

轻质空心木质复合材料热和力学性能分析

张 峰,臧小榕,漆楚生,张 扬,母 军*

(北京林业大学 木质材料科学与应用教育部重点实验室,木材科学与工程北京市重点实验室,北京 100083)

摘 要:将 PVC 空心塑料管嵌入至木质纤维板坯中,通过热压法制备轻质木质复合材料(HWC),分析了 PVC 管空气体积比对 HWC 的力学性能和热性能的影响,并对热性能进行仿真分析。结果表明,通过嵌入 PVC 空心塑料管,可以制备密度 0.3 g/cm^3 的轻质木质复合材料,HWC 断面密度呈双“M”型分布,表层密度最小。随着 PVC 管内空气体积比的增加,HWC 静曲强度、弯曲弹性模量有增大的趋势,内结合强度减小,对 24 h 吸水厚度膨胀率和吸水率影响较小。PVC 管内空气体积比对 HWC 的导热系数影响较小,且均 $<0.07 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,并可通过合并 Series 模型和 Parallel 模型进行预测。PVC 空心塑料管的嵌入阻碍了木质复合材料的热量传递,热传递测试降温 1 h 后 HWC 表面温度平均比对照组高 0.93°C 。

关键词:空心木质复合材料;PVC 管;力学性能;导热系数;有限元分析

中图分类号:S781.2

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2018)06-0216-07

Thermal and Mechanical Property Analysis of Light-Weight Hollow Wood Composites

ZHANG Feng,ZANG Xiao-rong,QI Chu-sheng,ZHANG Yang,MU Jun*

(Key Laboratory of Wood Material Science and Utilization of Ministry of Education,Beijing City Key Laboratory of Wood Science and Engineering,Beijing Forestry University,Beijing 100083,China)

Abstract:Light-weight hollow wood composites (HWC) were manufactured by embedding PVC plastic tubes to fiberboard with hot-press. The influences of tube air volume ratio on thermal and mechanical properties of HWC were investigated and thermal simulation analysis was carried out. The results indicated that HWC with density of 0.3 g/cm^3 could be successfully prepared by embedding PVC tubes. HWC vertical density profile curve was in “M” shape distribution while surface density was minimum. With the increase of tube air volume ratio,water absorption performance of HWC had no significant impact,modulus of rupture and modulus of elasticity tended to increase but bonding strength reduced. Thermal conductivity of all HWC was less than $0.07 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ and could be forecasted by combining series model and parallel model. Hollow structure had obvious effect on inhibiting heat transfer,which led to a lower heat transfer rate of HWC than control group. Surface temperature was 0.93°C higher than control group after cooling 1 h of heat transfer test.

Key words:hollow wood composite; PVC tube; mechanical property; thermal conductivity; finite element analysis

我国每年木材消耗量将近 5 亿 m^3 ,其中建筑领域年消费木材量约占全国总消费量的 $1/3$ ^[1],以木质复合材料代替实木,或以轻质木质复合材料代替

中高密度的木质复合材料,可以很大程度地减少木质资源的消耗^[2]。Xie^[3]等制备一种密度仅为 0.0563 g/cm^3 超低密度复合材料,其导热系数仅为

收稿日期:2017-12-09 修回日期:2018-01-10

基金项目:北京林业大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(2017PT04);中国博士后科学基金项目(2016M591289);“948”国家林业局引进项目(2015-4-50)。

作者简介:张 峰,男,在读硕士,研究方向:木质复合材料与胶黏剂。E-mail:zhangfeng@bjfu.edu.com

*通信作者:母 军,女,博士生导师,教授,研究方向:木质生物质材料利用。E-mail:mujun222@sina.com

0.035 W/(m·K),减噪系数达 0.67,在建筑吸音保温材料中有很高的应用前景。低密度复合材料普遍存在力学性能较差的问题,通过表面改性能够对轻质复合材料的力学强度进行改善^[4],但轻质复合材料力学性能仍难以达到建筑结构用材的标准。基于轻质复合材料较低的导热系数,其有望能在建筑保温材料领域中广泛应用。

目前,我国建筑能耗占社会总能耗的 33%左右^[5],研究表明建材行业在节能减排方面具有很大的潜能^[6]。由于气体的导热系数非常低,因而很多空心、多孔原料被用以制备保温材料。周统建^[7]构建 3 种不同结构的空心复合墙体材料,比较不同空心结构墙体材料的保温隔热性能,结果表明空心结构墙体材料均能达到我国建筑材料保温隔热要求。童宏拓^[8]等采用预埋 PVC 管平压成型法制备空心复合材料,板材空心结构完好同时具备良好的力学性能。

为研究具备良好保温性能的轻质绿色建材,本研究利用 PVC 管在轻质复合材料中构建空心结构来制备空心木质复合材料(HWC),分析 HWC 中空

气体积比对材料的物理力学性能与热学性能的影响,并通过 Ansys 有限元软件对 HWC 进行热学仿真分析,为其在建筑保温材料中的应用提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

杨木木纤维,于 90℃干燥箱中干燥至含水率 5%左右备用;异氰酸酯胶黏剂,型号:PM200,NCO 含量为 30.5%~32%,粘度 250 MPa·s(25℃),密度 1.04 g/cm³;硬质 PVC 管,外直径(d)分别为 5、6、7 mm,管壁厚度均为 0.5 mm,密度为 1.2 g/cm³。

1.2 空心复合材料制备

HWC 目标密度为 0.3 g/cm³,尺寸为 350 mm×350 mm×20 mm。试验设计分组如表 1 所示,控制变量为 PVC 管内空气体积占整板的体积比 λ,由此可求出对应复合材料中 PVC 管铺装数量 n,PVC 塑料体积比 λ_p,木纤维体积比 λ_w,木纤维中气体体积比 λ_a(忽略 MDI 胶黏剂体积),计算公式如下:

表 1 试验设计分组及断面密度测量值

Table 1 Experiment group and vertical density profile measurements

<i>n</i>	<i>d</i> /mm	λ /%	λ _p /%	λ _w /%	λ _a /%	ρ _{mean} /(g·cm ⁻³)	ρ _{max} /(g·cm ⁻³)	ρ _{min} /(g·cm ⁻³)
1	—	0	0	20	80	0.303	0.329	0.279
2	5	7.50	4.22	16.63	71.66	0.332	0.791	0.187
3	5	8.75	4.92	16.06	70.27	0.312	0.769	0.161
4	5	10.00	5.63	15.50	68.88	0.315	0.750	0.147
5	5	11.25	6.33	14.94	67.48	0.329	0.791	0.146
6	5	12.50	7.03	14.38	66.09	0.335	0.771	0.147
7	6	7.50	3.30	17.36	71.84	0.295	0.567	0.212
8	6	8.75	3.85	16.92	70.48	0.295	0.577	0.194
9	6	10.00	4.40	16.48	69.12	0.325	0.610	0.215
10	6	11.25	4.95	16.04	67.76	0.309	0.567	0.188
11	6	12.50	5.50	15.60	66.40	0.298	0.531	0.183
12	7	7.50	2.71	17.83	71.96	0.289	0.588	0.190
13	7	8.75	3.16	17.47	70.62	0.284	0.577	0.173
14	7	10.00	3.61	17.11	69.28	0.308	0.544	0.192
15	7	11.25	4.06	16.75	67.94	0.292	0.582	0.171
16	7	12.50	4.51	16.39	66.60	0.289	0.490	0.177

$$n = \frac{\lambda \times V}{V_t} \quad (1)$$

$$\lambda_p = \frac{v_p \times n}{V} \quad (2)$$

$$\lambda_w = \frac{v_w}{v} = \frac{M - M_p}{\rho_w V} \quad (3)$$

$$\lambda_a = 1 - \lambda - \lambda_p - \lambda_w \quad (4)$$

式中,*V*为板材体积,*V_t*为 PVC 管体积,*V_p*为 PVC 塑料体积,*V_w*为木纤维体积,*M*为板材质量,*M_p*为 PVC 塑料质量,ρ_w为木纤维细胞壁密度,取值为 1.5 g/cm³^[9]。

PVC 管定位模具由塑料管与细木条粘接完成,用以确定 PVC 管数量和间距,每张板中 PVC 管铺装结构均为双层铺装,上下层 PVC 管平行错开排列,定位模具如图 1 所示。采用热压法制备 HWC,首先将称量干燥好的木纤维置于滚筒内混合搅拌,利用雾化喷枪对纤维进行均匀施胶,其中施胶量为 4%,丙酮作为稀释剂以质量比 1:1 与 MDI 胶混合。然后将施胶后的木纤维置于尺寸 350 mm×350 mm×500 mm 的木模具中,分 3 层进行铺装,质量比为 3:4:3,PVC 管用定位模具固定后铺装于

木纤维层中间。预压完成后取出木模具与定位模具,将板坯置于热压机中热压,热压温度为 180℃,热压时间 8 min,热压压力 1 MPa,采用 20 mm 厚度规控制板材厚度。热压完成的 HWC 在温度 25℃、湿度 65% 条件下恒温恒湿静置 7 d 后,进行物理力学及热学性能测试。



图 1 PVC 管定位模具

Fig. 1 Locate mold of PVC tubes

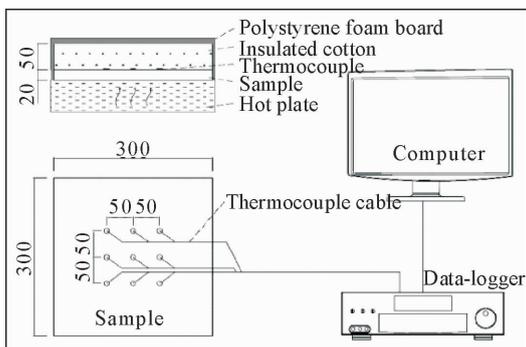


图 2 热传递测试装置

Fig. 2 Equipment diagram of heat transfer test

1.3 性能测试

1.3.1 物理力学性能测试 断面密度(VDP)利用剖面密度分析仪(GreConDA-X)测量,扫描速度 0.5 mm/s,试件尺寸为 50 mm×50 mm×20 mm。内结合强度(IB)、静曲强度(MOR)、弹性模量(MOE)、吸水厚度膨胀率(TS)、吸水率(WA),参照 GB/T17657-2013《人造板及饰面人造板理化性能测试方法》^[10]进行测定,测量仪器为万能力学试验机,型号 MMW-50,生产厂家为济南耐而试验机有限公司,每组试验测量 10 次。

1.3.2 导热系数测试及预测 导热系数(TC)及热阻(TR)利用 DRH-300 导热系数测试仪测定,试件尺寸 300 mm×300 mm×20 mm,环境温度 23℃,冷面温度 25℃,热面温度 45℃。

Series 模型和 Parallel 模型可用来预测多相木基复合材料的导热系数^[11],Series 模型适用于材料垂直热流方向排列的导热系数计算,Parallel 模型适用于材料平行于热流方向排列的导热系数计算。在复合材料中纤维排列方式介于两者之间,因此合并这 2 个模型公式可以有效预测复合材料模型^[12]。假设边界条件为:HWC 中木纤维、板材内气体及少量水分均匀分布于板材内部;PVC 管排列整齐,单

位体积内 PVC 塑料的体积分数均匀一致;各组 HWC 中木纤维、PVC 塑料、板材内气体及水分的导热系数均为定值且不随含水率和密度变化。则根据 Series 模型推导 HWC 导热系数为:

$$K_1 = \frac{1}{\left(\frac{\lambda}{K_t} + \frac{\lambda_p}{K_p} + \frac{\lambda_w}{K_w} + \frac{\lambda_a}{K_a}\right)} \quad (5)$$

根据 Parallel 模型推导 HWC 导热系数为:

$$K_2 = \lambda K_t + \lambda_p K_p + \lambda_w K_w + \lambda_a K_a \quad (6)$$

合并公式为:

$$K_3 = \frac{a}{\left(\frac{\lambda}{K_t} + \frac{\lambda_p}{K_p} + \frac{\lambda_w}{K_w} + \frac{\lambda_a}{K_a}\right)} + (1-a)(\lambda K_t + \lambda_p K_p + \lambda_w K_w + \lambda_a K_a) \quad (7)$$

式中, λ 为 PVC 管内空气体积比, λ_p 为 PVC 塑料体积比, λ_w 为木纤维细胞壁体积比, λ_a 为木纤维中空气体积比, K_t 为管内空气导热系数,取值为 0.023 W/(m·K), K_p 为 PVC 塑料导热系数,取值为 0.14 W/(m·K)^[13], K_w 为木材细胞壁的导热系数,取值为 0.421 W/(m·K)^[14], K_a 为木纤维内部气体的导热系数,取值为 0.046 W/(m·K)^[9]。

1.3.3 热传递测试 热传递过程温度变化曲线利用温度巡检仪测定,试验装置如图 2 所示。HWC 表面共选取 9 个测量点,热电偶测量端紧贴于板材表面,另一端接入 16 通路温度巡检仪。加热装置为 DB-2A 智能控温电热板,热面温度为 50℃,环境温度(25±0.5)℃。加热过程 HWC 表面覆盖隔热棉隔绝试件表面空气对流,升温时间 1 h,然后移除电热板及隔热棉,将板材置于室温环境自然冷却 1 h。

1.3.4 热学仿真模拟 为更直观模拟空心单元热学特性,以 Solidwork 软件创建尺寸为 20 mm×20 mm×10 mm 的简化模型,并在 Ansys Workbench 软件中进行热学的有限元模拟。其中木质材料密度为 0.3 g/cm³,导热系数 0.061 W/(m·K),比热 1 173 J/(Kg·K)^[15],PVC 塑料密度为 1.2 g/cm³,导热系数为 0.14 W/(m·K)^[13],比热由物理性能测试系统(型号:PPMS-9T)测量得出,为 895.6 J/(Kg·K)。模型底面施加热载荷为 50℃,顶面及侧面对流为 5 W/(m²·℃),输出结果为热流矢量图及温度云场图。

2 结果与分析

2.1 空心木质复合材料制备情况

由图 3 可知,HWC 中管材排列均匀,在热压温度 180℃,热压压力 1 MPa,热压时间 540 s 条件下,能够制出结构稳定的 HWC,PVC 管孔洞略微变形但无坍塌现象。



图 3 空心复合材料

Fig. 3 Hollow wood composites

2.2 断面密度分析

由图 4 可知,HWC 厚度方向的断面密度呈双“M”型,“M”型曲线的峰值范围与 PVC 管有关。PVC 管层的密度高于纯木纤维层,这是因为 PVC 塑料的密度为 1.2 g/cm^3 远远高于 HWC 的平均密度 0.3 g/cm^3 。PVC 管层的密度变化较大,靠近表层曲线较陡,表明在热压过程中靠近表层的 PVC 管变形较大。由表 1 可知,各组 HWC 的平均密度相差不大,在 $0.284 \sim 0.332 \text{ g/cm}^3$,与目标密度 0.3 g/cm^3 接近。外径 d 对 HWC 最大密度的影响较大,最大密度从大到小依次为 $d=5 \text{ mm}$ 、 $d=6 \text{ mm}$ 和 $d=7 \text{ mm}$ 。这是因为密度最大值为 PVC 管边界的临界值,在 λ 相同的情况下,外径越小则 PVC 管数量越多,因而密度更大。各组最小密度差别不显著,表明各组 HWC 表层木基材料密度基本一致。

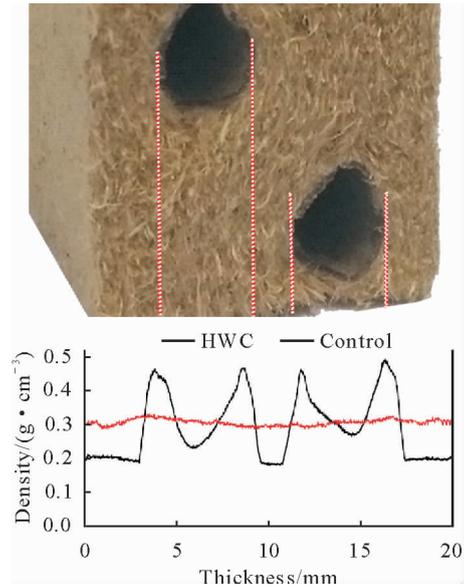


图 4 典型断面密度分布曲线

Fig. 4 Typical vertical density profile curve

2.3 吸水厚度膨胀率及吸水率分析

由图 5(a)可知,整体上各组 2 h TS 变化不大,约为 $4\% \sim 6\%$ 。随着浸水时间的增加,24 h TS 明显增大。同时随着 λ 的增大,24 h TS 整体呈下降的趋势。这是因为在相同密度下, λ 的增加会导致木纤维含量相对减少,吸水单元减少使得厚度膨胀

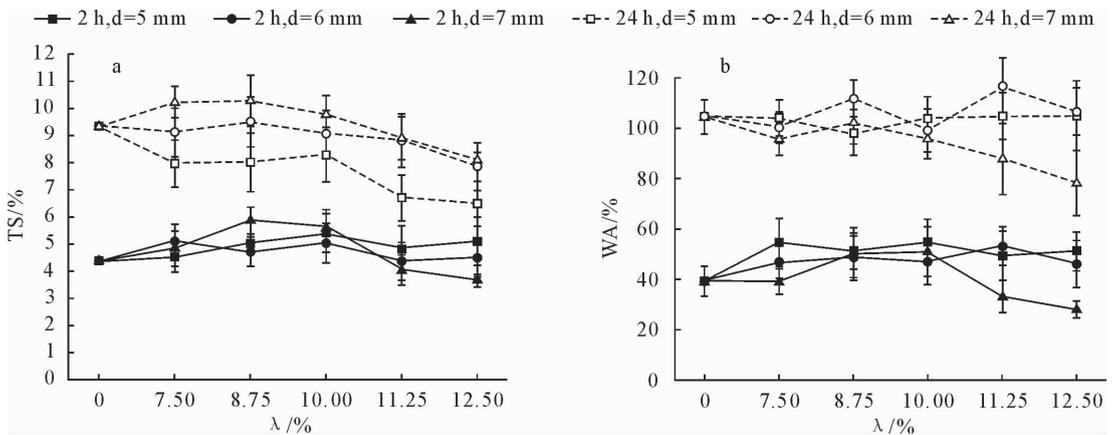


图 5 管径及体积比对厚度膨胀率及吸水率的影响

Fig. 5 The influence of diameter and volume ratio on thickness swelling and water absorption

减少。各组 HWC 的 24 h TS 均 $< 12\%$, 满足中密度纤维板标准。由图 5(b)可知,各组 2 h WA 约为 50% , 无显著变化趋势。随着浸水时间的增加,WA 明显增大,但各组之间 WA 差别较小。相较于对照组复合材料,HWC 的 TS 及 WA 差别均不大,表明 MDI 胶黏剂具备良好的防水性能,PVC 管添加对复合材料吸水性能影响不大。

2.4 力学性能分析

由图 6(a)可知,各组 HWC 的 MOE、MOR 均高于对照组,这是因为弯曲性能测试为三点弯曲试

验,长条状 PVC 管具有良好韧性,有助于增强复合材料纵向的抗弯强度。随着 λ 的增加,MOE 与 MOR 有轻微增大,这是因为 λ 的增加会增大 PVC 管的数量。由图 6(b)可知,各组 IB 值均较低,这主要是因为 HWC 平均密度为 0.3 g/cm^3 ,属于低密度复合材料,纤维之间粘接性能较差。添加 PVC 管后复合材料 IB 值相比对照组有所下降,这是因为 PVC 管表面未进行改性处理,木塑界面胶合性能较差。同时试验中发现破坏界面均为木塑界面,断裂面塑料面积占比约为 $20\% \sim 28\%$,使得 HWC 的力

学强度较低。随着 PVC 管数量的增加对 HWC 结合强度的影响越不利。其中外径 7 mm, λ 为 10% 的 HWC 表现出较好的力学性能, MOE、MOR 和 IB 分别为 385.4、3.2 MPa 和 0.05 MPa。

2.5 导热系数分析

由图 7(a)可知,复合材料的 TC 与 TR 成反比关系。外径 5 mm 的 PVC 管由于内径较小,空气对流速率较低热阻较大,因此随着 λ 的增加 TC 会降低;但随着单位体积内 PVC 塑料含量增加,PVC 塑料对复合材料 TC 的作用力增强,PVC 塑料 TC 为

0.14 W/(m·K) 远大于复合材料导热系数 0.061 W/(m·K),因此随着 λ 的增加 HWC 的 TC 有所提高。 d 为 6 mm 和 7 mm 组 TC 随着 λ 的增加而增加,这是因为当 PVC 管的外径较大时,管内空气上下对流作用加强,同时 PVC 塑料具有较高的导热系数对 TC 影响较大。但是整体来看,各组的 TC 之间的差别并不大,均在 0.06~0.068 W/(m·K),与对照组之间无显著差别。这可能是因为各组中气体的总体积分数($\lambda + \lambda_a$)十分接近,使得稳态热传递过程中的导热性能相近。HWC 的导热系数均 <

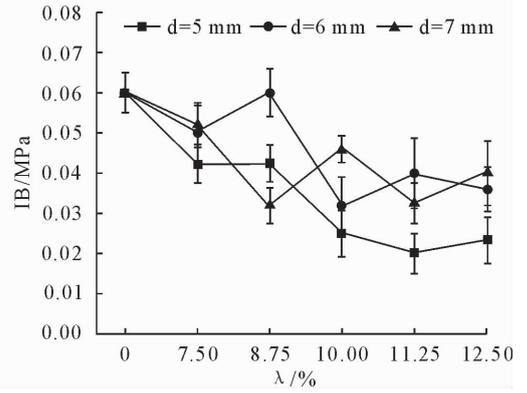
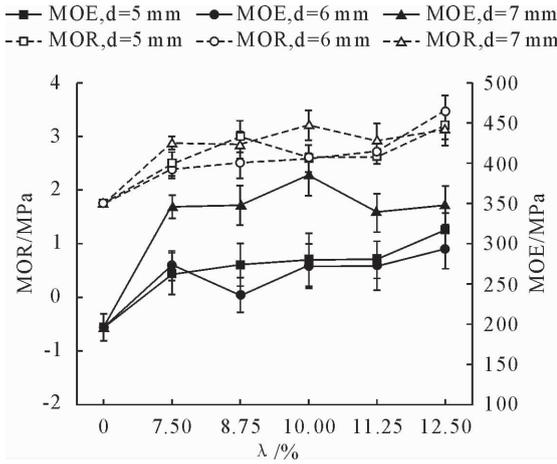


图 6 管径及体积比对力学性能的影响

Fig. 6 The influence of diameter and volume ratio on mechanical properties

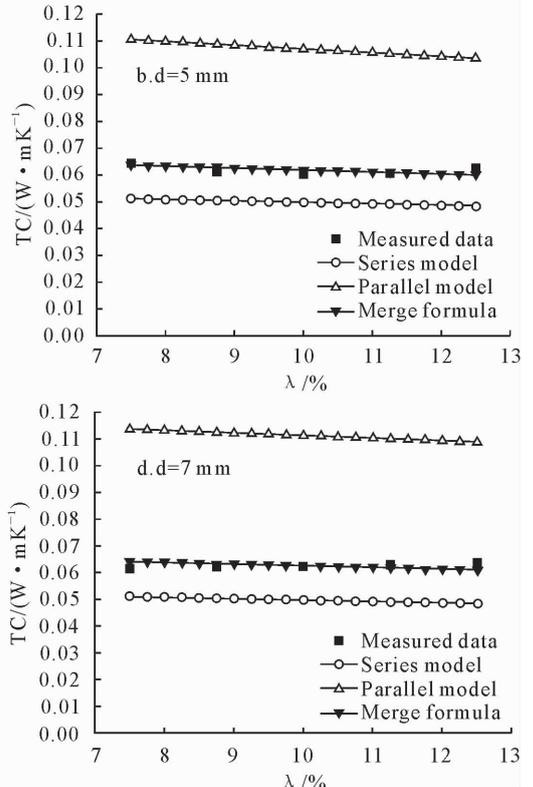
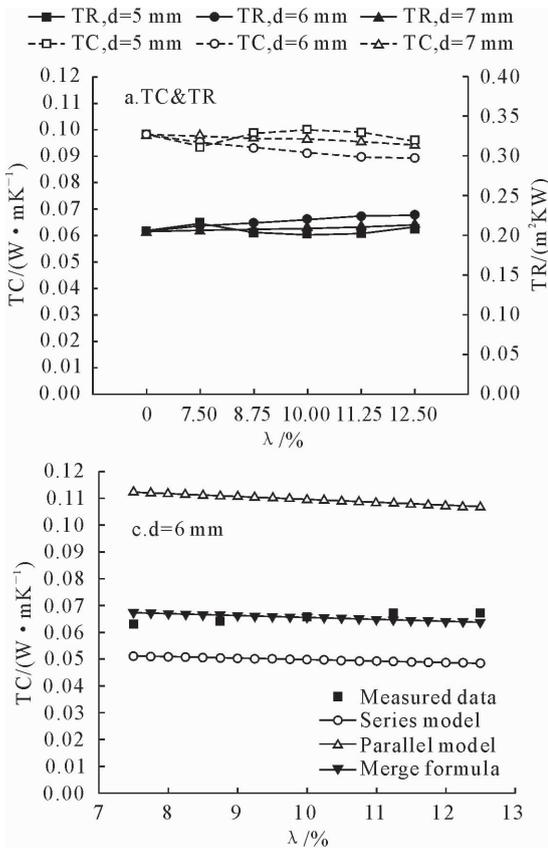


图 7 管径及体积比对导热系数的影响及模型预测

Fig. 7 The influence of diameter and volume ratio on thermal conductivity and prediction

0.12 W/(m·K), 满足建筑保温材料的要求。

根据 Series 模型和 Parallel 模型的合并公式计算可知,当系数 α 分别为 0.789 5、0.735 7、0.792 0 时,d 为 5、6、7 mm 的各组 HWC 导热系数预测曲线与试验数据吻合度较高,如图 7(b)、图 7(c)、图 7(d)所示。

2.6 热传递测试分析

图 8(a)、图 8(b)分别为同一直径 d(5 mm)不同管内空气体积比 λ 及同一管内空气体积比 λ (7.5%)不同直径 d 条件下的温度变化曲线。由图 8 可知,d 及 λ 对热传递速率影响不大,这是因为各组气体总体积分数($\lambda + \lambda_a$)十分接近,使得 HWC 在瞬态热传递过程中表现出相似的传热特性。升温阶段,温度曲线出现一定的波动,这是由于加热板温度变化导致,加热板温度在设定温度 50°C 条件会上下波动,幅度大小约为 2°C,从而影响加热过程复合材料中的热流传递。在升温阶段对照组升温速率稍快,HWC 均表现出一定的热传递滞后。降温阶段,

对照组复合材料降温速率最快,HWC 表现出明显的热传递滞后效应,表明在没有热载荷条件下,依靠复合材料自身导热作用,具有空心结构的复合材料能够表现出更显著的阻碍热流传递作用。降温 1 h 后 HWC 表面温度平均比对照组高 0.93°C,最大温差可高于对照组 1.4°C,表明 HWC 具备良好的保温能力,在建筑保温材料领域具有良好的应用前景。

2.7 热学仿真分析

由图 9 可知,对照组热流方向为垂直向上,边缘部分由于对流作用有热流流失。HWC 内部热流方向相对复杂,热量从板材底部分向上传导,热流遇到 PVC 管后,一部分热流绕开 PVC 管继续沿着木纤维向上传递,一部分通过 PVC 管向上传递热量,少量热量通过 PVC 管内部空气传导。木纤维与 PVC 管连接界面热流曲线最密集,表明该处热流传递速率最快,这是因为 PVC 塑料具有较高的导热系数,热流更容易往塑料区域传递。

由图 9 可知,0~50 s 时间段对照组复合材料温

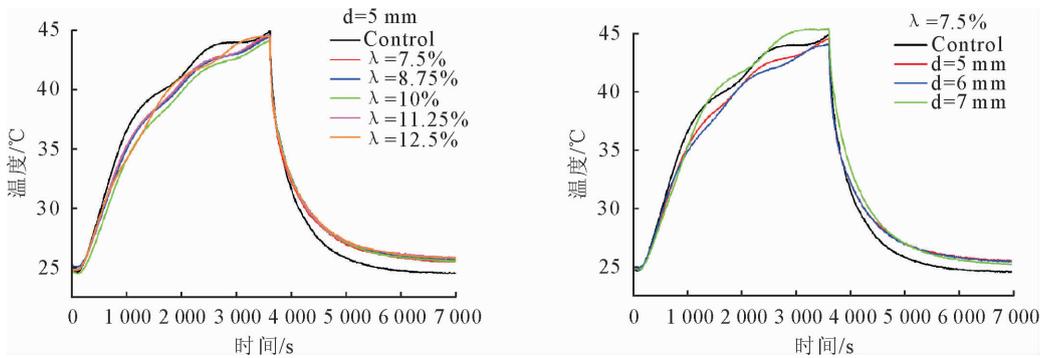


图 8 空心复合材料热传递曲线

Fig. 8 Heat transfer curve of hollow wood composites

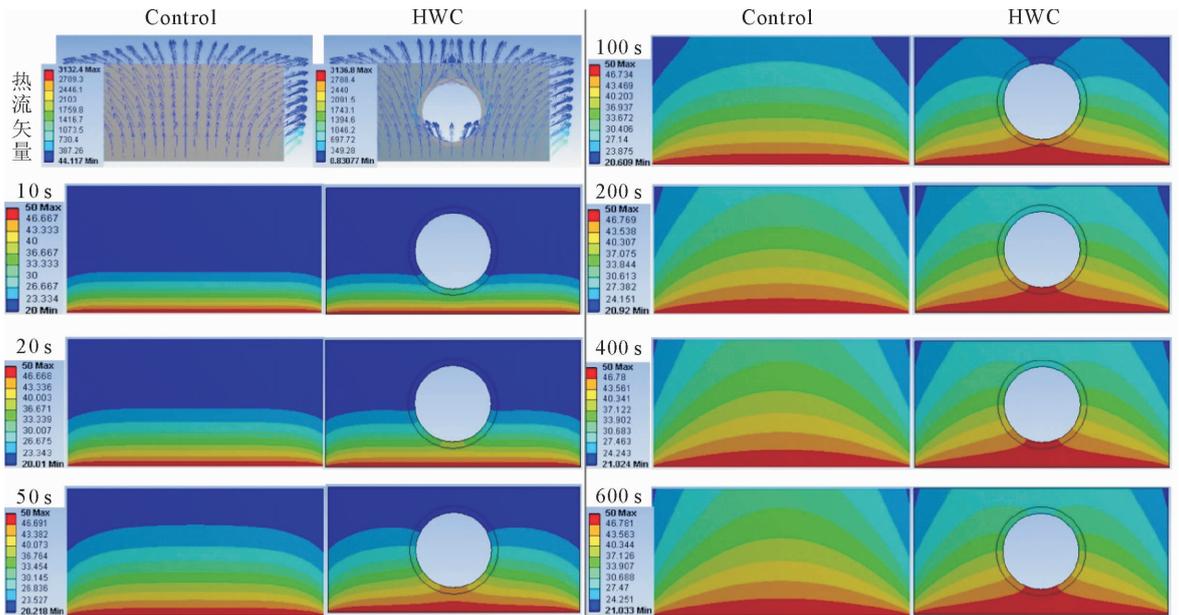


图 9 热流矢量及温度场云图仿真结果

Fig. 9 Heat flux vector and temperature field simulation results

度均匀增加,在厚度方向上呈阶梯状分布。50 s 之后由于复合材料周边的空气对流作用,边缘的热量会流失到空气中,中心温度持续增加,最后复合材料内部温度场呈抛物线状分布,且越靠近热源的区域抛物线越平缓。0~20 s HWC 内部温度云场图与对照组类似,热流在刚到达 PVC 塑料的时候,传递速率有所增加,略高于周边木纤维处热流温度。在 20 s 之后的时间段,PVC 导热速率较快的这种现象仍然存在,但是由于环状 PVC 管周长较长,热流通过的路径也随之增加,使得在 50 s 左右开始,周边木纤维的热流传递速率会超过 PVC 塑料,木纤维温度逐渐大于 PVC 塑料的温度,此时温度云场呈“M”型分布,并在之后的热传递过程中沿着这种趋势继续传递下去。由 200 s HWC 的温度云场图可以推断,当热流由 PVC 管顶部继续向上传递到木纤维的时候,由于传热介质相同,周围温度高的区域会将热量传递到中心温度较低的区域,此时中心处的温度有所提高,但是温度场仍然呈“M”型分布。HWC 表现出理想的保温特性,有期望能在建筑保温材料中应用。

3 结论与讨论

利用 PVC 管定位装置能够实现管材均匀铺装排列,在热压温度 180℃,热压压力 1 MPa,热压时间 540 s 条件下,利用木纤维与 PVC 管能够制备出轻质空心复合材料(HWC),制备后的 HWC 结构稳定,PVC 管孔洞略微变形但无坍塌现象。

HWC 厚度方向断面密度分布不均匀,断面密度曲线呈双“M”型结构分布。随着 λ 的增加,HWC 吸水性能变化不大,静曲强度及弹性模量增加但是内结合强度降低。 $d=7\text{ mm}$ 、 $\lambda=10\%$ 的 HWC 表现出较好的力学性能,MOE、MOR 和 IB 分别为 385.4、3.2 MPa 和 0.05 MPa。整体上 HWC 的力学性能较低,这是低密度木质材料的普遍存在的问题^[16],需要更进一步的研究去改善。

HWC 的导热系数差别不大,均在 0.06~0.068 W/(m·K),满足建筑保温材料的要求。结合 Series 模型和 Parallel 模型能够有效预测 HWC 的导热系数,外径 5、6、7 mm 的系数 α 分别为 0.789 5、0.735 7、0.792 0。降温 1 h 后 HWC 表面温度平均比对照组高 0.93℃,最大温差可高于对照组 1.4℃,HWC 具备良好的保温能力。Ansys Workbench 热学仿真分析表明 HWC 的热传导速率低于对照组,空心结构有良好的抑制热传递作用。HWC 具备基本力学性能同时保温性能显著,在建筑保温材料领域具备良好应用前景。

参考文献:

- [1] 刘能文. 建筑模板“以塑代木”大有可为[N]. 中华建筑报, 2014-07-05(8).
- [2] 阴晓璐,张扬. 轻质纤维板的研究现状和发展趋势[J]. 山东林业科技, 2015, 45(5): 96-99.
- [3] XIE Y, TONG Q J, CHEN Y, *et al.* Manufacture and properties of ultra-low density fibreboard from wood fibre[J]. *Biore-sources*, 2011, 4(6): 1066-1055.
- [4] CHEN T, NIU M, XIE Y, *et al.* Modification of ultra-low density fiberboards by an inorganic film formed by si-al deposition and their mechanical properties[J]. *Bioresources*, 2014, 10(1): 538-547.
- [5] 韩辉. 基于 BIM 技术的建筑能耗分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- [6] OUYANG X, LIN B. Analyzing energy savings potential of the Chinese building materials industry under different economic growth scenarios [J]. *Energy and Buildings*, 2015, 109: 316-327.
- [7] 周统建,张海洋,王志强,等. 银杏木空心刨花板复合墙体保温隔热性能计算[J]. 建筑节能, 2012(11): 42-43, 47.
- [8] 童宏拓,周驹,王祝兵,等. 预埋 PVC 管空心刨花板平压成型技术[J]. 林业工程学报. 2016, 1(5): 31-35.
TONG H T, ZHOU J, WANG Z B, *et al.* Fabrication of hollow particleboards using flat-pressing with pre-buried PVC tubes [J]. *Journal of Forestry Engineering*. 2016, 1(5): 31-35. (in Chinese)
- [9] 林铭,谢拥群,饶久平,等. 木材横纹导热系数一种新的表达式的推导及与实测值比较[J]. 林业科学, 2013, 49(2): 108-112.
LIN M, XIE Y Q, RAO J P, *et al.* Derivation of a new expressions for wood transverse thermal conductivity and comparison to experimental value[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, 49(2): 108-112. (in Chinese)
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 17657-2013 人造板及饰面人造板理化性能试验方法[S]. 北京, 2013.
- [11] QI C, YADAMA V, GUO K, *et al.* Thermal conductivity of sorghum and sorghum-thermoplastic composite panels[J]. *Industrial Crops and Products*, 2013, 45(2): 455-460.
- [12] LI X, CHEN H, LI H, *et al.* Integration of form-stable paraffin/nanosilica phase change material composites into vacuum insulation panels for thermal energy storage[J]. *Applied Energy*, 2015, 159: 601-609.
- [13] 张海波,师广岭,尚海涛,等. PVC 塑料砂浆导热性研究[J]. 材料导报, 2015(16): 142-146.
- [14] GU H M, Zinksharp A. Geometric model for softwood transverse thermal conductivity: part I [J]. *Wood & Fibre*, 2005, 37(4): 699-711.
- [15] GUO W, LIM C J, BI X, *et al.* Determination of effective thermal conductivity and specific heat capacity of wood pellets [J]. *Fuel*, 2013, 103(1): 347-355.
- [16] MORENO D D, SARON C. Low-density polyethylene waste/ recycled wood composites [J]. *Composite Structures*, 2017, 176: 1152-1157.