

极软地层巷道围岩变形机理与控制技术研究

王波¹, 王军², 高昌炎¹

(1. 华北科技学院安全工程学院, 北京 101601; 2. 山东建筑大学土木工程学院, 山东 济南 250100)

摘要:为了解决北皂煤矿海域二采区回风巷围岩强度低、自承能力差、变形速度快、难以维护的难题,从围岩力学特性、软岩巷道流变特性、扰动影响、巷道底鼓、围岩失水风干崩解等方面进行了研究。研究表明:在揭示该类巷道围岩变形机制基础上,提出了高强度钢管混凝土支架支护方案,巷道断面采用圆形,钢管混凝土支架支护钢管选用 $\phi 194\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 钢管,接头套管选用 $\phi 219\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 的钢管,充填标号 C40 混凝土,支架壁后辅助钢筋网支护和混凝土喷碇支护,监测出支架的变形量为 20~80 mm,最大变形也只达到 80 mm,支架没有明显变形,钢管混凝土支架支护方案能够控制北皂煤矿海域二采区回风巷围岩变形,保持巷道围岩的稳定。

关键词:海域巷道;极软地层;围岩变形;钢管混凝土支架

中图分类号:TD353 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2017)10-0030-06

Study on deformation mechanism and control technology of roadway surrounding rock in ultra soft strata

WANG Bo¹, WANG Jun², GAO Changyan¹

(1. School of Safety Engineering, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China;

2. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250100, China)

Abstract:In order to solve the low strength, poor bearing capacity, quick deformation and hard maintenance difficulty of the surrounding rock in the second mining block under the sea area of Beizao Mine, from the surrounding rock mechanics features, rheological features of the soft rock mine roadway, study was conducted on the disturbance influences, floor heave, dewatering and drying disintegration of the surrounding rock and other aspects. The deformation mechanism of the surrounding rock in the type roadway was revealed. A support plan with high strength steel tube concrete supports was provided. The cross section of the mine roadway was circular. The support steel tube of the steel tube concrete supports would be a $\phi 194\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ steel tube and the joint coupling of the steel tube would be a $\phi 219\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ steel tube. The backfill would be conducted with C40 concrete. Behind the support wall, the auxiliary steel bar mesh support and shotcrete support would be made. The site test results showed that the deformation value of the support was 20~80 mm, the max deformation was 80 mm only, the support had not obvious deformation, the support plan with the steel tube concrete support could be able to control the surrounding rock deformation of the air return gateway in No. 2 mining block under the seam area of Beizao Mine and the surrounding rock of the gateway was kept in stable.

Key words:mine roadway under sea area; ultra soft strata; surrounding rock deformation; steel tube concrete supports

0 引 言

龙口北皂煤矿是我国第一个进行海下采煤的矿井,进入海域扩大区开采后,软岩具有的松、散、软、

弱 4 种属性在海域表现极为突出,其重塑性高、崩解性快、流变性强、胀缩性大、触变性敏感,巷道稳定性难以控制,对生产造成了极大的影响。

随着我国煤矿开采深度的增加,软岩巷道支护

收稿日期:2017-04-18;责任编辑:曾康生 DOI:10.13199/j.cnki.est.2017.10.005

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51404105);河北省自然科学基金资助项目(E2015508047);中央高校基本科研业务费资助项目(3142015085,3142017030)

作者简介:王波(1981—),男,山东阳谷人,副教授,硕士生导师,博士。Tel:010-61597463,E-mail:wangbo.94@163.com

引用格式:王波,王军,高昌炎.极软地层巷道围岩变形机理与控制技术研究[J].煤炭科学技术,2017,45(10):30-35.

WANG Bo, WANG Jun, GAO Changyan, et al. Study on deformation mechanism and control technology of roadway surrounding rock in ultra soft strata[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(10): 30-35.

问题日益突出^[1-2],支护体失效现象严重,不能满足支护要求,导致围岩变形较大,冒顶片帮事故时有发生,部分巷道虽已经过多次返修,但变形破坏仍不能较好地控制,尤其受开采扰动影响的采区动压巷道形势会更加严峻^[3],基于以上原因,国内外学者对深部软岩支护的研究也不断深入,一批新技术新方法在工程实践中得到应用,比如以锚网索配合U型钢可缩支架的互补控制技术^[4-5]、U型钢和高强度锚索为主的棚索协调支护技术等^[6-8],钢管混凝土支架是近年来发明的一种高强度支架^[9-11],核心是在空钢管内充填混凝土形成的一种新型构件,钢管为核心混凝土提供紧箍力,使混凝土处于三向受压状态,增加了混凝土的强度^[12-13]。而核心混凝土的存在一方面提高了整体强度,另一方面则避免薄壁钢管的内凹失稳破坏。在相同用钢量的情况下,其承载力可达U型钢支架的3~5倍,非常适用于维护深井软岩巷道的稳定性^[14-15]。

结合龙口北皂煤矿海域扩大区软岩巷道的地质条件和巷道围岩变形特点,采用以钢管混凝土支架为主的联合支护方案快速支护岩巷道,限制巷道围岩变形,维持巷道围岩的稳定。通过现场矿压观测表明,钢管混凝土支架支护方案能够维持巷道围岩的稳定。

1 工程概况

北皂煤矿位于龙口市巾村镇北皂村西部,可采煤层3层,海域二采区回风巷长2 472 m,标高-350 m,穿煤2顶板掘进,岩性为含油泥岩,先后采用了U₂₉型钢、U₃₆型钢和锚喷支护等多种支护形式,均未控制住围岩变形,巷道返修率高、破坏十分严重,变形破坏特征主要包括以下4方面。

1)初始变形速率大,巷道开掘初始变形异常剧烈。在巷道开掘并进行临时支护后,观测到两帮最大移近速率为99.6 mm/h,顶板最大下沉速率为126 mm/h。

2)围岩持续变形时间长。巷道开挖引起应力集中影响消除后,到巷道围岩变形达到稳定以前,围岩变形大且持续时间较长。巷道开掘后,浅部围岩在较短的时间内向巷内自由空间急剧位移,并在深部围岩运动的作用下,形成一个剧烈破碎裂隙带或可能冒落带。根据深部围岩位移观测,静压期间,巷道两帮5 m以内的围岩碎胀变形量占单侧帮(右帮)位移总量的39%~56%;5 m以外深部围岩碎胀

变形量占单侧帮位移总量的46%~61%,10 m以外深部围岩仍存在位移。

3)围岩变形以垂直变形为主。海域二采区回风巷顶含油泥岩单轴抗压强度为8.1~16.95 MPa,平均为11.9 MPa,仅为陆地同层位的25%~50%,没有足够的强度支撑上覆岩层的质量,因此,围岩以垂直变形为主,破坏的基本形态为顶板显著下沉。

4)对应力扰动反应极为敏感。受到相邻巷道掘进扰动影响,已经相对稳定的巷道,围岩变形再次急剧增大。

2 海域二采区回风巷变形机理分析

2.1 围岩力学特性

海域二采区回风巷围岩强度低,膨胀性能强。采场覆岩下沉变形速度快,巷道收敛变形量大,底臃严重。这些都与岩石的矿物成分、黏土矿物含量、岩石的微观结构特征、岩石力学参数等密切相关。岩石力学参数测试结果见表1,对测试结果进行分析可知,含油泥岩抗压强度为5.7~12.5 MPa,平均8.6 MPa。岩石水理参数测试结果见表2。

表1 煤层顶板岩石力学参数

Table 1 Physical-mechanical parameters of rock in coal roof

试件号	岩性	弹模/ MPa	泊松比	单轴抗压 强度/MPa	极限 应变/%
1	含	1431	—	12.50	1.12
2	油	1041	0.21	5.70	0.80
3	泥	993	0.36	10.70	0.97
4	岩	1441	0.25	5.70	0.76

表2 岩石水理参数测试结果

Table 2 Test results of rock water-physical parameters

试件号	密度/ (g·cm ⁻³)	含水率/ %	饱和质 量/g	吸水 率/%	膨胀 率/%	备注
1	2.23	11.2	251	42.6	14.2	
2	2.19	11.8	222	28.7	12.9	含油
3	2.17	10.1	215	31.3	14.9	泥岩
4	2.09	10.0	256	34.4	15.4	

由表2可知,含油泥岩吸水率28.7~42.6%,膨胀率12.9%~14.9%。微观结构测试结果如图1所示。岩石、黏土的矿物成分测试结果分别见表3、表4。

通过对电镜扫描结果分析可知,含有黏土矿物的岩石,其蒙脱石或者伊蒙混层矿物在岩石中具有

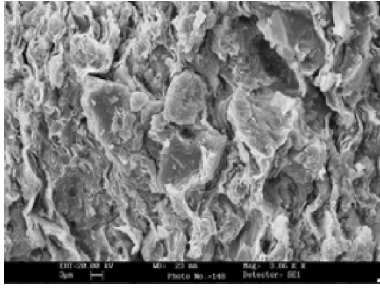


图1 含油泥岩泥质间粒状钠长石颗粒(3 860倍)

Fig. 1 The granule of albite in oil mudstone(3 860 times)

定向结构,多呈片状分布。岩石的微裂隙较发育,而且大部分连通性较好,有的裂隙夹有长石晶体等充填物,蒙脱石含量高。

表3 岩石矿物成分含量

Table 3 Content of rock mineral ingredient

岩样	矿物种类及其含量/%					黏土矿物 总含量/%
	石英	斜长石	方解石	方英石	黄铁矿	
含油泥岩1	16.6	3.3	13.8	7.2	1.5	57.6
含油泥岩2	36.2	4.7	0	0	0	59.1

表4 黏土矿物成分相对含量

Table 4 Comparable content of clay mineral ingredient

岩样	黏土矿物相对含量/%						混层比/%	
	S	L/S	I	K	C	C/S	I/S	C/S
含油泥岩1	87	0	6	7	0	0	95	0
含油泥岩2	66	0	8	26	0	0	95	0

注:S为蒙脱石,L/S为伊/蒙混层,I为伊利石,K为高岭石,C为绿泥石,C/S为绿/蒙混层。

由表3和表4可知,含油泥岩中黏土矿物含量为57.6%~59.1%,其中蒙脱石含量为66%~87%。

2.2 软岩巷道流变特性

海域二采区回风巷开掘后稳定的围岩,随着时间的推移,其围岩运动不断发展,经过一定的时间以后,便可能发生失稳破坏。巷道围岩经长期流变,岩石内部逐渐发生微破坏变形,围岩与支护体之间的作用力随之缓慢增加。当围岩应力达到峰值(含油泥岩的长期强度 $\sigma_s = 5.3 \sim 8.5$ MPa)后,围岩破坏加剧、变形迅速增加,围岩与支护体之间的作用力随之急剧升高,支护体的支护能力达到极限而遭破坏。因此,岩石长期流变、围岩应力达到峰值、支护体过载等是巷道围岩破坏的主要原因。

2.3 扰动影响

海域二采区回风巷围岩自身稳定性差,应力每发生微小的变化,都造成支护体强烈的变形,即流变扰动效应,当围岩应力增量为0.04~0.06 MPa时,两

帮移近速率由采动影响前的0.2~0.8 mm/d,升高到采动影响后的0.8~1.4 mm/d;顶底板移近速率由采动影响前的0.5~1.0 mm/d,升高到采动影响后的2~4 mm/d。采动影响范围广,支撑压力作用时间长,是影响巷道稳定性的一个主要因素。

2.4 巷道严重底鼓引起巷道失稳

海域二采区回风巷底板岩层的向上运动,一方面迫使顶及两帮围岩与支护体之间的压力增加,打破了顶及两帮原有的支护体-围岩的平衡关系,引起支护体-围岩平衡波动,导致了巷道失稳破坏;另一方面,底板岩层的向上运动,带动两帮底角岩层向巷内移动,进一步增加了两帮围岩与支护体之间的压力,同样导致了巷道的失稳。

2.5 围岩失水风干崩解

海域二采区回风巷经多次拉底,巷道底板岩石完全暴露,而该段巷道断面收缩严重,风速过大,使巷道底板岩石失水风干崩解,导致巷道围岩失稳加剧,使破坏范围逐渐扩大。因此,围岩失水风干是引起巷道失稳破坏的另一重要原因。

3 巷道围岩控制技术

3.1 支护对策

1)根据海域地应力的主方向布置巷道。海域地应力实测结果表明,最大主应力的方向为北东向,所以应该尽可能将巷道沿北东向布置。

2)根据岩石的黏土质含量和水理特性及时实施封闭支护。海域岩层黏土含量高、吸水性强、膨胀率高。所以巷道开挖之后,及时进行封闭支护,尽量减少围岩吸水量,减少掘进施工时的巷道底板积水,巷道喷浆层开裂后及时补喷,都是控制巷道吸水量的有效措施。

3)提高“支架-围岩”支护体系整体的支护能力。海域煤₂层巷道围岩初始运动变形剧烈、持续变形时间长和围岩松动破坏范围广是煤₂层巷道支护难的主要原因,增大煤₂层巷道支护强度和充分发挥围岩承载能力是提高煤₂层巷道稳定性的的重要途径。

3.2 钢管混凝土支架复合支护方案设计

3.2.1 钢管混凝土支架结构设计

1)钢管规格。支护钢管选用 $\phi 194$ mm \times 8 mm钢管,单位长度质量为36.7 kg/m;接头套管 $\phi 219$ mm \times 8 mm的钢管,单位长度质量为41.62 kg/m。

2)支架断面。海域二采区回风巷道,岩石强度低,巷道稳定性差,所以设计需采用支护反力较大型

号的 $\phi 194 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 钢管混凝土支架进行支护, 支架断面设计为圆形。巷道断面尺寸要求: 净宽 3.80 m, 净高 3.45 m。支架断面形状参数见表 5。

表 5 支架断面参数

Table 5 Parameters of support section

断面形状	支架周 长/m	支架净 重/kg	净高 \times 净宽/ (mm \times mm)	底拱深度/ mm	支架节数
圆形	14.74	541	3 450 \times 3 800	1 050	5

3) 钢管支架结构参数。钢管混凝土支架结构分为 5 段: 左帮段, 右帮段, 左底拱段, 右底拱段, 顶拱段, 套管连接。支架之间顶杆连接, 支架间距设计为 0.8 m。支架顶杆采用 $\phi 76 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的钢管混凝土短杆, 顶杆间距 1.5~1.8 m, 能够有效防止支架发生压杆失稳。钢管支架结构如图 2 所示。

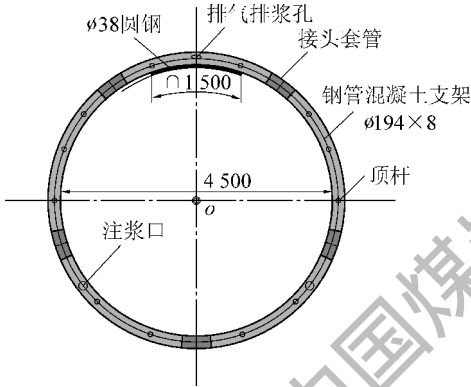


图 2 五节圆形钢管混凝土支架

Fig. 2 Five-circular steel tube confined concrete support

3.2.2 支架连接设计

支架顶拱段段与左右两帮之间用接头套管连接, 接头套管采用 $\phi 219 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 的钢管。相邻钢管混凝土支架间用 $\phi 76 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的钢管混凝土顶杆连接, 支架之间的间距 800 mm, 支架间设 10 根顶杆, 如图 3 所示。

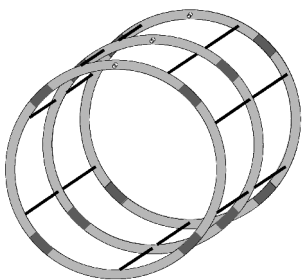


图 3 钢管混凝土支架结构

Fig. 3 Structure of steel tube confined concrete support

3.2.3 壁后硃体支护设计

1) 钢筋网铺设。金属网采用 $\phi 8 \text{ mm}$, 编成规格为 1 000 mm \times 1 000 mm 钢筋网, 网孔 100 mm \times 100 mm, 网片之间压茬 100 mm, 钢筋网全断面铺设。

2) 混凝土喷硃设计。支架安装、钢筋网铺设、泡沫塑料板充填完成后, 混凝土喷硃处理, 喷硃厚度 300 mm。喷硃混凝土采用 42.5 号的普通硅酸盐水泥配制, 标号 C20。

辅助支护设计与钢管混凝土支架设计共同组成二采回风巷支护设计。整体设计如图 4 所示。

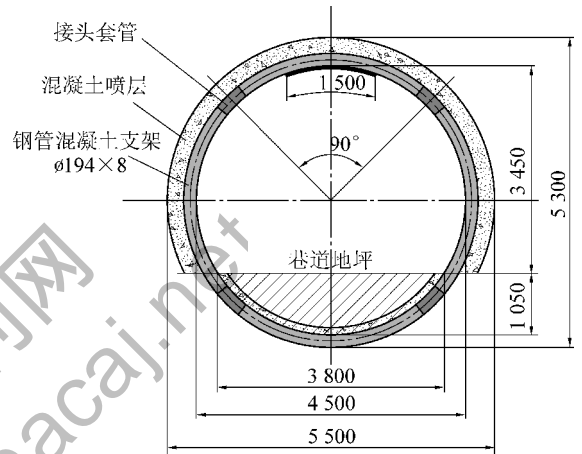


图 4 圆形五弧段钢管混凝土支架支护断面

Fig. 4 Round five-segment arc section of steel tube confined concrete support

3.2.4 钢管混凝土支架施工工艺

巷道支护施工工艺流程: 开挖巷道断面 \rightarrow 临时支护(顶板布置锚杆) \rightarrow 安装空钢管支架 \rightarrow 在支架与围岩之间铺设钢筋网、防雨布 \rightarrow 在支架与围岩之间浇注混凝土 \rightarrow 10~20 架钢管支架集中灌注混凝土。

4 支护效果监测及分析

4.1 钢管混凝土支架变形观测结果及分析

整个二采区回风巷共有 40 架钢管混凝土支架, 从巷道入口进行编号, 钢管混凝土支架第 1 架为 1 号观测点, 以此类推, 钢管混凝土支架第 40 架为 40 号观测点。每架设置观测点, 共 40 个观测点, 每 3 d 观测一次, 共观测 45 d, 图 5 为 2 号支架和 8 号支架的两帮及顶底板移近量, 支架安装 45 d 后, 2 号支架的两帮移近量为 56 mm, 顶底板移近量为 23 mm, 8 号支架的两帮移近量为 33 mm, 顶底板移近量为 10 mm。分析所有钢管混凝土支架变形观测数据, 支架的变形范围为 20~80 mm, 最大变形也只达到 80 mm, 属于正常范围之内, 支架没有明显变形(图 6)。

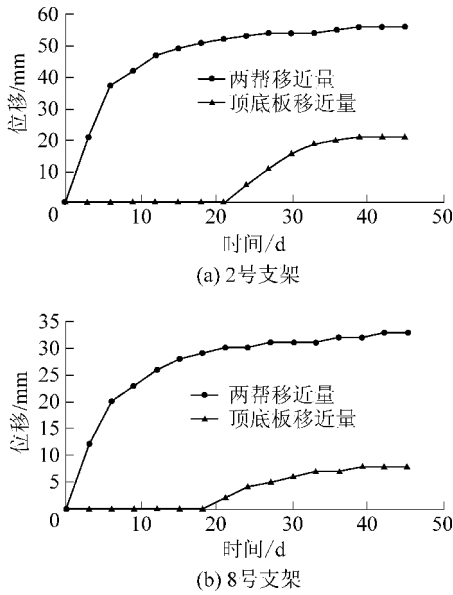


图5 支架变形监测曲线

Fig. 5 Curves of supports deformation monitoring

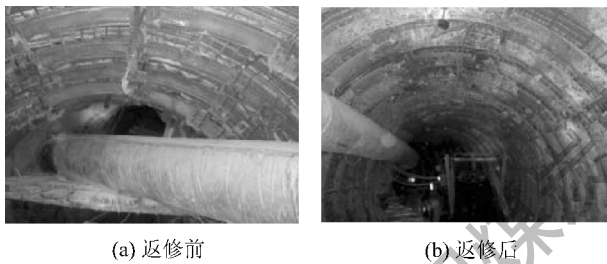


图6 钢管混凝土支架支护效果

Fig. 6 Support effect of steel tubular confined concrete supports

4.2 钢管混凝土支架受力观测结果及分析

测量仪器采用振弦式压力盒,选取十个支架,分别在支架的顶部、两帮、及左右两底角处,共安装液压枕6台,平均3 d观测1次,8号支架受力观测曲线如图7所示。支架安装45 d后,左顶、左帮、左底角、右顶、右帮、右底角分别受力为43.0、129.3、58.3、138.8、56.4、130.8 kN,远小于该型号钢管混凝土支架承载力1 752.7 kN。

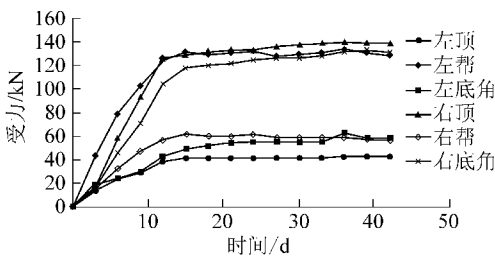


图7 8号支架受力观测曲线

Fig. 7 Force curves of No.8 support

4.3 观测结果分析

钢管混凝土支架的变形分3个阶段:第1阶段:在支护监视初期,位移稍有变化,表明围岩应力在重分布。第2阶段:钢管混凝土支护完毕到采煤工作面推进到动压影响区支护这期间巷道的变形,以及巷道开挖引起的可恢复的弹性变形。第3阶段:支架变形到后期,支护起到有效阻止围岩变形作用,开始承受围岩产生的应力,围岩变形逐渐趋稳定,相对位移趋于收敛状态。钢管混凝土支架安装3个多月后,巷道变形逐渐趋于稳定,钢管混凝土支架没有明显变形,与相邻的锚杆锚索支护段比较,钢管混凝土支架的支护效果明显优于锚杆锚索支护,钢管混凝土支架支护能力强大,能够有效控制软岩巷道变形。

5 结论

- 1) 北皂煤矿海域二采区回风巷围岩以含油泥岩为主,抗压强度平均 8.6 MPa,膨胀率 12.9%~14.9%、黏土矿物含量为 57.6%~59.1%、其中蒙脱石含量为 66%~87%。属于典型的膨胀性软岩。
- 2) 围岩变形主要有初始变形速率大,围岩持续变形时间长,围岩浅部破坏剧烈、深部松动破坏范围广,垂直变形为主,对微弱的矿山压力变化反应极为敏感等特征。
- 3) 钢管混凝土支架支护方案采用圆形巷道支护断面,钢管选用 $\phi 194 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 的无缝钢管,并灌注标号 C40 混凝土,辅助金属网支护和混凝土喷碇。
- 4) 通过对支架进行变形观测,支架的变形量为 20~80 mm,最大变形也只达到 80 mm,支架没有明显变形,钢管混凝土支架支护方案维持了二采区回风巷围岩的稳定。

参考文献 (References):

[1] 李为腾,李术才,玄超,等.高应力软岩巷道支护失效机制及控制研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(9):1836-1848.
LI Weiteng, LI Shucui, XUAN Chao, et al. Mechanism and control of failure of rock roadway support in highly stressed soft rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (9): 1836-1848.

[2] 陆银龙,王连国,张蓓,等.软岩巷道锚注支护时机优化研究[J].岩土力学,2012,33(5):1395-1401.
LU Yinlong, WANG Lianguo, ZHANG Bei, et al. Optimization of bolt-grouting time for soft rock roadway [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1395-1401.

[3] 曾凡宇.软岩及动压巷道失稳机理与支护方法[J].煤炭学报,

- 2007, 32(6):573-576.
- ZENG Fanyu. The loss of stability and supporting method for the soft and dynamic tunnels[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(6):573-576.
- [4] 李爱军.深部厚层软弱复合顶板巷道支护技术研究[J].煤炭科学技术, 2015, 43(8):29-33.
- LI Aijun. Study on support technology of mine roadway with thick soft and weak composite roof in deep underground mine[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(8):29-33.
- [5] 冯月新,尹 乾,许国安.大断面软岩硐室稳定性控制技术[J].煤炭科学技术, 2016, 44(1):90-94.
- FENG Yuexin, YIN Qian, XU Guoan. Stability control technology of soft rock chamber with large cross section[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1):90-94.
- [6] 孙玉福.高强度锚索支护技术及在潞安矿区的应用[J].采矿与安全工程学报, 2010, 27(4):595-599.
- SUN Yufu. Application of high strength cable bolting technology in Lu'an coal mining area[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(4):595-599.
- [7] 王其洲,谢文兵,荆升国,等.动压影响巷道U型钢支架-锚索协同支护机理及其承载规律[J].煤炭学报, 2015, 40(2):301-307.
- WANG Qizhou, XIE Wenbing, JIN Shengguo, *et al.* Research on U-shape steel frame and anchor cable collaborative support mechanism and loading law of roadway under dynamical pressure impact[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2):301-307.
- [8] 王金华.全煤巷道锚杆锚索联合支护机理与效果分析[J].煤炭学报, 2012, 27(1):1-7.
- WANG Jinhua. Analysis on mechanism and effect of rock bolts and cables in gateroad with coal seam as roof[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 27(1):1-7.
- [9] 高延法,王 波,王 军,等.深井软岩巷道钢管混凝土支架支护结构性能试验及应用[J].岩石力学与工程学报, 2010, 29(S1):2604-2609.
- GAO Yanfa, WANG Bo, WANG Jun, *et al.* Test on structural property and application of concrete-filled steel tube support of deep mine and soft rock roadway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1):2604-2609.
- [10] 王 波.软岩巷道变形机理分析与钢管混凝土支架支护技术研究[D].北京:中国矿业大学(北京), 2009.
- [11] 王 军.钢管混凝土圆弧拱的抗弯力学性能实验研究与工程应用[D].北京:中国矿业大学(北京), 2014.
- [12] 李学彬,杨仁树,高延法,等.大断面软岩斜井高强度钢管混凝土支架支护技术[J].煤炭学报, 2013, 38(10):1742-1748.
- LI Xuebin, YANG Renshu, GAO Yanfa, *et al.* High-strength steel tubular confined concrete supports support technology for large-section soft rock inclined shaft[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(10):1742-1748.
- [13] 李学彬,高延法,杨仁树,等.巷道支护钢管混凝土支架力学性能测试与分析[J].采矿与安全工程学报, 2013, 30(6):817-821.
- LI Xuebin, GAO Yanfa, YANG Renshu, *et al.* Mechanical performance testing and analysis of steel tuber confined concrete supports in roadway supporting[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(6):817-821.
- [14] 李学彬,高延法,黄万朋,等.动压软岩巷道钢管混凝土支架支护围岩稳定性分析[J].科技导报, 2012, 30(16):42-47.
- LI Xuebin, GAO Yanfa, HUANG Wanpeng, *et al.* Analysis on surrounding rock stability of soft rock roadway supported by steel tube confined concrete supports during mine dynamic pressure[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(16):42-47.
- [15] 高延法,冯绍伟,刘珂铭,等.极软岩返修巷道钢管混凝土支架支护方案研究[J].中国煤炭, 2014, 40(11):36-39.
- GAO Yanfa, FENG Shaowei, LIU Keming, *et al.* Research on concrete-filled steel tube support scheme in repairing roadway with extremely-soft rock[J]. China Coal, 2014, 40(11):36-39.