

光纤拉丝过程中裸纤波动控制实验研究

何宝¹,付明磊¹,陈坤²,吴仪温²,张文其²,刘建中²,庄明杰²,陆春校²

(1.浙江工业大学 理学院,杭州 310023;2.杭州永特信息技术有限公司,杭州 311401)

摘要:控制光纤拉丝过程中的裸纤丝径波动是影响光纤拉丝质量的重要因素。给出了光纤拉制过程的数据模型,分析了导致光纤拉丝中影响裸纤波动的因素,介绍了光纤拉丝的整个过程,进行了炉内温度场和气体流场对裸纤直径波动的采样数据测试,并针对炉体结构、气体搭配和流量大小设计了相应的实验。实验数据表明:通过改变加热炉、拉丝塔的结构以及惰性气体流速与配置可以减轻拉丝制造过程的扰动,提高光纤裸纤直径波动的控制精度,丝径波动范围从 $\pm 1 \mu\text{m}$ 提高到 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 。

关键词:光纤制造;光纤裸纤波动;拉丝塔;玻璃纤维拉丝

中图分类号:TN929.11 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2022)03-0085-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.03.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Experimental study of bare fiber fluctuation control in optical fiber drawing process

HE Bao¹, FU Minglei¹, CHEN Kun², WU Yiwen²,ZHANG Wenqi², LIU Jianzhong², ZHUANG Mingjie², LU Chunxiao²

(1. College of Sciences, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2. Hangzhou Yongte Information Technology Co., Ltd., Hangzhou 311401, China)

Abstract: Controlling the fluctuation of bare fiber diameter in the process of optical fiber drawing is an important factor affecting the quality of optical fiber drawing. The data model of the optical fiber drawing process is given, the factors affecting the bare fiber fluctuation in the optical fiber drawing are analyzed, the whole process of optical fiber drawing is introduced, the sampling data of the bare fiber diameter fluctuation by the temperature field and gas flow field in the furnace are tested, and the corresponding experiments are designed according to the furnace structure, gas matching and flow rate. The experimental data show that by changing the structure of heating furnace and drawing tower and the flow rate and configuration of inert gas, the disturbance of drawing manufacturing process can be reduced and the control accuracy of bare fiber diameter fluctuation can be improved. The fluctuation range of fiber diameter is from $\pm 1 \mu\text{m}$ increased to $\pm 0.5 \mu\text{m}$.

Key words: optical fiber manufacturing, optical fiber bare fiber fluctuation, drawing tower, glass fiber drawing

0 引言

2019年,4G和光纤到户建设接近尾声,供应商采购量减少,新建产能集中释放,光纤价格大幅下跌。2020年,光纤光缆采集规模与2019年基本持平,但光

收稿日期:2021-10-12。

基金项目:浙江省重点研发计划项目(2020C01083)资助。

作者简介:何宝(1997—),男,浙江绍兴人,硕士,现就读于浙江工业大学理学院光学工程专业,主要研究方向为光纤通信、光纤预制棒以及光纤拉制技术,参与了浙江省重点研发计划项目。



纤价格再度下跌,降到每芯20元/km^[1-3]。近年来,“信息经济”、“中国制造2025”、“互联网+”、“一带一路”和“新基建”等一系列的国家政策战略的实施和推动,将带来巨大的光纤需求,同时对光纤质量会有更高的要求^[4-5]。

光纤拉制是影响光纤质量的重要环节之一。在光纤拉制过程中,裸纤直径的均匀性会受到预制棒直径、熔炉尺寸、惰性气体流速和配置以及其它操作条件和设计参数的影响^[6-9]。目前,国内外学术界和工业界关于光纤拉制的工作主要集中在受热区域的模拟仿真,例如:PAEK U C等人^[10]采用一维模型研究

了预制棒的颈缩轮廓和温度分布;MYERS M R^[11]深入研究了在光纤拉伸中可能出现的扰动,忽略了流体中的惯性、重力和表面张力,并预测了一维模型的半径、速度和温度,其结论考虑了一维模型的局限性,且数值和实验结果吻合度较好;LEE S H K 等人^[12-13]全面研究了影响预制棒在炉内热传递的因素,包括玻璃的表面流动和惰性气体中的对流和辐射传热,获得了拉伸速度、惰性气体速度及炉子尺寸对温度分布和张力的影响情况;CARANDANG G G 等人^[14]对拉丝炉内吹扫气体的自然对流和强制对流效应进行了数值研究,研究结果表明增加氦气流量与流速,可以减少拉丝过程中的微扰。

本文通过实验研究优化炉内温度场,并降低气体对流分布减轻拉丝过程中的扰动,实现比原有的拉丝控制系统更高精度的光纤丝径波动控制。

1 光纤拉制模型和工艺

1.1 光纤拉制模型

从预制棒逐渐过渡到光纤的区域称为颈缩区,示意图如图 1 所示。基于质量和能量守恒,以及力-动量平衡获得的流体流动和热传递方程,可建立光纤拉制中的热传输方程。假设圆柱形熔炉中玻璃和吹扫气体时的传输过程是轴对称的,则玻璃流体和吹扫气体的控制方程^[15]为

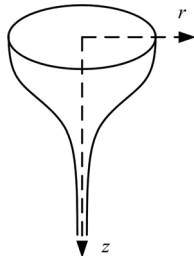


图 1 颈缩区示意图

$$\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(ru)}{\partial r} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \times \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \mu \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{2}{r} \times \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] - \frac{2\mu u}{r^2} \quad (3)$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial r} + v \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \mu \Phi + S_r \quad (4)$$

其中, v 和 u 分别是轴向和径向的速度分量, ρ 是密度, z 是轴向坐标, r 是径向坐标, T 是温度, t 是时间, p 是压力, μ 是动态粘度, C_p 是恒态比热, k 是固体和液体的导热系数, $\mu\Phi$ 是粘性耗散, S_r 是辐射源项。

光纤预制棒颈部下端熔体变形区如图 2 所示。颈

部向下区域可分为 2 个区域:成型区 a 和拉伸区 b,图中 L 表示拉伸区长度。成型区 a 的特点是快速变窄,然后逐渐进入拉伸区 b。在拉伸区 b 中,纤维特性最终形成,其受到来自成型区 a 和下方拉伸扰动的影响。拉伸区 b 可以用一维模型来研究,包括连续性和力平衡方程、描述玻璃熔体状态的物理方程,不考虑玻璃熔体的弹性,2 种方程^[16]分别为

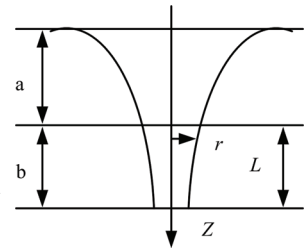


图 2 颈部下端熔体变形区

$$\frac{\partial(r^2)}{\partial t} + \frac{\partial(r^2 v)}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

$$\rho \left[\frac{\partial(vr^2)}{\partial t} + \frac{\partial(r^2 v^2)}{\partial z} \right] = \frac{\partial(pr^2)}{\partial z}, p = 3\mu \frac{\partial(v)}{\partial z} \quad (6)$$

玻璃的材料特性随温度、成分和微观结构的变化而变化。辐射特性和折射率尤其受掺杂剂影响。玻璃在室温下是一种过冷液体,粘度随温度变化非常大。因此,对于二氧化硅,基于动态粘度 μ 可用数据的曲线拟合表示为

$$\mu = 4545.45 \exp \left[32 \left(\frac{T_{\text{melt}}}{T} - 1 \right) \right] \quad (7)$$

其中, T_{melt} 是二氧化硅的软化点温度,约为 1900 K。该方程表明动态粘度 μ 随温度 T 呈强烈指数变化。

在光纤拉伸过程中,颈缩区玻璃的自由表面流动存在温差大、粘度和横截面积变化大的情况。由于光纤直径较小,业界通常假设整个颈缩区温度均匀。然而,由于粘度的高温依赖性,这种假设不能得到准确的结果。即使光纤半径在 62.5 μm 左右,也需要大量的网格点以捕获温度变化以及对特性、流动、粘性耗散、热诱导缺陷和掺杂剂移动的影响,颈部以下区域的直径越大,需要的网格点越多^[17-18]。因此,粘度随温度的变化情况对研究流动至关重要,流动反过来也决定了光纤的颈缩区形状、速度场和温度场。

1.2 光纤的拉制工艺

首先,将光纤预制棒送入高温炉内,石墨电阻炉通过辐射加热的方式使预制棒温度超过其软化点温度。再通过施加轴向张力,使预制棒下端被拉成直径约为 125 μm 的光纤。同时,向炉体内充入惰性气体,如氮气和氦气,排除氧气以保持惰性环境并避免内部石墨件在高温下被氧化。在拉伸过程中,预制棒下端在约为 0.3 m 的距离内直径从 140 mm 左右显著变化到约 125 μm 。预制棒的颈缩区形状由操作条件决定,例如炉温、预制棒直径、施加的张力和拉伸速度,以及

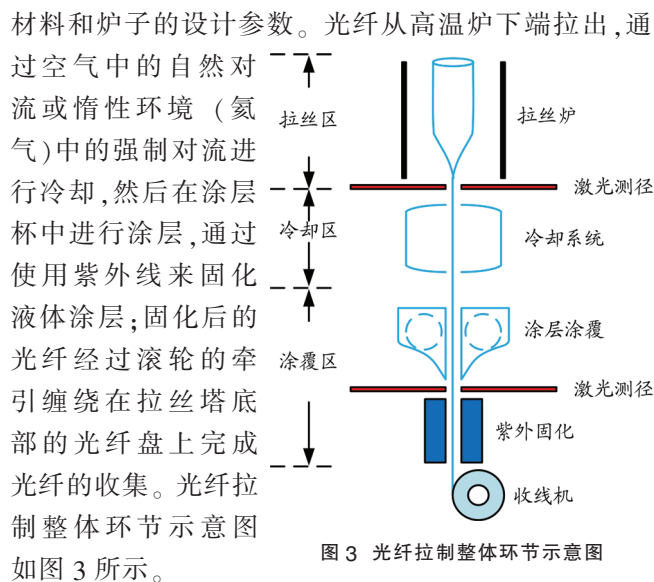


图3 光纤拉丝制整体环节示意图

2 实验和结果分析

本文针对熔炉尺寸、不同的惰性气体流速和配置,设计了相应的实验进行研究。

首先,本文对石墨加热炉进行改造。加高下端锥形马弗提高其锥形斜率,改变拉丝炉内温度场的分布和动态粘度,使光纤预制棒的颈缩区范围、斜率变大,下端直径变小;同时,减小因马弗下端玻璃延伸管的直径加长带来的扰动对光纤丝径波动的影响。预制棒拉丝实物图、拉丝炉实物图以及经改造之后得到的预制棒颈缩区实物图如图4~图6所示。

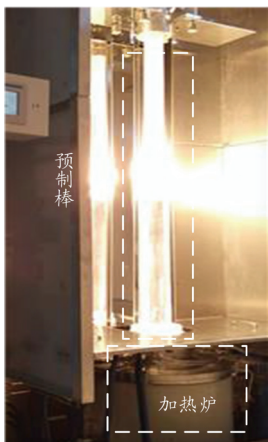


图4 拉丝实物图

然后,本文对一座拉丝塔进行改造并实验。保持光纤的拉丝速度为2000 m/min左右,炉内氩气流量为25 L/min,不使用氦气。在拉丝过程中使用基恩士测径仪对光纤直径进行在线采样,采取时长5 min的数据量。实验塔改造前后丝径波动情况对比如图7所示,图中对比项是实验塔改造前的数据,实验项是实验塔改造后的数据,箱型区域代表了75%的数据量,箱型区域的横线代表中位值,上下两端的棱形实心小点代表最大值与最小值,紧靠箱型区域的是样本数据的正态分布图。实验结果表

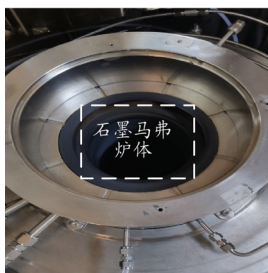


图5 拉丝塔实物图

明:经过改造后的试验塔的丝径波动与改造前有了明显改善,对比之前 $\pm 1\text{ }\mu\text{m}$ 的波动范围,改造后得到的波动范围可控制在 $\pm 0.7\text{ }\mu\text{m}$ 以内。

本文选取了5座非实验改造的拉丝塔,同样采取基恩士测径仪在线取样光纤的直径数据,并与实验拉丝塔进行对照。实验塔(拉丝线号为1)和非实验改造的拉丝塔(拉丝线号为2~6)的拉丝丝径波动对比情况如图8所示。实验结果表明:与其它拉丝塔样本的整体数据相比,实验塔的拉丝丝径波动范围的展宽有了明显的改善,其数据分布更加集中,符合正态分布;而且,光纤裸纤直径的上下限明显降低,可控制在124~125.3 μm 。



图6 预制棒颈缩区图

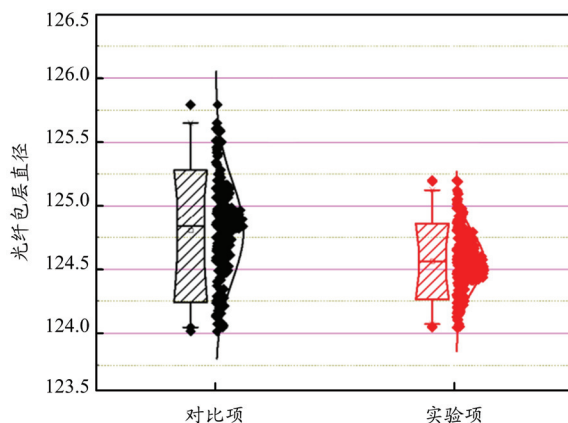


图7 改造前后丝径波动对比

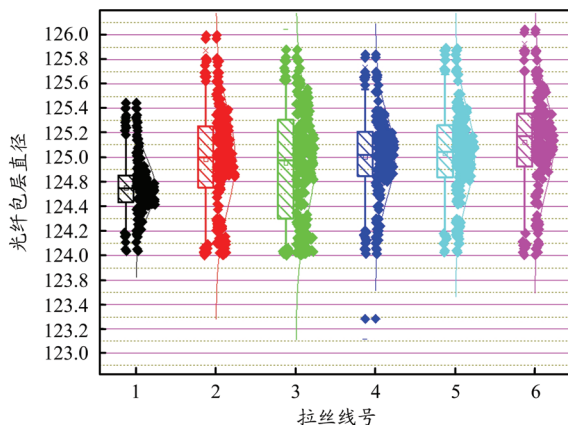


图8 实验塔与其它拉丝塔丝径波动对比

此外,本文使用改造后的拉丝炉研究 6 种惰性气体流速和配置情况下的丝径波动,6 种情况分别为:氩气为 25 L/min(情况 1)、氩气为 23 L/min 和氦气为 2 L/min(情况 2)、氩气为 21 L/min 和氦气为 4 L/min(情况 3)、氩气为 19 L/min 和氦气为 6 L/min(情况 4)、氩气为 17 L/min 和氦气为 8 L/min(情况 5)、氩气为 15 L/min 和氦气为 10 L/min(情况 6),实验结果如图 9 所示。其中,情况 1 为实验原始对照组。

由图 9 可知,当氦气的流量增加时,整体的展宽范围先降低后增加。在使用氦气时,采用 4 L/min 流量时得到的效果更好,丝径波动范围大致可控在 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 内。

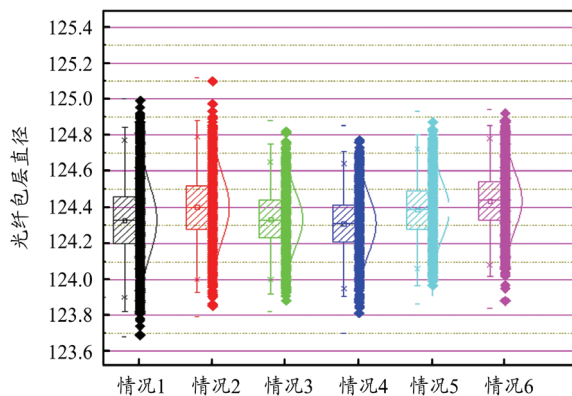


图 9 不同气体组合丝径波动情况对比

3 结束语

本文研究了光纤预制棒颈缩区的形状以及不同的惰性气体流速和配置对光纤拉丝过程中裸纤直径的影响。实验结果表明:增加光纤预制棒颈缩区的斜率有利于改善裸纤直径波动;改变炉下延伸管的尺寸使得炉后冷却区域加长,再搭配适合的惰性气体流速和配置可以减少拉丝过程中的微扰,进一步改善丝径波动控制。在接下来的工作中,本文作者将进一步研究更多不同尺寸的马弗对光纤预制棒颈缩区形状的改变而对光纤裸纤直径波动的影响,探究更多惰性气体流速和配置对光纤裸纤直径波动的影响。

参考文献:

- [1] 哈力木拉提·巴图尔, 浅谈 5G 通信系统中光纤通信的有效应用[J]. 电子测试, 2019(12): 128-129.
- [2] 崔秀国, 刘翔, 操时宜, 等. 光纤通信系统技术的发展、挑战与机遇[J]. 电信科学, 2016, 32(5): 34-43.

- [3] SHAFI M, MOLISCH A F, SMITH P J, et al. 5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2017, 35(6): 1201-1221.
- [4] RUGGERI E, TSAKYRIDIS A, VAGIONAS C, et al. A 5G fiber wireless 4Gb/s WDM fronthaul for flexible 360 degrees coverage in v-band massive MIMO small cells [J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(4): 1081-1088.
- [5] WEY J S, ZHANG J W. Passive optical networks for 5G transport: technology and standards [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(12): 2830-2837.
- [6] 薛辉, 陈娜, 陈振宜, 等. 半导体锗芯光纤拉丝过程中的芯-包层流速差异研究[J]. 光通信技术, 2020, 44(2): 42-46.
- [7] 谢康, 吴椿烽, 钱宜刚. 拉丝工艺对光纤性能的影响[J]. 光通信技术, 2013, 37(7): 47-49.
- [8] 徐鹏, 杨一帆. 拉丝速率对石英光纤的制备及耐辐照性能影响研究[J]. 功能材料, 2020, 51(2): 2155-2159.
- [9] 翟亚芳, 肖文辉, 王朝颖, 等. 塑料微结构光纤拉丝塔分区加热系统的设计[J]. 光通信技术, 2006, 30(3): 58-59.
- [10] PAEK U C, RUNK R B. Physical behavior of the neck-down region during the furnace drawing of silica fibers [J]. Journal of Applied Physics, 1978, 49(8): 4417-4422.
- [11] MYERS M R. A model for unsteady analysis of preform drawing[J]. Journal for the American Institute of Chemical Engineers, 1989, 35(4): 592-602.
- [12] CHENG X, JALURIA Y. Effect of furnace thermal configuration on optical fiber heating and drawing [J]. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 2005, 48(6): 507-528.
- [13] LEE S H K, JALURIA Y. Simulation of the transport processes in the neck-down region of a furnace drawn optical fiber [J]. International journal of heat and mass transfer, 1997, 40(4): 843-856.
- [14] CARANDANG G G, KIM K. Numerical investigation on He and Ar gas convective cooling for optical fiber glass drawing at short draw towers [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33(12): 5653-5658.
- [15] JALURIA Y. Manufacture of optical fibers: drawing and coating processes[M]. Cham: Springer, 2018: 239-286.
- [16] UVAROV V P, ILICHEVVA. Effect of technological parameter variations on the stability of optical fiber drawing [J]. Glass & Ceramics, 2003, 60(5-6): 143-145.
- [17] LUZI G, EPPLÉ P, RAUH C, et al. Study of the effects of inner pressure and surface tension on the fibre drawing process with the aid of an analytical asymptotic fibre drawing model and the numerical solution of the full N-St. equations [J]. Archive of Applied Mechanics, 2013, 83(11): 1607-1636.
- [18] TARONI M, BREWARD C, CUMMINGS L J, et al. Asymptotic solutions of glass temperature profiles during steady optical fibre drawing[J]. Journal of Engineering Mathematics, 2013, 80(1): 1-20.