

# 雷电灾害对储罐影响的定量风险评估方法研究<sup>\*</sup>

盖程程, 翁文国, 袁宏永

(清华大学 工程物理系 公共安全研究院, 北京 100084)

**摘 要:** 基于量化风险评估方法, 研究雷电灾害对金属储罐的一种破坏方式——雷电流高温造成储罐的金属壳熔融破损, 进而造成储罐失效事故。以某储罐区的装有石油的金属储罐为研究对象, 对雷击储罐后, 造成储罐破裂, 引发池火这一事件链进行了分析, 验证了该方法的可行性。

**关键词:** 自然灾害; 诱发事故灾难; 雷电灾害; 储罐; 失效泄露; 风险评估

**中图分类号:** X915.5    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1000-811X(2012)02-0092-04

## 0 引言

随着全球气候环境的变化, 对石化企业而言, 越来越多的外部事件导致火、爆、毒事故的发生。其中最为常见, 也是后果最严重的就是, 自然灾害诱发的石化装置事故。国外文献中将这一类由自然灾害诱发的事故灾难事件定义为 Natech 事件, 由英文 Natural and Technological Disasters 简写而来。其中比较典型的初始事件有地震、雷电和飓风, 它们可能导致化工厂容器爆炸, 有毒气体的意外释放, 化学液体泄漏, 水源污染等<sup>[1]</sup>。

本文研究的对象就是雷电灾害对储罐区的影响。在国内, 最为典型的案例就是 1989 年 8 月 12 日发生在青岛黄岛油库的特大火灾, 其事故原因就是雷电发生时, 非金属油罐在遭受对地雷击时, 产生感应火花而引爆油气。事故造成直接经济损失 3 400 多万元, 死伤 140 人。2005 年 7 月 10 日, 克拉玛依卡 6 井一号站 100 m<sup>3</sup> 储油罐在正常进油的情况下, 遇雷击出油气口着火, 后经乌苏消防局抢救灭火才避免了更大的损失<sup>[2]</sup>。1994 年, 埃及南部某镇, 雷电导致一个军用燃料仓库 8 个储罐被引燃爆炸, 万余吨油燃烧着流进村庄, 造成 400 多人死亡<sup>[3]</sup>。

雷电除了可以引发火灾和爆炸以外, 还可以干扰控制系统和电气线路, 破坏敏感的电器元件, 影响范围可以超过 3 km。国内外的研究<sup>[4]</sup>中主要以 IEC62305 标准为评估蓝本, 评估人员生命、公

众服务、文化遗产和经济价值 4 个方面的损失。Renni<sup>[5]</sup>对雷击的 604 个储存易燃物品的常压储罐研究结果表明, 163 个储罐遭受到结构破坏而发生泄露, 228 个被雷电击中后立刻起火燃烧, 还有 213 个发生电气设备失效。陈军<sup>[6]</sup>对燃料油罐区多个油罐组进行整体风险评估, 并比较了整体法相对于单体法的优点。目前鲜有详细的方法评估雷电诱发事故的风险。

本文试图从自然灾害诱发事故灾难这一类灾害的评估框架中, 对雷电灾害诱发储罐区火爆毒事故进行定量风险评估。

## 1 评估流程

这一评估框架是基于 QRA 定量风险评估建立的, 如图 1 所示。在第 1 步和第 4 步对于不同的自然灾害输入不同的参数。利用设备对某一灾害的易损性模型计算损失概率和后果等。对于雷电灾害, 恰恰缺少的就是这一子模型。但是对于设备在雷电中的损失类型可以通过常识有一个初步的判断, 并且灾害的后果也是可以推理的。

第 1 步: 评估雷电的频率和强度。通过历史数据的统计可以计算出频率, 如以年为单位。常用的单位是地闪密度(Ng), 即地闪定位网络系统监测到的每年每平方米雷击大地次数。难点在于对于某一强度的雷击发生频率的预测。因为雷电强度在记载中通常是定性表示或者根本没有记录, 通常只记录了雷电落地次数。根据概率分析的风

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2011-10-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(70871069, 91024032); 国家科技支撑计划项目(2011BAK07B03)

作者简介: 盖程程(1985-), 女, 山东青岛人, 博士研究生, 主要从事风险评估与区划研究。

E-mail: gaic07@mails.tsinghua.edu.cn

险评估方法, 表达式如下:

$$f_{I_i} = f(I_i), \quad (1)$$

式中:  $I_i$  表示强度;  $i=1, \dots, N_I$  表示了区域内所有可能的雷电强度的离散化。历史数据统计表明<sup>[7]</sup>, 上述表达式服从对数正态分布:

$$P(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\log I}} \int_0^I \frac{1}{I} \exp \left( -\frac{1}{2} \left( \frac{\log I - \log \bar{I}}{\sigma_{\log I}} \right)^2 \right) dP. \quad (2)$$

对于评估区域进行统计, 可以得到平均雷电流幅值, 较为常见的形式是雷电流幅值累积频率分布图<sup>[8]</sup>。

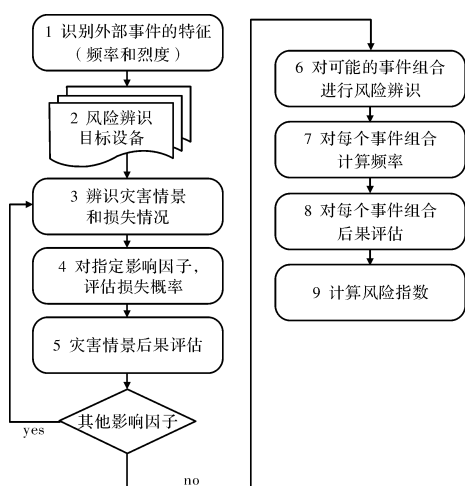


图1 自然灾害诱发事故灾难风险评估流程图

第2步: 对雷电灾害中可能遭受破坏的设备进行辨识。通过历史数据统计, 显示关键的受损设备是管道、法兰、反应装置、储罐等。本文以储罐为主要研究对象。

第3步: 对灾害情景进行假设。雷击导致储罐燃烧, 爆炸的案例中, 原因非常复杂。对于金属储罐和非金属储罐, 其诱发因素差距很大。本文对金属常压储罐进行情景假设, 雷击导致储罐破裂, 油品外溢。

第4步: 根据第一步选定灾害的特性, 确定其他的影响因子。

第5步: 对假设的情景进行量化风险评估, 以个人风险、社会风险的形式表达。

第6~9步是对更为复杂的灾害情景组合进行的分析。此处略去。

## 2 方法介绍

本文所研究的对象为接地不良的金属储罐, 在雷电发生时因联结点熔毁所导致的危化品泄露

事故。

雷电流在流经导体时, 由于导体电阻而发热, 这种热效应通常作用于电弧的根部, 如某些部位的联结点, 国外的相关文献中曾有报道<sup>[9]</sup>。雷电导致飞机机身固体的孔洞如图2所示。

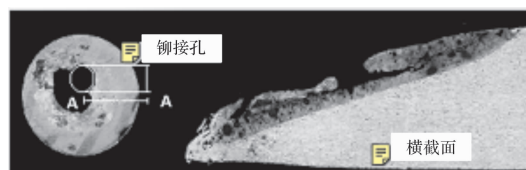


图2 雷电导致飞机机身固体的孔洞<sup>[10]</sup>

由于雷电流通道所造成的导体温度升高可以按照下面方法进行计算<sup>[11]</sup>。

电流在导体内以热能形式消散的表达式:

$$P(t) = i^2 R. \quad (3)$$

雷电通道的欧姆阻抗的能量也可以用下式表示:

$$W = R \cdot \int i^2 \cdot d_t. \quad (4)$$

在雷电放电过程中, 高能的特殊性, 使得其产生的热量在极短时间内耗散完毕。这一过程可以近似认为是绝热过程。

导体的温度可以用下式表示:

$$\theta - \theta_0 = \frac{1}{\alpha} \left[ \exp \frac{\frac{W}{R} \cdot \alpha \cdot \rho_0}{q^2 \cdot \gamma \cdot c_w} - 1 \right]. \quad (5)$$

式中:  $\theta - \theta_0$  为导体升高的温度(K);  $\alpha$  为电阻的温度系数(1/K);  $W/R$  为电流脉冲能量(J/Ω);  $\rho_0$  为在常温下导体的欧姆阻抗(Ωm);  $q$  为导体的横截面积(m<sup>2</sup>);  $\gamma$  为材料密度(kg/m<sup>3</sup>);  $c_w$  为热容(J/kgK);  $\theta_s$  为熔化温度(°C)。

雷电的典型特征是持续时间很短, 峰值电流很高。在这种条件下, 必须考虑趋肤效应(skin effect)。但在实际应用中, 由于物质的属性(如导磁性)和几何特征(导体的横断面积)减小了趋肤效应, 使得由此导致的温度升高可以忽略不计。

在雷电发生过程中, 热效应的来源主要是第一次回击。在联结点会发生材料融化和腐蚀。在弧根区, 由于雷电弧本身产生的大量热量及通电造成的电阻热效应。大量热能在金属的表面产生。在弧根区产生的热量, 超过了金属传导可吸收的及金属融化和蒸发过程损失的。这一过程的严重程度与电流幅度和持续时间相关。

在雷电通道的金属表面联结点计算热效应, 为了简化, 选用阳极-阴极电压降模型。这个模型适用于薄的金属皮, 结果偏于保守。模型假设,

雷击注入联结点的能量,都用来熔化或蒸发导体材料,而忽略在金属中的热耗散。也有文献中的模型介绍了雷电的联结点的损伤对电流脉冲持续时间上的依赖。

关于阳极-阴极电压降模型:

雷电弧的能量  $W$  等于阳极-阴极电压降乘以雷电电荷量  $Q$ 。

$$W = \int u_{a,c} id_t = u_{a,c} \int id_t = u_{a,c} \cdot Q, \quad (6)$$

式中:  $u_{a,c}$  为阳极-阴极电压降,几十伏,相对恒定值;  $Q$  为雷电电流在雷电弧根部的能量转换。

假设所有能量转化用于融化金属,这一假设有可能过高估计融化体积。

$$V = \frac{u_{a,c} Q}{\gamma} \cdot \frac{1}{c_w(\theta_s - \theta_u) + c_s}. \quad (7)$$

式中:  $V$  为融化的金属体积( $\text{m}^3$ );  $u_{a,c}$  为阳极-阴极电压降,几十伏,相对恒定值;  $Q$  为雷电电流在雷电弧根部的能量转换;  $\gamma$  为物质密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $c_w$  为热容( $\text{J}/\text{kgK}$ );  $\theta_s$  为融化温度( $^{\circ}\text{C}$ );  $\theta_u$  为环境温度( $^{\circ}\text{C}$ );  $c_s$  为融化潜热( $\text{J}/\text{kg}$ )。

相关金属材料的物理属性见表 1。

表 1 材料的物理属性

属性	铝	低碳钢	铜	不锈钢
$\rho_0/\Omega\text{m}$	$29 \times 10^{-9}$	$120 \times 10^{-9}$	$17.8 \times 10^{-9}$	$0.7 \times 10^{-6}$
$\alpha/(1/\text{K})$	$4.0 \times 10^{-3}$	$6.5 \times 10^{-3}$	$3.92 \times 10^{-3}$	$0.8 \times 10^{-3}$
$\gamma/(\text{kg}/\text{m}^3)$	2 700	7 700	8 920	$8 \times 10^3$
$\theta_s/^{\circ}\text{C}$	658	1 530	1 080	1 500
$c_s/(\text{J}/\text{kg})$	$397 \times 10^3$	$272 \times 10^3$	$209 \times 10^3$	—
$c_w/(\text{J}/\text{kgK})$	908	469	385	500

图 3 是三种材料在电荷作用下熔融的体积函数关系。

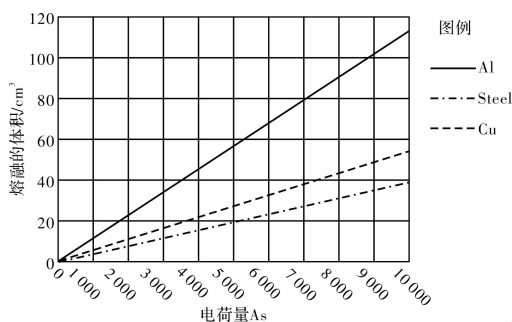


图 3 在  $u_{a,c} = 30 \text{ V}$ ,  $\theta_u = 20^{\circ}\text{C}$  时, 熔融的金属体积与电荷量的关系图

通过熔融的金属体积可以估算破裂孔径的数值,一般假定为圆形裂口。从而利用储罐中的液体经小孔泄露模型,为计算储罐区内外危险物的

浓度提供了手段,从而为风险的量化提供了基础。

### 3 案例研究

以某地的石油储罐区为研究区域,常压金属储罐为研究对象,储存的物质是石油。储罐的直径 30 m,高 14 m,储罐平均厚度 6.5 mm。根据历史数据统计,该地区的地闪密度是  $1.83 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。

根据上文所述的方法,计算得到雷电导致储罐破裂,融化的半球形金属体积是  $1.7 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ 。计算得到等效泄露孔径是 18.2 mm。

按照传统的液体连续泄露模型计算,可能发生的事件类型按照事件树进行分析,液体泄漏后将向低洼处流动并形成液池。对于粗糙的砂壤或砂地,扩展液池的最小厚度为 25 mm<sup>[12]</sup>。按照池火模型计算热辐射的数值<sup>[13]</sup>,进一步确定个人风险值。图 4 中标注颜色的区域为个人风险大于  $1 \times 10^{-6}$  区域,这个区域内风险不可接受。

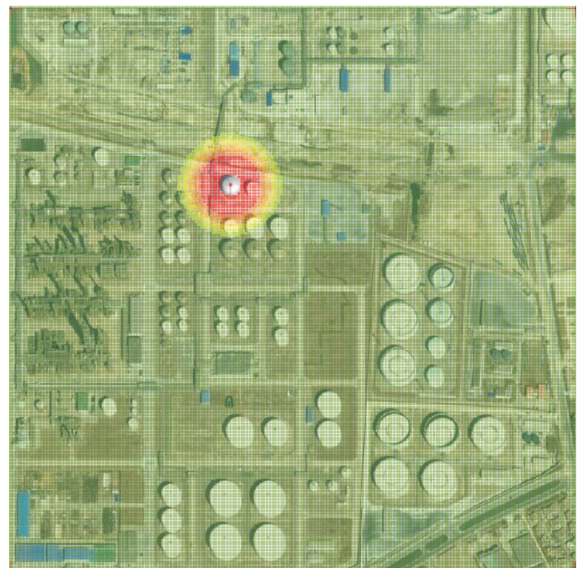


图 4 个人风险大于  $10^{-6}$  分布图

### 4 结论

雷电灾害诱发的储罐区火灾和爆炸事件越来越常见,但是由于国内对数据的收集和整理有限,许多细节还不足以利用进行科学分析与归纳,还只是停留在定性阶段。本文以雷电灾害对储罐破坏的一种影响方式为切入点,评估此类型的风险。也正是由于雷电灾害发生的随机性,建立一个完整的评估雷电灾害对储罐区影响的风险模型还有许多工作要做。

对于上文提到的这种灾害, 属于 Natech 事件的范畴, 也可以看做是灾害链或者多灾种耦合的一种表现形式。关于此类灾害的研究框架已在文中表述, 事实证明它是行之有效的。对于人们理解多灾种耦合的灾害情景, 辨识关键保护目标, 评估灾害的后果具有重要的现实意义。

## 参考文献:

- [1] 盖程程, 翁文国, 袁宏永, 等. Natech 事件风险评估研究进展[J]. 灾害学, 2011, 26(2): 125 - 129.
- [2] 杨仲江. 雷电灾害风险评估与管理基础[M]. 北京: 气象出版社, 2009.
- [3] Ash J W. Mitigation of the catastrophic failure of the primary containment in the bulk storage industry[EB/OL]. [2011 - 08 - 21]. [http://www.ljmu.ac.uk/BLT/BUE\\_Docs/ash.pdf](http://www.ljmu.ac.uk/BLT/BUE_Docs/ash.pdf).
- [4] 焦雪, 冯民学, 王尧钧, 等. 雷电灾害风险评估系统开发与应用[J]. 灾害学, 2011, 26(2): 72 - 76.
- [5] Renni E, Antonioni G, Krausmann E, et al. Reliability, risk, and safety theory and applications[M]. Taylor and Francis Group, 2009.
- [6] 陈军. 雷击风险整体评估方法及其在油库中的应用[C]// 第七届中国国际防雷论坛. 北京, 2008: 209 - 210.
- [7] Renni E, Antonioni G, Bonvicini S, et al. A novel framework for the quantitative assessment of risk due to major accidents triggered by lightnings[J]. Chemical Engineering Transactions, 2009, 17: 311 - 316.
- [8] 李家启, 李良福. 雷电灾害风险评估与控制[M]. 北京: 气象出版社, 2010.
- [9] Metwally I A, Heidler F, Zischank W. Measurement of the rear - face temperature of metals struck by lightning long - duration currents[J]. European Transactions on Electrical Power, 2004, 14 (4): 201 - 222.
- [10] 飞机结构修理 - 雷击[EB/OL]. [2011 - 08 - 21]. <http://wenku.baidu.com/view/716434333968011ca3009152.html>.
- [11] Protection against lightning British Standards[S]. BSI, 2006.
- [12] 中国石油化工股份有限公司青岛安全工程研究院. 石化装置定量风险评估指南[M]. 北京: 中国石化出版社, 2007.
- [13] 沈立, 吴起. 危险化学品建设项目设立安全评价[M]. 南京: 东南大学出版社, 2010.

## Method for Quantitative Risk Assessment of Tank Accidents Triggered by Lightning

Gai Chengcheng, Weng Wenguo and Yuan Hongyong

(Institute of Public Safety Research, Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Based on the quantitative assessment (QRA), a methodology for the risk assessment of metallic tank LOC triggered by lightning is presented in this paper. Material melting and erosion occur at the attachment point when lightning stroke tank. Then the LOC may incur immediate ignition such as pool fire. This disaster chain is analyzed and the methodology is verified.

**Key words:** natural and technological disaster; triggered accident; lightning; tank; leakage; risk assessment

## 下期要目

- |                                       |                  |
|---------------------------------------|------------------|
| 土石坝震损机理及震害影响因素研究 .....                | 张桂荣, 董正兴, 郭永彬    |
| 美国地震风险评估中建筑物易损性与损失组合的探讨 .....         | 吴凡, 汪明, 刘宁       |
| 再论自然灾害风险的定义 .....                     | 倪长健, 王杰          |
| 汶川特大地震“人的感觉”和“器物的反应”震害分析 .....        | 夏坤, 张令心, 刘洁平     |
| 珠江流域干旱事件的多变量区域分析及区域分布特征 .....         | 肖名忠, 张强, 陈晓宏     |
| G2 京津塘高速公路万辆车流的交通事故灾害与气象综合指数的关系 ..... | 丁德平, 李迅, 张德山, 等  |
| 灾后物资供应系统风险预警可拓模型的初步设计 .....           | 李智, 林达龙, 明亮, 等   |
| 城乡居民突发事件应对能力研究——以浙江省为例 .....          | 杨宏飞, 赵贞卿         |
| 山区沿河公路地质风险形成机制 .....                  | 陈远川, 陈洪凯         |
| 地裂缝活动对 Q3 残积古土壤物理力学性质的影响 .....        | 王颖, 宋彦辉, 李忠生, 等  |
| 利用欧氏距离函数评估海河流域暴雨灾害 .....              | 吴振玲, 史得道, 吕江津, 等 |
| 黑龙江省杨树烂皮病气象预报模型的适应性分析 .....           | 刘丹, 于成龙, 郭安红, 等  |
| 一种面向灾害应急的 UAV 影像快速拼接方法 .....          | 李明, 刘欢, 朱欣焰      |
| 遥感震害快速定量评估方法及其在玉树地震中的应用 .....         | 窦爱霞, 王晓青, 丁香, 等  |
| 低纬高原大气电场特征及其在预警中的应用 .....             | 谢屹然, 徐开, 张腾飞, 等  |