

钢管混凝土支架在千米深井动压巷道中的应用

高延法 刘珂铭 何晓升 谢 浩 高琨鹏 陈冰慧 张凤银
(中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院 北京 100083)

摘要:为解决华丰矿煤矿-1 100 m水平大巷支护过程中出现的围岩变形量大、变形持续时间长的问题,采用现场地质调查、理论计算和现场监测相结合的方法,分析了围岩变形特征和巷道失稳破坏的原因,在此基础上,依据深井巷道承压环强化支护理论,提出了基于钢管混凝土支架的高强度复合支护形式:支架断面设计为弧墙半圆拱形,主体钢管选用 $\phi 194\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 无缝钢管,充填C40钢纤维混凝土,辅助锚网喷支护和围岩加固注浆。研究结果表明:该支护体系能够给围岩提供0.93 MPa以上的支护反力,可有效抑制围岩向巷道空间内移动,支护稳定后,巷道围岩最终变形量小于150 mm,满足巷道变形要求;围岩结构的非对称性会导致围岩产生非对称变形,应结合支架承载力监测数据加强对变形关键部位的控制。

关键词:钢管混凝土支架;深井巷道;动压巷道;承压环理论

中图分类号:TD353 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2015)08-0007-06

Steel tube concrete support applied to dynamic pressure roadway inkilometers deep mine

Gao Yanfa ,Liu Keming ,He Xiaosheng ,Xie Hao ,Gao Kumpeng ,Chen Binghui ,Zhang Fengyin
(School of Mechanics and Civil Engineering ,China University of Mining and Technology (Beijing) ,Beijing 100083 ,China)

Abstract: In order to solve the large surrounding rock deformation value and long sustained deformation time problems occurred in a support process of -1 100 meters level roadway in Huafeng Mine, a site geological survey, theoretical calculation and site monitoring and measuring combined method was applied to analyze the surrounding rock deformation features and roadway stability lost and failure causes. Based on the circumstances, according to the pressure bearing ring strengthened support theory, the paper provided a high strength composite support method based on the steel tube concrete support. The cross section of the support designed was a semi arch support in an arc form wall. The main frame steel tube was selected with $\phi 194\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ seamless steel tube and was filled with C40 steel fiber concrete. The bolt-mesh-anchor supporting and surrounding rock reinforced grouting were applied as the auxiliary support. The study results showed that the support system could provide a support counterforce over 0.93 MPa to the surrounding rock and could effectively restrain the movement of the surrounding rock forward to the space of the roadway. After the support stabilized, the final deformation value of the surrounding rock along the roadway was less than 150 mm and could meet the deformation requirement of the roadway. An asymmetry of the surrounding rock structure could cause an asymmetric deformation of the surrounding rock. In combination with the loading force monitoring and measured data of the support, a control of the deformation key part should be enhanced.

Key words: steel tube concrete support; roadway of deep mine; dynamic pressure roadway; pressure-bearing ring theory

0 引言

我国中东部地区的大多数煤矿目前已进入深部

开采阶段。煤矿进入深部开采以后,将面临与浅部开采完全不同的工程岩体力学问题。深部高地应力、高渗透压、高地温和强烈的开采扰动影响,使得

收稿日期:2015-03-23;责任编辑:杨正凯 DOI:10.13199/j.cnki.est.2015.08.002

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51474218 51134025)

作者简介:高延法(1962—),男,山东滕州人,教授,博士生导师,博士。Tel:010-62329786 E-mail:gyskd@263.net

引用格式:高延法 刘珂铭 何晓升 等.钢管混凝土支架在千米深井动压巷道中的应用[J].煤炭科学技术 2015 A3(8):7-12.

Gao Yanfa ,Liu Keming ,He Xiaosheng *et al*.Steel tube concrete support applied to dynamic pressure roadway inkilometers deep mine [J].Coal Science and Technology 2015 A3(8):7-12.

工程岩体由浅部的线性岩石力学行为向深部非线性岩石力学行为转变。同时,在深部岩体所处的地质条件和应力场的复杂性,使得岩石由低围压下的脆性向高围压下的延性转化,导致巷道矿压显现剧烈,巷道围岩表现出显著的塑性大变形和持续流变特性^[1-3],巷道围岩的控制难度较浅部地层大幅增加。目前,主要采用高强度、高预紧力、高延伸率的锚杆支护系统联合其他支护方式对深部巷道的稳定性加以控制,并取得了良好的支护效果^[4-5]。但是,随着开采深度的进一步增加,巷道围岩破碎区的范围也进一步加大,由于锚杆长度的限制,使得巷道周边由锚杆及锚固岩体形成的锚固体的范围受到限制,锚固体外的岩体将对锚固体施加更大的作用力,使锚固体变形、失稳、破坏,严重影响巷道的正常使用。因此,研发更合理、支护能力更大的巷道支护技术就显得尤为重要。

钢管混凝土支架是近年来发明的一种高强度支架。在单位长度相同用钢量的条件下,钢管混凝土支架的极限承载力可达U型钢支架的约3倍^[6-8]。自2008年开始进行工程应用至今,钢管混凝土支架已经在中国12个省20多个煤矿中的深井巷道、软岩巷道、动压巷道、特殊硐室和巷道交岔点等难支护巷道中得到了成功应用^[9-15]。笔者以山东新汶集团华丰矿-1100m水平大巷为工程背景,详细介绍了以钢管混凝土支架为主体的复合支护技术在千米深井动压巷道中的应用,为其他地质条件类似的千米深井巷道围岩的稳定控制提供借鉴。

1 工程背景

华丰矿-1100m水平为矿井第5生产水平,共有四、六两层可采煤层,煤层走向85°~120°,煤层间距39m。-1100m水平大巷埋深1230~1250m,布置在六煤底板岩石中,与六煤水平距离约50m,大巷将受到四、六煤层工作面的采动影响。巷道穿层掘进,揭露的主要标志层依次为7(2)煤层、7(3)煤层、8(1)煤层和8(2)煤层,煤岩层综合柱状如图1所示。该区煤岩层赋存稳定,结构比较简单,巷道所穿过岩层大部分为粉砂岩、中砂岩,地层倾角31°~33°,岩石单轴抗压强度30~40MPa。

该区垂直地应力约32MPa,水平构造应力达35~47MPa。

岩石名称	柱状	厚度m	岩性描述
中砂岩		4.2	钙质胶结,厚层状,普氏系数5.0
煤7(2)	“”“”	0.3	以暗煤为主
细砂岩	“”“”	4.1	层理发育,钙质胶结,普氏系数5.5
粉砂岩	“”“”	8.0	层理发育,钙泥质胶结
泥灰岩	“”“”	0.9	含泥质白色颗粒
煤7(3)	“”“”	0.3	半暗煤为主
粉砂岩	“”“”	6.0	层理发育,钙泥质胶结
煤8(1)	“”“”	0.3	半暗煤为主
中砂岩	“”“”	7.5	厚层状,泥质胶结,遇水易风化松软
煤8(2)	“”“”	0.2	半暗煤为主
粉砂岩	“”“”	6.0	层理发育,钙泥质胶结
二灰	“”“”	1.5	厚层状,含泥质,质硬,贝壳状断口
煤9	“”“”	0.3	半暗煤为主
粉砂岩	“”“”	2.2	层理发育,钙泥质胶结
中砂岩	“”“”	4.0	厚层状,层理发育
泥灰岩	“”“”	0.5	厚层状,泥质,质硬,贝壳状断口

图1 煤岩层综合柱状

Fig. 1 Synthetic histogram of coal and rock seams

2 巷道原支护方案与破坏原因分析

2.1 巷道原支护方案

-1100m水平大巷原断面为直墙半圆拱形,巷道净宽5000mm、净高4000mm,掘进时采用光面爆破,全断面一次成巷,使用“锚网喷+U29型钢支架”支护。

1)临时支护。喷射50mm厚、标号C20混凝土喷层。

2)一次支护。复喷总厚度达到120mm,锚杆采用φ22mm×2200mm全螺纹钢水泥药卷锚杆,间排距1000mm×1000mm,金属网由φ5mm钢筋网焊接而成,网孔规格100mm×100mm。

3)二次支护。依第1次支护时的锚杆标志,按1000mm×1000mm间排距打锚杆并与第1次支护锚杆呈五花布置,然后喷浆盖网。压力较大地段采用U29型钢支架加强支护。

变形监测表明:-1100m水平大巷支护90天后仍不能稳定,巷道大部分变形超限,两帮移近量达500~1000mm,顶板下沉量超过1000mm,底鼓达400~600mm,平均每个月挖底1次。后使用U36型钢支架多次支护返修均不能实现巷道稳定。

2.2 巷道变形破坏原因分析

大巷变形破坏的原因可归结为以下4个方面:

1)巷道埋深超过1200m,巷道围岩所受荷载水平超过围岩的软化临界荷载,围岩变形表现为软岩变形特性。

2)巷道穿层,地层倾角大,巷道围岩结构呈

现非对称性。同时,岩层呈层理分布,节理裂隙较发育,形成了天然的力学弱面。在深部高应力作用下,这些弱面会首先产生滑移错动并进一步发展,巷道围岩变形呈现非对称性^[16-17],主要表现为沿煤层倾斜方向的上帮围岩的变形破坏比下帮严重,靠近上帮的底板底鼓严重,下帮肩部顶板下沉量较大,局部的大变形最终导致巷道整体变形失稳。

3) 水平构造应力与动压影响。深部开采使得水平构造应力与动压影响越来越强烈,加剧了巷道围岩的变形破坏。

4) 支护设计不合理、强度不足。巷道埋深较大,仅使用锚网喷这样的常规支护措施远不能满足要求;U型钢支架为半封闭式,没有反底拱段,承载能力较低,导致巷道底鼓严重,巷道帮、顶的变形和压力也成倍增长,使整个支护结构破坏失稳。

3 钢管混凝土支架复合支护方案设计

3.1 支护方案设计

依据深井巷道承压环强化支护理论^[7],深井巷道支护中围岩荷载大于围岩强度,围岩无法自稳,必须强化巷道周边一定宽度范围内的岩体,使其具有更高的承载能力,从而形成一个承压环,以控制承压环外部围岩的稳定性,达到巷道稳定的目的。要形成承压环,需采用如下几项强化支护技术:①锚网喷支护;②钢管混凝土支架支护;③围岩进行注浆加固。将支护方案设计如下:

1) -1 100 m 水平大巷扩修断面:宽和高分别为5 888、5 344 mm,扩修后做一次锚网喷支护。

2) 设置预留变形空间:顶部300 mm、帮部200 mm,使用钢管混凝土支架做二次支护,支架间距800 mm,钢管混凝土支架支护后巷道宽和高分别为5 000、4 000 mm。

3) 支架承载力达支架设计极限承载力80%时,进行围岩注浆加固。

其中,钢管混凝土支架属于主要支护手段,锚网喷和围岩注浆加固属于辅助支护手段。

3.2 钢管混凝土支架设计

1) 支架结构与参数选型。依据工程类比法,支架断面设计为弧墙半圆拱形;主体钢管选用ø194 mm×8 mm无缝钢管;接头套管规格为ø219 mm×8 mm。支架主体结构包括顶拱段,两帮

段和反底拱段,支架之间采用钢管混凝土连杆连接。

弧墙半圆拱形支架主体结构参数见表1。

表1 弧墙半圆拱形支架主体结构参数

Table 1 Parameters of arc wall semicircle arch support

名称	钢管型号/ (mm×mm)	单位质量/ (kg·m ⁻¹)	每段长度/m
顶拱段	ø194×8	36.7	4.232
两帮段	ø194×8	36.7	4.446
反底拱	ø194×8	36.7	4.177
接头套管	ø219×8	41.6	0.600

2) 混凝土配比。钢管内混凝土强度等级为C40,坍落度≥160 mm,其配比见表2。

表2 混凝土配比

Table 2 Mixing ratio of concrete

混凝土配料	配料类型	用量/(kg·m ⁻³)
水泥	42.5级普通硅酸盐水泥	450.00
砂子	中粗河砂	1 137.00
石子	粒径5~25 mm连续级配碎石	697.00
减水剂	高效萘系减水剂	5.85
膨胀剂	高效CSA膨胀剂	36.00
钢纤维	长30~50 mm,直径0.5~1.2 mm	18.00
水	未受污染的地下水	160.00

3) 钢管混凝土支架支护反力计算。
①钢管混凝土短柱承载能力计算,钢材的屈服极限 $f_s=215\text{ MPa}$,钢管的横截面积 $A_s=4 675\text{ mm}^2$;加入钢纤维的C40核心混凝土抗压强度设计值 $f_c=25\text{ MPa}$,核心混凝土横截面积 $A_c=24 885\text{ mm}^2$ 。钢管混凝土短柱承载力设计值 $N_0=A_cf_c(1+\sqrt{\theta}+1.1\theta)$ ^[18],其中,套箍指标 $\theta=A_sf_s/(A_cf_c)$,可得 $N_0=2 518.4\text{ kN}$ 。
②支架承载能力计算。钢管混凝土支架的极限承载力 $N_u=\varphi N_0$ ^[9],其中: N_u 为钢管混凝土支架极限承载力; φ 为折减系数,取0.8。计算得支架极限承载力为2 014.73 kN。
③支架支护反力计算。支架承载力计算模型如图2所示。支架支护反力计算式为 $S\int_{0^\circ}^{90^\circ}\sigma_0R\sin\theta d\theta=N_u$ ^[11],其中:S为支架间距,0.8 m;R为巷道半径2.7 m; σ_0 为支架支护反力。计算得 $\sigma_0=0.93\text{ MPa}$ 。

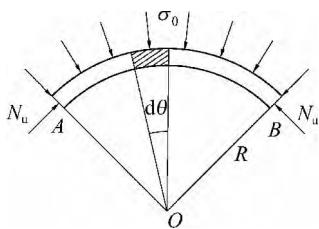


图2 钢混支架承载力计算模型

Fig. 2 Bearing capacity calculating model of CFST support

3.3 锚网喷支护设计

锚网喷+钢管混凝土支架支护断面如图3所示。

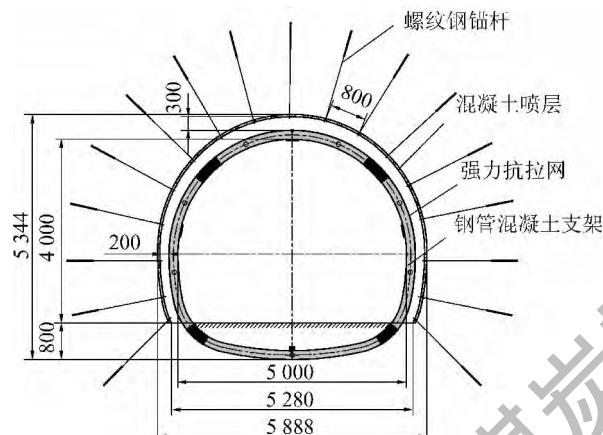


图3 锚喷网+钢管混凝土支架支护断面

Fig. 3 Section of bolting-wire mesh-shotcreting and CFST support

1) 巷道扩修后立即喷射 50 mm 厚 C20 混凝土喷层以封闭围岩, 防止岩块风化和掉落, 隔绝围岩与空气间水分交换。

2) 锚杆采用 $\varnothing 22 \text{ mm} \times 2400 \text{ mm}$ 高强螺纹钢锚杆, 间排距 $800 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$; 选用 $\varnothing 5 \text{ mm}$ 金属网, 网孔规格 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。修复过程中可依据巷道不同地段的围岩受力特征增加或减少锚杆使用量, 关键部位如底角应该适当增加锚杆数量与长度。

3) 复喷 150 mm 厚混凝土。该措施可以暂时滞后, 先架设钢管混凝土支架, 在支架后铺设强力抗拉网, 强力抗拉网和锚网间设置木背板做柔性变形层, 当柔性变形层达到变形极限后复喷混凝土。

3.4 围岩注浆加固支护设计

1) 围岩注浆对巷道变形的控制机理。深井巷道围岩在高应力作用下, 其内部裂隙发育程度会随着变形量的增大而增大, 裂隙发育至一定程度后会造成岩体内部结构发生破坏而破碎失稳。混凝土喷层+挂金属网只能固结巷道表面围岩; 锚杆虽然能

深入围岩内部, 但其对围岩发育裂隙的控制范围又是有限的。因此, 为保证破碎围岩的整体性, 提高围岩强度和承载能力, 有必要对围岩内部发育裂隙进行注浆加固处理。围岩注浆对巷道变形的控制机理主要体现在: ① 注射浆体对围岩中的裂隙面起到充填和加固作用, 改善了破裂岩体的物理力学性质, 增加了岩体的静、动弹性模量, 减弱了岩体的各向异性, 使得围岩的完整性得以保证^[19-20], 进而提高了围岩整体承载能力, 为巷道进一步稳定提供更好的围岩条件。② 通过围岩注浆, 使围岩重新胶结, 提高岩体的黏聚力 c 和内摩擦角 φ, 从而提高了破碎围岩体的自身强度与整体强度, 强化了承压环内岩体的承载能力。

2) 围岩高效注浆技术。① 注浆时机。根据硅酸盐水泥配制的普通混凝土强度发展规律, 当钢管内灌注混凝土 7 d 后, 支架承载力可达到设计极限承载力的 80%, 此时围岩最大适量变形已基本结束, 支护体的承载作用能够充分发挥, 是对围岩进行注浆加固的理想时机。② 注浆材料。选用 42.5 级普通硅酸盐水泥浆液注浆, 水灰比 0.6~0.7; 选用 $\varnothing 22 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 普通钢管中间钻麻花状排列 $\varnothing 6 \text{ mm}$ 小孔做注浆管, 注浆管长 3 000 mm, 间排距 1 600 mm \times 2 400 mm。

3) 注浆控制参数。注浆压力为 2.0~2.5 MPa, 注浆时间控制在 120 min, 使用全断面多孔同时注浆技术, 一次完成 1 个或多个断面注浆, 实现快速高效注浆效果。注浆量为每断面不少 1 t 水泥。围岩注浆加固设计如图 4 所示。

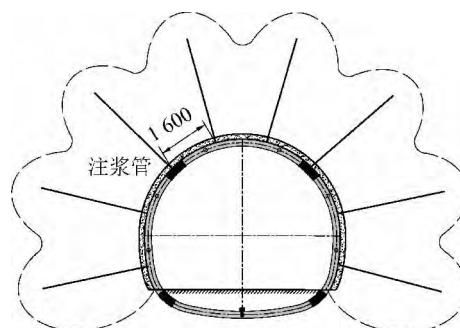


图4 围岩注浆加固设计

Fig. 4 Design of surrounding rock grouting

4 工程应用

4.1 巷道支护施工流程

巷道支护施工流程: ① 巷道开帮挑顶; ② 初喷 50 mm 厚混凝土喷层; ③ 锚网支护; ④ 安装空钢管支

架;⑤支架后铺设强力抗拉网;⑥钢管支架灌注混凝土;⑦支架承载力达到设计极限承载力的80%后,围岩注浆加固。

4.2 支架承载力监测

全断面均匀布置9个压力盒对支架不同位置的受力情况进行监测(反底拱段埋入地坪以下不予测量),压力盒间距约1.5 m(图5)。支架承载力从围岩注浆后开始监测,监测曲线如图6所示,支架受力具有明显的方向性,1号、2号和6号测点受力一直较大,围岩压力相对集中,分别对应支架左侧底脚、帮部和右侧肩部;注浆30天后,支架载荷已基本趋于稳定,监测表明支架不同位置受力均未超过极限值,支架整体处于稳定状态。

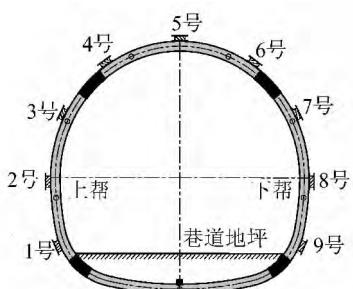


图5 压力盒布置

Fig. 5 Layout of pressure cell

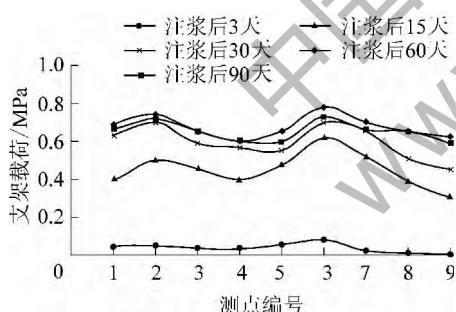


图6 支架载荷监测曲线

Fig. 6 Monitoring curves of support load

4.3 巷道围岩变形监测

采用十字布线法,对巷道顶底板和两帮围岩收敛变形进行监测。每隔5架支架布设1组测点,共布设5组。支护后30天内每3天观测1次,后期每15天观测1次,持续监测150天。监测表明:支护20~30天后,巷道围岩变形已基本趋于稳定;巷道支护3年来,围岩最大累计变形量80~150 mm,能够满足巷道变形要求,并维持巷道长期稳定;支架整体结构完好,没有出现明显受损。

5 结论

1) 提出了以钢管混凝土支架为主体的高强度复合支护形式:选用弧墙半圆拱形封闭式支架,支架主体钢管选用φ194 mm×8 mm无缝钢管,灌注C40钢纤维混凝土,辅助锚网喷支护和围岩加固注浆。

2) 巷道围岩的非对称结构导致支架受力呈现出方向性和差异性,沿煤层倾斜方向,支架上帮、底脚部和下肩部受力较大,是围岩变形的关键部位,应加强支架受力监测和变形控制。

3) 工程应用表明将基于钢管混凝土支架的复合支护形式用于深井软岩巷道支护是有效可行的,研究结果为类似条件巷道的支护设计提供了思路,有一定借鉴作用。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 何满潮.深部的概念体系及工程评价指标[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2854~2858.
He Manchao. Conception system and evaluation indexes for deep engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(16):2854~2858.
- [3] 常聚才,谢广祥.深部巷道围岩力学特征及其稳定性控制[J].煤炭学报,2009,34(7):881~886.
Chang Jucai,Xie Guangxiang. Mechanical characteristics and stability control of rock roadway surrounding rock in deep mine [J]. Journal of China Coal Society,2009,34(7):881~886.
- [4] 康红普.深部煤矿应力分布特征及巷道围岩控制技术[J].煤炭科学技术,2013,41(9):12~17.
Kang Hongpu. Stress distribution characteristics and strata control technology for roadways in deep coal mines [J]. Coal Science and Technology,2013,41(9):12~17.
- [5] 张辉,康红普,徐佑林.深井巷道底板预应力锚索快速加固技术研究[J].煤炭科学技术,2013,41(4):16~19,23.
Zhang Hui,Kang Hongpu,Xu Youlin. Study on rapid reinforced technology with pre-stressed anchor for floor of mine roadway in deep mine [J]. Coal Science and Technology,2013,41(4):16~19,23.
- [6] 高延法,王波,王军,等.深井软岩巷道钢管混凝土支护结构性能实验及应用[J].岩石力学与工程学报,2010,29(S0):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(S0) : 2604–2609.
- [7] 刘国磊.钢管混凝土支架性能与软岩巷道承压环强化支护理论研究[D].北京:中国矿业大学(北京) 2013: 65–89.
- [8] 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: 117–132.
- [9] 李学彬,高延法,杨仁树等.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, Gao Yanfa, Yang Renshu 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.
- [10] 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 and Technology Review 2012, 30(16) : 42–47.
- [11] 高延法,王军,黄万朋等.直墙半圆拱形钢管混凝土支架力学性能实验及应用[J].隧道建设 2014, 34(1) : 6–12.
Gao Yanfa, Wang Jun, Huang Wanpeng et al. Experiment on mechanical property of straight-wall semicircle-arch concrete-filled steel tube support and its application [J]. Tunnel Construction , 2014, 34(1) : 6–12.
- [12] 曲广龙.钢管混凝土支架结构抗弯性能研究及应用[D].北京:中国矿业大学(北京) 2013: 109–124.
- [13] 王正泽.深井破碎围岩巷道支架抗弯性能实验与支护方案研究[D].北京:中国矿业大学(北京) 2013: 109–124.
- [14] 张少峰.鹤壁三矿钢管混凝土支架技术应用[D].北京:中国矿业大学(北京) 2012: 32–54.
- [15] 张皓宸.平朔井工三矿东翼大巷冲刷带段钢管混凝土支架支护技术研究[D].北京:中国矿业大学(北京) 2014: 31–53.
- [16] 黄万朋.深井巷道非对称变形机理与围岩流变及扰动变形控制研究[D].北京:中国矿业大学(北京) 2012: 17–20.
- [17] 桂祥友,张辉,徐佑林.超千米深井巷道围岩变形破坏机理分析及控制[J].煤炭科学技术 2011, 39(S0) : 1–3, 7.
Guixiangyou Zhang Hui Xu Youlin. Analysis and control of surrounding rock deformation and failure mechanism in over kilometers deep-well roadway [J]. Coal Science and Technology 2011 , 39(S0) : 1–3, 7.
- [18] 蔡绍怀.现代钢管混凝土结构[M].北京:人民交通出版社 , 2007: 43–54.
- [19] 康红普,冯志强.煤矿巷道围岩注浆加固技术的现状与发展趋势[J].煤矿开采 2013, 18(3) : 1–7, 10.
Kang Hongpu, Feng Zhiqiang. Status and development tendency of roadway grouting reinforcement technology in coal mine [J]. Coal Mining Technology 2013, 18(3) : 1–7, 10.
- [20] 张农,王保贵,郑西贵等.千米深井软岩巷道二次支护中的注浆加固效果分析[J].煤炭科学技术 2010, 38(5) : 34–38, 46.
Zhang Nong, Wang Baogui, Zheng Xigui et al. Analysis on grouting reinforcement results in secondary support of soft rock roadway in kilometer deep mine [J]. Coal Science and Technology , 2010, 38(5) : 34–38, 46.

(上接119页)

- Liu Yulong. Analysis of mining vehicle braking system [J]. Coal Mine Machinery 2012, 33(8) : 106–107.
- [6] 赵瑞萍.全液压制动系统在轻型防爆胶轮车上的应用[J].液压气动与密封 2012, 33(8) : 44–46.
Zhao Ruiying. The application of hydraulic braking system for light proof tire vehicle [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals , 2012 , 33 (8) : 44–46.
- [7] 魏臻,鲍红杰,陆阳等.矿井胶轮车运输监控系统信号设计与调度规则[J].煤炭学报 2010, 35(3) : 509–514.
Wei Zhen, Shen Hongjie, Lu Yang ,et al. Design and scheduling rules on mine rubber tyred locomotive transport monitor system signal [J]. Journal of China Coal Society , 2010 ,35 (3) : 509– 514.
- [8] 王新.湿式制动器在防爆胶轮车中的应用分析[J].煤矿机械 2008, 29(12) : 181–183.
Wang Xin. Analysis and application of wet brake in explosion-proof rubber tire vehicle [J]. Coal Mine Machinery , 2008 ,29 (12) : 181–183.
- [9] 杨健康.煤矿用防爆胶轮车制动系统冲击问题分析与研究[J].机械传动 2012, 36(4) : 90–93.
Yang Jiankang. The analysis and research on brake system impact problem for the explosion-proof rubber tire vehicle in coal mine [J]. Journal of Mechanical Transmission 2012, 36(4) : 90–93.
- [10] 任志勇.轻型防爆胶轮车制动器的设计与计算[J].工程机械 , 2011 ,42(2) : 45–47.
Ren Zhiyong. Brake design and calculation of light explosion-proof rubber-tyred vehicle [J]. Engineering Machinery ,2011 ,42(2) : 45–47.
- [11] 刘德昌,刘英林.防爆胶轮车工作制动器活塞的参数化研究 [J].机械设计与制造 2013(11) : 120–122.
Liu Dechang, Liu Yinglin. Parametric research of brake piston for rubber tyred vehicle [J]. Mechanical Design and Manufacture , 2013(11) : 120–122.
- [12] 张媛媛.矿用胶轮车前工作制动器动壳参数化设计[D].太原:太原理工大学 2013.
Zhang Yuanyu. Parametric design for move shell of mining rubber-tyred vehicle front brake [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Teh-nology 2013.
- [13] 王阳君.矿用胶轮车前轮工作制动器参数化设计的参数研究 [D].太原:太原理工大学 2013.
Wang Yangjun. Parameters research of rubber tire mining work front wheel brake parametric design [D]. Taiyuan: Taiyuan Univer-sity of Technology 2013.
- [14] 任志勇.轻型防爆胶轮车制动器的设计与计算[J].工程机械 , 2011(2) : 45–47.
Ren Zhiyong. Design and calculation of light flame proof rubber tyre brake [J]. Construction Machinery 2011 (2) : 45–47.