

穿 435 m 落差断层大巷的地质保障及施工控制技术

张 农^{1, 2}, 许兴亮^{1, 2}, 程真富^{1, 3}, 王 成^{1, 2}

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221008; 2. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221008; 3. 淮北矿业集团生产管理部, 安徽 淮北 235006)

摘要: 以穿过 435 m 落差、140 m 宽度断层带的主运输大巷的安全开掘为工程背景, 研究特大断层区巷道施工地质保障及围岩控制技术。在断层岩性组成、断层岩芯剪切滑动面擦痕特征、断层导水特性及现代活动性等研究的基础上, 结合区域地质分析判定穿该断层区域巷道施工不会遭受到断层突水威胁, 施工的关键在于巷道顶板安全控制, 针对性地提出化学浆液预注浆控制迎头空顶区岩体垮冒技术。如何防止超大范围断层破碎带内松散泥质岩体渗水泥化则是成巷后的最大技术问题; 高强预应力锚杆支护和滞后强化注浆技术相结合可有效防止泥化, 实现巷道长期维护。针对顶板状况设计两种技术方案, 采取分步实施的动态施工工艺, 在围岩顶板空顶自稳时间很短时, 采取超前预注浆和喷层、架棚、注浆、锚杆组合技术方案; 在围岩空顶自稳期间允许施工锚杆时, 采用锚杆、注浆和关键部位锚索加固方案, 保证了巷道的施工安全和长期稳定。

关键词: 采矿工程; 巷道开掘; 断层; 地质保障; 注浆; 锚杆支护; 过程监控

中图分类号: TD 35

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)增 1 - 3292 - 06

GEOLOGICAL GUARANTEE AND CONSTRUCTION CONTROLLING TECHNIQUE OF MAIN ROADWAY CROSSING FAULT ZONE WITH 435-m FALL

ZHONG Nong^{1, 2}, XU Xingliang^{1, 2}, CHENG Zhenfu^{1, 3}, WANG Cheng^{1, 2}

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resources and Mine Safety, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China; 3. Production and Management Division, Huaibei Ming Group, Huaibei, Anhui 235006, China)

Abstract: Taking safe construction of the main haulage roadway drilling crossing a 435-m fall and 140-m wide fault zone as engineering background, a study of engineering geological guarantee and construction controlling technique of roadway are performed. Based on the fault rocks, scraping characteristics of rock core shear-sliding surface, water conductivity, recent activities of the faults and regional geological analysis, it is found that roadway construction will not be subjected to fracture water outburst. The key construction technique lies in successful control of head-on hollow roof rock collapse. Under this point, grouting of chemical serum should be chosen as a precaution. Once the roadway is formed, it is important to control large-scale water seepage caused by argillitization of broken loose mudstone and keep long-term stability of roadway. So combination of lag-grouting of controlling rock mass weakened by fracture water and high-intensity pretension supporting to prevent

收稿日期: 2008 - 01 - 17; **修回日期:** 2008 - 04 - 02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50674085); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2007CB209408); 2006 年教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET - 06 - 0478)

作者简介: 张 农(1968 -), 男, 博士, 1989 年毕业于中国矿业大学采矿工程专业, 现任教授, 主要从事煤矿巷道围岩控制方面的教学与研究工作。
E-mail: zhangnong@126.com

continuous rheological deformation is advocated. As a result, two supporting schemes were considered: as long as self-stability of the roof rock is allowed, the stepwise bolting with anchorage cables installed at key area will be adopted; otherwise, the pre-grouting, spraying, shedding and bolting scheme will be selected instead. Process controlled project is highlighted by dynamic use of advancing pre-grouting, spraying, shedding and bolting to guarantee the roadway's safe construction.

Key words: mining engineering; roadway construction; fault zone; geological guarantee; grouting; bolting supporting; process monitoring

1 引 言

桃园煤矿隶属安徽淮北矿业集团, 井田境内横穿一条落差大于 400 m 的正断层(F2 断层), 断层走向 $N80^{\circ}\sim 88^{\circ}W$, 倾向 NNE, 倾角 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$, 两端皆延伸出该矿井。八、十采区被 F2 断层分割于桃园煤矿北部, 单独布置北区生产系统, 需要施工立井和地面铁路及装车站, 而利用中央生产系统, 需要北八运输大巷横穿 F2 断层。两方案比较, 第一方案技术难度小, 但多投资人民币 220 万元。已有地质勘探资料表明该断层带的落差大于 400 m, 断层影响带宽度超过 100 m。经补充勘探和综合比较确定采用穿断层施工大巷技术方案, 但需要解决在特大落差断层的巨厚破碎带内施工永久性巷道的防治水、顶板控制和长期维护的技术难题^[1, 2]。本文介绍围绕这一工程技术开展的地质保障、安全施工及围岩控制技术研究成果。

2 穿 F2 断层区域的地质保障技术

首先围绕 05 - 水 1 和 05 - 水 2 两个钻孔所获得的部分岩芯样品开展分析。

2.1 断层岩芯剪切滑动面擦痕分析

断层擦痕是断层运动方式的直接体现, 根据对 2 个钻孔部分岩芯样品进行的断层擦痕观察分析, 发现其原始擦痕剪切面不规则, 倾角变化较大。从 05 - 水 1 钻孔的几个样品来看, 优势滑动面倾角为 $40^{\circ}\sim 45^{\circ}$, 擦痕方向与滑面倾向往往不一致, 常常呈一定的夹角, 表明断层运动具有水平分量, 水平位移方向呈右旋或左旋运动, 可能在不同的地质历史阶段, 由于地壳运动方式的差异, 导致不同擦痕特征, 此类现象反映出 F2 断层的活动方式十分复杂。

2.2 断层带岩性分析

断层带内岩体通常含有泥质成分, 而且许多地段泥质成分含量很高, 从钻孔揭露的岩芯看, 断层

角砾岩的岩石成分主要由泥岩、粉砂岩、细砂岩与少量煤层构成。水 1 孔 525 m 处的样品黏粒含量高达 65%, 而碎石含量只有 8.3%。

大量观测资料证明, 在张性裂隙断层带内, 地下水渗透过程中, 运动水流可携带黏粒(多半是胶粒物质), 并不断在裂隙中沉积下来。如果断层内张性裂隙很大, 就可以成生体积较大、黏粒含量较高的断层带黏性土体。水 1 孔 528 m 处高黏性土现象就是以这种方式产生后, 又经过后期压密而形成的。图 1 的黑色松软淤泥显示出了这类黏性土的早期形态。在断层应力作用下揉皱(见图 2)或破碎(见图 3)现象严重。粉砂岩呈浅灰色~深灰色, 层状结构, 常夹浅灰色细砂岩层理, 在断层应力作用下也较为破碎。细砂岩呈灰白色~浅灰色, 硅质胶结, 性硬, 在断层应力作用下出现裂隙或呈较大的碎块状。



图 1 张性裂隙中的黑色软淤泥沉积(05 - 水 2, 钻孔深度 336 m)

Fig.1 Black mud deposition in opening crack(hole No.2, depth 336 m)

2.3 断层导水特性分析

05 - 水 1 和 05 - 水 2 钻孔的钻进冲洗液消耗量小而稳定, 以额定泵量 2.5 L/s 压水试验, 水压升高较快, 压水试验水压过程见图 4。单位吸水量 $\omega = 0.002\ 95\ L/(\min \cdot m^2)$, 渗透系数 $k = 0.006\ 04\ m/d$, 属于弱透水性断层。

2 个钻孔钻进完毕后, 都进行了简易注水试验。



图2 揉皱式压性劈理(05-水1钻孔,深484.36 m)

Fig.2 Crumpled cleavage derived from pressure(hole No.1, depth 484.36 m)



图3 破碎岩石与相对完整岩石之间以滑动层面相接触(05-水1钻孔,深507.35~509.35 m)

Fig.3 Contact of sliding layer between broken rock and integrity rock(hole No.1, depth 507.35 - 509.35 m)

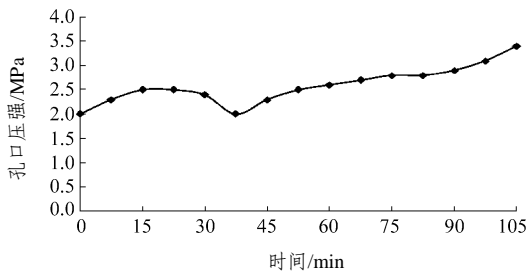


图4 压水试验水压曲线

Fig.4 Process of water pressure test

终孔后把钻孔灌满,观察其水位下降情况,经过一定时间后,根据回灌量折算出相应的注水量。按此方法测出05-水1钻孔最大注水量为5 L/h;05-水2钻孔最大注水量为9.5 L/h。这样小的注水量也表明钻孔所遇到的断层带范围内没有导水性较强的裂隙存在。由此认为F2断层属于弱透水性断层,不会造成大规模矿井突水事故。

由于F2断层带导通了下古生界碳酸盐岩岩溶裂隙含水层(奥灰)、石炭系碳酸盐岩岩溶裂隙含水层(太灰)、基岩地层区域强含水层,虽然对大巷开掘无直接影响,但因各种导水断裂发育,致使该含水层与太原群灰岩水乃至二迭系煤系地层有一定的

水力联系,构成底部煤层开采的间接充水含水层,存在裂隙渗水的影响,对巷道长期维护不利,开挖工程证明在扰动条件下会造成裂隙渗水。从一般规律看,大型断层带外围岩体破碎,往往更容易出现小规模导水裂隙,因而在穿断层区施工中应注意断层接触带附近的裂隙导水性,在开巷时应采取探水、放水降压措施,以确保施工安全。

2.4 断层稳定性评价

(1) 断层稳定性评价

断层碎屑是由断层反复运动时两侧岩石的磨擦滑动碎裂与地下水携带物质的沉淀等作用形成的,它记载着有关断层运动的大量信息。分形几何是描述自然界复杂对象的数学工具之一,分维则是分形几何学最基本、最关键的概念,是表示分形的定量指标。用于研究断层带填充物的粒度分形^[3, 4],属于自然界的碎形现象,在求取沉积物的分维值时,常用的方法是质量维数法。这里取土工试验所测的碎屑颗粒为对象,在双对数坐标系建立 $M(r)/M$ 与 r 线性拟合关系,求出斜率 b ,得到3个样品的分维值(D)分别为2.94, 2.66和2.86。从拟合效果来看,3个样品的分形线性相关系数分别为0.994, 0.974和0.938,都远远大于0.900的要求,说明3个样品分形性都非常好。尤其水1-528样品的相关系数分别达到0.994,显示出本身在颗粒分布上具有极高的自相似特性。

在源岩一定的情况下,主要受断层运动的频度及运动方式的影响,断层运动频度高,断层经过长期反复运动,断层碎屑粒径逐渐变小,导致分维值变大^[5]。对本工程来说,断层碎屑说明两个问题:一是否为活断层,二断层是黏滑性的(快速而剧烈的运动,伴随着岩石的断裂和地震)还是蠕滑性的(两盘之间作缓慢而持续的运动)。3个 D 值中有2个大于2.80,1个小于2.70(而实际上钻探过程中绝大部分细颗粒物没有取上来,否则大多数会大于2.80),说明断层运动主要以两盘之间缓慢而持续的蠕滑运动为主,不至于出现巷道剧烈断裂破坏和导致地震的现象。

(2) F2断层的现代活动性判断

勘探资料已经证明,F2断层北部的上盘基岩面标高比下盘低50 m左右,形成一个沿断层线分布的带状陡坎(见表1)。2004年物探结果证实,断层上盘地层在新第三纪以来沉降速度大于下盘,在断层两盘形成落差,造成新生界地层厚度差异,这其实意味着断层在新第三纪以来仍在发展。断层碎屑的

表 1 桃园矿 F2 断层两侧沉积物厚度与地形关系

Table 1 Relationship between thickness and terrain of sediment located in fault F2 in both sides of Taoyuan mine

断层南侧			断层北侧			断层不同高程差值			方向		
孔号	基岩标高/m	三隔厚度/m	孔号	基岩标高/m	三隔厚度/m	四含厚度/m	基岩标高差/m	三隔厚度差/m		四含厚度差/m	
4-2	-277.10	56.6	39.9	4-3	-309.40	62.00	38.90	32.30	6.60	-1.0	东 ↑
构 9	-257.25	69.0	25.5	3-4 ₃	-301.03	87.68	38.10	43.78	18.78	12.6	
4-1	-255.00	52.6	30.6	4-5	-305.68	62.69	39.14	50.68	10.09	8.54	↓
补 1-2	-260.90			补 1-1	-298.90	81.80	35.50	38.00			西

粒度分布对断层运动特性也有一定的影响^[6-7]。

考查 3 个样品的粒度分布, 在砂级颗粒中未出现强烈的单峰, 而且都明显显示出黏粒的峰形, 这就充分表明 F2 断层在发育后期一直未出现剧烈活动。

表 2 马丽散 N 主要技术参数

Table 2 Main technical parameters of marithan N

25 °C 时的 密度 (g · cm ⁻³)	25 °C 时的 黏度 (MPa · s)	体 积 比	初始黏度 (MPa · s)	膨胀 开始 时间	反应 结束 时间	最终 压力 (MPa)	黏合 力 (MPa)	膨 胀 比
1.04	200	1	450	1'15"	2'10"	>35	>5	2
1.23	210	1	250	0'45"	1'15"	>35	>5	2

3 施工控制技术

3.1 围岩控制原理

采用围岩强化控制原理控制特大断层破碎带巷道的施工安全和长期稳定, 包括 3 个方面: (1) 围岩强度的强化, 通过注浆提高断层破碎带内松散围岩的强度; (2) 锚杆承载性能的强化, 通过选择超高强杆体材料制造锚杆, 改进锚杆结构和附件性能, 使锚杆支护实现高系统强度、高预拉力和高系统刚度, 形成高增荷承载性能; (3) 支护围岩承载结构的强化, 通过帮角及底板关键部位的进一步加强, 提高支护围岩结构的整体稳定性。

3.2 预注浆技术

在施工迎头拱顶区扇形布置 4~5 套中空注浆锚杆, 对预开挖区 2~3 m 范围内的岩体实施注浆加固, 提高巷道顶板区域围岩的整体稳定性及施工通过能力^[8-9], 降低水对围岩力学性质的影响。

注浆材料选择由树脂和催化剂双组分合成的新型高分子——聚亚胶脂材料化学浆液马丽散 N, 该材料具有低初始黏度、高黏合力, 很好的机械性能与渗透性, 并可以通过加入一定量的加速剂控制反应速度。其主要技术指标见表 2。

3.3 高强预应力锚杆支护技术

坚持以高强预应力支护^[10]为基础是综合控制围岩稳定、降低巷道流变速度、保持长期稳定的关键。采用屈服强度超过 500 MPa 的 IV 级锚杆专用

螺纹钢加工超高强锚杆, 抗破断强度比 II 级螺纹钢锚杆高 50%, 比 Q235 普通锚杆材料高 3 倍(见表 3); 采用等强度加工技术保证锚杆杆体强度不会因加工而损失; 采用新型大托盘(尺寸为 200 mm×200 mm), 增大护表面积, 消除小托盘与围岩局部小面积接触而产生的集中载荷、挤压破损围岩的现象; 选用超强大扭矩阻尼螺母可以实施大扭矩安装、提高锚杆承载性能; 采用 MOS-90J2 型气扳机可以实现锚杆 80~100 kN 的高预紧力, 有效地增加锚杆对巷道围岩支护初期的控制作用, 提升锚杆支护的作用级别; 选用高强塑网、钢塑复合带、冷拔电弧网等高强度、高刚度护表材料可以解决软破岩体的网兜现象, 提高支护结构的整体稳定性, 防止锚杆松弛、锚固失效; 采用了科学的非对称性抗弯模量断面设计的 M 型钢带向上弯矩小, 容易与煤岩体表面密贴, 向下弯矩大, 可以提供较大的抗变形与撕裂能力。这些综合措施大大改善松散层裂破碎岩

表 3 各种锚杆材料强度指标

Table 3 Strength indexes of various bolts

锚杆材料	直径 /mm	屈服强度 /MPa	极限强度 /MPa	屈服荷载 /kN	极限荷载 /kN	伸长率 /%
Q235 圆钢	16	240	410	48	82	26
II 级螺纹钢	22	335	490	130	190	15
III 级螺纹钢	22	400	570	156	228	15
IV 级螺纹钢	22	500	630	190	240	15

体的维护效果。

两帮和四角关键部位采用小孔径预应力锚索加强,由高强度预应力钢绞线、专用托盘、锁具组成,可以有效加固控制6~8 m的岩层范围,将周边显著变形的岩体与深部变形量相对较小的岩体有效连接起来,利用稳定岩体的承载能力来支护巷道,实现小变形岩体控制大变形岩体,约束浅位岩体的整体移动。部分复杂地段结合U型钢结合壁后充填技术,实现锚架联合支护,确保穿断层区域巷道长期稳定。

4 施工方案

该段工程围岩赋存条件变化频繁,差异较大,这里依据顶板完整性及自稳性能、巷帮有无水及出水量的大小等分别采用如下两套方案分段治理,并在后续施工过程中不断反馈优化,在过程控制^[11]中保证安全:(1)第一套方案:开挖后顶板自稳时间短,采用超前预注浆结合喷棚注锚综合支护技术,以U型钢封闭可缩支架为基础支护。(2)第二套方案:开挖后顶板自稳时间长,允许空顶施工锚杆,则以喷锚注分步动态加固为基础支护,再实施关键部位锚索加固和围岩注浆技术。

5 支护效果分析

根据施工揭露北八运输大巷穿过断层带的落差为435 m,断层核心带宽度70 m,断层影响带宽度140 m。在F2断层区域巷道设围岩收敛观测站18处:(1)以马蹄形全封闭U型棚支护为基础的施工段,第1架棚至370架两帮相对移近量最大值275 mm,平均移近0.476 mm/d;最大底臃量173 mm,平均底臃量0.299 mm/d。(2)采用锚喷巷支护段两帮相对移近量最大26 mm,平均移近0.045 mm/d;最大底臃量10 mm,平均底臃量0.017 mm/d。(3)无底梁U型棚支护段两帮最大相对移近量90 mm,平均移近0.156 mm/d;最大底臃量30 mm,平均底臃量0.052 mm/d。进入F2断层区域20 m位置由于受夏季空气潮湿影响,出现混凝土皮开裂、脱落、底臃、两帮相对位移速度加大现象(见图5,6的变形异常段;时间:2006年1月11日~2007年8月29日),但在局部采取了复喷浆液措施后,该地段迅速趋于稳定。经3 a观测,该工程完好。

与该矿近似条件过规模较小断层的巷道严重破

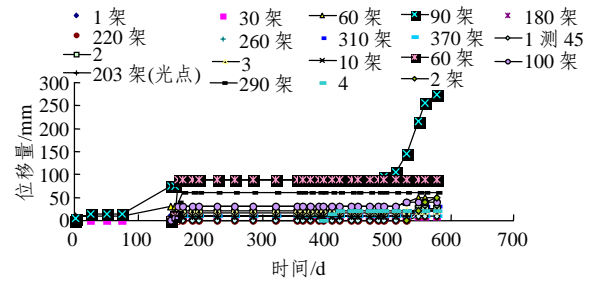


图5 F2断层区域北八运输大巷带两帮位移观测曲线
Fig.5 Relative displacement variation between side walls of main haulage roadway N8 in fault F2 zone

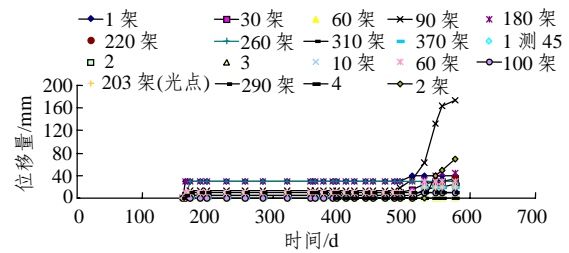


图6 F2断层区域北八运输大巷底鼓观测曲线
Fig.6 Floor swelling variety of main haulage roadway N8 in fault F2 zone

坏情况(见图7)相比,北八运输大巷过F2断层区域巷道围岩变形破坏得到明显的控制,支护状况达到预期效果。该支护体系能够有效地确保安全施工及正常使用(维护效果见图8)。



图7 临近区域巷道(北四石门)修复前破坏情况
Fig.7 Destruction of nearby roadway(Shimen N4) before repairing



图8 北八运输大巷F2断层核心带巷道维护效果
Fig.8 Maintaining effect of main haulage roadway N8 in fault F2 core zone

6 结 论

(1) 采用多种地质勘探方法研究 F2 断层区域的工程地质保障, 并对穿断层的围岩稳定性进行分析评价, 认为该断层属于弱透水性断层, 有一定现代活动性, 但突水威胁很小。技术难度主要体现在大范围破碎岩体的松动垮冒和泥质岩体的渗水泥化, 若解决了破碎岩体地带的顶板施工安全保障、防止泥质岩体泥化及在高应力及裂隙水弱化条件下长期维护等关键技术, 则巷道可以成功穿越该构造破碎区。

(2) 提出超前预注浆控制顶板保障断层破碎带顶板施工安全及综合分步实施的围岩强化控制技术控制围岩长时流变的技术方案, 采用新型高强预应力锚杆支护, 结合 U 型钢壁后充填注浆加固及滞后关键部位锚索加固技术, 并用动态过程控制技术指导施工, 顺利穿越了断层。

(3) 施工揭露该断层实际落差为 435 m、核心带宽度 70 m, 影响带宽度 140 m。经 3 a 跟踪观测, 该工程维护良好。

参考文献(References):

- [1] 邓仁清. 高压富水隧道注浆堵水施工技术及应用[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(2): 263 - 266, 275.(DUN Renqing. A method of water blocking by grouting in high pressure and enriched water tunnel and its application[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(2): 263 - 266, 275.(in Chinese))
- [2] 郭军杰, 韩春晓, 涂兴子. 煤巷掘进过断层方法[J]. 矿山压力与顶板管理, 2004, 21(2): 39 - 40, 43.(GUO Junjie, HAN Chunxiao, TU Xingzi. Methods of coal entry driving through fault[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2004, 21(2): 39 - 40, 43.(in Chinese))
- [3] 邵顺妹, 邹谨敞. 断层泥的分形研究[J]. 地震学报, 1996, 18(3): 376 - 381.(SHAO Shunmei, ZOU Jinchang. Fractal research of fault mud[J]. Acta Seismologica Sinica, 1996, 18(3): 376 - 381.(in Chinese))
- [4] 徐永福, 吴正根. 断层碎屑分布的分维及其地质意义[J]. 河海大学学报, 1996, 24(3): 1 - 4.(XU Yongfu, WU Zhenggen. Fractal dimension of fragment and its geologic implication[J]. Journal of Hohai University, 1996, 24(3): 1 - 4.(in Chinese))
- [5] 谢焱石, 谭凯旋. 断裂构造的分形研究及其地质应用[J]. 地质地球化学, 2002, 30(1): 71 - 76.(XIE Yanshi, TAN Kaixuan. Fractal research on fracture structure sand application to geology[J]. Geology-Geochemistry, 2002, 30(1): 71 - 76.(in Chinese))
- [6] 任光明, 聂德新. 软弱层带夹泥粒度成分的分形研究[J]. 地质灾害与环境保护, 1997, 8(4): 1 - 8.(REN Guangming, NIE Dexin. Fractal character of granulometer composition of intercalated gouge in weak-layer zones[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1997, 8(4): 1 - 8.(in Chinese))
- [7] 柏春广, 王 建. 一种新的粒度指标: 沉积物粒度分维值及其环境意义[J]. 沉积学报, 2003, 21(2): 234 - 239.(BAI Chunguang, WANG Jian. A new grain-size index: grain-size fractal dimension of sediment and its environmental significance[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(2): 234 - 239.(in Chinese))
- [8] 赵庆彪, 刘长武. 软岩巷道锚注加固系统的“网络”效应[J]. 金属矿山, 2003, (12): 27 - 30.(ZHAO Qingbiao, LIU Changwu. “Network” effect of bolting-grouting reinforcement system in soft rock roadways[J]. Metal Mine, 2003, (12): 27 - 30.(in Chinese))
- [9] 熊 伟, 何满潮. 软岩巷道冒落区注浆技术[J]. 金属矿山, 2005, (2): 20 - 23.(XIONG Wei, HE Manchao. Grouting technology for collapsed zone in soft rock tunnel[J]. Metal Mines, 2005, (2): 20 - 23.(in Chinese))
- [10] 张 农, 高明仕, 许兴亮. 煤巷预拉力支护体系及其工程应用[J]. 矿山压力与顶板管理, 2002, (4): 1 - 4, 7.(ZHANG Nong, GAO Mingshi, XU Xingliang. Prestressed supporting system of roadway and its engineering application[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2002, (4): 1 - 4, 7.(in Chinese))
- [11] 许兴亮, 张 农, 徐基根, 等. 高地应力破碎软岩巷道过程控制原理与实践[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(1): 51 - 55.(XU Xingliang, ZHANG Nong, XU Jigen, et al. Principle and practice of process control over soft broken roadway with high ground stress[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2007, 24(1): 51 - 55.(in Chinese))