DOI: 10.11883/bzycj-2016-0291
文章编号: 1001-1455(2018)03-0534-07

柴油的烤燃燃爆性能实验*

刘 健[1],姚 箭[1],宋述忠[2],李 斌[1],解立峰[1],王永旭[1]
(1.南京理工大学化工学院,江苏 南京 210094;
2.北京奥信化工科技发展有限责任公司,北京 100043)

摘要: 为研究 3 种柴油燃料装入 76 L 标准小型货车油箱在明火烤燃下的燃爆特性,利用摄像机、高速照相机、红外热成像仪、热电偶以及电子秤分别记录并测量了油箱的烤燃过程及其产生的喷射火焰表面最高温度、火焰尺寸、油箱内外部温度变化、油料蒸发速率等参数。结果表明:相同烤燃条件下,-10# 柴油油箱发生剧烈燃烧和爆炸,防火柴油与阻燃抑爆柴油油箱出现了喷射火焰。防火柴油油箱喷射火焰最高温度、火焰高度、内部蒸气温度和油液温度平均升温速率比-10# 柴油分别降低 31.39%、75.34%、39.05%和 57.32%;阻燃抑爆柴油油箱喷射火焰最高温度、火焰高度、油料质量蒸发速率、内部蒸气温度和油液温度平均升温速率比防火柴油分别降低 24.67%、61.11%、14.29%、7.54%和 7.54%;阻燃抑爆柴油在抑制火焰温度上升、火球尺寸增长以及降低质量蒸发速率上效果更明显。

关键词: 阻燃抑爆柴油;油箱;烤燃;喷射火焰;蒸发速率;蒸气温度
中图分类号: O382.1 **国标学科代码**: 1303520 **文献标志码**: A

车辆的燃油系统一直是其最薄弱的环节。由于油料的闪点低,而军用装甲装备、飞机、大型货运汽车以及油罐槽车具有超大油箱且经常处于明火、静电、枪击、雷电及意外碰撞的环境,燃油箱不可避免存在火灾爆炸危险。特别在军事领域,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,造成严重的装备损毁和人员伤亡[1-3]。

以往,油箱阻燃防爆技术主要通过填充阻隔防爆材料,而长时间使用后材料会被腐蚀和破损并影响燃料基本性能[4-6]。目前,对阻燃抑爆柴油有了相关研究。防火柴油(fire-resistant diesel, FRD)[7]是利用微乳化技术向柴油中添加了表面活性剂和水的柴油。阻燃抑爆柴油(fire-resistant-explosion-suppression diesel, FED)是向柴油中添加了聚合物抑爆剂和复合抗抛撒剂的柴油。Gupta 等[8]通过庚烷池火和双流体雾化器研究水雾特性在抑制油池火焰上的作用。Fahd 等[9]研究 10%水乳化柴油在梯度变化负载条件下,直喷式柴油机的性能和排放变化,并与基地柴油进行比较。Ochoterena 等[10]主要利用 NMR 和光学分析表征水系乳化柴油、微乳化柴油和常规柴油燃料的物理性质、喷雾特征及燃烧特性。Apparao 等[11]通过爆炸装置形成环氧丙烷和环氧乙烷易爆气溶胶,研究碳氢燃料在空气中的抛撒分散性条件。Marty 等[12]评估水系乳化防火燃料发展局限性及 JP-8 防火燃料的使用。在我国,有相关研究:陈中元等[13]研究微乳化柴油中以正构醇作助乳化剂,利用三元相图分析体系中组分相的变化情况,并通过实验对微乳化柴油进行分析测试;黄勇等[14]通过静爆实验,研究了安全柴油的燃爆性能,以进一步完善制备工艺,提高其性能;魏成龙[15]研究了抑爆剂、乳化剂与助乳化剂的选择对阻燃抑爆柴油的阻燃性能的影响,进行微观表征。阻燃抑爆柴油的相关研究较多,但该燃油的阻燃抑爆效果还未在明火烤燃油箱的实验中得到验证。

为此,本文中利用 76 L 标准小货车油箱,考察油箱在模拟外部受热条件下的燃爆特性。对比盛装不同油料的油箱,在明火炙烤下是否发生剧烈的燃烧和爆炸现象,以评估燃油的阻燃抑爆效果,为进一步改进及日后相关标准的制定提供参考。

* **收稿日期**: 2016-09-21; **修回日期**: 2016-12-08
基金项目: 国家国际科技合作专项项目(2013DFR0080);江苏省科技支撑计划项目(BE2014735)
第一作者: 刘 健(1992—),男,硕士研究生; **通信作者**: 李 斌,wriber@sina.com。

1　实　验

1.1　装置与仪器

标准货车油箱的容积为 76 L，材质为 20 钢，长宽高分别为 680、400、290 mm，壁厚为1.5 mm。钢制燃烧池的长宽高分别为 700、460、200 mm。

WRNT-187 K 型热电偶的最大量程 1 000 ℃，长 1.5 m。Fastcam nltima APX 型高速照相机（日本 Photron 公司生产）的拍摄频率为1 000 s^{-1}，每帧像素 1 024×1 024。IRS 669 型红外热成像仪由上海热像机电科技有限公司生产。铝板作为验证板使用，长宽高分别为 2 000、2 000、2 mm，布氏硬度 23，抗拉强度 90 MPa。XMTA-9000 型智能温度数显仪由北京雷辉盛宗仪表有限公司生产。还有高清摄像机、电子秤等。

1.2　样品

实验油料为－10# 柴油、防火柴油（FRD）、阻燃抑爆柴油（FED），表 1 为 3 种柴油的理化性能。

表 1 实验油料理化性能

Table 1 Physical and chemical properties of experimental diesel

柴油	成分	运动黏度(20 ℃)/($mm^2 \cdot s^{-1}$)	闪点/℃	密度/($kg \cdot m^{-3}$)
－10# 柴油	w(－10# 柴油)＝100%	3.934	84	808
FRD	w(－10# 柴油)＝87%，w(水)＝5%，w(添加剂)＝8%	6.892	82	826
FED	w(－10# 柴油)＝86.6，w(水)＝5%，w(添加剂)＝8%，w(抑爆剂)0.4%	20.850	81	842

1.3　实验方法与布置

参照 GB/T 14372-2013《危险货物运输：爆炸品的认可和分项试验方法》、AQ 3001-2005《汽车加油（气）站、轻质燃油和液化石油气汽车罐车用阻隔防爆储罐技术要求》和 GJB 3075-1997《军用柴油规范》，分别将盛装 38 L 的－10# 柴油、防火柴油和阻燃抑爆柴油的试验油箱放置于金属支架上。钢制燃烧池置于支架正下方，在油箱内部分别添加热电偶测量烤燃过程中油蒸气温度与油液温度，油箱四周的三面（除下风面）距离其边缘 4 m 处竖直放置验证板，并且使见证板中心与油箱中心同高。每次实验前在油池中添加 20 L 煤油作为燃料。高速摄像机、普通摄像机和红外热成像仪置于距油箱中心 30 m 处。红外热成像仪用于采集油箱及燃烧火焰的表面温度，采样周期为 1 s。电子秤用于测量明火烤燃过程中油箱内油料蒸发速率。实验布置如图 1 所示。

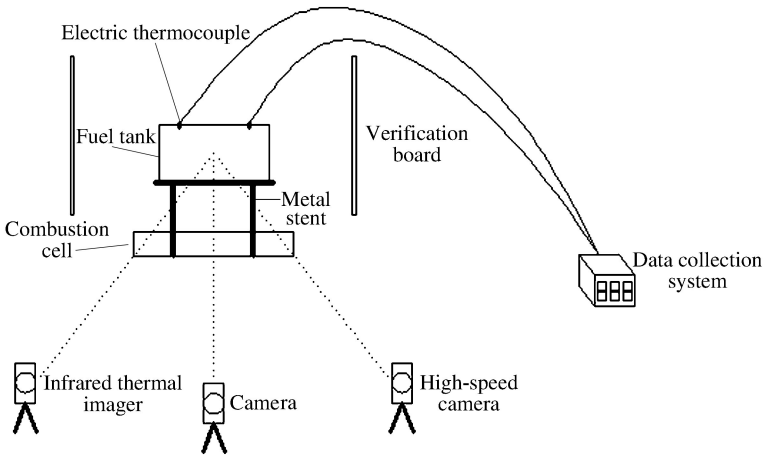


图 1 实验布置示意图

Fig. 1 Experimental arrangement

2 结果分析

2.1 现象分析

图 2 为高清摄像机拍摄的分别盛装－10# 柴油、防火柴油、阻燃抑爆柴油 3 组油箱烤燃实验的典型时刻图片。

从图 2 中可以看出，在 17 min 左右，盛装－10# 柴油的油箱表面及侧面出现明显喷射火焰，后发生爆炸形成巨大火球，侧面验证板受损。因为烤燃过程中密闭油箱中的油蒸气在内部迅速积聚，当油蒸气压力超过油箱承受压力时，油箱发生爆炸，油蒸气与油料迅速向外扩散，形成爆炸云团，与空气周围混合发生爆燃，爆炸高温火球体积约为 157.4 m^3，为油箱容积的 2 071 倍。而盛装防火柴油和阻燃抑爆柴油的油箱仅产生了喷射火焰，阻燃抑爆柴油的火焰比防火柴油的微弱些。这是由于油箱排气口溢出的油蒸气被池火点燃，形成喷射火焰。－10# 柴油在烤燃过程产生喷射火焰的最高温度约为 1 490.4 ℃，防火柴油喷射火焰最高温度比－10# 柴油降低 31.39%，阻燃抑爆柴油比防火柴油降低 24.67%。



图 2 油箱烤燃实验

Fig. 2 Fuel tank cook-off experiments

由于体系含水量、聚合物抑爆剂和表面活性剂的添加改变了柴油的理化性质。3 种燃料的闪点、密度差别不大，运动黏度差别较大。在烤燃条件下：一方面，高分子聚合物抑爆剂的添加导致油样黏度增大，蒸发性变差，限制了油蒸气与空气的充分混合，从而阻碍油蒸气的剧烈燃烧和爆炸；另一方面，阻燃抑爆柴油中的水分一部分气化成为水蒸气，混合在柴油蒸气中，在遇火点燃时，水蒸汽的形成过程吸收了大量热量，降低燃烧区域火焰温度，影响了柴油蒸气的燃烧。

可见，阻燃抑爆柴油能降低油料的汽化和蒸发速率，降低燃烧过程的温度，影响火焰传播，降低燃油油箱烤燃过程的危险性。

2.2　烤燃油箱外部温度场分布

图 3 是红外热成像系统拍摄的 3 组实验烤燃过程中温度最高时刻红外热成像图。运用系统自带软件对所记录的图像进行处理，得到喷射火焰最高温度和尺寸，见表 2。

根据图 3 和表 2 可以看出，盛装－10# 柴油油箱烤燃过程中发生剧烈燃烧和爆炸，爆炸火球表面最高温度达 1 490.4 ℃，火球高温持续时间达 3.2 s，最高温火球尺寸体积约为 157.4 m^3，在 17 min 左右有一个明显的突越，说明在该点发生的爆炸。防火柴油喷射火焰体积约为 0.576 m^3，阻燃抑爆柴油喷射火焰体积约为 0.168 m^3；－10# 柴油最高温火球高度为 7.3 m，防火柴油喷射火焰高度比－10# 柴油降低了 75.34%，阻燃抑爆柴油比防火柴油降低了 61.11%。可见，阻燃抑爆柴油能够通过阻滞火焰传播速度，明显降低火焰高度。

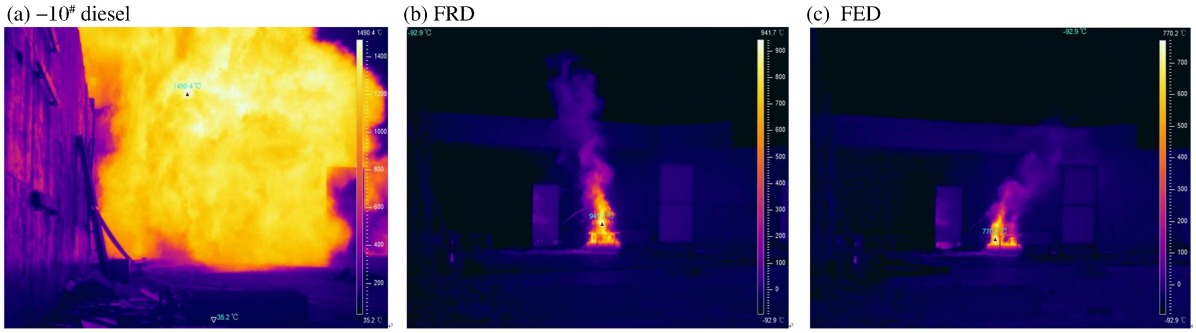


图 3　3 种油料最高温时刻红外热成像照片

Fig. 3　Infrared images of 3 diesels at their highest temperature

表 2　喷射火焰的尺寸和表面温度

Table 2　Size and surface temperature of jet fire

柴油	火焰最高温度/℃	1 000 ℃以上高温持续时间/s	火焰最大直径/m	火焰最大高度/m	备注
－10# 柴油	1 490.4	3.2	6.71	7.3	火球超出视野
FRD	1 022.5	1.0	0.98	1.8	—
FED	770.2	0	0.85	0.7	—

2.3　烤燃油箱内部温度场变化

为研究阻燃抑爆柴油对油箱内部温度场的影响，选用两个热电偶分别测量烤燃过程中油蒸气温度与液相温度。盛装 3 种柴油的油箱烤燃过程中其内部温度变化如图 4 所示。

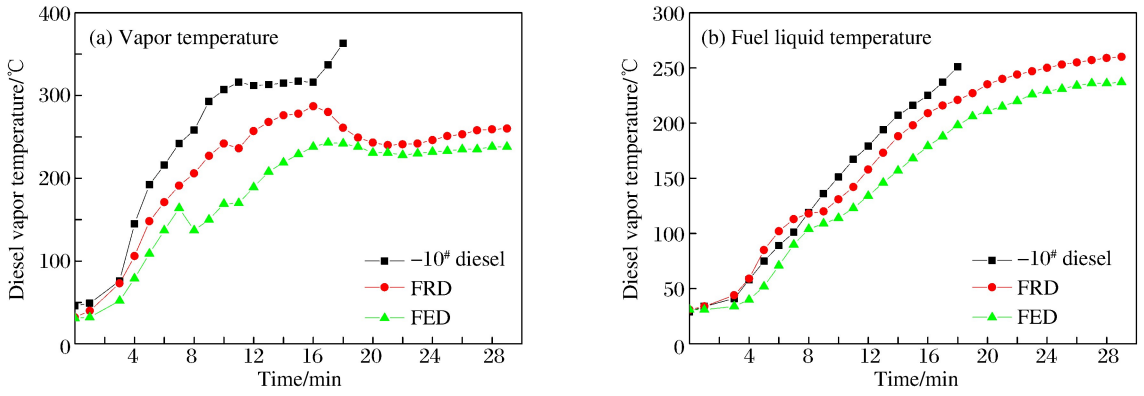


图 4　油箱内部温度

Fig. 4　Internal temperature of fuel tanks

同类柴油相比,3 组实验油箱内部油蒸气温度都始终高于油液温度,－10# 柴油油箱油液温度平均升温速率为 13.06 ℃/min,油蒸气升温速率先增加后减小,且始终高于油液温度,平均升温速率为 18.65 ℃/min。17 min 时,油箱内部油液温度达到 251 ℃,油蒸气温度到达 363 ℃,随后油箱发生爆炸,油料抛洒,热电偶被抛出;防火柴油油箱内部油液温度平均升温速率为 7.96 ℃/min,油蒸气温度升温速率为 7.96 ℃/min,20 min 后,两者接近;阻燃抑爆柴油油箱内部温度随变化与防火柴油相似,油液温度平均升温速率为 7.36 ℃/min,油蒸气温度平均升温速率为 7.36 ℃/min。25 min 后,油箱内部油蒸气温度与油液温度接近,最终维持在 243 ℃。两组实验后期,蒸汽温度都有下降过程,油池火逐渐转弱,提供热量有限。防火柴油油箱内部蒸气温度和油液温度平均升温速率比－10# 柴油分别降低 39.05%和 57.32%;阻燃抑爆柴油油箱内部蒸气温度和油液温度平均升温速率比防火柴油分别降低 7.54%和 7.54%。

不同柴油同类温度比较,阻燃抑爆柴油与防火柴油对于降低油箱内部油液温度和油蒸气温度效果明显,其中阻燃抑爆柴油效果最佳。烤燃过程,油箱内部有多种相态存在,防火柴油与阻燃抑爆柴油体系中的水蒸气能稀释柴油中的挥发组分,且能附着在燃油的表面达到隔绝氧气的效果,水份也能吸收热量降低体系温度,达到降低油箱内部温度的效果[16]。

2.4 3 种柴油的蒸发速率

为研究明火烤燃过程中油箱内油料蒸发速率,根据试验前后油箱和油料总体质量的变化,获得相应油料烤燃过程中的质量蒸发速率,见表 3。

从表 2 中可以看出,－10# 柴油油箱在烤燃过程中发生剧烈燃烧和爆炸,油箱破损,未蒸发的油料被抛撒,实验后质量无法测得。防火柴油在烤燃过程中质量蒸发速率为 0.35 kg/min,阻燃抑爆柴油的质量蒸发速率为 0.30 kg/min。阻燃抑爆柴油油料质量蒸发速率比防火柴油降低 14.29%。阻燃抑爆柴油和防火柴油中的液态水吸热汽化为水蒸汽,水蒸汽能吸收高温火焰的辐射热,降低对可燃物表面的热反馈,导致其表面温度下降,蒸发速率减小。另外,水的汽化潜热远大于柴油(常温常压下,柴油的汽化潜热为 230～250 kJ/kg,水的汽化潜热约为 2 257 kJ/kg),导致油料汽化减缓。抑爆剂也导致油料黏度增大,蒸发性差,所以同样条件下阻燃抑爆柴油的质量蒸发速率略低于防火柴油。

表 3 油箱内油料蒸发速率

Table 3 Evaporation rate of diesel in tanks

柴油	实验前质量/kg	实验后质量/kg	时间/min	速率/(kg·min^{-1})
－10# 柴油	40	—	17	—
FRD	40	29	31	0.35
FED	40	31	30	0.30

3 结 论

(1)以 3 种柴油基燃油为原料,以 76 L 标准小货车油箱为载体,模拟 3 种柴油装入油箱在烤燃条件下的特性。－10# 柴油油箱烤燃反应剧烈,并发生剧烈燃烧和爆炸,防火柴油和阻燃抑爆柴油烤燃反应程度较低,在油箱口形成喷射火焰。

(2)在剧烈燃烧和爆炸过程中,－10# 柴油爆炸时高温火球体积约为 157.4 m^3,为油箱容积的 2 071 倍,最高温度为 1 490.4 ℃,高温持续时间为 3.2 s。阻燃抑爆柴油的开发,降低了油品在高温时的危险性。

(3)防火柴油和阻燃抑爆柴油在烤燃条件下与－10# 柴油相比,喷射火焰的最高温度和尺寸、油料质量的蒸发速率都有显著降低,阻燃抑爆柴油效果最好。

(4)阻燃抑爆柴油能够降低油料气化和蒸发速率,有效阻滞火焰传播。在明火烤燃条件下危险性排序为:－10# 柴油最高,防火柴油次之,阻燃抑爆柴油最低。

参考文献：

[1] 黄勇，鲁长波，安高军，等. 柴油爆炸性能外场实验研究[J]. 爆炸与冲击，2015，35(4)：482-488.
HUANG Yong，LU Changbo，AN Gaojun，et al. Experimental research on explosion performance of diesel fuel in the external field[J]. Explosion and Shock Waves，2015，35(4)：482-488.

[2] 鲁长波，安高军，王浩喆，等. 储存过程中阻隔防爆材料对油品性能影响研究[J]. 中国安全生产科学技术，2014，10(10)：124-130.
LU Changbo，AN Gaojun，WANG Haozhe，et al. Study on influence of separate and explosion-proof material on properties of oil in storage process[J]. Journal of Safety Science and Technology，2014，10(10)：124-130.

[3] 黄勇，鲁长波，安高军，等. 充填抑爆材料油箱的烤燃性能[J]. 含能材料，2015，23(5)：490-495.
HUANG Yong，LU Changbo，AN Gaojun，et al. Fast cook-off performance of fuel tanks with explosion suppression infill[J]. Chinese Journal of Energetic Materials，2015，23(5)：490-495.

[4] 鲁长波，朱祥东，王浩喆，等. 非金属阻隔防爆材料防爆性能综合评价研究[J]. 中国安全生产科学技术，2014，10(12)：125-130.
LU Changbo，ZHU Xiangdong，WANG Haozhe，et al. Comprehensive evaluation on explosion proof performance of non-metallic barrier and explosion proof material[J]. Journal of Safety Science and Technology，2014，10(12)：125-130.

[5] 高建村，庞磊，孟倩倩. HAN 阻隔防爆技术研究进展[J]. 中国安全科学学报，2013，23(8)：43-47.
GAO Jiancun，PANG Lei，MENG Qianqian. Progress in study on HAN separate and explosion proof technology [J]. China Safety Science Journal，2013，23(8)：43-47.

[6] 薄雪峰，鲁长波，杨真理，等. 碳纤维含量对球形非金属阻隔防爆材料防爆性能的影响[J]. 中国安全生产科学技术，2016，12(7)：37-41.
BO Xuefeng，LU Changbo，YANG Zhenli，et al. Effect of carbon fiber content on explosion-proof performance of spherical non-metallic separation explosion-proof material[J]. Journal of Safety Science and Technology，2016，12(7)：37-41.

[7] 罗琳，解立峰，韩志伟，等. 柴油的抛撒成雾及燃爆特性研究[J]. 高压物理学报，2015，29(3)：213-218.
LUO Lin，XIE Lifeng，HAN Zhiwei，et al. Cloud character in explosion dipersion and combustion feature of diesel [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics，2015，29(3)：213-218.

[8] GUPTA M，PASI A，RAY A，et al. An experimental study of the effects of water mist characteristics on pool fire suppression[J]. Experimental Thermal & Fluid Science，2013，44(1)：768-778.

[9] FAHD M E A，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(2)：1042-1049.

[10] OCHOTERENA R，LIF A，NYDÉN M，et al. Optical studies of spray development and combustion of water-in-diesel emulsion and microemulsion fuels[J]. Fuel，2010，89(1)：122-132.

[11] APPARAO A，RAO C R，TEWARI S P. Studies on formation of unconfined detonable vapor cloud usingexplosive means[J]. Journal of Hazardous Materials，2013，254/255：214-220.

[12] Marty S D，Schmitigal J. Fire resistant fuel[R]. Southwest Research Inst San Antonio Tx Tardec Fuels and Lubricants Research Facility，2009.

[13] 陈中元，鲁长波，谷晓昱. 醇对柴油微乳液组成及热力学参数的影响[J]. 石油学报(石油加工)，2011，27(3)：424-428.
CHEN Zhongyuan，LU Changbo，GU Xiaoyu. Effects of alcohol on the composition and thermodynamic properties of diesel oil microemulsion[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section)，2011，27(3)：424-428.

[14] 黄勇，解立峰，鲁长波，等. 安全柴油燃爆性能的静爆试验研究[J]. 爆破器材，2015(6)：20-24.
HUANG Yong，XIE Lifeng，LU Changbo，et al. Static experiment for combustion and explosion performances of safety diesel fuel[J]. Explosive Materials，2015(6)：20-24.

[15] 魏成龙. 阻燃防爆柴油性能评定研究[D]. 南京：南京理工大学，2014.

[16] SALMEIA K A, FAGE J, LIANG S, et al. An overview of mode of action and analytical methods for evaluation of gas phase activities of flame retardants[J]. Polymers, 2015,7(3):504-526.

Experimental study on cook-off performance of diesel fuel

LIU Jian[1], YAO Jian[1], SONG Shuzhong[2], LI Bin[1], XIE Lifeng[1], WANG Yongxu[1]

(1. *Industrial Chemistry Institute, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*;
2. *Beijing Auxin Chemical Technology Ltd., Beijing* 100043, *China*)

Abstract: In the present work we investigated the cook-off and combustion explosion properties of 76 L fuel tanks with −10# diesel, fire-resistant diesel (FRD), fire-resistant-explosion-suppression diesel (FED) by performing experiments on the surface temperatures of the fire, the sizes of the jet fire, the internal temperatures of fuel tanks and the evaporation rate of the diesel using a video-camera, a high-speed camera, an infrared thermal imager, a thermocouples and an electronic balance. The results show that explosion might occur when the fuel tanks were filled with −10# diesel and a jet fire would occur when the fuel tanks were filled with FRD or FED in the same cook-off conditions. The highest surface temperatures, the height of the jet fire, the vapor temperature and the fuel temperature of FRD were reduced by 31.39%, 75.34%, 39.05% and 57.32% respectively as compared with −10# diesel. The highest surface temperatures, the height of the jetfire, the evaporation rate of the diesel, the vapor temperature and the fuel temperature of FED were reduced by 24.67%, 61.11%, 14.29%, 7.54% and 7.54% respectively as compared with FRD, indicating that FED was more effective than the other diesel in preventing temperature increase of the jet fire, size growth of the fireball and reducinge the diesel's evaporation rate.

Keywords: fire-resistant-explosion-suppression diesel; fuel tanks; cook-off; jet fire; rate of evaporation; diesel vapor temperature

(责任编辑 丁 峰)