



急倾斜大采高综采工作面沿空留巷技术研究

李腾 姜永东 刘华君 邹勇 桂涛 陈飞

引用本文：

李腾, 姜永东, 刘华君, 等. 急倾斜大采高综采工作面沿空留巷技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(S2): 1–9.
LI Teng, JIANG Yongdong, LIU Huajun. Research on gob-side entry retaining technology inclined fully mechanized mining face with large mining height[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(S2): 1–9.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2023-1358>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大倾角煤层沿空留巷弓形柔性掩护支架控制技术

Control technology of flexible bow-shield-supporting system for gob-side entry retaining in highly inclined seam
煤炭科学技术. 2021, 49(3): 37–42 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2021.03.003>

深井矸石充填工作面沿空留巷围岩控制原理与技术

Principle and technology of surrounding rock control for gob-side entry retaining in deep mine gangue backfilling face
煤炭科学技术. 2022, 50(6): 68–76 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/9c1176a8-1efc-48f9-b23f-71843601b9bb>

浅埋中厚煤层沿空留巷底板变形力学分析及底鼓控制技术

Mechanical analysis of floor deformation and floor heave control technology for gob-side entry retaining in medium thick coal seam with shallow cover depth
煤炭科学技术. 2024, 52(10): 11–20 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1382>

大采高工作面过空巷群顶板破断及矿压规律研究

Study on the law of roof breakage and mine pressure passing large cross-section gob group in the fully-mechanized face with high mining height
煤炭科学技术. 2020, 48(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e37f57cc-76f5-4343-8c5d-f7c96cb9cc45>

大采高综采工作面设备智能控制系统研究

Research on equipment intelligent control system in large mining height fully-mechanized face
煤炭科学技术. 2022, 50(9): 192–199 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/6bab11b4-5102-4674-bc02-770a75f731a0>

超大采高综采工作面回撤通道支护技术研究

Study on support of retractable channel in fully-mechanized mining face with super large mining height
煤炭科学技术. 2022, 50(6): 204–210 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/3a79114b-3506-4799-8d04-a40570310934>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

采矿科学与工程



移动扫码阅读

李 腾, 姜永东, 刘华君, 等. 急倾斜大采高综采工作面沿空留巷技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(S2): 1-9.
LI Teng, JIANG Yongdong, LIU Huajun, et al. Research on gob-side entry retaining technology inclined fully mechanized mining face with large mining height[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(S2): 1-9.

急倾斜大采高综采工作面沿空留巷技术研究

李 腾¹, 姜永东¹, 刘华君^{1,2}, 邹 勇², 桂 涛¹, 陈 飞³

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 四川川煤石洞沟煤业有限责任公司, 四川广元 628208; 3. 四川华蓥山广能集团嘉华机械有限责任公司, 四川广安 638600)

摘要: 针对急倾斜大采高综采工作面沿空留巷矿压显现剧烈, 支护困难等问题, 以川煤石洞沟煤矿31111综采工作面为工程背景, 采用理论分析、现场监测, 得到了31111综采工作面周期来压步距约16.4 m, 煤壁前方支承压力影响范围约40 m, 明确了31111机巷超前支护距离; 结合微震监测三维定位技术, 得到了31111综采工作面“三区”(煤壁支承压力影响区约40 m, 离层区122~144 m)和“三带”(顶板垮落带0~2 m、裂隙带2~30 m、弯曲下沉带30~96 m)范围, 揭示了急倾斜大采高岩层周期性破断规律及“厂”型移动拱特征, 为后续来压预测预报, 实施沿空留巷提供数据支撑。基于回采过程中巷道围岩变形及压力分布规律, 提出在非断层带采用弓型柔性掩护支架+锚网索联合支护的沿空留巷方法, 断层带采用弓型柔性掩护支架+锚网索+矸石胶结充填联合支护的沿空留巷方法。现场工程实践表明, 该方法刚柔并举, 对采空区垮落矸石有良好的支撑、掩护作用, 保障了沿空留巷安全, 实现矿山无煤柱安全经济开采。

关键词: 急倾斜煤层; 大采高; 矿山压力与控制; 沿空留巷; 综采

中图分类号: TD325 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2024)S2-0001-09

Research on gob-side entry retaining technology inclined fully mechanized mining face with large mining height

LI Teng¹, JIANG Yongdong¹, LIU Huajun^{1,2}, ZOU Yong², GUI Tao¹, CHEN Fei³

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Sichuan Chuanmei Shidonggou Coal Industry Co., Ltd., Guangyuan 628208, China; 3. Jiahua Machinery Co., Ltd., Sichuan Huayingshan Guangneng Group, Guang'an 638600, China)

Abstract: In order to solve obvious dynamic pressure and support problems of gob-side entry retaining in steeply inclined fully-mechanized mining face with large mining height, taking 31111 fully-mechanized mining face in Shidonggou Coal Mine of Sichuan Coal Group as the research background, through theoretical analysis and field monitoring, the periodic weighting step of 31111 fully mechanized mining face is about 16.4 m, and the influence range of abutment pressure in front of coal wall is about 40 m. The advance support distance of 31111 roadway is defined. Combined with the three-dimensional positioning technology of microseismic monitoring, the range of 'three zones' (the influence zone of abutment pressure of coal wall is about 40 m, the separation zone is 122~144 m) and 'three zones' (the caving zone of roof is 0~2 m, the fracture zone is 2~30 m, and the bending subsidence zone is 30~96 m) of 31111 fully mechanized mining face is obtained, and the periodic fracture law of steeply inclined and large mining height strata and the characteristics of '厂' type moving arch are revealed, which provides data support for subsequent pressure prediction and implementation of gob-side entry retaining. Based on the deformation and pressure distribution law of roadway surrounding rock in the mining process, the method of gob-side entry retaining with bow-shaped flexible shield support + anchor net cable combined support is proposed in the non-fault zone, and the method of gob-side entry retaining with bow-shaped flexible shield support + anchor net cable + gangue cemented filling combined support is pro-

收稿日期: 2023-09-21 责任编辑: 朱恩光 DOI: 10.12438/cst.2023-1358

基金项目: 重庆市自然科学基金资助项目(2022YSZX-JCX0005CSTB, cstc2024ycjh-bgjxm0091)

作者简介: 李 腾(1997—), 男, 湖南省株洲人, 无, 硕士。E-mail: lt945799836@163.com。

通讯作者: 姜永东(1977—), 男, 贵州省遵义人, 教授, 博士。E-mail: jiangyd1015@163.com。

posed in the fault zone. The field engineering practice shows that the method is rigid and flexible, which has a good supporting and shielding effect on the caving gangue in the goaf, ensures the safety of gob-side entry retaining, and realizes the safe and economic mining without coal pillar in the mine.

Key words: steeply inclined coal seam; large-height mining; mine pressure and control; gob-side entry retaining; fully-mechanized mining

0 引言

我国西部50%以上的煤矿属于急倾斜煤层,煤层开采机械化、自动化程度越来越高,如何在急倾斜综采条件下实施沿空留巷,实现煤层安全经济高效开采成为现阶段急需解决的问题^[1-2]。近年来,我国沿空留巷巷旁支护经历了木垛-矸石垛-密集支柱-柔模支护的演变,在支护性能、隔绝密闭性及自动化程度等方面有极大提升^[3-6];巷内支护在材料、构件、强度等方面不断优化升级,由被动承载支护方式发展为以锚杆(索)为代表的主动支护体系,进一步确保煤帮及顶板的稳定性和完整性^[7-9];围绕急倾斜煤层,众多学者通过相似材料模型、数值模拟、现场试验等方法,开展了大量研究,揭示了岩层移动、垮落的基本形式及矿压显现基本规律^[10-14],形成了以充填式沿空留巷和切顶式沿空留巷为主的2大技术类型^[15-17]。

上述研究促进了沿空留巷技术的发展,研究成果在一些条件较好的煤层中得到应用推广。然而,针对急倾斜大采高综采工作面这类复杂条件下实施沿空留巷的研究还非常少,严重制约了急倾斜煤层开采的发展,急需开展进一步的研究。为此,笔者以川煤集团石洞沟煤矿31111综采工作面为研究对象,通过理论分析、现场监测、工程实践应用,开展急倾斜大采高综采条件下沿空留巷技术研究,实现了31111综采工作面无煤柱开采,为类似条件下实施沿空留巷提供参考。

1 31111综采工作面概况

石洞沟煤矿31111综采工作面走向长501 m,采高3.6 m,煤层平均厚度约3.8 m,平均倾角56°,工作面长70~90 m,属急倾斜大采高工作面。采用走向长壁俯斜智能综合机械化采煤法, MG400/990-WD4型双滚筒采煤机截割落煤, SGZ800/400型可弯曲刮板输送机运煤, ZY5200/18/48QD型液压支架支护顶板。煤层直接顶为钙质细粉砂岩,直接底为薄层状粉砂质泥岩夹煤线,工作面煤层柱状图如图1所示。在机巷、风巷施工过程中,发现4处逆断层,分别在风巷见煤点以西61、330 m处,机巷见煤点以

西65、428 m处,断层造成煤层顶板破碎,给沿空留巷带来了困难,断层情况见表1。

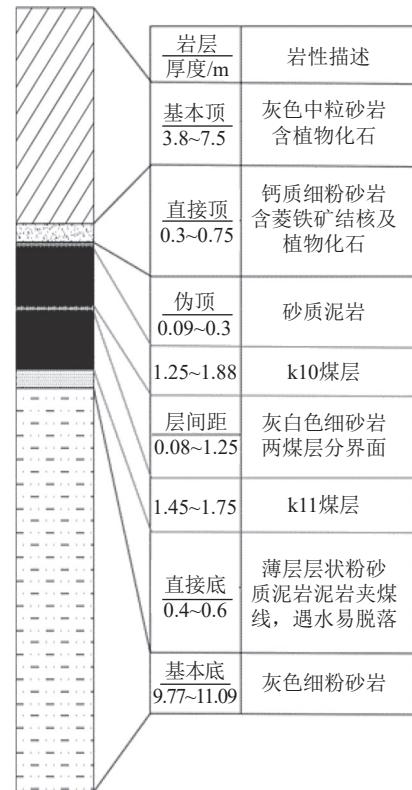


图1 31111工作面岩性综合柱状图

Fig.1 Coal seam comprehensive histogram of 31111 working face

表1 31111工作面断层特征

Table 1 31111 working face fault characteristic

断层	长度/m	断距/m	方位角/(°)
1号	30	1.85	196∠51
2号	24	0.90	182∠66
3号	46	2.2	132∠58
4号	30	1.8	140∠64

31111综采工作面运输巷为机轨合一的五边形异形巷道,断面积15 m²,巷道断面如图2所示。巷道采用锚网索联合支护,锚杆采用ø22 mm×2 400 mm全螺纹钢树脂锚杆,间排距900 mm×900 mm;锚网为ø6.5 mm圆钢焊接,网孔尺寸100 mm×100 mm;锚索为ø22.4 mm×7 400 mm,间排距1 800 mm×2 700 mm。

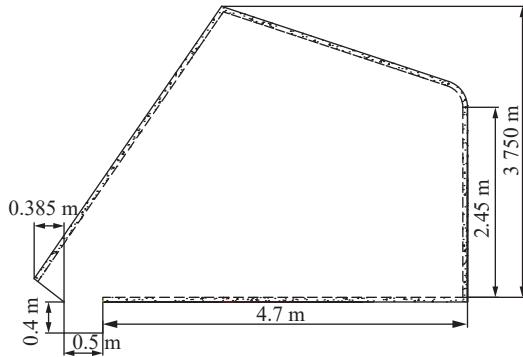


图 2 31111 机巷巷道断面

Fig.2 Section diagram of 31111 machine roadway

2 急倾斜煤层矿山压力及显现特征

2.1 岩层移动分析及来压步距计算

石洞沟煤矿 31321、31325 等工作面位于 31111 工作面东侧, 先于 31111 工作面开采, 开采过程中发现: 急倾斜煤层开采后, 基本顶断裂形成“三区”(煤壁支撑区、离层区、重新压实区)和“三带”(垮落带、裂隙带和弯曲下沉带), 构成“厂”型弯曲岩层移动结构, 垮落带因压实程度不同, 从下往上分为密实带、松散带、悬空带^[18], 如图 3 所示。

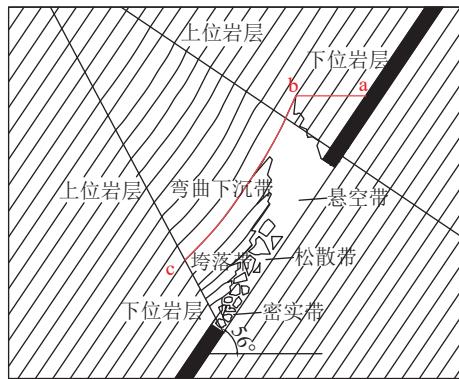


图 3 急倾斜煤层基本顶“厂”型移动结构

Fig.3 '厂' type moving structure of main roof in steep coal seam

与悬臂梁结构相比, 急倾斜岩层受倾角影响, 断裂后将形成倾向砌体结构, 岩层垮落呈“变形—断裂—铰接结构—破断失稳—垮落”周期性特征。岩层垮落后的将在重力作用下沿层理面向采空区滑落、滚动, 在采空区上部形成大范围破坏, 给留巷支护带来较大冲击, 影响沿空留巷效果。

考虑煤层倾角的影响, 采用正交梁力学模型计算 31111 综采工作面来压步距。顶板初次垮落前, 将暴露顶板看作四边固支的平行四边形板; 顶板断裂后, 将暴露顶板看作三边固支一边简支的平行四

边形板^[19-20], 来压步距系数见表 2, 来压步距为

$$L = \min(CK_{xi}, CK_{yi})$$

表 2 来压步距系数

Table 2 Pressure step coefficient

序号	边界条件	位移协调系数 u_i	步距系数	
			K_{xi}	K_{yi}
1	四边固支	$\frac{1-e^4 A}{1+e^3 B}$	DE	F
2	一边简支	$\frac{2-4e^4 A}{7/4+e^3 B}$	DE	$\sqrt{2/3}F$

注: $A = \frac{I_x}{I_y}$; $B = A \cos^2 \alpha$; $C = \sqrt{\frac{2R_t H^2}{q}}$; $D = \sqrt{\frac{H(1+\sin^2 \alpha)}{\cos \alpha}}$;
 $E = \sqrt{\frac{8e}{4e+3u_i \cos^2 \alpha}}$; $F = \sqrt{\frac{8e^2}{(4-3u_i) \cos \alpha}}$ 。

式中: α 为煤层倾角; e 为采区几何形状系数, 取 0.4; H 为岩梁厚度; q 为平行荷载; R_t 为岩石抗拉强度, 8.5 MPa; I_x 、 I_y 为截面惯性矩。

计算得, 31111 工作面基本顶初次来压步距约 42.3 m, 基本顶周期来压步距约 16.4 m。此外, 受充填研石支撑作用力的不同, 采场上、中、下部初次来压步距、周期来压步距沿工作面倾斜方向相应增加^[20], 超前支护距离不应低于采场下部来压步距。

2.2 煤壁前方支承压力影响范围监测

为研究煤壁前方支承压力对巷道变形的影响, 在 31111 运输巷布置 3 处共 9 个变形监测点(A 、 B 、 C), 分别位于巷道顶板和两帮, 距工作面 160、170、180 m, 采用 SWJ-IV 隧道收敛计监测采动条件下巷道顶板下沉量与两帮移近量, 测量精度 0.01 mm, 监测结果如图 4a-4b 所示。结果表明, 采动条件下巷道顶板下沉量与两帮移近量在距工作面前方 120 m 左右开始有较明显的变化, 且距工作面前方 40 m 左右巷道变形剧烈, 变形速率随工作面推进逐渐增大, 最高可达 4~6 mm/d; 采动条件下巷道两帮移近量略大于顶板下沉量, 这是因为巷道为五边形, 在重力、构造应力和采动压力共同作用下, 产生偏压变形。

为掌握采动条件下超前支承压力演化特征, 采用 MCZ-300 锚杆液压测力计监测采动条件下煤壁支承压力影响范围, 测点(1号、2号、3号)布置在 31111 运输巷近采空区一侧, 距工作面 110、140、180 m, 监测结果如图 4c 所示。可知, 采动条件下工作面前方支承压力影响区域在距工作面 40 m 以内, 峰值压力距工作面约 10 m 处, 值为 30~35 MPa, 集中系数约为原岩应力的 6 倍。该研究表明, 急倾斜煤层在综采条件下, 矿山压力显现比较剧烈, 实施沿

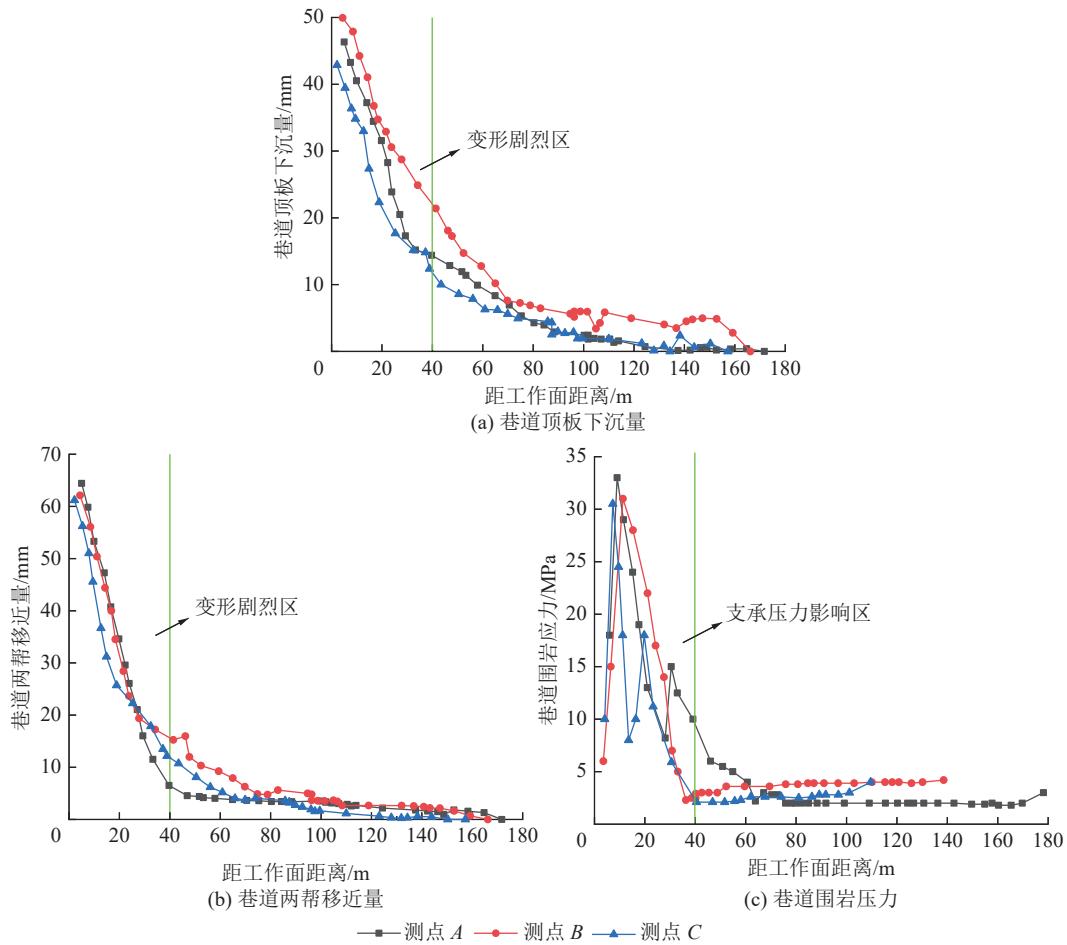


图4 采动条件下巷道围岩变形与压力监测

Fig.4 Deformation and pressure monitoring of roadway surrounding rock under mining conditions

空留巷时,需加强对巷道两帮的支护,超前支护距离应大于30 m。

2.3 采场“三区三带”分布特征

为分析31111综采工作面采动条件下顶板断裂

和移动情况,揭示采场“三区三带”分布规律,采用KJ551微震监测三维定位技术,在31111工作面运输巷、联络巷布置2组,共8个监测点,测点空间布置及坐标如图5所示。

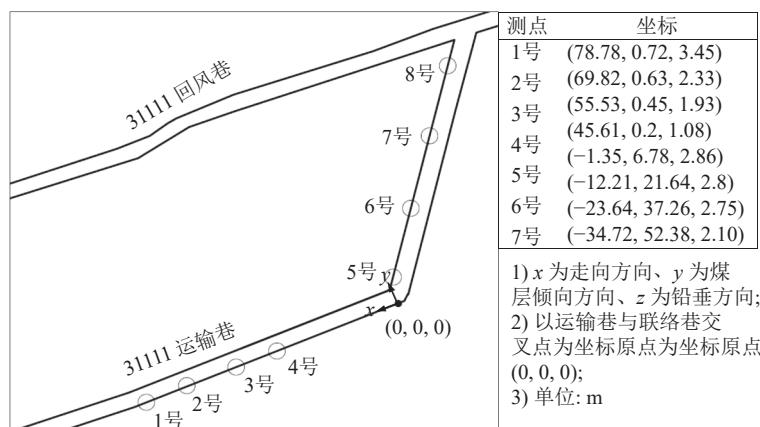


图5 微震监测点布置

Fig.5 Layout of microseismic monitoring points

采动影响下顶、底板微震事件监测分布如图6~8所示,可以得出:1)随工作面推进,顶、底板

岩层微震事件数逐渐增加,且断裂点主要集中在岩层顶板,表明顶板受采动影响更大。2)从工作面推

进过程中,微地震新增事件分布情况可以看出,煤壁支承压力影响区在工作面前方35~37 m,这与图4c压力监测的结果基本一致,离层区在工作面后方122~144 m。3)沿煤层法线方向,微震事件分布密集程度可划分为三个区域,得到采场顶板垮落带、裂隙带、弯曲下沉带分别位于工作面上方0~2、2~30、30~96 m。4)沿重力方向,1 000 J以上微震事件主要集中在中上部,下部几乎没有,表明采动影响下顶板上段岩层因自重垮落沿底板向下滚动,充填密实采空区下部空间,致使采空区下部基本顶岩层断裂移动减小;采空区中上部空间无充填岩块,处于悬空状态,岩层断裂和移动范围大,且微震事件数最终形成“厂”型结构断裂。5)从微震事件数随推进距离

变化规律发现,岩层垮落呈周期出现,来压步距约13.4~23.5 m,且峰值事件数增量明显,约为平均事件数的2.8倍,表明来压时,顶板岩层破断剧烈,将对巷道产生较大冲击。

微震监测与巷道压力及变形监测所得巷道承压范围基本一致,结合理论分析及计算可知:急倾斜煤层因自身倾角太大,直接顶上端岩体易在自重作用下沿层理面移动、滑落,覆岩破坏范围主要位于采空区偏上方岩层,最终采场上端未冒落覆岩形成水平横梁,构成“厂”型移动拱结构。岩层呈周期性垮落,每次垮落时来压明显,会对巷道产生较大冲击,在实际生产过程中,要加强来压预测预报,做好超前支护工作。

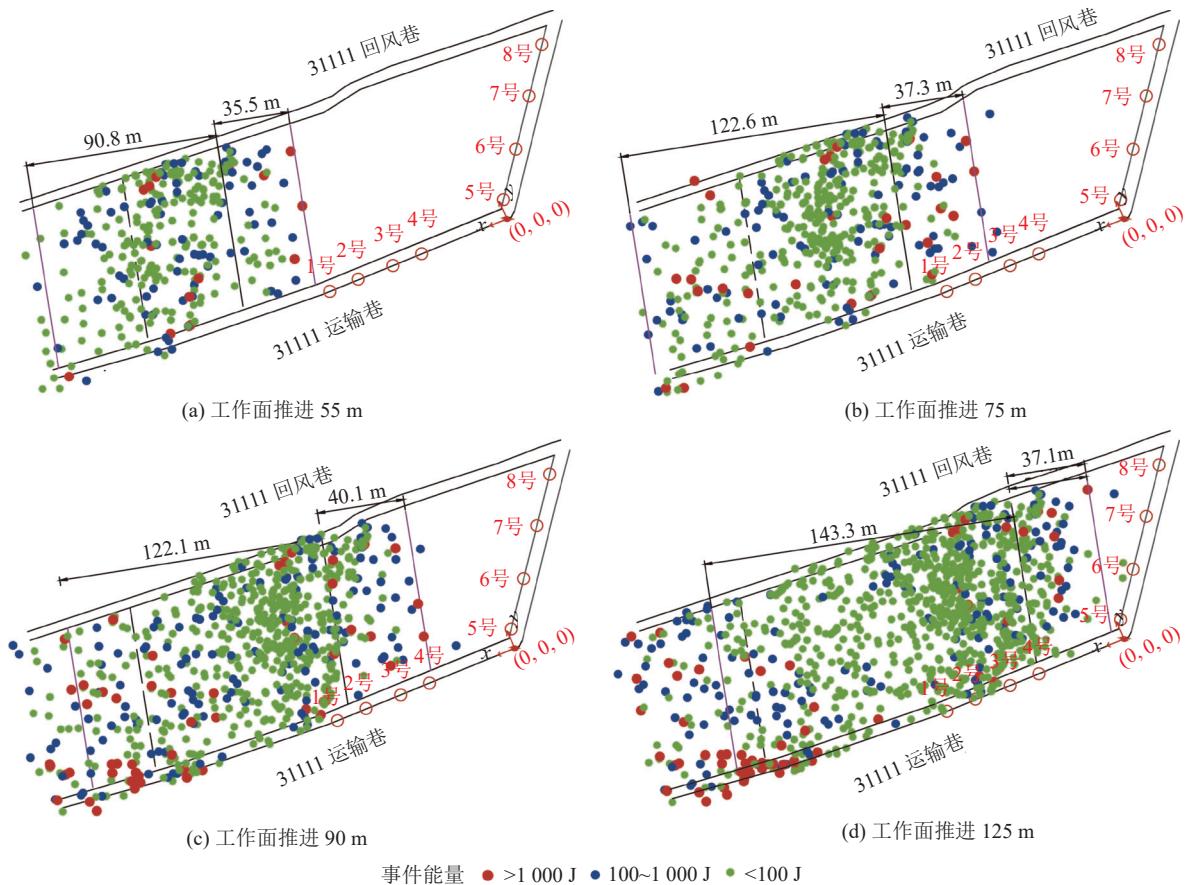


图6 采动影响下顶、底板微震事件分布平面图

Fig.6 Plane diagram of microseismic events of roof and floor under influence of mining

3 沿空留巷方法

在“厂”型结构作用下,覆岩破坏范围主要位于采空区上部岩层,巷道沿采空区一侧受力较大,且31111机巷为五边异形巷道,采用传统支护方式难以实施沿空留巷。为此,基于采动条件下巷道变形及受力分布规律,设计了弓型柔性掩护支架,支架可超

前安装,考虑到31111工作面有4处逆断层,顶板较破碎,易形成大的松动圈,在逆断层带采用矸石胶结充填,限制巷道围岩大变形,控制围岩松动圈。

3.1 非断层带沿空留巷方法

31111机巷非断层带沿空留巷采用弓型柔性掩护支架+锚网索联合支护。弓型柔性掩护支架为3节式结构,如图9所示,由12号矿用工字钢加工而

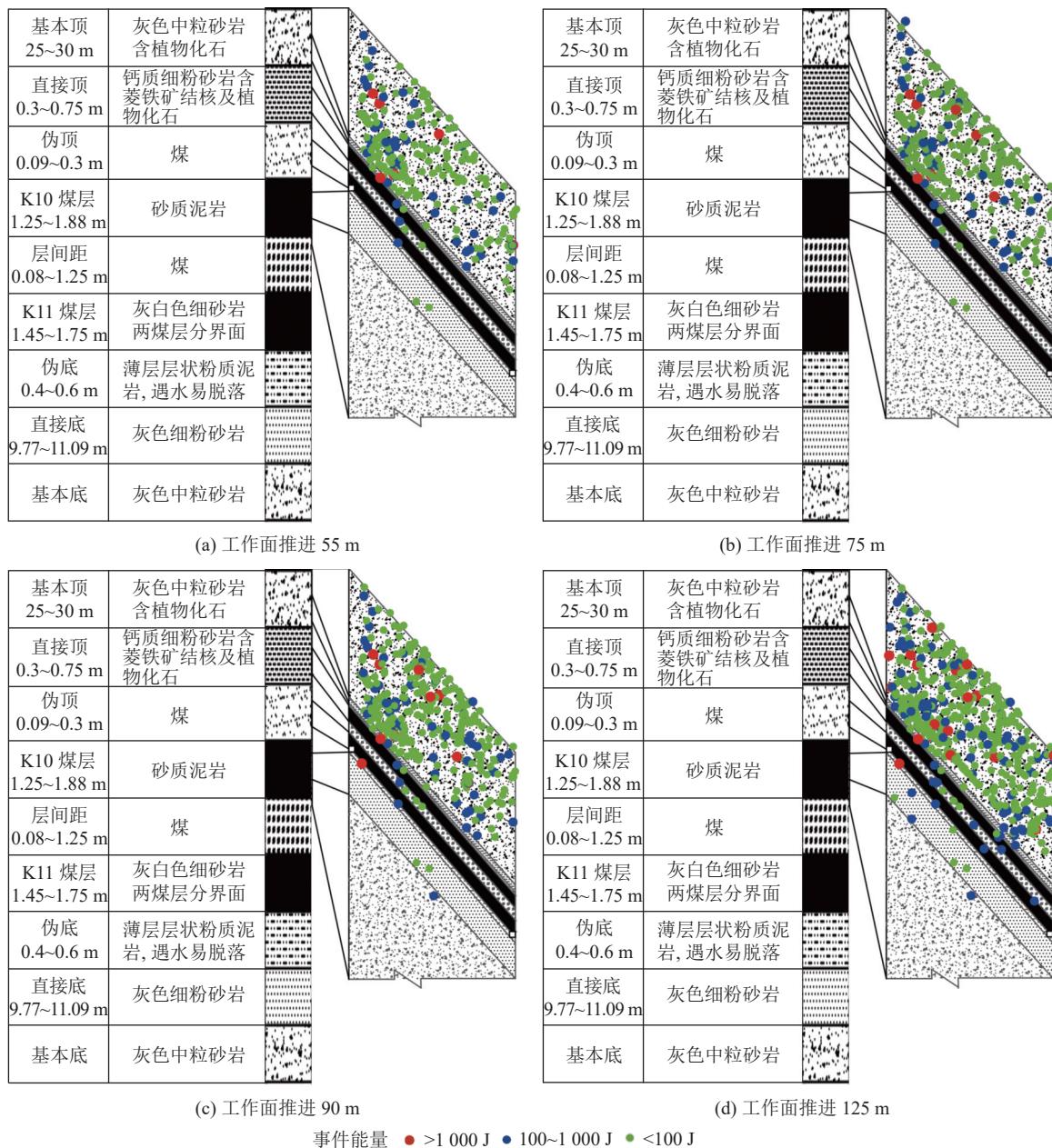


图 7 采动影响下顶、底板微震事件分布剖面图

Fig.7 Microseismic event profile of roof and floor under influence of mining

成, 梁腿总长 5.5 m (前梁长 2.1 m, 掩护梁长 1.7 m, 梁腿长 1.7 m), 梁腿与掩梁夹角 143°, 前梁与掩梁夹角 135°, 每根支架设有 5 排眼孔用于固定钢绳。支架用 5 组 ø26 钢丝绳、ø28 绳卡及螺栓夹板连接, 每间隔 900 mm, 在前梁下方支设一根单体液压支柱, 每连续安装 2 m 护巷支架 (12 根弓形架, 11 组木隔板) 留设 1 个超前溜煤眼, 宽 0.8 m。巷道另一侧采用 ø17.8 mm×4 000 mm 钢绞线锚索+11 号矿用工字钢锚索梁对顶梁进行上下拉、撑支护加固, 顶板下侧区域补网片并用锚杆锚索钢梁锁固, 钢梁、支架、木垫板共同形成一个柔性支护整体。

3.2 逆断层带沿空留巷方法

31111 逆断层带采用弓型柔性掩护支架+锚网索+研石胶结充填联合支护。

1) 胶结材料的选择

传统研石装袋充填支护强度低, 前期支护阻力小, 增阻缓慢, 不能及时提供足够的支护强度, 需要在砂袋内添加合适的胶结材料。目前工业上大量使用的胶结材料主要有单液水泥、水泥-水玻璃浆、树脂类浆液、黏土水泥浆等, 混凝土材料强度往往处于 20~40 MPa, 高水材料在 1.5:1 水灰比条件下峰值强度一般为 11 MPa^[21-22]。结合石洞沟煤矿地质条

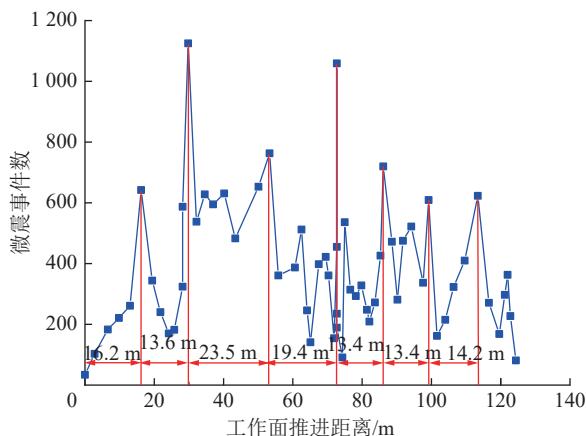


图 8 采动条件下微震事件数变化规律

Fig.8 Change rule of microseismic event number under mining condition

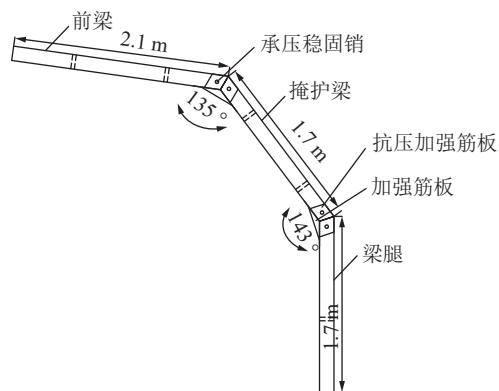


图 9 弓型柔性掩护支架结构

Fig.9 Structure diagram of '弓' type flexible shield support

件与大量成功的留巷经验^[22-24], 本次选用由半水石膏粉、水淬渣粉末、砂石骨料、缓凝剂等成分构成的胶结材料, 材料早期强度高、增阻速度快, 且主体原料来源广泛, 单位胶结研石用价较普通水泥更低, 经济适用性好。

2) 支护参数与工艺

锚网索及弓型柔性掩护支架支护参数和支护工艺与运输巷非断层带相同, 研石胶结充填所用砂袋按胶结材料: 河砂: 碎研石=1:3:2干料混合装袋, 随运随砌, 采用水平错层堆垒, 每垒好一层砂袋, 便在砂袋上部和侧面扎孔, 随后均匀喷水, 喷水时注意水压不宜过大, 水量不宜过少。在砂袋距顶梁1.7m左右时, 边码边退, 确保砂袋高度与顶梁平齐, 充分接顶, 使砂袋与围岩共同形成支护整体。现场施工表明, 利用早班检修时间, 5人堆码砂袋, 可在确保施工安全的同时, 实现综采和支护有序推进。

4 沿空留巷应用效果

31111综采工作面运输巷采用沿空留巷方法后,

留巷段围岩变形得到有效控制, 现场支护效果理想, 极大地减少了巷道维护成本。煤层开采过程中, 支架焊接处完整无损, 支架系统未出现断裂、弯曲变形, 充分发挥了支架的支撑掩护功能, 且支架可取, 随工作面边采边撤架回收, 维修后可以多次重复利用, 回收率达94%, 进一步降低支护成本。在断层带, 研石胶结充填堆码规整稳固, 很好地支撑起支架背部顶板, 有效控制断层带巷道围岩的垮落变形。现场应用效果如图10所示, 从图中可知, 31111综采工作面沿空留巷平直完整, 支护效果良好, 实用性强, 实现了该矿综采工作面沿空留巷和无煤柱开采, 煤炭资源多回收2.4万t, 同时该方法推广应用于代家坝、唐家河等煤矿, 经济效益明显。



(a) 非断层带沿空留巷



(b) 断层带沿空留巷

图 10 沿空留巷实景

Fig.10 Realistic scene of gob-side entry retaining

现场工程实践表明, 在矿山压力作用下, 岩层因自重垮落, 沿底板向下滚动堆积, 崩落带底部岩石不断被压密实, 又进一步为上覆岩层提供支护阻力, 胶结研石砂袋、支架、围岩相互作用, 共同组成一个刚柔并举的支护体, 确保沿空留巷的稳定性, 保障护巷安全。

5 结 论

1) 通过理论计算、微震监测、巷道压力与变形监

测,得到了31111综采工作面“三区”(煤壁支承压力影响区约40 m,离层区122~144 m)和“三带”(顶板垮落带0~2 m、裂隙带2~30 m、弯曲下沉带30~96 m)范围,揭示了急倾斜岩层周期性破断规律及岩层“厂”型移动拱特征,基本顶周期来压步距约16.4 m。

2)基于采动条件下巷道变形及承压规律,设计了弓型柔性掩护支架,提出非断层带采用弓型柔性掩护支架+锚网索联合支护。支架由12号矿用工字钢加工,可回收重复利用。实践表明,支架、钢梁、垮落带共同形成刚柔并举的护巷系统,保障了沿空留巷安全,实现31111工作面无煤柱开采,煤炭资源多回收2.4万t。

3)针对31111综采工作面逆断层带沿空留巷难题,提出断层带采用弓型柔性掩护支架+锚网索+矸石胶结充填联合支护。胶结材料成分以半水石膏粉、水淬渣粉末为主,经济适用性好。实践表明,胶结材料能大幅提高矸石砂袋抗冲击和抗压能力,有效控制巷道围岩松动圈,提高巷道围岩承压能力。

参考文献(References):

- [1] 王家臣. 我国综放开采40年及展望[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 83~99.
WANG Jiachen. 40 years development and prospect of longwall top coal caving in China[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 83~99.
- [2] 康红普, 张晓, 王东攀, 等. 无煤柱开采围岩控制技术及应用[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 16~44.
KANG Hongpu, ZHANG Xiao, WANG Dongpan, et al. Strata control technology and applications of non-pillar coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 16~44.
- [3] 柏建彪, 张自政, 王襄禹, 等. 高水材料充填沿空留巷应力控制与围岩强化机理及应用[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(6): 16~28.
BAI Jianbiao, ZHANG Zizheng, WANG Xiangyu, et al. Stress control and surrounding rock strengthening mechanism of gob-side entry retaining with high-water content material filling and its application[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(6): 16~28.
- [4] 郭海军, 杜怀龙. 厚煤层沿空留巷柔模混凝土充填体合理宽度确定[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(S2): 105~112.
GUO Haijun, DU Huailong. Determination of reasonable width of flexible formwork concrete filling body for gob-side entry retaining in thick coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(S2): 105~112.
- [5] 陈勇, 柏建彪, 朱涛垒, 等. 沿空留巷巷旁支护体作用机制及工程应用[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1427~1432.
CHEN Yong, BAI Jianbiao, ZHU Taolei, et al. Mechanisms of roadside support in gob-side entry retaining and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1427~1432.
- [6] 谭云亮, 于凤海, 宁建国, 等. 沿空巷旁支护适应性原理与支护方
法[J]. 煤炭学报, 2016, 41(2): 376~382.
TAN Yunliang, YU Fenghai, NING Jianguo, et al. Adaptability theory of roadside support in gob-side entry retaining and its supporting design[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(2): 376~382.
- [7] 康红普, 牛多龙, 张镇, 等. 深部沿空留巷围岩变形特征与支护技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 1977~1987.
KANG Hongpu, NIU Duolong, ZHANG Zhen, et al. Deformation characteristics of surrounding rock and supporting technology of gob-side entry retaining in deep coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 1977~1987.
- [8] 陈勇, 柏建彪, 王襄禹, 等. 沿空留巷巷内支护技术研究与应用[J]. 煤炭学报, 2012, 37(6): 903~910.
CHEN Yong, BAI Jianbiao, WANG Xiangyu, et al. Support technology research and application inside roadway of gob-side entry retaining[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(6): 903~910.
- [9] 康红普. 我国煤矿巷道围岩控制技术发展70年及展望[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(1): 1~30.
KANG Hongpu. Seventy years development and prospects of strata control technologies for coal mine roadways in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(1): 1~30.
- [10] 黄旭超. 急倾斜煤层开采应力及裂隙演化规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(S1): 93~96.
HUANG Xuchao. Study on stress and fracture evolution law of steeply inclined coal seam mining[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(S1): 93~96.
- [11] 王红伟, 焦建强, 伍永平, 等. 急倾斜厚煤层短壁综放采场承载结构泛化特征[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(11): 56~64.
WANG Hongwei, JIAO Jianqiang, WU Yongping, et al. Generalization characteristics of bearing structure in short wall fully-mechanized top-coal caving mining face of steeply inclined thick seam[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(11): 56~64.
- [12] 文志杰, 汤建泉, 王洪彪. 大采高采场力学模型及支架工作状态研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(S1): 42~46.
WEN Zhijie, TANG Jianquan, WANG Hongbiao. Study on mechanical model and hydraulic support working state in mining stope with large mining height[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S1): 42~46.
- [13] 孙秉成, 李春阁. 急倾斜特厚煤层复杂结构条件冲击地压防治技术[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(S1): 13~15.
SUN Bingcheng, LI Chunge. Rock burst control technology of steep and extra thick coal seam under complex structure condition[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(S1): 13~15.
- [14] 姚琦, 冯涛, 廖泽. 急倾斜走向分段充填倾向覆岩破坏特性及移动规律[J]. 煤炭学报, 2017, 42(12): 3096~3105.
YAO Qi, FENG Tao, LIAO Ze. Damage characteristics and movement of inclined strata with sublevel filling along the strike in the steep seam[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(12): 3096~3105.
- [15] 任超. 大采高综采工作面沿空留巷工艺顶板管控技术分析[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(S2): 97~104.
REN Chao. Technical analysis on roof control of gob-side entry

- retaining process in fully-mechanized mining face with large mining height[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(S2) : 97–104.
- [16] 周思友. 大倾角中厚煤层拱形断面复合沿空留巷技术[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(S1): 67–69.
- ZHOU Siyou. Compound gob-side entry retaining technology of large dip angle and thick coal seam with arch section[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(S1): 67–69.
- [17] 唐建新, 李霜, 候阳阳, 等. 急倾斜三软厚煤层留小煤柱沿空护巷技术[J]. *地下空间与工程学报*, 2022, 18(4): 1392–1400.
- TANG Jianxin, LI Shuang, HOU Yangyang, et al. Gob side entry protection technology of small coal pillar in steeply inclined three-soft thick coal seam[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2022, 18(4): 1392–1400.
- [18] 杨帆. 急倾斜煤层采动覆岩移动模式及机理研究 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2006.
- YANG Fan. Study on movement mode and mechanism of overlying strata in steep seam mining[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2006.
- [19] 蒋金泉. 倾斜煤层采场老顶初次来压步距的计算[J]. *矿山压力与顶板管理*, 1992, 9(1): 56–61, 102–104.
- JIANG Jinquan. Calculation of first weighting interval of main roof in inclined coal seam stope[J]. *Ground Pressure and Strata Control*, 1992, 9(1): 56–61, 102–104.
- [20] 房局. 急倾斜俯伪斜采场顶板破断特征及矿压规律研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- FANG Ju. Study on roof breaking characteristics and ground pressure law of steep and pseudo-inclined stope[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [21] 唐建新, 胡海, 涂兴东, 等. 普通混凝土巷旁充填沿空留巷试验[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(9): 1425–1429.
- TANG Jianxin, HU Hai, TU Xingdong, et al. Experimental on roadside packing gob-side entry retaining for ordinary concrete[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(9) : 1425–1429.
- [22] 华心祝. 我国沿空留巷支护技术发展现状及改进建议 [J]. *煤炭科学技术*, 2006, 34(12): 78–81.
- HUA Xinzhu. Development status and improved proposals on gob-side entry retaining support technology in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2006, 34(12): 78–81.
- [23] 张自政, 柏建彪, 王卫军, 等. 沿空留巷充填区域直接顶受力状态探讨与应用[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(8): 1960–1970.
- ZHANG Zizheng, BAI Jianbiao, WANG Weijun, et al. Study on stress state of immediate roof above backfill area in gob-side entry retaining and its application[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(8): 1960–1970.
- [24] 张东升, 马立强, 冯光明, 等. 综放巷内充填原位沿空留巷技术[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(7): 1164–1168.
- ZHANG Dongsheng, MA Liqiang, FENG Guangming, et al. The technique of gob-side entry retaining with entry-in packing on its original position in fully-mechanized coalface with top-coal caving[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(7): 1164–1168.