

讨论与综述

木材压缩处理技术研究的现状

蔡家斌, 董会军

(南京林业大学材料科学与工程学院, 江苏南京 210037)

摘要: 概述压缩木的发展历程及国内外的研究现状, 重点介绍压缩木的软化方法、压缩回弹预防方法以及压缩处理后材性变化的研究情况, 分析压缩木技术的应用前景并提出建议。

关键词: 压缩; 材性; 表面密实; 压缩整形; 热处理

中图分类号: S781.7 文献标识码: B 文章编号: 1001-8654(2014)06-0028-04

Literature Review on Compressed Wood Technology

CAI Jia-bin, DONG Hui-jun

(College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: The authors reviewed compressed wood technology development and introduced softening methods, compression recovery prevention methods and property changes after compression. They also analyzed and made suggestions on future technology development and potential applications for compressed wood.

Key words: compress; wood properties; surface densification; compressive deformation; heat treatment

随着人口的增长和人们生活水平的提高, 对木材产品的需求不断增长。为了解决天然林木材特别是热带阔叶林木材资源不足的问题, 科研人员开展了人工速生林木材强化技术研究, 利用木材密实化技术制备压缩木, 成为研究热点之一。

压缩木是通过热压处理而制成的一种质地坚硬、密度大、强度高的强化材料, 具有优良的物理力学性能, 可以替代硬阔叶树材, 广泛应用于室内装饰、家具、建材等领域。20 世纪初期, 德国就有压缩木成品出售; 美国也有制造压缩木的专利。30 年代, 前苏联开展了炉中加热压缩法(简称干法)和蒸煮压缩法(简称湿法)生产压缩木的工艺研究^[1]。50 年代末和 60

年代初, 我国研制出压缩木锚杆和压缩木木梭, 分别应用于煤矿生产和纺织生产中。70 年代, 印度采用其国产的 17 种树种木材, 经压缩后用于代替进口的鹅耳枥木材, 制造织布机木梭。自 90 年代以来, 随着木材工业科研水平的迅速提高, 各国学者将木材压缩及其变形固定的研究推向了一个新的高度, 为压缩木材的工业化利用, 奠定了良好的基础。

目前压缩木的研究集中在三大领域: 压缩(软化)工艺、压缩变形固定技术及压缩木的材性。笔者对相关领域的国内外研究概况进行归纳总结, 旨在为压缩木更深入的理论研究和产业化应用提供参考。

1 木材软化压缩工艺研究

压缩木是通过压缩木材, 增加单位体积内木材的实质重量, 提高木材密度, 达到改善其物理力学性能的目的。根据压缩木材的用途, 压实的方法有: 板材横向压实和原木整形压实。由于压缩时木材的细胞

收稿日期: 2013-11-20; 修改日期: 2014-07-23

基金项目: 引进国际先进林业科学技术计划(948 计划)项目“速生木材热压-高温热处理关键技术引进”(2011-4-12); 江苏省学科建设工程项目“江苏高校优势学科建设”(PAPD)。

作者简介: 蔡家斌(1962—), 男, 南京林业大学材料科学与工程学院副教授。

壁易发生破坏,压缩后木材易反弹、变形。为了使压缩时不破坏木材细胞壁的结构,并使内部微观结构之间产生相对的滑移、且滑移的位置可被固定,在压缩之前,须对木材进行软化处理。

水是极性分子,进入木材细胞壁后,可以与纤维素非结晶区、半纤维素中的羟基形成氢键,加大分子链之间的距离,增大自由体积。当木材含水率达到纤维饱和点时,自由体积膨胀至最大,成为木材压缩的最佳状态^[2]。此外,也可将某些化学药剂(如氨水)浸渍到木材细胞壁的非结晶区内,使木素、半纤维素和纤维素的非结晶区体积膨胀,增大自由体积空间,提高木材的塑性,达到提高压缩率的目的^[3]。

但是,如果分子的振动不够,即分子热运动的能量不够,即使具备足够的自由体积空间,也无法完全改善木材的压缩性能。因此,只有能量和增塑剂一起作用于木材时,如湿热处理,才能有效地使木材软化,进而提高其压缩性能。

木材是一种黏弹性材料,从微观考虑,加热处理可实现木材细胞结壳物质的玻璃态转变,使木材更容易压缩。当木材经过高温高压水蒸气处理后,部分木素和半纤维素发生软化和降解,使纤维素和木素之间部分暂时失去联接,微纤丝容易移动,内部应力得到松弛,有效减少了压缩对木材结构的破坏^[2]。所以,增加含水率、浸渍化学药剂是提高木材塑性的充分条件,而加热是必要条件。

目前常用加热软化木材的方法有:微波加热法、高温高压蒸煮法、常压汽蒸法和热水处理法。

20世纪90年代初,日本京都大学将干燥的日本柳杉锯材表层浸泡在水中,当水渗透到设定的表层深度后,用微波辐射加热,使表层软化,然后将锯材放置在热压机上压缩、干燥、定型,得到表面压密的木材^[4]。日本还开发了利用微波加热的方法,对软化后的木材进行压缩整形的技术,将低质材加工成优质材。如小径级原木经过压缩整形后,年轮、木射线的形状,随着各个方向压缩程度的不同而产生很大变化;再将压缩木刨切,可产生出各种各样、具有不同纹理的薄木,为中小径级间伐材(幼龄材)的合理利用提供了有效途径^[5]。

浙江农林大学采用高温高压蒸煮的方法,将速生杉木木材自然干燥至含水率50%左右后,用高压蒸

汽(0.23 MPa, 125℃)蒸煮100 min,得到的整形材平均静曲强度为89.0 MPa,比素材提高了72%^[6]。

南京林业大学采用温度85℃、相对湿度100%的蒸汽对杨木进行汽蒸预处理,处理杨木试材热压后的回弹率明显降低,MOE、MOR及最大载荷均有所提高^[7]。

中国林科院将杨木浸没于20℃水中2 h,在不受压力的条件下,用热压机对浸水试样进行180℃预热处理,随后再进行热压,得到表面密实的杨木。结果表明,随预热时间延长,压缩试样的压缩层厚度和密度增加、且向芯层移动,压缩试样的MOE和MOR比未处理对照材明显增强^[8]。

2 压缩木材的防变形研究

木材压缩处理后,经水热处理时易发生塑性变形和弹性变形^[9]。国内外学者研究发现,要使木材的压缩变形得到固定的主要措施有:1)释放压缩木材的内部应力;2)使压缩木内部形成分子交联结构;3)使压缩木材内部形成憎水键型结构^[10];4)使压缩木内部形成凝聚结构^[9]。

从力学角度看,木材被压缩后,其内部必然会产生应力,导致木材向原来的状态恢复。1996年,南京林业大学的研究发现,在应变保持不变的情况下,木材内部的应力随时间增加而逐渐减小;并认为该现象是木材内部分子运动的结果,决定于木材内部分子的运动状态,与周围温度和湿度有关。如果温度升高,远远超过玻璃化转变温度,木材大分子运动受到的内摩擦阻力减小,应力衰减加速;反之,如果温度降低,应力衰减缓慢^[11]。

2006年,东北林业大学测试了在60℃水热处理和180℃饱和蒸汽处理过程中木材的应力松弛状态,结果表明:温度条件对木材应力松弛的影响,远比应变水平的影响显著;随着温度的增加,木材应力松弛急剧增大,残余应力迅速下降^[12]。

水、热处理减少或消除压缩木的弹性恢复变形的基本原理是:在加热状态下,非结晶区纤维素、半纤维素和木素等非结晶物质实现玻璃化转变;在玻璃化状态下,当受外力作用时,自由体积发生运动或位移,并保持位移状态不变时,再将温度降低至自由体积冻结点以下,即可实现对木材塑性变形的固定。

木材中的微纤丝几乎不受水分和热量的影响,但当受外力压缩时,微纤丝可产生与外力相平衡的弹性变形,此时再受水、热作用,木材内缔结物质将重新软化,微纤丝的弹性复原力会导致变形的回复^[13]。要使其形状稳定,必须增强木材组织的内聚力,使木材具有一定的整体刚性。

1937年,德国研究发现,热处理可改善木材的尺寸稳定性,在加热过程中,木材细胞壁聚合物之间发生交联反应,使得半纤维素的吸湿性降低^[3]。1973年,美国学者也提出了气干材热压处理,改善尺寸稳定性的方法^[14]。1984年,澳大利亚学者提出,高温和化学处理可改善木材的尺寸稳定性^[15]。随后,国内外学者展开了用热处理方法防止压缩木回弹变形的研究。

1994年,日本学者对热处理和水热处理引起的木材成分、结构和物理性质的变化进行了研究,并分析了木材变形的永久固定和横向压缩等问题。木材在180℃、200℃、220℃水热蒸气的条件下分别处理2、5、3 h,压缩可完全固定^[5]。

木材是易吸湿材料,但水热处理或热处理可以降低木材的吸湿性能,处理温度越高,时间越长,其降幅越大,疏水性越高^[5]。

2000年,东北林业大学采用高温高压水蒸气,对软质木材进行压缩、定型处理,并同高温加热处理木材进行对比。结果表明,无论是高温加热处理还是高温水蒸气处理,木材的尺寸稳定性明显得到提高。在相同温度条件下,要达到相同的抗胀(缩)率时,高温高压水蒸气处理所需的时间远远短于高温加热处理。如:当加热处理温度为180℃时,需加热处理15~20 h;而水蒸气处理仅需8~10 min,压缩变形几乎完全被固定^[16]。

中国林科院木材工业所也采用同样的热处理方法,用于固定大青杨木材的压缩变形。结果表明:两种处理均使木材的尺寸稳定性明显提高,且进一步证实了高温水蒸气处理所需的时间远远少于高温加热处理的时间^[17-18]。

2009年,南京林业大学采用高温热处理工艺固定杨木板材的压缩变形。结果表明:杨木板材经过热压及高温热处理后,密度和尺寸稳定性提高,吸湿性降低,压缩变形得到很效固定^[19]。

此外,木材成分中的羟基是不稳定基团,用低分子预聚物浸渍,与木材成分中的羟基形成化学键结合、交联,也可以提高压缩木的尺寸稳定性。1996年,东北林业大学学者使用不同浓度的水溶性低分子量三聚氰胺-甲醛(MF)树脂处理大青杨木材,并在加热过程中进行横纹方向的压缩。红外光谱测试结果表明:树脂与木材中的综纤维素、纤维素、 α -纤维素、木质素和半纤维素发生了交联;经固体含量10%的树脂处理试件,在室温条件下浸水后可完全保持其压缩形态^[20]。

2002年,中国林科院木材工业研究所研究了酚醛树脂(PF)处理固定压缩木材变形的机理,X射线衍射分析及ESR和ESCA测试表明:木材细胞壁物质中的某些基团与PF预聚物发生交联,形成了新的基团。随着树脂质量分数的增加,无论是冷水浸泡还是煮沸,PF处理压缩木的吸水厚度膨胀率和压缩变形恢复率均明显降低,抗弯性能优于素材^[21]。

3 压缩材的材性研究

木材经压缩密实后,其组织构造、物理力学性质发生了重大变化。随着压缩木密度的增加,其强度、冲击韧性和硬度呈线性增长,耐磨性增加最快。国内外学者一直重视压缩木的物理力学性能及尺寸稳定性的研究。

1998年,中国林科院木材工业所采用水溶性低分子量酚醛树脂固定大叶山杨和柳杉的压缩变形,制造表面压密材,结果表明:随着压缩率的增加,表面压密材的硬度、顺纹抗压强度、弹性模量和静曲强度均明显增加;当压缩率一定时,树脂固体含量的变化对上述性能指标的影响不显著^[18,22-23]。

2000年,西北农林科技大学对色木径向、弦向、非标准向压缩木的干缩性、力学性能和吸水性进行了测试和比较研究,结果表明:3种压缩木之间的顺纹抗压强度、抗弯强度和冲击韧性互有高低,径向压缩木并非所有的力学强度指标均最大。3种压缩木压缩方向的干缩率表现为:径向压缩木最小,其次是非标准向的压缩木;垂直于压缩方向的干缩率为:弦向压缩木最小,其次是非标准向的压缩木;吸水膨胀率均表现为:压缩方向大于非压缩方向,浸水前3天的吸水速度最快^[24-26]。

2000年,东北林业大学进行了水蒸气处理法制作压缩整形木的研究,结果表明:压缩整形木的变形回复率很低,吸湿、吸水膨胀率均明显低于素材,具有良好的尺寸稳定性^[27]。

2004年,福建农林大学测定和分析了杉木压缩木在不同水温、不同时段的方向和弦向吸水厚度膨胀率。结果表明,不同条件下,方向和弦向吸水厚度膨胀率随时间变化的速度和幅度不同,达到方向和弦向最大吸水厚度膨胀率的时间也不同^[28]。对杉木间伐材高温压缩密化处理及回复变定过程的研究表明:蒸煮时加入自主研发的软化添加剂CH,可使处理材的回复率大大降低,压缩变定效果好。对速生杨密实化处理和物理力学性能测定发现,蒸煮时添加质量分数5%CH的软化效果好,处理材的厚度吸湿回复率较低,同时物理力学性能得到明显提高;处理材的红外吸收光谱分析和微观结构观察发现,处理材的细胞被挤压,细胞腔变小,而细胞壁未受到破坏^[29]。

2011年,西南林学院以热空气和导热油为加热介质,在不同温度条件下对华山松和西南桉木2个树种的压缩木进行热处理。结果表明:后期热处理可以降低压缩木的吸湿率和吸水率,而且油浴处理的效果优于热空气处理。此外,热处理对西南桉木的性能改善效果略优于华山松^[30]。

4 压缩木技术应用前景分析及建议

国内外学者多年的潜心研究,为低密度、低附加值小径材替代优质材,提出了一条前景广泛的利用途径,对解决我国木材资源短缺问题具有重大意义。已有压缩木预处理软化、整形定型和尺寸固定等理论研究已形成体系,为压缩木的实际生产奠定技术支撑。

但是,压缩木的变形以及回复是如何产生的,怎样才能使变形永久固定,这些问题还没有十分明确的答案。要实现压缩木的工业化稳定生产,还需继续加强理论与生产性试验研究。

1) 从分子水平上明确并完善压缩木变形等理论研究,发挥其对木材压缩等塑性加工技术的指导作用^[31]。日本学者也认为,木材具有纤维、年轮、射线组织等异质性构造,有关横向变形形态方面还有很多未知的部分,从宏观的木材构造到微观的细胞形态,有待深入研究^[32]。

2) 开发快速、高效的压缩木生产应用技术。目前,国内外压缩木的定形工艺复杂,采用的卸压时间均在30 min以上,甚至长达几个小时。有待进一步研究开发压缩木生产实用技术,解决生产周期长、效率低、生产设备不配套等问题,促进压缩木的生产技术进步,推动压缩木的快速生产与广泛应用。

参考文献:

- [1] 王立昌,张双保,常建民.木材压缩处理技术简介[J].建筑人造板,2001(4):8-10.
- [2] 李军.浅析实木弯曲机理及影响因素[J].林业科技开发,1998(6):16-18.
- [3] Stamm A J, Hansen L A. Minimizing wood shrinkage and swelling. Effect of heating in various gases[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 1937, 29(7):831-833.
- [4] 井上雅文,则元京.软质针叶树材的表面层压密化处理(第1报)[J].木材学会志(日),1990,36(11):969-975.
- [5] 则元京.木材的热处理及水蒸汽处理[J].木材学会志(日),1994,49(12):588-592.
- [6] 李文珠,钱俊,金永明,等.速生杉木整形初步研究[J].建筑人造板,2000(4):25.
- [7] 苗平,王正,黄金成,等.汽蒸预处理对杨木板材密实化的影响[J].木材工业,2011,25(5):41-43.
- [8] 夏捷,黄荣凤,吕建雄,等.水热预处理对毛白杨木材压缩层形成的影响[J].木材工业,2013,27(4):42-45.
- [9] Masafumi Inoue, Kazuya Minato, Misoto Norimoto. Permanent fixation of compressed deformation of wood by crosslinking[J]. Mokuzai Gakkaishi, 1994, 40(9):931-936.
- [10] Dwianto W, Inoue M, Norimoto M. Permanent fixation of compressive deformation of Albizia wood (*Paraserianthes Falcata*) by heat treatment[J]. Journal of Tropical Forest Products, 1998, 4(1):59-67.
- [11] 李大纲,刘一星.木材微波加热弯曲工艺学原理[M].哈尔滨:东北林业大学出版社,1993.
- [12] 李坚.加热、水蒸气处理对木材横纹压缩变形的固定作用[J].东北林业大学学报,2000,28(4):4-8.
- [13] 宋魁彦,李坚.国内外木材弯曲后热定型研究现状[J].木工机械与设备,2007(7):7-9.
- [14] Burmester V. Effect of heat-pressure-treatments of semi-dry wood on its dimensional stability[J]. Holz Roh-Werkst, 1973, 31: 237-243.
- [15] W E Hillis, A N Rozsa. High temperature and chemical effects on wood stability Part 1: General considerations[J]. Wood Sci Technol, 1984, 18: 281-293.
- [16] 李坚,刘一星,刘君良.加热、水蒸气处理对木材横纹压缩变形的固定作用[J].东北林业大学学报,2000,28(4):4-8.

(下转第34页)

PF 树脂中的游离苯酚含量。

2.3 与溴量法对比

采用溴量法检测 PF 树脂(质量同表 1)中的游离苯酚含量,并与紫外分光光度法进行对比,结果如表 3 所示。

表 3 光度法与溴量法检测 PF 树脂中苯酚含量百分比

PF 树脂 类别	含量百分比/%	
	溴量法	光度法
PF-I a	1.391	1.428
PF-I b	1.387	1.393
PF-II a	0.168	0.462
PF-II b	0.152	0.463

由表 3 可见,对于 PF-I 树脂,光度法的检测值略高于溴量法;而对于苯酚含量较低的 PF-II 树脂,光度法检测结果明显高于溴量法,可能是两种方法的检出限不同所致,原因有待进一步研究证实。

光度法与溴量法各有优缺点。溴量法需要标定规定浓度的标准溶液,操作繁琐;处理中还需加入强酸,存在一定危险性;定量滴定时对操作人员的技能要求较高,同时存在主观误差;测量耗时较长,不宜用于批量检测。但是该方法所用的分析仪器价格较低,检测成本较低。紫外分光光度法采用精密分析仪器,误差小、方法科学,试样处理后可批量测量,时间短,较适宜实验室统一推行,但分析仪器

价格较高。

3 结论

1) 本试验中,以 0.1 mol/L 的 NaOH 溶液为溶剂,苯酚质量浓度在 0~80 $\mu\text{g/mL}$ 范围内时,与吸光度有良好的线性关系。因此,紫外分光光度法可用于测量 PF 树脂中的游离苯酚含量,结果准确,操作简单可行。

2) 紫外分光光度法与传统的溴量法相比,所用试剂少,速度快,稳定性好,易于操作,建议将其纳入 PF 树脂的测定方法标准中。

参考文献:

- [1] 薛斌,张兴林.酚醛树脂的现代应用及发展趋势[J].热固性树脂,2007(4): 47-50.
- [2] 陈燕清,倪水年,王小波.多元校正一紫外吸收光度法同时测定苯酚、苯胺、对苯二酚[J].南昌航空大学学报(自然科学版),2008(1): 59-62.
- [3] 李会平,王立新.紫外差示分光光度法同时测定含苯系物废水中苯胺和苯酚[J].分析试验室,2010(12): 90-93.
- [4] 白家磊,魏子章,王莹,等.水中苯胺、苯酚快速分离及分光光度法测定[J].中国公共卫生,2011(2): 133-134.
- [5] 徐高扬,宋洪昌,贾海红,等.光催化降解过程中苯酚的分光光度法测定[J].分析试验室,2005(11): 49-52.

(责任编辑 张一萍)

(上接第 31 页)

- [17] 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):202-228.
- [18] 刘君良,李坚,刘一星,等.高温水蒸气处理固定大青杨木材横纹压缩变形的研究[J].林业科学,2003,39(1): 126-131.
- [19] 蔡家斌.高温热处理对杨木压缩板物理力学性能的影响[J].林业科技开发,2009,23(3): 104-107.
- [20] 方桂珍,刘一星,崔永志,等.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(40): 18-21.
- [21] 刘君良,李坚,刘一星. PF 预聚物处理固定木材压缩变形的机理[J].东北林业大学学报,2002,28(4):16-20.
- [22] 刘君良,江泽慧,孙家杰.酚醛树脂处理杨树木材物理力学性能测试[J].林业科学,2002,38(4):176-180.
- [23] 刘君良,刘一星,罗志刚.杨木、柳杉表面压密材的研究[J].吉林林学院学报,1998,14(3): 125-128.
- [24] 雷亚芳,李增超,邱增处,等.色木径向、弦向、非标准向压缩木的干缩性[J].西北林学院学报,2000,15(1): 46-48.
- [25] 雷亚芳,吕晓峰,田兆坤,等.色木径向、弦向、非标准向压缩木的

主要力学性能[J].西北林学院学报,2000,15(2): 29-32.

- [26] 雷亚芳,赵荣军,杨创创.色木径向、弦向、非标准向压缩木的吸水性[J].西北林学院学报,2000,15(3): 51-55.
- [27] 刘一星,刘君良,李坚,等.水蒸气处理法制作压缩整形木的研究(I):构造变化和尺寸稳定性[J].东北林业大学学报,2000,28(4): 9-12.
- [28] 林铭,谢拥群,杨庆贤,等.水温对杉木压缩木吸水厚度膨胀率的影响[J].福建林学院学报,2004,24(2): 172-174.
- [29] 陈瑞英.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.
- [30] 陈太安.后期热处理对压缩木尺寸稳定性的影响[J].西南林业大学学报,2011,31(4): 77-79.
- [31] 王洁瑛,赵广杰.木材变形的产生、回复及其永久固定[J].北京林业大学学报,1999,21(3):71-77.
- [32] 井上雅文.压缩木研究现状与今后展望[J].人造板通讯,2002(9):3-6.

(责任编辑 向琴、孟凡丹)