

# 金属矿破碎带巷道围岩支护优化设计

Optimization design of roadway surrounding rock support in fractured zone of a metal mine

许金成, 张绍江, 李 岗, 杨明东(南京安吉特矿山工程有限公司, 江苏 南京 211100)

**摘 要:**某金矿在进入深部开采后,出现了围岩大变形破坏,巷道顶板出现破碎冒落,两帮片状、板状剥落,支护出现大面积失效情况。针对此现象,基于松动圈理论对破碎巷道围岩进行支护优化设计。通过测算围岩松动圈,确定其松动范围为1.5~2.0 m。确定了支护形式选用锚杆+短锚索+金属网的支护方案。经过工程实践,巷道收敛及锚杆受力效果良好,能够为相似条件矿山提供借鉴。

**关键词:**金属矿;破碎;巷道;支护设计;优化

**中图分类号:** TD353      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-609X(2021)06-0092-05

**Abstract:** With the deep mining of a certain gold mine, large deformation of roadway surrounding rock occurred, causing the fracture and caving of the roadway roof and the flaky and platy peeling of the two roadsides, showing a large area of support failure. In view of this phenomenon, support optimization design was carried out for the fractured roadway surrounding rock based on the loose circle theory. By measuring the surrounding rock loose circle, the loosening range is confirmed to be 1.5~2.0 m. The supporting scheme of rock bolt + short anchor cable + metal mesh was adopted. Through engineering practice, the effect of roadway convergence and rock bolt stress is good, which can provide reference for mines with similar conditions.

**Key words:** metal mine; fracture; roadway; support design; optimization

## 1 前言

随着资源的深部开发,深部地压灾害频发,巷硐围岩稳定性问题日益凸显。围绕岩爆、围岩大变形破坏等限制安全生产的重大课题,许多专家学者开展了许多工作,并取得丰硕成果<sup>[1-5]</sup>,实现了重大突破。特别是在巷道围岩破坏机理及稳定性分析方面,冷建民等<sup>[6]</sup>对三山岛金矿千米巷道变形破坏机理进行了深入探究,认为高应力下进行开挖卸荷后导致的应力松弛使得巷道出现大变形破坏。由伟等<sup>[7]</sup>运用弹塑性力学理论对新城金矿滕家矿区巷道围岩的塑性区破坏范围进行了力学解析,并以此为基础对巷道围岩稳定性进行了模拟分析。杨括宇等<sup>[8]</sup>以金山店铁矿东区为工程背景,对破碎岩体中巷道围岩破坏机理进行了研究,提出采矿活动引发破碎岩体附近断层活化,从而使得破碎围岩巷道变形加剧,并对围岩支护参数选择与支护方式优化展开探讨。吴磊<sup>[9]</sup>针对冬瓜山铜矿深部硬岩巷道,通过现场实践,提出基于静力、能量及动量等多角度的

支护体评价与设计方法,并得到成功推广应用。李江<sup>[10]</sup>将陈耳金矿作为研究背景,通过理论分析、室内试验及数值模拟相结合的方式对巷道破碎围岩支护进行了参数优化,并提出湿法锚网喷结合的支护方式,在现场取的较好支护效果。翁磊等<sup>[11]</sup>针对玲珑金矿巷道围岩出现冒落松散问题,有针对性地提出了一种联合支护对策,应用后使围岩变形得到有效控制。上述研究在围岩破坏机理及深部巷道支护等方面均取得了丰硕成果,但是对于金属矿山复杂赋存条件下的深部巷道围岩大变形破坏机理研究以及支护参数的优化设计研究鲜有报道,某金矿开采深度大,裂隙发育,岩体较为破碎,围岩变形规律复杂,地压更难以控制,本文对其支护进行设计优化,以期实现对破碎巷道的围岩有效支护,为相似地质条件矿山提供参考。

## 2 巷道围岩变形破坏特征

随着开采深度的下降,应力环境复杂程度增高,巷道高地压现象突出,通过现场踏勘发现深部巷道的围岩变形破坏特征主要出现帮部片状或板状剥落,具体如图1所示。通过现场勘察可以获得以下认知:①深部中段的巷道中多数节理以平行矿体的节理组为主,节理比较发育,围岩较为破

[作者简介] 许金成(1978-),男,工程师,从事采矿安全与爆破工程方面的施工技术研究。

[引用格式] 许金成,张绍江,李岗,等.金属矿破碎带巷道围岩支护优化设计[J].中国矿山工程,2021,50(6):92-96.

碎。深部巷道的围岩变形破坏特征主要出现帮部片状或板状剥落;②巷道围岩岩性以绢英化花岗岩为主,局部存在深度变质的片麻状花岗岩,巷道路拉开后,围岩受压导致片理化明显,表面成薄片形

态剥落;③变形严重区域多存在于巷道交叉点,这些位置由于开挖导致应力向四周转移,而拉开巷道成为了很好地释压空间,因此巷道围岩处应力集中明显。

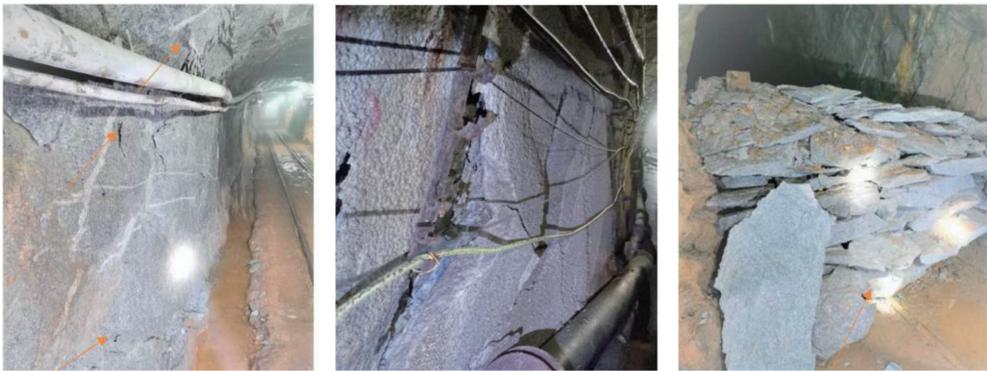


图1 巷道围岩破坏状态

### 3 破碎巷道围岩支护优化设计

#### 3.1 松动圈理论

当地下空间开挖后,巷道围岩应力改变重新分布,巷道周边切应力最大,径向应力为0,围岩强度急剧下降。巷道周边应力随岩体破碎逐渐向内部降低,破碎区也逐步向内扩展。因此,根据松动圈大小不同,决定了支护系统的设计。依据围岩松动圈的大小,可将围岩分为三大类:稳定岩层( $L_p < 0.4$  m);中等稳定岩层( $L_p = 0.4 \sim 1.5$  m);不稳定岩层( $L_p \geq 1.5$  m)。围岩支护方法和支护参数也根据松动圈大小进行分类,松动圈厚度0.4~1.0 m、1.0~1.5 m、1.5~2.0 m的围岩类别分别为Ⅱ级(稳定围岩)、Ⅲ(一般围岩)、Ⅳ(不稳定围岩),Ⅱ级、Ⅲ级围岩可采用锚杆结合局部喷层支护;Ⅳ级围岩一般采用锚杆、金属网并结合喷层支护。

#### 3.2 开挖后围岩松动圈测试及分析

为了弄清巷道围岩塑性区范围、顶板软弱夹层的及围岩裂隙发育情况,采用钻孔多功能成像分析仪CXK12探测巷道围岩钻孔内部的裂隙分布和发育特征,钻孔多功能成像仪如图2所示。



图2 钻孔多功能成像仪

#### 1) 具体窥视位置

为详细掌握巷道不同位置围岩变形破坏情况,在巷道顶板中间、顶板靠近左帮、顶板靠近右帮、左帮中部和右帮中部等不同位置布置钻孔进行巷道围岩深部位移监测结构探测,在巷道内至少布置2个钻孔窥视站,单个窥视站需进行至少3次以上窥视,以便提高围岩窥视效果。具体的窥视测站钻孔布置位置如图3所示。

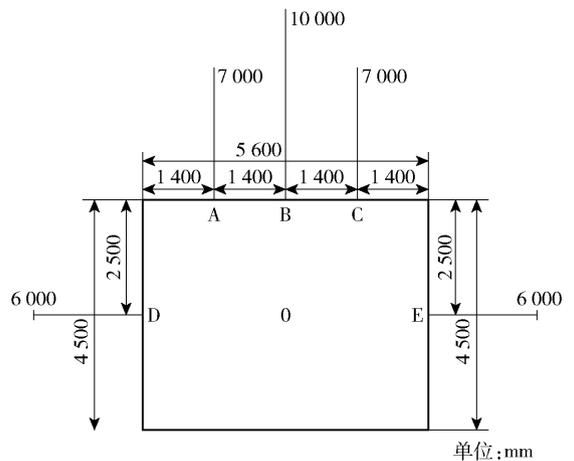


图3 窥视孔布置位置图

#### 2) 窥视结果分析

在测站采用钻孔多功能成像仪分别对巷道五个钻孔进行窥视,通过结果可知,顶板三个钻孔内围岩破坏情况基本相类似,破坏程度比较小,而在帮部的破坏较顶部而言破坏程度有所加深。图4所示为具体窥视结果。

从钻孔的窥视结果可知:巷帮2 m内异常破碎,在2~3 m存在小范围的破碎区,3~5 m相对完整。

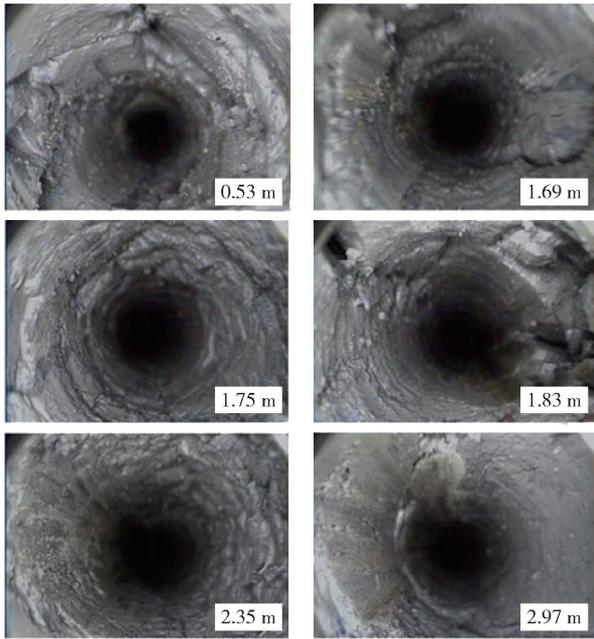


图4 钻孔窥视结果

因此,要特别重视该区域支护方式和支护参数的选择。按照围岩松动圈理论,对大于1.5 m时的松动圈,需高强度的联合支护方案。

### 3.3 支护参数的确定

在采矿过程中,围岩破碎巷道采用传统的锚杆挂网支护方式,巷道变形破坏严重,巷道很难维护。基于松动圈支护理论结合顶板岩性,为了保证巷道的支护效果,同时尽量减少支护成本,设计选用巷道锚杆+短锚索+金属网支护方案。

#### 1) 锚杆支护参数计算

锚杆长度可按式(1)确定:

$$L_{mg} = L_b + L_e + L_o \quad (1)$$

式中: $L_{mg}$ ——锚杆长度,m;

$L_b$ ——锚固长度,一般取0.5 m;

$L_e$ ——有效长度,m;

$L_o$ ——外露长度,一般取0.2 m。

在锚杆失效的情况下,其潜在的冒落高度应按松动圈高度叠加计算,那么锚杆有效长度应为1.5 m,锚杆总长度应为2.2 m。

按照覆岩重量及单根锚杆的支护能力计算,取锚杆间排距为取0.7 m×0.6 m。

#### 2) 短锚索支护参数

短锚索支护时锚固端应位于稳定岩层中,因此巷道围岩稳定岩层位置直接影响短锚索长度。根据现场实际情况选短锚索长度为5 m。在此支护方案中锚索的主要作用是悬吊作用,需与锚杆共同作用

起到组合拱作用,在锚杆中间进行锚索悬吊,设计锚索设计直径21.6 mm,间排距为2 m×2 m。

在锚索施工时,利用7655气腿式凿岩机钻进4.8 m,打入短锚索至预制深度,检查排气管和注浆管畅通情况。然后对进行分段注浆,每拔出4~5根套管注一次浆。锚索外露20 cm,通过张拉机具进行预应力加载,预应力应不小于100 kN。

(3) 金属网采用直径4 mm铁丝编织而成,网孔85 mm×85 mm,单片金属网宽1 000 mm、长3 000 mm。

(4) 支护使用宽200 mm、长4 300 mm、厚3 mm的W钢带,并在钢带腹部开锚索孔,开孔位置与锚索间排距相适应,锚索孔直径40 mm。

### 3.4 主要支护参数校核

#### 3.4.1 锚杆主要支护参数校核

##### 1) 锚杆长度校核

围岩支护使用的锚杆长度包括有效长度、锚固段长度以及锚杆外露长度构成。巷道设计跨度为3.5 m,采用基于组合拱原理得到锚杆长度为

$$L = k \left( 1.5 + \frac{B}{10} \right) \quad (2)$$

式中: $L$ ——长度,m;

$k$ ——影响系数,取值范围0.9~1.2,围岩稳定取小值、不稳定取大值;

$B$ ——巷道设计跨度,取3.5 m。

经计算得到 $L = 1.92 \text{ m} < 2.2 \text{ m}$ 。

经过理论分析以及前期测试发现,当巷宽3.5 m时,选择使用2.2 m长锚杆可满足围岩支护需要。

##### 2) 锚杆间距校核

校验公式为

$$a = \sqrt{\frac{Q}{KHr}} \quad (3)$$

式中: $a$ ——间距,m;

$Q$ ——锚固力,即最大抗拉拔力;取50 kN;

$H$ ——松动圈厚度,取2.4 m;

$r$ ——悬吊岩体容重,实测均值为26 400 kN/m<sup>3</sup>;

$K$ ——安全系数,取1.5。

代入相关参数求得 $a = 0.817 \text{ m}$ 。设计的锚杆间距0.7 m < 0.817 m,锚杆间距设计参数可满足要求。

##### 3) 锚杆排距校核

排距校验公式为

$$b = \frac{nN}{krB2} \quad (4)$$

式中: $b$ ——锚杆排距,m;  
 $n$ ——顶锚杆数,3根;  
 $N$ ——锚杆锚固力,50 kN;  
 $L_2$ ——破碎带深度,取2.4 m计算。

将上述参数代入公式求得 $b=0.676$  m,设计的锚杆间距0.6 m,可满足要求。

### 3.4.2 短锚索主要支护参数校核

#### 1) 短锚索长度校验

为确保支护安全,在确定短锚索长度时,取短锚索长度最大值,以便更好控制围岩变形。

基于组合拱原理得到短锚索长度为

$$L = k \left( 1.5 + \frac{B}{10} \right) \quad (5)$$

式中: $L$ ——短锚索长度,m;

$k$ ——影响系数,取0.9~1.2;

$B$ ——巷道设计跨度,取3.5 m;

代入参数,得: $L=1.92$  m。因此,短锚索长度选择5 m合理。

#### 2) 间距校验

间距校验公式为

$$a = \sqrt{\frac{Q}{KHr}} \quad (6)$$

式中: $a$ ——间距,m;

$Q$ ——锚固力,取500 kN;

$H$ ——松动圈厚度,取2.4 m;

$r$ ——被悬吊岩层的容重,取26 400 kg/m<sup>3</sup>;

$K$ ——安全系数,取1.5。

计算得到 $a=2.31$  m,设计短锚索间距2.0 m,支护参数满足要求。

#### 3) 短锚索排距校验

短锚索排距校验公式为:

$$b = \frac{nN}{krBL_2} \quad (7)$$

式中: $b$ ——排距,m;

$n$ ——短锚索根数,2根;

$N$ ——锚固力,250 kN;

$r$ ——岩体容重,26 400 kN/m<sup>3</sup>;

$B$ ——巷道设计跨度,3.5 m;

$L_2$ ——松动圈深度,取2.4 m。

把以上数据代入公式得: $b=2.25$  m;短锚索排距设计2.0 m小于2.25 m,符合要求。

## 4 支护效果

如图5所示,在监测期间巷道位移逐渐趋平,其

顶板最大下沉量为102 mm,左帮收缩量为69 mm,右帮收缩量为60 mm。与设计优化前相比,顶板下沉量减小了46%,两帮移近量减小了49%,说明由于顶板锚索的增加,围岩的强度和整体性明显提高,支护方案能有效控制围岩变形。

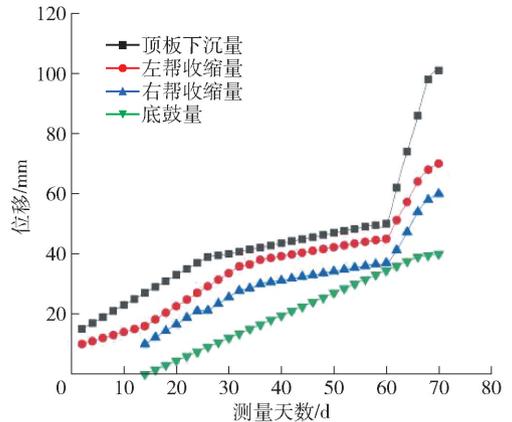


图5 测点监测结果图

由图6所示,应力监测分别布置于顶板、左帮及右帮处,编号1~3号测点。0~10 d内,测点锚杆预应力都是以较缓慢的速率平稳上升,锚索+锚杆支护的共同作用下,内部形成稳定的承载应力拱结构,围岩强度增加,取得了比较满意的支护效果。

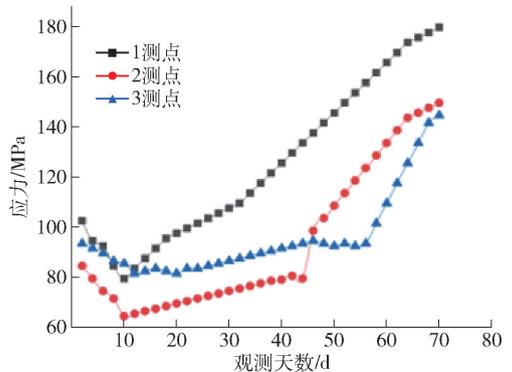


图6 锚杆应力监测图

## 5 结论

(1)通过钻孔窥视仪确定了破碎巷道围岩松动圈范围。巷顶松动范围小于巷帮松动范围,巷帮2 m内异常破碎,在2~3 m存在小范围的破碎区,3~5 m相对完整。因此,要特别重视该区域支护方式和支护参数的选择。

(2)根据松动圈支护理论,设计选用巷道锚杆+短锚索+金属网支护方案。设计锚杆总长度应为2.2 m,间排距为取1 m×1.5 m。设计锚索长度应为5 m,间排距为取2 m×2 m。金属网采用直径4 mm

铁丝编织而成,网孔 85 mm × 85 mm,单片金属网宽 1 000 mm、长 3 000 mm。

(3)通过监测发现锚杆预应力上升缓慢,在锚索 + 锚杆支护的共同作用下,内部形成稳定的承载应力拱结构,10 d 内巷顶顶板最大下沉量为 102 mm,左帮收缩量为 69 mm,右帮收缩量为 60 mm,支护设计应用效果良好。

#### [参考文献]

- [1] 钱七虎. 岩爆、冲击地压的定义、机制、分类及其定量预测模型[J]. 岩土力学,2014,35(1):1-6.
- [2] 何满潮,苗金丽,李德建,等. 深部花岗岩试样岩爆过程实验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007(5):865-876.
- [3] 宫凤强,李夕兵. 岩爆发生和烈度分级预测的距离判别方法及应用[J]. 岩石力学与工程学报,2007(5):1012-1018.
- [4] 康红普,范明建,高富强,等. 超千米深井巷道围岩变形特征与支护技术[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(11):2227-2241.

- [5] 余伟健,王卫军,黄文忠,等. 高应力软岩巷道变形与破坏机制及返修控制技术[J]. 煤炭学报,2014,39(4):614-623.
- [6] 冷建民,吴大伟,王楠,等. 三山岛金矿深部巷道围岩破坏机理及支护参数优化[J]. 金属矿山,2019(6):45-50.
- [7] 由伟,张姝婧,李怀宾,等. 新城金矿滕家矿区深部巷道围岩破坏与数值分析[J]. 金属矿山,2019(4):6-10.
- [8] 杨括宇,陈从新,夏开宗,等. 崩落法开采金属矿巷道围岩破坏机制的断层效应[J]. 岩土力学,2020,41(S1):279-289.
- [9] 吴磊. 深部硬岩巷道支护技术研究[D]. 长沙:中南大学,2010.
- [10] 李江,刘龙琼,缪国卫,等. 陈耳金矿深部开采巷道支护技术优化及应用[J]. 黄金,2018,39(4):31-35.
- [11] 翁磊,李夕兵,刘科伟,等. 玲珑金矿松散围岩主巷变形破坏机制及支护对策[J]. 中国安全科学学报,2014,24(7):129-134.

(上接第 91 页)

在辉石中,相对集中系数 81.118%。

(2)选矿试验最终确定推荐“磁选预富集—粗精矿浸出”联合流程提取矿石中的有价元素铌;磁选全流程试验可获得铌的浸出液产品含铌 87.44 mg/L,铌的选冶回收率为 63.12% 的良好指标;另外浸渣中含 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 品位仅 130 g/t,与磁选抛除的尾矿中铌含量相当。

#### [参考文献]

- [1] 程征,伍喜庆,杨平伟. 我国钽铌资源的特征及选矿技术[J]. 金属矿山,2013(7):97-100.
- [2] 张培善,杨主明,陶克捷,等. 我国钽铌稀土矿物学及工业利用[J]. 稀有金属,2005(2):206-210.

- [3] 选矿手册编委会. 选矿手册[M]. 北京:冶金工业出版社,1990.
- [4] 卢烁十,陈经华. 细晶石为主的钽铌矿石工艺矿物学及可选性研究[J]. 有色金属(选矿部分),2016(5):1-6,12.
- [5] 戴惠新,杜五星,戴菲,等. 云南某花岗伟晶岩型钽铌矿工艺矿物学研究及可选性分析[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版),2018,43(1):25-31.
- [6] 王其宏,章晓林,景满,等. 钽铌矿浮选技术研究进展[J]. 硅酸盐通报,2017,36(12):4060-4065,4071.
- [7] 蒋海勇,戴惠新,杨伟林,等. 钽铌矿精选的研究现状[J]. 矿产综合利用,2015,(5):13-16.
- [8] 武彪,尚鹤,温建康. 低品位难处理钽铌矿中铌的浸出试验研究[J]. 稀有金属,2013,37(5):791-797.