

光纤熔融拉锥中电弧加热的分析与实验

张 伟¹ 荣伟彬¹ 杨 威² 王乐锋¹ 孙立宁¹

¹哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080

²哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 加热温度是光纤熔融拉锥制造中的关键因素,直接影响器件的性能。为了提高加热区域温度的稳定性和可控性,设计了高压电弧加热装置,并对电弧加热、弧区温度和光纤预热进行了分析。设计了高频高压电源和电极。电源的电流和频率独立可调,采用电压闭环和电流控制确保引弧成功和提高电弧放电电流的稳定性,并分析了其放电过程。建立了弧区温度测量实验平台,采用红外热像仪测量加热中陶瓷棒的温度,得到了弧区温度。通过实验确定了频率、电弧控制电压以及加热距离与弧区温度的关系。通过电弧控制电压和通过加热距离控制电弧加热区的温度。通过计算得到电弧弧区的中心温度可达到1635 ℃,实验测得稳定性为2.37 ℃。建立了细径光纤(直径80 μm)的加热模型,通过有限元的瞬态分析确定了预热时间,经过25 s,光纤加热区达到稳定。

关键词 光纤光学; 熔融拉锥; 电弧加热; 红外热像仪; 温度测量; 有限元仿真

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0305003

Analysis and Experiments of the Arc Heating for Fiber Fused Biconical Taper Technology

Zhang Wei¹ Rong Weibin¹ Yang Wei² Wang Lefeng¹ Sun Lining¹

¹State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150080, China

²School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract The heating temperature is one of the key factors in the fiber fused biconical taper manufacture, which can affect the component performance. In order to improve the temperature stability and controllability in the heating region, the high-voltage arc heating device is presented and arc heating, heating region temperature and fiber preheating are studied. The high-frequency high voltage power source, in which the current and frequency can be adjusted independently, and electrodes are designed. The closed-loop controls of the voltage and current are applied to ensure the success of the arc ignition and the stability of the arc discharge current, and the discharge process is analyzed. The temperature detection device in which the infrared camera is adopted to measure the heating region temperature by the ceramic rod is designed. Through the analysis of experimental data, the relationships among the frequency, arc control voltage, arc current, heating distance and arc region temperature are determined. According to experiments and computation results, the temperature of the arc center region can reach 1635 ℃ within the stability of 2.37 ℃. Based on the established heating model for fine fibers with the diameter of 80 μm, the preheating time is computed by the transient analysis of the ANSYS software. It is shown that the temperature of the heating region can reach the

收稿日期: 2014-07-29; 收到修改稿日期: 2014-10-29

基金项目: 机器人技术与系统国家重点实验室(哈尔滨工业大学)自主研究课题(SKLR201301A01)、长江学者和创新团队发展计划(IRT0915)

作者简介: 张 伟(1982—),男,博士研究生,主要从事光纤微操作技术与装备等方面的研究。E-mail: zw062003@163.com

导师介绍: 荣伟彬(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事微操作技术与装备等方面的研究。

E-mail: rwb@hope.hit.edu.cn(通信联系人)

stability by 25 s.

Key words fiber optics; fused biconical taper; arc heating; infrared camera; temperature measurement; ANSYS simulation

OCIS codes 060.2310; 040.1880; 150.5758

1 引言

熔融拉锥技术是制造光纤耦合器、偏振器、光开关等器件的常用方法,由于其工艺简单且容易控制,得到了广泛的应用^[1]。熔融拉锥法是指通过加热使光纤熔化,同时在两端拉伸光纤,使光纤熔锥区形成锥型或者哑铃型,是光纤耦合器制造中重要方法之一^[2]。加热温度是熔融拉锥制造过程的一个重要因素,直接影响着光纤器件的性能。目前在光纤熔融拉锥中,常采用氢氧焰的方式使光纤达到熔融状态,但氢氧焰加热产生的水分子很容易与SiO₂结合生成Si-OH离子,使SiO₂结构变松弛,松弛的SiO₂结构会降低光纤耦合器在潮湿空气中的抗侵蚀性,增加器件的损耗^[3]。燃烧气流也会影响耦合器的性能,火焰的温度容易受到氢气和氧气气压的影响。如果要提高气压的稳定性,则需要比较复杂的气路,增加了生产成本的同时,还使得加热区温度不易控制。另外,氢气是易燃易爆气体,操作时对工作人员的操作要求较高^[4]。

Yokota等^[5]提出的采用CO₂激光热辐射对光纤进行加热制作光纤耦合器的方法,能够自动控制光纤锥形的形状,具有无污染的特点,但是CO₂激光加热系统存在体积大、成本高等缺点^[6]。Bayle等^[7]改进了这种方式,采用扫描激光束加热,加热机构主要由激光器、反射镜和透镜等组成,扫描镜安装在检流计上,检流计两端施加波形电压,检流计摆动带着反射镜往复旋转,激光器通过反射镜的摆动增大加热区域,这种方式提高了加热区温度一致性,但是降低了加热区温度的稳定性。Takeuchi等^[8]采用电加热代替火焰加热,选用铬酸镧作为加热材料,温度能到达1700℃,温度稳定在2℃以内,能够实现长时间加热,但是施加的电流比较大,加热过程释放有毒物质Cr₂O₃。并且铬酸镧的导热性比较差,会因受热过急而裂损,升温速度比较慢(300℃/h)^[9]。帅词俊等^[10]采用MoSi₂代替铬酸镧作为加热材料,温度能够达到1600℃,温度稳定在2℃以内,但是MoSi₂在1000℃以下容易氧化而粉化,并且加热时,通入的电流比较大,对硬件电路提出更高的要求。

电弧加热^[11]是制造光纤器件的重要方法之一,相对激光加热和电加热,这种方式简单,广泛应用在光纤探针、光纤球、光栅的制造和光纤及光子光纤的熔接中^[12]。传统的电弧具有加热温度高、容易控制、工作时间长等优点,但是加热区域小,区域内的温度一致性不好,难以用于光纤耦合器的制造中。本文设计了一种新型的高压电弧加热装置,较好地克服了传统加热方式存在的不足。设计了温度测量的实验平台,采用红外线热像仪对加热区的温度进行测量,研究了电弧控制电压、频率、加热距离和温度之间的关系。最后通过有限元仿真对细径光纤的预热阶段进行了分析。

2 高压电弧装置的设计

高压电弧装置主要由高频高压电源和电极组件组成。高压电源的原理图如图1所示,整流滤波模块将普通交流(AC)电整流为直流(DC)电,采用Buck降压斩波变换器(DC/DC)变成可调的直流电,采用半桥(Half Bridge)电路进行逆变,得到峰值和频率可调的高频交流方波,最后利用升压变压器得到高频高压交流方波,输入到左右两个电极上。输出高频高压交流的幅值和频率独立可调,分别由调压部分和逆变部分调节。开始起弧时,以调压模块输出电压为采样反馈量,采用电压闭环控制,使电源工作在限压区,即输出根据电极实际间距确定易于起弧的电压值,该电压值(高于4000V)远高于维持电弧所需电压值(约3000V),为自动或手动起弧创造条件。电弧引燃后,以经过补偿的、与电弧电流呈比例关系的升压变压器原边电流作为采样反馈量,采用电流闭环控制,使电源转入恒流区,并根据上位机下发的指令[数模转换卡(DA卡)输出的电弧控制电压,范围为6~9V]输出幅值恒定的电弧电流(约5~7mA),以保证电弧温度稳定。恒压与恒流控制之间的切换由控制器自动完成,高压电源装置如图2所示。

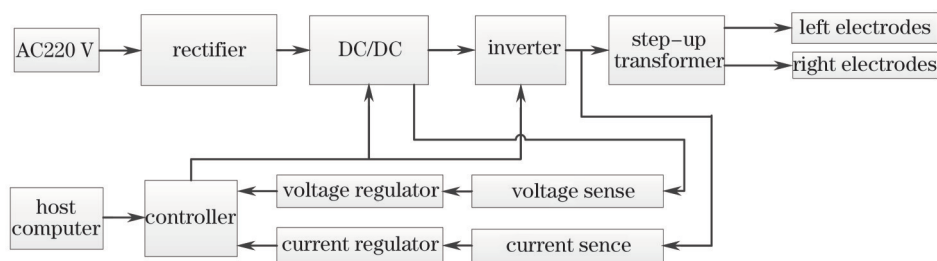


图1 高压电源的原理意图

Fig.1 Schematic of high-voltage power device

电极组件由电极、石英绝缘隔热件、铜电极座和石英加热槽组成。结构图如图3所示,电极采用钨钨材料,电极顶端具有球状突体,采用钨钨材料,具有容易加工、不易磨损等特点,且钨钨电极在低电流下有极佳的起弧性能,引弧容易,电弧稳定性好。两个钨钨电极分布在石英加热槽的左右两侧,呈对称分布,石英加热槽将电弧放电粒子约束在一个很小的空间内,提高了电弧放电时所产生的温度的一致性,也便于光纤加热。高压电源产生的高频高压交流电输出到左右两个电极上,通过引弧器使两电极之间的空气击穿,在石英槽中产生等离子放电。等离子放电产生大量的热,加热光纤石英加热槽中的光纤,使其达到粘弹性状态。

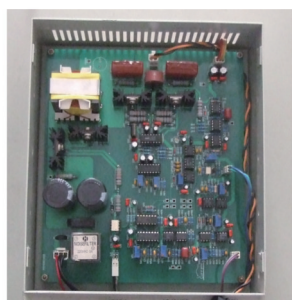


图2 高压电源图

Fig.2 High-voltage power device

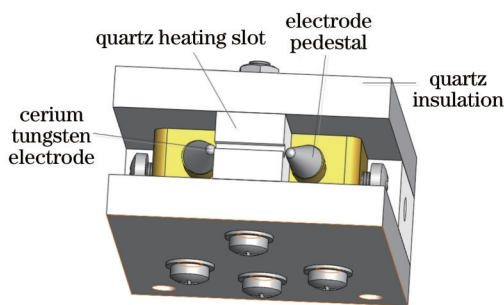


图3 电极组件结构图

Fig.3 Structure of electrode assembly

3 电弧放电分析

当引弧器将两钨钨电极短路时,放电产生粒子和能量,左右两个钨钨电极的电压比较高,两电极的电场强度比较大,带电离子在电场强度下起到加速作用,增加了带电粒子的动能。同时,电极施加的电压频率比较高,电子在高频场中不断来回运动,增加了同气体碰撞的次数,也增加了与粒子碰撞的概率。当两端电子的动能增加到足够大时,与中性粒子产生非弹性碰撞而使之电离。电弧分为阳极位降区、弧柱区(弧区)和阴极位降区。弧柱区的温度比较高,由于热电离,弧柱部分产生大量带电粒子,同时增加了粒子的动能。当引弧器撤去后,放电过程仍可以继续,发生自持放电。通过实验发现,能否自持放电,与控制器上施加的数模(DA)控制电压和频率有关,控制器控制着起弧后两极之间的放电电流。当电弧控制电压高于6V时,发生自持放电。电压的频率决定着电弧温度场的分布。在文献[13]中,放电频率为20kHz比频率为50Hz形成的温度场平缓,温度梯度小,因此采用高频高压电弧放电。

电弧放电是个非常复杂的过程,将电弧放电的模型进行简化,电弧等离子体满足能量方程^[14-15]

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v E) = \frac{\partial P}{\partial t} + \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - S_R + \frac{J^2}{\sigma}, \quad (1)$$

式中 ρ 为等离子体的密度, v 为等离子体的速度, σ 为电导率, P 为流体受到的压力, J 为电流密度, E 为动态熵, λ 为气体的热传导系数, S_R 为辐射项, T 为气体的温度。由(1)式可以看出高压电弧等离子体的温度与电流密度的平方有关。

4 弧区温度测量

高压电弧的温度影响着耦合器的制造性能。Rego等^[16]采用S型由铂铑10-铂热电偶测量电弧放电区域

温度的大小,将热电偶放入毛细玻璃管中,测得电弧的温度为 $1420\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$,但玻璃管放在电弧中长时间会发生变形。Wiley等^[17]将多模光纤固定在手动二维平台上,光纤的一端放在电弧放电区,光纤的另一端与红外敏感光度计相连,测得电弧放电区的温度为 $1660\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 34\text{ }^{\circ}\text{C}$,但当光纤发生变形时,需要及时更换光纤。

由于石英加热槽的宽度为 1 mm ,长度为 11 mm ,工作区间比较窄,加热区的温度比较高,且槽中存在着高能量的带电粒子,电极两端存在非常高的电势差,很难直接测量弧区的温度,因此采用非接触测量的方法测量高压电弧的弧区温度。红外热像仪可以非接触式地测量物体表面的温度,具有响应快、精度高、测量范围广、实时性强等优点,能够形象直观地显示被测物体表面的温度分布情况^[18-19]。本文采用美国FLIR公司的红外热像仪SC325测定高压电弧弧区的温度分布。SC325具有 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的热灵敏度,测量的最高温度为 $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于红外热像仪的测量波长为 $750\sim 1300\text{ nm}$,而高压电弧的波长约为 $255.75\sim 409.08\text{ nm}$ ^[20],因此无法直接测量弧区的温度。采用在高压电弧中放一根陶瓷棒,陶瓷棒的直径为 0.5 mm ,在高压电弧的加热下,陶瓷棒迅速地达到热平衡,陶瓷棒的温度和弧区的温度基本相同。通过采用热成像仪测量陶瓷棒的温度确定电弧弧区的温度。陶瓷棒的主要成分为 Al_2O_3 ,最高的工作温度为 $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$,绝缘破坏强度为 18 kV/mm ,钨钼电极两端最高电压约为 4000 V ,不能将陶瓷棒击穿,因此陶瓷棒能够满足测量的要求。

弧区测温实验平台是由三个电动位移平台、连接板、陶瓷棒和热像仪组成,实验平台如图4所示。陶瓷棒置于石英加热槽的中心,采用云山素将陶瓷棒固定在光纤支架上。通过电极Z向位移平台A调节陶瓷棒在石英槽的位置,实现采用电弧弧区的不同位置加热。通过电极Z向位移平台B调节热成像仪的焦距,使陶瓷棒处于热成像仪的聚焦处。通过FLIR R&D software软件对热成像仪的图像数据进行分析,可以得到加热区域的温度分布,也可得到加热区域的某点随着时间的变化。在电弧放电加热过程中,通过调节电弧的电流及频率,控制电弧弧区的温度。通过控制器上位机的电弧控制电压调节电弧的电流;通过调节控制器中控制电阻的阻值调节电弧的频率;通过控制电极Z向位移平台控制弧区加热区的温度。

电弧电极电压在 3000 V 以上,采用电流互感器测量电弧的电流。选用耀华电子的TAK12-02CT互感器,互感器的两端接上 $2\text{ k}\Omega$ 电阻;采用FLUKE 196B测量电阻两端的电压,通过计算可得电弧电流。测量的电弧电流和电弧控制电压如图5所示,通过最小二乘拟合得到电弧控制电压和电弧电流的关系为

$$I = 0.065U^2 - 0.63U + 6.77, R^2 = 0.9979, \quad (2)$$

式中 I 为电弧电流的有效值,单位为 mA ; U 为电弧控制电压,单位为 V , R 为拟合系数。可知,电流和电弧控制电压呈二次关系。

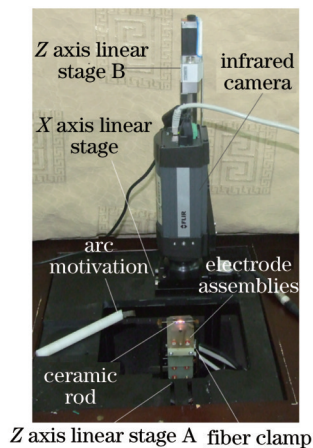


图4 弧区温度测量平台

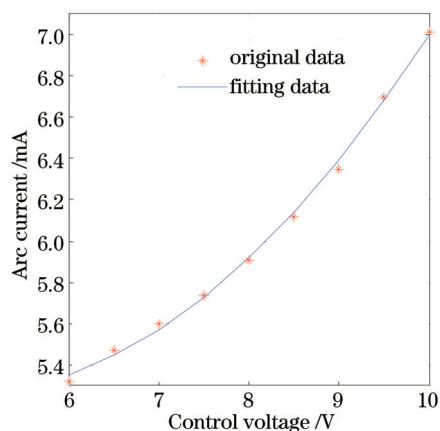


图5 电流和控制电压的关系图

Fig.4 Platform of arc heating temperature measurement device

Fig.5 Experimental control voltage as a function of the current

由于采用石英槽将电弧等离子体束缚在石英槽中,影响了等离子体的分布,进而影响了电弧的温度分布。图6为控制电压为 7.5 V ,频率为 31 kHz 时高压电弧加热陶瓷棒的温度分布图。图7为图6中陶瓷棒中心线 AB 上的温度分布。高压电弧弧区的温度最高,然后向两边降低,在两电极区的温度最低。热等离子体束缚在石英槽中,导致石英槽内的温度比较高,槽外温度相对比较低,电弧的温度分布基本关于两电极连接

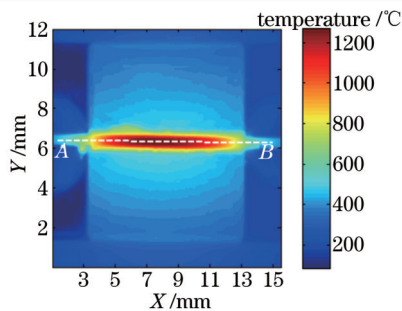


图6 电弧加热的温度分布图

Fig.6 Arc heating temperature distribution

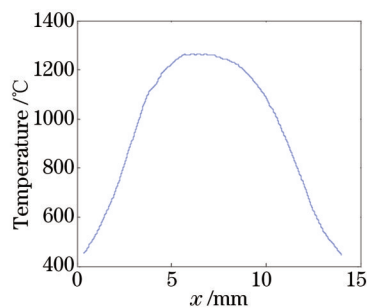


图7 图6中AB上的温度分布图

Fig.7 Temperature distribution along the line AB in Fig.6

线对称。通常高压电弧弧区温度相对比较稳定,用于光纤的加热,因而在设计时电极基座与水平面的角度为 70° ,从阳极到阴极的等离子流呈弧线型,这样可以确保采用高压电弧的弧区加热光纤。

在变化电场中,电场频率会对电弧放电产生重要的影响。当电极Z向位移平台A不变时,即陶瓷棒和高压电弧中心的距离不变时,电弧控制电压为8 V,电弧频率在24~34.8 kHz之间,弧区温度变化和电弧频率之间的关系如图8所示。频率在24 kHz时,弧区温度最大;在34.8 kHz时,弧区温度最小,电弧的频率和弧区温度呈线性关系

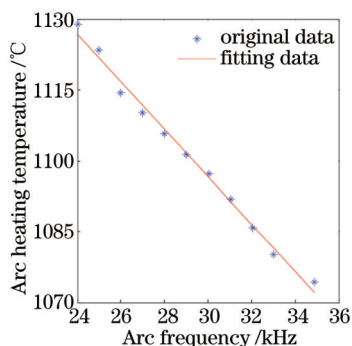
$$T = -5.024f + 1247, \quad R^2 = 0.9921, \quad (3)$$

式中 f 为高压电弧频率,单位为kHz; T 为弧区温度,单位为 $^\circ\text{C}$ 。当频率比较低时,两电极之间的空气不容易击穿,引弧比较困难,并且放电不稳定,因而在熔融加热过程中选择放电电压的频率为31 kHz。

由(1)式和(2)式可知,电弧控制电压决定着电弧中的电流,而电弧电流与弧区温度有密切联系。当放电电压频率为31 kHz时,弧区温度的变化和电弧控制电压的关系如图9所示,通过拟合得到温度和控制电压之间为

$$T = -12.84U^2 + 314.1U - 635.7, \quad R^2 = 0.9995. \quad (4)$$

由图9可知电弧控制电压与弧区温度呈二次关系,基于此通过上位机控制电弧控制电压进而控制弧区温度。当陶瓷棒在石英槽中位置不同时,即加热距离不同时,其温度不同。电弧频率为31 kHz,电弧控制电压、加热距离和弧区温度之间的关系如图10所示。当电弧控制电压不变时,加热距离和弧区温度呈线性关系。拟合参数如表1所示。电弧控制电压依次为7、8、9 V时,温度随着距离 d 的变化率基本相同,只是起始温度不同。电弧加热距离为0时,为电弧的弧区中心,此时的温度即为电弧弧区中心温度,也为电弧弧区最高温度。当控制电压为9 V,由表1的数据计算可知弧区的最高温度为 1624°C ,完全满足光纤熔融拉锥的需要。在光纤熔融拉锥中,加热区温度场的稳定性直接影响着耦合器的性能。当加热区的温度不稳定时,会造成耦合器的性能一致性变差,光纤耦合器受热不均匀,容易产生热应力,降低了光纤器件的光学性能和机械性能。图11为弧区温度在 800°C 、 1000°C 、 1200°C 和 1250°C 的30 min内的变化曲线,温度的变化标准差最大为 2.37°C ,比现有氢氧焰加热更加稳定,温度也易控制。



8 频率与弧区温度的关系图

Fig.8 Experimental arc heating temperature as a function of frequency

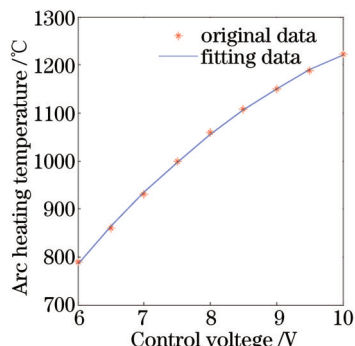


图9 电弧控制电压与弧区温度的关系图

Fig.9 Experimental control voltage as a function of arc heating temperature

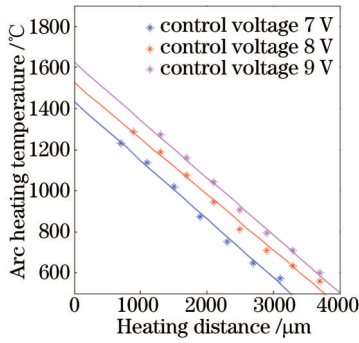


图 10 加热距离与弧区温度的关系图

Fig.10 Experimental distance as a function of arc heating temperature

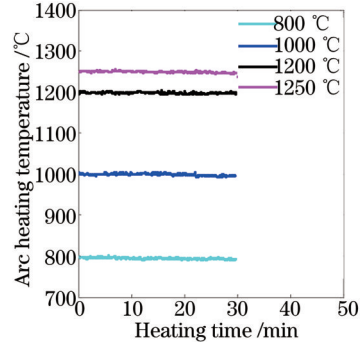


图 11 电弧加热温度稳定曲线

Fig.11 Temperature stability curves of arc heating

表 1 拟合参数表

Table 1 Fitting coefficients

Control voltage /V	$T(x)=P_1d+P_2$		
	P_1	P_2	R^2
7	-0.2866	1435	0.9926
8	-0.2714	1525	0.9923
9	-0.2801	1624	0.9953

5 预热分析

光纤的主要材料是石英玻璃,在熔融拉锥过程中,呈现明显的粘弹性。当光纤温度分布不均时,光纤的热应力不均,直接影响耦合器件的流变成形,因此需要对光纤的预热阶段进行分析。在预热阶段,光纤处于电弧弧区温度场中,在高压电弧温度场的作用下,光纤表面的温度不断升高,同时向纤芯传热,经过一段时间达到稳定。采用 ANSYS 软件对预热阶段瞬态热分析,确定预热时间^[21]。

光纤关于中心轴对称,为了简化计算,在分析中建立二维模型进行分析。如图 12 所示,光纤的半径为 0.04 mm,光纤的长度为 15 mm,处于电弧加热区域的长度为 10 mm,A 点为光纤加热的中点,B 点为加热区域的边沿点,C 点为非加热区的中点。采用 PLANE77 二维八节点四边形单元。假定电弧等离子体加热温度为 1000 °C,环境温度为 20 °C。热对流是指流体和与之接触的固体,由于温差存在引起的热量传递,因而在加热区采用等离子热对流边界条件,未加热区域采用空气自然对流条件^[22]。经过 ANSYS 瞬态分析,光纤温度随着时间的变化如图 13 所示,光纤加热区域温度逐渐升高,并且热量向非加热区域传递,经过一段时间后光纤的温度达到稳定,光纤温度和弧区温度基本相等。图 14 为光纤上 A、B、C 3 点的温度和加热时间的变化图,经过 25 s,光纤温度基本达到稳定。

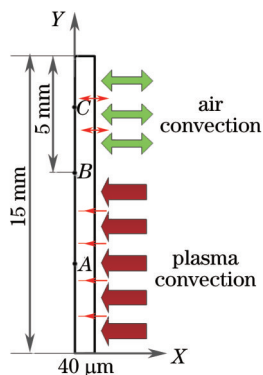


图 12 有限元热分析边界条件

Fig.12 Structure of finite element thermal analysis

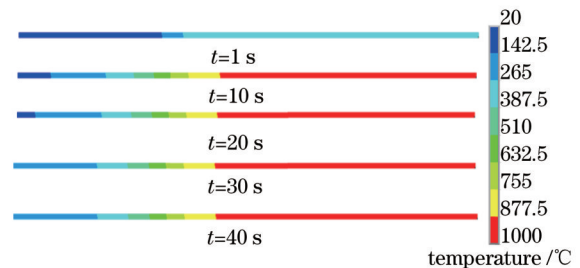


图 13 光纤温度的变化图

Fig.13 Fiber temperature changes as a function of time

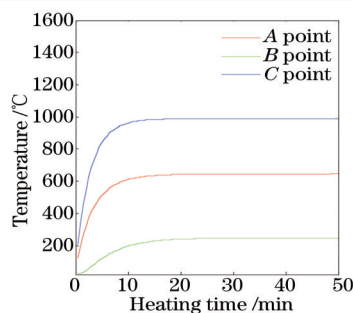


图14 光纤上点的温度变化图

Fig.14 Points temperature changes of the fiber

6 结 论

在光纤耦合器的熔融拉锥制造中,加热温度是影响其性能的关键因素。设计了一个采用高压电弧加热的装置,采用电压闭环和电流控制确保引弧成功和电弧放电电流的稳定性,建立了弧区温度测量实验平台,采用红外热像仪对弧区温度进行测量。电弧控制电压与弧区温度以及放电电流呈二次关系、弧区的温度与放电频率和加热距离呈线性关系。通过控制电弧控制电压和加热距离控制弧区温度。经计算得到高压电弧弧区的中心温度可达到1635℃,测得稳定性为2.37℃,适合于细径光纤耦合器的制造。最后利用有限元方法分析了预热时间,经过25s,光纤加热区达到稳定。

参 考 文 献

- 1 Pal B. Fabrication and modeling of fused biconical tapered fiber couplers[J]. *Fiber and Integrated Optics*, 2003, 22(2): 97-117.
- 2 Rong Weibin, Zhang Wei, Wang Lefeng, *et al.*. Simulation and experiments on automatic polarization alignment of fine polarization maintaining fibers[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(12): 1205002.
荣伟彬, 张伟, 王乐锋, 等. 细径保偏光纤自动对轴的仿真与实验[J]. *中国激光*, 2013, 40(12): 1205002.
- 3 Nagata H. Chemical properties of fused fiber coupler surface[J]. *Optical Fiber Technology*, 2000, 6(3): 324-328.
- 4 Shuai C, Gao C, Nie Y, *et al.*. Performance improvement of optical fiber coupler with electric heating versus gas heating[J]. *Appl Opt*, 2010, 49(24): 4514-4519.
- 5 Yokota H, Sugai E, Sasaki Y. Optical irradiation method for fiber coupler fabrications[J]. *Optical Review*, 1997, 4(1A): 104-107.
- 6 Yablon A D. *Optical Fiber Fusion Splicing*[M]. Berlin: Springer, 2005. 21-23.
- 7 Bayle F, Meunier J P. Efficient fabrication of fused-fiber biconical taper structures by a scanned CO₂ laser beam technique[J]. *Appl Opt*, 2005, 44(30): 6402-6411.
- 8 Takeuchi Y, Hirayama M, Sumida S, *et al.*. Characteristics of ceramic microheater for fiber coupler fabrication[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1998, 37(6B): 3665-3668.
- 9 Wang Chaohui, Liu Jianhong, Gu Xiaohua, *et al.*. Double heat system with high temperature resistance furnace of nickel-chromium resistance wire and lanthanum chromite[J]. *China Ceramics*, 2011, 47(2): 54-56.
王超会, 刘剑虹, 顾晓华, 等. 镍铬电阻丝与铬酸镧元件双加热系统高温电阻炉研究[J]. *中国陶瓷*, 2011, 47(2): 54-56.
- 10 Shuai Cijun, Peng Shuping, Wen Xuejun. Design of the electrical heater for fused-taper optical fiber devices[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(s2): 359-362.
帅词俊, 彭淑平, 文学军. 用于光纤器件熔融拉锥的电加热器的设计[J]. *光学学报*, 2009, 29(s2): 359-362.
- 11 Zhou Siyin, Nie Wansheng, Feng Wei, *et al.*. Research on the performance change of cavity by pulsed control plasma[J]. *Laser & Optoelectronics Process*, 2013, 50(7): 072601.
周思引, 聂万胜, 冯伟, 等. 脉冲控制模式电弧等离子体对凹腔性能改变的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(7): 072601.
- 12 Morishita K, Yamamoto D. Fused fiber couplers wavelength-flattened by arc discharge[C]. *Fibres and Optical Passive Components, Proceedings of 2005 IEEE/LEOS Workshop on IEEE*, 2005. 187-191.
- 13 Tachikura M. Fusion mass-splicing for optical fibers using electric discharges between two pairs of electrodes[J]. *Appl Opt*, 1984, 23(3): 492-498.

- 14 Zhou Xue, Cui Xinglei, Zhai Xiaoyi. Study on influence of silver contact vapor on arc characteristics in aerospace relay[J]. Low Voltage Apparatus, 2012, (15): 6-11.
周 学, 崔行磊, 翟筱羿. 考虑 Ag 触头蒸发烧蚀条件下的航天继电器分断电弧特性的研究[J]. 低压电器, 2012, (15): 6-11.
- 15 Ma Qiang, Rong Mingzhe, Anthony B Murphy, *et al.*. Simulation and experiment on airarc characteristics in low-voltage circuit breaker considering wall ablation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(12): 74-81.
马 强, 荣命哲, Anthony B Murphy, 等. 考虑器壁侵蚀影响的低压断路器电弧运动特性仿真及实验[J]. 电工技术学报, 2009, 24(12): 74-81.
- 16 Rego G, Santos L, Schroder B, *et al.*. *In situ* temperature measurement of an optical fiber submitted to electric arc discharges[J]. Photon Technol Lett, IEEE, 2004, 16(9): 2111-2113.
- 17 Wiley R, Clark B. Large area isothermic plasma for large diameter and specialty fiber splicing[C]. Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, 2008.
- 18 Wu Zepeng, Xuan Ming, Jia Hongguang, *et al.*. Infrared image dynamic range compression and contrast enhancement based on optimal mapping curve[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1209002.
吴泽鹏, 宣 明, 贾宏光, 等. 基于最优映射曲线的红外图像动态范围压缩和对比度增强方法[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1209002.
- 19 Chen Lulu, Li Xiaolu, He Tao, *et al.*. Image-matching-based temperature field measurement of heat dispersing surface of air-cooled condenser[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1112003.
陈路路, 李小路, 贺 涛, 等. 基于图像拼接的空冷凝汽器散热面温度场测量[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1112003.
- 20 Liu Bo, New Measurement for Detecting Arcs due to the Pantograph Contact Loss Form the Contact Line in Electric Railways[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2002. 24-26.
刘 波. 电力机车弓网离线电弧检测装置[D]. 成都: 西南交通大学, 2002. 24-26.
- 21 Shuai Cijun, Duan Ji'an, Miao Jianyu, *et al.*. Thermal analysis of fused biconical taper in the process of optical fiber coupler pre-drawing[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2004, 35(4): 618-621.
帅词俊, 段吉安, 苗健宇, 等. 光纤耦合器预拉时熔锥区的热分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2004, 35(4): 618-621.
- 22 Hong Changqing, Han Jiecai, Zhang Xinghong, *et al.*. Numerical simulation on thermal shock damage behavior of TiB₂-Cu composite via combustion synthesis[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35(1): 47-51.
洪长青, 韩杰才, 张幸红, 等. TiB₂-Cu 复合材料热冲击损伤行为的数值模拟[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(1): 47-51.

栏目编辑: 王晓琰