

先进材料

碳系水性电热油墨在外卖恒温箱中的应用

别一飞¹, 刘嘉铭², 高智勇³(1. 武汉大学 图像传播与印刷包装研究中心, 武汉 430079; 2. 合肥美的电冰箱有限公司, 合肥 230000;
3. 武汉大学 城市设计学院, 武汉 430072)

摘要: **目的** 改善外卖箱的保温性能, 解决低温条件下热餐食物在配送过程中热量大幅度流失的问题。**方法** 应用发热性能良好且环保的碳系水性电热油墨, 结合丝网印刷技术制备发热器件并装配在发泡聚丙烯 (EPP) 外卖箱中, 从而维持箱内恒温。**结果** 所制备的发热器件在 18 V 电压条件下饱和温度可达到 76.7 °C, 温度和功率密度呈线性关系, 斜率高达 782.6 °C·cm²/W。在使用了发热器件之后, 恒温箱内温度可长时间保持在 60 °C 以上。在从环境温度开始加热的恒温箱中经过 1 h 的配送过程模拟实验, 初始温度约为 60 °C 热餐食物温度下降仅有 5 °C。在对比测试中, 初始温度为 60 °C 的热水分别放置在恒温箱和普通 EPP 外卖箱内, 20 min 后恒温箱保温效率比普通外卖箱的高 27.3%。**结论** 碳系水性电热油墨制成的发热器件具有低功耗和高加热性能的特点, 应用于外卖恒温箱中提高了保温效果, 有效减少外卖食物温度流失。

关键词: 外卖恒温; 电发热; 印刷电子; 电热油墨

中图分类号: TB332 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)11-0144-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.11.016

Application of Carbon Water-Based Electric Heating Ink in Constant Temperature Takeaway Box

BIE Yi-Fei¹, LIU Jia-ming², GAO Zhi-yong³(1. Research Center of Graphic Communic, Printing and Packaging, Wuhan University, Wuhan 430079, China;
2. Hefei Midea Refrigerator Factory Co., Ltd., Hefei 230000, China; 3. School of Urban Design, Wuhan University,
Wuhan 430072, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the heat preservation performance of takeaway boxes to solve the problem of large heat loss in distribution of hot meals at low temperature. Carbon water-based electric heating ink with good heating performance and environmental protection was used in combination with screen printing technology to prepare a heating device and assemble it in a foamed polypropylene (EPP) takeaway box, so as to maintain constant temperature in the box. The saturation temperature of the heating device could reach 76.7 °C at 18 V. The temperature and power density were linear, and the slope was as high as 782.6 °C·cm²/W. After the heating device was installed, the temperature in the thermostat could be maintained above 60 °C for a long time. After 1 hour of simulated distribution in the constant temperature

收稿日期: 2022-08-15

基金项目: 教育部中华优秀传统文化传承基地(汉绣)年度开放课题(HXJD2022B02); 湖北文化创意产业化设计研究中心年度开放基金重点项目(HBCY2101); 湖北省非物质文化遗产研究中心(湖北美术学院)年度基金指导性项目(FY-2021-15)

作者简介: 别一飞(1999—), 女, 硕士生, 主攻包装新材料与技术、包装设计与制造。

通信作者: 高智勇(1971—), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为产品及包装智能设计与设计智能、非物质文化遗产信息图谱研究及活化研发、美育研究。

takeaway box heated from the ambient temperature, the temperature of the hot food with an initial temperature of about 60 °C dropped by only 5 °C. In the comparison test, hot water with an initial temperature of 60 °C was placed in the constant temperature takeaway box and the ordinary EPP takeaway box respectively. After 20 minutes, the heat preservation efficiency of the constant temperature takeaway box was 27.3% higher than that of the ordinary takeaway box. The heating device made of carbon water-based electric heating ink has low power consumption and high heating performance. Its application in constant temperature takeaway boxes improves the heat preservation effect and effectively reduces the temperature loss of takeaway.

KEY WORDS: takeaway constant temperature; electric heating; printed electronics; electric heating ink

中国外卖行业经历了从起步到市场规模迅速扩大的时期, 在线外卖收入占全国餐饮业收入比重持续提高, 但其中配送的外卖食物变冷、口感变差等问题极大地影响着消费者的消费体验^[1-2]。如何使箱内保持合适的温度状态是外卖配送中的难题。目前, 外卖箱大多通过减少运输过程中散失的热量来达到保温目的, 使用隔热材料可以较好地隔绝箱体内外环境, 但是其内部热量交换是热餐食物的高热量与箱内环境低热量之间不平衡的热交换。特别是在寒冷及阴雨天气条件下, 配送过程中多次开盖会散失大量热量导致箱内温度大幅降低的问题不能避免, 食物的口感及品质难以保障^[3-4]。

相较于传统的被动保温, 更多的加热保温方式被提出。朱传辉等^[5]提出了一种采用相变蓄热材料研制的外卖保温箱, 采用的主要加热原理是蓄热材料的相变放热, 但是相变材料存在循环过程中热物理性质的退化问题、相变材料的可逆性是否足够、相变材料的经济性问题, 这是保温箱能否采用这一材料的 3 个主要问题。曹莹等^[6]设计了一款太阳能智能保温箱, 采用环保的太阳能电池对电加热保温箱的电源选择方向有一定的指导意义, 但是太阳能电池转换效率低, 其能否满足加热需求是一个重大问题。

碳系导电材料因具有更轻的质量、导热系数高、导电性能好、电热转换效率高和响应速率快等优点而成为良好的电热器件候选材料^[7-11]。Xia 等^[12]以薄层石墨和碳纤维为导电填料添加到改性树脂中制备电热膜, 电热膜在 22 V 的电压下通电 5 min, 温度可达到 265 °C, 表现出优异的电热性能。Luo 等^[13]采用逐层组装的方法制备了柔性碳纳米管/聚氨酯电热膜。结果表明, 该薄膜具有良好的电热性能, 在 10 V 电压下可达到 140 °C 的饱和温度。Chang 等^[14]制备的三维石墨烯/碳化聚丙烯腈复合纸最快的比热速率可达 213 °C/(s·V), 在 1.75 V 的工作电压下, 最高温度可达 235 °C。由此可见, 碳系导电复合材料表现出良好的电阻性加热行为, 规模化生产可用于家庭供暖、加热服装、工业保温等领域。但由于传统溶剂型碳系导电复合材料在使用过程中会产生挥发性有机物 (VOCs) 以及复合材料大多处于研发阶段等, 所以其在食品保温研究中很少使用。

因此, 文中针对外卖运输过程中的热量损失问题, 从主动供热角度出发, 使用环保无污染且成本较低的碳系水性电热油墨印制电热板, 并装配在外卖恒温箱中。构建在约 60 °C 的温度下保持热平衡的恒温箱内环境, 从根本上解决在运输过程中食物温度降低的问题, 成功实现保存食物最佳食用温度的效果。对外卖恒温箱的主体布局进行了结构设计, 模拟测试了在 1 h 的配送过程中外卖恒温箱内部的温度变化, 同时设置空白对照实验, 验证使用发热器件后外卖恒温箱的恒温效果。

1 材料与结构

1.1 发热材料

本研究使用纳米碳材料制备的碳系水性电热油墨, 以炭黑、石墨、碳纳米管为导电填料, 水为溶剂, 水性丙烯酸树脂为连接料, 消泡剂和分散剂为助剂^[15-17], 无挥发性有机物 (VOCs) 排放, 具有环保无毒害、低成本、电热性能优异的优点, 可在安全电压 (≤ 36 V) 下表现出高效的电热转换性能。本研究所用的实验材料和试剂如表 1 所示, 所用的实验仪器设备见表 2。在制备碳系水性电热油墨过程中, 油墨中总的碳质量分数控制在 20.8% (石墨占 10.8%, 炭黑占 6%, 碳纳米管占 4%), 水的质量分数控制在 52.2%, 水性丙烯酸树脂在油墨中的质量分数控制在 10%, 消泡剂的质量分数控制在 2%, 分散剂的质量分数为 15%。制备工艺见图 1。

表 1 实验中使用的材料和试剂
Tab.1 Materials and reagents used in experiment

试剂名称	规格	厂家
石墨	固体含碳量为 99.9 %	河南六工石墨有限公司
炭黑	—	东莞市灿煜化工有限公司
碳纳米管	—	广州宏武材料科技有限公司
水性丙烯酸树脂	固含量为 (45±2) %	武汉鸥易光电科技有限公司
分散剂	W-190	建德国昌化学材料有限公司
消泡剂	DC-65	武汉申试化工有限公司
去离子水	自制	

表 2 实验仪器设备
Tab.2 Experimental instrument and equipment

设备名称	型号	厂家
电子天平	FA1104N	上海菁海仪器有限公司
搅拌器	D2010W	上海梅颖浦仪器仪表制造有限公司
超纯水器	UPI-1-5T	四川优谱超纯科技有限公司
高速分散机	FS-400D	杭州大卫科教仪器有限公司
砂磨分散机	PT0.6L	湖南省欧华科技有限公司
丝网印刷机	YS-4060D	深圳市亿宝莱印刷设备有限公司
红外热像仪	菲力尔 C2	美国菲力尔 (FLIR) 公司
可调直流电源	KPS6017	深圳市美瑞克电子科技有限公司

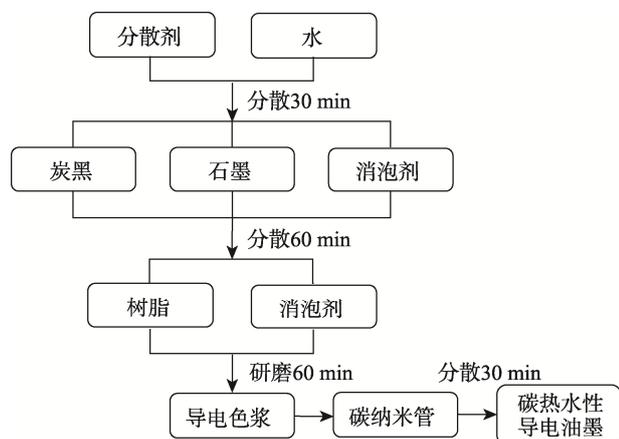


图 1 碳系水性电热油墨的制备工艺
Fig.1 Preparation of carbon water-based electric heating ink

1.2 发热器件设计

本研究使用 200 目丝网版在承印物上印刷面积为 25 cm×25 cm 的碳系水性电热油墨。丝网印刷前, 打开丝网印刷机进行丝网印刷版的安装和位置的调试, 固定好印制基材后进行设备抽真空; 将碳系水性电热油墨涂在丝网印刷机刮板的一侧, 用回油刀先将油墨浸润在待印刷的丝网版孔内, 再将印刷刮板下降到基材处与基材直接接触, 进行发热器件的电路印制。发热器件截面图如图 2 所示, 结构分解图如图 3 所示, 其中最上方 1 为万通板材料, 其内部孔状结构使热量均匀分布在发热器件表面, 并且能提供一定的缓冲防震作用。紧贴着万通板的 2 是贴在导电涂层两端的铜带, 其作为电热油墨层的电极并将多个发热模块并联起来。图 2 和图 3 中紧贴着万通板的黑色层 3 为碳系水性电热油墨, 经干燥固化形成导电涂层, 承担导电发热的作用。底部 4 为环氧树脂玻璃纤

维布, 通过热压的方法来与前 3 层材料复合, 主要保护导电涂层, 防止水汽、磨损等外部因素对器件性能的影响, 提高发热器件的使用寿命。

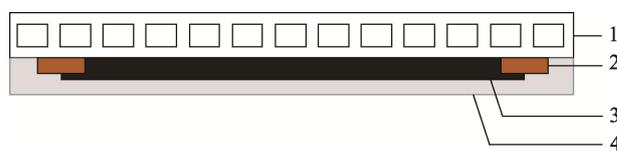


图 2 发热器件截面
Fig.2 Cross section of heating device

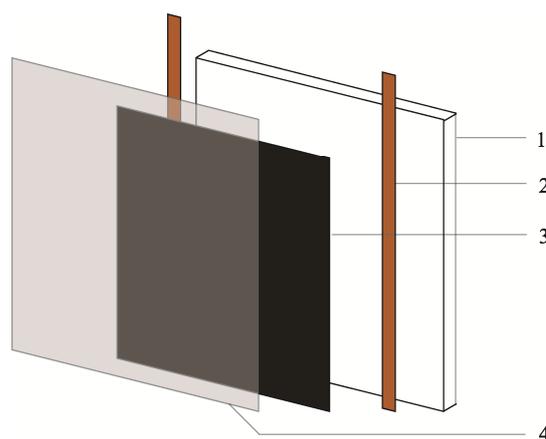


图 3 发热器件结构分解
Fig.3 Structure decomposition of heating device

1.3 发热原理

电热油墨作为一种新型电热材料, 需要通过凹版印刷、丝网印刷、刮涂、旋涂或喷涂的方式附着在基材上, 并经过干燥形成平整均匀的导电涂层才能使用。印刷的油墨在初始阶段由于不导电的溶剂、连接料等阻隔在导电碳填料之间, 因此无法形成有效的导电通路。在干燥过程中, 其内部导电粒子间隙随着溶剂的挥发逐渐缩小, 最终不同尺寸的纳米级碳材料互相填充, 紧密连接形成交纵错杂的导电通路, 在外加电压下形成电流并将一部分电能转化为热能, 以热对流、热传导和热辐射的形式向周围环境传导。电热器件在一定时间内产生的热量 Q 可通过式 (1) 计算。

$$Q = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t \quad (1)$$

式中: Q 为发热量; I 为通过器件的电流; U 为外加电压; R 为电阻; t 为时间。

1.4 外卖恒温箱结构

最终设计成型的外卖恒温箱如图 4 所示。箱体尺寸为 58 cm×42 cm×42 cm, 箱体选用 EPP 材料, 采用 2 块发热器件, 通过连接固定后置于箱内两壁进行供热。选用箱体 2 个面积相对较大的面作为发热面有 3 个好处: 2 个面作为发热面相比 4 个面节省材料; 2

个面积较大的面作为发热面电阻小, 通电发热效果明显; 恒温箱的 2 个相对的面作为发热面, 在通电加热时可以形成热对流, 加速箱体温度的提升, 箱体内温度更加均匀。发热器件可先组装后直接插入恒温箱或者取出收纳, 使用便捷, 结构稳固。同时通过对发热器件功率的控制能有效地使恒温箱体内温度达到热餐食物的最佳存储温度。

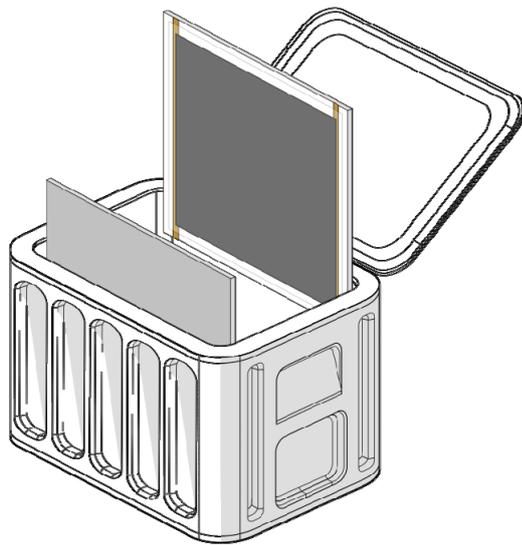


图 4 发热器件安装示意图
Fig.4 Schematic diagram of heating device installation

2 电热性能测试

为了验证所设计的恒温箱的保温性能, 分别对发热器件和装置发热器件后的恒温箱进行电热性能测试。在室温 18 °C 的条件下, 将发热器件分别接通 14、16、18、20 V 直流电压, 用红外摄像机记录发热器件的温度变化, 测试发热器件的温度响应速率和各工作电压下的饱和温度。由图 5 结果可看出, 发热器件的温度影响速度较快, 在接通电源 10 min 内温度快速上升, 随后逐渐趋于平稳, 大约 20 min 即能到达相对稳定的饱和温度。当给发热器件施加 14 V 电压时, 通过的工作电流为 1.89 A, 发热器件所消耗的功率仅仅只有 26.5 W, 能够达到的饱和温度为 54.1 °C 左右; 接通 16 V 电压时, 工作电流为 2.16 A, 功率为 34.6 W, 饱和温度为 65.1 °C; 施加 18 V 电压时, 工作电流为 2.43 A, 功率为 43.7 W, 饱和温度为 76.7 °C; 施加 20 V 电压时, 工作电流为 2.71 A, 此时发热器件的功率为 54.2 W, 饱和温度为 88.8 °C。总的来说, 使用碳系水性电热油墨丝网印刷制备的发热器件可在小于 55 W 的低功耗下实现从 54 °C 到 89 °C 发热区间的灵活温度调节, 从而满足多样化的温度控制需求。图 6 展示的是本实验制备的发热器件的发热温度与功率密度的函数关系, 温度和功率密度的拟合曲线近似

线性关系 ($T=782.6 \times P+21.4$, T 为温度, P 为功率密度)。由图 6 可知, 斜率很陡峭 ($\approx 782.6 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^2/\text{W}$), 说明在相同的功率密度条件下, 单位面积能达到的饱和温度更高, 即有更高的电热转化效率, 能耗更低^[18]。

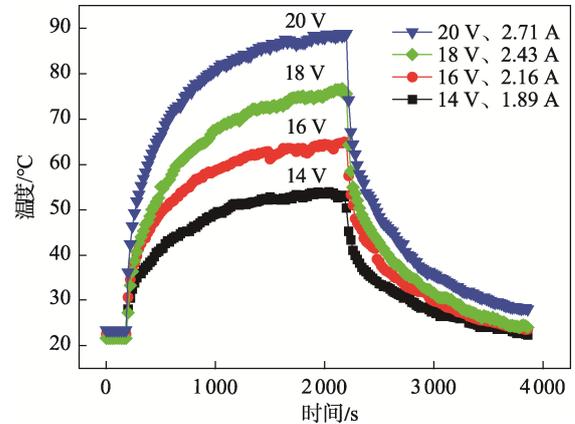


图 5 发热器件在不同电压下的运行情况
Fig.5 Operation of heating device under different voltage

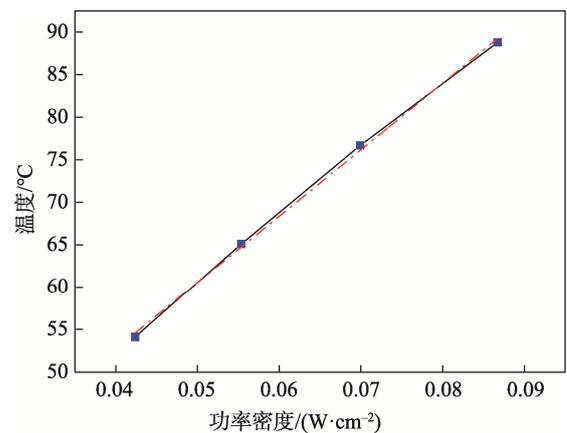


图 6 发热器件的温度与输入功率密度
Fig.6 Temperature and input power density of heating device

综合考虑功耗、食物保温效果和使用安全性, 设计的恒温箱选择将 2 片发热器件置于箱内壁两侧, 并将电压设置在 18 V 对恒温箱的保温效果进行测试, 同时使用探头型温湿度计读取在加热过程中箱体内部环境的温度。从图 7 实验结果来看, 未放置食物的外卖恒温箱在 18 °C 的室温条件下, 通过两侧的发热器件进行加热约 30 min 后能达到 60 °C 以上的温度, 之后箱内温度能稳定在 60~65 °C 左右。由于箱体优异的隔热效果, 在加热-冷却过程中, 温度曲线表现出了明显的快速升温 and 缓慢降温的特征, 切断电源后经过 100 min 箱内温度降至接近室温。该过程所消耗的时间是升温过程的 4 倍, 因此该恒温箱出色的加热性能及隔热性能充分满足外卖热餐食物的保温需求。

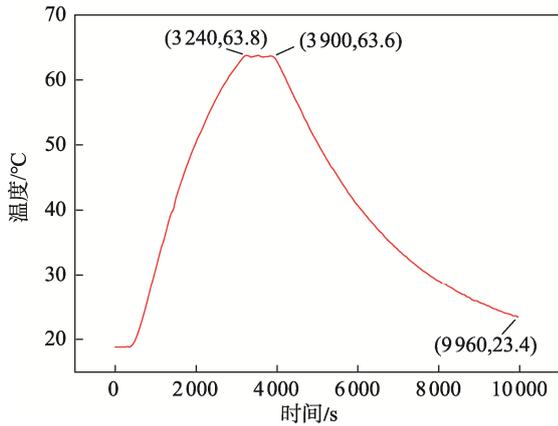


图7 空箱测试
Fig.7 Empty box test

随后模拟了热餐食物的配送过程，对恒温箱的保温效果进行测试。将初始温度为 60 °C 的食物放入外卖恒温箱中，同时对恒温箱施加 18 V 的电压使箱内环境温度开始升温，此阶段是将热餐食物放入恒温箱中准备配送的模拟；然后每过 10 min 打开箱盖 10 s，模拟在外卖配送过程中取出其他餐食的操作；

最后在 1 h 之后取出热餐食物测量温度，模拟配送实验至此结束。在整个模拟配送过程中通过探头式温湿度计记录的箱内环境温度变化如图 8 所示。图 8 中温度曲线的 5 次突然下降对应在 1 h 模拟实验中的 5 次开盖操作。由于箱体内外温差巨大，因此在开盖的一瞬间箱内热量大量流失导致温度突然下降。虽然在开盖的过程中会导致箱内环境温度下降，但是箱内环境温度整体上还是保持上升趋势，并在 43 min 时箱内温度已经达到 60 °C 以上。最终在取出热餐食物时，其温度仅下降约 5 °C，食物仍保持在口感合适的温度。

最后设置空白对照实验，将 60 °C 的水分别放置在普通外卖箱和外卖恒温箱中保存 20 min，然后取出观察其温度变化情况，从而更加直观地评估电热器件对外卖保温箱在保温效果上的提升。从图 9 结果来看，60 °C 水放置在普通外卖箱中经过 20 min 后温度降低到 47.5 °C，而放置在外卖恒温箱中的水在经过 20 min 后取出其温度仍能保持在 60 °C，其保温效率比普通外卖箱的高 27.3%。充分证明了所设计的恒温箱在原外卖箱的基础上大幅度提升了保温效果。

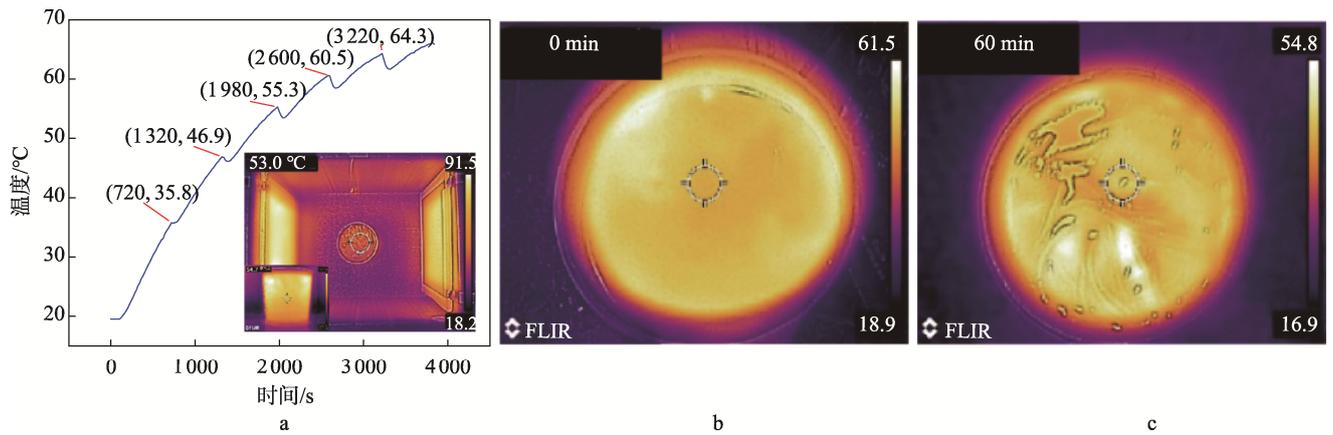


图8 模拟运输测试
Fig.8 Simulated transport test

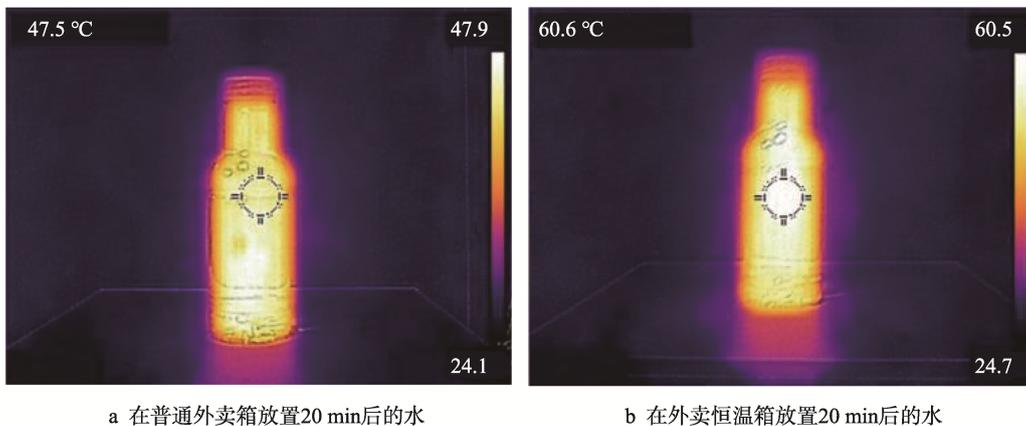


图9 普通外卖箱和外卖恒温箱对比测试
Fig.9 Comparison test of ordinary takeaway box and constant temperature takeaway box

3 结语

本研究将碳系水性电热油墨和印刷电子技术相结合运用到外卖恒温箱中。使用炭黑、石墨和碳纳米管等成本较低的碳材料制备了碳系水性电热油墨,并进一步制备了发热器件。在通电情况下,制备的发热器件(25 cm×25 cm)在18 V电压条件下,饱和温度可达到76.7 °C,功率密度为 $6.992 \times 10^{-2} \text{ W/cm}^2$ 。在不同输入电压下,发热器件的功率密度与温度之间呈现线性关系,斜率为 $782.6 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^2/\text{W}$ 。表明发热器件能有效地将电能转换为热能,能达到即时补充运输过程中热量损失的作用,从根本上解决了外卖食品在配送过程中热交换不平衡的问题,可在低温环境下对外卖热餐食物起到更加可靠的保温效果。与传统的外卖保温箱相比,本研究所制备的外卖恒温箱保温效率大幅提高,满足外卖行业发展对安全与高品质食品的需求。

参考文献:

- [1] 刘佩琦. O2O 模式下餐饮外卖顾客满意度研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017: 41-46.
LIU Pei-qi. Research on Customer Satisfaction of Takeaway Food in Online to Offline[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2017: 41-46.
- [2] 王安霞, 侯贺维. 以用户体验为中心的外卖食品包装创新设计研究[J]. 包装工程, 2020, 41(10): 186-192.
WANG An-xia, HOU He-wei. Innovation Design of Takeaway Food Packaging Centered on User Experience[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(10): 186-192.
- [3] 双海军, 田桂瑛, 霍良. O2O 平台下外卖包装面临的问题及对策研究[J]. 包装工程, 2018, 39(19): 144-149.
SHUANG Hai-jun, TIAN Gui-ying, HUO Liang. Problems and Countermeasures of Takeout Package under O2O Platform[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(19): 144-149.
- [4] 李红艳, 李勇. 餐饮外卖行业发展存在问题及对策[J]. 物流工程与管理, 2018, 40(5): 133-134.
LI Hong-yan, LI Yong. Problems in the Development of Catering Take-Away Industry and Its Countermeasures[J]. Logistics Engineering and Management, 2018, 40(5): 133-134.
- [5] 朱传辉, 李保国, 苏树强. 智能食品蓄热保温箱的研发与应用[J]. 包装与食品机械, 2016, 34(4): 66-69.
ZHU Chuan-hui, LI Bao-guo, SU Shu-qiang. Development and Application of Intelligent Food Thermal Insulation Box[J]. Packaging and Food Machinery, 2016, 34(4): 66-69.
- [6] 曹莹, 王冲. 太阳能智能保温箱研究[J]. 科技风, 2018(31): 2.
CAO Ying, WANG Chong. Research on Solar Intelligent Incubator[J]. Technology Wind, 2018(31): 2.
- [7] 艾晓龙, 夏金童, 赵敬利, 等. 导电填料对炭系电热涂料电热性能的影响[J]. 涂料工业, 2012, 42(6): 37-40.
AI Xiao-long, XIA Jin-tong, ZHAO Jing-li, et al. Influence of Conductive Fillers on Electrothermal Property of Carbon-Based Electrothermal Coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2012, 42(6): 37-40.
- [8] DOWNAROWICZ D, KOWALSKI K. Electrothermal Regeneration of BPL Activated Carbon: Possibilities for Improvement of Process Efficiency[J]. Chemical Papers, 2020, 74(6): 1954-1956.
- [9] QIN W, YOU W, ZHONG M, et al. Electrothermal Energy and Deicing Properties of Carbon Nanotube Films[J]. Aerospace Materials & Technology, 2019, 49: 86-90.
- [10] WANG Y, XIE J, WANG X. The Ultra-Flexible Films of Super Conductive Carbon Black/Poly (Vinylidene Fluoride) as Electrothermal Materials[J]. Materials Research Express, 2019, 6: 116402.
- [11] LIU Yun-hao, MA Xiao-hua, ZHANG Hai-zhai, et al. Large-Scale Production of Electrothermal Films with GNSS/CNTS/CB Three-Dimensional Structure Ink by Screen Printing[J]. ACS Applied Electronic Materials, 2022, 4(2): 814-822.
- [12] XIA J T, CHUAN-JUN T U, Yan L I, et al. Preparation of Composite Electroheat Carbon Film[J]. Journal of China Nonferrous Metals Society, 2005, 15(5): 1014-1020.
- [13] LUO J, LU H, ZHANG Q, et al. Flexible Carbon Nanotube/Polyurethane Electrothermal Films[J]. Carbon, 2016(110): 343-349.
- [14] CHANG H, JIA Y, XIAO L, et al. Three Dimensional Cross-Linked and Flexible Graphene Composite Paper with Ultrafast Electrothermal Response at Ultra-Low Voltage[J]. Carbon, 2019(154): 150-155.
- [15] 王望, 郭彦峰, 孙振锋. 碳系导电油墨填料的研究进

- 展[J]. 化工进展, 2015, 34(12): 4259-4264.
- WANG Wang, GUO Yan-feng, SUN Zhen-feng. Research Progress of Carbon-Based Conductive Ink Fillers[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(12): 4259-4264.
- [16] 张园. 印刷电子用导电油墨的研究进展[J]. 化工新型材料, 2015, 43(7): 9-11.
- ZHANG Yuan. Research Progress of Conductive Ink Applied in Printed Electronics[J]. New Chemical Materials, 2015, 43(7): 9-11.
- [17] 马秀峰, 李飞. 导电油墨技术及其研究方向[J]. 中国印刷与包装研究, 2010, 2(6): 9-14.
- MA Xiu-feng, LI Fei. Conductive Ink Technology and Research Direction[J]. China Printing and Packaging Study, 2010, 2(6): 9-14.
- [18] LIAO Y, TIAN Y F, MA X H, et al. Screen-Printed High-Performance Flexible Electrothermal Films Based on Three-Dimensional Intercalation Graphene Nanosheets/MWCNT/Carbon Black Composite[J]. ACS Applied Materials & Interfaces. 2020, 12(42): 48077-48083.

责任编辑：曾钰婵