

光子晶体光纤拉制中工艺参数的控制^{*}

郭铁英[†] 姜淑琴 李宏雷 简水生

(全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

(北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

(2008 年 8 月 28 日收到, 2008 年 10 月 20 日收到修改稿)

分析了光子晶体光纤拉制中各工艺参数之间的相互影响, 建立了工艺参数与最终光纤结构之间的对应关系. 在温度和送料速度的协调控制下, 通过调节气压参数可有效控制气孔结构. 实验拉制出孔径孔距比分别为 0.45 和 0.8 的单模以及高占空比光子晶体光纤. 在制备非均匀孔径光子晶体光纤时, 仅靠调控工艺参数往往难以拉制出理想结构. 本文以一种单偏振单模 PCF 结构为例, 对预制棒结构进行了优化设计. 计算表明可由此拉制出满足要求的光子晶体光纤.

关键词: 光子晶体光纤, 工艺参数, 气压控制, 气孔结构

PACC: 4281, 4281B, 4710

1. 引言

光子晶体光纤^[1,2] (photonic crystal fiber, PCF) 由于其独特的石英-微孔结构, 具备很多传统光纤无法取得的奇异特性^[2-5]. 因此自问世以来, 一直受到全世界范围的关注, 在短短十几年间取得了突飞猛进的进展. 近年来, 其相关研究已深入到通信、传感、线性与非线性光学、光谱学、生物医学, 以及测量学等众多领域^[6-15].

目前, 用于分析 PCF 特性的理论模型和方法已趋于成熟, 然而光纤制作一直是该领域的最大难题之一, 极大地限制了光子晶体光纤的进一步发展及其实用化的进程. 制作石英基 PCF 多采用管棒堆积法制作预制棒, 其设计灵活、工艺易于实现. 将预制棒拉制成包含特定气孔结构的光纤是制作的难点所在. 预制棒内部存在大量的石英-空气界面, 在拉丝过程中这些自由表面受表面张力、黏度效应、拉伸应力等作用, 结构极易缩塌或变形. 如何合理控制工艺参数, 克服这些不利因素的影响, 这是拉制结构完善的光子晶体光纤的基本保障. 为此, 本文对引入气压控制的 PCF 拉制过程进行了数值模拟, 讨论了送料速度、牵引速度、温度、气压等各参数之间的协调控制及其对最终光纤结构的影响. 并在此基础上, 对包

含非均匀孔径 PCF 的制作进行了探讨.

2. 理论基础

PCF 预制棒由毛细管和细棒按一定结构堆积而成, 如图 1. 我们已经对毛细管的制作进行了理论与实验分析^[16], 从中得知, 由于光子晶体光纤中气孔十分微小(微米级), 表面张力作用显著, 可达 10^5 — 10^6 N 数量级^[17], 为避免气孔闭合, 必须在孔内引入气压控制以抵制表面张力的紧缩效应.



图 1 管棒堆积法制作的 PCF 预制棒

包含气压控制的 PCF 拉制过程中石英流的运动由流体力学的 Navier-Stokes 方程进行描述^[16,18]. 如图 2, 设预制棒中任一毛细管 A 初始内、外半径分别为 R_h , R_i , 拉制过程中对应内、外半径为 $R(z)$ 和

^{*} 国家自然科学基金(批准号 60777033)和教育部重点项目(批准号 308002)资助的课题.

[†] E-mail: jennien_g@yahoo.com.cn

$R_0(z)$ 的气孔结构.实际上在拉制过程中相邻毛细管外壁将融合在一起,最终 $R_0(L)$ 相当于相邻两孔中心距离的一半.设管内施压为 p ,管壁流动速度 $\mathbf{v} = ue_z + we_r$, u,w 分别为沿 z 轴(拉丝方向)和沿 r 轴(预制棒径向)的速度分量.考虑连续稳定拉丝过程,忽略重力的影响,并认为熔融石英各部分等温.圆柱坐标系下管 A 的动量守恒、质量守恒方程分别为

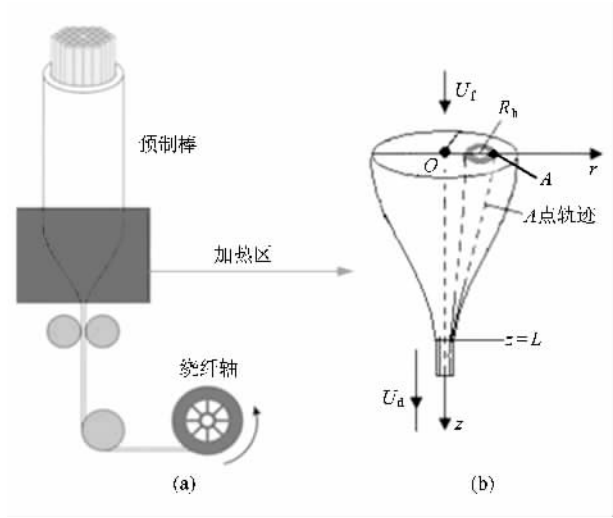


图2 (a) 光纤拉丝示意图 (b) 加热区的预制棒示意图(A 为任一毛细管)

$$\begin{aligned} &\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial z} + w\frac{\partial u}{\partial r}\right) \\ &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\mu r\frac{\partial u}{\partial r}\right) \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial z}\left(2\mu\frac{\partial u}{\partial z}\right) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\mu r\frac{\partial w}{\partial z}\right), \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial z} + w\frac{\partial w}{\partial r}\right) \\ &= -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu\frac{\partial}{\partial r}\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rw)\right] \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\frac{\partial w}{\partial z}\right) + \frac{\partial \mu}{\partial z}\frac{\partial u}{\partial r} + 2\frac{\partial \mu}{\partial r}\frac{\partial w}{\partial r}, \quad (2) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{w}{r} = 0, \quad (3)$$

其中, ρ 为石英密度, t 为熔融石英流在加热区(heating zone,如图2,长度为 L)停留的时间; μ 为石英黏度系数.方程(1)–(3)完整描述了管 A 的运动规律.结合初始条件和边界条件,即可求解气孔结构在拉丝过程中所发生的变化.初始条件和边界条件的推导参见文献[16].

初始条件及加热区入口($z=0$)、出口($z=L$)的边界条件为

$$\begin{aligned} z=0 \text{ 时}, u &= U_f, w = 0, \\ R_i(0) &= R_h, R_o(0) = R_i, \quad (4) \end{aligned}$$

$$z=L \text{ 时}, u = U_d, \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (5)$$

其中, U_f 为预制棒进入加热区的速度称为送料速度, U_d 为牵引速度.

运动边界条件为
内表面

$$w - \frac{dR_i}{dt} - u\frac{dR_i}{dz} = 0; \quad (6)$$

外表面

$$\frac{dR_o}{dt} - w + u\frac{dR_o}{dz} = 0. \quad (7)$$

切向应力边界条件为

$$\hat{t}_i^T \sigma_{st} \hat{n}_i = 0, \quad (8)$$

$i=1,2$ 分别代表管内、外表面.

由于气压 p 的引入,Cauchy应力张量写为

$$\sigma_{st} = \begin{pmatrix} -p + 2\mu\frac{\partial u}{\partial z} & \mu\left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z}\right) \\ \mu\left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z}\right) & -p + 2\mu\frac{\partial w}{\partial r} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

法向应力边界条件为

内表面

$$\hat{n}_1^T \sigma_{st} \hat{n}_1 = \gamma/R_i; \quad (10)$$

外表面

$$\hat{n}_2^T \sigma_{st} \hat{n}_2 = -\gamma/R_o. \quad (11)$$

(8)–(11)中, $\hat{t}$ 、 $\hat{n}$ 分别为单位切向量和单位法向量(指向外侧), γ 为石英材料表面张力系数.将(6)(7)式代入基本控制方程(1)–(3)消去 w ,代入应力边界条件,并分别在径向 $[R_i(z), R_o(z)]$ 、轴向 $[0, L]$ 分别对 r 和 z 作积分运算.最后代入初始条件(4)(5),进行化简.通过数值方法即可求解出 $R_i(z), R_o(z)$ 与各控制参数以及初始结构参数之间的对应关系.

3. 数值分析

利用 Matlab 编程进行数值计算.设毛细管 A 内外半径分别为 $R_h=0.3\text{ mm}$, $R_i=0.45\text{ mm}$.堆成普通三角格子的预制棒结构.石墨炉加热区长度 $L=161.6\text{ mm}$.表面张力系数取纯石英的典型值^[19–21] $\gamma=0.3\text{ N/m}$,黏度系数^[19,22]

$$\mu = 5.8 \times 10^{-8} \exp\left(\frac{515400}{8.3145T + 2271.10567}\right) \text{ Pa} \cdot \text{s},$$

$$1400^{\circ}\text{C} \leq T \leq 2500^{\circ}\text{C}.$$
 (12)

为描述拉丝过程中管 A 结构的相对变化,定义参数 S 为

$$S = \frac{R_i(L)/R_o(L)}{R_h/R_i}.$$
 (13)

实际上, $R_i(L)/R_o(L)$ 可以看作最终光纤的孔径孔距比 (d/Δ (d 为气孔直径, Δ 为孔间距离)), 该参数决定着光纤的传输特性. S 反映了光纤相对于预制棒的结构变化, 也即反映了光纤特性的相对于初始设计的改变. 需要指出, 孔内气压的引入使气孔膨胀成为可能, 若最终 $S > \frac{1}{R_h/R_i}$, 由 (13) 式得出 $R_i(L)/R_o(L) > 1$, 显然这超出了物理极限, 气孔将被胀破. 因此, 可控拉丝范围应在 $0 < S < R_i/R_h$ 内. 对于本文所取的 $R_h = 0.3\text{ mm}$, $R_i = 0.45\text{ mm}$ 的毛细管, $0 < S < 1.5$ 范围为有效计算结果.

3.1. 拉制参数对气压控制的影响

在 PCF 拉制过程中, 工艺参数的控制至关重

要, 不仅决定着拉丝能否顺利进行, 也决定着最终光纤能否满足结构要求. 引入气压控制工艺可以主动调节气孔的缩放, 在一定程度上提高了对光纤结构的可控性. 然而要保证气压控制得以稳定有效实施, 无疑要取决于其他控制参数的协调配合. 为此我们计算分析了送料速度、牵引速度、温度等拉制参数对气压控制的影响, 同时给出了光纤结构变化与工艺参数的对应关系.

图 3(a) 给出了不同 U_f 下, 气压 p 与结构变化率 S 的对应关系曲线. 可见, U_f 越小, 对应的 p - S 曲线斜率越大. p - S 曲线斜率大表明气孔结构对所施加的气压十分敏感, 气压小幅的增减就会导致气孔剧烈变化, 很容易造成整个结构的混乱. 增大 U_f 使 p - S 曲线斜率减小, 气压的可调范围 ($0 < S < 1.5$) 大大展宽, 此时通过调节施压量 p 的大小, 可以有效调节气孔的相对尺寸. 因此, 高 U_f 更有利于气压控制的实施. 然而需要指出, U_f 与最终光纤尺寸密切相关, 高 U_f 可能导致最终光纤的尺寸过大, 失去实

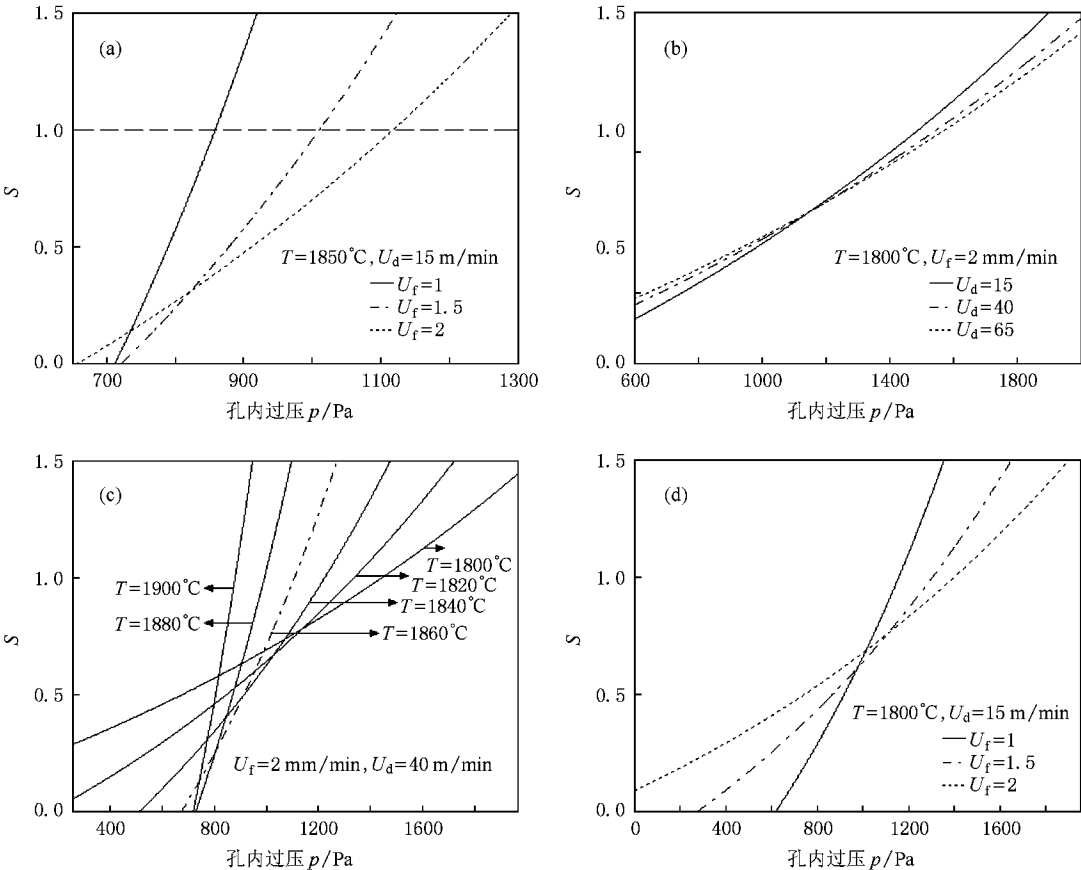


图 3 不同拉丝条件下气孔结构的相对变化 S 与孔内气压 p 的关系曲线 (a) $T = 1850^{\circ}\text{C}$, $U_d = 15\text{ m/min}$, p - S 曲线随 U_f 的变化 (b) $U_f = 2\text{ mm/min}$, $U_d = 40\text{ m/min}$, p - S 曲线随温度 T 的变化 (c) $T = 1800^{\circ}\text{C}$, $U_f = 2\text{ mm/min}$, p - S 曲线随 U_d 的变化 (d) $T = 1800^{\circ}\text{C}$, $U_d = 15\text{ m/min}$, p - S 曲线随 U_f 的变化

用价值.值得庆幸的是,通过考察 U_d 的影响,这一顾虑得以解除.如图 3(b),固定 U_f 和温度不变, U_d 从 15 m/min 逐渐增至 65 m/min,如此大的增幅对应 p - S 曲线斜率仅有很小的改变,表明气压控制系统对牵引速度的变化不敏感.这意味着最终光纤的尺寸可以通过调节 U_d 加以控制,而不会影响拉丝系统的稳定性.

由于石英黏度是温度的强函数^[19-22],因此温度对光纤结构的影响十分显著.特别是在采用气压控制拉制光纤时,显然,所需施加的气压量与石英黏度密切相关,因此合理控制温度参数显得尤为重要.计算表明,实施气压控制对温度提出了限制要求.如图 3(c),当 $T > 1860\text{ }^{\circ}\text{C}$, p - S 曲线十分陡峭,气压稍有浮动就可导致气孔迅速收缩或膨胀,很容易造成光纤结构混乱或导致拉丝过程失控.当 $T < 1860\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, p - S 曲线斜率较小,气压可调范围较宽,此时气压控制更为稳定可靠,可有效发挥对气孔结构的主动调控作用.因此,我们在实际拉丝过程中通常将温度控制在 $1860\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下.

3.2. 控制参数对光纤结构的影响

我们通过图 3(d)与图 3(a)比较了 $T = 1800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $T = 1850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 两种温度条件下的 p - S 曲线.比较发现,降温使 p - S 曲线在横轴方向展宽,曲线下半部分相对左移而上半部分相对右移,且 U_f 越大,移动幅度越大. p - S 曲线下半部分左移,表明为维持相同结构所需施加的气压减小.例如对于 $U_f = 1\text{ mm/min}$ 的情况,为避免气孔闭合,即保持 $S > 0$, $1850\text{ }^{\circ}\text{C}$ (如图 3(a))时至少需施压 $p > 720\text{ Pa}$,而在 $1800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时(如图 3(d)),只需 $p > 610\text{ Pa}$.所需施加的气压减小,意味着气孔结构的缩塌趋势减弱,也就是说降温和增大 U_f 对结构缩塌起到了抑制作用.同理, p - S 曲线的上半部分相对右移,表明使气孔相对胀大所需的气压量增大了,也就是说降温和增大 U_f 对气孔膨胀也有抑制作用.由此可以看出,针对光纤不同的特性要求,参数控制方案也会大不相同.例如,要拉制大模场面积 PCF 等要求 d/Λ 较小的光纤结构,往往需要适当提高温度或减小 U_f ,以加大气孔结构的缩塌.而相反,要实现小模场面积或全光子带隙型要求 d/Λ 很大的光纤,则要使气孔尽量不产生缩塌,甚至需要合适的气压将气孔胀大.此时往往需要适当提高温度或减小送料速度,否则气孔胀大变化会受到抑制,若过分增大施压无疑会增加系统的不稳定性.

此外,温度过低、 U_f 过快伴随着石英不能充分熔融的问题.石英不能充分熔融,不仅导致光纤强度变差,而且相邻毛细管的管壁难以充分融合,会在管间产生大量额外的空隙,造成气孔移位或变形等,严重影响光纤结构.综合以上分析,虽然降低温度、增大 U_f 使气压可控范围更宽、施压作用更稳定,但是为确保最终光纤结构及强度要求,拉丝中温度不宜过低,送料速度也不宜过高.根据长期的实验经验,通常 T 不应低于 $1800\text{ }^{\circ}\text{C}$, U_f 不宜超过 2 mm/min .

图 3 的计算分析实际上已建立起光纤结构与工艺参数的对应关系,由此即可根据实际要求选取相应的工艺参数控制光纤的拉制.实际上气压控制工艺的引入在一定程度上扩展了参数的选取空间,提高了拉丝的灵活性和可控性.同一根预制棒在不同的参数控制条件下可以拉制出孔径孔距比截然不同的多种 PCF,而要拉制某一特定结构的 PCF,也有多种参数配置方案可供选择.例如,要以上文的预制棒结构拉制无尽单模 PCF^[3],最终光纤的孔径孔距比需满足 $d/\Lambda < 0.45$,由(13)式可知,应选择 $S < 0.675$ 时 p - S 曲线所对应的参数进行拉丝控制.那么,既可以根据图 3(a)选择 $T = 1850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 对应的参数,也可以由图 3(d)选择 $T = 1800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 对应的参数,同样,还可以根据图 3(c)选择其他温度条件对应的工艺参数,理论上均可对所期望的结构进行有效控制.同理,如果期望拉制高占空比的 PCF,例如要求最终光纤的 $d/\Lambda > 0.8$,则由(13)式应选择 $S > 1.2$ 时 p - S 曲线对应的工艺参数来控制拉丝过程.

在此指导下进行 PCF 拉制实验,制得两组 PCF 截面如图 4.实验均在 $T = 1800\text{ }^{\circ}\text{C}$, $U_f = 1.5\text{ mm/min}$, $U_d = 15\text{ m/min}$ 的控制条件下进行,最终光纤结构通过微调施压量进行控制.对于图 4(a)单模 PCF, $d/\Lambda = 0.45$,对应 $S = 0.675$,由图 3(d),理论上应施压 $p = 1036\text{ Pa}$,而实际施压约 1200 Pa ;对于图 4(b)的高占空比小模面积 PCF, $d/\Lambda = 0.8$,对应 $S = 1.2$,理论上应施压 $p = 1453\text{ Pa}$,而实际施压约 1600 Pa .两组实验中,实际施压量均高于理论计算值,这是由于实验所选用石英材料的黏度系数以及表面张力系数与理论计算中所取数值(因生产商不同)存在一定差异.此外,现有测温设备也存在一定误差,实际炉温要略高于显示的测量温度,因此实际需要更高的气压抵制高温的缩塌作用.显然,我们的实验结果仍不失为理论分析的有力验证.根据最终光纤结构要求,可通过理论计算对工艺参数进行有效预测,大大提高了拉

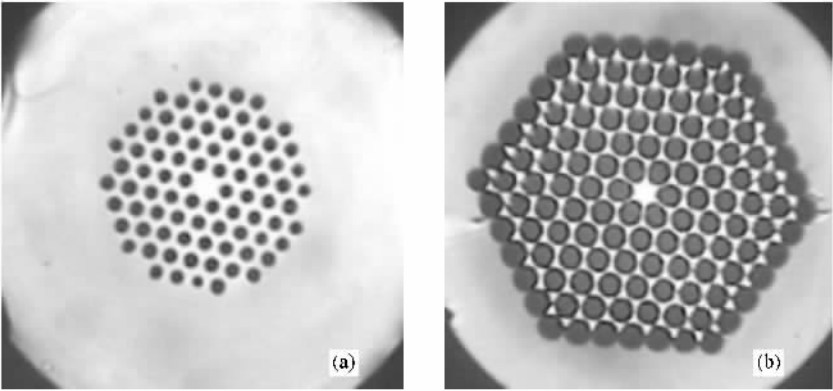


图 4 实验拉制的 PCF 孔径孔距比分别为 $d/\Lambda = 0.45$ (a) 和 $d/\Lambda = 0.8$ (b)

丝效率和成功率.

4. 非均匀孔径光子晶体光纤的制作及参数控制

光子晶体光纤的最大优势之一就是其结构设计的灵活多样性. 通常为获得特别的偏振或色散特性, 会在包层中引入不同尺寸的气孔, 例如图 5 (a) 的

PCF 结构, 芯区两侧引入两个大孔, 打破了结构的旋转对称性. 根据文献 [23], 该结构在 $\Lambda = 2.2 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.4$, $d_b/\Lambda = 0.95$ 时, 可在 $1.37\text{--}1.62 \mu\text{m}$ 波长范围实现单偏振单模传输. 这种设计不会增加预制棒的制作难度, 只需挑选相同外径不同内径的毛细管即可堆出所需结构, 如图 5 (b). 然而孔间结构的差异使控制过程中参数控制的难度加大. 下面以此为例讨论非均匀孔径 PCF 的制作.

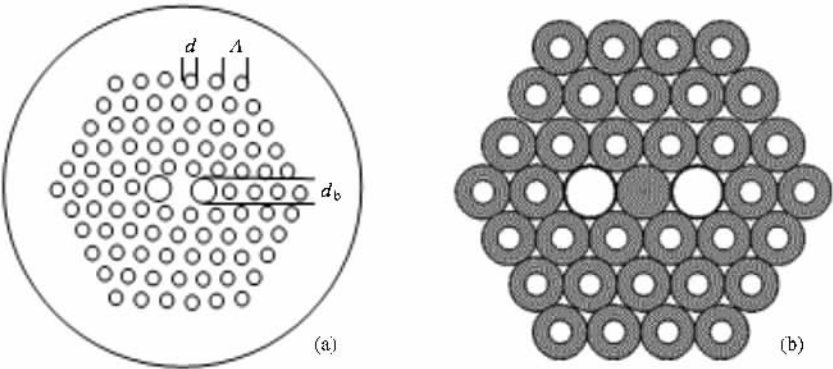


图 5 (a) 非均匀孔径光子晶体光纤端面, 小孔直径 d , 大孔直径 d_b ; (b) 选用相同外径不同内径的毛细管堆制光纤预制棒

图 5 (b) 的预制棒选用外径相同 ($R_i = 0.5 \text{ mm}$), 内外径比分别为 $X_A = 0.4$ 和 $X_B = 0.95$ 两种毛细管堆制. 预制棒结构参数与光纤结构参数 ($d/\Lambda = 0.4$, $d_b/\Lambda = 0.95$) 相同. 接下来通过计算制定参数配置方案. 选择在 $T = 1800 \text{ }^\circ\text{C}$, $U_i = 1.5 \text{ mm/min}$, $U_d = 50 \text{ m/min}$ 拉丝条件下, 计算气压参数 p 与最终气孔结构 $R_i(L)/R_o(L)$ 相当于 d/Λ 的对应关系, 如图 6 (a) 所示. 可以看到, 要使毛细管 A 保持 $R_i(L)/R_o(L) = 0.4$, 需施压 1790 Pa , 而要保持薄壁管 B 最

终的 $R_i(L)/R_o(L) = 0.95$, 需施压 960 Pa . 在等压控制条件下, 无法同时满足两种结构需求. 若施压量 $p \geq 1000 \text{ Pa}$, 会导致管 B 胀破; 若 $p < 1000 \text{ Pa}$, 如图 6 (a) 在 $p = 960 \text{ Pa}$ 时, 小孔几近闭合. 如果可以对两种气孔进行分压控制, 分别施加所需的气压, 管 B 施压 960 Pa , 其余厚壁管施压 1790 Pa , 理论上可以实现 $d/\Lambda = 0.4$, $d_b/\Lambda = 0.95$ 结构. 但是, 分压控制工艺上很难实现, 需配备特殊的气压控制装置, 我们目前还不具备分压控制的条件.

我们知道,降低温度和加快送料速度可以使气压可控范围展宽,从而有望实现气压的同步控制.显然,进一步降低控制温度已不可取,因此增大送料速度到上限值 $U_f = 2 \text{ mm/min}$,此时计算气压 p 与 $R_1(L)/R_0(L)$ 的关系曲线如图 6(b).可见,虽然增大 U_f 使两曲线相向移动,气压可控区间的重叠量增

加,但仍无法通过等压控制同时实现 $d/\Lambda = 0.4$, $d_b/\Lambda = 0.95$.至此我们认为,按光纤比例结构所堆制的这种预制棒结构,无法在允许的参数控制范围内,拉制出符合要求的光纤.因此,我们考虑改变预制棒比例结构,重新选择两种毛细管的结构参数,堆制新的预制棒结构.

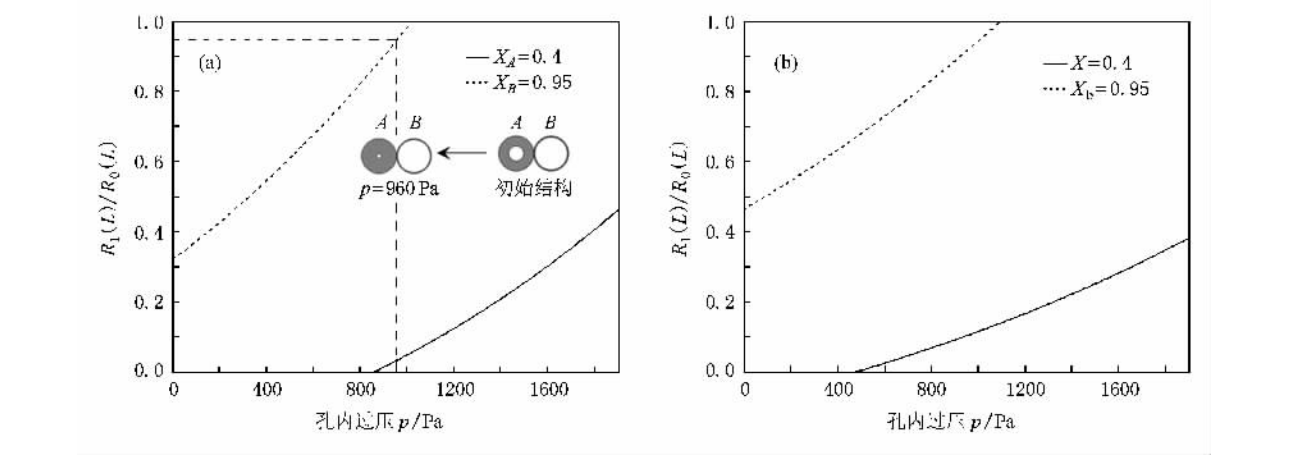


图 6 初始内外径比分别为 $X_A = 0.4$ 和 $X_B = 0.95$ 的毛细管,在 (a) $T = 1800 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $U_f = 1.5 \text{ mm/min}$, $U_d = 50 \text{ m/min}$ (b) $T = 1800 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $U_f = 2 \text{ mm/min}$, $U_d = 50 \text{ m/min}$ 拉制条件下,其最终结构参数 $R_1(L)/R_0(L)$ 与气压 p 的对应关系

由图 6 不难看出,减小 X 参数的差异,即增大 X_A 或减小 X_B 也可以使两条曲线相对靠近,从而有望以等气压同步控制两种气孔结构.然而如何确定两种毛细管的结构参数,保证二者有最为合适的偏差,从而在相同气压下满足各自的结构变化要求.为此我们通过反向计算,以两种毛细管分别对应 $R_1(L)/R_0(L) = 0.4$ 和 0.95 为已知,反向求取 X_A 和 X_B .同样在 $T = 1800 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $U_f = 1.5 \text{ mm/min}$, $U_d = 50 \text{ m/min}$ 拉制条件下,反向计算了气压 p 与两种毛细管

初始内外径比 X_A , X_B 的对应关系,如图 7.由此,我们实现了对预制棒结构的反向优化设计.可以看到,两种毛细管均有很宽的可选范围,图 7 中任一气压对应的一对 X_A , X_B 均为可选的结构参数.

为验证该结果的可靠性,选择图 7 中 $p = 1412 \text{ Pa}$ 对应的 $X_A = 0.49$, $X_B = 0.754$ 两种毛细管,堆制类似于图 5(b)预制棒结构.计算在 $T = 1800 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $U_f = 1.5 \text{ mm/min}$, $U_d = 50 \text{ m/min}$ 拉制条件下 p 与 $R_1(L)/R_0(L)$ 的对应关系曲线,如图 8.可见,施加等

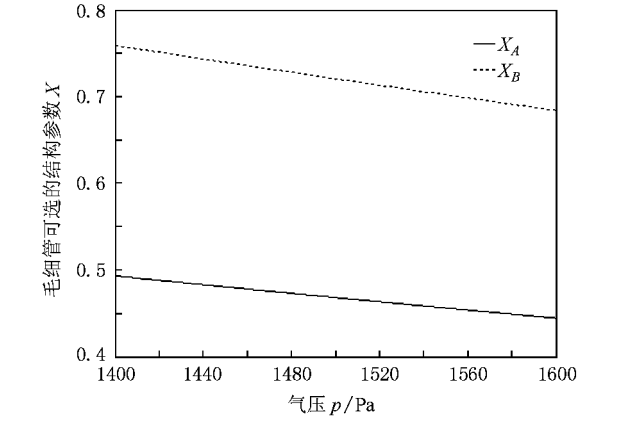


图 7 不同气压 p 下可供选择的毛细管内外径比 X (X_A 为厚壁管参数, X_B 为薄壁管参数)

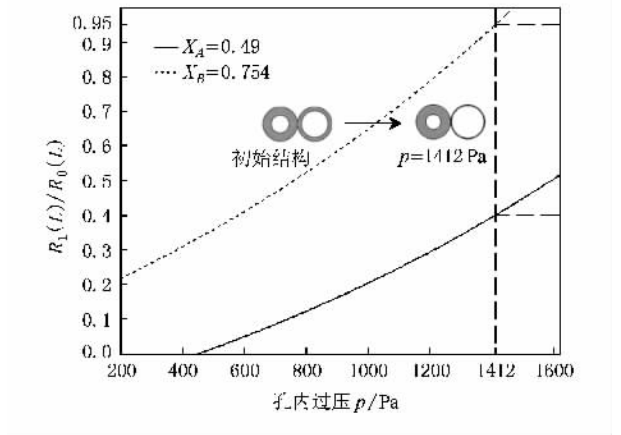


图 8 初始内外径比分别为 $X_A = 0.49$ 和 $X_B = 0.754$ 的毛细管,其最终结构参数 $R_1(L)/R_0(L)$ 与气压 p 的对应关系

压 $p = 1412 \text{ Pa}$ 可同时满足两种气孔结构变化的要求,从而实现 $d/\Lambda = 0.4$, $d_b/\Lambda = 0.95$ 的单偏振单模 PCF.

5. 结 论

本文通过对引入气压控制的光子晶体光纤拉制过程的数值分析,讨论了温度、送料速度、牵引速度等拉制参数对气压控制以及对最终 PCF 结构的影响,得出了一些实用的结论.由此,可以根据预制棒

结构以及最终光纤结构要求,对拉制过程中的各种工艺参数进行预测,从而制定合理的参数配置方案,大大提高拉丝效率和成功率.为制备非均匀孔径光子晶体光纤,本文以一种单偏振单模 PCF 结构为例,讨论了参数控制以及预制棒设计等问题.分析表明,在预制棒结构优化之前,仅靠调控参数无法取得理想光纤结构.为此,通过反向计算对预制棒初始结构进行了优化,理论上可在相应参数条件下制取符合要求的光纤.本文的分析可为研制更多高质量的特种 PCF 提供有力参考.

-
- [1] Knight J G , Birks T A , Russell P S J *et al* 1996 *Opt. Lett.* **21** 1547
 - [2] Russell P S J 2003 *Science* **299** 358
 - [3] Birks T A , Knight J C , Russell P S J 1997 *Opt. Lett.* **22** 961
 - [4] Saitoh K , Florous N , Koshiba M 2005 *Opt. Express* **13** 8365
 - [5] Liu X Y , Zhang F D , Zhang M , Ye P D 2007 *Acta. Phys. Sin.* **56** 301 (in Chinese) [刘小毅、张方迪、张 民、叶培大 2007 物理学报 **56** 301]
 - [6] Maeda J , Yoshida M 2005 Proc. OFC2005 OFB1
 - [7] Broderick N G R , Monro T M , Bennett P J , Richardson D J 1999 *Opt. Lett.* **24** 1395
 - [8] Liu J G , Kai G Y , Xue L F *et al* 2007 *Acta. Phys. Sin.* **56** 941 (in Chinese) [刘建国、开桂云、薛力芳等 2007 物理学报 **56** 941]
 - [9] Liu W H , Song X Z , Wang Y S *et al* 2008 *Acta. Phys. Sin.* **57** 917 (in Chinese) [刘卫华、宋啸中、王屹山等 2008 物理学报 **57** 917]
 - [10] Wang Y P , Xiao L , Wang D N *et al* 2006 *Opt. Lett.* **31** 3414
 - [11] Hartl , Li X D , Chudoba C *et al* 2001 *Opt. Lett.* **26** 608
 - [12] Ramond T M , Diddams S A , Hollberg L , Bartels A 2002 *Opt. Lett.* **27** 1842
 - [13] 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
 - [14] Udem T , Holzwarth R , Hansch T W 2002 *Nature* **416** 233
 - [15] Robinson 2002 *Photon. Spect.* **36** 45
 - [16] Guo T Y , Lou S Q , Li H L *et al* *Acta. Phys. Sin.* **58** 352 (in Chinese) [郭铁英、娄淑琴、李宏雷等 物理学报 **58** 352]
 - [17] Tabor D 1969 *Gases , Liquids and Solids* (Penguin Books , Harmondsworth UK)
 - [18] Landau L D , Lifshitz E M 1982 *Fluid Mechanics* (Oxford , England : Pergamon Press)
 - [19] Bansal N P , Doremus R H 1986 *Handbook of Glass Properties* (New York : Academic Press) p14
 - [20] Kingery W D 1959 *J. Am. Ceramic Soc.* **42** 6
 - [21] Schultz W W , Davis S H 1984 *J. Appl. Mech.* **51** 1
 - [22] Doremus R H 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 7619
 - [23] Jian Ju , Wei Jin 2006 *J. Lightwave Technol.* **24** 825

Control of the fabrication parameters during the fabrication of photonic crystal fibers^{*}

Guo Tie-Ying[†] Lou Shu-Qin Li Hong-Lei Jian Shui-Sheng

(Key Lab of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network of EMC , Beijing 100044 , China)

(Institute of Lightwave Technology , Beijing Jiaotong University , Beijing 100044 , China)

(Received 28 August 2008 ; revised manuscript received 20 October 2008)

Abstract

The interplay between the fabrication parameters during the fabrication of photonic crystal fibers(PCF) are numerically analyzed. Relation between these parameters and the final fiber 's geometry is identified. With the cooperative control of drawing temperature and feed speed , the final hole structure can be effectively controlled by tuning the applied pressure. A single-mode PCF with its d/Λ approaching 0.45 , and a PCF with high air-filling fraction , whose d/Λ equals 0.8 , are successfully fabricated. For fabrication of PCFs with uneven-sized holes , parameter control alone is sometimes inadequate in achieving the desired geometry. Taking a single-polarization single-mode(SPSM) PCF structure as example , the preform 's geometry is redesigned for optimization by inverse calculation. And the required SPSM PCF can thus be fabricated.

Keywords : photonic crystal fiber , fabrication parameter , pressure control , hole structure

PACC : 4281 , 4281B , 4710

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 60777033) and the Research Foundation from Ministry of Education of China(Grant No. 308002).

[†] E-mail : emmien _ g@yahoo.com.cn