

深井开采

# 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

Pre-conditioning Technology by Hydraulic Fracturing and Its  
Application Practice in a Block Caving Mine

刘育明<sup>1</sup>, 李文<sup>1</sup>, 王鑫<sup>2</sup>, 夏长念<sup>1</sup>, 卞开文<sup>2</sup>, 吴岩<sup>2</sup>,  
陈小伟<sup>1</sup>, 黄海根<sup>2</sup>, 裴青彦<sup>2</sup>

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 山西北方铜业有限公司铜矿峪矿, 山西 运城 043700)

**摘要:**水压致裂矿岩预处理是自然崩落法矿山生产过程中的重要辅助崩落技术,对于改善矿岩崩落特性可以发挥重要作用。依托在我国首例自然崩落法矿山铜矿峪矿开展的410 m中段首采区水压致裂矿岩预处理技术应用研究项目,形成了自然崩落法矿山水压致裂矿岩预处理作业工艺与技术装备,分析了首采区矿岩崩落速率提升、大块率降低等方面取得的应用效果,实现了水压致裂矿岩预处理技术在国内自然崩落法矿山的成功应用,并提出了完善水压致裂矿岩预处理技术的进一步研究方向。

**关键词:**自然崩落法; 矿岩预处理; 水压致裂; 硬岩金属矿; 矿岩可崩性

中图分类号: TD862

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2022)03-0026-07

**Abstract:** Pre-conditioning by hydraulic fracturing is an important auxiliary caving technology in the production process of block caving mine, which plays a vital role in improving rock cavability. Relying on the application research project of preconditioning by hydraulic fracturing at the start mining area of 410 m level in Tongkuangyu Copper Mine, the technology and related equipment of preconditioning by hydraulic fracturing in block caving mine were formed and successfully used in advancing caving rate and decreasing oversize rate. Some new study thoughts are given to promote hydraulic fracturing pre-conditioning technology.

**Key words:** block caving; pre-conditioning; hydraulic fracturing; hard rock metal mine; cavability

## 1 前言

自然崩落法采矿技术是一种可实现地下矿产资源低成本、高效率开发的采矿方法,主要适用于开采矿体厚大、陡倾角、矿岩完整性差的矿床,发展至今已有120多年历史,在全球范围内20多个国家/地区的50余座矿山成功应用,主要以开采铜/金/钼等矿石为主。国际上知名的自然崩落法矿山主要有智利的El Teniente矿、El Salvador矿,澳大利亚的Cadia East矿、Northparkes矿、Ridgeway矿,南非的

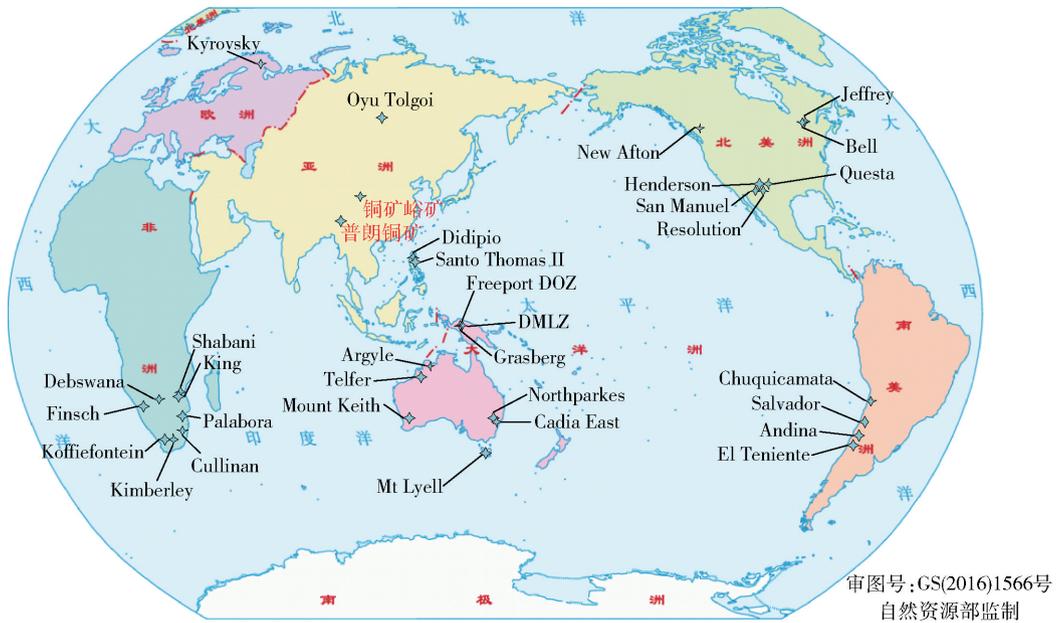
Palabora矿,美国的Henderson矿,印尼的Deep Ore Zone(DOZ)矿以及中国的铜矿峪矿、普朗铜矿等,全球在产或在建自然崩落法矿山分布如图1所示。鉴于自然崩落法采矿技术在生产成本及规模等方面的突出优势,近些年受到了国际矿业界的广泛关注,一批新的自然崩落法开采矿山正在逐渐形成,如智利丘基卡马塔(Chuquicamata)铜矿、塞尔维亚贾玛(Jama)铜矿等。

自然崩落法采矿技术是随着新技术和新装备的应用而不断发展的。刘育明等人<sup>[1]</sup>结合国际自然崩落法采矿技术发展现状并依托在我国铜矿峪矿、普朗铜矿等自然崩落法矿山的长期工程实践和技术积累基础上,总结形成了现代自然崩落法开采理论与技术,对自然崩落法采矿技术的发展趋势进行了详尽阐述。其中,越来越多的硬岩矿山采用自然崩落法开采技术是未来的发展趋势之一。硬岩矿山自然崩落法开采成功与否的关键在于其矿岩崩落特

[作者简介] 刘育明(1964-),男,湖南衡山人,教授级高级工程师,现任中国恩菲工程技术有限公司副总工程师,主要从事金属矿山采矿设计咨询与技术研究工作。

[基金项目] 创新方法工作专项《深部金属矿产资源开发多创新方法集成应用研究与示范》(2019IM050300)

[引用格式] 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.



审图号:GS(2016)1566号  
自然资源部监制

(世界地图引自标准地图服务网站)

图1 全球在产/在建自然崩落法矿山分布图

性,矿岩崩落特性直接影响自然崩落法矿山生产过程中的大块率、崩落速率、卡斗/悬顶、崩落中止成拱等问题。为了改善硬岩矿山的矿岩崩落特性,国外一些自然崩落法矿山在生产过程中逐渐形成并应用了矿岩预处理技术<sup>[2]</sup>,即通过一种(或一组)弱化自然崩落法矿山采场矿块的人工措施在矿体内部制造人工裂隙改变矿体的结构特征以增强矿体的可崩性使矿体保持持续稳定崩落并达到期望的破碎块度。现阶段矿岩预处理已成为国外自然崩落法矿山生产过程中的常规作业,采用的方法包括水压致裂矿岩预处理、钻孔爆破矿岩预处理以及两者的联合应用<sup>[3]</sup>。

水压致裂矿岩预处理是当前自然崩落法矿山应用效果较好的一种矿岩预处理技术,在国外矿山的应用研究已较为成熟,但相关的公开可获取资料较少,极大地限制了我国自然崩落法采矿领域技术的发展。我国在水压致裂矿岩预处理技术方面的研究和应用还处于起步阶段,中国恩菲工程技术有限公司自然崩落法采矿技术团队在国内最早开展金属矿山坚硬岩体水压致裂矿岩预处理技术研究<sup>[4-5]</sup>,并在国内首座自然崩落法矿山铜矿峪矿进行了现场工业试验研究。为了促进我国自然崩落法采矿技术的不断发展与创新,本文依托铜矿峪矿水压致裂矿岩预处理研究项目,介绍了自然崩落法矿山水压致裂矿岩预处理成套技术装备及作业工艺,分析水压致裂矿岩预处理作业过程参数、现象及压裂效果,总结

形成适用于我国自然崩落法矿山的水压致裂矿岩预处理技术,为国内矿山及科研机构开展类似研究提供参考借鉴。

## 2 水压致裂矿岩预处理技术

为了改善自然崩落法矿山的矿岩崩落特性,国外学者提出了“矿岩预处理”的概念,通过人工工程在崩落开始前对待崩落矿体进行处理实现矿岩崩落特性的改变。水压致裂技术发展至今已有几十年的历史,最早应用于油气开采领域改善储层的渗透性,随后被推广应用在煤矿坚硬顶板卸压增透、深部地应力测量等领域。国外矿业学者将水压致裂技术引入到自然崩落法矿山矿岩预处理领域并得到了较好的应用效果,目前已成为自然崩落法矿山应用最为广泛的矿岩预处理技术,在改善矿岩崩落特性、降低大块率及矿震等级等方面发挥了重要作用。水压致裂矿岩预处理技术是指按照压裂钻孔布置方案施工深钻孔通达待崩落矿体并在钻孔中按照一定间距逐段封隔注入高压水使钻孔孔壁产生新裂隙或扩展原生裂隙,上述裂隙在持续注入的高压水驱动作用下向外持续扩展延伸,实现钻孔全孔段矿岩体的压裂处理。

水压致裂矿岩预处理技术在国外自然崩落法矿山已有十多年的研究和应用经验,澳大利亚的 Cadia East 矿<sup>[6]</sup>、Northparkes 矿、智利的 El Salvador 矿<sup>[7]</sup>、El Teniente 矿<sup>[8]</sup>等是较早开展水压致裂矿岩预处理

技术研究的自然崩落法矿山。近几年,一些新近采用自然崩落法开采矿山也开展了水压致裂矿岩预处理技术应用研究,例如智利的 Chuquicamata 矿<sup>[9]</sup>、印尼的 DMLZ 矿<sup>[10]</sup>等。图2所示是 Cadia East 矿在 PC1-S1 矿块开展的水压致裂矿岩预处理工业试验钻孔布置及装备系统图。压裂钻孔施工巷道位于 PC1-S1 矿块上部,钻孔为下向深孔且呈交错布置,压裂钻孔系统主要包括高压注水泵、跨位式封隔器、钻机、储水箱等。

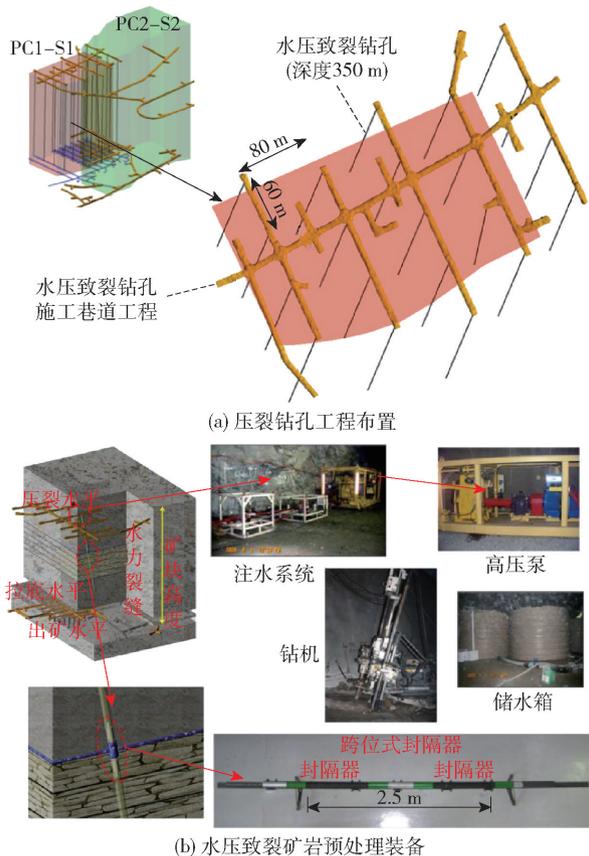


图2 澳大利亚 Cadia East 矿水压致裂矿岩预处理工程

## 3 工程应用案例

### 3.1 工程概况

铜矿峪矿位于山西省运城市垣曲县,是山西北方铜业有限公司的主营矿山,于1958年1月开工建设,距今已有六十多年的开采历史。铜矿峪矿以古老的斑岩铜矿著称,主要赋存于变钾质基性火山岩层内,主矿体有两条(4#和5#矿体),两矿体在平面上呈巨大透镜状,倾向北西,倾角 $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$ ,沿倾斜为似板状;两矿体在空间上平行展布,间距约为110~130 m,5#矿体位于4#矿体下盘。

现阶段,铜矿峪矿正处于二期工程开采阶段,设

计生产规模约600万t/a,采用胶带斜井-辅助斜坡道-盲混合井联合开拓的铲运机出矿自然崩落法<sup>[11]</sup>。铜矿峪矿二期工程分成两个中段分步开采:530 m中段开采530~690 m之间矿体,于2008年开始基建施工,2010年6月开始拉底爆破,目前530 m中段出矿工作已接近尾声;410 m中段开采410~530 m之间矿体,于2017年1月开始基建施工,目前已开始拉底出矿工作。

铜矿峪矿由530 m中段向410 m中段过渡期间的产能衔接稳定是矿山生产保障的重要工作,根据矿山生产进度计划安排,在410 m中段首采区需形成持续出矿能力,即需要首采区上覆矿岩在拉底工程实施后可保持持续稳定崩落。基于以上背景并考虑到铜矿峪矿深部矿岩的崩落特性变差的现状,提出了在410 m中段首采区开展水压致裂矿岩预处理作业以促进首采区矿岩的持续崩落。

### 3.2 水压致裂矿岩处理现场试验

#### 3.2.1 试验区区域及试验系统方案

中国恩菲工程技术有限公司与北方铜业铜矿峪矿合作开展了4#和5#矿体410 m中段首采区水压致裂矿岩预处理应用试验研究,其中5#矿体410 m中段首采区水压致裂矿岩预处理试验于2020年12月6日开始,并于2021年1月27日完成;4#矿体410 m中段首采区水压致裂矿岩预处理试验于2021年10月12日开始,并于2022年3月7日完成。图3所示为铜矿峪矿4#矿体410 m中段首采区范围(红色闭合线框)及压裂钻孔布置示意图,首采区面积约11 900 m<sup>2</sup>,压裂钻孔分别布置在530 m水平(1#和5#钻孔)和554 m水平(2#、3#、4#和6#钻孔),压裂钻孔为竖直孔,孔底位于410 m中段拉底工程顶部水平,530 m水平压裂钻孔深度约71 m,554 m水平压裂钻孔深度约95 m。

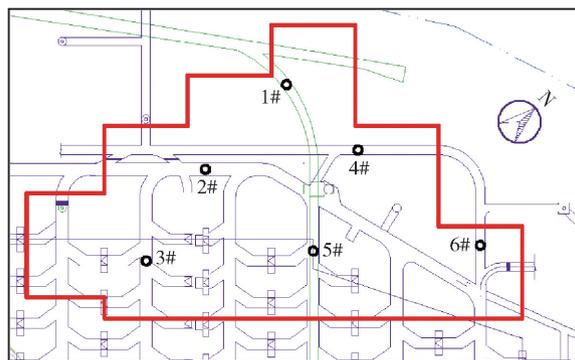


图3 4#矿体首采区范围及压裂钻孔布置示意图

按照如图4所示系统搭建了现场水压致裂矿岩预处理试验装备体系,包括高压注水泵、储水槽、输水管路、封隔器及监测系统等。现场试验过程中采用了不同流量规格的高压注水泵,小流量高压注水泵用于给封隔器注水,大流量高压注水泵用于给压裂段注水。图5所示为4#矿体现场试验过程使用的250TJ3型大流量高压注水泵,共2台,单台最大流量约159 L/min、最大许用压力55 MPa。储水槽

采用钢管架、木板、隔水帆布等搭建而成。封隔器采用橡胶厂定制加工的胶筒与金属管件、连接件等组装而成。高压输水管路由高压钢丝胶管和宝钢R780Ø50地质钻杆连接形成。图6所示为现场试验过程监测系统,该监测系统主要用于高压泵注水过程的压力及流量监测以及水压致裂过程水力裂缝扩展的微震信号监测。

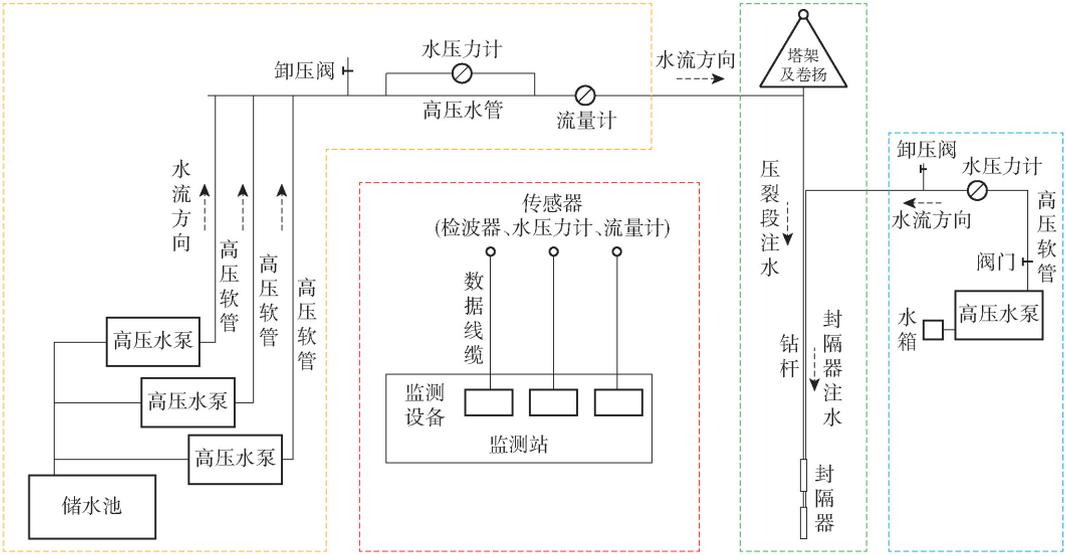


图4 水压致裂矿岩预处理试验系统



图5 大流量高压注水泵

现场水压致裂矿岩预处理作业前采用高清钻孔摄像仪对钻孔孔壁图像进行了采集,具体如图7所示,根据钻孔图像将孔内破碎段剔除出压裂计划,然后将组装完成并密封检验的封隔器下放至孔内压裂

段位置,按照如下压裂计划开展逐段压裂:钻孔40 m深度以下按照1 m间距压裂,钻孔40 m深度以上按照1.5 m间距压裂,孔口段10 m作为安全预留不压裂。

现场试验过程中封隔器注水与压裂段注水采用双管路。采用高压钢丝胶管将封隔器与小流量高压注水泵连接,试验开始时开启小流量高压注水泵给封隔器注水,当压力约为10 MPa时关闭注水阀门和关停注水泵。当封隔器膨胀压力保持稳定时开启大流量高压注水泵向压裂段注水,持续注水时间约35 min。现场试验过程中保持监测系统正常运行,实时采集水压致裂矿岩预处理作业过程的注水压力、

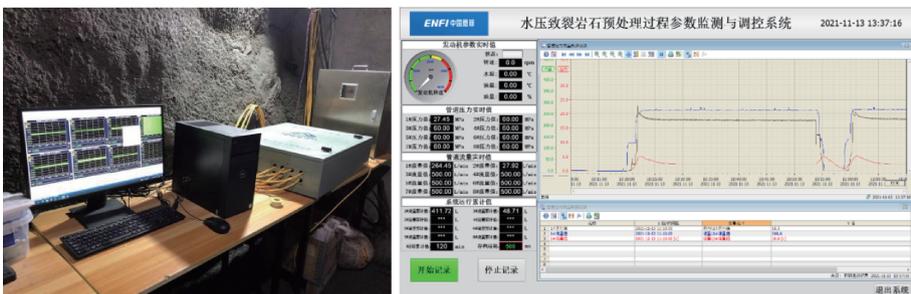


图6 现场监测软硬件系统

流量、微震信号等信息。



图7 现场钻孔孔壁图像采集

### 3.2.2 试验结果分析

#### 1) 水压致裂过程起裂压力分析

水压致裂过程起裂压力主要与矿岩体强度、地

应力水平等因素相关,该参数指标对于自然崩落法矿山水压致裂矿岩预处理作业高压注水泵设备性能选型具有重要意义。图8所示为铜矿峪矿4#矿体水压致裂矿岩预处理过程典型注水压力时程曲线,从曲线图中可以获取起裂压力指标。图9所示为铜矿峪矿4#矿体410 m中段首采区水压致裂矿岩预处理现场试验获取的不同压裂回次的起裂压力。从图中数据可以看出,最小起裂压力为3.2 MPa,最大起裂压力为42.4 MPa,平均值约为23.76 MPa。图10所示为铜矿峪矿4#矿体410 m中段首采区水压致裂矿岩预处理过程起裂压力频次分布图,从图中可以看出,起裂压力主要集中在20~30 MPa,约占总压裂次数的60%。

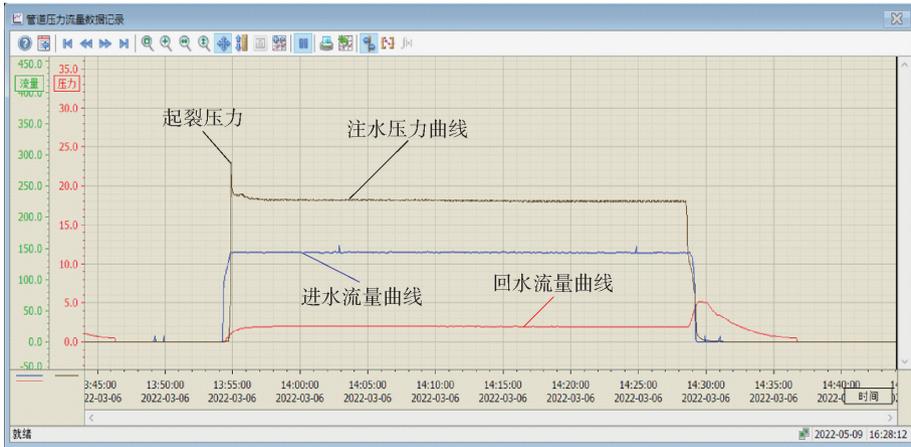


图8 水压致裂过程典型注水压力曲线

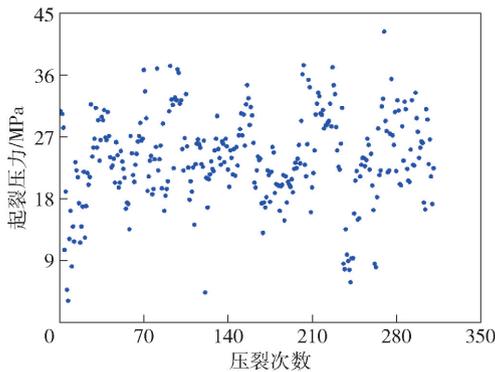


图9 铜矿峪矿4#矿体首采区水压致裂起裂压力散点图

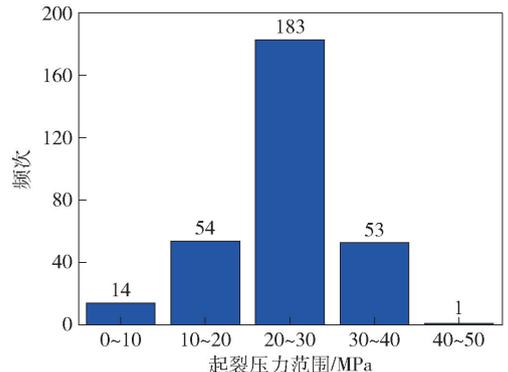


图10 铜矿峪矿4#矿体首采区水压致裂起裂压力分布频次图

#### 2) 水压致裂矿岩预处理效果分析

水压致裂矿岩预处理实施前后的钻孔孔壁图像裂缝变化是直观反映水压致裂矿岩预处理效果的有效方式。图11所示为铜矿峪矿4#矿体4#压裂钻孔在水压致裂矿岩预处理实施前后的钻孔孔壁图像(钻孔深度55~56 m和76~77 m),通过对比图像可以直观地看到在实施水压致裂后钻孔孔壁上新增

了细微裂隙,见图中箭头指示位置,水压致裂矿岩预处理可以有效增加岩体内部裂隙发育程度。

水压致裂矿岩预处理作业实施效果可以在自然崩落法矿山生产出矿过程中得到直观反映。铜矿峪矿5#矿体410 m中段首采区在水压致裂矿岩预处理作业实施后,实现了首采区矿岩的持续崩落,保障

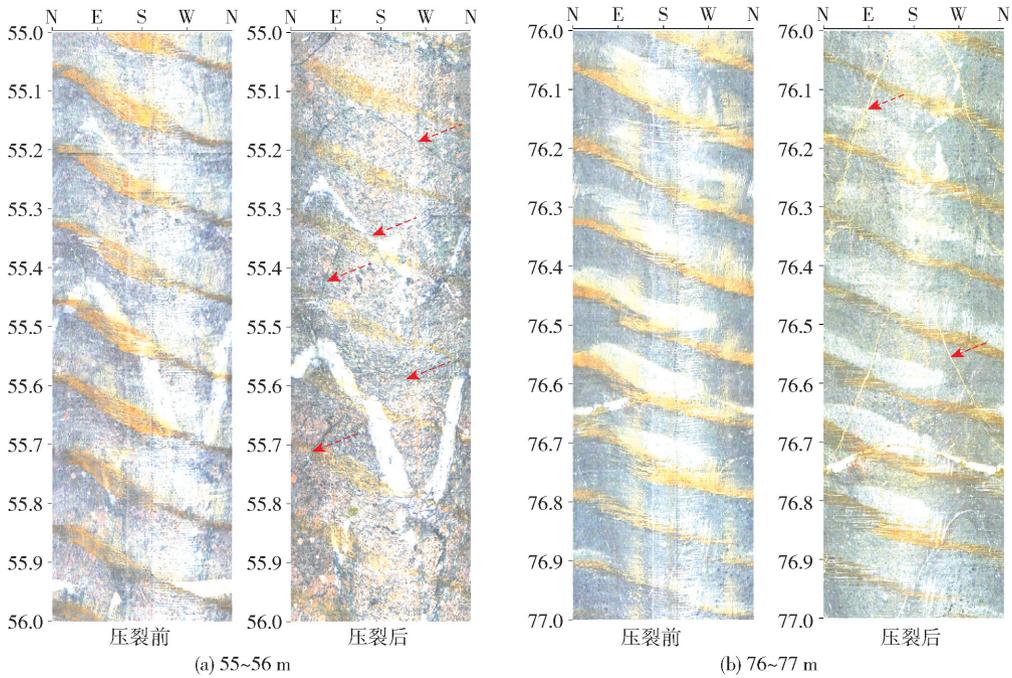


图 11 铜矿峪矿 4#矿体 4#钻孔水压致裂前后钻孔图像对比

了铜矿峪矿在 2021 年生产过渡期间的产能稳定。铜矿峪矿 5#矿体 410 m 中段首采区在实施拉底后,出矿前期利用压裂钻孔采用测深法对不同时间节点的崩落高度进行了现场实测,并计算了不同时期的崩落速率。出矿后期受拉底范围增大及出矿量增多影响,上部原先实施水压致裂矿岩预处理作业的工作水平巷道出现了破裂、垮塌,导致人员无法再次进入测量。表 1 中列出了铜矿峪矿 5#矿体 410 m 中段 5#压裂钻孔的实测数据。从表中数据可以看出,

表 1 铜矿峪矿 5#矿体 410 m 中段 5#钻孔崩落速率实测值

监测日期	孔口 标高/ m	崩落顶 板标 高/m	崩落 高度/ m	崩落 速率/ m·d <sup>-1</sup>	备注
2021-3-30	532.7	464.1			
2021-6-6	532.7	467.9	3.8	0.058	
2021-6-24	532.7	470.5	2.6	0.144	
2021-7-7	532.7	472.9	2.4	0.185	
2021-7-19	532.7	475.1	2.2	0.183	
2021-7-27	532.7	481.9	6.8	0.567	
2021-8-10	532.7	481.9	0	0.000	崩落停滞
2021-8-20	532.7	481.9	0	0.000	崩落停滞
2021-9-3	532.7	498.0	16.1	1.238	
2021-9-14	532.7	532.7	34.7	3.155	530 m 水平巷道观测
2021-9-30	532.7	552.7	20	1.333	554 m 水平巷道观测
平均崩落速率				0.498	

2021 年 9 月 3 日后矿山崩落速率急剧加快,在随后的 9 月 14 日和 9 月 30 日分别观察到了 530 m 水平巷道和 554 m 水平巷道的垮塌。截止 2021 年 9 月 30 日前的崩落速率平均为 0.498 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升了约 3 倍。

自然崩落法矿山出矿水平的大块率直接反映着矿岩的崩落特性。2021 年 3 月至 5 月,铜矿峪矿对 5#矿体 410 m 中段首采区出矿水平的大块情况进行了调查统计。结果表明,5#矿体 410 中段首采区水压致裂矿岩预处理实施后投产初期大块率为 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 20.4 个百分点。同时,根据矿山现场出矿水平大块块度分析,5#矿体 410 中段首采区产出大块块度一般为 1.5~3 m,多为中低位卡堵,特大块高位卡堵情况较少,相比 530 m 中段高位大块处理难度减小,矿山出矿水平大块处理作业安全系数得到提高。

#### 4 结论与展望

水压致裂矿岩预处理技术是自然崩落法采矿领域的核心关键技术,对于自然崩落法矿山改善矿岩崩落特性及推动自然崩落法采矿技术向硬岩矿山拓展应用可起到重要作用。本文在分析总结国内外自然崩落法山水压致裂矿岩预处理技术

研究成果基础上,详细介绍了研究团队在铜矿峪矿水压致裂矿岩预处理现场试验研究项目基础上形成的水压致裂矿岩预处理技术与装备体系,并分析了实际应用效果。基于研究过程发现和存在的一些问题,提出以下需要进一步研究的课题或方向。

(1)高性能封隔器结构设计与开发。封隔器是水压致裂矿岩预处理过程中的易损耗件,且直接关系到水压致裂矿岩预处理作业过程安全。在水压致裂矿岩预处理作业过程中封隔器的突然破裂失效将导致封隔器及孔内钻杆在注入的高压水作用下如同活塞一样被顶出,极大地影响水压致裂作业的安全与工作效率。

(2)水压致裂过程水力裂缝扩展监测与定位。通过对水力裂缝扩展监测与定位有助于了解水压致裂矿岩预处理作用机理,对于水压致裂矿岩预处理工艺改进具有重要意义。微震监测技术可能是水压致裂矿岩预处理过程水力裂缝扩展监测与定位的有效手段,但在微震信号的捕获、水力裂缝扩展微震信号识别以及微震信号精准定位等方面还需要深入研究。

#### [参考文献]

- [1] 刘育明. 现代自然崩落法开采理论与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2020.
- [2] Brown E T. Block Caving Geomechanics [M]. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 2007.
- [3] 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).
- [4] 刘育明, 陈晓云, 彭华, 等. 硬岩金属矿水压致裂矿岩预处理现场试验研究[J]. 中国矿山工程, 2020, 49(2): 1-4(14).
- [5] Li Wen, Liu Yuming, Chen Xiaowei, et al. Field test and numerical simulation of preconditioning by hydraulic fracturing in hard rock iron mine [C]. Eighth International Conference & Exhibition on Mass Mining, Santiago, Chile, 2020: 264-274.
- [6] Catalan A, Dunstan G, Morgan M, et al. An Intensive preconditioning methodology developed for the Cadia East panel cave project, NSW, Australia [C]. Proceedings of Massmin 2016, 2016: 1-15.
- [7] Chacon E, Barrera V, Jeffrey R, et al. Hydraulic fracturing used to precondition ore and reduce fragment size for block caving [C]. Proceedings of Massmin 2004, Santiago Chile, 2004: 529-534.
- [8] Pardo C, Rojas E. Selection of Exploitation Method Based on the Experience of Hydraulic Fracture Techniques at the El Teniente Mine [C]. Seventh International Conference & Exhibition on Mass Mining, Sydney, NSW, 2016: 97-103.
- [9] Flores G, Catalan A. A transition from a large open pit into a novel "macroblock variant" block caving geometry at Chuquicamata mine, Codelco Chile [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019, (11): 549-561.
- [10] Nugraha N, Bastiawarman R, Edgar I. Initial setup of hydraulic fracturing in Deep Mill Level Zone (DMLZ) underground mine, PT Freeport Indonesia, Papua, Indonesia [C]. Massmin 2020-Eighth International Conference & Exhibition on Mass Mining, Chile, 2020: 239-248.
- [11] 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).