

制作微通道板的玻璃纤维拉丝炉温度场研究

丛晓庆, 孙建宁, 张珈玮, 刘文伟, 张正君, 徐伟, 钱琳, 李婧雯, 孙赛林, 阮凯, 林正
(北方夜视技术股份有限公司南京分公司, 江苏 南京 211106)

摘要: 制作微通道板的玻璃纤维需要经过拉丝炉拉制而成, 拉丝炉的温度场分布直接影响丝径的均匀性, 而目前缺乏制作微通道板的玻璃纤维拉丝炉的理论研究, 依靠经验所设计的拉丝炉性能差异较大, 为此本文根据拉丝炉的实际结构, 构建对应的三维模型, 利用热传递理论对模型进行分析, 重点研究炉芯中心位置、加热温度均匀性和保温层均匀性对拉丝炉内部温度场的影响, 根据理论分析结果对微通道板拉丝炉的改进给出了3个方面的建议。

关键词: 微通道板; 拉丝炉; 模型; 温度场

中图分类号: TQ171.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2021)05-0490-06

Temperature Field of Glass Fiber-Drawing Furnaces for Microchannel Plate Fabrication

CONG Xiaoqing, SUN Jianning, ZHANG Jiawei, LIU Wenwei, ZHANG Zhengjun,
XU Wei, QIAN Lin, LI Jingwen, SUN Sailin, RUAN Kai, LIN Zheng
(Nanjing Branch, North Night Vision Technology Co. Ltd, Nanjing 211106, China)

Abstract: The glass fiber used in microchannel plate fabrication must be drawn in drawing furnaces. The temperature field distribution of the drawing furnace directly affects the uniformity of the wire diameter. Owing to the lack of theoretical research on glass fiber-drawing furnaces for microchannel plate fabrication, the designed drawing furnace and performance differences are based on experience. Based on the actual structure of a drawing furnace, this study aims to develop its corresponding 3D model on the basis of the theory of heat transfer analysis and to investigate the effects of the center of the furnace core, the uniformity of the heat insulation layer, and the drawing furnace temperature uniformity on the internal temperature field. Based on the theoretical analysis results, three suggestions are given to improve the drawing furnace for making micro channel plate.

Key words: micro channel plate, drawing furnace, model, temperature field

0 引言

微通道板 (Micro Channel Plate, MCP) 是一种多孔网状结构的薄片玻璃, 通道内壁具有二次电子发射特性, 可将电子进行成千万倍的倍增, 是实现微光夜视的关键元件^[1]。在一定电压下, 对微通道板输入空间分布均匀的电子流, 经过倍增后输出的电子流均匀性的差异, 也就是电子增益的差异, 这种差异叫做固定图案噪声^[2]。固定图案噪声是一直困扰我国微通道板技术进步的屏障, 解决固定图案噪声问题是开发高性能微通道板必须突破的关键。固定图案噪声主要取决于通道内壁表面状况和通道均匀程度。制作 MCP 需要制作大量的高精度玻璃纤维, 而高精度玻璃纤维制

造要经历玻璃预制棒制备和拉丝等具体工艺步骤^[3], 在纤维拉制的过程中, 拉丝炉内的温度场分布情况将直接影响着纤维的直径和纤维端面的形状, 预制棒受热不均, 会导致复丝边缘纤维的受热程度不同, 影响通道均匀程度, 对微通道板固定图案噪声有着直接的影响, 因此研究微通道板拉丝炉的温度场分布状况对解决固定图案噪声问题有着重要的意义。

目前国内对于拉丝炉的研究成果大都集中在对光纤拉丝炉内部热量传递和气流的研究方面^[4-8]。文献[4]建立了光纤拉丝炉内部气体温度场模型, 根据模型特点划分了网格, 利用数值模拟的方法探究了光纤拉丝炉内部气体温度场的变化, 并分析了有关参数对炉内温度场的影响。文献[5]介绍了光纤感应拉丝炉的涡

流场分析方法,并建立了涡流场的数学模型,在二维分析的基础上,建立了感应线圈和导体(石墨中心管)的三维模型,模拟了导体(石墨中心管)中的涡流场。文献[6]对光纤拉丝炉内部气体流场及拉丝炉相关部件的温度分布进行了理论建模和数值模拟,根据二维和三维拉丝炉几何模型,对光纤拉丝炉的内部气体流场数值计算与分析。

上述研究成果主要对光纤拉丝炉进行建模,对内部热量传递和气流特性进行分析与研究,但是微通道拉丝炉与光纤拉丝炉结构具有本质的区别,例如,微通道板拉丝炉与光纤拉丝炉相比较内部不需要惰性气体,所以光纤拉丝炉有关研究成果无法应用于微通道板拉丝炉设计中,因此,目前微通道板拉丝炉的设计主要依靠经验进行,这样设计而成的微通道板拉丝炉性能无法保证,为此本文以微通道板的实际结构为基础,建立拉丝炉的数学模型,利用热传递理论对拉丝炉的内部温度场进行分析,分析得到影响拉丝炉温度场分布的主要因素,并根据得到的理论分析结果,对微通道板拉丝炉的改进,给出了3个方面的建议。

1 拉丝炉模型

根据现有的微通道板拉丝炉结构,建立对应的结构模型,并在该结构的基础上建立对应的热传递模型,重点研究影响拉丝炉温度场分布的主要因素,包括:拉丝炉炉芯中心位置、加热温度均匀度、保温层均匀度等。

1.1 拉丝炉结构模型

拉丝炉的实际结构如图1所示,根据实际结构形式,其对应的三维模型与二维截面图如图2和3所示,从图中可以看出拉丝炉由主炉和副炉构成,采用主炉加热的方式,其中主炉采用的炉芯为加热丝绕于碳化硅内胆中,在炉壳和炉芯间塞有保温层,副炉与主炉结构相似,但是没有缠绕加热丝。

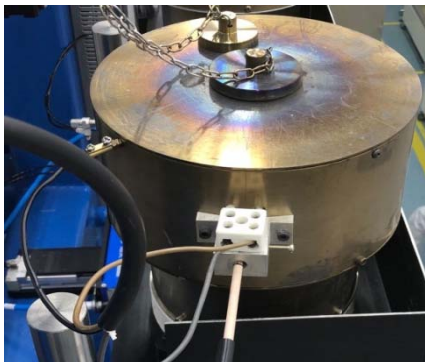


图1 拉丝炉实物图

Fig.1 Photo of drawing furnace

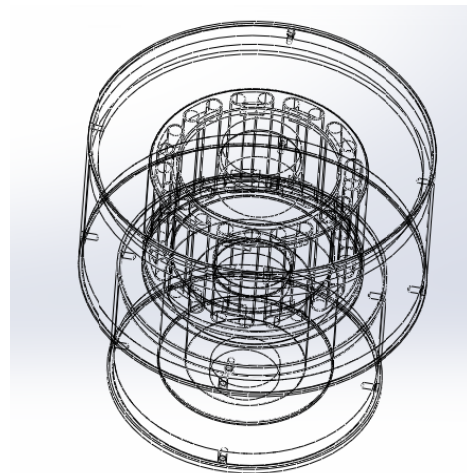


图2 拉丝炉三维几何模型

Fig.2 Three-dimensional geometrical modeling of drawing furnace

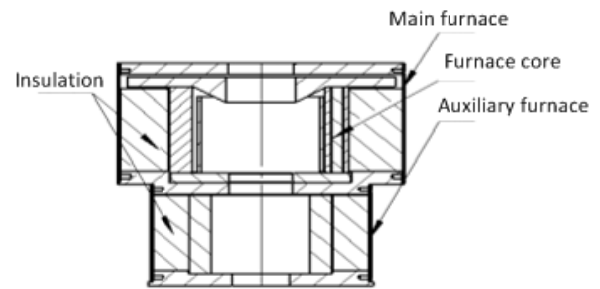


图3 拉丝炉二维截面示意图

Fig.3 Two-dimensional section diagram of drawing furnace

1.2 热传递模型

根据微通道板拉丝炉结构模型与热传递理论,考虑拉丝炉的热传递的3种形式,即:热传导、热对流和热辐射。

1) 热传导

热传导是指热量从系统的一部分传到另一部分或由一个系统传到另一系统的现象,在拉丝炉的内部存在较多的热传导形式,例如加热丝和碳化硅之间热传递、碳化硅与保温层材料之间的热传递等,热量从存在温度梯度的高温部分传递给低温部分。

在分析拉丝炉内部热传导形式时,所采用的热传导关系式如式(1)所示:

$$\frac{Q}{t} = \frac{KA(T_{hot} - T_{cold})}{d} \tag{1}$$

式中: Q 为时间 t 内的传热量或者热流量; A 为换热面积; K 为热传导率或者热传导系数; T_{hot} 和 T_{cold} 为拉丝炉内热传导高、低温度数值,且满足 $T_{hot} > T_{cold}$; d 为热传导的距离。

2) 热对流

在拉丝炉主炉和副炉的空腔表面以及加热炉外

表面等固体表面与它周围所接触的空气之间,由于存在着温度差而引起热量交换,该过程为热对流形式,在该过程中,所交互的热量 q'' 如式(2)所示:

$$q'' = h(T_s - T_B) \quad (2)$$

式中: h 为对流换热系数; T_s 为加热丝所绕的碳化硅表面和拉丝炉外表面等固体表面的温度; T_B 为各固体表面周围对应的空气温度。

3) 热辐射

拉丝炉内加热丝以及所绕的碳化硅等高温物体通过热辐射的形式向炉腔内其他的物体传递热量,所传递的热量被炉腔内的低温物体所吸收,完成能量交互与传递,它们之间净热量传递量可以利用如式(3)所示的斯蒂芬-玻尔兹曼方程来计算:

$$q = \varepsilon \sigma A_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4) \quad (3)$$

式中: q 为热流率; ε 为实际物体的辐射率,它的数值介于0~1之间; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数,约为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; A_1 为辐射面1的面积; F_{12} 为由辐射面1到辐射面2的形状系数; T_1 为辐射面1的绝对温度; T_2 为辐射面2的绝对温度。

2 仿真与结果分析

2.1 温度场影响因素

为了简化模型性能研究,主要研究炉芯中心位置、加热温度均匀度和保温材料均匀度对温度场分布的影响。

通过调节炉芯中心位置,研究在其他条件不变的前提下,炉芯中心偏移量对拉丝炉内部温度场分布的影响程度。

将加热丝简化为独立的加热源进行研究,通过设置加热源温度的大小,研究加热温度均匀度对拉丝炉内部温度场分布的影响程度。

为了研究保温材料均匀度对拉丝炉内部温度场分布的影响程度,根据微调图2所示拉丝炉的三维几何模型,将保温层整体均匀分割为8个部分如图4所示,不同的部分设置相同或者不同的材料系数,则可以研究保温层的均匀程度对拉丝炉内部温度场分布的影响程度。

2.2 模型参数

在对拉丝炉内部温度场分布研究时,拉丝炉模型各构成部件对应的材料参数如表1所示。

表1中未列出的其他参数如下:

- 1) 拉丝炉外部空气温度假设为 22°C ;
- 2) 加热丝的基准温度为 755°C ,若研究加热丝温度不均匀情形,加热丝的基准温度设置为 745°C ,对应的温度变化范围为 $735^\circ\text{C} \sim 755^\circ\text{C}$;

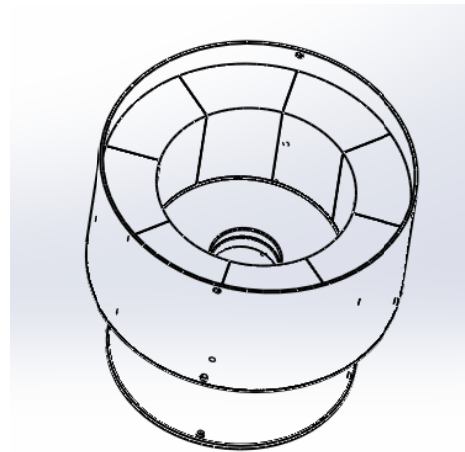


图4 保温层等分模型图

Fig.4 Insulation layer isometric model

表1 拉丝炉构成部件材料参数

Table 1 Material parameters of wire drawing furnace components

Order	Name	Heat conductivity coefficient
1	Aluminabrick	0.4 W/(m ² ·K)
2	Quartz	1.1 W/(m ² ·K)
3	SiC	86.3 W/(m ² ·K)
4	Ly12	100 W/(m ² ·K)
5	Aluminafiber	0.07 W/(m ² ·K)
6	Air	12.5 W/(m ² ·°C)

3) 保温层的材料为氧化铝纤维,材料对应基准导热系数如表1中所示为 $0.07 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,若研究保温材料不均匀情形,对应的导热系数变化范围为 $0.06 \sim 0.07 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

2.3 结果分析

根据微通道拉丝炉的模型与参数设置,利用ANSYS软件重点研究炉芯中心位置、加热温度均匀度和保温材料均匀度对温度场分布的影响,其中包括理想模型情形和非理想情形,即其他因素保持不变的条件下,各主要因素对拉丝炉内部温度场分布的影响。

2.3.1 理想情形

在该情形中,炉芯中心位置无偏移、加热丝加热温度保持一致,且保温层材质均匀一致,主炉腔体空气层温度场与副炉腔体空气层温度场分布分析具体如下:

1) 主炉腔体空气层温度场

主腔空气层、碳化硅层、加热丝、保温层和主腔外壳对应的温度分布如图5所示。

主腔空气层对应的温度场分布和等温线分布如图6所示。

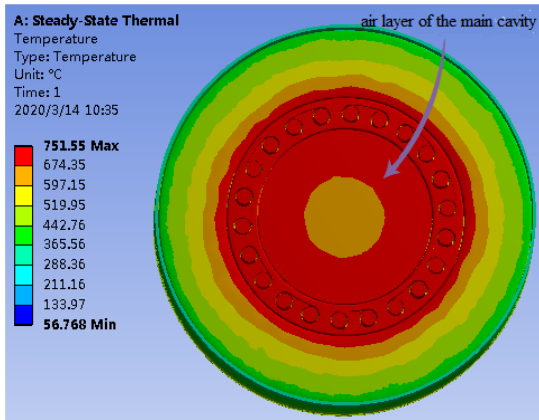
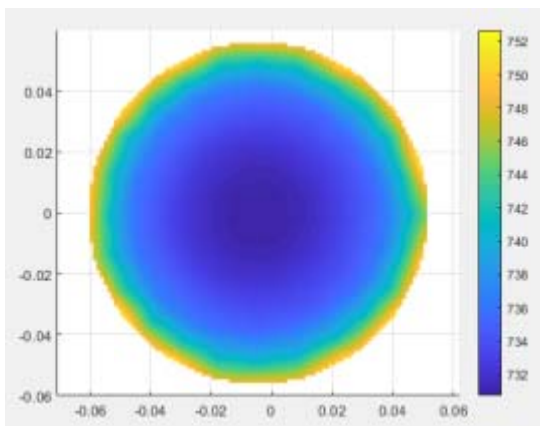


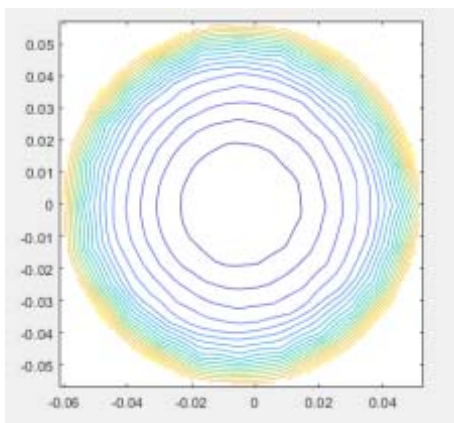
图5 主腔温度场分布图

Fig.5 Temperature distribution map of main cavity



(a) 主腔空气层温度分布图

(a) Temperature distribution diagram of the air layer of the main cavity



(b) 主腔空气层温度分布等温线图

(b) Isotherm diagram of air layer temperature distribution in main cavity

图6 主腔空气层对应的温度场分布和等温线分布图

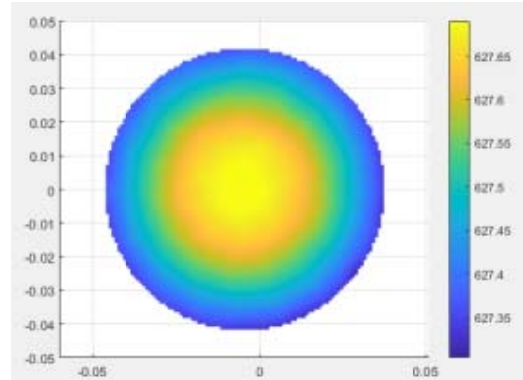
Fig.6 The temperature field distribution and isotherm distribution map corresponding to the air layer of the main cavity

从图5和图6可以看出,在炉芯位置没有偏移,保温层纤维棉分布均匀,加热丝温度均匀的条件下,

主腔空气层在同一圆周上,温度分布是均匀的,温度分布沿径向由外至中心逐渐减少。

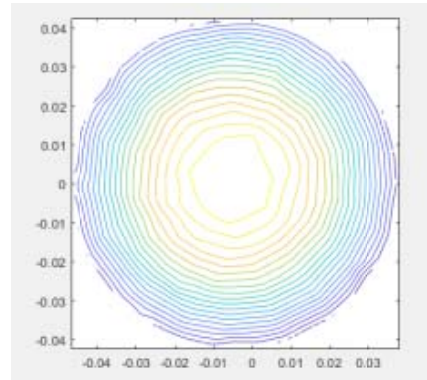
2) 副炉腔体空气层温度场

副腔空气层对应的温度场分布图和等温线分布如图7所示。



(a) 副腔空气层温度分布图

(a) Temperature distribution diagram of the air layer of the auxiliary cavity



(b) 副腔空气层温度分布等温线图

(b) Isotherm diagram of air layer temperature distribution in auxiliary cavity

图7 副腔空气层对应的温度场分布图和等温线分布图

Fig.7 The temperature field distribution map and isotherm distribution map corresponding to the air layer of the auxiliary cavity

从图7可以看出,在同一圆周上,空气层中心位置的温度高于边缘位置的温度。

当拉丝炉各组件材料质地均匀,加热丝各段阻值一致(加热温度均匀)时,拉丝炉各部分具有良好的对称性,主炉和副炉中空气层在同一圆周上,温度分布是均匀的,不同的是,主炉温度分布由外至中心逐渐减少,因为空气层加热是由加热丝加热碳化硅后向炉膛中心辐射,而副炉温度分布由中心向外逐渐减少,因为副炉的热量由主炉从上向下传递至副炉。

2.3.2 非理想情形

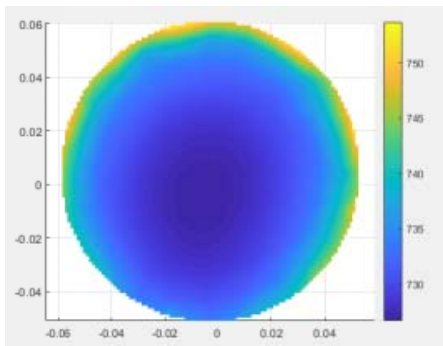
在利用经验实际制作拉丝炉时,加热丝是利用纯手工的方式缠绕于碳化硅炉膛内,沿炉膛圆周方向的

阻值分布是有差异的；在往炉壳内装炉芯时，由于没有定位，导致炉芯的中心与炉子的中心是偏心的；保温层采用的是硅酸铝纤维棉，人工塞进炉内，保温层分布往往不均匀。

针对如上非理想情形，为方便分析，研究其中一个作用条件发生变化而其他条件保持不变时，该条件单独作用对拉丝炉温度场分布的影响。同时考虑到纤维丝由主炉输出时已经变径成形，副炉只是起到缓冲的作用，防止纤维丝骤冷，产生应力导致断裂，因此，非理想情形仅对主炉温度场分布进行分析。

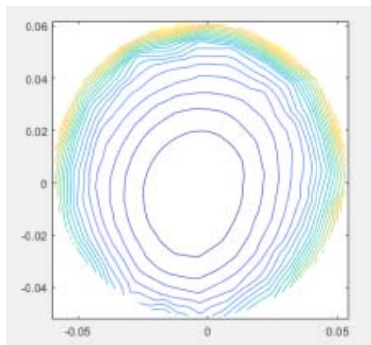
1) 炉芯位置对温度场影响

主腔空气层对应的温度场分布和等温线分布如图8所示。



(a) 主腔空气层温度分布图

(a) Temperature distribution diagram of the air layer of the main cavity



(b) 主腔空气层温度分布等温线图

(b) Isotherm diagram of air layer temperature distribution in main cavity

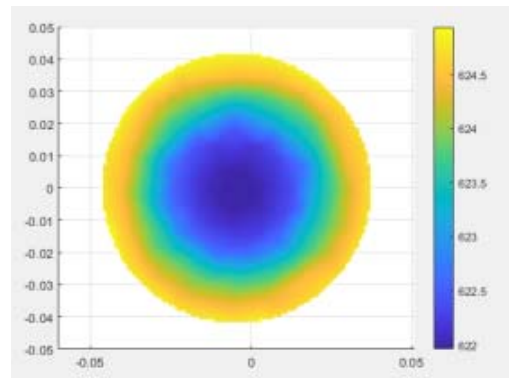
图8 主腔空气层对应的温度场分布和等温线分布图

Fig.8 The temperature field distribution and isotherm distribution map corresponding to the air layer of the main cavity

由图8可以看出，由于炉芯位置的偏移，会造成等温线中心位置的偏移，从而造成了主腔等温线的疏密程度发生了很大的变化，因此，加热丝温度均匀的情况下，等温线较为规则，等温线疏密不同，造成同一圆周上测温点的温度不同。

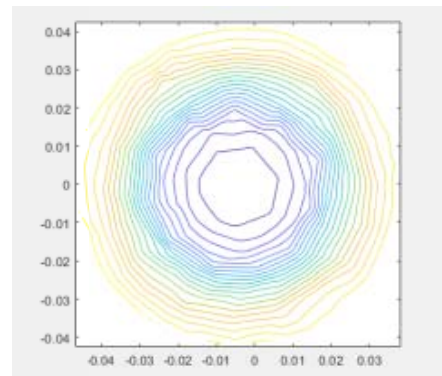
2) 加热温度均匀度对温度场的影响

主腔空气层对应的温度场分布和等温线分布如图9所示。



(a) 主腔空气层温度分布图

(a) Temperature distribution diagram of the air layer of the main cavity



(b) 主腔空气层温度分布等温线图

(b) Isotherm diagram of air layer temperature distribution in the main cavity

图9 主腔空气层对应的温度场分布和等温线分布图

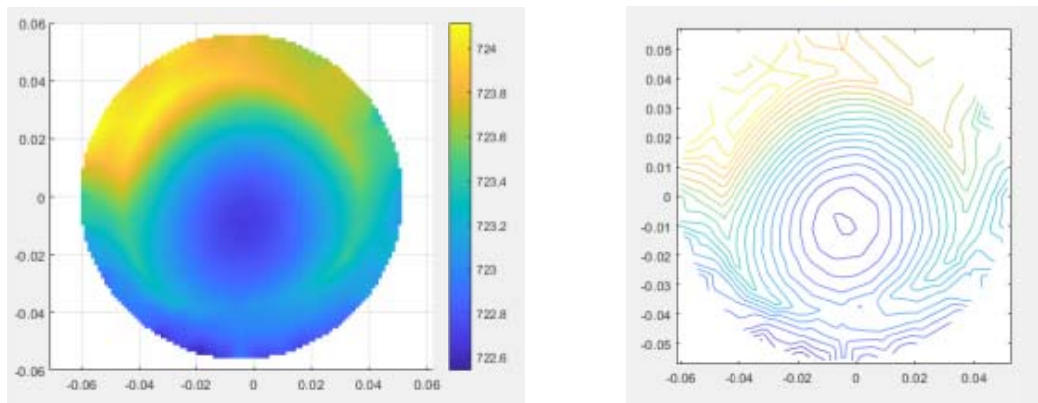
Fig.9 The temperature field distribution and isotherm distribution map corresponding to the air layer of the main cavity

图9对照图6可以看出，如果加热丝的温度非均匀，则对主腔空气层温度等温线的形状有所影响，图6中均匀加热时，对应温度线近似为同心圆，即处于同一圆周的测温点的温度大致一样，而由图9可以看出，如果加热丝的温度存在差异，等温线的形状发生变化，会对处于同一圆周的测温点的温度产生影响。

3) 保温层均匀度对温度场的影响

主腔空气层对应的温度场分布图和等温线分布如图10所示。

从图10可以看出，在炉芯无偏移，加热丝温度均匀，保温层分布非均匀的情形下，主腔空气层的温度场受到影响，特别是靠近保温层的边缘部分，等温线的形状变化较大，而接近中心的部分等温线基本保持同心圆的形状。



(a) 主腔空气层温度分布图
(a) Temperature distribution diagram of the air layer of the main cavity

(b) 主腔空气层温度分布等温线图
(b) Isotherm diagram of air layer temperature distribution in the main cavity

图 10 主腔空气层对应的温度场分布图和等温线分布图

Fig.10 The temperature field distribution map and isotherm distribution map corresponding to the air layer of the main cavity

本文对目前生产使用的拉丝炉进行了温度场测试,制作了4点测温工装,将测温工装插入拉丝炉中,加热温度设置为755℃,利用测温仪器测得4点的温度分别是737℃、732℃、734℃、731℃,在4点形成的圆周上的温度存在差异。拉丝炉实际测温结果表明,炉内温度场存在分布不均匀现象,验证了非理想情形下的拉丝炉模型仿真结果的参考意义。

3 结论

根据拉丝炉的模型与理论分析结果可以看出,影响拉丝炉内部主腔和副腔的温度场的分布与多种因素有关,主要包括炉芯中心位置、缠绕于碳化硅上加热丝温度均匀度和保温层的均匀度。炉芯位置的偏移,会造成等温线中心位置的偏移,从而造成了主腔等温线的疏密程度发生了很大的变化;加热丝的温度存在差异,等温线的形状发生变化,会对处于同一圆周的测温点的温度产生影响;保温层的非均匀分布,会对主腔空气层的温度场造成影响,特别是靠近保温层的边缘部分,等温线的形状变化较大。根据理论分析结果,在设计微通道板拉丝炉时,可以在以下3个方面进行改进:

1) 在进行拉丝炉装配时,要尽可能减小炉芯的中心的偏移量,保证炉腔内等温线的形状和中心保持稳定;

2) 尽可能保证加热丝加热温度均匀,在通过同样电流大小的前提下,尽可能保证绕于碳化硅上的加热丝的疏密程度保持一致,从而保证各段加热丝阻值基本相等,发热功率和温度保持一致;

3) 在实际中,保温层的均匀性比较难于量化,因

此需要在实际装配时,保证保温层在直观意义上的均匀性,同时可以选择一种保温特性更加优异的材料。

参考文献:

- [1] 刘辉,黄英,王善立,等.微通道板固定图案噪声成因探索[J].中国建材科技,2005(6):30-33.
LIU Hui, HUANG Ying, WANG Shanli, et al.. Study cause of formation on the fixed pattern noise of the MCP[J]. *Architectural Glass and Functional Glass*, 2005(6): 30-33.
- [2] 缪坤治,宁进.降低微通道板固定图案噪声的途径与实践[J].中国建材科技,1998(1):31-35.
MIU Kunzhi, NING Jin. Ways and Practices to Reduce the Noise of Fixed Patterns on Microchannel Plates[J]. *Architectural Glass and Functional Glass*, 1998(1): 31-35.
- [3] 李杰.用于MCP的高精度玻璃纤维拉丝机结构设计[D].南京:南京理工大学,2018.
LI Jie. Structural Design of High-Precision Glass Fiber Drawing Machine for MCP[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [4] 田越迎.光纤拉丝炉内部温度场研究[D].苏州:苏州大学,2019.
TIAN Yueying. Research on the Internal Temperature Field of Fiber Drawing Furnace[D]. Suzhou: Soochow University, 2019.
- [5] 廖平录.光纤感应拉丝炉的涡流场研究与设计[D].苏州:苏州大学,2018.
LIAO Pinglu. Research and Design of Eddy Current Field of Fiber-Optic Induction Wire Drawing Furnace[D]. Suzhou: Soochow University, 2018.
- [6] 刘伟媛.光纤拉丝炉内部气体流场研究[D].苏州:苏州大学,2013.
LIU Weiyuan. Research on the gas flow field inside the fiber drawing furnace[D]. Suzhou: Soochow University, 2013.
- [7] 江锋,张子豪.大尺寸变径预制棒拉丝密封工艺研究[J].机电信息,2020,638(32):97-99.
JIANG Feng, ZHANG Zihao. Research on the Wire Drawing Sealing Process of Large-size Reducing Preforms[J]. *Electromechanical Information*, 2020, 638(32): 97-99.

王建江.低损耗耐高温单模光纤的设计与开发[D].苏州:苏州大学,2019.
WANG Jianjiang. Design and Development of Low-loss and High-temperature-resistant Single-mode Fiber[D]. Suzhou: Soochow University, 2019.