

基于围岩应力监测和振动监测的采场稳定性研究^①

毛文杰¹, 赵国彦¹, 王玺², 陈立强¹, 党成凯¹

(1.中南大学资源与安全工程学院,湖南长沙410083; 2.山东黄金矿业科技有限公司深井开采实验室分公司,山东莱州261400)

摘要:采用自主设计的多功能监测杆对某金属矿采场开挖过程中的围岩稳定性进行实时监测,记录采场回采过程中监测杆长度范围内岩层垂直方向应力变化和围岩振动事件。结果表明,开挖面积增大会导致围岩所受应力和峰值速度呈现上升趋势,反映出围岩内部发生破裂次数增多,围岩稳定性下降,松动圈深度增加。对于采用集中端头锚固式锚杆进行支护的矿山,锚杆长度大于松动圈深度时,能更有效地控制松动圈演化和岩体冒落。该采场完成为期一个月的开采后,岩层沉降使监测杆长度范围内岩层垂直方向应力增加约3.9 MPa,振动事件强度满足我国爆破振动安全许可标准,综合评价围岩稳定性较好。

关键词:金属矿山; 围岩; 应力; 地压监测; 多功能监测杆; 振动信号; 松动圈; 采场稳定性

中图分类号: TD326

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2023.02.001

文章编号: 0253-6099(2023)02-0001-04

Stope Stability Analysis Based on Monitoring of Surrounding Rock Stress and Vibration

MAO Wenjie¹, ZHAO Guoyan¹, WANG Xi², CHEN Liqiang¹, DANG Chengkai¹

(1.School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 2.Deep Mining Laboratory Subsidiary of Shandong Gold Mining Technology Co Ltd, Laizhou 261400, Shandong, China)

Abstract: A self-designed multi-functional rod was adopted to provide a real-time monitoring of surrounding rock stability during the excavation of a metal mine, and the variations of vertical stress of rock stratum and surrounding rock vibration occurrence within the monitoring range of the multi-functional rod during stoping were all recorded. It is found that the stress and peak ground velocity of the surrounding rock are all trending up as excavation area increases, which reflects that more fractures occur inside the surrounding rock, leading to lower degree of stability for the surrounding rock, and the excavation damage zone (EDZ) goes deeper. As for mines supported by top threaded anchor bolts, the EDZ evolution process and caving of rock mass can be more effectively controlled when the thread length of rod is greater than the depth of EDZ. After one month's mining of this stope, it is found that the vertical stress of the rock stratum within the monitoring length of the multifunctional rod increases by 3.9 MPa due to the subsidence of the stratum, and the frequency of vibration occurrence meets the blast vibration standard for safety permit in China. It is shown that the surrounding rock has a good stability based on the comprehensive evaluation.

Key words: metal mines; surrounding rock; stress; ground pressure monitoring; multifunctional monitoring rod; vibration signal; excavation damage zone (EDZ); stope stability

深井开采过程中出现的高地压、高地温、高岩溶水压等问题严重威胁着井下生产安全^[1],在这种复杂的岩石力学环境中,矿山巷道的掘进和采场的开挖工作大多采用分段式或渐进式,导致次生应力场不断产生,进而造成开采局域环境中的矿岩受力不均,部分岩层

中或将出现大面积的应力集中并引发片帮、冒顶等岩体失稳事故。金属矿属于硬岩类矿床,其岩层开挖后的岩体为卸荷岩体,原先均匀分布的应力释放并重新分布,产生新的二次应力场,并形成应力集中区,其中顶板中心位置岩石受到拉应力最大,其大小超过岩体

① 收稿日期: 2022-09-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0604606)

作者简介: 毛文杰(1997—),男,湖北黄冈人,硕士研究生,主要从事采矿与岩石力学研究工作。

通信作者: 赵国彦(1963—),男,湖南沅江人,教授,主要从事采矿工程、矿山安全和岩石力学与工程等方面的研究。

的破坏强度时,岩石将出现拉伸破坏;在顶板和侧帮的隅角位置,岩石受到的剪应力最大,其大小超过岩体的剪切强度时,岩石将发生剪切破坏^[2]。

国内外学者对采场稳定性做了许多研究^[3-11],主要采用微震监测、声发射监测、应力场监测等监测手段对金属矿采场围岩进行安全监测。本文以某金属矿深部采场岩体开挖为工程背景,以笔者自行研发的一种多功能监测杆为监测设备,同时进行应力数据和振动数据采集,通过采场开挖过程中两种数据的变化,分析采场围岩稳定性,为井下安全生产提供指导。

1 地压监测系统搭建

1.1 矿山开采条件

某金属矿已开采深度达到-1 100 m,高地应力条件下岩体发生失稳破坏的情况更加频繁,岩体支护更加困难,极大地影响井下安全生产。该金属矿主要矿体走向长 536 m,最大斜深 865 m,矿体厚度 1~4 m,走向 290°~335°,倾向 SW,总体倾角 35°。矿区矿体顶、底板岩石主要构成为:一是钾化二长花岗岩,二是石英脉,三是黑云斜长片麻岩。总体而言,矿区岩石形状完整,质地细密坚硬,岩石松散系数为 1.6,硬度系数为 6~12,属于比较坚固、坚固岩石。矿区采用 3 种采矿方法进行开采:一是浅孔留矿法(占比 60%),二是削壁充填采矿法(占比 10%),三是上向水平分层充填采矿法(占比 30%)。根据对采出矿量的测算,该矿矿石平均贫化率大约为 28%,矿石损失率在 3%左右。

1.2 多功能监测杆介绍

岩体应力监测设备主要包括振弦应力计、应变计、压力盒、空心包体应力计等,岩体振动监测常采用微震监测系统,包括 SOS 微震监测系统、BNS 微震监测系统、IMS 微震监测系统等。笔者自行研发了一种多功能监测杆,如图 1 所示。该多功能监测杆参照涨壳锚杆的外形和作用机理设计而成,最大直径处 40 mm,头部连杆长度可变,设备总长度 1.8~2.8 m。应力传感器和振动传感器通过自主设计形状和尺寸组装为一体置于杆体中间部位,应力传感器量程 ± 100 MPa,灵敏度 0.1 Hz,振动传感器量程 ± 500 g,灵敏度 10 mV/g,通过多次井下试验验证,上述两种传感器的量程和灵敏度皆可满足监测要求。下部数据采集平台由 VM511 振弦读数模块、树莓派 3 代 B+、树莓派电源控制板、双通道隔离型 RS485 扩展板等模块组成,并搭配大容量锂电池,保证设备能够无线长时间供电,数据采集平台的数据集控区通过 USB 数据单元与采集区连接,根据烧录的程序定时访问采集区,并将采集到的

数据按照类别和时间进行集成和分类存储,再通过软件程序完成应力数据和振动数据的自动发送。

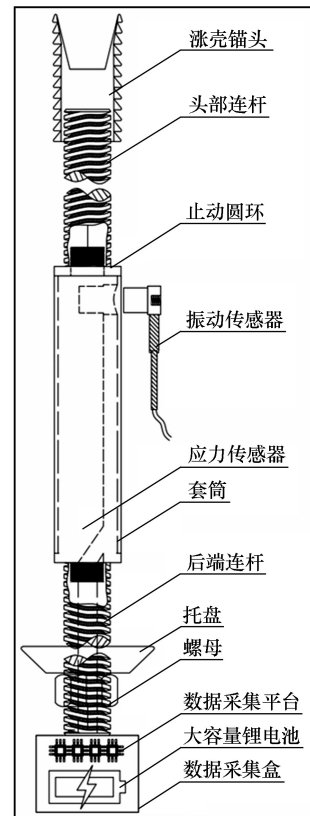


图 1 多功能监测杆示意

该设备工作原理为:在采场顶板上钻凿满足直径和长度要求的钻孔,将多功能监测杆插入其中,多功能监测杆上端的涨壳锚头锚固在岩石深部的稳固岩层,尾部紧固装置可把托盘紧固在孔口处,则整个多功能监测杆在钻孔内部受到拉应力,当岩层发生沉降时,多功能监测杆内置的应力传感器可以测量出深部涨壳锚头锚固段到托盘处垂直方向拉应力的变化,当测得的应力增大,反映岩层位移增加;另一方面,多功能监测杆与岩层紧密接触,内置的振动传感器可测得岩石破裂、爆破振动、凿岩打孔等振动信号。

1.3 现场布置方案

根据监测点所处工程地质情况,该矿区现采矿段主要开拓和回采工作集中在-1 145 m 中段,此中段开采深度大,作业密度较集中,穿脉附近采空区、充填区和节理裂隙发育区域较多,能为监测工作提供丰富的有效数据,且-1 145 m 中段矿体上部巷道离矿体很近,为测点提供了较好的安装条件,故选择-1 145 m 中段 28 采场作为本次监测区。采场监测点布置如图 2 所示:在 28 采场的顶板围岩中心处钻凿孔径 42 mm、孔深 2.9 m 的垂直上向孔作为监测设备安装孔,于 2021 年 5 月

26日安装长2.4 m的多功能监测杆,于2021年5月30日沿着中心线在2.4 m多功能监测杆两边分别间隔3 m垂直向上安装1.8 m和2.8 m的多功能监测杆,3个监测点位于同一直线上,并调整后面两根监测杆的初始应力读数与第1根监测杆记录的读数相同。

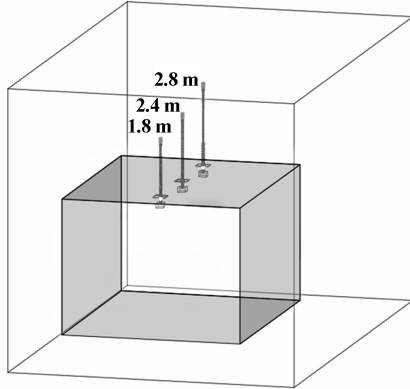


图2 采场监测点布置

以上3次钻孔作业均采用锚杆台车或凿岩机完成,打孔作业后,应探明钻孔内是否有异物阻塞安装孔。然后将组装、调试完毕的多功能监测杆安装于其中,并在后台查看数据上传情况,确保监测设备正常工作。

2 应力监测与振动监测分析

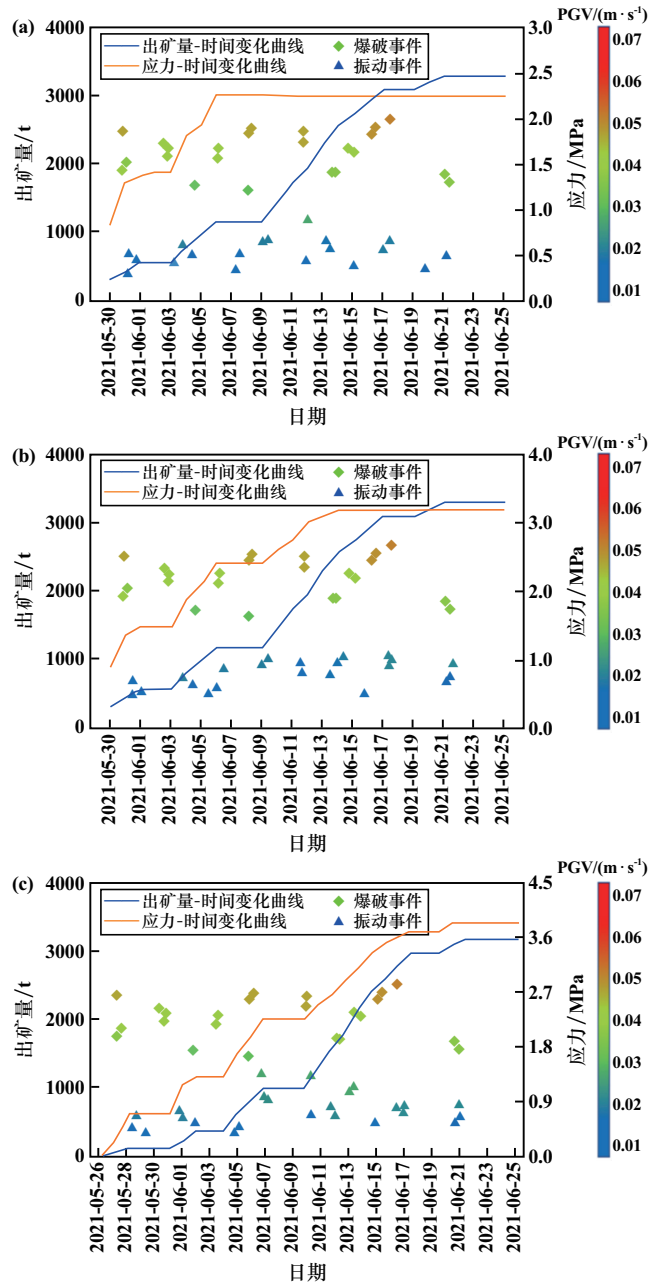
2.1 振动监测分析

对3根多功能监测杆现场监测数据及矿山提供的工况数据进行整理,绘制出采场累计出矿量、监测杆长度范围内岩层垂直方向应力增加量、振动事件数量及强度随时间的变化曲线如图3所示。

振动监测通过获得质点峰值速度(Peak Ground Velocity, PGV)来反映岩体活动特征,PGV可以体现振动能量的大小。采场的开挖导致振动事件频繁出现。当振动事件频率突然降低时,表示应力积累但没有释放,此时更可能发生冒顶、片帮等灾害^[12]。

如图3所示,通过采场监测得到振动事件分布情况,振动信号强度通过其在最右侧纵轴的投影位置来表征。2021年6月5~11日,出矿量减少,相应获得的振动事件数量减少,振动强度降低;6月13~17日出矿量增加,爆破事件和振动事件的频率和强度明显增加,由对应的工况可知,这段时间采场开采强度增大,造成的顶板崩落、地表沉降对岩体稳定性具有较大影响。其次,每次爆破事件之后都可采集到对应的滞后振动数据,当爆破事件强度越大时,振动事件强度越大,说明合适的爆破参数和爆破方法能够减小对采场围岩稳定性的影响,研究发现,振动事件的PGV始终小于0.033 m/s,

爆破事件的PGV始终小于0.053 m/s,满足我国爆破振动安全许可标准。



(a) 监测杆长度1.8 m; (b) 监测杆长度2.4 m; (c) 监测杆长度2.8 m

图3 矿区监测数据

2.2 应力监测分析

多功能监测杆通过固有谐振频率的变化来测量应力计内部的应力应变大小,频率与应力的计算公式为:

$$p = \frac{K \times (f_i^2 - f_0^2)}{1\ 000} \quad (1)$$

式中 p 为应力,MPa; K 为标定系数; f_0 为零点频率值,Hz; f_i 为 i 状态时的频率值,Hz。

如图3所示,随着累计出矿量增大,围岩应力呈现

增长趋势,后期应力增长趋势变缓,表现为岩体应力重分布趋向于平衡。整体上出矿量-时间曲线与应力-时间曲线的走势有较高相似性,且随着开挖强度增大,PGV 呈现上升趋势,反映出围岩内部发生破裂次数增多,岩石稳定性下降,说明岩体开挖是导致围岩失稳的直接原因之一。

多功能监测杆所测应力数据反映的是监测杆长度内岩体的应力变化。由图 3 可知,1.8 m 监测杆最终监测应力趋向于 2.3 MPa,2.4 m 监测杆最终监测应力趋向于 3.2 MPa,2.8 m 监测杆最终监测应力趋向于 3.9 MPa,2021 年 6 月 23 日之后,出矿量不再增加,同时监测应力不再增加,应力重分布趋向于平衡,为期一个月的采场开采完成后,岩层沉降导致监测杆长度范围内岩层垂直方向应力大致增加了 3.9 MPa。

如图 3 所示,2021 年 6 月 6 日后,1.8 m 监测杆测得的应力值明显小于另外两根监测杆,且应力变化曲线开始趋于平缓,6 月 9 日后,1.8 m 监测杆测得应力停止增长。根据松动圈理论,说明随着开挖强度增大,松动圈也持续发生演化,说明此时松动圈深度已经超过 1.8 m,并且大于 1.8 m 监测杆涨壳锚头锚固的深度,围岩无法对监测杆两端进一步产生更大的拉应力,故出现应力增长速率变慢、最终停止增长的现象。而 2.4 m 和 2.8 m 监测杆应力持续增长,说明围岩松动圈、塑形区范围还在向深部延伸。此外,从 2021 年 6 月 10 日开始,2.4 m 监测杆应力监测数值明显小于 2.8 m 监测杆,并在 6 月 15 日监测数据不再随出矿量增加而增长,只有 2.8 m 监测杆测得的应力始终保持增长趋势,说明此时松动圈深度已达到 2.4 m。因此对于采用集中端头锚固式锚杆进行支护的矿山,当所选锚杆长度大于松动圈深度时,可以更加有效地控制松动圈演化和岩体冒落。

3 结 论

1) 增大开挖面积会导致岩体所受应力增大,振动事件数量和 PGV 都呈现上升趋势,体现为围岩内部发生破裂次数增多、岩体稳定性下降,说明岩体开挖是导致围岩失稳的直接原因之一。

2) 增加开挖强度会使围岩松动圈深度产生变化,对于采用集中端头锚固式锚杆进行支护的矿山,当所

选锚杆长度大于松动圈深度时,进行支护时能够将表面不稳岩层紧固在深部稳定岩层中,可以更加有效地控制松动圈演化和岩体冒落。

3) 为期一个月的采场开采完成后,岩层沉降、应力重分布导致监测杆长度范围内岩层垂直方向应力大致增加了 3.9 MPa,采场应力变化相对不大,测得振动事件 PGV 始终小于 0.033 m/s,爆破事件 PGV 始终小于 0.053 m/s,满足我国爆破振动安全许可标准,综合评价采场围岩相对稳定。

4) 研发的多功能监测杆能够对采场进行实时应力监测和振动监测,以测得的应力变化和振动强度来判别围岩稳定性,对降低生产安全风险具有重要意义。

参考文献:

- [1] 蔡美峰,薛鼎龙,任奋华. 金属矿深部开采现状与发展战略[J]. 工程科学学报, 2019,41(4):417-426.
- [2] 左红艳. 地下金属矿山开采安全机理辨析及灾害智能预测研究[D]. 长沙:中南大学资源与安全工程学院, 2012.
- [3] 王旭. 浅层采空区稳定性微震监测技术与应用研究[D]. 长沙:长沙矿山研究院, 2017.
- [4] ZHAO Hongbo, CHEN Bingui, ZHU Changxing, et al. Decision Tree Model for Rockburst Prediction Based on Microseismic Monitoring[J]. Advances in Civil Engineering, 2021(3):1-14.
- [5] 郭晓强,皇甫凤成,王果,等. 阿舍勒铜矿微震监测系统建设与应用研究[J]. 矿冶工程, 2019,39(6):29-34.
- [6] 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.
- [7] 刘祥鑫,张艳博,梁正召,等. 岩石破裂失稳声发射监测频段信息识别研究[J]. 岩土工程学报, 2017,39(6):1096-1105.
- [8] 袁子清,彭威,史晓鹏,等. 矿山地压在线监测系统在某铁矿中的应用[J]. 有色金属(矿山部分), 2014,66(4):71-74.
- [9] 王德超,王琦,李术才,等. 基于微震和应力在线监测的深井综放采场支承压力分布特征[J]. 采矿与安全工程学报, 2015,32(3):382-388.
- [10] 樊长刚,盛焰正,陈双庆. 考虑参数不确定性的红砂岩边坡可靠性分析研究[J]. 公路工程, 2022,47(2):103-108.
- [11] 徐文全,王恩元,沈荣喜,等. 采动应力监测传感装置及应用研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2016,33(6):1123-1129.
- [12] 王雷,王琦,李术才,等. 软岩巷道掘进期间微震活动特征及稳定性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2018,35(1):10-18.

引用本文:毛文杰,赵国彦,王玺,等. 基于围岩应力监测和振动监测的采场稳定性研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(2):1-4.