

某飞机多舱燃油箱洗涤惰化的工程计算

刘玉林, 王学德, 穆小红, 杨国良

(南京理工大学 能源与动力工程学院, 南京 210094)

摘 要: 为研究某飞机多舱燃油箱洗涤惰化过程, 将洗涤气分为与燃油发生传质部分和未发生传质部分, 通过理论计算获得洗涤气与燃油发生传质并向气相空间逸出的氧气量, 未发生传质的部分用于气相冲洗, 其余与液相洗涤逸出量相结合, 建立模型进行工程计算。由此将整个洗涤惰化过程转化为有逸出的气相冲洗过程。结果表明: 这种将洗涤惰化转化为有逸出的冲洗模型是可行的, 其结果与实验值基本吻合。随着时间的增长, 气相氧体积分数一般经历先增长后下降的过程, 最终趋向于洗涤气体积分数。多舱飞机燃油箱的各舱氧体积分数值变化快慢与进气出气口位置和舱体体积有关。

关 键 词: 燃油箱安全; 逸出氧气量; 燃油洗涤; 燃油冲洗; 工程计算

中图分类号: V228

文献标志码: A

Scrubbing inerting engineering calculations in multi-bay fuel tank of an aircraft

LIU Yu-lin, WANG Xue-de, MU Xiao-hong, YANG Guo-liang

(School of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to research the scrubbing inerting process in multi-bay fuel tank of an aircraft, scrubbing gas was transformed into two sections, fuel mass transfer section and no-mass transfer section. By theoretical calculation, fuel was in mass transfer with scrubbing gas and the amount of oxygen escaped to the gas phase space was obtained. The no-mass transfer section could be used to access the gas space directly considered as fuel washing process. The other section could be combined to build the model for engineering calculations by working out the amount of oxygen spilling from fuel. In this way, the whole scrubbing inerting process was transformed into washing process with escaping gas. The results show that the model for the conversion of scrubbing inerting to washing with overflow is really credible. The results of the model are consistent with experiment results. As time increases, the gas phase oxygen volume fraction will increase and then decrease again, converging to a final gas phase oxygen volume fraction equal to the value of the scrubbed gas. The result of multi-bay fuel scrubbing shows the time required for stabilizing is related to the distance from the inlet and the volume of each bay.

Key words: fuel tank safety; overflow oxygen; fuel scrubbing; fuel washing; engineering calculations

自 20 世纪 60 年代开始人们才对燃油箱的防 爆及安全问题进行有目的的研究并进入实验与应

收稿日期: 2014-02-27

基金项目: 南京理工大学紫金之星资助计划; 江苏省青蓝工程资助项目

作者简介: 刘玉林(1990—), 女, 江苏金坛人, 硕士生, 研究方向为计算流体力学。

通讯作者: 王学德(1977—), 男, 山东德州人, 副教授, 博士, 研究方向为计算流体力学。E-mail: wangxuede2000@sina.com

用阶段,主要是通过对燃油箱内无油空间实施受控惰化,来实现飞机燃油箱的安全目的^[1].近年来飞机燃油箱防爆及抑爆材料技术在国外得到迅速的发展,为飞机的生存率、利用率和可靠率做出了贡献^[2-4].而军机在对防爆与安全上要求更为严格^[5-8].燃油箱惰化是指采取一定技术措施,使飞机燃油箱气相空间的氧体积分数控制在始终无法支持燃烧所需要的氧体积分数水平.燃油箱惰化分为两种:一是燃油箱上部气相空间冲洗(fuel washing),以降低气相氧体积分数为目标;二是燃油洗涤(fuel scrubbing)^[9],通过喷嘴将惰化气体冲入燃油内部,旨在降低燃油和气相的氧体积分数.

从国内外相关文献来看,燃油箱洗涤惰化的研究已比较深入.燃油洗涤技术常用的方法是用燃油引射富氮气体或用喷嘴将富氮气体引入燃油箱下部,使富氮气体形成大量均匀且微小的气泡,增加气体和燃油的气液传质面积,更有效地置换燃油中的氧气.1986年,McConnell等人应用C-5A洗涤喷嘴在不同燃油(JP-4和JETA)中进行洗涤实验^[10];2000年,Cavage给出了不同型号飞机燃油箱洗涤惰化时的耗氮量及每年的变化量^[11];闫红敏等人对燃油洗涤过程进行了详尽的描述,假设冲入燃油箱的气体可全部与燃油发生传质并建立数学模型^[12];冯诗恩等人就洗涤效率对飞机燃油箱惰化的影响进行分析^[13];卢吉通过研究燃油地面预洗涤的规律来建立数学模型,和燃油洗涤进行对比^[14].不论是国外文献公布的实验或根据传质的一般规律都可知,当洗涤喷嘴设计有差异,导致气泡尺寸和分布规律有差别时,燃油的洗涤效果也将有很大变化^[15].针对多舱燃油箱惰化问题,前人对客机波音747多舱燃油箱中央翼内各舱的惰化情况做了大量研究^[16-17].

从国内外文献来看,前人所用来燃油洗涤的方法均是燃油逸出量作为下一个时间步长初始条件的模型来分析.这种方法在对研究单舱燃油洗涤时具有很高的准确性,但是对多舱燃油箱洗涤问题的研究存在一定难度.本文的创新点是将燃油洗涤和燃油冲洗相结合,通过在每一个时间步长内将燃油洗涤出的氧气量加入气相空间,利用未传质部分的惰化气体对气相空间冲洗,达到控制氧体积分数的目的.利用该方法首先对单舱进行验证.在此基础上对某飞机多舱燃油箱的洗涤惰化的情况进行计算,分析燃油洗涤的影响因素(如洗涤效率、载油率、进出口位置等),以期为飞机安全系统的设计研究提供参考.

1 燃油箱惰化模型的建立

在不影响计算结果的前提下,作出以下假设:

- 1) 温度参数无差异,整个控制体包括燃油液相与其上部气相空间,甚至混合气体的温度相等.
- 2) 模型中的各类气体均视为理想气体.
- 3) 用于洗涤的富氮气体通入燃油底部后迅速与燃油充分混合,逸出的气体与气相空间气体也迅速充分混合,混合气体内状态参数处处相等.
- 4) 同一工况下,用于洗涤的富氮气体质量流率保持恒定,气泡使得气液分界面发生相对位移对气相体积的影响微小,可以忽略.
- 5) 燃油中逸出的氮气与氧气(不包括未与燃油发生传质的那部分洗涤气)按照分压比排向气相空间.

1.1 燃油洗涤理论模型

为了实现气相冲洗的目的,得到未发生传质的气体量,同时考察不同喷嘴对惰化过程的影响,引入洗涤效率 η ,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,也就是与燃油发生传质的比例.由洗涤效率得到未发生传质的洗涤气,便于进行气相冲洗.同时通过洗涤效率可以研究不同喷嘴对惰化的影响(不同喷嘴对应不同的洗涤效率).

图1是单位时间步长内燃油洗涤过程的参数变化情况简化图.图中 $p_{\text{Ou}1}$, $p_{\text{Ou}2}$ 分别为单位时间步长内初始和终了时刻气相中氧分压; $p_{\text{Nu}1}$, $p_{\text{Nu}2}$ 分别为单位时间步长内初始时刻和终了时刻气相中氮分压; $p_{\text{t}1}$ 和 $p_{\text{t}2}$ 为单位时间步长内初始和终了时刻的系统总压.

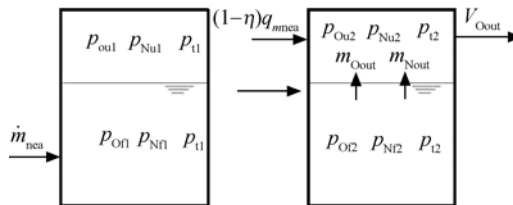


图1 单位时间步长内燃油洗涤过程简化图

Fig. 1 Schematic of fuel scrubbing process in unit time step

以燃油为控制体,单位时间步长 Δt 内的质量守恒方程为

$$\eta q_{m\text{mea}} \Delta t = (m_{\text{O}2} - m_{\text{O}1}) + m_{\text{Oout}} = \frac{\beta_{\text{O}} V_{\text{f}2}}{R_{\text{O}} T_2} p_{\text{O}2} - \frac{\beta_{\text{O}} V_{\text{f}1}}{R_{\text{O}} T_1} p_{\text{O}1} + m_{\text{Oout}} \quad (1)$$

$$\eta q_{m\text{Onea}} \Delta t = (m_{\text{N}2} - m_{\text{N}1}) + m_{\text{Nout}} = \frac{\beta_{\text{N}} V_{\text{f}2}}{R_{\text{N}} T_2} p_{\text{Nf}2} - \frac{\beta_{\text{N}} V_{\text{f}1}}{R_{\text{N}} T_1} p_{\text{Nf}1} + m_{\text{Nout}} \quad (2)$$

式(1)~式(2)中, $\beta_{\text{O}}, \beta_{\text{N}}$ 是氧、氮在燃油中的阿斯特瓦尔德系数^[8]; $R_{\text{O}}, R_{\text{N}}$ 为氧、氮的气体常数; $V_{\text{f}1}, V_{\text{f}2}$ 表示单位时间步长内初始和终了时刻燃油体积; T_1, T_2 表示单位时间步长内初始和终了时刻温度; $m_{\text{O}1}, m_{\text{O}2}, m_{\text{N}1}, m_{\text{N}2}$ 分别表示氧、氮的初始和终了时刻的燃油中的质量; $p_{\text{Of}1}, p_{\text{Nf}1}$ 为单位时间步长内燃油中初始时刻氧、氮分压; $p_{\text{Of}2}, p_{\text{Nf}2}$ 表示单位时间步长内燃油中终了时刻氧、氮分压; $m_{\text{Oout}}, m_{\text{Nout}}$ 表示单位时间步长内从燃油中溢出的氧、氮质量; $q_{m\text{Onea}},$

$$\begin{cases} A = \frac{V_{\text{f}2}(\beta_{\text{O}} - \beta_{\text{N}})}{T_{\text{f}2}} \\ B = \frac{V_{\text{f}2}(\beta_{\text{N}} - \beta_{\text{O}})}{T_{\text{f}2}}(p_{\text{t}2} - p_{\text{v}}) - \frac{\beta_{\text{N}} V_{\text{f}1}}{T_{\text{f}1}}(p_{\text{t}1} - p_{\text{v}}) - \eta \frac{R q_{m\text{nea}} \Delta t}{\omega_{\text{Nnea}} M_{\text{N}} + \omega_{\text{Onea}} M_{\text{O}}} + \frac{V_{\text{f}1}(\beta_{\text{N}} - \beta_{\text{O}})}{T_{\text{f}1}} p_{\text{Of}1} \\ C = \eta \frac{R q_{m\text{nea}} \omega_{\text{Onea}} \Delta t}{\omega_{\text{Nnea}} M_{\text{N}} + \omega_{\text{Onea}} M_{\text{O}}}(p_{\text{t}2} - p_{\text{v}}) + \frac{\beta_{\text{O}} V_{\text{f}1} p_{\text{Of}1}}{T_{\text{f}1}}(p_{\text{t}2} - p_{\text{v}}) \end{cases} \quad (7)$$

式(6)~式(7)表示 Δt 内充入的富氮气体在燃油中氧、氮的始末状态参数的递推关系式(例如从 $p_{\text{Of}1}$ 到 $p_{\text{Of}2}$ 的过程). 其中 $M_{\text{O}}, M_{\text{N}}$ 表示氧、氮的摩尔质量; $\omega_{\text{Onea}}, \omega_{\text{Nnea}}$ 表示洗涤气中的氧、氮质量分数. 这里主要是通过这个关系式得到单位时间步长内燃油向气相逸出的氧气及氮气的质量, 以便以气相为控制体时的计算. 得到的 $p_{\text{Of}1}$ 和 $p_{\text{Of}2}$ 再代入式(1)即可得到单位步长内逸出的氧气质量 m_{Oout} .

本文将洗涤用的富氮气体分为两部分: 一部分与燃油充分溶解, 液相中溶解氧分压增加, 从而产生向气相逸出的趋势; 另一部分富氮气体则直接排入气相空间, 与之充分混合, 降低气相空间氧的体积分数. 在单位时间步长内, 假设冲入燃油的富氮气体中未与液相发生传质的那部分气体是直接通向气相的, 即可将这部分气体视为洗涤惰化的气体源.

以气相空间为控制体, 假设富氮气体通入气相空间与其中的气体充分混合, 流入流出燃油箱的体积流量相等. 则 t_2 时刻燃油箱气相空间中氧气体积等于 t_1 时刻的气相空间氧气体积加上流入的富氮气体中的氧气体积, 再加上燃油中逸出的氧气体积(来自于富氮气体与燃油溶解析出的氧气体积的部分), 再减去流出的氧气体积, 即

$$V_{\text{O}}(t_2) = V_{\text{O}}(t_1) + q_{\text{v}}(1 - \eta) \omega_{\text{Onea}} + V_{\text{Oout}} - \frac{q_{\text{v}} V_{\text{O}}(t_1)}{V_{\text{u}}} \quad (8)$$

$q_{m\text{Nnea}}$ 表示洗涤气中氧、氮的质量流量. 燃油中排出的氧、氮分压比:

$$\frac{m_{\text{Oout}}}{m_{\text{Nout}}} = \frac{p_{\text{Of}2} R_{\text{N}}}{p_{\text{Nf}2} R_{\text{O}}} \quad (3)$$

同时燃油中气体分压的关系

$$p_{\text{Of}1} + p_{\text{Nf}1} = p_{\text{t}1} - p_{\text{v}} \quad (4)$$

$$p_{\text{Of}2} + p_{\text{Nf}2} = p_{\text{t}2} - p_{\text{v}} \quad (5)$$

其中 p_{v} 表示大气压.

通过联立以上所有方程式, 合并代入并简化得

$$A p_{\text{Of}2}^2 + B p_{\text{Of}2} + C = 0 \quad (6)$$

其中系数分别为

其中 q_{v} 为流入和流出燃油箱的体积流量, V_{Oout} 为燃油中逸出的氧气体积, V_{u} 为燃油箱气相空间体积.

1.2 某飞机多舱燃油箱洗涤的工程计算方法

本文所计算模型如图2所示. 该模型一共有32个舱, 从燃油箱内侧(翼根)到油箱外侧(翼尖)方向各舱的编号依次为1, 2, 3, 4, ..., 32, 每个舱的体积已在表1中给出. 由于10舱为集油箱, 因此不参与具体的惰化计算, 在计算初始时刻直接作为固体区域. 结合实际模型的特殊构造, 将整个燃油箱分为4个块, 单独进行分析, 分别是1~4舱, 编号为B1-4; 5~9舱, 编号为B5-9; 11~17舱, 编号为B11-17; 18~32舱, 编号为B18-32. 对该模型引入冲洗模型的基本方法, 气相空间统一进行冲洗计算, 每个时间步长各舱向气相空间逸出一定氧气量, 由此来计算整个洗涤惰化过程的变化.

在第1节的假设条件下, 主要计算过程为:

1) 确定进气口、出气口的位置及气相空间气流方向. 这里为了方便研究, 规定每个油箱块的进气口为低数字编号的舱, 分别为B1, B5, B11, B18, 出气口分别为B4, B9, B17, B32, 气体的流动方向为从右向左, 即从低数字编号流向高数字编号的方向. 这里分有4个油箱块. 为叙述简便, 以下研究均以油箱块B1-4为例.

2) 进行液相洗涤研究. 将该油箱块视为一个整体, 在一定的载油率和洗涤速率下统一进行洗

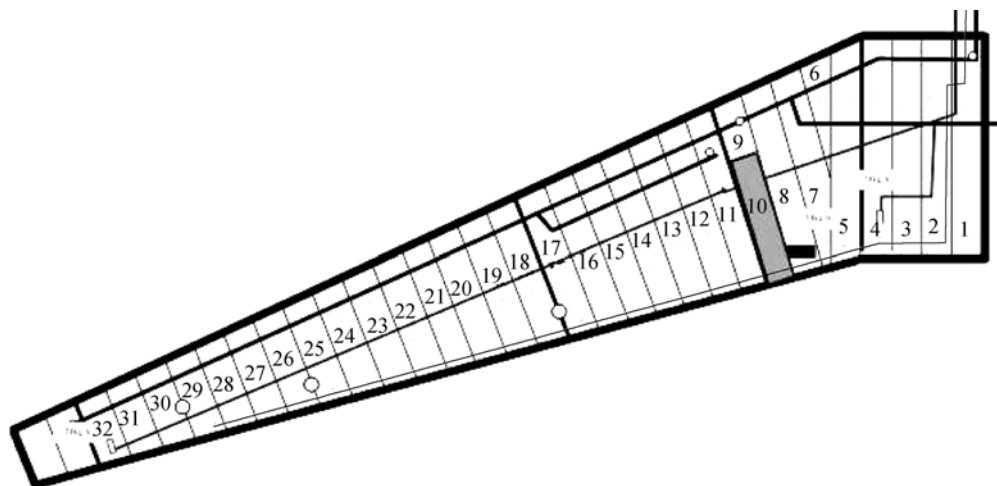


图 2 某飞机燃油箱惰化各舱排列和编号示意图

Fig. 2 Each bay arrangement and number of fuel tank inerting of an aircraft

表 1 各舱编号及对应的体积

Table 1 Each bay number and the corresponding volume

编号	体积/m ³	编号	体积/m ³	编号	体积/m ³
B1	3.81	B12	2.37	B23	1.09
B2	3.81	B13	2.21	B24	1.01
B3	3.57	B14	2.00	B25	0.93
B4	3.81	B15	1.83	B26	0.83
B5	3.82	B16	1.75	B27	0.77
B6	1.08	B17	1.65	B28	0.70
B7	2.86	B18	1.51	B29	0.64
B8	2.99	B19	1.44	B30	0.60
B9	0.87	B20	1.33	B31	0.54
B10		B21	1.09	B32	0.90
B11	2.35	B22	1.18		

涤,由式(6)、式(7)得出该油箱块在单位时间步长内逸出的氧气体积 V_{Oout} ,然后按各舱体积比分配至各舱的气相空间。

3) 对整个油箱块的气相空间进行冲洗计算。

进气口在 B1 舱,出气口在 B4 舱,由于模型各舱分布特点,气相空间气流方向依序由 B1 舱至 B4 舱。对于一个多舱燃油箱的各舱 t_2 时刻该隔舱的气相氧体积就等于 t_1 时刻原有的气相氧体积加上流入该舱的氧气体积加上燃油中逸出的氧气体积再加上其他舱流入的氧气体积(这里只有 B1 舱无其他舱流入的氧气)减去流出的氧气体积, B1-4 各舱气相氧体积数学表达式分别为

$$V_{\text{OB1}}(t_2) = V_{\text{OB1}}(t_1) + q_{V_{\text{nea}}}(1 - \eta) w_{\text{nea}} \Delta t + \frac{V_{\text{fout}} V_{\text{B2}}}{V_{\text{sum}}} - \frac{q_{V_{\text{out1}}} \Delta t V_{\text{OB1}}(t_1)}{V_{\text{uB1}}} \quad (9)$$

$$V_{\text{OB2}}(t_2) = V_{\text{OB2}}(t_1) + \frac{V_{\text{fout}} V_{\text{B2}}}{V_{\text{sum}}} + \frac{q_{V_{1-2}} \Delta t V_{\text{OB2}}(t_1)}{V_{\text{B2}}} - \frac{q_{V_{\text{out2}}} \Delta t V_{\text{OB2}}(t_1)}{V_{\text{uB2}}} \quad (10)$$

$$V_{\text{OB3}}(t_2) = V_{\text{OB3}}(t_1) + \frac{V_{\text{fout}} V_{\text{B3}}}{V_{\text{sum}}} + \frac{q_{V_{2-3}} \Delta t V_{\text{OB3}}(t_1)}{V_{\text{B3}}} - \frac{q_{V_{\text{out3}}} \Delta t V_{\text{OB3}}(t_1)}{V_{\text{uB3}}} \quad (11)$$

$$V_{\text{OB4}}(t_2) = V_{\text{OB4}}(t_1) + \frac{V_{\text{fout}} V_{\text{B4}}}{V_{\text{sum}}} + \frac{q_{V_{3-4}} \Delta t V_{\text{OB4}}(t_1)}{V_{\text{B4}}} - \frac{q_{V_{\text{out4}}} \Delta t V_{\text{OB4}}(t_1)}{V_{\text{uB4}}} \quad (12)$$

式中 $q_{V_{i-n}}$ 表示从 i 舱流入 n 舱的体积流量; V_{sum} 表示油箱块 B1-4 的体积总和; V_{uBi} 表示第 i 舱气相体积; $q_{V_{\text{out}i}}$ 表示 i 舱流出的气体体积流量。再由氧气体积换算得各舱气相氧体积分数的变化。由于其他油箱块的模型简便,气流方向均是单一的由右向左移动,所以其他油箱块的分析方法与前面一致。

4) 整理分析所得每个舱的数据,进行分块对比分析。

2 模型求解及计算结果分析

首先通过单舱油箱洗涤验证正确性,然后实现对某飞机燃油箱洗涤惰化的模拟分析。

2.1 单舱燃油箱洗涤模型验证

为了验证这种计算方法的正确性及本文模型的可靠性,通过对文献[18]的燃油箱模型进行求解,与实验数据进行对比验证。图 3(a)给出了单

舰燃油箱燃油洗涤惰化气相氧体积分数随时间的变化规律与文献[18]中的实验值的对比图。与文献[18]一致工况下,用纯氮气体进行洗涤,初始气相氧体积分数为0。发现气相氧变化趋势是一致的,随着洗涤时间的增大,气相氧体积分数先是迅速增大,约150 s后减小且逐渐都趋向一个值,最终达到接近于洗涤气氧体积分数值即0。大多数时间段内计算值与文献[18]实验值吻合程度较高,初始阶段计算值比文献[18]实验值偏高,这是因为本模型在未冲洗状态下,计算初始阶段从燃油中逸出大量氧气,而实验中气相已冲洗,燃油液面处部分氧已经排出。图3(b)是与文献[18]中的计算方法的计算值进行了对比。从图中可以看出,与已证实正确的计算方法所得的计算值相比,结果几乎一致,最大误差仅为1.6%。

综上所述,通过将本文计算值与实验结果和文献[18]中的计算值和实验结果两方面的对比,本文计算模型的可行性和正确性得到初步验证。

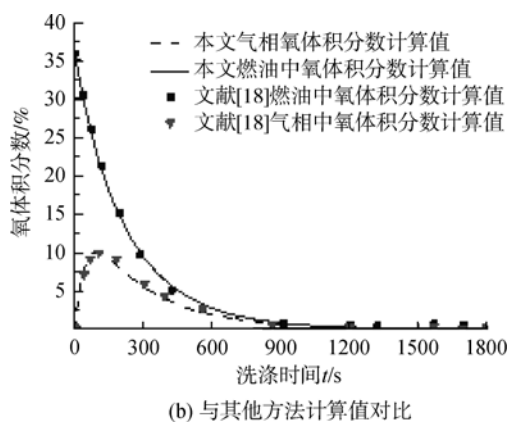
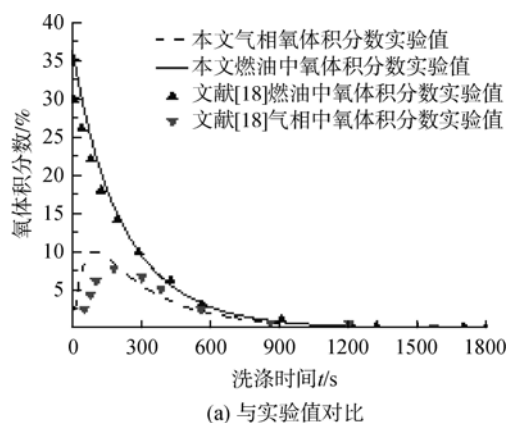


图3 单舱燃油箱洗涤过程气液两相氧体积分数随时间变化规律

Fig. 3 Variations of gas-liquid two-phase oxygen volume fraction with time in a single bay during fuel scrubbing process

为了进一步验证,图4~图6分别给出了不同因素对洗涤惰化过程的影响。油箱体积均为 2.498 m^3 ,温度为 15°C ,洗涤气氧体积分数为0.05。图4探讨了初始气相氧体积分数对洗涤惰化的影响。载油率为0.09,洗涤气质量流量为 0.003 kg/s 。初始气相氧气体积分数为0.21(即气相未惰化)时,气相氧体积分数随时间增大而不断减小;初始气相氧体积分数为0,0.10(即气相惰化后)时,气相氧体积分数先是增大后减小。但是初始气相氧体积分数并不影响惰化最终程度。

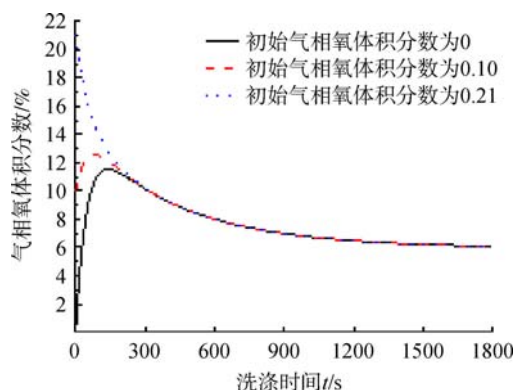


图4 不同初始气相氧体积分数对洗涤惰化的影响

Fig. 4 Effect of different initial gas phase oxygen volume fraction on scrubbing inerting

图5给出了不同洗涤效率对洗涤惰化的影响规律。载油率为0.09,洗涤气质量流量为 0.0015 kg/s 。即不同性能的洗涤喷嘴对洗涤惰化过程的影响。从图中可以看出,当洗涤效率很小时,更多的洗涤气直接进入气相空间,燃油中逸出溶解氧量很小,所以气相氧体积分数达到最低即惰化达到平衡的时间较少。所以洗涤效率越大,燃油箱惰化时间越长。

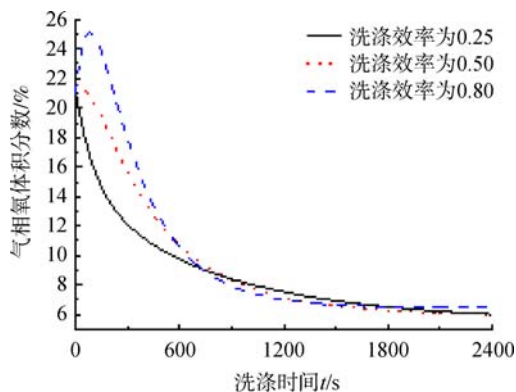


图5 不同洗涤效率对洗涤惰化的影响

Fig. 5 Effect of different scrubbing efficiency on scrubbing inerting

图6给出了不同载油率对洗涤惰化过程的影响. 洗涤效率为0.25, 洗涤气流质量流量为0.003 kg/s. 从图中可以看出载油率越大, 同时刻气相氧体积分数越低, 气相氧体积分数降得越快, 这主要是因为高载油率下气相冲洗的速率会大于液相氧气逸出速率, 但最终气相氧体积分数都趋于一个稳定值. 载油率为0.90的气相氧体积分数在约900s之后会略高于载油率为0.50的值, 这是因为惰化后程气相氧体积分数趋于一致时, 载油率越高氧气逸出相对量越大.

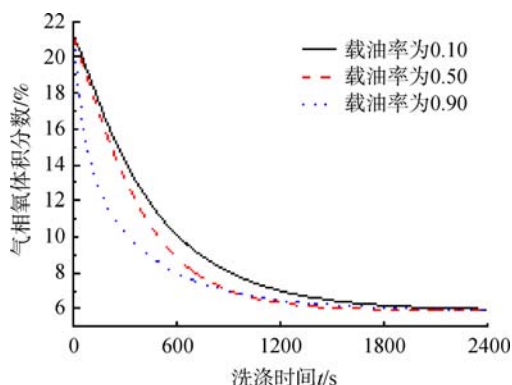


图6 不同载油率对洗涤惰化的影响

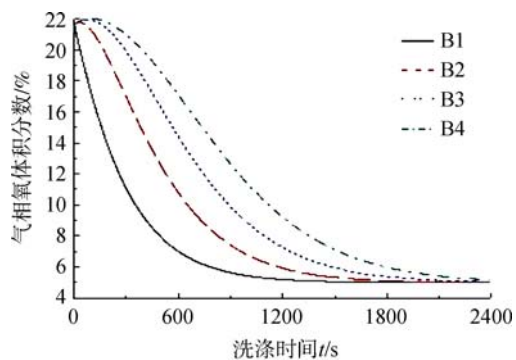
Fig. 6 Effect of different rates of carrier fuel on scrubbing interting

2.2 某飞机洗涤惰化的工程计算

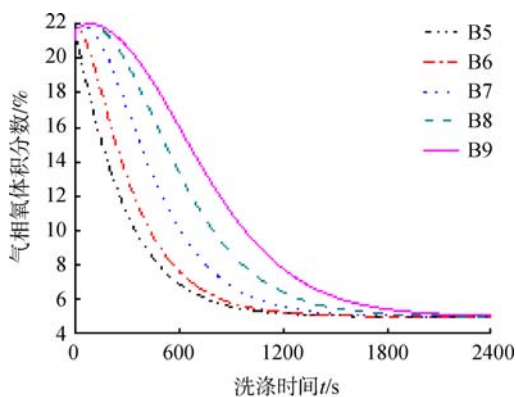
本文主要就是研究多舱飞机燃油箱的洗涤惰化过程, 通过前文可得到单位时间步长内洗涤置换出的氧气量并结合气相冲洗的工程计算方法同步对燃油箱整体进行惰化研究. 此种方法的正确性已在前面的计算中得到验证.

图7给出了在温度为15℃, 载油率为0.30, 洗涤气质量流量为0.015 kg/s, 洗涤效率为0.25的工况下所得结果. 可以看出各舱气相氧体积分数总体上是随时间变化而逐渐减小的. 由于进气口、出气口和气流方向设定的关系, 离进气口位置越近的舱, 气相氧体积分数下降越快, 越易达到平衡; 远离进气口的舱受燃油中置换出的氧气的影响越大, 表现为气相氧体积分数在开始阶段会有小幅度的上升, 但都在150s后逐渐下降.

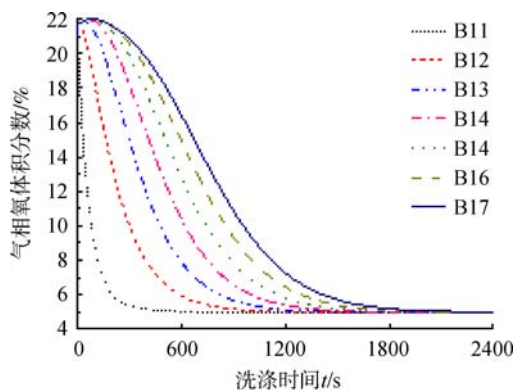
在每个油箱分块中所有舱最终都会趋向于一个稳定值, 这个值等于洗涤气的氧体积分数值. 但是各个舱块达到平衡的时间不等, 这与各舱的体积以及距离进气口和出气口的位置有关. 图7(a)中油箱块B1-4需要的时间最长, 需要2400s, 这与该飞机的实际油箱各舱油箱块体积大小是一致



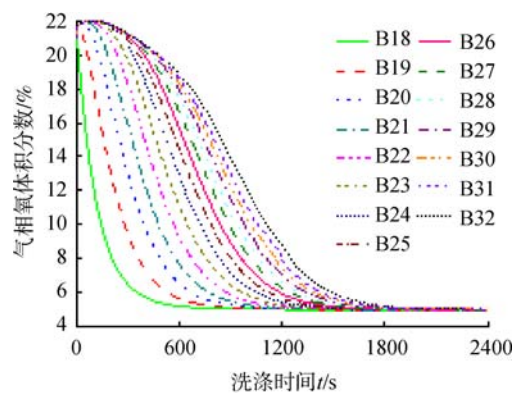
(a) B1-4



(b) B5-9



(c) B11-17



(d) B18-32

图7 某飞机各个舱的气相氧体积分数随时间变化规律

Fig. 7 Variation of gas phase oxygen volume fraction with time in each bay of an aircraft

的,油箱块 B1-4 各舱体积比其他舱的体积都大。而其他舱都在2000 s左右达到平衡。

3 结 论

本文主要通过将飞机燃油箱洗涤惰化过程变换为燃油冲洗和燃油洗涤两结合的过程,运用该研究方法来分析,得到如下结论:

1) 从单舱燃油箱计算结果对比分析可以得出,气相冲洗和液相洗涤结合的方法是可行的。随着时间的增大,气相氧体积分数大体上逐渐减小;惰化后的燃油箱随时间变化气相氧体积分数会先增大后减小,最终趋向一个等于洗涤气氧体积分数的值。与文献[18]所用计算方法得到的结果几乎一致,说明该方法可行。

2) 洗涤惰化的特性研究。初始气相氧体积分数不影响洗涤惰化最终程度;载油率越大,气相氧体积分数降得越快,但不影响洗涤惰化的程度;洗涤效率越大,洗涤时间越长。

3) 多舱燃油箱洗涤惰化,总体上氧体积分数是不断下降并最终达到一个同一值。相同条件下,达到稳定所需的时间与距离进气口的远近、燃油箱的体积有关。一般地,距离进气口越近,燃油箱体积越小,惰化时间就越短。所有舱均在2400 s达到稳定值。

参考文献:

- [1] 兰顿. 飞机燃油系统[M]. 颜万亿,译. 上海:上海交通大学出版社,2010.
- [2] 张辉,刘应书,李永玲,等. 机载制氮系统在油箱防火中的应用和研究进展[J]. 低温与特气,2009,27(4):1-5.
ZHANG Hui, LIU Yingshu, LI Yongling, et al. Applications and development tendencies of onboard oxygen generating systems in aviation field[J]. Low Temperature and Specialty Gases, 2009, 27(4): 1-5. (in Chinese)
- [3] 张欲晓,樊尚春. 民用飞机燃油箱的防爆方法[C]//大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会2007年学术年会论文集. 北京:中国航空学会,2007:1-4.
- [4] 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. Aircraft fuel tank explosion and explosion suppression material application technology[J]. Aeronautical Science and Technology, 2002(3): 33-35. (in Chinese)
- [5] Vannice W L, Grenich A F. Fighter aircraft OBIGGS (on-board inert gas generation system) study: Volume 1[R]. Ohio, US: Aero Propulsion Laboratory Fire Protection Branch(AFWAL/POSH), ADA183690, 1987.
- [6] Howell T J. Fighter aircraft OBIGGS (on-board inert gas generation system) study: Volume 2[R]. Ohio, US: Aero Propulsion Laboratory Fire Protection Branch(AFWAL/POSH), ADA183781, 1987.
- [7] Knight T C, Ritter J E. The AH-64A nitrogen inerting system[J]. AIAA 84-2480, 1984.
- [8] Jone L, Jaeger W H. A fuel tank inerting system for military aircraft[R]. Air Force Aero Propulsion Laboratory, AFAPL-TR-70_85, 1971.
- [9] 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 aircraft fuel tank inerting technology washing and scrubbing[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 42(5): 614-619. (in Chinese)
- [10] McConnell P M, Dalan G A, Anderson C L. On-board inert gas generator system(OBIGGS) studies: Part 2 fuel scrubbing and oxygen evolution tests[R]. Ohio, US: Aero Propulsion Laboratory Fire Protection Branch (AFWAL/POSH), ADA167445, 1986.
- [11] Cavage W M. The cost of implementing ground-based fuel tank inerting in the commercial fleet[R]. Washington DC, US: Office of Aviation Research, DOT/FAA/AR-00-19, 2000.
- [12] 闫红敏,江平,高永庭,等. 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, et al. 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. (in Chinese)
- [13] 冯诗愚,鹿世化,刘卫华,等. 洗涤效率对飞机燃油箱惰化过程的影响分析[J]. 航空动力学报,2010,25(11):2457-2463.
FENG Shiyu, LU Shihua, LIU Weihua, et al. Analysis the affect of scrubbing efficiency in aircraft fuel tank inerting process[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(11): 2457-2463. (in Chinese)
- [14] 卢吉. 机载空分装置及惰化系统的理论研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2012.
LU Ji. Theoretical study onboard the space division devices and inerting systems[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [15] 冯霄. 化工原理:下[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [16] Cavage W M. Modeling inert gas distribution in commercial transport aircraft fuel tanks[R]. AIAA-2002-2032, 2002.
- [17] 张声奇,王学德,王志伟,等. 多隔舱燃油箱惰化流场的数值模拟与分析[J]. 航空动力学报,2013,28(4):838-843.
ZHANG Shengqi, WANG Xuede, WANG Zhiwei, et al. Numerical simulation and analysis of nitrogen-enriched air flow in multi-bay fuel tank[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(4): 838-843. (in Chinese)
- [18] 汪明明. 飞机燃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 aircraft fuel tank vapor space oxygen concentration control technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)

(编辑:陈越)