

利用 VAD 工艺制造 G.657.A2 光纤的研究

秦钰,沈一春,钱宜刚

(中天科技精密材料有限公司,江苏 南通 226009)

摘要:近年来,G.657.A2 光纤已成为高性能接入网广泛使用的光纤。为了实现其优质、高效的批量制造,介绍了利用气相轴向沉积法(VAD)制造 G.657.A2 光纤的工艺方法,通过优化波导结构设计和制造工艺参数,改善了 VAD 光纤制造工艺制造 G.657.A2 芯棒时出现的波导结构和宏弯损耗性能不够稳定的缺点。通过对光纤的宏弯损耗性能进行理论分析,结合 VAD 光纤制造工艺的工艺特点,确立了光纤的波导结构设计;再对用 VAD 工艺制造下凹包层波导结构进行研究,通过实验对比明确了具有优越宏弯损耗性能的光纤包层沉积工艺参数。对所研制的 G.657.A2 光纤进行了测试,结果表明 VAD 光纤制造工艺的产品性能好且生产效益高,是一种值得推广的 G.657.A2 弯曲损耗不敏感光纤的制造方法。

关键词:气相轴向沉积法;G.657.A2;宏弯损耗;波导结构;掺氟

中图分类号:TN914 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2019)10-0016-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.10.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on the fabrication of G.657.A2 optical fiber by VAD process

QIN Yu, SHEN Yichun, QIAN Yigang

(Zhongtian Technology Advanced Material Co. Ltd., Nantong Jiangsu 226009, China)

Abstract: In recent years, G.657.A2 optical fiber has been widely used in high performance access network. In order to achieve high-quality and high-efficiency batch manufacturing, this paper introduces the process of manufacturing G.657.A2 optical fibers by vapor axial deposition (VAD). By optimizing the design and manufacturing parameters of waveguide structure, the instability of waveguide structure and macro-bending loss of G.657.A2 optical fibers produced by VAD manufacturing process are improved. In this paper, the macro-bending loss performance of optical fibers is theoretically analyzed and the waveguide structure design of optical fibers is established combined with the technological characteristics of VAD optical fibers manufacturing process. Then, the manufacturing process of depressed cladding waveguide structure in VAD optical fibers manufacturing process is studied, and the deposition process parameters for excellent macro-bending loss performance is confirmed through experimental comparison. The test results of the G.657.A2 optical fiber show that the VAD optical fiber manufacturing process has high efficiency and good product performance. It is a kind of manufacturing method of G.657.A2 bending loss insensitive optical fiber which is worth popularizing.

Key words: vapor axial deposition; G.657.A2; macro-bending loss; waveguide structure; fluorine-doping

0 引言

随着全球光纤网络建设的不断完善,其重点已逐渐由骨干网向城域网和用户接入网等支线网络过渡。

收稿日期:2019-07-24。

作者简介:秦钰(1989-),男,江苏南通人,硕士,工程师,毕业于南京大学,现任中天科技精密材料有限公司工艺研发主管。主要从事光纤预制棒的研发与生产工作,多次主导预制棒制造工艺的技术升级和新产品研发项目,在预制棒管外沉积法方面有丰富经验。



其中光纤到户(FTTH)是最具代表性的应用,成为近年来光纤网络建设的热点^[1]。FTTH 系统由于其光纤节点多、走向复杂和弯曲布线多等特点,对光纤的抗弯损性能有更高的要求,普通 G.652 光纤无法满足使用。为此,光纤研究人员开发出了接入网使用的弯曲不敏感的 G.657 光纤。G.657 光纤具有的弯曲损耗不敏感性能,使它成为光纤接入网中室内布线的首选光纤。按照允许的弯曲直径和弯曲损耗不同,G.657 光纤可以分为 2 个子类:G.657.A 和 G.657.B。G.657.A 子类光纤可以进一步分为 G.657.A1 和 G.657.A2。G.657.A 与

G.652.D 光纤完全兼容,G.657.A2 的耐弯曲性更好、弯曲损耗更小,已经成为光纤接入网中室内布线常用的光纤^[2]。

为了提高抗弯曲性能,G.657 光纤的折射率分布结构普遍采用下凹包层波导结构。G.657 光纤的波导结构决定了光纤的弯曲损耗性能,而光纤的波导结构由预制棒的芯棒决定。在 4 种光纤预制棒芯棒制造工艺中,在生产效率方面,外部化学气相沉积法(OVD)和气相轴向沉积法(VAD)的生产效率远高于等离子化学气相沉积法(PCVD)和改良化学气相沉积法(MCVD),从而赢得了制造成本低的优势。在波导结构控制方面,管内沉积工艺(PCVD、MCVD)属于低温逐层沉积的方式,光纤波导结构容易控制;VAD 法因氢氧焰燃烧沉积粉末温度高和波导结构径向一次成型的工艺特点,在波导结构控制上显得力不从心。解决 VAD 工艺波导结构控制问题,是 VAD 光纤制造工艺研究的重点^[3-6]。

综上所述,本文对成本方面具有绝对优势的 VAD 工艺进行了深入研究,通过优化波导结构的设计和制造工艺参数,改善其制造 G.657 芯棒时波导结构控制和宏弯损耗性能不够稳定的缺点,并采用相对成熟的 OVD 工艺进行外包层制作,实现高性能 G.657.A2 光纤的批量生产。

1 光纤宏弯损耗的理论分析

光纤研究证明单模光纤的宏弯损耗与弯曲半径和波长之间存在单调变化的关系,即弯曲半径越小和波长越长,宏弯损耗越大^[7]。因此,在 G.657.A2 弯曲半径 7.5/10/15 mm 的固定标准和使用一定波段的光源条件下,想要改善宏弯性能,需要从单模光纤对光的约束能力的本质上进行考虑。现已证明,阶跃折射率单模光纤的宏弯损耗与其模场直径(MFD)呈正相关性,与其截止波长 λ_c 呈反相关性。其宏弯性能可以简单地用一个无量纲参数宏弯数(MAC)来表征,MAC 值越小,宏弯性能越好^[8,9]。MAC 定义为 MFD 与 λ_c 之间的比值:

$$MAC = \frac{MFD}{\lambda_c} \quad (1)$$

由式(1)可知,G.657 弯曲不敏感单模光纤应该是一种具有小 MFD 或者长 λ_c 的光纤,并且应该具有比较大的芯、包折射率差的结构。但是,由于 G.657.A2 光纤需要与 G.652 光纤熔接互通,考虑到熔接损耗,MFD 不宜过小。加之 FTTH 的多业务特点要求 G.657 光纤

需满足全波段(1260~1625 nm)的传输要求,因此,G.657 光纤成缆后的截止波长需要小于 1260 nm。

2 光纤波导结构设计与研究

经过多年的研究与探索发展,全玻璃结构 G.657 光纤常用的波导(剖面)结构大概可以分 3 类:小纤芯结构、下凹包层折射率分布结构和环沟形下凹包层折射率分布结构^[10]。

小纤芯结构是在普通的 G.652 光纤波导结构的基础上通过减小纤芯直径,即以减小模场直径来改善光纤弯曲性能。该波导结构设计可以显著提高光纤的抗弯曲能力,降低弯曲损耗。但小纤芯结构存在 2 个问题:一是在与 G.652 光纤熔接时,因 G.652 光纤和 G.657 光纤模场直径失配,从而产生大的附加熔接损耗;二是为了保证一定的 V 值(归一化频率),必须增大纤芯和包层的折射率差,即增加了纤芯 GeO_2 的掺杂量,但这会明显增加散射损耗。

下凹包层折射率分布光纤是通过在光纤包层中掺氟形成下凹型折射率分布。该设计实现了在不增加芯层掺杂量、不减小芯层直径的情况下,增加光强分布集中度,有效提高了光纤抗弯曲性能,并且不会增加因模场直径失配引起的附加熔接损耗。在下凹包层折射率分布结构中,除了纤芯和下凹内包层之间的导光界面外,下凹内包层与 SiO_2 包层之间还有一个界面,因为折射率由小到大,所以这是一个折光界面,基模的尾场在此会有泄漏损耗,需要减小此项损耗。

环沟形下凹包层折射率分布结构是在光纤包层区设置较深的环沟形折射率下凹区,从而提高光场在纤芯的集中度。该折射率剖面可将光场的绝大部分光功率限制在纤芯内,并且有效地限制单模光纤中基模的光场尾场逸出光纤包层,从而大大地减小弯曲损耗。因环沟形折射率下凹区包层折射率差较大,在与 G.652 光纤熔接时,需调整熔接机的工艺参数。此外,较深的环沟形折射率下凹区对掺氟深度要求较高,一般采用管内沉积法实现。

2.1 G.657.A2 的波导结构设计

本文采用 fiber CAD 软件辅助,并结合 VAD 制造工艺的特点,将 G.657.A2 的波导结构设计为下凹包层折射率分布。根据 G.657.A2 的光学性能要求,其光纤芯层波导结构为阶跃形折射率分布,光纤包层波导结构需形成下凹折射率分布,光纤外包层采用 OVD 工艺沉积纯 SiO_2 ,折射率接近为 0%。由此,光纤芯层的正折射率(相对纯 SiO_2)和光纤芯层的负折射率(相对

纯 SiO_2) 所形成的芯包折射率差是本波导结构的核心设计。同时,为了避免光纤中传导模的传输尾场泄漏到外包层内造成弯曲损耗,芯棒的芯包比 d/a (其中 a 为光纤芯层直径, d 为光纤包层直径) 需要进行控制。G.657.A2 光纤的剖视结构和波导结构示意图如图 1 所示。

图 1 中, Δn 为芯包折射率差, Δn_1 为光纤芯层相对正折射率, Δn_2 为光纤包层相对负折射率。 Δn_1 和 Δn_2 分别用式(2)和式(3)求得:

$$\Delta n_1 = \frac{n_1 - n_0}{n_0} \quad (2)$$

$$\Delta n_2 = \frac{n_2 - n_0}{n_0} \quad (3)$$

其中, n_0 为纯 SiO_2 的折射率, n_1 为光纤芯层的折射率, n_2 为光纤包层的折射率。

2.2 光纤芯/包层折射率研究

由 2.1 节可知,在光纤波导结构(即折射率剖面)方面,提高光纤抗弯曲损耗的方式主要是增大光纤的光纤芯层与光纤包层之间折射率差 Δn 。增大折射率差的方法有 2 种:一种是增大光纤芯层折射率;另一种是降低光纤包层的折射率。这 2 种方式都是将基模的光场严格地限制在光纤纤芯中,以降低光纤的宏弯损耗。

本文进行系列实验,制备数十根芯包折射率差 Δn 不同、其它工艺参数一致的预制棒并进行拉丝。实验共计拉丝 72000 km, 在 1550 nm 和 1625 nm 波长下,按 ITU-T G.657 光纤标准测试不同圈径的宏弯合格率(合格率=宏弯合格长度/拉丝总长度, 拉丝每小盘中各项宏弯有一项不合格即记为该盘宏弯不合格)和模场直径中位值,结果如图 2 所示。

从图 2 可以看出,随着 Δn 的增大, G.657.A2 光纤的宏弯合格率逐渐提升, 同时伴随 MFD 的降低。但是,一味增大 Δn 也会有负面效果,过大的折射率容易在玻璃化中产生错位,导致预制棒内应力过大从而在拉丝时增加断纤几率。因此,为了获得高于 90% 的宏弯合格率,且同时满足 ITU.T G.657.A2 的模场直径标

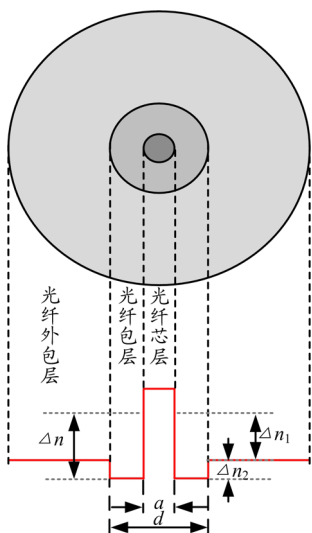


图 1 VAD 法 G.657.A2 光纤的剖视结构和波导结构示意图

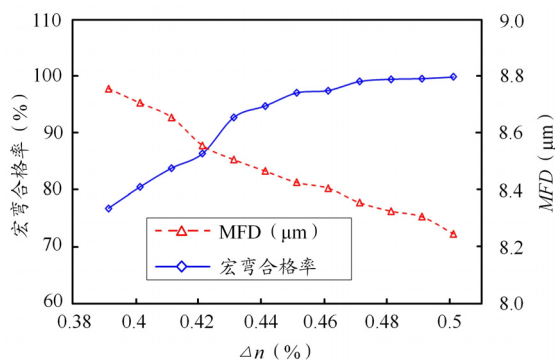


图 2 不同芯包折射率差 Δn 与宏弯合格率、模场直径的关系

准 8.4~9.2 μm , Δn 选择在 0.44%~0.46% 之间比较合适。

VAD 工艺中一般采用在光纤芯层中掺杂锗来增加石英玻璃折射率。因此,为了增加光纤的抗弯曲性能,可以通过增加光纤芯层中的锗掺杂量来增大 Δn_1 值,但 GeO_2 含量的提高,会导致光纤的瑞利散射增加^[1]。并且如果掺入的 GeO_2 含量过高还可能形成 GeO 气体,随之产生气泡。这对于最终光纤的传输性能和机械强度都是不利的。本文进行了系列实验,通过改变锗掺杂量,制备 Δn_1 不同,但其它工艺参数一致的预制棒再进行拉丝,测试其在波长 1550 nm 处的衰减,结果如图 3 所示。

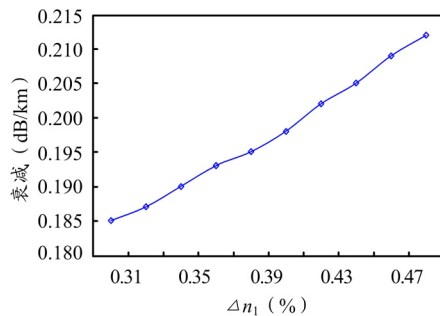


图 3 Δn_1 与 1550 nm 波长处衰减的关系

从图 3 可以看出,1550 nm 波长处衰减随 Δn_1 的增大而增大。因此,想要获得较好的宏弯损耗性能的同时兼顾衰减性能, Δn_1 应尽可能小。目前,光纤行业中各光纤厂家将 G.657.A2 的 1550 nm 波长处衰减控制在 0.195 dB/km 以下。从图 3 中可知, Δn_1 应控制在 0.35% 以下,也就需要 Δn_2 应尽可能达到 -0.10% 以上,以保证 Δn 达标(为 0.44%~0.46%)。

2.3 光纤芯包比 d/a 研究

本文进行系列实验,制备数十根芯包比 (d/a) 不同、 $\Delta n=0.45\%$, 且其它工艺参数一致的预制棒再进行拉丝。实验共计拉丝 84000 km,按 ITU-T G.657 光纤标准测试这些光纤在 1550 nm 和 1625 nm 波长处不同圈径的宏弯合格率并进行对比,结果如图 4 所示。可以看出,随着 d/a 的增大,光纤宏弯合格率呈提高趋

势,当 d/a 达 5.2 后,宏弯合格率不再有显著变化。

规模化生产中,在预制棒芯棒 d 一定的条件下,芯棒 d/a 越大,制备的光纤

预制棒的棒径就越小,这不利于生产成本和效益的控制。因此,考虑到宏弯合格率及生产效益的平衡,可以将芯棒的 d/a 值设定在 5.2~5.5 之间。

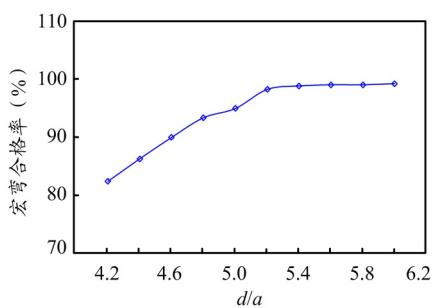


图4 芯包比 d/a 与宏弯合格率的关系

3 光纤包层波导结构的制造工艺研究

VAD 芯棒沉积喷灯示意图如图 5 所示。VAD 预制棒芯棒沉积工艺一般用芯层喷灯沉积预制棒芯棒的光纤芯层,其原料中掺杂 GeCl_4 形成正折射率,用包层喷灯沉积预制棒芯棒的光纤包层,其原料中掺杂

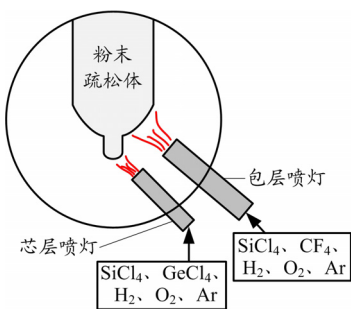


图5 VAD 芯棒沉积喷灯示意图

杂 CF_4 形成负折射率。VAD 工艺沉积 G.657.A2 预制棒芯棒时,制备光纤芯层波导结构可采取与制备常规 G.652 预制棒芯棒类似的控制方法。本文主要对 VAD 工艺中光纤包层掺氟进行研究,以改善负折射率控制能力不足的问题。

VAD 工艺沉积 G.657.A2 芯棒时,氟元素在 SiCl_4 高温水解沉积的同时掺杂进入粉末中。生产中我们发现,光纤包层中的氟元素掺杂对粉末疏松体密度和 SiO_2 沉积效率均会产生影响,加上氟元素以近似游离态的形式存在,在高温下容易挥发出棒体。因此,在 VAD 工艺沉积 G.657.A2 预制棒芯棒的过程中,需要通过适当地调整原料、气体流量配比,确保在波导结构达成的前提下改善粉末疏松体的开裂问题,并发挥 VAD 工艺的优势提升沉积速率,提升效益。

3.1 掺氟量对粉末疏松体强度的影响

在 SiO_2 疏松体中,氟掺杂的机理是氟原子取代硅氧四面体中的氧,但当氟浓度达到一定量后会发生如下反应:



当氟原子完全取代硅氧四面体中氧原子转化为

气态的 SiF_4 后,会随废气排出疏松体,造成掺入的氟流失使掺杂浓度降低,同时也使粉末疏松体内沉积的 SiO_2 颗粒部分流失。因此,沉积掺氟会降低粉末疏松体的密度,当密度小至一定程度时,疏松体强度会出现问题,发生开裂或垮塌,造成报废。

本文进行一系列实验验证不同掺氟量对粉末疏松体密度和开裂几率的影响,采用的实验条件是: SiCl_4 流量为 25 g/min,氢气流量为 70 L/min,氧气流量为 45 L/min。实验中为了避免其它因素对实验结果产生影响,把其它工艺参数均固定不变,仅通过调节 CF_4 流量,测量沉积粉末疏松体的重量与体积,通过比值表征密度,并记录所沉积粉末疏松体的开裂根数占比,结果如图 6 所示。当 CF_4 流量小于 400 sccm 时,粉末疏松体密度变化较小,开裂几率变化不大;当 CF_4 流量越来越大时,粉末疏松体密度开始降低,开裂几率逐渐增加;当 CF_4 流量大于 1500 sccm 时,密度急剧降低,开裂几率成倍增加,粉末疏松体的结构强度已明显不足。因此, CF_4 流量选择不应大于 1500 sccm,或辅以氢氧气流量调节增加粉末疏松体密度。

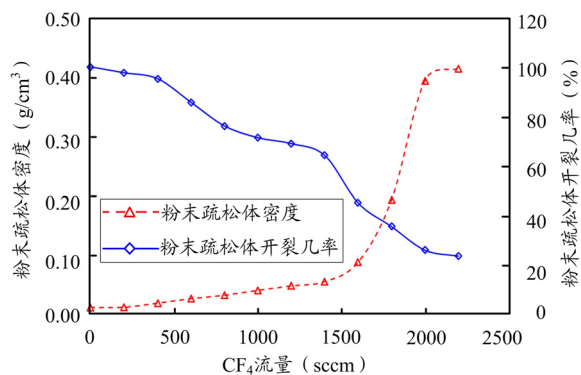


图6 掺氟量对粉末疏松体密度和开裂几率的影响

3.2 沉积温度对掺氟负折射率深度的影响

温度是 VAD 工艺沉积 G.657.A2 预制棒芯棒中重要的工艺参数。在常温下,硅氧以双键存在,键能大、稳定性高, $\text{Si}=\text{O}$ 双键比 $\text{Si}-\text{F}$ 单键的键能大,因此低温条件下氟难以进入玻璃晶格取代氧;而高温时, $\text{Si}=\text{O}$ 双键发生离解: $\text{Si}=\text{O} \rightarrow \text{Si}-\text{O}^*$,离解后产生的 $\text{Si}-\text{O}^*$ 由于其键能小于 $\text{Si}-\text{F}$,提供了氟取代氧的条件,使氟的掺杂反应易于发生。但是,温度过高时,氟会与 SiO_2 发生副反应生成 SiF_4 而挥发。因此,温度过高也会对石英玻璃掺氟产生负面影响。

为制定合理的预制棒生产工艺参数,本文通过实验研究了沉积温度对有效掺氟量的影响,采用的实验条件是: SiCl_4 流量为 25 g/min, CF_4 流量为 1000 sccm。

秦钰,沈一春,钱宜刚:利用 VAD 工艺制造 G.657.A2 光纤的研究

实验中为了避免其它因素对实验结果产生影响,将其它工艺参数固定不变,仅通过调节氢氧气流量改变沉积温度,并用红外热成像仪测量粉末疏松体火焰位置表面温度。光纤包层中氟的含量是通过测量折射率进行评估的,相对纯 SiO_2 ,负折射率越深说明掺氟效果越好,含氟量越多。实验结果如表 1 所示。

表 1 沉积温度与光纤包层相对负折射率的关系

实验 编号	H_2 流量 (L/min)	O_2 流量 (L/min)	沉积温度 ($^{\circ}\text{C}$)	相对负折射率 (%)
F1#	50	35	1300	-0.12%
F2#	60	40	1370	-0.12%
F3#	70	45	1450	-0.11%
F4#	80	50	1520	-0.09%
F5#	90	55	1600	-0.05%

从表 1 可以看出,随着 H_2 流量的增加,沉积温度逐渐升高,负折射率变浅,说明光纤包层掺杂的氟浓度降低,更多的氟与 SiO_2 发生副反应生成 SiF_4 而挥发。由此可见,较低的沉积温度有利于提高掺氟效果,达成更低的光纤包层负折射率。但沉积温度不能低于 SiCl_4 与 O_2 反应的最低温度 1250°C ,否则 SiCl_4 反应不充分,所形成的 SiO_2 粉末中分子键缺陷增加,影响所制光纤的各项性能^[12]。

3.3 掺氟量对粉末沉积效率的影响

由上节可知,在 SiO_2 疏松体中氟掺杂会致使生成的 SiO_2 与 F 反应生成 SiF_4 而挥发损失,降低了 SiO_2 的沉积效率和沉积速率。沉积效率指沉积的 SiO_2 与投入的 SiCl_4 全部生成 SiO_2 的量之比,它表示利用率,计算公式为^[12]:

$$E=2.83 \frac{M_{\text{SiO}_2}}{M_{\text{SiCl}_4}} (\%) \quad (5)$$

其中, M_{SiO_2} 由所沉积粉末疏松体进行称重得到, M_{SiCl_4} 指沉积过程中所消耗的 SiCl_4 的量,由质量流量计记录的流量与时间的乘积得到。

本文进行一系列实验验证不同掺氟量对粉末沉积效率和速率的影响,采用的实验条件是: SiCl_4 流量为 25 g/min ,氢气流量为 70 L/min ,氧气流量为 45 L/min 。实验中为了避免其它因素对实验结果产生影响,将其它工艺参数固定不变,仅改变 CF_4 流量。通过测量结果计算沉积速率和效率,结果如图 7 所示。

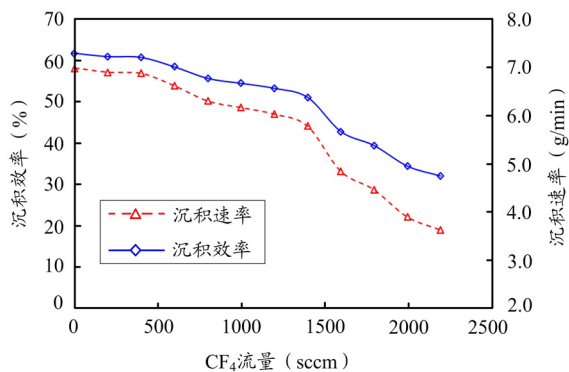


图 7 CF_4 流量与沉积速率、沉积效率之间的关系

图 7 中,在不掺氟的情况下, SiO_2 的沉积速率为 7 g/min ;当 CF_4 流量小于 400 sccm 时,氟原子部分取代氧原子, SiO_2 流失尚不明显,沉积速率和效率变化较小;随着 CF_4 流量的逐步增大,氟与 SiO_2 的副反应逐渐明显, SiO_2 开始流失,沉积速率和效率受到影响有所降低;当 CF_4 流量大于 1600 sccm 时,副反应更为剧烈, SiO_2 沉积速率急剧降低。在 VAD 工艺中, SiO_2 沉积速率至少应达到 5 g/min ,否则就失去了 VAD 工艺高效、低成本的优越性。因此,考虑到光纤预制棒的生产时间及成本,需要结合光纤包层折射率下凹深度的需求选择合适的 CF_4 流量。从实验结果来看, CF_4 流量不应大于 1600 sccm ,通过换算可知原料掺杂中 CF_4 和 SiCl_4 的摩尔比不应超过 1:2。

3.4 预制棒芯棒的包层喷灯工艺参数

通过以上的实验和分析,我们得出了 VAD 工艺掺氟与热量、粉末疏松体密度和沉积速率关系的变化规律。为了达成光纤包层相对折射率下凹深于 -0.10% 的波导结构设计要求,并且尽可能提升沉积速率(从效益出发,沉积速率应大于 5 g/min)、降低开裂几率(通过实验已验证密度为 $0.3\sim 0.5 \text{ g/cm}^3$ 时,不易开裂),本文确立了合适的喷灯流量配比以平衡各因素的制约,并且结合 VAD 粉末疏松体首尾部分包层厚度不足更易开裂且为无效部分的特点,制定了粉末疏松体首尾部分密度增大的轴向密度控制办法,从而减少开裂几率。最终制定出 VAD 工艺沉积 G.657.A2 预制棒芯棒光纤包层的工艺参数,具体如表 2 所示。

表 2 预制棒芯棒光纤包层的工艺参数

粉末 沉积位置	光纤包层工艺参数						
	CF_4 流量 (sccm)	SiCl_4 流量 (g/min)	H_2 流量 (L/min)	O_2 流量 (L/min)	粉末疏松体 密度(g/cm^3)	沉积速率 (g/min)	负折射率 (%)
中间部分	1400	25	80	50	0.353	5.4	-0.106
首尾部分	—	15	90	55	0.48	—	—

经过大量生产数据的验证,采用表 2 中的工艺参数,我们可以批量制造出粉末疏松体开裂几率低于 10%,沉积速率高于 5 g/min,光纤包层负折射率深度达-0.10%以上的芯棒,形成了稳定的 VAD 工艺沉积 G.657.A2 芯棒光纤包层的工艺条件。

4 VAD 工艺制造的 G.657.A2 光纤的宏弯损耗性能

本文采用 VAD 工艺制造的 G.657.A2 光纤的折射率剖面实例如图 8 所示。

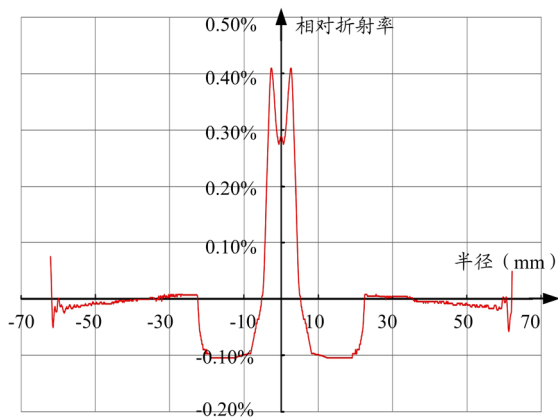


图 8 VAD 工艺 G.657.A2 光纤折射率剖面

将具有上述折射率剖面的 G.657.A2 预制棒芯棒采用 OVD 工艺进行外包层制作,再将所制得的光纤预制棒进行光纤拉制。实验累计拉丝 80000 km 以上,对其宏弯损耗性能进行测试。测试数值与 G.657.A2 光纤宏弯损耗标准的比较如表 3 所示。可以看出,采用 VAD 工艺研制的 G.657.A2 光纤的宏弯损耗性能指标全部符合且优于标准要求。由此可见,采用本文的设计可以实现宏弯损耗性能优越的 G.657.A2 光纤的稳定量产。

表 3 VAD 工艺制造的 G.657.A2 光纤的宏弯损耗性能指标

光学性能	标准要求	测试数值
1310 nm 模场直径(μm)	(8.6~9.5) $\pm$ 0.4	8.47
R15 $\times$ 10@1550 nm 宏弯损耗(dB)	$\leq$ 0.03	0.005
R15 $\times$ 10@1625 nm 宏弯损耗(dB)	$\leq$ 0.1	0.026
R10 $\times$ 1@1550 nm 宏弯损耗(dB)	$\leq$ 0.1	0.031
R10 $\times$ 1@1625 nm 宏弯损耗(dB)	$\leq$ 0.2	0.108
R7.5 $\times$ 1@1550 nm 宏弯损耗(dB)	$\leq$ 0.5	0.133
R7.5 $\times$ 1@1625 nm 宏弯损耗(dB)	$\leq$ 1.0	0.349

5 结束语

本文基于 VAD 工艺主要从波导结构设计及制造方面进行研究。首先对光纤宏弯损耗性能进行理论分析;然后根据 VAD 工艺的工艺特点进行光纤波导结构设计,分别对芯包层折射率差和芯包比 d/a 对宏弯损耗性能的影响进行分析,确定了基本剖面结构;最后在 VAD 工艺中对下凹包层折射率分布波导结构的制造进行研究,通过研究掺氟量对粉末疏松体强度、粉末沉积效率的影响和沉积温度对掺氟深度的影响,确定了光纤包层负折射率深度达成-0.10%、宏弯性能优越的稳定工艺参数。

性能测试结果表明:采用 VAD 工艺制造的 G.657.A2 光纤预制棒所拉制的光纤符合并优于 ITU-T G.657 标准规范的弯曲不敏感光纤的性能要求。本文研究的 VAD 工艺具有产品性能好且生产效益高的特点,是一种值得推广的 G.657.A2 弯曲损耗不敏感光纤的制造工艺。

参考文献:

- [1] 栗宁,孙慧皎,冯春芳,等. 光纤到户关键技术及运营模式研究[J]. 电力系统通信,2011,32(5):123-128.
- [2] 朱险峰. FTTH 网络的设计与光缆产品的选择 [J]. 电信传输,2008(8):74-77.
- [3] JOHN B MacChesney, PAUL B O'Connor. Optical fiber fabrication and resulting product: U.S. Patent, 4217027[P]. 1977-08-29.
- [4] DIETER Kupper, HANS Lydtin, LUDWIG Rehder. Method of producing internally coated glass tube for the drawing of fiber optic light conductors: U.S. Patent, RE30635[P]. 1979-09-28.
- [5] LARRY L Carpenter. Method of forming light focusing fiber waveguide: U.S. patent, 3823995[P]. 1972-03-30.
- [6] STEWART Edward Miller. Axial fabrication of optical fibers: U.S. Patent. 3966446[P]. 1975-10-23.
- [7] MARCUSE D. Curvature loss formula for optical fibers [J]. Opt. Soc. Amer, 1976, 66(3): 216-220.
- [8] FAUSTINI L, MARTINI G. Bend loss in single-mode fibers [J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(4): 671-679.
- [9] UNGER C, STOCKLEIN W. Characterization of the bending sensitivity of fiber by the MAC-value [J]. Optics Communications, 1994(107): 361-364.
- [10] 陈炳炎. 光纤光缆的设计和制造[M]. 杭州:浙江大学出版社,2016: 44-52.
- [11] 任国斌,王智,姜淑琴,等. 单模光纤的瑞利散射损耗研究[J]. 铁道学报,2003,25(5):60-63.
- [12] 孙明武,高祀建. 光纤制备过程中掺氟对沉积速率及沉积效率的影响[J]. 中国建材科技,1994(8):21-24.