

某矿山地应力测试结果及建模反演分析

In-situ Stress Test Results and Modeling Inversion Analysis of a Mine

孙健¹, 安晶^{2,3}, 宫长亮¹, 陈小伟^{2,3}, 张磊¹, 张少杰², 张建立¹,
谢盛青², 巨有³

(1. 鞍钢集团矿业有限公司大孤山分公司, 辽宁 鞍山 114046; 2. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 3. 北京科技大学, 北京 100083)

摘要:采用水压致裂法对某矿山进行地应力测试, 基于现场实测数据, 对地应力大小与埋深的关系进行分析, 得到该矿山地应力的分布规律和变化特征。使用有限差分法软件 FLAC 对矿区地应力场进行反演模拟, 模拟结果用来验证地应力现场实测结果的准确性。地应力实测结果表明: 该矿区的地应力以水平构造应力为主, 平均最大水平主应力方向为 N 62.6°E; 矿区最大、最小水平主应力以及垂直应力均随着深度的增加而增大; 最大水平主应力与垂直应力的平均比值为 2.42, 最小水平主应力与垂直应力的平均比值为 1.49。数值模拟结果表明: 孔底监测点地应力反演值与实测值之间最大误差为最大水平主应力的 -13.9%, 误差大小在合理范围内, 验证了现场实测数据的准确性与反演模拟的可靠性, 为矿山后续工作提供数据基础。

关键词:地应力测试; FLAC 模拟; 水压致裂; 地应力分布规律

中图分类号: TD163 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2023)03-0034-06

Abstract: The hydraulic fracturing method was used to conduct in-situ stress testing at a certain mine. Based on the measured data, the relationship between the magnitude of the in-situ stress and depth was analyzed, and the distribution law and variation characteristics of in-situ stress in the mine were obtained. The FLAC finite difference software was used to perform inversion simulation on the mining area, and the simulation results were used to verify the accuracy of the in-situ stress measurement results. The in-situ stress measurement results showed that the in-situ stress in the mining area was mainly composed of horizontal structural stress, with an average maximum horizontal principal stress direction of N 62.6°E. The maximum and minimum horizontal principal stresses and the vertical stress in the mining area all increased with depth. The average ratio of the maximum horizontal principal stress to the vertical stress was 2.42, and the average ratio of the minimum horizontal principal stress to the vertical stress was 1.49. The numerical simulation results showed that the maximum error between the inverted value of in-situ stress at the hole bottom monitoring point and the measured value was -13.9% of the maximum horizontal principal stress. The error was within a reasonable range, which verified the accuracy of the in-situ measurement data and the reliability of the inversion simulation, providing a data basis for subsequent work at the mine.

Key words: in-situ stress testing; FLAC simulation; hydraulic fracturing; distribution law of in-situ stress

1 前言

地应力是地壳中的一种天然应力, 在采矿、水利水电、隧道等地下或边坡工程中会引起变形和失稳, 从而导致一系列的灾害。因此, 测量和控制地应力的重要性不言而喻, 对井下或露天矿灾害进行控制的首要前提就是进行地应力测量^[1]。

随着国民经济的发展和矿产资源需求的增加,

深部矿产资源的开采已成为必然趋势。然而, 深部开采所面临的高地应力区问题比浅部开采更加严峻。由于地层深度的增加, 地应力的复杂度也相应增加, 围岩的力学行为与浅部围岩存在明显差异, 岩体平衡也会发生变化。这些变化会对深部矿产资源的开发带来重大的安全隐患^[2-3]。因此, 研究矿山地地下原岩应力场分布规律对深部矿产资源的开发和安全的具有重要的实际意义和参考价值。对于深部岩体工程的设计和施工, 必须充分考虑地应力的影响, 并采取相应的措施来保障工程的安全。此外, 地应力的研究也对于岩土力学和地震学等学科有着重要的理论和实践价值。

近年来, 众多专家和学者对地应力测量进行了

[作者简介] 孙健(1981—), 男, 高级工程师, 主要从事设备管理和工程管理工作。

[引用格式] 孙健, 安晶, 宫长亮, 等. 某矿山地应力测试结果及建模反演分析[J]. 中国矿山工程, 2023, 52(3): 34-39.

深入研究,地应力测量方法已经有了很大的发展和进步。声发射法、震源机制分析、钻孔崩落、水压致裂等都是进行地应力测量的主要方法^[4],其中水压致裂法是测量地应力的常用方法,水压致裂法的优点为操作方便,计算理论简单、结果相对准确^[5]。

不少学者研究了地应力测试和分析方法在不同矿山和工程中的应用,探究地应力分布规律,提高矿山和工程的稳定性和安全性。侯奎奎等^[6]研究了在三山岛金矿 2 005 m 竖井建井区域中不同地应力测试方法的应用,研究了地应力的分布规律。刘允芳等^[7]介绍了单钻孔中水压致裂法三维地应力测量的新进展,提出了单钻孔中水压致裂法三维地应力测量的新方法。赵国平等^[8]研究了水压致裂法地应力测试在水电工程中的应用。张晓^[9]以水压致裂法进行了寺河煤矿的地应力测试,研究了小孔径水压致裂三维地应力测量及其在寺河煤矿的应用。此外,还有一些论文关注了具体的矿山和工程。王兴旭等^[10]研究了小庄煤矿地应力场分布规律实测与模拟。李庶林等^[11]研究了凡口铅锌矿深部矿床地应力测试,为凡口铅锌矿深部地压的后续研究提供了基础数据。康红普等^[12]研究了晋城矿区地应力场及其应用。唐华瑞等^[13]研究了会泽铅锌矿深部地应力分布规律。

现场实测地应力具有一定的局限性和偶然性,将现场实测和数值模拟结合起来分析矿区地应力分布规律也有着重要意义。王社光等^[14]研究了地下矿山地应力场反演数值模拟方法。郭延辉等^[15]提出了基于 FLAC3D 的岩体初始高水平构造应力场反演方法。Li 等^[16]利用 FLAC 建立三维数值模型,得到巷道围岩和破坏危险区的变化特征,为高地应力区域引起的灾害事故的解决提供了理论依据。

本文为了研究某矿区内地应力分布规律和变化特征,采用水压致裂法对矿区进行地应力测试,最大测试深度达到 450 m。为了避免现场实测工作的局限性和偶然性,结合有限元差分软件对矿区地应力场进行反演模拟,计算分析反演模拟得到的地应力值与现场施工实测的地应力值之间的大小关系,以期获得更加准确的地应力场,对后续工作以及同地区工程施工提供可靠的数据基础。

2 地应力测试过程与结果

本次现场测试采用单回路水压致裂法,测量设备采用 YGHF-2.0 型地应力测量系统。在测试过程中,

每段通常都要进行 3~5 次循环,以便取得合理的应力参量以及准确判断岩石的破裂和裂缝的延伸状态。

钻孔深度为 450.00 m,钻孔口径为 75 mm,绳索钻具成孔,岩芯质量完整,孔内水位距孔口 4.6 m。根据钻孔的地质条件、岩芯 RQD 及钻孔沉渣等初始资料,逐段逐次开展了 5 段地应力测试工作,获取了 5 段合理的压裂曲线,测段位置依次为 212.35 m、266.27 m、333.51 m、386.13 m 和 430.08 m。由浅到深 5 个测段的压力记录曲线如图 1 示。

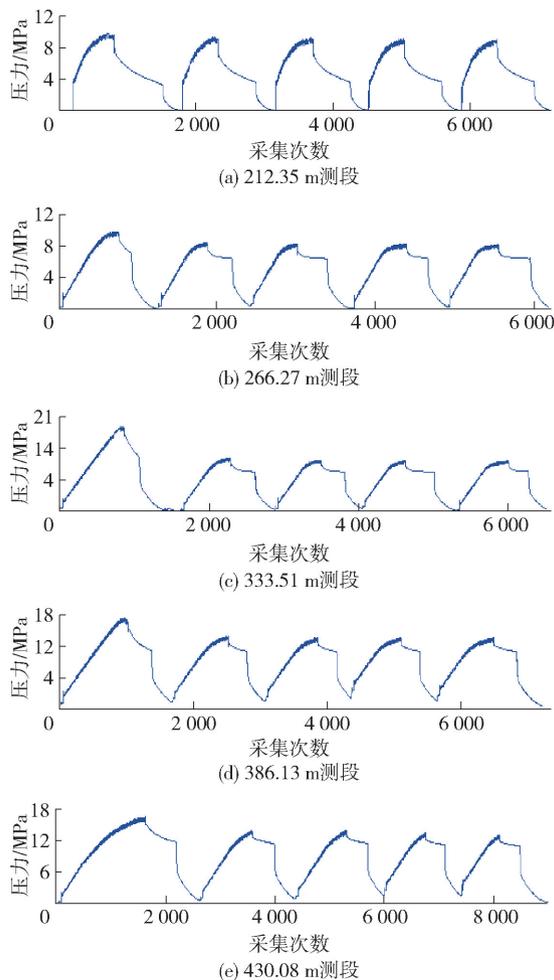


图 1 钻孔压裂特征曲线

根据所获得的曲线数据,前五个测段的数据表现较为理想,压裂记录曲线符合标准,每个压裂段的破裂压力、重张压力和闭合压力在每次循环中都很清晰、明确。同时,压裂参数具有良好的一致性,各个循环曲线的规律性很强。

基于确定的压力参数及相关计算公式,可以得出测段岩体的原位抗拉强度 T 、最大水平主应力 S_H 、最小水平主应力 S_h 及垂直主应力 S_V 。其中垂直主应

力是按照上覆岩层的密度(2.82 g/cm³)计算得到。地应力测量结果见表1,相关计算见式(1)~式(3)。

表1 压裂特征参数及地应力计算结果

| 序号 | 测段 深度/m | 压裂参数/MPa | | | | | 主应力值/MPa | | | 破裂 方向/(°) | |
|----|------------|------------------|------------------|------------------|-------|-------|----------|-------|-------|--------------|----------|
| | | $P_{b\text{地面}}$ | $P_{r\text{地面}}$ | $P_{s\text{地面}}$ | P_w | P_0 | T | S_H | S_h | | S_v |
| 1 | 212.35 | 9.96 | 9.28 | 7.70 | 2.12 | 2.08 | 0.68 | 15.99 | 9.82 | 9.82 | |
| 2 | 266.27 | 13.53 | 11.34 | 9.27 | 2.66 | 2.62 | 2.19 | 19.18 | 11.93 | 7.51 | |
| 3 | 333.51 | 19.11 | 11.69 | 9.82 | 3.34 | 3.29 | 7.42 | 21.15 | 13.16 | 9.40 | N6 7.7°E |
| 4 | 386.13 | 15.68 | 13.93 | 12.05 | 3.86 | 3.82 | 1.75 | 26.13 | 15.91 | 10.89 | |
| 5 | 430.08 | 16.71 | 14.08 | 12.16 | 4.30 | 4.25 | 2.63 | 26.75 | 16.46 | 12.12 | N 75.3°E |

$$P_b = P_{b\text{地面}} + P_w \quad (1)$$

$$P_r = P_{r\text{地面}} + P_w \quad (2)$$

$$P_s = P_{s\text{地面}} + P_w \quad (3)$$

式中: P_b ——岩石的破裂压力;

P_s ——瞬时闭合压力;

P_r ——裂缝的重新张开压力;

P_w ——测段处的钻杆内水柱压力。

根据水压致裂法地应力测试的基本原理,通过水压致裂实验可引起地下岩体破裂,形成裂缝。而这些裂缝的走向即为最大水平主应力的方向。因此,通过对水压致裂实验中裂缝的走向进行测定,可以确定地下岩体最大水平主应力的方向。

采用装有电子定向仪的印模器,在333.51 m、430.08 m测段进行了2次最大水平主应力方向的印模测定,印痕清晰,结果如图2所示。这些测定结果将有助于研究地下岩体的力学特性,为工程建设提供科学依据。

破裂方位是相对磁北而言的,该矿山所在地区磁方位角与真北方位的偏差为-8.9°,据此对磁偏角进行校对。根据裂缝方向的测定,求得最大水平主应力方位为N 58.8°E和N 66.4°E。

3 地应力分布规律分析

由钻孔应力测试结果可知,所测范围最大水平主应力值为15.99~26.75 MPa,最小水平主应力值为9.82~16.46 MPa。从应力与深度的关系看,应力随深度增大基本呈增加的趋势,具体如图3所示。

三个主应力的大小关系为: $S_H > S_h > S_v$ 。将测点结果利用最小二乘法进行线性回归,回归结果见式(4)~式(6)。

$$S_H = 0.05122H + 5.15821 \quad (4)$$

$$S_h = 0.03104H + 3.34723 \quad (5)$$

$$S_v = 0.02819H \quad (6)$$

基于上述回归公式,可以预测孔底最大埋深

450 m处(孔底位置)3个主应力的大小依次为28.21 MPa、17.32 MPa和12.69 MPa。

地应力侧压系数反映了水平地应力的相对大小和构造应力的水平,是工程设计和稳定性分析的基本参数之一。从表3可知,该钻孔附近的地应力以构造应力为主,最大水平主应力与垂直应力的平均比值为2.42,最小水平主应力与垂直应力的平均比值为1.49。建议加强巷道的边墙设计,防止较大构造应力造成边墙失稳。

根据实测结果表明,水压致裂法在同一测段上进行多次测量时,初次的破裂循环与其后的重张循环存在显著差别。通常情况下,破裂压力 P_b 大于重张压力 P_r 。这是因为在初始破裂循环中,不仅需要克服岩体所承受的压应力,还要克服岩体本身的抗拉强度 T 。而在破裂后的重张循环中,由于破裂面已经形成,只需要克服作用在破裂面上的地应力,因此可以通过两者之差来计算岩体原位抗拉强度。据此,通过计算,工程区岩体原位抗拉强度约为2.93 MPa。这个结果表明,矿区的岩体在受到拉应力时具有一定的抗拉能力。这对于矿山的开采和地下工程的设计非常重要,因为在这些工程中,岩体可能会受到各种类型的力作用,包括拉应力。因此,了解岩体的原位抗拉强度有助于更好地预测岩体的行为,并采取相应的措施来确保工程的安全和稳定性。

本次测段333.51处最大水平主应力方向为N 58.8°E,测段430.08 m处最大水平主应力方向为N 66.4°E,平均最大水平主应力方向为N 62.6°E。其结果符合矿山所在区域内的现今构造运动的应力场方向。

4 FLAC反演模拟与结果分析

根据试验数据结合矿山地质资料建立关于矿区地应力场的FLAC三维数值模型,模型整体采用

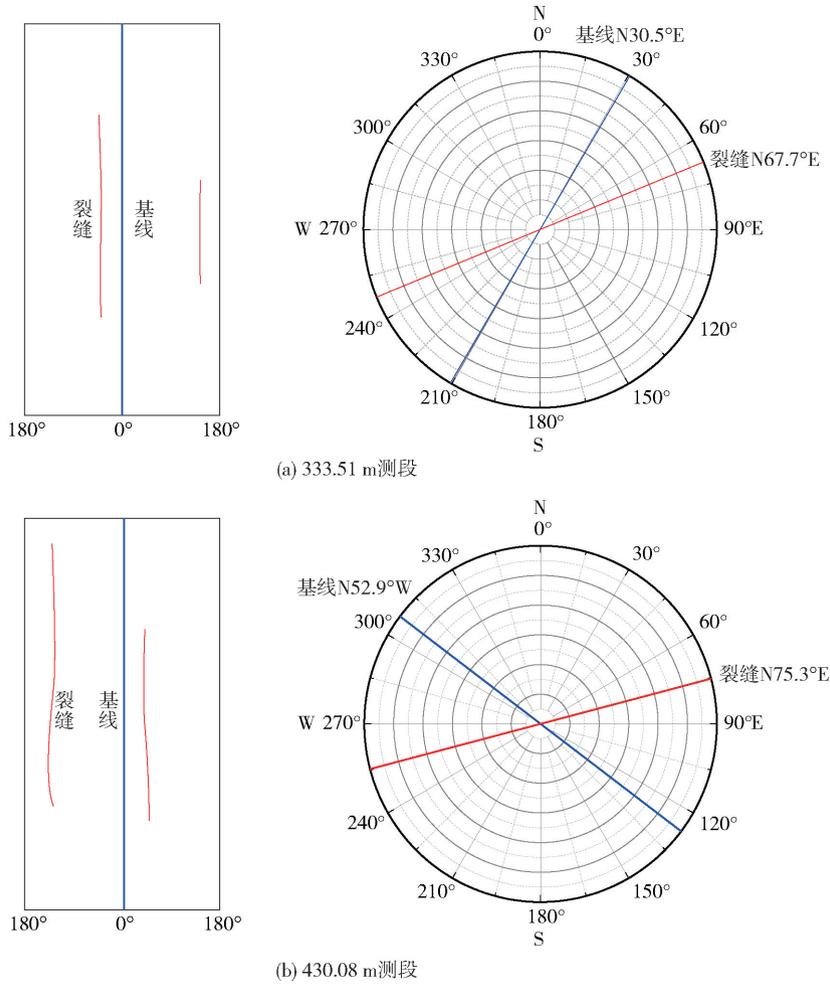


图2 钻孔印模结果

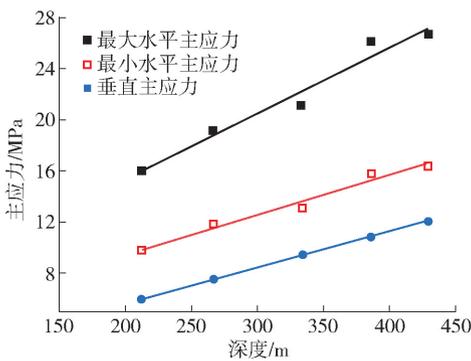


图3 钻孔三向主应力随深度分布图

表3 钻孔地应力侧压系数

| 序号 | 测段深度/m | 垂直应力 S_v /MPa | 最大水平主应力 | | 最小水平主应力 | |
|----|--------|-----------------|------------|-----------|------------|-----------|
| | | | S_H /MPa | S_H/S_v | S_h /MPa | S_h/S_v |
| 1 | 212.35 | 5.99 | 15.99 | 2.67 | 9.82 | 1.64 |
| 2 | 266.27 | 7.51 | 19.18 | 2.56 | 11.93 | 1.59 |
| 3 | 333.51 | 9.40 | 21.15 | 2.25 | 13.16 | 1.40 |
| 4 | 386.13 | 10.89 | 26.13 | 2.40 | 15.91 | 1.46 |
| 5 | 430.08 | 12.12 | 26.75 | 2.21 | 16.46 | 1.36 |

Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型,模型上边界取至地表。模型 X 方向和 Y 方向长度均为 1 000 m;模型 Z 方向为竖直方向,模型高度为 900 m;露天矿坑为圆柱体和圆台组成的整体,圆柱体上下表面半径为 500 m,高度为 74 m;圆台上表面半径为 500 m,下表面半径为 100 m,圆台垂直高度为 300 m,计算模型整体如图 4 所示。

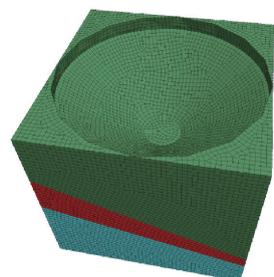


图4 计算模型图

计算模型 X、Y 方向两端均约束两侧方向位移,模型下表面固定位移,模型上表面为自由边界。Y 方向为最大水平主应力方向,X 方向为最小水平主应力方向,Z 方向为垂直应力方向。矿岩物理力学参数可

通过室内试验得到,具体参数见表 4。图 5、图 6 和图 7 所示分别为模型计算完成后 X 方向、Y 方向水平应力分布以及 Z 方向的垂直应力分布图,图 8 所示为模型经过计算后三向应力大小随深度变化图。

表 4 矿区内矿岩力学参数

| 岩性 | 密度 $\rho/g \cdot cm^{-3}$ | 弹性模量 E/GPa | 泊松比 μ | 抗拉强度 σ/MPa | 黏聚力 c/MPa | 内摩擦角 $\phi/(^\circ)$ |
|--------|---------------------------|--------------|-----------|-------------------|-------------|----------------------|
| 绿泥石英片岩 | 3.00 | 3.06 | 0.35 | 7.50 | 39.54 | 47.69 |
| 花岗斑岩 | 2.72 | 20.22 | 0.28 | 5.82 | 75.60 | 37.17 |
| 太古代花岗岩 | 2.85 | 10.27 | 0.41 | 4.41 | 18.22 | 47.95 |
| 磁铁矿 | 3.68 | 23.56 | 0.26 | 7.60 | 66.22 | 43.08 |

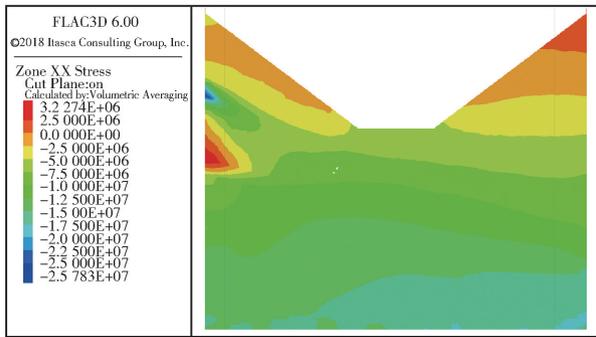


图 5 数值模拟后 X 方向应力

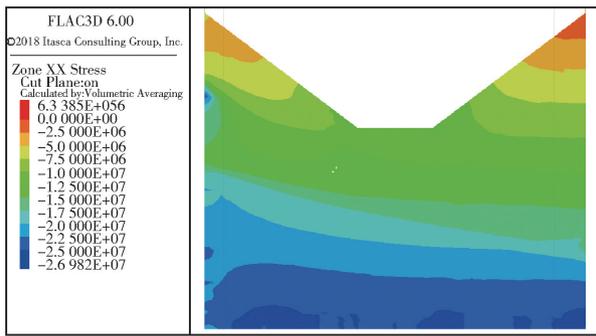


图 6 数值模拟后 Y 方向应力

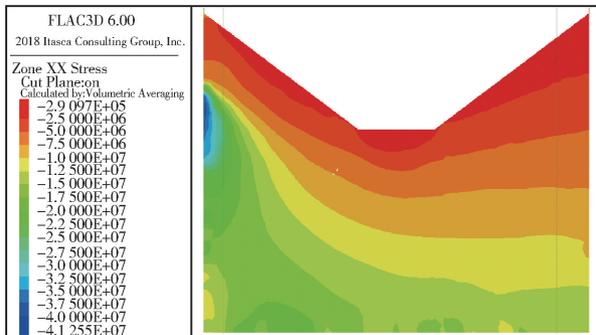


图 7 数值模拟后 Z 方向应力

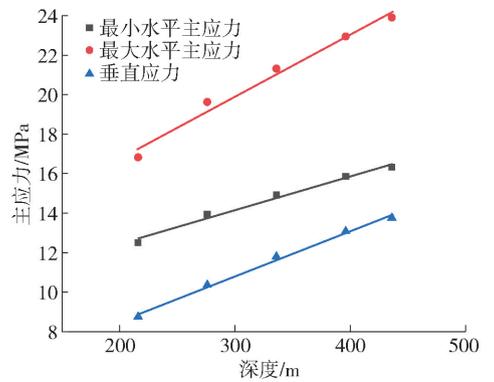


图 8 数值模拟三向应力大小随深度变化图

次为 28.21 MPa、17.32 MPa 和 12.69 MPa。为了检验矿区实测地应力准确性,此次模拟在模型内部的孔底位置(模型内坐标为 500,500,76)布设监测点,监测得到孔底位置三向地应力曲线,以期分析数值模拟后监测点的三向主应力值与地应力实测值之间的关系,具体如图 9、图 10、图 11 所示。

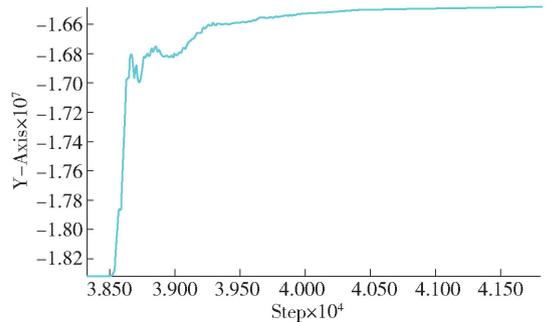


图 9 孔底位置 X 方向应力监测值

从图中可以得出:应力值趋于稳定后孔底位置 Z 方向应力大小为 14.18 MPa, X 方向应力为 16.50 MPa, Y 方向应力大小为 24.29 MPa。经过计算,孔底位置 X、Y、Z 方向地应力监测值与实测值的误差大小分别为:11.74%、-4.73%、-13.9%。监

根据现场地应力实测后得到地应力线性回归方程推测孔底最大埋深 450 m 处 3 个主应力的大小依

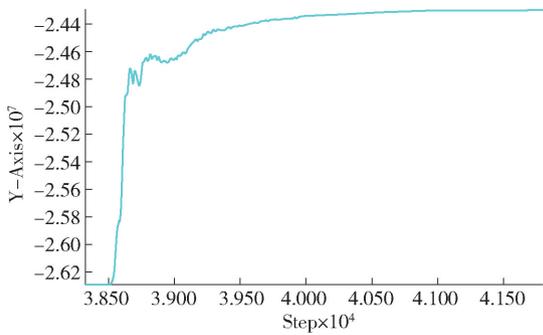


图 10 孔底位置 Y 方向应力监测值

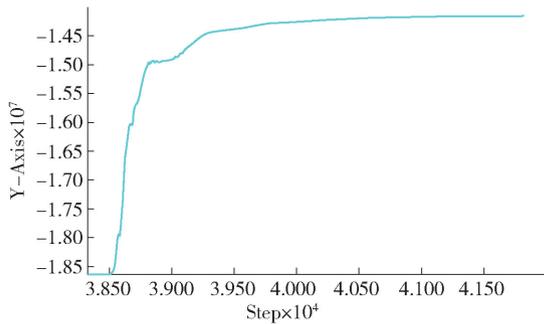


图 11 孔底位置 Z 方向应力监测值

测结果表明,孔底测点位置最大水平主应力、最小水平主应力以及垂直主应力模拟反演值与现场实测地应力值之间的相对误差均在允许范围内。综上所述,矿区内地应力反演模拟结果与现场地应力实测结果具有较好的一致性,说明现场实测地应力结果具有一定的准确性。

5 结论

(1) 该铁矿矿区地应力场以水平构造应力为主,测段 333.51 m 处最大水平主应力方向为 N 58.8°E,测段 430.08 m 处最大水平主应力方向为 N 66.4°E,平均最大水平主应力方向为 N 62.6°E。

(2) 三个主应力的大小关系为: $S_H > S_h > S_v$ 。根据得到的线性回归公式预测孔底最大埋深 450 m 处(孔底位置)3 个主应力的大小依次为 28.21 MPa、17.32 MPa 和 12.69 MPa。

(3) 矿区最大主应力、最小主应力以及垂直应力均随着深度的增加而增大;最大水平主应力与垂直应力的平均比值为 2.42,最小水平主应力与垂直应力的平均比值为 1.49。建议加强巷道的边墙设计,防止较大构造应力造成边墙失稳。

(4) 数值模拟反演结果表明,矿区各个主应力的方向与现场实际测量地应力方向基本一致,孔底监测点处三向应力的反演值与实测地应力回归值之

间的误差均在允许范围内,表明矿区地应力现场实测结果具有一定准确性。

[参考文献]

- [1] 梁晨. 一种新的地应力测量方法理论及数值分析[D]. 武汉:湖北工业大学, 2020.
- [2] 侯朝炯,王襄禹,柏建彪,等. 深部巷道围岩稳定性控制的基本理论与技术研究[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(1): 1-12.
- [3] 左宇军,荣鹏,林健云,等. 黔西南锦丰金矿地应力测试及分布特征研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2022, 39(4): 1-8.
- [4] 贺永胜,王启睿,刘恩来,等. 深部岩体地应力分布及测试技术研究进展[J]. 防护工程, 2021, 43(4): 71-78.
- [5] 祁军,樊冬梅,谢得峰,等. 基于水压致裂法的拉脊山地区深部地应力测试及可靠性分析[J]. 青海大学学报, 2021, 39(6): 65-73.
- [6] 侯奎奎,吴钦正,张凤鹏,等. 不同地应力测试方法在三山岛金矿 2 005 m 竖井建井区域的应用及其地应力分布规律研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(4): 1093-1102.
- [7] 刘允芳,刘元坤. 单钻孔中水压致裂法三维地应力测量的新进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(S2): 3816-3822.
- [8] 赵国平,陈文华,马鹏,等. 水压致裂法地应力测试在水电工程中的应用[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(11): 77-82.
- [9] 张晓. 小孔径水压致裂三维地应力测量及在寺河煤矿应用[J]. 煤矿开采, 2017, 22(4): 10-12+31.
- [10] 王兴旭,孟坤,陈梦. 小庄煤矿地应力场分布规律实测与模拟研究[J]. 陕西煤炭, 2020, 39(1): 27-31+17.
- [11] 李庶林,杨念哥. 凡口铅锌矿深部矿床地应力测试[J]. 矿业研究与开发, 2003(4): 15-17.
- [12] 康红普,姜铁明,张晓,等. 晋城矿区地应力场研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 1-8.
- [13] 唐华瑞,郭闪闪,韩灵杰,等. 会泽铅锌矿深部地应力分布规律的研究[J]. 矿业研究与开发, 2016, 36(3): 45-48.
- [14] 王社光,王立杰,耿帅,等. 地下矿山地应力场反演数值模拟研究[J]. 金属矿山, 2021, 544(10): 46-50.
- [15] 郭延辉,侯克鹏. 基于 FLAC3D 的岩体初始高水平构造应力场反演方法[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(21): 8523-8529.
- [16] Li Tao, Gong Hao, Xu Guoliang. Study on the influence of in situ stress distribution on the stability of roadway surrounding rock[J]. Advances in Civil Engineering, 2021.