复杂空腔下软破围岩巷道注浆加固技术及应用*

秦国玉[1],谭宝会[2],张国龙[1],李海[1],何建元[1],张刚刚[1],左琳[2],胡颖鹏[2]

(1.金川集团镍钴股份有限公司龙首矿, 甘肃 金昌市 737100;
2.西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳市 621010)

摘要:复杂条件下软破围岩巷道的稳定性控制是矿业领域的关键技术难题。为解决金川龙首矿在掘支后短期内大变形破坏问题,开展了软破围岩巷道二次支护研究。现场调查与破坏机理分析表明,围岩软破及底板充填不接顶空腔是导致巷道失稳的主要原因。据此,提出了"注浆+喷锚网"二次支护方案,每个注浆断面均匀布置5个注浆孔,注浆孔深为2.2 m,注浆排距为2 m,二次喷锚网参数与首次支护参数相同。现场应用结果表明,该二次支护方案显著抑制了巷道变形与破坏,进路变形量降低80%以上,眉线破坏率降幅达50%,且在全生产周期内未出现大范围返修情况,支护效果持久稳定。该研究成果可为类似条件矿山的软破围岩巷道支护设计提供可靠的技术参考与实践依据。

关键词:复杂空腔;软破围岩;注浆加固;巷道稳定性;二次支护

中图分类号:TD353 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)12-0129-06

Grouting Reinforcement Technology and Application for Roadway with Soft and Broken Surrounding Rocks in Complex Cavity Conditions

QIN Guoyu[1], *TAN Baohui*[2], *ZHANG Guolong*[1], *LI Hai*[1],
HE Jianyuan[1], *ZHANG Ganggang*[1], *ZUO Lin*[2], *HU Yingpeng*[2]

(1.Longshou Mine, Jinchuan Group Nickel-Cobalt Co., Ltd., Jinchang, Gansu 737100, China;
2.School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China)

Abstract: The stability maintenance of roadways with soft and broken surrounding rocks under complex conditions has always been a key technical challenge in the mining industry. To solve the problem of large deformation and damage in the short term after excavation and support in Longshou Mine of Jinchuan, research on secondary support of roadway with soft and broken rocks was carried out. The on-site investigation and analysis of the failure mechanism indicate that the main reasons for the instability of the roadway are the soft and fracture of the surrounding rocks and the failure of the floor filling to connect with the roof cavity. On this basis, a secondary support scheme of "grouting+anchoring net" was proposed, with 5 grouting holes evenly arranged on each grouting section, with a grouting hole depth of 2.2 m and a grouting spacing of 2 m. The parameters of the secondary anchoring net were the same as those of the initial support. The on-site application results show that the secondary support scheme significantly suppresses the deformation and damage of the roadway, reduces the deformation of the drift by more than 80%, and reduces the failure rate of the eyebrow line by 50%. There are no large-scale repairs during the entire production cycle, and the support effect is long-lasting and stable. The research results can provide reliable technical reference and practical basis for the support design of roadway with soft and broken rocks in similar mines.

Key words: Complex cavity, Soft and broken surrounding rock, Grouting reinforcement, Roadway stability, Secondary support

0 引言

在地下矿山开采过程中,巷道的稳定性直接关系到矿山的生产安全和经济效益。矿山巷道常用的支护方式有喷锚网支护[1]、钢拱架支护[2]、注浆支护[3],以及多种支护方式联合使用[4]。当巷道围岩较为软破时,巷道围岩变形控制的难度增加,尤其在深部高地应力或复杂采动地压扰动作用下,软破围

* **收稿日期**:2025-07-12
基金项目:四川省自然科学基金项目(2022NSFSC1089)
作者简介:秦国玉(1979—),男,甘肃金昌人,硕士,高级工程师,主要从事矿山生产管理等方面工作。E-mail:814405947@qq.com
通信作者:谭宝会(1988—),男,陕西宝鸡人,博士,副教授,主要从事金属矿地下开采技术研究。E-mail:tanbaohui@swust.edu.cn

岩巷道的变形控制难度将显著增加[5-8]。

近年来,随着采矿作业条件的复杂化,软破围岩巷道支护问题成为影响采矿安全的一大关键因素,为此,矿业领域的学者和技术人员进行了大量的研究。刘东锐[9]针对某矿松散软弱岩围岩条件,提出了首采分层矿体及上下盘采用锚网+坑木支护、其余分层上下盘采用锚网支护的联合支护方式,有效抑制了巷道两帮以及顶板的变形破坏,同时将支护成本从750元/m降低至605元/m;王能跃等[10]针对贵州锦丰金矿深部软破岩体巷道支护难度大的问题,通过数值模拟对多种方案进行比选,最后优选了"钢网+树脂锚杆+纤维混凝土"联合支护方案,使巷道两帮及顶板累积位移量较原支护方案分别下降了48.67%和72.85%;牛晋林[11]针对同安煤矿F3断层顶板出现断裂、破碎现象,将注浆支护技术应用于断层应力区破碎顶板,控制住围岩裂隙继续向外扩张破坏,显著提升了顶板稳定性及锚杆支护质量;张延旭等[12]针对某矿15层煤顶板松软破碎情况,采用"注浆膨胀锚杆+锚索+钢筋网+W钢带"的支护方案对破碎巷道进行支护,并取得了较好的支护效果。除此之外,还有诸多学者采用各种方法对软破围岩巷道的支护方式进行了研究[13-15]。综上所述,对于软破围岩巷道的稳定性控制需要结合实际工程特点来采取相适应的支护方案,以确保巷道支护效果。

本文以金川龙首矿西二采区无底柱分段崩落法采场最末分段软破围岩回采进路发生大变形为工程背景,分析了回采进路发生大变形的本质原因及破坏模式,提出了"注浆+喷锚网"的二次支护方案,以期保障采场作业安全。

1 工程背景

龙首矿是我国重要的镍矿开采基地,其西二采区矿体陡立厚大,矿岩松软破碎。建矿初期矿山采用下向分层进路式胶结充填法进行开采,设置有1 554 m和1 430 m两个中段,设计年产量为165万t。2019年矿山上部中段由胶结充填法改为无底柱分段崩落法开采,崩落法采场开采标高为1 613~1 546 m,待采矿体夹于上下两个充填体之间(如图1所示),采场内设有1 595 m、1 580 m、1 565 m和1 546 m四个回采分段。

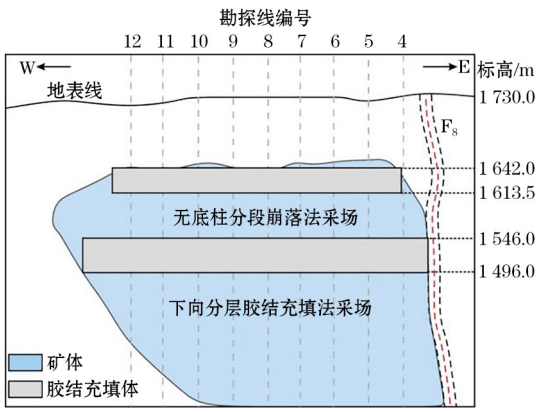


图1 西二采区双中段开采采场布置情况

Fig.1 Layout of the stope in the West No.2 mining area

崩落法采场首采分段于2019年5月投入生产,于2023年下半年开始进行最末分段回采进路的掘进工作。回采进路断面形式为直墙半圆拱,宽×高=4.2 m×4.1 m,采用单层喷锚网进行支护,锚杆为螺纹钢弯钩锚杆,长2.25 m,锚杆间距为1 m,排距为1 m,金属网采用Φ6.5 mm钢筋制作,金属网的网格尺寸为15 cm×15 cm,喷砼厚度为100 mm,强度等级为C25。最末分段回采进路支护方式与前3个分段保持一致,然而现场施工中发现,最末分段进路在完成掘支后1个月内便发生了严重的变形和破坏。对于长度达到200 m左右的回采进路,整条进路掘进尚未完工,便发生了全线变形和破坏,回采进路最大变形量达到了80 cm以上。最末分段回采进路断面形式、支护方式及破坏情况如图2所示。



(a)断面形式及支护方案 (b)回采进路支护初期(2023年12月) (c)回采进路发生破坏(2024年1月)

图2 最末分段回采进路原支护方式及破坏情况

Fig.2 The original support methods and damage conditions of the drifts in final sublevel

回采进路的严重变形不仅影响到崩落法采场的作业安全,同时也影响到矿石的正常回采,为了抑制回采进路变形的进一步发展,矿山对回采进路进行了局部返修试验,相关参数与首次喷锚网支护方案相同,但仍未能有效抑制回采进路的变形发展,表明常规喷锚网支护方案已经无法满足进路支护需求。因此需要优化支护方案,以维持最末分段回采进路稳定性。

2 进路大变形原因及机理分析

2.1 矿体软弱破碎

龙首矿西二采区矿体力学性质先天禀赋差,矿体普氏系数为3.0～7.0,属于典型的软弱至中等坚硬矿体。此外,矿体中普遍分布有错综复杂的结构面,节理十分发育,如图3所示。现场调查可知,该区域岩体节理密集,间距为5～10 cm,结构面中多充填有绿泥石和滑石等,导致整体稳定性差。在地下裂隙水作用下,充填物发生软化泥化,降低了结构面的强度,使回采进路更易发生变形和破坏。

西二采区矿体自身强度较低且节理裂隙发育,属于典型的软破矿体,给回采进路的稳定性维护带来了难度。



图3 西二采区揭露的破碎矿体

Fig.3 The fractured ore body exposed in the West No.2 mining area

2.2 待采矿体承载能力降低

西二采区采用崩落法回采矿体,夹持于上下盘充填体之间,可视作一个水平矿柱。回采前,该矿柱初始厚度为68 m。随着分段向下开采,采场顶板冒落,使上覆岩层载荷由实体压力转变为散体压力,虽载荷有所降低,但矿柱厚度亦因开采而急剧减小。待开采至最末分段时,矿柱厚度仅余19 m,致使其刚度和承载能力显著劣化。与此同时,在持续的采动地压与频繁的中深孔爆破振动叠加作用下,最末分段矿体破碎程度加剧。在此种极度劣化的矿体中施工回采进路,其稳定性自然难以维持。

2.3 进路底板下方存在空腔

最末分段位于1 546 m水平,进路底板下方即为下部中段的首层充填体。由于原充填法回采进路在充填后,充填料经过滤水、离析和沉缩等作用后,通常会在进路顶板部位形成高0.5～1.0 m的充填不接顶空腔。为了确保崩落法最末分段回采进路的施工安全,在回采进路掘进过程中采用钻孔、地质雷达等手段对进路底板下方充填不接顶情况进行了探测,根据物理探测结果以及回采进路掘进时局部揭露的不接顶情况可知,在最末分段回采进路底板下方1.5～3 m范围内普遍存在下部充填采场首层和第二层的充填不接顶空腔。由于首层和第二层充填进路均为无假顶采矿,充填进路采用了喷锚网支护,因此这些不接顶空腔大多仍保持在稳定状态,空腔跨度为1～2 m,空腔高度为0.5～1.0 m,空腔形态呈弓形[16]。

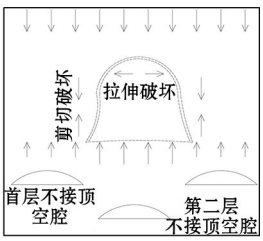
分析认为,最末分段回采进路之所以会较前3个分段发生明显的变形和破坏,最主要和最根本的原因是进路底板下方存在大量的不接顶空腔,给回采进路在崩落法采动地压下发生沉降变形提供了发展空间。从现场实际情况来看,最末分段回采进路的破坏主要集中于腰线部位和顶板部位,其中,腰线部位大多发生“外鼓＋错断”破坏,见图4(a),顶板部位大多发生“下沉＋拉裂”破坏,见图4(b)。图4(c)为回采进路在不接顶空腔干扰下的破坏机理示意图。从图4(c)中可以看出,进路开挖后两帮因下方存在空腔,在地压作用下发生显著下沉,而进路底板则因为开挖卸压作用沉降不明显,从而出现了进路的不均匀沉降,两帮的大幅沉降和底板的相对上抬导致两帮直墙支护体在其腰线部位出现“错断式”剪切破坏,顶板则随两帮下沉过程发生“拉裂破坏”。



(a) 进路两帮“外鼓+错断”



(b) 进路顶板 “下沉+拉裂”



(c) 回采进路破坏机理

图 4 最末分段回采进路破坏特征及破坏机理

Fig.4 The damage characteristics and mechanism of the drifts in final sublevel

3 回采进路二次支护方案

3.1 二次支护方案的提出

最末分段回采进路在发生大变形破坏后,矿山曾在局部尝试采用二次喷锚网支护方案进行加固,但支护效果较差。这是因为进路周边矿体在经历大变形后,破碎程度进一步加剧,整体性显著降低,在此基础上,一次支护的锚杆无法与软破围岩形成有效的协同承载结构,锚固作用微弱,无法抑制巷道持续变形破坏。

针对上述问题,提出了两种支护方案。方案一为空腔回填与支护加固,即对回采进路底板下方的不接顶空腔进行回填,从而限制变形空间,再采用喷锚网对回采进路进行二次加固。方案二为“注浆+喷锚网”加固,即通过向破碎矿体中注入具有胶结性能的浆液来提高破碎矿体的完整性和承载能力,通过增强矿体自身强度来减小其变形量,再采取喷锚网支护对注浆后的矿体进行二次加固,使矿体和锚杆能够形成有效的协同承载结构,从而抑制回采进路的变形。

方案一虽然可以从根本上消除诱发回采进路产生大变形的因素,但由于空腔分布广、数量多,要完全对其实现密实回填难度很大,且施工周期长、成本高昂。相比之下,方案二的现场操作性更强,可作为推荐方案。然而,为确保其加固效果达到预期,需对方案二中涉及的注浆加固参数进行系统优化研究。

3.2 注浆加固参数

为有效加固已发生严重变形的回采进路围岩,采取“先注浆、后喷锚”的分步加固策略。首先采用断面注浆对破碎矿体进行整体加固,每个断面布置 5 个注浆孔:两帮直墙(距底板 1.5 m)各 1 个水平孔;半圆拱两肩各 1 个 40°斜向上孔;顶板中心 1 个垂直上向孔。所有注浆孔深 2.2 m,排距 2 m,具体布置详见图 5。待注浆提升矿体整体强度后,再通过喷锚网进行二次加固。

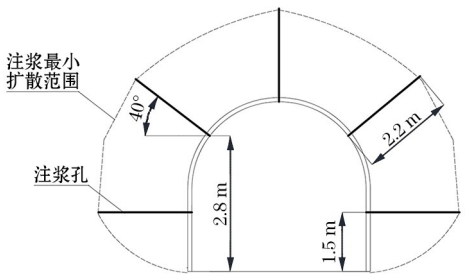


图 5 注浆孔布置方式及参数

Fig.5 Grouting hole layout method and parameters

注浆材料选用山西某公司生产的矿用超强无机加固材料,注浆浆液按水灰比 0.3∶1 进行调配,根据厂家提供的材料性能参数,浆液初凝时间为 3～8 min,终凝时间为 8～15 min,1 h 抗压强度将达到 25 MPa,28 d 抗压强度将达到 80 MPa 以上,抗拉强度达到 3～5 MPa,抗剪强度达到 8～12 MPa。

各注浆孔依次完成注浆作业后,再按照首层喷锚网的支护参数对注浆加固进路实行二次支护。

4 现场应用

4.1 二次支护过程

对于变形严重、无法满足设计尺寸的回采进路,在二次加固支护前要进行断面修复,具体采用深度 20～30 cm 的潜孔装药爆破方式扩大巷道轮廓。

断面修复后再进行注浆工作。其中,注浆前要通过压水试验检查管路密封性,同时冲洗岩体裂隙,增强浆液扩散能力。注浆系统采用 T-28 型风动凿岩机成孔,2ZBQ-50/6 型气动注浆泵注浆,配套叶片式搅拌机与自制储浆桶制备浆液;注浆杆为矿山自制中空钢管,长 2.2 m,内径为 25 mm,前端呈锥形以便安装,管壁每间隔 20 cm 布置直径 8 mm 的梅花型出浆孔,孔外预留 30 cm 作为止浆段。正式注浆时,设定泵站终止压力为 4.5 MPa,注浆过程中

泵压随阻力逐步升高,达到设定压力且稳压至少需要 3 min;若注浆流量显著减小,即可结束该孔注浆。注浆顺序为自上而下逐孔进行,采用止浆阀确保浆液在孔内充分凝固,相关设备及现场实施情况见图 6。注浆工作完成后,采用喷锚网支护方案进行二次支护,通过注浆加固与支护结构的协同作用,提升回采进路软破围岩整体稳定性与承载能力,实现对巷道的长期稳定控制。



(a) 注浆管 (b) 注浆压力泵 (c) 注浆浆液 (d) 尾部止浆段

图 6 注浆设备及现场实施情况

Fig.6 Grouting equipment and grouting implementation situation

龙首矿西二采区支护流程具体为 1 546 m 分段 4#～9# 进路在 2023 年 12 月完成初次掘支工作,2024 年 1 月 4#～9# 进路发生大变形破坏,并于 2024 年 2 月开始采用本研究提出的“注浆＋喷锚网”方案进行二次加固支护,2024 年 3 月完成二次加固支护。

4.2 应用效果

为评估支护效果,在 4# 进路中部设置了 3 个监测断面,间距 10 m,采用手持式收敛仪以 3 d 为一个周期进行变形监测。监测结果显示,二次加固后进路变形得到有效控制。支护后 3 个月内,最大位移量控制在 10 cm 以内;即使在采动地压与爆破振动共同作用下,最大变形量也始终控制在 30 cm 以内。相比之下,原支护条件下同一位置最大位移达 54 cm,表明二次加固方案使巷道变形降低 80%以上。此外,加固后各进路在整个回采周期内未发生大面积返修。图 7 展示了 4# 进路二次支护后的全周期稳定状况。



(a) 加固后 1 个月 (2024年4月) (b) 加固后 3 个月 (2024年6月) (c) 采矿过程中 (2024年8月)

图 7 “注浆＋喷锚网”二次支护后回采进路生命周期内稳定情况

Fig.7 The stability of the drift in the life cycle after the secondary support of “grouting ＋ anchoring net”

同时,在现场可观测到,注浆加固后,采场破碎矿体的眉线破坏情况也得到显著改善。统计结果表明,前 3 个分段单条进路眉线破坏率约为 30%,而末分段加固后降至约 15%,降幅达 50%,有效保障了爆破作业安全与矿石回采。

经济分析显示,注浆加固比传统喷锚网二次支护成本增加 362.8 元/m,但比三次支护节省 738 元/m。考虑到围岩已发生松动破坏,仅依靠重复喷锚网支护难以确保稳定,注浆方案在保障安全与生产连续性方面的综合效益显著。目前该技术已从二次返修加固推广至 1 546 m 分段进路的常规掘进作业中。

5 结论

(1) 根据现场分析,龙首矿西二采区最末分段回采进路发生了严重变形破坏,这主要由其赋存的破碎矿岩条件及底板下伏的未接顶空腔共同导致。这些高 0.5～1.0 m、跨度 1～2 m 的空腔为围岩变形提供了充分空间,是引发失稳的关键因素。

(2) 针对最末分段实际条件,提出了“注浆＋喷锚网”的二次支护方案。通过注浆提升围岩自身强度,再结合喷锚网形成协同承载体系,从而实现对巷道变形的有效控制。

(3) 所提出的二次支护方案对控制进路变形与

破坏成效显著。二次支护后,3 个月内最大位移量小于 10 cm,在采动地压与爆破振动共同作用下,回采进路最大变形量控制在 30 cm 以内。进路变形量降低了 80%以上,眉线破坏率降幅达 50%,实现了回采进路在采动地压下的长期稳定,且杜绝了大范围返修。

参考文献(References):

[1] 陈光华,孟浩,李立立.煤矿巷道支护技术的研究与应用[J].山东工业技术,2017(8):67.
CHEN Guanghua, MENG Hao, LI Lili. Research and application of roadway support technology in coal mine[J]. Journal of Shandong Industrial Technology,2017(8):67.

[2] 张洲,王思远.旺岭煤矿回采巷道锚杆支护方案优化研究[J].河南科技,2025,52(5):50-55.
ZHANG Zhou, WANG Siyuan. Study on optimization of bolt support scheme in mining roadway of Wangling coal mine[J].Henan Science and Technology,2025,52(5):50-55.

[3] 张军亮.矿井巷道中的注浆支护技术研究与应用[J].冶金与材料,2024,44(5):121-123.
ZHANG Junliang. Research and application of grouting support technology in mine roadway[J]. Metallurgy and Materials,2024,44(5):121-123.

[4] 于振建,龚永超,廖敦霞,等.深部大规模矿山岩体质量评价与巷道支护技术研究[J].矿业研究与开发,2025,45(6):1-11.
YU Zhenjian, GONG Yongchao, LIAO Dunxia, et al. Research on rock mass quality evaluation and roadway support technology in deep large-scale mines[J]. Mining Research and Development,2025,45(6):1-11.

[5] 程志强.软弱破碎围岩深埋隧道大变形控制施工技术研究[J].铁道建筑技术,2023(7):158-162.
CHENG Zhiqiang. Research on large deformation control construction technology of deep buried tunnel in weak broken surrounding rock [J]. Railway Construction Technology,2023(7):158-162.

[6] 周晓路,朱贵祯.深部松软破碎顶板回采巷道围岩控制及支护技术研究[J].山东煤炭科技,2021,39(9):74-76+79.
ZHOU Xiaolu, ZHU Guizhen. Study on surrounding rock control and support technology of deep soft broken roof mining roadway[J].Shandong Coal Science and Technology, 2021,39(9):74-76+79.

[7] 王景义.松软破碎围岩巷道巷修支护研究与应用[J].山东煤炭科技,2017(6):15-17.
WANG Jingyi. Research and application of roadway repair and support in soft and broken surrounding rock[J]. Shandong Coal Science and Technology,2017(6):15-17.

[8] 江飞飞,李向东,盛佳,等.软弱破碎岩体工程地质调查与质量评价[J].黄金科学技术,2016,24(3):94-99.
JIANG Feifei, LI Xiangdong, SHENG Jia, et al. Engineering geological investigation and quality evaluation of weak fractured rock mass[J].Gold Science and Technology, 2016,24(3):94-99.

[9] 刘东锐.软弱破碎矿体采场支护技术研究[J].有色金属(矿山部分),2021,73(2):64-68.
LIU Dongrui. Research on stope support technology of weak broken ore body[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2021,73(2):64-68.

[10] 王能跃,王堃,王世博.深部软破岩体巷道失稳机理分析与支护优化研究[J].有色金属(矿山部分),2023,75(5):43-51.
WANG Nengyue, WANG Kun, WANG Shibo. Analysis of instability mechanism and support optimization of deep soft rock roadway[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2023,75(5):43-51.

[11] 牛晋林.注浆支护技术在应力区破碎顶板中的应用[J].机械管理开发,2021,36(11):193-194.
NIU Jinlin. Application of grouting support technology in broken roof in stress zone[J]. Mechanical Management and Development,2021,36(11):193-194.

[12] 张延旭,冷超,王超,等.松软破碎围岩巷道支护技术研究[J].矿业研究与开发,2019,39(10):22-25.
ZHANG Yanxu, LENG Chao, WANG Chao, et al. Research on supporting technology of soft and broken surrounding rock roadway [J]. Mining Research and Development,2019,39(10):22-25.

[13] 张伟.中厚煤层破碎围岩巷道注浆加固技术研究[J].山东煤炭科技,2018(3):8-10+13.
ZHANG Wei. Study on grouting reinforcement technology of broken surrounding rock roadway in medium thick coal seam[J].Shandong Coal Science and Technology,2018(3): 8-10+13.

[14] 郭忠平,张贵银,韩春,等.深部矿山破碎围岩巷道控制技术研究[J].金属矿山,2015(8):40-43.
GUO Zhongping, ZHANG Guiyin, HAN Chun, et al. Research on roadway control technology of broken surrounding rock in deep mine[J]. Metal Mine, 2015(8): 40-43.

[15] 吕博.破碎软岩巷道围岩支护优化研究[J].能源与节能,2025(2):291-293.
LYU Bo. Optimization study on surrounding rock support of broken soft rock roadway[J]. Energy and Energy Saving, 2025(2):291-293.

[16] 刘允秋,肖益盖,李同鹏,等.深井高应力破碎岩体支护技术研究与应用[J].金属矿山,2022(6):29-34.
LIU Yunqiu, XIAO Yigai, LI Tongpeng, et al. Research and application of support technology for high stress fractured rock mass in deep mine[J]. Metal Mine,2022(6): 29-34.