

用于制作光子晶体光纤的毛细管的控制 理论与实验分析*

郭铁英¹⁾²⁾ 娄淑琴¹⁾ 李宏雷¹⁾ 简水生¹⁾

1) 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

2) 北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

(2008 年 8 月 11 日收到, 2008 年 10 月 16 日收到修改稿)

根据流体力学的相关理论建立了毛细管控制过程的简化模型. 首先通过理论计算, 分析了毛细管制作中的各种工艺参量, 如控制参量、设备参量、预制棒结构参量等, 对最终毛细管结构的影响. 在本文讨论的工艺下, 毛细管结构的相对塌缩不可避免, 而工艺参量的调整仅可以在一定程度上改善结构的变化. 最后通过具体的控制实验与理论计算进行了比较分析, 二者取得了很好的一致性, 验证了计算模型的可靠性. 相关结论可推广到光子晶体光纤的制作中, 有很好的工艺参考价值.

关键词: 光子晶体光纤, 毛细管, 制作理论, 工艺参量

PACC: 4281, 4281B, 4710

1. 引言

光子晶体光纤^{1,2)} (photonic crystal fiber, PCF) 通常包含大量有序或无序排列的细微空气孔, 因此又被称为多孔光纤或微结构光纤. 由于其独特的空气-石英结构, 光子晶体光纤具备了很多传统光纤无法取得的优异特性²⁻⁵⁾, 因此自问世以来, 一直是业界的研究热点, 在短短十几年间取得了突飞猛进的进展. 它的出现将光纤技术带入了一个崭新的、更为广义的发展阶段. 近年来, 其相关研究已深入到众多领域, 如通信、传感、线性与非线性光学、光谱学、生物医学, 以及测量学等领域^{2,6-11)}.

目前, 用于分析 PCF 特性的理论模型和方法已趋于成熟, 而其制作工艺却仍然被视为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进程的推进. 在高温拉丝过程中, 熔融石英受到表面张力、黏度效应、拉力、气压等多种因素的综合作用, 导致光纤预设计的气孔结构受到很大甚至破坏性的影响. 如何选择合适的工艺控制参量, 尽量避免或减小微孔结构的扭曲和变形, 这是制作的难点所在. 本文根据对 PCF 的管束堆积-拉丝工艺的长期探索, 建立了毛细管控制过程的简化模

型, 从理论上考察了控制过程中几个主要控制参量: 温度、送料速度、牵引速度等对最终毛细管结构的影响, 并通过具体的拉丝实验进行了对比分析. 作为 PCF 制作流程的第一步, 毛细管制作理论及经验的积累无疑可为制作光子晶体光纤打下坚实基础, 提供有力的工艺参考, 从而为基于 PCF 的其他研究铺平道路.

2. 理论模型

基于管束堆积法制作石英基光子晶体光纤预制棒, 首先要按光纤设计要求制备出结构均匀的毛细管 (mm 量级). 毛细管的控制与传统光纤拉丝类似, 选取石英管 (cm 量级) 作为预制棒, 在拉丝塔上拉成所需尺寸和结构的细管. 这一过程中, 熔融石英的流动可由 Navier-Stokes 方程来描述.

2.1. 不可压缩 Navier-Stokes 方程

Navier-Stokes 方程 (N-S 方程) 是流体力学中描述不可压缩黏性流体运动的基本方程¹²⁾, 形式为

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla p + \rho\mathbf{F} + \mu\Delta\mathbf{v}, \quad (1)$$

其中, ρ 为流体物质密度; \mathbf{v} 为流体速度矢量; t 为时

* 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.

间; p 为流体各向同性压力; F 为质量力(body force); μ 是流体的动态黏度系数.熔融石英流(如图1)是典型的黏性不可压缩流体.圆柱坐标系下,设石英流动速度 $v = ue_z + we_r$,其中, 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, e_z, e_r 为两个方向的单位矢量.在连续稳定拉丝过程中,重力的影响(ρF)可忽略. z, r 两个方向的动量守恒方程分别展开为

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

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial z} + w \frac{\partial w}{\partial r} \right) \\ &= - \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rw) \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial \mu}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial r} + 2 \frac{\partial \mu}{\partial r} \frac{\partial w}{\partial r}. \quad (3) \end{aligned}$$

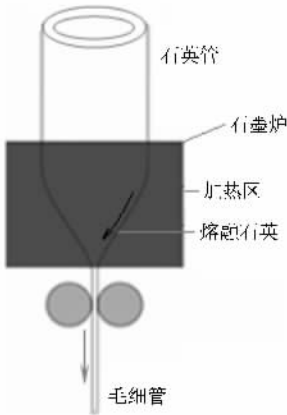


图1 毛细管控制示意图

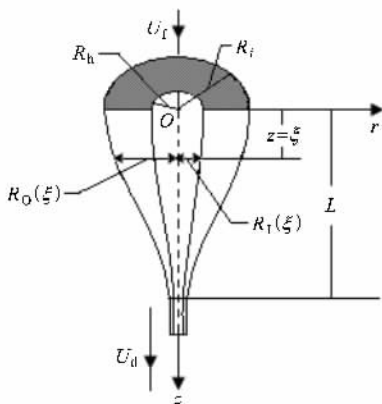


图2 预制棒软化拉伸区示意图

拉丝过程遵循质量守恒,出入石墨炉的石英质量保持不变,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r w) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u) = 0, \quad (4)$$

对于不可压缩牛顿物质, ρ 不随温度、时间等参量而改变,从而(4)式简化为

$$\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{w}{r} = 0. \quad (5)$$

方程(2)(3)(5)构成了石英流动的二维控制方程组.显然,模型中包含非线性的二阶偏微分方程,需在特定条件下才能求解出我们所需要的参量对应关系.下面首先根据毛细管的实际控制过程,讨论模型的简化、初始条件与边界条件的确定等求解问题.

2.2. 毛细管控制模型的简化

如图2描述了毛细管的具体控制过程以及一些基本参量.初始石英管内外半径分别为 R_h, R_i ,以送料速度 U_f 缓慢送入石墨炉中(加热区长度为 L)并受热软化,在下方牵引力(牵引速度 U_d)作用下发生拉伸尺寸逐渐缩减(neck-down),拉伸区域内外半径分别以 $R_i(z)$ 和 $R_o(z)$ 表示,在加热区出口($z=L$)尺寸减至最小并不再变化,即为毛细管的最终尺寸.显然,对这一过程,控制方程的求解域在 $0 \leq z \leq L, R_i(z) \leq r \leq R_o(z)$.由于我们实际控制毛细管时,通常石英管口与环境相通(管内、外等气压),气压的影响可略去,计算模型以及边界条件均可得到简化.

首先确定初始条件,根据具体的拉丝情况:

$z=0$ 时,

$$u = U_f, w = 0, R_i(0) = R_h, R_o(0) = R_i; \quad (6)$$

$z=L$ 时,

$$u = U_d, \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (7)$$

由运动学原理,对于流动石英中任一点 $P(R, z)$,有 $D(R(z, t) - r)/Dt = 0$,在管内、外表面上分别展开为

内表面:

$$\frac{\partial (r - R_i)}{\partial t} - u \frac{\partial R_i}{\partial z} = 0,$$

从而

$$w - \frac{\partial R_i}{\partial t} - u \frac{dR_i}{dz} = 0; \quad (8)$$

外表面:

$$\frac{\partial (R_o - r)}{\partial t} + u \frac{\partial R_o}{\partial z} = 0,$$

从而

$$\frac{\partial R_o}{\partial t} - w + u \frac{dR_o}{dz} = 0. \quad (9)$$

连续拉丝过程中,普遍认为石英表面不存在剪应力,切向应力边界条件

$$\hat{n}_i^T \sigma_{st} \hat{n}_i = 0 \quad (i = 1, 2 \text{ 分别代表内、外表面}), \quad (10)$$

在石英-空气界面的法向,不计气压的影响,受力主要为表面张力产生的紧缩力作用,内、外表面法向应力边界条件分别为

内表面:

$$\hat{n}_1^T \sigma_{st} \hat{n}_1 = \gamma / R_1; \quad (11)$$

外表面:

$$\hat{n}_2^T \sigma_{st} \hat{n}_2 = -\gamma / R_o. \quad (12)$$

(10)–(12)式中 \hat{n} 分别为单位切向量和单位法向量(指向外侧), γ 为表面张力系数, σ_{st} 为 Cauchy 应力张量(略去气压项):

$$\sigma_{st} = \begin{pmatrix} 2\mu \frac{\partial u}{\partial z} & \mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ \mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) & 2\mu \frac{\partial w}{\partial r} \end{pmatrix}. \quad (13)$$

将(8)(9)式代入(2)(5)式消去 w , 然后在 (R_1, R_o) 区间对 r 从进行积分运算,代入切向、法向应力边界条件,经过计算化简,可得到

$$\begin{aligned} & (R_o^2 - R_1^2) \left(3\mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \rho u \frac{\partial u}{\partial z} - \rho \frac{\partial u}{\partial t} \right) \\ & = -\gamma \frac{\partial}{\partial z} (R_1 + R_o), \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & (R_o^2 - R_1^2) \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial t} (R_o^2 - R_1^2) \\ & + u \frac{\partial}{\partial z} (R_o^2 - R_1^2) = 0, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} & R_1^2 \frac{\partial u}{\partial z} + u \frac{\partial R_1^2}{\partial z} + \frac{\partial R_1^2}{\partial t} \\ & = -\frac{\gamma R_1 R_o}{\mu (R_o - R_1)}. \end{aligned} \quad (16)$$

方程(14)–(16)为关于 $R_1(z), R_o(z), u$ 三个未知项的二阶偏微分方程,结合(6)(7)式中初始条件,可由数值方法进行求解,从而得到 $R_1(z), R_o(z)$ 即管的结构参量与工艺参量 U_f, U_d 以及 μ, γ 等的对应关系.这里需要指出,控制温度 T 的影响体现在石英黏度系数 μ 的变化上. μ 是温度的强函数^[13,14],温度小范围的浮动即可显著改变石英黏度,从而改变流动石英的运动状态,影响最终拉制出的光纤结构.

3. 理论计算

根据以上分析,利用 Matlab 编程进行计算.计算中具体参量设置如下:设初始石英管内外径尺寸分别为 $R_i = 8 \text{ mm}, R_o = 10 \text{ mm}$.石墨炉加热区长度 $L = 161.6 \text{ mm}$ (依设备而定).纯石英的黏度系数^[13,14]

$$\mu = 5.8 \times 10^{-8} \exp\left(\frac{515400}{8.3145T + 2271.10567}\right) \text{ Pa} \cdot \text{s}, \quad (17)$$

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

实际上表面张力系数 γ 也是温度的函数,但随温度变化幅度很小^[15],在此取纯石英的典型值 $\gamma = 0.3 \text{ N/m}$ ^[14–16]用于计算.

我们定义参量 S 描述毛细管控制前后内外径比值的相对变化:

$$S = \frac{R_f(L)R_o(L)}{R_i/R_i}, \quad (18)$$

其中 $R_f(L), R_o(L)$ 分别为最终拉出的毛细管的内、外半径.我们分别计算了 $T = 1900 \text{ }^\circ\text{C}, 1950 \text{ }^\circ\text{C}, 2000 \text{ }^\circ\text{C}$ 三种温度条件下 S 即毛细管结构随各拉丝参量的变化规律,如图 3.四组计算共同的结论是:1)初始石英管的比例结构无法保持,毛细管结构发生收缩($S < 1$),实际意味着内孔相对于外径发生了收缩;2)温度越高,收缩越剧烈(S 越小).以图 3(a)为例,其他条件均相同时,在 $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ 拉制出的毛细管的 S 远低于 $1900 \text{ }^\circ\text{C}$ 的情况,温度越高,内孔相对越小.例如 $U_d = 5 \text{ m/min}$ 时, $T = 1900 \text{ }^\circ\text{C}$ 对应 $R_f(L)/R_o(L) = 0.736$,温度升高 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 至 $T = 2000 \text{ }^\circ\text{C}$,对应 $R_f(L)/R_o(L)$ 减小为 0.56 ,内孔相对于外径的比例减小了 24% .这在光子晶体光纤中,相当于孔直径与孔间距之比 d/Λ 减小了 24% ,光学特性将因此发生巨大改变.可见,温度是控制过程中极为重要的控制参量,低温有助于结构的保持.图 3(a)同时表明,加快牵引速度对结构收缩稍有改善,但改善量不大,随 U_d 的增加, S 曲线变化较为平缓.相对于 U_d ,增加 U_f 对减小结构收缩更为有效,特别是在温度较高($T = 2000 \text{ }^\circ\text{C}$)时,如图 3(b),随 U_f 增加, S 增幅较大,说明高速送料可在一定程度上抑制结构收缩.然而,无论是通过控制控制温度,还是控制 U_d 或 U_f ,都无法实现 $S = 1$,即无法使最终拉制出的毛细管保持初始结构.这是由于拉丝控制中没有引入气压的作用,表面张力(表现为紧缩力)起主导作用,导致管内、外壁收缩.表面张力与曲率半径成反比^[17],

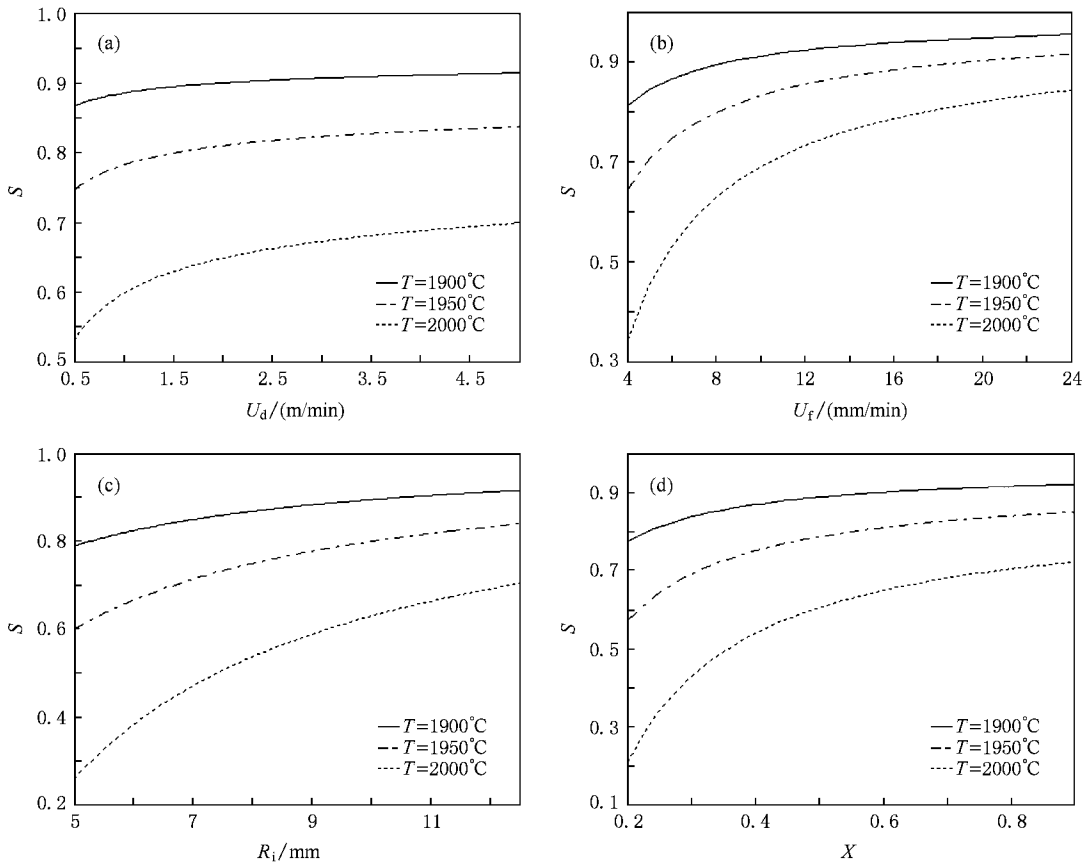


图3 其他条件相同时 (a) S 随牵引速度 U_d 的变化 (b) S 随送料速度 U_f 的变化 (c) 初始石英管内外径比值相同, S 随外径 R_i 的变化 (d) 初始石英管等外径时, S 与壁厚参量 $X = R_o/R_i$ 的对应关系曲线

内孔半径小,表面张力更大,导致收缩较外壁更剧烈,从而最终内、外径比例要小于初始值.在拉制光子晶体光纤时,由于气孔更加微小(微米级),表面张力较毛细管的情况要高出两到三个数量级,要保持其微孔结构,必须引入孔内过压抵制表面张力,否则气孔闭合难以避免.

图3(c)(d)计算了石英管初始结构参量与最终毛细管结构变化的关系.直观上,相同控制参量下,不同结构的石英管拉制出的毛细管结构也会有所不同.图3(c)表明,两根管壁相对厚度相同(内外径比 $X = R_o/R_i$ 相同)的石英管,在同等拉丝条件下尺寸较大(R_i 较大)者结构缩塌量小,而两根等外径(R_i 相同)的石英管,若管壁厚度不同(X 不等),直觉上薄壁者(X 较大者)缩塌将更为显著.然而计算表明,厚壁管结构缩塌反而更为剧烈,而且温度越高,这一现象越明显.如图3(d), $T = 2000^\circ\text{C}$ 时,初始 $X = 0.2$ 的厚壁管拉制后内外径比值缩小了80%,而初始 $X = 0.8$ 的薄壁管拉制后内外径比值仅缩小了30%.这一现象再次表明了表面张力的强

紧缩效应,并可以推广为小孔的收缩较大孔剧烈.图3(c)(d)的分析结果对光子晶体光纤的拉制来说尤为重要.因为在堆积 PCF 预制棒时,很难保证所有毛细管尺寸、结构完全相同.根据以上结论,如果相邻两根细管结构存在差异,在拉制过程中会有不同的形变量,这必然会对最终 PCF 微孔结构的横、纵向均匀性产生影响,从而使光纤的预期特性遭到破坏.多孔光纤拉制过程中相邻孔间差异的影响将在后续文章中具体分析讨论.

同时我们也考察了拉丝设备参量——加热区长度 L 对毛细管结构的影响,如图4.通常拉丝塔的加热元件是石墨发热体,其长度决定了预制棒拉伸区的长度.可见, L 越长即加热区越长,结构缩塌越剧烈.而且拉丝温度越高, S 对 L 越敏感.图4(a)(b)分别计算了初始内外径为 8 mm/10 mm(管 a),1.6 mm/2 mm(管 b)两种石英管在同等条件下,拉制出的毛细管的 $S-L$ 关系曲线.显然, L 的增大对管 b 的拉制影响更大.以 $T = 1950^\circ\text{C}$ 的情况为例, $L = 30$ mm 时,由管 a 所拉制出的毛细管 $S_a = 0.98$,管 b 所

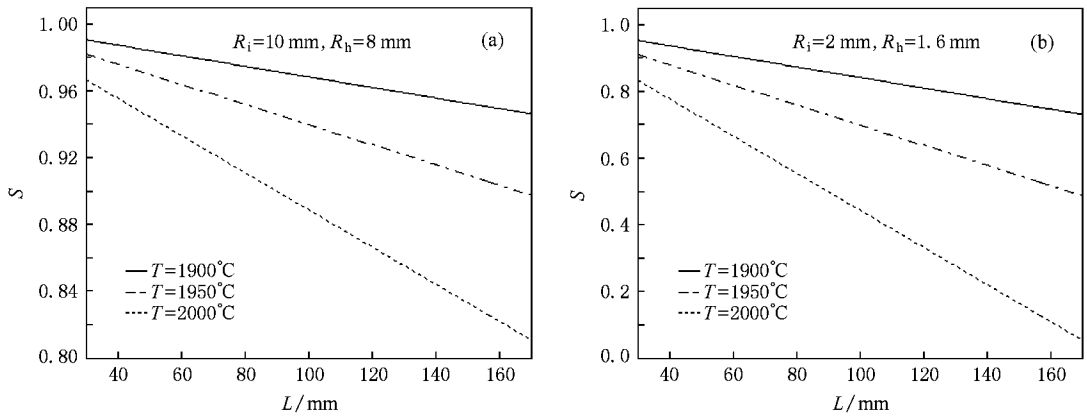


图4 毛细管结构的相对变化与加热区长度 L 的关系, 初始石英管内外半径分别为 (a) $R_h = 8 \text{ mm}$, $R_i = 10 \text{ mm}$ (b) $R_h = 1.6 \text{ mm}$, $R_i = 2 \text{ mm}$

拉制出的毛细管 $S_b = 0.9$, 均相对于初始结构发生了小幅缩塌; 当加热区长度增加到 $L = 170 \text{ mm}$ 时, S_a 减小到 $S_a = 0.9$, 而 S_b 减小到 0.1 以下, 内孔几乎接近闭合. 可见, 对于 PCF (预制棒由毫米尺寸毛细管堆制) 的拉制, L 的影响不容忽视. 除降低温度抑制其影响外, 如果条件允许, 应尽量使用较短的发热体 (石墨炉加热元件) 进行拉丝.

4. 实验结果

通过以上计算, 我们从理论上预测了拉制温度、送料速度、牵引速度这三个控制参量对最终毛细管结构的影响. 下面通过具体的拉丝实验进行比较分析. 实验同样选取内外径尺寸为 $R_h = 8 \text{ mm}$, $R_i = 10 \text{ mm}$ 的高纯石英管 (国产) 作为预制棒. 石墨炉 (TGL-8S-A 特种光纤拉丝塔, China) 加热区长度 $L = 161.6 \text{ mm}$. 材料黏度 μ 和表面张力系数 γ 的取值同上文. 为便于验证比较, 我们固定牵引速度 U_d , 分别在 $1900 \text{ }^\circ\text{C}$, $1950 \text{ }^\circ\text{C}$, $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ 三种拉制温度下进行多组实验, 每一温度条件下, U_f 从 4 mm/min 逐渐增加 (4 mm/min/次) 至 24 mm/min , 图 5 记录了实验结果. “ \circ ” 代表毛细管内外直径的实验测量值; “—” 给出根据实验条件计算的理论值.

比较表明, 实验数据与理论计算基本相符. 其中, 毛细管内径的理论值与实验测量值拟合程度较好, 最大偏差约为 0.07 mm ($T = 1900 \text{ }^\circ\text{C}$). 而外径数据最大偏差约为 0.12 mm ($T = 1900 \text{ }^\circ\text{C}$). 我们认为产生理论与实验偏差的原因有以下几个方面: 一是实际拉丝与测量操作必定存在一些不完美因素, 即

存在系统误差; 二是实验所用石英管的 μ , γ 与计算取值有一定差异 (因制造商不同). 此外, 由图 5 不难发现, 多数情况下, 理论与实验的偏差随 U_f 的增大而增大, 且低温时的偏差要高于高温情况. 究其原因, 我们认为这是由于石英黏度对温度的强依赖性造成的. 由 (17) 式可以看出, 温度小幅的降低会使石英黏度有几倍的增加. 当送料速度较快时, 熔融石英尚未达到预期温度即被拉下, 由于实际黏度更大, 收缩受到阻碍, 从而与理论值产生了小的偏差. 虽然实验数据与理论计算出现了小的偏差, 然而就总体而言, 仍然应该说我们的实验与理论计算取得了很好的一致性, 计算模型的可靠性得到了有力验证. 这意味着我们根据设计要求, 可预先通过计算选取合理的工艺参量, 即可制备出所需结构的毛细管, 不仅提高了控制系统的稳定性, 更提高了拉制效率和质量.

5. 结 论

光子晶体光纤的制作工艺一直是制约其发展与实用化的最大难点之一. 本文针对 PCF 制作流程的第一步——毛细管的制作, 从流体力学的 Navier-Stokes 方程出发, 建立了毛细管的拉制过程的简化模型, 由此通过数值计算, 理论分析了毛细管拉制过程的主要控制参量: 温度、送料速度、牵引速度, 以及其他一些工艺参量, 如初始石英管结构参量、拉丝设备参量等对最终毛细管结构的影响, 得到了有用的结论. 相关结论推广到光子晶体光纤的拉制中, 可作为有力的工艺参考. 最后通过具体的毛细管拉制实验进行了对比分析. 实验结果与理论计算取得了很好的一致性, 验证了理论模型的可靠性. 本文的分析

及结论不仅为毛细管的制作提供了理论依据,为 PCF 预制棒的堆制作足了准备,相关结论对于包含

更多气孔、结构更为复杂的光子晶体光纤的制作同样有重要的指导意义.

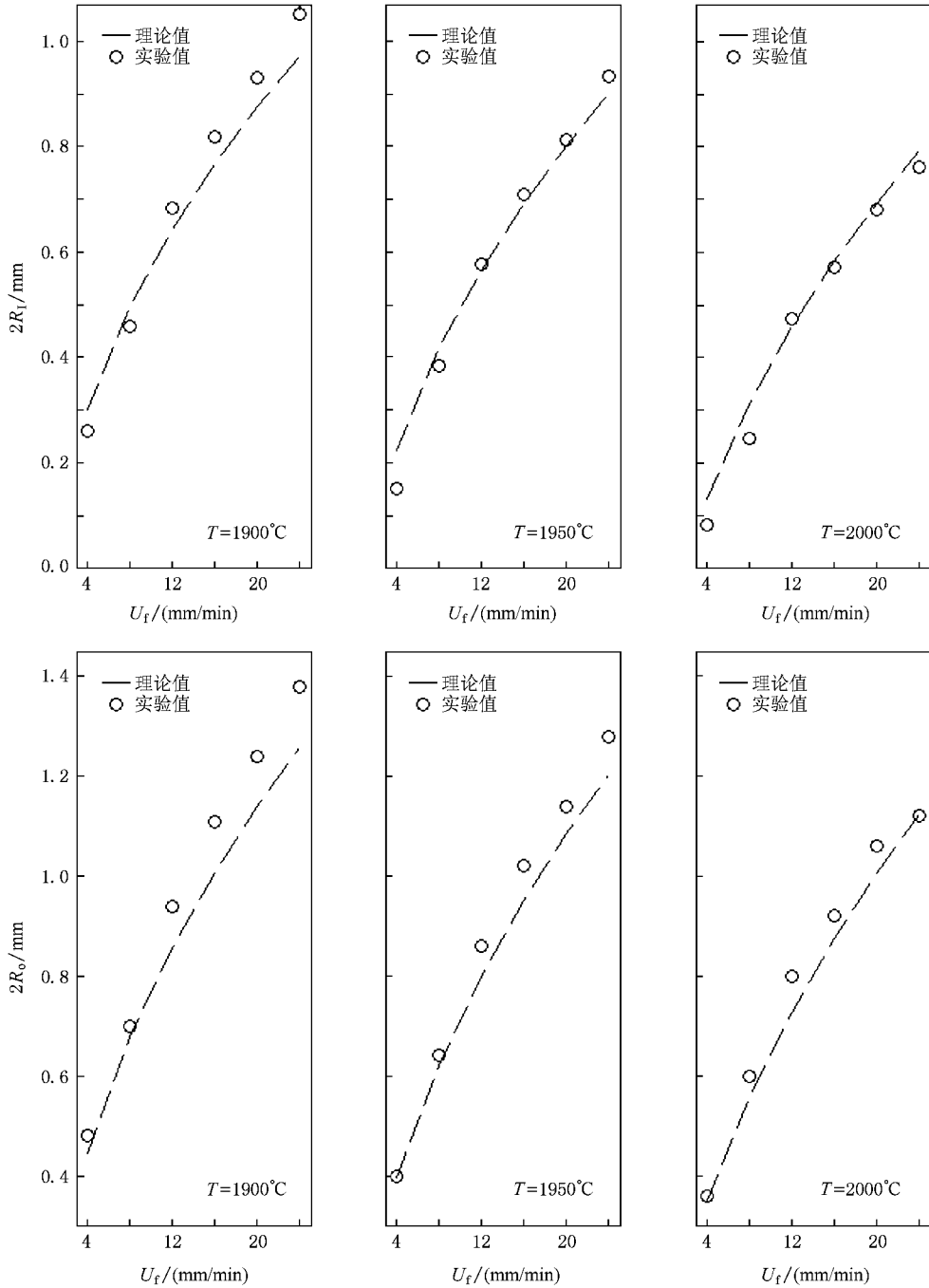


图 5 相同 U_d 不同温度下毛细管内直径 ($2R_1$) 与外直径 ($2R_o$) 随 U_f 的变化

[1] Knight J C , 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] Hart L , Li X D , Chudoba C *et al* 2001 *Opt. Lett.* **26** 608
- [12] Landau L D , Lifshitz E M 1982 *Fluid Mechanics* (Oxford , England : Pergamon Press)
- [13] Doremus R H 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 7619
- [14] Bansal N P , Doremus R H 1986 *Handbook of Glass Properties* (New York : Academic Press) p14
- [15] Kingery W D 1959 *J. Am. Ceramic Soc.* **42** 6
- [16] Schultz W W , Davis S H 1984 *J. Appl. Mech.* **51** 1
- [17] Tabor D 1969 *Gases , Liquids and Solids* (Penguin Books , Harmondsworth UK)

Capillary drawing for fabrication of photonic crystal fibers : theoretical calculation and experiments *

Guo Tie-Ying^{1 2)} Lou Shu-Qin¹⁾ Li Hong-Lei¹⁾ Jian Shui-Sheng¹⁾

1) *Key Lab of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network of EMC , Beijing Jiaotong University , Beijing 100044 , China)*

2) *Institute of Lightwave Technology , Beijing Jiaotong University , Beijing 100044 , China)*

(Received 11 August 2008 ; revised manuscript received 16 October 2008)

Abstract

A simplified fluid – mechanics model is developed for the drawing of silica capillaries. Calculations are carried out to predict the influence of the technical parameters on the final geometry of the capillaries. Geometrical collapse is inevitable when drawing capillaries , and active control of the parameters only helps to some extent in tuning the final structures. Drawing experiments were performed to check the theoretical calculations. Good agreement was obtained , which certified the validity of the model. The predictions provide valuable practical information for the fabrication of photonic crystal fibers.

Keywords : photonic crystal fibers , capillary , fabrication theory , technical parameter

PACC : 4281 , 4281B , 4710