

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2018.02.006

油箱内部强起爆条件下安全柴油燃爆性能的试验研究^{*}

宋 刚^① 张文铨^① 封晓杰^① 李 斌^① 黄 勇^{①②} 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)

[摘 要] 针对装有军用油料的油箱在战场可能面临的苛刻条件(外部火烧、枪击等),以军用柴油为主体,通过特殊工序制造了两种配方的安全柴油。使用 50 L 的模拟油箱,分别装填军用柴油和两种安全柴油,在野外试验场地开展了内部强起爆条件下的 3 种柴油样品的爆炸试验,使用高速摄像装置和红外热成像系统对 3 种油样的爆炸过程进行记录,并对其爆炸温度场进行测试。结果表明:两种配方的安全柴油都有明显的阻燃抑爆效果。通过建立其阻燃抑爆性能评估标准发现,安全柴油在对爆炸火球高温持续时间和池火的抑制上有明显效果。

[关键词] 油箱;安全柴油;抑爆;池火

[分类号] X932

Experimental Study on Combustion and Explosion Performance of Safe Diesel under Strong Detonation Conditions in Fuel Tank

SONG Gang^①, ZHANG Wencheng^①, FENG Xiaojie^①, LI Bin^①, HUANG Yong^{①②}, XIE Lifeng^①

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)

[ABSTRACT] Aimed at sustaining under the severe conditions (external fire, gun shooting, etc.) that military oil tanks faced in the battle field, two kinds of safe diesel based on military diesel through the special craft were developed. Field tests, which contains inner explosion of 50 L tanks with military diesel and two kinds of safe diesel respectively, were carried out. High speed camera and infrared thermal imaging system were employed to record the explosion process and the temperature field. The results show that two kinds of safety diesel oil had obvious flame retardant and detonation effect. By establishing the evaluation standard of flame retardant and explosive performance, it was found that the safe diesel obviously facilitates the duration of explosion fire and the suppression of fire.

[KEYWORDS] fuel tank; safe diesel; explosion suppression; pool fire

引言

柴油是一种轻质石油产品,是复杂的烃类混合物。由于具有易制取、燃烧热值高等特点,柴油在民用和军用机动设备所使用的能源占比中具有较高的地位,是陆用装备及车辆的主要能源供给。作为军用机动设备的一种典型且常用能源,利用柴油能效的同时,如何预防由于多种打击造成的柴油燃爆事

故的发生是一个具有重要意义的课题^[1-4]。国外从十多年前开展了柴油阻燃抑爆性能改性的相关研究,提出了“安全柴油”的概念^[5],并成功制备了多种安全柴油样品,从燃料源头入手,解决其安全性的问题。在国内,原总后油料研究所、南京理工大学和北京化工大学在安全柴油配方设计及其阻燃抑爆性能测试研究领域开展了大量工作,并获得了诸多成就。Zhou等^[6-8]针对轻质石油燃料及非金属材料的阻燃技术开展了大量的系统研究工作,为安全柴油

^{*} 收稿日期:2017-07-21
基金项目:南京理工大学“百千万”计划项目
作者简介:宋刚(1996-),男,本科生,主要从事阻燃抑爆柴油方向研究。E-mail:songgang_joe@qq.com
通信作者:李斌(1984-),男,博士,讲师,主要从事安全技术和多相爆轰方向研究。E-mail:libin@njust.edu.cn

配方的设计奠定了基础。李菲^[9]以阳离子表面活性剂 CTAB 为乳化剂、不同链长的醇为助乳化剂,制备了一系列配方的微乳化柴油,并对各样品进行性能研究。魏成龙^[10]对制备的柴油样品进行了理化性能、阻燃性能和抑爆性能测定试验,对筛选出的安全柴油配方进行了发动机台架试验,评价出安全柴油的动力性和经济性。罗琳^[11]对安全柴油的雾化效果及抛撒性能进行了大量试验。黄勇等^[12]针对微乳化配方柴油样品开展了诸如静爆、池火燃烧等多方面试验工作。

每种安全柴油样品的性能不一,且其阻燃抑爆性能评价标准也多种多样^[13-14]。为更好地研究安全柴油的安全性,在前人研究工作的基础上,使用 50 L 油桶模拟实际柴油油箱,进行内部强爆炸能量作用下的安全柴油阻燃抑爆性能研究,通过模拟油箱的研究工作,为安全柴油研发工作的进一步开展提供数据支持。

1 试验样品及装置

本次试验样品选用目前军队实际使用的军用柴油和经过研究开发的以军用柴油为基础油料的 3[#]安全柴油和 6[#]安全柴油。不同含水量系列安全柴油的配方是在俄罗斯国防部第 25 研究所研制的 ПБД-Л 柴油基础上进行改进的。油料研究所对开发的安全柴油进行了反复的理化性能、行车、台架等试验,试验结果表明,使用含水质量分数 15% 以内安全柴油的装甲车辆行车性能较好。

这类安全柴油能够长期保持性能稳定的原因在于使用了特殊的高效表面活性剂。由于篇幅和保密原因,对于其乳化过程、油包水型微量乳浊液的形成过程不再详述。

两种安全柴油的组成及配比如表 1 所示。

表 1 安全柴油组分及配比

Tab. 1 Components and ratio of safe diesel %			
安全柴油	组分质量分数		
	军用柴油	复合乳化剂	水
3 [#]	79	16	5
6 [#]	71	14	15

试验中使用 Mikronscan 7200V 型红外热成像仪测试柴油燃爆后的温度场;使用 Photron 公司的 Fastcam APX 型高速摄像机记录柴油燃爆过程,拍摄速率为 1 000 帧/秒。

试验场地布置如图 1 所示。试验采用 8[#] 雷管

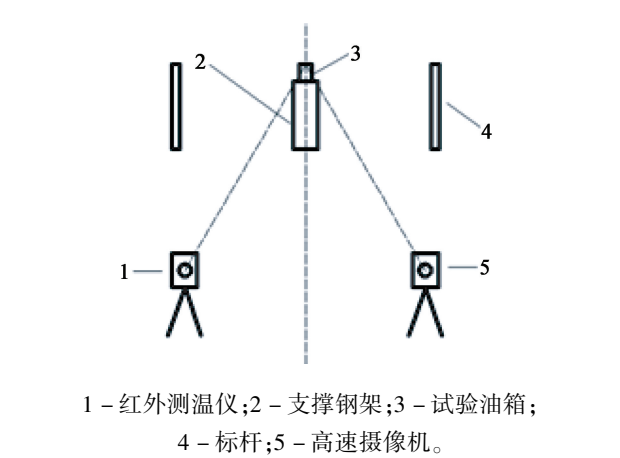


图 1 试验场地布置图

Fig. 1 Layout of the test site

和 50 g 海萨尔炸药作为强起爆源。试验时,将灌装了试验柴油的油箱固定于支架上,然后将雷管固定在指定位置处,待所有测试设备准备就绪后,人员撤离试验场地,开始油箱内部强起爆试验,通过高速摄像机记录得到不同试验柴油爆炸的过程,通过红外测温仪测试分析得到爆炸火球表面的最高温度、火球直径、火球持续时间等特征参数。

本次试验中,油箱容积为 50 L,试验燃料装填量为 30 L。强起爆源在油气分界面处点火。

2 试验结果与讨论

在油气分界面处,50 g 点火药量下,对军用柴油、3[#]安全柴油、6[#]安全柴油进行了抑爆效果测试,每种样品分别开展了 3 次试验,典型的试验结果如图 2 所示。

由图 2 可以看出,军用柴油及 3[#]、6[#]安全柴油均能发生爆炸,但军用柴油爆炸后形成的火球明显比安全柴油大,且后续有池火出现,而 3[#]、6[#]安全柴油在燃爆后未出现池火。

军用柴油燃料抛撒能力显著加强,而此时,安全柴油的抑制抛撒的能力相对被大大削弱了;600 ms 时,由炸药提供的驱动力逐渐减弱,安全柴油的抑制抛撒能力开始显现,此时的爆炸火球与同时刻下军用柴油的爆炸火球相比尺寸要小;至 1 200 ms 时,军用柴油转为池火燃烧,而 3[#]安全柴油未出现池火,燃爆过程基本结束;6[#]安全柴油的着火爆炸过程与 3[#]安全柴油相似,600 ms 时,其爆炸火球较 3[#]安全柴油进一步减小,表明 6[#]安全柴油对爆炸火球的抑制能力优于 3[#]安全柴油。

图 3 和表 2 分别为使用红外热成像仪对 3 种柴

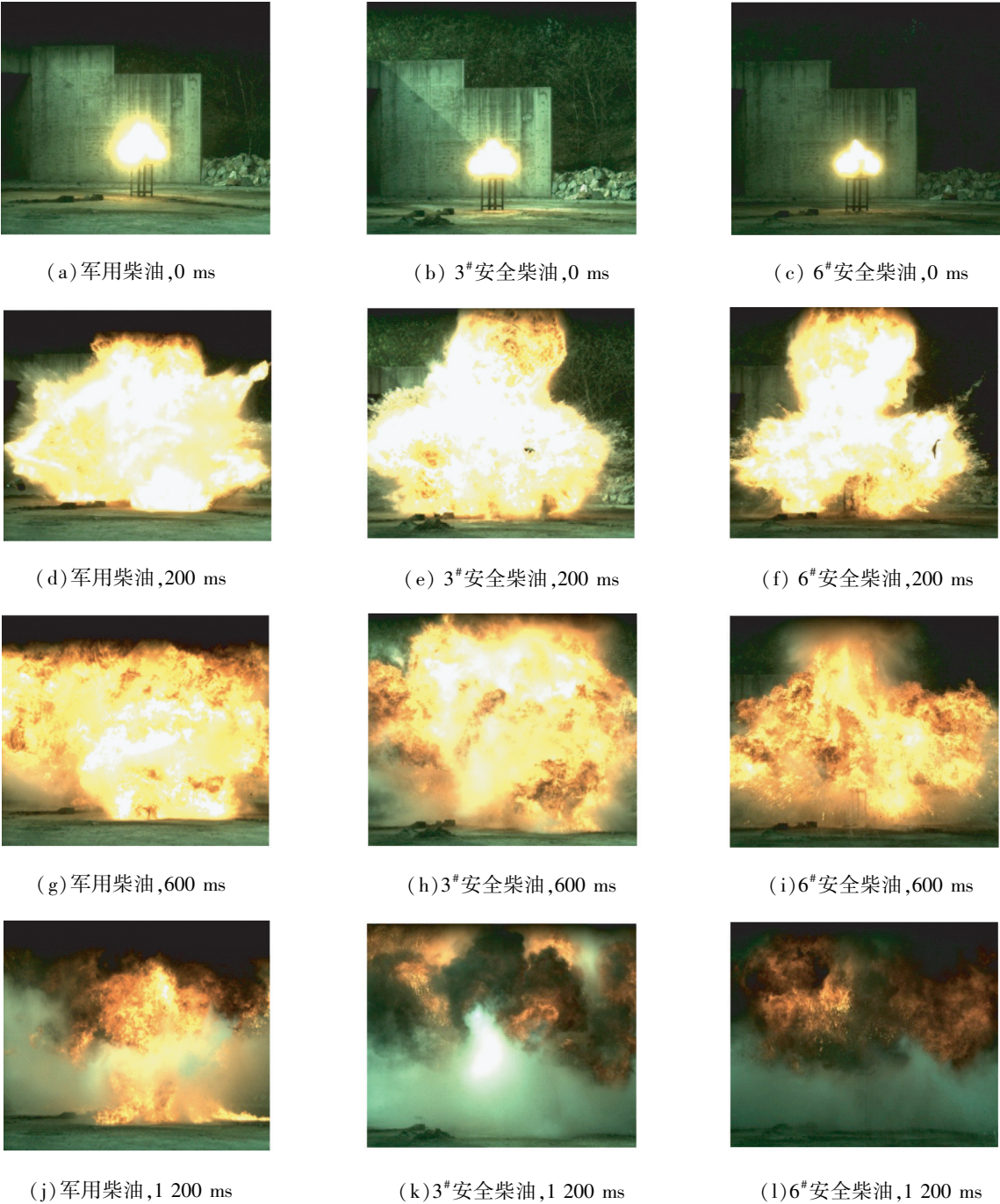


图 2 内部强起爆条件下柴油样品典型的油料燃爆过程

Fig. 2 Typical diesel blasting processes under internal strong detonation conditions

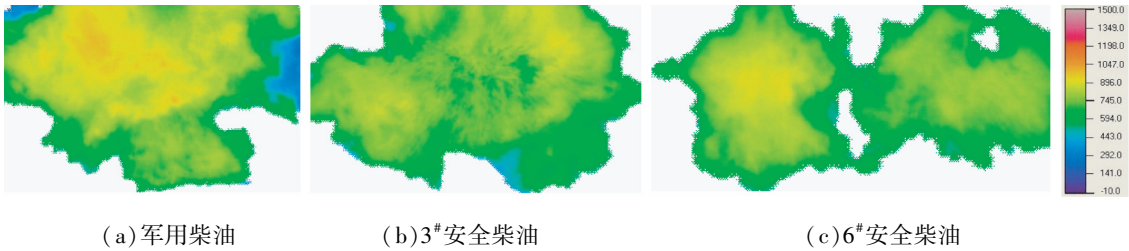


图 3 内部强起爆条件下柴油样品的典型温度场测试结果

Fig. 3 Typical diesel fuel temperature field test results under internal strong detonation conditions

表 2 内部强起爆条件下柴油样品的爆炸火球参数

Tab.2 Explosion fireball parameter of diesel fuel under internal strong detonation conditions

样品	最高温度/ ℃	火球持续时间/ ms	火球面积/ m ²	平均最高温度/ ℃	平均火球持续时间/ ms	平均火球面积/ m ²
军用柴油	1 514.1	14 060	23.8	1 558.8	15 120	24.5
军用柴油	1 580.9	15 430	24.6			
军用柴油	1 581.4	15 870	25.1			
3 [#] 安全柴油	1 419.4	3 010	24.7	1 435.0	3 080	24.5
3 [#] 安全柴油	1 424.9	2 990	23.6			
3 [#] 安全柴油	1 460.7	3 240	25.2			
6 [#] 安全柴油	1 462.2	2 020	19.4	1 419.8	1 940	18.5
6 [#] 安全柴油	1 410.6	1 960	18.2			
6 [#] 安全柴油	1 386.6	1 840	17.9			

油样品的爆炸温度场进行测试的结果和温度场相关参数。

由表 2 可知,6[#]安全柴油的爆炸火球表面最高温度、火球持续时间及火球最大面积均较 3[#]安全柴油小,但 6[#]安全柴油的高温区持续时间略大于 3[#]安全柴油,各安全柴油的各项爆炸火球参数均小于同条件下军用柴油样品。

根据爆炸火球热伤害评估准则并结合阻爆型燃料的特性^[15-16],提出使用爆炸火球表面最高温度、高温区持续时间、火球最大直径及池火自熄灭能力 4 个参数来评价试验油品的抑爆能力。为了量化试验燃料的自熄灭能力^[17],定义爆炸火球后出现池火,则自熄灭能力的量值为 1;若爆炸火球之后没有池火出现,则自熄灭能力的量值为 0。在这一基础上,定义阻爆试验油品的抑爆能力 P_{FRD} 为军用柴油和安全柴油的抑爆能力特征参数值的差值与军用柴油抑爆能力特征参数值的比值的百分数,即

$$P_{FRD} = \frac{\gamma_{MD} - \gamma_{FRD}}{\gamma_{MD}} \times 100\%。$$
 (1)

式中: γ_{MD} 为军用柴油的抑爆能力特征参数值,即爆炸火球表面最高温度、高温区持续时间、火球最大直径或池火自熄灭能力 4 个参数; γ_{FRD} 为阻爆试验油品的抑爆能力特征参数。

表 3 为内部强起爆条件下安全柴油样品的抑爆能力评估。

表 3 中, P_{θ} 是以爆炸火球表面最高温度为评估指标的阻爆柴油的抑爆能力; P_{td} 是以高温区持续时间为评估指标的阻爆柴油的抑爆能力; P_D 是以火球最大直径为评估指标的阻爆柴油的抑爆能力; P_{pf} 是以燃料自熄灭能力为评估指标的阻爆柴油的抑爆能力。50 g 裸药柱条件下,阻爆柴油高温区持续时间的抑制能力仍有 43% 以上,表明现有的配方阻爆柴

油在较高点火药量下仍具有较好的抑爆效果。

表 3 内部强起爆条件下安全柴油样品的抑爆能力评估

Tab.3 Evaluation of explosion-proof capacity of diesel samples under internal strong detonation conditions

样品	P_{θ}	P_{td}	P_D	P_{pf}
3 [#] 安全柴油	8	47	0	100
6 [#] 安全柴油	9	43	24	100

3 结论

1)在内部强起爆条件下,填装安全柴油的油箱爆炸后,安全柴油样品相对于军用柴油具有较好的抑爆性能。

2)建立了安全柴油抑爆能力的评价方法,并对两种安全柴油样品进行评价,发现安全柴油对爆炸火球高温持续时间和池火方面的抑制效果显著。

参 考 文 献

[1] 朱英中. 柴油与安全柴油燃爆性能研究[D]. 南京:南京理工大学,2012.
ZHU Y Z. Research on the explosion characteristic of diesel fuel and safety diesel[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.

[2] 黄文,毛汉颖. 燃油乳化研究和应用的现状[J]. 仪器仪表与分析监测,2002(2):5-6.

[3] 陈登龙,丁以钿,林建生. 乳化柴油的研究[J]. 化工科技,2002,10(1):15-18.
CHEN D L, DING Y D, LIN J S. The research on emul-

- sifying diesel oil [J]. Science and Technology in Chemical Industry, 2002, 10 (1): 15-18.
- [4] 陈雪松,王正,苑宇. 油包水型乳化柴油试验研究[J]. 柴油机,2004(5):28-31.
CHEN X S, WANG Z, YUAN Y. Experimental investigation on water-in-oil emulsion diesel oil[J]. Diesel Engine,2004(5):28-31.
- [5] MARTY S D, SCHMITIGAL J. Fire-resistant fuel; AD A302805[R]. 2009.
- [6] ZHOU Y J, AN G J, WANG X D, et al. Study on explosion suppression technologies for oil and gas pipeline [J]. Procedia Engineering, 2014, 84: 412-418
- [7] LU C B, AN G J, XIONG C H, et al. Progress on fire and explosion suppression technologies for light petroleum fuel [J]. Procedia Engineering, 2014, 84: 384-393.
- [8] AN G J, LU C B, ZHU X D, et al. Study on explosion suppression performance of spherical nonmetallic materials [J]. Procedia Engineering, 2014, 84: 369-376.
- [9] 李菲. 阻燃抑爆柴油的制备及其性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2012.
LI F. Preparation and properties study of flame-retardant and explosion-inhibitory diesel [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2012.
- [10] 魏成龙. 阻燃抑爆柴油性能评定研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
WEI C L. Performance assessment research of fire resistant and explosion suppression diesel [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [11] 罗琳. 三种柴油基燃料的成雾及燃爆性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
LUO L. Research on the dispersion and explosion characteristic of three kinds of fuel [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.
- [12] 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 Y, LU C B, AN G J, et al. Experimental research on explosion performance of diesel fuel in the external field[J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35 (4): 482-488.
- [13] 郝建斌. 燃烧与爆炸学[M]. 北京: 中国石化出版社, 2012:107-109.
- [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,2015,44(6):20-24.
HUANG Y, XIE L F, LU C B, et al. Static experiment for combustion and explosion performances of safety diesel fuel [J]. Explosive Materials, 2015, 44(6): 20-24.
- [15] DE RIS J, ORLOFF L. The role of buoyancy direction and radiation in turbulent diffusion flames on surfaces [J]. Symposium (International) on Combustion, 1975, 15(1):175-182.
- [16] 傅维镡,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.
FU W B, GONG J S, HOU L Y. Combustion of fuel with water content [M]. Beijing: Higher Education Press, 2009:22-25.
- [17] 黄勇,解立峰,鲁长波,等. 微乳化柴油火焰传播特性的实验研究[J]. 工业安全与环保,2014,40(10):36-39.
HUANG Y, XIE L F, LU C B, et al. Experiment study on micro-emulsified diesel flame propagation characteristic [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2014, 40(10): 36-39.

(上接第 27 页)

- Orbitrap mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2012, 40(11):1674-1679.
- [24] BRIDOUX M C, SCHWARZENBERG A, SCHRAMM S, et al. Combined use of direct analysis in real-time/Orbitrap mass spectrometry and micro-Raman spectroscopy for the comprehensive characterization of real explosive samples [J]. Analytical & Bioanalytical Chemistry, 2016, 408(21):5677-5687.
- [25] 王文豪,张榆梓,周红,等. HPLC-MS/MS 检测爆炸尘土中的二硝基重氮酚 [J]. 刑事技术, 2016, 41 (2):107-110.
WANG W H, ZHANG Y Z, ZHOU H, et al. Detection of diazodinitrophenol in post-blast dust by HPLC-MS/MS [J]. Forensic Science and Technology, 2016, 41(2): 107-110.
- [26] 丛浦珠,苏克曼. 分析化学手册:第九分册 质谱分析 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.