



推荐阅读:

[2025 年中国能源消费及煤炭需求预测](#)

[深部岩体力学与开采理论研究进展](#)

[煤炭开采与岩层运动](#)

[煤矿千米深井围岩控制及智能开采技术构想](#)

煤炭开采:

[煤及共伴生资源精准开采科学问题与对策](#)

[煤矿厚煤层高强度开采技术特征及指标研究](#)

[深部煤炭资源采选充绿色化开采理论与技术](#)

[我国放顶煤开采的工程实践与理论进展](#)

[“采充并行”式保水采煤方法](#)

[特厚煤层综放开采地表沉陷预计模型算法改进](#)

[特厚煤层智能化综放开采理论与关键技术架构](#)

[煤矿“采选充+X”绿色化开采技术体系与工程实践](#)

煤岩动力灾害:

[煤矿冲击地压扰动响应失稳理论及应用](#)

[煤矿深部开采煤岩动力灾害多尺度分源防控理论与技术架构](#)

[冲击危险评价的相对应力集中系数叠加法](#)

[煤矿复合动力灾害危险性实时预警平台研究与展望](#)

[煤矿典型动力灾害风险精准判识及监控预警关键技术研究进展](#)

[基于冲击启动过程的近场围岩冲击危险性电磁波 CT 评估方法](#)

[煤矿冲击地压启动理论及其成套技术体系研究](#)

[基于变分模态分解及能量熵的微震信号降噪方法](#)

[煤矿深部开采冲击地压监测解危关键技术研究](#)



移动阅读

高明仕,贺永亮,陆菜平,等. 巷道内强主动支护与弱结构卸压防冲协调机制[J]. 煤炭学报,2020,45(8):2749-2759.

GAO Mingshi, HE Yongliang, LU Caiping, et al. Coordination mechanism of internal strong active support, soft structure pressure relief and anti-punching of roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(8): 2749-2759.

巷道内强主动支护与弱结构卸压防冲协调机制

高明仕^{1,2}, 贺永亮^{1,2}, 陆菜平^{1,2}, 邵 轩³, 杨 征⁴

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 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 221116; 3. 河南大有能源股份有限公司 常村煤矿, 河南 三门峡 472400; 4. 陕西陕煤榆北煤业有限公司, 陕西 榆林 719300)

摘 要:为探索深部冲击地压巷道稳定性控制技术,解决冲击地压巷道支护与卸压之间的矛盾,以义马矿区常村煤矿21170运输巷为研究对象,依据冲击地压巷道的强弱强结构模型,采用理论分析、数值模拟、现场试验相结合,分析了强弱强结构消波吸能特性以及内强小结构破坏能量准则和弱结构吸能效应。根据钻孔破碎区力学特征理论推导了多次反复致裂中间弱结构卸压区影响因素,多次反复致裂半径与钻孔半径、初始应力、内摩擦角、弹性模量、降模量、峰值强度和致裂半径修正系数有关。通过数值模拟分析了内强小结构内置钢管支撑护壁技术对巷道围岩的强度和支护体结构完整性控制效果以及周围煤岩体的应力、位移的破坏规律。研究了内强小结构主动支护强化技术,中间卸压防冲弱结构的内置套管反复掏裂致裂方法,并通过微震能量监测验证了弱结构防冲吸能效应。研究表明:内置钢管支撑护壁技术在保护内强小结构不受破坏的作用下可以多次进行弱结构致裂,既防内强小结构松动圈裂隙扩展,又防止巷道支护层的整体失稳。工程实践表明:锚杆索主动支护+液压抬棚减跨强力支护+卸压防冲弱结构组成的“内支-外卸”组合技术,微震监测显示震动能量减少了50%,巷道两帮位移和顶板下沉显著较小,有效维护了巷道围岩稳定性,保证了工作面顺利安全回采。

关键词:内强支护;外卸防冲;协调机制;强弱强结构;冲击地压

中图分类号:TD353;TD324 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2020)08-2749-11

Coordination mechanism of internal strong active support, soft structure pressure relief and anti-punching of roadway

GAO Mingshi^{1,2}, HE Yongliang^{1,2}, LU Caiping^{1,2}, SHAO Xuan³, YANG Zheng⁴

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resource and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Changcun Coal Mine, Henan Dayou Energy Co., Ltd., Sanmenxia 472400, China; 4. Shanxi Coal Group Yubei Coal Co., Ltd., Yulin 719300, China)

Abstract: In order to explore the stability control technology of deep rockburst roadway, and to solve the contradiction between the support and the pressure relief impact on the roadway, taking the 21170 roadway of Changcun Coal Mine in Yima as an example, according to the strong-soft-strong structural model of roadway in the impact area, the theoretical analysis, numerical simulation and field test are used to analyze the energy absorption characteristics of strong-soft-strong structure, internal strong structure energy damage criterion and soft structure energy absorption effect. Based on the theory of the mechanical characteristics of the fractured zone of the borehole, the influencing factors of the pressure relief zone of the soft structure of repeated drilling are deduced. The repeated cracking radius is related to the drilling

收稿日期:2020-03-18 修回日期:2020-06-01 责任编辑:郭晓伟 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2020.0427

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51564044)

作者简介:高明仕(1970—),男,甘肃靖远人,教授,博士生导师,博士。E-mail:cumt_gms@163.com

通讯作者:贺永亮(1988—),男,山东宁阳人,博士研究生。E-mail:cumthyl@cumt.edu.cn

radius, initial stress, internal friction angle, elastic modulus, modulus reduction, peak strength, and drilling radius correction factor. Through the numerical simulation, the failure law of the strength of the surrounding rock of the roadway and the structural integrity control of the supporting body and the stress and displacement of the surrounding coal and rock body are analyzed by the internal steel pipe borehole protection technology. The strengthening technology of active support for internal strong structure and the method of repeated drilling caused by internal steel pipe in the pressure relief and control structure are studied. Through the monitoring of micro-seismic energy, the energy absorption effect of soft structure is verified. The internal steel pipe borehole protection technology can repeatedly drill the soft structure under protecting the internal strong structure from damage, not only prevents the crack expansion in the loose circle of the internal strong structure, but also prevents the overall instability of the supporting layer of the roadway. The engineering practice show that the anchor cable active support+hydraulic lifting shed reduction span strong support+soft structure energy absorption technology form an integrated technology of internal strong support structure and external soft pressure relief structure. The micro-seismic monitoring shows that the vibration energy is reduced by 50%, the displacement of the two sides of the roadway and the roof subsidence are significantly smaller, which effectively maintains the stability of the surrounding rock of the roadway and ensures the smooth and safe mining of the working face. The research results provide a reference for similar roadway anti-shock and support in the impact area.

Key words: internal strong support; pressure relief anti-punching; coordination mechanism; strong-soft-strong structure; rock burst

冲击地压是影响煤矿安全高效开采最严重的动力灾害之一,随着煤矿开采深度不断增加,冲击地压危害越来越严重^[1]。据不完全统计,发生在巷道内的冲击地压事故占冲击地压总数的90.8%^[2]。现有的冲击地压巷道支护体系仅从支护角度进行设计,未考虑动静载能量的吸收和转移,巷道防冲主要是开采保护层、钻孔卸压、爆破卸压等措施,卸压的同时有可能使巷道的支护体系遭到破坏。卸压技术对控制巷道变形及冲击地压防治在短期内效果显著,随着服务年限的增加,应力转移过程中弱化了巷道围岩强度,使巷道稳定性下降。冲击区域巷道内强主动支护与卸压防冲的矛盾无法协调解决,不能同时满足冲击地压巷道的支护与防冲要求。

近几年,一些研究人员开始改变支护方式和支护材料研究冲击地压巷道的支护。康红普等^[3]研究了高冲击韧性锚杆(索)的力学性能,将高冲击韧性锚杆(索)作为支护材料应用于冲击地压巷道,有效控制了冲击巷道变形。何满潮等^[4]研究恒阻大变形锚杆(索),分析了恒阻大变形锚杆(索)的解析模型,并成功应用于冲击地压巷道支护,取得较好效果。杨仁树等^[5]提出了锚杆、锚索、槽钢梁、喷射混凝土、U型钢联合支护方案,解决了高应力软岩巷道支护,有效控制高应力软岩巷道变形。潘一山等^[6]提出了高强度巷道液压支架、防冲吸能液压支架、金属支架-泡沫铝联合支护用于冲击地压巷道支护。张农等^[7]研究了“卸压-锚固”沿空留巷控制机理,实现了巷道卸压后大间排距主动控制,取得较好效果。刘军、徐学

锋等^[8-9]研究了封闭刚柔吸能支护冲击地压巷道。王猛等^[10]分析了深部钻孔卸压巷道规律、巷道弱化特征,得出卸压同时增加了巷道围岩的破碎程度。赵同彬等^[11]实现了卸压后巷道支护强度计算,现场试验表明卸压后支护强度明显降低。支护材料和支护方式的发展极大推动了冲击地压巷道支护技术的改革,但从现场应用及实际效果看,巷道围岩内部卸压防冲破坏了巷道支护结构,使巷道支护强度明显减弱,冲击地压巷道支护与卸压无法同时满足,不能有效控制巷道围岩变形,冲击地压巷道内强主动支护与卸压防冲的矛盾有待深入研究和解决。

笔者依据“强弱强”结构模型^[12],提出锚杆(索)主动支护+液压抬棚减跨强力支护+弱结构吸能技术支护方案,研究了反复掏裂形成弱结构技术,协调解决了冲击地压巷道内强主动支护与卸压防冲的矛盾,提高了冲击地压巷道支护与卸压效果。

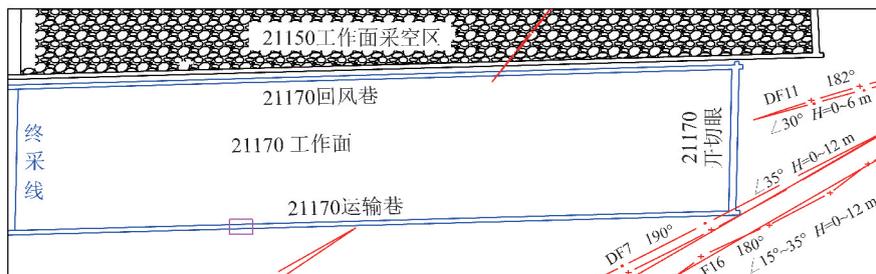
1 巷道情况

1.1 工程地质

义马常村煤矿21170运输巷埋深780 m,巷道直接顶和基本顶主要为泥岩,泥岩厚度大,易风化破碎,直接底为煤矸互层或炭质泥岩,遇水易膨胀,基本底为黏土岩砂岩互层。受上覆岩层中巨厚砾岩层的存在和F16断层的影响,地应力、采动应力以及构造应力的叠加造成局部应力高度集中,煤体中聚集的高弹性能在释放过程中经常发生煤炮或冲击破坏。21170工作面示意图及煤层柱状图如图1所示。

序号	累计厚度/m	层厚/m 最小~最大 平均	柱状	煤岩名称	岩性描述
1	700.1	$\frac{425 \sim 435}{430}$		砾岩	主要成分为灰色,紫红色石英岩,石英砂岩,次为灰绿色棕红色火成岩,直径大小不一,最大直径17 cm。次棱角状为主,局部显棕红色和灰绿色,泥砂质基底胶结,夹有层状棕红色粉砂岩
2	720.6	$\frac{22.0 \sim 25.0}{23.5}$		细砂岩	浅灰色细砂岩条带,波状交错层理,含较多瘤状黄铁矿结核,顺层分布,断面见白云母碎片
3	763.7	$\frac{36.0 \sim 44.5}{40.1}$		泥岩	较多植物化石,部分炭化,粒度偏粗,以下较致密均一,中部见少量瓣鳃类生物化石碎屑。倾角变化较大,夹较多菱铁质条带,水平层理,底部含片状黄铁矿
4	768.5	$\frac{0.05 \sim 9.1}{4.8}$		泥岩	断口规则状,岩石细腻,层面具有少量的白云母片,局部夹含粉砂岩,夹含植物碎片及瓣鳃类化石,还可见有菱铁质条带,泥质胶结。底部有0.11 m厚的褐灰色细中砂岩
5	779.7	$\frac{10.8 \sim 13.3}{12.0}$		煤	灰分较高,煤质变化较大,变质程度低,局部具有纤维状结构,质较轻,夹炭质泥岩夹矸
6	782.8	$\frac{0.5 \sim 5.7}{3.1}$		炭质泥岩	黑色,质纯,少量滑石。含炭质成分较高
7	807.8	$\frac{22.2 \sim 27.8}{30.0}$		黏土岩	灰色,砂质黏土岩,含有棱角状石英岩小砾石(3~10 mm)及菱铁质,含较多植物根部化石。比重稍大
8	812.9	$\frac{4.0 \sim 6.3}{5.1}$		砾岩	砾块成分主要为石英岩石英砂岩,磨园度好,砾块大小不一,胶结物为灰色的砂泥质成分,基底式胶结

(a) 煤层柱状



(b) 21170工作面示意

图 1 21170 工作面示意及煤层柱状

Fig. 1 21170 working face schematic diagram and coal seam histogram

1.2 巷道原支护及破坏特征

21170 运输巷沿煤层底板掘进,巷道断面采用斜墙三心拱断面,宽×高=6 900 mm×4 050 mm,原支护设计如图 2 所示。一级支护:巷道顶板、两帮采用锚杆、锚索、金属网等主动支护;二级支护:锚网后架棚,棚距 1 200 mm,支架后顶预留 300 mm 空间,背设主动承压,两帮让压 300 mm;三级支护:支架后顺巷道中心打一道连续液压抬棚加强支护。

因防冲工作需要要在巷道围岩帮部施工大直径卸压深孔,卸压钻孔参数:直径 110 mm,深度 25 m,间距 2.0 m。根据矿方资料及巷道表面位移原始记录,卸压钻孔施工后,巷道表面位移变化较大,造成了巷道严重变形破坏,整个断面几乎闭合,防冲钻孔极大破坏了巷道帮部煤体的完整性,生产无法正常进行。

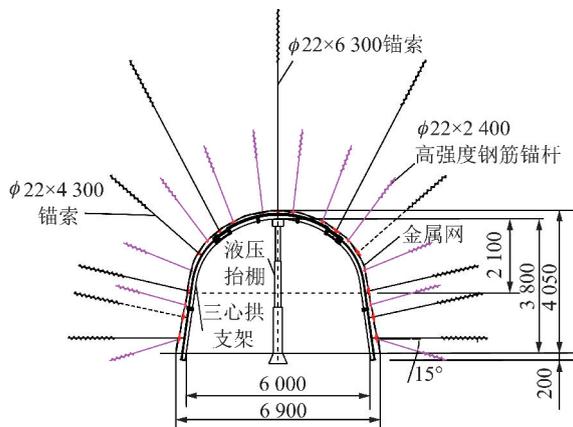


图 2 21170 运输巷原支护断面

Fig. 2 Cross section of 21170 roadway original support

造成了冲击地压巷道支护与卸压间的矛盾。21170 运输巷破坏如图 3 所示。



(a) 巷道整体破坏



(b) 两帮围岩变形

图 3 巷道破坏

Fig. 3 Roadway failure diagram

2 冲击区域巷道强弱强结构控制模型

2.1 强弱强结构

强弱强结构控制模型以开挖巷道为中心,由近及远依次将巷道周围煤岩体分为内强小结构、中间弱结构和外强大结构。内强小结构为巷道围岩支护结构体,即巷道支护层,用于支护巷道稳定;中间弱结构为消波吸能区,经过致裂破碎形成的松散煤岩体,用于吸收冲击地压震源所产生的能量;外强大结构即稳定层,由未经开采扰动的原岩体组成。强弱强结构中内强小结构、中间弱结构和外强大结构每一个结构在冲击地压巷道的支护、防冲作用中具有不同的作用。冲击地压巷道强弱强结构控制模型如图 4 所示。

2.2 强弱强结构消波吸能特性分析

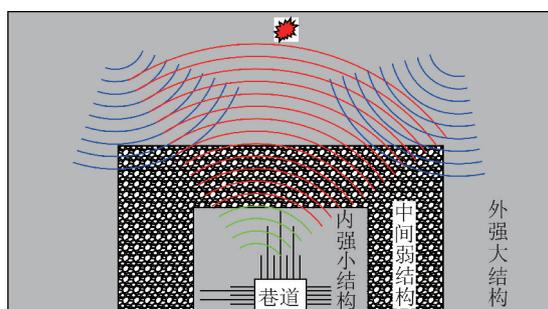
2.2.1 内强小结构能量准则

冲击区域巷道破坏是煤岩体集聚的能量释放失稳的过程,巷道失稳是积聚在煤岩体的能量突然释放^[13]。冲击区域巷道煤岩体破坏的最小能量 E_{\min} 为

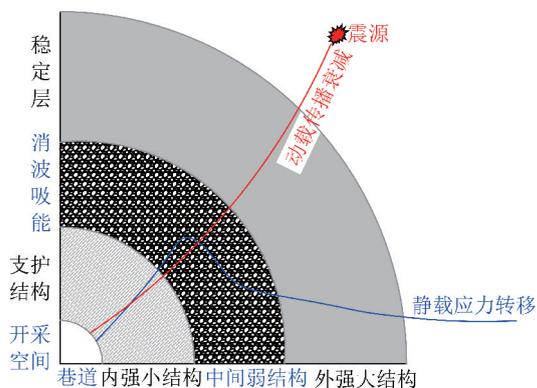
$$E_{\min} = \frac{\sigma_c^2}{2E} \quad (1)$$

式中, σ_c 为煤岩体的单轴抗压强度; E 为煤岩体的弹性模量。

巷道在煤岩体中集聚的能量 E_0 为



(a) 强弱强结构控制模型



(b) 强弱强结构应力变化特征

图 4 强弱强结构控制模型及变化特征

Fig. 4 Strong-soft-strong structure control model and characteristics

$$E_0 = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)}{2E} \quad (2)$$

式中, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为煤岩体 3 个主应力; ν 为煤岩体泊松比。

强弱强结构分析示意图如图 5 所示,图中, r 为巷道半径, m ; r_x 为巷道中心到内强小结构距离, m ; r_d 为巷道中心到弱结构的距离, m ; h 为巷道埋深, m ; t 为巷道围岩承载拱厚度, m ; 数字“1,2,3,4”为在无冲击状态下,巷道围岩周边的应力重新分布,应力向围岩深部转移,由图 5 中的曲线 1 和曲线 2 转移到弱结构外的曲线 3 和曲线 4。假设冲击震动源的能量为 E_d ,冲击波在煤岩体的传播过程中逐渐衰减,衰减后的能量 E_{dh} 为

$$E_{dh} = E_d h^{-\eta} \quad (3)$$

式中, $h = d - r$ 为震源到巷帮的距离, d 为震源到巷道中心点的距离, m ; η 为衰减系数。

冲击区域巷道煤岩体的能量 E_z 为

$$E_z = E_{dh} + E_0 \quad (4)$$

冲击区域巷道煤岩体残余能量 E_r 为

$$E_r = E_z - E_x = E_{dh} + E_0 - E_x \quad (5)$$

式中, E_x 为巷道开挖扩修耗散能量。

冲击区域巷道破坏能量准则为: $E_r > E_{\min}$ 。

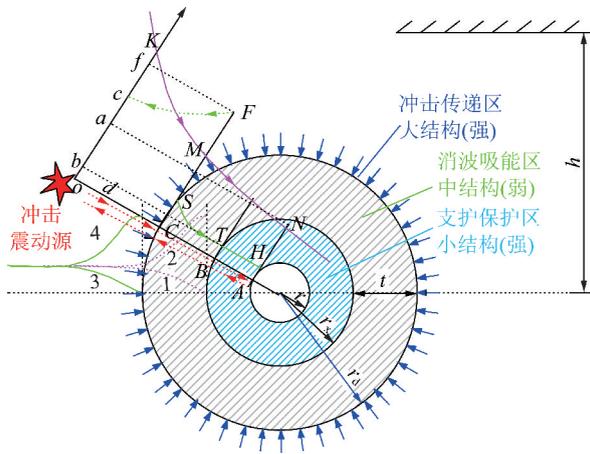


图 5 强弱强结构分析示意

Fig. 5 Strong-Soft-Strong structure analysis

此时,剩余的残余能量以动能、巷道支护体振动失效或巷帮围岩较大位移形式显现出来,造成了巷道围岩的破坏。

2.2.2 弱结构吸能效应

① 弱结构块体松散吸能 E_1 。动载冲击波在致裂的煤岩体中传播比在致密煤岩体传播所用时间长,导致冲击波波速降低,振动波速也降低,从而冲击能量减少。② 致裂煤岩体旋转吸能 E_2 。动载冲击波在致裂煤岩体的破碎区域传播,使致裂破碎煤岩体发生反转与移动,将冲击能量转化为致裂破碎煤岩体的动能,从而使冲击动能较小。③ 空间散射吸能 E_3 。煤岩体致裂形成的破碎区域,动载冲击波在传播时向四周破碎区域散射,在松散区域不断扩展,使动载冲击波的强度降低。④ 破碎围岩反射吸能 E_4 。动载冲击波在致裂破碎区域传播,与破裂煤岩体发生反射与透射现象,经反射后,透射后的动载冲击波将减少,同时波会发生弥散,因此,动载冲击波向巷道传播的冲击能减少。综上,致裂煤岩体形成的弱结构区域吸能总量为 $E_p = E_1 + E_2 + E_3 + E_4$ 。根据能量守恒原理,动载冲击波经致裂煤岩体形成的弱结构进入内强小结构,动载冲击能将转化为内强小结构的动能及弹性能、弱结构的吸收能。由于内强小结构动能将沿着巷道围岩破坏巷道支护结构,弱结构的吸收能越大,传递到内强小结构的动能越小,巷道越稳定。

$$E_r - E_p < E_{\min} \quad (6)$$

若式(6)满足,弱结构设置时机合适,衰减指数增加,冲击残余能量被吸收,传递到内强小结构剩余能量足够小,对巷道不足以造成破坏,巷道支护稳定。

3 内强主动支护与弱结构卸压防冲协调机制

3.1 弱结构卸压破碎区因素分析

致裂钻孔周围在无钢管作用下反复致裂形成破

碎区,设钻孔半径为 a ,反复致裂形成破碎区半径为 b ,假设钻孔附近煤体为各向同性介质,钻孔周围致裂破碎区由塑性区到弹性区,其中弹性区不发生损伤,如图 6 所示,根据钻孔破碎区的力学特征推导中间弱结构^[14-15]。

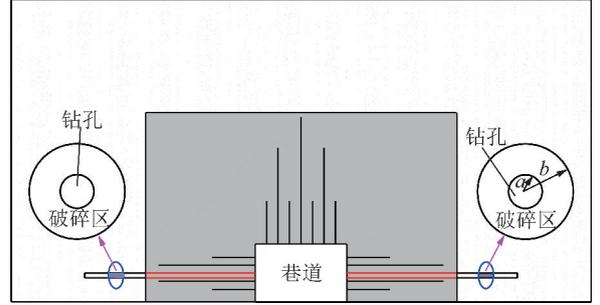


图 6 致裂区分析

Fig. 6 Broken zone analysis diagram

摩尔-库伦准则:

$$\sigma_{\theta} = \frac{1 + \sin \varphi_p}{1 - \sin \varphi_p} \sigma_r + \frac{2c_p \cos \varphi_p}{1 - \sin \varphi_p} \quad (7)$$

微分方程:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_{\theta}}{r} = 0 \quad (8)$$

由边界条件得:

$$(\sigma_r)_{r=a} = 0 \quad (9)$$

式中, σ_r 为钻孔径向应力; σ_{θ} 为钻孔切向应力; φ_p 为内摩擦角; c_p 为黏聚力; a 为钻孔半径。

3.1.1 破碎区

一次致裂径向应力 σ'_{r1} 及切向应力 $\sigma'_{\theta1}$ 为

$$\sigma'_{r1} = \sigma_0 \left(\frac{r}{a} \right)^{m-1} \quad (10)$$

$$\sigma'_{\theta1} = m\sigma'_r = m\sigma_0 \left(\frac{r}{a} \right)^{m-1} \quad (11)$$

式中, $m = \frac{1 + \sin \varphi_p}{1 - \sin \varphi_p}$ 。

二次致裂径向应力及切向应力为

$$\sigma'_{r2} = \sigma_0 \left(\frac{r}{\mu_1 a} \right)^{m-1} \quad (12)$$

$$\sigma'_{\theta2} = m\sigma'_r = m\sigma_0 \left(\frac{r}{\mu_1 a} \right)^{m-1} \quad (13)$$

式中, μ_1 为第 2 次致裂半径修正系数, $\mu_1 = 1.1 \sim 1.2$ 。

n 次致裂径向应力 σ'_{rn} 及切向应力 $\sigma'_{\theta n}$ 为

$$\sigma'_{rn} = \sigma_0 \left(\frac{r}{\mu_{n-1} a} \right)^{m-1} \quad (14)$$

$$\sigma'_{\theta n} = m\sigma'_r = m\sigma_0 \left(\frac{r}{\mu_{n-1} a} \right)^{m-1} \quad (15)$$

式中, μ_{n-1} 为第 n 次致裂半径修正系数, $\mu_{n-1} = 1.1 \sim 1.8, n \geq 2$ 。

在 $r=b$ 处:

$$\sigma_r^b = \sigma_0 \left(\frac{b}{\mu_{n-1} a} \right)^{m-1} \quad (16)$$

3.1.2 塑性区

塑性区的径向应力 σ_r'' 及切向应力 σ_θ'' 为

$$\frac{\sigma_r''}{\sigma_c} = \left[\frac{\sigma_r^b}{\sigma_c} + \frac{1 + (\lambda/E)}{m-1} - \frac{\lambda/E}{m+1} \frac{R_p^2}{b^2} \right] \left(\frac{r}{b} \right)^{m-1} - \frac{1 + (\lambda/E)}{m-1} + \frac{\lambda/E}{m+1} \frac{R_p^2}{r^2} \quad (17)$$

$$\frac{\sigma_\theta''}{\sigma_c} = \left(\frac{\sigma_r^b}{\sigma_c} + \frac{1 + (\lambda/E)}{m-1} - \frac{\lambda/E}{m+1} \frac{R_p^2}{b^2} \right) m \left(\frac{r}{b} \right)^{m-1} - \frac{1 + (\lambda/E)}{m-1} + \frac{\lambda/E}{m+1} \frac{R_p^2}{r^2} \quad (18)$$

式中, R_p 为塑性区半径; λ 为降模量。

在破碎区与塑性区交界处 $r=b$ 时, $\sigma_{\theta(b)}'' = m\sigma_{r(b)}''$, 得

$$R_p = b\sqrt{1 + E/\lambda} \quad (19)$$

3.1.3 弹性区

弹性区内的径向应力 σ_r'' 及切向应力 σ_θ'' 为

$$\sigma_r'' = \sigma_0 \left(1 - \frac{R_c^2}{r^2} \right) \quad (20)$$

$$\sigma_\theta'' = \sigma_0 \left(1 + \frac{R_c^2}{r^2} \right) \quad (21)$$

式中, R_c 为弹性区半径。

塑性区与弹性区 $R_c = R_p$ 时, 得

$$\left[\frac{\sigma_r^b}{\sigma_c} + \frac{1 + \lambda/E}{m-1} - \frac{\lambda/E}{m+1} \frac{R_p^2}{b^2} \right] \left(\frac{R_p}{b} \right)^{m-1} - \frac{2\sigma_0}{\sigma_c} - 1 = \frac{1 + \lambda/E}{m-1} + \frac{\lambda/E}{m+1} = \frac{\sigma_c}{m+1} \quad (22)$$

由式(16), (19)和(22)可得

$$b = \mu_{n-1} \left\{ \frac{\sigma_c}{\sigma_0} \left[\frac{(1 - \sin \varphi_p)(2\sigma_0/\sigma_c - 1)}{2} + \frac{(1 - \sin \varphi_p)(1 + \lambda/E)}{2\sin \varphi_p} - \frac{(\lambda/E)(1 - \sin \varphi_p)}{2} \right] \times \left(1 + \lambda/E \right)^{-\frac{\sin \varphi_p}{1 - \sin \varphi_p}} + \frac{(1 - \sin \varphi_p)(1 + \lambda/E)}{2} - \left. \frac{(1 - \sin \varphi_p)(1 + \lambda/E)}{2\sin \varphi_p} \right\}^{\frac{1 - \sin \varphi_p}{2\sin \varphi_p}} a \quad (23)$$

多次反复致裂半径 b 与钻孔半径 a 、初始应力 σ_0 、内摩擦角 φ_p 、弹性模量 E 、降模量 λ 、峰值强度 σ_c 和致裂半径修正系数 μ_{n-1} 有关。致裂半径修正系数 μ_{n-1} 是指破碎区半径在一次致裂后, 由于地应力、

岩体性质及致裂技术等原因造成的破碎区半径与理论值之间的偏差。钻孔在巷道高应力下进行反复掏裂, 使周围的煤岩体破裂, 形成中间弱结构, 达到吸收高应力的效果, 实现巷道稳定。

3.2 内置钢管支撑护壁技术

巷道围岩的强度和支护体的结构对冲击巷道支护有重要影响, 钻孔、爆破等巷道内卸压是最常用的应力转移技术, 在转移巷道应力的同时对巷道围岩的强度和支护体结构完整性产生一定的破坏, 不利于冲击巷道内强主动支护的稳定。通过数值模拟分析了内强小结构内置钢管支撑护壁技术对巷道围岩的强度和支护体结构完整性控制效果以及周围煤岩体的应力、位移的破坏规律。

根据义马常村煤矿 21170 运输巷煤层地质条件进行简化, 采用有限元 FLAC^{3D} 对煤体内置钢管护壁效果进行模拟, 分析钢管对煤层中内强小结构的保护作用, 模型尺寸为 60 m×10 m×50 m, 采用摩尔-库仑准则, 中间弱结构致裂钻孔直径为 110 mm, 水平、底边界约束位移, 上边界施加 17.5 MPa 荷载。

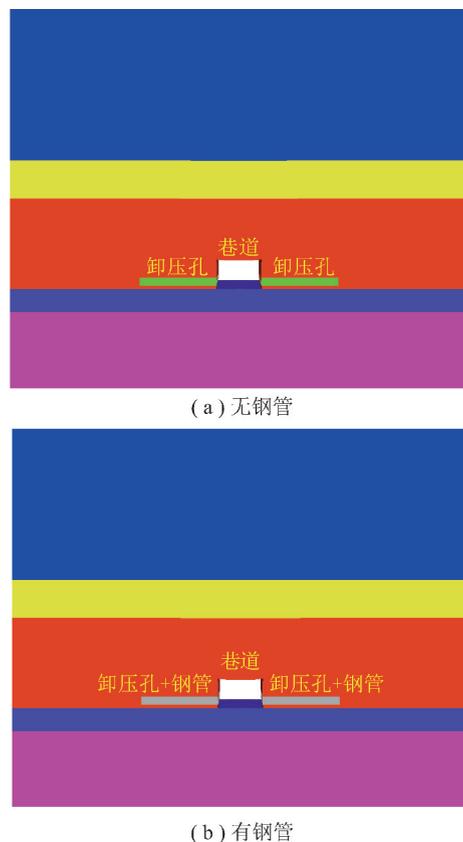


图 7 模型计算

Fig. 7 Numerical models

钢管体采用线弹性本构模型, 弹性模量 $E = 210$ GPa, 壁厚 0.045 m, 煤体采用 Mohr-Coulomb 弹

塑性模型,根据煤体性质,体积模量 $E = 4.8 \text{ GPa}$,剪切模量 $G = 3.6 \text{ GPa}$,密度 $1\,400 \text{ kg/m}^3$,抗拉强度 0.8 MPa ,黏聚力 $c = 1.1 \text{ MPa}$ 。钢管采用柱形壳体网格,网格划分尽可能均匀,钢管与煤体接触处网格保持一致。在两者之间设置钢管煤接触面,钢管侧的接触面处采用中间为空心的柱体网格。

图 8 为应力计算结果,有钢管套入时煤体应力无法释放与未钻孔前应力相似,而无钢管钻孔应力得到释放。由图 9 可以看出,无钢管致裂钻孔周围塑性区是有钢管的 5~8 倍,在致裂钻孔中套入钢管,钻孔周围的塑性区明显减小。无钢管套入的钻孔,塑性区较大,以致影响巷道内强小结构支护的稳定性。图 10 可以看出,套入钢管钻孔周围基本不发生位移,而无钢管套入钻孔周围煤体位移是有钢管套入位移的 20 倍。

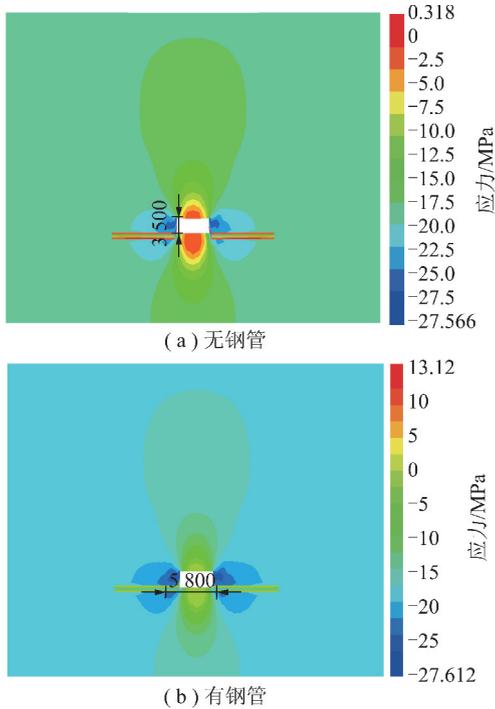


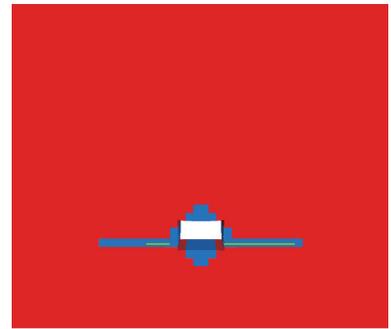
图 8 竖直方向应力图

Fig. 8 Vertical direction stress

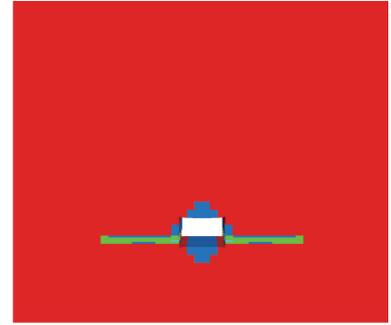
钻孔中套入钢管,保护了钻孔周围煤体不受破坏,也保护了巷道支护的内强小结构,同时,中间弱结构区域在高应力作用下被压实后,可通过钢管再次进行中间弱结构致裂,保护了内强小结构中煤体不受二次破坏。

3.3 内强主动支护与弱结构卸压防冲协调机制

巷道开挖或扩修后,在巷道围岩周边建立一个内强小结构支护圈,控制巷道围岩稳定性,同时,在巷道两帮致裂中间弱结构,弱化围岩强度转移高应力,冲击地压巷道支护与卸压协调机制如下:



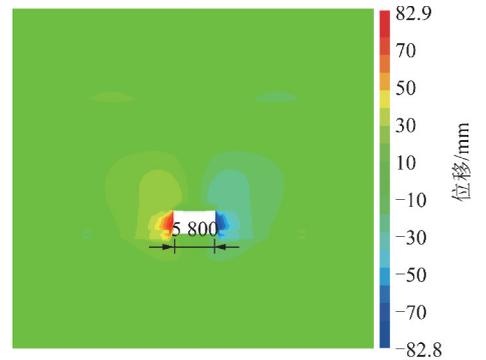
(a) 无钢管



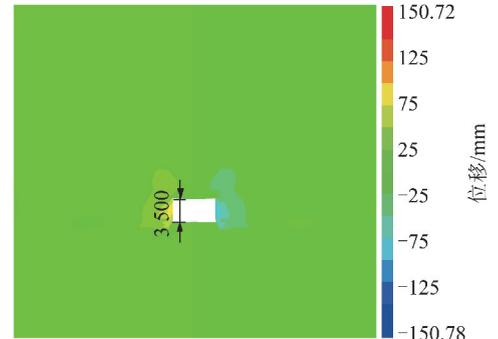
(b) 有钢管

图 9 塑性破坏区

Fig. 9 Plastic failure zone



(a) 无钢管



(b) 有钢管

图 10 X 方向位移计算

Fig. 10 X direction displacement calculation

(1) 锚杆(索)、钢带联合支护^[16]控制顶板两帮锚固区,防治巷道两帮位移变化,顶板梯次支护^[17]加固浅部围岩也强化深部围岩支护圈,防治巷道顶板下

沉,内置钢管支撑护壁技术保护内强小结构不被卸压钻孔弱化,形成内强主动支护结构。避免因大直径卸压钻孔破坏巷道的完整性^[18],造成巷道破坏。

(2)利用巷道两帮防冲卸压孔构建中间弱结构,巷道帮部弱结构的致裂为巷道支护提供了更好的应力环境,巷道的卸压效果更佳^[19-21],避免了巷道在冲击动载下造成的破坏,形成弱结构卸压防冲结构。弱结构转移高应力,吸收冲击能量,避免因冲击对巷道造成的严重破坏。

(3)内强小结构的主动强化支护构建了巷道支护稳定的锚固承载圈,中间弱结构卸压防冲为巷道提供了良好的应力支护条件,内置钢管支撑护壁技术在保护内强小结构不受破坏的作用下可以多次进行中间弱结构致裂,既防内强小结构松动圈裂隙扩展,又防止巷道支护层的整体失稳,同时致裂了中间弱结构,解决了冲击地压巷道支护与卸压间的矛盾。

4 现场应用

现场应用在义马矿区常村煤矿 21170 运输巷,巷道处于冲击危险区域范围内,为深井大断面高应力强卸压大蠕变冲击地压巷道。本次支护方案依据强弱强结构及内强主动支护与弱结构卸压防冲协调关键技术,考虑巷道最终使用断面,巷道断面采用矩形断面,宽×高=5.8 m×3.5 m,以锚杆、锚索、金属网主动支护,液压抬棚减跨支护构

建内强小结构,以反复掏裂法实现中间弱结构消波吸能,即“锚杆索主动支护+液压抬棚强力支护+弱结构防冲吸能”内强主动支护与弱结构卸压防冲协调支护方案。

4.1 内强主动支护参数

顶板支护:顶板用 7 根 $\phi 22$ mm×L2 500 mm 左旋螺纹钢高强锚杆加两节 3.1 m 长四孔 M₄ 钢带,锚杆间距 900 mm,排距 800 mm。沿巷道走向布置 3 根 $\phi 18.9$ mm×L5 300 mm 让压短锚索,托盘尺寸为 400 mm×400 mm×16 mm,锚索间距 1.5 m,排距 1.6 m,即:两排锚杆施工一组短锚索。沿巷道的走向方向布置 $\phi 18.9$ mm×L8 000 mm 让压长锚索,托盘尺寸为 400 mm×400 mm×16 mm,两根单体锚索间距 2.5 m,排距 1.6 m,即:两排锚杆施工两根长锚索。

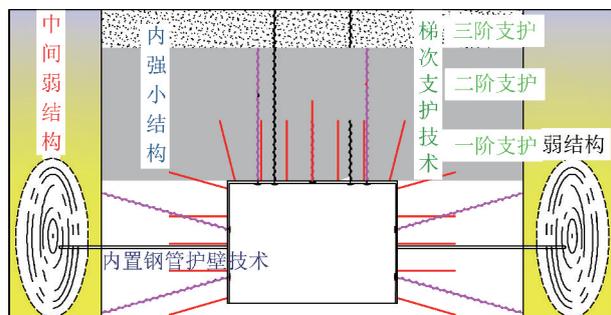


图 11 支护与卸压协调机制示意

Fig. 11 Coordination mechanism between support and pressure relief

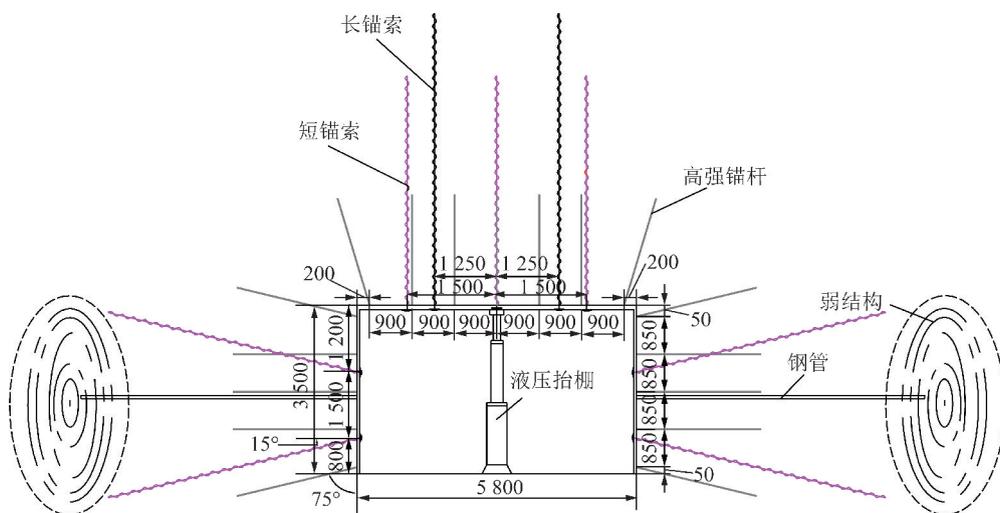


图 12 巷道具体支护参数

Fig. 12 Roadway support parameters

帮部支护:巷道两帮均采用 5 根 $\phi 22$ mm×L2 500 mm 左旋螺纹钢高强锚杆加 3.5 m 长四孔 M₄ 钢带,锚杆间距 850 mm,排距 800 mm。施工 10 ~

20 m 后,在两帮中上及靠近底板位置施工两排帮部走向锚索梁,锚索为 $\phi 18.9$ mm×L5 300 mm,3.2 m 长槽钢梁,孔间距 1.6 m,孔外端长度 0.8 m。

液压抬棚加强支护;锚网支护后,紧跟施工点顺巷道中心打一道液压走向抬棚加强支护,液压走向抬棚是内强小结构重要一部分。

4.2 弱结构卸压防冲方案

利用反复掏裂法致裂技术弱化巷道两帮实现“中间弱结构”吸收动静载能量,钻机分别在巷道的左右两帮向煤岩体指定位置打若干个卸压孔,钻孔直径 110 mm,卸压孔孔口之间的间隔为 3 m,同时在钻孔内套入 10 m 钢管保护内强小结构不受破坏,起到了加固巷道内强小结构的作用,之后,从钢管内向卸压钻孔继续钻孔,利用深入卸压钻孔内的钻杆对巷道的煤岩体进行致裂,致裂后煤岩体相互贯通,形成巷道两帮的防冲弱结构。当巷道两帮的防冲弱结构在煤岩体压力作用下压实后,再次通过钢管反复多次循环对煤岩体进行致裂卸压而不破坏巷道内强小结构,巷道支护层不会在卸压钻孔作用下使煤岩体松动圈扩大。致裂示意如图 13 所示。

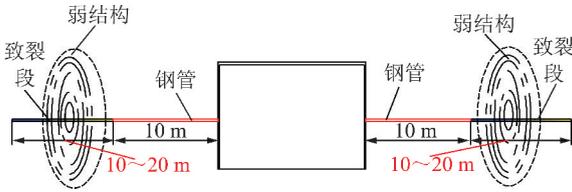


图 13 弱结构构建示意

Fig. 13 Soft structure construction diagram

21170 运输巷中间弱结构层利用防冲卸压孔设置中间弱结构钻孔。根据矿压观测,在巷道两帮各打 20 m 钻孔,钻孔直径为 110 mm,在钻孔开口 10 m 段放入直径正好满孔直径的钢管。10 m 钢管可由短钢管公母螺丝对接联结而成。在钢管外端 10 m 以外,利用钻孔过程掏煤松动效应形成煤岩松散弱结构。当巷道两帮的防冲弱结构层在煤岩体压力作用下压实后,再次从钢管内向卸压钻孔内钻进,对巷道左右两帮的煤岩体进行致裂,根据巷道两帮防冲弱结构压实情况,反复对巷道左右两帮的煤岩体致裂多次。在此过程中,巷道左右两帮不会在卸压钻孔作用下使煤岩体松动圈扩大,在致裂弱结构的同时保护了巷道内强小结构。

4.3 矿压观测及分析

在巷道扩修期间,对巷道的两帮位移、顶板离层及中间弱结构致裂前后微震监测能量进行观测分析。

4.3.1 巷道两帮表面位移变化量

21170 运输巷两帮位移变化量如图 14 所示。随着维护时间的增加,巷道表面位移量不断增加,两帮

最大位移量为 611 mm。两帮位移量在 60 d 左右趋于稳定,弱结构致裂前后对比可以看出,弱结构致裂对巷道内强小结构的影响较小,弱结构致裂后巷道在一定时间内并没有发生失稳现象。160 d 后由于工作面采动影响,导致巷道两帮移近量增加。

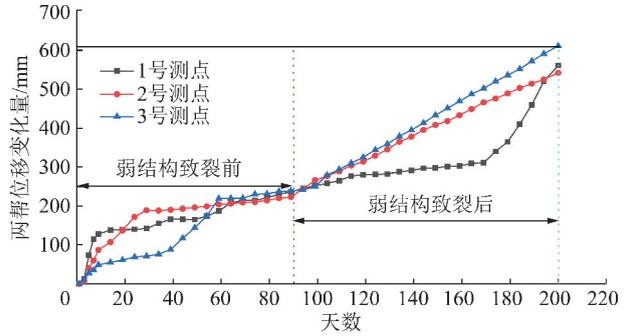


图 14 21170 运输巷两帮位移变化

Fig. 14 21170 roadway surface displacement diagram

4.3.2 顶板下沉量

顶板变化量如图 15 所示,随着维护时间的增加,巷道顶板变化不断增加,顶板最大下沉量 52 mm,顶板得到了有效控制,中间弱结构致裂对巷道顶板没有很大影响,巷道顶板没有因中间弱结构致裂而发生较大的离层造成巷道失稳现象。

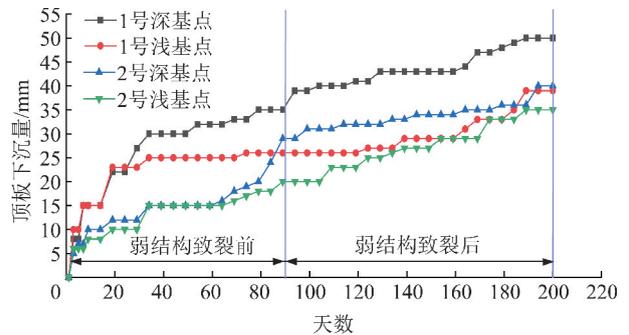


图 15 21170 运输巷顶板下沉量

Fig. 15 21170 roadway roof separation

4.3.3 弱结构实施后微震监测

图 16 显示了弱结构致裂前后巷道微震能量监测,弱结构致裂后,巷道微震监测到的能量明显减小。煤体内的应力得到了明显转移或吸收,有效减少了高应力及冲击地压对巷道破坏。

4.4 巷道支护效果

21170 运输巷支护效果如图 17 所示。内强主动支护与煤岩体致裂卸压防冲消波吸能方案明显改善了巷道支护情况,支护参数选择合理,有效控制了顶板离层并抑制巷道围岩变形,回采之前不需要再次返修。不仅巷道支护效果显著,同时节约了多次返修材料和人工成本,经济效果较好。

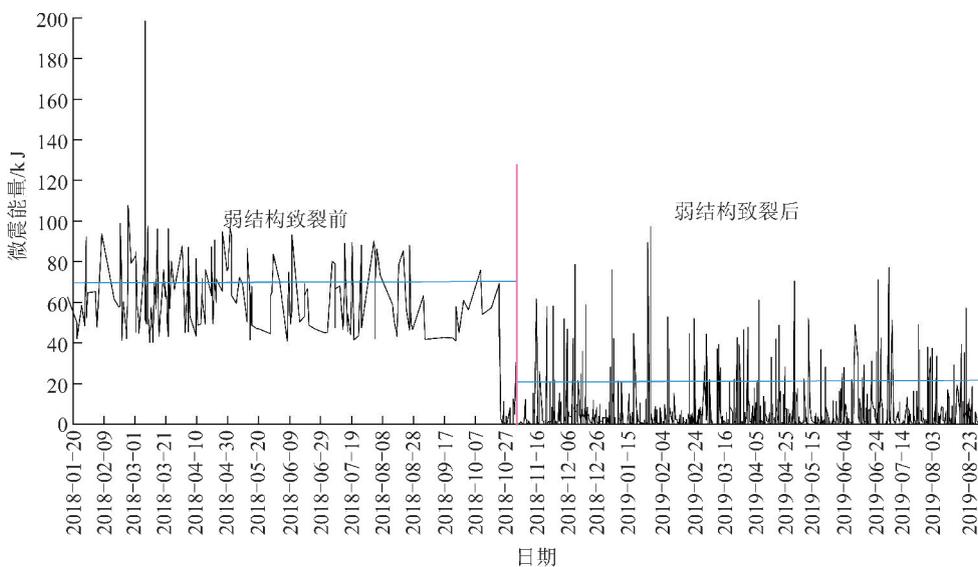


图 16 弱结构致裂前后微震能量监测

Fig. 16 Microseismic energy monitoring before and after soft structure



(a) 巷道整体支护效果



(b) 巷道顶帮支护效果

图 17 21170 运输巷效果

Fig. 17 21170 roadway implementation diagram

5 结 论

(1) 基于强弱强结构控制模型,研究了内强小结构主动强力加固措施及中间弱结构致裂吸能效应,提出了保护内强小结构不受破坏,致裂中间弱结构消波吸能的关键技术,解决了冲击区域巷道内强主动支护与弱结构卸压防冲的矛盾。

(2) 提出了反复掏裂技术致裂中间弱结构技术,理论推导了中间弱结构的影响因素。在指定区域适当时间致裂中间弱结构,达到有效卸压目的,中间弱结构致裂后,巷道两帮能量明显减少,巷道两帮顶板位移变化较小。两帮弱结构对改善巷道围岩应力,进一步提高巷道支护稳定性有重要影响。

(3) 通过数值模拟和现场试验研究了内置钢管支撑护壁技术能够有效保护巷道围岩强度和完整性不受破坏,提高了巷道帮部围岩稳定性,中间弱结构在高应力压实后可以再次致裂,保护了内强小结构不受钻孔的二次破坏。研究成果协调解决了冲击区域

巷道内强主动支护与弱结构卸压防冲间的矛盾,有效控制了巷道变形,支护效果显著,可在高应力强冲击同类巷道进行推广应用。

参考文献 (References):

- [1] WU Y, GAO F, CHEN J, et al. Experimental study on the performance of rock bolts in coal burst-prone mines [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(10): 3959-3970.
- [2] 姜耀东, 赵毅鑫. 我国煤矿冲击地压的研究现状: 机制、预警与控制 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(11): 2188-2204.
JIANG Yaodong, ZHAO Yixin. State of the art: Investigation on mechanism, forecast and control of coal bumps in China [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(11): 2188-2204.
- [3] 康红普, 吴拥政, 何杰, 等. 深部冲击地压巷道锚杆支护作用研究与实践 [J]. *煤炭学报*, 2015, 40(10): 2225-2233.
KANG Hongpu, WU Yongzheng, HE Jie, et al. Rock bolting performance and field practice in deep roadway with rock burst [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(10): 2225-2233.
- [4] 何满潮, 李晨, 宫伟力, 等. NPR 锚杆/索支护原理及大变形控制技术 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(8): 1513-1529.

- HE Manchao, LI Chen, GONG Weili, et al. Support principles of NPR bolts/cables and control techniques of large deformation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(8): 1513-1529.
- [5] 杨仁树, 李永亮, 郭东明, 等. 深部高应力软岩巷道变形破坏原因及支护技术 [J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(6): 1035-1041.
- YANG Renshu, LI Yongliang, GUO Dongming, et al. Deformation reasons and support technology of deep and high-stress soft rock roadway [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(6): 1035-1041.
- [6] 马箫, 潘一山, 张建卓, 等. 防冲支架的核心吸能构件设计与吸能性能研究 [J]. 煤炭学报, 2018, 43(4): 1171-1178.
- MA Xiao, PAN Yishan, ZHANG Jianzhuo, et al. The Design and performance research on the core energy absorption component of anti impact support [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(4): 1171-1178.
- [7] 韩昌良, 张农, 阚甲广, 等. 沿空留巷“卸压-锚固”双重主动控制机理与应用 [J]. 煤炭学报, 2017, 42(S2): 323-330.
- HAN Changliang, ZHANG Nong, KAN Jiaguang, et al. Mechanism and application of double active control with pressure-relieving and an-choring for gob-side entry retaining [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S2): 323-330.
- [8] 刘军, 欧阳振华, 齐庆新, 等. 深部冲击地压矿井刚柔一体化吸能支护技术 [J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(6): 17-20.
- LIU Jun, OUYANG Zhenhua, QI Qingxin, et al. Rigid-flexibility integrated energy absorption support technology applied in deep mine with pressure bumping [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(6): 17-20.
- [9] 徐学锋, 窦林名, 刘军, 等. 封闭柔性支护结构对底板冲击矿压的抑制机理 [J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(5): 745-749.
- XU Xuefeng, DOU Linming, LIU Jun, et al. Controlling function of closed compressible support structure on floor burst [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(5): 745-749.
- [10] 王猛, 郑冬杰, 王襄禹, 等. 深部巷道钻孔卸压围岩弱化变形特征与蠕变控制 [J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(3): 437-445.
- WANG Meng, ZHENG Dongjie, WANG Xiangyu, et al. Deformation characteristics and creeping control of deep roadway with pressure-relief borehole [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(3): 437-445.
- [11] 于风海, 赵同彬, 谭云亮, 等. 卸压开采影响下回采巷道支护强度量化计算方法探讨 [J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(3): 460-466.
- YU Fenghai, ZHAO Tongbin, TAN Yunliang, et al. Study on quantitative calculation method of mining roadway supporting intensity under depressurized mining [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(3): 460-466.
- [12] 高明仕, 窦林名, 张农, 等. 冲击矿压巷道围岩控制的强弱力学模型及其应用分析 [J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 359-364.
- GAO Mingshi, DOU Linming, ZHANG Nong, et al. Strong-soft-strong mechanical model for controlling roadway surrounding rock subjected to rock burst and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2): 359-364.
- [13] 高明仕, 赵一超, 温颖远, 等. 震源扰动型巷道冲击矿压破坏力能准则及实践 [J]. 煤炭学报, 2016, 41(4): 808-814.
- GAO Mingshi, ZHAO Yichao, WEN Yingyuan, et al. Stress and energy criterion of the roadway destruction subjected to disturbance type rockburst and its practice [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(4): 808-814.
- [14] 王宏伟, 张登强, 姜耀东, 等. 巷道围岩破碎区分布特征及其影响因素的数值模拟 [J]. 煤炭学报, 2018, 43(S2): 377-384.
- WANG Hongwei, ZHANG Dengqiang, JIANG Yaodong, et al. Investigation on the characteristics of excavation damaged zone and numerical simulation of contributing factors [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(S2): 377-384.
- [15] 徐连满, 潘一山, 曾祥华, 等. 巷道围岩破碎区吸能防冲性能研究 [J]. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1376-1382.
- XU Lianman, PAN Yishan, ZENG Xianghua, et al. Study on the energy-absorbing cushion performance of roadway surrounding rock crushing zone [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(6): 1376-1382.
- [16] 高明仕, 闫高峰, 杨青松, 等. 深度破坏软岩巷道修复的锚架组合承载壳原理及实践 [J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(3): 365-369.
- GAO Mingshi, YAN Gaofeng, YANG Qingsong, et al. Load-bearing shell principle of trusses combined with bolts in the repairing of soft rock roadway with large destruction and its application [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(3): 365-369.
- [17] 高明仕, 郭春生, 李江锋, 等. 厚层松软复合顶板煤巷梯次支护力学原理及应用 [J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(3): 333-338.
- GAO Mingshi, GUO Chunsheng, LI Jiangfeng, et al. Mechanical principles and application of a multi-length support technology to a coal roadway with thick soft combined roof during deep mining [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2011, 40(3): 333-338.
- [18] DOU Linming, MU Zonglong, LI Zhenlei, et al. Research progress of monitoring, forecasting, and prevention of rockburst in underground coal mining in China [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2014, 1(3): 278-288.
- [19] PYTEL Witold, SWIŃON Joanna, WÓJCIK Adrian. The effect of mining face's direction on the observed seismic activity [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2016, 3(3): 322-329.
- [20] LI Huigui, LI Huamin. Mechanical properties and acoustic emission characteristics of thick hard roof sandstone in Shendong coal field [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2017, 4(2): 147-158.
- [21] YUAN Ruifu, SHI Bowen. Acoustic emission activity in directly tensile test on marble specimens and its tensile damage constitutive model [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2018, 5(3): 295-304.