

## 基于电场驱动喷射微 3D 打印的曲面透明电加热玻璃技术

马圣旺<sup>1</sup>, 王飞<sup>1,2,\*</sup>, 杨建军<sup>1</sup>, 兰红波<sup>1</sup>

(1. 青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 青岛 266525; 2. 山东省增材制造(3D 打印)技术与应用高校重点实验室, 青岛 266525)

**摘要:**为了解决高性能曲面透明电加热玻璃制造工艺复杂和制备成本高的问题,提出了一种基于电场驱动喷射微 3D 打印制造曲面透明电加热玻璃的新方法,并阐述了该工艺流程;通过实验揭示了主要打印参数对制造曲面透明电加热玻璃银线线宽的影响规律;使用优化的打印参数在曲面透明玻璃上制备了有效加热面积为  $35\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ ,线宽为  $90\text{ }\mu\text{m}$ ,周期为  $3000\text{ }\mu\text{m}$ ,附着为 4B,透光率为 90%,电阻为  $1.6\text{ }\Omega$ ,银线为金属网栅结构的曲面透明电加热玻璃。实验结果表明,该打印方法工艺简单,利用该方法制造的曲面透明电加热玻璃具有附着力好、透光率高和加热性能良好等优点,为实现低成本、高性能的曲面透明电加热玻璃的工业化制造提供了一种全新的解决方案。

**关键词:**透明电加热玻璃;曲面打印;电场驱动喷射;微 3D 打印

**中图分类号:** TG156 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2024)03-0119-08

## Curved surface transparent electric heating glass technology based on electric field driven jet micro 3D printing

MA Shengwang<sup>1</sup>, WANG Fei<sup>1,2,\*</sup>, YANG Jianjun<sup>1</sup>, LAN Hongbo<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Key Laboratory of Technology and Application of Increasing Materials Manufacturing

(3D Printing) in Shandong Province, Qingdao 266525, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of complex manufacturing process and high preparation cost of high-performance curved surface transparent electric heating glass, a new method of manufacturing curved surface transparent electric heating glass based on electric field driven jet micro 3D printing is proposed, and the technological process is described. The influence of the main print parameters on the silver linewidth of curved surface transparent electric heating glass is experimentally revealed, and by using the optimal printing parameters, a curved surface transparent electric heating glass was prepared, with an effective heating area of  $35\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ , a linewidth of  $90\text{ }\mu\text{m}$ , a period of  $3000\text{ }\mu\text{m}$ , an adhesion of 4B, a light transmittance of 90%, a resistance of  $1.6\text{ }\Omega$  and with the silver lines as the metal grid structure. The experimental results indicate that the printing method has a simple process, and the curved surface transparent electric heating glass printed by using the proposed meth-

收稿日期: 2022-12-12

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR202102190308)

作者简介: 马圣旺(1998—), 男, 山东菏泽人。硕士, 研究方向为 3D 打印。E-mail: wang17863976500@163.com。

\* 通信作者: 王飞(1985—), 男, 山东泰安人。博士, 副教授, 主要从事 3D 打印与特种加工方面的研究。

E-mail: wangfei@qut.edu.cn。

od has the advantages of good adhesion, high transmittance and good heating performance. This method provides a new solution for the industrial manufacturing of low-cost and high-performance curved surface transparent electric heating glass.

**Key words:** transparent electric heating glass; curved surface printing; electric field driven jet; micro 3D printing

曲面透明电加热器是利用透明导电材料通电后产生的焦耳热对曲面玻璃表面进行加热,主要防止在寒冷潮湿的环境中发生结霜、结雾和结冰<sup>[1-2]</sup>,保证设备的正常工作。它主要应用在汽车、船舶、设备显示器、相机镜头、交通信号灯、航空航天等各种民用和军事设备上<sup>[3-5]</sup>,展示了其广阔的工业化应用前景。目前工业上最成熟的透明电加热玻璃主要是氧化铟锡(ITO)导电玻璃<sup>[6]</sup>,由于 ITO 导电玻璃中的铟是稀有金属,且制造过程中容易发生破碎,存在生产成本低和工艺制造复杂等缺点,需要开发可替代 ITO 的透明导电材料。新兴的透明导电材料主要有石墨烯、金属纳米线、导电聚合物、金属网栅等。这些导电材料中,石墨烯<sup>[7]</sup>具有制造简单和导电性好的优点,但是难以同时兼顾透光率和导电性。金属纳米线<sup>[8]</sup>热稳定性差,与基底的附着力较差,难以保证表面导电性。导电聚合物<sup>[9]</sup>具有加工成本低、导电性好等优点,但聚合物环境稳定性较差。

金属网栅可以通过调节线宽和周期等参数控制透光性和导电性,解决二者的矛盾,拥有良好的综合光电性能<sup>[10-11]</sup>。目前制造曲面透明电加热玻璃金属网栅的技术主要包括全息光刻、喷墨打印、气溶胶喷印、激光直写、电流体动力喷射、丝网印刷等。但是这些技术都存在一定的局限性,例如全息光刻<sup>[12]</sup>存在生产成本低、难以实现大面积曲面制造的问题。喷墨打印<sup>[13]</sup>的打印分辨率低,且打印材料黏度受限,低黏度和大尺寸的液滴容易在曲面上滑动<sup>[14]</sup>。气溶胶喷印<sup>[15]</sup>可以在不同曲面上制造导线,但存在打印材料受限,难以实现大高宽比银网栅制造。激光直写<sup>[16]</sup>可以实现曲面金属网栅制造,但存在基底材料要求较高、生产成本低等问题。电流体动力喷射<sup>[17]</sup>打印分辨率较高,打印导电材料会出现短路和放电击穿现象,无法实现稳定打印。丝网印刷<sup>[18]</sup>的银导线线宽较粗,银网栅表面形貌差,影响光学和电学性能。

综上所述,目前能在曲面玻璃衬底上实现金属网栅制作的工艺方法都存在制作工艺复杂、生产成本低等问题。因此,本文提出一种基于电场驱动喷射微 3D 打印制造曲面透明电加热玻璃的新方法,该方法采用导电纳米银浆作为打印材料,利用五轴联动电场驱动喷射微 3D 打印设备将导电纳米银浆打印到曲面透明玻璃基材上,从而实现曲面透明电加热玻璃的制作。同时研究了主要打印参数对银线形貌的影响规律,并对所制造的曲面透明电加热玻璃的结构和综合性能进行了测试,为实现高性能大面积曲面透明电加热玻璃的高效低成本制造提供了全新的解决方案。

## 1 曲面透明电加热玻璃制备工艺流程

相比于传统的曲面共形打印技术(微挤出打印、喷墨打印、气溶胶喷印、电流体动力喷射等),电场驱动喷射微 3D 打印具有打印分辨率高、高黏度印刷、适用各种基材、制造工艺简单等优点,可以在平面和任意曲面上打印制造电子器件。本文提出的电场驱动喷射微 3D 打印制备曲面透明电加热玻璃的工艺流程如图 1 所示,具体工艺步骤如下。

步骤 a: 三维扫描建模。使用三维扫描仪对曲面玻璃基材进行扫描,获得三维模型。

步骤 b: 图形路径绘制及打印代码生成。利用 CAM 软件在扫描生成的曲面模型上绘制网格图形,绘制好的图形经过软件后处理模块生成打印运动代码。

步骤 c: 曲面玻璃基材表面处理。采用超声清洗机清洗曲面玻璃表面的油污,随后进行玻璃表面疏水处理,降低其表面能,提高打印的稳定性和一致性。最后,将曲面玻璃基材置于恒温干燥箱内进行烘干,待基材烘干后固定在打印设备上。

步骤 d: 打印制造金属银网栅。使用纳米导电银浆作为打印材料,设置打印工艺参数,将打印代码导入到 3D 打印设备上,进行网栅图形的打印。

步骤 e: 金属银网栅电化处理。将打印完网栅图形的曲面玻璃基材置于恒温干燥箱内,设置烧结温

度为 135 ℃,烧结时间为 60 min,对纳米导电银浆进行加热固化。

步骤 f:金属银网栅封边处理。使用刮刀对烧结后的金属银网栅进行封边处理,封边处理后再次放入恒温干燥箱进行图形边缘导电化处理,连接电源形成曲面透明电加热玻璃。

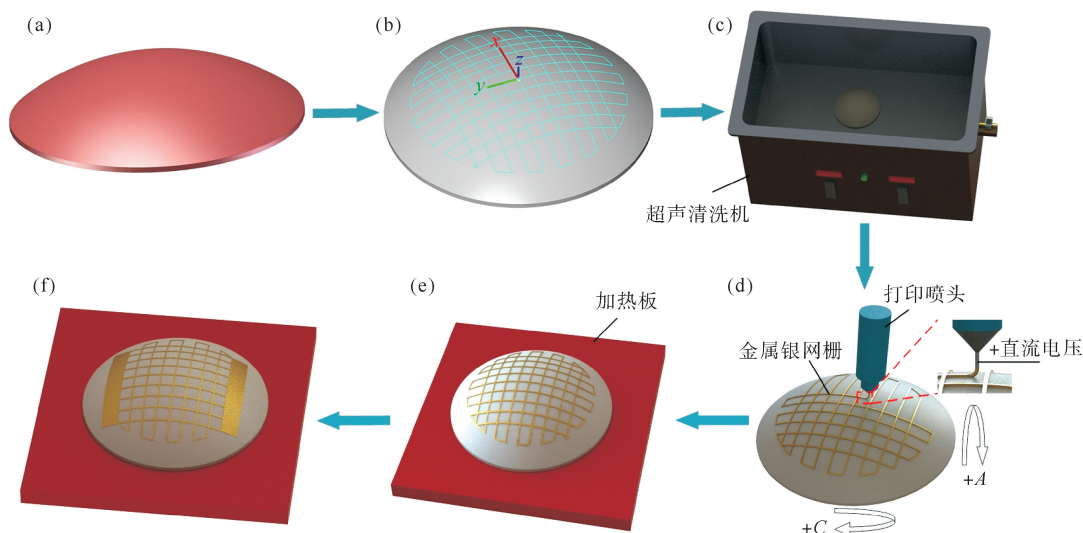


图 1 曲面透明电加热器的制备工艺流程

## 2 打印设备和打印材料

### 2.1 打印设备

本实验研究采用自主研发的五轴联动电场驱动喷射微 3D 打印设备,该设备的主要功能模块包括五轴运动模块、喷头模块、相机观测模块、系统控制模块,在各个模块的相互配合下实现五轴联动电场驱动微 3D 打印工艺全过程。其中,五轴运动模块包括 X、Y、Z 直线轴和 A、C 旋转轴,用于调整打印喷头始终沿着曲面的法线方向,最大成形尺寸为 200 mm×200 mm×100 mm;喷头模块包括打印喷头、空压机、调压阀、高压电源等,空压机及调压阀用于给打印喷头提供合适负压,高压电源连接打印喷嘴提供打印电场;相机观测模块主要由电荷耦合器件(CCD)相机和 LED 可调光源组成,用于观测打印喷嘴运动情况和射流形态;系统控制模块包括工控机、显示屏、运动控制器等。

### 2.2 打印材料

实验打印喷嘴采用内径为 100  $\mu\text{m}$  的不锈钢喷嘴。曲面玻璃基材的材质为光学玻璃,直径为 70 mm,中心厚 15 mm。打印导电材料选用北京中科纳通公司研制的商用纳米导电银浆 NT-TL20E,其主要性能参数:黏度为 300  $\text{dPa}\cdot\text{s}$ ,银含量为 70%,电阻率为 200  $\text{m}\Omega\cdot\mu\text{m}$ ,附着力等级为 4B。

## 3 打印工艺参数研究

### 3.1 打印电压对银线线宽和形貌的影响

打印电压是电场驱动喷射微 3D 打印形成稳定电场的重要条件,是影响打印稳定性和打印银线形貌的关键工艺参数。为确定打印银金属网栅最合适的打印电压,本文通过调节不同的打印电压,并保持其他打印工艺参数不变,得到打印电压和银线线宽的关系(图 2(a))。实验中采用的电压形式为直流电压,其他工艺参数设置如下:气压为 300 kPa,打印速度为 5 mm/s,喷嘴距基材表面法向高度为 80  $\mu\text{m}$ ,喷嘴内径为 100  $\mu\text{m}$ 。实验结果表明,当电压过低时,电压提供的电场力不足以形成稳定射流,导致打印的银线不均匀;当打印电压逐渐升高时,可以稳定打印银线,银线线宽略有增加;当电压过大时,射流来回摆动,打印银线发生弯曲(图 2(b))。因此,适合本研究的打印电压范围为 900~1500 V。

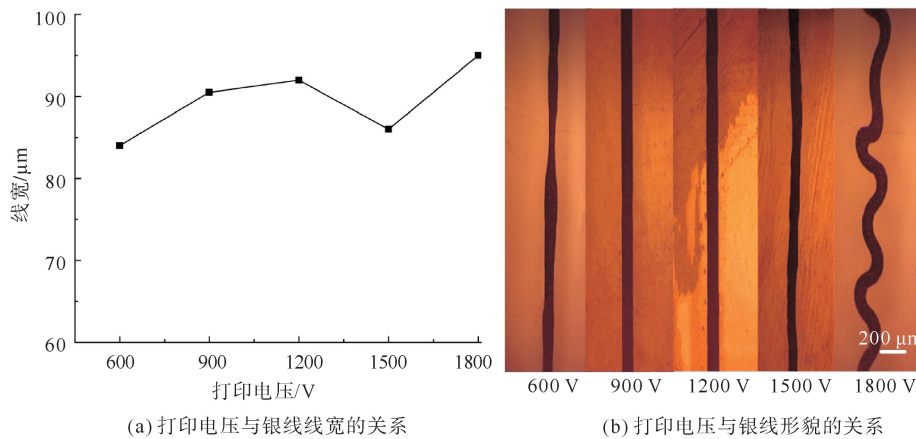


图2 打印电压对银线线宽和形貌的影响

### 3.2 打印气压对银线线宽和形貌的影响

在电场驱动微3D打印技术中,打印气压是影响银线线宽和形貌的重要工艺参数,打印气压的大小控制着打印材料的流量。本文通过调节不同的打印气压,并保持其他打印工艺参数不变,得到打印气压与银线线宽的关系(图3(a))。本实验工艺参数设置如下:电压为1000 V,打印速度为5 mm/s,喷嘴距基材表面法向高度为80 μm,喷嘴内径为100 μm。实验结果表明,在一定范围内,打印线宽随着气压的增大而增大。气压值过小时,打印材料无法挤出,不能满足喷嘴的稳定喷射;气压值过大时,打印材料供给过多,所以打印材料在基底表面的沉积量增加,打印线宽增大,如图3(b)所示。因此,适合本研究的打印气压范围为0.20~0.40 MPa。

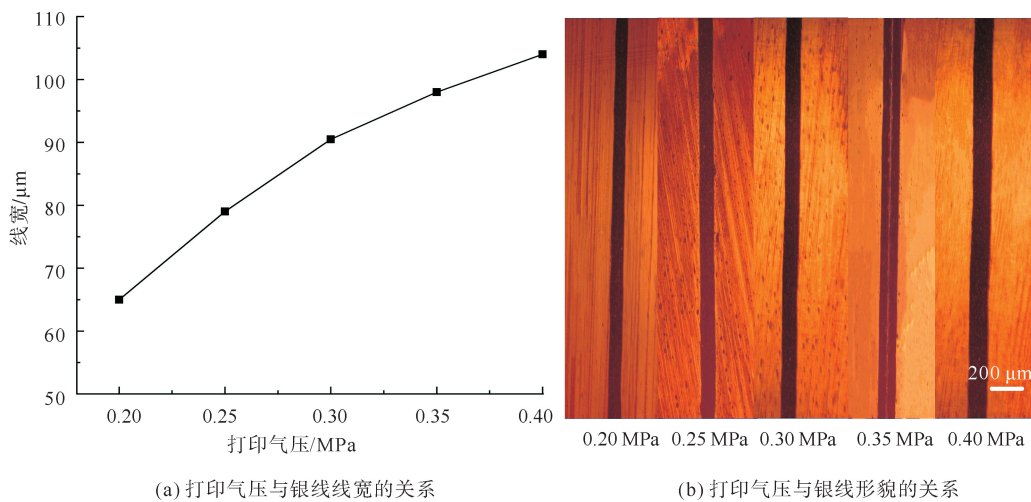


图3 打印气压对银线线宽和形貌的影响

### 3.3 打印速度对银线线宽和形貌的影响

打印速度也是影响银线线宽和形貌的重要工艺参数,通过高速运动将射流进行拖拽拉伸,减小打印线宽。本文通过调节不同的打印速度,并保持其他打印工艺参数不变,得到的打印速度与银线线宽的关系(图4(a))。打印工艺参数设置如下:电压为1000 V,气压为300 kPa,喷嘴距基材表面法向高度为80 μm,喷嘴内径为100 μm。实验结果表明,在一定范围内增大打印速度,银线线宽逐渐减小,但当打印速度超过15 mm/s时,会导致打印线宽不均匀(图4(b))。主要原因是打印速度过快会导致拖拽力超过打印材料表面张力,导致打印银线线宽不一致。因此,适合本研究的打印速度范围为5~15 mm/s。

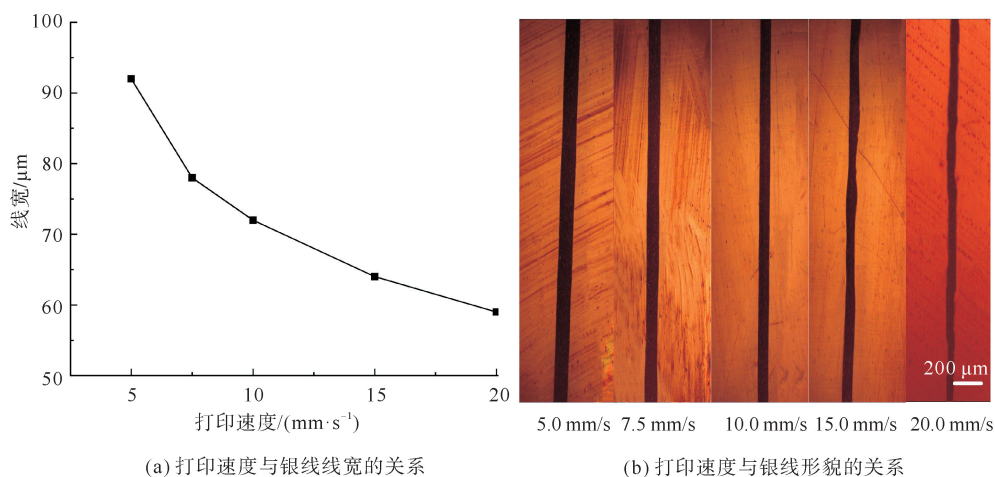


图 4 打印速度对银线线宽和形貌的影响

## 4 案例研究

### 4.1 曲面透明电加热玻璃制造和结构表征

根据本实验所提出的电场驱动喷射微 3D 打印技术,并结合优化的打印工艺参数,打印了多组不同周期的金属网栅实验样件,通过典型案例验证所提方法的可行性和有效性。打印工艺参数为:打印电压 1100 V、打印气压 280 kPa、打印速度 5 mm/s、喷嘴距基材表面法向高度 80  $\mu\text{m}$ 。图 5 展示了其中一个打印烧结后的金属网栅样件,制备的银网栅图形几何尺寸为:打印线宽约为 90  $\mu\text{m}$ ,打印周期为 3000  $\mu\text{m}$ ,图形面积为 40 mm $\times$ 40 mm,图中显示打印的金属网栅一致性较好,金属网栅交叉重叠处无突变点和断线,银线表面形貌良好。

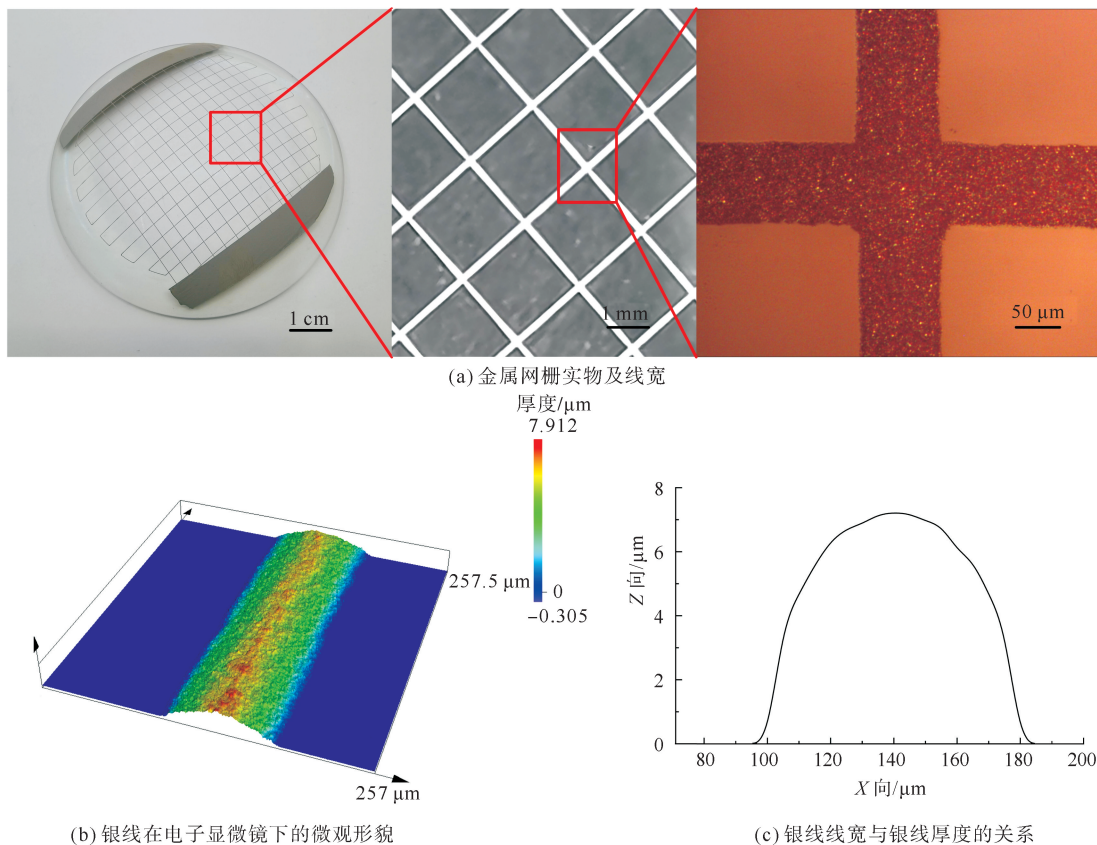


图 5 曲面透明电加热器结构表征

## 4.2 曲面透明电加热玻璃透光率和电阻测试

透光率是决定曲面透明加热玻璃性能的一个重要指标。对于曲面透明玻璃上的金属网栅来说,周期和线宽会直接影响其透光率。本实验控制打印线宽不变研究不同打印周期对金属网栅透光率的影响(图6(a))。实验结果表明,透光率随着金属网栅周期的增大而增大,当打印线宽为 $90\ \mu\text{m}$ ,周期为 $3\ \text{mm}$ ,可见光透光率超过 $90\%$ ,具有良好的光学性能。

电阻是反映金属网栅导电性的重要技术指标。金属网栅的打印周期和线宽都对电阻有影响。本实验控制打印线宽不变研究不同打印周期对金属网栅电阻的影响及其规律,测试的银网栅图形几何尺寸为:打印线宽约为 $90\ \mu\text{m}$ ,有效面积为 $35\ \text{mm}\times 40\ \text{mm}$ 。实验结果表明,同一线宽不同周期条件下,电阻随着打印周期的增大而逐渐增大(图6(b))。

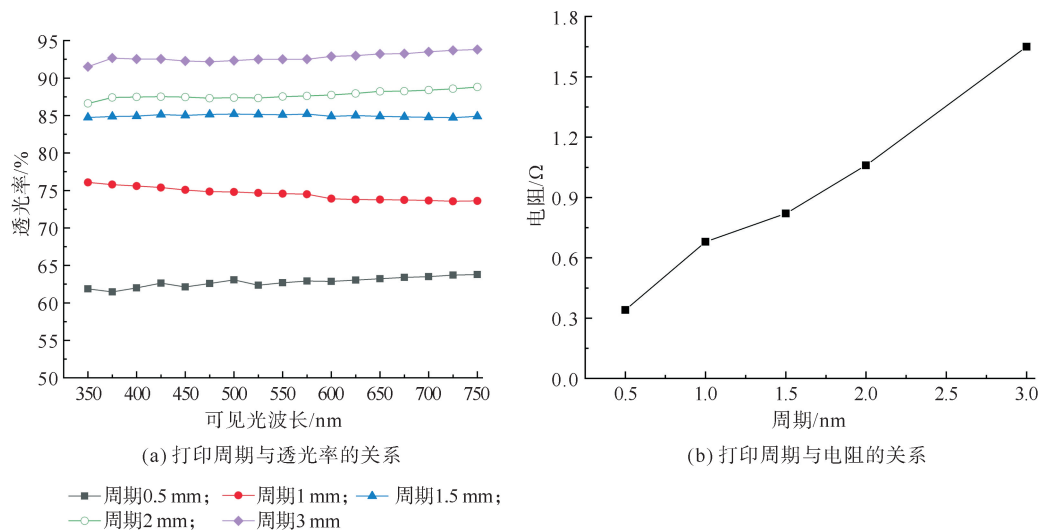


图6 曲面透明电加热器透光率和电阻测试

## 4.3 曲面透明电加热玻璃表面附着力测试

采用3M百格胶带对曲面透明玻璃上的银网栅进行附着力测试,表面附着力测试如图7所示。测试方法为用3M百格胶带牢牢粘住被测金属网栅的指定区域,并用手指或用橡皮擦用力擦拭胶带,以加大被测区域的接触面积,静置 $20\ \text{min}$ 后沿着胶带一端在垂直方向迅速扯下胶带,同一测试区域重复2次,观察曲面基材上金属网栅的脱落情况。实验结果显示金属网栅没有明显的脱落和损坏,脱落面积小于 $5\%$ ,测试前后电阻值没有发生变化。根据附着力测试评判标准,金属网栅与曲面玻璃的附着力等级为4B等级。

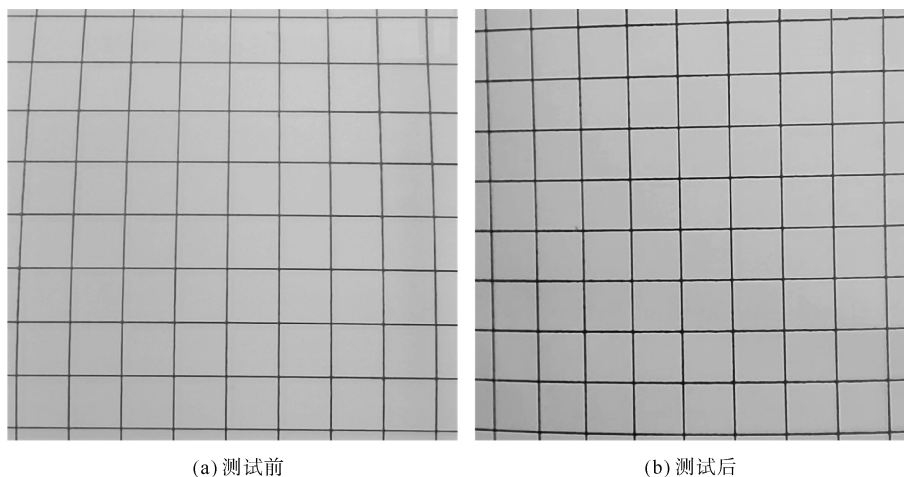


图7 曲面透明电加热器表面附着力测试

#### 4.4 曲面透明电加热玻璃加热性能测试

为了进一步研究曲面透明电加热玻璃的加热性能,需要对其进行加热效果的测试。加热性能测试的银网栅图形几何尺寸为:打印线宽约为  $90\ \mu\text{m}$ ,有效加热面积为  $35\ \text{mm}\times 40\ \text{mm}$ ,电阻值为  $1.6\ \Omega$ 。所测曲面透明电加热玻璃进行加热性能测试的接线原理如图 8(a)所示,采用恒压直流电源给样件供电,分别测试 2、4、6、8 V 的加热效果,利用红外热成像仪记录实时加热温度,得到曲面透明电加热玻璃在不同电压下的时间与温度关系如图 8(b)所示。由图 8(b)可知,随着外加电压的升高,温度上升率越快。图 8(c)为曲面透明电加热玻璃样件在恒定直流电压分别为 2、4、6、8 V 条件下通电加热 1 min 的热像图,图中展示了曲面透明电加热玻璃的加热区域温度均匀,表现出良好的导电性。

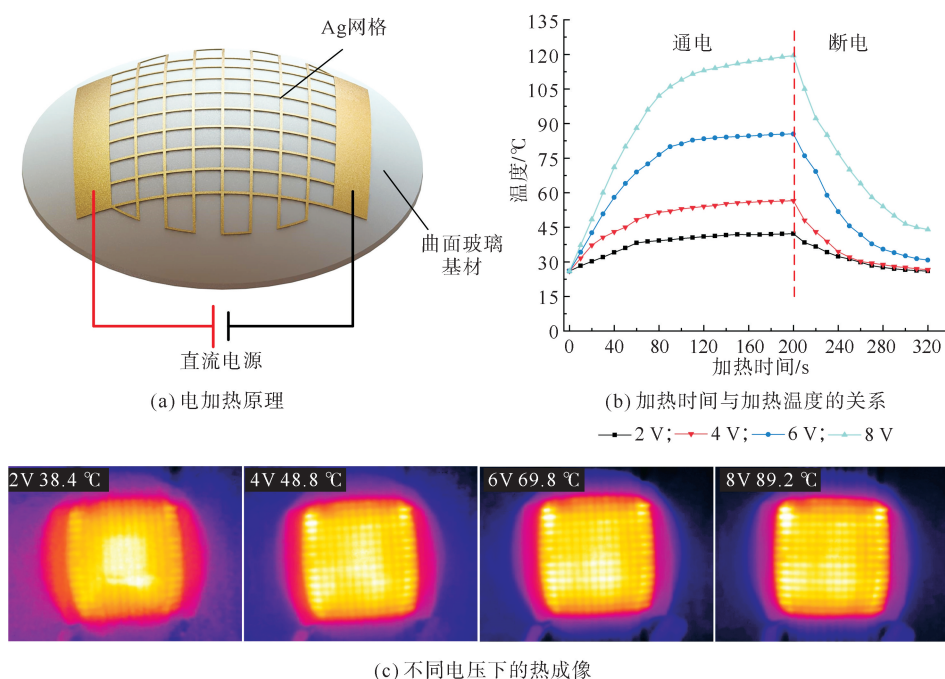


图 8 曲面透明电加热器加热性能测试

## 5 结论

本文提出了基于电场驱动喷射的微 3D 打印曲面透明电加热玻璃的新方法,该方法具有制造成本低和工艺简单等特点,可以同时兼顾透光性和导电性。通过实验研究揭示了主要打印参数对所制造曲面透明电加热玻璃金属银线形貌的影响,并优化出最适合打印金属银网络的工艺参数。利用所提出的新方法,结合优化的工艺参数,在曲面透明玻璃基材上制备了有效加热面积为  $35\ \text{mm}\times 40\ \text{mm}$ ,线宽为  $90\ \mu\text{m}$ ,周期为  $3\ \text{mm}$ 、附着力为 4B,透光率为 90%,电阻约为  $1.6\ \Omega$  的曲面透明电加热玻璃。最后,对所制造的电加热玻璃进行了加热性能测试。实验结果表明,所制作的曲面透明电加热玻璃上的金属银线一致性较好,没有出现断线和形貌不好的问题,表现出良好的导电性。

#### 参考文献 (References):

- [1] 黄华义,辛崇飞. 电加热玻璃在采光顶设计中的应用优势[J]. 门窗,2009(4):45-47.  
HUANG Huayi, XIN Chongfei. Application superiority of electric heating glass using in natural lighting roof[J]. Doors & Windows, 2009(4):45-47.
- [2] 刘晨鸣. 浅析飞机风挡玻璃电加热防冰[J]. 军民两用技术与产品,2017(4):16-17.  
LIU Chenming. Analysis on electric heating and ice prevention of aircraft windshield glass[J]. Dual Use Technologies & Products, 2017(4):16-17.

- [3] 秦文峰,游文涛,钟勉,等. 碳纳米管薄膜电热特性及其除冰性能[J]. 宇航材料工艺,2019,49(1):86-90.  
QIN Wenfeng, YOU Wentao, ZHONG mian, et al. Electrothermal energy and deicing properties of carbon nanotube films[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2019, 49(1): 86-90.
- [4] KANG J, JANG Y, KIM Y, et al. An Ag-grid/graphene hybrid structure for large-scale, transparent, flexible heaters[J]. *Nanoscale*, 2015, 7(15): 6567-6573.
- [5] 王伟,龚健,杨怀京. 高性能电加热电磁屏蔽玻璃的研制[J]. 中国建材科技, 2005(3): 30-32.  
WANG Wei, GONG Jian, YANG Huaiping. Research of high performance electro-heating electromagnetic-shielding glass[J]. *China Building Materials Science & Technology*, 2005(3): 30-32.
- [6] JIA L, YAN D, LIU X, et al. Highly efficient and reliable transparent electromagnetic interference shielding film[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(14): 11941-11949.
- [7] XIE Y, LIU S, HUANG K, et al. Ultra-broadband strong electromagnetic interference shielding with ferromagnetic graphene quartz fabric[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(30): 2202982.
- [8] LEE Y, MIN S Y, KIM T S, et al. Versatile metal nanowiring platform for large-scale nano-and opto-electronic devices[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(41): 9109-9116.
- [9] 白盛池,汪海风,杨辉,等. 转印法制备薄膜太阳能电池用银纳米线-聚合物复合透明导电薄膜[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(3): 347-353.  
BAI Shengchi, WANG Haifeng, YANG Hui, et al. Preparation of silver nanowire-polymer composite transparent conductive films by transfer method for thin film solar cells[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2018, 46(3): 347-353.
- [10] ZHU X, XU Q, LI H, et al. Fabrication of high-performance silver mesh for transparent glass heaters via electric-field-driven microscale 3D Printing and UV-assisted microtransfer[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(32): 1902479.
- [11] 杨建军,李红珂,朱晓阳,等. 高性能电加热玻璃 3D 打印与微转印复合制造工艺[J]. 光学精密工程, 2019, 27(4): 820-831.  
YANG Jianjun, LI Hongke, ZHU Xiaoyang, et al. Three-dimensional printing and micro-transfer composite manufacturing process for high performance glass heaters[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(4): 820-831.
- [12] ZHANG Y, ZHEN Y, GAO Z, et al. Fabrication of metal grating by holographic lithography system[C]// 2015 International Conference on Optoelectronics and Microelectronics (ICOM). IEEE, 2015: 341-344.
- [13] JEONG J A, KANG S B, KIM H K. Transparent Cu grid prepared by inkjet printing with Cu nanoparticle ink[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2013, 63(1): 62-66.
- [14] ZHANG H, HUANG J, WANG J, et al. Development of a path planning algorithm for reduced dimension patch printing conductive pattern on surfaces[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 95: 1645-1654.
- [15] DAVIES M, HOBBS M J, NOHL J, et al. Aerosol jet printing polymer dispersed liquid crystals on highly curved optical surfaces and edges[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 18496.
- [16] ALEEM M, VISHNURAJ R, KRISHNAN B, et al. Realization of micropatterned, narrow line-width Ni-Cu-Sn front contact grid pattern using maskless direct-write lithography for industrial silicon solar cells[J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2021, 4(10): 10682-10696.
- [17] 曹辉,张广明,杨建军,等. 基于单平板电极电场驱动喷射沉积微纳 3D 打印[J]. 科学通报, 2021, 66(21): 2745-2757.  
CAO Hui, ZHANG Guangming, YANG Jianjun. Electric-field-driven jet deposition micro-nano 3D printing based on a single-plate electrode[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(21): 2745-2757.
- [18] CHEN X, WU X, SHAO S, et al. Hybrid printing metal-mesh transparent conductive films with lower energy photonically sintered copper/tin ink[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 13239.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)