张天,王逸良. 多次采动巷道围岩变形演化规律及支护技术研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报,2020,2(2):023016.
ZHANG Tian,WANG Yiliang. Study on deformation evolution law and support technology of surrounding rock in multiple mining roadway [J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering,2020,2(2):023016.

# 多次采动巷道围岩变形演化规律及支护技术研究

张　天,王逸良

(河南理工大学 能源科学与工程学院,河南 焦作　454000)

**摘　要**:为探究多次采动下巷道围岩的变形演化规律,解决巷道围岩大变形问题,以山西襄垣七一新发煤业5101工作面回风巷为工程背景,采用现场调研、数值模拟和工业性试验相结合的方法,对多次采动期间巷道围岩变形及塑性区演化规律进行研究,结果表明:随着采动影响的加剧,巷道围岩变形量增加且所占总变形量比重增加,并呈现明显的非对称变形;巷道围岩塑性区破坏深度延伸,破坏面积加大且巷道右帮塑性破坏区扩展最为明显,其塑性破坏规律大致呈:“巷道右肩角处→巷道右底角处→巷道右帮中部”的动态扩展过程。基于巷道围岩变形特征及规律提出支护方案,现场工业性试验结果表明,支护方案合理,巷道变形满足工作面开采需要,研究结果可为类似地质条件下巷道围岩控制提供借鉴。

**关键词**:多次扰动;演化规律;非对称变形;围岩控制

**中图分类号**:TD353　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:2096-7187(2020)02-3016-08

# Study on deformation evolution law and support technology of surrounding rock in multiple mining roadway

ZHANG Tian,WANG Yiliang

(*School of Science and Engineering*,*Henan Polytechnic University*,*Jiaozuo* 454000,*China*)

**Abstract**:In order to explore the deformation evolution law of surrounding rock in multiple mining roadway and solve the large deformation problem of surrounding rock in the roadway,the 5101 working face of Shanxi Xiangyuan Qiyi Xinfa Coal Industry Co.,Ltd. was used as the engineering background,using on-site investigation,numerical simulation and the combination of industrial tests and the evolution law of the surrounding rock deformation and the evolution of the shaping zone during multiple mining were studied. The results showed that with the increasing of mining influence,the deformation of surrounding rock of roadway and the proportion of total deformation increased, which indicated an asymmetric deformation. The deformation depth of roadway surrounding rock in the shaping zone extended,which enlarged the damage area and showed an obvious plastic deformation of the right sidewall. The plastic failure law was roughly the dynamic expansion process of "the right shoulder angle of the roadway → the right bottom corner of the roadway → the middle right part of the roadway". Based on the deformation characteristics and laws of roadway surrounding rock,the support scheme was presented. The field industrial test results showed that the support scheme was reasonable and the roadway deformation met the mining face mining needed. The research results could provide reference for surrounding rock control under similar geological conditions.

**收稿日期**:2019-08-08　　**修回日期**:2019-10-29　　**责任编辑**:李　青

**作者简介**:张天(1994—),男,河南济源人,硕士研究生,主要从事巷道围岩控制方面的研究工作。E-mail:280980527@qq.com

**Key words**: multiple disturbances; evolution law; asymmetric deformation; surrounding rock control

据不完全统计[1-4],我国矿井开采过程中,至少有70%~80%的巷道会经受不同程度的动压影响。与常规的静压巷道不同,动压巷道[5-7]由于受上覆工作面或邻近工作面(巷道)的采掘扰动影响,其应力场分布特征及其围岩变形规律更为复杂,围岩稳定性控制也更为困难。鉴于此,国内外学者针对其巷道围岩变形破坏机理做了大量的研究[8-10],并取得了丰富的研究成果。王卫军等[11]对采动影响下的底板巷道围岩变形破坏特征及其失稳机理进行了系统的研究,结果表明:围岩应力分布受超前支承压力在底板中传递的显著影响是底板巷道变形破坏的根本原因;康红普等[12]基于锚索索体破断载荷偏小、强度较低的问题,提出了全断面高预应力强力锚索支护技术;张农等[13]为保证迎采动工作面小煤柱沿空掘巷围岩稳定,提出了预拉力组合支护技术;王连国等[14]针对动压巷道中围岩可锚性差的问题,提出了锚注支护技术;王襄禹等[15]针对动压巷道围岩变形大、难支护的问题,提出了“非均匀支护”技术。国内外学者已对动压巷道变形破坏机理以及围岩控制技术等做了大量的研究[16-20],但由于各矿井围岩地质条件存在一定的差别,针对多次采动影响下的围岩变形及塑性区演化规律和围岩控制技术仍需作进一步深入的研究。本文以山西襄垣七一新发煤业5101工作面回风巷为工程背景,通过现场调研、数值模拟以及现场工业性试验相结合的方法对多次扰动影响下的巷道围岩变形与应力演化规律及其相应围岩控制技术进行研究。

## 1 工程地质概况

新发煤业五采区工作面所采煤层为山西组3号煤层,煤层结构简单,厚2.82~3.03 m,平均2.91 m,直接顶为砂质泥岩、细粒砂岩,基本顶为砂质泥岩或中细粒砂岩。3号煤层于本区域分为上、下2层,分别称为$3^{上}$煤层(上部煤层)和$3_{下}$煤层(下部煤层),两煤层间距0~9.30 m,平均4.65 m,埋深为280~300 m,倾角平均为3°左右,均属于近水平煤层。五采区布置首采工作面时,由于巷道内瓦斯涌出量较大,为保证$3^{上}$煤层中5001、5002工作面的安全回采,决定在3号煤层内事先布置5101工作面回风巷,该巷道既可提前抽放$3^{上}$煤层的瓦斯,又可为下煤层工作面开采服务。巷道位置关系如图1所示,岩石力学参数见表1。

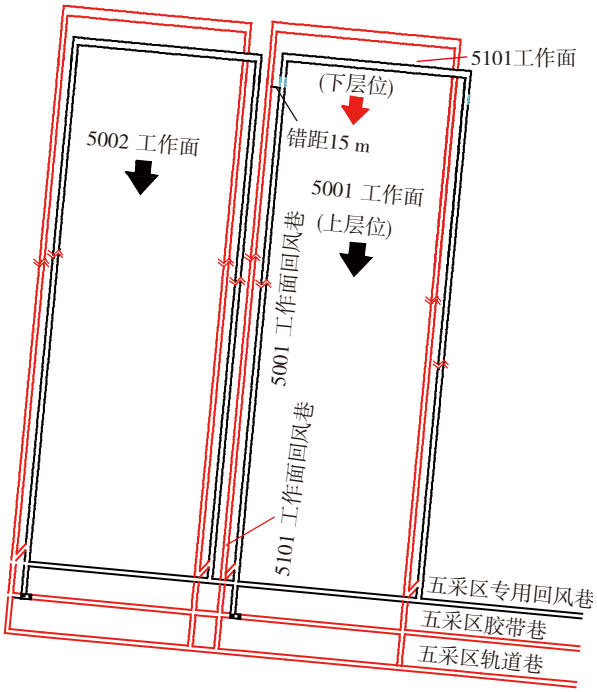



图1 巷道位置关系

Fig. 1 Roadway position diagram

**表1 顶底板岩石力学参数**

**Table 1 Rock mechanics parameters of the top and bottom plates**

| 岩石名称 | 密度/(kg·m$^{-3}$) | 体积模量/GPa | 抗拉强度/MPa | 剪切模量/GPa | 黏聚力/MPa | 内摩擦角/(°) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 砂质泥岩 | 2 530 | 4.50 | 1.70 | 4.90 | 3.10 | 25 |
| 粉砂岩 | 2 750 | 3.15 | 6.60 | 1.54 | 8.32 | 27 |
| 砂岩 | 2 550 | 6.40 | 1.90 | 5.30 | 3.30 | 28 |
| 细粒砂岩 | 2 380 | 2.68 | 1.59 | 1.71 | 2.72 | 27.8 |
| $3^{上}$煤层 | 1 780 | 0.99 | 0.58 | 0.57 | 0.80 | 18 |
| 3号煤层 | 1 780 | 0.99 | 0.58 | 0.57 | 0.80 | 18 |
| 泥岩 | 2 675 | 1.08 | 0.54 | 0.53 | 0.68 | 22 |

## 2　巷道围岩变形特征及影响因素分析

### 2.1　巷道围岩变形特征

通过对5101工作面回风巷已掘段和其他类似工程地质条件下采区进行现场调研,可知其巷道围岩变形特征主要为:① 顶板下沉量大,支护失效较多。巷道顶板的最大下沉量可达500 mm左右,“网兜”现象极其严重,且多处锚杆断裂失效;② 帮部收缩量大,非对称变形明显,巷道两帮相对移近量最大可达1 500 mm左右,且巷道右侧变形明显高于左侧。

### 2.2　巷道围岩变形破坏影响因素分析

结合5101工作面回风巷围岩变形特征,通过现场调研可知巷道变形的主要影响因素为:① 巷道围岩软弱。巷道沿煤层顶板掘进,其顶板为砂质泥岩,底板为泥岩、粉砂岩,两帮为实体煤,巷道围岩软弱,岩性较差。因此在巷道掘进及周围工作面回采过程中,巷道围岩极易发生塑性变形破坏;② 多次扰动影响。由于巷道受到自身掘进、5001和5101工作面回采影响,因此围岩区域应力场是由初始应力场、支承压力、开采动载等叠加形成的应力场。

## 3　动压巷道围岩变形演化规律

### 3.1　数值模型的建立及计算过程

为研究5101工作面回风巷在受到多次扰动影响下围岩变形及应力演化规律,根据5101工作面实际地质条件,建立FLAC$^{3D}$数值计算模型,模拟采用摩尔-库仑模型,模型尺寸为长×宽×高=400 m×150 m×45 m,模型底部为固定边界,4个侧面水平方向固定,上部为应力边界,应力大小等于上覆岩层所受重力,为7.0 MPa,经测定侧压系数$\lambda$=1.2。采用“十字布点法”分别于5101工作面回风巷巷帮中部与顶板中部垂直巷道表面向外布置水平监测线(模型中$y$ = 75 m处)。

结合山西襄垣七一新发煤业五采区工作面实际开采顺序,在模拟中先将5101工作面回风巷掘进,之后对不同工作面进行分步开挖,具体计算过程为:加载原始应力→掘进5101工作面回风巷→对5001工作面进行循环开挖→对5101工作面进行循环开挖。

数值计算及工作面开挖顺序如图2所示。

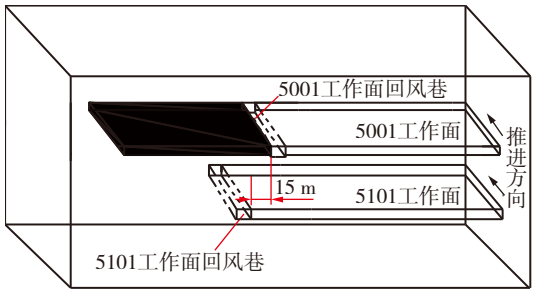



图2　数值模型计算及工作面开挖顺序

Fig. 2　Numerical model calculation and working surface excavation sequence diagram

### 3.2　模拟结果分析

#### 3.2.1　巷道围岩变形演化规律

随着不同工作面的推进(沿工作面推进方向本文以工作面位于测点前方为负,后方为正),5101工作面回风巷围岩变形量逐渐增大,图3为不同采动影响阶段下巷道围岩变形量。

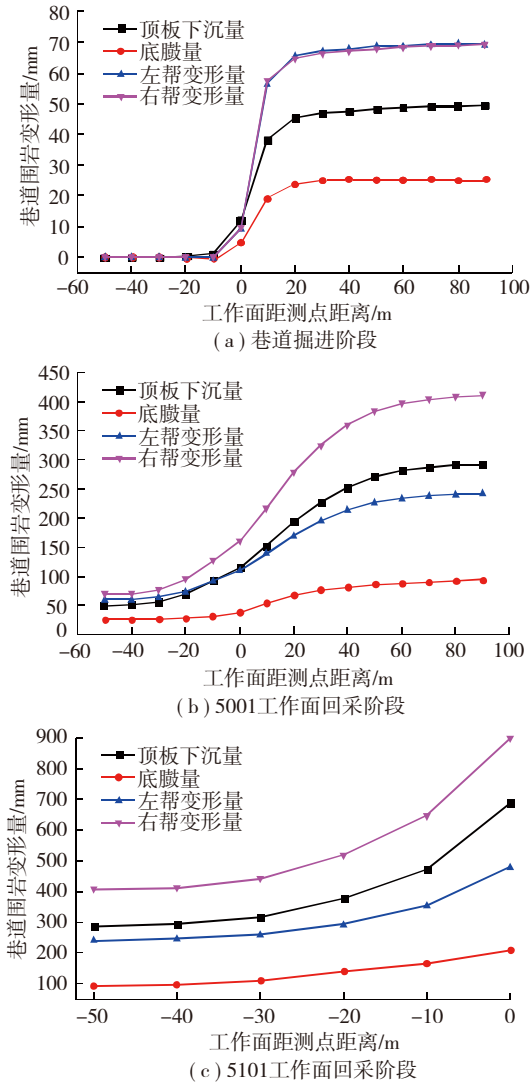


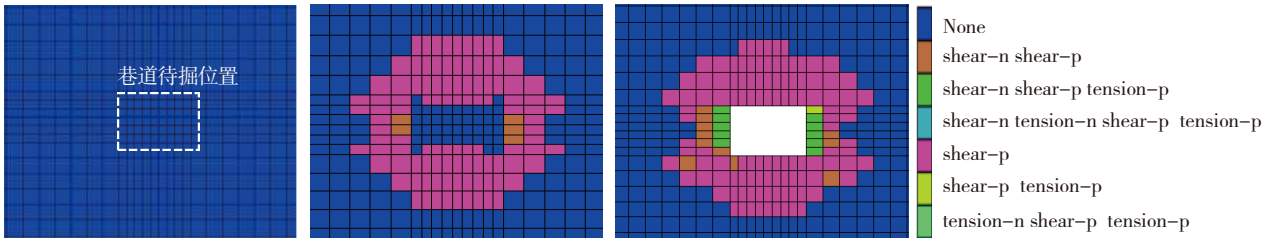

图3　不同采动阶段巷道围岩变形演化曲线

Fig. 3　Deformation evolution curves of surrounding rock in different mining stages

由图3(a)可知：掘进引起的围岩位移调整过程主要集中在掘进工作面距测点前方10 m至后方10 m处，此期间巷道顶板下沉量、左帮变形量、右帮变形量、底臌量分别增加至38.2，56.6，57.6，19.9 mm；而当掘进工作面推进至距测点后方90 m处时，巷道围岩变形量逐渐趋于稳定。由图3(b)可知：当5001工作面由距测点前方30 m推进至后方60 m处时，其所受采动影响剧烈，且巷道不同部位之间所受的影响程度也有很大的差别，其中巷道顶板下沉量、左帮变形量、右帮变形量、底臌量分别增加至292.4，241.6，410.0，94.4 mm。由图3(c)可知：由于受到自身工作面开采的影响，随着工作面距测点距离的减小，巷道围岩变形量及其变形速率都呈持续增大的趋势；当工作面由距测点前方50 m处推进至0 m处时，巷道顶板下沉量、左帮变形量、右帮变形量、底臌量分别增加至690.0，480.2，898.8，210.1 mm。

### 3.2.2 巷道围岩塑性区演化规律

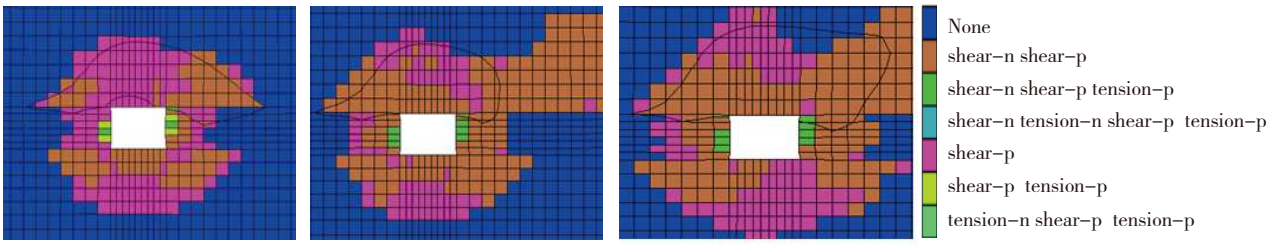
随着不同工作面的推进，5101工作面回风巷围岩塑性区分布形态也在不断发生变化，为动态反映采掘扰动影响下5101工作面回风巷围岩塑性区演化规律，分别对掘进阶段、5001和5101回采阶段巷道围岩塑性区分布进行分析。不同采动阶段巷道围岩塑性区分布如图4～6所示，不同采动阶段塑性破坏面积统计如图7～8所示。




(a) 距测点-10 m　(b) 距测点0 m　(c) 距测点10 m

图4　掘进阶段巷道围岩塑性区演化

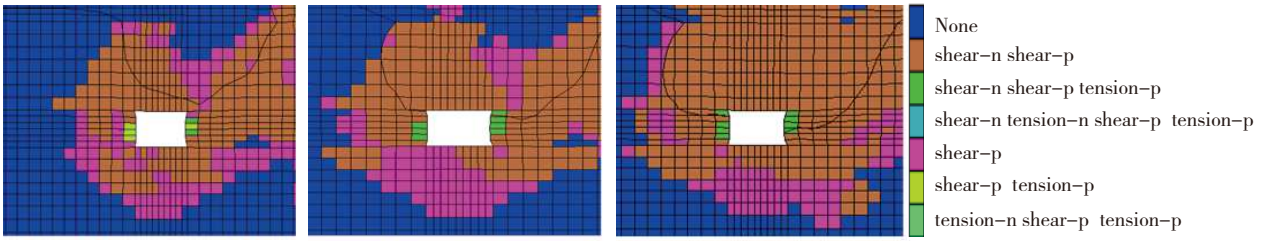
Fig. 4　Evolution diagram of plastic zone of surrounding rock in roadway during excavation




(a) 距测点-10 m　(b) 距测点0 m　(c) 距测点10 m

图5　5001工作面回采期间巷道围岩塑性区演化

Fig. 5　Evolution diagram of plastic zone of surrounding rock during mining of 5001 working face




(a) 距测点-50 m　(b) 距测点-30 m　(c) 距测点-10 m

图6　5101工作面回采期间巷道围岩塑性区演化

Fig. 6　Evolution diagrams of plastic zone of surrounding rock during mining of 5101 working face

(1) 掘进阶段：由图4，7可知：① 掘进引起的围岩塑性变形破坏主要以剪切破坏为主，仅在巷道两帮浅部出现小范围的抗拉破坏；② 当掘进工作面位于测点前方10 m处时，巷道围岩塑性区为零，受掘进影响较小；③ 随着掘进工作面的逐步推进，巷道围岩塑性区范围也在逐步扩大，但其破坏范围均大致呈对称“O”型分布；④ 掘进引起的塑性破坏主要集中在掘进工作面距测点0 m及后方10 m处。

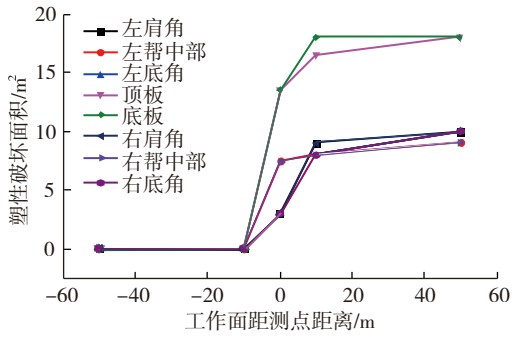



图7 掘进阶段巷道围岩塑性区扩展曲线

Fig. 7 Curves of plastic zone expansion of surrounding rock in roadway

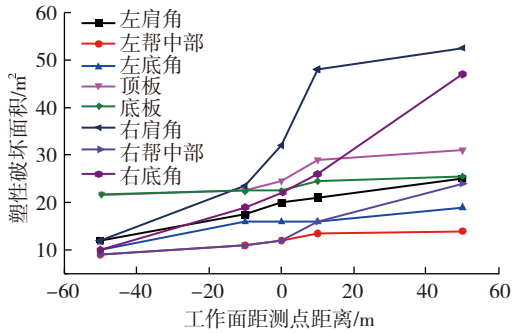



图8 一次采动阶段巷道围岩塑性区扩展曲线

Fig. 8 Expansion curves of surrounding plastic zone of roadway in primary mining stage

(2) 由图5,8可知:① 在5001工作面回采期间,巷道围岩变形破坏仍主要以剪切破坏为主,仅在两帮浅部出现小范围的抗拉破坏;② 随着5001工作面的逐步推进,巷道两帮塑性破坏特征也逐步由对称破坏演变为非对称破坏,同时巷道围岩塑性区均表现为不同程度向深部扩展的趋势,且巷道右帮塑性破坏区扩展最为明显。

(3) 由图6可知:① 与掘进阶段以及5001回采阶段相同,在5101工作面回采期间,巷道围岩变形破坏仍主要以剪切破坏为主,仅在两帮浅部出现小范围的抗拉破坏;② 随着5101工作面由距测点前方50 m处推进至前方10 m处时,巷道左帮中部以及左底角处的塑性破坏面积分别由15,19 $m^2$,增加至20,23 $m^2$,而对于巷道顶板和右帮来说,随着工作面的推进,其塑性破坏面积则逐步扩展至模型全部区域。

### 3.2.3 巷道围岩应力演化规律

随着采动影响的加剧,巷道围岩应力不断发生变化,分别取不同采动阶段工作面推进至测点前方10 m处垂直应力云图进行研究。不同采动阶段垂直应力分布形态如图9所示。

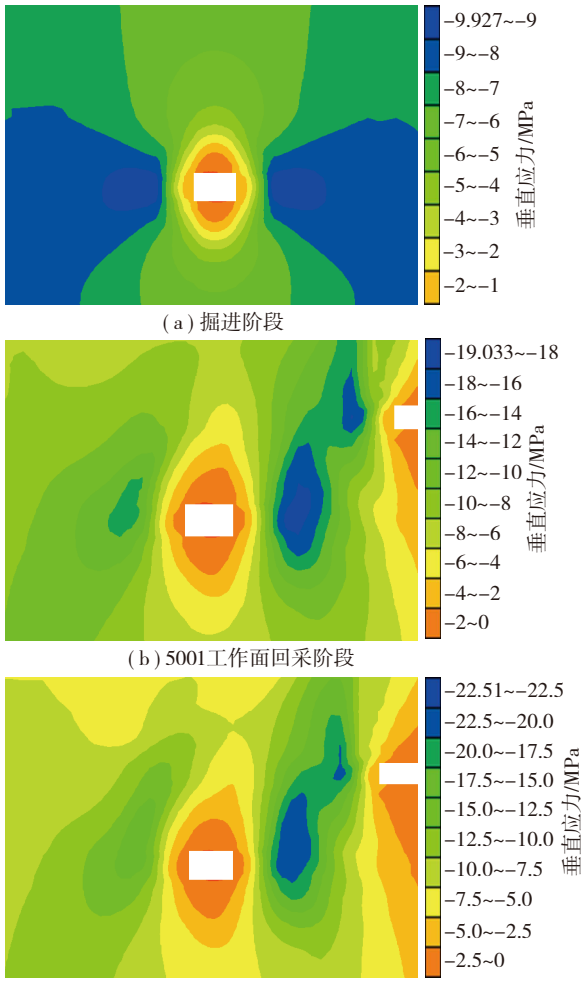



图9 不同采动阶段垂直应力场分布

Fig. 9 Vertical stress field distribution at different mining stages

由图9(a)可知:巷道掘进之后,在两帮浅部出现一定程度的卸压,而在两帮深部则产生了应力集中现象,其峰值约为9.0 MPa,应力集中系数约为1.16。由图9(b)可知:5001工作面的开采对于巷道围岩应力场分布具有较大的影响,巷道右帮垂直应力最高可达18 MPa,应力集中系数为2.32,相较掘进阶段的9.0 MPa,增加了100%。由图9(c)可知:与一次采动阶段相比,在5101工作面回采期间,巷道右帮的垂直应力最高可达22.51 MPa,应力集中系数约为2.90。

综上所述,随着掘进工作面、5001及5101工作面的逐步推进,呈现以下规律:① 巷道围岩“非对称”变形也逐步变得明显;掘进阶段约占围岩总变形量的9.5%,一次采动阶段约占围岩总变形量的36.4%,而二次采动阶段约占围岩总变形量的

54.1%；② 巷道围岩塑性区均表现为不同程度向深部扩展的趋势；巷道两帮塑性破坏特征也逐步由对称破坏演变为非对称破坏；其塑性破坏规律表现为："巷道右肩角处→巷道右底角处→巷道右帮中部"的动态扩展过程；③ 巷道顶底板浅部均出现了不同程度的卸压，且随着深度的增加，卸压程度也有所降低，而对于巷道两帮来说，其垂直应力则大致呈"浅部卸压，深部应力集中"的分布特征，且其应力集中程度也随着采动影响的加剧而逐渐增大。

## 4 动压巷道支护参数的确定

由现场观测及数值分析可知，5101工作面回风巷围岩大变形主要源于多工作面开采的叠加影响，且其变形过程主要发生在5001工作面以及自身工作面回采期间，合理的支护方式对于巷道围岩稳定性起着至关重要的作用。根据试验巷道实际地质条件提出相应的围岩稳定性控制方案，巷道支护断面如图10所示。

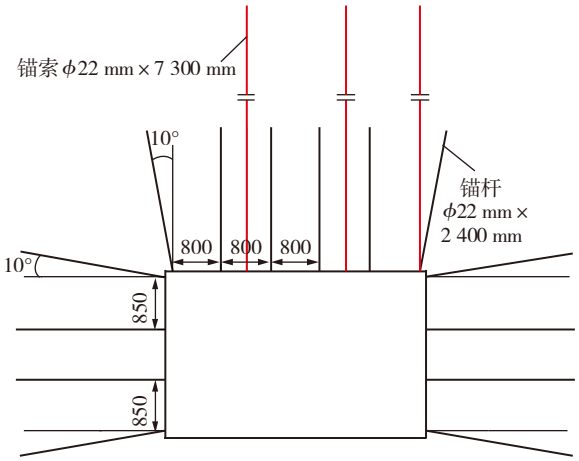



图10 巷道支护断面

Fig. 10 Road support section

原支护方案：顶板布置6根锚杆，规格为ϕ22 mm×2 400 mm，间排距为800 mm×900 mm，顶板锚杆均垂直于巷道顶板布置；两帮各布置4根锚杆，锚杆规格与顶板相同，间排距为850 mm×900 mm，两帮锚杆均水平布置；顶板中部布置1根规格为ϕ17.8 mm×6 300 mm的钢绞线锚索，排距为1 800 mm。该支护方案下锚杆锚索预应力较低，导致锚杆、索的主动承载性能未能得到有效发挥；在巷道开挖后，顶板离层、围岩裂隙张开等扩容变形现象未能得到及时控制，致使巷道围岩裂隙由表及里迅速扩展，围岩破坏失稳逐渐向深部转移。

为缓解巷道大变形并保证工作面的正常开采，在原支护方案的基础上对锚杆锚索的布置方式进行优化。① 锚杆：顶板及两帮锚杆数量、间距不变，为更好地发挥锚杆支护效果，将最外端锚杆分别向外倾斜10°，排距均由900 mm变为800 mm；② 锚索：顶板布置2根规格为ϕ22 mm×7 300 mm的钢绞线锚索，间排距为1 600 mm×1 600 mm，锚索预紧力由200 kN增加至250 kN。由于巷道右侧变形量较大，加强右侧巷道支护能有效地将上覆岩层压力向巷道左侧转移，缓解非对称变形，因此在顶板右侧增加1根规格为ϕ22 mm×7 300 mm的钢绞线锚索，排距1 600 mm，与原有锚索呈2-1-2布置方式，顶板长锚索可锚固到巷道顶板塑性区外的深部稳定岩层，差异化的锚索布置可有效控制顶板冒落、台阶错动等非均匀破坏。

## 5 现场工业性试验

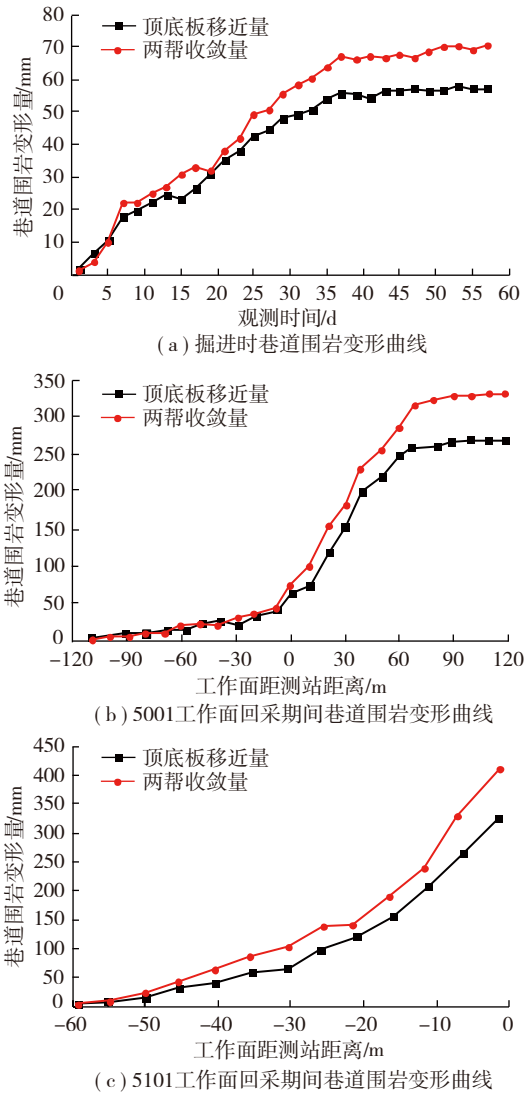
为验证支护方案的合理性，对5101工作面回风巷不同采动阶段巷道围岩表面位移进行观测，观测结果如图11所示。

(1) 由图11(a)可知：在巷道掘进期间，两测站变化规律大致相似，巷道围岩变形量逐渐增大，而变形速率则呈先增大后减小的趋势；33 ~ 35 d内巷道围岩变形量开始逐渐趋于稳定；监测数据表明：顶底板和两帮移近量最大值分别为57，71 mm。

(2) 由图11(b)可知：随5001工作面的推进，巷道围岩变形过程大致经历3个阶段：① 在工作面距测站前方120 ~ 30 m时，巷道围岩受5001工作面采动的影响较小；② 当5001工作面位于测站前方30 m至后方70 m左右时，由于受到5001工作面侧向支承压力的影响，巷道围岩变形量开始急剧增大；③当工作面位于测站后方70 m之后，随5001工作面采动影响减弱，巷道围岩变形量也逐步趋于稳定。在5001工作面采动期间顶底板与两帮累积变形量分别为269，332 mm。

(3) 由图11(c)可知：随5101工作面的推进，巷道围岩受采动影响逐渐增大，巷道围岩变形量呈递增趋势，顶底板累计移近量与两帮累计收敛量分别为：324，414 mm。

从矿压观测结果来看，受到多次扰动影响下的巷道围岩变形量仍大于普通的回采巷道，但在采用




(a) 掘进时巷道围岩变形曲线

(b) 5001工作面回采期间巷道围岩变形曲线

(c) 5101工作面回采期间巷道围岩变形曲线

图11 不同采动阶段巷道围岩变形量

Fig. 11 Deformation of surrounding rock of roadway in different mining stages

该支护方案之后,基本能够保证巷道在其服务年限内的正常使用;可见:“高强树脂锚杆+锚索补强支护”的联合支护方案在5101工作面回风巷中使用较为成功。

## 6 结 论

(1) 现场调研可知:围岩软弱、支护方案不合理、周围工作面及自身工作面回采所造成的侧向与前方支承压力的叠加作用是诱发5101工作面回风巷围岩大变形的主要原因。

(2) 采用数值模拟的方法分别对巷道不同采动阶段下的围岩变形及塑性区演化规律进行了研究,结果表明:① 随着采动影响的加剧,巷道围岩变形量增加,巷道围岩呈现出明显的“非对称”变形特征,且掘进阶段、一次采动阶段、二次采动阶段的围岩变形量分别占总变形量的9.5%,36.4%,54.1%;② 巷道围岩塑性破坏区均表现为不同程度向深部扩展的趋势,同时,巷道两帮塑性破坏特征也逐步由对称破坏演变为非对称破坏;且不同工作面的开采对于巷道右帮的影响程度最大。

(3) 针对巷道围岩破坏特征提出“高强树脂锚杆+锚索补强支护”的联合支护方案,现场监测结果表明巷道围岩变形得到了有效地控制,满足工作面开采的需求。

## 参考文献(References):

[1] 马海峰,殷志强,李传明,等. 邻近层同采工作面动压巷道失稳机理及错距优化研究[J]. 采矿与安全工程学报,2016,33(2):278-283.
MA Haifeng, YIN Zhiqiang, LI Chuanming, et al. Study on instability mechanism and offset optimization of dynamic pressure roadway inadjacent seam with same mining face[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(2): 278-283.

[2] 张志康,王连国,单仁亮,等. 深部动压巷道高阻让压支护技术研究[J]. 采矿与安全工程学报,2012,29(1):33-37.
ZHANG Zhikang, WANG Lianguo, SHAN Renliang, et al. Research and application of pressure relief anchor box beam support system in deep coal roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(1): 33-37.

[3] 张明,姜福兴,王建超,等. 超深井多煤层扰动下巷道变形的时空规律[J]. 采矿与安全工程学报,2018,35(2):229-237.
ZHANG Ming, JIANG Fuxing, WANG Jianchao, et al. Space-time regularity of roadway deformation under disturbance of several coal seams in ultra-deep mines[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(2): 229-237.

[4] 李家卓,张继兵,侯俊领,等. 动压巷道多次扰动失稳机理及开采顺序优化研究[J]. 采矿与安全工程学报,2015,32(3):439-445.
LI Jiazhuo, ZHANG Jibing, HOU Junling, et al. Multiple disturbance instability mechanism of dynamic pressure roadway and mining sequence optimization[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(3): 439-445.

[5] 徐佑林,许猛堂,程利兴. 强烈动压影响巷道再造承载拱控制原理与试验研究[J]. 采矿与安全工程学报,2018,35(6):1135-1141.
XU Youlin, XU Mengtang, CHENG Lixing. Control principle and experimental study of heavy-duty dynamic pressure affecting roadway reconstruction bearing arch[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(6): 1135-1141.

[6] 高福全,薛吉胜,尹希文. 强烈动压影响下锚网支护巷道矿压显现规律研究[J]. 煤炭科学技术,2015,43(1):28-32.
GAO Fuquan, XUE Jisheng, YIN Xiwen. Research on strata behaviors law of bolting with wire mesh roadway affected by strong dynamic pressure[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(1): 28-32.

[7] 李清,曹怀建,侯健,等. 腾晖矿松软厚煤层动压回采巷道矿压显现规律研究[J]. 煤炭工程,2016,48(10):70-73.
LI Qing,CAO Huaijian,HOU Jian,et al. Mine pressure behavior of mining roadway in soft thick seam under dynamic pressure in Tenghui Mine[J].Coal Engineering,2016,48(10):70-73.

[8] 苏夏收,王炯,马福杰,等. 店坪矿动压巷道恒阻大变形锚索支护技术[J]. 煤炭科学技术,2018,46(S1):6-11.
SU Xiashou,WANG Jiong,MA Fujie,et al. Supporting technology of constant resistance and large deformation anchor cable in dynamic pressure roadway of Dianping Mine[J]. Coal Science and Technology,2018,46(S1):6-11.

[9] 唐芙蓉,王连国,张华磊,等. 动压软岩巷道破坏机理及控制技术研究[J]. 采矿与安全工程学报,2010,27(4):537-542.
TANG Furong,WANG Lianguo,ZHANG Hualei,et al. Failure mechanism of dynamically-pressured soft rock roadway and control technology[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2010,27(4):537-542.

[10] 余伟健,杜少华,王卫军,等. 高应力软岩近距离巷道工程的掘进扰动与稳定性[J]. 岩土工程学报,2014,36(1):57-64.
YU Weijian,DU Shaohua,WANG Weijun,et al. Excavation disturbance and stability of short-distance roadway with high stress and soft rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2014,36(1):57-64.

[11] 王卫军,袁越,余伟健,等. 采动影响下底板暗斜井的破坏机理及其控制[J]. 煤炭学报,2014,39(8):1463-1472.
WANG Weijun,YUAN Yue,YU Weijian,et al. Failure mechanism of subinclined shaft in floor under mining influence and its control[J]. Journal of China Coal Society,2014,39(8):1463-1472.

[12] 康红普,林健,吴拥政. 全断面高预应力强力锚索支护技术及其在动压巷道中的应用[J]. 煤炭学报,2009,34(9):1153-1159.
KANG Hongpu,LIN Jian,WU Yongzheng. High pretensioned stress and intensive cable bolting technology set in full section and application in entry affected by dynamic pressure[J]. Journal of China Coal Society,2009,34(9):1153-1159.

[13] 张农,李学华,高明仕. 迎采动工作面沿空掘巷预拉力支护及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(12):2100-2105.
ZHANG Nong,LI Xuehua,GAO Mingshi. Pretensioned support of roadway driven along next gob and heading adjacent advancing coal face and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(12):2100-2105.

[14] 王连国,缪协兴,董建涛. 动压巷道锚注支护数值模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报,2006,23(1):39-42.
WANG Lianguo,MIAO Xiexing,DONG Jiantao. Numerical simulation of bolt-grouting support in soft roadway affected by mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2006,23(1):39-42.

[15] 王襄禹,柏建彪,李磊,等. 近断层采动巷道变形破坏机制与控制技术研究[J]采矿与安全工程学报,2014,31(5):674-680.
WANG Xiangyu,BAI Jianbiao,LI Lei,et al. Deformation failure mechanism and control technology of mining-induced roadway near a fault[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2014,31(5):674-680.

[16] 康红普,徐刚,王彪谋,等. 我国煤炭开采与岩层控制技术发展40 a及展望[J]. 采矿与岩层控制工程学报,2019,1(1):013501.
KANG Hongpu,XU Gang,WANG Biaomou,et al. Forty years development and prospects of underground coal mining and strata control technologies in China[J] .Journal of Mining and Strata Control Engineering,2019,1(1):013501.

[17] 王家臣. 基于采动岩层控制的煤炭科学开采[J]. 采矿与岩层控制工程学报,2019,1(1):013505.
WANG Jiachen. Sustainable coal mining based on mining ground control[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering,2019,1(1):013505.

[18] 张 农,韩昌良,谢正正. 煤巷连续梁控顶理论与高效支护技术[J]. 采矿与岩层控制工程学报,2019,1(1):013005.
ZHANG Nong,HAN Changliang,XIE Zhengzheng. Theory of continuous beam control and high efficiency supporting technology in coal roadway[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering,2019,1(1):013005.

[19] 惠功领,牛双建,靖洪文,等. 动压沿空巷道围岩变形演化规律的物理模拟[J]. 采矿与安全工程学报,2010,27(1):77-81,86.
HUI Gongling,NIU Shuangjian,JING Hongwen,et al. Physical simulation on deformation rules of god-side roadway subjected to dynamic pressure[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2010,27(1):77-81,86.

[20] 袁越,王卫军,袁超,等. 深部矿井动压回采巷道围岩大变形破坏机理[J] .煤炭学报,2016,41(12):2940-2950.
YUAN Yue,WANG Weijun,YUAN Chao,et al. Large deformation failure mechanism of surrounding rock for gateroad under dynamic pressure in deep coal mine[J]. Journal of China Coal Society,2016,41(12):2940-2950.