

基于火灾动态模型的石油储罐泄漏火灾模拟与分析

张亮亮

(中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司应急救援中心(消防支队), 山东 东营 257000)

摘要: 石油储罐泄漏火灾具有极大的危害性, 对其进行准确模拟与深入分析可为火灾预防、扑救及风险评估提供关键支撑。本文运用火灾动态模型(FDS), 针对石油储罐泄漏火灾场景展开建模, 详细设定了储罐参数、泄漏条件、环境因素等, 模拟火灾发展过程, 包括火焰形态、温度分布、热辐射强度等关键特征。通过模拟结果深入分析不同因素对火灾演化的影响, 旨在为石油储罐区消防安全设计与应急响应策略制定提供科学依据, 提升石油储罐区应对泄漏火灾的能力。

关键词: 石油储罐; 火灾动态模拟; 结果分析

石油储罐由于长期承受压力、腐蚀等作用, 易发生泄漏事故, 一旦泄漏引发火灾, 其火势凶猛、蔓延迅速, 后果不堪设想。火灾动态模型(FDS)以较低成本、较高精度模拟复杂火灾场景, 为石油储罐泄漏火灾研究开辟新途径。

1 火灾动态模型(FDS)原理

FDS 是基于计算流体动力学(CFD)原理开发的一款火灾模拟软件。它通过求解 Navier-Stokes 方程组来描述火灾中的流体流动, 考虑了热传导、对流、辐射等多种热传递方式以及燃烧反应动力学过程。在模拟火灾时, 将空间划分为众多微小的网格单元, 针对每个单元依据守恒定律进行质量、动量、能量等物理量的计算与更新, 从而追踪火灾的发生、发展与蔓延态势。其采用的大涡模拟(LES)方法能够较好捕捉到火灾中的湍流特性, 对于复杂火焰形状、烟雾扩散等现象的模拟具有较高可信度。

2 石油储罐泄漏火灾模拟模型构建

2.1 储罐模型参数设定

2.1.1 几何尺寸

依据实际常见的石油储罐规格, 选取大型立式圆柱形储罐作为研究对象, 储罐直径设定为 30m, 罐高为 20m, 罐壁厚度根据储罐设计标准取值为 25mm, 确保模型结构强度与实际相符。储罐顶部采用拱顶设计, 考虑其对火焰传播及热辐射反射的影响。拱顶的弧度半径约为 15m, 厚度为 8mm, 拱顶的弧度和厚度会影响热辐射的反射路径, 在一定程度上改变火焰前锋上升过程中的气流扰动模式。当火焰接触拱顶后, 热辐射一部分被反射回燃烧区域, 增强局部热反馈, 促使燃料燃烧更剧烈; 另一部分向四周散射, 可能影响到相邻储罐或周边设施。从光学原理来讲, 拱顶的

曲面结构类似于一个巨大的凹面镜, 对热辐射有聚焦和散射的双重作用, 这在火灾发展过程中会显著改变热量分布, 影响火焰形态与传播方向。

2.1.2 材料属性

储罐罐体材料为碳钢, 设定其热导率为 $45\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、比热容为 $0.46\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 、密度为 $7850\text{kg}/\text{m}^3$ 等热物理性质参数, 这些参数直接影响储罐在火灾中的受热响应, 如罐壁温度升高速率、热应力分布等, 进而关系到储罐是否会发生结构失效, 加剧火灾危害。碳钢的热导率决定了热量从火焰传递到罐壁内部的速率, 较高的热导率会使罐壁更快升温, 引发罐内油品温度升高, 增加挥发风险; 比热容则反映了储罐吸收热量而自身温度升高的难易程度, 比热容大的材料在相同热量输入下温度上升相对缓慢, 能为储罐结构完整性提供一定缓冲时间; 密度影响储罐的质量分布和力学性能, 在热应力计算以及火灾冲击下的稳定性分析中起着关键作用。例如, 在火灾高温烘烤下, 热导率高的碳钢罐壁迅速升温, 罐内油品受热挥发, 产生的油气积聚在罐顶空间, 一旦达到可燃极限, 极易引发二次爆炸, 严重威胁储罐及周边安全。

2.2 泄漏模型设定

2.2.1 泄漏位置与孔径

考虑储罐底部连接管道、阀门处以及罐壁腐蚀薄弱点等易泄漏部位, 分别设定不同泄漏场景, 泄漏孔径从微小裂缝到较大孔洞不等, 如初始模拟设置孔径为 5mm, 研究不同泄漏速率下火灾发展差异。不同泄漏位置的风险程度各异, 底部管道连接处泄漏, 油品容易在地面积聚形成液池, 液池燃烧具有较大的热辐射面积, 且火焰贴近储罐壁, 对储罐结构威胁大; 罐壁腐蚀薄弱点泄漏, 燃料喷射方向和落点受罐壁形状、

腐蚀坑洼等因素影响,可能形成局部高温区,加速罐壁局部受热损坏。从流体力学角度看,底部泄漏由于重力作用,油品流出速度相对稳定,而罐壁泄漏则因压力分布不均,燃料喷射方向具有不确定性,这使得火灾发展初期的火势蔓延方向更难预测。泄漏孔径的大小直接决定了初始泄漏速率,微小裂缝泄漏时,火灾发展相对缓慢,初期火焰较小,有一定的应急响应时间;而较大孔洞泄漏则会迅速引发大规模火灾,短时间内大量燃料泄漏并气化燃烧,火势难以控制。

2.2.2 泄漏速率模型

根据流体力学伯努利方程结合储罐内压力、油品粘度等参数,建立泄漏速率计算公式,实时计算油品泄漏量随时间的变化,为火灾模拟提供持续的燃料供给源,确保模拟的动态真实性。在实际储罐运行中,储罐内压力随油品储存量、温度变化以及呼吸阀等设备的工作状态而改变,油品粘度受油品成分、温度影响显著。通过实时监测这些参数,代入泄漏速率公式,能够精准预测不同工况下的泄漏情况,为火灾预警和应急处置提供关键数据支持。

例如,在高温季节,油品粘度降低,泄漏速率可能增大;储罐内压力异常升高时,同样会加速泄漏,模拟模型必须考虑这些动态因素才能准确反映火灾发展过程。以某实际储罐区为例,夏季高温时段,罐内油品因温度上升粘度下降约30%,同时由于呼吸阀故障导致压力升高50kPa,根据泄漏速率模型计算,泄漏速率相比正常情况增加近4倍,若此时发生泄漏火灾,火势发展将极为迅猛。

2.3 火灾场景环境设定

石油储罐区周边自然环境中风速风向多变,设置不同风速梯度(如0-10m/s)以及水平、垂直等多种风向工况,分析风对火焰倾斜角度、燃烧速率、热辐射传播方向的影响,因为风既可能加速燃料与空气混合促进燃烧,也可能吹散火焰使热辐射分散。在低风速(0-3m/s)时,火焰相对稳定,燃烧产生的热烟气在浮力作用下缓慢上升,热辐射集中在火焰周围及上方区域,对周边设施的热辐射影响主要取决于火焰与设施的距离;随着风速增大,火焰被吹向顺风方向倾斜,火焰前锋面积增大,燃料与空气混合更充分,燃烧速率加快,但同时部分未燃烧的燃料被吹散,导致燃烧不完全,热辐射传播方向也偏向顺风方向,且在风的携带下,热辐射可以传播更远距离,对下风向的储罐和建筑物构成更大威胁。垂直风向工况下,风会

扰乱火焰和热烟气的至升路径,使热羽流发生偏移,可能导致储罐顶部局部受热不均,增加罐顶结构破坏风险。从空气动力学原理分析,风的存在改变了火焰周围的气流场结构,为燃烧提供更多的氧化剂,促进燃烧反应;也对火焰和热烟气的拖拽作用,使得热量、烟雾的扩散路径变得复杂多变,极大影响火灾的发展态势。

3 模拟结果分析

3.1 火焰形态演变

在泄漏初期,由于燃料泄漏量相对较少,火焰呈现小型局部燃烧状态,形状近似圆形,直径约为1m,随着泄漏持续、燃料积聚增多,火焰逐渐升高、拉长,在有风条件下,火焰明显向顺风方向倾斜,形成不规则的火炬状,且火焰前锋受气流扰动呈现锯齿状波动,反映出湍流对燃烧过程的强烈影响。对比不同风速下的模拟结果,当风速为5m/s时,火焰拉伸更为显著,高度可达10m,甚至出现火焰断裂、吹散的现象,表明风速是改变火焰形态的关键因素之一。进一步分析发现,火焰的拉伸和变形与风速大小有关,还与风的紊流强度密切相关。紊流强度高的风场会使火焰表面的涡旋结构更加复杂,加剧燃料与空气的混合不均匀性,导致火焰前锋的波动更加剧烈,甚至出现局部熄火和复燃现象,这对火灾的发展和扑救带来极大不确定性。从燃烧理论角度,湍流的存在使得燃料与氧化剂的混合更加高效,但也使得燃烧过程变得不稳定,火焰前锋的温度、浓度分布不均,进而引发火焰的各种复杂变形。

3.2 温度分布特征

3.2.1 垂直方向

从储罐底部泄漏源附近开始,温度急剧上升,在火焰中心区域达到最高值,可超过1500℃,向上随着高度增加,温度逐渐降低,但由于热对流与辐射作用,在火焰上方一定范围内仍维持较高温度,形成明显的热羽流。在罐顶附近,受火焰辐射及热空气回流影响,温度也相对较高,可达500℃左右,这对罐顶的稳定性构成威胁,易导致罐顶坍塌事故。热羽流的发展高度和温度衰减速率受多种因素影响,其中燃料泄漏速率、火焰燃烧强度以及周围环境风速是关键因素。高泄漏速率和强燃烧强度会促使热羽流上升更高,温度衰减变慢;而风速增大时,热羽流会被吹散、稀释,上升高度受限,温度在垂直方向上的分布更加均匀,但也会使热辐射在水平方向上的传播范围扩大。

从热力学原理来看,热羽流的形成是由于火焰产生的高温气体密度低于周围空气,在浮力作用下上升,其上升过程中不断与周围空气进行热交换,风速的入改变了这种热交换的平衡,影响了热羽流的发展态势。

3.2.2 水平方向

以泄漏点为中心,温度呈同心圆状向外递减,靠近储罐壁处温度梯度较大,在距离泄漏点 5m 处,温度可从火焰附近的 800℃ 迅速降至 300℃ 左右,随着距离增加,温度衰减速率逐渐变缓。在有障碍物存在时,由于热流受阻积聚,障碍物后方局部区域温度出现异常升高,形成高温“死角”,可能引发周边其他设施受热损坏。

此外,温度分布的均匀性还与储罐区的地面材质有关,若地面为导热性良好的混凝土材质,热量会在地面快速传导扩散,降低局部高温风险;反之,若地面为隔热性较好的沥青或砂石材质,热量积聚在泄漏点附近,会加剧局部高温危害,影响周边设施的安全运行。从热传导理论分析,地面材质的热导率差异决定了热量在地面的部位,导热性好的材质能将热量迅速分散,避免局部过热;而隔热性强的材质则阻碍热量扩散,使得局部温度升高,对周边设施的热辐射影响增大。

3.3 热辐射强度变化

热辐射是石油储罐泄漏火灾造成周边危害的重要因素,模拟结果显示热辐射强度在火焰表面达到最大值,随着距离的增大而迅速衰减。在无风状态下,热辐射呈对称分布,以泄漏点为圆心向外扩散;有风时,热辐射分布偏向顺风方向,且在风的作用下传播更远距离。当热辐射强度达到一定阈值时,可引燃周边相邻储罐或可燃设施,通过模拟确定不同工况下的热辐射危险范围,如在风速为 6m/s、泄漏孔径为 8mm 的组合工况下,热辐射致灾半径可达 30m,为储罐区安全间距设置提供关键参考。尤其是热辐射的传播还受到大气能见度、湿度等气象条件影响。在雾天或高湿度环境下,水蒸气会吸收和散射部分热辐射,降低热辐射的有效传播距离;在晴朗干燥的天气下,热辐射传播更远,对周边的威胁更大。

因此,在储罐区安全规划和风险评估时,必须充分考虑当地气象条件变化。从辐射传热原理可知,热辐射的传播遵循斯蒂芬-玻尔兹曼定律,大气中的水蒸气等成分对热辐射具有吸收和散射作用,改变了热辐射的能量传输路径,影响其传播距离和对周边目标

的危害程度。

4 影响因素敏感性分析

4.1 泄漏速率的影响

逐步增大泄漏速率,发现火灾发展速度显著加快,火焰尺寸迅速膨胀,温度峰值升高,热辐射强度增强。当泄漏速率翻倍时,火焰高度可增加 50%,热辐射危险范围扩大 60%,表明泄漏速率对火灾强度具有很强的正相关性,在储罐日常维护与泄漏监测中,严格控制泄漏速率至关重要。从能量释放角度看,泄漏速率增大意味着单位时间内参与燃烧的燃料增多,释放的热量呈指数级增长,从而驱动火焰快速发展壮大。同时,高泄漏速率下产生的大量高温烟气自身携带大量热能,会通过热对流和辐射作用,加速周围环境升温,扩大热影响范围,使得火灾扑救难度急剧增加。

4.2 风速的影响

风速改变了火焰形态,对燃烧速率也有明显影响。低风速(<3m/s)时,空气补充相对稳定,燃烧相对充分,热辐射集中;随着风速增大,燃烧过程变得不稳定,部分燃料被吹散未充分燃烧,但热辐射传播范围更广。风速超过一定阈值(如 8 m/s)后,火焰甚至可能被吹熄,不过一旦风速减弱,未燃尽燃料积聚又易复燃,为火灾扑救带来极大挑战。研究发现,风速对燃烧速率的影响并非线性关系,在不同风速区间呈现不同的变化规律。在风速 3-6m/s 区间,燃烧速率随着风速增大而逐渐加快,这是由于空气卷入量增加,促进燃料与空气的混合;当风速超过 6m/s 后,燃烧速率增长变缓,甚至开始下降,因为此时燃料吹散损失的影响逐渐超过空气混合增强的效果。通过对多组模拟数据的分析,绘制出风速与燃烧速率的关系曲线,能更直观地看出这种变化趋势,为火灾扑救策略制定提供科学依据。

5 结论

基于火灾动态模拟结果,为石油储罐区消防安全设计提出优化建议,如合理增大储罐间距、设置有效的防风屏障、加强泄漏监测预警系统以快速控制泄漏速率等。同时,在应急响应方面,依据热辐射危险范围精准制定人员疏散、消防力量部署策略。

参考文献:

- [1] 陈慧宇,夏登友,臧娜,等.基于复杂网络的石油储罐火灾事故链风险分析[J].消防科学与技术,2024,43(11):1495-1499.
- [2] 李炳秋.石油储罐多灾种耦合事故反演研究[D].北京:中国石油大学,2021.