



移动扫码阅读

徐佑林,刘德成,吴旭坤,等.强动压“三软”煤层巷道“卸-转-固”围岩控制技术[J].煤炭科学技术,2021,49(2):30-37. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.02.004

XU Youlin, LIU Decheng, WU Xukun, et al. Surrounding rock control technology by “pressure relief-stress transfer-reinforce” in “Three-Soft” coal seam under strong dynamic pressure[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(2):30-37. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.02.004

强动压“三软”煤层巷道“卸-转-固”围岩控制技术

徐佑林^{1,2},刘德成³,吴旭坤²,曹佐勇^{1,4},高永雄⁵,张仁松⁶,周泽¹,周波⁷,许猛堂¹,张辉¹

(1.贵州理工学院 矿业工程学院,贵州 贵阳 550003;2.贵州大学 矿业学院,贵州 贵阳 550025;3.安徽昊成矿业技术服务
有限公司,安徽 合肥 230000;4.贵州煤矿安全监察局,贵州 贵阳 550004;5.贵州紫森源集团投资有限公司,贵州 盘州 553503;
6.贵州致远工程技术咨询有限公司,贵州 贵阳 550000;7.贵州湾田煤业集团有限公司 湘桥煤矿,贵州 盘州 553503)

摘要:针对强动压影响下三软煤层巷道围岩控制难的问题,以仲恒煤矿“三软”煤层 115-101 回风巷为工程背景,通过现场调查、围岩松动和地应力测试,采用 UDEC 数值软件根据实际建立数值模型,研究了巷道变形破坏原因,并基于应力控制原理,提出受强动压影响的三软煤层巷道卸-转-固围岩综合控制理论。研究表明:115-101 回风巷围岩松动圈范围 0~5 m,应力峰值在深入围岩 5~6 m 处,采用卸-转-固围岩控制技术,在原有的 29U 型钢支护条件下,降低支护排距,根据煤层倾角及厚度设计并施工爆破卸压孔,在孔底连线安装炸药,利用自制的封孔设备将加固材料通过高压风压入钻孔进行封孔,实施爆破。爆破后,围岩应力重新分布,重新形成破碎区、塑性区和弹性区,并使应力集中的弹性区转移到围岩更深处,降低巷帮及底板浅部围岩应力集中,在巷道周围表层一定范围内形成低应力卸压圈,而在围岩深部形成了应力集中的自承载圈,集中应力主要由该自承载圈的岩体承担。该自承载圈的岩体处于围岩深部,基本处于三向应力状态,降低集中应力对巷道的破坏作用,稳定性得到很大提高。巷道围岩顶底板移近速率降低了 79.43%,两帮移近速率下降了 54.17%,巷道围岩变形量明显减少,有效控制了强动压影响下三软煤层巷道围岩变形。

关键词:强动压;三软煤层;卸-转-固;围岩应力;围岩控制

中图分类号:TD353 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2021)02-0030-08

Surrounding rock control technology by “pressure relief-stress transfer-reinforce” in “Three-soft” coal seam under strong dynamic pressure

XU Youlin^{1,2}, LIU Decheng³, WU Xukun², CAO Zuoyong^{1,4}, GAO Yongxiong⁵, ZHANG Rensong⁶,
ZHOU Ze¹, ZHOU Bo⁷, XU Mengtang¹, ZHANG Hui¹

(1.School of Mining Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, China; 2.School of Mining, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3.Anhui Haocheng Mining Technology Service Co., Ltd., Hefei 230000, China; 4.Guizhou Administration of Coal Safety, Guiyang 550004, China;
5.Guizhou Zisenyan Group Investment Co., Ltd., Panzhou 553503, China; 6.Guizhou Zhiyuan Engineering Technology Consulting Co., Ltd.,
Guiyang 550000, China; 7.Xiangqiao Coal Mine, Guizhou Wantian Coal Industry Group Co., Ltd., Panzhou 553503, China)

Abstract: Aiming at the technical problem of difficult control of surrounding rock in the three-soft coal seam under the influence of strong dynamic pressure, taking the No.115-101 tail entry in the three-soft coal seam of Zhongheng Coal Mine as the engineering background, according to the actual situation, UDEC numerical software was used to establish a numerical model by field investigation, loosening of surrounding rock, and in-situ stress test, the causes of roadway deformation and failure are studied, and based on the principle of stress control, a comprehensive control theory of “pressure relief-stress transfer-reinforce” surrounding rock in “Three-soft” coal seam roadway affected by strong dynamic pressure is proposed. The research results show that the loose circle of surrounding rock of No.115-101 tail entry is in the range of 0~5 m, and the stress concentration range is 5~6 m of surrounding rock. The surrounding rock control technology of “pressure relief-stress transfer-reinforce” is adopted, which is under the condition of profiled original 29U steel support, reduce the sup-

收稿日期:2020-11-12;责任编辑:朱恩光

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51764010,51874109);贵州省科技计划资助项目(黔科合平台人才[2019]5674)

作者简介:徐佑林(1983—),男,贵州贵阳人,教授,博士。E-mail:282110949@qq.com

port row spacing, design and construct blasting pressure relief holes according to the inclination and thickness of the coal seam, install explosives at the bottom of the hole, and use self-made hole sealing equipment to press the reinforcement material into the hole through high pressure wind to seal the hole and implement blasting. After blasting, the surrounding rock stress is redistributed to reform the broken zone, plastic zone and elastic zone, and the elastic zone of stress concentration is transferred to the deeper surrounding rock, reducing the stress concentration of the surrounding rock in the shallow part of the roadway and floor, a low-stress relief ring is formed in a certain range of the surface around the roadway, and a self-supporting ring with concentrated stress is formed in the deep part of the surrounding rock, and the concentrated stress is mainly borne by the rock mass of the self-supporting ring. The rock mass of the self-supporting ring is in the deep part of the surrounding rock and is basically in a three-dimensional stress state, which reduces the destructive effect of concentrated stress on the roadway and greatly improves the stability. Finally, the approaching rate of the roof and floor of the roadway surrounding rock was reduced by 79.43%, and the approaching rate of the two sides was decreased by 54.17%, the deformation of the surrounding rock of the roadway was significantly reduced, effectively controlling the surrounding rock deformation of the three-soft coal seam under the influence of strong dynamic pressure.

Key words: strong dynamic pressure; “Three-Soft” coal seam; “pressure relief-stress transfer-reinforce”; surrounding rock stress; surrounding rock control

0 引言

随着煤矿开采深度的增加,开采扰动强度不断增大,强动压作用下三软煤层巷道支护更加困难^[1]。该类巷道围岩软弱破碎,一旦受到强动压影响,巷道围岩变形更加强烈,易造成冒落失稳、支架破坏等一系列事故,严重影响着煤矿的安全生产^[2-4],众多学者针对三软煤层巷道围岩变形破坏机制及相应控制措施进行了研究,并取得了富有成效的成果。在三软煤层采动应力方面,夏洪春等^[5]分析了三软煤层超长工作面矿压显现规律及应力分布特征,得到三软煤层超长工作面的顶、底板控制技术。李春杰等^[6]研究了沿空留巷围岩应力分布规律,得到了原岩应力区、应力增高区及应力降低区的准确分布。唐建新等^[7]得到三软煤层回采巷道围岩破坏模式和支护失效机制,锚网索联合支护结构失效,进而导致围岩-支护承载结构丧失承载力。王琦等^[8]以典型三软煤层——龙口矿区梁家煤矿4606工作面为工程背景,对4606沿空巷道围岩变形破坏机制进行分析,提出了具有针对性的围岩控制措施。在三软煤层巷道围岩控制措施方面,康红普等^[9]针对强采动影响下软岩巷道围岩大变形问题,分析高地应力与超长工作面强采动应力叠加作用下巷道围岩大变形机理,提出强采动巷道支护-改性-卸压协同控制理念,有效控制了千米深井、软岩、强采动巷道大变形。徐佑林等^[10]分析了软岩巷道围岩的变形机理,提出再造承载拱的巷道支护体系,对强动压影响下的巷道围岩控制取得较好效果。孙利辉等^[11]针对强动压影响下松软煤层巷道巷帮变形破坏问题,分析巷帮变形破坏特征,研究其滑移变形机理,提出巷帮锚注加固技术,并在井下试验工

程中取得较好的成效。

综上所述,相关学者开展了众多关于三软煤层巷道围岩控制技术的研究,然而随着开采扰动强度的增加,单一支护技术手段难以控制三软煤层围岩稳定性。鉴于此,笔者以典型三软煤层矿井仲恒煤矿115-101北翼回风巷为工程背景,对三软煤层回采巷道围岩变形破坏机理以及破坏特征进行分析研究,提出卸-转-固围岩综合控制理论,利用爆破卸压使围岩应力向深部转移,改变围岩应力分布状态,降低围岩应力集中程度,采用加固材料进行封孔,提高加固段整体强度,保证强动压影响下巷道围岩稳定。

1 工程背景

仲恒煤矿115-101回采工作面位于井田一采区,115-101回风巷设计长度540 m,该巷道东邻13201里运输巷,西邻10801-1工作面采空区,巷道埋深350 m。115-101工作面开采15-1号煤层,煤层厚度2.0 m,煤层倾角33°,煤层顶底板岩层以泥岩、泥质粉砂岩为主,工作面煤岩柱状如图1所示。

2 巷道围岩变形破坏机理

2.1 巷道支护现状及破坏原因分析

2.1.1 支护现状

115-101回风巷为半圆拱断面,巷道净宽4 400 mm,高3 000 mm,净断面积10.7 m²,原支护形式为29U型钢半圆拱,棚距0.5 m,每架U型钢增加1根单体液压支柱增强支护强度。

据井下实际情况(图2),巷道总体变形破坏较为严重,加强支护的单体支柱出现向煤层倾向方向偏斜,巷道底鼓量普遍在800~1 000 mm(图3),巷道已满足不了通风、运输、行人需要。






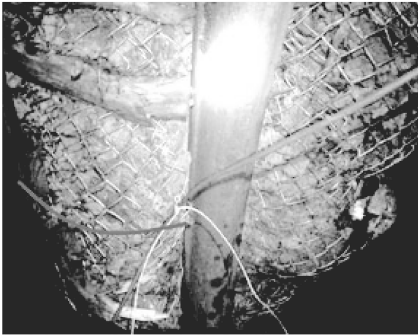
岩层	岩性	柱状	厚度/m	岩性特征
基本顶	粉砂岩		5.0	灰色，泥质胶结，疏松易碎
直接顶	泥质粉砂岩		1.0	灰色，泥质胶结，疏松易碎，遇水膨胀
15-1号煤	煤		2.0	粉末状，性软质轻，含0~6层夹矸
直接底	泥岩		0.3	灰色，疏松易碎，遇水变软
基本底	泥质粉砂岩		5.0	深灰色，泥质胶结，疏松易碎，遇水膨胀

图1 115-101北翼工作面煤岩柱状

Fig.1 Coal and rock column diagram of No.115-101 north wing working face



(a) U型钢变形



(b)“网兜”现象

图2 巷道变形

Fig.2 Roadway deformation

2.1.2 巷道变形破坏原因分析

根据现场观测和资料收集分析巷道变形破坏原因,主要有以下3点。

1)巷道围岩稳定性差。115-101北翼回风巷顶底板岩性为泥质粉砂岩和粉砂岩,遇水易软化,围岩稳定性极差,在掘进时易发生顶板塌陷、底鼓、片帮等事故,煤层坚固性系数0.30~0.45,属于极软煤层。围岩稳定性差是巷道受到强动压后易变形破坏的主要因素。

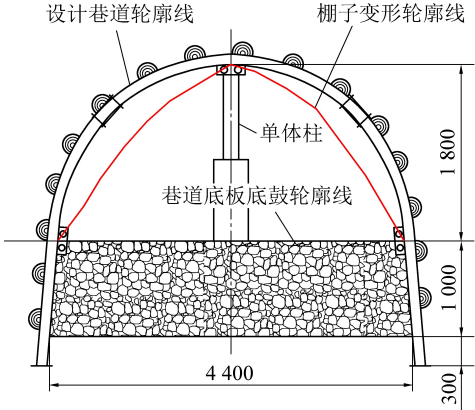


图3 115-101北翼回风巷变形示意
Fig.3 Schematic of roadway deformation of No.115-101 north wing tail entry

2)构造应力影响。仲恒煤矿位于盘关向斜西翼中段,属纸厂井田南半部。井田南翼煤层倾角为31°~33°,北翼煤层倾角为62°~65°。空心包体应变计在深入巷道底帮8.45 m处测量的地应力为30.8 MPa,故115-101北翼回风巷正处于由缓变陡的构造应力范围内。

3)巷道布置不合理,受采动影响强烈(图4)。由图4可知,115-101北翼回风巷上方45~48 m有10801-1工作面和13201工作面。强动压影响明显是巷道围岩变形破坏的关键因素,现场随时可以听到岩层断裂声,巷道支护困难。

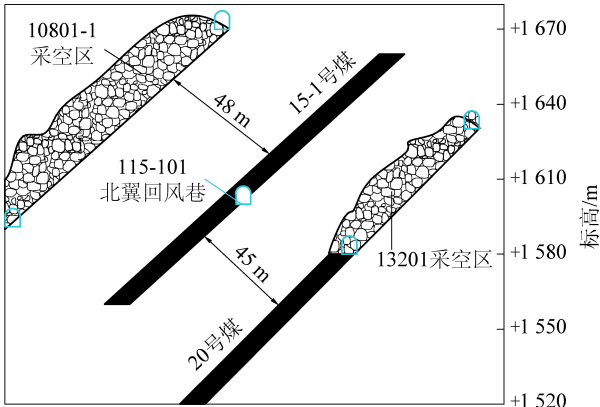


图4 巷道布置剖面
Fig.4 Sectional view of roadway layout

2.2 115-101回风巷采动应力演化及围岩变形分析

115-101北翼回风巷周围工作面布置众多,巷道受到多次采动影响,采动应力的演化是该巷破坏的重要原因。因此,分析115-101回风巷邻近工作面开采对巷道围岩变形的影响,得到巷道围岩的变化特征,掌握采动应力的演化是对115-101回风巷进行合理支护的必要条件。

根据115-101回风巷与邻近工作面的相对位

置关系,采用 UDEC 数值软件建立数值模型。为分析 115-101 回风巷在工作面开采过程中的应力变化状况,在巷道围岩的左右两帮以及顶、底板各布置 1 条测线,测线长 10 m,测线上各分布 10 个测点,如图 5 所示。数值分析岩石力学参数见表 1。

表 1 岩(煤)物理力学参数

Table 1 Rock (coal) physical mechanics parameters

岩性	密度/(kg·m ⁻³)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa
泥质粉砂岩	2 320	4.44	3.33	25	2.5	3.5
煤层泥岩	1 300	1.33	0.80	20	1.3	1.0
	2 130	2.77	2.08	25	2.0	2.5
粉砂岩	2 550	8.06	6.30	35	4.2	5.4

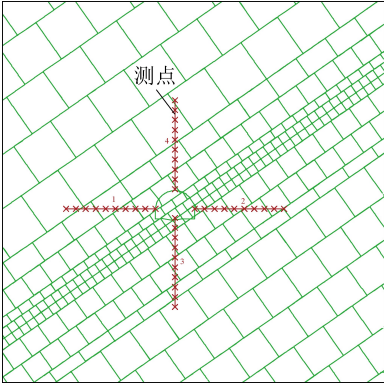


图 5 数值分析模型及测线布置

Fig.5 Numerical analysis model and survey line layout

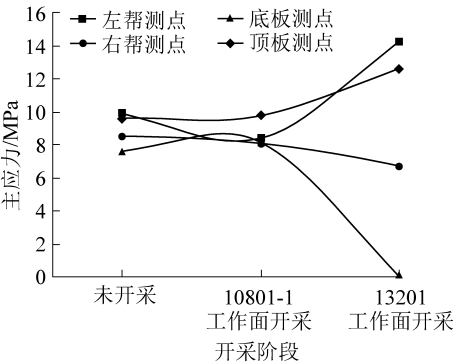


图 6 各监测点主应力变化

Fig.6 Variation of principal stress of each monitoring point

由图 6 可知,随着工作面的不断回采,各个监测点的应力状态均发生了变化,其中,10801-1 工作面位于 115-101 回风巷上方,其开采对巷道围岩影响相对较小,而 13201 工作面开采则直接影响了其底板以及巷道右帮的采动应力状态,导致巷道底板和巷道右帮采动应力急剧卸载,其中巷道底板采动应力变化趋势最为明显。由此可见,10801-1 工作面与 13201 工作面对 115-101 回风巷的影响程度并不一致,115-101 回风巷围岩主要受 13201 工作面的影响,且以右帮与底板受影响最为严重。

2.2.1 采动应力演化分析

为分析工作面开采对 115-101 回风巷围岩造成的影响,在 115-101 回风巷围岩深 2 m 处布置监测点,记录开采过程中各个测点的最大主应力,各监测点主应力变化如图 6 所示。

2.2.2 巷道围岩破坏特征分析

巷道围岩塑性区分布以及巷道围岩最大主应力分布特征如图 7、图 8 所示。

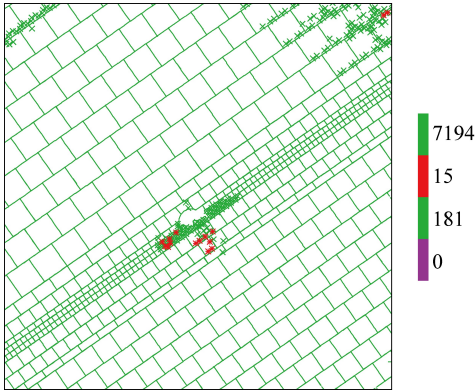


图 7 115-101 回风巷围岩塑性区分布状况

Fig.7 Distribution of plastic zone in surrounding rock of No.115-101 tail entry

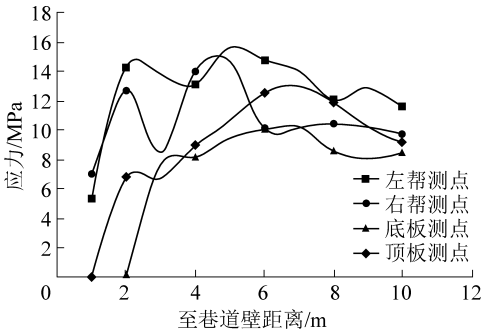


图 8 115-101 回风巷围岩应力分布情况

Fig.8 Stress distribution in surrounding rock of No.115-101 tail entry

由图 7、图 8 可知,在工作面开采完成以后,115-101 回风巷围岩塑性区主要集中分布于巷道底部,右帮岩块发生了垮落,巷道的顶板以及左帮围岩状况较好。由图 8 可知,巷道浅部围岩在采动应力的作用以及巷道开挖的作用下发生了应力卸载现

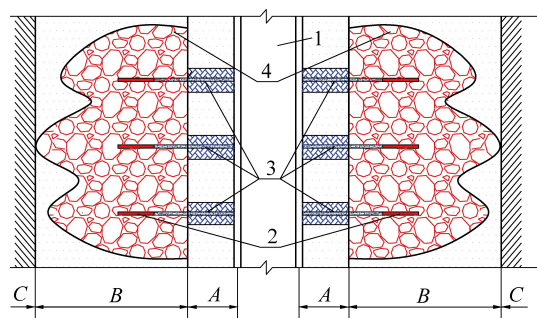
象,说明浅部围岩发生了破坏,而在距巷道壁5~6 m处,巷道应力达到最大值,在距巷道壁6 m以外围岩应力逐渐趋于原岩应力状态。说明115-101回风巷围岩松动圈范围在围岩0~5 m处,采动应力集中在围岩5~6 m处。

综上所述,115-101回风巷围岩破坏以巷道的两处底脚最为严重,且115-101回风巷围岩的破坏范围为距离巷道壁0~5 m,在5~6 m处巷道围岩承载性能较好,此处围岩应力达到峰值状态。

3 卸-转-固围岩控制原理及工程应用

3.1 卸-转-固围岩控制原理

目前,通过改变巷道围岩应力分布状态,使巷道周边高应力转移到围岩深部,从而保证巷道长期稳定,采用的巷道卸压方法主要有钻孔卸压^[12-14]、爆破卸压^[15-17]、无煤柱开采及切缝等^[18-20]。基于此,笔者针对115-101回风巷现有支护形式已经达不到有效支护的情况,根据上述破坏原理及应力控制原理提出“卸-转-固”围岩控制理念,主要包括卸压、应力转移和巷道围岩加固3个部分,其原理思想如图9所示。



1—巷道;2—炸药;3—卸-转-固孔;4—爆破卸压带;
A—巷道围岩加固区;B—卸压和应力降低区;C—应力转移区

图9 卸-转-固原理

Fig.9 “Pressure relief-stress transfer-reinforce” principle diagram

爆破卸压:通过在巷道帮脚应力集中区施工卸压孔进行爆破,使深部围岩内积聚的弹性变形能以变形破裂的形式释放,将原来的应力集中区变为卸压区。

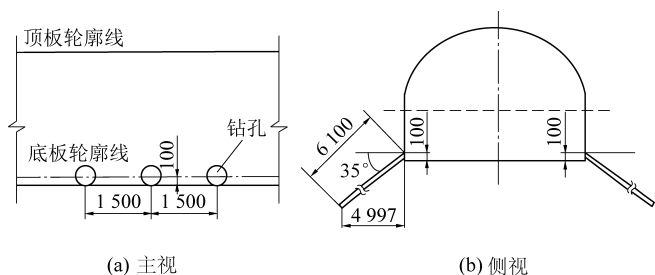
应力转移(核心技术):爆破后,围岩应力重新分布,重新形成破碎区、塑性区和弹性区,并使应力集中的弹性区转移到围岩更深处,降低巷帮及底板浅部围岩应力集中;会在巷道周围表层一定范围内形成低应力卸压圈,而在围岩深部形成了应力集中的自承载圈,集中应力主要由该自承载圈的岩体承担。该自承载圈的岩体位于围岩深部,基本处于三向应力状态,稳定性得到很大提高。

加固(起关键控制作用):爆破产生的爆轰压力对松软围岩具有挤压作用,将松散岩体压紧,进而对围岩进行加固(根据实际情况,巷道卸压孔会同时安装锚索,在爆破围岩稳定后安装托盘,进行张拉,施加高预紧力进行加固)。

3.2 卸-转-固围岩控制技术及工艺

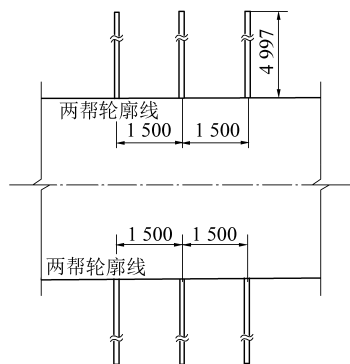
根据现场巷道支护形式和变形破坏情况及巷道服务周期,结合煤岩特征和煤层顶底板岩性,并根据数值模拟结果,最终确定加固巷道浅部0~5 m的围岩,在巷道深5~6 m处采用爆破方式形成卸压区,具体施工工艺如下。

1) 卸压孔施工。采用ZDY650钻机在巷道帮脚以倾角35°向下打 $\phi 75$ mm、深6 100 mm的钻孔,钻孔间距1 500 mm。钻孔布置如图10所示。



(a) 主视

(b) 侧视



(c) 俯视

图10 钻孔布置

Fig.10 Drilling layout

2) 爆破卸压。在卸压孔深部封闭空间内进行爆破(图11),卸压孔用 $\phi 32$ mm \times 1 000 mm PVC管装三节 $\phi 32$ mm \times 300 mm乳化炸药实施爆破。

3) 加固封孔段。利用自制封孔设备将加固材料通过压风填入卸压孔,加固材料为合成的混凝土,质量比为水泥:细沙:水=1:2:1,细沙粒径小于5 mm,提高封孔加固段整体岩体强度。

4 卸-转-固围岩控制技术应用效果分析

4.1 巷道围岩应力变化分析

试验在原支护基础上采用卸-转-固技术方案,实施长度20 m,其余巷道段均采用原支护方案,在

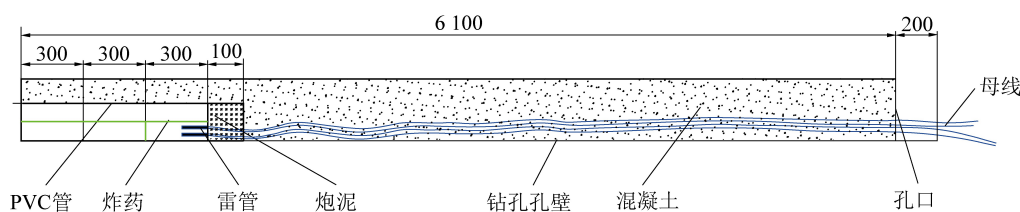


图 11 钻孔装药、加固结构示意图

Fig.11 Schematic of drilling charge and reinforcement structure

115-101 回风巷措施实施段和未实施段分别布置 1 个测站,每个测站共计 3 个测点,每个测点相距 2 m (深度 6、10、14、18 m),采用钻孔应力计监测巷道围岩应力变化情况,监测点布置如图 12 所示(由于现场煤层条件限制,钻孔容易出现塌孔,实际安装深度分别为 5、6、9、9.5 m)。

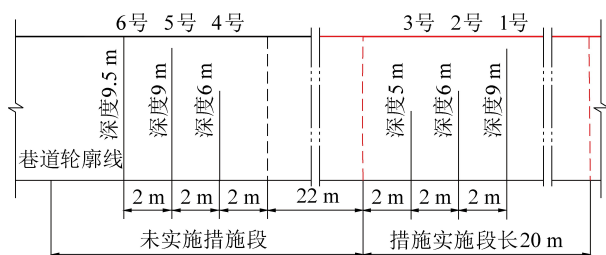


图 12 钻孔应力测点布置

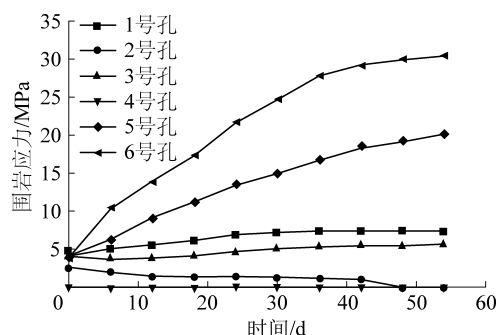
Fig.12 Layout of borehole stress measurement points

通过现场采集数据,得到巷道围岩应力的变化曲线,图 13 中 1、2、3 号为试验段巷道的围岩应力变化曲线,4、5、6 号为原支护段的围岩应力变化。

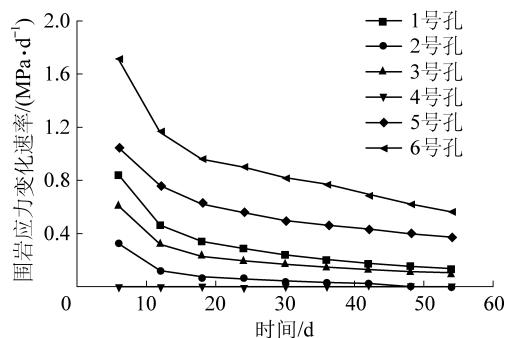
由图 13 可知,试验段巷道 1 号孔深度 9 m,初始应力 4.08 MPa,在 30 d 内,围岩应力以 0.24 MPa/d 的速率增长,30 d 后,围岩应力稳定在 7.37 MPa,无明显变化;2 号孔深度 6 m,初始应力 3.15 MPa,在监测期间 54 d 内,巷道围岩应力逐渐降低,在 48 d 时降为 0;3 号孔深度 5 m,初始应力 4.06 MPa,巷道围岩应力趋于稳定,在 48 d 时,围岩应力在 5.43 MPa 左右波动。由于未试验段巷道 4 号孔的钻孔应力设备损坏,无数值不作考虑;5 号孔深度 9 m,初始应力 4.12 MPa,巷道围岩应力以 0.37 MPa/d 速率呈线性增大,在 54 d 时已达到 20.14 MPa;6 号孔深度 9.5 m,初始应力 3.86 MPa,在 0~40 d,巷道围岩应力急剧增大,速率达到 0.748 MPa/d,监测 40 d 后,巷道围岩应力增加有所减缓,在 54 d 时已达到 30.46 MPa,由此可知,采用卸-转-固围岩控制技术,降低了巷道两帮及底板浅部围岩应力集中程度,并将应力转移到围岩深部,有效控制了巷道围岩变形速度。

4.2 巷道围岩变形规律分析

为了监测巷道顶底板及两帮位移的变化,在 115-101 北翼回风巷设置 2 个观测站,1 号站(采用



(a) 围岩应力变化



(b) 围岩应力变化速率

图 13 巷道围岩应力变化规律

Fig.13 Stress change laws of surrounding rock of roadway

卸-转-固技术)和 2 号站(原支护),巷道表面位移观测结果如图 14 所示。

由图 14 可知,未试验段巷道围岩变形量较大,在 50 d 内,顶底板最大移近量 534 mm,两帮最大移近量 487 mm,顶底板累计移近量大于两帮,0~30 d 围岩变形速率很大,顶底板移近速率达到 12.97 mm/d,两帮移近速率最大达到 12 mm/d,30 d 后巷道围岩变形速率有所减缓,但巷道围岩依旧没有稳定,变形仍有增大的趋势。试验段巷道围岩初期变形较快,在 30 d 后,巷道围岩趋于稳定状态,顶底板最大移近量 105 mm,两帮最大移近量 195 mm,顶底板移近速率 2.1 mm/d,两帮移近速率为 3.9 mm/d。

通过以上巷道围岩变形监测情况可知,采用卸-转-固和 U 型钢联合支护技术时,在 30 d 内,围岩顶底板移近量比未试验段巷道降低 79.43%,两帮移近量比未试验段巷道移近量降低 54.17%。说明在卸-转-固技术下,巷道围岩变形得到了有效控制。

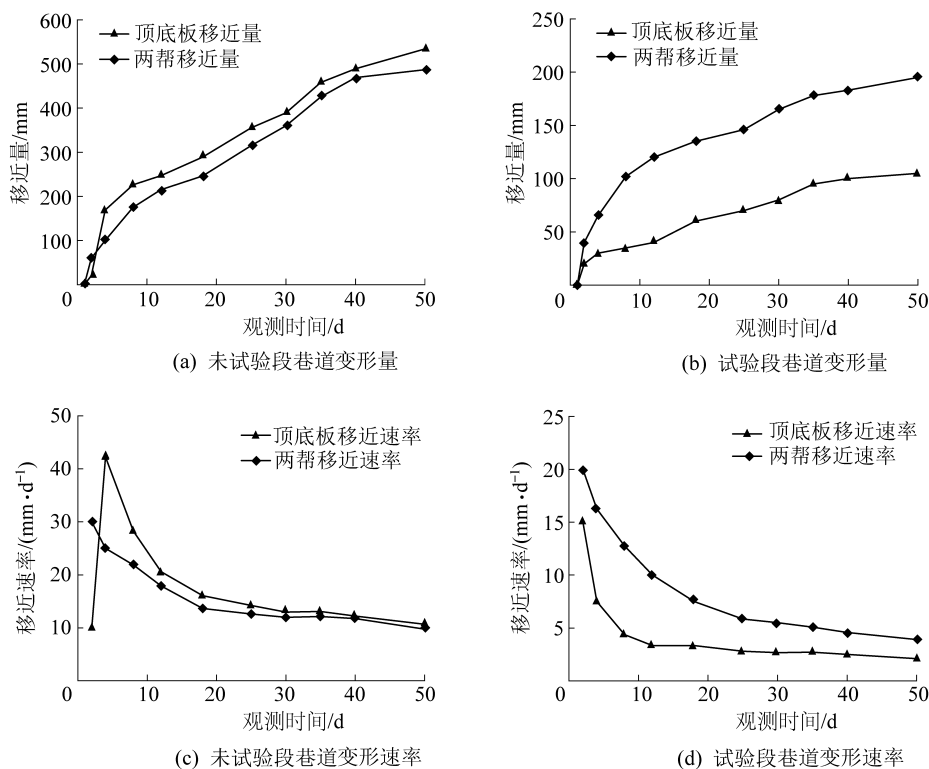


图14 巷道围岩变形规律

Fig.14 Deformation law of surrounding rock of roadway

5 结 论

1) 采用 UDEC 数值软件建立数值模型, 分析了 115-101 回风巷受上部 10801-1 和 13201 工作面采动影响, 结合现场实际, 分析了巷道围岩变形破坏原因, 得到围岩软弱是巷道受到强动压后易变形破坏的主要因素, 强动压影响是加剧围岩变形破坏的关键因素。

2) 根据 115-101 回风巷围岩变形破坏特征, 基于应力控制原理提出了卸-转-固围岩综合控制理念, 通过对围岩应力集中区进行爆破卸压, 将浅部围岩应力转移到深部, 降低底板及巷帮浅部应力集中程度, 通过爆破产生的爆轰压力对浅部松散围岩进行挤压, 实现对围岩的加固, 提高围岩整体强度并充分发挥围岩的自身承载能力抵抗围岩变形。

3) 通过井下试验效果对比分析可知, 实施卸-转-固围岩控制技术后, 巷道两帮及底板浅部围岩应力集中程度有明显降低, 巷道顶底板移近速率降低了 79.43%, 两帮移近速率下降了 54.17%, 巷道围岩变形得到了有效控制, 表明卸-转-固支护技术能有效控制强动压影响下三软煤层巷道围岩变形。

参考文献 (References):

[1] 任鸽鹏. 大南湖一矿三软煤层巷道变形规律与支护技术研究

[D]. 西安: 西安科技大学, 2017.

[2] 冯友良. 大断面煤巷开挖卸荷帮部破坏机制与控制技术研究 [D]. 北京: 中国矿业大学 (北京), 2017.

[3] 王 猛, 郑冬杰, 李 杰, 等. 动压作用大巷破碎围岩分区域差异性修复技术研究 [J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(11): 255-262.

WANG Meng, ZHENG Dongjie, LI Jie, et al. Study on technology of sub-regional differential repair of broken surrounding rock under dynamic pressure [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(11): 255-262.

[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 Jiazhao, ZHANG Jibing, HOU Junling, et al. Research on the mechanism of multiple disturbance instability of dynamic pressure roadway and optimization of mining sequence [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2015, 32(3): 439-445.

[5] 夏洪春, 郑学军, 李金奎, 等. 三软煤层超长工作面采场矿压显现规律研究 [J]. 大连大学学报, 2008(3): 124-128.

XIA Hongchun, ZHENG Xuejun, LI Jinkui, et al. Study on the behavior of underground pressure in three-soft coal seam super long face [J]. Journal of Dalian University, 2008(3): 124-128.

[6] 李春杰, 刘银先, 高红彬, 等. “三软”煤层采场覆岩运动及应力分布规律 [J]. 西安科技大学学报, 2015, 35(2): 187-191.

LI Chunjie, LIU Yinxian, GAO Hongbin, et al. “Three-soft” coal seam overburden movement and stress distribution law [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2015, 35(2): 187-191.

- [7] 唐建新,王艳磊,舒国钧,等.高应力“三软”煤层回采巷道围岩破坏机制及控制研究[J].采矿与安全工程学报,2018,35(3):449-456.
- TANG Jianxin, WANG Yanlei, SHU Guojun, *et al.* Research on failure mechanism and control of surrounding rock in high-stress “three-soft” coal seam mining roadway[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2018, 35(3): 449-456.
- [8] 王琦,潘锐,李术才,等.三软煤层沿空巷道破坏机制及锚注控制[J].煤炭学报,2016,41(5):1111-1119.
- WANG Qi, PAN Rui, LI Shucan, *et al.* Damage mechanism and bolt injection control of roadway along goaf in three-soft coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(5): 1111-1119.
- [9] 康红普,姜鹏飞,黄炳香,等.煤矿千米深井巷道围岩支护-改性-卸压协同控制技术[J].煤炭学报,2020,45(3):845-864.
- KANG Hongpu, JIANG Pengfei, HUANG Bingxiang, *et al.* Collaborative control technology of surrounding rock support-modification-decompression for coal mine thousand-meter deep mine roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 845-864.
- [10] 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. Strong dynamic pressure affects the control principle and experiment of roadway rebuilding bearing arch control[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2018, 35(6): 1135-1141.
- [11] 孙利辉,杨贤达,张海洋,等.强动压松软煤层巷道煤帮变形破坏特征及锚注加固试验研究[J].采矿与安全工程学报,2019,36(2):232-239.
- SUN Lihui, YANG Xianda, ZHANG Haiyang, *et al.* Deformation and failure characteristics of coal side of roadway in soft coal seam under strong dynamic pressure and experimental study on bolt-grouting reinforcement[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2019, 36(2): 232-239.
- [12] 李树彬.“三软”煤层回采巷道钻孔卸压控制围岩变形研究[D].焦作:河南理工大学,2009.
- [13] 刘天啸.高应力巷道钻孔卸压机理及让压支护技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.
- [14] 马斌文,邓志刚,赵善坤,等.钻孔卸压防治冲击地压机理及影响因素分析[J].煤炭科学技术,2020,48(5):35-40.
- MA Binwen, DENG Zhigang, ZHAO Shankun, *et al.* Analysis on mechanism and influencing factors of drilling pressure relief to prevent rock burst[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(5): 35-40.
- [15] 孙刘伟.煤巷爆破卸压-支护加固协同防冲技术研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2020.
- [16] 宋焕虎,魏辉.爆破卸压技术在深部煤层防治冲击地压中的应用[J].煤炭科技,2015,41(12):53-56.
- SONG Huanhu, WEI Hui. Application of blasting distressing technology in preventing and controlling rockburst in deep coal seam[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2015, 41(12): 53-56.
- [17] 曹民远,李康,闫瑞兵,等.倾斜煤层沿空预留煤柱爆破卸压工程应用研究[J/OL].煤炭科学技术:1-7[2020-10-08].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20200217.1256.010.html.
- CAO Minyuan, LI Kang, YAN Ruibing, *et al.* Application research on blasting pressure relief engineering of reserved coal pillars along the inclined coal seam[J/OL]. Coal Science and Technology: 1-7[2020-10-08].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20200217.1256.010.html.
- [18] 何满潮,陈上元,郭志彪,等.切顶卸压沿空留巷围岩结构控制及其工程应用[J].中国矿业大学学报,2017,46(5):959-969.
- HE Manchao, CHEN Shangyuan, GUO Zhibiao, *et al.* Surrounding rock structure control and its engineering application of cutting the roof to relieve pressure and leaving roadway along goaf[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(5): 959-969.
- [19] 胡超文,王俊虎,何满潮,等.中厚煤层切顶卸压无煤柱自成巷技术关键参数研究[J/OL].煤炭科学技术:1-10[2020-10-08].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.td.20200217.1032.006.html.
- HU Chaowen, WANG Junhu, HE Manchao, *et al.* Study on the key parameters of self-built roadway technology without coal pillars by cutting roof and pressure relief in medium and thick coal[J/OL]. Coal Science and Technology: 1-10[2020-10-08].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.td.20200217.1032.006.html.
- [20] 杨军,魏庆龙,王亚军,等.切顶卸压无煤柱自成巷顶板变形机制及控制对策研究[J].岩土力学,2020,41(3):989-998.
- YANG Jun, WEI Qinglong, WANG Yajun, *et al.* Research on roof deformation mechanism and control countermeasures of self-contained roadway without coal pillar without coal pillar[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(3): 989-998.