弱胶结富水巷道合理支护技术研究

朱光亚[1],李思超[2,3,4],柏建彪[2],王襄禹[2,3,4],白 宇[2,3,4]

(1. 徐矿集团哈密能源有限公司,新疆 哈密 839000; 2. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室,江苏 徐州 221116;
3. 中国矿业大学 矿业工程学院,江苏 徐州 221116; 4. 中国矿业大学 深部煤炭资源开采教育部重点实验室,江苏 徐州 221116)

摘 要: 为了解决大南湖西五矿围岩胶结性差、顶板含水量大导致巷道支护困难的问题,采用现场实测与数值模拟相结合的方法,进行了现场锚固性能测试,分析了随顶板岩层含水量增加,采用架棚支护、锚杆支护和锚杆锚索联合支护 3 种支护方式时巷道围岩变形规律和支护体受力特征。研究结果表明: 在现场围岩条件下锚杆、锚索可以达到规定的拉拔力; 顶板含水量较大时采用架棚支护围岩变形严重,梯形棚发生结构性失稳,而锚杆锚索联合支护可以有效减弱在水作用下锚杆轴向力的降低,大幅减小围岩变形。现场观测结果显示锚杆锚索联合支护围岩控制效果显著。

关键词: 弱胶结围岩; 富水巷道; 合理支护方式; 围岩稳定性

中图分类号: TD323 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2016)03-0007-05

Study on rational support technology of mine weakly consolidated watery roadway

Zhu Guangya[1], Li Sichao[2,3,4], Bai Jianbiao[2], Wang Xiangyu[2,3,4], Bai Yu[2,3,4]

(1. *Hami Energy Company Limited, Xuzhou Coal Mining Group, Hami* 839000, *China*; 2. *National Key Lab of Coal Resources and Safety Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou* 221116, *China*; 3. *School of Mining Engineering, China university of Mining and Technology, Xuzhou* 221116, *China*; 4. *MOE Key Lab of Deep Coal Resource Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou* 221116, *China*)

Abstract: In order to solve the mine roadway support difficult problem caused by the poor consolidated surrounding rock and high roof water content in Dananhu Xiwu Mine, a site measuring and numerical simulation combined method was applied to the site bolting reinforcement performances test and to analyze the surrounding rock deformation law and support stressed features with the roof strata water content increased when three support modes of the square support, bolt support and bolt and anchor combined support were applied.The study results showed that under the condition of the site surrounding rock, the bolt and anchor could reach the stipulated pulling force.When the roof water content was high, due to the square support applied, the deformation of the surrounding rock was serious and the square supports had the structure stability lost occurred, but the bolt and anchor combined support could effectively reduce the axial force decreased under the function of water and could highly reduce the deformation of the surrounding rock.The site observation results showed that the control effect of the surrounding rock was obvious when the bolt and anchor combined support applied.

Key words: weakly consolidated surrounding rock; mine watery roadway; rational support mode; surrounding rock stability

0 引 言

弱胶结地层在我国西部矿区,如内蒙古、新疆、宁夏等地广泛分布。长期以来,弱胶结围岩巷道支护一直是困扰煤矿安全生产的技术难题[1]。由于弱胶结围岩多为黏土类岩体,松散、胶结性差,围岩强度较低、易风化、难锚固,易导致巷道变形失稳[2-3]。在巷道围岩富水的情况下,弱胶结围岩遇水易软化、泥化、崩解,使得巷道支护更为困难[4-5]。软岩巷道支护形式主要有全刚性支护、U 钢可缩性

收稿日期: 2015-09-10; **责任编辑:** 杨正凯 **DOI:** 10.13199/j.cnki.cst.2016.03.002

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51574227)

作者简介: 朱光亚(1973—),男,江苏灌云人,工程师,现任徐矿集团哈密能源有限公司副总工程师。

引用格式: 朱光亚,李思超,柏建彪,等.弱胶结富水巷道合理支护技术研究[J].煤炭科学技术,2016,44(3):7-11.

Zhu Guangya, Li Sichao, Bai Jianbiao, *et al*.Study on rational support technology of mine weakly consolidated watery roadway[J].Coal Science and Technology, 2016, 44(3): 7-11.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

支架支护、锚网喷注支护等形式[6-8]。随着对巷道围岩控制机理的不断认识和发展，锚杆支护理论已从被动承载发展至主动加固、从单一因素支护作用发展到复合支护作用、从简单条件适用扩展至复杂条件适用[9-10]，巷道支护应逐渐推广以锚杆支护为基础的支护方式。对于弱胶结富水巷道，在水的作用下围岩吸水膨胀软化导致围岩强度发生衰减[11]；树脂锚固剂遇水后其反应物凝结性降低，致使锚杆、锚索的黏结力降低，易于引起锚固失效；而且水对巷道围岩中的锚杆、锚索的金属构件产生锈蚀作用，在一定程度上降低了支护材料本身的力学性能[12-14]。因而选择弱胶结富水巷道的合理支护方式，确定围岩控制技术时应对锚杆、锚索的锚固性能进行测试，判断巷道围岩的可锚性[15]。哈密大南湖矿区为弱胶结软岩煤田且存在多个含水层，巷道围岩由于胶结性较差以及在顶板水作用下围岩强度的衰减，使得巷道支护困难。笔者针对大南湖西五矿首采工作面回采巷道采用架棚支护巷道维护困难的问题，采用现场实测、数值模拟等方法确定巷道的合理支护方式，保证巷道围岩稳定。

1　生产地质条件

大南湖西五矿位于新疆哈密市西南，地面标高 +437—+583 m。设计可采储量约为 384.49 Mt，矿井设计生产能力为 4 Mt/a。111801 工作面为 18 煤层首采工作面，平均埋深 230 m，111801 运输巷和回风巷断面尺寸均为 5.0 m×3.5 m。18 煤层顶板多为灰色砂质泥岩和泥质粉砂岩，其余为灰色细-粗粒砂岩及砂砾岩。细砂岩为细粒结构，含较多植物化石及炭屑；粗粒砂岩为粗粒状结构，泥质胶结，分选差；砂砾岩为砂砾质结构、含水，为直接顶板的主要含水层且水量较大。砂质泥岩为抗压强度为 21.2~34.8 MPa，平均 26.5 MPa，粗、细粒砂岩抗压强度为 3.6~21.7 MPa，平均 12.7 MPa，属于软岩。煤层顶底板柱状图如图 1 所示。

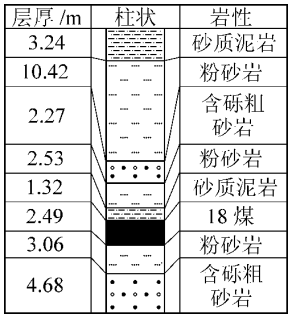


图 1　煤层顶底板柱状图

Fig. 1　Coal seam roof and floor histogram

2　弱胶结围岩锚固性能测试

为了测试在富水顶板条件下锚杆、锚索的锚固性能，在 111801 运输巷设置试验段进行锚杆、锚索拉拔试验，用于检验现有顶板条件下锚杆、锚索能否发挥对巷道围岩的主动支护作用，以及在顶板水作用下锚杆、锚索的锚固力随时间推移而衰减情况。试验段位于 111801 运输巷 262~274 m，巷道顶部和两帮锚杆均为直径 22 mm、长度 2 200 mm 的左旋高强螺纹钢锚杆，锚固剂采用 2 支普通树脂药卷，规格为 K2350；顶锚索采用直径 18.9 mm、长度 6 300 mm 的钢绞线锚索，4 支树脂锚固剂为 K2350。试验段顶板含水层在巷道顶板上方约 1.8 m 处，在试验段进行顶板涌水量测试，顶板单孔涌水量为 0.045~0.092 m^3/h。

锚杆、锚索拉拔力现场测试结果见表 1，随锚杆、锚索安装时间的增加，顶锚杆平均拉拔力先小幅增加后逐渐衰减，说明在顶板水的作用下锚杆的锚固性能有所弱化，但在安装 43 d 后拉拔力基本稳定且仍大于 120 kN，可以满足现场支护要求；帮锚杆锚固在煤层中，拉拔力不发生衰减，7 d 后基本保持不变；顶锚索拉拔力在安装 22 d 后有小幅的减小，顶板水对锚索的锚固性能基本不产生影响。由现场锚固性能测试结果可知在现有围岩条件下锚杆、锚索能够起到对巷道的支护作用。

表 1　现场锚杆、锚索拉拔力测试结果

Table 1　Test results of drawing force of anchor and cable

安装后时间/d	顶锚杆平均拉拔力/kN	帮锚杆平均拉拔力/kN	锚索平均拉拔力/kN
3	127.5	129.0	233.5
7	131.0	134.5	238.0
22	124.0	132.0	240.5
43	122.5	135.0	237.5

3　巷道支护方案数值模拟

依据 111801 工作面运输巷和回风巷的生产地质条件，采用 FLAC^{3D}建立数值模拟模型。研究分析采用架棚支护、锚杆支护和锚杆锚索联合支护方案，随顶板含水量的增加、不同支护方案的巷道稳定性，对比巷道顶板岩层处于干燥状态、未饱和水状态和

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

饱和水状态时巷道围岩变形规律和支护体受力特征,为确定有效的支护形式及合理的支护参数提供依据。

模型尺寸为 70 m×30 m×70 m,上边界承受均布载荷,型底边界垂直方向固定,前后左右边界水平方向固定。模拟的本构模型采用摩尔-库仑模型,围岩力学参数选取参照煤岩体实验室力学参数测试试验及水对顶板围岩强度弱化试验的结果,确定顶板砂质泥岩、泥质粉砂岩、含砾粗砂岩力学参数见表 2。

表 2　不同含水状态下顶板岩层力学参数

Table 2　Parameters of roof rock in different moisture state

含水状态	岩性	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa
干燥	砂质泥岩	4.5	3.4	37	1.8	1.3
	泥质粉砂岩	3.0	2.4	34	1.4	0.8
	含砾粗砂岩	2.8	2.3	36	0.8	0.5
未饱和水	砂质泥岩	1.2	0.8	31	1.2	0.7
	泥质粉砂岩	1.0	0.7	29	1.0	0.6
	含砾粗砂岩	0.8	0.6	27	0.5	0.4
饱和水	砂质泥岩	0.6	0.4	28	0.6	0.4
	泥质粉砂岩	0.6	0.4	25	0.5	0.3
	含砾粗砂岩	0.7	0.5	27	0.4	0.4

在模型中部开挖巷道,巷道断面尺寸为 5.0 m×3.5 m,巷道分别采用架棚支护、锚杆支护和锚杆锚索联合支护方式,每种方案的支护参数如下: 架棚支护采用 11 号工字钢梯形棚,棚距 1.2 m; 锚杆支护顶板和两帮锚杆直径 22 mm,长度 2 200 mm,间排距 750 mm×800 mm; 锚杆锚索联合支护顶板和两帮锚杆直径 22 mm,长度 2 200 mm,间排距 750 mm×800 m; 顶板锚索直径 21.6 mm,长度 6 300 mm,间排距 1 400 mm×1 600 mm。利用 FLAC^{3D} 软件内置的流固耦合模块,通过改变顶板岩层的饱和度和岩石力学参数计算巷道采用不同支护方案时顶板岩层水含量变化对巷道及支护体的影响,其中未饱和水状态取岩层饱和度为 50%。

4　弱胶结围岩巷道支护效果分析

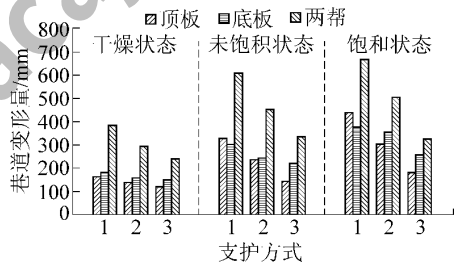
4.1　围岩变形规律

采用不同支护方案、围岩处于不同含水状态时巷道围岩变形情况如图 2 所示。

1) 采用架棚支护、锚杆支护和锚杆锚索联合支护 3 种支护方式,随着顶板岩层含水量的增加巷道变形量逐渐增加,其中顶板岩层含水量对架棚支护的影响最为显著。对于架棚支护在未饱和水与饱和水条件下,顶底板移近量分别大于 600、800 mm,此时梯形棚已发生结构性失稳,维持巷道围岩稳定。随顶板岩层含水量的增加,单一的架棚支护难以满足生产要求。

2) 在顶板岩层干燥的条件下,采用锚杆支护和锚杆锚索联合支护对于巷道的支护效果差别不大; 随顶板岩层含水量的增加,只采用锚杆支护巷道的顶底板移近量与两帮移近量均明显大于锚杆锚索联合支护,在顶板水的作用下锚杆对巷道的支护作用被弱化。

3) 在巷道顶板岩层含水的情况下采用锚杆锚索联合支护的形式,巷道围岩变形量明显小于锚杆支护,相对于架棚支护围岩变形显著变小。采用锚杆锚索联合支护巷道顶板下沉量小于底鼓量,联合支护可以有效控制顶板下沉,使巷道变形维持在较低的水平,可以保证巷道顶板的整体稳定,有效地控制围岩变形。



1—架棚支护; 2—锚杆支护; 3—锚杆锚索联合支护

图 2　巷道围岩变形量

Fig. 2　Displacement of surrounding rock

4.2　支护体受力特征

4.2.1　架棚支护受力分析

工字钢支架通过连接件锁紧后在外力推动下支架连接部分滑动,必须克服搭接部位型钢与型钢之间、型钢与连接件之间的摩擦阻力。当巷道围岩变形促使支架承受载荷增加时,支架内力随之增大。当轴力推动型钢搭接部位滑移时,连接件将发生歪斜,并出现变形,弯矩造成支架的挠曲,巷道围岩持续变形,支架荷载和其内力也不断增加[16-18]。

在数值模拟中工字钢支架采用 BEAM 单元,同时根据 11 号工字钢材料屈服强度为 510 MPa 和抗弯截面模量约为 74 cm^3,确定支架的屈服弯矩为 37 740 N·m。模拟中支架顶梁的弯矩大于棚腿,随着计算时步的增加,支架承受的弯矩逐渐加大,且最大弯矩所处位置位于顶梁中部,同时棚腿的弯矩也

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

明显加大。随围岩水含量增加支架所受弯矩逐渐增加，在未饱和水和饱和水状态下已大幅超过了支架的屈服弯矩，支架结构性失稳特征较为明显，架棚支护难以有效控制巷道围岩变形。

4.2.2　锚杆、锚索受力分析

在采用锚杆支护和锚杆锚索联合支护的情况下，顶板岩层含水量不同时锚杆、锚索的轴向拉力变化如图 3 所示。

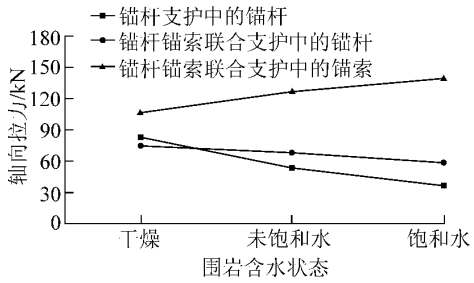


图 3　顶板锚杆、锚索轴向拉力变化

Fig. 3　Axial tension change of bolt and cable in roof

1) 采用锚杆支护，随着顶板岩层含水量的增加锚杆轴向拉力逐渐减小，由干燥条件下的 83 kN 下降到饱和水条件下的 37 kN，变化幅度较大。锚杆轴向拉力的下降主要由顶板水对顶板围岩及锚杆锚固性能的弱化作用引起，在水的作用下随顶板岩层水含量的增加，锚杆的锚固力逐渐下降，锚杆不能充分发挥其性能，锚杆所受的轴向拉力变小。

2) 采用锚杆锚索联合支护，随着顶板岩层含水量的增加锚杆轴向拉力逐渐减小，但受深部锚索挤压作用其减小量明显小于单纯采用锚杆支护时锚杆轴向拉力的减小量；随水含量的增加锚索的轴向拉力逐渐升高。采用锚杆锚索联合支护可形成稳定的整体承载结构，减小水对支护体支护强度的弱化作用。在锚杆和锚索的共同作用下巷道顶板整体性明显增强，能够保持围岩的稳定性。

5　现场应用效果分析

111801 运输巷先期采用架棚支护，选用 11 号工字钢梯形棚作为支护材料，棚距为 1.2 m。采用架棚支护在顶板含水量较大的区段巷道变形严重，且架棚支护施工速度较慢难以满足生产要求。为了保证安全生产、提高生产效率进行巷道支护方案的优化调整，采用锚杆锚索联合支护的形式，支护参数如下：①顶板和两帮锚杆采用左旋螺纹钢高强度锚杆，直径 22 mm，长度 2 200 mm，尾部配套使用蝶形托盘，托盘规格为 150 mm×150 mm×10 mm；锚杆间排距均为 750 mm×800 mm，采用 1 支 CK2335 和 1 支 Z2360 防水型树脂药卷，锚杆螺母上紧转矩大于 200 N·m，锚固力大于 100 kN。顶板和两帮均铺设金属网和钢筋梯子梁，钢筋梯子梁采用直径 12 mm 的圆钢焊接，顶板和两帮铺设直径 6 mm 钢筋网，网格规格 100 mm×100 mm，搭接量不小于 100 mm。②顶板锚索规格为直径 21.6 mm、长度 6 300 mm 的 19 股钢绞线锚，碟形钢托盘规格为 300 mm×300 mm×16 mm。顶板锚索间排距为 1 400 mm×1 600 mm，锚固剂采用 1 支 CK2335、3 支 Z2360 防水型树脂药卷，锚索预紧力大于 150 kN，锚固力大于 250 kN。相邻 2 排锚索间沿巷道轴向铺设钢筋梯子梁，钢筋梯子梁采用直径 14 mm 的圆钢焊接。

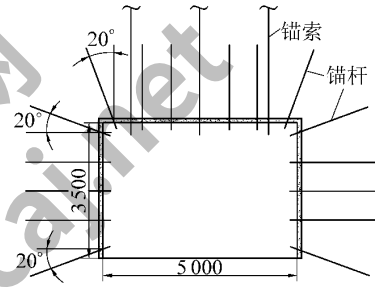


图 4　巷道支护断面

Fig. 4　Supporting cross section of roadway

分别对 111801 运输巷采用架棚支护和锚杆锚索联合支护的区段进行矿压观测，观测结果如图 5 所示。采用架棚支护顶底板移近量达到 500 mm，两帮移近量大于 400 mm，此时巷道变形较为严重；采用锚杆锚索联合支护顶底板和两帮移近量均大幅减小，且顶板变形小于两帮，锚杆锚索联合支护可以有效控制巷道变形，维持巷道稳定。

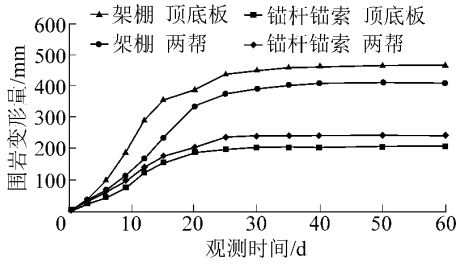


图 5　巷道位移监测曲线

Fig. 5　Displacement monitoring curves on roadway

6　结　　论

1) 现场锚杆、锚索锚固性能测试表明在试验巷道弱胶结富水围岩条件下锚杆、锚索拉拔力随时间有小幅衰减，但仍能够满足支护要求。43 d 后锚杆

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

拉拔力大于 120 kN,锚索拉拔力大于 235 kN,在现场围岩条件下可以采用锚杆锚索联合支护的形式。

2) 通过数值模拟可以发现在顶板含水量较大的情况下,巷道采用架棚支护变形严重难以维护,梯形棚发生结构性失稳; 在水的作用下锚杆的锚固性能发生弱化,只采用锚杆支护时锚杆不能充分发挥其对围岩的控制作用,巷道变形量明显大于锚杆锚索联合支护; 采用锚杆锚索联合支护可以有效减弱锚杆轴向拉力的降低,对围岩的控制效果最好。

3) 现场矿压观测结果表明巷道采用锚杆锚索联合支护区段的围岩变形量显著小于采用架棚支护的区段。综合以上分析,采用锚杆锚索联合支护可以解决巷道在围岩胶结性差、顶板含水量较大的条件下的支护难题。

参考文献(References) :

[1] 何满潮,孙晓明.中国煤矿软岩巷道工程支护设计与施工指南[M].北京: 科学出版社,2004: 87-90.

[2] 王云博,景继东,张德泉,等.弱胶结软岩巷道变形破坏控制技术及其应用[J].煤矿开采,2014,19(2) : 53-57.
Wang Yunbo,Jing Jidong, Zhang Dequan,*et al*.Technology of control deformation and failure of weakly consolidated soft-rock roadway and its application [J].Coal Mining Technology,2014,19(2) : 53-57.

[3] 李廷春,卢　振,刘建章,等.泥化弱胶结软岩地层中矩形巷道的变形破坏过程分析[J].岩土力学,2014,35(4) : 1077-1083.
Li Tingchu,Lu Zhen,Liu Jianzhang,*et al*.Deformation and failure process analysis of rectangular roadway in muddy weakly cemented soft rock strata [J].Rock and Soil Mechanics,2014,35(4) : 1077-1083.

[4] 姚强岭,李学华,瞿群迪.富水煤层巷道顶板失稳机理与围岩控制技术[J].煤炭学报,2011,36 (1) : 13-18.
Yao Qiangling,Li Xuehua,Qu Qundi. Instability mechanism and technique of surrounding rock control of water-enriched roofs of coal drifts [J]. Journal of China Coal Society,2011,36 (1) : 13-18.

[5] 许兴亮,张　农.富水条件下软岩巷道变形特征与过程控制研究[J].中国矿业大学学报,2007,36 (3) : 298-302.
Xu Xingliang,Zhang Nong .Study of control process deformation behavior and of soft rock drift under rich water condition [J].Journal of China University of Mining & Technology,2007,36(3) : 298-302.

[6] 张　农,阚甲广,杨　森.锚杆(索) 和 U 型钢支架支护失效形式与控制技术[J].煤炭科学技术,2015,43(6) : 41-47.
Zhang Nong,Kan Jiaguang,Yang Sen.Control technology and failure types of anchor bolt support and U-steel frame support [J]. Coal Science and Technology,2015,43(6) : 41-47.

[7] 康红普.软岩巷道底鼓机理及防治[M].北京: 煤炭工业出版社,1993: 79 -86.

[8] Kang Hongpu.Support technologies for deep and complex roadways in underground coal mines: a review [J].International Journal of Coal Science & Technology,2014,1(3) : 261-277.

[9] 侯朝炯,郭励生,勾攀峰.煤巷锚杆支护[M].徐州: 中国矿业大学出版社,1999.

[10] 姚强岭.富水巷道顶板强度弱化机理及其控制研究[D].徐州: 中国矿业大学,2011: 5-6.

[11] 郭富利,张顶立,苏　洁,等.地下水和围压对软岩力学性质影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(11) : 2324-2332.
Guo Fuli,Zhang Dingli,Su Jie,*et al*.Experimental study on influences of groundwater and confining pressure on mechanical behaviors of soft rocks [J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,26(11) : 2324-2332.

[12] 薛亚东,黄宏伟.水对树脂锚索锚固性能影响的试验研究[J].岩土力学,2005,26(12) : 31-34.
Xue Yadong,Huang Hongwei.Experimental study on effect of water on anchoring performance of resin cable bolts [J].Rock and Soil Mechanics,2005,26(12) : 31-34.

[13] 李　铀,白世伟,方昭茹,等.预应力锚索锚固体破坏与锚固力传递模式研究[J].岩土力学,2003,24(5) : 686-690.
Li You,Bai Shiwei,Fang Zhaoru,*et al*.Research on failure mechanism and anchoring force transmission of prestressed cable [J].Rock and Soil Mechanics,2003,24(5) : 686-690.

[14] 张发明,陈祖煜,刘　宁.岩体与锚固体间粘结强度的确定[J].岩土力学,2001,22(4) : 470-473.
Zhang Faming,Chen Zuyu,Liu Ning. Determination of cohesive strength between rock mass and anchors [J].Rock and Soil Mechanics,2001,22(4) : 470-473.

[15] 李　元,刘　刚,龙景奎.深部巷道预应力协同支护数值分析[J].采矿与安全工程学报,2011,28(2) : 204-208.
Li Yuan,Liu Gang,Liu Jingkui.Numerical analysis of theory of pre-stress synergetic support in deep mine roadway [J].Journal of Mining & Safety Engineering,2011,28(2) : 204-208.

[16] 荆升国.高应力破碎软岩巷道棚-索协同支护围岩控制机理研究[D].徐州: 中国矿业大学,2009: 23-26.

[17] 张益东.巷道金属支架实际承载能力的计算和断面参数合理性的研究[D].徐州: 中国矿业大学,1989.

[18] 王悦汉,陆士良.壁后充填对提高巷道支护阻力的研究[J].中国矿业大学学报,1997,26(4) : 1-4.
Wang Yuehan,Lu Shiliang. Research on the effect of roadway backfilling on the raise of support resistance [J].Journal of China University of Mining & Technology,1997,26(4) : 1-4.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net