

菠萝叶纤维/玻璃纤维夹芯点阵圆筒的制备与平压性能

郝美荣¹, 胡英成^{1*}, 张 利²

(1. 东北林业大学 材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨陵 712100)

摘 要:天然纤维资源丰富、绿色环保、生物可降解等优点吸引了人们的关注,点阵结构的设计可以同时实现材料设计、结构设计与功能性设计。将材料设计与结构设计相结合,以菠萝叶纤维和玻璃纤维作为增强材料,以酚醛树脂和改性的环氧树脂为基体材料,设计了3种不同夹芯组坯方式的点阵圆筒结构,菠萝叶纤维层用P代替,玻璃纤维层用G代替,则3种结构为(PG)_n、PGP和GPG结构,并探索了3种圆筒结构的制备工艺;通过轴向压缩试验,分析了3种结构的平压性能。结果表明,纤维缠绕工艺简单可操作;(PG)_n、PGP和GPG夹芯点阵圆筒的破坏部位发生在肋条交叉附近的环向与螺旋向肋条;从结构的抗压角度出发,相比于结构PGP和GPG,结构(PG)_n不具备优势条件;从轻质高强角度出发,PGP夹芯点阵圆筒的性能最好,GPG结构次之,(PG)_n最差;夹芯点阵圆筒可以作为建筑材料使用。

关键词:点阵圆筒;夹芯组坯;制备工艺;平压性能

中图分类号:S781.21 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2017)05-0218-07

Manufacture and Compression Performance of Pineapple Leaf Fiber/Glass Fiber Reinforced Lattice Cylinder with Sandwich Ribs

HAO Mei-rong¹, HU Ying-cheng^{1*}, ZHANG Li²

(1. School of Materials Science and Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China;
2. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Natural fibers have many advantages, such as abundant, green, biodegradable, which has been attracted the attention of people. The design of lattice structure contains material design, structural design and functional design simultaneously. Taking pineapple leaf fibers and glass fibers as reinforced materials, phenol formaldehyde resin and modified epoxy resin as matrix materials, this paper combined material design and structural design together, three different combination forms of lattice cylinders with sandwich ribs were designed, namely structure (PG)_n, PGP and GPG, where P and G represented pineapple leaf fiber and glass fiber, respectively. The preparation process of three types of lattice cylinder was explored, and the compression performances of three types of structures were analyzed through axial compression tests. The experiment results showed that filament winding method was easy to operate. The failure parts of (PG)_n, PGP and GPG lattice cylinders with sandwich ribs were in circumferential and helical ribs, adjacent to the crossover. In compression resistance perspective, compared with structure PGP and GPG, the superiority of structure (PG)_n was smaller. In lightweight and high strength perspective, the property of PGP lattice cylinder was the best, the GPG lattice cylinders' took second place, and (PG)_n was the worst. Lattice cylinders with sandwich ribs could be used as building materials.

Key words: lattice cylinder; sandwich combination; preparation process; compression performance

收稿日期:2017-03-30 修回日期:2017-05-20
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:郝美荣,女,在读硕士,研究方向:生物质复合材料及其力学性能。E-mail:meirong505@163.com
* 通信作者:胡英成,男,博士,教授,研究方向:生物质复合材料及其力学性能。E-mail:yingchenghu@nefu.edu.cn

木材具有较高的强重比和突出的隔热保温、吸音隔声以及自然美观、质感舒爽等环境协调性能,这些特点使得木材及木制品在现代木结构建筑中得到了越来越广的应用^[1-5]。在现代木结构建筑中,作为承重结构柱材使用的木制品主要是原木、方木、胶合木、大截面单板层积材(LVL)及单板条层积材(PSL)^[6]等。但这些木质工程材料的截面多是矩形且为实心结构。

为了适应现代木结构建筑对圆形木柱的需求,出现了依据单板层积原理、模拟木材细胞壁 S2 层的构造、应用螺旋缠绕法制备的空心圆筒单板层积材^[7-8]。近年来,随着国家对天然林的禁止采伐及人工林木材的开发利用,出现了不同截面形状的空心胶合木柱^[9-10]。空心结构可以节省木材,减轻结构自重,可提高结构自身的刚度及抗震性,同时也可在空心部位进行功能设计。

点阵圆筒结构也是一种空心结构,现被广泛应用于复合材料领域。点阵结构轻质高强、孔隙率较大,可以实现材料设计、结构设计和功能设计于一体,被认为是极具发展前景的一类新型材料^[11-12],因此点阵结构也被应用到了木质工程材料领域^[13-14]。点阵圆筒结构是一种二维形式的点阵结构,在复合材料领域主要使用碳纤维与玻璃纤维制备^[15-20]。研究发现,相比圆筒壳体、加筋圆筒,点阵圆筒结构的比载荷更有优势^[21];点阵圆筒结构的环向肋条能够使结构更加稳定,三角形点阵圆筒比菱形点阵圆筒结构具有更高的承载优势^[20]。因此,本文采用三角形点阵圆筒结构作为研究对象。

面临我国严峻的木材资源供需矛盾,一方面要对人工林木材进行合理节约利用,另一方面是要开发利用资源丰富的农作物天然纤维材料。由于天然纤维成本低、资源丰富、可生物降解、可再生,同时密度较低,有一定的比强度比刚度^[22],因此天然纤维增强复合材料的研究成为热点^[23-27]。在众多的天然纤维中,菠萝叶纤维(PALF)由于其较高的纤维素含量(70%~82%)及低的微纤丝角^[28],与其他天然纤维相比,其力学性能较为优越,然而,相比玻璃纤维等合成纤维,力学性能仍偏低^[29]。

鉴于此,笔者采用菠萝叶纤维和玻璃纤维作为增强体,以酚醛树脂和改性的环氧树脂为基体,采用一体成型的缠绕法以不同的夹芯组坯方式制备了点阵圆筒结构,以期得到一种轻质高强、具有可用比强度/比刚度,同时可以在连通空间中配置功能性材料的结构,以期用于现代木结构建筑等领域。

1 材料与方法

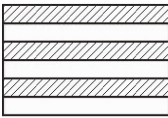
1.1 原材料

菠萝(*Ananas comosus*)叶纤维购买于海南中国热带农业科学院农业机械研究所;玻璃纤维缠绕纱购买于山东玻纤集团股份有限公司,无碱无捻粗纱,2 400 g/km,长丝束;酚醛树脂购买于北京太尔化工有限公司;改性的环氧树脂购买于黑龙江石化院;液态硅橡胶购买于深圳市固加实业发展有限公司,型号为 3118A;丙酮购买于天津光复精细化工研究所;硅油购买于天津光复精细化工研究所。

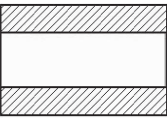
1.2 点阵圆筒的设计

点阵圆筒结构主要由环向和螺旋向肋条组成,参考 Hao^[30]等制备的菠萝叶纤维点阵圆筒结构,Buragohain^[21]等制备的复合材料加筋网格圆筒结构,及现有试验室的试验设备,确定的点阵圆筒的尺寸参数如表 1 所示。为了探索夹芯组坯方式对点阵结构力学性能的影响,本文设计了 3 种组坯方式来形成肋条,按照纤维肋条的厚度进行等分,分别为菠萝叶纤维(P)与玻璃纤维(G)交替铺层,即(PG)_n结构;菠萝叶纤维分为 2 份铺在外侧,即 PGP 结构;玻璃纤维分为 2 份铺在外侧,即 GPG 结构,纤维杆的铺层方式如图 1 所示。

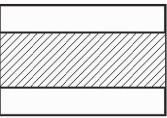
表 1 点阵圆筒的尺寸设计					
Table 1 Dimensional design of lattice cylinder					
外径 /mm	缠绕角 /°	肋条间距 /mm	高度 /mm	肋条宽度 /mm	肋条厚度 /mm
100	30	27.2	113.8	5	10



(a) (PG)_n



(b) PGP



(c) GPG

图 1 肋条的组坯方式

Fig. 1 Combination forms of rib

1.3 制备工艺

1.3.1 菠萝叶纤维的预处理 购买的菠萝叶纤维原料如图 2 所示,为提高浸渍树脂的速度以及降低纤维的变异性,包括粗细不均匀、局部缺陷、纤维长度的不连续性,手工进行纤维丝束的分散与接长,并将预处理后的纤维束绕到木棍上备用,如图 3 所示。

1.3.2 模具的制备 点阵圆筒结构中肋条的制备很关键,肋条的形状与压实与否直接影响最终的承载力,为较好的控制肋条形状,完成肋条的制备,本文,采用硅橡胶模来制备点阵圆筒结构,而硅橡胶模的制备需要辅以木模。木模的制备过程参考张昌天

的木模制备^[19],具体参数则参考设计的圆筒的参数,如图 4 所示。制备好木模后,通过液态硅橡胶的称量、排气泡、木模涂抹硅油、将液态硅橡胶倒入木模、加热固化、脱模成型制备硅橡胶模,其详细细节可参考张昌天的工艺^[19],本文排气泡采用真空干燥箱,常温下,压力设置为 0.1 MPa,时间为 2 h。液态硅橡胶的硫化工艺流程为在 30℃ 的条件下加热 2 h,之后升温到 80℃,时间持续 1.5 h,制成的硅橡胶模如图 5 所示。



图 2 菠萝叶纤维原料
Fig. 2 Pineapple leaf fiber raw materials



图 3 预处理后的菠萝叶纤维束
Fig. 3 Pineapple leaf fiber bundle after pretreatment

1.3.3 点阵圆筒制备工艺 点阵圆筒结构的制备采用缠绕工艺^[30]。首先用丙酮清洗硅橡胶模具,将脱模剂—硅油涂抹在硅橡胶模上,之后将硅橡胶模固定在一个圆筒形的金属芯模上,然后将纤维浸渍树脂基体,菠萝叶纤维和玻璃纤维分别浸渍酚醛树脂和改性的环氧树脂,之后进行纤维缠绕,纤维缠绕先进行环向缠绕,之后进行螺旋向缠绕,直到缠绕填满硅橡胶模凹槽,之后将其用铁皮包裹压实,放入真空干燥箱中进行固化,固化温度为 150℃,固化时间为 3.5 h,最后脱模即可制得点阵圆筒结构。对于 (PG)_n 结构,菠萝叶纤维与玻璃纤维交替缠绕;对于 PGP 结构,首先在内侧缠绕菠萝叶纤维,之后在中间缠绕玻璃纤维,最后在外侧缠绕菠萝叶纤维;对于 GPG 结构,首先在内侧缠绕玻璃纤维,之后在中间

缠绕菠萝叶纤维,最后在外侧缠绕玻璃纤维,制成的 3 种夹芯点阵圆筒如图 6 所示。

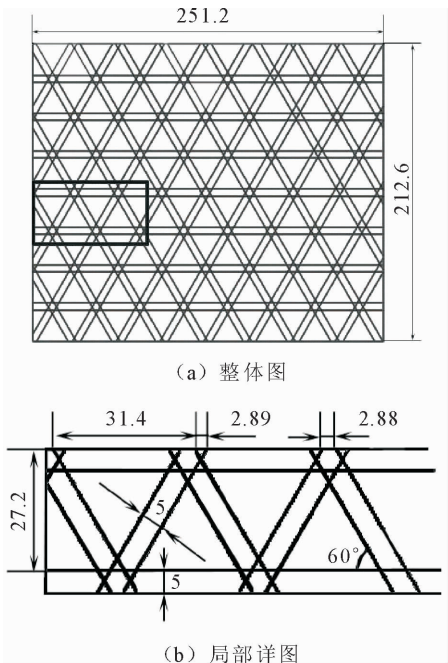


图 4 木模的尺寸设计图
Fig. 4 Dimensional design schematics of wood mold



图 5 制备的硅橡胶模
Fig. 5 Fabricated silicon rubber mold

1.4 性能测试

将制备好的 3 种夹芯点阵圆筒结构的上下端面打磨平整,防止轴向压缩时,受到的承载力不是均布力而影响实验结果。参考国标 GB/T 1453-2005《夹芯结构或芯子平压性能试验方法》^[31],将不同组坯方式的各试件分别放在万能力学试验机下进行轴向压缩测试,加载速度为 2 mm/min。

2 结果与分析

2.1 3 种夹芯结构的力学性能

2.1.1 (PG)_n 结构夹芯点阵圆筒 (PG)_n 夹芯点阵圆筒的轴向压缩载荷-位移曲线图如图 7(a)所示,主要分为 3 个阶段:上升阶段、平台阶段和曲线下降阶段。承载初期,载荷随着位移的增大而增大,在载

荷接近 1 000 N 时,开始听到噼啪声,并有一些小的颗粒掉落下来,故在增长阶段出现一些小的波动,主要是由于纤维杆中的基体与增强材料间出现的裂缝引起的。进入平台阶段之后,声音持续,靠近交叉点附近的环向纤维杆件出现分层,进而引起整根环向肋条的最外层玻璃纤维分层,如图 8 所示,但结构仍

可以继续承载,承载力先下降之后上升,该现象类似于金明敏木质基点阵夹芯结构弯曲试件的测试现象,芯子拔出会减低结构的承载力,但之后可以继续承载,承载力提升。最终达到峰值载荷后,随着分层的加重,承载力缓慢下降。

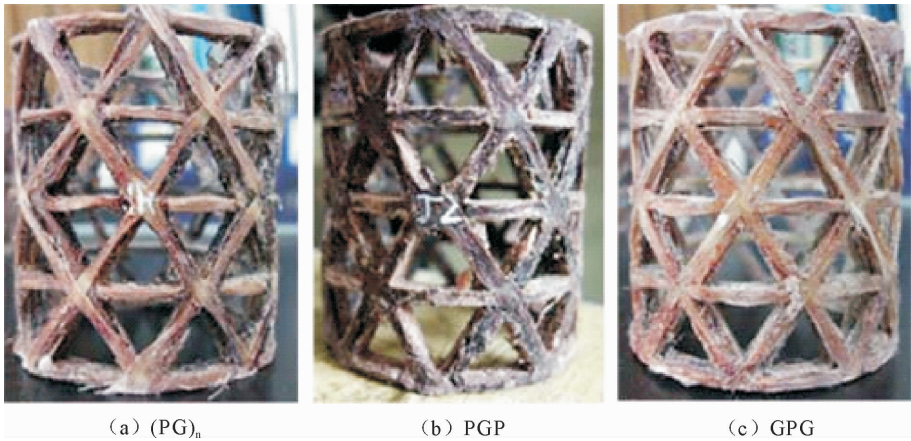
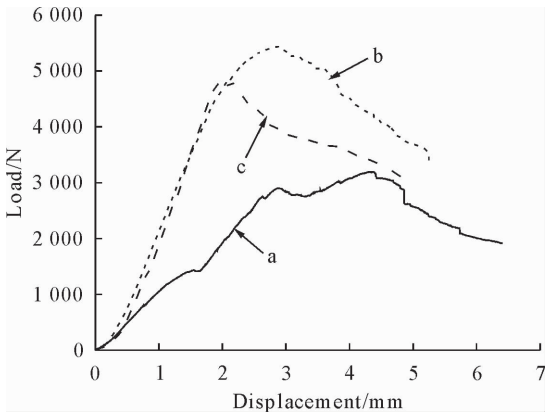


图 6 制成的夹芯点阵圆筒

Fig. 6 Manufactured lattice cylinders with sandwich ribs



注:(a) (PG)_n 结构;(b) PGP 结构;(c) GPG 结构。

图 7 夹芯点阵圆筒的载荷-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves of lattice cylinders with sandwich ribs



图 8 (PG)_n 夹芯点阵圆筒的破坏形式:分层

Fig. 8 Failure form of lattice cylinders with (PG)_n sandwich ribs: delamination



图 9 PGP 夹芯点阵圆筒的破坏形式:弯折和分层

Fig. 9 Failure form of lattice cylinders with PGP sandwich ribs: break and delamination

2.1.3 GPG 结构夹芯点阵圆筒 GPG 夹芯点阵圆筒的轴向压缩载荷-位移曲线图如图 7(c)所示,主要

分为 2 个阶段:线性阶段和载荷下降阶段。结构承载初期,载荷到 1 300 N 时开始听到噼啪声,之后声音持续,主要是由于菠萝叶纤维与酚醛树脂基体、玻璃纤维与环氧树脂基体,以及树脂基体间微裂缝的产生。之后载荷达到峰值,螺旋向肋条靠近交叉点处出现分层,进而分层扩大到整根螺旋向肋条,如图 10 所示,最外层的玻璃纤维剥落,承载力迅速下降。

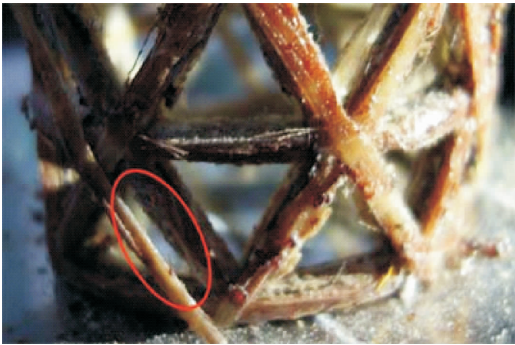


图 10 GPG 夹芯点阵圆筒的破坏形式:分层
Fig. 10 Failure form of lattice cylinders with GPG sandwich ribs: delamination

2.2 夹芯点阵圆筒的性能对比

(PG)_n 结构、PGP 结构和 GPG 结构夹芯点阵圆筒的性能分析对比如表 2 所示,从最大承载力、压缩强度出发,PGP 结构与 GPG 结构相差不大,但

PGP 结构性能较好,(PG)_n 结构最差,造成这种现象的主要原因是 PGP 结构与 GPG 结构中菠萝叶纤维与玻璃纤维间的界面结合层数相同,均为 2 层,而 (PG)_n 结构的界面结合层数相对较多,为 5 层,力学性能偏低,该现象与魏延霞制备的玻璃纤维增强复合圆筒 LVL 的顺纹抗压强度结果相似,随着玻璃纤维层数的增多,抗压强度逐渐下降,说明对于夹芯结构来说,界面结合层数越少,力学性能越好,可以适当的采取改性措施来提升界面间的结合性,从而提高结构的承载力。从压缩模量和刚度出发,GPG 结构的性能最好,PGP 结构次之,(PG)_n 结构最差;从载荷质量比角度出发,PGP 结构的性能最好,GPG 结构次之,(PG)_n 结构最差。结构 (PG)_n 无论从强度还是刚度角度出发,各项性能均较差,说明 (PG)_n 结构的构造从抗压角度来讲,没有 PGP 和 GPG 结构有优势。PGP 结构的刚度略小于 GPG 结构,相比于 GPG 结构降低了 11.3%,但其载荷质量比提升了 30.7%,故从结构的轻质高强角度出发,PGP 结构的设计最优,其次为 GPG 结构。3 种夹芯点阵圆筒结构的载荷质量比均大于张昌天采用玻璃纤维双股缠绕制备的点阵圆筒结构的载荷质量比值 25.32 N/g,说明这 3 种夹芯点阵圆筒有潜力作为建筑材料使用。

表 2 夹芯点阵圆筒的性能对比

Table 2 Performance comparison of lattice cylinder with sandwich ribs

组坯方式	最大载荷/N	压缩强度/MPa	压缩模量/GPa	刚度/(kN·mm ⁻¹)	质量/g	载荷质量比/(N·g ⁻¹)
(PG) _n	3 193	113	4.2	1.04	124.6	25.63
PGP	5 441	192	11.0	2.74	122.8	44.31
GPG	4 708	170	12.4	3.09	141.8	33.90

2.3 夹芯点阵圆筒的破坏分析

采用有限元模型对 (PG)_n、PGP 和 GPG 3 种夹芯点阵圆筒结构进行分析模拟,来预测夹芯点阵圆筒结构的失效部位。对于 (PG)_n、PGP 和 GPG 3 种夹芯点阵圆筒结构来说,3 种结构除组坯方式不同外,其他均相同,包括结构构型、尺寸参数等。3 种结构的组坯方式不同,反映在有限元模型上,就是材料参数的不同。此处,重点分析结构的破坏部位,而不是对结构受力真实情况的模拟,故对于有限元的计算结果,分析比较最大受力点即可预测 3 种结构的失效部位。纯菠萝叶纤维复合材料的材料参数^[30]为: $E_1 = 1\,012\text{ MPa}$, $E_2 = 383\text{ MPa}$, $\nu_{21} = 0.357$, $G_{12} = 586.5\text{ MPa}$ 。有限元计算单元类型为 BEAM189,上端面共施加载荷 1 000 N,有限元分析计算的点阵圆筒的轴向应力云图如图 11 所示,点阵圆筒的剪力图如图 12 所示。

图 11 为点阵圆筒的轴向应力云图,正号表示所

受的应力为拉应力,负号表示压应力,从图中可以看出,点阵圆筒在受压时,环向肋条主要承受拉应力,螺旋向肋条主要承受压应力,其中螺旋向肋条的压应力值大于环向肋条的拉应力值。图 12 为点阵圆筒的剪力云图,正负号表示方向不同,从图中可以看出,除上下端面外,环向肋条均出现了最大剪力值。综上所述,在肋条交叉附近的环向肋条与螺旋向肋条均出现了比较大的剪力、应力值,故失效主要集中在交叉点附近。(PG)_n 夹芯点阵圆筒的失效是由于靠近交叉点附近的环向纤维杆件的分层引起的整根环向肋条的分层;PGP 夹芯点阵圆筒的失效是由于靠近交叉点附近的螺旋向肋条发生弯折引起的螺旋向肋条分层;GPG 夹芯点阵圆筒的失效是由于靠近交叉点处螺旋向肋条分层引起的整根螺旋向肋条的分层,3 种夹芯点阵圆筒的失效部位与有限元分析结果相吻合。

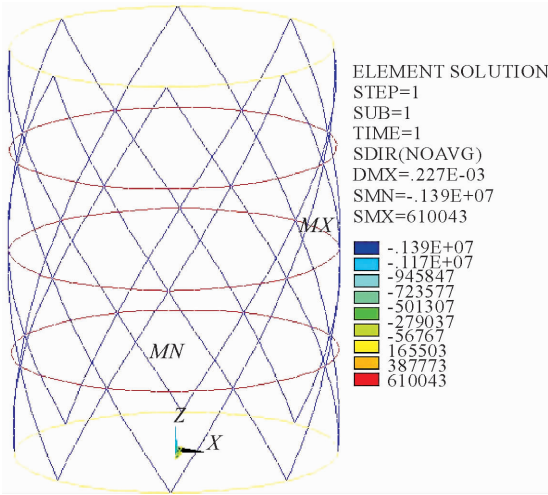


图 11 点阵圆筒的轴向应力云图

Fig. 11 Axial stress nephogram of lattice cylinder

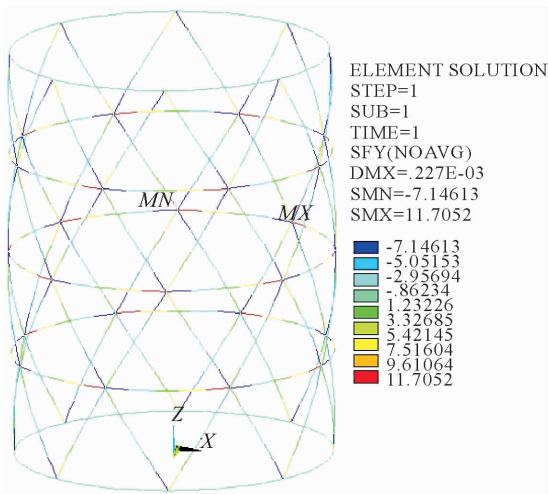


图 12 点阵圆筒的剪力云图

Fig. 12 Shear nephogram of lattice cylinder

(PG)_n 结构、PGP 结构和 GPG 结构夹芯点阵圆筒在承载过程中,点阵肋条均出现了分层现象,包括玻璃纤维层与菠萝叶纤维层间胶结界面的分层((PG)_n 与 PGP 结构)、玻璃纤维与玻璃纤维层间的分层(GPG 结构)。玻璃纤维层与菠萝叶纤维层间的界面处相比于纯玻璃纤维层和纯菠萝叶纤维层来说,界面结合更加复杂,此处的基体材料包括酚醛树脂与改性环氧树脂,增强材料包括菠萝叶纤维与玻璃纤维,由于材料性质的不同,在承载过程中,界面两侧的玻璃纤维层与菠萝叶纤维层受力后的变形不均等,故在界面处会形成应力集中现象,从而导致了界面间的分层出现。对于玻璃纤维层来说,其基体材料为改性环氧树脂,由于玻璃纤维需要浸渍环氧树脂,故购买的改性环氧树脂粘度偏小,粘结效果不是很好,故在玻璃纤维层间出现了分层。

3 结论与讨论

该研究采用纤维缠绕工艺首次制备了 3 种天然纤维与玻璃纤维夹芯组坯的点阵圆筒结构,并进一步通过轴向压缩试验测试探索了 3 种结构的平压性能。通过试验分析发现,(PG)_n 结构的刚度为 1.04 kN/mm,PGP 结构为 2.72 kN/mm((PG)_n 的 2.62 倍),GPG 结构为 3.09 kN/mm((PG)_n 的 2.97 倍),(PG)_n 结构的压缩强度为 113 MPa,PGP 结构为 192 MPa((PG)_n 的 1.7 倍),GPG 结构为 170 MPa((PG)_n 的 1.5 倍),说明(PG)_n 结构的平压性能没有 PGP 和 GPG 结构有优势。PGP 夹芯点阵圆筒结构相比与 GPG 结构,刚度下降 11.3%,载荷质量比提升 30.7%,说明从轻质高强角度出发,PGP 夹芯点阵圆筒结构的设计最优。通过有限元模拟点阵圆筒结构的受力情况,发现点阵圆筒的破坏部位主要集中在交叉点附近的环向肋条与螺旋向肋条上,该分析模型与试验测试的结果现象相似。3 种夹芯点阵圆筒结构的载荷质量比均大于张昌天采用玻璃纤维双股缠绕制备的点阵圆筒结构的载荷质量比值 25.32 N/g,说明(PG)_n、PGP 和 GPG 夹芯点阵圆筒可以作为建筑材料使用,由于在试验过程中,3 种结构均出现了分层现象,故从提升结构整体的力学性能角度出发,可以对菠萝叶纤维层与玻璃纤维层进行改性处理,提升界面间的结合力。

参考文献:

[1] 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,2014,30(5):195-198. (in Chinese)
[2] 朱晓东,何鑫魏,刘玉. GFRP 加固木结构规格材抗弯力学性能及可靠性研究[J]. 西北林学院学报,2014,30(5):181-185.
ZHU X D,HE X W,LIU Y. Reliability of GFRP reinforced wooden structure lumber[J]. Journal of Northwest Forestry University,2014,30(5):181-185. (in Chinese)
[3] 曹静,汪娟丽,李玉虎,等. 古建筑木构件原位加固防腐研究[J]. 西北林学院学报,2015,30(4):257-262.
CAO J,WANG J L,LI Y H,*et al.* In-situ consolidation and restoration of wooden components in historic buildings[J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(4):257-262. (in Chinese)
[4] 孙燕良,张厚江,朱磊,等. 木构件材料力学性能快速检测研究[J]. 西北林学院学报,2012,27(2):245-248.
SUN Y L,ZHANG H J,ZHU L,*et al.* Rapid test on mechanical properties of wooden components[J]. Journal of Northwest Forestry University,2012,27(2):245-248. (in Chinese)
[5] 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)

[6] 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)

[7] 山内秀文. 圆筒形单板层集材的开发与应用[J]. 人造板通讯, 2003(3): 6-9.

[8] 魏延霞. 玻璃纤维增强圆筒形单板层积材的性能研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2005.

[9] 罗志华. 胶合空心木柱的工艺及CFRP加固性能研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2014.

[10] 陈银慧, 胡瑾, 孙友富, 等. 胶合空心木柱结构设计与制造工艺[J]. 林业机械与木工设备, 2014, 42(9): 33-36.

CHEN Y H, HU J, SUN Y F, *et al.* Structural design and manufacturing process of glued hollow wooden columns[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2014, 42(9): 33-36. (in Chinese)

[11] DESHPANDE V S, ASHBY M F, FLECK N A. Foam topology: bending versus stretching dominated architectures [J]. Acta Materialia, 2001, 49(6): 1035-1040.

[12] 吴林志, 熊健, 马力, 等. 新型复合材料点阵结构的研究进展[J]. 力学进展, 2012, 42(1): 41-67.

WU L Z, XIONG J, MA L, *et al.* Process in the study on novel composite sandwich panels with lattice truss cores[J]. Advances in Mechanics, 2012, 42(1): 41-67. (in Chinese)

[13] 张利. 典型生物质复合材料性能与结构的优化及可靠性分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.

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

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

[16] 鞠苏. 复合材料桁架弯曲特性与非线性约束优化设计[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.

[17] FINNEGAN K, KOOISTRA G, WADLEY H N G, *et al.* The compressive response of carbon fiber composite pyramidal truss sandwich cores [J]. International Journal of Materials Research, 2007, 98: 1264-1272.

[18] WANG B, WU L, JIN X, *et al.* Experimental investigation of 3D sandwich structure with core reinforced by composite columns [J]. Materials & Design, 2010, 31(1): 158-165.

[19] 张昌天. 二维点阵复合材料结构的制备与性能[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.

[20] 周涛. 二维网格复合材料点阵结构及其刚度与强度分析[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.

[21] BURAGOHAIN M, VELMURUGAN R. Study of filament wound grid-stiffened composite cylindrical structures [J]. Composite Structures, 2011, 93(2): 1031-1038.

[22] SHIH Y F, CHANG W C, LIU W C, *et al.* Pineapple leaf/recycled disposable chopstick hybrid fiber-reinforced biodegradable composites [J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2014, 45(4): 2039-2046.

[23] 贾翀, 张洋, 王方先, 等. 不同优化工艺对稻草刨花板物理力学性能的影响[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(3): 201-204.

JIA C, ZHANG Y, WANG F X, *et al.* Influence of different optimizing technologies on the physical and mechanical properties of rice-straw particleboards [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(3): 201-204. (in Chinese)

[24] ZHANG L, HU Y. Novel lignocellulosic hybrid particleboard composites made from rice straws and coir fibers [J]. Materials & Design, 2014, 55: 19-26.

[25] ALWANI M S, KHALIL A, ISLAM M N, *et al.* Fundamental approaches for the application of pineapple leaf fiber in high performance reinforced composites [J]. Polimery, 2014, 59(11-12): 798-804.

[26] BISWAL M, MOHANTY S, NAYAK S K. Influence of organically modified nanoclay on the performance of pineapple leaf fiber-reinforced polypropylene nanocomposites [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2009, 114(6): 4091-4103.

[27] PETRONE G, RAO S, DE ROSA S, *et al.* Initial experimental investigations on natural fibre reinforced honeycomb core panels [J]. Composites Part B-Engineering, 2013, 55: 400-406.

[28] KAEWPIROM S, WORRARAT C. Preparation and properties of pineapple leaf fiber reinforced poly (lactic acid) green composites [J]. Fibers and Polymers, 2014, 15: 1469-77.

[29] KENGKHETKIT N, AMORNSAKCHAI T. Utilisation of pineapple leaf waste for plastic reinforcement; 1. a novel extraction method for short pineapple leaf fiber [J]. Industrial Crops and Products, 2012, 40: 55-61.

[30] HAO M R, HU Y C, WANG B, *et al.* Mechanical behavior of natural fiber-based isogrid lattice cylinder [J]. Composite Structures, 2017.

[31] GB/T 1453-2005 夹层结构或芯子平压性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.