

文章编号: 1006-9941(2010)04-0439-04

# 液态燃料爆炸极限及其惰化抑制实验研究

姚干兵<sup>1,2</sup>, 解立峰<sup>1</sup>, 刘家骢<sup>1</sup>, 汪信<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094; 2. 扬州大学化学化工学院, 江苏 扬州 225002)

**摘要:** 采用自行设计的一套可燃液体爆炸极限试验装置,对 RP-5 油料、RP-3 油料及工业酒精的爆炸极限及 1301、二氧化碳、氮气等惰化介质对这三种燃料惰化抑制作用特性进行了实验研究。结果表明,RP-5 油料、RP-3 油料及工业酒精的爆炸极限浓度分别为 1.53% ~ 7.73%、0.82% ~ 7.17% 及 3.38% ~ 18.25%; 1301 对 RP-5 油料、RP-3 油料及工业酒精的最小惰化抑制浓度分别为 6.75%、6.8% 及 5.56%; 二氧化碳和氮气对 RP-3 油料的最小惰化抑制浓度分别为 45% 和 49%。根据实验结果分析,得出 1301 对油料爆炸惰化抑制效果明显优于二氧化碳与氮气。

**关键词:** 爆炸力学; 液态燃料; 爆炸极限; 惰化; 抑制

**中图分类号:** TJ55; O381

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.04.019

## 1 引言

液体燃料作为一种高能量密度能源物质,其燃烧爆炸是迅速释放能量的物理化学过程。随着科学技术的发展及应用能力的不断提升,液体燃料在航空航天、国防、工农业生产等许多领域得到了广泛应用,例如煤油作为飞机发动机的动力燃料,环氧丙烷可作为云爆武器的重要装填组分,乙醇作为车用清洁燃料之一进行推广等。但是在为人类的进步与发展提供能源动力和生产原料的同时,燃料的安全隐患也就显现出来了,特别是随着工业生产规模的不断扩大。在实际生产中,可燃液体的蒸气与空气混合浓度若达到燃烧爆炸极限范围内,在外界点火能量的诱发下即可发生燃烧爆炸,甚至爆轰,酿成危害严重的灾害性事故。在很多情况下液体燃料气云都能够达到爆炸极限浓度,所以燃料气云燃烧爆炸是现代石油化工过程中火灾爆炸事故中最为普遍的形式。因此,为了预防、减缓和控制此类工业灾害事故的发生,也为了获得燃料气云相关燃烧爆炸特性参数,就有必要对燃料气云爆炸及抑制特性进行研究,本研究主要研究液态燃料气云爆炸极限及其惰化抑制特性。

国内外许多学者针对燃料气云爆炸特性参数及其

防火防爆抑制技术进行了相关研究。Hijertager 等<sup>[1]</sup>分析了管道内障碍物对甲烷-空气、丙烷-空气混合物爆燃过程中火焰传播速度和压力的影响,指出在相同条件下丙烷-空气混合物的爆炸压力与甲烷-空气混合物有较大差别。Fairweather、Dunn-Rank 等<sup>[2-3]</sup>针对预混气体火焰传播特性进行了相关研究。周凯元等<sup>[4]</sup>针对丙烷-空气爆燃波的火焰面在直管道中的加速运动及影响因素等进行了初步的实验研究。Knystautas 等<sup>[5]</sup>通过实验观测了火焰传播状态特征。胡栋等<sup>[6]</sup>在圆柱形激波管中进行了氢-氧混合物 DDT 过程研究,获得了爆炸极限、临界初始压力、爆轰波传播速度和压力等特性数据。本文基于对相关研究文献的分析与总结,并结合工业液体燃料应用发展的趋势,开展了具有应用前景的三种液体发动机燃料进行燃料气云爆炸极限及其惰化实验研究,探讨了可燃液体气云爆炸极限及爆炸惰化抑制作用效果,这可为进一步研究液体燃料气云爆炸特性和相关工业安全提供必要的参考。

## 2 实验部分

### 2.1 实验装置

液态燃料爆炸极限测定所采用的实验装置主要由反应管、点火装置、搅拌装置、真空泵、压力计、电磁阀等组成,如图 1 所示。反应管为石英玻璃材质制成,管长为 1400 mm,管内径为 60 mm,管壁厚为 4 mm,管底部装有通径为 25 mm 的泄压阀。点火装置为脉冲高压放电器,输入电压为 220 V,放电电压为 10 kV,火花持续

收稿日期: 2009-09-21; 修回日期: 2010-02-04

基金项目: 国家自然科学基金(10676120)

作者简介: 姚干兵(1975-),男,博士后,主要从事多相爆轰及工业灾害防治技术研究。e-mail: yaogao11@163.com

解立峰(1965-),男,博士,主要从事工业防火防爆技术研究。

e-mail: xielifeng319@sina.com

时间为 3 s。整套实验装置可安放在可调温的恒温试验箱内。装置搭建完成后,采用纯度不低于99.99%的乙烯爆炸极限测定结果对该装置可靠性进行评估。结果表明,使用该装置测得的乙烯爆炸上下限与标准值的偏差均小于 10%。另外还采用丙酮挥发性蒸气作为验证气体进行了爆炸极限的测定,由该装置测得丙酮的爆炸上下限与标准值的偏差也均小于10%。依据 GB/T12474-90 判别标准,认定该装置满足标准要求,能进行可燃液体蒸气的爆炸极限测定及相关实验。



图 1 可燃液体爆炸极限测试装置

Fig. 1 Experimental apparatus for the explosion limits of combustible liquid

## 2.2 实验方法

首先将实验装置和相关辅助装置放置于可调温的试验温箱内,确定试验温度点,然后运用温控系统调节好温度。接着打开连接爆炸装置至储油罐之间的阀门,观察真空压力表的读数,使爆炸装置内的压力为油蒸汽的分压值后,关闭进气阀门,缓慢打开空气进气口的阀门的电磁阀,使爆炸试验装置内的压力缓慢上升至大气压力后,关闭进气阀门。然后打开爆炸装置内的无油搅拌泵,使爆炸装置内的油气得到充分混合。最后打开爆炸装置底部泄压阀,点燃点火电极,观测记录燃烧爆炸实验现象。点火判据是反应管内可燃气体与空气混合后被电火花点燃,形成火焰面并燃烧至管顶定为传播,如未燃烧至管顶定为不传播。试验后用湿度低于 30% 的清洁空气冲洗试验装置,反应管壁及点火电极若有污染应于试验后清洗。再选定下一个爆炸极限点,按照上述步骤重复实验,直至测出该燃料的爆炸上、下限。进行数据处理时,通过试验结果确定最接近的火焰传播和不传播两点的体积分数,按式(1)计算爆炸极限的值:

$$\phi = \frac{1}{2}(\phi_1 + \phi_2) \quad (1)$$

式中, $\phi$  为爆炸极限值, $\phi_1$  为传播体积分,  $\phi_2$  为不传播体积分。

进行燃料惰化抑制实验时,将实验装置和相关辅助装置放置于可调温的试验温箱内,确定试验温度点,然后运用温控系统调节温度。检查介质试验罐的气密性,并对介质罐进行抽真空。采用称重法计量所需加注的油料质量,从进液口吸入燃料液体,在试验温度点下进行燃料爆炸惰化抑制试验。

## 2.3 样品

实验用燃料和 1301 抑制剂由中石化南京炼油厂南京消防器材提供,氮气和二氧化碳气体从南京五十五所购得。

## 3 结果分析与讨论

### 3.1 燃料爆炸极限实验结果与分析

在环境温度(可调温试验箱内温度)为 30 °C,湿度为 40%,初始压力为大气压条件下。所测得三种燃料的爆炸极限和火焰速度列于表 1 和表 2。所获得的典型火焰传播过程如图 2 和图 3 所示。由表 1 可以看出,在相同的外界条件下,工业酒精的爆炸极限范围最大,RP-3 油料次之,RP-5 油料最小;RP-3 油料的爆炸下限浓度最低。爆炸极限范围越宽,燃料与空气所形成的混合物就越容易达到这一极限范围,所以单从爆炸极限这一指标,可以判定工业酒精的爆炸危险性最大,RP-3 油料的危险性次之,RP-5 油料的危险性最小。

在工业生产中,工业酒精是常见的溶剂和反应物,属于低闪点型燃料,挥发性较好,为易燃危险化学品。RP-5 油料、RP-3 油料均为石油化工直馏馏分、加氢裂化、加氢精制等组分及必要的添加剂调和而成,尽管都是由不同馏程的烃类化合物组成,但是 RP-5 油料属重煤油高闪点型燃料,挥发性较差;而 RP-3 油料属轻煤油低闪点型油料,挥发性较好;所以在靠近下限浓度时,RP-3 油料燃烧火焰传播速度大于 RP-3 油料火焰。

表 1 三种油料的爆炸极限范围测试结果

fuel	low limit	upper limit	explosion limit
RP-5	1.53	7.73	1.53 ~ 7.73
RP-3	0.82	7.17	0.82 ~ 7.17
ethanol	3.38	18.25	3.38 ~ 18.25

表 2 三种油料燃烧火焰传播平均速度

concentration of fuel	3.41% (ethanol)	1.6% (RP-5)	0.85% (RP-3)
rate of flame propagation	1.12	0.67	0.91

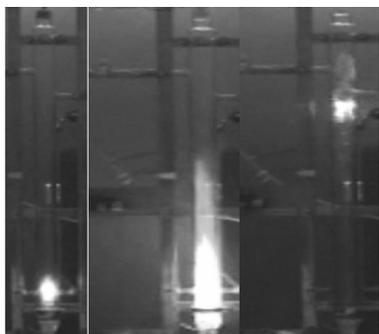


图2 浓度为6% RP-5 油料火焰传播过程  
Fig.2 Propagation process of RP-5 flame

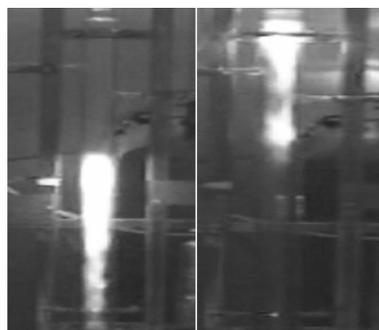


图3 浓度为6% RP-3 油料火焰传播过程  
Fig.3 Propagation process of RP-3 flame

### 3.2 燃料惰化抑制实验结果与分析

#### 3.2.1 惰化介质对不同燃料抑制结果与分析

1301 惰化介质对 RP-5 油料和工业酒精的惰化抑制实验结果分别如图4和图5所示。由图4和图5可以看出,随着1301惰化介质含量的增加,RP-5油料蒸气和工业酒精的爆炸极限范围均是逐渐减小,当惰化介质达到一定浓度(即曲线最高点浓度)时,其爆炸极限范围接近一点,此时,惰化介质含量若再增加,混合气体便失去爆炸性。这是由于随着惰化介质含量的增加,相对氧化剂的量就减少,使燃料与氧化剂反应所放出的能量不足以维持反应继续进行而得到抑制。结果表明,1301惰化介质对RP-5油料的最小惰化抑制浓度为6.75%,对工业酒精的最小惰化抑制浓度为5.56%。

#### 3.2.2 同一燃料与不同惰化介质作用结果与分析

氮气、二氧化碳及1301惰化介质对RP-3油料惰化抑制实验结果分别如图6、图7和图8所示。

由图6、图7和图8可知,随着混合气体中惰化介质浓度的增加,其爆炸极限的范围在逐渐缩小。但通过图6、图7与图8的对比还可以发现,二氧化碳与氮气对RP-3油料的爆炸上限的影响较之对下限的影响更为显著,这是因为在上限中氧的浓度本来就已经很小,故二

氧化碳和氮气浓度的增加所产生的影响就比较大,从而使油料爆炸上限显著下降;1301惰性气体对RP-3油料的最小惰化抑制浓度为6.75%,而二氧化碳和氮气对其的最小惰化抑制浓度分别为45%与49%,1301惰化抑制效果要明显高于二氧化碳和氮气的惰化抑制效果,这是二氧化碳和氮气的惰化过程主要是降低助燃氧气浓度,吸收反应放出的热量及隔离可燃介质来实现的,其惰化抑制过程都是以物理抑制作用为主。而1301惰化介质不仅能降低氧气浓度、吸收反应的热量,更为重要的是,1301能通过形成抑制基团,优先与油料和氧反应形成的自由基发生反应,反应活化能比较低,此反应易于发生,从而使链传递不能进行,中止链式反应进程的游离基达到抑制爆炸链反应的进行。

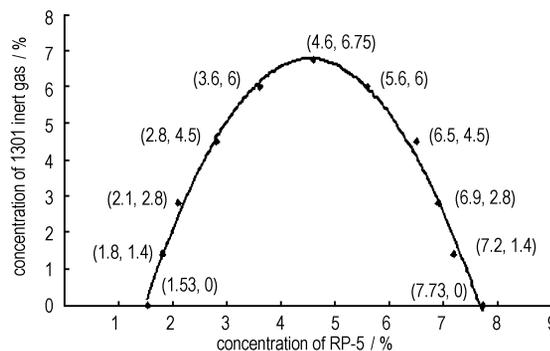


图4 1301 惰性气体对 RP-5 油料的抑爆曲线  
Fig.4 Suppression curve of inert gas to RP-5

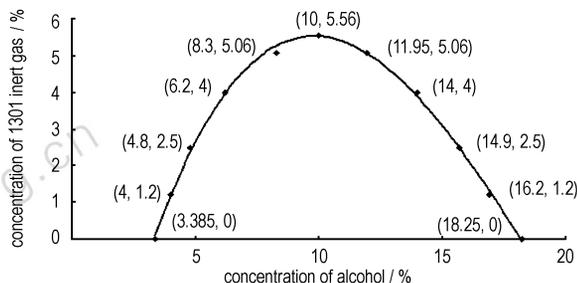


图5 1301 惰性气体对工业酒精的抑爆曲线  
Fig.5 Suppression curve of inert gas to alcohol

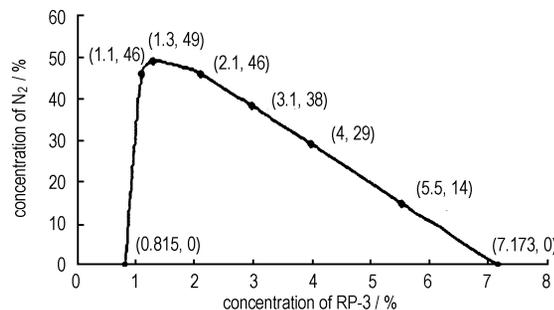


图6 氮气对 RP-3 油料的抑爆曲线  
Fig.6 Suppression curve of N<sub>2</sub> to RP-3

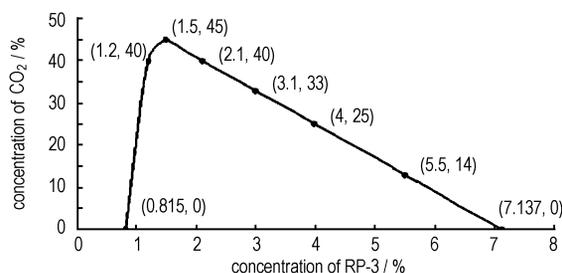


图7 二氧化碳对 RP-3 油料的抑爆曲线

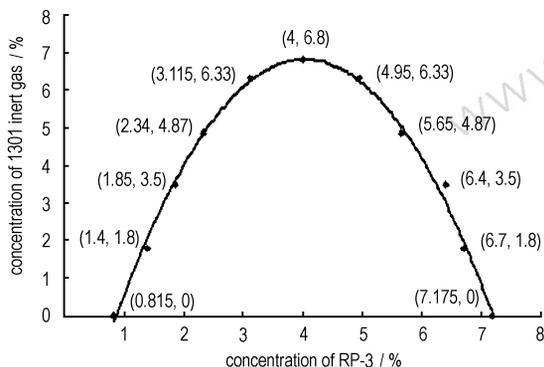
Fig. 7 Suppression curve of CO<sub>2</sub> to RP-3

图8 1301 惰性气体对 RP-3 油料的抑爆曲线

Fig. 8 Suppression curve of inert gas to RP-3

## 4 结论

本研究自行设计建造了一套可燃蒸气的爆炸极限测试装置,采用该装置对 RP-5、RP-3 和工业酒精 3 种燃料爆炸极限及其惰化抑制进行了研究,结论如下:

(1) 在初始压力为大气压、初始温度为 30 °C 条件下,测得 RP-5 油料的爆炸极限范围为 1.53 % ~ 7.73 %, RP-3 油料的爆炸极限范围为 0.82 % ~ 7.17 %,工业

酒精的爆炸极限范围为 3.38 % ~ 18.25 %。

(2) 1301 对工业酒精的最小惰化抑制浓度为 5.56%,对 RP-5 油料的最小惰化抑制浓度为 6.75%,对 RP-3 油料的最小惰化抑制浓度为 6.8%,表明 1301 对 RP-5 油料惰化抑制作用效果与 RP-3 油料基本相同。

(3) 二氧化碳对 RP-3 油料的最小惰化抑制浓度为 45%,氮气对 RP-3 油料的最小惰化抑制浓度为 49%,1301 对 RP-3 油料的抑爆效果优于二氧化碳和氮气。

### 参考文献:

- [1] Hijertager B H, Parker Fuher. Flame acceleration of propane-air in a large-scale obstructed tube dynamics of shock wave [J]. *Explosions and Detonation*, 1984, 94: 504 - 522.
- [2] Fairweather M, Hargrave G K, Walker. Studies of premixed flame propagation in explosion tube [J]. *Combustion and Flame*, 2004, 116: 504 - 518.
- [3] Dunn-Rankin, D Mcvann. Over pressure from nondetonating battle-accelerated turbulent flame in tubes [J]. *Combustion and Flame*, 1999, 116: 504 - 518.
- [4] 周凯元, 李宗芬. 丙烷-空气爆燃波的火焰在直管道中的加速运动 [J]. *爆炸与冲击*, 2000, 20(2): 137 - 141. ZHOU Kai-yuan, LI Zong-fen. Flame from acceleration of propane-air deflagration in straight tubes [J]. *Explosives and Shock Waves*, 2000, 20(2): 137 - 141.
- [5] Knystautas R, Guirao C M, Lee J H, et al. Measurements of cell size in hydrocarbon-air mixtures and prediction of critical tube diameter, critical initiation energy, and detonability limits, dynamics of shock wave [J]. *Explosions and Detonations*, 1984, 94: 23 - 27.
- [6] 胡栋, 龙属川, 吴传谦, 等. 可燃性气体爆炸极限和爆燃转爆轰的研究 [J]. *爆炸与冲击*, 1989, 9(3): 266 - 275. HU Dong, LONG Shu-chuan, WU Chuan-qian, et al. Studies of the detonability limit and the transition from deflagration to detonation for detonability gases [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1989, 9(3): 266 - 275.

## Experimental Study on Explosion Limits and Suppression of Combustible Liquid

YAO Gan-bing<sup>1,2</sup>, XIE Li-feng<sup>1</sup>, LIU Jia-cong<sup>1</sup>, WANG Xin<sup>1</sup>

(1. Chemical School, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. College of Chemistry & Chemical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225002, China)

**Abstract:** The explosion limits and the least suppression explosion concentrations of RP-5 oil, RP-3 oil and alcohol air mixtures were measured respectively by use of the apparatus, which was designed for measuring explosion limit of combustible liquid vapor. Results indicate the explosion limits of RP-5 oil, RP-3 oil and alcohol air mixtures are 1.53% ~ 7.73% (vol.), 0.82% ~ 7.17% (vol.) and 3.38% ~ 18.25% (vol.) respectively; the least suppression explosion concentrations of the 1301 inert gas are 6.75%, 6.8% and 5.56% respectively for the RP-5 oil, RP-3 oil and alcohol air mixtures. The least suppression explosion concentrations of N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> are 49% and 45% respectively for the RP-3 oil air mixtures. So the suppression effect of the 1301 inert gas is better than that of the CO<sub>2</sub> and the N<sub>2</sub>.

**Key words:** explosion mechanics; combustible liquid vapor; explosion limit; inertia; suppression

**CLC number:** TJ55; O381

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.04.019