

文章编号: 1000-8055(2023)08-1995-06

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20210554

航空燃油闪点对油箱可燃性暴露时间的影响

刘冠男, 冯诗愚, 王立群, 潘江丽, 范菊莉

(南京航空航天大学 航空学院 飞行器环境控制与生命保障工信部重点实验室, 南京 210016)

摘 要: 基于国国民用飞机适航符合性评估需要, 简要总结了 FAA 修订 FAR25.981 适航规章发展变迁, 收集了国内外不同燃油海平面闪点数据, 通过蒙特卡洛可燃性暴露分析程序, 得到了闪点平均值和标准差变化对油箱可燃暴露率的影响。结果表明: 闪点平均温度值越大, 标准差范围越宽, 油箱可燃性暴露率也越大, 在相同条件下, 飞机使用 RP-3 燃油的可燃性暴露率高于 Jet A 燃油, 因此在我国飞机在适航审定过程中应当充分考虑燃油差异对可燃性的影响, 完善适合我国国情的适航审定标准和规范。

关 键 词: 闪点; 可燃性暴露; 飞机油箱; 蒙特卡洛分析; RP-3 燃油

中图分类号: V228; TQ021.4

文献标志码: A

Influence of aviation fuel flash point on fuel tank flammability exposure time

LIU Guannan, FENG Shiyu, WANG Liqun, PAN Jiangli, FAN Juli

(Key Laboratory of Aircraft Environmental Control and Life Support Industry and Information Technology, College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Based on the airworthiness conformity assessment needs of domestic civil aircraft, the development and changes of airworthiness regulations of FAR25.981 revised by FAA were studied, and the fuel flash point temperature ranges at home and abroad were investigated. Through monte Carlo flammability exposure analysis program, the impact of the average flash point and range changes on fuel tank flammability exposure rate was obtained. Results showed that the larger average flash point temperature value indicated the wider standard deviation range, and the larger flammability exposure rate of fuel tank. Under the same conditions, the flammability exposure rate of aircraft using RP-3 fuel was higher than that of Jet A fuel. Therefore, the impact of fuel differences on flammability should be fully considered in the airworthiness certification process of aircraft in China, and the airworthiness application standards and specifications suitable for China's national conditions should be improved.

Keywords: flash point; flammability exposure; aircraft fuel tank; Monte Carlo analysis; RP-3 fuel

飞机油箱燃爆是威胁航空安全的重要原因之一。1959 年至今, 全球共发生 18 起相关事故, 导

致大量人员伤亡^[1]。自 1996 年 TW800 事故以来^[2], 美国联邦航空局(Federal Aviation Administration,

收稿日期: 2021-09-28

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国民用航空局民航联合研究基金(U1933121); 中央高校基本科研业务费专项资金; 江苏高校优势学科建设工程; 南京航空航天大学研究生科研与实践创新计划项目(xcxjh20210108)

作者简介: 刘冠男(1998—), 女, 硕士生, 主要从事油箱惰化性和飞机燃油系统方面的研究。

通信作者: 范菊莉(1981—), 女, 副教授、硕士生导师, 博士, 主要从事飞机燃油系统方面的研究。E-mail: fj@nuaa.edu.cn

引用格式: 刘冠男, 冯诗愚, 王立群, 等. 航空燃油闪点对油箱可燃性暴露时间的影响[J]. 航空动力学报, 2023, 38(8): 1995-2000. LIU Guannan, FENG Shiyu, WANG Liqun, et al. Influence of aviation fuel flash point on fuel tank flammability exposure time[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(8): 1995-2000.

FAA)颁布了一系列修正案、咨询通报及适航条例^[3-6],规定在油箱内必须采取降低可燃蒸汽体积分数的措施,降低飞机燃爆风险^[7]。

FAA 在 25-125 修正案规定了油箱可燃性暴露分析方法(fuel tank flammability assessment method, FTFAM)^[8],该方法基于大量模拟飞行数据,通过蒙特卡洛算法随机抽样计算得到飞机各个航段的可燃性暴露时间,来确定某飞机油箱潜在可燃性。目前,我国对于油箱可燃性评估方法的研究还处于起步阶段,中国民用航空局(Civil Aviation Administration of China, CAAC)所建立的规章与 FAA 基本一致^[9],审定过程中也采用 FAA 的 FTFAM 程序。

油箱可燃性暴露率是适航过程中油箱可燃评估的关键指标,影响其结果的变量很多,如环境温度、航段距离、飞机马赫数等^[10-11],其中包括燃油特性,尤其闪点是最为关键参数之一。FTFAM 程序中的燃油闪点分布规律是 FAA 通过收集全球 200 余种燃油所得。收集的油品以国外飞机普遍采用的 Jet A 为主,而我国和俄罗斯燃油样品较少,这对在欧美飞行为主的机型进行适航审定较为适用。但是,RP-3 燃油的闪点普遍低于 Jet A 燃油^[12],我国自行研制的 ARJ21 和 C919 等飞机还未得到 FAA 适航认证许可,且未来主要市场还在国内,加注的燃油也以 RP-3 为主,理论上在相同条件下会存在更大的燃爆风险,因此直接照搬 FAA 油箱可燃性评估的方法是否合适值得商榷。虽然目前已有一部分型号飞机加装了 FRM 系统,其油箱可燃性主要由油箱上部气相空间氧体积分数大小决定,与燃油类型差异很小,但是仍存在很大一部分飞机未加装 FRM 系统,其燃油类型对油箱可燃性影响较大。

有鉴于此,本文基于国国民用飞机适航认证需要,对可燃性适航规章进行了简要梳理分析,收集了国内外航空燃油闪点分布规律数据,通过 FTFAM 程序计算了燃油闪点变化对油箱可燃性暴露时间的影响。通过本文研究,可为 CAAC 建立适合我国实际国情的油箱可燃性适航审定评估方法提供一定的理论参考。

1 油箱可燃性评估方法及标准

1.1 FAA 油箱可燃性评估适航规章

自 FAA 于 1967 年 5 月颁布了 25-11 号修正案增加了 FAR25.981“油箱温度”的条款以来^[13],

又对其进行了两次修订,如表 1 所示。特别是 25-125 号修正案《运输类飞机油箱可燃性降低》,其在 25-102 号修正案基础上进一步细化了对于可燃性暴露时间的限制要求。规定了油箱的机队平均可燃暴露时间不得超过可燃性暴露评估时间(fluammability exposure evaluation time, FEET)的 3%。对于采用了降低可燃性措施(fluammability reduction method, FRM)的油箱,则不得超过 1.8%^[14-15]。CAAC 于 2016 年 4 月颁布了中华人民共和国交通运输部令,也对油箱可燃性适航要求进行了完善,但基本完全照搬了 FAA 条款和评估方法^[16]。

表 1 FAR25.981 条款的历次修订
Table 1 Previous amendments to FAR25.981

序号	生效日期	条款编号	关注内容
1	1967.06.04	25-11	油箱温度
2	2001.06.06	25-102	油箱点燃预防及初步可燃环境要求
3	2008.09.19	25-125	油箱点燃预防及细化可燃环境要求

1.2 运输类飞机油箱可燃性评估方法

机队平均可燃暴露时间是指一个机型的机队在各个航段距离范围内,按照规定燃油特性以及环境参数条件,油箱上部空间处于可燃状态的时间^[17]。整个飞行评估总时间包括从飞机起飞前准备开始,历经飞行、着陆、所有商载物品卸下以及全体乘客和机组人员离开飞机的全部过程时间的总和^[18],即 FEET。油箱的可燃性暴露时间是运输类飞机油箱可燃性评估的重点,除非是传统非加热铝制机翼油箱可在可燃性评估时采用定性分析方法,其他则必须进行定量分析^[19]。

FTFAM 程序将模拟的每次飞行分为多个时间段,通过确定燃油温度是否落在可燃区间内,然后统计得到本次模拟飞行中的油箱可燃性暴露时间。通过进行大量模拟飞行,计算得到可燃性暴露率^[20-21],其基本计算流程如图 1 所示,图中 t_{amb} 表示环境温度, t_{out} 表示外界空气温度。

由上可燃极限(upper flammability limit, UFL)和下可燃极限(lower flammability limit, LFL)形成的可燃区间与闪点有直接关系,FAA 和 CAAC 均规定燃油的上下可燃极限如下所示:

$$t_{\text{LFL}} = (t_{\text{fp}} - 5.56) - \frac{0.56 \cdot H}{246} \quad (1)$$

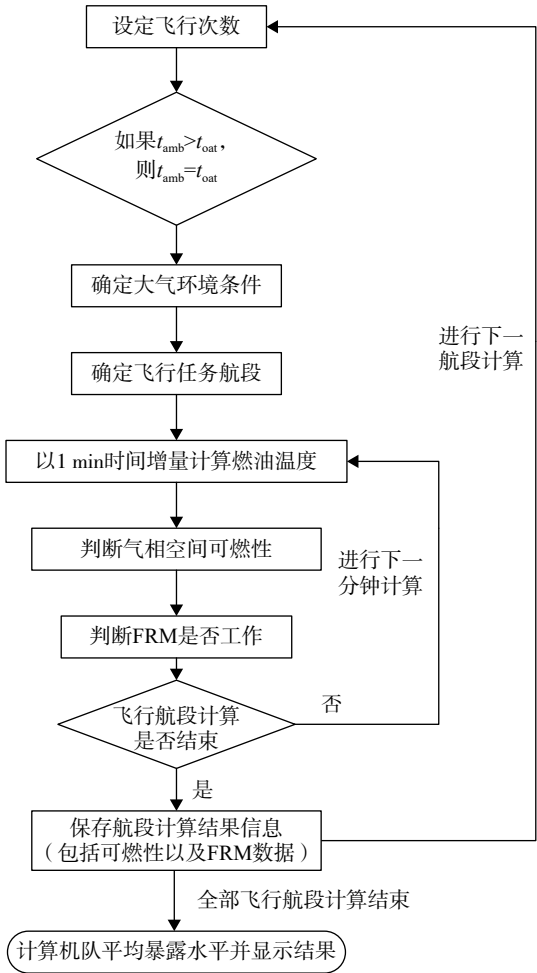


图 1 蒙特卡洛分析程序的计算流程

Fig. 1 Monte Carlo analysis program calculation flow

$$t_{UFL} = (t_{fp} + 35.28) - \frac{0.56 \cdot H}{156} \quad (2)$$

式中 t_{LFL} 为下可燃极限温度, $^{\circ}\text{C}$; t_{UFL} 为上可燃极限温度, $^{\circ}\text{C}$; t_{fp} 为海平面燃油闪点温度, $^{\circ}\text{C}$, FTFAM 程序按照 FAA 颁布的 25 部适航条例中的附录 N 定义闪点按照高斯分布选取, 如表 2 所示^[22-23]; H 是飞行高度, m 。

表 2 环境温度和燃油闪点高斯分布

Table 2 Gaussian distribution of ambient temperature and fuel flash point	
参数	闪点温度/ $^{\circ}\text{C}$
平均温度	48.89(120 $^{\circ}\text{F}$)
正标准差	4.44(8 $^{\circ}\text{F}$)
负标准差	4.44(8 $^{\circ}\text{F}$)

2 国内外燃油闪点分布对比

全球各个国家所使用的燃油不同, 因此包括闪点在内的理化特性也存在较大差异。即使同一

种牌号燃油, 由于生产厂家和开采地点差异也会导致各馏分比例不同, 进而影响闪点高低。因此通常用一个范围区间来表示燃油的闪点, 而不是一个具体的数值。

燃油闪点的高低取决于油品中沸点最低的烃类含量, 北美的燃油馏分相比于欧洲国家的燃油馏分更重, 相对分子量更大, 故此即使在相同的规格要求下, 北美生产的航空燃油往往比欧洲有更高的闪点。我国 RP-3 号航空燃油馏分较轻, 挥发性较强, 因此闪点较欧美国家低。

国内外关于燃油闪点资料非常丰富, 但是相互差异较大。刘济瀛给出的 RP-3 燃油的闪点范围在 40~51 $^{\circ}\text{C}$, RP-5 燃油的闪点范围在 59~69 $^{\circ}\text{C}$ ^[24]; 张洪钧给出 RP-3 燃油的闪点范围为 38~50 $^{\circ}\text{C}$ ^[25]; 张云杰在低气压环境氧体积分数中测试了 RP-3 燃油闪点为 46.1 $^{\circ}\text{C}$, RP-5 燃油闪点为 67 $^{\circ}\text{C}$ ^[26]; 刘宇通过阿贝尔方法对 10 组 RP-3 样品燃油闪点进行了测量, 其平均值为 45 $^{\circ}\text{C}$ ^[27]。

通过寻访厂商以及文献调研, 收集多组国内不同厂家 RP-3 燃油闪点的数据, 经统计得到如图 2 所示的闪点及闪点标准差的分布。燃油闪点平均值在 43~47 $^{\circ}\text{C}$ 的范围内, 由于燃油厂家的不同, 其燃油闪点的范围区间大小不一, 闪点最低为 37 $^{\circ}\text{C}$, 最高为 53 $^{\circ}\text{C}$ 。

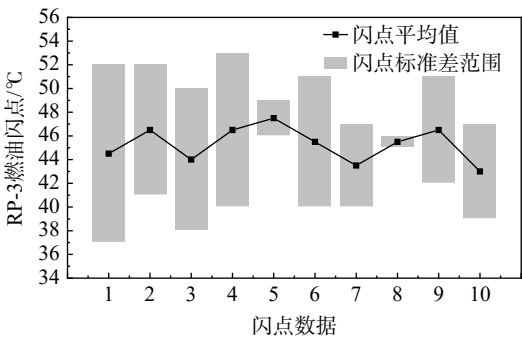


图 2 不同厂家 RP-3 燃油平均闪点及标准差

Fig. 2 Average flash point and standard deviation of RP-3 fuel from different manufacturers

El-Maghraby 按照 ASTM-D-1655 标准测量了 Jet A-1 燃油的闪点^[28]; 国外航空燃油手册中涉及了各个国家的燃油闪点平均值并给出其标准差^[29]。通过搜集国外不同燃油的资料^[30-31], 将不同种类燃油闪点分布绘制在图 3 上。从图中可见, 不同种类航空燃油闪点差异很大, RP-3 燃油闪点平均值与 Jet A 燃油闪点平均值相差约 5 $^{\circ}\text{C}$, 其闪点范围也存在差异。

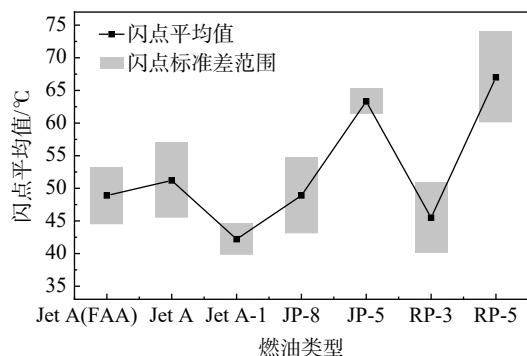


图 3 各国家不同种类燃油平均闪点及标准差

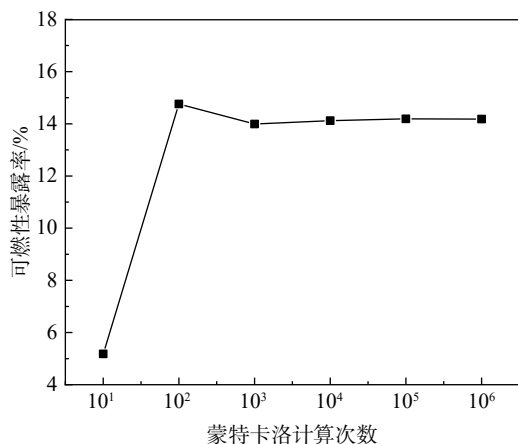
Fig. 3 Average flash point and standard deviation of different fuel in different countries

3 闪点对油箱可燃性暴露率影响

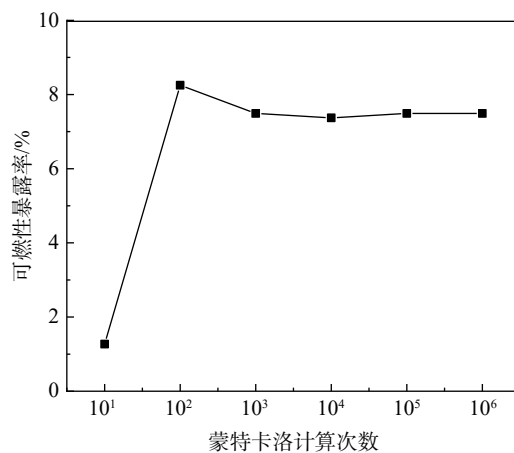
为探究闪点变化对油箱可燃性的影响,通过 FTFAM 程序,输入包括飞行任务数据以及建立飞机油箱热模型提取的平衡温差与时间常数等数据,通常 FAA 按照 25 部附录 N25.4 选择飞行参数,过改变其内部闪点计算表格区域,得到闪点变化对油箱可燃性暴露率影响,具体计算步骤可参考文献 [32]。

3.1 飞行计算次数影响

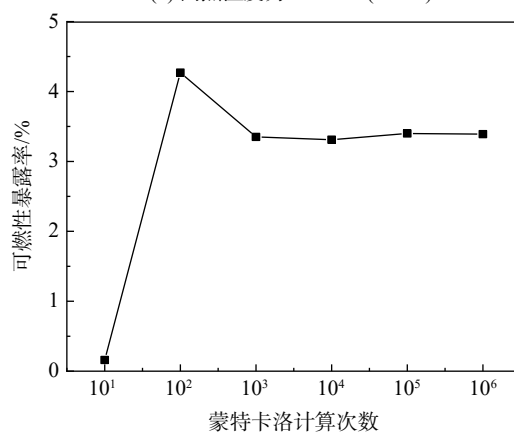
图 4 计算了海平面闪点温度分别为 37.78 °C (100°F)、43.33 °C (110°F)、48.89 °C (120°F)、54.44 °C (130°F) 这 4 种情况下,飞行次数对油箱可燃性暴露率影响。由于蒙特卡洛方法是一个随机计算的过程,理论上模拟的飞行次数越多,计算的油箱可燃性暴露时间就越接近真实值。从图 4 中可见,当飞行次数超过 10^3 次后,可燃性暴露率趋于一致,但是出于准确性的考虑,本文后续没有特别说明,选取的拟飞行次数均为 10^5 。



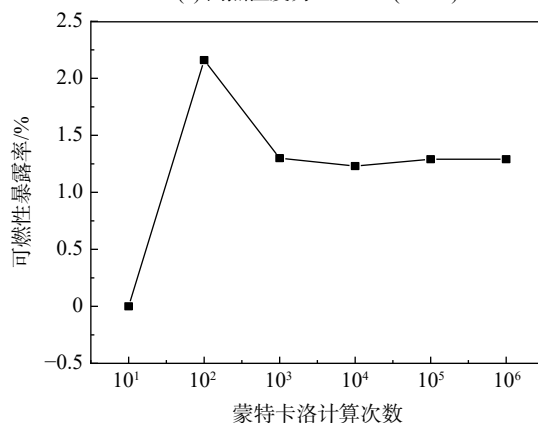
(a) 闪点温度为 37.78 °C (100°F)



(b) 闪点温度为 43.33 °C (110°F)



(c) 闪点温度为 48.89 °C (120°F)



(d) 闪点温度为 54.44 °C (130°F)

图 4 不同闪点不同计算次数对油箱可燃性暴露率的影响

Fig. 4 Influence of different flash points and different calculation times on flammability exposure rate of fuel tank

3.2 燃油闪点的影响

图 5 中给出了拟飞行 10^5 次计算海平面燃油闪点平均值从 35 °C (95°F) 增加至 57.22 °C (135°F) 时对油箱可燃性暴露率影响结果,计算中闪点标准差固定为 4.44 °C (8°F)。从图中可发现,随着燃油闪点平均值增大,由于上下可燃极限增加,

燃油温度在可燃区间中的时间增加, 故油箱可燃性暴露率升高。

图6将闪点平均值固定为48.89℃(120°F), 计算了燃油闪点标准差变化对油箱可燃性暴露率影响。随着标准差从2.78℃(5°F)增加至10℃(18°F)后, 油箱可燃性暴露率也不断增大, 其原因也在于可燃范围随着标准差范围增大而增大。

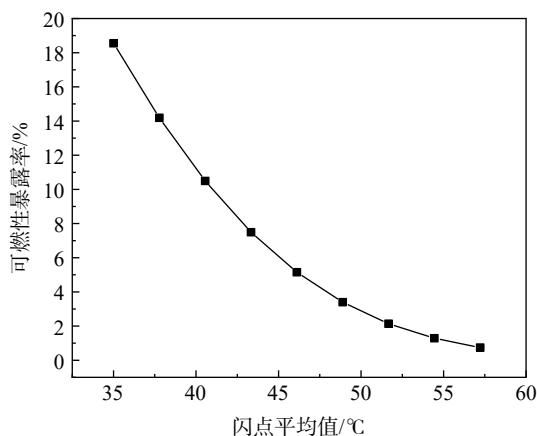


图5 燃油平均闪点变化对油箱可燃性暴露率影响

Fig. 5 Influence of fuel average flash point change on fuel tank flammability exposure rate

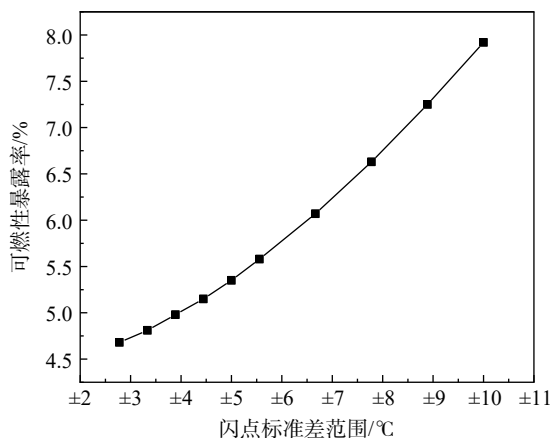


图6 燃油闪点标准差变化对油箱可燃性暴露率影响

Fig. 6 Influence of fuel flash point interval variation on fuel tank flammability exposure rate

采用图3中所收集的几种不同国家的航空燃油平均闪点温度以及标准差, 通过FTFAM程序计算油箱可燃性暴露率, 结果如图7所示。从图中可见, 当Jet A燃油满足低于3%的要求时, RP-3燃油已高达6.03%, 已不满足条款要求。Jet A-1高达8.03%, 其原因在于虽然其标准差范围很小, 但是海平面闪点极低。JP-8是Jet A的军用牌号, 其油箱可燃性暴露率为3.87%略高于Jet A,

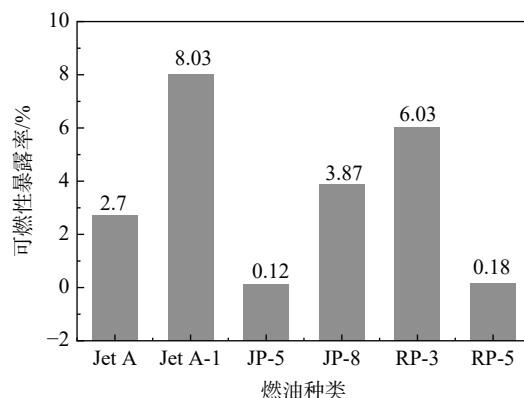


图7 不同燃油类型对油箱可燃性暴露率影响

Fig. 7 Influence of different fuel types on fuel tank flammability exposure rate

JP-5和RP-5燃油均为高闪点燃油, 故可燃性暴露率较低, 分别为0.12%和0.18%, 当然这两种燃油大多用于军用舰载飞机, 无需满足民用机适航条款, 不过可反映闪点对可燃性暴露率的影响。

4 结 论

1) 油箱可燃性暴露率是评估民用飞机燃爆安全性的重要参数, 但是上下可燃极限形成的可燃区间与海平面下燃油的闪点有关。RP-3号航空燃油馏分较轻, 挥发性较强, 故RP-3闪点整体上低于Jet A, 相差约为5℃。因此, 需要考虑燃油闪点差异对可燃性暴露率的影响。

2) 在对某油箱进行蒙特卡洛计算显示, 闪点平均温度值和标准差范围增大, 油箱可燃性暴露率也随之增大, 油箱发生燃爆的几率也增加。因此, 需要评估中要充分考虑闪点的影响。

3) FAA所编制的FTFAM程序中燃油闪点来自于全球收集的200余种油品, 且主要以Jet A燃油为主, 因此闪点高于国内RP-3燃油。我国在适航审定中需结合我国国情, 充分考虑国产油品对可燃性暴露率的影响, 不断完善适航标准, 更加准确、客观、严格地进行适航资格审定。

参考文献:

- [1] 孟昭蓉, 杨春生. 世界航空事故汇编[M]. 北京: 中国民用航空杂志社, 2002.
- [2] WYCZALEK F A. TWA800 fuel tank flammability-an analytical investigation[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1998, 13(1): 16-19.
- [3] Federal Aviation Administration. Transport airplane fuel tank system design review, flammability reduction, and maintenance and inspection requirements: Notice No. 99-18[S]. Washington DC: Federal Register, 1999: 41-44.

- [4] Federal Aviation Administration. Transport airplane fuel tank system design review, flammability I reduction, and maintenance and inspection requirements: Amendment Nos.21-78, 25-102[S]. Washington DC: Federal Register, 2005: 13.
- [5] Federal Aviation Administration. Reduction of fuel tank flammability in transport category airplanes: Notice No.05-14[S]. Washington DC: Federal Register, 2005: 34-36.
- [6] Federal Aviation Administration. Fuel tank flammability reduction means: AC25.981-2A[S]. Washington DC: Federal Register, 2008: 11-12.
- [7] 兰江, 朱磊, 赵竞全. 通用油箱热模型的建模与仿真[J]. 航空动力学报, 2014, 26(7): 124-131.
LAN Jiang, ZHU Lei, ZHAO Jingquan. Modeling and simulation of general fuel tank thermal model[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 26(7): 124-131. (in Chinese)
- [8] Federal Aviation Administration. Reduction of fuel tank system flammability in transport category airplanes: amendment Nos. 25-125[S]. Washington DC: Federal Register, 2008: 5-8.
- [9] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准: CCAR-R4[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011: 11.
- [10] 李杰, 张宇, 刘媛媛. 基于FTFAM的油箱可燃性暴露率影响因素研究[J]. 航空科学技术, 2015, 26(5): 34-38.
LI Jie, ZHANG Yu, LIU Yuanyuan. Study on the factors affecting the fuel tank flammability exposure rate based on FTFAM[J]. *Aeronautical Science and Technology*, 2015, 26(5): 34-38. (in Chinese)
- [11] 付振东. 燃油中溶解氧逸出规律与油箱热模型技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
FU Zhengdong. Study on function of oxygen evolution and fuel tank thermal model technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)
- [12] 冯晨曦. 民机油箱气相空间氧浓度控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
FENG Chenxi. Control technology of oxygen concentration on civil aircraft fuel tank ullage[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)
- [13] Federal Aviation Administration. Aircraft propulsion system design requirements: Amendment Nos.25-11[S]. Washington DC: Federal Register, 1967: 18-20.
- [14] Federal Aviation Administration. Fuel tank flammability reduction means advisory circular: No.25.981-2A[S]. Washington DC: Federal Register, 2008: 12-13.
- [15] Federal Aviation Administration. Familiarization briefing for fuel tank flammability rule: Amendment 25-125[R]. Washington DC: Federal Register, 2008: 4-8.
- [16] Federal Aviation Administration. Fuel tank flammability user manual[R]. DOT/FAAAR-05/8, 2008.
- [17] 刘春阳, 李新, 鲍梦瑶. 民用运输类飞机油箱可燃性要求[J]. 国际航空, 2018(3): 74-76.
LIU Chunyang, LI Xin, BAO Mengyao. Civil transport aircraft fuel tank flammability airworthiness requirement[J]. *International Aviation*, 2018(3): 74-76. (in Chinese)
- [18] 雷延生, 王澍. 基于FAA适航要求的飞机油箱防爆技术研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2011(3): 23-27.
LEI Yansheng, WANG Shu. Research of aircraft fuel tank explosion prevention technique basing on FAA airworthiness requirement[J]. *Civil Aircraft Design and Research*, 2011(3): 23-27. (in Chinese)
- [19] 张瑞华, 刘卫华, 刘春阳, 等. 运输类飞机油箱可燃性适航符合性方法[J]. 航空动力学报, 2020, 35(5): 1099-1108.
ZHANG Ruihua, LIU Weihua, LIU Chunyang, et al. Flammability and airworthiness compliance method of fuel tank for transport aircraft[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2020, 35(5): 1099-1108. (in Chinese)
- [20] 冯诗愚, 刘冠男, 江荣杰, 等. 飞机油箱机载惰化技术研究现状与发展趋势[J]. 航空动力学报, 2021, 36(3): 616-625.
FENG Shiyu, LIU Guannan, JIANG Rongjie, et al. Research status and development trend of aircraft fuel tank on-board inerting technology[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2021, 36(3): 616-625. (in Chinese)
- [21] 魏书有. 飞机油箱可燃性暴露评估研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2013.
WEI Shuyou. Aircraft fuel tank flammability exposure evaluation research[D]. Tianjin: College of Aeronautical Engineering Civil Aviation University of China, 2013. (in Chinese)
- [22] 童升华. 国产燃油理化性能与易燃性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
TONG Shenghua. Research on physicochemical characteristics and flammability of domestic fuels[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)
- [23] 王盛园. 基于国产燃油物理-化学特性的油箱可燃性评估技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
WANG Shengyuan. Theoretical study of fuel tank flammability assessment technology based on physicochemical characteristics of domestic fuels[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [24] 刘济瀛. 中国喷气燃料[M]. 北京: 中国石化出版社, 1991.
- [25] 张洪钧. 改善3号喷气燃料质量的措施[J]. 炼油设计, 1998, 28(3): 19-21.
ZHANG Hongjun. Measures for improving quality of jet fuel RP-3[J]. *Petroleum Refinery Engineering*, 1998, 28(3): 19-21. (in Chinese)
- [26] 张云杰. 低气压环境氧浓度对航空煤油闪点影响的研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2019.
ZHANG Yunjie. Study on the effect of oxygen concentration in pressure environment on flash point of aviation kerosene[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2019. (in Chinese)
- [27] 刘宇. 3号喷气燃料阿贝尔闭口闪点测量不确定度的评定[J]. 辽宁化工, 2019, 48(12): 1223-1225, 1248.
LIU Yu. Evaluation of uncertainty in measurement of abel closed cup flash point of No.3 jet fuel[J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2019, 48(12): 1223-1225, 1248. (in Chinese)
- [28] EL-MAGHRABY R M. A study on bio-diesel and jet fuel blending for the production of renewable aviation fuel[J]. *Materials Science Forum*, 2020, 1008: 231-244.
- [29] Coordinating Research Council Incorporation. Handbook of aviation fuel properties[M]. New York: Society of Automotive Engineers Distributor, 2004.
- [30] VOZKA P, VRTIŠKA D, ŠIMÁČEK P, et al. Impact of alternative fuel blending components on fuel composition and properties in blends with jet A[J]. *Energy and Fuels*, 2019, 33(4): 3275-3289.
- [31] SOCHET I, GILLARD P. Flammability of kerosene in civil and military aviation[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2002, 15(5): 335-345.
- [32] Federal Aviation Administration. Fuel tank flammability assessment method (Monte Carlo model): Version 11[R]. Washington DC: Federal Register, 2008.