHANG Zhong-feng, et al. Situation and Developing Trends of Chinese fir[J]. *World Forestry Research*, 2006, 19(5): 54—58.
- [8] 伍艳梅. 木包装材料高频加热检疫处理技术研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009.
WU Yan-mei. Research on High Frequency Heating Quarantine Treatment Technology for Wood Packaging Materials[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2009.
- [9] 龙传文, 龙博, 韦文榜. PF树脂对杉木浸渍与压缩工艺的研究[J]. *中国胶粘剂*, 2008, 17(4): 27—29.
LONG Chuan-wen, LONG Bo, WEI Wen-bang. Study on Dipping and Compressive Process of Chinese Fir by PF Resin[J]. *China Adhesives*, 2008, 17(4): 27—29.
- [10] 王向歌, 金菊婉, 邓玉和, 等. 不同固含量低分子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.
- [11] 姚迟强, 于利, 李延军, 等. 酚醛树脂浸渍处理对杉木单板层积材性能的影响[J]. *浙江林业科技*, 2013, 33(2): 19—22.
YAO Chi-qiang, YU Li, LI Yan-jun, et al. Effect of PF Resin Treatment on Physical and Mechanical Properties of Chinese Fir LVL[J]. *Journal of Zhejiang Forestry Science & Technology*, 2013, 33(2): 19—22.
- [12] 戴仔财. 速生杉木横向复合型浸渍的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2012.
DAI Zai-cai. The Research about Fast-Growing Fir of its Horizontal Compound Type Impregnation[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2012.
- [13] 黄松军. 强化杉木单板层积材工艺研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
HUANG Song-jun. Study on Processing Technology of Strengthened LVL from Plantation Chinese Fir[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008.
- [14] HUANG Y H, FEI B H, YU Y, et al. Effect of Modification with Phenol Formaldehyde Resin on the Mechanical Properties of Wood from Chinese Fir[J]. *Bioresources*, 2012, 8(1): 272—282.
- [15] 马青, 李艳, 王天龙, 等. 初含水率对杉木浸渍重量变化率含水率和密度的影响[J]. *木材加工机械*, 2014, 25(3): 37—39.
MA Qing, LI Yan, WANG Tian-long, et al. The Effects of the Initial Moisture Content of the Chinese Fir on the Weight Change Rate, Moisture Content and Density of the Impregnated Wood[J]. *Wood Processing Machinery*, 2014, 25(3): 37—39.
- [16] 刘喻娟, 李重根, 郭杰文, 等. 速生杉木甲基丙烯酸甲酯改性及材性研究[J]. *华南农业大学学报*, 2011, 32(4): 116—118.
LIU Yu-juan, LI Chong-gen, GUO Jie-wen, et al. Study on Modifying Fast-growing Chinese-fir with the Methyl Methacrylate and the Properties of Modified Wood[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2011, 32(4): 116—118.
- [17] 张南南, 袁光明, 陈超. 水基纳米碳酸钙表面改性及其对杉木的增强效应[J]. *中南林业科技大学学报*, 2012, 32(1): 79—82.
ZHANG Nan-nan, YUAN Guang-ming, CHEN Chao. Surface Modification and Enhancement Effects of Water-based Nano-CaCO₃ on Chinese Fir[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2012, 32(1): 79—82.
- [18] 刘干. 杉木/纳米 Al₂O₃ 复合增强效应的研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2009.
LIU Gan. The Research of Improving Effect on the Composites of Nano-Al₂O₃ with Common Chinese Fir [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2009.
- [19] 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, 8(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, 8(1): 25—29.
- [20] 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.
- [21] 王燕, 陈泽君. 杉木浸渍改性材的尺寸稳定性研究[J]. *湖南林业科技*, 2013, 40(5): 41—44.
WANG Yan, CHEN Ze-jun. Research on Dimensional Stability of Treated Chinese Fir[J]. *Hunan Forestry Science & Technology*, 2013, 40(5): 41—44.
- [22] 刘智. 季胺铜防腐剂处理和热处理后人工林杉木的耐腐性研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2006.
LIU Zhi. Study on the Resistance to Decay Fungi of Chinese Fir Treated by ACQ-D and Heat Treatment[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2006.
- [23] 王传耀, 杨文斌, 陈刚. 杉木间伐材 ACQ 防腐与综合强化复合改性研究[J]. *林业科学*, 2006, 42(12): 101—107.
WANG Chuan-yao, YANG Wen-bin, CHEN Gang. Study on the Compound Modification of ACQ Preservative and Reinforce of *Cunninghamia Lanceolata*[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(12): 101—107.
- [24] 罗海. 速生杉木阻燃与弯曲异型研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2012.
LUO Hai. Study on Fire-Retardant and Bending of the Fast-Growing Chinese Fir[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2012.
- [25] 张彦娟. 丙烯酸酯/硅溶胶改性人工林木材与表面纹理强化的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
ZHANG Yan-juan. Study on Plantation Modified by Acrylate/Silica Emulsion and Grain Manifestation[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2014.
- [26] 武国峰, 姜亦飞, 宋舒莘, 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.
- [27] 袁佳. 杉木高温炭化改性技术的初步研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2010.

- YUAN Jia. The Study on the High Temperature Heat Treatment of Chinese Fir[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2010.
- [28] 程大莉. 高温热处理杉木木材的工艺及性能研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2007.
CHENG Da-li. The Study on Technics and Properties of Heat Treated Fir Wood[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2007.
- [29] 邓邵平, 江茂生, 陈孝云, 等. 杉木间伐材高温热处理后化学成分的变化[J]. 林业科学, 2009, 45(11): 121—126.
DENG Shao-ping, JIANG Mao-sheng, CHEN Xiaoyun, et al. Changing Rules of Components of Cunninghamia Lanceolata Thinning Wood in Heat Treating Process[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(11): 121—126.
- [30] 李延军, 唐荣强, 鲍滨福, 等. 高温热处理杉木力学性能与尺寸稳定性研究[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(4): 232—236.
LI Yan-jun, TANG Rong-qiang, BAO Bin-fu, et al. Mechanical Properties and Dimensional Stability of Heat-treated Chinese Fir[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(4): 232—236.
- [31] 黄金富. 热处理杉木速生材力学性能及防腐特性的研究[J]. 福建建材, 2012(11): 1—2.
HUANG Jin-fu. The Study on Mechanical Properties and Anticorrosion Properties of Heat Treated Chinese Fir[J]. Fujian Building Materials, 2012(11): 1—2.
- [32] 江京辉, 吕建雄, 周永东, 等. 水蒸气热处理对人工林杉木性质的影响[J]. 木材工业, 2015, 29(2): 13—16.
JIANG Jing-hui, LYU Jian-xiong, ZHOU Yong-dong, et al. Influence of Heat Treatment by Steam on Wood Properties of Chinese Fir from Plantations[J]. China Wood Industry, 2015, 29(2): 13—16.
- [33] CAO Y J, LU J X, HUANG R F, et al. Increased Dimensional Stability of Chinese Fir through Steam-heat Treatment[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2012, 70(4): 441—444.
- [34] 楼超超. 硅溶胶对杉木的阻燃改性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
LOU Chao-chao. Study on the Modification of Chinese Fir by Silica Sol to Enhance Wood's Fire-Resisting Property[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [35] 邓邵平. 两段处理法对杉木间伐材性能改良的研究[J]. 福建林学院学报, 2007, 27(1): 52—56.
DENG Shao-ping. Modification on Thinning Wood of Cunninghamia Lancelolate by Double Diffusion[J]. Journal of Fujian College of Forestry, 2007, 27(1): 52—56.
- [36] 陈泽君, 范友华, 胡伟. 杉木改性复合木材的制备及性能研究[J]. 湖南林业科技, 2008, 35(2): 12—14.
CHEN Ze-jun, FAN You-hua, HU Wei. Study on the Preparation of a Modified China Fir Composite by Inorganic Substances and Its Properties[J]. Hunan Forestry Science & Technology, 2008, 35(2): 12—14.
- [37] 王娜娜. 木材表面氢氧化铝薄膜的低温水热生成及性能研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
WANG Na-na. The Study of Low-Temperature Hydrothermal Growth of Al(OH)₃ Film on Wood Surface and Its Performance[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014.
- [38] QIAN X Q, YE Q Q, LAI J Y. Effects of SiO₂ Sol on Leachability of Wood Impregnated with Disodium Octaborate Tetrahydrate[J]. Rare Metal Materials & Engineering, 2012, 41(11): 668—671.
- [39] SHI Z Q, FU F, WANG S Q, et al. Modification of Chinese Fir with Alkyl Ketene Dimer (AKD): Processing and Characterization[J]. Bioresources, 2012, 8(1): 581—591.
- [40] 朱长庆, 张建, 庄期应, 等. 工艺条件对杉木微波处理后渗透性能影响的研究[J]. 林业机械与木工设备, 2009, 37(11): 18—21.
ZHU Chang-qing, ZHANG Jian, ZHUANG Qi-ying, et al. Study on the Effect of Technological Conditions on Permeability of Microwave Treated Fir[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2009, 37(11): 18—21.
- [41] 何盛, 林兰英, 傅峰, 等. 六种木材的微波处理实验研究[J]. 微波学报, 2014, 30(4): 90—96.
HE Sheng, LIN Lan-ying, FU Feng, et al. Experimental Study of Six Species of Wood Treated by Microwave[J]. Journal of Microwaves, 2014, 30(4): 90—96.
- [42] 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.
HE Sheng. The Improvement of Wood Liquid Impregnability by Microwave Treatment and Its Mechanism[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2014.
- [43] 王海元, 秦学娴, 王天龙, 等. 微爆破处理对杉木干燥特性的影响[J]. 木材加工机械, 2013(5): 17—19.
WANG Hai-yuan, QIN Xue-xian, WANG Tian-long, et al. Effects of Air-Compressed Explosion Treatment on the Drying Characteristics of Chinese Fir[J]. Wood Processing Machinery, 2013(5): 17—19.
- [44] 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.
WANG Hai-yuan. Effect of Micro-Exploration Pretreatment on Permeability and Drying Characteristics of Chinese Fir and Locust[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013.
- [45] 苗平, 张文静. 汽蒸处理对木材横向渗透性的影响[J]. 南京林业大学学报, 2009, 33(2): 99—102.
MIAO Ping, ZHANG Wen-jing. Effect of Steaming Treatment on Transverse Permeability of Wood[J]. Journal of Nanjing Forestry University, 2009, 33(2): 99—102.
- [46] LU J X. Liquid Penetration of Freeze-drying and Air-drying wood of Plantation Chinese Fir[J]. Journal of Forestry Research, 2005, 16(4): 293—295.
- [47] 谢敏芳, 黄晓东, 窦延光. 聚氨酯防火涂料处理杉木壁板的热释放率研究[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(5): 165—167.
XIE Min-fang, HUANG Xiao-dong, DOU Yan-guang. A Study on Heat Release Rate of the Chinese Fir Wainscot Coated with the Polyurethane Flame-retardant Coating[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2006, 21(5): 165—167.