

骆正山, 刘璐, 张新生, 等. 雷静电作用下储气库安全危害分析[J]. 灾害学, 2022, 37(1): 68–71, 76. [LUO Zhengshan, LIU lu, ZHANG Xinsheng, et al. Analysis of Gas Storage Safety Hazards under the Influence of Lightning and Static Electricity [J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(1): 68–71, 76. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2022.01.012.]

# 雷静电作用下储气库安全危害分析\*

骆正山, 刘璐, 张新生, 王小完

(西安建筑科技大学 管理学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:**为保障能源储备安全,探究雷电和静电对储气库安全的影响。根据雷电和静电理论,构建储气库雷静电概率模型,分析雷静电对储气库的影响。考虑天然气扩散的特殊性,选取高斯烟羽模型预测气体扩散范围,并结合闪火后果准则对闪火危害范围进行分析,构建 CCPS–BST 模型对爆炸危害范围预测,分析风速及大气稳定度对三种危害后果的影响。结果表明,雷静电会增加储气库泄漏后发生闪火和爆炸的概率,气体扩散范围和闪火后果沿主导风向呈梭形分布,蒸气云爆炸后果由中心向四周扩散,三种危害范围都与风速和大气稳定度呈相反的变化。研究结果可为多因素下储气库安全分析研究提供参考,为降低灾害后果和维护储气库的日常安全提供了理论依据。

**关键词:**储气库;闪火;蒸气云爆炸;雷电;静电

**中图分类号:**TE822;X4;X915.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1000–811X(2022)01–0068–05

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2022.01.012

天然气作为一种绿色高效能源,在我国的能源结构中占比较大<sup>[1]</sup>。储气库是天然气调峰的重要手段之一,近年来国内外储气库发生泄漏与爆炸的事故超过数十余起<sup>[2]</sup>,对人民的生命财产安全造成巨大威胁。美国加州 Aliso Canyon 储气库发生天然气泄漏,持续了 111 d,导致经济损失高达 3.3 亿美元<sup>[3]</sup>。因此,开展储气库安全分析具有重要的意义。

国内外学者对储气库安全的研究主要是对其进行风险评价和泄漏后果危害分析:采用单因素分析法<sup>[4]</sup>或借助 Bow–tie<sup>[5]</sup>对天然气泄漏影响因素及风险进行分析;李丽锋等<sup>[3]</sup>使用阻流模型和高斯烟羽模型对储气库注采井泄漏后的泄漏速率和扩散范围进行预测,借助 TNT 当量法计算爆炸危害范围;刘狄龙<sup>[6]</sup>利用 TNT 当量法对蒸气云爆炸和沸腾液体蒸气爆炸进行定量的评估;陈国华等<sup>[7]</sup>对比分析 TNT 当量法和 TNO 多能法预测蒸气云爆炸危害范围的结果,得 TNO 多能法在衡量爆炸后果方面准确度较高;上述研究所采用的方法具有一定的局限性且精度不高,需要选择合理有效的方法对储气库安全进行分析。同时,静电是石油化工火灾爆炸事故的主要成因,而对静电的研究主要集中在事故原因分析和危险性分析:从介绍静电的产生和控制措施<sup>[8]</sup>,到采用模糊分

析法和鱼骨图与层次分析法结合对静电后果风险评价<sup>[9]</sup>,都未对静电危害后果量化分析。加之,雷电是中国十大自然灾害,也会对储气库安全产生很大影响。根据雷电致灾机理,对雷电进行风险评价和致灾因子相关性分析<sup>[10–11]</sup>,苏伯尼等<sup>[12]</sup>对雷击的全过程进行量化评价,得出雷击后果的事故概率及危害范围。

综上,在研究储气库安全时,主要考虑影响其泄漏的因素并对其进行风险评价和分析,未将具体的环境因素的影响考虑在内。而对于雷电和静电危害分析的研究均是对单个方面进行分析,缺乏综合考虑两者共同作用在储气库的后果。因此,本文提出对雷静电影响下的储气库泄漏后果进行预测。

鉴于此,分析静电聚集和雷电因素影响下储气库泄漏后果,构建雷静电概率模型和储气库泄漏后果模型,得出雷静电对储气库的影响概率,并对此情况下的储气库泄漏后果分析。

## 1 理论分析

储气库注采井泄漏包括井口泄漏和地层迁移

\* 收稿日期: 2021–08–30 修回日期: 2021–10–13

基金项目: 国家自然科学基金“在役海底油气输送管道风险评估与管理研究”(41877527); 陕西省社科基金“大数据背景下城市天然气管道风险评估与管理研究”(2018S34)

第一作者简介: 骆正山(1969–),男,汉族,陕西西安人,教授,博士生导师,主要从事油气管道的腐蚀防护、风险评估等方面的研究. E-mail: luozhengshan@163.com

通讯作者: 刘璐(1997–),女,汉族,山西临汾人,硕士研究生,主要从事油气风险评估的研究. E-mail: 15731334119@163.com

泄漏。地层迁移泄漏分为迁移至其他地层和迁移后泄漏至大气。不同情况导致的后果见图 1。

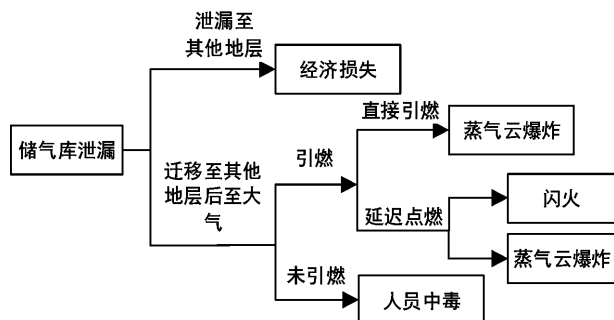


图 1 储气库泄漏事故模拟图

雷电是发生于大气中的瞬时电压和电流高、电磁辐射强的灾害性天气现象<sup>[13]</sup>。根据其种类不同造成的危害分别为直击雷会对建筑物产生破坏和感应雷会通过室外的金属线引燃室内物体。雷电机理即在形成雷云的过程中, 遇到地面较高的建筑物时, 雷闪电流的电磁场作用导致建筑物外部的导体感应产生电流或电压进入内部, 造成雷击<sup>[14]</sup>。

静电使物体带有静电荷, 两种不同性质的物体在正常情况下紧密接触再迅速分离, 使电荷的等量和均衡状态被破坏。产生的静电荷可通过自然逸散和不同形式的放电释放。静电聚集理论是指在通过放电释放静电荷的同时会将电能转化为热能, 引燃可燃物成为火灾爆炸的点火源。

## 2 建模

基于雷电机理和静电聚集理论, 建立雷静电概率模型; 基于高斯烟羽模型和 CCPS - BST 模型, 建立储气库泄漏后果模型。

### 2.1 雷静电概率模型

计算闪电击中储气库及静电引起火花的期望, 得出雷静电引发火灾的概率。

(1) 雷电击中储气库概率。基于 IEC (国际电工委员会) 提出的《IEC62305 - 2 雷电防护第 2 部分: 风险管理》, 对储气库年遭雷击次数  $N_d$  计算:

$$N_d = N_c \times A_d \times C_d \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中:  $N_c$  为雷击大地密度;  $N_c = 0.1 T_d$ ,  $T_d$  为雷暴日数;  $A_d$  为截收面积;  $C_d$  为相对位置因子

(2) 静电引发火灾爆炸概率。静电放电能量是指通过火花放电释放的能量。静电放电量为:

$$W = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2)$$

式中:  $W$  为静电放电能量;  $C$  为静电电容;  $V$  为带电点位即静电电位差。

储气库库体的导电片是火灾爆炸的主要点火源之一。实验测得通过电流达到 400 A 即可使得导电片产生点燃性火花<sup>[12]</sup>。若有  $n$  个导电片, 库体是等势体则全部导电片是并联的, 因此, 需约  $I \geq n \times 400$  A 的电流使得静电聚集产生火花。

闪电电流与负载电阻无关, 基于国家标准《DL/T620—1997 交流电气装置的过电压保护和绝

缘配合》可得电流值:

$$\lg P = -\frac{I}{88} \quad (3)$$

式中:  $I$  为电流幅度值(kA);  $P$  为雷电实际电流超过  $I$  的概率。

由式(3)得静电电荷积累到期望值的概率, 乘以每年闪电击中储气库的期望, 即得闪电击中储气库并产生火花的概率。

### 2.2 泄漏后果模型

高斯烟羽模型预测天然气扩散质量浓度分布, 结合闪火的后果评价准则, 确定闪火的危害范围; 采用 CCPS - BST 模型预测蒸气云爆炸的危害范围。

(1) 高斯烟羽模型。在预测气体扩散范围的模型中, DEGADIS 模型适用重气, BM 模型适用中性气体, 高斯烟羽模型适用于中性气体且周围比较开阔的情况, 具有简便易于理解和计算结果与试验结果能较好吻合的优点<sup>[15]</sup>。其数学表达式为:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z} e^{(-y^2/2\sigma_y^2)} (e^{[-(z+H)/2\sigma_z^2]} + e^{[-(z-H)/2\sigma_z^2]}) \quad (4)$$

式中:  $C(x, y, z)$  为下风向给定地点  $(x, y, z)$  处空气中物质的质量浓度 ( $\text{g}/\text{m}^3$ );  $H$  为泄漏源强的高度(m);  $Q$  为泄漏速率 (源强) ( $\text{g}/\text{s}$ );  $u$  为风速 ( $\text{m}/\text{s}$ );  $x$  为下风向距离(m);  $y$  为侧向风距离(m);  $z$  为垂直风向距离(m);  $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$  分别为侧向风向和垂直风向的扩散系数, 根据文献[16]取值。

(2) 闪火模型。闪火是种非爆炸性燃烧过程, 即可燃气体或蒸气与空气混合后被点燃, 其主要危害是灼烧和热辐射。由于其热辐射造成的伤害不大, 主要分析直接灼烧的危害后果。从欧洲工业气体协会(EIGA) 4 得闪火的危害后果可采用混合气体浓度燃烧下限来衡量。

(3) CCPS - BST 爆炸模型。蒸气云爆炸的危害范围预测主要是通过利用关系模型, 即: TNT 当量模型、TNO 多能法和 Baker - Strehlow - Tang 模型等。TNT 当量模型的依据是高能炸药爆炸, 低估了远距离的破坏, 且当距离爆炸波中心的距离接近零时, 超压会接近无限大, 即高估了近距离的伤害范围<sup>[17]</sup>。TNO 多能法需要选择合适的爆源强度, 但缺少定量选择的原则, 也并未考虑不同可燃物对爆炸波的影响。Baker - Strehlow - Tang (BST) 模型是由一组无量纲距离、无量纲峰值侧向超压的曲线组成, 是根据火焰传播速度来选取不同的爆炸波强度曲线, 从而得出数据, 预测结果与实际较为接近。

因此, 建立 CCPS - BST 模型对爆炸危害范围进行预测, 通过 CCPS 模型得爆炸的总能量, BST 确定爆炸超压, 以超压为后果评价准则确定爆炸的危害范围。

CCPS 蒸气云爆炸模型的计算公式如下:

$$E = \text{ref} \times e_f \times H_e \times \text{Mass} \quad (5)$$

式中:  $E$  为爆炸总能量(MJ);  $\text{ref}$  为地面反射因子;  $H_e$  为蒸气的燃烧热 ( $\text{MJ}/\text{kg}$ );  $\text{Mass}$  为蒸气云爆炸的总质量(kg)。

由式(5)得爆炸总能量  $E$ , 通过 BST 计算爆炸冲击波超压:

$$x = r \times \sqrt{\frac{E}{p_{atm}}}; \quad (6)$$

$$y = \begin{cases} D, & x \leq x_0; \\ A \times B^{1/x}, & x \geq x_0. \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $r$  为距爆炸中心的距离(m);  $p_{atm}$  为大气压强(MPa);  $A$ 、 $B$ 、 $D$ 、 $x_0$  为常数, 其取值参考文献[18]。

### 3 实例分析

雷雨天气下, 某储气库发生泄漏, 占地面积约  $2.8 \times 10^5 \text{ m}^2$ , 天然气的储藏温度为  $-18^\circ\text{C}$ , 压力为 4.6 MPa。假定储气库中装有天然气 60 t, 发生泄漏事故时一半, 即泄漏量为 30 t, 室外平均气温为  $28^\circ\text{C}$ , 风速在  $2 \sim 6 \text{ m/s}$  间变化。所在地的大气稳定度频率用帕斯奎尔(Passquill)分级法<sup>[19]</sup>表示, 将大气的扩散能力分为 6 个稳定度级别: 从 A 到 F 级表示气象逐渐稳定。经调查得, 当地大气稳定度主要集中在 B、C、D 三个等级。

#### 3.1 ALOHA 及范围确定

ALOHA 具有较强的通用性, 含多种扩散和爆炸模型, 能全面较好的模拟天然气泄漏后果、闪火及蒸气云爆炸危害范围。闪火的危害主要考虑火焰直接灼烧, 以气体爆炸下限(Lower Explosive Limit, LEL)来确定闪火的危害后果和范围, 具体如表 1 所示。蒸气云爆炸的危害后果以超压准则来确定, 不同超压值对目标物的损害对应关系见表 2。

表 1 闪火危害范围划分<sup>[20]</sup>

可燃物的平均质量浓度	后果
高于 LEL 的 60%	极易发生闪火
介于 LEL 的 10% ~ 60% 之间	有发生闪火的可能性
低于 LEL 的 10%	不会发生闪火

表 2 蒸气云爆炸的危害范围划分<sup>[21]</sup>

危害等级	超压值/kPa	后果
I	$\geq 55.16$	建筑物严重破坏及人员死亡
II	24.13 ~ 55.16	墙体破坏及人员重伤
III	$> 6.87$	玻璃破碎及人员轻伤

#### 3.2 研究结果

通过 ALOHA 模拟大气稳定度为 C, 风速为  $4 \text{ m/s}$  的气体扩散范围、闪火及爆炸的危害范围及不同风速和大气稳定度对泄漏后果的影响如下图所示。

(1) 雷静电对泄漏影响概率。根据式(1)得储气库的年遭雷击次数的期望  $N_d$  为 0.899 6。若库体有 30 个导电片, 引发火花所需电流为 12 kA, 则静电聚集产生火灾的概率为 0.73, 雷电击中储气库产生火花次数的期望为 0.657 7。

由此可见, 在雷电产生火花的概率远远高于 50%, 在雷电和静电的共同作用下, 产生火花, 导致天然气在泄漏后由简单的泄漏变成闪火或爆炸的概率极大。

(2) 气体扩散范围。由图 2 得, 气体扩散范围沿着主导风向呈梭形分布, 沿下风向的扩散距离大于下风向两侧的距离, 且浓度随着距离的增加而逐渐降低。图 3 可知天然气的扩散距离随着风速

的增加而减小, 大气越稳定, 天然气不易扩散, 相同浓度下的扩散范围大。

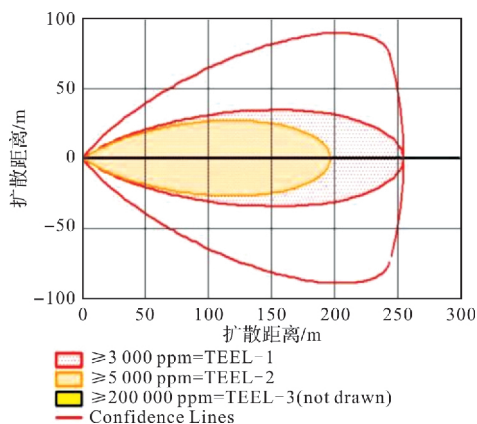


图 2 储气库泄漏后的气体扩散分布

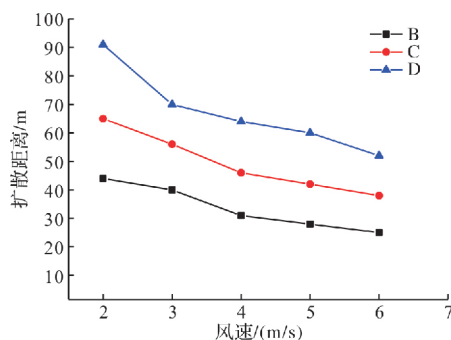


图 3 不同大气稳定度和风速对应的 TEEL-1 距离

(3) 闪火的危害范围。从图 4 中可得闪火危害范围沿风向呈梭形分布, 与天然气扩散规律相似, 在主导风向的危害距离大于主导风向两侧。风速和大气稳定度对易于发生闪火范围(图 5)的影响规律相似, 即风速越低, 气体越易聚集, 闪火的危害距离越大; 大气越稳定, 气云易聚集且扩散缓慢, 闪火危害范围增加。

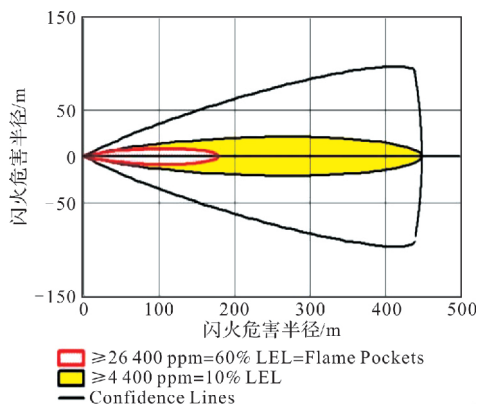


图 4 储气库泄漏后的闪火危害范围

(4) 蒸气云爆炸的危害范围。由图 6 得蒸气云危害范围由中心开始向四周扩散。同时, 随着风速由  $2 \text{ m/s}$  增加到  $6 \text{ m/s}$ , 对天然气泄漏扩散形成的气云扰动加强, 天然气难以聚集, 使得蒸气云爆炸的伤害半径显著减小, 爆炸的危害范围随着大气稳定度的降低而减小(图 7)。

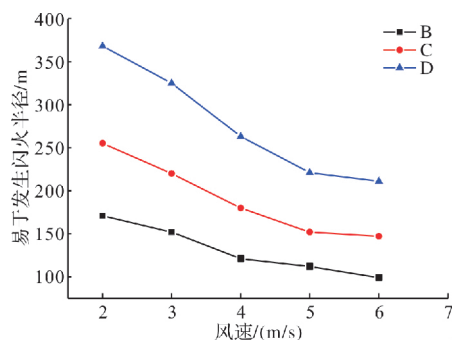


图5 不同风速和大气稳定度的易于发生闪火半径

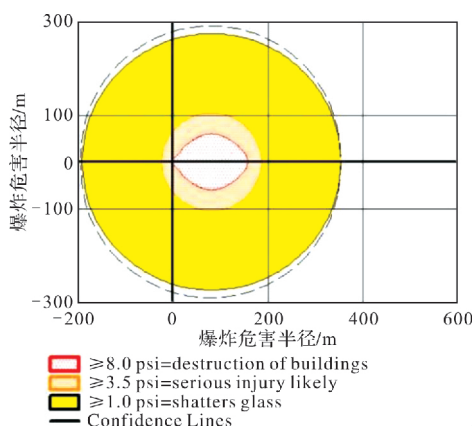


图6 蒸气云爆炸的危害范围

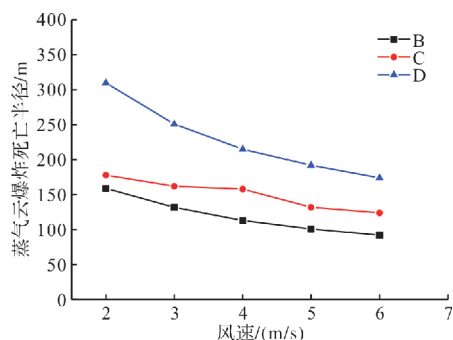


图7 不同风速和大气稳定度下爆炸死亡区半径

## 4 讨论

通过不同扩散模型和爆炸模型得出的气体扩散范围和爆炸危害距离见表3、表4。与BM模型和DEGADIS模型比较, 高斯烟羽模型所得结果较为全面, 更加适用于模拟天然气的扩散范围。CCPS-BST模型弥补了TNT当量法局限性及TNO多能法结果相对比较保守的缺陷, 预测的爆炸危害范围较为准确和全面。

表3 不同模型得出天然气扩散距离

模型名称	气体扩散范围/m		
	TEEL-1	TEEL-2	TEEL-3
BM模型	28	205	312
DEGADIS模型	25	232	318
高斯烟羽模型	46	296	385

表4 不同模型得出蒸气云爆炸危害距离

模型名称	冲击波危害半径/m		
	超压 > 55.16 kPa	超压 > 24.13 kPa	超压 > 6.89 kPa
TNT当量模型	162	170	264
TNO多能法模型	138	176	283
CCPS-BST模型	158	189	355

## 5 结论

针对雷静电作用下的储气库泄漏情况, 通过ALOHA模拟天然气泄漏导致的闪火和蒸气云爆炸危害范围, 可得以下结论:

(1) 本研究建立雷静电概率模型和储气库泄漏后果模型, 能更好的对雷静电影响下的储气库泄漏后果进行全面有效的评价。在雷电和静电的共同作用下, 储气库泄漏的概率大大增加。储气库泄漏后的气体扩散范围、闪火及爆炸的危害范围都会受到风速和大气稳定度的影响, 危害范围随着风速和大气稳定度的降低而增大。

(2) 研究储气库泄漏后果时考虑雷电和静电的影响, 具有显著的科学价值与现实意义, 也为储气库泄漏的风险预警和防范提供了较为可靠的理论支持, 进而丰富了对储气库灾害后果研究的理论体系。

## 参考文献:

- [1] 张刚雄, 李彬, 郑得文, 等. 中国地下储气库业务面临的挑战及对策建议[J]. 天然气工业, 2017, 37(1): 153-159.
- [2] 王者超, 李崴, 刘杰, 等. 地下储气库发展现状与安全事故原因综述[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2019, 1(2): 49-58.
- [3] 李丽锋, 罗金恒, 赵新伟, 等. 储气库注采井蒸气云爆炸致灾范围研究[J]. 石油管材与仪器, 2019, 5(2): 51-53, 65.
- [4] 肖峻峰, 陈健, 戴程呈, 等. 高含硫天然气泄漏爆炸与毒性影响因素分析[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(6): 43-49.
- [5] 陈樑, 金龙, 黄兵, 等. 基于二维云模型的储罐泄漏风险Bow-tie量化分析[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(3): 809-815.
- [6] 刘狄龙. 大榭石化球罐区火灾爆炸分析与评价[J]. 江西化工, 2019, 145(5): 174-176.
- [7] 陈国华, 徐佳, 周志航, 等. 埋地输气管道泄漏爆炸作用下并行邻管的动力响应[J]. 油气储运, 2020, 39(11): 1228-1237.
- [8] 陈国华, 范小猛, 蒋漳河. 油库静电危险源辨识及其危害防护措施[J]. 油气储运, 2014, 33(5): 526-530.
- [9] 刘金玉, 王殿生, 胡玉琴. 基于层次分析的油库区静电风险模糊综合评价方法[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2019, 34(1): 120-126.
- [10] 刘健, 杨仲江, 杨虎, 等. 基于正态云模型的布达拉宫雷电灾害风险评估[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(6): 100-104.
- [11] 刘平英, 杨宗凯, 胡颖, 等. 2016年云南省雷电灾害分布与致灾因素相关性分析[J]. 灾害学, 2018, 33(1): 130-135, 151.
- [12] 苏伯尼, 黄弘, 李云涛. 雷电引发油罐火灾爆炸事故的概率计算[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(4): 79-83.
- [13] 史津梅, 许维俊, 徐亮, 等. 青海省东部农业区雷电灾害风险评估[J]. 冰川冻土, 2019, 41(6): 1359-1366.
- [14] 全建军, 郑志泓, 郑永通, 等. 地震台站综合防雷技术[J]. 地震工程学报, 2017, 39(S1): 168-178.

(下转第76页)