

# 中国联通 G.654.E 光纤

China Unicom G.654.E Fiber Finalist  
Test Analysis

## 入围测试分析

张曜晖,赵璋卓,张 彬(中讯邮电咨询设计院郑州分公司,河南 郑州 450007)

Zhang Yaohui, Zhao Zhangzhuo, Zhang Bin (China Information Technology Designing & Consulting Institute Co., Ltd. Zhengzhou Branch, Zhengzhou 450007, China)

### 摘要:

超 100 Gbit/s 的超高速传送技术在 G.652 光纤上的无电中继距离受限,增大了设备投资,对传输光纤提出了新的要求。由于 G.654.E 光纤具有的低衰减系数、大有效面积、低非线性效应等特性,可以很好地延长无电中继传输距离,满足干线传输需求,目前 G.654.E 光纤尚未在国内正式投入商用,需在招标采购前进行 G.654.E 光纤的入围测试。对中国联通 G.654.E 光纤光缆招标采购中 G.654.E 光纤入围测试结果进行了分析与总结。

### Abstract:

The ultra-high speed transmission technology exceeding 100 Gbit/s is limited in the no-electric power relay distance on the G.652 fiber, which increases the equipment investment and puts forward new requirements for the transmission fiber. Due to the low attenuation coefficient, large effective area, low nonlinear effect and other characteristics of G.654.E fiber, it can well extend the transmission distance without electric relay and meet the requirements of trunk transmission. The current G.654.E optical fiber has not been officially put into commercial use in China, it is necessary to take finalist test of the G.654.E optical fiber before the procurement invitation. It is an analysis and summary of the finalist test results of G.654.E fiber optical cable in the bidding and procurement of China Unicom G.654.E fiber optical cable.

### Keywords:

Optical fiber; G.654.E; Test

**引用格式:**张曜晖,赵璋卓,张彬. 中国联通 G.654.E 光纤入围测试分析[J]. 邮电设计技术, 2019(10):8-15.

### 关键词:

光纤; G.654.E; 测试

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2019.10.002

中图分类号: TN913

文献标识码: A

文章编号: 1007-3043(2019)10-0008-08

## 0 前言

中国联通拟在省际光缆干线工程建设中应用 G.654.E 光纤光缆,并将开展 G.654.E 光纤光缆的招标采购工作。在正式招标采购前,中国联通依据企标对 G.654.E 光纤进行了技术入围测试。测试通过是后续中国联通 G.654.E 光纤光缆采购资格审查的必要条件。入围测试工作遵从“面向产品、规则在先、测试在后、公开公正、双盲测试”的基本原则开展。

2018年5月9日,中国联通 G.654.E 光纤入围测试

公告在中国联通采购与招标网、公开招标相关网站、通信新闻相关网站公布。公告共分为测试原则、测试依据、测试要求、基本流程、合格标准、测试申请材料递交以及测试相关信息7个部分。

G.654.E 光纤入围测试公告发布后,得到了国内外知名光纤厂家的积极响应。共有11个厂家投放了12种 G.654.E 产品参加测试。每种产品3个样品,共36个。

测试达到了预期目的。12种样品中,最终通过测试的样品有11种,测试总体通过率为92%。通过测试的 G.654.E 光纤产品,可在中国联通骨干光缆线路中使用。

收稿日期: 2019-07-10

## 1 概述

### 1.1 目前长途干线传输中面临的问题及解决方向

随着互联网业务、DC 高速互联以及移动互联网的飞速发展,网络流量呈爆炸式增长,网络扩容速度不断加快,对长途干线提出了超高速传送的要求。但是,超 100G 传输系统在现有 G.652 上无电中继距离受限、设备投资大,因此,对传输光纤提出了新的要求。

随着偏振复用、数字信号处理、相干接收和超强纠错编码技术等高速传输关键技术的成熟,光纤的色散和偏振模色散不再是系统性能的限制因素,光纤衰减和非线性效应成为主要限制因素。通过降低光纤衰减系数,减小光纤链路总衰减,可以减少 EDFA 光放站点,减小光放站引入的 ASE 噪声,从而提升传输性能,延长距离。非线性效应是光纤传输系统中固有的损伤效应,随着输入光功率的增加而显著增加。通常通过增大输入光功率,延长传输距离,但是会引入非线性效应损伤,而目前业内尚未实现非线性效应损伤的有效补偿。通过增大光纤有效面积,减小光纤中的能量密度,可以有效降低光纤中的非线性效应,从而提升系统传输性能,延长传输距离。

因此,当前光纤技术发展呈现两大趋势,第 1 是降低光纤损耗,第 2 是增大有效面积。国内运营商在选择长途干线光纤发展的技术路线时,都倾向于选择大有效面积与低损耗相结合的新型光纤,即新型的 G.654.E 光纤。

### 1.2 G.654.E 光纤标准制订及产业发展现状

在国际标准领域,自 1997 年 4 月 ITU-T 对 G.654 定标以来,经过数次更新,在 2012 年的 G.654 标准中将 G.654 光纤分为 A、B、C、D 4 个子类,主要区别在于 MFD 范围和宏弯性能上,但以上标准中均建议其光纤产品应用在海底光缆传输系统中。为适应陆地用超 100 Gbit/s 系统,ITU-T 自 2013 年 7 月开始讨论 G.654.E 光纤。在保持与现有陆地用单模光纤基本性能一致的前提下,增大光纤有效面积,同时降低光纤衰减系数,从而提升网络传输性能。

与 ITU-T 标准修订同时,中国联通牵头联合长飞、烽火公司以及其他光纤光缆厂家参与共同编制的 G.654 行标《截止波长位移单模光纤特性》已经报送上级管理部门审批。该行标对 G.654 光纤 A、B、C、D、E 各子类相关标准进行了详细约定并定义了测量方法。

行标中 G.654.E 子类将主要用于干线长距离传输

应用场景,而由于该标准中模场直径标称值和容差范围较大,衰减值也与 G.652.D 光纤相当,与 G.652.D 光纤相比优势并不明显。中国联通根据自身需求,计划将 G.654.E 光纤作为下一代骨干网建设的主用光纤,并在行标基础上制定了企业标准《中国联通 G.654.E 光纤技术规范》。企业标准归一化了模场直径、衰减特性和宏弯损耗等关键技术指标,满足了中国联通干线光缆网建设实际需要,为培育新型光纤市场,规范 G.654.E 规格指标,扩大新型光纤规模应用,促进整个行业的健康发展做了极大贡献。

G.654.E 行标与中国联通企业标准的技术指标对比如表 1 所示。

表 1 G.654.E 行标与中国联通企业标准技术指标对比表

项目	行业标准	中国联通企业标准
1 550 nm 模场直径/mm	(11.5~12.5)±0.5	12.5±0.5
1 550 nm 衰减系数/(dB/km)	≤0.21	≤0.17
1 625 nm 衰减系数/(dB/km)	≤0.40	≤0.20
30 mm 半径,100 圈,1 550 nm、1 625 nm 处宏弯损耗最大值/dB	0.1	0.05

中国联通 G.654.E 光纤企业标准的施行,规范了 G.654.E 光纤的研发和生产方向,避免了类似 G.655 光纤标准宽泛、兼容性差的情况。

国内外主要光纤生产厂家,如康宁、OFS、长飞、亨通、中天、烽火、通鼎等,都已研发并推出 G.654.E 光纤。中国联通企业标准推出后,各主流光纤厂商积极响应,陆续推出了符合中国联通企业标准的 G.654.E 光纤产品。经对各主要光纤厂家 G.654.E 光纤生产情况调研,认为 G.654.E 光纤产品已经成熟,其技术规格和生产能力能够满足省际干线光缆网建设的需要。

### 1.3 中国联通应用 G.654.E 光纤的必要性

为更好地评估 G.654.E 光纤在陆地应用的性能,自 2015 年起,中国联通与国内外主流光纤光缆供应商共同开展了现网测试验证工作,对新型光纤技术的应用性能进行详细论证。

中国联通分别在东部干线网络和西部干线网络开展试点,其中东部试验网选择了带宽需求量大、最有可能优先部署 400G 技术的山东济南—青岛段,光缆长度约 430 km;西部试验网选择了工作环境复杂,途径戈壁滩、天山以及草原的新疆哈密—巴里坤段,光缆长度约 150 km,可以充分验证架空敷设工艺对大有效面积光纤的影响及较恶劣环境下长期运行的光缆的性能。

实验证明,400G 双载波 PM-16QAM 在 G.654.E 光纤

上支持的传输距离明显比 G.652.D 光纤长,超低损耗的  $110 \mu\text{m}^2$  的 G.654.E 光纤的传输距离是现用 G.652 光纤的 1.86 倍;超低损耗的  $130 \mu\text{m}^2$  的 G.654.E 光纤的传输距离是现用 G.652 光纤的 2.3 倍。G.654 光纤大有效面积带来的传输性能提升大于光纤损耗带来的性能提升,应优先采用大有效面积 G.654 光纤,同时降低 G.652 光纤衰减系数。实验对比结果如图 1 所示。

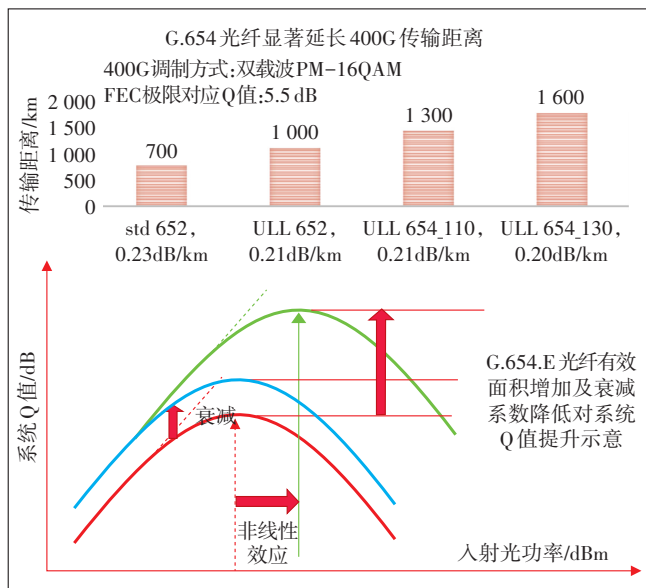


图 1 G.654.E 光纤与 G.652 光纤 400G 系统开通实验性能比较

实验表明,G.654.E 光纤通过降低非线性和衰减提高了传输性能,通过工艺和材料进步提高了在工程应用中的环境适应性,是一种综合性能有了较大提高的新一代陆地光缆用光纤。传输性能的提高为更加灵活地设置传输系统方案提供可能性。

因此,中国联通决定将 G.654.E 光纤作为新一代骨干网主用光纤。

## 2 中国联通开展 G.654.E 光纤入围测试情况

中国联通决定在骨干光缆网中应用新型 G.654.E 光纤,从而拉开了 G.654.E 光纤正式工程应用的帷幕。2018 年 5 月 9 日在中国联通采购与招标网上发布了“中国联通 G.654.E 光纤入围测试公告”。

### 2.1 入围测试的总体思路

测试公告中依据中国联通 G.654.E 企业标准,公布了测试项目和技术指标。采用自愿报名的方式,欢迎所有能够生产符合标准的 G.654.E 光纤厂家参加入围测试。测试工作遵从“面向产品、规则在先、测试在后、公开公正、双盲测试”的基本原则开展。

为保证测试的公正性,参加测试的光纤生产厂商将参加测试的样品光纤复绕到组织方提供的标准光纤盘上,制成标准样品(每厂家 3 个样品)。标准样品为盲样,每个样品有唯一的样品编号。参加测试的 3 个样品中有 1 个不满足技术指标要求即视为未通过测试(不合格),并规定最终结果由中国联通传输专家委员会认定。

### 2.2 对 G.654.E 光纤技术指标要求

中国联通 G.654.E 光纤的入围测试检测项目包括 4 个部分,分别为尺寸参数、传输性能、机械性能和环境性能。其指标要求符合《中国联通 G.654.E 光纤技术规范》。尺寸参数测试项目及具体指标要求如表 2 所示。

表 2 尺寸参数及指标要求

项目	技术指标
包层直径/ $\mu\text{m}$	$125 \pm 1$
芯/包层同心度误差/ $\mu\text{m}$	$\leq 0.6$
包层不圆度/%	$\leq 1.0$
涂覆层直径(未着色)/ $\mu\text{m}$	$245 \pm 10$
涂覆层直径(着色)/ $\mu\text{m}$	$250 \pm 15$
涂覆层/包层同心度误差/ $\mu\text{m}$	$\leq 12.5$

传输性能测试项目及具体指标要求如表 3 所示。

表 3 传输性能及指标要求

项目	技术指标	
1 550 nm 模场直径/ $\mu\text{m}$	$12.5 \pm 0.5$	
截止波长 $\lambda_{cc}/\text{nm}$	$\leq 1 530$	
30 mm 半径,100 圈,1 550 nm、1 625 nm 处宏弯损耗最大值/dB	0.05	
微弯损耗/(dB/km)		
参考项		
衰减系数	1 550 nm/(dB/km)	$\leq 0.17$
	1 625 nm/(dB/km)	$\leq 0.20$
衰减波长特性	1 530~1 575 nm 波长范围内/(dB/km)	$\leq 0.03$
衰减均匀性/(dB/km)	光纤衰减曲线应有良好的线性并且无明显台阶。用 OTDR 检测光纤时,在 1 550 nm、1 625 nm 处任意 500 m 光纤的衰减应不大于 $(\alpha_{\text{mean}} + 0.10 \text{ dB})/2$ , $\alpha_{\text{mean}}$ 是光纤的平均衰减系数	
色散特性	1 550 nm 波长的色散系数/[ps/(nm·km)]	17~23
	1 550 nm 波长的色散斜率/[ps/(nm <sup>2</sup> ·km)]	0.05~0.07
	1 530 nm 到 1 625 nm 间的色散参数(D)/[ps/(nm·km)]	-
偏振模色散 1 550 nm/(ps/ $\sqrt{\text{km}}$ )	$\leq 0.15$	

机械性能测试项目及具体指标要求如表4所示。

环境性能测试项目分为环境试验后光衰减变化要求和环境试验后机械性能要求如表5、表6所示。

表4 机械性能及指标要求

项目	技术指标
光纤抗张强度/GPa	威布尔概率水平为15%时,抗张强度 $\geq 3.14$
	威布尔概率水平为50%时,抗张强度 $\geq 3.80$
光纤翘曲/m	$\geq 4.0$
涂覆层剥离力/N	平均值:1.0~5.0
	峰值:1.0~8.9
动态疲劳参数 Nd	$\geq 20$

表5 环境试验后光衰减变化要求

试验项目	试验条件	波长/nm	允许的衰减变化/(dB/km)
恒定湿热	温度为(85 $\pm$ 2)℃,相对湿度不低于85%,放置30天	1 550、1 625	$\leq 0.05$
干热	温度为(85 $\pm$ 2)℃,放置30天	1 550、1 625	$\leq 0.05$
温度特性	温度范围为-60~+85℃,2个循环周期	1 550、1 625	$\leq 0.05$
浸水	浸泡在温度为23℃ $\pm$ 5℃水中30天	1 550、1 625	$\leq 0.05$

表6 环境试验后机械性能变化要求

试验项目	剥离力平均值/N	剥离力峰值/N	动态疲劳参数 Nd
恒定湿热	1.0~5.0	1.0~8.9	$\geq 20$
浸水	1.0~5.0	1.0~8.9	-

### 2.3 国内外参加测试的厂家介绍

G.654.E 光纤入围测试公告发布后,共有11个厂家,投放12种G.654.E产品参加测试(长飞提供了2种G.654.E产品)。合计37个样品(每种产品3个样品,共36个,另外长飞提供1盘G.652.D光纤做对照测试用)。详细厂家信息见表7。

表7 报名参加入围测试厂家列表

序号	单位名称	序号	单位名称
1	长飞光纤光缆股份有限公司(长飞)	7	江苏中天科技股份有限公司
2	OFS FIBEL DENMARK ApS (OFS)	8	通鼎互联信息股份有限公司
3	成都康宁光缆有限公司上海徐汇分公司(康宁)	9	杭州富通通信技术股份有限公司
4	江苏亨通光电股份有限公司(亨通)	10	南京华脉科技股份有限公司
5	烽火通信科技股份有限公司(烽火)	11	江苏中利集团股份有限公司光缆公司
6	西安西古光通信有限公司		

由表7可以看到,国内主要光纤生产厂家都已报名参加本次G.654.E光纤入围测试。本次入围测试也是对致力于研发G.654.E光纤厂家的激励与促进。

### 2.4 测试过程

正式测试从2018年6月4日开始,依照公告中的测试项目对盲样进行测试。测试过程中对不合格的测试盲样进行了多次复测确认,以排除偶然因素。至2018年8月8日顺利完成了全部样品的测试。

测试表明,大部分样品符合测试公告中的测试要求,尚有部分样品不合格,主要表现在浸水项。经研究认为,因G.654.E为新型光纤,现有国际和国内标准对其测试方法规范尚不完善。考虑到通信行业的发展及对新型光纤研究开发的鼓励,决定未通过测试项目的厂商可以重新提供光纤样品,由中国联通组织复测。

2018年10月18日完成了新样品的复测,结果表明,除1个样品的翘曲度不合格外,参加复测的样品的所有测试指标都满足中国联通指标要求,其中重点关注的浸水指标都在0.01 dB/km以下,该项指标合格。

至此,本次中国联通G.654.E光纤入围测试全部完成。

## 3 测试结果分析

### 3.1 测试结果

本次参加测试共有12种产品,37个样品(含1个作为对照的G.652.D光纤盲样)。其中G.652.D光纤模场直径特征明显,可以轻易从测试数据中分辨出G.652.D光纤盲样。其余36个盲样中,共有15个指标、10个样品不合格,存在同一不合格样品有多个项目不合格的情况。15个不合格指标分布在4个测试项目中。测试数据如表8所示。不合格总体分布如图2所示。

### 3.2 测试结果分析

测试结果中,共有模场直径、翘曲、浸水衰减、温

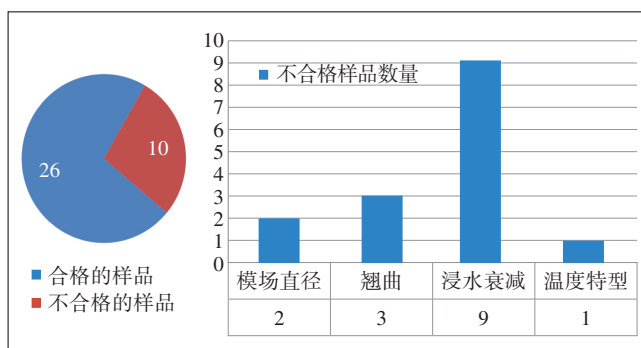


图2 测试结果总体分析

表8 测试数据表

检测项目	指标要求	盲样号	5187769	4636149	7362507	2903843	3057262	4496164	1038971	6131541	9022973	5378248	6920624	8863063	2539407	9784241	4964068	7500685	
1 550 nm 模场直径	远场扫描法	12.5±0.5 μm	远场扫描法	12.35	12.28	12.20	12.67	12.70	12.68	12.45	12.62	12.49	12.20	12.28	12.18	12.36	12.29	12.25	12.23
	可变孔径法		可变孔径法	12.50	12.27	12.19	12.60	12.59	12.73	12.32	12.64	12.52	12.38	12.34	12.44	12.32	12.15	12.18	12.07
截止波长 λ <sub>cc</sub>	≤1 530 nm	/	1 400	1 468	1464	1492	1495	1490	1483	1411	1481	1380	1444	1373	1392	1392	1417	1449	
30 mm 半径, 100 圈, 1 550 nm/1 625 nm 处宏弯损耗最大值	0.05 dB	1 550 nm	0.005	0.020	0.022	0.013	0.009	0.012	0.009	0.003	0.009	0.019	0.011	0.028	0.004	0.013	0.011	0.011	
		1 625 nm	0.026	0.030	0.031	0.009	0.008	0.016	0.002	0.010	0.012	0.049	0.014	0.044	0.001	0.042	0.021	0.031	
衰减系数 (OT-DR)	1 550 nm	≤0.17 dB/km	1 550 nm	0.168	0.168	0.166	0.153	0.152	0.153	0.169	0.168	0.169	0.167	0.167	0.168	0.167	0.167	0.168	0.168
	1 625 nm	≤0.20 dB/km	1 625 nm	0.183	0.183	0.181	0.172	0.171	0.172	0.182	0.182	0.183	0.182	0.181	0.182	0.180	0.181	0.181	0.183
衰减系数 (截断法 22 m)	1 550 nm	≤0.17 dB/km	1 550 nm	0.172	0.170	0.170	0.154	0.155	0.155	0.172	0.172	0.172	0.171	0.167	0.169	0.171	0.169	0.169	0.173
	1 625 nm	≤0.20 dB/km	1 625 nm	0.187	0.187	0.188	0.177	0.176	0.174	0.187	0.187	0.188	0.187	0.185	0.186	0.186	0.184	0.185	0.190
色散特性	1 550 nm 波长的色散系数	17~23 ps/(nm·km)	-	19.14	18.98	18.86	20.96	21.05	20.99	20.85	20.89	20.87	18.83	19.01	18.74	20.70	20.92	20.78	21.90
	1 550 nm 波长的色散斜率	0.05~0.07 ps/(nm <sup>2</sup> ·km)	-	0.06	0.06	0.05	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06	0.05
偏振模色散 1 550 nm	≤0.15 ps/√km	-	0.010	0.014	0.015	0.014	0.025	0.005	0.018	0.020	0.012	0.016	0.041	0.043	0.037	0.027	0.018	0.023	
光纤翘曲	≥4.0 m	-	6.98	5.88	4.42	5.39	5.32	4.70	26.91	15.18	11.03	3.77	4.14	5.05	18.67	5.26	5.11	12.85	
恒定湿热	1 550 nm	≤0.05 dB/km	1 550 nm	0.004	0.006	0.008	0.002	0.003	0.003	0.004	0.002	0.001	0.000	0.006	0.001	0.001	0.003	0.001	0.002
	1 625 nm	≤0.05 dB/km	1 625 nm	0.009	0.004	0.011	0.007	0.007	0.003	0.001	0.004	0.001	0.008	0.009	0.002	0.003	0.002	0.000	0.002
干热	1 550 nm	≤0.05 dB/km	1 550 nm	0.003	0.004	0.008	0.003	0.004	0.005	0.002	0.002	0.000	0.002	0.004	0.002	0.001	0.001	0.004	0.002
	1 625 nm	≤0.05 dB/km	1 625 nm	0.006	0.005	0.012	0.004	0.006	0.005	0.001	0.003	0.001	0.012	0.008	0.001	0.006	0.003	0.004	0.003
浸水	1 550 nm	≤0.05 dB/km	1 550 nm	0.012	0.016	0.004	0.071	0.104	0.080	0.063	0.035	0.040	0.011	0.009	0.011	0.005	0.002	0.001	0.014
	1 625 nm	≤0.05 dB/km	1 625 nm	0.012	0.021	0.001	0.105	0.148	0.109	0.087	0.050	0.049	0.005	0.012	0.015	0.002	0.000	0.003	0.009
温度特性	1 550 nm	≤0.05 dB/km	1 550 nm	-60℃:	-60℃:	-60℃:	-60℃:	-60℃:	-60℃:	-60℃:	-60℃:	-60℃:	-60℃:	-60℃:	-60℃:	-60℃:	-60℃:	-60℃:	-60℃:
				0.012	0.020	0.011	0.015	0.019	0.013	0.006	0.019	0.014	0.013	0.012	0.007	0.020	0.012	0.016	0.019
温度特性	1 625 nm	≤0.05 dB/km	1 625 nm	+85℃:	+85℃:	+85℃:	+85℃:	+85℃:	+85℃:	+85℃:	+85℃:	+85℃:	+85℃:	+85℃:	+85℃:	+85℃:	+85℃:	+85℃:	+85℃:
				0.005	0.006	0.007	0.003	0.005	0.005	0.003	0.003	0.002	0.005	0.004	0.003	0.016	0.002	0.002	0.004
温度特性	1 550 nm	≤0.05 dB/km	1 550 nm	-60℃:	-60℃:	-60℃:	-60℃:	-60℃:	-60℃:	-60℃:	-60℃:	-60℃:	-60℃:	-60℃:	-60℃:	-60℃:	-60℃:	-60℃:	-60℃:
				0.009	0.025	0.014	0.013	0.018	0.012	0.004	0.017	0.015	0.018	0.014	0.006	0.013	0.007	0.012	0.015
温度特性	1 625 nm	≤0.05 dB/km	1 625 nm	+85℃:	+85℃:	+85℃:	+85℃:	+85℃:	+85℃:	+85℃:	+85℃:	+85℃:	+85℃:	+85℃:	+85℃:	+85℃:	+85℃:	+85℃:	+85℃:
				0.008	0.003	0.007	0.007	0.010	0.005	0.004	0.001	0.004	0.009	0.003	0.003	0.018	0.006	0.003	0.006
不合格数量				0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	

7263997	7668884	1616014	9020961	5557598	6770306	9539755	8524046	8409038	3733762	1243836	9342173	4774492	1643217	3538919	5238739	6656136	1851544	9578196	1196624		
12.24	12.27	12.18	12.18	12.19	12.47	12.53	12.52	12.31	12.32	12.41	12.41	12.38	12.46	12.18	12.36	12.20	13.16	12.85	13.26		
12.18	12.19	12.26	12.23	12.29	12.39	12.42	12.51	12.21	12.34	12.45	12.31	12.44	12.50	12.21	12.33	12.22	13.04	12.65	13.36		
1429	1425	1490	1498	1490	1477	1470	1445	1441	1403	1380	1496	1472	1446	1483	1418	1458	1518	1521	1513		
0.019	0.010	0.005	0.022	0.005	0.009	0.027	0.002	0.027	0.001	0.017	0.006	0.003	0.004	0.034	0.023	0.020	0.005	0.001	0.002		
0.019	0.015	0.006	0.023	0.006	0.021	0.010	0.003	0.010	0.013	0.030	0.014	0.013	0.003	0.036	0.017	0.028	0.020	0.007	0.042		
0.167	0.168	0.162	0.162	0.163	0.171	0.169	0.167	0.169	0.167	0.167	0.168	0.171	0.170	0.168	0.168	0.168	0.164	0.171	0.163		
0.181	0.182	0.179	0.179	0.180	0.183	0.182	0.180	0.182	0.181	0.180	0.181	0.184	0.183	0.181	0.182	0.183	0.195	0.197	0.181		
0.172	0.173	0.167	0.167	0.171	0.172	0.170	0.169	0.172	0.171	0.169	0.173	0.172	0.172	0.170	0.171	0.174	0.169	0.174	0.163		
0.187	0.188	0.183	0.183	0.189	0.186	0.187	0.185	0.187	0.187	0.185	0.188	0.187	0.187	0.185	0.188	0.190	0.201	0.200	0.182		
21.89	21.87	20.59	20.56	20.61	20.87	20.85	20.90	20.74	20.80	20.76	20.87	20.86	20.88	18.92	19.23	18.81	19.08	19.18	19.23		
0.05	0.05	0.06	0.05	0.06	0.06	0.05	0.06	0.05	0.06	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05	0.06		
0.039	0.070	0.080	0.072	0.066	0.016	0.010	0.024	0.013	0.009	0.002	0.012	0.009	0.042	0.009	0.027	0.061	0.056	0.061	0.074		
4.39	4.38	29.67	24.44	32.31	12.65	12.44	29.76	19.63	7.14	16.28	22.14	10.31	12.20	13.14	5.98	15.55	2.71	2.62	4.47		
0.001	0.005	0.008	0.009	0.012	0.001	0.007	0.008	0.003	0.000	0.002	0.002	0.002	0.001	0.002	0.001	0.001	0.004	0.005	0.013		
0.001	0.001	0.002	0.009	0.002	0.002	0.001	0.005	0.003	0.002	0.001	0.000	0.001	0.001	0.005	0.000	0.002	0.007	0.016	0.013		
0.000	0.005	0.009	0.009	0.010	0.003	0.009	0.007	0.002	0.001	0.001	0.001	0.003	0.001	0.000	0.002	0.000	0.014	0.006	0.000		
0.001	0.002	0.008	0.009	0.000	0.002	0.006	0.003	0.001	0.002	0.002	0.002	0.001	0.000	0.002	0.002	0.001	0.016	0.014	0.002		
0.014	0.008	0.013	0.003	0.004	0.036	0.038	0.040	0.005	0.003	0.002	0.051	0.044	0.055	0.008	0.023	0.016	0.627	0.579	0.466		
0.012	0.012	0.014	0.003	0.015	0.053	0.050	0.049	0.008	0.003	0.008	0.075	0.050	0.082	0.011	0.031	0.018	0.853	0.835	0.636		
-60℃: 0.014 +85℃: 0.004	-60℃: 0.018 +85℃: 0.005	-60℃: 0.018 +85℃: 0.004	-60℃: 0.026 +85℃: 0.004	-60℃: 0.014 +85℃: 0.010	-60℃: 0.024 +85℃: 0.004	-60℃: 0.018 +85℃: 0.009	-60℃: 0.015 +85℃: 0.006	-60℃: 0.009 +85℃: 0.003	-60℃: 0.018 +85℃: 0.003	-60℃: 0.017 +85℃: 0.004	-60℃: 0.004 +85℃: 0.002	-60℃: 0.025 +85℃: 0.001	-60℃: 0.016 +85℃: 0.003	-60℃: 0.009 +85℃: 0.005	-60℃: 0.011 +85℃: 0.002	-60℃: 0.013 +85℃: 0.002	-60℃: 0.179 +85℃: 0.005	-60℃: 0.048 +85℃: 0.019	-60℃: 0.017 +85℃: 0.003		
-60℃: 0.013 +85℃: 0.008	-60℃: 0.017 +85℃: 0.008	-60℃: 0.018 +85℃: 0.004	-60℃: 0.021 +85℃: 0.003	-60℃: 0.017 +85℃: 0.004	-60℃: 0.028 +85℃: 0.006	-60℃: 0.017 +85℃: 0.001	-60℃: 0.014 +85℃: 0.005	-60℃: 0.010 +85℃: 0.004	-60℃: 0.015 +85℃: 0.005	-60℃: 0.017 +85℃: 0.006	-60℃: 0.010 +85℃: 0.005	-60℃: 0.015 +85℃: 0.006	-60℃: 0.017 +85℃: 0.005	-60℃: 0.028 +85℃: 0.006	-60℃: 0.010 +85℃: 0.004	-60℃: 0.006 +85℃: 0.003	-60℃: 0.010 +85℃: 0.003	-60℃: 0.016 +85℃: 0.006	-60℃: 0.198 +85℃: 0.016	-60℃: 0.044 +85℃: 0.016	-60℃: 0.014 +85℃: 0.004
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	4	2	2		

度特性 4 类指标有样品不合格。具体结果如下(表 9 到表 12 中的斜杠前后数据表示多次测试)。

a) 1 550 nm 模场直径(指标要求:  $12.5 \pm 0.5 \mu\text{m}$ )。模场直径不合格项如表 9 所示。

表 9 模场直径不合格项(单位:  $\mu\text{m}$ )

测试方法	盲样号	
	1851544	1196624
远场扫描法	13.16/13.17	13.26
可变孔径法	13.04/13.10	13.36/13.22/12.95

表 9 中 2 个盲样采用多种测试方法测试,模场直径超出指标要求上限  $13 \mu\text{m}$ 。模场直径为 G.654.E 测试的重要指标之一,2 个样品全部不符合中国联通 G.654.E 光纤入围测试技术指标要求。

b) 翘曲度(指标要求:翘曲半径  $\geq 4.0 \text{ m}$ )。翘曲半径不合格项见表 10。不合格的主要原因是在拉丝过程中,光纤在横截面上密度和热应力的不均匀导致的。

表 10 翘曲半径不合格项(单位: m)

项目	盲样号		
	5378248	9578196	1851544
翘曲度	3.77/3.39	2.62/3.37	2.71/2.53

c) 浸水后衰减变化值。指标要求:在 1550 nm 衰减变化  $\leq 0.05 \text{ dB/km}$ ;在 1 625 nm 衰减变化  $\leq 0.05 \text{ dB/km}$ 。浸水后衰减变化不合格项见表 11。

表 11 浸水后衰减变化不合格项(单位: dB/km)

波长/ nm	盲样号				
	1038971	3057262	9578196	9342173	1643217
1 550	0.063/0.060	0.104/0.105	0.579/0.567	0.051/0.050	0.055/0.052
1 625	0.087/0.081	0.148/0.145	0.835/0.805	0.075/0.072	0.082/0.075
波长/ nm	盲样号				
	4496164	2903843	1851544	1196624	
1 550	0.080/0.089	0.071/0.074	0.627/0.441	0.466/0.332	
1 625	0.109/0.117	0.105/0.107	0.853/0.631	0.636/0.469	

由表 11 可知,共有 9 个盲样测试数据不合格,其中“9342173”、“1643217”2 个样品结果较贴近要求指标,其余样品均远大于指标要求。

d) 温度特性。指标要求:在 1 550 nm 衰减变化  $\leq 0.05 \text{ dB/km}$ ;在 1 625 nm 衰减变化  $\leq 0.05 \text{ dB/km}$ 。温度特性不合格项见表 12。

表 12 温度特性不合格项(单位: dB/km)

温度/ $^{\circ}\text{C}$	波长/nm	盲样号
		1038971
-60	1 550	0.179/0.186
	1 625	0.198/0.202
80	1 550	0.005
	1 625	0.006

### 3.3 复测结果

测试不合格项主要集中在翘曲度和浸水实验上。翘曲度测试中,其中 1 个样品经过 11 次测试,4 次大于 4 m,7 次小于 4 m,平均值 3.55 m,未达到 4 m 的标准要求,判定为不合格。结果如表 13 所示。

表 13 光纤翘曲度测试表(不合格样品)

序号	指标要求/m	实测值/m	序号	指标要求/m	实测值/m
1	$\geq 4.0$	3.45	7	$\geq 4.0$	3.90
2	$\geq 4.0$	5.02	8	$\geq 4.0$	3.07
3	$\geq 4.0$	4.99	9	$\geq 4.0$	2.57
4	$\geq 4.0$	4.25	10	$\geq 4.0$	2.03
5	$\geq 4.0$	5.10	11	$\geq 4.0$	2.94
6	$\geq 4.0$	2.77			
最大值/m	5.10				
最小值/m	2.03				
平均值/m	3.55				

浸水实验是另外 1 个重点测试项目,由不合格厂家重新提供样品,共 12 个样品进行浸水测试。浸水测试周期为 30 天,测试结果如表 14 所示。

浸水测试表明,此次参测样品浸水指标都小于要

表 14 浸水样品测试数据(单位: dB/km)

序号	样品编号	浸水前		浸水后		衰减变化 $\Delta$	
		1 550 nm	1 625 nm	1 550 nm	1 625 nm	1 550 nm	1 625 nm
1	2018-7757	0.156	0.190	0.155	0.187	-0.001	-0.003
2	2018-7756	0.170	0.193	0.152	0.172	-0.018	-0.021
3	2018-7755	0.166	0.188	0.156	0.176	-0.010	-0.012
4	2018-7747	0.159	0.177	0.158	0.176	-0.001	-0.001
5	2018-7751	0.168	0.180	0.166	0.178	-0.002	-0.002
6	2018-7750	0.166	0.181	0.165	0.180	-0.001	-0.001
7	2018-7754	0.168	0.180	0.167	0.180	-0.001	0.000
8	2018-7749	0.166	0.180	0.166	0.179	0.000	-0.001
9	2018-7752	0.168	0.181	0.164	0.178	-0.004	-0.003
10	2018-7753	0.166	0.179	0.166	0.178	0.000	-0.001
11	2018-7746	0.153	0.171	0.152	0.170	-0.001	-0.001
12	2018-7748	0.154	0.173	0.153	0.171	-0.001	-0.002

求的 0.05 dB/km,浸水指标合格。

其他指标也都按检测要求进行了复测,2018 年 11 月 1 日,复测的全部项目完成,所有复测样品中,除 1 个样品的翘曲度指标不合格外,其他样品各项指标均满足中国联通的测试指标要求,通过了本次复测。

#### 4 结论

随着未来超 100G 传输技术的发展,中国联通在业内率先启动了 G.654.E 光纤的标准化、入围测试及工程招标工作,为 G.654.E 光纤在国内的工程应用和技术发展开辟了道路。

参加本次中国联通 G.654.E 光纤入围测试的共 11 个厂家 12 种产品,每种产品 3 个样品,最终有 1 个样品未能通过测试,合格率为 97%。按照测试规则,参加测试的 3 个样品中有 1 个未通过测试即视为该产品未通过测试,因此,本次入围测试未通过的产品为 1 个,产品的测试通过率为 92%。

中国联通 G.654.E 光纤入围测试的顺利完成,为下一步中国联通省际干线光缆线路工程中招标采购 G.654.E 光缆创造了条件,本次测试通过的光纤产品将获得此次招标采购的入围资格。

后续中国联通将继续在北京—上海、上海—广州、北京—广州等光缆新建工程中加快中国联通 G.654.E 新型光纤的应用速度,进一步推动中国联通基础网络的技术领先。

#### 参考文献:

[1] 吕洪涛,张曜晖,金飙. 中国联通省际干线光缆网光纤技术和建方式研究[J]. 邮电设计技术,2018(6):44-50.

[2] 沈世奎,王光全. 应对超高速传输需求中国联通将逐步建设 G.654.E 光缆[J]. 通信世界,2017(24):46-46.

[3] 程蕊岚,刘继芳,马琳. 影响光纤熔接损耗的因素及解决方法[J]. 电子科技,2009,22(5):50-51.

[4] 张彬,张义军,刘少锋,等. 陆地用新型 G.654 光纤成缆性能的试验研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术,2017(1):12-15.

[5] 李春生,李琳莹,杨世信,等. 单模光纤模场直径标准研究[J]. 现代传输,2013(2):72-76.

[6] 任军江,朱源,陈钱龙,等. 温度对光纤强度特性影响的初步研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术,2014(1):8-9.

[7] 史惠萍. 光纤紧套被覆层剥离力的试验研究[C]// 全国第 15 次光纤通信暨第 16 届集成光学学术会议论文集. 2011.

[8] 胡继刚,戴杰,吴磊,等. 基于谱衰减模型测试单模光纤衰减的研究[C]// 2014 年光缆电缆学术年会论文集. 2014.

[9] LEI Z, ZHU J, JING L, et al. Novel ultra low loss & large effective ar-

ea G.654.E fibre in terrestrial application[C]// Optical Fiber Communications Conference & Exhibition. 2017.

[10] JOY A, LIJI G, NEETHU T, et al. Theoretical performance evaluation of linear impairments in optical WDM networks with ITU-T defined fibers [C]// International Conference on Wireless Communications. 2016.

[11] CHANG D, PERRIER P, FEVRIER H, et al. Unrepeated 100G Transmission Over 520.6 km of G.652 Fiber and 556.7 km of G.654 Fiber With Commercial Raman DWDM System and Enhanced ROPA [J]. Lightwave Technology Journal of, 2015, 33(3): 631-638.

[12] ZHANG C, ZHAO C, WANG G, et al. G.654.E Fibre Deployments in Terrestrial Transport System [C]// Optical Fiber Communications Conference & Exhibition. 2017.

[13] CIGLIUTTI R, TORRENGO E, BOSCO G, et al. Transmission of 9 138 Gbit/s Prefiltered PM-8QAM Signals Over 4000 km of Pure Silica-Core Fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(15): 2310-2318.

[14] ZHANG W T, LIU Y L, LI F. Investigation on Acceleration Response of Fiber Optic Mandrel Hydrophone [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2006, 48: 883-886.

[15] YIN K, ZHOU H, ZHANG M, et al. Optimization design of the pressure phase sensitivity of the fiber-optic air-backed mandrel hydrophone[C]// International Conference on Optical Fibre Sensors. International Society for Optics and Photonics, 2008.

[16] PRESBY H M, MARCUSE D. Refractive Index and Diameter Determinations of Step Index Optical Fibers and Preforms[J]. Applied Optics, 1974, 13(12):2882-2885.

[17] SHIBATA N, KAWACHI M, EDAHIRO T. Refractive-index profiling of preform rods by a photoelastic method: application to VAD single-mode fiber preforms [J]. Applied Optics, 1982, 21(19): 3507-3510.

[18] MORISHITA K. Refractive-index-profile determination of single-mode optical fibers by a propagation-mode near-field scanning technique[J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 1(3):445-449.

[19] OĞUZ ÇELIKEL. Mode field diameter and cut-off wavelength measurements of single mode optical fiber standards used in OTDR calibrations [J]. Optical and Quantum Electronics, 2005, 37(6): 587-604.

[20] FREUND R, M. NÖLLE, SCHMIDT-LANGHORST C, et al. Single- and multi-carrier techniques to build up Tb/s per channel transmission systems [C]// Transparent Optical Networks (ICTON), 2010 12th International Conference on. IEEE, 2010.

#### 作者简介:

张曜晖,高级工程师,主要从事传输网规划、设计、研究等工作;赵璋卓,工程师,硕士,主要从事传输网络规划咨询设计工作;张彬,高级工程师,主要从事传输网规划、设计、研究等工作。