

文章编号: 1004-4051(2024)02-0168-07

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20230503

## 复杂地形条件下充填工艺研究及应用

王旭<sup>1,2,3</sup>, 李闯<sup>1,2,3,4</sup>, 法源<sup>1,2</sup>, 古亚洲<sup>1,2,3</sup>

(1. 低品位难处理黄金资源综合利用国家重点实验室, 福建上杭 364204;

2. 紫金矿业集团股份有限公司, 福建上杭 364200;

3. 紫金(长沙)工程技术有限公司, 湖南长沙 410114;

4. 中国矿业大学(北京), 北京 100083)

**摘要:** 在构建高效绿色环境友好型矿山指导思想下, 全尾砂胶结充填采矿法因其具备处理尾砂及控制围岩变形、降低开采对地表环境影响的优点, 成为了矿山安全、高效、绿色开采的关键支撑技术, 得到了全面的推广应用。在矿山应用过程中, 尾砂料浆多采用管道运输, 而在以陡峭山谷为主的复杂地形条件下, 特别是长距离、大落差、反坡输送过程中, 极易出现堵管、爆管, 甚至损坏输送泵等问题, 成为了限制大规模充填的瓶颈问题。本文以武里蒂卡金矿为例, 在开展系统性试验研究获取完整充填试验数据的基础上, 结合矿山总图布置特点、地形条件及采空区空间相对区域位置等因素, 进行尾砂输送方案对比优选, 首次提出适应大落差山地条件的压滤尾砂缆车运输再造浆充填工艺方案, 并在现场成功实施和运行。矿山生产运行情况表明: 单套充填系统即可满足矿山 3 000 t/d 的生产需求, 充填料浆似膏体态, 系统运行稳定, 配比参数精准, 充填质量有保障。压滤尾砂缆车运输再造浆工艺方案具有流程短、占地少、效率高、运行经济可靠等优点, 在大落差山地条件下该充填工艺能够实现充填物料高效运输、制备及低成本充填, 具有较好的推广应用意义。

**关键词:** 压滤尾砂; 充填工艺; 尾砂反坡输送; 缆车运输; 似膏体充填; 复杂地形

**中图分类号:** TD853 **文献标识码:** A

## Research and application of filling technology under complex terrain conditions

WANG Xu<sup>1,2,3</sup>, LI Chuang<sup>1,2,3,4</sup>, FA Yuan<sup>1,2</sup>, GU Yazhou<sup>1,2,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Low-grade Refractory Gold Ores, Shanghang 364204, China;

2. Zijin Mining Group Co., Ltd., Shanghang 364200, China;

3. Zijin(Changsha) Engineering Technology Co., Ltd., Changsha 410114, China;

4. China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Under the guidance of building an efficient, green and environment-friendly mine, the full tailing cemented filling mining method has been widely promoted and applied as a key support technology for safe, efficient and green mining due to its advantages of treating tailing, controlling

收稿日期: 2023-07-12 责任编辑: 聂虹

基金项目: “高寒及生态脆弱区露天开采区域水系统损伤防控技术”项目资助(编号: 2022YFC2903902)

第一作者简介: 王旭(1985—), 男, 汉族, 湖南岳阳人, 硕士, 高级工程师, 主要从事充填工艺、充填胶结剂及充填采矿法等方面的研究工作, E-mail: 258805458@qq.com。

通讯作者简介: 李闯(1986—), 男, 汉族, 辽宁沈阳人, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事采矿工艺方面的研究, E-mail: 47720791@qq.com。

引用格式: 王旭, 李闯, 法源, 等. 复杂地形条件下充填工艺研究及应用[J]. 中国矿业, 2024, 33(2): 168-174.

WANG Xu, LI Chuang, FA Yuan, et al. Research and application of filling technology under complex terrain conditions[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(2): 168-174.

surrounding rock deformation and reducing the impact of mining on the ground environment. In the process of mine application, the tailing slurry is mostly transported by pipeline. Under the complex terrain conditions dominated by steep valleys, especially in the process of long-distance, large drop and reverse slope transportation, problems such as pipe blocking, pipe explosion and even damage to the conveying pump are easy to occur, which become the bottleneck problem limiting large-scale filling. Taking Buriticá Gold Mine as an example, on the basis of systematic experimental research to obtain complete filling test data, combined with the characteristics of mine general layout, topographic conditions and the relative regional position of goaf space, the tailing transportation scheme is compared and optimized. For the first time, the pressure filter tailing cable tram transportation and reconstruction slurry filling technology scheme adapted to the conditions of large drop mountain is proposed, and it is successfully implemented and operated on site. The mine production operation shows that a single set of filling system can meet the production demand of 3 000 t/d in the mine. The filling slurry is paste-like, the system runs stably, the ratio parameters are accurate, and the filling quality is guaranteed. In summary, the technology scheme of transporting and reconstructing slurry by pressure filter tailings cable tram has the advantages of short process, less land occupation, high efficiency, economical and reliable operation. Under the condition of large drop mountain, the filling technology can realize the efficient transportation, preparation and low cost of filling materials, which has good popularization and application significance.

**Keywords:** filter pressing tailing; filling technology; tailing reverse slope transportation; cable tram transport; paste-like filling; complex terrain

## 0 引言

金属矿地下开采产生的采空区若不能及时处理极易引发坍塌、冒顶等问题。大量废石和尾砂堆存于地表也易引发泥石流、滑坡及溃坝等灾害事故。因此,将矿床开发过程中产生的固体废渣作为骨料充填采空区,同时解决了地表废渣堆存隐患和井下空区隐患,可谓“一废治两害”<sup>[1]</sup>。在保障矿床开采整体安全及矿区周边生态环境的前提下,提高地下矿产资源有效利用率和矿山企业经济效益。

充填技术已有近百年的发展历史,最初以就近处理井下固体废弃物为目的,逐渐发展为一种改善采矿环境、提高采矿指标的工艺技术。充填技术<sup>[2-3]</sup>发展的每个阶段都有其特殊的时代特征和技术特点,如20世纪40年代以前的干式充填<sup>[4]</sup>,主要以处理废弃物为目的;20世纪40—50年代的水砂充填<sup>[5]</sup>,主要以解决地表开采沉陷为目的;20世纪60—70年代的胶结充填,以低浓度尾砂充填<sup>[6]</sup>为主;20世纪80—90年代,以高浓度全尾砂充填<sup>[7-9]</sup>、膏体充填<sup>[10-11]</sup>为主。时至今日,充填工艺日趋成熟,充填采矿法因符合国家“绿水青山”发展理念而在全国大范围推广。

随着矿业开采活动的进行,易开采的平原露天矿石及浅部矿石资源逐渐枯竭,资源开发逐步向开采难度更大的深部<sup>[12]</sup>矿脉和高海拔<sup>[13]</sup>山地矿脉转变。在矿山充填技术应用中,大落差山地条件下的地下矿山充填受限于工业场地条件,往往面临物料输送技术难度大、投资成本高等诸多问题。本文针对大

落差山地条件下的充填行业瓶颈问题,从武里蒂卡金矿充填实际出发,首次提出压滤尾砂缆车运输方案,研究采用压滤尾砂缆车运输再造浆充填工艺,实现了大落差山地条件下充填物料高效运输、制备及低成本充填。该充填系统在武里蒂卡金矿的成功应用,为大落差山地条件下矿山规模化充填提供了新的思路与工程借鉴。

## 1 充填技术条件

武里蒂卡金矿位于哥伦比亚西北部的安提奥基省麦德林市西北约91 km处。矿区地形以陡峭山谷为主,海拔600~2 200 m,高差达1 600 m。武里蒂卡金矿矿业权范围内主要赋存金银,矿化带由多条平行的矿脉组成,矿脉走向长1 470 m,矿脉倾角大于55°,倾向延深1 860 m,矿脉厚度多在0.8 m以下,属于急倾斜极薄矿脉<sup>[14-17]</sup>。矿山探明Au金属储量为350 t、Ag金属储量为1 500 t,矿石品位为Au 9 g/t、Ag 30 g/t;矿区水文地质条件简单,工程地质条件为简单-中等。

矿山设计生产规模3 000 t/d,采用斜坡道+平硐联合开拓。一期开采标高+1 700~+1 200 m,选矿工业场地位于山谷,标高+1 000 m。设计采用中深孔空场嗣后充填法<sup>[18-20]</sup>,充填作为矿山生产中的重要一环,充填规模和充填体质量应满足采矿需求。

## 2 充填工艺方案确定

### 2.1 充填材料及试验结果

1) 选用矿山选矿厂的浮选全尾砂作为充填集料,

浮选尾砂产率 95%，日产尾砂量 2 850 t，尾砂产量可以满足采空区充填需求。胶凝材料选用当地散装水泥。

2) 基本理化性质试验：浮选尾砂主要成分是硅酸盐矿物，有效密度约 2.79 t/m<sup>3</sup>；尾砂中 -18 μm 颗粒占比 42.31%，-38 μm 占比 49.43%，总体颗粒较细。浓度 66% 的充填料浆基本不泌水，保水性好。尾砂浸出液中的有害成分含量小于《危险废物鉴别标准浸出毒性鉴别》(GB 5085.3—2007) 浸出液有害成分浓度限值，满足相关环保规范的要求。

3) 流动性试验：当水泥-全尾砂料浆浓度在 66%~70% 时，坍落度数值在 25~28 cm，料浆呈似膏体态，流平性好且无离析现象；流变参数测试结果显示，浓度在 66%~70% 时，不同水泥含量的料浆屈服应力区间为 30~100 Pa，黏度区间为 0.11~0.14 Pa·s，参考类似工程，料浆流变满足泵送要求。故推荐充填浓度 66%~70%。

4) 强度配比试验：充填浓度 66%~70%、水泥含量 4%~8% 时，28 d 试块强度为 0.3~0.9 MPa，满足采矿方法要求。

## 2.2 充填站选址

矿区山势陡峭，采选工业场地受限，可供选择的备选站址有 2 个，分别为备选站址 1：主平硐硐口西南侧 +1 050 m 标高建站，此处因毗邻选矿厂，水、电、路外部条件好，无需征地，尾砂输送投资及成本低，缺点为充填料浆需向上输送 150~650 m 不等，最大输送泵压超过 10 MPa，充填料浆输送技术难度大、风险高，充填工业泵投资及运营成本高；备选站址 2：回风斜井井口北侧 +1 715 m 标高建站，此处因毗邻回风斜井，水、电、路外部条件较好，无需征地，同时因地势高，充填料浆可以借助重力输送，大幅降低输送难度和输送泵压，节约充填料浆输送成本，缺点为尾砂需首先由选矿厂向上输送至充填站，需建设专门的尾砂输送系统，投资较高。

综合对比不难发现，两个备选站址的外部建设条件相当，但备选站址 1 存在充填料浆输送风险高的难题，若选择此处建站难以保证充填系统安全稳定运行，经与矿山商议后决定选择备选站址 2 建站，即回风斜井井口北侧 +1 715 m 标高建站。

## 2.3 尾砂输送工艺对比

充填站站址选定回风斜井井口 (+1 715 m)，选矿厂至充填站高差超过 700 m，水平距离 1 400 m，如何高效地将选矿厂尾砂输送至充填站成为充填工艺研究急需解决的关键难题。当地法律要求尾砂必须干排，因而尾砂浓密设施和尾砂压滤设施已建设完成。针对上述条件，开展了多种输送方式对比研究工作，由于篇幅问题，主要针对以下 2 种方案进行详细对比分析，具体分析如下所述。

1) 方案 1：高浓度尾砂浆泵压输送至充填站立式砂仓。在选矿厂设置高效深锥浓密机，高浓度尾砂泵送至充填站立式砂仓。干尾砂输送量为 60 t/h、1 440 t/d，浓密机浓缩后底流浓度不小于 60%，则尾砂输送流量 60 m<sup>3</sup>/h，向上扬送 730 m，水平输送 1 400 m，管道内径 110 mm，计算管道料浆输送阻力 14.88 MPa，采用充填工业泵两段接替输送，泵型号 HGBZ70.12.150，泵流量 70 m<sup>3</sup>/h，最大泵压 12 MPa，电机功率 150×2 kW。配套尾砂输送管选型为无缝钢管 Φ133×12(流速 1.71 m/s)，理论重量 35.81 kg/m。充填工业泵两用两备。

2) 方案 2：压滤尾砂缆车输送至充填站。设置缆车系统输送尾砂至充填站缓存斗，压滤尾砂输送量 140 t/h(含水率 12%)，向上输送 730 m，水平输送 1 400 m。缆车系统运行功率 353 kW，可变绳速范围 0~6 m/s，铲斗 26 个，间隔 30 s。

从投资、运营成本料浆制备浓度稳定性等方面对 2 种方案进行对比，见表 1。

表 1 尾砂输送方案分析比较表

Table 1 Analysis and comparison of tailing transportation schemes

输送方案	投资/万元	运营成本/(元/t)	料浆制备浓度稳定性影响
方案 1	1 600	7.6	立式放砂过程中浓度波动 1%~3%，整体稳定可行
方案 2	3 000	4.5	雨水天气引起部分时段浓度波动较大，整体稳定可行

由表 1 可知，2 个方案各自具有明显的投资优势和运营成本优势，方案 1 的前期投资优势明显；通过运营成本分析，在 4.5 年时两方案总费用(投资+运营成本)将相等，之后方案 2 经济优势逐步增加，以矿山总服务期 20 a 计算，方案 2 总费用约为方案 1 总费

用的 71%，故在矿山运营期间，方案 2 经济性指标更优；两种供料方式对充填料浆制备浓度均有不同程度的影响，但浓度整体稳定，满足充填生产需求。

综上所述，推荐方案 2 压滤尾砂缆车输送作为矿山充填系统尾砂输送工艺。

## 2.4 充填工艺及参数

在尾砂处理方式、尾砂输送方式以及充填站站址均已确定的前提下,最大限度地简化工艺流程,节约充填站用地,创新性地提出了压滤尾砂缆车运输再造浆充填工艺,工艺流程如图1所示。该充填工艺具有尾砂输送效率高、充填工艺流程短、充填站占地面积小、技术风险小等优点。

确定设置1套充填系统,技术参数如下:充填流量80~100 m<sup>3</sup>/h,充填浓度66%~70%,水泥添加量4%~8%,根据实际生产需求调节,系统连续运行最长时间24 h,一次最大充填量2 400 m<sup>3</sup>。

## 3 充填系统建设与运行

根据所采用的充填材料、充填工艺,结合武里蒂卡金矿矿体赋存条件及工业场地布置,在满足充填料浆泵压输送要求条件下,在山体中上部设置1个充填站(图2),充填站内设置1套充填系统。充填系统各部分按照主要功能可分为五大功能部分:尾砂脱水处理系统、尾砂输送系统、尾砂缓存给料系统、水泥给料系统、充填料浆制备和输送系统。

### 3.1 尾砂脱水处理系统

尾砂脱水处理系统由高效浓密机+陶瓷过滤机组成,高效浓密机将尾砂浆浓度提升至50%,陶瓷过滤机则进一步将尾砂含水率降低至12%左右,使尾砂呈松散滤饼状。浓密机技术参数:直径17 m,装机功率45 kW,处理能力112.5 t/h,底流浓度50%,溢流水浑浊度低于300 ppm。配套变频卧式离心泵2台,一用一备,泵送能力160 m<sup>3</sup>/h,扬程45 m,功率85 kW。陶瓷过滤机参数:3台(两用一备),单台处理能力为64 t/h,过滤机型号BY-160 m<sup>2</sup>,电机功率12 kW/台,压滤尾砂实物如图3所示。

### 3.2 尾砂输送系统

前端装载机铲运松散压滤尾砂至缆车装料斗,料斗下部的皮带定量供料至缆车吊桶,如图4所示。利用缆车将尾矿滤饼从压滤区(1 078 m)转运至充填站(1 724 m),直线距离约1.4 km,垂直高差730 m。缆车系统共有缆车斗20个,每斗空重1.2 t,斗容1.55 m<sup>3</sup>,最大载重1.5 t。

### 3.3 尾砂缓存给料系统

在缆车终点处,压滤尾砂排放到进料缓存斗,斗容10 m<sup>3</sup>。开始充填时,缓存斗将以一定速率供料至皮带输送机,如图5所示。输送机配备皮带秤,以便计量压滤尾砂重量。压滤尾砂浓度由操作员定期烘干测试并输入控制系统。

### 3.4 水泥给料系统

当以设计流量100 m<sup>3</sup>/h运行时,消耗水泥7.3 t/h,

日最大水泥消耗量为175 t/d。水泥仓设计存储360 t,以满足2 d的水泥用量需求。供水泥料时,打开旋转阀,水泥经过皮带秤计量,由螺旋输送机输送进入卧式连续搅拌机。旋转阀转速变频调整以改变水泥给

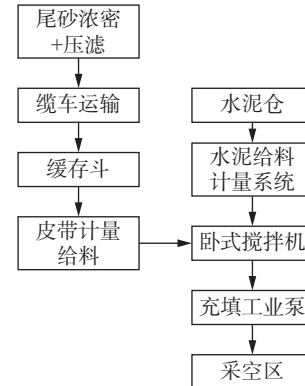


图1 武里蒂卡金矿充填工艺流程图

Fig. 1 Filling technology flow chart of Buriticá Gold Mine



图2 武里蒂卡金矿充填站

Fig. 2 Filling station of Buriticá Gold Mine



图3 经陶瓷过滤机压滤后的全尾砂

Fig. 3 Full tailing after being filtered by a ceramic filter



图4 缆车运输压滤尾砂

Fig. 4 Cable tram transportation of filter tailing

料量,水泥给料系统实物如图6所示。

### 3.5 充填料浆制备与输送系统

尾砂、水泥和水分别计量后按一定比例送入卧式双轴连续搅拌机,制备成浓度合适的充填料浆,制备好的充填料浆从搅拌机侧面排出并进入充填工业泵,然后将充填料浆泵送至待充空区。

卧式搅拌机型号 SIMEM MDC201 L,如图7所示,设计搅拌能力  $160 \text{ m}^3/\text{h}$ ,搅拌叶片转速  $53 \text{ rpm}$ ,功率  $100 \text{ kW}$ ,电机等级 IP54;充填工业泵型号 KSP220H (HD)XL,如图8所示。设计最大流量  $130 \text{ m}^3/\text{h}$ ,泵最大液压  $22 \text{ MPa}$ ,最大出口压力  $10 \text{ MPa}$ ,电机  $2 \times 330 \text{ kW}$ 。矿山主要共有2种充填管道,内径均为  $150 \text{ mm}$ ,主管道采用耐磨钢管,耐压等级不低于  $10 \text{ MPa}$ ,采场管道采用钢编复合管,耐压强度  $5.9 \text{ MPa}$ 。

### 3.6 充填系统运行

充填系统于2021年2月投入运行,截至2023年2月底,共计完成129个矿房的充填,总计充填方量  $47 \text{ 万 m}^3$ ,累计消耗水泥  $3.8 \text{ 万 t}$ 。

充填系统运行期间,各设备运转正常,控制系统

精准可靠。主要运行参数为压滤尾砂含水率  $11\% \sim 13\%$ ,充填流量  $60 \sim 90 \text{ m}^3/\text{h}$ ,充填浓度  $64\% \sim 68\%$ ,最长连续充填时间  $30 \text{ h}$ ,综合灰砂比  $1:16$ ,充填运营成本  $18 \text{ 元/t}$ 。充填料浆如图9所示。

## 4 结论

大落差山地条件下,如何安全、高效、大规模地向上充填采空区是充填行业共同面临的卡脖子问题。在此条件下实现大规模充填存在诸多技术难题,如



图7 卧式连续搅拌机

Fig. 7 Horizontal continuous mixer



图5 尾砂缓存给料系统

Fig. 5 Tailing buffer feeding system



图8 充填工业泵

Fig. 8 Filling industrial pump



图6 水泥给料系统

Fig. 6 Cement feeding system

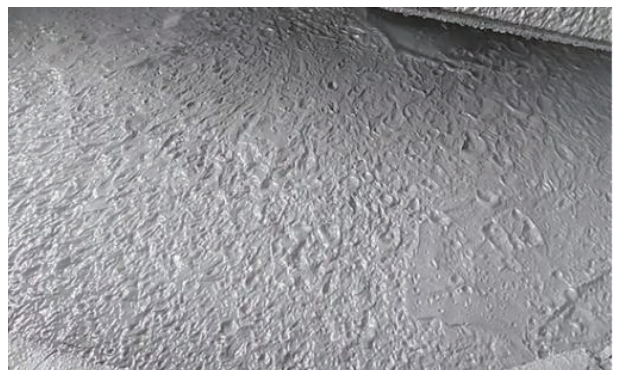


图9 武里蒂卡金矿全尾砂充填料浆

Fig. 9 Full tailing filling slurry of Buriticá Gold Mine

物料低浓度输送效率低且能耗大、物料高浓度输送技术难度大且风险高、充填工艺选择受制于工业场地面积等。针对上述问题,本文结合矿山总图布置特点、地形条件及采空区空间相对区域位置等因素,进行尾砂输送方案对比优选,创新性地提出适应大落差山地条件的压滤尾砂缆车运输再造浆充填工艺方案,该充填方案在武里蒂卡金矿成功实施和运行。项目成果总结分析如下所述。

1) 矿山生产运行单套充填系统即可满足矿山3 000 t/d生产需求,充填料浆似膏体态,系统运行稳定,配比参数精准。系统运行实际参数为压滤尾砂含水率11%~13%,充填流量60~90 m<sup>3</sup>/h,充填浓度64%~68%,最长连续充填时间30 h,综合灰砂比1:16,充填运营成本18元/t。

2) 针对大落差山地条件下向上充填采空区存在物料输送难度大、效率低、工业场地条件受限等难题,创新性地提出压滤尾砂缆车运输方案,解决了类似矿山充填实践中出现的尾砂输送效率低、风险高、性价比差的关键难题,为后续充填工艺流程的简化创造了条件,可为矿山充填尾砂输送类似工况提供借鉴。

3) 研究并应用了压滤尾砂缆车运输再造浆充填工艺,工艺流程为尾砂浓缩压滤+缆车运输+皮带给料+一段搅拌+泵压输送。该充填工艺具有流程短、占地少、效率高等优点,在大落差山地条件下该充填工艺能够实现尾砂向上高效运输、充填料浆可靠制备输送及低成本充填,具有较好的推广意义。

## 参考文献(References):

- [ 1 ] 吴爱祥. 实现一废治两害[N]. 中国黄金报, 2015-09-04(15).
- [ 2 ] 孙光华, 王玥, 任伟成. 胶结充填技术在金属矿山中的应用现状与发展趋势[J]. 有色金属(矿山部分), 2022, 74(4): 26-33.  
SUN Guanghua, WANG Yue, REN Weicheng. Application status and development trend of cemented filling technology in metal mines[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2022, 74(4): 26-33.
- [ 3 ] 程海勇, 吴爱祥, 吴顺川, 等. 金属矿山固废充填研究现状与发展趋势[J]. 工程科学学报, 2022, 44(1): 11-25.  
CHENG Haiyong, WU Aixiang, WU Shunchuan, et al. Research status and development trend of solid waste backfill in metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(1): 11-25.
- [ 4 ] 刘浪, 方治余, 张波, 等. 矿山充填技术的演进历程与基本类别[J]. 金属矿山, 2021(3): 1-10.  
LIU Lang, FANG Zhiyu, ZHANG Bo, et al. Development history and basic categories of mine backfill technology[J]. Metal Mine, 2021(3): 1-10.
- [ 5 ] 叶晓, 周友生. 水砂充填技术在大茶园矿井的应用及改进[J]. 中国矿业, 2012, 21(S1): 274-277.  
YE Xiao, ZHOU Yousheng. Application and improvement of the hydraulic filling technology in the Dachayuan Mine[J]. China Mining Magazine, 2012, 21(S1): 274-277.
- [ 6 ] 周在波, 刘娟红, 吴瑞东, 等. 低浓度全尾砂充填材料泌水及其调控机理[J]. 材料研究学报, 2020, 34(7): 481-488.  
ZHOU Zaibo, LIU Juanhong, WU Ruidong, et al. Analysis of bleeding of low concentration full tailings filling material and its regulation control[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2020, 34(7): 481-488.
- [ 7 ] 杨伟, 张钦礼, 杨珊, 等. 动载下高浓度全尾砂胶结充填体的力学特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(1): 156-161.  
YANG Wei, ZHANG Qinli, YANG Shan, et al. Mechanical property of high concentration total tailing cemented backfilling under dynamic loading[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2017, 48(1): 156-161.
- [ 8 ] 甘德清, 高峰, 陈超, 等. 高浓度全尾砂充填料浆临界输送流速研究[J]. 金属矿山, 2015(11): 22-26.  
GAN Deqing, GAO Feng, CHEN Chao, et al. Study on critical conveying velocity of full-tailings filling slurry of high concentration[J]. Metal Mine, 2015(11): 22-26.
- [ 9 ] 姚中亮. 全尾砂结构流体胶结充填的理论与实践[J]. 矿业研究与开发, 2006, 26(S1): 15-18, 48.  
YAO Zhongliang. Theory of and practice in cemented filling with unclassified tailings structure fluid[J]. Mining Research and Development, 2006, 26(S1): 15-18, 48.
- [ 10 ] 阳京平. 全尾砂膏体充填采矿技术现状及展望[J]. 中国矿业, 2021, 30(S1): 17-23.  
YANG Jingping. Current status and prospects of full tail paste filling mining technology[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(S1): 17-23.
- [ 11 ] 李守强, 郭利杰, 郑旭, 等. 膏体充填料浆管道自流输送分析及管线布置[J]. 中国矿业, 2021, 30(8): 149-153.  
LI Shouqiang, GUO Lijie, ZHENG Xu, et al. Analysis of paste filling slurry pipeline gravity transportation and pipeline layout[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(8): 149-153.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] 冯盼学, 解联库, 万串串, 等. 高海拔地下金属矿大规模安全采矿技术及应用[J]. 有色金属(矿山部分), 2017, 69(4): 5-9.  
FENG Panxue, XIE Lianku, WAN Chuanchuan, et al. Large scale and safe mining technology and application in underground metal mine at high altitude[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2017, 69(4): 5-9.
- [ 14 ] 张文方, 王文丽, 王春. 马子冲锰矿急倾斜极薄矿脉采矿方法研究[J]. 金属矿山, 2017(5): 33-37.  
ZHANG Wenfang, WANG Wenli, WANG Chun. Study on the mining method of steeply inclined and extremely thin ore vein in Mazi-chong Manganese Mine[J]. Metal Mine, 2017(5): 33-37.
- [ 15 ] 叶光祥. 探讨急倾斜极薄矿脉机械化开采新技术及应用[J]. 世界有色金属, 2021(23): 22-24.  
YE Guangxiang. This paper discusses the new mechanized mining

- technology and application of steeply inclined very thin vein[J]. World Nonferrous Metals, 2021(23): 22-24.
- [16] 覃魁. 关于急倾斜薄矿脉采矿方法的研究[J]. 世界有色金属, 2018(6): 85-86.
- QIN Kui. Research on mining method of steep inclined thin vein[J]. World Nonferrous Metals, 2018(6): 85-86.
- [17] 龚开福. 急倾斜薄矿脉回采方法的研究和实践[J]. 中国矿业, 2015, 24(S2): 167-169, 174.
- GONG Kaifu. Research and practice of mining method for steeply declined and narrow veins[J]. China Mining Magazine, 2015, 24(S2): 167-169, 174.
- [18] 邵亚平, 崔松, 陈寅, 等. 下行中深孔空场嗣后充填采场结构参数优化研究[J]. 中国矿业, 2020, 29(S2): 329-335.
- SHAO Yaping, CUI Song, CHEN Yin, et al. Study on optimization of stope structural parameters of downward medium deep hole open stoping with subsequent filling[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(S2): 329-335.
- [19] 余昕, 周家祥, 宋卫东, 等. 分段凿岩阶段空场嗣后充填采矿工艺及爆破设计[J]. 金属矿山, 2018(8): 7-12.
- YU Xin, ZHOU Jiayang, SONG Weidong, et al. Mining technology and blasting design of the staged open stope mining with subsequent filling in sublevel drilling process[J]. Metal Mine, 2018(8): 7-12.
- [20] 朱先艳. 分段空场嗣后充填法优化与应用[J]. 中国矿山工程, 2021, 50(3): 12-15.
- ZHU Xianyan. Sublevel open stoping with post-filling: a case of application and optimization[J]. China Mine Engineering, 2021, 50(3): 12-15.