

文章编号: 1001-1986(2019)02-0157-05

煤巷复合顶板结构对其稳定性影响试验

陈新年¹, 王景春^{1,2}, 熊咸玉¹, 樊佳伟¹, 沈攀¹

(1. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054;

2. 陕西省高速公路建设集团公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 煤层巷道复合顶板结构较为复杂, 其自身稳定性与岩性、岩层厚度、层数、岩层位置及层间黏结力等因素有关。基于简化的复合顶板组合梁结构力学理论, 建立了简化的组合梁力学测试模型, 通过不同试验分析复合顶板结构特征对其稳定性的影响, 其目的是为复合顶板稳定性分类及控制提供科学依据。研究结果表明: 煤巷复合顶板厚度不变时, 其自身稳定性随岩层强度提高、硬岩层厚度增加、硬厚岩层到煤层距离的减小及层间黏结力的增大而提高, 随分层数的增多而降低, 当层数达到 4 层及以上时, 顶板稳定性受其层数变化的影响变小。各因素的影响程度由大到小依次: 岩性>岩层厚度>层数>岩层位置>层间黏结力; 强度低、厚度小的软弱薄夹层较其他岩层更易产生应力集中, 且破坏早于其他岩层。

关 键 词: 煤层巷道; 复合顶板结构; 顶板稳定性; 模拟试验; 影响因素

中图分类号: TD322 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.02.024



Influence of composite roof structure on the stability of coal roadway

CHEN Xinnian¹, WANG Jingchun^{1,2}, XIONG Xianyu¹, FAN Jiawei¹, SHEN Pan¹

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Shaanxi Provincial Expressway Construction Group Co., Xi'an 710065, China)

Abstract: The composite roof structure of coal roadway is rather complex. Its stability is related to lithology, thickness of strata, number of strata, location of strata and cohesive force between layers. Based on mechanics theory of simplified composite roof composite beams, a simplified mechanical test model of composite beams was established, and the effects of the structural characteristics of composite roof on the stability of composite beams were analyzed by experiments. The purpose is to provide a scientific basis for the classification and control of composite roof stability. The results show that the stability of the roof increases with the increase of the lithology, the increase of the thickness of the hard rock, the decrease of the distance between the hard and thick layers and the strengthening of the interlayer bonding force when the thickness of the composite roof of the coal roadway is certain, but it reduce with the manifold of the number of layers, until the number of layers is more than four layers, and the stability of roof is affected by the number of layers. The influence of variation is small, and the influence degree of its influence factors from large to small is: lithology > rock thickness > layer > rock location > interlayer cohesive force. Compared with other rock formations, the weak thin interlayer with lower strength and small thickness is more prone to produce stress concentration anterior to other damages of layers.

Keywords: coal seam roadway; composite roof structure; roof stability; simulation test; influence factor

复合顶板在我国煤层巷道顶板中占 30%以上, 其复杂的结构特征, 对巷道围岩的稳定性评价及支护造成很大的影响, 导致顶板冒落事故频繁发生^[1-2], 严重影响煤矿生产安全, 其自身的稳定性对巷道围

岩稳定性起至关重要的作用。

复合顶板一般由软硬岩互层或含有软弱夹层的层状岩层构成^[3-5], 各岩层厚度与煤巷跨度之比基本满足薄板假设^[6-7](岩层厚度小于煤巷跨度的 1/5), 且

收稿日期: 2018-04-18

第一作者简介: 陈新年, 1960 年生, 男, 陕西合阳人, 教授级高级工程师, 硕士生导师, 从事岩土工程支护理论与技术教学研究工作。

E-mail: chenxinnian362@126.com

通信作者: 王景春, 1989 年生, 男, 陕西白水人, 硕士研究生, 从事岩土工程支护理论工作. E-mail: xustwjc@foxmail.com

引用格式: 陈新年, 王景春, 熊咸玉, 等. 煤巷复合顶板结构对其稳定性影响试验[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(2): 157-161.

CHEN Xinnian, WANG Jingchun, XIONG Xianyu, et al. Influence of composite roof structure on stability of coal roadway[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(2): 157-161.

具有岩层结构弱面发育、软弱夹层多、岩层厚度小及层间黏结力小等特点。大量的研究表明：构成复合顶板的地层岩性、岩层厚度、层数、岩层位置及层间黏结力等结构特征^[8-10]是影响其自身稳定性的主要因素。目前，国内外许多专家学者一般采用理论分析及数值模拟的方法对复合顶板的稳定性进行分析与研究^[11-13]，但没有充分考虑岩层位置、层间黏结力等结构特征对其自身稳定性的影响，对采用模拟试验方法系统揭示煤巷复合顶板结构对其稳定性影响的研究较少。因此，本文基于简化的复合顶板结构力学理论，通过试验研究其结构特征对复合顶板稳定性的影响，为复合顶板稳定性分类及支护参数的选取提供科学依据。

1 简化的复合顶板结构力学理论

根据复合顶板的结构特征，一般将复合顶板简化成含有软弱夹层的复合岩梁力学模型^[14](图 1)。其假定条件：两端为固定铰支座，竖向为均布荷载，水平轴力均匀分布，层间没有摩擦力，为平面应变问题。

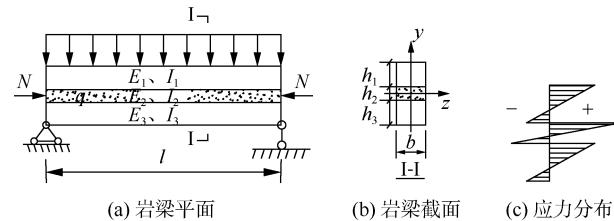


图 1 复合岩梁力学模型

Fig.1 Mechanical model of composite rock beam

图中， q 为竖向均布荷载； N 为水平轴力； l 为岩梁跨度； b 为岩梁宽度，取 1 m； E_1 、 E_2 、 E_3 为岩层弹性模量， I_1 、 I_2 、 I_3 为惯性矩， h_1 、 h_2 、 h_3 为岩层厚度。根据材料力学理论，复合岩梁的受力状态与分层数有很大关系，因此，引入分层数系数 k 来考虑层数对其受力状态的影响^[15]：1 层 ($k=1$)，2 层 ($k=0.75$)，3 层 ($k=0.7$)，4 层及以上 ($k=0.65$)。

在地应力作用下，复合岩梁跨中最大应力为：

$$\sigma = \sigma_N \pm \frac{M_Z}{W_Z} = \sigma_N \pm \frac{6M_Z}{kbh^2} \quad (1)$$

式中 σ 为岩梁跨中的最大应力； σ_N 为岩层水平构造应力； M_Z 为垂直荷载下的最大弯矩； W_Z 复合岩梁抗弯截面模量，大小为 $kbh^2/6$ ； h 为组合梁的总厚度。

在弯曲变形过程中，复合岩梁各岩层的曲率半径相同，即

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M_{Z1}}{E_1 I_1} = \frac{M_{Z2}}{E_2 I_2} = \frac{M_{Z3}}{E_3 I_3} \quad (2)$$

$$M_Z = M_{Z1} + M_{Z2} + M_{Z3} \quad (3)$$

式中 ρ 为组合岩梁的曲率半径； M_{Z1} 、 M_{Z2} 、 M_{Z3} 表示各岩层的弯矩。

复合岩梁各岩层在地应力作用下的应力分布为^[14,16]：

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_1 = \frac{h_1 N}{h_1 + h_2 + h_3} \pm \frac{q l^2 E_1 h_1}{4k(E_1 b_1 h_1^3 + E_2 b_2 h_2^3 + E_3 b_3 h_3^3)} \\ \sigma_2 = \frac{h_2 N}{h_1 + h_2 + h_3} \pm \frac{q l^2 E_2 h_2}{4k(E_1 b_1 h_1^3 + E_2 b_2 h_2^3 + E_3 b_3 h_3^3)} \\ \sigma_3 = \frac{h_3 N}{h_1 + h_2 + h_3} \pm \frac{q l^2 E_3 h_3}{4k(E_1 b_1 h_1^3 + E_2 b_2 h_2^3 + E_3 b_3 h_3^3)} \end{array} \right. \quad (4)$$

从以上分析发现，在 q 、 N 、 l 一定的条件下，由式(1)可知煤巷复合顶板厚度一定时，顶板跨中的拉应力随分层数的增多而增大；由式(4)可知煤巷复合顶板中各岩层的应力随岩层 E 的增大而增大，随岩层 h 的增大而减小；强度较低、厚度较薄的软弱夹层相比其他岩层更易形成应力集中区。但是，该力学理论未考虑岩层位置及层间黏结力对其产生的影响，不能全面准确反映结构特征对其自身稳定性的影响。因此，下文基于该力学理论，通过模拟试验研究其结构特征对复合顶板稳定性的影响。

2 模拟试验方案

2.1 试验目的

通过试验系统揭示复合顶板岩性、岩层厚度、层数、岩层位置及层间黏结力等因素对其稳定性的影响规律，为复合顶板稳定性分析提供科学依据。

2.2 试验模型的建立及试验方法

基于简化的复合顶板组合梁结构力学理论，结合煤巷复合顶板的受力变形规律和稳定性影响因素，建立不同岩性、岩层厚度、层数、岩层位置及层间黏结力的两端铰支的简化组合梁试验模型，并在试验模型各岩层跨中下边缘处粘贴电阻应变片(图 2、图 3)，通过施加集中荷载，测试不同组合梁结构的抗弯强度及各层应变变化规律^[17]。

2.3 模型的制备

煤巷复合顶板岩层以砂岩、泥岩及软弱岩层为主，因此选择 2 种不同强度的试验材料，一种是强度较低的黄砂岩(抗压强度为 37 MPa，抗拉强度相比黑砂岩较低)，另一种是强度较高的黑砂岩(抗压强度为 64 MPa，内摩擦角和黏聚力相比黄砂岩较



图2 简化模型抗弯试验装置

Fig.2 Bending resistance test device for simplified model

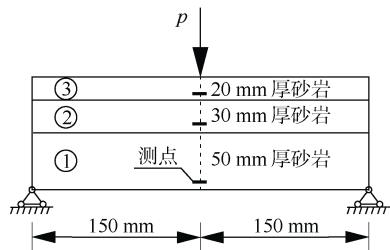


图3 简化模型及测点布置示意图

Fig.3 Simplified model and measurement point layout

大)。根据复合顶板岩层厚度小于煤巷跨度 1/5 的要求, 试验采用跨度为 300 mm 的两端简支结构。因此, 将 2 种砂岩分别加工成 400 mm×100 mm×20 mm、400 mm×100 mm×30 mm、400 mm×100 mm×50 mm 3 种规格的薄板。

3 试验结果分析

3.1 岩性及层间黏结力对复合顶板稳定性的影响

在试验模型厚度、层数一定的条件下, 建立不同岩性、岩层厚度及层间黏结力的组合模型, 并进行抗弯强度试验(表 1)。为了确定各岩层强度与厚度关系, 引入综合强度指数, 其定义如下:

$$q_k = \frac{\sum_{i=1}^n q_i h_i}{h} \quad (5)$$

式中 q_k 为组合梁综合强度指数; q_i 为组合梁岩层强度; h_i 为组合梁岩层厚度; h 为组合梁总厚度。

表1 不同岩性的组合模型抗弯强度对比表

Table 1 Comparison of flexural strength of combined models with different lithology

序号	组合方式/mm (由上至下)	抗弯强度/MPa(累积减少率/%)		综合强度指数
		无黏结层	有黏结层	
I	黑(50+30+20)	5.31	6.84	64.17
II	黑50+黄(30+20)	4.50(15.25)	6.29(8.04)	50.42
III	黄50+黑(30+20)	3.83(27.87)	5.04(26.32)	50.42
IV	黄(50+30+20)	2.98(43.88)	4.50(34.21)	36.67

由图 4 可知:

组合梁层数、厚度一定时, 其抗弯强度随组合梁综合强度指数的降低而降低, I 号至 IV 号的综合强度指数变化比约为 1.079~0.79~0.57, 抗弯强度变化比约为 1.088~0.73~0.62, 呈正比关系, 降幅可达 38%。说明在垂直地应力作用下, 煤巷复合顶板地层岩性是影响其稳定性的主要因素之一。

无黏结层组合梁抗弯强度均小于有黏结层组合梁抗弯强度, 平均降幅在 22% 以上, 说明层间黏结力对煤巷复合顶板的稳定性有一定的影响。

I、II 号组合模型综合强度指数相等, 抗弯强度却有明显差异, 说明硬岩层位置对煤巷复合顶板的稳定性也有较大的影响。

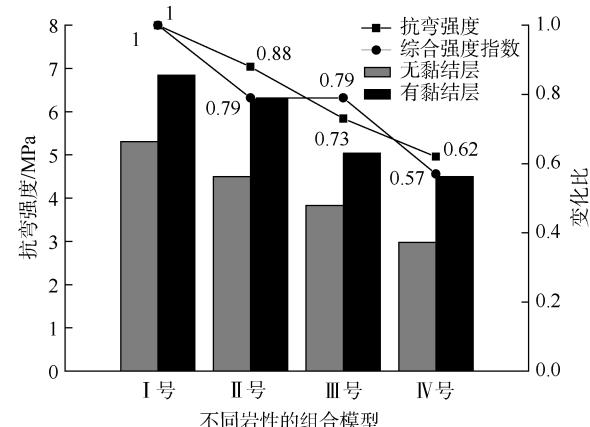


图4 不同岩性的组合模型抗弯强度对比图

Fig.4 Comparison of flexural strength of different lithological combination models

3.2 岩层位置对复合顶板稳定性的影响

在试验模型岩性、厚度及层数一定的条件下, 建立厚岩层不同位置的组合模型, 并进行抗弯强度试验(表 2)。

表2 厚岩层不同位置组合模型抗弯强度对比表

Table 2 Comparison of flexural strength of composite models at different locations of thick layers

序号	组合方式/mm (由上至下)	抗弯强度/MPa		累积减少率/%	
		黄砂岩	黑砂岩	黄砂岩	黑砂岩
I	50+30+20	2.98	5.31		
II	20+50+30	2.24	4.51	24.83	15.07
III	20+30+50	2.07	4.32	30.54	18.64

从图 5 可以看出, 在组合梁岩性、厚度及层数不变的条件下, I、II、III 号组合梁抗弯强度随 50 mm 岩层位置的下移而依次减小, 且变化比约为 1.08~0.75, 降幅可达 25%。复合顶板随厚岩层位置的上移而自身稳定性逐渐降低, 由于该组试验未施加水平荷载, 造成岩层位置对组合梁的影响与实际

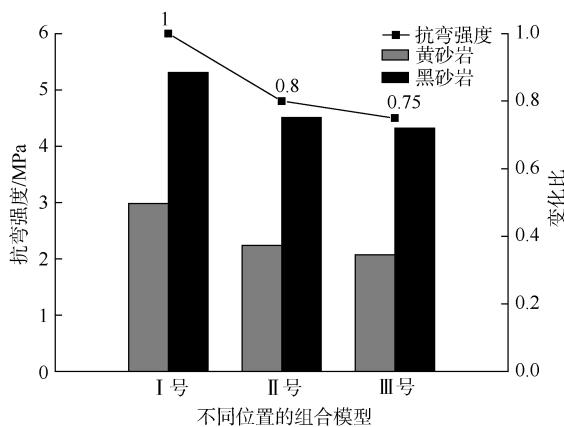


图 5 不同位置的组合模型抗弯强度对比图

Fig.5 Comparison of flexural strength of composite models at different locations

煤巷顶板的变形破坏规律相反^[18]，但可以进一步说明其稳定性与厚岩层位置有密切关系。

3.3 层数对复合顶板稳定性的影响

在试验模型岩性、厚度一定的条件下，建立不同层数的组合模型，并进行抗弯强度试验(表 3)。

由图 6 可知，在组合梁厚度一定的条件下，组合梁结构的抗弯强度随分层数的增多而明显降低，1 层至 5 层的抗弯强度变化比约为 1.067 0.53 0.47 0.44，降幅达 56%，但当分层数为 4 层及以上时，组合梁的抗弯强度基本趋于平缓状态。说明煤巷复合顶板厚度不变时，其稳定性随分层数的增多而降低，当分层数达到 4 层及以上时，顶板稳定性受其层数变化的影响变小。

表 3 不同层数的组合模型抗弯强度对比表

Table 3 Comparison of flexural strength of composite models with different number of layers

层数 (Number of Layers)	组合方式/mm (Combination Method/mm)	抗弯强度/MPa (Flexural Strength/MPa)		累积减少率/% (Cumulative Reduction Rate/%)	
		黄砂岩 (Yellow Sandstone)	黑砂岩 (Black Sandstone)	黄砂岩 (Yellow Sandstone)	黑砂岩 (Black Sandstone)
1层	100	5.46	10.48		
2层	50+50	3.86	6.53	29.30	37.69
3层	50+30+20	2.98	5.31	45.42	49.33
4层	30+20+30+20	2.56	4.88	53.11	53.44
5层	20+20+20+20+20	2.34	4.62	57.14	55.92

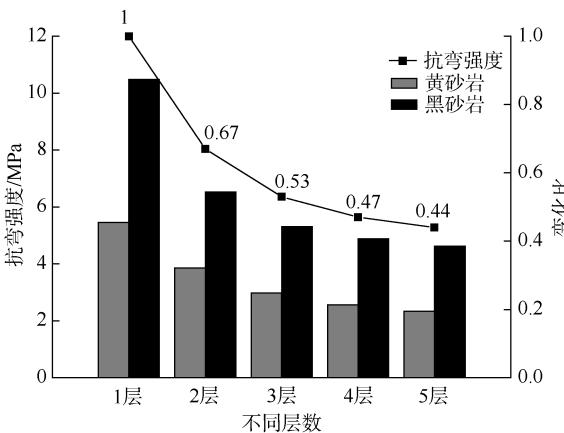


图 6 不同层数的组合模型抗弯强度对比图

Fig.6 Comparison of flexural strength of combination models with different number of layers

总结以上分析可知：煤巷复合顶板厚度一定时，其自身稳定性随岩层强度提高、硬岩层厚度增加、硬厚岩层到煤层距离的减小及层间黏结力增大而提高；随分层数的增多而降低，当分层数达到 4 层及以上时，顶板稳定性受其层数变化的影响变小。各因素的影响程度由大到小依次为岩性>岩层厚度>层数>岩层位置>层间黏结力。

3.4 煤巷复合顶板应力-应变分布规律分析

由图 7 可知：

组合梁在垂直荷载作用下，岩层应变均为正

值，且随荷载的增大而增大，说明复合顶板结构在垂直地应力作用下，各岩层处于受拉状态，且变形随地应力的增大而增大。

当弯曲应力为 2 MPa 时，图 7a 组合梁中 20 mm、30 mm、50 mm 岩层的应变逐渐减小，图 7b 组合梁中 30 mm、50 mm、20 mm 岩层的应变逐渐减小，图 7c 组合梁中 50 mm 软岩、20 mm 硬岩、30 mm 硬岩岩层的应变逐渐减小；从图 7a 和图 7b 的变形规律得知，薄夹层变形相比其他岩层变形较大，且顶部岩层变形相比底部岩层变形较大，说明复合顶板结构在垂直地应力作用下，薄夹层相比其他岩层更易产生应力集中现象，且其他岩层应力从顶层到底层依次趋势减小(此现象的主要原因是组合梁模型未施加水平荷载)；从图 7b 和图 7c 的变形规律得知，软岩层变形相比硬岩层变形较大，且同材质薄岩层变形相比厚岩层变形较大，说明软弱薄岩层相比其他岩层更易产生应力集中现象。

4 试验结果与理论分析对比

通过以上分析可知，在考虑岩性、岩层厚度、层数的情况下，简化组合梁模型的受力变形规律与力学理论分析结果，其影响程度和规律基本一致。但模拟试验揭示岩层位置和层间黏结力对其稳定性影响也很大，岩层位置对其承载力影响达到 25%，

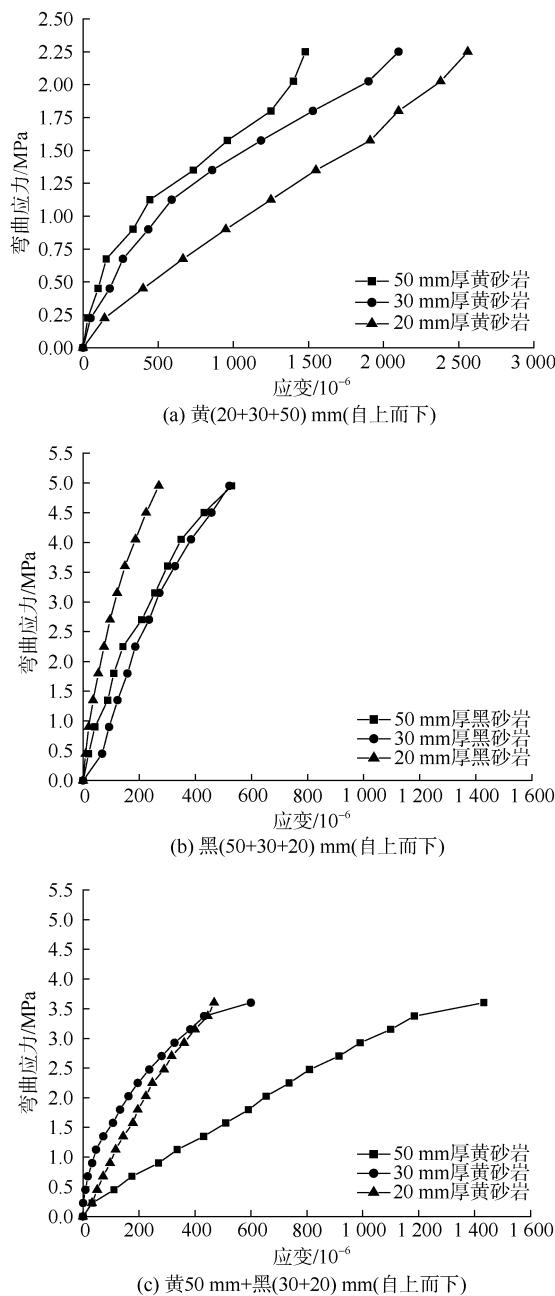


图7 组合梁应力-应变曲线

Fig.7 Stress strain curve of composite beam

层间黏结力对其承载力影响达到 22%以上。说明模拟试验能够系统全面的揭示复合顶板结构对其稳定性的影响, 也为理论分析的进一步完善提供依据。

5 结论

a. 煤巷复合顶板厚度一定时, 其自身稳定性随岩层强度的提高、硬岩层厚度增加、硬厚岩层到煤层距离的减小及层间黏结力的增大而提高; 而随分层数的增多而降低, 直到层数达 4 层及以上时, 顶板稳定性受其层数变化的影响变小。

b. 在影响煤巷复合顶板自身稳定性的几个主要因素中, 影响程度由大到小依次是岩性>岩层厚度>

层数>岩层位置>层间黏结力。

c. 强度低、厚度小的软弱薄夹层相比其他岩层更易产生应力集中现象, 且破坏早于其他岩层。

参考文献

- [1] 柳晓莉, 郭立稳, 张志业. 2005.1—2009.6 煤矿死亡事故统计分析[J]. 河北理工大学学报(自然科学版), 2010, 32(2): 1-3. LIU Xiaoli, GUO Liwen, ZHANG Zhiye. Statistics and analysis of coal mine fatalities from January 2005 to June 2009[J]. Journal of Hebei Polytechnic University(Natural Science), 2010, 32(2): 1-3.
- [2] 杨峰, 王连国, 贺安民, 等. 复合顶板的破坏机理与锚杆支护技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(3): 286-289. YANG Feng, WANG Lianguo, HE Anmin, et al. The failure mechanism of composite roof and bolt support technology[J]. Journal of Mining and Safety Engineering 2008, 25(3): 286-289.
- [3] 侯朝炯, 郭励生. 煤巷锚杆支护[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1999.
- [4] 宫显斌. 复合顶板条件下煤巷锚杆支护技术[J]. 煤炭科学技术, 2000, 28(10): 7-9. GONG Xianbin. Bolt support technology for coal roadway under compound roof condition[J]. Coal Science and Technology, 2000, 28(10): 7-9.
- [5] 郭忠平, 何希林. 复合顶板煤巷锚带网加锚索联合支护[J]. 矿山压力与顶板管理, 2000, 17(1): 13-15. GUO Zhongping, HE Xilin. Combined roof coal roadway, anchor belt net and anchor rope combined support[J]. Mine Pressure and Roof Management, 2000, 17(1): 13-15.
- [6] 钱钟铭, 徐林生. 煤矿坚硬顶板控制[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1994.
- [7] 杨逾, 冯国才, 梁冰. 工作面厚硬顶板力学变形研究[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(6): 1402-1405. YANG Yu, FENG Guocai, LIANG Bing. Study on mechanical deformation of thick and hard roof of working face[J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(6): 1402-1405.
- [8] GOLSHANIA A, DA M, OKUI Y, et al. Numerical simulation of the excavation damaged zone around an opening in brittle rock[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2007(44): 835-845.
- [9] 朱义欢, 邵国建. 地下洞室围岩短长期稳定性的评判准则综述[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(增刊2): 2093-2098. ZHU Yihuan, SHAO Guojian. Summary of short term and long-term stability criteria for underground caverns[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(S2): 2093-2098.
- [10] MAEIIIMA T S, MORIOKA H S, MORI T Y. Evaluation of loosened zones on excavation of a large underground rock cavern and application of observational construction techniques[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2003(18): 223-232.

- visco-elastic-plastic creep model of artificially frozen soil under high confining pressures[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, 65(2): 219–225.
- [11] 薛凯喜, 赵宝云, 刘东燕, 等. 岩石非线性拉、压蠕变模型及其参数识别[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(9): 1440–1445.
- XUE Kaixi, ZHAO Baoyun, LIU Dongyan, et al. Nonlinear creep model of rock in tensile or compressive stress and its parameter identification[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(9): 1440–1445.
- [12] 李守巨. 智能计算与参数反演[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [13] 权国通, 谭超, 侯海潮, 等. 基于粒子群三次样条优化的采煤机截割路径规划[J]. *煤炭科学技术*, 2011, 39(3): 77–79.
- QUAN Guotong, TAN Chao, HOU Haichao, et al. Cutting path planning of coal shearer base on particle swarm triple spline optimization[J]. *Coal Science and Technology*, 2011,
- 39(3): 77–79.
- [14] 赵宝云, 刘东燕, 郑志明, 等. 基于短时三轴蠕变试验的岩石非线性黏弹性蠕变模型研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2011, 28(3): 446–451.
- ZHAO Baoyun, LIU Dongyan, ZHENG Zhiming, et al. Non-linear visco-elastic plastic creep models of rocks based on the short time triaxial creep test[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2011, 28(3): 446–451.
- [15] 陈军浩, 姚兆明, 徐颖, 等. 人工冻土蠕变特性粒子群分数阶导数模型[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(10): 1763–1768.
- CHEN Junhao, YAO Zhaoming, XU Ying, et al. Particle swarm fractional order derivative model of artificial frozen soil creep properties[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(10): 1763–1768.

(责任编辑 张宏)

(上接第 161 页)

- [11] 贾蓬, 唐春安, 王述红. 巷道层状岩层顶板破坏机理[J]. *煤炭学报*, 2006, 31(1): 11–15.
- JIA Peng, TANG Chun'an, WANG Shuhong. Roof failure mechanism of roadway bedding strata[J]. *Journal of China Coal Society*, 2006, 31(1): 11–15.
- [12] 谷拴成. 层状顶板岩层中巷道稳定性研究[J]. *建井技术*, 1991, 12(4): 17–19.
- GU Shuancheng. Study on roadway stability in layered roof strata[J]. *Well Construction Technology*, 1991(4): 17–19.
- [13] PENG S. Coal mine ground control[M]. Xuzhou: China University Mining and Technology Press, 2013.
- [14] 谷拴成, 苏锋, 崔希鹏. 煤巷复合顶板变形破坏规律分析[J]. *煤炭科学技术*, 2012, 40(5): 20–23.
- GU Shuancheng, SU Feng, CUI Xipeng. Analysis on deformation and failure law of complex roof in seam gateway[J]. *Coal Science and Technology*, 2012, 40(5): 20–23.

- [15] 王建宇. 地下工程锚喷支护原理和设计[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1980.
- [16] 于远祥. 矩形巷道围岩变形破坏机理及在王村矿的应用研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2013.
- [17] 王景春. 煤层巷道复合顶板结构对其稳定性影响分析[D]. 西安: 西安科技大学, 2018.
- [18] 林崇德, 孙同迟. 煤巷层状顶板破坏机理分析[J]. *煤矿开采*, 1998, 3(1): 41–46.
- LIN Chongde, SUN Tongchi. Analysis of failure mechanism of layered roof in coal roadway[J]. *Coal Mining*, 1998, 3(1): 41–46.

(责任编辑 周建军)