

基于六西格玛方法的 G.657.B3 光纤研发方案

吴椿烽, 陈娅丽, 陈京京, 周建峰, 徐功明, 张烨锋

(中天科技精密材料有限公司, 江苏 南通 226009)

摘要: 为了解决光通信领域中光纤产品在研发-生产阶段存在试验周期长、研发成本高和产品品质不稳定等问题, 基于六西格玛质量管理方法, 建立发明问题解决理论(TRIZ)-实验设计(DOE)-过程能力 C_{pk} 模型应用于抗弯曲光纤 G.657.B3 的研制, 通过这一模型有利于开展高效的试验设计与试验成本控制, 确定了 G.657.B3 光纤折射率剖面参数的最佳组合, 并应用于批量化生产。实验结果表明: 在 1550 nm、1625 nm 波长处, 弯曲半径为 5 mm 且绕 1 圈时, 光纤的宏弯典型损耗均值分别是 0.063 dB、0.165 dB, 光纤的宏弯性能优良。

关键词: 光纤; G.657.B3; 六西格玛方法; 弯曲损耗; 折射率剖面

中图分类号: TN929.1 文献标志码: A 文章编号: 1002-5561(2023)01-0081-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.01.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Development scheme of G.657.B3 optical fiber based on six sigma method

WU Chunfeng, CHEN Yali, CHEN Jingjing, ZHOU Jianfeng, XU Gongming, ZHANG Yefeng

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

Abstract: In order to solve the problems of long test cycle, high research and development cost and unstable product quality in the research and development to production stage of optical fiber products in the field of optical communication, based on the six Sigma quality management method, the invention problem solving theory(TRIZ)-design of experiments (DOE)-process capability C_{pk} model was established and applied to the development of anti-bending fiber G.657-B3. This model is beneficial to carry out efficient test design and test cost control, determine the best combination of refractive index profile parameters of G.657.B3 fiber, and apply to mass production. The experimental results show that at the wavelength of 1550 nm and 1625 nm, the typical loss of macro bending is 0.063 dB and 0.165 dB, respectively, when the bending radius is 5 mm and one circle is made, and the macro bending performance of the fiber is good.

Key words: optical fiber, G.657.B3, six Sigma method, bending loss, refractive index profile

0 引言

近年来, 光纤宽带网络不断升级优化, 性能更优、适应更苛刻环境的特种光纤逐步受到高度青睐。通信产业网分析报告指出: 2024 年, 中国特种光纤市场规模将达到 187.4 亿元, 年复合增长率为 13.9%^[1], 拥有超强抗弯曲性能的 G.657.B3 光纤将在工业、海洋、航

空航天和生物医学等光传输领域发挥着越来越重要的作用^[2-4]。光纤预制棒制备是 G.657.B3 光纤最关键的工艺技术, 其决定了光纤的光学性能。因此, 通过对光纤预制棒的波导结构、掺杂参数等进行独特的设计, 可以使光纤具备超小弯曲直径、狭窄空间或百圈级以上缠绕等应用条件下的专属特性^[5-6]。

G.657.B3 光纤独特的抗弯曲性能, 使其折射率剖面结构的复杂度远高于常规的 G.652 或 G.657A1/A2 光纤, 制备工艺也更为复杂。研究人员往往需要开展大量的试验来摸索合适的剖面结构参数以满足实际生产要求, 存在研发周期长、品质稳定性差等弊端。因此, 如何开展高效的产品研发显得尤为重要。本文提出基于六西玛方法的 G.657.B3 光纤研发方案, 将科学

收稿日期: 2022-07-12。

作者简介: 吴椿烽(1982—), 男, 江苏南通市人, 硕士, 正高级工程师, 六西格玛黑带。长期从事光纤预制棒的研发、生产和质量控制。负责完成国家级、省级项目 10 项, 获省级科技进步二等奖 1 项、市级科技进步二等奖 2 项和三等奖 1 项, 在全国质量管理成果发表交流活动中获“专业级”荣誉。



的质量统计学应用于 G.657.B3 光纤的研制工作中,确定最佳工艺参数,从而实现性能稳定的产品规模化生产。

1 基于六西格玛方法的产品研发流程

六西格玛是一种系统、专业性强的科学质量管理方法。本文借助该方法应用于光纤通信领域,以独特的解题流程指导科研生产,可有效提高研发效率。基于六西格玛方法与光纤性能特点建立的发明问题解决理论(TRIZ)^[7-8]-实验设计(DOE)^[7-9]-过程能力指数 C_{pk} 模型,如图1所示。具体研发设计流程为:①根据市场或客户需求开展新产品研制,如 G.657.B3 光纤需具备优良的宏弯性能;②基于 TRIZ 帮助人们打破思考问题的盲目性和知识面局限性,利用 TRIZ 中矛盾矩阵和光纤传输原理,提出经济又适宜的光纤研制工艺;③确定工艺方法后,通过 DOE 统计解析自变量因子 X 's(折射率剖面结构参数)和因变量 Y (宏弯损耗)之间的影响关系及其显著因子的最佳设计值;④基于选定值进行连续性生产,采用统计过程控制(SPC)技术来描述产品指标周期内变化趋势,并以 C_{pk} 值表征其稳健能力水平。

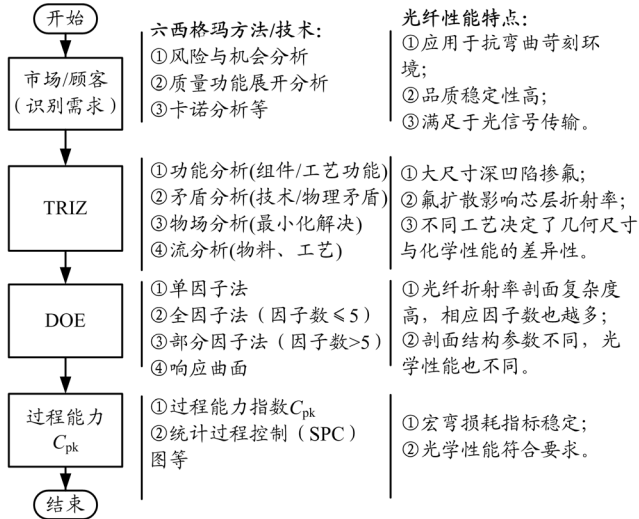


图1 基于六西格玛方法与发明性能特别建立的模型流程图

2 应用案例-抗弯曲 G.657.B3 光纤的研制

2.1 宏弯机理分析

基于阶跃型单模光纤的弯曲损耗机理^[10-14],可得出弯曲损耗 α_c 的理论公式为

$$\alpha_c = A_c \times R^{-1/2} \times \exp^{-KR} \quad (1)$$

$$A_c = 30 \times (\Delta n)^{1/4} \times \lambda^{-1/2} \times (\lambda_c / \lambda)^{3/2} \quad (2)$$

$$K = 0.705 \times (\Delta n^{3/2} \lambda) \times (2.748 - 0.996 \times \lambda_c / \lambda)^3 \quad (3)$$

$$\Delta n = (n_{\text{core}} - n_0) / n_0 \quad (4)$$

其中, A_c 为工作波长下基模的振幅, R 为光纤弯曲半径, K 为弯曲损耗系数, Δn 为芯/包相对折射率差, λ 为工作波长, λ_c 为截止波长, n_{core} 为芯层折射率, n_0 为纯硅包层折射率。由式(1)~式(4)可知,在 R 和 λ 一定的情况下, Δn 、 λ_c 是光纤弯曲损耗 α_c 的主要影响因素。

G.657.B3 光纤作为传输介质不仅需要具备良好的抗弯曲性能,还要满足模场直径(MFD)、截止波长 λ_c 等指标要求,从而保证光纤在小尺寸弯曲条件下的正常通信。因此,G.657.B3 光纤设计为多包层结构,并设计凹陷沟渠^[11]来约束光在芯层中传输,避免在光纤弯曲条件下出现泄漏损耗。然而,MARCUSE D 等人^[12-13]的研究表明,单一阶跃型光纤宏弯理论中的剖面结构设计参数,无法直接指导生产获得良好的抗弯曲性能。在实际生产中,需要通过调节掺杂浓度、几何尺寸等大量试验来确定最佳的折射率剖面结构参数,满足光纤各项性能要求。图2为多包层结构抗弯曲 G.657.B3 光纤的折射率剖面结构示意图。

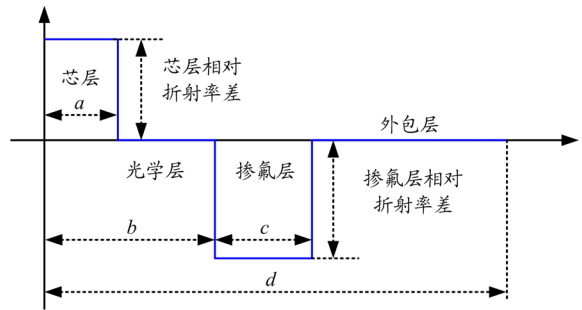


图2 抗弯曲 G.657.B3 光纤折射率剖面结构示意图

2.2 基于 TRIZ 的三步法制备工艺

大尺寸多包层折射率剖面结构 G.657.B3 光纤的制备工艺面临的主要问题是实现剖面结构中宽而深的掺氟层制备,一般采用气相轴向沉积(VAD)法来制备掺氟层。但是,采用 VAD 法制成的粉末棒在玻璃化过程中氟元素容易扩散至芯层,抵消了芯层掺氟提高折射率的作用,继而会影响芯层相对折射率差。随着掺氟层越深越宽(掺氟量增加),这种影响也越显著。

如果将芯层、光学层和掺氟层从一步成型分为多步制备,则可以避免上述问题。因此,本文提出了基于 TRIZ 的三步法研制抗弯曲光纤的工艺:首先,采用 VAD 法制备芯层和光学层,并玻璃化;然后,再以 VAD 法在玻璃化的光学层表面制备掺氟层,可阻隔氟元素向内扩散;最后,匹配外包层形成光纤预制棒。

2.3 DOE 论证与优化

2.3.1 DOE 因子效应数据采集

通过对图 2 中 G.657.B3 光纤折射率剖面结构的研究,归纳出 6 个自变量因子 X 's 来表征折射率剖面结构参数: X_1 为芯层直径 $2a$ 、 X_2 为芯层相对折射率差、 X_3 为掺氟层厚度 c 、 X_4 为掺氟层相对折射率差、 X_5 为包芯比 b/a 、 X_6 为外包倍率 d/a 。

分辨度为 IV 的 DOE 因子试验设计方案实施表如表 1 所示。每个因子取高、低 2 个水平来验证 6 个自变量因子 X 's(折射率剖面结构参数)与因变量 Y (光纤 1550 nm 波长处弯曲半径 $R=5$ mm、1 圈时的宏弯损耗)之间的关系。其中,5#、10#、16# 为中心点(各因子高低水平的中心)的 3 次重复试验,试验总次数为 $2^{(6-2)}+3$ 次(试验量较单因子法至少降低 50%)。然后,按表 1 所列的光纤预制棒折射率剖面结构参数开展制备试验,将所拉制光纤的宏弯损耗一并填入表 1,即完成 DOE 因子效应分析前的数据采集。

表 1 试验设计方案实施表

运行序号	$X_1/\mu\text{m}$	X_2	$X_3/\mu\text{m}$	X_4	X_5	X_6	Y/dB
1#	6.95	0.30%	5.0	-0.50%	2.5	15.5	0.166
2#	8.05	0.30%	7.5	-0.36%	2.5	15.5	0.140
3#	8.05	0.55%	7.5	-0.36%	4.0	18.0	0.125
4#	8.05	0.55%	5.0	-0.36%	2.5	15.5	0.157
5#	7.45	0.425%	6.25	-0.43%	3.25	16.75	0.127
6#	6.95	0.30%	7.5	-0.36%	4.0	15.5	0.143
7#	6.95	0.55%	7.5	-0.36%	2.5	18.0	0.122
8#	6.95	0.30%	7.5	-0.50%	4.0	18.0	0.119
9#	6.95	0.55%	7.5	-0.50%	2.5	15.5	0.034
10#	7.45	0.425%	6.25	-0.43%	3.25	16.75	0.125
11#	6.95	0.30%	5.0	-0.36%	2.5	18.0	0.195
12#	6.95	0.55%	5.0	-0.36%	4.0	15.5	0.153
13#	8.05	0.55%	7.5	-0.50%	4.0	15.5	0.043
14#	8.05	0.30%	5.0	-0.36%	4.0	18.0	0.193
15#	8.05	0.30%	5.0	-0.50%	4.0	15.5	0.162
16#	7.45	0.425%	6.25	-0.43%	3.25	16.75	0.131
17#	8.05	0.55%	5.0	-0.50%	2.5	18.0	0.122
18#	6.95	0.55%	5.0	-0.50%	4.0	18.0	0.126
19#	8.05	0.30%	7.5	-0.50%	2.5	18.0	0.124

2.3.2 DOE 因子效应分析

筛选前后因子对宏弯性能影响效应的分析结果如表 2 所示。按照因子显著效应的判断准则,一般取显著性水平 α 为 0.05(置信水平为 95%)时,采用统计学中

方差分析、 t 检验对表 1 中自变量因子 X 's 和因变量 Y 进行计算,得到各个因子效应及二阶交互效应的 T 值和 P 值(T 值是统计学中 2 个水平试验差异性 t 检验的统计量值, P 值是统计学中 t 检验或 F 检验所认定因子为显著性时的错误概率)。由因子效应的 P 值判断其显著性^[7],当 P 值 <0.05 ,说明该因子效应显著,应予保留;反之,可剔除。从表 2 可以看出,因子 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_6 以及 $X_2 \times X_4$ 、 $X_2 \times X_6$ 的 P 值 <0.05 ,说明该因子对宏弯损耗的因变量 Y 值产生显著的影响效应;而因子 X_1 、 X_5 以及二阶交互 $X_1 \times X_2$ 、 $X_1 \times X_4$ 、 $X_1 \times X_5$ 、 $X_1 \times X_6$ 的 P 值 >0.05 ,说明其对宏弯性能影响不显著。

表 2 筛选前后因子对宏弯性能影响分析结果

项	筛选前		筛选后	
	T 值	P 值	T 值	P 值
X_1	0.43	0.686	0.686	—
X_2	-17.43	0.000	-17.6	0.000
X_3	-20.74	0.000	-20.91	0.000
X_4	16.27	0.000	16.39	0.000
X_5	0.20	0.853	—	—
X_6	6.28	0.002	6.33	0.000
$X_1 \times X_2$	0.77	0.467	—	—
$X_1 \times X_3$	1.0	0.361	—	—
$X_1 \times X_4$	-0.21	0.839	—	—
$X_1 \times X_5$	-2.20	0.079	—	—
$X_1 \times X_6$	-0.29	0.782	—	—
$X_2 \times X_4$	6.35	0.001	6.40	0.000
$X_2 \times X_6$	4.20	0.008	4.24	0.001

表 3 为采用统计分析的一般线性模型对筛选后所得因子进行方差分析的结果^[7]。其中, F 值是统计学中多水平差异性 F 检验的统计量值。可以看出,回归模型的 P 值 <0.05 ,说明经筛选后保留的因子所构成的回归模型显著有效。

由统计学中 t 检验查表^[7]可知,显著性水平 α 为 0.05,残差自由度为 12,相应的显著影响界限 $T_{\text{临界}}$ 值为 2.18。经筛选后各显著因子 T 值的柏拉图分布图如图 3 所示。可以看出,各显著因子效应的 T 值均超出 $T_{\text{临界}}$ 值,表明因子 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_6 是影响宏弯损耗的主要因素, X_2 分别与 X_4 、 X_6 存在显著的交互作用,共同影响宏弯性能。

表 3 宏弯性能的回归显著性分析结果

项目	自由度	偏差平方和	均方和	F 值	P 值
回归模型	6	0.02885	0.004808	184.9	0.000
残差	12	0.00031	0.000026	—	—
总计	18	0.02916	—	—	—

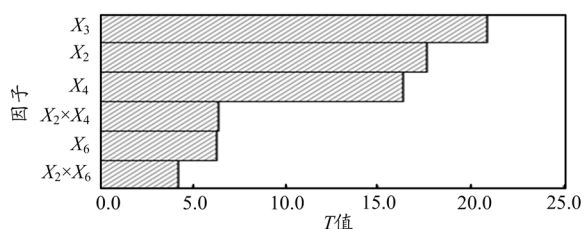


图 3 T 值柏拉图

2.3.3 参数优选与论证

光纤折射率剖面结构中, X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_6 与宏弯损耗之间的关系如图 4 所示。可以看出, 宏弯损耗随着 X_2 增加而降低, 随着 X_3 增加亦呈降低趋势; 此外, 宏弯损耗随着 X_4 和 X_6 增加而呈上升趋势。因此, 光纤折射率剖面结构中的 X_2 、 X_3 、 X_4 和 X_6 对其宏弯损耗有显著的影响。

不同因子参数组合所对应的光纤宏弯等光学性能如表 4 所示。当各因子参数取值 No. I 时, 宏弯损耗最小约 0.04 dB, MFD、 λ_c 分别是 8.35 μm 、1272 nm, 存在 λ_c 超标现象; 当因子各参数取值 No. II~No. III 时, 光纤的宏弯损耗分别达到 0.127 dB、0.194 dB, 也存在宏弯偏大或超标现象。若要保证宏弯损耗低于 0.1 dB、 $\lambda_c < 1260$ nm, 应选择在 No. IV 范围内取值。此外, No. IV 是基于 No. I~No. II 范围内所选定的参数值: X_2 为 $0.48 \pm 0.005\%$ 、 X_4 为 $-0.46 \pm 0.005\%$ 、 X_3 为 $6.8 \pm 0.05 \mu\text{m}$ 、 X_6 设为 16.2 ± 0.1 。在此条件下所制备的光纤在 1550 nm 波长处的宏弯损耗低于 0.08 dB, λ_c 、MFD 分别处于 1246~1250 nm 和 8.35~8.38 μm 范围内, 拥有良好的光学性能, 制备光纤的折射率剖面结构图如图 5 所示。

本文基于选定的折射率剖面结构参数 (No. IV) 制备光纤预制棒, 并测试光纤的宏弯损耗。连续 30 天周期内 (每天随机 10 根棒统计为 1 组) 测试的 1550 nm、1625 nm 波长处的宏弯损耗 SPC 图如图 6 所示。可以看出, 在批量化生产周期内, 光纤在 1550 nm、1625 nm 波长处的宏弯损耗均值 (标准差) 分别是 0.063 dB (0.022)、0.165 dB (0.045)。通过六西格玛过程能力查表^[7]计算可得, 其 1550 nm、1625 nm 波长处宏弯损耗的过程能力指数 C_{pk} 分别为 1.28、1.21, 达到三西格玛水平 (C_{pk} 值为 1), 表明产品的品质稳定性水平良好。

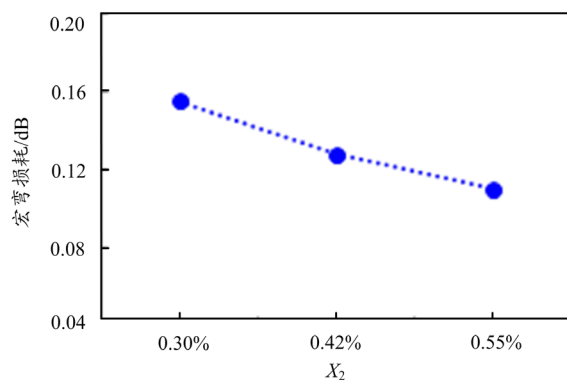
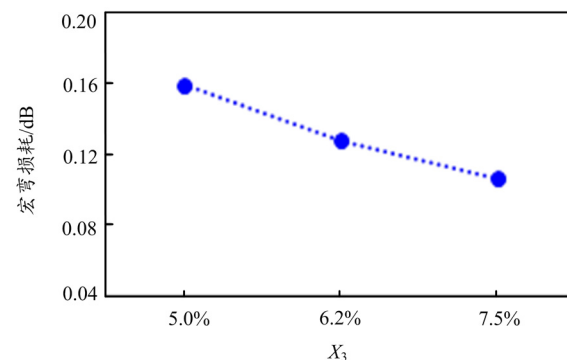
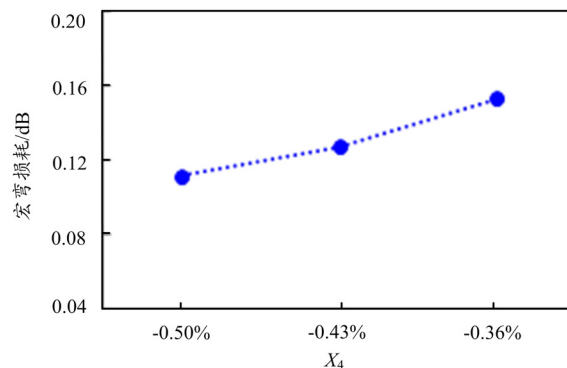
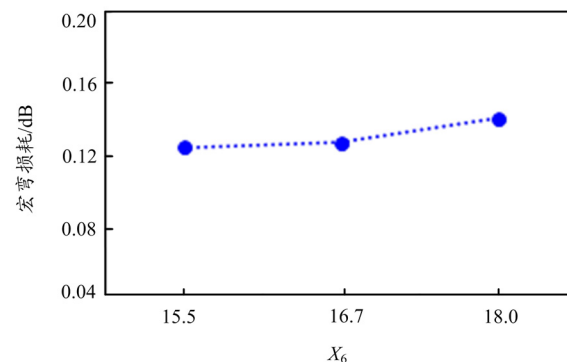
(a) 芯层相对折射率差 X_2 与宏弯损耗关系图(b) 掺氟层厚度 X_3 与宏弯损耗关系图(c) 掺氟层相对折射率差 X_4 与宏弯损耗关系图(d) 外包倍率 X_6 与宏弯损耗关系图

图 4 各因子不同取值水平下对光纤宏弯损耗的影响

表 4 不同因子参数组合对应的光纤宏弯等光学性能

范围	X_2	$X_3/\mu\text{m}$	X_4	X_6	Y/dB	λ_c/nm	$\text{MFD}/\mu\text{m}$
No. I	0.552%	7.54	-0.522%	15.5	0.038	1272	8.35
No. II	0.425%	6.25	-0.434%	16.7	0.127	1240	8.40
No. III	0.301%	5.03	-0.356%	18.1	0.194	1218	8.58
	0.482%	6.83	-0.465%	16.2	0.068	1246	8.38
No. IV	0.477%	6.84	-0.459%	16.1	0.065	1250	8.35
	0.481%	6.76	-0.461%	16.2	0.071	1247	8.36

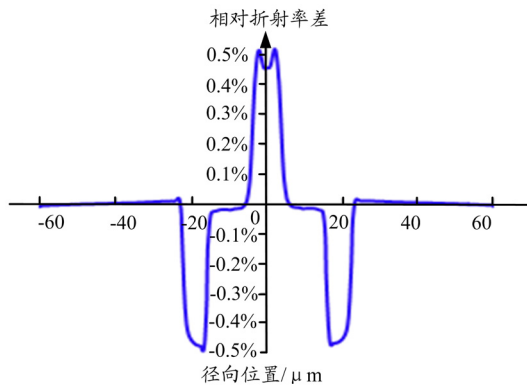
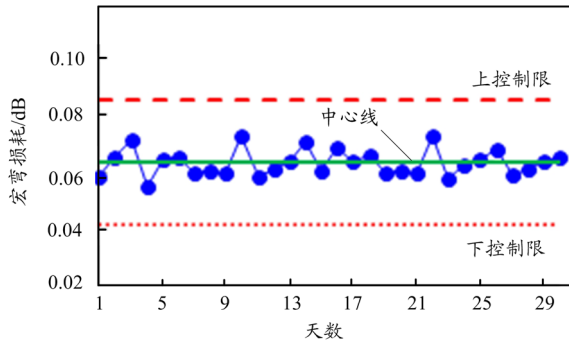
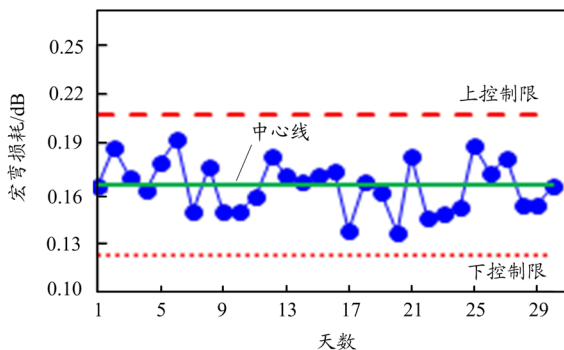


图 5 NO. IV 条件下光纤的典型折射率剖面结构图



(a) $R=5\text{ mm}$ 且绕 1 圈时, 光纤 1550 nm 波长处的宏弯损耗



(b) $R=5\text{ mm}$ 且绕 1 圈时, 光纤 1625 nm 波长处的宏弯损耗

图 6 1550 nm、1625 nm 波长处的宏弯损耗 SPC 图

3 结束语

本文对光通信领域中如何缩短光纤研发周期、提升品质、降低成本等问题进行了研究,通过将六西格玛方法与光纤特点相结合,建立了 TRIZ-DOE- C_{pk} 的产品研发流程,并应用于抗弯曲 G.657.B3 光纤的研制中。基于这一研发模型,确定了光纤折射率剖面结构参数中影响宏弯性能的 4 个主要参数,分别是芯层相对折射率差、掺氟层相对折射率差、掺氟层厚度以及外包倍率,并进一步优选出了其最佳设计值。实验结果表明:在 1550 nm、1625 nm 波长处,弯曲半径为 5 mm、绕 1 圈时的宏弯典型损耗均值分别是 0.063 dB、0.165 dB,过程能力指数 C_{pk} 分别为 1.28、1.21,达到了三西格玛水平,实现了良好的抗弯曲性能和品质稳定性,有效提升了企业产品品质 and 经济效益。

参考文献:

- [1] 王永超. 2020 年特种光纤行业调查报告 [J]. 通信产业报, 2020(24): 15-15.
- [2] 任明当, 夏杰, 周汉强. 新基建推动光电线缆产业技术创新与发展[J]. 光电通信, 2020(4): 6-12
- [3] 刘铁根, 王双, 江俊峰, 等. 航空航天光纤传感技术研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(8): 1681-1692.
- [4] TAKEDA S I, AOKI Y, NAGAO Y. Damage monitoring of CFRP stiffened panels under compressive load using FBG sensors [J]. Composite Structures, 2012, 94(3): 813-819.
- [5] 尹泽立男, 须藤昭一. 光导纤维[M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1994.
- [6] 蒲涛, 徐俊华, 苏洋, 译. 光纤通信[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [7] 何帧. 六西格玛管理[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2014.
- [8] 温会涛, 林可心, 刘琳, 等. 基于简化 LCA、TRIZ 与 DOE 的生态设计方法与应用[J]. 中国皮革, 2022, 51(3): 1-9.
- [9] 温丽梅, 张送, 韦统边, 等. 浅析一种调整工业生产参数的方法[J]. 汽车实用技术, 2021(14): 62-64.
- [10] 成煜, 李诗愈, 李进延, 等. 抗弯光纤的理论研究与制造[J]. 光学与光电技术, 2005, 3(6): 38-40.
- [11] WATEKAR P R, JU S, YOON Y S, et al. Design of a trench bend insensitive single mode optical fiber using spot size definitions [J]. Optics Express, 2008, 16(18): 13545-13551.
- [12] MARCUSE D. Curvature loss formula for optical fibers [J]. Journal of the Optical Society of America Optical Physics, 1976, 66(3): 216-220.
- [13] 吴椿烽, 陈京京, 钱宜刚, 等. 基于 VAD 法制备的低水峰 G.657.B3 光纤设计与性能研究[J]. 光通信技术, 2021, 45(6): 43-47.
- [14] WATEKAR P R, JU S, HAN W T. Optimized design of trench optical fiber for ultralow bending loss at 5 mm of bending diameter [J]. Applied Optics, 2011, 50(25): 97-101.