

文章编号: 1673-3363-(2015)02-0267-06

# 南山煤矿构造应力区软岩巷道变形破坏机理研究

郭志彪<sup>1</sup>, 李二强<sup>1,2</sup>, 张跃林<sup>1</sup>, 邓小卫<sup>1</sup>, 王炯<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 力学与建筑工程学院, 北京 100083;

2. 贵州工程应用技术学院土木建筑工程学院, 贵州 毕节 551700)

**摘要** 本文通过对南山煤矿东部构造应力区的现场调研,总结了东部区巷道常见的破坏特征,选取-120总回风巷道作为研究对象,利用数值模拟再现了无支护和普通锚网索支护下构造应力区软岩巷道的变形破坏过程,研究了其变形破坏机理。研究表明,影响构造应力区软岩巷道的破坏原因因为赋存应力高、岩体强度低以及原支护不适应深部软岩大变形等。结合破坏机理分析了在构造应力作用下围岩与支护体的相互作用关系,概括了其变形破坏过程。

**关键词** 构造应力区; 变形破坏机理; 围岩与支护体作用

中图分类号 TD 322 文献标志码 A DOI 10.13545/j.cnki.jmse.2015.02.015

## Study on deformation and failure mechanism of the tectonic stress areas' soft rock roadway in Nanshan coal mine

GUO Zhibiao<sup>1</sup>, LI Erqiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Yuelin<sup>1</sup>, DENG Xiaowei<sup>1</sup>, WANG Jiong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. School of Civil Engineering, Guizhou University of Engineering Science, Bijie, Guizhou 551700, China)

**Abstract** Based on the site investigation of the tectonic stress area in eastern zone of Nanshan coal mine, the common failure characteristics of the roadway has been summarized in this paper. -120 total return wind roadway has been selected to study the deformation and failure mechanisms, reproducing the deformation and failure process of the soft rock roadway in tectonic stress areas under no support or ordinary bolt net support, by using FLAC<sup>3D</sup> and studies. The results show that the reasons of roadway damage include high stress, low rock strength and the inadaptation of the original support to deep soft rock deformation. Finally, combining with the deformation and failure mechanisms, the relationship between surrounding rock and supporting body has been analysed, and their deformation and failure processes has been generalized.

**Key words** tectonic stress areas; deformation and failure mechanism; interaction between surrounding rock and supporting body

随着煤炭资源开采深度的不断增加,地质环境不断恶化,地应力增大,岩体所处的应力环境变化以及由此引起的岩体力学性质、破断等特性的变异,

造成巷道维护困难、成本提高、安全难以保证等问题,如矿压显现加剧、巷道围岩大变形等<sup>[1-3]</sup>,从而对煤炭的安全高效生产造成巨大的威胁。作为有 70

收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51374214, 41040027); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2009QL06)

作者简介: 郭志彪(1976—),男,吉林省农安县人,副教授,从事深部岩石力学及深井支护方面的研究。

E-mail: guozhibiao@126.com

Tel: 13910283906

多年开采历史的鹤岗矿区,其中南山煤矿是该矿区的主力矿井。南山煤矿东部区断层构造发育<sup>[4]</sup>,受地质构造影响形成的构造应力区<sup>[5]</sup>中节理裂隙极其发育,岩石强度低,采用传统锚网索支护巷道变形破坏严重,巷道维护极为困难<sup>[6]</sup>。朱维申等<sup>[7-10]</sup>针对构造应力场中巷道稳定问题,采用理论分析、数值模拟等方法分析了构造应力场中巷道布置方位对巷道围岩稳定性的影响,布置巷道时,尽量避免巷道轴向与构造应力夹角过大,以减小构造应力对巷道稳定性的影响。解联库等<sup>[11]</sup>采用数值模拟方法研究了巷道的非线性渐进破坏特性。唐效敏<sup>[12]</sup>认为构造应力作用巷道围岩的破坏顺序是顶板屈曲破坏、两帮压缩破坏、底板屈曲破坏。姜耀东等<sup>[13]</sup>研究了深部构造应力作用下巷道的破坏特征,认为构造应力较大时,巷道将不可避免地发生大变形、强流变和严重底鼓。崔英达、常聚才等<sup>[14-15]</sup>分析了预应力的作用机理和对巷道围岩稳定性的影响。杨军、王炯等<sup>[16-17]</sup>研究了深部软岩巷道的变形破坏机理和支护对策。

本文结合现场工程地质条件,利用数值模拟软件对构造应力区巷道稳定性及变形破坏进行研究,系统分析断层影响下构造应力区深部软岩巷道的变形破坏机理,进而研究传统锚网索较低预应力支护条件下巷道围岩与支护体的相互作用关系和破坏模式,得出传统支护材料无法适应深部高应力软岩大变形而产生整体拔出或拉断的结论。

## 1 工程地质特性

### 1.1 南山矿概况

南山矿位于鹤岗煤田的中部,是鹤岗煤田中部的一个矿井,于 1937 年开采,正式建成于 1945 年。矿井内断裂发育,特别是西、东部区断裂构造尤为复杂,东部区主要边界断层为南 1 断层和南 18 断层,2 条大断层产生许多次生断层,彼此切割,错综复杂,对煤层的正常赋存造成严重的破坏。

### 1.2 地质特性分析

结合南山煤矿东部区地质条件,巷道底板以灰白中砂岩为主,岩样平均抗压强度 41.86 MPa,吸水软化强度软化系数平均为 0.54,强度大大降低。

根据地应力现场实测结果,可得其分布规律为:最大水平主应力平均值 26.959 MPa,垂向应力平均值 14.46 MPa;最大主应力是垂直应力的 1.864 倍,说明矿区的地应力场是以水平构造应力场为主导的;根据对南山矿区区域构造行迹的复合分析和

典型测点的地应力现场实测结果的相互验证,确定矿区构造应力场方向为近 NW 向。

### 1.3 巷道变形破坏特征

针对复杂构造区软岩特点,南山煤矿试验了以锚网索和棚式支护为主体的多种形式,试图通过不同的支护方式控制巷道围岩,以使其稳定,但未能很好地控制巷道变形。东部区-180 运输大巷车场段巷道为东部区巷道地应力显现最为明显的区段,巷道顶板、底板和两帮 3 个方向上变形量大。

东部区-310 强力皮带道由于巷道迎头围岩破碎见断层,矿山压力显现较大,采用锚网索和 U 型钢复合支护不能有效释放围岩变形能,部分巷道已由原来的净宽 4.7 m 缩至 3.8 m。

根据现场破坏调查结果,构造应力区巷道变形破坏模式(图 1)下呈现以下特征:巷道的变形破坏严重,具体表现为巷道四面受压,整体变形破坏严重;巷道围岩由于构造影响通常应力集中,造成支护体与围岩在强度、刚度和结构上变形不协调,使得支护体破坏数量多,变形破坏多呈现不对称性。

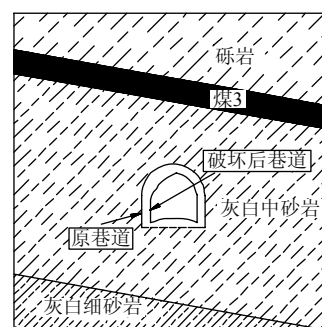


图 1 巷道变形破坏模式

Fig.1 The roadway's deformation and destruction mode

## 2 巷道变形破坏机理数值分析

### 2.1 工程地质模型

依据现场实际工程地质条件,建立工程地质模型(图 2)。

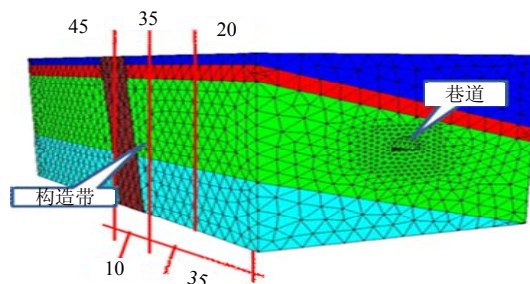


图 2 工程地质模型 (m)

Fig.2 Engineering geological model

模型中部设置宽为 10 m 的平行四边形状断层破碎带, 设定为长×宽×高=90 m×40 m×40 m, 岩层倾角 20°。该模型侧面限制水平移动, 底部固定, 模型上表面为应力边界, 施加的荷载为 15 MPa, 模拟上覆岩体的自重边界。各岩层及构造带处的岩性如表 1 所列。

表 1 工程岩体的物理力学计算参数  
Table 1 Mechanical parameters of engineering rock mass

序号	岩性	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	体积 模量/ GPa	剪切 模量/ GPa	抗拉 强度/ MPa	黏结 力/ MPa	内摩 擦角/ (°)
1	砾岩	2 580	2.67	1.23	1.85	2.35	34
2	构造带砾岩层	1 850	1.333	0.87	0.80	1.20	20
3	煤 3	1 350	0.78	0.71	0.35	0.60	21
4	构造带煤 3 层	945	0.35	0.50	0.10	0.30	12
5	灰白中砂	2 360	2.35	1.21	1.40	2.10	29
6	构造带中砂层	1 650	1.65	0.85	0.60	1.00	13
7	灰白细砂	2 230	1.93	1.16	1.10	1.85	32
8	构造带细砂层	1 560	1.00	0.50	0.50	0.90	19

2.2 无支护形式模拟分析

针对巷道变形破坏机理研究, 首先对无支护情况下巷道的变形、受力等进行模拟运算, 通过模拟结果分析构造应力区影响下不同的位移区来研究巷道在这种无支护方式下的变形破坏过程。无支护条件下巷道变形严重, 巷道顶底板位移量最大达 1 021 mm, 两帮位移量最大达 964 mm, 巷道变形破坏在垂直、水平方向均比较显著, 顶板下沉量大于底鼓量, 顶板变形具有一定的非对称性。

选取有代表性的断面, 如远离构造带区域(20 m)、构造带交界区域(35 m)和构造带区域(45 m), 通过各断面的总位移等确定构造带的影响程度, 如图 3 所示。由图 3 可知: 无支护下巷道围由于构造带的影响各区域变形和塑性区分布变形破坏显著, 45 m 处断面的顶底板移近量最大达 1.021 m, 两帮移近量为 0.964 m; 20, 35 m 处断面变形对比 45 m 处断面变形呈依次递减趋势, 顶底板移近量分别为 0.922, 0.952 m, 20, 35 m 处断面的两帮移近量分别为 0.853, 0.917 m。巷道变形规律如图 4 所示。

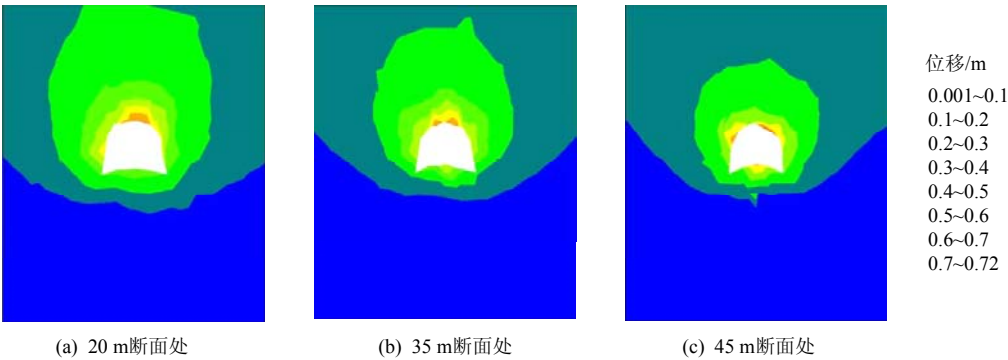


图 3 无支护情况断面处总位移分布  
Fig.3 The section's total displacement with no supporting

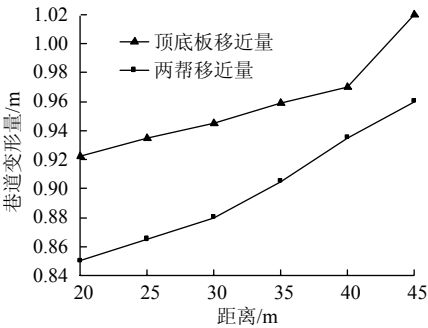


图 4 构造带影响下无支护巷道变形曲线  
Fig.4 Deformation curve without supporting under the influence of tectonic belt

塑性区范围最小约为 4.5 m, 但在 35, 45 m 处断面的塑性区同 20 m 处塑性区相比厚度增加极为

明显, 巷道两帮、左顶板部分塑性区厚度较大, 最大塑性区范围约达 8 m。

2.3 普通锚网索支护模拟分析

结合现场工程实际, 分析普通锚网索支护条件下巷道变形破坏机理, 锚网索支护参数如下: 巷道断面尺寸 3800 mm(净宽)×3200 mm(净高); 锚杆采用  $\Phi 20$  mm×L3000 mm 左旋无纵筋螺纹锚杆(极限拉力为 15.7 t), 间排距 700 mm×700 mm; 锚索采用  $\Phi 17.8$  mm×L8000 mm 钢绞线, 间排距 1400 mm×1400 mm; 采用  $\Phi 10$  焊接钢筋网, 网片规格长×宽=1500 mm×2000 mm, 网孔尺寸为 100 mm×100 mm。

根据上述参数, 建立数值分析模型, 研究巷道

在该支护方式下的变形破坏过程。数值模拟结果如 5 所示。巷道顶底板移近量最大达 764 mm，两帮移近量最大达 729 mm，巷道变形破坏在垂直、水平方向均比较显著，底鼓量大于顶板下沉量，底鼓具

有非对称性。针对普通锚网索支护形式下的构造带队巷道变形破坏的影响，同上选取远离构造带区域(20 m)、构造带交界区域(35 m)、构造带区域(45 m)等断面进行研究分析。

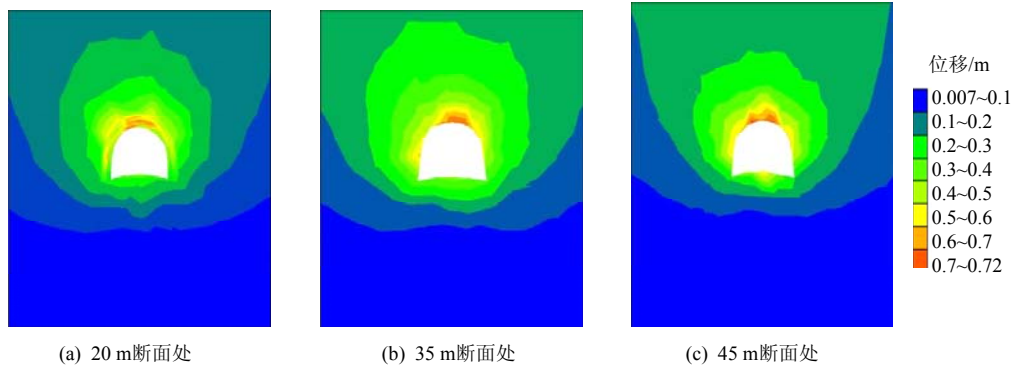


图 5 普通支护断面处总位移分布  
Fig.5 The section's total displacement with general supporting

普通支护下巷道围岩由于构造带的影响各区域变形和塑性区分布稍有差异，整体同无支护状态下构造应力区巷道变形及塑性区大体一致，但对比无支护情况普通支护也显现了一定的巷道控制效果，从各监测点对比得出图 6 和表 2。

可以看出：在构造带的作用下，随着构造带的逐步影响导致其变形增加，塑性区范围增大，最大塑性区范围约 7.5 m。塑性区越大，说明应力释放越厉害，围岩产生破坏的可能性也就越大；并且顶底板及两帮变形量均呈现这种规律。由此可见，构造应力区是软岩巷道变形破坏的主要因素。

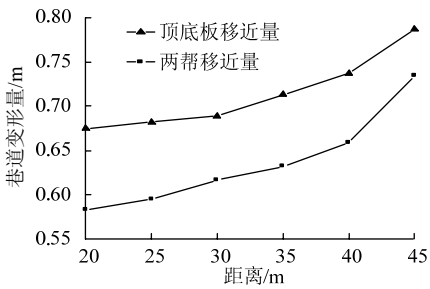


图 6 构造带影响下普通支护巷道变形曲线  
Fig.6 The general supported roadway's deformation curve under the influence of tectonic belt

表 2 构造带作用下无支护和普通锚网索支护的巷道变形量

Table 2 The roadway's deformation under no supporting and ordinary cable anchor supporting

支护状况	远离构造带区域(20 m)		构造带交界区域(35 m)		构造带区域(45 m)	
	顶底板/m	两帮/m	顶底板/m	两帮/m	顶底板/m	两帮/m
无支护	0.922	0.853	0.952	0.917	1.021	0.964
普通锚网索支护	0.675	0.583	0.713	0.632	0.787	0.734

2.4 构造应力区软岩巷道破坏机理分析

通过上述对南山煤矿构造应力区软岩工程破坏现象及特征的总结和分析，得出南山煤矿构造应力区软岩巷道变形机理如下：

1) 巷道赋存应力高。南山煤矿构东部区断层构造发育，南 18 是井田东部大断层，断层两盘岩石极破碎，构造应力发育；南山矿构造应力区软岩工程难度系数较高，其自重应力水平达到约 15 MPa，最大水平主应力 27 MPa。水平及垂直多向复杂受力导致巷道围岩发生严重变形破坏。

2) 工程岩体强度低。虽然室内所取完整岩样强度较高，但实际东部区赋存岩体破碎、强度较低，岩体应力与岩体强度的比值较大；另外在巷道掘进过程中，东部区水害严重，围岩遇水泥化现象严重，吸水软化强度大大降低，导致围岩自承载能力缺失。

3) 原支护不适应大变形。支护技术及参数的选择对巷道稳定影响同样较大，通过对无支护以及普通支护条件下的模拟分析得出，在上述模拟结果中巷道变形均较严重，虽然普通支护条件下巷道围岩



变形有所改善,但普通支护预紧力极低,削弱了锚杆(索)主动及时的支护作用。可见,在复杂软岩工程中,必须考虑各种支护材料的不同特性,使不同支护材料之间达到耦合作用。并且支护体间排距的不合理布置易产生局部应力集中而造成围岩与支护体破坏等,进而影响整体支护效果的充分发挥。

### 3 构造应力区围岩与支护作用关系

针对普通锚杆与巷道围岩的相互作用,结合数值模拟得出巷道的变形破坏是一个渐变的恶性循环的过程。普通支护下支护体与围岩的作用关系概述如图7。

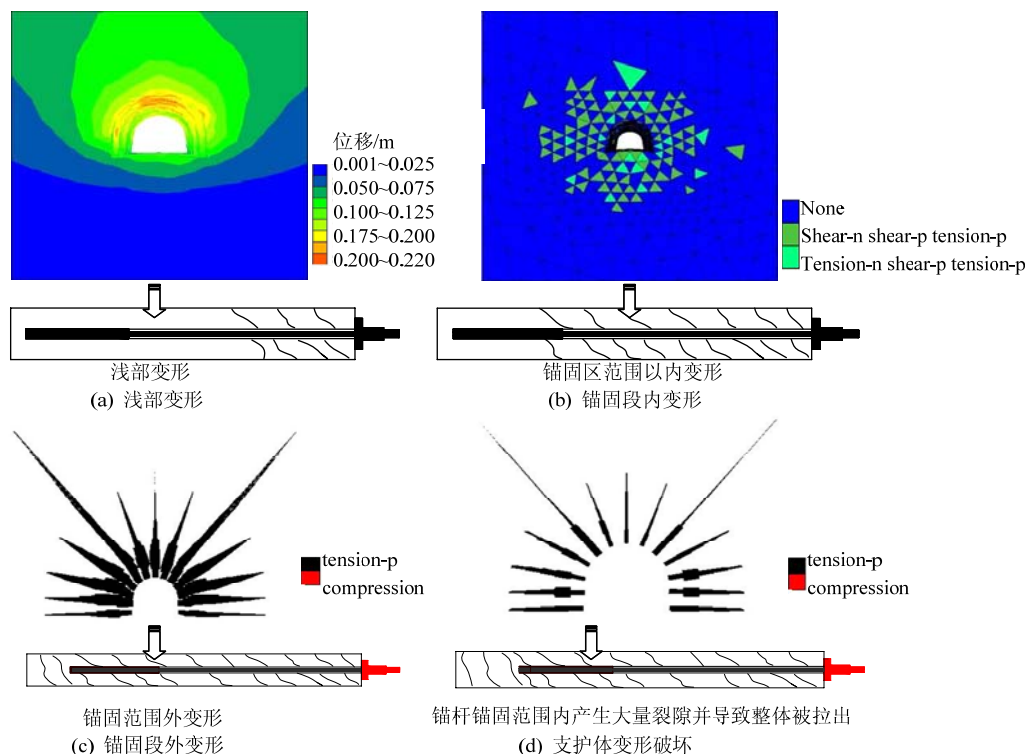


图7 普通锚杆变形破坏过程示意图

Fig.7 Schematic diagram of ordinary bolt's deformation and failure process

针对普通锚网索支护,普通锚杆(HRB335)屈服拉力为10 t、极限拉力为15.7 t,锚杆支护体受力最大约为13.5 t,超过其屈服强度(图8)。

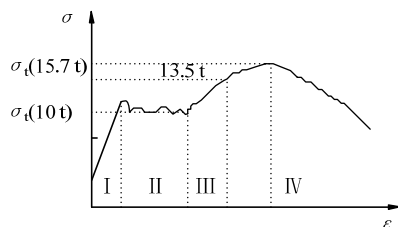


图8 普通锚杆受力变形示意图

Fig.8 Schematic diagram of ordinary bolt's force and deformation

根据模拟得出,支护体随后受力呈变小趋势,但是巷道变形却仍逐步加大,说明在围岩塑性区发展产生大量裂隙使锚杆锚固段锚固损伤,从而导致锚杆支护体部分被拔出失效并引起受力重分布。

综上,将普通支护体与围岩的作用过程概述如

下:巷道开挖→围岩应力状态改变为二向受力状态→普通锚网低预应力支护→巷道发生浅部变形→围岩塑性松动圈逐步扩展转移至深部,塑性区扩展至锚杆锚固段外,锚固段裂隙导致锚固力降低→锚杆锚固段围岩产生大量裂隙,导致部分锚杆整体被拔出,致使支护体失效→支护体整体发生失效,直至巷道最终变形破坏。

### 4 结论

1) 通过对现场工程地质条件及巷道变形破坏特征的调查研究,分析了南山煤矿构造应力区软岩巷道变形破坏的主要特征。变形破坏主要表现为:在常规U型棚支护、普通锚网索支护等作用下,巷道顶板、底板和两帮3个方向上变形量大(大范围显现);高应力作用下支护体破坏数量多且多呈现非对称变形特征。

2) 针对无支护及普通锚网索支护下开挖过程

的巷道围岩塑性区、位移场等变化特征进行了分析研究,得出其变形破坏机理和主控因素:复杂构造应力造成围岩赋存应力高,断层裂隙和吸水强度软化引起工程岩体强度降低,传统支护的低预应力和材料变形不适应围岩大变形。

3) 在构造应力区软岩巷道变形破坏机理的基础上,研究了支护体(锚杆)与围岩的相互作用关系,再现了两者相互作用下变形破坏过程,为提出合理的构造应力区软岩巷道的稳定性控制对策提供基础数据。

#### 参考文献:

- [1] 孟庆彬, 韩立军, 乔卫国, 等. 深部高应力软岩巷道变形破坏特性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(4): 481-486.  
MENG Qingbin, HAN Lijun, QIAO Weiguo, et al. Research on deformation failure characteristics of the deep high-stress soft rock roadways[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(4): 481-486.
- [2] 陈炎光, 陆士良. 中国煤矿巷道围岩控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1994: 1-6.
- [3] GUO Zhibiao, YANG Xiaojie, et al. A study of support strategies in deep soft rock: the horsehead crossing roadway in Daqiang Coal Mine[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22(5): 665-667.
- [4] 杨之化. 南山煤矿区域地质构造规律及煤层特征分析[J]. 煤, 2010(5): 58-59.  
YANG Zhihua. Regional geological structure and coal seam characteristics analysis of Nanshan coal mine[J]. Coal, 2010(5): 58-59.
- [5] 鲁岩, 邹喜正, 刘长友, 等. 构造应力场中的巷道布置[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(2): 144-149.  
LU Yan, ZOU Xizheng, LIU Changyou, et al. Roadway layout in tectonic stress field[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(2): 144-149.
- [6] 孟庆江. 南山煤矿动压巷道变形破坏机理及支护对策[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2012.
- [7] 朱维申, 何满潮. 复杂条件下围岩稳定性与岩体动态施工力学[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 23-42.
- [8] 何满潮, 张国锋, 齐干, 等. 夹河矿深部煤巷围岩稳定性控制技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(1): 27-31.  
HE Manchao, ZHANG Guofeng, QI Gan, et al. Stability control of surrounding rocks in deep entry of Jiahe coal mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(1): 27-31.
- [9] 孔德森, 蒋金泉. 深部巷道在构造应力场中稳定性分析[J]. 矿山压力与顶板管理, 2000, 17(4): 56-58.  
KONG Desen, JIANG Jinquan. Deep roadway stability analysis in the tectonic stress field[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2000, 17(4): 56-58.
- [10] 张光建. 地应力及其对巷道稳定性的影响分析[J]. 矿山压力与顶板管理, 2003, 20(1): 6-9.  
ZHANG Guangjian. Ground stress and its effect on the stability of the roadway analysis[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2003, 20(1): 6-9.
- [11] 解联库, 李华炜, 杨天鸿, 等. 侧向压力作用下巷道围岩破坏机理的数值模拟[J]. 中国矿业, 2006, 15(3): 54-57.  
XIE Lianku, LI Huawei, YANG Tianhong, et al. Numerical simulation on the progressive process of laneway failure caused by lateral pressure[J]. China Mining Magazine, 2006, 15(3): 54-57.
- [12] 唐效敏. 构造应力区的巷道围岩变形分析与维护机理研究[J]. 山东煤炭科技, 2009(3): 95-96.  
TANG Xiaomin. Analyse on roadway distortion of tectonic stress area and study on maintenance mechanism [J]. Shandong Coal Science and Technology, 2009(3): 95-96.
- [13] 姜耀东, 刘文岗, 赵毅鑫, 等. 开滦矿区深部开采中巷道围岩稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(11): 1857-1861.  
JIANG Yaodong, LIU Wengang, ZHAO Yixin, et al. Study on surrounding rock stability of deep mining in Kailuan mining group[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(11): 1857-1861.
- [14] 翟英达. 锚杆预紧力在巷道围岩中的力学效应[J]. 煤炭学报, 2008, 33(8): 856-859.  
ZHAI Yingda. The mechanics effect of bolt pretension in roadway surrounding rock[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(8): 856-859.
- [15] 常聚才, 谢广祥. 锚杆预紧力对煤矿巷道支护效果的响应特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(5): 657-661.  
CHANG Jucai, XIE Guangxiang. Research on response characteristics of bolt pretension on supporting effect of rock roadway in coal mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(5): 657-661.
- [16] 杨军, 于世波, 陶志刚, 等. 第三系软岩巷道变形破坏特性及耦合控制对策研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(3): 373-378.  
YANG Jun, YU Shibo, TAO Zhigang, et al. On the deformation and failure characteristics of the tertiary soft rock roadway and coupling control measures[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(3): 373-378.
- [17] 王炯, 郭志飏, 蔡峰, 等. 深部穿层巷道非对称变形机理及控制对策研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(1): 28-33.  
WANG Jiong, GUO Zhibiao, CAI Feng, et al. Study on the asymmetric deformation mechanism and control countermeasures of deep layers roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(1): 28-33.