DOI: 10.11883/1001-1455(2017)04-0779-06

油箱明火烤燃燃爆特性实验研究*

姚 箭[1],王海洋[1],王翠华[2],王永旭[1],朱祥东[3],李 斌[1]
(1.南京理工大学化工学院,江苏 南京 210094;
2.山东诚泰安全技术咨询有限公司,山东 济南 250013;
3.中国人民解放军总后勤部油料研究所,北京 102300)

摘要:车辆在遭遇事故或高温天气时容易起火自燃,车辆油箱可能发生爆燃,威胁人员的生命安全。为研究装有油料的油箱在明火烤燃下的燃爆特性,采用摄像机、红外热成像仪和热电偶对油箱在烤燃过程中喷射火焰的表面温度和尺寸以及油箱内部温度进行测试,以 76 L 油箱为研究对象,对比不同密闭条件和填充情况下油箱的燃爆特性。实验结果表明:油箱在出油口关闭、未填充抑爆材料时,易发生爆炸,烤燃产生的爆燃火球表面最高温度在 1 800 K 以上,火球体积约为油箱体积的 1 600 多倍;油箱内填充抑爆球可使喷射火焰的最高表面温度和尺寸显著降低;在相同条件下,油箱内柴油蒸气的平均升温速率比汽油蒸气低 36.0%,最高温度低 16.2%。

关键词:油箱;烤燃;爆燃;抑爆材料
中图分类号:O385 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

随着我国生活水平的提高,人均汽车持有量快速增加,给人们带来方便的同时,也带来了安全隐患。车辆、飞机等交通工具在遭遇事故或高温天气时,容易起火发生自燃,所产生的高温可能进一步引燃油箱内的油料,甚至产生爆燃,造成二次破坏。此外,储油区、加油站等火灾及爆炸高发的危险区域,一旦出现起火源,极易发生燃烧爆炸事故[1],在火焰的炙烤下,周边车辆油箱及油料储罐的安全受到威胁,容易发生更为严重的次生事故。为提高车辆和飞机的燃油箱以及油料储罐的本质安全化程度,国内外的专家学者进行了相关研究。美国空军早在 1978 年就制定了在飞机燃油箱内填充网状泡沫材料的相关规范[2]。20 世纪末中国陆续研制了铝合金抑爆材料。姜光华等[3]发现填充铝合金抑爆材料的易燃易爆液/气体容器在明火点燃、射击、气焊等操作下没有爆炸危险。江平等[4]发现在油箱、油罐内填充的聚氨酯网状泡沫材料具有抑爆特性,并探讨了其抑爆机理。范广龙等[5]对卡车燃油箱的防爆技术进行了相关研究,从多个方面分析了影响抑爆材料效果的因素。黄勇等[6]对填充球形非金属抑爆材料的 108 L 柴油油箱进行了明火烤燃实验,验证了抑爆球的抑爆效果。E. Planas 等[7]研究了液化天然气(liquefied natural gas,LNG)油罐车车祸撞击引发的油罐及燃油箱 BLEVE(boiling liquid expanding vapour explosion)爆炸的成因和热辐射效应。B. Song 等[8]采用 Fluent 软件模拟了飞机油箱经太阳辐射 1 h 后燃料表面和蒸气的温度变化,为进一步研究火灾情况下油箱和油罐内部的温度变化提供了参考。F. Heymes 等[9]研究了 50 m 处的树冠火对 2 m^3 液化石油气(liquefied petroleum gas,LPG)油罐的影响,实验发现树冠火没有引起油罐的 BLEVE 爆炸。L. A. Godoy 等[10]模拟了空的钢制储罐在不同外部火焰烤燃下的变形情况,所得结果与 2009 年 Bayamon 大火下油罐的变形一致。目前,有关油箱和油罐的抑爆、防爆研究较多,但是对于含有油料的油箱在明火烤燃下的燃爆特性研究较少。

为模拟油箱在外部受热条件下的燃爆特性,本文中以 76 L 油箱为研究对象,在敞开空间进行油箱的烤燃实验,对比不同密闭条件和填充情况下油箱的烤燃现象,分析影响烤燃反应的主要因素,为进一步提高油箱的本质安全化程度提供技术参考。

* **收稿日期**:2015-12-03;**修回日期**:2016-04-05
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)
第一作者:姚 箭(1991—),男,博士研究生;**通信作者**:李 斌,wrilber@sina.com。

1 实 验

1.1 实验装置与仪器

实验设备:标准货车油箱,容积为 76 L,长、宽、高分别为 680、400 和 290 mm,壁厚 1.5 mm,材质为不锈钢;金属支架,钢制,用于放置油箱,其长、宽、高均为 500 mm;燃烧池,钢制,长、宽、高分别为 1 000、460 和 200 mm。

测试仪器:普通摄像机;WRNT-187 K 型铠装热电偶,最大量程 1 000 ℃,长 1.5 m;XMTA-9000 型智能温度数显仪,北京雷辉盛宗仪表有限公司生产;Mikronscan 7200V 型红外热成像仪,美国 Mikron 公司生产,系统采用 320×240 微热辐射计 UFPA 探测器,温度响应时间为 2 μs。

1.2 实验样品

实验油料:92 号汽油、−10 号军用柴油,其理化性质如表 1 所示。

抑爆材料:中空栅格状球体[11](简称抑爆球),棕色,直径为 30 mm,单球质量为 1.65 g。

表 1 实验油料的理化性能

Table 1 Physical and chemical properties of experimental oil

油料	闪点/℃	沸点/℃	爆炸极限/%	相对密度
92 号汽油	−50	40	1.3～6.0	0.70
−10 号军用柴油	65	282		0.87

1.3 实验方法

实验场地布局见图 1。将盛装 25 L 油料和抑爆球(填充密度约 60 kg/m^3)的油箱放置在金属支架上,油池置于支架下方,实验前在油池中添加 15 L 煤油作为燃料。将普通摄像机和红外热成像仪置于距油箱中心 20 m 处。其中,红外热成像仪用于采集油箱和燃烧火焰的表面温度,采样周期为 1 秒每帧;热电偶用于测量油箱内部的温度场。

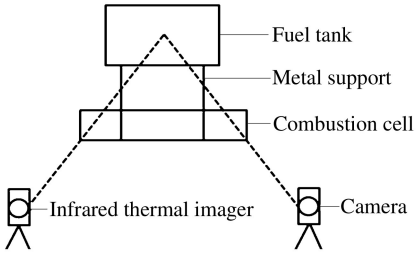

图 1 实验场地布置示意

Fig. 1 Experimental layout

2 实验结果分析与讨论

2.1 烤燃油箱的燃爆特性

不同时刻油箱的烤燃情况如图 2 所示。实验 1、实验 3 和实验 4 的油箱表面出现喷射火焰或火苗,实验 2 发生爆燃。实验结果和现象说明列于表 2。

表 2 实验现象与结果

Table 2 Experimental phenomena and results

实验	填充物	出油口	油箱表面喷射火焰燃烧情况	抑爆球	其他
1	汽油	开	多股喷射火柱,最大尺寸约 2 m		
2	汽油	关	爆燃火球,直径约 10 m		发生爆燃,有巨大声响,油箱解体,有大面积池火
3	汽油、抑爆球	关	一股喷射火柱,最大尺寸约 2 m	约 1/3 球体熔化	
4	军用柴油、抑爆球	关	火苗,最大尺寸约 0.5 m	约 1/8 球体熔化	

从图 2 和表 2 可以看到,实验 1 出现多股喷射火柱,实验 2 在烤燃过程中发生爆燃,产生巨大火球,产生差异的原因在于油箱密闭情况不同。实验 1 中,油箱的出油口打开,用于模拟油箱敞开条件下的烤燃反应;而实验 2 中,油箱的出油口关闭,用于模拟当出油口与外部设备连接时油箱封闭条件下的烤燃



图 2　不同时刻拍摄的实验照片

Fig. 2　Consecutive moments in experiments

反应。对于实验 1，在烤燃过程中，油箱内产生的油蒸气从出油口喷出，形成多股火柱；对于实验 2，烤燃产生的油蒸气在油箱内积聚，当油蒸气压力超过油箱承受压力时，油箱发生爆炸，油蒸气和油料迅速向四周扩散，与周围空气混合发生爆燃，部分油料落地形成大面积池火。实验 1 中，喷射火柱的总体积约为 0.4 m^3，为油箱容积的 5 倍；而实验 2 中，爆燃火球的体积约为 125.6 m^3，为油箱容积的 1 675 倍。

在实验 3 中，油箱内填充抑爆球，出油口关闭，实验发现在烤燃过程中油箱表面只有一股火柱。这主要归功于油箱中的抑爆球，抑爆球的蜂窝状高孔隙结构可以有效降低油箱内油料的汽化和挥发。蜂窝结构材料具有较高的表面效能及良好的吸热性，可以迅速地将油液和油蒸气热量吸收，使温度降低，气体的产生速率和膨胀程度降低。在相同的烤燃条件下，实验 3 中油箱内的压力上升较缓慢，在烤燃过程中油箱内的压力未达到承压极限。实验结束后，发现只有油箱上部的抑爆球（约 1/3）发生熔化，下部抑爆球完好。这是因为对油箱下部进行加热时，汽油大量挥发，油蒸气集中在油箱上部空间，并从排气孔缝隙逸出，产生火柱，此时油箱上部温度会急剧上升，抑爆球在火焰附近炙烤，容易发生熔化、烧结。由此可见，抑爆球的存在可以有效延缓油蒸气的产生，降低油箱明火烤燃的危险性。

2.2　烤燃油箱外部火焰的温度分布

运用红外热成像仪自带的 MikroSpec 软件，对烤燃过程中的热成像图进行处理、分析，得到选定图像区域内的最高、最低和平均温度，及其随时间变化的关系[12]。图 3 为喷射火焰表面温度最高时的红

外热成像图。烤燃过程中喷射火焰的表面温度、尺寸等参数列于表 3，其中：d、h 分别为喷射火焰的最大直径和高度，由 Lens Calculator 程序计算得到；T_m 为火焰表面最高温度；T_a 为表面温度最高时火焰表面的平均温度；t_h 为温度超过 1 273.15 K 时的高温持续时间。

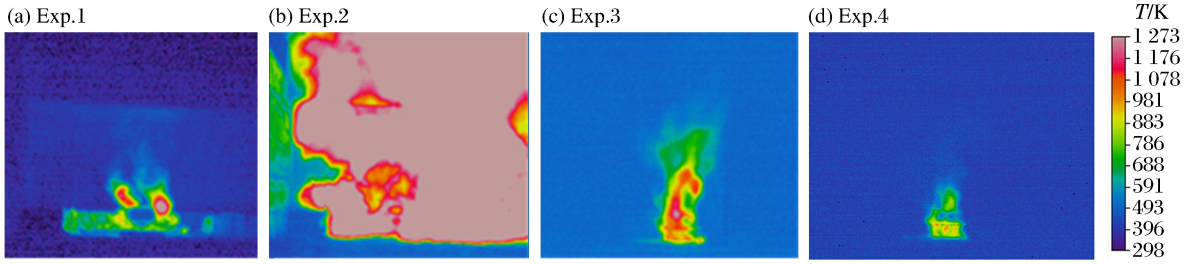

图 3 温度最高时刻喷射火焰的红外热成像图

Fig. 3 Infrared images of jet fire when T_m reached

表 3 喷射火焰尺寸和表面温度

Table 3 Size and surface temperature of jet fire

实验	T_m/K	T_a/K	d/m	h/m	t_h/s
1	1 423	1 021	2.2	0.5	588
2	1 883	1 352	8.9	10.6	5
3	1 278	949	0.5	2.1	0.033
4	1 099	840		0.5	

根据实验 2 中火球表面最高温度和尺寸，利用 Baker 火球模型[13]进行估算，得到距火球中心 1 和 10 m 处产生的热剂量分别为 3 145 和 47 kJ/m^2。根据热剂量毁伤准则，爆燃火球在 1 m 处产生的热剂量可以引燃木材，在 10 m 处产生的热剂量能造成人员皮肤疼痛。实验 3 中火柱的最高表面温度为 1 278 K，比实验 2 中火球最高表面温度下降 32.1%。这主要是因为油箱内充满抑爆球，抑爆球排列紧密，其蜂窝状结构存在较多的细小孔隙，油蒸气向上逸出通过孔隙时，由于传热效应和器壁效应，热交换频繁，从而损耗部分能量，油蒸气压力和蒸发速度逐渐降低，产生火柱的尺寸和表面温度相应减小。

2.3 烤燃油箱内部的温度分布

为研究明火烤燃过程中油箱内部温度随时间变化的规律，选用两个 K 型铠装热电偶分别测试油液和油蒸气的温度。在烤燃过程中实验 3 和实验 4 的油箱内部温度变化如图 4 所示。

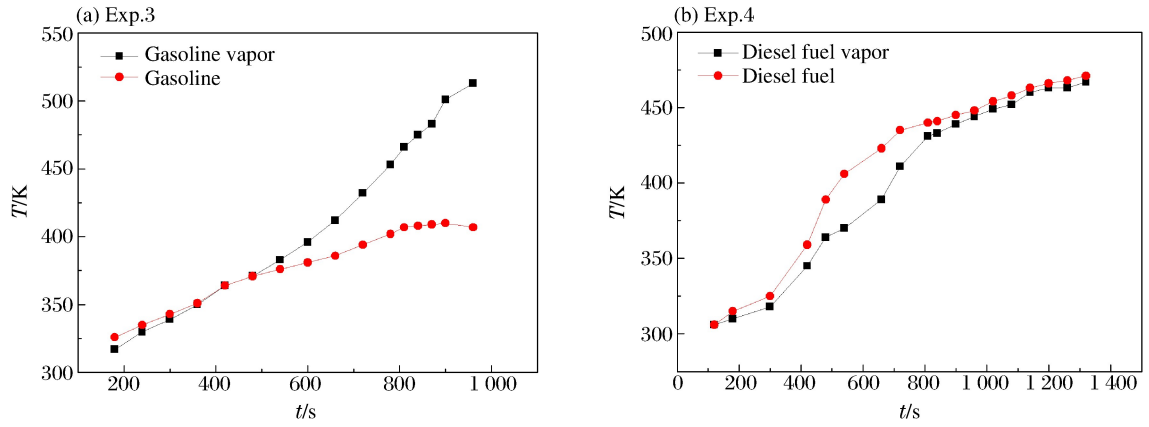

图 4 实验 3 和实验 4 中油箱内部温度变化

Fig. 4 Internal temperature of fuel tanks in Exp. 3 and Exp. 4

实验 3 中，油箱内油液的温度稳步上升，平均升温速率约为 0.12 K/s，800 s 后维持在 410 K 左右；油蒸气温度在 420 s 时超过油液温度，1 000 s 时达到 525 K，平均升温速率约为 0.25 K/s，且升温速率随时间的延长不断升高。92 号汽油的主要成分为 C_5～C_{12} 脂肪烃和环烷烃类。随着油箱底部温度的上升，汽油所含的轻组分不断挥发，油蒸气在油箱上部积聚，在油箱上部喷射火焰的炙烤下，汽油蒸气温度不断升高，逐渐高于油液温度。

实验 4 中，油箱内油液和油蒸气的升温速率相近，约为 0.14 K/s，比汽油蒸气的平均升温速率低 36.0%，800 s 后升温速率逐渐下降，1 000 s 时柴油蒸气温度达到 440 K，比汽油蒸气低 16.2%。在整个烤燃过程中，柴油油液温度与柴油蒸气温度接近，但始终比柴油蒸气温度高 3～5 K。－10 号军用柴油的主要成分为 C_{11}～C_{24} 脂肪烃和环烷烃类，加热过程中只有少量组分挥发。油蒸气通过抑爆球的孔隙时，与抑爆球相互作用，有部分能量损耗，故热电偶测得的蒸气温度略低于油液温度。由于柴油中的挥发性组分较少，因此油箱上部只出现火苗，油箱内部温度的上升主要依赖于油池火，所以油液温度高于柴油蒸气温度。

3　结　论

为模拟油箱在外部受热条件下的燃爆特性，以 76 L 油箱为研究对象，在敞开空间进行油箱外部烤燃实验，对比不同密闭条件和填充情况下油箱的烤燃现象，结果表明：

(1) 对于未填充抑爆球、出油口密闭的汽油油箱，烤燃产生的爆燃火球表面最高温度达 1 800 K 以上，火球体积约为油箱体积的 1 600 多倍，影响范围较广，热危害严重；

(2) 对于填充抑爆球的汽油油箱，其喷射火焰的表面最高温度和尺寸显著降低；

(3) 在相同条件下，油箱内柴油蒸气的平均升温速率比汽油低，且柴油蒸气温度略低于其油液温度。

参考文献：

[1] 周丽秀. 汽车加油站油罐火灾案例分析及消防安全对策[J]. 广东化工，2015，42(9)：156-157.
Zhou Lixiu. Gasoline tank fire case analysis and fire safety countermeasures on automobile gasoline filling station [J]. Guangdong Chemical Industry, 2015，42(9)：156-157.

[2] Military specification-battle and inserting material: MIL-B-83054B[S]. US Air Force, 1978.

[3] 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 Guanghua, Liu Jianguo, Nan Zijiang. Explosion suppression materials of preventable explosion of flammable and explosive liquid and gas containers[J]. Ordnance Safety Technology, 1997(3)：19-21.

[4] 江平，李晓光，高永庭. 燃油箱中空充填网状聚氨酯泡沫抑爆原理[J]. 沈阳航空航天大学学报，2003，20(4)：13-15.
Jiang Ping, Li Xiaoguang, Gao Yongting. Explosion suppression mechanism of void design reticulated polyurethane foam for fuel tank[J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautcal Engineering, 2003，20(4)：13-15.

[5] 范广龙，舒勇. 卡车燃油箱防爆技术研究[J]. 汽车实用技术，2015(2)：18-20.
Fan Guanglong, Shu Yong. The disquisition of the fuel oil box's prevent-blasting on truck[J]. Automobile Applied Technology, 2015(2)：18-20.

[6] 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.

[7] Planas E, Pastor E, Casal J, et al. Analysis of the boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE) of a liquefied natural gas road tanker: The Zarzalico accident[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015，34：127-138.

[8] Song B, Wang X, Zhang H. The aircraft composite integral fuel tank fire safety performance analysis and shrinkage ratio simulation calculation[J]. Procedia Engineering, 2013，52：320-324.

[9] Heymes F, Aprin L, Forestier S, et al. Impact of a distant wildland fire on an LPG tank[J]. Fire Safety Journal,

2013,61(5):100-107.

[10] Godoy L A, Batista-Abreu J C. Buckling of fixed-roof aboveground oil storage tanks under heat induced by an external fire[J]. Thin-Walled Structures, 2012,52(1):90-101.

[11] 臧充光,焦清介,郭学永,等.一种非金属阻隔抑爆球:CN 102807054A[P]. 2013-02-27.

[12] 王凤丹.燃料空气炸药热辐射毁伤效应研究[D].南京:南京理工大学,2010.

[13] Baker W E, Cox P A, Westine P S, et al. Explosion hazards and evaluation[M]. Elsevier Science Publishing Company, 1983.

Experimental study of cook-off performance of fuel tanks

Yao Jian[1], Wang Haiyang[1], Wang Cuihua[2], Wang Yongxu[1], Zhu Xiangdong[3], Li Bin[1]

(1. *School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*;
2. *Shandong Cheng-tai Security Technology Consulting Company, Ltd.*, *Jinan* 250013, *Shandong, China*;
3. *Oil Research Institute, The General Logistics Department of China People's Liberation Army, Beijing* 102300, *China*)

Abstract: Vehicles are apt to catch fire easily in high-temperature weather or in traffic accidents. When their fuel tanks cook off, an explosion may occur, thereby posing a hazard to personal safety. To investigate the cook-off performance of fuel tanks, we conducted 4 tests on 76 L fuel tanks under different airtight conditions and infillings, and obtained the surface and internal temperatures and the size of the fireballs using an infrared thermal imager, thermocouples and a camera. The experimental results show that the explosion may occur when the fuel outlets are closed and the fuel tank is not filled with explosion suppression balls. In our experiments, the highest surface temperature of the explosion fireball was above 1 800 K, and the volume of the fireball was 1 600 times more than that of the fuel tank. The explosion suppression balls filled in the tanks decreased the highest surface temperature and sizes of the jet fire. Under the same conditions, the average heating rate and the highest temperature of the diesel fuel vapor were 36.0% and 16.2% lower than that of the gasoline vapor respectively.

Keywords: fuel tanks; cook-off; explosion; explosion suppression materials

(责任编辑 王 影)