

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.0005

地下盐穴储气库泄漏原因及防治措施研究

陈祥胜^{1,2}, 李银平¹, 施锡林¹, 叶良良^{1,2}, 杨春和¹

(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: 良好的密闭性能是盐穴储气库安全运营的基本前提, 但地质赋存条件复杂、建库实践不足、理论体系不完备等均会导致盐腔遭遇各类泄漏风险。根据国内外的工程实践及事故统计, 再结合盐穴储库特有的工程地质条件和运行工况, 总结出三大泄漏因素(地质因素、工程因素、人为失误)和 4 种泄漏类型。地下盐穴储气库潜在的泄漏类型有夹层密闭性不足引起的气体近水平漏失、盖层被突破失效致使气体上窜、井筒完整性不足致使气体逃逸、夹层与断层连通致使气体流向断层。最终, 依据各自的泄漏特征提出了相应的预防处置措施, 以防止气体泄漏事故的发生和大范围的蔓延。由于我国盐穴储库的发展暂时处于上升期, 研究结果对深部盐穴储气库的安全建设具有一定的借鉴和指导意义。

关 键 词: 盐穴储气库; 泄漏分析; 密闭性; 盐岩; 安全运营

中图分类号: TS32

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2019)增 1-0367-08

Analysis of leakage risks and prevention measures of underground salt cavern gas storage

CHEN Xiang-sheng^{1,2}, LI Yin-ping¹, SHI Xi-lin¹, YE Liang-liang^{1,2}, YANG Chun-he¹

(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 Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Good sealing performance is the fundamental prerequisite for a safe operation of a salt cavern gas storage engineering. However, the complicated geological conditions, the lack of practice in building gas storage, and the incomplete theoretical knowledge will lead to various leakage risks for the gas storage in the salt cavern. According to engineering practices and statistics on accidents worldwide, and combined with the unique engineering geological conditions and operational states of the salt cavern gas storage, three major leakage factors (i.e. geological factors, engineering factors and human activity) and four leakage types were summarized in this paper. The potential leakage types in underground salt cavern gas storage include near-horizontal leakage of gas caused by insufficient interlayer sealing, upward movement of gas through the strata caused by the breakthrough and failure of caprock, natural gas leakage along the wellbore due to its insufficient integrity, the gas flow to the faults owing to the connectivity between the interlayers and faults. Based on their respective leakage characteristics, corresponding preventive measures were proposed to prevent the occurrence of gas leakage accidents and its large-scale spread. In view of the fact that the development of salt cavern gas storage in China is temporarily at a developing period, this research results have certain reference and guiding significance for safety construction of deep salt cavern gas storage.

Keywords: salt cavern gas storage; leakage analysis; tightness; rock salt; safety operation

1 引 言

我国石油和天然气对外依存度高, 能源安全形势严峻^[1], 根据中国石油经济技术研究院发布的 2017 年国内外油气行业发展报告, 2017 年我国石油

对外依存度高达 67.4%, 天然气对外依存度达 39.0%。随着经济的不断攀升和生活水平的提高, 这一数据在未来 10 年里依然会不断递增, 特别我国北部及东部沿海地区多次出现的“气荒”, 更加凸显出能源大规模储备的必要性和迫切性, 因此必须建

收稿日期: 2019-01-02

基金项目: 国家重点研发计划 (No.2018YFC0808401); 国家自然科学基金项目 (No.51874273, No.51774266, No.51874274)。

This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2018YFC0808401) and the National Natural Science Foundation of China (51874273, 51774266, 51874274).

第一作者简介: 陈祥胜, 男, 1994 年生, 博士研究生, 主要从事地下盐穴储库密闭安全性评价等方面的研究。E-mail: chenxs15@163.com

通讯作者: 李银平, 男, 1969 年生, 博士, 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

立完备的大型油气地下储库,以应对可能的突发状况,确保国民经济和社会的可持续发展。

盐岩具有极低的渗透率、良好的蠕变行为、损伤自修复和塑性变形能力大等特性,被认为是石油和天然气等碳氢化合物地下储备的理想场所,在欧美等发达国家中已得到了广泛应用^[2-5]。我国也正在大力发展地下盐穴储气库,首座盐穴储气库—中石油金坛盐穴储气库部分盐穴已于 2007 年投入运行,是西气东输管道的重要配套工程,在长江三角洲地区的天然气平稳供应中做出了重要贡献。为了进一步保障燃气供应和管道运输安全,中石油和中石化分别在西气东输二线和川气东送工程沿线配套规划建设多座储气库,预计在未来十几年会迎来一个盐穴开发利用的高峰期。

尽管盐穴储库在能源存储方面具有明显优势,但地质赋存条件复杂,建库实践不足,理论体系不完备等,能源储库的密封安全性遭遇了巨大的挑战。由文献[6-7]可知,美国发生过约 18 起盐穴油气泄漏事故,引发的火灾和爆炸不仅造成大量的经济损失,致使多起人员伤亡。Miyazaki^[8]对几起典型的储气库泄漏事故进行分析,结果表明盐穴井筒完整性在密闭性评估中至关重要。Sovacool^[9]统计了 1907-2007 年内的上百起重大的能源事故,强调了事故的发生由人为失误、技术复杂性等组合因素导致。Evans 等^[10]对英国、美国等地下储气库技术和事故进行了评估,建议盐腔需保证足够的保护层厚度、深度以及盐岩边界。井文君等^[6]采用风险矩阵法对盐岩储库在建设 and 运营过程中的存在的重大风险进行了评价,分析了储备库重大事故的发生概率、风险等级、事故类型以及引发事故的主要原因。与欧美海相沉积的盐丘有所不同,我国湖相沉积的层状盐岩具有非盐类夹层数量多、杂质含量高等特点^[11-12],导致储库的密封性评估更加困难、不确定性因素更多,必须全面评估储库的密闭安全性,以防止事故的发生和大范围的蔓延。

在学者前期研究的基础上,本文重点考虑了薄互层盐穴储气库可能发生的泄漏因素,总结出 4 种潜在的泄漏类型,以在设计和运行阶段加以控制,并考虑相应的预防处置措施。根据国外盐穴储库泄漏事故统计,结合层状盐矿特有的地质环境,可将盐穴储库渗漏因素归纳为以下三大类:即地质因素、非盐类夹层渗漏、断层泄漏、盖层突破失效、腔体蠕变收缩、安全矿柱宽度不足等;工程因素,套管破损、地表装置损坏、固井工艺不良等;人为失误,过量注采、操作不当、检修以及维护不及时等。

部分因素不仅仅是单方面的类型,而是涉及到多种组合情况,所罗列出的泄漏因素属于其单方面做主导,如腔体蠕变收缩与储库运行压力、地应力、盐岩力学特性均相关,但地质环境视为其主导因素。

2 盐穴储气库泄漏因素及类型

2.1 地质类因素

层状盐岩储库所处的地质环境必须考虑高地应力、高渗透压、复杂地质条件等诸多不利因素,无论是在储库设计阶段还是在运行阶段密闭性都是需要着重考虑的一环。

非盐类夹层多由泥岩、石膏和钙芒硝组成,其渗透率和孔隙率均高于盐岩^[13-14],其非盐类夹层与盐岩层之间的变形不协调,会导致两者界面裂纹较为发育^[15-16],成为储气库渗漏的主要通道,见图 1 中的①号渗漏形式。如果夹层与盐腔附近的断层或地层不整合带相连,①号渗漏形式往往会衍生出④号泄漏形式,即断层泄漏,此时储气库会变得极其危险,天然气会沿着断层不断往外“逃逸”,最终在地表可能引发爆炸和火灾。夹层泄漏是层状盐穴储库与盐丘型储库的最大不同,也是密闭性评估必须考虑的因素之一,我国金坛区块部分盐穴已实施井因微渗夹层的存在导致密闭性测试不合格,后经超细水泥封堵成功避免该类盐穴储气库井的废弃^[17]。

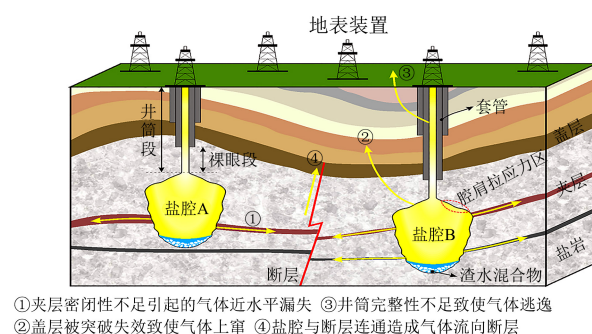


图 1 层状盐穴储气库潜在的泄漏类型
Fig.1 The potential leakage types in bedded salt cavern gas storage sites

物性封闭是盖层对油气封存的根本机理,依赖于自身致密的结构实现密封^[18]。在层状盐岩地层中盖层通常为泥质岩,孔隙率和渗透率也均大于盐岩,盖层是盐穴储气库密闭性评价的关键部位。图 1 中的②号漏形式属于盖层突破失效,一方面可能由于地质构造导致盖层密封能力下降或腔体肩部的张拉应力使得盐岩保护层裂隙发育严重;另一方

面运行压力 P_m 过大致使盖层被突破。气体突破盖层后会进入非盐类地层内，此时的密封性无法得到保障，天然气会泄漏殆尽，如美国堪萨斯州的 Conway 储库的丙烷泄漏事故^[6]。

盐穴储气库寿命一般为 30–50 年，我国石油天然气行业标准规定盐穴储库的上限运行压力不超过上覆地层压力的 80%^[19]，因长时间高差应力作用下盐腔会发生蠕变收缩^[20–21]。洞室的收缩变形会导致盐腔可利用空间越来越小，腔壁周边塑性区会越来越大，为天然气泄漏提供了有利条件，如图 2 所示。李银平等^[22]研究表明，盐腔蠕变收缩率与盐岩力学特性、储库压力变化、地应力、温度及水环境综合相关，过大的收缩率会造成腔体围岩破损甚至坍塌破坏，还会造成库区地表持续沉降。

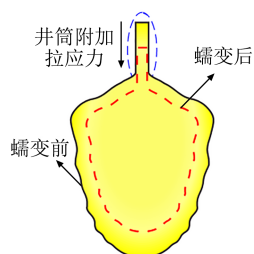


图 2 高地应力作用下盐腔的蠕变收缩

Fig.2 Volumetric creep shrinkage of salt cavern under a high geostress state

特别地，当盐穴腔顶处蠕变收缩过量对井筒会产生附加拉应力，应力过大会削弱井筒完整性甚至引起套管破损，泄漏类型由地质类向工程类转变。附加应力的产生是盐岩变形与套管变形不协调导致的，因此在建腔过程中需预留足够长度的裸眼段或脖颈段，使其削弱盐穴蠕变变形对井筒完整性的影响。

2.2 工程类因素

井筒属于盐穴储库的重要组成部分，其密封性是后续溶腔和储气的保障。井筒完整性与套管和固井质量紧密相关^[23–25]，套管破损或固井工艺不良均会导致图 1 中的③号泄漏形式。泄漏的天然气会沿井筒竖直渗至地表，进而引发爆炸和火灾。美国 2001 年 Yaggy 储气库和 2004 年 Moss Bluff 均是由套管破损引发的天然气泄漏，教训惨重^[8–9]。

相邻盐穴储库边界间的最小距离被称为矿柱宽度 W ，由储库稳定性分析综合确定^[19]。矿柱宽度不足会引起储库间串气，即图 1 中①号泄漏形式的对接，此时各储库之间失去独立性，严重影响注采

气功能，加上各储库运行压力设计值不尽相同，连通之后不利用管理和稳定性、密封性评估。

2.3 人为失误

人为失误相较于地质和工程因素属于可控范畴，一般设备及时检修维护、人员进行专业培训、按设计要求进行定期定量注采，均可减少人为失误概率。1995 年美国 Mineola 和 Clute 储气库均是因人为失误引发大火和爆炸，多户居民被迫撤离^[6]。虽然人为失误属于可控范畴，但依然是重中之重。

3 气体泄漏预防处置措施

围绕层状盐穴储气库潜在的 4 种泄漏类型和 3 种泄漏因素，开展天然气泄漏预防或处置措施研究，以保障储气库在全寿命周期中的密闭安全性能，以便在遇到泄漏等紧急情况时做出较为合理有效的决策。

3.1 夹层密闭性不足所致渗漏

湖相沉积的盐岩往往会与钙芒硝、黏土矿物、石膏等矿物伴生，形成层状盐岩。层状盐岩类似于组合型材料，大量的试验研究表明盐岩夹层的孔隙率和渗透率普遍高于盐岩^[14, 17]，使得夹层的密闭性能在储气库的密封性评价中变得尤为重要。对于密闭性差、结构破碎、存在层间错动的夹层，称为软弱夹层。

根据软弱夹层在储气库中所处的位置，可分为裸眼段（脖颈段）夹层和腔内夹层。由于深部夹层的隐蔽性和不可控性，目前预防处置夹层渗漏最合理有效的手段是夹层注浆封堵法和密闭性检测，前者是处置，后者是预防，两者相互结合构成了软弱夹层渗漏的防治体系。

3.1.1 高压挤超细水泥注浆

注浆法通常被用来封堵破碎及软弱地层，在煤矿和隧道等地下工程中有重要的应用^[26–27]，虽然深部盐穴储库与传统的防水防渗工程不同，但在实际工程中已有开始采用超细水泥注浆对井筒裸眼段泄漏层实施封堵的初步应用^[28–30]。这种方法借助井身结构将 PT 封隔器下至泄漏位置，并隔离泄漏层与上部地层，避免注浆压力对密闭性良好地层产生不利影响，最终通过施加挤入压力使浆液进入泄漏层以达到封堵目的。

封堵法的可行性在于通过封隔器注浆可以不受盐腔形态以及内压影响，井身结构提供的良好工作空间使封堵成为了可能，因此高压挤超细水泥注浆法仅适用于裸眼段（脖颈段）夹层，对于成腔后

腔体内部渗漏夹层的封堵并不适用。因为盐腔内壁凹凸不平,加上内径变化以及内压影响给封堵带来了极高难度,针对腔内夹层的泄漏封堵,目前仍然没有有效且合理的封堵手段。

3.1.2 储气库密闭性检测

盐穴储气库的密闭性检测通常会采用氮气泄漏测试法(NLT),NLT法具有测试原理简单,成本低,能大致明确泄漏范围等优点,在我国使用较为普遍^[31-32]。此外,密闭性检测手段还包括API法、Geostock法和FLT法^[2,33-35],均存在各自的适用条件,如Geostock法测试精准,能得出气体泄漏率随时间的变化值,但测试过程复杂,成本高,不能明确泄漏位置。

密闭性检测的目的在于保障储气库的密闭安全性能,如果检测结果不合格,这并不意味着就是夹层密封性失效,具体的泄漏原因须根据测试数据、地质条件、工程条件等综合判定^[17]。如果确定属于夹层泄漏,再依据其所处位置分析能否利用注浆封堵方法。

3.2 盖层突破失效所致渗漏

盖层的本质在于依赖其自身结构致密、孔喉不发育、岩石韧性好、规模大这一基本性质实现封隔^[36],一旦盖层被突破,物性封闭能力失效,气体会沿着盖层向上“逃窜”,发生泄漏事故。

因盖层规模大、埋深深,物性封闭能力失效时难以处置,通常以预防为主。预防盖层突破的手段主要有增加盖层厚度、控制储库运行压力、加大盐岩顶板保护层厚度等。为便于理解各参数的实际意义,现将盐穴储库中关键设计及运行参数绘制为图3。

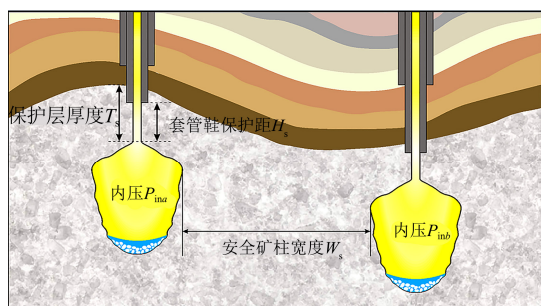


图3 影响盐穴储气库泄漏的关键设计及运行参数
Fig.3 Key design and operating parameters affecting leakage of salt cavern gas storage

3.2.1 储库运行压力 P_{in}

盐穴地下储库运行寿命长,油气注采周期通常

为数天甚至数月,如图4所示。导致腔体内压处于一个动态循环变化过程^[37-38],考虑到内压对气体渗流和盐岩蠕变的综合影响,因此储气库必须设置合理的上下限运行压力,防止盐腔内压超出上限运行压力或低于下限运行压力。

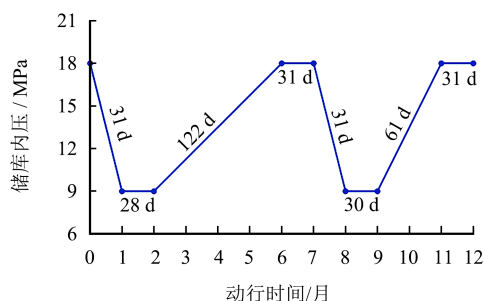


图4 某盐穴储气库内压动态变化过程
Fig.4 Dynamic process of internal pressure in a salt cavern gas storage

过高的上限运行压力极易引起盖层被突破、地层破裂、地表隆起等风险,引发气体泄漏,变相的增加了气体泄漏的可能性和提高了储库密封性要求。出于上述因素考虑,盐穴地下储气库安全技术规程规定^[19]“盐腔上限运行压力不得高于地层破裂压力以及上覆地层压力的80%”,为工程实际提供了参考。

过低的下限运行压力尽管可以减少气体泄漏,但在高地应力下盐腔蠕变收缩严重,造成顶板或者矿柱垮塌、地表沉陷,盐腔整体稳定性不足,因此下限运行压力应满足腔体稳定性要求。

根据上述分析结果,储库运行压力以及上下限压力建议值为

$$\left. \begin{aligned} P_{\min} &\leq p_{in} \leq P_{\max} \\ P_{\max} &\leq 0.8 \min \left(\sigma_f, \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \right) \\ P_{\min} &\leftarrow \text{稳定性分析} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: P_{in} 为腔体内压; $P_{\max}$ 为储库上限运行压力; $P_{\min}$ 为储库下限运行压力; σ_f 为地层破裂压力; $\gamma_i h_i$ 为上覆某地层压力; n 为目标层的上覆地层数。

3.2.2 盐岩顶板保护层厚度 T_s

盐穴储库在造腔过程中其顶部应预留一定厚度的盐层作为盐腔顶板,顶板上下分别连接盖层和盐腔,具有提高储库密封性和降低盖层被突破的作用,顶板保护层厚度大,可以有效地削弱渗透压力,阻止或延缓气体到达盖层,工程实际中其厚度应根据盐腔密封性和稳定性综合评价确定。

3.3 井筒完整性不足所致渗漏

良好的井筒完整性是后续水溶造腔和注气排卤的基本前提。井筒完整性与固井套管、水泥环、套管头等密切相关^[39-40]，如固井工艺不良引起的环空带压、套管腐蚀破损、套管头移动都可能导致井筒完整性不足。

考虑到盐穴井筒的寿命周期与盐腔使用周期相同，一般不能也不方便处置。盐穴井筒完整性不足所采取的措施同样是预防为主，它主要与固井工艺、套管材料以及腔顶至套管鞋保护距 H_s 相关。

为保证盐穴储气库的密闭性，井筒套管鞋一般要下入到腔顶预留盐层中，套管鞋到腔顶之间的部分被称之为裸眼段。裸眼段是实际工程中用来消除盐腔蠕变收缩对井筒完整性影响的重要举措之一。由于盐岩具有很强的蠕变变形能力，盐穴储气库投入运行后井下套管的强度及变形特征与盐层存在变形不协调，足够多的保护距可以避免套管因承受过大拉应力而破坏，造成井筒完整性失效。

保护距需根据套管材料所能承受的应变变形值确定，利用材料屈服强度和弹性模量进行计算，并不是固定值。

3.4 因断层导致气体渗漏

盐穴储库选址时应尽量避免或远离断层和地层不整合带，但地质条件复杂，在工程实际中不可避免地会遇到断层问题，特别是当夹层与断层连通时腔内的气体会借助夹层流向断层，加速气体的泄漏。

由于断层的位置无法改变，实际过程中为防止气体泄漏，只能采取规避措施，即设置安全距离。腔体与断层之间会设置保护宽度，腔体与腔体之间会设置安全矿柱宽度。

3.4.1 腔体至断层间保护宽度

为防止气体流向断层，引发泄漏事故，盐穴地下储气库安全技术规程^[19]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，一般情况下盐穴距断层的距离应大于盐腔直径 2.5 倍以上。在实际工程中必须严格准守行业规范，以防止事故的发生。

3.4.2 腔体与腔体间安全矿柱宽度 W_s

盐穴地下储存场址由多个溶腔组成，形成盐腔群。与周围的地应力相比，盐腔内压较低，导致上覆岩层的部分载荷需转移至矿柱之上。矿柱要承受较高垂向压力，而侧向压力（内压）相对较低，为了确保矿柱不发生破坏、保障储库群的安全稳定，相邻储库溶腔之间必须有足够的安全距离，即安全

矿柱宽度（见图 3）。矿柱宽度大小还对储库长期运行体积收缩有显著影响，一定宽度的矿柱能保证储库群的静力稳定性，如若矿柱蠕变变形过大同样也会大大缩短储存库运行寿命。

盐穴储库安全矿柱距离的确定，须满足两个储存库之间的矿柱中间部位的应力小于盐岩的长期强度，国内外对安全矿柱宽度的定义：

$$W_s = \alpha D \quad (2)$$

式中： W_s 为安全矿柱宽度； D 为单腔直径； α 为安全系数，德国一般取 $1.5^\circ \sim 3.0^\circ$ ，美国一般取 $1.75 \sim 2.50$ 。具体的安全系数确定需根据腔体蠕变收缩率、腔周最大位移和破损区综合分析确定。

4 结 论

（1）非盐类夹层与盐岩层之间的变形不协调，导致两者岩性界面可能发生剪切滑移。非盐类夹层的孔隙率和渗透率均高于盐岩，使得夹层可能成为层状盐岩储库泄漏的主要通道与场所。腔体蠕变收缩与井筒套管之间同样存在变形不协调，盐腔过度的蠕变收缩对套管会产生附加拉应力，一旦变形过大会致使井筒完整性受损，造成水泥环失效，引发气体泄漏。

（2）盐穴储库的泄漏绝大部分都与工程地质条件与人为因素相关，还存在各种组合形式下的复杂类型。在设计之初或是运营期间都需密切关注储库的密闭安全性。根据预防为主，治理为辅的原则，从地形选址到参数设计、人员管理到现场监测都需严格按照规范要求执行。

（3）盐穴储气库事故的发生看似具有突发性和偶然性，有迹可循，储库运营期间建议在腔内放置压力监测点，实时反馈气压变化情况。在腔体周边设置多个天然气观察井或压力检测井，提前预知事故发生的可能性。

参 考 文 献

- [1] 史丹. 全球能源格局变化及对中国能源安全的挑战[J]. 中外能源, 2013, 18(2): 1—7.
SHI Dan. Changes in global energy supply landscape and implications to China's energy security[J]. Sino-Global Energy, 2013, 18(2): 1—7.
- [2] BÉREST P, BROUARD B, DURUP J. Tightness tests in salt-cavern wells[J]. Oil and Gas Science and Technology, 2001, 56(5): 451—469.
- [3] OZARSLAN A. Large-scale hydrogen energy storage in

- salt caverns[J]. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2012, 37(19): 14265—14277.
- [4] SCHAINKER R B. Executive overview: Energy storage options for a sustainable energy future[C]//Power Engineering Society General Meeting. [S. l.]: IEEE, 2005.
- [5] 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): 4409—4417.
- YANG Chun-he, LIANG Wei-guo, WEI Dong-hou, et al. Investigation on possibility of energy storage in salt rock in China[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(24): 4409—4417.
- [6] 井文君, 杨春和, 陈锋. 基于事故统计分析的盐岩地下油/气储库风险评价[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1787—1793.
- JING Wen-jun, YANG Chun-he, CHEN Feng. Risk assessment of salt cavern oil/gas storage based on accident statistical analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(6): 1787—1793.
- [7] BÉREST P, BROUARD B. Safety of salt caverns used for underground storage blow out; mechanical instability; seepage; cavern abandonment[J]. **Oil and Gas Science and Technology**, 2003, 58(3): 361—384.
- [8] MIYAZAKI B. Well integrity: An overlooked source of risk and liability for underground natural gas storage. Lessons learned from incidents in the USA[J]. **Geological Society London Special Publications**, 2009, 313(1): 163—172.
- [9] SOVACOL B K. The costs of failure: A preliminary assessment of major energy accidents, 1907-2007[J]. **Energy Policy**, 2008, 36(5): 1802—1820.
- [10] EVANS D J, WEST J M. An appraisal of underground gas storage technologies and incidents, for the development of risk assessment methodology[R]. British: British Geological Survey for the Health and Safety Executive, 2008.
- [11] 李银平, 刘江, 杨春和. 泥岩夹层对盐岩变形和破坏特征的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 25(12): 2461—2466.
- LI Yin-ping, LIU Jiang, YANG Chun-he. Influence of mudstone interlayer on deformation and failure characteristics of salt rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 25(12): 2461—2466.
- [12] 李银平, 杨春和, 罗超文, 等. 湖北省云应地区盐岩溶腔型地下能源储库密闭性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2430—2436.
- LI Yin-ping, YANG Chun-he, LUO Chao-wen. Study on sealability of underground energy storage in deep salt formation in Yunying area, Hubei province[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(12): 2430—2436.
- [13] 陈祥胜, 李银平, 尹洪武, 等. 多夹层盐矿地下储气库气体渗漏评价方法[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 11—20.
- CHEN Xiang-sheng, LI Yin-ping, YIN Hong-wu, et al. Gas leakage assessment method of underground gas storage in multi-interlayer salt mine[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(1): 11—20.
- [14] 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, 33(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, 33(3): 500—506.
- [15] 刘伟, 李银平, 霍永胜, 等. 盐岩地下储库围岩界面变形与破坏特性分析[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.
- [16] 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, 2008, 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**, 2008, 28(7): 1297—1304.
- [17] CHEN X S, LI Y P, LIU W, et al. Study on sealing failure of wellbore in bedded salt cavern gas storage[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2019, 52(1): 215—228.
- [18] SHI X L, LIU W, CHEN J, et al. Geological feasibility of underground oil storage in Jintan salt mine of China[J]. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2017: 1—11.
- [19] 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.
- [20] 丁国生, 杨春和, 张保平, 等. 盐岩地下储库洞室收缩变形分析[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(1): 80—84.
- DING Guo-sheng, YANG Chun-he, ZHANG Bao-ping, et al. Shrinkage analysis of salt cavern storage[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2008, 4(1): 80—84.
- [21] 井文君, 程林, 杨春和, 等. 基于可靠度方法的盐岩地下储气库腔体收缩风险分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 2): 3673—3680.
- JING Wen-jun, CHENG Lin, YANG Chun-he, et al. Volume shrinkage risk analysis of salt rock cavern gas storage based on reliability method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(Suppl.2): 3673—3680.
- [22] 李银平, 孔君凤, 徐玉龙, 等. 利用 Mogi 模型预测盐岩储气库地表沉降[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1737—1745.
- LI Yin-ping, KONG Jun-feng, XU Yu-long, et al. Prediction of surface subsidence above salt rock gas storage using Mogi model[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(9): 1737—1745.
- [23] BENGE G. Improving wellbore seal integrity in CO₂ injection wells[J]. **Energy Procedia**, 2009, 1(1): 3523—3529.
- [24] DE SIMONE M, PEREIRA F L, ROEHL D M. Analytical methodology for wellbore integrity assessment considering casing-cement-formation interaction[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2017, 94: 112—122.
- [25] GENEDY M, KANDIL U F, MATTEO E N, et al. A new polymer nanocomposite repair material for restoring wellbore seal integrity[J]. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, 2017, 58: 290—298.
- [26] FRANSSON Å, TSANG C F, RUTQVIST J, et al. A new parameter to assess hydromechanical effects in single-hole hydraulic testing and grouting[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2007, 44(7): 1011—1021.
- [27] 邹翀, 李治国. 岩溶隧道富水区段衬砌渗漏水治理技术[J]. 隧道建设, 2005, 25(5): 49—52.
- ZOU Chong, LI Zhi-guo. Renovating technology of lining leakage at water rick sector of karst tunnel[J]. **Tunnel Construction**, 2005, 25(5): 49—52.
- [28] 唐玉华, 施智玲. 盐穴储气库井微渗层封堵技术[J]. 中国井矿盐, 2016, 47(3): 22—24.
- TANG Yu-hua, SHI Zhi-ling. The leaking stoppage technique of micro-infiltrated layers in salt-cavern gas storage wells[J]. **China Well and Rock Salt**, 2016, 47(3): 22—24.
- [29] 万贵春, 陈铁铮, 王得金, 等. 超细水泥用于油田封堵作业[J]. 钻井液与完井液, 2002, 19(1): 21—22.
- WAN Gui-chun, CHEN Tie-zheng, WANG De-jin, et al. Fine particulate cement for water shutoff[J]. **Drilling Fluid and Completion Fluid**, 2002, 19(1): 21—22.
- [30] 王超, 王野, 任强, 等. 超细水泥在储气库老井封堵中的研究与应用[J]. 钻井液与完井液, 2011, 28(5): 54—56.
- WANG Chao, WANG Ye, REN Qiang, et al. Research and application of superfine cement in job of old well plugging back in underground gas storage[J]. **Drilling Fluid and Completion Fluid**, 2011, 28(5): 54—56.
- [31] 袁光杰, 申瑞臣, 袁进平, 等. 盐穴储气库密封测试技术的研究及应用[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 119—121.
- YUAN Guang-jie, SHEN Rui-chen, YUAN Jin-ping, et al. Study and application of tightness testing technology for salt cavern gas storage[J]. **Acta Petrolei Sinica**, 2007, 28(4): 119—121.
- [32] 丁国生, 张昱文. 盐穴地下储气库[M]. 北京：石油工业出版社, 2010.
- DING Guo-sheng, ZHANG Yu-wen. Salt cavern gas storage[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [33] 李建中, 李奇, 胥洪成. 盐穴地下储气库气密封检测技术[J]. 天然气工业, 2011, 31(5): 90—92.
- LI Jian-zhong, LI Qi, XU Hong-cheng. Sealing testing techniques of underground gas storage based on salt caverns[J]. **Natural Gas Industry**, 2011, 31(5): 90—92.
- [34] API. Recommended practice for the design of solution-mined underground storage facilities[S]. Washington: API, 1994.
- [35] CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. Storage of hydrocarbons in underground formations[S]. Mississauga: Canadian Standards Association, 2002.