

# Research on the Influence of Fuel System Anti-Icing Agent on Water Solubility in Different Jet Fuels

Kai Chen<sup>1</sup>, Hai Xiang<sup>1</sup>, Ting Sun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The Second Research Institute of CAAC, Chengdu Sichuan

<sup>2</sup>School of Chemistry and Materials Science, Sichuan Normal University, Chengdu Sichuan

Email: [chenkai@fcc.org.cn](mailto:chenkai@fcc.org.cn)

Received: Aug. 5<sup>th</sup>, 2015; accepted: Aug. 21<sup>st</sup>, 2015; published: Aug. 28<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

The solubility of water in the jet fuel decreases as temperature decreases. The free water precipitating out from jet fuel can be easily crystalized and adding fuel system anti-icing agent could effectively increase water solubility at the same temperature. Research on the influence of fuel system anti-icing agent on water solubility in different jet fuels is very important for water management in fuel system of the aircraft. The solubility of water in No.3 jet fuel, pure synthesized hydrocarbon jet fuel and 50:50 volume ratio jet fuel containing synthesized hydrocarbon is carefully measured. The effects of addition of DiEGME and TriEGME into jet fuel on water solubility are also studied. A complete discussion is carried out on the impact of concentration of anti-icing agent on improving water solubility in jet fuel. The relationship between temperature and water solubility in jet fuel with different anti-icing agents is also built in this paper.

## Keywords

Fuel System Anti-Icing Agent, Solubility, Jet Fuel, Jet Fuel Containing Synthesized Hydrocarbon

---

# 燃油系统防冰剂对水在不同喷气燃料中溶解度影响研究

陈 凯<sup>1</sup>, 向 海<sup>1</sup>, 孙 婷<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国民用航空总局第二研究所, 四川 成都

<sup>2</sup>四川师范大学化学与材料科学学院, 四川 成都

Email: [chenkai@fccc.org.cn](mailto:chenkai@fccc.org.cn)

收稿日期: 2015年8月5日; 录用日期: 2015年8月21日; 发布日期: 2015年8月28日

## 摘要

水在喷气燃料中的溶解度随温度的降低而降低, 析出的微量水极易形成冰晶, 而在喷气燃料中加入燃油系统防冰剂能有效增加水在相同温度下的溶解度。研究燃油系统防冰剂对水在不同喷气燃料中溶解度的影响对加强飞机燃油系统水管理具有重要作用。项目对水在3号喷气燃料、纯合成烃喷气燃料及50:50体积比含合成烃喷气燃料中的溶解度进行了测量, 考察了二乙二醇甲醚及三乙二醇甲醚防冰剂的加入对水在上述三种燃料中溶解度的增强效果, 同时对防冰剂加入浓度对提高水在燃料中溶解度的作用进行了探讨, 建立了在3号喷气燃料中加入不同种类的防冰剂后, 水在其中溶解度与温度的关系。

## 关键词

燃油系统防冰剂, 溶解度, 喷气燃料, 含合成烃喷气燃料

## 1. 引言

航空喷气燃料在炼制、储存、运输及加注过程中受内部及外部因素影响将不可避免的混入少量水分。飞机在起飞过程中, 外界温度的降低将导致水在喷气燃料中溶解度的降低, 从而使喷气燃料中的溶解水转变成为自由水析出。万米高空的低温将使这些分散在油料中的自由水凝结成冰, 如不能及时有效将其移除, 这些冰粒将堆积成块引发油滤及输油管路的堵塞, 最终造成燃油系统失效从而无法给发动机正常供油, 引发飞行事故[1] [2]。因此, 测量水在不同温度下在喷气燃料中的溶解度对计算飞机在飞行过程中可能析出的自由水的量以及掌握飞行过程结冰量具有重要意义。

水在喷气燃料中的溶解度与燃料组成、燃料温度及燃料储罐上方水蒸气分压有关。当储罐上方气体完全被水蒸气所饱和, 平衡状态下, 溶解在喷气燃料中的水即为在该温度下水在喷气燃料中的最大溶解量。当喷气燃料上方气体的相对湿度小于 100%时, 燃料中水的溶解量将低于在饱和状态下的溶解量[3]。为防止在低温下自由水在燃料中的结晶, 在喷气燃料中加入防冰剂是增加水在相同温度下在喷气燃料中的溶解量的有效手段。燃油系统防冰剂多为醚类化合物, 具有亲水及亲油双重性质, 因与水形成氢键增大了燃料对水的溶解度, 使燃料对水的溶解由可逆过程转变为不可逆过程[4]-[6]。尽管目前已经积累了大量的关于水在不同温度下在传统 3 号喷气燃料中的溶解度数据[7]-[10], 然而, 燃油系统防冰剂的加入对水在喷气燃料中溶解度的影响尚未知晓, 这就致使飞机设计制造者无法对防冰剂的加入对飞机飞行过程中自由水析出量的改变进行精确评估。研究燃油系统防冰剂对水在喷气燃料中溶解度的影响对优化飞机设计、增强飞行过程安全性具有重大意义。同时, 含合成烃的航空喷气燃料等新型航空燃料的出现也使得有必要重新对水在不同燃料中的溶解度进行测试。本项目首先对水在低温条件下在不同喷气燃料中的溶解度进行了测试, 然后深入研究了防冰剂种类、防冰剂加入浓度等对水在传统喷气燃料、含合成烃喷气燃料及纯合成烃燃料中溶解度的影响, 项目的完成为燃油系统防冰剂在民航客机上的应用推广提供了基础性数据。

## 2. 实验部分

### 2.1. 油样准备

项目分别测量了水在不同温度下在 3 号喷气燃料、纯合成烃喷气燃料及 50:50 体积比的含合成烃喷气燃料中的溶解度。3 号喷气燃料由中石化镇海炼厂提供，纯合成烃喷气燃料由中石化杭州炼厂提供，而 50:50 体积比的含合成烃喷气燃料由上述两种喷气燃料混合制备而成。其中，根据国标 GB/T 11132-2008 “液体石油产品烃类的测定 - 荧光指示剂吸附法”对上述 3 种喷气燃料测试结果显示 3 号喷气燃料芳烃体积含量为 17.1%，烯烃体积含量为 0.6%，50:50 体积比的含合成烃喷气燃料芳烃体积含量为 8.5%，烯烃体积含量为 0.3%。根据美国材料测试协会标准 ASTM D2425“质谱法测定中间馏分中烃类的试验方法”及 D5291 “仪器法测定石油产品及润滑油碳、氢、氮含量的试验方法”对纯合成烃喷气燃料的检测结果表明纯合成烃燃料中环烷烃、芳烃、链烷烃质量分数含量分别为 2.8%，0 及 97.2%，碳氢含量质量分数为 99.87%。三种油料的部分性质如表 1 所示。

### 2.2. 试验装置

燃料的冷却以及与水的平衡饱和在平衡槽中进行，其装置图如图 1 所示。该装置由一个外部玻璃容器和内部玻管组成，内部玻管上方用橡胶塞封闭。玻管内部管壁上方装有一个特别的盛水容器，以保证内管燃料上方气体被水蒸气所饱和。外部玻璃容器与内部玻管之间充满了冷凝剂乙醇，以保证试验进行过程中玻管内部油料温度与上方气体温度的均匀一致。实验进行前，将 100 mL 的油样预先装入内部玻管中，同时，将蒸馏水被置于内部玻管上方盛水容器中。其后，将玻管用橡皮塞密封，将其置于装有冷凝剂的外部烧杯中，开启磁力搅拌器，使油料在试管内得以充分搅拌。大约一小时后，燃料与上方水蒸气达到该温度下的平衡，利用针筒注射器抽取少量油样进行分析，即可得到在该温度下水在燃料中的溶解度。实验过程中，冷凝剂自下而上流动，并以 10°C/h 的冷凝速率对燃料进行冷却。燃料在充分搅拌的情况下，溶解水在温度降低的情况下将自动析出并挥发至玻璃试管上方，整个过程燃料始终保持清澈透明，无悬浮水析出。当达到指定冷凝温度后，燃料温度始终维持在 0.1°C 误差范围以内，同时利用针筒注射器

**Table 1.** Physical and chemical properties of different jet fuel

**表 1.** 不同喷气燃料的物理化学性质

物化性质	测试方法	3 号喷气燃料	纯合成烃燃料	含合成烃喷气燃料
芳烃含量, % (体积分数)		17.1	0	8.5
烯烃含量, % (体积分数)		0.6	N/A	0.3
总硫含量, % (质量分数)		0.0726	N/A	0.0379
馏程	GB/T6536			
初馏点, °C		159.4	N/A	160.7
10%回收温度, °C		178.6	194.1	184.9
20%回收温度, °C		186.2	N/A	195.7
50%回收温度, °C		201.2	251.8	223.8
90%回收温度, °C		232.4	271.1	268.9
终馏点, °C		251.0	278.4	279.4
密度(20°C), kg/m <sup>3</sup>	GB/T 1884	800.3	767.7(15°C)	781.9
冰点, °C	GB/T 2430	-60.0	-59.3	-60.0

快速抽样进行分析。

### 2.3. 水在燃料中溶解度测试

实验对水在燃料中溶解度的测试完全依照美国材料测试协会标准 ASTM D6304 “卡尔菲休库伦法测定水在石油产品、润滑油及添加剂中含量的标准测试方法”进行。项目利用 831 KF Coulometer (瑞士万通)库伦法卡尔菲休水分测定仪对 取样油样的溶解水进行测量。卡尔菲休试剂由梅特勒 - 托利多公司提供。滴定过程中，当伴随着电流突然增加的出现，则认为达到滴定终点。

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 水在不同喷气燃料中的溶解度测量

项目首先考察了水在 3 号喷气燃料、纯合成烃喷气燃料及 50:50 体积比含合成烃航空喷气燃料中溶解度随温度变化的情况，如图 2 所示。其中，参照油样是指美国航空油料性质手册所提供的指定油样。

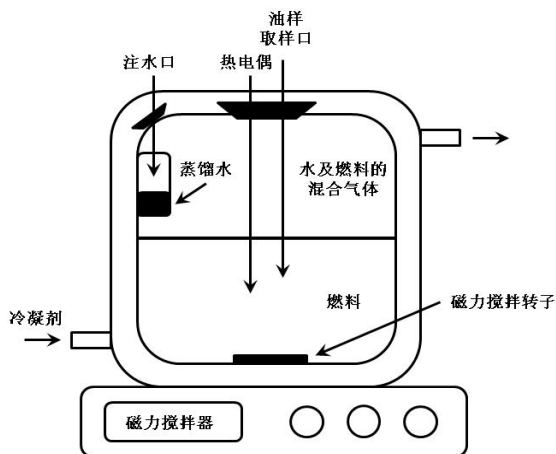


Figure 1. Setup for fuel solubility test

图 1. 燃料溶解度测试装置图

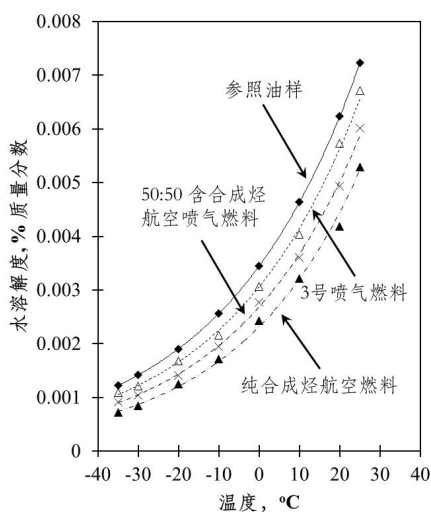


Figure 2. Water solubility in different type of jet fuels

图 2. 水在不同喷气燃料中的溶解度

油样中烷烃、芳烃及烯烃的体积含量分别为 74.6%，23.9%，1.5%。由实验结果可知，无论油样组成如何，随温度的降低，水在燃料中的溶解度呈指数形式下降。以 3 号喷气燃料为例，20℃时，水在其中的溶解度质量分数为 0.00573%，当温度为-20℃时，水在其中的溶解度质量分数仅为 0.00168%。相同温度下，水在参照油样中的溶解度最高，3 号喷气燃料次之，在纯合成烃航空燃料中溶解度最低。这与油料的组成有关。有研究表明，在碳 7 至碳 12 范围内，水在直链烷烃中的溶解焓及溶解度与碳数无关，为  $34.9 \pm 1.1$  kJ/mol，在芳烃和烯烃中的溶解焓比在相同碳数的直链烷烃中的溶解焓分别低 11 kJ/mol 和 2 kJ/mol。25℃条件下，水在碳 5 到碳 9 烷烃中的溶解度为 70 ppm 到 100 ppm 质量分数，而在芳烃中溶解度为 430 ppm 到 690 ppm 质量分数[1]。这主要是因为芳烃化合物因具有特殊的六元环，使得  $\pi$  电子云得以均匀分布。而水分子因氢氧原子的电负差而具有很强的偶极性。同烷烃及环烷烃化合物相比，水分子与芳烃化合物相互间形成的静电吸引力增强了水在芳烃中的溶解度。比较上述四种油样，其中，参照油料的芳烃体积分数最高 23.9%，3 号喷气燃料次之 17.1%，50:50 体积比含合成烃航空喷气燃料再次之 8.5%，而纯合成烃喷气燃料中则无芳烃，这也就造成了在相同温度下水在 4 种油样中溶解度呈逐步减小的趋势。

### 3.2. 防冰剂对水在喷气燃料中溶解度影响

在燃料中加入燃油系统防冰剂能有效增加水在燃料中的溶解度，使燃料对水的溶解由可逆过程变为不可逆过程，防止水析出。图 3、图 4 分别比较了加入防冰剂前后水在 3 号喷气燃料、纯合成烃中溶解度随温度的变化。实验选取的燃油系统防冰剂为二乙二醇单甲醚及三乙二醇单甲醚。二乙二醇单甲醚为现在各国适航当局批准使用的飞机燃油系统防冰剂，尽管其在军用飞机上成功使用二十余年，但近年来发现的飞机油箱内部涂层脱落、油箱金属材料腐蚀均证实与二乙二醇单甲醚相关，因此，二乙二醇单甲醚大有被三乙二醇单甲醚取代的趋势。项目的对比研究将为三乙二醇单甲醚的应用提供有用的参考数据。由图 3 及图 4 的比较可知，无论油品组成如何，加入燃油系统防冰剂不同程度的增加了燃料对水的溶解度。-20℃条件下，无防冰剂时，水在 3 号喷气燃料及纯合成烃喷气燃料中的溶解度质量分数分别为 0.00168%，0.00125%，燃油中加入 0.2% 体积分数的二乙二醇甲醚或三乙二醇甲醚后，水在 3 号喷气燃料及纯合成烃喷气燃料中的溶解度质量分数分别增加为 0.00443%，0.00418%，0.00318%，0.00298%。尽管水在含二乙二醇单甲醚的燃料中的溶解度略高于其在含三乙二醇单甲醚燃料中的溶解度，但同水在

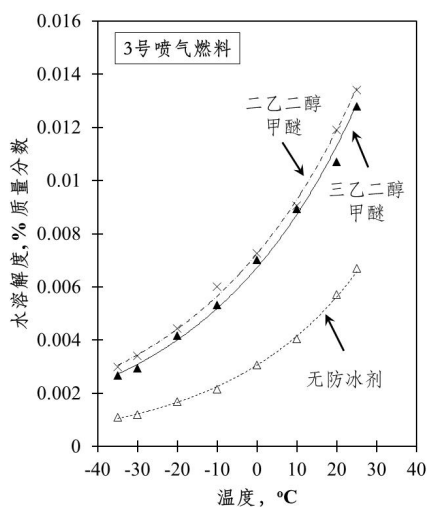


Figure 3. Impact of icing inhibitor on water solubility in jet fuel

图 3. 防冰剂对水在喷气燃料中溶解度影响

未加入燃油系统防冰剂燃料中的溶解度相比，三乙二醇加醚的加入有效抑制了水在低温条件下从燃料中的析出。加入燃油系统防冰剂能有效增加水在燃料中的溶解度主要是因为防冰剂多为醚醇类化合物，化合物的羟基具有良好的亲水性，能与燃料中微量水缔合形成氢键，而防冰剂的烃基具有亲油性，从而增大了水在燃料中的溶解度。

### 3.3. 防冰剂浓度与水在喷气燃料中溶解度关系

图 5 展示了防冰剂浓度对水在不同温度下对其 3 号喷气燃料中溶解度的影响。由图可知，随浓度的增加，相同温度下水在燃料中的溶解度迅速增加。在 $-20^{\circ}\text{C}$ ，水在不含三乙二醇甲醚及含 0.10%，0.15% 及 0.20% 体积浓度的三乙二醇甲醚喷气燃料中的溶解度质量分数分别为 0.00168%，0.00322%，0.00343%，

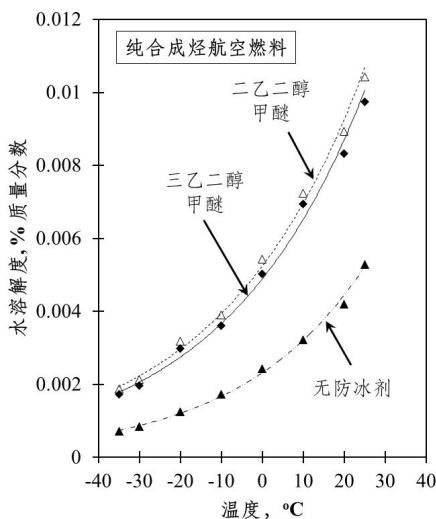


Figure 4. Impact of icing inhibitor on water solubility in synthesized hydrocarbon

图 4. 防冰剂对水在纯合成烃中溶解度影响

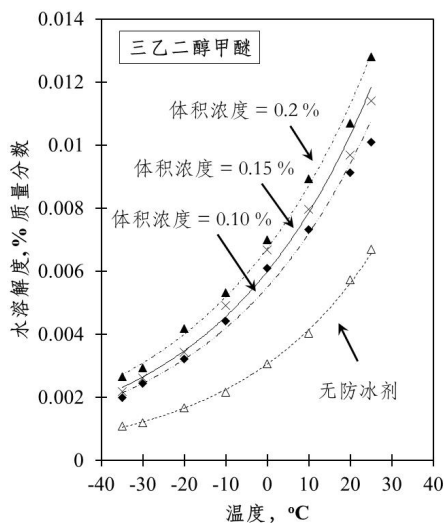


Figure 5. Impact of icing inhibitor concentration on water solubility in jet fuel

图 5. 防冰剂浓度对水在喷气燃料中溶解度影响



0.00418%。然而，成倍增加防冰剂的浓度并未能导致水在燃料中溶解度的成倍增加。水在燃料中含三乙二醇单甲醚体积浓度为0.20%时的溶解度仅为在燃料中含三乙二醇单甲醚体积浓度为0.10%时的1.298倍。这也说明加大防冰剂浓度仅能有限的增加水在其中的溶解度。

为精确计算温度降低时水从3号喷气燃料中的析出量，项目建立了水的溶解度与温度的函数关系。项目假定水蒸气为理想气体，3号喷气燃料为理想溶液，则水在燃料中的溶解度与温度应满足下述关系：

$$d \ln c / dT = \Delta H_s / RT^2 \quad (1)$$

其中， $c$  为溶解度， $H_s$  为溶解焓。对上述方程积分即可得：

$$\ln C = A - B/T \quad (2)$$

其中  $A = \Delta S_s / R$ ， $B = \Delta H_s / R$ 。 $\Delta S_s$ ， $\Delta H_s$  分别为溶解熵及溶解焓， $R$  为气体常数。

图6为水在无防冰剂及含0.20%体积浓度三乙二醇甲醚及0.2%体积浓度二乙二醇甲醚喷气燃料中溶解度对数与温度倒数线性关系图。实验结果与计算结果得以很好的拟合。值得提出是在0℃时，线性回归曲线有明显的拐点出现。在0℃出现的线性回归曲线斜率的变化主要是因为在冰-水相变化时出现的油水系统的焓和熵的不连续变化。

#### 4. 结论

项目首先对水在3号喷气燃料、纯合成烃喷气燃料及50:50体积比含合成烃喷气燃料中的溶解度进行了测量，结果表明，随温度的降低水在三种不同燃料中的溶解度呈指数形式下降，随燃料中芳烃含量的增加，水在燃料中的溶解度逐步增大。这主要是因为极性水分子与芳烃化合物之间的静电作用力有关。在三种燃料中加入防冰剂均能有效提高水在相同温度下在燃料中的溶解度，避免了低温下自由水的析出，且三乙二醇单甲醚与二乙二醇单甲醚具有相近的增强水分子在燃料中溶解度的性能。醇醚类化合物的亲

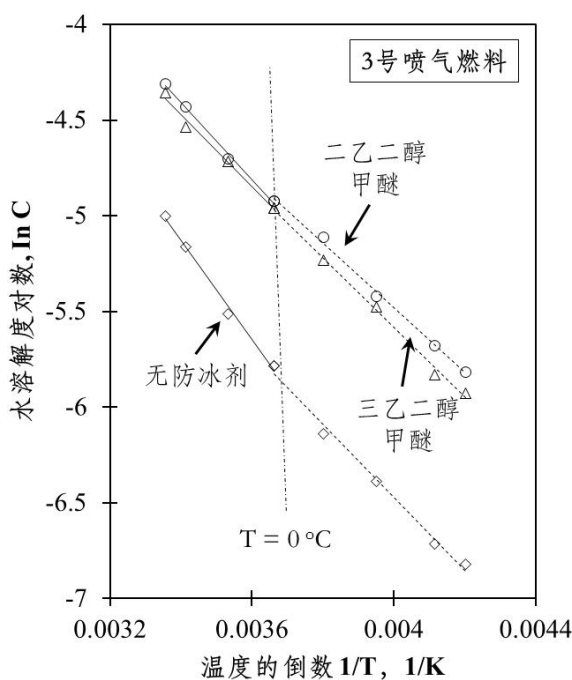


Figure 6. Linear regression curve for water solubility in jet fuel containing icing inhibitor

图6. 水在含防冰剂喷气燃料中溶解度线性回归曲线

水亲油双重性质促进了水在燃料中的溶解度。增加防冰剂浓度能有效增大水在燃料中的溶解度，但成倍增加防冰剂的浓度并未能导致水在燃料中溶解度的成倍增加。此外，水在燃料中的溶解度的对数与温度的倒数呈线性关系，且在 0℃ 出现斜率的突变，这主要是因为该温度下出现的冰水相转化导致的溶解焓和溶解熵的不连续变化所致。

## 基金项目

国家自然科学基金项目“新型环境友好飞机燃油系统防冰剂的研究”(U1433101)。

## 参考文献 (References)

- [1] Zambrana, S., Repetto, S.L., Lawson, C.P. and Lam, J.K.-W. (2013) Behaviour of water in jet fuel—A literature review. *Progress in Aerospace Sciences*, **60**, 35-44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.paerosci.2012.12.001>
- [2] Lam, J., Carpenter, M., Williams, C. and Hetherington, J. (2014) Water solubility characteristics of current aviation jet fuels. *Fuel*, **133**, 26-33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2014.04.091>
- [3] Lam, J., Hetherington, J. and Carpenter, M. (2013) Ice growth in aviation jet fuel. *Fuel*, **113**, 402-406. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.048>
- [4] 刘多强, 关绍春, 孙建章, 韩松霖 (2009) 防冰剂在喷气燃料中的应用. *石油化工应用*, **5**, 1-4.
- [5] Taylor, S. (2008) Component interactions in jet fuels: Fuel system icing inhibitor additive. *Energy Fuels*, **22**, 2396-2404. <http://dx.doi.org/10.1021/ef800090p>
- [6] Repetto, S., Costello, J., Costello, B. and Ratcliffe, N. (2013) The development of novel fuel dehydrating icing inhibitors. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, **6**, 553-563. <http://dx.doi.org/10.4271/2013-01-2169>
- [7] Naya, S., Cao, R., Fernandez, M., Saavedra, J., Brage, H. and Cancelo, C. (2013) Estimating water and solid impurities in jet fuel from ISO codes. *Energy Fuels*, **27**, 7858-7867. <http://dx.doi.org/10.1021/ef401378z>
- [8] Murray, J.B., Broadley, S.L. and Morris, J.G. (2011) Supercooling of water droplets in jet aviation fuel. *Fuel*, **90**, 433-435. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2010.08.018>
- [9] Raikos, V., Vamvakas, S.S. and Sevastos, D. (2012) Water content, temperature and biocide effects on the growth kinetics of bacteria isolated from JP-8 aviation fuel storage tanks. *Fuel*, **93**, 559-566. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2011.10.028>
- [10] Dunn, P.F., Thomas, F.O., Leighton, J.B. and Lv, D. (2011) Determination of Henry's law constant and the diffusion and polytropic coefficients of air in aviation fuel. *Fuel*, **90**, 1257-1263. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2010.11.039>