

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20200402.001

碳纤维纸木质电热复合材料面层
电热效果的纵向尺寸效应

包永洁^{1,2}, 黄成建^{*1,2}, 陈玉和^{1,2}, 戴月萍³

(1. 国家林业和草原局竹子研究开发中心, 杭州 310012; 2. 浙江省竹子高效利用重点实验室, 杭州 310012;
3. 杭州大索科技有限公司, 杭州 311251)

摘 要: 根据热力学能量守恒定律和傅里叶 (Fourier) 定律, 利用一维传热理论推导基于碳纤维纸 (CFP) 的木质电热复合材料的结构特征与其表面空气温度效果之间的理论关系式, 对其关系进行了定性分析, 研究木质电热复合材料面层电热效果的纵向尺寸效应, 分析表明面层板厚度与表面空气温度呈反比例关系。对面层板厚度分别为 2 mm 和 4 mm 的木质复合材料开展了温度测试试验, 以验证理论计算结果正确性。结果显示, 通过理论计算, 得出基于 CFP 的木质电热复合材料面层厚度与表面空气温度之间呈反比关系; 通过实验验证, 对比两种不同面层材料厚度的电热复合材料表面空气温度, 发现厚度为 2 mm 的电热复合材料表面空气温度高于厚度为 4 mm 的, 与理论计算结果一致。在采暖领域, 相对于面层板较厚的木质电热复合材料, 面层板较薄的更能充分利用能源。

关键词: 碳纤维纸; 电热作用; 电热复合材料; 传热; 尺寸效应

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2020)12-3214-06

Longitudinal scale effect of electro-thermal effectiveness of front panel of the integrated
wooden electric heating composite based on carbon fiber paper

BAO Yongjie^{1,2}, HUANG Chengjian^{*1,2}, CHEN Yuhe^{1,2}, DAI Yueping³

(1. China National Bamboo Research Center, Hangzhou 310012, China; 2. Key Laboratory for
High Efficient Processing of Bamboo of Zhejiang Province, Hangzhou 310012, China;
3. Hangzhou Dasso Technology Co. Ltd., Hangzhou 311251, China)

Abstract: Based on laws of thermodynamics: law of conservation of energy and Fourier law, the theoretical relationship between the structure property and the environment temperature above the surface of the integrated wooden electric heating composites based on carbon fiber paper (CFP) was derived with the solution for one-dimensional heat transfer problem, and then qualitatively analyzed to study the longitudinal scale effect of the front panel of the integrated wooden electric heating composites. The derived relational expression shows an inversely proportional relationship between the structure property and the environment temperature. In order to verify the theoretical calculation results, the temperature tests were conducted on the integrated wooden electric heating composites with 2 mm and 4 mm thickness front panel respectively. The results show that the relationship between the thickness of the front panel and the air temperature above the surface of the composites based on CFP presents inversely proportion based on the mathematical calculation. Compared with the air temperature above the surface of composites with 4 mm thickness front panel, the air temperature of the composites with 2 mm thickness front panel turns out to be higher through experimental validation, which is consistent with the theoretical calculation.

收稿日期: 2020-01-15; 录用日期: 2020-03-20; 网络首发时间: 2020-04-02 15:58:08
网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200402.001>
基金项目: 中国林科科学院基金 (CAFYBB2016ZD008)
通信作者: 黄成建, 硕士, 助理研究员, 研究方向为木竹材高效利用 E-mail: hcj5236@yeah.net

引用格式: 包永洁, 黄成建, 陈玉和, 等. 碳纤维纸木质电热复合材料面层电热效果的纵向尺寸效应 [J]. 复合材料学报, 2020, 37(12): 3214-3219.
BAO Yongjie, HUANG Chengjian, CHEN Yuhe, et al. Longitudinal scale effect of electro-thermal effectiveness of front panel of the integrated wooden electric heating composite based on carbon fiber paper[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(12): 3214-3219(in Chinese).

Hence, the integrated wooden electric heating composites with thinner front panel have an advantage of utilization of energy.

Keywords: carbon fiber paper; electro-thermal effect; electric heating composite; heat transfer; scale effect

碳纤维具有轻质高强的特征, 广泛应用于航空航天和运动穿戴装备中, 曾被认为是商业化最成功的碳产品^[1], 碳纤维是一种很好的电发热材料^[2], 具有良好的导电和导热性能, 最早在爱迪生时代就被用作灯丝^[3]。王志平等^[4-5]、路鹏程等^[6]及纪朝晖等^[7]对碳纤维电热作用机制及其复合材料力学性能、吸湿行为和界面应力的影响开展了系列研究。李果等^[8]、Darzi等^[9]利用碳纤维制成相变储能材料并对其性能进行了研究, 制备出的复合材料具有良好的热稳定性和广阔的应用前景。由 Kong Qingqiang 等^[10]的研究可知, 纳米碳材料与石墨烯混合, 可制备出导热率高达 $977\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 的复合纸材料。

碳纤维在电池领域的应用研究较多。在 Ren Jing 等^[11]的研究里, 碳纤维通过扭曲的方法被制成线状微型超级电容和微型电池, 在 Le Viet Thong 等^[12]的研究中, 碳纤维被制备成同轴纤维超级电容器的电极, 具有有效表面积大和导电性能高的特征。

碳纤维导电纸 (Carbon fiber paper, CFP) 是单独使用碳纤维或使用碳纤维与其他纤维为原料, 通过湿法或干法制备的一类功能纸^[13]。根据 Zhang Xuejun 等^[14]的研究, CFP 可制作成质子交换膜用于电池的电极材料。Ma Tian Yi 等^[15]在 CFP 上通过原位生长碳氮化合物的方法制备电极, 具备可弯曲和可逆的性能。Kong Desheng 等^[16]在 CFP 表面植入 CoSe_2 , 制备出析氢反应中高效且稳定的电催化剂。

电阻在 $10^{-3}\sim 10^{-2}\ \Omega\cdot\text{cm}$ 范围的 CFP 属于高性能 CFP, 可被用作导电发热材料, Shi Y Z 等^[17]、Kim Taejin 等^[18]对 CFP 的研究结果显示, CFP 具有较高的电热转换效率, 接近 100%。汤龙其等^[19]在 CFP 上聚合生成聚吡咯, 结果显示, 该复合材料导电性能稳定, 发热结果显著。根据 CFP 的导电发热特性, 相关研究院所和企业正在研究利用 CFP 纸质纤维与木材胶合性能优良的特性, 将其与木质材料复合, 制成基于 CFP 的木质电热复合材料, 这是一种多层复合材料, 旨在开发一体化木质电热复合地板, 应用到地暖采暖领域中, 以期达到节约空间、节能降耗和快捷采暖的功效。

CFP 作为发热单元应用于木质电热复合材料

的相关研究已经开展起来, 袁全平等^[20]、SONG 等^[21]、肖瑞崇等^[22]、黄成建等^[23]开展了木质电热复合材料制备技术、老化及其机制^[24-26]等方面的相关研究, 提出了一套比较完整的制备技术, 为应用实践研究奠定了基础。为了提升电热效果, 针对电热复合材料的结构设计, 袁全平等^[24]开展了实验性的对比研究, 确定了比较合理的地板结构设计方案, 但是对于电热复合材料结构设计的理论机制却没有进一步明确。

目前 CFP 的相关研究主要集中在电池电极应用研究和质子交换膜, 而 CFP 作为发热单元应用于木质电热复合材料的研究较少, 且主要集中在对其制备方法、电热性能及材料性能的研究, 对于结构设计尽管有部分文献涉及, 但均是通过实验设计得到相关参数和结构类型, 对于理论机制则需要进一步研究。

本文结合前期研究, 开展基于 CFP 的木质电热复合材料面层电热效果的纵向尺寸效应的理论基础研究, 并通过试验验证理论计算结果, 旨在通过理论分析深化木质电热复合材料的基础理论研究, 提高科学说服力, 同时促进先进复合材料的科学应用。基于面板厚度这一关键点, 分析木质电热复合材料面层的纵向尺寸效应, 开展理论基础研究, 对 CFP 复合材料在采暖领域的节能策略和企业生产具有现实指导意义。

1 材料与方法

1.1 原材料及 CFP 电热复合材料的制备

厚度分别为 2.2mm 和 2mm 的杨木单板 (Populus simonii)、薄竹 (Phyllostachys edulis) 采购于杭州森瑞竹木业有限公司, 分别锯切成幅面为 400 mm×160 mm 备用。CFP 采购于北京碧岩特种材料有限公司, 裁制成尺寸为 380 mm×140 mm 的试样, 测试电阻并编号记录。如图 1 所示, 将 CFP 置于薄竹和杨木单板之间, 按照不同面层厚度叠加复合制成复合材料, 胶粘剂为三聚氰胺改性脲醛树脂, 施胶量为 $200\text{ g}/\text{m}^2$, 手工施胶, 陈化时间为 15~20 min, 压力为 1.2 MPa, 热压温度为 110℃, 面层板厚度为 2 mm 和 4 mm 的多层复合材料热压时间分别为 5 min 和 8 min。制成的木质电热复合材料如图 2 所示。

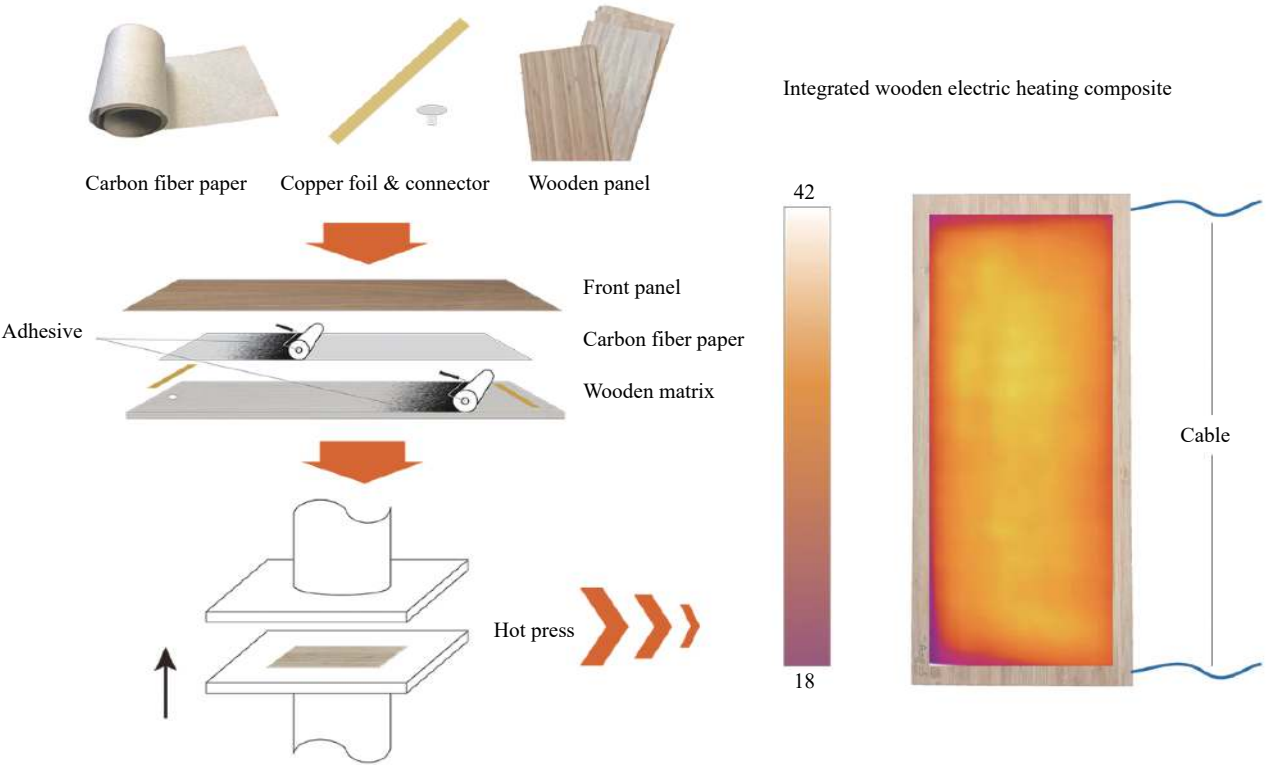


图1 碳纤维纸 (CFP) 木质电热复合材料制备示意图

Fig. 1 Schematic representation of preparation process of integrated wooden electric heating composites based on carbon fiber paper (CFP)

1.2 温度测试

利用聚氨酯泡沫 (厚度为 50 mm) 制成尺寸为 1 m×1 m×1 m 的测试舱, 将电热复合材料两端分别连接电源, 放置在测试舱中间位置, 在距离复合材料样品表面 50 mm 的位置布置测温电偶, 通电后, 分别测试并记录距离试样表面 50 mm 处的温度, 测温设备为北京赛维美科技有限公司的 64 通道测温仪, 型号为 SMT-A64。



图2 两种不同面面板厚度的 CFP 木质电热复合材料试样

Fig. 2 Integrated wooden electric heating composite based on CFP specimens with different thicknesses of front panels

2 理论计算

2.1 CFP 面层纵向尺寸效应模型建立

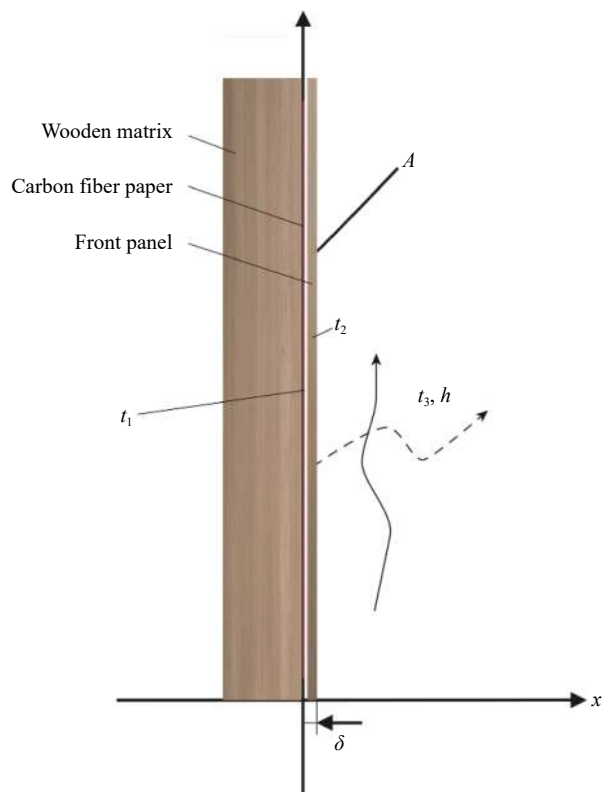
木质电热复合材料在制备过程中, 将具有高电热转换效率的 CFP 置于板材中间, 通电后通过 CFP 将电能转化成热, 通过热传导、热辐射的方式向木质材料和空气传导热量, 实现地热辐射采暖。

图3为 CFP 木质电热复合材料传热过程示意图。复合材料表面面积为 A , CFP 距木质电热复合材料表面的距离, 即面层的厚度为 δ , CFP 的温度为 t_1 , 面板温度为 t_2 , 复合材料表面空气温度为 t_3 , 复合材料面层采用的是导热系数较高的竹材, 其导热系数为 λ , 表面传热系数 (包含辐射传热)^[27] 为 h , CFP 的电热转化效率 $\eta=99\%$ 。

由发热单元 CFP 发热向面板传热, 该过程分

为两个部分: (1) 发热单元向面板导热; (2) 面板向空气对流传热。由于 CFP 厚度较薄, 在制备复合材料过程中施加了 1.2 MPa 的压力, 与上下层木材紧密结合在一起, 厚度忽略不计, 因此这里假定发热单元层与面层之间接触良好, 无引入附加电阻。同时, 由于实际应用中板面的长和宽为厚度的 10 倍以上, 此处传热问题可看作一维稳态导热问题。

如图3所示, 根据传热学理论^[27], 复合材料表层温度场的数学描述为



δ—Thickness of front panel; t_1 —Temperature of CFP; t_2 —Temperature of the front panel; t_3 —Temperature of air; h —Surface coefficient of heat transfer; λ —Heat conductivity coefficient; A —Surface area of composite

图3 CFP 木质电热复合材料传热过程示意图

Fig. 3 Schematic representation of heat transfer of integrated wooden electric heating composites based on CFP

$$\frac{d^2t}{dx^2} = 0 \tag{1}$$

边界条件：

$$x = 0, -\lambda \frac{dt}{dx} = q \tag{2}$$

$$x = \delta, -\lambda \frac{dt}{dx} = h(t - t_3) \tag{3}$$

其中： q 为热流密度； t 为复合材料的温度。

解温度场式 (1) 得通解为

$$t = c_1x + c_2 \tag{4}$$

其中， c_1 、 c_2 为常数。

由边界条件式 (2)、式 (3) 解得

$$t = t_3 + q \left(\frac{\delta - x}{\lambda} + \frac{1}{h} \right) \tag{5}$$

推导式 (5) 则有^[27]

$$t_3 = t_2 - q \left(\frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h} \right) \tag{6}$$

根据热力学第一定律，发热单元 CFP 传导至面层的热量与面层传热至空气中的热量相等，因

此结合热力学 Fourier 定律则有

$$\Phi_1 = \Phi_2 \tag{7}$$

$$\Phi_1 = -A\lambda \frac{t_1 - t_2}{\delta} \tag{8}$$

$$\Phi_2 = -Ah(t_2 - t_3) \tag{9}$$

其中， Φ_1 、 Φ_2 分别为热单元 CFP 传导至面层的热量与面层传热至空气中的热量。

则热流密度为

$$q_1 = \lambda \frac{t_1 - t_2}{\delta} \tag{10}$$

$$q_2 = \frac{t_2 - t_3}{h} \tag{11}$$

由式 (7)~(9) 可得

$$q_1 = q_2 \tag{12}$$

由式 (6)、式 (10)、式 (11) 及式 (12) 推导则有

$$t_2 = \frac{\lambda}{h\delta + \lambda} (t_1 - t_3) + t_3 \tag{13}$$

由式 (13) 与式 (10)，求解得到面板周围空气温度 t_3 与面板厚度 δ 关系式为

$$t_3 = \left(t_1 - \frac{q}{h} \right) - \frac{q\delta}{\lambda} \tag{14}$$

其中： t_1 为 CFP 发热温度，为恒定值； q 、 h 和 λ 为常数。通过式 (14) 可以看出，面板周围空气温度与面板厚度成反比，即面板越薄则 CFP 电热复合材料表层周围的温度越高。根据该推导结果，在实际制备基于 CFP 的电热复合材料时面层材料厚度越薄将越有利于热量的充分利用，因此在充分考虑复合材料应用场景和其他性能的前提下，尽可能的降低面层材料厚度对节能降耗有实际意义。

2.2 试验验证

分别采用 2 mm 和 4 mm 厚的竹单板与 CFP、杨木单板层积材进行复合制备基于 CFP 的木质电热复合材料，分别对距离复合材料板面 50 mm 高度处的空气温度进行测试分析，复合材料电气参数详情如表 1 所示，两种木质复合材料电阻相差 16 Ω ，但是测试过程中为确保木质复合材料中 CFP 发热情况一致，通过变压器调整至相同的发

表 1 CFP 木质电热复合材料电气测试参数
Table 1 Electric parameters of integrated wooden electric heating composites based on CFP

Front panel thickness/mm	Resistance/ Ω	Test voltage/V	Actual power/kW
2	397	80	16.12
4	413	81.59	16.12

热功率, 测试结果如图4所示。可以得到空气温度与表板厚度之间的关系。通电后, 随着时间推移 2 mm 面板的复合材料在 50 mm 处空气温度比 4 mm 面板的高, 因此, 总体上 50 mm 处空气温度随厚度的增加呈下降趋势, 即空气温度与面板厚度呈反比, 这与理论推导出来的定性结果相符合, 也与梁善庆等^[28]的实验结果一致。

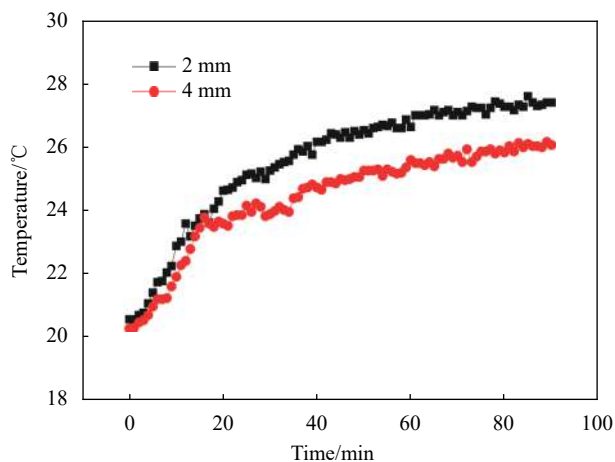


图4 不同面层板厚度的CFP木质电热复合材料表面50 mm的温度曲线

Fig. 4 Temperature curves at 50 mm above the surface of integrated wooden electric heating composites based on CFP with different thicknesses front panels

由理论计算和试验验证结果可以看出, 基于CFP的木质电热复合材料表面空气温度与面板厚度呈反比, 针对木质电热复合材料用于采暖等相关领域的产品, 面层越薄, 周围空气温度越高, 采暖效果越好。因此, 在达到同样表面空气温度的条件下, 面板越薄, 节能效果越好。因此木质电热复合材料在制造采暖产品时, 在保证产品力学强度和安全性的前提下, 面板应尽可能薄。

3 结论与展望

(1) 通过对基于碳纤维纸(CFP)的木质电热复合材料面层纵向尺寸效应的热传导问题开展定性理论分析, 推导出复合材料表面空气温度与面层板厚度之间的理论关系式, 表明表面空气温度与面层板厚度之间呈反比关系。

(2) 通过开展木质电热复合材料通电测温试验验证, 面层厚度为2 mm的木质电热复合材料表面温度高于4 mm的, 试验结果与理论推导结果一致。

(3) 根据本研究的结果, 基于CFP的木质电热复合材料面层板越薄, 其表面空气温度越高, 说

明电能利用越充分, 降低面板厚度, 对采暖等领域的节能有一定的促进作用。

参考文献:

- [1] EDIE D D. The effect of processing on the structure and properties of carbon fibers[J]. *Carbon*, 1998, 36(4): 345-362.
- [2] DALTON N, LYNCH R P, COLLINS M N, et al. Thermoelectric properties of electrospun carbon nanofibres derived from lignin[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 121: 472-479.
- [3] 窦光宇. 初识碳纤维[J]. *科技潮*, 1998(2): 47.
DOU Guangyu. Learning about carbon fiber[J]. *Science and Culture*, 1998(2): 47(in Chinese).
- [4] 王志平, 叶亮, 路鹏程. 基于介电性能研究碳纤维/环氧树脂材料单向板电热作用机制[J]. *复合材料学报*, 2017, 34(2): 270-277.
WANG Zhiping, YE Liang, LU Pengcheng. Electro-thermal influencing mechanism of carbon fiber/epoxyunidirectional laminated composites based on dielectric properties[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, 34(2): 270-277(in Chinese).
- [5] 王志平, 孙凌丰, 路鹏程, 等. 电热作用对碳纤维/树脂复合材料界面应力的影响[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(6): 1381-1388.
WANG Zhiping, SUN Lingfeng, LU Pengcheng, et al. Influence of electro-thermal effect on interfacial stress of carbon fiber reinforced polymer composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(6): 1381-1388(in Chinese).
- [6] 路鹏程, 毕亚芳, 王志平, 等. 电热作用对碳纤维树脂基复合材料力学性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2016, 33(10): 2223-2229.
LU Pengcheng, BI Yafang, WANG Zhiping, et al. Effects of electric thermal effect on mechanical properties of carbon fiber reinforced polymer[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33(10): 2223-2229(in Chinese).
- [7] 纪朝辉, 毕亚芳, 路鹏程, 等. 电热作用对碳纤维/环氧树脂基复合材料吸湿行为的影响[J]. *复合材料学报*, 2017, 34(2): 308-313.
JI Zhaohui, BI Yafang, LU Pengcheng, et al. Electric-thermal effects on moisture absorption behavior of carbon fiber/epoxy resin composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, 34(2): 308-313(in Chinese).
- [8] 李果, 欧阳婷, 蒋朝, 等. 碳纤维/纳米石墨片网络导热增强石蜡相变储能复合材料的制备及表征[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(5): 1130-1137.
LI Guo, OUYANG Ting, JIANG Chao, et al. Preparation and characterization of carbon fiber-graphite nanoplatelets network reinforced paraffin phase change composites[J].

- Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(5): 1130-1137 (in Chinese).
- [9] DARZI Mohammad Ebrahimnejad, GOLESTANEH Seyyed Iman, KAMALI Marziyeh, et al. Thermal and electrical performance analysis of co-electrospun-electrosprayed PCM nanofiber composites in the presence of graphene and carbon fiber powder[J]. *Renewable Energy*, 2019, 135: 719-728.
- [10] KONG Q Q, LIU Z, GAO J G, et al. Hierarchical graphene-carbon fiber composite paper as a flexible lateral heat spreader[J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24(27): 4222-4228.
- [11] REN J, LI L, CHEN C, et al. Twisting carbon nanotube fibers for both wire-shaped micro-supercapacitor and micro-battery[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(8): 1155-1159, 1224.
- [12] LE V T, KIM H, GHOSH A, et al. Coaxial fiber supercapacitor using all-carbon material electrodes[J]. *ACS Nano*, 2013, 7(7): 5940-5947.
- [13] 施云舟, 王彪. 碳纤维导电纸的研究现状及其应用[J]. 化工新型材料, 2014, 42(4): 192-197.
- SHI Yunzhou, WANG Biao. Research progress and application of carbon fiber reinforced conductive paper[J]. *New Chemical Materials*, 2014, 42(4): 192-197(in Chinese).
- [14] ZHANG Xuejun, SHEN Zengmin. Carbon fiber paper for fuel cell electrode[J]. *Fuel*, 2002, 81(17): 2199-2201.
- [15] MA T Y, RAN J, DAI S, et al. Phosphorus-doped graphitic carbon nitrides grown in situ on carbon-fiber paper: Flexible and reversible oxygen electrodes[J]. *Angewandte Chemie (International ed in English)*, 2015, 54(15): 4646-4650.
- [16] KONG D, WANG H, LU Z, et al. CoSe₂ nanoparticles grown on carbon fiber paper: An efficient and stable electrocatalyst for hydrogen evolution reaction[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2014, 136(13): 4897-4900.
- [17] SHI Y Z, WANG B. Mechanical properties of carbon fiber/cellulose composite papers modified by hot-melting fibers[J]. *Progress in Natural Science-Materials International*, 2014, 24(1): 56-60.
- [18] KIM T J, CHUNG D D L. Carbon fiber mats as resistive heating elements[J]. *Carbon*, 2003, 41(12): 2436-2440.
- [19] 汤龙其, 令旭霞, 王士华, 等. 聚吡咯/碳纤维纸电热复合材料的制备及性能[J]. 复合材料学报, 2020, 37(6): 1426-1433.
- TANG Longqi, LING Xuxia, WANG Shihua, et al. Preparation and properties of polypyrrole/carbon fiber paper electricthermal composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(6): 1426-1433 (in Chinese).
- [20] 袁全平, 梁善庆, 傅峰. 碳纤维电热功能复合纤维板的制备工艺[J]. 木材工业, 2017, 31(4): 14-18.
- YUAN Quanping, LIANG Shanqing, FU Feng. Electric heating composites made from carbon fiber paper and fiberboard[J]. *China Wood Industry*, 2017, 31(4): 14-18(in Chinese).
- [21] SONG Jianbin, YUAN Quanping, LIU Xueshen, et al. Combination of nitrogen plasma modification and waterborne polyurethane treatment of carbon fiber paper used for electric heating of wood floors[J]. *Bioresources*, 2015, 10(3): 5820-5829.
- [22] 肖瑞崇, 陈玉和, 包永洁, 等. 竹木电热复合材料的通电老化性能研究[J]. 木材工业, 2017, 31(4): 19-23.
- XIAO Ruichong, CHEN Yuhe, BAO Yongjie, et al. Electrifying aging performance of bamboo-wood thermoelectric composites[J]. *China Wood Industry*, 2017, 31(4): 19-23(in Chinese).
- [23] 黄建成, 包永洁, 李能, 等. 不同胶黏剂竹木复合电热地板的基本特性[J]. 浙江农林大学学报, 2017, 34(2): 369-373.
- HUANG Chengjian, BAO Yongjie, LI Neng, et al. Adhesives used to make bamboo/wood composite electro-thermal plywood[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2017, 34(2): 369-373(in Chinese).
- [24] 袁全平. 木质电热复合材料的电热响应机理及性能研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2015.
- YUAN Quanping. Performance and electric heating response mechanism of wooden electric heating composites[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2015(in Chinese).
- [25] YUAN Quanping, FU Feng. Application of carbon fiber paper in integrated wooden electric heating composite[J]. *Bioresources*, 2014, 9(3): 5662-5675.
- [26] SONG J B, HU H B, ZHANG M X, et al. Thermal aging properties and electric heating behaviors of carbon fiber paper-based electric heating wood floors[J]. *Bioresources*, 2017, 12(4): 9466-9475.
- [27] 杨世铭, 陶文栓. 传热学[M]. 第四版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- YANG Shiming, TAO Wenshan. Heat transfer[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006(in Chinese).
- [28] 梁善庆, 李思程, 柴媛, 等. 内置电热层实木复合地板表面温度变化规律及模拟[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(11): 112-122.
- LIANG Shanqing, LI Sicheng, CHAI Yuan, et al. Change law and simulation of surface temperature for electric heating engineered wood flooring with built-in electrothermal layer[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2018, 40(11): 112-122(in Chinese).