

定向刨花板在三点弯曲不同加载速度下的力学行为

胡妙言, 刘楚航, 李万兆

(南京林业大学 材料科学与工程学院, 南京 210037)

摘要: **目的** 科学评价定向刨花板的力学性能。**方法** 基于 GB/T 17657—2013 使用三点弯曲方法, 在 5 种加载速度条件下检测定向刨花板试件的力学性能, 并使用数字散斑应变测量分析系统 (DIC) 同步记录试样面内应变分布。**结果** 基于研究选取的加载速度, 发现加载速度的增加虽可在一定程度上提高弹性模量和最大载荷测量值, 但影响并不明显。定向刨花板固有力学性能的变异性明显大于加载速度对力学性能的影响。**结论** 当加载时间大于或小于国标规定的时间 (60 ± 30) s 时, 最大载荷条件下试样的最大位移变异性增加。定向刨花板试样内的应变分布并不完全符合经典的梁弯曲理论和层合板理论。

关键词: 定向刨花板; 加载时间; 力学性能; 应变分布

中图分类号: O39 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)17-0090-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.17.013

Mechanical Behavior of OSB under Different Loading Speeds in the Three Point Bending Method

HU Miao-yan, LIU Chu-hang, LI Wan-zhao

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

ABSTRACT: The work aims to scientifically evaluate the mechanical properties of oriented strand board (OSB). The mechanical properties of OSB specimens were measured under five loading speeds in the three point bending method based on GB/T 17657—2013. The in-plane strain distribution of the specimens was recorded with digital image correlation (DIC) synchronously. The results showed that, based on the loading speed selected in the study, it was found that, although the increase of the loading speed could improve the elasticity modulus and the maximum load measurement value to a certain extent, the effect was not obvious. The variation of intrinsic mechanical properties of OSB was obviously greater than the effect of loading speed on mechanical properties. The variation of the maximum displacement of the sample increases under the maximum loading force when loading time is larger or smaller than (60 ± 30) s given in the national standard. The strain distribution in OSB sample is not completely in consistency with the well-known beam bending theory and laminated panel theory.

KEY WORDS: oriented strand board; loading time; mechanical properties; strain distribution

收稿日期: 2019-04-29

基金项目: 江苏省自然科学基金 (BK20170923); 江苏省高等学校大学生创新创业训练计划 (SPITP); 江苏省高等学校自然科学基金项目 (17KJB220003)

作者简介: 胡妙言 (1998—), 女, 南京林业大学本科生, 主攻木质复合材料。

通信作者: 李万兆 (1986—), 男, 博士, 南京林业大学副教授, 主要研究方向为木质复合材料加工工艺优化与性能无损检测。

木材是一种重要的包装材料,其中实木包装材料与人造板材包装材料应用广泛。近年来,我国工业包装用材中,木材用量约占80%,且大多只能单次使用,森林资源大量被浪费,因此,加快推进应用包装节能材料的工业产品人造板,是促进我国工业产品包装升级的现实需求。在此形势下,我国包装业发展定向刨花板(OSB)有特定的优势,定向刨花板是重要的人造板之一,具有可再生、材料利用率高、可重复使用等特性,可以使用小径材、间伐材等为原料,回收再利用也比较简便,可在一定程度上缓解我国木材供需矛盾突出、优质木材匮乏的现状,有利于生态平衡。定向刨花板的物理力学性能可以与胶合板相媲美,且在价格上更具优势,可以部分取代实木或胶合板在包装等行业的应用^[1-4]。同时定向刨花板用于出口包装时,其出口免检的优势非常明显,是世界各国公认的免检包装材料。近年,随着我国刨花板产品的产量和质量不断提高,刨花板出口虽呈增长趋势,但我国刨花板进口量仍大于出口量,刨花板类产品也是我国唯一进口量大于出口量的人造板种^[5-7]。海关统计数据 displays, 2017 年我国定向刨花板及类似板进口质量为 7.104 85 亿 kg, 约为同年出口质量的 3.5 倍。进口金额为 2.407 64 亿美元, 约为同年出口金额的 2.4 倍。目前,国内外针对定向刨花板的研究多集中于功能化改良或改性,针对其固有力学性能的发生机制研究相对较少,如定向刨花板力学性能变异性较大的发生机制尚不明确。根据 GB/T 17657—2013 规定的三点弯曲法,要求调整加载速度,使定向刨花板试样在 (60±30) s 内达最大载荷^[8]。研究参考三点弯曲法,检测了在 5 个恒定加载速度条件下的定向刨花板试样力学性能。基于加载速度、加载时间、弹性模量、最大载荷 (F_{\max}) 和加载过程中试样面内的应变分布,探究加载时间对定向刨花板力学性能的影响规律。研究成果以期优化定向刨花板产品的检测方式和评价指标提供理论支撑和实践指导。

1 试验

1.1 材料

以厚度为 9.5 mm 的二类定向刨花板(可在干燥条件下承载)为研究对象^[9],该定向刨花板板材以杨木(*Populus Euramericana*)和二苯基甲烷二异氰酸酯(MDI)胶黏剂为原材料生产,购自国内市场。为最小化各试件的性能差异,试验用试件均取自同一块尺寸为 1 m×2.5 m 的定向刨花板板材,制备 30 个横截尺寸为 50 mm×400 mm 的试样。其中试件长度方向与表层刨花纤维方向一致。使用黑色中性笔在试样一侧中部区域(9.5 mm×80 mm)绘制散斑,中性笔笔芯为 0.5 mm,单个散斑面积约为 (0.2±0.05) mm² (见

图 1)。试样置于恒温恒湿环境中(相对湿度为 65%、温度为 20 °C),保持 14 d 以平衡含水率。

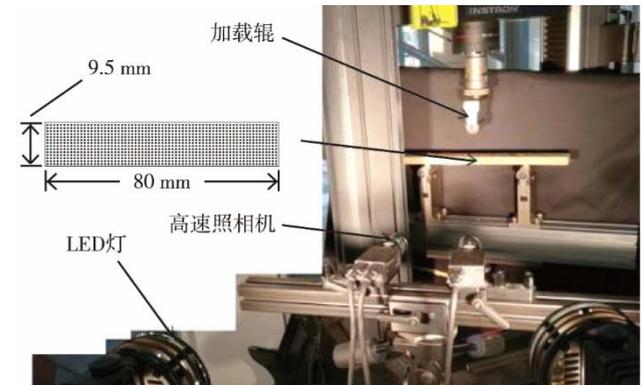


图 1 力学性能与应变分布检测示意

Fig.1 Overview of the experimental setup for measuring mechanical properties and strain distribution

1.2 力学性能检测

使用加载精度为 0.001 N 的 Instron 万能力学试验机,两撑辊间的距离为 240 mm,采用三点弯曲法检测试样力学性能。加载时间为加载载荷达到最大所需时间;加载速度设定为 5 个固定值,分别为 1, 6, 12, 18, 24 mm/min。每个加载速度条件下测试 6 个试样的力学性能,并同时记录面内应变分布。测试过程中,每 0.1 s 记录 1 次加载载荷及加载辊位移,后将加载时间整理为小于 30 s, 30~90 s, 大于 90 s 等 3 个时间区间。试样的弹性模量基于式(1)计算得出。

$$E = \frac{L^3 m}{4wh^3} \quad (1)$$

式中: E 为试样的弹性模量(MPa); L 为 2 支撑辊间的距离(mm); m 为负载变化的初始直线斜率(依据 GB/T 17657—2013, m 的数值范围限制在试样 F_{\max} 数值的 0.1 至 0.4 倍之间); w 为试样宽度(mm); h 为试样厚度(mm)。

1.3 面内应变分布检测

加载过程中,使用数字散斑应变测量分析系统(DIC)检测试样的面内应变分布,DIC(Digital Image Correlation),数字散斑动态应变测量分析系统是一种光学非接触式面内应变检测系统^[10],具体为使用 Correlation Solution 软件将面内散斑的位移变化换算为应变分布,进一步整理为弯曲和剪切应变分布。基于 Lagrange 张量完成应变分布的量化表征,使用 Matlab 软件实现应变分布可视化。试验结果中正弯曲应变代表拉伸弯曲应变,负弯曲应变代表压缩弯曲应变,正剪切应变代表顺时针剪切应变,负剪切应变代表逆时针剪切应变。试验同步记录了加载过程和应变分布,这可以实现加载参数与应变分布在时间维度上的统一。具体而言,首先手动调节加载辊高度,使之

与试样上表面无压接触;之后施加载荷并记录应变分布,其中每0.3 s记录一次应变分布。

2 结果与讨论

2.1 弹性模量计算值和测量值的相关性

基于式(1)计算所得弹性模量与万能力学试验机实测值之间的线性相关($R^2=0.9912$)(见图2),这保证了进一步探索加载时间与定向刨花板力学性能之间相关性时数据的可靠性。

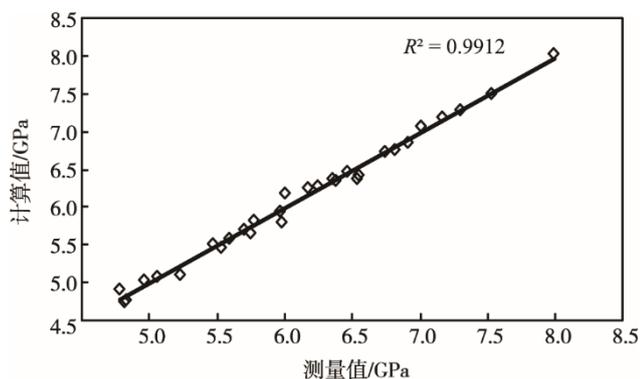


图2 弹性模量计算值和测量值的相关性
Fig.2 Relationship between calculated and measured E

2.2 加载速度对最大载荷和最大位移的影响

木质复合材料在不同加载速度下,往往表现出不同的力学行为,一般而言最大破坏应力与应力的作用速度成正比^[11-13]。试验中,当加载时间小于30 s时,加载速度为24 mm/min和18 mm/min;当加载时间大

于90 s时,加载速度为6 mm/min和1 mm/min(见表1),这说明加载速度的增加会在一定程度上提高定向刨花板试样的弹性模量测量值。这与其他研究人员所得结果基本一致。已有研究表明,加载速度变化对木质刨花板的抗弯弹性变形阶段和塑性变形阶段都有显著影响,在较高的加载速度下木质刨花板的弹性模量与破坏强度都较大^[13-14]。也有研究结果也表明,当加载速度较小时,试样内部结构的破坏有较大可能会出现在强度最低区域;相反,当加载速度较大时,试样内部结构的破坏出现在强度最低区域的可能性降低^[15]。

2.3 加载时间对最大载荷和最大位移的影响

随着加载时间的增加,试样的平均弹性模量呈下降趋势,加载时间长,外力缓慢作用时,塑性表现降低了定向刨花板的破坏应力,破坏机理为试样内部结合强度最低的区域,是依存于时间的塑性变形;相反,加载时间短,当外力快速作用时,弹性部分表现显著,试样不易在内部结合强度最低的区域破坏,为瞬时弹性变形。因此当加载时间小于30 s时,内部结构破坏出现在强度最低区域的可能性较小,这是试样弹性模量的较大主要原因。相较于加载时间小于30 s,加载时间在30~90 s和大于90 s时试件平均 F_{max} 更小,分别为514.7 N和522.4 N(见表1),这也进一步证实了以上观点。

对比加载时间为30~90 s和大于90 s时试样的弹性模量,加载时间增加虽会使弹性模量降低,但并不明显。此外,加载时间的增加提高了 F_{max} 值。在不同加载时间条件下,弹性模量及 F_{max} 的最大标准差分别为

表1 三组加载时间条件下定向刨花板试样的加载速度、弹性模量和 F_{max}
Tab.1 Loading speeds, E and F_{max} of OSB specimens with three groups of loading time

小于30 s			30~90 s			大于90 s		
加载速度/ (mm·min ⁻¹)	弹性模量/ MPa	F_{max} /N	加载速度/ (mm·min ⁻¹)	弹性模量/ MPa	F_{max} /N	加载速度/ (mm·min ⁻¹)	弹性模量/ MPa	F_{max} /N
24	5970.2	475.2	18	5221.3	450.6	6	4964.3	469.9
24	5815.5	378.6	18	4824.4	467.6	6	5695.1	539.4
24	7157.3	652.2	12	7299.4	607.9	6	5059.9	398.4
24	6380.8	678.8	12	6242.6	574.9	6	6543.6	562.2
24	6910.7	597.4	12	5770.1	443.3	1	7987.6	640.9
24	7000.5	591.1	12	7523.8	640.4	1	6543.6	574.9
18	6464.7	562.7	12	6355.6	428.1	1	6739.2	557.6
18	5748.5	437.7	12	5469.8	539.7	1	6003.1	563.5
18	6535.3	564.1	6	5971.9	487.5	1	4780.9	442.9
18	6173.5	442.8	6	5595.2	506.8	1	5531.8	473.8
平均值	6315.7	538.1		6027.4	514.7		5984.9	522.4
标准差	657.7	94.3		817.0	69.7		940.2	69.6

817.0 MPa 和 94.3 N, 见表 1, 这表明测量结果变异性大。相较于加载时间对弹性模量及 F_{\max} 的影响, 定向刨花板试样固有力学性能的不确定性对测量结果的影响似乎更加明显。目前, 定向刨花板已经广泛应用于木结构建筑、包装、家具、装饰装修等行业, 并且保持着持续、良好的增长态势。定向刨花板除了首选作为建筑材料外, 其中相当大的一部分是用于包装工业。定向刨花板可以制作货柜、货仓、电缆盘、包装箱的箱板和底板, 还可制作包装箱的框架和托盘等, 可以替代木材制作包装箱的全部材料。在欧洲, 定向刨花板在包装业中被用于制造包装托盘和木质包装箱, 占其全部产量的 20%。由于其刨片是按一定方向排列的, 纵向抗弯强度比横向大得多, 因而可代替胶合板用于建筑、包装等领域。目前, 定向结构刨花板已成为发达国家包装箱和托盘工业等领域的主要木质包装材料, 也是我国现阶段需要推广的一种用来替代原木的包装用人造板。对于包装工业, 发展定向刨花板、将其应用于包装材料相较于其他传统木质包装材料有如下益处, 定向刨花板具有天然木材的各种优点, 基本保留了木材的天然特性; 此外, 由于其刨片是按一定方向排列, 因此需采用特殊工艺和专用设备重组木质纹理结构, 重叠交错的内部结构使定向刨花板具有极高的强度和尺寸稳定性, 还消除了天然木材的各向异性及横向强度低、易裂的缺点, 作为包装材料加工性良好, 有抗弯强度高、线膨胀系数小、尺寸稳定性好; 其材质均匀、握钉力强、防蛀、保温、隔热、抗震及阻燃, 使得定向结构刨花板在恶劣的环境中能保持形状稳定, 有超强的产品保护功能; 此外还具有耐冲击、耐水、易加工及易于进行表面装、易于进行表面装贴、表面可涂覆涂料等优点。然而, 在实际生产过程中, 刨花形态、刨花铺装方向和胶黏剂分布等很难实现完全统一, 这会造成定向刨花板物理力学性能存在天然的不均匀性。为了进一步探索加载时间对定向刨花板力学性能的影响机制, 整理了试样 F_{\max} 与最大位移之间的关系, 见图 3。结果表明, 在不同加载时间条件下, F_{\max} 与最大位移之间无明显规律, 最大位移变异性小且主要集中在 8.7~20.3 mm 区间内, 而 F_{\max} 变异性显著。这是造成定向刨花板试样力学性能变异性大的主要原因。

当加载时间小于 30 s 和大于 90 s 时, 试件的最大位移分别达到 101.9 mm 和 64.8 mm, 见图 3。当加载时间为 30~90 s 时, 以上现象没有出现。这说明 GB/T 17657—2013 中规定的加载时间可能有助于降低加载过程中最大位移的变异性。当最大位移变异性不大时, 引发 F_{\max} 波动的主要原因是加载过程中试样内部应变分布的不确定性。

2.4 加载速度对应力分布的影响

为更好地理解以上实验现象, 此研究记录了不

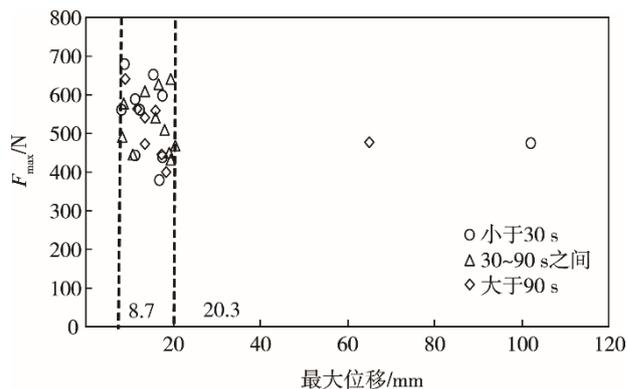


图3 不同加载时间条件下定向刨花板试样的位移与 F_{\max} 的对应关系

Fig.3 Relationship between displacement and F_{\max} of the OSB specimens with different loading time

同加载速度条件下定向刨花板试样的面内应变分布 (见图 4)。结果表明, 载荷状态下, 试样内的弯曲应变并没有按层状分布; 相反, 试样内弯曲应变易沿厚度方向迁移, 这可能与定向刨花板内部的多孔结构有关^[16-17]。定向刨花板表层和芯层的界面结构模糊, 这易造成表层和芯层力学性能差异化不明显, 因此层间弯曲应变分布的差异化亦不明显, 这是造成力学性能波动较大的主要原因^[18]。如图 4 所示, 在 3 种不同加载速度条件下, 试样上下表面均出现明显的剪切应变, 这与经典的梁弯曲理论不符。经典的梁弯曲理论认为三点弯曲过程中, 最大剪切应变应出现在中芯层及附近区域。剪切应变分布与经典的梁弯曲理论不符的主要原因为定向刨花板是非均质材料, 在制造过程中, 刨花尺寸不均一、刨花铺装方向难统一、胶层粘合强度不一致、施胶前后含水率难控制等因素可导致定向刨花板内部结构不均匀, 这将最终影响试样的刚度^[19]。基于以上分析可知, 应用于包装工业的由定向结构刨花板制成的包装箱和托盘等制品, 在制造、流通、储运过程中可能受到的冲击振动等外界情况, 其力学性能不能用简单的层状理论解释, 也很难仅仅用经典的梁弯曲理论阐明, 因此使用传统的三点弯曲法检测定向刨花板的力学性能会存在较大的不确定性。为更好地评价定向刨花板的力学性能, 拓展定向刨花板在包装工业中的应用, 减少此类包装材料产品在制造、流通、储运等过程中的损耗, 以达到更好地保护内装物及包装件的目的, 可以考虑使用四点弯曲法检测, 这样可以有效降低剪切应变对检测结果的影响。为提升定向刨花板产品的均质化和力学性能, 可以尝试通过优化铺装工艺和热压工艺, 进一步差异化定向刨花板内部结构的层状分布, 以期更好地预测和控制应变分布。

由图 4 可知, 当加载速度较小时, 试件内部应变较小。由表 1 可知, 试样 F_{\max} 与加载速度间的关系并不明显。在加载速度较小、应变较小的情况下, 试件

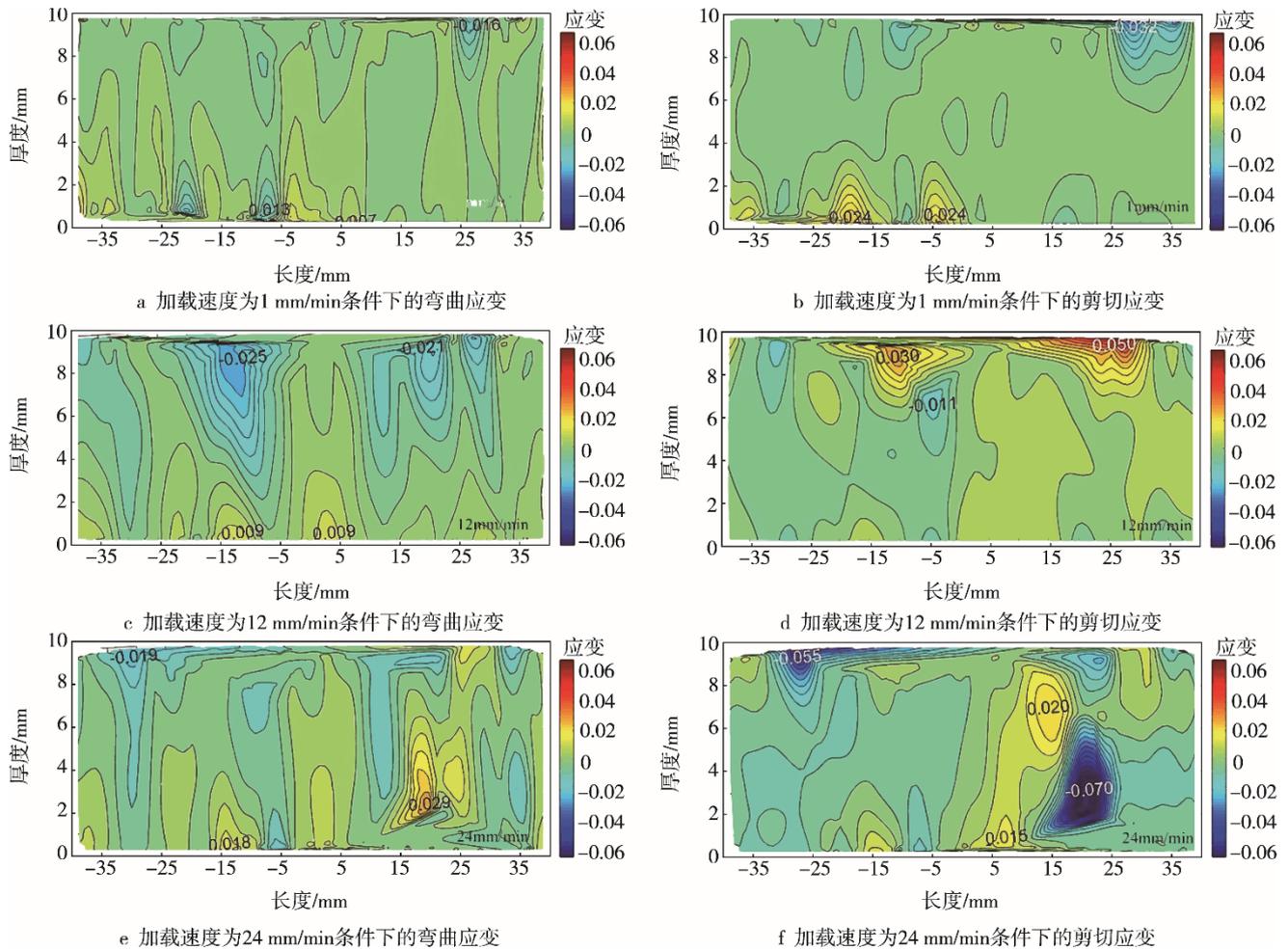


图4 3种加载速度条件下定向刨花板试样在 F_{max} 条件下的应变分布
 Fig.4 Strain distribution of OSB specimens at F_{max} under three different loading speeds

内部结构也易发生破坏。出现该现象的主要原因是较小应变导致了试样内部强度较低区域的结构破坏。

3 结语

使用三点弯曲法测量所得定向刨花板试样力学性能时变异性大。试件固有的力学性能变异性明显大于加载速度对力学性能的影响。GB/T 17657—2013 规定的加载时间对测量结果影响的可靠性仍有待商榷。

与加载时间为 (60 ± 30) s 相比,当加载时间小于 30 s 或大于 90 s 时, F_{max} 条件下试样的最大位移变异性更大。

三点弯曲法加载条件下,定向刨花板试样内的剪切应变分布与经典的梁弯曲理论不符;弯曲应变易沿试样厚度方向迁移,剪切应变分布也并不仅仅集中于中芯层附近区域。低加载速度条件下,较小的应变可造成试样内部结构破坏并最终降低 F_{max} 。

参考文献:

[1] 尚大军, 贺小翠. 我国定向刨花板工业前景展望[J].

木材加工机械, 2007(3): 50—52.

SHANG Da-jun, HE Xiao-cui. Prospect of Oriented Strand Board Industry in China[J]. Wood Processing Machinery, 2007(3): 50—52.

[2] 于宝利. 浅谈定向刨花板生产及气流分选机的应用[J]. 中国人造板, 2008(4): 20—21.

YU Bao-li. OSB Production and Application of Air Flow-separator Machine[J]. China Wood-based Panels, 2008(4): 20—21.

[3] 梅长彤, 雍晟. 我国定向刨花板工业发展历史、现状和机遇[J]. 中国人造板, 2016, 23(3): 6—9.

MEI Chang-tong, YONG Cheng. History, Current Situation and Opportunities of Oriented Strand Board Industry Development in China[J]. China Wood-based Panels, 2016, 23(3): 6—9.

[4] 谢军安, 刘阳. 可持续发展下的森林资源保护与管理[J]. 石家庄经济学院学报, 2011, 34(3): 122—126.

XIE Jun-an, LIU Yang. Forest Resource Protection and Management in Sustainable Development[J]. Journal of Shijiazhuang University of Economics, 2011, 34(3): 122—126.

[5] 钱小瑜. 我国刨花板行业在结构调整中快速成长[J]. 林产工业, 2016, 43(9): 6—7.

- QIAN Xiao-yu. Particleboard Industry in China Experiences Rapid Growth in Structural Adjustment[J]. *China Forests Industry*, 2016, 43(9): 6—7.
- [6] 钱小瑜. 世界人造板工业发展现状与趋势[J]. *中国人造板*, 2011, 18(9): 1—7.
- QIAN Xiao-yu. Situation and Trend of the Global Wood-based Panels Industry[J]. *China Wood-based Panels*, 2011, 18(9): 1—7.
- [7] 武国芳, 任海青, 周海宾, 等. 轻型木结构用材料和构件制造技术研究进展[J]. *木材工业*, 2017, 31(1): 5—8.
- WU Guo-fang, REN Hai-qing, ZHOU Hai-bin, et al. Review of Manufacturing Technology of Materials and Members for Light Wood Frame Construction[J]. *China Wood Industry*, 2017, 31(1): 5—8.
- [8] GB/T 17657—2013, 人造板及饰面人造板理化性能试验方法[S].
- GB/T 17657—2013, Test Methods of Evaluating the Properties of Wood-based Panels and Surface Decorated Wood-based Panels[S].
- [9] EN 300—2006, Oriented Strand Board (OSB)-definitions, Classification and Specifications[S].
- [10] SCHREIER H, ORTEU J J, SUTTON M A. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements[M]. Heidelberg: Springer-verlag, 2009.
- [11] 龚蒙, 徐永吉, 唐海波. 木材顺拉弹性模量测定方法的研究——加载速度的选择[J]. *南京林业大学学报*, 1995(4): 93—96.
- GONG Meng, XU Yong-ji, TANG Hai-bo. A Study of Testing Method of Measuring Wood Modulus of Elasticity Tension Parallel to Grain: Determining of Loading Speed[J]. *Journal of Nanjing Forestry University*, 1995(4): 93—96.
- [12] 朱南峰. 加载速度对静曲强度数值的影响[J]. *林业科技开发*, 1996(3): 25—26.
- ZHU Nan-feng. Effect of Loading Speed on the Static Strength[J]. *Forestry Science and Technology*, 1996(3): 25—26.
- [13] 边明明, 殷亚方, 宋坤霖, 等. 不同压缩加载速度对杉木微观结构和力学性能影响[J]. *建筑材料学报*, 2012, 15(4): 575—580.
- BIAN Ming-ming, YIN Ya-fang, SONG Kun-lin, et al. Effect of Loading Rate on Microstructure Characteristics and Mechanical Properties of Chinese Fir[J]. *Journal of Building Materials*, 2012, 15(4): 575—580.
- [14] 张心安, 朱一辛, 程丽美, 等. 竹材增强单板层积材的动态与静态弯曲性能[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2006(1): 69—71.
- ZHANG Xin-an, ZHU Yi-xin, CHENG Li-mei, et al. The Comparison of Dynamic and Static MOR of Bamboo Strengthened LVL[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2006(1): 69—71.
- [15] MENG Q F, CHEN W S, HAO H, et al. Failure Behaviors of Oriented Strand Board Material Under Quasi-static and Dynamic Loads[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(3): 04017297.
- [16] LI W Z, VAN D B J, DHAENE J, et al. Investigating the Interaction Between Internal Structural Changes and Water Sorption of MDF and OSB Using X-ray Computed Tomography[J]. *Wood Science and Technology*, 2018, 52(3): 701—716.
- [17] LI W Z, VAN D B J, DE S T, et al. Investigating Water Transport in MDF and OSB Using a Gantry-based X-ray CT Scanning System[J]. *Wood Science and Technology*, 2016, 50(6): 1197—1211.
- [18] 胡英成, 王逢瑚, 刘一星, 等. 刨花板动态抗弯弹性模量的无损检测[J]. *东北林业大学学报*, 2001(1): 9—11.
- HU Ying-cheng, WANG Feng-hu, LIU Yi-xing, et al. Nondestructive Test of the Dynamic Deflection Modulus of Elasticity for Particleboard[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2001(1): 9—11.
- [19] UMUT C M, KEMAL A. Low Velocity Bending Impact Behavior of Foam Core Sandwich Beams: Experimental[J]. *Composites*, 2017, 112: 158—175.