

## 考虑氧逸出的多舱燃油箱惰化理论研究

鹿世化<sup>1,2</sup> 冯诗愚<sup>1</sup> 王盛园<sup>1</sup> 刘卫华<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学航空宇航学院, 南京, 210016; 2. 南京师范大学能源与机械工程学院, 南京, 210042)

**摘要:**在考虑到氧逸出条件下,用数值积分的方法建立了多舱油箱燃油冲洗的数学模型。以波音747中心翼油箱为研究对象,对模型进行求解,得到了各舱氧浓度分布随着通风换气次数的变化规律。与已有文献的实验结果和计算结果对比发现,该模型具有较高的计算精度。用该模型研究了不同载油率和不同的通风形式下各舱的惰化效果。结果显示,随着载油率的下降,各舱达到给定氧浓度所需的换气次数增加。改变通风形式,对各舱惰化效果影响显著。提出在对多舱油箱进行冲洗惰化设计时,应将“最不利舱”的因素考虑在内。该研究可为多舱油箱惰化工程设计提供相应的支持,为通风系统的优化提供理论依据。

**关键词:**燃油惰化; 冲洗; 多舱燃油箱; 通风方式

**中图分类号:**V228;TQ021.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2615(2012)01-0100-05

## Theoretical Study on Inerting Process for Multi-Bay Fuel Tank Based on Oxygen Evolution

Lu Shihua<sup>1,2</sup>, Feng Shiyu<sup>1</sup>, Wang Shengyuan<sup>1</sup>, Liu Weihua<sup>1</sup>

(1. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing, 210042, China)

**Abstract:** Considering the evolution of the dissolved oxygen from fuel, the washing inerting mathematical model of ullage for multi-bay fuel tank is set up based on the infinitesimal method. Adopting Boeing 747 central wing tank as the object, the model is solved and the varying regular patterns of oxygen concentration of each bay related to the inerting time are obtained. By comparing the calculating results with the published data, the model has higher accuracy. The influences of different fuel load and ventilation mode on inerting effect of all bays are investigated and compared. When the fuel load decreases, the volumetric tank exchange needed for a given oxygen concentration of each bay increases. Changing the ways of ventilation has a significant influence on inerting effect of each bay. The multi-bay fuel tank inerting system takes into account a concept of "worst bay", first proposed in this paper. This study can support the engineering design of the fuel tank inert and supply a theoretical base for the optimization of pipe arrangement.

**Key words:** fuel inerting; washing; multi-bay fuel tank; ventilation mode

1996年7月环球航空公司800次航班坠毁之后,美国联邦航空管理局(FAA)对油箱的安全问题给予了高度的重视。美国国家交通运输安全委员会(NTSB)认为事故的主要原因是中心翼油箱的

爆炸造成的。事故发生之后,FAA进行了大量研究,试图消除或减少油箱内的可燃蒸汽,其中机载油箱惰化技术被认为是最行之有效的的方法之一。该方法分为冲洗和洗涤,冲洗是将富氮气体(NEA)

**基金项目:**航空科学基金(50306017)资助项目;南京航空航天大学引进人才科研基金(S1030-014)资助项目。

**收稿日期:**2011-04-12;**修订日期:**2011-05-30

**通讯作者:**冯诗愚,男,副教授,1974年生,E-mail:shiyuf@nuaa.edu.cn。

通入油箱上部气相空间,将其中的氧气和燃油蒸汽置换排出,使气相空间氧浓度保持在所要求的极限氧浓度以下<sup>[1-4]</sup>。燃油冲洗因为管路布置相对简单,故适合于民用客机。

FAA 之前的研究主要集中在对空油箱进行惰化研究,例如文献[5]采用单个矩形油箱进行了理论和实验研究,指出要想使得油箱内氧气的体积浓度达到8%,需要1.5~1.6倍体积的NEA95(氮气浓度95%,氧气浓度5%);William<sup>[6]</sup>建立了波音747中心翼油箱多分隔舱的地面惰化工程计算方法,并将结果与相应的比例复制模型和全尺寸模型的实验结果及CFD计算结果进行了对比,结果显示,所建立的计算方法具有较高的精度;此外,William<sup>[7]</sup>还建立了飞行中的波音747中心翼油箱的数学模型,用于计算给定飞行周期和一定的惰化系统性能条件下的油箱内的氧气浓度。

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,导致其氧浓度降低,燃油中氧气有向气相空间逸出的趋势,特别是若油箱存在较强的外界激励,例如晃动、颠簸等时,逸出的速率会较大,所以在实际的计算中有必要将氧逸出这一因素考虑在内。国内有研究者<sup>[8]</sup>在对单舱的油箱惰化研究中将氧的逸出考虑在内,建立了冲洗过程的数学模型。高秀峰等人<sup>[9]</sup>的研究结果显示,有氧逸出模型中,气相体积换气次数随载油量增加而急剧上升,而总体积换气次数与载油量成反比关系。但是,实际的民机中央翼油箱由多个隔舱组成,各个隔舱之间惰化过程有所区别,现有的计算模型无法很好地适应多隔舱燃油箱惰化过程的设计。国外对于多舱油箱惰化的研究显示也没有将冲洗过程中氧的逸出这一因素考虑在内。

鉴于此,本文以波音747中心翼油箱为例,在考虑氧逸出这一因素的基础上建立多舱油箱惰化的数学模型,并对不同载油率、不同通风形式下各舱氧浓度的分布进行分析和计算,以期多舱油箱惰化系统的设计提供参考。

## 1 计算模型

### 1.1 惰化气体流动方式

多舱油箱的冲洗惰化首先要考虑的问题是气体的流向问题。本文的研究对象是波音747中心翼油箱,其由6个分隔舱组成。首先从如图1所示的流动方式入手,这种考虑基于以下两个方面:首先,现有实验证实,当惰化气体通过单一隔舱(远离气

体出口)进入油箱的情况下,惰化的效率是最高的<sup>[10]</sup>,上述流动正是从单一入口——3舱进入,从远离3舱的出口——1舱和6舱流出。其次,文献[6]采用了上述的方式进行了实验研究,结果表明惰化效果较为理想。本文考虑到将要建立的理论模型的验证,故采用与该文相同的流动方式。气流进入3舱后有30%进入2舱,30%进入5舱,40%进入4舱,这是根据舱间的气流横断面的面积假设而定。

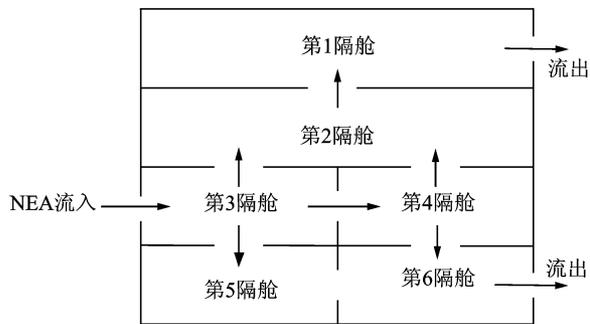


图1 波音747中心翼油箱结构

### 1.2 多舱冲洗理论模型

从图1不难看出,富氮气体的流动可以分为4路,即进口→3舱→2舱→1舱→出口、进口→3舱→5舱→6舱→出口、进口→3舱→4舱→6舱→出口、进口→3舱→4舱→2舱→1舱出口,不管哪一路,均可以看作是舱体串联后的气体流动。

为了图表的简洁和易于方程式的表达,这里选取某一路的第*i*舱来建立燃油冲洗的详细过程,如图2所示。图中字母*O*,*N*分别代表氧气、氮气的质量;下标*U*,*F*分别代表气相空间和燃油;下标*OU*,*OF*分别代表气相空间的氧和氮;下标*i*代表第*i*舱; $\Delta t$ 为时间步长; $P_V$ 为燃油蒸汽压。

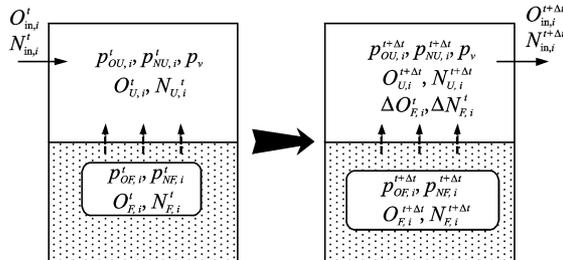


图2 单位时间步长内双舱冲洗过程示意图

理论模型基于如下合理假设:

- (1)氧氮及混合气体、燃油蒸汽视为理想气体;
- (2)冲洗模型中,恢复平衡状态所需的弛豫时间远小于计算步长 $\Delta t$ ;
- (3)洗涤模型中,在气液两相分界面上,存在浓

度边界层,边界层内气体与燃油中溶解的气体重新达到平衡状态的过程是准静态过程;

(4)计算步长内,各种气体充分混合进入下一舱,并且气体内部各处温度、压力和密度等状态参数相同;

(5)气相空间和燃油的温度相同。

在时间步长 $\Delta t$ 内对第 $i$ 舱做氧氮质量平衡,得出

$$\dot{O}_{in,i}^t \Delta t + O_{U,i}^t + \Delta O_{F,i} = O_{U,i}^{t+\Delta t} + \dot{O}_{out,i}^{t+\Delta t} \Delta t \quad (1)$$

$$\dot{N}_{in,i}^t \Delta t + N_{U,i}^t + \Delta N_{F,i} = N_{U,i}^{t+\Delta t} + \dot{N}_{out,i}^{t+\Delta t} \Delta t \quad (2)$$

式中 $\dot{O}_{in,i}^t$ 和 $\dot{N}_{in,i}^t$ 是由上一个隔舱(第 $i-1$ 舱)流入的氧氮气体。因此有

$$\begin{cases} \dot{O}_{in,i}^t = \dot{O}_{out,i-1}^{t-\Delta t} \\ \dot{N}_{in,i}^t = \dot{N}_{out,i-1}^{t-\Delta t} \end{cases} \quad (3)$$

第 $i$ 舱中氧气和氮气从燃油中析出的质量为

$$\Delta O_{F,i}^t = \frac{\beta_O V_F}{R_O T_F} (p_{OU,i}^t - p_{OU,i}^{t+\Delta t}) \quad (4)$$

$$\Delta N_{F,i}^t = \frac{\beta_N V_F}{R_N T_F} (p_{NU,i}^t - p_{NU,i}^{t+\Delta t}) \quad (5)$$

式中: $\beta_O$ 和 $\beta_N$ 为氧氮气体阿斯特瓦尔德系数,其定义和具体计算方法可参考文献[11]; $V_F$ 为燃油所占体积; $T_F$ 为燃油的温度; $R_O$ 和 $R_N$ 是氧氮的摩尔常数。

混合气体后的气体按组分的摩尔分数比被排入下一个隔舱(第 $i+1$ 舱),即

$$\frac{\dot{O}_{out,i}^{t+\Delta t}}{M_O} = \frac{p_{OU,i}^{t+\Delta t}}{p_{NU,i}^{t+\Delta t}} \frac{\dot{N}_{out,i}^{t+\Delta t}}{M_N} \quad (6)$$

将式(1,2)代入式(5),化简可得

$$\frac{\frac{(p_{OU,i}^t - p_{OU,i}^{t+\Delta t})}{R_O T_F} (V_U + \beta_O V_F) + \dot{O}_{in,i}^t \Delta t}{\frac{(p_{NU,i}^t - p_{NU,i}^{t+\Delta t})}{R_N T_F} (V_U + \beta_N V_F) + \dot{N}_{in,i}^t \Delta t} = \frac{p_{OU,i}^{t+\Delta t} M_O}{p_{NU,i}^{t+\Delta t} M_N} \quad (7)$$

式中 $M$ 为气体分子量。

若不考虑燃油箱与外界环境之间的压差,即认为其为开式油箱,则有

$$p_t = p_{OU,i}^t + p_{NU,i}^t + p_v = p_{OU,i}^{t+\Delta t} + p_{NU,i}^{t+\Delta t} + p_v \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)并化简为一元二次方程的形式,即

$$A(p_{OU,i}^{t+\Delta t})^2 + B p_{OU,i}^{t+\Delta t} + C = 0 \quad (9)$$

其中系数分别为

$$\begin{aligned} A &= \frac{V_F}{T_F} \left( \beta_N \frac{M_O}{R_N} - \beta_O \frac{M_N}{R_O} \right) \\ B &= \frac{\beta_O M_N V_F}{R_O T_F} (p_{OU,i}^t + p_t - p_v) - \\ &\quad \frac{\beta_N M_O V_F}{R_N T_F} p_{OU,i}^t + M_N \dot{O}_{in,i}^t \Delta t + \\ &\quad M_O \dot{N}_{in,i}^t \Delta t + \frac{V_U}{T_U} \left( \frac{M_O p_{NU,i}^t}{R_N} + \frac{M_N}{R_O} p_{OU,i}^t \right) \\ C &= M_N \left( \dot{O}_{in,i}^t \Delta t + \frac{p_{OU,i}^t V_U}{R_O T_U} + \beta_O \frac{p_{OU,i}^t V_F}{R_O T_F} \right) \cdot \\ &\quad (p_v - p_t) \end{aligned} \quad (10)$$

显然,如果知道 $t$ 时刻从第 $i-1$ 个隔舱流入第 $i$ 隔舱氧氮质量以及第 $i$ 个隔舱的 $t$ 时刻的氧氮分压,则可根据式(9)得到该舱 $t+\Delta t$ 时刻新的氧氮分压以及流出至第 $i+1$ 个隔舱的氧氮质量。从前述分析可知,流入第1个隔舱为富氮气体,即

$$\begin{cases} \dot{O}_{in,1}^t = \dot{Q}_{NEA} \rho_{NEA} a_{NEA,O} \\ \dot{N}_{in,1}^t = \dot{Q}_{NEA} \rho_{NEA} a_{NEA,N} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\dot{Q}_{NEA}$ 为富氮气体体积流量; $\rho_{NEA}$ 为富氮气体密度; $a_{NEA,O}$ 和 $a_{NEA,N}$ 分别为富氮气体中氧氮的质量分数。

则可将式(11)作为计算的初始条件,依次得到各舱终了状态的氧氮分压力、氧气在气相空间的浓度、燃油中溶解的氧氮质量和比例。

## 2 计算结果与分析

在一定的氮气百分比和惰性化水平条件下,注入油箱内的富氮气体的体积除以油箱的体积所得的数值是一个恒定值<sup>[6]</sup>。利用流量和油箱体积对该恒定值进行量纲一化,定义为体积换气次数(Volumetric tank exchange, VTE),表示如下

$$VTE = \frac{\dot{Q}_{NEA} \cdot t}{V_U} \quad (12)$$

图3给出了计算结果与文献[6]中的工程模型预测结果和实验结果的对比。从图中可以看出,本模型与实验结果有着较好的吻合。与该文献中的计算模型相比,本文的计算结果与实验结果更为接近,这证明了本文所建立模型的精准性和可行性。有些舱,比如4舱和6舱的氧浓度分布和实验值存在的差距较大,这或许是因为实验的假设中的分配比与实际实验的分配比存在着差别所导致,但从总体趋势看,吻合性较好。

考虑到飞机飞行时燃油箱内的载油量会发生变化,图4给出了3种不同载油率下各舱氧浓度度

VTE的变化关系。从图中可以看出,不同载油率对应下的各个单舱的惰化效果不同,惰化效果随着载油率的上升而下降,即80%时最好,50%次之,20%时最差。某一种载油率下的多舱氧浓度分布与其余两种从整体趋势上是相似的,即无论哪种载油率下,3舱惰化效果最好,其次是2舱、5舱、4舱、6舱,最后是1舱。

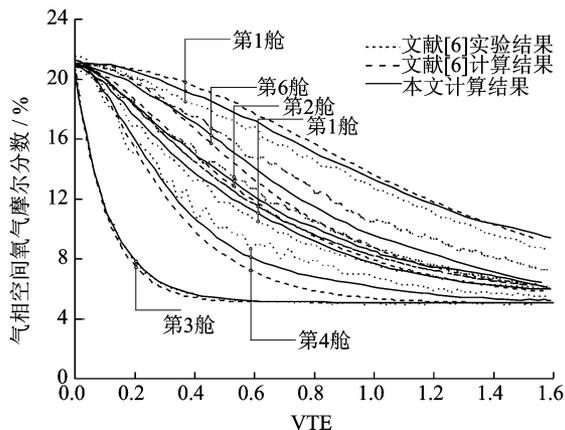


图3 计算结果与实验结果对比

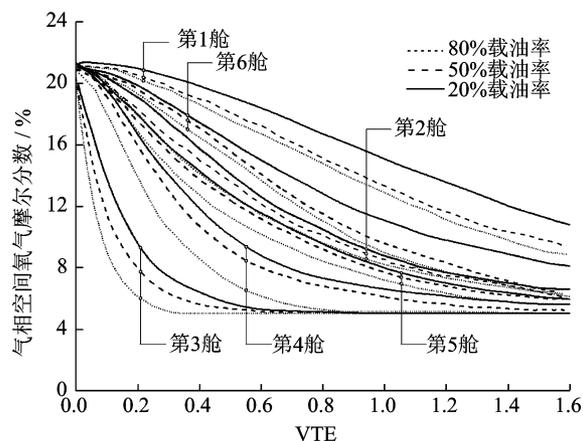


图4 不同载油率下各舱氧浓度的分布

冲洗时,含氧量极低的富氮气体直接通入气相空间,对气相空间的稀释作用十分明显,虽然此时有氧气从燃油中析出,但其量较少。载油率较高时,气相空间的体积较小,此时一定量的富氮气体容易将空间内的氧浓度在短时间内降低到给定值,惰化效果较好。

如前所述,为了与实验值进行比较,本文采用了文献[6]给出的通风方式,即从3舱进入,从1舱和6舱出。这里,为了比较不同通风形式下各舱的冲洗惰化效果,将进口换为6舱,出口设置为1舱和3舱,得到两种通风方式下氧浓度分布如图5所示。

从图5中不难看出,改变通风方式后,各舱的

氧浓度分布均有较大变化。从而可以认为,对于各个单舱的惰化效果而言,通风方式起到关键的影响作用。但是对于整个多舱油箱而言,如何判别不同通风方式下整体惰化的效果?文献[6]给出的思路是对于各舱按照面积比进行加权平均计算,对比不同通风方式下的整体平均值。图6给出了3舱进口下本文和文献[6]的计算结果以及6舱进口下本文的计算结果。从平均值的角度看,6舱进口的效果略优于3舱进口。

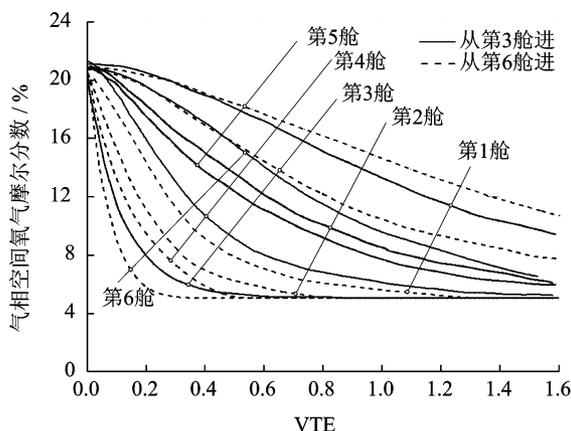


图5 两种不同通风方式下各舱氧浓度的分布

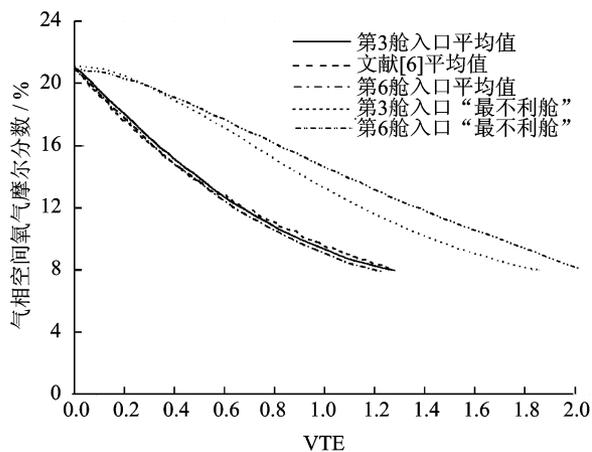


图6 平均氧浓度和“最不利舱”氧浓度比较

面积加权平均不同通风方式对比研究、惰性气体流量估算上作用明显。对于多舱的油箱惰化,由于给定氧浓度的设定是针对各单舱而言,所以仅依靠平均值并不能反映出事实的全部。本文认为,在对富氮气体流量进行精确计算时,必须考虑到“最不利舱”,即该通风方式下惰化效果最差的舱。

从图6可以看出,平均氧浓度达到要求值,即8%时的VTE值位于1.2~1.3之间,而3舱进口对应的“最不利舱”为1舱达到这一值的VTE约为1.8,6舱进口对应的5舱的VTE约为2.0。即使从

平均值角度看,6舱进口优于3舱进口,但是3舱的“最不利舱”所需的VTE值小于6舱的“最不利舱”,所以在通风方式选择时,应该优先考虑3舱。

### 3 结束语

在考虑氧逸出的情况下,建立了多舱油箱的冲洗惰化理论模型,用该模型对波音747中心翼油箱进行了计算并与已有文献的实验结果进行了对比,结果显示该模型具有较高的计算精度。

计算了不同载油率下各舱氧浓度的分布,结果显示,对于各个隔舱而言,载油率较高时,惰化效果较好。这意味着,为了达到给定的氧浓度的要求,随着载油率的下降,需要提供更多的富氮气体来进行冲洗惰化。

对两种不同通风方式下的多舱氧浓度分布进行了计算和比较。结果显示,通风方式是影响各分舱氧浓度的关键因素。提出在对多舱油箱冲洗惰化计算时,“最不利舱”的氧浓度分布应该作为不可忽略的因素加以考虑。

由于受到篇幅所限,本文仅针对两种通风方式进行了计算和比较。通风方式的优化关系到能否用最少的富氮气体、最简单的注入方法来使得氧气浓度达到给定值。这正是下一步要开展的工作。

#### 参考文献:

[1] William M C. Developing a fuel tank inerting system [R]. Washington D C, USA: Office of Aviation Research, 2005.

[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] William M C. The effect of fuel on an inert ullage in a commercial transport airplane fuel tank[R]. DOT/FAA/AR-05/25. Washington, D C, USA: Office of

Aviation Research, 2005.

- [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] Michael B, William M C. Inerting of a vented aircraft fuel tank test article with nitrogen enriched Air [R]. FAA Report DOT/FAA/AR-01/6, 2001.
- [6] William M C. Modeling inert gas distribution in commercial transport aircraft fuel tanks[R]. AIAA Conference Paper 2002-3032, 2002.
- [7] William M C. Modeling in-flight inert gas distribution in a 747center wing fuel tank[R]. Toronto, Ontario Canada, AIAA 2005-4906, 2005.
- [8] 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 & Astronautics, 2010, 42(5): 614-619.
- [9] 高秀峰,刘卫华,熊斌,等. 燃油箱冲洗惰化过程理论研究[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(9):16-20; 114.  
Gao Xiufeng, Liu Weihua, Xiong Bin, et al. Theoretical study of washing inerting process for fuel tank [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(9):16-20; 114.
- [10] William M C, Ole K. Inerting a B-747 SP center wing tank scale model with nitrogen enriched air [R]. FAA Report DOT/FAA/AR-02/51, 2002.
- [11] 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.