

墩柱式沿空留巷技术研究

贾民¹, 柏建彪², 田涛¹, 徐莹², 邱亮亮²

(1. 兖州煤业股份有限公司 济宁二号煤矿, 山东 济宁 272072; 2. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:为解决济宁二号煤矿工作面回采距离短、掘进速度慢、采掘接替紧张的难题,通过采用墩柱压力试验、建立力学模型、理论计算及现场试验方法,创新性地提出采用墩柱结构进行沿空留巷。结果表明:墩柱能够满足留巷强度要求,切顶所需压力为 21.96 MPa;当钢管内砂石质量配比为 1.0 : 1.6 时,墩柱式沿空留巷效果最好,墩柱既能保持较高强度,又具有良好的可缩性;矿压观测结果显示顶底板移近量最大为 596 mm,两帮移近量最大为 299 mm,能够保证沿空留巷的稳定性。

关键词:沿空留巷;墩柱;围岩稳定性;承载力;巷旁支护阻力

中图分类号:TD322.4 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2014)01-0018-05

Research on Pier Column Gob-side Entry Retaining Technology

JIA Min¹, BAI Jian-biao², TIAN Tao¹, XU Ying², QIU Liang-liang²

(1. Jining No.2 Coal Mine, Yanzhou Coal Mining Company Limited, Jining 272072, China;

2. School of Mining, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to solve the problem short mining distance, slow driving speed, conflict of exploitation and mining of working face in Jining No.2 Coal Mine, pier column pressure testing, mechanical model, theoretical calculations and field test methods were applied to put forward innovatively pier structure gob-side entry retaining. The results showed that the pier column could meet the strength requirements, the required for cutting the top pressure was 21.96 MPa. When the sand and stones weight ratio in steel pipe was 1.0 : 1.6, the effect of pier column gob-side entry retaining was the best, the pier column not only could maintain a higher strength, but also had good scalability. The rock pressure observation showed that the maximum roof to floor convergence was 596 mm, the maximum rib to rib convergence was 299 mm, which could ensure the stability of gob-side entry retaining.

Key words: gob-side entry retaining; pier column; stability of surrounding rock; bearing capacity; roadside supporting resistance

0 引言

我国煤炭资源丰富,但是赋存条件十分复杂,煤炭井工开采需要掘进大量巷道,据统计,2006年我国新掘巷道总进尺约 2.1 万 km,其中回采巷道进尺占 70%以上^[1]。绝大部分回采巷道长期以来一直采用留煤柱护巷的方法进行维护,由此造成了大量的煤炭损失,其比例约占全矿煤炭损失量的 40%^[2]。护巷煤柱的留设不仅导致煤炭采出率较低、巷道维护困难,而且较宽的区段煤柱在工作面回采后将形成应力集中区,使布置在煤柱下方的底板

岩巷和下层煤回采巷道维护困难,有时甚至会导致煤与瓦斯突出的动力现象^[3-5]。沿空留巷技术具有缓解采掘接替紧张、提高煤炭采出率、降低瓦斯危害等优点^[6-9],该技术无论从薄煤层到中厚煤层还是从浅埋煤层到深埋煤层都得到广泛的推广应用。该技术一直处于发展过程,尤其巷旁支护体的材料组成,从传统的木垛、矸石袋和密集木支柱发展到支护强度大、隔绝采空区好的混凝土块和高水速凝材料^[10-12]。但对于混凝土块,机械化程度低、工人劳动强度大,对于高水速凝材料充填体,充填系统较为复杂、材料成本较高^[13-14]。基于此,笔者提出了墩

收稿日期:2013-07-15;责任编辑:杨正凯 DOI:10.13199/j.cnki.est.2014.01.005

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51204167)

作者简介:贾民(1965—),男,山东邹城人,高级工程师,硕士,现任济宁二号煤矿矿长。Tel:13407547155,E-mail:lyccumt@126.com

引用格式:贾民,柏建彪,田涛,等.墩柱式沿空留巷技术研究[J].煤炭科学技术,2014,42(1):18-22.

JIA Min, BAI Jian-biao, TIAN Tao, et al. Research on Pier Column Gob-side Entry Retaining Technology[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(1): 18-22.

柱式沿空留巷技术,即结构外壳为可嵌套的 2 节无缝钢管,管内充满砂石。该巷旁支护体结构简单,并且可回收,在降低劳动强度和材料成本方面具有较大的优势。

1 墩柱式沿空留巷技术

1.1 沿空留巷巷旁支护体的作用

沿空留巷是在工作面回采过程中,通过采取有效的巷旁支护和巷内支护技术,将工作面的回采巷道保留下来作为邻近工作面的一条回采巷道^[14]。根据工作面回采时上覆岩层的活动规律,可知巷旁支护体的作用:①巷旁支护体紧随工作面构筑,此时巷旁支护体及时支护直接顶,确保巷道内直接顶不破碎。②在顶板垮落阶段,巷旁支护体的作用是为减小巷旁支护体所承受的载荷,尽可能高地切落采空区外侧的顶板,这就要求巷旁支护体应具有早期强度高、增阻速度快的力学特性,保证巷旁前期支护阻力大于顶板断裂在巷旁支护体外侧所需的最小支护阻力。由于巷旁支护体较难阻止顶板岩层断裂后的旋转下沉,这要求巷旁支护体具有一定的可缩量以适应顶板变形,防止巷旁支护体被压坏失去承载能力。③在顶板稳定阶段,巷旁支护体提供后期支护阻力维持大结构稳定,进而保持巷道的稳定。

1.2 墩柱结构及其适应性

1)墩柱外壳设计。墩柱外壳结构如图 1 所示,由 8mm 厚无缝钢管制作,为适应巷道高度的变化

外壳分为上下 2 节,上节和下节长均为 2 000 mm,2 节之间搭接长度不小于 500 mm。上节外径为 426 mm,内径为 410 mm;下节外径为 406 mm,内径为 390 mm。墩柱内砂石通过上节的充填口进行充填和下节的放砂口进行释放。为方便墩柱竖立,在上下 2 节分别焊接了 2 个吊环,采用 $\phi 12$ mm 钢筋制作。尤为重要的是为使墩柱具有较大的初撑力,采用 $\phi 34$ mm 刮板链在上节焊接了 2 个单体支撑座。

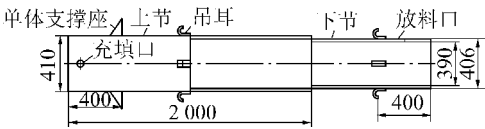


图 1 墩柱外壳结构

2)砂石材料质量配比。砂石材料的质量配比对墩柱的充填材料密度有很大影响,加水和振动情况下对充填材料密度的影响如图 2 所示,由图 2 可知:①加水后材料的流动性比不加水时强,因为水是液体,具有很强的流动性,在水的带动下粒径较小的砂子流向粒径较大的石子空隙中,使材料的密实度增大,承载性能也相应增大。②砂石材料在不振动的情况下,由于材料本身黏聚力的影响,即使在水的带动下也不能很好的密实,而振动能使材料与材料之间的黏聚力减小,从而增加材料的流动性,密实度也相应增加。③砂石材料质量配比为 1.0 : 1.6 时振动密实度最大,与岩石的密度也相差不大。综上所述,墩柱内选择砂石材料配比为 1.0 : 1.6,施工时加水并且振动,使其保持较高的支护强度。

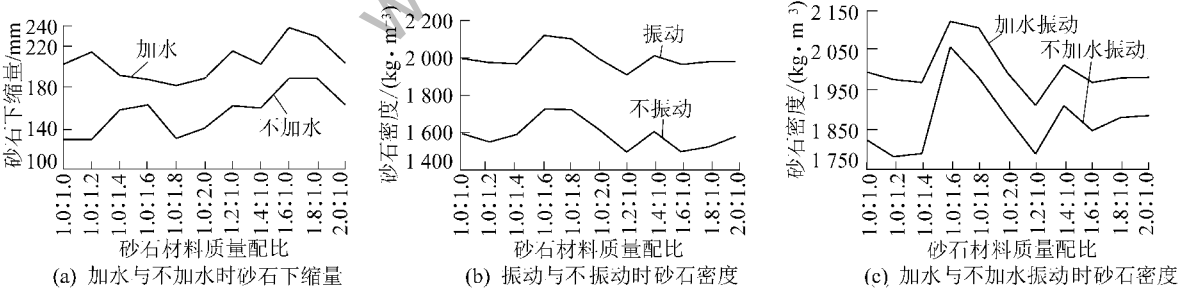


图 2 加水和振动对充填材料密度的影响

3)墩柱承载力。对墩柱做了 2 次抗压强度试验,压力机质量 4 000 t,最大行程 2 m,公称压强 32 MPa,总功率 200 kW。第 1 次试验时墩柱充填材料中没有加水,第 2 次试验时在充填材料中加了水,试验数据分别见表 1、表 2。①从不加水和加水的效果比较来看,在压力相同时加水后比不加水砂石下缩量小,如在压力 2 510 kN、不加水时砂石下缩量为 180 mm,加水时砂石下缩量为 120 mm。②当压力

为 2 510 kN 时,墩柱底部开始变形,并随着压力机下压缩量逐步加大。当压力为 3 760~5 020 kN 时,墩柱下部基本破裂。③当达到一定压力时,墩柱在桶壁最薄弱的地点即下节的放砂口处开始破裂,直至继续受力损坏报废。

4)墩柱在沿空留巷技术中的适应性。①通过对单节无缝钢管充填砂石的墩柱进行试验发现,当采用单节无缝钢管时,可缩量主要体现在外包

钢管的可缩性上,由于无缝钢管直管的可缩量较小,容易破坏。而由2节无缝钢圆管和充填砂石材料组成的墩柱具有可缩性,主要原因是当顶板给予墩柱一定压力时,管内砂石材料容易在下节钢管冲切下发生破坏,进而使上节钢管向下移动,使墩柱具有可缩性。随着顶板压力的增加,管内砂石材料产生横向变形,材料与钢管的相互作用力也相应增加,即材料围压增大,所带来的效应使材料的强度增加,当压力增大到一定程度,砂石不会被小钢管冲切破坏,说明其可缩性也是有一定限度的。②上节钢管内径比下节钢管外径略大,内部充填砂石,由上下钢管重叠部分所产生的摩擦力和砂石的承载力共同作用,提供一定的支护阻力。钢管壁的位移 u_r 计算式为

$$\begin{cases} u_r = \frac{1}{E} \left[\frac{(1+\mu)}{g} \frac{a^2 b^2 q_1}{b^2 - a^2} + (1-\mu) \frac{q_1 a^2 g}{b^2 - a^2} \right] \\ u_\theta = 0 \end{cases}$$

其中: E 为砂石的弹性模量; μ 为砂石的泊松比; g 为钢管径向长; a 为钢管内径; b 为钢管外径; q_1 为钢管内壁压力; u_θ 为钢管壁环向位移。由上式可知,随着 q_1 或 a 的增大,其钢管的径向位移增大。当大直径钢管在上,小直径钢管在下时,由于 q_1 向下逐渐增大,导致大直径钢管的上部径向位移小,两钢管相互移动时,容易出现“夹持”现象,从而可提供更大的支护强度。

| 表1 不加水时墩柱受力与砂石下缩量的关系 | | |
|----------------------|--------|---------------|
| 压力/kN | 下缩量/mm | 墩柱状态 |
| 1 000 | 20 | 没变形,状态正常 |
| 1 250 | 50 | 没变形,状态正常 |
| 1 880 | 120 | 没变形,状态正常 |
| 2 260 | 140 | 没变形,状态正常 |
| 2 510 | 180 | 底部变形,并逐步加大 |
| 3 760 | — | 上部变形,放砂口处筒壁破裂 |

| 表2 加水时墩柱受力与砂石下缩量的关系 | | |
|---------------------|--------|----------|
| 压力/kN | 下缩量/mm | 墩柱状态 |
| 1 250 | 30 | 没变形,状态正常 |
| 1 700 | 50 | 没变形,状态正常 |
| 2 510 | 120 | 下部稍变形 |
| 3 760 | 230 | 下部变形量变大 |
| 5 270 | — | 下部基本破裂 |

2 现场应用情况

2.1 工程概况

济宁二号煤矿由于地质条件复杂,工作面回采距离较短,掘进速度慢,采掘接续非常紧张。为了缓解接续紧张的局面,在该矿93_下07工作面运输巷实施墩柱式沿空留巷,该工作面位于矿井九采区中部,工作面回采长度1 603.24~1 621.00 m,工作面长195.54 m。煤厚1.00~3.30 m,平均2.54 m;煤层倾角0~12°,平均2°;煤层普氏系数 $f=1.91$,为软~中等硬度煤层;煤层基本顶为粉砂岩,厚度为22.46~23.98 m,平均厚度为23.22 m,层理发育, $f=6.0\sim13.0$;煤层直接底为泥岩,厚度0~2.0 m,平均厚度1.0 m, $f=2.0\sim4.0$;煤层基本底为粉砂岩,厚度3.82~5.31 m,平均厚度4.57 m, $f=5.0\sim8.0$ 。93_下07工作面运输巷断面为矩形,净宽×净高为4.0 m×2.8 m,留巷前采用锚网梁支护,顶部采用 $\phi 22$ mm×2 200 mm的树脂锚杆,间排距为800 mm×800 mm;锚索规格为 $\phi 18$ mm×6 000 mm,间排距为1 800 mm×2 400 mm;两帮采用 $\phi 20$ mm×2 200 mm树脂锚杆,间排距为800 mm×800 mm。

2.2 巷旁支护阻力计算

巷旁支护体与顶板相互作用的力学模型(图3)^[10-11],用平衡法对AB、BC段岩块建立力学方程。

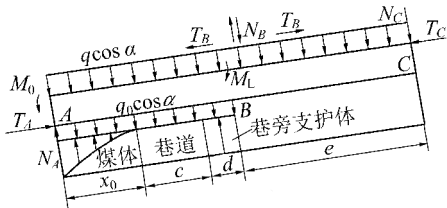


图3 沿空留巷力学模型

对于BC段岩块,在垂直于煤层倾角 α 方向上合力为0,即 $\sum F_n=0$,B点对基本顶的作用力 N_B 为

$$N_B = qe \cos \alpha + N_C$$

其中: q 为基本顶及其上部软弱岩层单位长度的自重,取 2×10^5 N/m; e 为BC岩块的长度,取14.2 m; N_C 为采空区侧受到的剪切力, N 。在平行于煤层倾角 α 的方向上,合力为0,即 $\sum F_s=0$,B点对BC段的作用力 T_B 为

$$T_B = T_C + qe \sin \alpha$$

其中: T_C 为受到采空区侧的推力,取 5.3×10^6 N。在B点合力矩为0,即 $\sum M_B=0$,基本顶岩层的极限弯矩 M_L 为

$$\begin{aligned} M_L - qe^2 \cos \alpha / 2 - N_c e + T_c (h - \Delta S_c) + qe(h/2 - \Delta S_c) \sin \alpha &= 0 \\ N_c = [M_L + T_c (h - \Delta S_c) + qe(h/2 - \Delta S_c) \sin \alpha - qe^2 \cos \alpha / 2] / e \end{aligned}$$

其中: h 为基本顶岩层厚度, 23.22 m; ΔS_c 为 AC 岩块被切断时 C 点的下沉量, 取 1.8 m。对于 AB 段岩块, 在 A 点合力矩为 0, 即 $\sum M_A = 0$, 巷旁支护体的切顶阻力 P 为

$$\begin{aligned} P = [M_L + (N_c + qe \cos \alpha)(x_0 + c + d) + \frac{1}{2}(q + q_0)(x_0 + c + d)^2 \cos \alpha - \int_0^{x_0} \sigma_y(x_0 - x) dx - (T_c + qe \sin \alpha)(h - \Delta S_B) - M_0 - q(x_0 + c + d)(h/2 - \Delta S_B) \sin \alpha] / (x_0 + c + d/2) \end{aligned}$$

$\sigma_y = (C_0 / \tan \varphi_0 + P_x / K) e^{2 \tan \varphi_0 x / (MK)} - C_0 / \tan \varphi_0$
式中: x_0 为应力极限平衡区宽度, 取 5.5 m; c 为巷道宽度, 取 4 m; d 为巷旁支护体宽度, 取 0.41 m; σ_y 为沿空留巷煤体下侧支撑压力, N; M_0 为 A 点基本顶的残余弯矩, N·m, 考虑最危险情况取 0; ΔS_B 为基本顶垮落前 B 端的下沉量, 取 0.33 m; q_0 为直接顶单位长度自重, 取 50 000 N; C_0 为煤层与顶底板岩层交界面的黏聚力, 取 0.1 MPa; φ_0 为煤层与顶底板岩层交界面的内摩擦角, 取 18°; P_x 为实体煤帮的支护阻力, 取 0.2 MPa; K 为侧压系数, 取 0.8; M 为采高, 取 2.54 m; x 为应力平衡区内沿 AB 方向任意一点到 A 点的距离, m。

计算得切断顶板所需的支护阻力为 2 118 kN/m, 设计墩柱间距为 1 500 mm, 墩柱的压力为 21.96 MPa。对比前面的墩柱承载力试验结果, 笔者所设计的墩柱可满足试验巷道沿空留巷时的使用要求。

2.3 回采工艺及墩柱施工工艺

1) 匹配的回采工艺。①采煤机割三角煤时后退到 25 号架机窝处, 把机头的金属网放下, 在 1~3 号支架前全部铺设 1.2 m×10.0 m 双层经纬金属网, 金属网与巷道搭接长度不少于 2 000 mm, 且与运输巷顶网联为一体, 金属网隔扣相联。顶板不完整时采用单体液压支柱加一字梁进行临时支护, 然后打一排锚杆加强支护, 之后再撤掉临时支护。具体工序如下: 联网(支架前临时支护)→撤除超前支护→吊网→拉移端头支架→推移刮板输送机→拉移转载机。②采煤机推进 200 m 以后退回到 25 号支架位置, 把采煤机机头支架处金属网放下, 继续联

网, 将 1 号支架外侧浮煤清理干净。具体工序如下: 联网(架前临时支护)→撤除超前支护→吊网→拉移端头支架→推移刮板输送机→拉移转载机→施工墩柱。③在工作面回采前 200 m 范围内, 机头每推进 1.1 m 施工一个墩柱, 回采 200 m 后, 机头每推进 1.5 m 施工一个墩柱, 依次施工直至终采线位置。若需加强端头顶板支护时, 在墩柱确定位置沿工作面倾向方向施工顶部锚杆。

2) 墩柱施工工艺。墩柱模具由地面加工成型运输到现场, 墩柱施工用料采用集中备料、集中浇注的施工方式。墩柱浇注采用的砂子和石子在地面按照质量比 1.0:1.6 在井上集中均匀拌制。墩柱式沿空留巷施工工艺如下: ①清理。根据设计位置在工作面 1 号支架外侧将浮煤清理干净, 清理出的面积大于墩柱底部面积, 同时把清理位置的底板整平。②调整无缝钢管模具。利用单体支柱顶住上节模具上焊接的吊环将上节模具顶到顶板上, 然后配合 8 号铁丝将上节模具固定到顶网上, 确保墩柱后期的接顶效果。同时模具的上下节搭接不少于 500 mm。模具的下方出水口统一对准巷道。③装振动器。模具固定完毕之后, 在模具外固定一圈钢板以防止振动装置破坏模具, 然后将振动装置固定到模具外。④检查充填设备。检查好喷浆机的电源、管路连接等情况, 经确认完毕后, 开启喷浆机, 人工上料充填墩柱。⑤充填振动密实。将充填管口插入上节模具上的充填口进行充填, 同时开启模具外壁的振动装置, 振动 5 min 后再进行充填并持续振动, 以确保模具内的混合料充填均匀、密实。对于接顶不严的墩

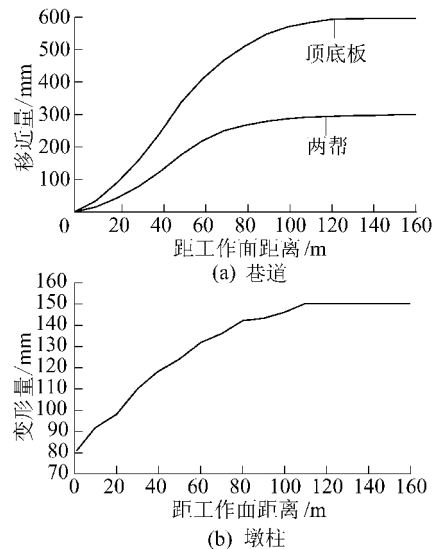


图4 沿空留巷及墩柱变形量

柱必须进行二次接顶,可采用在模具和顶板接触位置用风镐开一个小口进行充填以保证接顶。

2.4 现场应用效果分析

为掌握沿空留巷的矿压规律,在沿空留巷期间设置相应测站,对沿空留巷围岩变形进行观测,巷道围岩变形量及相应位置墩柱变形量分别如图4所示。由图4a可知,巷道顶底板移近量596 mm,两帮移近量为299 mm。从现场实际观测情况来看,巷道顶板比较完整,顶板变形量较小,顶底板移近量较大主要是由巷道底鼓引起的,顶板最大变形量为76 mm,而底鼓量最大为600 mm。由图4b可知,随着工作面的推进,墩柱上下两柱之间产生相对移动,相对移近量最大为150 mm,由此可见,墩柱具有一定的穿底现象。

3 结 论

通过理论分析及现场试验验证了墩柱式沿空留巷技术的可行性,当墩柱内部砂石质量配比为1.0:1.6,两墩柱中心距为1 500 mm时,墩柱留巷效果较好。笔者创新性地提出了采用2节无缝钢圆管,使得墩柱能适应巷道高度变化,同时具有可缩性和较强的初期支护阻力,实现了让压,能够适应顶板岩层断裂后的旋转下沉。现场试验表明,留巷期间墩柱巷旁支护体能使巷道变形控制在使用要求内,能够满足下一工作面回采时的使用要求,解决了回采工作面接替紧张的难题,保证矿井的正常生产,且减少了煤柱的留设,取得了良好的经济效益。

(上接第17页)

参考文献:

- [1] 冀中能源股份有限公司.华北型煤田隐伏含水陷落柱预探评价于快速治理理论及关键技术[R].邢台:冀中能源股份有限公司,2010.
- [2] 刘建功,赵庆彪.煤矿充填法采煤[M].北京:煤炭工业出版社,2011.
- [3] 刘建功,赵庆彪,尹尚先.煤田隐伏岩溶陷落柱探查与综合治理技术[M].北京:煤炭工业出版社,2010.
- [4] 虎维岳.矿山水害防治理论与方法[M].北京:煤炭工业出版社,2005.
- [5] 赵庆彪.邢台矿区煤矿开采新技术应用与发展[M].北京:煤炭工业出版社,2000.
- [6] 赵铁锤.全国煤矿典型水害案例与防治技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2006.
- [7] 武强,张志龙,张生元,等.煤层底板突水评价的新型实用方

参考文献:

- [1] 国家煤矿安全监察局.中国煤炭工业年鉴[M].北京:煤炭工业出版社,2007:18-22.
- [2] 阚甲广.典型顶板条件沿空留巷围岩结构分析及控制技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2009:23-24.
- [3] 康红普,牛多龙,张镇.深部沿空留巷围岩变形特征与智慧技术[J].岩石力学与工程学报,2010,29(10):1976-1987.
- [4] HOU C J.Review of Roadway Control in Soft Surrounding Rock Under Dynamic Pressured[J].Journal of Coal Science & Engineering(China),2003,9(1):1-7.
- [5] 徐金海,付宝杰,周保精.沿空留巷充填体的流变特性分析[J].中国矿业大学学报,2008,37(5):585-589.
- [6] 白书民.薄煤层无巷旁充填沿空留巷技术研究[J].煤炭科学技术,2012,40(11):42-44.
- [7] 臧英新,陈威.二次沿空巷道留巷支护方式及围岩变形规律研究[J].煤炭科学技术,2012,40(3):17-20.
- [8] 杨晓红,马步才,樊少武.沿空留巷Y型通风瓦斯治理效果分析[J].煤炭科学技术,2011,39(7):46-49.
- [9] 王建文.坚硬灰岩顶板沿空留巷技术研究及应用[J].煤炭科学技术,2013,41(5):54-57.
- [10] 柏建彪,周华强,侯朝炯,等.沿空留巷巷旁支护技术的发展[J].中国矿业大学学报,2004,33(2):59-62.
- [11] 张东升,茅献彪,马文顶.综放沿空留巷围岩变形特征的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(3):331-334.
- [12] 贾凯军,冯光明.煤矿超高水材料充填开采技术及其展望[J].煤炭科学技术,2012,40(11):6-9.
- [13] 石建军,马念杰,白忠胜.沿空留巷顶板断裂位置分析及支护技术[J].煤炭科学技术,2013,41(7):35-37.
- [14] 李保顺,龙军,李幸宇.沿空留巷巷旁支护体稳定性及围岩控制技术[J].煤矿开采,2012,17(4):66-69.

法Ⅱ:脆弱性指数法[J].煤炭学报,2007,32(11):1121-1126.

- [8] 赵庆彪,程建远,杜丙申,等.东庞矿突水陷落柱综合探查技术[J].煤炭科学技术,2008,36(4):96-100.
- [9] 赵庆彪.高承压水上煤层安全开采指导原则及技术对策[J].煤炭科学技术,2013,41(9):83-86.
- [10] 赵庆彪.带压开采防治水技术保障体系建设[J].中国煤炭,2010,36(1):98-100.
- [11] 赵庆彪,李彩惠,陈立武.小煤矿突水淹井后对大矿威胁的水患治理[J].煤矿安全,2002,33(4):17-18.
- [12] 赵庆彪,马念杰,刘斯筠.注浆治理冲积层放顶煤综采工作面冒顶溃砂[J].煤矿安全,2002,33(10):33-35.
- [13] 赵庆彪,马念杰,王中江,等.井下小帷幕动水注浆截流技术实践[J].煤炭科学技术,2002,30(9):24-26.
- [14] 刘建功.冀中能源低碳生态矿山建设的研究与实践[J].煤炭学报,2011,36(2):317-321.
- [15] 刘建功,赵庆彪.综合机械化充填采煤[J].煤炭学报,2010,35(9):1413-1418.