

# 红石岩煤矿工作面回风巷破坏机理及防治技术

张军华<sup>1</sup>, 吴 蒸<sup>2</sup>, 张恩强<sup>2</sup>, 惠峰凯<sup>1</sup>

(1. 陕西省红石岩煤矿, 陕西 延安 727307; 2. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:**针对红石岩煤矿工作面回风巷严重破坏问题,采用现场调查、实验室试验和理论分析等方法,分析了其破坏的影响因素及破坏机理,提出了以开底板卸压槽卸压为主的防治技术,并分析了卸压槽卸压原理。结果表明:引起巷道破坏的主要原因是邻近工作面的采场支承压力,次要原因是地质构造,其破坏机理为底板塑性屈服引起两帮剪压破坏,两帮破坏又使底板失去“支座”,加剧底鼓程度,直至平衡;卸压槽切断了直接底板,改变了底板受力结构和采场支承压力在底板的传递途径和方式,从而改变了围岩的受力状态,另外卸压槽吸收了底板变形,也有利于巷道的稳定;以卸压槽卸压为主的治理技术能有效地控制巷道变形破坏,满足安全生产的要求。

**关键词:**工作面;破坏机理;底板卸压槽;卸压原理

**中图分类号:**TD355   **文献标志码:**A   **文章编号:**0253-2336(2018)02-0150-06

## Failure mechanism and prevention technology of air return gateway in coal mining face of Hongshiyian Mine

ZHANG Junhua<sup>1</sup>, WU Zheng<sup>2</sup>, ZHANG Enqiang<sup>2</sup>, HUI Fengkai<sup>1</sup>

(1. Hongshiyian Coal Mine of Shaanxi Province, Yan'an 727307, China;

2. School of Energy, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** According to serious failure problems of the air return gateway in a coal mining face of Hongshiyian Mine, a site investigation, lab experiment, theoretical analysis and other methods were applied to analyze the failure influence factor and failure mechanism. The paper provided a prevention and control technology mainly with the floor pressure released slot to release the pressure and analyzed the pressure released mechanism of the pressure released slot. The results showed that the main cause of the failure occurred in the gateway were the support pressure of the coal mining face nearby. The second cause was the geological structure, the failure mechanism was that the plastic yield of the seam floor could cause the shearing failures of the two sidewalls, the two sidewall failure would make the floor lost a bracket and the floor heave degree would be increased until the floor pressure balanced. The pressure released slot would cut the direct floor and would change the floor stressed structure and the transmission path and method of the support pressure on the floor of the coal mining face. Therefore, the stressed status of the surrounding rock was changed, the pressure released slot could absorb the floor deformation and would be favorable to the stability of the mine roadway. The control technology mainly with the pressure released slot to release the pressure could effectively control the deformation failure of the mine roadway and could meet the requirements of the safety production.

**Key words:** coal mining face; failure mechanism; pressure relief groove in seam floor; pressure releasing principle

## 0 引言

红石岩煤矿工作面巷道采用双巷掘进<sup>[1-3]</sup>, 因此工作面回风巷需要经历相邻2个工作面的2次采

动影响。在经受第1次采动影响后, 工作面回风巷变形破坏严重, 需经过大工程量翻修才能投入使用; 在经受第2次采动影响的过程中其大部分仍会产生较严重的变形破坏<sup>[4-5]</sup>, 部分段需要反复维修才能

收稿日期:2017-11-13;责任编辑:王晓珍    DOI:10.13199/j.cnki.est.2018.02.020

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2011JY005);陕西省岩层控制重点实验室资助项目(13JS066)

作者简介:张军华(1968—),男,陕西高陵人,工程师。E-mail:550230146@qq.com

引用格式:张军华,吴 蒸,张恩强,等.红石岩煤矿工作面回风巷破坏机理及防治技术[J].煤炭科学技术,2018,46(2):150-155.

ZHANG Junhua, WU Zheng, ZHANG Enqiang, et al. Failure mechanism and prevention technology of air return gateway in coal mining face of Hongshiyian Mine [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(2): 150-155.

维持使用。国内外学者对巷道变形机理和巷道破坏治理做了大量研究。王卫军等<sup>[6]</sup>研究了采动影响下底板暗斜井的破坏机理,认为超前支撑压力在底板中的传递是引起底板巷道变形破坏的根本原因;郭志飚等<sup>[7]</sup>通过数值模拟研究了深部软岩巷道变形破坏机理,认为赋存应力大,岩体强度低和原支护强度不足才导致巷道变形破坏;杨本生等<sup>[8]</sup>采用“底板浅孔注浆+深部锚索束高压注浆”技术治理巷道底鼓,效果良好;李树刚等<sup>[9]</sup>针对破碎围岩,基于数值模拟和现场实践,提出了基于锚索与注浆的支护加固方案,提高了巷道稳定性;高明仕等<sup>[10]</sup>针对深部巷道高应力、大变形的特点,研制了让压锚索支护技术,并通过实验室试验和工程实践,证明其有效保护了锚网支护系统的完好性,提高了深部巷道围岩的支护质量和支护水平。由于地质条件和开采条件的不同,巷道的破坏情况和原因也不同,进而防治技术也不同。

针对这种情况,红石岩煤矿开展了“红石岩煤矿工作面回风巷变形破坏机理及治理技术研究”项目的研究工作。在12405工作面开采过程中和采后,对12406回风巷变形破坏进行了全面、系统的现场调查和分析研究,提出了以在底板中预开卸压槽<sup>[11~12]</sup>卸压为主的防治技术方案,并在12407回风巷进行实施,取得了良好的效果。笔者依据该项目主要研究结果,对相关问题进行进一步分析。

## 1 回风巷概况

与12406回风巷和12407回风巷相关的工作面包括12405工作面、12406工作面和12407工作面,这些工作面均位于四采区。2条巷道及相关工作面布置如图1所示。其中12406回风巷服务于12406工作面,其变形破坏主要发生在12405工作面开采影响过程中;12407回风巷服务于12407工作面,其主要受12406工作面开采影响。

### 1.1 12406工作面地质及开采技术

1)12406工作面位于曹家峪沟下,地面标高+1 020—+1 215 m,煤层底板标高+890—+930 m,盖山厚度145~320 m。煤层厚度1.95~4.52 m,平均3.6 m;煤层倾角5°左右。煤层直接顶为泥岩,厚3.5 m左右,工作面由南西向北东由泥岩渐变为粉砂岩,局部为细砂岩;基本顶为粉砂岩,厚40 m左右,坚硬,在工作面北东部中间夹有4 m左右的含砾粗砂岩。煤层伪底为炭质泥岩,平均厚0.35 m左右,由

南东向北西逐渐变薄;直接底为泥岩,平均厚5.0 m左右,由南东向北西逐渐变厚;基本底为砂岩,厚14 m左右,工作面由北西向南东由中粒砂岩逐渐向粉砂岩变化,但整个工作面以中粒砂岩为主。

四采区内地层为平缓起伏的大单斜构造,次级构造以短轴背向斜为主。井田内煤层的构造受南峪口背斜和芋园-秋林子沟向斜影响,产生次一级的构造,区域内无断层。

红石岩煤矿水文地质类型属于复杂,受采掘破坏或影响的主要地表水,其补给条件好,补给水源充沛。但实际生产中矿井涌水量不大,一般为600~800 m<sup>3</sup>/d。

2)2406工作面采用采煤法是长壁全部垮落、综采。工作面长度150 m,工作面推进长度2 520 m,区段煤柱宽度20 m。工作面采高1.8~3.6 m,截深0.8 m,日进尺4.8 m。工作面巷道布置如图1所示。

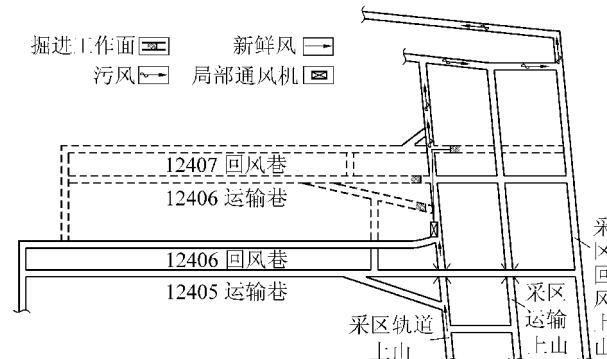


图1 两条回风巷及相关工作面布置平面

Fig. 1 The layout plan of two tail entries and related working face

### 1.2 回风巷布置及支护方式

#### 1.2.1 巷道布置

巷道设计断面为矩形,高3.0 m、宽3.6 m;沿煤层底板布置,巷道坡度小于3°~5°。

#### 1.2.2 巷道支护

巷道采用锚-网-钢带支护。其中顶板和上帮采用ø18 mm×1 800 mm金属锚杆,设钢带和金属网;下帮采用ø18 mm×2 000 mm塑料锚杆,无钢带和金属网。金属网网片1 m×6 m,网孔100~150 mm。锚固剂采用ø35 mm×300 mm树脂药卷,每孔一卷。金属锚杆托板为110 mm×110 mm×8 mm钢托板,塑料锚杆托板为ø100 mm圆形塑料托板;钢带用ø12 mm圆钢制成,顶板钢带顺巷道宽度方向布置,两帮钢带与巷道底板呈45°角布置,如图2所示。

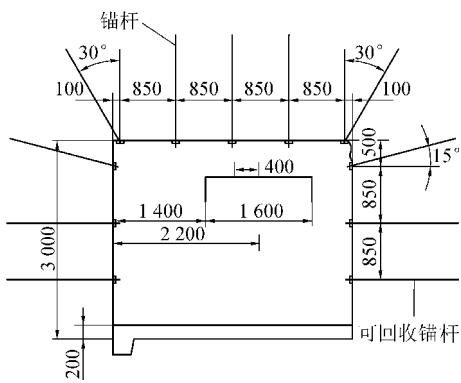


图 2 回风巷断面及支护

Fig. 2 Cross section and support of tail entry

## 2 12406 回风巷变形破坏调查与分析

### 2.1 巷道变形破坏调查

在 12405 工作面开采即将结束时,对 12406 回风巷进行了现场调查,现场调查采用观测、拍照等方式进行。沿巷道全长每间隔 50 m 对巷道底鼓量、巷帮破坏深度进行测量,对变形破坏特征进行描述,对典型破坏形态进行拍照。巷道典型破坏特征如图 3 所示,巷道底鼓量沿巷道长度分布曲线如图 4 所示。

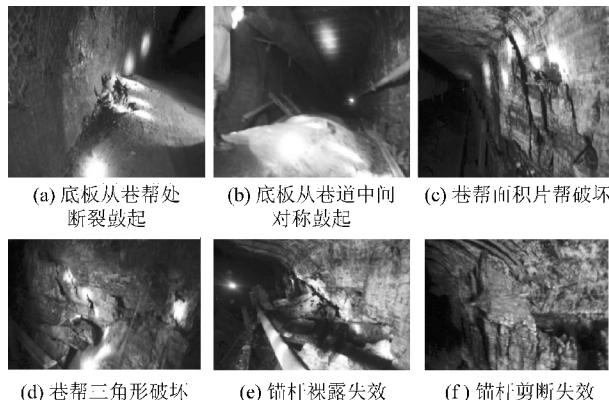


图 3 12406 回风巷典型破坏形态照片

Fig. 3 Typical destruction shape of No.12406 tail entry

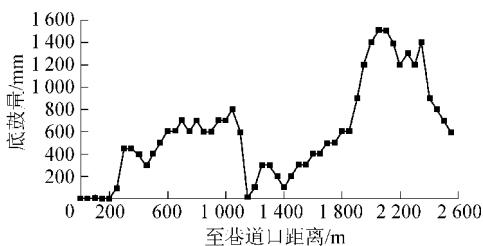


图 4 12406 回风巷底鼓量曲线

Fig. 4 Floor heave curve of No.12406 tail entry

### 2.2 巷道变形破坏特征分析

现场调查结果显示,12406 回风巷变形破坏具

有以下主要特征:

1) 巷道变形破坏程度沿巷道长度有明显的分段差异性。沿巷道长度按巷道变形破坏程度分为 6 段,由外向里依次为:第 1 段,位于 0~250 m 处,巷道基本未变形;第 2 段,位于 250~550 m 处,巷道变形破坏轻微;第 3 段,位于 550~1 150 m 处,此段处于南峪口背斜构造区,巷道变形破坏较严重;第 4 段,位于 1 150~1 950 m 处,巷道变形破坏中等;第 5 段,位于 1 950~2 300 m 处,此段处于芋园-秋林子沟向斜构造区,巷道变形破坏严重;第 6 段,位于 2 350~2 550 m 处,巷道变形破坏中等。

2) 巷道变形破坏以底鼓为主,沿巷道全长几乎均存在不同程度的底鼓,其中最大底鼓量达 1 500 mm。底鼓呈现 2 种基本类型,即底板断裂鼓起型和底板塑性屈服鼓起型,2 种类型均存在对称鼓起型和非对称鼓起型 2 种情况。

3) 巷帮破坏属剪切破坏。破坏区一般为一正三角区,即在巷道底板处破坏深度最大,在顶板处破坏深度最小,底板处破坏最大深度达 1 300 mm。剪切破坏体整体向巷内位移并产生片帮,片帮下部严重,由下而上逐步减缓。

4) 巷帮破坏下帮(实体煤侧)较上帮(煤柱侧)严重。在下帮破坏严重段锚杆失效严重,靠近顶板的一排锚杆较多被拉剪断(断口呈拉剪破坏特征),其余锚杆多数因煤壁片落而杆体裸露。

5) 底鼓量与巷帮破坏深度密切相关。一般底鼓量大处巷帮破坏深度亦大。

### 2.3 巷道变形破坏机理研究与分析

#### 2.3.1 岩石黏土矿物分析及膨胀性测定

在 12407 回风巷底板采取岩样,在实验室进行了岩样黏土矿物分析及膨胀性测定。分析结果为:样品主要以石英碎屑为主,黏土矿物为杂基,黏土矿物中以 L/S 混层矿物为主,高岭石次之,偶见伊利石,几乎未见蒙脱石,从而判定岩石不具有膨胀性。测定结果为:岩石遇水无膨胀性或具有甚微膨胀性。

#### 2.3.2 12406 回风巷变形破坏的主要因素

根据现场调查结果,认为影响 12406 回风巷变形破坏的主要因素是受 12405 工作面开采影响,另外与地质构造、煤层顶底板条件、支护结构等有关。

1) 12405 工作面开采影响。据现场实际情况,12406 回风巷从掘成到受 12405 工作面开采影响前,仅局部有轻微底鼓现象。而调查结果显示,在 12405 工作面开采即将结束时该巷道几乎沿全长均

发生了底鼓,且底鼓量由里向外逐渐变小,如图4所示。这是因为越向里受开采影响时间越长,经历的影响过程越全,影响越充分。说明12406回风巷变形破坏是12405工作面周围支承压力作用的结果,其围岩变形破坏及稳定受12405工作面围岩变形破坏及稳定控制。

2)地质构造影响。沿12406回风巷分布着一个向斜(芋园-秋林子向斜)和一个背斜(南峪口背斜),如图5所示,其位置分别与调查统计的第3段和第5段相对应,其巷道变形破坏程度分别为严重和较严重。另外,根据生产实际,12405回风巷底鼓严重段也与这2个地质构造区基本吻合。由此可以确定褶皱构造与巷道变形破坏有一定关系。

3)煤层及其顶、底板条件影响。根据地质资料以及12406回风巷揭露情况,沿12406回风巷煤层厚度在向斜构造区变厚,在背斜构造区变薄;在相应区域煤层顶、底板条件也与其他区域明显不同。说明煤层及顶、底板条件的变化与褶皱构造有关。而煤层及顶、底板条件的变化直接决定了巷道及采场围岩条件、采场支承压力分布及向巷道围岩中传递的方式和路径、巷道围岩受力以及变形破坏形式等不同。其中顶板条件影响和决定着采场支承压力的大小及其分布范围,当采场支承压力大、分布范围大时对回风巷的影响较大;反之则相反。而底板条件直接影响和决定了采场支承压力向巷道底板的传递方式和路径及底板的破坏形式。底板断裂鼓起是底板较硬但抗弯能力不足产生的一种梁式断裂破坏;而底板塑性鼓起是因为底板相对较软,在受压缩后产生的一种屈服破坏。

4)12406回风巷支护方案影响。由图2可知,12406回风巷两帮支护不同,上帮支护强度明显大于下帮。在采场支承压力作用下,巷道下帮支护结构首先破坏(或因锚杆承载能力不足被拉剪断,或因不能有效控制煤壁片落导致锚杆杆体外露而失效),随巷道下帮支护结构失效,下帮煤壁破坏向深部逐渐发展,同时引起上帮载荷增加,导致上帮破坏。当两帮载荷达到新的平衡后两帮稳定。由此可见,巷道下帮支护结构因支护强度不足而失效是导致巷道严重变形破坏的因素之一,而巷道下帮支护强度远弱于上帮是巷道下帮破坏较上帮严重的主要原因。

### 2.3.3 12406回风巷变形破坏机理

1)巷道变形破坏原因。12406回风巷破坏主要

是由12405工作面开采引起的,是其采场周围支承压力作用的结果,如图5所示, $\gamma$ 为上覆岩层的平均容重, $kN/m^3$ ; $H$ 为单元体距离地表的深度,m; $\gamma H$ 为原岩应力; $K$ 为巷道顶板应力集中系数。其破坏特征与构造、煤层及其顶底板条件、巷道支护结构等有关。该巷道破坏不属于膨胀性矿物膨胀引起的破坏。

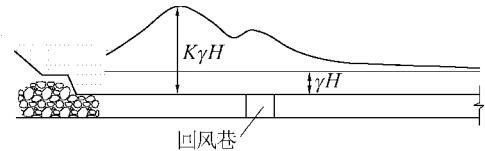


图5 支承压力分布

Fig. 5 Distribution of abutment pressure

需要特别强调,煤层基本顶为40 m厚的坚硬粉砂岩,基本底为14 m厚的坚硬中砂岩,而直接底板为泥岩。这种特殊的围岩结构决定了采场支承压力分布和向巷道传递的规律以及巷道产生以底鼓为主的破坏特征,这也是在一个埋深仅145~320 m、区段煤柱宽20 m、巷道断面宽度仅3.6 m的巷道中能够出现严重破坏的主要自然因素。

2)巷道围岩破坏类型及变形破坏过程。根据巷道围岩受力和破坏特征分析,底板破坏属梁式断裂破坏或塑性屈服破坏,两帮破坏主要为压剪破坏。

巷道破坏由围岩条件、受力条件和支护结构最不利处开始,逐步向四周扩展。就12406回风巷整体而言,其围岩受基本顶与基本底夹持和控制。在2个坚硬岩层之间,巷道顶板由于支护强度较大,且受基本顶的“保护”,变形很小,而巷道底板由于岩层条件最差,受力最复杂且无支护,因此破坏先从底板开始。在底板对两帮的作用下,随底板破坏引起两帮破坏。巷道围岩的破坏过程是:先底板,再两帮;先下帮,后上帮;两帮破坏由底板向顶板发展。

3)巷道围岩受力及巷道变形破坏演化过程。在受12405工作面开采影响前巷道围岩受力平衡,围岩稳定。如图6所示,12405工作面支承压力 $K\gamma H$ 打破了原平衡状态,其在底板的分力 $K'\gamma H$ 使底板先产生变形( $K'$ 为巷道底板应力集中系数),出现底鼓;由此产生一个主动的附加力 $Q$ ,作用于两帮煤体之上引起两帮变形破坏,两帮变形破坏随底鼓发展由下而上逐渐发展,在两帮形成一个正三角形分布的破坏区。随两帮煤体变形片帮,两帮锚杆杆体或裸露、或被拉剪断。在锚杆失效后两帮破坏进一步加剧。两帮破坏实际上相当于支承底板岩层的

支座由外向里逐渐削弱,从而又引起底鼓进一步加剧。在底板和两帮的相互作用和影响下,底板和两

帮破坏范围不断增加直到最后达到平衡和稳定。

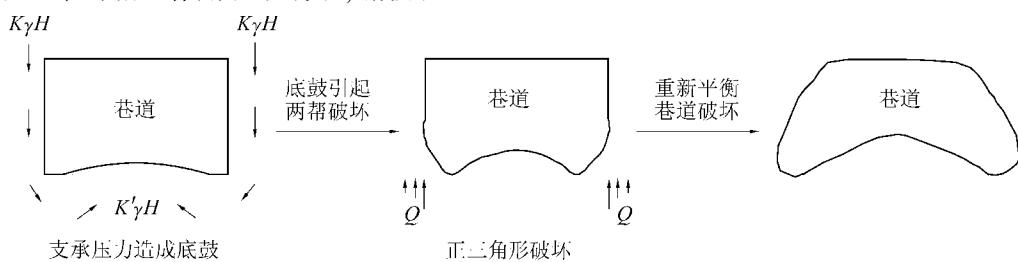


图6 支承压力下巷道破坏演化过程

Fig. 6 The destruction process of roadway under the abutment pressure

### 3 12407回风巷变形破坏防治方案

根据上述研究结果,提出以在巷道底板开挖卸压槽卸压为主的巷道变形破坏防治方案,并在12407回风巷进行了实施,取得了其绝大部分不需要维修就能满足安全使用要求的效果。

#### 3.1 底板卸压槽卸压设计与施工

##### 3.1.1 底板卸压槽布置

针对12406回风巷变形破坏的分段差异性,按照对可能发生严重及较严重破坏段巷道进行重点防治的原则,确定在12407回风巷中卸压槽采用分段布置。

为了通过对比试验确定卸压槽的合理深度,从开切眼开始布置了3个试验段,对1 000、1 200、1 400 mm三个深度的卸压槽进行对比试验。

设计卸压槽断面为矩形,宽度600 mm、深度1 200 mm,卸压槽中心线距巷道上帮700 mm,即其边缘到该巷帮距离400 mm,如图7所示。其中卸压槽深度是经过上述对比试验后确定的。

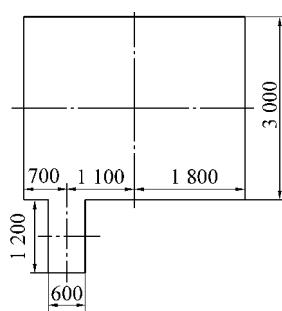


图7 卸压槽参数

Fig. 7 Parameters of pressure relief groove

##### 3.1.2 底板卸压槽施工

1)施工时间。为了确保卸压槽的卸压效果,设计卸压槽应在受12406工作面采动影响前形成。即卸压槽形成应超前12406工作面至少50 m。

2)施工方法。采用机械施工。

3)卸压槽回填。根据12407回风巷受12406工作面采动影响产生变形破坏的过程在前,巷道服务于12407工作面生产的使用过程在后,确定在巷道使用前将卸压槽保持开放状态,即不填充,以保证受12406工作面采动影响产生的巷道围岩压力得以充分释放。当巷道受12406工作面开采影响结束,巷道变形稳定后,在巷道服务于12407工作面前用原渣对卸压槽进行回填。这既保证了卸压槽的卸压效果,节省了卸压槽施工时出渣的运输费用,也避免了选择使用其他填充材料引起的麻烦和造成的浪费。

#### 3.2 其他防治措施

根据对12405回风巷变形破坏影响因素的分析,建议采取以下辅助防治措施。

1)在工作面运输巷进入采空区前,应对其顶板支护结构进行卸载以保证顶板能沿下帮及时充分垮落;如果在下帮有悬顶,应强制放顶。以减小侧向支承压力影响。

2)改变巷道支护结构,加强巷道下帮支护强度。

#### 3.3 治理效果

治理方案在12407回风巷应用后,有效减小了巷道变形量,对应12406巷道变形破坏程度较严重、严重的部分转为变形破坏轻微,使冒顶、片帮等事故的风险大幅降低。此方案增强了巷道围岩整体的稳定性,能够保证安全使用。

### 4 底板卸压槽卸压原理

#### 4.1 卸压槽的卸压作用分析

1)切断了直接底板,减小甚至消除了直接底板的挠曲以及由此产生的对巷道两帮煤体的附加作用力,有利于两帮煤体的稳定。

2)切断了直接底板,一是切断了上帮采场支承压力沿水平方向通过直接底板向巷内和下帮传递的

途径,有利于下帮煤体稳定;二是改变了支承压力由底板沿垂直方向向巷道直接地板传递的途径和在其上的分布,有利于底板稳定。

3)有效吸收了由采场支承压力作用产生的巷道底板的水平变形和下位岩层的隆起变形,从而减小了巷道变形破坏。

#### 4.2 卸压槽卸压原理

卸压槽切断了直接底板,改变了巷道底板受力结构和采场支承压力在巷道底板中的传递途径和方式,从而改变了巷道围岩的受力状态,主要是大幅改善了支护较弱的巷道下帮的受力状态;卸压槽吸收了巷道底板变形,大幅减弱了底板变形对两帮的影响,从而保证了两帮的稳定。这就是采用底板卸压槽后能够保证巷道稳定的原理。

### 5 结 论

1)红石岩煤矿12406回风巷变形破坏主要由采场支承压力造成,其次为地质构造,破坏具有分段差异性。

2)红石岩煤矿工作面回风巷变形破坏特征以底鼓为主;其巷道破坏过程为采场支承压力造成底鼓,底鼓引起两帮呈正三角形剪切破坏,两者破坏程度呈正相关直至巷道破坏。

3)采用“以底板卸压槽卸压为主,其他相关措施并举”的治理方案,取得了显著效果,经对比分析,卸压槽布置参数宽600 mm、深1 200 mm较为合理;采取了“卸压槽在受采动期间敞开,在受采动影响结束后原渣回填”的卸压槽处置方式,施工简单易行、省工省料,卸压充分。

4)卸压槽通过改变巷道底板受力结构改变了采场支承压力在底板的传递途径和方式,从而改变了巷道围岩的受力状态;同时卸压槽通过自身变形吸收了巷道围岩变形,有利于减小巷道变形量。

#### 参考文献(References):

- [1] 张恩强,勾攀峰,陈海波.井巷工程[M].徐州:中国矿业大学出版社,2010;57-60.
- [2] 张恩强,张军华,陈永光,等.红石岩煤矿巷道底鼓原因分析及其治理[J].矿业安全与环保,2013,40(6):65-68.  
ZHANG Enqiang, ZHANG Junhua, CHEN Yongguang, et al. Cause analysis of roadway floor heave and its control in Hongshiyian coal mine[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2013, 40 (6):65-68.
- [3] 李军.红石岩煤矿回采巷道底鼓机理及防治技术研究[D].
- [4] 张恩强,吴蒸,高丁丁,等.采动影响下工作面巷道变形破坏机理研究[J].煤炭技术,2017,36(1):24-26.  
ZHANG Enqiang, WU Zheng, GAO Dingding, et al. Study on failure mechanism of roadway under mining influence [J]. Coal Technology, 2017, 36(1):24-26.
- [5] 任艳芳,宁宇.浅埋煤层长壁开采超前支承压力变化特征[J].煤炭学报,2014,39(S1):38-42.  
REN Yanfang, NING Yu. Changing feature of advancing abutment pressure in shallow long wall working face [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S1):38-42.
- [6] 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,2001,39(8):1463-1472.  
WANG Weijun, YUAN Yue, YU Weijian, et al. Failure mechanism of the sub inclined shaft in floor under mining influence and its control [J]. Journal of China Coal Society, 2001,39(8):1463-1472.
- [7] 郭志飚,李二强,张跃林,等.南山煤矿构造应力区软岩巷道变形破坏机理研究[J].采矿与安全工程学报,2015,32(2):267-272.  
GUO Zhibiao, LI Erqiang, ZHANG Yuelin, et al. Study on deformation and failure mechanism of the tectonic stress areas' soft rock roadway in Nanshan coal mine [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32 (2):267-272.
- [8] 杨本生,高斌,孙利辉,等.深井软岩巷道连续“双壳”治理底鼓机理与技术[J].采矿与安全工程学报,2014,31(4):587-592.  
YANG Bensheng, GAO Bin, SUN Lihui, et al. Study on technology and mechanism of continuous “double shell” harnessing floor heave in deep soft - engineering rock roadway [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(4):587-592.
- [9] 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.
- [10] 高明仕,杨青松,赵一超,等.高应力大变形巷道压锚索支护技术及装置研制[J].采矿与安全工程学报,2016,33(1):7-11.  
GAO Mingshi, YANG Qingsong, ZHAO Yichao, et al. Support technology and device development of yield cables [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(1):7-11.
- [11] 吴蒸,张恩强,戚子特,等.卸压槽卸压机理研究[J].煤矿安全,2017,48(6):48-51.  
WU Zheng, ZHANG Enqiang, QI Zite, et al. Study on pressure release mechanism of pressure releasing slot [J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(6):48-51.
- [12] 程志超,高明仕,权修才.高水平应力下巷道底板切槽底鼓防治研究[J].煤矿安全,2016,47(3):52-55.  
CHENG Zhichao, GAO Mingshi, QUAN Xiucai. Study on floor heave prevention and control with floor grooving under high horizontal stress [J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(3):52-55.