



“三软”厚煤层回采巷道掘锚一体机工艺优化及应用

贾后省 皇东山 方珍珠 李东发 昌李宁 王国营

引用本文：

贾后省, 皇东山, 方珍珠, 等. “三软”厚煤层回采巷道掘锚一体机工艺优化及应用[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(8): 1–10.
JIA Housheng, HUANG Dongshan, FANG Zhenzhu. Process optimization and application of bolter miner for “three-soft” thick coal seam mining roadway[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(8): 1–10.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2023-1530>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

软弱围岩掘锚一体化快速掘进关键技术与工程实践

Key technology research and engineering practice of speedy drivage with driving and bolting integration in soft surrounding rock
煤炭科学技术. 2024, 52(1): 280–287 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2023-0544>

三软煤层复合顶板巷道控制技术研究

Study on control technology of composite roof roadway in soft roof, soft coal and soft floor coal seam
煤炭科学技术. 2020, 48(11): 121–128 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b5b6ea1a-35de-4c01-94ac-a71c2b8e2114>

深部特厚煤层对采对掘巷道围岩综合应力场演化研究

Research on evolution of integrated stress field of surrounding rock of mining while digging opposite roadway in deep and ultra-thick coal seam
煤炭科学技术. 2020, 48(8): 26–36 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/2682323f-8632-419a-8455-4505a7c4eeb1>

软弱厚煤层沿顶掘进并沿底回采技术研究

Research on technology of excavating under roof then mining along bottom in soft and thick coal seam
煤炭科学技术. 2019(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/3e1d9a9c-a803-4e83-a5a7-74781537217f>

强动压“三软”煤层巷道“卸-转-固”围岩控制技术

Surrounding rock control technology by pressure relief stress transfer reinforce in three-soft coal seam under strong dynamic pressure
煤炭科学技术. 2021, 49(2): 30–37 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2021.02.004>

三软煤层巷道掘进防漏顶预注浆液扩散规律研究

Study on diffusion law of pre-grouting slurry for leakproof roof of roadway development in coal seam with soft floor, soft roof and soft coal
煤炭科学技术. 2020, 48(6) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/53545e78-5d6d-40f2-8bfe-a2be334420d4>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

采矿科学与工程



贾后省, 皇东山, 方珍珠, 等. “三软”厚煤层回采巷道掘锚一体机工艺优化及应用[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(8): 1-10.

JIA Housheng, HUANG Dongshan, FANG Zhenzhu, et al. Process optimization and application of bolter miner for “three-soft” thick coal seam mining roadway[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(8): 1-10.

移动扫码阅读

“三软”厚煤层回采巷道掘锚一体机工艺优化及应用

贾后省^{1,2}, 皇东山^{1,3}, 方珍珠⁴, 李东发⁴, 昌李宁⁴, 王国营^{1,2}

(1. 河南理工大学能源科学与工程学院, 河南焦作 454003; 2. 煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心, 河南焦作 454003;
3. 中赟国际工程有限公司, 河南郑州 450015; 4. 国网能源和丰煤电有限公司沙吉海煤矿, 新疆塔城 834400)

摘要: “三软”厚煤层回采巷道围岩整体强度低, 且岩层结构组合普遍变化较大, 造成掘进工作面悬露顶板稳定性差异明显, 部分顶板稳定性较差区域无法直接采用掘锚一体机及配套施工工艺, 造成掘进工作面频繁停工, 整体掘进效率下降。针对此类问题, 以沙吉海煤矿“三软”厚煤层回采巷道为工程背景, 采用现场调研、理论分析、数值模拟等综合研究方法, 阐明了掘进工作面悬露顶板漏冒、掘锚一体机陷入底板或跑偏、煤壁片帮是制约掘锚一体机在“三软”厚煤层回采巷道中应用的关键制约因素; 考虑悬露顶板厚度、扰动影响系数、顶板各岩层强度及各岩层完整性等参数的影响, 建立和推导了掘进工作面悬露顶板极限跨距计算公式; 形成了以掘进工作面悬露顶板极限跨距计算为主导的巷道围岩稳定性分级方法, 将“三软”厚煤层回采巷道围岩划分为极稳定、稳定、中等稳定、不稳定、极不稳定5个级别; 提出了不同稳定性级别围岩条件下掘锚一体机装备及施工工艺分类优化方案, 并从截割滚筒位态调整、底板接地处理、巷帮作业平台增设等方面给出了困难作业环境下掘锚一体机应用对策。研究成果在沙吉海煤矿B1003W05工作面巷道进行了工程应用, 其分类优化方案可有效保障掘锚一体机在“三软”厚煤层中的正常运行, 相比邻近巷道采用悬臂式掘进机综掘工艺, 掘进速度提升了1.0~1.8倍。

关键词: “三软”厚煤层; 回采巷道; 掘锚一体机; 采掘工艺; 快速掘进

中图分类号: TD421 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2024)08-0001-10

Process optimization and application of bolter miner for “three-soft” thick coal seam mining roadway

JIA Housheng^{1,2}, HUANG Dongshan^{1,3}, FANG Zhenzhu⁴, LI Dongfa⁴, CHANG Lining⁴, WANG Guoying^{1,2}

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. State Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean-efficiency Utilization, Jiaozuo 454003, China; 3. Zhongyun International Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450015, China; 4. Shajihai Coal Mine of State Grid Energy Hefeng Coal and Electricity Co., Ltd., Tacheng 834400, China)

Abstract: The overall strength of the surrounding rock of “three-soft” thick coal seam mining roadway is low, and the combination of rock structure generally changes greatly, resulting in obvious differences in the stability of hanging roof of driving face, and some areas with poor roof stability cannot directly adopt bolter miners and supporting construction technology, resulting in frequent stoppage of driving face and a decrease in the overall driving efficiency. In view of such problems, taking “three-soft” thick coal seam mining roadway of Shajihai Coal Mine as engineering background, and using comprehensive research methods such as on-site research, theoretical analysis and numerical simulation, it was clarified that roof leakage of driving face, bolter miner falling into the floor or mistracking, and rib spalling are the key constraints restricting the application of the bolter miner in “three-soft” thick coal seam roadway. Considering the influence of parameters such as the thickness of the hanging roof, the influence coefficient of disturbance, the strength of each rock layer of

收稿日期: 2023-10-23 责任编辑: 李莎 DOI: 10.12438/cst.2023-1530

基金项目: 教育部实验教学和教学实验室建设研究项目(SYJX2024-131); 河南省高校科技创新人才资助项目(22HASTIT010); 国家自然科学基金资助项目(52074102)

作者简介: 贾后省(1988—), 男, 山东济宁人, 副教授, 博士生导师, 博士。E-mail: jiahousheng@126.com

the roof and the integrity of each rock layer, the calculation formula of the limit span of hanging roof of driving face was established and derived. A stability grading method for surrounding rocks of roadway was formed dominated by the calculation of the limit span of hanging roof of driving face, and surrounding rocks of “three-soft” thick coal seam roadway is divided into 5 grades: extremely stable, stable, moderately stable, unstable and extremely unstable. Classification and optimization scheme of bolter miner equipment and construction process under different stability levels of surrounding rock is proposed, and the application countermeasures of bolter miner under difficult operating conditions are given from the aspects of cutting drum position adjustment, floor grounding treatment, and addition of roadway operation platform. The research results were applied in the roadway of Shajihai Coal Mine No.B1003W05 working face, and its classification optimization scheme can effectively ensure the normal operation of the bolter miner in “three-soft” thick coal seams, and the driving speed is increased by 1.0–1.8 times compared with fully-mechanized driving of boom-type roadheader.

Key words: “three-soft” thick coal seam; mining roadway; bolter miner; mining technology; fast driving

0 引言

巷道作为井工煤矿中必要的生产和生命通道,其安全快速的掘进是煤炭安全高效生产前提,是煤炭开采过程中的关键环节^[1-4]。我国煤炭开采每年新掘巷道约12 000 km,规模巨大,其中“三软”厚煤层巷道、松散软弱煤岩体等困难支护巷道比例急剧增加^[5],受限于稳定性较差的围岩环境和高密度的支护参数,大型高效掘进装备直接使用普遍“水土不服”,现有技术条件下掘进效率较为缓慢^[6-7]。以沙吉海煤矿“三软”厚煤层巷道为例,该矿产能不断释放,连年产量快速增长,采掘接续矛盾突出,传统掘进工艺已无法满足矿井产能释放的需要,鉴于掘锚一体机是当前适应性较好的一种快掘装备,该矿引进了MB670系列掘锚机组,而“三软”厚煤层条件下掘锚一体机配套施工工艺及作业方式难以正常运行,造成掘进速度总体缓慢。因此,优化和提出“三软”厚煤层条件下掘锚一体机作业工艺和关键对策是实现此类巷道快速掘进的有效途径,对类似“三软”厚煤层地质条件下的矿井产能释放、安全高效生产具有实际意义。

针对复杂地质条件下制约巷道安全、快速掘进的关键问题,诸多学者从巷道智能快速掘进装备技术及装备使用工艺方面进行了研究和实践。王虹等^[8-10]分析了国内掘进机在截割技术、元部件可靠性、自动控制技术、除尘系统以及系统配套技术方面与国外相比存在的差距,提出了提高整机适应性、拓展使用范围、开展基础技术研究、发展综掘系统配套技术为今后我国综掘技术的发展方向。马宏伟等^[11-13]为了有效解决目前煤矿井下掘进机定位定向不准确、自动化程度低等问题,提出了一种基于光纤惯导与数字全站仪组合的掘进机自主定位定向方法,有效保障了巷道快速掘进与施工质量。张敏骏等^[14-17]为实现掘进装备在工作空间内的自主纠偏并提高巷道断面截割尺寸,提出了一种区域栅格化的掘进机自

主纠偏方法,实现了大型掘进装备的正常运行。

以上先进技术和工艺一般适用于顶底板中等稳定、顶板允许一定空顶、煤层倾角不大的回采巷道,其中,掘进工作面暴露顶板稳定性是决定施工工艺的关键,姜鹏飞等^[18-20]根据煤巷掘进工作面空顶距及自稳时间,对煤巷掘进工作面围岩稳定性进行了分类,并提出了相应的支护要求,提出了确定适合的掘进模式、优化掘进工艺是提高煤巷掘进速度的主要技术途径。柏建彪等^[21-23]在建立顶板稳定分析力学模型基础上,运用差分法计算得到了顶板应力分布规律与空顶距的关系,根据顶板应力与其单轴抗压强度和抗拉强度关系判定顶板稳定性,并在此基础上确定了合理掘进空顶距。

诸多学者基于特定煤层赋存环境从巷道围岩稳定性、快速掘进装备技术及使用工艺等多个方面进行了巷道智能高效掘进的研究,但针对“三软”厚煤层这种特殊赋存条件下快速掘进装备及技术方面的研究较少,尤其在“三软”厚煤层地质条件下,巷道围岩整体软弱且区域差异性显著直接影响了掘锚一体机施工工艺适用性。据此,以沙吉海煤矿“三软”厚煤层B1003W05工作面巷道为工程背景,系统分析了制约掘锚一体机在“三软”厚煤层回采巷道中应用的关键影响因素,并基于掘进工作面暴露顶板稳定性级别划分优化了掘锚一体机装备及其施工工艺,为类似“三软”厚煤层巷道快速掘进提供技术借鉴。

1 工程概况

沙吉海煤矿主采B10煤层,其B1003W05工作面埋深250 m左右,工作面区域煤层厚度4.8~7.7 m,掘进期间巷道顶煤厚度变化较大,煤层倾角平均15°,坚固性系数为0.87,且纵向节理发育,整体强度较低。煤层顶板岩层复合特点显著,以强度较低的泥岩、粉砂质泥岩及砂质泥岩为主,属于典型的“三软”厚煤层赋存环境,如图1所示。

该煤层回采巷道设计断面尺寸为5 400 mm×



图1 B1003W05 采煤工作面区域地质柱状图

Fig.1 Geological histogram of No.B1003W05 working face area

3 800 mm, 挖进工作长期采用以悬臂式挖进机为主的综掘工艺, 大断面挖进条件下悬臂式挖进机需摆动机身, 多次截割才能成巷, 顶板和帮部支护工作需要气腿式锚杆钻机及手持风钻联合完成, 挖进和支护作业效率低下, 成巷速度普遍在 180~260 m/月, 造成采掘接替紧张, 并且钻进设备需要频繁搬运和连接管线, 钻机操作复杂, 工人劳动强度高。由于“三软”厚煤层巷道围岩整体软弱的限制, 直接采用现有大型高效掘锚装备难免“水土不服”, 配套施工工艺及作业方式难以正常运行, 因此, 针对现有高效掘锚装备特点, 优化和提出“三软”厚煤层条件下装备作业工艺和关键对策是实现此类巷道快速挖进的有效途径。

2 “三软”厚煤层巷道掘锚一体机适应性分析

掘锚一体机是指将掘装功能与锚杆钻机的锚锚支护功能有机的结合在一起, 构成整体的掘锚装备, 实现切割、装运、行走、锚杆支护于一体, 达到掘、支平行作业, 快速挖进, 是当前适应性较好的一种快掘装备。但是常规工艺条件下, 掘锚一体机还主要适

用于顶底板中等稳定、顶板允许一定空顶、煤层倾角不大的回采巷道。

“三软”厚煤层巷道围岩整体强度低且稳定性差, 尤其受邻近工作面侧方支承压力影响的煤柱巷道, 易出现随掘随冒、煤壁片帮等问题。因此, 在部分巷道围岩稳定性较差区域, 围岩条件限制了掘锚一体机常规工艺及作业形式的正常应用, 沙吉海矿引进了 MB670 掘锚一体机, 运行过程中出现的主要问题如下:

1) B10 煤层巷道顶板岩体整体强度低且顶煤厚度变化较大, 悬露顶板稳定性差异显著, 尤其是在掘进期间受到邻近采空区侧向支承压力影响的区域, 巷道矿压显现相对剧烈, 如图 2 所示, 巷道掘进影响期间, 顶板下沉量超过 300 mm, 甚至出现随掘随冒的问题, 顶板漏冒处理耗时耗力, 严重影响掘进速度, 需要尽可能缩小掘进工作面空顶距离并及时支护, 然而掘锚一体机临时支护发挥作用却相对有限。



图2 巷道顶板变形剧烈现场
Fig.2 Scene of violent deformation of roadway roof

2) 掘锚一体机及配套的转载机总质量大, 体积大, 总质量在 103 t 左右, 设备尺寸为长 11.16 m、宽 5.20~6.24 m、高 2.15~3.00 m, 因此, 设备对地压力大, 巷道底板较为松软时, 极易造成底板发生破坏, 导致设备陷入底板或跑偏, 如图 3 所示, 将其挖掘出、



图3 掘锚一体机跑偏现场
Fig.3 Scene of bolter miner running off

调整需耗费大量的时间,大幅降低了掘进速度。

3)B10煤层煤体竖向节理发育,煤壁稳定性差,尤其B1003W05运输巷帮部在邻近B1003W03采空区侧向支承压力作用下频繁出现片帮,如图4所示,需要较高的锚杆支护密度,而传统掘锚工艺巷帮支护及时性较差,巷帮存在因支护不及时发生片帮的隐患。

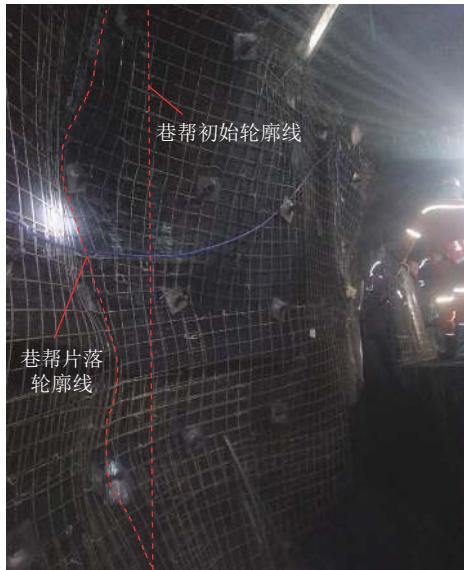


图4 巷道掘进工作面附近片帮现场

Fig.4 Scene of rib spalling near roadway driving face

3 “三软”厚煤层巷道掘锚一体机工艺优化

“三软”厚煤层条件下掘锚一体机直接应用存在较多的局限,实现其成功应用的关键在于根据巷道围岩稳定差异性进行掘锚一体机施工工艺的针对性优化,实现不同围岩条件下巷道的掘锚一体机正常运行与快速掘进。

3.1 掘进工作面暴露顶板极限跨距分析

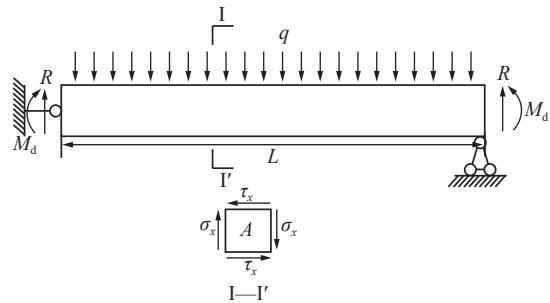
3.1.1 暴露顶板稳定性力学模型

巷道掘进期间,暴露顶板破坏程度较小,其稳定性可用材料力学方法求得,由于梁的弯曲所产生的弯距所对应梁的极限跨距要远小于剪切应力所形成的极限跨距,因此这里在进行建模计算时,按照所能承受的弯距极限来计算顶板岩梁的极限跨距,暴露顶板前方为煤壁支撑,后方为8根 $\varnothing 22\text{ mm}$ 锚杆和4根 $\varnothing 21.8\text{ mm}$ 强力锚索支护,总体上可认为暴露顶板处于简支状态,岩梁任意一点的应力分析模型如图5所示。

已知梁内任意点的正应力 σ 为

$$\sigma = \frac{My}{J_z} \quad (1)$$

式中: M 为该点在断面的弯矩, $\text{N}\cdot\text{m}$; y 为该点离断面



q —暴露顶板所受荷载; R —暴露顶板两端垂直方向上受到的反力;
 M_d —均布荷载在暴露顶板两端产生的弯矩; L —暴露顶板的极限跨距;
 A —截面 I—I' 上任意点; σ_x —垂直应力; τ_x —剪应力

图5 岩梁上任意点的应力分析

Fig.5 Stress analysis at any point on a rock beam

中性轴的距离, m ; J_z 为对称中性轴的断面惯性矩, m^4 。

梁的断面惯性矩 $J_z = bh^3/12$ (b 为梁的宽度, 取单位宽度 1 m; h 为基本顶岩层的单层厚度), 任意点 A 的正应力 $\sigma = 12\frac{My}{h^3}$ 。根据简支梁的计算, 最大弯矩发生在梁的两端, 此时, $M_{\max} = -\frac{1}{8}qbL^2$, $y = \frac{h}{2}$ 。因此, 该处的最大拉应力 σ_{\max} 为

$$\sigma_{\max} = \frac{3qL^2}{4h^2} \quad (2)$$

当 $\sigma_{\max} = R_t$ (R_t 为岩梁的极限抗拉强度) 时, 岩层将在该处拉裂。因此, 掘进工作面暴露顶板实际的极限跨距 L 为

$$L = 2h \left(\frac{R_t}{3q} \right)^{1/2} \quad (3)$$

式(3)中暴露顶板荷载 q 的计算可根据各岩层之间的相互影响来定。根据组合梁原理, 并结合曲率与弯矩之间的关系^[24], 暴露顶板(第1层岩层)上第 n 层岩层对其影响时形成的荷载 $(q_n)_1$ 的计算公式为

$$(q_n)_1 = \frac{E_1 h_1^3 (\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \dots + \gamma_n h_n)}{E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3 + \dots + E_n h_n^3} \quad (4)$$

式中: E_1 为暴露顶板的弹性模量, MPa; E_n 为第 n 层岩层的弹性模量, MPa; h_1 为暴露顶板的厚度, m; h_n 为第 n 层岩层的厚度, m; γ_1 为暴露顶板的容重, MN/m³; γ_n 为第 n 层岩层的容重, MN/m³。

3.1.2 暴露顶板稳定性影响因素分析

掘进工作面顶板岩层的稳定性程度一般取决于其所承受的荷载大小和自身强度之间的综合作用, 然而在实际工程中, 扰动影响会显著影响巷道围岩周围的应力分布。同时, B10煤层纵向节理较为发育, 极大弱化了岩体强度。据此, 从岩层强度、岩层完整性及煤层扰动影响等3方面分析其对暴露顶板稳定性的影响程度, 并以相应的影响系数来表示。

1) 岩层强度影响。B10 煤层纵向节理较为发育, 煤体强度显著小于试验室煤岩所测强度, 并且试验室煤岩样所测强度一般为煤岩体强度的 1.5~2.0 倍, 因此, 悬顶顶煤强度近似为试验室煤岩强度的 0.65 倍。

2) 岩层完整性影响。悬顶顶板极限跨距计算时, 对于自身完整性较好的砂岩类岩层, 可按实际岩层厚度计算。B10 煤层及顶板多数岩层软弱且整体稳定性差, 巷道顶煤厚度 0~3.9 m, 采用实际岩层厚度计算不合理, 因此, 该类软弱岩层最大计算厚度不超过 2 m, 计算悬顶顶板极限跨距时, 取其等效厚度为

$$h_d = \begin{cases} H, & H \leq 1.0 \text{ m} \\ \frac{2H}{H+1}, & H > 1.0 \text{ m} \end{cases} \quad (5)$$

式中: h_d 为岩层等效厚度, m; H 为实际岩层厚度, m。

3) 巷道所受扰动影响。依据 B1003W05 工作面煤层顶底板岩层组合特征及各岩层厚度信息, 采用 FLAC^{3D} 模拟软件建立了数值模型, 煤岩物理力学参数见表 1, 模型尺寸为 800 m×300 m×300 m, 对采煤工作面周围网格进行了加密处理, 如图 6 所示。模型四周和底面施加位移边界约束, 顶面为自由边界, 考虑上覆岩层载荷, 模型上表面施加应力为 2.5 MPa, 通过对模型的分步开挖来实现 B1003W05 工作面的推进过程。

表 1 煤层及顶底板各分层岩石力学参数

Table 1 Mechanical parameters of each layered rock of coal seam, roof and floor

层号	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ MPa	密度/ (kg·m ⁻³)	剪切模量/ GPa	体积模量/ GPa
粉砂岩	37.1	4.90	2 440	4.7	4.0
泥岩	27.5	4.72	2 390	4.3	2.7
粉砂质泥岩	29.5	4.72	2 390	4.3	2.7
B10煤层	25.7	3.17	2 200	2.6	2.2
泥岩	27.5	4.72	2 390	4.3	2.7
泥质粉砂岩	32.5	4.72	2 300	4.3	3.5
B9煤层	25.7	3.17	2 200	2.6	2.2
B8煤层	25.7	3.17	2 200	2.6	2.2

4) 数值模型结果分析。在 B1003W05 工作面靠近煤柱巷道侧布置了测线, 获取了本工作面回采期间工作面前方煤柱巷道侧不同距离处的支承压力曲线, 如图 7 所示, 该工作面超前支承压力峰值位于工作面前方 5.0 m 左右, 峰值为 22.8 MPa, 工作面处原岩应力近似取其上覆岩层所产生的垂直应力, 约为 6.2 MPa。因此, 在不考虑覆岩运动规律和垮落顶板碎胀影响的条件下, 煤柱巷道区域的支承压力集中系数约为 3.7。

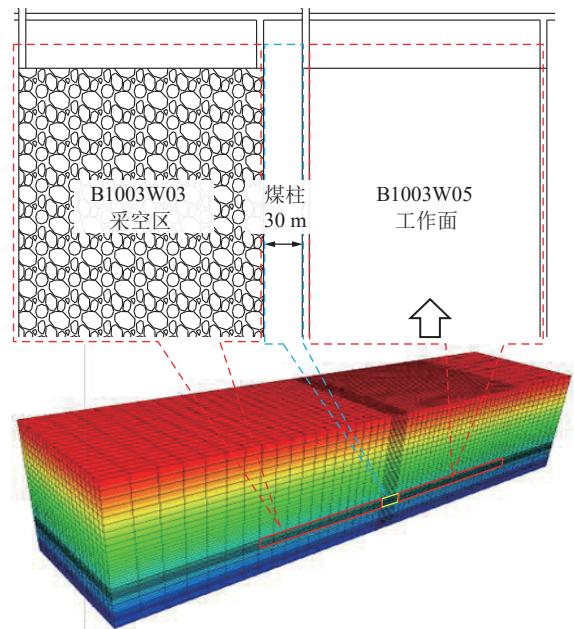


图 6 采煤工作面位置关系及数值模型
Fig.6 Position relationship and numerical model of working face

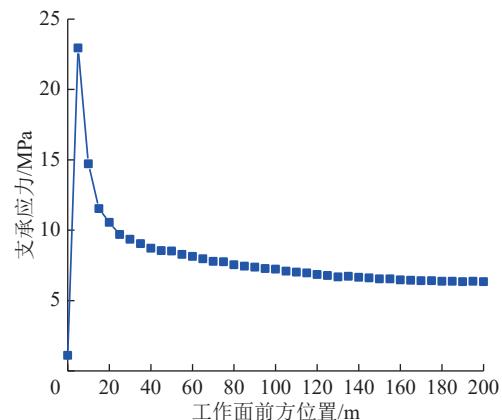


图 7 B1003W05 工作面前方超前支承压力
Fig.7 Front abutment pressure of No.B1003W05 working face

结合数值模拟结果分析, B1003W05 工作面两侧巷道掘进期间, 未受扰动影响区域仅受原岩应力作用, 其扰动影响系数 f_c 可近似取 1.0。受邻近工作面采空区影响的煤柱巷道, 在不受垮落顶板碎胀影响的条件下, 其周边围岩支承压力集中系数为 3.7, 充分考虑到直接顶厚度、采煤厚度、直接顶碎胀系数等因素的影响, 其扰动影响系数近似为

$$f_c = 3.7 + (1 - K_p) \frac{\sum h}{m} \quad (6)$$

式中: $\sum h$ 为直接顶厚度, m; m 为采煤厚度, m; K_p 为直接顶碎胀系数。

因此, 基于掘进工作面悬顶顶板稳定性分析, 并结合岩层强度、岩层完整性和煤层扰动等因素对掘进工作面悬顶顶板稳定性的影响, 得到实际的掘进

工作面暴露顶板极限跨距为

$$L = 2h \left(\frac{R_t f_q}{3q f_c} \right)^{1/2} \quad (7)$$

式中, f_q 为岩层的强度影响系数。

综合 B1003W05 工作面巷道顶煤厚度变化及顶底板岩层组合特征, 计算得出暴露顶板所受荷载 q 为 21.5~51.3 kPa, 扰动影响区域巷道扰动影响系数 f_c 为 3.33, 计算可得采煤工作面不同类型巷道的掘进工作面暴露顶板极限跨距如图 8 所示。

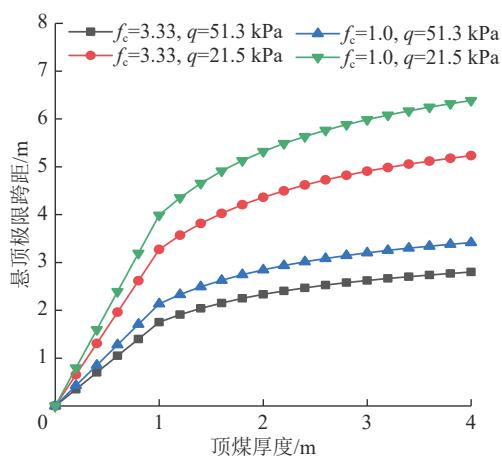


图 8 不同荷载和扰动影响类型下掘进工作面暴露顶板极限跨距计算结果

Fig.8 Calculation results of limit span of hanging roof of driving face under different load and disturbance influence types

当 $f_c=1.0, q=21.5\text{ kPa}$ 时, 掘进工作面未受邻近工作面扰动影响且暴露顶板所受荷载最小, 暴露顶板极限跨距随顶煤厚度增加而增加, 顶煤厚度较大时, 其极限跨距趋于平稳, 暴露顶板最大极限跨距为 6.4 m。当 $f_c=3.33, q=21.5\text{ kPa}$ 时, 掘进工作面受邻近工作面扰动影响但暴露顶板所受荷载最小, 相同顶煤厚度下暴露顶板极限跨距略大, 不同顶煤厚度下暴露顶板极限跨距趋势变化不大, 最大极限跨距 5.2 m。当 $f_c=1.0, q=51.3\text{ kPa}$ 时, 即掘进工作面未受邻近工作面扰动影响、暴露顶板所受荷载最大时, 不同顶煤厚度下掘进工作面暴露顶板极限跨距趋势变化不大, 最大极限跨距 3.4 m。当 $f_c=3.33, q=51.3\text{ kPa}$ 时, 即掘进工作面受邻近工作面扰动影响、暴露顶板所受荷载最大时, 相同顶煤厚度下暴露顶板极限跨距最小, 而且极限跨距趋于平稳时, 最大极限跨距仅为 2.8 m, 且暴露顶板极限跨距差异较大, 常规掘锚工艺不能适用。

3.2 困难作业环境下掘锚一体机应用对策

困难作业环境下掘锚一体机的正常运行决定了整条巷道能否顺利施工, 因此, 针对“三软”厚煤层巷道困难作业区域底板松软、部分区域顶板稳定性差、

煤壁易片帮等制约掘锚一体机应用的问题, 作了如下设备改造和工艺优化:

1) 顶板稳定性较差区域, 支护作业前截割滚筒嵌入掘进工作面煤体。具体工艺过程为: 掘进过程中, 改变边掘进、边支护的平行作业形式, 完成单倍锚杆排距(800 mm)的掘进尺寸后, 将截割滚筒与铲板一起放在最底, 前移机身 800 mm, 使截割滚筒完全嵌入掘进工作面煤体, 以最大限度减小掘进工作面顶板暴露范围, 同时进行顶板及两帮的支护作业, 完成本次循环暴露围岩的支护后, 再进行下一循环割煤, 施工作业原理如图 9 所示。

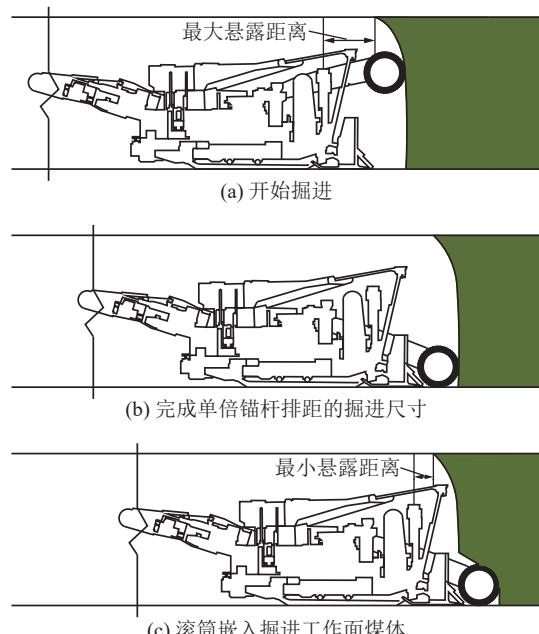


图 9 掘锚循环及时支护原理

Fig.9 Schematic diagram of driving-bolting cycle and timely support

2) 优化掘锚一体机履带接地面积, 并尽量保障底板稳定性。掘锚一体机及配套的转载机质量大、体积大, 很容易造成遇水软化后的底板发生破坏, 严重会导致掘锚方向偏移的问题。松软泥泞底板条件下, 当掘锚一体机跑偏一定距离后, 便无法调整回正常位置, 据此, 作了如下优化: ①增设专用指向激光仪, 设备机身中部位置设有定位标志, 当激光偏离定位标志超过 50 mm 时, 则提前干预掘进方向, 防止掘锚一体机过度跑偏。②当遇到巷道底板松软或泥化严重的区域, 提前在掘锚一体机履带位置处铺设方木, 减小履带与地面的对地比, 降低对松软底板的压力, 杜绝或减少掘锚一体机后续行进中的跑偏。③提高排水设备的功率, 增加排水效率, 减弱水对掘进工作面区域的松软底板的弱化, 如图 10 所示。

3) 加装巷帮煤壁锚杆作业平台, 增加帮部施工

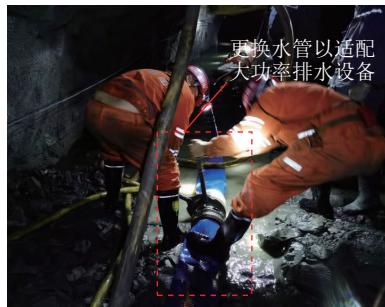


图 10 掘进工作面区域松软底板排水
Fig.10 Drainage of soft floor in driving face area

的及时性与支护密度。掘锚一体机本身具有打帮锚杆孔的功能,然而,由于巷道断面大、巷帮支护密度高以及巷道围岩整体软弱的原因,且掘锚一体机顶部施工平台距巷道帮部约 1.2 m,掘锚一体机自身又无法做到帮部的及时支护,致使帮部片帮的风险增加,这对现场的工作人员,特别是掘锚一体机司机带来很大的安全隐患。据此,设计加装了巷帮煤壁锚杆作业平台,一方面给帮部及时支护提供条件,另一方面形成对掘锚一体机司机的二次保护,如图 11 所示。

表 2 不同暴露顶板极限跨距掘进施工工艺及顶板支护对策
Table 2 Driving techniques and roof support countermeasures of different hanging roof limit span

暴露顶板极限跨距L/m		围岩稳定性	顶板控制形式	掘锚一体机装备施工工艺关键参数		
L>2.8	极稳定			截割滚筒嵌入深度/m	履带接地处理	巷帮煤壁支护方式
2.2 < L ≤ 2.8	稳定	锚网索分级控制	—	—	—	机载式锚杆钻机支护
1.8 < L ≤ 2.2	中等稳定	锚网索分级控制	—	适时增加履带接地面积、及时增设排水设备、严格控制施工用水	帮部作业平台及时支护	机载式锚杆钻机支护
0.8 < L ≤ 1.8	不稳定	锚网索分级控制	≥0.8	—	帮部作业平台及时支护	帮部作业平台及时支护
0 < L ≤ 0.8	极不稳定	层次控制+超前预注浆	≥0.8	—	帮部作业平台及时支护	帮部作业平台及时支护

当巷道围岩极不稳定或不稳定时,掘锚一体机截割滚筒需嵌入煤壁底部,嵌入深度大于 0.8 m;巷帮利用帮部作业平台进行及时支护;底板进行相应的履带接地处理。巷道围岩中等稳定时,巷道掘进过程需要采用帮部作业平台进行及时支护及底板进行相应的履带接地处理。巷道围岩稳定时,巷道掘进过程需采用适当的履带接地处理办法以减弱对底板的破坏。巷道围岩极稳定时,可直接采用掘锚一体机常规工艺。

在顶板控制形式上,由于巷道围岩极不稳定区域顶煤软弱且厚度较小,其上部岩层大多属于较软弱的泥质岩体,因此,在邻近工作面采空区支承压力的影响下,该区域的顶板破裂深度一般较大,需采用层次控制+超前预注浆对该类顶板进行稳定性控制。巷道围岩不稳定、中等稳定、稳定时,由于顶煤厚度较厚,稳定性程度相对较高,但考虑到煤体及顶板软

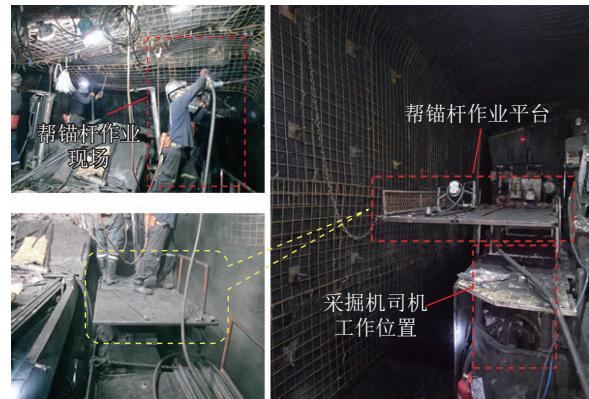


图 11 巷帮施工工艺优化及现场应用
Fig.11 Process optimization and on-site application of rib side construction

3.3 掘锚一体机施工工艺优化

B1003W05 工作面煤层巷道稳定性差异性较大,不同围岩条件需要针对性施工工艺。据此,以掘进工作面暴露顶板极限跨距为核心指标,将围岩分为 5 级,并提出了每级围岩巷道的掘锚一体机施工工艺及顶板控制形式,见表 2。

弱的特点,采用锚网索分级控制方法来保证巷道顶板稳定。巷道围岩极稳定时,采用普通锚杆索联合支护即可。

4 工程应用

在沙吉海煤矿 B1003W05 工作面双巷进行了巷道围岩稳定性分级,该工作面平均走向长 3 230 m,平均倾向长 275 m,考虑 B1003W05 运输巷距邻近的 B1003W03 回风巷 30 m,2 条巷道距离巷口相同距离处的顶煤厚度一般相同,因此,结合 B1003W03 工作面回采期间回风巷不同位置处钻屑观察和钻机扭矩观测结果,对巷道不同位置处的顶煤厚度进行了统计,并结合不同荷载和扰动影响类型下掘进工作面暴露顶板极限跨距计算结果将 B1003W05 工作面巷道围岩稳定性进行了分级。考虑到巷道频繁变换支护设计对施工的不利影响,同一条巷道围岩稳

定性不宜分级过多,故运输巷主要分为中等稳定、不稳定、极不稳定3种围岩稳定性级别,分别占比59.3%、27.7%、13%;回风巷主要为极稳定、稳定2种围岩稳定性级别,分别占比64.8%、35.2%,如图12所示。

将优化后的掘锚一体机施工工艺应用于B1003W05工作面巷道的掘锚工作时,基于表2所示的控制顶

板稳定的原则,煤层巷道断面为矩形(5400 mm×3800 mm),采用锚索+锚杆+Ω型钢带(钢筋网)联合支护,但在巷道暴露顶板极不稳定区域,需提前对巷道顶板破裂深度范围内的破碎岩体进行注浆加固。不同暴露顶板稳定性巷道围岩支护参数如图13所示,顶板锚杆采用的均是规格为 $\varnothing 22\text{ mm} \times 2500\text{ mm}$ 的全螺纹等强金属锚杆,间排距为700(1000)×

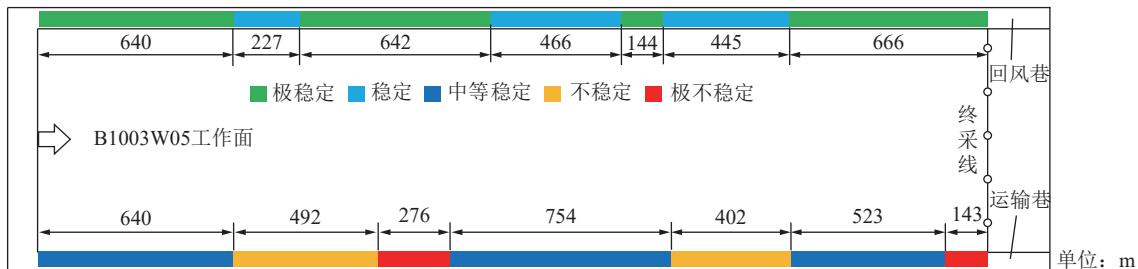


图12 B1003W05 工作面巷道围岩稳定性分级

Fig.12 Stability grading of rocks surrounding No.B1003W05 working face roadway

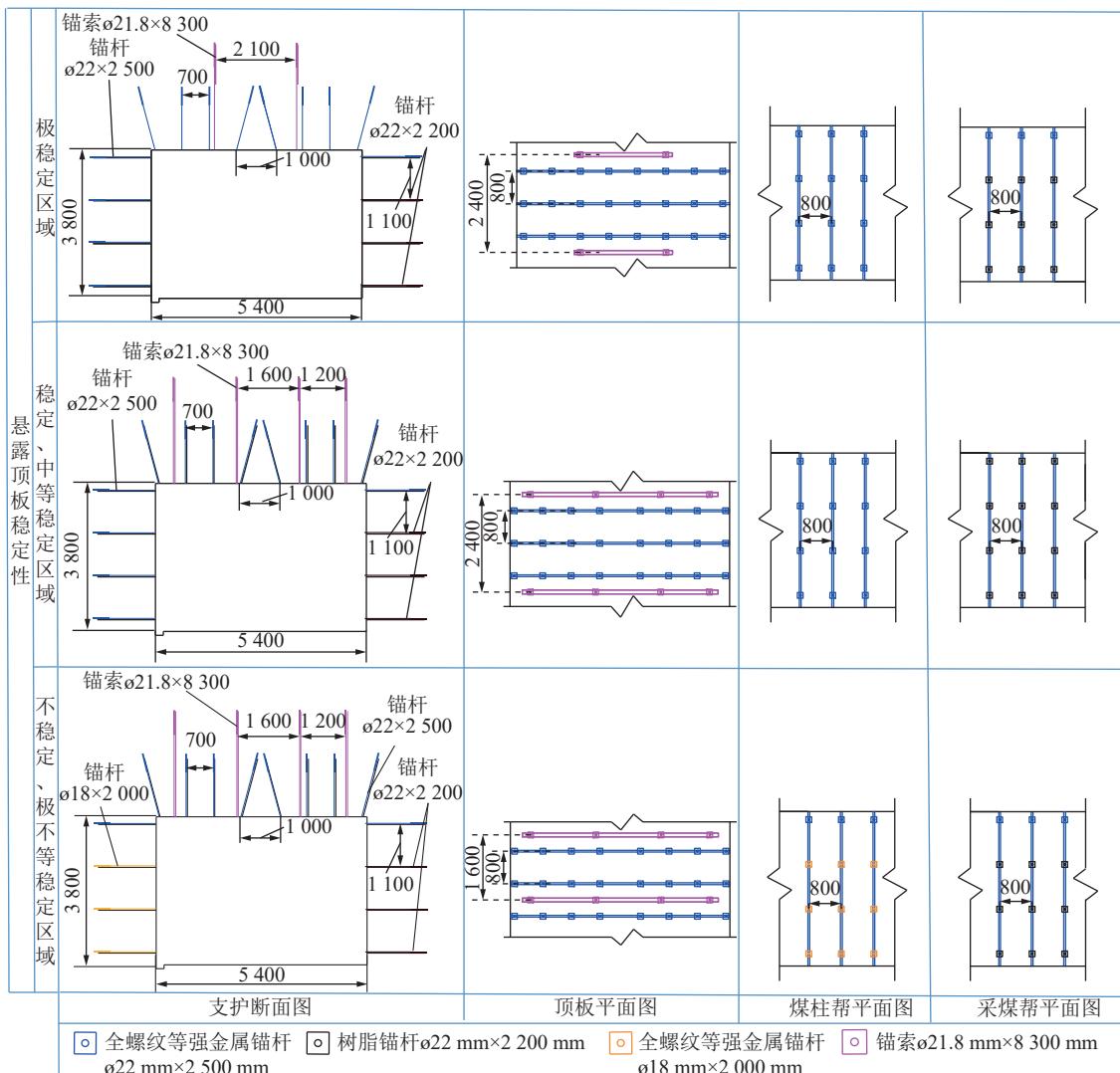


图13 不同围岩稳定性巷道支护参数

Fig.13 Roadway supporting parameters of different surrounding rock stability

800 mm; 帮部锚杆间排距为 1 100 mm×800 mm, 其中煤柱帮锚杆采用规格为 $\varnothing 22\text{ mm} \times 2 500\text{ mm}/\varnothing 18\text{ mm} \times 2 000\text{ mm}$ 的全螺纹等强金属锚杆, 采煤帮锚杆采用规格为 $\varnothing 22\text{ mm} \times 2 200\text{ mm}$ 的树脂锚杆和 $\varnothing 22\text{ mm} \times 2 500\text{ mm}$ 的全螺纹等强金属锚杆; 锚索采用规格为 $\varnothing 21.8\text{ mm} \times 8 300\text{ mm}$ 的钢绞线, 间排距为 1 600(1 200) mm×2 400 mm/1 600(1 200) mm×1 600 mm/2 100 mm×2 400 mm。

与相邻的 B1003W03 工作面悬臂式掘进机工艺相比, 该工作面掘锚一体机掘进效率大幅提升, 整条巷道施工掘锚一体机运行正常, 无明显误工停时, 巷道整体成巷速度由 180~260 m/月提升至 510 m/月以上, 掘进速度提升了 1.0~1.8 倍, 如图 14 所示。

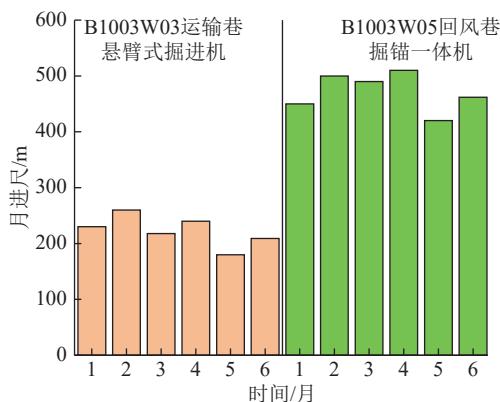


图 14 不同掘进设备施工条件下巷道掘进速度对比

Fig.14 Comparison of roadway driving speed under different driving equipment conditions

5 结 论

1) 通过理论计算分析, “三软”厚煤层条件下受扰动影响的煤柱巷道掘进工作面暴露顶板的极限跨距差异显著, 在工作面巷道暴露顶板稳定性差的区域, 会造成常规工艺条件下掘锚一体机无法正常运行。

2) 提出了困难作业环境下掘锚一体机应用对策, 掘进循环结束, 将截割部滚筒完全嵌入前方煤壁以最大限度减小暴露距离; 调整履带以增加对地比, 减弱对松软底板的破坏; 在掘锚一体机顶部两侧增设巷帮作业平台。

3) 以“三软”厚煤层工作面巷道暴露顶板极限跨距为指标, 将巷道围岩稳定性划分为 5 个级别, 分析了不同级别巷道围岩稳定性特点, 提出了不同稳定性级别围岩条件下掘锚一体机装备及施工工艺分类优化方案。在沙吉海煤矿 B1003W05 工作面巷道进行现场应用, 结果表明, 掘锚一体机现场应用效果显著, 相比邻近巷道悬臂式掘进机综掘工艺, 整体成巷

速度由 180~260 m/月提升至 510 m/月以上。

参考文献(References):

- [1] 王国法, 王虹, 任怀伟, 等. 智慧煤矿 2025 情景目标和发展路径 [J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 295–305.
WANG Guofa, WANG Hong, REN Huawei, et al. 2025 scenarios and development path of intelligent coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 295–305.
- [2] 王国法, 徐亚军, 张金虎, 等. 煤矿智能化开采新进展 [J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 1–10.
WANG Guofa, XU Yajun, ZHANG Jinghu, et al. New development of intelligent mining in coal mines [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 1–10.
- [3] 杨仁树, 李成孝, 陈骏, 等. 我国煤矿岩巷爆破掘进发展历程与新技术研究进展 [J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 224–241.
YANG Renshu, LI Chengxiao, CHEN Jun, et al. Development history and new technology research progress of rock roadway blasting excavation in coal mines in China [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 224–241.
- [4] 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.
- [5] 王步康. 煤矿巷道掘进技术与装备的现状及趋势分析 [J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(11): 1–11.
WANG Bukang. Current status and trend analysis of roadway driving technology and equipment in coal mine [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(11): 1–11.
- [6] 康永水, 耿志, 刘泉声, 等. 我国软岩大变形灾害控制技术与方法研究进展 [J]. 岩土力学, 2022, 43(8): 2035–2059.
KANG Yongshui, GENG Zhi, LIU Quansheng, et al. Research progress on support technology and methods for soft rock with large deformation hazards in China [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(8): 2035–2059.
- [7] 刘家顺, 靖洪文, 孟波, 等. 含水条件下弱胶结软岩蠕变特性及分数阶蠕变模型研究 [J]. 岩土力学, 2020, 41(8): 2609–2618.
LIU Jiashun, JING Hongwen, MENG Bo, et al. Research on the effect of moisture content on the creep behavior of weakly cemented soft rock and its fractional-order model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(8): 2609–2618.
- [8] 王虹. 我国综合机械化掘进技术发展 40 a [J]. 煤炭学报, 2010, 35(11): 1815–1820.
WANG Hong. The 40 years developmental review of the fully mechanized mine roadway heading technology in China [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(11): 1815–1820.
- [9] 朱伟, 王虹, 李首滨, 等. 煤矿采掘装备核心控制技术现状和发展趋势 [J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(12): 153–160.
ZHU Wei, WANG Hong, LI Shoubin, et al. Current status and development trend of core control technology for coal mining and tunneling equipment [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(12): 153–160.

- [10] 王虹,王步康,张小峰,等.煤矿智能快掘关键技术与工程实践[J].煤炭学报,2021,46(7):2068–2083.
WANG Hong, WANG Bukang, ZHANG Xiaofeng, et al. Key technology and engineering practice of intelligent rapid heading in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2068–2083.
- [11] 马宏伟,王岩,杨林.煤矿井下移动机器人深度视觉自主导航研究[J].煤炭学报,2020,45(6):2193–2206.
MA Hongwei, WANG Yan, YANG Lin. Research on depth vision based mobile robot autonomous navigation in under ground coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2193–2206.
- [12] 马宏伟,毛金根,毛清华,等.基于惯导/全站仪组合的掘进机自主定位定向方法[J].煤炭科学技术,2022,50(8):189–195.
MA Hongwei, MAO Jinggen, MAO Qinghua, et al. Automatic positioning and orientation method of roadheader based on combination of ins and digital total station[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(8): 189–195.
- [13] MA Hongwei, LI Xiaopeng. The theoretical research on localization using improved particle filter for mine rescue robot in unknown underground space[J]. Journal of Coal Science & Engineering(China), 2008, 14(3): 497–500.
- [14] 张敏骏,蔡岫航,吕馥言,等.受限巷道空间区域栅格化掘进机自主纠偏研究[J].仪器仪表学报,2018,39(3):62–70.
ZHANG Minjun, CAI Xiuhang, LV Fuyan, et al. Research on roadheader auto rectification in limited roadway space based on regional grid[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(3): 62–70.
- [15] ZHANG Minjun, LYU Fuyan, LI Chunzhi. et al. The roadheader auto-rectification dynamic analysis and control based on the roadway floor mechanic characteristics[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021, 46(3): 2649–2661.
- [16] 张敏骏,吉晓冬,李旭,等.掘进机姿态调整模型辨识方法与精准控制[J].西安交通大学学报,2021,55(6):9–17.
ZHANG Minjun, JI Xiaodong, LI Xu, et al. Method of model identification and precise control for tunnel boring machine body posture adjustment[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(6): 9–17.
- [17] JI Xiaodong, ZHANG Minjun, QU Yuanyuan, et al. Travel dynamics analysis and intelligent path rectification planning of a roadheader on a roadway[J/OL]. Energies, 2021, 14(21):7201. <https://doi.org/10.3390/en14217201>.
- [18] 康红普,姜鹏飞,高富强,等.掘进工作面围岩稳定性分析及快速成巷技术途径[J].煤炭学报,2021,46(7):2023–2045.
KANG Hongpu, JIANG Pengfei, GAO Fuqiang, et al. Analysis on stability of rock surrounding heading faces and technical approaches for rapid heading[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2023–2045.
- [19] 程利兴,康红普,姜鹏飞,等.深井沿空掘巷围岩变形破坏特征及控制技术研究[J].采矿与安全工程学报,2021,38(2):227–236.
CHENG Lixing, KANG Hongpu, JIANG Pengfei, et al. Deformation and failure characteristics and control technology of surrounding rocks in deeply gob-side entry driving[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(2): 227–236.
- [20] KANG Hongpu, JIANG Pengfei, FENG Yanjun, et al. Application of large-scale hydraulic fracturing for reducing mining-induced stress and microseismic events: a comprehensive case study[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(2): 1399–1413.
- [21] 柏建彪,肖同强,李磊.巷道掘进空顶距确定的差分方法及其应用[J].煤炭学报,2011,36(6):920–924.
BAI Jianbiao, XIAO Tongqiang, LI Lei. Unsupported roof distance determination of roadway excavation using difference method and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(6): 920–924.
- [22] MENG Ningkang, BAI Jianbiao, CHEN Yong, et al. Stability analysis of roadside backfill body at gob-side entry retaining under combined static and dynamic loading[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 127: 10533.
- [23] 肖同强,柏建彪,王襄禹,等.深部大断面厚顶煤巷道围岩稳定原理及控制[J].岩土力学,2011,32(6):1874–1880.
XIAO Tongqiang, BAI Jianbiao, WANG Xiangyu, et al. Stability principle and control of surrounding rock in deep coal roadway with large section and thick top-coal[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1874–1880.
- [24] 钱明高,史平五,许家林.矿山压力与岩层控制[M].徐州:煤炭工业出版社,2003.