

文章编号:1000-8055(2011)11-2528-06

气体分配方式对多隔仓燃油箱地面惰化的影响

冯晨曦, 刘卫华, 鹿世化, 冯诗愚

(南京航空航天大学 航空宇航学院, 南京 210016)

摘 要: 在各仓温度和压力为定常边界条件下,采用数值积分法,建立多仓燃油箱冲洗的数值模型,应用波音 747 中央翼燃油箱,通过将计算结果与国外文献中公布的实验数据进行比较,验证了模型具有较高的计算精度;然后,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,计算出各隔仓氧气体积分数随时间及换气次数的变化关系,结果表明:要使各隔仓均惰化至目标氧气体积分数,按体积分配富氮气体的均匀进气方式所需的惰化时间最短,按数量分配的均匀进气方式所需的时间最长;由左舷、中弦、右弦整体平均氧气体积分数随换气次数的变化,可知非均匀进气方式优于均匀进气方式。

关 键 词: 燃油惰化; 冲洗; 燃油箱; 多隔仓; 气体分配

中图分类号: V228; TQ021.4

文献标志码: A

Study on ground-based inerting process influenced by different gas distribution for multi-bay fuel tank

FENG Chen-xi, LIU Wei-hua, LU Shi-hua, FENG Shi-yu

(College of Aerospace Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Under the constant temperature and pressure boundary conditions, a mathematical model of fuel washing was established based on the numerical integration method. Firstly, the validity of the model was verified by comparing the calculated results obtained from the model of Boeing 747 with the experimental data published in foreign literatures, showing good agreement of the results. Secondly, the model of Boeing 737 central wing fuel tank was chosen as a research objective, the inerting gas was distributed by uniform and non-uniform ways; when the flow of inerting gas was distributed by volume and quantity ways, the changes of oxygen concentration with time and volumetric tank exchange (VTE) were calculated. The results shows that, when inerting is completed, uniform inlet with nitrogen-rich air distributed by volume costs the shortest inerting time, and uniform inlet with nitrogen-rich air distributed by quantity costs the longest inerting time. The comparison between changes of left side, right side and center in overall average oxygen concentration with VTE shows that non-uniform inlet is better than uniform inlet.

Key words: fuel inerting; washing; fuel tank; multi bays; gas distribution

收稿日期:2010-12-02; 修订日期:2011-03-05

基金项目:航空科学基金(50306017); 南京航空航天大学引进人才科研基金(S1030-014)

作者简介:冯晨曦(1986—),男,江苏太仓人,硕士生,主要从事多隔仓燃油箱惰化技术的研究。

通讯作者:冯诗愚(1974—),男,浙江绍兴人,副教授,博士,主要从事油箱惰化、机载制冷及膜分离技术方面的研究。

油箱惰性化技术是指通过技术措施, 保证飞机油箱上部空间气相层的氧气体积分数, 在整个飞行过程中始终保持低于支持燃油燃烧所需要的氧浓度水平, 以保障飞机燃油箱的安全性^[1-5]. 机载燃油箱惰性化技术可分为冲洗和洗涤. 冲洗又称为惰性气体置换技术, 即将富氮气体 (NEA) 通入油箱上部气相空间, 将其中的氧气和燃油蒸气置换排出, 使气相空间氧气体积分数达到所要求的极限氧气体积分数以下, 其管路布置相对简单, 适合用于民用客机.

1996 年 7 月 17 日, 环球航空公司的一架 B747-100 客机在执行 800 号航班任务时, 于纽约长岛上空爆炸, 机上 230 人全数丧命^[1], 这一事故引起了人们对于飞机中央翼燃油箱安全性的强烈关注, 促使油箱惰性化技术快速发展^[2]. 在环球航空公司的事故发生后, 美国和欧洲开展了大量的研究工作, 成功研发了机载膜分离制氮及油箱冲洗惰性化技术, 将其纳入了适航条例之中^[6-7]. 我国正在研发的国产大飞机 C919, 为了满足适航条例的要求, 更是将燃油箱惰性化技术列入了 50 余项关键技术.

燃油箱惰性化技术应用的前提在于清晰地了解惰化过程中油箱内氧气体积分数的分布规律. 文献[8]采用微分方法建立了燃油箱冲洗过程数学模型, 但是所建模型仅适用于单仓油箱, 不适用于多仓模型. 计算流体动力学 (CFD) 方法可进行多隔仓燃油箱惰化过程的仿真, 从而获取各位置的浓度场及速度场等详细信息, 但是其计算时间较长^[9].

本文采用数值积分的方法, 建立了一种多隔仓油箱冲洗的工程计算模型, 首先将该模型应用于波音 747 多隔仓中央翼燃油箱中, 并将计算结果与国外文献中公布的实验数据进行了比较. 随后, 将此模型应用于波音 737 多隔仓中央翼燃油箱, 研究通过采用均匀进气及非均匀进气这两种不同的方法, 对惰化过程所造成的不同影响.

1 燃油箱冲洗模型的建立

在建立理论模型之前提出如下合理的假设:

- 1) 氧氮及混合气体均视为理想气体;
- 2) 计算步长内, 各种气体充分混合, 并且每个隔仓中上部的热力参数和体积分数各处相同, 但各隔仓间有所差别;
- 3) 油箱中无燃油, 为空油箱;
- 4) 惰化气体和燃油箱气相温度相同;

5) 燃油箱中无质量堆积, 即气体净流入体积与净流出体积完全相同.

如图 1 所示, 假设第 i 个隔仓周边有 m 个隔仓向该仓注入混合气体, 故总充入混合气体质量为

$$m_{\text{in,all},i} = \sum_{k=1}^m m_{\text{in},i,k} = \sum_{k=1}^m (m_{\text{O, in}, i, k} + m_{\text{N, in}, i, k}) \quad (1)$$

该仓有 n 个口向外排放气体, 总排出气体质量为

$$m_{\text{out,all},i} = \sum_{l=1}^n m_{\text{out},i,l} = \sum_{l=1}^n (m_{\text{O, out}, i, l} + m_{\text{N, out}, i, l}) \quad (2)$$

同时向该仓充入富氮气体, 质量流量为 $\dot{m}_{\text{nea}}$, 则流入的富氮气体中氧氮质量分别为

$$\begin{cases} m_{\text{O, nea}, i} = a_{\text{O, nea}} \dot{m}_{\text{nea}, i} \Delta t \\ m_{\text{N, nea}, i} = a_{\text{N, nea}} \dot{m}_{\text{nea}, i} \Delta t \end{cases} \quad (3)$$

式中下标 O 和 N 分别代表氧气和氮气.

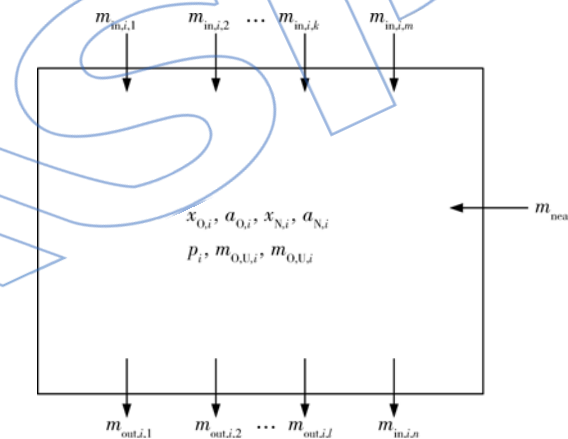


图 1 第 i 仓与相邻隔仓流动关系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of flows between bay i and the adjacent bays

时间步长 Δt 初始时刻气相空间的氧氮质量分别为 $m_{\text{O,U},i}^t$ 和 $m_{\text{N,U},i}^t$, 终了时刻的质量为 $m_{\text{O,U},i}^{t+\Delta t}$ 和 $m_{\text{N,U},i}^{t+\Delta t}$, 则分别对氧氮做质量平衡, 有

$$m_{\text{O,U},i}^t + m_{\text{O, nea}, i} + m_{\text{O, in, all}, i} = m_{\text{O,U},i}^{t+\Delta t} + m_{\text{O, out, all}, i} \quad (4)$$

$$m_{\text{N,U},i}^t + m_{\text{N, nea}, i} + m_{\text{N, in, all}, i} = m_{\text{N,U},i}^{t+\Delta t} + m_{\text{N, out, all}, i} \quad (5)$$

如果认为油箱内的压力与外界压力相等, 即 $p_i = p_t$, 并将式 (1)~(3) 代入后可得

$$\frac{p_t V_{U,i} (x_{\text{O},i}^t - x_{\text{O},i}^{t+\Delta t})}{R_0 T} + a_{\text{O, nea}} \dot{m}_{\text{nea}, i} \Delta t + \sum_{k=1}^m a_{\text{O}, k} m_{\text{O, in}, i, k} = \sum_{l=1}^n m_{\text{O, out}, i, l} \quad (6)$$

$$\frac{p_t V_{U,i} (x_{O,i}^{t+\Delta t} - x_{O,i}^t)}{R_N T} + a_{N,nea} \dot{m}_{nea,i} \Delta t + \sum_{k=1}^m a_{N,k} \dot{m}_{N,in,i,k} = \sum_{l=1}^n m_{N,out,i,k} \quad (7)$$

式中 R_O 和 R_N 为氧氮气体常数, $V_{U,i}$ 为第 i 个隔仓的气相空间体积, T 为温度, a 为氧气或氮气的质量分数, x 为氧气或氮气的体积分数.

如果认为第 i 仓排出的气体按终了时刻氧氮气的体积分数比排出^[10], 则显然有

$$\frac{\sum_{l=1}^n m_{O,out,i,k}}{\sum_{l=1}^n m_{N,out,i,k}} = \frac{p_{O,i}^{t+\Delta t} M_O}{p_{N,i}^{t+\Delta t} M_N} = \frac{x_{O,i}^{t+\Delta t}}{1 - x_{O,i}^{t+\Delta t}} \frac{M_O}{M_N} \quad (8)$$

联立式(6)~(8), 在相邻仓其他参数以及第 i 仓初始时刻仓内氧气体积分数确定的情况下, 可求解出第 i 仓终了时刻的氧气体积分数 $x_{O,i}^{t+\Delta t}$. 由于计算起始时, 所有隔仓中的氧气体积分数及其他参数均一致, 因此只要选择一个计算时间步长 Δt , 富氮气体的流量 $\dot{m}_{nea}$ 以及各仓之间相互的流动关系, 则可逐步递推计算出任意时刻下所有仓中的氧气体积分数分布.

为了便于对不同体积的燃油箱及富氮气体流量下的惰化规律进行比较研究, 定义一无量纲准则数——换气次数 V_{te} ^[11] 为

$$V_{te} = \frac{\dot{Q}_{nea} t}{V_U} = \frac{\dot{m}_{nea} t}{\rho_{nea} V_U} \quad (9)$$

式中 ρ_{nea} 为富氮气体密度; $\dot{Q}_{nea}$ 为富氮气体体积流量.

2 波音 747 多仓燃油箱的模型验证

为了验证本文所推导模型的正确性, 采用波音 747 中央翼燃油箱结构对模型进行验证, 计算中选取油箱初始氧气体积分数为 21%, 温度为 20 °C, 油箱中各隔仓体积与文献[12]中所公布数

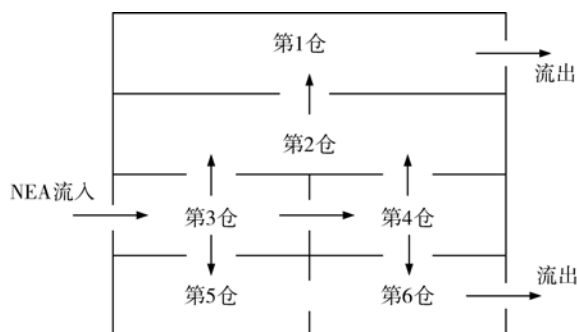


图2 波音 747 中央翼燃油箱示意图

Fig. 2 Diagram of Boeing 747 center wing fuel tank

据一致, 富氮气体质量流量为 4.98×10^{-2} kg/s, 富氮气体中氧气的体积分数为 5%, 波音 747 中央翼燃油箱如图 2 所示.

由图 3 可见, 本文中的数值模型计算结果与国外实验数据相比, 具有较高的计算精度, 符合工程设计要求.

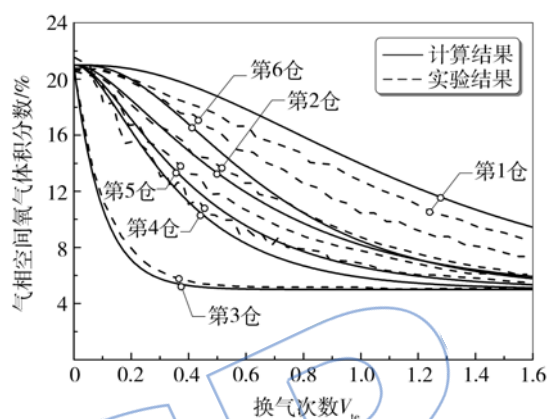


图3 波音 747 惰化模型与国外实验数据对比

Fig. 3 Comparison between Boeing 747 interring model and foreign experimental data

3 气体分配方式对惰化过程影响

3.1 均匀进气及非均匀的气体分配方法

本文选取了两种不同的进气方式, 对惰化过程进行研究, 其中图 4(a) 为非均匀进气方式, 所有的富氮气体均流入位于 737 油箱中部的第 1, 2 和 3 仓; 而图 4(b) 为均匀进气方式, 即富氮气体通过管道引入所有的隔仓. 在两种进气方式下, 其与外界环境连通的排气孔设置位置相同, 均位于两侧的第 7 和第 11 仓.

此外, 每个隔仓所流入的富氮气体流量也有两种方式分配, 第一种称为按数量平均, 即

$$\dot{m}_{nea,i} = \frac{\dot{m}_{nea}}{N_{nea}} \quad (10)$$

另外一种称为按体积平均, 即

$$\dot{m}_{nea,j} = \dot{m}_{nea} \frac{V_{U,j}}{\sum_{j=1}^n V_{U,j}} \quad (11)$$

式中 N_{nea} 为有富氮气体流入的隔仓总数量.

3.2 波音 737 在两种方法下的比较分析

计算中总的富氮气体质量流量为 4.98×10^{-2} kg/s, 其所含氧气体积分数为 5%, 惰化时间为 30 min, 油箱温度为 20 °C, 各隔仓初始氧气体积分数均为 21%, 各隔仓的体积及富氮气体的充

入质量流量见表 1。

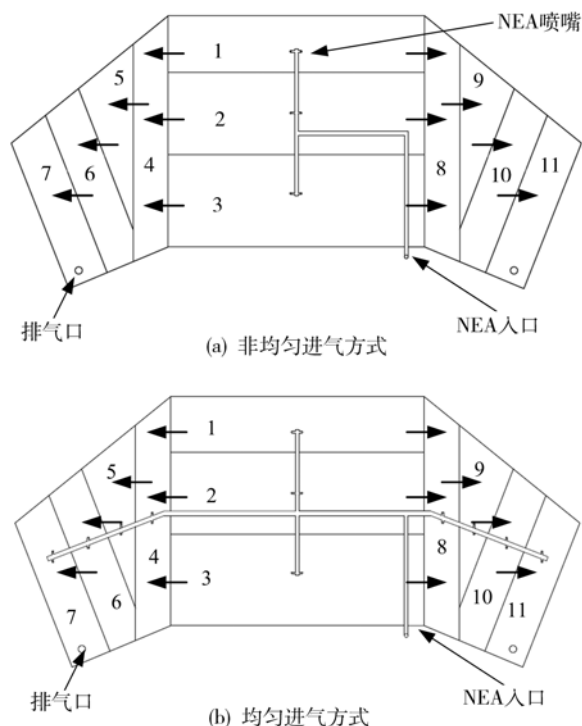


图 4 波音 737 多隔舱燃油箱进气示意图

Fig. 4 Intake diagram of Boeing 737 multi-bays fuel tank

表 1 各舱容积及富氮气体质量流量

Table 1 Volume and NEA flow rate of each bay

隔 仓	各仓 容积/ m^3	富氮气体流量 / $10^{-2} (\text{kg/s})$			
		非均匀分配		均匀分配	
		数量 平均	容积 平均	数量 平均	容积 平均
1	2.093	1.660	1.215	0.453	0.640
2	3.052	1.660	1.775	0.453	0.933
3	3.440	1.660	1.990	0.453	1.052
4/8	1.145	0	0	0.453	0.350
5/9	0.732	0	0	0.453	0.224
6/10	0.990	0	0	0.453	0.303
7/11	0.984	0	0	0.453	0.301

图 5 显示了非均匀进气方式下按体积和按数量平均时,各舱中氧气体积分数与换气次数之间的关系,从图中可见,两种方式下,第 4 至第 11 隔舱的氧气体积分数变化规律基本相同,但是第 1 至第 3 隔舱中氧气体积分数变化规律差别较大,

以惰化至氧气体积分数低于 12% 为例,第 1 仓按数量平均方式较按体积平均方式更快,但是第 2 仓和第 3 仓则是按体积平均方式更优,其原因在于,由于第 1 仓容积较小,故此按体积平均方式,其流入的富氮气体流量也较按数量平均少,因此惰化过程也没有按数量平均快。

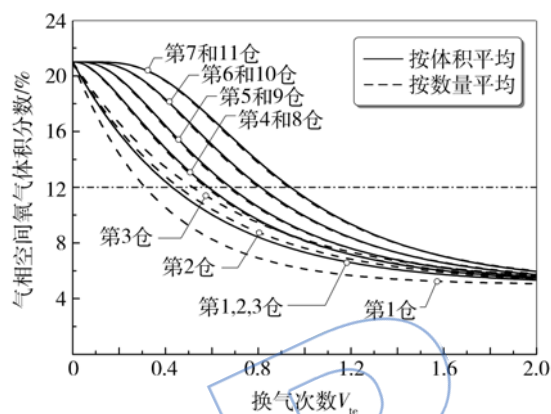


图 5 非均匀进气方式下氧气体积分数与换气次数关系

Fig. 5 Relationship between molar concentration of oxygen and V_{te} under non-uniform inlet

图 6 给出了均匀进气下,各舱中氧气体积分数与换气次数之间的关系,从图中可见,此时按数量平均和按体积平均存在很大差异,按体积平均时,各舱的惰化过程完全重合,达到 12% 的氧气体积分数所需 V_{te} 约为 0.82; 而按数量平均时,第

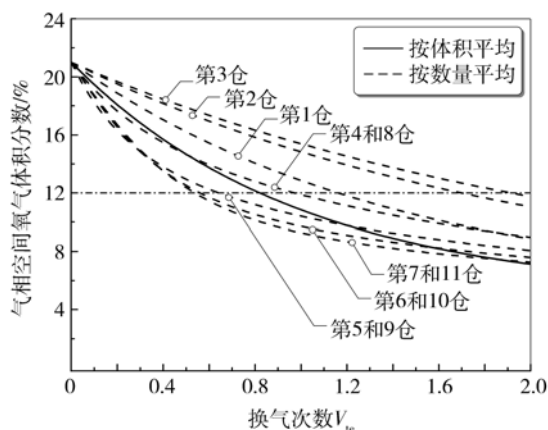


图 6 均匀进气方式下氧气体积分数与换气次数关系

Fig. 6 Relationship between molar concentration of oxygen and V_{te} under uniform inlet

7 和 11 仓在 V_{te} 约为 0.54 时已经达到 12% 的氧气体积分数,而第 3 仓所需 V_{te} 则需要约为 1.91,其原因在于第 3 仓容积较大,但是按数量平均时,所分配获得的富氮气体流量却较少,因此惰化十分缓慢。

如果以所有仓均达到氧气体积分数为 12% 为考核指标,表 2 中列出了以上所述几种富氮气体分配方式下,惰化过程所需的换气次数和实际的惰化时间,从表中可见,按体积平均的均匀进气方式所需的换气次数最少,而按数量平均的均匀进气方式所需的最多,而非均匀进气方式下的两种平均方式所需换气次数基本相同。

表 2 不同气体分配方式下的惰化效果

Table 2 Inerting effect under different gas distribution

进气方式	换气次数	惰化时间/s	换气次数	惰化时间/s
富氮气体流量/ $10^{-2}(\text{kg/s})$	5		10	
均匀 体积平均	0.813	320	0.813	162
进气 数量平均	1.908	738	1.908	372
非均匀 体积平均	0.938	366	0.938	186
进气 数量平均	0.938	366	0.938	186

但是,在实际的工程设计中,要严格地控制进入每个仓的富氮气体流量十分困难,而且如果油箱总载有燃油,各个隔仓实际的气相空间容积也随着飞行时间的推移而逐渐变化,因此各仓之间的容积比例也会相应变化,按体积平均几乎无法实现,所以,只有按数量平均才有可能得到应用。此外,在油箱惰化设计过程中,更多的关心于油箱的整体平均氧气体积分数随时间的变化关系。考虑到实际油箱结构特点和用油顺序,因此将第 1 至第 3 号仓定义为中舷隔仓组、第 4 至第 7 仓定义为左舷隔仓组,而第 8 至第 11 号仓定义为右舷隔仓组,对任意时刻时每个隔仓组中所有隔仓中的氧气体积分数进行平均,从而获得三组隔仓组中整体平均氧气体积分数的变化规律,如图 7 所示。

从图 7 中可见,同样以氧气体积分数达到 12% 为考察标准,非均匀进气方式时,左舷和右舷换气次数略大于均匀进气方式,但是中舷要远优于均匀进气方式。如果将氧气体积分数达到的指标控制在 9%,则无论左舷、右舷还是中舷,非均

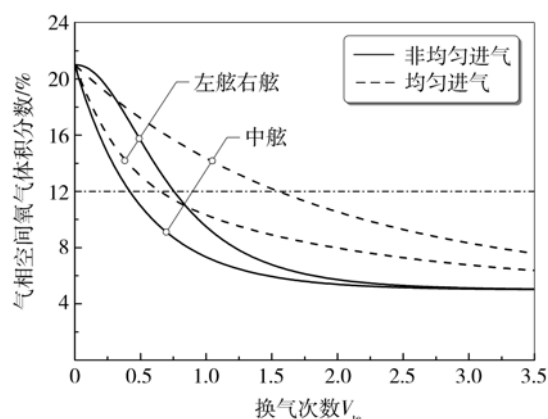


图 7 各隔仓组整体平均氧气体积分数随换气次数变化关系

Fig. 7 Relationship between overall average oxygen concentration and V_{te}

匀进气方式都优于均匀进气方式。

4 结论

本文建立了一种多隔仓燃油箱冲洗惰化过程数学模型,运用此模型预测多隔仓燃油箱地面惰化过程中上部气相空间氧气体积分数随时间的变化关系,并研究了惰化气体在不同方式下进气时,对多隔仓燃油箱地面惰化过程的影响。研究结果显示:

1) 非均匀进气方式时,无论是按体积平均还是按数量平均来分配进入各仓的富氮气体,只对第 1 至 3 号隔仓的惰化过程影响较大。

2) 均匀进气方式时,若按体积平均分配富氮气体,则各隔仓惰化过程完全相同,但是若按数量平均分配富氮气体,则各隔仓惰化过程差异明显,以氧气体积分数达到 12% 为例,第 3 仓所需惰化时间比第 7 和 11 仓长约 3.5 倍。

3) 计算结果表明,若要求各隔仓均达到某个确定的氧气体积分数,则按体积分配的均匀进气方式所需惰化时间最短,按数量分配的均匀进气方式所需的时间最长,其余两种方法的惰化时间基本相同,且介于前两者之间;虽然按体积分配的均匀进气方式惰化过程最优,但是,考虑到该方案在实际工程设计中基本无法实现,因此很难实际应用。

4) 分析波音 737 隔仓组总体平均氧气体积分数的变化规律,结果也显示非均匀进气方式优于均匀进气方式。

本文的研究结果说明,富氮气体的进气方式

对多隔仓燃油箱惰化效果有极大地影响,在实际工程应用中,按数量分配的非均匀进气方式为最优方案。

在后续研究中,将进一步考虑不同的油箱载油率、氧氮气体的逸出、飞行全程中外界压力变化等诸多因素对多隔仓燃油箱惰化过程的影响,为飞机燃油箱惰化方案选择提供更加准确的理论支持。

参考文献:

- [1] William M C. The effect of fuel on an inert ullage in a commercial transport airplane fuel tank[R]. Washington, DC, USA: Office of Aviation Research, DOT/FAA/AR-05/25, 2005.
- [2] 肖再华. 飞机燃油箱惰化[J]. 航空科学技术, 2005, 17(1): 31-32.
XIAO Zaihua. Inerting of aircraft fuel tank[J]. Aerospace Science and Technology, 2005, 17(1): 31-32. (in Chinese)
- [3] William M C. Measuring oxygen concentration in a fuel tank ullage[J]. AIAA 2009-1743, 2009.
- [4] 王小平, 肖再华. 飞机燃油箱氮气惰化的机理分析及应用[J]. 航空科学技术, 2008, 20(6): 24-26.
WANG Xiaopin, XIAO Zaihua. Fundamentally analysis on inerting of aircraft fuel tank with nitrogen-enriched air and its application [J]. Aerospace Science and Technology, 2008, 20 (6): 31-32. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] Michael B, William M C, Richard H, et al. Flight-testing of the FAA onboard inert gas generation system on an airbus A320[R]. Atlantic City, New Jersey, USA: William J Hughes Technical Center, DOT/FAA/AR-03/58, 2004.
- [7] Michael B, William M. C. Ground and flight testing of a Boeing 737 center wing fuel tank inerted with nitrogen-enriched air[R]. Washington, DC, USA: Office of Aviation Research, DOT/FAA/AR-01/63, 2001.
- [8] 高秀峰, 刘卫华, 熊斌, 等. 燃油箱冲洗惰化过程理论研究[J]. 西安交通大学学报, 2010, 46(9): 16-20.
GAO Xiufeng, LIU Weihua, XIONG Bin, et al. Theoretical study of washing inerting process in aircraft fuel tank [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 46(9): 16-20. (in Chinese)
- [9] Michael B, William M C. Inerting of a vented aircraft fuel tank test article with nitrogen-enriched air[R]. Washington, DC, USA: Office of Aviation Research, DOT/FAA/AR-01/6, 2001.
- [10] 汪明明. 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. 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)
- [11] 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: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [12] William M C, Ole K. Inerting a Boeing 747sp center wing tank scale model with nitrogen-enriched air[R]. Washington, DC, USA: Office of Aviation Research, DOT/FAA/AR-02/51, 2002.