

木材压缩密实改性技术研究进展

宋丽琴¹, 姬富强², 孙建平^{1*}

(1. 广西大学 资源环境与材料学院, 广西 南宁 530000; 2. 广西森工集团股份有限公司, 广西 南宁 530000)

摘要:合理利用资源丰富的速生材可有效缓解我国木材资源短缺、供需矛盾日益加剧等问题,而速生材由于生长周期短导致密度较小,因此需要通过压缩密实等改性技术才能满足速生材在工业生产中的应用要求。针对木材压缩密实改性技术的预处理、热压密实和后期固定3个阶段研究现状进行综合评述,发现目前预处理主要有水煮、高温蒸汽、微波加热、浸渍和脱木素等方法,且不同的预处理方法的效果以及对压缩材的性能影响不同;含水率、压缩比、热压温度、保温时间、热压压力和保压时间等热压密实工艺参数对压缩材性能影响也有不同;后期固定主要通过高温加热和浸渍树脂固定等方法提高压缩材尺寸稳定性。尽管木材压缩密实技术相对成熟,但依旧存在预处理效果不好、压缩率低、环境污染和性能提升单一等问题,后续研究可以集中在优化传统预处理工艺、探索生物预处理工艺及实现绝缘阻燃等多功能压缩密实木材方面。

关键词:预处理;热压密实;后期固定

中图分类号:S781.2

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2022)04-0248-09

Research Progress on Compression of Wood

SONG Li-qin¹, JI Fu-qiang², SUN Jian-ping^{1*}

(1. School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530000, Guangxi, China;

2. Guangxi Forestry Industry Group Stock Corporation, Nanning 530000, Guangxi, China)

Abstract: Reasonable utilization of fast-growing wood can effectively alleviate the shortage of wood resources and intensifying contradiction between supply and demand in China. However, the density of fast-growing timber is low due to its short growth cycle. Therefore, the application requirements of fast-growing timber in industrial production can only be met through compression. In this study, the research status of wood compression modification technology in three stages of pretreatment, hot compression and later fixation was reviewed. It was found that the main pretreatment methods were hydrothermal, high temperature steam, microwave heating, impregnation and delignification, and different pretreatment methods had different effects on the properties of compressed wood. The effects of moisture content, compression ratio, hot pressing temperature, holding time, hot pressing pressure and holding time on the properties of compressed wood are also different. In the later stage, the dimensional stability of compressed wood can be improved by high temperature heating and resin impregnation. Although the wood compaction technology is relatively mature, there are still some problems, such as poor pretreatment effect, low compression rate, environmental pollution and performance improvement. The follow-up research can focus on optimizing the traditional pretreatment process, exploring the biological pretreatment process and realizing the multi-functional wood compaction, such as insulation and flame retardant.

Key words: pretreatment; hot compaction; later fixation

收稿日期:2021-04-15 修回日期:2021-07-19

基金项目:国家自然科学基金(31660174);广西自然科学基金重点项目(2022GXNFSDA035065)。

作者简介:宋丽琴。研究方向:林产品深加工与木材功能性改良技术。E-mail:liqinsong2020@163.com

*通信作者:孙建平,博士,教授。研究方向:生物质复合材料。E-mail:sjp_jpcn@163.com

木材作为4大基础材料(水泥、钢铁、塑料、木材)之一,被广泛应用于建筑、家具制造和制浆造纸等行业^[1-2]。这是因为相比于钢铁、合金类材料,木材具有质地轻、环保、可再生、节约能源和可循环利用等优点,相比于聚合物和仿生复合材料,木材具有制造工艺简单、成本低等优点^[3]。我国是一个木材资源极度稀缺的国家,加之人们对于木材的需求量日益增多,导致木材的供需矛盾亦进一步加剧^[4]。为了缓解木材供需矛盾,合理开发利用资源丰富的速生材来减缓天然材的消耗是有效的解决方法。速生材一般在幼年时砍伐,所以幼龄材所占比例较大,其半纤维素和木素含量高。因此多数材质疏松、易开裂变形、不耐腐朽和使用寿命短^[5-6],所以在制作家具以及其他木材制品时难以进行高精度加工,在建筑行业

中速生材的强度、硬度也难以满足相应的标准要求^[7]。

近几年,高性能材料不断增长的需求引起了人们对木材改性技术的兴趣,通过木材改性可为速生材的充分利用开辟更广阔的领域,同时也可为我国木材原料利用转向以速生材为主提供保证^[8]。众所周知,木材的强度与密度呈正相关,可以通过提高速生材密度来改善木材的强度,目前常用的改性途径主要有2种(图1):一种是通过外力对经过软化预处理的木材细胞腔或者细胞间隙进行挤压致密木材;另一种是通过有机或无机组分浸渍填充木材的细胞腔或者细胞间隙致密木材^[9-10]。本研究针对压缩密实木材的研究现状进行总结,并在此基础上分析压缩密实木材改性技术的研究趋势。

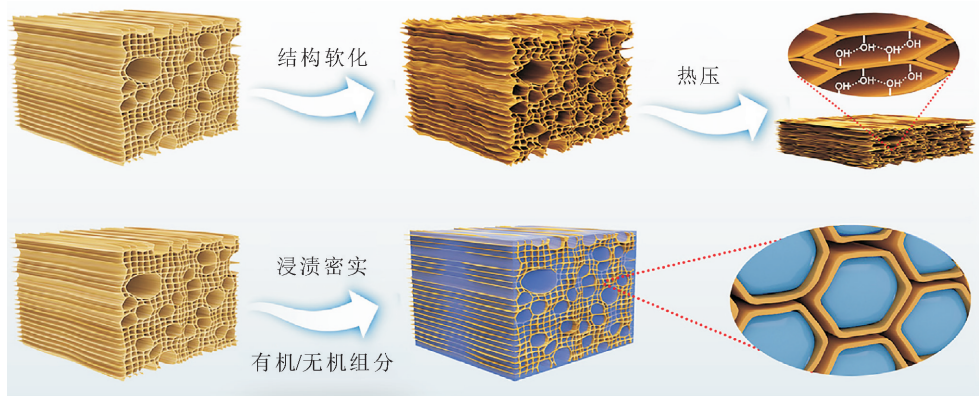


图1 密实木材改性技术^[9]

Fig. 1 Modification technologies of dense wood^[9]

1 木材压缩密实改性技术研究现状

美国以及德国在20世纪30年代就已经发现压缩密实木材在军用工业中的优良应用^[11];之后苏联、日本和印度等国也开始着手对木材压缩密实工艺进行研究,提出加热压缩、蒸煮压缩、高温加压方式制备密实山毛榉(*Fagus longipetiolata*)和桦木(*Betula*),并利用压缩密实木材制造织布梭^[12];20世纪50年代末和60年代初我国也研究出煤矿用的压缩木锚杆和木梭^[13]。20世纪90年代后,为提高速生材利用率,木材压缩密实改性技术备受学术界以及工业界的关注^[14],进行了大量的关于理论和应用的研究,目前木材压缩密实改性技术已经相对成熟,并形成了完备的技术体系^[15]。压缩密实改性木材技术一般包括预处理、热压密实、后期固定3个阶段^[16],这3个阶段相对独立又相互影响。

1.1 预处理

在干燥状态下即使很小的力对木材进行压缩也会导致木材细胞壁破坏,因此对木材进行热压密实前需要对木材进行预处理,使木材充分软化、塑性增

强。目前常用的预处理方法有水煮、高温蒸汽、微波加热、浸渍及化学药剂脱木素等,每种预处理方法工艺不同,对压缩密实后木材性能的影响也存在一定差异^[17]。

1.1.1 水煮预处理 从表1可以看出,随着含水率的增加,湿润状态下木材组分的玻璃化转变温度降低,其中木素和半纤维的玻璃化转变温度下降明显,而纤维素下降不明显。因此,水煮预处理的原理是在热量和水的共同作用下,部分半纤维素和木质素会发生一定的降解呈黏流态,半纤维素的“黏结”作用削弱,使得纤维素、半纤维素和木质素之间部分失去联结,加大分子链之间的距离,为分子提供足够运动空间增大木材的塑性,从而使木材软化^[18]。国内吴海超^[19]和国外A. Pertuzzatti等^[20]的研究结果均证实了水煮预处理能显著增大木材的塑性,使得木材易于压缩。

对于不同树种来说,最佳水煮预处理软化条件取决于木材的结构以及组分含量之间的差别。张帝树等^[21]认为白桦(*Betula platyphylla*)在80℃,保温时长为2.5~3h软化效果最好,此时白桦塑性最

佳,压缩效果好;而杨木(*Populus tomentosa*)的最佳软化条件是 60 ℃,保温时长为 3 h。但王茜等^[22]将杨木试材在 80 ℃下分别水煮预处理 0.5、1、1.5、2 h,水煮后的试材在热压温度 140 ℃和保压时间 10 min 的条件下进行横纹径向压缩处理,压缩完成后立即浸泡在冷水中进行回复处理,得出水煮软化 1 h 的回复率最低,仅针对回复率而言,杨木的最佳水煮预处理条件是 80 ℃和 1 h。因此,针对不同树种其最佳水煮软化条件不同。

表 1 木材细胞壁主要成分的玻璃化转变温度^[14]

Table 1 Vitrifiable changing temperature of main component in wood cell wall ^[14] ℃		
木材组分	干燥状态	湿润状态
木素	134~235	77~128
半纤维素	167~217	54~142
纤维素	231~253	222~250

另外,水煮处理尺寸较厚的木材,耗时长、尺寸稳定性差,为了解决以上问题陈瑞英等^[23-24]通过试验研究蒸煮工序加入软化添加剂 CH(文献作者自配的软化添加剂)制备压缩密实化杉木(*Cunninghamia lanceolata*)以及杨木,得出添加适量的软化剂预处理后的压缩密实化杉木木材回复率减小,其宽度吸湿率和厚度吸湿率分别降低了 117% 和 203%;添加质量分数为 5% 的 CH 溶液蒸煮软化杨木密实化效果好,处理材回复率明显降低,厚度吸湿率为 2.1%,与未添加 CH 水煮处理对比分别降低 50%。因此添加 CH 能够显著提高压缩材的尺寸稳定性,而且压缩后的杨木提高了原木材表面平整度和光泽度,克服了杨木易青变的缺陷。

1.1.2 高温蒸汽预处理 高温蒸汽预处理的原理与水煮预处理相似,即在高温高湿环境中,木材中的部分半纤维素易降解,而纤维素非结晶区分子链上的羟基容易和水形成氢键,使得纤维素之间的间距增大,相互之间引力降低,在压力作用下,容易产生位移,在宏观环境中则表现为木材的塑形提高,容易被压缩而不会破坏其细胞壁。研究发现,提高高温蒸汽预处理温度能显著提高压缩密实木材的尺寸稳定性,如 C. H. Fang 等^[25]利用该高温蒸汽喷射热压机对杨木单板进行致密化,蒸汽预处理温度分别为 140、160、180、200、220 ℃,然后在 4.5~9.0 MPa 的压力下,从初始厚度压缩至目标厚度。结果表明随着预处理温度的增加致密化单板的吸湿性明显降低,且致密后的单板布氏硬度提高 2~3 倍,拉伸和弯曲强度也显著提高。另外致密单板显示出良好的外观产品潜力,可用于工程木地板、楼梯台阶和桌面等。

与处理温度一样,高温蒸汽预处理时间对压缩

密实木材的力学性能和尺寸稳定性有一定的影响,如魏新莉等^[26]研究发现,在 130 ℃的汽蒸温度下,汽蒸软化时间控制在 60 min 以内对热压密实化杨木的物理力学性能较好;如果汽蒸软化时间超过 60 min,热压密实化杨木的力学性能指标都有明显降低。赵钟声等^[27]研究发现,日本柳杉(*Cryptomeria japonica*)、日本厚朴(*Magnolia hypoleuca*)、中国产大青杨(*Populus cathayana*)、落叶松(*Larix gmelinii*)和杉木 5 种木材在 200 ℃的水蒸气温度下进行压缩处理 5~60 min 后,压缩木材试件都随着水蒸气处理时间的增加而压缩变形恢复率减少。因此,在适宜的蒸汽预处理时间范围内,能显著提高压缩材的性能,一旦超过范围,性能可能会出现降低的趋势。

高温蒸汽预处理中常用的一种处理工艺是粘弹性热压(简称 VTC)改性工艺。VTC 工艺是一种使用蒸汽、热量和机械压缩处理木材,压缩过程中不会导致细胞壁破裂且会增加木材的强度和硬度^[28],通过该工艺制备的压缩木称为 VTC 处理材^[29]。VTC 处理材表面具有疏水性能,尺寸稳定性高,具有良好的生物耐腐蚀性^[30],是一种极具发展前景的制备压缩密实木材工艺技术。

1.1.3 微波加热预处理 微波加热预处理木材是 20 世纪 80 年代研究和开发的一种新型工艺,微波加热是在微波场作用下使极性分子如水及有关的官能团(如羟基)等,产生摆动,摩擦生热的过程^[31-32]。与传统的水热预处理(水煮预处理和高温蒸汽预处理)相比,微波加热预处理有如下优点:第一,水热预处理软化木材耗时较长且加热不均匀,而微波加热来自木材内部,可达到里外一起加热的目的,且升温迅速,可缩短软化时间;第二,微波加热预处理过程中温度可控性强,使得木材能在最佳工艺条件下进行软化处理^[33]。

90 年代初, M. Inoue 等^[34]将干燥的日本柳杉锯材的表层浸泡在水中,当水渗透到一定量以后,用微波辐射加热使表层软化,然后放置在热压机上压缩、压密、干燥定型得到表面压密的木材。寇建良等^[35]对杨木采用水煮、冷冻、微波 3 种方式预处理后再进行压缩密实化,结果表明微波加热软化处理材压缩后吸水厚度膨胀率平均值为 84.4%,回复率平均值为 72.0%,低于其他 2 种软化处理方法,证明微波预处理对压缩处理杨木尺寸稳定性有改善。这是由于木材中的水分在高强度微波的辐射下作取向运动,相互摩擦产生热量,使水分汽化,迅速增大的蒸汽压强能瞬间冲破木材结构中最薄弱的部位(木材细胞壁上纹孔膜等)^[36]。在此过程中木材中

大量水分被蒸发,从而使试样含水率降低易于压缩,因此木材的吸湿膨胀率及回弹率较小。J. Dömény等^[37]发现微波增塑山毛榉木材进行压缩致密后的木材密度增加,剖面密度在整个横截面上分布均匀,径向和切向的致密试样恢复率分别为13%和2%;且从微观结构图可以看出微波塑化以及随后的致密化没有任何细胞壁破裂,证明微波加热是山毛榉软化的一个有效途径。

水煮结合微波预处理可以通过水的作用增大木材细胞壁内自由体积的空间,利用微波加热提高分子热运动的能量,还可以破坏纤维素和半纤维素链分子间的氢键以及木质素与碳水化合物之间的连接键,使木质素本身产生热软化的作用,利于植物纤维网状结构的疏松,从而增大木材细胞壁内自由体积的空间,提高软化性能。如宋魁彦等^[38]对榆木(*Ulmus rubra*)试样进行水煮处理,然后在输出功率600 W的微波条件下对其处理260、280、300 s后进行压缩密实木材,结果表明处理时间为280 s时顺纹压缩率最大。采用同样方法对水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)木材进行预处理,微波处理时间分别为320、350、380 s,发现微波软化处理时间350 s时软化效果最好^[39]。

1.1.4 浸渍预处理 浸渍预处理一般选用低分子量树脂或非甲醛化交联体浸渍木材,由于树脂或非甲醛化交联体固化在木材细胞腔、细胞间隙以及细胞壁微纤丝中,会抑制木材细胞壁微纤丝的回弹,使树脂浸渍处理后的压缩木材具有很高的稳定性^[40-41]。研究发现,树脂浸渍预处理的浓度是影响压缩材尺寸稳定性的关键因素,如提高酚醛树脂水溶液浸渍预处理浓度对降低泡桐(*Paulownia*)压缩木材的回弹率具有一定促进作用,10%的酚醛树脂水溶液浓度具有理想的结果^[42];10%的低分子量三聚氰胺甲醛树脂(MF)处理杨木后热压,压缩试样在室温条件下浸水可完全保持其压缩变形,17.5%和25%的树脂处理的压缩杨木在沸水中仍可保持其压缩变形^[43]。

树脂浸渍预处理后不仅能提高压缩木材的尺寸稳定性,还会影响压缩木材的力学性能。随着酚醛树脂处理浓度的增加,压缩木材的顺纹抗压强度、表面硬度和耐磨性均有不同程度的提高^[44]。刘艳萍等^[45]采用改性三聚氰胺树脂处理杨木压缩密实化后,处理材顺纹抗压强度大幅度提高,比未处理的杨木素材平均提高201.44%,弹性模量增加量也较大,比未处理材平均提高138.13%,静曲强度比未处理材平均提高63.64%^[45]。柴宇博等^[46]研究发现,杨木热压密实前经过乙酸酐酯化处理或三聚氰胺改性脲

醛树脂(MUF)浸渍预处理,其各项力学性能均得到大幅提高,且三聚氰胺改性脲醛树脂相比于乙酸酐酯浸渍后提升力学性能的效果好,可使杨木密度从0.39 g/cm³提高到0.76 g/cm³,表面硬度、弹性模量和抗弯强度分别提高192%、196%和142%。

但是,使用含有甲醛和苯酚的树脂可能会引发潜在的环境问题^[47],研究开发以多元羧酸类化合物为酯化剂、无机盐类为催化剂的交联剂是一类新型的水溶性、无毒害、无污染的非甲醛系试剂交联体系^[48]。方桂珍等^[49]发现多元羧酸类化合物(1,2,3,4-丁烷基四甲酸)对大青杨浸渍后压缩处理的试材变形恢复率较低,陈太安等^[50]发现糠醇浸渍压缩木的吸水厚度增长率在4.38%~5.97%,远低于对照材的49.81%~57.28%,相比于天然材糠醇浸渍压缩材的抗弯强度和表面硬度显著提高,增幅分别为89.1%和131.1%;更重要的是醇树脂的原料糠醛主要来源于玉米(*Zea mays*)秸秆、甘蔗(*Saccharum officinarum*)渣等农业剩余物,既能实现资源的再利用又对环境友好。A. Pfriem等^[51]用糠醇和马来酸酐混合溶液以真空和加压浸渍的方式对山毛榉木材进行处理,然后机械压缩密实化制得的压缩木材呈现出较低的回弹率。J. W. Wu等^[52]采用环保型反应性水性丙烯酸树脂浸渍杨木,致密后的木材性能优良,适用于地板、桌椅和浴室柜等。

1.1.5 化学药剂脱木素预处理 最先提出化学药剂脱木素预处理制备压缩密实木材的是美国马里兰大学材料科学与工程系胡良兵课题组。该课题组主要通过图2中的“两步法”制备压缩密实木材,先将尺寸为120.0 mm×44.0 mm×44.0 mm的天然木块在2.5 mol的氢氧化钠和0.4 mol的亚硫酸钠混合的沸腾水溶液中浸泡7 h,然后在沸腾的去离子水中浸泡数次以去除化学物质;再在5 MPa的压力下,100℃下压制1 d获得尺寸为115.6 mm×46.5 mm×9.5 mm的致密木材^[3]。该预处理方法原理与传统的碱性亚硫酸盐制浆法一致,即在碱性亚硫酸盐蒸煮液中,SO₃²⁻在碱性条件下与木素反应,使木素磺化的同时,还能使各种醚键结合发生断裂,木素磺化即是在苯环侧链上引入磺酸基,使其能够溶于水,达到脱木素预处理效果^[53]。利用“两步法”制备的压缩密实木材由于脱除了部分细胞壁成分,压缩率更高,强度、韧性和抗弹力均提高十倍以上且尺寸稳定性强,是一种优异的高性能结构材料。此外,M. Frey等^[54]将云杉(*Picea asperata* Mast)在80℃的过氧化氢和冰醋酸的混合溶液中脱木素预处理制备的致密木材力学性能也优于天然木材和许多其他天然纤维增强复合材料。

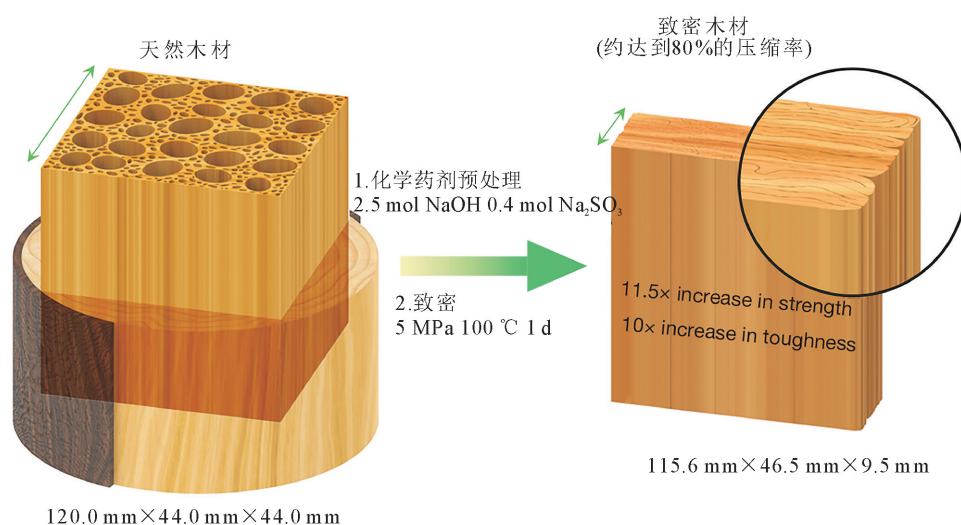


图2 自上而下“两步法”将天然木材转化为超强的致密木材的示意图^[3]

Fig. 2 Schematic of the top-down two-step approach to transforming bulk natural wood directly into super-strong and tough densified wood^[3]

总的来说,通过化学药剂脱木素预处理制备的压缩密实木材压缩率高,性能提升显著,但由于部分脱木素会导致木材细胞壁成分分布不均匀,使压缩后的木材均匀性较差,且脱木素会增加亲水性纤维素的暴露,导致稳定性差使压缩材使用环境受到限制^[55-57]。为了解决以上问题,M. Frey 等^[58]提出一种新的化学药剂脱木素预处理制备压缩密实木材方法,先将天然木材在过氧化氢和冰醋酸的混合溶液中进行脱木素预处理,留下纤维素骨架形成一个连续的多孔结构,然后将环氧树脂渗透到纤维素骨架中,再在压力为 3 MPa、热压温度为 60 °C 下对树脂渗透的木质纤维素骨架进行压缩,得到一种脱木素木材增强聚合物(DWRP)复合材料。这种复合材料具有高达 70 GPa 的拉伸性能和 600 MPa 的强度,与合成复合材料相比,此方法使纤维素之间联系紧密,单位体积内纤维素的体积分数占比高,因此其力学性能优越。

1.2 热压密实

热压密实即在一定条件下对木材进行压缩,从而得到压缩密实木材。根据木材在压缩过程的细胞壁的形状来看,木材压缩共分为 3 个阶段:最初的弹性变形阶段,这个过程中木材细胞壁的形状几乎不变;之后的稳定变形阶段,木材细胞壁被挤压变形,相邻细胞壁之间距离减小;最后的细胞腔几乎消失阶段,木材的细胞壁相互紧贴。这就达到了木材的极限压缩情况,如果继续加压,细胞壁则可能被破坏。

热压密实工艺中的含水率、压缩比、热压温度、保温时间、热压压力和保压时间等均是影响制备的压缩密实木材性能的因素。如刘献奇等^[59]发现热压温度是压缩木性能的主要因素,处理时间为次

要因素。吕慧敏^[60]发现,压前含水率越高(100%左右),木材的恢复率则会越低,但含水率过高,则会因木材细胞间水分不易排出造成压缩后的鼓泡现象;含水率过低(25%左右)的情况下,热压后的木材会发生一定程度的表面碳化现象,且热压后的试件颜色较深;最终得出最佳的压前含水率为 50%左右。K. Laine 等^[61]研究得出保压时间及保压温度不仅影响密度分布的形成,而且影响木材的硬度。由此可见,热压工艺参数对压缩材的性能影响较大,因此应根据树种及压缩木用途,合理设定压缩工艺参数,获得理想的压缩密实木材。

1.3 后期固定

压缩密实后的木材受到水分以及湿热作用后,压缩变形可以部分甚至全部恢复^[62-63],这是由于木材细胞壁中的微纤丝(纤维素大分子链聚集并结晶化的构造体)和细胞质基质(部分无定型高分子木质素和非结晶性多支链半纤维素)的弹性应变引起的^[64]。

针对压缩密实木材的变形回弹机理,主要采取以下 3 个途径来防止压缩密实木材后期变形回弹:第一,变形状态下的木材组分分子间形成架桥,以防止微纤维的相对位移;第二,使表面疏水化,减少水分的作用;第三,加热,缓解内部应力^[65]。目前常用以下方法提高压缩密实木材的稳定性。

1.3.1 高温加热处理 当木材热处理后,半纤维素和纤维素间的氢键被破坏,纤维素和木质素的相互作用被削弱或者破坏,微纤丝和 Matrix 基体(半纤维素和木质素)中内应力因而得到一定程度的释放。热处理过程中会使得半纤维素降解,导致吸湿性较强的羟基和羰基减少。木质素大分子中的甲氧基基

团在高温下发生脱甲氧基反应,在半纤维素水解的酸性条件下酚羟基发生酯化反应,导致羟基减少,同时木质素发生解聚反应生成醛类物质参与亚甲基桥的交联反应,形成稳定的网状结构^[66-70]。这些是提高压缩材尺寸稳定性的主要因素。A. Darwis 等^[71]和高志强等^[72]的研究结果均发现,热处理后期固定能显著改善致密材的尺寸稳定性。

1.3.2 高温高压水蒸气处理 水蒸气后期固定原理与热处理相似,相比于高温热处理,利用水蒸气后期固定能够大量缩短处理时间。大量研究发现,压缩木在温度为 160~200 ℃ 的高温水蒸气下后期固定 2~8 min 几乎可实现永久固定^[73]。

1.3.3 浸渍处理 浸渍固定采用树脂或非甲醛系列试剂的交联剂浸渍压缩密实后的木材,浸渍溶液使木材细胞壁中的微纤丝和细胞质基质进行固定,且浸渍固定后的木材表面疏水化,减少木材表面与水分的接触,进一步提高压缩木材的稳定性^[74]。研究发现三聚氰胺甲醛树脂和异氰酸酯树脂等处理可使压缩材的变形回弹受到有效抑制。利用浓度为 6% 的三聚氰胺甲醛树脂浸渍处理固定的泡桐压缩木在室温水里几乎无回弹,而用 25% 的三聚氰胺甲醛树脂处理的压缩木试样,即使在沸水中也几乎无回弹^[75]。随着改性异氰酸酯树脂质量分数的增加,无论是冷水浸泡还是煮沸处理,压缩材的厚度膨胀率和压缩变形恢复率都明显降低,当树脂质量分数 >15% 时,尺寸稳定性提高更加明显^[76]。

1.3.4 其他处理 除以上 3 种常用的固定方法外,高能射线照射处理、常压高温处理和高频热处理等方法也可以提高压缩木材的尺寸稳定性^[64]。

2 展望

压缩密实改性技术是提高速生材强度的重要措施,这对于发挥我国速生材资源的优势具有非常重要的现实意义以及社会效益。近年来,针对木材压缩密实改性技术的研究越来越多,传统的预处理方法主要有物理法(水煮、高温蒸汽和微波加热等)和化学法(树脂浸渍、化学药剂脱木素等)。其中,水煮预处理温度可控范围窄,且木材受热不均匀,对于一些相对较厚的试件加热的时间长,软化效果不是很理想;高温蒸汽预处理虽然温度可控范围大,耗时较水煮预处理更短,软化效果比水煮好,但是其设备要求高,投资相对较高;微波预处理与高温蒸汽预处理相似,设备以及技术要求高;而浸渍预处理以及化学药剂脱木素预处理过程中需要使用化学药剂,会对环境产生一定的影响,不适合大幅度推广使用。

针对传统的预处理方法中存在的问题,水煮预

处理应提高其传热速度以及传热均匀性;高温蒸汽预处理和微波预处理应该在寻求低廉的设备,减少成本的基础上进行改进;树脂预处理可以使用并开发一些环保树脂进行预处理,而化学药剂脱木素预处理可回收利用产生的废液,以免造成环境污染。不同预处理工艺,寻找合适的工艺参数,从而获得性能优异的产品进行深入研究改进。除了改善传统的预处理方法,未来还可以从以下几方面进行深入研究新的预处理方法。目前化学药剂脱木素预处理过程是对木材试样进行不同程度的脱木质素和半纤维素,最后压缩致密的木材细胞壁成分大都是纤维素,未来可以利用化学试剂对木材进行不同程度脱纤维素和半纤维素预处理,探究压缩致密木质素的木材性能影响。此外,木腐真菌可以不同程度地腐朽木材,实质上也就是不同程度地降解木材中的木质素、纤维素和半纤维素,这个过程与化学药剂脱木素处理的原理大致相同,但是更加生态环保。因此可以尝试木腐真菌预处理方法制备压缩密实木材,从而探究生物法预处理制备压缩密实木材的可行性,可为压缩自然界的腐朽木材提供参考,变废为宝,实现资源的再利用。

此外,目前压缩密实木材存在提升性能单一等问题。针对这一问题,未来可在提升木材力学性能的同时添加一些辅助性能,从而打造出多功能压缩密实木材,如可在压缩密实木材表面涂覆绝缘漆等制备压缩密实绝缘木材。绝缘材料往往需耐化学药品、耐气候变化、耐腐蚀等性能,而压缩密实绝缘木材具有力学性能强、耐腐蚀性等优越性能;制备压缩密实木材的同时进行染色或模拟纹理,既提高原木机械性能又能提高其美学价值,扩大压缩密实木材的使用范围;可利用压缩密实木材用作阻燃材料,因为压缩密实木材可以部分或完全去除木材细胞壁之间的空间,从而形成高度致密的层压结构。这种密集(layered)的层压结构不仅有效地降低了材料的透气性,而且有助于在材料着火时在木材表面形成绝缘炭层。浓密的木炭层对下层木材形成了一道隔热屏障,通过减少热扩散和氧扩散,提高了防火性能,致密木材还具有优异的抗压强度,有效防止了木结构的倒塌和破坏,在发生火灾时获得宝贵的救援时间。

参考文献:

- [1] FRATZL P. Wood made denser and stronger[J]. Nature, 2018, 554 (7691): 172-173.
- [2] CHEN C J, KUANG Y D, ZHU S Z, *et al.* Structure-property-function relationships of natural and engineered wood [J]. Nature Reviews Materials, 2020, 5: 642-666.
- [3] SONG J, CHEN C, ZHU S, *et al.* Processing bulk natural wood

- into a high-performance structural material[J]. *Nature*, 2018, 554(7691): 224-228.
- [4] 张也, 王玉兰, 陆全济, 等. 油棕叶梗重组方材制备工艺[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(4): 229-235.
ZHANG Y, WANG Y L, LU Q J, *et al.* On the technology of preparing reconsolidated square lumber of oil palm leaf stem [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(4): 229-235. (in Chinese)
- [5] CAHYON T D, WAHYUDI I, PRIADI T, *et al.* The quality of 8 and 10 years old samama wood (*Anthocephalus macrophyllus*) [J]. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 2015, 12(1): 22-28.
- [6] 张涛, 于建芳, 王哲, 等. 茶多酚浸渍马尾松的改性研究[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(4): 191-196.
ZHAN T, YU J F, WANG Z, *et al.* Modification of *Pinus massoniana* timber infused with tea polyphenols [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(4): 191-196. (in Chinese)
- [7] PELIT H, BUDAKÇI M, SÖNMEZ A. Density and some mechanical properties of densified and heat post-treated Uluda fir, linden and black poplar woods [J]. *European Journal of Wood & Wood Products*, 2017, 76(5): 1-9.
- [8] 杨洋, 张蕾, 宋菲菲, 等. 人工林速生材高值化利用研究进展[J]. 林产工业, 2020, 57(5): 53-55.
- [9] 吴义强. 木材科学与技术研究新进展[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(1): 1-28.
WU Y Q. Newly advances in wood science and technology [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2021, 41(1): 1-28. (in Chinese)
- [10] LAINE K, SEGERHOLM K, WLINDER M, *et al.* Wood densification and thermal modification: hardness, set-recovery and micromorphology [J]. *Wood Science and Technology*, 2016, 50(5): 883-894.
- [11] STAMM A J, SEBORG R M. Resin treated, laminated, compressed wood [J]. *American Institute of Chemical Engineers Journal*, 1941, 23(37): 385-397.
- [12] BURMESTER V E. Effect of heat-pressure-treatments of semi-dry wood on its dimensional stability [J]. *Holz Rohwerkst*, 1973, 31(6): 237-243.
- [13] 黄广华. 低质速生材密实化结构的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2004.
- [14] 高志强. 木材层状压缩可控性机理及其变形固定研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [15] 涂登云, 陈川富, 周桥芳, 等. 木材压缩改性技术研究进展[J]. 林业工程学报, 2021, 6(1): 13-20.
TU D Y, CHEN C F, ZHOU Q F, *et al.* Research progress of thermo-mechanical compression techniques for wood products [J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2021, 6(1): 13-20. (in Chinese)
- [16] 陈思敏. 柳杉木材密实化工艺研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2017.
- [17] 王娱, 王天龙, 沈杨, 等. 预处理方式对速生杨木试件密实及密闭性的影响[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(2): 213-217.
WANG Y, WANG T L, SHEN Y, *et al.* Effects of pretreatment methods on the compaction and airtightness of fast-growing poplar [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(2): 213-217. (in Chinese)
- [18] KUTNAR A, KAMKE F A. Influence of temperature and steam environment on set recovery of compressive deformation of wood [J]. *Wood Science and Technology*, 2011, 46(5): 953-964.
- [19] 吴海超. 水热法制取压缩木的力学性能及其应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [20] PERTUZZATTI A, MISSIO A L, Cademartori P H, *et al.* Effect of process parameters in the thermomechanical densification of pinus elliottii and eucalyptus grandis fast-growing wood [J]. *Bioresources*, 2018, 13(1): 1576-1590.
- [21] 张帝树, 梅瑞仙, 李启岭. 白桦及毛白杨小径材木方软化工艺的研究[J]. 北京林业大学学报, 1994(1): 47-52.
- [22] 王茜, 薛童, 胡逢海, 等. 毛白杨压缩变形回复工艺与应用的研究[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(1): 247-251.
WANG Q, XUE T, HU F H, *et al.* A study on the technique and application of compressive deformation recovery of poplar timber [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2018, 33(1): 247-251. (in Chinese)
- [23] 陈瑞英, 刘景宏, 魏萍. 杉木间伐材压缩密化与回复变形的研究[J]. 福建林学院学报, 2005, 25(4): 294-298.
- [24] 陈瑞英, 胡国楠. 速生杨木密实化研究[J]. 福建林学院学报, 2005, 34(3): 324-329.
- [25] FANG C H, MARIOTTI N, CLOUTIER A, *et al.* Densification of wood veneers by compression combined with heat and steam [J]. *European Journal of Wood & Wood Products*, 2012, 70(3): 155-163.
- [26] 魏新莉, 向仕龙, 何华. 水热预处理对杨木压缩木物理力学性能的影响[J]. 木材工业, 2004, 18(3): 20-22.
- [27] 赵钟声, 刘一星, 井上雅文, 等. 水蒸气前处理对杨木等5个树种木材压缩变形恢复率及力学性能影响的研究[J]. 国际木业, 2003, 33(5): 16-20.
- [28] KAMKE F A. Densified radiata pine for structural composites [J]. *Maderas Ciencia Y Tecnología*, 2006, 8(2): 83-92.
- [29] KAMKE F A, RATHI V M. Apparatus for viscoelastic thermal compression of wood [J]. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2011, 69(3): 483-487.
- [30] ALES U, KAMKE F A, SERNEK M, *et al.* Erratum to: the wettability and bonding performance of densified VTC beech (*Fagus sylvatica* L.) and norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) bonded with phenol-formaldehyde adhesive and liquefied wood [J]. *European Journal of Wood & Wood Products*, 2013, 71(3): 371-379.
- [31] 王必林. 压缩木销钉连接力学性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [32] HANSSON L, ANTTI A L. The effect of microwave drying on Norway spruce woods strength: a comparison with conventional drying [J]. *Journal of Materials Processing Tech.*, 2003, 141(1): 41-50.
- [33] MIROSLAV G, MILAN G. Changes in temperature and moisture content in beech wood plasticized by microwave heating [J]. *Bioresources*, 2013, 8(3): 3372-3384.
- [34] INOUE M. Surface compression of coniferous wood lumber [J]. *Journal of the Japan Wood Research Society*, 1990, 36

- (11):969-975.
- [35] 寇建良,孙照斌,刘宇化.毛白杨速生材压缩密实化工艺初步研究[J].河北林果研究,2004,24(3):20-22.
- [36] 常佳,王金林,王清文,等.微波处理对木材染色性能的影响[J].林业科学,2008,44(6):109-112.
CHANG J, WANG J L, WANG Q W, *et al.* Effects of wood dyeing with microwave processing[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44(6):109-112. (in Chinese)
- [37] DÖMÉNY J, ČERMÁK P. Density profile and microstructural analysis of densified beech wood (*Fagus sylvatica* L.) plasticized by microwave treatment[J]. European Journal of Wood & Wood Products, 2018, 76:105-111.
- [38] 宋魁彦,李坚.水热-微波处理对榆木软化和顺纹压缩及弯曲的影响[J].林业科学,2009,45(10):120-125.
SONG K Y, LI J. Effect of hydrothermal-microwave treatment on softening and longitudinal compressing and bending elm wood[J]. Silvae Sinicae, 2009, 45(10):120-125. (in Chinese)
- [39] SONG K Y, LI J. Effect of Hydrothermal-Microwave Softened Treatment on Longitudinal Compressing and Bending Ash Wood[J]. Advanced Materials Research, 2010, 113:103-108.
- [40] LYKIDIS C, KOTROTSIOU K, TSICHLAKIS A. Reducing set-recovery of compressively densified poplar wood by impregnation-modification with melamine-formaldehyde resin[J]. Wood Material Science & Engineering, 2020, 15(5):269-277.
- [41] BIZIKS V, BICKE S, MILITZ H. Penetration depth of phenol-formaldehyde (PF) resin into beech wood studied by light microscopy[J]. Wood Science and Technology, 2018, 53(1):165-176.
- [42] 陈玉和,李强,James HMuehl.泡桐木材压缩硬化研究初报-泡桐压缩木回弹率的影响因素[J].中南林学院学报,1997(1):46-51.
- [43] 方桂珍,刘一星,崔永志.低分子量MF树脂固定杨木压缩木回弹技术的初步研究[J].木材工业,1996,10(4):18-21.
- [44] 章卫钢,鲍滨福,杜春贵,等.酚醛树脂浸渍压缩密实化杉木燃烧特性[J].浙江农林大学学报,2015,32(3):399-403.
ZHANG W G, BAO B F, DU C G, *et al.* Combustion properties of Chinese fir densified by phenolic resin impregnation and compression[J]. Journal of Zhejiang Agriculture and Forestry University, 2015, 32(3):399-403. (in Chinese)
- [45] 刘艳萍,张洋,李艳,等.改性三聚氰胺树脂处理杨木密实化的研究[J].西北林学院学报,2009,24(3):156-158.
LIU Y P, ZHANG Y, LI Y, *et al.* Densification of poplar wood by modified MF resin[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(3):156-158. (in Chinese)
- [46] 柴宇博,刘君良,王飞.两种预处理方法对杨木压缩变形的固定作用及性能影响[J].木材加工机械,2016,27(5):16-19.
CHAI Y B, LIU J L, WANG F. Effects of different modification methods on the fixation of compression and properties of plantation poplar wood[J]. Forestry and Grassland Machinery, 2016, 27(5):16-19. (in Chinese)
- [47] WANG Z, ZHAO S, KANG H, *et al.* Reduction of energy consumption of green plywood production by implementing high-efficiency thermal conductive bio-adhesive: assessment from pilot-scaled application[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 210(10):1366-1375.
- [48] 魏新莉,向仕龙,何华.速生材压缩强化处理的工艺与设备进展[J].林业机械与木工设备,2003,31(11):31-33.
- [49] 方桂珍,崔永志,常德龙.多元羧酸类化合物对木材大压缩量变形的固定作用[J].木材工业,1998(2):16-19.
- [50] 陈太安,罗朋朋,徐忠勇,等.糠醇浸渍对杨木压缩材物理力学性能的影响[J].林业工程学报,2016,1(2):21-25.
CHEN T A, LUO P P, XU Z Y, *et al.* Effects of furfuryl alcohol impregnation on physical and mechanical properties of densified poplar wood[J]. Journal of Forestry Engineering, 2016, 1(2):21-25. (in Chinese)
- [51] PFRIEM A, DIETRICH T, BUCHELT B. Furfuryl alcohol impregnation for improved plasticization and fixation during the densification of wood[J]. Holzforschung, 2012, 66(2):215-218.
- [52] WU J W, FAN Q, Wang Q W, *et al.* Improved performance of poplar wood by an environmentally-friendly process combining surface impregnation of a reactive waterborne acrylic resin and unilateral surface densification-ScienceDirect[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 261:121-131.
- [53] 林涛,范晶,殷学风,等.透明木材制备方法研究进展[J].现代化工,2019,39(8):43-48.
- [54] FREY M, NAUTIYAL I, SHUKLA S. Delignified and densified cellulose bulk materials with excellent tensile properties for sustainable engineering[J]. Journal of Engineering, 2018, 341:71-77.
- [55] FREY M, BIFFI G, ADOBES-VIDAL, MARIA, *et al.* Tunable wood by reversible interlocking and bioinspired mechanical gradients[J]. Advanced Science, 2019, 6(10):180-219.
- [56] GRNQVIST P, FREY M, KEPLINGER T, *et al.* Mesoporosity of delignified wood investigated by water vapor sorption[J]. ACS Omega, 2019, 4(7):12425-12431.
- [57] PRESS C. Thermo-hydro-mechanical wood processing[M]. Taylor & Francis Usa, 2012.
- [58] FREY M, SCHNEIDER L, MASANIA K, *et al.* Delignified wood-polymer interpenetrating composites exceeding the rule of mixtures[J]. ACS Appl., 2019, 11:35305-35311.
- [59] 刘献奇,赵湘玉,钟楷.花旗松薄木压缩工艺初探[J].林业机械与木工设备,2017,45(8):25-27.
LIU X Q, ZHAO X Y, ZHONG L. Probe into the douglas fir veneer compression process[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2017, 45(8):25-27. (in Chinese)
- [60] 吕慧敏.高强度速生杨木集成材制造工艺的研究[D].南京:南京林业大学,2011.
- [61] LAINE K, RAUTKARI L, HUGHES M. The effect of process parameters on the hardness of surface densified Scots pine solid wood[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2013, 71(1):13-16.
- [62] CHU D, MU J, AVRAMIDIS S, *et al.* Functionalized surface layer on poplar wood fabricated by fire retardant and thermal densification. part 1: compression recovery and flammability[J]. Forests, 2019, 10(11):955.
- [63] GAO Z, HUANG R, LU J, *et al.* Sandwich compression of wood; control of creating density gradient on lumber thickness and properties of compressed wood[J]. Wood Science &

- Technology, 2016, 50(4): 833-844.
- [64] 李坚. 木材科学[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [65] LAINE K, BELT T, RAUTKARI L, *et al.* Measuring the thickness swelling and set-recovery of densified and thermally modified scots pine solid wood[J]. Journal of Materials Science, 2013, 48(24): 8530-8538.
- [66] 李任. 预热条件对毛白杨层状压缩木材形成及其性能影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [67] KOCAEFE D, HUANG X, KOCAEFE Y. Dimensional stabilization of wood[J]. Current Forestry Reports, 2015, 1(3): 151-161.
- [68] GUO J. Changes of wood cell walls in response to hygro-mechanical steam treatment[J]. Carbohydrate Polymers: Scientific and Technological Aspects of Industrially Important Polysaccharides, 2015, 115: 207-214.
- [69] XIAN H, KOCAEFE D, KOCAEFE Y, *et al.* Structural analysis of heat-treated birch (*Betula papyrifera*) surface during artificial weathering[J]. Applied Surface Science, 2013, 264: 117-127.
- [70] GÉRARDIN, P. New alternatives for wood preservation based on thermal and chemical modification of wood—a review[J]. Annals of Forest Science, 2016, 73(3): 559-570.
- [71] DARWIS A, WAHYUDI I, DWIANTO W, *et al.* Densified wood anatomical structure and the effect of heat treatment on the recovery of set[J]. Journal of the Indian Academy of Wood Science, 2017, 14(2): 1-8.
- [72] 高志强, 张耀明, 吴忠其, 等. 加压热处理对表层压缩杨木变形回弹的影响[J]. 木材工业, 2017, 31(166): 24-28.
- [73] SHUOYE, CHEN, EIICHI, *et al.* Shape fixation of compressed wood by steaming: a mechanism of shape fixation by rearrangement of crystalline cellulose[J]. Wood Science & Technology, 2018, 52(5): 1-13.
- [74] INOUE M, NORIMOTO M, OTSUKA Y, *et al.* Surface compression of coniferous wood lumber. 3: permanent set of the surface compressed layer by a water solution of low molecular weight phenolic resin[J]. Journal of the Japan Wood Research Society, 1991, 37(3): 234-240.
- [75] 张云岭. 低分子量三聚氰胺-甲醛树脂固定泡桐压缩木回弹的研究[J]. 木材工业, 1996, 10(6): 15-18.
- [76] 杨霞. 异氰酸酯树脂固定人工林杨木压缩变形的研究[J]. 吉林林业科技, 2006, 35(3): 39-40.

(上接第 242 页)

- [9] LAMY F, TAKARLI M, ANGELLIER N, *et al.* Acoustic emission technique for fracture analysis in wood materials[J]. International Journal of Fracture, 2015, 192(1): 57-70.
- [10] KHENNANE A, KHELIFA M, BLERON L, *et al.* Numerical modelling of ductile damage evolution in tensile and bending tests of timber structures[J]. Mechanics of Materials, 2014, 68(1): 228-236.
- [11] 张明, 李仲奎, 杨强, 等. 准脆性材料声发射的损伤模型及统计分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2493-2501.
- ZHANG M, LI Z K, YANG Q, *et al.* A damage model and statistical analysis of acoustic emission for quasi-brittle materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2493-2501. (in Chinese)
- [12] 张明, 李仲奎. 准脆性材料破裂过程失稳的尖点突变模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1233-1239.
- ZHANG M, LI Z K. A cusp catastrophe model of unstable failure process of quasi-brittle materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1233-1239. (in Chinese)
- [13] 王明华, 鞠双, 李新慈, 等. 基于 Lab VIEW 的多通道木材声发射信号采集系统[J]. 计算机系统应用, 2020, 29(5): 63-68.
- WANG M H, JU S, LI X C, *et al.* Multi-Channel wood acoustic emission signal acquisition system based on lab VIEW[J]. Computer Systems & Applications, 2020, 29(5): 63-68. (in Chinese)
- [14] 董红平, 李明. 基于瞬时频率的木材声发射事件辨识与损伤监测[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(2): 229-234.
- DONG H P, LI M. Wood acoustic emission event identification based on instantaneous frequency and damage monitor[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(2): 229-234. (in Chinese)
- [15] 李新慈, 鞠双, 罗廷芳, 等. 马尾松胶合木胶层对声发射信号传播特性的影响[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(3): 185-190, 239.
- LI X C, JU S, LUO T F, *et al.* Influence of adhesive layer at massson pine glulam on acoustic emission signal propagation characteristics[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(3): 185-190, 239. (in Chinese)
- [16] 张志研, 赵东. 木材损伤的声发射模式研究[J]. 力学与实践, 2009, 31(2): 74-77.
- ZHANG Z Y, ZHAO D. Study on the acoustic emission model of wood damage[J]. Mechanics in Engineering, 2009, 31(2): 74-77. (in Chinese)