

文章编号:1000-8055(2017)02-0268-07

doi:10.13224/j.cnki.jasp.2017.02.002

一种燃油箱绿色惰化系统地面惰化性能分析

冯诗愚, 李超越, 邵 垒, 陈 悟, 刘卫华
(南京航空航天大学 航空宇航学院, 南京 210016)

摘 要: 在描述一种采用催化燃烧产生惰气来降低油箱气相空间氧体积分数的新型绿色惰化工作原理基础上, 设计了绿色惰化系统流程, 通过一定的假设和简化建立了其数学模型并进行了求解. 将结果与采用中空纤维膜产生富氮气体的机载惰化系统进行了比较, 结果显示: 当绿色惰化系统中抽吸气的流量与中空纤维膜惰化所产生富氮气体流量一致时, 前者惰化效果远好于后者. 同时, 还研究了催化反应器效率和预热气体抽取比例对绿色惰化系统的影响, 结果表明: 提高反应器效率可有效缩短达到安全氧体积分数所需的时间, 且最终油箱气相空间氧体积分数会降低, 而选取合适的预热气体抽取比例可以减少系统能耗.

关 键 词: 燃油箱; 催化燃烧; 惰化; 氧体积分数; 中空纤维膜

中图分类号: V228; TQ021.4

文献标志码: A

Analysis on ground-based inerting performance of a fuel tank green on-board inert gas generation system

FENG Shi-yu, LI Chao-yue, SHAO Lei,
CHEN Wu, LIU Wei-hua

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

Abstract: Based on the description of the operating principle of a green on-board inert gas generation system (GOBIGGS), which could decrease the oxygen volume fraction on ullage of a fuel tank via the injection of the inerting gas produced by a catalytic combustion reactor, a GOBIGGS flow was designed and its mathematical model was setup. GOBIGGS was compared with the on-board inert gas generation system (OBIGGS) in which the inerting process was realized via the injection of the nitrogen enriched air (NEA) separated by a hollow fiber membrane module. The result reveals that if the flow rate of the exhaust gas from the fuel tank in GOBIGGS is identical with that of NEA in OBIGGS, the inerting effect of GOBIGGS is much more positive than that of OBIGGS. Additionally, the performance GOBIGGS affected by the efficiency of the catalytic combustion reactor and the allocation proportion of the preheating gas were investigated. It is found that the increase of the efficiency could shorten the inerting time to the maximum safe oxygen volume fraction and reduce the ultimate oxygen volume fraction, and the power consumption of the system could decrease if a proper allocation proportion of the preheating gas is chosen.

收稿日期: 2015-06-14

基金项目: 航空科学基金(20132852040); 南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(SX1401135, BX1401049); 中央高校基本科研业务费专项资金

作者简介: 冯诗愚(1974—), 男, 副教授、博士, 主要从事油箱惰化性和飞机燃油系统方面的研究.

引用格式: 冯诗愚, 李超越, 邵垒, 等. 一种燃油箱绿色惰化系统地面惰化性能分析[J]. 航空动力学报, 2017, 32(2): 268-274. FENG Shiyu, LI Chaoyue, SHAO Lei, et al. Analysis on ground-based inerting performance of a fuel tank green on-board inert gas generation system[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(2): 268-274.

Key words: fuel tank; catalytic combustion; inerting; oxygen volume fraction; hollow fiber membrane

飞机的安全问题一直受到广泛关注,而燃油系统燃烧、爆炸是引起飞机失事的主要原因之一^[1-2].有数据表明在越南战争中,美国空军由于受到地面火力攻击而损失了数千架飞机.在这些损失中,由于燃油失火导致的损失比例高达 50%^[3].机舱安全研究技术小组(cabin safety research technical group, CSRTG)对 1966 年至 2009 年全世界 3726 起民航事故统计结果显示,共有 370 起事故与油箱燃烧爆炸有关.由此可见,无论对于军机还是民机,都必须采用有效的措施来防止油箱燃爆.

从上世纪 50 年代起,美国军方就开始了采用氮气、Halon 1301(哈龙)气体惰化油箱的研究工作^[4-6],而采用中空纤维膜制取富氮气体的机载制氮惰化技术(on-board inert gas generation system, OBIGGS)成为了目前实用和经济的飞机油箱燃爆抑制技术,其在 F-15, F-22, F-35, C-17 和 A400 等新型军机上得到了广泛应用^[7].

但是,从国内外的应用现状来看,中空纤维膜机载制氮惰化技术仍然存在很多问题,例如分离膜效率低导致飞机代偿损失大、分离膜入口需求压力高导致在很多机型上无法使用(如直升机)、细小的膜丝和渗透孔径逐渐堵塞及气源中臭氧导致膜性能衰减严重、富氮气体填充油箱时导致燃油蒸汽外泄污染环境等.

美国怀特-帕特森空军基地、Honeywell 和 Phyre 公司从 2006 年始联合进行下一代新型机载惰化技术的研究工作^[8-9],称之为“绿色惰化技术”(green on-board inert gas generation system, GOBIGGS).其基本原理是将油箱上部气相空间的燃油蒸汽和空气导入一个催化氧化反应器,并补充一定的外部空气进行可控的无焰催化燃烧,燃烧后碳氢物被氧化为二氧化碳和水蒸气,水蒸气通过处理装置被分离,而剩余的二氧化碳、未参与反应的氮气和未完全反应的燃油蒸汽及氧气被再次送入油箱上部,从而降低氧体积分数达到惰化的目的.

Phyre 公司资料显示,在 2011 至 2012 年间,样机在 A-3 攻击机、UH-60 黑鹰直升机和波音 737 客机上完成了地面和少量飞行实验.初步实验研究表明,这种新型惰化技术具有无需引气,代偿损失小,启动速度快,惰化效率高等诸多

优点^[10].

目前对于中空纤维膜惰化方式的理论和实验研究结果十分丰富,例如中空纤维膜分离效果理论和实验研究^[11-12],冲洗和洗涤方式下气相和液相空间氧浓度变化关系等^[12-14].但是,受限于保密原因,绿色惰化技术公开资料很少,目前可见的资料仅有一些简单的原理描述和少量的实验测量结果.国内于 2013 年开始展开了对该技术的追踪和研究,但是由于在绿色惰化技术中,油箱上部气体体积分数变化关系是催化器的入口边界条件,而它又受到催化器出口反应产物的影响,同时气体的溶解和逸出又与油箱上部气体浓度变化相关,三者相互耦合,因此必须初步了解入口的浓度和流量等参数的变化对惰化性能的影响,从而为催化反应器的设计提供一定的依据.

有鉴于此,本文首先设计了一种绿色惰化系统流程,在此基础上建立了其工作过程数学模型并进行了求解,得到了油箱上部气相空间氧体积分数随时间的变化关系,同时将其与中空纤维膜惰化方式进行了对比,最后初步研究了几个关键参数对惰化效果的影响.

1 绿色惰化系统流程描述

在国外流程的基础上^[15],本文所设计的流程如图 1 所示.从燃油箱上部抽取混合气体(后续称为“抽吸气”),抽吸气中包含燃油蒸汽、氧气、氮气、二氧化碳、少量气态水蒸气和微量氮化物及一氧化碳等杂质.来自油箱的抽吸气中氧体积分数可能不足,因此需要从外界环境补气并与抽吸气混合后在回热器冷侧通道中被加热,加热后的气体进入电预热器进一步达到反应所需温度后,进

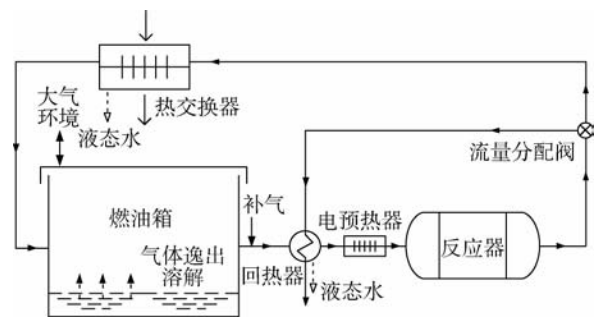


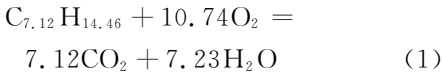
图 1 绿色惰化系统流程示意图
Fig.1 Schematic flow chart of GOBIGGS

入催化反应器被氧化,反应后的产物(后续称为“惰化混合气”)进入流量分配阀,一部分进入回热器热侧通道,另外一部分流经热交换器热侧通道后,由流经冷侧通道的冲压空气(或环控引气)降温,去除气体中的水分及降低惰化气的温度,最终将惰化混合气充入油箱上部空间.在惰化过程中,随着油箱上部气相空间各气体的分压变化,气体会向燃油中溶解或从燃油中逸出.

2 惰化系统数学模型

2.1 参数选择及基本假设

选取大庆 RP-3 燃油为研究对象,其中氢质量分数为 14.46%,分子式可简化为 $C_{7.12}H_{14.46}$,分子量为 141 g/mol,因此其与氧气的反应式为



惰化过程在地面进行,油箱压力保持不变,恒定为地面大气压力.为了简化计算,认为燃油箱中气相和燃油温度及外界环境温度均为 30℃,按照通常自持式催化燃烧的工艺参数,选取进入反应器的混合气温度(出电预热器)为 150℃,离开反应器的温度为 200℃,热交换器出口温度也为 30℃.忽略油箱中少量的水蒸气,在回热器和热交换器中也认为所有的水蒸气均能被冷却成液态水.回热器前外界补气量恰好满足反应器中燃油蒸汽可被完全氧化所需的量.燃油箱中的燃油蒸汽分压为该温度下的饱和蒸汽压.

催化反应器效率 η 定义为

$$\eta = 1 - \frac{q_{n,cat,out,fuel}}{q_{n,cat,in,fuel}} \times 100\% \quad (2)$$

式中 $q_{n,cat,in,fuel}$, $q_{n,cat,out,fuel}$ 为进、出催化反应器燃油蒸汽的摩尔流量(单位: mol/s); η 为进入反应器的燃油蒸汽被转化为二氧化碳和水的百分比.当 $\eta=100\%$ 时,所有的燃油蒸汽均被转换,而 $\eta=0\%$ 时,则没有任何燃油蒸汽被氧化.

流出催化反应器的混合惰气在流量分配阀中分配的关系由预热气体抽取比例系数 ϵ 决定,其定义为

$$\epsilon = \frac{q_{n,pre}}{q_{n,cat,out}} \times 100\% \quad (3)$$

当 $\epsilon=100\%$ 时,没有任何反应后的惰化混合气进入油箱,而当 $\epsilon=0\%$ 时,则所有惰气均进入油箱.

来自环境的补气量按照 $\eta=100\%$ 时所需的氧气量计算.此外,由于油箱压力维持恒定,因此

根据充入和离开油箱气量的多少,按照质量平衡关系可计算外界环境空气进入油箱或从油箱离开的气量.本文认为进入油箱流量为正,离开为负.

选择的油箱为某型战斗机油箱,其容积为 14.5 m³.同时认为当外界气体进入油箱气相空间,以及气体向燃油中溶解或从燃油中逸出后,温度和浓度可瞬时混合并达到均匀状态.

2.2 惰化过程数学模型推导

根据以上参数和基本假设,以抽吸气摩尔流量 $q_{n,u,out}$ 为基准,首先给出各处流量关系.外界补气摩尔流量为

$$q_{n,add} = q_{n,add,o} + q_{n,add,n} = \frac{100}{21}(10.74q_{n,u,out}x_{u,fuel} - q_{n,u,out}x_{u,o}) \quad (4)$$

进入催化反应器的气体总摩尔流量为

$$q_{n,cat,in} = q_{n,add} + q_{n,u,out} \quad (5)$$

认为热交换器中可以去除所有水蒸气,则流出催化反应器的各种气体摩尔流量为

$$\begin{cases} q_{n,cat,out,o} = 10.74(1-\eta)q_{n,u,out}x_{u,fuel} \\ q_{n,cat,out,n} = q_{n,u,out} \\ \left[x_{u,n} + \frac{0.79}{0.21}(10.74x_{u,fuel} - x_{u,o}) \right] \\ q_{n,cat,out,c} = 7.12\eta q_{n,u,out}x_{u,fuel} + q_{n,u,out}x_{u,c} \\ q_{n,cat,out,h} = 7.23\eta q_{n,u,out}x_{u,fuel} \end{cases} \quad (6)$$

进入油箱的混合惰气摩尔流量为

$$q_{n,u,in} = q_{n,cat,out}(1-\epsilon) \quad (7)$$

式中 $x_{u,o}$, $x_{u,n}$, $x_{u,c}$, $x_{u,fuel}$ 为油箱上部气相空间各气体组分的体积分数.

对油箱中各气体组分建立质量平衡方程,即

$$q_{u,in,o}\Delta\tau + q_{amb,o}\Delta\tau + \Delta m_{f,o} - q_{u,out,o}\Delta\tau = (p_o^{\tau+\Delta\tau} - p_o^{\tau}) \frac{V_u}{R_o t_u} \quad (8)$$

$$q_{m,u,in,n}\Delta\tau + q_{m,amb,n}\Delta\tau + \Delta m_{f,n} - q_{m,u,out,c}\Delta\tau = (p_n^{\tau+\Delta\tau} - p_n^{\tau}) \frac{V_u}{R_n t_u} \quad (9)$$

$$q_{m,u,in,c}\Delta\tau + \Delta m_{f,c} - \dot{m}_{u,out,c}\Delta\tau = (p_c^{\tau+\Delta\tau} - p_c^{\tau}) \frac{V_u}{R_c t_u} \quad (10)$$

式中 q_m 为质量流量(单位: kg/s); V_u 为油箱气相空间体积(单位: m³); t_u 为气相温度(单位: °C); R 为气体常数(单位: J/(mol · K)). 其中 $\Delta m_{f,o}$, $\Delta m_{f,n}$, $\Delta m_{f,c}$ 为氧气、氮气和二氧化碳在 $\Delta\tau$ 时间内从燃油中逸出或向燃油中溶解的量(单位: kg),可表示为

$$\Delta m_{f,o} = m_{f,o}^{\tau+\Delta\tau} - m_{f,o}^{\tau} = \left(\frac{\beta_o p_o^{\tau+\Delta\tau} V_f}{R_o t_f} - m_{f,o}^{\tau} \right) \frac{\Delta\tau}{\tau_o} \quad (11)$$

$$\Delta m_{f,n} = m_{f,n}^{+\Delta\tau} - m_{f,n}^{\tau} = \left(\frac{\beta_n p_n^{+\Delta\tau} V_f}{R_n t_f} - m_{f,n}^{\tau} \right) \frac{\Delta\tau}{\tau_0}$$

(12)

$$\Delta m_{f,c} = m_{f,c}^{+\Delta\tau} - m_{f,c}^{\tau} = \left(\frac{\beta_c p_c^{+\Delta\tau} V_f}{R_c t_f} - m_{f,c}^{\tau} \right) \frac{\Delta\tau}{\tau_0}$$

(13)

式中 p_o, p_n, p_c 为油箱中气体的分压力; β 为气体的阿斯特瓦尔德系数, 其计算方法可参看文献[16]; V_f, t_f 为燃油的体积和温度; τ_0 为时间常数, 当 $\tau_0 = \infty$ 时, 则气体不会从燃油中逸出, 而当 $\tau_0 = 0$ 时, 则气体可瞬间与燃油达到平衡状态。

中空纤维膜分离性能及地面惰化过程数学模型可参看相关文献[17], 本文不再赘述。

3 模型求解结果及分析

3.1 中空纤维膜与绿色惰化方法比较

首先采用中空纤维膜方式惰化燃油箱, 当所选择的某型膜入口压力为 0.8 MPa, 产生含氧氧体积分数为 5% 的富氮气体时 (NEA5) 时, 膜的分离效率为 29.1%, 而产生含氧体积分数为 2% 的富氮气体时 (NEA2), 膜的分离效率为 18.4%。图 2 中给出了富氮气体流量为 60 kg/h, 在 3 种不同载油率、2 种富氮气体体积分数及不考虑或按照平衡溶解关系考虑气体溶解逸出两种情况下进行地面惰化时, 气相空间中氧氮的变化关系。显然, 载油率越大, 气相空间容积则越小, 惰化速度越快, 而考虑气体溶解和逸出时, 所需惰化时间越长, 这与文献[17]的计算结果一致, 原因也可参考该文献的分析。

绿色惰化过程中, 进入油箱的混合惰气由催化反应器产生, 从式(6)和式(7)可见, 该惰气流量

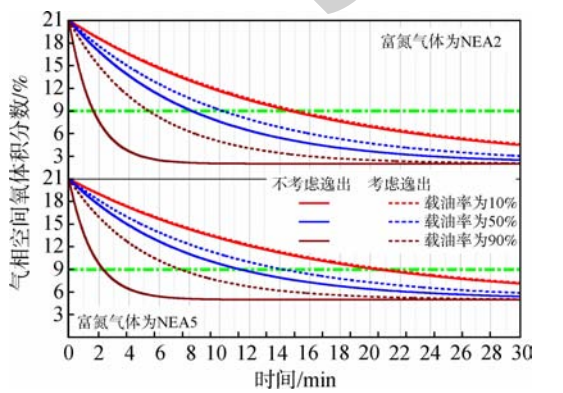


图 2 中空纤维膜惰化时气相空间氧体积分数变化
Fig. 2 Variation of oxygen volume fraction on ullage in OBIGGS

的体积分数和流量均会随着时间变化, 因此本文中以油箱出口的抽吸气流量为基准, 分别计算了抽吸气流量为 30 kg/h 和 60 kg/h 下, 同样考虑和考虑气体溶解逸出及 3 种载油量下, 油箱气相空间氧体积分数的变化关系, 如图 3 所示, 计算中认为 $\eta = 80\%$, 而 $\epsilon = 0\%$, 即反应器产生的混合惰气均进入油箱, 而不流经回热器。

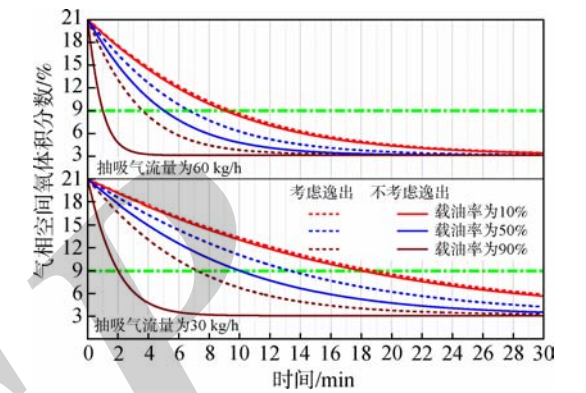


图 3 绿色惰化时气相空间体积分数变化
Fig. 3 Variation of oxygen volume fraction on ullage in GOBIGGS

比较图 2 和图 3 可以发现, 当绿色惰化系统中抽吸气流量为 30 kg/h 时, 惰化效果略好于中空纤维膜惰化时采用 NEA5 的效果, 略差于采用 NEA2 时的效果, 而当抽吸气流量增加至 60 kg/h 时, 绿色惰化效果明显优于中空纤维膜惰化方式。其原因可由图 4 中进入油箱混合惰气流量及含氧体积分数来说明, 从图中可以发现, 在绿色惰化系统中, 进入油箱的混合惰气流量逐渐增加, 体积分数逐渐减少直至稳定。当抽吸气流量为 30 kg/h

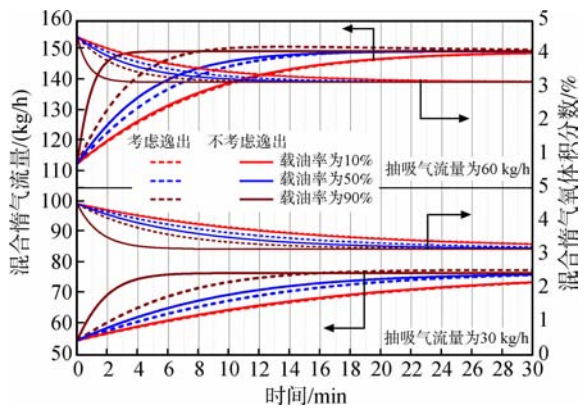


图 4 绿色惰化时混合惰气流量和氧体积分数变化
Fig. 4 Variation of flow rate and oxygen volume fraction of hybrid inerting gas in GOBIGGS

时,最终混合惰气的流量约为 70 kg/h,氧体积分
数约为 3%,而中空纤维膜富氮气体流量为 60
kg/h,氧体积分数为 5%,因此绿色惰化系统惰化
效果介于 NEA2 和 NEA5 之间.当抽吸气流量增
加至 60 kg/h 时,通过催化反应器产生的混合惰
气流量达到约 150 kg/h,远高于中空纤维膜产生
的富氮气体,因此惰化效果很好.

根据所选膜的分离效率,可得到中空纤维膜
惰化时所需引气流量,对于 NEA2 引气流量为
326 kg/h, NEA5 为 206 kg/h,若引气温度为
400℃,膜入口温度为 60℃,则在不考虑任何能量
损失的情况下,理论能耗分别为 30.8 kW 和 19.5
kW.对于绿色惰化系统,其能耗来自于电预热器,
由于当 $\epsilon=0\%$ 时,进入催化反应器的气体均由电
预热器加热,在抽吸气流量为 30 kg/h 和 60 kg/h
时,计算可得最大加热功率,分别为 2.7 kW 和
5.5 kW,即使考虑到发电效率为 30%,其能耗也
仅为 9.0 kW 和 18.3 kW,低于中空纤维膜惰化方
式的能耗.

3.2 关键参数对绿色惰化的影响

图 5 给出了载油率为 50%下,抽吸气流量为
60 kg/h,预热气体抽取比例系数 $\epsilon=0\%$ 时,3 种不
同催化反应器效率 η 对气相空间氧体积分数的影
响,从图中可见,当效率 η 越高,则惰化所需的时
间越短,且最终油箱气相空间氧体积分分数越低.虽
然从图 4 可知,随着惰化过程进行,在绿色惰化方
法中,混合惰气的氧体积分分数逐渐降低,但是当反
应器效率为 65%时,其惰化能力基本相当于中空
纤维膜方法时采用 NEA6 的富氮气体来惰化油
箱,而反应器效率为 80%和 95%时,则大致相当
于 NEA3 和 NEA1.从中空纤维膜的分离特性来
看^[12],产生 NEA3 和 NEA1 的气体需要很高的

进气压力和很大的引气流量,虽然目前对于 RP-3
燃油蒸汽的催化反应效率还未进行相关实验,但是
从工业废气催化燃烧实验报道可知,对于丙烷和
丙烯混合物,反应器运行 1 000 h 后,催化反应
效率仍可保持在 98%以上^[18],因此绿色惰化方法
具有较为明显的优势.

图 6 计算 3 种不同预热气体抽取比例 ϵ 对气
相空间氧体积分数的影响,显然预热气体抽取的
越多,则进入油箱的混合惰气流量越小,惰化效果
越差.但是,预热气体可以有效降低电预热器所消
耗的电功率,特别是当 $\epsilon=40\%$ 时,与图 2 比较可
发现,绿色惰化方法惰化至气相空间氧体积分
数为 9%的时间基本与中空纤维膜采用 NEA2 富氮
气体惰化所需的时间相当,但是从图 7 可发现,电
预热器基本无需启动,仅依靠回热器就可基本满
足将流入催化反应器的气体加热到 150℃的要

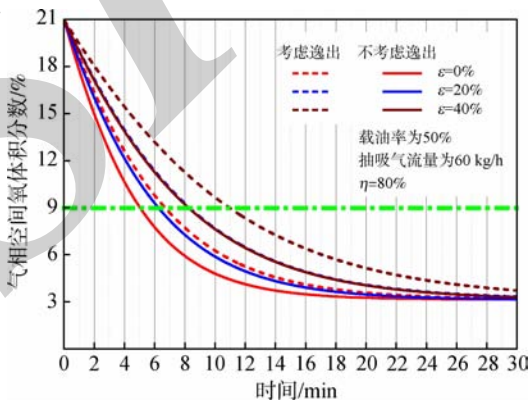


图 6 预热气抽取比例 ϵ 对惰化效果的影响
Fig. 6 Inerting effect influence by allocation proportion
of the preheating gas ϵ

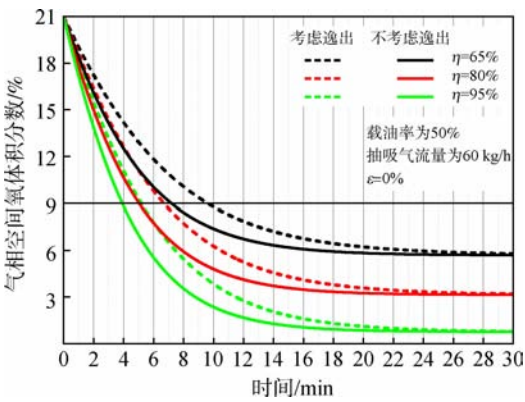


图 5 反应器效率对惰化效果的影响
Fig. 5 Inerting effect influence by efficiency of reactor

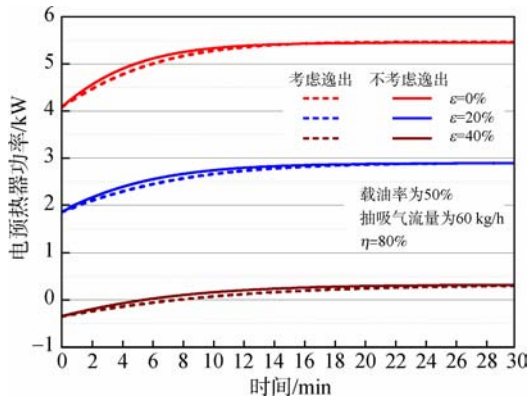


图 7 预热气抽取比例 ϵ 对电预热器功率影响
Fig. 7 Input power of electric preheater influenced by
allocation proportion of the preheating
gas ϵ

求,因此除风机等所消耗的少量电功外,整个系统可维持能量自平衡.

4 结 论

采用催化燃烧方法,将油箱上部气相空间的燃油蒸汽在催化反应器中转换成二氧化碳是控制油箱氧浓度,减少燃烧爆炸风险的有效技术.通过建立绿色惰化流程和数学模型进行的理论研究显示

1) 当绿色惰化方法中从油箱抽吸的气体流量与中空纤维膜方法充入油箱的惰化气体流量相同时,绿色惰化使油箱上部气相空间达到安全氧体积分数所需的时间远低于中空纤维膜方法,其原因在于绿色惰化方法中可产生更多的混合惰气,且混合惰气中氧体积分数极低.

2) 当绿色惰化方法从从油箱抽吸的气体流量为中空纤维膜方法充入油箱的惰化气体一半时,绿色惰化的效果介于中空纤维膜采用 NEA2 和 NEA5 惰化油箱的效果,但是其能耗低于中空纤维膜惰化方法.

3) 催化反应器效率会直接影响达到安全氧体积分数所需的时间及最终气相空间的氧体积分数,效率越高则惰化性能越佳,因此提高催化反应效率是绿色惰化的关键研究目标.

4) 预热气体抽取比例会直接影响惰化效果及电预热器的能耗,预热气流量越大,惰化效果越差,但是能耗越低,因此选择合适的预热气抽取比例十分重要.

但是,本文的研究中所建立的数学模型比较粗略,例如没有考虑水蒸气对系统的影响,催化反应器的性能仅用恒定的反应器效率来表征,特别是反应器前后温度设置为固定值,因此在未来的工作中要进一步考虑反应器中催化过程的数学描述及传热对系统性能的影响.

参考文献:

[1] 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)

[2] Johnson R L, Gillerman J B, Johnson R L, et al. Aircraft fuel tank inerting system[J]. International Journal of Hindu Studies, 1983, 13(13): 51-81.

[3] Abramowitz A, Boris P. Characterization of an oxygen/nitrogen permeable membrane system DOT/FAA/AR-95/

91[R]. Washington: Characterization of An Oxygen/nitrogen Permeable Membrane System, 1996.

[4] McConnell P M, Dalan G A, Anderson C L. Vulnerability methodology and protective measures for aircraft fire and explosion hazards[R]. Boeing Military Airplane Company AD-A167445, 1986.

[5] Mcchale E T. Hydrogen suppression study and testing of Halon 1301-phases I and II [R]. Atlantic Research Corporation MA-RD-920-77035, 1976.

[6] Geffs T. Fuel tank inerting and fire fighting, with liquid nitrogen[J]. Fire Technology, 1969, 5(3): 193-196.

[7] Langton R, Clark C, Hewitt M, et al. Aircraft fuel systems [M]. Hoboken NJ: Wiley, 2009.

[8] 刘凤春,邱献双. 一种新型的飞机油箱催化惰化系统[J]. 航空科学技术, 2011(4): 27-29.
LIU Suchun, QIU Xianshuang. A new fuel tank catalytically inerting system[J]. Aeronautical Science and Technology, 2011(4): 27-29. (in Chinese)

[9] Johnson R W, Zaki R, Yates S F. Advanced carbon dioxide fuel tank inerting system: US, 20080128048[P]. 2008-01-28.

[10] Walker S, Jung W, Robertson S. Demonstration of a novel catalyst based green on board inert gas generation system (GOBIGGSTM) for fuel tank inerting[R]. Phoenix, Arizona: AHS 69th Annual Forum, 2013.

[11] 冯诗愚,卢吉,刘卫华,等. 机载制氮系统中空纤维膜分离特性[J]. 航空动力学报, 2012, 27(6): 1332-1339.
FENG Shiyu, LU Ji, LIU Weihua, et al. Separation performance of hollow fiber membrane for on-board inerting gas generating system[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(6): 1132-1339. (in Chinese)

[12] 薛勇,刘卫华,高秀峰,等. 机载惰化系统中空纤维膜分离性能的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(3): 107-111.
XUE Yong, LIU Weihua, GAO Xiufeng, et al. Experimental study on separation performance of hollow fiber membrane for onboard inert gas generating system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(3): 107-111. (in Chinese)

[13] Cai Y, Bu X, Lin G, et al. Experimental study of an aircraft fuel tank inerting system[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 20: 394-402.

[14] 王学德,王志伟,刘卫华,等. 某中央翼燃油箱惰化流场的数值模拟及特性分析[J]. 航空动力学报, 2012, 27(12): 2641-2647.
WANG Xuede, WANG Zhiwei, LIU Weihua, et al. Numerical simulation and analysis of nitrogen-enriched air flow in a center wing tank[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(12): 2641-2647. (in Chinese)

[15] Morris R W, Miller J. Fuel deoxygenation and aircraft thermal management[R]. San Diego: California: 4th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC), 2006.

[16]

International A. Standardtest method for estimation of sol-
ubility of gases in petroleum liquids;Standard A. D2779-92
[S]. West Conshohocken,PA:ASTM,2007.

[17]

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 Bing,et al. Theoreti-
cal study of washing inerting process in aircraft fuel tank
[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2010,44(9):16-

20. (in Chinese)

[18]

陈建国. 工业有机尾气催化燃烧技术研究[D]. 上海:华东
理工大学,2011.
CHEN Jianguo. Development of the catalytic combustion
techniques for industry organic exhaust gas[D]. Shanghai:
East China University of Science and Technology,2011.
(in Chinese)

(编辑:叶 青)