

单模塑料光导纤维

于建明 陶肖明

(香港理工大学纺织及制衣学院 香港 九龙)

摘 要: 综述了单模塑料光导纤维的制作原理及现有的制作技术, 讨论了各种类型单模塑料光导纤维在传感、通讯、光信息处理等方面的应用。

关键词: 单模光导纤维 塑料光导纤维 传感器 非线性光学

中图分类号: TQ342.82 文献标识码: A 文章编号: 1001-0041(2003)01-0038-04

石英光导纤维具有优异的光传输性能, 石英光纤光缆的使用将人类带进光通讯时代。现有制造石英光纤技术的发展已很完善, 使光损耗率降至极低水平, 因此, 远程通讯均采用石英光纤。与石英光纤相比, 塑料光纤具有柔软、制造成本低、数值孔径较大以及易于操作等优点。光损耗较大是塑料光纤的主要缺点。1964 年美国杜邦公司首先研制成功以聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)为芯材的塑料光导纤维(POF), 1972 年实现了商品化。日本三菱人造丝公司在杜邦公司之后开始从事 POF 开发, 并于 1975 年成功开发出牌号为 ESKA 的 POF。1982 年三菱人造丝公司购买了美国杜邦公司有关 POF 的全部专利技术资产, 成为全球 POF 技术开发和商业化生产的最大公司, 具有垄断地位。本文介绍单模塑料光纤的制造原理及其方法, 并讨论可能的种类以及他们的应用前景。

1 单模光导纤维制造原理

对于具有皮芯结构、同心圆截面的光导纤维, 描述光线沿光纤传播行为的基本参数有如下定义^[1]:

$$V = 2\pi a / \lambda (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \tag{1}$$

式中 V —— 标准化频率;
 a —— 纤芯半径;
 λ —— 传播光的波长;
 n_1 —— 芯材的折射率;
 n_2 —— 皮材的折射率。

对于具有一定波长的光在纤维中传播, 当标准化频率满足: $0 \leq V \leq 2.405$ 时, 此时的光波导满足单模条件。对于该波长的光来说, 光纤是单

模光纤。单模条件要求皮材和芯材折射率差很小, 纤芯直径也很小。如果选择与石英单模光纤相同的结构尺寸, 芯/皮直径分别是 $9/125 \mu\text{m}$, 采用 PMMA 作为皮材, 它的折射率在波长 589.3 nm 为 $1.489^{[2]}$ 。应用公式(1)和单模条件; 对 589.3 nm 波长入射光满足单模条件时, 纤芯材料的折射率应小于 1.4898 。表 1 列出了几种甲基丙烯酸酯类均聚物折射率值^[2]。

表 1 几种甲基丙烯酸酯类均聚物折射率值

Tab. 1 Refractive index of several kinds of methacrylate homopolymer

聚合物	折射率*
聚甲基丙烯酸甲酯	1.489 0
聚甲基丙烯酸苄基酯	1.568 0
聚甲基丙烯酸乙酯	1.485 0
聚甲基丙烯酸 2, 2, 2-三氟乙酯	1.437 0
聚甲基丙烯酸三氟异丙醇酯	1.417 7

* 20°C 钠光 D 线波长下测试的折射率值。

通过选择单体种类和共聚组成, 聚合物材料的折射率容易通过分子设计达到单模条件的要求。欲合成上述举例中折射率为 1.4898 的纤芯材料, 可以通过少量的甲基丙烯酸苄基酯与甲基丙烯酸甲酯共聚。与甲基丙烯酸甲酯相比, 甲基丙烯酸苄基酯是对紫外光较敏感的结构单元。如果要增加其含量同时满足单模条件, 可以加入折射率更低的第三共聚单体, 如表 1 中的甲基丙烯酸 2, 2, 2-三氟乙酯或甲基丙烯酸三氟异丙醇酯。

收稿日期: 2002-06-24; 修订日期: 2003-01-08。

作者简介: 于建明(1963-), 河北人, 硕士, 博士研究生。
从事塑料光导纤维和功能合成纤维的研究。

2 单模塑料光导纤维制造方法

单模塑料光导纤维的制作目前还处于实验室研制阶段, 基本的方法都是预制棒拉伸法。文献中报道了如下 3 种预制棒制作方法。

第一种是“棒插入管”技术, 即将纤芯材质的聚合物棒插入皮层材质的聚合物管中, 棒与管要紧密吻合^[3]。由于单模条件要求纤芯直径非常小, 往往需要将首次制得的预制棒拉细, 再作为插入棒插入到与其直径相配的皮肤聚合物管中, 得到的预制棒再次经历热拉伸, 使纤芯直径进一步细化。由于该工艺常常需要两次或两次以上的热拉伸过程, 常常造成聚合物性能的劣化。

第二种方法是将直径较细的芯材棒(约 800 μm)放在两个侧面中心轴线带有半圆形槽的半圆柱体之间, 在特制的模具中两个半圆柱体将纤芯棒夹紧并经历热处理得到预制棒^[4]。此法中细直径的芯材棒一般是由较粗的芯材预制棒经热拉伸制得, 因此, 最终得到的单模纤维芯材实际上也经历了两次热拉伸过程。另外, 上述两种预制棒制作方法, 都需要经历芯材棒向皮层轴心的镶入过程, 皮芯界面的污染很难避免, 界面粘和质量低。

第三种方法是将芯材在皮层材料轴心空洞中聚合得到预制棒^[5]。这种方法是首先在轴心插入聚四氟乙烯细棒的玻璃试管中合成皮层聚合物, 插入的聚四氟乙烯细棒直径与设计的预制棒纤芯直径相同。第二步, 将聚四氟乙烯细棒抽出, 接着在形成的空洞内合成芯材聚合物。图 1 给出了第三种方法示意制作过程。与前两种方法相比, 此方法只经过一次热拉伸过程, 皮层和纤芯之间的粘接效果最理想。

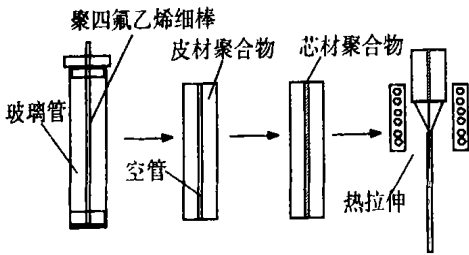


图 1 预制棒制作和拉伸过程示意图

Fig. 1 Diagram of preform manufacture and drawing stage

预制棒拉伸法制作单模光纤是一种间歇方法, 适合于实验室制作少量试样。采用复合喷丝板皮芯共挤出熔融纺丝方法, 可以连续批量制作, 目前还未见到这种方法的研究报道。

3 特殊类型单模塑料光导纤维的设计制作

3.1 光导纤维光栅传感器

1989 年 Meltz^[6] 采用紫外激光全息照射方法在紫外光敏的掺锗石英单模光纤芯部首次写入永久性布拉格光栅。目前较常用的写入光栅方法是相位模板技术。该方法是将特定波长的紫外光经过相位模板照射在光纤写光栅部位。由于光纤芯材部分的紫外光敏性, 在写入光栅位置纤芯轴向折射率呈现周期性的变化。变化的周期与使用的相位模板周期有关。光栅周期一般是 1 μm 左右, 满足布拉格条件的光波将被光栅反射回来。整个光栅的尺寸可以根据使用要求设计, 可以是 10 mm 长。光纤写入光栅的位置发生温度变化引起纤维沿轴向膨胀或收缩, 或者由于外部应力场作用经历拉伸或收缩, 光栅的周期将发生变化, 反射光的大小也会发生相应变化。因此, 布拉格光栅本身是对温度和应力(或应变)场敏感的传感器。由于单模光纤直径细小(125 μm), 可以通过镶入或编入纺织复合材料的增强纤维中, 进入复合材料内部, 对复合材料的制造过程可进行随时监测, 可用于研究复合材料应力应变行为以及监测复合材料在使用过程的状况^[7]。但是, 石英光纤断裂伸长只有 1% 左右, 当复合材料的形变超过 1% 时, 石英光纤光栅传感器将不能有效地继续监测材料的应变行为。使用聚合物材料制造的塑料光纤一般断裂伸长可达 10% 左右, 而且, 塑料光纤柔软, 容易与增强纤维编织在一起。如果在单模塑料光纤中写入布拉格光栅, 这种光栅传感器将具有更广泛的应用前景。

光纤光栅除了用于传感, 还具有另外两种重要的功能: 光波过滤和波长调制。在石英单模光纤基础上, 光栅过滤器和调制器广泛于光通讯中。如果开发出具有光敏性能的塑料单模光纤, 可应用塑料光纤开发这两种功能的光通讯光学器件。

1999 年, 澳大利亚新南威尔士大学首次研制出芯材光敏的单模塑料光纤, 并且用紫外激光在纤维中写入布拉格光栅^[8]。该纤维以 PMMA 为皮材, 少量甲基丙烯酸苄基酯与甲基丙烯酸甲酯共聚物为芯材。甲基丙烯酸苄基酯的加入既可提高芯材的折射率又能赋予芯材紫外光光敏性。研究表明, 写入的光栅具有 10^{-4} 数量级的折射率变化, 光栅反射率达 80%, 布拉格波长 (λ_B) 谱线宽 0.5 nm。当长度为 10 mm 光栅部位发生 1.3% 应变时, 布拉格光栅反射波的调制变化是

20 nm, 这是石英光纤光栅能力的数十倍。由于反射波 λ_B 具有较大的调制变化范围, 光栅作为传感器将具有更灵敏和准确的功能。作为光波过滤器和调制器也会具有更宽的光谱范围。公式(2)给出了布拉格光栅反射光谱中心波长的反射率(R)与光栅各参数之间的关系^[7]:

$$R = \tanh^2(\pi \Delta n_0 L / \lambda_B)$$

式中 Δn_0 ——光栅折射率周期性变化的差值,
它代表光栅的强度;
 L ——光栅的长度。

通过光敏性分子设计, 聚合物材料在紫外激光激励下可以产生比石英无机材料更大的折射率变化, 因此, 塑料光纤光栅反射率可以达到非常高的程度。光敏性单模塑料光纤的研究刚刚开始, 今后需开发更多类型的品种, 并对其性能和应用进一步深入研究。

3.2 具有非线性光学性能的单模光导纤维

光电子技术的发展, 非线性光学起到了十分关键的作用。非线性光学效应的应用, 可以制造出波长变换、调制、开关、存储、限幅等各种进行光信息处理的重要元器件, 从而使信息的光处理和光计算有希望得以实现。

非线性光学材料研究结果表明, 有机化合物材料显示出比无机晶体材料具有更大的非线性效应, 在非线性光学方面将会有较大的潜力。制造高非线性的单模塑料光纤将可以使非线性材料方便地装入纤维波导装置中, 实现光波导过程中的相位变化和制造光学开关。将某些具有光致变色功能的有机染料掺入透明的聚合物材料中, 可使聚合物材料具有明显的非线性光学性能。Garvey 研制成功了芯材掺杂光致变色染料、具有高度非线性的 PMMA 塑料单模光纤^[5]。结果表明, 染料加入量高达 5%(质量百分比)的 PMMA 纤芯光纤光损耗在 1 060 nm 波长下与不加染料时基本相同; 偏振入射光在其中传输过程能保持 99.8% / cm 偏振性能。

Peng 等人制作了芯材掺杂激光染料的塑料光导纤维^[9]。研究结果表明, 波长为 514 nm 激光经历 73 cm 长的光纤, 输出光的波长提高为 633 nm, 并且, 输出光信号波长的提高与所经历的光纤路径长度成正比。该光纤还具有光信号放大功能, 输入 532 nm 波长的激光经历大约 50 cm 长的光纤后, 输出端的光信号强度可提高数百倍。虽然, 这种研究是在阶跃式多模光纤中进行的(芯

/皮直径 30/300 μm), 这种效果同样可应用于单模塑料光纤中。

3.3 其他种类的塑料单模光导纤维

开发氟聚合物单模塑料光纤。由于聚合物中 C—H 键被 C—F 键替代, 含氟聚合物在近红外波段具有低的光损耗。已有文献报道了主链具有芳香环结构的含氟聚合物的合成以及在塑料光纤制作中的应用。该聚合物不但具有理想的透光性能, 并且具有理想的耐热和热机械稳定性。它的折射率可以通过调整反应单体中芳香环结构来控制。目前, 以石英单模光纤为基础的光信息传输主要采用 800 nm 和 1550 nm 两个波长。如果能制作出低光损的含氟聚合物塑料单模光纤, 可以在 800 nm 左右波长下, 实现塑料光纤与石英光纤在光信息传输过程中的对接, 这在很多场合下是非常有意义的。

4 结语

随着光通讯技术的进步、光子学的发展以及光信息处理时代的来临, 对塑料单模光纤的需求有可能会变得非常迫切。与无机材料相比, 高分子材料通过分子设计更容易实现所需要的物理性能。而且, 高分子材料还具有加工容易、价格低廉、柔软易弯曲、容易实现材料的非线性光学性能等优势。因此, 塑料单模光纤的研制和特殊品种的开发将会更有意义。目前, 单模塑料光纤的研制主要是采用预制棒拉伸法在实验室制作少量试样, 采用熔融共挤出方式制作单模塑料光纤应是未来的发展方向。

参 考 文 献

- [1] Giovanni Cancellieri. Single-mode Optical Fiber Measurement: Characterization and Sensing[M]. Artech House, Norwood MA, USA, 1993
- [2] Brandrup J, Immergut E H, Grulke E A. Polymer handbook, 4th edition[M]. Wiley New York, 1999. 572~577
- [3] Bosc D, Toinen C. Full Polymer Single-mode Optical Fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1992, 4(7): 749
- [4] Garvey D W, Zimmerman K, Young P, et al. Single-mode Nonlinear-optical Polymer Fibers[J]. J Opt Soc Am B, 1996, 13(9): 2 017
- [5] Peng G D, Chu P L, SM IREE, et al. Fabrication and Characterization of Polymer Optical Fibers[J]. Journal of Electrical and Electronics Engineering, Australia-IE Aust & The IREE Society, 1995, 15(3): 289
- [6] Meltz G, Morey WW, Glenn WH. Formation of Bragg Gratings in Optical Fibers by a Transverse Holographic Method

[J]. Optical letters, 1989 14: 823 ~ 825

[7] Du W , Tao X M , Tam H F , et al. Fundamentals and Applications of Optical Fiber Bragg Grating Sensors to Textile Structural Composites[J] . Composite Structures, 1998, 42: 217 ~ 229

[8] Xiong Z , Peng G D , Wu B et al. Highly Tunable Bragg Gratings in Single-mode Polymer Optical Fibers[J] . IEEE Photonics Technology Letters, 1999, 11(3): 352

[9] Peng G D , Chu Pak L , Xiong Z , et al. Dye-doped Step-index Polymer Optical Fiber for Broadband Optical Amplification[J] . Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(10): 2215 ~ 2223

Single-mode plastic optical fibers

Yu Jianming, Tao Xiaoming

(Institute of Textiles and Clothing, The Hong Kong Polytechnic University, Hongkong)

Abstract: The principle for fabricating single-mode polymer optical fibers (POF) and their manufacture techniques were reviewed. The potential applications with various types of single-mode POFs in the field of sensing, communication and optical message processing were discussed.

Key words: single-mode optical fiber; plastic optical fiber; sensor; nonlinear optics

◀ 国内外动态 ▶

扬子石化公司 1 050 kt/a
PTA 改造将全面启动

扬子石化公司针对市场需求及本身的生产现状,进行了新一轮 PTA 改造计划。1 050 kt/a PTA 生产线,将以 600 kt/a PTA 改造的技术成果为基础,采用国内外先进技术,新增 450 kt/a PTA 的生产能力,这样与老装置一起,形成生产能力为 105 万 t/a 的 PTA 生产基地,并将注重采用国产化设备,使 PTA 装置国产化水平迈上一个新台阶。

这次 PTA 改造将充分依托扬子石化公司现有装置配套的公用工程及辅助设施,进一步挖掘潜力,充分发挥规模经济的优势,全面提高整体技术水平。

1 050 kt/a PTA 改造工程总投资约 10 亿元以上,扬子石化公司将于 2003 年全面启动,生产与改造同时进行。该工程完成后,将成为我国最大的 PTA 生产基地。

扬子石化公司 PTA 装置设备
国产化率超过 70%

日前,由扬子石化公司自行设计的 PTA 新型过滤机转鼓在 PTA 装置上投用成功,实现了 PTA 过滤机国产化。

PTA 装置原有的过滤机转鼓由于设计不完善,经常出现严重结垢,或发生变形,给过滤机处理物料带来了安全隐患和不便。扬子石化公司根据 PTA 装置工艺生产的特点和要求,成功地设计出能在 PTA 装置氧化部分和精制部分通用的新

型过滤机转鼓,不仅消除了安全隐患,而且又一次改变了大型设备依赖进口的局面,每台国产化过滤机转鼓可节约费用 300 多万元。

自 1996 年以来,扬子石化公司共投资 6 亿多元,对 PTA 装置的干燥机、增压机、高速泵等大型设备进行了国产化改造,消除了装置生产瓶颈,PTA 装置的产能也进一步扩大,并拥有大量自有技术,其中有 6 项获得国家专利。到目前为止,PTA 装置的设备国产化率已经达到了 70% 以上,在国内同行中处于领先地位。

(通讯员 郑宁来)

台商积极登陆投资 PTA

目前,我国大陆有扬子石化、仪征、翔鹭石化、上海石化、天津石化、辽阳石化等多家大厂生产纯对苯二甲酸 (PTA),总产量达到 1 975 kt/a。但产品仍供不应求。台湾化学纤维生产商瞄准大陆这个商机,积极登陆投资 PTA 生产。台湾的东展兴业公司继在江苏省投资设立远纺化学纤维公司后,又决定在 2002 年末,申请纯对苯二甲酸设厂批文。工厂地址则以沿海或有炼油厂的地区为主,目前评估地区包括华东、华北、及大西北地区。据悉,台湾的台化公司,除在台湾积极扩充纯对苯二甲酸生产厂的产能外,已决定在宁波设立产能至少在 600 kt/a 以上的 PTA 生产厂。但是,考虑远东、台化已经与国际大厂均纷纷在大陆设立纯对苯二甲酸生产厂,担心未来会出现供过于求的局面,加上纯对苯二甲酸生产厂的投资金额甚巨,最少在 2 亿至 3 亿美元左右,所以目前杜邦公司正在重新考虑是否有必要在大陆设立纯对苯二甲酸生产厂的问题。

(通讯员 杨树明)