

梯度型聚合物通信光纤制备的理论分析*

宋海军, 王学忠, 赵卫

(中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

摘要:对直接挤出法制备梯度型聚合物光纤的工艺流程进行了分析, 根据双组分混合物折射率计算理论和梯度型聚合物光纤径向折射率分布函数, 计算了梯度型聚合物光纤单位长度中所含掺杂剂的质量; 将非稳态扩散理论和有限差分法结合起来, 对梯度型聚合物光纤折射率分布的形成进行了理论研究, 建立了数学物理模型, 得到描述梯度型聚合物光纤径向折射率形成的普遍性近似方法。

关键词:梯度型聚合物光纤; 折射率分布; 数学物理模型; 有限差分法

中图分类号: TQ342+.82

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)02-343-4

0 引言

近几年, 传输距离 1 km 范围内的短距离光传输已成为光纤传输技术发展的一个全新领域, 也是高速、大容量全光传输网络的一个重要组成部分。石英光纤, 由于芯径小, 需要结构精密准确的连接器与耦合器, 因此, 增加了整个网络系统的安装维修费用, 不适合短距离光传输, 特别是局域网的需求。光子晶体光纤虽然可以满足高速、大容量传光特点, 但其现阶段主要处于理论探索和实验阶段^[1-4]。而聚合物光纤 (Polymer Optical Fiber: POF) 以其大芯径、易于安装、强抗电磁干扰、高柔韧性、价格低廉等优点, 已成为短距离光通信网络的首选传输介质。聚合物光纤可分为突变型 (SI-POF) 和梯度型 (GI-POF)。由于 SI-POF 存在较大的模间色散, 光纤的传输带宽较窄, 通常只能满足 100 m 内的小容量信号传输要求。随着网络通信的发展, SI-POF 已不能满足高速局域网的传输要求。GI-POF 由于径向折射率分布的特点, 其在 100 m 距离的带宽理论上可达 5G 左右, 以成为当前高速全光局域网的首选传输介质^[5]。

目前研究较多的 GI-POF 制备方法主要有界面凝胶共聚法^[6-7]和直接挤出法。本文对直接挤出法工艺流程进行了分析, 计算了掺杂剂含量, 并建立了描述折射率分布形成的数理模型。

1 直接挤出法的基本原理

直接挤出法^[8-10]是连续制备 GI-POF 的一种工艺, 其基本流程如图 1。

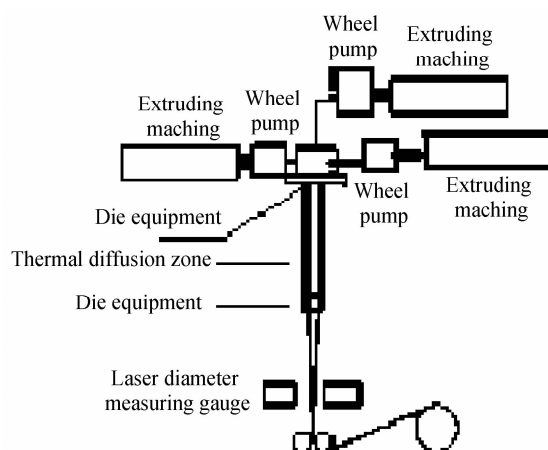


图 1 挤出法制备 GI-POF 拉丝系统
Fig. 1 System for GI-POF using coextrusion method

在该工艺中, 一般情况下将同一种聚合物粘料分别放入由内到外各层挤出机中, 且给各层粘料中加入一种或几种能够按要求改变折射率分布的可扩散掺杂剂。各层聚合物经各个挤出机后以熔融态进入连接各个挤出机的共挤模具, 该模具经过特殊设计, 可允许至少两种聚合物材料同时挤出, 并且各物料出口同心排列。工作时, 在惰性气体保护下将各层聚合物加热熔融, 从共挤模具挤出 (靠近中心部位的聚合物具有较大的折射率), 进入扩散区域。扩散段通常加热到能够维持聚合物熔体的流动, 并能够促进掺杂剂扩散的温度。同时扩散段在结构上有足够的长度以保证熔体在扩散区有足够的停留时间以达到所需要的扩散程度, 使扩散区中的聚合物沿径向的折射率呈抛物线型分布。从扩散区流出的聚合物在一定的牵引力的作用下被拉伸, 在空气中冷却定型, 并经过测径仪, 通过收卷装置收卷到盘上。

2 直接挤出法理论分析

目前人们所采用的直接挤出法中, 一般选用两种以上聚合物, 和多种掺杂剂, 这使整个扩散过程变得比较复杂, 从而沿光纤径向的折射率分布很难控

* 中科院西安光机所所长基金资助
Tel: 029-88880165 Email: shjwll123@sina.com
收稿日期: 2007-09-14

制,因此生产出来的 GI-POF 的质量不能令人满意. 为了解决这一问题,本文在此提出将双组分混合物折射率的计算理论^[11]、扩散理论^[12]和直接共挤工艺结合起来制备 GI-POF 的理论方案.

2.1 掺杂剂质量计算

在共挤工艺中,选用由两种物质组成的同一种混合物为各层挤出机所加粒料(各层差别在于两种物质所占质量比例不同). 对于液体混合物的折射率有经验公式

$$n = k_1 n_1 + k_2 n_2 \quad (1)$$

式中 n 为混合物的折射率, k_1 、 k_2 分别为构成该混合物的两种物质的体积分数, n_1 、 n_2 分别为两种物质对应的折射率. 设:混合物的总体积为 V , 折射率为 n_1 的物质所占体积为 V_1 , 则

$$n = \frac{V_1}{V} n_1 + \frac{V - V_1}{V} n_2 \quad (2)$$

将 $V_1 = \frac{m_1}{\rho_1}$ 代入式(2), 并对上式两端微分, 可得

$$(n - n_1) dV = \frac{dm_1}{\rho_1} (n_1 - n_2) \quad (3)$$

截一段光纤, 如图 2. 在极坐标中

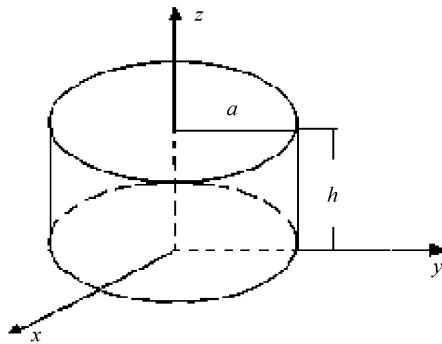


图 2 一段聚合物光纤
Fig. 2 A piece of polymer fiber

$$dV = 2\pi h r dr \quad (4)$$

梯度型聚合物光纤径向折射率分布函数为

$$n(r) = n_c \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^g \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中 n_c 为光纤轴线处的折射率, Δ 为剖面相对折射率差, a 为光纤纤芯的半径. 当 $g=2$ 时, 称为抛物型折射率剖面, 梯度光纤最优折射率剖面的 g 值在 2 附近, 为了讨论简单, 选 $g=2$, 则

$$2\pi h r dr \left\{ n_c \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - n_2 \right\} = \frac{dm_1}{\rho_1} (n_1 - n_2) \quad (6)$$

对式(6)积分, 可求出单位长度, 半径为 a 的整个光纤中所含参杂剂的质量 m_1

$$m_1 = \int_0^a \frac{2\pi\rho_1}{(n_1 - n_2)} \left\{ n_c \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - n_2 \right\} r dr \quad (7)$$

2.2 扩散过程的控制

从共挤模具挤出的聚合物, 其折射率沿径向呈阶梯状分布. 为了使其经扩散后沿径向呈抛物形分布, 首先要求聚合物光纤单位长度中所含掺杂剂的质量应和式(7)计算的质量相同. 在扩散区中仅考虑一种组分的扩散(若两种组分互相扩散, 也可以等效为一种组分静止, 另一种组分扩散). 由于整个扩散过程是非稳态扩散过程, 所以可以根据菲克扩散第二定律得出扩散方程

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (8)$$

选 D 为常量, 式(8)变为

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (9)$$

式中 D 为扩散系数, c 为扩散组元的体积浓度. 由于

$$n(r) = n_c \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^g \right]^{\frac{1}{2}}$$

和

$$n^2(r) = \begin{cases} n_c^2 & 0 \leq r < r_b \\ n_b^2 & r_b \leq r < r_a \\ n_a^2 & r_a \leq r < l \end{cases}$$

的交点为 $(0, n_c^2)$ 、 $(a \left(\frac{n_c^2 - n_b^2}{n_c^2 - n_a^2} \right)^{\frac{1}{2}}, n_b^2)$ 和 (a, n_a^2) 三点(如图 3), 所以可将扩散过程分为两个相互独立的

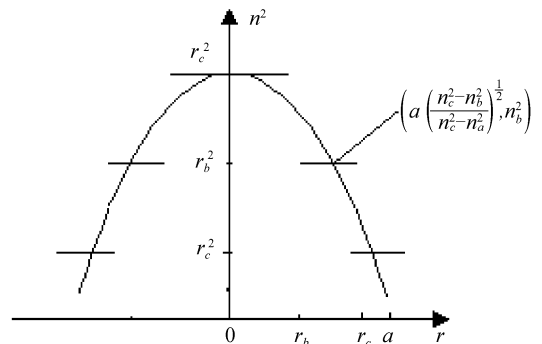


图 3 折射率阶跃分布和梯度分布函数图像
Fig. 3 Function of step index and graded index

过程, 且在柱坐标中讨论该问题^[13], 由于整个过程和坐标 z 、 φ 无关, 可将第一过程表示为

$$\frac{\partial c}{\partial t} - D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial c}{\partial r} \right) = 0 \quad (0 \leq r < a \left(\frac{n_c^2 - n_b^2}{n_c^2 - n_a^2} \right)^{\frac{1}{2}}) \quad (10)$$

$$\begin{cases} c|_{r=0} = c_1 \\ c|_{r=a \left(\frac{n_c^2 - n_b^2}{n_c^2 - n_a^2} \right)^{\frac{1}{2}}} = c_2 \end{cases}$$

$$c|_{t=0} = f_1(c)$$

同理描述第二个扩散过程的方程为

$$\frac{\partial c}{\partial t} - D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial c}{\partial r} \right) = 0 \quad (a \left(\frac{n_c^2 - n_b^2}{n_c^2 - n_a^2} \right)^{\frac{1}{2}} \leq r < a)$$

$$\begin{cases} c|_{r=0} = c_1 \\ c|_r = a \left(\frac{n_c^2 - n_b^2}{n_c^2 - n_a^2} \right)^{\frac{1}{2}} = c_2 \end{cases}$$

$$c|_{t=0} = f_1(c) \quad (11)$$

因为这两个方程的边界条件是非齐次的,很难求得解析解。可以根据有限差分理论建立差分方程,求得近似解。将 t 的变化区间分成相同的长度 τ 的小区间,将 r 的变化区间分成有相同长度 ζ 的小区间,命名为 t_k 和 r_i ($k=1,2,\dots; i=1,2,\dots$)。则式(10)和式(11)可化为相同形式的差分方程

$$\frac{c(r,t+\tau) - c(r,t)}{\tau} - D \left[\frac{c(r+\zeta,t) + c(r-\zeta,t) - 2c(r,t)}{\zeta^2} + \frac{1}{r} \frac{c(r+\zeta,t) - c(r,t)}{\zeta} \right] = 0 \quad (12)$$

在式(12)中令 $t = t_k, t + \tau = t_{k+1}, t - \tau = t_{k-1}; r = r_i, r + \zeta = r_{i+1}, r - \zeta = r_{i-1}$, 得

$$c(r_i, t_{k+1}) = c(r_i, t_k) + \tau D \left[\frac{c(r_{i+1}, t_k) + c(r_{i-1}, t_k) - 2c(r_i, t_k)}{\zeta^2} + \frac{1}{r_i} \frac{c(r_{i+1}, t_k) - c(r_i, t_k)}{\zeta} \right] \quad (13)$$

这样,已知在某个时刻 t_k ,在各个地点 r_i 的值 $c(r_i, t_k)$,就可以求得在下一个时刻 t_{k+1} ,在各个地点 r_i 的值 $c(r_i, t_{k+1})$ 。因此,既然初始值 $c(r_i, 0)$ 已知,就可以求得 $c(r_i, t_1)$ 等等,如此不断进行下去,就可以近似解出光纤的扩散问题。

3 结论

直接挤出法是连续制备 GI-POF 的一种工艺,,它易于进行大规模工业生产,因此也备受人们的注视。本文对直接挤出法的整个流程进行了简单的分析,将双组分混合物折射率计算理论、非稳态扩散理论和有限差分法融合起来,形成一整套系统的理论方法,为梯度型聚合物光纤的研制提供了理论依据,能够对聚合物光纤沿径向折射率的梯度型分布的形成进行定量描述,这对于人们制备梯度型聚合物光纤有一定的参考价值。

参考文献

[1] XU Gui-wen, QU-YANG Zheng-biao. A new double-wavelength photonic crystal resonator [J]. *Acta Photonica*

Sinica, 2007, **36**(3): 429-433.

许桂雯,欧阳征标. 一种新型光子晶体双色谐振腔[J]. *光子学报*, 2007, **36**(3): 429-433.

- [2] XIE Dong-hua, HE Xiao-dong, TONG Chuan-ping, et al. Parameter analysis of planer photonic crystal micorecavity [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(3): 434-438.
谢东华,何晓东,佟传平,等. 平板型光子晶体谐振腔性能分析 [J]. *光子学报*, 2007, **36**(3): 434-438.
- [3] WANG Wei-jiang, XIAO Wan-neng, ZHOU Jin-yun. The unidirectional transmission properties of nonlinear photonic crystals [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(3): 439-443.
王维江,肖万能,周金运. 非线性光子晶体的单向透射性 [J]. *光子学报*, 2007, **36**(3): 439-443.
- [4] SUN Xi-wen, WANG Qing-yue, HU Ming-lie, et al. Modulation instability and supercontinuum generation in photonic crystal fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(1): 51-54.
- [5] LI Zhong-hui. Research progress of graded index polymer opticl fiber [J]. *Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications*, 2003(1): 1-6.
李忠辉. 渐变型聚合物光纤研究进展 [J]. *光纤与光缆及其应用技术*, 2003(1): 1-6.
- [6] KOIKE Y. High-bandwidth graded-index polymer optical fiber [J]. *Polymer*, 1991, **32**(10): 1737-1742.
- [7] KOIKE Y, ISHIGURE T, NIHEL E. High-bandwidth graded-index polymer optical fiber [J]. *Lightwave Technology*, 1995, **13**(7): 1475-1479.
- [8] PERRY G A, WITCHER C E. Graded polymer optical fibers and prosser for manufacture thereof; US, 5235660 [P], 1993.
- [9] LIU B T, CHEN W C, HSU J P. Mathematical modeling of a co-extrusion process for preparing graded-index polymer optical fibers [J]. *Polymer*, 1999, **40**(6): 1451-1457.
- [10] GARITO, et al. Graded index optical fibers; US, 645 729 [P], 1998.
- [11] WHITE R M, et al. Experimental physics for students [M]. London: Chapman and Hall Press, 1973, 85.
- [12] MA Si-chun. Fundamentals of materials science [M]. Xi'an: Shaanxi Technology Press, 1998: 190-192.
马泗春. 材料科学基础 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1998: 190-192.
- [13] LIANG Kun-miao. Methods of mathematical physics [M]. Beijing: People's Education Press, 1962: 295-330.
梁昆淼. 数学物理方法 [M]. 北京: 人民教育出版社, 1962: 295-330.

Preparation Theory for Graded Index Polymer Optical Fiber Used in Communication

SONG Hai-jun, WANG Xue-zhong, ZHAO Wei

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Received date: 2007-09-14

Abstract: The preparation method for graded index polymer optical fiber was analyzed using co-extrusion methods. According to the calculation theory about two refractive index and the function of refractive index distribution of the GI-POF, the dopants' mass was calculated. Based on the unstable diffusion theory and finite difference method, the forming of refractive index distribution was described and the mathematical model was obtained. The general approximate way to describe the forming of refractive index distribution of the GI-POF was attained.

Key words: Graded index polymer optical fiber; Refractive index distribution; Mathematical model; Finite difference method



SONG Hai-jun was born in 1976. He received the M. S. degree in optical engineering from Xidian University in 2007. Now he is working as an engineer at Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, and his research interests focus on optical fiber communication, fiber optics and quantum optics.