

文章编号:1000-8055(2013)04-0838-06

多隔舱燃油箱惰化流场的数值模拟与分析

张声奇¹, 王学德¹, 王志伟¹, 刘卫华², 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, 南京 211100)

摘 要: 根据多隔舱燃油箱的特点,建立了适用于多隔舱燃油箱惰化流场的数值模拟方法.将数值模拟结果与工程模型结果及国外文献中的实验数据进行了对比,验证了该方法的正确性.通过对各个隔舱内氧气体积分数分布的分析发现,惰化过程中,各个隔舱内的氧气体积分数趋于均匀,流出某隔舱的气体的氧气体积分数近似等于该隔舱内的平均氧气体积分数.将数值模拟得到的两种流通方式下隔舱间气体体积流量分配情况与隔舱间流通面积比进行对比发现,当通气口相对于富氮气体进口对称布置时隔舱间体积流量能够近似按照面积比分配,而不对称布置时分配情况比较复杂,不能够简单地按照面积比确定.

关 键 词: 多隔舱燃油箱;惰化;富氮气体 (NEA);数值模拟;氧气体积分数;体积流量

中图分类号: V228

文献标志码: A

Numerical simulation and analysis of nitrogen-enriched air flow in multi-bay fuel tank

ZHANG Sheng-qi¹, WANG Xue-de¹, WANG Zhi-wei¹,
LIU Wei-hua², 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. Nanjing Engineering Institute of Aircraft System, Nanjing 211100, China)

Abstract: According to the characteristic of multi-bay fuel tank, a numerical simulation method for nitrogen-enriched air (NEA) flow in multi-bay fuel tank was developed. Firstly, the correctness of this method was verified by comparing the inerting results from numerical simulation with the results of the engineering model and the test data from foreign literatures. Secondly, after analyzing the oxygen volume fraction in individual bay of the inerting process, it was found that the oxygen volume fraction distribution in individual bay tended to be even and the outflow oxygen volume fraction of one bay was approximately equal to the average oxygen volume fraction of that bay. Lastly, the simulated flow rates were compared with the cross-section flow areas between different bays. It is found that if the vents are

收稿日期: 2012-05-10

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130417.1353.201304.838_017.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(2011YBXM111)

作者简介: 张声奇(1988—),男,河北秦皇岛人,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.

placed symmetrically to the inlet of NEA, the flow rates can be weighted based on the cross-section flow areas; while if the vents are placed asymmetrically to the inlet of NEA, the flow pattern would be relatively complex.

Key words: multi-bay fuel tank; inerting; nitrogen-enriched air (NEA); numerical simulation; oxygen volume fraction; volume flow rate

采用机载制氮系统(OBIGGS)产生的富氮气体(NEA)对民机燃油箱进行冲洗惰化可以有效地降低燃油箱发生爆炸的危险^[1-6].在对飞机燃油箱惰化系统进行设计时,气相空间氧气体积分数变化规律的预测至关重要,它将影响到机载制氮系统及气体分配管路的设计^[7-9].

当今,大多数民机燃油箱都采用多隔舱布局,隔舱之间通过隔板上的孔洞及管路相连通.多隔舱燃油箱布局及隔舱间连通方式的复杂性导致其惰化流场也非常复杂^[10-11].因此,对多隔舱燃油箱各个隔舱的惰化流场进行模拟变得十分重要.国内外研究人员在对多隔舱燃油箱惰化规律进行研究时采用的方法主要有:实体模型实验、缩比模型实验、工程模型计算和计算流体动力学(CFD)数值模拟.前两种方法所得到的结果虽然可信度高,但成本太大,一般在设计初期阶段不宜使用.工程模型计算方法能够快速给出各舱内平均氧气体积分数随时间的变化关系,但是,由于工程计算模型中隔舱间的流动方向是人为确定的,体积流量是按照面积比确定的,使其在面对复杂的油箱结构及气体流通方式时难以应用.CFD数值模拟方法在给定进、出口处的边界条件时,可以通过离散求解流动控制方程来确定隔舱间的流动方向及体积流量分配情况,使其能够适用于复杂的油箱结构和气体流通方式.应用CFD数值模拟方法不仅能够给出气相空间氧气体积分数的变化规律,还能够给出惰化过程中各个时刻隔舱内氧气体积分数的空间分布,更加直观地了解各个隔舱内的惰化情况,从而也便于对富氮气体进口及通气口位置进行优化设计.

国内外关于使用CFD方法对多隔舱燃油箱惰化流场进行研究的文献较少,因此有必要对此进行研究.本文借助CFD软件FLUENT,针对多隔舱燃油箱惰化流场建立了数值模拟方法.以波音747多隔舱中央翼燃油箱为计算模型,进行了惰化流场的数值模拟,将模拟结果与工程模型结果及国外实验数据进行了对比,以验证该方法的正确性.随后又对数值模拟所得的各个隔舱内氧气体积分数分布情况及不同气体流通方式下隔舱

间体积流量分配情况进行了分析研究.

1 计算方法

1.1 几何模型简化与网格生成

实际多隔舱燃油箱的结构十分复杂,因此在不改变其基本结构的前提下,需要对其进行简化.简化原则为:①忽略油箱内螺帽、管线等微小特征;②将隔舱间多个小的气体流通界面用等面积的一个或几个流通界面代替;③将通气口和富氮气体喷口简化为壁面上的进气口和出气口.

按照以上简化原则,采用文献^[12]中的几何参数,用三维造型软件建立了波音747中央翼油箱的几何模型,如图1所示.

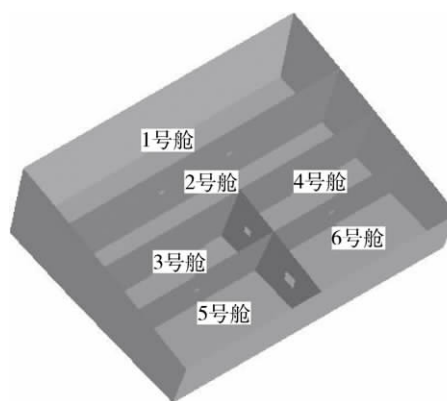


图1 波音747中央翼油箱几何模型

Fig. 1 Geometrical model of Boeing 747 center wing tank

计算网格分为结构网格和非结构网格.与非结构网格相比,结构网格的计算精度高、计算结果可靠.因此,为了降低网格对计算结果的影响,本文在研究中采用了计算结果更为可靠的结构网格,如图2所示,网格总数约为46万.

1.2 数值计算方法

本文使用软件FLUENT 6.3求解器,离散求解非定常Navier-Stokes(N-S)方程组,即质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程.由于富氮气体喷口处的雷诺数较低,可以认为流动处于层流状态,因此本文采用了层流模型进行计算.由于

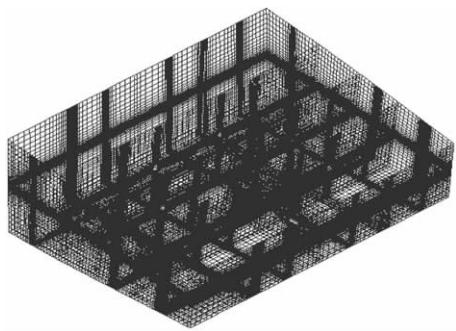


图2 计算网格

Fig. 2 Computational grids

计算过程中计算域内存在较大的质量浓度梯度,而且氧气体积分数是本文所关注的重要参数,因此还要求解组分输运方程^[13]. 组分输运方程的通用形式为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega_i) + \nabla \cdot (\rho V\omega_i) = -\nabla \cdot J_i + R_i + S_i \quad (1)$$

式中 ω_i 是组分 i 的质量分数; J_i 是组分 i 的扩散通量; R_i 是组分 i 由于化学反应的净生成率; S_i 表示通过其他方式组分 i 的净生成率及用户自定义的其他源项.

本文研究中各项离散格式的设置情况:压力项为标准格式,能量、动量及组分为1阶迎风格式. 速度压力耦合方法采用了 pressure implicit with splitting of operators(PISO)算法. NEA 进口和通气口分别采用了速度入口(velocity-inlet)和压力出口(pressure-outlet)边界条件. 在速度入口边界条件中,入口流速通过富氮气体的体积流量和喷口面积确定. 该边界条件中还需要设定富氮气体中氧气质量分数. 若富氮气体中氧气体积分数为 φ_{O_2} ,则按下式确定富氮气体中的氧气质量分数:

$$\omega_{O_2} = \frac{32\varphi_{O_2}}{32\varphi_{O_2} + 28(1 - \varphi_{O_2})} \quad (2)$$

2 多舱燃油箱模拟验证与分析

2.1 CFD 数值模拟的惰化规律验证

为验证本文所建立的数值模拟方法的正确性,将数值模拟所得气相空间氧气体积分数变化规律与工程模型结果及文献[14]中的实验数据进行了对比. 计算时气体流通方式如图3所示,富氮气体从3号舱流入,同时在1号舱和6号舱设置通气口与外界环境相通^[15]. 计算条件为:油箱载油率为0%;油箱内初始氧气体积分数为21%;富

氮气体的氧气体积分数为5%;富氮气体进口处体积流量为 $0.0661 \text{ m}^3/\text{s}$.

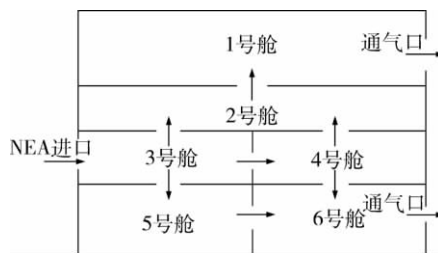


图3 波音747中央翼油箱气体流通方式

Fig. 3 Air flow pattern of Boeing 747 center wing tank

在工程模型计算过程中假定每个隔舱内气体充分混合,每一隔舱流入其相邻隔舱的体积流量按照隔舱间的流通面积比确定. 工程模型的数学描述如下:

$$V_{O_2 \text{ bay},n}(t) = V_{O_2 \text{ bay},n}(t-1) + \dot{Q}_{\text{nea}} \cdot \Delta t \cdot \varphi_{O_2, \text{nea}} + \sum_i [\dot{Q}_{i-n} \cdot \Delta t \cdot V_{O_2 \text{ bay},i}(t-1)/V_{\text{bay},i}] - \dot{Q}_{\text{sum}} \cdot \Delta t \cdot V_{O_2 \text{ bay},n}(t-1)/V_{\text{bay},n} \quad (3)$$

式中 $V_{O_2 \text{ bay},n}(t)$ 为 t 时刻 n 号舱内的氧气体积; $V_{\text{bay},n}(t)$ 为 n 号舱的容积; $\dot{Q}_{\text{nea}}$ 为流入 n 号舱的富氮气体体积流量; Δt 为时间步长; $\varphi_{O_2, \text{nea}}$ 为富氮气体中的氧气体积分数; $\dot{Q}_{i-n}$ 为从 i 号舱流入 n 号舱的体积流量; $\dot{Q}_{\text{sum}}$ 为流入 n 号隔舱的总体积流量. 则 t 时刻 n 号舱内的氧气体积分数为

$$\varphi_{O_2 \text{ bay},n}(t) = \frac{V_{O_2 \text{ bay},n}(t)}{V_{\text{bay},n}} \quad (4)$$

将 t 时刻各隔舱的氧气体积分数作为下一步计算的输入参数,从而得到氧气体积分数随时间的变化规律.

为便于将 CFD 数值模拟结果与工程模型结果及实验数据进行对比,引入了无量纲准则数体积置换次数(volumetric tank exchange) N_{vte} ,其表达式为

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

式中 $\dot{Q}_{\text{nea}}$ 为进入油箱的富氮气体总体积流量; t 为惰化时间; V_u 为油箱总体积.

气相空间氧气体积分数随 N_{vte} 的变化关系对比如图4所示,从图中可以看出,CFD 数值模拟结果与工程模型及实验数据都吻合得很好. 证明

了本文所建立的多隔舱燃油箱惰化流场数值模拟方法的准确性和可行性。

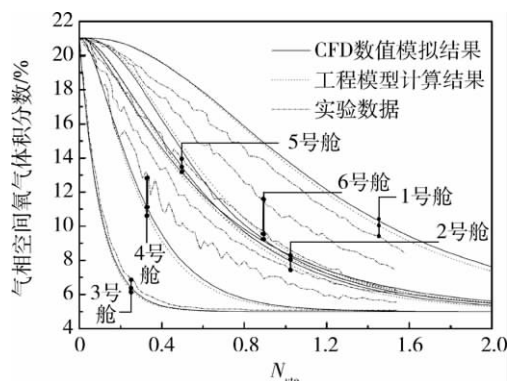


图4 数值模拟结果与工程模型结果及实验数据对比

Fig. 4 Comparison of numerical simulation results with engineering model result and test data

2.2 各个隔舱内氧气体积分数分析

图5为上文所述计算条件下CFD数值模拟得到的惰化过程中不同时刻的氧气体积分数分布云图。通过云图可以明显看出,随着富氮气体的充入,燃油箱内氧气体积分数逐渐下降,首先下降的

是富氮气体进口所在的3号舱,然后依次是4号舱、2号和5号舱、6号舱,最后是1号舱。通过云图的定性分析可以看出,在惰化过程中,各个隔舱内部的氧气体积分数趋于均匀,而隔舱之间的氧气体积分数差异较大。例如,在20s时只有3号舱得到了明显惰化,到100s时,4号舱也得到了明显惰化,但氧气体积分数明显高于3号舱。随着惰化过程的进行,各隔舱间氧气体积分数的差异开始变得越来越明显,直到都趋于富氮气体的氧气体积分数时,差异才逐渐消失,如图5(d)中的3号舱和4号舱都已趋于富氮气体的氧气体积分数。

图6给出了各个隔舱内的平均氧气体积分数和出流气体氧气体积分数随时间的变化关系。从图中可以看出,在惰化过程中流出某隔舱的气体的氧气体积分数与该隔舱内的平均氧气体积分数几乎相等。由此也可以说明,惰化过程中各个隔舱内氧气体积分数的分布趋于均匀。从图中还可以看出,惰化过程中各个隔舱间的氧气体积分数存在较大差异,随着各个隔舱趋于富氮气体的氧气体积分数,该差异才逐渐消失。这与通过云图定性分析所得的结论是一致的。

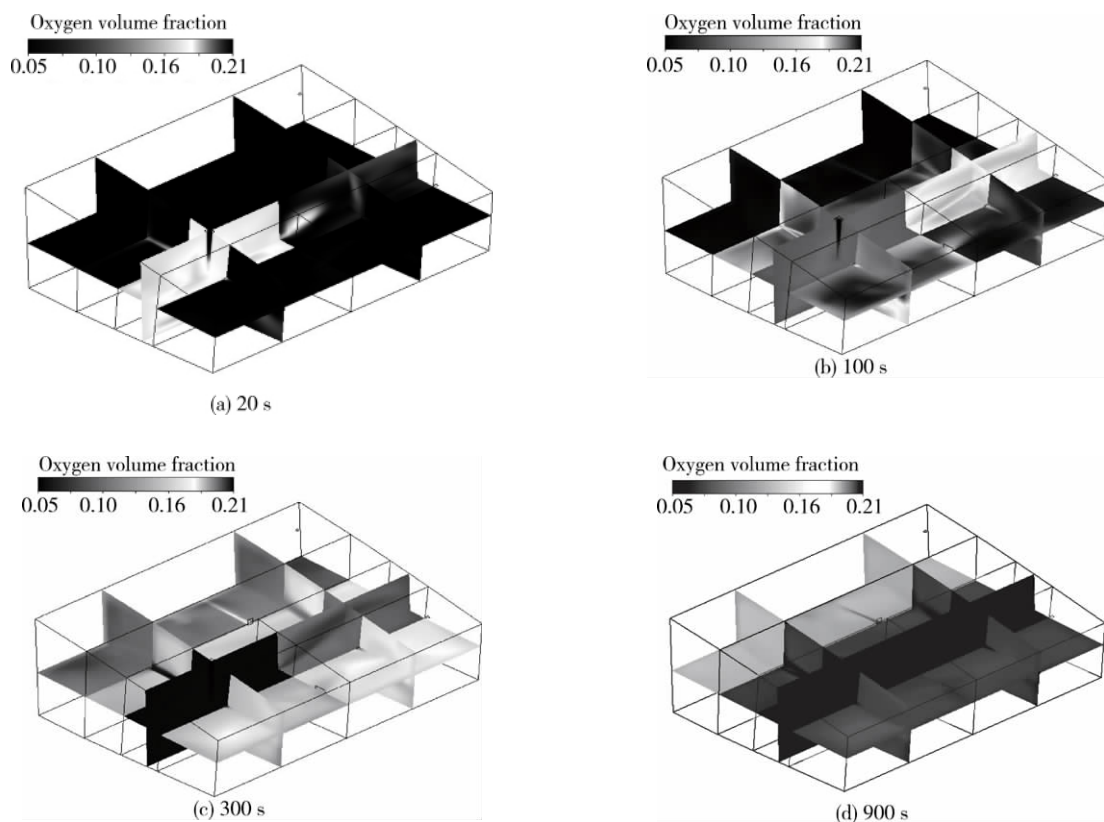


图5 不同时刻氧气体积分数分布云图

Fig. 5 Contours of oxygen volume fraction at different times

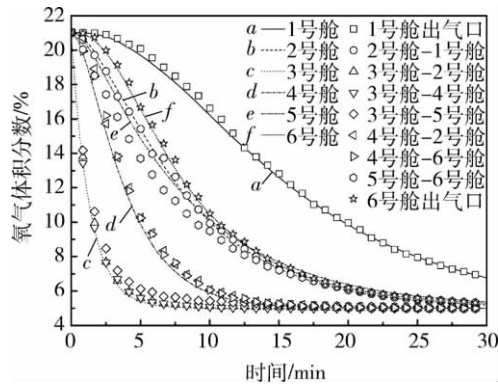


图 6 各隔舱及出流气体的氧气体积分数
随时间变化关系

Fig. 6 Relation between oxygen volume fraction and
time of individual bay and out flow

2.3 隔舱间气体体积流量分配规律研究

在多隔舱燃油箱冲洗惰化过程中,隔舱间气体体积流量分配情况将直接影响各个隔舱内氧气体积分数的变化规律. CFD 数值模拟过程中,隔舱间的体积流量分配情况是由求解器在给定的边界条件下通过求解流动控制方程得到的. 由于2.1节已经证明了本文 CFD 方法在预测氧气体积分数变化规律方面的准确性,也就说明本方法所得的隔舱间气体体积流量分配情况能够反映真实情况. 为研究隔舱间气体分配与隔舱间流通面积的关系,本文将对波音 747 中央翼油箱在两种流通方式下数值模拟得到的隔舱间体积流量分配情况

与隔舱间的面积比进行对比分析.

方式 1 为图 3 所示的流通方式,NEA 进口位于 3 号舱,通气口位于 1 号舱和 6 号舱. 方式 2 的 NEA 进口位于 6 号舱,通气口位于 1 号舱和 3 号舱,如图 7 所示.

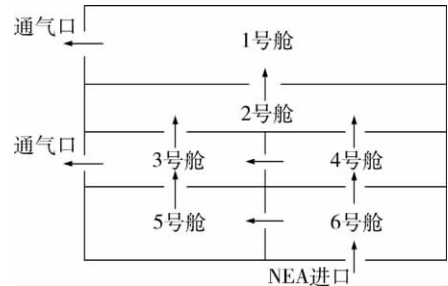


图 7 方式 2 的气体流通方式

Fig. 7 Air flow pattern of the second mode

方式 1 在 3 号舱和 4 号舱存在分流情况,方式 2 在 6 号舱和 4 号舱存在分流情况,因此这里仅对存在分流的隔舱进行分析,如表 1 和表 2 所示.

由表 1 可以看出,方式 1 时,存在分流的 3 号舱和 4 号舱的体积流量分配情况与流通面积比偏差较小,其最大偏差为 15.23%;方式 2 时,存在分流的 6 号舱和 4 号舱的体积流量分配情况与流通面积比偏差较大,其最小偏差为 21.32%,最大偏差达到了 181.34%.

两种流通方式存在如此大的差别的原因是:方式 1 中两个通气口位置相对 NEA 进口比较对

表 1 方式 1 的 3 号舱和 4 号舱分流体积流量分析

Table 1 Volume flow rate analysis of out flow from bay 3 and bay 4 of the first mode

分流隔舱	总出流面积/ 10^{-3} m^2	流入 隔舱	流通面积/ 10^{-3} m^2	占总出流面积 百分比/%	计算所得平均体积 流量/(dm^3/s)	占总出流体积 流量百分比/%	偏差/%
3 号舱	58.601	2 号舱	16.568	28.27	21.142	32.03	13.30
		4 号舱	28.710	48.99	27.57	41.77	-14.74
		5 号舱	13.323	22.73	17.29	26.20	15.23
4 号舱	32.838	2 号舱	15.935	48.53	11.552	42.00	-13.44
		6 号舱	16.903	51.47	15.95	58.00	12.67

表 2 方式 2 的 6 号舱和 4 号舱分流体积流量分析

Table 2 Volume flow rate analysis of out flow from bay 6 and bay 4 of the second mode

分流隔舱	总出流面积/ 10^{-3} m^2	流入 隔舱	流通面积/ 10^{-3} m^2	占总出流面积 百分比/%	计算所得平均体积 流量/(dm^3/s)	占总出流体积 流量百分比/%	偏差/%
6 号舱	86.656	4 号舱	16.904	19.53	36.257	54.94	181.34
		5 号舱	69.658	80.47	29.735	45.06	-44.01
4 号舱	44.762	2 号舱	16.052	35.86	17.924	49.54	38.14
		3 号舱	28.71	64.14	18.26	50.46	-21.32

称,分流时的流动驱动压差相差不大,因此体积流量能够近似按照面积比分配;方式2中两个通气口位置相对NEA进口完全不对称,导致分流时的流动驱动压差相差很大,体积流量无法按照面积比进行分配.因此可得出结论,当通气口相对于NEA进口对称布置时隔舱间体积流量能够近似按照面积比进行分配,而不对称布置时分配情况比较复杂,不能简单地按照面积比确定.这也体现出CFD数值模拟方法在对复杂通气形式进行模拟方面的优势.

3 结论

1) 使用本文所建立的CFD数值模拟方法对波音747中央翼燃油箱的冲洗惰化过程进行模拟,所得到的结果与工程模型结果及实验数据吻合得很好,说明本文的几何模型简化和网格生成是合理的,数值模拟方法是正确的.

2) 通过CFD数值模拟发现,在多隔舱燃油箱惰化过程中,各个隔舱内氧气体积分数趋于均匀,流出某隔舱的气体的氧气体积分数近似等于该隔舱内的平均氧气体积分数.并且,在惰化过程中,各个隔舱间的氧气体积分数存在较大差异,随着各个隔舱趋于富氮气体的氧气体积分数,该差异才逐渐消失,整个燃油箱趋于富氮气体的氧气体积分数.

3) 通过对两种流通方式下CFD数值模拟所得隔舱间体积流量分配情况与隔舱间流通面积比的对比分析发现,当通气口相对于NEA进口对称布置时隔舱间体积流量能够近似按照面积比进行分配,而不对称布置时分配情况比较复杂,不能简单地按照面积比确定.从而也体现出CFD数值模拟方法在对复杂通气形式进行模拟上的优势.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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-01/06, 2001.
- [3] 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 aircraft fuel tanks[J]. Aeronautical Science and Technology, 2005, 17(1): 31-32. (in Chinese)
- [4] William M C, Timothy B. Modeling in-flight inert gas dis-

tribution in a 747 center wing fuel tank[R]. AIAA 2005-4906, 2005.

- [5] 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.
- [6] 王小平,肖再华.飞机油箱氮气惰化的机理分析及应用[J].航空科学技术,2008(6):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(6): 24-26. (in Chinese)
- [7] 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 of inerting process influenced by efficiency in aircraft fuel tank[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(11): 2457-2463. (in Chinese)
- [8] 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):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, 44(9): 16-20. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 罗伊·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.
- [11] 冯晨曦,刘卫华,鹿世化,等.气体分配方式对多隔舱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, 2010, 25(11): 2457-2463. (in Chinese)
- [12] William M C, Ole K. Inerting a B-747SP center wing tank scale model with nitrogen-enriched air[R]. Washington, DC, USA: Office of Aviation Research, DOT/FAA/AR-02/51, 2002.
- [13] 王福军.计算流体力学分析[M].北京:清华大学出版社,2010.
- [14] William M C. Modeling inert gas distribution in commercial transport aircraft fuel tanks[R]. AIAA 2002-3032, 2002.
- [15] William M C. Ground based inerting of commercial transport aircraft fuel tanks[R]. Aalborg, Denmark: Meeting on Fire Safety and Survivability, RTO-MP-103, 2002.