

飞机燃油箱冲洗惰化过程的理论研究

高秀峰¹, 刘卫华², 熊斌³, 张洪³, 李云¹, 冯诗愚²

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 南京航空航天大学航空宇航学院, 210016, 南京;
3. 成都飞机设计研究所燃油动力系统设计研究室, 610041, 成都)

摘要: 采用微分计算方法, 在考虑、不考虑燃油中溶解氧逸出这2种极限情况下, 建立了燃油箱气相空间冲洗惰化的数学模型, 并用实验数据验证了模型的正确性. 以无氧逸出模型为基础, 定义了物理意义明确的惰化率、气相体积换气次数和总体积换气次数3个参数, 用于简捷描述惰化效果及所需要的冲洗气量. 研究结果显示: 在无氧逸出模型中, 气相体积换气次数及惰化终了时气相空间的含氧量与载油量无关, 而总体积换气次数随载油量的增加线性减少; 在有氧逸出模型中, 由于受从燃油中逸出氧气的影响, 气相体积换气次数随载油量增加而急剧上升, 而总体积换气次数仍与载油量成反比关系; 当载油率相同时, 有氧逸出模型的换气次数大于无氧逸出模型的换气次数. 在进行实际冲洗惰化设计时, 可在这2种模型的计算结果之间选择合适的值来估算富氮气体的流量.

关键词: 燃油惰化; 冲洗; 换气次数; 燃油箱; 气体逸出

中图分类号: V228; TQ021.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)09-0016-05

Theoretical Study of Washing Inerting Process in Aircraft Fuel Tank

GAO Xiufeng¹, LIU Weihua², XIONG Bin³, ZHANG Hong³, LI Yun¹, FENG Shiyu²

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 3. Department of Aircraft Power System, Chengdu Aircraft Design & Research Institute, Chengdu 610041, China)

Abstract: Considering or not the evolution of the dissolved oxygen from fuel oil, two different washing inerting mathematical models of ullage for the fuel tank are established with differential method, and the models are verified by experimental data. On the basis of the model without oxygen evolution, three parameters of inerting ratio, volumetric tank exchange of ullage, and total volumetric tank exchange are defined to simplify the description of the inerting process and the calculation of the nitrogen-enriched air flow rate. The results show that the volumetric tank exchange of ullage and the final oxygen concentration of the inerted ullage are independent of the fuel load, but the total volumetric tank exchange decreases when the fuel load increases in the model without oxygen evolution. In the oxygen evolution model, because some oxygen is released from the fuel, the volumetric tank exchange increases dramatically when the fuel load increases, but the total volumetric tank exchange is still inversely related to the fuel load. Under the same fuel load, both volumetric tank exchange of ullage and total volumetric tank exchange in the oxygen evolution model are higher than those in the model without oxygen evolution. In the washing inerting design, a proper flow rate of nitrogen-enriched air can be estimated and determined according to the calculating results via the two models.

Keywords: fuel inerting; washing; volumetric tank exchange; fuel tank; gas evolution

飞机燃油箱惰化技术指的是通过技术措施,使飞机燃油箱上部空间气相层的含氧量在整个飞行过程中始终保持低于支持燃油燃烧所需要的含氧量水平,以保障飞机燃油箱的安全性^[1-2]。

惰化气体或介质主要有液氮、哈龙 1301 和富氮气体 (NEA) 三大类^[3]。液氮和哈龙 1301 虽然有惰化流程简单、技术成熟度高和易于实现全航程按所需流量供给等优点,但由于后勤保障成本高及环保性差,故不是未来发展的方向,而利用机载制氮系统 (OBIGGS) 产生富氮气体来惰化燃油箱,则显示出巨大的发展潜力。机载制氮可采用分子筛或膜分离 2 种方法来实现。由于膜分离法所用设备的质量、体积更小,发动机引气量也小,因此已有取代分子筛的趋势^[4]。

机载燃油箱惰化技术可分为冲洗和洗涤 2 种。冲洗惰化技术也称为惰性气体置换技术,就是将富氮气体通入燃油箱上部的气相空间,把其中的氧气和燃油蒸气置换排出,使气相空间的含氧量低于所要求的极限含氧量,这种技术的管路布置相对简单,适合民用客机。洗涤惰化技术是将富氮气体均匀地充入燃油中,把燃油中溶解的大部分氧气置换排出^[5],这种技术惰化效果好,但是设备和管路布置复杂,目前仅在军用飞机中使用。1990 年代以来,美国和欧洲开展了大量的研究工作,波音和空客飞机都已成功应用了机载膜分离制氮及燃油箱冲洗惰化技术,并将其纳入了适航条例之中^[6-7]。我国的国产大飞机 C919 和支线飞机新舟 700 为了满足适航条例,也将陆续采用这项技术,特别是在国产大飞机的研制中,已将燃油箱惰化作为 50 余项关键技术之一。

燃油箱冲洗惰化的重要工作之一就是确定冲洗惰化所需的富氮气体流量,目前国内的相关研究很少,而国外文献大多仅给出计算或实验结果,缺乏详细的理论分析和数学建模过程。本文拟建立燃油箱冲洗惰化过程的数学模型,分析不同富氮气体浓度和燃油箱载油率对气相空间含氧量的影响,从而得到富氮气体流量的计算方法,为冲洗惰化技术的应用打下理论基础。

1 冲洗惰化过程的数学模型

1.1 无溶解氧逸出模型

所谓无溶解氧逸出,是指不论燃油箱中是否存在燃油,均不考虑燃油中所溶解的氧气向气相空间的逸出。针对此状态建立的冲洗惰化过程数学模型

称为无溶解氧逸出模型,简称为“无氧逸出模型”。为了简化研究的复杂性,模型中做以下基本假设:

- (1) 不考虑燃油中氧气的逸出;
- (2) 环境的压力与燃油箱内的压力保持一致;
- (3) 忽略氧、氮相对分子质量的差异;
- (4) 富氮气体、燃油箱气相及燃油的温度相同;
- (5) 燃油箱上部的热力参数和浓度参数各处相同,且混合过程瞬间完成。

如图 1 所示,在某个时间微元 dt 内,一定的富氮气体流量 $\dot{m}_{\text{NEA}}$ 从入口进入燃油箱上部的气相空间,与气相空间原来的气体混合后,部分混合后的气体从出口排至外界环境中。由于认为燃油箱的压力无变化,即不存在质量堆积,因此排出的气体流量

$$\dot{m}_{\text{out}} = \dot{m}_{\text{NEA}} \quad (1)$$

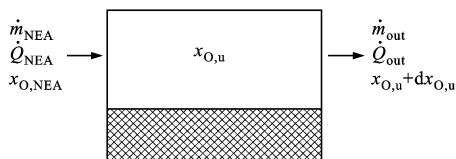


图1 无氧逸出模型的冲洗惰化示意图

由于忽略了氧、氮相对分子质量的差异,即不同组分气体的密度保持一致,因此流入和流出气体的体积流量相同,即

$$\dot{Q}_{\text{NEA}} = \dot{Q}_{\text{out}} = \dot{Q} \quad (2)$$

故在 dt 时间内,气相空间中含氧量的变化与流入、流出气体的体积流量的平衡关系如下

$$\dot{Q}x_{\text{O,NEA}}dt - \dot{Q}x_{\text{O,u}}dt = V_u(x_{\text{O,u}} + dx_{\text{O,u}}) - V_u x_{\text{O,u}} \quad (3)$$

式中: $x_{\text{O,u}}$ 、 $x_{\text{O,NEA}}$ 为气相空间和富氮气体中氧的摩尔分数; V_u 为气相空间的体积。

令 $x = x_{\text{O,NEA}} - x_{\text{O,u}}$, 将其代入式(3)并化简得

$$\dot{Q}xdt = V_u d(x_{\text{O,NEA}} - x) = -V_u dx \quad (4)$$

若认为冲洗开始时气相空间的含氧量与外界环境的含氧量 ($x_{\text{O,amb}}$) 一致,则对式(4)积分得

$$\int_0^t \frac{\dot{Q}}{V_u} dt = \int_{x_{\text{O,NEA}} - x_{\text{O,amb}}}^{x_{\text{O,NEA}} - x_{\text{O,u}}} -\frac{1}{x} dx \quad (5)$$

式中: t 为冲洗惰化时间。积分后可得

$$\frac{x_{\text{O,amb}} - x_{\text{O,u}}}{x_{\text{O,amb}} - x_{\text{O,NEA}}} = 1 - \exp\left(-\frac{\dot{Q}t}{V_u}\right) \quad (6)$$

若定义燃油箱惰化率

$$R = \frac{x_{\text{O,amb}} - x_{\text{O,u}}}{x_{\text{O,amb}} - x_{\text{O,NEA}}} \quad (7)$$

并定义燃油箱气相体积换气次数

$$E_u = \frac{t \dot{Q}}{V_u} \tag{8}$$

则式(6)可简化为

$$R = 1 - \exp(-E_u) \tag{9}$$

采用式(9)来表征无溶解氧逸出的冲洗过程具有明确的物理意义:在初始时刻,由于未进行冲洗,此时燃油箱内的气相含氧量与外界大气中的一致,即 $x_{O,u} = x_{O,amb}$,惰化率 R 为 0,当冲洗过程持续无限长时间后,则有 $x_{O,u} = x_{O,NEA}$,此时惰化率 $R=1$;类似地,如果气相体积换气次数 E_u 为 0,则燃油箱未进行惰化,即 $R=0$,当 E_u 为无穷大时, $R=1$.

当燃油箱中的载油量发生变化时,气相空间的容积也相应发生变化,为了便于计算冲洗的气量,定义燃油箱总体积换气次数

$$E_t = \frac{t \dot{Q}}{V_u + V_f} = \frac{t \dot{Q}}{V_{tank}} \tag{10}$$

并定义燃油箱体体积载油率

$$\epsilon_v = \frac{V_f}{V_u + V_f} \tag{11}$$

则气相体积换气次数与总体积换气次数的关系为

$$E_t = (1 - \epsilon_v) E_u \tag{12}$$

1.2 溶解氧平衡逸出数学模型

在初始状态时,燃油与气相空间中的氧气处于平衡状态,当富氮气体进入气相空间后,导致含氧量降低,燃油中的氧气有向气相空间逸出的趋势,这将造成式(6)所描述的结果与实际情况有较大的偏差.特别是当燃油箱存在较强的外界激励,例如晃动、颠簸时,氧气逸出的速率会较大.针对这种情况建立的模型称为溶解氧平衡逸出模型,简称为“有氧逸出模型”.

燃油中所溶解的气体量很少,可作为稀溶液处理,满足拉乌尔和亨利定律.对于石油制品,常用阿斯特瓦尔德系数来表征气体在燃油中的溶解量^[8-9],其含义是单位体积燃油在规定的气体分压和气体、液体温度下处于平衡时所溶解的气体体积,表示为

$$\beta = \frac{2.31(980 - d)}{1\,000} \cdot \exp\left[\frac{0.639(700 - T)}{T} \ln(3.333\beta_0)\right] \tag{13}$$

式中: T 为气体和燃油的温度; d 为燃油在 15℃ 时的密度; β_0 是密度为 850 kg/m³ 的燃油在 15℃ 时的阿斯特瓦尔德系数,对于氧气为 0.16,对于氮气为 0.069.

对于有氧逸出模型,做如下假设:

- (1)逸出的氧气与气相空间原有气体及冲洗过程所流入的富氮气体的混合过程在瞬间完成,且其热力和浓度参数各处均相同;
- (2)燃油中氧气的逸出速率最快,且氧气逸出后气相和液相立刻达到平衡状态;
- (3)环境压力与燃油箱内压力保持一致;
- (4)富氮气体与燃油箱中的气相和燃油温度相同;
- (5)排出燃油箱外的气体和气相空间的混合气体具有相同的氧氮摩尔比.

如图 2 所示,在某个时间微元内,富氮气体流入燃油箱气相空间,并与原有的气体混合,由于混合后气相空间中含氧量减少,因此燃油中的氧气将向气相空间中逸出,并再次与气相空间中的气体混合后排出燃油箱外.当时间微元 dt 足够小时,可认为排出的混合气体的氧氮摩尔比与此时间微元初始时刻气相空间的氧氮摩尔比相同,这样氧氮质量比可由下式描述

$$\frac{dm_{O,out}}{dm_{N,out}} = \frac{p_{O,u} M_O}{p_{N,u} M_N} \tag{14}$$

式中: $p_{O,u}$ 和 $p_{N,u}$ 为氧、氮的分压; M_O 和 M_N 为氧、氮的相对分子质量.

气相空间的氧、氮分压与总压 p 的关系为

$$p = p_{O,u} + p_{N,u} = x_{O,u} p + (1 - x_{O,u}) p \tag{15}$$

时间微元内排出的氧气质量 $dm_{O,out}$ 与流入的氧气质量 $dm_{O,in}$ 、气相空间的氧气质量变化量 $dm_{O,u}$ 及燃油中的氧气逸出量 $dm_{O,f}$ 之间的关系为

$$dm_{O,out} = dm_{O,in} + dm_{O,f} - dm_{O,u} = \dot{m}_{O,NEA} dt - \frac{\beta_O V_f p}{R_O T_f} dx_{O,u} - \frac{p V_u}{R_O T_u} dx_{O,u} \tag{16}$$

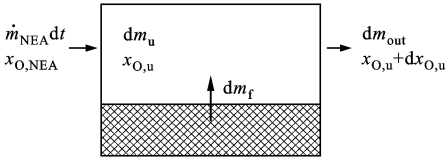


图 2 有氧逸出模型的冲洗惰化示意图

结合式(12),排出的氮气质量 $dm_{N,out}$ 与流入的氮气质量 $dm_{N,in}$ 、气相空间的氮气质量变化量 $dm_{N,u}$ 及溶解到燃油中的氮气质量 $dm_{N,f}$ 的关系为

$$dm_{N,out} = dm_{N,in} + dm_{N,f} - dm_{N,u} = \dot{m}_{NEA} dt + \frac{\beta_N V_f p}{R_N T_f} dx_{O,u} + \frac{p V_u}{R_N T_u} dx_{O,u} \tag{17}$$

将式(16)、(17)代入式(14),并考虑到气体和燃

油温度相同,即 $T_u = T_f = T$,化简可得

$$\frac{dx_{O,u}}{dt} = \frac{(\dot{m}_{O,NEA}R_O + \dot{m}_{NEA}R_N)Tx_{O,u} - R_O T \dot{m}_{O,NEA}}{(\beta_O - \beta_N)V_f p x_{O,u} - (\beta_O V_f p + p V_u)} \quad (18)$$

式中: R_O 和 R_N 为氧、氮的气体常数; V_f 为燃油的体积; $\dot{m}_{O,NEA}$ 为富氮气体中氧气的流量。

将式(18)积分,并将式(8)和式(11)代入,可得

$$E_u = \frac{\dot{Q}t}{V_u} = \int_{x_{O,amb}}^{x_{O,u}} \frac{R_{NEA}}{R_O M_O} \cdot \left\{ \left[(\beta_O - \beta_N) \frac{1 - \epsilon_V}{\epsilon_V} x_{O,u} - \left(\beta_O \frac{1 - \epsilon_V}{\epsilon_V} + 1 \right) \right] / \left[\frac{x_{O,u}}{x_{O,NEA} M_O + (1 - x_{O,NEA}) M_N} - x_{O,NEA} \right] \right\} dx_{O,u} \quad (19)$$

式中: R_{NEA} 为富氮气体的气体常数。

由式(19)可见,即使考虑了燃油中溶解氧的逸出,在一定的载油率下气相空间含氧量的变化仍然只与气相体积换气次数相关。式(18)可直接积分求解,也可采用数值积分求解。

同样,考虑到载油量发生变化后气相空间的体积非恒值,将式(10)代入式(18)并积分,可得燃油箱总体积换气次数

$$E_t = \frac{\dot{Q}t}{V_u + V_f} = \frac{\dot{Q}t}{V_{tank}} = \int_{x_{O,amb}}^{x_{O,u}} \frac{R_{NEA}}{R_O M_O} \left\{ \left[(\beta_O - \beta_N) x_{O,u} - (\beta_O + 1 - \epsilon_V) \right] / \left[\frac{x_{O,u}}{x_{O,NEA} M_O + (1 - x_{O,NEA}) M_N} - x_{O,NEA} \right] \right\} dx_{O,u} \quad (20)$$

2 模型求解及分析

分别对空燃油箱和有一定载油量的燃油箱采用模型进行计算,并将计算结果与实验值进行对比,结果如图3所示。所取实验数据一组由本课题组通过实验获得,另一组来自文献[6]。在文献[6]的冲洗实验过程中,燃油箱受到很强的外界晃动激励,且燃油也被泵不断抽出再回灌至燃油箱中,即燃油被充分搅动,以达到较强的传质效果。由图3可见,本文建立的数学模型基本能够反映出冲洗惰化过程中上部气相空间含氧量的变化规律。对于空燃油箱,实验值与无氧逸出模型的计算结果十分吻合,而当燃油箱存有一定燃油且传质较剧烈时,实验值与有氧逸出模型的结果更加贴近。

图4给出了无氧逸出模型中采用不同含氧量的

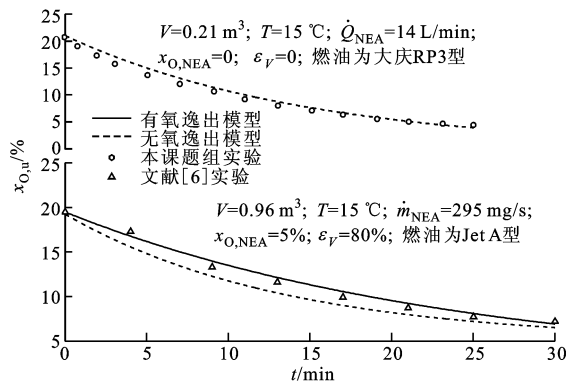


图3 2种模型的计算结果与实验值的比较

富氮气体时,气相体积换气次数与惰化率及冲洗后气相空间含氧量的关系。从图中可见,惰化率仅与气相体积换气次数相关,而与富氮气体的含氧量无关。但是,在相同的惰化率下,不同含氧量的富氮气体冲洗燃油箱所能达到的最终气相空间含氧量是不同的,富氮气体中含氧量越高,最终气相空间的含氧量也越高,换言之,若要求惰化到相同的气相空间含氧量,则富氮气体的含氧量越低,所需要的气相体积换气次数就越少,即所需的冲洗气体流量越小。

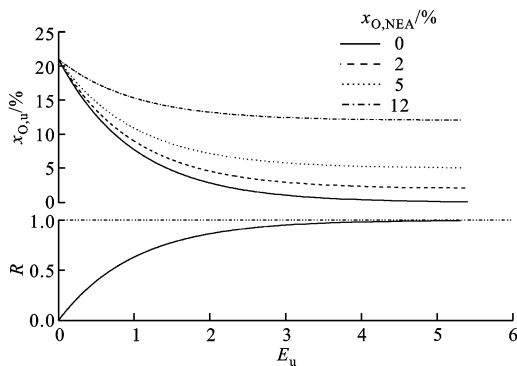


图4 气相体积换气次数与惰化率和气相空间含氧量的关系

图5给出了采用氧摩尔分数为5%的富氮气体将燃油箱上部气相空间惰化至相同含氧量时,2种模型计算出的所需气相体积换气次数和总体积换气次数随燃油箱载油率的变化关系。以惰化至气相空间的氧摩尔分数为8%为例,将计算结果与文献[10]的实验数据进行了对比,结果显示理论计算结果与实验值吻合程度很高。

由图5并结合式(9)和式(12)可见,在无氧逸出模型中,气相体积换气次数不随载油率的变化而变化,而总体积换气次数则随载油率的增加而线性减少。在有氧逸出模型中,由于考虑了氧气的逸出,所

需的冲洗气量显然会增加,以消除逸出的氧气对气相空间的影响,因此气相体积换气次数随载油率的增加而急剧上升.从式(19)可见,实际上 $E_u \propto \epsilon_V^{-1}$,而从式(20)可见,总体积换气次数随载油率增加而线性减少,即 $E_t \propto \epsilon_V$,且有氧逸出模型中的总体积换气次数也高于无氧逸出模型的换气次数.此外,在相同的载油率下,惰化终了时气相空间的含氧量越低,则所需的换气次数就越多.

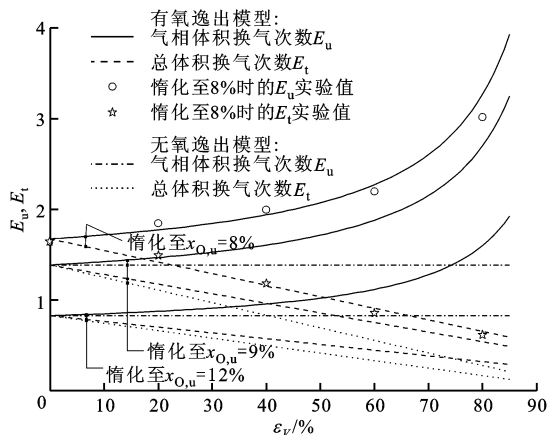


图5 燃油箱载油率与换气次数的关系

目前,国内外常用氧摩尔分数为5%的富氮气体作为冲洗气源,而惰化终了的气相空间氧摩尔分数也大多要求为9%(对于军机)或12%(对于民机),因此若认为无溶解氧逸出时,总体积换气次数可采用式(21)的经验公式估算,而当有溶解氧逸出时,则可采用式(22)来估算.在实际设计时,根据飞机的飞行任务特点,可在式(21)和式(22)的计算结果之间合理选取.

无溶解氧逸出时,计算燃油箱总体积换气次数的经验公式为

$$\left. \begin{aligned} E_{t,9\%} &= 1.386 - 1.386 \times 10^{-2} \epsilon_V \\ E_{t,12\%} &= 0.827 - 8.27 \times 10^{-3} \epsilon_V \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

有溶解氧平衡逸出时,计算燃油箱总体积换气次数的经验公式为

$$\left. \begin{aligned} E_{t,9\%} &= 1.386 - 1.058 \times 10^{-2} \epsilon_V \\ E_{t,12\%} &= 0.827 - 6.33 \times 10^{-3} \epsilon_V \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

3 结 论

本文建立了飞机燃油箱冲洗惰化过程的数学模型,分别考虑了燃油中无氧气逸出和有溶解氧平衡逸出2种不同的极限情况,并定义了惰化率、气相体积换气次数和总体积换气次数等归一化参数,以简

捷描述富氮气体流量、惰化时间、气相空间含氧量和燃油箱各部分体积之间的关系,便于简化设计.数学模型求解结果与实验数据的对比显示,无氧逸出模型与空燃油箱的冲洗惰化过程符合较好,而有氧逸出模型适合于非空燃油箱,且燃油箱存在较充分的传质,考虑到实际燃油箱的激励不可能十分剧烈,不会达到溶解氧全部平衡逸出,因此上部气相空间的实际含氧量应介于2种模型的计算值之间,故在进行冲洗惰化系统设计时,换气次数或富氮气体流量可在本文2种模型计算出的极限值之间选取.

当无氧气逸出时,气相体积换气次数随载油率的变化始终保持为恒值,但是随着燃油中氧气的逸出,所需的气相体积换气次数随载油率的增加而急剧增加.2种模型的计算结果都表明,无论是否有氧气逸出,总体积换气次数均随着载油量增加而线性减少,且有氧逸出模型的计算值要高于无氧逸出模型的计算值.

由于燃油箱载油率变化后气相空间和燃油的体积也会相应发生变化,而燃油箱总体积保持恒定,因此在进行冲洗惰化设计时,宜采用总体积换气次数来估算所需的富氮气体流量.

本文所述的研究中未考虑飞机爬升时由于外界压力变化而造成的影响,因此在后续工作中将对此开展进一步的研究.

参考文献:

- [1] CAVAGE W M. Developing a fuel-tank inerting system [R]. Washington DC, USA: Office of Aviation Research, 2005:20-23.
- [2] 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(8):24-26.
WANG Xiaoping, XIAO Zaihua. Fundamentally analysis on inerting of aircraft fuel tank with nitrogen-enriched air and its application [J]. Aeronautical Science and Technology, 2008(8):24-26.
- [3] 肖再华.飞机燃油箱惰化[J].航空科学技术,2005(1):31-32.
XIAO Zaihua. Inerting aircraft fuel tanks [J]. Aeronautical Science and Technology, 2005(1):31-32.
- [4] 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.
- [5] 闫红敏,江平,高永庭.军用飞机机载制氮系统研究

[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2005,22(5):12-14.

YAN Hongmin, JIANG Ping, GAO Yongting. Study on the on-board inert gas generator system of military aircraft [J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2005,22(5):12-14.

[6] BURNS M, CAVAGE W M, HILL R, 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, 2004;5-8.

[7] CAVAGE W M. Modeling in-flight inert gas distribution in a 747 center wing fuel tank [R]. Toronto, Canada; American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005:35-42.

[8] 杜博夫金 H, 马拉尼切娃 B, 马苏尔 Ю. 喷气燃料性能手册[M]. 常汝楫, 译. 北京: 航空工业出版社, 1990: 45-47.

[9] ASTM Committee on Standards. ASTM D2779 - 92 (2002) Standard test method for estimation of solubility of gases in petroleum liquids [S]. West Conshohocken, USA; ASTM International, 2002.

[10] BURNS M, CAVAGE W M. Inerting of a vented aircraft fuel tank test article with nitrogen-enriched air [R]. Atlantic City, New Jersey, USA; William J. Hughes Technical Center, 2001:1-13.

(编辑 葛赵青)