

# 油页岩原位开采的大气环境风险评估

张凤君, 刘兆焜, 李晨阳, 陶怡, 吕聪

吉林大学地下水资源与环境教育部重点实验室, 长春 130021

**摘要** 在近临界水油页岩原位开采过程中,会产生一些有毒有害气体( $H_2S$ 、苯、甲苯等),这些气体可能通过法兰接口、输送管道破损处、多级地质裂隙及废弃井外侧地质裂隙泄漏,带来一定的风险隐患。本文以吉林某地区油页岩原位开采为例,对其进行了空气环境的风险计算与评价。结合该区油页岩原位开采的生产工艺,确定 $H_2S$ 、苯、甲苯为本次环境风险评价的风险评价因子,通过源项分析对它们的泄漏量进行了计算,结果为 $H_2S$  92.1kg/s,苯 3.168kg/s,甲苯 0.109kg/s,风险类型为泄露。同时,本文对最大可信事故进行了后果计算,结果表明输送管道或法兰接口发生破裂泄漏后厂区内 $H_2S$ 的车间最高容许浓度超标。在风速为2m/s时, $H_2S$ 、苯及甲苯出现浓度值超过职业接触限值现象; $H_2S$ 、苯在厂区及附近100m范围内存在浓度超过立即危害生命和健康浓度限值现象,甲苯未超标; $H_2S$ 浓度发生超出急性毒害限值现象,苯及甲苯未超标。短时间发生泄漏事故影响区域主要为厂区内。鉴于风险计算和评价,本项目的风险值水平低于同行业标准,环境风险可接受。为了最大程度地降低风险事故发生的概率及对周边环境的影响,本文提出了一些防范及管理建议。

**关键词** 页岩油;原位开采;苯;甲苯;硫化氢;风险评价

**中图分类号** X82

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.26.006

## Risk Assessment of the Atmospheric Environment During In-situ Oil Shale Exploitation

ZHANG Fengjun, LIU Zhaoying, LI Chenyang, TAO Yi, LÜ Cong

Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130021, China

**Abstract** Some poisonous gases, like  $H_2S$ , benzene and toluene, will be produced in the process of in situ shale-oil extraction. These gases may leak out through the flange interface, the pipeline breakage, the geological crack and the outer side of an abandoned well. In this study, the risk of the air environment is assessed and evaluated in the in-situ shale-oil extraction in a country of Jilin Province, China. The most credible accident consequences are calculated at the same time. It is shown that, after leakage from the flange interface or the pipeline or after rupture,  $H_2S$  tends exceed the maximum allowable concentration in the workshop in the plant area. The concentration values of  $H_2S$ , benzene and toluene exceed the occupation contact limiting values when the wind speed is 2m/s. The concentrations of  $H_2S$  and benzene exceed the value of the immediate danger to life and the health concentration limitation. Toluene value is within the standard.  $H_2S$  concentrations exceed the limit value of acute poisoning phenomenon, while those of benzene and toluene are within the standard. The plant area is mainly affected during the short time of the leakage accident occurring. According to the risk calculation and evaluation in this study, the project risk level is lower than the same industry standard. The environmental risk is acceptable. In order to minimize the probability of the accident risk and the impact on the surrounding environment, we put forward some prevention and management suggestions.

**Keywords** shale oil; in-situ exploitation; benzene; toluene;  $H_2S$ ; risk assessment

### 0 引言

油页岩是一种含可燃有机质的沉积岩<sup>[1]</sup>。作为非常规油

气资源,油页岩以资源丰富和具有开发利用可行性而被列为21世纪重要的接替能源,主要用于发电及炼油。油页岩的原

收稿日期:2013-03-05;修回日期:2013-06-17

基金项目:国家潜在油气资源产学研用合作创新项目(OSR-01);油页岩成矿理论、资源评价与环境保护项目(OSR-01-08)

作者简介:张凤君,教授,研究方向为水处理技术,电子信箱:zhangfengjun@jlu.edu.cn;吕聪(通信作者),讲师,研究方向为水处理和污染防控与修复,电子信箱:lvcong@jlu.edu.cn



位开采是油页岩开采的环境友好方式之一,其开采方式为:直接对地下油页岩层进行加热,然后将裂解生成的油气抽取输送至地面进行精炼<sup>[2]</sup>。原位开采具有产品质量好、采油率高、占地面积少和环保等优点,从而得到世界各国的认可和采用<sup>[3]</sup>。油页岩原位开采技术目前已有 10 余种<sup>[4]</sup>,本文就近临界水原位开采过程可能产生的环境风险进行评价研究。由于近临界水提取的混合物中含有 H<sub>2</sub>S、苯及甲苯等有毒有害物质,在开采过程采用的高温高压技术可能会使其沿地质裂缝及废弃井外泄,管道输送的过程中,也存在泄露的风险隐患。根据 HJ/T 169—2004《建设项目环境风险评价技术导则》<sup>[5]</sup>(以下简称《导则》)要求,本文对吉林某地区近临界水原位开采油页岩项目进行环境风险评价。

## 1 大气环境风险识别与分析

### 1.1 大气环境风险识别

风险识别包括物质风险识别和生产设施风险识别两部分。结合本项目的生产工艺,原位开采过程中物质风险识别主要为生产过程的油水混合物;生产设施风险识别主要包括地质裂缝、废弃井、法兰接口及输送管道,风险类型为泄露<sup>[6]</sup>。

#### 1.1.1 物质风险识别

通过对本项目涉及物质的有毒有害、易燃易爆性质分析,综合考虑对环境可能产生的影响,本文确定 H<sub>2</sub>S、苯、甲苯为本次环境风险评价的风险评价因子。3 者的特性如表 1 所示。表中 LC<sub>50</sub> 为急性毒害(大鼠吸入);PC-MAC 为车间最高容许浓度;PC-STEL 为短时间接触容许浓度;IDLH 为立即危害生命和健康浓度。

表 1 主要有毒有害物质特性(单位:mg·m<sup>-3</sup>)

Table 1 Characteristics of poisonous and harmful materials (unit: mg·m<sup>-3</sup>)

污染物	LC <sub>50</sub> <sup>[7]</sup>	工作场所最高容许浓度 <sup>[8]</sup>		IDLH <sup>[7]</sup>
		PC-MAC	PC-STEL	
H <sub>2</sub> S	618	10		430
苯	31900		10	9800
甲苯	31900		100	7700

#### 1.1.2 生产设施风险识别

油页岩原位开采过程产生的 H<sub>2</sub>S、苯和甲苯随油水混合物一并被抽出,经由管道输送。地下开采过程中,由于高温高压会使地层产生地质裂隙,所以存在污染物随油水混合物沿废弃井外侧地质裂隙泄漏和多级地质裂隙泄漏。在输送过程中,法兰接口、输送管道等关键部位都存在泄露的风险。

#### 1.1.3 研究地区概况

本项目开采区为东西向 140m,南北向 130m。页岩层位于地下 305~380m。项目所在地的动峰加速度值主要为 0.1~0.2g,地壳稳定性一般。该地区常年盛行西南风。项目所在地

北偏西方向约 900m 处有一座 400 余人居住的村庄。

#### 1.1.4 评价等级

据《导则》附录 A.1 规定,对本项目重大危险源辨识。开采区地下页岩层预计含油量 174720t, H<sub>2</sub>S 含量 5241.6t, 苯及甲苯含量 344.5t 超过临界量,为重大危险源,确定环境风险评价等级为一级。所以大气环境影响评价主要针对距离生产厂区 5km 以内的环境敏感目标,即北偏西方向的村庄。

### 1.2 源项分析

#### 1.2.1 最大可信事故和发生概率

结合当地地质条件,通过 TOUGH2 软件模拟得出,油水混合物沿多级地质裂缝及废弃井最高只渗透至地表以下 40~50m 处的含水层,不会到达地面。所以最可能发生泄漏的薄弱环节为法兰接口及管道。

输送过程中毒物泄漏引起环境风险的最大可信事故概率类比相关统计数据,取 1.0×10<sup>-5</sup>/a<sup>[9]</sup>。

#### 1.2.2 H<sub>2</sub>S 泄露量定量计算

预测 H<sub>2</sub>S 泄露时参数,考虑到地层下高温高压操作状态下,气体逸散不是常温,设定温度为 358K,操作压力为 0.07MPa(G)。假定泄露时间为 30min,采用《导则》附录 A.2 公式进行酸性气 H<sub>2</sub>S 泄露估算。气体泄露速度 Q<sub>c</sub> 为

$$Q_c = Y C_d A P \sqrt{\frac{M \kappa}{R_0 T_c} \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1}}}$$

式中, Q<sub>c</sub> 为气体泄露速度, kg/s; P 为容器压力, Pa; C<sub>d</sub> 为气体泄露系数; A 为裂口面积, m<sup>2</sup>; Y 为流出系数; M 为分子量, 34; R<sub>0</sub> 为气体常数, J·mol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>; T<sub>c</sub> 为气体温度, K; κ 为气体绝热指数。计算出 H<sub>2</sub>S 排放量为 92.1g/s。

#### 1.2.3 苯及甲苯泄露量和蒸发量计算

液相泄露最大可能是近临界水与页岩油的混合物通过法兰接口等处发生地上泄露时形成液池,易挥发成分蒸发进入大气环境。液池蒸发速度为

$$Q = \frac{a \cdot p \cdot M}{R_0 \cdot T_0} \cdot u^{(2+n)(2-n)} \cdot r^{\frac{4+n}{2n}}$$

式中, Q 为蒸发速度, kg/s; a, n 为大气稳定度系数, 取 4.685×10<sup>-5</sup>, 0.3(稳定); p 为液体表面蒸汽压力; M 为分子量; R<sub>0</sub> 为气体常数, 取 8.314J/(mol·K); T<sub>0</sub> 为环境温度, 取 298K(25℃); u 为风速, 取年平均风速 4m/s; r 为液池半径, 30m。

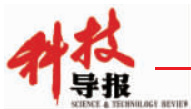
依照公式计算出泄露事故发生后, 苯的挥发源强为: 3.168kg/s, 甲苯的挥发源强的 0.109kg/s。

### 1.3 大气环境风险的后果计算

后果计算主要是通过各种模型计算出事故发生时, 污染物在环境中的迁移情况, 及对周围环境的影响范围和程度。

#### 1.3.1 预测模式

按最大可信事故源项设定, 有毒有害物质在大气中的扩散采用《导则》中多烟团模式, 对设定事故状态下的各污染物在不同风向风速和稳定度下的浓度分布进行预测。



$$C(x,y,0) = \frac{2Q}{(2\pi)^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2}\right] \exp\left[-\frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right] \exp\left[-\frac{z_0^2}{2\sigma_z^2}\right]$$

式中,  $C(x,y,0)$  为下风向地面  $(x,y)$  坐标处的空气污染物浓度,  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $x_0, y_0, z_0$  为烟团中心坐标;  $Q$  为事故期间烟团的排放量;  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  为  $x, y, z$  方向的扩散参数,  $\text{m}$ 。常取  $\sigma_x = \sigma_y$ 。

对于瞬时或短时间事故, 可采用变天条件下多烟团模式。本节的大气风险预测, 采用动态烟团扩散模式预测不利

气象条件下最大可信事故发生时, 在评价区内各风险因子毒性影响时间内的平均最大浓度分布。

### 1.3.2 预测结果及评价

大气稳定度分为强不稳定、不稳定、弱不稳定、中性、较稳定和稳定 6 级。它们分别表示为 A、B、C、D、E、F。当地主要大气稳定度条件为 D 类(风速 2m/s, 6m/s)、E 类(风速 2m/s, 5m/s)及 F 类(风速 2m/s), 因此选取了稳定度和风速出现频率较高的这 5 种情况, 进行计算。各污染物的模拟结果见表 2。

表 2 H<sub>2</sub>S、苯和甲苯泄漏预测结果

Table 2 Predictions of the spill of H<sub>2</sub>S, benzene and toluene

气象条件	D 类		E 类		F 类	
	2m/s	6m/s	2m/s	5m/s	2m/s	
H <sub>2</sub> S	最大落地浓度/( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	991	52.9	$1.05\times 10^3$	62.8	93.2
	最大落地距离/m	32	92	47	126	69
	LC <sub>50</sub> 最远距离/m	64	—	87	—	139
	PC-MAC/m	791	400	1199	655	2078
	IDLH 最远距离/m	84	—	115	—	185
苯	最大落地浓度/( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$1.88\times 10^4$	$1.82\times 10^3$	$1.90\times 10^4$	$2.16\times 10^3$	$1.84\times 10^4$
	最大落地距离/m	46	92	62	126	100
	LC <sub>50</sub> 距离/m	—	—	—	—	—
	PC-STEEL 最远距离/m	>5000	>3500	>5000	>5000	>5000
	IDLH 最远距离/m	103	—	142	—	226
甲苯	最大落地浓度/( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	646	62.6	654	68	634
	最大落地距离/m	46	92	62	100	100
	LC <sub>50</sub> 距离/m	—	—	—	—	—
	PC-STEEL 最远距离/m	224	—	318	—	520
	IDLH 最远距离/m	—	—	—	—	—

通过表 2 的预测结果可知, 输送管道或法兰接口发生破裂泄漏后厂区内 H<sub>2</sub>S 的 PC-MAC 超标。在风速为 2m/s 时, H<sub>2</sub>S、苯及甲苯出现浓度值超过职业接触限值现象; H<sub>2</sub>S、苯在厂区及附近范围 100m 内存在浓度超过 IDLH 限值现象, 甲苯未超标; H<sub>2</sub>S 浓度发生超出 LC<sub>50</sub> 限值现象, 苯和甲苯未超标。短时间发生泄漏事故影响区域主要为厂区内内部。

## 2 事故风险计算及评价

### 2.1 风险计算

根据《导则》, 任一毒物泄漏, 从吸入途径造成的效应包括: 感官刺激或轻度伤害、确定性效应(急性致死)、随机性效应(致癌或非致癌等效致死率)。本论文只考虑急性危害。

根据《导则》, 对危害值的计算可采用简化分析法时, 以各种危害的死亡人数代表危害值, 对泄漏扩散的危害值, 用 LC<sub>50</sub> 浓度求毒性影响。若事故发生后下风向某处, 污染物最大浓度值大于或等于其半致死浓度 LC<sub>50</sub>, 则事故导致评价区内因发生污染物致死确定性效应而致死的人数  $C_i$  为

$$C_i = \sum_{k,j \in \ln} 0.5N(X_{ln}, Y_{jn}) \quad (1)$$

式中,  $N(X_{ln}, Y_{jn})$  表示浓度超过污染物半致死浓度区域中的人数,  $\ln$  表示污染区。由于有些建设项目会有临近的几个厂区, 几个临近生产区域具有同时发生风险事故的可能。所以当几个区域同时发生风险事故时, 需要对各个风险事故区域内的死亡人数进行求和。本文中的建设项目只有一个评价区域  $N(140, 130)$ , 因此有  $C_i = 0.5N(140, 130) = 0.5$  人/次。

最大可信灾害事故对环境所造成的风险  $R$  为

$$R = P \cdot C \quad (2)$$

式中,  $R$  为风险值;  $P$  为最大可信事故概率(事件数/单位时间);  $C$  为最大可信事故造成的危害(损害/事件)。相关行业统计数据表明, 化工装置毒性物质泄露的发生概率为  $1 \times 10^{-5}$ /年<sup>[10]</sup>。所以有  $R = P \cdot C = 0.5 \times 10^{-5}$  人/年。

### 2.2 风险评价

风险可接受分析采用最大可信灾害事故风险值  $R_{\max}$  与同行业可接受风险水平  $R_L$  比较。

类比石油化工业风险统计值, 综合考虑本项目的工艺和设备技术及管理水平等方面, 最终确定本项目可接受的风险值为  $8.33 \times 10^{-5}$  死亡人数/年<sup>[6]</sup>。因为  $R_{\max} \leq R_L$ , 所以该项目的风险水平是可接受的。

### 2.3 风险事故防范与管理

为降低最大可信事故发生的概率,需从设计及管理方面采取有效措施,从而降低事故发生的概率及对周边环境的影响。在厂区设计方面,科学的设计及成熟可靠的工艺是生产安全的首要保证。

(1) 加强抽取井及油水混合物输运管道的各个环节的密闭化,确保工作场所通风排毒。合理处理废弃井。

(2) 确保近临界水的温度及压力不超高生产要求,防止注入地下对底层产生额外过大的压力而产生过多地质裂隙。

(3) 设置火炬,处理事故停产造成的装置及连带上、下游装置无法回收的气体。

(4) 配备有毒气体检测仪及有氧式防毒面具,确保工人掌握正确的使用方法。

在风险防范管理方面,确保建设项目以及与之配套的安全设施符合国家有关安全的规范和标准,制定风险应急预案。设置安全管理办公室;配置专职人员制定安全规范,检测工程的运行状况,对工程重大危险源进行登记建档。

### 3 结论

(1) 本项目在开采过程中会产生  $H_2S$ 、苯和甲苯等有毒有害物质,生产过程潜在事故风险为有毒有害物质泄露,废弃井、管道输送及法兰接口是风险防范的重点区域。

(2) 通过气体泄露预测可知,发生泄漏时存在  $H_2S$  浓度超过  $LC_{50}$  标准的现象,在风速为 2m/s 时  $H_2S$ 、苯在厂区及附近 100m 范围内存在浓度超过 IDLH 限值现象,且 3 种污染物均超过职业接触限值,厂区内不宜有工人继续作业,应尽快疏散,并采取相应应急措施。短时间发生泄漏事故影响区域主要为厂区内,主要影响人群为厂区内工作人员,不会对厂区周围居民产生危害。

(3) 本项目的风险值水平低于同行业标准,因此认为环境风险是可以接受的。

### 4 思考与建议

(1) 环境风险评价是对不良结果进行描述并对发生概率进行计算的系统过程。与安全评价不同,环境风险评价侧重于强调重大可信灾害事故和风险最大可接受水平。

(2) 本文采用了  $LC_{50}$ 、职业接触限值(PC-MAC,PC-STEL)和 IDLH 3 种标准对风险进行了分级别的评价,并预测出事故发生后各种有毒有害物质在 3 种标准下各自的达标距离。但现今关于人体损害及生态危害的研究相对较少,因此风险评价在急性伤害和急性危害方面的准确性还有待提高。

(3) 环境风险评价对项目建设的的主要作用:通过后果计算预测风险事故对周围环境及人身安全的影响和损害值,在环境安全距离、风险防范与管理等方面给出合理化建议。

#### 参考文献 (References)

[1] 孟庆涛. 油页岩资源评价方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.

- Meng Qingtao. Study on oil shale resource evaluation method [D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [2] 陈晨, 张祖培, 王森. 吉林省油页岩的开采新模式 [J]. 中国矿业, 2007, 16(5): 55-57.
- Chen Chen, Zhang Zupei, Wang Miao. China Mining Magazine, 2007, 16(5): 55-57.
- [3] Johnson H R, Crawford P M, Bunger J W. Strategic significance of America's oil shale resource[R]. Washington DC: United States Department of Energy, 2004.
- [4] 孟庆涛, 刘招君, 柳蓉, 等. 松辽盆地农安地区上白垩统油页岩含油率影响因素[J]. 吉林大学学报, 2006, 27(6): 445-451.
- Meng Qingtao, Liu Zhaojun, Liu Rong, et al. Journal of Jilin University, 2006, 27(6): 445-451.
- [5] 国家环保总局. 中华人民共和国环境保护行业标准, 建设项目环境风险评价技术导则(H/T 169-2004)[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.
- State Environmental Protection Administration. Environmental protection industry standard of the People's Republic of China, Technical Guidelines for Environmental Risk Assessment on Projects (H/T 169-2004)[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2004.
- [6] 高英巍, 何佳, 包存宽, 等. 基于区域环境风险敏感性分析的石油化工业规划环境风险评价[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(3): 93-96.
- Gao Yingwei, He Jia, Bao Cunkuan, et al. Environmental Pollution & Control, 2009, 31(3): 93-96.
- [7] 国家环境保护局有毒化学品管理办公室. 化学品毒性、法规、环境数据手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992.
- National Environmental Protection Agency Toxic Chemicals Management Office. Chemical toxicity and laws and regulations environment data manual[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1992.
- [8] 中华人民共和国卫生部. 中华人民共和国国家职业卫生标准, 工作场所所有害因素职业接触限值 (第 1 部分: 化学有害因素) (GBZ 2.1-2007) [S]. 北京: 人民卫生出版社, 2007.
- Ministry of Health of the People Republic of China. National occupational health standards of the People's Republic of China, Occupational exposure limits for hazardous agents in the workplace Chemical hazardous agents (GBZ 2.1-2007) [S]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2007.
- [9] 胡二邦. 环境风险评价实用技术与方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000.
- Hu Erbang. Practical technology and environmental risk assessment methods[M]. Beijing: China Environment Science Press, 2000.
- [10] 阮关心. 区域环境风险评价中最大可信事故的确定 [J]. 能源与环境, 2012(3): 88-92.
- Ruan Guanxin. Resource and Environment, 2012(3): 88-92.

(责任编辑 侯澄芝)

#### 《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映中国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域中国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过 300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。