

文章编号:1671-251X(2019)06-0073-08

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2018120025

煤巷底鼓破坏特征及支护技术研究

张宇旭¹, 王科²

(1. 湖北理工学院 学工部, 湖北 黄石 435003;
2. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116)



扫码移动阅读

摘要:针对煤层巷道底鼓破坏问题,以某矿53082巷为研究对象,采用UDEC离散元模拟软件对该巷道掘进期间的围岩应力状态、位移分布及破坏模式进行了分析研究,结果表明:在较大的水平构造应力下,53082巷底板软弱煤层成为应力释放的主要区域,破坏特征主要表现为浅部拉伸破坏和深部的剪切破坏。针对53082巷原有支护方案无法控制底板位移,造成底鼓比较严重的问题,通过对不同底板支护方案进行支护效果模拟分析,提出了底板注浆与锚杆锚索联合支护方式,试验结果表明:底板注浆与锚杆锚索联合支护方式优于单一的锚杆锚索支护方式,大大改善了底板应力状态,抑制了底板深部的剪切破坏,顶底板位移量控制在150 mm以内,两帮位移量控制在60 mm以内,巷道围岩的控制效果较好。

关键词:沿空留巷; 巷道底板; 底臃; 变形; 拉伸破坏; 剪切破坏; 巷道支护; UDEC数值模拟
中图分类号:TD327 **文献标志码:**A

Research on failure characteristics of floor heave and support technology in coal roadway

ZHANG Yuxu¹, WANG Ke²

(1. Students' Affairs Division, Hubei Polytechnic University, Huangshi 435003, China;
2. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract:In view of problem of floor heave failure in coal seam roadway, taking 53082 roadway of a mine as the research object, the stress state, displacement distribution and failure form of surrounding rock during the roadway excavation were analyzed and studied by UDEC discrete element simulation software. The results show that under relatively large horizontal tectonic stress, the weak coal seam of roadway floor 53082 becomes the main area of stress release, and the main failure characteristics are shallow tensile failure and deep shear failure. In view of problem that the original support scheme of roadway 53082 can not control the floor displacement and causes serious floor heave, a combined support mode of floor grouting and anchor bolt and cable was put forward through simulation analysis of support effect of different floor support schemes. The test results show that the combined support mode of floor grouting and anchor bolt and cable is superior to the single support mode of anchor bolt and cable, and greatly improves stress state of floor, and restrains the shear failure of deep floor, the displacement of roof and floor is controlled within 150 mm, the displacement of two sides is controlled within 60 mm, and the control effect of surrounding rock of roadway is better.

Key words:gob-side entry retaining; roadway floor; floor heave; deformation; tensile failure; shear failure; roadway support; UDEC numerical simulation

收稿日期:2018-12-12;修回日期:2019-04-25;责任编辑:张强。
基金项目:湖北省教育厅科研计划项目(B2016275);湖北理工学院科研项目(14xjz02A)。
作者简介:张宇旭(1979—),男,湖北黄梅人,副教授,硕士,现主要从事土木工程方面的教学与研究工作,E-mail:543913570@qq.com。
引用格式:张宇旭,王科. 煤巷底鼓破坏特征及支护技术研究[J]. 工矿自动化,2019,45(6):73-79.
ZHANG Yuxu, WANG Ke. Research on failure characteristics of floor heave and support technology in coal roadway[J]. Industry and Mine Automation,2019,45(6):73-79.

0 引言

巷道作为井下煤矿开采的血脉,承担着运输、行人、通风等重要作用,良好的巷道是保证工作面安全生产的重要条件。如果巷道出现严重的大变形,则会影响矿井的安全生产乃至威胁人身安全。巷道底鼓是煤矿巷道中常见的大变形动力破坏之一,因其破坏机理复杂、影响因素较多,有效控制和预防巷道底鼓难度较大^[1-3]。

关于巷道底鼓破坏原因及支护技术的研究,国内研究学者取得了较多的研究成果。姜耀东等^[4]对常见的底鼓类型进行了分类,并提出了影响底鼓的主要因素,但没有对底鼓破坏模式及范围进行进一步的研究。邓博团等^[5]认为水对膨胀性底鼓影响较大,通过施工下扎锚杆和底板防水可有效降低底鼓,该控制措施主要适用于遇水膨胀性底鼓,但对于应力型底鼓控制效果不好。柏建彪等^[6]研究了巷道在采动应力影响下的底板变形破坏机制,将底板破坏区域沿深度变化划分为“两点三区”,并从应力控制角度提出了巷道布置优化方案,但对于已经完成布置的工作面难以通过优化方案来解决巷道底鼓问题。康红普^[7]研究了侧压系数、围岩性质对巷道底鼓的影响,但未对锚杆支护方式对底鼓的控制作用进行分析。何满潮等^[8]研究了巷帮、顶板及底板变形的相互作用关系,认为通过提高巷帮关键部位支护强度可有效控制底鼓,但对于巷帮和顶板变形不大、底鼓强烈的巷道适用性不强。王卫军等^[9-10]研究了两帮变形对底鼓的作用,认为两帮收缩会促使底板隆起,加强两帮支护强度可控制底鼓,该控制技术主要适用于因巷帮收缩导致底板隆起的底鼓类型,而对于应力型底鼓效果不佳。上述研究成果为解决底鼓问题提供了多种控制方案,但仍存在以下不足:① 巷道底鼓的研究主要集中在遇水膨胀性底鼓和巷帮收缩隆起性底鼓上,而对应力型底鼓研究较少。② 采用 FLAC 分析底鼓破坏机理时,主要从应力、变形角度,缺乏从底板裂隙破坏角度的研究。针对以上问题,本文以某煤矿沿空留巷为例,采用 UDEC 离散元模拟软件对巷道围岩底鼓破坏特征及支护方案进行数值模拟研究,对巷道掘进期间的围岩应力状态、位移分布及破坏模式进行了分析,以期同类巷道的围岩支护提供借鉴。

1 工程概况

某矿是隶属于山西晋城煤业集团的一座现代化矿井,井田位于沁水煤田南端,晋城市西北 20 km 处,跨泽州和沁水两县。目前该矿井实际生产能力

为 6.0 Mt/a,井下地质条件中等复杂。该矿 5308 工作面巷道平面布置如图 1 所示。5308 工作面为五盘区大采高接替工作面,工作面长度为 221 m,推进长度为 2 748.1 m。53082 巷既为相邻 5306 综放工作面的副巷,将来又为 5308 工作面服务,属于沿空留巷。53082 巷沿煤层顶板掘进,巷道断面均为矩形。

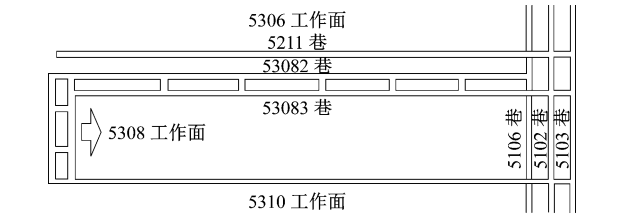


图 1 5308 工作面巷道平面布置

Fig. 1 Roadway layout diagram of 5308 working face

5308 工作面开采 3 号煤层,煤层平均厚度为 6.07 m,平均倾角为 5°,平均埋深为 472 m。煤层直接顶为泥岩,单轴抗压强度为 35.9~65.8 MPa,平均厚度为 2.89 m;基本顶为中粒砂岩,成分以石英、长石为主,含泥质条带,单轴抗压强度为 79.9~91.2 MPa,平均厚度为 4.8 m;直接底和基本底均为砂质泥岩,平均单轴抗压强度为 36.7 MPa,平均总厚度为 5.83 m。煤层顶底板岩性见表 1。

表 1 煤层顶底板岩性

Table 1 Lithology of coal roof and floor

岩层名称	埋深/m	层厚/m	岩性描述
砂质泥岩	458.50	12.20	灰黑色薄层状,上部含泥质较多,下部含砂质较多,含大量植物化石
中粒砂岩	463.30	4.80	浅灰色,中厚层状,成分以石英、长石为主,含泥质条带,岩芯完整
砂质泥岩	466.19	2.89	灰黑色,薄层状,含大量植物化石,岩芯完整,不坚硬
3 号煤	472.26	6.07	黑色,条带状结构,似金属光泽,煤芯完整
砂质泥岩	478.09	5.83	灰黑色,中厚层状,含植物化石,含砂质较多,岩砂泥互层状,局部夹薄层细砂岩
泥岩	480.99	2.90	灰黑色,薄层状,风化易碎,局部含钙质结构,见细小方解石脉
砂质泥岩	494.40	13.42	灰黑色,中厚层状,含植物化石,风化易碎

53082 巷在掘进过程中产生了明显底鼓现象,巷道全长底板均有不同程度的底鼓,局部最严重处位移量达到 1 200 mm 左右;帮部围岩变形相对底板情况较好,局部最大两帮位移量达到 500 mm。

因此,该煤层巷道大变形破坏已经严重影响了巷道的正常掘进及安全生产,深入认识 53082 巷掘进过程中底鼓的破坏机理对于提出合理的支护方案、保证巷道服务期限内的安全具有重要意义。

2 底鼓破坏特征的数值模拟

为进一步研究 53082 巷掘进过程中围岩的底鼓破坏机制,采用离散元软件 UDEC 进行数值模拟研究。

2.1 数值模型的构建

在离散元概念中,将研究对象视为许多较小块体的集合体,这些块体可以是刚体,也可以是变形体,通过定义块体之间的力学接触行为来模拟其集合体的受力、运动及变形等过程。

UDEC 三角形块体在模拟岩石破裂相较于随机多边形(Voronoi)块体具有明显的优势^[11-12]。本文中,首先基于 UDEC 中内置 Voronoi 模型,生成随机凸多边形块体,然后通过自定义的 FISH 语言,将 UDEC 中自带的随机多边形块体切割成三角形块体,再进一步划分单元。三角形块体、单元及接触面模型如图 2 所示。

在本模拟中,三角形块体采用考虑抗拉强度的摩尔库伦本构模型,所需赋予的参数为密度 ρ 、体积

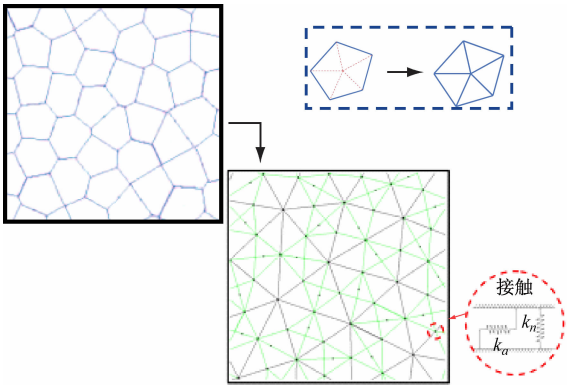


图 2 三角形块体、单元及接触面模型
Fig. 2 Triangle block, zone and contact models

模量 K 、剪切模量 G ;接触面采用“库伦滑移模型”,所需参数为法向刚度 k_n 、剪切刚度 k_s 、黏聚力 c^j 、内摩擦角 φ^j 及抗拉强度 σ_t^j (上标 j 表示接触面,以此与常用的岩石力学参数(c, φ)进行区分)。UDEC 中块体及接触面的模型参数见表 2。其中, k_n 及 k_s 可通过式(1)、式(2)^[13-14]计算得出。

$$k_n = 10 \left[\frac{K + \frac{3}{4}G}{\Delta z_{\min}} \right]$$
 (1)

$$k_s = 0.4k_n$$
 (2)

式中 $\Delta z_{\min}$ 为块体节点距相邻接触面的最小宽度。

表 2 UDEC 中块体及接触面的模型参数
Table 2 Model parameters of block and contact surface in UDEC

岩性	块体参数			接触面参数				
	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	K/GPa	G/GPa	$k_n/(\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$	$k_s/(\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$	c^j/MPa	$\varphi^j/(^\circ)$	σ_t^j/MPa
砂质泥岩	2 500	5.8	2.6	802.5	321	1.3	34	0.4
中粒砂岩	2 600	8.0	4.8	1 160	464	3.3	30	0.8
3 号煤	1 400	2.0	1.2	290.5	116	0.8	23	0.2
泥岩	2 600	6.7	3.1	902.5	361	3.5	33	0.6

模型赋予的初始地应力场采用该煤矿井下实测数据。本次数值模拟中采用与 53082 巷最近测点的原岩应力测量结果:采用水压致裂法测得的最大主应力为水平主应力(属于构造应力) $\sigma_H=16.6 \text{ MPa}$,最小主应力 $\sigma_V=9.4 \text{ MPa}$,整体上属于中等地应力矿井。根据煤层顶底板岩层分布状况,将模型分为 7 层,划分了 3 430 个不同尺寸的矩形及三角形块体。其中,为了精细化研究巷道围岩应力及位移分布情况,在以巷道为中心的 $9 \text{ m} \times 15 \text{ m}$ 范围内划分了平均边长为 0.25 m 的三角形块体。模型的总体尺寸为长 $\times$ 高 $=75 \text{ m} \times 47 \text{ m}$,本文建立的 UDEC 数值模型如图 3 所示。

2.2 巷道围岩应力分析

为了模拟 53082 巷开挖过程中围岩应力的演

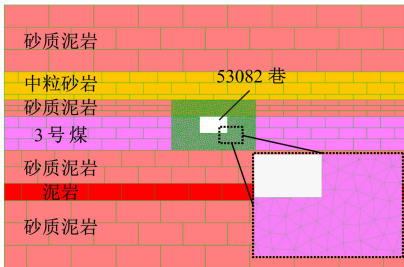


图 3 UDEC 数值模型
Fig. 3 UDEC numerical model

化过程,将巷道开挖引起的围岩应力按 5 个阶段进行释放,应力释放系数 β 分别为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0。当 $\beta=1.0$ 时,表示巷道开挖后围岩应力已全部释放完毕,围岩运动趋于稳定。巷道开挖过程中的围岩最大主应力 $\sigma_{\max}$ 的分布情况如图 4 所示。从

图 4 可看出,随着围岩应力的不断释放,巷道围岩的应力释放区域也不断扩大。应力释放区域内的围岩表现为松动破坏,并由表及里向深部扩展。其中,当应力释放系数达到 0.4 时,巷道两帮尤其是左帮表现出较明显的楔形破坏区;而当应力释放系数超过

0.4 后,巷道两帮破坏趋于稳定,底板破坏开始加剧。当围岩应力完全释放后,底板呈现出了大深度的应力释放区,底板鼓起非常严重。而巷道顶板应力释放区最小,破坏程度也最小,巷道两帮次之。这与现场巷道围岩的破坏情况非常一致,如图 5 所示。

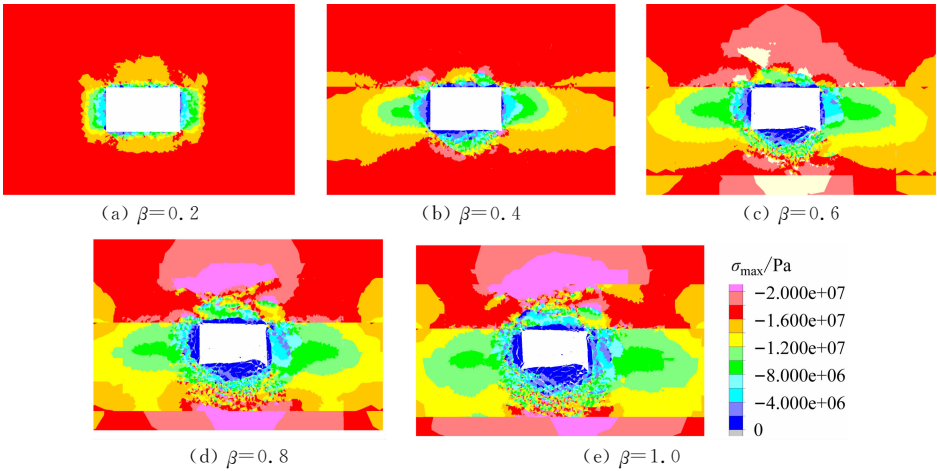


图 4 巷道围岩内的最大主应力分布

Fig. 4 Maximum principal stress distribution in surrounding rock of roadway

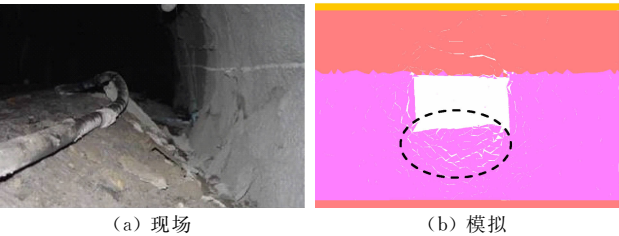


图 5 现场与模拟的巷道底鼓破坏

Fig. 5 Field and simulated roadway floor heave failure

2.3 巷道围岩位移分析

模拟的巷道围岩位移监测曲线如图 6 所示。图中 P_1 — P_4 分别为顶板监测点、底板监测点、左帮监测点及右帮监测点。由图 6 可看出,初始开挖之后,巷道两帮位移增长速度最大,底板次之,顶板最小。当应力释放系数达到 0.4 时,两帮与底板达到相同的位移,大约为 0.2 m。应力释放系数超过 0.4 后,巷道围岩位移进入稳定增长阶段,该阶段底板位移增长速率大于两帮位移;当围岩应力完全释放后,底板最大位移量可达 0.45 m,而两帮约 0.3 m,顶板位移量最小,约为 0.1 m。

此外,通过监测巷道底板一定深度内的位移分布,可以看出底板深部的位移破坏情况。监测到的巷道底板深度 9 m 范围内的位移情况如图 7 所示,可以看出底板的破坏深度在 3 m 左右。也就是说,底板煤层均发生了一定程度的破坏或位移,深度越深,位移越小。而深度 3 m 之外的直接底及基本底岩层位移则非常小,并且位移随深度增加呈近似线性减小,说明直接底及基本底岩层仍处于弹性阶段,

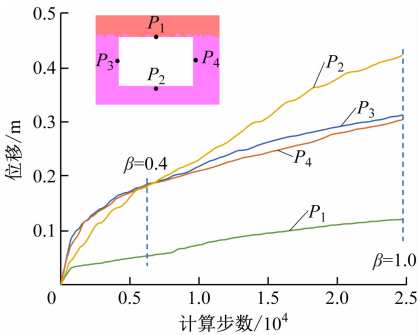


图 6 模拟的巷道围岩位移监测曲线

Fig. 6 Simulated curves of displacement monitoring of roadway surrounding rock

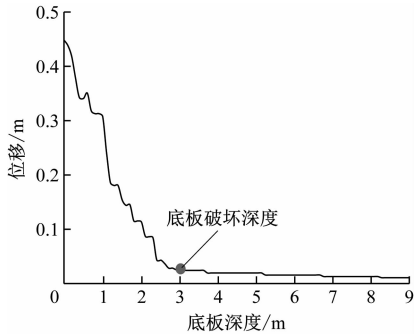


图 7 不同底板深度处的位移变化曲线

Fig. 7 Displacement change curve at different floor depth 并未发生塑性破坏。

2.4 巷道围岩破坏模式分析

为了进一步分析巷道开挖后围岩的变形及破坏特征,本文还记录了围岩内拉伸及剪切裂纹的分布及演化过程,如图 8 所示。从图 8 可看出,巷道开挖后围岩的破坏既有拉伸破坏,又有剪切破坏,并且剪

切破坏往往位于围岩深部破坏区,而拉伸破坏则主要发生在围岩浅部。当围岩应力完全释放后,底板呈现出大深度的拉伸破坏及一定深度的剪切破坏。底板拉伸裂纹发育密集,产生的碎胀变形及碎胀压力使得底板破碎围岩向开挖空间严重侵入。底板的

剪切裂纹带厚度较小,仅分布在底板煤层内,并未向直接底(泥质砂岩)延伸。这也直观地反映了直接底岩层的完整性,说明了巷道底板的破坏主要是软弱煤层的破坏,并没有引起直接底及基本底的破坏。

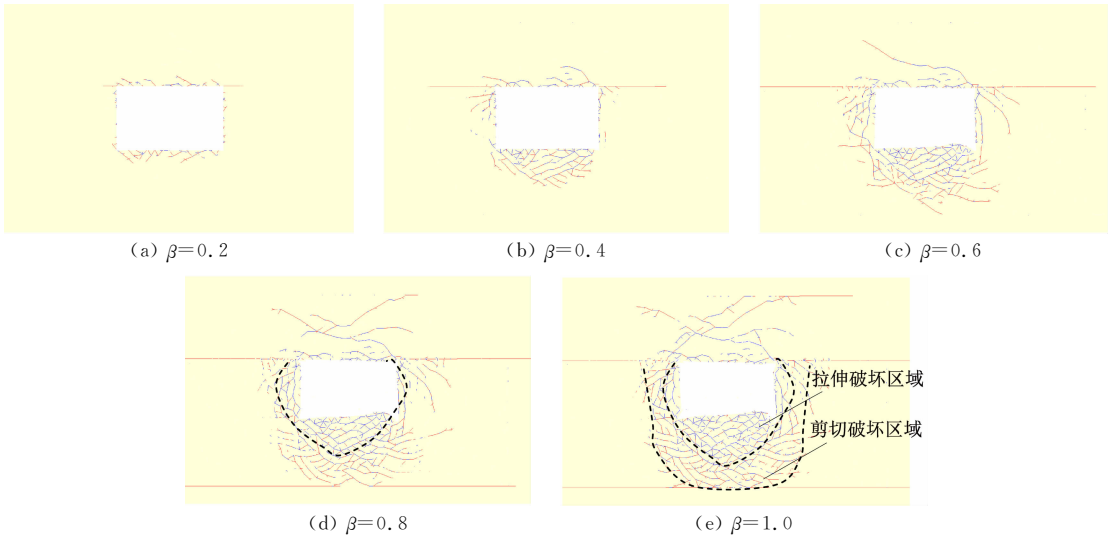


图 8 围岩裂纹分布及演化过程

Fig. 8 Cracks distribution and evolution of surrounding rock

2.5 巷道底鼓破坏原因分析

基于以上对巷道围岩应力状态、位移分布及破坏模式的分析,并结合 53082 巷所处的实际地质条件(埋深较大,局部位置又处于构造带附近,水平构造应力大)可以看出,53082 巷处于高应力集中区域,巷道开挖后会引起地应力的强烈释放,由于煤层顶底板均为完整性好、强度较高的砂质泥岩,所以煤层成为主要的应力释放区域。由于该巷的宽高比较大,水平应力的释放并未引起太严重的两帮破坏,巷道底板在较大的水平应力下容易产生挤压、挠曲,从而产生严重的拉伸破坏并向采掘空间侵入。

3 支护方案的数值模拟

3.1 原有支护方案分析

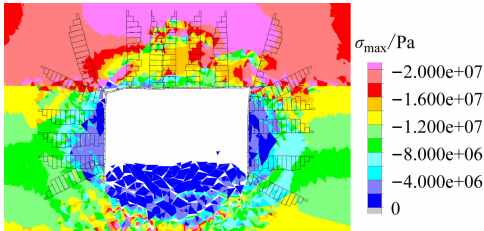
53082 巷沿用原有的锚网支护方案对巷道顶板及两帮进行支护。顶板锚杆为左旋无纵筋锚杆,直径为 22 mm,长度为 2 400 mm;帮部锚杆为全螺纹钢锚杆,直径为 20 mm,长度为 2 000 mm;锚杆间排距为 0.8 m×0.8 m。本文采用 UDEC 中的 Cable 单元模拟锚杆支护作用,相应参数见表 3。原支护方案下的数值模拟结果如图 9 所示。从图 9 可以看出,原支护方案下围岩应力释放区与未支护时相差不大,顶板及两帮应力情况有所改善,但底板仍是应力释放的主要部位和大深度的拉伸及剪切破坏区。

原有支护条件下与未支护条件下的围岩位移对

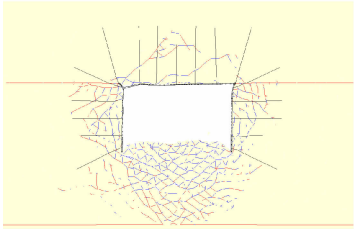
表 3 UDEC 中锚杆支护单元参数

Table 3 Parameters of anchor bolt support in UDEC

弹性模量/GPa	拉伸强度/kN	胶结面刚度/(N·m ⁻²)	胶结面黏聚力/(N·m)	预紧力/kN
200	120	2×10 ⁹	4×10 ⁵	50



(a) 围岩最大主应力



(b) 围岩裂纹分布

图 9 原支护条件下的模拟结果

Fig. 9 Simulation results under primary support condition 比如图 10 所示,从图 10 可以看出,原有的支护方案对巷道的顶板沉降及两帮位移具有良好的控制作用,但底板位移反而有所增加,巷道底鼓现象更加严重。这说明原有支护方案不仅无法控制底板位移,反而可能会促进围岩应力在底板区域的释放,造成

底板变形情况更加恶化。

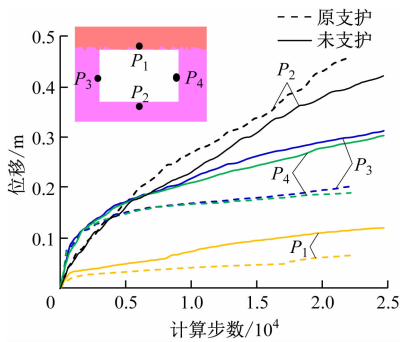


图 10 原支护与未支护条件下的围岩位移对比曲线

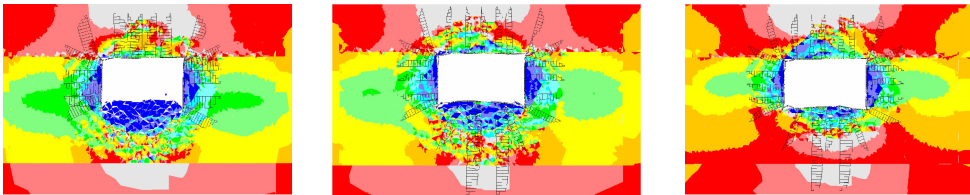
Fig. 10 Comparison curves of surrounding rock displacement under the condition of original support and non-support

3.2 支护方案的优化

基于原有支护方案下的情况分析,提出了针对底板的锚杆、锚索联合支护,以及底板煤层注浆联合

锚杆、锚索支护 2 种方案。本文对这 2 种支护方案分别进行了模拟,并与原支护方案一同进行了分析。此外,本文对底板注浆的模拟主要是基于注浆对底板岩层整体力学性能的提升实现的。考虑到破碎岩块之间的浆液增加了岩块之间的胶结,提高了岩块之间节理面的黏聚力、内摩擦角及抗拉强度,将巷道底板注浆范围内接触面模型参数的黏聚力、内摩擦角及抗拉强度均提升 30%,以此来模拟注浆后的加固效果。模拟结果如图 11 和 12 所示。

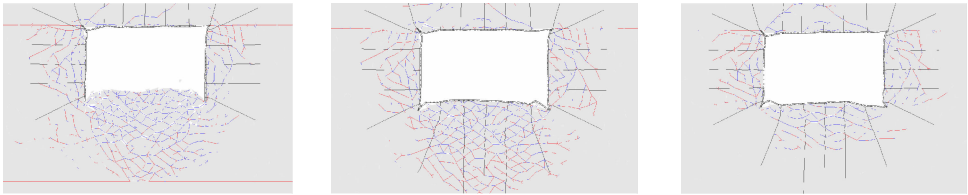
由图 11 和 12 可以看出,采用锚杆锚索支护巷道底板时,底板围岩应力释放区域与原支护方案相比稍有减小,但底板破碎程度及范围均没有发生显著改善。而在底板注浆与锚杆锚索联合支护作用下,巷道底板应力释放区域明显减小,底板破坏深度、范围均大大降低,尤其是明显抑制了底板深处的剪切破坏。



(a) 原支护 (b) 底板锚杆锚索支护 (c) 底板注浆与锚杆锚索联合支护

图 11 不同支护方案下的围岩最大主应力分布

Fig. 11 Maximum principal stress distribution under different support schemes



(a) 原支护 (b) 底板锚杆锚索支护 (c) 底板注浆与锚杆锚索联合支护

图 12 不同支护方案下的围岩裂纹分布

Fig. 12 Cracks distribution under different support schemes

不同支护方案下的底板围岩位移对比如图 13 所示,由图 13 可以看出,相比原支护方案,锚杆锚索支护下的位移量仅降低了 25.5%,而底板注浆与锚杆锚索联合支护下的位移量则比原支护减少了 60%。底板锚杆锚索支护作用下底板破坏深度与原支护相同,仍为 3 m,而底板注浆则大大提高了底板煤层的力学性能,底板破坏深度减小为 1.5 m,破坏区域位于锚杆的锚固范围之内。通过以上对比可以看出,仅采用底板锚杆锚索支护并不能改善底板围岩的破碎情况,对底鼓的控制作用也是有限的。而底板注浆与锚杆锚索联合支护由于大大提高了底板岩层的力学性能,提高了底板岩层的完整性,明显抑制了巷道底板的破碎、鼓起。

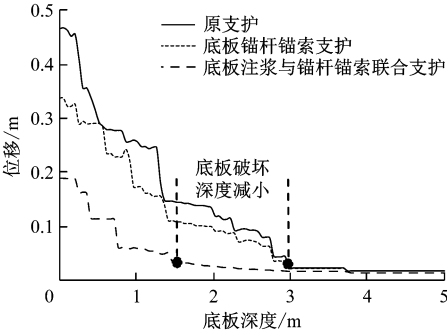


图 13 不同支护方案下的底板围岩位移

Fig. 13 Floor displacement of surrounding rock under different support schemes

4 现场试验

对某煤矿 53082 巷底板采用注浆与锚杆锚索联合支护方案进行现场试验验证。帮顶支护与原支护参数保持一致,巷道底板注浆水灰比为 2:1,注浆压力为 2~5 MPa;底板锚索长度为 6 m,预紧力为 200 kN。对巷道断面进行围岩位移监测,结果如图 14 所示。从图 14 可以看出,该支护方案下的顶底板位移量控制在 150 mm 以内,两帮位移量控制在 60 mm 以内。巷道围岩的控制效果非常好。

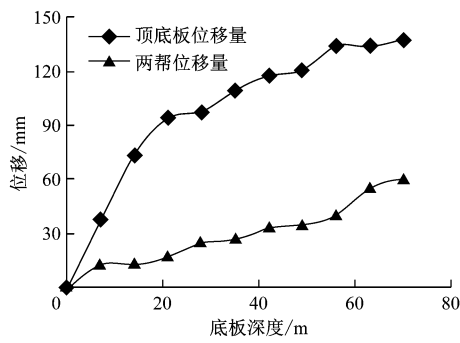


图 14 底板注浆与锚杆锚索联合支护后的围岩位移
Fig. 14 Displacement of surrounding rock under the combination support of floor grouting and bolt and anchor cable

5 结论

(1) 巷道开挖后巷道底板围岩的应力释放是造成巷道围岩破坏的主要原因。在较大的水平应力作用下,软弱的煤层底板成为应力释放的主要区域,底板的破坏特征主要表现为浅部的拉伸破坏及深部的剪切破坏。

(2) 采用底板锚杆锚索支护方式并不能提高底板岩体的承载能力,无法改善底板的破碎情况,因此,无法充分发挥锚杆及锚索的支护作用。底板注浆从本质上提高了底板煤层的力学性能,在与锚杆锚索联合支护作用下明显降低了巷道底板的破坏深度,大大抑制了深部剪切裂纹的发育。现场试验证明,采用底板注浆与锚杆锚索联合支护方式可以明显改善底板应力状态,底板位移量达到控制要求。

参考文献(References):

[1] 康红普. 软岩巷道底鼓的机理及防治[M]. 北京: 煤炭工业出版社,1993:1-3.
[2] 贺永年,韩立军,邵鹏,等. 深部巷道稳定的若干岩石力学问题 [J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(3): 288-295.
HE Yongnian, HAN Lijun, SHAO Peng, et al. Some problems of rock mechanics for roadways stability indepth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

Engineering,2006,25(3):288-295.
[3] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等. 深部开采岩体力学研究 [J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803-2813.
HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(16):2803-2813.
[4] 姜耀东,赵毅鑫,刘文岗,等. 深部开采中巷道底鼓问题的研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(14): 2396-2401.
JIANG Yaodong, ZHAO Yixin, LIU Wengang, et al. Research on floor heave of roadway in deep mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(14):2396-2401.
[5] 邓博团,苏三庆,任建喜,等. 深埋大断面软岩巷道底鼓机理及其控制技术研究[J]. 煤炭工程,2016,48(2): 43-46.
DENG Botuan, SU Sanqing, REN Jianxi, et al. Study on the mechanics and control technology of the large section roadway floor heave in deep mine [J]. Coal Engineering,2016,48(2):43-46.
[6] 柏建彪,李文峰,王襄禹,等. 采动巷道底鼓机理与控制技术[J]. 采矿与安全工程学报,2011,28(1):1-5.
BAI Jianbiao, LI Wenfeng, WANG Xiangyu, et al. Mechanism of floor heave and control technology of roadway induced by mining [J]. Journal of Mining and Safety Engineering,2011,28(1):1-5.
[7] 康红普. 应力状态及围岩性质对巷道底鼓的影响[J]. 矿山压力与顶板管理,1994(2):43-46.
KANG Hongpu. Influence of the properties and stress conditions of the surrounding rock on the heave of roadway floor [J]. Ground Pressure and Strata Control,1994(2):43-46.
[8] 何满潮,张国锋,王桂莲,等. 深部煤巷底鼓控制机制及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(增刊 1): 2593-2598.
HE Manchao, ZHANG Guofeng, WANG Guilian, et al. Research on mechanism and application to floor heave control of deep gateway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (S1): 2593-2598.
[9] 王卫军,侯朝炯. 沿空巷道底鼓力学原理及控制技术的研究 [J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(1): 69-74.
WANG Weijun, HOU Chaojiong. Study on mechanical principle and control technique of floor heave in roadway driven along next goaf [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(1):69-74.
[10] 王卫军,冯涛. 加固两帮控制深井巷道底鼓的机理研

究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(5):808-811.

WANG Weijun, FENG Tao. Study on mechanism of reinforcing sides to control floor heave of extraction opening [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(5):808-811.

[11] GAO F, STEAD D, COGGAN J. Evaluation of coal longwall caving characteristics using an innovative UDEC trigon approach [J]. Computers & Geotechnics,2014,55:448-460.

[12] LISJAK A, GRASSELLI G. A review of discrete modeling techniques for fracturing processes in discontinuous rock masses [J]. Journal of Rock Mechanics & Geotechnical Engineering, 2014, 6: 301-314.

[13] 张元超,杨圣奇,陈森,等. 深井综放沿空掘巷实体煤帮变形破坏机制及控制技术[J]. 岩土力学,2017, 38(4):1103-1113.

ZHANG Yuanchao, YANG Shengqi, CHEN Miao, et al. Deformation and failure mechanism of entity coal side and its control technology for roadway driving along next goaf in fully mechanized top coal caving face of deep mines [J]. Rock and Soil Mechanics,2017,38(4):1103-1113.

[14] KAZERANI T, ZHAO J. Micromechanical parameters in bonded particle method for modeling of brittle material failure[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2010,34(18):1877-1895.