

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2015.06.005

# 安全柴油燃爆性能的静爆试验研究\*

黄 勇<sup>①②</sup> 解立峰<sup>①</sup> 鲁长波<sup>③</sup> 安高军<sup>③</sup> 熊春华<sup>③</sup> 李永坚<sup>④</sup>

①南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

②常州大学环境与安全工程学院(江苏常州,213164)

③中国人民解放军总后勤部油料研究所(北京,102300)

④山西江阳化工有限公司(山西太原,030043)

[摘 要] 为掌握安全柴油的燃爆性能,以便进一步完善制备工艺,提高其安全性能,开展了炸药起爆、引燃普通柴油(1#柴油)以及不同含水量(质量分数)的安全柴油(2#、3#柴油)的静爆试验,并采用高速照相机、红外热成像仪分别记录了试验过程和火球的表面温度。试验结果表明:1#、2#、3#柴油云雾被引燃形成火球所需的初始点火能量逐渐增大,而2#、3#柴油火球的尺寸和表面平均温度则小于1#柴油;1#柴油的池火持续时间达到125 s,而2#、3#的池液只是出现闪燃现象,未形成池火,表现出了较强的自熄灭能力。因此,安全柴油具有较好的阻燃抑爆能力,而将它的含水量控制在合适的水平是提高其安全性能的重要方法。

[关键词] 安全柴油;燃爆性能;火球;点火能量;云雾;池火

[分类号] TK428.9

## 引言

柴油被广泛用作大型车辆、舰船和武器装备的燃料,一旦车辆、装备发生安全事故或遭受炮火袭击,容易引发油箱中柴油的二次爆炸效应,这是造成车辆装备损毁和人员伤亡的重要原因。另外,消防车、救护车等特殊车辆经常出现在火灾事故救援现场,其油箱处于高温环境中,也可能引爆油料。因此,几十年来各国纷纷开展了油箱抗爆技术研究,希望能有效减小油箱爆炸危害。油箱抗爆技术的实施一般有两种途径:一是在油箱内填充阻隔防爆材料,二是改善燃料自身安全性能。实践证明,目前的各类阻隔防爆材料在使用过程中会使燃料的抗腐蚀性变差、实际胶质增加,而且阻隔防爆材料本身的延展力和拉伸强度容易发生变化,在使用中会破碎并产生颗粒物,使发动机动力下降甚至油路堵塞<sup>[1-2]</sup>。因此,如何提升燃料自身的安全性能,使其在受到高温烘烤或外力袭击时不易发生燃烧、爆炸,成为解决油箱安全问题的重要举措。

近40年来,俄罗斯、美国<sup>[3-4]</sup>开展了在消防灭火、处突维稳、反恐救援、军事装备等特殊领域使用的具有阻燃抑爆功能且动力性能基本保持不变的安安全柴油研究。俄罗斯研发的安全柴油的阻燃性能是

靠水来保证的。美国一些学者研究发现,一般的乳化柴油只能增强火焰的自熄灭能力,不能减小火球的尺寸;因此,在乳化柴油的基础上添加了微量的某种抑爆剂,并开展了相应的试验研究<sup>[5]</sup>。我国是近几年才开始这种具有阻燃抑爆性能的安全柴油研究的,并取得了一些成果<sup>[6]</sup>,但还缺少外场大尺度试验来验证其燃爆性能。

为此,笔者开展了炸药引燃普通柴油和安全柴油云雾的试验,并运用高速照相机和红外热成像仪记录了试验过程和爆炸火球(火球)表面温度。通过对试验结果进行分析,比较了它们的燃爆性能,为进一步改善制备工艺、提高其安全性能提供了技术参考。

## 1 试验

### 1.1 试验装置和测试仪器

1)起爆装置:由引信和主炸药组成。引信为一支8#电雷管,主炸药为海萨尔炸药柱。

2)试验油箱:圆桶形,容积50 L,尺寸为 $\varnothing 360$  mm $\times$ 500 mm,材质为20#钢,壁厚为2 mm。

3)油箱支架:钢制,高800 mm。

4)高速照相机:Fastcam nltima APX型,日本Photron公司生产,最大拍摄速率为12 000 帧/秒,每

\* 收稿日期:2015-04-19

基金项目:国家科技部国际科技合作重大专项资助(2013DFR60080)、江苏省科技厅计划项目(BE2014735)

作者简介:黄勇(1978~),男,博士研究生,主要从事燃烧、爆炸及其作用机理、化工安全技术。E-mail:huangyong001@cczu.edu.cn

通信作者:解立峰(1965~),男,博士,教授,博士生导师,主要从事多相爆轰理论与防火防爆技术研究。E-mail:xielifeng319@sina.com

帧最大像素  $1\ 504 \times 1\ 128$ 。

5) 红外热成像仪: Mikronscan 7200V 型, 美国 Mikron 公司生产, 该系统用  $320 \times 240$  微热辐射计 UFPA 探测器接收探测目标所释放出来的能量, 其温度响应时间为  $2\ \mu\text{s}$ 。

## 1.2 试验样品

1#:  $-10^\#$  柴油。

2#: 由  $-10^\#$  柴油、水、微量乳化剂和抑爆剂等构成的乳化柴油。以质量分数计, 其中含水量为  $6.0\%$ , 抑爆剂含量为  $0.4\%$ 。

3#: 与 2# 的主要区别在于含水量增加到  $8.0\%$ 。

试验样品的基本理化性能如表 1 所示,  $T_i$  表示闭口闪点,  $\rho$  为密度,  $\mu$  为运动黏度 ( $20\ ^\circ\text{C}$ )。

表 1 试验样品的基本理化性能

Tab. 1 Basic physical and chemical property of samples

试验样品	$T_i/^\circ\text{C}$	$\rho/(\text{g} \cdot \text{mL}^{-1})$	$\mu/(\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
1#	84	0.794	3.93
2#	84	0.840	22.84
3#	85	0.841	23.78

## 1.3 试验方法

每次试验将盛装 25 L 试验样品的密闭油箱竖直放置在支架上, 在距油箱中轴 25 m 的位置处分别布置高速照相机和红外热成像仪, 试验场布置如图 1 所示。起爆装置固定在油箱蒸气区接近油液面的位置(文献[7]已通过试验证实, 起爆能量作用在油料蒸气区比作用在油液内造成的爆炸后果更严重), 起爆、引燃试验样品, 同时开启高速照相机、红外热成像仪, 分别记录试验过程、火球表面温度。高速照相机拍摄速率为 1 000 帧/秒、像素为  $1\ 504 \times 1\ 128$ , 红外热成像仪每隔 31 ms 采集一次样品。

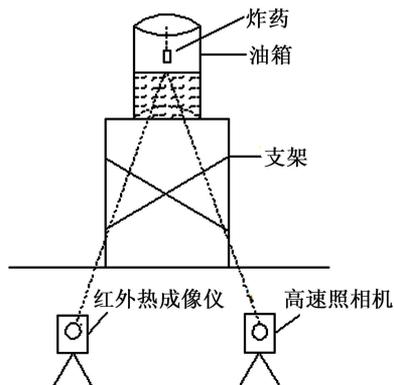


图 1 试验场布置示意图

Fig. 1 Layout schematic of experiment

## 1.4 点火能量的确定

点火能量是指炸药起爆后使试验样品的抛撒云雾发生自持续燃烧的能量。试验时, 首先仅用一支 8# 电雷管起爆、引燃试验样品。若不能引燃试验样品, 则再增大起爆能量(每次增加 5 g 海萨尔药柱), 直至获得能够引燃试验样品的能量。点火能量可通过式(1)进行计算:

$$E_i = 5.945 + 5.558 m. \quad (1)$$

式中: 5.945、5.558 分别为一支 8# 电雷管和每克海萨尔炸药的爆热, kJ;  $m$  为炸药的质量, g;  $E_i$  为点火能量, kJ。

试验结果表明, 当点火能量分别为 117.105、256.055、283.845 kJ 时, 可以将 1#、2#、3# 柴油云雾分别引燃。为便于对比试验样品的燃爆性能, 取 3 个点火能量的最大值(283.845 kJ)进行油箱未盛装油样和油箱分别盛装 1#、2#、3# 柴油的静爆试验。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 试验过程分析

炸药柱起爆瞬间, 爆炸冲击波使油箱迅速变形、破裂、分解, 爆炸产物释放的大量热迅速加热油气界面附近的柴油, 使之急速沸腾、汽化, 发生沸腾液体扩展蒸气爆炸<sup>[8]</sup>, 并形成灼热且富含燃料的爆炸云团(包含爆炸中间产物和某些尚未反应的炸药组分), 表现为高温火球。同时, 中下部的柴油在爆炸产物膨胀的推力下从正在破裂分解的油箱中以射流的形式向外高速喷出, 柴油液滴将经历雾化、蒸发、混合及燃烧等过程。图 2 为不同时刻的试验照片。

从图 2 可以看出: 5 ms 时, 未盛装油样的试验的火球亮度明显大于其他 3 组试验的火球, 这是由于它的火球几乎包含了爆炸产物释放的全部热量, 而盛装油样的试验由于油样迅速汽化需要吸收大量爆炸产物释放的热量, 使得此时火球表面温度相对较小, 亮度较低; 50 ms 时, 未盛装油样试验的火球已消散, 形成白色浓烟, 而 1#、2# 和 3# 柴油汽化形成的高压蒸气向油箱外喷出, 被高温引燃, 火球膨胀、扩展; 200 ms 时, 可见 1#、2# 和 3# 火球从油箱两侧抛撒出来, 其中 1# 的雾化程度明显高于 2# 和 3#, 呈云雾状, 而雾化效果最差的 3# 呈不规则的液滴群, 因此 1# 液雾比 2#、3# 液滴易引燃, 火球火焰将液雾预热、引燃, 火球不断扩展; 1 000 ms 时, 1# 的火球表面呈红黑色, 2#、3# 的火球逐渐在消散。

### 2.2 火球特征参数

运用 AutoCAD 软件、红外热成像仪自带的 Microspec 软件分别对试验照片和火球热像图进行分析、处理, 可以得到火球的尺寸、表面温度等特征参

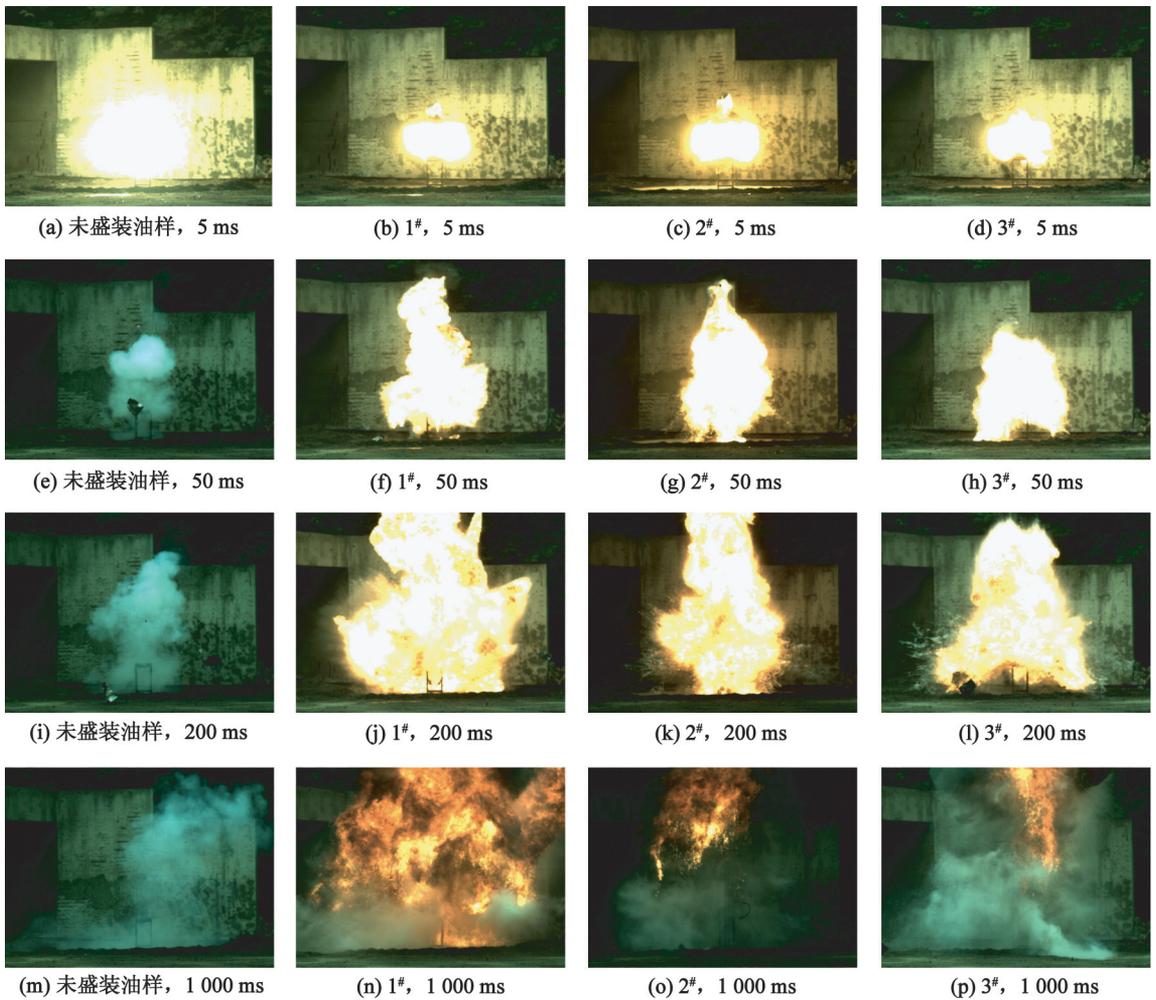


图 2 试验过程典型照片

Fig. 2 Typical photos of experimental process

表 2 火球的尺寸和表面温度

Tab. 2 Size and surface temperature of fireball

试验样品	$S/m^2$	$d/m$	$T_m/^\circ C$	$T_a/^\circ C$
未盛装油样	3.07	2.33	639.8	489.2
1#	22.79	5.67	1 428.1	943.8
2#	10.63	3.53	1 253.2	855.4
3#	10.47	3.37	1 373.1	896.3

数,如表2所示。 $S$ 、 $d$ 分别指火球的最大截面积、最大直径, $T_m$ 表示火球发展过程中表面的最高温度, $T_a$ 表示火球  $T_m$  时的表面平均温度。图 3 为 3 种样品的火球表面最高温度随时间变化趋势图。

由表 2 可知,未盛装油样的油箱中炸药起爆产生的爆炸火球最大截面积、最大直径分别为 3.07  $m^2$ 、2.33 m,而 3 种油样的火球与之相比均有较大扩展,其中 1# 的火球最大截面积、最大直径均为最大,是未盛装油样的油箱爆炸火球的 7.42 倍和 2.43

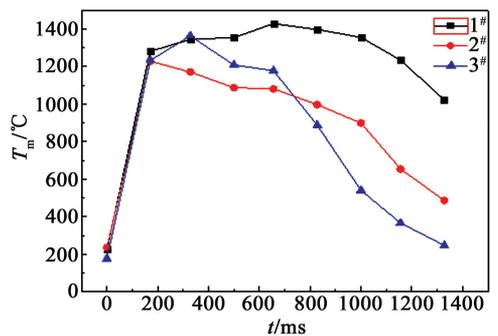


图 3 火球表面最高温度随时间的变化

Fig. 3 The highest surface temperature of fireball changing with time

倍,最小的 3# 火球最大截面积、最大直径是其 3.41 倍和 1.44 倍,可见安全柴油的火球扩展尺寸较小。由上文可知,抛撒过程中 1# 与 2#、3# 的雾化程度有明显差别,1# 这种液滴较小的云雾在受到冲击波作用后,由于液滴的惯性、表面张力、黏滞性,在液滴表层形成逆气流方向的剪切力,将其逐层剥离,而在尾部形成细雾,并汽化参加燃烧反应,支持火焰传播。

2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>液滴较大的云雾在冲击波通过后造成了气流和液滴间较大的速度差,气流在液滴表面受到滞止,形成滞止动压,迫使液滴变形、破解,但由于液滴变形、剥离和破碎过程需要一段时间(由图2可知,2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>形成细小雾滴的时间比1<sup>#</sup>迟),造成损失于液滴破碎、汽化燃烧反应区之外的能量也增大<sup>[9]</sup>,不易将其云雾点燃,火球扩展较小。

由图3可见,起爆后火球表面温度急剧升高,在200 ms左右时达到最大,然后随着爆炸中间产物的耗尽,火球温度有所下降,但由于油蒸气持续燃烧,火球仍保持较高温度;200~800 ms,2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>火球表面最高温度仍较大,均在1 000℃以上,并且在300 ms左右时3<sup>#</sup>柴油表面最高温度高于1<sup>#</sup>柴油。这是因为炸药起爆释放大热,导致环境温度急剧升高,安全柴油的油包水微粒中水分将先沸腾汽化,产生的巨大压力冲破油膜的束缚,发生了微爆效应(它也是乳化柴油在发动机内能充分燃烧的主要原因)<sup>[10]</sup>,导致在这段时间内火球部分表面温度较高;1 000 ms后,1<sup>#</sup>的火球还处于自由扩散期初期,火球内部的液雾仍在剧烈燃烧,维持着1 000℃以上高温,2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>已处于自由扩散期末期,随着能量不断向周围扩散,火球的温度持续降低。

### 2.3 池火持续时间

炸药起爆后,大量未来得及汽化的油料被抛撒在地面。1<sup>#</sup>的池火在其火球消散、熄灭后仍在剧烈燃烧,持续时间大约为125 s,而抛撒在地面的2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>在火球高温作用下只发生了闪燃,持续时间为350~400 ms。图4为炸药起爆后1 200 ms时3种样品的池火情况。2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>未发生池火,说明安全柴油具有较强的自熄灭能力。根据燃烧理论<sup>[11]</sup>,着火是反应放热因素与散热因素相互作用的结果。可燃液体可以被引燃,形成稳定火焰的条件是:

$$(\varphi \cdot \Delta H_c - L_v)G_1 + Q_E - Q_1 \geq 0 \quad (2)$$

式中: $\varphi$ 为可燃液体对流传热分数; $\Delta H_c$ 指燃烧热; $L_v$ 为蒸发热; $G_1$ 为可燃液体蒸发速度或燃烧速度; $Q_E$ 为外界热源的加热速率; $Q_1$ 为液面的热损失速率。

若 $(\varphi \cdot \Delta H_c - L_v)G_1 + Q_E - Q_1 < 0$ ,则可燃液体引燃不成功(如闪燃)。池火阶段,认为 $Q_E = 0$ ,因此当单位面积的液面的热量大于0时,才可以发生持续的池火灾。显然,安全柴油液面的热量小于0,即单位液面燃烧产生的净热量小于单位液面的热损失,这是由于安全柴油为含水乳化柴油,其中油包水微粒内的水分汽化温度比油低,水先蒸发欲克服油-水界面的表面张力,需要吸收大量热量,导致油温较

(a) 1<sup>#</sup>(b) 2<sup>#</sup>(c) 3<sup>#</sup>

图4 1200 ms时样品的池火情况

Fig. 4 Pool fires of samples at 1200 ms

低,不能持续产生池火燃烧所需足够的油蒸气,达不到着火浓度下限。

### 3 结论

1) 静爆试验条件下,1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>云雾引燃的能量分别是117.105、256.055、283.845 kJ,说明安全柴油的易燃性和点火敏感性均较低。

2) 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>的黏度大,抛撒雾化效果差,液雾不易着火,火球的扩展尺寸远比1<sup>#</sup>小,而且2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>具有较强的自熄灭能力,池液在高温引燃过程中发生了闪燃现象,但未形成池火。

3) 安全柴油的含水量增加,其所需的点火能量也相应增大;同时也增强了液雾的微爆效应,导致火球表面温度升高。因此,将安全柴油的含水量控制在合适的水平是提高阻燃抑爆能力的重要方法。

### 参考文献

- [1] 钟若瑛. 铝合金抑爆材料在飞机燃油箱上的应用研究[D]. 西安:西北工业大学,2002.  
ZHONG R Y. On the explosion suppression of aluminum alloy material used in aircraft fuel tank [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2002.

- [2] 韩志伟,解立峰,宋晓斌,等.球形抑爆材料与网状抑爆材料抑爆性能对比研究[J].爆破器材,2011,40(6):15-18.  
HAN Z W, XIE L F, SONG X B, et al. Contrast studies on explosion suppression performance between spherical materials and reticular materials [ J ]. Explosive Materials, 2011, 40(6):15-18.
- [3] WEATHERFORD W D, NAEGELI D W. Research on fire-resistant diesel fuel flammability mitigation mechanisms: ADA130743 [ R ]. Southwest Research INST San Antonio Tx Belvoir Fuelsand Lubricants Research Facility,1982.
- [4] MARTY S D. SCHMITIGAL J. Fire resistant fuel:AD A508203[R]. Southwest Research INST San Antonio Tx Belvoir Fuelsand Lubricants Research Facility,2009.
- [5] SCHMITIGAL J A, LE PERA M E. Army testing fire resistant fuels for combat vehicles[J]. National Defense, 2009, (10): 1-3.
- [6] 吴珣. 抑爆柴油的配制及影响因素研究[D]. 北京:北京化工大学,2011.  
WU X. Preparation and influencing factors of explosion proof diesel oil [ D ]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2011.
- [7] 黄勇,解立峰,鲁长波,等.聚能射流引爆柴油的实验研究[J].中国安全科学学报,2013,23(6):63-67.  
HUANG Y, XIE L F, LU C B, et al. Experimental study on diesel detonated by shaped charge jet [ J ]. China Safety Science Journal, 2013, 23(6): 63-67.
- [8] ABBASI T, ABBASI S A. The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE): mechanism, consequence assessment, management [ J ]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 141(3): 489-519.
- [9] 白春华,梁慧敏,李建平,等.云雾爆轰[M].北京:科学出版社,2012:58-59.  
BAI C H, LIANG H M, LI J P, et al. Cloud detonation [ M ]. Beijing: Science Press, 2012: 58-59.
- [10] LIF A, HOLMBERG K. Water-in-diesel emulsions and related systems [ J ]. Advances in Colloid and Interface Science, 2006,123-126:231-239.
- [11] 郝建斌.燃烧与爆炸学[M].北京:中国石化出版社,2012:107-109.  
HAO J B. Combustion and explosion [ M ]. Beijing: China Petrochemical Press, 2012: 107-109.

### Static Experiment for Combustion and Explosion Performances of Safety Diesel Fuel

HUANG Yong<sup>①②</sup>, XIE Lifeng<sup>①</sup>, LU Changbo<sup>③</sup>, AN Gaojun<sup>③</sup>, XIONG Chunhua<sup>③</sup>, LI Yongjian<sup>④</sup>

① School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

② School of Environmental and Safety Engineering, Changzhou University (Jiangsu Changzhou, 213164)

③ Beijing POL Research Institute (Beijing, 102300)

④ Shanxi Jiangyang Chemical Industry Co., Ltd (Shanxi Taiyuan, 030043)

[ABSTRACT] In order to clarify combustion and explosion performance of safety diesel fuel and to modify preparation processes to improve its safety performance, a series of experiments igniting the ordinary diesel fuel cloud (1<sup>#</sup>) and safety diesel fuel with different water content (2<sup>#</sup> and 3<sup>#</sup>) by explosive were conducted. The process of experiments and temperature parameters of fireballs were recorded separately by high-speed camera and the infrared thermal imager. The experimental results show that the initial ignition energy of 1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup> cloud increase gradually under the experimental conditions, but the size and average surface temperature of fireball of 1<sup>#</sup> are larger than those of 2<sup>#</sup> and 3<sup>#</sup>; the pool fire duration of 1<sup>#</sup> is 125s while 2<sup>#</sup> and 3<sup>#</sup> just exhibit flash burn phenomenon and can't form a pool fire, which shows that the emulsified diesel fuels have a stronger self-extinguishing ability. Therefore, it is proved that safety diesel fuels have better flame retardant and explosion suppression performances, and an important method to improve safety performance is to control the water content at the right level of safety diesel fuel.

[KEY WORDS] safety diesel fuel; combustion and explosion performances; fireball; ignition energy; cloud; pool fire