

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2869

# 多夹层盐矿地下储气库气体渗漏评价方法

陈祥胜<sup>1,2</sup>, 李银平<sup>1,2</sup>, 尹洪武<sup>1,2</sup>, 葛鑫博<sup>1,2</sup>, 施锡林<sup>1,2</sup>, 杨春和<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 我国盐穴地下储气库一般建设于富含泥质夹层的湖相沉积盐岩中, 由于泥质夹层的孔隙率和渗透率均大于盐岩, 因此其渗透性能对储气库的密闭性起控制作用。夹层的沉积特性一般沿水平展布, 据此建立多夹层盐穴储气库渗漏分析理论模型。依据某储气库泥岩夹层的孔渗测试数据, 并结合实际运行参数进行天然气渗漏计算。再利用以上研究成果分析气体渗漏范围和泄漏量的影响因素及变化规律, 并对储气库选址及设计中的几个关键参数展开适用性评价, 如储库离盐矿边界及断层的安全距离、相邻储气库安全矿柱宽度等。研究表明: 泥质夹层孔隙压力的变化趋势表现为沿径向先急剧降低, 而后趋于稳定; 某时刻气体渗流范围和泄漏量由夹层渗透参数、渗透介质以及初始孔隙压力共同决定; 渗流的影响范围随着时间的增加而逐渐增大, 最终也趋于稳定。研究结果可为多夹层盐穴储气库选址、设计及密封性评价提供理论和技术支撑。

**关 键 词:** 层状盐穴储气库; 密闭性分析; 泥质夹层; 泄漏量分析; 气体渗流; 渗透临界范围

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2018)01-0011-10

## Gas leakage assessment method of underground gas storage in multi-interlayer salt mine

CHEN Xiang-sheng<sup>1,2</sup>, LI Yin-ping<sup>1,2</sup>, YIN Hong-wu<sup>1,2</sup>, GE Xin-bo<sup>1,2</sup>, SHI Xi-lin<sup>1,2</sup>, YANG Chun-he<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academic and Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In China, the gas storage in underground salt cavern is normally built in the lacustrine sedimentary salt rock, which is rich in muddy interlayers. Since the permeability and porosity of muddy interlayers are higher than those of salt rock, the sealing of the gas storage is determined by the permeability of muddy interlayers. In this study, a new theoretical model is established for the seepage analysis of bedded salt cavern gas storage. This model is based on the sedimentary characteristics of mudstone interlayer, which is horizontally distributed. Natural gas leakage is also calculated by using the porosity-permeability testing data and the actual operation parameters of the mudstone in a gas reservoir. According to the above results, this study analyzes the influencing factors and change regularities of gas leakage and seepage range. Furthermore, an applicability evaluation is given by considering several key parameters in siting and designing the gas storage reservoir, such as safe distance from salt cavern to salt mine boundary or faults, safe salt pillar width of adjacent storage and some others design indexes of rock salt gas storage. The analytical results show that pore pressure in the muddy interlayer firstly decreases sharply along the radial direction, and then tends to be stable. Gas seepage range and leakage at a certain time are determined by the permeability parameters of the interlayer, permeability media and the initial pore pressure together. The influencing range of seepage gradually increases with time elapsing, and eventually becomes stable as well. Hence, this study can provide theoretical and technical support for the location, design and sealing evaluation of multi-interlayers salt cavern gas storage.

**Keywords:** rock salt gas storage; sealing analysis; muddy interlayer; leakage analysis; gas seepage; seepage critical range

## 1 引 言

盐岩因其具有极低的渗透性、良好的蠕变行为、

损伤自恢复和塑性变形能力大等优良特性, 被认为是石油、天然气地下储备和存放高放射性废物的理想场所<sup>[1-3]</sup>。目前, 世界上大部分的盐穴地下储气库

收稿日期: 2016-12-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41472285, No. 51404241)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41472285, 51404241).

第一作者简介: 陈祥胜, 男, 1994 年生, 博士研究生, 主要从事地下工程渗流及水力耦合方面的研究。E-mail: chenxs15@163.com

通讯作者: 李银平, 男, 1969 年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事能源地下储备岩石力学与工程方面的研究工作。E-mail: ypli@whrsm.ac.cn

主要集中在欧洲和北美等发达国家,它对能源储备和城市供能起着至关重要的作用。我国盐岩绝大部分以层状盐岩为主,属于湖相沉积相较于国外的巨厚的且 NaCl 含量很高的海相沉积盐丘,具有非盐夹层数量多、杂质含量高等特点。我国的盐穴地下储气库主要建设于这种复杂层状盐岩地层中,其密封性受到了广泛关注,选址、设计和施工要尽量规避泄漏的风险;在长期运营过程中更要评估和监测天然气的泄漏范围和泄漏量,这对储气库密闭性评价和安全性评估具有极其重要的意义。

目前,国内外学者针对储气库的密闭性问题和渗流等方面做出了诸多研究。Hussainy 等<sup>[4]</sup>研究了真实气体在多孔介质中的渗流问题,并对气体在多孔介质的孔压分布做了大量理论和试验研究;Wu 等<sup>[5]</sup>分析了气体在不同渗流情况下考虑 Klinkenberg 效应在多孔介质中的渗流;Stormont<sup>[6]</sup>认为对盐穴储气库的开挖扰动是影响储气库密闭性的重要因素;Zhang 等<sup>[7]</sup>对层状盐岩油气储气库的稳定性和密闭性的评价做了大量研究,并针对夹层与盐岩形成的不同夹角对层状盐岩的强度的影响也进行了探讨;Huang 等<sup>[8]</sup>建立了气体渗透率的演化方程,模拟出气体渗透范围;Yin 等<sup>[9]</sup>将人工合成的盐岩与天然盐岩渗透特性进行对比,发现两者之间差异性较小;Li 等<sup>[10-11]</sup>针对盐穴造腔的形态扩展、夹层垮塌和不规则盐腔的修复做出了一定的研究;陈卫忠等<sup>[12]</sup>建立了等效边界气体渗流模型,用数值方法仿真了不同注采压力条件下围岩气体压力分布;刘伟等<sup>[13]</sup>针对盐岩地下储库围岩界面变形与破损特性进行分析,得出因盐岩与夹层之间的变形不协调,导致盐穴洞室附近小范围内可能发生局部剪切滑移;冯国庆等<sup>[14]</sup>建立了在低渗透气藏中气体的不稳定渗流模型,并进行理论求解;李宁等<sup>[15]</sup>研究了气体在低流速情况时的渗流情况;Li 等<sup>[16]</sup>将气体一维渗流控制方程应用在多孔介质分析中;纪文栋<sup>[17]</sup>研究了夹层层状分布对渗透的影响;刘伟等<sup>[18]</sup>提出夹层的渗透率是深部层状盐岩中能源储库密闭性评价的关键参数。

盐穴储气库中的气体渗透临界范围与渗流过程中的孔隙压力梯度直接相关,由于渗流过程需要消耗势能,所以当势能不再能驱动流动时即可认为渗流达到其临界范围。鉴于储气库中泥质夹层的渗透特性对储气库密闭性起控制作用,因此本文以泥质夹层为研究对象,加上其沉积特性一般沿水平展布,假设其为横观各向同性介质,并且渗流发生在水平层面上,以此建立多夹层盐穴储气库渗流分析模型。

结合考虑 Klinkenberg 效应的 Darcy 定律,利用 Boltzmann 变换法求解气体渗流过程中的偏微分方程,得出了盐穴储气库中气体在泥质夹层中的孔隙压力分布解析解,进而利用该解析解计算了某在役储气库在同步循环注采压力作用下 1~30 a 时间里的围岩孔隙压力分布、气体渗流范围和泄漏量占库容百分比。在此基础上,进一步探讨了渗透临界范围和泄漏量与时间、夹层渗透系数、渗透介质和孔隙压力的关系。研究结果能为盐穴储气库选址、设计及密封性评价提供理论和技术支撑。

## 2 多夹层盐穴储气库渗流分析模型

由于泥质夹层与盐岩独有的地质特性,本文中的气体渗流过程分别考虑天然气一维渗流和二维轴对称渗流。根据实际情况提出了各自的边界条件,最终将其应用于渗流理论分析模型。

### 2.1 渗流分析模型

如图 1 所示,层状盐穴储气库主要包括盐岩、泥质夹层、盖层和底板,其中主体盐岩因其极低的渗透率和孔隙率,一般认为不可渗透(渗透率一般小于  $10^{-20} \text{ m}^2$ ),而泥质夹层的渗透率相较于盐岩一般高出 2~3 个数量级。因此,泥质夹层成为储气库气体渗漏的主要通道和场所,并对储气库密闭性起控制作用。由于泥质夹层夹杂在盐岩之间,其层间渗流可以忽略不计,可认为渗流主要集中在水平层面上。根据该渗流分析理念,笔者提出了多夹层盐穴储气库渗流分析模型。

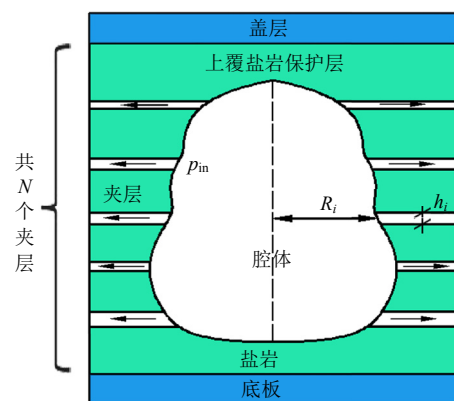


图 1 多夹层盐穴储气库渗流分析模型  
Fig.1 Seepage analysis model of bedded salt cavern gas storage

图 1 中的多夹层盐穴储气库渗流分析模型共包括  $N$  个泥质夹层;  $p_m$  为腔内运行压力;  $R_i$  为第  $i$  个夹层处盐腔的半径;  $h_i$  为第  $i$  个夹层的厚度。

### 2.2 气体 Klinkenberg 效应

气体在多孔介质中的渗流不同于液体，主要表现在气体的高压缩性和 Klinkenberg 效应。试验研究表明<sup>[19-20]</sup>：岩石渗透率越低，滑脱效应越明显；压力越低，滑脱效应也越明显。泥质夹层属于渗透率较低的多孔介质，此时的 Klinkenberg 效应不可忽略。基于此分析，将 Klinkenberg 效应考虑到夹层中的气体渗流，研究结果会更符合实际情况。

Klinkenberg<sup>[21]</sup>基于理想多孔介质的气体渗流导出如下关系方程：

$$k_g = k_\infty \left( 1 + \frac{4c\bar{v}}{r_0} \right) \quad (1)$$

式中： $k_g$  为气体渗透率； $k_\infty$  为绝对渗透率； $\bar{v}$  为分子平均自由程； $r_0$  为孔隙喉道半径； $c$  为修正系数。

由于分子平均自由程与压力成反比，可以写为

$$\frac{4c\bar{v}}{r_0} = \frac{b}{\bar{p}} \quad (2)$$

式中： $b$  为 Klinkenberg 系数，它取决于介质孔隙结构、温度和平均气压； $\bar{p}$  为气体平均压力。

最终气体渗透率表示为

$$k_g = k_\infty \left( 1 + \frac{b}{\bar{p}} \right) \quad (3)$$

由上述方程可知，Klinkenberg 系数  $b$  是平均气压  $\bar{p}$  的函数，可以由试验得出，因此只要已知渗流过程中  $\bar{p}$ ，就可以用  $\eta$  表示气体渗透率的 Klinkenberg 影响系数：

$$k_g = \eta k_\infty \quad (4)$$

### 2.3 渗流边界条件

如图 2 所示，盐穴储气库运行一般分为 4 个阶段：恒定低压阶段、注气加压阶段、恒定高压和采气降压阶段。储气库一般为循环注采，且从安全角度考虑相邻储气库一般采用相同压力同步注采。设储气库运行压力设计范围为  $p_{\min} \sim p_{\max}$ ，腔内压力  $p_{in}$  取运行期间的平均压力  $(p_{\min} + p_{\max}) / 2$ ，夹层初始孔隙压力  $p_0$  取一个大气压。

由于层状盐岩独有的地质特性，盐穴储气库气体渗流方向主要沿水平泥质夹层，层间相对而言几乎不发生渗透。基于该情况，提出夹层的一维渗流边界条件：

$$\left. \begin{aligned} p(x=0, t) &= p_{in} \\ p(x, t=0) &= p_0 \\ p(x \rightarrow L_D, t) &= p_0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中： $x$  为渗透范围； $L_D$  为一维渗流情况在时间  $t$  下气体渗流范围。

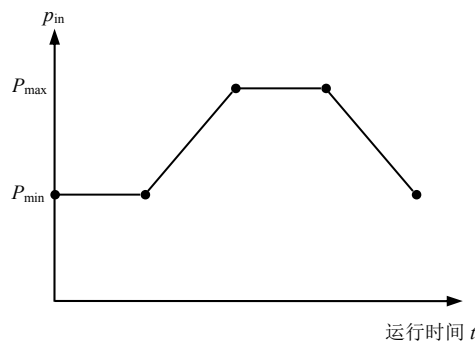


图 2 腔体压力图  
Fig.2 Plot of cavern pressure

当然，相对于一维渗流而言，二维轴对称渗流更符合实际情况，如图 3 所示，因为盐腔周边为无限岩体，气体会沿着盐腔周边向四周发生放射性渗流，整个边界连接起来就像是一个渗流环。

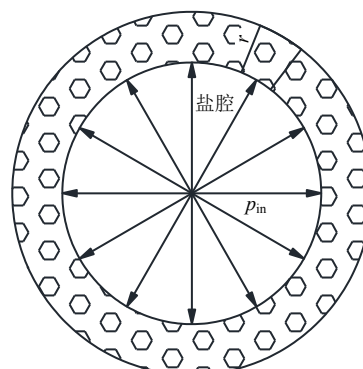


图 3 二维轴对称渗流模型  
Fig.3 The model of two-dimensional axisymmetric flow

基于上述腔体压力图可得泥质夹层的气体二维轴对称渗流边界条件：

$$\left. \begin{aligned} \lim_{r \rightarrow 0} p(r, t) &= p_{in} \\ p(r, t=0) &= p_0 \\ p(r \rightarrow R_D, t) &= p_0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中： $r$  为渗透半径； $R_D$  为二维轴对称渗流情况在  $t$  时刻的气体渗流范围。

## 3 渗流理论计算模型

相较于液体，气体在地下多孔介质中的渗流较为简单，但因地下渗流环境的复杂性和实际情况的不确定性，实际上所考虑的因素依然较多。为简化分析，特做出如下假设：

(1) 储气库气体渗流主要沿水平泥质夹层，层

间方向不发生渗透，泥质夹层视为横观各向同性材料。

(2) 气体为理想气体，满足理想气体状态方程，气体渗流为等温过程。

(3) 泥质夹层固体颗粒骨架压缩性远小于气体压缩性，夹层孔隙率和绝对渗透率恒定。

(4) 气体在泥质夹层中渗流符合考虑 Klinkenberg 效应的 Darcy 定律。

本文渗流理论计算模型主要思想是：将气体运动方程和状态方程代入连续性方程，其中运动方程中需要考虑 Klinkenberg 效应，代入边界条件并进行理论分析，最终得出渗流控制的平衡微分方程。

### 3.1 气体一维渗流

基于 Jacob Bear 推导出一维多孔介质的渗流偏微分方程<sup>[22]</sup>，再结合 Klinkenberg 效应式 (4) 可得

$$\phi \frac{\partial p}{\partial t} = \nabla \cdot \left( p \frac{k_{\infty} \eta}{\mu} \nabla p \right) \quad (7)$$

式中： $p$  为孔隙压力； $\phi$  为孔隙率； $\mu$  为气体动力黏度。

基于上述做出的假设，可将一般情况下的气体渗流平衡微分方程化简并得出一维水平方向的平衡微分方程：

$$\phi \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{k_{\infty} \eta}{\mu} \left\{ \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \right\} \quad (8)$$

为方便理论求解，消去上式的压力偏导的平方项，将式 (8) 等价变换为关于平方压力  $p^2(x,t)$  的偏微分方程：

$$\frac{\partial(p^2)}{\partial t} = \frac{k_{\infty} p \eta}{\mu \phi} \frac{\partial^2(p^2)}{\partial x^2} \quad (9)$$

偏微分方程 (9) 中压力  $p$  是随着空间位置和时间变化的变量，对方程求解提出了巨大的难度，对此做简化处理，用平均孔隙压力  $\bar{p}$  代替  $p$ ：

$$\bar{p} = \frac{P_{in} + P_0}{2} \quad (10)$$

可得如下的简洁表达式：

$$\frac{\partial^2(p^2)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial(p^2)}{\partial t} \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{k_{\infty} \eta \bar{p}}{\phi \mu} \quad (12)$$

根据量纲分析，自变量  $x$ 、 $t$  和系数  $\alpha$  可组成

无量纲量  $\lambda$ ，对此作 Boltzmann 变换<sup>[23]</sup>：

$$\lambda = \frac{x}{\sqrt{4\alpha t}} \quad (13)$$

利用链式求导法则，有

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p^2}{\partial x} &= \frac{\partial p^2}{\partial \lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial x} = \frac{\partial p^2}{\partial \lambda} \frac{1}{\sqrt{4\alpha t}} \\ \frac{\partial p^2}{\partial t} &= \frac{\partial p^2}{\partial \lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial t} = -\frac{\partial p^2}{\partial \lambda} \frac{\lambda}{2t} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

将上述链式法则结果代入式 (11)，时间变量  $t$  可以消除， $\lambda$  变为方程的唯一变量，最终得出一个常微分方程：

$$\frac{\partial^2 p^2}{\partial \lambda^2} = -2\lambda \frac{\partial p^2}{\partial \lambda} \quad (15)$$

引入误差函数：

$$\text{erf } z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-u^2} du \quad (16)$$

对方程进行积分，代入压力边界条件 (5)，并回代  $\lambda$ ，可得

$$p^2(x,t) = p_m^2 - (p_m^2 - p_0^2) \text{erf} \left( \frac{x}{\sqrt{4\alpha t}} \right) \quad (17)$$

式中： $\text{erf}$  表示误差函数，特别地， $\lim_{x \rightarrow 0} \text{erf} \left( \frac{x}{\sqrt{4\alpha t}} \right) = 0$ ，

$\lim_{x \rightarrow \infty} \text{erf} \left( \frac{x}{\sqrt{4\alpha t}} \right) = 1$ ； $\alpha = k_{\infty} \eta \bar{p} / (\phi \mu)$ 。

通过对误差函数  $\text{erf } z$  (图 4) 进行分析：误差函数积分区间在  $[0, 3]$  时，其积分数值区间为  $[0, 1]$ ，将积分值回代式 (17)，恰好满足孔隙压力  $p$  在储气库腔内压力  $p_m$  和夹层初始孔隙压力  $p_0$  之间的变化值，即只要满足上述误差函数为 1，此时  $x = 6\sqrt{\alpha t}$  就为气体在  $t$  时刻渗流范围临界值  $L_D$ ：

$$L_D = 6\sqrt{\alpha t} \quad (18)$$

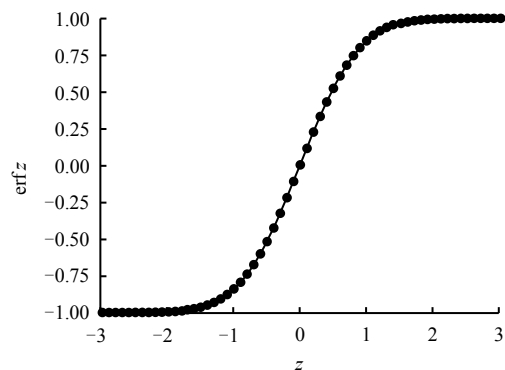


图 4 误差函数图

Fig.4 Plot of the error function

### 3.2 气体二维轴对称渗流

地下盐穴储气库周边假设为无限岩体，则气体

在盐穴储气库中的渗流实际上可以视为二维轴对称流动。取储气库水平某截面，如图 5 所示，渗流可视为从储气库边界向无限岩体做放射性流动；整个边界连接起来就像是一个渗流环。

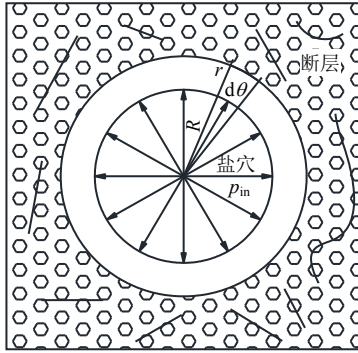


图 5 二维轴对称渗流

Fig.5 Two-dimensional axisymmetric flow

同样是基于 Jacob Bear 得出的公式<sup>[22]</sup>，再结合二维轴对称渗流问题，取微小渗流元进行分析，即可得出非稳态平面径向渗流控制方程：

$$\phi \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r p v) = 0 \quad (19)$$

式中：v 为渗流速度。

考虑式 (4) 的 Klinkenberg 效应的 Darcy 定律：

$$v = -\frac{k_{\infty} \eta}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (20)$$

进而可得气体二维轴对称渗流的平衡微分方程：

$$\phi \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{k_{\infty} \eta}{\mu r} \frac{\partial}{\partial r} (r p \frac{\partial p}{\partial r}) \quad (21)$$

同理，为方便理论求解将式 (21) 等效变换为关于平方压力  $p^2(r, t)$  的偏微分：

$$\frac{\partial^2 (p^2)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial (p^2)}{\partial r} = \frac{\mu \phi}{k_{\infty} p \eta} \frac{\partial (p^2)}{\partial t} \quad (22)$$

对式 (22) 做类似于一维渗流式 (9) 的简化处理，可得如下的简洁表达式：

$$\frac{\partial^2 (p^2)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial (p^2)}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial (p^2)}{\partial t} \quad (23)$$

根据量纲分析，自变量  $r$ 、 $t$  和系数  $\alpha$  可组成无量纲量  $\xi$ ，对此作 Boltzmann 变换<sup>[23]</sup>：

$$\xi = \frac{r^2}{4\alpha t} \quad (24)$$

利用链式求导法则替换变量  $r$  和  $t$ ：

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p^2}{\partial t} &= \frac{\partial p^2}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial t} = -\frac{\partial p^2}{\partial \xi} \frac{\xi}{t} \\ \frac{\partial p^2}{\partial r} &= \frac{\partial p^2}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial r} = \frac{\partial p^2}{\partial \xi} \frac{r}{2\alpha t} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

将上述链式法则结果代入式 (23) 可得非稳态平面径向流渗流控制方程，时间变量  $t$  可以消除， $\xi$  变为方程的唯一变量，最终可得常微分方程：

$$\frac{\partial^2 p^2}{\partial \xi^2} = -\left(1 + \frac{1}{\xi}\right) \frac{\partial p^2}{\partial \xi} \quad (26)$$

引入指数积分函数  $Ei z$ ，具体形式如下：

$$Ei z = -\int_{-z}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (27)$$

对方程 (26) 求解即可得出其理论解析解，回代变量  $\xi$ ，可得

$$p^2(r, t) = c_1 + c_2 \cdot Ei \left( -\frac{r^2}{4\alpha t} \right) \quad (28)$$

代入边界条件 (6)，即可得出系数  $c_1$ 、 $c_2$ ：

$$c_1 = p_0^2 \quad (29)$$

$$c_2 = \frac{p_{in}^2 - p_0^2}{\lim_{r \rightarrow 0} Ei \left( -\frac{r^2}{4\alpha t} \right)} \quad (30)$$

最终将所得系数  $c_1$ 、 $c_2$  代入式 (28)，可得与 Wu 等<sup>[4]</sup>近似一致的方程：

$$p^2 = p_0^2 + \frac{p_{in}^2 - p_0^2}{\lim_{r \rightarrow 0} Ei \left( -\frac{r^2}{4\alpha t} \right)} Ei \left( -\frac{r^2}{4\alpha t} \right) \quad (31)$$

式 (31) 为储气库气体在二维轴对称渗流过程中压力  $p$  随时间和空间位置变化的近似解析解。该解析解与 Wu 等<sup>[5]</sup>得出的结果并不完全一致，原因是 Wu 的结果是以渗流井点源流量  $Q_{in}$  作为边界条件得出计算结果，并且忽略渗流井的半径  $R$ 。然而这与盐穴储气库渗流边界条件完全不相符，因此需要进行修正。首先盐穴储气库的运行压力稳定在一定范围，不能给出定值流量的边界条件；其次，储气库盐腔半径一般可达 40~60 m，若假设其为点源进行泄漏量和渗透范围分析，则与实际结果相比必然会出现较大的误差。因此，本文结合实际边界情



况采用腔体内压力作为边界条件进行分析。

图 6 显示的是自变量  $z$  在区间 $[0, 4]$ 时, 指数积分函数  $Ei(-z)$  绝对值下的积分函数曲线。该函数在区间 $[0, 1]$ 下变化十分剧烈, 笔者为得出二维轴对称渗流临界范围, 认为当某时刻的孔隙平方压力  $p^2$  与初始孔隙平方压力的比值不大于 1.01, 即认为此时达到渗透临界范围:

$$\frac{p^2 - p_0^2}{p_0^2} \leq 0.01 \quad (32)$$

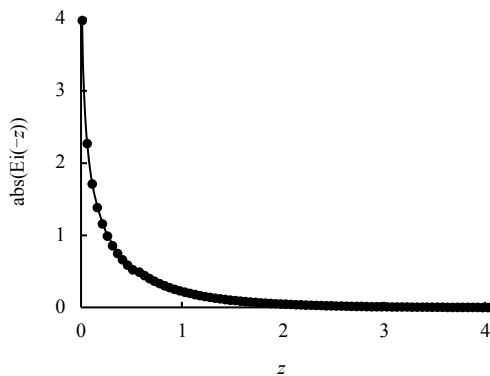


图 6 指数积分函数图

Fig.6 Plot of the exponential integral

此时气体二维轴对称渗透临界范围近似可表示为

$$Ei\left(-\frac{R_0^2}{4\alpha t}\right) = 0.01 \times \frac{p_0^2}{(p_m^2 - p_0^2)} \cdot Ei\left(-\frac{0.01}{4\alpha t}\right) \quad (33)$$

### 4 夹层孔压及泄漏范围分析

通过对多夹层盐穴储气库渗漏分析模型进行理论分析, 推导并得出了气体在泥质夹层中的一维和二维轴对称渗流的孔压和泄漏范围近似解析解。运用该分析结果对国内某在役储气库的孔压分布和泄漏范围定量估算, 为储气库密闭性评价提供参考依据。

#### 4.1 孔隙压力变化趋势分析

该储气库运行压力范围为 8~16 MPa; 腔内初始压力  $p_m$  取其平均值 12 MPa; 夹层内部初始孔隙压力  $p_0$  取一个大气压, 即 0.1 MPa。根据中国科学院武汉岩土力学研究所盖层及夹层密闭性评价研究报告<sup>[24]</sup>可知, 该储气库共有 4 段泥岩夹层(夹层编号由上至下依次排序), 且都为灰色质泥岩, 孔隙率和渗透率相差不大。根据上述的分析结果可知, 气体渗流临界范围和泄漏量由夹层渗透参数、渗透介

质和原始孔隙压力共同决定, 因此针对 4 个灰色质泥岩夹层笔者以夹层 1 作为举例, 而不需要一一进行分类分析。

具体的盐岩、泥质夹层及天然气参数如表 1 所示。

表 1 泥岩和天然气参数表

Table 1 Parameters of mudstone and natural gas			
类型	孔隙率 $\phi$	渗透率 $k_{xx}/m^2$	动力黏度 $\mu/(Pa \cdot s)$
盐岩	0.05	$2.09 \times 10^{-19}$	/
夹层 1	0.10	$1.98 \times 10^{-17}$	/
夹层 2	0.15	$2.26 \times 10^{-17}$	/
夹层 3	0.10	$1.78 \times 10^{-17}$	/
夹层 4	0.11	$2.17 \times 10^{-17}$	/
天然气	/	/	$1.84 \times 10^{-5}$

为方便理论分析计算, 各夹层距腔体中心距离取平均半径, 此时的储气库可视为轴对称腔体, 夹层计算所需参数见表 2。

表 2 模型计算基本参数

Table 2 Basic parameters of model calculation		
类型	夹层厚度 /m	岩腔半径 /m
夹层 1	1.08	41.40
夹层 2	1.53	39.25
夹层 3	1.51	37.70
夹层 4	2.54	34.65

式 (17) 和式 (31) 分别为盐穴储气库气体一维渗流和二维轴对称渗流过程中的孔隙压力随时间和空间变化的近似解析解; 利用文献<sup>[25]</sup>所得的 Klinkenberg 效应的 Darcy 定律参数, 并结合该储气库运行基本参数, 即可得出泥质夹层中的孔隙压力在这两种不中渗流情况下随时间和空间变化的曲线趋势, 分别如图 7 和图 8 所示。

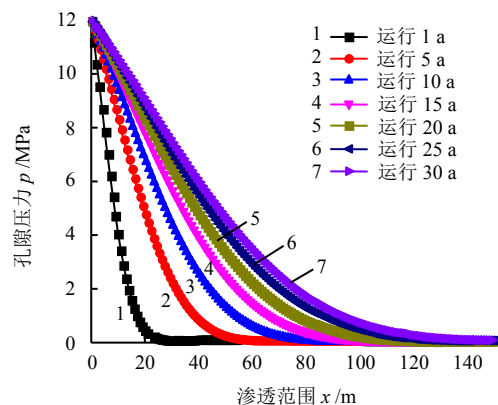


图 7 一维渗流孔压分布图

Fig.7 Plot of gas pressure of one dimensional flow

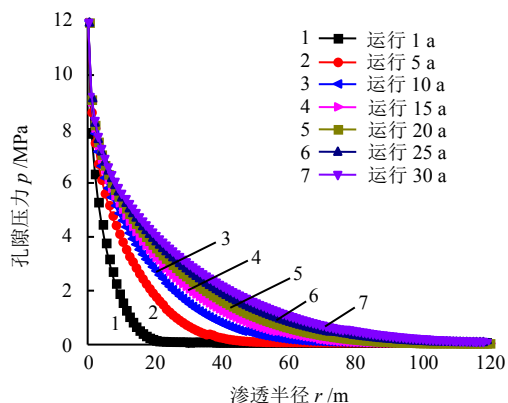


图 8 二维轴对称孔压分布图  
Fig.8 Plot of gas pressure of two-dimensional axisymmetric flow

由气体一维渗流和二维轴对称渗流过程中的孔隙压力分布图可知：

(1) 泥质夹层中气体的孔隙压力随着渗透距离的逐渐加大，孔压变化趋势表现为先急剧下降，最后趋于稳定，此时的渗透距离即为该运行时间的渗流临界范围。

(2) 渗透影响范围内孔隙压力随着储气库运行时间的增加而逐渐增加，其变化趋势相较于前期变化较为平缓，但最终也会趋于稳定，渗透影响范围增大，但增大趋势逐渐减小。

(3) 对比两种孔压分布图，发现二维轴对称渗流的孔压变化趋势更加剧烈明显，相同条件下它比一维渗流情况更快地到达渗透临界范围。

#### 4.2 气体渗透范围趋势分析

式 (18) 和式 (33) 分别是考虑 Klinkenberg 效应的气体的一维渗流临界范围值和二维轴对称渗流临界范围值。同样，利用文中的基本参数代入各自对应式，即可得出基于上述边界条件的任意时刻的渗透临界范围值。图 9 表示的是各自考虑 Klinkenberg 效应和忽略 Klinkenberg 效应的渗透临界范围变化趋势图。

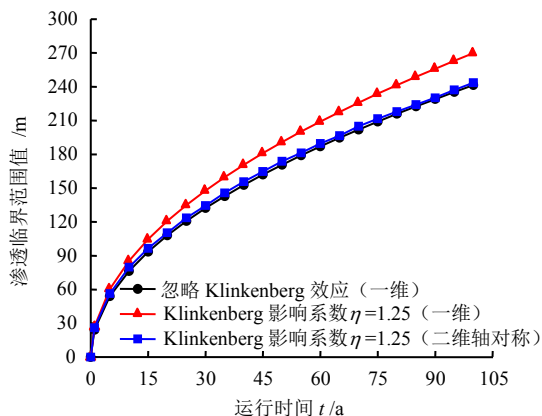


图 9 气体在不同情况下的渗透临界范围  
Fig.9 Critical range of gas under different conditions

由图 9 的渗透临界范围结果和气体渗透方程可知：

(1) Klinkenberg 效应对气体渗流临界范围影响较为显著。以一维渗流为例，在任意时间段内，当系数  $\eta = 1.25$ <sup>[25]</sup> 时渗流渗透范围是不考虑 Klinkenberg 效应的 1.12 倍，因此如果忽略气体渗流的 Klinkenberg 效应结果会造成一定的误差。

(2) 当储气库在  $p_m = 12$  MPa 和 Klinkenberg 系数  $\eta = 1.25$  时，气体的二维轴对称渗流在 1、5、10、20 a 时间里，渗透范围分别约达到 26.03、56.37、79.82、110.32 m。

(3) 文中提出的简化后的 Klinkenberg 效应的 Darcy 定律应用于低渗透气体渗流的理论分析会有一些的误差，因为在该渗流条件下气体渗流会存在启动压力。不过，在前期压力梯度超过启动压力梯度一定范围内时，气体渗流速度是按线性关系变化的<sup>[14]</sup>，而此时符合笔者简化后的 Klinkenberg 效应的 Darcy 定律，然而后期小范围内流速逐渐减小，此时表现为非线性变化并存在启动压力梯度。本文简化后的分析与实际情况可能存在误差，主要表现在后期低速渗流情况下，因此在考虑气体渗流启动压力的情况时文中的理论分析结果将会偏大。

(4) 无论是气体一维渗流还是二维轴对称渗流，其渗流距离都是随着时间的增长，渗透范围逐渐增大，最后趋于稳定。

(5) 从能量的角度出发，不难发现二维轴对称渗流需要从径向流动并向环向扩散，而一维渗流只需沿水平方向流动，因此在相同的压力和运行时间的情况下，气体二维轴对称渗流的临界范围比一维渗流的临界范围小，但是相差并不大。

#### 4.3 盐穴储气库气体渗透范围评估

将文中的气体渗透临界范围分析应用在该储气库工程实际中，以此检验理论分析的合理性。

根据中华人民共和国石油天然气行业标准盐穴地下储气库安全技术规程<sup>[26]</sup>第 5.1.3 条“地质设计要求”规定：盐穴的井位应远离与盐系地层及盖层有关的主要断裂系统。一般情况下，距断层的距离应大于盐穴直径 2.5 倍以上。

该盐穴储气库最大直径约 80 m，按照上述安全技术规程要求，储气库距断层距离应不小于 200 m。

气体一维渗流和二维轴对称渗流影响范围如果达到该储气库规范设计的 200 m，分别需要约 55 a 和 66 a，如图 10 所示。而一般储气库运行寿命为 30~50 a 之间，因此，这就表明按照盐穴地下储气库安全技术规程设计是安全可靠的。

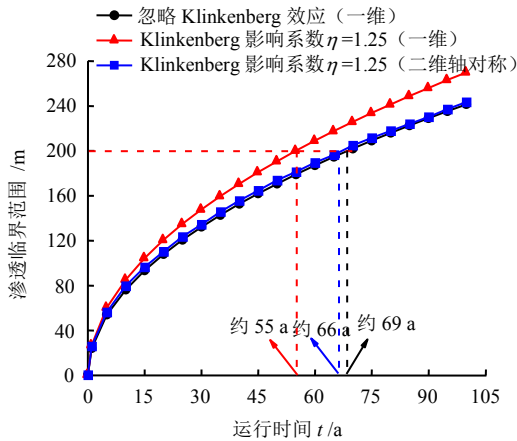


图 10 渗透范围为 200 m 的标识图  
Fig.10 Plot of seepage range of 200 meters

### 5 储气库泄漏量分析

上述储气库的夹层孔压及泄漏范围分析结果可以应用于该储气库泄漏量分析。泄漏的大部分天然气滞留在泥质夹层孔隙中，因此对天然气的泄漏量分析主要集中在泥质夹层中。根据上述建立的理论模型，我们已经知道天然气在夹层中渗流时孔隙压力的变化情况，因此可以根据上述理论结果对储气库泄漏量进行定量分析。根据实际情况假设泥质夹层厚度为  $h$ ，将泄漏部分分割成无数个微圆环  $dr$ ，此时天然气在泥质夹层中的泄漏量近似定义为

$$Q_g = \int_0^{R_D} 2\pi(R+r)h\phi\rho dr \quad (34)$$

式中： $Q_g$  为气体泄漏量 (kg)； $R$  为该夹层位置的岩腔半径； $\rho$  为气体密度。

由于气体的高压缩性，如果用体积 ( $m^3$ ) 表示泄漏量会出现较大的误差，所以泄漏值用质量表示，然后利用 Boyle 定律转换成标准大气压下的体积值，最后分析整个盐腔的泄漏百分比。

渗流过程中假设气体满足理想气体状态方程：

$$\rho = \frac{M_g p}{R_g T} \quad (35)$$

式中： $M_g$  为气体分子量 (g/mol)； $R_g$  为气体的普适系数 (8.314 J/mol·K)； $T$  为绝对温度。

将式 (35) 代入式 (34)，可得该夹层位置的天然气泄漏量为

$$Q_g = \int_0^{R_D} 2\pi(r+R)h\phi \cdot \frac{M_g}{R_g T} p dr \quad (36)$$

针对存在  $N$  个不同厚度  $h_i$  的夹层，整个储气库总泄漏量可定义为

$$Q_T = \sum_{i=1}^N \int_0^{R_{D_i}} 2\pi(r_i+R_i)h_i\phi_i \cdot \frac{M_g}{R_g T} p_i dr \quad (37)$$

式中： $Q_T$  为总泄漏量； $R_i$  为第  $i$  个夹层处盐腔的半径； $r_i$  表示第  $i$  个夹层气体渗透距离； $R_{D_i}$  表示第  $i$  个夹层的渗透范围临界值； $h_i$  表示第  $i$  个夹层的厚度； $\phi_i$  表示第  $i$  个夹层的孔隙率； $p_i$  表示第  $i$  个夹层的孔隙压力变化值。

根据表 2 中的具体参数代入储气库总泄漏量定义式 (37)，即可得到总泄漏量。在实际工程中，天然气泄漏质量并不能直接代表储气库的密封性能的好坏，而泄漏量占库容百分比却能相对定量地描述储气库气体泄漏值。

盐穴储气库泄漏量占库容百分比定义为：在一定时间内的标准大气压 ( $p_0$ ) 下，气体存留在泥质夹层中的总泄漏量与储气库总存储量的比值：

$$L_r = \frac{Q_{TS}}{Q_{CS}} \times 100\% \quad (38)$$

式中： $L_r$  为泄漏量百分比； $Q_{TS}$  为标准大气压下的气体总泄漏量； $Q_{CS}$  为标准大气压下的储气库总存储量。

图 11 为该盐穴储气库 0~100 a 内的天然气泄漏量百分比趋势图。储气库在运行 5、10、50、100 a 的泄漏量占库容百分比分别为 1.165%、1.748%、5.018%和 8.324%。具体表现为随着时间的逐渐增长，泄漏量百分比趋势表现为先增大后减小，最终趋于稳定增长，50 a 运营期内年均泄漏率约为 0.1%。

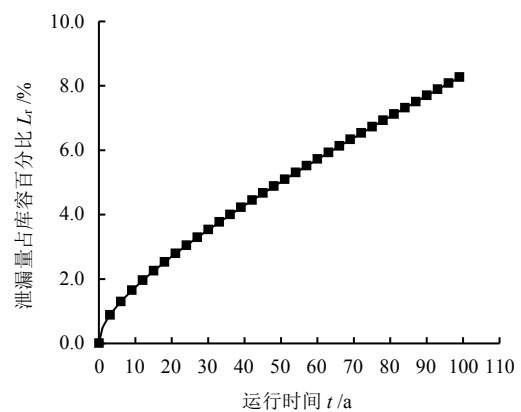


图 11 泄漏量占库容百分比图  
Fig.11 Leakage percentage accounting for total cavern containment

### 6 结 论

盐穴储气库气体的密闭性与泥质夹层的渗透性能密切相关，为防止天然气沿着泥质夹层渗流至盐



矿边界或者较大断层位置从而发生泄漏, 需对储库泄漏量及泄漏范围开展评估。本文以泥质夹层为研究对象, 结合某储气库运行期间的注采压力情况, 建立了多夹层盐穴储气库渗漏分析模型, 并利用渗流理论计算了气体在泥质夹层中的一维和二维轴对称情况下的孔压分布、渗透临界范围和储气库泄漏量占库容百分比, 最终得出了以下结论:

(1) 本文建立了多夹层盐穴储气库渗漏模型, 并推导了气体一维和二维轴对称渗流的孔压近似解析解, 分析表明: 随着渗透距离的逐渐加大, 孔压变化趋势表现为先急剧下降, 后趋于稳定; 随着储气库运行时间的逐渐增加, 孔压变化趋势相较于前期变化较为平缓, 但最终也会趋于稳定, 其渗透影响范围增大, 但增大趋势逐渐减小。

(2) 利用两种渗流的孔压近似解析解, 开展了气体的渗透临界范围的研究, 研究发现在时间一定的情况下由夹层渗透参数、渗透介质和孔隙压力共同决定。结合气体的渗透临界范围图可知: 储气库在运行初期, 如 5 a 内气体向外渗透的趋势相当明显, 渗流过程中随着时间逐渐变长, 渗流影响范围逐渐增大最后趋于稳定。

(3) 气体泄漏量百分比与孔隙压力和渗透临界范围直接相关, 某现役储气库在运行 5、10、50、100 a 的泄漏量百分比分别为 1.165%、1.748%、5.018%和 8.324%。具体表现为随着时间的逐渐增长, 泄漏量百分比趋势表现为先增大后减小, 最终趋于稳定增长。

以上成果对盐穴储气库选址、设计以及密闭性评价提供了理论和技术支撑, 为今后的盐穴储气库建设起到了指导和参考作用。当然, 本文的理论计算模型考虑的是较为理想的情况, 不同场址的岩层渗透参数也不尽相同, 与工程实际情况可能不会完全吻合。因此, 在以后的工作中将会考虑在储气库周边设置观察井来监测天然气实际渗透范围、岩层孔隙压力, 进一步验证和完善本文天然气泄漏范围及泄漏量的分析模型。

### 参 考 文 献

[1] 吴文, 侯正猛, 杨春和. 盐岩的渗透特性研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 746—749.  
WU Wen, HOU Zheng-meng, YANG Chun-he. Investigations on permeability of rock salt[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(7): 746—749.

[2] 杨春和, 李银平, 屈丹安, 等. 层状盐岩力学特性研究

进展[J]. 力学进展, 2008, 38(4): 484—494.

YANG Chun-he, LI Yin-ping, QU Dan-an, et al. The research progress on mechanical properties of bedded salt rock[J]. **Advances in Mechanics**, 2008, 38(4): 484—494.

[3] 尹洪武, 马洪岭, 施锡林, 等. 盐穴储气库泥岩夹层渗透性测试新方法[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2241—2248.

YIN Hong-wu, MA Hong-ling, SHI Xi-lin, et al. A new method for permeability test on mudstone interlayer in a salt cavern gas storage[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(8): 2241—2248.

[4] AL-HUSSAINY R, JR H J R, CRAWFORD P B. The flow of real gases through porous media[J]. **Journal of Petroleum Technology**, 1966, 18(5): 624—636.

[5] WU Y S, PRUESS K, PERSOFF P. Gas flow in porous media with Klinkenberg effects[J]. **Transport in Porous Media**, 1998, 32(1): 117—137.

[6] STORMONT J C. Conduct and interpretation of gas permeability measurements in rock salt[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 1997, 34(34): 648—648.

[7] ZHANG G, LI Y, YANG C, et al. Stability and tightness evaluation of bedded rock salt formations for underground gas/oil storage[J]. **Acta Geotechnica**, 2014, 9(9): 161—179.

[8] HUANG X L, XIONG J. Numerical simulation of gas leakage in bedded salt rock storage cavern[J]. **Procedia Engineering**, 2011, 12(3): 254—259.

[9] YIN H, MA H, CHEN X, et al. Synthetic rock analogue for permeability studies of rock salt with mudstone[J]. **Applied Sciences**, 7(9): 946.

[10] LI J, SHI X, WANG T, et al. A prediction model of the accumulation shape of insoluble sediments during the leaching of salt cavern for gas storage[J]. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, 2016, 33: 792—802.

[11] LI J, SHI X, YANG C, et al. Repair of irregularly shaped salt cavern gas storage by releaching under gas blanket[J]. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, 2017, 45: 848—859.

[12] 陈卫忠, 谭贤君, 伍国军, 等. 含夹层盐岩储气库气体渗透规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1297—1304.

CHEN Wei-zhong, TAN Xian-jun, WU Guo-jun, et al. Research on gas seepage law in laminated salt rock gas

- storage[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(7): 1297—1304.
- [13] 刘伟, 李银平, 霍永胜, 等. 盐岩地下储库围岩界面变形与破损特性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1621—1628.  
LIU Wei, LI Yin-ping, HUO Yong-sheng, et al. Analysis of deformation and fracture characteristics of wall rock interface of underground storage caverns in salt rock formation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(6): 1621—1628.
- [14] 冯国庆, 刘启国, 石广志, 等. 考虑启动压力梯度的低渗透气藏不稳定渗流模型[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(4): 457—461.  
FENG Guo-qing, LIU Qi-guo, SHI Guang-zhi, et al. An unsteady seepage flow model considering kickoff pressure gradient for low-permeability gas reservoirs[J]. **Petroleum Exploration and Development**, 2008, 35(4): 457—461.
- [15] 李宁, 唐显贵, 张清秀, 等. 低渗透气藏中气体低速非达西渗流特征实验研究[J]. 天然气勘探与开发, 2003, 26(2): 49—55+28.  
LI Ning, TANG Xian-gui, ZHANG Qing-xiu, et al. Experimental study on the characteristics of low velocity non Darcy flow in low permeability gas reservoir[J]. **Natural Gas Exploration and Development**, 2003, 26(2): 49—55+28.
- [16] LI J, ZHAN H B, HUANG G H. Applicability of the linearized governing equation of gas flow in porous media[J]. **Transport in Porous Media**, 2011, 87(3): 815—834.
- [17] 纪文栋. 盐穴地下储气库的密闭性研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012.  
JI Wen-dong. Study on sealability of underground gas storage in rock salt[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [18] 刘伟, 李银平, 杨春和, 等. 层状盐岩能源储库典型夹层渗透特性及其密闭性能研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 31(3): 500—506.  
LIU Wei, LI Yin-ping, YANG Chun-he, et al. Investigation on permeable characteristics and tightness evaluation of typical interlayers of energy storage caverns in bedded salt rock formations[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 31(3): 500—506.
- [19] 朱光亚, 刘先贵, 李树铁, 等. 低渗气藏气体渗流滑脱效应影响研究[J]. 天然气工业, 2007, 27(5): 44—47.  
ZHU Ya-guang, LIU Xian-gui, LI Shu-tie, et al. Study on the Klinkenberg effect of gas seepage in lower permeability gas reservoir[J]. **Natural Gas Industry**, 2007, 27(5): 44—47.
- [20] 朱益华, 陶果, 方伟, 等. 低渗气藏中气体渗流 Klinkenberg 效应研究进展[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(5): 1591—1596.  
ZHU Yi-hua, TAO Guo, FANG Wei, et al. Research progress of the Klinkenberg effect in tight gas reservoir[J]. **Progress in Geophysics**, 2007, 22(5): 1591—1596.
- [21] KLINKENBERG L J. The permeability of porous media to liquids and gases[J]. **API Drilling and Production Practice**, 1941, 2(2): 200—213.
- [22] JACOB BEAR, BACHMAT Y. Introduction to modeling of transport phenomena in porous media[J]. **Kluwer**, 1990, 4: 481—516.
- [23] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 2010.  
KONG Xiang-yan. Advanced seepage mechanics[M]. Hefei: The publisher of University of Science and Technology of China, 2010.
- [24] 马洪玲, 施锡林, 刘伟. 盖层及夹层密闭性评价试验[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2012.  
MA Hong-ling, SHI Xi-lin, LIU Wei. Tightness evaluation experiment of cap rock and interlayer[R]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [25] 武志德, 周宏伟, 丁靖洋, 等. 不同渗透压力下盐岩的渗透率测试研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 2): 3740—3746.  
WU Zhi-de, ZHOU Hong-wei, DING Jing-yang, et al. Research on permeability testing of rock salt under different permeability pressures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(Supp. 2): 3740—3746.
- [26] 中华人民共和国国家能源局. SY 6806—2010 盐穴地下储气库安全技术规程[S]. 北京: 石油工业出版社, 2011.  
National Energy Administration of China. SY 6806—2010 Safety rules of salt cavern underground gas storage[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.