

油田生产设施环境安全距离理论与案例分析

李娜¹ 张震² 冷飞³

(1. 中煤国际工程集团北京华宇工程有限公司; 2. 科学出版社; 3. 北京经济技术开发区环保局)

摘 要 为保护油田生产设施周围环境及居民人身财产安全,在油田设施和周围不同环境功能区之间设置科学的环境安全距离,是一种经济、有效的环境保护与安全管理措施。文章提出油田生产设施环境安全距离的概念,以及有毒气体井喷泄漏、噪声污染、管线泄漏和火灾爆炸的环境安全距离估算模式,将油田生产设施分为井场、站库和管线三类,提出环境安全距离估算方法。最后以重庆开县“12·23”特大井喷事故为例,对硫化氢毒气井喷泄漏的环境安全距离进行估算,与实际情况相对比后证明估算结果可靠。

关键词 油田;生产设施;环境安全;距离

中图分类号: TE48

文献标识码: A

文章编号: 1005-3158(2012)06-0076-05

0 引 言

随着国家能源需求飞速增长,油田开采和生产规模不断扩大。与此同时,城市空间拓展及生态环保要求日益提升,城市规划建设与油田开发生产之间的矛盾日益突出。例如,在某些城市的规划和建设过程中,地方政府有时会勒令油田企业搬迁生产设施,由此造成企业蒙受巨大经济损失,或忽视油气设施的潜在危险而紧邻建设,给市政建设埋下安全隐患。因此,为了保护居民人身财产安全,同时减少企业重复投资,在油田企业建设之初就应计算好设施周围的环境安全距离^[1]。

目前油气设施安全距离研究,主要集中在卫生防护距离、液化石油气泄漏事故安全距离及液化石油气储罐爆炸火灾安全距离方面,往往不针对油田生产设施。特别是在油田生产设施的环境安全距离研究方面,在理论和应用上均缺乏较为系统的研究。文章提出油田生产设施环境安全距离的概念和生产中比较常见的五种情境的环境安全距离估算模式,并按三类生产设施提出环境安全距离估算方法,以期给政府部门在城市规划初期、油田企业在项目筹备前期减少环境危害提供科学依据。

1 油田生产设施环境安全距离的概念

油田设施的环境安全距离是指:在油田及其相邻区域,针对油田设施正常运行和异常事故两种情况,为保证不损害和不降低受体环境的质量和功能,在任何防护措施情况下,油田设施与周围受体环境之间

设定的最小空间水平距离。这种距离更多的是具有对规划、布局的指导意义,是以保护受体环境不受或少受损害和影响为目的。

与卫生防护距离相比,环境安全距离的保护对象更广泛,既包括附近居民或人群,也包括自然或人工环境,乃至抽象、综合的环境质量和生态功能;环境安全距离还针对两种状态,即正常和异常,不仅考虑正常生产情况下的影响和损害,还要求分析异常事故条件下的事故风险危害,实现对油田设施影响与危害的系统防护。

2 油田生产设施环境安全距离估算模式

2.1 气体排放的环境安全距离

包括井喷事故造成硫化氢或天然气等气体的非正常排放,也包括井场、站库等设施总烃、柴油机废气等无组织排放,可选用 HJ 2.2—2008《环境影响评价技术导则 大气环境》推荐的“大气环境防护距离计算模式”确定不同要求的环境安全距离。

2.2 噪声影响的环境安全距离估算

井场和站库噪声环境安全距离的估算,可先用 HJ 2.4—2009《环境影响评价技术导则 声环境》中的“工业噪声预测计算模式”预测设施周围的声级分布情况,然后根据不同类别的环境噪声标准限值得出不同的环境安全距离。

2.3 火灾事故的环境安全距离估算

原油库和联合站大型油罐区发生在防火堤内的

火灾为池火灾,对周围环境的损害主要是其高能热辐射。燃料池或输油管道中的油品泄漏至地面或水面引发的大面积燃烧,也属池火。油品储罐发生爆炸,形成一个能量强大的火球,此种火灾属气爆。

2.3.1 池火灾伤害模型

对于圆柱形池火,先要计算火焰高度及表面热辐射通量,再以此为基础计算热辐射对周围环境的损害规律,进而得出不同损害程度下的环境安全距离。

◆ 当危险单元为油罐或油罐区时,池直径(m)

$$D = (4S/3.14)^{1/2} \quad (1)$$

式中: S 为防护堤所围池面积, m^2 。

当危险单元为输油管道且无防护堤时,假定泄漏液体无蒸发、充分蔓延且无渗透。

$$D = [4W/(3.14H_{\min}\rho)]^{1/2} \quad (2)$$

式中: W 为泄漏的液体量, kg; $H_{\min}$ 为最小油层厚度, m; 与地面性质和状态有关; ρ 为油的密度, kg/m^3 。

◆ 火焰高度

$$H = 42D\{m_f/[\rho_0(gD)^{0.5}]\}^{0.61} \quad (3)$$

式中: H 为火焰高度, m; D 为池直径或当量直径, m; m_f 为燃烧速率, $kg/(m^2 \cdot s)$; ρ_0 为空气密度, kg/m^3 ; $g=9.8 \text{ m/s}^2$ 。

◆ 表面热辐射通量

$$q_0 = DH_c f m_f / (D + 4H) \quad (4)$$

式中: q_0 为火焰表面热辐射通量, kW/m^2 ; f 为热辐射系数,可取 $f=0.15$; H_c 为液体燃烧热, kJ/kg 。

◆ 目标接受到的热辐射通量

$$q = q_0(1 - 0.05 \ln r)V \quad (5)$$

式中: r 为目标到油区中心的水平距离, m; V 为视角系数,视角系数按莱(Rai)和卡雷卡(Kalelkar)方法计算。

2.3.2 火球和气爆伤害模型

火球和气爆的损害可采用穆尔哈斯等人的经验公式计算,然后得出不同损害程度下的环境安全距离。

2.4 爆炸危害条件下的环境安全距离估算

油罐、联合站、原油库和压气站等设施存在爆炸风险,估算其环境安全距离,可用世界银行推荐的爆炸危害关系式计算不同程度的损害半径^[2],进而得出不同要求的环境安全距离。

2.5 输油及污水管线泄漏的环境安全距离估算

输油及污水管线泄漏可先用下述模式估算泄漏

液体在地表、地下土壤及地下水环境的扩散迁移情况,再根据不同环境质量要求下的相关限值得出环境安全距离。

◆ 液体泄漏量

$$Q(m^3/h) = 0.01252cd^2 \sqrt{(p_1 - p_2)/\rho} \quad (6)$$

式中: p_1 为介质压力, Pa; p_2 为大气压力, Pa; ρ 为液体密度, kg/m^3 ; c 为校正系数,一般在 $0.61 \sim 0.63$ 之间; d 为孔的直径, mm。

◆ 非渗透性地表扩散可选用 Raisbeck 和 Mohtadi (1974)的经验公式(土壤冻结,被水饱和或特别致密)假设地面平坦,

$$r = (Q/\pi h)^{1/2} \cdot t^{1/2} \quad (7)$$

式中: r 为石油泄漏区在时刻 t 的半径, m; Q 为泄漏速率, m^3/h ; h 为油层厚度, m; t 为时间, h。

◆ 渗透性(多空性)地表(Raisbeck 和 Mohtadi, 1975)

$$S = 53.5V^{0.89} \quad (8)$$

如果原油以泄漏点为圆心,呈圆形扩展,则扩展半径为:

$$r = (S/2\pi)^{1/2} = (53.5V^{0.89}/2\pi)^{1/2} \quad (9)$$

式中: r 为扩展半径, m; S 为泄漏面积, m^2 ; V 为泄漏体积, m^3 。

◆ 原油在包气带多空土壤介质中的渗透 CONCAWE(1974)模型:

$$D = 1000 V/(A \cdot R \cdot K) \quad (10)$$

式中: D 为最大渗透深度, m; V 为泄漏油体积, m^3 ; A 为渗透面积, m^2 ; R 为多空隙介质截留能力 (l/m^3),其取值主要取决于土壤性质,例如对于粗砂—中砂土壤, R 取 15; K 为对不同油品黏度的近似修正因子,对于黏度较大的原油来说, $K=2$ 。

◆ 泄漏对地下水的影响预测

输油及污水管道,特别是输油管道,多为地下管道,泄漏污染物的迁移会污染地下水,且泄漏不易察觉,易形成连续泄漏。连续源情况下, t 时刻泄漏预测区域任一点的污染物浓度值为^[3]:

$$c(x, y, t) = \int_0^t \frac{\epsilon/n}{4D(t-\tau)} \exp\left\{-\frac{[x-V(t-\tau)]^2 + y^2}{4D(t-\tau)} - \lambda(t-\tau)\right\} d\tau \quad (11)$$

式中: n 为介质的空隙度; $c(x, y, t)$ 为地下水中污染物的浓度, mg/L ; D 为水力弥散系数, m^2/d ; V 为水流速度, m/d ; ϵ 为源强, g/d ; λ 为降解系数。

此式可采用复合抛物线数值积分法计算。

3 油田生产设施环境安全距离估算方法

为了研究方便, 文章将油田主要生产设施划分为三大类, 即井场、站库和管线。并在上述环境安全距离估算模式的基础上, 分别就这三大类设施提出环境安全距离的估算方法。

3.1 井场

井场在正常生产和风险事故两种情况下的环境影响及风险识别见表 1^[4]。

表 1 井场类设施环境影响及风险识别

井场类型	正常生产环境影响因子	事故状态环境风险因子
采油井场	噪声、总烃	原油、天然气
钻井井场	柴油机废气、总烃、噪声、落地原油	原油、天然气、 H_2S
作业井场	噪声、落地原油	原油、天然气、 H_2S

针对噪声污染, 用 2.2 节所述估算模式。

针对柴油机废气和总烃无组织排放, 用 2.1 节所述估算模式。

井喷情况下原油的地表扩散, 根据不同的地表状况, 可以分别运用模式(6)~(11)估算其扩散距离和渗透距离, 进而得出环境安全距离。

3.2 站库

油田各站库产生的污染物主要包括废气、废水、噪声和固体废物, 站库类设施环境影响及风险识别见表 2。其中大气污染物主要是烃类气体, 锅炉和加热炉烟气。由于联合站加热炉大多燃用天然气, 大气污染物排放量较小, 对环境影响不大, 因此联合站产生的主要大气污染物为烃类气体, 也是油田的特征污染物^[5]; 噪声主要来自站内各种泵类、压缩机等机械设备的运转。

由于正常生产时产生的废水全部回注地层, 出现事故时, 废水排入事故罐, 因此废水对周围环境影响很小; 废渣主要是除油罐、混凝沉降罐、核桃壳过滤器、反冲洗回收水罐产生的含油污泥, 污泥堆放于站内干化池内, 定期外运, 对周围环境无明显影响。

表 2 站库类设施环境影响及风险识别

序号	类别	正常生产环境影响因子	风险事故
1	联合站	锅炉、导热油炉废气; 总烃、噪声	爆炸、火灾
2	计量站	噪声、总烃	/
3	配水间	噪声	/
4	注水站	噪声	/
5	原油库	总烃、噪声	爆炸、火灾
6	压气站	总烃、噪声	爆炸、火灾

站库的环境影响只考虑总烃和噪声以及事故状态下的环境风险影响。

对于噪声和上述井场噪声的估算方法一样。对于总烃气体等的站库气体无组织排放环境安全距离的估算和上述井场所用方法相同。

发生风险事故时, 对于火灾, 若是池火, 可运用模式(1)~(5)估算其损害半径; 若是火球, 则可运用穆尔哈斯等人的经验公式估算火灾损害半径; 参数根据设施具体情况取特定值。对于爆炸, 可运用世界银行推荐的爆炸危害关系式估算损害半径。有了损害半径, 便可科学设置环境安全距离, 以降低火灾或爆炸对特定环境功能区造成的损害。

3.3 管线

油田管线有多种类型, 其环境影响主要是管线泄漏对环境的污染, 如油气泄漏及其引起的火灾和爆炸等。

原油及污水管线泄漏量按模式(6)估算, 按地表状况选用模式(7)或(9)估算其地表环境安全距离, 运用模式(10)估算其地下渗透情况。若输油管道(地上, 无防护堤)原油泄漏引发池火时, 假定泄漏原油无蒸发, 并已充分蔓延且忽略地面渗透, 则据泄漏量和地面性质, 可用模式(2)计算最大扩散面积, 再按式(3)~(5)估算损害直径。参照损害直径, 便可设置适宜的环境安全距离。

4 硫化氢井喷泄漏环境安全距离估算实例

4.1 重庆开县“12·23”特大井喷事故背景

2003 年 12 月 23 日夜, 重庆市开县高桥镇, 由川东石油钻探公司承钻的中国石油天然气集团公司西南油气田分公司川东北气矿罗家 16 H 井在起钻时, 突然发生井喷, 富含硫化氢的气体从钻井喷出达 30 m, 气体随空气迅速扩散, 事故造成 243 人死亡、2 142

表 3 H₂S 浓度标准限值

mg/m³

类 别	居住区最高容许浓度	工作场所浓度标准			厂界标准限值	畜舍区容许浓度*		
浓 度	0.01	10	14	21	0.03	10	10	8
标准来源	TJ36—1979 《工业企业设计卫生标准》	TJ36—1979 《工业企业设计卫生标准》 车间最高容许浓度	美国 ACGIH(政府工业卫生专家委员会) TLV-TWA(时间加权平均容许浓度)	美国 ACGIHSTEL (短时间接触容许浓度)	GB14554—1993 《恶臭污染物排放标准》 一级标准	禽舍	猪舍	牛舍

* 李锦钰. 无公害猪肉的生产及其认证. 中国牧业网(<http://www.china-ah.com>).

人中毒住院治疗、65 000 名居民被紧急疏散、9.3 万人受灾,各种经济损失达 6 432 万元。这是我国石油行业类似事故伤亡人数最多、损失最为惨重的一次^[6]。

4.2 源强确定

事故发生时,含有高浓度硫化氢的天然气从钻具水眼喷涌达 30 m,天然气中硫化氢含量达 151 g/m³以上,无阻流量达 1 000×10⁴ m³/d,可推知硫化氢源强为 17 470 g/s。井喷从 23 日 21 时发生至 24 日 16 时对井喷气体点燃处理,共持续 18 h。

以此案例为参考,确定源强,进行井场井喷气体泄漏环境安全距离估算。

4.3 气象条件

事故发生时,该地区风速 1.3 m/s,大气稳定度 D~E。

由于井喷发生时刻难以预料,发生各风向皆有可能,因此其环境安全区域应以井喷点为中心,以环境安全距离为半径画圆,不必考虑风向。

4.4 环境标准

目前,国内外针对硫化氢的浓度标准主要是从卫生防护角度出发,没有针对环境功能区或珍稀动植物物种等浓度标准,各种标准的硫化氢浓度标准限制见表 3。

4.5 扩散模拟

用 HJ 2.2—2008《环境影响评价技术导则 大气环境》推荐的“大气环境防护距离计算模式”,源强 Q 取 17 470 g/s,有效源高 30 m,持续时间 18 h,泄漏不同时段下风向轴线地面浓度预测结果见表 4。

由表 4 可看出,随着时间的推移和距离的增大,硫化氢污染物浓度逐渐减小。井喷后 1 h 最远扩散

至 8 km,而井喷后 5 h 最远可扩散至 30 km,而井喷后 20 h 硫化氢污染物浓度衰减非常明显,最大落地浓度仅为 1.14 mg/m³。

4.6 扩散模拟结果检验

硫化氢为无色气体,是一种神经毒剂,主要靶器是中枢神经系统和呼吸系统。不同浓度的硫化氢会对人体产生不同程度伤害,轻则刺激眼睛及呼吸道,重则瞬间致命。

根据井喷事故现场情况,死亡的 243 人中 90%为距事故井二三百米的小阳村人,说明硫化氢浓度在二三百米处超过 1 000 mg/m³;距离事故井近 2 000 m 的三喜村受伤村民事发时感觉眼睛像抹了辣椒粉,一天睁不开,说明该距离硫化氢浓度达到 70 mg/m³;事发后当地居民被疏散到距事故井 5 000 m 以外,说明此距离硫化氢浓度已不会引起中毒反应。这些实际情况证明此次扩散模拟结果基本准确,比较可靠。

4.7 环境安全距离

根据模拟结果,可得出硫化氢浓度达到不同浓度标准时,下风向轴线预测点距井喷井场的距离,如表 5 所示。

根据模拟结果,当硫化氢泄漏停止后,其环境浓度在短时间内降低,安全距离增大,即在泄漏最后时刻安全距离基本达到最大值。因此,当井喷发生后,猪和家禽至少应距离井喷点 4 500 m 外,牛马等家畜至少应距离井喷点 5 000 m 外,居民应疏散至离井喷点 101 600 m 外。

根据此次实例模拟估算可知,相似地质、气象条件地区的相似规格的井场周围应设置如表 6 所示的环境安全距离。在各环境安全距离以内,不宜布置相应功能区,或在井喷发生后,应据此距离迅速进行安

全处置。

表 4 H₂S 井喷泄漏不同时段轴线地面浓度分布

下风向轴线距离/m	预测时段/(mg/m ³)				
	井喷后 1 h	井喷后 5 h	井喷后 18 h (实施点火)	井喷后 20 h	井喷后 84 h (成功压井)
200	1 188.13	1 188.13	1 188.13	0.00	0.00
600	457.49	457.50	457.50	0.00	0.00
1 000	184.49	184.50	184.50	0.00	0.00
1 400	97.12	97.17	97.17	0.00	0.00
1 800	59.45	59.56	59.56	0.00	0.00
2 200	39.91	40.13	40.13	0.01	0.00
2 600	28.40	28.84	28.84	0.01	0.00
3 000	20.92	21.72	21.72	0.01	0.00
3 400	15.61	16.94	16.94	0.02	0.00
3 800	11.57	13.57	13.57	0.03	0.00
4 200	8.36	11.12	11.12	0.05	0.00
4 600	5.79	9.28	9.28	0.07	0.00
5 000	3.78	7.85	7.85	0.09	0.00
5 400	2.29	6.74	6.74	0.13	0.00
5 800	1.28	5.84	5.84	0.17	0.00
6 200	0.66	5.11	5.11	0.23	0.00
6 600	0.30	4.51	4.51	0.30	0.00
7 200	0.08	3.79	3.79	0.41	0.00
7 600	0.03	3.40	3.40	0.50	0.00
8 000	0.01	3.07	3.07	0.59	0.00
8 400	0.00	2.78	2.79	0.69	0.00
8 800	0.00	2.54	2.54	0.78	0.00
9 200	0.00	2.32	2.32	0.87	0.00
9 600	0.00	2.13	2.13	0.95	0.00
10 000	0.00	1.96	1.97	1.02	0.00
15 000	0.00	0.84	0.87	0.87	0.00
20 000	0.00	0.40	0.49	0.49	0.00
25 000	0.00	0.15	0.31	0.31	0.00
30 000	0.00	0.04	0.22	0.22	0.00
41 600	0.00	0.00	0.11	0.11	0.00
45 200	0.00	0.00	0.10	0.10	0.00
47 600	0.00	0.00	0.09	0.09	0.00
72 500	0.00	0.00	0.03	0.03	0.00
99 000	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00
101 600	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
155 000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000 1
385 000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000 6
500 000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000 1

注:最大落地点下风向距离 $X_m=233\text{ m}$;最大落地浓度 $C_m=1\ 228.6\text{ mg/m}^3$; $X_m=228\text{ m}$; $C_m=1\ 226.9\text{ mg/m}^3$; $X_m=228\text{ m}$; $C_m=1\ 226.9\text{ mg/m}^3$; $X_m=1\ 1591\text{ m}$; $C_m=1.14\text{ mg/m}^3$; $X_m=342\ 478\text{m}$; $C_m=0.006\text{ mg/m}^3$

表 5 硫化氢扩散达到不同浓度标准时的轴线距离 m

标准	井喷后 1 h	井喷后 5 h	井喷后 18 h	井喷后 20 h	井喷后 84 h
车间最高容许浓度 10 mg/m ³	4 000	4 500	4 500	—	
猪舍区、禽舍区容许浓度 10 mg/m ³	4 000	4 500	4 500	—	
牛舍区容许浓度 8 mg/m ³	4 300	5 000	5 000	—	硫化氢浓度极小,已无影响
《恶臭污染物排放标准》一级标准 0.03 mg/m ³	7 600	31 000	72 500	72 500	
居住区最高容许浓度 0.01 mg/m ³	8 000	34 000	101 600	99 000	

表 6 井场环境安全距离 m

功能区	环境安全距离
大型工作区	4 500
大型猪舍区、禽舍区	4 500
大型牛舍区	5 000
居住区	101 600

5 结束语

环境安全距离理论意义重大,科学合理,简单易懂,可操作性强。该项成果为防止和减轻油田生产设施的潜在环境影响和事故危害、合理协调城市规划与油田设施之间的关系提供了科学的决策依据。

参考文献

[1] 李巍,张震,闫毓霞.油田生产环境安全评价与管理[M].北京:化学工业出版社,2005.

[2] 开方明,马夏康,尹谢平,等.油罐区泄漏及火灾危险危害评价[J].安全与环境学报,2004,4(3):3-6.

[3] 钱云平.地下水系统中污染物的行为特征[J].地下水,1997,19(1):31-33.

[4] 吴宗之,高进东.重大危险源辨识与控制[M].北京:冶金工业出版社,2001.

[5] 奚成刚,陈家军,许兆义.油田开发过程中事故环境风险评价[J].中国安全科学学报,2002,12(3):35-38.

[6] 徐龙君,吴江,李洪强.重庆开县井喷事故的环境影响分析[J].中国安全科学学报,2005,15(5):84-87.