

# 浅埋高强度采动巷道围岩松动圈演化规律研究

赵 宾<sup>1,2,3</sup>, 梁宁宁<sup>1,2,3</sup>, 王方田<sup>1,2,3,4</sup>, 刘兆祥<sup>5</sup>

(1.中国矿业大学 矿业工程学院,江苏 徐州 221116;2.中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室,江苏 徐州 221116;  
3.中国矿业大学 深部煤炭资源开采教育部重点实验室,江苏 徐州 221116;4.煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室,北京 100011;  
5.神东煤炭集团有限公司 补连塔煤矿,内蒙古 鄂尔多斯 017209)

**摘 要:**为研究浅埋采动巷道围岩松动圈演化规律,保证煤矿地下水库的安全运行,以补连塔煤矿典型浅埋高强度综采面为工程背景,综合运用理论分析、数值模拟、现场实测等方法对采动影响下的矩形巷道受力变形特征进行了分析。研究表明:浅埋高强度采动巷道松动圈主要集中在两帮呈“凸”型发育,受采空区残余支承压力影响程度大于工作面超前支承压力,巷道煤柱侧松动范围较工作面侧严重;巷道在二次采动阶段受一次采动和回采稳定的叠加影响破坏最严重,为保证遗留煤柱长期稳定性提出了锚网喷联合支护方法。研究成果为煤矿地下水库安全运行及类似条件下巷道围岩控制提供了科学依据。

**关键词:**浅埋巷道;松动圈;采动响应;围岩稳定性;煤柱坝体

中图分类号:TD82 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2018)05-0033-07

## Surrounding rock broken zone evolution law of high-intensity mining affected roadway in shallow coal seam

ZHAO Bin<sup>1,2,3</sup>, LIANG Ningning<sup>1,2,3</sup>, WANG Fangtian<sup>1,2,3,4</sup>, LIU Zhaoxiang<sup>5</sup>

(1.School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;2.State Key Laboratory of Coal Resources and Mine Safety, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;3.Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education of China, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;4. State Key Laboratory of Groundwater Protection and Utilization by Coal Mining, Beijing 100011, China;5.Bulianta Coal Mine, Shendong Coal Group Co., Ltd., Ordos 017209, China)

**Abstract:** In order to study the broken rock zone evolution law of mining affected roadway in shallow coal seam and to ensure the safe operation of coal mine underground reservoir, a typical high-intensity fully-mechanized mining face of shallow coal seam in Bulianta Coal Mine was chosen as the project background, and the intergrated research methods include theoretical analysis, numerical simulation and field measurement were carried out to analyze the stress and deformation characteristics for the mining affected rectangular roadway. The results indicated that the broken rock zone was developing with convex type which mainly concentrated in both sides of the shallow high-intensity mining roadway, and it was significantly affected by the side abutment pressure of goaf than the front abutment pressure of mining face, besides, the broken zone of pillar side was more serious than working face side in the roadway. The roadway was damaged worst at secondary recovery which impactation was combined with the mining and the recovery, and to ensure the long-term stability of the remaining coal pillars that the method of bolting and shotcreting with wire mesh was proposed. The research results provide a scientific basis for the safe operation of underground coal mine reservoir and the control of roadway surrounding rock with similar conditions.

**Key words:** roadway in shallow seam; broken zone; mining response; surrounding rock stability; coal pillar dam

## 0 引 言

巷道围岩松动圈是对巷道围岩破坏情况进行定

量分析的指标,根据松动圈的范围进行指导采用不同措施保持巷道稳定。目前许多分析方法如弹塑性理论、普氏理论、太沙基理论等对松动圈的形成都有

收稿日期:2017-12-17;责任编辑:杨正凯 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2018.05.006

基金项目:煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室 2016 年开放基金课题资助项目(SHJT-16-30.13);江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目(SJCX17\_0520)

作者简介:赵 宾(1994—),男,山东菏泽人,硕士研究生。通讯作者:王方田,博士,副教授,E-mail:wangfangtian111@163.com

引用格式:赵 宾,梁宁宁,王方田,等.浅埋高强度采动巷道围岩松动圈演化规律研究[J].煤炭科学技术,2018,46(5):33-39,46.

ZHAO Bin, LIANG Ningning, WANG Fangtian, et al. Surrounding rock broken zone evolution law of high-intensity mining affected roadway in shallow coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(5): 33-39, 46.

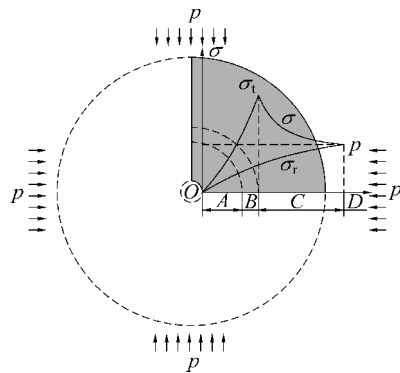
不同的描述。董方庭等<sup>[1-2]</sup>提出了巷道围岩松动圈支护理论,认为松动圈厚度是衡量围岩失稳程度与支护难度的关键性指标;刘刚等<sup>[3-4]</sup>讨论了矩形煤巷围岩松动圈的形成及回归公式,得出了矩形巷道围岩松动圈发育的一般性规律;靖洪文等<sup>[5]</sup>对深井巷道围岩松动圈影响因素进行了实测分析,提出了深井巷道围岩松动圈控制技术;张华磊等<sup>[6]</sup>探讨了采动环境下巷道围岩的破裂演化机制,并针对巷道变形特征制定了相应的控制方案;孙希奎等<sup>[7]</sup>研究了直墙半圆拱形煤巷围岩松动圈的分布规律,验证了“蝴蝶”形松动圈形成机理;陈秋南等<sup>[8]</sup>通过修正扰动参数推导出了圆形隧道轴对称条件下围岩松动圈的解析式,但在实际应用中效果不佳。

以上研究多是针对深井或圆拱形巷道,较少针对浅埋矩形巷道条件探讨围岩松动圈演化规律。我国西北浅埋煤层开采强度大,建设的煤矿地下水库需要保证较高的煤柱稳定性,矿井安全高效开采与地下水库稳定运行对巷道围岩变形控制提出了更高的要求<sup>[9-11]</sup>。笔者以补连塔煤矿浅埋煤层高强度综采工作面矩形巷道为工程背景,综合运用理论分析、数值模拟及现场实测的方法,探究不同采动条件下巷道围岩松动圈演化规律,有利于浅埋煤层巷道煤柱留设及地下水库煤柱坝体系统安全运行,同时为类似条件下巷道围岩控制提供科学依据。

## 1 浅埋矩形巷道围岩松动圈分析

回采巷道开挖后,煤体原有应力的平衡状态被破坏,围岩应力重新分布并出现应力集中现象。围岩一定范围的煤体发生变形破坏,破碎产生裂隙从而形成塑性变形区。以圆形巷道为例,其围岩应力分布如图1所示<sup>[12-13]</sup>。①破裂区A:围岩强度明显削弱,低于原岩应力 $p$ ,围岩发生明显的破裂和位移;②塑性区B:位于破裂区A之外,围岩出现塑性破坏处于缓慢变形中,但围岩强度随深度增加而增大;③弹性区C:围岩切向应力 $\sigma_t$ 大于原岩应力 $p$ ,只发生弹性变形,围岩较稳定;④原岩应力区D:围岩处于巷道开挖影响范围之外,保持原岩状态。根据上述分析,将破裂区A和塑性区B合称为围岩的松动圈。

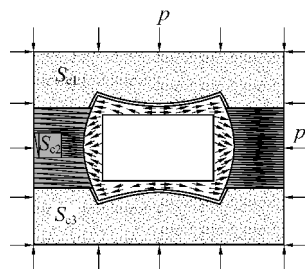
矩形回采巷道多为全煤巷掘进,顶底板与两帮岩性差别较大,根据文献[4]中的矩形巷道松动圈回归公式可知,围岩松动圈与原岩应力、围岩强度 $S_0$ 及宽高比 $K$ 密切相关,其中原岩应力与围岩强度



0—圆形巷道位置; $\sigma_t$ 、 $\sigma_r$ —切向应力、径向应力

图1 圆形巷道围岩应力分布

Fig.1 Stress distribution of surrounding rock of circular roadway 对松动圈范围影响最大,采动过程中顶底板受拉、两帮受压,破裂主要集中在两帮呈“凸”型发育,破裂范围随时间不断向煤岩体内部扩展。矩形巷道围岩松动圈如图2所示。



$S_{c1}$ 、 $S_{c2}$ 、 $S_{c3}$ 分别表示上覆岩层、煤层、下部岩层的围岩强度

图2 矩形巷道围岩松动圈示意

Fig.2 Schematic diagram of broken zone of surrounding rock in rectangular roadway

围岩松动圈的范围是对巷道围岩稳定性评价的重要依据,根据松动圈的大小可将巷道围岩划分为不同标准类型,具体见表1。

表1 巷道围岩稳定性分类<sup>[1-2]</sup>

Table 1 Stability classification of roadway surrounding rock

围岩分类	围岩稳定性	围岩松动圈直径/cm
I	稳定围岩	0~40
II	较稳定围岩	40~100
III	一般围岩	100~150
IV	一般不稳定围岩	150~200
V	不稳定围岩	200~300
VI	极不稳定围岩	>300

## 2 工程概况

补连塔煤矿位于西北典型浅埋矿区,矿井主采2-2煤层,煤层较稳定,倾角 $1^\circ\sim 3^\circ$ ,可采厚度6.55~



产条件,在模型上边界施加 4.5 MPa 垂直应力模拟上覆岩重,侧压系数取 1.2,初始地应力平衡采用摩尔-库仑本构模型计算,采用岩石力学参数见表 2。

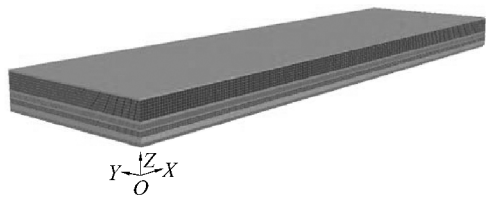


图 5 三维数值模型

Fig.5 Three-dimensional numerical model



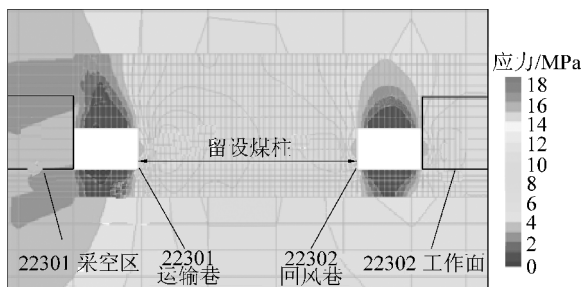
图 6 工作面与巷道布置

Fig.6 Layout of working face and roadway

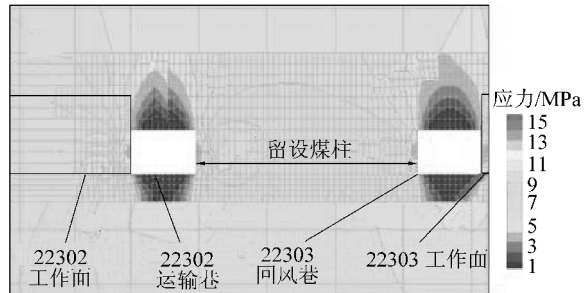
根据矿井实际开采顺序及数值模拟需要,设定 2 个模拟步骤,步骤一:22301 工作面完全回采→22302 工作面两巷掘进→22302 工作面回采 60 m→在 22302 工作面前方 120 m 处的 22302 回风巷(编号为 1 号)、22302 工作面前方 20 m 处的 22302 运输巷(编号为 2 号)布置测线;步骤二:22301 工作面完全回采→22302 工作面两巷掘进→22302 工作面回采 100 m→22303 工作面两巷掘进→22303 工作面回采 70 m→在 22303 工作面前方 15 m 的 22303 回风巷(编号为 3 号)布置测线。其中 1 号、2 号、3 号测站分别对应 22301 回采稳定、22302 一次采动和 22303 二次采动阶段,测线布置在巷帮中间位置,监测深度为 5 m,模拟开挖时模型四周各留有 50 m 煤柱以消除边界效应,开挖后的采空区采用压实理论进行充填以表征顶板垮落压实现象<sup>[18]</sup>。

2) 巷道应力位移模拟结果分析。根据数值计算及监测结果,得到巷道垂直应力模拟结果如图 7 所示,位移监测数据如图 8 所示。

根据巷道所受垂直应力模拟结果可知,在回采稳定阶段,22301 工作面残余支撑压力最大值为 12.2 MPa,应力集中系数为 2.22,出现位置距 22301 运输巷煤壁 2.5~3.0 m 范围内,之后沿煤柱倾向向 22302 工作面方向递减,22302 回风巷受残余支撑压力影



(a) 回采稳定阶段



(b) 一次采动阶段

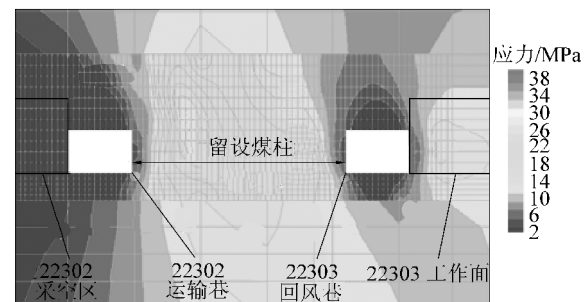


图 7 巷道垂直应力模拟结果

Fig.7 Simulation results of roadway vertical stress

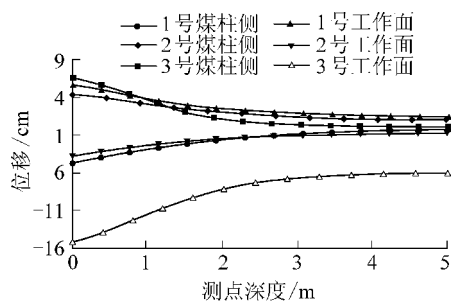


图 8 监测位移数据

Fig.8 Monitoring displacement curve

响,垂直应力大小表现为煤柱侧大于工作面,巷道煤柱侧围岩移近量最大值为 44 mm,工作面侧为 37 mm,巷道破坏形式表现为煤柱侧较工作面严重;在一次采动阶段,巷道受工作面超前支撑压力的影响,22302 运输巷两侧围岩受力均在 10 MPa 左右,但巷



道工作面侧应力集中范围半径较煤柱侧大 4.0~5.0 m,巷道工作面侧围岩移近量衰减程度较煤柱侧小,工作面侧破坏情况更严重;在二次采动阶段,煤柱上的应力分布规律与回采稳定阶段相似,22303 回风巷应力分布规律与一次采动阶段相似,但煤柱垂直应力最大值达 26.6 MPa,应力集中系数达 4.84,应力扰动受回采稳定及一次采动叠加影响,此时巷道工作面侧围岩移近量最大达 151 mm,而煤柱侧仅为 67 mm,围岩整体破坏情况较为严重。

3) 巷道松动圈模拟结果分析。根据文献[7]定义的松动圈范围确定方法,数值模拟塑性区近似等同于松动圈厚度是不准确的,应采用 Y 方向水平主应力小于最大水平主应力的方法确定数值模拟围岩松动圈范围<sup>[7]</sup>。

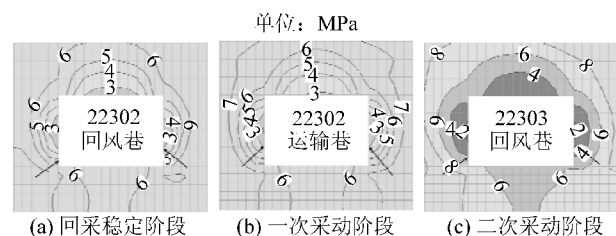


图9 Y方向主应力云图

Fig.9 Principal stress nephogram of Y direction

根据巷道实际埋深条件可知,工作面巷道最大水平主应力为 6.0 MPa,巷道围岩中小于该应力的松动范围如图 9 所示。通过几何比例法可知,回采稳定阶段巷道两侧松动范围相差不大,均为 1.2 m;一次采动阶段巷道两侧松动范围同样相似,为 1.0 m;二次采动阶段巷道煤柱侧松动范围为 1.4 m,工作面侧为 1.3 m。整体来看,两帮松动圈发育规律与模拟应力位移规律相似,同时与理论分析中两帮松动圈向外“凸”型发育特征相吻合;由于工作面一次开采高度达 6.0~7.0 m,开采强度大,巷道上部留有 3.0 m 左右的煤层,且巷道直接底是与煤层性质类似的泥岩,导致数值模拟结果中巷道顶底板破坏范围偏大。

## 4 巷道围岩松动圈实测分析

### 4.1 声波探测原理

采用声波探测法测量进行围岩松动范围测量,实质上是应用超声波在不同介质中传播速度不同来预测围岩的破坏程度。将煤体视为弹性体,根据弹性理论,由弹性波的波动方程通过弹性力学空间问题的静力方程推导,可得出超声波纵波波速与介质

的弹性参数之间的关系为

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1-\mu)(1-2\mu)}}, V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}} \quad (1)$$

其中: $V_p$ 为煤体的纵波速度; $V_s$ 为煤体的横波速度; $E$ 为煤体的弹性模量; $\mu$ 为煤体的泊松比; $\rho$ 为煤体的密度。

从式(1)可知,煤岩体波速可间接反映煤岩块抗压强度及内部破坏情况,通过巷道围岩不同深度的波速变化规律可确定巷道围岩的松动圈范围。

### 4.2 巷道围岩松动圈实测分析

采用单孔声波测试法对采动作用下巷道围岩破坏情况进行实测,由于测试布置方式的局限性,松动圈实测工作只针对巷帮中部进行。单孔声波测试仪器与测试布置示意如图 10 所示。

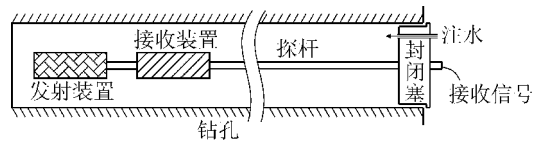


图10 单孔声波测试法装置

Fig.10 Single hole sonic testing device and schematic diagram

其中一次回采稳定松动圈测试(1号测站)布置在 22302 回风巷工作面前方 150 m 处,每隔 10 m 一点,共计 3 个测点;一次采动影响松动圈测定(2号测站)布置在 22302 运输巷工作面前方 30 m 处,每隔 10 m 或 15 m 一点,共计 4 个测点;二次采动影响松动圈测定(3号测站)布置在 22303 回风巷工作面前方 30 m 处,每隔 10 m 或 15 m 布置一个测点,共计 4 个测点。对每个测站的每个测点进行编号,以一次回采稳定布置为例。

按照测量布置要求,分别测量巷道工作面侧(正帮)、煤柱侧(副帮)超声波的传播速度。测量工作首先钻进测量孔,孔径一般为 42 mm,孔深不小于 4.0 m,紧接着将孔内杂质清理干净、送探杆及测试装置入孔底并进行充水,保证孔内满水状态并缓慢将探杆拉出。每拉出 10 cm 记录一次数据,即根据距巷帮深度不同来反应煤体应力水平和受破坏程度的差异。3 个测站全部记录数据经处理后如图 11 所示。

根据声波探测原理并结合不同测站声波传播速度,可推断不同采动阶段下矩形巷帮围岩破坏松动范围,具体数据见表 3。

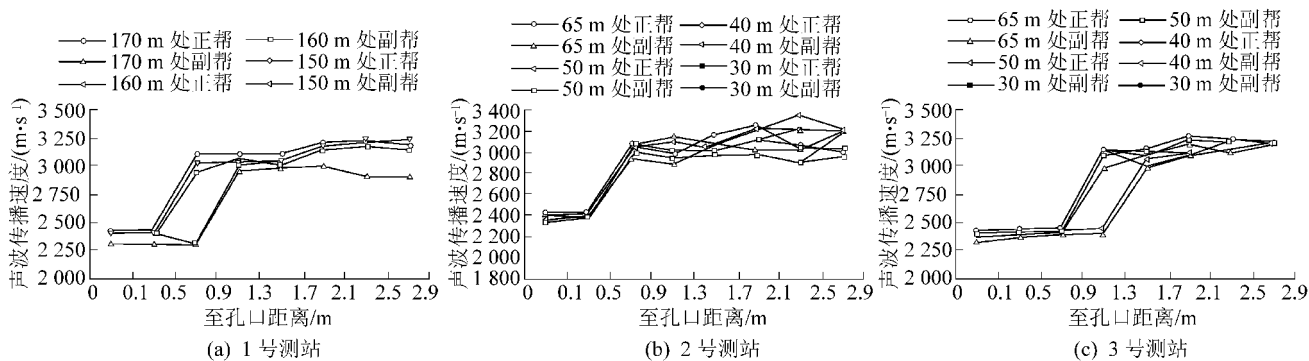


图11 不同测站声波传播速度

Fig.11 Velocity diagram of sound wave propagation at different measuring stations

表3 不同采动阶段下巷道松动范围

Table 3 Roadway loosening range under different mining stages

影响阶段	测点位置	松动范围/m	
		工作面侧	煤柱侧
一次回采	170 m 处 1 号孔	0.9	1.0
稳定	160 m 处 2 号孔	1.0	1.1
	150 m 处 3 号孔	1.0	1.0
一次采动影响	65 m 处 1 号孔	0.8	0.7
	50 m 处 2 号孔	0.8	0.7
	40 m 处 3 号孔	0.9	0.8
	30 m 处 4 号孔	0.9	0.8
二次采动影响	65 m 处 1 号孔	1.3	1.1
	50 m 处 2 号孔	1.5	1.2
	40 m 处 3 号孔	1.4	1.1
	30 m 处 4 号孔	1.4	1.1

根据表3中的数据可知,一次回采稳定阶段,工作面侧巷帮松动范围在0.9~1.0 m,平均1.0 m;煤柱侧巷帮松动范围在1.0~1.1 m,平均1.0 m,两帮的松动圈趋于一致;一次采动影响阶段,工作面侧巷帮松动圈范围0.8~0.9 m,平均0.85 m,煤柱侧巷帮松动范围在0.7~0.8 m,平均0.75 m,两帮松动范围随距离工作面距离的缩小而逐渐增大;二次采动影响阶段,工作面侧巷帮松动范围在1.3~1.5 m,平均1.4 m,煤柱侧巷帮松动范围在1.1~1.2 m。

#### 4.3 浅埋矩形采动巷道松动圈演化规律分析

根据实测结果和数值模拟分析可知,回采稳定阶段和二次采动阶段巷道松动圈均表现为煤柱侧大于工作面侧,而一次采动阶段表现为工作面侧大于煤柱侧,这是由于煤柱侧承受从回采完毕长时间存在的采空区残余支撑压力的影响,而工作面侧承受的是移动超前支撑压力的作用;同时,巷帮松动圈实测显示松动范围最大为二次采动阶段的1.1~1.4

m,最小为一次采动阶段的0.75~0.85 m,模拟结果显示松动范围最大为二次采动阶段的1.3~1.4 m,最小为一次采动阶段1.0 m,实测结果增长0.4~0.5 m,模拟结果增长0.3~0.4 m,两者数据及变化幅度接近,表明巷道在二次采动受残余支撑压力和超前支撑压力叠加影响时巷道破坏最严重,且回采稳定残余支撑压力影响程度要大于一次采动超前支撑压力。

根据巷道围岩稳定性分类可知,22302回风巷受一次回采稳定影响时为中松动圈一般围岩状态;22302运输巷受一次采动影响时为中松动圈较稳定围岩状态;22303回风巷受二次采动影响时为大松动圈一般不稳定围岩状态。整体而言,巷道围岩在工作面回采时并未出现严重破坏,回采后采空区逐渐压实过程中,遗留煤柱两侧破坏情况加重。从保证地下水库安全运行的角度考虑,应在整个回采周期中对破坏严重的巷道煤柱侧进行加强支护,根据松动圈范围进行支护设计,采取锚网喷联合支护如图12所示。

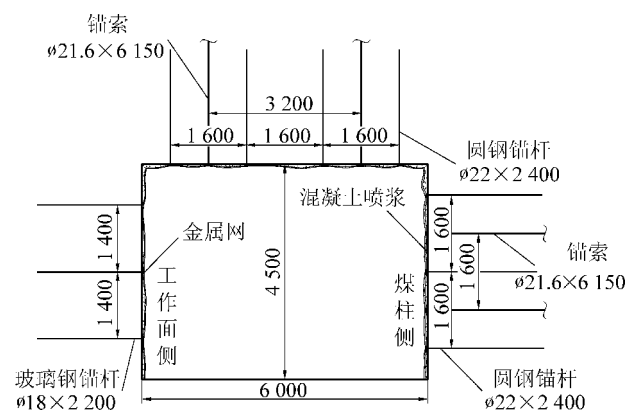


图12 锚网喷联合支护示意

Fig.12 Bolting and shotcreting support with wire mesh

## 5 结 论

1) 根据对浅埋高强度采动巷道围岩破坏特征分析可知,巷道围岩松动圈主要在两帮呈“凸”型发育,破坏程度受采空区残余支撑压力和工作面超前支撑压力影响。

2) 数值模拟和实测结果均表明,回采稳定阶段与二次采动阶段巷道松动圈发育煤柱侧大于工作面侧,而一次采动阶段相反,说明残余支撑压力的影响程度要大于超前支撑压力。

3) 浅埋矩形巷道受二次采动影响时两帮松动圈发育最大,受一次采动影响时最小,松动范围增加0.4~0.5 m,表明二次采动应力叠加影响时巷道破坏最严重。

4) 煤矿地下水库留设的煤柱坝体受多次采动及长期采空区残余支撑压力的影响,从保证地下水库安全运行考虑,提出了采用锚网喷联合支护方法进行煤柱坝体长期稳定性控制的方法。

### 参考文献 (References):

- [1] 董方庭.巷道围岩松动圈支护理论及应用技术[M].北京:煤炭工业出版社,2001.
- [2] 董方庭,宋宏伟,郭志宏,等.巷道围岩松动圈支护理论[J].煤炭学报,1994,19(1):21-31.  
DONG Fangting, SONG Hongwei, GUO Zhihong, *et al.* Tunnel wall rock loose circle support theories [J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(1): 21-31.
- [3] 刘 刚,宋宏伟.煤巷围岩松动圈规律研究[J].煤炭学报,2002,27(1):31-35.  
LIU Gang, SONG Hongwei. Study on the distribution law of the broken rock zone around rectangular-shap coal roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(1): 31-35.
- [4] 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.
- [5] 靖洪文,付国彬,郭志宏.深井巷道围岩松动圈影响因素实测分析及控制技术[J].岩石力学与工程学报,1999,18(1):70-74.  
JING Hongwen, FU Guobin, GUO Zhihong. Measurement and analysis of influential factors of broken zone of deep roadways and study on its control technique [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(1): 70-74.
- [6] 张华磊,王连国,涂 敏,等.采动环境下巷道围岩破裂演化规律及其控制技术研究[J].采矿与安全工程学报,2013,30(5):653-658.

- ZHANG Hualei, WANG Lianguo, TU Min, *et al.* Study on failure evolution laws and control technology of roadway surrounding rock under mining circumstances [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2013, 30(5): 653-658.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 顾大钊.煤矿地下水库理论框架和技术体系[J].煤炭学报,2015,40(2):239-246.  
GU Dazhao. Theory framework and technological system of coal mine underground reservoir [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 239-246.
- [10] 顾大钊,张 勇,曹志国.我国煤炭开采水资源保护利用技术研究进展[J].煤炭科学技术,2016,44(1):1-7.  
GU Dazhao, ZHANG Yong, CAO Zhiguo. Technical progress of water resource protection and utilization by coal mining in China [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 1-7.
- [11] 陈苏社,黄庆享,薛 刚,等.大柳塔煤矿地下水建设及水资源利用技术[J].煤炭科学技术,2016,44(8):21-28.  
CHEN Sushe, HUANG Qingxiang, XUE Gang, *et al.* Technology of underground reservoir construction and water resource utilization in Daliuta Coal Mine [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(8): 21-28.
- [12] 赵彦钵,吴瑞祥,李政林,等.极限拉应变准则在围岩松动圈模拟中的应用[J].地下空间与工程学报,2014,10(2):315-321.  
ZHAO Yanbo, WU Ruixiang, LI Zhenglin, *et al.* Application of ultimate tensile strain criteria to simulate the loose zone of surrounding rock [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(2): 315-321.
- [13] 钱鸣高,石平五,许家林.矿山压力与岩层控制[M].中国矿业大学出版社,2010.
- [14] 黄庆享.浅埋煤层的矿压特征与浅埋煤层定义[J].岩石力学与工程学报,2002,21(8):1174-1177.  
HUANG Qingxiang. Ground pressure behavior and definition of shallow seams [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(8): 1174-1177.
- [15] 屠世浩,白庆升,屠洪盛.浅埋煤层综采面护巷煤柱尺寸和布置方案优化[J].采矿与安全工程学报,2011,28(4):505-510.  
TU Shihao, BAI Qingsheng, TU Hongsheng. Pillar size determina-

- Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(2): 300-305, 310.
- [12] 王德超, 李术才, 王琦, 等. 深部厚煤层综放沿空掘巷煤柱合理宽度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(3): 539-548.
- WANG Dechao, LI Shucai, WANG Qi, *et al.* Experimental study of reasonable coal pillar width in fully mechanized top coal caving face of deep thick coal seam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(3): 539-548.
- [13] 赵启峰, 杜锋, 李强, 等. 综采工作面沿空掘巷围岩控制技术[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(10): 23-28.
- ZHAO Qifeng, DU Feng, LI Qiang, *et al.* Surrounding rock control technology of gateway driven along goaf in fully mechanized coal mining face[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(10): 23-28.
- [14] 于洋, 柏建彪, 陈科, 等. 综采工作面沿空掘巷煤柱合理宽度设计及其应用[J]. 煤炭工程, 2010, 42(7): 6-9.
- YU Yang, BAI Jianbiao, CHEN Ke, *et al.* Design and application of rational narrow coal pillar width to gate way driving along goaf of fully mechanized coal mining face[J]. Coal Engineering, 2010, 42(7): 6-9.
- [15] 赵国贞, 马占国, 孙凯, 等. 小煤柱沿空掘巷围岩变形控制机理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(4): 517-521.
- ZHAO Guozhen, MA Zhanguo, SUN Kai, *et al.* Research on deformation controlling mechanism of the narrow pillar of roadway driving along next goaf[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(4): 517-521.
- [16] 徐光亮. 成庄矿沿空掘巷窄煤柱宽度确定研究[J]. 煤炭工程, 2016, 48(1): 14-16.
- XU Guangliang. Size determination of narrow coal pillar in gob-side roadway driving in Chengzhuang Coal Mine[J]. Coal Engineering, 2016, 48(1): 14-16.
- [17] 余学义, 王琦, 赵兵朝, 等. 大采高工作面区段窄煤柱合理尺寸研究[J]. 煤炭工程, 2015, 47(1): 15-17, 21.
- YU Xueyi, WANG Qi, ZHAO Bingchao, *et al.* Study on reasonable size of district sublevel small coal pillar in high cutting working face[J]. Coal Engineering, 2015, 47(1): 15-17, 21.
- [18] 马金宝, 王胜, 宋宗武. 基于煤岩应力监测的深井沿空掘巷煤柱宽留设研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(8): 121-127.
- MA Jinbao, WANG Sheng, SONG Zongwu. Research on width of coal pillar of roadway driving along goaf based on coal-rock stress monitoring[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(8): 121-127.
- [19] 李磊, 柏建彪, 王襄禹. 综放沿空掘巷合理位置及控制技术[J]. 煤炭学报, 2012, 37(9): 1564-1569.
- LI Lei, BAI Jianbiao, WANG Xiangyu. Rational position and control technique of roadway driving along next goaf in fully mechanized top coal caving face[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(9): 1564-1569.
- [20] 侯朝炯, 李学华. 综放沿空掘巷围岩大、小结构的稳定性原理[J]. 煤炭学报, 2001, 26(1): 1-7.
- HOU Chaojiong, LI Xuehua. Stability principle of big and small structures of rock surrounding roadway driven along goaf in fully mechanized top coal caving face[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(1): 1-7.

## (上接第39页)

- tion and panel layout optimization for fully mechanized faces in shallow seams[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2011, 28(4): 505-510.
- [16] 王方田. 浅埋房式采空区下近距离煤层长壁开采覆岩运动规律及控制[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
- [17] 黄庆享, 周金龙. 浅埋煤层大采高工作面矿压规律及顶板结构研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(S2): 279-286.
- HUANG Qingxiang, ZHOU Jinlong. Roof weighting behavior and roof structure of large mining height longwall face in shallow coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(S2): 279-286.
- [18] 白庆升, 屠世浩, 袁永, 等. 基于采空区压实理论的采动响应反演[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(3): 355-361.
- BAI qingsheng, TU shihao, YUAN yong, *et al.* Back analysis of mining induced response on the basis of goaf compaction theory[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(3): 355-361.