

飞机燃油箱机载惰化技术研究现状与发展趋势

冯诗愚¹, 刘冠男¹, 江荣杰¹, 陈广豪², 潘俊²

(1. 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业和信息化部重点实验室, 南京 210016;

2. 中国航空工业集团有限公司 金城南京机电液压工程研究中心

航空机电系统综合航空科技重点实验室, 南京 211106)

摘 要: 为了有效减少飞机燃油箱燃爆风险,以机载惰化技术为重点,介绍了燃油可燃性和氧体积分数指标确定的方法,根据燃爆极限可将民机的安全氧体积分数定为 12%,军机则采用直接用燃烧弹打击油箱测定最大压力的方式将其定为 9%,分析了气体在燃油中平衡和非平衡溶解的差异,并给出了相应的计算方法,对中空纤维膜惰化技术中分离膜特性、惰化气体分配方式及仿真方法进行了介绍,分析了机载惰化技术未来的发展趋势。结果表明:目前国内机载惰化技术已经成为主流的惰化技术,但针对国产燃油可燃性的研究十分匮乏,未来可以对此展开进一步研究,并且可对冷却惰化、绿色惰化和吸附惰化等技术加大研究力度,有望拥有自主的知识产权。

关 键 词: 惰化; 可燃性; 中空纤维膜; 燃爆极限; 飞机燃油箱

中图分类号: V228; TQ021.4 **文献标志码:** A

Research status and development trend of aircraft fuel tank on-board inerting technology

FENG Shiyu¹, LIU Guannan¹, JIANG Rongjie¹,
CHEN Guanghao², PAN Jun²

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

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Aero Electromechanical System Integration, Jincheng Nanjing Engineering Institute of Aircraft Systems, Aviation Industry Corporation of China Limited, Nanjing 211106, China)

Abstract: In order to effectively reduce the risk of fuel tank explosion, the method of fuel flammability and oxygen concentration index focusing on the technology of the on-board inerting was introduced. According to the fuel explosion limit, the safe oxygen concentration of civil aircraft can be set as 12%, and that of military aircraft set as 9% by directly striking the fuel tank with the fire bomb to determine the maximum pressure. It analyzed the differ-

收稿日期: 2020-05-02

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; 江苏省科研与实践创新计划(KYCX19_0198); 江苏高校优势学科建设工程

作者简介: 冯诗愚(1974—), 男, 副教授、硕士生导师, 博士, 主要从事油箱惰化性和飞机燃油系统方面的研究。

引用格式: 冯诗愚, 刘冠男, 江荣杰, 等. 飞机燃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.

ence between equilibrium and non-equilibrium dissolution of gas in fuel oil and introduced the characteristics of separation membrane, the distribution of inerting gas and the simulation method. The development trend of on-board inerting technology in the future was analyzed. The results showed that: domestic inerting technology has become the mainstream inerting technology, but there is a lack of research on the flammability of domestic fuel, which can be further studied in the future. In addition, research on cooling inerting, green inerting, adsorption inerting and other technologies can be intensified, and it's expected to have our own intellectual property rights.

Key words: inerting; flammability; hollow-fiber membrane; flammable limit; aircraft fuel tank

在越南战争中,由于受到地面火力攻击造成油箱失火导致的飞机损失比例高达 50%。北约在对 1141 次与失火有关的飞机事故调查中发现,主要原因就是由飞行或坠毁后燃油箱爆炸所引起^[1]。在加油和维护期间,也可能会引起油箱燃烧和爆炸。因此 20 世纪 50、60 年代开始,美国军机就开始采用油箱防火抑爆技术,防止炮火、子弹引起油箱爆炸而造成二次损伤^[2]。1996 年, TWA800 航班在爬升过程中中央翼油箱在点火源作用下产生爆炸,全机无人幸免,事故发生后,国外开始关注民用飞机燃油箱安全问题^[3]。1999 年,美国联邦航空管理局(FAA, Federal Aviation Administration)对 60 年代以来由于燃油箱燃爆引起的事故的 13 架飞机进行了统计,结果显示油箱爆炸而造成毁坏或坠毁事故达到 18 架次,共有 542 人死亡^[4]。

通过机载惰化技术制取惰化气体来保护油箱这一方法发展十分迅速,美国军方通过长期研究表明,与直接携带惰化气体的传统方法相比,虽然机载惰化技术难度大,但是对后勤保障要求很低,而且可以保证整个飞行过程中油箱上部气相空间氧体积分数始终低于支持燃烧的极限值。FAA 大量的论证和实验也表明机载惰化技术性能优异且安全稳定,故此,机载惰化成为了目前最为经济有效的燃油箱防火抑爆技术。

总体而言,国内机载惰化技术还处于起步阶段,仍面临着诸多问题,因此本文从航空角度来总结机载惰化技术的研究现状并对未来的发展趋势进行分析。

1 惰化技术分类及特点

大量研究表明:控制火焰传递和改变燃爆极限的飞机燃油箱防火抑爆技术是最为有效的方法,该技术按原理不同可分为两大类。一类是被

动式,通过在油箱内填充网状泡沫和网状金属丝防爆材料对燃烧或爆炸后的火焰传递进行抑制,目的在于减少燃烧或爆炸后的损失^[5-6]。另一类是主动式,即飞机燃油箱惰化技术,通过向油箱中注入惰化气体来主动控制并保持油箱上部空间的氧体积分数,而达到防火防爆目的,常用的惰化气体主要是 N₂、CO₂ 和哈龙 1301 等 3 种^[7]。

惰化气体的来源又可分为采用容器携带和机载设备制取两大类。前者通过携带充注了液氮/气氮/哈龙 1301 的贮存罐,油箱需要惰化时,控制系统打开惰化气体流量控制器,惰化气体流向油箱,以保证飞机油箱安全。该方法已在 DC-9、F-16、F-22 等多种飞机上得到了使用^[8-9]。携带惰化气体的方式虽可满足油箱对惰气瞬时大流量需求,但缺点在于设备重量大,并且需一套复杂的后勤保障系统,全寿命周期中经济性差且效率低,特别是携带的惰化气体有限,很难做到全程惰化保护,而且对于哈龙 1301 而言,其是一种碳氟化合物,对地球臭氧层较大的破坏力,目前被禁止使用^[10]。

按制取惰化气体方法不同,机载惰化大致可分为以下几种:①燃油催化惰化技术:通过催化燃烧燃油,混合物在燃烧室进行催化反应生成 CO₂ 和 H₂O,分离 H₂O 后,用 CO₂ 作为惰化气体,美国从 1969 年开始在 C-141 和 B-1 等机型上展开了预演型研究,前苏联也进行了相关研究,但是由于该技术中反应温度过高,易于产生有毒的 CO 和 NO_x 气体,现在除伊尔 76/78 运输机外,并无其他机型应用的报道^[11];②分子筛式机载制氮惰化系统:其源于机载制氧系统,使用两个合成沸石材料床,每个床连续地暴露于高低压,在处于高压空气下时,优先地吸收氧气,而暴露于低压时氧气放出,排放到机外。分子筛式机载制氮惰化系统于 1981 年成功装备在阿帕奇 AH-64 武装直升

机上,后来在 C-17、MH-60K、AH-1W、UH-1N 等飞机上也进行了装备。但是该技术对发动机引气量要求很高,且环境温度和介质温度对分子筛组件性能影响较大,工作可靠性降低^[12-13];③中空纤维膜式惰化系统:核心理念是膜空气分离技术,将引入的气体进行限流、降温、除杂等预先处理,再经过中空纤维膜空气分离装置将氮气分离提取出来,形成适合油箱惰化的富氮气体,最后经过分配系统将富氮气体输送到规定的油箱气相空间内。中空纤维膜式惰化系统优点与分子筛式类似,能全包线地实现油箱惰化,但其不仅单位体积渗透面积大,且原料气走丝内,分离器外壳无需承压,同时不需进行阀门切换,可连续产生富氮气体,体积紧凑,更适合用于飞机。目前国外已经有大量的军机和民机采用此类惰化装置,例如 F-22、F-35、波音 737、波音 747 和空客 A320 等^[14-15]。

中空纤维膜惰化技术从 20 世纪 70 年代逐渐展开,80 年代后应用于军机,而 90 年代后在民机上使用就十分成熟,但是国内无论从理论还是实践均远远落后。目前可见的理论研究报道始于 2004 年,从 2009 年后逐渐活跃,研究主要以南京航空航天大学为主,集中在惰气在油箱中的分配技术及分离膜性能的预测等方面。在实践方面,国内航空主机所、南京机电液压工程研究中心、江淮航空仪表厂、新乡航空工业有限公司都有一定的技术积累,且各有侧重,例如中航工业第一飞机设计研究院、中国商用飞机有限责任公司、南京机电液压工程研究中心重于系统集成,特别是中航工业第一飞机设计研究院和中国商用飞机有限责任公司均有型号应用经验。江淮航空仪表厂为中空分离膜装置的供应商,新乡航空工业有限公司为引气处理系统的供应商。

2 燃油的可燃性和气体溶解特性

2.1 燃油燃爆极限和安全氧体积分数

燃油与氧化物的混合物在点火源的作用下,产生自持的燃烧或爆炸行为称为可燃性。燃油可燃极限受到多种因素影响,如闪点、组成成分、气体溶解度、密度、自燃温度等,因此不同学者对可燃极限的定义也不尽相同。Bartknecht 和 Di Piazza 等将可燃混合物刚好可以点火的体积分数定义为可燃极限^[16-17],而 Zabetakis 和 Lees 等则曾将火焰离开点火源,并蔓延到整个混合物中时的体积分数称之为可燃极限^[18-19]。

在燃油蒸汽、氧气与惰气组成的混合体系中,了解其可燃特性,得到相应的指标是设计惰化系统的基础。爆炸三角形是最为常用的可燃性分析方法。如图 1 所示,爆炸三角形顶点是单一纯组分,而每条边是两种组分,内部是 3 种组分组成的混合体系,可燃与不可燃性行为之间的边界称为燃爆极限, U 和 L 是燃油蒸汽在纯氧中的上下可燃燃爆极限,当向其中加入惰气,降低氧体积分数后,上下燃爆极限差异会减少,如 u 和 l 是燃油蒸汽在空气中的上下燃爆极限,如果进一步减少氧体积分数至一定值后,上下燃爆极限会汇聚于一个点,该点对应的氧体积分数是支持燃烧的最小氧体积分数(MOC, minimum oxygen concentration),也称为极限氧体积分数(LOC, limiting oxygen concentration)。三角形 UEL 内的区域处于可燃状态,只要有相应的点火源,则混合体系则会燃烧^[20]。

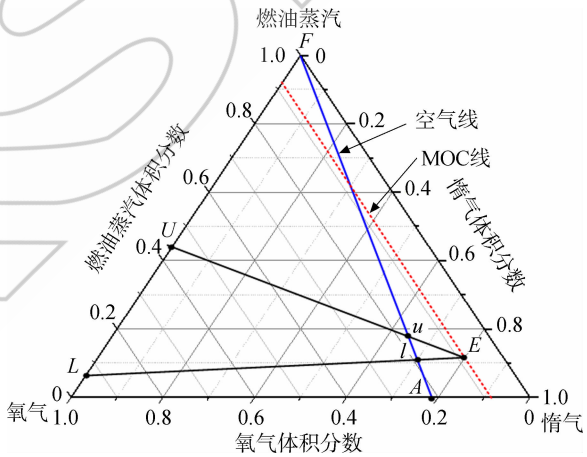


图 1 飞机燃油箱起火三角形
Fig.1 Ignition triangle of aircraft fuel tank

飞机燃油箱不进行惰化也可能处于可燃状态,从图 1 可见,A 点氧体积分数为 21%,则 FA 线为空气线,其上任意一点的氧氮比例为 21 : 79,燃油蒸汽的体积分数与燃油的饱和蒸汽压相关,如果忽略燃油中溶解的气体量,则燃油蒸汽分压与饱和蒸汽压相同,显然当燃油温度越高,蒸汽压越大,则混合体系所处的点沿 FA 线向 F 点移动,而燃油温度越低,则向 A 点移动,而飞机高度越高,总压越低,氧氮分压也越低,而在相同温度下,燃油蒸汽压不变,故此燃油蒸汽体积分数增加,即所处状态向 F 点移动,反之则向 A 点移动。为了更加直观反映未惰化时的可燃状态,通常采用图 2 所示的可燃包线来更加直观的说明此现

象,从图 2 中可见,可燃区域与燃油温度、高度及点火能量 Q 均相关,燃爆极限也可以用温度来表征^[21]。

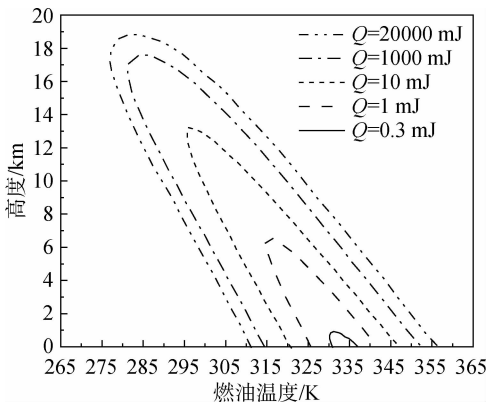


图 2 飞机燃油箱典型可燃极限

Fig. 2 Typical flammability limits for aircraft fuel tank

由于燃油的燃爆极限不是一个固定值,它会随着某些因素的变化而变化,影响燃油燃爆极限的主要因素包括可燃气体与助燃气体的混合比例、气体混合物的初始压力、混合物的初始温度、惰性气体成分与体积分数、贮存容器尺寸形状与材质、点火源能量及时间等等,因此采用实验测量是最准确的方法。国外已经在该领域做了大量的基础性研究,例如在美国航空燃料手册中给出了多种燃油在地面时的体积分数燃爆极限和温度燃爆极限值^[22]。

然而油品的种类繁多,如果所有的燃爆极限均需要实验测定,不仅花费巨大且应用时也十分困难,故此通过燃油的理化特性来预测其燃爆极限就显得十分重要。Shepherd 等建立了 JET-A 燃油闪点与化学组成之间的关系式,其正确性通过了实验的验证^[23];Sochet 等分别使用了气相色谱研究 JP-4 和 JET-A 燃油的成分组成,分析了燃爆极限和成分之间的关系,并将由 FAA 给出的 JET-A 燃油燃爆极限计算方法加以简化,变成与点火能量、闪点、初始压力相关的关系式^[24-25];在美国 NASA(National Aeronautics and Space Administration)刘易斯研究中心(Lewis Research Center)资助下,壳牌发展公司(Shell Development Company)对 JET-A 燃油热力学性质进行了实验测试,并采用多项式拟合,得到了 JET-A 燃油热力性能与温度、压力的关系方程。

随着惰气的进入,气相空间氧体积分数减少,当混合体系处于 MOC 右侧区域时,油箱处于不

可燃状态。了解 MOC 十分重要,适度提高气相空间氧体积分数的控制值可显著降低整个惰化系统重量、减少发动机引气量及代偿损失;当 MOC 由 9% 提高到 10% 时,惰化系统总重量可以降低约 5%,发动机引气量减少约 7%。基于燃爆极限的研究结果,FAA 研究显示,在海平面至 3 048 m 高度范围下的 JET-A 油箱,其 MOC 为 12%,当飞行高度增加至 12 192 m 后,MOC 线性增加至 14.5%。

军用飞机与民用飞机在防火抑爆方面最大的区别在于,军用飞机燃油箱可能遭受炮火直接打击,因此点火源能量远大于民机常见的闪电和静电等。美国军方采用 23 mm 高爆燃烧弹直接打击燃油箱来测量 MOC 和燃爆后的最大压力,如图 3 所示,当气相空间氧体积分数低于 9% 后油箱可处于惰化状态^[26]。

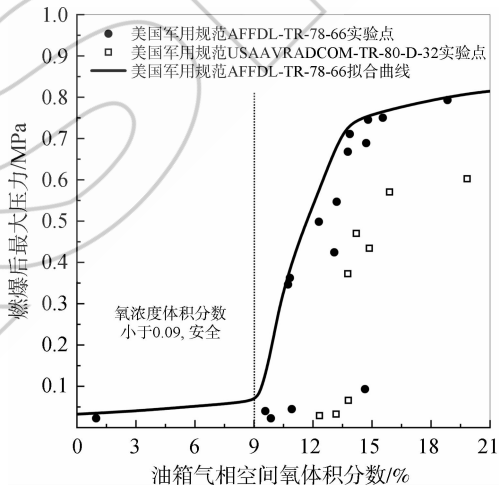


图 3 氧体积分数对 23 mm 高爆燃烧弹射击油箱后燃爆压力影响

Fig. 3 Influence of oxygen volumetric fraction on the burnout pressure after 23 mm high explosive incendiary bomb shot fuel tank

2.2 气体在燃油中平衡和非平衡溶解度

油箱上部空间中混合气体的可燃性不仅与气相空间原有气体体积分数相关,还与燃油中的溶解气体有直接关系。油箱是一个相对封闭的空间,与外界环境仅通过一个通气口连接,虽然空气中氧体积分数不随着高度发生变化,但随着高度增加,油箱上部空间总压降低后,气体分压也会成比例降低,则气体会从燃油中逸出,造成油箱上部空间气体组成比例发生变化。例如在海平面时,假设载油率为 80% 的油箱气相空间初始氧氮体积分数为 12% 和 88%,油箱中的燃油中气体溶解

度与气相完全平衡,则油箱处于惰化不可燃状态,但当飞机爬升至 12 000 m 时,因压力变化,溶解氧氮逸出,且逸出量不同,若为 JET-A 燃油,则气相空间氧体积分数将升至 23%,若为 RP-3 燃油,则氧体积分数更是高达 24.5%,进入非惰化可燃状态^[27]。显然了解气体的溶解特性对惰化系统设计有很大意义。

气体在燃油中的平衡溶解度大多采用亨利定律来描述,ASTM D2779-92(气体在液体燃油中溶解度估算方法)采用相对密度的方法,给出了常用气体在石油制品中描述其平衡溶解量的本生系数和阿斯特瓦尔德系数的计算公式^[28]。美国和中国的喷气燃油手册均直接采用了该方法,但是美国喷气燃油手册中明确指出该方法的最大误差约为 $\pm 20\%$ 。ASTM D2780-92(标准气体在液体燃油中溶解度估算方法)给出了标准的气体平衡溶解度测量方法,McConnell 等采用该方法对美国 JP-4 和 JET-A 燃油中氧气的平衡溶解度进行了精确测量,实验测定为更加准确地进行惰化系统的设计奠定了基础^[29]。目前国产燃油中气体的平衡溶解度大多直接采用 ASTM D2779-92(2002)相对密度计算公式,尚未见到采用 ASTM D2780-92 进行精确测量的报道。

平衡溶解度仅能反映达到平衡时传质的量,而无法给出达到此传质量所需时间,不能反映传质速率。例如美国霍华德空军基地对 UH-64 直升机燃油箱惰化过程中显示,当气相空间上部氧体积分数为 0.09,加入充分溶解氧氮的燃油后,经过 24 小时静置,气相空间上部氧体积分数仅增加至 0.104,处于惰化状态,而若按照平衡溶解计算,气相空间氧体积分数应达到 0.165,进入非惰化状态,因此简单按平衡溶解度获取的结果存在很大误差^[30]。事实上,平衡溶解是一种特例,气体在燃油中溶解或逸出量应是不断变化的,气液长期处于不平衡的状态,不断地进行相间传质,液相与气相也会存在体积分数梯度,因而非平衡溶解是更普遍的现象,若仅掌握平衡溶解特性,则与实际情况有很大偏差。

2001 年,Burns 等将波音 737 中央翼油箱地面惰化至氧体积分数 0.08,然后进行飞行实验,巡航阶段结束时发现载油率 0%、20%、40%及 80%的燃油箱中氧体积分数分别上升约 0.01、0.02、0.05 及 0.09,均小于按照平衡状态计算的结果^[31]。FAA 使用飞机燃油箱可燃性理论(FT-FAM)来评估油箱的可燃性时采用了一种时间常

数 τ 来计算非平衡状态下燃油中溶解氧逸出量如式(1)所示。通过对实验数据进行分析,得出飞行高度在 15 000 英尺下时,时间常数 τ 可取 3 500 min,在 15 000 英尺高度以上,时间常数 τ 可取 100 min^[32]。

$$\frac{x'_0 - x_0^{t-dt}}{20.9 - x_0^{t-dt}} = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}}$$

式中 x'_0 是当前时刻氧摩尔分数, x_0^{t-dt} 是上一时刻氧摩尔分数。

上述模型最关键的问题就在于时间常数取值,Harris 认为现有的时间常数只有在特定的机型、飞行包线、燃油条件下才适用,对于不同的条件适用性有待考证。针对以上问题,2011 年 Harris 等采用 0.75 m $\times$ 0.75 m $\times$ 0.3 m 的实验燃油箱,对氧在燃油中溶解进行了测定,并结合一维建模的方法,以实验油箱推导出 A320 燃油箱时间常数 τ 为 1 450 min 左右^[33]。

2013 年薛勇等认为目前使用的模型不具备量化燃油箱惰化过程中传质速率的能力,提出一种气液边界层频率传质模型,该模型利用传质频率 f 来表征传质过程的快慢,认为当 $f=0$ 时,气相与液相之间不发生传质,当 $f=\infty$ 时,气相与液相之间传质瞬间完成^[34]。

3 中空纤维膜机载惰化技术

3.1 中空纤维膜机载惰化技术的特点

机载制氮惰化通常由 3 部分技术有机组成:①引气及其处理技术,对来自飞机发动机或者环控系统的引气进行处理,以保证所引气体流量、压力、温度、含水量、含油量等指标满足机载制氮系统的入口条件要求。②机载膜分离制氮技术,其目的是对引入的空气进行分离,以产生所需要的、具有较高体积分数的油箱惰化气体,即富氮气体。③油箱上部气相空间氧体积分数控制技术,它要求采用适当的方式,在发动机引气量消耗量最少的前提下,确保在整个飞行过程中上部气相空间氧体积分数始终低于规定值。

纵观整个油箱惰化系统中引气及其处理技术是准备工作,机载膜分离制氮技术是基础,同时也是重点和难点,因为没有可靠的机载膜分离制氮设备的正常工作,就无法确保惰化所需的富氮气体的供应。同时,在飞行过程中,膜工作环境变化的条件下保证产品富氮气体的流量和纯度,关系到整个油箱惰化系统的成败;而要做到对膜分离装置的优化设计,使得飞机代偿损失最小,则是技

术难点和重点所在,油箱上部气相空间氧体积分数控制技术是关键,因为飞机的安全性最终还是取决于油箱上部气相空间氧体积分数的控制水平。

3.2 中空纤维膜分离特性研究

中空纤维膜这种结构形式制取富氮气体常被用于机载制氮系统膜分离装置中。其一般为圆筒形,内部放置了大量细小有机材料管束,这种材料制成的膜对氧气和氮气的渗透具有选择性,前者渗透速率高,称之为快气,而后者渗透速率低,称为慢气。在一定的膜内外压差条件下,大量的氮气就被阻隔在中空纤维膜一侧形成富氮气体供给油箱惰化系统,而大部分氧气透过中空纤维膜,成为废气直接排出。

气体的进气压力和温度、环境背压以及流量等参数均会直接影响机载中空纤维膜的分离特性,国内外在这方面已开展了大量的理论与实验研究工作,取得了较为丰硕的成果。

理论研究方面,刘猛等^[35]对中空纤维膜组件温度特性进行了分析;贺高红等^[36]研究了膜丝内压降规律,验证了 Hagen-Poiseuille 压降方程;冯诗愚等^[37]建立了中空纤维膜分离过程微分方程,并使用龙格-库塔法进行了求解,分析了膜丝内外压比、单位膜面积进料量和氧氮渗透比对产品气氧体积分数和制氮效率的影响;蔡琰等^[38]在考虑了体积分数极化和膜丝内压降的情况下,分析了进气温度及膜丝结构参数对性能的影响。

实验研究中,刘小芳等对膜分离性能进行了实验^[39];薛勇等搭建一个实验平台,对空气分离模块在不同条件下的工作性能进行实验,并通过整理实验数据获得膜工作温度、进气压力和飞行高度对中空纤维膜工作性能的影响^[40];Burns 等在 A320 上对飞行包线下的中空纤维膜性能进行了实验研究^[41]。

气体分离膜非理想现象很严重,理论与实际有较大差别,采用实验方法费时、费效。薛勇基于已有的实验数据,利用人工神经网络方法模拟和预测了中空纤维膜分离性能,获得各参数对中空纤维膜工作性能的影响^[42]。邵垒等采用多项式拟合方法,并结合 Levenberg-Marquardt 算法对膜分离性能进行了回归^[43]。

3.3 惰气在油箱中的分配技术

可采用两种不同的方式来使用进入油箱的富氮气体,第一种是将富氮气体通入燃油中,由于氧

氮溶解度差异,可以将燃油中溶解的氧气置换出来,该方法称为燃油洗涤技术。为了提高洗涤的效率,通常用燃油引射富氮气体或用气体喷嘴将富氮气体通入油箱下部,这两种方法的目的均是使富氮气体形成大量均匀且微小的气泡,增加气体和燃油的传质面积,从而更加有效地置换溶解的氧气。第二种是将富氮气体直接通入上部气相空间,从而置换出部分氧气,降低氧体积分数,称为油箱冲洗技术^[44]。

早期国内外的研究人员一般都认为,民机飞行时的姿态平稳,点火源相对单一,所以可仅采用冲洗技术;而军机除了飞行姿态复杂会使燃油溶解的气体逸出外,还存在更多点火源危险,例如地方炮火攻击等,因此必须采用燃油洗涤技术,以尽可能减少整体氧含量,提高安全性,例如 KC-135 加油机采用了洗涤技术。洗涤方式管路布置复杂,设备尺寸重量大,近年来随着对机载惰化技术的深入认识,大家发现洗涤虽可增加一定安全性,但是通过冲洗技术控制气相空间氧体积分数后,也足以保证油箱的安全性,且相对于洗涤技术更加简单,因此冲洗技术成为目前的主流。

冲洗惰气分配过程中根据流量模式又可分为单流和双流两种。无论民机还是军机大多采用双流模式来设计惰化系统。双流模式中膜出口至油箱入口有两路并联管路,其中一路设置有一个控制阀。在爬升和巡航阶段,该控制阀关闭,分离膜产生的富氮气体流量低而纯度高,从而保证油箱在巡航阶段被惰化至很低的氧体积分数,而俯冲下降阶段,控制阀打开,大量纯度较低的富氮气体进入油箱,阻止外界空气大量流入,造成氧体积分数上升。在民机中,由于俯冲下降速率较低,有时也会采用单流模式,在牺牲一部分性能的前提下,简化了管路布置和系统的控制难度。在某些特殊机型上,也有三流模式的应用报道,但是由于其管路和控制复杂,并不是主流技术。

3.4 油箱中氧体积分数分布仿真研究

3.4.1 国内外工程研究方法

2001 年,FAA 就开始采用数值积分方法来研究单舱惰气变化,其最早提出了油箱体积置换次数的概念(VTE, volumetric tank exchange)用来表征到达指定氧体积分数的快慢,FAA 指出,当使用含量为 5% 的富氮气体使油箱到达 8% 氧体积分数时,VTE 为 1.5^[45]。Cavage 等按照波音 747 中央翼等比例搭建了一个燃油箱模型,并

在不同隔舱内测量了氧体积分数的变化规律,该方法对研究惰性气体分配技术提供了一个良好的思路^[46]。

2010年,汪明明采用数值积分方法,建立了燃油冲洗和洗涤数学模型,研究结果表明,与冲洗相比,洗涤能显著减少燃油中含氧量,并且缩短了含氧量达到稳定的时间^[47];2011年,冯晨曦等建立多仓燃油箱冲洗数值模型选择波音737中央翼燃油箱作为研究对象,采用惰化气体均匀和非均匀两种分配方式,在惰化气体流量按体积和数量两种分配方式下,计算出各隔舱氧气体积分数随时间及换气次数的变化关系^[48];2012年,鹿世化为了对惰化气体流动方式进行优化,而设计建立一套气体流动的可视化实验装置,开展了一系列实验研究工作^[49]。

3.4.2 CFD方法研究

CFD计算方法由于其计算准确,可视化性好,且有较多商用软件,近年来,同样也在惰气分配技术领域得到了广泛应用。Cavage等利用CFD方法对B747中央翼油箱进行了建模,并对多隔舱氧体积分数变化进行了计算,并与实验数据进行了对比,发现计算结果准确^[46]。2012年,王学德等对某大型运输机中央翼油箱进行了CFD计算研究了在不同流量和体积分数富氮气体条件下燃油箱的惰化规律^[50]。王志伟等对在特定的飞行包线下,对某中央翼燃油箱全程惰化过程进行了数值模拟,得到在不同的惰化气体流量和惰化气体进气方式下燃油箱内氧体积分数的空间分布和平均氧体积分数随时间的变化规律^[51]。

4 机载惰化技术未来的发展趋势

4.1 中空纤维膜惰化技术未来发展趋势

目前,中空纤维膜制取富氮气体的机载制氮惰化技术是最经济和实用的飞机油箱燃爆抑制技术,但是其仍存在问题需要解决,例如分离膜制氮过程中需要消耗大量发动机引气导致飞机代偿损失大、对气源需求压力较高高导致在很多机型上应用效果较差(如直升机)、膜丝和渗透孔径很小容易被堵塞、引气中的臭氧会导致膜性能衰减、富氮气体填充油箱时会使得燃油蒸汽外泄污染环境等。因此,未来中空纤维膜机载惰化技术仍需要进行大量的研究来完善。

首先,提高分离膜的耐受温度是近年来的研

究热点之一,通常分离膜入口的气体来自发动机引气或环控系统压气机,气体的温度较高,故此需要配置冷却装置将气体的温度降至分离膜能够承受的范围。显然,如果分离膜的耐受温度越高,则冷却换热器所需的尺寸越小,而且一般分离膜的性能也随着温度升高而增加,减少引气量,这又进一步减小了冷却负荷。现今,国产分离膜的耐受温度大多在70℃左右,而国外膜已经可达到120℃。日本宇部公司最新公布了一种以聚酰亚胺为材料的高温分离膜,工作温度可达到150℃以上^[52]。

其次,不论是单流模式还是双流模式,富氮气体的流量和实际实时需求量并无直接关系,一般均是在设计阶段按照某一条或几条飞行包线计算不同阶段的富氮气体流量,然后设置管路上阀门或限流孔尺寸,当飞行包线与设计有偏差时,则会造成富氮气体流量不足或过量,不足会使系统设计失败,而过量则造成引气浪费,而且更多的燃油蒸汽被过量的富氮气体带出油箱外,形成环境污染。因此,按需惰化也是中空纤维膜机载惰化系统的发展方向,通过研制在线氧体积分数传感器,监测油箱上部气相空间氧体积分数,调整管路富氮气体通流面积,改变分离膜入口压力等措施,来控制进入油箱的富氮气体流量和纯度,使氧体积分数在所需范围内。

4.2 其他新型惰化技术

国内外研究者仍在飞机燃油箱防火抑爆技术领域不停探索,可以肯定的是,未来飞机燃油箱防火抑爆技术的一定是朝着高效、安全、环保方向发展。

4.2.1 绿色惰化技术

美国怀特-帕特森空军基地和Phyre公司从2006年始联合进行下一代机载惰化技术的研究工作,如图4所示,其基本原理是将油箱上部气相空间的燃油蒸汽和空气抽吸后送入一个催化氧化反应器,进行可控的无焰催化燃烧,碳氢物被氧化为二氧化碳和水,水蒸气通过处理装置被分离,而剩余的二氧化碳、未参与反应的氮气和未完全反应的燃油蒸汽及氧气被再次送入油箱上部,从而降低氧含量达到惰化的目的,这种耗氧型催化技术被称为“绿色惰化技术”^[53]。

Phyre公司通过实验测试显示,这种新技术有很多优点:由于不需要从发动机引气,因此可用于无合适气源的机型中(例如直升机);预热和启

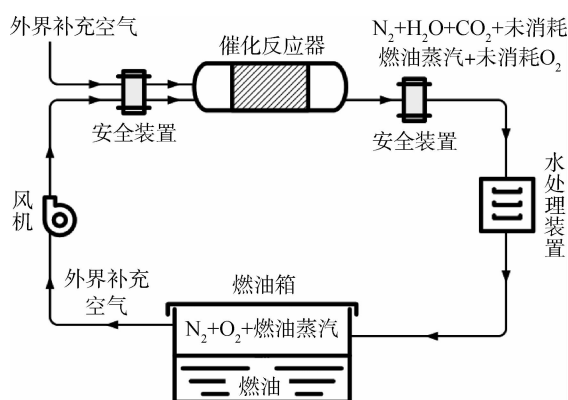


图4 绿色惰化原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of working principle of green inerting system

动速度快,氧气在反应器中被消耗,因此惰化效率高、时间短;惰化过程中无燃油蒸汽排出,绿色环保。

冯诗愚等建立了耗氧惰化数学模型,分析了3种典型国产燃油对惰化性能的影响,结果显示RP-5燃油所需惰化时间最短,而RP-6最长^[54]。

4.2.2 冷却惰化技术

前述已说明,当燃油温度越低,则燃油蒸汽体积分数也越低,当体积分数处于燃爆下限以外,油箱处于不可燃状态。通常燃油的温度与油箱所处外界环境、油箱内热源状态及油箱位置和材料等相关,例如铝制机翼油箱由于和外界环境空气可有效换热,因此大多数情况下不进行惰化也处于不可燃状态,而中央翼油箱由于无法和外界换热,且加热源较多,不进行惰化时基本处于可燃状态。

有鉴于此,波音公司提出了1种新的惰化方法,其从油箱上部空间抽取包含了空气和燃油蒸汽的混合气体,在1个冷却装置中降温,部分燃油蒸汽被冷凝成液态燃油,同时混合气温度也降低,通过这种方法改变了空气与燃油蒸汽比例,使油箱上部空间处于惰化状态。该方法无需从发动机引气,且被冷却的主要是空气,加之燃油汽化潜热较低,所转换成液态燃油量也很少,对冷却负荷要求不大,整个过程中只需检测气相空间的温度,则可判断是否需要启动冷却装置。

此外,还有一些其他的新技术,例如采用吸附惰化技术、催化耗氧和冷却复合惰化技术、固体材料消耗氧气惰化技术等等。

5 结论

机载惰化技术能够在整个飞行过程中对燃油

箱提供保护,且对后勤保障要求低,因此已经成为主流的惰化技术,不仅在国内外新设计的飞机上得以应用,在一些老机型上也通过加装的方式对油箱进行惰化。

了解燃油可燃特性并制定相应的氧体积分数安全指标是评估油箱安全性及设计惰化系统的基础,但是我国所采用的指标均基于国外燃油,针对国产燃油的研究也十分匮乏,未来需要对此展开研究。

燃油中气体溶解逸出现象会对惰化系统设计,前期流量估算,燃油可燃性等产生重大影响,这也是飞机燃油箱防火抑爆技术发展到中、后期,必然面对的一个问题,值得进行更加深入的研究。

基于中空纤维膜的机载惰化技术国外从20世纪70年代就逐渐展开,80年代后应用于军机,而90年代后在民机上使用就十分成熟,国内理论研究始于2004年,实际装机约在2012年前后,与国外差距很大,目前国外公司掌握了核心技术,国内追赶难度极大,而冷却惰化、绿色惰化和吸附惰化技术等在国外也刚刚开始进行研究,并没有成熟的产品,如果国内及时展开相关研究,可望拥有自主的知识产权,因此应该在这些领域加大研究力度。

参考文献:

- [1] ABRAMOWITZ A, BORIS P. Characterization of an oxygen/nitrogen permeable membrane system[R]. Atlantic City, US: FAA Technical Center, 1996.
- [2] JOHNSON R L, GILLERMAN J B. Aircraft fuel tank inerting system[R]. AFWAL-TR-82-2115, 1983.
- [3] HALL J E, HAMMERSCHMIDT J A, GOGLIA J J, et al. Aircraft accident report; in-flight breakup over the Atlantic ocean, trans world airlines flight 800[R]. NTSB/AAR-00/03, 2000.
- [4] CHERRY R, WARREN K. A benefit analysis for nitrogen inerting of aircraft fuel tanks against ground fire explosion[R]. DOT/FAA/AR-99/73, 1999.
- [5] 王震. 飞机燃油箱防爆及抑爆材料应用技术[J]. 航空科学技术, 2002(3): 33-35.
WANG Zhen. Explosion suppression for aircraft fuel tanks and application technology of suppression material[J]. Aeronautical Science And Technology, 2002(3): 33-35. (in Chinese)
- [6] 田宏, 吴穹, 江平, 等. 网状聚氨酯泡沫材料的发展[J]. 航空材料学报, 2001, 21(2): 59-63.
TIAN Hong, WU Qiong, JIANG Ping, et al. The development of reticulated polyurethane foam[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2001, 21(2): 59-63. (in Chinese)
- [7] 刘小芳, 刘卫华. 飞机供氧和燃油箱惰化技术概况[J]. 北

- 华航天工业学院学报, 2008, 18(3): 4-7.
- LIU Xiaofang, LIU Weihua. Outline of airborne oxygen supplied and its fuel tanks inerted[J]. Journal of North China Institute of Aerospace Engineering, 2008, 18(3): 4-7. (in Chinese)
- [8] KLUEG E P, MCADOO W C, NEESE W F. Performance of a DC-9 aircraft liquid nitrogen fuel tank inerting system [R]. FAA-NA-72-38, 1972.
- [9] REYNOLDS T L, EKLUND T I, HAACK G A. Onboard inert gas generation system/onboard oxygen gas generation system (OBIGGS/OBOGS) study: Part II gas separation technology-state of the art [R]. Seattle, US: Boeing Phantom Works, 2001.
- [10] BURCH I A, KENNETT S R, FLETCHER L E. A risk assessment approach for selecting a replacement for Halon 1301 fire suppressant [R]. Victoria, Australia: Aeronautical and Maritime Research Laboratory, 2001.
- [11] WAINRIGHT R B, PERLMUTTER A. Generation of inerting gases for aircraft fuel tanks by catalytic combustion techniques [R]. AFAPL-TR-69-68, 1969.
- [12] ANDERSON C L, GREINICH A F, TOLLE F F, et al. Performance tests of two inert gas generator concepts for airplane fuel tank inerting [C] // Proceedings of 19th Joint Propulsion Conference. Seattle, US: AIAA, 1983: 1-10.
- [13] MANATT S A, BUSS L B, FUNK A F. Design criteria for application of membrane nitrogen inerting systems to army aircraft fuel tanks [R]. USARTL-TR-77-50, 1977.
- [14] REYNOLDS T L, EKLUND T I, GREGORY A. Onboard inert gas generation system/onboard oxygen gas generation system (OBIGGS/OBOGS) study: Part I aircraft system requirements [R]. Seattle, US: Boeing Phantom Works, 2001.
- [15] SMITH D E. Fuel tank inerting systems for civil aircraft [D]. Fort Collins, US: Colorado State University, 2014.
- [16] BARTKNECHT W. Explosionsschutz: Grundlagen und Anwendung [M]. Berlin: Springer Verlag, 1993.
- [17] DI PIAZZA J T, GERSTEIN M, WEAST R C. Flammability limits of hydrocarbon-air mixtures [J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1951, 43(12): 2721-2725.
- [18] ZABETAKIS M G. Flammability characteristics of combustible gases and vapors [M]. Washington, DC: Government Printing Office, 1966.
- [19] LEES F P. Loss prevention in the process industries. [J]. Journal of Bacteriology, 1980, 110(3): 1208-1210.
- [20] PERRY R H, GREEN DW, MALONEY J O. Perry's chemical engineers' handbook [M]. Washington, DC: McGraw-Hill, 1997.
- [21] ZINN S V. Inerted fuel tank oxygen concentration requirements [R]. Atlantic City, US: National Aviation Facilities Experimental Center, 1971.
- [22] COUNCIL C. Handbook of aviation fuel properties [M]. New York: Naval Air Systems Command, 1983.
- [23] SHEPHERD J E, NUYT C D, LEE J J. Flash point and chemical composition of aviation kerosene (Jet A) [R]. Washington, DC: National Transportation Safety Board, 1999.
- [24] SOCHET I, PASCAUD J M, GILLARD P. Experimental and numerical investigation of kerosene flammability [J]. Journal De Physique IV, 2002, 12(7): 429-435.
- [25] 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.
- [26] ANDERSON C L. Test and evaluation of Halon 1301 and nitrogen inerting against 23 mm HEI projectiles [R]. AF-FDL-78-66, 1978.
- [27] 冯诗愚, 刘卫华, 黄龙, 等. 飞机燃油箱气相空间平衡氧体积分浓度理论研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(4): 556-560.
- FENG Shiyu, LIU Weihua, HUANG Long, et al. Theoretical study of equilibrium oxygen concentration on ullage in aircraft fuel tank [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 43(4): 556-560. (in Chinese)
- [28] Committee ASTM. Standard test method for estimation of solubility of gases in petroleum liquids; D2779-92 [S]. West Conshohocken, US: ASTM International, 2007: 1-5.
- [29] MCCONNELL P M, DALAN G A, ANDERSON C L. Vulnerability methodology and protective measures for aircraft fire and explosion hazards [R]. AFWAL-TR-85-2060, 1985.
- [30] VANNIC W L, GREINICH A F. Fighter aircraft OBIGGS study [R]. AFWAL-TR-87-2024, 1987.
- [31] BURNS M L, CAVAGE W M. Ground and flight testing of a Boeing 737 center wing fuel tank inerted with nitrogen-enriched air [R]. DOT/FAA/AR-01/63, 2001.
- [32] SUMMER S M. Fuel tank flammability assessment method user's manual [R]. DOT/FAA/AR-05/8, 2008.
- [33] HARRIS A P, RATCLIFFE N M. Dimensional modelling of the fuel outgassing phenomenon: Improving flammability assessment of aircraft fuel tanks [J]. The Aeronautical Journal, 2011, 115(10): 605-614.
- [34] 薛勇, 冯诗愚, 王澍, 等. 一种描述燃油与气体组分传质的频率传质模型 [J]. 航空动力学报, 2013, 28(12): 2709-2716.
- XUE Yong, FENG Shiyu, WANG Shu, et al. Frequency mass transfer model describing mass transfer between fuel and air [J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(12): 2709-2716. (in Chinese)
- [35] 刘猛, 王浚. 一种富氧中空纤维膜组件的温度特性 [J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(3): 280-282.
- LIU Meng, WANG Jun. Temperature characteristic of a kind of hollow-fiber membrane module used for oxygen enrichment [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(3): 280-282. (in Chinese)
- [36] 贺高红, 邹越, 徐仁贤, 等. 中空纤维气体分离膜丝内压降规律的研究 [J]. 膜科学与技术, 1994, 13(2): 22-28.

- HE Gaohong, ZOU Yue, XU Renxian, et al. A study on pressure drop in hollow-fiber membrane for gas separation[J]. Membrane Science and Technology, 1994, 13(2): 22-28. (in Chinese)
- [37] 冯诗愚, 卢吉, 刘卫华, 等. 机载制氮系统中空纤维膜分离特性[J]. 航空动力学报, 2012, 27(6): 1332-1339.
- FENG Shiyu, LU Ji, LIU Weihua, et al. Separation performance of hollow fiber membrane for on-board inerting gas generating system[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(6): 1332-1339. (in Chinese)
- [38] 蔡琰, 林贵平, 曾宇, 等. 中空纤维膜机载制氮装置的数学建模分析[J]. 航空动力学报, 2015, 30(9): 2100-2107.
- CAI Yan, LIN Guiping, ZENG Yu, et al. Mathematical modeling analysis of hollow fiber membrane onboard inert gas generation system[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(9): 2100-2107. (in Chinese)
- [39] 刘小芳, 刘卫华, 钱国诚, 等. 机载中空纤维膜富氮性能实验[J]. 航空动力学报, 2012, 27(5): 975-980.
- LIU Xiaofang, LIU Weihua, QIAN Guocheng, et al. Experimentation on nitrogen-enriched characteristics of on-board hollow fibre membrane[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(5): 975-980. (in Chinese)
- [40] 薛勇, 刘卫华, 高秀峰, 等. 机载惰化系统中空纤维膜分离性能的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(3): 107-111.
- XUE Yong, LIU Weihua, GAO Xiufeng, et al. Experimental study on separation performance of hollow fiber membrane for onboard inert gas generating system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(3): 107-111. (in Chinese)
- [41] BURNS M, CAVAGE W M, HILL R, et al. Flight-testing of the FAA onboard inert gas generation system on an airbus A320[R]. DOT/FAA/AR-03/58, 2004.
- [42] 薛勇. 机载中空纤维膜分离性能及民机燃油箱冲洗惰化研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- XUE Yong. Study on separation performance of onboard hollow fiber membrane and flushing inerting for fuel tank of civil aircraft[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [43] 邵垒, 刘卫华, 冯诗愚, 等. 机载空分装置富氮气体流量及影响因素[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(1): 141-146.
- SHAO Lei, LIU Weihua, FENG Shiyu, et al. Flow rate of nitrogen-rich air and influence factors for onboard air separation unit[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(1): 141-146. (in Chinese)
- [44] 汪明明, 冯诗愚, 蒋军昌, 等. 飞机燃油箱冲洗与洗涤惰化技术比较分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(5): 614-619.
- WANG Mingming, FENG Shiyu, JIANG Junchang, et al. Comparative analysis of fuel washing and scrubbing in aircraft fuel tank[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 42(5): 614-619. (in Chinese)
- nese)
- [45] BURNS M, CAVAGE W M. Inerting of a vented aircraft fuel tank test article with nitrogen-enriched air[R]. DOT/FAA/AR-01/6, 2001.
- [46] CAVAGE W, BOWMAN T. Modeling in-flight inert gas distribution in a 747 center wing fuel tank[J]. Immunology Letters, 2005, 1(2): 61-65.
- [47] 汪明明. 飞机燃油箱气相空间氧体积浓度控制技术的理论研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- WANG Mingming. Theoretical study of control technology of oxygen concentration on aircraft fuel tank ullage[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [48] 冯晨曦, 刘卫华, 鹿世化, 等. 气体分配方式对多隔舱燃油箱地面惰化的影响[J]. 航空动力学报, 2011, 26(11): 2528-2533.
- FENG Chenxi, LIU Weihua, LU Shihua, et al. Study on ground-based inerting process influenced by different gas distribution for multi-bay fuel tank[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(11): 2528-2533. (in Chinese)
- [49] 鹿世化. 油箱惰化空间浓度场模拟和气流优化的理论与实验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- LU Shihua. Numerical simulation of oxygen distribution in aircraft fuel tank ullage and theoretical and experimental study of airflow optimization[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [50] 王学德, 王志伟, 刘卫华, 等. 某中央翼燃油箱惰化流场的数值模拟及特性分析[J]. 航空动力学报, 2012, 27(12): 2641-2647.
- WANG Xuede, WANG Zhiwei, LIU Weihua, et al. Numerical simulation and analysis of nitrogen-enriched air flow in a center wing tank[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(12): 2641-2647. (in Chinese)
- [51] 王志伟, 王学德, 刘卫华, 等. 某中央翼燃油箱全程惰化流场的数值模拟研究[J]. 安全与环境学报, 2013(1): 180-184.
- WANG Zhiwei, WANG Xuede, LIU Weihua, et al. Numerical simulation of inert gas distribution in the whole flying process in the central wing tank[J]. Journal of Safety and Environment, 2013(1): 180-184. (in Chinese)
- [52] 金筑丰, 福田叙彦, 谷原望, 等. 气体分离膜组件及气体分离方法: CN201110345156. X[P]. 2012-07-04.
- [53] MORRIS R W, MILLER J, LIMAYE S Y. Fuel deoxygenation and aircraft thermal management[R]. AIAA 2006-4027, 2006.
- [54] 冯诗愚, 邵垒, 李超越, 等. 航空燃油类型对催化惰化系统性能的影响[J]. 航空学报, 2016, 37(6): 1819-1826.
- FENG Shiyu, SHAO Lei, LI Chaoyue, et al. Performance of catalytic inerting system affected by various aviation jet fuels[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(6): 1819-1826. (in Chinese)