

文章编号: 1006-9941(2015)05-0490-06

充填抑爆材料油箱的烤燃性能

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: 为研究烤燃对不填充和填充球形抑爆材料燃油箱的破坏效应, 正确评估抑爆球的阻燃抑爆效果, 模拟车辆、飞机的燃油箱受到炙烤的场景, 对盛装-10号柴油(-10PD)、喷气燃料(RP-5)的油箱进行烤燃实验, 并采用摄像机、高速照相机、红外热成像仪和热通量计等分别记录和测量了油箱的烤燃过程及其产生的喷射火球尺寸、表面温度和热辐射参数。结果表明: 油箱在烤燃过程中将产生喷射火, 甚至发生蒸气云爆炸, 其破坏效应主要表现为喷射火球的热效应。对于填充抑爆球的-10PD、RP-5油箱, 其油料受热初始燃烧的时间分别延迟了48 s和121 s, 喷射火球的最大截面积分别减小了65.72%、42.44%, 表面最高温度分别减小了26.13%、12.66%, 其热通量伤害后果也明显减小。

关键词: 柴油; 喷气燃料; 烤燃; 抑爆球; 喷射火球; 热效应; 热通量**中图分类号:** TJ5; X932**文献标志码:** A**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.05.016

1 引言

车辆、飞机等运载工具在遭遇事故或恐怖袭击时易引发火灾、爆炸, 还可能引爆油箱中油料发生“二次效应”^[1]。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, 多年来为了提高车辆、飞机等油箱的本质安全性, 专家、学者研制出不同类型的抑爆材料, 并尝试填充在燃油箱中以便减轻油箱爆炸的后果。

1968年, 美国空军最早开始在F-105、C-130和F-4等飞机的油箱内填充网状聚氨酯泡沫塑料来防止燃油箱爆炸, 后来又相继在A-7、A-10和F-15等飞机上采用同样方法来保护燃油箱^[2]。1984年美国空军制定了飞机燃油箱充用的网状泡沫材料规范MIL-B-83054B, 即《飞机燃油箱用的阻隔惰性材料》^[3]。本世纪初, 我国开始着手对IL8飞机机翼整体油箱进行抑爆设计, 并将铝合金网状材料充填到机翼整体油箱^[2]。中国兵器工业集团第五二研究所研制的铝合

金抑爆材料填充在汽油油箱中用明火点燃、射击或用电、气焊直接进行补漏操作均不发生爆炸^[4]。然而, 以上抑爆材料易水解或氧化, 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^[5-6]。因此, 近年国内一些科研单位开发了耐高温、抗氧化的非金属抑爆材料, 如 Al_2O_3 、 ZrO_2 、SiC泡沫陶瓷、以尼龙为主的塑料组合物等, 但该类材料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, 本研究开展了燃油箱的明火烤燃实验, 对比盛装不同油料的油箱在不填充和填充球形抑爆材料情况下烤燃反应的破坏效应, 以评估抑爆材料的阻燃抑爆效果, 为进一步提高、改进抑爆材料的研制技术提供技术参考。

2 实验

2.1 实验装置与仪器

(1) 实验油箱: 圆桶形, 容积为108 L, 尺寸: $\phi 500 \text{ mm} \times 550 \text{ mm}$, 材质为20号钢, 壁厚为2 mm。

(2) 木笼: 将截面尺寸不小于 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的木条以间距约100 mm制成笼状。

(3) 金属格栅: 用于放置油箱, 尺寸: $500 \text{ mm}(L) \times 500 \text{ mm}(W) \times 1000 \text{ mm}(H)$ 。

(4) 见证铝板: 作为见证板使用, 底部带有能够使其竖立的支撑, 尺寸: $2000 \text{ mm}(W) \times 2000 \text{ mm}(H) \times$

收稿日期: 2014-03-06; 修回日期: 2014-06-02

基金项目: 科技部国际科技合作重大专项资助(2013DFR60080); 常州市科技发展项目(CE20135035)

作者简介: 黄勇(1978-), 男, 博士研究生, 主要从事燃料的燃爆性能与机理、化工安全研究。e-mail: huangyong001@cczu.edu.cn

通信联系人: 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

2 mm(*T*),布氏硬度 23,抗拉强度 90 MPa。

(5) 高速照相机: Fastcam nltima APX 型,日本 Photron 公司,最大拍摄速率为 12000 帧/s,每帧最大 1024×1024 像素。

(6) 红外热成像仪: Mikronscan 7200V 型,美国 Mikron 公司,该系统用 320×240 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 μs。

(7) 热通量计: DaqPRO 5300 型,以色列 Fourier 公司,最大热通量量程达 2.3 MW·m⁻²,最大温度测量为 980 °C。

2.2 实验样品

(1) 实验油料: -10 号柴油(-10PD)、喷气燃料(RP-5),其理化性能见表 1^[7]。

表 1 实验油料理化性能

Table 1 Physical and chemical properties of experimental oil

fuel	flashing point/°C	ignition temperature /°C	explosive limit /%	combustion flame temperature /°C	main uses
-10PD	≥65	257	no data	700~800	fuel of large vehicles, ships and weaponry
RP-5	≥60	no data	0.6~3.7	850~950	kerosene, fuel of plane

(2) 抑爆材料: 中空栅格状球体抑爆材料(简称抑爆球),外观直径 30 mm,单球质量 1.65 g。抑爆球主要成分是石墨,还添加了少量聚酯类塑性材料,具有良好的导热性能和耐酸、耐碱、耐高温特性。

2.3 实验方法和实验布置

参照标准《危险货物运输 爆炸品的认可和分项试验方法》(GB/T 14372-2013)中危险货物外部火烧实验方法,观测盛装 54 L 油料的油箱,在外部火焰作用下的反应情况及其危险性和破坏效应:

(1) 发生爆轰、爆燃或爆炸的证据,三块垂直见证板中至少一块有穿孔;

(2) 危险的喷射物;

(3) 热效应(例如火球、热通量等)。

将盛装油料和填充抑爆球(填充密度约 60 kg·m⁻³)的实验油箱放置于金属格栅上,木笼堆于金属格栅下,堆成网格状,总体积不小于 6.25 m³,木笼应超出油箱边缘每个方向至少 1.0 m。在油箱四周的三面(除下风面)距离其边缘 4 m 处竖直放置见证板,并且使见证板中心与油箱中心同高。点火系统采用煤油浸透的

木材或木刨花,并从两边同时点燃木笼,一边是顶风侧。测试和记录仪器如普通摄像机、高速照相机、红外热成像仪、热通量计分别设置在下风面的 30, 140, 140, 15 m 处。实验场布置示意图如图 1 所示。普通摄像机用于记录油箱烤燃的全过程;高速照相机用于拍摄火焰喷射及爆炸过程,拍摄速率为 1000 帧/s;红外热成像仪用于采集喷射火球的表面温度,采样频率为 31 ms/次;热通量计记录了烤燃点附近某处的热通量,采样频率为 1 次/s。

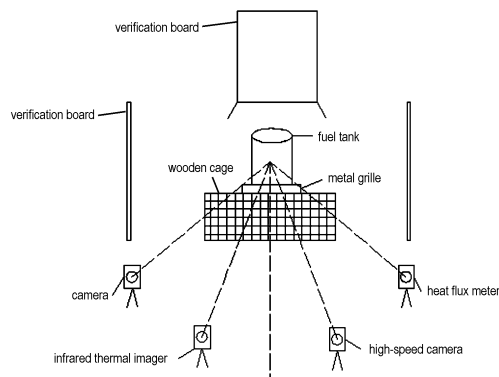


图 1 实验场布置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental layout

2.4 实验数据处理方法

由于油箱烤燃过程中可能伴有蒸气云爆炸,热通量计不宜设置在距烤燃点过近的位置,同时又考虑 GB/T 14372-2013 的相关实验方法要求,因此将热通量计设置在距烤燃中心点 15 m 处的位置,烤燃过程中产生的喷射火球表面的辐射度则由红外测温原理^[8]计算得到。

根据斯蒂芬-玻耳兹曼定律^[9],黑体的辐射度 *R* 为:

$$R = \sigma T^4 \quad (1)$$

式中,σ 为斯蒂芬-玻耳兹曼常数,5.67×10⁻⁸ W·m⁻²·K⁻⁴; *T* 为黑体的绝对温度, K。将碳氢燃料视为黑体^[10]。

3 实验结果分析与讨论

3.1 油箱烤燃反应的剧烈程度

图 2 为盛装 -10PD、RP-5 的油箱在不填充和填充抑爆球情况下四次实验的典型照片。

从图 2 可以看出,油箱烤燃反应的实验现象不尽相同,盛装 -10PD 的油箱(实验 1、2)仅产生了喷射火,而盛装 RP-5 油箱(实验 3、4)还发生了蒸气云爆炸形成火球,这是由于密闭油箱中的油料受热挥发和汽化,导致油箱内压力不断增加,当压力增加到超过油箱



a. test 1: -10PD



b. test 2: -10PD+explosion suppression balls



c. test 3: RP-5



d. test 4: RP-5+explosion suppression balls

图2 油箱烤燃实验照片

Fig.2 Photos of fuel tank cook-off experiments

表2 油箱毁伤情况和见证板状态

Table 2 Damage to fuel tanks and status of verification board

test	experimental conditions	initial burning time of fuel tank/s	fuel tank damage	status of verification boards	status of jet fireballs
1	-10PD	280	several cracks on the top of fuel tank.	no obvious indentation	jet flame about 4 m longer than that wood fire.
2	-10PD+explosion suppression balls	328	several cracks on the top of fuel tank.	no obvious indentation	
3	RP-5	326	fuel tank top was blown up about 30 m.	a verification board was knocked down by explosion shock waves.	the diameter of fireball exceeded the distance between the 2 verification boards.
4	RP-5+explosion suppression balls	447	several cracks on the top and bottom of fuel tank.	no obvious indentation	the diameter of fireball exceeded the distance between the 2 verification boards.

所能承受最大压力值时,油箱薄弱部位将破裂,受热的油蒸气高速逸出形成了喷射火。由于 RP-5 的挥发性和着火性均较高,油箱内仍保持了较高的油气浓度,此时处于过热状态 RP-5 更容易发生蒸气云爆炸^[11-13]。

油箱烤燃反应的剧烈程度可以由油箱初始燃烧时间、油箱毁伤情况和见证板状态等实验结果反映,实验结果如表 2 所示。

表 2 显示,填充抑爆球油箱(实验 2、4)的油料受热初始燃烧的时间比只盛装油料的油箱(实验 1、3)要延后很多,如-10PD 油箱初始燃烧时间推迟了 48 s, RP-5 油箱推迟了 121 s,这说明抑爆球起到了一定的阻燃抑爆作用,为车辆、飞机中人员的逃生及救援工作赢得时间。

由表 2 中油箱毁伤情况和见证板状态可知,实验 4 的爆炸威力比实验 3 小了很多,这是因为实验 4 的油箱填充了抑爆球,抑爆球本身有许多狭小的孔隙,这些孔隙能大大降低液滴分离与扩散雾化程度,减缓了油蒸气与空气燃烧反应的剧烈进行。

3.2 抑爆球的抑爆效果

3.2.1 喷射火球尺寸与表面温度

运用红外热成像系统自带的 MikroSpec 软件对喷射火球热成像图进行分析、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 3 列出了喷射火球的尺寸、表面温度等参数, S 、 d 和 h 分别指喷射火球的最大截面积及此时的直径、高度,它们是通过运用 AutoCAD 软件对高速照相机拍摄的火焰喷射及爆炸过程照片处理计算得到的, T_m 表示喷射火球发展过程中表面的最高温度, T_a 表示喷射火球 T_m 时的表面平均温度, t 为喷射火球表面 1273.15 K 以上高温的持续时间。图 3 为木笼火焰烧到油箱底部后 10 min 时的喷射火球红外热成像图。

表 3 喷射火球的尺寸和表面温度

Table 3 Sizes and surface temperature of jet fireball

test	S/m^2	d/m	h/m	T_m/K	T_a/K	t/s
1	3.53	1.76	5.41	1494.65	1142.35	7.81
2	1.21	1.49	1.84	1104.05	711.15	0
3	226.85	22.01	14.75	2031.75	1567.45	3.20
4	130.58	12.44	17.63	1774.45	1213.25	15.65

Note: S , d , and h are respectively the maximal cross sectional area, diameter, and height of the fireball at this moment. T_m is the highest surface temperature reached during the development of jet fireballs. T_a is the average surface temperatures of jet fireballs at the moment when T_m is reached. t is the time span while the surface temperature of jet fireballs stays above 1273.15 K.

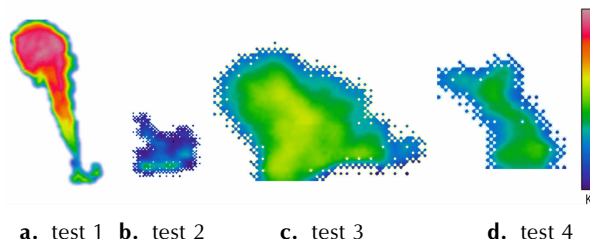


图 3 烤燃 10 min 时喷射火球的红外热成像图

Fig. 3 The infrared images of jet fireballs at 10 min

由表 3 中的 S 、 T_m 计算得到,实验 2、4 填充抑爆球使-10PD、RP-5 喷射火球的最大截面积 S 分别相对于实验 1、3 减小了 65.72%、42.44%,表面最高温度 T_m 分别减小了 26.13%、12.66%,并且火球的直径、表面平均温度等参数也相对较小。其主要原因是由于抑爆球排列紧密,球体的形状导致它在排列的过程中孔隙形成的通道更加曲折,油蒸气在逸出过程中通过这些曲折通道损耗的能量更大,其压力和速度也随之快速下降,导致喷射火球的尺寸、表面温度等均减小。但是,由于实验 3 的蒸气云爆炸更剧烈,能量瞬间释放也更迅速,所以其火球表面高温持续的时间较短,只有 3.20 s,小于实验 4 火球的高温持续时间。

由实验录像可知,木笼火焰烧到油箱底部后 10 min 时,实验 1、2 的喷射火正持续猛烈喷射,而实验 3、4 蒸气云爆炸已发生,火球正处于自由扩散期。从图 3 可以看出,实验 2、4 的喷射火球截面明显小于同时刻未填充抑爆球实验的喷射火球,尤其实验 2,此时喷射火强度较小,其表面温度基本在 800 K 以下,而实验 1 的喷射火高度远大于实验 2 的喷射火,其表面温度位于 1000 ~ 1500 K 之间。

3.2.2 喷射火球的热通量

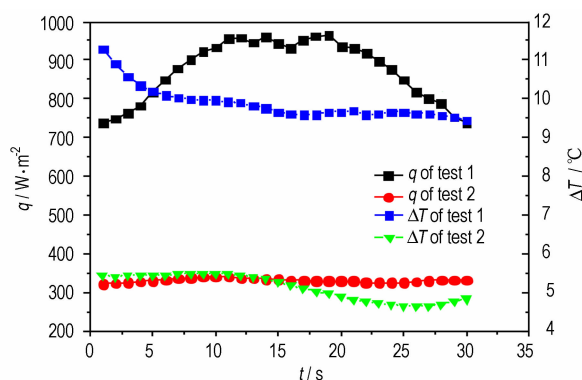
喷射火球表面不断以电磁波的形式向四周辐射热量,距火焰一定距离以外某点接收到的辐射热流称为热通量。喷射火球表面的辐射度可由式(1)计算得

出,距烤燃中心点 15 m 处的热通量由热通量计直接测出,结果列于表 4, T_a' 为喷射火球最大表面平均温度, q_{max} 、 ΔT_{max} 分别为距烤燃中心点 15 m 处的最大热通量和最大环境温差。图 4 为距烤燃中心点 15 m 处喷射火球能量急速释放阶段的瞬时热通量 q 、环境温差 ΔT 随时间变化的曲线。

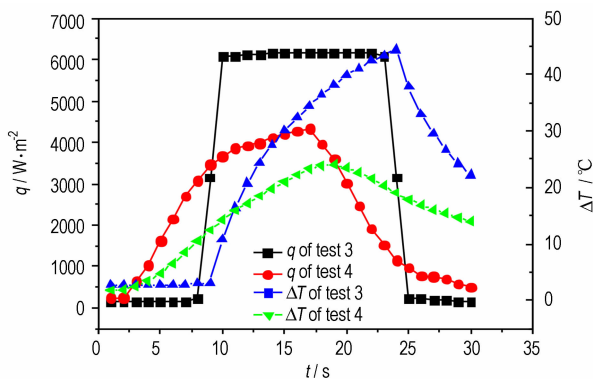
表 4 喷射火球热辐射参数

Table 4 Thermal radiation parameters of jet fireball

test	T_a'/K	$R/W \cdot m^{-2}$	$q_{max}/W \cdot m^{-2}$	$\Delta T_{max}/^{\circ}C$
1	1142.35	9.66×10^4	964.6	11.29
2	717.45	1.50×10^4	341.3	5.48
3	1574.65	3.49×10^5	6158.3	44.35
4	1226.55	1.28×10^5	4334.4	23.97



a. test 1 and test 2



b. test 3 and test 4

图 4 喷射火球热通量-时间、温差-时间曲线

Fig. 4 Curves of the heat flux-time and temperature difference-time for jet fireballs

表 4 中的最大表面平均温度 T_a' 是通过 MikroSpec 软件对每一次实验喷射火球的热成像图分析、比对获得,喷射火球辐射度 R 是将其 T_a' 代入公式(1)中计算得到的。比较各次实验的 T_a' 、 R ,实验 2 的喷射火球 T_a' 、 R 分别只有实验 1 喷射火球的 62.80%、

15.53%, 同理, 实验 4 的喷射火球 T_a' 、 R 是实验 3 的 77.89%、36.68%。另外, 填充抑爆球可分别将 -10PD、RP-5 的喷射火球在距烤燃中心点 15 m 处的最大热通量减小了 $623.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $1823.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 最大环境温差减小了 $5.81 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $20.38 \text{ }^\circ\text{C}$, 且使瞬时热通量和环境温差的变化幅度明显减小, 如图 4 所示, 这些变化说明抑爆球抑制了油料的剧烈燃烧, 释放的能量急剧减小, 释放速率趋于平缓。

实验 1、2 的温差-时间曲线的变化趋势与瞬时热通量的变化趋势相差较大, 而实验 3、4 的则更接近, 主要是因为实验 1、2 产生的喷射火(柱)释放热量小、时间长, 热量以传导、辐射等多种方式进行能量传递, 对热通量计读数的影响也较大, 而实验 3、4 产生的火球, 释放热量大, 时间短暂, 基本可以忽略热传导的作用因素^[14], 主要是热辐射作用, 对热通量计读数的影响较小。

3.3 油箱烤燃反应的破坏效应

根据 GB/T14372-2013 中对烤燃物危害的判定, 出现火球延伸到任何一块见证板之外、喷射火焰超出木柴(燃料)火焰 3 m 以上、在离堆垛边界 15 m 处喷射火焰比木柴(燃料)火焰的热通量超过 $4 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 的情况之一, 可以认为烤燃物的危害主要表现为热效应。因此, 由表 2 可见, 除了填充抑爆球的 -10PD 油箱烤燃实验, 其它各次实验均满足以上热效应表现, 所以盛装 -10PD 和 RP-5 油箱烤燃反应的破坏效应主要为油料燃烧产生的喷射火球的热效应。

对热效应严重程度的评判通常是通过热辐射对人的伤害或对物体的毁伤程度来判断。常见的热辐射毁伤准则有: 热通量(q)准则、热剂量(Q)准则、热通量-热剂量($q-Q$)准则、热通量-时间($q-t$)准则和热剂量-时间($Q-t$)准则。其中, $q-Q$ 准则、 $q-t$ 准则、 $Q-t$ 准则是完全等价的, 因此, 一般只常用 q 准则、 Q 准则、 $q-Q$ 准则。又因为 $q-Q$ 准则的毁伤曲线需要通过大量的实验来获取, 实际操作存在难度^[15], 所以不选择 $q-Q$ 准则作为烤燃实验喷射火球的热辐射伤害程度的判据。

q 准则以热流密度作为衡量目标是否被破坏的参数, 其适用范围为: 热流密度作用时间比目标达到热平衡所需的时间长。 Q 准则以目标接收到的热剂量作为目标是否被破坏的参数, 其适应范围为: 作用于目标的热流密度持续时间非常短, 以至目标接收到的热量来不及散失。烤燃实验的喷射火球主要以热辐射方式持续作用于目标, 且作用时间远比目标达到热平衡所需的时间长, 因此喷射火球的热效应伤害比较符合 q 准则。

热辐射对人的伤害机理主要有皮肤烧伤、眼睛损伤及次生火焰烧伤, 伤害严重时可导致死亡。国内外

研究者, 根据大量的理论和生物实验研究, 得到了热通量对目标的伤害阈值, 并推算出对人的伤害阈值^[16]。将表 4 中喷射火球辐射度以及距烤燃中心点 15 m 处的热通量, 对照热通量对人的伤害阈值标准, 可以获知喷射火球的热通量对人的伤害后果, 如表 5 所示。

表 5 喷射火球热通量伤害后果

Table 5 Heat flux damage consequences of jet fireball

position	experimental conditions	damage consequences near cook-off position
near cook-off position	-10PD	severely burns for 10 s
	-10PD+explosion suppression balls	pain threshold for 1 min
	RP-5	1% mortality 10 s exposure
	RP-5+explosion suppression balls	1% mortality 10 s exposure
the location away from cook-off position 15 meters away	-10PD	no discomfortable for prolonged exposure
	-10PD + explosion suppression balls	no discomfortable for prolonged exposure
	RP-5	pain threshold for 15 s exposure
	RP-5+explosion suppression balls	pain if exposure for more than 20 s

Note: Heat flux thresholds to human damage have been deducted by researchers from both home and abroad, based on theory and biological experiments. The consequences to personnel damage provided in Table 5 were evaluated according to relative references.

由表 5 可知, 无论是烤燃中心点附近, 还是距烤燃中心点 15 m 处, -10PD 油箱烤燃反应的热通量伤害后果均低于 RP-5 油箱烤燃反应。填充了抑爆球的油箱烤燃反应的热通量伤害更小, 如 -10PD 油箱的热通量伤害在烤燃中心点附近已降至人暴露 1 min 只是有疼痛感觉, 而 RP-5 油箱虽然在烤燃中心点附近的热通量大小仍足以导致人的死亡, 但在距烤燃中心点 15 m 处已降至暴露超过 20 s 才会引起疼痛, 这说明抑爆球具有明显的阻止和抑制油箱中油料燃烧、爆炸的作用, 从而有效降低了油箱烤燃反应的热通量伤害后果。

4 结论

(1) 填充抑爆球延迟了油箱破裂及其油料开始燃烧的时间, 盛装 -10PD、RP-5 的油箱开始燃烧时间分别从 280 s、326 s 延迟到 328 s 和 447 s。

(2) -10PD 和 RP-5 油箱在烤燃过程中产生的是喷射火球, 其破坏效应主要表现为火球的热效应。

(3) 填充抑爆球使 -10PD、RP-5 喷射火球的最大

截面积、表面最高温度以及 15 m 处的最大热通量等参数明显减小,其热效应伤害程度也显著降低。

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.
WU Xun. Preparation and influencing factors study of explosion proof diesel oil [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2011.

[2] 王震. 飞机燃油箱防爆及抑爆材料应用技术[J]. 航空科学技术, 2002, (3): 33-35.
WANG Zhen. Explosion suppression for aircraft fuel tanks and application technology of suppression material [J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2002, (3): 33-35.

[3] MIL-B-83054B (USAF). Military specification-battle and inerting material[S]. Aircraft Fuel Tank, 1978.

[4] 姜光华, 刘建国, 南子江. 可防止易燃易爆液、气体容器爆炸的抑爆材料[J]. 兵工安全技术, 1997(3): 19-21.
JIANG Guang-hua, LIU Jian-guo, NAN Zi-jiang. Explosion suppression materials of preventable explosion of flammable and explosive liquid and gas containers [J]. *Ordnance Safety Technology*, 1997(3): 19-21.

[5] 钟若英. 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 Ruo-ying. On the explosion suppression of aluminum alloy material used in aircraft fuel tank [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2002.

[6] 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 Zhi-wei, XIE Li-feng, SONG Xiao-bin, et al. Contrast studies on explosion suppression performance between spherical materials and reticular materials [J]. *Explosive Materials*, 2011, 40(6): 15-18.

[7] 刘治中, 许世海, 姚如杰. 液体燃料的性质及应用[M]. 北京: 中国石化出版社, 2000: 314-331.
LIU Zhi-zhong, XU Shi-hai, YAO Ru-jie. The properties and applications of the liquid fuel [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2000: 314-331.

[8] 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 Ying-zhong. Research on the explosion characteristic of diesel fuel and safety diesel [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.

[9] Ramaton Ramos, Henrique Boschi-Filho. The size of compact extra dimensions from blackbody radiation laws [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2014, 393(1): 261-267.

[10] 范维澄, 王清安, 姜冯辉, 等. 火灾学简明教程[M]. 第一版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1995: 91-92.
FAN Wei-cheng, WANG Qing-an, JIANG Feng-hui, et al. Fire learning introductory tutorial [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1995: 91-92.

[11] Sharma R K, Gurjar B R, Wate S R, et al. Assessment of an accidental vapour cloud explosion: Lessons from the Indian Oil Corporation Ltd. accident at Jaipur, India [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2013, 26(1): 82-90.

[12] PANG Lei, ZHANG Qi. Influence of vapor cloud shape on temperature field of unconfined vapor cloud explosion [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2010, 18(1): 164-169.

[13] Filippo Gavelli, Scott G Davis, Olav R Hansen. Evaluating the potential for overpressures from the ignition of an LNG vapor cloud during offloading [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2011, 24(6): 908-915.

[14] 黄磊, 何中其, 李春光, 等. 热通量传感器在爆炸场热辐射测试中的应用[J]. 火炸药学报, 2011, 34(5): 38-42.
HUANG Lei, HE Zhong-qi, LI Chun-guang, et al. Application of heat flux microsensor in radiation measurement of blasting field [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellant*, 2011, 34(5): 38-42.

[15] 郭学永, 李斌, 解立峰. 温压药剂的热毁伤研究[J]. 火炸药学报, 2008, 31(1): 16-19.
GUO Xue-yong, Li Bin, XIE Li-feng. Study on thermal damage of thermobaric explosive [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellant*, 2008, 31(1): 16-19.

[16] 仲倩. 燃料空气炸药爆炸参数测量及毁伤效应评估[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
ZHONG Qian. Research on measurement of explosion parameters and evaluation of damage effect of fuel air explosive [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011.

Fast Cook-off Performance of Fuel Tanks with Explosion Suppression Infill

HUANG Yong^{1,2}, LU Chang-bo³, AN Gao-jun³, XIONG Chun-hua³, XIE Li-feng¹

(1. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. School of Environmental and Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 3. Oil Research Institute, the General Logistics Department of China people's Liberation Army, Beijing 102300, China)

Abstract: In order to evaluate the effectiveness in flame retardant and explosion suppression of the infill, a comparative study of the fast cook-off performances in terms of destructive consequences was carried out between the fuel tanks with spherical explosion suppression infill (or explosion suppression balls for short) and those without. Cook-off experiments were performed on tanks with diesel fuel (-10PD) and jet fuel (RP-5), respectively, simulating the situation of fuel tanks of vehicles or aircrafts being cooked off. The sizes of the fireballs, the surface temperatures, and the parameters of heat radiation were recorded respectively with a video camera, a high-speed camera, an infrared thermal imager, and a heat flux meter. Results show that jet fire or even explosion of vapor cloud would occur while fuel tanks being cooked off so that the primary destructive activities are the thermal effect of jet fireball. The fuel tanks with explosion suppression balls out-performed those without for -10PD as well as for RP-5 in terms of the postpones of the initial combustions for 48 s and 121 s, the reduction in maximal cross-sectional areas for 65.72% and 42.44%, the decrease in the surface temperatures for 26.13% and 12.66%, respectively, and apparent decrease in heat flux damage consequences.

Key words: diesel fuel; jet fuel; cook-off; explosion suppression balls; jet fireball; heating effect; heat flux

CLC number: TJ5; X932

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.05.016