

温度对耗氧型惰化系统产水性能影响

彭孝天¹, 冯诗愚¹, 周利彪¹, 潘俊², 王洋洋²

(1. 南京航空航天大学 航空学院
飞行器环境控制与生命保障工业和信息化部重点实验室, 南京 210016;
2. 中国航空工业集团有限公司 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 211106)

摘 要:以油箱出口气体的摩尔流量为基准,推导了流经催化反应器、冷却器前后各气体组分的摩尔流量关系,建立了耗氧型惰化系统的数学模型。研究了环境温度对系统中“水”性能的影响。结果表明:随着惰化的进行,油箱上部水蒸气占比逐渐增加,而冷却气体量、反应器出口相对湿度及中除水量逐渐降低;液态水析出对冷却气体量影响巨大,不能忽略;另外,系统中水的生成与析出与环境温度相关,且环境温度越低,油箱水蒸气体积分数上升越慢,但系统需要的冷却空气量越多且析出的液态水量越大,如环境温度为 0℃时,冷却器中所需冷却气体量分别约为 20、40℃时的 1.11 倍、1.26 倍。因此在设计耗氧型惰化系统时,应充分考虑温度变化对水的生成与析出的影响。

关 键 词:飞机油箱;航空燃油;耗氧惰化;催化反应器;析水
中图分类号: V228; TQ021.4 **文献标志码:** A

Effect of temperature on water production performance
of oxygen-consuming inerting system

PENG Xiaotian¹, FENG Shiyu¹, ZHOU Libiao¹,
PAN Jun², WANG Yangyang²

(1. Key Laboratory of Aircraft Environmental Control and Life Support Industry
and Information Technology, College of Aerospace Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Aero Electromechanical
System Integration, Nanjing Engineering Institute of Aircraft Systems,
Aviation Industry Corporation of China Limited, Nanjing 211106, China)

Abstract: Based on the gas molar flow rate at fuel tank outlet, the molar flow relationship between the gas components flowing through the catalytic reactor and the cooler was deduced, and a mathematical model of the oxygen-consuming inerting system was established. The effect of ambient temperature on “water” performance in the system was studied. Results showed: as the inerting developed, the proportion of water vapor on fuel tank ullage gradually increased, while the amount of cooling air, the relative humidity at the reactor out-

收稿日期: 2020-01-02
基金项目: 国家自然科学基金民航联合基金(U1933121);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX19_0198);
中央高校基本科研业务费专项资金;江苏高校优势学科建设工程
作者简介: 彭孝天(1993—),男,博士生,主要从事飞机燃油箱防火抑爆研究。

引用格式: 彭孝天,冯诗愚,周利彪,等. 温度对耗氧型惰化系统产水性能影响[J]. 航空动力学报,2020,35(8):1622-1627. PENG Xi-aotian, FENG Shiyu, ZHOU Libiao, et al. Effect of temperature on water production performance of oxygen-consuming inerting system[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(8): 1622-1627.

let and the amount of removed water decreased. The impact of liquid water precipitation on cooling air amount was huge and cannot be ignored. In addition, the generation and precipitation of water in the system were related to the ambient temperature. The lower ambient temperature indicated the slower rise of water vapor volume on fuel tank ullage, but more cooling air required by the system and the greater amount of precipitating liquid water. For example, when the ambient temperature was 0 °C, the amount of cooling gas required in the cooler was about 1.11 times and 1.26 times of that at 20 °C and 40 °C, respectively. Therefore, when designing an oxygen-consuming inerting system, the effect of temperature changes on the generation and precipitation of water should be fully considered.

Key words: aircraft fuel tank; aviation fuel; oxygen-consuming inerting system; catalytic reactor; water precipitation

飞机安全一直备受关注,而油箱上部空间充满可燃油气混合物,是潜在安全隐患,必须采取有效措施减小爆炸概率^[1-2],采用燃油箱惰化技术被认为是降低油箱燃爆风险最可行的措施^[3]。

从 20 世纪中叶开始,各类油箱惰化技术相继出现^[4-5]。目前,采用中空纤维膜制取富氮气体(nitrogen enriched air, NEA)的机载制氮惰化技术(hollow fiber membrane based on-board inert gas generation system, HFM-OBIGGS)应用最为广泛^[6-7]。但 HFM-OBIGGS 技术仍存在很多问题^[8],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应用困难(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气外泄污染环境等^[9-10]。

近年来,一种机载绿色惰化技术(green on-board inert gas generation system, GOBIGGS)的研究报道越来越多^[11-12]。GOBIGGS 系统于 2007 年 5 月在 FAA(Federal Aviation Administration)大西洋城市技术中心进行了技术验证^[13]。选用了短程的 FL-350 飞行包线,其总飞行时间约为 105 min,所惰化的油箱为标准的中央翼油箱,油箱总容积为 0.48 m³,装载有 64 L 的 JP-8 燃油。结果表明,GOBIGGS 样机的表现十分出色,系统启动后约 7 min 左右,就将油箱气相空间氧体积分数惰化至 12% 以下;运行 20 min 左右,就将气相空间氧体积分数拉低至 0,而如果采用分离膜,基本不可能达到如此低的氧体积分数,且分离效率十分低;在俯冲下降阶段,氧体积分数略有上升,但是最高也低于 4%,绝对可满足惰化中氧体积分数控制要求。目前,这项技术还处于试验阶段,一旦技术成熟,GOBIGGS 有可能成为与

HFM-OBIGGS 相媲美甚至更优秀的 OBIGGS^[14]。

但是,与 HFM-OBIGGS 不同的是,催化惰化系统中反应器内的无焰催化燃烧会产生水,而目前的研究中均没有考虑 GOBIGGS 系统中的产生性能^[15-16]。而对于国产燃油 RP3、RP5,燃油蒸气压力更大^[17],如 RP3 燃油的蒸气压约为 JP8 的 10 倍^[18],这意味着参与反应的碳氢化合物体积分数更高,反应会产生更多的水。而湿度较高的惰化气体流回油箱后,与低温的油箱壁面接触进一步析出液态水,导致结冰、发动机停车、燃油箱腐蚀、微生物生长等问题^[19]。因此了解 3CIS 各部位“水”性能至关重要,如反应产生的水量、析出的水量以及油箱气相空间水的体积分数等,而目前的研究中均忽略或未重点考虑该问题^[20-21]。

更重要的是,飞机在不同飞行高度时,其外界环境温度是不断变化的,高空中环境温度更低,反应生成的水蒸气越容易析出。另外,与 HFM-OBIGGS 相比,3CIS 系统中还需提供冷却介质来带走反应热,及冷却反应后高温气体,而环境温度的高低决定了惰化气体在反应器及冷却器中的温降。因此了解反应器、冷却器中所需冷却气体量可为系统设计提供必要依据。

有鉴于此,本文建立了催化惰化系统数学模型,选择国产 RP3 航空燃油,研究了环境温度对系统中产水性能的影响,同时,还对比了考虑及不考虑水析出时,系统所需冷却气体量的差异。

1 惰化系统原理及假设

本文设计的耗氧惰化系统流程及各部分摩尔流量关系如图 1 所示,其基本原理为:包含燃油蒸气、氧气、氮气、二氧化碳及气态水蒸气的混合气从油箱气相空间被风机抽出。在电加热器加热至起燃温度后进入反应器中进行催化反应,反应后

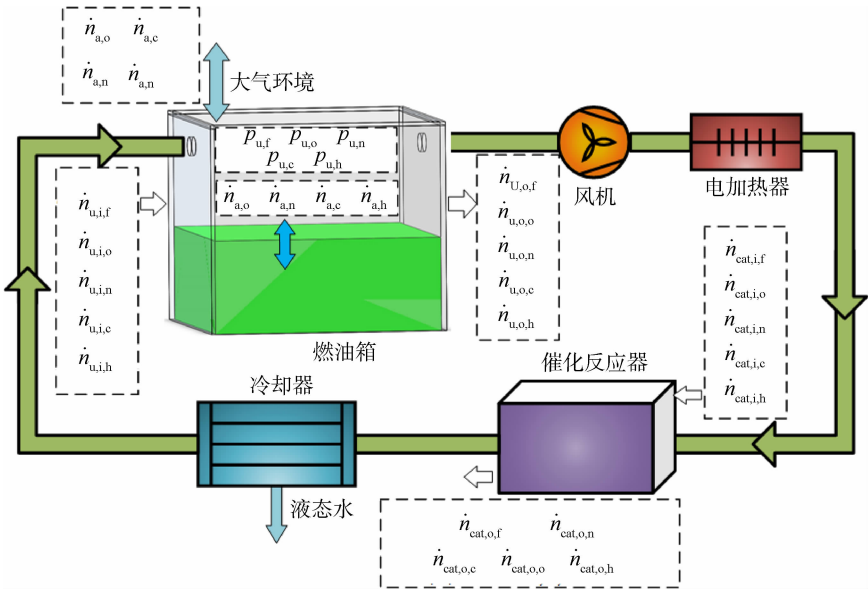


图 1 耗氧惰化系统流程图

Fig. 1 Flowchart of catalytic inerting system

形成主要由氮气和二氧化碳构成的混合惰气(oxygen depleted air, ODA),混合惰气流经冷却器被冷却气体降温并析出水,干燥的 ODA 被注回油箱上部气相空间,从而达到降低氧体积分数、惰化油箱的目的。

研究中做以下几个基本假设:

- 1) 不考虑燃油分子中存在的氧、硫和氮等微量元素,认为 RP3 燃油的分子式可表示为 $C_{10.05}H_{20.42}$ 。
- 2) 不考虑油箱与外界及气体与燃油的传热影响,油箱中温度与环境温度相同;认为催化反应器中气体温度恒为 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$,反应产生的热量由冷却空气带走,冷却器出口混合惰气被冷却至环境温度。
- 3) 计算反应器、冷却器中所需冷却气体量时,认为冷却空气冷却前后温差为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。
- 4) 惰化过程在地面进行且忽略管道阻力。
- 5) 气体与气体混合及气体在燃油中逸出和溶解过程瞬间完成,且满足平衡溶解关系。
- 6) 燃油蒸气分压按饱和蒸气压考虑,且饱和蒸气压按照里德蒸气压计算,忽略低气液比时真实蒸气压与里德蒸气压的差异。
- 7) 忽略油箱中的水蒸气体积分数变化对反应器反应造成影响。

2 数学模型

在催化反应器中,反应过程满足以下关系:

$$C_aH_b + \left(a + \frac{b}{4}\right)O_2 = aCO_2 + \frac{b}{2}H_2O \quad (1)$$

但是,考虑到即使氧气量足够,在催化反应器中也并非所有的燃油均可转换为二氧化碳和水,因此定义催化反应器效率 η_{cat}

$$\eta_{\text{cat}} = \frac{\dot{n}_{\text{cat},f}}{\dot{n}_{\text{cat},i,f}} \quad (2)$$

已知进入催化反应器的燃油蒸气摩尔流量 $\dot{n}_{\text{cat},i,f}$,氧气的摩尔流量 $\dot{n}_{\text{cat},i,o}$,由式(1)、式(2)可确定反应器中消耗的燃油蒸气摩尔流量 $\dot{n}_{\text{cat},f}$,氧气摩尔流量 $\dot{n}_{\text{cat},o}$,及生成二氧化碳摩尔流量 $\dot{n}_{\text{cat},c}$,水蒸气的摩尔流量 $\dot{n}_{\text{cat},h}$ 。

冷却器中采用气体冷却,进出口惰气的露点温度 T_d 不变,冷却器出口惰气温度 T 与环境温度相同,对比可判断出冷却器出口气体是否为饱和状态,进而可确定冷却器出口水蒸气分压力及 ODA 的相对湿度、含湿量、焓值等参数。

以油箱气相空间为控制体,对氧气、氮气、二氧化碳、水蒸气等组分建立质量守恒方程,即

$$\dot{n}_{u,i,o} + \dot{n}_{a,o} + \dot{n}_{f,o} - \dot{n}_{u,o,o} = \frac{V_u}{RT_u} \cdot \frac{dp_{u,o}}{d\tau} \quad (3)$$

$$\dot{n}_{u,i,n} + \dot{n}_{a,n} + \dot{n}_{f,n} - \dot{n}_{u,o,n} = \frac{V_u}{RT_u} \cdot \frac{dp_{u,n}}{d\tau} \quad (4)$$

$$\dot{n}_{u,i,c} + \dot{n}_{a,c} + \dot{n}_{f,c} - \dot{n}_{u,o,c} = \frac{V_u}{RT_u} \cdot \frac{dp_{u,c}}{d\tau} \quad (5)$$

$$\dot{n}_{u,i,h} + \dot{n}_{a,h} + \dot{n}_{f,h} - \dot{n}_{u,o,h} = \frac{V_u}{RT_u} \cdot \frac{dp_{u,h}}{d\tau} \quad (6)$$

气体从燃油中逸出或向燃油中溶解的量满足亨利定律,可按照平衡关系计算,压力减小时,逸出量为正,即

$$\dot{n}_{f,o} = - \left(\frac{\beta_o V_f}{RT_f} \right) \frac{dp_{u,o}}{d\tau} \quad (7)$$

$$\dot{n}_{f,n} = - \left(\frac{\beta_n V_f}{RT_f} \right) \frac{dp_{u,n}}{d\tau} \quad (8)$$

$$\dot{n}_{f,c} = - \left(\frac{\beta_c V_f}{RT_f} \right) \frac{dp_{u,c}}{d\tau} \quad (9)$$

$$\dot{n}_{f,h} = - \left(\frac{\beta_h V_f}{RT_f} \right) \frac{dp_{u,h}}{d\tau} \quad (10)$$

式中 $\dot{n}_{u,i,o}$ 、 $\dot{n}_{u,i,n}$ 、 $\dot{n}_{u,i,c}$ 、 $\dot{n}_{u,i,h}$ 分别为进入油箱 O_2 、 N_2 、 CO_2 、 H_2O 的摩尔流量, mol/s; $\dot{n}_{a,o}$ 、 $\dot{n}_{a,n}$ 、 $\dot{n}_{a,c}$ 、 $\dot{n}_{a,h}$ 分别为燃油箱中 O_2 、 N_2 、 CO_2 、 H_2O 与外界环境所交换的摩尔流量, 流入为正, 流出为负, 由压力平衡计算, mol/s; $\dot{n}_{f,o}$ 、 $\dot{n}_{f,n}$ 、 $\dot{n}_{f,c}$ 、 $\dot{n}_{f,h}$ 分别为燃油中 O_2 、 N_2 、 CO_2 、 H_2O 的溶解逸出量, 满足亨利定律, 逸出为正, 溶解为负, mol/s; $\dot{n}_{u,o,o}$ 、 $\dot{n}_{u,o,n}$ 、 $\dot{n}_{u,o,c}$ 、 $\dot{n}_{u,o,h}$ 分别为流出油箱 O_2 、 N_2 、 CO_2 、 H_2O 的摩尔流量, mol/s; V_u 、 V_f 分别为燃油箱气相空间、燃油的体积, m^3 ; R 为气体常数, $8.31 J/(mol \cdot K)$; T_u 、 T_f 为燃油箱气相空间、燃油的温度, K; $\frac{dp_{u,o}}{d\tau}$ 、 $\frac{dp_{u,n}}{d\tau}$ 、 $\frac{dp_{u,c}}{d\tau}$ 、 $\frac{dp_{u,h}}{d\tau}$ 分别为燃油箱中 O_2 、 N_2 、 CO_2 、 H_2O 的压力变化率, Pa/s; β_o 、 β_n 、 β_c 、 β_h 分别为 O_2 、 N_2 、 CO_2 、 H_2O 在燃油中的阿斯特瓦尔德系数。

在惰化过程中, 由于进出油箱的气体量不同, 气体会从油箱中排出或从外界进入油箱。因此, 气体流动状态是从油箱排出还是流入油箱, 必须从物质总量变化来判断。

1) 当流入油箱的气体足够为油箱增压时, 即存在如下关系:

$$\dot{n}_{u,i,total} - \dot{n}_{u,o,total} > \frac{V_u}{RT_u} \dot{p}_t \quad (11)$$

则油箱中的气体向外界等比例排放, 排出气体量满足关系

$$\frac{\dot{n}_{a,o}}{p_{u,o}} = \frac{\dot{n}_{a,n}}{p_{u,n}} = \frac{\dot{n}_{a,c}}{p_{u,c}} = \frac{\dot{n}_{a,h}}{p_{u,h}} \quad (12)$$

2) 当流入油箱的气体不足以为油箱增压时, 即存在如下关系:

$$\dot{n}_{u,i,total} - \dot{n}_{u,o,total} < \frac{V_u}{RT_u} \dot{p}_t \quad (13)$$

则外界气体流入油箱, 流入气体满足

$$\frac{\dot{n}_{a,o}}{x_{a,o}} = \frac{\dot{n}_{a,n}}{x_{a,n}} \quad (14)$$

$$\dot{n}_{a,c} = \dot{n}_{a,h} = 0 \quad (15)$$

同时, 油箱中气体分压力之和与外界环境压

力 p_t 相同, 满足

$$p_t = p_{u,o} + p_{u,n} + p_{u,c} + p_{u,h} + p_{u,f} \quad (16)$$

式中 $\dot{n}_{u,i,total}$ 、 $\dot{n}_{u,o,total}$ 分别为流入、流出油箱气体的总摩尔流量, mol/s; $p_{u,o}$ 、 $p_{u,n}$ 、 $p_{u,c}$ 、 $p_{u,h}$ 、 $p_{u,f}$ 、 p_t 分别为油箱内 O_2 、 N_2 、 CO_2 、 H_2O 、燃油蒸气的分压力及总压, Pa。

3 计算结果

选择某体积为 $1 m^3$ 的典型直升机油箱隔舱, 基于文中第 2 节的系统数学模型, 计算了 RP3 燃油在环境温度分别为 0、20、40 $^{\circ}C$ 下, 系统产水性能随惰化时间的变化关系。

图 2 为油箱气相空间水蒸气体积分数及氧体积分分数随时间的变化, 由于反应器内反应不断产生水, 而冷却器中水不能完全析出, 随着惰化气体冲回油箱, 上部水蒸气体积分数逐渐增大, 且环境温度越高, 气相空间水蒸气体积分数越高。结合图 3 冷却器出口含湿量随时间的变化可见, 由于环境温度不同时, 冷却器出口的混合惰气含湿量相差较大, 且温度越高, 流回油箱惰性气体中水蒸气占比越大。相反的是, 油箱气相空间内氧体积分分数随着惰化的进行逐渐降低, 且环境温度越低, 氧体积分分数下降越快。

催化反应为放热反应, 需利用冷却空气将反应器中的热量带走, 反应器需冷却热量与循环气体体积分数的比值随时间的变化如图 4 所示, 可见, 反应器中所需冷却热量逐渐减少, 这是由于随着惰化的进行, 油箱气相空间氧体积分分数逐渐降低, 反应强度慢慢减弱, 但环境温度高时, 由图 2 知油箱氧体积分分数下降更快, 因此惰化一段时间后, 参与反应的氧气量反而更少, 因此所需冷却热量更低。

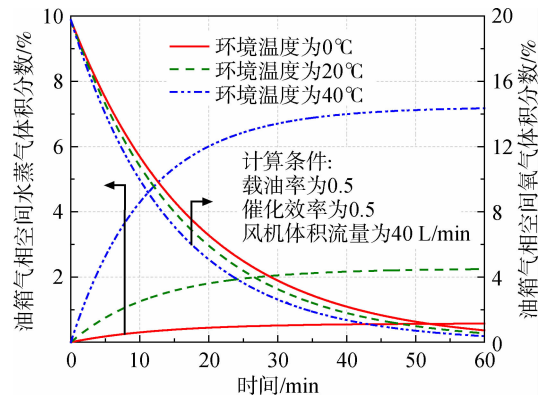


图 2 油箱气相空间水蒸气体积分数随时间的变化

Fig. 2 Variation of water vapor volume fraction with time on ullage

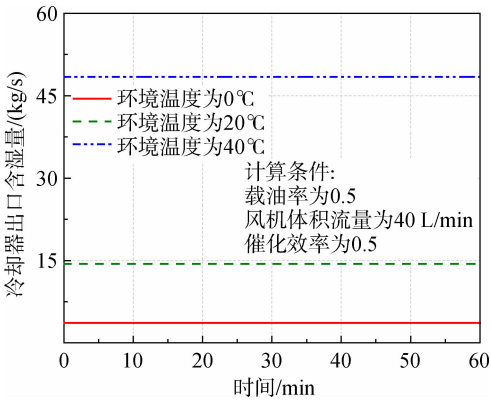


图 3 冷却器出口含湿量随时间的变化

Fig. 3 Variation of moisture content at cooler outlet with time

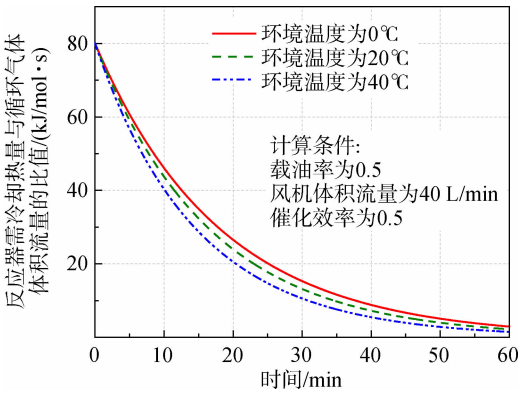


图 4 反应器需冷却热量与循环气体体积流量的比值随时间的变化

Fig. 4 Variation of the ratio of cooling heat required in reactor to circulating volume air flow with time

除了反应器外,冷却器中也需要冷却,为了更好的对比液态水析出对冷却热量的影响,计算得到冷却器需冷却潜热与显热比值随时间的变化,如图 5 所示。可见,刚开始时,液化潜热占冷却热

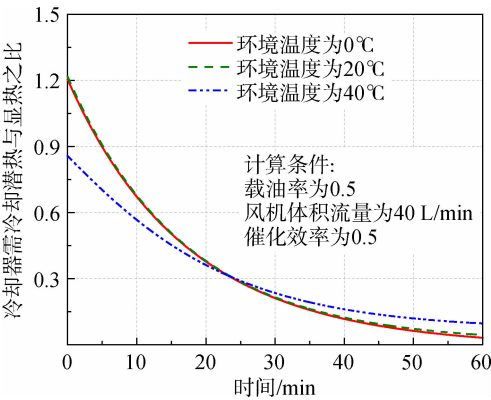


图 5 冷却器需冷却潜热与显热比值随惰化时间的变化

Fig. 5 Variation of the ratio of latent heat to sensible heat required in the cooler with time

量比重较大,随着惰化的进行,反应强度逐渐减弱,生成的水也变少,因此潜热占比逐渐降低。另外,环境温度越低,液态水越容易析出,在氧气充足时,潜热与显热之比越高。

反应器出口的相对湿度可反映反应器中生成水的量,即反应的强弱程度,其随惰化时间的变化如图 6 所示,可以看出,环境温度越高,反应器出口气体相对湿度越高。

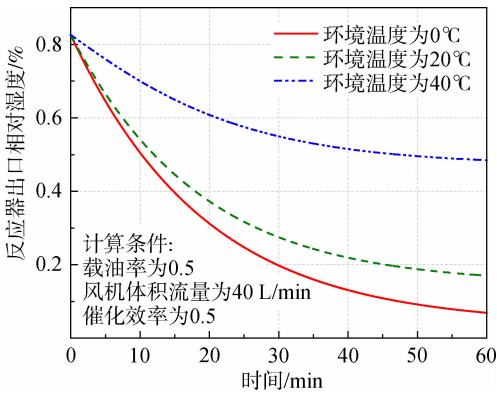


图 6 反应器出口相对湿度随时间的变化

Fig. 6 Variation of relative humidity at the outlet of reactor with time

环境温度不同,冷却器出口气体露点温度及含湿量也有差异,因此冷却器中析出的液态水量不一样,图 7 为冷却器中除水量的变化曲线,可见,环境温度越低,析出水越多,直至油箱气相空间氧气被消耗完,催化反应停止,无水析出。

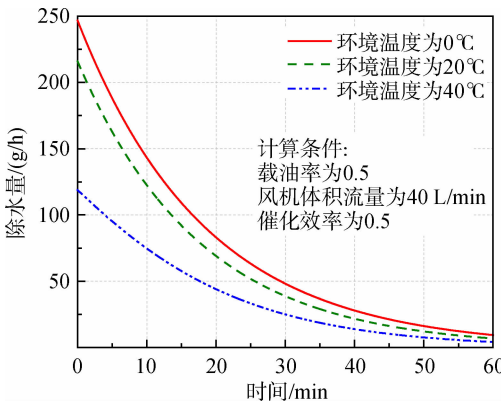


图 7 冷却器中除水量随时间的变化

Fig. 7 Variation of water removal in cooler with time

4 结 论

在建立了耗氧型惰化系统数学模型的基础上,研究分析了环境温度对系统水性能的影响,结论如下:

1) 油箱气相空间水蒸气体积分数随惰化的进行逐渐增加,而氧体积分数逐渐降低,最终均趋于平稳;另外,反应器及冷却器中所需的冷却气体量、反应器出口相对湿度、冷却器中除水量均随惰化的进行逐渐降低。

2) 考虑水析出时,冷却器中所需的冷却气体量较不考虑水析出时差别巨大。

3) 环境温度对系统中水的生成与析出影响较大,环境温度越低,油箱水蒸气体积分数上升越慢,但系统需要的冷却空气量越多且析出的液态水量越大。

参考文献:

[1] LI Jun, YANG Wei, PEI Yang. Vulnerability assessment for fire and explosion suppression measures of aircraft fuel system[J]. Advanced Materials Research, 2012, 510: 64-69.

[2] Aviation Rulemaking Advisory Committee (ARAC). Fuel tank harmonization working group final report[R]. Arlington, VA, USA: Aviation Rulemaking Advisory Committee Executive Committee Meeting, 2001.

[3] LANGTON R, CLARK C, HEWITT M, et al. Aircraft fuel systems[M]. Wiltshire, UK: John Wiley and Sons, 2009.

[4] VINEGAR A, JEPSON G W. Cardiac sensitization thresholds of halon replacement chemicals predicted in humans by physiologically based pharmacokinetic modeling [J]. Risk Analysis, 1996, 16(4): 571-579.

[5] 薛勇,冯诗愚,王澍,等. 一种描述燃油与气体组分传质的频率传质模型[J]. 航空动力学报, 2013, 28(12): 2709-2716.

XUE Yong, FENG Shiyu, WANG Shu, et al. Frequency mass transfer model describing mass transfer between fuel and air[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(12): 2709-2716. (in Chinese)

[6] 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): 1332-1339. (in Chinese)

[7] 邵垒,刘卫华,孙兵,等. 中空纤维膜分离性能实验与预测[J]. 航空动力学报, 2015, 30(4): 800-806.

SHAO Lei, LIU Weihua, SUN Bing, et al. Experiment and prediction of separation performance of hollow fiber membrane[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(4): 800-806. (in Chinese)

[8] SMITH D E. Fuel tank inerting systems for civil aircraft [D]. Fort Collins, Colorado, USA: Colorado State University, 2014.

[9] 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)

[10] CAVAGE W M. The cost of implementing ground-based fuel tank inerting in the commercial fleet[R]. Federal Aviation Administration, DOT/FAA/AR-00/19, 2000.

[11] 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: American Helicopter Society (AHS) 69th Annual Forum, 2013.

[12] CHATAGNER F, PIERRE Y. Method for analyzing the effect of projectile impact on aircraft fuel tank inerting for survivability design[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2016, 81(2): 335-338.

[13] ROBERTSON S, JUNG W, KOENIG D, et al. Development of green on-board inert gas generation system (GOBIGGS) [R]. San Diego: Phyre Technologies Incorporation, 2007.

[14] MORRIS R, MILLER J, LIMAYE S. Fuel deoxygenation and aircraft thermal management[R]. AIAA-2006-4027, 2006.

[15] SUMMER S M. Cold ambient temperature effects on heated fuel tank vapor concentrations [R]. Federal Aviation Administration, DOT/FAA/AR-TN99/93, 2000.

[16] SHAO L, LIU W, LI C, et al. Experimental comparison of fuel scrubbing inerting process using nitrogen and carbon dioxide of aircraft fuel tanks[J]. Fire Technology, 2018, 54(2): 379-394.

[17] LI C, FENG S, SHAO L, et al. Measurement of the diffusion coefficient of water in RP-3 and RP-5 jet fuels using digital holography interferometry[J]. International Journal of Thermophysics, 2018, 39(4): 53-56.

[18] 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. (in Chinese)

[19] 管天麟. 利用 OBIGGS 降低飞机燃油箱内水分[J]. 科技视界, 2015(26): 99-100.

GUAN Tianlin. Water reduction within fuel tanks using OBIGGS[J]. Science and Technology Vision, 2015(26): 99-100. (in Chinese)

[20] 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)

[21] CAI Y, BU X, LIN G, et al. Experimental study of an aircraft fuel tank inerting system [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(2): 394-402.

(编辑:叶青、王碧珺)