

综合技术

某矿山深部地应力特征及岩体稳定性分析

Deep in-situ Stress Characteristics and Stability Analysis of Rock Mass in a Certain Mine

熊赞民¹, 王恒涛¹, 孙尧²

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘要: 矿山开采过程中巷道和采场的变形破坏是地应力、地质构造和岩体强度等多因素综合作用的结果, 地应力是其中重要影响因素之一, 研究原岩应力测量结果有助于全面地认识和了解整个工程区地应力分布情况, 为工程设计和矿山开采提供依据。本文采用套芯解除法对某矿埋深 600 m 以深的 2 个中段进行了地应力测量, 结果表明: 应力场主要以水平应力为主导, 最大水平主应力值为 14.25 ~ 20.17 MPa; 中间主应力值为 8.34 ~ 11.35 MPa; 最小主应力值为 5.67 ~ 8.68 MPa, 为竖直应力。测区最大主应力方向 NNE ~ NEE, 各测段最大主应力与最小主应力的相差较大, 其比值平均在 2.54 左右, 造成剪应力值相对较大。通过 R_c/σ_{\max} 评价岩体稳定性, -258 m 中段, 英安斑岩、闪长岩、石英斑岩围岩属于低应力, 无岩爆; 绢云母千枚岩围岩大变形等级轻微。-378 m 中段, 英安斑岩、石英斑岩围岩为高应力, 有岩爆倾向; 闪长岩围岩属于低应力, 无岩爆; 绢云母千枚岩围岩大变形等级轻微。

关键词: 深部地应力; 套芯解除法地应力测量; 岩爆; 围岩大变形

中图分类号: TD311

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2023)04-0062-05

Abstract: The deformation of roadways and stopes in the process of mining is the reflection of multiple factors such as crustal stress, tectonics and rock mass strength. Crustal stress is one of the important influencing factors. Studying the measurement results of original rock stress is helpful to comprehensively understand the distribution of crustal stress in the whole project area, and provide a basis for engineering design and mining. The method and principle of in-situ stress measurement by relief method are described. The in-situ stress measurement by relief method for two medium stage which the depth are more than 600m in the certain mine, shows that the stress field in the exploration area is dominated by the horizontal stress, and the maximum horizontal principal stress is 14.25 ~ 20.17 MPa. The intermediate principal stress values were 8.34 ~ 11.35 MPa, respectively. The minimum principal stress values are 5.67 ~ 8.68 MPa respectively, which are vertical stresses. The direction of the maximum principal stress in the measuring area is NNE ~ NEE. The difference between the maximum principal stress and the minimum principal stress in each test section is large gap, and the ratio is about 2.54 on average, which will result in relatively large shear stress. R_c/σ_{\max} is used to calculate the stability of roadway surrounding rock. For medium stage -258 m, dacite porphyry and diorite rocks are of low stress and no rock burst. The deformation grade of sericite phyllite is slight. For medium stage -378 m, the surrounding rock of dacite porphyry is highly stressed and prone to rock burst; Diorite belongs to low stress, without rock burst; Quartz porphyry is of high stress and medium grade of large deformation; The large deformation grade of sericite phyllite surrounding rock is slight.

Key words: deep in-situ stress; overcoring relief method of in-situ stress measurement; rock burst; large deformation of surrounding rock

1 前言

某矿目前开采最低标高为 -378 m, 埋深超过 600 m。随着开采深度不断增加, 可能引起岩爆、冲

击地压、围岩大变形等工程地质问题^[1-3]。因此在矿区开展原位地应力测量, 掌握原岩应力场的基本特征, 为合理的井巷工程设计、巷道围岩支护、地压控制等有着重要的指导意义。

地应力测量方法包括水压致裂法、套芯解除法、岩芯滞弹性恢复法(ASR)等。其中套芯解除法是 20 世纪 70 年代发展起来的能够比较准确地确定岩体中三维应力状态的方法, 也是最经济合理的方法。

[作者简介] 熊赞民(1970—), 男, 博士, 注册岩土工程师, 主要从事矿山岩土力学与工程的咨询、设计和研究工作。

[引用格式] 熊赞民, 王恒涛, 孙尧. 某矿山深部地应力特征及岩体稳定性分析[J]. 中国矿山工程, 2023, 52(4): 62-66.

2 区域地质构造概况

矿山属丘陵中低山地貌,因受风化和雨水侵蚀作用,山坡坡角约为 $10^{\circ} \sim 35^{\circ}$,并形成呈树枝状的冲沟、山前谷地和中低山脉。矿区地势北东高、南西低,海拔标高 307.63 m,地形最大相对高差为 227.63 m。

2.1 构造

矿区所跨两个二级大地构造单元,分别是赣东北韧性剪切蛇绿岩造混杂带和泗洲庙复向斜。区内发育多组方向的断裂构造,有东西向、北东向、北北东向、北西向四组断裂,东西向断裂形成较早,多以挤压破碎带形式存在;北东向和北北东向断裂普遍发育;北西向断裂形成最晚。

2.2 地层岩性

区域出露地层有中元古界双桥山群(Pt2sh)、上元古界登山群(Pt3d)和震旦系(Z)、古生界寒武系(ϵ)、中生界侏罗系(J)和白垩系(K)及新生界第四系(Q)。矿体赋存于千枚岩、变石英闪长岩和石英斑岩中。

3 矿区应力场概况

由于水压致裂地应力测量仅能测出水平的二维应力,竖直应力依靠上覆岩体的重量估算,且近年来矿体深部的采掘对原岩应力场状态有影响,为进一步获取扰动后的矿区地应力状态,于 2022 年 6 月 ~ 8 月期间,在矿体的 -258 m 中段和 -378 m 中段,开展了 4 个测点的套芯解除法地应力测量,进而获取深部矿体在开采扰动后的三维地应力状态。

3.1 套芯解除法地应力测量设备及基本原理

套芯解除法地应力测量使用的应变计简记为 CSIRO 型空芯包体^[4],本次测试采用 KX-81 型空芯包体三轴地应力计,具体如图 1 所示。

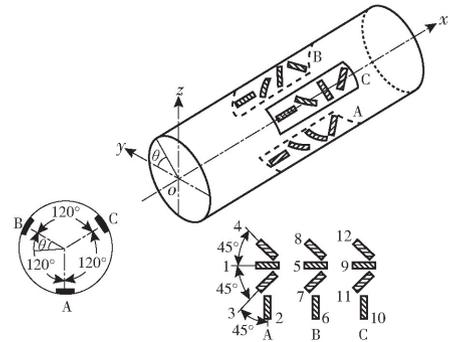
钻孔应力解除技术,就是将一段岩石通过取芯(套芯技术)从周围岩体施加给它的应力场内隔离开来的方法,应力解除过程如图 2 所示。现场解除完成后,使用率定器向套取的岩芯施加围压,从而获取测点岩石的弹性模量及泊松比。

3.2 测点选取与测量结果

经实地踏勘,将 4 个地应力测点分别布置在 -258 m 中段(3 个测点,钻孔编号 ZK258-1、ZK258-2、ZK258-3)和 -378 m 中段(1 个测点,钻孔编号 ZK378-1)。钻孔位于巷道旁侧,为近水平



(a) 空芯包体应力计外观



(b) 空芯包体应力计结构

图 1 KX-81 型空芯包体三轴地应力计

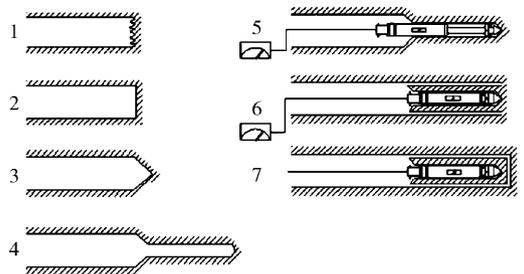


图 2 钻孔应力解除过程示意图

孔,倾角为上倾 $3^{\circ} \sim 5^{\circ}$;钻孔深度为巷道宽度的 2.5 倍以上,约为 8 m,钻孔直径为 130 mm。现场试验过程按照《原地应力测量水压致裂法和套芯解除法技术规范》进行^[5]。各测点应变实测曲线如图 3 所示。

对套孔解除取出的带包体岩芯用弹模率定器进行弹性参数率定,率定实验结果表明:矿区各测点的弹性模量约为 50 GPa,泊松比约为 0.25。分析计算出矿区地应力分量及主应力的方向和大小见表 1。

3.3 矿区地应力场分布规律

通过套芯解除法地应力实测,2 个工作面 4 个钻孔中最大水平主应力值为 14.25 ~ 20.17 MPa;中间主应力值分别为 8.34 ~ 11.35 MPa;最小主应力值分别为 5.67 ~ 8.68 MPa。按照套芯解除法地应

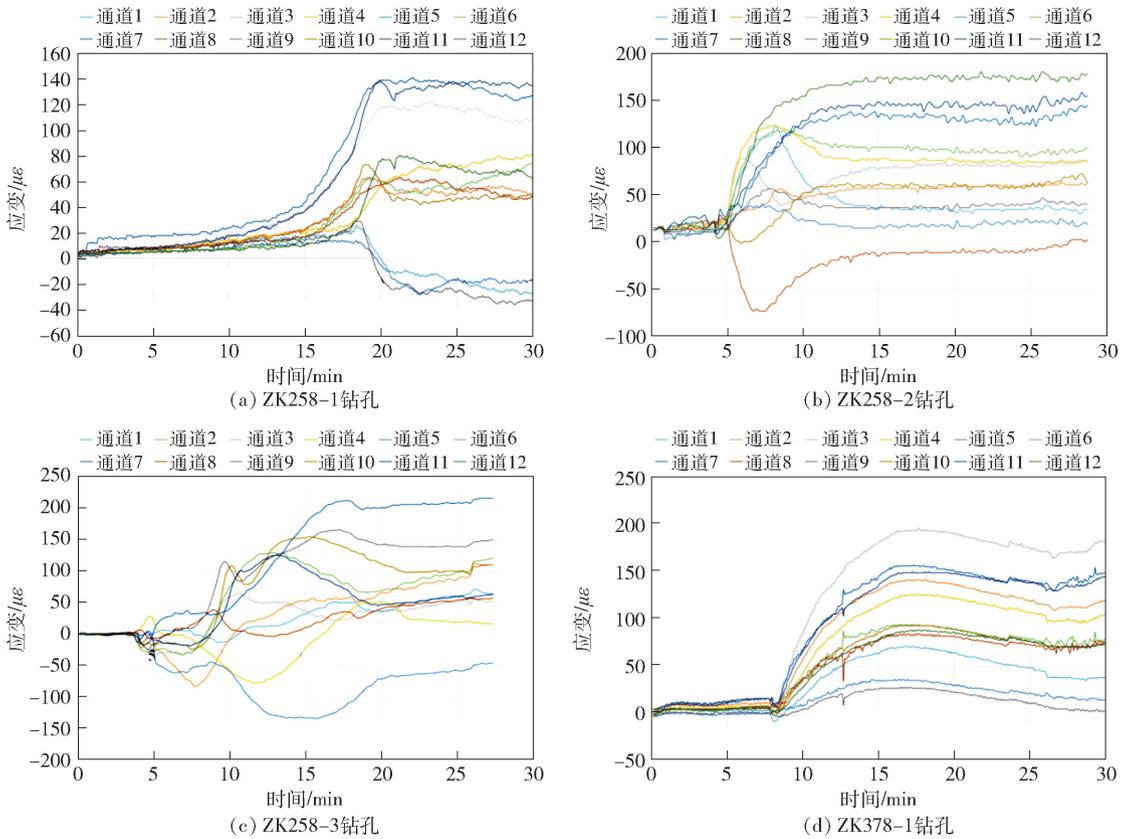


图3 套芯解除法应变实测曲线

表1 矿区地应力测量结果汇总表

钻孔位置	标高/m	主应力			垂向应力/MPa
		主应力	大小/MPa	方位角/(°)	
ZK258-1	-258	σ_1	14.25	11.8	9.4
		σ_2	8.66	-80.1	-11.5
		σ_3	5.68	293.2	82.2
ZK258-2	-258	σ_1	15.53	47.5	-3.6
		σ_2	8.51	-41.9	8.8
		σ_3	6.02	155.3	85.3
ZK258-3	-258	σ_1	15.68	247.0	-4.2
		σ_2	8.34	-22.8	12.1
		σ_3	5.67	143.2	84.8
ZK378-1	-378	σ_1	20.17	36.3	-2.5
		σ_2	11.35	214.4	-3.3
		σ_3	8.68	326.9	88.1

力测量理论, 竖直主应力可以按其上覆岩层的重力进行估算。从表1可知, 全部4个钻孔测量的最大主应力、中间主应力均接近水平方向, 其中最大主应力与水平面的平均夹角为4.9°, 中间应力与水平面的夹角为8.9°; 最小主应力为近似竖直方向。表明

该区应力场状态变化很小, 比较稳定, 应力场状态为逆冲型。

从表1可以看出, -258 m中段3个应力测点中的最大主应力量值在15.15 MPa左右, 最大主应力方向平均N42°E附近; -378 m中段应力测点的最大主应力量值为20.17 MPa, 最大主应力方向NNE~NEE, 受矿坑及巷道开挖的影响, 最大主应力方位角差异较大, 各测点最大主应力方向如图4所示。

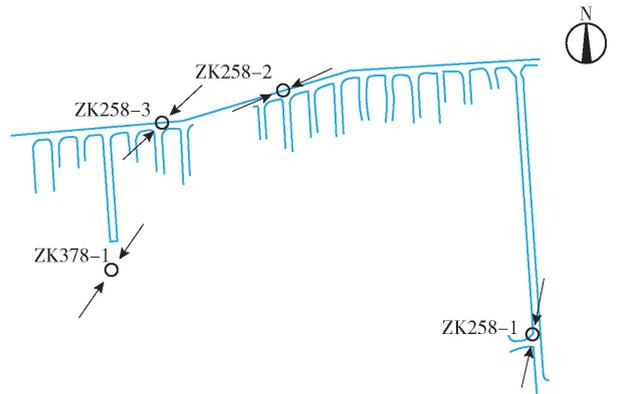


图4 各测点最大主应力方向

得到测区水平主应力随深度变化曲线如图5所示。

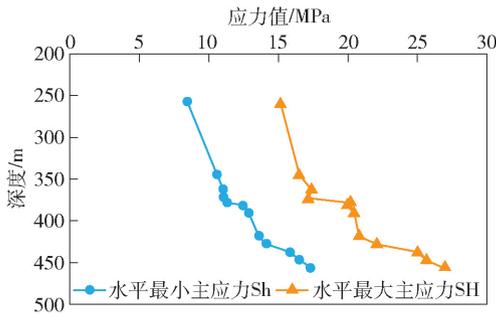


图5 主应力值随深度变化图

各测点的水平主应力最大值 (S_H) 和最小值 (S_h) 线性回归方程如下:

$$S_H = -9.23 + 0.077D$$

$$S_h = -7.14 + 0.052D$$

式中, D 为钻孔深度, 单位为 m。

通常利用水平最大主应力与垂向应力的比值研究各测点构造应力场的特征, 其中 -258 m 中段 $\sigma_1/\sigma_3 = 2.51 \sim 2.77$, -378 m 中段 $\sigma_1/\sigma_3 = 2.32$ 。可见两个中段最大主应力与最小主应力的相差较大, 其比值平均在 2.54 左右, 会造成剪应力值相对较大。

4 岩体稳定性分析

矿井开采深度不断增加, 矿山深部巷道和工作面的高应力环境易引起硬岩岩爆^[6-10]、软岩大变形、冲击地压等工程灾害, 严重影响着矿山开采的安全。

岩爆或软岩大变形的的外因是岩体开挖引起地下洞室围岩应力重新分布、应力集中造成的局部高地应力; 其内因是岩石硬度, 一般来讲在高应力作用下的硬岩易发生岩爆现象, 而软岩则具有大变形特征。通过对现场围岩样品开展岩石力学试验, 测定了岩石的力学参数, 具体参数见表2。

表2 主要围岩岩石力学参数

岩性	取样位置/ m	弹性模量 E_c / 10^4 MPa	变形模量 E_{50} / 10^4 MPa	泊松比 μ_{50}	抗压强度 / MPa
石英斑岩	-378	2.55	1.23	0.1	48.7
石英斑岩	-378	2.52	1.6	0.22	61.4
英安斑岩	-378	2.62	1.36	0.25	108.7
英安斑岩	-378	2.77	1.42	0.24	113.6
闪长岩	-288	9.33	5.48	0.33	153.5
闪长岩	-288	9.36	5.51	0.31	157.2
绢云母千枚岩	-258	2.05	1.27	0.22	35.7
绢云母千枚岩	-258	2.11	1.25	0.19	28.6

针对较硬的英安斑岩、闪长岩, 用工程区岩石单轴抗压强度 R_c 与巷道截面内最大主应力 σ_{max} 的比值 R_c/σ_{max} 作为岩爆判定标准之一^[11]; 对于较软的石英斑岩、绢云母千枚岩, 参照国内大型软岩巷道乌鞘岭巷道的大变形分级标准^[12-13] 确定大变形。主要围岩岩爆倾向见表3。

矿山主要巷道围岩大变形等级见表4。

表3 主要围岩岩爆评价

开采中段/m	围岩岩性	单轴抗压强度(平均) R_c /MPa	最大主应力(平均) σ_{max} /MPa	R_c/σ_{max}	岩爆倾向
-258	石英斑岩	55.05	15.15	3.63	高应力, 岩爆倾向
	英安斑岩	111.15	15.15	7.34	低应力, 无岩爆
	闪长岩	155.35	15.15	10.25	低应力, 无岩爆
-378	石英斑岩	55.05	20.17	2.73	高应力, 岩爆倾向
	英安斑岩	111.15	20.17	5.51	高应力, 岩爆倾向
	闪长岩	155.35	20.17	7.70	低应力, 无岩爆

表4 主要围岩大变形评价

开采中段/m	围岩岩性	单轴抗压强度(平均) R_c /MPa	最大主应力(平均) σ_{max} /MPa	R_c/σ_{max}	围岩大变形等级
-258	绢云母千枚岩	32.15	15.15	2.12	轻微, 相对变形量小于3%
-378	绢云母千枚岩	32.15	20.17	1.59	轻微, 相对变形量小于3%

5 结论

(1) 勘探区应力场主要以水平应力为主导, 实测得出2个工作面4个钻孔中最大水平主应力值为14.25~20.17 MPa; 中间主应力值分别为8.34~11.35 MPa; 最小主应力值分别为5.67~8.68 MPa。最小主应力为竖直应力, 显示出逆冲应力状态。

(2) -258 m中段3个应力测点最大主应力方向平均N42°E附近; -378 m中段应力测点最大主应力方向N36°E附近。可以看出4个测点的最大主应力方向NNE~NEE, 与区域构造应力场方向近似。设计时应尽可能布置巷道长轴线与最大应力方向小角度相交, 以减少硐壁的切向应力。

(3) -258 m中段 $\sigma_1/\sigma_3=2.51\sim 2.77$, -378 m中段 $\sigma_1/\sigma_3=2.32$, 两个中段最大主应力与最小主应力的相差较大, 其比值平均在2.54左右, 会造成剪应力值相对较大。

(4) 通过 R_c/σ_{\max} 评价岩体稳定性, -258 m中段, 英安斑岩、闪长岩、石英斑岩围岩属于低应力, 无岩爆; 绢云母千枚岩围岩大变形等级轻微。-378 m中段, 英安斑岩、石英斑岩围岩为高应力, 有岩爆倾向; 闪长岩围岩属于低应力, 无岩爆; 绢云母千枚岩围岩大变形等级轻微。对于有岩爆倾向的英安斑岩、石英斑岩, 测试的2个中段, 岩体完整性较差, 未发生岩爆。随着中段延深, 需对英安斑岩和石英斑岩重点关注。

[参考文献]

- [1] 于学馥, 郑颖人, 刘怀恒, 等. 地下工程围岩稳定分析[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1983.
- [2] 蔡美峰. 金属矿山采矿设计优化与地压控制-理论与

实践[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

- [3] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 4(16): 2803-2813.
- [4] LEEMAN E R. The CSIR "doorstopper" and triaxial rock stress measuring instruments [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1971, 3(1): 25-50.
- [5] 中国地震局. 原地应力测量水压致裂法和套芯解除法技术规范: DB/T 14—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [6] 彭祝, 王元汉, 李廷芥. Griffith理论与岩爆的判别准则[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(S1): 491-495.
- [7] 费鸿禄, 徐小荷, 唐春安. 地下硐室岩爆的突变理论研究[J]. 煤炭学报, 1995, 20(1): 29-33.
- [8] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3003-3010.
- [9] 张镜剑, 傅冰骏. 岩爆及其判据和防治[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2034-2042.
- [10] 何满潮, 王炆, 苏劲松, 等. 动静组合荷载下砂岩冲击岩爆碎屑分形特征[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(4): 699-705.
- [11] 马秀敏, 彭华, 李金锁, 等. 襄渝铁路增建二线: 新白岩寨隧道地应力测量及其在岩爆分析中的应用[J]. 地球学报, 2006, 27(2): 181-186.
- [12] 卿三惠, 黄润秋. 乌鞘岭隧道软岩大变形防治技术问题探讨[J]. 路基工程, 2005(4): 93-96.
- [13] 陈善民, 王全胜, 辛维克, 等. 新乌鞘岭隧道软岩大变形悬臂掘进机施工控制技术研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(4): 720-729.