

# 弱胶结软岩地层相邻大断面巷道合理间距研究<sup>①</sup>

陈佃浩<sup>1</sup>, 李廷春<sup>1</sup>, 吕学安<sup>1,2</sup>, 马旭强<sup>3</sup>, 张仕林<sup>1,4</sup>, 吕连勋<sup>1,5</sup>

(1. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590; 2. 青岛建国工程检测有限公司, 山东 青岛 266000; 3. 中国科学院 武汉岩土力学研究所 岩土力学重点实验室 湖北 武汉 430071; 4. 中国石油天然气华东勘察设计研究院 岩土工程处, 山东 青岛 266071; 5. 北京市勘察设计研究院有限公司, 北京 100038)

**摘要:** 基于相邻巷道开挖扰动和爆破振动对已有巷道影响的理论分析, 推导了相邻大断面巷道合理间距的确定公式。以麦垛山马头门硐室与主变电所巷道间距设计为依托, 利用数值方法计算变间距多个模型的开挖扰动影响, 以确定其巷道间距。研究结果表明, 麦垛山马头门硐室与主变电所巷道间距的理论计算值应不低于 36.6 m; 数值分析发现当巷道间距为 40 m 时, 马头门硐室与主变电所巷道中间围岩的应力场已接近原岩应力, 巷道围岩位移场与塑性区基本趋于对称稳定, 马头门硐室支护荷载与未受影响前基本一致。利用上述研究成果, 综合现场施工状况, 最终确定其间距为 40 m。工程施工后硐室与巷道稳定, 验证了在软岩地层中该巷道间距设计的科学合理性。

**关键词:** 弱胶结软岩; 巷道间距; 开挖扰动; 爆破振动; 数值分析

中图分类号: TD263

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2016.04.005

文章编号: 0253-6099(2016)04-0016-05

## Reasonable Spacing for Adjacent Large-section Roadway in Weakly Cemented Soft Rock Strata

CHEN Dian-hao<sup>1</sup>, LI Ting-chun<sup>1</sup>, LÜ Xue-an<sup>1,2</sup>, MA Xu-qiang<sup>3</sup>, ZHANG Shi-lin<sup>1,4</sup>, LÜ Lian-xun<sup>1,5</sup>

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China; 2. Qingdao Jianguo Engineering Testing Company Limited, Qingdao 266000, Shandong, China; 3. Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China; 4. Geotechnical Engineering Department, China National Petroleum Investigation and Design and Survey Institute in East China, Qingdao 266071, Shandong, China; 5. BGI Engineering Consultants Ltd, Beijing 100038, China)

**Abstract:** A formula for the reasonable spacing of large-section roadway was deduced based on the analysis of impact of the disturbance from the excavation of adjacent roadway and blasting vibration on the existing roadway. With the spacing between Matou chamber and main substation roadway in Maiduo Mountain Coal Mine as an example, the excavation disturbance for several models with different spacing was calculated with numeric method, for deciding the rational roadway spacing in the design. The study shows that the theoretical spacing between Matou chamber and main substation roadway shall be no less than 36.6 m. It is found that with the roadway spacing at 40 m, the stress field of the surrounding wall between chamber and the main substation roadway is close to the stress of primary rock. The displacement field of roadway surrounding rock is in the symmetry to the plastic zone, and the support load of chamber is basically unchanged. Based on the above results, the on-site working condition was taken into consideration to finally set the spacing at 40 m. Practice showed both the chamber and roadway remained stable after engineering construction, which has proved the spacing design scientifically reasonable.

**Key words:** weakly cemented soft rock; roadway spacing; excavation disturbance; blasting vibration; numerical analysis

马头门硐室是井底车场的重要组成部分, 与井筒相连, 是矿井的咽喉部位。一般而言, 马头门硐室设计

断面大, 最先施工。当与相邻大断面巷道间距过小时, 常受其开挖扰动和爆破振动的影响, 马头门硐室的围

① 收稿日期: 2016-02-03

基金项目: 国家自然科学基金(51279096, 51409154); 山东省自然科学基金(ZR2012EEM030)

作者简介: 陈佃浩(1989-), 男, 山东济南人, 硕士研究生, 主要从事裂隙岩体力学特性方面的研究工作。

通讯作者: 李廷春(1968-), 男, 山西朔州人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事裂隙岩体力学特性方面的研究工作。

岩稳定性得不到保证。当巷道间距过大时,会延长联络巷的长度,大大增加建设成本。因此,存在相邻大断面巷道合理间距的确定问题。

针对硐室或巷道的间距设计问题,许多学者进行了研究。靖洪文等<sup>[1]</sup>分析了新上海一号煤矿副井马头门硐室的破坏特征,指出周围硐室的开挖引起马头门硐室的失稳;刘泉声<sup>[2]</sup>等对淮南朱集矿轨道巷的围岩变形进行监测,结果表明,巷道之间的扰动影响在间距大于 5 倍硐径情况下仍然存在;闫长斌等<sup>[3]</sup>通过数值方法分析变间距下硐室群的稳定性,得出硐室间距越大硐室群越稳定的结论;蒲胜双等<sup>[4]</sup>从巷道应力影响带和围岩稳定性两方面分析,得出平行巷道间距的确定方法。

弱胶结软岩广泛存在于我国西北部地区,其典型特征为强度低、胶结差、易风化、遇水软化等<sup>[5-6]</sup>;在此类岩层中,根据硬岩的设计原则,得出大断面相邻巷道的间距,许多煤矿的马头门硐室、大断面巷道等出现了底鼓、片帮、冒顶等现象<sup>[1,7]</sup>。

本文基于当量半径法分析巷道的弹塑性应力场,并考虑临近巷道爆破施工震动下已有巷道的安全,推导出泥化弱胶结软岩地层中大断面巷道合理间距的确定公式。依托麦垛山煤矿马头门硐室工程,通过数值分析方法得出平行巷道合理间距。结合两种方法,为麦垛山煤矿马头门硐室与主变电所巷道间距的确定提供依据。

## 1 巷道间距的理论计算

### 1.1 开挖扰动安全间距确定

目前,多数煤矿巷道断面形状为直墙半圆拱形。而受边界条件等所限,对于此类巷道的求解主要借助于数值模拟。如果采用解析法求解,多采用当量半径法将其截面近似为圆形,进行粗略的解析分析。

#### 1.1.1 非圆形巷道的当量半径法

当量半径法就是用一个与非圆形巷道截面积相等的虚拟圆来代替非圆形巷道,通过分析虚拟圆形巷道周边应力分布,粗略计算非圆形巷道的围岩应力。其中当量半径<sup>[8]</sup>就是这个虚拟圆的半径,其计算公式为:

$$R_1 = k \cdot \left( \frac{S}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中  $R_1$  为当量半径,  $m$ ;  $S$  为非圆形巷道截面面积,  $m^2$ ;  $k$  为巷道断面形状修正系数<sup>[8]</sup>。

#### 1.1.2 非圆形巷道应力弹塑性解

静水压力场中,在极软岩层,埋深为  $H$  的圆形巷道,开挖后周边围岩某点处的应力  $\sigma_\theta$ 、 $\sigma_r$  如图 1 所

示<sup>[9]</sup>。通过理论计算可得到  $\sigma_\theta$ 、 $\sigma_r$  的解析解<sup>[10]</sup> 结合当量半径法得出非圆形巷道应力弹塑性解为:

塑性区应力:

$$\begin{cases} \sigma_\theta^p = ccot\varphi \left[ \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \left( \frac{r}{k} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1-\sin\varphi}} \left( \frac{S}{\pi} \right)^{\frac{\sin\varphi}{\sin\varphi-1}} - 1 \right] \\ \sigma_r^p = ccot\varphi \left[ \left( \frac{r}{k} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1-\sin\varphi}} \left( \frac{S}{\pi} \right)^{\frac{\sin\varphi}{\sin\varphi-1}} - 1 \right] \end{cases} \quad (2)$$

弹性区应力:

$$\begin{cases} \sigma_\theta^e = p_0 + (ccos\varphi + p_0\sin\varphi) \cdot \left[ \frac{(p_0 + ccot\varphi)(1 - \sin\varphi)}{ccot\varphi} \right]^{\frac{1-\sin\varphi}{\sin\varphi}} \frac{Sk^2}{\pi r^2} \\ \sigma_r^e = p_0 - (ccos\varphi + p_0\sin\varphi) \cdot \left[ \frac{(p_0 + ccot\varphi)(1 - \sin\varphi)}{ccot\varphi} \right]^{\frac{1-\sin\varphi}{\sin\varphi}} \frac{Sk^2}{\pi r^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中  $\sigma_\theta$ 、 $\sigma_r$  分别为切向应力和径向应力,  $MPa$ ; 上标  $p$ 、 $e$  分别代表塑性区和弹性区;  $p_0$  为原岩应力,  $p_0 = \mu H$ ,  $MPa$ ;  $R_0$  为圆形巷道半径,  $m$ ;  $c$  为岩石的粘聚力,  $MPa$ ;  $\varphi$  为岩石的内摩擦角,  $(^\circ)$ ;  $r$  为该点到巷道中心位置的距离,  $m$ 。

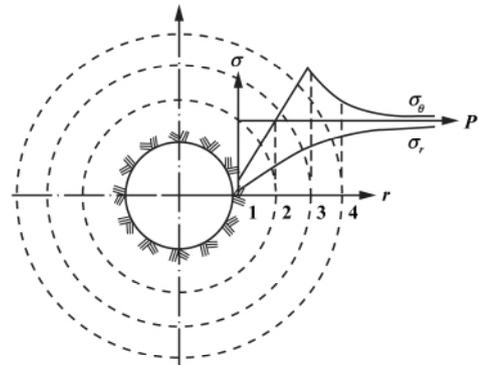


图 1 圆形巷道围岩弹塑性应力分布状态  
1 2—塑性区; 3 4—弹性区

#### 1.1.3 开挖扰动安全间距

由图 1 可知,巷道开挖引起围岩应力重分布,从临空面到岩体内部,其值逐渐恢复到原岩应力状态。根据叠加原理求得弹性区内扰动应力的改变值。

$$\begin{cases} \sigma_{\theta 0}^e = \sigma_\theta^e - p_0 = T \frac{Sk^2}{\pi r^2} \\ \sigma_{r 0}^e = \sigma_r^e - p_0 = -T \frac{Sk^2}{\pi r^2} \end{cases} \quad (4)$$

式中  $\sigma_{\theta 0}^e$ 、 $\sigma_{r 0}^e$  分别为切向和径向应力扰动值。

$$T = (ccos\varphi + p_0\sin\varphi) \left[ \frac{(p_0 + ccot\varphi)(1 - \sin\varphi)}{ccot\varphi} \right]^{\frac{1-\sin\varphi}{\sin\varphi}} \quad (5)$$

如图1所示,在极软岩层中开挖巷道,周边围岩的塑性区位于弹性区内侧。开挖两条巷道时,为保证彼此的稳定性,相邻巷道围岩的塑性区不能重叠,即两条巷道之间存在弹性区。

在两巷道间的弹性区中心取一个微元,其应力状态可等效为图2。设两巷道中心间距为 $2l$ ,则该微元到一侧巷道中心的距离为 $l$ ,其应力可由叠加原理求得:

$$\begin{cases} \sigma_{\theta}^e = p_0 + \sigma_{\theta 0}^e + \sigma_{\theta 1}^e = p_0 + T \left[ \frac{S_0 k_0^2}{\pi l^2} + \frac{S_1 k_1^2}{\pi l^2} \right] \\ \sigma_r^e = p_0 + \sigma_{r 0}^e + \sigma_{r 1}^e = p_0 - T \left[ \frac{S_0 k_0^2}{\pi l^2} + \frac{S_1 k_1^2}{\pi l^2} \right] \end{cases} \quad (6)$$

式中 $\sigma_{\theta 1}^e$ 、 $\sigma_{r 1}^e$ 分别为后掘巷道开挖所引起的切向和径向扰动应力改变值,MPa; $S_0$ 、 $S_1$ 分别为两相邻巷道的截面积, $m^2$ ;  $k_0$ 、 $k_1$ 分别为两相邻巷道的断面形状修正系数。

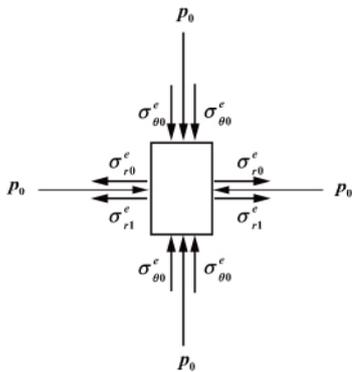


图2 两巷道间中心微元应力状态

一般认为,当洞室开挖引起的扰动应力接近原岩应力时,扰动应力对围岩的影响可以忽略。考虑到支护反力的作用,围岩塑性区半径与弹性区应力都会有所降低<sup>[10]</sup>,本文将应力变化率10%定为应力扰动的阈值<sup>[11]</sup>,以体现支护的影响。即:

$$p_0 \pm T \left[ \frac{S_0 k_0^2}{\pi l^2} + \frac{S_1 k_1^2}{\pi l^2} \right] = p_0 (1 + 10\%) \quad (7)$$

则相邻巷道合理间距 $l_r$ 为:

$$\begin{aligned} l_r &= 2l - \left[ k_0 \left( \frac{S_0}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} + k_1 \left( \frac{S_1}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \\ &= 2 \left[ \frac{T(k_0^2 S_0 + k_1^2 S_1)}{10\% p_0 \pi} \right]^{\frac{1}{2}} - \left[ k_0 \left( \frac{S_0}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} + k_1 \left( \frac{S_1}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

1.2 爆破安全允许距离确定

根据爆破安全规程<sup>[12]</sup>,巷道应处在爆破安全允许距离之外,爆破安全允许距离 $l_b$ 按式(9)计算:

$$l_b = \left( \frac{K}{v} \right)^{\frac{1}{\alpha}} (qdS)^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

式中 $l_b$ 为爆破振动安全允许距离,m; $v$ 为巷道允许振速, $\mu m/s$ ;  $K$ 、 $\alpha$ 分别为与爆破点至保护对象间的地形、地质条件有关的系数和衰减指数; $q$ 为单位炸药消耗量, $kg/m^3$ ;  $d$ 为单次爆破掘进进尺,m。

1.3 巷道合理间距确定

弱胶结软岩地层中,大断面巷道间距须满足两个条件:①后掘巷道的开挖扰动对临近巷道的影响可忽略不计;②相邻巷道处于对方的爆破安全允许距离之外。即,巷道安全间距 $L$ 应表示为:

$$L \geq \max\{l_r, l_b\} \quad (10)$$

式中 $l_r$ 与 $l_b$ 分别通过式(8)和式(9)确定。

2 工程实例

2.1 工程概况

麦垛山煤矿位于宁夏回族自治区中东部,该矿副立井并筒掘至底部后,逐步进行副立井主水平硐室与巷道的开挖支护。水平埋深550m,处于弱胶结软岩地层中,围岩物理力学性质如表1所示。

表1 岩石的物理力学参数

岩性	密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	泊松比	粘聚力 $/MPa$	内摩擦角 $/(^{\circ})$	单轴抗压强度 $/MPa$
粉砂岩	2.4	0.30	12	32	43
细砂岩	2.3	0.32	8	25	25

2.2 马头门硐室的支护参数

马头门硐室断面形状为直墙半圆拱形,最长一段硐室的掘进断面宽8.4m、高9.5m,断面较大。初始支护设计采用“锚网喷+砌碇支护”,其主要支护参数如图3所示。

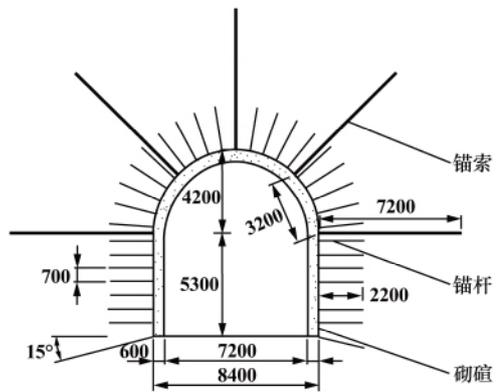


图3 马头门硐室支护断面图(单位:mm)

采用 $\Phi 20\text{ mm} \times 2\ 200\text{ mm}$ 全螺纹树脂锚杆,间排距 $700\text{ mm} \times 700\text{ mm}$ ,每个锚杆孔使用2支药卷;顶部

采用  $\Phi 17.8 \text{ mm} \times 7200 \text{ mm}$  的锚索补强,排距为  $1400 \text{ mm}$ ,每排5根,垫板尺寸  $\Phi 300 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ;钢筋网片为  $\Phi 6.5 \text{ mm}$  圆钢加工,规格为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ,喷射厚度  $150 \text{ mm}$  的混凝土形成临时支护。

硐室全部开挖后,以双层钢筋混凝土砌碛为永久支护,厚度为  $600 \text{ mm}$ ,强度等级为 C60,配筋规格为  $\Phi 25 \times @300 \times 300 \text{ mm}$ 。

### 2.3 硐室周围巷道分布情况

马头门硐室与设备通道和管子道相邻,平行于后期车场中开挖的巷道。周围巷道中主变电所断面最大,其开挖扰动对临近的马头门硐室影响最大。

后掘主变电所巷道断面为直墙半圆形,断面宽度为  $8.4 \text{ m}$ 、高度为  $9.5 \text{ m}$ ,支护设计为“锚网喷+砌碛支护”,与马头门硐室的支护参数相同。

### 2.4 马头门硐室与主变电站巷道间距确定

#### 2.4.1 巷道开挖扰动安全间距

马头门硐室为非圆形断面,采用当量半径法将马头门硐室圆形标准化,通过式(8)确定巷道间距。

岩层物理力学参数按照物理性质较差的细砂岩选取(表1)。岩石容重  $2400 \text{ kg/m}^3$ 。故巷道周围原岩应力为:  $p_0 = \mu \times H = 13.2 \text{ MPa}$ 。

马头门硐室与主变电所巷道的截面积  $S_0 = S_1 = 72.23 \text{ m}^3$ 。断面为拱形,修正系数取  $k_0 = k_1 = 1.10^{[9]}$ 。

将以上各参数代入式(8),可得:  $l_r = 36.6 \text{ m}$ 。

#### 2.4.2 爆破安全允许距离

根据爆破安全规程<sup>[12]</sup>,泥化弱胶结软岩地层中,  $k$ 、 $\alpha$  分别取  $250$ 、 $1.8$ ;巷道允许振速取  $15 \text{ cm/s}$ 。单位炸药消耗量  $q = 1.36 \text{ kg/m}^3^{[13]}$ 。按单次掘进进尺  $d = 2 \text{ m}$  计算,将以上数据代入式(9)得:  $l_b = 27.7 \text{ m}$ 。

#### 2.4.3 巷道安全间距的确定

综合考虑巷道开挖扰动与爆破安全两种因素,在弱胶结软岩地层中,深埋大断面巷道间距应按式(10)选取。即:  $L \geq \max\{l_r, l_b\} = l_r = 36.6 \text{ m}$ 。即:马头门硐室与主变电所巷道间距应不小于  $36.6 \text{ m}$ 。

## 3 相邻巷道开挖影响的数值分析

以麦垛山煤矿建设为依托,利用有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup> 模拟分析多种巷道间距下巷道的稳定性,选择马头门硐室与主变电所巷道合理间距。

### 3.1 模型的建立

根据麦垛山煤矿马头门硐室与主变电站巷道的实际情况,建立如图4所示的计算模型。图4中左侧为马头门硐室,右侧为主变电所巷道。 $D$  为二者的间距,分别取  $20$ 、 $25$ 、 $30$ 、 $35$ 、 $40 \text{ m}$ ,建立5种计算模型。按照实际施工顺序,先开挖和支护马头门硐室,后开挖和支护主变电所巷道。

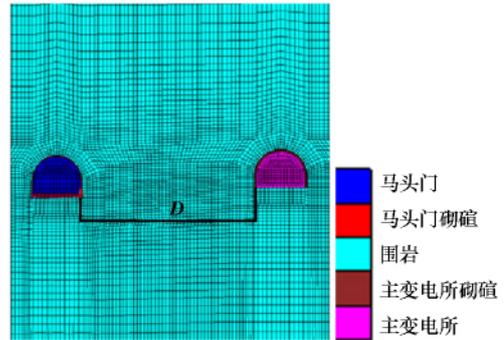


图4 计算模型

### 3.2 数值计算结果分析

受篇幅所限,仅展示巷道间距为  $20$ 、 $30$ 、 $40 \text{ m}$  时的水平应力场、位移场、塑性区和5种巷道间距下支护荷载的变化的分析。

#### 3.2.1 围岩水平应力分布特征

不同巷道间距下平行巷道间围岩水平应力分布特征如图5所示。图中用黑线勾勒出的部分为应力影响带(应力变化率降低到  $10\%$  以下且处于变化中的区域)。

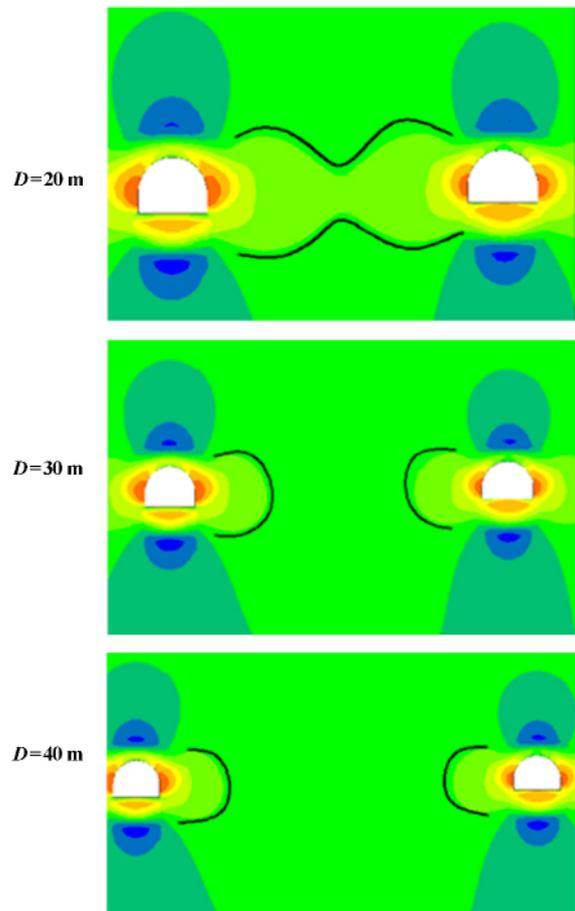


图5 不同巷道间距时围岩水平应力分布云图

由图5可见,当巷道间距为  $20 \text{ m}$  时,巷道的影响区域有连通部分;当巷道间距为  $30 \text{ m}$  时,巷道应力影

响区域已相互独立,但巷道影响带约占中间围岩宽度的一半;当巷道间距为40 m时,巷道应力影响带已相互独立,且巷道应力影响带大小已不足巷道中间围岩宽度的1/3,相邻巷道间开挖扰动的影响可基本忽略。

### 3.2.2 巷道围岩变形破坏分析

当单一巷道的形状和受力对称,围岩的位移场是对称的。若受到临近巷道开挖扰动影响,这种对称性会被打破,且巷道部分区域的位移值会增大。

巷道竖向位移云图如图6所示。由图可见,巷道间距不同时,巷道开挖扰动的影响使巷道位移的对称性发生改变。巷道间距为20 m时,巷道竖向位移场向中部倾斜;巷道间距为30 m时,巷道竖向位移场的倾斜度减小,但仍有一定的偏斜;巷道间距为40 m时,巷道竖向位移场基本恢复对称。

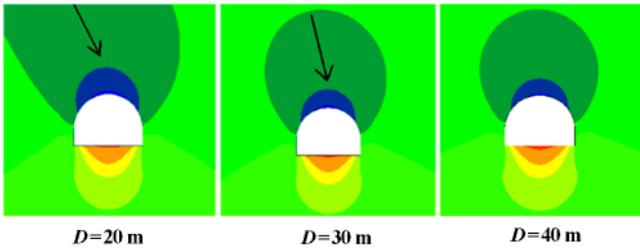


图6 巷道竖向位移云图

图7为巷道塑性区分布,左侧为马头门硐室,右侧为主变电所巷道;并标出了塑性区不对称部分。

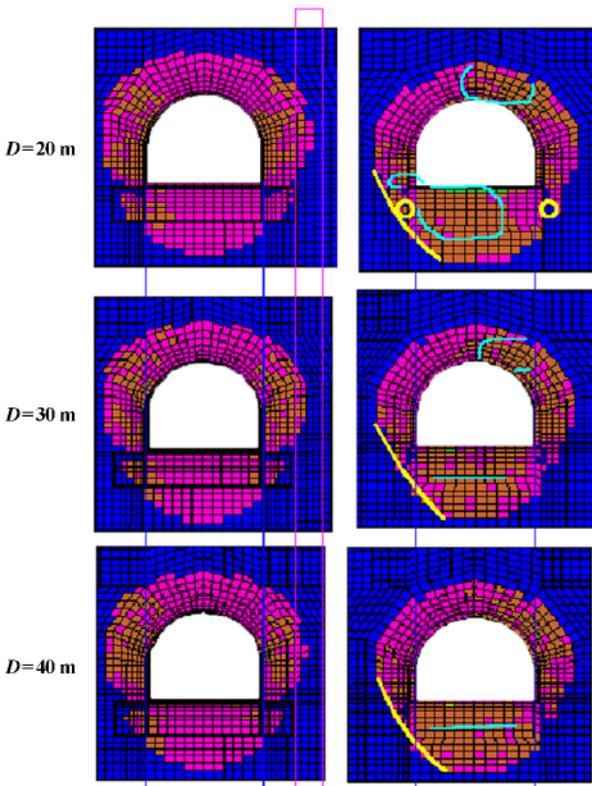


图7 巷道围岩塑性区分布图

由图7可见,随着巷道间距增大,马头门硐室与主变电所巷道塑性区不对称部分面积逐渐缩小,且部分区域塑性区范围也在减小;巷道间距为40 m时,硐室与巷道围岩塑性区已基本对称。

### 3.2.3 巷道支护荷载变化特征

由数值计算方法得出的巷道支护荷载如表2所示,其值受到材料参数以及巷道形状等多种因素的影响。本次计算中仅考虑巷道间距这一个影响因子。

表2 马头门硐室右帮锚杆受力的变化情况

D /m	F <sub>1</sub> /kN	F <sub>2</sub> /kN	$\frac{F_2 - F_1}{F_1} \times 100 /\%$
20	1.464	1.605	9.63
25	1.464	1.561	6.62
30	1.463	1.524	4.17
35	1.463	1.487	1.64
40	1.464	1.465	0.06

注: D为马头门硐室与主变电所巷道之间的距离; F<sub>1</sub>为仅开挖支护马头门时,马头门硐室右帮的锚杆受力; F<sub>2</sub>为主变电所巷道开挖后,马头门硐室同位置处的锚杆受力。

由表2可知:①主变电所未开挖时,马头门硐室右帮锚杆受力基本不变,硐室稳定;②主变电所巷道开挖后,锚杆受力增大,且巷道间距由20 m增大到40 m时,其增大比率逐渐减小;③巷道间距为40 m时,锚杆受力增大比率仅为0.06%,支护荷载与主变电所巷道未开挖时基本一致。

### 3.2.4 数值分析结果

综合不同巷道间距下围岩应力扰动、变形破坏以及巷道支护荷载变化的研究成果,确定麦垛山煤矿马头门硐室与主变电所巷道间距为40 m。

### 3.3 巷道间距的确定及应用

通过理论计算与数值分析两种方法得出的马头门硐室与主变电站巷道间距分别为不小于36.6 m和40 m。综合现场施工状况及安全性要求,将巷道间距确定为40 m。

利用上述成果,在麦垛山煤矿现场实施后,马头门硐室和主变电所巷道围岩安全稳定。

## 4 结 论

利用理论计算和数值分析相结合的方法,对弱胶结软岩地层相邻大断面巷道的稳定性进行分析,得出以下几点结论:

- 1) 考虑临近巷道开挖扰动与爆破施工震动下已有硐室的安全,推导出巷道合理间距的确定公式:  $L \geq \max\{l_r, l_b\}$ 。以麦垛山煤矿工程设计为依托,计算出弱胶结软岩地层下,马头门硐室与主变电所巷道合理间距不小于36.6 m。(下转第25页)

论上的矿石贫化率为 9.45%。实际爆破生产统计 27# 爆堆共生产矿石 1.71 万吨, 矿石 MgO 平均品位为 16.51%, 矿石贫化率为 7.15%。

由以上分析计算可知, 以台阶起采厚度为依据选择爆破方案的实际生产结果满足乌龙泉矿贫化率 10% 的控制要求, 验证了理论方案的可行性。同时, 理论计算将废石品位以 0 处理, 而实际废石是有一定品位的, 所以实际贫化率一般会比理论贫化率略小, 从另一角度反映出理论方案应用于实际的效果较好。

## 4 结 论

针对乌龙泉矿露天台阶分爆分采矿石贫化率差别大、不易控制问题, 提出生产台阶矿石起采厚度(简称台阶起采厚度)的概念, 以台阶起采厚度作为分爆分采方案选择的依据, 控制台阶生产中矿石贫化率。得到结论如下:

1) 推导计算了 3 种爆破方案下矿石贫化率与台阶起采厚度的关系式; 贫化率一定时, 最小台阶起采厚度随矿体倾角、采掘带宽度和剥离表土厚度的增大而减小, 随废石混入厚度增大而增大。

2) 乌龙泉矿露天采场矿石贫化率控制为 10% 时, 各爆破条件下最小台阶起采厚度差别较大, 变化范

围为 4.91 ~ 10.13 m; 采场实际生产中根据台阶起采厚度制定分爆分采方案, 贫化率控制效果较好。

3) 台阶起采厚度为台阶生产爆破方案的选择提供了依据, 更加准确地控制采场矿石贫化率, 保证作业效率; 生产过程中, 合理地增加采掘带宽度、控制废石混入厚度可以有效降低矿石贫化率。

### 参考文献:

- [1] 丁 鹏, 李夕兵, 刘志祥, 等. 基于损失率和贫化率的采场参数优化研究[J]. 矿冶工程, 2007, 27(3): 24-27.
- [2] 毛荐新, 张传舟, 曹祖武, 等. 开采技术因素对露天矿石损失与贫化的影响[J]. 金属矿山, 2002(10): 10-13.
- [3] 李昌宁, 任凤玉, 徐小荷. 我国矿产资源开采中的损失贫化浅析[J]. 自然资源学报, 2000(1): 36-39.
- [4] 张洪运. 浅谈矿山企业控制和降低采矿损失率与矿石贫化率[J]. 有色矿冶, 2002(2): 6-7.
- [5] 朱胜利. 七里坪金矿生产实践中降低贫化率、损失率措施的探讨[J]. 价值工程, 2011(24): 27-29.
- [6] 汪小艳. 土屋铜矿深孔爆破技术优化的研究[J]. 爆破, 2014, 31(1): 82-84.
- [7] 陈 毅. 爆破效果影响因素分析[J]. 有色金属(矿山部分), 2011, 63(1): 65-67.
- [8] 钟 杰, 白云飞. 凡口铅锌矿采场贫化率与损失率分析[J]. 有色金属(矿山部分), 2009, 61(2): 11-14.
- [9] 袁怀雨, 刘保顺, 李克庆. 合理入选品位整体动态优化[J]. 北京科技大学学报, 2002, 24(3): 239-242.

(上接第 20 页)

2) 通过数值方法分析马头门硐室与主变电所巷道的稳定性, 当巷道间距为 40 m 时, 麦垛山马头门硐室与主变电所巷道中间围岩的应力场接近原岩应力, 位移场与塑性区基本趋于对称稳定, 马头门硐室支护荷载与未受影响前基本一致。

3) 结合两种巷道间距确定方法, 得出麦垛山煤矿马头门硐室和主变电所巷道间距应为 36.6 ~ 40 m。综合现场施工状况, 将巷道间距确定为 40 m。

4) 我国西部地区处于弱胶结软岩地层, 围岩岩性差。而马头门硐室巷道断面大, 临近巷道多, 支护设计时应特别注意临近巷道开挖扰动和爆破振动的影响。确定合理的巷道间距不仅有助于保持巷道稳定性, 而且能大大减少煤矿的建设成本。

### 参考文献:

- [1] 靖洪文, 苏海健, 孟 波. 新上海一号煤矿副井马头门合理支护技术研究[J]. 安徽理工大学学报, 2012, 32(S1): 4-8.
- [2] 刘泉声, 时 凯, 黄 兴. 临近巷道掘进扰动效应下巷道变形监

测分析[J]. 煤炭学报, 2011, 36(6): 897-902.

- [3] 闫长斌, 徐国元. 竖向排列地下硐室群动力稳定性的数值模拟分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2006, 37(3): 593-599.
- [4] 蒲胜双, 李旭阳. 相邻平行巷道间距的确定[J]. 矿业安全与环保, 2001, 28(S1): 152-154.
- [5] 李廷春, 卢 振, 刘建章, 等. 泥化弱胶结软岩地层中矩形巷道的变形破坏过程分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 1077-1083.
- [6] 李廷春, 张仕林, 卢 振, 等. 泥化弱胶结软岩巷道底板变形破坏机理分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2015, 30(1): 1-7.
- [7] 王渭明, 高 鑫, 景继东, 等. 弱胶结软岩巷道锚网索耦合支护技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(1): 23-26.
- [8] 刘长武, 曹 磊, 刘树新. 深埋非圆形地下洞室围岩应力解析分析的“当量半径”法[J]. 铜业工程, 2010(1): 1-5.
- [9] 于学馥, 郑颖人, 刘怀恒, 等. 地下工程围岩稳定性分析[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1983.
- [10] 王渭明, 杨更社, 张向东, 等. 岩石力学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010.
- [11] 李廷春, 李术才, 白世伟. 厦门海底隧道顶板厚度选择及其开挖稳定性分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 2010-2014.
- [12] GB6722-2011, 爆破安全规程[S]. 2011.
- [13] 段宝福. 工程爆破[M]. 北京: 北京大学出版社, 2012.