

引用格式: FU Minglei, HE Bao, CHEN Kun, et al. Experimental Study on Deuterium Gas Treatment for Reducing the Hydrogen Diffusion of G.657 Optical Fiber[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(12):1206001

付明磊,何宝,陈坤,等.用于降低G.657光纤氢损的氘气处理实验研究[J].光子学报,2021,50(12):1206001

用于降低 G.657 光纤氢损的氘气处理实验研究

付明磊¹,何宝¹,陈坤²,吴仪温²,张文其²,刘建中²,庄明杰²,陆春校²

(1 浙江工业大学 理学院,杭州 310023)

(2 杭州永特信息技术有限公司,杭州 311401)

摘 要:氢损现象是导致光纤出现附加吸收损耗的重要因素。以内包层下凹型弯曲不敏感 G.657 光纤为实验用光纤,分析了弯曲不敏感 G.657 光纤结构与衰减因素,阐述了氘气消除光纤氢敏感性机理,并设计了光纤氢损实验对氘气处理配方进行了定量数据测试。通过调整氘气的浓度和处理时长两项关键参数,得到了不同实验条件下光纤的附加衰减值。对比实验结果和追踪复测结果均表明,0.9% 氘气浓度和 80 h 氘气处理时长是适合降低弯曲不敏感 G.657 光纤氢损的氘气处理配方。

关键词:单模光纤;氢损;G.657;附加吸收损耗;氘气处理;弯曲损耗

中图分类号:TN929.11

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215012.1206001

Experimental Study on Deuterium Gas Treatment for Reducing the Hydrogen Diffusion of G.657 Optical Fiber

FU Minglei¹, HE Bao¹, CHEN Kun², WU Yiwen², ZHANG Wenqi², LIU Jianzhong²,
ZHUANG Mingjie², LU Chunxiao²

(1 College of Sciences, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

(2 Hangzhou Yongte Information Technology Co., Ltd., Hangzhou 311401, China)

Abstract: Hydrogen diffusion is an important factor that causes additional absorption loss in optical fibers. The concave G.657 fiber with the inner cladding was chosen as the experimental fiber, and the structure and attenuation factors of the G.657 fiber were analyzed. The mechanism of deuterium gas to eliminate the hydrogen sensitivity of the fiber was explained, and the fiber hydrogen diffusion experiment was designed to carry out the deuterium gas treatment formula. By adjusting the two key parameters of deuterium concentration and processing time, the additional attenuation value of the fiber under different experimental conditions was obtained. The comparison experiment results and the tracking retest results show that 0.9% deuterium gas concentration and 80 h deuterium treatment time are suitable for reducing the hydrogen diffusion of G.657 optical fiber.

Key words: Single-mode optical fiber; Hydrogen diffusion; G.657; Additional absorption loss; Deuterium gas treatment; Bending loss

OCIS Codes: 060.0060; 060.2310; 060.2430; 060.2290

0 引言

随着 5G 新基建规模的不断扩大,5G 基站的建设数量迅猛增加。这对光纤接入网的连接密度和布线工艺均提出了很高的挑战。为满足集中布线的要求,光纤难免受到悬挂、弯折等因素的影响而长时间处于小

基金项目:浙江省重点研发计划项目(No. 2020C01083)

第一作者:付明磊(1981—),男,副教授,博士,主要研究方向为光电信号处理。Email: fuml@zjut.edu.cn

收稿日期:2020-06-17;录用日期:2020-07-30

<http://www.photon.ac.cn>

半径弯曲的困难条件^[1-4]。在这种情况下,普通 G.652D 单模光纤的传输衰减会大幅增加,无法满足其通信传输所需。而 G.657 光纤具有弯曲损耗不敏感特性,且能在 O-E-S-C-L(1 260~1 625 nm)全通信波段内使用,使它成为光纤接入网中狭小范围布线的首选^[5-11]。

在光纤生产和使用过程中,环境中的氢元素(或氢气)会导致光纤产生附加衰减,尤其在 1 383 nm 波长处会产生明显的附加吸收损耗,从而影响光纤在 E 波段的信号传输,即光纤的氢损现象^[12]。目前,产业界对于光纤的氢损问题已经开展了相关研究工作。谢康等的研究表明,随着拉丝速率的增加,光纤在 1 383 nm 波长处附加的损耗呈增加趋势^[13]。陈强等的研究表明,光纤的氢损与预制棒烧结温度、预制棒延伸时张力、氢氧焰接触时间、拉丝炉温度等因素存在关系^[14]。蒋锡华等研究了氢损对光纤 1 383 nm 波长处吸收峰的影响以及氦气处理消除光纤敏感性的机理^[15]。

目前,对于光纤的氢损问题,产业界普遍通过氦气处理工艺来降低其在 1 383 nm 波长处产生的附加衰减。但是,氦气处理工艺涉及氦气的浓度和处理时长等关键参数,目前已有的文献报道中很少有研究者对这一关键工艺的细节进行讨论与实验分析。因此,本文对具有下凹陷包层结构的 G.657 光纤的氢损问题进行研究,通过调整氦气的浓度和处理时长等关键参数,得到了不同实验条件下光纤附加衰减的定量测试数据,获得了能够批量生产 G.657 光纤的氦气处理配方。

1 光纤弯曲等效模型与阶跃型光纤设计

1.1 光纤弯曲等效模型

光纤在受力弯曲的情况下,其内部应力使得光纤介质密度和光场分布发生变化,导致其折射率分布与水平不受力时有所不同。图 1 所示是普通阶跃单模光纤在受力弯曲和正常状态下的折射率分布对比。此时,一般采用对弯曲光纤进行坐标变换的方式等效成直光纤,然后利用等效的折射率求解弯曲光纤的性能参数。图 2 是弯曲光纤的等效模型^[16]。根据麦克斯韦的电磁理论方程组和各向同性的物质方程,可以得到亥姆霍兹方程,即

$$\begin{cases} \nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0 \\ \nabla^2 \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, \mathbf{E} 为电场, \mathbf{H} 为磁场, $k = \omega \sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_r \mu_0} = k_0 n$, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为真空的波数, ϵ_0 为真空介电常数, μ_0 是真空磁导率。

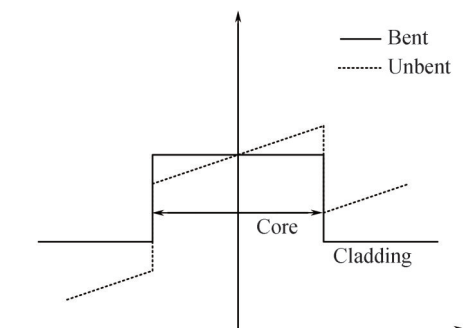


图1 光纤弯曲和平直状态的折射率
Fig. 1 Refractive index diagram of the fiber in the bent and straight state

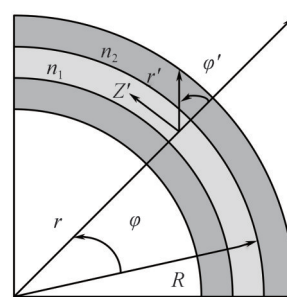


图2 弯曲光纤等效模型
Fig. 2 Equivalent model of bent fiber

在柱坐标系中,亥姆霍兹方程的电场方程表达式为

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial z^2} + k_0^2 n^2 \mathbf{E} = 0 \quad (2)$$

引入新的坐标系 r' 、 φ' 和 z' , R 为弯曲半径进行坐标变换化简后可得

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial r'^2} + \frac{1}{r'} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial r'} + \frac{1}{r'^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial \varphi'^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial z'^2} + k_0^2 n^2 \left(1 + 2 \frac{r'}{R} \cos \varphi'\right) \mathbf{E} = 0 \quad (3)$$

对比式(3)和式(2)可以得到弯曲光纤的等效折射率为

$$n_{\text{bent}} = n_{\text{straight}} \left(1 + \frac{x}{\rho \cdot R} \right) \quad (4)$$

式中, R 为弯曲半径, n_{bent} 为弯曲光纤的等效折射率, n_{straight} 为直光纤的折射率,弯曲方向是 x 轴正方向, ρ 是材料的弹光系数。

1.2 阶跃型光纤设计

实验研究对象是内包层下凹型G.657光纤,其光纤结构如图3所示。利用气相轴向沉积法(Vapour Axial Deposition, VAD)制造芯棒时,通过在芯灯喷料中掺杂锗增加芯层折射率,在包灯中掺杂氟来降低内包层的折射率,所设计的光纤折射率剖面如图4所示。

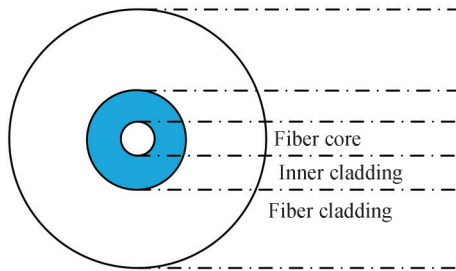


图3 光纤剖视结构图

Fig. 3 Optical fiber cross-sectional structure diagram

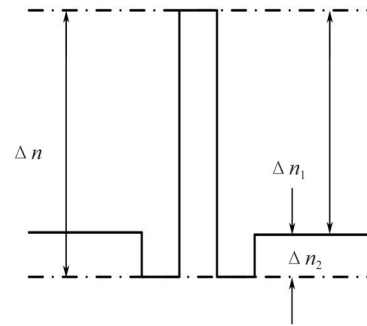


图4 光纤折射率剖面图

Fig. 4 Optical fiber refractive index profile

图4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 分别表示为

$$\Delta n_1 = \frac{n_1 - n_0}{n_0} \quad (5)$$

$$\Delta n_2 = \frac{n_2 - n_0}{n_0} \quad (6)$$

式中, n_0 为纯SiO₂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。

图5是本次实验利用VAD法制造出来的G.657芯棒对应的折射率剖面图,包括纤芯和一部分包层结构。VAD法利用氢氧喷灯的火焰水解反应沉积二氧化硅微粒。受到各阶段间的原料流量改变、喷灯与沉积体之间相对位置等因素的影响,所制备的芯棒折射率剖面结构很难与阶跃光纤折射率分布理论值曲线完全吻合,所以在纤芯结构上会有轻微的折射率分布不均的情况。当芯层中心折射率分布呈现凸型时,芯层对光的限制能力会沿着径向而逐渐降低,呈现高斯分布。这种现象会导致光纤的光纤模场直径(Mode Field Diameter, MFD)值降低、截止波长上升。而当芯层中心折射率分布呈现凹型时,光强呈现非高斯能量分布,有利于增加MFD值、降低截止波长。

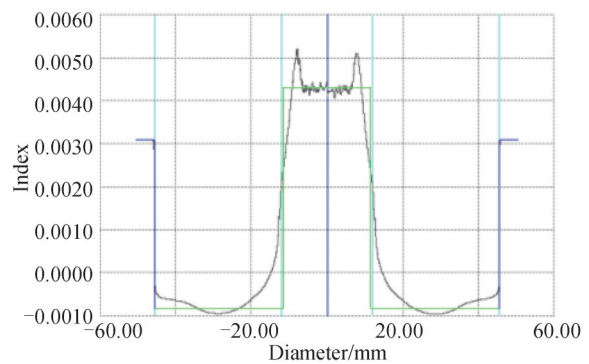


图5 G.657实际折射率剖面图

Fig. 5 Actual refractive index profile for G.657

此外,负责芯层和内包层沉积的两个喷灯之间的相互影响会导致纤芯结构和包层之间的过渡区域是一条倾斜的曲线,在制备预制棒过程中,要尽可能地使之斜率降低。芯层的相对折射率差值一般控制在0.004左右,太高会导致光纤传输衰减增大。靠近芯层的下凹陷区需要同时考虑宽度和深度的影响,基于VAD法氟掺杂的限制无法做到很高程度的掺杂,实际生产过程中下凹陷区宽度和深度会有相反的影响,一般使得

宽度和深度保持在一个适中的范围内。

2 VAD工艺引起的光纤氢损与氦气消除光纤氢敏感性机理

2.1 VAD工艺引起的光纤氢损分析

引起光纤衰减的因素包括吸收衰减、散射衰减和附加衰减^[17]。吸收衰减主要分为光纤材料固有的本征吸收和光纤材料中的非本征吸收,其中非本征吸收主要是由石英玻璃中的OH离子吸收和过渡金属离子吸收所造成的。引起散射衰减主要原因是瑞利散射和波导散射,其中瑞利散射是由纤芯结构不均匀引起的,而波导散射是与光纤波导结构缺陷有关的散射。附加损耗分为弯曲损耗和连接损耗。

图6所示是在VAD工艺沉积时将液态的卤化物 SiCl_4 等原料蒸发成气态,经过氢氧喷灯喷出,在氢氧火焰中水解,生成细小颗粒的玻璃粉尘,沿轴向附着在石英靶棒的前端。沉积过程中严格控制各阶段原料气体流量、火焰温度、沉积表面的温度、靶棒的提升速度和旋转速度等因素,才能制作出均匀稳定的粉末松散体。

采用VAD工艺沉积G.657光纤预制棒芯棒时,一般在负责沉积芯层的喷灯中掺杂 GeCl_4 ,经火焰水解生产 GeO_2 来提高芯层折射率。当芯层中 GeO_2 浓度越高, Δn_1 也就越大。在负责沉积包层的喷灯中掺杂 CF_4 来降低包层折射率,氟元素在 SiCl_4 高温水解的同时掺杂进松散体中。氟元素以近似游离态的形式存在,温度过高时,氟会与 SiO_2 发生副反应生产 SiF_4 而挥发。所以,较低的沉积温度有利于提高掺氟的效果,但是沉积温度低于 1250°C 时, SiCl_4 反应不充分,所形成的 SiO_2 微粒中的分子键缺陷将会增加,缺陷主要以不饱和硅氧悬空键($\text{Si}-\text{O}-$)的形式存在。

与普通的G.652D光纤相比,G.657光纤纤芯中掺锗量更多,波导结构更加复杂。纤芯中折射率分布的均匀性差异会明显增加瑞利散射。另一方面,由于锗掺杂量的提高,在预制棒制造过程中高温环境下造成的原子无序排列等缺陷也会增加,在含氢环境下引起的氢损附加损耗也会有所增加。

2.2 氦气消除光纤氢敏感性机理

引起氢损现象的原因主要有:1)光纤预制棒的制造过程中,原材料形成硅基时产生的原子无序排列缺陷;2)光纤预制棒在高温处理下吸收高能后产生的化学键断裂;3)芯棒拉伸或光纤预制棒拉丝环节持续的强拉伸张力作用下产生的缺陷^[18]。

其中,光纤中的缺陷以不饱和硅氧悬空键($\text{Si}-\text{O}-$)的形式存在,即



当光纤的使用环境中存在H离子时,H离子极易与不饱和硅氧悬空键形成 $\text{Si}-\text{O}-\text{H}$ 。OH的振动吸收峰是由化学键的伸缩或弯曲运动引起的,这些振动吸收可由简谐振动的频率计算公式得出,即

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\kappa}{\mu}} \quad (8)$$

式中, μ 是化学键组成原子的约化质量, $\mu = m_1 \cdot m_2 / (m_1 + m_2)$, m_1 和 m_2 分别是两个原子质量; κ 是两个组成原子所组成化学键的键力常数,可近似地认为与键能的大小成正比。

由于OH的基波在 $2.73\ \mu\text{m}$,一次谐波在 $1.38\ \mu\text{m}$,即在光纤通信窗口中 $1383\ \text{nm}$ 处形成吸收水峰。而OD的基波在 $3.75\ \mu\text{m}$,一次谐波在 $1.90\ \mu\text{m}$,二次谐波在 $1.26\ \mu\text{m}$,基本都在传输波段范围($1260\sim 1625\ \text{nm}$)以外。氦处理利用氦与光纤中不饱和的硅氧悬空键结合,提前占据悬空键末端,避免光纤中不饱和的硅氧悬空键与日后使用环境中的H结合形成羟基,其机理为



需要指出的是:O-D的键能比O-H的键能更稳定(O-D的键能为 $466\ \text{kJ/mol}$,O-H的键能为 $460\ \text{kJ/mol}$),从而保证了经过氦气处理的光纤具有抗氢老化能力^[19]。



图6 VAD沉积过程
Fig. 6 VAD deposition process

3 氘气处理实验与数据分析

由氘气消除光纤氢敏感性机理可知,氘气分子在纤芯中与缺陷结构预先结合,以保护在后续含氢环境下纤芯结构中的缺陷不会被氢分子结合,达到降低氢老化衰减的目的。根据菲克定律,氘气在光纤中的扩散公式为

$$X^2 = Dt_k \quad (10)$$

式中, X 为氘气平均扩散距离; D 为氘气的有效扩散系数(由气体的浓度、温度、压力等决定); t_k 为扩散时间。

在保证最后的光纤产品达到氢老化附加衰减低于0.01 dB/km的前提下,氘气处理工艺可以通过改变氘气的浓度、氘气罐的温度和罐内气体压力,来增加氘气在光纤中的扩散速度,从而降低工艺处理时长。但是提高浓度、温度、压力会大幅增加处理成本,且光纤在较高的温度环境下可能会使表面外观颜色发黄。因此,氘气处理工艺优化的原则是综合考虑时间及成本因素^[20]。

将同一根G.657光纤预制棒首、中、尾三个部分所拉制的光纤作为实验光纤。首先,利用PK8000光时域反射仪(图7)对所选光纤进行第一次衰减测试。接下来,将所选光纤置于氘气处理罐(图8)中,以不同浓度和处理时长进行氘气处理实验。氘气处理结束后对所选光纤进行第二次衰减测试。然后,将实验光纤置于氢损实验柜中4天,进行第三次衰减测试。在1240 nm处的衰减增加量大于0.03 dB/km后,即可认为1383 nm处衰减增加达到饱和。最后,氢损实验完成,记录光纤衰减值。

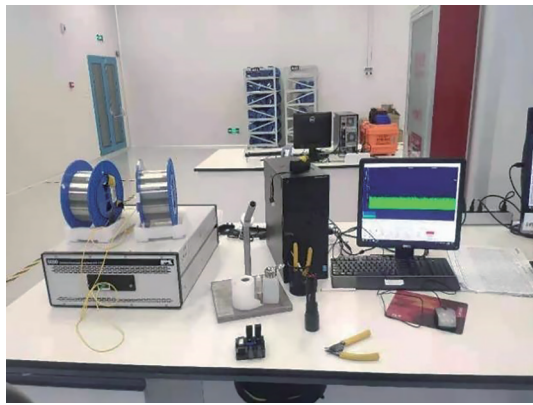


图7 光纤测试平台

Fig. 7 Test platform for the fiber



图8 氘气处理罐

Fig. 8 Deuterium gas treatment tank

图9为经配方2.5% 48 h、1.5% 60 h、1% 48 h + 1.0% 12 h和0.6% 48 h处理后的G.657光纤附加衰减值的统计箱型图,即第一次所测光纤衰减和第二次所测光纤衰减差值的箱型图。其中,前一个数据表示氘气浓度,后一个数据表示氘气处理时长。图中箱型区域表示所测样本50%的数据量,上下横线为所测数据的最大值与最小值,图中箱型区域横线代表中位数,圆点代表平均值。

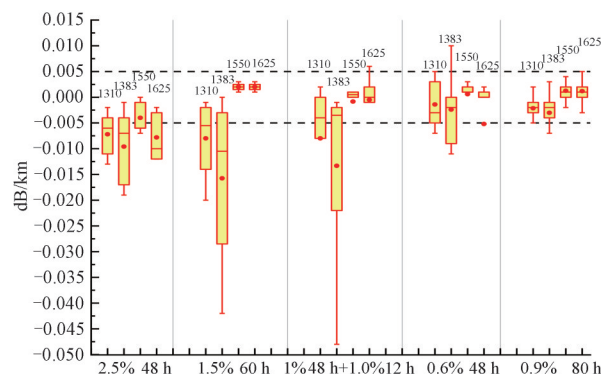


图9 不同的浓度和处理时长条件下进行氘气处理后的附加衰减值

Fig. 9 Additional attenuation value after deuterium treatment with different concentration and treatment time

由实验结果可知,氘气处理配方 2.5% 48 h、1.5% 60 h、1% 48 h + 1.0% 12 h 和 0.6% 48 h 处理后的大部分光纤附加衰减范围超过 0.005,证明光纤存在过氘的情况。氘气处理配方 0.9% 80 h 处理后的光纤附加衰减范围基本都小于 0.005,证明光纤无过氘情况。

图 10 所示的是经配方 0.6% 48 h、0.8% 80 h 和 0.9% 80 h 氘气处理后光纤未出现明显过氘现象后,进行氢损实验所得的附加衰减统计箱型图,即第二次所测衰减和第三次所测衰减差值的统计箱型图。

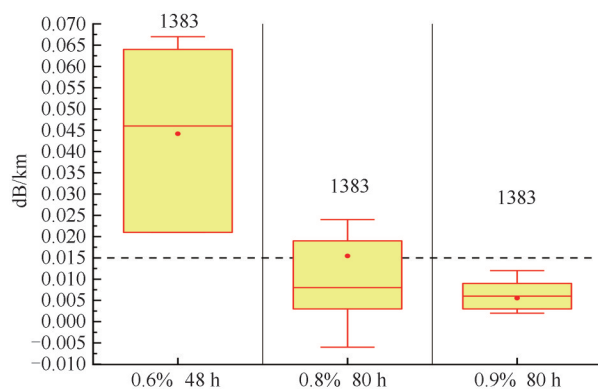


图 10 无明显过氘现象的光纤氢损附加衰减值

Fig. 10 Additional attenuation value of optical fiber hydrogen loss without obvious over-deuterium

由实验结果可知,经配方 0.6% 48 h 和 0.8% 80 h 处理的光纤测得的附加衰减差值大部分超过 0.010 dB/km,说明光纤中存在的缺陷并未被氘完全结合。配方 0.9% 80 h 处理的光纤经氢损实验后所得的附加衰减基本都小于 0.010,说明光纤内存在的缺陷基本都被氘所结合,可以经受长时间含氢环境的侵蚀。

对使用 0.9% 80 h 氘气配方的 G.657 光纤进行一个月的跟踪抽检,对同一罐光纤中抽取不同棒的光纤 4-8 盘进行复测衰减和氢损测试。追踪复测衰减结果如图 11 所示。

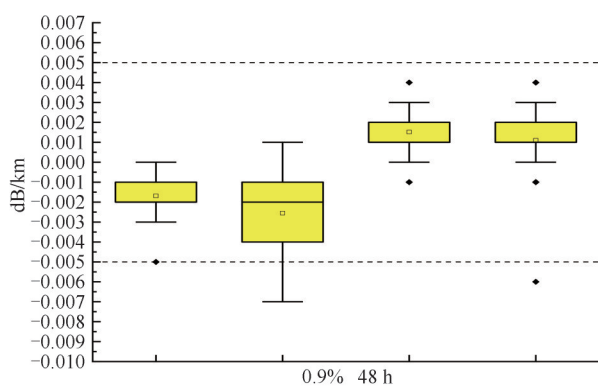


图 11 0.9% 80 h 氘气配方的追踪复测衰减结果

Fig. 11 Trace retest attenuation result of 0.9% 80 h deuterium gas formula

图 11 实验结果表明,由氘气处理配方 0.9% 80 h 处理后的光纤附加衰减范围基本都小于 0.005 dB/km,证明光纤无过氘情况。同时,氢损跟踪同样未有异常,证明 0.9% + 80 h 氘气配方,适用于处理 G.657 型光纤。

图 9~11 中的实验结果说明:在使用高浓度的氘气配方处理大量光纤时,氘气侵入光纤的速率大幅增加,与光纤中缺陷的结合速率也随之增加。考虑到不同光纤之间内部缺陷数量存在差异,处理时长差异会造成处理过的光纤出现部分过氘和部分欠氘的情况。对于过氘的光纤产品,其衰减会大幅上升。对于此类过氘光纤经过长时间的静置或加热处理可有效降低衰减,但同时有部分光纤的衰减无法降低,从而导致降级或者报废。说明用氘气处理光纤中的缺陷时并不能单纯地通过提高氘气浓度来提高处理速度。其中,0.8% 80 h 配方在实际生产中是适用普通 G.652D 单模光纤的氘气处理配方,对此使用同样的配方对 G.657 光纤进行了一次对比实验,结果表明使用同样配方处理的 G.657 光纤会出现欠氘现象,不能完全消除

光纤中存在的缺陷。而0.9% 80 h配方是适用处理G.657光纤的氘气处理配方,由此可知G.657与G.652D光纤在氘气处理方面存在差异,主要原因是G.657光纤中导致氢损吸收衰减的缺陷多于普通G.652D单模光纤。

4 结论

本文以G.657光纤的氢损现象为研究对象,通过分析G.657光纤结构与衰减因素、氘气消除光纤氢敏感性机理,设计了氘气处理实验。通过改变氘气处理罐中的氘气浓度和处理时长,测试了氘气处理后的光纤附加衰减值。经过反复测试和追踪复测证实,0.9% 80 h配方是适用处理G.657光纤的氘气处理配方。接下来的研究工作将探讨引起G.657光纤衰减的其他因素,比如VAD沉积时温度的影响、考虑保持氘气浓度稳定不变和只在实验开始时通入一定量浓度的氘气对罐体内光纤衰减的影响等,并设计相关实验开展更细致的研究。

参考文献

- [1] XIAO Chengwei. G.657 single-mode fiber design based on OptiFiber[J]. Computer and Telecommunications, 2020, (8): 36-40.
肖承伟. 基于OptiFiber的G.657单模光纤设计[J]. 电脑与电信, 2020, (8): 36-40.
- [2] QIN Yu, SHEN Yichun, QIAN Yigang. Study on manufacturing G.657.A2 optical fiber using VAD process[J]. Optical Communication Technology, 2019, 43(10): 16-21.
秦钰, 沈一春, 钱宜刚. 利用VAD工艺制造G.657.A2光纤的研究[J]. 光通信技术, 2019, 43(10): 16-21.
- [3] JAFFER S S, HUSSAIN A, QURESHI M A, et al. A low cost PON-FSO based fronthaul solution for 5G CRAN architecture[J]. Optical Fiber Technology, 2021, 63 (2): 102500.
- [4] LIANG Siyuan, ZHAO Fangli, ZHAO Feng, et al. ANN-based channel estimation algorithm of IM/DD-OFDM/OQAM-PON systems with mobile fronthaul network in 5G[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 59: 102310.
- [5] MOHAMMED A F Y, NEWAZ S H S, SANKAR D S, et al. A green converged TWDM-PON and 5G HetNet catering applications demanding low latency[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 58: 102261.
- [6] RUGGERI E, TSAKYRIDIS A, VAGIONAS C, et al. A 5G fiber wireless 4Gb/s WDM fronthaul for flexible 360 degrees coverage in V-band massive MIMO small cells[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(4): 1081-1088.
- [7] JunshanWEY, ZHANG Junwen. Passive optical networks for 5G transport: technology and standards[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(12): 2830-2837.
- [8] LI Chungyi, LU Haihan, CHOU Cingru, et al. A flexible bidirectional fiber-FSO-5G wireless convergent system[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(5): 1296-1305.
- [9] LIMA E S, PEREIRA L A M, BORGES R M, et al. 5G new radio photonicallly-amplified Xhaul[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 60: 102358.
- [10] SHE Yulai, ZHOU Dejian, CHEN Xiaoyong, et al. Study on ultralow bending loss of bend-insensitive single mode optical fiber[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 50: 225-232.
- [11] CAO Shanshan, GUO Chaoyang, XU Haitao, et al. Preparation and performance of a small-sized bending-resistant optical fiber[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(5): 0506001.
曹珊珊, 郭朝阳, 徐海涛, 等. 一种小尺寸抗弯曲光纤的制备与性能研究[J]. 光子学报, 2021, 50(5): 0506001.
- [12] WANG Derong. Study on the increase of optical fiber transmission loss caused by hydrogen diffusion[J]. Optical Fiber and Cable and Its Application Technology, 1999, (1): 21-28.
王德荣. 氢扩散引起光纤传输损耗增加的研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 1999, (1): 21-28.
- [13] XIE Kang, HUANG Daiyong, HAN Qingrong. Deuterium gas treatment eliminates optical fiber hydrogen sensitivity[J]. Post and Telecommunications Design Technology, 2004, (7): 36-39.
谢康, 黄代勇, 韩庆荣. 氘气处理消除光纤氢敏感性[J]. 邮电设计技术, 2004, (7): 36-39.
- [14] CHEN Qiang, CHEN Haibin, LAN Xingling, et al. The influence of optical fiber preform preparation on the attenuation of 1383nm after optical fiber deuterium treatment[C]. Proceedings of the 2017 Communication Line Academic Conference of China Institute of Communications, 2017: 83-85.
陈强, 陈海斌, 兰兴铃, 等. 光纤预制棒制备对光纤氘处理后1383nm衰减的影响[C]. 中国通信学会2017年通信线路学术年会论文集, 2017: 83-85.
- [15] JIANG Xihua, KANG Xiaojian, WANG Yao, et al. Research on the hydrogen sensitivity of optical fiber[C]. 2010 Optical Cable and Cable Academic Annual Meeting of China Institute of Communications, 2010: 188-197.
蒋锡华, 康晓健, 王樯, 等. 光纤的氢敏感性研究[C]. 中国通信学会2010年光缆电缆学术年会, 2010: 188-197.
- [16] SUN Jiang, KANG Zexin, WANG Jing, et al. Novel bending-resistant design of two-layer low-index trench fiber with

- parabolic-profile core[J]. *Optics Express*, 2014, 22(15):18036-18043.
- [17] ZHANG Ben, WANG Xinyang. Causes and optimization techniques of communication optical fiber signal transmission attenuation[J]. *Electronic Components & Information Technology*, 2020, 4(10):35-36.
张奔,王新洋. 通信光纤信号传输衰减成因及优化技术[J]. *电子元器件与信息技术*, 2020, 4(10):35-36.
- [18] JOSEPH A A, TIMOTHY H, ROBERT P D, et al. Optical fiber resistant to hydrogen-induced attenuation: US, US5838866 A[P]. 2003-08-23.
- [19] MODONE E, ROBA G. OH reduction in preforms by isotope exchange[J]. *Electronics Letters*, 1981, 17(21):815-817.
- [20] LIU Xiaowei, ZHANG Hui, XU Zhengliang, et al. Optimization of 200 μm optical fiber deuterium gas treatment process[J]. *Optical Fiber, Cable and Application Technology*, 2018, (4):27-29+46.
刘晓玮, 张辉, 徐正良, 等. 200 μm 光纤氘气处理工艺的优化[J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2018, (4):27-29+46.