

自然崩落法矿山矿岩赋存特征精细调查与 辅助致裂崩落效果研究

Study on Detailed Investigation of Rockmass Occurrence Characteristics and
Caving Effect With Assisted Fracturing in a Block Caving Mine

李文^{1,2}, 刘育明^{1,2}, 夏长念^{1,2}, 王鑫³, 吴岩³, 彭华⁴, 陈小伟^{1,2},
杨成虎³, 王泽泽³

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 深部金属矿采动地压灾害防控国家矿山安全监察局重点实验室, 北京 100038;
3. 山西北方铜业有限公司铜矿峪矿, 山西 运城 043700; 4. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘要:自然崩落法采矿技术对矿岩赋存特征要求严苛, 矿岩崩落特性直接影响自然崩落法矿山矿岩崩落速率及出矿块度。通过人工辅助致裂增加矿岩体内部裂隙发育程度实现矿岩预处理, 是当前国外自然崩落法矿山生产过程的重要技术手段。本文以我国首座自然崩落法矿山铜矿峪矿向深部转移首采区开采工程为背景, 开展了矿岩赋存特征精细调查与水压致裂矿岩预处理试验研究。结果表明: 铜矿峪矿 410 m 中段 5 号矿体首采区矿岩坚硬、中等完整~较完整, 岩体质量等级为 II~III 类, 矿岩中等可崩~难崩, 矿岩崩落破碎特性为中等破碎~大块较多; 岩体赋存特征精细调查对于深入了解矿岩崩落特性意义重大; 通过钻孔摄像技术获取了水压致裂矿岩预处理试验前后钻孔孔壁图像并揭示了水压致裂过程产生的新裂隙, 有效改善了矿岩结构面发育程度; 通过对崩落顶板监测及出矿口块度统计分析显示首采区生产期崩落速率提高了 3 倍多、出矿口大块率降低了 58.3%, 为铜矿峪矿转深部开采过渡期产能平稳衔接提供了坚实保障; 初步形成了水压致裂矿岩预处理技术及装备体系, 可支撑我国现代自然崩落法采矿技术进一步推广应用。

关键词:自然崩落采矿法; 矿岩预处理; 水压致裂法; 地应力测试; 出矿块度; 崩落速率

中图分类号: TD853 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2024)01-0015-10

Abstract: Mining with block caving is extremely severity for rockmass occurrence characteristics, and rockmass caveability directly affects caving rate and secondary fragmentation of block caving mines. It is a vital technology to realize ore and rock pre-conditioning by increasing internal fractures with artificial auxiliary fracturing, which is currently a routine production process of block caving mines abroad. Based on Tongkuangyu mining project of the first block caving mine in China transferring to the deep, a detailed investigation of rockmass occurrence characteristics and a field test on rockmass pre-conditioning by hydraulic fracturing were carried out. The results show that rockmass at the start caving area of No. 5 orebody in Level 410m of Tongkuangyu mine is hard rock with medium to less integrity, rockmass quality classification is II to III and rockmass caveability is moderately to hard, which would result in caving mining with medium broken and more bulk. Detailed investigation of rockmass occurrence characteristics is the basis for in-depth understanding of rockmass caveability. Borehole wall images before and after preconditioning tests by hydraulic fracturing were obtained and newly generated hydraulic fractures were observed, which could effectively improve the degree of rockmass structure development. Based on analysis of caving front monitoring and drawpoint fragmentation distribution, a more than 3 times increase in caving rate and a 58.3% reduction in secondary fragmentation were achieved in production period of the start caving area, which provide a solid support for steady convergence of production capacity in transition period of mine to the deep. The technology of rockmass pre-conditioning by hydraulic fracturing and related equipment system were initially formed which could support a further development of modern block caving mining in China.

[作者简介] 李文(1988—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事非煤矿山岩石力学与采矿新技术研究工作。

[基金项目] 国家重点研发计划项目(2023YFC2907201)。

[引用格式] 李文, 刘育明, 夏长念, 等. 自然崩落法矿山矿岩赋存特征精细调查与辅助致裂崩落效果研究[J]. 中国矿山工程, 2024, 53(1): 15-24.

Key words: block caving mining method; rockmass pre-conditioning; hydraulic fracturing; in-situ stress measurement; secondary fragmentation; caving rate

1 前言

我国是矿产资源消费大国,铜、铁等大宗金属矿产对外依存度高达80%以上^[1],在当前全球竞争格局背景下存在受制于人、“卡脖子”的风险。为保障国家矿产资源供应安全,国家相关部委已出台相关政策,推动国内矿产资源勘查开发力度。矿产资源开发伴随采矿装备、开采技术的进步而不断发展,浅地表矿产资源的开发殆尽,将促使矿山朝着地球深部资源发展,地下大规模采矿技术将是支撑深部矿产资源安全、绿色、高效开发的重要手段。而自然崩落采矿法在铜、金、钼等低品位、厚大矿床开发中具有显著优势,因其生产成本低、规模大、易实现自动化、智能化等特点,得到了全球矿业界的广泛关注^[2]。全球范围内自然崩落法生产矿山主要分布在智利、澳大利亚、南非、印度尼西亚、美国、中国等国家,如El Teniente矿、Chuquicamata矿、Cadia East矿、Northparkes矿、Palabora矿、Freeport DMLZ矿、铜矿峪矿、普朗铜矿等。

矿岩崩落特性是矿山开展自然崩落法采矿可行性研究与投产后生产管理过程的重点关注内容^[3],直接关系到矿山自然崩落法采矿应用的成败。对于受矿岩赋存特征变化导致矿岩可崩性变差的自然崩落法矿山,会引起生产过程出矿水平大块增多、大块悬顶卡斗、甚至崩落中止等问题,增加了矿山二次破碎工程量与生产安全风险,阻碍了矿山连续生产与产能保障。在国际崩落法研究项目(International Caving Study, ICS)的基础上,国外一些学者开展了自然崩落法矿山矿岩预处理技术研究,通过在待崩落矿体中布置深孔进行水压致裂或受限爆破增加矿岩体内部的裂隙发育程度,以改善矿岩的可崩性,该技术已在国际自然崩落法矿山得到了广泛应用^[4-5]。我国现阶段自然崩落法生产矿山仅有两座(铜矿峪矿和普朗铜矿),矿山在前期设计阶段均开展了较为详尽的矿岩赋存特征调查与崩落特性研究,对于保障矿山成功应用自然崩落法采矿技术提供了坚实支撑。随着铜矿峪矿朝着深部发展面临着矿岩更加坚硬、完整的开采条件,将直接导致矿岩崩落速率减缓、大块增多等风险,极大制约了矿山的产能提升与安全生产,亟需开展自然崩落法矿山矿岩

预处理技术应用研究与超前储备。

基于以上背景,文章依托国内首座自然崩落法矿山转深部开采首采区水压致裂矿岩预处理技术应用研究项目,开展了铜矿峪矿深部矿岩赋存特征精细调查与水压致裂预处理现场试验,分析了矿岩崩落效果,检验了水压致裂矿岩预处理技术在我国自然崩落法矿山的应用成效。

2 研究区概况

铜矿峪矿位于山西省运城市垣曲县,是我国首座成功应用自然崩落法采矿技术的地下金属矿山,采用自然崩落法开采至今已三十多年的历史。该矿山主要矿体有2个(4号矿体和5号矿体),含矿岩性主要为变石英晶屑凝灰岩和变石英斑岩^[6]。铜矿峪矿区主要位于铜矿峪复式同斜向斜的南翼,矿区内的构造以断层为主,主断层有三条,其中最大的一条是近南北的平推正断层;区内还发育着东西向或南北向的小断层,断距很小,对矿体破坏作用不大;矿区内的断裂构造多为成矿期后构造,与铜矿峪矿床的成因没有直接关系。

铜矿峪矿现阶段正处于二期工程530 m中段转410 m中段回采过渡期,过渡期的产能稳定衔接是矿山近期关注的主要目标。随着矿山开采向深部转移,410 m中段已有生产巷道揭露出岩体的结构特征,相比530 m中段呈现出岩体结构面的发育程度有降低的趋势,对于410 m中段矿岩崩落效果将产生不利影响。同时,410 m中段首采区拉底工程不能形成上覆矿岩持续崩落的水力半径,致使矿岩开采难以高效推进。因此,在借鉴国外自然崩落法矿山生产实践基础上,应用水压致裂矿岩预处理技术,改善铜矿峪矿410 m中段首采区矿岩崩落特性,以保障铜矿峪矿过渡期的矿岩持续崩落与产能稳定衔接。

在铜矿峪矿410 m中段5号矿体首采区布置了6个竖直深钻孔,钻孔布置如图1所示。其中,1[#]、3[#]和5[#]钻孔孔口位于530 m运输水平巷道,2[#]、4[#]和6[#]钻孔孔口位于554 m出矿水平巷道^[7]。钻孔孔底均位于410 m中段拉底爆破分界线。通过上述的6个钻孔开展了岩芯结构面调查与矿岩物理力学特性参数测试,采用高清钻孔摄像机获得了各钻孔的孔壁

图像,利用钻孔声波测试仪开展了钻孔岩体声波测试,采用水压致裂法开展了原岩地应力测试,最后开展了逐段水压致裂矿岩预处理试验。

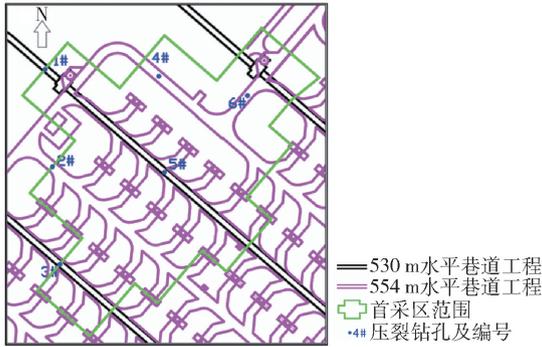


图1 铜矿峪矿410 m中段5号矿体首采区压裂钻孔布置图

3 矿岩赋存特征精细调查与辅助致裂方法

3.1 矿岩赋存特征精细调查

矿岩赋存特征精细调查是掌握自然崩落法矿山矿床开采技术条件的基础性工作,精细调查如图2所示,主要包括岩体结构面调查与分析、矿岩物理力学特性参数测试、原岩地应力测试、岩体声波测试等。而岩体中结构面调查和产状分析是开展工程岩体稳定性、崩落特性分析的基础性工作之一,主要依托钻孔或巷道等岩体揭露工程进行结构面产状及位置调查,常用方法有岩芯编录法、测线法、统计窗法、三维点云法、数字图像法等^[8-9],通过对结构面调查数据进行统计分析得出优势节理组组数及产状、节理发育密度等岩体结构特征表征指标,可用于岩体结构分类与岩体质量评价^[10]。矿岩物理力学特性参数测试主要参照《工程岩体试验方法标准》GB/T

50266—2013开展室内岩块试验,获取岩石物理力学特性参数^[11]。原岩地应力测试是工程设计前期及施工过程中研究工程岩体力学属性及受力状态,进行围岩稳定性分析与岩体工程科学决策的必要前提,通常采用水压致裂法、应力解除法、声发射法等^[12-15],获取区域地应力场的主应力大小、方位及其分布规律。岩体声波测试的理论依据是不同岩性和结构特征的岩体具有不同的波速,主要采用单孔一发双收声波测试方法,通过发射探头向岩体发射弹性波,接收探头接收岩体中传播的弹性波,从而获得弹性波的传播时间及频谱特征。然后,通过区域岩体纵波波速,综合反映岩体内部结构的完整性和力学性质^[16]。基于以上矿岩赋存特征精细调查结果,进行矿岩可崩性评价与崩落块度预测^[17-19]。

3.2 矿岩辅助致裂

自然崩落法矿山矿岩辅助致裂方法主要有水压致裂法 (Hydraulic fracturing) 和受限爆破法 (Confined blasting),具体如图3所示,国外自然崩落法矿山均开展了相关试验研究。上述两种方式均需要在待崩落矿体中钻凿深钻孔,水压致裂法通常采取从上部水平巷道中向下实施竖直孔或倾斜孔,受限爆破法通常采取从下部水平巷道中向上钻凿竖直孔或倾斜孔。水压致裂矿岩预处理形成的水力裂缝扩展半径可达30m左右,因其作业成本低而在自然崩落法矿山开采中得到广泛应用。水压致裂矿岩预处理装备体系由储水池(图4a)、高压注水泵组(图4b)、汇水管路(图4c)、封隔器(图4d)、孔口塔架(图4e)以及监测系统(图4f)等单元组成。在水压致裂矿岩预处理装备系统搭建完成后进行封隔器组装与调试,随后将封隔器下放至压裂钻孔内预定位

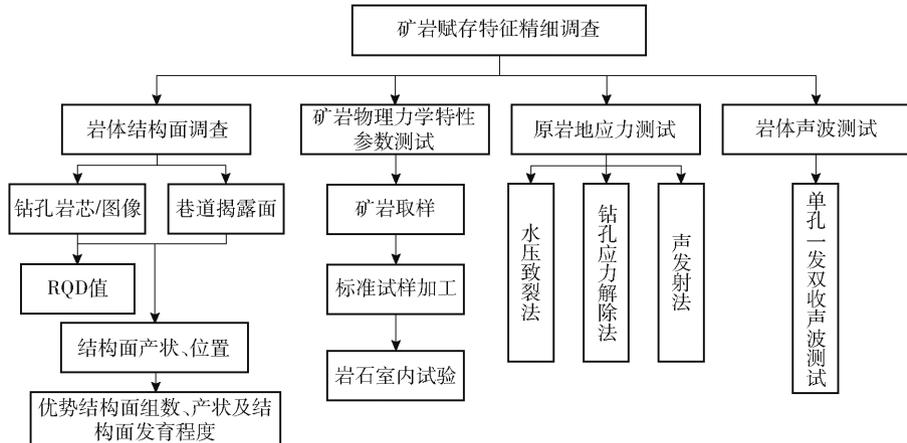


图2 矿岩赋存特征精细调查框图

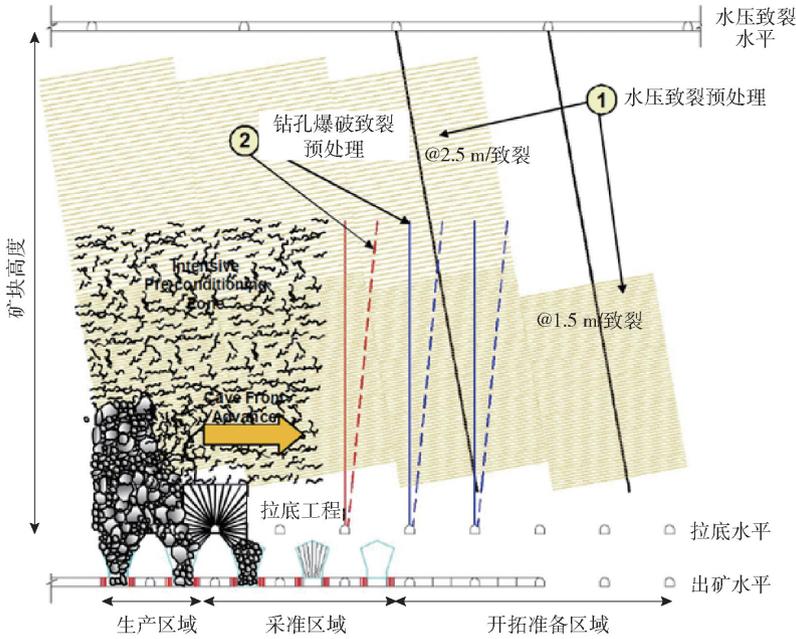


图3 自然崩落法矿山矿岩辅助致裂方法



图4 水压致裂矿岩预处理实物装备体系

置,通过小流量注水泵向封隔器注水使其膨胀形成压裂段(封隔一段区域),再通过大流量注水泵组向压裂段注水,使孔壁岩石破裂并在持续注入的高压水驱动下水力裂缝不断向外延伸扩展。

4 调查处理结果与崩落效果分析

4.1 矿岩赋存特征精细调查结果

依托铜矿峪矿410 m中段5号矿体首采区压裂钻孔,开展了矿岩赋存特征精细调查,主要包括岩芯结构面调查、岩石物理力学特性参数测试、现场地应力测试、钻孔图像采集以及钻孔声波测试等工作。铜矿峪矿410 m中段5号矿体首采区6

个压裂钻孔岩芯RQD值统计显示,其值为65%~76%。其中,3#和6#钻孔岩芯整体完整性较好,1#、2#、4#和5#钻孔岩芯整体完整性。钻孔岩芯RQD值分布如图5所示。

铜矿峪矿410 m中段5号矿体首采区矿岩室内测试的物理力学特性指标散点图显示:岩石天然密度变化范围为2.74~2.93 g/cm³,其平均值为2.79 g/cm³;岩石纵波波速的变化范围为5 600~7 250 m/s,其平均值为6 425 m/s;岩石单轴抗压强度的变化范围为78.94~200.00 MPa,其平均值为127.94 MPa;矿岩抗拉强度变化范围为2.88~

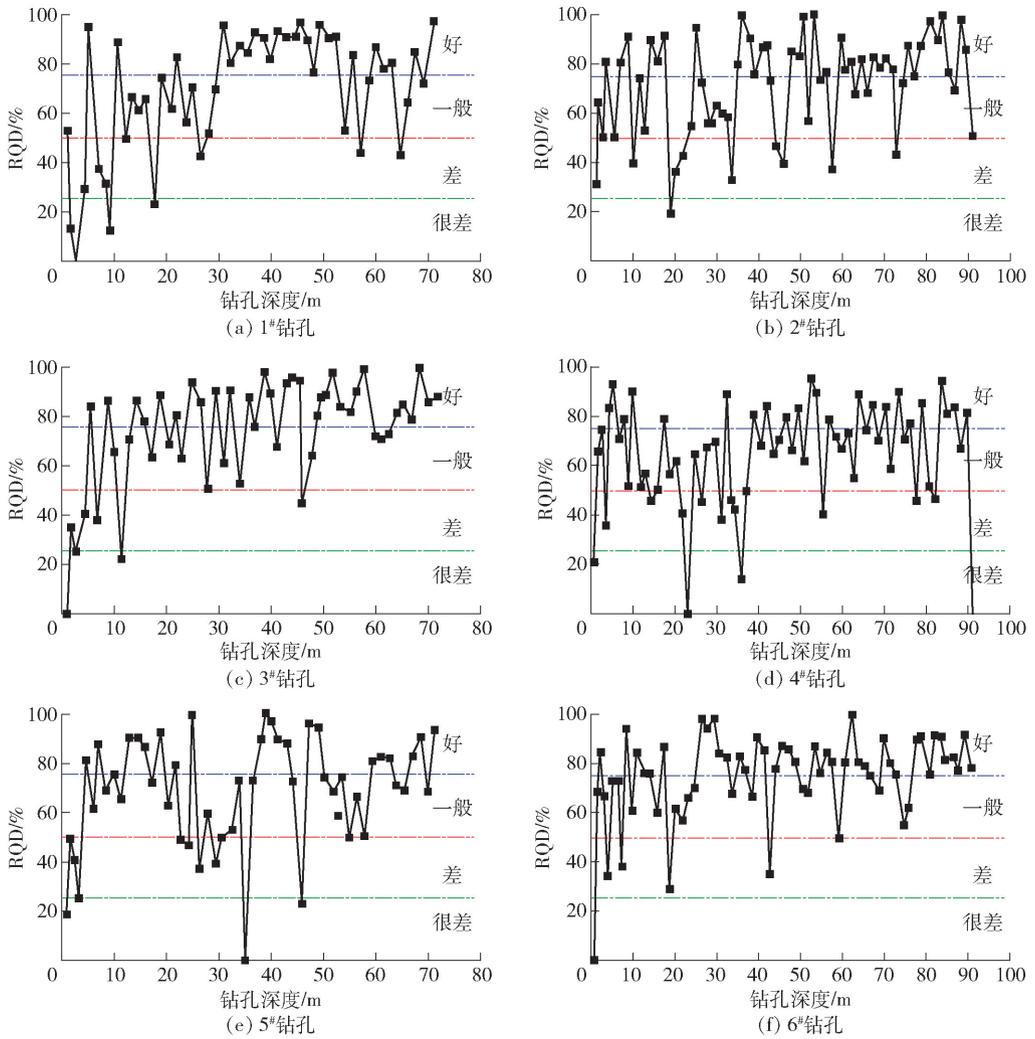


图 5 410 m 中段 5 号矿体首采区压裂钻孔岩芯 RQD 值分布特征

11.54 MPa,其平均值为 5.44 MPa。综合上述指标,该区域矿岩具有致密、坚硬的特点。参数测试如图 6 所示。

通过水压致裂法地应力测试在铜矿峪矿 410 m 中段 5 号矿体首采区 6# 钻孔开展了 3 个测点的测试工作。表 1 中列出了水压致裂法地应力测量结果,实测最大水平主应力为 10.51 ~ 33.08 MPa,最小水平主应力为 6.01 ~ 17.98 MPa,总体应力水平较高。浅部地应力数值最大,由浅至深先减小再增大,推测为上部崩落开采造成底部一定深度范围内呈现应力集中,60 m 深度以下逐渐转为正常的随深度增加的趋势。实测矿岩原位抗拉强度为 1.88 ~ 5.27 MPa,破岩压力最大值为 24.70 MPa。采用印模定向法对水力压裂裂缝进行定位,实测矿区最大水平主应力方向为 NE39.30°。

采用钻孔摄像技术获取压裂钻孔孔壁扫描图

像,进行结构面识别与产状提取,具体如图 7 所示。铜矿峪矿 410 m 中段 5 号矿体首采区节理极点等密度图显示:该区域矿体的优势节理组共 3 组,其产状分别为 139°∠64°、148°∠19°和 354°∠38°,等密度图如图 8 所示。表 2 中列出了钻孔岩芯调查和钻孔图像调查获得的各压裂钻孔节理密度,其分布范围分别为 1.59 ~ 2.69 条/m 和 1.16 ~ 2.41 条/m,可见上述两种调查方法获得的岩体结构面发育密度基本吻合,但前者获得的节理密度偏大,主要是由于岩芯调查过程中受钻孔取芯过程人工扰动而产生了新的破裂面,导致其统计结果偏大。

铜矿峪矿 410 m 中段 5 号矿体首采区 4# 钻孔在压裂实施前测得的岩体纵波波速随钻孔深度变化曲线表明:该区域岩体纵波波速相对平稳,波速范围为 3 000 ~ 3 300 m/s。通过与室内岩石声波速度对比发现,岩体声波速度约为岩石声波速度的 50%,主

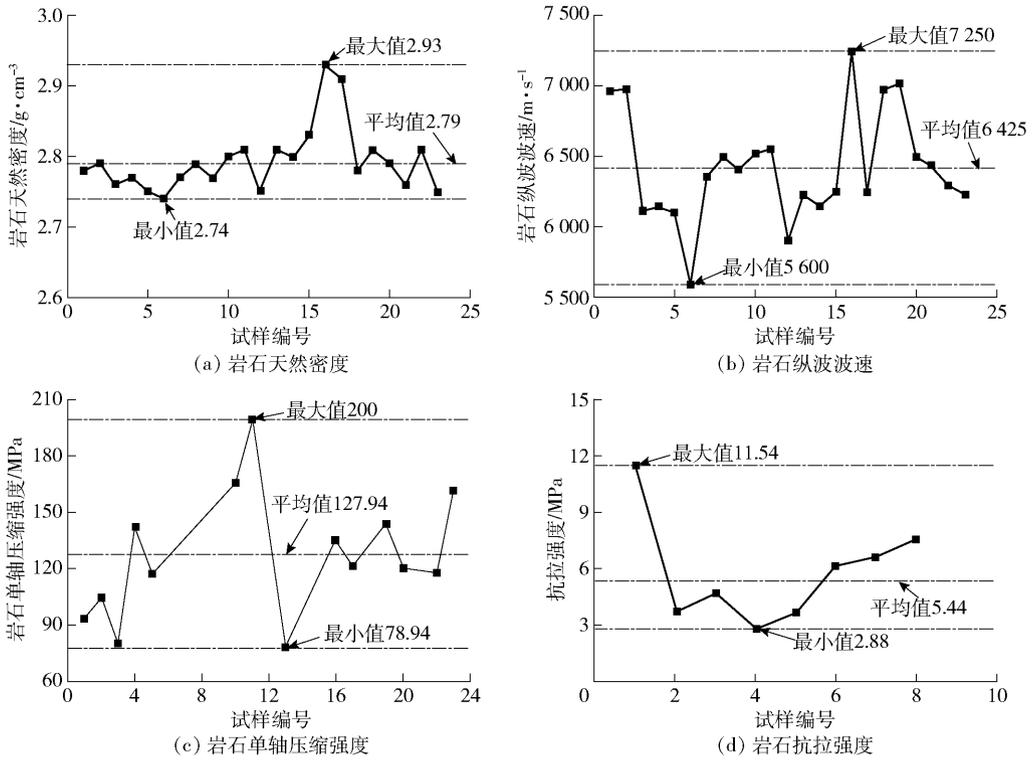


图6 室内岩石物理力学特性参数测试结果

表1 410 m中段5号矿体首采区水压致裂法地应力测量结果

测段 深度/m	压裂参数/MPa				主应力值/MPa				破裂 方位
	P_b	P_r	P_s	P_0	T	S_H	S_h	S_v	
49	24.70	19.90	17.50	0.48	4.80	33.08	17.98	1.49	
61	8.20	6.32	5.41	0.60	1.88	10.51	6.01	1.85	NE39.3°
76	15.62	10.35	6.78	0.74	5.27	10.73	7.52	2.31	

注： P_b —破裂压力； P_r —重张压力； P_s —瞬时闭合压力； P_0 —孔隙压力； T —抗拉强度； S_H —水平最大主应力； S_h —水平最小主应力； S_v —垂向主应力。

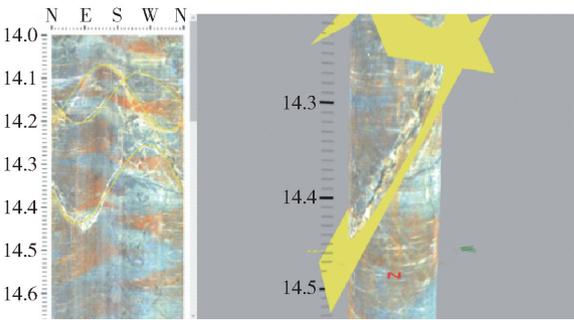


图7 压裂钻孔图像及结构面识别与产状提取

要原因可能是岩体中不连续结构面的存在阻碍了声波传播,具体变化曲线如图9所示。

通过铜矿峪矿410 m中段5号矿体首采区矿岩赋存特征精细调查与结果综合分析,发现研究区矿岩属于坚硬岩,岩体中等完整~较完整,岩体

质量等级为Ⅱ~Ⅲ类。结合矿岩可崩性分级参照表(表3),该区域矿岩为中等可崩~难崩,矿岩崩落破碎特性为中等破碎~大块较多。上述结果为铜矿峪矿后期开展水压致裂矿岩预处理提供了重要依据。

4.2 矿岩水压致裂预处理结果

铜矿峪矿410 m中段5号矿体首采区共实施了6个钻孔的水压致裂矿岩预处理试验,压裂钻孔布置如图1所示,水压致裂矿岩预处理试验周期共53天(2020年12月6日—2021年1月27日)。在铜矿峪矿554 m出矿水平巷道布置了水压致裂矿岩预处理系统,包括高压注水泵组、储水池、汇水管路以及监测仪器等。现场水压致裂试验过程采用从孔底往上逐段压裂模式,压裂间隔一般为1.5~2.5 m,部分破碎钻孔段根据钻孔图像进行验证后进行跳段

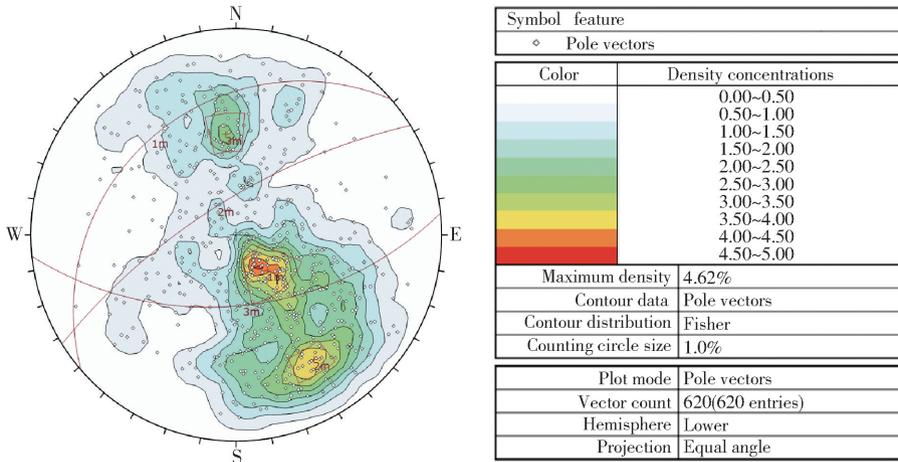


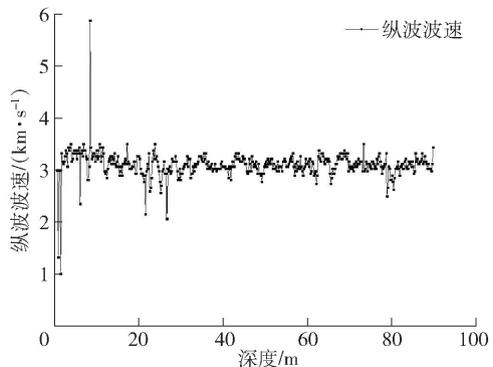
图8 410 m中段5号矿体首采区节理极点等密度图

表2 基于钻孔岩芯调查和钻孔图像调查的节理密度统计

钻孔编号	钻孔岩芯调查			钻孔图像调查		
	调查钻孔长度/m	节理总数/条	节理密度/条·m ⁻¹	调查钻孔长度/m	节理总数/条	节理密度/条·m ⁻¹
1#	71.05	162	2.28	66	120	1.82
2#	91.05	145	1.59	85	99	1.16
3#	71.65	156	2.17	60	117	1.95
4#	91.55	223	2.43	—	—	—
5#	71.15	150	2.11	58	121	2.08
6#	91.05	245	2.69	67	162	2.41



(a) 4#钻孔岩体声波测试



(b) 4#钻孔声波波速随深度变化曲线

图9 4#压裂钻孔岩体声波测试及波速随深度变化曲线

表3 矿岩可崩性分级参照表

岩体质量分级	RQD/%	可崩性类别	破碎特性
V	<25	极易崩	极破碎
IV	25 ~ <50	易崩	不破碎
III	50 ~ <70	中等可崩	中等破碎
II	70 ~ <90	难崩	大块较多
I	90 ~ 100	极难崩	大块多

处理。现场压裂过程对注水压力、流量以及微震信号进行实时监测。全部压裂试验过程中监测注水压力和注水流量,并形成相应的散点图,具体如图10所示。从图中可看出,注水压力集中于10~32 MPa,均值约21.30 MPa;注水流量主要受现场试验过程中开启的高压注水泵台数及阀门控制,大部分试验过程的注水流量为250~300 L/min。

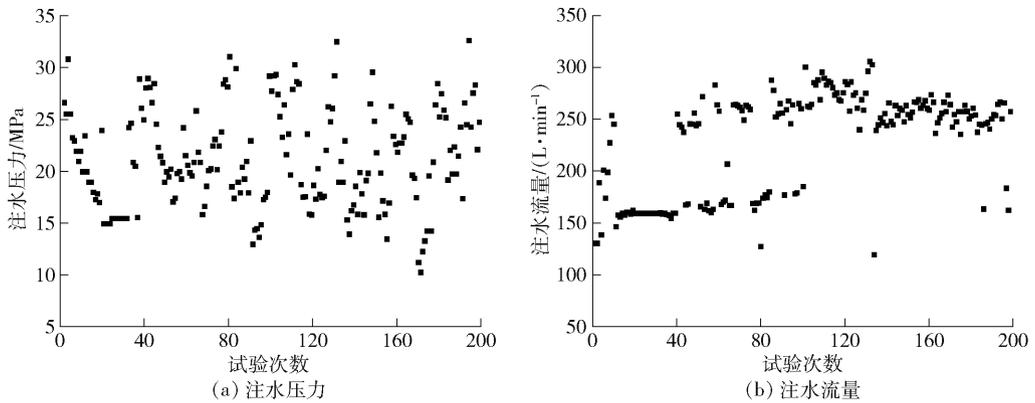


图10 水压致裂矿岩预处理试验注水压力和注水流量散点图

4.3 矿岩崩落效果分析与评价

矿岩崩落效果主要采用崩落速率和出矿块度两个指标进行评定^[20]。文章对铜矿峪矿410 m中段5号矿体首采区采用水压致裂矿岩预处理后的矿岩崩落效果进行了跟踪调查与分析。

1) 崩落速率

2021年7月19日采用钻孔摄像法观测铜矿峪矿410 m中段5号矿体首采区5#压裂钻孔崩落顶板发展现状,具体如图11所示。从图中可以看出,当钻孔摄像探头下放至孔内57.63 m深度时,已到达崩落顶板边界,图中黑色区域即为崩落顶板与崩落矿岩之间的空区。图12中列出了5号矿体首采区拉底爆破实施后5#压裂钻孔在不同时期监测得到的崩落顶板标高。从图中测量的崩落顶板变化可以看出,崩落速率呈现5个变化期。第1变化期:2021年3月30日—6月6日(68天)的崩落速率约0.06 m/d;第2变化期:6月7日—7月19日(43天)崩落速率约0.17 m/d;第3变化期:7月20—27日(8天内)崩落速率约0.85 m/d;第4变化期:7月28日—8月20日(24天内)崩落顶板标高未见变化(崩落速率为0);第5变化期:8月21日—9月30日(41天内)崩落速率约1.73 m/d。

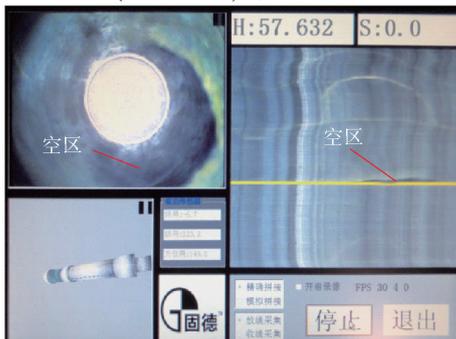


图11 5#压裂钻孔崩落顶板观测

上述监测期内平均崩落速率约0.50 m/d,通过与铜矿峪矿530 m中段首采区平均崩落速率(0.12 m/d)比较发现,410 m中段首采区水压致裂矿岩预处理实施后矿岩崩落速率提高了3倍多。实践表明:铜矿峪矿410 m中段5号矿体首采区在2021年度实现了全年正常生产,矿山全年生产规模与2020年度基本持平,有效保障了该矿山转段过渡期的产能平稳衔接。

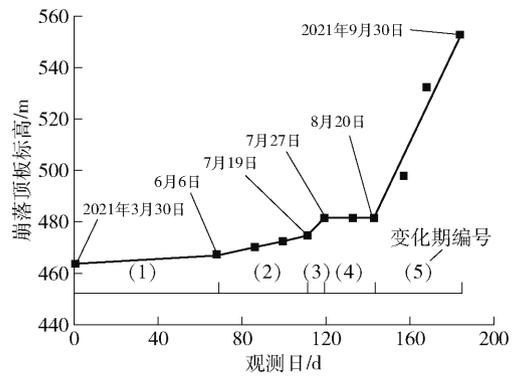


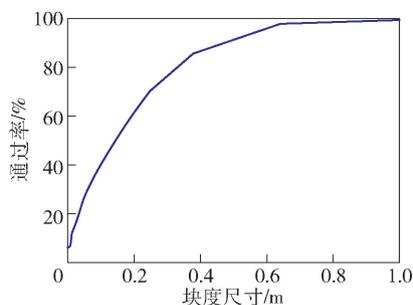
图12 5#压裂钻孔崩落顶板监测记录

2) 出矿块度

2023年2月10日,在410 m中段5号矿体首采区出矿口拍摄的矿岩块度可以看出(图13),不同出矿口出矿块度差异性较大,部分出矿口大块尺寸为1.5~2 m,基本无高位悬顶或卡斗现象。通过对现场出矿口矿岩块度统计分析^[21],将尺寸大于1.2 m的矿岩块度定义为大块,a-1中出矿口块度最大尺寸约0.72 m,大块率为0;a-2中出矿口块度最大尺寸约1.82 m,块度尺寸小于1.2 m约占78%,大块率约为22%;a-3中出矿口块度最大尺寸约1.85 m,小于1.2 m的块度约占72%,大块率约为28%。上述3个出矿口的平均大块率约16.6%。2021年3—



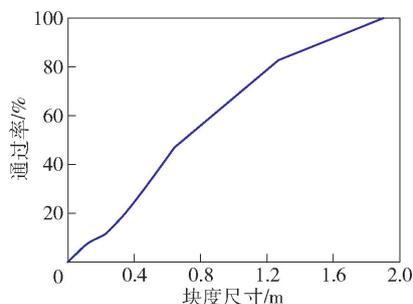
(a) a-1出矿口块度图像



(b) a-1出矿口块度统计



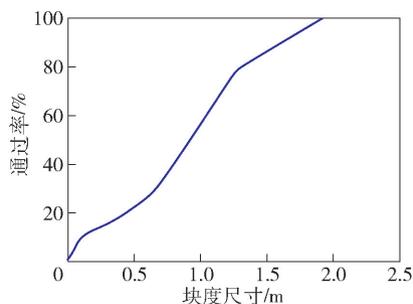
(c) a-2出矿口块度图像



(d) a-2出矿口块度统计



(e) a-3出矿口块度图像



(f) a-3出矿口块度统计

图13 410 m中段5号矿体首采区出矿口矿岩块度调查与统计分析

5月,铜矿峪矿对410 m中段5号矿体首采区出矿水平的大块情况进行统计,结果表明水压致裂矿岩预处理措施实施后投产初期大块率约为14.6%,远低于530 m中段投产初期35%的大块率,同期大块率减少了58.3%。大块率的降低有利于出矿作业的连续性,同时降低了二次破碎消耗的雷管、炸药等火工品,以及巷道的不稳定性,有效保障了矿山的生产能力与安全环境^[22]。

5 结论

通过我国首座自然崩落法矿山铜矿峪矿410 m中段水压致裂矿岩预处理技术的应用研究,获得了矿岩赋存特征,完成了水压致裂矿岩预处理试验,取得了较好的应用效果。具体结论如下。

(1)岩体赋存特征精细调查结果表明,铜矿峪矿410 m中段深部矿岩结构面发育程度低,导致未来生产期内矿岩出矿的大块率增大,增加了大块处

理的安全风险与生产成本。

(2)通过水压致裂矿岩预处理现场试验,有效增加了铜矿峪矿410 m中段5号矿体首采区矿岩内部裂隙的发育程度,实现首采区生产期矿岩崩落速率提高了3倍多、出矿口大块率降低了58.3%,有效保障了矿山转深部开采过渡期产能平稳衔接。

(3)初步形成了自然崩落法矿山矿岩赋存特征精细调查与水压致裂矿岩预处理技术,辅助致裂崩落效果明显,可为今后类似矿山自然崩落法开采可行性研究及生产技术推广应用提供技术支撑。

[参考文献]

- [1] 左更. 中国金属矿产品资源安全保供问题亟待全面思考与布局[J]. 冶金经济与管理, 2022(3): 4-6.
- [2] 刘育明, 李文, 陈小伟, 等. 硬岩金属矿自然崩落法开采中矿岩预处理技术研究[J]. 中国矿山工程, 2018, 47(3): 59-63(74).
- [3] 潘长良, 李立明, 曹平, 等. 自然崩落法矿岩崩落特性

- 及崩落规律[J]. 中南矿冶学院学报, 1994, 25(4): 441-445.
- [4] CHITOMBO G P. Caving mining: 16 years after Laubscher's 1994 paper 'Cave mining-state of the art' [J]. Mining Technology, 2010, 119(3): 132-141.
- [5] KATSAGA T, RIAHI A, DEGAGNE D O, et al. Hydraulic fracturing operations in mining: conceptual approach and DFN modeling example [J]. Mining Technology, 2015, 124(4): 255-266.
- [6] 刘育明. 自然崩落法的发展趋势及在铜矿峪矿二期工程中的技术创新[J]. 采矿技术, 2012, 12(3): 1-4 (28).
- [7] 刘育明, 李文, 王鑫, 等. 水压致裂矿岩预处理技术及其在自然崩落法矿山的应用实践[J]. 中国矿山工程, 2022, 51(3): 26-32.
- [8] 王培涛, 覃拓, 黄正均, 等. 基于三维点云的岩体结构面信息快速识别方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(3): 503-519.
- [9] 赵兴东, 刘杰, 张洪训, 等. 基于摄影测量的岩体结构面数字识别及采场稳定性分级[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(1): 127-133.
- [10] 马超锋, 李晓, 成国文, 等. 工程岩体完整性评价的实用方法研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3579-3584.
- [11] 贾锁刚, 万有余, 王倩, 等. 页岩各向异性力学特性微观测试方法研究[J]. 地质力学学报, 2021, 27(1): 10-18.
- [12] 彭华, 马秀敏, 姜景捷, 等. 赵楼煤矿 1 000 m 深孔水压致裂地应力测量及其应力场研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1638-1645.
- [13] 孟文, 田涛, 孙东生, 等. 基于原位地应力测试及流变模型的深部泥页岩储层地应力状态研究[J]. 地质力学学报, 2022, 28(4): 537-549.
- [14] 李远, 王卓, 乔兰, 等. 基于双温度补偿的瞬接续采型空心包体地应力测试技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(6): 1479-1487.
- [15] 张昕, 付小敏, 沈忠, 等. 利用岩石声发射 Kaiser 效应测试地应力的方法研究[J]. 中国测试, 2017, 43(10): 18-23.
- [16] 原野, 王志修, 于世波. 基于声波钻孔测试技术的岩体完整性分析[J]. 中国矿业, 2019, 28(s1): 85-87.
- [17] RAFIEE R, ATA EI M, KHALOOKAKAIE R. A new cavability index in block caving mines using fuzzy rock engineering system [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2015(77): 68-76.
- [18] RAFIEE R, ATA EI M, KHALOOKAKAIE R, et al. A fuzzy rock engineering system to assess rock mass cavability in block caving mines [J]. Neural Computing & Application, 2016(27): 2083-2094.
- [19] GOMEZ R, CASTRO R L, CASALI A, et al. A comminution model for secondary fragmentation assessment for block caving [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017(50): 11-23.
- [20] 王川婴, 胡培良, 孙卫春. 基于钻孔摄像技术的岩体完整性评价方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1326-1330.
- [21] 王鑫瑀, 曹鹏飞. 岩石爆破破碎块度分布测量方法综述[J]. 化工矿物与加工, 2020(6): 47-49.
- [22] 韩鹏举, 赵书刚. 无底柱分段崩落法开采过程的机械化应用研究[J]. 有色设备, 2022, 36(05): 14-18.