

文章编号:1000-8055(2012)12-2641-07

某中央翼燃油箱惰化流场的数值模拟 及特性分析

王学德¹, 王志伟¹, 刘卫华², 张声奇¹, 王小平³

(1. 南京理工大学 能源与动力工程学院, 南京 210094;

2. 南京航空航天大学 航空宇航学院, 南京 210016;

3. 南京机电液压工程研究中心 航空机电系统综合航空科技重点实验室, 南京 211100)

摘 要: 在不同富氮气体入口参数下,对某大型运输机中央翼燃油箱的惰化过程进行了数值模拟,研究了在不同流量和体积分数富氮气体条件下燃油箱的惰化规律.计算结果显示:当富氮气体中氮气体积分数为 95%、体积流量分别为 $0.021, 0.028 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $0.042 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,燃油箱内平均氧体积分数随体积置换次数的变化曲线几乎完全重合;当富氮气体体积流量为 $0.042 \text{ m}^3/\text{s}$ 、氮气体积百分比分别为 92%、94%和 98%时,燃油箱惰化率随时间的变化曲线重合.说明相同体积分数富氮气体条件下燃油箱惰化完成时所需富氮气体量与富氮气体流量无关,而富氮气体的流量直接决定了各舱室富氮气体的惰化率.通过对计算结果的分析,证明了利用缩比油箱去模拟真实油箱的惰化过程的合理性.为优化某运输机中央翼燃油箱惰化系统设计提供参考.

关 键 词: 数值模拟; 燃油箱惰化; 油箱冲洗; 机载制氮系统; 入口参数

中图分类号: V228

文献标志码: A

Numerical simulation and analysis of nitrogen-enriched air flow in a center wing tank

WANG Xue-de¹, WANG Zhi-wei¹, LIU Wei-hua²,
ZHANG Sheng-qi¹, WANG Xiao-ping³

(1. School of Energy and Power Engineering,

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

2. College of Aerospace Engineering,

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

3. Aviation Key Laboratory of

Science and Technology on Aero Electromechanical System Integration,

Nanjing Engineering Institute of Aircraft System, Nanjing 211100, China)

Abstract: Under the different nitrogen-enriched air (NEA) parameters, the inerting process was studied by numerical simulation of a civil airplane center wing tank (CWT). The study show the inerting rule of the CWT under different flow rates and different oxygen concentration. The results show that, when the NEA containing volume fraction of about 95% of the nitrogen and the volume flow rate of the NEA are $0.021, 0.028 \text{ m}^3/\text{s}$ and $0.042 \text{ m}^3/\text{s}$, the average oxygen volume fraction distribution versus volumetric tank exchange

收稿日期: 2011-12-22

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20121218.0859.201212.2641_001.html

基金项目: 南京理工大学紫金之星资助计划; 教育部博士点基金(20093219120031);

南京理工大学自主科研资助项目(2011YBXM111)

作者简介: 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.

(VTE) are almost the same; when the volume flow rate of the NEA is $0.042 \text{ m}^3/\text{s}$ and the volume fraction of the nitrogen are 92%, 94% and 98%, the inerting ratio versus time are the same. It is conclusion that the inerting time of the CWT has nothing to do with the flow rate under the same oxygen concentration, and the flow rate of the NEA determines the inerting ratio of each bay. Based on comparative analysis of the numerical result, it proves that the shrink analogy method can be used to simulate the inerting process of the CWT. The research provides reference for optimizing the design of a transport airplane inerting system.

Key words: numerical simulation; fuel tank inerting; fuel washing; onboard inert gas generation system; input parameter

飞机作为运输工具已被越来越多的人所接受,同时飞机的安全问题也受到了社会的广泛关注.相关文献显示,燃油箱爆炸在飞机的所有灾难性事故中占有很高的比例^[1].通过向飞机燃油箱气相空间充入惰性介质,使气相空间中的混合气体惰化,能够很好地实现燃油箱的防火抑爆,提高飞机的安全性^[2-3].机载制氮惰化系统即是通过向飞机燃油箱气相空间充入富氮气体,降低飞机燃油箱气相空间氧体积分数,以此实现燃油箱防火抑爆的技术^[4-5].根据国内外公布的资料显示,美国在 1996 年环球航空公司飞机事故之后开始重视民用飞机燃油箱惰化系统的研究^[6],并进行了大量的理论研究和试验验证,包括对影响惰化过程参数的试验分析,例如惰化气体流量和体积分数对惰化过程的影响^[7-8],但通过 CFD 技术对影响参数的分析研究还未见报道.而国内对该技术的研究起步较晚,相关研究资料较少,就目前公布的资料,主要是对惰化理论和工程方法的研究,涉及惰化过程影响参数的研究很少^[9-12].影响惰化性能的参数直接影响到惰化系统的设计任务,对系统设计具有至关重要的作用.基于数值模拟技术的研究方法,不仅能给出不同参数对惰化性能的影响规律,而且还可以对整个惰化过程进行监控,给出不同时刻燃油箱惰化流场中氧体积分数的空间分布规律,方便设计人员及时调整惰化系统的设计方案.

本文以空载某大型运输机中央翼油箱为研究对象,对该模型进行两组不同输入参数的数值模拟:一是体积分数为 95% 富氮气体在 0.021 , $0.028 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $0.042 \text{ m}^3/\text{s}$ 三种不同流量下的仿真计算;一是流量为 $0.042 \text{ m}^3/\text{s}$ 的富氮气体在 92%, 94% 和 98% 三种不同体积分数下的仿真计算.研究了不同进气口参数对某运输机中央翼油箱惰化性能的影响规律.为优化燃油箱惰化系统设计提供参考.

1 几何模型的建立

研究的某大型运输机中央翼燃油箱由三部分组成,每部分有 3 个油舱,总容积为 15.3 m^3 ,包括:主体油箱(C_bay 包括油舱 C_bay1, C_bay2 和 C_bay3)、左侧油箱(L_bay 包括油舱 L_bay1, L_bay2 和 L_bay3)和右侧油箱(R_bay 包括油舱 R_bay1, R_bay2 和 R_bay3).惰化气体入口布置方式采用仅在主体油箱的 3 个隔舱按体积比分配富氮气体的非均匀进气方式^[13] (non-equal manner),如图 1 所示.分配公式为

$$Q_{\text{nea},i} = \frac{V_i}{V} Q_{\text{nea}} \quad (1)$$

其中 V_i 是各舱室的体积; V 为总体积; Q_{nea} 是富氮气体流量.

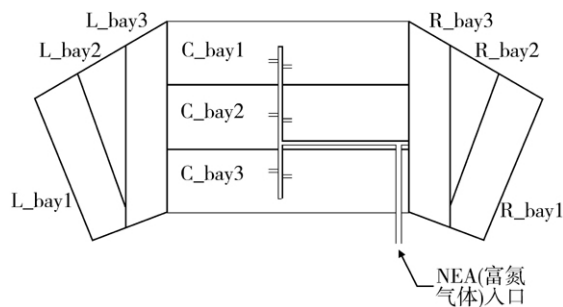


图 1 燃油箱惰化气体入口布置方式

Fig. 1 Distribution method of the fuel tank

2 数值计算

2.1 网格生成

高质量的网格是 CFD 计算的基础,由于该模型的复杂性,尤其是惰化气体分配管路更是增加了网格生成的难度.因此在合理假设的前提下,通过使用专业网格生成软件 ICEM CFD 对模型进行网格生成,如图 2 所示.

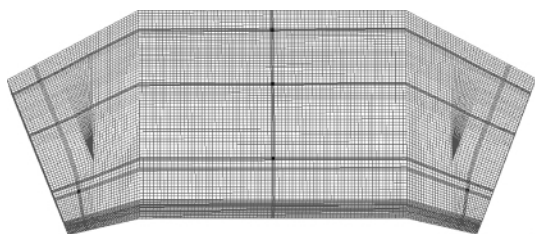


图 2 网格生成效果图

Fig. 2 Grid distribution of the fuel tank

2.2 控制方程

燃油箱冲洗惰化过程中,富氮气体的流动除遵循流体运动普遍适用的 Navier-Stokes 方程组外,同时富氮气体与气相空间中的气体组分混合、扩散,还要遵守组分守恒定律,满足组分输运方程. 组分输运方程采用以下的通用形式:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} Y_i) = -\nabla \cdot \mathbf{J}_i + R_i + S_i \quad (2)$$

式中 Y_i 是第 i 种组分的质量分数, R_i 是第 i 种组分由于化学反应的净生成率, J_i 是第 i 种组分的扩散通量, S_i 是第 i 种组分离散相及由用户自定义的源项导致的额外产生速率. 其中扩散通量的表达式随着流动状态的变化而不同. 层流时

$$\mathbf{J}_i = -\rho D_{i,m} \nabla Y_i \quad (3)$$

其中 $D_{i,m}$ 为混合物中第 i 种组分的扩散系数.

对上述控制方程通过有限体积法中 1 阶逆风格式对其进行离散. 由于入口流速较小,流动状态处于低雷诺数阶段,因此用层流模型,压力速度耦合采用 PISO (pressure-implicit with splitting of operators) 的计算方法.

2.3 边界条件和初始条件

富氮气体入口设为速度入口边界条件,入流速度通过富氮气体的体积流量和喷口面积确定,富氮气体中氧气的质量分数由公式(4)确定.

$$F_{w_{O_2}} = \frac{32F_{\varphi_{O_2}}}{32F_{\varphi_{O_2}} + (1 - F_{\varphi_{O_2}}) \times 28} \quad (4)$$

式中 $F_{\varphi_{O_2}}$ 为富氮气体中氧气的体积分数. 燃油箱气相空间中气体通气管路的通风口采用压力出口边界条件,由于本文主要是对地面冲洗惰化过程的仿真计算,因此将出口压力值设定为环境大气压,出口氧气的质量分数直接取为空气的质量分数为 0.233. 油箱壁面设为固体壁面边界条件.

3 惰化结果的对比分析

3.1 不同流量入口参数惰化流场分布规律

图 3 给出了体积分数为 95% 的富氮气体在 3 种不同流量情况下惰化进行到 100 s 时的氧体积分数分布云图的比较,从云图可以看出在 0.021, 0.028 m³/s 和 0.042 m³/s 三种不同流量下惰化进程依次加快,这与实际物理过程相符.

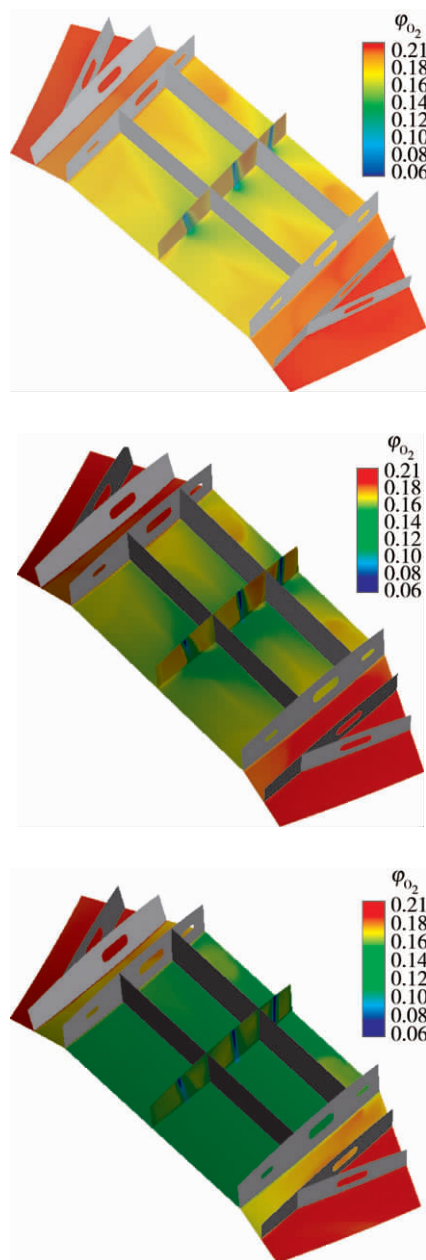


图 3 不同流量油箱在 100 s 时刻氧体积分数分布云图

Fig. 3 Oxygen volume fraction distribution of the fuel tank under different flow rates at 100 seconds

为了方便研究流量对惰化过程的影响规律,图 4 分别给出了体积分数为 95% 的富氮气体在 3 种不同流量冲洗下左、右侧,中部油箱以及整体油箱平均氧体积分数随时间变化曲线图。

从图 4(a)中可以看出,由于油箱结构的对称性,左、右侧平均氧体积分数的变化规律相同,0.021,0.028 m³/s 和 0.042 m³/s 三种不同流量下平均氧体积分数达到安全指标下(氧体积分数低于 8%)的惰化时间分别为 970.5,726.1 s 和 485.4 s,惰化时间随流量的增加呈线性减少趋势。

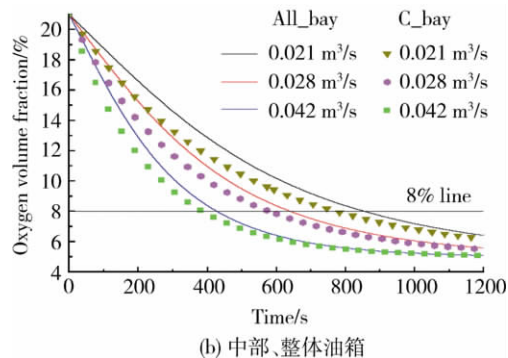
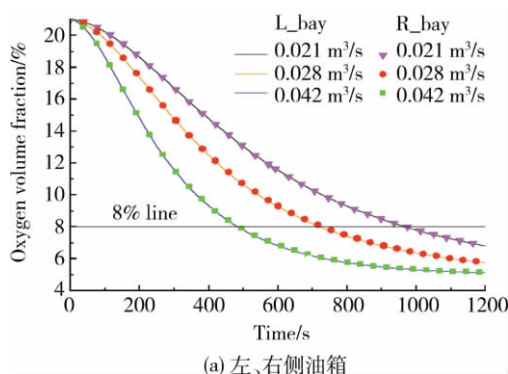


图 4 不同流量下油箱平均氧体积分数随时间的变化规律

Fig. 4 Average oxygen volume fraction distribution vs. time under different flow rates

图 4(b)显示中部和整体油箱的变化趋势相同,中部油箱达到安全指标时 0.021,0.028 m³/s 和 0.042 m³/s 三种不同流量的富氮气体所用时间 772.4,579.4 s 和 358.8 s,惰化时间随流量的增加呈线性减少的趋势;油箱整体平均氧体积分数达到限定值时,0.021,0.028 m³/s 和 0.042 m³/s 三种不同流量所用时间为 857.0,641.8 s 和 428.4 s,惰化时间随流量同样呈线性减少趋势。由此表明对于相同体积分数不同流量的富氮气体,惰化完成时的时间随流量的比例线性减少或增加。

图 5 给出了不同流量下平均氧体积分数随体积置换次数^[14](volumetric tank exchange, VTE, 记为 N_{vte})的变化规律。体积置换次数是一无量纲准则数,它的引进方便了对不同体积燃油箱在相同惰化气体流量下惰化规律的比较研究。其表达式如下:

$$N_{vte} = \frac{\dot{Q}_{nea} \cdot t}{V_u} \quad (5)$$

其中 $\dot{Q}_{nea}$ 为流入、流出油箱的富氮气体体积流率; t 为惰化时间; V_u 为油箱气相空间的容积。从图中可以看出:左、右侧油箱的曲线完全重合,不同流量下平均氧体积分数随 N_{vte} 的变化曲线完全一致,这充分说明:

1) 对于相同体积分数下的富氮气体,惰化完成时富氮气体的总需求量由油箱的体积决定,与流量没有关系。

2) 对于体积成比例的油箱,只要按体积比例去调节流量,所得惰化过程相同,该结论为利用缩比油箱去模拟真实油箱的惰化过程奠定了理论基础。

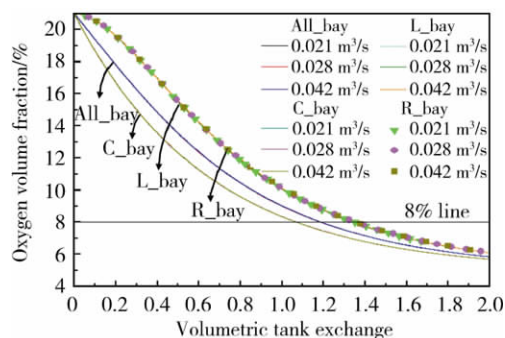


图 5 不同流量油箱内平均氧体积分数随 VTE 的变化规律

Fig. 5 Average oxygen volume fraction distribution vs. VTE under different flow rates

3.2 不同体积分数入口参数惰化流场分布规律

此次模拟采用 92%,94%和 98%三种不同体积分数的富氮气体在 0.042 m³/s 流量下对研究模型进行冲洗惰化。图 6 给出了惰化进行 200 s 时 3 种体积分数富氮气体对流场冲洗结果的比较。从图中可以定性地看出,流场氧体积分数分布随富氮气体体积分数升高而逐次降低。

图 7、图 8 分别给出了左、右两侧,中部及整体油箱平均氧体积分数在不同惰化气体体积分数下随时间和体积置换次数的变化规律。从图中可以看出,在不同惰化气体体积分数下,各舱平均氧

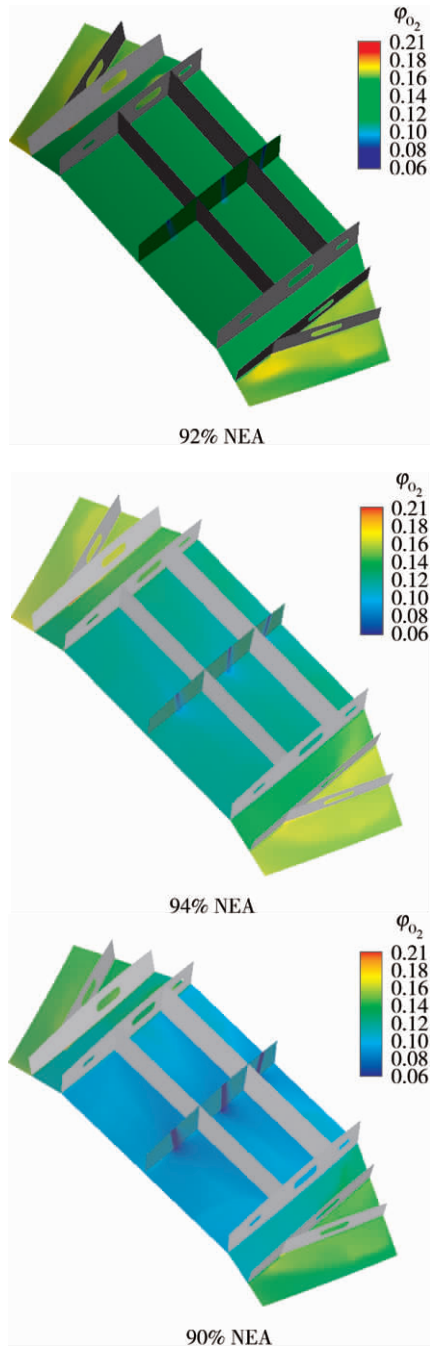


图 6 不同体积分数富氮气体惰化 200 s 时氧体积分数分布云图

Fig. 6 Oxygen volume fraction distribution of the fuel tank under different oxygen volume fraction NEA at 200 seconds

体积分数随时间和 VTE 的变化规律基本相同,在相同时刻或相同的体积置换次数,平均氧体积分数随惰化气体体积分数的增加而线性减小;在相同的体积分数下,惰化的时间或所需要的气体流量随体积分数的减小而增加。

图 9 给出了不同体积分数下左、右侧、中部和整体油箱在相同流量下的惰化率^[15] (R_{inert}) 随惰

化时间的比较结果,其惰化率的计算公式为

$$R_{\text{inert}} = \frac{C_{\text{amb},\text{O}_2} - C_{\text{O}_2}(t)}{C_{\text{amb},\text{O}_2} - C_{\text{nea},\text{O}_2}} \quad (6)$$

式中 $C_{\text{amb},\text{O}_2}$ 为环境空气中氧气体积分数; $C_{\text{nea},\text{O}_2}$ 为富氮气体中氧气体积分数; $\varphi_{\text{O}_2}(t)$ 为惰化过程中氧气体积分数。

从图 9 中可以看出,对于相同流量,各个舱室不同体积分数下的惰化率曲线重合,由此表明,富

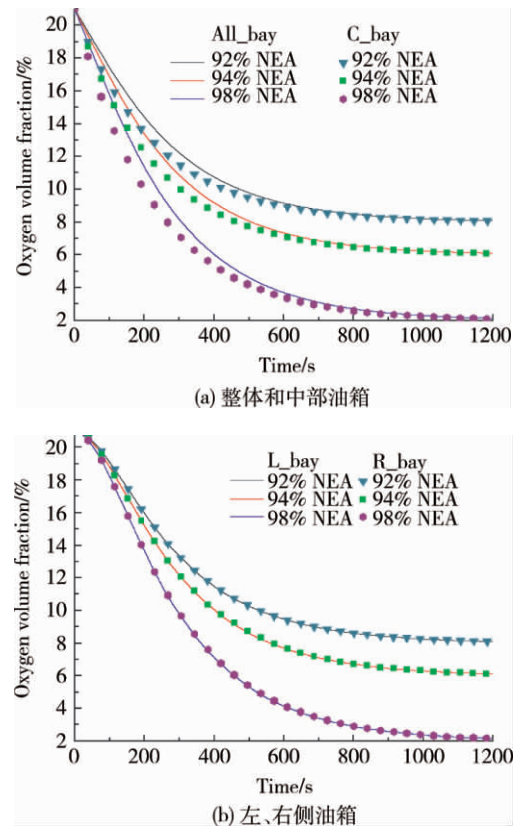
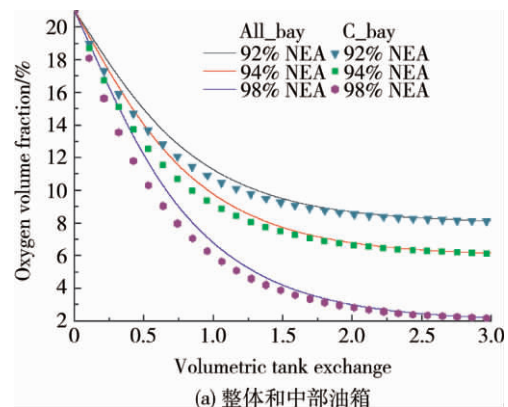


图 7 不同体积分数下油箱内平均氧体积分数随时间的变化规律

Fig. 7 Average oxygen volume fraction distribution vs. time under different oxygen volume fraction NEA



(a) 整体和中部油箱

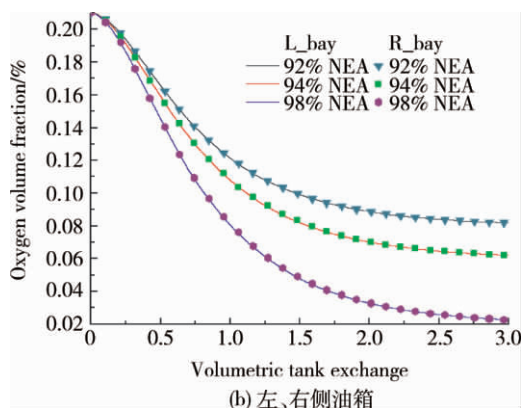


图 8 不同体积分数下油箱内平均氧体积分数的变化规律

Fig. 8 Average oxygen volume fraction distribution vs. VTE under different oxygen volume fraction NEA

氮气体的流量直接决定了各舱室富氮气体的惰化率。

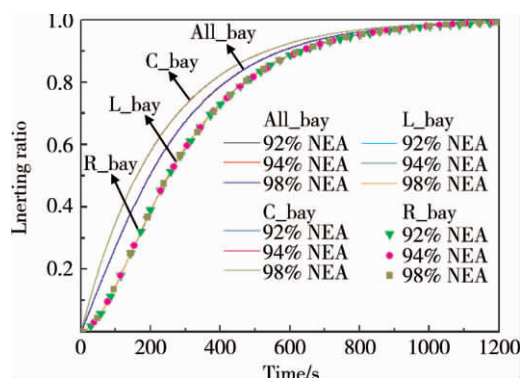


图 9 不同流量油箱各部分惰化率随时间的变化规律

Fig. 9 Average oxygen volume fraction distribution of each part of the CWT vs. inerting ratio under different oxygen volume fraction NEA

4 结 论

本文通过使用 CFD 方法对某中央翼油箱在不同进气口参数下的惰化流场进行了仿真计算,并对计算结果做了对比分析,最终得出如下重要结论:

1) 对于本论文研究模型,相同体积分数的富氮气体,惰化完成时富氮气体的总需求量由油箱的体积决定,与流量没有关系,而完成惰化所需时间随流量的比例线性减少或增加. 同时在相同体积分数条件下,对于体积成比例的油箱,只要按体积比例去调节流量,所得惰化过程相同.

2) 在相同的富氮气体流量条件下,相同时刻

或相同体积置换次数,平均氧体积分数的惰化气体体积分数的增加而线性减小. 并通过对燃油箱惰化率的研究表明,富氮气体的流量直接决定了各个舱室富氮气体的惰化率.

因此,对于具体型号民用飞机中央翼油箱而言,选择合适的富氮气体入口参数,可以有效地减小惰化时间和减少惰化气体需求量. 但该计算模型仅对地面冲洗进行了仿真计算,然而在整个飞行过程中,飞机燃油箱冲洗惰化过程是比较复杂的,为给飞机惰化系统的设计提供更合实际的数据,在以后的工作中将进一步展开对飞机在给定飞行包线下惰化规律的研究.

参考文献:

- [1] Abramowitz A, Boris P. Characterization of an oxy/nitrogen permeable menbrane system[R]. Federal Aviation Administration Report, DOT/FAA/AR-95/91, 1996.
- [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, 20(6): 24-26.
WANG Xiaoping, 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): 24-26. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] Burns M, Cavage W M, Hill R, et al. Flight testing of the FAA onboard inert gas generation system on an airbus A320[R]. Federal Aviation Administration Report, DOT/FAA/AR-03/58, 2004.
- [5] Burns M. Evaluation of fuel tank flammability and the FAA inerting system on the NASA747 SCA[R]. Federal Aviation Administration Report, DOT/FAA/AR-04/41, 2004.
- [6] Buns M, Cavage W M. Ground and flight testing of a Boeing 737 center wing fuel tank inerted with nitrogen enriched air[R]. Federal Aviation Administration Report, DOT/FAA/AR-01/63, 2001.
- [7] Cavage W M. Modeling in-flight inert gas distribution in a 747 center wing fuel tank[R]. AIAA-2005-4906, 2005.
- [8] Buns M, Cavage W M. Inerting of a vented aircraft fuel tank test article with nitrogen enriched air[R]. Federal Aviation Administration Report, DOT/FAA/AR-01/6, 2001.
- [9] 高秀峰,刘卫华,熊斌,等. 飞机燃油箱冲洗惰化过程的理论研究[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(9): 18-20.
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, 44(9): 18-20. (in Chinese)
- [10] 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 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] 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)
- [12] 黄光容, 何亚平, 牛奕, 等. 影响飞机燃油箱惰化系统参数的数值研究[J]. 火灾科学, 2011, 20(2): 117-124.
HUANG Guangrong, HE Yaping, NIU Yi, et al. Numerical research on the parameters influencing[J]. Fire Safety Science, 2011, 20(2): 117-124. (in Chinese)
- [13] 冯晨曦, 刘卫华, 鹿世化, 等. 气体分配方式对多隔仓燃油箱地面惰化的影响[J]. 航空动力学报, 2011, 26(11): 2528-2533.
FENG Chenxi, LIU Weihua, LU Shihua, et al. Study on ground-based inerting process influenced by different gas distribution for multi-bay fuel tank[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(11): 2528-2533. (in Chinese)
- [14] Cavage W M. Ground based inerting of commercial transport aircraft fuel tanks[R]. RTO-MP-103, 2002.
- [15] Cavage W M. Ground-based inerting of a Boeing 737 center wing fuel tank[R]. SAE Conference Paper 2001-01-2656, 2001.