

# 微结构光纤预制棒拉制过程的温度场分布\*

周桂耀<sup>1)†</sup> 侯峙云<sup>2)</sup> 潘普丰<sup>2)</sup> 侯蓝田<sup>1)‡</sup> 李曙光<sup>2)</sup> 韩 颖<sup>2)</sup>

1) 燕山大学亚稳材料制备技术与科学重点实验室, 秦皇岛 066004)

2) 燕山大学红外光纤与传感研究所, 秦皇岛 066004)

(2005 年 1 月 14 日收到, 2005 年 4 月 18 日收到修改稿)

根据非稳态傅里叶热传导方程及微结构光纤(MSF)预制棒的初始条件和边界条件, 建立圆柱形坐标系, 推导出 MSF 预制棒的温度场分布方程. 计算结果表明: 当 MSF 预制棒在高温炉内的温度场分布接近热传导稳态分布时的下棒速度为制备 MSF 的最佳速度, 此时高温炉的加热温度可降低到 MSF 预制棒的软化温度, 另外, 随着 MSF 空气填充率的增加, MSF 预制棒的下棒速度也应加快.

关键词: 微结构光纤, 光纤预制棒, 温度场分布, 热传导

PACC: 4410, 4281, 4281B

## 1. 引 言

目前已有大量关于微结构光纤(MSF)性能研究的报道<sup>[1-12]</sup>, 这表明了 MSF 具有重要的作用和美好的发展前景. 由于大多数 MSF 都是由单一材料(如纯石英或聚合物——PMMA 等)和空气孔所组成, 因此, MSF 结构的设计具有高度的灵活性, 通过调整空气孔的排列方式和空气填充率则可达到多种不同的应用<sup>[13-15]</sup>, 这是传统光纤所无法做到的.

MSF 奇异的光学特性与 MSF 的结构有密切关系, 两种不同折射率物质的(空气和石英玻璃)排布方式, 即空气孔的尺寸大小、形状、空气孔之间的距离, 空气孔排布的形状、中间传光芯径的尺寸与形式(是空芯、还是实芯或椭圆形)等都影响着 MSF 的基本性能<sup>[16]</sup>. MSF 包层中的空气孔的有序排列相当于二维光子晶体结构, 这对于某一方向的波矢会产生光子带隙效应, 使位于带隙中的光不能在包层中传输, MSF 的纤芯相当于光子晶体结构中的线缺陷, 使不能在包层中传输的光都局域在纤芯中<sup>[17]</sup>. 此时, 在纤芯中传输的光不再受全内反射临界角的约束, 甚至被弯曲到曲率半径接近光学原子半径时都可以低损耗进行传输<sup>[18]</sup>. 因此, 通过改变空气孔在 MSF 包层中的分布规律和几何尺寸, 使其适合于不

同领域的应用, 这是光纤的一次革命. 但是, 在制备 MSF 时, 由于材料表面张力的作用, 在高温熔融状态下, MSF 预制棒内的气孔产生收缩或形变, 致使制备出来的 MSF 内部结构变成不规则, 甚至被破坏, 从而极大地影响了 MSF 的光学性能, 无法达到预想的结果, 给制备 MSF 带来了一定的困难. 材料的表面张力和材料的黏度都是温度的函数, 因此, 通过控制拉制温度可抑制或减小表面张力和黏度对 MSF 结构的影响. 为此我们通过理论计算得出 MSF 预制棒在拉丝过程中的温度场分布规律, 在制备不同结构 MSF 和在不同的环境条件下所应采用的最佳温度, 这是拉制理想结构的 MSF 所不可缺少的理论基础.

## 2. MSF 预制棒在高温区的温度场分布方程

由于大多数 MSF 预制棒都属于圆柱形结构, 因此采用圆柱坐标系来计算. 设 MSF 预制棒的中心轴为坐标系的纵坐标  $z$  方向, 以高温区的上端面中心点为原点, 与 MSF 预制棒  $z$  轴垂直方向为径向坐标  $r$ , 圆柱坐标系如图 1 所示. 图中  $L$  为高温区的高度,  $u_f$  为 MSF 预制棒的下棒速度.

设 MSF 预制棒在高温区的温度场函数为  $T(r, \phi, z, u_f)$ , 由于高温炉发热体为圆筒形结构, 且 MSF

\* 国家 973 计划(批准号 2003CB314905)和国家 863 计划(批准号 2003AA311010)资助的课题.

† E-mail: zguyiao@heinfo.net

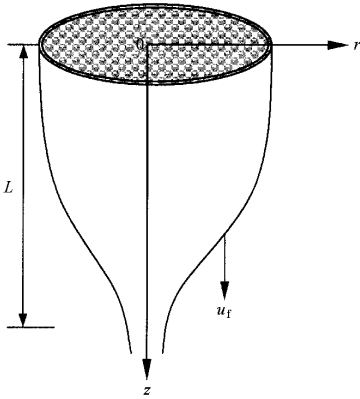


图 1 在拉制区中的 MSF 预制棒形状

预制棒是放在发热体的中心轴上,因此温度场函数  $T(r, \phi, z, u_f)$  与  $\phi$  无关,可将  $T(r, \phi, z, u_f)$  变为  $T(r, z, u_f)$ ,为了计算方便先求解  $T(r, z, t)$  方程,其中  $t$  为 MSF 预制棒在高温炉内停留的时间 ( $t = \frac{z}{u_f}$ ),  $r$  为 MSF 预制棒的径向位置,  $z$  为 MSF 的拉制方向.

若高温炉的加热温度为  $T_0$ ,则  $T(r, z, t)$  可表示为

$$T(r, z, t) = U(r, z, t) + T_0, \quad (1)$$

$U(r, z, t)$  为边界温度保持为零度的温度分布方程,根据非稳态傅里叶热传导方程得到

$$\begin{aligned} \nabla^2 U(r, z, t) &= \frac{\rho c_p}{k} \frac{\partial U(r, z, t)}{\partial t} \\ &= \frac{1}{a} \frac{\partial U(r, z, t)}{\partial t}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $\rho$  为材料密度,  $c_p$  为热容,  $k$  为导热系数,  $a$  为 MSF 预制棒的导温系数.

由于高温炉的温度始终保持为  $T_0$ ,当  $r = f(z)$ ,  $t = 0$  时,由 (1) 式得到

$$\begin{cases} T = T_0, \\ U = 0, \end{cases} \quad (3)$$

其中  $f(z)$  为 MSF 预制棒在高温区的形变方程,在此设  $f(z) = r_0 - \frac{r_0 - r_{00}}{L} z$ ,  $r_0$  为 MSF 预制棒的初始半径,  $r_{00}$  为 MSF 的半径.

设  $U(r, z, t) = R(r)Z(z)I(t)$ ,将 (2) 式展开得

$$\frac{1}{R} \left( \frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} \right) + \frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} = \frac{1}{aI} \frac{dI}{dt}. \quad (4)$$

为了方便求解,设

$$\frac{1}{R} \left( \frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} \right) = -\beta^2, \quad (5)$$

$$\frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} = -\eta^2, \quad (6)$$

由 (4) (5) 和 (6) 式得到

$$I(t) = \exp[-\alpha(\beta^2 + \eta^2)t]. \quad (7)$$

根据边界条件

$$R(r) = 0, \quad r = f(z), \quad (8)$$

$$\frac{dZ(z)}{dz} + HZ(z) = 0 \quad z = 0 \text{ 和 } z = L, \quad (9)$$

其中  $H = \frac{k_0}{k}$ ,  $k$  为 MSF 预制棒材料的导热系数,  $k_0$  为氩气的导热系数. 得出 (5) 式和 (6) 式的解,用贝塞尔函数表示如下:

$$R(\beta_m, r) = J_0(\beta_m r), \quad (10)$$

$$Z(\eta_n, z) = \eta_n \cos \eta_n z + H \sin \eta_n z, \quad (11)$$

其中  $\beta_m$  为方程  $J_0[\beta_m f(z)] = 0$  的  $m$  个正根,  $\eta_n$  为方程  $\tan \eta_n L = \frac{2H\eta_n}{\eta_n^2 - H^2}$  的  $n$  个正根. 由 (7) (10) (11) 式可得出

$$U(r, z, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} c_{mn} R(\beta_m, r) Z(\eta_n, z) I(t). \quad (12)$$

根据 MSF 预制棒的初始条件,当  $t = 0$  时,  $T = T_1 - T_0$ ,并将其代入 (12) 式得到

$$T_1 - T_0 = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} c_{mn} R(\beta_m, r) Z(\eta_n, z), \quad (13)$$

其中  $T_1$  为 MSF 预制棒的初始温度.

设

$$N(\beta_m) = \int_0^{f(z)} r R^2(r) dr, \quad N(\eta_m) = \int_0^L Z^2(z) dz,$$

在 (13) 式两边分别乘以

$$\int_0^{f(z)} \int_0^L r R(r) Z(z) dr dz$$

则可得到

$$c_{mn} = \frac{T_1 - T_0}{N(\beta_m) N(\eta_n)} \int_0^{f(z)} \int_0^L r R(r) Z(z) dr dz, \quad (14)$$

其中由 (8) (9) (10) 和 (11) 式求得

$$\frac{1}{N(\beta_m)} = \frac{2}{f^2(z) J_1^2[\beta_m f(z)]}, \quad (15)$$

$$\frac{1}{N(\eta_m)} = \mathcal{A}(\eta_n^2 + H^2)L + 2H. \quad (16)$$

将 (7) (10) (11) (14) 式代入 (12) 式,并由  $t = \frac{z}{u_f}$  得

$$U(r, z, u_f) = (T_1 - T_0) \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4J_0(\beta_m r) Y(\eta_n \cos \eta_n z + H \sin \eta_n z) [( \eta_n^2 + H_2 )L + 2H]}{f^2(z) J_0^2(\beta_m r)} \times \exp\left[-\frac{a(\beta_m^2 + \eta_n^2)}{u_f}\right] \int_0^{L(z)} \int_0^L r J_0(\beta_m r) Y(\eta_n \cos \eta_n z + H \sin \eta_n z) dr dz. \quad (17)$$

将(17)式代入(1)式得出 MSF 预制棒在高温炉里的温度场分布方程  $T(r, z, u_f)$ 。

### 3. 计算结果

我们采用纯石英制造了两种 MSF 的预制棒,其外径为 24mm,空气填充率  $f$  分别为 30% 和 60%。由于 MSF 预制棒是由石英和空气组成,则  $a = a_{air}f + a_{silica}(1-f)$ ,  $a_{air}$  为空气导温系数,  $a_{silica}$  为石英导温系数。其中,石英、空气和氩气的物理常数分别在表 1 列出。

表 1 材料的物理常数

材料	石英	氩气	空气
密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{cm}^{-3}$	2637	0.348	0.93
比热 $c_p/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	8164	518	1010
热导系数 $k/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	6.193	0.03936	0.032

制备的 MSF 外径为 0.6mm,石墨高温炉的高温区高度为 45mm,环境温度  $T_1$ (MSF 预制棒的初始温度)为 293K,石墨高温炉的温度  $T_0$  为 2173K。则 MSF 预制棒的温度  $T$  随  $f, r$  和  $u_f$  的不同而变化(见图 2, 3)。

由图 2 和图 3 可以看出,当空气填充率分别为

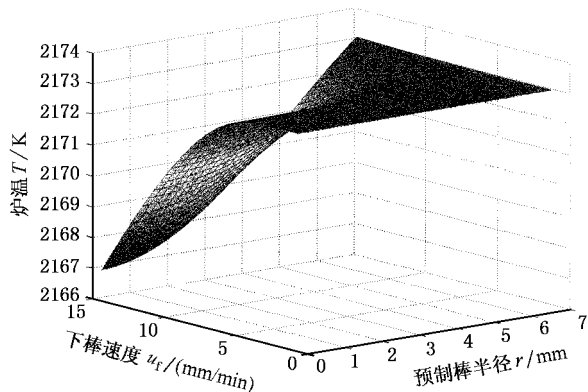


图 2 MSF 预制棒的温度  $T$  与  $r$  和  $u_f$  的关系( $f = 60\%$ ,  $z = 20\text{mm}$ )

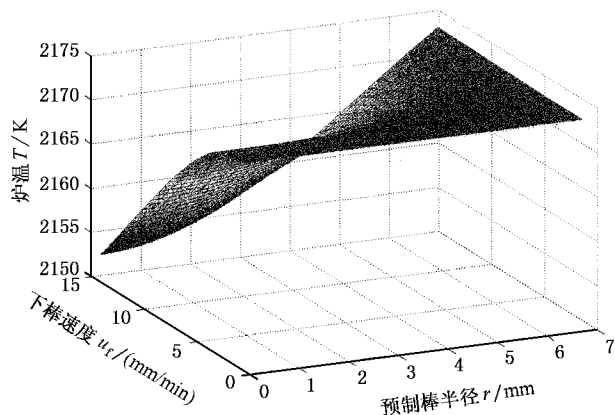


图 3 MSF 预制棒的温度  $T$  与  $r$  和  $u_f$  的关系( $f = 30\%$ ,  $z = 20\text{mm}$ )

60% 和 30% 时,若下棒速度  $u_f$  分别小于 3.2mm/min 和 1.8mm/min,则在高温区  $z = 20\text{mm}$  处,MSF 预制棒的温度分布几乎不随  $r$  和  $u_f$  变化,即温度场接近稳态分布,由此可计算出在拉制 MSF 时所需要的最佳拉制温度  $T_0$  和 MSF 预制棒的下棒速度  $u_f$ ;在拉制区内的 MSF 预制棒的温度随  $r$  增大而增大,即 MSF 预制棒的中心轴的温度为最低点,因此,为了使 MSF 顺利拉制出来,则 MSF 预制棒中心的温度也必须高于石英玻璃的软化温度,且石英玻璃的黏度还要降低到引力不至于拉断 MSF,这样必须要适当升高高温炉的温度。MSF 预制棒的最佳下棒速度应选择在 MSF 预制棒的温度场分布刚好接近于温度场稳态分布点处,这时高温炉的温度可降到接近石英玻璃的软化温度,从而防止由于温度过高破坏 MSF 的结构。若 MSF 预制棒的下棒速度增快,预制棒的轴心点温度降低,无法将 MSF 拉下来,而升高高温炉的温度,又会使 MSF 预制棒的外层温度升高,破坏 MSF 的外包层结构,若 MSF 预制棒的下棒速度减慢,处于熔融状态的 MSF 预制棒在高温炉内停留时间增长,同样也会影响到 MSF 的内部结构。另外,从图 2 和图 3 还可看出,当空气填充率为 60% 时,最佳的下棒速度为 3.2mm/min;当空气填充率为 30% 时,

最佳的下棒速度为 1.8mm/min,即随着 MSF 的空气填充率的增大,MSF 预制棒的下棒速度也应加快.

## 4. 结 论

通过建立 MSF 预制棒拉制过程的非稳态温度场分布方程,得出 MSF 预制棒的温度场分布与 MSF 预制棒的半径  $r$ 、下棒速度  $u_f$  和 MSF 预制棒空气填

充率  $f$  之间的关系.计算表明,当下棒速度降到 MSF 预制棒的温度场分布刚好接近稳态分布时,高温炉的温度可降到最低,即可接近 MSF 的材料软化温度.这对 MSF 外包层结构影响最小;另外,还发现空气填充率高的 MSF 预制棒比空气填充率低的 MSF 预制棒的导温系数大,因此对制备空气填充率高的 MSF,MSF 预制棒的下棒速度要快于制备空气填充率低的 MSF.

- [ 1 ] Dianov E M , Bufetov I A , Frolov A A *et al* 2004 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **16** 180
- [ 2 ] Golowich S E , Weinstein M I 2003 *Phys. B* **338** 136
- [ 3 ] Shangping G , Feng W , Sacharia A , Hsiang T , Robert S R 2004 *Opt. Express* **12** 3341
- [ 4 ] Alexander A , Martijn V E , Stuart D J , Richard P M 2004 *Opt. Lett.* **29** 1882
- [ 5 ] Genty G , Lehtonen M , Ludvigsen H , Kaivola M 2004 *Opt. Express* **12** 3471
- [ 6 ] Martijn V E , Maryanne L , Alexander A *et al* 2001 *Opt. Express* **9** 319
- [ 7 ] Martijn V E , Argyros A , Barton G , Bassett I M *et al* 2003 *Opt. Fiber Technol.* **9** 199
- [ 8 ] Li S G , Hou L T , Ji Y L , Zhou G Y *et al* 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 1300
- [ 9 ] Li Y F , Wang C Y , Hu M L *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1396 ( in Chinese ) [ 栗岩峰、王清月、胡明列等 2004 物理学报 **53** 1396 ]
- [ 10 ] Li S G , Ji Y L , Zhou G Y *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 478 ( in Chinese ) [ 李曙光、冀玉领、周桂耀等 2004 物理学报 **53** 478 ]
- [ 11 ] Zheng Y , Zhang Y P , Huang X J *et al* 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 750
- [ 12 ] Zhang Y P , Zheng Y , Huang X J *et al* 2004 *Chin. Opt. Lett.* **2** 122
- [ 13 ] Hu M L , Wang C Y , Li Y F *et al* 2004 *Laser Phys.* **14** 776
- [ 14 ] Benjamin J E , Charles K , Paul W , Robert S W , Arturo H J 2001 *Opt. Express* **9** 698
- [ 15 ] Renversez G , Kuhlmeier B , McPhedran R 2003 *Opt. Lett.* **28** 989
- [ 16 ] Jinendra K R , Robert S W , Andrew J S 2000 *Opt. Lett.* **25** 796
- [ 17 ] Issa N A , Poladian L 2003 *J. Lightwave Technol.* **21** 1005
- [ 18 ] Roberts P J , Couny F , Sabert H *et al* 2005 *Opt. Express* **13** 236

# Temperature distribution of microstructure fiber preform during fiber drawing<sup>\*</sup>

Zhou Gui-Yao<sup>1,2)†</sup> Hou Zhi-Yun<sup>2)</sup> Pan Pu-Feng<sup>2)</sup> Hou Lan-Tian<sup>1,2)</sup> Li Shu-Guang<sup>2)</sup> Han Yin<sup>2)</sup>

1) *Key Laboratory of Metastable Materials Science & Technology, Yanshan University, Qinghuangdao 066004, China*

2) *Institute of Infrared Fibers & Sensors of Yanshan University, Qinghuangdao 066004, China*

( Received 14 January 2005 ; revised manuscript received 18 April 2005 )

## Abstract

Drawing temperature is an important factor affecting the structure of microstructure fibers (MSF) during MSF drawing. According to the Fourier equation of time-dependent heat conduction with original conditions and boundary conditions of MSF preform, the temperature distribution equation of MSF preform is derived in cylindrical coordinates. It is shown the feeding speed of MSF preform is optimal when the temperature distribution of MSF preform is close to the steady-state heat conduction in high temperature furnace, then the temperature of high temperature furnace can be lowered to the intenerate temperature of MSF preform. In addition, the optimal speed will be increased if the air-filling fraction of MSF preform is high.

**Keywords** : microstructure fibers, fiber performs, temperature distribution, heat conduction

**PACC** : 4410, 4281, 4281B

<sup>\*</sup> Project supported by the National Basic Research Program of China ( Grant No. 2003CB314905 ) and the National High Technology Development Program of China ( Grant No. 2003AA311010 ).

<sup>†</sup> E-mail : zguiyao@heinfo.net