

Study on the Accidental Risk and Rescue Measures of Spill Fires

Yangyang Mu^{1,2}, Changxing Ren^{1,2}, Jin Li¹

¹ Tianjin Fire Research Institute of MPS, Tianjin 300381, China

² National Center for Fire Engineering Technology, Tianjin 300381, China

易燃液体流淌火灾事故风险及扑救策略研究

慕洋洋^{1,2}, 任常兴^{1,2}, 李晋¹

¹ 公安部天津消防研究所, 天津 300381, 中国

² 国家消防工程技术研究中心, 天津 300381, 中国

Abstract

Spill fires during production and storage may cause large damage and even lead to massive explosions. In this article, the accidental risk and rescue measures of spill fires were discussed. Based on accidents happened before, there are four typical scenes may lead to spill fires. It is essential to understand the parameters of spread speed, the burning rate and the heat radiation which affect the risk of spill fires directly. The foaming material and carbon nanotubes proved to be a novel and effective way to inhibit the spread of liquid flow. Benefit from its motility and far range, the large-flow fire monitor and deck pipes were primarily considered in case of spill fires.

Keywords: spill fires; accidental risk; characteristic parameters; fire inhibition; fire extinguishing

摘要

本文阐述了易燃液体流淌火灾事故风险, 划分为储罐破裂、储罐外溢、装置泄漏和长输管线泄漏四大类, 分析了蔓延速度、燃烧速率、热辐射等特征参数对流淌火灾风险的影响, 重点探讨了封堵、围堵技术,

蒸气抑制技术, 碳纳米材料抑火技术和灭火技术等扑救流淌火的方法及装备, 提出作战中应尽量采用大流量消防炮、车载消防炮等机动灵活、射程较远的大流量灭火装备, 避免人员靠近火场, 加强泡沫对易燃蒸气的覆盖抑制作用。

关键词: 流淌火; 事故风险; 特征参数; 控火; 灭火

1. 引言

易燃液体泄漏事故在石油化工的生产、储存、运输和使用过程中时有发生。泄漏的液体通常易挥发、易燃易爆, 一旦遇到点火源, 极易引发一种典型的火灾事故: 流淌火。这类火灾燃烧面积广、扩散速度快、热辐射强, 扑救困难, 给消防部队应急救援带来极大挑战。

近年来, 发生了多起易燃液体流淌火灾事故。2013年11月22日中石化输油储运公司潍坊分公司因输油管线破裂发生爆燃, 同时入海口被油污污染海面上发生爆燃, 事故共造成62人遇难, 136人受伤, 直接经济损失7.5亿元; 2015年4月6日福建省漳州市腾龙芳烃有限公司二甲苯装置加热炉区域发生爆炸着火事故, 引发装置附近的重石脑油储罐和轻重整液储罐爆裂燃烧, 形成大面积流淌火; 2016年4月22日江苏德桥仓储有限公司储罐区2号交

换站发生火灾，大量汽油从损毁管线泄漏，形成全路面的流淌火等，造成了恶劣的社会影响和重大经济损失。

因此，深入分析流淌火事故风险，研究火灾风险特征参数变化规律，掌握流淌火灭火、控火措施，对于易燃液体流淌火事故防治具有十分重要的意义^[1,2]。

2 流淌火事故风险

众多流淌火事故案例表明，流淌火事故主要集中在储罐区，而少量发生在生产装置区和运输管线上。综合分析，造成大面积流淌火的典型事故场景可划分为以下四类：

2.1 罐体破裂

易燃液体储罐发生爆炸事故，造成管壁、罐底阀门结构破裂，引发油品泄漏，形成流淌火。发生油品泄漏的部位和可能



图 1. 中石油大连石化分公司三苯罐区小罐区“6·2”事故现场

性会因储罐类型不同而异^[3]。

大型固定顶储罐或高液位储罐发生爆炸，可能会造成罐顶与罐壁局部被炸开；对于小型固定顶罐或中低液位罐而言，往往被“揭盖”形成敞口全液面火灾；有的固定顶罐爆炸，可能会发生罐壁与罐底焊缝沿罐底四周部分或全部撕裂，发生油品外泄恶性事故。如 2009 年 4 月 8 日内蒙古鄂尔多斯市伊泰煤制油有限责任公司中间罐区 4 号 500m³ 重质蜡油发生燃爆，罐底炸裂，而罐顶与罐壁保持完好，造成大面积流淌火；2013 年 6 月 2 日，中国石油天然气股份有限公司大连石化分公司三苯罐区小罐区 939# 拱顶罐发生爆炸，爆炸时物料液位

0.5m，爆炸导致罐体破裂，着火物料在防火堤中蔓延，并引燃罐组内三个相邻储罐，罐体全部破裂。

外浮顶储罐发生蔓延流淌的风险主要集中在：原油火灾沸溢、油罐开裂。外浮顶原油储罐全液面火灾，难以扑灭，大都发生沸溢，导致油品外泄，可能会造成重大社会风险。

内浮顶储罐为双顶结构，通常爆炸导致罐顶撕裂、内浮盘被破坏，形成全液面火灾，油品不会流淌到防火堤。但灭火救援中喷射水或泡沫导致储罐内液体外溢，形成流淌火。典型事故如 2015 年福建腾龙芳烃有限公司“4·6”重大爆炸着火事故^[4]。

2.2 储罐外溢

可燃液体储罐进料过程中由于操作人员失误或液位报警系统失效，导致过量充装，易燃液体外溢，形成流淌火灾。1993 年南京炼油厂油罐火灾，由于操作工误开阀门，致使管道内汽油以 350t/h 的流量流向已经满罐的 310 号储罐，导致浮顶被冲离，汽油从 16.1m 高的罐顶沿四周流淌而下；2001 年沈阳大龙洋石油有限公司内倒油过程中导致油罐过充溢油，遇到火花被引燃，发生恶性爆炸火灾。2005 年英国的邦斯菲尔德油库火灾爆炸事故，是典型的因液位报警系统故障导致过量充装、汽油外溢的事故。

2.3 装置泄漏

石化企业生产工艺区内布置大量塔、泵、加热炉、换热器等装置设备，有些设备处理物料大、操作温度高，操作介质含有 S、H 等腐蚀性物质，具有泄漏风险，特别是设备长时间运作，在设备密封处、焊缝处、法兰、阀门处等，可能会造成大量物料泄漏形成大面积流淌火。如 2010 年 4 月 2 日，美国特索罗阿纳科斯特炼油厂石脑油加氢单元换热器在焊缝处发生大面积破裂，泄漏出大量热氢气和石脑油，引发重大火灾和死亡事故。2016 年 10 月 9 日南京金陵石化炼油厂芳烃联合装置异构化单元进料过滤器法兰处密封垫圈失效，导致汽

油调和组分油泄漏，遇点火源形成地面流淌火。

2.4 长输管线泄漏

每座原油储罐都有进出管线和收油线，罐区现场输油管线多、距离长，并且沿途设置阀组较少，一旦输油管线中间发生意外破裂，即使迅速关闭阀门，管道内仍剩余大量原油，可能会引发恶性流淌火灾事故，具有较大风险。2010年大连中石油国际储运有限公司“7·16”输油管道爆炸火灾事故是最好的例证^[5]。

3 流淌火灾风险特征参数

流淌火灾事故危害大、社会风险突出，研究蔓延速度、燃烧速率、热辐射等特征参数变化规律，对评估流淌火灾事故潜在影响规模和事故后果具有重要意义。

3.1 蔓延速度

流淌火蔓延是一个包含多相流动和传热过程相互耦合的过程，决定着火灾发展方向、发展速度及火灾扑救最佳时机的选择等。研究发现，液体初始温度是影响火焰蔓延速度的主要因素。整个火蔓延可分为低速稳定阶段、脉动阶段、稳定阶段、气相稳定加速阶段和化学计量比阶段。当液体初始温度低于自身闪点时，火焰蔓延处于液相控制阶段，泄漏液体需要被加热以维持火焰传播。当液体初始温度大于自

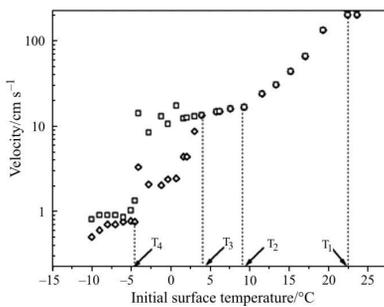


图2. 燃料初始温度对火蔓延速度的影响^[6]

身闪点时，液体上方蒸气压达到最低燃烧下限，火焰蔓延便以预混模式通过气相传

播，此阶段成为气相控制阶段。火焰蔓延速度随初始温度升高，不断增长。

以醇类为例^[6]，如图2所示，当液体初始温度小于 T_4 时，火焰蔓延速度接近 1cm s^{-1} ；当温度从 T_4 上升到 T_3 过程中，火焰蔓延速度呈明显振荡上升；随着温度进一步上升至接近液体闪点时，蔓延速度稳定增长，增长加速度保持在 $1\text{cm s}^{-1}\text{C}^{-1}$ ；一旦温度超过液体闪点 ($T_2 < T < T_1$)，蔓延速度变为 15cm s^{-1} ，并加速增长，加速度量级达到 $10\text{cm s}^{-1}\text{C}^{-1}$ ；当火蔓延燃烧进入完全气相控制阶段时 ($T > T_1$)，火焰在气相传播，蔓延速度量级高达 100cm s^{-1} 。对汽油而言，气相控制阶段火蔓延速度可达 1.6m s^{-1} 。

因此，对于流淌火事故，救援人员要充分判断现场状况，在灭火的同时，对尚未燃着的液体和泄漏储罐采取降温冷却，若火场温度过高，应果断撤退，避免被流淌火卷入火场。

3.2 燃烧速率

燃烧速率直观反映着泄漏液体燃烧的快慢，是火灾中决定火焰温度和辐射热的重要参量，其变化规律也会直接影响流淌火蔓延面积和事故影响范围，决定着火灾中灭火预案及战术的制定。试验表明，流淌火燃烧共经历增长期、稳定燃烧期以及衰减期3个阶段。流淌火质量燃烧速率可通过 Babrauskas^[7]和 Ditch^[8]提出的模型来进行预测，公式(1)所示：

$$m'' = C_\delta m''_\infty (1 - e^{-k\beta D}) \quad (1)$$

$$C_\delta = 1 - q_{out} / q_{fback} \quad (2)$$

其中， m''_∞ 是最大单位面积质量燃烧速率， $\text{g s}^{-1}\text{m}^{-2}$ ；

$k\beta$ 是与燃料自身相关的经验常数；

D 是当量流淌直径， m ；

q_{out} 、 q_{fback} 分别是液面热量损失和热量补偿， kW/m^2 。

流淌火燃烧速率主要受泄漏液体厚度和接触面性质的影响。泄漏液体厚度越薄，燃烧速率越慢，燃烧越不稳定。如毫米级厚的汽油流淌火，其燃烧速率仅为稳定燃烧状态下的 $1/5$ ^[9]。接触面的热传导性会对液体燃烧过程中的热量传导造成影响，液

体在热传导性好的表面质量燃烧速率较传导性差的地面低。如流淌火燃烧速率在乙炔基地面上最快，而在混凝土最慢。接触面斜度也会影响流淌火燃烧速率，燃烧速率随斜度增大而越小。

此外，相比池火，流淌火的燃烧速率更小。汽油流淌火的质量损失速率约为油池火的 0.8 倍；正庚烷在水面的流淌火，其燃烧速率为相同燃烧尺寸池火的 0.57 倍^[10,11]。

3.3 热辐射

流淌火是一个不断发展变化的动态过程，燃烧过程中的热辐射也会随着液体的流淌发生复杂的变化。充分了解流淌火的热辐射规律，对火灾扑救至关重要。国内研究人员对比研究了汽油流淌火与池火燃烧特性，发现流淌火热辐射值与油池火差异明显，距火焰中心相同距离处，油池火明显大于流淌火^[12,13]。

目前针对流淌火燃烧速率、热辐射等特征参数的研究还不够深入，关于流淌火的各种模型多建立在池火研究基础上，缺乏足够的实验数据支撑模型的科学性。为此，公安部天津消防研究所搭建流淌火蔓延试验平台，以开展大尺度流淌火试验，研究连续泄漏的流淌火燃烧蔓延特性。该

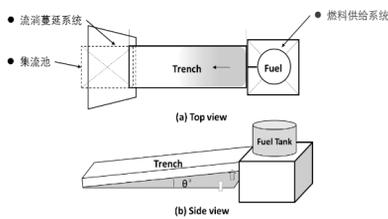


图 3. 流淌火蔓延试验平台示意图

平台主要包括：燃料供给系统、流淌蔓延系统和测量系统三部分，可实现燃料持续供给、流淌坡度可调、燃烧参数实时监测等功能。

4 流淌火处置技术研究

流淌火燃烧蔓延过程中伴随火焰内部空气卷吸、燃烧产物和燃料蒸气运动状态发生变化，泄漏液体内部热交换更快，火焰

流淌扩散加快，燃烧范围不断扩大，危险性极高。因此，合理的控火措施、正确的灭火方式是扑救流淌火的关键。

4.1 封堵、围堵处置技术

通常，易燃液体泄漏应急处置主要遵循“切断来源、堵截分割、逐个击破”的原则，大致分为两步：第一步，首要任务是控制泄露源，即要立即切断可燃物供应来源，可采取关阀断料、开阀导流、倒罐转移以及应急堵漏等措施控制泄露源；第二步，构筑临时防护堤，可采取快速围堵技术，严格控制流淌火的蔓延，然后进行灭火。

传统的应急封堵技术主要是针对管道、阀门、法兰等装置突发性泄漏，包括固定夹具法、粘贴式密封胶堵漏、强磁堵漏、钢带捆扎法堵漏等，可依据不同泄漏场景选择适宜的封堵方法。对于泄漏介质为危化品时，可选用固定夹具法、钢带捆扎法和强磁封堵。需要注意的是，强磁封堵仅适用于封堵压力小于 2MPa、温度不超过 80℃ 的亲磁性危化品大型罐体，而粘贴式密封胶则仅适用于温度不超过 80℃ 的水、水蒸气的封堵。

围堵是将泄漏物质限定在规定或者局部区域内，防止液体流淌蔓延的过程^[14]。大规模液体泄漏可采用快速发泡围堵技术，该技术通过将发泡技术与喷雾技术相结合，基于聚氨酯泡沫、酚醛泡沫等材料，可在 1min 内快速硬化，实现对泄漏液体的快速围堵，可接合在混凝土、沥青及其他硬质表面，但不能附着在湿润表面或穿过液体，泡沫不能直接施加在流动液体上。目前，矿井用高分子发泡材料可快速填充岩层与煤层的空洞、封堵漏风及建立防火隔离墙，具有耐高温、抗腐蚀等特性。公安部天津消防研究所将该项技术用于快速围堵油罐区、易燃易爆液体泄漏事故，相关技术研究还在进行中。

4.2 泡沫抑制蒸气技术

在流淌火现场处置中，如果能够采用有效手段抑制液体蒸气挥发、减缓火蔓延速度，则可为消防队员扑救火灾和应急救

援争取到宝贵时间，具有非常重大的意义。

抑制易燃液体蒸气挥发，最常用的技术是使用浓缩泡沫液覆盖，特别对于被围堵起来的液体来说使用这种技术是非常有效的。通常，泡沫类型、用量、25%泡沫析液时间、发泡倍数、覆盖层厚度和泄漏液体蒸气压等都会对抑制效果造成影响。泡沫析液时间越长，泡沫覆盖持续的时间就越长；泄漏液体蒸气压越高，抑制所需时间就越长，难度就越大。现场救援人员应充分了解泄漏液体物性，尽量选用析液时间长、发泡倍数高的泡沫灭火剂。需要注意的是，泡沫灭火剂并非适用于抑制所有类型蒸气，灭火泡沫主要适用于扑救非水溶性烃类液体和极性化合物的火灾，而不适用于控制无机酸或者碱性物质挥发出来的气体，也不适用于控制液化气体，以及甲烷、丙烷等烃类气体。水成膜泡沫和氟蛋白泡沫所产生的覆膜不能保证有效地抑制蒸气；而大多数蛋白泡沫、氟蛋白泡沫、水成膜泡沫和高倍泡沫不适合用于抑制无机酸火碱性蒸气；对于易燃烃类液体和遇水反应的无机物质，应选用专门适用于无机化合物的泡沫原液。此外，要明确非吸气型水成膜泡沫液抑制蒸汽的效果不如吸气型泡沫溶液^[15]。

4.3 碳纳米材料抑火技术

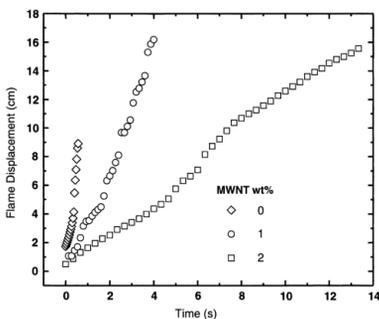


图 4. 初始温度 18℃ 时，多壁碳纳米管对正丙醇火焰蔓延速度的影响

碳纳米技术是当前世界最热门的科学研究热点，引起国内外各个研究领域科学家的广泛关注。

基于此，Mohamed I. Hassan 及其团队

^[16]创新性地 将碳纳米管加入易燃液体中，利用其高长径比、良好的润湿性和高导热性等特性，以减缓、抑制易燃液体火焰蔓延速率。实验证明，碳纳米管的加入可明显抑制正丙醇火焰传播，在低于闪点温度下，可有效降低正丙醇火焰蔓延速率 9%-15%。类似地，掺杂碳纳米材料的聚合物，表现出良好的阻燃性。

在煤油和柴油池火试验中，通过添加多壁碳纳米管，燃料火焰温度可降低 10%-20%，火焰蔓延时间变长，其中煤油火焰蔓延时间延长 15%-30%，柴油火焰蔓延时间延长 6%-26%。可膨胀石墨在抑制原油流淌火的试验中，展现出良好的抑制油品蒸发燃烧和降低火焰热辐射的作用^[17]。

碳纳米材料用于控制易燃液体火蔓延为人们提供了全新的思路，然而目前关于这方面的研究鲜有报道，并且尚处于实验室研究阶段，试验规模较小，未来还需进一步开展大量理论分析和大尺度试验以验证其可行性。

4.4 灭火技术研究

在扑救易燃液体火灾过程中，泡沫灭火剂是使用最广泛、最普遍的灭火材料，实战中地面流淌火扩散速度快，泡沫施加必须要形成有效覆盖层，防止液体复燃。可采用压缩空气泡沫灭火技术与市售蛋白泡沫、抗溶水成膜泡沫或合成抗溶泡沫灭火剂结合，以抑制液体火灾、水溶性液体火灾、小型油罐火灾等。对传统空气泡沫难以扑灭的如凝析油、环氧丙烷、正戊烷等低沸点可燃液体火灾，可采用七氟丙烷泡沫灭火技术^[18]。还可以尝试在普通泡沫中添加碳材料或利用新型环保水系生物灭火剂以扑救油类火灾。

5 结论

大面积流淌火灾事故危害大、影响范围广，易引发区域事故风险升级，甚至引发社会风险。流淌火是液体流淌和燃烧相互耦合作用的过程，扑救时首要任务是切断泄漏源，做好周边冷却保护，确定现场警戒区和疏散区，按应急预案展开作战，

力争短时间速战速决。具体包括:

(1) 造成大面积流淌火的典型事故场景可划分为: 储罐破裂、储罐外溢、装置泄漏和长输管线泄漏四类, 其中储罐区是发生流淌火灾事故重灾区。

(2) 流淌火蔓延速度决定着火灾发展方向、发展速度及扑救最佳时机的选择; 燃烧速率, 是决定火焰温度和辐射热的重要参量, 其变化规律也会直接影响流淌火

蔓延面积和事故影响范围, 对火灾中灭火预案及战术具有重要参考价值。

(3) 流淌火蔓延速度快, 应避免人员靠近火场, 立即切断可燃物供应来源, 快速构筑围堵措施, 尽量采用大流量消防炮、车载消防炮等机动灵活、射程较远的大流量灭火装备, 并应实时预判其蔓延方向, 一旦发现人身安全受到威胁应及时撤离。

Acknowledgements

This study was supported by Science and Technology Program of Tianjin, China (No.17YFZCSF00970).

致谢

本研究得到了天津市科技计划项目(17YFZCSF00970)的资助。

参考文献

- [1] Mealy, C., Benfer, M., Gottuk, D., Liquid fuel spill fire dynamics, *Fire Technology*, 50 (2), 419-436, 2014.
- [2] Farid Kadri, The Assessment of Risk Caused by Fire and Explosion in Chemical Process Industry: A Domino Effect-Based Study, *Journal of Risk Analysis and Crisis Response*, 3 (2), 66-76, 2013.
- [3] 韩钧. 储油罐区重大火灾风险及防范措施, *石油化工安全环保技术*, 31(1): 1-5, 2015.
- [4] 秘义行, 智会强, 王璐, 泡沫灭火技术, 中国计划出版社, 北京, 2016.
- [5] 张清林, 国内外石油储罐典型火灾案例剖析, 天津大学出版社, 天津, 2014.
- [6] Akita K., Some problems of flame spread along a liquid surface, *Proceedings of the Combustion Institute*, 14(1): 1075-1083, 1973.
- [7] Babrauskas, V., Estimating large pool fire burning rates, *Fire Technology*, 19 (4), 251-261, 1983
- [8] Ditch, B.D., de Ris, J.L., Blanchat, T.K., et al., Pool fires-An empirical correlation, *Combustion. Flame*, 160 (12), 2964-2974, 2013.
- [9] J Zhao, H Huang, et al, Experimental and modeling study of the behavior of a large-scale spill fire on a water layer, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 43:514-520, 2016.
- [10] 蔡宾斌. 流淌火与油池火燃烧特性对比实验研究, *消防科学与技术*, 32(8) :829-831, 2013.
- [11] DT Gottuk, JL Scheffey, et al, Optical Fire Detection (OFD) for Military Aircraft Hangars: Final Report on OFD Performance to Fuel Spill Fires and Optical Stresses, Naval Research Laboratory, NRL/MR/6180000-8457, 2001.
- [12] Mealy C, Benfer M, Gottuk D, Fire dynamics and forensic analysis of liquid fuel fires, *NIJ-2008-DN-BX-K168*, 2010.
- [13] J Zhao, H Huang, et al, Quantitative risk assessment of continuous liquid spill fires based on spread and burning behaviours, *Applied Thermal Engineering*, 126, 2017.
- [14] 任常兴, 宋晓亚. 易燃液体流淌火预防与扑救, *现代职业卫生*, 11:25-27, 2016.
- [15] NFPA 471. Recommended practice for response to hazardous materials incidents.
- [16] Hassan MI, Grulke E, Chuah K, Saito K, Effects of carbon nanotubes on flame spread rate over 1-propanol, *Fire Safety Journal*, 40:425-438, 2005.
- [17] A Alibakhshi, H Mirshahvalad, S Alibakhshi, Investigating the Mechanism of Effect of Carbon Nanotubes on Flame Spread Over Liquid Fuels, *Fire Technology*, 51 (4):1-12, 2014.
- [18] 张清林, 徐康辉, 秘义行等. 七氟丙烷气体泡沫灭火技术试验研究, *消防科学与技术*, 30(3):217-220, 2011.