

油罐抑爆材料对外火加热油罐的热效应及其影响

李海峰（山东垦利石化集团有限公司，山东 东营 257500）

摘要：在装有抑爆材料的油罐中进行了防爆试验研究。以煤油为燃料，加热汽油和柴油储罐，以研究抑爆材料对爆燃程度的影响。图像信息和温度数据分别由高速相机和红外成像设备记录。填充材料内储罐的最高火灾温度明显下降。柴油液体的温度高于柴油蒸汽的温度。相反，汽油蒸汽的温度会不断升高，并超过汽油液体。在抑制材料的存在下，汽油和柴油液体的平均温升速率分别约为 0.12 和 0.15K/s。

关键词：油罐；抑制材料；防爆；热辐射

1 引言

许多关于燃料爆炸事故的综合研究表明，火灾是储油设施油箱故障的最直接原因。对于大多数爆炸事故，辐射的热效应是与冲击波一样致命的关键因素。爆炸过程中辐射的快速加热效应是限制消防人员活动的主要因素，并决定了消防设计标准和最佳消防策略。为了减少爆炸事故期间对人员的危害，通过数值计算和实验方法研究了燃料爆炸的抑制。在实验室条件下，甲烷-空气混合物中的这种由于几乎瞬间分散的能力而产生了小爆炸，以保护具有复杂几何形状和高保温能力的纤维增强塑料储罐免受火灾。消防系统包括专用树脂和两种膨胀涂料，能够将储罐内达到 150℃ 的持续时间延长 20min，并抑制了非预混氮气。有 N₂ 抑制段的爆炸的超压上升率和峰值超压值均小于无 N₂ 抑制的爆炸。有研究表明，燃料蒸汽爆炸中的膨胀金属网材料和聚合物泡沫。适当的单元尺寸和足够的单位体积表面积可以有效地抑制爆燃过程。

对于油罐的爆炸事故，在油罐中填充灭火材料，这是避免油罐意外发生外部火灾时发生爆炸危险的有效方法之一。实验结果表明，放射性冲击引起的平均热通量为 26kW/m²，壁温保持在 427K 以下。50m 的安全距离能有效避免沸腾液体膨胀蒸汽爆炸。由薄铝箔产生的高多孔基质可以作为一种有益的特性插入到燃料箱中，以降低燃料箱和压力容器沸腾液体膨胀蒸汽爆炸的风险。在本研究中，进行了池火引起的汽油和柴油储罐爆燃，以检查灭火材料的防爆性。

2 实验装置

实验前，将 1250mm × 680mm × 520mm 不锈钢油箱安装在自制金属支架上。油箱的厚度和体积分别为 1.5mm 和 400L。油池位于金属支架底部。高速相机和红外成像设备距坦克中心的距离为 20m。帧速率为 1000fps 的高速相机放置在距离坦克中心 20m 处。记

录速率为 5 个 /s 样本的红外成像设备紧邻高速相机。

为了测量抑制材料对油箱热辐射的影响，进行了四次试验。在实验之前，用预先填充的抑制材料将 200L 燃料油填充到油箱中。在没有支撑材料的空油箱中也填充 200L 燃油作为对比试验。试验 1、试验 2 和试验 3 的油箱都装满了汽油，只有试验 4 装满了柴油。在试验 3 和试验 4 中安装了抑制材料。向油池中加入 20 升煤油。大火是由油池中的点火头产生的，作为点燃油箱的燃料。在油池点火后，一台高速摄像机被用来评估烹饪的整个过程。红外成像装置用于记录储罐内火焰的表面温度。用两个热电偶测量油液和油蒸汽的温度。

3 结果与讨论

3.1 抑爆材料

一些研究人员介绍了高分子聚合物阻燃作用的一般机理。聚合物的阻燃组分（如硫酸根、磷或卤素）可作为脱水剂，从热解聚合物中提取水并促进炭的形成。炭将促进火焰向冷凝相的较低传热，从而干扰加热过程。然后，阻燃剂组分将减少加热过程，因为它们阻碍氧和碳氧化成二氧化碳。最后，由聚合物的酸性组分形成的保护涂层减少了气相和冷凝相之间的传热和传质，从而降低了燃烧的释放热。然而，它仍然对抑制材料有负面影响。例如，抑制材料和燃料油之间的化学相容性可能导致抑制材料的机械性能下降和燃油质量下降。

图 1 显示了与四个不同实验条件的油罐相关的四组高速照片。试验 2 的油罐刚刚发生了沸腾油蒸汽的爆炸。油罐解体，伴随着巨大的声音和大范围的池火。由于出口的不同（试验 2、试验 3 和试验 4 的油出口关闭，以模拟封闭环境下油箱的煮沸；试验 1 可用于模拟开放环境下的情况），油蒸汽从油出口喷出，在试验 1 中形成多个火焰；对于测试 2，油出口被关闭，

使得油蒸气积聚在油箱中,从而引起爆震。但在测试3和测试4中,油箱表面只有火焰,由于存在抑制材料,油箱仍保持完好。

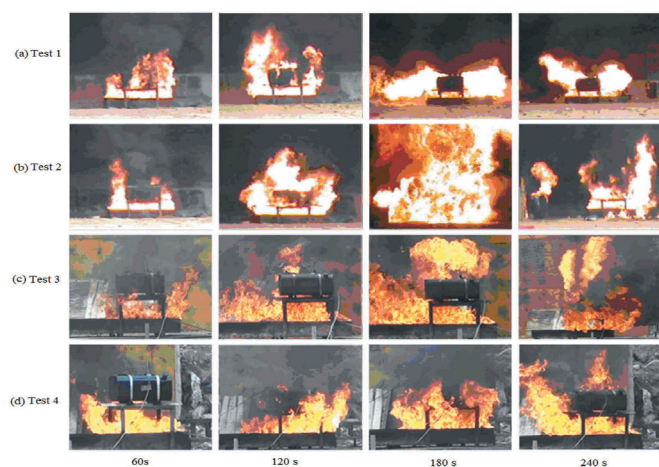


图1 高速相机测量的照片

3.2 燃烧或爆炸过程的温度曲线

油箱内部温度(测试3和测试4)随爆燃时间的变化如图2所示。在装有抑制材料的汽油油箱中,油箱中的油液温度稳步上升;油液的平均温度上升速率约为0.12K/s。800s后,油液温度保持在400K。当 $t=420s$ 时,油蒸汽温度开始超过油液温度。油蒸汽的平均升温速率约为0.25K/s,在 $t=1000s$ 时油蒸汽的最大升温速率为525K;上升速率随时间而增加。随着油箱底部温度的升高,汽油的轻组分蒸发到空气中,并积聚在油箱上部。在池火的影响下,汽油蒸汽的温度会不断升高,并超过汽油液体。

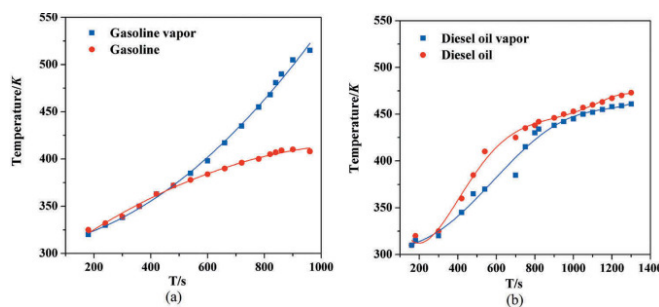


图2 汽油或柴油的温度随时间变化

在装有抑制材料的柴油油箱中,油液和油蒸汽的平均温升率差异很小。油液和蒸汽的温度以0.15K/s的速度增加,直到 $t=800s$ 。当 $t=1000s$ 时,柴油蒸汽的温度约为440K,同时仅为汽油蒸汽的75%。柴油的主要成分是脂肪烃和环烷烃。只有少数成分在加热下蒸发到空气中。柴油蒸汽的热量通过柴油蒸汽和抑制材料之间的相互作用而消散,从而使油液温度高于油

蒸汽。热红外图像显示了油箱火焰温度的变化,如图3所示。已证明材料的细胞结构可有效抑制温度上升。这是因为由于抑制材料的高导热性和快速吸热能力,油的蓄热和蒸发速度降低。油蒸汽的热量被高度多孔的基质吸收,这降低了气体的产率和膨胀度。

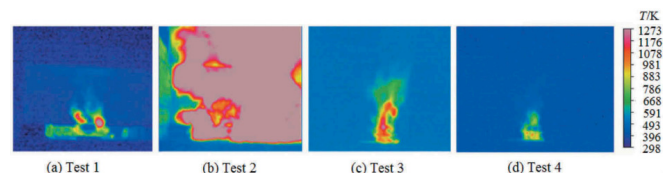


图3 热红外装置测量的照片

至于过热液体的沸腾,液体可以被加热到一定的极限温度,当没有开始沸腾的中心时,该温度超过其正常沸点。沸腾液体膨胀蒸汽爆炸(BLEVE)模型的分析研究表明,在初始阶段,装有过热液体的储罐的减压过程产生了罕见的波动。液体的温度超过正常沸点。当液体内部出现均匀成核中心时,冲击波会随着整个液体的快速沸腾而破坏储罐。可以提出以下BLEVE实现标准:

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT \quad (1)$$

其中 P 是压力; V 是比体积; T 是温度; R 是通用气体常数; a 和 b 是可以通过临界压力 P_c 和临界温度 T_c 表示的系数。值 V_0 可以通过求解等式(1)来确定。用于确定值 T_a 的公式可以从等式(2)获得,并且如下:

$$\left(P_a + \frac{a}{V_0}\right)\left(\frac{V_0 - b}{R}\right) = T_a \quad (2)$$

与计算值相比,可以发现,当BLEVE发生时,计算结果和实验结果相差很小。由于抑制材料的原因,油蒸汽的温度(测试4)无法达到临界温度,因此在油箱故障期间不会出现BLEVE。

根据两种类型的燃烧模型使用不同的方程。池火条件下的火焰长度 L 可表示为:

$$L = 84D \left[\frac{m_f}{\rho_0(2gD)^{0.5}} \right]^{0.61} \quad (3)$$

式中, D 为油池半径, m_f 为单位面积燃烧速度, ρ_0 为大气密度, g 为重力加速度。在试验3中,火焰长度 L 可以表示为:

$$L = 3.76M^{0.325} \quad (4)$$

其中 M 是燃料质量。测量火焰高度与预测值的关系模型显示出与实验值的良好匹配。在BLEVE过程中,火球长度几乎达到了10m。由于对爆炸的抑制材

料,汽油和柴油的火球长度分别为 2.1m 和 0.5m。

3.3 燃烧或爆炸过程的热辐射

根据现有公式,关于 BLEVE (测试 2),单位面积热能 Q 与爆炸源到测量点 R 的距离之间的关系可以总结为:

$$\frac{Q}{BGM^{1/3}\theta^{2/3}} = \frac{D^2/R^2}{F + D^2/R^2} \quad (5)$$

其中 M 为燃料质量, θ 为火焰温度, D 为火球直径, BG 为 2.04×10^4 , F 为常数。根据公式的理论分析,热能似乎与火球表面而不是 R 有关。相反,热能似乎来自爆炸源,与 R^2 呈负相关。

池火加热了油箱中的油后,快速加热引发了 BLEVE 现象。对于池火的热辐射分析(试验 3 和 4),其中 Q 和 R 之间的关系的关系的计算方程如下:

$$Q = \frac{(\pi R L + 2\pi R L) M H_c \eta}{72 M^{0.61} + 1} \quad (6)$$

其中 M 是燃料质量, L 是火焰高度, H_c 是燃料燃烧热, η 是效率系数。图 4 显示了每单位面积的热能与火源或爆炸源距离的关系曲线。热辐射准则以单位面积热能为评价指标,通过火灾或爆炸源产生的热能来判断对目标的破坏效果。当 BLEVE 发生在没有抑制材料的汽油罐中时,来自 1m 火球的大约 2777 kJ/m^2 的热能足以点燃木材。直到 8m 后,火球仍能以 72 kJ/m^2 的热能造成皮肤损伤。相比之下,油箱中填充的抑制材料通过抑制油蒸汽的蒸气压和蒸发速率,有效地防止了 BLEVE 事故。来自 1m 火球的热能降低到仅 21 kJ/m^2 ,在这种情况下,在没有长时间接触的情况下,目标受到火焰的影响较小。

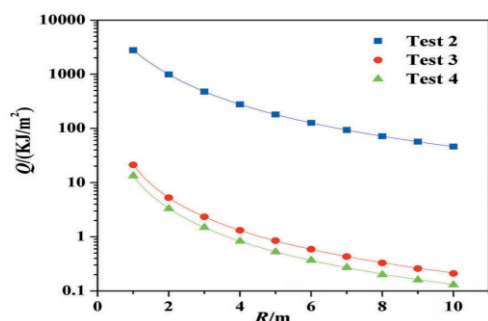


图 4 距油箱不同距离的热能

4 结论

进行了四项试验以测量抑制材料对油罐防爆的影响。在试验 1 中,从油出口喷出的油蒸气构成多个火焰;对于测试 2,油出口被关闭,使得油蒸气积聚在油箱中,从而引起爆震。但在测试 3 和测试 4 中,油

箱表面只有火焰,由于存在抑制材料,油箱仍保持完好。可以注意到,抑制材料可以有效地降低储罐中的温度升高。在没有抑制材料的情况下,高温的整个持续时间约为 10min,这是抑制材料情况下的大约两倍。在抑制材料的影响下,汽油和柴油液体的平均温升速率分别约为 0.12 和 0.15K/s。柴油蒸汽的热量通过柴油蒸汽和抑制材料之间的相互作用而消散,从而使油液温度高于油蒸汽。相反,汽油蒸汽的温度会不断升高,并超过汽油液体,因为汽油的轻组分蒸发到空气中,并积聚在油箱的上部。在 BLEVE 过程中,火球长度几乎达到了 10m。同时,汽油和柴油的火球长度分别为 2.1 和 0.5m。BLEVE 发生在没有抑制材料的汽油罐中,来自 1m 火球的大约 2777 kJ/m^2 的热能足以点燃木材。在存在抑制材料的情况下,火球仍然可以以 72 kJ/m^2 的热能导致皮肤损伤,直到 8m 后。来自 1m 火球的热能降低到仅 21 kJ/m^2 ,在这种情况下,在没有长时间接触的情况下,目标受到火焰的影响较小。

参考文献:

- [1]Eckhoff R K. Boiling liquid expanding vapour explosions (BLEVEs): A brief review[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries,2014(32):30-43.
- [2]Chang J I, Lin C C. A study of storage tank accidents[J]. Journal of loss prevention in the process industries, 2006,19(1):51-59.
- [3]Landucci G, Molag M, Reinders J, et al. Experimental and analytical investigation of thermal coating effectiveness for 3 m^3 LPG tanks engulfed by fire[J]. Journal of hazardous materials,2009,161(2-3):1182-1192.
- [4]Khakzad N, Landucci G, Reniers G. Application of dynamic Bayesian network to performance assessment of fire protection systems during domino effects[J]. Reliability Engineering & System Safety,2017(167): 232-247.
- [5]Abbasi T, Abbasi S A. The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE): Mechanism, consequence assessment, management[J]. Journal of Hazardous Materials,2007,141(3):489-519.
- [6]Abbasi M H, Benhelal E, Ahmad A. Designing an Optimal safe layout for a fuel storage tanks farm: Case Study of Jaipur Oil Depot[J]. Int. J. Chem. Mol. Nucl. Mater. Metall. Eng,2014(8):147-155.