

不同环境条件对铝合金线缆组件电气性能的影响研究

韩占杰, 王晓佳*, 张哲, 文放

(中国航空综合技术研究所, 北京 100028)

摘要: **目的** 对比分析 3 种试验环境对 2 种不同型号铝合金线缆组件直流电阻与电压降的影响。**方法** 首先, 以 2 种不同型号航空用铝合金导线 (各包含 3 种不同线径) 组成的铝合金线缆组件为试验对象, 开展潮湿、盐雾、振动 3 种环境试验; 其次, 利用宏观与微观形貌观察、直流电阻测试方法与电压降测试方法, 得到环境试验前后线缆组件的电气性能数据; 最后, 采用均值处理等方法, 对试验数据进行整理, 对比分析 3 种环境条件下铝合金线缆组件的直流电阻、电压降的变化规律。**结果** 铝合金线缆组件经潮湿与盐雾试验后, 锡镀层无明显起泡、起皱和脱落; 潮湿试验后, 所有线缆组件直流电阻值均有所增加, 且随着线径增加, 直流电阻值的增加速率降低; 盐雾试验后, 几乎所有线缆组件的直流电阻与电压降都降低; 振动试验后, 所有线缆组件的直流电阻值均有所增加, 然而增加值不超过 3.2%, 且振动试验后几乎所有线缆组件的电压降都降低。**结论** 铝合金线缆组件的端子镀层对潮湿与盐雾环境有一定的防护作用, 有效避免了腐蚀膜层的形成, 降低了环境对铝合金线缆组件电气性能的影响。相比电压降, 线缆组件的直流电阻对环境条件更为敏感。盐雾环境对铝合金线缆组件的电气性能尤其是直流电阻的影响较大, 然而, 由于端子镀层的防护, 变化值小于 10%。

关键词: 铝合金线缆组件; 环境适应性; 潮湿; 盐雾; 振动; 电气性能

中图分类号: TM206

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)11-0045-08

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2023.11.007

Effect of Different Environmental Conditions on Electrical Performance of Aluminum Alloy Cable Components

HAN Zhan-jie, WANG Xiao-jia*, ZHANG Zhe, WEN Fang

(China Aero Poly-technology Establishment, Beijing 100028, China)

ABSTRACT: The work aims to compare and study the effect of three environmental conditions on the direct current (DC) resistance and voltage drop of two types of aluminum alloy components. With aluminum alloy components of aluminum alloy wires (of three types of diameter) for aviation of two different brands as objects, environmental tests (moisture, salt spray and vibration tests) were carried out. First, the values of DC resistance and voltage drop were measured before and after the aforementioned environmental tests, using macroscopic and microscopic morphology observation, DC resistance and voltage drop test method. Second, the experimental results were processed systematically. At last, the test data were processed and the elec-

收稿日期: 2023-05-22; 修订日期: 2023-08-09

Received: 2023-05-22; Revised: 2023-08-09

引文格式: 韩占杰, 王晓佳, 张哲, 等. 不同环境条件对铝合金线缆组件电气性能的影响研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(11): 45-52.

HAN Zhan-jie, WANG Xiao-jia, ZHANG Zhe, et al. Effect of Different Environmental Conditions on Electrical Performance of Aluminum Alloy Cable Components[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(11): 45-52.

*通信作者 (Corresponding author)

tirical performance of aluminum alloy cable components under different environments conditions were compared and analyzed insightfully according to the processing results. The experimental results indicated that after undergoing the moisture and salt spray tests, the tin plating of the aluminum alloy cable components demonstrated no significant blistering, wrinkling, or delamination; After the moisture test, the value of DC resistance of all cable components increased with the increase of wire diameters, and its increasing rate decreased; After the salt spray test, the values of DC resistance and voltage drop of almost all cable components were reduced; After the vibration test, the values of DC resistance of all cable components increased, and the increase values were less than 3.2%. In addition, the values of voltage drop of almost all cable components decreased. Terminal coating of aluminum alloy cable components has a certain protection against moisture and salt spray environment, and effectively avoids the formation of corrosion film, which reduces the impact of environment on the electrical performance of aluminum alloy cable components. DC resistance of aluminum alloy cable components is more sensitive to environmental tests than voltage drop. The effects of salt spray on the electrical performance of aluminum alloy cable components are more serious than that of moisture and vibration. However, due to the protection of the terminal coating, the variation value is less than 10%.

KEY WORDS: aluminum alloy cable components; environmental suitability; moisture; salt spray; vibration; electrical performance

线缆组件是电子设备进行互联互通的神经线,广泛应用于飞机、卫星、高铁、汽车等复杂机械系统的电子设备中,且数量较多。线缆组件等连接的稳定性及环境可靠性,影响整个电气系统的安全性能^[1-3]。在航空领域,由于飞机环境载荷复杂多变,航空用线缆组件面临的环境也多种多样,增加了线缆组件设计与选型工作的难度。例如,在潮湿环境中,电缆往往容易受潮导致绝缘性能下降,从而可能引发电气故障;盐雾环境则带来电缆金属部件及连接端子的腐蚀问题,增加了电阻,降低了线缆组件的导电性能,同时还可能导致连接失效;振动环境对线缆组件的物理结构产生影响,如松动、折断等,也会导致电气性能的变化等。为了保证线缆组件的长期运行能力,需要有针对性地进行不同环境下线缆组件电气性能的试验与研究。

为了深入探究线缆组件在不同环境下的适应性、连接可靠性及电气性能,许多研究者开展了相关试验与评估方法研究。王巍等^[4]研究了湿度与盐雾环境对常用电气电缆设备绝缘电阻的影响,并探讨了防潮防腐的有效手段。吕志召等^[5]基于 5 项环境试验后的拉伸试验,研究了不同飞机接线端子的连接可靠性,为飞机用接线端子的设计、检验等提供了可靠性试验验证措施与理论依据。罗思敏等^[6]基于电气性能综合评估方法,对 XLPE 配电网电缆受潮过程进行了研究,评估了湿热环境下配网电缆的受潮问题,并强调了中间接头浸水和内源性受潮对绝缘劣化的重要性,为配网电缆受潮问题的预防提供了关键指导。刘琦等^[7]开展了加速试验和有限元仿真分析,研究了航空电连接器在某岛礁服役条件下的失效行为和腐蚀机理。同时,一些学者还着眼于新型材料与涂层技术的研发,以降低环境对电线电缆的影响^[8-10]。张丽军等^[11]采用浸泡法和电化学方法研究了镀层对铝合金耐蚀性的影响,表明镀

层的存在能显著提高铝合金在氯化钠溶液中的耐蚀性。张红飞等^[12]研究了铝合金 2 种防护涂层在 5% NaCl 盐雾环境下的腐蚀疲劳性能,得出相较于传统涂层,纳米涂层在盐雾环境下的防护效果更好。这些研究成果为铝合金线缆组件在环境适应性、连接可靠性及电气性能方面提供了重要的试验方法与理论基础。

与铜电缆相比,铝合金电缆具有抗拉强度高、自重承载力强、柔韧性好、防腐蚀性能高、铠装特性好等优点^[13-16]。2014 年,全球电线电缆行业的首份铝合金电缆的全生命周期研究报告^[17]称,在电缆产品设计的 7 项特征化指标中,铝合金电缆有 6 项优于铜电缆,表明推广铝合金电缆在适用条件下替代铜电缆可行且具有一定的经济与社会意义^[18]。由于质量是飞机设计的关键指标,在实际工程应用中,适用条件下的“以铝代铜”将会一定程度上减轻飞机的质量。为了更好地理解铝合金线缆组件的环境适应性、连接可靠性及电气性能,许多研究者开展了相关试验与研究。例如,针对铝端子,黄召明等^[19]进行了压接端子短时耐受流试验,并对试验结果进行了分析,研究了线缆线径与压线钳的匹配关系和压接工艺这 2 个方面对压接端子性能的影响。针对线束保护套,范航京等^[20]研究了飞机线束用自卷绕开口保护套的力学性能、耐环境性能和阻燃性,设计了飞机线束保护材料的替代方案。然而,目前针对铝合金线缆组件在不同环境中的电气性能等关键特性变化规律的研究还不是很深入。铝合金线缆组件压接不牢靠、电气性能不稳定、环境可靠性不高等问题的存在,大大影响了其在航空领域的应用。

为了深入研究航空用铝合金线缆组件在不同环境条件(潮湿、盐雾、振动)下的电气性能变化规律,本研究首先设计并制备了由 2 种不同型号的航空用铝合金导线,每种导线各包含 3 种不同线径,从而构

成铝合金线缆组件。其次,以该线缆组件为试验对象,设计并开展了潮湿、盐雾、振动 3 种环境试验。进而,通过宏观与微观形貌观察、直流电阻测试方法与电压降测试方法,对比了铝合金端子潮湿与盐雾试验后的镀层情况,并对镀层的防护原理进行了分析。同时,测量了环境试验前后线缆组件的直流电阻与电压降。最后,采用均值处理等方法,对试验数据进行整理和统计,对比分析了 3 种环境条件下铝合金线缆组件的直流电阻、电压降的变化规律,讨论了航空用铝合金线缆组件的环境适应性。这些研究成果对航空铝合金线缆组件的设计、防护及修理具有重大意义,并为国

产化线缆组件在民用飞机上的选型与应用提供了有力支撑。

1 试验件设计与制备

铝合金线缆组件主要由铝合金接线端子、铝合金电线电缆、热缩管、线束主标识等组成,结构如图 1 所示。其中,铝合金接线端子是六角压接端子,铝合金电线电缆规格见表 1,长度为 380 mm。

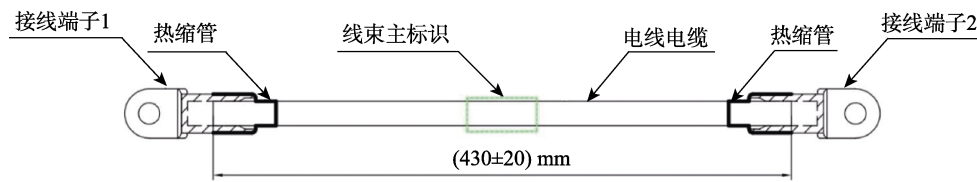


图 1 铝合金线缆组件结构
Fig.1 Structure of aluminum alloy cable components

表 1 铝合金电线电缆规格
Tab.1 Specification of aluminium alloy cables

线型	线规	线径/mm
JC3A/FM3A	6H	4.11
	4H	5.19
	01H	8.25

JC3A 与 FM3A 铝合金线缆组件(3 种不同线径)

如图 2 所示。其中,铝合金接线端子区别于其他线缆组件的铜端子,采用更轻的铝合金端子,端子热处理工艺为电镀锡。铝合金电线电缆是对波音飞机的导线进行国产化研制而成,其结构与材料组成如图 3 所示。其绝缘材料为聚氟乙烯,热处理工艺为辐射交联,其导体材料为铝合金,导体丝区别于普通导线的 AWG24,采用 AWG27 导体丝,增加了导线的柔性。环境试验中,每种规格线缆组件的数量为 3,编号 1#~9#。

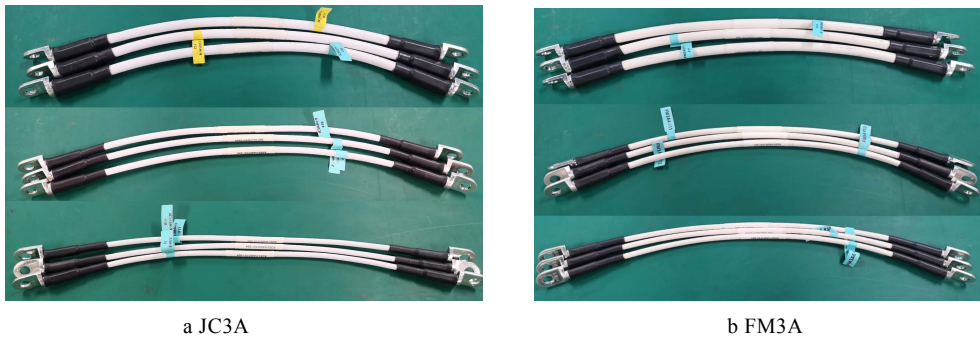


图 2 铝合金线缆组件
Fig.2 Aluminum alloy cable components

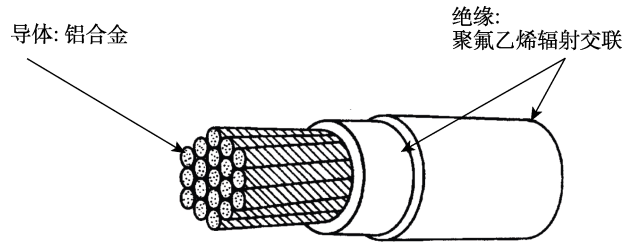


图 3 铝合金电线电缆的结构与材料组成
Fig.3 Structure and material composition of aluminum alloy cables

2 环境试验及测试

对 1#~9#线缆组件设计并开展潮湿(1#~3#)、盐雾(4#~6#)、振动(7#~9#)环境试验,并在环境试验前后对其电气性能进行测试。由于铝合金电线电缆是参照国外电线电缆产品说明书进行仿制而成的,国内尚无该电线电缆的专用规范或标准,因此本研究中的电线电缆环境试验也依据国外相关标准进行,其环境参数适用于本研究中的线缆组件电

气性能变化。

2.1 试验方案与条件

2.1.1 潮湿试验

为了研究潮湿环境对铝合金线缆组件压接部位和绝缘层性能的影响。按 EN3475-412^[21]的方法进行了潮湿试验。潮湿试验中,线缆组件的放置如图 4 所示。潮湿试验的试验条件:试验温度为 $(71\pm 2)^\circ\text{C}$;试验湿度为 $(95\pm 5)\%$;试验循环 15 个周期,试验曲线如图 5 所示。

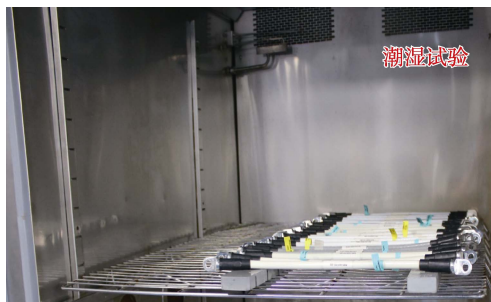


图 4 潮湿试验试验件放置
Fig.4 Article layout of moisture test

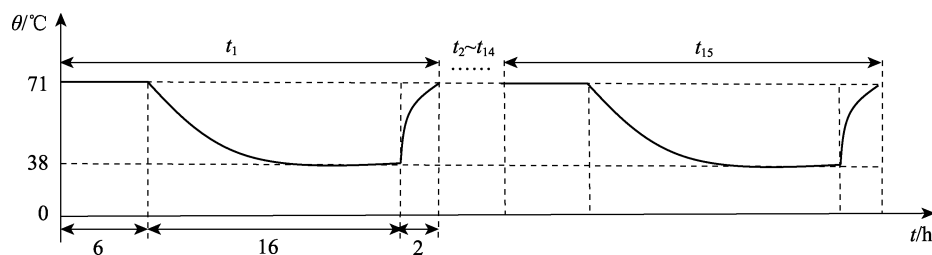


图 5 潮湿试验曲线
Fig.5 Moisture test curve

2.1.2 盐雾试验

为了研究腐蚀环境对铝合金线缆组件结构和性能的影响,按 ASTM-B117^[22]的方法进行了盐雾试验。盐雾试验中,线缆组件的放置如图 6 所示,盐雾试验的试验条件:盐雾沉降率为 $(1\sim 2)\text{ mL}/(80\text{ cm}^2\cdot\text{h})$;盐雾试验溶液的 pH 值为 6.5~7.2;盐水的质量浓度为 $(5\pm 1)\%$;试验温度为 $35(+1.1\sim 1.7)^\circ\text{C}$;连续喷雾 100 h。

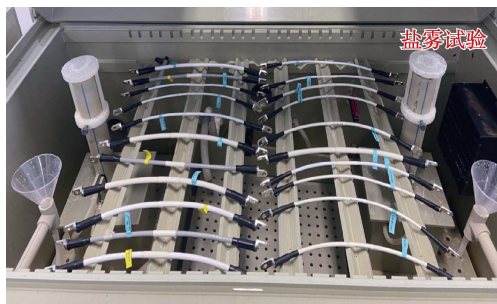


图 6 盐雾试验试验件放置
Fig.6 Article layout of salt spray test

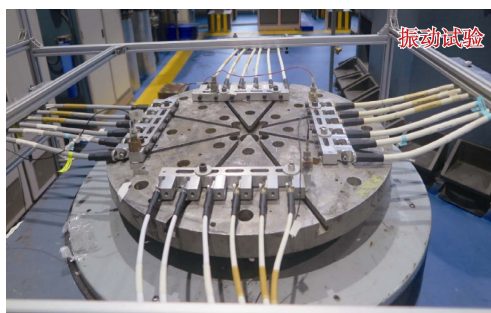


图 7 振动试验试验件放置
Fig.7 Article layout of vibration test

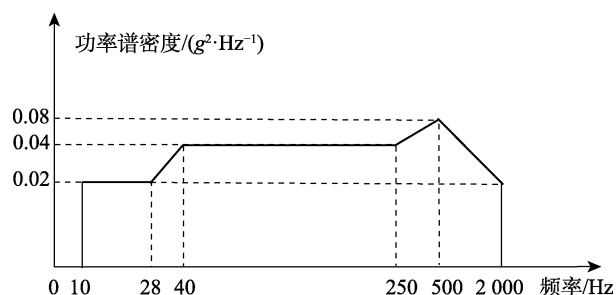


图 8 振动试验曲线
Fig.8 Vibration test curve

2.1.3 振动试验

为了研究高频振动环境对铝合金线缆组件结构和性能的影响,进行了线缆组件的振动试验。振动试验中线缆组件的放置如图 7 所示,振动试验曲线如图 8 所示。振动试验条件:频率范围为 10~2 000 Hz;在性能量级上进行每轴向 1 h 的随机振动。

2.2 电气性能测试

在环境试验前后,分别测量 1#~9#线缆组件的电

气性能。采用 EN3475-301^[23]中直流电阻的测试方法,对线缆组件的直流电阻进行测试,并将测试电阻 R_t 修正到 20°C 下的电阻值 R_{20} 。

$$R_{20} = \frac{R_t}{[1 + 0.04(t - 20)]} \quad (1)$$

式中: t 为测量的环境温度。

采用 MIL-T-7099E^[24]中的电压降测试方法对电

压降进行测试,电压降的测试电流:01H 为 202 A;4H 为 83 A;6H 为 30 A。

3 结果及分析

3.1 环境试验后外观

环境试验结束后,首先对每组线缆组件的外观进行宏观与微观检测,结果表明,所有线缆组件绝缘层无明显泛白、膨胀、起泡、皱裂、脱落及麻坑等现象;涂镀层无明显起泡、起皱和脱落;端子无裂纹,导线导体无断丝等其他机械损伤。对线缆组件的铝合金端子进行微观检测,其中,FM3A01H 线缆组件的铝合金端子的潮湿与盐雾试验前后的金相图如图 9 所示,可见,试验前后锡镀层并未发生明显的变化。结果表护明,锡镀层能够在铝合金端子

表面形成一层保层,避免了铝基体与空气中氧气的直接接触,从而减少其氧化速度。此外,锡镀层可以抵御腐蚀性环境对铝基体的侵蚀,特别是在潮湿或有害化学物质存在的情况下,进而确保了高效可靠的电气连接。因此,铝合金线缆组件的端子镀锡层对潮湿与盐雾环境有一定的防护作用,有效避免了铝合金基体金属暴露在潮湿与盐雾环境中,从而形成腐蚀镀层等。

3.2 电气性能

3.2.1 直流电阻

对环境试验前后每型线缆组件的 3 根试样的直流电阻数据进行了均值处理,处理结果见表 2、3。其中,试验前后百分比=(试验后均值-试验前均值)/试验前均值。

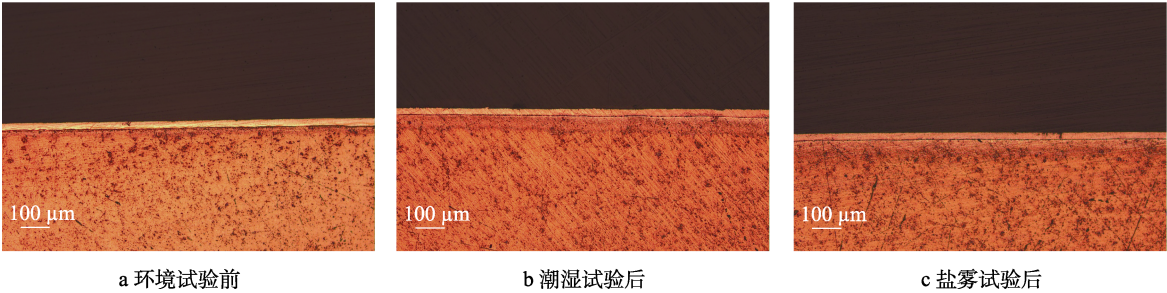


图 9 潮湿与盐雾试验前后 FM3A01H 线缆组件的铝合金端子金相对比

Fig.9 Comparison of aluminum alloy terminal microstructures of FM3A01H cable components before and after moisture and salt spray tests: a) before environmental testing; b) after humidity testing; c) after salt spray testing

表 2 JC3A 线缆组件环境试验前后直流电阻对比

Tab.2 Comparison of DC resistance of JC3A cable components before and after environmental tests

环境试验	线缆组件	试验前/kΩ	试验后/kΩ	试验前后百分比/%
潮湿	JC3A6H	1.325 3	1.393 3	5.13
	JC3A4H	0.979 3	1.026 7	2.37
	JC3A01H	0.584 7	0.636 7	2.60
盐雾	JC3A6H	1.325 3	1.213 3	-8.45
	JC3A4H	0.979 3	0.856 7	-6.13
	JC3A01H	0.584 7	0.486 7	-4.90
振动	JC3A6H	1.325 3	1.343 3	1.36
	JC3A4H	0.979 3	1.016 7	1.87
	JC3A01H	0.584 7	0.640 0	2.77

表 3 FM3A 线缆组件环境试验前后直流电阻对比

Tab.3 Comparison of DC resistance of FM3A cable components before and after environmental tests

环境试验	线缆组件	试验前/kΩ	试验后/kΩ	试验前后百分比/%
潮湿	FM3A6H	1.227 3	1.266 7	3.20
	FM3A4H	0.904 7	0.963 3	2.93
	FM3A01H	0.552 7	0.593 3	2.03
盐雾	FM3A6H	1.227 3	1.123 3	-8.47
	FM3A4H	0.904 7	0.796 7	-5.40
	FM3A01H	0.552 7	0.580 0	1.37
振动	FM3A6H	1.227 3	1.266 7	3.20
	FM3A4H	0.904 7	0.916 7	0.60
	FM3A01H	0.552 7	0.613 3	3.03

1) 潮湿试验。潮湿试验后, 所有线缆组件直流电阻值均有所增加。JC3A6H、JC3A4H、JC3A01H 线缆组件直流电阻分别增加 5.13%、2.37%、2.60%。FM3A6H、FM3A4H、FM3A01H 线缆组件直流电阻分别增加 3.20%、2.93%、2.03%。可见, 随着线径增加, 直流电阻值的增加速率降低。

2) 盐雾试验。盐雾试验后, 除了 FM3A01H 线缆组件直流电阻增加 1.37%, 其他所有线缆组件的直流电阻值均有一定程度降低。JC3A6H、JC3A4H、JC3A01H 线缆组件的直流电阻分别降低 8.45%、6.13%、4.90%, FM3A6H、FM3A4H 线缆组件的直流电阻分别降低 8.47%、5.40%。可见, 盐雾试验对线缆组件直流电阻的影响较大。然而, 由于端子镀锡层的防护, 变化值未超过 10%。此外, 随着线径增加, 直流电阻值降低速率变小。

3) 振动试验。振动试验后, 所有线缆组件的直流电阻值均有所增加。JC3A6H、JC3A4H、JC3A01H

线缆组件直流电阻分别增加 1.36%、1.87%、2.77%, FM3A6H、FM3A4H、FM3A01H 线缆组件直流电阻分别增加 3.20%、0.60%、3.03%。可见, 振动试验对不同线径线缆组件直流电阻的影响较小, 不超过 3.2%。

综上所述, 潮湿试验后, 所有线缆组件的直流电阻值均有所增加, 且随着线径的增加, 直流电阻值增加速率降低。盐雾试验对线缆组件直流电阻的影响较大, 且随着线径增加, 直流电阻值降低速率变小。然而, 由于端子镀锡层的防护, 变化值未超过 10%。振动试验后, 所有线缆组件直流电阻值均有所增加, 振动试验对不同线径线缆组件的直流电阻影响较小, 不超过 3.2%。

3.2.2 电压降

对环境试验前后每型线缆组件的 3 根试样的电压降数据进行了均值处理, 处理结果见表 4、5。

表 4 JC3A 线缆组件环境试验前后电压降对比
Tab.4 Comparison of voltage drop of JC3A cable components before and after environmental tests

环境试验	线缆组件	试验前/mV	试验后/mV	试验前后百分比/%
潮湿	JC3A6H	86.174 7	89.176 7	3.48
	JC3A4H	73.042 0	74.303 3	1.73
	JC3A01H	65.244 0	60.716 7	-6.94
盐雾	JC3A6H	86.174 7	84.933 3	-1.44
	JC3A4H	73.042 0	72.623 3	-0.57
	JC3A01H	65.244 0	65.244 0	-8.31
振动	JC3A6H	86.174 7	86.130 0	-0.05
	JC3A4H	73.042 0	72.166 7	-1.20
	JC3A01H	65.244 0	58.806 7	9.87

表 5 FM3A 线缆组件环境试验前后电压降对比
Tab.5 Comparison of voltage drop of FM3A cable components before and after environmental tests

环境试验	线缆组件	试验前/mV	试验后/mV	试验前后百分比/%
潮湿	FM3A6H	78.548 7	77.553 3	-1.27
	FM3A4H	66.432 0	67.826 7	2.10
	FM3A01H	50.338 0	51.850 0	3.00
盐雾	FM3A6H	78.548 7	77.446 7	-1.40
	FM3A4H	66.432 0	64.146 7	-3.44
	FM3A01H	50.338 0	50.046 7	-0.58
振动	FM3A6H	78.548 7	79.040 0	0.63
	FM3A4H	66.432 0	65.446 7	-1.48
	FM3A01H	50.338 0	49.576 7	-1.51

1) 潮湿试验。潮湿试验后, JC3A01H 的电压降比试验前降低 6.94%, JC3A6H、JC3A4H 线缆组件的电压降分别增加 3.48%、1.73%。FM3A6H 电压降试验后比试验前降低 1.27%, FM3A4H、FM3A01H 线缆组件分别增加 2.10%、3.00%。两型线缆组件电压降值的变化规律不一致, 潮湿试验对 JC3A01H 线缆

组件电压降的影响较大。

2) 盐雾试验。盐雾试验后, 所有线缆组件的电压降值均有一定程度的降低。JC3A6H、JC3A4H、JC3A01H 线缆组件的电压降分别降低 1.44%、0.57%、8.31%, FM3A6H、FM3A4H、FM3A01H 线缆组件的电压降分别降低 1.40%、3.44%、0.58%。两型线缆组

件电压降值的变化规律不一致,盐雾试验对 JC3A01H 线缆组件电压降影响较大。

3) 振动试验。振动试验后,除了 FM3A6H 线缆组件电压降增加 0.63%,其余所有线缆组件的电压降均有一定程度的降低。JC3A6H、JC3A4H、JC3A01H 线缆组件的电压降分别降低 0.05%、1.20%、9.87%,FM3A4H、FM3A01H 线缆组件的电压降分别降低 1.48%、1.51%。两型线缆组件电压降值的变化规律不一致,振动试验对 JC3A01H 线缆组件电压降的影响较大。

综上所述,盐雾试验后,所有线缆组件电压降值均有一定程度降低。JC3A01H 线缆组件的电压降对潮湿、盐雾与振动环境最敏感。结合铝合金线缆组件环境试验前后的直流电阻变化规律,结果表明,相比电压降,直流电阻对环境条件更为敏感。对比 3 种不同环境的试验结果,盐雾环境对铝合金线缆组件的电气性能尤其是直流电阻的影响较大,然而,由于端子镀锡层的防护,直流电阻的变化值未超过 10%。

4 结论

1) 铝合金线缆组件的端子镀锡层对潮湿与盐雾环境有一定的防护作用,有效避免了腐蚀膜层等的形成,降低了潮湿与盐雾环境对铝合金线缆组件电气性能的影响。

2) 相比电压降,铝合金线缆组件的直流电阻对潮湿、盐雾环境更为敏感:潮湿试验后,所有线缆组件的直流电阻值均有所增加,且随着线径的增加,直流电阻值的增加速率降低;盐雾试验后,几乎所有线缆组件直流电阻值均有一定程度降低,且随着线径的增加,直流电阻值的降低速率变小。

3) 盐雾环境对铝合金线缆组件的电气性能尤其是直流电阻的影响较大,然而,由于端子镀锡层的防护,直流电阻的变化值未超过 10%。

4) 不同环境条件(潮湿、盐雾、振动)下铝合金线缆组件电气性能的影响规律分析,对航空铝合金线缆组件的设计、防护及修理具有重大意义,支撑了国产化线缆组件在民用飞机上的选型与应用。

参考文献:

- [1] 杨奋为. 军用电连接器的应用及发展[J]. 机电元件, 2007, 27(3): 42-49.
YANG Fen-wei. Application and Development of Military Electrical Connectors[J]. Electromechanical Components, 2007, 27(3): 42-49.
- [2] 黄健峰. 线束端子压接工艺的研究与可靠性分析[D]. 北京: 北京邮电大学, 2016.
HUANG Jian-feng. Research and Reliability Analysis of Wire Harness Terminal Crimping Technology[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2016.
- [3] 王玲, 杨万均, 张世艳, 等. 热带海洋大气环境下电连接器环境适应性分析[J]. 装备环境工程, 2012, 9(6): 5-9.
WANG Ling, YANG Wan-jun, ZHANG Shi-yan, et al. Environmental Worthiness Analyses of Electrical Connectors in Tropic Marine Atmosphere[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(6): 5-9.
- [4] 王巍, 杨涛. 环境湿度对绝缘电阻影响的试验研究[J]. 建筑电气, 2018, 37(12): 49-55.
WANG Wei, YANG Tao. Experimental Study on the Influence of Ambient Humidity on Insulation Resistance[J]. Building Electricity, 2018, 37(12): 49-55.
- [5] 吕志召, 梁国胜, 雷军, 等. 飞机用电线电缆接线端子连接可靠性研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2022, 40(S1): 21-25.
LV Zhi-zhao, LIANG Guo-sheng, LEI Jun, et al. Research on Connection Reliability of Wire and Cable Terminals for Aircraft[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2022, 40(S1): 21-25.
- [6] 罗思敏, 栾乐, 许中, 等. 基于电气性能综合评估的 XLPE 配网电缆受潮过程研究[J]. 绝缘材料, 2022, 55(10): 47-53.
LUO Si-min, LUAN (L /Y), XU Zhong, et al. Study on Damping Process of XLPE Distribution Cable Based on Comprehensive Evaluation of Electrical Performance[J]. Insulating Materials, 2022, 55(10): 47-53.
- [7] 刘琦, 郁大照, 王琳, 等. 航空电连接器海洋环境加速试验与腐蚀仿真研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(11): 18-27.
LIU Qi, YU Da-zhao, WANG Lin, et al. Acceleration Test and Corrosion Simulation of Aviation Electrical Connectors in Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(11): 18-27.
- [8] 郭亮亮, 许洋, 曹碧辉. 纳米涂料与涂层技术的应用[J]. 化工设计通讯, 2018, 44(9): 48.
GUO Liang-liang, XU Yang, CAO Bi-hui. Application of Nano Coatings and Coating Technology[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2018, 44(9): 48.
- [9] 刘春江, 黄超, 姜涛, 等. 铝合金表面阳极化层环境损伤失效行为研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(3): 123-127.
LIU Chun-jiang, HUANG Chao, JIANG Tao, et al. Environmental Damage Failure Behaviors of Anodic Films on Aluminum Alloy[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(3): 123-127.
- [10] 郑国禹, 陈亮. 雷达吸波涂层失效分析及修复技术研究[J]. 表面技术, 2011, 40(6): 91-93.
ZHENG Guo-yu, CHEN Liang. The Degeneration Analysis and Repair Technique of Radar Absorbing Coating[J]. Surface Technology, 2011, 40(6): 91-93.
- [11] 张丽军, 杨文忠. AA5052 铝合金表面化学镀锡及其耐

- 蚀性[J]. 腐蚀与防护, 2018, 39(11): 873-877.
ZHANG Li-jun, YANG Wen-zhong. Electroless Tin Plating on AA5052 Aluminum Alloy and Its Corrosion Resistance[J]. Corrosion & Protection, 2018, 39(11): 873-877.
- [12] 张红飞, 赵连红, 王浩伟. 2024 铝合金连接结构两种防护涂层耐蚀性研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(7): 82-85.
ZHANG Hong-fei, ZHAO Lian-hong, WANG Hao-wei. Corrosion Resistance of Two Protective Coatings of 2024 Aluminum Alloy Structure[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(7): 82-85.
- [13] 陈露露. GT185 铜接线端子与铝线束磁脉冲压接工艺的数值模拟与性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
CHEN Lu-lu. Research on Process and Mechanical Properties of Magnetic Pulse Crimping of GT185 Terminals and Aluminum Wires[D]. Changsha: Hunan University, 2020.
- [14] 戴洪琦. 浅析铝合金电缆的优势和劣势[J]. 世界有色金属, 2019(19): 246-250.
DAI Hong-qi. On the Advantages and Disadvantages of Aluminum Cable[J]. World Nonferrous Metals, 2019(19): 246-250.
- [15] 谢莉杰. 铝合金电缆发展趋势及应用的研究[J]. 质量技术监督研究, 2018(1): 25-29.
XIE Li-jie. Research on Development Trend and Application of Aluminum Alloy Cable[J]. Quality and Technical Supervision Research, 2018(1): 25-29.
- [16] 彭永领, 周俊民, 乔月纯. 铝合金电缆的性能及其在应用中应注意的问题[J]. 科技创新与应用, 2017(24): 182-183.
PENG Yong-ling, ZHOU Jun-min, QIAO Yue-chun. Aluminum Cable's Performance and Its Problems in Application[J]. Technology Innovation and Application, 2017(24): 182-183.
- [17] 肖阳. 高性能铝合金电缆导体及端子的开发[C]// 2016 中国铝加工产业技术创新交流大会论文集. 霍林郭勒: [出版者不详], 2016.
XIAO Yang. Development of High Performance Aluminum Alloy Conductor And Terminal[C]// 2016 China Aluminum Processing Industry Technology Innovation Exchange Conference. Holingola: [s. n.], 2016.
- [18] 黄竹林. 稀土铝合金线缆“代铜”将成为新趋势[J]. 资源再生, 2013(9): 51-52.
HUANG Zhu-lin. Rare-Earth Aluminium Alloy Wire Instead of Copper Will Become a New Trend[J]. Resource Recycling, 2013(9): 51-52.
- [19] 黄召明, 高月欣, 李翔飞, 等. 压接端子短时耐受流试验及其分析[J]. 机电工程, 2017, 34(10): 1196-1199.
HUANG Zhao-ming, GAO Yue-xin, LI Xiang-fei, et al. Analysis of Crimp Terminals Short-Term Tolerant Flow[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 34(10): 1196-1199.
- [20] 范航京, 黄明俊, 王宗武, 等. 飞机线束用自卷绕开口保护套性能分析[J]. 电线电缆, 2019(5): 29-33.
FAN Hang-jing, HUANG Ming-jun, WANG Zong-wu, et al. Performance Analysis of Self-Wrapping Open Protective Sleeve for Aircraft Wiring Harness[J]. Wire & Cable, 2019(5): 29-33.
- [21] DS/EN 3475-304: 2002, Aerospace Series—Cables, Electrical, Aircraft Use—Test Methods—Part 412: Humidity Resistance[S].
- [22] ASTM-B117: 2017, Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus[S].
- [23] DS/EN 3475-301: 2002, Aerospace Series—Cables, Electrical, Aircraft Use—Test Methods—Part 301: Ohmic Resistance Per Unit Length[S].
- [24] MIL-T-7099E: 1979, Terminal, Lug And Splice, Crimp Style Aluminum For Aluminum Aircraft Wire[S].

责任编辑: 刘世忠