

焦家金矿巷道围岩承载结构随岩体质量演化规律

王兴亚¹, 刘立波^{2*}, 郭奇峰²

(1. 山东黄金矿业(莱州)有限公司焦家金矿; 2. 北京科技大学土木与资源工程学院)

摘要:以焦家金矿-790 m中段为研究对象,建立了巷道围岩承载结构力学模型,基于巷道和围岩协同承载机制,考虑围岩损伤分区,结合松动圈声波测试试验,确定了松动圈范围,为岩石的稳定性评价及支护设计提供了依据,采用Flac^{3D}软件对巷道围岩承载结构特征及支护作用进行了数值模拟研究。研究结果表明:围岩强度等级越低,支撑层的厚度越大,围岩表面位移也就越大;关键支撑层离巷道越远,巷道表面位移越大;围岩的支护阻力越大,支撑层的厚度越小,关键支撑层离巷道越近,越有利于控制巷道的变形。

关键词:巷道围岩;承载结构;损伤分区;数值模拟;岩体质量评价;稳定性

中图分类号:TD353

文章编号:1001-1277(2025)07-0059-07

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20250709

引言

巷道围岩损伤分区与承载结构是巷道的岩层控制及弹性区^[1]。康红普^[2-3]在1997年首次提出了巷道围岩关键支撑圈的概念,一些学者在巷道围岩控制方面已经进行了相关研究。例如:马念杰等^[4-5]开发了非均匀应力与支护设计的重要依据。深部巷道围岩与浅部巷道围岩一样,会形成具有不同应力场特征的破碎区、塑性区力场下的圆形巷道围岩塑性区计算方法;袁超等^[6]基于塑性区理论推导研究了塑性区的分布特征与影响因素;刘朝科等^[7-8]对非均匀应力场下的巷道围岩进行了弹塑性分布研究;李涛等^[9-11]分析了塑性区形态,并从不同的理论角度出发,推导出了非均匀应力场中巷道塑性区边界线方程;余一松等^[12-13]通过模拟演化了破碎区对巷道围岩的影响。但上述研究都尚未引入损伤理论,没有考虑围岩内部的损伤状态。目前,关于巷道围岩承载结构、损伤分区和支护理论的研究虽取得了一些进展,但从实践效果来看,对巷道的围岩变形控制仍有提升空间^[14-15]。

充分发挥围岩的自身强度和自承能力以达到采矿工程的稳定是矿山岩石力学最基本的原理^[16-17],对围岩损伤分区的了解和对其承载结构特征的演化尤为重要。山东黄金矿业(莱州)有限公司焦家金矿(下称“焦家金矿”)现已进入深部开采,岩体在高应力环境下的采掘扰动响应更为明显,易出现破碎岩体大变形、完整硬岩动力破坏等潜在地压灾害。

本文以焦家金矿-790 m中段为例,假设巷道围岩为均质各向同性介质,建立巷道力学模型,基于巷道和围岩协同承载机制,考虑围岩损伤分区,根据松动圈声波测试试验确定其松动圈的范围^[18],为岩石的稳定性评价及支护设计提供依据,最后,采用Flac^{3D}软件有限差分程序对巷道围岩承载结构特征及支护作用进行数值模拟分析,以期对矿山安全高效开采提供依据。

1 工程概况

焦家金矿位于焦家断裂54勘探线—52勘探线的破碎蚀变岩带内,赋存标高在-450~30 m,控制长度1 600 m,其蚀变矿化特征见表1。

焦家断裂在区内长千余米,一般厚70~250 m,最大厚度370 m,平均厚度148 m。断裂区破碎巷道中包含多个不同等级岩石,地应力复杂,因此对巷道围岩承载结构的分析及其随岩石质量等级的演化规律研究是必要的。

本文以现场实测数据为基础,以聚类分析、可靠性分析、数理统计等现代数学手段为依据,以计算机为主要处理手段,通过调研国内外岩体质量评价方法,对各种方法进行综合系统的对比分析,结合焦家金矿的实际工程情况,分别选取RQD法、BQ法、[BQ]法、Q指标分级法、RMR分级法和GSI指标作为焦家金矿岩体质量评价的基础,建立对应的岩体评价体系对焦家金矿深部各个采场岩体质量与稳定性进行评

收稿日期:2024-12-20; 修回日期:2025-01-25

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3001301)

作者简介:王兴亚(1990—),男,工程师,从事金属矿山采矿工程研究工作;E-mail:106533252@qq.com

*通信作者:刘立波(2001—),男,硕士研究生,研究方向为金属矿山采矿技术;E-mail:1009694188@qq.com

表 1 焦家金矿围岩蚀变矿化特征

Table 1 Alteration and mineralization characteristics of surrounding rock in the Jiaojia Gold Mine

与主裂面距离	断裂构造岩	围岩蚀变			矿化特征	
		蚀变作用	蚀变岩	厚度/m	矿化类型	金品位
近 ↓ 远	糜棱岩		黄铁绢英岩质碎裂岩	2 ~ 30	浸染状	
	碎粒岩	钾长石化	黄铁绢英岩化花岗岩质碎裂岩	1 ~ 34	细脉浸染状	较稳定
	碎斑岩	硅化	黄铁绢英岩化花岗岩	30 ~ 100		↓
	碎裂岩	黄铁绢英岩化	钾长石化硅化花岗岩	100 ~ 200	细脉、网脉状	不稳定

价,为深部采矿方法优化和采场结构参数优化提供基
础理论依据。

运用上述5种方法对焦家金矿-790 m中段深部
岩体进行质量分级评价,得到的结果见表2。

表 2 焦家金矿-790 m中段深部岩体质量分级结果

Table 2 Rock mass quality classification at -790 m level in the Jiaojia Gold Mine

测点位置	RQD法	BQ法	[BQ]法	Q指标分级法	RMR分级法	IRMR分级	GSI值
-790 m中段104勘探线	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	6	Ⅱ	Ⅲ	48
-790 m中段112勘探线	Ⅲ	Ⅰ	Ⅲ	6	Ⅱ	Ⅲ	46
-790 m中段120勘探线	Ⅲ	Ⅰ	Ⅲ	5	Ⅱ	Ⅲ	47

根据上述5种分级方法的换算对比原则,对岩体
的分级结果进行对比换算,Q指标分级法和IRMR分
级法分级结果近似一致,说明该分级方法对焦家金矿
深部岩体质量分级的结果准确可靠。

基于GSI指标,采用Hoek-Brown准则理论,将
GSI值和室内岩石力学参数代入Hoek-Brown准则,计
算出焦家金矿-790 m中段岩体的物理力学参数,结
果见表3。

表 3 基于Hoek-Brown准则的岩体强度计算结果

Table 3 Rock mass strength calculation results based on Hoek-Brown criterion

测点 位置	GSI值	岩石单轴 抗压强度/ MPa	岩石单轴 抗拉强度/ MPa	岩石弹性 模量/GPa	岩体容重/ (kN·m ⁻³)	岩体抗压 强度/MPa	岩体抗拉 强度/MPa	岩体内聚 力/MPa	岩体内摩 擦角/(°)	岩体弹性 模量/GPa	岩体泊松比
-790 m中段	56.50	114.56	8.56	41.52	26.862	19.10	0.13	38.81	2.08	6.73	0.22

由于井下环境的多变性,加之结构调查范围有
限,通过结构面调查获取GSI值的测点有限,得到的
岩体强度覆盖范围不够广泛。故根据工程岩体质量
等级(BQ)与岩体质量Q分级中Q值及GSI值的转化
关系,结合室内岩石力学试验的岩石力学数据,采用

GSI指标的Hoek-Brown准则,计算出不同岩体质量等
级岩体力学参数范围。岩石质量分级以工程岩体质
量等级为依据,并选取其对应等级的下限值计算,结
果见表4。

表 4 基于Hoek-Brown准则的不同质量等级岩体力学参数(焦家金矿-790 m中段)

Table 4 Rock mass mechanical parameters with different quality levels based on Hoek-Brown criterion (-790 m level, Jiaojia Gold Mine)

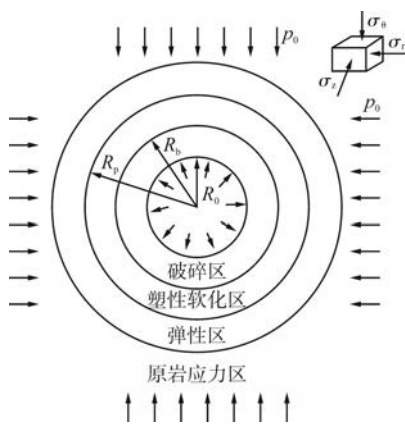
工程岩体质量等级	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/GPa	泊松比
I	90.33	2.81	9.25	56.86	25.20	0.19
II	52.90	0.89	4.99	53.00	20.91	0.22
III	34.14	0.27	3.25	47.85	13.38	0.23
IV	23.51	0.09	2.38	42.40	6.73	0.30
V	2.05	0.01	0.27	13.10	0.89	0.38

2 围岩应力分析与损伤分区

巷道围岩应力主要由围岩自身承担,支护结构只承担小部分应力,即围岩是主要的承载体^[19]。在维持巷道围岩稳定时,保持围岩承载区域的稳定尤为重要,而其中的关键就是支护。支护不仅要减少围岩变形和防止破碎围岩垮落,更要限制围岩应力峰值的外移,从而达到维持巷道围岩稳定的目的。因此,针对复杂应力条件下的巷道围岩,结合巷道岩体强度及其所受应力、应变条件,分析围岩损伤分区的应力场等特征。

2.1 基于 Mohr-Coulomb 理论的巷道围岩应力理论分析

建立巷道围岩力学模型(见图1),假设围岩为各向均质同性介质,巷道围岩开挖后弹性区、塑性软化区和破碎区由里到外依次分布。



R_0 —巷道半径 R_b —破碎区外半径 R_p —软化区外半径 p_0 —原岩应力
 σ_r —围岩的径向应力 σ_θ —切向应力 σ_z —垂向应力

图1 巷道围岩力学模型

Fig. 1 Mechanical model of roadway surrounding rock

为分析巷道围岩的力学特征,围岩应满足以下力学条件^[20]。

1) 基于 Mohr-Coulomb 准则的屈服函数。

$$F = \sigma_\theta - \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_r - \frac{2C \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} = 0 \quad (1)$$

式中: C 为岩石的内聚力(MPa); φ 为岩石的内摩擦角(°)。

2) 平衡微分方程。

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (2)$$

式中: r 为研究点至巷道断面中心的距离(m)。

3) 几何方程。

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}; \varepsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad (3)$$

式中: ε_r 、 ε_θ 分别为围岩的径向、切向应变; u 为围岩的径向位移。

不考虑在巷道开挖之前由于原岩应力引起的弹

性位移,本构方程为:

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{1 - \mu^2}{E} \left[(\sigma_r - p_0) - \frac{\mu}{1 - \mu} (\sigma_\theta - p_0) \right] \\ \varepsilon_\theta = \frac{1 - \mu^2}{E} \left[(\sigma_\theta - p_0) - \frac{\mu}{1 - \mu} (\sigma_r - p_0) \right] \end{cases} \quad (4)$$

式中: E 为岩石的弹性模量(GPa); μ 为岩石的泊松比。

4) 围岩软化模型。在塑性软化区内,围岩的内聚力和內摩擦角分别软化至塑性软化值 C_p 、 φ_p ,即:

$$C_p = C(\varepsilon_\theta^p); \varphi_p = \varphi(\varepsilon_\theta^p) \quad (5)$$

式中: ε_θ^p 为塑性应变,且 $\varepsilon_\theta^p = \varepsilon_\theta - \varepsilon_\theta^e$; ε_θ^e 为峰值应变。

塑性软化区内围岩满足的强度条件为:

$$F^p = \sigma_\theta - \frac{1 + \sin \varphi_p}{1 - \sin \varphi_p} \sigma_r - \frac{2C_p \cos \varphi_p}{1 - \sin \varphi_p} = 0 \quad (6)$$

在破碎区内则分别软化至残余强度值 C_b 和 φ_b 。

破碎区内围岩满足的强度条件为:

$$F^b = \sigma_\theta - \frac{1 + \sin \varphi_b}{1 - \sin \varphi_b} \sigma_r - \frac{2C_b \cos \varphi_b}{1 - \sin \varphi_b} = 0 \quad (7)$$

围岩强度参数的初始值 C_0 、 φ_0 ,塑性软化值 C_p 、 φ_p 和残余强度值 C_b 、 φ_b 之间的关系为:

$$\begin{cases} C_p = C_0 - M_C(\varepsilon_\theta - \varepsilon_\theta^e) \\ \varphi_p = \varphi_0 - M_\varphi(\varepsilon_\theta - \varepsilon_\theta^e) \end{cases} \quad (8)$$

式中: M_C 、 M_φ 分别为内聚力、內摩擦角软化模量, $M_C = (C_0 - C_b)/(\varepsilon_\theta^b - \varepsilon_\theta^e)$, $M_\varphi = (\varphi_0 - \varphi_b)/(\varepsilon_\theta^b - \varepsilon_\theta^e)$ 。

5) 围岩剪胀扩容模型。围岩在破坏后,岩体内部裂隙贯通,破裂岩块沿破裂面滑移变形,岩体产生体积膨胀。根据非关联流动法则,可将屈服函数(F)中的內摩擦角替换成剪胀角(ψ),从而可得到塑性势函数(G)的表达式。

$$\begin{cases} d\varepsilon_r^p = d\lambda \frac{\partial G}{\partial \sigma_r} = -d\lambda \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi} \\ d\varepsilon_\theta^p = d\lambda \frac{\partial G}{\partial \sigma_\theta} = d\lambda \end{cases} \quad (9)$$

式中: $d\lambda$ 为与塑性势函数相关联的标量因子, $d\lambda \geq 0$ 。

$$\eta^p = \left| \frac{d\varepsilon_r^p}{d\varepsilon_\theta^p} \right| = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi} \quad (10)$$

式中: η^p 为塑性软化区的围岩扩容系数。

2.2 不同等级围岩应力损伤分区分布

1) 弹性区。根据弹性力学平面应变问题的相关理论^[20-21],弹性区围岩应力分布为:

$$\begin{cases} \sigma_r^e = p_0 + (\sigma_{ep} - p_0) \frac{R_p^2}{r^2} \\ \sigma_\theta^e = p_0 - (\sigma_{ep} - p_0) \frac{R_p^2}{r^2} \end{cases} \quad (11)$$

式中: σ_{ep} 为弹性区和塑性软化区交界面上的径向应力。

2)塑性软化区。塑性软化区的围岩满足平衡微分方程,有:

$$\sigma_r^p = \frac{L_p}{1 - K_p} + C_1 r^{K_p - 1} \quad (12)$$

式中: $K_p = \frac{1 + \sin \varphi_p}{1 - \sin \varphi_p}$; $L_p = \frac{2C_p \cos \varphi_p}{1 - \sin \varphi_p}$; C_1 为积分常数。

由应力连续条件,当 $r = R_p$ 时, $\sigma_r^p = \sigma_r^e = \sigma_{ep}$, 结合塑性软化区围岩强度条件,得到塑性软化区围岩应力:

$$\begin{cases} \sigma_r^p = \frac{L_p}{1 - K_p} + (\sigma_{ep} - \frac{L_p}{1 - K_p}) (\frac{R_p}{r})^{1 - K_p} \\ \sigma_\theta^p = \frac{L_p}{1 - K_p} + K_p (\sigma_{ep} - \frac{L_p}{1 - K_p}) (\frac{R_p}{r})^{1 - K_p} \end{cases} \quad (13)$$

3)破碎区。破碎区的围岩满足平衡微分方程,有:

$$\sigma_r^b = \frac{L_b}{1 - K_b} + C_2 r^{K_b - 1} \quad (14)$$

式中: $K_b = \frac{1 + \sin \varphi_b}{1 - \sin \varphi_b}$; $L_b = \frac{2C_b \cos \varphi_b}{1 - \sin \varphi_b}$; C_2 为积分常数。

由应力边界条件,当 $r = R_0$ 时, $\sigma_r^b = p_i$, 结合破碎区围岩强度条件,得到破碎区围岩的应力为:

$$\begin{cases} \sigma_r^b = \frac{L_b}{1 - K_b} + (p_i - \frac{L_b}{1 - K_b}) (\frac{R_0}{r})^{1 - K_b} \\ \sigma_\theta^b = \frac{L_b}{1 - K_b} + K_b (p_i - \frac{L_b}{1 - K_b}) (\frac{R_0}{r})^{1 - K_b} \end{cases} \quad (15)$$

4)塑性软化区和破碎区。塑性软化区和破碎区交界处 $r = R_b$ 的强度参数均软化至残余值,有 $C_p = C_b$, $\varphi_p = \varphi_b$ 。且有应力连续条件 $\sigma_r^b = \sigma_r^p$ 。

联立式(14)、式(15),可得围岩塑性软化区和破碎区半径为:

$$\begin{cases} R_p = R_0 \left[\frac{(1 - K_b) p_i - L_b}{(1 - K_b) \sigma_{ep} - L_b} \right]^{\frac{1}{1 - K_b}} \\ R_b = \frac{R_p}{\xi} \end{cases} \quad (16)$$

根据上述理论计算公式,以焦家金矿-790 m中段巷道围岩为例,计算不同等级围岩塑性软化区和破碎区半径,计算结果见表5。

表5 巷道围岩塑性软化区和破碎区半径

Table 5 Radii of plastic softening zone and fractured zone in roadway surrounding rock m

指标	围岩级别			
	Ⅱ级围岩	Ⅲ级围岩	Ⅳ级围岩	Ⅴ级围岩
R_p	2.15	2.52	2.99	4.43
R_b	1.87	2.10	2.30	3.41

2.3 不同质量等级围岩支撑结构区域深浅承载结构分析

巷道围岩切向应力和径向应力的分布情况见图2,将切向应力作为分析围岩承载能力的对象。图2中与各区域切向应力对应的是其厚度,理论上讲,弹性区的厚度趋于无穷大,但在实际研究中,仅取对工程岩体有实际影响的那一区域作为分析对象^[15]。

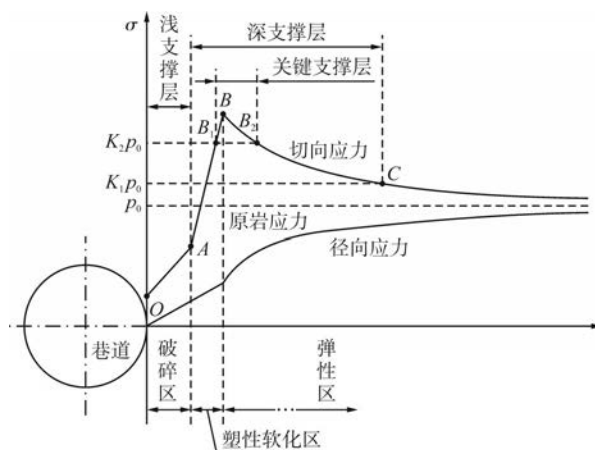


图2 巷道围岩支撑结构区域划分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of regional division of roadway surrounding rock support structure

破碎区的围岩虽然有较大变形,但是仍有一定的承载能力,这部分所受切向应力均低于原岩应力,因此将破碎区OA段确定为“浅支撑层”。塑性软化区和弹性区具有较高的承载能力,特别是围岩强度尚未软化的弹性区,因此将切向应力大于 K_1 倍原岩应力的区域ABC段确定为“深支撑层”。而在深支撑层中的 BB_1B_2 区域承担了绝大部分的荷载,因此将切向应力大于 K_2 倍原岩应力的区域确定为“关键支撑层”。

根据各个分区的应力表达式和各支撑层的范围界定,对各支撑层的厚度进行计算。

浅支撑层厚度为:

$$T_q = R_b - R_0 = R_0 \left\{ \frac{1}{\xi} \left[\frac{(1 - K_b) p_i - L_b}{(1 - K_b) \sigma_{ep} - L_b} \right]^{\frac{1}{1 - K_b}} - 1 \right\} \quad (17)$$

深支撑层厚度由全部塑性软化区和部分弹性区组成。软化区部分的厚度为 $T_{sr} = R_p - R_b$ 。弹性区部分为 $K_1 p_0 \leq \sigma_\theta^e \leq \sigma_F$ 的部分。其中, σ_F 为切向应力峰值。根据式(17), $\sigma_F = 2p_0 - \sigma_{ep}$ 。则:

$$K_1 p_0 \leq p_0 - (\sigma_{ep} - p_0) \frac{R_p^2}{r^2} \leq 2p_0 - \sigma_{ep} \quad (18)$$

可得深支撑层中弹性区部分的厚度 T_{st} 为:

$$T_{st} = R_p \left(\sqrt{\frac{p_0 - \sigma_{ep}}{K_1 - 1}} - 1 \right) \quad (19)$$

深支撑层的厚度 T_s 为:

$$T_s = T_{sr} + T_{st} = R_0 \left[\sqrt{\frac{p_0 - \sigma_{ep}}{(K_1 - 1)p_0}} - \frac{1}{\xi} \right] \left[\frac{(1 - K_b)p_i - L_b}{(1 - K_b)\sigma_{ep} - L_b} \right]^{\frac{1}{1 - K_b}}$$

(20)

关键支撑层厚度由部分塑性软化区和部分弹性区组成。软化区部分 T_{gr} 和弹性区部分 T_{gt} 厚度分别为:

$$\left\{ \begin{aligned} T_{gr} &= R_p \left[\frac{K_2 p_0 - K_2 K_p p_0 - L_p}{K_p (\sigma_{ep} - K_p \sigma_{ep} - L_p)} \right]^{\frac{1}{K_p - 1}} \\ K_2 p_0 &\leq \sigma_{\theta}^p \leq \sigma_F \end{aligned} \right. \quad (21)$$

$$\left\{ \begin{aligned} T_{gt} &= R_p \sqrt{\frac{\sigma_{ep} - p_0}{(1 - K_2)p_0}} \\ K_2 p_0 &\leq \sigma_{\theta}^e \leq \sigma_F \end{aligned} \right. \quad (22)$$

其中, $\sigma_{\theta}^p = \frac{L_p}{1 - K_p} + K_p (\sigma_{ep} - \frac{L_p}{1 - K_p}) (\frac{R_p}{r})^{1 - K_p}$,
 $\sigma_{\theta}^e = p_0 - (\sigma_{ep} - p_0) \frac{R_p^2}{r^2}$ 。关键支撑层的厚度为:

$$T_g = T_{gr} + T_{gt} = R_p \left\{ \left[\frac{K_2 p_0 - K_2 K_p p_0 - L_p}{K_p (\sigma_{ep} - K_p \sigma_{ep} - L_p)} \right]^{\frac{1}{K_p - 1}} + \sqrt{\frac{\sigma_{ep} - p_0}{(1 - K_2)p_0}} \right\} =$$

$$R_0 \left\{ \left[\frac{K_2 p_0 - K_2 K_p p_0 - L_p}{K_p (\sigma_{ep} - K_p \sigma_{ep} - L_p)} \right]^{\frac{1}{K_p - 1}} + \sqrt{\frac{\sigma_{ep} - p_0}{(1 - K_2)p_0}} \right\} \left[\frac{(1 - K_b)p_i - L_b}{(1 - K_b)\sigma_{ep} - L_b} \right]^{\frac{1}{1 - K_b}} \quad (23)$$

由各支撑层厚度计算公式可知:围岩的各支撑层均受岩体强度、原岩应力和支护阻力的影响,支撑结构的位置与厚度均受其影响。当支护阻力、原岩应力一致时,不同等级围岩(岩体强度存在显著差异)的支撑结构位置与厚度亦不相同。焦家金矿-790 m 中段不同质量等级围岩支撑结构区域划分情况见表 6。

表 6 巷道围岩支撑结构区域划分

Table 6 Regional division of roadway surrounding rock support structure

支撑结构	围岩级别			
	Ⅱ级围岩	Ⅲ级围岩	Ⅳ级围岩	V级围岩
浅支撑层/m	0.42	0.65	0.85	1.96
深支撑层/m	2.31	2.78	3.08	4.56
关键支撑层/m	0.46	0.71	1.02	1.22

3 巷道围岩承载结构特征演化

为了研究巷道围岩支撑层的演化特征和承载结构对巷道稳定性的作用,采用 Flac^{3D} 软件有限差分程序对巷道围岩承载结构特征及支护作用进行数值模拟研究。以焦家金矿-790 m 中段围岩为例,该处巷道开挖时采用三心拱结构,巷道宽 4.2 m,高 3.9 m,拱高 1 m,根据松动圈声波测试试验,确定其松动圈的范围约 15 m,结合采用 GSI 指标的 Hoek-Brown 准则得到的不同质量岩体强度,建立的数值计算模型见图 3。

3.1 支撑层结构特征分析

不同等级围岩最大和最小主应力的分布情况见图 4、图 5。巷道开挖后径向应力越往深处越趋近于

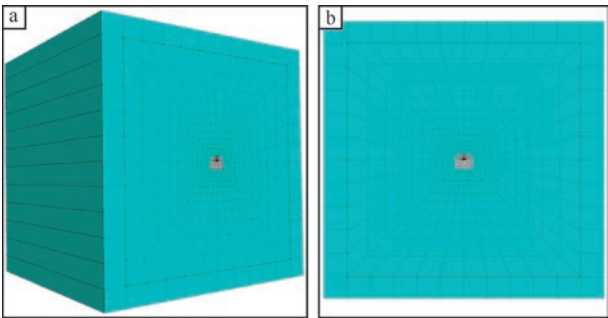


图 3 焦家金矿-790 m 中段 Flac^{3D} 数值计算模型

Fig. 3 Flac^{3D} model of -790 m level in the Jiaojia Gold Mine

原岩应力,而切向应力在围岩深处产生了局部集中,二者均有一定程度的降低。

3.2 巷道变形破坏特征

巷道围岩塑性破坏区的范围及其表面位移量随着围岩等级的提高而减小,同时应力也随围岩等级的提高而在两底角和拱角集中,深、浅支撑层的分化面越来越模糊。不同等级围岩塑性破坏区分布情况见图 6。

随着围岩质量等级的降低,塑性破坏区范围逐渐扩大,塑性区扩展深度从Ⅱ级围岩到 V 级围岩依次为 1.09 m、1.67 m、2.08 m、2.72 m。根据数值模拟计算结果,对巷道围岩支撑结构区域划分,见表 7。

4 结 论

1) 基于 Mohr-Coulomb 理论对巷道围岩应力进行了理论分析,计算了不同等级围岩塑性软化区和破碎区半径,并通过对不同质量等级围岩支撑结构区域深、浅支撑层结构演化特征的分析发现,围岩强度等级越低,支撑层的厚度越大,围岩表面位移也就越大;

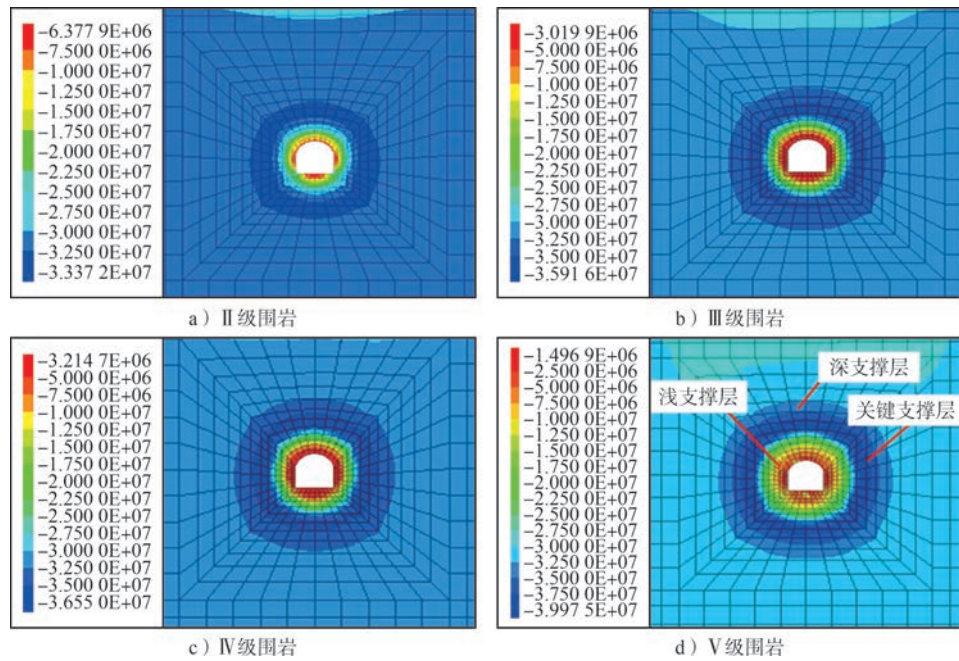


图4 不同等级围岩最大主应力分布情况

Fig. 4 Maximum principal stress distribution in surrounding rock of different grades

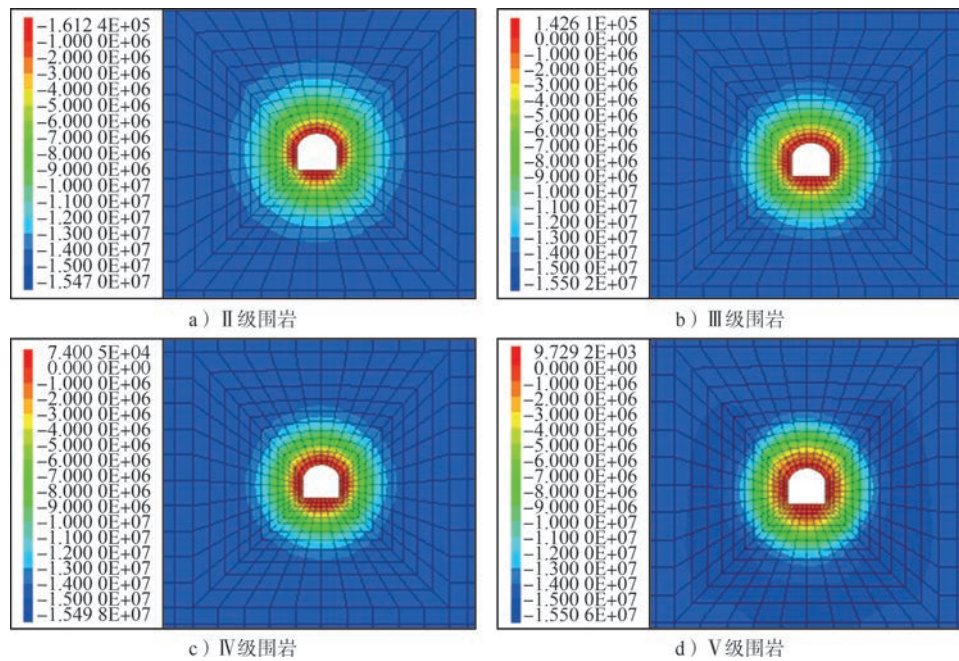


图5 不同等级围岩最小主应力分布情况

Fig. 5 Minimum principal stress distribution in surrounding rock of different grades

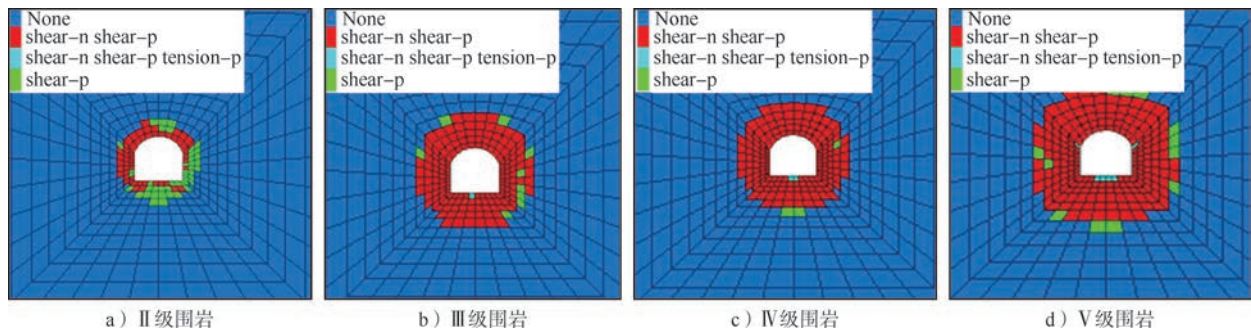


图6 不同等级围岩塑性破坏区分布情况

Fig. 6 Plastic failure zone distribution in surrounding rock of different grades

表 7 巷道围岩支撑结构区域划分
Table 7 Regional division of roadway surrounding rock support structure

支撑结构	围岩级别			
	Ⅱ级围岩	Ⅲ级围岩	Ⅳ级围岩	Ⅴ级围岩
浅支撑层/m	0.68	1.05	1.22	1.49
深支撑层/m	2.96	3.32	3.51	3.81
关键支撑层/m	0.98	1.25	1.46	1.60

关键支撑层离巷道越远,巷道表面位移越大。

2)通过Flac^{3D}软件有限差分程序对巷道围岩承载结构特征及支护作用进行了数值模拟研究,并根据数值模拟计算结果,对巷道围岩支撑结构区域划分,数值模拟结果与理论计算结果所反映的围岩支撑结构区域划分随围岩等级递减规律较为一致,实际工程中以理论计算为准。

3)理论计算显示,围岩的支护阻力越大,支撑层的厚度越小,关键支撑层离巷道越近,越有利于控制巷道的变形。

【参 考 文 献】

[1] 王宏伟,蒋耀东,薛胜,等.主动开采过程动压作用下巷道周边开挖损伤区评价[J].国际岩石力学与采矿学报,2015,77(7):265-277.

[2] 康红普.巷道围岩的承载圈分析[J].岩土力学,1996,17(4):84-89.

[3] 康红普.巷道围岩的关键圈理论[J].力学与实践,1997(1):34-36.

[4] 马念杰,李季,赵志强.圆形巷道围岩偏应力场及塑性区分布规律研究[J].中国矿业大学学报,2015,44(2):206-213.

[5] 雷显权,刘福春,严庆文,等.超埋深高应力复杂地层巷道围岩损伤分区与承载结构特征研究[J].金属矿山,2023(8):171-

180.

[6] 袁超,张建国,王卫军,等.基于塑性区分布形态的软弱破碎巷道围岩控制原理研究[J].采矿与安全工程学报,2020,37(3):453-460.

[7] 刘朝科,任建喜.非均匀应力场圆形巷道塑性区研究[J].煤矿安全,2014,45(3):42-45.

[8] 潘阳,赵光明,孟祥瑞.非均匀应力场下巷道围岩弹塑性分析[J].煤炭学报,2011,36(增刊1):53-57.

[9] 李涛,赵光明,孟祥瑞,等.考虑中间主应力的非均匀应力场圆形巷道围岩塑性区分析[J].煤炭工程,2014,46(3):68-71.

[10] 张小波,赵光明,孟祥瑞.基于岩石非线性统一强度准则的非均匀应力场中圆形巷道围岩塑性区分析[J].安全与环境学报,2013,13(3):202-206.

[11] 陈立伟,彭建兵,范文,等.基于统一强度理论的非均匀应力场圆形巷道围岩塑性区分析[J].煤炭学报,2007,32(1):20-23.

[12] 余一松,李华华,朱志根,等.软弱破碎带巷道开挖围岩破裂演化规律及支护技术研究[J].黄金,2023,44(2):14-18.

[13] 林开森,周健,李佳建.巷道与断层破碎带间距对岩体稳定性影响分析[J].黄金,2024,45(4):1-4.

[14] 彭文庆,朱豪,汪琦.破碎岩体巷道围岩承载结构应力分布规律[J].中南大学学报(自然科学版),2023,54(6):2 447-2 458.

[15] 蒋万飞.黄金矿山深部地应力测试与分布规律研究[J].黄金,2024,45(11):53-57.

[16] 蔡美峰.深部开采围岩稳定性与岩层控制关键理论和技术[J].采矿与岩层控制工程学报,2020,2(3):5-13.

[17] 于学馥.岩石记忆与开挖理论[M].北京:冶金工业出版社,1993.

[18] 杨旭旭,王文庆,靖洪文.围岩松动圈常用测试方法分析与比较[J].煤炭科学技术,2012,40(8):1-5,54.

[19] 王玺,刘焕新,刘震等.基于岩体质量等级的巷道围岩承载结构分析[J].金属矿山,2022(8):63-68.

[20] 赵光明,张小波,王超等.软弱破碎巷道围岩深浅承载结构力学分析及数值模拟[J].煤炭学报,2016,41(7):1 632-1 642.

[21] 张小波,赵光明,孟祥瑞.基于Drucker-Prager屈服准则的圆形巷道围岩弹塑性分析[J].煤炭学报,2013,38(增刊1):30-37.

Evolutionary rules of load-bearing structure of roadway surrounding rock in the Jiaojia Gold Mine

Wang Xingya¹, Liu Libo², Guo Qifeng²

(1. Jiaojia Gold Mine, Shandong Gold Mining Industry (Laizhou) Co., Ltd.;

2. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing)

Abstract: Taking the -790 m level of the Jiaojia Gold Mine as the research object, a mechanical model of the load-bearing structure of the roadway surrounding rock was established. Based on the cooperative bearing mechanism of the roadway and surrounding rock, considering the damage zoning of the surrounding rock, and combining with the loose circle ultrasonic testing experiment, the range of the loose circle was determined, which provided a basis for the stability evaluation of the rock and the design of support. The Flac^{3D} software was used to numerically simulate the characteristics of the load-bearing structure of the surrounding rock and the supporting effect. The research results show that the lower the strength grade of the surrounding rock, the thicker the thickness of the supporting layer, and the greater the surface displacement of the surrounding rock; the farther the key supporting layer is from the roadway, the greater the surface displacement of the roadway; the greater the supporting resistance of the surrounding rock, the thinner the thickness of the supporting layer, and the closer the key supporting layer is to the roadway, the more favorable it is for controlling the deformation of the roadway.

Keywords: roadway surrounding rock; load-bearing structure; damage zoning; numerical simulation; rock mass quality evaluation; stability