

## 七氟丙烷气体泡沫灭火技术试验研究

张清林<sup>1</sup>, 徐康辉<sup>2</sup>, 秘义行<sup>1</sup>, 李深梁<sup>2</sup>, 智会强<sup>1</sup>,

魏云峰<sup>3</sup>, 王俊扬<sup>2</sup>, 杨景<sup>2</sup>, 谷平<sup>4</sup>

(1 公安部天津消防研究所, 天津, 300381;

2 杭州新纪元消防科技有限公司, 浙江, 杭州, 311100;

3 中国石油塔里木油田公司质量安全环保处, 新疆, 库尔勒, 841000;

4 中国石化镇海炼化分公司, 浙江, 宁波, 315207)

**摘要:** 试验研究表明, 空气泡沫难以彻底扑灭凝析油、环氧丙烷、正戊烷等低沸点可燃液体储罐火灾, 且不能有效控制环氧丙烷等液体储罐火灾。为此, 开发了用七氟丙烷灭火剂替代空气发泡的七氟丙烷气体泡沫灭火技术, 并对环氧丙烷、正戊烷等低沸点可燃液体进行了试验研究。试验表明, 七氟丙烷气体泡沫可快速、有效扑灭该类液体火灾。本文对上述试验研究进行了归纳总结。

**关键词:** 七氟丙烷气体泡沫, 灭火试验, 凝析油, 环氧丙烷, 正戊烷

环氧丙烷、轻烃等低沸点可燃液体储罐广泛存在于我国的石油化工企业中, 目前, 国内对该类液体的生产量和需求量越来越大, 如我国对环氧丙烷的需求量以每年 12% 以上的速度增长。在我国, 低沸点可燃液体储罐一般设置了空气泡沫灭火系统, 但由于低沸点可燃液体的特殊性及其缺乏试验数据, 国内外对空气泡沫扑救低沸点可燃液体的灭火性能认识尚不深入。因此, 相关规范均未对该类储罐泡沫灭火系统的设计做明确规定, 如: 美国 NFPA11《低倍数、中倍数、高倍数泡沫灭火系统》规定“沸点低于 37.8 °C 的易燃液体应采用较高的供给强度, 适宜的供给强度应通过试验确定”; 欧洲标准 EN13565(2)-2009 规定“沸点低于 40 °C 的易燃液体应采用较高的供给强度, 适宜的供给强度应通过试验确定”; GB50151-2010《泡沫灭火系统设计规范》规定“沸点低于 45 °C 的非水溶性液体, 设置泡沫灭火系统的适用性及其泡沫混合液供给强度, 应由试验确定”。为了尝试解决该问题, 公安部天津消防研究所先后与中国石油塔里木油田公司、杭州新纪元消防科技有限公司等联合开展了凝析油、环氧丙烷、正戊烷等低沸点可燃液体储罐空气泡沫灭火试验。试验结果表明, 空气泡沫难以彻底灭火, 对环氧丙烷等液体甚至无法控火。

然而, 随着石化工程的大型化, 低沸点可燃液体储罐的单罐容量也越来越大,

且该类储罐一般和其他石油储罐设置在一起，增大了储罐区的火灾危险性，由于没有可靠的灭火手段，一旦发生火灾，将导致重大损失。因此，急需解决这一长期困扰泡沫灭火技术的难题，为低沸点可燃液体储罐提供可靠的灭火手段。

基于对空气泡沫灭火试验研究和现有其它灭火技术的特性分析，公安部天津消防研究所和杭州新纪元消防科技有限公司提出用七氟丙烷灭火剂替代空气发泡的七氟丙烷气体泡沫灭火技术，并研发了七氟丙烷气体泡沫灭火系统，同时针对环氧丙烷、正戊烷等低沸点可燃液体储罐成功地开展了系列灭火试验，为该系统的工程应用提供了基础条件。

## 1 空气泡沫灭火试验

### 1.1 试验液体

低沸点可燃液体易蒸发、饱和蒸汽压大，靠普通空气泡沫的覆盖隔离作用难以完全阻止可燃蒸汽向燃烧区域的输送，其火灾一般不易被彻底扑灭。为了研究空气泡沫对低沸点可燃液体的灭火性能，选择了三种具有代表性的低沸点可燃液体：凝析油、环氧丙烷和正戊烷，对三种液体分别进行了多次灭火试验。

凝析油中 C5~C8 占 89.28%，C4 以下组份占 6.5%；环氧丙烷为水溶性液体，沸点 34.24 °C，饱和蒸气压 75.86 kPa(25 °C)，闪点-37 °C，爆炸极限 2.8~37.0%，20 °C时在水中溶解度 40.5 g，水在环氧丙烷中的溶解度 12.8 g；正戊烷沸点 36.10 °C，饱和蒸气压 53.32 kPa(18.5 °C)，闪点-40 °C，爆炸极限 1.7~ 9.8%。

### 1.2 试验结果

试验基本数据见表 1 所示。

对凝析油进行了 5 次试验，其中有 1 次使用的是灭火试验残油。试验储罐直径 3.5m，深 1.5 m。从试验情况看，泡沫混合液供给强度约为 12.0 L/ (min·m<sup>2</sup>) 时，2 min 左右基本控火。但除了用灭火试验残油的 1 次成功灭火外，其它 4 次试验即使泡沫混合液供给强度为 24.0 L/ (min·m<sup>2</sup>)，仍不能彻底灭火，而是在一侧罐壁处形成长时间边缘火，见图 1。另外，由于可燃蒸气充斥于泡沫之中，使得泡沫也具有可燃性，见图 2。

对于环氧丙烷，是通过 1.73 m<sup>2</sup> 油盘的试验筛选后，选择目前灭火性能最好的 6%型抗溶合成型泡沫液，进行了 1 次直径 3.5 m 储罐灭火试验，储罐深 1m。在泡沫混合液供给强度为 11.6 L/ (min·m<sup>2</sup>) 时，供泡沫 3 min 不能控火，之后，将泡沫混合液供给强度加大至 22.3 L/ (min·m<sup>2</sup>)，1 min 后有限控火，见图 3。继

续供给泡沫，不但不能增强控火功效，且随着时间增长，环氧丙烷液体出现沸腾且有大量蒸汽裹挟泡沫溢出，并可闻爆鸣声，火失控。

对正戊烷进行了 4 次试验，前两次试验未加冷却水，参照 GB15308《泡沫灭火剂》中非水溶性液体的试验方法进行，供泡 5 min 未灭火，后两次试验将盘壁加高至 0.8 m，并在盘壁施加冷却水，采用两只泡沫管枪同时供泡，供给泡沫时间超过 15 min，最终泡沫充满油盘仍不能灭火，见图 4。

综上，普通空气泡沫对低沸点可燃液体的灭火性能不佳，即使使用较高的供给强度和较长的供给时间，仍不能彻底灭火，对于环氧丙烷甚至无法控火。



图 1 凝析油空气泡沫试验照片



图 2 空气泡沫燃烧现象



图 3 环氧丙烷空气泡沫试验照片



图 4 正戊烷空气泡沫灭火试验

表 1 低沸点可燃液体空气泡沫灭火试验结果

序号	试验液体	泡沫混合液供给强度/L/(min·m <sup>2</sup> )	泡沫液类别	冷却状况	灭火情况
1	凝析油	12.0/24.0	美国 6% 型成膜氟蛋白、美国及国产 6% 型水成膜	罐壁进行水冷却	在罐壁边缘形成长时间边缘火
2	环氧丙烷	11.6/22.3	6% 型抗溶合成型泡沫液	罐壁及罐顶进行水冷却	11.6 L/(min·m <sup>2</sup> ) 的供给强度无法控火，供给强度加大为 22.3 L/(min·m <sup>2</sup> ) 后，长时间供泡不能彻底灭火
3	正戊烷	2.43	3% 氟蛋白 6% 水成膜	无水冷却	连续供给泡沫 5 min，最终未灭火
4	正戊烷	4.9	3% 氟蛋白 6% 水成膜	盘壁进行水冷却	供给泡沫时间超过 15 min，最终未灭火

## 2 系统组成及灭火原理

七氟丙烷气体泡沫灭火系统主要由泡沫液储罐、七氟丙烷储罐、供水系统、泡沫比例混合装置、七氟丙烷比例混合装置、七氟丙烷气体泡沫产生器、阀门和管道等部件组成。灭火系统启动后，水流通过泡沫比例混合装置和泡沫液混和，形成泡沫混合液，泡沫混合液再经过七氟丙烷比例混合装置和七氟丙烷液体混合，形成一定比例的七氟丙烷液体和泡沫混合液的混合液体，该混合液体通过特制的七氟丙烷气体泡沫产生器后产生一定倍数的七氟丙烷气体泡沫，施加到燃液表面进行灭火。

七氟丙烷气体泡沫兼具空气泡沫覆盖隔离和七氟丙烷气体化学抑制的双重灭火功效。七氟丙烷气体的密度约是空气的 6 倍，利用七氟丙烷灭火剂发出的泡沫均匀、致密，覆盖隔离作用及抗烧性能明显优于空气泡沫。另外，由于七氟丙烷的饱和蒸汽压为 0.45 MPa (25 °C)，在灭火系统管道内呈液态，与泡沫混合液能充分混合且为液体单相流，便于系统的工程应用。

### 3 七氟丙烷气体泡沫灭火试验

#### 3.1 试验液体

环氧丙烷和正戊烷的沸点分别为 34.24 °C 和 36.1 °C,在低沸点可燃液体中，属于灭火难度极大的液体，若七氟丙烷气体泡沫能够扑灭这两种液体火灾，则亦能扑灭其他低沸点可燃液体火灾，同时考虑到环氧丙烷为水溶性液体，正戊烷为非水溶性液体，可代表两种性质不同的液体，使用抗溶泡沫液和普通泡沫液进行试验。因此，选用环氧丙烷和正戊烷进行七氟丙烷气体泡沫灭火试验。

#### 3.2 试验系统

根据国内外的相关试验，一般液体燃料储罐直径大于 2.5 m 后，直径对液体燃料燃烧特性的影响基本趋同，另外，现行相关规范中规定的几种可燃液体的最小泡沫混合液供给强度，基本参考了面积 10 m<sup>2</sup> (直径约 3.5 m) 油盘火的试验数据。因此，选用了直径为 3.5 m 储罐进行试验，储罐深 1 m。为防止试验发生意外，液体外泄，在储罐外围加筑了保护水池。七氟丙烷采用压缩氮气驱动，泡沫混合液采用压缩空气驱动。试验时，罐壁采用在管道上打孔的方式进行水冷却。试验系统见图 5。

#### 3.3 试验结果

主要试验数据见表 2。对环氧丙烷进行了 2 次灭火试验，从试验结果可以看到，利用七氟丙烷气体泡沫，可以实现快速控火和灭火。在 12 L/(min·m<sup>2</sup>) 的供给

强度下，控火时间小于 2 min，灭火时间小于 3 min。试验照片见图 6 和图 7。

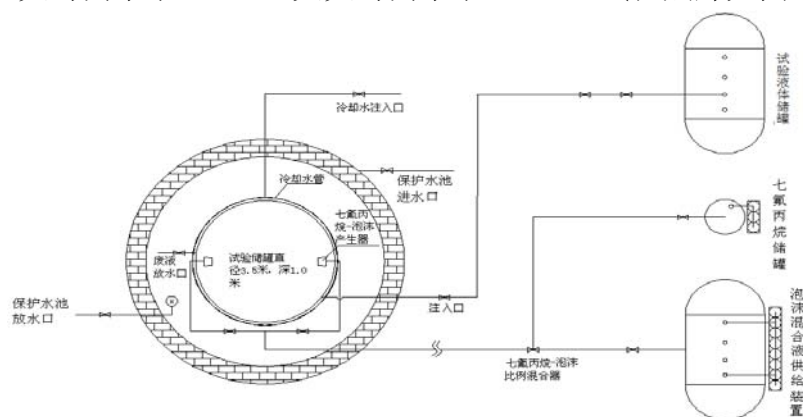


图 5 试验系统图

对正戊烷进行了 2 次灭火试验，第一次试验混合液供给强度为  $6.7 \text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ ，供给泡沫 55 s 后控火，供给泡沫 6 min30 s 时停止供泡，此时仅剩离泡沫产生器最远端的小部分边缘火未灭，停止供泡 5 min 后，边缘火熄灭。第二次试验供给强为  $13.1 \text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ ，供泡 1 min 后控火，2 min 后灭火。试验照片见图 8 和图 9。

在试验过程中，对七氟丙烷气体泡沫的发泡倍数和析液情况进行了测试，当七氟丙烷/泡沫混合液混合比在 6% 左右时，发泡倍数在 11 倍左右，25% 析液时间大于 1 h。和空气泡沫相比，七氟丙烷气体泡沫致密，覆盖性能好，泡沫质量高。

上述试验表明，七氟丙烷气体泡沫的灭火效率远高于空气泡沫，以较小的强度供给泡沫时，能够在较短的时间内控火和灭火。



图 6 环氧丙烷灭火试验照片（预燃）



图 7 环氧丙烷灭火试验照片（灭火后）



图 8 正戊烷灭火试验照片（预燃） 图 9 正戊烷灭火试验照片（灭火后）

表 2 低沸点可燃液体七氟丙烷气体泡沫灭火试验结果

序号	试验液体	环境温度 / $^{\circ}\text{C}$	灭火剂类型	泡沫混合液供给强度/L/( $\text{min}\cdot\text{m}^2$ )	冷却水流量/L/s	七氟丙烷/泡沫混合液混合比	控火时间/s	灭火时间/s
1	环氧丙烷	12.0	6%抗溶成型泡沫液	12.0	4.8	5.20%	60	110
2	环氧丙烷	13.5	6%抗溶成型泡沫液	12.0	4.8	8.25%	70	160
3	正戊烷	19.7	3%水成膜	6.7	2.7	6.04%	55	390s
4	正戊烷	19.7	3%水成膜	13.1	2.7	5.71%	30	120

#### 4 总结及展望

利用空气泡沫对凝析油、环氧丙烷、正戊烷等低沸点可燃液体进行的灭火试验表明，空气泡沫难以彻底扑灭该类液体火灾，对环氧丙烷等液体甚至无法控火。这一试验结果使目前国内外消防界对低沸点可燃液体火灾的扑救有了新的认识。利用研发的七氟丙烷气体泡沫灭火系统，对环氧丙烷、正戊烷进行的灭火试验表明，对于低沸点可燃液体，七氟丙烷气体泡沫的灭火效率远高于空气泡沫，应用较低的供给强度在较短的时间内即可有效扑灭该类液体火灾。七氟丙烷气体泡沫灭火系统可应用于低沸点可燃液体储罐区，对提高该类储罐区的消防安全具有积极意义。

由于七氟丙烷气体泡沫灭火技术开发研究时间较短，出于安全可靠的目的，目前建议的系统设计参数难免偏保守。随着工程应用的逐步深入，今后会在最佳灭火泡沫倍数及相应七氟丙烷灭火剂与泡沫混合液的混合比、最佳泡沫混合液供给强度等方面进行深入研究，使系统在安全可靠的基础上经济合理。

**参考文献:**

- [1] NFPA11-2005,Low-,Medium-,and High-Expansion Foam[S].
- [2] EN13565(2)-2009, Fixed firefighting systems-Foam systems-Part 2:Design,construction and maintenance[S].
- [3] GB50151-2010,泡沫灭火系统设计规范[S].
- [4] 张德义.石油化工危险化学品手册[M].北京: 中国石化出版社, 2006。

——本文发表于《消防科学与技术》(2011年第3期)