



开式和闭式环境下燃油地面预洗涤比较分析*

Comparative Analysis of the Aircraft Ground-Based Oil Pre-Scrubbing on Open and Closed Environment

卢吉 冯诗愚 付振东 刘卫华 / 南京航空航天大学航空宇航学院

摘要: 基于氧氮质量守恒关系, 建立了开放式油罐与闭式增压式油罐洗涤过程的数学模型, 并采用微元计算方法对其进行求解, 得到油罐气相和燃油中氧气浓度随时间的变化关系。计算结果显示, 提高洗涤效率对降低两种洗涤方式下燃油中的氧浓度均是有利的; 对于闭式油罐洗涤, 提高阀门设置值可使燃油中的氧浓度达到较低的水平, 且波动较小。通过比较, 闭式系统比开式系统洗涤燃油中的氧浓度下降更快。

关键词: 油箱惰化; 地面预洗涤; 开式; 闭式; 氧浓度

Keywords: fuel tank inerting; ground-based prescrubbing; open; closed; oxygen concentration

0 引言

飞机油箱的防火防爆能力不仅关

系到飞机的生存能力和易损性, 同时也关系到飞机的利用率、成本及乘员的安

全^[1]。国外研究工作表明, 当飞机油箱上部气相空间的氧浓度低于9%时, 即使

流区交汇到一起, 形成了一个径向向下的大回流区, 实现壁式火焰稳定器稳定燃烧并沿径向稳定器向下流动传焰的功能。由图7和图8可以看到, 以壁式火焰稳定器和径向支板火焰稳定器为中心, 火焰很快扩散到了整个加力燃烧室空间, 出口截面总温分布均匀。

4 结论

本文在深入分析未来先进航空发动机加力燃烧室发展趋势的基础上, 提出了一种与涡轮后框架一体化设计的加力燃烧室方案。该方案火焰稳定器系统为径向支板/稳定器与内外涵之间的壁式火焰稳定器的组合方案, 同时喷油杆布置在径向支板稳定器内。

应用计算流体动力学软件对该方案模型进行了数值计算, 分析了其冷态和

热态情况下的流场, 计算结果表明, 径向支板稳定器和壁式稳定器能够组织起加力燃烧室内的有效燃烧, 出口截面温度分布均匀, 验证了方案的可行性。【AST

参考文献

[1] 加力燃烧室原理[M]. 南京: 南京航空学院. 1977.

[2] Jeffery A. Lovett, Torrence P. Brogan, Derk S. Philippona, et al. Development Needs for Advanced Afterburner Designs[R]. AIAA 2004-4192, 2004.

[3] US Patent 5385015 Augmentor burner.

[4] Wadia A. R., James F. D. F110-GE-132: Enhanced Power Through Low-Risk Derivative Technology[J].

ASME Journal of Turbomachinery, 2001, 123(7): 544-551.

[5] Hakan Schmidt, Development of a Cooled Radial Flameholder for the F404/RM12 Afterburner, ISABE-2003-1058.

[6] S. Olovsson, Combustion Calculations on a premixed system with a bluff body flameholder AIAA-92-3470.

[7] 叶桃红等. 发动机加力燃烧室湍流流场数值计算[J], 推进技术, 1999, 20(1).

[8] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD软件原理与应用[M], 北京: 清华大学出版社, 2007.

作者简介

孙雨超, 助理工程师, 主要从事发动机加力燃烧室设计研究。

飞机遭遇到23mm口径燃烧弹袭击,也不会引起燃烧和爆炸^[1]。因此,燃油箱惰化技术就是通过某种方式将油箱气相空间氧浓度降到安全水平,以达到防爆防火的目的。从20世纪60年代开始,美国军方就对氮气抑爆技术进行了大量的理论研究和实验验证^[1,2]。

目前,机载燃油箱惰化技术分为洗涤和冲洗两种。燃油洗涤是通过安装在油箱底部的细小喷管将惰性气体通入燃油中,置换其中的溶解氧,将燃油中的溶解氧降低到一定水平,使飞行过程中氧气的析出量较少或不析出,从而使油箱上部空间氧浓度维持在一个安全水平^[3]。冲洗则是将惰性气体直接通入燃油箱上部气相空间,使其维持一个较低的氧浓度水平。目前军用飞机大多将洗涤和冲洗结合起来使用。

机载燃油箱惰化技术虽然具有生命周期内费用低及无需后勤保障这两个重要的优点,但也存在一些缺点,例如,在军用飞机上采用洗涤技术,需要在油箱中布置许多洗涤喷嘴,一个洗涤喷嘴需要与一路油管 and 一路气管对应,管路的布置十分复杂,同时也增加了设备的重量。

如果能够对燃油在地面进行预先处理,如采用洗涤技术在地面将燃油中的溶解氧事先置换出来,同时避免或减少加油过程中外界氧气的溶入,那么在飞机飞行过程中,随着高度的变化,没有或仅有少量氧气析出,从而维持气相空间的氧浓度,则可在飞机上不设置洗涤装置,从而大大简化管路布置和设备重量。

国内外文献中只简单提及地面洗涤过程使用的装置,而其流程、洗涤方式及设计参数均为空白。如文献[4]中论证了地面洗涤的经济性与可行性,初步提出了地面洗涤的相关方法;文献[5]中提到了加油车加油过程中的洗涤装置,没有给出洗涤的过程及设计参数等。因此,有必要首先进行燃油地面预洗涤过程的理论研究,了解其中存在的相关问题,比较开式与闭式洗涤方式的优劣,以及洗涤效率、载油率对预洗涤过程的影响等。

1 燃油地面预洗涤过程数学模型

1.1 开式油罐燃油地面预洗涤数学模型

开式油罐燃油地面预洗涤过程与机载惰化滑行阶段洗涤过程十分类似,均是通过设置在油罐底部的细小喷管将惰性气体通入油罐下部的燃油中,置换其中的氧气,达到降低燃油中氧浓度的目的^[4],在整个过程中,上部气相空间与外界

环境相通。所不同的是,燃油预洗涤过程在地面完成,可直接满足飞机爬行过程中燃油箱惰化的需求,其目的是降低燃油中氧浓度,使其在飞行过程中溶解氧析出量较少或不析出,燃油箱气相空间不致超标。而机载惰化洗涤过程直接作用于飞行包线,直接降低气相空间氧浓度。所以,地面洗涤往往需要更高的洗涤要求,如需要浓度更高的洗涤富氮气体,用来将燃油洗涤到更低的氧浓度水平。

为了简化模型并使其具有可操作性,对于开式油罐燃油地面预洗涤,提出以下假设:

- 1) 燃油与其上层气相空间温度相等,均为 T ;
- 2) 燃油中的参数与气相空间中的相同,如温度、压力、氧氮分压、浓度等,富氮气体充入燃油中迅速与燃油融合,溢出氧也与气相空间充分混合;
- 3) 燃油箱内压力保持恒定,并与外界环境相同;
- 4) 氧氮按照分压比排出油罐;
- 5) 忽略燃油蒸气压对洗涤过程的影响。

如图1所示,在计算时间间隔 dt 内,将用于洗涤的富氮气体充入油箱底部燃油中,其中一部分与燃油充分混合,由于燃油中的氧气分压高于富氮气体中的氧气分压,因此燃油中的氧气向一部分富氮气体扩散传质,氧气浓度提高的富氮气体最终排入气相空间,而另一部分富氮气体直接排入气相空间。为表示有效用于洗涤的富氮气体的量,定义洗涤效率 η ,其表示与燃油充分混合的富氮气体质量占总富氮气体质量的比。

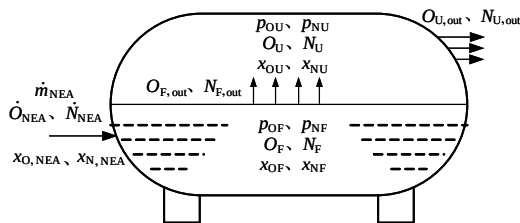


图1 开式油罐燃油地面预洗涤示意图

建立上述物理过程的氧氮质量守恒方程,首先以燃油所占体积 V_F 为控制容积,则有

$$\eta \dot{N}_{NEA} dt = dO_F + O_{F,out} = \frac{\beta_O V_F}{R_O T} dp_{OF} + O_{F,out} \quad (1)$$

$$\eta \dot{N}_{NEA} dt = dN_F + N_{F,out} = \frac{\beta_N V_F}{R_N T} dp_{NF} + N_{F,out} \quad (2)$$

* 航空科学基金(2007ZC52038)、南京航空航天大学引进人才科研基金(S1030-014)资助项目



式中, β_O 和 β_N 是氧氮气体在燃油中的阿斯特瓦尔德系数, 其含义是单位体积燃油在气体和液体规定的气体分压和温度下处于平衡时溶解的气体体积, 具体计算方法可参看文献[6]; p_{OF} 和 p_{NF} 为燃油中氧氮分压; R_O 和 R_N 是氧氮气体常数。

以气相空间 V_U 为控制容积, 则

$$O_{F,out} + (1-\eta) \dot{O}_{NEA} dt = \frac{V_U}{R_O T} dp_{OU} + O_{U,out} \quad (3)$$

$$N_{F,out} + (1-\eta) \dot{N}_{NEA} dt = \frac{V_U}{R_N T} dp_{NU} + N_{U,out} \quad (4)$$

式中, p_{OU} 和 p_{NU} 为气相空间中氧氮分压。

氧气与氮气按照分压比从燃油中溢出, 即

$$\frac{O_{F,out}}{N_{F,out}} = \frac{p_{OF} R_N}{p_{NF} R_O} \quad (5)$$

气相空间气体混合后也按照分压比排出, 即

$$\frac{O_{U,out}}{N_{U,out}} = \frac{p_{OU} M_O}{p_{NU} M_N} = \frac{p_{OU} R_N}{p_{NU} R_O} \quad (6)$$

由于是开式洗涤, 因此油箱中总压 p_t 与外界环境 p_{amb} 相同, 且与分压之间的关系为

$$p_{OU} + p_{NU} = p_{OF} + p_{NF} = p_t = p_{amb} \quad (7)$$

$\dot{O}_{NEA}$ 和 $\dot{N}_{NEA}$ 为富氮气体中氧氮的质量流量, 其为

$$\dot{O}_{NEA} = \dot{m}_{NEA} \frac{x_{O,NEA} M_O}{x_{O,NEA} M_O + x_{N,NEA} M_N} \quad (8)$$

$$\dot{N}_{NEA} = \dot{m}_{NEA} \frac{x_{N,NEA} M_N}{x_{N,NEA} M_O + x_{N,NEA} M_N} \quad (9)$$

联立以上各式, 可得燃油和气相空间中单位时间氧分压变化量为

$$\frac{dp_{OF}}{dt} = \frac{\eta T}{V_F} \dot{m}_{NEA} R_{NEA} \frac{x_{O,NEA} p_t - p_{OF}}{(\beta_N - \beta_O) p_{OF} + \beta_O p_t} \quad (10)$$

$$\frac{dp_{OU}}{dt} = \frac{\dot{m}_{NEA} R_{NEA} T}{V_U p_t} \left[(x_{N,NEA} p_t - p_{OU}) - \eta (x_{N,NEA} p_t - p_{OF}) \frac{(\beta_N - \beta_O) p_{OU} + \beta_O p_t}{(\beta_N - \beta_O) p_{OF} + \beta_O p_t} \right] \quad (11)$$

1.2 闭式油罐燃油地面预洗涤数学模型

闭式系统与开式系统结构相似, 但是在排气口处设置了一个阀门, 该阀门上阈值为 Δp_h , 下阈值为 Δp_l , 当油罐内外压差高于 Δp_h 时阀门开启, 气相空间的气体可排出, 当油罐内外压差低于 Δp_l 时阀门关闭。

闭式洗涤过程中, 燃油中的质量平衡关系与开式洗涤相同。但是, 由于阀门的限制, 气相空间中压力与外界环境压力不同, 气体通过阀门排出, 受到阀门通径及内外压差的影响,

因此气相空间质量守恒关系与开式系统有所差异。将气相空间中的排气过程分为两个阶段, 首先在 $t \sim t+dt/2$ 时间段内, 氧氮从燃油中析出并与气相空间原有气体充分混合, 然后 $t+dt/2 \sim t+dt$ 时间段内, 混合后的气体通过阀门排出, 前一个阶段的质量守恒方程为

$$O_U^{t+dt/2} = O_U^t + O_{F,out} + (1-\eta) \dot{O}_{F,IN} dt \quad (12)$$

$$N_U^{t+dt/2} = N_U^t + N_{F,out} + (1-\eta) \dot{N}_{F,IN} dt \quad (13)$$

而后一个阶段的质量守恒方程为

$$O_U^{t+dt} = O_U^{t+dt/2} - \dot{Q}_{U,out} x_{OU}^{t+dt/2} dt \quad (14)$$

$$N_U^{t+dt} = N_U^{t+dt/2} - \dot{Q}_{U,out} x_{NU}^{t+dt/2} dt \quad (15)$$

式中, $\dot{Q}_{U,out}$ 为通过阀门排出的气体体积流量, 其与油箱的内外压差相关, 如果 $p_t^{t+dt/2} - p_{env} \leq \Delta p_l$, 阀门关闭, $\dot{Q}_{U,out} = 0$; 而 $p_t^{t+dt/2} - p_{env} > \Delta p_h$, 阀门打开, 其流量大小与压比相关, 在气体通过孔口时可能出现临界流动和亚临界流动情况, 这两种流动由临界压力比 $\zeta = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$ 决定, 其中, γ 是气体绝热指数, 因此气体流经阀门时出现两种情况:

1) 当 $\zeta p_t^{t+dt/2} < p_{env} < p_t^{t+dt/2}$ 时

$$\dot{Q}_{U,out} = \mu S \left(\frac{2\gamma}{\gamma-1} p_t^{t+dt/2} \rho_t^{t+dt/2} \right)^2 \left[\left(\frac{p_{env}}{p_t^{t+dt/2}} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_{env}}{p_t^{t+dt/2}} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

2) 当 $p_{env} < \zeta p_t^{t+dt}$ 时, 气体在阀门最小截面处出现临界流动, 即

$$\dot{Q}_{U,out} = \mu S \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} (\gamma p_t^{t+dt/2} \rho_t^{t+dt/2})^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

式中, μ 为流量系数, S 为阀门通流面积。

将式(16)和(17)代入式(14)和(15), 并结合式(10)则可以得到微元终了时刻气相空间氧气浓度和其他参数。

2 模型求解与分析

2.1 开式油罐模型求解分析

图2给出了不同初始气相空间条件下, 燃油和气相空间氧摩尔分数随洗涤时间的变化关系。从图中可见, 随着

洗涤时间的增加,气相空间与燃油中的氧浓度都将减小,且随着洗涤过程的进行,不同初始条件下气相空间趋于一致,并最终达到所用富氮气体中氧气的摩尔分数。从图中也可以看出,初始条件不同并不会影响燃油中氧气摩尔分数的变化。

从图3可以看出,对于燃油地面洗涤来说,虽然在起始阶段采用较高的洗涤效率,气相空间氧浓度的下降没有采用较低的洗涤效率快,但是后期效果较好。在相同的洗涤时间内,随着洗涤效率的提高,燃油中的含氧量迅速减少。因此,提高洗涤效率对燃油洗涤是有利的。

2.2 闭式油罐模型求解分析

对于闭式油罐的洗涤也设置了不同的洗涤效率,从图4可以看出,与开式洗涤过程相似,洗涤效率的增加也能使燃油中的氧浓度迅速减小,所以,对于闭式洗涤过程来说,提高洗涤效率同样对燃油洗涤是有利的。但是在闭式系统中,高洗涤效率会造成起始阶段气相空间氧浓度增加,不过随着时间的增加,洗涤效率对于气相空间的影响越来越小,洗涤过程进行到15分钟左右,洗涤效率对气相空间基本没有影响,过程曲线重合。

阀门设置值对洗涤过程的影响主要体现在阀门开启的时间上,阀门开启前洗涤过程都是一致的。从图5可见,对于燃油而言,较高的阀门设置值可以使燃油中的氧浓度达到一个较低的水平并且波动较小;而对于气相空间来说,较高的阀门设置值反而会影响气相空间氧浓度的降低。因此,选择适当的阀门设置值对燃油地面预洗涤来说也是很重要的。洗涤过程进行到20分钟以后,阀门设置值的影响变得很小。阀门设置值对于气相空间的影响比对燃油的影响要大,这是因为阀门开启放气是直接作用于气相空间的,而燃油却有一定的缓冲作用。

2.3 开式与闭式油罐洗涤效果比较分析

图6给出了两种不同方式下的洗涤效果。从中可见,闭式洗涤过程可以使燃油中的氧浓度迅速减小,甚至可以下降到一个比开式洗涤过程最低氧浓度更低的水平。但是这种低氧浓度状态并不是一个稳定的状态,随着洗涤过程的继续,燃油中的氧浓度将会“回归”到与开式系统最低氧浓度相同的水平并在其上下波动。由此说明,长时间的洗涤对于闭式洗涤来说并不一定是有利的,有可能在达到洗涤最低浓度水平以后氧浓度有所回升(这与限压阀门设置值有关)。而气相空间氧浓度则与之相反,最初下降速度比开式油罐洗涤过程慢,甚至会有所上升,但随着洗涤过程的进行,达到限压阀门

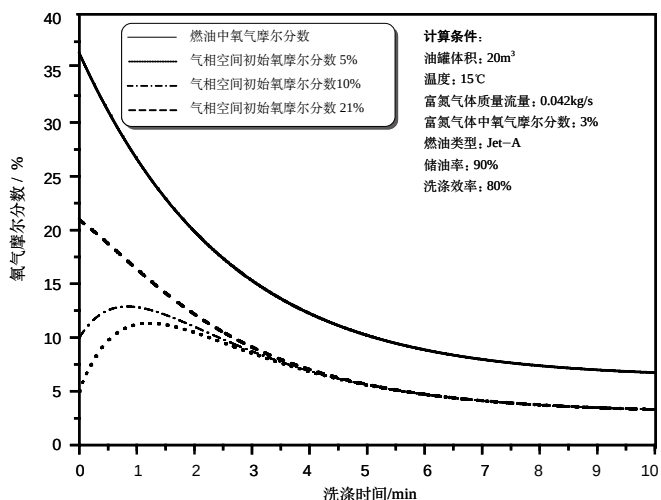


图2 开式油罐洗涤过程气相/燃油氧浓度随时间变化

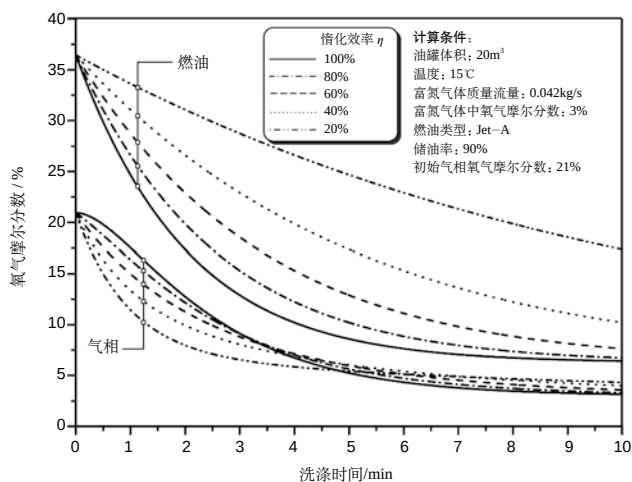


图3 开式洗涤不同洗涤效率气相/燃油氧浓度随时间变化

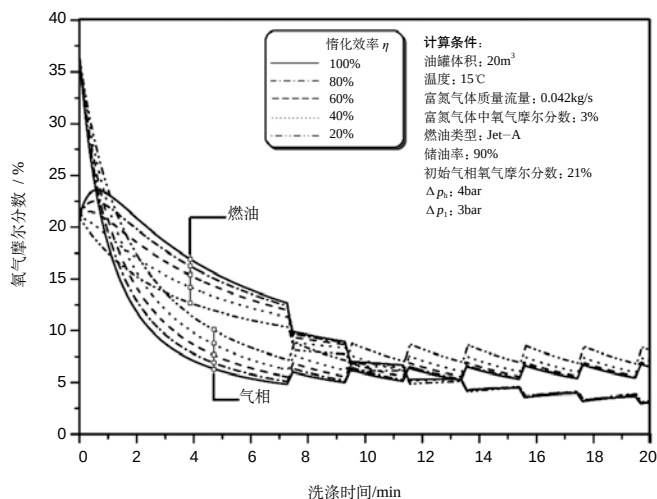


图4 闭式油罐不同洗涤效率气相/燃油氧浓度随时间变化

设置值之后,由于放气过程的进行,燃油中溶解的富氮气体的析出,气相空间的氧浓度迅速下降,最终将达到与开式洗涤过

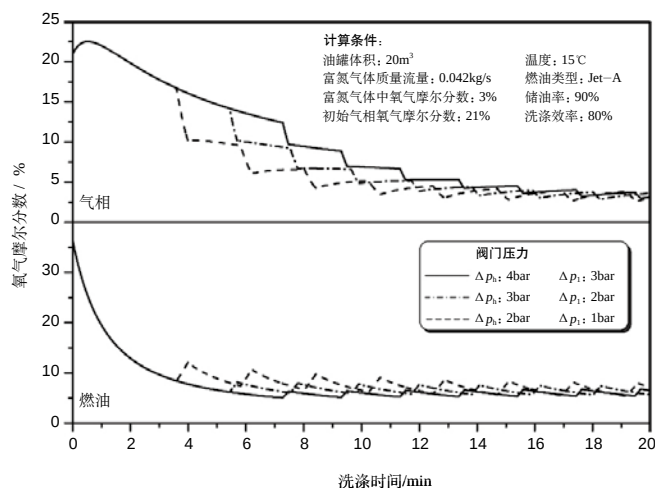


图5 闭式油罐不同阀门设置气相/燃油氧浓度随时间变化

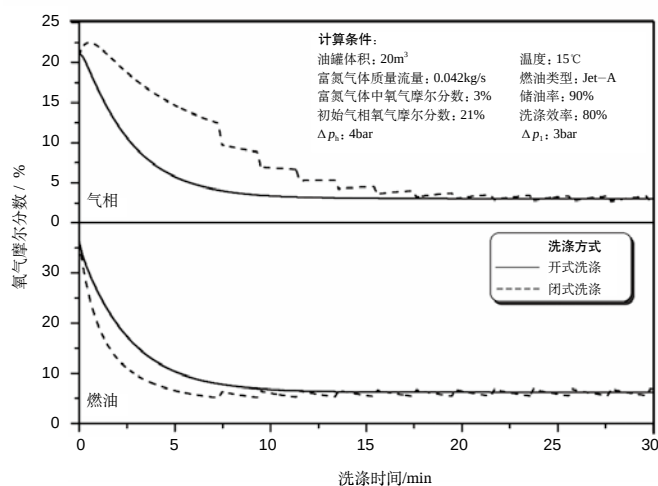


图6 开式与闭式油罐洗涤效果比较

程相同的最低氧浓度水平。因此,对于闭式洗涤来说,选择适当的阀门设置值,可以使洗涤过程优于开式油罐地面预洗涤过程。在实际操作中,还应综合考虑油罐承受压力、洗涤时间要求等后勤保障条件,选择切实可行的燃油地面预洗涤过程。

3 结论

本文通过建立两种燃油地面预洗涤方式的数学模型,得出了两种洗涤过程油罐气相空间和燃油中的氧浓度随时间变化的关系,通过比较得出以下结论。

无论开式油罐还是闭式油罐,洗涤效率的提高对于燃油洗涤来说都是有利的,在洗涤至相同氧气含氧浓度的情况下,可明显减少地面预洗涤的时间或所用的富氮气体的流量,因此,对于地面预洗涤而言,应该尽可能对洗涤器进行优化,提高洗涤过程的洗涤效率。

阀门设置值对于闭式燃油洗涤的影响很大,根据实际情况设置适当的限制压力对于燃油洗涤来说是有利的,还应根据实际情况选择适当的阀门当量直径。

闭式油罐洗涤过程可以得到比开式油罐洗涤过程更低氧浓度的燃油,惰化的速率也较高,但由于增压作用,储油罐需要有一定的承压能力,增加了洗涤装置的投资。

从以上分析结果来看,闭式油罐洗涤过程可以使燃油中的氧浓度迅速减小,惰化到一定氧浓度水平所需的时间较少,且通过设置合理的阀门设置值和洗涤时间,所得到的洗涤后的燃油中氧浓度较小,因此,本文认为闭式洗涤较开式洗涤具有优势。

AST

参考文献

- [1] William M.C..The Effect of Fuel on an Inert Ullage in a Commercial Transport Airplane Fuel Tank[R]. DOT/FAA/AR-05/25,July,2005:35~36.
- [2] Johnson R L, Gillerman J B. Aircraft fuel tank inerting system[R]. AD-A141 863. Torrance California:Airesearch Manufacturing Company,1983.
- [3] William M C.Measuring oxygen concentration in a fuel tank ullage[R].AIAA-2009-1743,2009.
- [4] 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.
- [5] William M.C..The Cost of Implementing Ground Based Fuel Tank Inerting in the Commercial Fleet[R]. DOT/FAA/AR-00/19,May,2000:1~60.
- [6] 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.

作者简介

卢吉,硕士研究生,主要从事油箱惰化、飞机燃油系统模拟等工作。

冯诗愚,博士,副教授,主要从事人机环境工程和生命保障、可再生能源利用等方面的研究。

付振东,硕士研究生,主要从事座舱污染源传播、油箱惰化仿真等研究。

刘卫华,博士,教授,博导,主要从事人机环境工程、制冷和热泵系统等研究。