超深金属矿井施工扰动下高应力巷道的变形特征与加固技术*

熊晓晨[1],王胜建[1],郭旻[2],胡军生[1],罗文冲[2],金长宇[3]

(1.鞍山五矿陈台沟矿业有限公司, 辽宁 鞍山市 114051;
2.五矿矿业控股有限公司, 安徽 合肥 230011;
3.深部金属矿智能开采与装备全国重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘要:随着矿山开采进入深部,在高地应力等多方面因素的影响下,巷道易产生变形破坏。某超深金属矿深部粗碎硐室大件道巷道出现了喷浆体开裂、网片崩解以及原岩风化脱落等问题。首先通过水压致裂法和岩石力学试验测得地应力和岩石力学参数。然后,采用变形监测、钻孔摄像以及地压监测等手段对巷道变形特征进行分析,并结合监测结果分析了巷道围岩破坏机理。提出了30 mm厚的初喷+5 m长锚索主动支护+钢筋网+U29拱架被动支护+120 mm厚的复喷的联合支护形式。工程实践表明,加固支护后巷道围岩承载力增强,未发现变形破坏,巷道围岩进入相对稳定状态。

关键词:高应力巷道;围岩破坏特征;地应力;岩体质量;支护方案

中图分类号:TD353 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)06-0025-07

Deformation Characteristics and Reinforcement Technology of High-Stress Roadways in Ultra-Deep Metal Mines Under Construction Disturbance

Xiong Xiaochen[1], *Wang Shengjian*[1], *Guo Min*[2], *Hu Junsheng*[1], *Luo Wenchong*[2], *Jin Changyu*[3]

(1.Anshan Chentaigou Mining Co., Ltd., China Minmetals Corporation, Anshan, Liaoning 114051, China;
2.Minmetals Mining Holdings Limited, Hefei, Anhui 230011, China;
3.State Key Laboratory of Intelligent Deep Metal Mining and Equipment, Shenyang, Liaoning 110819, China)

Abstract: Roadways are prone to deformation and failure under the influence of high in-situ stress as mining progresses to deep underground areas. Cracks in shotcrete, mesh fragmentation and weathering spalling of surrounding rock occur in the heavy haulage roadway of a crushing chamber in an ultra-deep metal mine. In-situ stress and rock mechanical parameters were measured by the hydraulic fracturing method and rock mechanics tests. Deformation characteristics of the roadway were analyzed via deformation monitoring, borehole photography and ground pressure monitoring, and the failure mechanism of surrounding rock was explored based on monitoring data. A combined support scheme was proposed, consisting of 30 mm thick initial shotcreting, 5 m long anchor cable for active support, steel mesh, U29 steel arch for passive support and 120 mm thick secondary shotcreting. Engineering practice shows that the bearing capacity of the surrounding rock is enhanced after reinforcement, no deformation and failure are observed, and the surrounding rock maintains a relatively stable state.

Key words: High-stress roadway, Surrounding rock failure characteristics, In-situ stress, Rock mass quality, Support scheme

0 引言

随着浅部资源的减少,矿山开采深度在逐年增加,部分矿山开采深度已超过千米。深部矿井需要解决一系列的工程技术难题,深井矿山的高地应力条件下,岩体破坏呈现出较浅部更为复杂的形态[1-2]。对此,国内外专家学者开展了大量的研究工作。在理论发展方面,先后取得了轴变理论、松动圈支护理论、联合支护理论、围岩强度强化理论、关键部位耦合支护理论、主次承载区支护理论等一系列研究成果,有力促进了我国巷道围岩控制技术的发展[3-5]。袁亮等[6]分析了岩体在"三高"耦合作用下的变形破裂机理和稳定性演化规律,并提出了基于"应力状态恢复改善、围岩增强、破裂固结与损伤修复、应力转移与承载圈扩大"四项基本原则的深部岩巷围岩稳定控制理论。左建平等[7]提出了深部煤矿巷道等强支护力学理论,其核心为基于巷道轴比与地应力的关系,通过"深层应力调控、浅层岩性改善和表层结构支护"

* **收稿日期**:2025-05-28
基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC2907200).
作者简介:熊晓晨(1994—),男,山西大同人,工程师,主要从事矿山采矿技术工作。E-mail:xiongxc@minmetals.com

三位一体支护技术体系对巷道开挖后形成的不规则应力场进行调控,使巷道围岩应力场恢复至与地应力场相匹配的等强状态。黄炳香等[8]提出了深部采动巷道围岩流变和结构失稳大变形理论,从深部环境、深部岩体及强烈施工扰动相互作用出发,揭示了深部巷道围岩应力场时空演变规律和大变形与破坏机理。

在巷道支护和加固工艺方面,于振建等[9]基于岩体质量评价和巷道破坏机理分析,对不同支护方案下的巷道围岩稳定性进行了数值模拟分析,得出各支护方案的支护效果由弱到强依次为:锚杆+钢拱架支护,锚喷支护,锚喷+钢拱架联合支护,其中锚喷支护方案已能满足矿山大部分风化带区域的支护要求,只有在极破碎区域建议选用锚喷+钢拱架联合支护方案。查文华等[10]依据采动下不同区域的破坏形态,提出了"三锚"联合支护技术和抗让结合的支护理念。范仕清等[11]针对深井高应力巷道,研发了一种无机复合注浆加固材料,提出了以锚索补强加固顶板围岩为基础,采用预应力中空锚杆和预应力中空锚索分步注浆加固顶板,采用预应力中空锚杆分步注浆加固巷帮。石磊等[12]基于金能煤矿 1201 回风巷道变形特征分析,提出了一种"锚杆(索)+金属管棚+注浆+钢筋网"的联合支护方案,该支护方案通过长短锚索的有机结合,实现了深浅部围岩的有效支护,提高了围岩的整体稳定性。覃美满等[13]基于岩体质量评价等,运用数值模拟和现场试验,提出了"锚杆+钢塑格栅网+双筋条+喷砼"的联合支护方式,降低了支护成本。王社光等[14]根据巷道底鼓变形规律并结合现场实际,提出了"反底拱+锚网喷+短锚索"的组合支护修复方案,并对修复后的围岩稳定性进行了分析,工程实践表明,支护后巷道的变形趋势得到了有效控制。王小平等[15]针对金川三矿区破碎围岩巷道双层喷锚网支护成本高的问题,采用 FLAC3D 对比分析了 3 种支护方案下的巷道围岩塑性区破坏情况和变形量,并结合人工成本、材料消耗及施工工艺进行比选,提出了具有更高经济效益的钢筋条联合单层喷锚网支护的巷道加固方案。本文以某超深金属矿高应力巷道为背景,采用变形监测、钻孔摄像及地压监测等手段研究分析巷道围岩的变形特征和破坏机理。据此,提出巷道加固方案和支护参数,为超深井巷道加固提供思路。

1 工程概况

1.1 巷道工程及地质条件

某深井矿山粗碎硐室大件道位于井下-1 082 m 水平,地面标高+65 m,工程埋深 1 147 m。如图 1 所示,大件道北侧为粗碎硐室,南侧与 1 号回风井联通,中间与除尘硐室连接,该巷道主要担负硐室大件下放及硐室设备检修等功能。该区域地层主要为古元古界辽河岩群浪子山岩组,岩性主要为绿泥千枚岩,由粒度细小的石英、绢云母、绿泥石及少量长石组成。岩石表面呈灰绿色,鳞片粒状变晶结构,千枚状构造,岩石较破碎,片状节理发育,片理面有丝滑光泽,岩石整体性较差,无明显淋水现象。

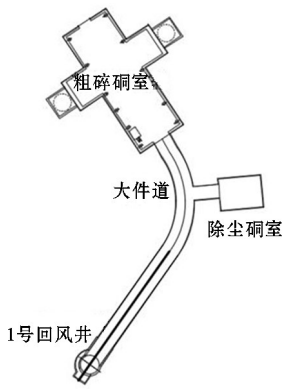


图 1 工程平面布置

Fig.1 Engineering layout plan

1.2 巷道原支护方案

该巷道设计开挖断面为 5 400 mm×5 600 mm,净断面为 5 100 mm×5 450 mm。原支护方案如图 2 所示,设计采用锚喷网支护,喷射混凝土等级为 C25;锚杆采用树脂锚杆,规格为 Φ22 mm×2 600 mm,间、排距均为 1 000 mm,呈梅花形布置,托板采用 150 mm×150 mm×12 mm 热轧钢板;金属网采用 Φ6.5 mm 圆钢制作,网度为 150 mm×150 mm。

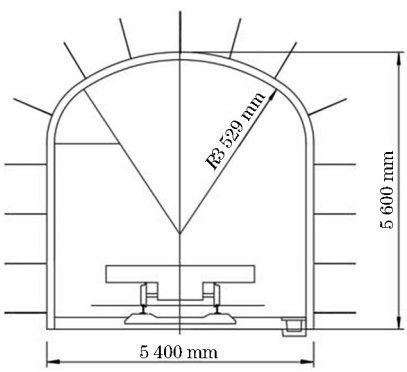


图 2 巷道原支护设计

Fig.2 Original support design of roadway

1.3 地应力测试

本研究采用水压致裂法对该矿深度 800~850 m 和 1 100~1 160 m 的岩层进行地应力试验。通

过对水压致裂实测最大主应力值与深度的关系进行回归分析,得到最大主应力回归曲线如图 3 所示,回归方程如下:

$$\sigma_x = 0.035\ 7H - 0.186\ 1 \quad (1)$$

式中:H 为埋深;σ_x 为最大水平主应力,MPa。

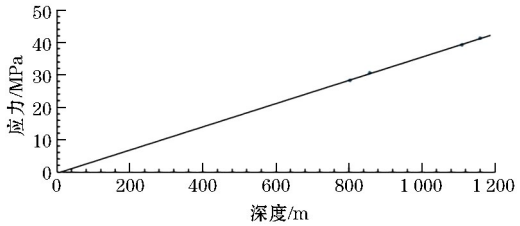


图 3 最大主应力回归曲线

Fig.3 Regression curve of maximum principal stress

粗碎硐室大件道埋深为 1 147 m,由式(1)计算得到该巷道围岩的最大主应力为 40.76 MPa。

1.4 岩石力学试验和岩体质量评价

岩石试件的饱和单轴抗压强度试验采用 Rockman 微机控制电液伺服压力试验机,共计测试 10 组岩样,测试结果见表 1。

表 1 绿泥千枚岩饱和单轴抗压强度及变形试验结果

Table 1 Test results of saturated uniaxial compressive strength and deformation of chlorite phyllite rock

抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
92.10	43.51	0.26

根据该矿岩层分布特点,对岩体质量进行分级。依据《工程岩体分级标准》(GB/T 50218—2014),由岩体基本质量指标修正公式计算得到修正后的岩体基本质量指标[BQ],结果见表 2。

表 2 绿泥千枚岩基本质量指标与等级

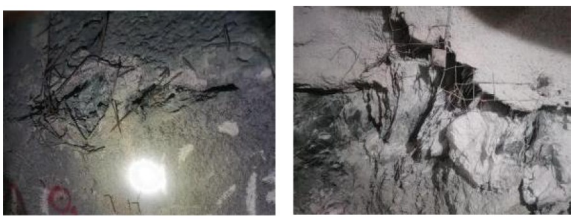
Table 2 Basic quality indicator and grade of chlorite phyllite rock

基本质量指标 BQ	基本质量指标修正值[BQ]	质量级别
512.8	392.8	Ⅲ

2 巷道破坏特征及原因分析

2.1 巷道破坏过程及现象

根据现场巷道开挖后揭露的情况来看,粗碎硐室大件道、粗碎硐室、除尘硐室均处于深部绿泥千枚岩中。2021 年开挖该巷道后,采用锚网喷进行支护,巷道保持稳定。2023 年完成除尘硐室开挖后,该巷道仍基本保持稳定。在 2024 年 3 月,开始施工粗碎硐室后,虽然马头门至除尘硐室中间的巷道围岩稳定性良好,但是除尘硐室洞口至粗碎硐室的巷道右侧围岩破坏严重,而且具有明显的时间效应,2024 年 4 月至 5 月以喷浆体开裂和网片崩解为主,6 月至 7 月出现支护体内的原岩风化脱落,破坏深度加深,岩体破坏表现出碎胀扩容大变形的特征,如图 4 所示。



(a) 4—5 月 (b) 6—7 月

图 4 巷道围岩破坏

Fig.4 Damage of surrounding rock of roadway

2.2 巷道围岩破坏特征

(1) 巷道围岩变形严重,断面收缩较大。

巷道出现变形现象后,为监测该巷道变形情况,在该段巷道的帮壁腰部共设置了两个监测点,两个监测点间距为 5 m。自 2024 年 3 月初至 7 月初,每周通过全站仪来监测巷道变形量。根据监测数据可以发现,经过 4 个月后,监测点 1 处的断面由5.233 m 缩小为 4.299 m,变形量为 0.934 m;监测点 2 处的断面由 5.211 m 缩小为 3.663 m,变形量为1.548 m。具体变形情况见图 5。

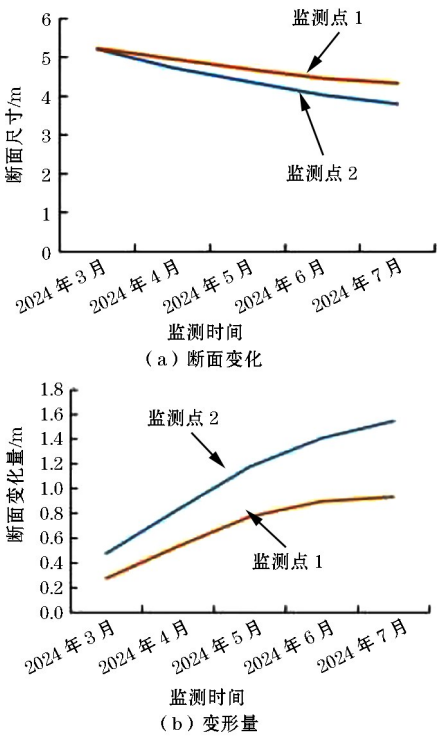


图 5 巷道变形监测结果

Fig.5 Deformation monitoring results of roadway

(2) 巷道支护结构失效,围岩持续卸荷。

为监测该部位巷道围岩的地压活动规律,在该巷道布设了一套地压监测设备。为了保证地压监测设备的监测稳定性,采用打钻埋设的方法,每个钻孔深度为 2.5～3.0 m。地压监测数据显示,该巷道处于持续卸荷状态,应力值由 5 月初的 15 MPa 降至 7 月初的 3 MPa。监测结果见图 6。

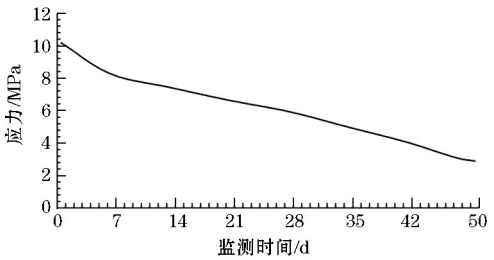


图 6 巷道应力监测结果

Fig.6 Stress monitoring results of roadway

(3) 巷道围岩松动范围大,完整性差。

为了揭示巷道围岩松动圈的深度,在该巷道开展了钻孔摄像探测,在巷道两侧各布置一个钻孔,见图 7。通过对现场钻孔数据进行采集,获得了孔壁成像数据。测试结果表明,大件道左帮(摄像点 2)围岩的松动圈深度在 1.1 m 左右,大件道右帮(摄像点 1)围岩的松动圈深度在 2.2 m 左右。

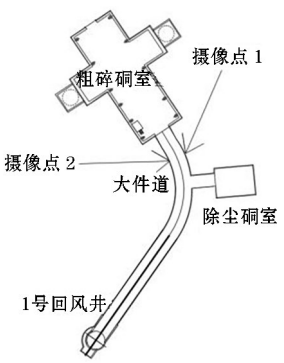


图 7 钻孔摄像点位布置

Fig.7 Points layout of drilling camera

2.3 巷道围岩破坏机理

该巷道的破坏与巷道埋藏深、地应力大、开挖扰动、围岩承载力差、片理发育及原有支护强度不足等关系,以上因素的综合作用引起巷道发生失稳和破坏。

该矿以水平构造应力为最大主应力,巷道开挖后,从巷道表面到深部原始应力区域依次形成破碎区、塑形区和弹性区。巷道开挖后,在原有支护形式下,实现了应力平衡,未发生变形和破坏,除尘硐室开挖后,在原有支护形式下,该区仍能达到应力平衡。但在粗碎硐室开挖后,该巷道围岩中出现了应力集中,原有应力平衡被打破。

该区域岩石的单轴抗压强度达到 92.1 MPa,最大主应力值为 40.76 MPa。应力集中难以达到岩石的单轴抗压强度值,但是绿泥千枚岩的千枚状构造和发育的片状节理导致其承载力下降,同时其片理方向与巷道轴线方向平行,在不断集中的水平构造应力和开挖扰动作用下,片理不断张开,使得巷道围岩出现了持续的松弛,最终导致巷道在围岩条件和受力条件最不利处(拱肩)发生压剪破坏和横向顶拉破坏,出现喷浆体破裂和锚网崩裂现象,破坏由点到面逐步扩大。在支护结构失效后,未及时采取喷浆封闭,导致围岩受到巷道内潮湿空气的侵蚀风化,最终与原岩脱层,发生岩体破坏。

另外,从钻孔摄像和地压监测数据来看,在巷道左帮(摄像点 2)和右帮(摄像点 1)承受着不同的压力,这主要是因为巷道右帮三面凌空,而左帮单面凌空,右帮岩体的应力集中更为严重,故而右帮松弛深度较左帮深 1.1 m,岩体卸荷也更为剧烈,同时也出现了更严重的破坏现象。

3 深部巷道修复与加固技术

3.1 支护方式选择

巷道支护结构应与围岩变形破坏特征相适应,充分发挥巷道岩体本身的承载能力,在支护体的作用下,限制围岩破裂区和塑性区的发展,提高围岩的整体承载能力。

锚杆(索)是主动支护方式,通过对岩体施加主动支护压力来控制围岩变形;钢拱架是一种被动支护形式,其突出特点是刚度大,施工便捷,能够立即承受荷载,从而有效约束围岩变形,提高支护有效性。研究证明,这两种支护方式的组合能够有效控制高地应力、大变形巷道的破坏。因该工程岩体片理发育,揭露后因潮湿环境易发生风化,导致片理开裂,岩体破坏,故而需要开挖后立即进行喷浆封闭岩面,初喷层厚度为 30～50 mm,达到封闭岩体、防止掉块、阻止风化的目的。锚索和拱架施工完成后,再次进行二次喷浆支护,复喷层厚度为 100～150 mm,以将锚索和拱架全部覆盖为宜。通过复喷,将围岩和各支护体胶结和包裹,使支护结构与围岩成为一个整体,共同抵抗围岩变形。

综上,结合该矿深部高应力巷道变形破坏的特征,对深部巷道采取锚网+钢拱架+喷射混凝土的组合支护方式进行加固修复。

3.2 支护参数确定

锚索长度应满足下式:

$$L \geqslant L_1+L_2+L_3+L_4 \tag{5}$$

式中:L 为锚索长度,m;L_1 为锚索锚固段长度,m;L_2 为围岩松动圈厚度;L_3 为托盘及锚具厚度;L_4 为外露长度[16]。

锚索锚固长度 L_1 一般为 1.5～2 m,该处取 2 m;结合钻孔摄像观察的松动圈,L_2 取 2.2 m;L_3 取 0.15 m,L_4 取 0.3 m。经计算,得出锚索长度为 4.65 m,综合考虑安全系数,确定锚索长度 L 为 5 m。锚索选用直径为 17.8 mm 的钢绞线,锚索间、排距均为 1 200 mm,锚索锚固力不低于 150 kN。锚索托盘尺寸为 300 mm×300 mm×16 mm。钢筋网采用直径为 6.5 mm 的圆钢制作,钢筋网的网孔规格为 150 mm×150 mm。

钢拱架采用 29U 型钢,卡缆型号为 29U,厚度为 16 mm,单位长度理论质量为 29 kg/m,弹性模量为 200 GPa,泊松比为 0.3,容重为 7 800 kg/m^3,抗拉强度大于 575 MPa,屈服强度大于 400 MPa,伸长率大于 26%。钢拱架间距 800 mm。在钢拱架底脚用锚杆锁定,相邻拱架之间采用钢筋连接,钢筋间距1 000 mm。

喷射混凝土的强度等级为 C35,初喷层厚度为 30 mm,在锚网和拱架施工完成后,进行复喷,复喷层厚度为 120 mm。

3.3 加固效果模拟

为进一步验证支护参数选取的合理性,对该段巷道进行了建模分析,数值模拟模型见图 8。

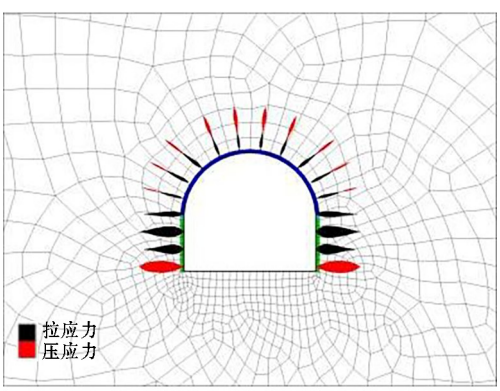


图 8 巷道加固模型

Fig.8 Roadway reinforcement model

通过模拟发现,加固支护后,巷道边墙中部锚索以拉应力为主,最大拉力为 66.8 kN。图 9 为巷道围岩最大主应力云图,从图 9 可以看出,2～3 m 的表层围岩属于卸荷区域,这与现场测试结果基本一致,4～5 m 的范围内存在高应力,同时也验证了预应力锚杆的长度设计为 5 m 是合理的。

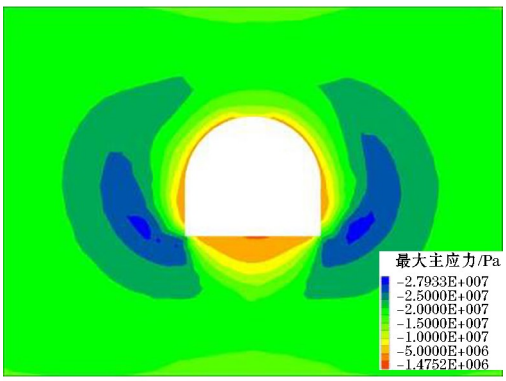


图 9 最大主应力云图

Fig.9 Cloud map of maximum principal stress

模拟计算结果表明,支护前围岩最大主应力随着巷道开挖的推进而持续降低,支护后围岩完整性增强,其力学强度参数得到了提升,围岩最大主应力进一步提高。

4 现场工程应用

4.1 施工步骤与要求

按照以上确定的加固方案,首先对破损的喷浆层和裸露失去强度的岩体进行检撬,然后按照 2.5 m 一个循环使用风镐对断面不足部位进行处理,处理完成一个循环后,在 2～3 h 内完成 30 mm 厚的初喷;之后铺设钢筋网和施工两排锚索,锚索施工要求压紧金属网和岩面,网片之间搭接长度为 100 mm,锚索外露长度控制在 250～350 mm 之间,安装完成后进行拉拔试验,要求达到拉拔力不小于 150 kN 的设计要求。锚索施工后,安装钢拱架,拱架间距、横向位置和高程偏差均不应超过±50 mm,竖向斜度应不超过 2°,钢拱架应支立于稳固基础上,将支架与巷道顶、帮楔紧。最后进行复喷,复喷厚度为 120 mm,要求将锚索和拱架完全覆盖。

4.2 现场加固效果

自加固支护后,该段巷道未发生变形破坏。安装在原位置的地压监测设备显示,自 2024 年 7 月初开始,随着加固支护施工的不断进行,巷道围岩完整

性得到了大幅提高,围岩应力值逐渐提高,由7月初的3 MPa逐步增加至7月底的9 MPa,说明变形的围岩松弛区得到了加固修复,岩体承载力增加,岩体进入相对稳定状态。

5 结论

(1) 通过水压致裂法获得了某金属矿山深部地层最大主应力的回归方程,计算得到该矿山埋深1 147 m的深部巷道处的最大主应力为40.76 MPa。通过岩石力学试验得到该矿山岩石的饱和单轴抗压强度为92.10 MPa,并将该深部巷道工程的岩体质量等级评定为Ⅲ级。

(2) 通过变形监测、应力监测和钻孔摄像,分析了巷道破坏特征,发现巷道围岩变形严重,断面收缩较大,最大收缩量达1.548 m;巷道支护结构失效,围岩持续卸荷,约2个月的时间内地压监测应力值由监测初期的15 MPa降低至3 MPa;巷道围岩松动圈范围大、完整性差,巷道右帮围岩松动圈厚度达到2.2 m。

(3) 该巷道工程岩体的千枚状构造和发育的片状节理,导致岩体承载力下降,在不断集中的水平构造应力和开挖扰动作用下,使得片理发生开裂,岩体出现持续卸荷,最终致使岩体发生压剪破坏和横向顶拉破坏。

(4) 结合巷道破坏特征,确定了主动支护和被动支护相结合的加固支护方案,具体方案为:30 mm厚的初喷+5 m长锚索主动支护+钢筋网+U29拱架被动支护+120 mm厚的复喷。该支护结构在发挥围岩自身承载力的基础上,有效控制了巷道的变形破坏。

(5) 加固支护方案实施后,巷道未发生变形破坏,地压监测应力值由加固前的3 MPa增加至9 MPa,巷道围岩承载力得到增强,围岩逐步进入相对稳定状态。

参考文献(References):

[1] 王勇,吴爱祥,杨军,等.深部金属矿开采关键理论技术进展与展望[J].工程科学学报,2023,45(8):1281-1292.
Wang Yong, Wu Aixiang, Yang Jun, et al. Progress and prospective of the mining key technology for deep metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(8): 1281-1292.

[2] 张家林,杨帆,张望,等.深部资源开采创新成效分析与思考[J].采矿与安全工程学报,2024,41(3):450-461.
Zhang Jialin, Yang Fan, Zhang Wang, et al. Innovation effectiveness analysis and technology management reflection of deep resource exploitation[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2024,41(3):450-461.

[3] 于学馥,乔端.轴变论和围岩稳定轴比三规律[J].有色金属,1981,33(3):8-15.
Yu Xuefu, Qiao Duan. Theory of axial variation and three rules of axial ratio for stabilizing country rock [J]. Nonferrous Metals,1981,33(3):8-15.

[4] 侯朝炯,勾攀峰.巷道锚杆支护围岩强度强化机理研究[J].岩石力学与工程学报,2000,19(3):342-345.
Hou Chaojiong, Gou Panfeng. Mechanism study on strength enhancement for the rocks surrounding roadway supported by bolt [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2000,19(3):342-345.

[5] 何满潮,高尔新.软岩巷道耦合支护力学原理及其应用[J].水文地质工程地质,1998(2):1-5.
He Manchao, Gao Erxin. Mechanical principle and application of coupled support in soft rock roadway [J]. Hydrogeology and Engineering Geology,1998(2):1-5.

[6] 袁亮,薛俊华,刘泉声,等.煤矿深部岩巷围岩控制理论与支护技术[J].煤炭学报,2011,36(4):535-543.
Yuan Liang, Xue Junhua, Liu Quansheng, et al. Surrounding rock stability control theory and support technique in deep rock roadway for coal mine[J]. Journal of Coal Mining,2011,36(4):535-543.

[7] 左建平,刘海雁,徐丞谊,等.深部煤矿巷道等强支护力学理论与技术[J].中国矿业大学学报,2023,52(4):625-647.
Zuo Jianping, Liu Haiyan, Xu Chengyi, et al. Theory and technology of strong support mechanics for deep coal mine roadways[J]. Journal of China University of Mining and Technology,2023,52(4):625-647.

[8] 黄炳香,张农,靖洪文,等.深井采动巷道围岩流变和结构失稳大变形理论[J].煤炭学报,2020,45(3):911-926.
Huang Bingxiang, Zhang Nong, Jing Hongwen, et al. Theory of rheological and structural instability and large deformation of surrounding rock in deep mining tunnels[J]. Journal of Coal Industry,2020,45(3):911-926.

[9] 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 mine[J]. Mining Research and Development,2025,45(6):1-11.

[10] 查文华,梁译文,许涛,等.采动下深部高应力巷道围岩变形特征分析及支护技术研究[J].煤炭工程,2023,55(12):64-70.
Zha Wenhua, Liang Yiwen, Xu Tao, et al. Deformation characteristics analysis and support countermeasures of surrounding rock in deep high stress roadway under mining [J]. Coal Engineering,2023,55(12):64-70.

[11] 范仕清,张辉,杨张杰,等.深井高应力巷道围岩变形特征与修复加固技术[J].煤炭技术,2022,41(6):34-37.
Fan Shiqing, Zhang Hui, Yang Zhangjie, et al. Deformation characteristics and repair and reinforcement technology of surrounding rock in deep and high stress roadway[J]. Coal Technology,2022,41(6):34-37.

[12] 石磊,王鹏,姜丙孝,等.深部复杂破碎软岩巷道围岩变形控制技术研究[J].中国矿业,2025,34(6):215-223.
Shi Lei, Wang Peng, Jiang Bingxiao, et al. Study on surrounding rock deformation control technology of deep complex broken soft rock roadway [J]. China Mining Magazine,2025,34(6):215-223.

[13] 覃美满,寇向宇,廖宁,等.某铅锌矿脉外巷道支护参数设计优化研究[J].矿业研究与开发,2025,45(2):42-48.
Qin Meiman, Kou Xiangyu, Liao Ning, et al. Optimization study on the design of support parameters for the roadway outside the vein of a lead zinc mine[J]. Mining Research and Development,2025,45(2):42-48.

[14] 王社光,于庆磊,于兴社,等.中关铁矿有轨运输巷底鼓变形监测分析及控制技术研究[J].矿业研究与开发,2024,44(4):107-113.
Wang Sheguang, Yu Qinglei, Yu Xingshe, et al. Monitoring analysis and control technology of floor heave deformation in railway transportation roadway of Zhongguan Iron Mine[J]. Mining Research And Development,2024,44(4):107-113.

[15] 王小平,王文杰,黄永祥,等.金川三矿破碎围岩巷道变形控制方式优选研究[J].矿业研究与开发,2024,44(10):65-72.
Wang Xiaoping, Wang Wenjie, Huang Yongxiang, et al. Research on optimal selection of deformation control methods for roadway with fractured surrounding rocks in Jinchuan No.3 Mine [J]. Mining Research and Development,2024,44(10):65-72.

[16] 高杨轶,王贻明,张纯锋,等.软岩巷道预应力锚杆支护设计与参数优化[J].矿业研究与开发,2025,45(5):113-122.
Gao Yangyi, Wang Yiming, Zhang Chunfeng, et al. Design and parameter optimization of prestressed anchor support for soft rock roadway[J]. Mining Research and Development, 2025,45(5):113-122.