

# 微结构光纤制备过程中不同位置空气孔 的形变量分析\*

周桂耀<sup>1)†</sup> 侯峙云<sup>2)</sup> 李曙光<sup>2)</sup> 韩颖<sup>2)</sup> 侯蓝田<sup>1)‡</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)

(2007 年 1 月 4 日收到, 2007 年 3 月 28 日收到修改稿)

根据热传导原理, 在拉制微结构光纤(MSF)时, 在高温区中, MSF 预制棒的包层内不同位置加热的温度也不一样, 且由表面往中心方向温度逐渐下降, 温度梯度随 MSF 预制棒下棒速度的加快或包层空气填充率的减少而增大. 由于材料的表面张力和黏度系数都是温度的函数, 因此将 MSF 预制棒拉细成 MSF 时, 实际所得到的 MSF 结构, 并非预制棒等比例的缩小, 而是温度越高的空气孔形变量越大. 为得到符合设计要求的 MSF, 就必须将 MSF 预制棒包层空气孔尺寸按温度变化规律设计, 从而消除由于加热温度的非均匀性对拉制的 MSF 包层空气孔所产生的影响.

关键词: 微结构光纤, 光纤预制棒, 温度梯度, 表面张力

PACC: 4281, 4281B, 4410

## 1. 引 言

微结构光纤(MSF)或光子晶体光纤早在 1973 年就被提出<sup>[1]</sup>, 但在随后的很长时间没有得到重视, 直到 1996 年第一根 MSF 的诞生才引起科学工作者的广泛关注<sup>[2]</sup>. 关于 MSF 每年有数百篇文献进行报导<sup>[3-6]</sup>, 并且这个数量还在不断增加, 这显示出 MSF 的重要作用和美好的发展前景. 研究的内容也在不断扩大, 覆盖了多个领域, 如通信<sup>[7-10]</sup>、传感<sup>[11, 12]</sup>、光学与光谱学<sup>[13-16]</sup>、医学与生物学<sup>[17]</sup>、各种测量学等<sup>[18-22]</sup>, 尤其可以制造各种光学器件, 并且具有全新的特性<sup>[23]</sup>, 如 MSF 激光器、放大器、调制器、变频器、波长转换器、补偿器等. 另外, 还可利用 MSF 作为一个平台, 在其内部沉积半导体材料, 从而制备出光纤半导体器件<sup>[24]</sup>. 正由于 MSF 具有许多特殊的性能和美好的应用前景, 它的出现给人们带来了许多意外的惊喜, 它标志着光纤波导器件将进入一个崭新的发展阶段, 光电子器件光纤化的前景将

更加广阔.

目前, 应用理论模拟设计 MSF 的方法已发展到比较成熟的阶段, 可以给出各种性能 MSF 的假设, 但是由于 MSF 制备工艺相对落后, 特别是如何根据预先确定结构的 MSF 计算出每一环节的工艺参数, 是拉制高质量 MSF 的重要保证.

## 2. 模型建立

MSF 的制备与传统通信光纤的拉制相似, 主要分为两个过程. 首先按 MSF 包层结构参数制备 MSF 预制棒, 然后将制备好的 MSF 预制棒安装到光纤拉丝塔上进行拉丝. 有关拉制 MSF 的第二个过程的研究, 我们研究组已通过理论进行了描述<sup>[25]</sup>, 指出了拉制的 MSF 结构不但与预制棒的结构有关系, 还受拉制工艺参数的影响. 根据理论分析与实验观察, MSF 的外径或内空气孔直径的塌陷率或形变量  $\Delta S$  与材料的黏度系数  $\eta$  成反比关系,

$$\Delta S \propto \frac{1}{\eta}, \quad (1)$$

\* 国家重点基础研究发展计划(973)项目(批准号: 2003CB314905), 国家自然科学基金重点项目(批准号: 60637010)和燕山大学优秀博士生导师科学基金资助的课题.

† E-mail: zguyao@163.com

其中,由艾林分子理论又可得到

$$\eta = \frac{h\rho N_A}{M} \exp\left(-\frac{E_0}{RT}\right), \quad (2)$$

其中,  $h$  为普朗克常数,  $\rho$  为 MSF 材料的密度,  $N_A$  为阿伏加德罗常数,  $M$  为分子量,  $R$  为摩尔气体常数,  $E_0$  为分子活化能,  $T$  为 MSF 预制棒的温度.

由(1)式和(2)式可得出  $\Delta S$  与拉制温度的关系

$$\Delta S \propto \exp\left(\frac{E_0}{RT}\right). \quad (3)$$

根据非稳态傅里叶热传导方程

$$\nabla^2 T(r, t) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(r, t)}{\partial t}, \quad (4)$$

由边界条件

$$T(r, t) = 0, 0 \leq r < r_0, t = 0 \quad (5)$$

$$T(r, t) = T_0, r = r_0, t > 0, \quad (6)$$

可计算出在高温区内 MSF 预制棒的温度场分布会出现一定的温度梯度,

$$T = (T_1 - T_0) \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4J_0(\beta_m r) \chi \eta_n \cos \eta_n z + H \sin \eta_n z}{f^2(z) J_1^2(\beta_m(z))} \times \exp\left[-\frac{a(\beta_m^2 + \eta_n^2)}{u_f}\right] \int_0^{(kz)} \int_0^L r J_0(\beta_m r) \chi \eta_n \cos \eta_n z + H \sin \eta_n z \chi r dz + T_0, \quad (7)$$

其中,  $T_0$  为高温炉加热温度,  $T_1$  为 MSF 预制棒的初始温度(或环境温度),  $r_0$  为 MSF 预制棒的外径,  $\beta_m$  为贝塞尔方程  $J_0[\beta_m(z)] = 0$  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,  $L$  为高温区高度,  $a$  为导温系数,  $H = \frac{k_0}{k}$  ( $k$  为 MSF 预制棒材料的导热系数,  $k_0$  为氩气的导热系数).

将(3)式和(7)式联合,在拉制微结构光纤的过程中可得到 MSF 包层内不同位置空气孔的形变量并不相等.因此,可按照所设计的 MSF 结构和实际工艺参数来确定 MSF 预制棒的结构.

### 3. 实验结果

通过理论设计了外径为  $90 \mu\text{m}$  的折射率引导型的 MSF(见图1),MSF 的纤芯直径为  $2.1 \mu\text{m}$ ,包层中

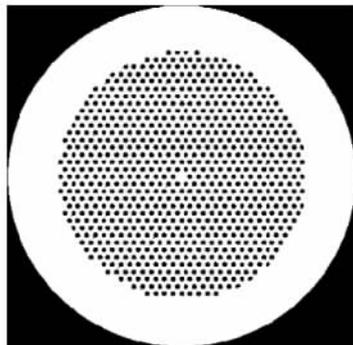


图1 理论设计的微结构光纤

的空气孔直径为  $2.0 \mu\text{m}$ ,孔间距为  $2.3 \mu\text{m}$ ,包层空气孔共有 14 层,MSF 的材料为光学石英.

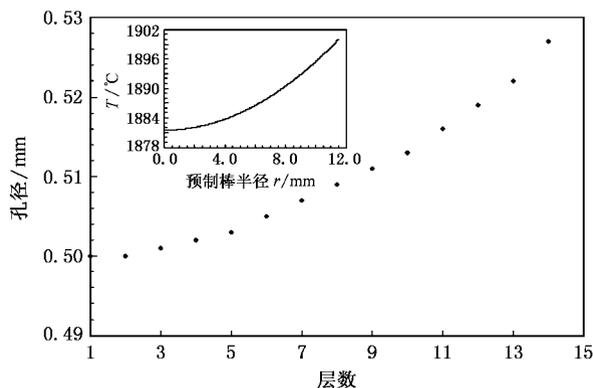


图2 MSF 预制棒包层孔径及温度场分布

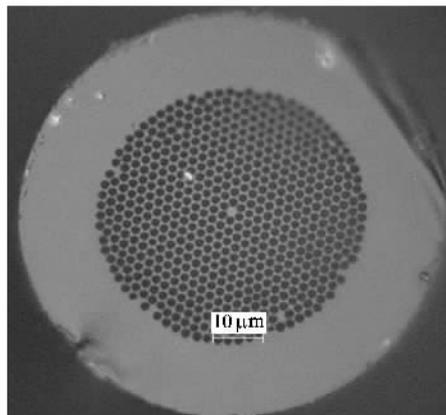


图3 实验中拉制的 MSF

根据 MSF 结构设计的要求,我们选择 MSF 预制

棒的外径为 23 mm, 拉制工艺参数: 下棒速度  $U_f$  为 10 mm/min, 拉丝速度  $U_d$  为 560 m/min, 高温炉温度  $T_0$  为 1900°C. 由此可计算出在高温区中的温度场分布和 MSF 预制棒包层中每层空气孔的直径 (由中心往外依次第 1 层, 第 2 层, 第 3 层……第 14 层) (如图 2). 图 2 表明了 MSF 预制棒的包层空气孔孔径的变化与温区场分布情况基本相似, 即在高温区的空气孔由于其收缩速度比低温区的快, 但为了保持 MSF 结构的均匀性, 在制备 MSF 预制棒时, 外层空气孔要比内层空气孔稍大以消除温度非均匀分布给 MSF 结构所带来的影响.

由计算结果, 我们将 MSF 预制棒制造成纤芯直径为 0.506 mm, 包层空气孔径由第 1 层至第 14 层分别为 0.5 mm, 0.5 mm, 0.501 mm, 0.502 mm, 0.503 mm, 0.505 mm, 0.507 mm, 0.509 mm, 0.511 mm, 0.513 mm, 0.516 mm, 0.519 mm, 0.522 mm, 0.528 mm, 并在该工艺

条件下拉制成 MSF (见图 3). 用日本 HIROX 公司生产的 KH-1000 型高倍数字显微镜对拉制的 MSF 进行观察测量, MSF 外径为 92  $\mu\text{m}$ , 光纤的纤芯直径为 2.14  $\mu\text{m}$ , 包层内的空气孔直径为 1.98  $\mu\text{m}$ , 孔间距为 2.25  $\mu\text{m}$ , MSF 包层孔之间的偏差率约 3%. 由实验结果可得出, 制备出的 MSF 符合理论设计的要求.

## 4. 结 论

利用材料热力学性质和热传导理论, 建立起 MSF 结构参数与拉制工艺参数的相互联系, 在预先确定 MSF 的结构参数和具体的工艺参数的情况下, 利用该理论可计算出 MSF 预制棒结构参数, 从而使制备出的 MSF 符合设计要求. 同时利用该模型还可对带隙型 MSF 和非均匀结构的 MSF 的预制棒进行设计和实验.

- [ 1 ] Kaiser P, Marcatili E A J, Miller S E 1973 *J. Bell Syst. Tech.* **52** 265
- [ 2 ] Knight J C, Birks T A, Russell P S, Atkin D M 1996 *Opt. Lett.* **21** 1547
- [ 3 ] John F, Ryan B 2004 *J. Appl. Phys.* **43** 5717
- [ 4 ] Wang J, Shi Y M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2820 ( in Chinese )  
[ 王 晶, 时延梅 2006 物理学报 **55** 2820 ]
- [ 5 ] Wang J, Lei N G, Yu C X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 946 ( in Chinese )  
[ 王 健, 雷乃光, 余重秀 2007 物理学报 **56** 946 ]
- [ 6 ] Russel P 2003 *Science* **299** 358
- [ 7 ] Hecht J 2003 *Laser Focus World* **39** 99
- [ 8 ] Li S G, Liu X D, Hou L T 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1880 ( in Chinese )  
[ 李曙光, 刘晓东, 侯蓝田 2004 物理学报 **53** 1880 ]
- [ 9 ] Zsigri B 2003 *Electron. Lett.* **39** 796
- [ 10 ] Mortensen N, Stach M, Broeng J, Petersson A, Simonsen H, Michalzik R 2003 *Opt. Express* **11** 1953
- [ 11 ] Zhang C S, Kai G Y, Wang Z, Wang C, Sun T T, Zhang W G, Liu Y G, Liu J F, Yuan S Z, Dong X Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2758 ( in Chinese )  
[ 张春书, 开桂云, 王 志, 王 超, 孙婷婷, 张伟刚, 刘艳格, 刘剑飞, 袁树忠, 董孝义 2005 物理学报 **54** 2758 ]
- [ 12 ] Hoo Y L, Jin W, Shi C Z, Ho H L, Wang D N, Ruan S C 2003 *Appl. Optics* **42** 3509
- [ 13 ] Holzwarth R, Udem T, Hänsch T W, Knight J C, Wadsworth W J, Russell P 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 2264
- [ 14 ] Fedotov A B, Zheltikov A M, Ivanov A A, Alfimov M V, Chorvat D, Beloglazov V I, Melnikov L A, Skibina N B, Tarasevitch A P, Linde D 2000 *Laser Phys.* **10** 723
- [ 15 ] Fedotov A B, Zhou P, Tarasevitch A P 2002 *J. Raman Spect.* **33** 888
- [ 16 ] He G, Lin T C, Prasad P, Kannan R, Vaia R, Tan L S 2002 *Opt. Express* **10** 566
- [ 17 ] Wang Y M, Zhao Y H, Nelson J S, Chen Z P, Windeler R S 2003 *Opt. Lett.* **28** 182
- [ 18 ] Bellini M, Hansch T W 2000 *Opt. Lett.* **25** 1049
- [ 19 ] Ramond T M, Diddams S A, Hollberg L, Bartels A 2002 *Opt. Lett.* **27** 1842
- [ 20 ] Thomann I, Bartels A, Corwin K L, Newbury N R, Hollberg L, Diddams S A, Nicholson J W, Yan M F 2003 *Opt. Lett.* **28** 1368
- [ 21 ] Udem T, Holzwarth R, Hansch T W 2002 *Nature* **416** 233
- [ 22 ] Robinson 2002 *Photon. Spect.* **36** 45
- [ 23 ] Jian Y Q, Yan P G, Lü K C, Zhang T Q, Zhu X N 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1809 ( in Chinese )  
[ 贾亚青, 闫培光, 吕可诚, 张铁群, 朱晓农 2006 物理学报 **55** 1809 ]
- [ 24 ] Pier J A, Adrian A C, Chris E F, John R H, Thomas J S, Neil F B, Bryan R J, Won D J, Zhang F, Elena R M, Venkatraman G, Vincent H C, John V B 2006 *Science* **311** 1583
- [ 25 ] Zhou G Y, Hou Z Y, Li S G, Hou L T 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 1162

# Analysis of the shrinkage in size of air holes in different sections during the fabrication of microstructured fibre \*

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

<sup>1</sup> *Key Laboratory of Metastable Materials Science & Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*

<sup>2</sup> *Institute of Infrared Fibers & Sensors of Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*

( Received 4 January 2007 ; revised manuscript received 28 March 2007 )

## Abstract

According to the heat conduction theory, different sections of the cladding of microstructured fibres (MSF) have different temperature in the high temperature zone during drawing MSF. The temperature decreases gradually from the surface to the central in MSF preform, and the temperature gradient will increase with either the increase of feed speed of MSF preform or decrease of the air-filling fraction. Because both the surface tension and the coefficient of viscosity are functions of temperature, when the MSF preform is thinned to MSF, the actual structure of MSF is not a simple down-sealing of the preform. The shrink size of the air holes will increase as the temperature rises. In order to obtain the MSF as expected, we must design the size of air holes of the MSF preform to vary correctly with the temperature variations, so as to effectively eliminate the effects of uneven heating temperature on the air holes in the cladding of MSF.

**Keywords** : microstructured fibre , fibre preform , temperature gradient , surface tension

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

\* Project supported by National Basic Research Program of China ( Grant No. 2003CB314905 ), the State Key Program of National Natural Science of China ( Grant No. 60637010 ) and the Science Foundation of Yanshan University for the Excellent Ph. D. Students.

† E-mail: zguiyao@163.com