

石油储罐火灾状态下临近储罐冷却技术分析

秦光达（中石油燃料油有限责任公司青岛仓储分公司，山东 青岛 266555）

摘要：为保障石油储备战略的稳步实施，近年来国内储罐建设规模不断扩大，油库运营风险等级也在增加。储罐冷却技术作为火灾扑救与防止火势蔓延的关键，基于储罐火灾状态下应加强对临近罐的冷却处理，根据火灾机理与特点，联合油罐之间的传热模式，综合多方影响因素采取合理的冷却防护措施，加强油罐冷却系统的优化设计，从而避免事故的再次发生。

关键词：石油储罐；油库火灾；临近罐冷却

0 引言

一般情况下储罐火灾状态下的火焰热辐射较大，这一现象会引发临近罐变形与破裂，这是造成油品溢流或者火灾蔓延的主要原因。基于火灾情况下的临近罐冷却，应根据火灾机理与发生特点，充分考虑油罐之间的传热模式，借鉴以往事故中的优秀实践经验，加强对冷却系统的合理设计，采取适当的冷却防护措施，保障着火罐与临近罐的安全。

1 大型储罐全面积火灾机理与特点分析

石油储罐火灾一般发生于密封圈外周位置，此外还有防火堤内池火灾和流淌火灾等情况，储罐内石油溢流或浮顶沉没会造成全方位内的火灾事故。比如大连市某次输油管道和油库火灾事故的发生最初是因为管道断裂引发的，断裂的输油管道发生石油泄漏，从而引发局部火灾；消防系统失效，消防泵没有设置备用电源，导致消防泵无法正常启动；电缆损坏，石油储罐的切断阀处于火堤内部，最终导致油源无法被切断，火势逐渐蔓延，从而造成全面积的储罐敞口火灾，油库中管道、石油储罐、电缆、阀门等各处均发生不同程度的损坏，本次火灾事故直接造成至少2亿元的经济损失，大约600m³的原油流入海中。再比如国外波多黎各2009年San Juan油库发生严重火灾事故，受高温热辐射的影响，导致油库22座石油储罐被间接损坏。美国Norco Orion炼油厂内石油储罐发生的火灾事故是先进记录的规模最大的储罐全液面火灾事故，储罐的直径为80m，燃烧时间达到了13h，由于空气污染，周围人员已经疏散。在储罐区内创建专业消防系统，除了要考虑密封圈火灾问题，还要考虑系统失效或火灾再次复燃造成的问题。由此可见，着火罐和临近罐的冷却是火灾扑救的关键^[1]。

2 油罐间传热模式分析

热辐射是造成油罐之间火灾持续蔓延的主要原因

之一，临近油罐中的燃料在热辐射的作用下会产生大量蒸汽，随后被引燃而加大火势。油罐冷却主要以油罐的火热特性为基础，根据储罐与临近油罐的传热模式，为冷却技术的研究提供科学参考依据。当前石油储罐中的油罐间传热模式主要有以下几种：

2.1 热辐射

物体在电磁波的作用下传递能量的情况就是热辐射，而被传递的能量就是辐射能，辐射换热作为真空内唯一的热传递方式，在换热期间无需介质参与，火灾状态下油管和临近罐的热量传递属于“辐射传热”与“对流传热”，这就是典型的辐射传热现象^[2]。

2.2 热传导

因温度梯度的存在，静态介质间的传热就是热传导，一般以导热系数来表示导热能力。随着油罐的燃烧，火焰的热量会以热辐射的方式传递给临近罐壁，临近油罐外部升温，这部分热量通过热传导传递到内壁与石油中。

2.3 热对流

液体内部高温部分间采用流动热量交换的方式实现传热，这就是热对流。火灾状态下，火焰会产生大量的热辐射，这会让临近油罐外壁迅速升温，高温的外壁会通过热传导将热量传递给内壁，再传递给石油液体，油罐中高温液体利用热对流的方式同温度较低的液体完成热量传递，这个时候油罐中高温液体之间的热量传递方式就是热对流。

3 石油储罐火灾状态下临近储罐冷却技术应用

3.1 综合多方影响因素，借鉴优秀实践经验

针对储罐火灾状态下的储罐冷却，在《石油库设计规范》GB 50074-2014中明确表示了着火储罐和位于其1.5倍直径范围内的临近罐均需要进行冷却处理。除此之外，着火浮顶罐也要进行冷却，这一情况下的临近罐可以不冷却处理。综合国内相关火灾扑救经验，

火灾扑救现场处中可能会因为风速、介质等因素面临风险,有研究人员采用涡流 FDS 模型,根据石油储罐的火灾燃烧机理展开数值模拟分析,最终得出微风状态下的石油浮顶罐不需要进行冷却,而中级风力状态下对于下风向位置的临近罐需要进行冷却处理,以此防止火势的蔓延。一般情况下,火灾状态下临近储罐是否需要冷却,这需要考虑多方因素,例如石油储罐的安全距离或储罐自身安全性能等,综合考虑多次火灾扑救实践经验,根据临近罐不被引燃的情况,防止其与其他罐产生影响,所以有必要对着火罐的临近罐进行冷却处理。对石油储罐灭火之后,还需进一步为着火罐补充喷射泡沫,确保现场没有任何火灾死角,降低储罐自身温度,避免油气快速挥发,防止储罐再次复燃。国内对于储罐进行冷却一般会考虑以下因素:

3.1.1 部分储罐密集设置,从而造成防火距离不足

通常储罐工程设计会为了节约成本而设置的防火距离比较小,但是火灾风险等级比较高,无法达到全方位火灾扑救的要求,也不能保证相邻储罐的安全。不仅如此,消防道路比较窄,不支持多辆消防车在消防道路中双向通行,多方因素影响下火灾现场无法满足高效灭火的要求。结合储罐防火距离,从地质条件、油库选址等角度考虑,《石油库安全管理规定》中提出,罐组中浮顶罐之间的防火距离有必要超过临近罐直径的 1 倍以上;固定顶罐的防火距离需要超过临近罐直径的 0.8 倍以上。为了更好的防范火灾,新建罐的防火距离应当适当扩大,大规模浮顶罐的热辐射预防能力有所增强,罐体自身安全性较高,这为后续储罐的冷却提供了重要参考。

3.1.2 火灾事故现场消防系统的泡沫供给强度不足

油库内会配备消防车辆,但整体缺少功率较大的移动式高射程消防泡沫炮,导致泡沫的喷射范围比较分散,最终灭火效率比较低,无法保障火灾及时扑救。为了避免火灾持续蔓延,需对临近罐采取冷却措施,根据《泡沫灭火系统设计规范》得知,储罐的消防设施中泡沫液的供给强度需要 $> 2.5\text{L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$,临近罐的冷却水供给强度应 $> 2.5\text{L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 。在输油管道和油库火灾事故发生前,要求固定消防设施必须对浮顶罐进行灭火,再对临近储罐与工艺管道进行冷却处理,从而尽可能的减小灭火时间,减少泡沫量的过度使用,避免水资源消耗过大^[3]。

石油储罐全液面火灾事故作为高风险事故,不仅对社会环境产生了严重危害,还会给石油企业造成重

大经济损失,所以新建的石油储罐工程需要充分考虑火灾风险等级情况,在设计消防系统时需要科学考虑冷却水量。对此,以下建议可供参考:首先,充分考虑储罐自身安全水平,要求浮顶罐高出固定顶储罐,中小规模与原油储罐容易受到热辐射的影响,对火灾敏感性较高,所以条件相同情况下需对安全水平偏低的储罐进行冷却处理。其次,如果储罐周围风险等级较高或安全距离不足,应科学考虑对消防设施的合理配置,加强对泡沫灭火强度的优化设计,并将临近储罐与管道降温冷却作为减少消防用水消耗的重要组成部分,确保储罐系统安全。

3.2 基于热辐射的临近储罐冷却防护措施

物体遭受火源热辐射的大小一般与火焰的高度、温度、燃油蒸发热、与辐射源距离存在关联。石油储罐持续燃烧的过程中,罐中石油燃烧的火焰高度与储罐的横截面、油品种类有关,截面越大或者油品的油质越轻,那么火焰的高度和辐射面积也会逐渐加大。石油在空气内燃烧的温度是 1100°C ,火焰产生的热值通常可以达到 41590kJ/kg ,储罐和临近罐的距离越小,临近储罐遭受的辐射热就会越大。正常情况下,火焰表面产生的热辐射是指单位时间内,单位火焰的表面积辐射出的热能,这与燃料性质、火焰燃烧的充分程度、火焰尺寸等因素息息相关,具体情况需要按照储罐的直径情况选择火焰表面的辐射通量,如表 1 所示。

表 1 油罐半径与罐壁热辐射情况

序号	石油储罐半径 /m	火灾状态下着火罐壁外 0.4D 处热辐射值 / $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$
1	10	45420.06
2	20	36122.55
3	30	31634.75
4	40	28812.10
5	50	26808.26

火灾状态下,对临近储罐外壁进行冷却时,要求冷却水必须喷射在罐壁的顶部与上沿位置,确保水流自上而下的流,从而起到对储罐的全方位冷却效果。要求冷却水保持均匀,在储罐上不能产生空白点,防

止罐壁上温差较大而变形。全面冷却期间,需对下风向的冷却水量适当加大。由于石油储罐火灾持续时间较长,火灾扑救难度较大,需要经过漫长的扑救过程,当火焰达到一定高度后,临近储罐的冷却系统将无法隔离着火罐传递的热辐射,尤其是临近储罐的干湿壁比例比较大,此时将会引发火灾连锁反应。

面对这一情况,建议采用基于无线遥控模式的泡沫炮和水幕发生器,发挥这类灭火装备的作用,在油罐外形成一道隔热水幕,使其更好的隔离热辐射给临近储罐造成的威胁。结合地域实际情况,分析上下风向的临近储罐外部管壁、罐口隔热水幕的科学设置方法。如果临近储罐处于上风方向,建议将水幕发生器由消防人员携带,消防人员身穿具有避火作用的服装,利用罐体,在火罐的上风向架设水幕发生器,此时装置可以产生一道 10m 高的水幕。供水压力如果达到了全额流量,此时会形成一道高度在 15m 左右,宽度在 32m 左右的冷却隔离带,从而有效隔离着火管对临近罐的热辐射。临近储罐如果位于下风向,因此处的热辐射比较强,多数情况下无法近距离对该处的储罐快速冷却,对此可采用 2 架无线遥控泡沫炮,在间隔 30m 处的位置科学布置,仰角处于 45° 的时候,会产生 30m 高的弧形水幕墙,水幕墙可以用来隔绝储罐带来的辐射热,根据石油储罐的分布情况,决定采用自上而下的滴状水幕。

做好相邻储罐围堰防护工作,一般每个储罐都会安装固定或者半固定式的灭火装置,例如在 2 万方罐顶处会安排至少 6 个固定式泡沫灭火装置,如果火灾状态下火焰带来的辐射热对临近储罐造成威胁,此时可利用泡沫灭火装置朝着围堰的方向喷射泡沫,从而有效避免临近储罐因热辐射的作用而被引燃。在一定的冷却条件下进行临近储罐的冷却,当冷却水流喷射在储罐外壁上沿与顶部的位置时,水流自上而下的流,对储罐可以起到全方位的冷却保护作用。由于储罐内外壁温差比较大,因此而导致储罐壁发生变形问题。着火罐对临近罐产生威胁的情况下,需要先用泡沫进行覆盖,避免罐内油品蒸发散热而出现安全事故。此外,对于冷却水量的设定应保证合理,将着火罐的冷却强度设置为 $0.68\text{--}0.8\text{L/s}\cdot\text{m}$,临近管的冷却强度设置为 $0.35\text{--}0.7\text{L/s}\cdot\text{m}$ 。与此同时,还需要对呼吸阀和量油口位置进行覆盖,一般可使用湿毛毡,以此保障油品蒸发泄漏点安全,做好人员防护工作,保障整个灭火过程的安全。

3.3 优化油罐冷却系统

一般情况下,石油储罐的水冷却主要有固定式和移动式两种,根据《油库设计规范》GB50074-2014 得知,容积不低于 3000m^3 或储罐罐壁高度不小于 15m 的地面立式储罐,需设置固定式消防冷却水系统,以此预防火灾状态下临近储罐的火灾蔓延。因此,建立固定式水冷却系统,该系统主要有三种形式:一种是储罐罐壁漫流式系统,即在罐的顶部集中配水,水流沿着罐壁流到地面,该方式冷却效果较好,成本较低,但是一旦出现火灾,顶部最先受到破坏,此时系统将无法起到良好的保护作用。一种是水喷雾系统,该系统一般会用在液化烃油罐中。最后一种是水喷淋系统,这一系统主要用在石油储罐中,水喷淋后会形成一道水膜,它具有抑制油管壁升温的效果,能够在保护罐体的同时,避免火灾的持续蔓延。

油罐水喷淋冷却系统主要包含水源、供水管、消防水泵、冷却水管等部分,系统主要在油罐的上层圈板的位置设置环形冷却水管,为更好的节约水资源,水管会被划分为 4 段圆弧分别控制。对临近罐壁进行冷却时,可开启面向火焰那一层的水管进行喷淋冷却,因水管的孔眼在使用期间容易出现堵塞问题,所以系统需要在冷却管上设水幕喷头,要求喷头之间的间距 $\leq 2\text{m}$,喷头的最大保护面积必须达到 12.5m^2 以上。固定顶临近罐冷却水的强度为 $2\text{--}2.5\text{L/min}\cdot\text{m}^2$,冷却水强度为 $2\text{--}5\text{L/min}\cdot\text{m}^2$ 。火灾状态下,临近油罐的温度与热辐射值自罐顶的位置开始,从上至下逐渐下降,冷却水的强度越大,对临近储罐的热辐射削减率也会越大。

4 总结

总而言之,石油库中储罐全液面火灾事故属于高风险、低概率事件,为避免事故的发生对社会造成严重危害,有必要考虑火灾风险等级情况,加强对消防系统的合理设计,采用临近罐冷却技术,依靠水喷淋冷却系统降低水源过度使用,实现对临近储罐罐壁的快速冷却,防止火灾进一步蔓延,提高火灾扑救效率。

参考文献:

- [1] 付叶飞.石化火灾扑救对灭火救援装备的需求研究[J].今日消防,2021,6(11):25-27.
- [2] 史玉婷.基于 FDS 的大型外浮顶油罐全液面火灾应急处置研究[D].北京:中国石油大学,2021.
- [3] 王加军.油罐火灾中对邻近储罐的冷却及防护[J].中国石油和化工标准与质量,2019,39(11):175-176.