

文章编号: 1673-3363-(2015)02-0285-06

# 杨庄矿软岩巷道锚杆与钢管混凝土支架 联合支护技术研究

李学彬<sup>1</sup>, 杨仁树<sup>2</sup>, 高延法<sup>2</sup>, 薛华俊<sup>2</sup>

(1. 北京中煤矿山工程有限公司, 北京 100013; 2. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

**摘要** 杨庄矿Ⅲ水平南大巷软岩巷道围岩强度低, 黏土矿物含量高, 吸水泥化现象严重, 巷道围岩变形量大, 锚杆失效较为普遍。结合南大巷软岩巷道围岩变形特点, 设计了锚杆与钢管混凝土支架联合支护方案。巷道断面采用马蹄形, 锚杆为 $\Phi 20\text{ mm}\times L1800\text{ mm}$ 的左旋螺纹钢锚杆, 钢管混凝土支架主体钢管选用 $\Phi 194\text{ mm}\times L8\text{ mm}$ 无缝钢管, 灌注C40核心混凝土。结合理论计算可知, 设计支护方案的极限承载能力大于南大巷围岩荷载, 能够维持巷道围岩的稳定。通过数值分析和现场监测分析可知, 巷道围岩变形较小, 锚杆和钢管混凝土支架支护作用力均小于其极限荷载, 支护结构稳定, 所以锚杆与钢管混凝土支架联合支护方案满足了Ⅲ水平南大巷软岩巷道支护的要求。

**关键词** 软岩巷道; 钢管混凝土支架; 理论分析; 数值模拟

中图分类号 TD 32 文献标志码 A DOI 10.13545/j.cnki.jmse.2015.02.018

## Study on combined support technology of bolt-mesh-shotcrete and concrete filled steel tubular supports for soft rock roadway in Yangzhuang mine

LI Xuebin<sup>1</sup>, YANG Renshu<sup>2</sup>, GAO Yanfa<sup>2</sup>, XUE Huajun<sup>2</sup>

(1. Beijing China Coal Mine Engineering Co. Ltd, Beijing 100013, China; 2. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract** The sounding rock of III-Level South Roadway was significantly affected by geological structure, lower roadway sounding rock strength, higher content of clay minerals, and serious argillization. Combined with deformation characteristics of South Roadway, the combined support of bolt and steel tubular confined concrete support (STCCS) has been designed as follows: roadway section is in horseshoe, with  $\Phi 20\text{ mm}\times L1800\text{ mm}$  L-steel bolt, STCCS constituted by  $\Phi 194\text{ mm}\times L8\text{ mm}$  seamless steel tube and C40 core concrete. Combined with theoretical calculation, the ultimate bearing capacity of the designed support programs is greater than the surrounding rock load of South Roadway, which can maintain the stability of roadway surrounding rock. By numerical analysis and on-site monitoring analysis, the final deformation of roadway sounding rock is small after roadway support scheme has been applied. The support force of bolt and STCCS was less than their limit load. Consequently, roadway support is stable and reliable. So the support programs reached the soft roadway support require-

收稿日期: 2013-07-26

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51134025)

作者简介: 李学彬(1981—), 男, 山东省潍坊市人, 博士, 从事巷道支护方面的研究。

E-mail: lixuebin152@163.com

Tel: 15210074163

ment of III-Level South Roadway.

**Key words** soft rock roadway; STCCS; theoretical analysis; numerical simulation

随着开采深度的增加,淮北矿区许多矿井都出现了用传统方法难以控制的软岩巷道支护难题<sup>[1-2]</sup>,而软岩巷道支护问题一直是当今世界地下工程中一项重要而复杂的技术问题,能否解决好复杂地质条件下软岩巷道的支护问题,关系到淮北矿区矿井纵深发展和安全生产<sup>[3-6]</sup>。淮北矿区软岩巷道的特点是:巷道埋深在 600~800 m,围岩以破碎软岩和膨胀型软岩为主,软岩巷道占矿井主体岩巷的 70%以上,受地质构造应力和回采动压影响明显,巷道围岩变形量大,锚杆和锚索断裂、混凝土喷层炸裂、围岩碎裂脱落及支架断卡缆、跪腿、尖顶、扭曲等变形破坏现象较普遍,软岩巷道返修率高<sup>[1,6-7]</sup>,严重影响煤矿安全高效生产。

随着高强度钢管混凝土支架支护技术逐步应用于软岩巷道中,联合锚杆支护、注浆支护等其他支护方式共同维持巷道围岩的稳定,为软岩巷道支护提供一种新的支护方式<sup>[8-10]</sup>。在钢管混凝土结构中,钢管的约束作用使混凝土处于三向受压状态,从而使核心混凝土具有更高的抗压强度,提高钢管混凝土构件的承载能力<sup>[11-12]</sup>。结合 III 水平南大巷试验段的工程地质条件和巷道围岩变形特点,拟采用锚网喷+钢管混凝土支架支护的复合支护方案,探索软岩巷道新的支护方法,同时为四水平巷道支护储备技术。

## 1 工程概况

### 1.1 南大巷试验段工程地质条件

III 水平南大巷试验段位于三 64 采区,巷道埋深为 517~526 m,区段地质构造形态为褶曲构造,小断层较为发育,岩层倾角为 4°~8°。该巷道顶板为条带状砂质泥岩,受构造影响,顶板较破碎,围岩强度低,硬度系数接近 1。

### 1.2 围岩矿物成分分析

围岩矿物成分分析结果表明:岩石中黏土矿物含量为 71.3%,石英含量 28.7%。黏土矿物中中高岭石含量为 86%,伊/蒙混层含量 12%,伊利石含量 2%,高岭石占矿物成分总量的 61.3%。经过 SEM 试验可知,巷道围岩试验结构疏松,层状结构主要为蒙脱石和高岭石,层间间隙为 1~10 μm,层间为圆柱状石英,结合水理性质测试可知,高岭石具有

很强的吸水性,极易吸水泥化,如表 1 所示。由于高岭石是非膨胀性黏土矿物,吸水后强度降低,不会产生较大的膨胀力,所以 III 水平南大巷试验段巷道为吸水软化性软岩巷道。

表 1 岩石水理性质  
Table 1 The rock water physics nature

编号	饱和吸水率/%	自然膨胀率/%	吸水软化性		岩石软化状态
			干燥	自然	
1	14.4	77.4			
2	18.3	119.5			
3	25.6	75.6			
均值	19.4	90.8			

## 2 原支护方案及巷道变形特点

### 2.1 南大巷原支护方案

III 水平南大巷原支护为锚网喷支护,锚杆为  $\Phi 20 \text{ mm} \times L1800 \text{ mm}$  的左旋螺纹钢锚杆,每根锚杆配 2 卷 Z2550 型树脂卷,挂网为菱形金属网,喷射混凝土厚度 100 mm,巷道原支护参数如图 1。

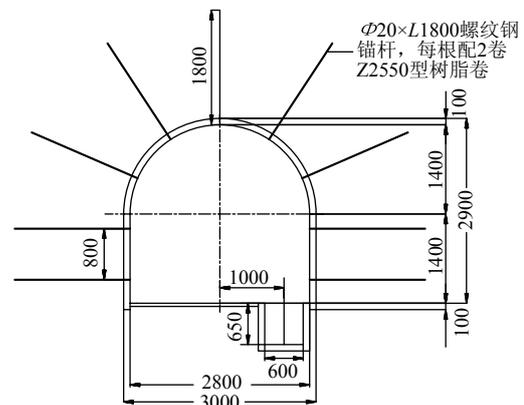


图 1 原南大巷支护参数 (mm)

Fig.1 Original supporting parameters of South Roadway

### 2.2 巷道变形破坏特点

该巷道初次掘进支护完成后,巷道顶板下沉严重,顶部大面积垮落,巷道底板破坏不明显。巷道两帮呈现出非对称性,巷道左帮围岩稳定,无明显变形,而巷道右帮变形量较大,锚杆失效较为普遍,喷层断裂脱皮明显,这是由于巷道排水沟设在巷道右侧导致的。经过 2 次锚网加固后,巷道变形仍严

重，断面不能满足使用要求。

### 3 钢管混凝土支架支护方案设计与验算

#### 3.1 巷道联合支护方案设计

根据软岩巷道支护理论和现场经验，设计锚杆和钢管混凝土支架联合支护方案，如图 2 所示。

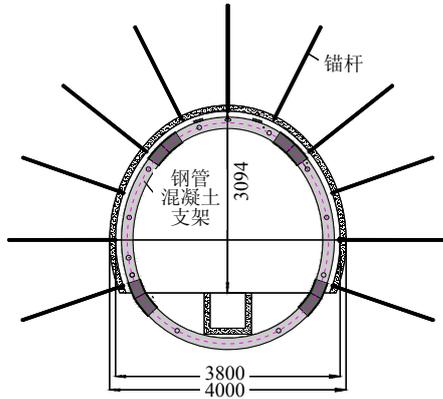


图 2 巷道支护参数图 (mm)

Fig.2 Roadway support parameters

1) 巷道断面采用马蹄形；

2) 锚网喷支护：混凝土喷层厚度 100 mm，锚杆采用  $\Phi 20 \text{ mm} \times L1800 \text{ mm}$  左旋螺纹钢，间排距为  $0.8 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ ；

3) 钢管混凝土支架支护：支架钢管型号为  $194 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ ，并采用混凝土输送泵灌注 C40 混凝土浆，支架间距 800 mm，采用顶杆连接。钢管混凝土支架具体结构和连接方式如图 3 所示。



图 3 钢管混凝土支架连接方式

Fig.3 Connection method of STCC supports

#### 3.2 巷道支护荷载计算

通过现场地应力测试可知，最大水平地应力  $p_0=16.2 \text{ MPa}$ ，方位角平均值为  $134.9^\circ$ 。结合岩样的实验室试验结果和井筒检查钻孔勘察报告，通过塑性芬纳(Fenner)公式<sup>[13]</sup>计算得出所需的支护反力为

$$\sigma_i = [p_0(1 - \sin\varphi) + c \cot\varphi] \left( \frac{r_a}{R_p} \right)^{\xi-1} - c \cot\varphi = 1.31 \text{ MPa} \quad (1)$$

式中： $r_a$  为巷道半径； $\xi = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}$ 。

#### 3.3 巷道支护反力验算

1) 锚杆支护反力计算

锚杆型号为  $\Phi 20 \text{ mm} \times L1800 \text{ mm}$ ，间排距  $D \times D=800 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$ ，锚杆屈服荷载  $F_s=120 \text{ kN}$ ，根据理论公式<sup>[14]</sup>计算得

$$\sigma_m = \frac{F_s}{D^2} = 0.19 \text{ MPa}$$

2) 钢管混凝土支护反力计算

① 短柱承载能力计算

钢管混凝土短柱采用  $194 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$  的 20# 无缝钢管和 C40 钢纤维核心混凝土，钢管和核心混凝土计算参数如表 2，3 所示。

表 2 钢管计算参数

Table 2 Calculative parameter for steel tube

型号	屈服强度 $f_s / \text{MPa}$	弹性模量 $E_s / \text{MPa}$	泊松比 $\mu_s$	外径 $D / \text{mm}$	壁厚 $\delta / \text{mm}$
20#	279	$210 \times 10^3$	0.33	194	8

表 3 核心混凝土计算参数

Table 3 Calculative parameter for core concrete

等级	混凝土试块核心抗压强度 $f_c / \text{MPa}$	弹性模量 $E_c / \text{GPa}$	泊松比 $\mu_c$
C40	25	33	0.167

通过分析得到钢管混凝土结构的轴压短柱极限承载力公式<sup>[11-12]</sup>：

$$N_0 = A_c f_c (1 + \sqrt{\theta} + 1.1\theta) \quad (2)$$

式中： $A_c$  为核心混凝土横截面积； $\theta$  为套箍指标，

$$\theta = A_s f_s / A_c f_c = 1.62。$$

可得  $N_0=2521.3 \text{ kN}$

② 支架承载能力计算

根据《钢管混凝土结构技术规程》(CECS 28—2012)，考虑钢管支架在压弯时，受长细比与偏心率影响，钢管混凝土支架的极限承载力为

$$N_u = \varphi N_0 \quad (3)$$

式中： $N_u$  为钢管混凝土支架的极限承载力； $N_0$  为钢管混凝土轴压短柱承载力； $\varphi$  为折减系数，考虑长细比和偏心率的影响， $\varphi=0.85$ 。

得  $N_u = 2017.0 \text{ kN}$

③ 支架支护反力计算

半圆形支架支护反力计算公式<sup>[15]</sup>为

$$S \int_0^{180^\circ} \sin\theta \cdot \sigma_{cs} \cdot R \cdot d\theta = 2N_u \quad (4)$$

式中： $S$  为支架排距，取  $0.5 \text{ m}$ ； $R$  为巷道计算半径，取  $2.947 \text{ m}$ ； $\sigma_{cs}$  为钢管混凝土支架的支护反力； $N_u$  为支架极限承载力。

计算得  $\sigma_{cs}=1.37 \text{ MPa}$

综上所述,设计巷道支护方案的极限承载能力为  $\sigma_i=\sigma_{cs}+\sigma_m=1.56 \text{ MPa}$ ,满足南大巷软岩巷道支护的要求。

### 4 数值模拟分析

#### 4.1 巷道模型建立

根据岩石力学原理,巷道开挖后其应力影响范围约为巷道宽度的 3~5 倍,结合巷道尺寸,采用 FLAC<sup>3D</sup> 建立南大巷软岩巷道模型,其几何尺寸为 50 m×20 m×45 m,计算模型共划分 175 600 单元和 185 283 节点。模型限制沿水平方向移动,模型底面限制各个方向移动。模型上部为自由面并施加垂直载荷  $p_0=11.9\times 10^6 \text{ Pa}$ 。巷道岩石均采用应变软化模型<sup>[15-16]</sup>,结合实验室试验测试和井筒检查钻孔勘

察报告可知,巷道围岩力学参数如表 4 所示。

表 4 岩层材料参数  
Table 4 Rock material parameters

岩性 巷道	弹性 模量/ GPa	泊松比	黏结 强度/ MPa	内摩擦 角/(°)	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	抗拉 强度/ MPa
砂岩	4.5	0.21	2.56	36	2 650	1.12
泥岩	1.9	0.30	1.33	28	2 450	1.02
砂质泥岩	2.6	0.26	1.54	30	2 520	1.08

#### 4.2 支护计算参数确定

##### 1) 锚网喷支护参数

巷道开挖后,立即施加锚网喷支护,锚杆规格为  $\Phi 20 \text{ mm}\times L1800 \text{ mm}$ ,间排距为  $800 \text{ mm}\times 800 \text{ mm}$ ,具体参数如表 5 所示;混凝土喷层厚度为 100 mm,混凝土喷层参数如表 6 所示。

表 5 锚杆支护参数

Table 5 Bolt support parameters

支护	弹性模量/ GPa	预应力 /kN	长度/ m	横截面积/ m <sup>2</sup>	药卷外圈 周长/m	药卷刚度/ MPa	单位长度药卷 黏聚力/(kN·m <sup>-1</sup> )	抗拉极限/ kN
锚杆	206	34.5	1.8	$3.14\times 10^{-4}$	0.549	17.50	2 000	120

表 6 混凝土喷层支护参数

Table 6 Parameters for concrete layer

喷层材料	厚度/ mm	弹性模量/ GPa	泊松比	法向刚度/ MPa	切向刚度/ MPa	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)
混凝土	100	30.5	0.2	34	30	1.35	30

##### 2) 钢管混凝土支护参数

根据钢管混凝土结构性能计算公式<sup>[13]</sup>得出支架的极限弯矩  $M_u=0.4r_cN_u=78.3 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ,支架的弹性模量  $E_{sc} = E_s A_s + E_c A_c / A_{sc} = 55.1 \text{ GPa}$ 。采用 Beam 单元模拟钢管混凝土支架,其力学参数如表 7 所示。

表 7 钢管混凝土支架力学参数

Table 7 Mechanical parameters of STCCS

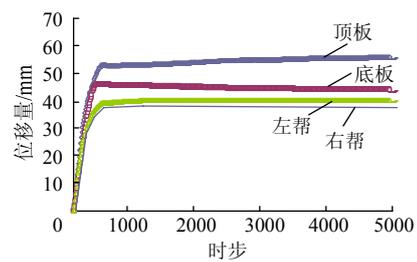
支架	弹性 模量/ GPa	泊松比	塑性 极限弯矩/ (kN·m)	横截 面积/ m <sup>2</sup>	极惯 性矩	Z 惯 性矩	Y 惯 性矩
Beam	55.1	0.25	78 300	0.029 6	$13.9\times 10^{-5}$	$6.95\times 10^{-5}$	$6.95\times 10^{-5}$

#### 4.3 南大巷支护稳定性分析

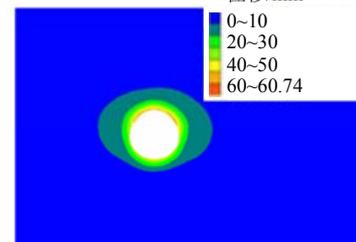
##### 1) 巷道围岩变形分析

巷道开挖后巷道壁临空,监测点围岩变形呈线性增加。施加锚喷支护后,围岩的变形速度略微降低,围岩变形量仍然持续增加;施加钢管混凝土支架支护后,围岩变形曲线明显降低,直至水平。顶底板移近量明显大于巷道两帮移近量,其中,顶板监测点的位移量最大,为 55.89 mm,而左帮位移量

明显大于右帮,为 40.18 mm。巷道围岩稳定后,巷道浅部围岩位移量较为均大于 20 mm,其中顶板位移量最大,为 60.74 mm,如图 4 所示。



(a) 巷道表面收敛监测曲线  
位移/mm



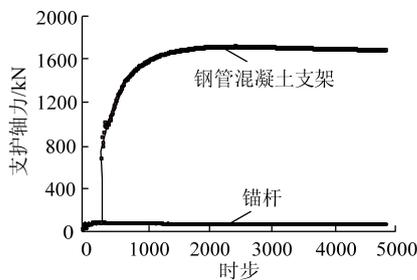
(b) 巷道围岩位移云图

图 4 巷道围岩位移图

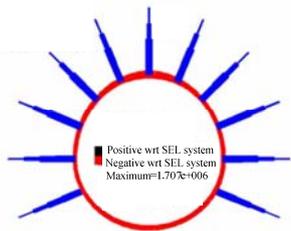
Fig.4 Roadway surrounding rock displacement

### 2) 支护结构受力分析

施加巷道锚杆支护后，巷道围岩离层变形使锚杆轴力迅速提高 84.4 kN，及时施加钢管混凝土支架支护，支护初期轴力迅速呈线性增加至 1 000 kN，之后呈抛物线缓慢增加至 1 680 kN，高强度的支护反力限制巷道围岩进一步变形，支护结构轴力也不再增加(图 5a)。围岩稳定后钢管混凝土支架轴力的极值出现支架顶底端，其中，支架顶部的轴力最大，为 1 707 N，而支架帮部轴力为 945.5 kN(图 5b)。锚杆支护轴力最大值出现左帮锚杆浅部，为 110.1 kN，最小值出现在顶板锚杆深部，为 25.8 kN。钢管混凝土支架轴力和锚杆轴力均小于其极限值，从而保证巷道支护的安全性和可靠性。



(a) 轴力监测曲线



(b) 轴力分布

图 5 巷道支护结构受力分析

Fig.5 Mechanics analysis on roadway support structural

## 5 现场监测分析

### 5.1 监测方案设计

对 30, 45 架支架处设置 2 个监测点，采用“十”字布点方法分别监测支架顶底段相对移近量和两帮段相对移近量，如图 6 所示。



图 6 巷道支架变形监测

Fig.6 Deformation monitoring on STCCS in roadway support

根据现场检数据，掌握巷道围岩和钢管混凝土支架的变形规律，对巷道支护状况进行跟踪反馈和预测，判断巷道支护效果和围岩稳定，以保证煤矿安全生产和软岩巷道稳定。

### 5.2 监测结果分析

对南大巷试验巷道中 2 个钢管混凝土支架监测点进行 3 个多月的变形监测，结果如图 7 所示。

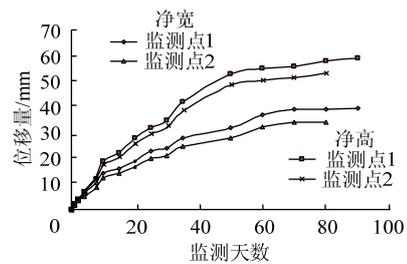


图 7 支架相对位移监测曲线

Fig.7 Relative displacement monitoring curve of STCCS in roadway support

钢管混凝土支架支护与围岩接触后，监测点初期变形速度较快，2 个监测点净宽与净高变化速度较为接近，此时钢管混凝土支架接头的空隙逐渐闭合，支架几乎起不到支护作用，巷道支护主要依靠锚杆支护；监测 10 d 后支架净高的变形程度明显增加，钢管混凝土支架与围岩充分接触，支架的支护作用开始显现出来，巷道表面变形速度明显降低，钢管混凝土支架与锚杆共同支护巷道围岩，支架相对变形速度趋于水平，巷道围岩稳定。巷道监测点 1, 2 净高的相对位移量较高，为 59, 54 mm，而巷道监测点 1, 2 净宽的相对位移量为 39.5, 34 mm，钢管混凝土支架结构稳定，没有明显受损，支架支护作用良好，能维持巷道围岩稳定。

## 6 结论

1) III水平南大巷软岩巷道顶板为条带状砂质泥岩，围岩强度低，硬度系数接近 1，巷道围岩中具有膨胀性的黏土矿物含量为 71.3%，其中高岭石含量为 49.7%，吸水泥化现象严重。巷道变形明显，锚杆支护失效普遍，巷道返修率高。

2) 结合杨庄煤矿 III水平南大巷软岩巷道工程地质条件和巷道变形破坏特点，设计了锚杆与钢管混凝土支架联合支护方案，巷道断面采用马蹄形，锚杆为  $\Phi 20 \text{ mm} \times L1800 \text{ mm}$  的左旋螺纹钢锚杆，钢管混凝土支架采用  $\Phi 194 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$  无缝钢管，并灌注 C40 钢纤维混凝土。

3) 通过理论计算可知，设计的联合支护方案极

限承载能力大于巷道围岩荷载,能够维持软岩巷道围岩的稳定性。

4) 通过数值分析和现场监测分析可知,巷道围岩变形较小,在巷道支护中,锚杆和钢管混凝土支架作用力均小于其极限荷载,支护结构稳定。设计的锚杆和钢管混凝土支架联合支护方案满足了III水平南大巷软岩巷道支护的要求。

#### 参考文献:

- [1] 李桂臣, 马振乾, 张农, 等. 淮北矿区多次跨采巷道破坏特征及控制对策研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(2): 181-187.  
LI Guichen, MA Zhenqian, ZHANG Nong, et al. Research on failure characteristics and control measures of roadways affected by multiple overhead mining in Huaibei mining area[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(2): 181-187.
- [2] 张农, 李宝玉, 李桂臣, 等. 薄层状煤岩体中巷道的不均匀破坏及封闭支护[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(1): 1-6.  
ZHANG Nong, LI Baoyu, LI Guichen, et al. Inhomogeneous damage and sealing support of roadways through thin bedded coal-rock crossovers[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(1): 1-6.
- [3] 晏玉书. 我国煤矿软岩巷道围岩控制技术现状及发展趋势[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1996: 1-17.
- [4] 何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 47-62.
- [5] 刘波, 杨仁树, 何满潮, 等. 深部矿井锚拉支架设计理论及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2875-2881.  
LIU Bo, YANG Renshu, HE Manchao, et al. Design principle for truss-bolt system and its application to deep coal mine roof reinforcement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2875-2881.
- [6] 马学宗. 淮北矿区深部软岩支护现状和发展趋势的探讨[J]. 安徽理工大学学报, 2012, 32(增刊 1): 302-304.  
MA Xuezhong. The discussion of deep soft rock supporting situation and trend of development in Huaibei Coal Mining Area[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology, 2012, 32(Sup 1): 302-304.
- [7] 张浩, 丁允杰. 煤炭开采新理论与新技术[C]//中国煤炭学会开采专业委员会2012年学术年会论文集, 2012.
- [8] 高延法, 王波, 曲广龙, 等. 钢管混凝土支架力学性能实验及其在巷道支护中的应用[C]//第八届海峡两岸隧道与地下工程学术与技术研讨会, 2009: 1-10.
- [9] 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试验及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 1): 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(Sup 1): 2604-2609.
- [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 & Technology Review, 2012, 30(16): 42-47.
- [11] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 16-38.
- [12] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构(修订版)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007: 20-32.
- [13] 沈明荣, 陈建峰. 岩体力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2007: 8-23.
- [14] 康红普, 王金华. 煤巷锚杆支护理论与成套技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2007: 14-27.
- [15] 李学彬. 钢管混凝土支架强度与巷道承压环强化支护理论研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2012.
- [16] Itasca Consulting Group. FLAC<sup>3D</sup> (Fast Lagrangian Analysis of Continua in Three-dimensions), Version 2.1, User manual[M]. FLAC Consulting Group Inc, 2002.