

高应力-节理化复合软岩巷道地质特征及支护技术

朱 阁¹ 张志成² 李平虎³ 穆文平¹ 张连杰¹ 武 雄¹

(1. 中国地质大学(北京) 水资源与环境工程北京市重点实验室 北京 100083; 2. 武汉市测绘研究院 湖北 武汉 430022;
3. 天津市勘察院 天津 300191)

摘 要:为解决鹤壁矿区深部煤矿开采过程中软岩巷道围岩大变形、难支护的问题,通过工程地质条件调查、室内试验等手段,分析鹤壁矿区软岩巷道的工程地质特点,得到软岩围岩的变形破坏力学机制。结合关键部位耦合支理论及数值模拟技术,对软岩巷道采用锚网喷和锚索为主的支护方式,并现场监测评估支护效果。研究表明:鹤壁矿区巷道围岩属于高应力-节理化复合型软岩;变形破坏的Ⅰ_{AB}Ⅱ_{BD}Ⅲ_D型复合变形力学机制由节理、分子吸水膨胀、胶体膨胀、自重应力以及工程开挖等共同构成;采用的支护方式可使支护体应力分布平均,应力集中区范围和岩体变形均较小;经现场监测表明:在该支护条件下开挖15天后巷道围岩变形趋于稳定,30天后变形速率为0,累计变形量不超过40 mm,保证软岩巷道工程的稳定性。

关键词:高应力-节理化复合型软岩;变形力学机制;锚喷支护;围岩

中图分类号:TD322

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2015)09-0018-06

Study on geological features and support technology of high stress-jointed complex type soft rock roadway

Zhu Ge¹, Zhang Zhicheng², Li Pinghu³, Mu Wenping¹, Zhang Lianjie¹, Wu Xiong¹

(1. Beijing Key Lab of Water Resources and Environment Engineering, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Wuhan Geomatic Institute, Wuhan 430022, China; 3. Tianjin Institute of Geotechnical Investigation and Surveying, Tianjin 300191, China)

Abstract: In order to solve the high deformation and difficult support problems of surrounding rock in soft rock roadway occurred during the mining process of deep mine in Hebi Mining Area, with engineering geological condition investigation, indoor test and other means, the engineering geological features of soft rock roadway in Hebi Mining Area were analyzed and the deformation mechanics mechanism of soft surrounding rock was obtained. In combination with the "key position" coupling support theory and computer numerical simulation technology, the soft roadway was supported mainly with bolt/steel mesh/shotcreting and anchor and site monitoring, measuring and evaluation were conducted on the support effect. The study showed that the surrounding rock of roadway in Hebi Mining Area was high stress-jointed type soft rock. The complex deformation failure mechanics mechanism was jointly consisted of joint, molecular water absorption swelling, colloid swelling, gravity stress and engineering excavation (Type I_{AB}Ⅱ_{BD}Ⅲ_D). In the bolt/steel mesh/shotcreting + anchor support method applied to the design, the stress distribution of support mass was even and the stress concentration zone scope and the rock deformation were both smaller. After support engineering completed, the site monitored and measured data showed that under the support condition, the deformation of mine roadway was in stabilization after 15 days of the excavation. After 30 days of the excavation, the deformation rate was 0 and the total deformation value was not over 40 mm. Thus the support status was excellent and the stability of soft rock roadway could be ensured.

Key words: high stress-jointed complex type soft rock; deformation mechanics mechanism; bolt/shotcreting support; surrounding rock

收稿日期:2015-05-28; 责任编辑:王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2015.09.004

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41172289); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2012YXL043); 国家科技支撑计划资助项目(2012BAJ11B04)

作者简介:朱 阁(1988—),男,安徽蚌埠人,博士研究生。Tel: 13718758586, E-mail: zhuanzhuge729@163.com

引用格式:朱 阁 张志成 李平虎 等.高应力-节理化复合软岩巷道地质特征及支护技术[J].煤炭科学技术 2015 43(9):18-23.

Zhu Ge Zhang Zhicheng Li Pinghu et al. Study on geological features and support technology of high stress-jointed complex type soft rock roadway [J]. Coal Science and Technology 2015 43(9):18-23.

0 引 言

煤炭是我国工农业生产和社会发展的基石,在我国一次能源生产与消费结构中始终占 70% 左右^[1]。随着我国国民经济的飞速发展,对煤炭资源的需求量不断上升,我国煤炭资源的开采深度也在以 8~12 m/a 的速度逐年增加。预计在未来 20 年我国很多煤矿将进入到 1 000~1 500 m 的开采深度^[1-5]。随着采煤深度的不断增加,在深部高应力作用下,一些原本在浅部低应力状态下表现为硬岩特征的巷道围岩表现出大变形、大地压、难支护的高应力软岩状态,上述特点使得深部矿井地下工程隐患日趋增多,工程灾害频发,给深部煤矿开采带来了极大的安全隐患^[6]。因此,对深部高应力软岩及其支护问题的研究一直是近年来国内外学术界广泛关注的问题。目前国内外已针对软岩问题进行了大量研究,逐渐形成了一些有影响的理论和技术,对软岩巷道的支护工程进行分析并提出了一系列支护手段与工艺。如新奥法理论、松动圈理论、大圆弧理论、联合支护理论、关键部位耦合组合支护理论等^[7-9]。

近年来随着开采深度的加深,矿区巷道围岩开始表现出软岩特征^[10]。随之而来的软岩问题日益严重,尤其在鹤壁矿区内上仓带式输送机斜巷和南大巷的软岩问题最为复杂。上仓带式输送机斜巷原支护方案为 U 型棚支护设计,施工完成后 U 型棚和巷道均发生持续变形并很快超过预留值。不到 1 年的时间里,巷道两帮移近量高达 1 500 mm,且底鼓严重,由设计净高 3 m 缩变至不及 2 m,严重制约煤矿的生产。笔者就鹤壁矿区上仓带式输送机软岩斜巷巷道围岩的工程地质条件、软岩微观结构等工程地质特征,并以此为出发点进行分析研究。得出鹤壁矿区软岩巷道围岩的变形破坏力学机制,结合关键部位耦合组合支护理论和计算机模拟技术,提出喷锚结合的软岩巷道支护措施并通过现场监测试验证明有效。

1 鹤壁矿区工程地质特征

1.1 岩性与节理

鹤壁矿区内主要地层岩性分析如下: ①灰黑色中薄层粉砂岩,层厚 20~70 cm,钙质胶结,致密,干净,强度较高,中部发育有一软弱夹层,层厚 3~5 cm,白色,胶结疏松,空隙发育,风干后强度较高,遇

水浸泡变软变滑,崩解性不强; ②紫斑泥岩,层厚 50~100 cm,泥质胶结,干净,岩体上发育有大量的裂隙,结构较疏松,强度较低,崩解性不强; ③灰白色中薄层泥岩,层厚 20~70 cm,泥质胶结,胶结疏松,岩块强度极低,入手有滑腻感,崩解性很强; ④灰黑色中薄层泥质粉砂岩,层厚 20~70 cm,泥质或钙质胶结,胶结较致密,干净,岩块强度较高,崩解性不强。上仓带式输送机斜巷围岩节理极为发育,节理和层面一起控制着围岩的变形和破坏,大幅降低了岩体的强度,受节理和层面控制,巷道围岩以掉块方式破坏^[5,11]。研究区主要发育有 3 组节理,见表 1。

表 1 研究区节理特征
Table 1 Features of joints in the study area

序号	走向	倾角	描述
1	320~340°, NNW 向	70°~80°	近直立
2	220~240°, SW 向	70°~80°	近直立
3	20~30°, NNE 向	35°~45°	倾角较缓

其中 1、2 两组节理为共轭节理,其主应力为近南北向;节理的延展性较好,贯穿于整个掘进断面且节理密度大。根据软岩工程分类,研究区软岩发育节理 3 组,节理密度大(20~30 条/m²)并且沿节理面发生变形破坏,属节理化软岩中的破碎软岩。

1.2 研究区软岩黏土矿物物化特征与微观结构

微观结构特征是软岩巷道支护设计的基础,围岩所含黏土矿物的种类及含量是影响围岩变形、破坏的一个重要因素。根据出露位置和软岩岩性从上仓带式输送机斜巷和南大巷选择 3 个样品进行扫描电镜分析(图 1)和物化测试,3 个样品分别为上仓输送机斜巷的黑色中薄层泥岩(岩样 1),上仓输送机斜巷的紫斑色中厚层泥岩(岩样 2),南大巷 1、2 号交岔点灰黑色中薄层泥岩(岩样 3),测试结果见表 2。

根据扫描电镜和全岩及黏土矿物 X 光衍射成分分析结果,研究区软岩以泥岩为主,其主要矿物成分为石英、赤铁矿及少量的钠长石和钾长石,以及大量的黏土矿物。结构疏松,粒间有孔隙发育,颗粒表面黏土矿物呈片状。黏土矿物软岩石英含量较高,而黏土矿物含量中等,说明该类型软岩的强度不低,因此在支护设计中应充分利用围岩的强度。黏土矿物的主要类型为高岭石(K)、伊蒙混层(I/S)和伊利

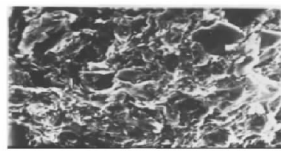
表2 软岩全岩及黏土矿物X光衍射成分分析结果

Table 2 Analysis results of the whole-rock and clay minerals of soft-rock by X-ray diffraction

岩样	矿物种类和含量/%				黏土矿物 总量/%	黏土矿物相对含量/%			混层比/%
	石英	钾长石	斜长石	赤铁矿		I/S	I	K	
1	34.0	0.6	0.9	—	64.5	32	7	61	25
2	43.3	—	—	6.8	49.9	14	2	84	30
3	31.5	—	1.3	—	67.2	46	5	49	20



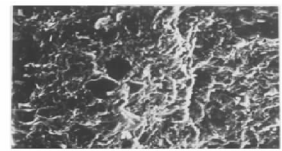
(a) 片状 I/S 混层与石英晶体



(b) 片状、丝状高岭石与 I/S 混层



(c) 片状 I/S 混层



(d) 鳞片状高岭石

图1 软岩岩样颗粒表面微观示意

Fig. 1 SEM micrographs sketch of soft rock sample

石(I)等3种矿物。其中高岭石(K)含量较高,伊蒙混层矿物(I/S)含量较低,伊利石(I)含量最低,混层比也较低。从以上测试数据来看,软岩中膨胀性大的矿物如伊蒙混层矿物(I/S)含量不高;而膨胀性小的黏土矿物如高岭石(K)含量较高^[12-13]。因此,在支护设计中只要对淋水较严重段内的围岩进行及时封闭即可。综上所述,研究区软岩的膨胀性中等偏小,是影响巷道围岩变形的次要因素。上仓输送机斜巷软岩的物理力学参数:容重26.31 kN/m³、弹性模量13 913.4 MPa、泊松比0.191、单轴抗压强度63.73 MPa、单轴抗拉强度2.172 MPa、黏聚力11.79 MPa、内摩擦角43.95°。

1.3 地应力与地下水

鹤壁矿区采深较大,埋深达730 m,地应力较高,自重应力达14.3 MPa,给巷道围岩稳定性带来不利影响^[6]。该应力条件下巷道围岩应力水平 $\sigma_c \geq 25$ MPa,膨胀性小,并且在深部应力作用下体现出软岩形变特征,因此研究区软岩为高应力软岩。

研究区巷道由于围岩节理、层理发育,地下水以基岩裂隙水形式出露。部分地段内巷道淋水严重。地下水的存在增加了围岩向巷道运动的附加体积力,降低了围岩岩体强度。同时由于地下水的物理作用,使含有膨胀性矿物和崩解性强的围岩在地下水的作用下产生体积膨胀或垮落,也使节理、裂隙发生扩容现象,导致围岩稳定性降低^[14]。

现场工程地质特征和室内试验分析结果表明,鹤壁矿区的软岩属于高应力型和节理化型的复合,即高应力-节理化型,记作HJ型^[15]。

2 HJ复合型软岩巷道变形破坏特征

2.1 软岩巷道变形力学机制分类及其特点

对于鹤壁矿区HJ复合型软岩,其变形力学机制也是复合型的。

1) 根据黏土矿物物化分析与测试,其物化膨胀类型包括分子吸水膨胀(代号I_A)和胶体膨胀(代号I_B)。该类软岩膨胀性矿物含量较低,所含膨胀性矿物为伊/蒙混层矿物,属伊/蒙混层型变形,因此其力学机制属于I_{AB}型。

2) 由于鹤壁矿区构造简单,其残余构造应力较小,巷道变形力源机制主要是自重应力机制(代号II_B)和工程偏应力机制(代号II_D)。根据软岩变形力学机制分类属于II_{BD}型。

3) 根据现场工程地质调查,鹤壁矿区巷道围岩节理发育,其优势节理集中在3个方向,在节理和层理的双重控制下,围岩以不规则锯齿状掉块方式破坏。根据软岩结构变形分类该破坏模式属于III_D型。综上所述,鹤壁矿区HJ复合型软岩的变形力学机制为I_{AB} II_{BD} III_D型^[16],上述特征也是研究区上仓输送机斜巷大变形、难支护的原因。此类复合型软岩在变形、破坏这一动态过程中所表现出来具有“岩爆”、节理化软岩初始变形速度快、围岩应力极高不易支护以及节理化软岩容易较大规模的塌方、冒落等特征。

2.2 关键部位耦合支护

何满潮^[17]提出软岩巷道的围岩变形破坏不是均匀的、整体性的同时破坏,而是巷道的一个或几个部位首先开始变形、损伤、破坏,进而导致整个支护

体失稳, 这些首先破坏的部位称为关键部位。软岩的非线形力学特性和支护材料的线形力学特性不相适应决定了关键部位的存在^[17-18]。在鹤壁矿区 HJ 型软岩巷道施工过程中, 需要耦合支护的关键部位可以通过工程裂纹进行反分析确定。在工程荷载作用下, 巷道的关键部位在出现明显的变形之前, 巷道工程时常在一些局部出现细小的工程裂纹。工程裂纹出现时常伴随着高应力腐蚀现象, 即在关键部位产生鳞片状、片状支护体剥落, 表明关键部位出现。同时根据裂纹的力学性质和复合力学性质与裂纹体系的配套关系, 可以推得产生裂纹部位的工程荷载性质及整个巷道工程的工程荷载组合特征。进行关键部位耦合支护最佳时间(段)是鳞、片状剥落的高应力腐蚀现象出现的时间。通过上述软岩关键部位的识别和最佳耦合支护时间的确定, 选择支护措施以解决好巷道围岩和支护体之间的相互作用。

2.3 支护措施选择与复合型变形力学机制的转化

鹤壁矿区的 HJ 复合型软岩的变形力学机制为 $I_{AB} II_{BD} III_D$ 型, 具有多种变形力学机制, 想要对软岩巷道进行有效支护, 必须采取联合支护方法。因此首先需要有效地把复合型转化为单一型, 采取各种转化技术将 $I_{AB} II_{BD} III_D$ 型复合变形力学机制转化成只剩下重力场的单一变形力学机制, 因为重力场是无法转换的。

鹤壁矿区 HJ 型软岩的复合型变形力学机制的转化过程及转化技术^[16]如图 2 所示。

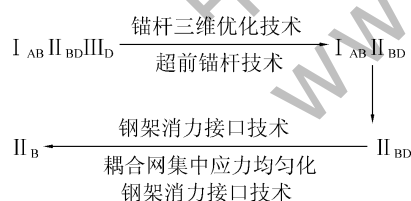


图 2 鹤壁矿区 HJ 型软岩的复合型变形力学机制的转化过程

Fig. 2 Conversion process of the complex type deformation mechanism of HJ Type soft rock in Hebi Mine

通过以上转化, 鹤壁矿区 HJ 软岩的复合型变形力学机制就成为只考虑重力作用的单一型变形力学机制。

3 HJ 复合型软岩巷道支护设计

3.1 支护设计方案

根据力学机制转化结果支护设计采用锚网喷加

锚索耦合支护方式, 支护设计断面如图 3 所示。支护材料及支护参数如下^[19-21]:

1) 锚网喷支护厚度 100 mm, 其中初喷厚 50 mm, 复喷厚 50 mm; 混凝土强度等级 C20; 锚杆采用 20 锰硅螺纹钢筋, 直径 20 mm, 长度 2 000 mm, 间排距 700 mm×700 mm, 采用复合托板, 钢托板可为 A3 钢, 尺寸 150 mm×150 mm, 木托板为 150 mm×150 mm×30 mm。

2) 锚杆采用树脂药卷端头锚固, 树脂药卷用量为 2 卷/根, 拉拔力不小于 160 kN/根。

3) 金属网用 $\phi 6.5$ mm、3 号钢钢筋制成, 网格尺寸 100 mm×100 mm。

4) 锚索长 6.0 m, 锚固力 210 kN, 排距 2 m, 每排 3 根, 锚固段用树脂药卷 3 支。

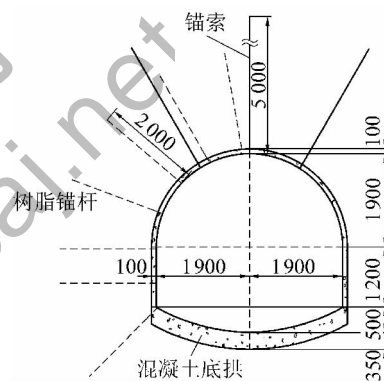


图 3 巷道断面支护

Fig. 3 Supporting diagram of roadway cross-section

3.2 设计方案说明

1) 采用螺纹钢树脂锚杆和钢筋网耦合支护技术, 锚杆呈三花布置, 钢筋网片之间用挂钩相连, 这样一方面提高了单根锚杆的抗拉拔力, 使得锚、网强度和围岩变形相耦合, 既能使巷道围岩充分释放变形能, 又能保证围岩受限制地变形; 另一方面, 使得锚、网支护体形成一个整体, 既能增加支护体强度, 又能尽量使整个巷道围岩应力均匀化, 尽最大限度避免应力集中部位的出现。

2) 采用复合托盘技术, 避免了螺纹钢锚杆在丝扣处发生断裂, 导致锚杆失效^[22]。

3.3 HJ 复合型软岩巷道支护设计数值模拟

通过有限元计算机数值模拟技术, 按照设计好的支护方案, 锚杆、锚索等模拟布置与实际设计支护方案相同, 结合已知的巷道软岩各项物理参数, 对开挖后的支护效果进行了模拟分析, 结果如图 4 所示。设计支护方案的水平方向应力 σ_x 、竖直方向应力

σ_y 、 σ_{xy} 面剪应力 τ_{xy} 应力图以及岩体变形图表明设计支护方案水平方向应力仅在支护体范围附近比较明显(在两帮范围稍大一些); 竖直方向应力集中区出现在巷道的两角部, 应力集中区范围很小; 剪应力主要出现在支护体内, 分布较为均匀; 岩体变形明显较小。需要指出的是, 在实际施工中由于巷道围岩岩性

为泥岩, 节理发育、淋水严重。为防止水对围岩的弱化作用导致巷道开挖后还未来得及进行锚网支护, 围岩就开始掉块、冒落。在实际工程中将设计中二次(一次初喷, 一次关键部位喷层)喷射混凝土改为三次, 其中第 1 次初喷分为一次初喷和二次初喷, 使得巷道围岩及时得到临时支护, 赢得支护时间^[17-18]。

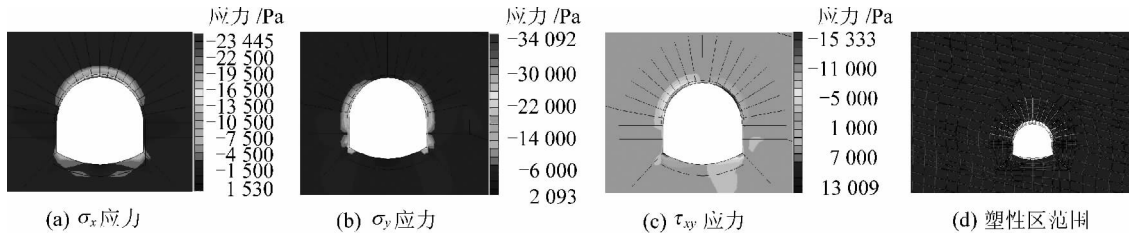


图 4 软岩巷道支护新设计方案数值模拟

Fig. 4 Numerical simulation for new supporting design plan of soft rock roadway

3.4 HJ 复合型软岩巷道支护效果分析

支护工程施工完成后在巷道现场通过表面位移监测试验观测巷道围岩向邻空区的移动规律。在巷道顶板和两帮均设有若干断面, 每个断面设置 4 个测点, 其表面位移试验曲线如图 5、图 6 所示。

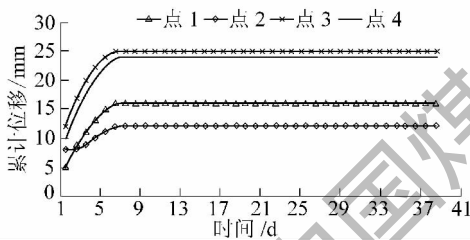


图 5 断面累积位移-时间关系曲线

Fig. 5 Relationship curves of cumulative displacement and time

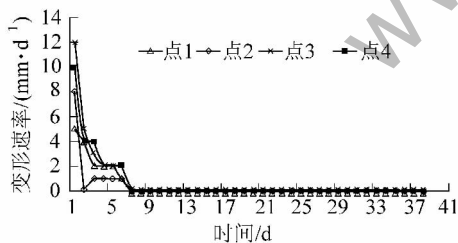


图 6 断面变形速率-时间关系曲线

Fig. 6 Relationship curves of deformation speed and time

通过图 5、图 6 可以看出: 围岩在巷道开挖 1 个星期内变形最大, 7 天后, 变形速率减小, 15 天后, 变形趋于稳定。结合关键部位识别方法可以确定本次试验关键部位耦合支护最佳时间为 30 天。巷道围岩表面最大累积位移为 60 mm, 这样的位移在设计许可范围内, 且 30 天后巷道稳定, 变形速率为 0, 说明支护措施成功。

4 结 论

1) 根据现场工程地质调查和室内黏土矿物物化试验确定研究区围岩受区内发育节理影响, 以掉块方式破坏; 研究区软岩含石英较多, 黏土矿物含量中等, 具有一定强度, 膨胀性中等偏小, 但自重应力和地应力较大, 使得围岩表现出软岩的特性。可以确定鹤壁矿区的软岩属于高应力型和节理化型的复合, 即高应力-节理化型(HJ 型)。

2) 结合试验结果与软岩变形力学机制确定鹤壁矿区软岩变形的力学机制为 I_{AB} II_{BD} III_D 型, 该类型变形力学机制使得研究区的软岩巷道在变形破坏过程中具有大变形, 难支护并且具有“岩爆”, 节理化软岩变形初始速度快, 围岩应力极高不易支护且节理化软岩容易发生大规模的塌方、冒落等特点。

3) 将鹤壁矿区 HJ 复合型软岩变形力学机制转化成重力作用的单一力学变形机制, 确定采用锚网喷加锚索耦合支护的方式对软岩巷道进行支护设计, 利用计算机数值模拟技术模拟该支护设计, 数值模拟结果证明支护方案可行。

4) 设计施工完成后, 对巷道围岩断面进行现场动态监测, 监测结果表明, 围岩在巷道开挖后半个月变形趋于稳定, 变形速率趋于 0。说明支护设计合理有效, 可以为研究区软岩巷道开采提供参考。

参考文献:

- [1] 杨 峰. 高应力软岩巷道变形破坏特征及让压支护机理研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009: 1-15

- Yang Feng. Research on deformation and failure character and yielding support mechanism in high stress soft rock roadway [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology 2009: 1-15.
- [2] 余伟健, 袁 越, 王卫军. 困难条件下大变形巷道围岩变形机理与控制技术[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(1): 15-20.
- Yu Weijian, Yuan Yue, Wang Weijun. Deformation mechanism of roadway surrounding rock with large deformation and control technology under difficult conditions [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(1): 15-20.
- [3] 宗义江, 韩立军, 郝建明. 极破碎软岩巷道失稳机理与动态迭加耦合支护技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(3): 355-362.
- Zong Yijiang, Han Lijun, Gao Jianming. Instability mechanisms and dynamic superposition coupling support in extremely fractured and soft rock roadway [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(3): 355-362.
- [4] Wang C, Wang Y, Lu S. Deformational behavior of tunnels in soft rocks in underground coal mines and principles for stability control [J]. Int J Rock Mech and Min Sci, 2000, 37(6): 937-946.
- [5] 张 璨, 张 农, 许兴亮, 等. 高地应力破碎软岩巷道强化控制技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(1): 13-18.
- Zhang Can, Zhang Nong, Xu Xingliang, et al. Support technique intensifying soft broken roadway with high ground stress [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(1): 13-18.
- [6] 马春德. 深部复合型破坏高应力软岩巷道支护技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010: 1-8.
- Ma Chunde. Research on the support technology for high stressed soft rock roadway with composite failure [D]. Changsha: Central South University, 2010: 1-8.
- [7] 孙晓明, 何满潮. 深部开采软岩巷道耦合支护数值模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(2): 37-40.
- Sun Xiaoming, He Manchao. Numerical simulation research on coupling support theory of roadway within soft rock at depth [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2005, 34(2): 37-40.
- [8] 何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 102-103.
- [9] Chistiansson R. The latest development for in-situ rock stress measuring techniques [C] // Proceedings of the International symposium on In-situ Rock Stress. Trondheim, Norway, 2006: 3-10.
- [10] 何满潮, 李 乾, 蔡 健, 等. 兴安煤矿深部返修巷道锚网索耦合支护技术[J]. 煤炭科学技术, 2006, 34(12): 1-4.
- He Manchao, Li Qian, Cai Jian, et al. Coupling support technology with bolt, steel mesh and anchor for deep mine repair roadway in Xing'an Mine [J]. Coal Science and Technology, 2006, 34(12): 1-4.
- [11] 孙晓明, 何满潮, 冯增强. 深部松软破碎煤层巷道锚网索支护技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2005, 33(3): 47-50.
- Sun Xiaoming, He Manchao, Feng Zengqiang. Research on bolt mesh anchor combined support technology for deep soft and broken seam gateway [J]. Coal Science and Technology, 2005, 33(3): 47-50.
- [12] Arya Assadi Langroudi S, Shahaboddin Yasrobi. A micro-mechanical approach to swelling behavior of unsaturated expansive clays under controlled drainage conditions [J]. Applied Clay Science, 2009(45): 8-19.
- [13] Maki Ito, Shahid Azam. Engineering properties of a vertisolic expansive soil deposit [J]. Engineering Geology, 2013, 151: 10-16.
- [14] 郭富利, 张顶立, 苏 洁, 等. 地下水 and 围压对软岩力学性质影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2324-2332.
- Guo Fuli, Zhang Dingli, Su Jie, et al. Experimental study on influences of groundwater and confining pressure on mechanical behaviors of soft rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(11): 2324-2332.
- [15] 何满潮, 晏玉书, 王同良, 等. 软岩的概念及其分类 [C] // 中国岩石力学与工程学会软岩工程专业委员会、煤矿软岩工程技术研究推广中心. 世纪之交软岩工程技术现状与展望. 北京: 煤炭工业出版社, 1999: 11.
- [16] 何满潮, 彭 涛. 高应力软岩的工程地质特征及变形力学机制 [J]. 矿山压力与顶板管理, 1995(2): 8-11.
- He Manchao, Peng Tao. The engineering geological characteristics and deformation mechanism of the high stress soft rock [J]. Mine Pressure and Roof Management, 1995(2): 8-11.
- [17] 何满潮, 王俊臣. 软岩巷道关键部位二次耦合支护技术 [C] // 中国岩石力学与工程学会软岩工程专业委员会、煤矿软岩工程技术研究推广中心. 世纪之交软岩工程技术现状与展望. 北京: 煤炭工业出版社, 1999: 6.
- [18] 王俊臣, 贾明魁, 郭建周, 等. 关键部位二次组合支护技术及其应用 [J]. 煤炭科学技术, 1999, 27(10): 1-3.
- Wang Junchen, Jia Mingkui, Guo Jianzhou, et al. The double composite supporting technology and its application in key part [J]. Coal Science and Technology, 1999, 27(10): 1-3.
- [19] 何满潮, 邵正盛, 彭 涛. 论高应力软岩巷道支护对策 [J]. 水文地质工程地质, 1994(4): 7-11.
- He Manchao, Zou Zhengsheng, Peng Tao. Research on the supporting strategy of soft rock roadway with high stress [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1994(4): 7-11.
- [20] 陈庆敏, 马文顶, 袁 亮, 等. 软岩的工程分类及其支护原则 [J]. 矿山压力与顶板管理, 1997(51): 120-123, 234.
- Chen Qingmin, Ma Wending, Yuan Liang, et al. Engineering classification and support principles of soft rock [J]. Mine Pressure and Roof Management, 1997(51): 120-123, 234.
- [21] 李殿国. 煤矿软岩巷道支护技术新进展 [J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(4): 37-39.
- Li Dianguo. New progress of support technology for soft rock roadway in coal mine [J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(4): 37-39.
- [22] 何满潮, 袁 越, 王晓雷, 等. 新疆中生代复合型软岩大变形控制技术及其应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(3): 433-441.
- He Manchao, Yuan Yue, Wang Xiaolei, et al. Control technology for large deformation of mesozoic compound soft rock in Xing Jiang and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(3): 433-441.