

# 基于激光扫描的巷道不规则围岩表面对喷射混凝土支护特性影响分析<sup>①</sup>

金开玥<sup>1,2</sup>, 左宇军<sup>1</sup>, 郑禄璟<sup>1,2</sup>, 林健云<sup>1</sup>, 潘林<sup>2</sup>, 荣鹏<sup>1</sup>, 侯元将<sup>1</sup>

(1. 贵州大学矿业学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州锦丰矿业有限公司, 贵州 贞丰 562200)

**摘要:** 为研究钻爆法施工巷道围岩表面形状特征对喷射混凝土支护特性的影响, 以贵州锦丰金矿为工程背景, 采用三维激光扫描仪对巷道围岩表面进行扫描, 建立巷道三维模型, 使用三维软件剖取巷道实际断面形状, 对断面的几何特征进行分析。对标准断面和实测断面分别建立数值模型, 对比分析了喷射混凝土的内力变化及其对围岩的支护效果, 结果表明, 巷道不规则围岩表面导致喷射混凝土剪力和弯矩明显增大, 而对轴力的影响相对较小; 巷道围岩凹坑部位多为负弯矩极值点, 凸起部位多为正弯矩极值点; 在轴力和弯矩共同作用下, 凸起部位的喷射混凝土安全系数明显降低, 对围岩的支护作用减弱, 围岩容易出现拉伸破坏。

**关键词:** 巷道围岩; 围岩支护; 三维激光扫描; 钻爆法; 不规则围岩表面; 喷射混凝土; 支护承载能力图

中图分类号: TD353

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.03.003

文章编号: 0253-6099(2023)03-0011-05

## Analyzing Effects of Uneven Rock Surface on Performance of Shotcrete Support in Roadway Based on Laser Scanning

JIN Kaiyue<sup>1,2</sup>, ZUO Yujun<sup>1</sup>, ZHENG Lujing<sup>1,2</sup>, LIN Jianyun<sup>1</sup>, PAN Lin<sup>2</sup>, RONG Peng<sup>1</sup>, HOU Yuanjiang<sup>1</sup>

(1. College of Mining, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China; 2. Guizhou Jinfeng Mining Limited, Zhenfeng 562200, Guizhou, China)

**Abstract:** Guizhou Jinfeng Gold Mine was taken as an engineering example for investigating effect of geometric features of rock surface on the performance of shotcrete support in the roadway constructed by drilling and blasting. The rock surface of the roadway was scanned by using a 3D laser scanner, and a 3D geometric model was established for the roadway. The actual shape of cross-sections was created by slicing the geometric model with a 3D software for analyzing the geometric features. With numerical models respectively established for the designed and actual sections, the variation in internal forces of the shotcrete and its supporting effect for the surrounding rock were analyzed. The results show that uneven rock surface of a roadway can lead to significant increase in the shear force and bending moment of shotcrete, but relatively small effect on the axial force. It is found that concave part of surrounding rock in a roadway is subjected to maximum negative bending moment, while convex part is mostly subjected to maximum positive bending moment. Under the interaction of axial force and bending moment, the shotcrete on convex part has an obvious lower safety factor, leading to weakened support to the surrounding rock, thus tensile failure is prone to occur.

**Key words:** surrounding rock in roadway; surrounding rock support; 3D laser scanning; drilling and blasting; uneven rock surface; shotcrete; support capacity diagram

喷射混凝土支护具有及时封闭岩面、防止围岩水  
解风化、防止危石掉落、与围岩共同作用形成承载结构

等作用<sup>[1-2]</sup>。随着湿喷技术及装备水平的发展, 喷射混  
凝土支护在矿山的应用越来越广泛。采用钻爆法进行

① 收稿日期: 2022-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(51964007); 贵州省高层次创新型人才培养项目(黔科合人才(2016)4011号); 贵州省矿山动力灾害预警与控制技术科  
技创新人才团队项目(黔科合平台人才(2019)5619); 贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2022]一般247, 黔科合支撑[2021]一般516)

作者简介: 金开玥(1990—), 男, 贵州织金人, 硕士研究生, 主要研究方向为岩石力学和采矿工程。

通信作者: 左宇军(1965—), 男, 湖南湘乡人, 博士(后), 教授, 主要研究方向为岩石力学和采矿工程等。

地下岩质工程的开挖施工,不可避免造成围岩表面凹凸不平<sup>[3-4]</sup>。已有研究分别通过对地下开挖工程围岩表面的几何形状作出假设,运用多种方法研究了围岩不规则表面对混凝土结构的影响,表明围岩不规则表面对混凝土结构受力状态影响很大,对混凝土支护效果产生明显不利影响<sup>[5-10]</sup>。大多假设基于围岩表面具有特定几何形状,而实际上,巷道开挖后的围岩表面形状随机性较强。

本文以贵州锦丰金矿井下 150 m 中段巷道为研究对象,采用三维激光扫描设备对实际开挖巷道围岩表面进行扫描,建立三维巷道模型,在此基础上对巷道几何特征进行分析,进一步通过数值模拟对喷射混凝土的受力情况及支护效果进行分析,以期清晰认识实际巷道围岩不规则表面对喷射混凝土支护特性的影响,从而指导矿山喷射混凝土支护设计。

## 1 工程背景

贵州锦丰金矿位于贵州省黔西南州贞丰县境内,为典型断控卡林型金矿床,矿岩以砂岩及黏土岩为主。矿区内地质构造发育,岩体破碎,岩体质量 RMR 和 Q 系统分级分别为Ⅲ级和Ⅳ级。地下矿山采用斜坡道开拓,斜坡道及平巷工程均采用钻爆法进行施工,采用锚喷方式进行全断面支护,树脂锚杆长 2.4 m,支护间距 1.0 m×1.0 m 或 1.2 m×1.2 m,喷射混凝土强度为 C30,使用聚丙烯纤维进行增强,纤维添加量为 6 kg/m<sup>3</sup>,主斜坡道、中段巷等工程喷射混凝土设计厚度 100 mm。混凝土搅拌站建于地表,采用 Normet LF 600 混凝土罐车运至作业面后,由 Normet Spraymec 湿喷台车进行喷浆施工。

随着矿山开采深度逐步增加,喷射混凝土出现破坏的现象越来越明显。现场调查结果显示,喷射混凝土在巷道表面凸起部位破坏较为常见,也较为严重。

## 2 实测巷道围岩表面几何特征

选取 150 m 中段巷道作为研究对象,采用 ZEB Horizon 三维激光扫描设备对巷道进行现场扫描,扫描获取的点云数据经过解算处理后,导入到 Surpac 软件,得到如图 1 所示的巷道实体模型。

使用 Surpac 软件的实体剖切功能,在图 1 所示的剖切面 1、剖切面 2 和剖切面 3 所在位置分别对实体进行剖切,得到 3 个实测巷道断面,将实测断面和标准断面放在一起进行对照分析,以标准断面右墙角为起点,间隔 0.2 m,在实测断面和标准断面之间沿标准断

面轮廓线法线方向绘制短线,得到如图 2 所示的实测断面和标准断面对照图,图中短实线长度代表实测断面的超欠挖数值,超挖取正值,欠挖为负值,以超欠挖值为纵坐标、标准断面上各点到起点的弧线距离为横坐标,绘制了如图 3 所示的超欠挖曲线图,曲线波峰对应为巷道围岩表面凹坑部位,波谷则表示巷道围岩表面凸起。

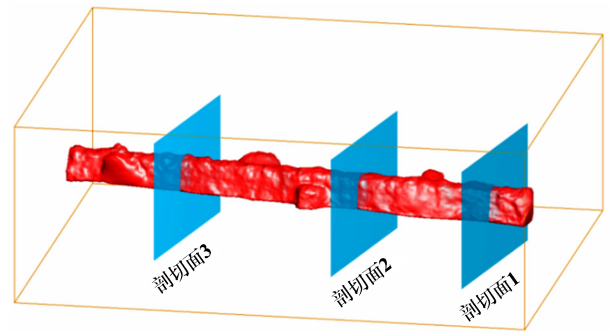


图1 巷道三维实体模型



图2 巷道实测断面与标准断面对照图

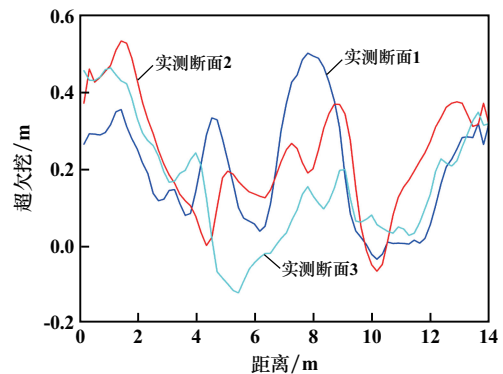


图3 实测断面超欠挖曲线

通过以上分析可以看出,150 m 中段巷道围岩表面并不规则,超挖现象较普遍,欠挖情况相对较少,各个断面形状并不一致,凸起和凹坑位置、大小各异,表现出明显的随机性。

## 3 数值模拟分析

### 3.1 岩体力学参数

取围岩中完整砂岩样品进行测试分析,得到其力学参数如表 1 所示。

表1 完整砂岩力学参数

密度/ ( $t \cdot m^{-3}$ )	单轴抗压 强度/MPa	抗拉强度/ MPa	杨氏模量/ GPa	泊松 比	黏结力/ MPa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )
2.70	44.1	3.8	35.3	0.26	3.8	37.0

在150 m中段进行工程地质调查,得到岩体RMR值及岩体质量分类结果如表2所示。

表2 岩体质量RMR分类结果

分级参数取值						RMR	岩体 分级
岩块强度	RQD	节理间距	节理条件	地下水	节理方向		
4	8	10	20	15	-5	52	III

通过Hoek-Brown经验公式进行估算<sup>[11]</sup>,得到岩体力学参数如表3所示。

表3 岩体力学参数估算结果

单轴抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	变形模量/ MPa	内聚力/ MPa	摩擦角/ ( $^{\circ}$ )
1.225	0.028	4 261	1.357	33.56

### 3.2 地应力条件

采用岩芯直径变形分析法(DCDA)测试得到150 m标高地应力结果如表4所示。

表4 地应力测试结果

最大水平主应力/MPa	最小水平主应力/MPa	垂直应力/MPa
9.70	3.37	14.36

### 3.3 支护材料力学参数

喷射混凝土及树脂锚杆的力学参数分别如表5及表6所示。

表5 喷射混凝土力学参数

密度/ ( $kg \cdot m^{-3}$ )	单轴抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	杨氏模量/ GPa	泊松 比
2 482	34.5	4.0	30.0	0.23

表6 树脂锚杆力学参数

直径/mm	杨氏模量/GPa	黏结力/( $N \cdot m^{-1}$ )
25	200	$8.3 \times 10^4$

### 3.4 模型建立

将标准断面、实测断面及相应的锚杆设计文件分别导入Phase2软件。围岩材料假设为塑性各向同性,破坏准则选择莫尔库伦准则。衬砌类型为增强混凝土,厚度100 mm。锚杆为全长锚固树脂锚杆,长度2.4 m,

间排距 $1.0 m \times 1.0 m$ ,拉拔力0.2 MN,无预应力。初始应力设为常数。

## 4 结果分析

### 4.1 喷射混凝土内力

#### 4.1.1 轴力

以巷道右墙角为起始点,沿逆时针方向取混凝土单元的轴力数据,与各单元至起始点的弧线距离一起绘制喷射混凝土轴力-距离图,如图4所示。从图4可以看出,巷道围岩表面的凹凸变化引起喷射混凝土轴力的小范围波动,但轴力数值变化不大,实测断面和标准断面条件下喷射混凝土轴力沿巷道周边的整体变化趋势基本一致。

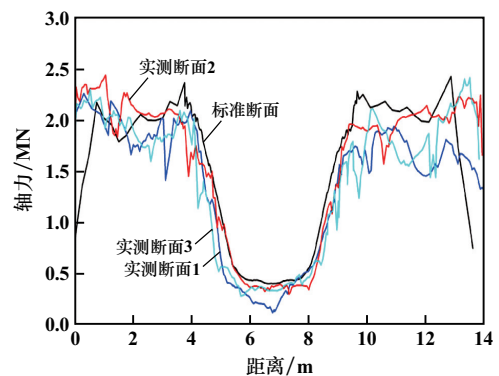


图4 喷射混凝土轴力-距离图

#### 4.1.2 剪力

以与绘制喷射混凝土轴力-距离图相同的方式绘制喷射混凝土剪力-距离图,如图5所示。从图5可以看出,标准断面条件下喷射混凝土剪力沿巷道周边变化并不大,但实测断面条件下喷射混凝土剪力波动较为明显,剪力数值明显增大。

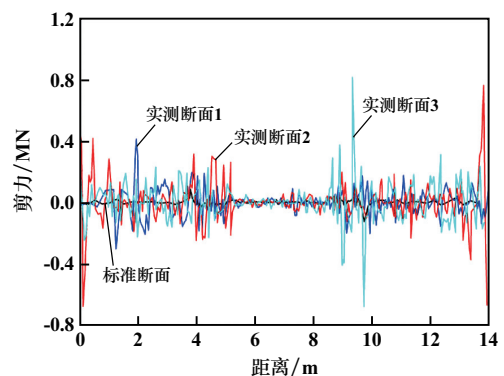


图5 喷射混凝土剪力-距离图

#### 4.1.3 弯矩

以与绘制喷射混凝土轴力-距离图相同的方式绘制喷射混凝土弯矩-距离图,如图6所示。从图6可以

看出,标准断面条件下喷射混凝土弯矩沿巷道周边波动较小,而实测断面条件下喷射混凝土弯矩沿巷道周边波动较大,弯矩数值明显增大,弯矩曲线波峰(正弯矩极值)产生于断面凸起处(对应于超欠挖曲线的波谷),弯矩曲线波谷(负弯矩极值)则产生于断面凹坑处(对应于超欠挖曲线的波峰)。

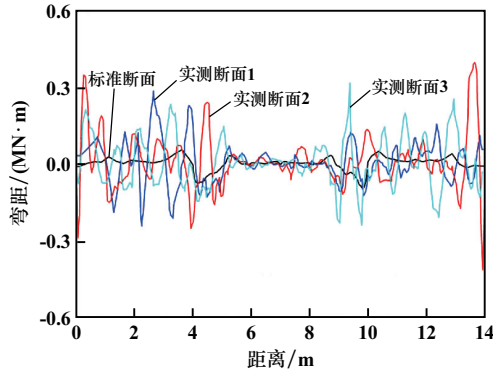
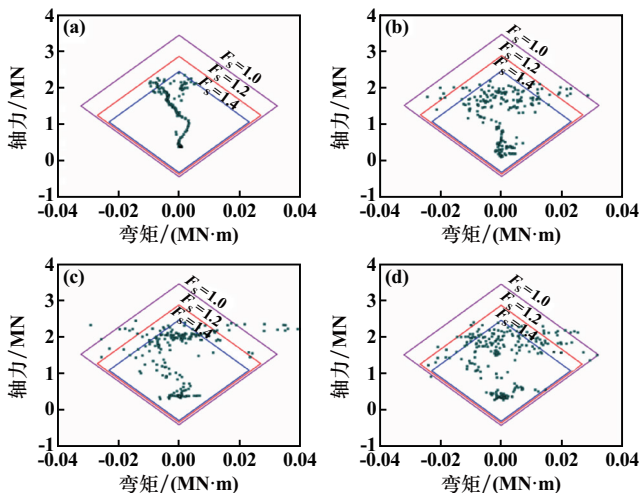


图6 喷射混凝土弯矩-距离图

#### 4.2 喷射混凝土支护承载能力图

支护承载能力图是一种混凝土支护设计方法<sup>[12]</sup>。该方法根据混凝土的材料力学性质,计算混凝土在不同安全系数  $F_s$  下的最大承载轴力、剪力和弯矩,并绘制不同安全系数下的承载力包络线,从而直观反映在轴力和弯矩或轴力和剪力共同作用下混凝土的安全性。

设置  $F_s$  分别为 1.0、1.2、1.4,通过数值计算,得到各个断面条件下喷射混凝土在轴力和弯矩共同作用下的承载力包络线以及各个混凝土单元的轴力、弯矩,绘制轴力-弯矩图如图 7 所示。

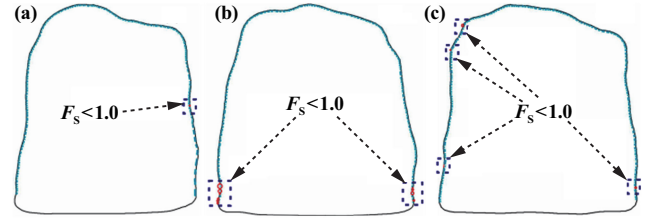


(a) 标准断面; (b) 实测断面 1; (c) 实测断面 2; (d) 实测断面 3

图7 轴力-弯矩图

从图 7 可以看出,标准断面各个混凝土单元轴力、弯矩数值上较为集中,  $F_s$  均大于 1.2。实测断面混凝

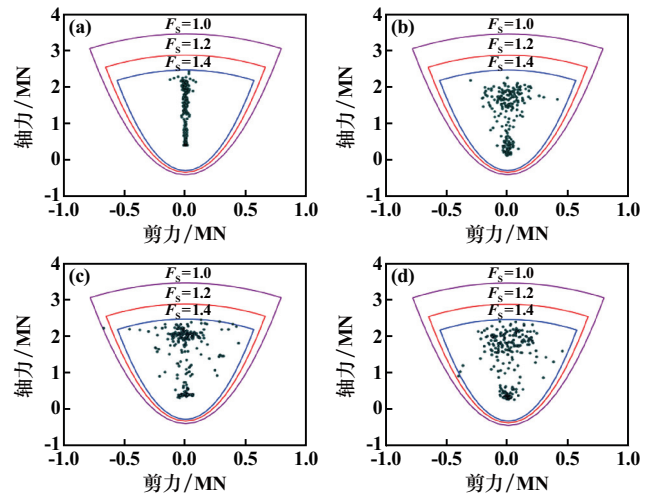
土单元轴力、弯矩较为离散,且部分单元的  $F_s < 1.0$ ,即这些部位将会产生破坏。将  $F_s < 1.0$  的单元位置在断面图上进行标示,如图 8 所示。从图 8 可知,产生破坏的部位主要在围岩表面凸起部位,由此证明,混凝土结构在凸起部位比在凹坑部位更易产生破坏,破坏形式为由轴力和弯矩共同作用而形成的拉弯破坏。



(a) 实测断面 1; (b) 实测断面 2; (c) 实测断面 3

图8  $F_s < 1.0$  的混凝土单元位置

同样,设置  $F_s$  分别为 1.0、1.2、1.4,通过数值计算,得到各个断面条件下喷射混凝土在轴力和剪力共同作用下的承载力包络线以及各个混凝土单元的轴力、剪力,绘制轴力-剪力图如图 9 所示。



(a) 标准断面; (b) 实测断面 1; (c) 实测断面 2; (d) 实测断面 3

图9 轴力-剪力图

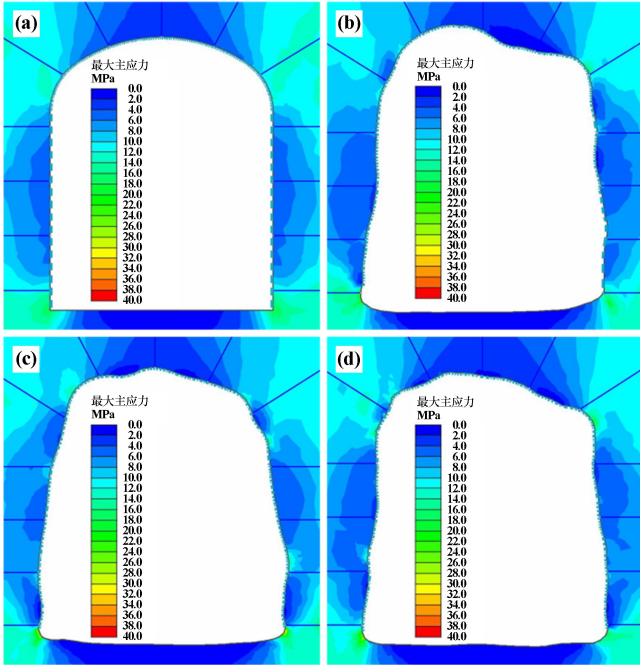
由图 9 可以看出,标准断面喷射混凝土轴力、剪力数值较为集中,安全系数均大于 1.4;实测断面条件下喷射混凝土的轴力、剪力数值相比标准断面较为离散,部分单元的安全系数介于 1.0~1.4 之间。由此证明,不规则围岩表面减小了喷射混凝土结构在轴力和剪力共同作用下的安全系数,但破坏的可能性相比在轴力和弯矩共同作用下破坏的可能性要小。

#### 4.3 喷射混凝土支护效果

##### 4.3.1 围岩最大主应力

围岩最大主应力计算结果如图 10 所示。由图 10 可见,标准断面条件下围岩最大主应力在拱顶和边墙

相对较小,实测断面条件下围岩凸起部分的最大主应力较周边更低,凹坑部位最大主应力高于周边位置。由此说明,喷射混凝土在凸起部位能够向围岩提供的支护抗力较小,凹坑部位则可向围岩提供更高的支护抗力。

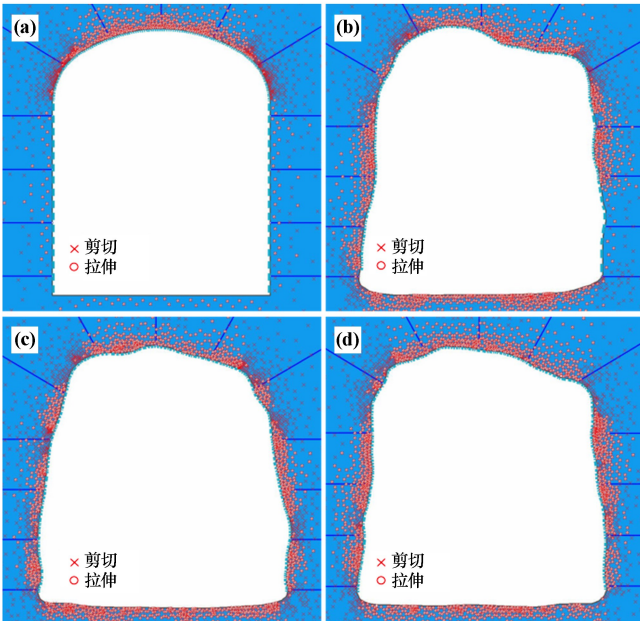


(a) 标准断面; (b) 实测断面1; (c) 实测断面2; (d) 实测断面3

图10 最大主应力计算结果

#### 4.3.2 围岩屈服单元

围岩屈服单元计算结果如图11所示。由图11可见,标准断面条件下围岩总体屈服单元数为1658,屈服多发生在顶板,边墙屈服单元相对较少;实测断面条



(a) 标准断面; (b) 实测断面1; (c) 实测断面2; (d) 实测断面3

图11 围岩屈服单元计算结果

件下围岩总体屈服单元数分别达到了2536、2698和2718,屈服单元产生的部位多为围岩凸起部位,出现了大量的拉破坏,而在凹坑部位的屈服单元相对较少。

## 5 结 论

1) 通过三维激光扫描得到的巷道实测断面与标准断面相比,存在不同程度的超欠挖,且超挖比欠挖更为普遍,实测巷道围岩表面凹坑和凸起的大小、位置随机性较强。

2) 喷射混凝土剪力和弯矩受巷道不规则围岩表面影响很大,围岩表面的凹凸起伏导致剪力和弯矩明显增大;围岩凸起部位多为正弯矩极值点,凹坑部位多为负弯矩极值点;围岩不规则表面对喷射混凝土轴力的影响相对较小。

3) 在相同的混凝土力学参数及支护厚度条件下,巷道不规则围岩表面降低了喷射混凝土整体安全系数,其中在围岩凸起部位安全系数降低较为明显;在轴力和弯矩共同作用下,喷射混凝土在围岩凸起部位容易产生弯拉破坏。

4) 喷射混凝土在巷道围岩表面凸起部位的支护能力明显弱于在凹坑部位的支护能力,围岩在凸起部位更容易产生破坏。

### 参考文献:

- [1] 杨锡祥,韩悦,刘宁,等. 软岩巷道锚网喷支护技术研究[J]. 矿业研究与开发, 2018,38(6):11-15.
- [2] LI L, WU A, WANG Y, et al. Mechanism of wet shotcrete interacting with rock in support systems[J]. Journal of Central South University, 2013,20(3):821-829.
- [3] 郭学庭,李腾,王乃伟,等. 掘进巷道节理组分析及爆破参数优化分析[J]. 矿冶工程, 2021,41(4):24-28.
- [4] 耿晓杰,吴顺川,高永涛,等. 基于多因素评价的隧道围岩质量与超欠挖关系[J]. 2014,35(11):3240-3246.
- [5] Moorak Son, Edward J. Cording. Ground-liner interaction in rock tunneling[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2007,22(1):1-9.
- [6] Malmgren Lars, Nordlund Erling. Interaction of shotcrete with rock and rock bolts—A numerical study[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008,45(4):538-553.
- [7] Lee Seung-do. Numerical analysis for irregular shotcrete on uneven tunnel perimeter[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010,47(3):488-495.
- [8] Ping Zhang, Ering Nordlund. A 3DEC Numerical Analysis of the Interaction Between an Uneven Rock Surface and Shotcrete Lining[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021,54(5):2267-2289.
- [9] 李树忱,朱林,孙爱花,等. 超欠挖状态下支护结构的力学特性研究[J]. 煤炭学报, 2017,42(11):2817-2825.

大,冲击搅动起来的底质淤泥越多,在水体中形成的污泥浓度越大,对水体造成的影响越大。

2) 降低输送系统水泵油压,输送系统脱泥排放的污泥浓度明显降低;而增加输送系统水泵油压时,输送系统脱泥排放的污泥浓度增大速度较慢,主要是被捕捉系统捕捉至输送系统的底质淤泥的量有限,输送系统排出的污泥浓度也有限。

3) 海底采矿车进行采矿作业时,在不降低海底采矿车采集率的前提下,为了降低污泥浓度,应尽量采用喷嘴系统水泵和输送系统水泵较低油压工况条件。

### 3 结 语

1) 在海底多金属结核水力式集矿系统中,输送系统脱泥排放产生的污泥浓度远高于捕捉系统扰动底质淤泥产生的污泥浓度,输送系统脱泥排放的污泥是产生水体浑浊的主要原因之一。

2) 在海底水力式集矿系统试验过程中,监测到的污泥浓度呈现先迅速上升后快速下降的变化趋势,随着试验的进行,水体中污泥浓度迅速增加,集矿试验结束后污泥浓度快速下降,直至恢复到初始浓度状态,说

明在集矿试验过程中,被搅动和捕捉的大颗粒底质泥沙受重力作用会快速沉降至水底。

#### 参考文献:

- [1] 王春生,周怀阳. 深海采矿对海洋生态系统影响的评价Ⅱ. 底层生态系统[J]. 海洋环境科学, 2001,20(2):32-37.
- [2] 丁忠军,孙永福,高 伟,等. 深海采矿潜在环境影响因素及监测技术体系研究[J]. 海洋开发与管理, 2021,38(7):73-83.
- [3] ISA. Recommendations for the guidance of contractors for the assessment of the possible environmental impacts arising from exploration for marine minerals in the Area[EB/OL]. <https://www.isa.org.jm/document/isa251tc6>.
- [4] Durden J M, Lallier L E, Murphy K, et al. Environmental Impact Assessment process for deep-sea mining in 'the Area'[J]. Marine Policy, 2018, 87:194-202.
- [5] 李小艳,程阳锐,郑 皓,等. 新一代海底履带式集矿车“鲲龙500”行走性能分析[J]. 矿冶工程, 2020,40(5):1-4.
- [6] Cho S G, Park S, Choi S, et al. Multi-objective design optimization for manganese nodule pilot miner considering collecting performance and manoeuver of vehicle[C]//ISOPE ocean mining & gas hydrates symposium. 2013.

引用本文: 陈时平,卓晓军,李 俊,等. 海底多金属结核水力式集矿系统产生的污泥浓度分析[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):16-19.

(上接第15页)

- [10] 王明年,万姜林,杨其新. 隧道超欠挖的力学效果分析[J]. 西南交通大学学报, 1996(6):3-8.
- [11] Hoek E, Brown E T. The Hoek-Brown failure criterion and GSI-2018 edition[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019,11(3):445-463.
- [12] Carranza-Torres C, Diederichs M. Mechanical analysis of circular

liners with particular reference to composite supports. For example, liners consisting of shotcrete and steel sets[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009,24(5):506-532.

引用本文: 金开玥,左宇军,郑禄琛,等. 基于激光扫描的巷道不规则围岩表面对喷射混凝土支护特性影响分析[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):11-15.

## 关于检测学术不端的公告

为弘扬良好学术风气,保护知识产权,防止抄袭、伪造、篡改、不当署名、一稿多投、一个学术成果多篇发表等学术不端行为,本刊与中国学术期刊(光盘版)电子杂志社合作,由中国学术期刊(光盘版)电子杂志社学术不端文献检测中心对本刊网络版刊登的文章进行系统检测,并按照“《中国学术期刊网络出版总库》删除学术不端文献暂行办法”,对出现以上学术不端行为的文章作出严肃处理。

特此公告!

矿冶工程杂志编辑部

2023年6月