

熔锥型光纤耦合器流变成形的工艺敏感性研究

帅词俊,段吉安,钟 掘

(中南大学 机电工程学院,湖南 长沙 410083)

摘要:基于理论与实验研究,建立了光纤耦合器熔融拉锥过程的粘弹流变力学模型,并给出了光纤耦合器非均匀温度场条件下的流变过程数值分析,获得了拉锥速度、熔融温度等流变工艺参数对器件应力分布与器件性能的影响规律。特别是熔融温度对器件应力分布的影响极为突出,熔融温度变化5℃可导致最大应力变化30%,同截面的应力差值改变20%,温度梯度变化3%可以导致锥区截面的应力差值改变90%。并发现在目前的流变工艺条件下,光纤耦合器易产生耦合区析晶、锥区微裂纹等流变缺陷,目前的流变制造技术与设备难以实现器件的微观结构与折射率均匀分布。该研究为光纤耦合器流变制造工艺与设备的改进、优化提供了基础。

关键词:光纤器件;熔融拉锥;粘弹流变力学

中图分类号:TH162 **文献标识码:**A

Technical sensitiveness in the rheological manufacture progress of fused taper coupler

SHUAI Ci-jun, DUAN Ji-an, ZHONG Jue

(College of Mechanical and Electrical Engineering,
Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Through theoretical and experimental research, the viscoelastic mechanical model of optical fiber coupler in the process of fused biconical taper was established, with which, the numerical analysis under non-uniform temperature field was realized. The results show that rheological parameters such as drawing speed and fused temperature have a tremendous influence on stress distribution and performance of optical fiber coupler, especially the influence of fused temperature. The change of fused temperature by 5℃ can lead to the change of maximum stress by 30% and stress difference by 20% in the same cross section. The change of temperature gradient by 3% can result in the change of stress difference by 90%. Under the present condition of rheological technology, the optical fiber coupler is prone to generating rheological defects such as crystallizations and microcrack. It is difficult to realize uniform distribution of microstructure and refractive index with the present rheological manu-

收稿日期:2004-11-12; **修订日期:**2005-01-20.

基金项目:国家重点自然科学基金资助项目(No. 50235010)

facture technology and equipment.

Key words: fiber coupler; fused biconical taper; viscoelastic rheology

1 引言

光纤耦合器是一种光分路与合路的光无源器件^[1]。其制作工艺过程为:将两根除去涂覆层的单模(或多模)光纤以一定的方式靠拢,在高温下加热熔融,同时向两侧拉伸,最终产生一段双向圆锥结构,入射的光信号在这个双锥体结构的耦合区发生功率再分配,一部分光从“直通臂”继续传输,另一部分光从“耦合臂”传输^[2-4]。其高温的获得一直用微型燃烧器,熔融条件则靠耦合器制造设备的机械参数来控制,包括拉锥速度、流动气体的量、微型燃烧器离光纤的距离、以及加热时间等。在很多情况下,这些机械参数值是因设备而异的,因此,熔融条件不只由光纤的熔融温度和拉锥速度之类的物理参数决定。而到目前为止,光学性质和锥体形状之间的关系从来没有用这些物理参数分析过。

从国内外的研究现状来看,目前对光纤耦合器的光学原理分析与设计较多,而从制造科学角度,对流变制造过程的力学行为规律研究不足,尤其对流变制造工艺参数与器件光学性能的相关机制和规律认识不够^[5-7],基本上处于一种基于经验的技艺阶段。器件的性能及其一致性较差,效率和成品率低。我国目前光纤器件的流变制造技术与设备基本依赖进口^[8]。这里以光纤耦合器为研究对象,研究其流变制造工艺和器件光学性能的相关规律^[9-10]。

2 光纤耦合器流变制造实验研究

2.1 流变工艺参数对光纤耦合器性能的影响

熔融拉锥流变过程主要包括拉锥速度

(V)、火焰温度等工艺参数。这里以拉锥速度为例,实验测试其对器件性能的影响。其他工艺条件不变,改变拉锥流变速度,获得不同流变速度下耦合器的损耗(IL)如图 1 所示(图中每个点都是 20 次实验数据的统计平均值)。

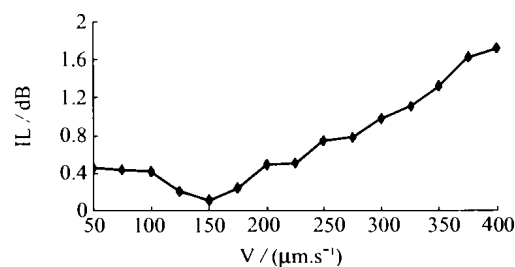


图 1 拉锥速度与损耗的相关规律

Fig. 1 Relevant laws between IL and drawing speed

由图 1 可见,存在一个很窄的流变速度区间(这里为 $150 \mu\text{m/s}$ 附近的区间),使得光纤耦合器的损耗较小,即性能及其一致性较好;离开此区间,器件的性能迅速下降。因此拉锥速度与器件性能密切相关,需要精确控制拉伸速度,才能获得性能优良的光纤耦合器。

2.2 光纤耦合器的典型流变缺陷

由两熔锥光纤融合而成的光纤耦合器可分成两部分,长为 W 的耦合区域和两个长为 L 的锥形区域,如图 2 所示。裸光纤的表面原本十分光滑。如图 3 所示。

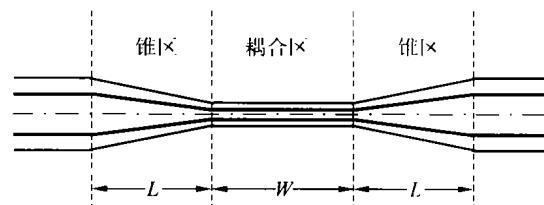


图 2 熔锥型光纤耦合器的结构示意图

Fig. 2 Structure sketch map of fused taper

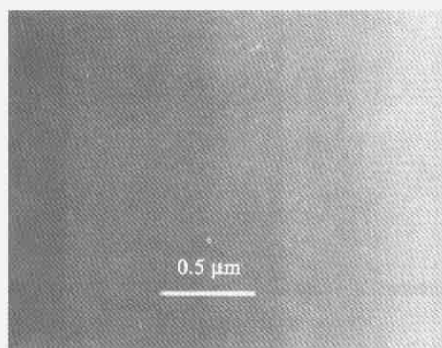


图3 裸光纤表面

Fig. 3 Surface of naked optic fibre

将熔融拉锥流变制造的光纤耦合器置于扫描电镜下观测,发现其锥区产生了微裂纹、耦合区发生了析晶等缺陷,严重影响器件的光学性能。不同拉锥速度下光纤耦合器的锥区表面形貌如图4所示。由图可见,随着拉锥速度的增加,光纤耦合器的锥区微裂纹愈加严重。

不同拉锥速度下光纤耦合器的耦合区表面形貌如图5所示。由图可见,在原本是非晶体结构的耦合区表面,析出了方石英晶体,且拉锥速度越低,析晶越严重。

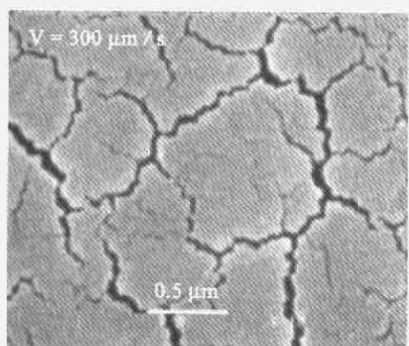
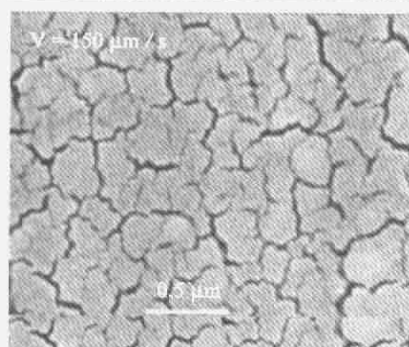
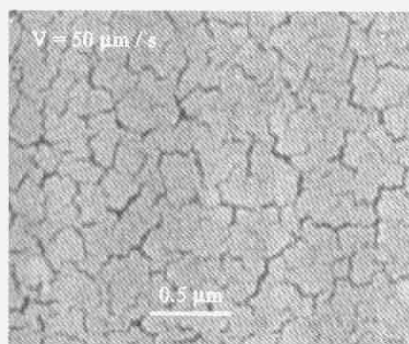


图4 光纤耦合器锥区的表面扫描电镜图
Fig. 4 Surface in taper region of the fiber coupler

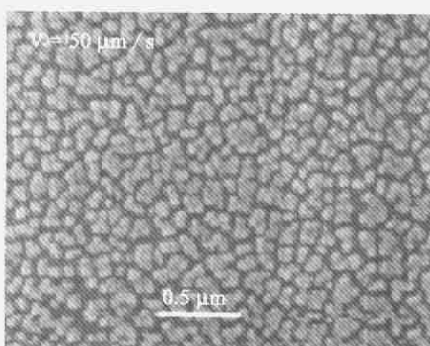
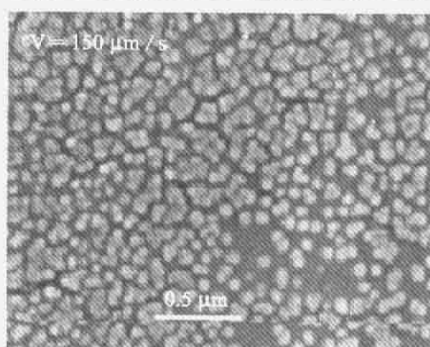
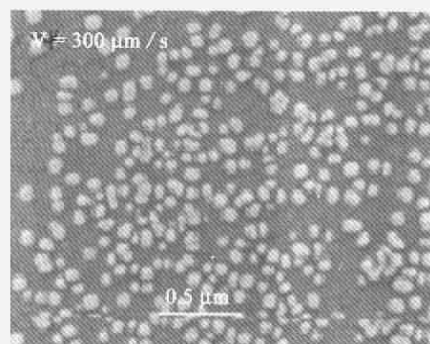


图5 光纤耦合器熔耦合区的表面扫描电镜图
Fig. 5 Surface in fused region of the fiber coupler

由此可见,锥区微裂纹和耦合区析晶这两类流变缺陷都与拉锥速度密切相关,拉锥速度增大时锥区微裂纹加剧,而拉锥速度减小时耦合区析晶加剧。只有在适当拉锥速度下这两类缺陷都较小时,才能获得较小的器件损耗。这正是导致光纤耦合器损耗与拉锥速度间具有图 1 所示关系的重要原因。

3 熔融拉锥流变过程建模与有限元仿真

光纤耦合器熔融拉锥制造是一个很复杂的热力耦合粘弹流变过程,光纤的微观形貌与流变过程的应力状态密切相关。这里以流变场的应力状态演变为核心,对熔融拉锥过程进行流变力学仿真分析,以期阐明光纤器件性能与流变工艺参数的相关规律。

3.1 熔融拉锥过程的流变力学模型

3.1.1 运动方程

根据光纤的轴对称结构特征,简化为二维问题。根据热粘弹理论,其运动方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + X &= (\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}) \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + Y &= (\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}), \end{aligned} \quad (1)$$

式中的应力分量 $(\sigma_{xx}, \sigma_{yy})$ 包括拉伸速度引起的拉应力与温度改变引起的热应力。 u 、 v 是光纤质点分别在 x (轴向)、 y (径向)方向的速度分量。

3.1.2 导热方程

将熔融拉锥过程视为二维的瞬态热传导过程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] - \left[u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right], \quad (2)$$

式中: T 为温度(K); t 为时间。 k 为光纤的导热系数(J/(m·s·K)); $a = k/(\rho c)$ 为热

扩散系数(m²/s); ρ 为光纤的密度(Kg/m³); c 为光纤的比热(J/(Kg·K))。

3.1.3 本构方程

光纤高温流变过程中,其应力松弛可以用广义 Maxwell 方程表达。其等温(T_0)条件下的积分型本构方程为^[11-12]:

$$\sigma(T_0, t) = \int_0^t 2G(T_0, t-\tau) \frac{d}{d\tau} e(\tau) d\tau + \mathbf{I} \int_0^t k(T_0, t-\tau) \frac{d\Delta}{d\tau} d\tau, \quad (3)$$

式中: σ 为应力, τ 为应变, e 为应变偏张量, Δ 为应变球张量, $G(t)$ 为剪切松弛函数, $K(t)$ 为体积松弛函数, \mathbf{I} 为单位张量。

3.2 工艺参数对光纤耦合器应力分布的影响分析

基于有限元分析方法,利用有限元软件 ANSYS 中的 APDL 语言,自行编写了热粘弹分析程序。对以上流变模型进行数值求解,获得不同流变工艺参数下流变场的应力分布。

3.2.1 拉锥速度的影响

在相同熔融温度场下改变拉锥速度,计算分析了拉锥速度对光纤耦合器应力场的影响。

拉锥速度对光纤耦合器中最大应力的影响如图 6 所示。可见,在 0~400 $\mu\text{m/s}$ 拉锥速度范围内,器件的最大应力与拉锥速度成正比。

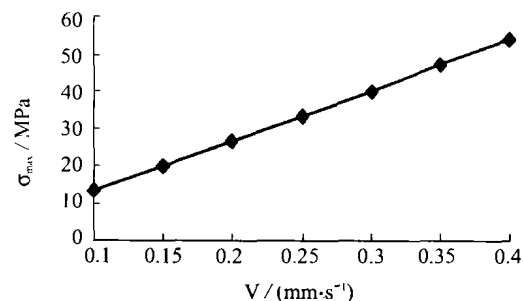


图 6 拉锥速度与器件最大应力的关系

Fig. 6 Maximum equation stress and drawing

拉锥速度对器件不同截面的应力差(应力不均匀性)的影响如图 7 所示。可见,器件内部应力分布的不均匀性随拉锥速度的增大而加剧(其中锥区应力的不均匀性尤为严重),使器件性能下降。

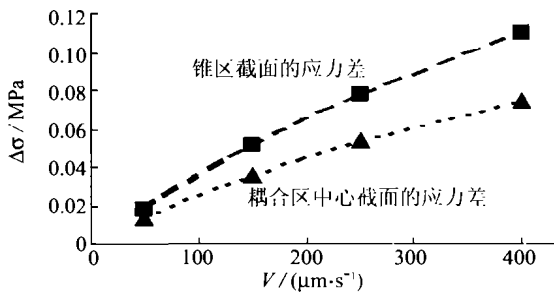


图 7 拉锥速度与不同截面应力差的关系
Fig. 7 Stress difference and drawing speed in a section

3.2.2 熔融温度的影响

流变过程中,光纤实际上是处于燃烧火焰形成的温度场中。将光纤所处的火焰最高温度定义为熔融温度。在相同拉锥速度下改变熔融温度(火焰各点的温度作相同量值的改变,使火焰温度场的梯度保持不变),计算分析了熔融温度对光纤耦合器应力分布的影响。器件的最大等效应力与熔融温度的关系如图 8 所示。可见 5 C 的温度扰动可以引起器件的应力变化 30%。不同熔融温度下器件不同截面的应力不均匀性如图 9 所示。可见提高熔融温度有利

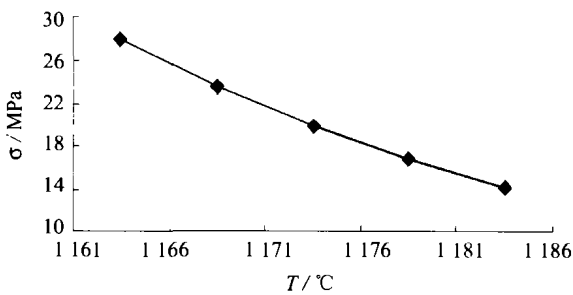


图 8 熔融温度与光纤耦合器最大应力的关系
Fig. 8 Maximum equivalent stress and temperature

于器件应力分布均匀化。5 C 的温度变化可导致应力差改变 20%。

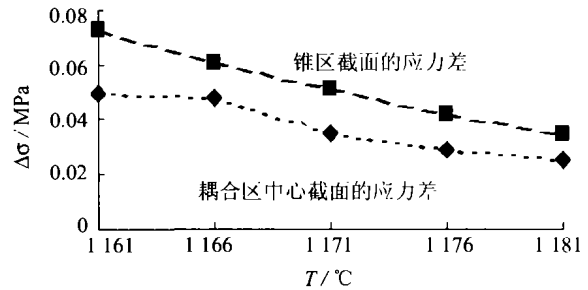


图 9 熔融温度与器件不同截面应力差的关系
Fig. 9 Stress difference and temperature in a section

3.2.3 熔融温度场分布的影响

在拉锥速度和熔融温度(即火焰最高温度)不变的条件下,改变火焰温度场的梯度(图 10 所示为两个不同梯度的火焰温度场),计算分析了温度场梯度变化对器件应力分布的影响。

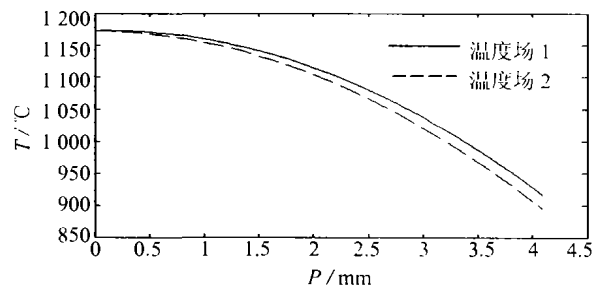


图 10 不同梯度的温度场

Fig. 10 Temperature field with different gradient

温度场 1 与温度场 2 的梯度差为 3% (温度场 1 的梯度较小,两个温度场的最大温差 $< 10\text{ C}$)。温度场 1 对应的器件截面应力分布如图 11 所示。

温度场 2 对应的器件截面应力分布如图 12 所示。

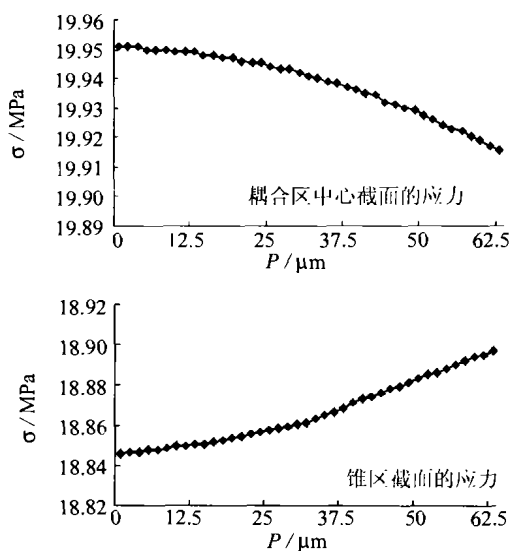


图 11 温度场 1 条件下器件不同截面的应力场径向分布

Fig. 11 Stress in the different section in temperature field 1

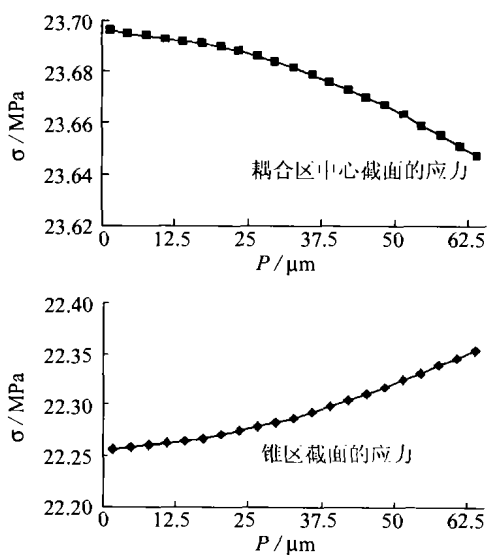


图 12 温度场 2 条件下器件不同截面的应力场径向分布

Fig. 12 Stress in the different section in temperature field 2

参考文献:

- [1] 宋金声. 我国光无源器件的技术进展和发展趋势[J]. 世界宽带网络, 2002, 9(11): 16-18.
SONG J S. Technological advance and developmental trend of passive devices in china[J].
Broad Band Web in the World, 2002, 9(11): 16-18. (in Chinese)

由图 11 与图 12 可见, 温度梯度对器件的应力分布的影响极为突出, 增加温度梯度将显著增大锥区的应力不均匀性, 3% 的梯度变化可以导致器件的最大应力值改变 20%、锥区截面的应力差改变 90%。

目前光纤器件流变制造设备中, 熔融温度场一般采用燃烧火焰获得, 实际测试表明, 火焰中心的温度漂移约为 5℃, 而火焰边缘的温度漂移可达 50℃。可见, 燃烧火焰的加热方式远不能满足高性能光纤器件的流变制造技术要求, 亟待开发高稳定、温度梯度优化的特种加热技术。

4 结 论

本文通过对光纤器件流变过程进行理论仿真与实验研究, 发现了熔融温度对器件应力分布的影响极为突出, 熔融温度变化 5℃ 可导致最大应力变化 30%, 同截面的应力差值改变 20%, 温度梯度变化 3% 可以导致锥区截面的应力差值改变 90%。发现目前的工艺条件下, 器件易产生耦合区析晶、锥区微裂纹等流变缺陷, 严重影响器件性能, 认识到目前的光纤耦合器流变制造技术与设备难以实现器件的微观结构与折射率均匀分布, 以上工作为光纤器件流变制造工艺与设备的改进、优化提供了理论基础和依据。

- [2] THOMAS F S. Finite-element calculation of stresses in glass parts undergoing viscous relaxation[J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1987,70(2):90-95.
- [3] KAZUHIRO H. Silicon optical MEMS; optical components and sensors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(6):632-633.
- [4] SAKAI M, SHIMIZU S. Indentation rheometry for glass-forming materials[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2001,282(1):236-247.
- [5] 曾毅,侯国章.一种新型光纤传感器在精密产品加工中的应用研究[J]. *光学精密工程*, 2001,9(2):139-141.
ZENG Y, HOU G Z. Applications of novel optical fiber sensors in manufacturing precision products[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001,9(2):139-141. (in Chinese)
- [6] CASSAGNAU P, MELIS F. Non-linear viscoelastic behaviour and modulus recovery in silica filled polymers[J]. *Polymer*, 2003,44(21): 6607-6615.
- [7] SAKAGUCHI S, TODOROKI S. Viscosity of silica core optical fiber[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1999,244(2):232-237.
- [8] GEORGE W S. Theories of relaxation[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1990,123(1): 75-89.
- [9] BONNET J P. On the thermally activated structural relaxation in glasses[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1991,127(1):227-231.
- [10] JAN P, VAN D B. Master stress relaxation function of silica glasses[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1996,196(2):210-215.
- [11] GEORGE W S. Model of structure relaxation in glass with variable coefficient[J]. *Communications of the American Ceramic Society*, 1986,89(7):94-96.
- [12] CHUN H H. Mathematical model of viscosity measurements for viscoelastic solids[J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1986,69(3):48-49.

作者简介:帅词俊(1976—),男,湖南浏阳人,博士,主要研究方向为光器件制造、计算机辅助设计与制造。Email:shuai@mail.csu.edu