

文章编号: 1671-251X(2024)08-0044-08

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2024050043

# 关家崖煤矿重复采动巷道变形特征及控制对策研究

赵杰<sup>1,2</sup>, 张宁波<sup>1</sup>, 刘海兵<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116;

2. 山西兴县华润联盛关家崖煤业有限公司, 山西 吕梁 033000)

**摘要:** 针对重复采动巷道围岩变形严重、无法复用, 重复采动巷道在服务期内具有明显的叠加演化特征的问题, 以关家崖煤矿 13092 巷道为研究背景, 采用现场实测、数值模拟和理论分析的方法, 对重复采动巷道变形的叠加扩展特征和控制对策进行了研究。重复采动巷道变形特征分析结果表明: ① 一次回采扰动下, 重复采动巷道变形呈现分区和非对称破坏特征, 可划分为快速变形区、强烈变形区和缓慢变形区; 裂纹破坏主要在煤壁帮和煤柱帮, 而顶底板较少, 表现为巷道两帮显著片帮和内移; 煤壁帮与顶板、煤柱帮与底板交汇处变形严重。② 二次采动巷道在一次破坏基础上叠加扩展, 使得非对称破坏更加显著, 形成巷道围岩蝶形叠加塑性破坏区。③ 重复采动巷道围岩控制的重点时间为一次回采阶段, 重点区域为强烈变形区和缓慢变形区的巷道煤柱帮一侧。通过分析采动巷道蝶形变形特征和破坏分区规律, 提出了重复采动巷道多层次耦合控制技术, 采用浅低压-深高压注浆提高煤柱支撑力, 采用锚索补强提高支护体支撑力, 实现耦合控制。通过加固前后变形量对比分析验证了多层次耦合控制满足巷道复用要求。

**关键词:** 重复采动巷道; 变形特征; 塑性破坏; 叠加扩展特征; 多层次耦合控制

中图分类号: TD353

文献标志码: A

## Research on deformation features and control strategies of repeated mining roadways in Guanjiaya Coal Mine

ZHAO Jie<sup>1,2</sup>, ZHANG Ningbo<sup>1</sup>, LIU Haibing<sup>2</sup>

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. Shanxi Xingxian Huarun Liansheng Guanjiaya Coal Industry Co., Ltd., Lüliang 033000, China)

**Abstract:** The surrounding rock of the repeated mining roadway is severely deformed and cannot be reused, and the repeated mining roadway has obvious overlapping extension features during the service period. In order to solve the above problems, this study takes the 13092 roadway of Guanjiaya Coal Mine as the research background, and adopts on-site measurement, numerical simulation, and theoretical analysis methods to investigate the overlapping extension features and control measures of repeated mining roadway deformation. The analysis of deformation features of repeated mining roadways shows the following points. ① Under a single mining disturbance, the deformation of repeated mining roadways exhibits zoning and asymmetric failure features, which can be divided into rapid deformation zone, strong deformation zone, and slow deformation zone. The crack damage mainly occurs in the coal wall and coal pillar walls, with less damage to the roof and floor, manifested as significant fragmentation and inward movement of the two sides of the roadway. Severe deformation occurs at the intersection of the coal wall and roof, as well as the coal pillar and floor. ② The secondary mining roadway expands and overlaps on the basis of the primary damage, making the asymmetric

收稿日期: 2024-05-15; 修回日期: 2024-08-25; 责任编辑: 胡娴。

基金项目: 山西省基础研究计划面上项目(202303021211063)。

作者简介: 赵杰(1987—), 男, 山西晋城人, 高级工程师, 硕士, 从事煤矿生产技术管理工作, E-mail: cklw2024@126.com。

引用格式: 赵杰, 张宁波, 刘海兵. 关家崖煤矿重复采动巷道变形特征及控制对策研究[J]. 工矿自动化, 2024, 50(8): 44-51.

ZHAO Jie, ZHANG Ningbo, LIU Haibing. Research on deformation features and control strategies of repeated mining roadways in Guanjiaya Coal Mine[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(8): 44-51.



扫码移动阅读

damage more significant and forming a butterfly shaped plastic failure zone in the surrounding rock of the roadway. ③ The key time for controlling the surrounding rock of the repeated mining roadway is the first mining stage. The key area is the coal pillar side of the roadway in the strong deformation zone and the slow deformation zone. By analyzing the butterfly deformation features and failure zoning rules of mining roadways, a multi-level coupling control technology for repeated mining roadways is proposed. Shallow low pressure - deep high pressure grouting is used to improve the support force of coal pillars. The anchor cables are used to reinforce and improve the support force of support bodies, achieving coupling control. The comparative analysis of deformation before and after reinforcement has verified that multi-level coupling control meets the requirements of roadway reuse.

**Key words:** repeated mining roadway; deformation features; plastic failure; overlapping extension features; multi level coupling control

## 0 引言

在大采高综采工作面,为了减少巷道掘进对接续的影响,解决通风问题,常采用多巷布置,将其中一条巷道保留下来,以便在下一工作面回采时复用<sup>[1-2]</sup>。重复采动巷道会经历掘进、本工作面回采和下一工作面回采3个阶段,时间跨度为3—4 a,其中本工作面回采阶段对重复采动巷道的的影响程度最大且持续时间最长<sup>[3]</sup>。本工作面回采过后,重复采动巷道会出现严重的持续变形现象:锚固大多失效,巷道两帮收缩和底鼓均超过1.5 m,需要进行扩帮起底和重新支护<sup>[4]</sup>,否则无法满足复用要求且存在较大安全隐患<sup>[5]</sup>。因此,分析重复采动巷道的变形叠加特征,并提出量化准则,将重复采动巷道变形量控制在合理范围内,对于实现巷道安全复用具有重要意义。

学者们对重复采动巷道进行了广泛研究,取得了一定成果。闫帅等<sup>[6]</sup>探索了煤柱宽度对相邻工作面煤柱内重复采动巷道围岩应力分布和变形的影响,发现煤柱宽度增加会导致巷道围岩垂直应力峰值向一侧移动,并逐渐远离巷道。张鹏等<sup>[7]</sup>利用数值模拟研究了复用巷道围岩应力分布、煤柱应力分布和煤柱合理宽度。岳延朋等<sup>[8]</sup>研究了重复采动巷道围岩变形特征与控制原理,提出了长短锚索分层联合支护技术。赵志强等<sup>[9]</sup>分析了重复采动下留巷围岩塑性区分布特征。范子儀等<sup>[10]</sup>根据围岩塑性区分布形态及应力分布特征,提出了软岩巷道非对称变形差异化支护方案。

以上研究集中在煤柱与重复采动巷道围岩稳定性的关系及巷道补强加固方案等方面<sup>[11]</sup>,为本文研究提供了坚实的理论基础。重复采动巷道在服务期内具有明显的叠加演化特征,但有关破坏叠加扩展机理的研究较少。本文以山西兴县华润联盛关家崖

煤业有限公司(简称关家崖煤矿)重复采动巷道为研究背景,采用现场实测和理论分析相结合的方法,对重复采动巷道的变形叠加扩展特征、量化及控制机理进行研究,以期为重复采动巷道安全高效控制提供理论支撑。

## 1 工程概况

关家崖煤矿1309工作面主采3号煤,走向长2 776 m,倾向长220 m,采高4.75 m,埋深400 m,采用一次采全高采煤法。13092巷为1308和1309两个工作面服务,服务年限约3 a,如图1所示。13092巷沿顶掘进,为矩形断面,净宽为4 800 mm,净高为4 400 mm,净断面积为21.12 m<sup>2</sup>,采用锚索、菱形网、钢筋托梁、锚杆联合支护,13092巷与13091巷之间保护煤柱宽60 m。

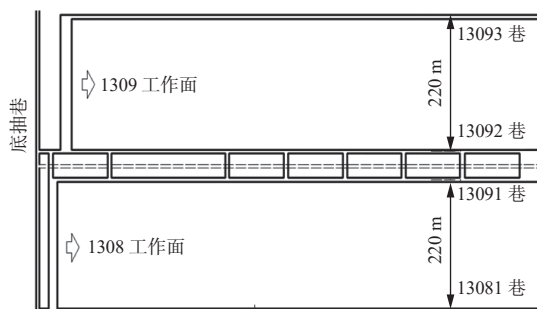


图1 巷道与工作面布置

Fig. 1 Layout of roadway and working face

煤层顶板依次为砂质泥岩(平均厚度为0.78 m)、中粒砂岩(平均厚度为12.5 m)、砂质泥岩(平均厚度为2.9 m),如图2所示。

观测方案:以1308工作面前100 m至后1 000 m、1309工作面前0~100 m为主要观测区间,共布置5组测站(测站间隔100 m),观测一次采动(1308工作面回采)、二次采动(1309工作面回采)对13092重复采动巷道稳定性的影响<sup>[12]</sup>。

平均厚度/m	图例	岩性	描述
3.50		粉砂岩	灰黑色粉砂岩, 夹泥岩条带, 云母及植物化石
0.30		炭质泥岩	黑色炭质泥岩, 松软
2.00		砂质泥岩	灰黑色, 半坚硬, 中厚层状, 含丰富植物化石
2.70		粉砂岩	灰黑色, 含大量白云母碎片, 含丰富植物化石
0.10		含炭泥岩	黑色含炭泥岩, 松软, 条痕黑褐色
2.90		砂质泥岩	灰色, 中厚层状, 水平纹理, 含植物化石, 具节理
12.50		中粒砂岩	平均抗压强度为 78.3 MPa, 裂隙较发育, 呈半张开状, 见有方解石和泥质物充填现象。岩性特征为浅灰色, 中厚层状, 大型楔状交错层理, 上部夹泥纹, 垂直裂隙
0.78		砂质泥岩	灰黑色砂质泥岩, 半坚硬, 中厚层状, 岩石破碎
4.60		3 煤	黑色煤, 以亮煤为主, 夹镜煤条带, 玻璃光泽。夹矸为含炭泥岩

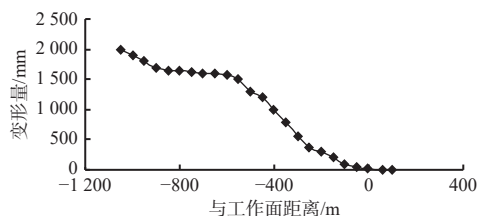
图 2 顶板柱状图

Fig. 2 Roof column histogram

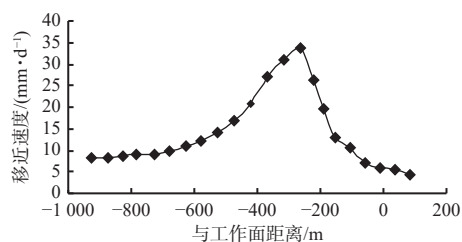
## 2 重复采动巷道变形特征分析

### 2.1 一次采动变形扩展特征

1308 工作面回采期间, 13092 重复采动巷道两帮累计变形量、移近速度如图 3 所示。一次采动两帮变形量统计数据见表 1。



(a) 一次采动下两帮变形量变化



(b) 一次采动下两帮移近速度变化

图 3 一次采动下巷道两帮变形特征

Fig. 3 Deformation characteristics of two sides of the roadway under one-time mining

由图 3 和表 1 可看出, 重复采动巷道的变形显示出明显的分区<sup>[13]</sup>和非对称特征。

1) 快速变形区。距 1308 工作面 100 ~ -200 m 区域, 13092 巷道平均绝对变形量为 228 mm, 占服务期变形量的 11.6%; 平均移近速度为 5.3 mm/d, 巷道

表 1 13092 巷一次采动两帮变形量统计数据

Table 1 Statistical data on deformation of two sides of the roadway 13092 under one-time mining

测点 序号	距工作面 100~-200 m		距工作面 -200~-700 m		距工作面 -700~-1 000 m	
	绝对变 形量/mm	占比/%	绝对变 形量/mm	占比/%	绝对变 形量/mm	占比/%
1	240	11.3	1 462	68.4	348	20.2
2	226	12.2	1 374	71.5	251	16.3
3	231	10.5	1 545	68.0	424	21.5
4	209	10.9	1 458	73.3	253	15.8
5	234	13.1	1 366	73.6	189	13.4
均值	228	11.6	1 441	70.9	293	17.5

处于快速变形阶段。

2) 强烈变形区。距 1308 工作面 -200 ~ -700 m 区域, 13092 巷道平均绝对变形量为 1 441 mm, 占服务期变形量的 70.9%, 平均移近速度为 20.1 mm/d, 巷道处于强烈变形阶段。

3) 缓慢变形区。距 1308 工作面 -700 ~ -1 000 m 区域, 13092 巷道平均绝对变形量为 293 mm, 占服务期变形量的 17.5%, 移近速度为 6.8 mm/d, 巷道处于缓慢变形阶段。

分析可得:

1) 1308 工作面对重复采动巷道的影响是持续的、长时间的, 呈现 3 个变形影响区。工作面回采后顶板岩层失去支撑, 出现弯曲下沉和破断失稳, 超前支承压力和侧向支承压力通过煤岩介质持续向巷道传递, 使其发生变形破坏。近位及远位岩层的破断是持续、分层次的, 并随工作面推进不断向前发生, 表现为工作面 and 巷道矿压显现持续、长时间、分区域、不均衡、滞后。这是因为当厚硬岩层破断时, 载荷传递至巷道围岩, 重复采动巷道受到侧向挤压、推拉复合作用而发生高速变形和大变形; 当厚硬岩层破断后, 巷道变形趋缓, 移近速度降低。

2) 一次回采扰动下, 重复采动巷道发生显著非对称破坏, 裂纹破坏主要在煤壁帮和煤柱帮, 而顶底板较少, 表现为巷道两帮显著片帮和内移; 煤壁帮与顶板、煤柱帮与底板交汇处变形严重。

### 2.2 二次采动变形叠加特征

1309 工作面回采期间, 重复采动巷道两帮变形量、移近速度如图 4 所示。二次采动期间, 工作面前方 40 m 内巷道变形破坏严重, 工作面前方 20 m 内巷道发生剧烈变形, 最大变形量为 690 mm, 最大移近速度为 170 mm/d; 工作面前方 40 m 以外巷道变形量逐渐减小, 采动超前支承压力影响范围小于 60 m。

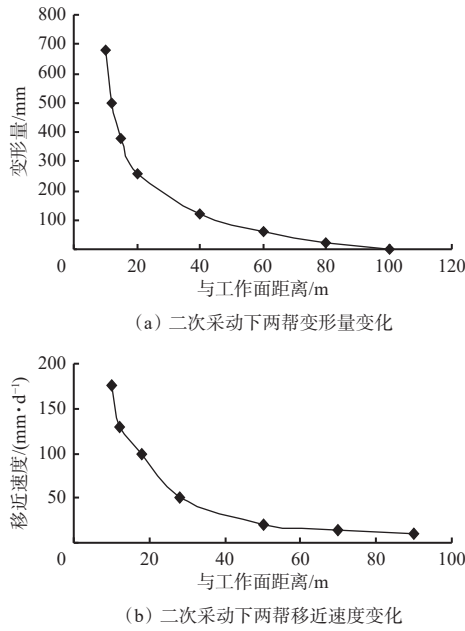


图4 二次采动下巷道两帮变形特征

Fig. 4 Deformation features of two sides of the roadway under secondary mining

分析重复采动巷道整个服务期间的变形破坏可知,一次、二次采动导致的巷道变形量分别为1962 mm和690 mm,占比分别为74%和26%,一次回采期间为主要影响阶段。二次采动巷道在一次破坏基础上叠加扩展,并继续呈现非对称破坏特征。两帮破坏深度继续大幅增加,顶板和底板破坏深度几乎不变,在煤壁帮与顶板、煤柱帮与底板交汇处变形破坏继续叠加扩展,使得非对称破坏更加显著,形成巷道围岩蝶形叠加塑性破坏区。

### 2.3 巷道塑性叠加扩展及量化

煤层开采后上覆基本顶破断的岩块B发生回转下沉,在煤柱和巷道围岩中形成应力集中<sup>[14]</sup>。在此位置煤体中竖向压力和侧向压力叠加并形成偏差(即偏应力 $\sigma_d$ ),且越靠近采空区偏应力越大,即煤体内最大主应力由竖直向水平偏转,如图5所示。

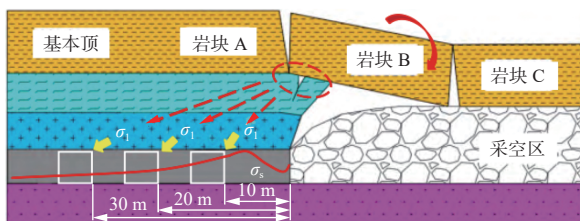


图5 采动应力偏转

Fig. 5 Mining stress deflection

偏应力大小和方向变化是巷道围岩塑性发展的主要影响因素,最大偏主应力 $\sigma_s$ <sup>[15]</sup>计算公式为

$$\sigma_s = \sigma_1 - (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 \quad (1)$$

式中: $\sigma_1$ 为最大主应力; $\sigma_2$ 为中间主应力; $\sigma_3$ 为最小主应力。

采用FLAC<sup>3D</sup>软件建立重复采动巷道围岩应力演化模型,模型尺寸为50 m×1 m×50 m(长×宽×高),分析不同应力环境下一次、二次采动影响下巷道围岩塑性区叠加扩展特征,如图6所示。 $\sigma_{s1}$ , $\sigma_{s2}$ 分别为一次、二次采动偏应力; $p_1$ , $p_2$ 分别为一次、二次采动塑性区范围。

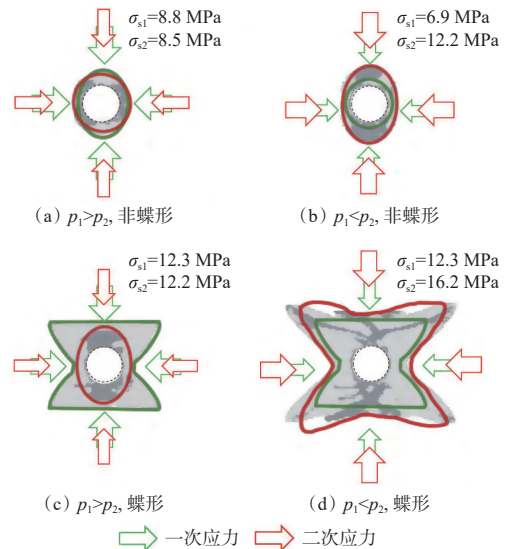


图6 重复采动巷道塑性区叠加扩展特征

Fig. 6 Overlapping extension features of plastic zone in repeated mining roadway

由图6可知,采动偏应力越大,巷道塑性破坏范围越大,越容易形成蝶形叠加塑性区;随主应力比值( $\sigma_1/\sigma_2$ )变化,塑性区呈圆形-椭圆形-蝶形演化。采动偏应力对塑性区范围和形状有重要影响:当 $\sigma_{s1} > \sigma_{s2}$ 时,一次采动塑性区范围大于二次采动塑性区范围;当 $\sigma_{s1} < \sigma_{s2}$ 时,一次采动塑性区范围小于二次采动塑性区范围。重复采动巷道塑性破坏由一次采动塑性区和二次采动塑性区叠加形成,其中一次采动塑性破坏不可逆,二次采动在一次采动破坏的基础上再破坏,形成的塑性破坏形态与 $\sigma_d$ , $\sigma_s$ 有直接关系,最终巷道呈现非对称破坏。

设一次采动塑性区主应力比值 $\eta_1$ 为1.5, 2.0, 2.5, 3.0,得到巷道叠加塑性区形态系数与主应力比值关系,如图7所示。定义形态系数为 $\tau$ ,当 $\tau = \infty$ 时,塑性变形为圆形;当 $\tau \geq 1$ 或 $\tau \leq 0$ 时,塑性变形为椭圆形;当 $0 < \tau < 1$ 时,塑性变形为蝶形<sup>[16]</sup>。

分析图7可知,主应力比值增大,巷道塑性区形态系数迅速减小后趋缓。 $\tau$ 越小,巷道塑性变形越接近蝶形,巷道破坏越严重。巷道叠加后塑性区形态及扩展规律如下:



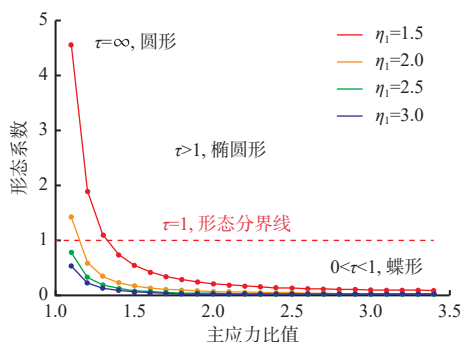


图 7 塑性区形态系数与主应力比值关系

Fig. 7 The relationship between shape coefficient of plastic zone and principal stress ratio

$$\tau_D = \begin{cases} \tau_2 & \tau_1 \geq 1, \tau_1 \leq 0 \\ \tau_1 \tau_2 & 0 < \tau_1 < 1, \tau_1 \neq \infty \\ \tau_1 & 0 < \tau_1 < 1, \tau_1 = \infty \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\tau_D$  为叠加后巷道塑性区形态系数;  $\tau_1, \tau_2$  分别为一次、二次采动后巷道塑性区形态系数。

重复采动巷道塑性区形态判定准则<sup>[17]</sup>:

$$\begin{cases} \text{圆形} & \tau_D = \infty \\ \text{椭圆形} & \tau_D \geq 1, \tau_D \leq 0 \\ \text{蝶形} & 0 < \tau_D < 1 \end{cases} \quad (3)$$

结合关家崖煤矿 13092 巷力学条件, 代入式(2)、式(3), 得到巷道围岩采动塑性区形态系数, 见表 2。

表 2 巷道围岩采动塑性区形态系数

Table 2 Shape coefficient of mining plastic zone of roadway surrounding rock

岩层岩性	$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_D$
砂质泥岩	6.47	0.22	0.24
煤	0.31	0.15	0.05
中粒砂岩	-0.72	1.53	-1.09

根据重复采动巷道塑性区形态判定准则, 砂质泥岩、煤和中粒砂岩在 2 次采动后, 塑性区叠加破坏分别属于蝶形、蝶形和椭圆形, 13092 巷道围岩破坏形态属于蝶形。因此, 重复采动巷道围岩控制的重点时间为一次回采阶段, 重点区域为强烈变形区和缓慢变形区的巷道煤柱帮一侧。

### 3 重复采动巷道多层次耦合控制技术

#### 3.1 多层次耦合控制力学分析

工作面回采产生超前支承压力和侧向支承压力<sup>[18]</sup>, 巷道围岩受力特征如图 8 所示。一次采动期间重复采动巷道在 1308 工作面侧向支承压力作用下应力增高, 为塑性区和弹性区; 二次采动期间重复采动巷道主要受本工作面(1309 工作面)超前支承压力和侧向支承压力影响, 为破坏区和塑性区。

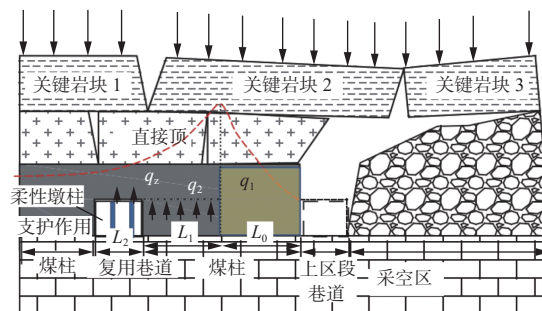


图 8 巷道围岩受力特征

Fig. 8 Stress features of roadway surrounding rock

重复采动巷道变形破坏以蝶形和较大蝶形破坏为主。关键岩块 2 发生破断回转, 作用于重复采动巷道及煤柱, 使完整性严重破坏, 承载力大幅下降。为实现重复采动巷道围岩控制, 支护体提供支撑力  $q_z$ , 煤柱塑性区、弹性区支撑力分别为  $q_1$  和  $q_2$ 。

通过分析采动巷道蝶形变形特征和破坏分区规律, 提出了重复采动巷道多层次耦合控制技术, 采用浅低压-深高压注浆提高煤柱支撑力, 采用锚索补强提高支护体支撑力, 实现耦合控制<sup>[19]</sup>。

#### 3.2 浅低压-深高压注浆方案

巷道两帮为蝶形破坏的主要扩展区, 在重复采动巷道两帮浅部围岩布置低压注浆钻孔, 低压注入浆液可粘合破坏围岩, 形成完整的承载体和止浆壳结构。针对二次采动下破坏向两帮围岩深部传递特征, 提出深部高压注浆思路, 高压注入的浆液进一步将深部小裂隙节理固结, 形成较好的整体, 使得巷道围岩继续发挥主要承载体作用<sup>[20-21]</sup>。

两帮钻孔布置 4 m 和 8 m 浅孔注浆及 12 m 深孔注浆。其中 4 m 和 8 m 浅孔注浆采用双液注浆材料, 水灰比 0.8:1, 封孔长度为 1 m。12 m 深孔注浆采用单液注浆材料, 水灰比 0.6:1, 封孔长度为 2 m。3 种规格注浆压力分别为 6, 8, 10 MPa, 注浆材料性能见表 3。4 m 和 8 m 浅孔每排均布置 3 个钻孔, 依次为上排、中排和下排, 孔径为 42 mm<sup>[19]</sup>, 间距为 2 m, 如图 9 所示。

表 3 注浆材料性能

Table 3 Performance of grouting materials

水灰比	流动时间/min	固结时间/min	不同龄期强度/MPa			
			2 h	1 d	3 d	7 d
0.8:1	1~3	8~15	10.8	12.8	14.7	17.5
0.6:1	1~5	10~20	8.0	10.9	11.5	12.7

对于 12 m 深孔, 需要在注浆前形成浅部封闭区, 即先完成 4 m 和 8 m 钻孔注浆。距离底板 1.5, 3 m 分别布置注浆钻孔, 间距、孔深和孔径分别为 2, 12, 42 mm, 上排、下排钻孔仰角分别为 5°和 0°。12 m 深孔布置如图 10 所示。

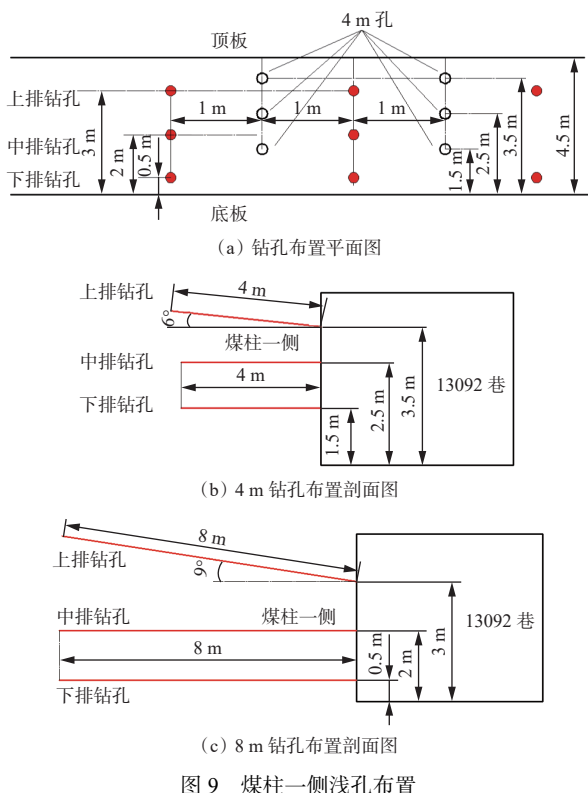


图9 煤柱一侧浅孔布置

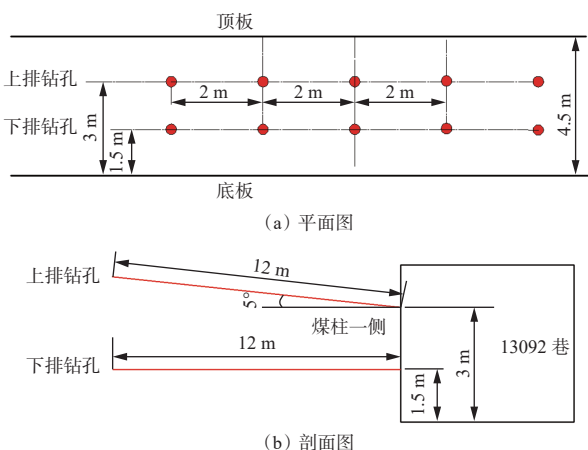


图10 煤柱一侧深孔布置

对13092巷道煤柱一侧进行全长滞后注浆, 钻孔布置如图11所示。距离底板1.5 m和3 m分别布置注浆钻孔, 孔间距、孔深、孔径和孔压分别为2 m, 12 m, 42 mm和10 MPa, 上排、下排钻孔仰角分别为 $5^\circ$ 和 $0^\circ$ 。

### 3.3 强力锚索支护方案

二次采动叠加扩展作用松动了支护体和锚固结构<sup>[22]</sup>, 因此, 采用强力锚索进行约束, 将破坏围岩—浆液黏结体与深部稳定岩层锚固起来, 形成大范围承载体, 实现对重复采动巷道围岩蝶形破坏的控制。

在顶板中补打1排锚索, 使得每排共3根锚索, 排距为1.2 m, 两侧锚索距离两帮1.2 m, 锚索长度为

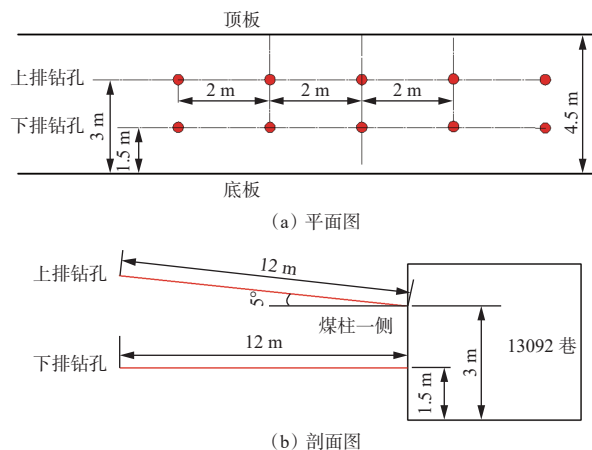


图11 滞后注浆钻孔布置

Fig. 11 Delayed grouting drilling layout

8.4 m<sup>[22]</sup>, 如图12(a)所示。在煤柱中补打1排锚索, 最上面的1根锚索距顶板800 mm, 仰角为 $11^\circ$ ; 第2根锚索距上部锚索1 500 mm, 仰角为 $0^\circ$ ; 第3根锚索距离第2根锚索1 500 mm, 锚索长度为7.4 m, 形成“三三三”锚索布置<sup>[18]</sup>, 如图12(b)所示。

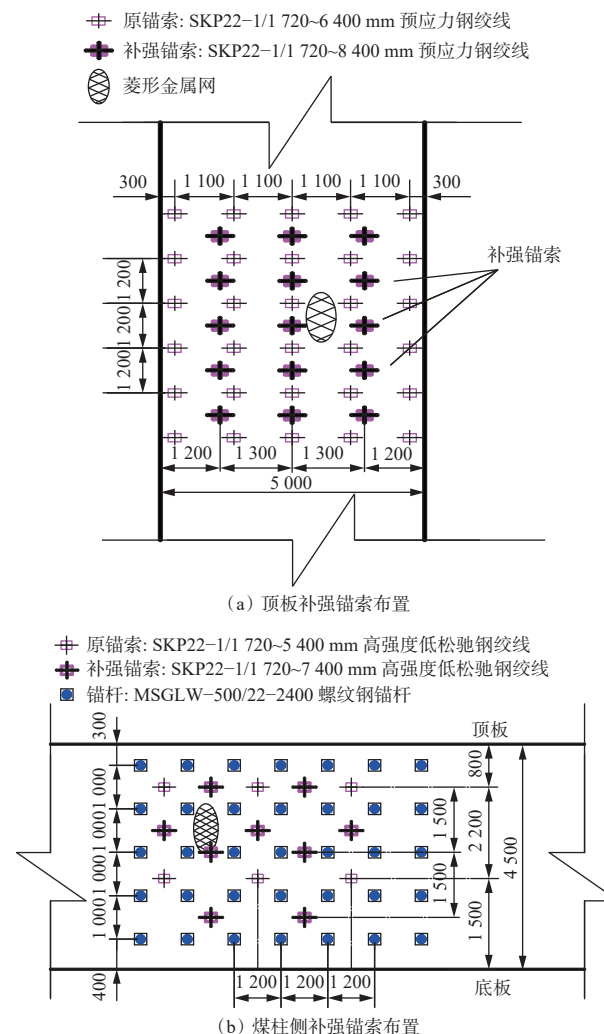


图12 强力锚索支护方案

Fig. 12 Strong anchor cable support scheme

#### 4 加固前后变形量对比

采用多层次耦合控制技术加固区域与未加固区域的巷道累计变形量对比见表 4。在一次采动和二次采动期间,重复采动巷道发生蝶形非对称破坏,以煤柱侧巷帮、巷帮与顶底板交汇点变形和底鼓为主。

表 4 加固区域与未加固区域变形量对比

Table 4 Comparison of deformation between reinforced area and unreinforced area

阶段	区域	变形量/mm				断面积/m <sup>2</sup>
		煤柱侧巷帮	回采侧巷帮	顶板	底板	
一次采动	加固区域	388	173	79	307	21.4
	未加固区域	912	405	526	671	13.0
二次采动	加固区域	155	70	55	210	18.2
	未加固区域	470	215	390	675	9.7

从表 4 可看出,加固区域煤柱侧巷帮和底板变形量明显减小,分别为 155 mm 和 210 mm;加固区域和未加固区域巷道有效断面积分别为 18.2、9.7 m<sup>2</sup>,说明多层次耦合控制满足巷道复用要求。

#### 5 结论

1) 重复采动巷道变形呈现分区和非对称破坏特征,可划分为快速变形区、强烈变形区和缓慢变形区;破坏主要在煤壁帮和煤柱帮及煤壁帮与顶板、煤柱帮与底板交汇处,属于持续扩展的蝶形破坏。

2) 重复采动巷道塑性区具有叠加扩展特征,一次采动塑性破坏不可逆,二次采动后在一次破坏基础上再破坏,以一次采动破坏为主。重复采动巷道围岩控制的重点时间为一次回采阶段,重点区域为强烈变形区和缓慢变形区的巷道煤柱帮一侧。

3) 提出了以浅低压-深高压注浆和强力锚索约束为核心的重复采动巷道多层次耦合控制技术和参数,并在关家崖煤矿 13092 巷道成功实现了复用。

#### 参考文献(References):

- [1] 朱卫兵,王晓振,谢建林,等. 矿山采动覆岩内部岩移原位监测技术进展及应用[J]. 工矿自动化, 2023, 49(9): 1-12.  
ZHU Weibing, WANG Xiaozhen, XIE Jianlin, et al. Advancements and applications: in situ monitoring technology for overburden movement in mining[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(9): 1-12.
- [2] 李波,王涛,李明. 强采动影响复用巷道墩柱支护技术研究与应用[J]. 煤炭工程, 2023, 55(7): 51-57.  
LI Bo, WANG Tao, LI Ming. Research and application

of pier column support technology for reused roadway with strong mining impact[J]. Coal Engineering, 2023, 55(7): 51-57.

- [3] 李超. 复用巷道水力压裂切顶应力场响应及控制效果评价[J]. 山西煤炭, 2023, 43(4): 14-19, 32.  
LI Chao. Stress field response and control effect evaluation of hydraulic fracturing and roof cutting in reused roadway[J]. Shanxi Coal, 2023, 43(4): 14-19, 32.
- [4] 刘光饶,齐振敏,杨位良,等. 强采动巷道断顶卸压稳定性控制机理及应用[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(17): 7090-7098.  
LIU Guangrao, QI Zhenmin, YANG Weiliang, et al. Control mechanism and application of roof break relief stability of strong mining roadway[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(17): 7090-7098.
- [5] 谢生荣,王恩,陈冬冬,等. 深部强采动大断面煤巷围岩外锚-内卸协同控制技术[J]. 煤炭学报, 2022, 47(5): 1946-1957.  
XIE Shengrong, WANG En, CHEN Dongdong, et al. Collaborative control technology of external anchor-internal unloading of surrounding rock in deep large-section coal roadway under strong mining influence[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(5): 1946-1957.
- [6] 闫帅,柏建彪,卞卡,等. 复用回采巷道护巷煤柱合理宽度研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 3081-3086, 3150.  
YAN Shuai, BAI Jianbiao, BIAN Ka, et al. Investigation on rational barrier pillar width of reused gateroad in coal mines[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10): 3081-3086, 3150.
- [7] 张鹏,赵健,许向前. 复用巷道小煤柱宽度及围岩应力研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(10): 61-63.  
ZHANG Peng, ZHAO Jian, XU Xiangqian. Study on small coal pillar width of reused roadway and surrounding rock stress[J]. Coal Technology, 2017, 36(10): 61-63.
- [8] 岳延朋,王涛,孙志勇. 回采工作面多巷布置复用巷道全锚索支护技术研究[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(4): 169-175.  
YUE Yanpeng, WANG Tao, SUN Zhiyong. Research on the whole anchor cable support technology of multi-roadway layout of roadway reuse in coal face[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(4): 169-175.
- [9] 赵志强,马念杰,刘洪涛,等. 巷道蝶形破坏理论及其应用前景[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(5): 969-978.  
ZHAO Zhiqiang, MA Nianjie, LIU Hongtao, et al. A butterfly failure theory of rock mass around roadway and its application prospect[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(5): 969-978.
- [10] 范子儀,李永亮,孙昊,等. 采动影响下弱胶结软岩巷道非对称变形特征与控制对策[J]. 采矿与岩层控制工

- 程学报, 2022, 4(2): 44-53.
- FAN Ziyi, LI Yongliang, SUN Hao, et al. Characteristics and control measures of unsymmetric deformation of roadways within weakly-cemented soft rock[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(2): 44-53.
- [11] 郝英豪, 王帅, 张鑫, 等. 超前支承压力影响下破碎顶板变形机制与控制[J]. 煤矿安全, 2024, 55(3): 147-154.
- HAO Yinghao, WANG Shuai, ZHANG Xin, et al. Deformation mechanism and control of broken roof under the influence of advance bearing pressure[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(3): 147-154.
- [12] 张懿, 张向阳, 卜庆为, 等. 厚煤切顶巷道顶板围岩支护承载稳定性分析[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(6): 37-46.
- ZHANG Yi, ZHANG Xiangyang, BU Qingwei, et al. Analysis on bearing stability of roof surrounding rock support in thick coal roof cutting roadway[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(6): 37-46.
- [13] 陈政文, 吴士良, 姜南. 动载作用下巷道超前支护区域划分[J]. 工矿自动化, 2023, 49(12): 139-146.
- CHEN Zhengwen, WU Shiliang, JIANG Nan. Division of advanced support areas in roadways under dynamic loads[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(12): 139-146.
- [14] 杨军, 王宏宇, 王亚军, 等. 切顶卸压无煤柱自成巷顶板断裂特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(6): 1137-1144.
- YANG Jun, WANG Hongyu, WANG Yajun, et al. Fracture characteristics of the roof in gob-side entry retaining with roof cutting and pressure release[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(6): 1137-1144.
- [15] 吴祥业, 王婧雅, 郭晓菲, 等. 重复采动巷道围岩塑性区叠加扩展形态特征及量化判别方法[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(1): 46-58, 105.
- WU Xiangye, WANG Jingya, GUO Xiaofei, et al. Morphological characteristics and quantitative discriminant method of superimposed plastic zone expansion of surrounding rock of repeated mining roadway[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(1): 46-58, 105.
- [16] 吴祥业, 王婧雅, 陈世江, 等. 重复采动巷道塑性区调控原理与稳定控制[J]. 岩土力学, 2022, 43(1): 205-217.
- WU Xiangye, WANG Jingya, CHEN Shijiang, et al. Regulation principle and stability control of plastic zone in repeated mining roadway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(1): 205-217.
- [17] 郭晓菲, 马念杰, 赵希栋, 等. 圆形巷道围岩塑性区的一般形态及其判定准则[J]. 煤炭学报, 2016, 41(8): 1871-1877.
- GUO Xiaofei, MA Nianjie, ZHAO Xidong, et al. General shapes and criterion for surrounding rock mass plastic zone of round roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(8): 1871-1877.
- [18] 王宇, 涂敏, 付宝杰, 等. 深井侧向采动应力分布规律及沿空巷道支护[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2020, 2(3): 40-47.
- WANG Yu, TU Min, FU Baojie, et al. Study on the distribution of side abutment pressures and ground support for double-used entries in deep mining[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2020, 2(3): 40-47.
- [19] 张进鹏, 刘立民, 刘传孝, 等. 基于预应力锚和自应力注的破碎围岩锚注加固应用研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(4): 774-783.
- ZHANG Jinpeng, LIU Limin, LIU Chuanxiao, et al. Application of bolt-grouting reinforcement for broken surrounding rock based on prestressed bolt and self-stress grouting[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(4): 774-783.
- [20] 李树刚, 成小雨, 刘超, 等. 破碎围岩动压巷道锚索支护与注浆加固技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 67-72.
- LI Shugang, CHENG Xiaoyu, LIU Chao, et al. Research on technology of anchor cable supporting and grouting reinforcement for dynamic pressurized tunnel with crushed surrounding rock[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 67-72.
- [21] 张洪伟, 万志军, 张源. 非充分稳定覆岩下综放沿空掘巷窄煤柱巷旁注浆加固机理[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(3): 489-495.
- ZHANG Hongwei, WAN Zhijun, ZHANG Yuan. Mechanism of grouted- reinforcement in last roadway for pillar in the fully-mechanized gob-side entry[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(3): 489-495.
- [22] 曹庆华, 杨月飞, 陈慧明, 等. 深部沿空留巷超前锚索补强支护及数值模拟[J]. 中国矿业, 2023, 32(4): 133-139.
- CAO Qinghua, YANG Yuefei, CHEN Huiming, et al. Numerical simulation of advanced anchor cable active reinforcement and support in deep gob side entry retaining[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(4): 133-139.