

文章编号: 1001-1455(2009)06-0659-06

可燃液体爆燃特性及其抑制实验^{*}

解立峰¹, 李 斌¹, 沈正祥², 龙 寅³

(1. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094;

2. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;

3. 南京消防器材股份有限公司, 江苏 南京 210007)

摘要: 设计了一套可燃液体爆炸特性实验装置, 利用该装置和立式爆轰管对 RP-5 油料、RP-3 油料及工业酒精的爆炸特性、1301 惰性气体对这 3 种燃料的抑制进行了研究。结果表明: RP-5 油料、RP-3 油料及工业酒精爆炸的体积分数范围分别为 1.53%~7.73%、0.82%~7.17% 及 3.38%~18.25%; 酒精云雾爆轰的临界起爆能为 2.11 MJ/m²、爆速和爆压分别为 1 609 m/s、1 480 kPa, 爆轰波传播的胞格宽度为 14.5 mm, 长度为 16.2 mm。1301 惰性气体对 RP-5 油料、RP-3 油料及工业酒精的最小惰化体积分数分别为 6.75%、6.8% 及 5.56%; 二氧化碳和氮气对 RP-3 油料的最小惰化体积分数分别为 45% 和 49%; 1301 惰性气体对油料爆炸抑制效果明显好于二氧化碳与氮气。

关键词: 爆炸力学; 爆炸范围; 爆炸参数; 可燃液体蒸气; 临界起爆能; 爆炸抑制

中图分类号: O381

国标学科代码: 130·35

文献标志码: A

1 引言

现代工业生产中, 燃料与空气混合物的气云爆炸是化工厂爆炸事故中最为普遍的形式。实际生产中, 很多因素可以使这些混合物浓度达到爆炸范围, 此时若有点火源存在, 便能酿成燃烧、爆炸灾害。在气云爆炸参数测定和防爆技术研究方面, 目前国内基本上采用气体、粉尘爆炸或二者混合爆炸^[1-4], 而对可燃液体液滴云雾的爆炸研究还不多见。爆炸抑制机理方面, 爆轰能够自持稳定传播的原因是横波的产生和发展。因此, 消除横波以破坏爆轰波的自持传播成为探索抑制爆轰的一种思路。L. G. Gvozdeva 等^[5]发现用多孔、可压缩材料在某些条件下可明显衰减反射波。G. Dupre 等^[6]利用衬在管壁上的吸收材料显著降低了爆轰波, 研究认为横波的声吸收是强力衰减爆轰波的主要原因, 而衬有吸收材料的管壁上热量和动量的损失是可以忽略的次要因素。A. A. Vasilev^[7]引入了横波与管壁非弹性碰撞的概念, 在衬有多孔管壁的管道内研究了临近极限的爆轰, 并试图用反射系数来解释这种衰减。A. Teodoreczyk 等^[8]对氢/氧混合气体爆轰波的衰减作了照相记录, 并提出了一个关于爆轰波沿多孔材料传播时大为简化的模型。郭长铭等^[9]研究了在方形和圆形截面管道内气相爆轰波在阻尼管道中传播时的衰减现象。先是在光滑管壁的管道中产生稳定的具有胞格结构的爆轰波, 然后使其通过专门设计的管壁上衬有网孔材料金属丝网或不锈钢纤维的阻尼段, 利用高速摄影、压力传感和烟迹技术等手段, 发现爆轰波被有效抑制, 管内的压力波显著衰减, 衰减的主要原因是网孔材料吸收了爆轰波波阵面的横波。

本文中在自行研制的可燃液体爆炸极限实验装置和爆轰管中, 对 3 种可燃液体爆炸参数和爆炸抑制效果进行测试, 确定其爆炸极限等爆炸参数, 比较 3 种抑爆剂的爆炸抑制效果。取得的结果可为工业安全生产和有效减灾防护措施制订提供技术基础数据。

* 收稿日期: 2008-07-29; 修回日期: 2009-08-22

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金重点项目(10676120);

北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室基金项目(KFJJ07-01)

作者简介: 解立峰(1965—), 男, 博士, 副研究员。

2 实验装置

2.1 可燃蒸气爆炸极限及其惰化实验装置

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;装置安放在可升温至 70 °C 的恒温箱内,如图 1 所示。

2.1.1 爆炸极限测试结果的确定

通过实验找到最接近的火焰传播和不传播两点的体积分数,按下式计算爆炸极限值

$$\varphi = (\varphi_1 + \varphi_2) / 2 \quad (1)$$

式中: φ 为爆炸极限值, φ_1 为传播体积分数, φ_2 为不传播体积分数。

点火判据确定如下: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判定为传播,未燃烧至管顶则判定为不传播。

3 种可燃液体是通过强制汽化方式产生蒸气;点火方式为高压放电产生电火花,火花持续时间不小于 500 ms;实验步骤完全按 GB/T12474-90 标准规定进行。



图 1 可燃液体爆炸范围测试装置

Fig. 1 The device for explosion range testing



图 2 立式爆轰管

Fig. 2 The vertical detonation tube

2.1.2 装置校验

(1)首先选用纯度不低于 99.99% 的乙烯考察,校验测定结果是否符合要求。使用该装置得出乙烯的爆炸上下限与标准偏差均小于 10%;根据 GB/T12474-90 的判别标准,确定该装置满足标准的要求,能进行相关实验。

(2)由本实验的特殊性,增加了丙酮挥发性蒸汽作为验证气体的校验。使用该装置测出的丙酮的爆炸上下限与标准值偏差均小于 10%;根据 GB/T12474-90 的判别标准,确定该装置满足标准的要求,能进行相关实验。

2.2 可燃液体云雾爆炸参数实验装置

实验装置为长 5.4 m、外径 240 mm、内径 200 mm 的立式激波管,在管体两侧间隔 0.35 m 交错布置了 14 个喷雾接管,喷嘴直径为 1 mm,从可燃液体喷入爆轰管内到起爆大约经过 1 s,形成直径约 400 μm 液滴云雾体系;沿管体轴向间隔 0.5 m 对称地分布了 16 个 Kistler 公司生产的石英压电压力传感器,以测量云雾的爆轰参数。喷雾系统由压缩气瓶、气室、电磁阀、单向阀、喷雾室和喷头组成。信号记录系统由电荷放大器(5358 型)、瞬态波存仪(JV5201 型)、微机及控制系统组成。全部实验均采用 8[#] 电雷管引爆不同药量黑索今药柱的方式引爆云雾,实验初始压力为一个大气压,环境温度 343 K。通过测量爆轰速度方法判断点火后爆轰激波管中出现的是哪种化学反应,当火焰传播速度超过 1 km/s 时认为管内反应为爆轰。具体参数参见文献[10]。

在爆轰管实验中,起爆药柱可看作点爆源,爆轰产生球面波。但由于本文所用管径与所实验的燃料胞格尺寸^[11]之比远大于 10,因而可近似将此波看作平面波。

3 实验结果分析与讨论

3.1 3种油料的爆炸极限实验结果分析与讨论

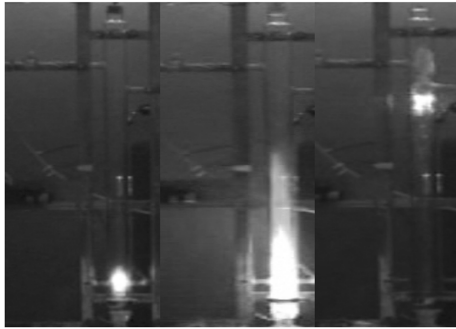
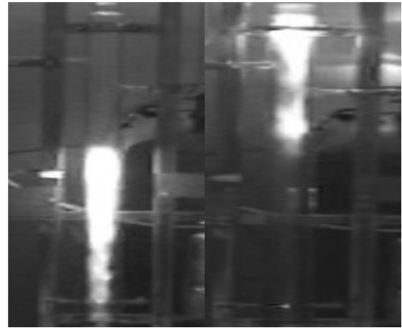
(a) RP-5, $\phi=6\%$ (b) RP-3, $\phi=6\%$ 

图3 油料火焰传播过程

Fig. 3 Flame propagation of oil

实验条件为:环境温度 30 ℃(温箱内)、湿度 40%、气体初始压力 100 kPa,其典型火焰传播过程见图 3。测得 3 种油料的爆炸范围列于表 1,3.41%酒精、1.6% RP-5 油料、0.85% RP-3 油料的火焰传播速度分别为 1.12、0.67、0.91 m/s。

由表 1 可以看出,在相同的外界条件下,工业酒精的爆炸范围最大,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。由此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。

RP-5 油料、RP-3 油料均为直馏馏分、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 油料属于重煤油高闪点型燃料,挥发性较差;而 RP-3 油料属于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-5 油料火焰。

3.2 爆轰参数实验结果分析与讨论

实验初始条件是常温常压。不同起爆能 E_c 下 3 种油料的实验结果如表 2 所示。

表 2 不同起爆能下 3 种油料的爆炸压力与速度

Table 2 Explosion pressure and velocity of three fuels with different initiation energy

油料	$E_c=0.69 \text{ MJ/m}^2$		$E_c=1.07 \text{ MJ/m}^2$		$E_c=2.11 \text{ MJ/m}^2$	
	p/kPa	$v/(\text{m/s})$	p/kPa	$v/(\text{m/s})$	p/kPa	$v/(\text{m/s})$
RP-5 油料	378	613	542	686	1 142	1 386
RP-3 油料	360	610	528	661	1 228	1 461
工业酒精	310	669	480	709	1 480	1 609

从表 2 可以看出,3 种燃料均以各自的体积分数参加云雾两相爆炸反应时,随着起爆能的增大,其爆轰压力、爆轰速度有明显的提高。当起爆能量达到 2.11 MJ/m^2 时,3 种燃料云雾爆炸压力都大于 1 000 kPa,爆速大于 1 km/s,接近其理论爆轰压力和爆速。这说明在足够起爆能激发下,3 种燃料云雾都能达到爆轰状态。特别是酒精燃料云雾爆轰压力和速度均高于另 2 种油料的爆压和爆速,这是因为酒精生成热较高,加上反应释放能量的速率较快,在相同时间内释放的热量多于 RP-5 油料、RP-3 油料,

表 1 3 种油料的爆炸范围测试结果

Table 1 Experimental explosion range of three fuels

油料名称	爆炸下限/%	爆炸上限/%	爆炸范围/%
RP-5 油料	1.53	7.73	1.53~7.73
RP-3 油料	0.82	7.17	0.82~7.17
工业酒精	3.38	18.25	3.38~18.25

故酒精用来支持传播的能量最多,其爆速也最快。

酒精燃料云雾爆轰波传播胞格尺寸测量结果如表 3 所示,表中 l_1 、 l_2 分别表示胞格宽度和长度。胞格结构如图 4 所示。

与环氧丙烷、90 溶剂油等燃料相比,酒精云雾爆轰的临界起爆能较大,这说明酒精的起爆感度较低,不易起爆;这一点也可以从其胞格尺寸的大小看出。酒精的胞格长度为 16.2 mm,胞格宽度为 14.5 mm,远大于环氧丙烷的胞格尺寸;与癸烷一样,其爆轰属于两相云雾爆轰。因为体系燃料浓度不均以及液滴颗粒大小不一,爆轰波在传播过程中必然会与液滴相互作用,即爆轰波的部分能量被液滴吸收,致使爆轰波的速度降低。与此同时,燃料由于吸收爆轰波的能量达到发生化学反应的条件,但由于其释放出来的能量被其他液滴吸收,由于液滴颗粒大小的不同将造成不同的后果(液滴颗粒被碳化等等),致使这一部分能量损失而无法支持爆轰波传播,所以酒精的起爆难度较大。

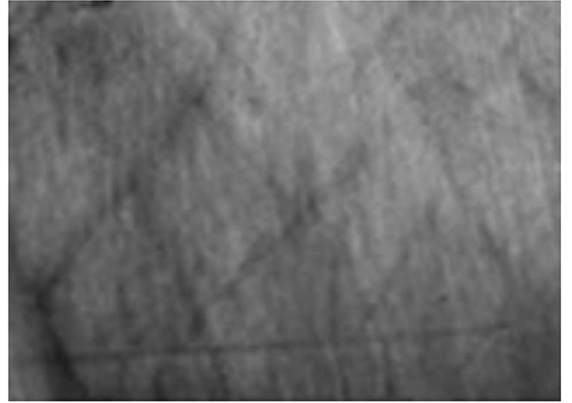


图 4 酒精爆轰波传播的胞格结构

Fig. 4 Cellular structure in alcohol drop-air mixtures

表 3 不同燃料云雾爆轰的临界起爆能

Table 3 Critical initiation energy of different spray detonation

燃料	体积分数/%	$E_c/(MJ/m^2)$	l_1/mm	l_2/mm	l_2/l_1
酒精	6.7	2.11	14.5	16.2	1.12
环氧丙烷	5.0	0.19	6.1	9.2	1.51
90 溶剂油	2.1	0.77	12.3	17.8	1.45
癸烷	1.3	2.12	17.8	20.9	1.17

3.3 3 种油料的情化实验结果与分析

(1)1301 惰化介质对 RP-5 油料和工业酒精的情化实验结果。由图 5 可以看出,随着 1301 惰性气体体积分数(φ_{1301})的增加,RP-5 油料蒸气(体积分数为 φ_{RP-5})和工业酒精(体积分数为 φ_{al})的爆炸范围也逐渐减小,当惰性气体体积分数为曲线最高点浓度时,其爆炸范围已经差不多接近一点,此时,惰性气体含量再稍微多一点,混合气体便失去爆炸性,故 1301 惰性气体对 RP-5 油料的最小惰化体积分数为 6.75%,对工业酒精的最小惰化体积分数为 5.56%。

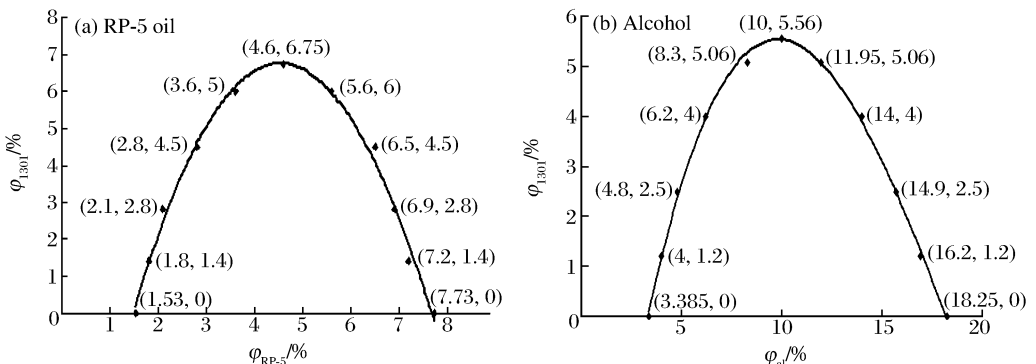


图 5 1301 惰性气体对 RP-5 油料和工业酒精的抑爆曲线

Fig. 5 Inhibiting curves of the 1301 inert gases to the RP-5 oil vapor and the alcohol vapor

(2)1301 惰化介质、二氧化碳(体积分数为 φ_{CO_2})及氮气(体积分数为 φ_{N_2})对 RP-3 油料(体积分数为 φ_{RP-3})情化实验结果。随着混合气体中惰性气体浓度增加,其爆炸范围逐渐缩小;但通过对比图 6~8 可

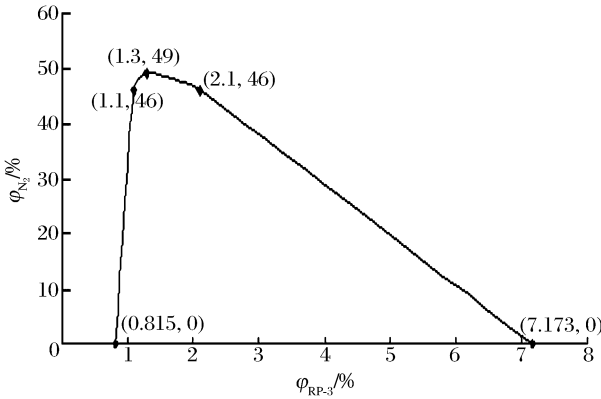


图 6 氮气对 RP-3 油料的抑爆曲线

Fig. 6 Inhibiting curve of N₂ to the RP-3 oil

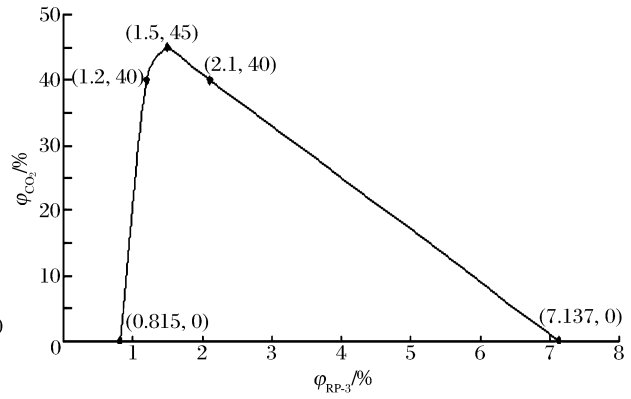


图 7 二氧化碳对 RP-3 油料的抑爆曲线

Fig. 7 Inhibiting curve of CO₂ to the RP-3 oil

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显著；1301 惰性气体对 RP-3 油料的最小惰化体积分数为 6.75%，而二氧化碳和氮气为 45% 与 49%，1301 的惰化效果明显好于二氧化碳的；这主要是因为二氧化碳的惰化过程主要是降低通过助燃氧气体积分数、吸收反应放出的热量及隔离可燃介质来实现的，而 1301 惰化气体不仅能降低氧气浓度、吸收反应的热量，更为重要的是 1301 能通过中断油料链式反应进程中的游离基而达到抑制爆炸链反应。

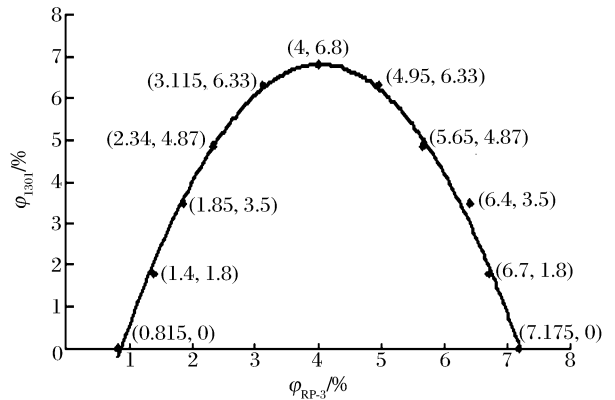


图 8 1301 惰性气体对 RP-3 油料的抑爆曲线

Fig. 8 Inhibiting curve of the 1301 inert gases to the RP-3 oil

4 结 论

(1)按照 GB/T 12474-90 要求建造的可燃蒸气的爆炸极限测试装置可以用来进行可燃液体蒸气的爆炸极限测定。(2)RP-5 油料、RP-3 油料、工业酒精的爆炸范围分别为 1.53%~7.73%、0.82%~7.17%、3.38%~18.25%；1301 惰性气体对 RP-5 油料、RP-3 油料、工业酒精的最小惰化体积分数分别为 6.75%、6.8%、5.56%；同时测得二氧化碳、氮气对 RP-3 油料的最小惰化体积分数为 45%、49%，1301 惰性气体的抑爆效果好于二氧化碳和氮气。(3)酒精云雾爆轰的临界起爆能、爆速和爆压分别为 2.11 MJ/m²、1 609 m/s、1 480 kPa，其爆轰波传播胞格宽度为 14.5 mm，胞格长度为 16.5 mm。

参考文献：

[1] 喻建良,刘润杰,毕明树.抑制爆炸波传播的方法[J].力学进展,2002,32(3):467-470.
YU Jian-liang, LIU Rui-jie, BI Ming-shu. The measures of suppressing explosion wave[J]. Advances in Mechanics, 2002,32(3):467-470.

[2] 张锐,陈光明.R502 新型替代制冷剂爆炸极限实验研究[J].爆炸与冲击,2005,25(2):189-193.
ZHANG Rui, CHEN Guang-ming. Experimental study of the explosion limits of a new refrigerant to R502[J]. Explosion and Shock Waves, 2005,25(2):189-193.

[3] 田贯三,马一太,杨昭.含有阻燃组元的可燃制冷剂爆炸极限的研究[J].爆炸与冲击,2003,23(3):225-229.
TIAN Guan-san, MA Yi-tai, YANG Zhao. The explosion limit of the flammable refrigerants containing nonflammable components[J]. Explosion and Shock Waves, 2003,23(3):225-229.

[4] 姚干兵,解立峰,刘家骢.激波管内燃料两相云雾爆轰的实验研究[J].高压物理学报,2007,21(1):77-82.

- YAO Gan-bing, XIE Li-feng, LIU Jia-cong. Experimental study on detonation characteristics of several liquid fuel-air clouds in shock tube[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2007,21(1):77-82.
- [5] Gvozdeva L G, Faresov, Y M, Brossard J, et al. Normal shock waves reflection on porous compressible materials [J]. AIAA Journal, 1986,106:155-165.
- [6] Dupre G, Peraldi O, Lee J H, et al. Propagation of detonation waves in acoustic absorbing walled tube[J]. AIAA Journal, 1988,114:248-263.
- [7] Vasil'ev A A. Near limiting detonation in channels with porous walls[J]. Combustion, Explosion and Shock Waves, 1994,30:101-108.
- [8] Teodorczyk A, Lee J H S. Detonation attenuation by foams and wire meshes lining the walls[J]. Shock Waves, 2005,25(4):225-236.
- [9] 郭长铭,李剑. 爆轰波在阻尼管道中声吸收的实验研究[J]. 爆炸与冲击,2000,20(4):289-295.
GUO Chang-ming, LI Jian. Experimental study on detonation waves in acoustic absorbing walls tube[J]. Explosion and Shock Waves, 2000,20(4):289-295.
- [10] 解立峰,郭学永,果宏,等. 燃料-空气云雾爆轰的直接引爆实验研究[J]. 爆炸与冲击,2003,23(1):78-81.
XIE Li-feng, GUO Xue-yong, GUO Hong, et al. Experimental study on the direct initiation of detonation in fuel-air mixtures[J]. Explosion and Shock Waves, 2003,23(1):78-81.
- [11] 解立峰. 云雾爆轰测试系统设计和云雾爆轰特性研究[D]. 南京:南京理工大学,2000.

Experiment on combustion and detonation characteristics and its suppression for liquid vapor

XIE Li-feng^{1*}, LI Bin¹, SHEN Zheng-xiang², LONG Yin³

(1. *Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;*

*2. State Key Laboratory of Explosive Science and Technology,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*

3. Nanjing Fire Protection Technology Co Ltd, Nanjing 210007, Jiangsu, China;)

Abstract: An apparatus for measuring explosion limit of combustible liquid vapor was designed. The explosion limits and detonation parameters, the least explosion suppressible concentration of RP-5 oil, RP-3 oil and alcohol air mixtures were measured respectively by using the apparatus and vertical detonation tube. The results indicate that the explosion limits and the least explosion suppressible concentration of the 1301 inert gas are (1.53~7.73)%, (0.82~7.17)% and (3.38~18.25)%, 6.75%, 6.8% and 5.56%, respectively, by volume, for RP-5 oil, RP-3 oil and alcohol air mixtures; the least explosion suppressible concentrations of N₂ and CO₂ are 49% and 45%, respectively, by volume, for RP-3 oil air mixtures. So the suppression effect of 1301 inert gas is better than CO₂ and N₂. The critical initiation energy, detonation velocity and pressure, the width of detonation wave cells are 2.11 MJ/m², 1 609 m/s, 1 480 kPa, 14.5 mm, respectively, for alcohol-air mixture with equivalence ratio concentration.

Key words: mechanics of explosion; explosion range; detonation parameters; combustible liquid vapor; critical initiation energy; explosion suppression

* Corresponding author: XIE Li-feng
Telephone: 86-25-84315526-807

E-mail address: xielifeng319@sina.com