

文章编号: 1003-1480 (2022) 03-0066-04

金属化凝胶甲基胍火灾热辐射特性研究

徐飞扬, 罗一民, 韩慧雯, 王艳茹, 刘大斌, 徐森

(南京理工大学 化学与化工学院, 江苏 南京, 210094)

摘要: 为研究金属化凝胶甲基胍在存储、生产、运输和使用过程中因意外燃爆而产生的火灾热辐射特性, 采用高速摄像机、红外热成像仪和热辐射测试系统, 记录火烧刺激条件下金属化凝胶甲基胍储罐的燃爆过程、表面火球最高温度以及火球热辐射的变化规律。结果表明: 火灾刺激条件下金属化凝胶甲基胍仅发生燃烧反应, 基于热通量判断准则得出 18kg 金属化凝胶甲基胍遭遇火灾时的无热辐射损害安全距离约为 30 m。

关键词: 液体推进剂; 金属化凝胶甲基胍; 火灾刺激; 热辐射特性

中图分类号: V511 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1480.2022.03.015

Study on Thermal Radiation Characteristics of Metallized Gel Methylhydrazine

XU Fei-yang, LUO Yi-min, HAN Hui-wen, WANG Yan-ru, LIU Da-bin, XU Sen

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing, 210094)

Abstract: To study the thermal radiation characteristics caused by accidental deflagration of metallized gel methylhydrazine (MMH) during production, storage, transportation and use, the information of the deflagration processes under external flame stimulation were obtained by a high-speed camera. Additionally, in the same situation, the highest temperature of the surface fireball and the principle of the thermal radiation were also studied by an infrared thermal imager and thermal radiation testing system. Results show that metallized gel MMH only has burning reaction. Based on criteria for judging heat flux, the safety radius of thermal radiation for metallized gel MMH (18kg) is about 30m.

Key words: Liquid propellant; Metallized gel methylhydrazine; Fire stimulus; Thermal radiation characteristic

液体推进剂是航天技术的核心与基础, 具有比冲高、安全性好和能够多次点火等优点^[1-3]。当液体推进剂发生意外燃爆时, 其产生的火球虽然不一定伴有明显的冲击波, 但其热效应持续时间长、温度高、火球尺寸大, 从而产生热辐射破坏或引燃物质, 使工作人员和设备受到伤害^[4-5]。金属化凝胶甲基胍是在甲基胍的基础上添加一定量的胶凝剂和固体粉末^[6]。Lastufka^[7]考察了在四氧化二氮 (NTO) 环境中燃烧的胶凝单甲基胍液滴, 研究了稀释剂对点燃和双火焰结构的影响。Wang^[8]开发了一个新的火球爆炸模型, 能够更准

确地预测热辐射阈值; Blankenhagel^[9]采用红外照相机对有机过氧化物火球的热辐射影响进行了评估; Gonome^[10]设计了一个喷水雾层, 估算了辐射衰减的有效水滴尺寸, 并且验证了优化雾层中水滴尺寸以及最大化热辐射防护的有效性。

目前针对不同情况的火灾, 研究方向多为火球尺寸变化、火球持续时间以及火球温度的变化规律等, 对火球热辐射传播规律也以理论计算和数值模拟居多, 针对不同距离处火球表面的热辐射值的试验研究却鲜见报道。因此, 研究液体推进剂火灾事故过程中

收稿日期: 2021-11-26

作者简介: 徐飞扬 (1992-), 男, 博士研究生, 从事液体推进剂安全性研究。

通讯作者: 徐森 (1981-), 男, 副教授, 从事爆炸力学、含能材料爆轰、危险性分级研究。

基金项目: 装备预研国防科技重点实验室基金(6142603200509)。

产生的热辐射效应十分有必要。本文选择金属化凝胶甲基胍实际制式储箱为研究对象,开展金属化凝胶甲基胍在储存、运输和使用过程中遭遇最常见意外刺激(外部火灾)下的热辐射效应研究。

1 试验

1.1 试验条件

试验用金属化凝胶甲基胍样品与制式储罐均由北京航天试验技术研究所提供,包装材料为柱状不锈钢储罐,样品净重为 18kg,样品包装的设计压力为 1.0MPa。

1.2 试验设计

试验测试系统如图 1 所示。使用高速摄像机(FASTCAM Mini UX 100, 日本 photron 公司)观察火烧刺激条件下液体推进剂储罐的反应过程,采用红外热成像仪(A615, 上海机电所)记录样品反应过程中的表面火球最高温度。样品下方燃烧池填充足够量的航空煤油液体燃料,以保证样品有充足的时间反应。3 组热通量传感器^[1](Vatell Heat Flux Microsensor, Vatell 公司)编号分别为 1#、2#和 3#,布置于样品同一侧,与燃烧池中心间距分别为 10m、20m 和 30m,用于表征其热辐射效应。

热通量传感器分为 2 部分:头部中心部分为热通量传感元件,外围部分为温度传感元件。其测试原理图如图 2 所示。

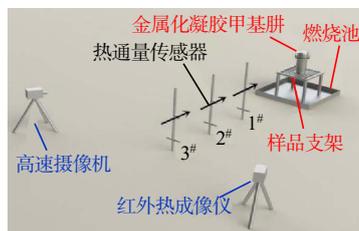


图 1 试验测试系统

Fig.1 Schematic diagram of test layout

热通量通过式(1)计算:

$$q = \frac{\Delta V_{\text{HFS}} / G_{\text{HFS}}}{g \cdot \Delta T + h} \quad (1)$$

式(1)中: q 为热通量, $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$; V_{HFS} 为来自 HFS 的瞬时放大电压信号, μV ; G_{HFS} 为 HFS 通道的放大器增益; g , h 为灵敏度和温度之间关系的系数,

传感器经校准出厂后,为固有常数; ΔT 为反应前后热辐射测点处的温度差, $^{\circ}\text{C}$, 由传感器外围部分测得。

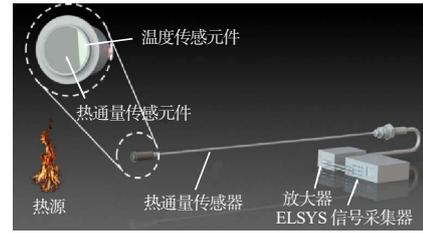


图 2 热通量传感器测试原理图

Fig.2 Schematic diagram of heat flux test principle

2 试验结果与分析

2.1 液体推进剂燃烧过程结果与分析

样品火烧反应过程部分高速录像如图 3 所示。

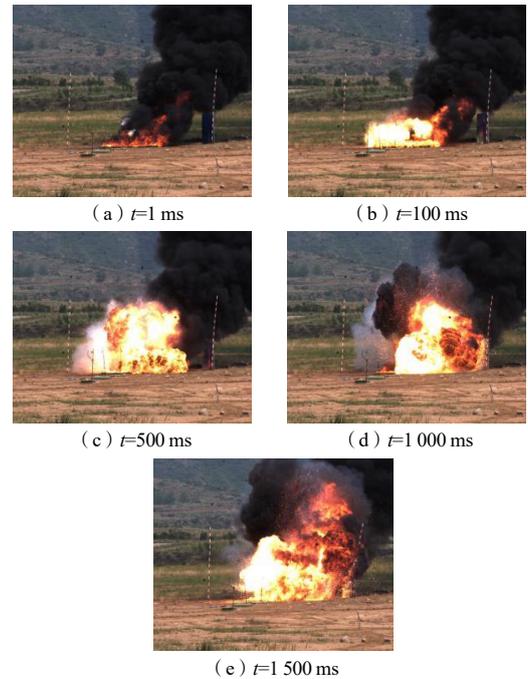


图 3 18kg 金属化凝胶甲基胍火烧反应过程
Fig.3 High speed video results of 18kg metallized gel MMH during burning

火灾刺激下,带包装的金属化凝胶甲基胍的受热温度远超其热分解温度,导致与储罐接触部分的推进剂在极短时间内发生热分解,并产生高温、高压气体产物。由于样品储存于密闭容器中,气体体积膨胀,蒸汽压不断增加,使得储箱内部压力超过了推进剂储箱包装的设计压力,储罐内样品和热分解产物冲出,贮箱中未来得及受热分解的样品在高压反应产物的作用下向四周抛洒,之后被火焰引发,进一步发生剧

烈的燃烧反应。

由图3可知,金属化凝胶甲基胂发生迸射,属燃烧反应,在其火烧中心周围观察到大量的样品残渣(氧化铝/凝胶剂/金属化凝胶甲基胂的混合物)。分析认为,一方面凝胶剂的存在抑制了甲基胂液滴的燃烧速率,随着燃烧的进行,在凝胶甲基胂液滴周围会形成“外壳”^[7],该外壳能够抑制液滴汽化,将蒸汽以气泡的形式积聚在外壳内,使液滴体积膨胀,最终,释放出气体射流;另一方面,金属及少量固体粉末的添加进一步抑制了推进剂的分解和燃烧速率,导致金属化凝胶甲基胂仅发生燃烧反应。

2.2 热辐射效应

2.2.1 热辐射通量试验结果与分析

样品反应时热通量随时间变化关系如图4所示。

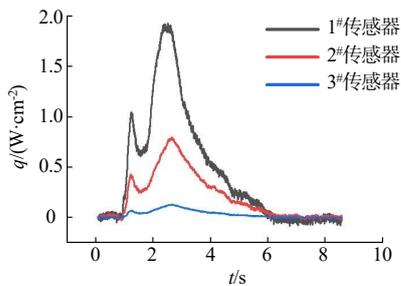


图4 18 kg 金属化凝胶甲基胂热通量随时间变化曲线

Fig.4 Heat flux curve of 18kg metallized gel MMH

通过测量试验样品在外部火灾试验中的热辐射通量变化,得到样品的热辐射通量峰值和样品燃烧持续时间内热辐射通量平均值,结果见表1。

表1 样品的辐射热通量试验值

Tab.1 Testing values of radiant heat flux of samples

试验样品	质量/kg	传感器编号	距离/m	热辐射通量试验值	
				平均值/(W·cm ⁻²)	峰值/(W·cm ⁻²)
金属化凝胶甲基胂	18	1#	10	0.499	1.388
		2#	20	0.214	0.802
		3#	30	0.035	0.129

注:试验前对10m处的相同质量的煤油的热辐射进行测试,热辐射峰值约为0.530W·cm⁻²,20m和30m处可忽略不计,表中结果均为扣除空白试验后的热辐射通量值。

表1结果表明,热辐射强度随距爆炸点距离的增加而降低,主要是由于热辐射能量在传输过程中,空气中的二氧化碳和水蒸气的吸收作用以及空气中的尘埃和其它悬浮粒子的散射作用,导致火球的热辐射强度衰减;另一方面,随着距离的增加,燃烧产物的温度急剧降低,热效应相应地也大大减弱。根据热通量判断准则:如果热辐射强度小于0.16 W·cm⁻²,无论

是人还是环境都不会遭受火球的热辐射破坏,此距离可视为无热辐射损害的安全距离^[12],可知18kg金属化凝胶甲基胂的安全距离约为30m。

2.2.2 红外结果与分析

利用红外热像仪^[13]测量样品火烧反应过程中的火球最高温度,结果如图5所示。

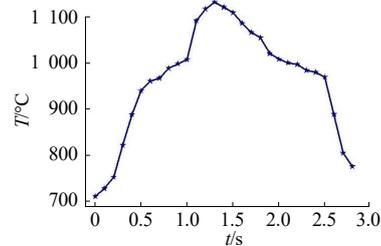


图5 样品反应过程火球表面最高温度

Fig.5 Maximum surface temperature of the fireball

观察发现,样品的热通量变化持续时间明显大于红外获得的样品反应持续时间,这是因为即使样品产生的火球熄灭后,由于燃爆产生的高温气体产物的膨胀扩散范围广,边缘温度高,在其爆心周围仍然存在着较高的温度场,向外界辐射能量。爆炸火球的红外测试结果见表2。

表2 红外测试结果

Tab.2 Infrared testing results

样品	火球最高温度/°C	火球最大直径/m
18 kg-金属化凝胶甲基胂	1 132.6	8.243

2.2.3 热辐射通量理论计算

在假设不发生大气能量散失的情况下,Baker提出通过公式(2)计算火球的热辐射通量^[14]:

$$q = \theta^4 \times G \times (D/R)^2 / (F + (D/R)^2) \quad (2)$$

式(2)中: q 为热通量, W·m⁻²; θ 为火球温度, K; D 为火球直径, m; R 为到火球中心的距离, m; F 、 G 为常量, $F=161.7$; $G=5.26 \times 10^{-5}$ 。计算过程中 θ 、 D 取样品燃爆过程中的最大值,结果如表3所示。

表3 基于Baker公式计算得到的热辐射通量值

Tab.3 Heat radiant flux value calculated based on Baker formula

试验样品	质量/kg	距离/m	热辐射通量理论值/(W·cm ⁻²)
金属化凝胶	18	10	36.2
		20	9.0
甲基胂		30	4.0

热辐射试验值与理论值随距离变化规律如图6所示。分析认为,相比理论计算值,试验值更加接近真实结果。用Baker静态模型公式计算的热通量显著大于测试值,是因为静态模型在计算时假设火球直径和火球温度为常量(测试过程获得参量的最大值),且火球的瞬态成长过程以及热辐射过程中传导和对流

过程交换的热量均忽略不计^[4]，而实际上，火球上升高度和火球作用时间等特征参量随时间是不断变化的，均为时间函数，且环境因素诸如风向、风速大小、测试点处的大气压等对火球热辐射的测量均有不可忽视的影响。

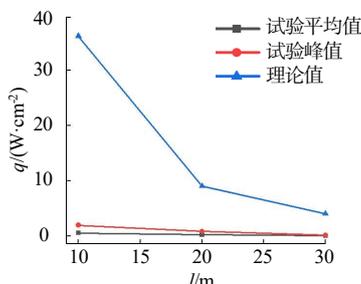


图6 热辐射试验与理论计算值随距离变化关系对比

Fig. 6 Relationship between the value of test and theoretical calculation of thermal radiation versus distance

3 结论

(1) 由于胶凝剂以及少量金属成分的存在抑制了甲基胍液滴的燃烧速率，使得金属化凝胶甲基胍在火灾刺激下仅发生了燃烧反应。

(2) 基于热通量判断准则得出制式包装下 18 kg 金属化凝胶甲基胍遭遇火灾时，无热辐射损害的安全距离约为 30m。

(3) 与 Baker 静态模型相比，通过热辐射传感器测量得到的热通量试验值能够更合理地评估火球热辐射毁伤效应。研究结果为液体推进剂发生遭遇火灾时产生的热毁伤防护提供了理论指导。

参考文献:

- [1] Li H M, Li G X, Li L, et al. Experimental study on thermal ignition and combustion of droplet of ammonium dinitramide based liquid propellant in different oxidizing gas atmospheres [J]. *Acta Astronautica*, 2020(169): 40-49.
- [2] 李亚裕. 液体推进剂[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011.
- [3] Xue S, Liu H, Zhou L, et al. Experimental research on rotating detonation with liquid hypergolic propellants[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2018, 31(12): 18-24.
- [4] Wang K, Liu Z, Qian X, et al. Long-term consequence and vulnerability assessment of thermal radiation hazard from LNG explosive fireball in open space based on full-scale experiment and PHAST[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017(46):13-22.
- [5] Dhurandher B K, Kumar R, Dhiman A. Impact assessment of thermal radiation hazard from LPG fireball[J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2015(11): 499-506.
- [6] Wang Y J, Li Z P, Fang T, et al. Study on prediction method for sedimentation stability of metallized gelled propellant[J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2016,14(6): 51-56.
- [7] Lastufka A E, Solomon Y, Anderson W E. Effect of diluent on gelled monomethylhydrazine ignition and dual flame behavior [C]//AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit,2013.
- [8] Wang K, He Y R, Liu Z Y, et al. Experimental study on optimization models for evaluation of fireball characteristics and thermal hazards induced by LNG vapor cloud explosions based on colorimetric thermometry[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018(366): 282-292.
- [9] Blankenhagel P, Wehrstedt K D, Mishra K B, et al. Thermal radiation assessment of fireballs using infrared camera[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2018(154):246-253.
- [10] Gonome H, Nagao T, Takagi Y, et al. Protection from thermal radiation of hazardous fires: optimizing microscale droplet size in mist barriers using radiative transfer analysis[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020(143): 114-120.
- [11] 黄磊. 不同炸药爆源的爆炸场热效应分析与测试[D]. 江苏南京:南京理工大学, 2012.
- [12] Baker W E, Cox P A, Westine P S, et al. *Explosion hazards and evaluation*[M]. Elsevier Scientific Pub. Co, 1983.
- [13] 阚金玲. 液固复合云爆剂的爆炸和毁伤特性研究[D]. 江苏南京:南京理工大学, 2008.
- [14] Song X Z, Zhang J, Zhang D, et al. Dispersion and explosion characteristics of unconfined detonable aerosol and its consequence analysis to humans and buildings[J]. *Process Saf. Environ. Protect*, 2021(152): 66-82.