

半导体锗芯光纤拉丝过程中的芯-包层流速差异研究

薛辉, 陈娜*, 陈振宜, 刘书朋, 商娅娜

(上海大学 特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200444)

摘要: 半导体芯光纤因其特殊的光电特性而受到广泛关注。由于纤芯和包层材料之间的性质差异, 制备高质量的半导体芯光纤比传统掺杂石英玻璃光纤更为困难。以锗芯光纤为研究对象, 通过有限元法, 模拟仿真了激光控制锗芯光纤的动态过程, 研究了控制过程中芯层锗和包层石英玻璃材料的流速差异, 以及不同拉丝速度对其流速差异的影响。仿真结果表明: 在预制棒颈缩区, 芯层锗和包层石英玻璃材料的流速差异最大, 且不同拉丝速度对预制棒芯层锗和包层石英玻璃材料的流速影响不同。

关键词: 锗芯光纤; 激光拉丝; 数值仿真; 芯-包层流速

中图分类号: TN256 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2020)02-0042-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.02.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study of the flow velocity difference of core and cladding during the drawing process of semiconductor Ge-core fiber

XUE Hui, CHEN Na*, CHEN Zhenyi, LIU Shupeng, SHANG Ya'na

(Key laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Semiconductor core fiber has attracted more and more attention due to its special photoelectric characteristics. The drawing of the semiconductor core fiber is more complicated than the conventional silica fiber due to the difference in properties between the core and the cladding material. In this paper, the Ge-core fiber is taken as the research object, and the dynamic drawing process of the Ge-core fiber is simulated by the finite element method. The difference in flow rate between the core of germanium and the cladding of silica, and the effect of different fiber drawing speeds on this flow rate difference are studied. The simulation result shows that significant difference of the core and cladding flow rate is at the position of the neck-down region of the preform, and the different drawing speed has different effects on the flow rates of the Ge-core and the silica-cladding of the preform.

Key words: Ge-core fiber; laser drawing; numerical simulation; core and cladding flow rates

0 引言

纯硅芯、纯锗芯光纤具有高导热性、宽透明窗口和高折射率等特点^[1], 在红外传输、传感以及全光系统中具有广阔的应用前景^[2]。近年来, 英国南安普顿大学^[3]、美国克莱姆森大学^[4]、美国宾夕法尼亚州立大学^[5,6]和

收稿日期: 2019-04-27。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61575120, 61475095)资助。

作者简介: 薛辉(1990-), 男, 硕士生, 现就读于上海大学通信与信息工程学院通信与信息系统专业, 主要从事半导体芯光纤的制备与特性研究, 分析模拟激光控制半导体光纤的动态过程, 期间参与的项目有硅锗半导体芯石英包层光纤的制备与特性研究, 在硅锗半导体芯光纤制备研究中做出贡献。

* 通信作者: 陈娜(E-mail: na.chen@shu.edu.cn)。



广州华南理工大学^[7]等均开展了纯锗芯、纯硅芯光纤技术研究, 在光纤拉丝工艺、光纤退火处理和光纤传输特性等研究方面取得一些成果, 这些研究中, 光纤是通过石墨炉加热和拉丝塔拉制而成的。上海大学前期同样采用石墨炉加热方式; 用熔芯法制备出了包层直径为 115~135 μm , 纤芯直径为 15~17 μm 的硅、锗芯光纤^[8], 并采用喇曼光谱对硅锗芯光纤的特性进行了分析研究^[9]。研究发现: 采用石墨炉加热半导体芯光纤的效果并不理想, 主要表现为温区过长、纤芯容易被氧化、芯包比不稳定, 从而导致光纤的传输性能较差。随着大功率激光技术的发展, 利用激光作为光纤拉丝的热源, 具有作用时间短、作用区域小、过程可直接观测和不易有杂质等优点。因此, 将激光拉丝系统

用于纯锗芯光纤的制备中,改善了石墨炉加热方式不易观测、温区过长等问题。但是,在激光拉制锗芯光纤过程中,仍然存在纤芯连续性差、芯包比不稳定等问题。产生这些问题的原因是芯-包层材料不同,虽然纯锗芯光纤和掺杂石英玻璃光纤的包层材料都是石英,但纯锗芯光纤的纤芯材料是锗,而掺杂石英玻璃光纤的纤芯材料是与包层同质的石英。在熔融状态下,锗芯和石英玻璃包层的粘度、比热容和密度存在较大的差异,难以拉制出高质量的纯锗芯光纤。

2004年,佐治亚理工学院 Zhiyong Wei 等人通过建立二维热流体仿真模型,用于预测石墨炉加热拉制石英玻璃光纤中锥区轮廓形状,并指出在光纤拉丝过程中,芯-包层的流速存在差异^[10]。而对于纯锗芯光纤,芯-包层的流速差异会更明显,由此导致在激光拉制纯锗芯光纤过程中,会出现芯区不连续、芯包比不稳定等问题。2017年,上海大学何婷和张炜等人建立激光拉丝模型,并与实验相结合,研究了半导体芯预制棒在激光作用下的温度分布^[11]和激光拉制锗芯光纤的动态拉丝过程^[12]。但是,并未讨论芯区不连续、芯包比不稳定的问题。

针对激光拉制锗芯光纤过程中出现的芯区不连续问题,本文基于光纤拉制的热传导方程,仿真研究了激光加热条件下,锗芯光纤拉丝过程中芯区锗和包层石英玻璃的流速差异性以及不同拉丝速度对其流速影响。

1 激光拉丝光路

在激光拉丝系统中,本文采用波长为 $10.6\text{ }\mu\text{m}$ 的 CO_2 激光器作为加热源。为了使激光均匀分布在预制棒表面,设计的反射镜组如图 1 所示。图 1(a)中,反射镜组包含 4 个组件:2 组锥面镜、1 个圆锥镜和 1 个斜 45° 的平面反射镜。反射镜组完成了激光光斑到光环的转换,并使激光均匀分布在预制棒表面。激光加热光纤预制棒的具体过程是:激光光斑经过圆锥镜和锥面

镜,由圆形光斑变为圆环,然后经斜 45° 平面反射镜反射到上方,最后经上方的锥面镜反射后,环形激光束在预制棒表面形成环状光斑。图 1(b)为反射镜组的截面图,可以直观地看出激光功率由高斯分布到半高斯分布的转换。

2 仿真模型

参考激光拉丝实验的引丝和稳定拉丝 2 个阶段,本文通过软件 (COMSOL Multiphysics) 分模拟光纤引丝阶段和模拟稳定拉丝阶段 2 个步骤建立仿真模型。

拉丝仿真模型的建立:在 r - z 坐标系中,同一 z 坐标下,预制棒表面激光功率密度相同,因此采用二维轴对称形式建立几何模型,如图 2 所示。图 2(a)表示以 $r=0$ 为对称轴、外径为 $3000\text{ }\mu\text{m}$ 、长度为 6 cm 和材料为纯石英玻璃的预制棒。芯层锗处于预制棒上方,半径为 $500\text{ }\mu\text{m}$ 、长度为 2 cm 。考虑到实际光路中高斯光束到环形光束的变换,为了更接近实际的功率分布函数,使用 ZEMAX 软件对光路仿真,得到图 2(a)中红色曲线所示的功率密度函数 $P(z)$ 。实验中,当预制棒收细后,表面积减小,激光功率密度 Q 增加。因此,边界热源设定时,需要引入一个半径比例因子 $\text{rate}=r_0/r$, r_0 为预制棒的初始半径, r 为当前位置的 r 轴坐标值,则边界热源设定的功率表达式为: $Q=P(z)\cdot\text{rate}$ 。图 2(b)是激光作用于预制棒表面后的温度分布,下端为引棒,作用是完成实验中的引丝过程。图 2(c)是完成引丝后,预制棒锥区轮廓和温度分布,由预制棒温度的分布可知,在激光加热较远区域,温度低于材料熔点,光纤状态不再变化,所以在稳定拉丝阶段中可以忽略这部分的计算。图 2(d)是第二步稳定拉丝的模型,上端为送棒入口,条件设定为 v_{in} ,表示预制棒的送棒速度;下端为光纤出口,条件设定为 v_{out} ,表示光纤拉丝速度。

在传热方面,模型整体的传热方程可以表示为^[12]:

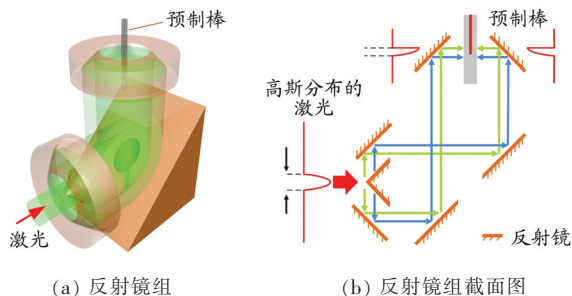


图 1 激光在反射镜组中的传输路径

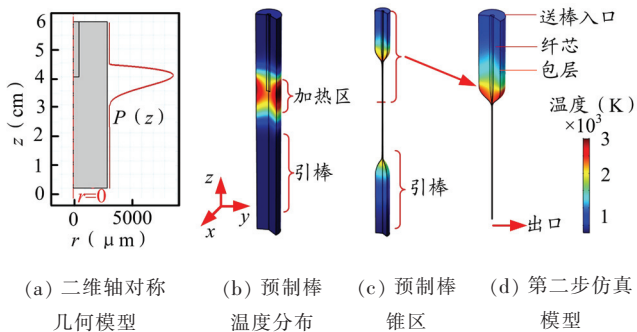


图 2 仿真模型

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot (\mathbf{q} + \mathbf{q}_r) = Q \quad (1)$$

其中, ρ 为密度, C_p 为比热容, ∇ 为矢量微分运算符, T 为温度, t 为时间, $\mathbf{u}$ 为速度矢量, $\mathbf{q}$ 为传导热通量, $\mathbf{q}_r$ 为辐射热通量, 预制棒的冷却是由空气对流和辐射散热共同造成的。空气对流可以表示为^[11]:

$$\mathbf{q} = h(T_{\text{ext}} - T) \quad (2)$$

其中, h 为热传导系数, T_{ext} 为外部温度。而辐射散热可表示为^[11]:

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}_r = \varepsilon \sigma (T_{\text{ext}}^4 - T^4) \quad (3)$$

其中, $\mathbf{n}$ 为表面向外的法向量, ε 为表面发射率, σ 是史蒂芬-玻尔兹曼常数。

在流体部分的研究中, 熔融 SiO_2 和熔化后的锗是牛顿不可压缩流体, 整个模型的流体部分由纳维斯托克斯方程控制, 其方程可以表示为^[12]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \boldsymbol{\tau}] + \mathbf{F} \quad (5)$$

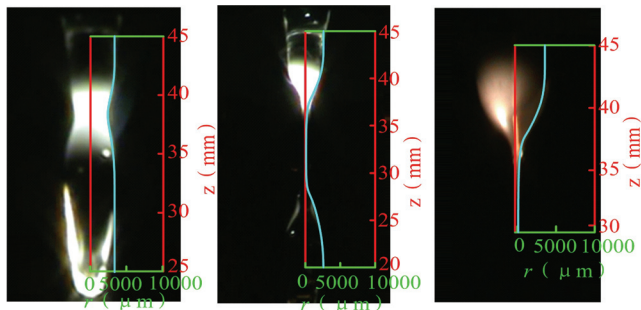
其中, 式(4)为连续性方程, 式(5)为动量方程, p 为压强, $\boldsymbol{\tau}$ 为粘性应力张力, $\mathbf{F}$ 为体积力, $\mathbf{I}$ 为单位矩阵。

3 结果分析

激光拉制锗芯光纤实验过程可分为引丝阶段和稳定拉丝阶段。本文监测了实验拉制锗芯光纤过程中预制棒轮廓的动态变化, 并与仿真结果进行了比较。

3.1 预制棒锥区轮廓形成阶段

在引丝阶段, 设定入口速度为 2 mm/min, 激光功率为 320 W。在激光拉丝实验中, 用摄像机采集预制棒轮廓变化过程。图 3 是摄像机采集的视频中不同拉丝阶段的图片, 其中图 3(a)和图 3(b)是预制棒引丝阶段的截图, 图 3(c)是稳定拉丝阶段的截图。图 3 中的实线是仿真得到的预制棒轮廓曲线, 可以看出实验结果和仿真结果符合较好, 这也证明了仿真结果的可靠



(a) 引丝阶段, $t=78$ s (b) 引丝阶段, $t=84.9$ (c) 稳定拉丝阶段

图 3 实验和仿真结果对比

性。图 3(a)和图 3(b)中芯区锗材料还未到达加热区, 而在图 3(c)中可以明显看出锗芯的存在。图 4 是仿真中预制棒轮廓变化过程图, 可以看出不同拉丝时间预制棒的轮廓曲线: 在前 80 s, 预制棒处于温度上升的阶段, 轮廓变形较慢; 在 84 s 后轮廓变形加快; 在 85.3 s, 引棒下移距离大约是 120 mm, 预制棒锥区形成, 引丝阶段仿真完成。

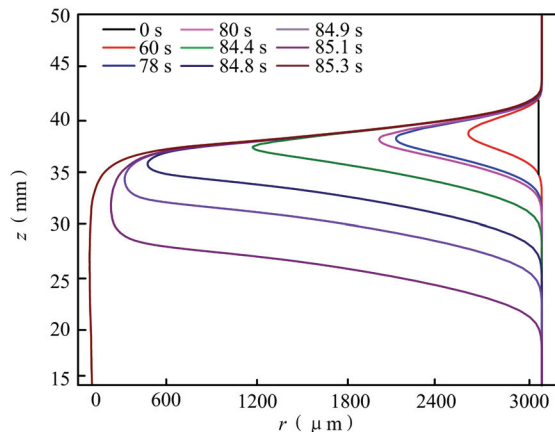


图 4 预制棒包层轮廓曲线

3.2 稳定拉丝阶段

稳定拉丝阶段是指在光纤拉丝过程中, 设定恒定的预制棒送棒速度和光纤拉丝速度, 光纤拉丝过程进入一个持续的稳定拉丝状态。为了研究不同拉丝速度对石英玻璃光纤和纯锗芯光纤芯-包层流速的影响, 通过数值仿真做了以下实验: 4 组对照实验, 设定不同送棒速度和拉丝速度, 具体数值如表 1 所示, 其它参数相同, 分别对石英玻璃光纤拉制过程和纯锗芯光纤拉制过程进行研究。

石英玻璃光纤拉制过程中, 在预制棒 z 为 30~40 mm 之间每隔 2 mm 作径向的平行切线, 取出切线上的芯-包层流速值, 结果如图 5 所示。芯-包层流速出现差异的位置是 z 为 32~38 mm 之间, 在 z 为 32~34 mm 之间芯-包层流速差最明显, 在 $z=30$ mm 以下区域芯-包层流速基本一致。对比图 5(a)~图 5(d)中径向切线 $z=$

表 1 数值仿真设定的边界条件参数

组号	包层半径 (μm)	芯层半径 (μm)	送棒速度 v_{in} (mm/min)	拉丝速度 v_{out} (m/min)	光纤半径理论值 (μm)
a	3000	500	2	4.6	62.5
b	3000	500	5	11.5	62.5
c	3000	500	13	30	62.5
d	3000	500	26	60	62.5

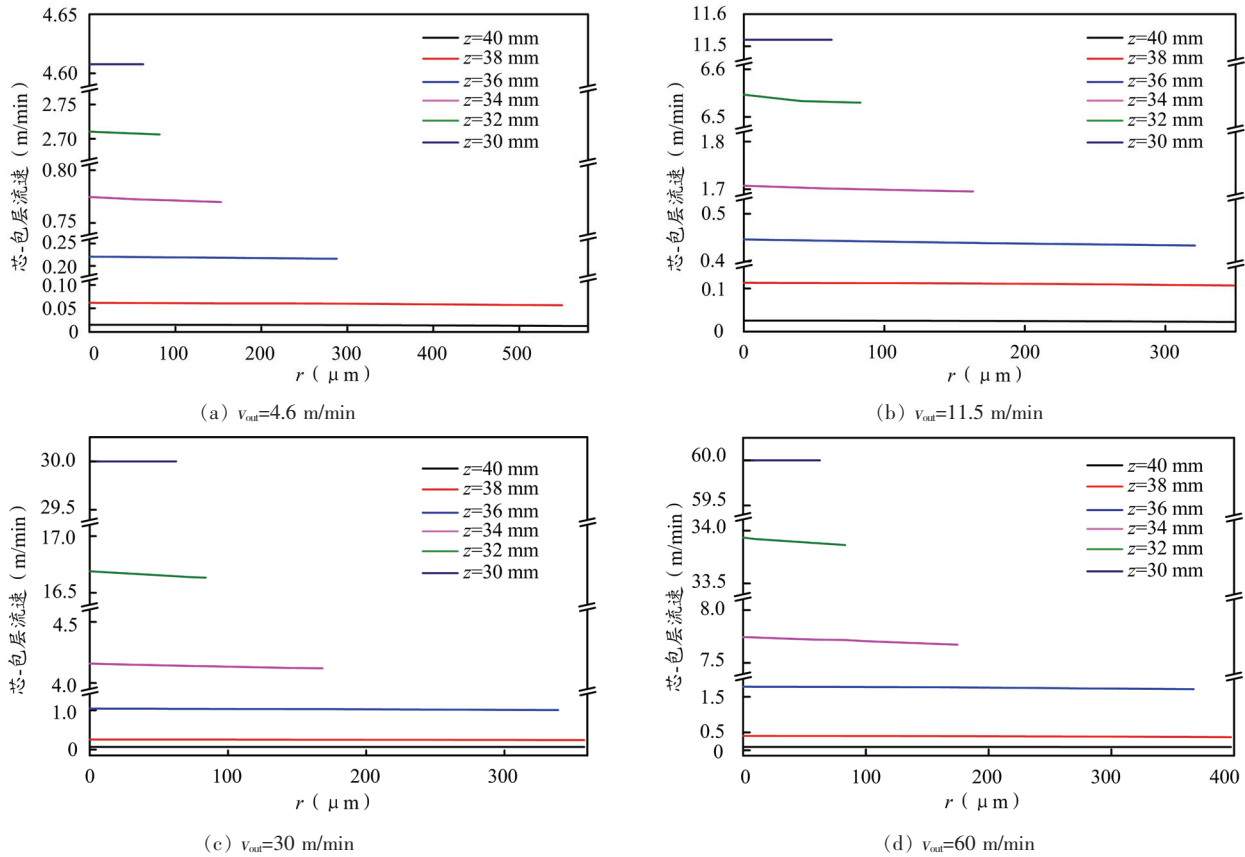


图5 石英玻璃光纤拉制过程中,预制棒锥区芯-包层流速(双斜杠表示纵坐标在这段数值附近较大范围内无有效信息)

32 mm 的芯-包层流速,结果如表 2 所示。可以看出:芯层流速 v_{co} 均大于包层流速 v_{cl} , 芯层流速 v_{co} 相对变化率随拉丝速度提高而减小, 但相对变化率很小, 均在 0.5% 以内。

纯锗芯光纤拉制过程中,在预制棒 z 为 30~40 mm 之间每隔 2 mm 作径向的平行切线,取出切线上的芯-包层流速,结果如图 6 所示。相比石英光纤,纯锗光纤芯-包层流速差异更明显。由于芯区和包层材料不同,在芯-包界面流速曲线有个明显的转变。对比图 6(a)~图 6(d)中径向切线 $z=32$ mm 的芯-包层流速,结果如表 3 所示。可以看出:相比石英玻璃光纤,纯锗光纤芯-包层流速差异明显增大;芯区流速 v_{co} 相对变化率

随拉丝速度提高而增加。

对比石英玻璃光纤和纯锗芯光纤的仿真结果可以得出:在光纤拉制过程中,石英玻璃光纤芯-包层流速在锥区位置有差异,但差异较小;纯锗芯光纤锥区芯-包层流速差异明显,在芯-包界面流速会有明显的变化。对比石英玻璃光纤和纯锗芯光纤芯层流速相对变化率可以得出:石英玻璃光纤中芯区流速变化很小,芯区流速相对变化率随拉丝速度提高而减小;而在纯锗芯光纤中,芯区域流速相对变化率很大,在 40% 以上,增大拉丝速度,芯区流速相对变化率增加明显,芯区流速相对变化率随拉丝速度提高而增大。在实验中,芯-包层流速差过大会造成丝径不稳定,包层

表 2 石英玻璃光纤拉制中, $z=32$ mm 芯-包层流速值

组号	包层流速 $v_{cl}(\text{m/min})$	芯层流速 $v_{co}(\text{m/min})$	芯-包层流速差 $\Delta v=v_{co}-v_{cl}(\text{m/min})$	v_{co} 相对变化率 $\Delta v/v_{cl} \cdot 100\%$
a	2.7045	2.7113	0.0068	0.25%
b	6.5300	6.5468	0.0168	0.26%
c	16.6446	16.6851	0.0405	0.24%
d	33.8631	33.9346	0.0715	0.21%

表 3 纯锗芯光纤拉制中, $z=32$ mm 芯-包层流速值

组号	包层流速 $v_{cl}(\text{m/min})$	芯层流速 $v_{co}(\text{m/min})$	芯-包层流速差 $\Delta v=v_{co}-v_{cl}(\text{m/min})$	v_{co} 相对变化率 $\Delta v/v_{cl} \cdot 100\%$
a	2.75	3.92	1.17	42.55%
b	6.52	9.44	2.92	44.79%
c	16.48	25.88	9.40	57.04%
d	32.31	51.34	19.03	58.90%

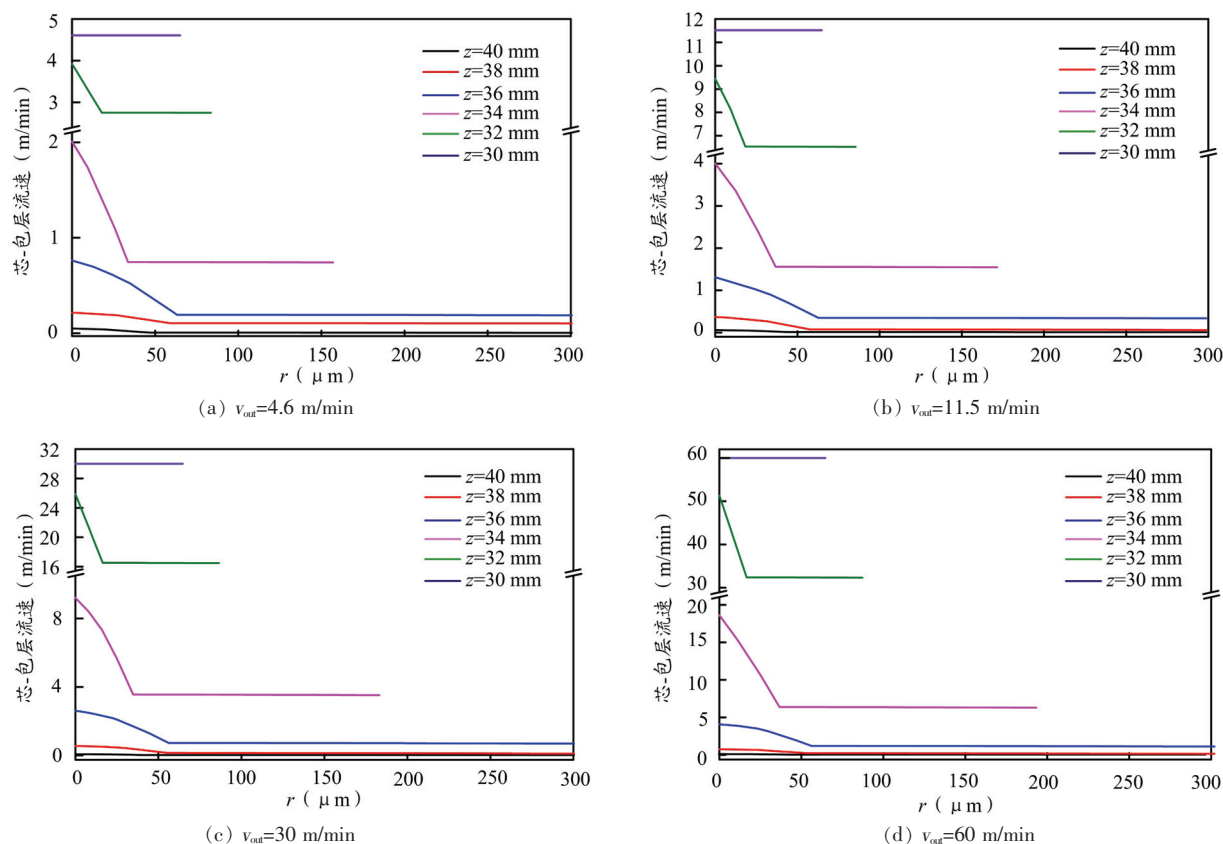


图6 纯锗芯光纤拉丝过程中,预制棒锥区芯-包层流速分布(双斜杠表示纵坐标在这段数值附近较大范围内无有效信息)

直径和芯层直径之比会有较大波动,芯区出现断裂等情况。从以上仿真数据可以看出,适当降低拉丝速度可以改善上述问题。

4 结束语

本文建立仿真模型,模拟了纯锗芯石英玻璃包层光纤预制棒拉制成光纤的动态过程,并把仿真得到的预制棒轮廓和摄像机记录的实际激光拉丝轮廓进行对比,实验结果和仿真结果符合较好。通过数值仿真,重点分析了半导体芯光纤拉丝过程中芯-包层材料流动速度变化。结果表明:半导体芯光纤拉丝过程中,预制棒颈缩区芯-包层材料流动速度差异最明显,不同的光纤拉丝速度对芯-包层材料流动速度影响不同。

参考文献:

- [1] SOREF R. Mid-infrared photonics in silicon and germanium [J]. Nature Photonics, 2010, 4(8): 495-497.
- [2] WON D J, RAMIREZ M O, KANG H, et al. All-optical modulation of laser light in amorphous silicon-filled microstructured optical fibers [J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(16): 161112-1-161112-3.
- [3] SAZIO P J A, AMEZCUA-CORREA A, FINLAYSON C E, et al. Microstructured optical fibers as high-pressure microfluidic reactors [J].

Science, 2006, 311(5767): 1583-1586.

[4] BALLATO J, HAWKINS T, FOY P, et al. Silicon optical fiber [J]. Optics express, 2008, 16(23): 18675-18683.

[5] JI X, PAGE R L, CHAUDHURI S, et al. Single-Crystal Germanium Core Optoelectronic Fibers [J]. Advanced Optical Materials, 2017, 5(1): 1600592-1-1600592-6.

[6] JI X, LEI S, YU S Y, et al. Single-crystal silicon optical fiber by direct laser crystallization [J]. ACS Photonics, 2016, 4(1): 85-92.

[7] 彭康亮. 半导体纤芯/玻璃包层复合光纤的制备与研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.

[8] ZHANG S, ZHAO Z, CHEN N, et al. Temperature characteristics of silicon core optical fiber Fabry - Perot interferometer [J]. Optics letters, 2015, 40(7): 1362-1365.

[9] WANG D, CHEN N, CHEN Z, et al. Composition and strain analysis of $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ core fiber with Raman spectroscopy [J]. AIP Advances, 2018, 8(6): 065006-1-065006-6.

[10] WEI Z, LEE K M, TCHIKANDA S W, et al. Free surface flow in high speed fiber drawing with large-diameter glass preforms [J]. Journal of heat transfer, 2004, 126(5): 713-722.

[11] HE T, ZHAO Z, CHENG X, et al. Temperature distribution of preform in drawing silicon core optical fiber with CO_2 laser heating [J]. High Power Laser & Particle Beams, 2016, 28(9): 091003-1-091003-6.

[12] ZHANG W, CHEN N, CHEN Z, et al. The dynamic process of laser drawing germanium core optical fiber [C]//In Journal of Physics Conference Series, March 16-18, 2017, Nanjing, China. Nanjing: IOP Publishing, 2017.