

文章编号:1674-8190(2015)04-507-05

舰载飞机电线电缆选用技术分析

李绪忠,李素琴

(中国航空工业集团公司第一飞机设计研究院,西安 710089)

摘要: 舰载飞机与岸基飞机相比,对全机电线电缆的选用提出了新的要求。根据舰载飞机服役的环境和技术要求,重点在于海洋环境对航空电线电缆的特殊耐受性要求,以及飞机自身对减重所提出的最大化可能性,结合航空电线电缆的国内外发展现状,提出舰载飞机全机电线电缆的选用方案,即常温区选用辐照交联 ETFE 绝缘电线电缆、高温区选用光滑无缝绕包 PI/PTFE 复合绝缘电线电缆、供电系统优选 PFA 绝缘挤出型电线、总线系统和高频信号传输选用 FC 光纤总线及发泡 PTFE 绝缘同轴电缆。该方案的最大优点在于将航空电线电缆的电性能、减重要求及耐海洋环境的特殊要求做到最大限度的结合,同时,对国内航空电线电缆的研发、制造技术水平亦具有深远的影响意义。

关键词: 舰载飞机; 电线; 电缆; 减重; 海洋环境

中图分类号: V242

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2015.04.018

Analysis of Selection for Wires and Cables in Shipboard Aircraft

Li Xuzhong, Li Suqin

(The First Aircraft Design and Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Xi'an 710089, China)

Abstract: Compare with the land-based aircraft, requirements for the selection of wire and cable in shipboard aircraft is new. On the basis of the ocean environment technical requirements and the maximize probability for weight reduction of the shipboard aircraft, combined with the domestic and overseas development of wire and cable, a reasonable technical project is proposed, i. e. ETFE irradiation cross-linking insulated wire and cable are selected in the room temperature and PI/PTFE smooth tape-wrap insulated wire and cable are selected in high temperature. PFA insulated wire is recommended in electrical system. FC and PTFE insulated coaxial cable can be used in the bus system and the high frequency signal transmission. The main advantage of this project is that the properties and the ocean circulation requirements of the wire and cable are combined as furthest as possible. Meanwhile, it will be of a meaningful significance on the development of the domestic aviation wire and cable.

Key words: shipboard aircraft; wires; cables; weight reduction; ocean environment

0 引言

舰载飞机服役的海洋环境,对其装机所用的材料提出了更为苛刻的要求,例如更轻的重量、良好的维护性能、耐腐蚀等。作为连接并保障飞机各系统正常工作的电线电缆,其选用的技术要求与岸基

飞机亦有很大的不同,包括绝缘材料的选择、导体及镀层的耐海洋环境性能差异、敷设安装的防腐蚀密封要求、电磁兼容要求等。上述特殊要求决定了电线电缆的选用原则和总体思路,例如机内设备间的普通安装线,高温区(包括发动机舱、APU 短舱周边、机翼前缘等部位)的用线,电源系统主馈线,航电系统数据总线以及其他特种电线电缆的选用,在基本电性能满足设计要求的前提下,均应首先考虑海洋环境的整体要求。同时,在对相关产品进行性能考核验证时,亦应着重注意环境因素对电机电

收稿日期:2015-05-11; 修回日期:2015-07-15

通信作者:李绪忠,578731695@qq.com

缆产品的影响。

本文通过对目前国内外航空电线电缆现状的分析,结合国内的实际发展和应用技术水平,确定舰载飞机的电线电缆选用方案,以期为舰载飞机的电气、航电、飞控等系统设计选线提供合理可行的参考依据。

1 航空电线电缆的国内外发展现状

电线电缆在航空产品上有着特殊而重要的地位。品种多、用量大、用途广、工作环境复杂是航空电线电缆的特点,其在飞机电气、无线电、仪表、雷达、火控、飞控等系统均有广泛而重要的应用。随着飞机性能要求的提高,单机电线电缆的用量也在逐步增加,对电线电缆的性能要求也越来越苛刻^[1-3]。

纵观航空电线电缆的发展历程,主要是绝缘层材料的选用变化。从最早的聚氯乙烯(PVC)、经历了尼龙(Nylon)、聚酰亚胺(PI)、聚四氟乙烯(PTFE)、聚全氟乙丙烯(FEP)、可溶性聚四氟乙烯(PFA)、乙烯-四氟乙烯(ETFE)、辐照交联乙烯-四氟乙烯(XETFE)直到聚酰亚胺/聚四氟乙烯(PI/PTFE)等绝缘层材料。从上述绝缘材料的更新换代可以看出,航空电线电缆总的发展趋势是具有重量轻、外径小、薄壁绝缘、耐高温、耐磨、耐溶剂、耐辐射以及高可靠性等。

目前,国外军民用飞机广泛选用的电线电缆主要包括两类:辐照交联 ETFE 绝缘电线电缆和 PI/PTFE 复合绝缘电线电缆。其中,辐照交联 ETFE 绝缘电线电缆的代表产品主要包括 55A、55PC、CMC 系列。辐照交联是近年来发展起来的一项新技术,其原理是将 ETFE 电缆料经过电子射线的高能照射,通过敏化剂的能量传递和加速交联作用,使 ETFE 由原来的热塑性材料变为热固性材料,从而形成不熔物,分子结构由杂乱的线形结构变为体型的网状结构。因此,ETFE 经辐照交联后,可以提高耐温等级,长期工作温度由 150℃ 提升为 200℃,同时也使其抗拉强度、抗老化性得到提高。辐照交联技术于 20 世纪 60 年代中期开始成功应用于制造航空电线电缆,该产品在美国波音飞机、洛马公司、欧洲空客及直升机上大量使用,包括 F-18、E2C 舰载机型^[4-6]。

20 世纪 90 年代中期,国内在研在制型号,包括 JH7A、J10、枭龙系列等,逐步开始选用 55A、55PC、CMC 系列产品,替代了大量使用的聚四氟乙烯绝缘和尼龙绝缘电线电缆,主要包括 55A08XX 系列、55PC18XX 系列、55PC11XX 系列等。2003 年以来,国内开始采用进口交联 ETFE 绝缘料和导体挤制加工成品电线电缆,经过近十年的探索,国产产品在性能上已经达到进口产品的水平,逐步替代了进口产品并在各型号上得到广泛应用。此类电线电缆的最高使用温度可以达到 200℃,但耐电弧击穿性能差,无法满足飞机高温部位对电线电缆的设计需求。同时,在导体技术方面,国产产品与进口产品仍存在一定差距,尤其是高强度铜合金导体,目前,高性能高强度铜合金导体材料的技术指标是以国际普遍采用的美国 SAE AS 22759 标准为基础制定的,该标准对高强度铜合金导体材料性能指标的要求以美军标 MIL-DTL-29606A 为准。国内在对高强度铜合金导体的研究方面进行过一定努力,但都局限于高强度、中导电率,与航空电线电缆对导体的技术要求还存在差距。

近年来,以聚酰亚胺/聚四氟乙烯(PI/PTFE)复合绝缘电线电缆为代表的产品逐步在航空航天领域得到大量使用。相对于交联 ETFE 材料,PI/PTFE 复合绝缘电线具有外径小、重量轻、耐锐边切割性能好、耐电弧、耐高温等性能优势。该产品满足美标 AS22759/80~92 要求,被应用于波音系列飞机、格鲁门公司等。但聚酰亚胺(PI)材料耐水解性能不稳定,美国海军曾规定海军型飞机不推荐使用含有 PI 材料绝缘的电线电缆,原因是海洋环境下产品绝缘层由于接触湿气可导致 PI 材料出现降解现象。

为了充分发挥 PI/PTFE 复合绝缘电线电缆的优异性能,同时避免产生 PI 材料耐水解性差的劣势,国外电线电缆制造商以最新版的美标 AS22759/180~192 为产品技术要求,生产出最新一代无缝绕包 PI/PTFE 复合绝缘电线电缆。此类电线电缆在绕包工艺上进行改进,对搭盖率进行严格的控制,同时对烧结工艺提出了更高的要求,从而使产品达到光滑无缝,避免了潮气或水分介质侵入的可能性,也得到了美国海军的认可。此类产

品除应用于空客 A380 飞机外,亦在海军型飞机上得到了使用^[7-9]。

2 舰载飞机对电线电缆的技术要求

舰载飞机除了应具备岸基飞机的基本技术要求外,还需满足其特殊的服役环境要求。首先是海洋环境,主要体现在三防环境,即湿热、盐雾、霉菌的影响。舰载飞机电线电缆的选用亦应满足三防技术指标的要求。在导体的选择上,由于存在盐雾潮湿环境,应考虑不同金属之间接触的异电位化学腐蚀问题;在绝缘材料的选择上,主要考虑的因素是不同材料的绝缘电阻对信号传输的差异性以及耐温等级;海上环境还会带来宽温域温度变化的影响,因此所选用的电线电缆应具备耐高低温变化的性能。同时,驾驶舱、电子设备舱、工作舱对隔音降噪、电磁辐射有特殊要求,选用的电线电缆应具备低噪音、电磁屏蔽等功能。对于舰载飞机而言,尽可能减轻重量是必须考虑的技术要求,而系统的减重措施中,电线电缆选用的合理与否具有重要影响。因此,在保证基本电气性能的前提下,应尽可能选用轻型电线电缆,必要时可以选用铝导体电线电缆。此外,为了提高信号传输速率、降低衰减,舰载飞机会选用数据总线集成系统,在总线电线电缆的选择上,可以考虑选用光纤电线电缆。

总之,舰载飞机对电线电缆的技术要求涵盖电性能、物理机械性能、耐环境性能及信号传输性能等方面。

3 电线电缆的合理选用

根据上述因素的要求,并综合考虑目前国内外航空电线电缆的使用发展现状,确定针对舰载飞机的电线电缆选用方案。

3.1 导体和镀层的选取

目前广泛使用的航空电线电缆导体,主要包括铜(Cu)、铜合金(Cu-Cr-Zr)、铜包铝(Cu/Al)三种。铜导体的导电性能最好,但机械性能稍差;铜合金导体机械性能最好,但导电性能稍差;铜包铝导体主要针对对重量有特殊要求的部位,其导电性能最低。

根据导体工作温度等级的不同,镀层分为镀锡

(150 ℃)、镀银(200 ℃)、镀镍(260 ℃)三种。

目前,国内尚无航空电线电缆选用指南的相关标准规范,本文参照美国机车工程师协会标准 SAE-AS-50881D-2010 的要求,兼顾导体的额定工作温度,对导体和镀层的选取建议采用以下方案:

(1) AWG 线规 22# 以下,选用铜合金导体,目的是提高其机械性能,满足压接强度要求;AWG 线规 20# ~ 10#, 选用铜导体,满足载流传输需求;AWG 线规 8# 以上,选用镀镍铜导体,若有进一步的减重要求,综合考虑可选用铜包铝或铝合金导体。

(2) 在空气暴露环境中,镀锡工艺会因为氧化而导致表面产生脆化现象,降低了导体的可焊性,故不建议选用镀锡处理的导体。镀银铜导体的直流电阻小,导电性能优异,是理想的载流导体类型。但是,由于银、铜金属之间在舰载飞机服役的海洋环境中,极易产生异电位化学腐蚀,可能导致线路出现不可预测的故障,除非有充分的密封保障措施,镀银导体应慎重选用。镀镍导体虽然直流电阻比镀银导体略大,但是金属镍、铜之间不会发生电化学腐蚀,且镀镍导体的使用温度涵盖了高温区的适用范围,因此,综合考虑各种因素,采用镀镍工艺处理的导体成为首选。

3.2 绝缘材料的选取

用于制造航空电线电缆的绝缘材料主要包括:聚四氟乙烯(PTFE)、聚全氟乙丙烯(FEP)、可溶性聚四氟乙烯(PFA)、聚酰亚胺(PI)、交联乙烯-四氟乙烯(ETFE)、聚四氟乙烯/聚酰亚胺/聚四氟乙烯(PTFE/PI/PTFE)。

上述材料的性能优缺点及差异性,如表 1 所示。

表 1 绝缘材料的性能优缺点及差异

Table 1 Advantages, disadvantages and difference performance of insulating material

材料类别	比重/ (g · cm ⁻³)	耐温等 级/℃	耐辐 照性	机械 性能	抗水 解性
PTFE	2.17	260	差	一般	良好
FEP	2.15	200	差	良好	良好
PFA	2.15	260	差	良好	良好
PI	1.44	260	差	良好	差
ETFE	1.70	200	优异	优异	良好
PTFE/PI/PTFE	1.78	260	差	优异	一般

从表1可以看出,综合考虑各项性能要求,ETFE绝缘材料成为首选,但其无法满足200℃以上部位的环境要求。为弥补缺陷,可以采用满足最新版AS22759/180~192标准要求的光滑型PTFE/PI/PTFE复合薄膜,经特殊工艺处理,用于绕包成型的成品电线电缆。这样既满足了高温区域使用环境的要求,又解决了PI材料抗水解性能差的问题^[10-12]。

3.3 电线电缆选用方案

(1) 常温区

电线电缆在飞机上应用的常温区,是指最高工作温度在200℃以下的区域,是全机电线电缆应用最为广泛的区域,一般情况下,常温区使用的电线电缆总量占全机用量的70%。包括舱内各系统之间的连接、敷设安装等。

在舰载飞机的常温区,最适宜选用的电线电缆为镀镍铜导体辐照交联ETFE绝缘挤出型产品。考虑到减重的需求,最小线规可以选为AWG24#。AWG24#、22#电线电缆的导体应选择铜合金,以满足机械强度的要求。

选用辐照交联ETFE绝缘挤出型电线电缆,在线束安装时应注意避免产生绝缘层受到锐利刮磨导致的破损现象,原因是ETFE材料的耐电弧击穿性能差,单根线的破损可能会导致线束的整体击穿,从而产生严重的后果。

(2) 高温区

高温区是指最高工作温度在200~260℃的区域,例如APU舱、发动机周边、机翼前缘等。就舰载飞机而言,高温区电线电缆的选择应当综合慎重考虑。首先是导体的选择,260℃的工作环境温度决定了只有镀镍导体能够满足要求,其次考虑机械强度,AWG24#、22#电线电缆的导体应选择铜合金。

高温区电线电缆绝缘层材料的选取比较复杂,首先,从材料的耐温等级考虑,只有PFA、PI、PTFE满足要求,但就舰载飞机的特殊服役环境而言,PI材料耐水解性差的因素决定了其不适用于海洋环境,PFA和PTFE虽然在耐水解性方面具有优势,但二者比重偏大,带来的重量损失也是显而

易见的。因此,PTFE/PI/PTFE复合材料绝缘成为最佳选择,该类材料是以薄膜带的形式绕包导体再经过烧结而制成电线电缆。

PTFE/PI/PTFE复合材料绝缘绕包电线电缆虽然在保证电线电缆同心度、耐电弧击穿性能、动态切割性能等方面具有优异的表现,但是对于海洋环境下服役的舰载飞机而言,其表面的搭盖缝隙亦成为引发腐蚀效应的潜在隐患,因此,在电线电缆的绕包工艺和烧结工艺上要有所改进,保证电线电缆表面光滑无缝,才能满足型号使用的技术环境要求。

(3) 供电系统主馈线

发电机供电用线按照线规区分,为AWG8#及以上大截面电线电缆,最大规格可达AWG0000#。该类电线电缆在飞机上用量不大,但技术要求高。电线电缆截面积增大会给敷设安装带来不便,因此主馈线的选择应考虑电线电缆自身的柔软性。综合耐温等级、腐蚀环境等要求,供电系统主馈线可以选用PFA绝缘挤出型超柔软电线电缆,导体采用镀镍铜。

(4) 其他特种电线电缆

特种电线电缆,是指包括数据总线、同轴电缆、热电偶测温补偿线、耐火焰线以及耐油电线电缆等具有特殊要求的电线电缆。对于此类电线电缆,主要考虑安装部位和相关系统的特殊要求来选择合适的电线电缆产品。对于舰载飞机,建议数据总线选用FC光纤产品,FC技术具备高速率的数据传输特性、高可靠性通信、扩展余度大等特点,可以大幅提高信号传输速率;同轴电缆选用发泡PTFE或FEP绝缘镀银铜导体低损耗稳相产品,对任务电子系统大有裨益。其他特种电线电缆,可以借鉴以往型号的选用经验,选择应用成熟稳定的货架产品^[13-14]。

4 结束语

舰载飞机电线电缆的选用,首先应充分考虑其服役环境可能带来的影响,同时结合载流能力、重量、耐高低温及其他相关的物理机械性能要求,得出最佳选用方案。在此基础上,结合电线电缆在飞机不同安装区域的特殊性,开展相关的系统性能验

证,最终达到预期目标,满足型号的设计技术要求。

参考文献

- [1] The Engineering Society for Advancing Mobility Land Sea Air and Space. SAE-AS50881 Wiring, aerospace vehicle [S]. USA: SAE, 2000.
- [2] The Engineering Society for Advancing Mobility Land Sea Air and Space. SAE-AS22759 Wire, electrical, fluoropolymer-insulated, copper or copper alloy [S]. USA: SAE, 2001.
- [3] 中国人民解放军总装备部. GJB 773A-2000 航空航天用含氟聚合物绝缘电线电缆[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2000.
Chinese PLA General Armament Department. GJB 773A-2000 General specification of fluoropolymer insulated wires and cables for aerospacecraft [S]. Beijing: Chinese PLA General Armament Department, 2000. (in Chinese)
- [4] 汪景璞, 邹元传. 电缆材料[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.
Wang Jingpu, Zou Yuanchuan. Cable material [M]. Beijing: China Machine Press, 1983. (in Chinese)
- [5] 赵翠琴. 交联工艺学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
Zhao Cuiqin. Study on crosslinking technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2001. (in Chinese)
- [6] 韩忠洗. 电缆工艺原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
Han Zhongxi. Cable technological principle [M]. Beijing: China Machine Press, 1991. (in Chinese)
- [7] 《电线电缆手册》编委会. 电线电缆手册: 第1册[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
The Editorial Board of *Wire and Cable Guide*. Wire and cable guide; Vol. 1 [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2008. (in Chinese)
- [8] 王澜, 王佩璋, 陆晓中. 高分子材料[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2009.
Wang Lan, Wang Peizhang, Lu Xiaozhong. Polymer materials [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [9] 顾书英, 任杰. 聚合物基复合材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
Gu Shuying, Ren Jie. Polymer matrix composites [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [10] 李长明. 高分子材料绝缘化学基础[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007.
Li Changming. Chemical basics of polymer insulation materials [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2007. (in Chinese)
- [11] 潘祖仁. 高分子化学[M]. 3版. 北京: 化学工业出版社, 2003.
Pan Zuren. Polymer chemistry [M]. 3rd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [12] 邢萱. 非金属材料学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1994.
Xing Xuan. Non-metallic materials science [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1994. (in Chinese)
- [13] 陈炳炎. 光纤光缆的设计和制造[M]. 2版. 杭州: 浙江大学出版社, 2003.
Chen Bingyan. Design and production of optical fiber cable [M]. 2nd ed. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2003. (in Chinese)
- [14] 胡先志. 光纤与光缆技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
Hu Xianzhi. Fiber optic and fiber cable [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007. (in Chinese)

作者简介:

李绪忠(1969—),男,高级工程师。主要研究方向:高分子材料及航空电线电缆技术。

李素琴(1982—),女,高级工程师。主要研究方向:高分子材料。

(编辑:马文静)