

文章编号:1674-8190(2021)01-079-06

# 民用飞机线缆防火性能适航验证研究

李龙彬<sup>1</sup>, 隋立军<sup>2</sup>

(1. 航空工业第一飞机设计研究院 第十研究所, 西安 710089)

(2. 中国民用航空适航审定中心 西安航空器审定中心, 西安 710065)

**摘要:** 电线电缆作为飞机上重要的材料,其防火阻燃性能的品质影响飞机的安全性。分析适航规章 CCAR-25-R4 在线缆防火性能方面的要求,总结当前国内外航空用标准/规范在电线电缆防火性能方面的规定;针对电线电缆防火性能的适航问题进行研究,给出适航工作的验证思路。对于飞机上使用的线缆,采用国外先进企业内部标准制定线缆的性能指标,能够降低适航验证风险,为线缆的选取和使用提供参考。

**关键词:** 民用飞机;电线电缆;适航;防火

中图分类号: V221+.91; V242

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2021.01.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Study on Wire and Cable's Fire Resistance Airworthiness for Civil Aircraft

LI Longbin<sup>1</sup>, SUI Lijun<sup>2</sup>

(1. No. 10 Research Institute, AVIC The First Aircraft Design Institute, Xi'an 710089, China)

(2. Xi'an Aircraft Certification Center, China Civil Aviation Airworthiness Certification Center, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The wire and cable as the important material of aircraft, its quality of fire resistance performance influences the safety of aircraft. The requirement of wire and cable's fire resistance performance in airworthiness regulation CCAR-25-R4 is analyzed, and the regulations of domestic and overseas aviation standards and specifications in wire and cable's fire resistance performance are summarized. The airworthiness problem of wire and cable's fire resistance performance is studied, and some suggestions of airworthiness work are given. The cable performance index made by foreign advanced inner-enterprise standards can decrease the airworthiness verification risk for cable used in aircraft, and provide the reference for the selection and usage of wire and cable.

**Key words:** civil aircraft; wire and cable; airworthiness; fire resistance

## 0 引言

飞机上发生火灾极易导致灾难事故。对于飞机内部使用的材料,要求火灾发生后能够具有防止火势蔓延的能力,确保一定时间内驾驶员对相关系统、发动机等的控制,同时也要求材料不产生过量

的烟雾、有害气体,防止和减少人员的伤亡。电线电缆在飞机上的用量大,起着连接飞机各大系统的枢纽作用,因此其防火的性能要求是选用时考虑的重要指标。国内对阻燃防火线缆的研究多集中在国内外公开标准的比对<sup>[1-4]</sup>,具体试验方法的研究<sup>[4-7]</sup>,飞机使用材料整体的适航符合性探讨<sup>[8-9]</sup>,也给出了当前线缆环保的发展趋势<sup>[10-12]</sup>,但对飞

收稿日期:2020-03-11; 修回日期:2020-04-24

通信作者:李龙彬,43673191@qq.com

引用格式:李龙彬,隋立军. 民用飞机线缆防火性能适航验证研究[J]. 航空工程进展, 2021, 12(1): 79-84.

LI Longbin, SUI Lijun. Study on wire and cable's fire resistance airworthiness for civil aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(1): 79-84. (in Chinese)

机上选用何种线缆能满足适航规章的要求,及满足适航要求的试验方法的选用很少有系统性的研究。

本文从研究适航规章对电线电缆防火性能的要求开始,分析线缆标准对其防火性能的要求以及线缆防火阻燃试验标准方法,探讨线缆的适航符合性验证途径,总结航空线缆防火适航验证的思路。

## 1 适航规章对电线电缆防火性能要求分析

对于民用运输类飞机,在适航规章 CCAR-25-R4<sup>[13]</sup>中,与舱内材料防火性能要求直接相关的条款是 CCAR25.853、855、856,分别针对座舱内部设施、货仓和行李舱、隔热/隔音材料。CCAR25.856 针对隔热/隔音材料,不涉及电线电缆。

在 CCAR25.853 中,条款(a)要求:舱内材料(包括用于材料的涂层或饰面)必须满足本部附录 F 第 I 部分规定的适用试验准则或其他经批准的等效试验方法,无论飞机的客座量为多少<sup>[13]</sup>。

在 CCAR25.855 中,条款(c)要求:C 级货舱的天花板和侧壁的衬垫必须满足本部附录 F 第 III 部分规定的试验或其他经批准的等效试验方法的要求;条款(d)要求:构成货舱或行李舱的所有其他材料必须满足本部附录 F 第 I 部分或其他经批准的等效试验方法规定的适用试验准则<sup>[13]</sup>。

根据 CCAR25.853、855 条款的指向,在附录 F 第 I 部分(a)材料试验准则的第(3)条中,可找到线缆进行放置角度为 60°燃烧的相关要求,即:电器系统部件,装于机身任何区域的电线或电缆的绝缘层,在按本附录第 I 部分规定进行 60°试验时,必须是自熄的<sup>[13]</sup>;平均烧焦长度不得超过 76 mm,移开火源后的平均燃烧时间不得超过 30 s,试样的滴落物在跌落后继续燃烧的时间平均不得超过 3 s<sup>[13]</sup>。

从上述条款看出,由于电线电缆一般位于内饰与结构之间或结构空间内部,如果按照狭义理解,电线电缆容易被排除在 CCAR25.853、855 条款涉及的材料之外,按照条款 CCAR25.853、855 的指向,也不能直接判断出电线电缆是否需要强制进行指定项目的验证试验。

适航条款 CCAR25.1713、CCAR25.831,分别针对飞机的电气互联系统(EWIS)防火以及飞机

的通风。EWIS 系统是飞机上任何部位的用于在两个或多个端点之间传输电能(包括数据和信号)的任何导线、布线装置或其组合<sup>[13-14]</sup>。在 CCAR25.1713 中,要求 EWIS 系统:

(a) 所有 EWIS 部件必须符合 CCAR25.831(c)适用的防烟防火要求<sup>[13]</sup>。

(b) 位于指定火区和应急程序使用的 EWIS 部件必须是耐火的<sup>[13]</sup>。

(c) 安装于飞机任何区域的电气导线和电缆的绝缘,以及对导线和电缆提供额外保护的材料<sup>[13]</sup>。按本部附录 F 第 I 部分的适用部分进行测试,必须是自熄的<sup>[13]</sup>。

在 CCAR25.831 中,条款(c)要求:必须有措施保证,在通风、加温、增压或其他系统和设备出现有合理可能的故障或功能失常后,仍能满足本条款(b)的规定<sup>[13]</sup>,即要求机组或旅客舱的空气不得含有达到有害或危险浓度的气体或蒸汽,一氧化碳在空气中的浓度不超过 1/20 000(认为是危险的)<sup>[13]</sup>,必须表明飞行期间通常有旅客或者机组乘坐的舱内二氧化碳的浓度不得超过 0.5%。

综上,条款 CCAR25.1713、CCAR25.831(c)的结合,更加清晰地指出了电线电缆要进行放置角度为 60°燃烧试验的要求,以及在飞机系统级层面的防烟防火、有害气体等的要求。对于防烟防火、耐火、有害气体在系统级层面给出的结果性需求,在进行飞机设计时,需要进行需求指标的逐级分解,以保证线缆最终满足规章的要求。在电线电缆防火性能要求方面,CCAR25.1713、CCAR25.831 的结合比 CCAR25.853、CCAR25.855 条款更直接明确。

## 2 电线电缆标准要求分析

### 2.1 国外电线电缆标准现状及发展趋势

经过多年的发展,国际上已形成了一系列的电线电缆规范、试验方法、标准等,形成了完备的体系,主要分欧洲标准系列(IEC、ISO、BS、DIN 等)和美国标准系列(UL、ASTM、AEIC、SAE 等),欧洲国家内部的标准 BS、DIN 要求一般高于 IEC 的要求<sup>[1-2]</sup>。在防火阻燃电线电缆或材料的试验标准方面,这两个系列标准最大的区别是对成束线缆的垂直燃烧的要求<sup>[3]</sup>。对于任何线缆,其面向对象广

泛的产品标准规范中对验证项目和指标的要求,一般是最低要求,通常都必须满足。国外对线缆实行认证制度,一种是对企业的生产进行评估认证,一种是对线缆产品进行认证。认证可提高产品的市场竞争力,当前国际电线电缆行业竞争激烈,因此企业内部标准要求多高于国际通用标准<sup>[2-4]</sup>。目前国际上电线电缆绝缘材料正在向耐温、耐介质、耐湿热环境、阻燃、低烟无毒、不含有害重金属、可回收性等方面发展<sup>[4,11-12]</sup>。飞机使用环境特殊,对线缆有着特殊的要求,如重量轻、可靠性高、相对较高的耐温等。飞机线缆主要是铜及铜合金导体,由于减重的需要,出现了铝及铝合金导体,线缆外部绝缘材料有聚四氟乙烯、聚酰亚胺、乙烯-四氟乙烯共聚体、辐照交联乙烯-聚四氟乙烯共聚体以及聚四氟乙烯/聚酰亚胺复合体等<sup>[15]</sup>。可以看出,飞机上线缆还在大量使用含卤素的绝缘材料,并没有及时采用最新的技术,后续发展需要进行产品技术更替。针对飞机相关线缆规范,当前国际上比较重要的有 ANSI/NEMA WC 27500《航空和工业电缆》系列<sup>[16]</sup>,SAE-AS-22759《铜及铜合金线芯氟聚合物绝缘电线》系列<sup>[17]</sup>。在 NEMA WC 27500 规范中除了规定与功能和环境相关的性能指标外,在防火性能方面规定了可燃性指标;在 SAE-AS-22759 中,还增加了冒烟指标;SAE-AS-4373-2012《绝缘电线测试方法》<sup>[18]</sup>中,给出了航空航天上使用线缆的试验方法。

## 2.2 国内电线电缆防火性能标准现状

国内线缆标准采取跟随和借鉴国外标准的方式制定,国标 GB/T 19666《阻燃和耐火电线电缆》<sup>[19]</sup>发布于 2005 年,其制定时等效采用了 IEC 标准要求。对于飞机上要求的阻燃防火电线电缆,国标没有强制认证的要求和规定,即对标式结构、电性能、机械性能、阻燃性能等的试验认证<sup>[4,20]</sup>,相关标准出现在国军标(GJB)、行业标准(HB)中,如表 1 所示。在 GJB 773B-2015<sup>[21]</sup>中,对燃烧性、冒烟、燃烧烟密度、燃烧有害气体释放、毒性给出了要求,GJB 76.X<sup>[22]</sup>、GJB 77.X<sup>[23]</sup>对燃烧性能进行了规定,HB 7274、HB 7275 和 HB 6215 对阻燃性和冒烟特性进行了规定<sup>[24-26]</sup>。上述 GJB 和 HB 中要求的耐火和防火性能测试方法为 GJB 17.X<sup>[27]</sup>给出的试验方法,GJB 17.X 于 1984 年发布,其编制主要参考了美国标准 Mil-W-5086C、Mil-W-22759D、Mil-W-81381A、ISO R 1220-1970 和 ISO R 1491-1970 等,这些标准分别发表于 1983 年、1973 年、1967 年、1970 年和 1970 年,目前已被替代废止并且新标准多次升版,因此国内标准急需更新。HB 发布了部分最新的耐火和防火试验方法,例如 HB 5469<sup>[28]</sup>、HB 6577<sup>[29]</sup>、HB 7066<sup>[30]</sup>。其中 HB 5469-1991 中 60°燃烧试验示意图有误,在 HB 5469-2014 中得到了更正。

表 1 国内飞机用电缆相关标准

Table 1 Relevant standards of national aircraft cable

标准编号	标准名称	最新版发布年份	分类
GJB 773B	航空航天用含氟聚合物绝缘电线电缆通用规范	2015	
GJB 76.X	航空用聚酰亚胺薄膜绝缘电线电缆(系列标准,X=1~5)	1985	
GJB 77.X	航空用聚氯乙烯绝缘尼龙护套电线电缆(系列标准,X=1~7)	1985	
HB 7274	航空用镀锡铜导体辐照交联乙烯-四氟乙烯共聚物绝缘电线	1996	材料规范
HB 7275	航空用镀银铜导体辐照交联乙烯-四氟乙烯共聚物绝缘电线	1996	
HB 6215	航空用聚四氟乙烯/玻璃丝组合绝缘电线	1989	
HB 6150	航空用聚四氟乙烯绝缘电线	1988	
HB 5963	航空用镀锡铜芯 105℃聚氯乙烯绝缘尼龙护套电线	1986	
GJB 17.X	航空电线电缆试验方法(系列标准,X=1~21)	1984	
HB 5469	民用飞机机舱内部非金属材料燃烧试验方法	2014	试验方法
HB 6577	民用飞机机舱内部非金属材料烟密度试验方法	2014	
HB 7066	民机机舱内部非金属材料燃烧产生毒性气体的测定方法	1994	

对国外航空相关线缆标准<sup>[16-17,31]</sup>分析可以看出:在防火方面,标准中一般会对电线电缆燃烧性、

冒烟指标给出要求<sup>[16-17,31]</sup>,但对于线缆燃烧释放的气体毒性方面,没有给出要求,当前对线缆的环境友

好性要求不断在加强<sup>[11-12]</sup>。这些公开的标准规范给出的是最低要求,企业内部产品规范中,技术要求则高于规范要求。这些国外线缆标准中全部指标要求的提出,应是考虑了飞机系统对其的需求,是在经过了大量试验后确定的,否则适航验证就会存在风险,电线电缆不能装机使用。通过国外民用飞机使用经验来看,其使用的产品,性能并没有出现不满足适航规章要求的情况。

也可看出:国内目前 HB 中电线电缆标准编制于 20 多年前,版本较旧,对低烟无毒、不含有害重金属、可回收性等国际上具有发展趋势的技术要求都没有纳入。部分 GJB 的技术要求相对较新,但整体配套的试验方法较老。在进行烟密度试验时,GJB 773B、HB 6577-1992、SAE-AS-4373 只要求了有焰燃烧试验,而 ASTM E662 要求包含有焰和无焰试验<sup>[26]</sup>。有研究报告指出,材料的阻燃性合格,烟密度性能不一定合格<sup>[7]</sup>,其热释放率也不一定合格<sup>[8]</sup>。综上,对于国内民用飞机来说,目前国内标准使用起来不配套、不协调。在产品标准方面,建议参照国外先进企业内部标准来制定选用线缆的性能指标;在试验方面,建议选用国外最新满足适航要求的试验方法来进行产品的适航符合性验证,如 SAE-AS-4373-2012 标准给出的试验方法;在工程应用方面,在验证试验规划充分,可后续化解风险的条件下,按照产品标准的约定方法执行。

### 3 电线电缆适航符合性验证思路

适航规章 CCAR-25 的 603 条款从宏观层面对材料的使用提出了要求,规章通过 603 条款来对民用飞机上使用的材料进行管控,通过 613 条款对材料的强度性能数据和设计值指标的制定给出具体要求,电线电缆作为飞机上使用的一种重要材料,必须满足这两个条款的要求,其中 613 条款虽然在文字上是针对材料强度指标确定和使用提出的要求,但对于线缆的其他性能指标,体现的理念可作为确定数值时的指导。在实际工程中,需要 603、613 条款与其他应用指标相关的条款结合,如防火相关条款 1713 与 831(c),表明材料在飞机上使用是安全的。

603 条款要求材料的适用性和耐久性:(a) 建立在经验或试验的基础上;(b) 符合经批准的标准(如工业或军用标准,或技术标准规定),保证这些材料具有设计资料中采用的强度和其他性能;(c)

考虑服役中预期的环境条件,如温度和湿度的影响<sup>[13]</sup>。

在 603 条款中,(b) 条是核心,要求使用的材料应符合某种材料规范/标准,材料规范应具备保证材料具有约定的强度和其他性能的功能。

613 条款除对具体的材料强度性能和设计值指标提出要求,还要求材料的强度性能必须以足够的材料试验为依据,在试验统计的基础上制定设计值<sup>[13]</sup>,并对特殊条件下材料值的使用给出了要求。

在工程实践中,包括飞机上使用的线缆材料,按照 603、613 条款的要求,表明满足条款的符合性验证过程一般有两个层次,第一个层次是材料规范中性能指标的制定满足条款的要求,第二个层次是型号中使用的材料满足材料规范中给出的性能指标的要求。没有使用经验和数据累积,则必须进行第一层次和第二层次符合性验证过程;有使用经验和数据累积,则进行第二层次的验证。

根据国内当前现状,在工作中,要使线缆满足适航条款中对防火性能的要求,满足规章对线缆材料性能的要求,建议借鉴国外先进企业满足适航要求的产品性能指标,定义国内飞机上使用电线电缆产品的性能要求;在有效举证的情况下,不进行第一层次的验证,只进行第二层次的验证过程,这是一种有效的工作方法。在验证过程中,试验大纲要得到局方的批准,试验过程要接受局方的监控,试验报告要得到局方的批准。材料在已经取证并在飞机上成功运行的使用经历,材料在相似型号上的服役经验数据或材料在相似型号上的试验数据,可以作为材料的使用经验。材料的数据累积要得到申请人和局方的认可,或者由局方充分信任的行业协会把关<sup>[32]</sup>。

### 4 结 论

(1) 适航条款 CCAR25. 1713、CCAR25. 831(c)和附录 F 的结合,明确地给出了电线电缆阻燃防火方面的适航要求。

(2) 飞机线缆的国内标准与其试验方法标准不配套、不协调。

(3) 对于飞机上使用线缆,采用国外先进企业内部标准来制定线缆的性能指标,能降低适航验证风险。适航规章中对于电线电缆防火性能的要求是最基本的,目前行业先进的线缆公开标准中规定



的耐火和防火性能都是最低要求。

(4) 对于飞机线缆,可按产品标准约定的试验方法进行符合性验证,但推荐选用国外最新满足适航要求的试验方法/标准来进行产品的适航符合性验证,有利于选取合适环保的材料。

### 参考文献

- [1] 戴继勇,张文秋,李婷婷,等. 电线电缆国内外标准对比[J]. 品牌与标准化, 2011(16): 16-17.  
DAI Jiyong, ZHANG Wenqiu, LI Tingting, et al. Comparison of domestic and foreign standards for wires and cables[J]. Brand and Standardization, 2011(16): 16-17. (in Chinese)
- [2] 郑荔丹. 阻燃耐火电缆国内外标准对比[J]. 科技展望, 2015(20): 113.  
ZHENG Lidan. Comparison of domestic and foreign standards for flame retardant and fire-resistant cables[J]. Technology Outlook, 2015(20): 113. (in Chinese)
- [3] 张初阳. 浅谈国外线缆标准的收集和研究[J]. 中国标准化, 2001, 1(2): 49-50.  
ZHANG Chunyang. Discussion on the collection and research of foreign cable standards[J]. China Standardization, 2001, 1(2): 49-50. (in Chinese)
- [4] 包光宏,胡林明,冯军. 电缆燃烧性能分级差异及方法标准溯源分析[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(5): 692-695.  
BAO Guanghong, HU Linming, FENG Jun. Tracing on test standards and differences of classification for burning behavior of cables[J]. Fire Science and Technology, 2019, 38(5): 692-695. (in Chinese)
- [5] 曾铭衡,黄煜华,雷军. 航空电线电缆烟密度试验方法研究[J]. 飞机设计, 2018, 38(6): 66-70.  
ZENG Mingheng, HUANG Yuhua, LEI Jun. Research on the test method for smoke density of wires and cables for aircraft[J]. Aircraft Design, 2018, 38(6): 66-70. (in Chinese)
- [6] 韩松兴. 舱内材料的热释放速率试验[J]. 民用飞机设计与研究, 2006(3): 28-37.  
HAN Songxing. Heat release rate test of cabin materials[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2006(3): 28-37. (in Chinese)
- [7] 韩松兴. 舱内材料的烟密度试验[J]. 民用飞机设计与研究, 2002(3): 37-42.  
HAN Songxing. Smoke density test of cabin materials[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2002(3): 37-42. (in Chinese)
- [8] 邝丽丽. 运输类飞机舱内材料防火适航要求及符合性验证试验方法[J]. 民用飞机设计与研究, 2018(1): 19-23.  
KUANG Lili. Airworthiness requirements of fire prevention and compliance verification test method for transport airplane interior materials[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2018(1): 19-23. (in Chinese)
- [9] 张旭. 适航防火条款的建立与对比[J]. 消防科学与技术, 2017, 36(9): 1309-1311.  
ZHANG Xu. The establishment and comparison of airworthiness fireproof codes[J]. Fire Science and Technology, 2017, 36(9): 1309-1311. (in Chinese)
- [10] 陈中强. 国外电缆材料的研究及发展的趋势[J]. 电线电缆, 2001(3): 12-13.  
CHEN Zhongqiang. Research and development trend of cable materials abroad[J]. Wire and Cable, 2001(3): 12-13. (in Chinese)
- [11] 侯海良,高海峰. 环保型电线电缆材料的现状及发展思考[J]. 电线电缆, 2006(3): 4-6,11.  
HOU Hailiang, GAO Haifeng. Current situation and development of environmental wire and cable materials[J]. Wire & Cable, 2006(3): 4-6,11. (in Chinese)
- [12] SENER A A, DEMIRHAN E. The investigation of using magnesium hydroxide as a flame retardant in the cable insulation material by cross-linked polyethylene[J]. Materials & Design, 2007, 29(7): 1376-1379.
- [13] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.  
CAAC. Airworthiness standards for transport category airplanes; CCAR-25-R4[S]. Beijing: CAAC, 2011. (in Chinese)
- [14] 徐明. 运输类飞机适航性技术参考手册: VI卷[M]. 北京: 航空工业出版社, 2019.  
XU Ming. Transport aircraft airworthiness technology reference handbook: Vol. VI[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2019. (in Chinese)
- [15] 飞机设计手册编委会. 飞机设计手册: 第三册(下)[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.  
Editorial Board of *Aircraft Design Manual*. Aircraft design manual: Vol. 3 (II) [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2001. (in Chinese)
- [16] National Electrical Manufacturers Association/American National Standards Institute. Standard for aerospace and industrial electric cable: ANSI/NEMA-WC-27500[S]. US: National Electrical Manufacturers Association/American National Standards Institute, 2002.
- [17] SAE. Wire, electric, fluoropolymer-insulated, copper or copper alloy: SAE-AS-22759-2001[S]. US: SAE International, 2001.
- [18] SAE. Test method for insulated electrical wire: SAE-AS-4373-2012[S]. US: SAE International, 2012.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 阻燃和耐火电线电缆通则: GB/T 19666-2005[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2005.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Flame retardant and fire resistant wires and cables: GB/T 19666-2005[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2005. (in Chinese)
- [20] 中国国家认证认可监督管理委员会. 电气电子产品类强制性认证实施规则电线电缆产品: CNCA-01C-002-2018[S]. 北京: 中国国家认证认可监督管理委员会, 2018.

- Certification and Accreditation Administration of the People's Republic of China. Rules for the implementation of compulsory certification of electrical and electronic products-wires and cables; CNCA-01C-002-2018[S]. Beijing: Certification and Accreditation Administration of the People's Republic of China, 2018. (in Chinese)
- [21] 中国人民解放军总装备部. 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: 中国人民解放军总装备部, 2015.  
General Equipment Department of the People's Liberation Army. General specification of fluoropolymer insulated wires and cables for aerospacecraft; GJB 773B-2015[S]. Beijing: General Equipment Department of the People's Liberation Army, 2015. (in Chinese)
- [22] 国防科工委. 铜及铜合金线芯氟聚合物绝缘电线(系列标准, X=1~5): GJB 76.X-1985[S]. 北京: 国防科工委, 1985.  
National Defense Science and Engineering Commission. Polyimide film insulated wires and cables for aerospacecraft Part 1~5; GJB 76.X-1985[S]. Beijing: National Defense Science and Engineering Commission, 1985. (in Chinese)
- [23] 国防科工委. 铜及铜合金线芯氟聚合物绝缘电线(系列标准, X=1~7): GJB 77.X-1985[S]. 北京: 国防科工委, 1985.  
National Defense Science and Engineering Commission. Polyvinyl chloride insulated and nylon jacketed wires and cables for aerospacecraft Part 1~7; GJB 77.X-1985[S]. Beijing: National Defense Science and Engineering Commission, 1985. (in Chinese)
- [24] 中国航空工业总公司. 航空用镀锡铜导体辐照交联乙烯-四氟乙烯共聚物绝缘电线: HB 7274-1996[S]. 北京: 中国航空工业总公司, 1996.  
Aviation Industry Corporation of China. Irradiation crosslinking of ethylene tetrafluoroethylene copolymer insulated wire with tinned copper conductor for aviation; HB 7274-1996[S]. Beijing: Aviation Industry Corporation of China, 1996. (in Chinese)
- [25] 中国航空工业总公司. 航空用镀银铜导体辐照交联乙烯-四氟乙烯共聚物绝缘电线: HB 7275-1996[S]. 北京: 中国航空工业总公司, 1996.  
Aviation Industry Corporation of China. Irradiation crosslinked ethylene tetrafluoroethylene copolymer insulated wire with silver plated copper conductor for Aviation; HB 7275-1996[S]. Beijing: Aviation Industry Corporation of China, 1996. (in Chinese)
- [26] 中华人民共和国航空航天部. 航空用聚四氟乙烯/玻璃丝组合绝缘电线: HB 6215-1989[S]. 北京: 中华人民共和国航空航天部, 1989.  
Ministry of Aeronautics and Space of the People's Republic of China. Polytetrafluoroethylene/glass fiber insulated wire for aviation; HB 6215-1989[S]. Beijing: Ministry of Aeronautics and Space of the People's Republic of China, 1989. (in Chinese)
- [27] 国防科工委. 航空电线电缆试验方法(系列标准 X=1~21): GJB 17.X-1984[S]. 北京: 国防科工委, 1984.  
National Defense Science and Engineering Commission. Test methods for aircraft electric cables and wires Part 1~21; GJB 17.X-1984[S]. Beijing: National Defense Science and Engineering Commission, 1984. (in Chinese)
- [28] 中华人民共和国工业和信息化部. 民用飞机机舱内部非金属材料燃烧试验方法: HB 5469-2014[S]. 北京: 中华人民共和国工业和信息化部, 2014.  
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Burning test method for cabin interior nonmetallic material of civil aircraft; HB 5469-2014[S]. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, 2014. (in Chinese)
- [29] 中华人民共和国工业和信息化部. 民用飞机机舱内部非金属材料烟密度试验方法: HB 6577-2014[S]. 北京: 中华人民共和国工业和信息化部, 2014.  
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Smoke density test method for cabin interior nonmetallic material of civil aircraft; HB 6577-2014[S]. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, 2014. (in Chinese)
- [30] 中国航空工业总公司. 民机机舱内部非金属材料燃烧产生毒性气体的测定方法: HB 7066-1996[S]. 北京: 中国航空工业总公司, 1996.  
China Aviation Industry Corporation. Determination of toxic gases produced by combustion of nonmetallic materials in civil aircraft cabin; HB 7066-1996[S]. Beijing: China Aviation Industry Corporation, 1996. (in Chinese)
- [31] 张佳庆, 范明豪, 杜晓峰. 电线电缆燃烧试验标准溯源与测试体系研究[J]. 绝缘材料, 2015(9): 6-11.  
ZHANG Jiaqing, FAN Minghao, DU Xiaofeng. Tracing and analysis on combustion test standards of electrical wires and cables[J]. Insulating Materials, 2015(9): 6-11. (in Chinese)
- [32] 沈小明, 陈挺, 张迎春. 民用航空材料适航审定[J]. 材料工程, 2017(11): 143-146.  
SHEN Xiaoming, CHEN Ting, ZHANG Yingchun. Airworthiness certification of civil aviation materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2017(11): 143-146. (in Chinese)

#### 作者简介:

李龙彬(1978-),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞机复合材料设计。

隋立军(1986-),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:民用飞机载荷强度适航审定

(编辑:丛艳娟)