

文章编号 1004-924X(2023)15-2203-15

用于玻璃热压印的高温快速均匀加热模块的 制造及优化

王 鑫¹, 龚 峰¹, 张志辉², 杨 高^{1*}

(1. 深圳大学 机电与控制工程学院 深圳市高性能特种制造重点实验室,
广东 深圳 518060;

2. 香港理工大学 工业及系统工程系 超精密加工技术国家重点实验室, 中国香港 999077)

摘要:热压印技术是实现高性能玻璃微光学元件低成本绿色制造的有效途径,但是,由于加热冷却周期较长,温度均匀性不高,其制造效率和成型质量被限制。因此,有必要开发高温快速均匀加热模块,实现高效高质热压印成型。首先,基于氮化硅陶瓷加热片设计制造加热模块,搭建加热测试平台,实现加热模块表面温度分布的实时监测;然后,开展恒电压加热重复性测试,评估实验结果的可靠性;接着,建立和修正加热模块恒电压加热有限元仿真模型,并结合有限元仿真模型和正交试验法对加热模块结构进行优化,以提高加热速率和温度均匀性。实验结果表明:优化后的加热模块不仅加热速率快,而且温度分布均匀。进行 180 s 恒电压加热测试时,加热模块的升温速率可达 363 °C/min,表面温差为 10.7 °C。对加热模块进行 700 °C 控温加热时,实测温度曲线与设定温度曲线基本一致,温度波动在 0.3 °C 以内,尤其中心 20 mm × 30 mm 区域的温差在 2 °C 左右。最后,将高温快速均匀加热模块集成于热压印装置,实现了 N-BK7 玻璃微结构阵列的高效率高质量热压印成型。

关键词:热压印;加热;温度均匀性;有限元仿真;正交试验

中图分类号:TB133 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20233115.2203

Fabrication and optimization of high-temperature uniform rapid heating module for glass hot embossing

WANG Xin¹, GONG Feng¹, CHEUNG Chifai², YANG Gao^{1*}

(1. Shenzhen Key Laboratory of High-performance Nontraditional Manufacturing,
College of Mechatronics and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

2. State Key Laboratory of Ultra-precision Machining Technology, Department of Industrial and
Systems Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China)

* Corresponding author, E-mail: gao.yang@szu.edu.cn

Abstract: Hot embossing is a promising technology for fabricating high-performance glass micro-optical components at low-cost and in a green manner. However, the efficiency and accuracy of hot embossing are limited by the long heating-cooling cycle time and the low uniformity of temperature distribution, respec-

收稿日期:2023-03-07;修订日期:2023-04-07.

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No. 52171076);广东省自然科学基金面上项目(No. 2023A1515012239);深港创新圈联合资助项目(No. SGDX20190919094403772);深圳市高等院校稳定支持项目(No. 202208091725520030);香港特别行政区政府创新科技基金资助项目(No. GHP/142/19SZ)

tively. Therefore, it is necessary to develop a high-temperature rapid uniform heating module to improve the efficiency and accuracy of hot embossing. First, a heating module based on a silicon nitride ceramic heater was designed and fabricated, and a heating test platform was constructed, enabling the real-time monitoring of the temperature distribution of the heating module. Constant-voltage heating tests were repeatedly conducted to demonstrate the reproducibility of the experiments. Subsequently, a numerical simulation model was established for the heating module, and the accuracy of the finite element model was evaluated by comparing the simulated and experimental results under the same process conditions. Numerical simulation and orthogonal tests were performed to optimize the heating module and hence obtain decent uniformity of the temperature distribution and a rapid heating rate. The experimental results indicate that the optimized heating module not only had a rapid heating rate but also a uniform temperature distribution. In the constant-voltage heating tests, the heating rate of the optimized heating module is as high as 363 °C/min, and the maximum temperature difference is 10.7 °C, which validates the feasibility of the optimization method. In the controlled heating test, the measured temperature curve is essentially consistent with the set temperature curve, and the temperature fluctuation is within 0.3 °C. In particular, the temperature difference in the central area of 20 mm×30 mm is approximately 2 °C. Finally, the optimized rapid heating module and a precision temperature control system were integrated into a high-temperature hot embossing machine, which achieved efficient hot embossing of high-quality N-BK7 glass microstructure arrays.

Key words: hot embossing; heating; uniformity of temperature; finite element simulation; orthogonal experiment

1 引言

热压印技术可实现高精度微结构的低成本复制,被应用于微透镜阵列、衍射光学元件和非涅尔透镜等微光学元件的生产中,以满足光学、生物医学、激光辐射及光纤通信等领域的应用需求^[1-3]。热压印成形过程是将坯料放入高精度的模具中,经过加热、保温、退火、冷却等步骤,将模具的结构特征复制到坯料上^[4]。在热压印过程中,加热模块的加热速率和表面温度分布直接影响热压印的效率和制品的成型精度^[5]。因此,高温快速均匀加热模块的开发是微纳热压印技术的一个研究重点。

加热模块的加热速率和温度均匀性与匀热块的材料、结构、发热元件的布局、加热方式等多种因素有关^[6-8]。近年来,研究人员一方面尝试了多种加热方法来提高热压印效率,如石墨烯-聚合物复合气体辅助加热、感应加热、激光辐照加热、红外加热等^[9];另一方面,通过优化不同位置加热元件的热流密度来提高表面温度分布的均匀性。Chen等^[10]利用石墨烯优异的电热特性设

计了一种石墨烯-聚合物复合加热器进行热压印,提高了加热效率,但这种石墨烯涂层技术中涂层的低强度和不均匀性会导致结构的不稳定和温度分布的不均匀。Nian等^[11]提出了一种感应式热压装置,使用感应加热线圈快速加热平板模具的表面,而不是整个平板模具,提高了加热效率。此外,在感应线圈的中心放置铁氧体材料来解决由邻近效应引起的表面温度不均匀的问题,并提高了表面温度。Kurita等^[12]提出将电阻加热方式改为激光加热来提高加热速率,即将玻璃放置在模具上,激光穿过玻璃基板照射到模具上,通过热辐射进行加热。王小权^[13]在模压机加热系统的设计中选用短波红外加热管,并对加热管进行半镀金处理来提高加热效率。陈冲^[14]设计了一种复合加热系统,使用电磁感应加热模具表面,硅钼棒电阻加热模具内部,实现对模具整体的快速加热。Chen等^[15]利用感应加热线圈从内向外加热模具,并利用红外加热管加热模具外表面,两种加热方式共同实现对模具的快速协同加热,并改善其表面温度分布的均匀性。史春彦等^[16]设计了一种具有夹层结构的加热模块,通过

增加面导热率高的夹层材料来加快热量的传导速率,使加热模块表面温度更均匀。Li等^[17]把模具的加热系统简化为单个加热单元进行热响应分析,以电加热元件规格和位置为优化设计参数,所需加热时间和模具表面温差为热响应指标,建立加热单元多目标优化模型,得到了加热单元的优化设计参数组合。刘锋等^[18]在确定加热线布局的情况下,研究不同热流密度对模具型腔表面温升速率和温度均匀性的影响,发现型腔表面温度和温度分布均匀性是一种竞争关系。本研究团队^[19]开发了基于氮化硅陶瓷加热片的快速加热模块,其结构简单,且最高温度可达 800 °C,加热速率为 300 °C/min。

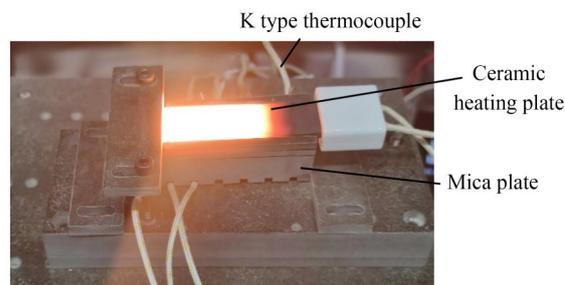
为了在保持高加热速率的同时,进一步提高加热模块的表面温度分布均匀性,本文设计制造高温快速均匀加热模块,并搭建加热测试平台。然后,比较相同工艺条件下的有限元仿真结果和实验结果来验证仿真模型的准确度。在此基础上,利用正交试验法进行多因子多水平分析,实现快速加热模块的整体结构优化,以提升其加热性能。

2 实 验

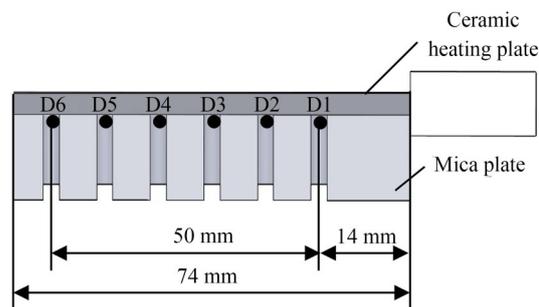
2.1 氮化硅陶瓷加热片加热性能测试

本文开发加热模块的发热元件为氮化硅陶瓷加热片。氮化硅陶瓷加热片是以氮化硅陶瓷为基体,钨丝为发热源,将钨丝埋在氮化硅基体中通过热压烧结工艺形成一体,再经过磨削加工,焊接导线制成。为方便后续对加热模块的设计制造及优化,需对发热元件本身的加热性能进行测试。由图 1(a)可知,陶瓷加热片通电加热时,中间区域呈亮白色,温度较高,故在对应位置均布 6 个测温点 D1~D6。利用图 1(b)所示的实验装置对陶瓷加热片的表面温度进行测量,即热电偶从底部穿过云母片并固定于陶瓷加热片下表面。这种测量装置可以减少周围环境的干扰,从而获得更准确的温度测量结果。

实验过程中,对陶瓷加热片施加额定 220 V 的直流电来测试其最大加热速率和能达到的最高温度。图 2 为施加 220 V 电压时陶瓷加热片上各点温度随时间的变化曲线。中心点 D2 在 150 s 左右温度能达到 1 000 °C,加热速率极快,满足高



(a) 陶瓷加热片通电加热
(a) Si_3N_4 ceramic heater at heating state



(b) 实验测温点
(b) Measuring points of temperature

图 1 陶瓷加热片表面温度测量装置

Fig. 1 Measurement setup for surface temperature of ceramic heater

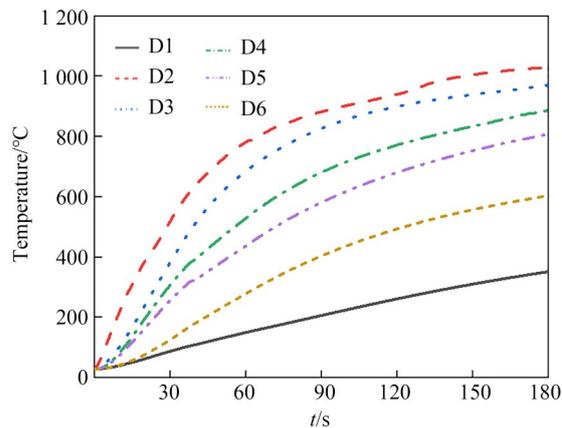


图 2 陶瓷加热片上各点温度随时间的变化曲线

Fig. 2 Temperature histories of various points on surface of ceramic heater

温热压印的快速加热需求。但是,陶瓷加热片表面的温差较大,中间点 D2, D3, D4 的加热速率较快,边缘点 D1, D5, D6 的加热速率较慢,即加热区域主要集中在中间区域。在热压印时,不均匀的温度分布会使成型元件产生残余应力。因此,

需要在陶瓷加热片表面覆盖高导热材料,如纯铜,使传热更均匀。如图 3 所示,本文将纯铜覆盖在陶瓷加热片中间的主要加热区域,从而在不明显降低加热效率的条件下显著提高表面温度的均匀性。

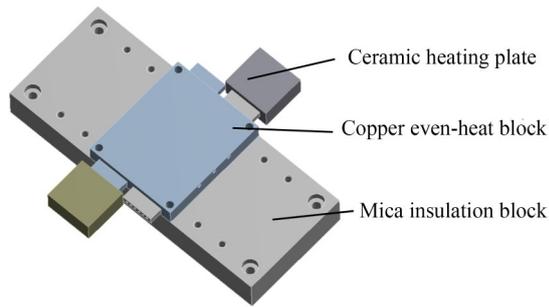
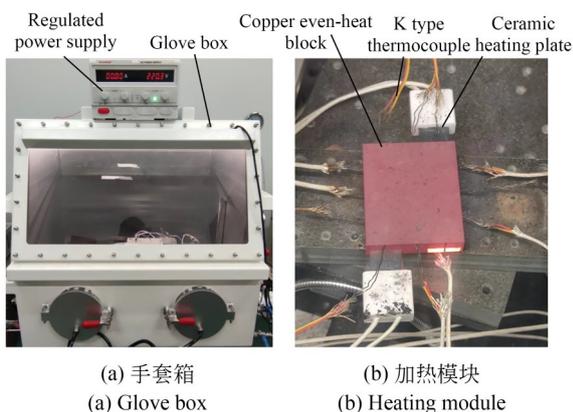


图 3 加热模块的几何模型

Fig. 3 Geometric model of heating module

2.2 实验装置

如图 4 所示,实验装置主要由加热模块和温度测量模块组成。加热模块使用尺寸为 $60\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的纯铜匀热块。匀热块中间开设有对称的 2 个方形槽,用来放置氮化硅陶瓷加热片(见图 5(a))。匀热块下面的隔热块材料为云母。温度测量模块利用一台 HIOKI LR8450 数据采集仪和多根 K 型热电偶来记录加热过程中的温度信号。



(a) 手套箱

(a) Glove box

(b) 加热模块

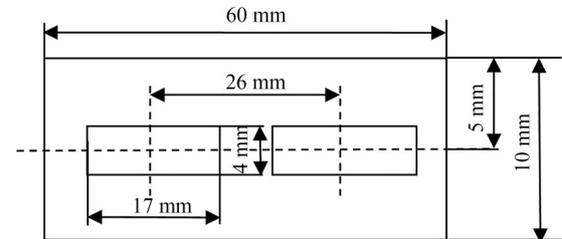
(b) Heating module

图 4 氮化硅陶瓷加热实验装置

Fig. 4 Experimental devices of Si_3N_4 ceramic heater

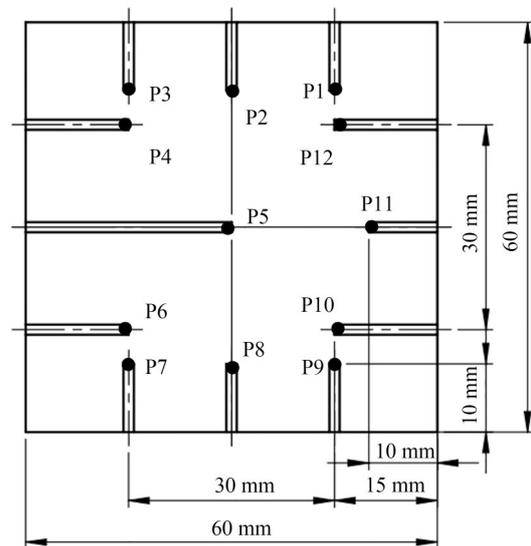
将 K 型热电偶插入匀热块侧边深孔进行温度测量,热电偶与匀热块上表面的距离为 1.5 mm 。热电偶的具体安装位置如图 5 所示,可

测量 P1 至 P12 点的温度。将匀热块作为一个“温度传感器”,能够实时反映匀热块表面温度的均匀性。



(a) 加热元件与匀热块的相对位置

(a) Relative position between heating element and evenheat block



(b) P1 至 P12 测温点分布

(b) Temperature distribution of measuring points from P1 to P12

图 5 均热块结构

Fig. 5 Structure of even-heat block

2.3 加热阶段传热过程分析

当给陶瓷加热片通电时,电流通过陶瓷加热片中的钨丝产生热量 Q ,热量沿径向从陶瓷加热片向周围传递。由于陶瓷加热片只有少部分直接与匀热块内表面接触,且存在着空气层,陶瓷加热片产生的热量一部分通过固体热传导的形式传递给匀热块,一部分通过空气传递给匀热块,另一部分通过热辐射传递给匀热块,还有一部分由空气层沿轴向的对流所损耗^[20]。并且,加热模块还以热对流与热辐射的方式与周围环境进行热交换,具体传热过程如图 6 所示。

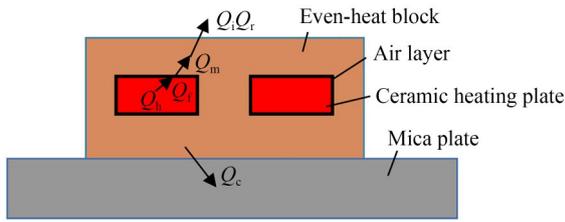


图 6 加热阶段传热过程分析
Fig. 6 Analysis of heat transfer in heating stage

根据热传递过程的能量守恒定律,加热过程中的热传递可表示为^[20]:

$$Q_h = Q_m + Q_i + Q_r + Q_c + Q_f, \quad (1)$$

式中: Q_h 为陶瓷加热片输出的热量; Q_m 为匀热块吸收的热量; Q_i, Q_r 分别为匀热块表面和周围环境通过热对流和热辐射交换的热量; Q_c 为匀热块向云母传递的热量; Q_f 是储存在加热元件内部的热量。

为研究热传导过程各因素对加热速率的影响,取 Δt 来分析。假设匀热块的初始温度为平均温度为 \bar{T}_m^1 ,加热 Δt 后,匀热块的平均温度为 \bar{T}_m^2 。

$$Q_h = \sum_{i=1}^n P_i \Delta t, \quad (2)$$

$$Q_m = c_m \rho_m V_m (\bar{T}_m^2 - \bar{T}_m^1), \quad (3)$$

$$Q_i = h_m A_m \int_0^t (T_m^2 - T_e^2) dt, \quad (4)$$

$$Q_r = \epsilon_m A_m \sigma \int_0^t ((T_m^2)^4 - (T_e^2)^4) dt, \quad (5)$$

式中: P_i 是陶瓷加热片在不同时刻输出的功率; Δt 是陶瓷加热片从室温加热到指定温度的时间; c_m, ρ_m, V_m 分别为匀热块的比热容、密度和体积; h_m, A_m 分别为匀热块外表面与空气的热对流系数和接触面积; T_m^2, T_e^2 分别为加热结束时匀热块外表面温度和周围环境温度; ϵ_m, σ 分别为匀热块的发射率和斯特藩-玻尔兹曼常数。

根据上述分析,联合式(2)~式(5)得:

$$\Delta T = \bar{T}_m^2 - \bar{T}_m^1 = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \Delta t - h_m A_m \int_0^t (T_m^2 - T_e^2) dt - Q_r - Q_c - Q_f}{c_m \rho_m V_m}. \quad (6)$$

由式(6)可知,为提高快速加热模块的加热速率,可通过增大 P ,或减小 $c_m, \rho_m, V_m, Q_i, Q_r,$

Q_c, Q_f 来实现。功率 P 由发热元件本身的规格决定。 c_m, ρ_m 是匀热块的物性参数, V_m 代表匀热块的体积。因此,在相同的输出热量 Q_h 下,选择低比热容的纯铜匀热块,并减小匀热块体积,温度能更高。加热实验在手套箱内进行,以减少 Q_i, Q_r 的影响;利用低热导云母片对匀热块进行隔热处理,可以减小 Q_c ; Q_f 反映的是陶瓷加热片本身储存的热量,减少 Q_f 实际上就是实现陶瓷加热片与匀热块之间热量的迅速转移,即减小匀热块与陶瓷加热片之间的安装间隙并改善表面的接触状态。其中 Q_i, Q_r, Q_c, Q_f 相对于 Q_h 和 Q_m 较小^[20],在加热期间对模具温度变化的影响比较小。在均热块材料、加热元件功率及加热环境一定的情况下, $P_i, c_m, \rho_m, h_m, A_m, T_m^2, T_e^2, \epsilon_m$ 为常量,从式(6)可知在相同加热时间内,调控均热块体积 V_m 能显著影响加热模块的加热效率。

2.4 加热实验设计

为了避免外界环境干扰,所有实验均在手套箱内进行。本研究进行恒电压加热实验:以恒定220 V电压对加热模块加热,各点温度由测温仪记录,采样间隔为1 s,每组实验重复3次,取其平均值作为最终结果。

2.5 实验结果及分析

为验证实验的重复性,比较5次实验中P5测温点加热300 s的温升曲线,如图7所示。5次实验的温升曲线基本一致,实验具有很好的重复性。

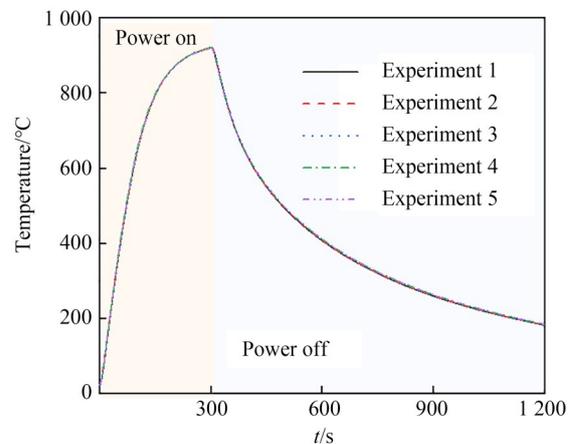


图 7 测温点重复性验证

Fig. 7 Verification of repeatability of temperature measurement

由图 7 可知,加热前 180 s 温升速率很快,故选取加热 180 s 时匀热块的表面温度进行研究。图 8 为恒电压加热 180 s 实验中匀热块测温点的温度曲线。在恒定 220 V 电压下,加热 180 s 时匀热块的表面温度可达 840 °C,但各点温差为

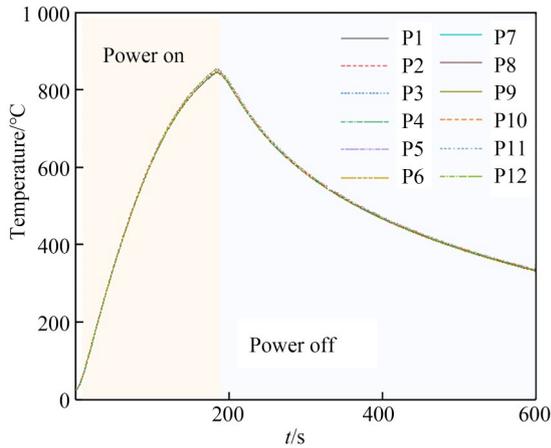


图 8 P1 至 P12 测温点恒电压加热 180 s 的温升曲线
Fig. 8 Temperature histories of measurement points from P1 to P12 in 180-second constant voltage heating test

14.5 °C,温差较大,故需要对匀热块的表面温度进行优化。

3 温度场热响应分析

本文采用 ANSYS Workbench 软件来模拟快速加热模块的瞬态传热过程。将有限元仿真得到的温升曲线与实验中相同位置的温升曲线进行对比,验证仿真模型的准确性。

3.1 有限元分析模型

图 3 为快速加热模块瞬态热分析的几何模型。为了更好地分析加热过程的温度场,对模型进行如下的简化与假设:

(1) 假定陶瓷加热片释放的热量都被匀热块所接收,即不计热损失;

(2) 忽略匀热块与陶瓷加热片之间的安装间隙;

(3) 假设加热模块中的材料为各向同性,且各材料的热物性参数如表 1 所示;

(4) 考虑纯铜匀热块的导热系数、比热容随温度不断变化^[21](见图 9)。

表 1 加热模块各材料的热物性参数^[22-23]

Tab. 1 Thermophysical parameters of each material of heating module

名称	材料	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比热/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)	热传导系数/($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$)
陶瓷加热片发热丝	钨	19 350	134	179
陶瓷加热片基体	氮化硅	3 200	710	20
匀热块	铜	8 920 ^[21]	—	—
隔热板	云母	2 800	206	0.43
绝缘套	氧化锆	57 000	850	2

3.2 有限元网格划分

在有限元分析中,划分网格的结构和疏密程度直接影响到计算结果的精度,因此需要控制网格划分的质量。这里主要研究匀热块的表面温度,故使用六面体网格,并将匀热块表面及陶瓷加热片的网格进行细化(见图 10)。

3.3 初始与边界条件的确定

匀热块初始温度和空气温度均等于实际环境温度,为 25 °C。根据实验测量的加热功率数据,设置陶瓷加热片的输入功率为 900 W。空气

与纯铜匀热块的对流传热系数在 2~25 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$ 之间^[24],本仿真将对流传热系数设为 15 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$ 。在设置热辐射参数时,考虑到铜在高温下易氧化,取其发射率为 0.8。

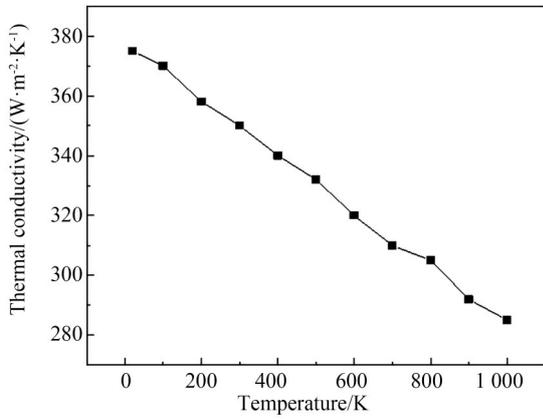
在微观尺度上,铜匀热块与陶瓷加热片的表面接触仅发生在一些离散微凸体上。这种不完全界面接触会导致热流收缩,影响界面传热。界面接触热阻的数量级通常在 1×10^{-4} 到 1×10^{-3} $(\text{m}^2\cdot\text{C})/\text{W}$ ^[25-27]。本次实验中匀热块与陶瓷加热片之间无接触压力,并且还有一定的装配误差,

所以界面传热系数取较小值,为 2 000 W/m²。加热模块各零件之间采用绑定接触,传热方式为热

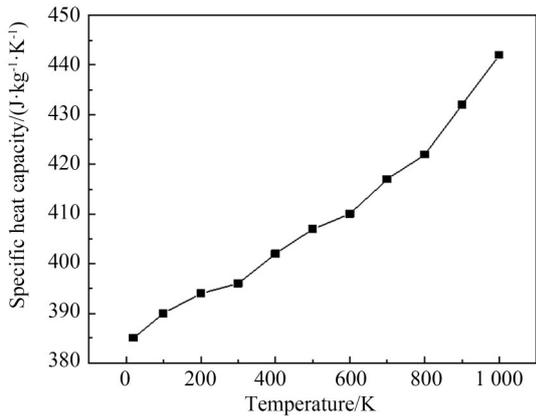
传导。建立传热分析模型,设置总加热时间为 180 s,选择固定增量模式,每一步的加热时间为 10 s。

3.4 仿真结果分析

图 11 为匀热块在恒定 220 V 电压下加热 180 s 后的表面温度分布,可以看出,匀热块中间位置的表面温度高于边缘位置的表面温度。这是因为两个氮化硅陶瓷加热片同时向纯铜匀热块传递热量,故匀热块中间位置热量更大,即温度更高。另一方面,匀热块侧面与空气对流换热,存在热量损失,故边缘位置的表面温度较低。



(a) 导热系数
(a) Thermal conductivity



(b) 比热容
(b) Specific heat capacity

图 9 铜的热物性参数

Fig. 9 Thermophysical properties of copper

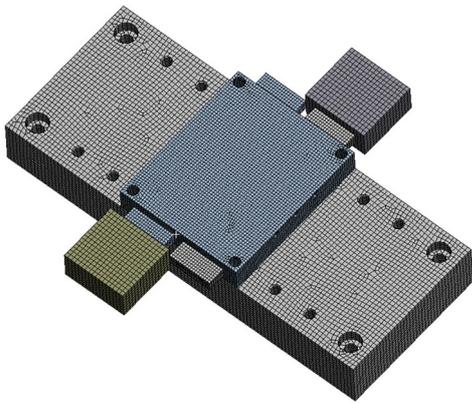


图 10 加热模块的网格划分

Fig. 10 Mesh of heating module

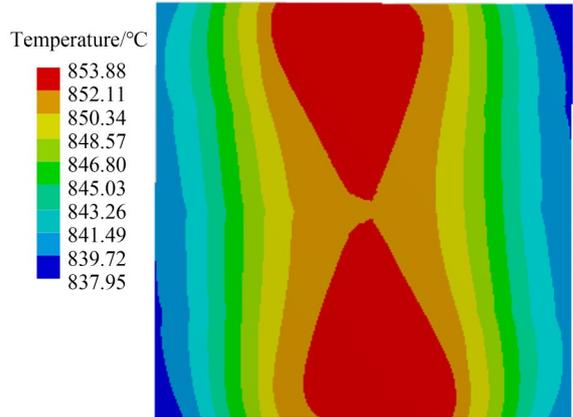


图 11 恒电压加热 180 s 时匀热块上的表面温度分布
Fig. 11 Temperature distribution on upper surface of even-heat block under constant-voltage heating for 180 s

3.5 模型验证

图 12 对比了匀热块在恒电压加热实验与仿真中的温升曲线,发现两者基本吻合。但是,在初始加热阶段,仿真结果与实验数据稍有偏差,有两个原因:(1)匀热块迅速升温,而热电偶响应速度有限,从而使温度测量数值偏低;(2)陶瓷加热片与匀热块界面存在间隙,影响陶瓷加热片与匀热块之间的热量传递,导致实验数据小于仿真结果。随着温度的不断升高,陶瓷加热片的功率降低,匀热块升温速率有所下降,则热电偶的测量温度准确性提高。高温下陶瓷加热片和匀热块产生热膨胀,减小界面间隙,所以中间段测量温度略微大于仿真温度。但是,随着温度的进一

步升高,从匀热块传递到隔热板的热量明显增加,实验测量温度逐渐低于仿真值。

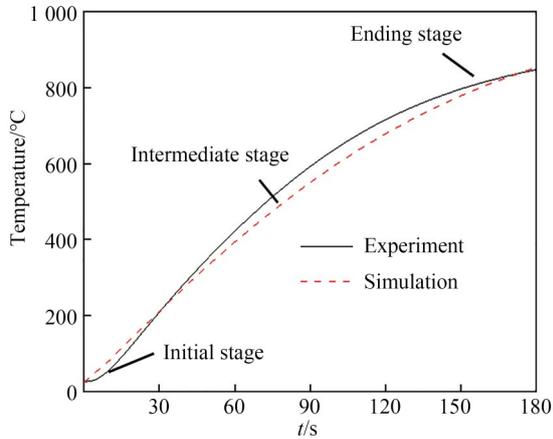


图 12 仿真与恒电压加热实验结果对比

Fig. 12 Comparison of simulation and constant-voltage heating experimental results

将恒电压加热 180 s 后匀热块各测温点的温度数据和有限元仿真结果进行对比,如图 13 所示,发现有限元模拟的最高温度为 853.88 °C,最低温度为 837.95 °C,平均温度为 847.84 °C,而实验最高温度为 847.2 °C,最低温度为 832.7 °C,平均温度为 840.78 °C。对于相同测温点,有限元仿真结果与实验测量结果比较接近,相差仅为 7.06 °C,从而进一步验证了有限元仿真模型的准确性。

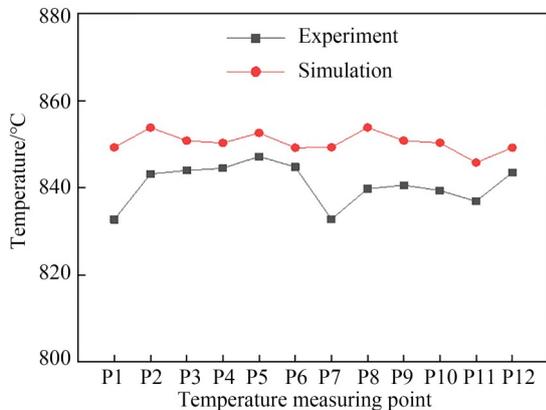


图 13 加热 180 s 时仿真与实验结果对比

Fig. 13 Comparison of simulation and experimental results when heating for 180 s

4 优化设计

由上述实验可知,匀热块表面的整体温差在 14.5 °C,因此需要对匀热块的表面温度分布进行优化。由式(6)及文献调研^[8]可知,可通过微调匀热块的体积以及陶瓷加热片的安装位置这两大主要因素来分析它们对匀热块加热效果的具体影响。

4.1 试验因素与优化目标

图 14 为加热元件位置示意图。将匀热块宽度 W 、两陶瓷加热片间距 X 、匀热块厚度 D 、加热片与匀热块上表面距离 H 作为正交试验的水平因素。每个因素考虑 5 个水平值,利用 $L_{25}(5^4)$ 正交表设计正交试验(见表 2)。

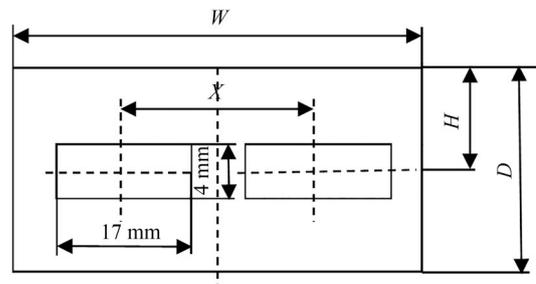


图 14 因素的几何含义

Fig. 14 Geometric meaning of factors

表 2 因素水平表

Tab. 2 Factors and their levels (mm)

水平因素	W	X	D	H
1	50	22	10	5
2	55	24	10.5	6
3	60	26	11	7
4	65	28	11.5	8
5	70	30	12	9

此加热模块主要面向微纳热压印应用,以加热速率和匀热块表面温度的均匀性为优化目标。为保证热压印的成形效率和产品质量,加热速率越快越好,温度分布越均匀越好。采用瞬态传热分析,模拟恒电压加热 180 s 后匀热块的表面温度,计算其加热速率,并利用表面的最高温度与最低温度之差来描述温度均匀性。试验结果如表 3 所示。

表 3 正交试验结果

Tab. 3 Orthogonal test results

实验 编号	W/mm	X/ mm	D/ mm	H/ mm	温度 /°C	温差 /°C	实验 编号	W/ mm	X/ mm	D/ mm	H/ mm	温度 /°C	温差 /°C
1	50	22	10	5	944.39	16.57	14	60	28	10	6	847.57	13.20
2	50	24	10.5	6	924.56	11.49	15	60	30	10.5	7	826.85	9.14
3	50	26	11	7	904.80	7.85	16	65	22	11.5	9	746.37	17.54
4	50	28	11.5	8	885.36	5.37	17	65	24	12	5	729.85	20.72
5	50	30	12	9	865.78	4.12	18	65	26	10	6	805.53	19.15
6	55	22	10.5	7	873.82	16.65	19	65	28	10.5	7	784.69	14.44
7	55	24	11	8	853.57	12.67	20	65	30	11	8	764.19	10.64
8	55	26	11.5	9	835.03	8.85	21	70	22	12	6	690.52	22.66
9	55	28	12	5	818.45	10.89	22	70	24	10	7	765.66	24.78
10	55	30	10	6	893.22	7.95	23	70	26	10.5	8	746.13	19.06
11	60	22	11	8	807.20	17.67	24	70	28	11	9	717.05	17.20
12	60	24	11.5	9	788.77	13.10	25	70	30	11.5	5	708.96	17.76
13	60	26	12	5	771.25	20.32							

4.2 正交试验结果分析

利用极差分析法^[28]对试验结果进行分析,计

算出各因素的均值和极差(见表4),以此判断各因素的主次关系和最优组合。

表 4 试验结果分析

Tab. 4 Analysis of results

因素	温 度						温 差					
	K1	K2	K3	K4	K5	极差R	K1	K2	K3	K4	K5	极差R
W	898.978	854.818	808.328	766.126	725.664	173.314	9.080	11.402	14.686	16.498	20.292	11.212
X	812.460	812.482	812.548	804.624	811.800	7.942	18.218	16.552	15.046	12.220	9.922	8.296
D	851.274	831.210	809.362	786.898	775.170	76.104	16.330	14.156	13.206	12.524	15.742	3.806
H	812.386	810.490	813.000	806.366	811.672	6.634	14.052	14.900	15.236	13.798	13.972	1.438

4.3 加热速率的影响因素分析

在恒定的加热时间内,匀热块表面所达到的平均温度可以反映其加热速率。由表3可知,匀热块表面平均温度最高的是1号试验的因素组合:W1X1D1H1,即匀热块宽50 mm、陶瓷加热片间距22 mm、均热块厚度10 mm、陶瓷加热片与匀热块上表面的距离为5 mm。施加恒定220 V电压加热180 s后,匀热块表面温度可以达到944.39 °C,加热速率达306 °C/min。

图15表明,两陶瓷加热片间距X、加热片与匀热块上表面距离H对加热速率基本没有影响。但是,增加匀热块宽度W和厚度D会显著降低加热速率。这是由于匀热块体积增大,在相同的输入功率下单位体积得到的热量减少;而且匀热块

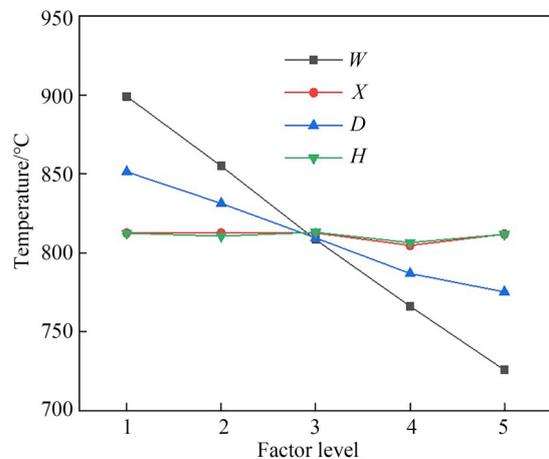


图 15 各因素对加热速率的影响

Fig. 15 Influence of various factors on heating rate

对流面和辐射面的增大导致热量损失增加。因此,加热速率随着匀热块宽度 W 和厚度 D 的增大而变小。

通过表 4 中的极差 R 可知,影响加热速率因素的主次关系为匀热块宽度 W 、厚度 D 、两陶瓷加热片间距 X 、加热片与匀热块上表面距离 H 。而且,匀热块平均温度最高的最优组合是 $W1X3D1H3$,即取 $W=50\text{ mm}$, $X=26\text{ mm}$, $D=10\text{ mm}$, $H=7\text{ mm}$ 。

4.4 温度均匀性的影响因素分析

匀热块表面温度均匀性最好的是 5 号试验的因素组合: $W1X5D5H5$,即匀热块宽 50 mm、陶瓷加热片间距 30 mm、均热块厚 12 mm、陶瓷加热片与匀热块上表面的距离为 9 mm。图 16 表明,匀热块宽度 W 减小,两陶瓷加热片间距 X 增加,或均热块厚度和加热片与匀热块上表面距离 H 取中间值,可提高匀热块表面温度的均匀性。

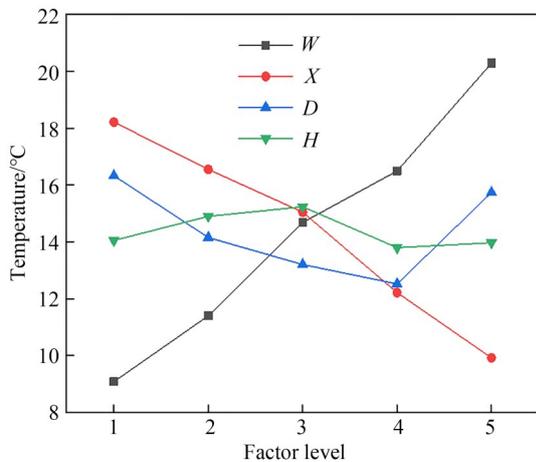


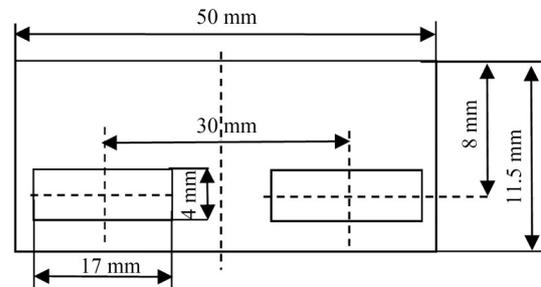
图 16 各因素对温度均匀性的影响

Fig. 16 Influence of various factors on temperature uniformity

由表 4 可知,影响温度均匀性主要因素的主次关系为匀热块宽度 W 、两陶瓷加热片间距 X 、均热块厚度 D 、加热片与匀热块上表面距离 H 。匀热块表面温度均匀性的最优组合是 $W1X5D4H4$,即取 $W=50\text{ mm}$ 、 $X=30\text{ mm}$ 、 $D=11.5\text{ mm}$ 、 $H=8\text{ mm}$ 。上述所有试验的加热速率足够快,满足玻璃快速热压印的要求,因此均热块优化结构取温度均匀性最好的参数组合。

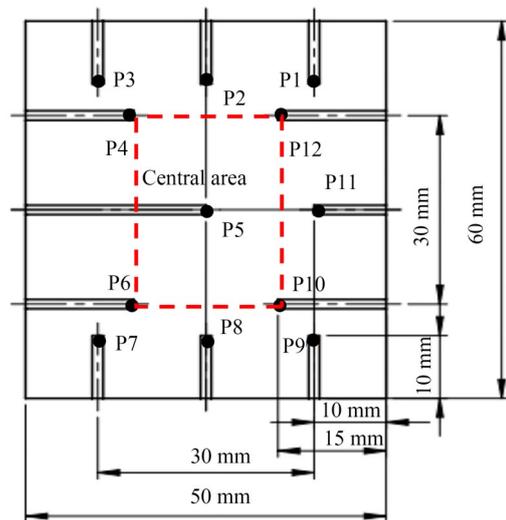
4.5 实验验证

图 17(a)为有限元模拟仿真结合正交试验进行优化设计得到的匀热块结构。各测温点位置如图 17(b)所示。对结构优化后的匀热块进行恒电压加热测试,P1至 P12 测温点的温度曲线如图 18 所示。由图可知,在恒定 220 V 电压下,将匀热块从 25 °C 加热到 600 °C 需 95 s 左右,中低温段升温速率可达 363 °C/min;从 600 °C 加热到 850 °C 需 85 s 左右,高温段的升温速率为 176 °C/min;在断电情况下,加热模块从 850 °C 冷却到 500 °C 仅需 190 s 左右,具有较快的冷却速率。



(a) 加热元件与匀热块的相对位置

(a) Relative position of heating element and homogenizing block



(b) P1至P12测温点分布

(b) Distribution of measuring points from P1 to P12

图 17 均热块优化结构

Fig. 17 Optimized structure of even-heat block

在相同的实验条件下,对结构优化前后的匀热块恒电压加热 180 s,比较其表面各测温点温度(见图 19)。实验结果表明:优化后的匀热块各测

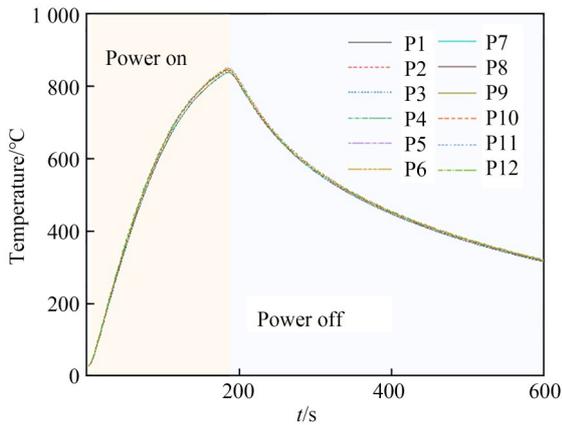


图 18 P1 至 P12 测温点恒电压加热 180 s 的温升曲线
 Fig. 18 Temperature histories of measurement points from P1 to P12 in 180-second constant voltage heating test

温点的平均温度为 844.45 °C,最高温度为 850.5 °C,最低温度为 839.8 °C,温差为 10.7 °C。优化后的匀热块温差由 14.5 °C 降低至 10.7 °C,表现出更好的表面温度均匀性,从而验证了有限元仿真结合正交试验进行优化设计的合理性。

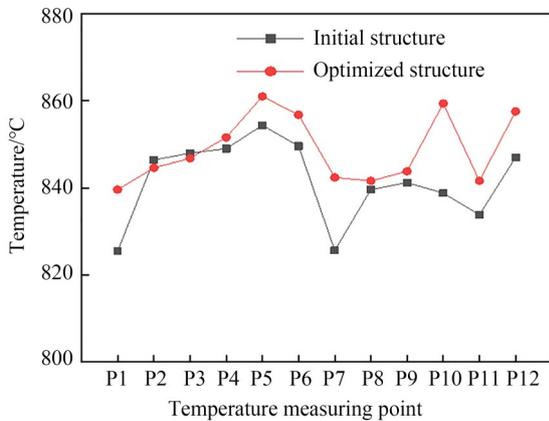


图 19 优化前后温度均匀性对比
 Fig. 19 Comparison of temperature uniformity before and after optimization

5 快速加热模块的热压印应用

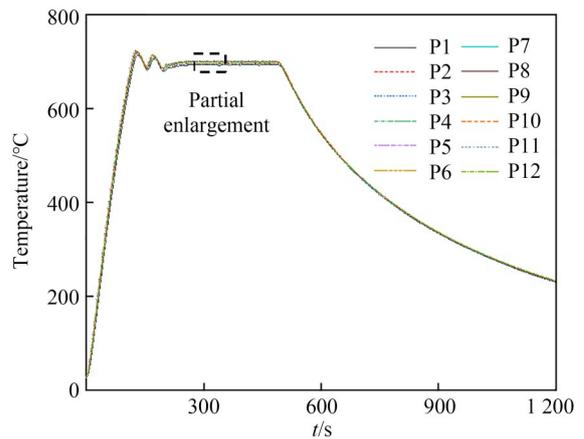
5.1 温度的精准控制

在热压印过程中,温度准确性对保证玻璃元件的形状精度极其重要。因此,需要对加热模块的温度进行精准控制。温控系统采用智能 PID 控制,通过驱动温控仪中固态继电器的通断,控

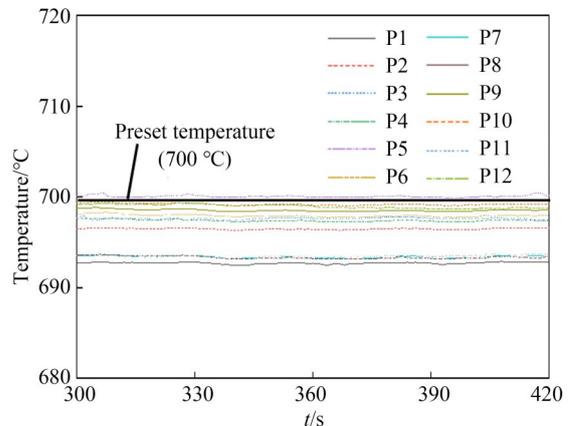
制可调直流稳压电源,调整发热元件的输入功率,从而实现温度控制。

使用具有高精度自整定功能的宇电 AI-526P 型智能温控仪,将均热块中心点 P5 作为控温点,以最大速率加热到 700 °C,然后恒温一段时间。利用上位机软件导出 P5 点的温度历史数据,同时利用测温仪记录其余各点的温度历史数据。

图 20 为控温加热实验中各测温点的温度曲线。由图可知,实验温度曲线与设定温度曲线基本一致,且温度波动在 0.3 °C 以内。对恒温阶段的实验温度曲线进行局部放大(见图 20(b)),发现匀热块温差在 7 °C 以内。特别地,用于热压印的 20 mm × 30 mm 中心区域的温差在 2 °C 左右。



(a) 温升曲线
 (a) Temperature histories of various points



(b) 局部放大
 (b) Partial enlargement of temperature history curves

图 20 控温加热 700 °C

Fig. 20 Heating to 700 °C under control

控温加热实验结果表明:加热模块的实测温度与温控系统的设定温度基本一致,温控精度能满足低熔点玻璃^[29](转化点小于 600 °C)和部分高熔点玻璃的成形需求。此外,在保证控温精度的同时,加热速率快且表面温度分布均匀性好,能很好地满足玻璃快速热压印的成形需求。

5.2 热压印装置

将优化设计与制造的快速加热模块安装在图 21 所示的热压印装置中,可用于玻璃微纳光学元件的高效制造。该装置由精密加载模块、快速加热模块和多轴运动平台组成。其中,精密加载模块实现压印力的精确调整;加热模块实现快速均匀加热;多轴运动平台实现玻璃坯料的精确定位。在快速加热模块与多轴运动平台间放置云母板,大幅度减少热量向运动平台传递,以保证设备正常运行。

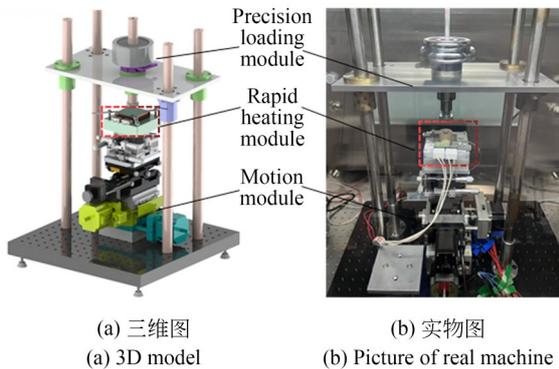


图 21 热压印装置

Fig. 21 Hot embossing machine

5.3 热压印结果

为防止零部件的高温氧化,将热压印装置放置在密封的手套箱内,并提供氩气氛围。通过优化热压印的工艺参数,将碳化硅模具表面的微结构高效精确地复制到 N-BK7 玻璃表面。图 22(a)~22(c)比较了碳化硅微沟槽阵列模具和玻璃光栅元件的表面形貌。模具微沟槽的深度为 $4.745 \mu\text{m} \pm 3.3 \text{ nm}$,玻璃表面微沟槽的高度为 $4.744 \mu\text{m} \pm 1.3 \text{ nm}$,特征复制率达 99.9%。图 22(d)~22(f)展示了碳化硅微孔阵列模具和玻璃微柱阵列的表面形貌。模具微孔的深度为 $4.686 \mu\text{m} \pm 1.8 \text{ nm}$,玻璃表面微柱的高度为 $4.675 \mu\text{m} \pm 9.1 \text{ nm}$,特征复制率达 99.8%。

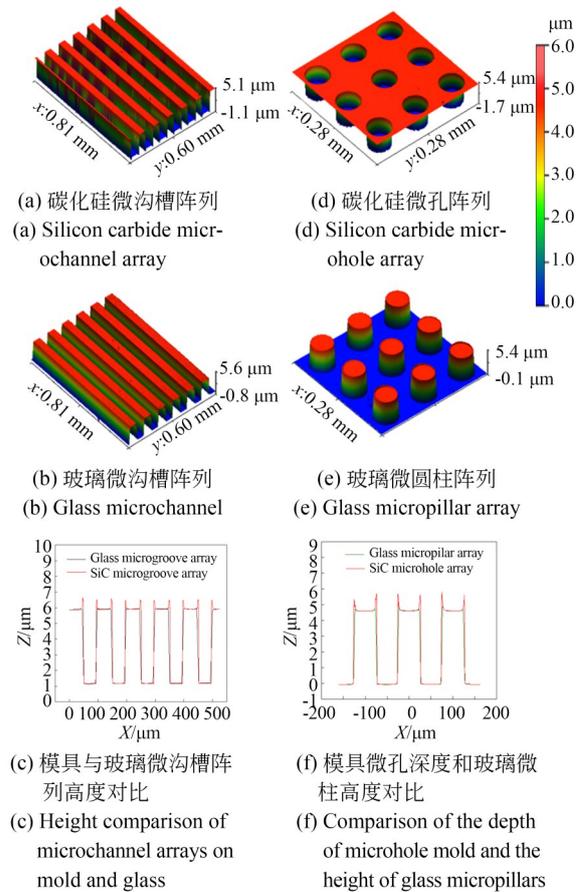


图 22 碳化硅和玻璃的微沟槽和微孔阵列表面形貌

Fig. 22 Surface topography of silicon carbide mold and glass microstructure arrays

6 结论

本文设计制造了一种基于氮化硅陶瓷加热片的加热模块,并搭建了加热测试平台。建立加热模块有限元模型,进行实验验证后,利用正交试验方法优化加热模块中发热元件的位置分布参数,如匀热块宽度、两陶瓷加热片间距、匀热块厚度、加热片与匀热块上表面距离。开展恒电压加热实验,利用嵌入匀热块表面的 12 根热电偶实时监测其表面温度。在恒定 220 V 电压下加热 180 s 时,匀热块表面温度可达 840 °C,温差为 14.5 °C。将有限元仿真与实验结果进行对比,发现两者比较接近,从而验证了有限元模型的准确性。以匀热块尺寸和发热元件位置分布为优化变量,加热模块的加热速率和表面温度分布均匀性为优化目标,结合有限元仿真和正交试验方法,对加热模块结构进行优化。对结构优化后的

匀热块进行 220 V 恒电压加热测试。实验表明,从 25 °C 加热到 600 °C 需 95 s 左右,中低温段升温速率可达 363 °C/min;从 600 °C 加热到 850 °C 需 85 s 左右,高温段升温速率为 176 °C/min。而且,加热 180 s 时,优化后的匀热块温差由 14.5 °C 降低至 10.7 °C,表现出更好的表面温度均匀性,从而验证了有限元仿真结合正交试验进行优化设计的有效性。设计了精密温控系统,控温加热

700 °C 时,实测温度与设定温度基本一致,且温度波动在 0.3 °C 以内。尤其,匀热块中心 20 mm × 30 mm 区域温差在 2 °C 左右,能很好满足玻璃热压印的成形需求。利用自主设计制造的快速加热模块和精密温控系统搭建高温热压印装置,成功地在高软化点玻璃(如 N-BK7 玻璃)表面成形出高质量微光栅与微圆柱阵列,验证了快速加热模块在玻璃微纳结构元件热压印成形的应用。

参考文献:

- [1] 舒成松,董浩,尹韶辉,等. 高精度微结构玻璃光学元件阵列模压技术研究进展[J]. 光学精密工程, 2020, 28(9): 1967-1985.
SHU CH S, DONG H, YIN S H, *et al.* Research progress of high precision micro structure glass optical element array molding technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(9): 1967-1985. (in Chinese)
- [2] DESHMUKH S S, GOSWAMI A. Current innovations in roller embossing-a comprehensive review [J]. *Microsystem Technologies*, 2022, 28 (5) : 1077-1114.
- [3] 高晓蕾,陈艺勤,郑梦洁,等. 大面积纳米压印技术及其器件应用[J]. 光学精密工程, 2022, 30 (5): 555-573.
GAO X L, CHEN Y Q, ZHENG M J, *et al.* Large-area nanoimprint lithography: processes and device applications [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(5): 555-573. (in Chinese)
- [4] 龚峰,李康森,闫超. 玻璃精密模压成形的研究进展[J]. 光学精密工程, 2018, 26(6):1380-1391.
GONG F, LI K S, YAN CH. Progress on precision glass molding [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(6):1380-1391. (in Chinese)
- [5] YAN J W, ZHOU T F. Modeling high-temperature glass molding process by coupling heat transfer and viscous deformation analysis [J]. *Precision Engineering*, 2009, 33(2): 150-159.
- [6] LIU D L, XIN Y, CAO W H, *et al.* Effects of process parameters on warpage of rapid heat cycle moulding plastic part [J]. *Journal of Central South University*, 2014, 21(8): 3024-3036.
- [7] CREMA L, SORGATO M, LUCCHETTA G. Thermal optimization of deterministic porous mold inserts for rapid heat cycle molding [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 109: 462-469.
- [8] LI X P, ZHAO G Q, GUAN Y J, *et al.* Optimal design of heating channels for rapid heating cycle injection mold based on response surface and genetic algorithm [J]. *Materials & Design*, 2009, 30(10): 4317-4323.
- [9] DESHMUKH S S, GOSWAMI A. Recent developments in hot embossing-a review [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2021, 36 (5) : 501-543.
- [10] CHENG C, KE K C, YANG S Y. Application of graphene-polymer composite heaters in gas-assisted micro hot embossing [J]. *RSC Advances*, 2017, 7 (11): 6336-6344.
- [11] NIAN S C, TSAI T H, HUANG M S. Novel inductive hot embossing for increasing micromolding efficiency [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2016, 70: 38-46.
- [12] KURITA T, OGURA I, ASHIDA K. Proposal of laser assisted hot embossing technology for glass [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 254: 248-253.
- [13] 王小权. 光学玻璃精密模压设备总体设计及加热系统研制[D]. 深圳: 深圳大学, 2017.
WANG X Q. *Overall Design of Optical Glass Precision Molding Equipment and Development of Heating System* [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2017. (in Chinese)
- [14] 陈冲. 高熔点玻璃模压机结构及控制系统设计研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
CHEN CH. *Research on the Structure and Control System Design of High Melting Point Glass Molding Machine* [D]. Changsha: Hunan University, 2017. (in Chinese)

- [15] CHEN P L, HONG R H, YANG S Y. Hot-rolled embossing of microlens arrays with antireflective nanostructures on optical glass[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2015, 25(9): 095001.
- [16] 史春彦, 刘强. 一种有石墨夹层的传热辊筒及其传热方法: 中国, 201510044677[P]. 2015-06-10. SHI CH Y, LIU Q. A heat transfer roller with graphite interlayer and its heat transfer method: *China*, 201510044677 [P]. 2015-06-10. (in Chinese)
- [17] LI J Q, LI T D, PENG X, *et al.* Optimal design of heating system for electrical rapid heat cycle mold based on multi-objective optimization, multiple-attribute decision-making, and conformal design theory[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, 10(8): 168781401878950.
- [18] 刘锋, 李吉泉, 彭翔, 等. 限定加热管布局的快速热循环注塑成形模具电加热系统优化[J]. *中国机械工程*, 2020, 31(22): 2699-2707. LIU F, LI J Q, PENG X, *et al.* Optimization of electric heating system for rapid thermal cycle injection molding mold with limited heating pipe layout [J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(22): 2699-2707. (in Chinese)
- [19] LI J Z, GONG F, WANG X, *et al.* Study on filling capacity of optical glass in a novel rapid hot embossing process [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(7): 3404.
- [20] 陶文铨. 传热学[M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2019. TAO W Q. *Heat Transfer*[M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2019. (in Chinese)
- [21] 杜广. 激光烧结制备电子封装用钨铜复合材料[D]. 南昌: 华东交通大学, 2013. DU G. *Preparation of Tungsten-copper Composites for Electronic Packaging by Laser Sintering* [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [22] 宋盼盼, 赵玉刚, 蒲业壮, 等. 激光辅助切削氮化硅陶瓷的温度场仿真及参数研究[J]. *应用激光*, 2019, 39(4): 634-640. SONG P P, ZHAO Y G, PU Y ZH, *et al.* Temperature field simulation and parameter study of laser-assisted cutting of silicon nitride ceramics [J]. *Applied Laser*, 2019, 39(4): 634-640. (in Chinese)
- [23] 田晓根, 张亚莉, 李少英, 等. 传热过程中固体形状对温度分布的影响分析[J]. *稀有金属*, 2017, 41(4): 377-383. TIAN X G, ZHANG Y L, LI SH Y, *et al.* Temperature distribution with different solid shapes in heat transfer process [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2017, 41(4): 377-383. (in Chinese)
- [24] 李泰栋, 沈子宜, 贾亚东, 等. 电热变模温注塑模具加热系统优化研究[J]. *塑料工业*, 2019, 47(1): 51-55, 78. LI T D, SHEN Z Y, JIA Y D, *et al.* Study on the optimization of heating system of electrothermal variable mold temperature injection mold [J]. *China Plastics Industry*, 2019, 47(1): 51-55, 78. (in Chinese)
- [25] 毕冬梅, 陈焕新, 王丽萍, 等. 低温下接触界面热阻的实验与模拟研究[J]. *低温工程*, 2011(5): 46-49, 55. BID M, CHEN H X, WANG L P, *et al.* Simulation study on thermal boundary resistance between different metals at low temperature [J]. *Cryogenics*, 2011(5): 46-49, 55. (in Chinese)
- [26] 李志伟, 徐烈, 孙恒, 等. 低温真空下固体界面间接接触热导实验分析[J]. *低温与超导*, 2004, 32(1): 55-58. LI ZH W, XU L, SUN H, *et al.* Experimental research on thermal contact resistance under vacuum and low temperature [J]. *Cryogenics and Superconductivity*, 2004, 32(1): 55-58. (in Chinese)
- [27] 徐烈, 杨军, 徐佳梅, 等. 低温下固体表面接触热阻的研究[J]. *低温与超导*, 1996, 24(1): 53-58. XU L, YANG J, XU J M, *et al.* The research of contact thermal resistance of solid surface at low temperature [J]. *Cryogenics and Super Conductivity*, 1996, 24(1): 53-58. (in Chinese)
- [28] 钱小辉, 马晓妍, 秦中华, 等. 基于正交试验的玻璃壳热应力影响因素分析[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(12): 91-98. QIAN X H, MA X Y, QIN Z H, *et al.* Analysis of glass shell's thermal stress based on orthogonal experiment [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(12): 91-98. (in Chinese)

- [29] 舒阳,周志雄,黄向明,等. 精密热压成型机关键技术研究与实现[J]. 机械工程学报, 2018, 54(17): 200-207.
SHU Y, ZHOU ZH X, HUANG X M, *et al.* Re-

search and implementation on critical technology of precision compression molding tool[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(17): 200-207. (in Chinese)

作者简介:



王 鑫(1998—),男,湖南益阳人,硕士研究生,2020年于南华大学获得学士学位,主要研究方向为玻璃热压印装备加热系统的研发。E-mail: 2070292069@email.szu.edu.cn

通讯作者:



杨 高(1994—),男,湖北黄冈人,助理教授,2016年于深圳大学获得学士学位,2020年于香港理工大学获得博士学位,主要研究方向为先进光学制造技术和智能装备。E-mail: gao.yang@szu.edu.cn