

基于微震监测的地下水封石油洞库施工期围岩稳定性分析

马 克^{1,2}, 唐春安³, 梁正召³, 吴 疆⁴, 徐奴文⁵, 庄端阳³

(1. 中国科学院 力学研究所, 北京 110190; 2. 大连力软科技有限公司, 辽宁 大连 116600; 3. 大连理工大学 岩石破裂与失稳研究中心, 辽宁 大连 116024; 4. 廊坊中油朗威工程项目管理有限公司, 河北 廊坊 065000; 5. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要:采用加拿大 ESG 微震监测系统对锦州某大型地下水封石油洞库局部开挖过程进行实时监测和分析, 圈定监测范围内围岩潜在危险区域, 再现开挖过程中洞库失稳区域的岩体微破裂萌生、发展和集聚。结果表明: (1) 采用人工定点敲击试验对监测系统定位性能进行测试, 确定研究区域岩体整体等效 P 波波速为 5 200 m/s, 传感器阵列范围内的震源定位误差小于 8 m; (2) 监测区域岩体微破裂呈 2 个条带状聚集, 一条位于水幕巷道 6 东侧, 水幕巷道 1 和 2 范围, 与水平面呈缓倾角。另一条位于储油洞室 1 北与 1 南范围 2+40~2+60 里程区域内, 与该区域辉绿岩脉分布范围一致, 说明微震监测系统可以查明判别岩脉等软弱结构面情况。这是由于大断面的储油洞室的强开挖卸荷, 高能量的释放导致岩脉的“过度”损伤, 从而诱发大量的微破裂。研究结果证明微震监测技术在地下水封石油洞库这种特殊岩体结构中应用的可行性, 为后期大规模微震监测系统的构建与实施提供参考依据。

关键词: 岩石力学; 地下水封石油洞库; 开挖卸荷; 微震监测; 能量释放

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2016)06-1353-13

Stability analysis of the surrounding rock of underground water-sealed oil storage caverns based on microseismic monitoring during construction

MA Ke^{1,2}, TANG Chun'an³, LIANG Zhengzhao³, WU Jiang⁴, XU Nuwen⁵, ZHUANG Duanyang³

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 110190, China; 2. Dalian Mechsoft Co., Ltd., Dalian, Liaoning 116600, China; 3. Institute of Rock Instability and Seismicity Research, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China; 4. China Petroleum Longway Engineering Project Management Co., Ltd., Langfang, Hebei 065000, China; 5. College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract: The real-time monitoring and analysis of the microseismic activities of the cave rocks of a large underground water-sealed oil storage cavern in Jinzhou during the disturbance caused by strong excavation were performed using the Canadian ESG monitoring system. The potential failure regions of the cave rocks within the scope of monitoring were identified. The initiation, development and agglomeration process of the rock micro-cracks during excavation were reproduced. The P wave velocity was determined to be 5 200 m/s with the error of source location less than 8 m within the scope of the sensor array. Micro-cracks of rocks within the scope

收稿日期: 2015-08-14; **修回日期:** 2015-10-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51504233); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2014CB047100); 中国博士后科学基金资助项目(2015M571137)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51504233), National Key Basic Research Development Plan(973)(Grant No. 2014CB047100) and the China Postdoctoral Science Foundation(Grant No. 2015M571137)

作者简介: 马 克(1983-), 男, 博士, 2006年毕业于辽宁科技大学土木工程专业, 现为博士后, 主要从事岩体工程微震监测及预警方面的研究工作。E-mail: mmaarrk1983@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.1137

were aggregated into two bands. One was located to the east of water curtain tunnel 6, in between the water curtain tunnels 1 and 2, and had a low angle with the horizontal plane. The other was located in 2+40-2+60 mileage between the oil storage grotto 1-North and 1-South, and shared the same distribution with the diabase dikes in the region. The microseismic monitoring system identified the condition of the weak structural surface like dikes. The strong excavation disturbance of the large section oil storage caverns and the release of large amount of energy led to the "over damage" of rock and resulted in a large number of micro-cracks. The research results proved the feasibility of applying the microseismic monitoring technology in the special rock mass structures like underground water-sealed oil storage caverns.

Key words :rock mechanics ;water sealed underground oil storage caverns ;excavation disturbance ;microseismic monitoring ; energy release

1 引言

石油储备已经被许多国家提到了战略高度上,地下水封石油洞库是国内外石油战略储备的一种重要方式,已在我国如火如荼地建设中^[1-3]。其特殊的工程类型 - 高边墙、大跨度和不确定结构面等使得洞库围岩稳定问题愈来愈成为水封洞库建设的关键和核心问题。国内外学者做了大量的研究工作,并取得了诸多有价值的成果。P. F. Gnirk 和 A. F. Fossum^[4]基于大型地下洞室储存压缩气体能量的稳定性,建立地下洞室稳定性评价的数值模型。陈奇等^[5]通过对实际液化石油气地下洞库工程的研究,指出石油洞库的围岩稳定主要取决于岩体的应力情况和完整性两方面因素。M. Tezuka 和 T. Seoka^[6]分析了地震火山多发的日本大断面地下水封储油洞库围岩的稳定性。连建发^[7]应用 ANSYS 对辽宁锦州大型地下水封油气库围岩稳定性进行了数值分析,实现了水封洞库围岩稳定性评价的可视化。J. J. Park 等^[8]结合韩国第一个湖下的 Pyongtaek LPG 水封洞库,研究了对建造过程中的应力状态、围岩属性以及既有洞库的稳定性。王芝银等^[9]从岩体流变时效特性方面,评价了大型地下储油洞室的强度及长期稳定性。徐方^[10]利用分形理论详细阐述青岛某地下水封石油储备库围岩渗透性和稳定性。陈祥^[11]根据黄岛地下水封石油洞库工程的具体情况,通过 FLAC^{3D} 对洞库的稳定性进行了数值模拟,分析了影响洞库的工程地质因素,并提出了判别岩爆的指标。王怡等^[12]应用三维有限差分法对地下储油洞库进行了流固耦合和变形特征等问题的研究,分析了掌子面推荐的空间影响范围,并得出了一些有益结论。上述研究成果为地下水封石油洞库围岩稳定方面的研究奠定了良好的基础。

然而,对于这种处于优质稳定性岩区的大断面

洞室群结构,其涉及的开挖工作面众多,这种工程结构的特殊性导致岩体力学性质的多样性和不确定性,并且施工期的强开挖卸荷作用更会对洞室群的围岩稳定性产生极大影响。随着地下水封石油洞库工程的规模不断增大,开挖过程中的围岩稳定性问题越来越成为决定工程成败的重要因素。

由于岩体结构的损伤破坏过程是一个伴随弹性波等形式释放出能量的渐进破坏诱致突变的过程,同时微震监测技术是获得岩体微破裂产生弹性波的三维空间监测技术,所监测的能量是岩石损伤破坏释放能量的一部分^[13]。因此,近年来微震监测作为一种岩体微破裂三维空间监测技术被广泛应用于矿山、水利水电、石油工程等领域中来揭示岩体内部动态损伤特征和评价工程岩体的稳定性。这亦是大型岩体工程可应用微震监测技术进行预警预报的力学基础^[14-17]。国内许多学者曾应用微震监测技术对滕东生建煤矿^[18]、冬瓜山铜矿^[19]、凡口铅锌矿^[20]、锦屏二级水电站深埋引水隧洞和排水洞^[21]、猴子岩水电站地下厂房^[22]等工程进行统计分析,并研究其发生规律,为大型洞库围岩稳定的理论研究和失稳预警等提供了重要资料。

如何有效利用微震监测技术对强开挖卸荷作用下水封石油洞库围岩内部可能出现的微破裂进行有效的监测,提前预测判别岩体潜在的失稳区域和围岩变形损伤程度,从而提高对围岩安全稳定性的正确判断,国内外尚缺乏相关的研究。开展地下水封石油洞库施工期的微震监测,进而分析其围岩力学行为特征,对全面评价地下水封石油洞库围岩稳定性具有重要的现实意义。

本文通过构建锦州某地下水封石油洞库储油洞室 1 北和 1 南的微震监测系统,对储油洞室 1 北和 1 南强开挖卸荷作用诱发的围岩微震活动性进行实时分析研究,试图识别和圈定洞库围岩潜在风险区域,以期较全面反映施工期地下水封洞库围岩体的

稳定性，为水封石油洞库的设计施工提供参考。

2 锦州某地下水封石油洞库工程

2.1 工程概述

锦州某地下水封石油洞库地处辽西山地东南边缘剥蚀丘陵，地面海拔高程 15.3~43.0 m，地下水位 10~25 m。地下水封洞库工程设计总容量为 $300 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，其主要组成部分如图 1 所示，包括东西向平行布置的 8 个储油洞室(分为 4 组)、水幕系统(包括水幕巷道和水幕孔)、施工巷道和连接巷道等设施构成。储油洞室洞底标高 -80 m，洞顶标高 -56 m，尺寸如图 2 所示。

在储油洞室洞顶上方 24 m 处设置水幕系统来保证储油洞库的水封效果，水幕系统由两部分组成：一部分是 SN 向和 EW 向分别布设的水幕巷道，底标高为 -32 m，尺寸如图 2 所示；另一部分是与水幕巷道相连接的水平和垂直水幕孔。5 条 EW 向布置的水幕巷道各超出储油洞室范围 20 m，自北向南依次为水幕巷道 1~5，SN 向布置的水幕巷道 6 分为 3 段，南北端超出储油洞室范围以外 14.5 m。水平水幕孔按 EW 方向布置，直径为 100 mm，两孔之间的间距为 20 m。垂直水幕孔直径为 100 mm，孔间间距为 20 m，孔深 58 m，底标高为 -90 m^[7]。2 条施工巷道为 8 m×8 m 的直墙拱形洞室(见图 2)，连通着水幕巷道 6 与连接巷道，出口位于场区东侧。

2.2 地质条件及施工方案

根据现场钻探、原位测试、孔内测试及室内试验结果可知场区表层为残积土层，其下基岩为中粗

粒花岗岩。场区 10 km 之内没有明显的大型断裂，但较小规模的岩脉分布较多，以辉绿岩脉、细晶岩、角闪闪长玢岩等岩脉为主。岩脉的走向、倾向及倾角与花岗岩节理基本一致，优势走向为 NNW 和 NNE，倾角则主要集中于 70°~80°和 40°~500°。在岩脉侵入部位，由于热液蚀变作用，节理发育，造成岩脉接触带附近的花岗岩一般较为破碎。场区地下水以基岩裂隙水为主，按赋存条件主要分为全、强风化带中的网状裂隙水和其下的脉状裂隙水^[23]。现场流量统计结果发现，施工期单个储油洞室平均涌水量达 295 m³/d，整个水封石油洞库平均涌水量近 4 800 m³/d。截止 2014 年 9 月施工期场区地下水位平均下降 11.05 m，场区西端和东北端区域水位最高下降 49.77 m，低于设计允许水位近 30 m。地下水位的下降，将会弱化岩脉和破碎带岩体强度，造成洞库围岩受力状态及其稳定性的恶化。

洞库各巷道、储油洞室的开挖采用台车钻眼，钻爆法施工。各巷道和洞室根据围岩级别，确定爆破循环进尺。水幕巷道实施全断面开挖，储油洞室由于开挖断面大，采用分步开挖法施工，周边均实施光面控制爆破。储油洞室按上、中、下层依次进行开挖，开挖高度分别 6，12，6 m(见图 2)，每一层根据围岩级别，采用全断面、左右半断面分部开挖法、台阶法等开挖方法。储油洞室上、中、下层分别同时开挖施工，相邻掘进工作面交错一定距离，以保证施工安全。截止 2014 年 7 月 28 日，水幕巷道、施工巷道、连接巷道已全部完成开挖，8 条储油洞室上层均完成开挖，中层和下层正在进行开挖，整个水封石油洞库开挖工作面多达 17 个，如图 3

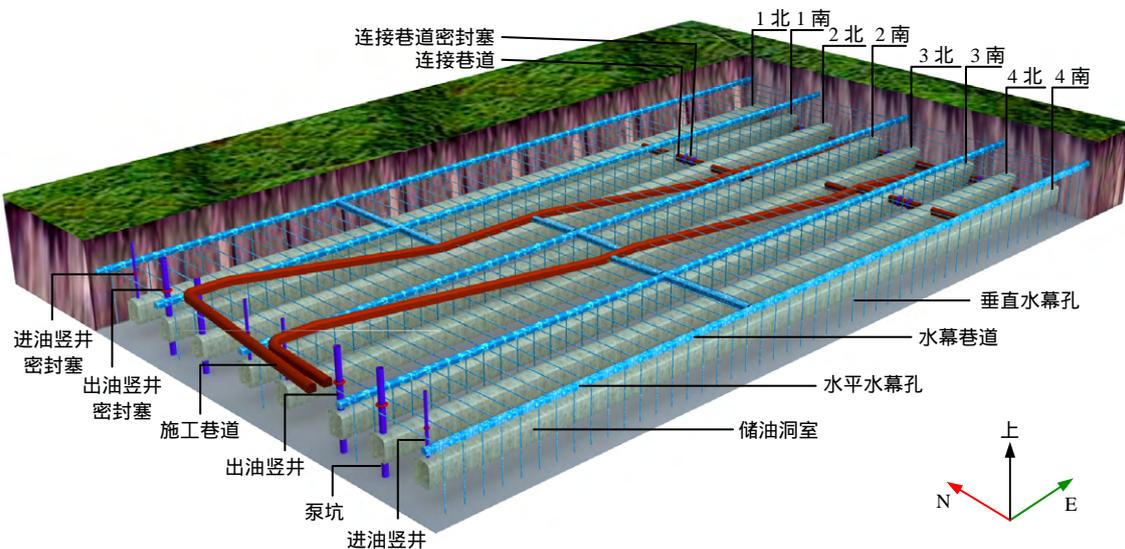


图 1 锦州某地下水封石油洞库示意图

Fig.1 Sketch of some underground water-sealed oil storage caverns in Jinzhou

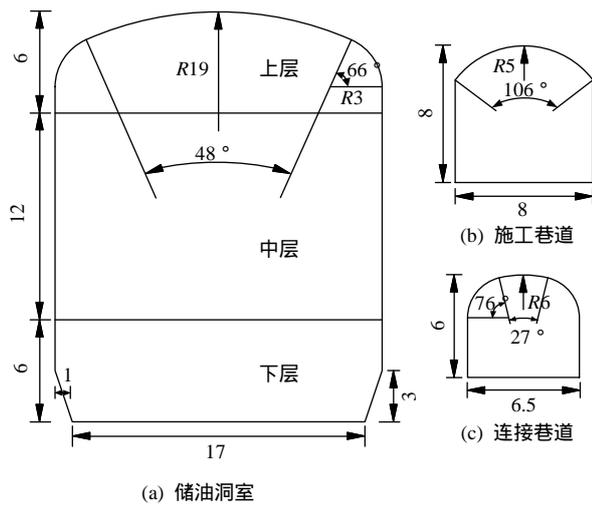


图2 储油洞室、施工巷道和水幕巷道尺寸(单位: m)
Fig.2 Dimension of storage grotto, construction tunnel and water curtain tunnel(unit: m)

所示。中层 3~4 日爆破一次, 进尺 10 m 左右, 每次开挖量多达 4 000 m³, 下层日进尺为 5~10 m, 形成快进尺、多断面、大开挖, 强卸荷的施工特征。

3 水封石油洞库微震监测系统构建

3.1 微震监测原理

岩石的非均匀性是地下洞室围岩失稳存在前兆的根源, 也是围岩失稳可预警的力学基础^[24]。利用

优化的监测网络技术对研究区域内伴随岩体微破裂产生的弹性波或者应力波进行捕捉, 反演计算微破裂的“时空强”三要素, 分析其活动性分布规律, 可识别和圈定水封石油洞库围岩潜在危险区域, 进而判断施工期围岩稳定状态。这种监测岩体微破裂产生的弹性波的三维空间监测技术称为微震监测^[25], 较之于以监测现场选定位置的应力和变形的传统监测技术, 微震监测技术能够更早地监测到岩体中正在发生的损伤和渐进性破坏过程, 从而进行围岩失稳预警并采取相应的防治措施。该技术目前已成为监测采动岩体运动的最为有效的研究手段之一^[26-28]。

3.2 微震监测系统构建

采用加拿大 ESG 公司生产的高精度微震监测系统, 系统组成主要包括加速度传感器、Paladin 信号采集系统、Hyperion 数据处理系统。单分量的加速度传感器为直径 32 mm 的不锈钢材质, 频率响应范围为 50~5 000 Hz, 灵敏度为 30 V/g, Paladin 信号采集系统采样频率为 20 000 Hz, 24 位模数转换, 采用阈值触发。考虑到地下水封石油洞库高边墙、大跨度、工作面众多、强开挖卸荷的特点和微震监测系统的要求, 且截止 2014 年 7 月 28 日, 水幕巷道开挖全部完成, 储油洞室 1 北中层开挖至 2+80 m 里程, 1 北下层和 1 南下层分别开挖至 6+47 m 里程

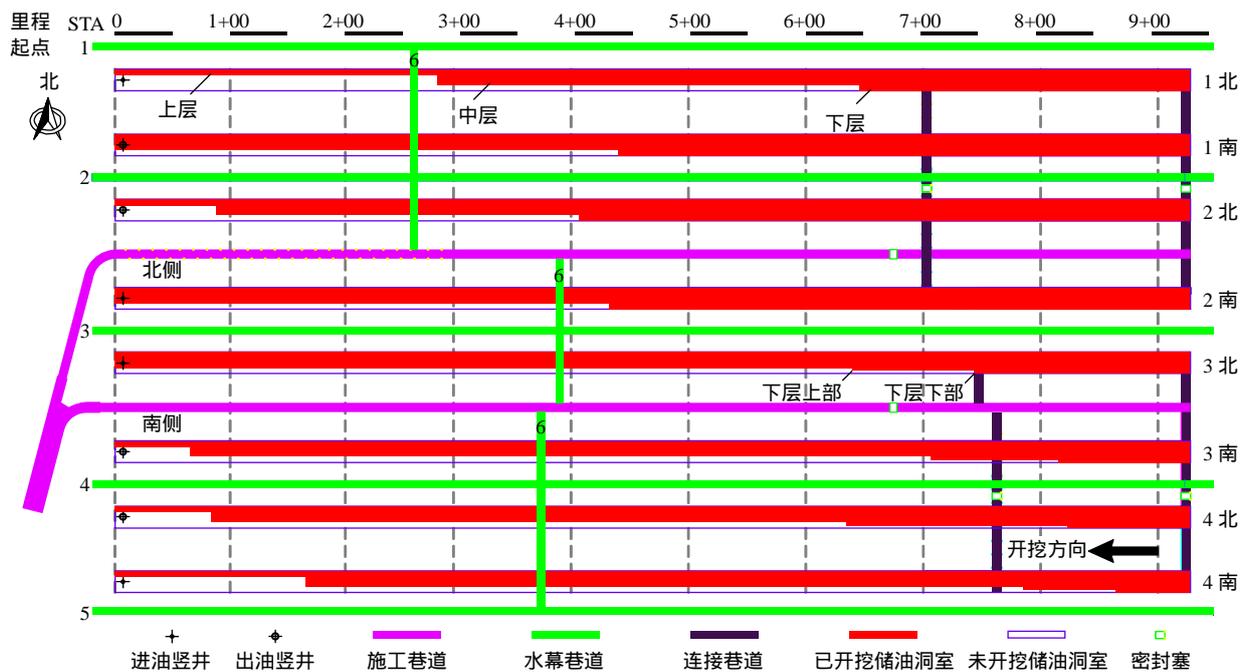


图3 锦州某地下水封石油洞库施工概况图
Fig.3 Construction sketch of some underground water-sealed oil storage caverns in Jinzhou

和 4+38 m 里程，故在水幕巷道中布置 6 通道微震监测系统，既可以实时监测储油洞室强开挖卸荷作用下的岩体微破裂，又能保证系统的安全稳定运行。微震监测系统覆盖储油洞室 1 北、1 南、水幕巷道 1 和水幕巷道 2 构建成的 300 m×200 m×100 m 的监测区域(见图 4 中放大的区域)，空间阵列式分布的 6 个加速传感器对监测区域内水封洞库强卸荷开挖诱发的微破裂事件进行全天候连续监测，实时获取微震事件的动态时空数据等多项震源参数信息，通过设定阈值、滤波处理、带宽检波等方法排除背景噪音事件，识别并存储完整波形与波谱分析图。

3.3 微震定位误差和信号的识别

微震长距离定位损伤破坏的误差主要由微震台网空间分布、到时准确性、P 和 S 波速模型和震源定位方法等因素决定^[29]。吕进国等^[30-31]尝试通过增加台网中传感器数量和优化定位算法等方式来降低微震长距离定位损伤误差。但由于岩石工程高度非线性、非均匀性使微震定位误差精度迥异。例如，矿山中微震长距离定位误差可控制在 12 m 以内，通过与优化算法结合，定位误差可达 3.78 m^[32]；油田

井下压裂长距离微震损伤定位精度控制在 50 m 以内^[33]；深埋岩爆隧洞重点区域内的微震定位误差在 10 m 以内^[15]；地下厂房和水电边坡传感器阵列优化后定位算法的误差均可控制在 10 m 范围内^[22]。

在大型岩石工程中，震源位于监测台网中心区域时，到时误差决定着定位误差；当震源远离台网中心时，波速则成为影响定位误差的主导因素^[34]。地下水封石油洞库特殊的结构特征，造成了开挖施工过程中弹性波传播的复杂性，准确地确定传播速度对于微震事件的定位至关重要。根据整体简化波速模型，假定微震信号在介质中传播速度等效为一种整体波速模型 V_p ，在水幕巷道 1、水幕巷道 6 内进行定点敲击试验，对研究区域内岩体波速模型进行测定，记录有效敲击事件波形图(见图 5)。根据洞库地质勘察资料^[23]，场区岩体弹性波传播速度为 4 400 ~ 6 100 m/s。通过对敲击波形分析，分别设定系统 P 波波速为 4 400 ~ 6 100 m/s 范围 18 种不同的波速，重新分析处理不同波速情况下敲击试验的定位误差(见表 1)。图 6 给出了不同 P 波波速下敲击点与微震监测结果误差关系曲线，可以看出 P 波波速

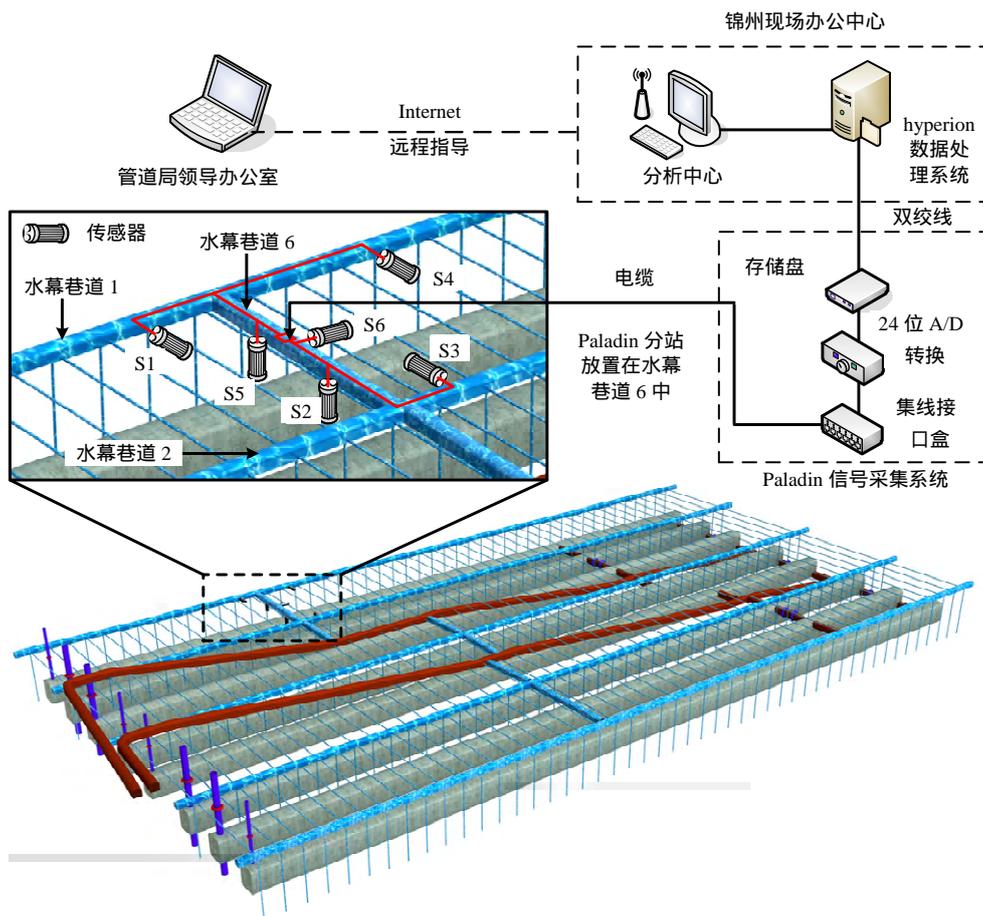


图 4 微震监测系统网络拓扑图

Fig.4 Topological graph of the microseismic monitoring network

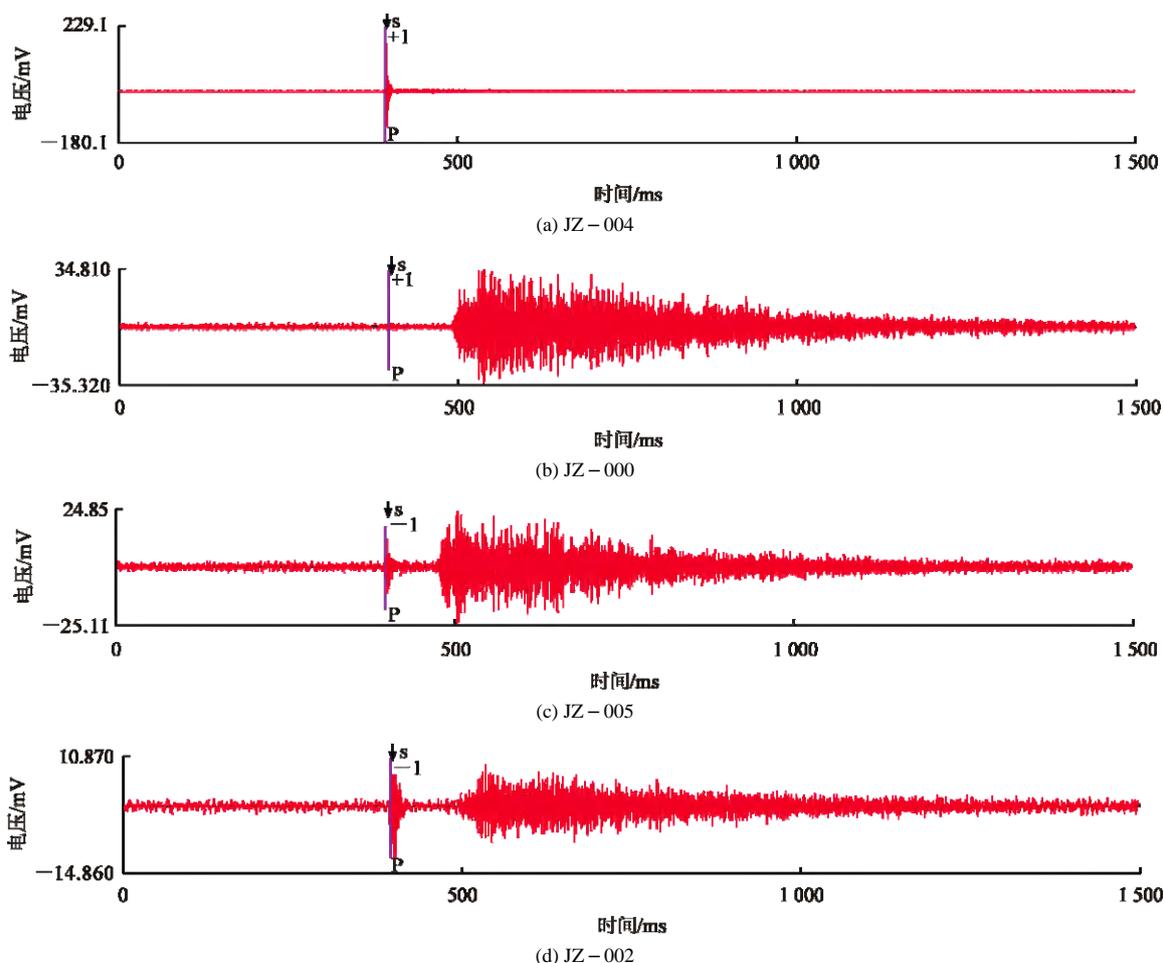


图5 人工敲击事件波形图

Fig.5 Waveform curves of manual knocking

表1 不同P波波速下敲击点定位误差(2014.7.29)

Table 1 Deviation of the locations of knocking under different P-wave velocities(Jul.29.2014)

序号	时间/ (时:分:秒)	波速为 4 400 m/s		波速为 4 500 m/s		波速为 4 600 m/s		波速为 4 700 m/s		波速为 4 800 m/s		波速为 4 900 m/s		波速为 5 000 m/s		波速为 5 100 m/s		波速为 5 200m/s	
		定位 误差/ m	均值/ m	定位 误差/ m	均值/ m														
1	15:51:36	14.9		14.3		13.6		13.0		12.4		11.8		11.3		10.9		10.5	
2	15:52:09	10.3		9.5		20.5		8.3		7.7		7.3		7.0		6.9		7.6	
3	16:00:30	13.8	13.4	13.4	12.5	13.0	13.6	12.7	10.8	12.4	10.0	12.2	9.3	18.1	9.6	12.0	7.9	11.9	7.5
4	16:06:24	9.4		8.6		8.0		7.3		6.6		6.0		5.4		4.9		4.4	
5	16:08:04	10.8		10.1		9.3		8.7		8.0		7.4		6.8		6.2		5.6	
6	16:50:58	20.9		19.0		17.1		15.0		12.9		11.0		9.0		6.8		5.1	

序号	时间/ (时:分:秒)	波速为 5 300 m/s		波速为 5 400 m/s		波速为 5 500 m/s		波速为 5 600 m/s		波速为 5 700 m/s		波速为 5 800 m/s		波速为 5 900 m/s		波速为 6 000 m/s		波速为 6 100 m/s	
		定位 误差/ m	均值/ m																
1	15:51:36	10.2		10.1		15.7		14.1		12.9		12.2		12.1		12.0		11.9	
2	15:52:09	9.1		9.0		8.9		8.9		8.9		8.9		8.9		8.8		8.8	
3	16:00:30	16.1	8.2	15.6		15.1	8.7	14.8		14.5	8.1	14.4	7.9	14.4	8.4	14.6	8.2	14.6	8.1
4	16:06:24	4.2		4.2	7.9	4.6		4.9	8.3	5.1		5.1	7.9	5.2		5.0		5.1	
5	16:08:04	5.0		4.4		3.9		3.5		3.2		3.2		6.3		5.4		5.2	
6	16:50:58	4.5		4.3		4.1		3.9		3.8		3.6		3.5		3.3		3.2	

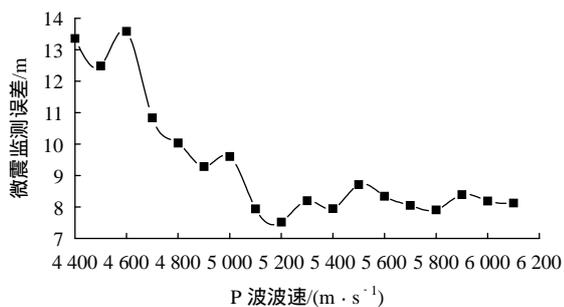


图 6 不同 P 波波速下敲击点与微震监测结果误差关系曲线
 Fig.6 Relation between the knocking points and microseismic monitoring errors under different P-wave velocity conditions

为 5 200 m/s 时，微震监测系统的定位误差达到最小

误差为 7.5 m，平均误差在 8 m 以内，满足工程岩体微震监测误差要求。

洞库开挖采用钻爆法施工，开挖爆破、风钻钻进等施工扰动产生大量的噪声信号，导致有效的微震信号与噪声信号混合在一起。准确识别微震信号是正确分析微震活动性规律的前提，运用 ESG 微震监测系统自带的 SMTI/VFPS 震源机制解析模块和时频结合分析技术，结合现场实际踏勘情况，分析石油洞库开挖施工过程中微震系统监测到的微震信号与噪音信号：敲击事件波形(见图 5)、开挖爆破波形(见图 7)、风钻掘进波形(见图 8)、微破裂事件波形(见图 9)，可以直观区分岩体损伤破坏的施工扰动

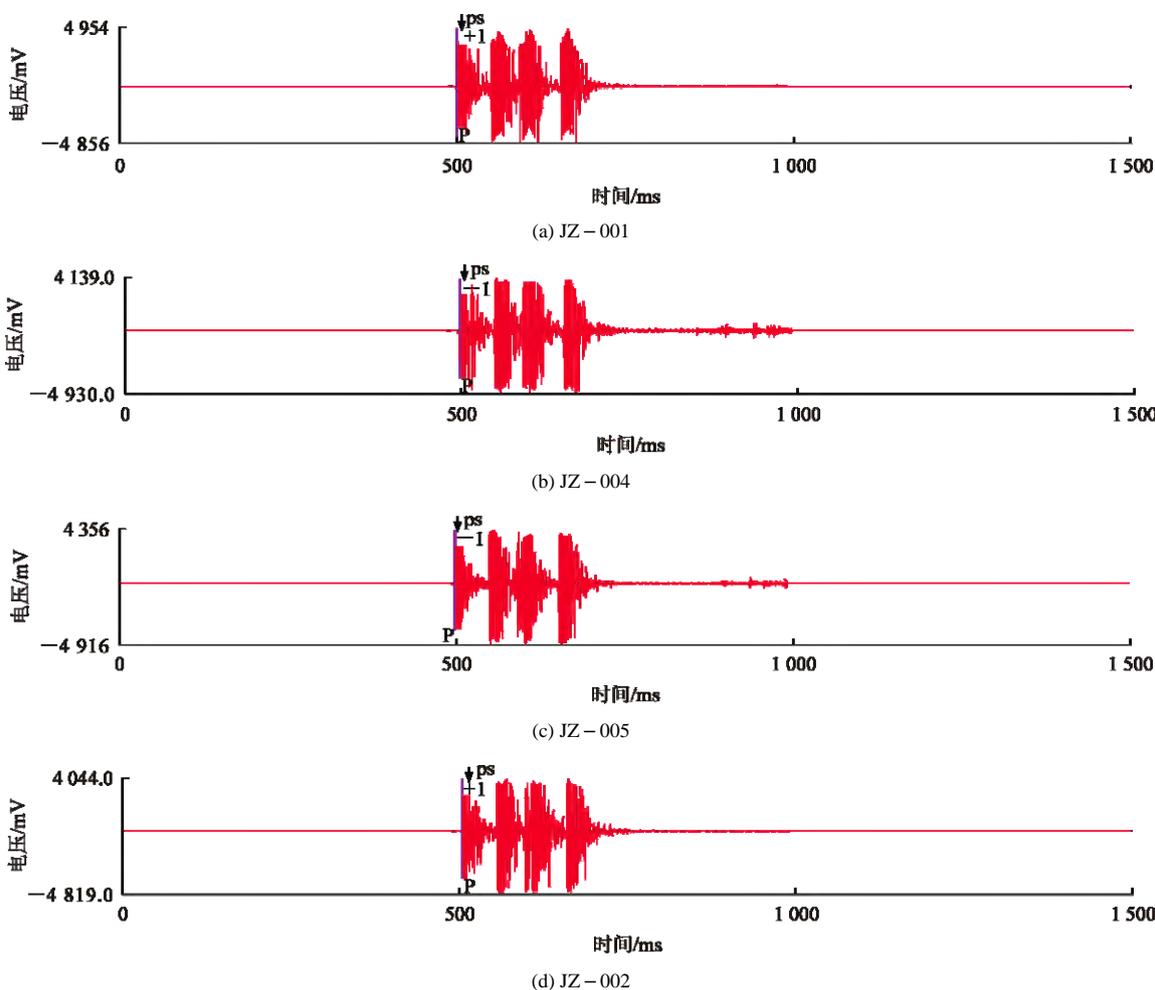
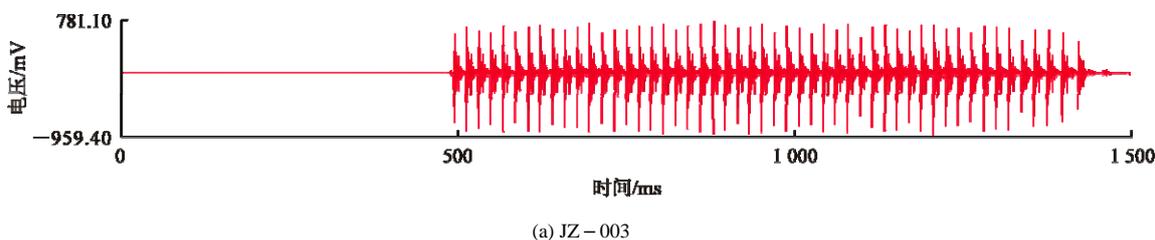


图 7 开挖爆破事件波形图
 Fig.7 Waveform curves of excavation blasting



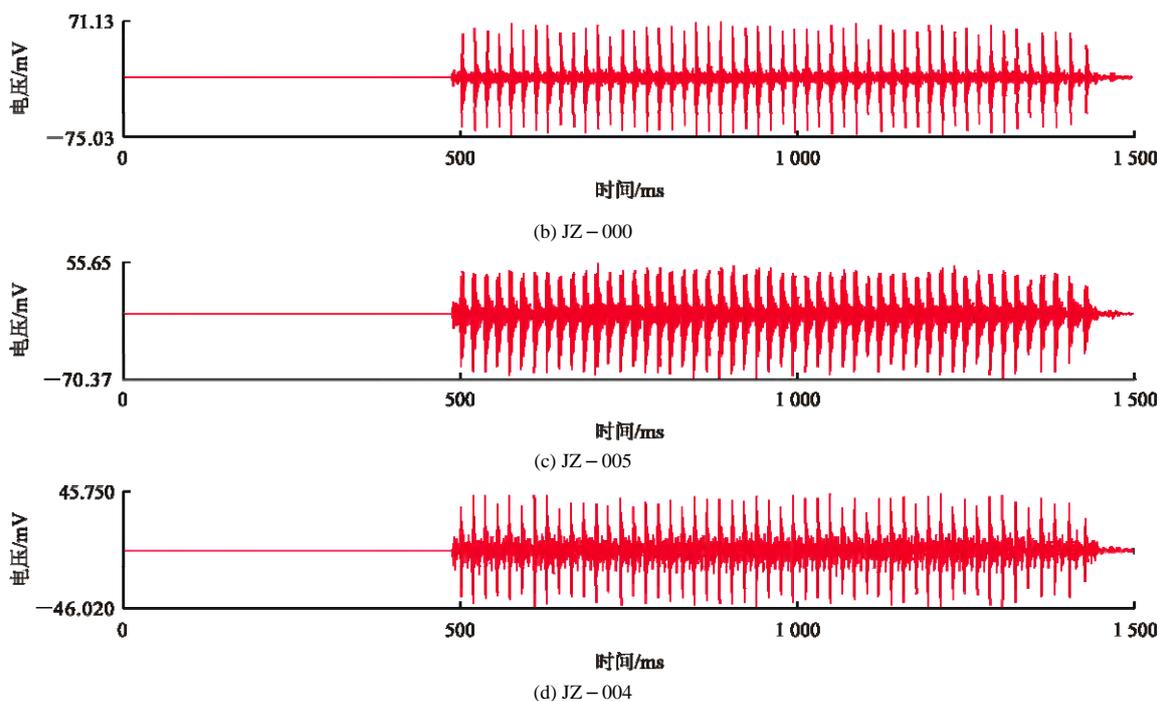


图 8 风钻掘进事件波形图

Fig.8 Waveform curves of pneumatic drilling

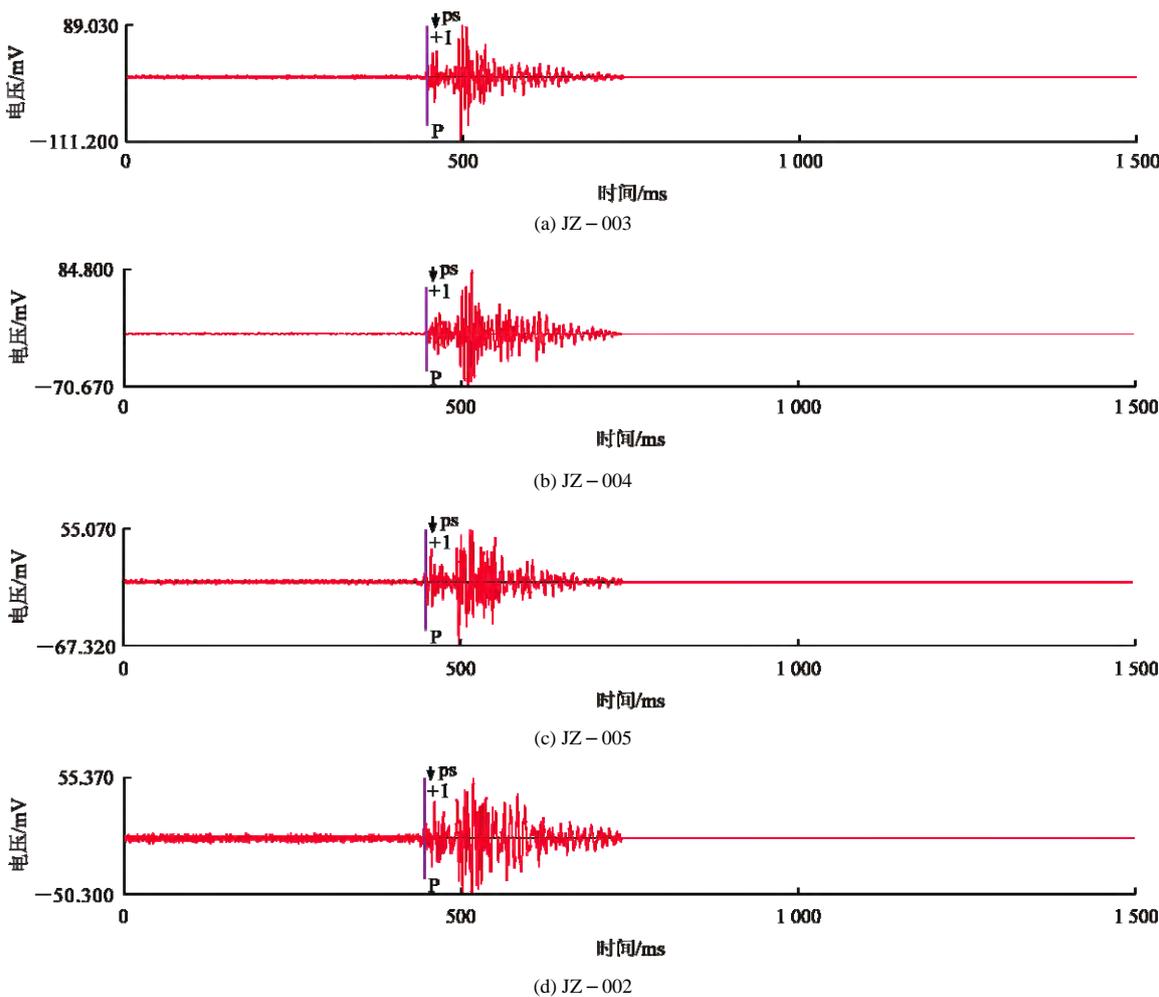


图 9 围岩微破裂事件波形图

Fig.9 Waveform curves of rock micro-cracks around storage caverns

噪音与微震信号。

4 水封石油洞库微震活动性规律和局部稳定性分析

4.1 微震活动性空间分布

自 2014 年 7 月 28 日微震监测系统构建以来，截止 2014 年 8 月 26 日系统共监测到有效事件 492 个，其中微震(微破裂)事件 361 个，爆破事件 123 个，敲击事件 8 个。强开挖卸荷间期水封洞室围岩微破裂主要集中在水幕巷道 1、水幕巷道 2 与储油洞室 1 北、1 南所构建的空间区域内，呈现 2 个条带集中分布区域。一条位于水幕巷道 6(2+63 里程)以东 30 m 附近区域，近水平分布；另一条位于储油洞室 1 北与 1 南之间 2+40~2+60 里程区域内，近垂直分布(见图 10(a))。微震事件主要聚集在这 2 条带状区域内，且在储油洞室 1 北 2+40~2+60 区域内微震事件聚集密度最大(见图 10(b))，该区域是施工过程中围岩潜在失稳危险区域。经现场踏勘资料

分析，此区域内的花岗岩中穿插辉绿岩脉、花岗细晶岩脉等岩脉(见图 11)，储油洞室 1 北和 1 南微破裂的主要聚集区与围岩中辉绿岩脉等的展布(240° 85°)较为一致。说明在储油洞室强开挖卸荷作用下，围岩中岩脉损伤较为强烈。

4.2 水封石油洞库局部稳定性分析

图 12 为 3 个不同监测时期水封石油洞库围岩微震事件分布及其密度云图(左侧为微震事件图，右侧为微震事件密度云图)。微震事件密度云图反映岩体微破裂聚集程度，密度越大，表示岩体微破裂越多，其微震能量与岩体破裂前应力值相对越高^[24]。监测初期，储油洞室 1 北中层开挖至 2+66 里程，微破裂萌生于掌子面附近，并在北边墙呈现聚集趋势(见图 12(a), (b))。2014 年 8 月 9 日，储油洞室 1 北中层掌子面推进至 2+17 里程，1 南下层开挖至 3+39 里程，1 北 2+45~2+55 里程南侧边墙岩体微破裂事件集聚。此时，2+70~3+10 里程围岩也逐渐发生微破裂(见图 12(c))。经过踏勘发现 1 北中层 2+45~2+55 里程南侧边墙出现 5 m³ 左右的‘踢腔’(见图 13)，

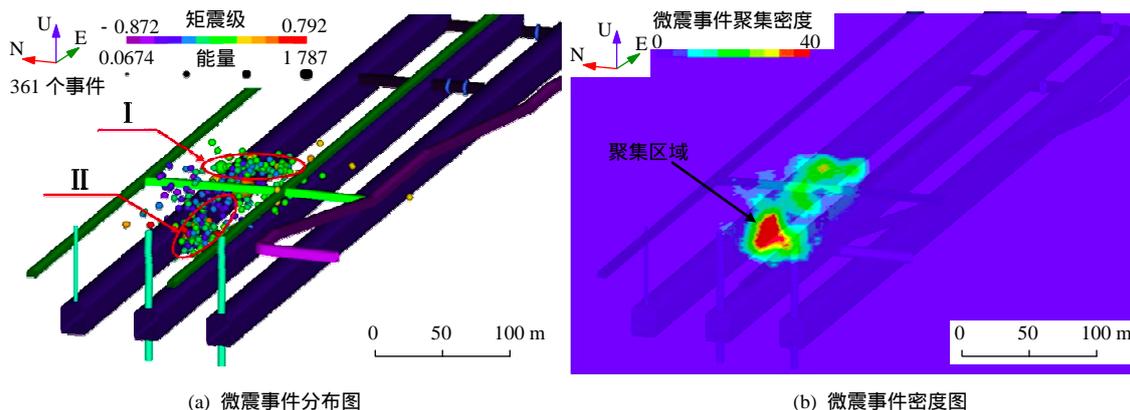


图 10 水封石油洞库微震事件空间分布规律(2014.7.28 ~ 2014.8.26)

Fig.10 The spatial distribution of microseismic events for underground water-sealed oil storage caverns(Jul.28 to Aug.26.2014)

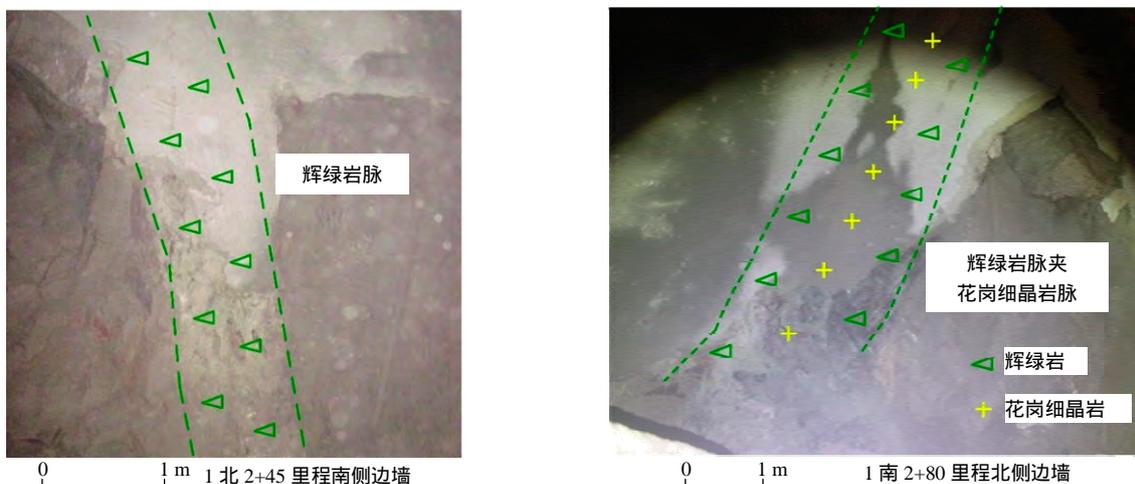


图 11 储油洞室 1 北、1 南部分辉绿岩脉出露图

Fig.11 Diabase dikes in the 1-north and 1-south area of the storage cavern

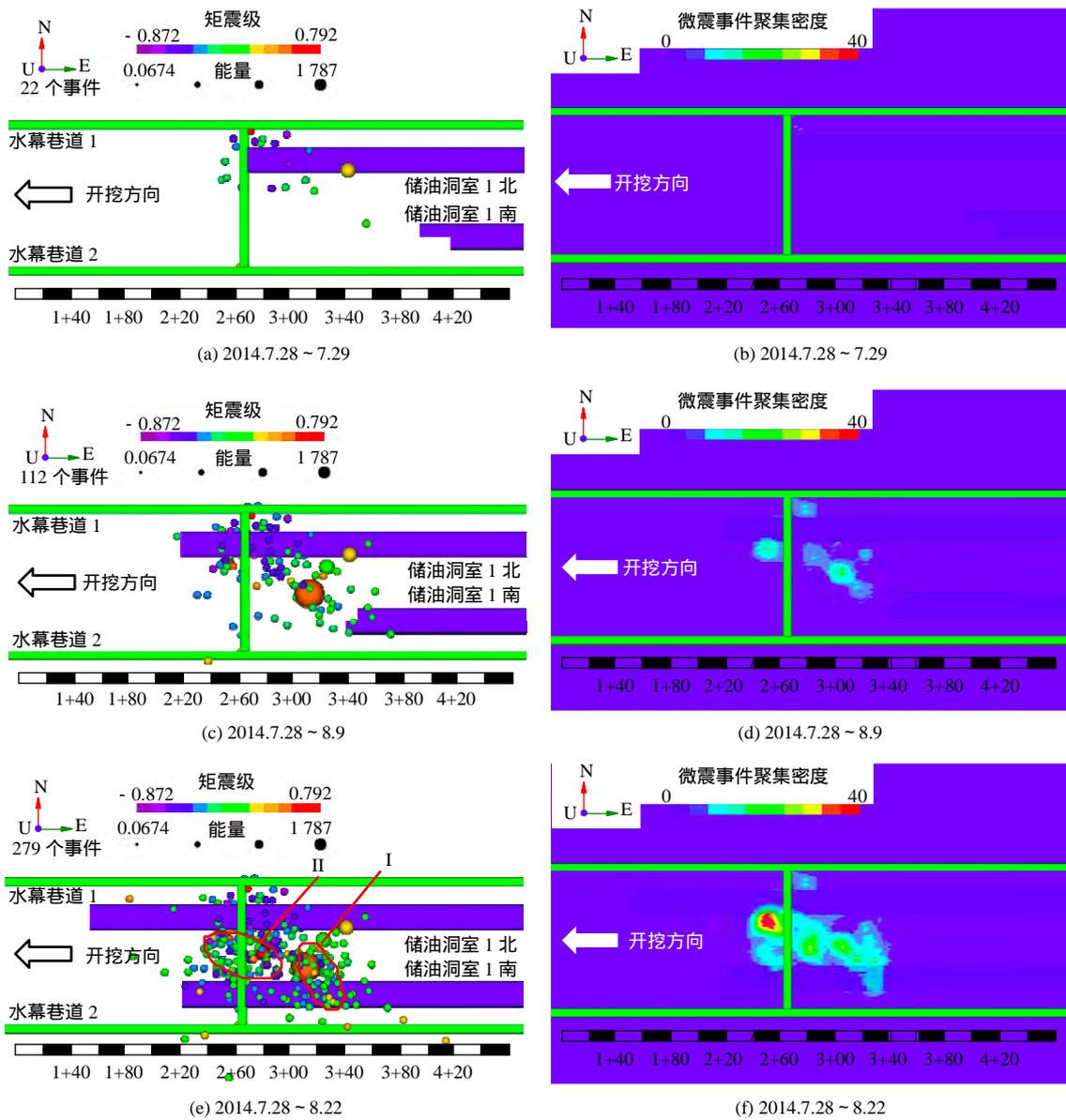


图 12 卸荷开挖作用下储油洞室 2+45~2+55 里程南侧边墙微震事件及其密度云图

Fig.12 The spatial-temporal distribution of microseismicity and the evolution of microseismic energy density during the excavation of water sealed underground storage cavern of 2+45-2+55 mileage of south side wall

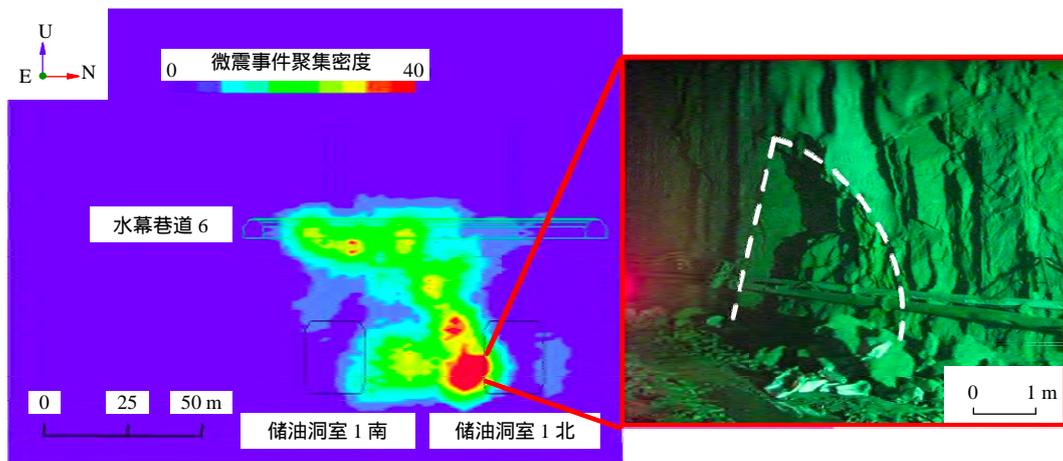


图 13 储油洞室 1 北 2+45 里程南侧边墙踢腔图

Fig.13 The failure of south side wall of water sealed underground storage cavern at 2+45 mileage

这是由于储油洞室强开挖卸荷导致该区域围岩应力升高, 超过围岩强度极限后, 发生弹性应变能释放形成的。同时, 强开挖卸荷引起围岩应力重分布, 致使围岩应力向辉绿岩脉、花岗细晶岩脉接触带转移, 形成更多的微破裂聚集(见图 12(d))。当储油洞室 1 北中层开挖至 1+52 里程, 储油洞室微破裂聚集呈现 2 条带状分布(见图 10(a)和 12(e))。此时, 储油洞室 1 北中层 2+45 ~ 2+55 里程南侧边墙出现多次小块岩石坠落现象。储油洞室的持续开挖, 导致围岩中的辉绿岩脉的损伤加剧, 是造成上述围岩局部失稳的主要原因。

微震监测系统再现了水封洞库强开挖卸荷过程中围岩的微破裂萌生、发展及宏观破裂的演化进程, 识别和圈定水封石油洞库施工期潜在的危险区域, 为水封石油洞库的设计施工提供参考。

5 结 论

本文首次尝试将微震这种三维“体”监测方法构建于地下水封石油洞库水幕巷道中, 对其下方 24 m 处的储油洞室开挖过程中的洞库围岩微破裂进行实时监测。得到如下结论:

(1) 采用人工定点敲击试验方法确定了研究区域岩体整体等效 P 波波速为 5 200 m/s, 监测系统水平方向定位误差小于 11 m, 垂直方向定位误差小于 4 m, 平均误差小于 8 m, 其定位精度完全满足工程需要。

(2) 从地下水封石油洞库围岩微震活动性空间分布规律看, 监测区域内围岩微破裂呈 2 个条带状分布: 一条位于水幕巷道 6 东侧, 水幕巷道 1 和水幕巷道 2 范围, 与水平面呈缓倾角; 另一条位于储油洞室 1 北与 1 南范围 2+40 ~ 2+60 里程区域内, 大致与该区域辉绿岩脉展布一致。正是由于开挖作用使得能量释放逐渐向辉绿岩脉、花岗细晶岩脉转移, 高能量的释放导致这些岩脉“过度”损伤, 诱发大量的微破裂。其结果印证了所构建的微震监测系统可帮助圈定洞库围岩未知岩脉和软弱结构面等的分布。

(3) 通过水封石油洞库开挖过程中的微震事件密度变化规律研究, 识别围岩失稳的危险区域, 实现对开挖卸荷过程中水封洞库围岩 24 h 连续监测和安全预警。为接下来水封石油洞库大规模微震监测系统的构建与实施提供参考依据。

参考文献(References):

- [1] 王章琼, 晏鄂川, 鲁功达, 等. 我国大陆地下水封洞库库址区地应力场分布规律统计分析[J]. 岩土力学, 35(增): 251-256.(WANG Zhangqiong, YAN E'chuan, LU Gongda, et al. Statistical analysis of in-situ stress field for underground water-sealed storage cavern in Chinese mainland[J]. Rock and Soil Mechanics, 35(Supp.): 251-256.(in Chinese))
- [2] SUN J P, ZHAO Z Y. Effects of anisotropic permeability of fractured rock masses on underground oil storage caverns[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25(5): 629-637.
- [3] LI S C, WANG Z C, PING Y, et al. Discrete element analysis of hydro-mechanical behavior of a pilot underground crude oil storage facility in granite in China[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 40(2): 75-84.
- [4] GNIRK P F, FOSSUM A F. On the formulation of stability and design criteria for compressed air energy storage in hard rock caverns[C]// The 14th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. Boston: [s. n.], 1979: 429-440.
- [5] 陈 奇, 慎乃齐, 连建发, 等. 液化石油气地下洞库围岩稳定性分析——以山东某地实际工程为例[J]. 煤田地质与勘探, 2002, 30(3): 33-36.(CHEN Qi, SHEN Naiqi, LIAN Jianfa, et al. Stability analysis on surrounding rock mass of underground storage for LPG —take a real project in Shandong province as an example[J]. Coal Geology and Exploration, 2002, 30(3): 33-36.(in Chinese))
- [6] TEZUKA M, SEOKA T. Latest technology of underground rock cavern excavation in Japan[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18(2/3): 127-144.
- [7] 连建发. 锦州大型地下水封 LPG 洞库岩体完整性参数及围岩稳定性评价研究[博士学位论文][D]. 北京: 中国地质大学, 2004.(LIAN Jianfa. Study on rock mass integrity parameters and surrounding rock stability evaluation of Jinzhou underground water seal LPG storage cavern[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: China University of Geosciences, 2004.(in Chinese))
- [8] PARK J J, JEON S, CHUNG Y S. Design of pyongtaek LPG storage terminal underneath Lake Namyang: a case study[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20(5): 463-478.
- [9] 王芝银, 李云鹏, 郭书太, 等. 大型地下储油洞粘弹性稳定性分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1 705-1 710.(WANG Zhiyin, LI Yunpeng, GUO Shutai, et al. Viscoelastic stability analysis of underground petroleum storage caverns[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(11):

- 1 705 – 1 710.(in Chinese))
- [10] 徐 方. 分形理论在青岛某地下水封石油储备库工程中的综合应用[硕士学位论文][D]. 北京: 中国地质大学, 2006.(XU Fang. Comprehensive application of fractal theory to the engineering of water-sealed oil tank in Qingdao[M. S. Thesis][D]. Beijing: China University of Geosciences, 2006.(in Chinese))
- [11] 陈 祥. 黄岛地下水封石油洞库岩体质量评价及围岩稳定性分析[博士学位论文][D]. 北京: 中国地质大学, 2007.(CHEN Xiang. Evaluation on quality and analysis on stability of adjacent rock mass of the water-sealed underground storage oil tank in Huangdao[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: China University of Geosciences, 2007.(in Chinese))
- [12] 王 怡, 王芝银, 许 杰, 等. 地下储油岩库稳定性的三维流固耦合分析[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2009, 33(3): 132 – 137.(WANG Yi, WANG Zhiyin, XU Jie, et al. 3D fluid-mechanical coupling stability analysis of underground petroleum storage caverns[J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science, 2009, 33(3): 132 – 137.(in Chinese))
- [13] 唐春安. 岩石破裂过程中的灾变[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993: 70 – 73.(TANG Chun'an. Catastrophe in rock failure process[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1993: 70 – 73.(in Chinese))
- [14] KAISER P K, MCCREATH D R, TANNANT D D. Canadian rockburst support handbook[R]. [S. l.]: Geomechanics Research Center, 1996.
- [15] MA T H, TANG C A, TANG L X, et al. Rockburst characteristics and microseismic monitoring of deep-buried tunnels for Jinping II hydropower station[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 49(6): 345 – 368.
- [16] FENG G L, FENG X T, CHEN B R, et al. Sectional velocity model for microseismic source location in tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 45(1): 73 – 83.
- [17] LU C P, LIU G J, LIU Y, et al. Microseismic multi-parameter characteristics of rockburst hazard induced by hard roof fall and high stress concentration[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 76(6): 18 – 32.
- [18] 姜福兴, 尹永明, 朱权洁, 等. 基于微震监测的千米深井厚煤层综放面支架围岩关系研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(2): 167 – 174.(JIANG Fuxing, YIN Yongming, ZHU Quanjie, et al. Relationship between support and surrounding rock of fully mechanized caving face in thick coal seam of kilometer deep mine based on microseismic monitoring technology[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2014, 31(2): 167 – 174.(in Chinese))
- [19] 唐礼忠, 潘长良, 杨承祥, 等. 冬瓜山铜矿微震监测系统及其应用研究[J]. 金属矿山, 2006, 3(10): 41 – 44.(TANG Lizhong, PANG Changliang, YANG Chengxiang, et al. Establishment and application of microseismicity monitoring system in Dongguashan copper mine[J]. Metal Mine, 2006, 3(10): 41 – 44.(in Chinese))
- [20] 李庶林, 尹贤刚, 郑文达, 等. 凡口铅锌矿多通道微震监测系统及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2 048 – 2 053.(LI Shulin, YIN Xiangang, ZHENG Wenda, et al. Research of multi-channel microseismic monitoring system and its application to Fankou lead-zinc mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2 048 – 2 053.(in Chinese))
- [21] 陈炳瑞, 冯夏庭, 曾雄辉, 等. 深埋隧洞 TBM 掘进微震实时监测与特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 275 – 283.(CHEN Bingrui, FENG Xiating, ZENG Xionghui, et al. Real-time microseismic monitoring and its characteristic analysis during TBM tunneling in deep-buried tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 275 – 283.(in Chinese))
- [22] 李 彪, 戴 峰, 徐奴文, 等. 深埋地下厂房微震监测系统及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增 1): 3 375 – 3 383.(LI Biao, DAI Feng, XU Nuwen, et al. Microseismic monitoring system and its engineering applications of deep-buried underground powerhouse[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Supp.1): 3 375 – 3 383.(in Chinese))
- [23] 中国石油天然气公司管道工程有限公司. 锦州地下水封石油洞库岩土勘察报告[R]. 北京: 中国石油天然气公司管道工程有限公司, 2010.(China Petroleum Pipeline Engineering Corporation. Geotechnical investigation report of Jinzhou underground water sealed oil storage caverns[R]. Beijing: China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, 2010.(in Chinese))
- [24] TANG C A, WANG J M, ZHANG J J. Preliminary engineering application of microseismic monitoring technique to rockburst prediction in tunneling of Jinping II project[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2010, 2(3): 193 – 208.
- [25] 马 克, 唐春安, 李连崇, 等. 基于微震监测与数值模拟的大岗山右岸边坡抗剪洞加固效果分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6): 1 239 – 1 247.(MA Ke, TANG Chun'an, LI Lianchong, et al. Reinforcement effects of anti-shear gallery of Dagangshan right bank slope based on microseismic monitoring and numerical simulations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(6): 1 239 – 1 247.(in Chinese))
- [26] 姜福兴, XUN L, 杨淑华. 采场覆岩空间破裂与采动应力场的微震探测研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(1): 23 – 25.(JIANG Fuxing, XUN L, YANG Shuhua. Study on microseismic monitoring for spatial

- structure of overlying strata and mining pressurefield in longwall face[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(1): 23–25.(in Chinese))
- [27] 高明仕, 龚林名, 张 农, 等. 岩土介质中冲击震动波传播规律的微震试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1 365–1 371. (GAO Mingshi, DOU Linming, ZHANG Nong, et al. Experiment study on earthquake tremor for transmitting law of rockburst in geomaterials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1 365–1 371.(in Chinese))
- [28] 潘一山, 赵扬锋, 官福海, 等. 矿震监测定位系统的研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 1 002–1 011.(PAN Yishan, ZHAO Yangfeng, GUAN Fuhai, et al. Study on rockburst monitoring and orientation system and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 1 002–1 011.(in Chinese))
- [29] GIBOWICZ S J, KILKO A. An introduction to mining seismology[M]. San Diego, California: Academic Press Inc., 1994: 84–85.
- [30] 吕进国, 姜耀东, 赵毅鑫, 等. 基于稳健模拟退火-单纯形混合算法的微震定位研究[J]. 岩石力学, 2013, 34(8): 2 195–2 203.(LU Jinguo, JIANG Yaodong, ZHAO Yixin, et al. Study of microseismic positioning based on steady simulated annealing-simplex hybrid algorithm[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8): 2 195–2 203.(in Chinese))
- [31] 李 楠, 王恩元, 孙珍玉, 等. 基于 L1 范数统计的单纯形微震震源定位方法[J]. 煤炭学报, 2014, 39(12): 2 431–2 438.(LI Nan, WANG Enyuan, SUN Zhenyu, et al. Simplex microseismic source location method based on L1 norm statistical standard[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(12): 2 431–2 438.(in Chinese))
- [32] 董陇军, 李夕兵, 唐礼忠, 等. 无需预先测速的微震震源定位的数学形式及震源参数确定[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(10): 2 057–2 067.(DONG Longjun, LI Xibing, TANG Lizhong, et al. Mathematical functions and parameters for microseismic source location without pre-measuring speed[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(10): 2 057–2 067.(in Chinese))
- [33] 王 健. 基于油井压裂微震监测的震源定位精度研究及检波器网络优化设计[硕士学位论文][D]. 长春: 吉林大学, 2012.(WANG Jian. Research on the source location accuracy and optimal geophone array designs for the oil well microseismic fracture monitoring[M. S. Thesis][D]. Changchun: Jilin University, 2012.(in Chinese))
- [34] CETE A. Seismic source location in the ruhr district[C]// Proceedings of the First Conference on Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic. Clausthal, Germany: Trans Tech Publications, 1977: 231–242.

下期内容预告

下期《岩石力学与工程学报》主要发表下列内容的文章：

- (1) NPR 锚杆/索支护原理及大变形控制技术；
- (2) 超高压智能数控真三维加载模型试验系统的研制及应用；
- (3) 岩石破裂过程中红外温度场瞬时变化异常探究；
- (4) 动力冲击对煤岩内部微结构影响的 NMR 定量表征；
- (5) 低频动载应力波传播规律及颗粒流模拟方法研究；
- (6) 低渗透砂岩型铀矿床爆破增渗模型试验及增渗机制研究；
- (7) 酸性干湿循环对泥质砂岩强度特性劣化影响研究；
- (8) 基于试验视频图像的花岗岩细观组分运动过程研究。

土工基础