

钻孔岩芯声发射法在张北能源储气库地应力测量中的应用^①

马春德^{1,2}, 吕志海², 谭观霜²

(1.中南大学 高等研究中心,湖南 长沙 410083; 2.中南大学 资源与安全工程学院,湖南 长沙 410083)

摘要: 使用新型定向岩芯声发射方法,对河北张北综合能源项目储气库建造工程区域进行地应力测量,结果表明,3个钻孔对应的90 m埋深处的地应力以水平构造应力为主,3个钻孔的最大主应力方向基本一致,均为近南北方向。使用圆周波速各向异性分析法进行验证,结果显示,圆周波速各向异性分析法得到的最大主应力方向与钻孔岩芯声发射法得到的结果吻合,进一步验证了钻孔岩芯声发射法测量结果的正确性。

关键词: 地应力; 钻孔岩芯; 声发射法; 圆周波速各向异性分析法

中图分类号: TD311

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2023.05.005

文章编号: 0253-6099(2023)05-0022-04

Application of Core Acoustic Emission into In-Situ Stress Measurement of Zhangbei Energy Storage Reservoir

MA Chunde^{1,2}, LÜ Zhihai², TAN Guanshuang²

(1.Advanced Research Center, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 2.School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: A new directional core acoustic emission technique was used to measure in-situ stress of the gas storage reservoir construction area of the Zhangbei Comprehensive Energy Project in Hebei Province. Results show that three boreholes buried at depth of 90 m have the corresponding in-situ stress dominated by horizontal structural stress, with the maximum principal stress approximately in the same north-south direction. In addition, the circumferential wave velocity anisotropy analysis method was conducted for verification, and the results show that the maximum principal stress is in a direction consistent with the result obtained from the acoustic emission testing of borehole core, which further verifies the correctness of the measurement by acoustic emission technique for the borehole cores.

Key words: in-situ stress; borehole core; acoustic emission technique; circumferential wave velocity anisotropy analysis method

压缩空气储能是一种新型的储能技术,已经被写入国家“十四五”规划中。我国拟在河北省张家口市张北县工业园区内建造一个超大规模的综合能源项目储气库,设计库容为 $3.00 \times 10^4 \text{ m}^3$,埋深200~300 m。对于超大规模的地下硐室,开挖后的围岩稳定性是值得关注的重要问题^[1-3],有必要对储气库拟建地下区域的地应力场分布变化情况进行测试分析,进而为储气库的科学合理设计和安全高效施工提供参考依据。

工程界常用的地应力测试方法主要有套孔应力解除法^[4]、水压致裂法^[5]和声发射法^[6]等,这些方法目

前都不完善。利用岩石声发射的Kaiser效应法进行地应力测量^[7-9],需要专用定向取芯工具,以便在测试前在钻孔中钻取定向岩芯,高成本、低效率和耗时的取芯过程阻碍了声发射法的有效推广^[10]。钻孔岩芯声发射法是一种新的基于无定向岩芯的测量方法^[11-12],可以实现无定向岩芯的地面重新定向和岩层地应力测量,从而改进传统声发射法无法定向的不足,使其得到的结果更接近于实际工况。本文通过钻孔岩芯声发射法对张北储气库建造区域进行地应力测量,并使用圆周波速各向异性分析法^[13]进行验证。

① 收稿日期: 2023-04-27

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52074352); 湖南省自然科学基金(2023JJ30680)

作者简介: 马春德(1976—),男,辽宁丹东人,博士(后),研究员,主要研究方向为矿山岩体力学及地压控制。

通信作者: 吕志海(1998—),男,湖南邵阳人,硕士研究生,主要从事岩土力学研究。

1 钻孔岩芯声发射法

1.1 测量方法及原理

在进行声发射试验之前,需要使用新型岩芯重定向装置基于钻孔弯曲绝对性原则、岩芯轴线与钻孔轴线一致性原则以及钻孔与岩芯空间姿态匹配唯一性原则对岩芯进行重定向。

1.1.1 钻孔弯曲绝对性原则

在进行常规取芯钻探施工过程中,钻头的钻进会受到地质因素和工艺因素的影响,其钻进轨迹与预设轨迹总是存在一定的偏差。传统意义上笔直钻孔的“直”只是忽略了测斜精度误差和测量密度影响的相对性的直,而钻孔轨迹弯曲却存在绝对性。即只要测量仪器(钻孔测斜仪)的精度足够,就可以测量出钻孔轨迹线上的顶角和方位角的微小变化值,即获得钻孔在空间上的弯曲变化情况。

1.1.2 岩芯轴线与钻孔轴线一致性原则

目前的取芯钻探基本采用金刚石或硬质合金的环形钻具,钻具在岩层中回转钻进取得岩芯。钻孔弯曲(包括顶角和方向角的变化)由上端向下端逐步渐进式连续变化,这种方式下,钻孔与对应岩芯始终为具有共同轴线的同心圆柱体,不管钻孔轴线发生什么样的偏离,二者始终拥有共同的轴线轨迹,即钻孔与岩芯弯曲具有一致性特征。

1.1.3 钻孔与岩芯空间姿态匹配唯一性原则

钻孔轴线与岩芯轴线重合,其轴线轨迹是一条变化的空间曲线,即使是一段较短的岩芯,其轴线轨迹上的各点的倾斜(弯曲)参数在空间上也是各不相同的,若想将它还原回钻孔的原始姿态,必须保证钻孔与对应岩芯的每一点的倾角和方位角完全一致,即钻孔与对应岩芯在三维空间中的空间姿态匹配具有唯一性。

1.2 试样加工过程

地应力测试岩样在地表重新准确定位后,送至石材加工厂进行声发射法标准试件加工。如图1所示,在垂直方向、0°方向、45°方向以及90°方向上分别钻取3~4个尺寸为25 mm × 50 mm的小岩芯试样,每个样品均经过仔细抛光,平整度良好。利用岩石材料的Kaiser效应,使用MTS材料试验机和PCI-II声发射测试系统对加工好的地应力测试岩样进行单轴压缩声发射试验。测试系统自动记录岩石的声发射幅值和绝对能量等数据,通过加卸载以及二次加载对声发射累计计数和绝对能量进行统计,结合二次加载的Felicity效应来判断岩石的Kaiser点。利用空间不同角度上岩芯的Kaiser效应点对应的应力值,可计算出测点处最大

水平主应力大小和方向。通过直接测量的垂直主应力和间接计算的2个水平主应力,对不同深度地应力值进行分析,可获得所测区域的应力场分布规律。

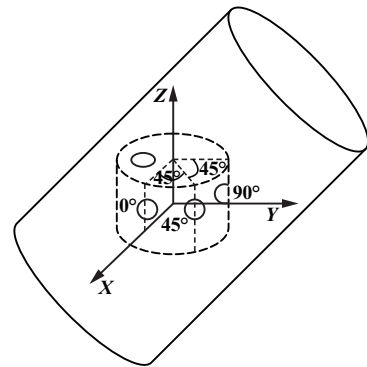


图1 四向取样示意图

1.3 声发射 Kaiser 效应测试地应力

岩样岩性为玄武岩,均取自张北综合能源项目储气库建造工程区域深度90 m左右岩层,分为ZK6、ZK7、ZK8,3组共48个试样。试验加载方式采用位移控制加载,加载速率为0.1 mm/min,进行两次应力加卸载。声发射系统前置放大器设定为40 db,声噪门阈值为45 db。所用声发射传感器为Φ8 mm × 8 mm,谐振频率20~400 kHz,采样频率1 MHz,用双通道采集数据,使用凡士林作为耦合剂。为减少试件端部效应影响,加载前在压头与试件接触端面均匀涂抹一层凡士林,试验开始时用声发射仪器同步采集数据。

图2为Kaiser效应点判断方法示意图。这是通过MTS815试验机以及声发射系统所做的一个玄武岩单轴压缩的声发射试验。图2分为上下两个半图,其中上半图为载荷-时间加载曲线,下半图为对应的声发射信号振幅散点时程图,二者的时间轴相同。两次加载的峰值载荷分别超过15 kN和25 kN。从第一次加载过程可以看到,载荷很小时就有声发射信号点产生,对应岩石压密阶段内部孔隙或颗粒的摩擦作用。加载到240 s左右时,声发射信号出现了明显激增的现象,此处出现较多高幅值声发射信号,可以初步判定为Kaiser效应发生区域,对应的载荷值约5 kN,但很难判定是发生在哪个准确时间点或哪个载荷值上。为提高判断精度,依据岩石声发射的“抹录不净现象”原理,在第二次加载的声发射信号图上找出首个出现的“抹录不净”信号点,即下半图中540 s左右时出现的M点。根据M点对应的载荷水平,回找第一次加载过程中的Kaiser效应区域对应的载荷,就可以较为准确地判定出该试件的Kaiser效应点,即4.72 kN。另外,图2中第二次加载到首次加载峰值载荷时,明显出现的Kaiser

效应现象,也很好地佐证了试验的有效性。

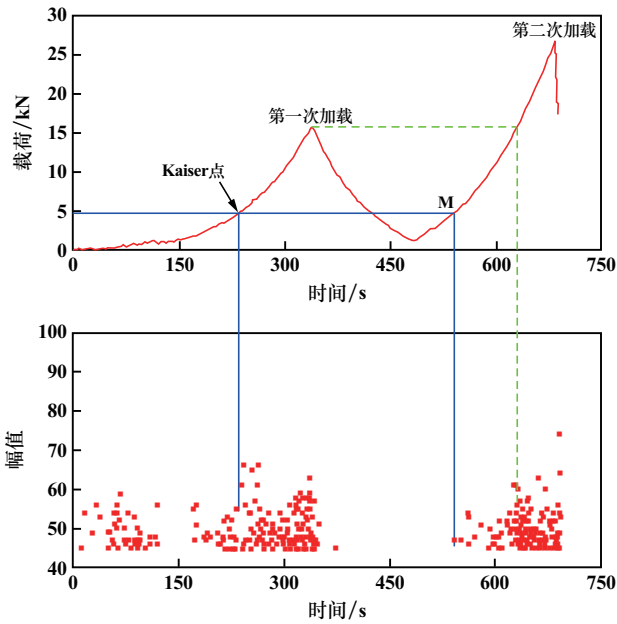


图2 Kaiser效应点判断方法示意图

2 地应力计算和结果分析

2.1 声发射计算与分析

对取自3个不同钻孔不同方位角度的AE试件进行声发射试验,获得每个试件的Kaiser效应特征点对应的应力值,整理后得到各钻孔不同方向上的应力分量如表1所示。对于水平方向上的3个应力值,基于弹性力学原理,根据平面主应力计算公式,可以计算得出各测点处的最大水平主应力 σ_H 、最小水平主应力 σ_h 及最大水平主应力方向,计算结果列于表2中。

$$\sigma_H = \frac{1}{2}(\sigma_0 + \sigma_{90}) + \frac{1}{2\cos 2\theta}(\sigma_0 - \sigma_{90}) \quad (1)$$

$$\sigma_h = \frac{1}{2}(\sigma_0 + \sigma_{90}) - \frac{1}{2\cos 2\theta}(\sigma_0 - \sigma_{90}) \quad (2)$$

$$\tan 2\theta = \frac{2\sigma_{45} - \sigma_0 - \sigma_{90}}{\sigma_0 - \sigma_{90}} \quad (3)$$

式中 σ_0 、 σ_{45} 、 σ_{90} 分别为正北向逆时针 0° 、 45° 和 90° 方向的主应力实测值; σ_H 、 σ_h 分别为水平方向上最大、最小主应力(压应力为正,拉应力为负); θ 为水平最大主应力与正北向夹角(规定逆时针转到北方向为正)。

表1 各钻孔不同方向上的应力分量

钻孔编号	垂直方向 Kaiser 点应力值/MPa	水平方向 Kaiser 点应力值/MPa		
		0°	45°	90°
ZK6	2.92	11.15	8.11	5.22
ZK7	3.09	12.13	7.55	3.36
ZK8	2.86	11.05	8.23	3.61

表2 各钻孔主应力计算结果

钻孔编号	垂直主应力 σ_v /MPa	自重应力 σ /MPa	最大水平主应力 σ_H /MPa	最小水平主应力 σ_h /MPa	最大水平主应力方位角 $\theta/^\circ$
ZK6	2.92	2.431	11.15	5.22	-0.72
ZK7	3.09	2.430	12.13	3.36	-1.27
ZK8	2.86	2.429	11.16	3.50	6.80

从表2可知,ZK6、ZK7和ZK8对应的90m埋深处的地应力以水平构造应力为主,最大水平主应力达到12MPa左右,最小水平主应力也比各自的垂直主应力大;垂直主应力比对应埋深计算所得自重应力稍大一点;3个钻孔最大主应力方向基本一致,均为近南北方向。

2.2 圆周波速各向异性分析法

当地下岩芯柱从钻孔中被套钻出来时,解除了最初的三向受压应力状态,各方向均发生了弹性恢复。从水平方向来看(岩芯柱环向),最大水平主应力方向先前受到的压应力最大,应力解除后该方向产生的恢复形变量也最大,对应的通过轴心的纵波波速减小。反之,最小水平主应力方向恢复形变量最小,对应的纵波波速也会相应增大。岩芯波速最低的方位即为最大主应力方向。

在对各钻孔岩芯进行地表重定向后,AE小试件加工之前,还采用PCI-II声发射系统的AST波速测量功能对所采集岩芯柱在环向 360° 上每间隔 15° 进行一次过轴心的纵波波速测量,图3为ZK6钻孔岩芯柱过轴心波速测量结果(ZK7和ZK8波速测试结果基本类似)。可以看到, 0° 和 180° (南北向)附近波速明显低于 90° 和 270° (东西方向),说明从波速测量的角度来看,水平最大主应力方向应该是近南北向。这一结果与钻孔岩芯声发射法所得结果吻合,进一步验证了钻

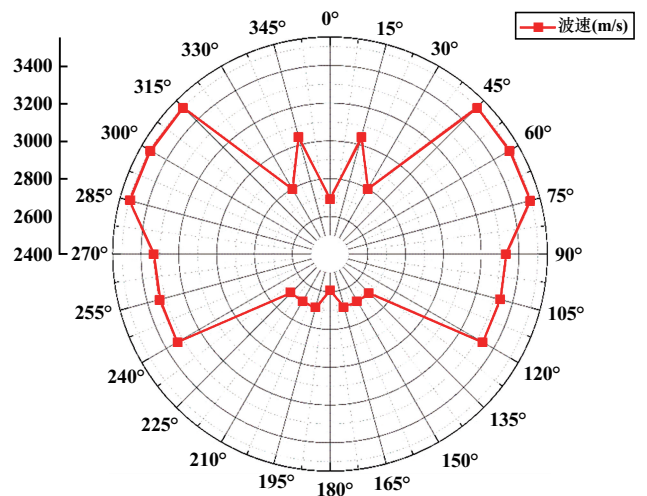


图3 圆周波速各向异性分析法结果

孔岩芯声发射法测量结果的正确性。

2.3 与区域构造情况的对比分析

该区域地质资料显示,张北县地处内蒙古高原南缘,属坝上高原区,为玄武岩、熔岩组成的起伏不平的台地,海拔1600~1850 m。张北县属内蒙古兴安华力西期古生代地槽区域,在华力西运动之后全部回返而结束地槽发展阶段,之后主要经历了燕山亚旋回、多伦复背斜、内蒙古兴安地槽褶皱等三次剧烈活动。张北县处于华力西运动产生的多伦复背斜(三级大地构造单元)西段的张北拗陷上(四级大地构造单元)。中部内蒙古台背斜占据张北高原大部分,是个长期遭受南北向地应力作用的隆起区。张北大地在构造变动方面是个长期稳定地区,后期在燕山亚旋回和喜马拉雅运动也发生不同程度的构造变动。张北拗陷自内蒙古兴安地槽褶皱以来,地壳运动基本结束,仅喜马拉雅运动对本区有轻微影响,根据近50年来的地质考察及地壳变形观测,未发现有其他明显的活动迹象。再次说明本次地应力测试结果中的最大主应力方向与该区域的主要构造情况具有较好一致性。

3 结 论

1) 张北综合能源项目储气库建设工程区域3个钻孔对应的90 m埋深处的地应力以水平构造应力为主,最大水平主应力达到12 MPa左右,最小水平主应力比各自的垂直主应力大,3个钻孔的最大主应力方向基本一致,均为近南北方向。

2) 利用自主研发的非定向地质岩芯地表重定向技术及测试系统对钻孔中岩芯进行了地表重定向工作,钻孔岩芯声发射法能够很好地实现非定向岩芯的地面重新定向和地应力状态的测量。

3) 圆周波速各向异性分析法较好地验证了钻孔岩芯声发射法的准确性。

参考文献:

- [1] 毛东桂. 废弃石膏矿地下储油空间围岩损伤演化规律及稳定性研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2022.
- [2] 肖益盖,刘允秋,汪为平,等. 某大型地下洞室群稳定性分析及加固技术研究[J]. 金属矿山, 2020(9):96-103.
- [3] 谭义欣. 基于ABAQUS的大型地下洞室围岩稳定性分析[D]. 南昌:东华理工大学, 2016.
- [4] 马春德,徐纪成,陈枫,等. 海下矿区三维地应力测量及分布规律研究[J]. 矿冶工程, 2011,31(5):9-12.
- [5] KANG H, ZHANG X, SI L, et al. In-situ stress measurements and stress distribution characteristics in underground coal mines in China[J]. Engineering Geology, 2010,116(3-4):333-345.
- [6] 马春德,刘泽霖,谢伟斌,等. 套孔应力解除法与声发射法在新城矿区深部地应力测量中的对比研究[J]. 黄金科学技术, 2020,28(3):401-410.
- [7] 李啸,汪仁建,李秋涛,等. 深部环境下岩石声发射地应力测试及其应用[J]. 矿冶工程, 2019,39(2):19-23.
- [8] 马春德,胡顺喜,王业顺,等. 引入外参数的声发射系统在地应力测量中的应用[J]. 矿冶工程, 2017,37(2):1-5.
- [9] 侯奎奎,郭良银,刘焕新,等. 滨海金属矿区域地应力场测量与规律分析[J]. 矿冶工程, 2022,42(4):22-24.
- [10] 李利峰,邹正盛,张庆. 声发射 Kaiser 效应在地应力测量中的应用现状[J]. 煤田地质与勘探, 2011,39(1):41-45.
- [11] LI X, CHEN J, MA C, et al. A novel in-situ stress measurement method incorporating non-oriented core ground re-orientation and acoustic emission: A case study of a deep borehole[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2022,152:105079.
- [12] MA C, LI X, CHEN J, et al. Geological core ground reorientation technology application on in situ stress measurement of an over-kilometer-deep shaft[J]. Advances in Civil Engineering, 2020;8830593.
- [13] 王成虎. 地应力主要测试和估算方法回顾与展望[J]. 地质论评, 2014,60(5):971-996.

引用本文: 马春德,吕志海,谭观霜. 钻孔岩芯声发射法在张北能源储气库地应力测量中的应用[J]. 矿冶工程, 2023,43(5):22-25.

(上接第21页)

- [8] LI Tao, Asari V. Modified luminance based MSR for fast and efficient image enhancement[C]//32nd Applied Imagery Pattern Recognition Workshop. 2003:174-179.
- [9] 杨红,崔艳. 基于开运算暗通道和优化边界约束的图像去雾算法[J]. 光子学报, 2018,47(6):238-244.
- [10] 孙凯乐,郭显久,张烜,等. 基于改进Canny算法的边缘检测[J].

电脑编程技巧与维护, 2018(6):165-168.

- [11] 杜绪伟,陈东,马兆昆,等. 基于Canny算子的改进图像边缘检测算法[J]. 计算机与数字工程, 2022,50(2):410-413.

引用本文: 陈卡,黄俊杰,曹嘉琪,等. 基于HSV空间融合Retinex算法的全天候运动目标检测[J]. 矿冶工程, 2023,43(5):17-21.