

# 飞机燃油氧气析出计算方法研究

## Research of Calculation Method of Oxygen Dissolved in the Fuel Releasing to Ullage

雷延生 / Lei Yansheng

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

### 摘要:

为降低燃油箱发生爆炸的风险,需在油箱中设置抑爆系统。咨询通告规定,要计算燃油箱平均氧气浓度,需考虑燃油中的氧气析出。根据不同高度下空气在燃油中的溶解度平衡关系及空气中氧氮分压关系,得出飞机随飞行高度变化氧气析出的计算方法。

**关键词:** 燃油; 氧气析出; 计算方法

[Abstract] In order to reduce risk of explosion of fuel tank, an inerting system should be install in aircraft. According to Advisory Circular, oxygen dissolved in the fuel releasing to ullage should be considered. This paper gets calculation method of oxygen dissolved in the fuel releasing to ullage according with equilibrium relationship of air inside fuel with different height and pressure relationship of oxygen with nitrogen in air.

[Key words] Fuel; Oxygen Release; Calculation Method

## 0 引言

燃油箱爆炸是航空安全的主要威胁之一。1996年7月17日, TWA800 起飞后, 在爬升时中央翼燃油箱的可燃蒸汽被点燃导致爆炸, 全机 230 名人员全部丧生<sup>[1]</sup>。事后, 美国国家运输安全委员会对事故展开了调查, 发现事故起因是不明点火源引起中央油箱爆炸。

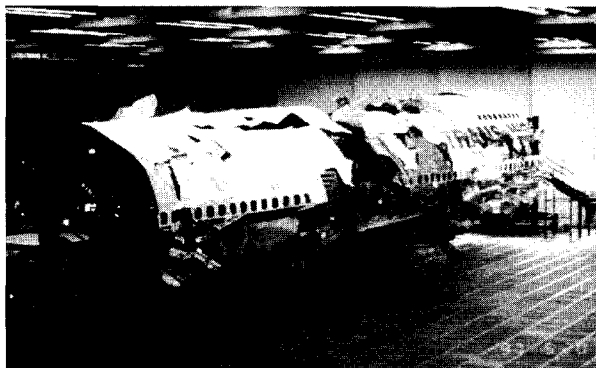


图1 发生爆炸的 TWA800 飞机

为了减少甚至杜绝此类事故的发生, FAA 先后于 2001 年 5 月发布了 FAR25 部第 102 修正案《运输类飞机燃油箱系统设计评审、降低可燃性以及维

护和检查要求》、FAR21 部特别适航条例 SFAR88 《燃油箱系统容错评估的等效安全条款》, 于 2008 年 7 月 21 日正式发布了 FAR25 部第 125 号修正案《降低运输类飞机燃油箱可燃性》。

中国民用航空局于 2011 年 11 月发布 CCAR-25-R4, 对适航条款 25.981 的要求进行充实, 并新发了附录 M 和附录 N。CCAR-25-R4 要求飞机在无法证明油箱为传统的非加热铝制机翼油箱时, 就需要进行蒙特卡洛分析, 并且蒙特卡洛分析所得到的可燃性暴露率不得超过 3%。

为了满足最新适航条款的要求, FAA 发布咨询通告 AC25.981-1C 和 AC25.981-2A, 对民用飞机燃油箱点燃防护提出指导意见。咨询通告指出, 采用降低燃油箱可燃性措施 (FRM) 使燃油箱内氧气浓度维持在一个不可燃的范围内是燃油箱防爆的有效手段。同时提出当燃油箱每个隔间中的平均氧气浓度值在海平面到 10 000ft 高度小于或等于 12% 时; 或者在 10 000ft 高度到 40 000ft 高度平均氧气浓度值小于或等于 12% 到 14.5% 的线性递推值时, 高于 40 000ft 高度小于或等于其线性外推值时, 燃油箱就可被认为是惰化的。咨询通告强调, 计算燃油箱内氧气浓度时, 需将燃油析出的氧气考

虑在内<sup>[2-3]</sup>。

因此,准确计算飞机燃油氧气析出就成为飞机适航取证必须掌握的一项重要技术。

## 1 燃油中氧气溶解的基础知识

飞机燃油中不可避免地溶解有一定的气体,在海平面高度,若溶解充分即达到平衡状态,油箱上部气相空间氧氮比例约为 21/79(忽略微量气体及燃油蒸汽压),而燃油中该比例为 35/65。随着飞机爬升,外界压力将逐渐降低,油箱上部空间氧氮分压也相应降低,燃油和气相空间的氧氮分压将有一定差别,气体会从燃油中逸出。由于氧气比氮气溶解度大,因此氧气的体积逸出量会大于氮气,故油箱上部空间的氧浓度将逐渐升高。

压力变化后的平衡氧浓度受到诸多因素的影响,包括巡航高度、燃油类型、油箱载油量、油箱温度等。

## 2 气体在燃油中的溶解度

当燃油中气体逸出和上部气相空间气体溶解相同时,就达到平衡状态。随着燃油馏分组成加重,粘度、表面张力和密度的增大,气体的溶解度下降。

气体在燃油中的溶解度很低,如果将气体视为溶质,而燃油为溶剂,则可将其视为稀溶液,因此满足拉乌尔(Raoult)和亨利(Henry)定律,用本生(Bunsen)或阿斯特瓦尔德(Astvald)系数来表征气体在燃油中的溶解量大小。本生系数指溶于单位体积燃油中的气体换算成  $t=0^{\circ}\text{C}$  和  $p=101.325\text{kPa}$  时的体积,可表示为

$$B = \frac{V_0}{V_1} = \frac{273 \cdot V_2 \cdot p_2}{V_1(273+t)(p_t - p_v)} \quad (1)$$

式中,  $V_0$  为换算到标准条件下的气体体积,单位  $\text{m}^3$ ;  $V_1$  为饱和温度下燃油的体积,单位  $\text{m}^3$ ;  $V_2$  为饱和温度下被吸收的气体体积,单位  $\text{m}^3$ ;  $p_2$  为释放出的气体压力,单位  $\text{Pa}$ ;  $p_v$  为饱和温度下燃油的饱和蒸汽压,单位  $\text{Pa}$ ;  $p_t$  为油箱总压,单位  $\text{Pa}$ 。

阿斯特瓦尔德系数指单位体积燃油在气体和液体规定的气体分压和温度下处于平衡时溶解的气体体积,可表示为

$$\beta = \frac{p_t - p_v}{p_i} \cdot \frac{2.31(980-d)}{1000} e^{\frac{0.639(700-T)}{T}} \ln(3.333\beta_0) \quad (2)$$

式中,  $T$  为气体和燃油温度,单位  $\text{K}$ ;  $d$  为燃油在

$15^{\circ}\text{C}$  时的密度,单位  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\beta$  是密度为  $850\text{kg}/\text{m}^3$  的燃油在  $15^{\circ}\text{C}$  时的阿斯特瓦尔德系数,氧气为 0.16,氮气为 0.069。

由燃油的物理特性可知,海平面时,燃油饱和蒸汽压与总压相比总是很小,参见式(2)可见,氧氮在燃油中的溶解度主要取决于燃油的密度和所处温度。图 2 给出了几种燃油在不同温度下的阿斯特瓦尔德系数,从图中可见,氧气的溶解度显然高于氮气,而且随着温度上升,氮气的溶解度增加率高于氧气。

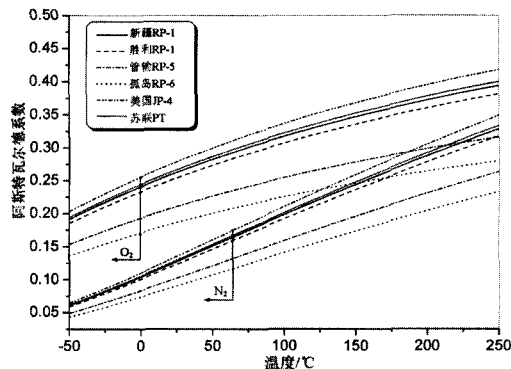


图 2 不同燃油溶解度随温度变化关系

## 3 不同高度下平衡氧浓度数学模型

当油箱燃油和气相空间在某一个压力下处于平衡状态时,改变外界压力,并维持足够长的时间,将在新的压力下达到平衡,该过程可用图 3 表示。如图 3 所示,初始状态时油箱上部气相空间的总压为  $p_{t,1}$ ,因为处于平衡状态,故燃油中氧氮摩尔浓度  $C_{O,1}$  和  $C_{N,1}$  与氧氮分压  $p_{O,1}$  和  $p_{N,1}$  满足亨利定律,即

$$\begin{cases} C_{O,1} = H_O p_{O,1} \\ C_{N,1} = H_N p_{N,1} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $H_O$  和  $H_N$  是氧氮的亨利系数,单位为  $\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{Pa})$ 。

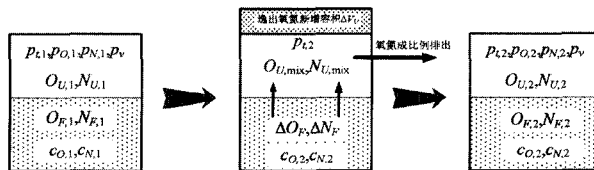


图 3 压力改变后的油箱参数变化示意图

当外界压力减少至  $p_{t,2}$  时,气相空间氧氮分压减小至  $p_{O,2}$  和  $p_{N,2}$ ,显然式(3)不再成立,因此氧氮从燃油中溢出,直至其摩尔浓度达到  $c_{O,2}$  和  $c_{N,2}$ ,从

(下转第 84 页)

的认识,即在建立和供应商坦诚互信的基础上,只要方法得当,分析问题有理、有力、有节,谈判就有无限空间。

### 3 结论

在合同谈判实践中,笔者以为观念的改变应该先行。无论是促进建立紧密沟通的大团队观念还是敢于更换谈判对手的举措,或者是从供应商的角度考虑问题,以及将矛盾分化的理念,其核心都无外乎七点:一是全局观,二是懂得舍小取大,三是知己知彼,四是准确判断,五是进退有维,六是注重细节,七是敢于创新。只有坚持这七点并将其运用于谈判,才能驭敌于无形,不战而屈人。多年的谈判经验让笔者感到,谈判桌前的职业风

范、专业视角、谈判经验以及个性魅力是决定谈判是否高效和成功的重要因素。只要能够以专业的态度对待,并采用适合的谈判策略,本着大团队合作的态度,通过准确判断谈判意图,合理分解商务风险,合同谈判将成为可以任我左右的利刃,无往而不胜。

### 参考文献:

- [1] (美)列维奇,等著.商务谈判[M].第5版.北京:机械工业出版社,2012.
- [2] (美)罗杰·道森.优势谈判——一位王牌谈判大师的制胜秘诀[M].重庆:重庆出版社,2008.
- [3] (美)Amanda Crandell Ju. 优势! 商务谈判英语口语 50 主题[M]. 北京:外文出版社,2009.

(上接第 47 页)

而建立新的平衡关系,在这个过程中,溢出的氧氮气在气相空间中需要增加额外的容积  $\Delta V_U$ , 总的气相空间容积变为  $V_U + \Delta V_U$ , 气相空间的氧氮总质量变为  $O_{U,mix}$  和  $N_{U,mix}$ , 然后气相容积恢复到  $V_U$ , 该过程中氧氮成比例排出。若采用微元计算方法,使每次总压变化量很小,故  $V_U$  也很小,则可得到较真实的氧浓度平衡关系。

压力变化后,燃油中氧氮的析出质量分别为:

$$\Delta O_F = O_{F,1} - O_{F,2} = \frac{\beta_O p_{O,1} V_F}{R_O T_F} - \frac{\beta_O p_{O,2} V_F}{R_O T_F} \quad (4)$$

$$\Delta N_F = N_{F,1} - N_{F,2} = \frac{\beta_N p_{N,1} V_F}{R_N T_F} - \frac{\beta_N p_{N,2} V_F}{R_N T_F} \quad (5)$$

式中,  $V_F$  为燃油体积,单位  $m^3$ ;  $R_O$ 、 $R_N$  为氧氮气体摩尔常数,单位  $J/kgK$ ;  $T_F$  为燃油温度,单位  $K$ 。

新的压力下,气相空间氧氮质量为:

$$O_{U,mix} = O_{U,1} + \Delta O_F = \frac{p_{O,1} V_U}{R_O T_U} + \frac{\beta_O V_F}{R_O T_F} (p_{O,1} - p_{O,2})$$

$$N_{U,mix} = N_{U,1} + \Delta N_F = \frac{p_{N,1} V_U}{R_N T_U} + \frac{\beta_N V_F}{R_N T_F} (p_{N,1} - p_{N,2})$$

式中,  $V_U$  为气相空间体积,单位  $m^3$ ;  $T_U$  为气相空间温度,单位  $K$ 。

由于氧氮成比例排出,因此新压力下氧氮分压比应该与气相空间氧氮摩尔比相同,即

$$\frac{O_{U,mix}/R_O}{N_{U,mix}/R_N} = \frac{O_{U,2}/R_O}{N_{U,2}/R_N} = \frac{p_{O,2}}{p_{N,2}} \quad (6)$$

初始和终了情况下,总压与分压的关系为:

$$p_{i,1} = p_{O,1} + p_{N,1} + p_v \quad (7)$$

$$p_{i,2} = p_{O,2} + p_{N,2} + p_v \quad (8)$$

将式(4)、(5)、(6)和(7)代入式(8)并化简可得:

$$\frac{p_{O,1}(V_U + \beta_O V_F) - \beta_O p_{O,2} V_F}{(p_{i,1} - p_{O,1})(V_U + \beta_N V_F) - \beta_N (p_{i,2} - p_{O,2} - p_v) V_F} = \frac{p_{O,2}}{(p_{i,2} - p_{O,2} - p_v)} \quad (9)$$

令

$$\begin{cases} A = V_F(\beta_O - \beta_N) \\ B = (p_v - p_{i,1})(V_U + V_F \beta_N) \\ \quad + V_F(p_{i,2} - p_v + p_{O,1})(\beta_N - \beta_O) \\ C = p_{O,1}(p_{i,2} - p_v)(V_U + V_F \beta_O) \end{cases} \quad (10)$$

则式(9)可简化为:

$$A p_{O,2}^2 + B p_{O,2} + C = 0 \quad (11)$$

### 4 结论

本文根据不同高度下空气在燃油中的溶解度平衡关系及空气中氧氮分压关系,得出飞机随飞行高度变化氧气析出的计算公式,该计算公式可以为适航取证分析油箱氧气析出提供有效支持。

### 参考文献:

- [1] Michael Burns, William M. Savage, Richard Hill. Flight-testing of the FAA Onboard Inert Gas Generation System on An airbus A320[R]. DOT/FAA/AR-03/58, June 2004.
- [2] AC25.981-1C Fuel Tank Ignition Source Prevention Guidelines[R]. December 2008.
- [3] AC25.981-2A Fuel Tank Flammability Reduction Means [R]. December 2008.