DOI: 10.11883/1001-1455(2015)04-0482-07

柴油爆炸性能外场实验研究*

黄 勇[1,2],鲁长波[3],安高军[3],熊春华[3],解立峰[1]
(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)

摘要:通过∅30 mm 杀爆燃弹外场炮击实验,模拟车辆、装备油箱被炮火击中后二次爆炸场景,采用高速照相机、红外热成像仪分别记录引爆柴油过程和爆炸火球的温度场,对比评估普通柴油、含水型柴油和抑爆型柴油的爆炸特性。实验结果显示:炮弹射击油箱瞬间,柴油液滴被抛撒出油箱,与空气快速混合形成气溶胶,并在炸药能量作用下引发爆炸,形成爆炸火球;不同类型柴油的爆炸火球均经历 3 个发展阶段,但其尺寸、扩展速率和表面温度等有较大差别,普通柴油和含水型柴油的火球这 3 个参数比较接近,都大于抑爆型柴油;含水型柴油的油箱毁伤容积为 108.00 dm^3,远高于普通柴油的 57.65 dm^3 和抑爆型柴油的 38.15 dm^3。研究表明,抑爆柴油中的高分子聚合物能起到较好的抑爆作用。

关键词:爆炸力学;爆炸性能;二次爆炸;柴油;火球
中图分类号:O384 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

轻质石油燃料和危险化学品爆炸性能方面的研究大多集中在车用汽油上。柴油尤其是军用柴油的闪点一般较高(−10 号军用柴油闪点高于 65 ℃),不属于易燃易爆危险化学品,其危险化学特性研究也较少。然而,柴油被广泛用作为大型车辆、机械设备和武器装备的燃料,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,这也是造成车辆装备损毁和人员伤亡的重要原因[1]。

本文中模拟实战条件,开展∅30 mm 杀爆燃弹引爆−10 号军用柴油和含水性、抑爆型军用柴油的实验,并运用高速照相机和红外热成像仪记录引爆过程和爆炸火球参数,通过对爆炸过程、火球参数和油箱毁伤容积等分析和处理,评估上述 3 种类型柴油的爆炸性能和抑爆效果,为进一步改进、完善抑爆型柴油配方提供实验参考。

1 实 验

1.1 实验方法

采用∅30 mm 杀爆燃弹在 120 m 外对盛装五分之一容积油料的卧置油箱的底面蒸气区中心进行炮击,文献[2]中已通过实验证实引爆柴油蒸气比引爆液相柴油造成的爆炸后果危害更大。实验要求炮弹须射正瞄准位置,且在油箱内部爆炸,否则实验结果视为无效。图 1 为炮弹射击点示意图。

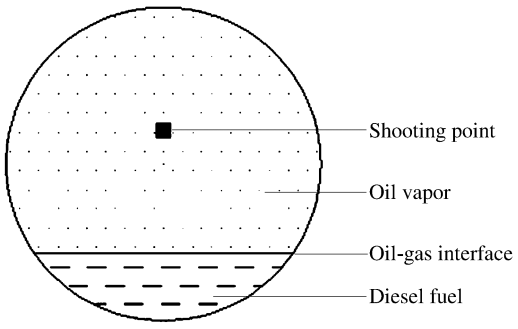

图 1 射击点示意图
Fig. 1 Sketch of the shooting point

1.2 实验油料和装置

(1) 实验油料:Ⅰ为−10 号军用柴油;Ⅱ为含水 15%的−10 号军用柴油;Ⅲ为−10 号抑爆军用柴油,即在−10 号军用柴油中添加了高分子聚合物

* **收稿日期**:2013-12-04;**修回日期**:2014-02-27
基金项目:科技部国际科技合作重大专项(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;**通讯作者**:解立峰,xielifeng319@sina.com。

抑爆剂及抗氧化剂等添加剂，其中抑爆剂的质量分数为 0.4%。

(2) 实验油箱：实验油箱为 108 L 的圆桶，∅500 mm×550 mm；油箱材质为 20 号钢，壁厚为 2 mm。

(3) 测试系统：测试系统主要包括一台高速照相机和一台红外热成像仪，高速照相机为最大拍摄速率为 12 000 s^{-1}，每帧最大分辨率为 1 504×1 128；红外热成像仪的温度响应时间为 2 μs，采用分辨率为 320×240 的微热辐射计探测器接收探测目标所释放出来的能量。

1.3　实验场布置

实验在军工专用实验靶场中进行，具体实验场的布置为：实验油箱卧放于 800 mm 高的支撑钢架上，并用两根 30 mm 宽铁条固定。油箱后侧 1 000 mm 处竖立放置一尺寸为 1 020 mm×1 800 mm×20 mm 的受弹钢板，钢板后为钢筋混凝土掩体，如图 2 所示。30 mm 口径防空火炮架设在轨道座上，炮口中心线与油箱被射击部位处于同一水平位置。高速照相机设置在油箱左前 45°方向约 25 m 处，拍摄速率为 1 000 s^{-1}。红外热成像仪布置在油箱前方 116 m 处，采样周期为 31 ms。



图 2　油箱布置

Fig. 2　The fuel tank layout

2　结果与分析

2.1　柴油爆炸过程

炮弹射击装备车辆油箱引发爆炸通常呈现火球形态。它是因炮弹起爆引起燃油箱破裂，抛撒出来的燃料液滴与空气快速混和形成气溶胶，并在炸药释放的能量作用下形成的。火球边缘的火焰对空气中的燃料液滴进行预热，使其蒸发、热解、着火和燃烧，促进火球的扩展。火球的发展可以分为 3 个阶段[3]：(1)快速扩展期——短时间内火球半径急剧增长，达到特征半径的 60～70%；(2)稳定期——大量的空气与燃料混合，释放大量的能量，以维持持续的高温环境；(3)自由扩散期——扩散期初期，火球内部的液滴仍在剧烈燃烧，火球中部维持着高温，随着能量不断向周围扩散，火球的温度逐渐降低，直至形成烟雾散去。

通过对高速照相机所拍摄的实验照片分析可以发现，炮弹射击油箱瞬间产生亮白色的小火球，同时炮弹破片及柴油液滴向四周猛烈喷射，数毫秒内将火球的大部分遮盖住；大约在 10～20 ms 时，大部分柴油液滴参与燃烧，火球急速扩展；50 ms 左右时，火球逐渐进入稳定期，保持较高温度，一般维持 10～10^3 ms 量级，之后进入自由扩散期。图 3 为 3 种柴油的火球发展过程的典型照片。图 3 显示：20 ms 时，火球急剧膨胀，明显可见炮弹破片和液滴云雾；200 ms 时，火球亮度较高；2 000 ms 时，火球燃烧大幅衰弱，表面呈暗红色，此时柴油Ⅲ的火球已成烟雾散去。

2.2　爆炸性能分析

火球参数和油箱毁伤情况反映了爆炸剧烈程度，因此可以用火球尺寸、扩展速率、表面温度和油箱毁伤容积等参数描述和分析柴油的爆炸性能。

表 1　火球尺寸

Table 1　Fireball size

柴油	D/m	h/m	S/m^2
Ⅰ	7.54	6.21	34.83
Ⅱ	6.49	7.80	40.08
Ⅲ	2.58	4.27	10.32

2.2.1　火球尺寸

运用 AutoCAD 软件对实验照片分析、处理，可以得到火球的直径、截面积等尺寸[4]，如表 1 所示，其中：S、D、h 分别为火球的最大截面积、最大直径及火球直径达到最大时的高度(纵向直径)。

由表 1 可知，柴油Ⅲ的火球最大直径及其高度、最大截面积均最小，且最大截面积只有柴油Ⅰ火球最大截面积的 29.63%。Ⅱ与Ⅰ相比，火球最大直径稍小，但其火球高度以及最大截面积均大于Ⅰ。

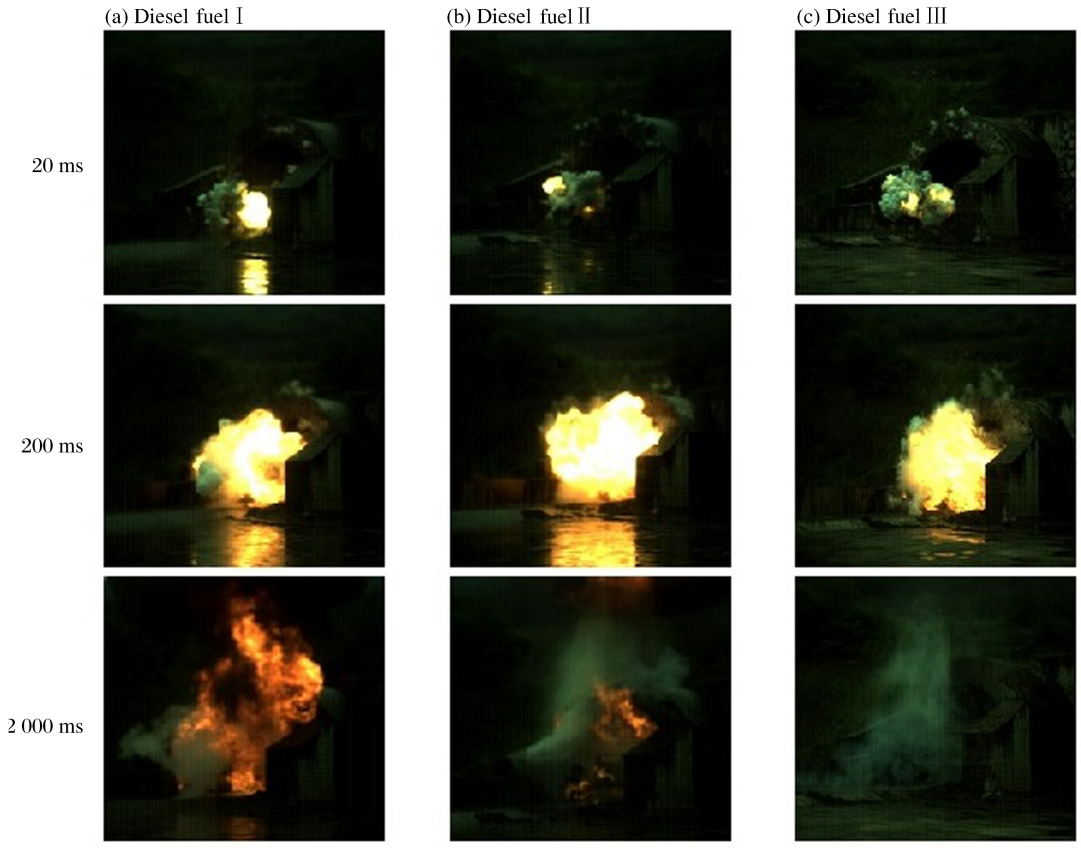

图 3 不同柴油爆炸过程的典型照片

Fig. 3 Typical photos of explosion process for different types of diesel fuel

2.2.2 火球扩展速率

ProAnalyst 是一款可追踪及测量视频中物体各项动态数据的分析软件，主要用于燃烧过程、弹道和轨道跟踪等领域的研究。运用 ProAnalyst 分析软件在水平方向上对火球左侧火焰的外边缘进行跟踪，获取 t_n、$t_{n'}$ 时刻的火球半径 R_n、$R_{n'}$，再将 $(R_{n'}-R_n)/(t_{n'}-t_n)$ 作为 $t_{n'}$ 时刻火球的横向扩展速率 v（即火球半径的增长速率）。图 4 是火球扩展速率曲线图，图中曲线由 3 种柴油不同时刻的扩展速率经二项式拟合而成。

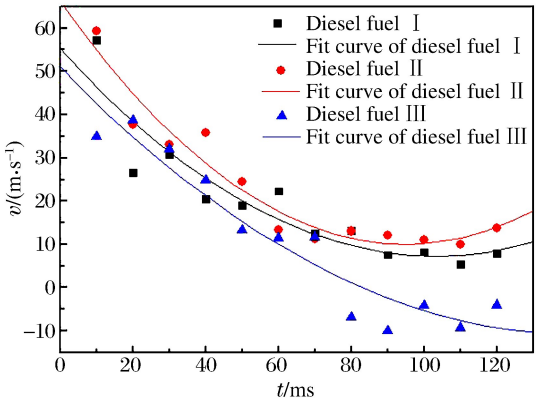

图 4 火球扩展速率曲线

Fig. 4 Expanding rate of the fireball

从图 4 可知：前 20 ms，炮弹炸药驱动作用使柴油形成射流，火球急剧扩展；之后，爆炸推力作用不断削弱，爆炸产物气体逐渐与柴油液滴分离，火球扩展速率随时间迅速衰减（但仍保持较高水平），一般来说液滴初速度大，运动中受到的阻力也较大，速度衰减也越快[5]，因此柴油Ⅰ和Ⅱ的火球在最大扩展速率时的衰减比柴油Ⅲ的火球更显著；此后液滴只在外部气场阻滞作用下做减速运动，而柴油Ⅲ的火球 80 ms 后扩展速率小于零，说明火球水平方向在逐渐收缩、消散。

含水型军用柴油是通过微乳化的方式在柴油中加入一定量水，以提高其防火性能。其中，水是以油包水型乳化油的形式存在。由于水沸点低于油的沸点，炮弹炸药起爆后环境温度急剧升高，水微粒将先

沸腾气化，体积瞬间增大。当水滴中的压力超过油的表面张力及环境压力之和时，水蒸气产生的巨大压力将冲破油膜的束缚，这相当于极小的爆炸，使油雾化成更细小的油颗粒，即“微爆效应”[6-8]。细小油颗粒与空气接触的比表面积增加了 10000 倍左右，变得更易燃烧。因此，图 4 中柴油Ⅱ火球的扩展速率几乎均大于同时刻Ⅰ和Ⅲ火球的扩展速率。

2.2.3　火球表面温度

红外热成像系统清晰地记录了火球表面温度变化过程，得到不同时刻的红外热图像。运用红外热成像系统自带的 MikroSpec 软件对热成像图进行分析、处理，可以得到选定图像区域内的最高、最低和平均温度，以及它们随时间的变化关系。表 2 是 3 种柴油的火球表面温度参数，其中：Δt 为各温度区间的持续时间，$T_{m,max}$ 为火球的表面最高温度 T_m 的最大值，$T_{a,max}$ 表示火球在达到表面最高温度时的平均温度。图 5 是火球表面最高温度随时间的变化关系曲线，T_m 为火球的表面最高温度。

表 2　火球表面温度

Table 2　Surface temperature of fireball

柴油	Δt/ms			$T_{m,max}$/℃	$T_{a,max}$/℃
	1000～1250 ℃	1250～1500 ℃	≥1500 ℃		
Ⅰ	1085	1333	527	1588.9	1264.7
Ⅱ	2190	1629	31	1509.9	1237.5
Ⅲ	391	62	0	1260.1	1001.9

从表 2 看出，柴油Ⅰ和Ⅱ的火球表面最高温度以及最高温度时的表面平均温度比较接近，均远高于柴油Ⅲ火球的表面最高温度（1260.1 ℃）和平均温度（1001.9 ℃）。在高温持续时间方面，柴油Ⅲ的优势更明显，其火球表面最高温度处于 1000 ℃以上的时间只有 453 ms，远低于Ⅰ（2945 ms）和Ⅱ（3850 ms），并且在 1250～1500 ℃、1000～1250 ℃高温段的持续时间同比Ⅰ和Ⅱ，分别是它们的 4.65%、3.81%和36.04%、17.85%。

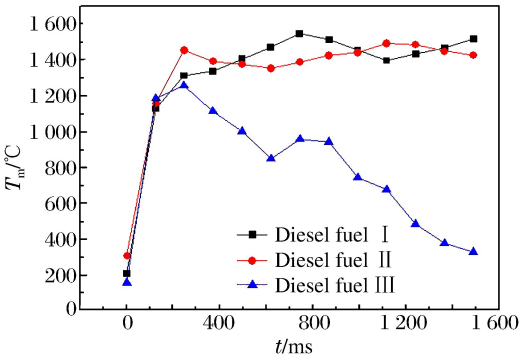

图 5　火球表面最高温度随时间的变化曲线

Fig. 5　Variation of the highest temperature on the surface of the fireball

图 5 显示了 1500 ms 内柴油火球表面最高温度随时间的变化，即火球发展初期表面温度迅速升高，并维持一段时间高温后，又逐渐降低。柴油Ⅲ的火球表面温度迅速升温至高温段，并维持了约 200 ms 后开始快速下降，而柴油Ⅰ和Ⅱ液滴与空气持续、充分反应释放出大量的能量，维持了较长时间 1200 ℃以上的高温。

2.2.4　油箱毁伤容积

同样实验条件下，3 种柴油的油箱的毁伤情况有很大差别，如图 6 所示，这体现了不同类型柴油之间抑爆效果的优劣。从图 6 看出，油箱主要是前后端面破裂，侧壁是数十个破片孔，说明爆炸驱动力主要是沿油箱轴线方向作用，因此可采用(1)式计算油箱毁伤容积，计算结果见表 3。

$$V=\pi(H+b)(D_1^2+D_1D_2+D_2^2)/12 \qquad (1)$$

式中：V 为油箱毁伤容积；H 为靶间距，即油箱前后端面间距（55 cm）；b 为靶板厚度，即油箱壁厚（2 mm）；D_1 和 D_2 为油箱前后端面的破坏尺寸。

图 6 和表 3 表明，Ⅲ的油箱毁伤容积稍小于Ⅰ的油箱，它的前、后端面均是部分翘起，而Ⅱ的油箱则被完全毁伤。

表 3　油箱毁伤容积计算结果

Table 3　Calculation results of fuel tank damage volume

柴油	D_1/dm	D_2/dm	V/dm^3
Ⅰ	2.1	5.0	57.65
Ⅱ	5.0	5.0	108.00
Ⅲ	3.5	2.4	38.15



图 6 油箱毁伤情况

Fig. 6 Fuel tank damage

3 抑爆性能评估与分析

对柴油爆炸过程、爆炸火球参数和油箱毁伤容积等实验结果进行综合分析，可以判定Ⅲ的抑爆效果较好，而Ⅱ不具有抑爆作用，甚至比Ⅰ具有更强的爆炸性能。

柴油Ⅲ具有良好的抑爆效果是因为柴油Ⅲ中添加了高分子聚合物抑爆剂。在实验室，运用液体燃料爆炸性能评定装置(主要由 20 L 球型爆炸仓、抽真空装置、压力采集系统、计算机自动控制系统等组成)进行了抑爆剂含量不同的－10 号抑爆军用柴油的爆炸性能实验。实验结果证明：抑爆柴油中抑爆剂的质量分数为 0～1.0%时，随着抑爆剂含量的增加，抑爆柴油的黏度增大，其抑爆效果总体也越好。实验结果列于表 4，w 为抑爆剂的质量分数，γ 为 20 ℃时油料的运动黏度，p_m 为最大爆炸压力。

表 4 抑爆剂含量对柴油爆炸性能的影响

Table 4 Impact of suppressant content on explosion performance of diesel fuel

w/%	γ/(mm^2 · s^{-1})	p_m/MPa	w/%	γ/(mm^2 · s^{-1})	p_m/MPa
0	3.934	0.606	0.5	32.54	0.202
0.1	6.760	0.574	0.8	79.33	0.152
0.3	16.23	0.348	1.0	148.49	0.157

掺有聚合物抑爆剂的柴油具有较大的黏度，可认为是黏弹性流体。黏弹性流体在高速抛撒过程中分子链的拉伸产生了抵制外部变形的拉伸应力[9-11]，因此它比具有相同黏弹性剪切黏度、密度和表面张力的低黏度牛顿流体在抛撒过程中分解的液滴更大[12]，限制了油滴与空气的充分混合，阻碍了油滴的剧烈燃烧和爆炸。图 7 为Ⅰ、Ⅲ在火球相同发展阶段抛撒出的柴油液滴形态。从图中可以清晰看出，Ⅰ柴油火球左侧抛撒出的液滴呈细小颗粒状，而Ⅲ抛撒出的液滴为大量不规则的块状液滴群。

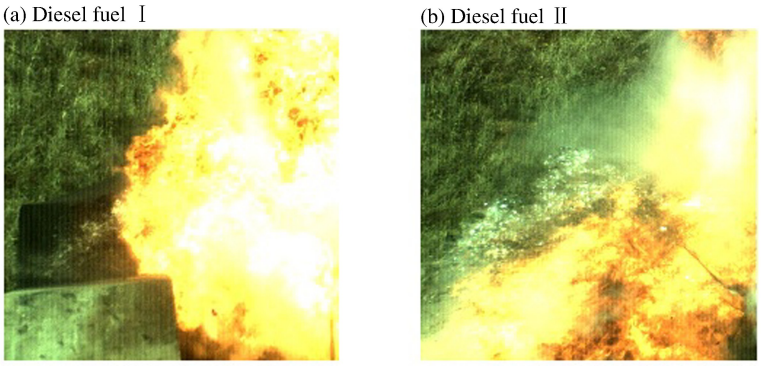

图 7 抛撒出的液滴形态

Fig. 7 Form of dispersal droplets

液体的黏弹性除了对抛撒出的液滴大小、形态有影响外，对火球扩展速率变化的稳定性也有较大影响，例如由于Ⅲ的较大黏弹性，当它在被抛撒过程中气动阻力起主导作用时，浓度梯度高的内部液体向浓度低的外部运动，使扩展速率增大，且这个过程是反复的[13]，因此该阶段Ⅲ既受到气动阻力作用导致能量耗散，黏弹性的作用又会使扩展速率反复增大，在图 4 中表现为柴油Ⅲ火球在外部气场阻滞作用下做减速运动时的扩展速率波动较大。

Ⅱ未起到抑爆作用的原因除了液滴在高温高压下被抛撒出来会发生“微爆”效应外，还有就是高温下油滴中蒸发出来的水蒸气也参与了燃烧反应，分解了更多 H·、·O· 和 ·OH 等活性游离基（主要表现为对油滴燃烧过程中产生的 CO 的催化作用），链式反应式为：

$$\begin{aligned} &H_2O + H\cdot \rightarrow \cdot OH + H_2 \\ &\cdot OH + CO \rightarrow CO_2 + H\cdot \\ &H_2O + H\cdot \rightarrow \cdot OH + H_2 \\ &\cdot OH + CO \rightarrow CO_2 + H\cdot \\ &\vdots \end{aligned} \tag{2}$$

这些活性游离基又大大活化了燃烧过程，使燃烧变得更充分、更完善[14]，促进了火球的扩展和表面高温的持续。

4　结　论

（1）∅30 mm 杀爆燃弹引爆柴油将使柴油液滴与空气形成气溶胶，并起火爆炸形成火球，可以较好的模拟二次爆炸过程。

（2）炮击作用下，含水型柴油比普通柴油具有更高的爆炸性能，表明水的添加加剧了爆炸作用。

（3）－10 号抑爆军用柴油（Ⅲ）的抑爆性能明显高于－10 号军用柴油（Ⅰ）和含水 15 %的－10 号军用柴油（Ⅱ），即抑爆柴油中高分子聚合物抑爆剂能有效地阻止云雾中的细小液滴的形成，阻碍了油液滴在抛撒过程中的燃烧和爆炸，起到较好的抑爆作用。

参考文献：

[1] 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，2011：1.

[2] 黄勇，解立峰，鲁长波，等. 聚能射流引爆柴油的试验研究[J]. 中国安全科学学报，2013，23(6)：63-67.
Huang Yong，Xie Li-feng，Lu Chang-bo，et al. Experimental study on diesel detonated by shaped charge jet[J]. China Safety Science Journal，2013，23(6)：63-67.

[3] 裴明敬，毛根旺，张颖，等. 温压炸药爆炸火球和冲击波传播过程的高速摄影测量[C]// 第四届全国爆炸力学实验技术学术会议论文集. 福建武夷山，2006：264-272.

[4] 阚金玲，刘家骢，曾秀琳，等. 温压炸药爆炸火球的特征[J]. 火炸药学报，2007，30(2)：55-58.
Kan Jin-ling，Liu Jia-cong，Zeng Xiu-lin，et al. Fireball characteristics of a thermal-baric explosive[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants，2007，30(2)：55-58.

[5] 颜事龙，刘锋，岳中文，等. 比药量对水爆炸抛撒成雾运动特性的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报，2007，39(11)：1825-1828.
Yan Shi-long，Liu Feng，Yue Zhong-wen，et al. Influence of the specific explosives on kinetic characteristics of water mist resulting from explosion[J]. Journal of Harbin Institute of Technology，2007，39(11)：1825-1828.

[6] 黄风林，黄勇. 微乳化柴油的研究与发展前景[J]. 内蒙古石油化工，2008(21)：9-10.
Huang Feng-lin，Huang Yong. The research and developing prospect for microemulsifying diesel oil[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry，2008(21)：9-10.

[7] Ebna Alam Fahd M，Yang W，Lee P S，et al. Experimental investigation of the performance and emission characteristics of direct injection diesel engine by water emulsion diesel under varying engine load condition[J]. Applied Energy，2013，102：1042-1049.

[8] Maiboom A，Tauzia X. NOx and PM emissions reduction on an automotive HSDI Diesel engine with water-in-diesel

emulsion and EGR: An experimental study[J]. Fuel, 2011,90(11):3179-3192.

[9] Anna S L, McKinley G H. Elasto-capillary thinning and breakup of model elastic liquids[J]. Journal of Rheology, 2001,45(1):115-138.

[10] Chao K K, Child C A, Grens E A, et al. Antimisting action of polymeric additives in jet fuels[J]. AICHE Journal, 1984,30(1):111-120.

[11] Christanti Y, Walker L M. Effect of fluid relaxation time of dilute polymer solutions on jet breakup due to a forced disturbance[J]. Journal of Rheology, 2002,46(3):733-748.

[12] Christanti Y, Walker L M. Surface tension driven jet break up of strain-hardening polymer solutions[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2001,100(1/2/3):9-26.

[13] 郭学永,惠君明,解立峰.燃料爆炸抛撒过程的实验研究[J].高压物理学报,2005,19(2):120-126.
Guo Xue-yong, Hui Jun-ming, Xei Li-feng. Experimental study on the process of fuel explosive dispersion[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005,19(2):120-126.

[14] 傅维镳,龚景松,侯凌云.含水燃料的燃烧[M].北京:高等教育出版社,2009:22-25.

Experimental research on explosion performance of diesel fuel in the external field

Huang Yong[1,2], Lu Chang-bo[3], An Gao-jun[3], Xiong Chun-hua[3], Xie Li-feng[1]

(1. *School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*;
2. *School of Environmental and Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou* 213164, *Jiangsu, China*;
3. *Oil Research Institute, General Logisitics Department of PLA, Beijing* 102300, *China*)

Abstract: In order to simulate the scene of secondary explosion caused by the fuel tank of vehicle, equipment bombarded, the shelling experiments of ∅30 mm fragmentation explosive incendiary shell were conducted in the external field. The process of diesel fuel detonated and temperature parameters of fireball were recorded by a high-speed camera, the infrared thermal imager separately. Explosion performance of ordinary diesel fuel, diesel fuel with water content and explosion suppression diesel fuel were compared and evaluated. The results show that the explosion fireball occurs due to the explosive energy acting on aerosols which result from quick mixing of air and diesel fuel dispersed from the fuel tank at the moment when shells shoot the fuel tank. The development all the explosion fireballs have three phases, but there are still notable differences in the sizes, expanding rates and surface temperatures among explosion fireballs of three types of diesel fuel. These three fireball parameters of ordinary diesel fuel and diesel fuel with water content are similar, which are greater than that of explosion suppression diesel fuel. Fuel tank damage volume of diesel fuel with water content is 108.00 dm^3, which is far greater than that of ordinary diesel fuel (57.65 dm^3) and explosion suppression diesel fuel (38.15 dm^3). The results also confirm the difference between three types of diesel fuel in explosion performance.

Key words: mechanics of explosion; explosion performance; second explosion; diesel fuel; fire ball

(责任编辑 王小飞)