

文章编号:1671-251X(2019)04-0024-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.17379

淋涌水型煤泥岩顶板巷道破坏机制与控制技术

赵云佩¹, 贾靖²

(1. 冀中能源邢台矿业集团有限责任公司, 河北 邢台 054000;
2. 冀中能源河北煤炭科学研究院, 河北 邢台 054000)



扫码移动阅读

摘要:针对华亿五一煤业淋涌水型煤泥岩顶板巷道变形破坏问题,以该煤矿11101工作面运输巷为例,采用现场观测与室内试验方法,对巷道破坏特征及机制展开了研究。结果表明:11101工作面运输巷煤泥岩顶板下沉变形显著,最大下沉量达700 mm,锚杆索和工字钢支架损坏现象严重;顶板泥岩含有大量高岭石和蒙脱石成分,遇水易发生泥化、软化和膨胀变形;巷道破坏失稳是围岩强度低、泥岩遇水易泥化、未采取防水措施、支护方式不合理等因素综合作用的结果。提出了顶板全锚索支护+防水型锚固剂+泄水孔排水的淋涌水型煤泥岩顶板巷道破坏控制措施,并应用于11101工作面回风巷。实践表明,回风巷掘出约30 d后,巷道变形趋于平稳,顶板最大下沉量约为112 mm,巷道断面满足生产需求。

关键词:煤泥岩顶板巷道;淋涌水型巷道;运输巷;回风巷;围岩控制;巷道破坏失稳;顶板下沉;全锚索支护

中图分类号:TD353 文献标志码:A

Failure mechanism and control technology of water spraying and gushing type roadway with coal-mudstone roof

ZHAO Yunpei¹, JIA Jing²

(1. Jizhong Energy Xingtai Mining Group Co., Ltd., Xingtai 054000, China;
2. Jizhong Energy Hebei Coal Science Research Institute, Xingtai 054000, China)

Abstract:For deformation and failure problem of water spraying and gushing type roadway with coal-mudstone roof in Huayi Wuyi Coal Mine, taking haulage roadway of 11101 working face in the coal mine as an example, roadway failure characteristics and mechanism was researched by use of field observation and indoor test. The results show that coal-mudstone roof of the haulage roadway has evident deformation with the maximum subsidence of 700 mm, and bolts, anchors and I-steel supports are damaged seriously. Roof mudstone contains large amounts of kaolinite and montmorillonite, which cause argillization, softening and swelling deformation of the mudstone in contact with water. Failure and instability of the haulage gateway are a result of the combined action of low-strength of surrounding rock, argillization of mudstone in contact with water, lack of waterproof measures and unreasonable support modes. Failure control measures of water spraying and gushing type roadway with coal-mudstone roof were proposed including whole anchors support of roof, waterproof type anchoring agent and drainage through outlet entrances. The control measures have been applied in return airway of 11101 working face. The practice shows that deformation tends to stabilize after tunneling of the return airway is finished 30 days, the maximum subsidence of roof is about 112 mm, and section of the return airway satisfies production requirements.

Key words: roadway with coal-mudstone roof; water spraying and gushing type roadway; haulage

收稿日期:2018-11-22;**修回日期:**2019-03-12;**责任编辑:**李明。
作者简介:赵云佩(1965—),男,河北武安人,高级工程师,硕士,现主要从事煤炭安全高效开采及煤矿防治水技术研究工作,E-mail:752071261@qq.com。

引用格式:赵云佩,贾靖.淋涌水型煤泥岩顶板巷道破坏机制与控制技术[J].工矿自动化,2019,45(4):24-29.
ZHAO Yunpei,JIA Jing. Failure mechanism and control technology of water spraying and gushing type roadway with coal-mudstone roof[J]. Industry and Mine Automation,2019,45(4):24-29.

rodeway; return airway; surrounding rock control; failure and instability of roadway; roof subsidence; whole anchor support

0 引言

煤矿巷道安全畅通对于煤炭资源的安全开采及矿井高产高效具有重要意义,但在煤矿巷道开掘过程中,巷道将不可避免地受到应力集中、地质构造、采掘扰动、地下水等因素的作用,巷道变形破坏问题普遍存在^[1-2]。据统计,中国大部分矿井都存在不同程度的水害问题,地下水与巷道围岩相互作用引起围岩力学性能降低,进而诱发围岩显著变形,使得围岩稳定性大幅下降。地下水还会对井下锚杆、锚索等支护结构的锚固段产生弱化作用,使得锚固效果骤降,当采用的支护设计不合理时,将导致围岩破裂甚至失稳,严重影响矿井安全生产^[3]。近年来,煤矿科技工作者分别从物理、化学、工程地质等角度对地下水与煤矿围岩间的影响机制、控制方法进行了大量有益探索。严红等^[4]分析了淋涌水型顶板巷道变形破坏特征,对顶板淋涌水等级进行了定量划分,提出了以新型防水锚固剂为核心的“四位一体”控制措施,取得了显著工程效果;姚强岭等^[5]采用室内试验、理论分析和数值模拟的方法分析了泥岩顶板巷道遇水导致承载性能降低、进而发生冒顶的机理,认为顶板岩层中的黏土矿物是顶板遇水泥化和膨胀的根本原因。卞跃威等^[6]从细观角度分析了水-泥化学作用对泥岩顶板软化和崩解的影响机制,并分析了时间效应对水-泥化学作用的影响。这些研究为分析含水顶板巷道灾变失稳机制与控制技术提供了很好的借鉴。

事实上,煤矿地质生产条件千差万别,即使同一巷道在不同区段亦有明显区别,巷道围岩变形破坏机制和相应的控制措施需要因地制宜^[7-8]。本文针对山西潞安集团华亿五一煤业有限公司(以下简称华亿五一煤业)典型淋涌水型煤泥岩顶板巷道变形破坏问题,开展了现场调研、室内试验和现场试验,分析了淋涌水型煤泥岩顶板巷道变形破坏特征及机制,并提出了相应的控制技术,成功解决了该类巷道破坏控制难题,为该矿区其他类似巷道破坏控制提供了技术支撑。

1 工程地质概况

华亿五一煤业位于山西省沁源县城西北约20 km处,行政区划属灵空山镇管辖,设计生产能力为90.00万t/a,主要开采11号煤层,煤层平均厚度

为3.0 m,结构复杂,灰黑色,内含多层泥岩夹矸。11101工作面是+1 300 m水平第一个回采工作面,地面标高1 240~1 295 m,井下标高845~794 m。11101工作面走向长度为150 m,倾向长度为454 m。该工作面西部、北部均为井田边界,东部为未采区域,南接3号胶带运输巷。工作面由区段运输巷、区段回风巷、切眼构成,如图1所示。采用MGY150/375-W型电牵引采煤机采煤,顶板管理采用自由垮落法。工作面两侧回采巷道沿煤层底板掘进,巷道宽4.5 m,高3 m,断面面积为13.5 m²,巷道最初选用锚杆索支护措施。

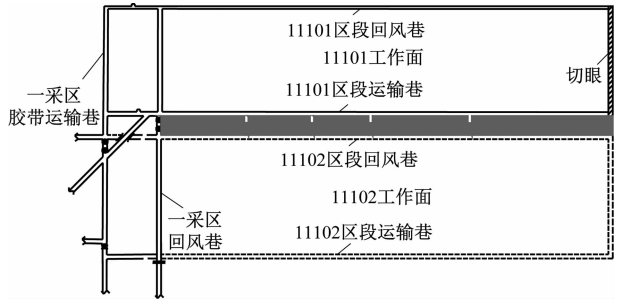


图1 11101工作面巷道布置

Fig.1 Roadway distribution of 11101 working face

11101工作面柱状图如图2所示。巷道顶板依次为泥岩(3.0 m)、煤(0.5 m)、泥岩(2.32 m)、砂岩(2.8 m)。泥岩呈片层状,节理裂隙较为发育,强度较低;砂岩致密坚硬,强度较高。底板为3.0 m厚泥岩,深灰色,泥质结构,含不完整植物化石。

岩性	厚度/m	柱状	岩石特性描述
砂岩	2.8		细砂岩致密坚硬
泥岩	2.32		深灰色,厚层状,透镜状层理
煤	0.5		低磷,低硫,具黏性
泥岩	3.0		黑色碳质泥岩,片层状,节理裂隙较为发育
煤	3.0		11号煤,黑色,内含多层夹矸,夹矸以泥岩为主
泥岩	3.0		深灰色,厚层状,透镜状层理

图2 11101工作面柱状图

Fig.2 Histogram of 11101 working face

顶板砂岩内裂隙发育,含水量丰富,顶板水经裂隙向下部煤泥岩顶板渗透,导致煤泥岩顶板快速泥

化、膨胀,产生显著变形。巷道开掘 1 个月后,顶板下沉明显,且随着时间增长,巷道变形呈增大趋势,矿方不得不采用工字钢+单体支架进行二次支护。但由于顶板已经发生破坏且下沉量突出,支护效果较差,严重影响矿井正常生产,已成为限制煤矿高产高效生产的关键问题之一。因此,选取 11101 工作面运输巷这一典型区域,开展淋涌水型煤泥岩顶板巷道破坏机制与控制技术研究。

2 巷道变形破坏特征及围岩特性试验

2.1 巷道变形破坏特征

通过对 11101 工作面运输巷进行长期观测,发现该巷道变形主要发生在煤泥岩顶板,具有以下特征。

(1) 顶板变形量大。11101 工作面运输巷顶板变形如图 3(a)所示。可看出煤泥岩顶板下沉变形显著,顶板中部下沉最为明显,最大下沉量达 700 mm;顶板岩体破裂严重,破裂岩体被菱形金属网兜住,形成明显网兜;锚杆索随着顶板下沉发生整体向下偏移,工字钢梁向下发生显著弯曲。

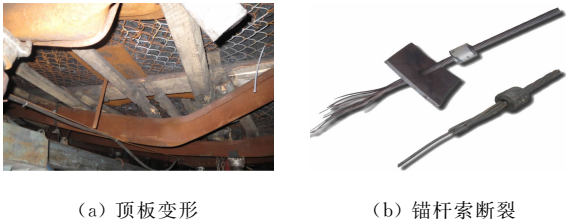


图 3 11101 工作面运输巷变形情况

Fig. 3 Deformation situation of haulage roadway of 11101 working face

(2) 支护结构损坏严重。11101 工作面运输巷采用锚杆索支护方式,初期可有效控制顶板变形。但随着时间推移,顶板水沿着锚杆索钻孔向锚固段渗透,使得锚杆索锚固效果急剧下降,造成顶板锚固区内煤岩稳定性降低并产生大量变形,使得锚杆索承载载荷数倍增加,导致锚杆索出现不同程度拉断、托盘和金属网撕裂现象,如图 3(b)所示。同时由于顶板显著变形,使得工字钢支架承受较大顶板载荷,加之顶板下沉变形的不均衡性,使得工字钢支架在应力集中区域最先发生破坏失稳,工字钢支架结构整体失稳,无法从根本上控制巷道整体变形。

2.2 围岩特性试验

为充分了解围岩矿物构成,采用 X 射线衍射仪对 11101 工作面运输巷围岩矿物成分进行室内试验。X 射线透入矿物内结晶体并发生衍射,根据 Bragg 公式计算矿物晶体内晶面的间距并估计各线

条强度,通过对比确定矿物成分,具有较高的准确性。11101 工作面运输巷顶板泥岩矿物成分见表 1。可看出顶板泥岩含有大量的高岭石和蒙脱石成分,其中高岭石在干燥环境下有吸水特性,在潮湿环境中将发生塑性变形,而蒙脱石遇水后将发生急剧膨胀,膨胀体积可超过 50%^[9]。由此可知,11101 工作面运输巷煤泥岩顶板中泥岩遇水后极易泥化、软化和膨胀变形,使得巷道围岩稳定性显著降低。

表 1 11101 工作面运输巷顶板泥岩矿物成分

Table 1 Mineral composition of roof mudstone in haulage roadway of 11101 working face %

岩样	矿物成分			
	石英	高岭石	蒙脱石	其他矿物
岩样 1	41	42	8	9
岩样 2	14	54	23	9
岩样 3	9	68	12	11

为进一步掌握煤泥岩顶板的水理风化特性,采用煤泥岩顶板岩样进行崩解试验,如图 4 所示。结果表明,当岩样不与空气接触时,其强度保持较高值,整体性较好;在空气中放置 40 d 后,岩样发生风化,破碎成松散块体;之后将岩样浸泡在水中,随着浸泡时间的增长,岩样强度大幅降低,仅靠人力就能将其掰断。在实际工程中,巷道掘出后,煤泥岩顶板长时间暴露在空气中,同时受到顶板水的侵蚀作用,泥岩裂隙快速发育,形成大范围的松散体,围岩强度大幅度降低,发生显著的碎胀变形。

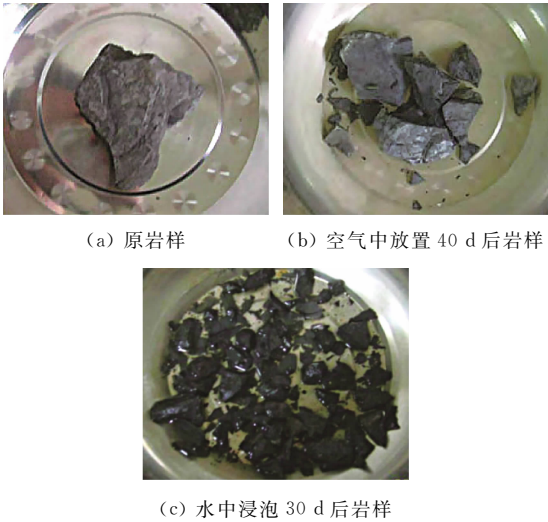


图 4 顶板泥岩崩解试验

Fig. 4 Slaking test of roof mudstone

3 煤泥岩顶板巷道变形破坏机制与控制方法

3.1 巷道变形破坏原因

11101 工作面运输巷虽然采用了锚杆索强力支

护技术,但巷道煤泥岩顶板依然发生大的变形破坏。根据巷道围岩力学环境和围岩特性综合分析,顶板泥岩强度低且遇水易泥化和膨胀变形,进而导致顶板发生松动破碎和支护结构失效,具体分析如下。

(1) 围岩强度低且裂隙发育,自稳能力差。根据矿方以往地质调研可知,煤泥岩顶板单轴抗压强度仅有 26 MPa,抗拉强度约为 3.4 MPa,强度较低;在工程环境下,围岩强度受采掘扰动影响,裂隙快速扩展,围岩强度将迅速衰减,极易发生失稳破裂。

(2) 顶板泥岩遇水膨胀变形特性显著。由矿物成分构成可知,顶板泥岩含有大量高岭石和蒙脱石等黏土矿物,遇水将发生显著膨胀变形;而 11101 工作面运输巷顶板砂岩内含有大量顶板水,且矿方未采取有效的排水措施,使得顶板水向煤泥岩顶板内大范围渗透,导致煤泥岩顶板强度大幅度降低,进一步降低了巷道顶板稳定性。

(3) 未采取排放水措施。不同于常规巷道围岩维护,淋涌水型煤泥岩顶板巷道除了支护强度要满足顶板要求外,还要抑制水理作用对顶板泥岩的侵蚀;此外,常规锚固剂在水理作用下的锚固作用大打折扣,影响支护效果和顶板稳定性,也需要采取必要的保护措施。

(4) 支护方式不合理。原有的锚杆索支护措施总体来看锚杆强度较低,现场出现大量破断现象;锚索长度为 4 300 mm,使得锚固点位于煤泥岩顶板内,无法锚固到顶板稳定岩层内,不能充分发挥顶板自身承载能力。

3.2 巷道变形破坏控制方法

基于 11101 工作面运输巷变形破坏原因分析,认为大幅提高支护刚度和强度,并采取有效的防水措施是控制淋涌水型煤泥岩顶板巷道破坏失稳的有效途径。通过改善锚杆索支护方式来增强顶板自身承载能力,通过采取有效的防水措施来抑制顶板水对泥岩和支护结构的侵蚀影响,从而保障淋涌水型煤泥岩顶板巷道安全^[10-11]。

(1) 强力短锚索支护顶板。与锚杆相比,短锚索可以提供更大的预紧力,提高顶板的初期支护强度和刚度,从而有效抑制顶板变形。对于 11101 工作面巷道顶板,由于泥岩厚度大且强度低,单纯采用锚杆支护已经无法保障顶板稳定,所以采用全锚索支护顶板,通过提高短锚索预紧力并采取合理的布置方式,有效改善顶板力学状态,确保顶板支护结构保持较高的强度和刚度,从而限制顶板岩层膨胀变形^[12-13]。

(2) 强力长锚索加强支护顶板。从安全角度出发,为防止煤泥岩顶板发生整体式切落事故,在短锚索基础上对顶板进行长锚索二次加固,将底部短锚索锚固结构与深部围岩联系在一起,提高承载结构的整体稳定性,形成更大范围的支护-围岩承载结构,有效控制围岩变形^[14-15]。

(3) 防水型锚固剂。锚固剂是锚索结构发挥锚固作用的关键。普通锚固剂在顶板水的作用下,锚固性能大幅降低,使得锚索结构不能充分发挥作用,锚固区内煤岩体易发生松动离层,导致支护结构失稳。防水型锚固剂具有较强的瞬时凝固强度和长期凝固强度,且受水理作用影响较小,可充分保障支护结构的稳定性。

(4) 顶板泄水孔排水。对于富含顶板水的巷道,在锚杆安装和支护过程中,顶板水将沿着钻孔向巷道内外泄,当水流量较大时,将造成锚固剂难以固定和锚固。通过在顶板内布置一定间距的泄水孔,可有效释放部分顶板水,减少顶板水对支护过程的影响。

4 工程实践

4.1 顶板破坏控制措施

针对华亿五一煤业 11101 工作面运输巷变形破坏特征,结合煤矿现有经济技术条件,提出顶板全锚索支护+防水型锚固剂+泄水孔排水的综合控制措施,并采用理论分析、数值模拟优化及工程类比法进行参数设计,最终将该措施应用于 11101 工作面回风巷。该巷道支护方案如图 5 所示。

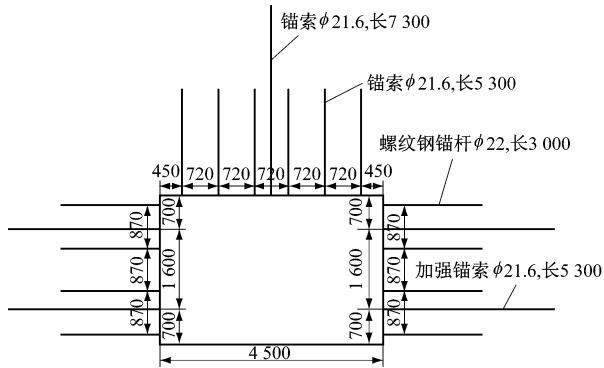


图 5 11101 工作面回风巷支护方案
Fig. 5 Support scheme of return airway of 11101 working face

(1) 顶板短锚索选用 $\phi 21.6$ mm 钢绞线,长度为 5 300 mm,外露 300 mm,间距为 720 mm,排距为 800 mm,预紧力不低于 200 kN;防水型锚固剂选用 1 卷 FSK2340 和 1 卷 FSK2340;托盘选用 300 mm $\times$ 300 mm $\times$ 16 mm(长 $\times$ 宽 $\times$ 厚)高强球型托盘;同一

排锚索选用规格为 $4\ 500\ \text{mm} \times 176\ \text{mm} \times 6\ \text{mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 厚)的M钢带。长锚索选用 $\phi 21.6\ \text{mm}$ 钢绞线,长度为 $7\ 300\ \text{mm}$,排距为 $1\ 600\ \text{mm}$,每排布置1根;防水型锚固剂选用1卷FSCK2340和1卷FSK2340。

(2) 帮部锚杆选用 $\phi 20\ \text{mm}$ 螺纹钢锚杆,长度为 $3\ 000\ \text{mm}$,每排4根,间距为 $870\ \text{mm}$,排距为 $800\ \text{mm}$;防水型锚固剂选用1卷FSCK2340和1卷FSK2340。加强锚索选用 $\phi 21.6\ \text{mm}$ 钢绞线,长度为 $5\ 300\ \text{mm}$,排距为 $1\ 600\ \text{mm}$,每排布置1根;防水型锚固剂选用1卷FSCK2340和1卷FSK2340。

(3) 为加强顶板水排放,在顶板中部每隔 $8\ \text{m}$ 设置1个 $\phi 28\ \text{mm}$ 、长 $5\ 500\ \text{mm}$ 的泄水孔,排放的顶板水引流到巷道排水沟内。

4.2 工程效果

在11101工作面回风巷掘进过程中对巷道变形破坏情况进行监测,结果如图6所示。可看出巷道掘出30 d后,巷道变形趋于稳定,顶板最大下沉量约为 $112\ \text{mm}$,巷道断面尺寸满足通风、行人、运输要求。在巷道服务期间,未发生锚杆索损坏、拉断等现象。因此,提出的顶板全锚索支护+防水型锚固剂+泄水孔排水措施可有效解决淋涌水型煤泥岩顶板巷道变形破坏问题。

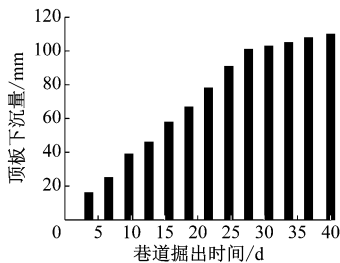


图6 11101工作面回风巷顶板下沉量监测结果

Fig. 6 Subsidence monitoring results of roof in return airway of 11101 working face

5 结论

(1) 11101工作面运输巷属于典型的淋涌水型煤泥岩顶板巷道,顶板下沉变形显著。由于顶板水的作用,导致锚杆索锚固不可靠、工字钢支架受力不均,锚杆索和工字钢支架损坏现象严重。

(2) 顶板泥岩含有大量高岭石和蒙脱石成分,导致泥岩遇水后极易泥化、软化和膨胀变形,降低了巷道围岩稳定性。

(3) 11101工作面运输巷破坏失稳是围岩强度低、泥岩遇水易泥化、未采取防水措施、支护方式不合理等因素综合作用的结果。

(4) 提出了顶板全锚索支护+防水型锚固剂+泄水孔排水的巷道破坏综合控制措施,并将其应用于11101工作面回风巷。实践表明,巷道掘出30 d后,巷道变形趋于稳定,顶板最大下沉量约为 $112\ \text{mm}$,巷道断面满足生产需求,为该矿区其他类似巷道的破坏控制提供了参考。

参考文献(References):

- [1] 张广超,何富连.大断面强采动综放煤巷顶板非对称破坏机制与控制对策[J].岩石力学与工程学报,2016,35(4):806-818.
ZHANG Guangchao, HE Fulian. Asymmetric failure and control measures of large cross-section entry roof with strong mining disturbance and fully-mechanized caving mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(4): 806-818.
- [2] 何富连,张广超.大断面采动剧烈影响煤巷变形破坏机制与控制技术[J].采矿与安全工程学报,2016,33(3):423-430.
HE Fulian, ZHANG Guangchao. Deformation and failure mechanism and control technology of large section coal roadway subjected to severe mining dynamic load [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(3): 423-430.
- [3] 李学华,梁顺,姚强岭,等.泥岩顶板巷道围岩裂隙演化规律与冒顶机理分析[J].煤炭学报,2011,36(6):903-908.
LI Xuehua, LIANG Shun, YAO Qiangling, et al. Analysis on fissure-evolving law and roof-falling mechanism in roadway with mudstone roof [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(6): 903-908.
- [4] 严红,何富连,段其涛.淋涌水碎裂煤岩顶板煤巷破坏特征及控制对策研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(3):524-533.
YAN Hong, HE Fulian, DUAN Qitao. Failure characteristic of coal roadway with water spraying and gushing in fragmentation roof and its control countermeasures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 524-533.
- [5] 姚强岭,李学华,瞿群迪,等.泥岩顶板巷道遇水冒顶机理与支护对策分析[J].采矿与安全工程学报,2011,28(1):28-33.
YAO Qiangling, LI Xuehua, QU Qundi, et al. Supporting countermeasures and roof falling mechanism reacting with water in mudstone roof roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(1): 28-33.
- [6] 卞跃威,夏才初,肖维民,等.考虑围岩软化特性和应

- 力释放的圆形隧道黏弹塑性解[J]. 岩土力学, 2013, 34(1):211-220.
- BIAN Yuewei, XIA Caichu, XIAO Weimin, et al. Visco-elastoplastic solutions for circular tunnel considering stress release and softening behaviour of rocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 211-220.
- [7] 严红,何富连,徐腾飞. 深井大断面煤巷双锚索桁架控制系统的研究与实践[J]. 岩石力学与工程学报, 2012,31(11):2248-2257.
- YAN Hong, HE Fulian, XU Tengfei. Study of double-cable-truss controlling system for large section coal roadway of deep mine and its practice[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(11):2248-2257.
- [8] 康荣,何富连,李宏彬. 桁架锚索在碎裂顶板巷道支护中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2010,38(5):28-30.
- KANG Rong, HE Fulian, LI Hongbin. Application of truss and anchor to support seam gateway with broken roof[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(5):28-30.
- [9] 康红普,王金华,林健. 煤矿巷道锚杆支护应用实例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010,29(4):649-664.
- KANG Hongpu, WANG Jinhua, LIN Jian. Case studies of rock bolting in coal mine roadways[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010,29(4):649-664.
- [10] 严红,何富连,王思贵. 特大断面巷道软弱厚煤层顶板控制对策及安全评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2014,33(5):1014-1023.
- YAN Hong, HE Fulian, WANG Sigui. Safety control and evaluation of roadway with super-large cross-section and soft-weak thick coal roof[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(5):1014-1023.
- [11] 苏学贵,宋选民,李浩春,等. 特厚松软复合顶板巷道拱-梁耦合支护结构的构建及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014,33(9):1828-1836.
- SU Xuegui, SONG Xuanmin, LI Haochun, et al. Study on coupled arch-beam support structure of roadway with extra-thick soft compound roof[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(9):1828-1836.
- [12] 张广超,何富连. 大断面综放沿空巷道煤柱合理宽度与围岩控制[J]. 岩土力学, 2016,37(6):1721-1728.
- ZHANG Guangchao, HE Fulian. Pillar width determination and surrounding rocks control of gob-side entry with large cross-section and fully-mechanized mining[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016,37(6):1721-1728.
- [13] 张广超,何富连,来永辉,等. 高强度开采综放工作面区段煤柱合理宽度与控制技术[J]. 煤炭学报, 2016, 41(9):2188-2194.
- ZHANG Guangchao, HE Fulian, LAI Yonghui, et al. Reasonable width and control technique of segment coal pillar with high-intensity fully-mechanized caving mining[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(9):2188-2194.
- [14] 王德超,李术才,王琦,等. 深部厚煤层综放沿空掘巷煤柱合理宽度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014,33(3):539-548.
- WANG Dechao, LI Shucai, WANG Qi, et al. Experimental study of reasonable coal pillar width in fully mechanized top coal caving face of deep thick coal seam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014,33(3):539-548.
- [15] ZHANG Guangchao, LIANG Saijiang, TAN Yunliang, et al. Numerical modeling for longwall pillar design: a case study from a typical longwall panel in China[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2018,15(1):121-134.