

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.03.019

不同类型惰气对飞机燃油箱可燃性影响理论研究

徐晶¹, 邵垒², 冯诗愚³

(1. 中国商飞上海飞机设计研究院, 上海, 201210; 2. 重庆交通大学航空学院, 重庆, 400074; 3. 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)

摘要: 以低温可控耗氧型催化惰化技术为背景, 采用微元计算法, 建立了使用混合惰气的油箱气相空间平衡氧浓度数学模型。在考虑燃油温度、载油率、气体组分等因素的情况下, 通过模型计算了平衡氧浓度随高度的变化关系, 同时与使用富氮气体的油箱进行了对比。研究表明: 在地面采用混合惰气惰化油箱后, 平衡氧浓度随着飞行高度增加而降低, 而采用富氮气体惰化的油箱则完全相反。油箱载油率越大, 气相空间氧浓度变化幅度越大。燃油温度增加, 对采用混合惰气的油箱不利, 但是对采用富氮气体的油箱有利。总体而言, 使用混合惰气惰化油箱可有效抑制油箱气相空间可燃性随飞行高度而增加的不利趋势, 该研究结果可为混合惰气地面惰化和预洗涤技术提供理论基础。

关键词: 油箱惰化; 平衡氧浓度; 混合惰气; 富氮气体; 数学模拟

中图分类号: V228 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2020)03-0493-06

Theoretical Study on Flammability of Aircraft Fuel Tank Affected by Various Inert Gases

XU Jing¹, SHAO Lei², FENG Shiyu³

(1. China COMAC Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai, 201210, China; 2. School of Aeronautics, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400074, China; 3. Key Laboratory of Aircraft Environmental Control and Life Support Industry and Information Technology, College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Based on low temperature controlled oxygen consumption catalytic inerting technology, a mathematic model of the equilibrium oxygen concentration of the fuel tank ullage with mixed inert gas is established using the method of differential element calculation. The relationship between equilibrium oxygen concentration and height is calculated by the model with the consideration of fuel temperature, fuel load and gas component and compared with fuel tank using nitrogen enriched air. The results show that when mixed inert gas is used to inert the fuel tank on the ground, the equilibrium oxygen concentration decreases with the increase of flight height, while it is completely the opposite when the nitrogen enriched air is used. The higher the fuel load is, the greater the variation range of oxygen concentration in the ullage. The increase in fuel temperature is bad for fuel tank with mixed inert gas, but good for those with nitrogen enriched air. In general, the use of mixed inert gas to inert fuel tank can effectively suppress the adverse trend of the fuel tank flammability increasing with flight height, and the study results can provide theoretical basis for ground inerting and fuel pre-scrubbing technology using mixed inert gas.

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)资助项目; 中航工业技术创新基金基础研究类(2014D60931R)资助项目; 民用飞机专项科研经费(工信部联装[2016]37号)资助项目; 江苏省普通高校研究生科研创新计划(KYLX15_0231)资助项目。

收稿日期: 2019-07-05; **修订日期:** 2020-05-06

引用格式: 徐晶, 邵垒, 冯诗愚. 不同类型惰气对飞机燃油箱可燃性影响理论研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(3): 493-498. XU Jing, SHAO Lei, FENG Shiyu. Theoretical study on flammability of aircraft fuel tank affected by various inert gases[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(3): 493-498.

Key words: fuel tank inerting; equilibrium oxygen concentration; mixed inert gas; nitrogen enriched air; mathematic model

近50年的空难数据显示,飞机燃油箱的燃烧爆炸已经成为了飞机失事的重要原因^[1-2]。利用中空纤维膜制取富氮气体(Nitrogen enriched air, NEA)的机载惰化技术(Onboard inerting gas generation system, OBIGGS)是目前应用最为广泛的飞机燃油箱燃爆抑制技术^[3-6]。但从国内外应用现状来看,OBIGGS技术仍存在问题,例如分离膜效率低导致飞机代偿损失大、分离膜入口需求压力高导致在一些机型上使用受到限制、细小的膜丝和渗透孔径容易堵塞后造成性能衰减、气源中臭氧导致膜性能衰减严重以及NEA填充油箱时导致燃油蒸汽外泄污染环境等^[7-9]。

考虑到OBIGGS技术中的众多问题,研究者们开始进行其他新型机载惰化技术的研究工作,而来源于绿色惰化技术的低温可控耗氧型催化惰化技术由于具有流程简单、工作效率高、质量轻等优势,近年来得到较大关注^[10-12]。耗氧惰化基本原理是将油箱上部气相空间的燃油蒸汽和空气进行无焰催化燃烧,燃烧后的产物在水分离器中去除水蒸气,而剩余的二氧化碳、氮气和氧气组成的混合惰气(Mixed inerting gas, MIG)被再次送入油箱上部,从而降低油箱氧含量,达到惰化目的。

当油箱中压力、温度等改变后,气体会向燃油中溶解或者从燃油中逸出,从而造成油箱气相氧浓度(本文浓度均指体积分数)变化。以飞机爬升为例,随着爬升高度增加,油箱中气体总压降低,气相与燃油之间平衡被打破,氧氮将从燃油中逸出,而由于氧气溶解度比氮气大,造成氧气的逸出量也大于氮气,故油箱上部空间氧浓度逐渐升高。冯诗愚等^[13]研究显示,不同高度下的平衡氧浓度与巡航高度、燃油类型、油箱载油量、油箱温度等很多因素有关,如对于国产RP-3号燃油而言,当达到巡航高度12 km时,气相空间氧浓度从海平面的21%增加至31.5%。

但是上述研究均以OBIGGS技术为背景,所针对的气体仅为氮气和氧气,而耗氧惰化技术中的MIG气体除了这两种气体外,还存在二氧化碳。一般来说,气体在燃油中的溶解度很低,如果将气体视为溶质,而燃油为溶剂,则可将其视为稀溶液,因此满足拉乌尔和亨利定律,为了使用方便,常用阿斯特瓦尔德系数来表征气体在燃油中的溶解量大小^[14-15]。图1计算了6种燃油中氧、氮及二氧化碳在不同温度下的阿斯特瓦尔德系数^[16]。从图中可见,在0℃时,二氧化碳在国产RP-3号燃油中的溶解度比氧气高约9倍,比氮气高约21倍,随着飞

机爬升,二氧化碳逸出量远大于氧气,故有可能造成气相空间氧浓度不仅不会上升,还有下降的可能。此外,二氧化碳在液体中溶解度随温度升高而降低,这与氧氮相反,因此也可能造成氧浓度的变化规律发生改变。

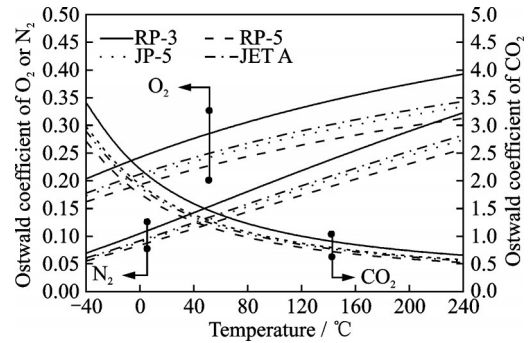


图1 不同燃油气体溶解度随温度变化关系
Fig.1 Relationship between gas solubility of different fuels and temperature

有鉴于此,以耗氧惰化技术为背景,建立不同高度下开式油箱上部气相空间平衡氧浓度数学模型,并进行求解,对使用MIG与NEA的油箱进行对比,并分析各因素对平衡氧浓度的影响。

1 不同高度下平衡氧浓度数学模型

在建立数学模型前,作如下假设:

- (1)油箱与外界环境连通,油箱内部压力与外界环境压力相同;
- (2)飞机爬升过程中,高度所造成压力变化相对于气体混合、溶解和逸出速率足够缓慢,气相和燃油箱可达到平衡状态;
- (3)气相与燃油温度相同,即 $T_U = T_F$;
- (4)气体在燃油中的溶解量满足亨利定律,并按阿斯特瓦尔德系数计算;
- (5)气相和燃油相中各处物性参数均匀。

如图2所示,当高度变化 dh ,外界环境压力减小 dp_t ,油箱内气相空间氧、氮和二氧化碳分压也减

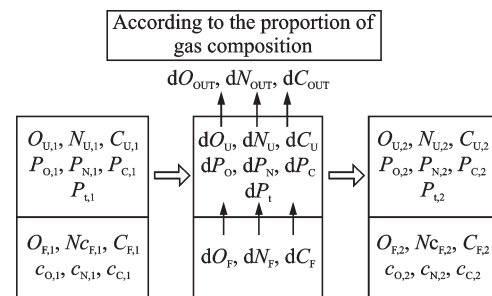


图2 压力变化下油箱参数
Fig.2 Fuel tank parameters under various pressures

小 dp_o 、 dp_N 和 dp_c , 此时气液平衡状态被打破, 燃油内溶解的氧、氮和二氧化碳会向气相逸出并达到新的平衡, 逸出质量为 dO_F 、 dN_F 和 dC_F , 油箱气相空间氧、氮和二氧化碳质量改变量为 dO_U 、 dN_U 和 dC_U , 由于油箱与外界环境压力相同, 为保持压力平衡, 油箱内向外界排出 dO_{OUT} 、 dN_{OUT} 和 dC_{OUT} 质量的气体, 根据质量守恒可列出如下方程

$$dO_{OUT} = dO_U + dO_F = \frac{V_U dp_o}{R_o T_U} + \frac{\beta_o V_F dp_o}{R_o T_F} \quad (1)$$

$$dN_{OUT} = dN_U + dN_F = \frac{V_U dp_N}{R_N T_U} + \frac{\beta_N V_F dp_N}{R_N T_F} \quad (2)$$

$$dC_{OUT} = dC_U + dC_F = \frac{V_U dp_c}{R_c T_U} + \frac{\beta_c V_F dp_c}{R_c T_F} \quad (3)$$

式中: V_U 为气相空间体积; V_F 为燃油体积; β_o 、 β_N 和 β_c 为氧气、氮气和二氧化碳阿斯特瓦尔德系数; R_o 、 R_N 、 R_c 为氧、氮和二氧化碳气体摩尔常数。

由于氧氮成比例排出, 因此排出氧氮分压比应该与气相空间氧氮摩尔比相同, 即有

$$\begin{cases} \frac{dO_{OUT}}{dN_{OUT}} = \frac{p_o M_o}{p_N M_N} \\ \frac{dO_{OUT}}{dC_{OUT}} = \frac{p_o M_o}{p_c M_c} \end{cases} \quad (4)$$

式中: M_o 、 M_N 和 M_c 分别为氧、氮和二氧化碳摩尔质量。

油箱内各组分分压力变化之和与外界环境压力变化相同, 即

$$dp_o + dp_N + dp_c = dp_t \quad (5)$$

联立式(1)–(5)可得

$$dp_o = \frac{dp_t \cdot B_1/A_1}{B_1/A_1 + B_2/A_2 + B_3/A_3} \quad (6)$$

$$dp_N = \frac{dp_t \cdot B_2/A_2}{B_1/A_1 + B_2/A_2 + B_3/A_3} \quad (7)$$

$$dp_c = \frac{dp_t \cdot B_3/A_3}{B_1/A_1 + B_2/A_2 + B_3/A_3} \quad (8)$$

式中: $A_1 = \frac{V_U + \beta_o V_F}{R_o T_F}$, $A_2 = \frac{V_U + \beta_N V_F}{R_N T_F}$, $A_3 = \frac{V_U + \beta_c V_F}{R_c T_F}$, $B_1 = p_o M_o$, $B_2 = p_N M_N$, $B_3 = p_c M_c$ 。

油箱中氧、氮和二氧化碳浓度分别为

$$x_o = \frac{p_o - dp_o}{p_t - dp_t} \quad (9)$$

$$x_N = \frac{p_N - dp_N}{p_t - dp_t} \quad (10)$$

$$x_c = \frac{p_c - dp_c}{p_t - dp_t} \quad (11)$$

外界环境高度与压力的关系为^[17]

$$\begin{cases} p_t = 1.01325 \times 10^5 (1 - 0.225577 \times 10^{-4} h)^{5.25588} \\ 0 \text{ m} \leq h < 11000 \text{ m} \\ p_t = 2.263204 \times 10^4 e^{-1.576885 \times 10^{-4} (h - 11000)} \\ 11000 \text{ m} \leq h < 12173 \text{ m} \end{cases} \quad (12)$$

式中 h 为高度。

当取 p_c 、 β_c 为 0 时, 模型蜕化为 NEA 气体油箱平衡氧浓度计算模型。

2 计算与分析

2.1 模型验证

采用空客 A320 中央翼缩比油箱, 其尺寸为 2.2 m(长)×0.5 m(高)×1.2 m(宽), 计算不同高度间隔 dh 对油箱气相空间氧浓度随飞行高度变化的影响, 如图 3 所示。从图中可以看出高度间隔在 10 m 内, 基本对计算没有影响, 因此本文后续计算中, 高度间隔 dh 设置为 10 m。

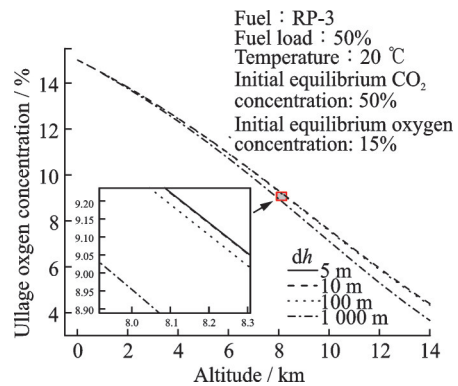


图 3 不同高度间隔对平衡氧浓度的影响

Fig.3 Effect of altitude intervals on equilibrium oxygen concentration

图 4 首先给出了文献[18]所提供的气相氧浓度随高度的变化关系, 从曲线上可见, 在飞行高度为 11 000 m 时, 得到通常概念中平衡氧浓度约为 34% 的结果。然后, 选取了几种不同的航空燃油, 并设定油箱载油量为 90%, 用本文所推导的数学模型计算了平衡氧浓度变化, 从图中可见, 虽然选取的燃油类型、初始载油量等参数不同, 但本文的计算结果与文献[18]中所给的结果仍十分接近, 故可认为所推导的数学模型基本正确。从计算结果可见, 随着飞行高度的增加, 油箱中平衡氧浓度不断上升, 但由于不同燃油的氧、氮溶解度和逸出量不同, 因此氧浓度也有差异。例如, 国产 RP-3 和美国 JP-4 燃油在 12 000 m 时, 其平衡氧浓度相差约 2.5%。

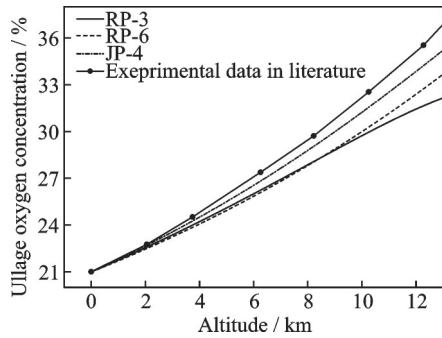


图4 90%载油量时气相空间平衡氧浓度与高度关系
Fig.4 Relationship between equilibrium oxygen concentration and altitude at 90% fuel load

2.2 不同参数对平衡氧浓度的影响

在地面采用NEA或MIG气体将油箱惰化至平衡状态,然后停止向油箱中通入NEA或MIG气体,并使飞机爬升至巡航高度,在爬升过程中,气体会从燃油中逸出,从而造成油箱气相空间氧浓度的变化。计算中仍然选用空客A320中央翼缩比油箱,所选取的NEA和MIG气体中氧浓度一致,MIG中二氧化碳的浓度固定为50%,结果如图5所示。

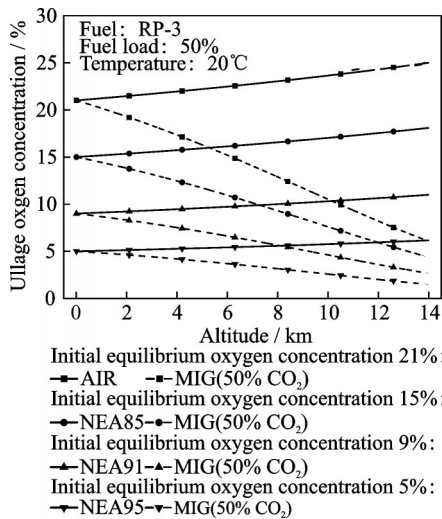


图5 不同初始氧浓度下平衡氧浓度与高度的关系
Fig.5 Relationship between equilibrium oxygen concentration and altitude under various initial oxygen concentrations

从图5中可见,不同初始氧浓度下,使用NEA充分惰化的燃油箱气相空间氧浓度随高度增加不断上升,这个结果与文献[13]及文献[19]相似,而使用MIG时,油箱中气相空间氧浓度却随高度增加不断下降,其原因在于MIG中二氧化碳的溶解度远大于氧气,当压力随高度减少时,燃油中二氧化碳的逸出量也远大于氧气,因此逸出的二氧化碳可使油箱气相空间氧浓度不断下降。

采用氧浓度为9%的NEA和氧浓度为9%、二氧化碳浓度为70%的MIG,分析了不同载油率下平衡氧浓度随高度的变化关系,如图6所示。从图中可见,无论是使用NEA还是MIG,随着载油量增加,油箱气相空间容积减少,燃油中溶解的气体量也增加,氧浓度变化也越大。

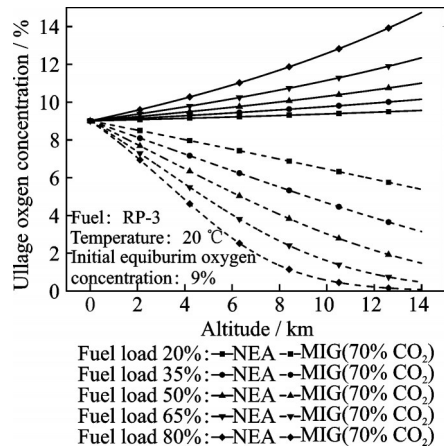


图6 不同载油率下平衡氧浓度与高度的关系
Fig.6 Relationship between equilibrium oxygen concentration and altitude at various fuel loads

图7中将MIG气体中氧浓度固定为12%,通过调整二氧化碳浓度后,分析油箱气相空间氧浓度随高度变化关系。从图中可发现,随着二氧化碳浓度减少,油箱气相空间氧浓度随高度的减少趋势变缓,当二氧化碳浓度为0%时,MIG气体蜕化为含氧为12%的NEA气体,这时油箱气相氧浓度随高度不仅不能减少,还会有所增加。

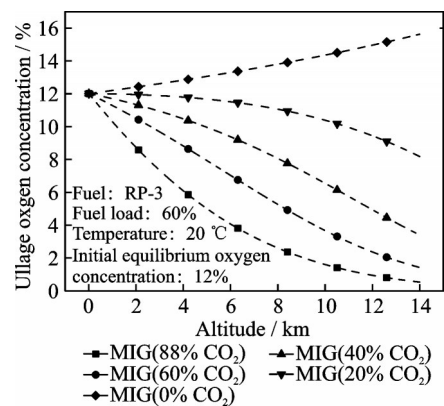


图7 CO₂含量对平衡浓度的影响
Fig.7 Effect of CO₂ contain on equilibrium oxygen concentration

图8计算了不同温度下平衡氧浓度变化,可以看出,当使用NEA气体时,在同一高度下,燃油温度越高,油箱气相空间氧浓度越低,其主要原因在于:虽然温度增加后,氧、氮溶解度都增加,但两者溶解度差别减少,因此当高度增加时,氧、氮气体的

逸出量之差趋小。使用 MIG 气体时,燃油温度越高,油箱气相空间氧浓度越高,其原因在于:二氧化碳溶解度随着温度上升而下降,因此温度升高时,二氧化碳逸出量减少,而氧气逸出量却增加,从而导致油箱气相空间浓度增加。此外,在 14 km 高度下,从 -40~40 °C 时使用 NEA 气体的油箱气相氧浓度差值约为 0.5%,而使用 MIG 气体的油箱氧浓度差值为 4%,这表明温度会对使用 MIG 气体的油箱产生更大影响。

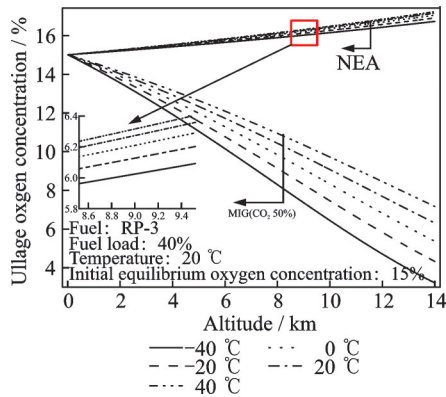


图 8 温度对平衡氧浓度的影响

Fig.8 Effect of temperature on equilibrium oxygen concentration

表 1 中计算了油箱容积 1 m³,温度为 20 °C,载油率为 80%,初始氧浓度为 9%,MIG 中二氧化碳浓度为 30% 情况下,不同燃油在海平面和 12.8 km 巡航高度下气体溶解量和逸出量。从表中可见,燃油类型对气体逸出影响较大,且二氧化碳逸出量超过氧气和氮气。

表 1 不同燃油类型在典型高度下气体溶解量和逸出量

Table 1 Dissolved and released gas from fuels at typical altitude

Fuel type	Dissolved gas at sea level/g			Released gas at cruise level/g		
	O ₂	N ₂	CO ₂	O ₂	N ₂	CO ₂
RP-3	24.9	70.1	806.4	23.5	68.7	404.5
RP-5	19.9	55.8	642.6	18.6	54.3	332.9
RP-6	17.6	49.4	568.6	16.4	47.8	300.3
JET A	22.2	62.4	717.6	20.8	60.9	365.8
JP-4	28.4	79.8	918.6	26.8	78.5	453.2
JP-5	21.2	59.5	684.8	19.8	58.0	351.5

3 结 论

本文以耗氧惰化技术为背景,建立了混合惰气平衡氧浓度数学模型,在考虑载油量、惰气组分含量、燃油温度等因素的基础上,分析了油箱气相氧浓度随高度变化的关系,结果显示:

(1)在地面采用 MIG 或 NEA 气体来惰化油箱后,随着飞行高度的增加,油箱气相空间中氧浓度变化情况完全相反,使用 MIG 气体的油箱,其氧浓度随着飞行高度增加而降低,而使用 NEA 气体的油箱气相氧浓度随着飞行高度的增加而增加。因此,MIG 气体对溶解氧逸出造成气相空间氧浓度的增加趋势有很好的抑制作用;

(2)油箱载油率越大,气相空间容积越小,在地面初始惰化时溶解的气体量越多,因此在相同的巡航高度下,气相空间氧浓度变化幅度越大,但是采用 MIG 和 NEA 气体的趋势相反;

(3)从抑制油箱气相氧浓度增加的角度出发,燃油温度增加对采用 MIG 气体的油箱不利,而对采用 NEA 气体的油箱有利,其原因在于,随着温度增加,二氧化碳在燃油中的溶解度下降,而氧气的溶解度上升。

用 MIG 气体惰化油箱可有效抑制油箱气相空间氧浓度随飞行高度而增加的不利趋势,因此有望应用在地面惰化和预洗涤等系统中,其优于 NEA 气体。

参考文献:

[1] CHERRY R, WARREN K. A benefit analysis for nitrogen: DOT/FAA/AR-99/73 [R]. London, England: CAA, Inerting of Aircraft Fuel Tanks Against Ground Fire Explosion, 1999.

[2] KOSVIC T C, ZUNG L B, GERSTEIN M, et, al. Analysis of aircraft fuel tank fire and explosion hazards: AFAPL-TR-71-7[R].[S.l.]: [s.n.], 1971.

[3] DESMARAIS L A, TOLLE F F, ALLEN T D. Evaluation of advanced airplane fire extinguishants [C]//Proceedings of the 19th AIAA, SAE, and ASME, Joint Propulsion Conference. Seattle, W A: AIAA, 1983: 179-191.

[4] DESMARAIS L A, TOLLE F F. Integrated aircraft fuel tank inerting and compartment fire suppression system. volume 2. evaluation of nitrogen-enriched air as a fire suppressant: AFWAL-TR-83-2021 [R].[S. l.]:[s.n.], 1983.

[5] CLODFELTER R G, ANDERSON C L, VAN-NICE W L. OBIGGS for fighter aircraft [C]//Proceedings of Aerospace Technology Conference and Exposition. Long Beach, California:[s.n.], 1987: 4-9.

[6] Fuel Tank Harmonization Working Group. Fuel tank inerting final report: Task Group 3 [R]. [S. l.]: ARAC, 1998.

[7] ABRAMOWITZ A, BORIS P. Characterization of an oxygen/nitrogen permeable membrane systgem: DOT/FAA/AR-95/91[R].1996: 3-9.

- [8] SMITH D E. Fuel tank inerting systems for civil aircraft[D]. Colorado:Colorado State University, 2014: 9-20.
- [9] 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.
- [10] ROBERT J R, MORRIS W, MILLER J, et al. Fuel deoxygenation and aircraft thermal management[C]//Proceedings of the 4th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC). San Diego: AIAA, 2006: 4027.
- [11] LIMAYE S, ROBERTSON S, KOEING D, et al. Development of a "Green" on-board inert gas generation system[C]//Proceedings of the 15th Triennial International Fire & Cabin Safety Research Conference. Atlantic City, New Jersey:[s.n.], 2007.
- [12] WALKER S, JUNG W, ROBERTSON S. Demonstration of a novel catalyst based green on board inert gas generation system (GOBIGGS) for fuel tank inerting[C]//Proceedings of the AHS 69th Annual Forum. Phoenix, Arizona:[s.n.], 2013.
- [13] 冯诗愚, 刘卫华, 黄龙, 等. 飞机燃油箱气相空间平衡氧浓度理论研究[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 & Astronautics, 2011, 43(4): 556-560.
- [14] Coordinating Research Council. Handbook of aviation fuel properties: CRC REPORT NO. 635[R]. [S.l.]: [s.n.], 2004.
- [15] ASTM. Standard test method for estimation of solubility of gases in petroleum liquids: D2779—92[S]. [S.l.]: [s.n.], 2002.
- [16] 汪明明. 飞机油箱气相空间氧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 University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [17] 寿荣中, 何慧珊. 飞行器环境控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
SHOU Rongzhong, HE Huishan. Aircraft environment control[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2004.
- [18] H. Ф. 杜博夫金, B. Г. 马拉尼切娃, Ю. И. 马苏尔. 喷气燃料性能手册[M]. 常汝楫, 译. 北京: 航空工业出版社, 1990.
- [19] 何勇, 李超越. 飞机燃油箱地面预洗涤技术理论研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2016, 31(1): 95-100.
HE Yong, LI Chaoyue. Theoretical research on ground-based prescribing technology for aircraft fuel tank[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2016, 31(1): 95-100.

(编辑: 夏道家)