文章编号：1000-5773(2013)05-0745-06

模拟柴油油箱爆炸过程的实验研究*

朱英中[1]，鲁长波[2]，安高军[2]，解立峰[1]

（1.南京理工大学化工学院，江苏南京　210094；
2.中国人民解放军总后勤部油料研究所，北京　102300）

摘要：为了研究柴油在外界能量作用下的燃爆特性，在无约束实验条件下，使用高速摄像及红外热成像手段，观测了模拟油箱内柴油着火、爆炸的过程，分析了柴油最小点火能与点火位置的关系，并对不同点火位置处的爆炸火球表面温度分布和火球参数进行了比较。结果表明：油箱内柴油的着火爆炸过程呈现爆炸火球和池火两个典型阶段；油箱蒸汽区的最小点火能为45.59 kJ，燃料区的最小点火能为307.20 kJ，燃料区的最小点火能是蒸汽区的6.7倍；在蒸汽区内，最小点火能量与点火位置无关，点火位置距油/气分界面越远，爆炸火球的表面最高温度越低、面积越小、辐射总能量越低，油/气分界面处点火形成的爆炸火球危险性最高。

关键词：柴油；爆炸；最小点火能；火球
中图分类号：O389；TQ564　　**文献标识码**：A

1　引　言

柴油油箱爆炸是柴油在运输、储存和使用过程中面临的主要危险之一，研究柴油油箱受到外界能量冲击后油料的抛撒、着火、爆炸过程在军事、消防及民用工程方面有着重要应用。国内外学者对燃料抛撒、爆炸形成的火球效应进行了大量研究，Dorofeev等[1]以0.1～100 t的汽油和煤油为实验研究对象，采用TNT起爆，获得了爆炸火球直径、持续时间与燃料量的关系；Roberts等[2]研究了液化天然气(LPG)的爆炸火球，认为燃料的热辐射伤害比爆炸产生的破片或冲击效应更危险；解立峰等[3]、何志光[4]利用FAE(燃料-空气炸药)模拟装置，研究了燃料爆炸火球的温度场，描述了爆炸火球的特征参数；傅智敏等[5]讨论了烃类燃料火球破坏效应的定量分析方法。这些研究一般采取中心装药方式，未考虑点火位置对燃料着火及爆炸火球的影响。

本实验使用升降法研究模拟油箱内柴油的最小点火能量，通过多次实验得到柴油油箱最容易发生爆炸的点火位置；并利用高速摄像机记录柴油的抛撒和爆炸过程，利用红外测温系统得到柴油爆炸火球的温度场变化，研究结果为控制柴油油箱爆炸提供基础。

2　实验装置及方法

实验装置采用Mikron Scan 7200V型红外热成像仪，它利用320×240微热辐射计UFPA探测器接收被测物体辐射的红外能量，将其转化为电信号，再运用微机、模拟信号调理、数字信号与图像处理技术，对温度场进行数字和图像处理，从而得到高温表面的温度，系统温度响应时间为2 μs。高速摄像采用Photron公司的Fastcam nltima APX型相机，拍摄频率为2 000帧/秒，单帧分辨率1 024×1 024。

* **收稿日期**：2011-10-13；**修回日期**：2013-07-04
基金项目：国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院NSAF联合基金(10676120)
作者简介：朱英中(1987—)，男，硕士研究生，主要从事爆燃与爆轰研究. E-mail：zhuyingzhong@hotmail.com
通讯作者：解立峰(1965—)，男，博士，副教授，主要从事多相爆轰理论及技术研究. E-mail：xielifeng319@sina.com

实验油料为－10 号柴油，其闪点为 91 ℃，20 ℃时的密度为 0.817 g/cm^3，利用气相色谱质谱联用仪(GC-MS)测得其组分如表 1 所示。采用壁厚0.5 mm、容量为 5 L 的模拟油箱，灌装 3 L 柴油，如图 1 所示。

表 1 柴油成分分析

Table 1 Composition of diesel

Constituents	Content/(%)
Alkane	53.45
Monocyclic alkane	20.67
Bicyclic alkane	11.65
Tricyclic alkane	3.47
Else	10.76

图 1 为实验油箱的示意图，实验中留空率为 40%，保证了足够的蒸汽空间。油箱内分为 2 个区域：油料区(Diesel)和蒸汽区(Vapor)，油料区为液相柴油部分，蒸汽区为油箱上部柴油蒸汽部分。以油/气分界面(Interface)为坐标横轴，蒸汽区距油/气分界面的距离 L 为正，油料区距油/气分界面的距离 L 为负。在油箱内 4 种典型位置处进行了点火爆炸实验，分别为：油/气分界面(L=0)，蒸汽区中部(L = 45 mm)，蒸汽区外边缘(L=90 mm)以及油料区中部(L=－55 mm)。

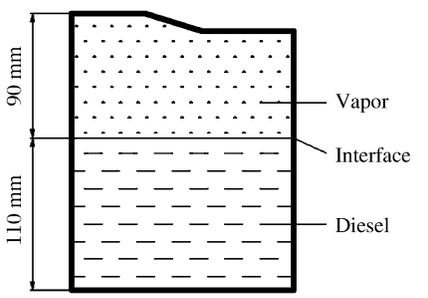


图 1 模拟柴油油箱示意图

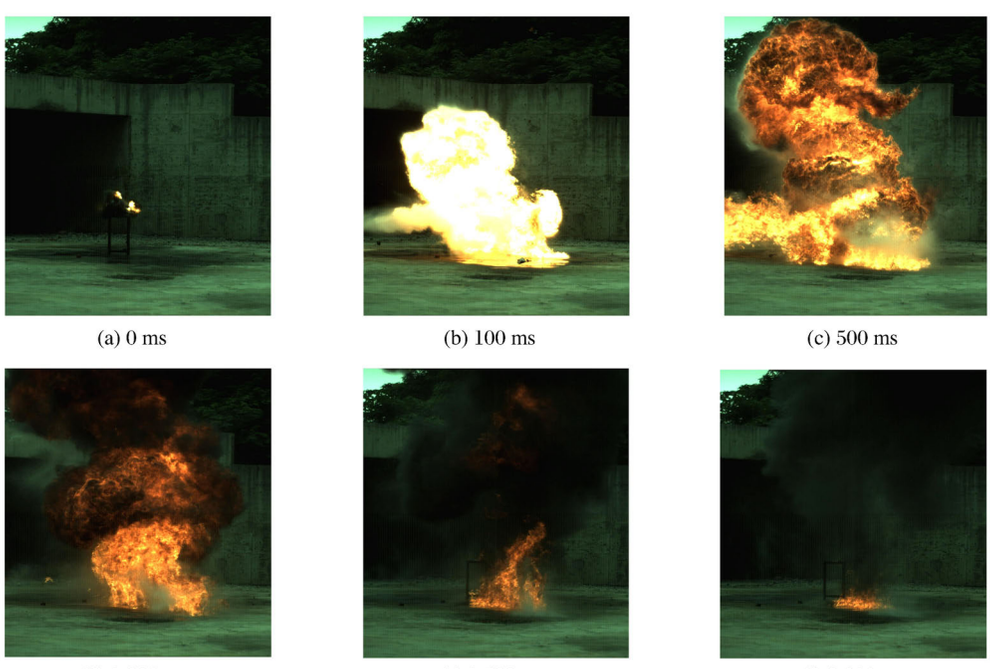
Fig. 1 Schematic of the simulated diesel tank

本研究采用强点火方式，根据升降法原理和对折实验法测定柴油油箱的最小点火能量，即在固定点火位置的条件下，采用一定能量的雷管和炸药，若油箱内燃料发生着火爆炸则按一定步长降低点火能量，若未点燃则按同一步长升高能量，反复实验，直到两次点火能量重合或达到实验精度的要求为止。依靠高速摄像及红外测温系统，记录燃料点火过程和爆炸火球的温度分布，并以此作为柴油油箱内燃料是否发生着火爆炸的评判依据。

3 实验结果及分析

3.1 柴油着火爆炸过程

图 2 所示为蒸汽区中部点火时柴油的着火爆炸过程。从图 2 中可以看出，点火后油箱经历了 2 个



(a) 0 ms (b) 100 ms (c) 500 ms

(d) 1 000 ms (e) 1 500 ms (f) 2 000 ms

图 2 柴油油箱着火爆炸过程

Fig. 2 Ignition and explosion process of the simulated diesel tank

不同的典型阶段。第一阶段中柴油的着火爆炸以爆炸火球形式存在,此阶段中起爆炸药的爆炸冲击波使油箱破裂,柴油抛撒成雾与空气快速混合,着火后形成爆炸火球并迅速扩展。因燃料量的不同,第一阶段的持续时间即爆炸火球持续时间也不同[1]。进入第二阶段,爆炸火球消散,柴油的燃烧以池火形式存在。池火的形成是由于部分未抛撒柴油溢出,并在爆炸火球的作用下被点燃,故而形成稳定燃烧。需要注意的是,在点火能量很高时,柴油燃料在火球阶段几乎全部反应,因此没有池火阶段。

3.2 最小点火能与点火位置的关系

利用升降法得到了不同位置处——蒸汽区外边缘(L=90 mm)、蒸汽区中部(L=45 mm)、油/气分界面(L=0)和油料区中部(L=−55 mm)——的最小点火能,部分实验结果见表 2。

表 2 中,当点火位置处于蒸汽区中部(L=45 mm)及油/气分界面(L=0)时,一旦柴油被点燃,在爆炸火球之后就会出现池火燃烧;而当点火位置处于蒸汽区外边缘(L=90 mm)时,点火能分别为 51.25 和 96.56 kJ(这一能量值是该位置处最小点火能的 2 倍),柴油被点燃后均未出现池火,这是由于在蒸汽区外边缘炸药爆炸后不能使油箱整体破裂形成油料抛撒,因此不能形成池火燃烧。依据实验结果,得到了柴油的最小点火能随点火位置的变化关系,其结果如图 3 所示。

表 2 模拟柴油油箱点火实验结果

Table 2 Test results of the simulated diesel tank ignition

Ignition location L/(mm)	Ignition energy E/(kJ)	Ignition	Pool fire
0	39.93	No	No
0	51.25	Yes	Yes
0	62.58	Yes	Yes
45	39.93	No	No
45	51.25	Yes	Yes
45	62.58	Yes	Yes
90	39.93	No	No
90	51.25	Yes	No
90	96.56	Yes	No
−55	62.58	No	No
−55	119.22	No	No

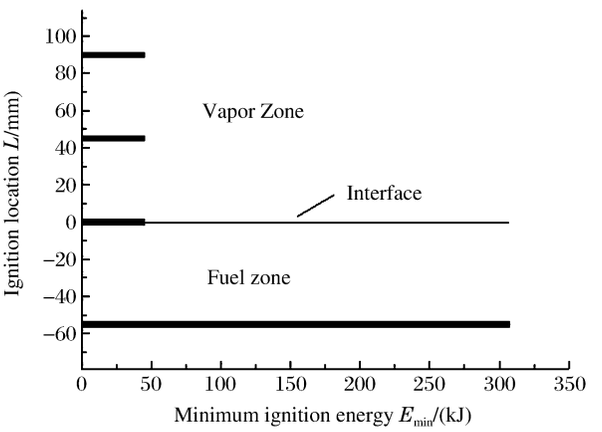


图 3 最小点火能量与点火位置的关系

Fig. 3 Relationship between minimum ignition energy and ignition location

图 3 表明,蒸汽区内的最小点火能不随点火位置的改变而变化,实验获得的蒸汽区内柴油的最小点火能为 45.59 kJ;而油料区中部柴油的最小点火能为 307.20 kJ,是蒸汽区最小点火能的 6.7 倍。这是由于在蒸汽区点火时,炸药爆炸后释放的热量使得燃料迅速汽化,燃料蒸汽首先被点燃,因此在蒸汽区内不同位置处的最小点火能量相同。当点火位置处于油料区中部时,炸药爆炸后首先使燃料产生抛撒过程,此时的燃料抛撒与吴德义等[6-7]研究的爆炸冲击波致使液体发生抛撒的过程类似。在爆炸冲击波作用下,油箱破裂产生裂缝,燃料从裂缝中喷出形成射流,射流进入空气后界面发生失稳,在空气阻力、表面张力以及粘性耗散的作用下,燃料开始破裂成液体丝、带、块或不规则液体单元。抛撒能量较弱时形成的液滴尺寸较大,此时的着火是燃料液滴表面的反应,所需点火能量显著高于蒸汽区点火能。此外,炸药爆炸后产生的热量不足以使燃料液滴云团体系的温度达到着火点,也是燃料区中部点火难以着火的原因之一。

3.3 爆炸火球与点火位置的关系

3.3.1 爆炸火球特征参数

从爆炸火球来看,尽管蒸汽区不同位置处的最小点火能相同,但爆炸火球却有显著区别。在点火能量为 50.4 kJ 的情况下,点火位置位于油/气分界面(L=0)和蒸汽区中部(L=45 mm)的火球形态类似,蒸汽区外边缘(L=90 mm)的火球明显较前两者要小;而在燃料区中部(L=−55 mm)点火时,油箱内柴

油只发生抛撒，没有着火，不形成火球。不同位置处的爆炸火球如图 4 所示。

由图 4 可知，柴油油箱着火爆炸后，火球呈不规则形状，主要沿纵向发展；爆炸火球的中心较高，爆炸产物与周围空气的热交换，使得火球边缘的温度迅速降低。不同位置处火球的特征参数见表 3。

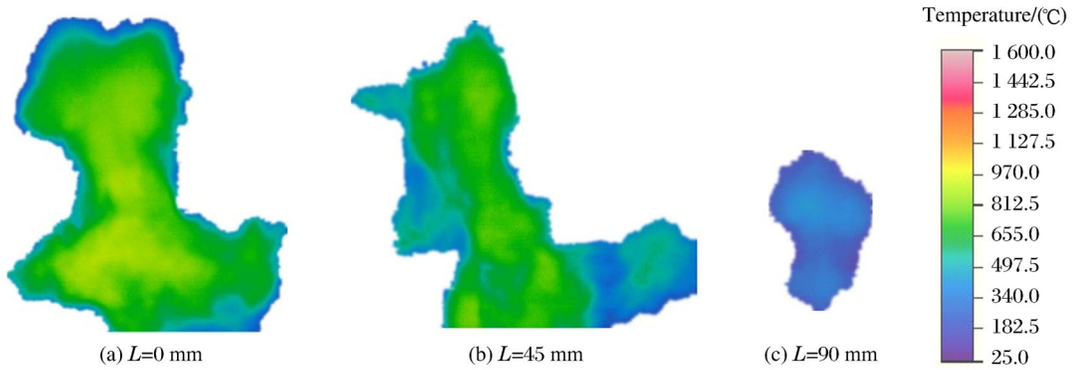


图 4 不同点火位置处柴油的爆炸火球

Fig. 4 Fireballs at different ignition locations

表 3 不同点火位置处爆炸火球特征参数

Table 3 Fireballs parameters with different ignition locations

L/(mm)	θ/(℃)	t/(ms)	t_d/(ms)	D/(m)	S/(m^2)
0	1 405	1 435	1 239	2.24	14.04
45	1 249	1 924	1 500	2.15	9.66
90	618	815	—	0.74	1.39

表 3 中，L 为点火源距油/气分界面的距离，θ 为爆炸火球表面最高温度，t 为火球持续时间，t_d 为高温区(1 000 ℃以上)持续时间，D 为爆炸火球最大直径，S 为爆炸火球最大面积。由表 3 可知：$\theta(L=0)>\theta(=45\,\text{mm})>\theta(L=90\,\text{mm})$，$t(L=45\,\text{mm})>t(L=0)>t(L=90\,\text{mm})$，$t_d(L=45\,\text{mm})>t_d(L=0)$，$D(L=0)>D(L=45\,\text{mm})>D(L=90\,\text{mm})$。$L=0$ 和 45 mm 处的爆炸火球直径相近，但面积差异较大。蒸汽区外边缘($L=90$ mm)处，爆炸火球没有形成高温区间，其各项火球特征参数均明显小于 $L=0$ 和45 mm处。

通过红外测温系统得到了柴油爆炸火球的表面最高温度随时间的变化曲线，如图 5 所示。在 $L=45$ mm处，0～100 ms 时，火球表面温度迅速升高，温升速率达到 7.94×10^3 ℃/s；100～1 600 ms，火球表面最高温度持续在 1 000 ℃以上，之后反应区温度迅速下降，进入到池火阶段后，反应区最高温度在 600 ℃以下；而 $L=90$ mm 处的火球表面温度较$L=0$ 和 45 mm 处的要低，其表面最高温度仅 618 ℃，爆炸火球之后没有出现池火。

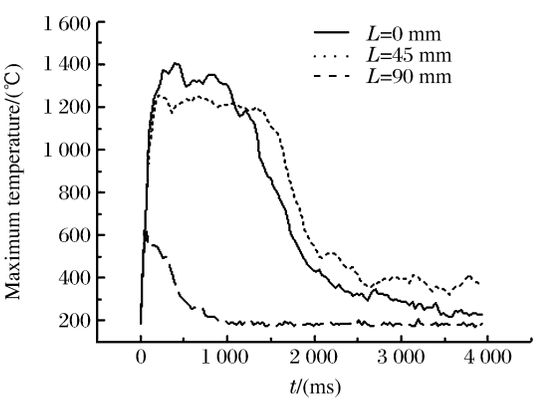


图 5 不同点火位置处爆炸火球表面最高温度随时间变化图

Fig. 5 Maximum surface temperature of fireballs varies with time at different ignition locations

3.3.2 爆炸火球热辐射参数

现有的爆炸火球模型[8-9]在评定火球热辐射危险时都是基于火球直径进行的，而本研究中的火球形状不规则，使用基于火球直径的评价模型将与实际情况不符。为了对爆炸火球的危险性进行定量化比较，依据红外测温仪原理，计算爆炸火球的辐射总能量作为火球危险性的比较依据。计算中使用的不同时刻火球面积由高速摄像照片获得，此法得到的结果更接近于实际情况。

根据玻尔兹曼定律

$$W_0 = \sigma T_0^4 \tag{1}$$

式中:W_0 为黑体辐射度;σ= 56.7 nW/(m^2 · K^4),为 Stefan-Boltzmann 常量;T_0 为黑体绝对温度。　但实际中,被测物体并非理想黑体,一般可视为灰体。灰体辐射功率与物体表面的比辐射率有关,同时被测物体表面温度是时间 t 的函数,因此,由(1)式得到灰体的辐射度

$$W(t) = \varepsilon\sigma T^4(t) \tag{2}$$

式中:$W(t)$为灰体辐射度;ε 为物体表面的比辐射率,根据实际测试经验,选取 ε=0.35;$T(t)$为某一时刻被测灰体的表面温度。

又因 $Q(t) = W(t) \cdot S(t)$,故有

$$E = \oint Q\mathrm{d}t = \oint WS\,\mathrm{d}t = \oint \varepsilon\sigma T^4(t)S(t)\mathrm{d}t \tag{3}$$

式中:$Q(t)$为爆炸火球表面的热辐射功率;E 为爆炸火球的辐射总能量;$S(t)$为某一时刻的火球面积。

基于(1)式～(3)式,计算得到不同点火位置处的热辐射参数,如表 4 所示。

表 4　不同点火位置处爆炸火球热辐射参数

Table 4　Heat radiation parameters of fireballs at different ignition locations

L/(mm)	W/(W/m^2)	Q/(W)	E/(kJ)
0	157 388.9	2 209 983	65 100
45	106 532.2	1 029 187	40 200
90	12 515.7	17 411	46.6

表 4 中,W 为火球表面最高热辐射度,Q 为火球表面最大热辐射功率。点火位置位于油/气分界面处(L=0)的爆炸火球辐射总能量是蒸汽区中部(L=45 mm)的 1.6 倍,是蒸汽区外边缘(L=90 mm)的 1 300 倍以上。因此得知,L=0 时爆炸火球危险性最大,L=90 mm 时危险性相对最小。

综上所述,可以发现在蒸汽区点火时,着火过程是:燃料蒸汽着火—燃料抛撒—液滴表面反应,而燃料区的着火过程是:燃料抛撒—液滴表面反应,着火过程的不同,使得蒸汽区和燃料区的点火能量存在显著差异。蒸汽区内,点火位置不同将导致爆炸火球的差异:当点火位置位于油/气分界面(L=0)时,炸药爆炸使油箱破裂,抛撒后的燃料液滴能够迅速与空气混合均匀,形成爆炸云团;而当点火位置位于蒸汽区中部(L=45 mm)时,炸药离燃料区较远,爆炸后对燃料的抛撒作用减弱;特别是当点火位置位于蒸汽区外边缘(L=90 mm)时,大部分燃料未能抛撒形成云团,火球只是由蒸汽区部分蒸汽及少量燃料引起的。因此,在蒸汽区内,随着点火位置远离油/气分界面,形成的爆炸火球的危险性将减弱。

4　结　论

(1) 柴油油箱内燃料的着火爆炸存在 2 个典型阶段:爆炸火球阶段和池火阶段。

(2) 实验测得柴油油箱内蒸汽区的最小点火能为 45.59 kJ,而油料区的最小点火能为 307.20 kJ。蒸汽区最小点火能与点火位置无关,油料区最小点火能是蒸汽区的 6.7 倍,二者最小点火能的差异是由于着火过程不同造成的。这一发现表明,若油箱的蒸汽区部分遭到打击,将更容易着火爆炸。

(3) 油/气分界面处点火形成的爆炸火球表面最高温度为 1 405 ℃,火球面积达 14.04 m^2。在蒸汽区内,点火位置距油/气分界面越远,爆炸火球的表面最高温度越低,火球面积越小,这一特性是由于远离油/气分界面后炸药对燃料的抛撒能力减弱造成的。

(4) 当爆炸源处于油箱的油/气分界面时,形成的爆炸火球辐射总能量最大,因此该位置处点火的爆炸火球更具危险性。

References:

[1] Dorofeev S B, Sidorow V P. Fireballs from deflagration and detonation of heterogeneous fuel-rich clouds [J]. Fire Saf J, 1995, 25(4): 323-326.

[2] Roberts T, Gosse A, Hawksworth A. Thermal radiation from fireballs on failure of liquefied petroleum gas storage vessels [J]. Process Saf Environp, 2000, 78(3): 184-192.

[3] Xie L F, He Z W, Yan F, et al. An experimental study on the parameter of FAE temperature field [J]. Journal of Ballistics, 2007, 19(1): 48-50. (in Chinese)
解立峰, 何正文, 严 峰. FAE 模拟装置温度场参数实验研究 [J]. 弹道学报, 2007, 19(1): 48-50.

[4] He Z G. Study on heat radiation effect of FAE fireballs [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004. (in Chinese)
何志光. FAE 爆炸火球热辐射效应研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2004.

[5] Fu Z M, Huang J Y, Fu M. Quantitative analysis of thermal radiation damaging effects caused by liquid or gaseous hydrocarbon fires [J]. China Safety Science Joumal, 2008, 18(9): 29-36. (in Chinese)
傅智敏, 黄金印, 付 敏. 烃类流体火灾伤害破坏作用定量分析 [J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(9): 29-36.

[6] Wu D Y, Yang J M. Experimental investigation on liquid dispersal induced by explosions [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(1): 91-95. (in Chinese)
吴德义, 杨基明. 强冲击波作用下液体抛撒的实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(1): 91-95.

[7] Wu D Y, Yang J M. Experimental investigation of liquid jet at initial stage of liquid dispersal with blast [J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2003, 17(3): 36-38. (in Chinese)
吴德义, 杨基明. 爆炸冲击波作用下液体抛撒初期射流形成的实验研究 [J]. 流体力学实验与测量, 2003, 17(3): 36-38.

[8] Satyanarayana K, Borah M, Rao P G. Prediction of thermal hazards from fireballs [J]. J Loss Prev Process Ind, 1991, 4(5): 344-347.

[9] Martinsen W E, Marx J D. An improved model for the prediction of radiant heat from fireballs [C]//International Conference and Workshop on Modeling Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials, CCPS, San Francisco, California, 1999: 1-16.

Study on the Deflagration Process of Simulated Diesel Oil Tank

ZHU Ying-Zhong[1], LU Chang-Bo[2], An Gao-Jun[2], XIE Li-Feng[1]

(1. *School of Chemical Engineering, NUST, Nanjing* 210094, *China*;
2. *Beijing POL Research Institute, Beijing* 102300, *China*)

Abstract: In order to study the deflagration characteristics of diesel oil ignited by external energy, tests were carried out without any restraints to observe the ignition and explosion process of the oil tank using thermal imager and high-speed camera. Relationship between minimum ignition energy of the diesel oil and ignition location was analyzed. Surface temperature and other parameters of fireballs at different ignition locations were measured and compared. Results show that the fuel explosion of oil tank occurs as two distinct stages: fireball and pool fire. The minimum ignition energy in vapor zone and fuel zone are 45.59 and 307.20 kJ respectively, and the minimum ignition energy is irrelative with ignition location in vapor zone. The maximum surface temperature and area of fireballs depend on the distance between ignition location and the phase interface. Fireballs ignited closest to the phase interface are most potentially dangerous.

Key words: diesel fuel; deflagration; minimum ignition energy; fireball