

盐岩地下储库气体泄漏量的计算方法

杨石刚, 方 秦, 张亚栋, 马林建

(解放军理工大学 工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 为分析评估盐岩储气库泄漏事故灾害, 借鉴现有输气管道气体泄漏率计算模型和压力容器泄压模型, 提出一种适合于盐岩储库气体泄漏量的计算方法, 与典型试验对比验证所提出计算方法的有效性; 并以金坛盐岩地下储库为例, 分析得到泄漏孔径、运营压力、井管长度对气体泄漏率的如下影响规律: 气体泄漏率随着注采井套管破裂孔径的增大而逐渐增大, 随着盐岩储气库运营压力的增大而线性增加, 并随着井管管长的增大而逐渐减小。另外, 应用所提出的模型对盐岩储库的气体泄漏速率和泄漏质量随时间的变化进行评估。

关键词: 岩石力学; 盐岩储气库; 气体泄漏; 泄压模型; 计算方法

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2012)增 2 - 3710 - 06

CALCULATION METHOD FOR GAS LEAKAGE MASS FROM UNDERGROUND GAS STORAGE CAVERNS IN SALT ROCK

YANG Shigang, FANG Qin, ZHANG Yadong, MA Linjian

(*Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China*)

Abstract: To analyze and evaluate the hazard of the leakage accident from underground gas storage caverns in salt rock, a prediction method for the gas leakage mass is firstly established on base of the existing models for calculating gas release rate of gas transmission pipelines and pressure drop of vessels. The analytical results were then validated by comparison with the existing test data. Furthermore, the factors influencing on the gas leakage rate of the underground gas storage cavern in salt rock were discussed. The results indicate that the release rate decreases with increase of the length, and increases with increases of the operating pressure as well as the pipeline diameter. Finally, the gas leakage rate and mass varying with time were evaluated by the proposed method.

Key words: rock mechanics; gas storage cavern in salt rock; gas leakage; pressure drop model; calculation method

1 引 言

盐岩地下储库作为国内外首选的能源储存方式^[1], 其在油气泄漏、溶腔失效、地表沉陷等灾难性事故中的安全防护问题向来备受关注。据统计, 国外有 60% 的盐岩储库事故是由储库密闭性失效引起的^[2], 不仅造成油气的大量损失, 还常常引起地

面的大火和爆炸, 对人民生命财产安全造成严重威胁, 如 2001 年 1 月 17 日, 美国堪萨斯州哈钦森市 Yaggy 储气库因腔体密封性失效, 导致气体泄漏, 多次引发火灾事故, 致多人死亡^[3]。2004 年 8 月 18 日, 美国得克萨斯州 Moss Bluff 储气库因密封系统失效造成天然气喷出, 大火持续 4 d, 周围 120 m 的范围都起火燃烧, 事故致使价值 3 600 万美元的天然气损失, 360 人紧急疏散。

收稿日期: 2012 - 04 - 27; **修回日期:** 2012 - 05 - 28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2009CB724608); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目(51021001)

作者简介: 杨石刚(1985 -), 男, 2008 年毕业于解放军理工大学国防工程与防护专业, 现为博士研究生, 主要从事工程防灾减灾方面的研究工作。
E-mail: youngshg@126.com

盐岩储气库泄漏的途径很多, 包括: (1) 通过阀门失效泄漏; (2) 通过注采井套管破裂口泄漏; (3) 通过地面管路、压气站破坏泄漏; (4) 通过套管接箍处泄漏; (5) 通过注采井生产套管腐蚀穿孔处泄漏; (6) 通过盖层水泥胶结不良处泄漏; (7) 通过套管鞋处泄漏; (8) 通过地下安全阀失效泄漏; (9) 通过盐岩层或夹层裂隙泄漏等^[4]。

从盐岩地下储库泄漏的气体可以分为 2 类: 泄漏到地面和泄漏到地下。从途径(1)~(3)泄漏的气体将在大气中扩散或聚集, 如果遇到点火源会起火爆炸造成储库井口设施及管井等关键部位失效, 进而导致灾难性井喷事故, 此时可根据气体的泄漏率和井喷的时间估算天然气损耗量。

从途径(4)~(9)泄漏的气体最可能的情形是储库中的气体沿着夹层逃逸, 造成气体损失, 这部分漏失的天然气大部分将长久被封存在泥岩夹层的裂隙和含水层中。事故统计分析表明: 盐岩地下储气库渗漏后沿断层迁移上升至地表进一步发生燃烧、爆炸的可能性极小^[4]。由于这部分泄漏气具有较强的隐蔽性, 而且渗漏是一个长期的过程(数月数年), 难以确定具体的气体泄漏量。

综上所述, 并不是所有的泄漏情形都会造成人员或财产的损失, 通过地下通道泄漏的气体, 大多都被长久封存在泥岩夹层的裂隙和含水层中, 而且这个过程的演化时间一般都较长(以月计)^[5], 泄漏量及影响范围分析机制是明显不同的。因此, 最有可能产生安全事故的泄漏主要是盐岩地下储气库因突发事件通过注采井套管泄漏到大气中的情形(见图 1)。本文考虑的泄漏主要是此种情形, 对通过地层渗透通道或者储气库管柱泄漏到地下的情形不予考虑。

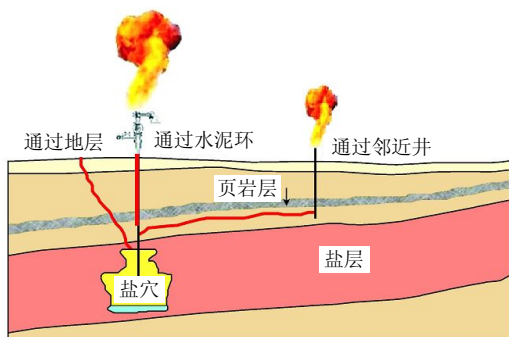


图 1 盐岩地下储气库泄漏示意图

Fig.1 Sketch of the gas leakage from an underground storage cavern in salt rock

盐岩储气库气体泄漏的危害严重程度主要取决

于泄漏量、泄漏扩散模式、引燃时间和管道周围的环境, 其中准确地确定事故情况下的气体泄漏量是进行事故分析和灾害风险评估的基础^[6]。当前我国虽然已经开始大规模地建设盐岩地下储库群, 但对于储库安全防护及管理的研究尚处于初步探索阶段^[7], 还没有见到有关盐岩储气库泄漏问题的研究报道。

为快速、准确地预测盐岩储气库在注采井套管泄漏情况下的风险后果并开展相应防护技术研究, 本文借鉴现有输气管道气体泄漏率计算模型和压力容器泄压模型, 提出了一种适合于盐岩储库气体泄漏量的计算方法, 并通过与试验的对比分析验证了方法的适用性, 最后结合工程算例讨论了各因素对盐岩储气库泄漏的影响规律。

2 盐岩储气库泄漏率的计算方法

2.1 基本假设

- (1) 天然气在井管中瞬时流动为一维定常流动, 气体所有特征参数沿井管截面均匀分布;
- (2) 管壁是绝热的, 即流动过程中气体不对外界做功, 外界也不对气体做功;
- (3) 忽略气体重力作用;
- (4) 忽略井喷过程中盐岩储库溶腔的体积变形。

2.2 物理模型

盐岩地下储气库天然气注、采井套管破裂泄漏的分析模型如图 2 所示。储气库的储存压力为 P_0 , 天然气从地面上的破裂孔口泄漏, 泄漏孔的直径为 d 。设破裂口到溶腔顶部的距离为 L , 用下标 0 表示盐岩溶腔内的参数, 下标 1, 2, 3 和 a 分别表示井管底部、管道破裂处管道内、泄漏口和大气环境参数。边界条件为 $P|_{x=L} = P_a$ (管道出口外), 其中, P_a 为标准大气压, L 为井管管长。

2.3 数学模型

2.3.1 稳态(音速)流

对于具有定常比热容的气体, 通过孔洞的质量流率能用滞止压力和温度表示^[8-9]为

$$Q_h = A_h C_d M_3 P_3 \sqrt{\frac{\gamma M_w}{ZRT_3}} = A_h C_d M_3 P_{2t} \sqrt{\frac{\gamma M_w}{ZRT_{2t}} \left[\frac{2}{(\gamma - 1)M_3^2 + 2} \right]^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} \quad (1)$$

其中,

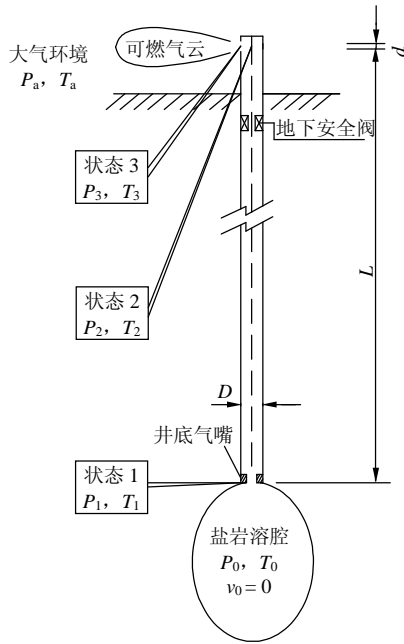


图 2 盐岩地下储库气体泄漏分析模型

Fig.2 Analytical model of the gas leakage from an underground storage cavern in salt rock

$$T_3 = T_{2t} \left[\frac{2}{(\gamma - 1)M_3^2 + 2} \right] \quad (2)$$

$$P_3 = P_{2t} \left[\frac{2}{(\gamma - 1)M_3^2 + 2} \right]^{\gamma/(\gamma - 1)} \quad (3)$$

式中： Q_h 为气体通过破裂口的质量泄漏速率(kg/s)； A_h 为泄漏孔面积(m²)； C_d 为气体泄漏系数； M 为马赫数； P_2, T_2 分别为破裂口处管道内气体压力和温度(Pa, K)； P_3, T_3 分别为破裂口处气体的压力和温度(Pa, K)； γ 为气体的等熵指数； M_w 为气体的分子量(kg/mol)； R 为通用气体常数(m²/s²·K)； Z 为压缩系数；下标 t 表示滞止特性。

图 2 中状态 1 的马赫数用下式^[10]求解：

$$\frac{\gamma + 1}{2\gamma} \ln \left(\frac{M_2^2 Y_1}{M_1^2 Y_2} \right) + Z \frac{\left(\frac{A_p}{A_h} \right)^2}{\gamma \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}} \left(1 - \frac{M_2^2}{M_1^2} \right) + \frac{4fL}{D} = 0 \quad (4)$$

其中，

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{2 + (\gamma - 1)M_1^2}{2 + (\gamma - 1)M_2^2} \quad (5)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{M_1}{M_2} \sqrt{\frac{2 + (\gamma - 1)M_1^2}{2 + (\gamma - 1)M_2^2}} \quad (6)$$

$$Y_j = 1 + \left(\frac{\gamma - 1}{2} \right) M_j^2 \quad (j = 1, 2) \quad (7)$$

式中： f 为管道摩擦因数； D 为管道内径(m)； P_1, T_1 分别为井管底部气体的压力(Pa)和温度(K)。

根据图 2 中状态 2 和 3 的质量守恒，状态 2 的马赫数可由下式^[11]求解：

$$\alpha = \frac{M_2 P_2}{M_3 P_3} \sqrt{\frac{T_3}{T_2}} = \frac{M_2}{M_3} \left[\frac{(\gamma - 1)M_3^2 + 2}{(\gamma - 1)M_2^2 + 2} \right]^{(\gamma + 1)/(2\gamma - 2)} \quad (8)$$

式中： α 为量纲化的孔尺寸，等于有效孔面积($A_h C_d$)除以管道的横截面面积(A_p)，即 $\alpha = A_h C_d / A_p$ 。

假设泄漏孔被气体塞满，即 $M_3 = 1$ ，状态 2 的马赫数可简化为下式求解：

$$\alpha = M_2 \left[\frac{\gamma + 1}{(\gamma - 1)M_2^2 + 2} \right]^{(\gamma + 1)/(2\gamma - 2)} \quad (9)$$

通过式(4)，(8)可从 M_3 倒推得 M_2, M_1 ，从而求解得到通过泄漏孔的质量流率。

井管底部的参数由下列各式确定：

$$T_1 = T_0 \left[\frac{2}{(\gamma - 1)M_1^2 + 2} \right] \quad (10)$$

$$P_1 = P_0 \left[\frac{2}{(\gamma - 1)M_1^2 + 2} \right]^{\gamma/(\gamma - 1)} \quad (11)$$

2.3.2 非稳态(亚音速)流

溶腔内的压力变化速率可由状态方程计算，假设天然气温度保持常数(等温假设)，则存在^[12]：

$$\frac{dP}{dt} = \frac{RT_1}{M_w V} \left(-\frac{dn}{dt} \right) \quad (12)$$

式中： V 为溶腔的体积(m³)， n 为从溶腔顶部套管流出的气体的量(mol)。且有

$$n = \frac{m}{M_w} \quad (13)$$

故

$$\frac{dP}{dt} = \frac{RT_1}{M_w^2 V} \left(-\frac{dm}{dt} \right) \quad (14)$$

通过喷嘴的质量流率能用下式^[9]计算：

$$Q_n = \frac{dm}{dt} = A_p \rho_1 M_1 \sqrt{\frac{\gamma Z R T_1}{M_w}} = A_p M_1 \sqrt{\gamma P_1} \quad (15)$$

式中： A_p 为管道面积(m²)， Q_n 为离开储库的质量流率， ρ_1 为井管底部气体的密度(kg/m³)。

储库溶腔内初始状态参数为正常运营腔内状态参数；考虑到压降之前储气库处于缓慢的注采运营状态，可近似取溶腔内状态参数为井底管道内气体

初始状态参数，即 $P_0 = P_1$ 。

将式(15)代入式(14)，可得到溶腔内的压力变化速率的表达式：

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{RT_1}{M_w^2 V} A_p M_1 \sqrt{\gamma \rho_1 P_1} \quad (16)$$

结合理想气体法则 $P = Z\rho RT/M_w$ ，可得

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP}{dt} &= -\frac{\sqrt{\gamma ZRT_1}}{(M_w)^{3/2}} \frac{A_p}{V} M_1 P_1 \\ \frac{dP}{P} &= -\frac{\sqrt{\gamma ZRT_1}}{(M_w)^{3/2}} \frac{A_p}{V} M_1 dt \\ \ln \frac{P}{P_0} &= -\frac{\sqrt{\gamma ZRT_0}}{(M_w)^{3/2}} \frac{A_p}{V} M_1 t \\ P &= P_0 e^{-\frac{\sqrt{\gamma ZRT_0}}{(M_w)^{3/2}} \frac{A_p}{V} M_1 t} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

将式(17)代入式(1)，可得到气体通过套管井口孔洞的质量流率随时间变化的表达式。

2.4 计算方法的试验验证

加拿大 Trans Canada Pipelines Limited(TCPL)、美国 SRI International(SRI)和英国 BG plc(British Gas)合作开展了一系列全尺寸管道破裂试验，以研究天然气管道的失效风险并为数学模型的发展和验证提供依据，其中一个试验^[13]采用了 TCPL 公司一条实际使用的长 76.74 km、直径 914 mm 的高压天然气管道，管道运营压力为 6 MPa 试验时，在一段长 1 200 m、直径 914 mm 的试验管道上安装了炸药以切开一条 12 m 长的口子，同时设计了一个点火系统，使管线破裂后产生持续的火焰(见图 3^[13])。

试验结果表明：在破裂最开始的 60 s，泄漏的天然总质量约为 240 000 kg，但是管道破裂后的 270 s(达到稳态泄漏阶段)，气体泄漏率约为 1 800 kg/s。

根据本文计算方法，计算出试验条件下的稳态气体泄漏率 $Q = 1\,980\text{ kg/s}$ 。可以看出，采用本文的方法计算能够比较准确地计算管道破损引起的气体泄漏，误差为 9.1%。

3 盐岩储库气体泄漏量的主要影响因素分析

金坛盐岩地下储气库^[14]，最高运营压力 $P_0=17\text{ MPa}$ ，天然气初始温度 T_0 取地层温度 323 K(50 °C)，井管管长 $L = 1\,200\text{ m}$ ，直径 $D = 216\text{ mm}$ ，管道粗糙度 $\varepsilon = 46\text{ }\mu\text{m}$ ，溶腔体积 $V = 2.5 \times 10^5\text{ m}^3$ 。天然气相对分子质量 $M_w = 17.1\text{ kg/mol}$ ，动力黏度 $\mu = 1.01 \times 10^{-5}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ ，天然气绝热指数 $\gamma = 1.3$ ，通用气体常数 $R = 8\,315\text{ m}^2/(\text{s}^2\cdot\text{K})$ ，天然气密度 $\rho = 0.68\text{ kg/m}^3$ ，大气环境温度 $T_a = 293\text{ K}$ ，大气压力 $P_a = 1.013 \times 10^5\text{ Pa}$ ，大气密度 $\rho_a = 1.22\text{ kg/m}^3$ 。

假设套管因某种原因而出现了泄漏，并且气体泄漏率始终小于管道允许最大泄漏率。在管道完全贯穿的情形，假定泄漏系数等于单位 1，即 $C_d = 1$ ；其他情况， $C_d = 0.61$ 。根据式(1)，(4)，(8)和(17)，对影响盐岩储气库泄漏率的几个主要因素进行了分析和讨论。

3.1 泄漏孔径对泄漏的影响

参照某盐岩储气库^[14]，本文计算中选取储气库注采套管直径为 216 mm，考虑从小孔破裂到全井眼贯穿的各种工况的气体泄漏，计算结果见图 4，5。

由图 4 可知，气体泄漏率随着盐岩储气库注采井套管破裂孔径的增大而逐渐增大，当 $P_0=17\text{ MPa}$ ， $L = 1\,200\text{ m}$ ， $d = 0.216\text{ m}$ 时， $Q = 106.67\text{ kg/s}$ 。而且所提出方法对各种不同井管管长(250~2 000 m)的盐岩储气库的计算都是适用的。

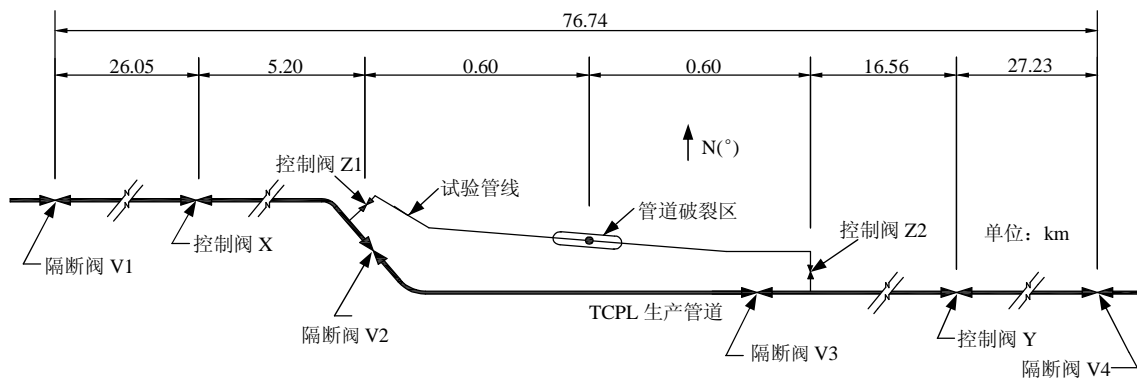


图 3 试验管线和控制阀分布示意图^[13]

Fig.3 Sketch of pipeline arrangement, showing valve locations^[13]

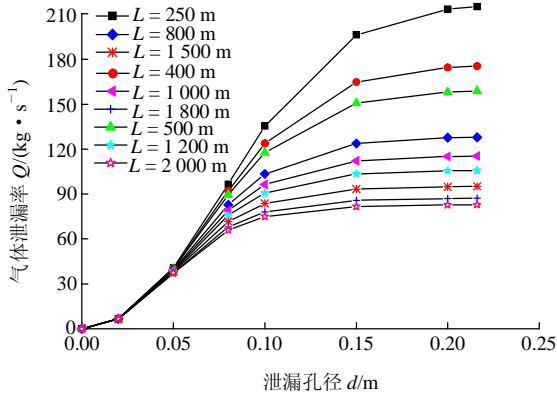


图4 气体稳态泄漏率与泄漏孔径的关系($P_0 = 17 \text{ MPa}$)

Fig.4 Relationship between gas leakage rate at steady state and hole diameter($P_0 = 17 \text{ MPa}$)

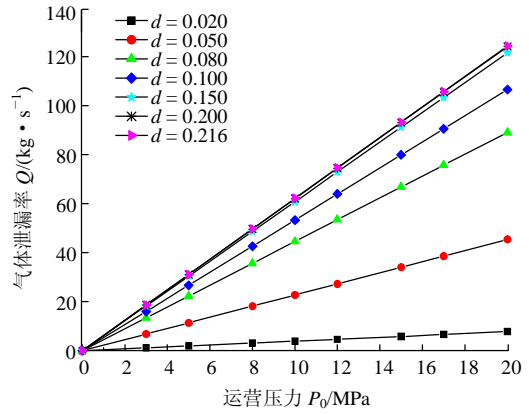


图6 气体稳态泄漏率与运营压力的关系($L = 1200 \text{ m}$)

Fig.6 Relationship between gas leakage rate at steady state and operating pressure($L = 1200 \text{ m}$)

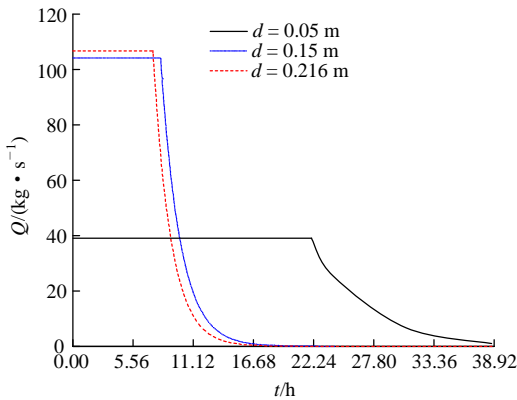


图5 不同泄漏孔径的气体泄漏率时程曲线($P_0 = 17 \text{ MPa}$, $L = 1200 \text{ m}$, $D = 0.216 \text{ m}$)

Fig.5 Leakage rate-time histories at different hole diameters ($P_0 = 17 \text{ MPa}$, $L = 1200 \text{ m}$, $D = 0.216 \text{ m}$)

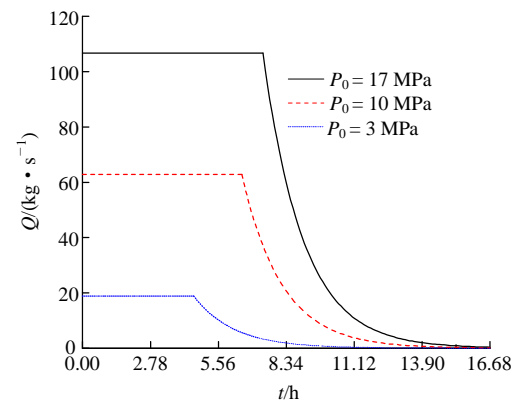


图7 不同压力下气体泄漏率时程曲线($L = 1200 \text{ m}$, $d = D = 0.216 \text{ m}$)

Fig.7 Leakage rate-time histories at different pressures ($L = 1200 \text{ m}$, $d = D = 0.216 \text{ m}$)

由图5可以发现,当井管外界压强小于临界压强时,出口截面气体流量保持最大流量;当溶腔压强小于临界压强时,出口截面气体流量随 P 的减小按指数型衰减至0。由于实际井喷工况中,溶腔压力总是大于外界大气压力的,故对于溶腔内天然气气压小于外界气压的情形,本文不作考虑。

3.2 运营压力对泄漏的影响

选取储气库运营压力在3~20 MPa之间变化的情况进行研究,计算结果见图6,7。

从图6可知,气体泄漏率随着盐岩储气库运营压力的增大而线性增加,当 $P_0 = 20 \text{ MPa}$, $L = 1200 \text{ m}$, $d = 0.216 \text{ m}$ 时, $Q = 124.34 \text{ kg/s}$ 。

由图7可以发现,对于不同溶腔压力,质量泄漏率随泄压时间的变化规律与破裂口直径一致。

3.3 井管长度对泄漏的影响

考虑的注采井管长度为250~2000 m的情况进行研究,气体泄漏率与井管长度的关系见图8,9。

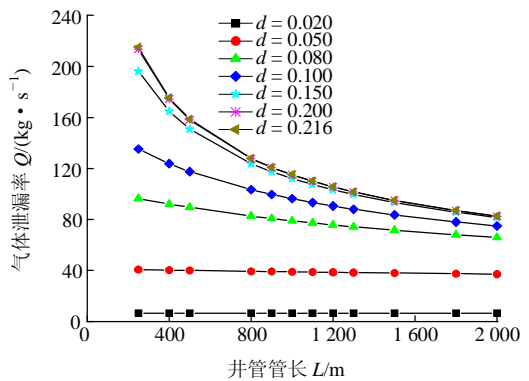


图8 气体稳态泄漏率与井管管长的关系($P_0 = 17 \text{ MPa}$)

Fig.8 Relationship between gas leakage rate at steady state and pipeline length($P_0 = 17 \text{ MPa}$)

从图8可知,气体泄漏率随着盐岩储气库井管管长的增大而逐渐减小,而且随着泄漏孔径的增加,泄漏率的减小幅度加剧。当孔径较小($\leq 0.05 \text{ m}$)时,气体泄漏率随管长增加基本保持不变;当孔径接近管径时,泄漏率随管长增加而急剧减小。

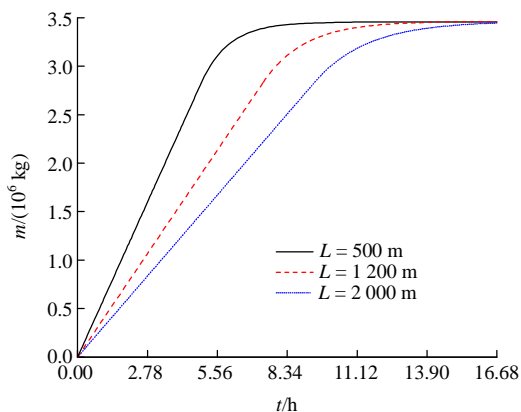


图 9 不同井管长的气体泄漏质量时程曲线($P_0 = 17 \text{ MPa}$, $d = D = 0.216 \text{ m}$)

Fig.9 Leakage mass-time histories at different pipeline lengths($P_0 = 17 \text{ MPa}$, $d = D = 0.216 \text{ m}$)

由图 9 可以发现, 当溶腔体积不变时, 在相同的泄漏条件下, 当溶腔压力下降到与外界大气压相当时, 不同井管长度的盐岩储库, 其气体泄漏总质量吻合较好, 说明本文方法具有较好的适用性。

4 结 论

本文借鉴已有的输气管道气体泄漏模型和压力容器泄压模型, 提出了一种适用于盐岩储库气体泄漏量的计算方法, 采用该方法对注采井套管失效情况的盐岩储气库泄漏问题进行了研究, 主要结论如下:

(1) 气体质量泄漏率是管道长度、直径、管壁摩擦系数、储库容积以及腔内气体初始状态参数的函数;

(2) 本文提出的气体泄漏率分析方法的计算结果与典型试验数据吻合较好, 误差为 9.1%;

(3) 具体算例表明, 气体泄漏率随着注采井套管破裂孔径的增大而逐渐增大, 随着盐岩储气库运营压力的增大而线性增加, 随着井管管长的增大而逐渐减小;

(4) 盐岩储库压力下降都服从指数型衰减或对数压力随时间线性降低规律;

(5) 当溶腔体积不变时, 在相同的泄漏条件下, 当溶腔压力下降到与外界大气压相当时, 不同井管长度和破裂孔径的气体泄漏总质量吻合较好, 本文方法具有较好的适用性。

参考文献(References):

[1] 杨春和, 梁卫国, 魏东吼, 等. 中国盐岩能源地下储存可行性研

究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4 409 - 4 417.(YANG Chunhe, LIANG Weigu, WEI Donghou, et al. Investigation on possibility of energy storage in salt rock in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(24): 4 409 - 4 417.(in Chinese))

[2] 谢丽华, 李鹤林, 赵新伟, 等. 盐穴地下储气库事故统计及风险分析[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(9): 125 - 131.(XIE Lihua, LI Helin, ZHAO Xinwei, et al. Statistics and risk analysis of underground gas storage accidents in salt caverns[J]. China Safety Science Journal, 2009, 19(9): 125 - 131.(in Chinese))

[3] BÉREST P, BROUARD B. Safety of salt caverns used for underground storage[J]. Oil and Gas Science and Technology, 2003, 58(3): 361 - 384.

[4] 谭羽非, 李玉星, 唐剑锋. 天然气地下储气库技术及数值模拟[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007: 129 - 131.(TAN Yufei, LI Yuxing, TANG Jianfeng. Technology of underground gas storage for natural gas and numerical modeling[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007: 129 - 131.(in Chinese))

[5] 谭羽非. 基于数值模拟方法计算天然气地下储气库的渗漏量[J]. 天然气工业, 2003, 23(2): 99 - 102.(TAN Yufei. Calculation leakage of underground gas storage by numerical modeling[J]. Natural Gas Industry, 2003, 23(2): 99 - 102.(in Chinese))

[6] Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers. Guidelines for vapor cloud explosions, pressure vessel burst, BLEVE and flash fire hazards[M]. 2nd ed. New York: Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 2010: 51 - 53.

[7] 杨石刚, 方 秦, 张亚栋. 盐岩地下储气库泄漏事故后果评价模型研究进展[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(8): 108 - 115.(YANG Shigang, FANG Qin, ZHANG Yadong. The research development on consequence assessment model due to leakage accident of underground gas storage caverns in salt rock[J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(8): 108 - 115.(in Chinese))

[8] CROWL D A, LOUVAR J F. Chemical process safety: Fundamentals with applications[M]. 2nd ed. NJ: Prentice Hall, 2002: 82 - 86.

[9] JO Y D, AHN B J. A simple model for the release rate of hazardous gas from a hole on high-pressure pipelines[J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, 97(1/3): 31 - 46.

[10] MONTIEL H, VYLCHEZ J A, CASAL J, et al. Mathematical modeling of accidental gas releases[J]. Journal of Hazardous Materials, 1998, 59(2/3), 211 - 233.

[11] LUO J H, ZHENG M, ZHAO X W, et al. Simplified expression for estimating release rate of hazardous gas from a hole on high-pressure pipelines[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2006, 19(4): 362 - 366.

[12] 赵衡阳. 气体和粉尘爆炸原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996: 192 - 195.(ZHAO Hengyang. Theory of gas and dust explosions[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996: 192 - 195.(in Chinese))

[13] ACTON M R, HANKINSON G, ASHORTH B P, et al. A full scale experimental study of fires following the rupture of natural gas transmission pipelines[C]// Proceedings of the International Pipeline Conference(ASME), [S.l.]: [s.n.], 2000: 47 - 52.

[14] 马林建, 刘新宇, 方 秦, 等. 压力失控条件下盐岩储气库腔内降压规律解析[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2011, 43(4): 27 - 31.(MA Linjian, LIU Xinyu, FANG Qin, et al. Pressure drop analysis of rock salt storage cavern under condition of operation pressure runaway[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science, 2011, 43(4): 27 - 31.(in Chinese))