

基于池火热辐射模型确定储罐合理安全距离新方法

赵建强¹ 刘迅² 刘翀² 吕黎军³ 马伟平⁴

摘要：研究确定储罐合理的防火间距，对于提高储罐安全设计水平具有重要意义。基于浮顶罐主要火灾事故类型，评价了国内标准关于储罐安全距离的局限性，即现有标准不能满足储罐全面积敞口火灾情况下的安全要求。基于储罐池火热辐射数学模型，计算出原油外浮顶罐在临界热辐射强度对应的储罐安全距离。新建储罐工程在满足国内标准基础上，建议结合储罐池火热辐射数学模型计算结果，综合考虑储罐防火堤面积、油品性质以及罐区消防设施能力。对于 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以下储罐应尽可能增加储罐防火间距，对于 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上储罐，其防火间距基本可满足现行国内标准规定的安全要求。

关键词：储罐；安全距离；热辐射；数学模型；标准

Doi : 10.3969/j.issn.1006-6896.2016.4.032

The New Method of Determining Tank Reasonable Safe Distance Based on Pool Fire Thermal Radiation Model

Zhao Jianqiang, Liu Xun, Liu Chong, Lv Lijun, Ma Weiping

Abstract: It was very important to determine tank reasonable distance for raising the tank safe design level. The paper expounded the tank safe distance difference of domestic and foreign standards. In allusion to the mainly floating tank fire accident forms, the limitation of domestic standard for tank safe distance was assessed, that is the current standard can not meet the safe requirement in the case of tank full exposure fire. By referring the tank pool fire thermal radiation model, the oil floating tank safe distance was obtained under critical thermal radiation strength. Finally, the paper put forward the principle of determining tank reasonable distance, with the comprehensive utilization of domestic standard and tank pool fire thermal radiation model and tank technological parameter. For less than $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ tank as far as possible to increase storage tank fire separation; for more than $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ tank, the fire prevention span basic can meet the safety requirements of the current domestic standards.

Key words: storage tank; safe distance; thermal radiation; mathematical model; principle

随着我国实施石油战略储备，储罐建设趋于大型化，大型储罐已达 $20 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[1]。近年来储罐事故时有发生，例如2010年7月16日大连油库火灾爆炸事故^[2]。提高大型储罐安全设计标准具有重要意义，其中储罐防火间距是一项重要参数。我国普遍存在储罐防火间距不足的问题，例如1989年黄岛油库事故1、2、3号拱顶罐（容积 $10\,000 \text{ m}^3$ 、直径31m），按照国家标准要求防火距离不应小于18.6m，而实际距离仅为11m，导致1、2号罐着火后3号罐也被引燃^[3]。储罐间距离直接影响油库面积、土地征用和建设投资，国内石油储备库规模已达几百

万立方米，因此有必要研究并确定合理的储罐防火间距，以提高储罐安全设计水平^[4]。

本文研究了国内外标准中关于储罐安全距离条款的差异；基于浮顶罐主要火灾事故类型，评价了国内标准关于储罐安全距离的局限性；根据储罐池火热辐射数学模型，计算了 1×10^4 、 2×10^4 、 5×10^4 和 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 原油外浮顶储罐在临界热辐射强度对应的储罐安全距离；探讨了综合利用国内标准、储罐池火热辐射数学模型以及储罐技术参数等确定储罐合理防火间距的准则依据。

¹中国石油新疆技师学院 ²中国石油天然气管道局第四工程分公司

³中国石油青海油田分公司管道输油处 ⁴中国石油管道科技研究中心

1 国内外标准差异分析

储罐防火间距国内标准有《石油化工企业设计防火规范(GB50160—2008)》^[5]、《石油库设计规范(GB50074—2002)》^[6]、《石油天然气工程设计防火规范(GB50183—2004)》^[7]；国外标准主要是美国消防协会标准《易燃和可燃液体规范(NFPA 30—2012)》^[8]等。

GB50074规定固定顶储罐安全距离为 $0.6D$ ，浮顶罐防火间距不应小于 $0.4D$ （ D 为着火油罐与相邻油罐两者中较大的油罐直径），在相邻油罐冷却水总流量不小于 45 L/s 时，浮顶罐安全间距最小可取 20 m 。GB50183、GB50160则删除了“浮顶罐安全间距最小可取 20 m ”的条款。针对储罐安全间距，国内标准并非完全一致，这对于储罐工程设计造成了一定的混淆和不便。

美国NFPA 30规定储存A级稳定液体储罐（A级液体是指闪点低于 $22.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、沸点低于 $37.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的液体），在储罐直径小于 45 m 时，储罐安全距离为相邻储罐直径之和的 $1/6$ ；在储罐直径大于 45 m 且设置事故蓄液池时，浮顶罐安全距离为相邻储罐直径之和的 $1/4$ （当与相邻油罐直径相等时，安全距离为 $0.5D$ ），固定顶储罐安全距离为相邻储罐直径之和的 $1/3$ 。

针对储罐之间的安全距离，国内标准偏于保守，国外标准更为严格。以 $10 \times 10^4\text{ m}^3$ 储罐（直径 80 m ）为例，国内标准要求储罐间距为 32 m （特殊情况下取值 20 m ），日本标准为 80 m ，美国标准为 40 m ，由此可见国内外标准差距较大。

2 浮顶罐火灾事故类型

大型浮顶罐普遍采用钢制双盘或浮船式浮顶，正常条件下浮顶与油品直接接触，罐内几乎没有气相空间。大型浮顶罐火灾形式通常是环形密封处的局部火灾。挪威NDV公司研发的LASTFIRE风险分析软件采集了1981~1995年世界范围内33 906个浮顶罐的62次火灾事故统计数据^[9]，包括密封圈火灾55次，浮顶溢流1次，浮顶塌陷1次，隔堤内火灾3次，防火堤内火灾2次。

外浮顶油罐发生全面积敞口火灾几率很小，但国外有浮顶下沉伴随火灾发生，最终形成储罐全面积敞口火灾的案例。1981年，美国Amoco石油公司某炼油厂一个 $10 \times 10^4\text{ m}^3$ 原油浮顶罐发生了浮顶沉没，导致火灾失控。外浮顶罐发生全面积敞口火灾很难扑救，特别是原油罐长时间大火会发生沸

溢，在固定式消防系统基础上，应增加机动设施用以扑救全面积敞口火灾^[10]。例如美国曾成功扑救过直径 60.96 m 的油罐火灾，使用了巨型泡沫炮，射程 152 m ，流量在 250 L/s 以上。沙特阿莫科公司推荐扑救直径 $60\sim 100\text{ m}$ 浮顶罐火灾，可使用流量 $260\sim 930\text{ L/s}$ 消防炮，建议混合液的供给强度为 $6.5\sim 10.4\text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ 。

基于浮顶罐内基本不存在油气空间，考虑防御性火灾，国内储罐间距基本按照 $0.4D$ 设计，在用地紧张情况下甚至不足 20 m 。若发生罐顶下沉的全面积敞口火灾，消防冷却水系统只能冷却着火储罐，不能冷却相邻储罐，其他储罐和整个罐区安全难以保证。

3 储罐池火热辐射数学模型

储罐发生泄漏时，原油从储罐、阀门和管道泄漏到罐区地面并流淌扩散，原油将在防火堤或隔堤限定的区域内积聚，形成特定厚度油池。池火灾会对相邻储罐造成威胁，且消防救援人员难以靠近，从而造成储罐火灾事故不断扩大。基于储罐防火间距国内标准的局限性，应研究浮顶罐发生全面积敞口火灾时对相邻储罐的热辐射影响，制定热辐射程度评价准则，进而确定储罐合理的防火间距。

3.1 储罐着火油池直径

根据防火堤面积计算着火油池直径

$$D = \left(\frac{4S}{\pi} \right)^{0.5} \quad (1)$$

式中： D 为着火油池当量直径， m ； S 为防火堤面积， m^2 。

3.2 储罐火灾火焰高度

储罐火灾的火焰高度用下述经验公式表示

$$h = 55D \left(\frac{4m_f}{\rho_0 \sqrt{gD}} \right) \quad (2)$$

式中： g 为重力加速度， m/s^2 ； ρ_0 为油蒸汽密度， kg/m^3 ； m_f 为油品燃烧速率， $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

3.3 火焰表面的热通量

储罐火灾热辐射能量向四周均匀辐射，火焰表面热通量可用下式表示

$$q_{\text{表}} = \frac{0.25\pi D^2 H_c m_f f}{0.25\pi D^2 + \pi Dh} \quad (3)$$

式中： $q_{\text{表}}$ 为火焰表面的热通量， kW/m^2 ； H_c 为油品燃烧热， kJ/kg ； f 为热辐射系数，取值 0.15 。

3.4 储罐火灾热辐射量

储罐火灾燃烧的总热辐射量为

$$q_{\text{总}} = \frac{(0.25\pi D^2 + \pi Dh)\eta H_c m_f}{72m_f^{0.61} + 1} \quad (4)$$

式中： $q_{总}$ 为储罐火灾燃烧的总热辐射量，kW； η 为效率因子，取值0.24。

3.5 热辐射强度

距离储罐中心 x 处的热辐射强度为

$$q_x = \frac{q_{总}}{4\pi x^2} \quad (5)$$

式中： q_x 为热辐射强度，kW/m²。

3.6 热辐射损害程度判定准则

着火储罐临近的储罐在足够强度热辐射作用下会产生燃烧或变形，造成人员伤亡和设备损坏。热辐射损害判定准则规定了目标承受的热辐射强度与设备损坏程度及人员伤亡状况的对应关系（表1）。确定储罐防火间距的基本原则是保证着火储罐的临近储罐不被引燃，且具备一定的扑救和冷却的

表1 热辐射损害判定准则

热辐射强度/(kW·m ⁻²)	设备损坏程度	人员伤亡程度
37.5	辐射半径内所有设施破坏	10 s内1%死亡，60 s内100%死亡
25	无火焰长时间辐射下，导致木材自燃的最小能量	10 s内重伤，60 s内100%死亡
12.5	有火焰时可引燃木材或者熔化塑料的最小能量	10 s内1度烧伤，60 s内1%死亡
4		20 s以上有疼痛感
1.6		长时间无不适感觉

操作场地，同时保证消防人员零伤亡，因此着火储罐的临界热辐射强度确定为10 kW/m²比较适宜^[11]。

4 计算示例

某原油储备库库容72×10⁴ m³，4个罐组，每个罐组由1×10⁴、2×10⁴、5×10⁴和10×10⁴ m³共4座原油外浮顶储罐组成，储罐直径分别是28.5、40.5、60和80 m，单罐防火堤面积分别为3 300、4 200、9 000 m²和13 200 m²。原油密度850 kg/m³，储罐充装系数0.85，原油燃烧速率0.0137 kg/(m²·s)，原油蒸汽密度2.0 kg/m³，原油燃烧热49.5×10³ kJ/kg。由上述计算模型可以得出该储备库储罐火灾损坏程度以及储罐安全距离（表2）。

由表2可以看出，临界热辐射强度对应的储罐安全距离均大于国内外标准规定的储罐防火间距，即现有标准的防火间距已不能满足发生全面积敞口火灾情况下临近储罐和人员的安全要求。以10×10⁴ m³为例，临界热辐射强度对应的储罐安全距离为37.4 m，国内标准对应的储罐防火间距为32 m，美国对应的储罐防火间距为40 m，这说明大型储罐的防火间距已接近甚至满足着火储罐热辐射临界强度的安全要求，而中小型储罐相对大型储罐遭受

热辐射危害的风险性更大。

5 确定储罐防火间距的影响因素

由储罐池火热辐射数学模型可知，确定储罐防火间距的主要影响因素是防火堤面积，它直接影响储罐油池直径、火焰高度、热通量等。国内标准《储罐区防火堤设计规范（GB 50351—2005）》规定储罐容量在2×10⁴ m³以上，防火堤内储罐不应多于2座；储罐容量在2×10⁴ m³以下，按照储罐容积在防火堤内可分别设置4座或者6座储罐。国内标准存在的问题是防火堤内可设置多个储罐，防火堤不能对独立储罐进行保护，由于没有防火阻隔，火可能威胁防火堤内其他储罐。建议进一步深入研究防火堤面积、高度、坡度等设计参数对储罐防火间距的影响。确定储罐防火间距的其他影响因素还包括油品性质，体现在原油和成品油燃烧热、油品表面燃烧速率存在差异，建议进一步深入研究原油储罐和成品油储罐的防火间距。

新建储罐工程在满足国内标准基础上，建议结合储罐池火热辐射数学模型计算结果，综合考虑储罐防火堤面积、油品性质以及罐区消防设施能力。对于10×10⁴ m³以下中小型储罐尽可能增加储罐防

表2 储罐火灾损坏程度和储罐安全距离计算结果

计算项目	1×10 ⁴ m ³ 储罐	2×10 ⁴ m ³ 储罐	5×10 ⁴ m ³ 储罐	10×10 ⁴ m ³ 储罐
储罐储存量/kg	2 384 250	3 034 500	36 125 000	72 250 000
防火堤面积/m ²	3 300	4 200	9 000	13 200
储罐着火油池直径/m	64.8	73.1	107.1	129.7
储罐火灾火焰高度/m	23.8	25.9	33.77	38.57
储罐火灾火焰表面热通量/(kW·m ⁻²)	41 186	42 090	44 985	46 454
储罐火灾总热辐射量/kW	212 009	264 031	627 868	751 867
临界热辐射强度对应的储罐安全距离/m	26.85	25.55	40.7	37.4
国内标准对应的储罐防火间距/m	11.4	16.2	24	32
美国标准对应的储罐防火间距/m	14.25	20.25	30	40

火间距;对于 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上大型储罐,其防火间距基本可满足现行国内标准规定的安全要求。

6 结语

(1) 针对储罐防火间距,国外标准更为严格。以外浮顶罐为例,国内标准为 $0.4D$,甚至更小,国外标准为 $0.5D$ 。

(2) 现行国内标准规定的储罐防火间距基于防御环形密封圈内的局部火灾,不能满足储罐发生全敞口火灾情况下的安全要求。

(3) 国外有发生浮顶罐全敞口火灾的实例,成功应用了消防炮等机动设施扑灭全敞口火灾的工业案例。

(4) 根据储罐池火热辐射数学模型,计算了 1×10^4 、 2×10^4 、 5×10^4 和 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 原油外浮顶储罐在临界热辐射强度对应的储罐安全距离。中小型储罐相对大型储罐遭受热辐射危害的风险性更大。

(5) 探讨了综合利用国内标准、储罐池火热辐射数学模型以及储罐技术参数等,确定储罐合理防火间距的准则依据。

参考文献

- [1] 陈雪梅,宋义伟,郝瑞梅.大型油库储油罐区安全设计[J].油气地面工程,2011,30(8):53-54.
- [2] 韩钧.大连7.16油库火灾事故教训及防范[J].石油化工安全环保技术,2012,28(1):1-5.
- [3] 冯刊民,王丰,唐清.油库事故分析与预防[M].北京:

(上接第97页)率97.6%,明显高于常规排泥的浓度。

1.5 对比常规工艺运行效果

原工艺用于处理水驱污水,磁分离工艺用于处理低含聚污水,将磁分离处理出水与试验前常规工艺出水进行比较。试验前,常规过滤工艺出水含油量接近 8 mg/L ,但是悬浮物超标严重,平均达到 11 mg/L ,不能达到水驱污水“8.3.2”指标要求。

2 运行费用

磁分离装置运行费用主要由电费、药剂费、磁粉费3部分构成,其中电费 0.134 元/吨 ,絮凝剂投加费用 0.248 元/吨 ,磁粉投加费用 0.008 元/吨 ,合计吨水成本为 0.39 元 。若加上一级气浮耗电费用 0.45 元/吨 ,则整个水处理费用为 0.84 元/吨 。

3 结论

(1) 磁分离技术具有较高的除油及除悬浮物效率,适用于低含聚污水处理。在磁分离装置进水含油量低于 50 mg/L 、悬浮物含量低于 50 mg/L 的情况

中国石化出版社,2005:66-78.

- [4] 李杰训.关于国家石油战略储备设施建设的思考[J].油气储运,2012,31(8):561-563,580.
- [5] 中国石油化工集团公司.石油化工企业设计防火规范:GB 50160-2008[S].北京:中国计划出版社,2009:30-34.
- [6] 中国石油化工集团公司.石油库设计规范:GB 50074-2002[S].北京:中国计划出版社,2003:25-33.
- [7] 中国石油天然气股份有限公司规划总院.石油天然气工程设计防火规范:GB 50183-2004[S].北京:中国计划出版社,2001:29-32.
- [8] 美国国家消防协会.易燃和可燃液体规范:NFPA 30-2012[S].纽约,2013.
- [9] 司海涛.大型浮顶罐主要安全事故类型及原因[J].油气储运,2012,31(9):1029~1033.
- [10] 董林林.大型油库消防系统设计[J].油气储运,2011,30(11):864-866.
- [11] 赵新颖.大型油库安全评价方法研究[D].东营:中国石油大学(华东),2006.

作者简介

赵建强:工程师,2012年毕业于中国地质大学(北京)石油工程专业,从事油气田安全管理和培训管理工作,0990-6812952,113197333@qq.com,新疆克拉玛依市白盐碱滩三平镇,834026。

收稿日期 2015-07-14

(栏目编辑 樊韶华)

下,出水水质可以达到“8.3.2”指标要求。

(2) 由于磁分离设备容积较小,抗波动性能差,仅适用于二级处理工艺,其前应设置抗冲击能力强的预处理工艺。

(3) 在本试验条件下,磁分离的絮凝剂及磁粉投加最佳浓度分别为 120 、 300 mg/L ,浓度再增加意义不大。

参考文献

- [1] 孙仁远,秦国鲲,梅永贵,等.聚合物溶液磁处理参数优化研究[J].西安石油大学学报:自然科学版,2005,20(1):47-49.

作者简介

尹立平:工程师,2005年毕业于中国石油大学(华东)油气储运专业,从事油田地面工程技术管理工作,yliping-gh@petrochina.com.cn,黑龙江省大庆油田第五采油厂规划设计研究所,163513。

收稿日期 2015-07-08

(栏目编辑 樊韶华)