

微地震监测技术在地下储气库中的应用

魏路路¹ 井岗² 徐刚¹ 王飞¹ 李晓峰¹ 刘博¹

1. 中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司 2. 中国石油西气东输管道公司

摘 要 为了保证地下储气库（以下简称储气库）在建设和运行过程中的完整性与安全性，必须建立完善的监测系统。为了给储气库的安全运行提供参考，在分析微地震监测技术主要方法——纵横波时差定位算法和 b 值法原理的基础上，以中国东部某盐穴储气库为例，利用微地震监测技术对该储气库造腔和注气过程进行监测，采用纵横波时差定位算法对微地震事件位置进行反演，并根据造腔井附近的微地震事件定位结果对腔体形态进行刻画，同时对微地震事件进行 b 值法分析，判断注气过程中是否诱发断层活动。研究表明：①该盐穴储气库在造腔井中未发现能量较大的破裂或坍塌，造腔工艺较安全；②造腔井腔体形态不规则，可近似为圆柱体；③注气井注气压力上升可导致断层活动，但诱发断层活动是否对储气库完整性造成危害则需要对该区域进行长期监测和分析研究才能做出判定。结论认为：①为了保障储气库的安全运行，应降低断层附近注气井的上限压力；②微地震监测技术在保障储气库安全运行中起着至关重要的作用，应在储气库建设和运行过程中加强实时监测，以期对储气库安全预警和优化运行提供科学依据。

关键词 地下储气库 微地震监测 纵横波时差定位算法 b 值法 造腔形态 注气 诱发断层活动 盐穴储气库

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2018.08.006

Application of microseismic monitoring technology in underground gas storage

Wei Lulu¹, Jing Gang², Xu Gang¹, Wang Fei¹, Li Xiaofeng¹ & Liu Bo¹

(1. CNPC Bureau of Geophysical Prospecting INC., Zhuozhou, Hebei 072750, China; 2. PetroChina West-East Gas Pipeline Company, Zhenjiang, Jiangsu 212000, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 38, ISSUE 8, pp.41-46, 8/25/2018. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: In order to ensure the integrity and safety of underground gas storage (UGS) during its building and running, it is necessary to establish a complete monitoring system. In this paper, the principles of main microseismic monitoring technologies (i.e., P-S wave location algorithm and b -value method) were firstly analyzed. Then, one salt cavern UGS in eastern China was taken as an example. Its solution mining and gas injection process was monitored using microseismic monitoring technologies, and the locations of microseismic events were inverted by means of P-S wave location algorithm. Furthermore, the morphology of the cavity was depicted according to the location results of microseismic events near the cavity-building well. In addition, the microseismic events were analyzed using b -value method to determine whether a faulting activity is induced in gas injection, so as to provide reference for the safe operation of UGS. And the following research results were obtained. First, no large fracture or collapse was discovered in the cavity-building well of this salt cavern UGS. And it is indicated that the solution mining process is safe. Second, the shape of the cavity is irregular and it can be approximated as a cylinder. Third, the increase of gas injection pressure of gas injecting well can induce a faulting activity, but whether the induced faulting activity has damage to the UGS integrity cannot be judged unless long-term monitoring and analysis are carried out in this area. In conclusion, the upper limit pressure of the gas injecting wells near the fault shall be reduced in order to ensure the safe operation of UGS. In addition, microseismic monitoring technology plays a vital role in guaranteeing the safe operation of UGS, so it is necessary to strengthen the real-time UGS monitoring during its building and running so as to provide a scientific basis for its early safety warning and operation optimization.

Keywords: Underground gas storage (UGS); Microseismic monitoring; P-S wave location algorithm; b -value; Cavity morphology; Gas injection; Induced faulting; Salt cavern UGS

基金项目：国家科技重大专项“油藏及非常规气藏地球物理配套技术”（编号：2017ZX05018-004）。

作者简介：魏路路，1988年生，工程师，硕士；主要从事微地震监测技术方法的研究工作。地址：（072750）河北省涿州市甲秀路物探局5号院。ORCID: 0000-0002-2233-3960。E-mail: weilulu01@cnpc.com.cn

0 引言

为了保证储气库在建设和运行过程中的完整性与安全性,必须建立完善的监测系统。在国外,一些学者已经对储气库微地震监测技术进行大量理论研究和实际应用。1992年开始,法国马诺斯克盐穴储气库建立了微地震监测系统^[1],至2013年的21年时间里定位到10 000多个诱发微震事件(震级介于-1.0~0.3),这些事件中大约有90%都与溶腔有关。除了诱发微地震活动,还监测到大约1 000个与盐体动力现象有关的事件(震级最高达到3.5级)被定位在底辟构造附近。2007年Mercerat等^[2]在盐腔内进行可控瞬态压力试验,通过追踪诱发微地震事件分析岩石超压的力学响应,更好地了解岩体内部的损伤过程。2010年荷兰Bergermeer储气库利用微地震监测技术监测储气库运行期间地下活动^[3],从监测开始至2013年1月,两年半的时间里共定位震级介于-2.0~-3.0级的微地震事件220个,通过微震监测证实了天然气注入对中间断层的稳定效应,并且发现了一个现有三维地震资料无法识别的气流挡板和小断层,最终根据微地震结果调整注采方案。2011年Eisner等^[4]对储气库微地震监测观测系统设计进行研究,比较了井下和地面监测阵列的定位精度,并综合这些数据确定最优的监测阵列。2014年Simone等^[5]对距离西班牙地中海海岸几十千米接近埃布罗河三角洲区域发生一系列地震活动进行研究,应用全波形技术反演震源位置、震源深度和震源机制,通过震源机制分析得到诱发地震由附近枯竭油气藏储气库注气活动引起。

近年来,我国在吸收国外成熟技术经验的基础上,持续加大储气库建设力度。但是,国内建库条件复杂,受注采交变应力影响,以及监测手段单一、监测体系不完备,可能导致圈闭完整性失效和天然气漏失,必须建立完善的监测体系^[6-7]。微地震监测技术具有覆盖范围大、测量速度快、噪音过滤能力强、定位准确、现场应用方便等特点,可作为常规监测手段的有效补充,实现对断裂密封性和流体运移实时监测,可为储气库安全预警和优化运行提供科学依据。虽然国内微地震监测技术已趋于成熟,应用范围也越来越广,但是少有储气库微地震监测这方面的研究与应用。以中国东部某盐穴储气库为依托,研究微地震监测技术在储气库建设运行中的作用,利用微地震事件定位结果对造腔井腔体形态进行刻画,并对注采井进行安全性评价。

1 技术原理

1.1 纵横波时差定位算法

微地震反演定位方法是微地震监测技术的核心问题^[8-11]。在众多的定位方法中,基于走时的同型波或纵横波时差定位算法是微地震反演中经典的算法。当微地震记录信噪比较高,同时存在足够纵横波信号时,可采用纵横波时差定位算法对微地震事件进行反演定位。

设第 k 个事件震源位置坐标为 $Q_k(x_{qk}, y_{qk}, z_{qk})$,第 i 个检波器坐标为 $P_i(x_{pi}, y_{pi}, z_{pi})$,则震源与观测点之间的距离为:

$$d_{ki} = \left[(x_{pi} - x_{qk})^2 + (y_{pi} - y_{qk})^2 + (z_{pi} - z_{qk})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中 d_{ki} 表示震源与第 i 个检波器之间的距离, m; x_{qk}, y_{qk}, z_{qk} 分别表示第 k 个事件震源位置在三维空间 x, y, z 轴上的坐标, m; x_{pi}, y_{pi}, z_{pi} 分别表示第 i 个检波器在三维空间 x, y, z 轴上的坐标, m。

已知纵横波传播速度 v_p, v_s ,则 P_i 点记录到微地震信号纵横波走时时差 ΔT_{ki} 可用公式(2)表示,即:

$$\Delta T_{ki} = \frac{d_{ki}}{v_s} - \frac{d_{ki}}{v_p} \quad (2)$$

则

$$\left[(x_{pi} - x_{qk})^2 + (y_{pi} - y_{qk})^2 + (z_{pi} - z_{qk})^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{\Delta T_{ki} v_s v_p}{v_p - v_s} \quad (3)$$

式中 ΔT_{ki} 表示 P_i 点记录到的震源坐标为 $Q_k(x_{qk}, y_{qk}, z_{qk})$ 微地震信号纵横波走时时差, s; v_p, v_s 分别表示纵、横波速度, m/s。

当接收信号的检波器个数大于3个,则可通过求解上式,得到微地震震源坐标。

1.2 b 值分析法

b 值估计来源于经典地震学。该方法的基础来源于任何一个地震序列的事件发生频率和它们的震级都不是完全杂乱无章、无迹可寻的^[12]。与之相反,它们遵循着一个幂定律关系。任何一个地震序列的频率—震级关系可以用公式(4)表示^[13],即:

$$\lg N_M = a - bM \quad (4)$$

式中 N 表示大于震级 M 的事件数,个; M 表示地震震级, M(里氏级); b 值是 $\lg(N)$ 与 M 交会图的线性拟合斜率,无因次。

2005年Danijel等^[14]指出 b 值受断层/裂缝机制影响。Williams等^[15-17]研究结果认为,当 b 值小

于 1 时，垂直应力是最小的，岩石处于压缩状态，破裂机制为逆断层； b 值为 1 时，垂直应力处于中间大小，破裂机制为走滑断层； b 值大于 1 时，岩石处于向外拉伸状态，对应正断层破裂机制。

2 盐穴储气库微地震监测应用实例

2.1 微地震监测概况

本文研究的盐穴储气库坐落在中国东部，岩盐矿床平面形态呈肾状分布，岩盐层埋深介于 800 ~ 1 200 m，厚度介于 67.85 ~ 232.29 m，分布较平缓，略有起伏，在平面和纵向上分布都比较稳定；上覆盖层岩性为泥岩，岩性纯、厚度大（图 1）。盐穴储气库腔体采用单井—单腔建库方式，腔体形状并不规则，可近似认为是半径 40 m、高 80 m 的圆柱体。

本次研究微地震监测技术在储气库中的作用包括以下方面：①利用微地震监测技术监测储气库在造腔和注气过程中地下岩层的活动情况，并根据微地震定位结果对造腔井腔体形态进行初步刻画；②监

测造腔过程中是否存在较大垮塌对腔体内井下工具造成伤害；③监测注气过程中是否诱发微地震事件，并对监测范围内储气库注气施工进行安全性评价。由于岩盐层上部（埋深 500 m 左右）较厚的玄武岩（图 1）对地震波信号存在屏蔽干扰，所以本次监测采用井中微地震监测方式。在监测井中放入 12 个三分量检波器（图 2），埋置深度为 870 ~ 980 m，级间距为 10 m。图 2 中所有井的井型为直井，监测井井口距离注采井和造腔井井口介于 277 ~ 969 m，监测日期从 2016 年 12 月 8 日—31 日共 23 d。

2.2 微地震监测结果

在微地震监测过程中，共监测到 500 多个有效微地震事件，其中在造腔井中监测到少量微地震信号，在距离监测井较近的注气井中并未监测到微地震事件（图 3）。大量事件集中出现在距离监测井较远的几口注气井附近，此处共监测到 473 个微地震事件，这些微地震信号在某一时间集中发生。从图 3、4 可以看出该区域微地震事件面状分布特性十分明显，震级范围介于 -2.500 ~ -0.353。根据微地震裂缝方位

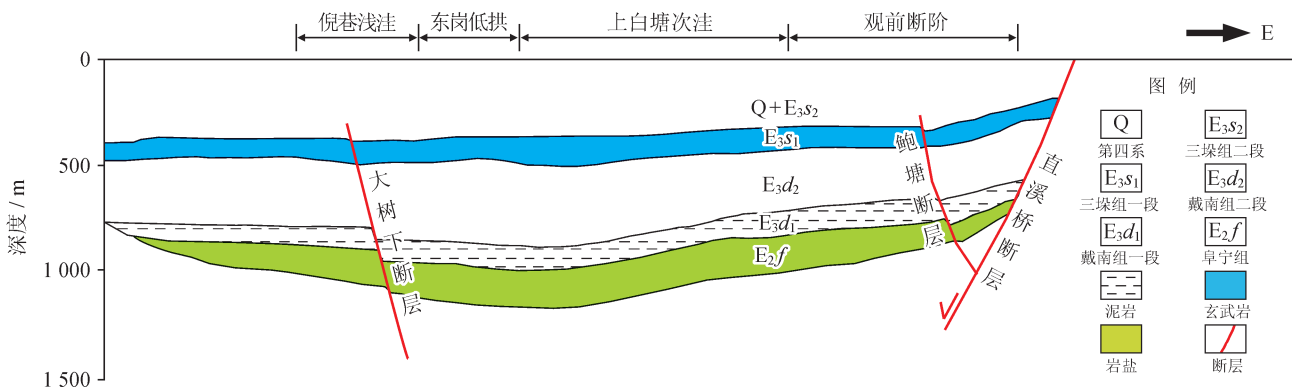


图 1 中国东部某盐穴储气库地质剖面图

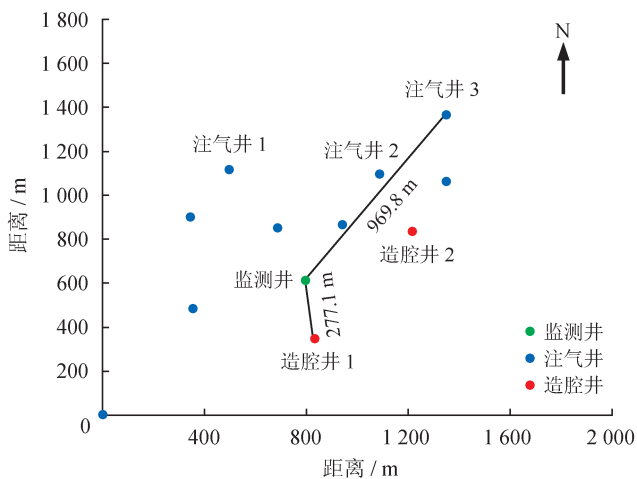


图 2 监测井、造腔井及注气井井位关系图

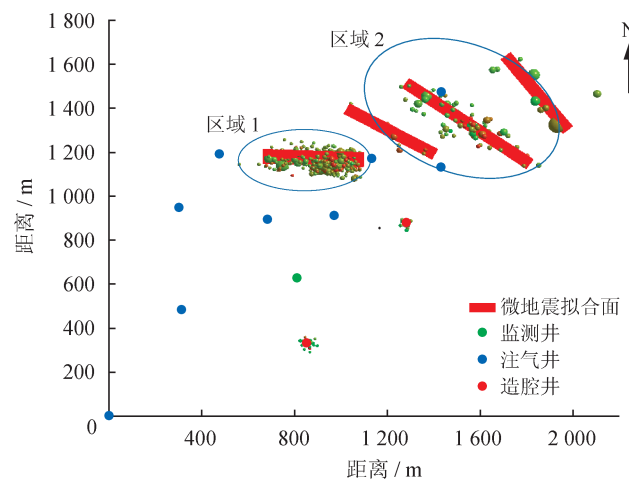


图 3 微地震事件定位结果俯视图

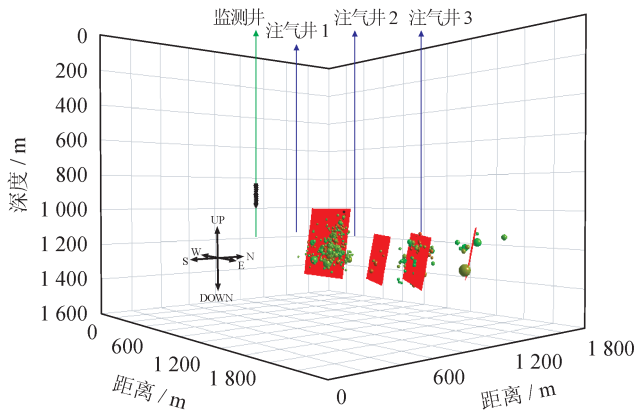


图 4 区域 1、区域 2 微地震事件三维显示图

特性，将该区域事件分为两个区域，区域 1 为呈近东西向分布的微地震事件，共 387 个，震级范围介于 $-2.500 \sim -0.585$ ；区域 2 为近西北—东南向微地震事件，共 86 个，震级范围介于 $-2.210 \sim -0.353$ 。

在造腔井中也监测到少量微地震事件（图 5），其中造腔井 1 共监测到 16 个微地震信号，震级范围介于 $-2.63 \sim -2.10$ ，微地震事件距离造腔井井轨迹最远水平距离为 40 m；造腔井 2 共监测到 16 个微地震信号，震级范围介于 $-2.48 \sim -2.26$ ，微地震事件距离造腔井井轨迹最远水平距离为 28 m。表明发生在造腔井附近的微地震事件与腔体表面岩盐破裂或垮塌有关，微地震事件定位位置可指示腔体边缘位置，通过计算微地震事件空间位置包络可以初步刻画腔体形态（图 6）。图 6 刻画的腔体形态并不规则，可近似认为是一个圆柱体，腔体刻画的精度取决于微地震事件定位精度，由于本次采用井中单井监测

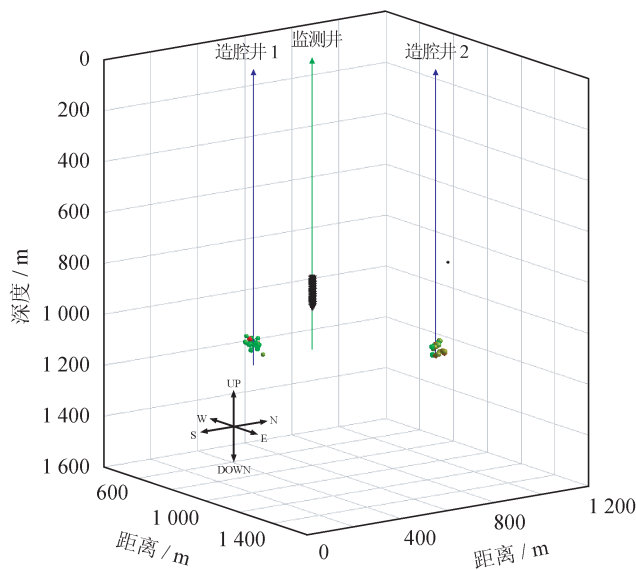


图 5 造腔井 1、造腔井 2 微地震事件定位结果三维显示图

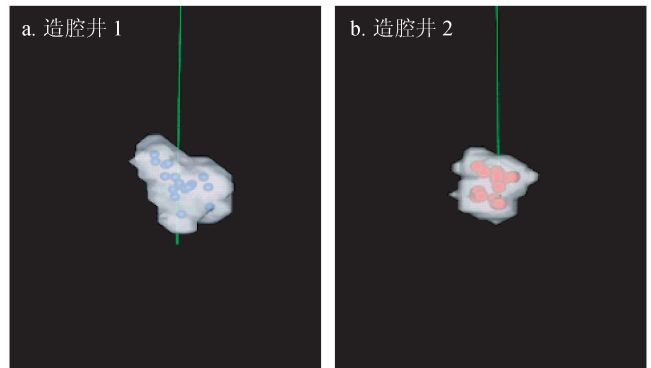


图 6 微地震事件包络刻画造腔井腔体形态图

且采用水平层状速度模型，可能导致腔体的初步刻画存在较大误差。

2.3 综合分析解释

在所有监测到的微地震事件中，造腔井附近微地震事件的形成原因较好解释，认为其产生与造腔活动有关。但是，在注采井附近监测到的大量成面状分布的微地震事件群，其产生原因和对储气库造成的影响需要进一步分析确认。

2.3.1 b 值分析

b 值大小可以定性描述微地震事件活动是否与断层活动有关，并对岩石破裂时破裂机制和应力状态进行描述。对区域 1、区域 2 中的微地震事件进行 b 值分析（图 7），结果表明，区域 1、区域 2 微地震事件 b 值大小分别为 1.2、1.1。根据研究， b 值为 1 左右与相关断层活动有关，并且 b 值大于 1 对应正断层向外扩展的应力状态。

2.3.2 微地震、地震结合分析

将微地震数据与地震数据进行结合分析，可以得到更多的结论与认识。建库前期已对该区域进行过高分辨率三维地震勘探工作，可将定位微地震事件与三维地震剖面结合分析。图 8 为该区域某一测线叠加剖面图，红色圈定区域对应面状分布的微地震事件位置。从图 8 中可看出盐岩层同向轴不连续，存在小的断层或裂缝，判断区域 1、区域 2 中成面状集中发生的微地震事件可能与此有关。

前期地震勘探工作中，已对该区域断层进行了精细刻画，该区域存在一些断层，将区域 1、区域 2 微地震事件位置投影到断层图中，发现在集中出现的微地震事件与断层解释吻合较好。将微地震事件位置附近放大显示，区域 1 与区域 2 分别对应近东西向和西北—东南向断层（图 9）。其中区域 1 微地

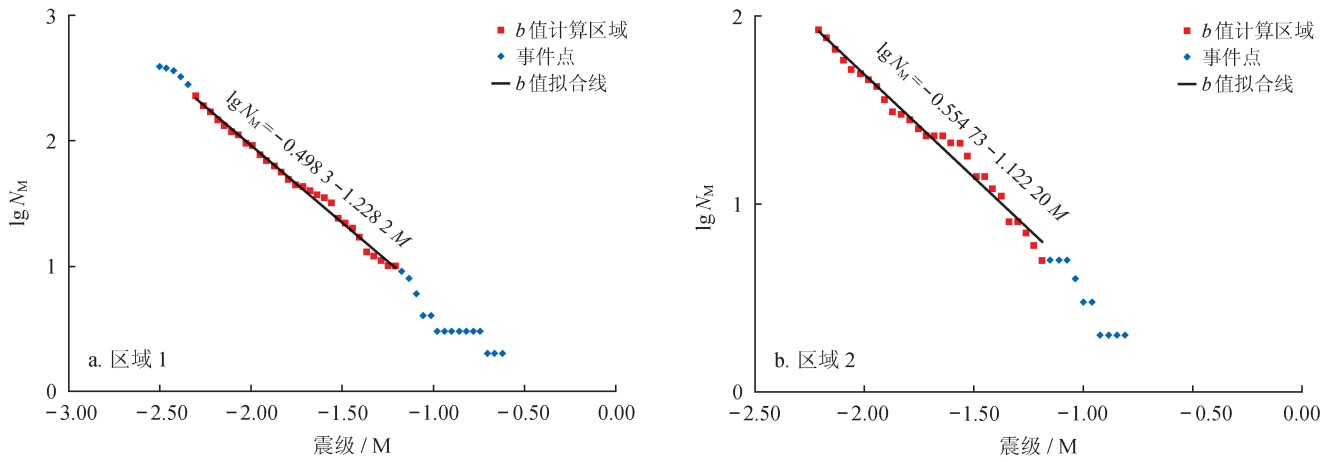


图 7 微地震事件 b 值分析图

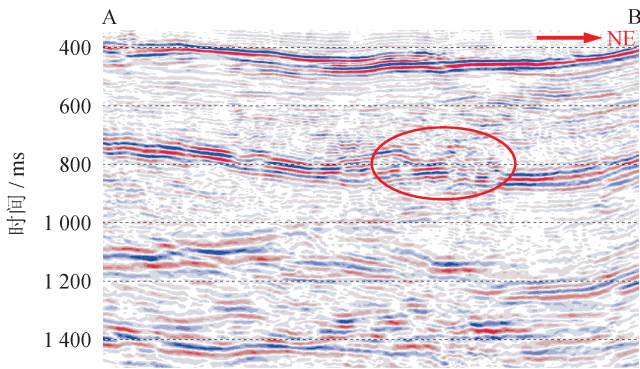


图 8 区域 1、区域 2 微地震事件位置处对应的三维地震剖面图

震事件与断层位置存在较小差异，可能是三维地震勘探精度误差导致，区域 2 中有部分微地震事件位置附近并未发现断层，推断可能是断层较小，三维地震勘探精度无法识别。

2.3.3 微地震与注气参数结合分析

通过 b 值计算和微地震、地震资料结合分析，初步认为区域 1、区域 2 呈面状分布的微地震事件产生与断层活动有关。为了研究断层活动是否由注气施工诱发及两者之间对应关系，将微地震事件产生

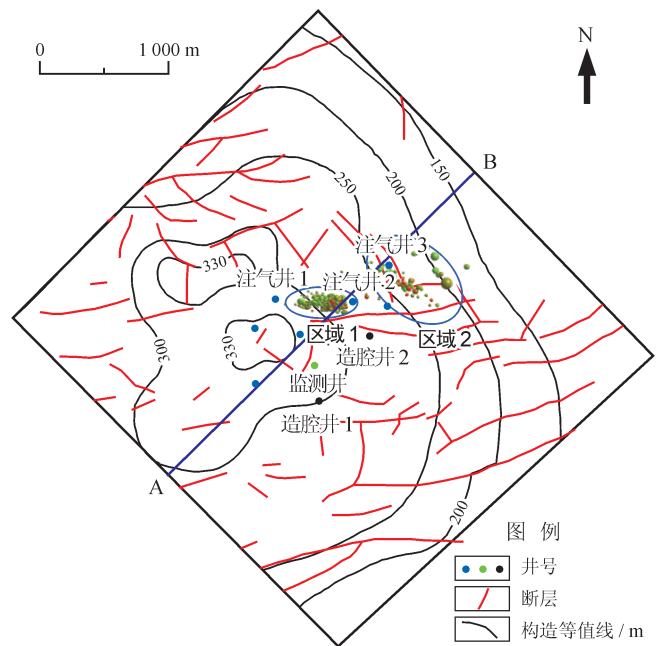


图 9 断层解释与微地震结合分析图

规律与断层附近注气井施工参数进行分析（图 10）。从图 10 中可以发现区域 1、区域 2 的微地震事件产生过程存与天然气注入具有较强的相关性。在注气

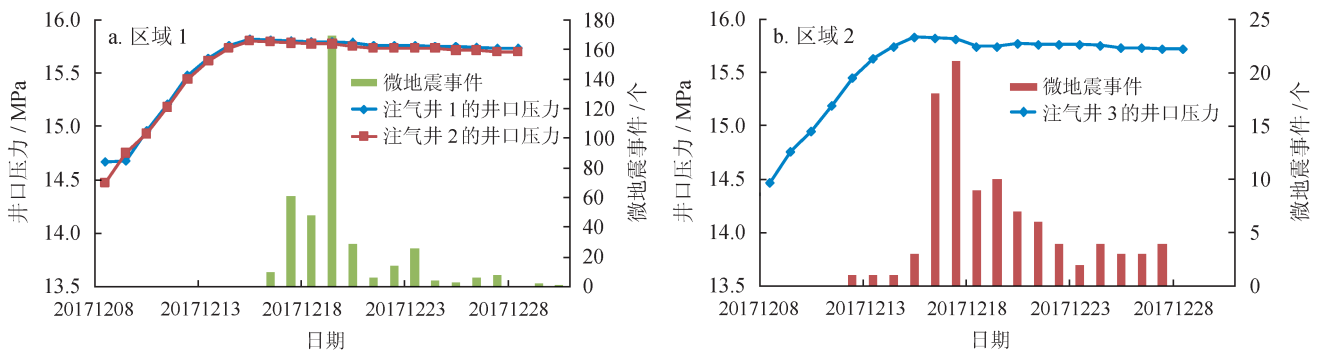


图 10 微地震事件与注气井井口压力关系图

初期,并未监测到微地震事件,随着注气井压力上升,当井口压力达到一定值时开始并大量出现微地震信号,初步认为断层活动由注气施工诱发。因此,在今后的注采气过程中,应对该区域进行重点监测和研究,在进一步实验分析取得有效结论前,为了保证储气库的安全运行,建议施工过程中,将注采井 1、2 的井口压力保持在低于 15.8 MPa,注采井 3 的井口压力保持在低于 15.4 MPa。

3 结 论

1) 中国东部某盐穴储气库在造腔井中未发现能量较大的破裂或垮塌,造腔工艺较安全。微地震事件定位结果反映造腔井腔体形态不规则,可近似认为圆柱体。腔体形态描述的准确性主要由微地震事件定位精度决定,要想取得精细结果,应对速度模型进行精细刻画,并布设完善的观测系统。

2) 微地震监测注气井 1、2、3 附近存在断层活动,分析认为由注气井注气压力上升导致,但诱发断层活动是否对储气库完整性造成危害则需要对该区域进行长期监测分析研究。为了保障储气库安全运行建议在取得进一步结论前,降低注气井 1、2、3 的井口压力。

3) 微地震监测技术在储气库安全运行中意义重大,可以在储气库建设和运行过程中实时监测地下活动,为储气库安全预警和优化运行提供科学依据。

参 考 文 献

- [1] Renoux P, Fortier E & Maisons C. Microseismicity induced within hydrocarbon Storage in Salt Caverns, Manosque, France[C]// Solution Mining Research Institute Fall 2013 Technical Conference, 30 September–1 October 2013, Avignon, France.
- [2] Mercerat D, Lynda DL, Bernard P & Souley M. Induced seismicity monitoring of an underground salt cavity under a transient pressure experiment[C]//Solution Mining Research Institute Spring Technical Conference, April 2007, Bale, Switzerland.
- [3] Kraaijpoel DA, Nieuwland DA & Dost B. Microseismic monitoring and subseismic fault detection in an underground gas storage[C]// Eage Passive Seismic Workshop, 2013.
- [4] Eisner L, Stotter C, Mueller MC, Duncan PM & Herndler E. Design of passive seismic monitoring for underground gas storage in the Vienna Basin, Austria[C]//73rd EAGE Conference & Exhibition Incorporating SPE EUROPEC 2011, 23–26 May 2011, Vienna, Austria.
- [5] Simone C, Francesco G, Sebastian H, Álvaro G, Elisa B, Samira M, et al. The 2013 September–October seismic sequence offshore Spain: A case of seismicity triggered by gas injection[J]. *Geophysical Journal International*, 2014, 198(2): 941-953.
- [6] 虞维超, 薛鲁宁, 黄维和, 张也, 温凯, 宫敬. 储气库可靠性一体化分析方法研究 [J]. *石油科学通报*, 2017, 2(1): 102-114. Yu Weichao, Xue Luning, Huang Weihe, Zhang Ye, Wen Kai & Gong Jing. An integration method for evaluating the operating reliability of underground natural gas storage[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2017, 2(1): 102-114.
- [7] 丁建东, 杨永祥, 丁熠然, 刘靓雯, 潘众, 荣伟. 苏桥地下储气库群注采工程风险与安全保障体系 [J]. *天然气工业*, 2017, 37(5): 106-112. Ding Jiandong, Yang Yongxiang, Ding Yiran, Liu Liangwen, Pan Zhong & Rong Wei. Risk analysis and a safety control system of the injection–production project in the Suqiao underground gas storage group, North China[J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(5): 106-112.
- [8] Zhou Wen, Wang Liangshu, Guan Luping, Guo Quanshi, Cui Shuguo & Yu Bo. Microseismic event location using an inverse method of joint P–S phase arrival difference and P-wave arrival difference in a borehole system[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2015, 12(2): 220-226.
- [9] Castellanos F & Van der Baan M. Microseismic event locations using the double-difference algorithm[J]. *CSEG Recorder*, 2013, 38(3): 26-37.
- [10] Bancroft JC, Wong J & Han L. Sensitivity of locating a microseismic event when using analytic solutions and the first arrival times[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2010(29): 2191-2195.
- [11] Geiger L. Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only[J]. *Bull. St. Louis Univ.* 1912(8): 56-71.
- [12] De La Pena A, Wessels SA, Gunnell AR, Numa KJ, Williams-Stroud S, Eisner L, et al. Fault or Frac? source mechanism and b value detection of fault fracturing: A Barnett case study[C]// 73rd EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2011, 23–26 May 2011, Vienna, Austria.
- [13] Keiiti A. Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N=a-bM$ and its confidence limits[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1965, 43(2): 237-239.
- [14] Danijel S, Stefan W & Max W. Variations in earthquake-size distribution across different stress regimes[J]. *Nature*, 2005, 437(7058): 539-542.
- [15] Williams MJ, Calvez JHL, Connors S & Xu Wenyue. Integrated microseismic and geomechanical study in the Barnett Shale Formation[J]. *Geophysics*, 2016, 81(3): KS135-147.
- [16] Grob M & Baan MVD. Statistical analysis of microseismic event locations and magnitudes, and their geomechanical implications[C]//SEG Technical Program Expanded, 2011, 30(1): 1570-1575.
- [17] Maxwell SC, Jones M, Parker R, Leanney S, Mack M, Dorval D, et al. Fault activation during hydraulic fracturing[C]//72nd EAGE Conference and Exhibition, 2010.