

# 低压环境下可燃液体火灾危险性的实验研究

丁超,周德闯,姚嘉杰,汪箭

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室,安徽合肥 230026)

**摘要:**闪点是评价可燃液体火灾危险性的主要指标之一,同时也是可燃液体的重要物性.通过模拟低压环境,选取两种纯净物(正癸烷、正己醇)和两种混合物(0#柴油、航空煤油)在35,45,55,65,75,85,95和101 kPa 8个不同压力下进行闭口杯闪点连续测量实验.结果表明:在模拟低压环境中,闪点与压力存在非线性的对应关系,利用先前研究的理论进行分析验证,模拟低压情况与真实情况符合较好.在此基础上,结合火灾危险性的分类标准,给出可燃液体的火灾危险性等级随环境压力变化的规律.研究结果可为高原环境中燃油的安全生产、储存、运输和使用,以及航空防火安全提供科学依据.

**关键词:** 低压舱;压力;可燃液体;闪点;火灾危险性

**中图分类号:** TK16 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.0253-2778.2014.08.011

**引用格式:** Ding Chao, Zhou Dechuang, Yao Jiajie, et al. Experimental study and hazard analysis on flammable liquids in an altitude chamber[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2014, 44(8):704-708.

丁超,周德闯,姚嘉杰,等. 低压环境下可燃液体火灾危险性的实验研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2014,44(8):704-708.

## Experimental study and hazard analysis on flammable liquids in an altitude chamber

DING Chao, ZHOU Dechuang, YAO Jiajie, WANG Jian

(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** Flash point, one of the main indicators to evaluate the fire hazard, is an important physical property of the flammable liquids. Using a portable flash point measuring apparatus, a series of measurements of two mono compound fuels (n-decane and n-hexanol) and two mixture compound fuels (0# diesel and Jet A) at different pressures were carried out in an altitude chamber at 35, 45, 55, 65, 75, 85, 95 and 101 kPa. The experiment results show that the flash point is in a non-linear relationship with the pressure. And using the theoretical analyses from previous studies, it can be verified that analog low pressure is in good agreement with the real situation. Based on the classification codes in China, the fire hazard class of the flammable liquids at different pressures has been given. The results can provide a scientific basis for the production, storage, transport and use of fuel in the plateau environment, as well as fire safety in aviation.

**Key words:** altitude chamber; pressure; flammable liquid; flash point; fire hazard

收稿日期:2014-03-27;修回日期:2014-05-20

基金项目:国家自然科学基金(51376172),浙江省安全生产科学研究所开放课题(GC-2011-005)资助.

作者简介:丁超,男,1988年生,博士生.研究方向:特殊环境下可燃液体危险性. E-mail: chalnity@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:汪箭,博士/教授. E-mail: wangji@ustc.edu.cn

## 0 引言

闪点,是指在规定的条件下,试验火焰引起可燃液体挥发出的蒸气着火,并使火焰蔓延至液体表面的最低温度,通常被作为判断可燃液体火灾危险性的一个重要指标.在航空安全方面,因航空燃油箱爆炸所引起的飞机失事占了近15%的比例(统计数据源自网站 www.planecrashinfo.com).1996年美国环球航空公司的TWA800航班在飞行过程中于海拔4206 m发生爆炸事故,据鉴定发现该事故发生的主要原因是燃油箱遇不明火源点燃发生爆炸<sup>[1]</sup>.飞机起飞后,海拔及环境压力变化如图1所示.

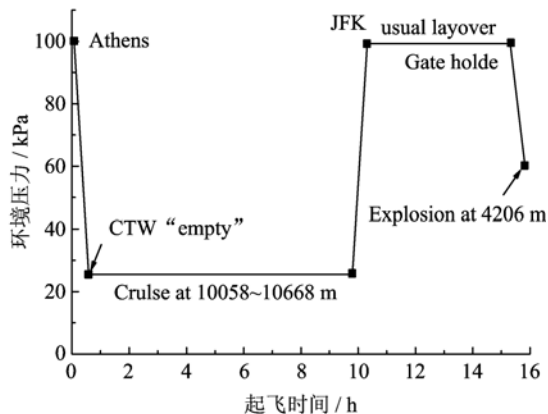


图1 TWA800飞行过程中海拔高度及压力变化

Fig. 1 Nominal fuel pressure and height history for TWA800

另一方面,市场对燃料的需求增长迅速,导致世界成品油管道运输规模不断扩大,而部分管道会横跨高海拔的高原环境,如格尔木至拉萨的成品油运输管道、大西南成品油运输管道等,油品运输安全问题也越来越受到专家学者的高度重视.因此,研究高原环境中可燃液体闪点随压力(海拔高度)的变化规律,以及其火灾危险性等级评估和分析,对飞机防火安全设计以及油品在高原环境的生产、储存、运输和使用安全均有着重要的科学价值和实际意义.

目前,在闪点变化规律的研究方面,国内外学者在蒸气压、燃烧极限、点火能、分子结构等物化性质与闪点的相关性上取得了一定的进展. Shepherd等<sup>[2]</sup>根据Le Chatelier<sup>[3]</sup>理论,分析了燃料与空气质量比、可燃液体的蒸气压、质量运输速率以及海拔对闪点的影响. Lee等<sup>[4]</sup>发现最小点火温度与航空煤油的闪点呈线性关系.另外,关于闪点与海拔高度关

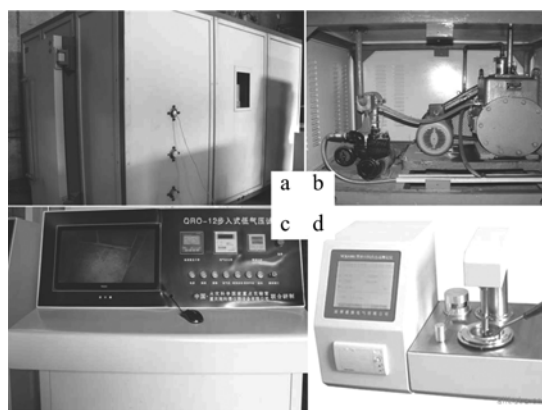
系的研究,目前主要通过低压舱模拟高原环境. Nestor等<sup>[5]</sup>发现随着海拔高度的升高闪点呈线性下降关系. Ding等<sup>[6]</sup>通过在西藏高海拔地开展实验发现,可燃液体闪点与海拔的关系为非线性.

本文利用低压舱来模拟低压环境,在35,45,55,65,75,85,95和101 kPa 8个不同环境压力下,进行两种纯净物(正癸烷、正己醇)和两种混合物(0#柴油、航空煤油)闭口杯闪点测量实验,研究闪点与压力(海拔高度)的关系,并利用先前研究的理论进行分析验证,在此基础上给出不同压力条件下其火灾危险性等级.

## 1 实验

### 1.1 实验设计

实验中采用中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室的低压实验舱模拟低压环境.它由实验腔体、抽气装置以及主控制台三大部分组成,如图2(a)~(c)所示.



(a) 低压舱舱体;(b) 抽气装置;(c) 主控制台;(d) 闪点仪

图2 实验装置图

Fig. 2 Experimental setup and instruments

实验中采用的测量仪器为淄博盛康电气有限公司研制的SCBS303型闭口闪点测试仪,如图2(d)所示.相关设备的主要性能参数如表1所示.

表1 仪器主要性能参数

Tab. 1 Main performance parameters of the instruments

低压舱	舱体	3.0×2.0×2.0 m	抽气功率	3 kW
	压力范围	30~101 kPa	抽气流量	30 L/s
SCBS303	范围	-59.9~299.9 °C	点火周期	3~5 s
	分辨率	0.1 °C	功率	50 W
闪点仪	准确度	符合 GB/T 261	加热功率	400 W

实验在35~101 kPa范围内选取35,45,55,

表 2 不同环境压力下可燃液体闪点测量值

Tab. 2 The flammable liquids' flash point measured at different pressure

工况	压力 /kPa	闪点/°C											
		正癸烷		正己醇		0#柴油		航空煤油					
1	101	58.2	58.5	57.6	65.2	66.0	66.7	77.2	78.0	78.5	55.2	54.5	55.6
2	95	55.5	55.8	56.4	63.3	63.9	63.9	75.9	75.2	75.1	52.8	53.0	52.3
3	85	53.6	54.0	55.4	61.4	60.4	62.5	70.5	71.2	71.0	51.0	50.5	50.3
4	75	53.0	52.4	53.3	59.0	60.0	58.7	68.0	67.8	68.2	47.0	48.0	47.5
5	65	51.0	50.0	50.1	56.4	55.4	56.0	64.7	65.0	64.7	45.0	44.2	44.3
6	55	47.6	48.0	48.0	51.7	51.3	52.0	63.7	63.0	64.4	42.8	43.0	41.7
7	45	45.5	44.0	45.2	46.3	47.0	46.2	58.2	58.0	58.1	37.0	38.2	37.6
8	35	41.2	42.3	40.4	41.2	41.0	42.2	52.6	52.0	52.3	31.7	32.0	31.7

65,75,85,95 和 101 kPa 8 个不同压力点,模拟的海拔高度范围约为 0~9 000 m. 在各个压力测试点,选取 4 种可燃性液体(纯净物:正癸烷、正己醇;混合物:0#柴油、航空煤油)进行闪点的连续测量,研究闪点与压力的关系.

### 1.2 实验结果及分析

本次实验中每个压力点 4 种试样均进行 3 次重复测定,并记录数据. 不同环境压力下,4 种可燃液体闭口杯闪点测量结果如表 2 所示.

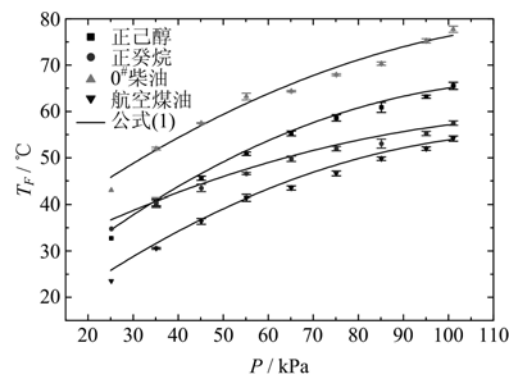
通过对比重复实验结果,每组工况的 3 次重复实验的数据重复性满足标准 GB/T 261-2008<sup>[7]</sup> 规定的要求. 取 3 次实验的平均值进行对比分析,图 3 给出了不同环境压力下 4 种可燃液体闪点测量的平均值与环境压力的关系图.

Ding 等<sup>[6]</sup>通过在西藏高海拔地区开展实地测量实验,提出可燃液体闪点与环境压力的理论表达式如下:

$$\frac{1}{T_F(P)} = A \cdot \ln P + B \quad (1)$$

式中,  $T_F(P)$  是环境压力为  $P$  时的闪点,  $A, B$  均为与可燃性液体物性相关的常数. 根据 Le Chatelier<sup>[3]</sup> 理论分析可知,常数  $A$  主要取决于可燃液体的蒸发潜热,因此对于不同可燃液体,公式(1)的斜率不同.

利用公式(1)对模拟低压环境下的测量结果进行验证,如图 3 所示,结合数据分析以及误差棒可知,标准偏差均小于 5%,因此实验重复性较好,结果的可靠性较高,模拟低压环境测量的结果与实际情况下符合较好. 因此在一定条件下,对于不能在高原低压实地开展的相关火灾研究实验,可以利用低压舱模拟低压环境进行相关的火灾实验研究,并且实验结果具有很好的可靠性.



在 25 kPa 的闪点值是基于 35~101 kPa 数据的预估值

图 3 可燃液体闪点随环境压力的变化规律

Fig. 3 The relationship between the flammable liquids' flash point and the pressure

## 2 高原环境下可燃液体危险性分析

### 2.1 可燃液体危险等级分类分析

根据我国《建筑设计防火规范》<sup>[8]</sup>、《石油库设计规范》<sup>[9]</sup>和《石油化工企业防火设计规范》<sup>[10]</sup>的相关标准以及彭湘淮等<sup>[11]</sup>的研究,可燃液体的火灾危险性分类的标准如表 3 所示. 由图 3 结果可以得到不

表 3 可燃液体火灾危险等级分类标准

Tab. 3 The standards of the flammable liquids' fire hazard classification

危险性等级	类别名称	特 征
甲	A	液化烃 15 °C 时的蒸气压力 > 0.1 MPa 的 烃类液体及其他类似液体
	B	甲 <sub>A</sub> 类以外, 闪点 < 28 °C
乙	A	28 °C ≤ 闪点 ≤ 45 °C
	B	45 °C < 闪点 < 60 °C
丙	A	60 °C ≤ 闪点 ≤ 120 °C
	B	闪点 > 120 °C
甲		闪点 < 28 °C
乙	可燃液体	28 °C ≤ 闪点 < 60 °C
丙		闪点 ≥ 60 °C

同环境压力条件下,可燃液体火灾危险性分类等级如图 4 所示. 结合以上研究,从图 4 中相关交点数据,可以得出可燃液体火灾危险等级随环境压力变化的规律.

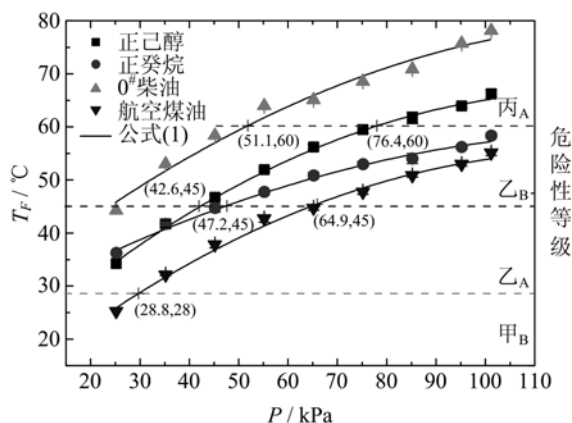


图 4 不同环境压力下可燃液体的闪点和火灾危险性等级

Fig. 4 The flammable liquids' flash point and fire hazardous rating in different altitude conditions

从图 4 可以看出,随着环境压力的下降,可燃液体火灾危险性等级越来越高,并且变化越来越快. 根据图 4 的结果分析可知,当环境压力低于 47.2 kPa 时,正癸烷的火灾危险性等级由乙<sub>B</sub>上升为乙<sub>A</sub>. 当环境压力低于 51.1 kPa 时,柴油的火灾危险性等级由丙<sub>A</sub>上升为乙<sub>B</sub>. 对于航空煤油,火灾危险性等级由乙<sub>B</sub>上升为乙<sub>A</sub> 对应的环境压力约为 64.9 kPa, 上升为甲<sub>B</sub> 对应的环境压力约为 28.8 kPa. 对于正己醇,火灾危险性等级由丙<sub>A</sub> 上升为乙<sub>B</sub> 对应的环境压力约为 76.4 kPa, 上升为乙<sub>A</sub> 对应的环境压力约为 42.6 kPa. 另外,从图 4 可知,相比正己醇和柴

油,正癸烷和航空煤油的火灾危险性可以在较宽的环境压力范围内保持相对安全的等级.

### 2.2 可燃液体防火安全要求分析

根据我国相关标准<sup>[8-10]</sup>以及相关学者研究<sup>[11]</sup>,不同危险类别的可燃液体(石油产品)安全储存标准如表 4 所示. 从表 4 可以看出,对于不同危险类别的可燃液体的储存防火要求各不相同. 因此随环境压力的变化,可燃液体在储存方面要满足更高的防火要求. 如柴油在环境压力高于 51.1 kPa 时,其储存规模没有任何限制,油罐间距最小为 0.4D(D 为储罐的直径),并且冷却方式没有特殊要求. 但当环境压力低于 51.1 kPa 时,其储存规模最大为 1 000 m<sup>3</sup>,油罐间距要增加到 0.75D,并且冷却要求采用移动式. 在使用可燃液体时,在环境压力下降的条件下,相关场所的耐火等级和建筑面积也要满足更高的要求. 另外对于航空飞机,飞机外界压力变化范围在 20~101 kPa 左右,可见对于燃油箱中的航空煤油而言,其火灾危险性等级从乙<sub>B</sub> 过渡增加到甲<sub>B</sub>. 因此,对于航空飞机油箱的安全设计,必须按照航空煤油危险类别甲<sub>B</sub> 的情况来进行.

### 3 结论

本文利用模拟低压环境的低压舱,对选用的两种纯净物(正癸烷、正己醇)和两种混合物(0# 柴油、航空煤油)在 35,45,55,65,75,85,95 和 101 kPa 8 个不同压力下进行了闭口杯闪点连续测量实验,利用先前理论分析进行验证,研究了可燃液体的闪点与环境压力的对应关系,并在此基础上给出了火灾危险性等级随环境压力的变化关系.

表 4 可燃液体储存防火安全要求

Tab. 4 The fire safety requirements of the flammable liquids' storage

规范	危险性等级	储罐防火安全要求	
		储罐类型、规模	防火间距要求
GB 50074-2002	甲 <sub>B</sub> 、乙	固定顶罐 ≤ 1 000 m <sup>3</sup>	0.75D <sup>a</sup> (移动冷却)
		固定顶罐 > 1 000 m <sup>3</sup>	0.6D(固定冷却)
	浮顶罐、内浮顶罐	0.4D	
	丙 <sub>A</sub>	固定顶罐	0.4D,且不大于 15 m
GB 50016-2006	甲、乙	地上固定顶罐 ≤ 1 000 m <sup>3</sup>	0.75D
		地上固定顶罐 > 1 000 m <sup>3</sup>	0.6D
	浮顶罐	0.4D	
	丙	不论容量大小	0.4D

【注】<sup>a</sup> D 为储罐的直径.

在模拟高原低压环境下,可燃液体的闪点与环境压力的关系与先前理论  $\frac{1}{T_F(P)} = A \cdot \ln P + B$  符合较好,即闪点倒数与环境压力对数呈线性关系,可见利用低压舱开展模拟低压环境的实验研究准确度较高.随着环境压力的下降,可燃液体闪点下降的幅度越来越大,其火灾危险性等级会越来越高,因此现行的火灾危险性评价标准需要随环境压力的变化进行相应调整.

通过实验结果分析可见,在高原环境下可燃液体的闪点远低于常压情况,因此飞机在飞行一定高度后,在常压情况下进行的油箱安全设计就不能满足要求了,需要进行安全性设计的调整和优化.另外在高原环境下,可燃液体的生产、储存、运输和使用也需要采用新的安全防火措施,从而满足火灾危险性增高情况下的安全需要.

#### 参考文献(References)

- [1] Flanner M. Causes and Effects of the Central Fuel Tank Explosion in TWA Flight 800. An Analysis of the Central Fuel Tank Explosion of TWA Flight 800 [R]. 2001.
- [2] Shepherd J E, Nuyt C D, Lee J J. Flash Point and Chemical Composition of Aviation Kerosene (Jet A) [R]. California: California Institute of Technology, 2000.
- [3] Le Chatelier H. Estimation of firedamp by flammability limits[J]. Ann Mines, 1891,19:388-395.
- [4] Lee J J, Shepherd J E. Spark Ignition Measurements in Jet A; Part II [R]. 2000.
- [5] Nestor L. Investigation of Turbine Fuel Flammability within Aircraft Fuel Tanks[R]. 1967.
- [6] Ding C, Yao W, Tang Y, et al. Experimental study of the flash point of flammable liquids under different altitudes in Tibet plateau [J]. Fire and Materials, 2013, 38: 241-246.
- [7] GB/T261-2008, 闪点的测定(宾斯基-马丁闭口杯法) [S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [8] GB50016-2006, 建筑设计防火规范[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
- [9] GB50074-2002, 石油库设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2002.
- [10] GB50160-2008, 石油化工企业防火设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2008.
- [11] Peng Xiangwei, Jiang Chunming. Analysis and comparison of standards and codes of light diesel oil in domestic and abroad [J]. Safety Health & Environment, 2003, 3(7): 10-13.
- 彭湘淮,姜春明. 国内外关于“轻柴油”安全标准规范的概括与比较[J]. 安全技术与管理,2003,3(7):10-13.