

文章编号:1000-8055(2013)12-2709-08

一种描述燃油与气体组分传质的频率传质模型

薛 勇¹, 冯诗愚², 王 澍¹, 周宇穗¹, 唐宏刚¹, 刘卫华²

(1. 中国商用飞机有限责任公司 上海飞机设计研究院 动力燃油部, 上海 200232;

2. 南京航空航天大学 航空宇航学院, 南京 210016)

摘 要: 抛开经典 Fick 定律, 提出用传质频率来表征燃油和空气氧氮传质的快慢, 建立了以频率传质模型为基础的飞机燃油箱冲洗惰化数学模型, 该模型能对传质速度进行量化, 而国内外工程界目前使用的模型不具备此量化能力; 该数学模型的准确性和有效性得到美国联邦航空管理局 (FAA) 相关封闭燃油箱内的氧氮传质实验数据的验证; 将该数学模型用于仿真 A320 的飞行阶段的氧的体积分数, 仿真结果同测试数据及其他模型的计算结果对比后发现: 频率传质模型的计算精度最高; 进一步仿真表明, 载油率的增加会明显延缓惰化氧的体积分数的降低, 且在高载油率下频率传质模型同不传质以及瞬时平衡这两种模型的计算结果差异很大。

关 键 词: 燃油惰化; 冲洗; 频率; 传质模型; 载油率

中图分类号: V228; TQ021.4

文献标志码: A

Frequency mass transfer model describeing mass transfer between fuel and air

XUE Yong¹, FENG Shi-yu², WANG Shu¹, ZHOU Yu-sui¹,
TANG Hong-gang¹, LIU Wei-hua²

(1. Power Plants and Fuel System Department,
Shanghai Aircraft Design and Research Institute,
Commercial Aircraft Corporation of China, Ltd., Shanghai 200232, China;

2. College of Aerospace Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In disregard of the classical Fick's law, frequency was used to describe the speed of mass transfer between fuel and air. A frequency mass transfer mathematic model of fuel flush inerting was proposed, which employed frequency to describe the mass transfer speed with incomparable advantages than other inerting engineering models. Frequency mass transfer model calculated results were compared with certain experimental data of Federal Aviation Administration (FAA), and the effectiveness was verified; the calculated results of frequency model and other models were also compared with A320 flight volume fraction of oxygen, showing that the frequency mass transfer model presents highest precision. Further simulation results show that increased fuel load could delay the inerting process, and frequency mass transfer model calculated result is obviously different from the calculated results of non-mass transfer and instant balancing situations when the fuel tank is nearly full.

Key words: fuel inerting; washing; frequency; mass transfer model; fuel load

收稿日期: 2012-12-09

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20131111.1602.011.html>

作者简介: 薛勇 (1985—), 男, 江苏扬州人, 工程师, 硕士生, 主要从事燃油和惰化技术的研究. E-mail: xueyong@comac.cc

1996年环球航空公司的一架波音747-100客机在执行800号航班任务时,于纽约长岛上空爆炸,机上230人全数丧命^[1],这一事引起人们的强烈关注,并敦促进研究者进一步去提高飞机燃油箱的防火防爆性能.理论和实验研究均表明油箱惰化技术能有效地保护飞机燃油箱的安全.对于商用飞机,目前国际上普遍采用的先进方法是将机载制氮系统分离出的富氮气体通入油箱上部空间,以此来稀释燃油箱内上部空间的氧和由于飞机爬升而从燃油中析出的氧.国外关于该技术的研究从20世纪80年代开始起步,但国内从2008年才刚刚起步.大约从2000年开始,由于制膜技术的突破,膜分离空气制氮惰化飞机燃油箱的技术得到了迅猛的发展,尤为突出的是美国联邦航空管理局(FAA)对该技术进行了大量卓有成效的理论和实验研究.

2000年FAA对商用客机的两种惰化方案进行了比较及费用评估^[2].其中一种方案是对燃油箱进行地面惰化(ground based inerting,GBI),即在飞机起飞前将富氮气体通入燃油中,通过气泡和燃油的传质把燃油中的大部分的氧置换出来,使得飞机在爬升的过程中没有氧从燃油中析出;另一种方案是进行持续的即时冲洗,且只对中央翼热油箱(hot center wing tank,HCWT)进行冲洗,即在飞行的过程中利用通入的富氮气体来不断稀释燃油箱气相空间原有的氧和在飞行过程中从燃油内溢出的氧(目前这种方法成为了民机惰化方案的首选).上述两种方案在实施时有两种具体的方式可以选择,分为循环惰化和非循环惰化.循环惰化是指洗涤或冲洗后排出油箱的混合气体,被收集起来作为制取富氮气体的气源,送入空气分离模块(air separation module,ASM)的入口,由此进行气体的循环利用;非循环惰化则只利用新鲜空气作为富氮气体的气源,惰化后的混合气体直接排入大气,不再加以利用.两种方案的评估的时期为2000年以后的10年,评估结果表明,即时冲洗中央翼热油箱的方案要比地面惰化的方案(GBI)节约约50%的费用,而非循环惰化要比循环惰化节约约50%的费用.

2001年FAA进行了地面和飞行惰化实验^[3],发现载油率越高,爬升和巡航的过程中溢出氧就会越多,导致气相氧体积分数升高.该实验结果和理论分析的结果相一致.

同年Burns和William发现^[4],当富氮气体(nitrogen enriched air,NEA)体积分数一定的时

候,如果把惰化曲线的纵坐标定为油箱换气次数,横坐标定为NEA的氧体积分数时,不同NEA流量和不同油箱体积的惰化曲线都统一成同一曲线.该文章并未指出的是:这一发现是基于地面冲洗惰化,在飞机爬升的过程中则不一定适用.他们还发现油箱内温度的略微变化对该惰化曲线的影响可以忽略.

2002年,波音747的地面惰化实验数据表明:燃油箱内隔舱的结构分布会极大的影响各单仓的惰化曲线^[5].该实验以长度缩比为0.24的油箱为实验对象,分别将实验结果、工程计算模型的结果、CFD模拟结果同波音747的实测数据进行了对比,发现缩比油箱的实验数据和实测数据的吻合度最高,工程计算模型的吻合度稍微低一点,而CFD仿真结果的吻合度较低.而对于个别氧的体积分数偏高或者偏低的舱,三种模型的精确度都有待进一步提高.

2004年8月Summer进行了不同大气压下燃油箱内的燃烧实验^[6],该实验采用JP-8燃油.实验结果表明:燃油箱内燃烧氧的体积分数下限(limited oxygen concentration,LOC)随着油箱内气压的降低的而略有增加,在地面标准大气压下的燃烧氧的体积分数下限为12%,当油箱气压降低到12192m高度的大气压时,LOC下限线性提高到14.5%.作者认为,不同品种燃油的LOC是否一致,研究者还需要通过实验验证来谨慎的做出回答.

2005年FAA对A320和NASA747的惰化系统分别进行了飞行测试^[7],发现空气分离模块的性能随进气压力的变化曲线和设计手册提供的性能稍有不同,质量流量和氧的体积分数都有偏差,而且两次实验之间也有一定的误差.这些误差可能是由于其他未考虑的对ASM性能有影响的因素造成的,也有可能是由于飞行时ASM的膜工作环境不稳定所造成的.同时双流量模式(dual-flow)的可行性得到了验证,双流量模式是指使用同样的空气分离模块,通过适当增加NEA的氧体积分数,可以大大增加NEA的质量流量,缓解了飞机下降增压时的逆惰化作用.

2005年7月FAA进行了燃油箱内气层和燃油液层之间氧氮传质的实验研究^[8].该实验在一个封闭燃油箱进行,在燃油气层和液层的初始氧氮含量相同的条件下,分别记录了三种情况下燃油箱上部空间的氧体积分数随时间的变化关系:
①利用燃油泵将油箱上部空间的气体泵入燃油液

层的底部,泵入的气体被打碎成微气泡,在从油箱底部上升到燃油液面的过程中可以大大加快气相和燃油之间氧氮的传质;②将燃油箱用绳索吊起在空中,人工晃动油箱以加快气相和燃油液层之间的氧氮传质;③利用加热板在油箱底部加热,加快气相和燃油液层之间氧氮的传质.通过比较三者的实验结果可以发现:将气体泵入燃油底层来加速传质,是最有效的方法,人工晃动油箱可以在一定程度上加快燃油箱内氧氮的传质,而依靠加热油箱底部来加速传质速率的方法是收效最小的.

2005 年 8 月 FAA 采用蒙特卡洛统计方法(Monte Carlo statistical methods)对某飞机燃油箱可燃性(FTFAM)进行了评估^[9],并公布了其计算程序.该计算程序考虑了飞行包线、油箱类型、惰化设置、大气温度、大气压力、载油率、油箱温度、飞行马赫数、燃油品种以及航程和天气等因素对惰化效果的综合影响.最终以油箱暴露在可燃性区域的时间占总飞行时间的机队平均概率来评估油箱的可燃性.

2008 年 FAA 对燃油箱内的温度分布进行了实验研究^[10].该实验将一个缩比油箱放置于大气模拟舱内来模拟飞行时的燃油箱压力和高度的变化情况,实验结果发现:①提高油箱上表面的温度或者大气的温度可以显著提高油箱内的温度;②低闪点的燃油会极大的增加油箱内可燃气体的体积分数.一组波音 727 飞机燃油箱温度的实测数据表明:油箱上部空间温度的增加会直接导致油箱可燃性的增加,该实验还表明:当飞机的攻角在 $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 范围内变化时,燃油箱内温度场的差别很小.

1 传质频率和频率传质模型

国内外工程界目前使用的模型不具备量化燃油箱惰化过程中传质速度的能力,一般来说传质问题需要从基本的扩散理论来进行推导,然而由于作者未找到足够的相关物性资料来支持相关的工程计算,而这些和燃油与空气各组分间的传质物性参数需要大量而准确的实验数据来确定,作者最终暂时舍弃了从经典的 Fick 定律来进行推导的想法,转而寻求一种新的建模和计算方法.

研究者在处理燃油和气体组分间的传质速率的时候,多采用一刀切的方法,即要么认为燃油内的氧氮和气相空间是完全不进行传质,要么认为是两者间的传质瞬时达到平衡,其模型缺乏精度,这很可能会严重影响对燃油箱惰化效果的预测.

在处理军用飞机燃油和气相空间氧氮传质问题时文献[11]曾引入洗涤效率的概念,然而这一概念并不适用于民用客机冲洗惰化的计算.本文提出一种气液边界层的频率传质模型,该模型利用传质的频率来表征传质过程的快慢.

传质频率是指进行传质的两种组分在单位时间内的传质次数,用符号 f 表示.

对应于传质频率的概念,频率传质模型所假设的传质方式如图 1 所示,假设气相与液相之间有一较薄的传质边界层将气相层和液相层的直接传质阻隔开.在进行传质过程时,假设气相层先和传质边界层进行平衡,使得传质边界层的气体组分体积分数升高或者降低;接着传质边界层再和液层进行平衡使得液层中的气体组分体积分数升高或者降低.

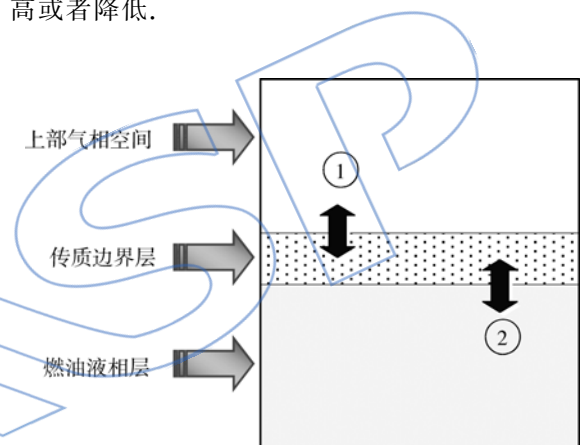


图 1 燃油和气相空间频率传质方式

Fig. 1 Fuel and ullage mass frequency transfer model

需要说明的是这两个先后进行的平衡都假设是瞬间完成的,这样就用瞬时平衡的频率替代了每次传质的速率来对传质过程的快慢进行了表征.假设传质边界层的厚度与总的燃油层厚度比为 x , $x = H_m / (H_m + H_l)$,理论上 x 的取值范围可在 $0 \sim 1$ 之间,在本文的计算中,暂定 $x = 0.01$. 对一个既定的传质过程而言, x 和 f 的搭配是反相关的,但两者之间的配合关系还不能简单地确定.如果能够依据实验而发现液相体积分数的变化规律,那么可以参照速度边界层或者温度边界层的方法来给传质边界层下一个确切的物理定义.

当 $f = 0$ 时,气相就无法和传质边界层进行传质,此时液相的组分和气相的组分之间相互没有影响.

当 $f = \infty$ 时,气相、传质边界层和液相之间

三者的相关组分体积分数瞬时达到平衡。

当 $0 < f < \infty$ 时, 传质频率就可以描述一般情况下的气液两相间的传质的快慢。

传质的频率的大小主要取决于燃油的种类和温度这两个因素, 燃油箱的晃动或泵射气体进入液层内部增大了燃油和气体的接触表面积, 为了模型计算的方便, 增大的接触表面积可近似等效为增大了传质的频率, 而气相空间压力的变化则只关系到每次传质平衡时后的质量交换量的大小。环境温度、燃油箱晃动程度和燃油品种都会影响到传质频率的大小。

2 飞机燃油箱冲洗数学模型的建立

在建立飞机燃油箱冲洗数学模型之前, 提出如下合理的假设:

- 1) 富氮气体、气相空间中的氧气和氮气、燃油蒸气及其混合气体视为理想气体。
- 2) 冲洗过程中, 恢复平衡状态所需的弛豫时间远远小于计算步长。
- 3) 计算步长内, 各种气体充分混合, 气体内部各处的温度、压力和密度状态参数相同。
- 4) 混合气体按组分的摩尔分数比排出。
- 5) 富氮气体的温度与燃油温度相等。
- 6) 忽略燃油蒸汽的溢出引起的燃油质量的减少。
- 7) 暂不考虑飞行中燃油消耗引起的燃油液面下降对惰化效果的影响。

基于频率传质模型, 飞机爬升阶段通气式燃油箱内氧氮传质的过程如图2所示, 上标 $t, t +$

$\Delta t/2, t + \Delta t$ 分别表示传质过程的起始、中间和终了时刻, 下标 O, u 表示气相空间的氧组分; O, m 表示传质边界层的氧组分; O, f 表示燃油层的氧组分; N, u 表示气相空间的氮组分; N, m 表示传质边界层的氮组分; N, f 表示燃油层的氮组分。

进行数学模型的推导时, 将 Δt 时间步长内的传质过程分为3步。

第1步: 从 t 时刻到 $t + \Delta t/2$ 时刻, NEA 进入油箱上部空间, 燃油箱内气相空间的氧质量增加量等于 NEA 的进气质量, 氧的质量平衡方程如下:

$$\dot{m}_{\text{nea}} \Delta t + m_{\text{O,u}}^t + m_{\text{O,m}}^t = m_{\text{O,u}}^{t+\Delta t/2} + m_{\text{O,m}}^{t+\Delta t/2} \quad (1)$$

式中 $\dot{m}_{\text{nea}}$ 指 NEA 的质量流量。

第2步: $t + \Delta t$ 时刻气相和传质边界层之间氧组分瞬时达到平衡, 平衡时液相中含有的氧氮的质量根据氧的 Ostwald 系数 β_o 来计算, 此时气相和传质边界层内的氧质量比为

$$\frac{m_{\text{O,u}}^{t+\Delta t/2}}{m_{\text{O,m}}^{t+\Delta t/2}} = \frac{\frac{p_{\text{O,u}}^{t+\Delta t/2} V_u}{R_o T_o}}{\frac{\beta_o p_{\text{O,m}}^{t+\Delta t/2} V_m}{R_o T_f}} \quad (2)$$

式中 V_u 为气相空间的体积; V_m 为传质边界层的体积; T_u 为气相空间的温度; T_f 为燃油的温度; R_o 为氧气的气体常数; β_o, β_n 为燃油 T_f 温度下氧、氮的 Ostwald 系数; $p_{\text{O,u}}^{t+\Delta t/2}$ 为 $t + \Delta t/2$ 时刻, 气相空间的氧压; $p_{\text{O,m}}^{t+\Delta t/2}$ 为 $t + \Delta t/2$ 时刻, 传质边界层的氧压。

由于气相和传质边界层之间的氧组分瞬时达到平衡, 有 $p_{\text{O,u}}^{t+\Delta t/2} = p_{\text{O,m}}^{t+\Delta t/2}$, 又因为假设 $T_u = T_f$, 式(2)可简化为

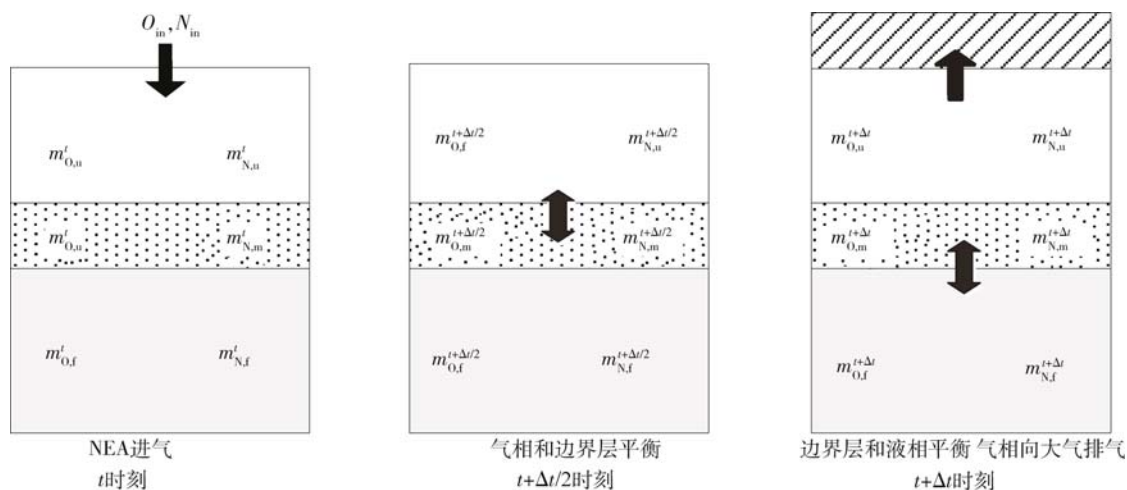


图2 通气式燃油箱内氧氮传质过程

Fig. 2 Mass transfer process of oxygen and nitrogen in vented fuel tank

$$\frac{m_{O,u}^{t+\Delta t/2}}{m_{O,m}^{t+\Delta t/2}} = \frac{V_u}{\beta_O V_m} = A_O \quad (3)$$

式中 A_O 称为氧的分配系数,将式(3)代入式(1)中,可以解得 $t+\Delta t/2$ 时刻气相空间层和传质边界层的氧质量分别为

$$m_{O,u}^{t+\Delta t/2} = (\dot{m}_{O,nea} \Delta t + m_{O,t}^t + m_{O,m}^t) \left(\frac{A_O}{1 + A_O} \right) \quad (4)$$

$$m_{O,m}^{t+\Delta t/2} = (\dot{m}_{O,nea} \Delta t + m_{O,u}^t + m_{O,m}^t) \left(\frac{1}{1 + A_O} \right) \quad (5)$$

第 3 步:传质边界层和燃油底层的氧均匀混合,传质边界层和燃油底层含氧质量的多少正比于各自的体积 V_m 和 V_f ,那么传质边界层和燃油层的氧质量关系满足下式:

$$m_{O,m}^{t+\Delta t} = \frac{V_m}{V_f + V_m} (m_{O,f}^t + m_{O,m}^{t+\Delta t/2}) = x(m_{O,f}^t + m_{O,m}^{t+\Delta t/2}) \quad (6)$$

$$m_{O,f}^{t+\Delta t} = \frac{V_f}{V_f + V_m} (m_{O,f}^{t+\Delta t/2} + m_{O,m}^{t+\Delta t/2}) = (1-x)(m_{O,f}^{t+\Delta t/2} + m_{O,m}^{t+\Delta t/2}) \quad (7)$$

氮组分的计算过程与氧组分的计算过程类似,终了时刻传质边界层和液层内的氮的质量分别为

$$m_{N,m}^{t+\Delta t} = x(m_{N,f}^t + m_{N,m}^{t+\Delta t/2}) \quad (8)$$

$$m_{N,f}^{t+\Delta t} = (1-x)(m_{N,f}^{t+\Delta t/2} + m_{N,m}^{t+\Delta t/2}) \quad (9)$$

此时油箱上部空间的压力超过大气压,由于民机燃油箱内的气压需要和大气压保持相同,因此向大气层排出多余气体,气体中氧氮组分按排出前的摩尔比(压力比)排出,油箱内的气相压力值下降为当地大气压,终了时刻气相空间的氧质量方程可表示为

$$\frac{m_{O,u}^{t+\Delta t}}{m_{O,u}^{t+\Delta t/2}} = \frac{p_{amb}^{t+\Delta t}}{p_{O,u}^{t+\Delta t/2} + p_{N,u}^{t+\Delta t/2} + p_v^{t+\Delta t/2}} \quad (10)$$

式中 $p_{amb}^{t+\Delta t}$ 为 $t+\Delta t$ 时刻当地大气压, $p_v^{t+\Delta t/2}$ 为燃油蒸汽压.

终了时刻气相空间的氧体积分数可表示为

$$\varphi_{O,u}^{t+\Delta t} =$$

$$\frac{\left(\frac{\dot{m}_{O,nea} \Delta t + m_{O,u}^t + m_{O,m}^t}{\dot{m}_{N,nea} \Delta t + m_{N,u}^t + m_{N,m}^t} \right) \left(\frac{\beta_N V_m + V_u}{\beta_O V_m + V_u} \right) \frac{R_O}{R_N}}{1 + \left(\frac{\dot{m}_{O,nea} \Delta t + m_{O,u}^t + m_{O,m}^t}{\dot{m}_{N,nea} \Delta t + m_{N,u}^t + m_{N,m}^t} \right) \left(\frac{\beta_N V_m + V_u}{\beta_O V_m + V_u} \right) \frac{R_O}{R_N}} \quad (11)$$

至此, t 到 $t+\Delta t$ 时刻的计算结束, $m_{O,u}^{t+\Delta t}$, $m_{O,m}^{t+\Delta t}$, $m_{O,f}^{t+\Delta t}$, $m_{N,u}^{t+\Delta t}$, $m_{N,m}^{t+\Delta t}$, $m_{N,f}^{t+\Delta t}$ 成为下个时间步长的初始氧氮质量.通过计算每个步长的氧氮含量

的变化就能得到惰化过程中氧的体积分数随时间的变化曲线.

3 模型验证及分析

3.1 封闭油箱

为了验证频率传质模型的有效性,作者根据 FAA 的相关实验条件^[8],如表 1 所示,编制了相关计算程序,并将两者的结果进行了对比,对比结果见图 3.

表 1 FAA 实验参数条件^[8]

Table 1 FAA experimental conditions

实验参数	数值
载油率/%	40
燃油品种	JET-A
Ostwald 系数	$\beta_O = 0.242$, $\beta_N = 0.107$
温度/K	$T_f = T_u = 288$
油箱体积 V/m^3	8.1836
NEA 氧体积分数/%	5
气相空间初始氧的体积分数/%	8
燃油层初始氧氮分压比	21/79
边界层厚度比 x	0.01

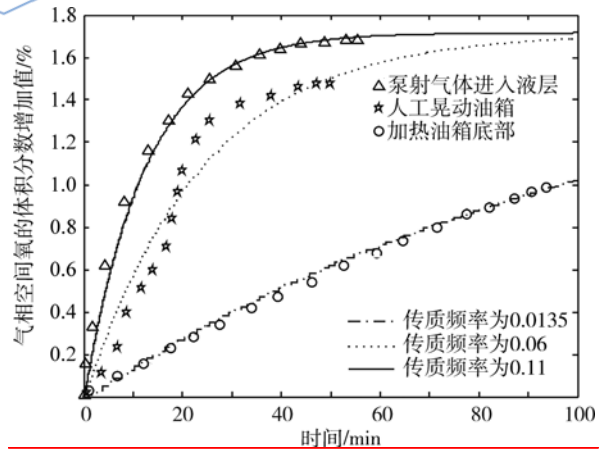


图 3 频率传质模型计算值和实验数据对比

Fig. 3 Comparison of frequency mass transfer model calculation and test data

该实验是 FAA 为了研究封闭燃油箱内气相空间和燃油层之间氧氮的传质速率而进行的,然而 FAA 并没有进一步进行理论研究.实验用的封闭燃油箱处于静止无激励状态时,1 h 内不会观察到氧的体积分数的增加.该实验记录了三种不同条件下燃油箱上部空间的氧的体积分数随时间

的变化曲线,这三种激励传质的条件分别如下.

- 1) 利用燃油泵将封闭油箱内上部空间的气体泵入燃油层的底部.
- 2) 将油箱用绳索吊起,人工晃动油箱.
- 3) 利用加热板在油箱底部加热.

图3中的三种间断线分别表示三种条件下的实验数据,从图中可以看出:将气体泵入燃油底层来加速传质,是几种条件中能最有效加快传质的方法,泵入的气体在从油箱底部上升到燃油液面的过程中可以大大加快气相和燃油液层之间的氧氮传质.人工晃动油箱可以在一定程度上加快燃油和气层的氧氮传质,而依靠加热油箱来加速传质的效果最差.

图3中的连续线表示频率传质模型计算结果,传质边界层厚度比定为 $x=0.01$. 当传质频率 f 分别取 0.1100, 0.0135 时,频率传质模型计算结果和对应条件下的实验结果较吻合. 而人工晃动油箱条件下的计算和实验数据则有较大的差别,这是因为 50 min 内由不同人员轮流晃动油箱,因此不同时间段内油箱晃动的程度有所不同,造成了传质快慢的突变,导致其数据点不规则,当 f 取 0.08 时可以表示晃动油箱的平均传质情况. 对这三种情况下气体传质过程的模拟是较准确的,可以表明频率传质模型的有效性和实用性.

3.2 飞机燃油箱冲洗惰化

本文进一步对 A320 飞机冲洗惰化的飞行数据进行了仿真,考虑了飞行包线的影响,计算条件如图4^[12]所示,包括 A320 的飞行包线和 NEA 的体积流量、氧的体积分数的数值. 实验中燃油箱的载油率为 23%,采用不同传质频率进行仿真的计算结果见图5.

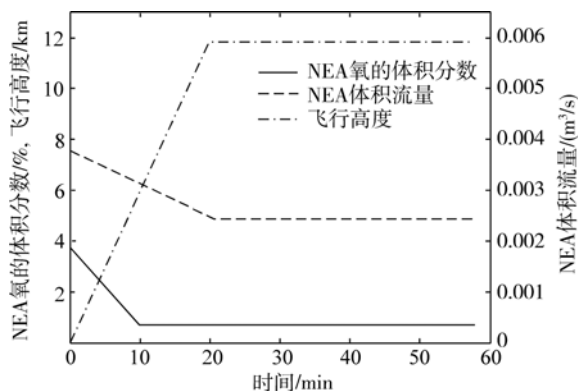


图4 A320 的飞行包线和 ASM 性能曲线

Fig. 4 A320 flight envelop and ASM performance curve

图5绘制了传质频率分别为 0, 0.08, ∞ 时的计算氧的体积分数曲线和实验测量数据,从中可以发现气相空间初始氧的体积分数是 18% 而不是 21%,是因为在飞机的滑行起飞阶段,气相空间的氧体积分数已经被冲洗到 18%. $f=0$ 和 $f=\infty$ 的计算结果和实验测量数据有着较大的差距,且两者的计算氧体积分数曲线都低于实际的氧体积分数曲线,两种计算结果都过分偏于安全. 这是因为当 $f=0$ 和 $f=\infty$ 时,无法衡量一般传质情况下,液相的氧随时间慢慢溢出时对惰化效果的影响. 作者通过多次仿真发现,当 $f=0.08$ 时,计算结果和实验数据非常接近,说明通过设置合适的传质频率,频率传质模型能够对飞机燃油箱的惰化过程进行较精确的仿真.

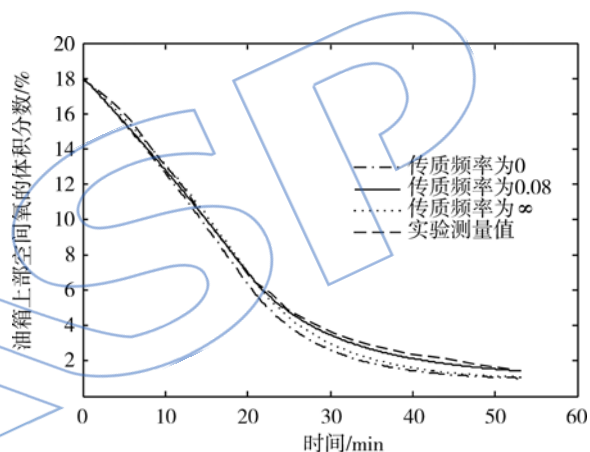


图5 载油率为 23% 时 A320 氧的体积分数曲线

Fig. 5 A320 volume fraction of oxygen at 23% fuel load

对 A320 惰化曲线的模拟表明,爬升阶段取 $f=0.08$ 较合适,在晃动油箱时的 $f=0.06$ 和泵射气体进入液层底部时 $f=0.11$ 之间. 这是因为爬升阶段对燃油和空气之间传质的激励程度介于晃动油箱和泵射气体进入液层底部这两者之间: 飞机在飞行的过程中燃油有晃动,这类似于人工晃动的条件;而在爬升的时候,油箱内的气压随着大气压的降低而降低,这使得液相的氧氮加速传质,因此传质过程比单纯的晃动油箱的情况更快,但是仍然没有泵射气体进入燃油液层底部的传质速率快.

在多隔舱都需要惰化时,富氮气体会按照一定的规律流通过每个隔舱,可能导致某个隔舱在某个时间段的气相氧分压力大于液相的氧分压力,这种情况还有待进一步研究. 研究者已经发现,在多隔舱情况下各隔舱通入富氮气体的顺序

会对隔舱内氧的体积分数造成很大的影响^[13]。

3.3 增大载油率的影响

作者在对燃油箱惰化过程进行仿真的过程中发现,载油率增大,导致了气相空间氧体积分数的降低速度变慢,是因为飞机爬升过程中氧析出量的明显增加和气相空间的减少。在假设传质边界层厚度比、传质频率和 NEA 不变的情况下,对载油率为 80% 的工况进行模拟,模拟结果见图 6。从图 6 中可以清晰地发现载油率增加到 80% 的时候,三种典型传质频率下的计算结果差别很明显, $f=0$ 惰化氧的体积分数始终都是最低的; $f=0.08$ 气相空间氧体积分数在起始阶段内比 $f=\infty$ 氧的体积分数下降得快;在 17 min 以后, $f=0.08$ 的曲线表明:积蓄在燃油中的氧持续释放,导致该氧的气体积分数曲线的下降速度最慢。随着时间的持续推进,三种传质频率下的气相空间氧的体积分数最终会共同趋近于 NEA 的氧体积分数。

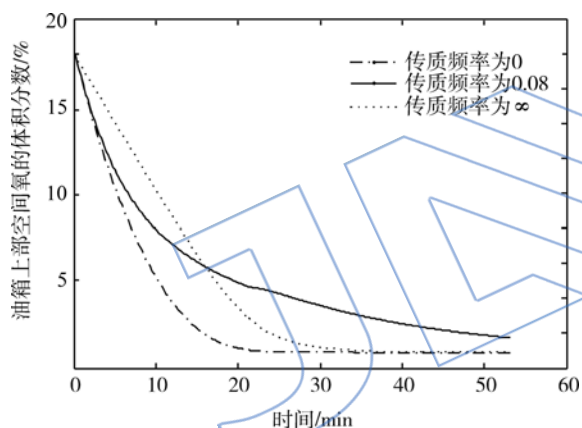


图 6 载油率为 80% 时计算氧的体积分数曲线
Fig. 6 Calculated volume fraction of oxygen at 80% fuel load

4 结 论

本文提出的传质频率是指进行传质的两种组分,在规定的传质边界层里单位时间内进行体积分数平衡过程的次数。环境温度、燃油箱晃动程度和燃油品种都会影响到传质频率 f 的大小。

传质边界层的定义还不完善,如果能够开展相关实验并发现液相体积分数梯度的一般性的变化规律,那么可以参照速度边界层或者温度边界层的方法来给传质边界层下一个准确的物理意义。

从传质频率这一概念出发,建立了民机燃油箱的冲洗惰化过程的频率传质数学模型。该模型能对燃油和空气传质过程进行较准确的仿真,并

得到了 FAA 相关实验和 A320 飞行测试数据的验证,且表现出较高的精度。

当燃油箱的载油率从 23% 增加到 80% 的时候,仿真结果表明:载油率的增加会明显延缓惰化氧的体积分数降低,且频率传质模型和瞬时平衡 ($f=\infty$)、不传质 ($f=0$) 这两种定性模型的计算结果差异很大。

目前频率传质模型的使用仅局限于民用飞机燃油箱冲洗惰化过程,而对于一般的气液传质问题的描述是否有效、准确,这一点还有待发现和补充,同时频率传质模型也需要和国内的一些其他燃油箱惰化的理论分析^[14]和实验数据进行对比研究^[15]。

参考文献:

- [1] William M C. The effect of fuel on an inert ullage in a commercial transport airplane fuel tank[R]. Washington DC, USA: Office of Aviation Research, DOT/FAA/AR-05/25, 2005.
- [2] Cavage W M. The cost of implementing ground-based fuel tank inerting in the commercial fleet[R]. Washington DC, USA: Office of Aviation Research, DOT/FAA/AR-00/19, 2000.
- [3] Burns M, Cavage W M. 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.
- [4] Burns M, 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-01/6, 2001.
- [5] William M C, Bowman T. Modeling inert gas distribution in commercial transport aircraft fuel tanks[R]. St. Louis, Missouri: 22nd AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, 2002.
- [6] Summer S M. Limiting oxygen concentration required to inert jet fuel vapors existing at reduced fuel tank pressures: final phase[R]. Washington DC, USA: Office of Aviation Research, DOT/FAA/AR-04/8, 2004.
- [7] William M C, Morrison R. Development and testing of the faa simplified fuel tank inerting system[R]. Washington DC, USA: Office of Aviation Research, DOT/FAA/AR-05/6, 2005.
- [8] William M W. The effect of fuel on an inert ullage in a commercial transport airplane fuel tank[R]. Washington DC, USA: Office of Aviation Research, DOT/FAA/AR-05/25, 2005.
- [9] William J. Fuel tank flammability assessment method user's manual [R]. Washington DC, USA: Office of Aviation Research, DOT/FAA/AR-05/8, 2002.
- [10] William M C, Summer S. A study of the flammability of

- commercial transport airplane wing fuel tanks[R]. Washington DC, USA: Office of Aviation Research, DOT/FAA/AR-08/8, 2008.
- [11] 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 scrubbing efficiency in aircraft fuel tank[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(11): 2457-2463. (in Chinese)
- [12] Burns M, William M C, Hill R. Flight-testing of the faa on-board inert gas generation system on an airbus A320[R]. Washington DC, USA: Office of Aviation Research, DOT/FAA/AR-03/58, 2004.
- [13] 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, 2011, 26(11): 2528-2533. (in Chinese)
- [14] 鹿世化, 冯诗愚, 王盛园, 等. 考虑氧逸出的多舱燃油箱惰化理论研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(1): 100-104. LU Shihua, FENG Shiyu, WANG Shengyuan, et al. Theoretical study on inerting process for multi-bay fuel tank based on oxygen evolution[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 44(1): 100-104. (in Chinese)
- [15] 刘小芳, 刘卫华, 钱国诚, 等. 燃油洗涤引射器充氮性能实验[J]. 航空动力学报, 2010, 25(4): 735-740. LIU Xiaofang, LIU Weihua, QIAN Guocheng, et al. Experiment on nitrogen-filling performance of fuel scrubbing ejector[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(4): 735-740. (in Chinese)