

木质基点阵夹层结构连接方式的优化

李曙光,胡英成*

(东北林业大学 材料科学与工程学院,黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:木质基点阵夹芯结构由于其材质的限制,常采取开槽粘接的方式来制造,这种方式破坏了面板的完整性。为了保证面板的完整性,本研究设计了一种新的连接方式,通过桦木方块连接桦木圆棒桦和杨木单板。与开槽粘接的连接方式对比,芯层在加上桦木方块后增强了芯层力传递的效率,这在平面外压缩和短梁剪切上得到体现。随着位移的增加,加入桦木方块的配置出现相对稳定的力学行为,增长了结构失效后的应急时间。试验分析了失效原因并与其他竞争模式做了对比,比强度优于部分合金和碳纤维制备的点阵夹芯结构。理论分析和试验结果一致性良好,具有成本低、环境友好等特点。

关键词:木质基;夹芯结构;垫块;压缩;短梁剪切

中图分类号:TS664 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2019)05-0225-06

Optimization of Connection Method of Wood-based Lattice Sandwich Structure

LI Shu-guang, HU Ying-cheng*

(College of Material Science and Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: Wood-based lattice sandwich structures have material limitations and thus are often manufactured by the slotting and adhesive bonding approach, which destroys the integrity of the panel. In order to ensure the integrity of the panel, this paper designed a new connection for the lattice sandwich structure. Birch round sticks and poplar veneers were joined through a birch block. The integrity of the panel was ensured by the novel connection. In contrast to the slotting and adhesive bonding connection, the force transfer of the core layer following the additional birch block increased. This manifested through out-of-plane compressions and short beam shears. As the displacement increased, the configuration of the added birch block had a relatively stable mechanical behavior, which increased the emergency time after the structural failure. The causes of the failure were analyzed and compared with other competition modes. The specific strength was better than some lattice sandwich structures composed of alloys and carbon fibers. The theoretical analysis and experimental results were in good agreement. The novel connection was characterized by its low cost and environmental friendliness.

Key words: wood base; sandwich structure; birch block; compression; short beam shear

点阵夹层结构具有优异的比强度和比刚度且构型多样,如金字塔型^[1-3]、X型^[4-6]、四面体型^[7]和八面体型^[8]结构等。制备点阵夹层结构的原料多样,冲压成型的金属^[9]和编织成型的金属丝^[10],碳纤维复合材料^[1-2,11-13],利用玻璃纤维制备的单层^[14]和多

层点阵^[15]结构等。夹层结构的破坏模式得以被研究^[16-18],如节点截断对剪切和抗压强度的影响^[7],芯层构型对于拔出性能有着影响^[19]。针对破坏时的缺陷加以改进设计出更加优异的构型是有必要的,如在复合金字塔中设计了插入件,面板的拔出强度

收稿日期:2018-09-27 修回日期:2019-01-26

基金项目:国家自然科学基金(31470581);中央高校基本科研业务费专项资金(2572016EJ1)。

作者简介:李曙光,男,在读硕士,研究方向:生物质基点阵夹芯结构。E-mail:sgliyl@163.com

*通信作者:胡英成,男,博士,教授,博士生导师,研究方向:生物质基点阵夹芯结构。E-mail:yingchenghu@nefu.edu.cn

得到改善且剪切载荷能力更高了^[20],但复杂的工艺和成本的高昂制约了其产业化发展^[9-10]。基于此,生物质基夹层结构被考虑。K. H. T. Kawasaki *et al*^[21]对木质夹芯板材做了剪切性能的研究,S. Banerjee *et al*^[22]分析了多层胶和板的力学行为,但这些都是传统的生物质夹层结构。近些年,木质基结构应用到建筑中的研究有很多^[23-26]。此外,生物质基点阵夹层结构也被研究^[27-28],如郝美荣等^[29]利用菠萝叶纤维制备的圆筒结构表现出良好的比载荷能力,并优化了配置。木质基夹层结构被通过开槽粘接的方式研究,在弯曲和平面外压缩表现了异于传统材质的力学行为^[30],但芯层和面板的分离使其弯曲力学性能受到影响。

由于材料特性和初始缺陷影响力学的行为^[11],夹层结构芯层和面板的连接方式被考虑。提高芯层和面板的连接强度,可以有效提高力学行为且加强连接的方式是多样的,通过热压加固芯层与面板的连接提高了压缩和剪切强度^[31]。利用编织技术将纤维编织穿插芯层和面板从而对于横向稳定性有着极大的贡献^[32]。但对于木质基结构,由于材质的限制,连接方式受到限制。

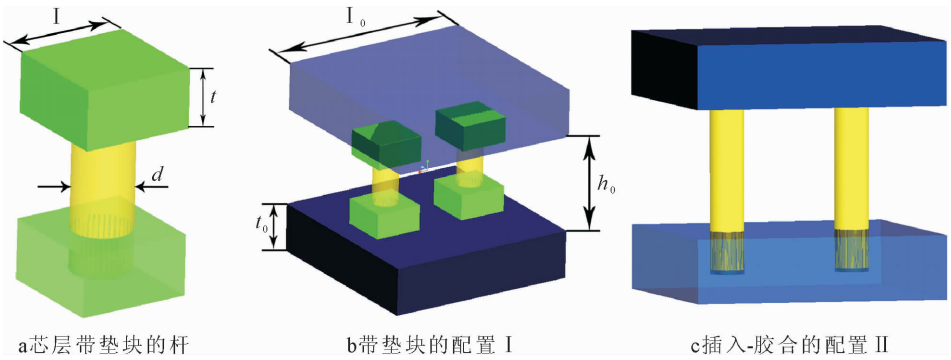


图 1 点阵夹层结构配置

Fig. 1 Lattice sandwich structure configuration

1.2 制备

垫块式木质基直柱型点阵夹芯结构(I)整体分3部分。第1部分为上下面板,第2部分为与面板连接的垫块,第3部分为与垫块连接的圆棒樺。芯层的杨木圆棒樺插入桦木垫块(图1a),最后和面板相连(图1b)。并与开槽粘接的连接方式的夹层结构(II)做对比(图1c)。接触部分都是通过环氧树脂胶在0.03~0.05 MPa接触压下室温48 h进行固化胶合。改变垫块的大小,得到3种配置(表2)。夹层结构芯层的相对密度是:

$$\rho=\frac{\pi d^2(h_0-2t)+8l^2t}{2l_0^2h_0}$$

(1)

本试验设计了一种新型的连接方式,在芯层和面板之间加入桦木方块,目的是为了保存面板的完整性。改变垫块的尺寸设计了3种配置,与插入-胶合的连接方式做对比,分别做了平面外压缩实验和短梁剪切试验。对失效模式和原因做了分析;对平面外压缩进行了理论预测。此外,芯层力的传递效率被考虑,并与几种竞争模式做了对比。

1 材料与方法

1.1 材料

桦木(Betula)圆棒樺购买于黑龙江哈尔滨腾展木业有限公司,桦木和杨木(Populus)购买于上海欣连木业有限公司,相关参数见表1。环氧树脂购买于黑龙江省科学院石油化学研究所,型号为WJ-23。为避免制备试件时由于材质的缺陷而导致测试数据的异常,试验利用称重法筛选面板、垫块和支柱。

表 1 原材料的相关参数

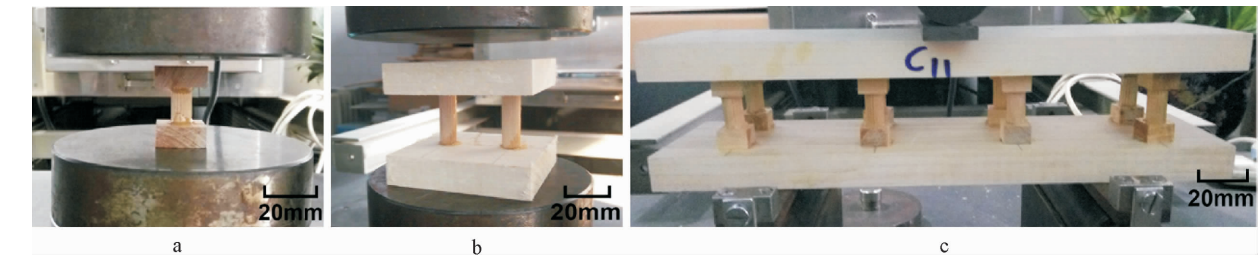
Table 1 Raw material related parameters			
参数	圆棒樺	桦木	杨木
密度/(g·cm ⁻³)	0.623	0.638	0.623
含水率/%	13.3	13.3	13.3

1.3 试验方法

参照 ASTM C365/C 364M-05 分别对芯层带垫块的杆件和试件(I和II)进行平面外压缩试验(图2a、图2b)。参照 C393/C393M-11 对试样I和对对比试样II进行短梁剪切试验,胞元为1×4(图2c)。

表 2 平面外压缩试件的相关参数

Table 2 Configuration of the out-of-plane compression Specimen						
/mm						
试件	<i>l</i> ₀	<i>h</i> ₀	<i>t</i> ₀	<i>l</i>	<i>t</i>	<i>d</i>
I ₁	60	30	15	12	8	8
I ₂	60	30	15	15	8	8
I ₃	60	30	15	20	8	8
II	60	30	15	—	—	8



注:a带垫块的芯层杆件平面外压缩图;b试件平面外压缩图;c试件短梁剪切图。

图 2 点阵夹芯结构正压和短梁剪切的试验

Fig. 2 Experimental diagram of positive pressure and short beam shear of lattice sandwich structure

1.4 理论分析

平面外等效压缩弹性模量 E 和等效压缩强度 σ 的理论公式分别为:

$$E=E_s \cdot \sin^4 \omega \cdot \bar{\rho} \tag{2}$$

$$\sigma=\sigma_s \cdot \sin^2 \omega \cdot \bar{\rho} \tag{3}$$

式中, E_s 、 σ_s 分别是芯层支柱的压缩弹性模量和压缩强度(表 3)。

表 3 芯层支柱的参数

Table 3 Parameters of the block in sandwich structure				
参数	I ₁	I ₂	I ₃	II
E_s/MPa	843.71	1 547.53	1 196.3	2 437.97
σ_s/MPa	62.29	64.14	66.38	71.43

比构型 II 更小,图 1c。

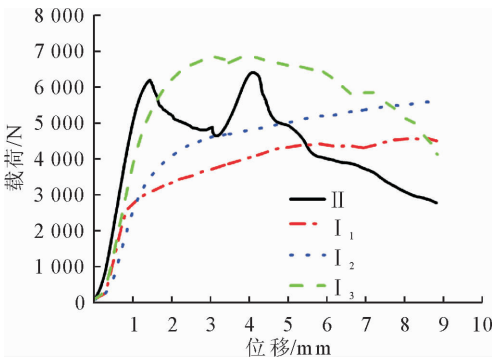


图 3 试件位移-载荷曲线

Fig. 3 Displacement-load curve of the out-of-plane compression

3 结果与分析

3.1 平面外压缩

3.1.1 基本情况 由图 3 可以看出,垫块式直柱型点阵夹芯结构 I 在平压试验过程中初期弹性变形阶段试件并无明显破坏。之后随着载荷的增加,垫块与圆棒榫端部接触的地方受到压缩,同时垫块将力传递到面板上,使得面板出现轻微凹陷;随着载荷的增加,垫块受到的压缩增大。这时因面板的受压部分变形凹陷,垫块与圆棒榫端、杨木面板部接触部位之间产生上下的剪切力,使得垫块沿着顺纹方向裂开,垫块分别受到面板和圆棒榫对其施加的剪力 T' 和 T (图 4)。

接着,圆棒榫顶着端部被压缩的垫块的一部分将压力施加到面板上(此时,芯子部分不再是通过垫块将力作用到面板上,而是通过被压破裂的部分垫块,一起将力作用到面板上,即作用在面板上的压强增大(图 5a)。最后,面板被压溃;圆棒榫也因受力过程中垫块和面板的受损而偏离原轴线一定角度受到剪切破坏(图 5b)。

图 1b 中构型 I 在随着压缩位移的增大,失效后力不会急剧下降,而是缓慢下降甚至是有所上升。这是因为杨木面板和垫块的破坏是持续性的。垫块的存在使得整个破坏过程中芯层柱对面板的压强相

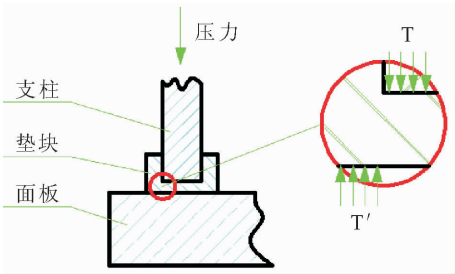


图 4 垫块受剪切力示意

Fig. 4 Schematic diagram of the birch block shear force

3.1.2 理论预测 理论值的预测在一定程度上受到芯层密度的影响,而芯层由于垫块的存在,增大了相对密度。垫块对于力的影响小于其对芯层相对密度的影响,这在计算的预测值上可以体现出来(表 4)。

3.1.3 效率分析 试验中每个胞元中的 2 个支柱能承受的力和记为 F_0 ,试件平面外压缩失。同时效的力记为 F_c 。定义 F_c/F_0 为芯层力的转化效率。随着垫块的增大,转化效率是递增的,但当垫块达到 15 mm×15 mm 时,转化效率的增加不再明显(表 5)。相对开槽粘接方式的结构(II),转化效率是明显的。随着压力的增大,初始缺陷导致的芯层的破坏,进一步试件失效。杨木比桦木质软,对芯层圆棒榫的约束能力,杨木弱于桦木。这样对初始缺陷的承受能力,II 弱于 I₃ 和 I₂ 强于 I₁。体现在转化效率上则是, I₃ 和 I₂ 的转化效率优于 II 和 I₁ (表 5)。

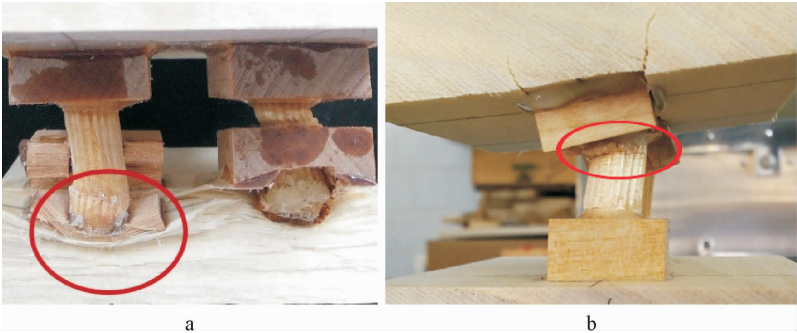


图 5 平面外压缩破坏

Fig. 5 Failure of the out-of-plane compression

表 4 理论值和测试值

Table 4 Experimental results and theoretical predictions

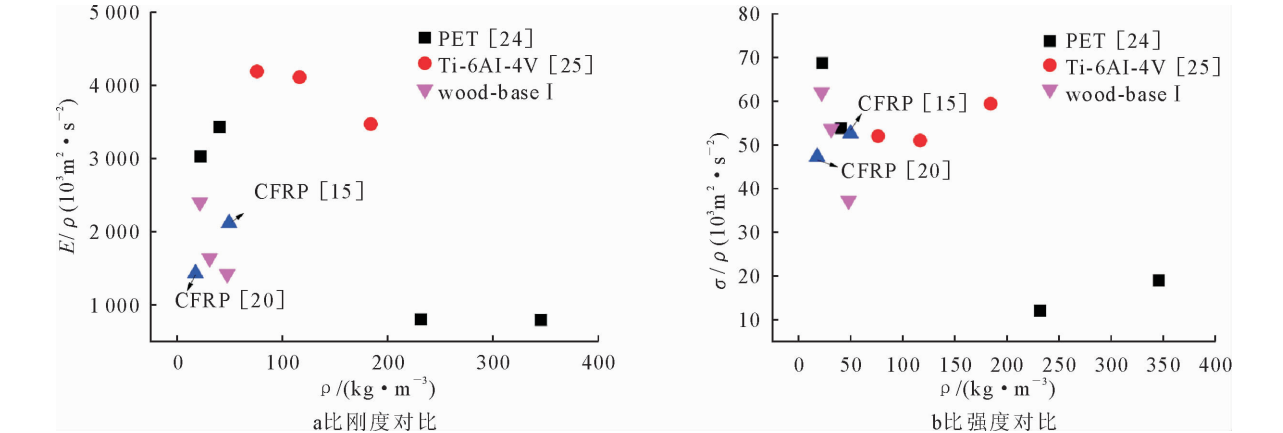
试件	试验数据/MPa		分析数据/MPa		$\bar{\rho}/\%$
	E	σ	E	σ	
I ₁	53.14	1.38	36.28	2.68	4.30
I ₂	51.24	1.70	89.76	3.72	5.80
I ₃	67.89	1.80	108.03	5.99	9.03
II	70.30	1.86	68.02	1.99	2.79

表 5 力的传递效率

Table 5 Transmission efficiency of the force

力的类型	I ₁	I ₂	I ₃	II
F_0/N	6 288.61	6 447.64	6 898.47	7 305.53
F_z/N	5 119.17	6 022.99	6 465.38	6 486.57
$F_z/F_0/\%$	81.40	93.41	93.72	88.79

3.1.4 竞争对比 由图 6 可见,具有桦木垫块的夹芯结构的比刚度比由碳纤维构成的金字塔夹层结构高约 60%^[11]。但比刚度约是由合金 Ti-6Al-4V 制备的金字塔结构的 1/2^[33]。在比强度上,配置 I₁ 要优于以上几种材料制备的夹层结构^[11,33-35]。



CFRP:碳纤维增强聚合物;PET:聚对苯二甲酸乙二醇酯

图 6 不同材料制备的点阵夹芯结构的比刚度和比强度的对比

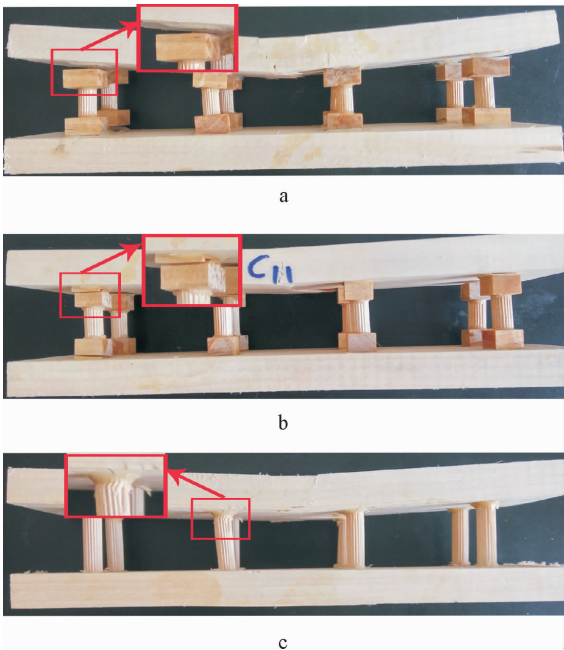
Fig. 6 Comparison of specific stiffness and specific strength of lattice sandwich structures prepared with different materials

3.2 短梁剪切

构型 I 中短梁剪切主要是垫块和面板之间胶合的先破坏,而后面板破坏见图 7a。但在 I₁ 中还会优先出现垫块的撕裂见图 7b。这主要因为短梁剪切试件的两端中,芯层的垫块承受了竖直拉伸的力。I₁ 中芯层的垫块较小,被拉伸的力撕裂。在 I₂ 和 I₃ 中垫块横向面积足够大,则更多的是垫块和面板之间粘接的破坏。而在 II 中则是面板破坏,芯层

支柱受到剪力见图 7c。

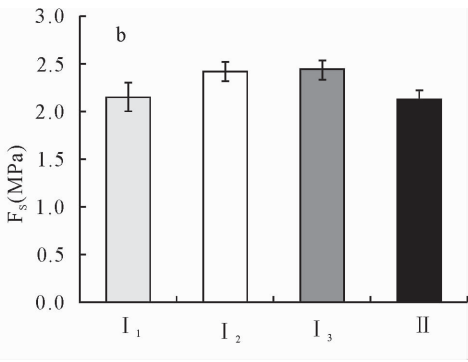
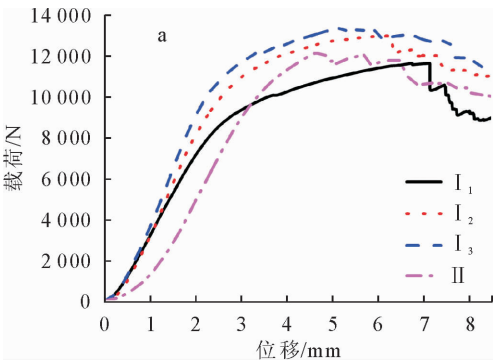
垫块的加入改变了破坏模式,同时垫块的大小改善了短梁剪切的力学行为,随着垫块的增大剪切力是增大的,但是垫块太小会引起受力时的变异性,见图 8a 中试件 I₁ 随着位移的增加,力的波动更大。相对构型 II 而言,构型 I 面板的完整性,可以提高短梁剪切的材料性能(图 8b)。



注:a 试件 I₂ 的短梁剪切破坏;b 试件 I₁ 的短梁剪切破坏;c 试件 II 的短梁剪切破坏。

图 7 短梁剪切破坏

Fig. 7 Short beam shear damage



注:a 短梁剪切位移-载荷示意图;b 短梁剪切强度的对比

图 8 点阵夹芯结构短梁剪切的性能对比

Fig. 8 Comparison of Shear behavior of short Beams with Lattice Sandwich structure

参考文献:

[1] XIONG J, MA L, WU L, *et al.* Fabrication and crushing behavior of low density carbon fiber composite pyramidal truss structures[J]. *Compos. Struct.*, 2010, 92(11): 2695-2702.

[2] YIN S, WU L, MA L, *et al.* Pyramidal lattice sandwich structures with hollow composite trusses [J]. *Compos. Struct.*, 2011, 93(12): 3104-3111.

[3] WU X, XIAO K, YIN Q, *et al.* Experimental study on dynamic compressive behaviour of sandwich panel with shear thickening fluid filled pyramidal lattice truss core[J]. *Int. J. Mech. Sci.*, 2018, 138/139: 467-475.

[4] HE L, CHENG Y S, LIU J. Precise bending stress analysis of corrugated-core, honeycomb-core and X-core sandwich panels [J]. *Compos. Struct.*, 2012, 94(5): 1656-1668.

4 结论

本试验设计了一种新型的木质基点阵夹层结构连接方法,即将芯层圆棒榫和杨木面板通过桦木垫块连接。进行平面外压缩和短梁剪切试验,分析了失效模式,进行了理论预测,且理论预测和试验保持良好的一致性。

保持面板完整的前提下,增大垫块的平面面积能增大抗压强度,短梁剪切强度和增强力的传递效率。但试验中当垫块的大小达到 15 mm×15 mm 时,短梁剪切强度和力的传递效率的增加不再明显。这可能是受制于垫块与支柱接触的部位厚度有限的缘故。

比较传统结构 II,新构型的设计使得试件的破坏形成了持续的相对平稳的过程,这增长了结构失效后的应急时间。

和 PET-合金-CFRP 制备的夹层结构比较,本试验的构型 I 在比强度上有着优势,且在成本和环境友好方面有着较大的优势。

综上,本试验的试样制备工艺简单,有着工业化生产的可能,且其具备无污染,环境友好等特点,有着较大的应用潜力。

[5] JIANG W, WEI Z, LUO Y, *et al.* Comparison of brazed residual stress and thermal deformation between X-Type and pyramidal lattice truss sandwich structure: neutron diffraction measurement and simulation study[J]. *High Temperature Materials and Processes*, 2016, 35(6): 567-574.

[6] WANG R, SHANG J, LI X, *et al.* Vibration and damping characteristics of 3D printed Kagome lattice with viscoelastic material filling[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 9604.

[7] CLOUGH E C, ENSBERG J, ECKEL Z C, *et al.* Mechanical performance of hollow tetrahedral truss cores[J]. *Int. J. Solid. Struct.*, 2016, 91: 115-126.

[8] O'MASTA M R, DONG L, ST-PIERRE L, *et al.* The fracture toughness of octet-truss lattices [J]. *J. Mech. Phys. Solids*, 2017, 98: 271-289.

[9] KOOISTRA G W, WADLEY H N G. Lattice truss structures from expanded metal sheet[J]. *Mater. Des.*, 2007, 28(2): 507-514.

[10] LEE Y H, LEE B K, JEON I, *et al.* Wire-woven bulk Kagome truss cores[J]. *Acta Mater.*, 2007, 55(18): 6084-6094.

[11] WANG B, WU L, MA L, *et al.* Mechanical behavior of the sandwich structures with carbon fiber-reinforced pyramidal lattice truss core[J]. *Mater. Des.*, 2010, 31(5): 2659-2663.

[12] VITALE P, FRANCUCCI G, RAPP H, *et al.* Manufacturing and compressive response of ultra-lightweight CFRP cores[J]. *Compos. Struct.*, 2018, 194: 188-198.

[13] WANG B, HU J, LI Y, *et al.* Mechanical properties and failure behavior of the sandwich structures with carbon fiber-reinforced X-type lattice truss core[J]. *Compos. Struct.*, 2018, 185: 619-633.

[14] FAN H, ZHOU Q, YANG W, *et al.* An experiment study on the failure mechanisms of woven textile sandwich panels under quasi-static loading[J]. *Composites Part B*, 2010, 41(8): 686-692.

[15] FAN H, YANG W, ZHOU Q. Experimental research of compressive responses of multi-layered woven textile sandwich panels under quasi-static loading[J]. *Composites Part B*, 2011, 42(5): 1151-1156.

[16] YIN S, WU L, NUTT S R. Compressive efficiency of stretch-stretch-hybrid hierarchical composite lattice cores[J]. *Mater. Des.*, 2014, 56: 731-739.

[17] YUAN W, SONG H, HUANG C. Failure maps and optimal design of metallic sandwich panels with truss cores subjected to thermal loading[J]. *Int. J. Mech. Sci.*, 2016, 115/116: 56-67.

[18] BEHARIC A, EGUI R R, YANG L. Drop-weight impact characteristics of additively manufactured sandwich structures with different cellular designs[J]. *Mater. Des.*, 2018, 145: 122-134.

[19] WANG J, DING L, SONG B, *et al.* Effect of size and shape of joining insert on the strength of sandwich-structured laminate panels for wheeled vehicle's body[J]. *J. Reinf. Plast. Compos.*, 2015, 34(22): 1823-1832.

[20] QI G, MA L. Experimental investigation of composite pyramidal truss core sandwich panels with lightweight inserts[J]. *Compos. Struct.*, 2018, 187: 336-343.

[21] KAWASAKI K H T, KOMATSU K, KAWAI S C. In-plane shear properties of the wood-based sandwich panel as a small shear wall evaluated by the shear test method using tie-rods[J]. *Journal of Wood Science.*, 2003, 49(3): 199-209.

[22] BANERJEE S, BHATTACHARYYA D. Optimal design of sandwich panels made of wood veneer hollow cores[J]. *Compos. Sci. Technol.*, 2011, 71(4): 425-432.

[23] 那斌, 王雯雯, 王实建, 等. 单板条层积材(PSL)施胶方法与热压工艺的研究[J]. *西北林学院学报*, 2012, 27(1): 241-245.

NA B, WANG W W, WANG S J, *et al.* Glue application and hot-pressing technology of parallel strand lumber[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2012, 27(1): 241-245. (in Chinese)

[24] 阙泽利, 杨玲, 王菲彬, 等. 导孔直径对木结构用规格材握螺钉力性能的影响[J]. *西北林学院学报*, 2014, 30(5): 195-198.

QUE Z L, YANG L, WANG F B, *et al.* Effects of vessel diameter on screw withdrawal strength in dimension lumber of wood structure[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2014, 29(5): 195-198. (in Chinese)

[25] 郝美荣, 胡英成, 张利, 等. 菠萝叶纤维/玻璃纤维夹芯点阵圆筒的制备与平压性能[J]. *西北林学院学报*, 2017, 32(5): 218-224.

HAO M R, HU Y C, ZHANG L, *et al.* Manufacture and compression performance of pineapple leaf fiber/glass fiber reinforced lattice cylinder with sandwich ribs[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2017, 32(5): 218-224. (in Chinese)

[26] 王韵璐, 曹瑜, 王正, 等. 国内外新一代重型 CLT 木结构建筑技术研究进展[J]. *西北林学院学报*, 2017, 32(2): 286-293.

WANG Y L, CAO Y, WANG Z, *et al.* Research progress of the new generation of heavy CLT wood structure building technology[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2017, 32(2): 286-293. (in Chinese)

[27] STOCCHI A, COLABELLA L, CISILINO A, *et al.* Manufacturing and testing of a sandwich panel honeycomb core reinforced with natural-fiber fabrics[J]. *Mater. Des.*, 2014, 55: 394-403.

[28] BOCCARUSSO L, DURANTE M, LANGELLA A. Lightweight hemp/bio-epoxy grid structure manufactured by a new continuous process[J]. *Composites Part B*, 2018, 146: 165-175.

[29] HAO M, HU Y, WANG B, *et al.* Mechanical behavior of natural fiber-based isogrid lattice cylinder[J]. *Compos. Struct.*, 2017, 176: 117-123.

[30] JIN M, HU Y, WANG B. Compressive and bending behaviours of wood-based two-dimensional lattice truss core sandwich structures[J]. *Compos. Struct.*, 2015, 124: 337-344.

[31] WU Q, MA L, WU L, *et al.* A novel strengthening method for carbon fiber composite lattice truss structures[J]. *Compos. Struct.*, 2016, 153: 585-592.

[32] JISHI H Z, UMER R, CANTWELL W J. The fabrication and mechanical properties of novel composite lattice structures[J]. *Mater. Des.*, 2016, 91: 286-293.

[33] QUEHEILLALT D T, WADLEY H N G. Titanium alloy lattice truss structures[J]. *Mater. Des.*, 2009, 30(6): 1966-1975.

[34] WANG B, ZHANG G Q, HE Q L, *et al.* Mechanical behavior of carbon fiber reinforced polymer composite sandwich panels with 2-D lattice truss cores[J]. *Mater. Des.*, 2014, 55: 591-596.

[35] VELEA M N, SCHNEIDER C, LACHE S. Second order hierarchical sandwich structure made of self-reinforced polymers by means of a continuous folding process[J]. *Mater. Des.*, 2016, 102: 313-320.