

采矿与井巷工程

# 大断面半圆拱煤巷围岩松动圈厚度测定及分布规律

孙希奎<sup>1,2</sup>, 常庆粮<sup>3,4</sup>, 施现院<sup>1,2</sup>, 李向阳<sup>1,2</sup>

(1. 山东能源淄博矿业集团有限责任公司, 山东 淄博 255000; 2. 山东省充填开采工程技术研究中心, 山东 淄博 255000;  
3. 淄博矿业集团有限责任公司 博士后流动站, 山东 淄博 255000;  
4. 中国矿业大学 矿业工程学院 深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 为研究直墙半圆拱煤巷松动圈的分布规律, 运用力学分析和应力波理论对松动圈形成机理进行了解释, 以某矿 11713 回风巷为工程实例, 采用 Midas/GTS-FLAC<sup>3D</sup> 耦合模拟技术对松动圈形成过程进行了模拟, 得出该类型巷道松动圈呈“蝴蝶”形, 同时定义了数值模拟中松动圈厚度的计算方法。为验证模拟结果的可靠性, 运用超声波测试法对该巷松动圈厚度进行了现场测定。结果表明: 松动圈厚度实测值为 1.8~2.0 m, 与数值模拟得到的 2.0 m 非常接近, 围岩类别为 IV, 巷道支护方式由 U 型棚支护改为锚联网支护, 支护能有效控制围岩变形, 可以在工程中推广应用。

**关键词:** 松动圈; 声波法; 半圆拱煤巷; 巷道支护

**中图分类号:** TD350 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2016)11-0001-06

## Thickness measurement and distribution law of loose rings of surrounding rock in large cross section semicircle arch seam gateway

Sun Xikui<sup>1,2</sup>, Chang Qingliang<sup>3,4</sup>, Shi Xianyuan<sup>1,2</sup>, Li Xiangyang<sup>1,2</sup>

(1. Shandong Energy Zibo Mining Group Corporation Limited, Zibo 272175, China; 2. Shandong Provincial Research Center of Backfill Mining Engineering and Technology, Zibo 255000, China; 3. Postdoctoral Research Station, Zibo Mining Group Corporation Limited, Zibo 255000, China; 4. MOE Key Lab of Deep Coal Resources and Mining, School of Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** In order to study the distribution law of the loose rings in the semicircle arch seam gateway with the vertical sidewalls, the mechanics analysis and the stress wave theory were firstly applied to explain the formation mechanism of the loose rings. Secondly, based on No. 11713 air return gateway of a mine as an engineering case, a Midas/GTS-FLAC<sup>3D</sup> coupling simulation technology was applied to simulate the formation process of the loose rings, the loose rings obtained of the type gateway was in a "butterfly" form and meanwhile the calculation method of the loose ring thickness in the numerical simulation was defined. In order to verify the reliability of the simulation results, an ultrasonic wave measuring method was applied to the site measurement on the loose ring thickness of the gateway. The results showed that the actual measured value of the loose ring thickness was 1.8 ~ 2.0 m and was much closed to 2.0 m obtained from the numerical simulation. The surrounding rock type was IV, the support method of the gateway was changed from the U type shield support to the bolt and steel mesh support, the support method could effectively control the deformation of the surrounding rock and could be promoted and applied to the engineering.

**Key words:** loose rings; sonic method; semicircle arch seam gateway; gateway support

## 0 引言

松动圈是评判巷(隧)道围岩稳定性和进行巷

道支护设计的重要参考指标。自 1946 年太沙基研究松动圈并提出冒落拱理论以来<sup>[1]</sup>, 国内外学者对松动圈理论开展了大量的研究。基于现场实测研

收稿日期: 2016-02-24; 责任编辑: 杨正凯 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.11.001

基金项目: 山东省泰山学者专项经费资助项目(201309)

作者简介: 孙希奎(1965—), 男, 山东淄博人, 研究员, 博士, 现任山东能源淄博矿业集团有限责任公司总工程师。E-mail: sunxikui@sina.com

引用格式: 孙希奎, 常庆粮, 施现院, 等. 大断面半圆拱煤巷围岩松动圈厚度测定及分布规律[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(11): 1-6.

Sun Xikui, Chang Qingliang, Shi Xianyuan, et al. Thickness measurement and distribution law of loose rings of surrounding rock in large cross section semicircle arch seam gateway[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(11): 1-6.

究,文献[2-3]分别提出了松动圈厚度的经验公式,由于仅考虑3个影响指标,其误差均较大。陈秋南等<sup>[4]</sup>基于Hoek-Brown准则,通过修正扰动参数推导出了圆形隧道轴对称条件下松动圈厚度的解析解,但实用性不足。在数值模拟方面,刘刚等<sup>[5]</sup>采用ANSYS模拟了静水压力状态下矩形巷道松动圈的分布规律,拟合出了松动圈厚度与围岩强度、地压和跨高比相关的回归方程。湛铠瑜等<sup>[6]</sup>在忽略构造应力的条件下,采用ANIDA模拟得出了松动圈5个影响指标的显著程度。此外,文献[7-9]分别采用BP神经网络、未确知聚类方法和支持向量机理论等数理统计方法对松动圈厚度进行了预测研究,均取得了一定的效果。由于松动圈受许多因素影响,其分布规律不尽相同。对此,笔者以潘北矿掘进的半圆拱煤巷为研究对象,采用Midas/GTS-FLAC<sup>3D</sup>耦合模拟技术和超声波测试技术,研究大断面半圆拱煤巷围岩松动圈的分布规律。

## 1 “蝴蝶”形松动圈形成机理及条件

巷道开挖卸荷以后,岩体中原岩应力场遭到破坏,应力重新分布呈“蝴蝶”形的二次应力场,表现为巷道两帮出现增压区,顶底板出现卸压区。如果围岩应力小于围岩抗压强度,围岩处于弹塑性状态,巷道自稳无需支护;相反,围岩会发生拉伸与剪切破坏,形成一定范围的破裂区,区内岩体被裂隙贯穿切割,黏聚力趋于零,内摩擦角较小。围岩根据受力情况由内向外可分为松动区(应力降低区)、塑性强化区(应力升高区)、弹性区和原岩区,如图1所示。巷道开挖瞬间,围岩产生弹性波(钻爆法还会产生爆轰波),并由巷道周边向深部传播,在介质分界处产生反射和折射,直至最终衰弱消失。巷道周边围岩极易在反射波的拉应力下出现脆性张拉裂隙,释放弹性能,在弹性能、围岩自重应力及覆岩静压作用下,裂隙进一步扩展、贯通,最终发生剪切破坏。在张拉和重剪的耦合作用下,破坏组合成复合破裂区,即松动圈。

根据文献[2-8]相关研究成果,松动圈受围岩性质、结构、构造、产状,巷道断面形状及尺寸、地应力、支护形式、施工工艺和地下水等因素制约,尤以围岩岩性、巷道断面积、地应力和支护影响较为显著。由文献[9-14]可知,受巷道开挖卸荷效应影响,巷道围岩两向应力不等是松动圈形态与巷道断面形状存在差异的主要原因。因此,“蝴蝶”形松动圈形成的条件是存在较高的偏应力,即巷道所受的

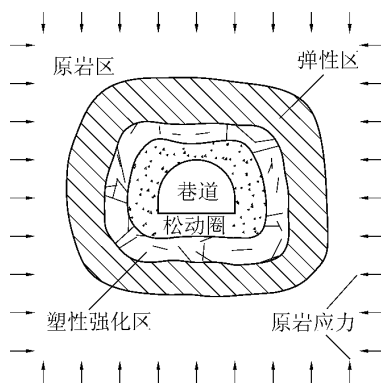


图1 巷道围岩松动圈分布

Fig. 1 Distribution of loose ring of surrounding rock

水平应力和垂直应力存在式(1)关系。

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_y} = \begin{cases} < 0.5 & (\text{圆形、矩形}) \\ > 1.0 & (\text{拱形}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 分别为巷道所受的水平和垂直应力,MPa。

支护是唯一可控制松动圈的人为方法,巷道支护能抑制围岩的变形,减小松动圈厚度。支护的对象主要是松动圈内围岩自重和圈内破裂岩块错动、滑移和裂隙产生、扩展等行为产生的碎胀变形力。若围岩具有松软膨胀性,还包括围岩的吸水膨胀变形。鉴于此,工程中应采用及时主动的且具有适宜刚度和变形量的支护材料。

## 2 工程概况

某矿设计产能400万t/a,开采水平为-490m和-650m,辅助水平-580m,主采13<sub>-1</sub>、11<sub>-2</sub>、7、4、3、1等煤层。掘进接替的11713回风巷采用EBZ150综掘机现已掘到预定位置,亟待贯通。该巷断面形状为直墙半圆拱形,如图2所示,巷宽5.0m,直墙高1.2m,拱高2.5m,支护方式保守采用“29U型棚

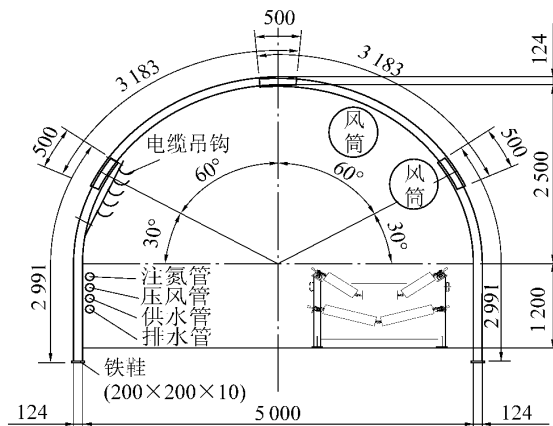


图2 巷道断面示意

Fig. 2 Schematic of roadway section

+10 号金属网”支护,棚距 800 mm。该巷所处煤层平均倾角 8°,均厚 5.25 m,巷道按中线沿 3 号煤层顶板施工,巷道顶板直接顶岩性为细砂岩,在部分区域有薄层泥岩和泥质砂岩,巷道底板直接底为厚层

的细粉砂岩。

根据前期开展的研究<sup>[15]</sup>,通过现场取样在室内测出折减后的煤岩物理力学参数见表 1,通过套孔应力解除法测得的地应力分布规律见式(2)。

表 1 煤岩物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of coal and rock

岩层	厚度/m	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	剪切模量/GPa	体积模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
直接顶	15.00	2 650	2.70	5.8	3.2	35	5.39
煤层	5.25	1 400	1.00	5.0	1.3	19	0.90
直接底	15.00	2 540	2.75	5.7	3.1	35	3.62

$$\begin{cases} \sigma_v = 0.026\ 6h \\ \sigma_H = 0.018\ 7h + 8.432\ 7 \\ \sigma_h = 0.016\ 3h + 3.040\ 9 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\sigma_v$ 、 $\sigma_H$ 、 $\sigma_h$  分别为垂直应力、最大和最小水平主应力,分别取 12.82、19.65、15.96 MPa;  $h$  为埋深,取 600 m。

3 数值模型建立与模拟结果分析

3.1 数值模型建立

数值模拟技术方便、经济、直观、形象,Midas/GTS 在岩土工程中应用较为广泛,人工界面操作,构建复杂地质模型比较简单,而 FLAC<sup>3D</sup> 采用命令流驱动,构建复杂模型比较困难,但后处理功能比较强大。鉴于此,笔者采用 Midas-FLAC<sup>3D</sup> 耦合模拟技术模拟 11713 巷道开挖后松动圈的分布规律。首先,在 Midas 中构建模型和网格划分,网格划分采用自由化分,巷道围岩区域局部加密,共有节点 49 681 个、

单元 261 921 个。然后将网格模型导入 FLAC<sup>3D</sup> 中进行后处理分析。根据圣维南原理,开挖扰动影响范围为 3~5 倍开挖区域半径。因此,构建的网格模型尺寸设计为 40 m×40 m×35 m(长×宽×高),如图 3 所示。

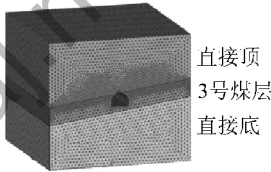


图 3 三维地层网格模型

Fig. 3 3D mesh model of stratum

3.2 松动圈产生与发展

松动圈作为塑性区的重要组成部分,塑性区的发布及演化可以表征松动圈的形成与发展。通过给模型定义边界条件和初始条件,模拟巷道开挖不同步数的塑性区分布情况,如图 4 所示。

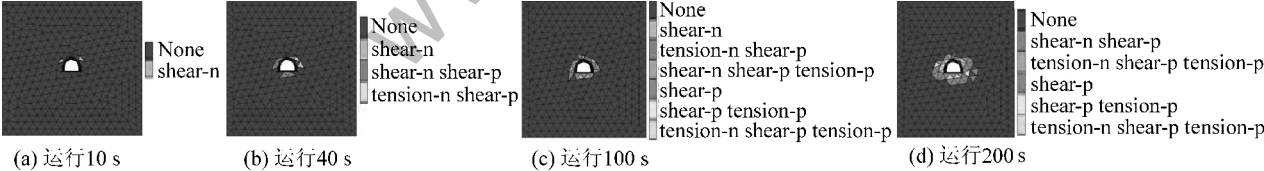


图 4 巷道围岩塑性区随计算时间发展变化

Fig. 4 Evolution picture of roadway's excavation damaged zone with different calculated steps

由图 4 可知,塑性区随开挖步数不断变大,巷道拱肩处应力最大,最先发生剪切和拉伸破坏,裂隙逐渐扩展,相互贯通,最终形成破裂区。塑性区形状为斜“蝴蝶”形,主要是受煤岩层产状的影响。巷道顶底板同比煤层强度大很多,巷道底部距底板细粉砂岩岩层还有约 1.3 m 厚度的煤层,巷道沿顶板掘进,故巷道底部塑性区很大,拱顶部塑性区相对较小。计算运行到 144.96 s 以后,计算收敛平衡,塑性区不再扩大,说明巷道围岩已发生塑性流动,此时若不

采取支护措施,巷道将失稳。

3.3 松动圈厚度模拟

由松动圈形成机理可知,松动圈区内应力小于原岩应力。许多学者将数值模拟出的塑性区大小近似等同于松动圈厚度,显然是不准确的。通过模拟发现,巷道塑性区的分布很大程度上受最大主应力的制约。因此,将巷道围岩最大主应力小于原岩应力的范围定义为松动圈范围。笔者松动圈近似为模型巷道围岩中  $y$  方向水平主应力小于最大水平主应

力  $\sigma_H$  的区域 如图 5 所示。

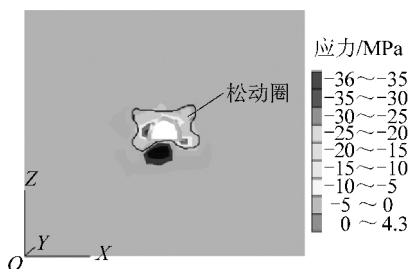


图 5 巷道围岩应力云图

Fig. 5 Stress nephogram of roadway surrounding rock

根据地应力分布规律,巷道原岩中最大水平主应力约为 20 MPa,巷道围岩中小于该应力的卸压区 松动圈近似为“蝴蝶”形。通过几何比例法,可计算松动圈的最大厚度为 2.85 m,最小 0.97 m,平均约 2.0 m。

#### 4 松动圈厚度的现场测定

目前,松动圈厚度的常见测量方法有声波法、多点位移计法、多点应力计法、地震波法、地质雷达法、电阻率法和钻孔成像法等多种<sup>[16]</sup>。鉴于声波法技术成熟,可操作性强,经济实用,在现场应用较为广泛。因此,笔者测试采用超声波技术测定 11713 煤巷围岩的松动圈厚度。

##### 4.1 测试仪器及原理

超声波测试法分为一发双收的单孔测试法和一发一收的双孔测试法,双孔测试需要 2 个钻孔,且要求不同钻孔的收、发探头同步移动,操作难度大。本次测试采用单孔法,仪器采用 CT-2 型超声波围岩裂隙探测仪,测试原理如图 6 所示。

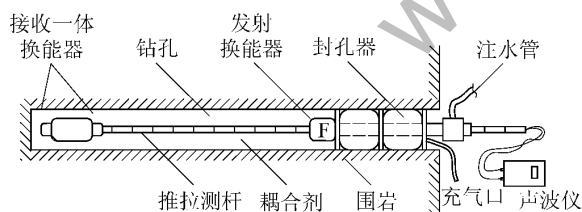


图 6 松动圈厚度超声波测试原理

Fig. 6 Principle of loose ring's thickness by ultrasonic testing

超声波在岩体中的波速和岩体受力状态及裂隙发育程度有关,岩体节理越发育,波速越低;相反,岩体没受开挖扰动影响较完整时,波速较高。因而,可根据巷道围岩不同位置处的纵波波速异常来判断松动圈厚度。在钻孔中布置超声波发射探头 F,在孔壁周围产生滑行波并沿着钻孔传播,传到接受换能

器 S1 时,声波仪感应开始计时为  $t_1$ ,传到接受换能器 S2 时,声波仪计时  $t_2$ 。S1 和 S2 相距  $l$ ,固定为 140 mm,通过超声波传播时间可计算接收探头处钻孔围岩的纵波速度,继而根据钻孔内各处波速大小判断松动圈厚度。

$$V_p = \frac{l}{t_2 - t_1} \times 10^3 \quad (3)$$

式中,  $V_p$  为纵波速度, m/s。

##### 4.2 测试步骤

1) 在 11713 回风巷选取 2 处测试断面,一个在邻近掘进工作面未支护区域(仅有前探梁临时支护),记为断面 1;一个距掘进工作面 15 m,记为断面 2。每组断面在两帮及顶板各布置 1 个钻孔,孔号记为 A、B、C,水平孔 A、B 距底板 1 m, C 孔为竖向孔。

2) 选择合适位置采用 YT28 凿岩机进行钻孔,孔径 40 mm,孔深 4.5 m;两帮水平钻孔 A、C 略向下倾斜  $3^\circ$ ,保证能存储一定的耦合剂;钻后对钻孔扫眼,清出孔中岩(煤)粉和碎石(煤)碴。

3) 检查仪器是否正常,然后螺旋连接推拉测杆及收发装置,通过测杆将接收探头送入钻孔孔底 4 m 位置,发射探头连同附属装置置入孔口适宜位置,随即对封孔器充气进行封堵,然后注入耦合剂(水),直至测杆尾部有连续水流出。

4) 打开仪器测量,通过抽拉带刻度的铜制金属测杆可测量不同孔深处围岩的波速,每次测量后向外抽拉 20 cm,直至测试完毕,每处钻孔位置测量 3 次。

5) 整理数据,分析孔深  $L$  和波速  $V_p$  关系,继而判断松动圈厚度。

##### 4.3 测试结果与分析

不同钻孔围岩波速测试结果见表 2。由表 2 可知,钻孔围岩最大波速 4 117 m/s,最小波速 498 m/s,波速由孔口向钻孔底部有递增的趋势,两帮围岩煤层波速明显低于顶板岩层波速。表中个别数据离散度较大,主要是因为围岩裂隙发育,水不能起到较好的耦合作用,可能还和水压不稳定有关。断面 1 钻孔 A、B、C 钻孔围岩出现波速突变的位置分布在 2.6~2.8、1.2~1.4、2.0~2.2 m;断面 2 钻孔 A、B、C 钻孔围岩出现波速突变的位置分布在 2.4~2.6、1.0~1.2、2.0~2.2 m。波速突变点位置即松动圈边界,故断面 1 松动圈平均厚度为 1.8~2.0 m,断面 2 松动圈平均厚度为 1.6~1.8 m,与数值模拟结果基本吻合。可见,29U 型棚支护能一定程度抑制松动圈的发展,由松动圈支护

理论可得,该巷围岩类别属于Ⅳ类,可以采用锚网支护代替 U 型棚支护<sup>[12]</sup>。此外,巷道顶板松动圈明显小于两帮围岩松动圈,主要是围岩岩性和二

次应力分布不同的缘故;左帮围岩松动圈略大于右帮同位置围岩松动圈,是因为煤岩层存在倾角导致二次应力分布规律发生偏转。

表 2 不同钻孔围岩波速测试结果

Table 2 Test results of surrounding rock's wave velocity of different drillings

孔深 L/m	钻孔围岩波速/(m·s <sup>-1</sup> )					
	断面 1A 孔	断面 1B 孔	断面 1C 孔	断面 2A 孔	断面 2B 孔	断面 2C 孔
1.0	648	548	1252	746	800	1 106
1.2	863	737	1 034	505	997	2 938
1.4	976	960	2 882	887	821	3 352
1.6	729	600	2 754	614	955	3 450
1.8	498	825	3 031	828	1 086	3 938
2.0	744	1 079	3 105	925	1 104	4 117
2.2	905	2 047	3 842	1 169	2 527	3 594
2.4	1 104	2 383	3 715	1 042	2 382	3 083
2.6	852	1 941	2 972	1 737	2 268	3 781
2.8	2 561	2 677	3 052	1 830	2 403	3 464
3.0	2 734	2 985	3 146	2 193	2 741	3 706
3.2	2 559	2 625	3 315	2 254	2 549	3 579
3.4	2 617	2 183	3 125	2 865	2 292	3 618
3.6	3 150	2 421	3 307	2 347	2 634	3 423
3.8	2 392	2 039	3 880	2 269	2 532	3 222
4.0	2 348	2 372	3 551	3 023	2 780	3 505

为验证该方法的可靠性,矿方在上述巷道的 T42 退迟点处开展了变断面试验,巷道形状由半圆拱形变为直角梯形,斜边沿直接顶顶板倾斜方向,左帮高 3.35 m,右帮高 4.05 m。支护方式改为“锚杆(索)+M 钢带(14 号槽钢梁)+10 号金属网”,顶部锚杆采用 7 根  $\phi 22$  mm $\times$ 2 500 mm 高强树脂锚杆与 M5 型钢带,锚杆间排距 800 mm $\times$ 800 mm,钢带间采用 14 号槽钢梁(2 800 mm)配合 3 根锚索(7 500 mm),锚索间排距 1 200 mm $\times$ 800 mm。在 T42 退迟点前后 10 m 处,记为 a(架棚支护)、b(锚梁网支护),矿方技术人员分别采用钢尺同时监测 2 点巷道两帮移近量,监测周期自 2014 年 10 月 16 日至 11 月 15 日,根据日报表记录,不同支护方式下巷道两帮移近速度如图 7 所示。

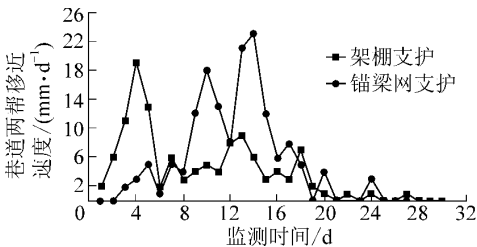


图 7 不同支护方式下巷道两帮移近量

Fig. 7 Convergence displacement of both sides of roadway under different support methods

由巷道收敛监测数据可知,架棚支护属于被动

支护,巷道两帮收敛变形在初期较为剧烈,6 d 后呈稳定变形,约 5 mm/d,20 d 后趋于 0,最终收敛量 121 mm;锚联网支护属于主动支护,初期变形较缓慢,10 d 后变形处于剧烈阶段,24 d 后变形趋近于 0,总收敛量 154 mm。由上可知,锚联网支护同比架棚支护巷帮收敛量略大,但仍在 200 mm 之内,仍能有效控制巷道围岩的变形。该支护方式安全高效、经济可靠,并有利于实现煤巷的快速掘进,可以在工程实际中推广应用。

5 结 论

1) 从力和弹性波耦合的角度解释了“蝴蝶”形松动圈形成的机理与条件,阐述了松动圈厚度的主要影响因素和支护作用机理。

2) 以某矿 11713 回风巷为工程实例,采用 Mi-das/GTS-FLAC<sup>3D</sup> 耦合模拟技术模拟了松动圈的形成过程,定义了数值模拟松动圈范围的确定方法。模拟结果表明,该巷松动圈呈“蝴蝶”形,最大厚度 2.80 m,最小 0.97 m,平均厚度约 2.00 m。

3) 为检验数值模拟结果的可靠性,采用 CT-2 型超声波围岩裂隙探测仪对 11713 回风巷松动圈厚度进行了现场测定,非支护裸巷松动圈厚度为 1.8~2.0 m,29U 型棚支护段松动圈厚度为 1.6~1.8 m,

与数值模拟结果较接近。巷道支护方式由此改为“锚梁网”支护,支护效果良好。

4) 需要说明的是,松动圈分布规律受多种因素的影响,至今尚未有适合所有巷道的松动圈分布规律及其厚度计算公式。工程中所测松动圈厚度多为支护后的松动圈大小,且松动圈的稳定需要一定的时间,少则3~7 d,多达90 d,如何消除支护作用和稳定时间对松动圈厚度测定的影响是下一步研究工作的重点。

#### 参考文献(References):

- [1] Karl Terzaghi. Rock defects and loads on tunnel supports [M]. Massachusetts: Harvard University Press, 1946.
- [2] 池田和彦. 隧道掘进松动圈厚度和塑性区范围的推导[J]. 日本铁路技术研究导报, 1974, 900(3): 1-38.  
Ikeda Yan. Derivation of excavation damaged zone's thickness and plastic zone's scope of tunnel [J]. Japanese Railway Technical Research Report, 1974, 900(3): 1-38.
- [3] 宋宏伟, 郭志宏, 周荣章, 等. 围岩松动圈巷道支护理论的基本观点[J]. 建井技术, 1974(4): 3-9.  
Song Hongwei, Guo Zhihong, Zhou Rongzhang, et al. The basic view of the surrounding rock excavation damaged zone roadway support theory [J]. Mine Construction Technology, 1974(4): 3-9.
- [4] 陈秋南, 黄小城, 谢小鱼. 基于 Hoek-Brown 准则对围岩松动圈半径的推导及改进[J]. 应用力学学报, 2015, 32(2): 304-310.  
Chen Qiunan, Huang Xiaocheng, Xie Xiaoyu. Derivation of the radius of the broken rock zone based on Hoek-Brown criterion and its improvement [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2015, 32(2): 304-310.
- [5] 刘刚, 宋宏伟, 段现军. 矩形巷道松动圈的回归公式[J]. 煤炭科学技术, 2001, 29(6): 38-40.  
Liu Gang, Song Hongwei, Duan Xianjun. Regressive formula for released zone in mine square type roadway [J]. Coal Science and Technology, 2001, 29(6): 38-40.
- [6] 湛恺瑜, 岳向阳, 唐春龙. 巷道围岩松动圈影响因素的敏感性数值计算[J]. 工程地质学报, 2001, 18(S1): 93-98.  
Zhan kaiyu, Yue Xiangyang, Tang Chunlong. Numerical simulation of the sensitivity of factors affecting broken rock zone [J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 18(S1): 93-98.
- [7] 薛新华. 遗传神经网络法在巷道围岩松动圈预测中的应用[J]. 岩土工程技术, 2006, 20(5): 237-239, 266.  
Xue Xinhua. Application of algorithm neural network method in the prediction of loosen zone around roadway [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2006, 20(5): 237-239, 266.
- [8] 赵国彦, 吴浩. 未确知聚类方法及其在松动圈厚度预测中的应用[J]. 科技导报, 2013, 31(2): 50-55.  
Zhao Guoyan, Wu Hao. Application of unascertained clustering method in the thickness prediction of excavation damaged zone [J]. Science and Technology Review, 2013, 31(2): 50-55.
- [9] 赵国彦, 吴浩. 松动圈厚度预测的支持向量机模型[J]. 广西大学学报, 2013, 38(2): 444-450.  
Zhao Guoyan, Wu Hao. Support vector machine model for predicting the thickness of excavation damaged zone [J]. Journal of Guangxi University, 2013, 38(2): 444-450.
- [10] 夏峰. 地下洞室围岩松动圈影响因素分析[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2009.
- [11] 檀远远. 复杂构造带回采巷道松动圈确定与支护对策研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2009.
- [12] 董方庭. 巷道围岩松动圈支护理论与应用技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001.
- [13] 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.  
Ma Nianjie, Li Ji, Zhao Zhiqiang. Distribution of the deviatoric stress field and plastic zone in circular roadway surrounding rock [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(2): 206-213.
- [14] 马念杰, 李季, 赵希栋, 等. 深部煤与瓦斯共采中的优质瓦斯通道及其构建方法[J]. 煤炭学报, 2015, 40(4): 742-748.  
Ma Nianjie, Li Ji, Zhao Xidong, et al. High quality gas channel and its construction method applied to coal and gas simultaneous extraction in deep mining [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(4): 742-748.
- [15] 张永坤. 潘谢矿区 A 组煤开采地应力测量和巷道支护技术研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2012.
- [16] 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.  
Yang Xuxu, Wang Qingwen, Jing Hongwen. Analysis and comparison on conventional loose zone measuring and test methods [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(8): 1-5.