

低氟析出宇航用交联乙烯-四氟乙烯共聚物绝缘 电线电缆的研制与应用

李斌¹, 周焱², 邵威威¹, 李峰¹, 刘兴万¹, 王相文¹

(1. 南京全信传输科技股份有限公司, 南京 211100; 2. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘要:普通宇航用交联乙烯-四氟乙烯共聚物绝缘电线、电缆(C55导线)存在氟析出量高的缺点,严重限制了其在航天器载人或密闭舱室中的应用。为有效降低空间站用导线的氟析出量,研究了低氟材料加工工艺,设计开发了具有低氟析出特点的宇航用交联乙烯-四氟乙烯共聚物绝缘电线电缆,并通过试验对其常规性能、极限性能、氟析出、寿命等性能进行了验证。结果表明,研制的具有低氟析出特点的C55/LF导线的常规性能指标、极限性能与普通C55产品相当。寿命评估试验表明样品有很宽的使用温度范围,能够满足航天器、空间站以及其他宇航设备上对线缆的寿命要求。通过在中国空间站的实际在轨运行验证表明,该导线满足设计目标要求。

关键词:低氟析出;交联乙烯-四氟乙烯共聚物绝缘;宇航用电线电缆;寿命

中图分类号:TM249

文献标志码:A

文章编号:1672-6901(2023)04-0027-06

Research and Application of Cross-Linked Ethylene-Tetrafluoroethylene Copolymer Insulated Wires and Cables with Low Fluoride Off-Gassing for Aerospace

LI Bin¹, ZHOU Yao², SHAO Weiwei¹, LI Feng¹, LIU Xingwan¹, WANG Xiangwen¹

(1. Nanjing Quanxin Cable Technology Co., Ltd., Nanjing 211100, China;

2. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: Conventional cross-linked ethylene-tetrafluoroethylene copolymer insulated wires and cables, namely C55 wires, whose disadvantage of high fluoride off-gassing has limited their applications in aerospace manned cabin or other closed spaces. To achieve the aim of low fluoride off-gassing, the measure to decrease the amount of fluoride off-gassing was studied and a new type of C55 wires with low fluoride off-gassing was developed. Furthermore, the normal performances, extreme performances, the amount of fluoride off-gassing and service life were verified. The results confirmed the performances of C55/LF wires with low fluoride off-gassing were consistent with conventional C55 wires, in which the former could satisfy the requirements of cables for spacecraft and space station, confirmed by the actual in-orbit operation in China space station.

Key words: low fluoride off-gassing; cross-linked ethylene-tetrafluoroethylene copolymer insulated; cables for aerospace; service life

0 引言

C55系列宇航用交联乙烯-四氟乙烯共聚物绝缘电线、电缆(以下简称C55导线)不仅具有外径小、质量轻、电性能和机械性能优异、耐温度冲击性能等特点,还具有耐外太空辐射、耐真空原子氧侵蚀、耐极限低温(-100℃)等宇航空间环境性能的特点,其性能与同系列进口电线电缆的水平相当。因此,C55导线适用于宇航苛刻环境下航天器、空间

站及其他宇航设备上的电子、电器间的信息和能量传输。

中国空间技术研究院使用的国产C55导线存在一定限制,产品中使用的交联乙烯-四氟乙烯(X-ETFE)材料存在氟析出现象。氟析出现象来源于绝缘材料乙烯-四氟乙烯(ETFE)辐照交联过程。乙烯-四氟乙烯材料挤塑后,需经过电子束辐照工序使链状分子交联成网状,从而获得优异的电气性能、机械性能和环境性能。在辐照过程中,高能电子束使部分C—F键被打断形成新的C—C键,从而产生游离氟,造成氟析出^[1-2]。氟析出现象存在两个显著的危害:一方面,析出的氟结合水蒸气会对金属元器件及设备造成不可逆的腐蚀现象,严重时甚至危害整

收稿日期:2022-12-25

作者简介:李斌(1986—),男,高级工程师。

E-mail:libin_52101@163.com

体系统的安全性和稳定性;另一方面,微量的氟析出在空间站等密闭载人设备内对乘员的生命健康也会造成一定的影响^[3-4]。因此,具有低氟析出特点的(C55/LF)的研制工作对宇航设备和空间站的正常运行很有必要,本工作研制了一种具有低氟析出量特点的C55导线并对其性能进行试验验证。

1 C55/LF 低氟导线的研制

1.1 研制目标

国产C55导线氟析出量根据辐照设备的差异一般为80~300 μg·g⁻¹之间,而进口的低氟“55/”导线氟析出量不大于20 μg·g⁻¹。低氟导线所采用标准为美国机动工程师协会(SAE)标准单篇规范SAE AS22759/50—2012(规定低氟导线的氟析出量不大于20 μg·g⁻¹)^[5]。因此,低氟C55导线的氟析

表1 挤塑温度对氟析出量影响

型号规格	温度/℃						氟析出量/(μg·g ⁻¹)
	加料段	熔融段	均化段	法兰	模头	模口温度	
AWG18	295	262	295	289	289	300	148.3
AWG18	281	252	285	279	279	290	110.2

由表1结果可以看出,降低挤塑温度可以使氟的析出量减少。

1.2.2 辐照能量对氟析出量的影响

氟析出的另一个主要来源就是辐照交联的过程中被高能电子束打断的部分C—F键。本工作通过调整不同的辐照电子束能量,考察了辐照能量对氟析出量的影响,结果见表2。

表2 辐照剂量为180 kGy时辐照能量对氟析出量的影响

型号规格	辐照能量/MeV	氟析出量/(μg·g ⁻¹)
AWG18	1.0	88.5
AWG18	1.4	102.6

由表2结果可以看出,氟析出量与辐照电子束的能量成正比。

1.2.3 辐照剂量对氟析出量的影响

电子束辐照对ETFE材料的影响除了辐照能量外,ETFE材料受到的辐照剂量也直接决定了材料内部化学键断裂的量,进而体现在氟析出量的变化上。辐照剂量对氟析出量的影响见表3。

表3 辐照能量为1.4 MeV时辐照剂量对氟析出量的影响

型号规格	辐照剂量/kGy	氟析出量/(μg·g ⁻¹)
AWG18	80	30.3
AWG18	180	102.6

由表3结果可以看出,氟析出量与辐照剂量成

正比,说明辐照剂量对氟析出量影响较大。

1.2 低氟材料加工工艺的试验和研究

在ETFE树脂中添加功能助剂与析出的氟化物反应,X-ETFE材料可实现低氟析出的目的。在获取低氟X-ETFE材料前,为了在原有材料基础上降低氟的析出,试验对低氟材料加工工艺进行了研究。

1.2.1 挤塑温度对氟析出量的影响

在挤塑加工过程中,X-ETFE材料受到高温和剪切作用,会“脱出”氟化氢产生自由基,而“脱出”的氟化氢会催化大分子链的降解。为了保障X-ETFE材料塑化均匀,稳定地挤塑,必须将加工温度控制在合理的区间。温度偏低会影响塑化效果,温度过高会导致氟析出量增大^[3]。通过调整挤出机各区温度,试验考察了各区温度对氟析出量的影响,结果见表1。

成正比,说明辐照剂量对氟析出量影响较大。

1.3 C55/LF 低氟导线的方案

本工作采用低氟X-ETFE材料生产C55系列电线电缆。该方案是将C55产品的绝缘材料由原来的普通X-ETFE材料更改为低氟X-ETFE材料,导体和屏蔽金属材料未发生变化,所要达到的性能指标与常规C55产品完全一致。经过多次工艺参数(挤塑温度、辐照能量和辐照剂量)调整,形成了低氟X-ETFE材料的工艺。不同厂家、不同牌号X-ETFE材料试制电线电缆后的氟析出量见表4。螺杆(加料段、熔融段、均化段)、法兰、模头、模口温度依次为275,270,265,245,295,300℃;辐照能量为1.4 MeV;辐照剂量为180 kGy。

表4 不同X-ETFE材料对氟析出量的影响

材料名称	氟析出量/(μg·g ⁻¹)
常规X-ETFE	77.4
国产低氟X-ETFE	63.8
进口低氟X-ETFE	6.7

由表4可以看出,进口低氟X-ETFE材料的氟析出量仅为6.7 μg·g⁻¹,满足不大于20 μg·g⁻¹的指标要求。

本工作将低氟X-ETFE材料试制了包含28号线规到12号线规的单芯和多芯的C55电线和电缆,按照GJB 773B—2015的试验方法对其性能进

行检验^[6]。以 C55/LF1122-22-9/9-9 规格的电缆为例,其性能检测结果见表 5。

表 5 C55/LF1122-22-9/9-9 关键性能检测结果

试验项目	技术要求	实测结果
电线绝缘最薄处厚度/mm	≥0.13	0.132
电缆护套最薄处厚度/mm	≥0.13	0.154
绝缘同心度/%	≥70	87.8
电线外径/mm	1.092±0.051	1.063
电缆外径/mm	≤3.14	2.929
20℃时导体的直流电阻/(Ω·km ⁻¹)	≤50.5	48.56
绝缘电阻/(MΩ·km)	≥1500	38700
绝缘表面电阻/(MΩ·mm)	不小于 1.3×10 ⁴ MΩ·mm;电压试验期间,无电弧、冒烟或燃烧	1.47×10 ⁶
电缆导体间及导体对屏蔽耐电压	电缆的导体之间、导体与屏蔽间经受 1.5 kV,30 s 交流电压试验应不击穿,漏电流不大于 100 mA/250 m	不击穿, 漏电流符合要求
电线老化试验	试验温度为(200±5)℃,试验时间为 500 h,试棒直径为(12.7±0.381)mm,单臂挂锤质量为(0.170±0.005 1)kg;试验后不开裂,电压 2.5 kV,通电时间 5 min,不击穿	不开裂、不击穿
电缆老化试验	试验温度为(230±5)℃,试验时间为 96 h,试棒直径为(31.8±0.954)mm,单臂挂锤质量为(0.170±0.005 1)kg;试验后不开裂,电压 1.0 kV,通电时间 1 min,不击穿	不开裂、不击穿
电缆浸液	试验后外径变化率不大于 5%,室温卷绕不开裂,浸水电压 1.0 kV,通电时间 1 min,不击穿	不击穿
电线绝缘交联度验证	试验温度为(300±5)℃,试验时间为 7 h,试棒的直径为(12.7±0.381)mm,单臂挂锤质量为(0.170±0.005 1)kg;试验后不开裂,电压为 2.5 kV,通电时间 5 min,不击穿	不开裂、不击穿
电缆护套交联度验证	试验温度为(300±5)℃,试验时间为 6 h,试棒最大直径为 152 mm,单臂挂锤质量为(0.170±0.005 1)kg;试验后不开裂,电压 1.0 kV,通电时间 1 min,不击穿	不开裂、不击穿
电线粘连	试验温度为(230±5)℃,试验时间为 24 h,试棒的直径为(50D±1.5D)mm,单臂挂锤质量为(0.454±0.013 6)kg;试验后,试样退绕时护套相邻圈和相邻层应容易分开且无粘连现象	不粘连
电缆粘连	试验温度为(200±5)℃,试验时间为 6 h,试棒最大直径为 152 mm,单臂挂锤质量为(0.170±0.005 1)kg;试验后,试样退绕时护套相邻圈和相邻层应容易分开且无粘连现象	不粘连
绝缘收缩	试验温度为(230±5)℃,试验时间为 6 h,试验后导体对绝缘伸缩量应不大于 3.2 mm	合格
温度冲击	极限试验温度为(200±5)℃和(-55±3)℃,极限温度下贮存时间为 30 min,共 4 个循环;试验后:所有试样任一端每次测量的导体暴露长度与原始长度之间的差(伸缩量)应不大于 1.5 mm,试验后无喇叭状张开	合格
潮湿条件的绝缘电阻/(MΩ·km)	绝缘电阻应不小于 1.5×10 ³ MΩ·km	4.73×10 ⁴
绝缘高温卷绕	试验温度为(313±5)℃,试验时间为 2 h,卷绕试棒直径为电线的自身外径;试验后线芯绝缘应无开裂、裂缝及其他损伤	合格
绝缘低温卷绕	试验温度为(-100±3)℃,试验时间为 4 h,试棒直径为(19.1±0.573)mm、单臂挂锤质量为(0.454±0.013 6)kg;试验后不开裂,电压为 2.5 kV,通电时间为 5 min,不击穿	合格
护套高温卷绕	试验温度为(230±5)℃,试验时间为 4 h,试棒的直径为(38.1±1.143)mm;试验后电缆护套应无开裂	合格
护套低温卷绕	试验温度为(-100±3)℃,试验时间为 4 h,试棒最大直径为 152 mm,单臂挂锤质量为(0.454±0.013 6)kg;试验后不开裂,电压 1.0 kV,通电时间 1 min,不击穿	合格
燃烧试验	试验过程中无燃滴物燃着试样下面的餐巾纸;试验后,延然火焰应在 30 s 内自行熄灭且燃烧距离应不大于 76 mm	合格
冒烟	电线无冒烟现象	合格
成品电缆单位长度最大质量/(kg·km ⁻¹)	18.2	17.16
试验后的质量损失/%	≤0.4	0.117

综上,本工作研制的 C55 低氟导线在氟析出量满足 SAE AS22759/50—2012 的前提下^[5],还能保

证性能水平与普通 C55 导线相当,因此可以等效替代普通 C55 导线。

2 试验部分

本工作进一步对研制的 C55 低氟导线进行了一系列评估试验,验证其极限性能、热寿命和氟析出量。其中,极限评估试验包括极限耐电压试验、耐极限高温试验、耐极限低温试验、耐极限温度冲击、耐极限室温卷绕和耐极限高温卷绕。

2.1 极限评估试验

2.1.1 极限耐电压试验

极限耐电压试验方法按 GJB 17.2-84 进行^[7],试验电压从 2.0 kV 开始,按照 0.5 kV 步长增加,每个电压保持 30 s,直到击穿为止,记录击穿电压。

2.1.2 耐极限高温试验

在每个试验温度点的样品为单独抽样,且每个温度均需要 3 根样品,每根样品各 1 m,将试样放入高温试验箱中,试验温度从 340 °C 开始,温度按照 30 °C 步长增加至 400 °C,每个温度点保持 2 h 后,取出样品自然冷却至常温,按照 2.1.1 节的方法进行极限耐电压试验,记录击穿电压。

2.1.3 极限耐低温试验

试验按照 GJB 150.4-86 中低温贮存试验进行^[8]。将试样放入装有-196 °C 液氮的专用罐中,试样应完全浸没于液氮中。6 个样品均分为 3 组,各组分别放置 48,72,96 h。试验结束后取出试样,自然恢复至室温,并按照 2.1.1 节的方法进行极限耐电压试验,记录击穿电压。

2.1.4 耐极限温度冲击试验

试样放入低温试验箱中,试验温度为 (-100 ± 2) °C,保持 30 min 后将试样取出,1 min 内放入已升温至 (200 ± 2) °C 的高温箱中,保持 30 min,按照以上步骤冷热循环 500 个周期,当温度冲击循环达到 500 个周期时,常温耐压测试通过后,再按照 2.1.1 节的方法进行极限耐电压试验。

2.1.5 耐极限室温卷绕

试验在室温下进行,将试样的中部在试棒上紧密卷绕 4 圈,试样两端应紧扎在试棒上,电缆卷绕直径为自身外径(D),电缆卷绕直径为 D 、 $(4/5)D$ 、 $(1/3)D$ 、 $(1/2)D$,试验后将试样从试棒上取下,观察试样是否开裂,然后进行常温下的耐电压试验和极限耐电压试验,记录击穿电压。

2.1.6 耐极限高温卷绕

试验按 GJB 17.16-84 第 4.2 进行^[9],电线试验温度为 313 °C,卷绕直径为自身外径,电缆试验温度为 230 °C,分别放置 4,6,8 h 后取出试样按 2.1.1 节的方法进行极限耐电压试验,记录击穿电压。

2.2 寿命评估

寿命评估试验只包含高温寿命试验。将 9 根试样平均分成 3 组,每组包含 3 根 1 m 试样,分别放入 (240 ± 3) 、 (260 ± 3) 、 (280 ± 3) °C 的高温箱中,每隔一定时间进行极限耐电压试验的测试,试验持续至样品无法测试或 2 000 h 为止,记录击穿发生的样品经历的热处理时间。

2.3 氟析出量分析

本工作按 GJB 773B—2015 中 4.6.46 规定试验方法进行^[6]。该试验以本工作研制的低氟 C55/LF0812-22-9 和同规格的普通 C55/0812-22-9 进行对比。

3 结果与讨论

3.1 极限试验与分析

按 2.1.2 节和 2.1.3 节的试验方法对 19 个不同型号规格的样品进行了室温、340 °C、370 °C、400 °C 等不同温度下的极限电压试验,试验结果见表 6,其中 400 °C 时,19 个样品均开裂碳化。

按 2.1.4 节、2.1.5 节和 2.1.6 节的试验方法,对表 6 中的 19 个不同型号规格的样品进行极限电压试验,结果见表 7。

由表 6 结果表明,C55/LF 导线样品的极限耐电压试验均达到了设备能力极限,C55/LF 导线样品未发生击穿现象。

通过耐极限高温试验说明 C55/LF 导线样品经过 340 °C 的高温试验后,均可达到设备极限而未击穿,经过 370 °C 的高温试验后,电性能出现明显的下降趋势,极限电压由 340 °C 的设备极限电压下降至最低 10.0 kV 左右。样品经受 400 °C 以上的高温时,绝缘和护套均出现开裂炭化现象,样品表面已经大面积损坏,电性能已经不满足技术要求,因此试验到 400 °C 即停止。

由表 6 测试结果表明,C55/LF 导线样品经过 48,72,96 h 的-196 °C 低温试验后,极限耐电压均达到设备极限能力值而未发生击穿。

由表 7 测试结果表明,C55/LF 导线样品经过温度冲击试验后,常规耐压均不开裂、不击穿,极限耐压也均达到了设备极限;C55/LF 导线样品经过室温卷绕后,外观无损伤,极限耐压均达到设备能力极限;C55/LF 导线样品在高温条件放置 4,6,8 h 后,其击穿电压均大于 13 kV。此外,随着试验时间的延长,极限耐压变化不大,这说明即使在高温条件下卷绕 8 h,样品的表面未有损伤,对产品的电性能无影响。

表6 不同温度条件下的极限电压

样号	型号规格	室温	340 ℃	370 ℃	-196 ℃		
					放置 48 h 后	放置 72 h 后	放置 96 h 后
1	C55/LF0112-28-9	15.9	15.8	14.1	16.0	15.9	16.0
2	C55/LF0814-28-9	15.7	15.9	13.1	16.0	15.9	16.1
3	C55/LF0814-26-9	15.9	15.8	13.1	15.9	15.8	16.0
4	C55/LF0812-24-9	16.1	16.1	11.0	15.8	15.8	15.9
5	C55/LF0112-24-9	15.9	16.0	10.9	15.8	15.8	15.9
6	C55/LF0812-22-9	15.6	15.8	12.8	15.8	16.0	15.9
7	C55/LF0114-20-9	15.9	16.0	13.6	15.9	15.9	15.8
8	C55/LF0112-18-9	15.8	15.8	10.1	15.8	16.1	15.9
9	C55/LF0812-16-9	16.0	15.9	12.6	16.1	15.9	15.9
10	C55/LF0112-12-9	15.8	16.0	12.0	15.8	16.0	15.9
11	C55/LF1124-28-9/9-9	15.9	15.6	12.2	15.8	15.8	15.7
12	C55/LF1824-20-9/9-9	15.8	15.9	12.7	15.8	15.7	15.7
13	C55/LF1122-22-9/9-9	15.9	15.7	11.9	15.8	15.8	15.7
14	C55/LF1822-18-9/9-9	15.9	15.8	10.2	15.9	15.7	15.7
15	C55/LF1822-16-9/9-9	16.1	15.8	12.2	16.0	15.8	15.8
16	C55/LF1822-12-9/9-9	16.2	15.9	10.2	16.1	16.1	16.0
17	C55/LF1192-28-9/9/9/9/9/9/9/9/9/9/9-9	16.2	15.5	14.0	16.1	16.1	16.0
18	C55/LF1194-24-9/9/9/9/9/9/9/9/9/9/9-9	16.4	15.3	11.0	16.5	16.0	15.5
19	C55/LF1894-20-9/9/9/9/9/9/9/9/9/9/9-9	16.6	16.1	14.3	16.6	16.0	16.1

表7 极限性能测试结果(室温、温度冲击和高温卷绕)

样号	耐极限温度冲击极限电压/kV	耐极限室温卷绕极限电压/kV	耐极限高温卷绕极限电压/kV			卷绕直径/mm
			放置 4 h 后	放置 6 h 后	放置 8 h 后	
1	16.1	16.0	15.8	16.0	15.8	自身直径
2	16.1	16.0	15.9	15.8	16.0	
3	16.1	16.0	15.8	15.8	16.0	
4	16.1	16.1	15.9	15.8	16.1	
5	16.2	15.9	15.9	16.0	15.9	
6	16.1	15.8	15.8	16.0	15.8	
7	16.2	15.9	15.9	16.0	15.9	
8	16.1	16.0	15.9	15.8	15.8	
9	16.0	16.0	15.9	16.0	16.0	
10	16.2	15.8	15.8	15.9	15.8	
11	16.2	15.6	15.3	15.3	15.3	25.4
12	16.1	15.8	15.9	15.8	15.9	44.5
13	16.1	15.7	15.6	15.6	15.5	31.8
14	16.2	15.8	15.6	15.4	15.4	44.5
15	16.0	16.0	15.6	15.8	15.7	57.2
16	16.3	16.0	15.8	15.7	15.5	76.2
17	15.6	16.5	15.1	15.0	16.0	44.5
18	16.0	16.2	击穿	击穿	击穿	44.5
19	15.6	16.2	16.1	16.0	击穿	76.2

3.2 寿命评估

根据阿伦尼乌斯方程从化学动力学角度定量描述有机质热降解过程,推算出反应速率常数关系式为^[6]

$$k = Ae^{-\frac{E}{RT}} \quad (1)$$

$$\ln k = \ln A - \frac{E}{RT} \quad (2)$$

式中: k 为温度 T 时的反应速率常数; A 为频率因子,单位时间内分子碰撞次数, s^{-1} ; E 为活化能, $kJ \cdot mol^{-1}$; T 为绝对温度, K ; R 为气体常数, $kJ \cdot (mol \cdot K)^{-1}$ 。

阿伦尼乌斯反应速率常数用失效时间 t 表示。 $\ln t$ 与温度的倒数成线性,曲线取点外推得到相应的温度下的失效时间关系。当电缆暴露在高温下,会加速降低电线电缆绝缘和护套的物理和电气性能。该试验方法可用于测定一个给定的绝缘系统不同温度下热寿命的影响因素,或在给定温度下比较不同绝缘系统。

按2.2节试验方法对C55/LF0812-22-9的电线进行高温寿命试验,得到电线在240,260,280 ℃时的失效时间分别为1 536,624,192 h。本试验中失效时间不能在数字上与绝缘材料在实际使用中的使用寿命联系,但是可以相对表示本试验确定参数下的使用寿命。可以通过这些

较高温度下短时间的试验结果推算出较低温度下较长时间的试验结果。故分别对 240, 260, 280 °C 温度点的温度的倒数与失效时间取对数后进行线性拟合, 线性拟合曲线为 $\ln t = 14.722T^{-1} - 21.297$ 。

通过线性拟合软件, 对数据进行线性拟合, 与式(2)对应可得:

$$\ln k = -21.297 + 14.722T^{-1} \quad (3)$$

根据式(3)可以推算其他更低的温度下电线电缆绝缘的失效时间, 见表 8。

表 8 推算结果

预估温度/°C	转化后的温度/K	温度的倒数/K ⁻¹	预估失效时间取自然对数(ln _r)	预估失效时间/h
220	493.15	0.002 027	8.5	5 115
200	473.15	0.002 113	9.8	18 215
180	453.15	0.002 207	11.2	73 130

由表 8 可以推算该 C55/LF 导线样品绝缘的理论寿命: ①长期处于 220 °C 工作时, 能够连续使用的时间达到 5 115 h(约 213 d); ②长期处于 200 °C 工作时, 能够连续使用的时间达到 18 215 h(约 2.1 a); ③长期处于 180 °C 工作时, 能够连续使用的时间达到 73 130 h(约 8.3 a)。综上, 本工作研制的

C55/LF 导线样品的使用温度范围较宽, 能够满足航天器、空间站等宇航设备对线缆的寿命要求。

3.3 氟析出量分析

按 2.3 节试验方法对本产品 C55/LF0812-22-9 进行氟析出量的测定, 并与普通样品 C55/0812-22-9 的氟析出量进行结果比对, 结果见表 9。

表 9 不同材料试制同规格线缆后的氟析出量

型号规格	试样质量/g	水原始质量/g	总质量/g	试验后总质量/g	氟析出量/(μg·g ⁻¹)
C55/LF0812-22-9	0.214 4	8.030	20.498 1	20.300 0	10.73
C55/0812-22-9	0.210 5	8.545	21.592 2	20.981 9	215.35

由表 9 结果可知, 本工作研制的 C55/LF0812-22-9 导线样品氟析出量为 10.73 μg·g⁻¹, 符合 SAE AS 22759/50—2012 要求的最大氟析出量应不大于 20 μg·g⁻¹ 的指标, 而普通 C55/0812-22-9 导线样品氟析出量远远超出标准要求。

4 低氟导线的在轨应用情况

传输线缆是航天器能量流和信息流的载体, 起着各分系统、各舱段纽带和桥梁的关键作用。本工作研制的 C55/LF 系列低氟导线通过中国空间技术研究院的鉴定和认定后, 在空间中首次成功应用并在载人航天器其他型号领域得到广泛推广。空间站低频导线占比高达 70%, 密封舱内全部采用了 C55/LF 系列低氟导线, 广泛应用于舱内平台及应用试验系统, 用于功率传输、指令、遥测等信号传输和采集, 其低氟析出的特性可有效的为宇航员安全提供保障。

中国空间站目前在轨的有“天和”核心舱(2021年4月发射)、“问天”实验舱(2022年7月发射)和“梦天”实验舱(2022年10月发射)。经长期在轨飞行验证表明, C55/LF 系列低氟导线能够为航天器在轨安全和可靠运行提供有力支撑。

5 结束语

为有效降低空间站用 C55 导线的氟析出量, 依据 SAE 标准单篇规范 SAE AS22759/50—2012, 本工作在低氟材料加工工艺研究工作的基础上, 提出采用进口低氟 X-ETFE 材料替代常规 X-ETFE 材料生产 C55 系列电线电缆并研制了低氟析出特点的 C55/LF 系列导线。通过极限评估试验和寿命评估试验对其性能进行验证, 结果表明: ①本工作研制的 C55/LF 系列低氟电线电缆在达到低氟析出(不超过 20 μg·g⁻¹) 目标的前提下, 其常规性能指标、极限性能与普通 C55 产品相当; ②该导线样品使用温度范围较宽, 能够满足航天器、空间站以及其他宇航设备上对线缆的寿命要求, 通过中国空间站的实际在轨运行进一步验证了该款导线的优异性能。

参考文献:

[1] 赵祥臻, 王寿泰. 耐热导线用辐照交联 F40 绝缘材料[J]. 绝缘材料通讯, 1998(1): 8-10.

[2] 赵祥臻. 辐照交联 F40 航空导线[J]. 上海工程技术大学学报, 1995, 9(1): 14-18.

[3] 王新营. 交联乙烯-四氟乙烯共聚物氟化物逸出的影响因素研究[J]. 绝缘材料, 2020, 53(1): 26-29.

(下转第 36 页)

表 2 光电混合缆机械性能测试数据

测试项目	标准要求	测试结果
拉伸试验	长期拉力下, 光纤在 1 550 nm 波长下附加衰减绝对值 ≤ 0.1 dB	0.003 dB
	短期拉力下, 光纤应变 $\leq 0.6\%$	0.384%
	去负荷后, 光纤在 1 550 nm 波长下光纤残余附加衰减 ≤ 0.1 dB	0.005 dB
压扁试验	长期压力下, 光纤在 1 550 nm 波长下附加衰减绝对值 ≤ 0.1 dB	0.003 dB
	短期压力下, 光纤在 1 550 nm 波长下附加衰减绝对值 ≤ 0.1 dB	0.003 dB
	去负荷后, 光纤在 1 550 nm 波长下附加衰减绝对值 ≤ 0.1 dB	0.002 dB
冲击试验	光纤在 1 550 nm 波长下附加衰减绝对值 ≤ 0.1 dB	0.005 dB
反复弯曲试验	光纤在 1550nm 波长下附加衰减绝对值 ≤ 0.1 dB	0.030 dB
扭转试验	光纤在 1550nm 波长下附加衰减绝对值 ≤ 0.1 dB	0.007 dB

表 3 光电混合缆环境性能与电气性能测试数据

检测项目	标准要求	测试结果
-20 ℃时光纤在 1 550 nm 的附加衰减/(dB·km ⁻¹)	≤ 0.1	0.046
70 ℃时光纤在 1 550 nm 的附加衰减/(dB·km ⁻¹)	≤ 0.1	0.027
20 ℃时导体直流电阻/($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	≤ 140	121.085
耐压试验 (浸水时间: 1 h, 电压(交流) 1.5 kV, 耐压时间 ≥ 1 min)	不击穿	不击穿

2018 方法测试, 14 根混合缆放在管子中, 环境温度为 40 ℃, 电流为 2.3 A, 测试时间为 1 h 时, 密封管道条件下温升为 3 ℃, 满足不超过 10 ℃的要求。微型光电混合缆各项性能指标达到了设计要求, 结构设计合理, 生产工艺成熟。

4 结束语

本工作开发的光电混合缆可实现 5G 室内场景的深度覆盖, 满足微基站(如皮基站、飞基站等)通信用需求, 具有一定的应用前景。

本工作开发的光电混合缆结构尺寸小、功耗低、安装简单、光电一体、布线迅速、维护方便, 该产品通

过了各项性能试验和现场应用验证, 具有应用价值。

参考文献:

- [1] 蔡勇. 5G 网络基站传输承载接入光缆网的建设探讨[J]. 通信电源技术, 2019, 36(6): 241-242.
- [2] 张旭, 皮人伟, 葛涵涛. 小基站+室分 助力 5G 时代新型智慧社区[J]. 上海信息化, 2020(1): 32-35.
- [3] 邹林森. 光纤与光缆[M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 2000: 158-163.
- [4] 陈晓红. 室内光缆性能与制造[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2003(4): 24-28.
- [5] 丁永国, 周仙来. 一种新型微调挤塑模具的设计及应用[J]. 电线电缆, 2018(2): 35-38.

(上接第 32 页)

- [4] 纪延磊, 袁翠萍, 王增辉, 等. 航天器舱内用含氟绝缘导线的宇航环境性能研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2017(4): 37-41.
- [5] SAE. Wire, electrical, fluoropolymer-insulated crosslinked modified etfe, low fluoride, normal weight, 80microinch silver-coated copper 200℃, 600 volt: sae AS22759/50—2012[S]. the USA: Society of Automotive Engineers, 2012.
- [6] 工业和信息化部电子第四研究院. 航空航天用含氟聚合物绝缘电线电缆通用规范: GJB 773B—2015[S]. 北京: 总装备

- 部军标出版发行部, 2015.
- [7] 机械工业部上海电缆研究所. 航空电线电缆试验方法 电压试验: GJB 17.2-84[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1984.
- [8] 中国船舶工业总公司第七研究院标准化研究室. 军用设备环境试验方法 低温试验: GJB 150.4-86[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1986.
- [9] 机械工业部上海电缆研究所. 航空电线电缆试验方法 卷绕试验: GJB 17.16-84[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1984.