



移动扫码阅读

高明仕,贺永亮,徐 东,等.冲击地压巷道减隔震技术原理及应用[J].煤炭科学技术,2021,49(6):53-60.

doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.06.006

GAO Mingshi, HE Yongliang, XU Dong, *et al.* Principle and application of reduce and isolation technology in rock burst roadway[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(6): 53-60. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.06.006

冲击地压巷道减隔震技术原理及应用

高明仕^{1,2}, 贺永亮^{1,2}, 徐 东^{1,2}, 俞 鑫^{1,2}

(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)

摘 要:冲击地压是煤矿开采过程中最严重的动力灾害之一,对煤矿安全开采造成了极大威胁。统计表明,约 90% 的冲击地压发生在巷道中,致使巷道损坏、垮冒甚至闭合以及人员伤亡。巷道支护已成为防治冲击地压的最后一道防线。基于冲击地压巷道围岩破坏过程及关键影响因素分析,研究了深部冲击地压巷道减隔震技术手段和实现方法,有效保护了巷道围岩结构的整体稳定性。提出了冲击地压巷道减隔震技术原理:隔震技术是在支护层与原岩之间致裂形成具有显著消波吸能作用的松散煤岩体,吸能机理主要体现在块体松散吸能、旋转吸能、空间散射吸能、反射吸能 4 个方面;减震技术通过锚杆锚索、O 型棚、防冲单元架等支护构件的大延伸及让压位移,经过减震支护构件的强散射和释能作用,保护巷道支护锚固体在瞬间高冲击动载作用下的整体移动性和让压位移特征;隔震+减震的双重组合保护效应,实现了巷道围岩消波降载支护体整体释能抗冲的性能特征,从而维护冲击地压巷道围岩的稳定性。现场实践和微震监测显示:减隔震技术可以有效控制冲击地压巷道变形和破坏,巷道表面监测的微震能量降低了 50%,巷道支护效果显著。

关键词:冲击地压;巷道支护;减隔震技术;削波吸能

中图分类号:TD324

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)06-0053-08

Principle and application of reduce and isolation technology in rock burst roadway

GAO Mingshi^{1,2}, HE Yongliang^{1,2}, XU Dong^{1,2}, YU Xin^{1,2}

(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)

Abstract: Rock burst is one of the most serious dynamic disasters in the process of coal mining, which poses a great threat to the safety of coal mining. Statistics show that 85% of rock burst occurs in the roadway, resulting in damage, collapse and even closure of the roadway and casualties. Roadway support has become the last line of defense to prevent rock burst. Based on the analysis of surrounding rock failure process and key influencing factors of rock burst roadway, the technical and implementation method of shock reduction and isolation in deep mine rock burst roadway are studied, which effectively protect the overall stability of surrounding rock structure of roadway. The principle of support and isolation technology for rock burst roadway is proposed. Isolation technology is to form loose coal and rock mass with significant wave absorbing and energy absorbing effect by cracking between supporting layer and original rock. The energy absorbing mechanism is mainly reflected in four aspects: loose block energy absorbing, rotating block energy absorbing, space scattering energy absorbing and reflection energy absorbing. Reduce technology through the large elongation and yielding displacement of supporting components such as anchor cable, O-shed and anti-scour unit frame, and through the strong scattering and energy release effect of damping supporting components, the overall mobility and yielding displacement characteristics of roadway supporting anchor solid under instantaneous high impact dynamic load are protected. The double combined protection effect of "isolation + reduce" realizes the performance characteristics of the whole energy release and anti-scour of the surrounding rock support for wave dissipation and load reduction, maintain the stability of the surrounding rock of the roadway with rock burst. The field practice and microseismic monitoring show that the technology of reducing isolation can effectively control the deformation and failure of the impact ground pressure roadway, the micro earthquake energy of the roadway

收稿日期:2021-01-11;责任编辑:朱恩光

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。Email:cumt_gms@163.com

surface monitoring is reduced by 50%, and the supporting effect of the roadway is remarkable.

Key words: rock burst; roadway support; reduce and isolation technology; wave and energy absorption

0 引言

随着煤矿开采深度的逐渐增加,冲击地压已经成为煤矿开采中最典型的动力灾害之一^[1]。约90%的煤矿冲击地压发生在巷道中^[2],因此,冲击地压巷道的支护成为巷道防冲研究的重点。现有的冲击地压巷道防冲措施主要采用钻孔卸压、爆破卸压等人工卸压方式进行,人工卸压对巷道支护体系有一定影响,冲击地压巷道支护仅依靠锚杆(索)等支护构件不能满足巷道的抗冲击性能,需要在巷道中增加具有吸能和抗震性能的结构和构件。吸能结构和抗震构件具有减隔冲击地压震动波的作用,对冲击地压巷道支护具有重要作用。

近年来,部分学者通过应用吸能材料和构建吸能区域等联合支护体系支护冲击地压巷道。康红普等^[3]介绍了高冲击韧性锚杆力学性能及支护参数设计方法,在现场进行工业试验,效果较好。潘一山等^[4]研制了具有吸能抗冲功能的巷道防冲液压支架,在冲击地压巷道支护中达到了防冲吸能效果。文献[5-6]采用试验、理论、现场相结合,揭示了恒阻大变形锚杆(锚索)的吸能规律,其因吸能抗震更利于冲击地压巷道支护。吴拥政等^[7]研究分析了冲击地压巷道围岩动态响应特征,现场实践表明高冲击韧性锚杆与锚索联合支护,可以有效提高冲击载荷作用下巷道围岩的稳定性。高明仕等^[8]建立了冲击地压巷道围岩稳定性控制的强弱强结构力学模型,分析了该力学模型防冲抗震机理。谭云亮等^[9]研究了不同破坏类型煤体能量释放特征,构建了冲击地压的“卸-固”协同控制技术。吕可等^[10]应用应力波传递理论推导了冲击地压巷道边界力学放大效应,通过数值模拟验证动静载条件下支护措施的合理性。鞠文君等^[11]研究了冲击地压巷道锚杆以及金属网动静载力学性能及吸能效果。张勇等^[12]采用理论分析、数值模拟等研究了围岩变形破坏机理以及防冲吸能技术原理,现场实践表明恒阻大变形支护体系能够有效控制围岩变形失稳。刘金海等^[13]提出先裂后注冲击地压防治技术,煤体裂化能够起到弱化煤体、均化应力、孤立冲击地压煤体的作用,实现了煤矿冲击的主动区域防治。吸能支护材料的优化及应用以及冲击地压巷道支护方式的改进极大推动了冲击地压巷道支护技术的发展,支护技术的改革对冲击地压巷道支护与卸压起到关键作

用,但对于冲击能级较高的巷道不能有效控制巷道围岩变形,冲击地压巷道防冲应从改善自身防冲性能、开发新型防冲材料等方面进行进一步研究。

基于建筑物及地下结构工程减隔震结构^[14]的动态反应特征及应用效果,提出了冲击地压巷道减隔震原理及体系,研究了冲击地压巷道减隔震技术手段和实现方法,实现了冲击地压巷道隔震+减震组合技术,有效控制了冲击地压巷道围岩变形,提高了冲击地压巷道支护效果。

1 减隔震技术原理及模型

1.1 减隔震技术原理

冲击地压巷道隔震控制是指在冲击地压巷道顶板或两帮构建隔震层或安装柔性装置,以吸收冲击地压能量保护巷道支护体,如图1所示。

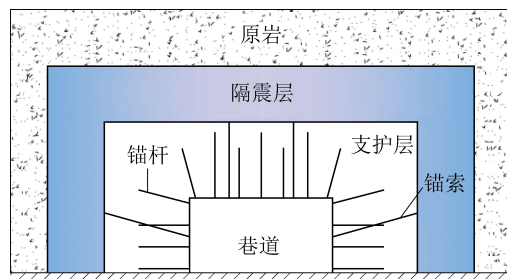


图1 冲击地压巷道隔震示意

Fig.1 Isolation schematic of rock burst roadway

隔震层具有较大的承载能力,能够承载巷道上覆岩层,控制巷道变形,上覆岩层结构在冲击作用下发生移动时,隔震层使“刚性”的抗冲击结构变为“柔性”的抗冲防震结构,从而有效吸收冲击震动波,降低冲击波对巷道的影响。

冲击地压巷道减震控制是指在巷道的特定位置建造某种吸能减震结构,或装设减震装置,或安装具有吸能支护作用构件,以优化巷道冲击应力反应特性,如图2所示。

传统的冲击地压巷道在支护层采用加强支护与反复卸压方式来抵抗冲击地压的影响,这种方法既不经济又达不到理想效果,同时破坏了巷道的支护层,使卸压和支护效果减弱。冲击地压巷道减隔震技术采用设置隔震层或安装减震装置达到减震、吸能效果。根据冲击地压巷道所处的冲击等级和巷道的防护对象设置不同的减隔震结构和构件。

1.2 减隔震模型

巷道开挖后应力重新调整,巷道围岩在应力作

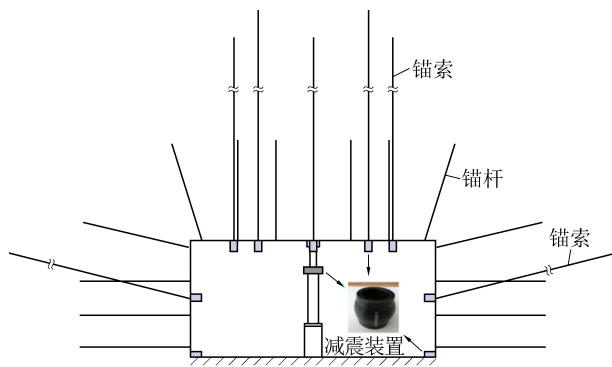


图2 冲击地压巷道减震示意

Fig.2 Reduce schematic of rockburst roadway

用下发生破坏,由于破坏较轻,巷道仍保持围岩的稳定。当巷道周围或较远处受到冲击震动时,震源传播而来的动载冲击波与静载原位应力场叠加后的应力强度大于巷道围岩的极限承载强度,巷道围岩将瞬间破坏或经应力波反复拉压累积损伤而破坏。围岩瞬间断裂产生的冲击震动波是巷道发生冲击地压破坏的关键因素之一,动静载叠加后总体应力强度超过巷道围岩支护体的承载极限巷道就会发生冲击地压破坏。

冲击地压巷道减隔震模型如图3所示,一般在支护层与原岩之间的隔震层设置1个对冲击震动波有显著消波吸能作用的结构,吸能结构设置后从原岩传递来的冲击震动波经过隔震层吸能结构的强散射和吸收作用,传递到支护层的强度会大幅减弱,从而维护冲击地压巷道的稳定性。为尽可能的减小冲击地压对巷道造成的损失,减震装置通常设置在巷道支护构件之间,将巷道支护结构分为支护和吸能两部分。当冲击震动波传递到支护层时,巷道支护构件的隔震装置能够吸收部分能量从而保护巷道支护结构不受破坏。

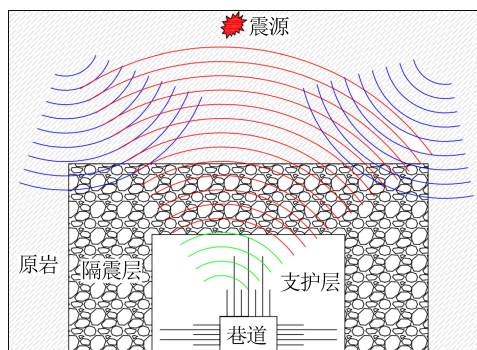


图3 冲击地压巷道减隔震模型

Fig.3 Reduce and isolation model of rock burst roadway

1.3 减隔震防冲机理

煤矿冲击地压发生后,煤岩体中的能量瞬间释放,冲击震动能量在传播过程中会消耗少量的能量,

由于煤岩体相对完整,假设冲击震动波在传播过程中能量损失为0,巷道开采深度为 H ,巷道宽度为 B ,巷高为 h ,隔震层高为 R_2 ,支护层高为 R_1 ,冲击地压震源释放的能量为 E ,隔震层吸收的能量为 E_1 ,减震层吸收的能量为 E_2 ,巷道支护层剩余的能量为 E_3 ,则 $E_3=E-E_1-E_2$,建立减隔震支护结构力学模型如图4所示。震动冲击波通过围岩传播的能量,首先在隔震层中被部分吸收,剩余的能量再传递到减震层和支护层。若 $E_3 \leq 0$,说明冲击地压释放能量被隔震层和减震层全部吸收。若经过减隔震后能量不能被隔震层和减震层全部吸收损耗,则 $E_3 > 0$ 。经过减震层和隔震层的吸能,剩余的冲击震动能较小,对支护材料影响较小,对巷道稳定性几乎没有影响。

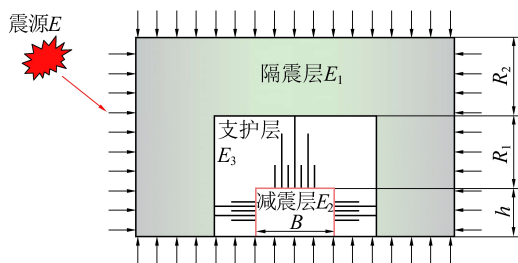


图4 减隔震结构力学模型

Fig.4 Mechanical model of reduce isolation structure

2 冲击地压巷道隔震技术

2.1 巷道隔震防冲技术

松散煤岩体具有良好的隔震缓冲吸能作用,在冲击地压巷道中,致裂煤岩体形成的弱结构,通过剪切、摩擦等相互作用具有良好的吸能特性。致裂形成的松散煤岩体、能量耗散过程复杂,试验研究表明^[15-16]:颗粒的粒径、颗粒构成的厚度以及颗粒的形状对消波吸能都有一定的影响。因此,致裂形成的弱结构形状,致裂煤岩体颗粒的大小及隔震层的厚度对冲击波的衰减耗能有一定的影响。支护层外完整煤岩体致裂形成的弱结构层可作为冲击巷道隔震层。巷道隔震防冲机理如图5所示,弱结构吸能机理主要体现在4个方面:①块体松散吸能,动载冲击波在松散煤岩体中传播所用的时间长,导致波速降低,冲击震动能量减少;②旋转吸能,动载冲击波在致裂弱结构区域传播,使致裂弱结构中发生反转和移动,转化冲击震动能;③空间散射吸能,且破碎区域向四周散射,且在散射区域不断扩散,使震动能量逐渐减小;④反射吸能,冲击波在破碎区域会发生反射,经过煤岩体反射后,同时会发生透射与弥散等现象,减弱冲击动载能量。经过上述弱结构吸能后,动载冲击能逐渐转变为弱结构隔震层的弹性能。

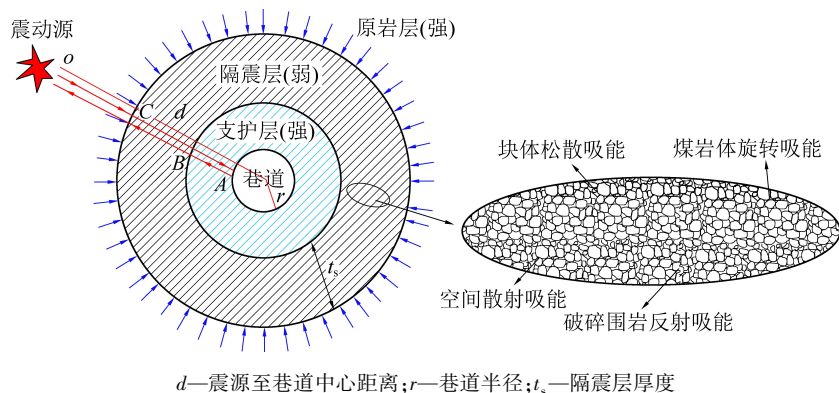


图5 巷道隔震防冲机理

Fig.5 Mechanism of reduce and isolation of roadway

2.2 巷道隔震层实现技术

巷道隔震层即弱结构层的构建利用反复钻孔致裂弱结构实现,利用钻机在适宜的时机指定位置进行钻孔,在钻孔内套入长6~12 m钢管,通过钢管可以反复多次对煤岩体进行致裂卸压而不破坏巷道支护层,同时钢管6~12 m处可以反复致裂形成弱结构层,吸收冲击地压能量。反复钻孔致裂和内置钢管技术^[17]在有效保护巷道支护层的前提下致裂弱结构,能有效吸收冲击地压能量,减弱冲击地压对巷道的破坏,反复钻孔致裂弱结构是一种简单有效实现巷道隔震层的方法。

弱结构隔震模型如图5所示,冲击震动波从震源传播到巷道表面时能量的衰减系数为 η ,冲击地压巷道支护强度为 σ_z ,冲击应力初始值为 σ_d ,震源到巷帮的距离为 $d-r$,支护层的厚度为 t_{AB} ,此时,震动波入射强度 σ_B 为

$$\sigma_B = \sigma_d (d - r - t_{AB})^{-\eta} \quad (1)$$

在巷道围岩支护小结构AB外表面上任意一点B处受到的应力强度大小为

$$\sigma_{Bh} = \sigma_d (d - r - t_{AB})^{-\eta} + \gamma h \left(1 - \frac{r^2}{(r + t_{AB})^2} \right) \quad (2)$$

式中: h 为巷道埋深; γ 为围岩的容重; r 为巷道半径。

当满足 $\sigma_{Bh} > \sigma_z$,即式(3)成立时巷道将被冲击破坏。

$$\sigma_d (d - r - t_{AB})^{-\eta} + \gamma h \left(1 - \frac{r^2}{(r + t_{AB})^2} \right) > \sigma_z \quad (3)$$

然而巷道弱结构隔震层建立后,震动波在弱结构隔震层得到消减,进入支护层的应力波强度大幅减弱。震动波在隔震层弱结构致裂松散介质中传播的能量衰减指数为 η_s ,经过隔震层弱结构松散介质

内部的衰减吸收,传播到巷道围岩支护体小结构的震动波强度 σ_B' 为

$$\sigma_B' = T_c \sigma_d (d - r - t_{AB} - t_s)^{-\eta_s} \quad (4)$$

式中: T_c 为应力波在弱结构的衰减系数。

此时,作用在围岩支护体小结构的总应力为

$$\sigma'_{Bh} = \frac{2\rho_s v_s}{\rho_s v_s + \rho_w v_w} \sigma_d (d - r - t_{AB} - t_s)^{-\eta_s} + \gamma h \left(1 - \frac{r^2}{(r + t_{AB})^2} \right) \quad (5)$$

式中: $\rho_s v_s$ 、 $\rho_w v_w$ 为巷道表面2种介质波阻抗。

当满足式(6)时,巷道虽发生冲击震动,但不会被破坏。

$$\frac{2\rho_s v_s}{\rho_s v_s + \rho_w v_w} \sigma_d (d - r - t_{AB} - t_s)^{-\eta_s} + \gamma h \left(1 - \frac{r^2}{(r + t_{AB})^2} \right) < \sigma_z \quad (6)$$

可以看出经过隔震层弱结构松散介质后,式(6)满足,巷道围岩结构就不会被破坏。

3 冲击地压巷道减震技术

3.1 锚杆(索)防冲减震

巷道施工锚网支护后,锚杆及其支护构件与煤岩体形成整体承载结构,对于较小的冲击地压显现,锚杆及其支护构件不会遭受破坏,能够较好地保护巷道支护结构。锚杆、锚索等支护构件^[18,19]构成的柔性吸能区域能够吸收部分冲击波能量,对巷道围岩起到了有效支撑作用。锚杆、锚索等支护构件防冲减震吸能如下。

顶板锚杆锚索吸收能量为

$$E_p = (E_s n_{ps} + E_g n_{pg}) / (ab) \quad (7)$$

式中: E_s 为每根锚索吸收的能量; n_{ps} 为顶板锚索数量; E_g 为每根锚杆吸收的能量; n_{pg} 为顶板锚杆数

量; a 为巷道顶板宽度; b 为顶板锚杆支护排距。

帮部锚杆锚索吸收能量为

$$E_L = (E_s n_{Ls} + E_g n_{Lg}) / (cd) \tag{8}$$

式中: n_{Ls} 为帮部锚索数量; n_{Lg} 为帮部锚杆数量; c 为巷道帮部高度; d 为帮部锚杆支护排距。

锚杆、锚索形成的减震层能够吸收传递到煤岩体中的冲击能量,在一定的范围内能够保持支护整体性和巷道的稳定性,起到了减震作用。

3.2 让压管防冲减震

让压管是在锚杆(索)尾部增加了具有让压功能的装置,为防止让压管受压产生胀口或缩口等变形,将管子做成鼓肚形(图 6)。通过在支承压垫板和螺母间安装让压管,巷道围岩所受压力较大时,通过挤压让压管的预留压缩量来补偿应力重新分布引起的巷道围岩的变形,提高锚索适应围岩变形的能力,实现锚杆(索)的让压功能。



图 6 让压装置

Fig.6 Actual drawing of pressure release device

试验采用 3 个让压管的上下截面平均内径 25.37 mm,平均外径 35.60 mm,平均壁厚 5.03 mm,中间鼓肚部分平均最大外径 41.08 mm。让压管试件的屈服强度分别为 283、290、306 kN,最大让压量分别为 21、20、22 mm,其平均屈服强度为 293 kN,平均最大让压量为 21 mm(表 1)。

表 1 让压管载荷-位移数据

Table 1 Load-displacement datas of pressure ring

编号	内径/ mm	壁厚/ mm	两端外 径/mm	鼓肚外 径/mm	高度/ mm	屈服强 度/kN	最大让压 量/mm
1	25.06	5.02	35.10	41.02	37.80	283	21
2	25.58	5.00	35.58	41.14	37.62	290	20
3	25.46	5.06	35.66	41.08	38.06	306	22
均值	25.37	5.03	35.46	41.08	37.82	293	21

3.3 O 型棚防冲减震

O 型棚具有良好的护表功能,是一种 U 型钢全断面封闭支护的特殊形式。防冲减震 O 型棚结构,如图 7 所示,O 型棚防冲减震原理为:冲击震动源产生的冲击应力波经过隔震层传播到支护层,剩余冲

击能量会瞬间向巷道释放,O 型棚与围岩的柔性填充物与刚性支架起到了吸能减震的作用,可抑制巷道顶底板和帮部变形,起到了防冲减震的效果。O 型棚吸能减震抵抗的冲击地压能量与冲击地压发生时震源的位置,震源到巷道的距离,冲击波在传播过程中的衰减,煤岩体的力学性质等因素有关^[20]。

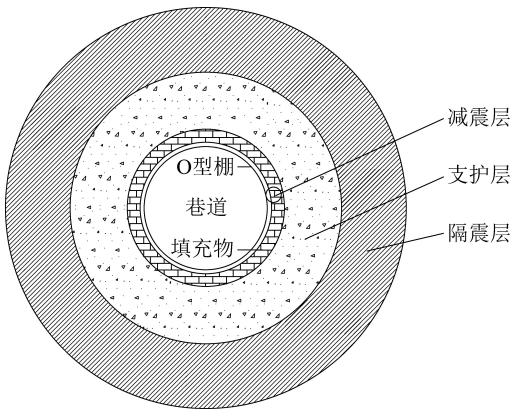


图 7 防冲减震 O 型棚结构

Fig.7 Structure of O-shaped shed with shock absorption

3.4 防冲液压支架减震

防冲液压支架能够有效增加巷道支护强度,同时可以平稳、快速吸收冲击地压震动能量,达到减震吸能的目的。防冲液压支架减震防冲原理:防冲液压支架能够支护冲击地压巷道使其在静载状态下不变形,当动载冲击时,吸能防冲构件吸收冲击地压能量起到减震效果。减震效果主要体现在 3 个方面:①防冲液压支架发生弹塑性变形吸收冲击能;②防冲液压支架与围岩体之间的空隙间接吸收冲击震动波的能量;③防冲液压支架吸能构件的变形吸收了冲击能,改变了防冲液压支架的受力情况。防冲液压支架支护如图 8 所示。

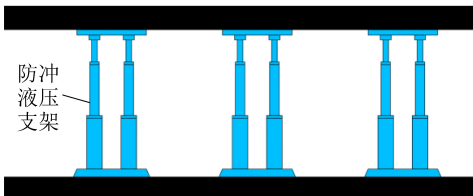


图 8 防冲液压支架支护

Fig.8 Anti-impact hydraulic support

4 工程实践

4.1 工程地质

某矿 21170 工作面埋深约 780 m,巷道直接顶和基本顶主要为泥岩,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。21170工作面上覆巨厚砾岩层,邻近F16断层,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,经测试,地应力整体上属于中等偏高地应力场,局部地区属于高地应力场,21170工作面煤层柱状如图9所示。

序号	累厚/m	厚度/m	柱状	岩层
1	700.1	$\frac{425 \sim 435}{430}$		砾岩
2	720.6	$\frac{22.0 \sim 25.0}{23.5}$		细砂岩
3	763.7	$\frac{36.0 \sim 44.5}{40.1}$		泥岩
4	768.5	$\frac{0.05 \sim 9.1}{4.8}$		泥岩
5	779.7	$\frac{10.8 \sim 13.3}{12.0}$		煤
6	782.8	$\frac{0.5 \sim 5.7}{3.1}$		炭质泥岩
7	807.8	$\frac{22.2 \sim 27.8}{30.0}$		黏土岩
				细砂岩
8	812.9	$\frac{4.0 \sim 6.3}{5.1}$		砾岩

图9 21170工作面煤层柱状

Fig.9 Coal seam histogram in No.21170 working face

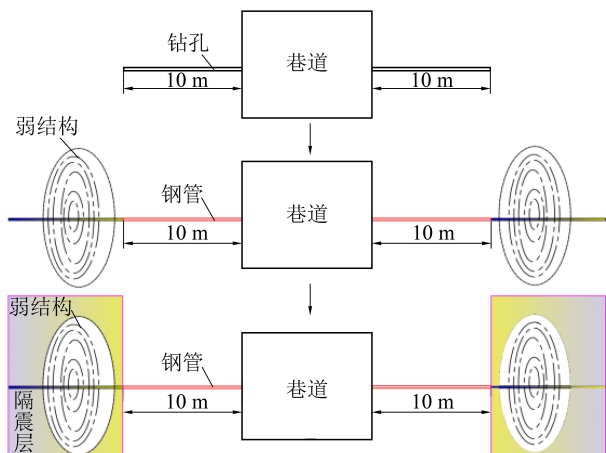


图10 弱结构隔震层致裂过程

Fig.10 Cracking process of soft structure isolation layer

4.2 减隔震支护方案

1) 隔震吸能方案。隔震技术通过致裂弱结构设置隔震层,以减小冲击震动波对巷道及支护结构的影响。弱结构的煤岩体致裂采用反复掏裂法,如图10所示。21170巷道左右两帮在适宜时机指定位置打设直径110 mm的钻孔,在钻孔内套入由短

钢管公母螺丝对接联结、直径正好满孔的长10 m钢管,在钢管10 m外,利用钻机反复致裂弱结构形成隔震层。弱结构隔震层不仅起到了吸能减震的作用,同时保护了巷道支护层不会在钻孔作用下松动。

2) 减震吸能方案。锚杆锚网减震:巷道采用12根 $\phi 22 \text{ mm} \times 2\,500 \text{ mm}$ 左旋螺纹钢高强锚杆加 M_4 钢带、钢筋网,锚杆间距900 mm,排距800 mm。让压管减震:顶板沿巷道走向布置3根 $\phi 18.9 \text{ mm} \times 5\,300 \text{ mm}$ 让压短锚索,锚索间距1.5 m,排距1.6 m,同时沿巷道走向布置2根 $\phi 18.9 \text{ mm} \times 8\,000 \text{ mm}$ 让压长锚索,托盘尺寸为 $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$,2根单体锚索间距2.5 m,排距1.6 m。帮部在施工10~20 m后,在两帮中上及靠近底板位置施工2排帮部走向锚索梁,锚索为 $\phi 18.9 \text{ mm} \times 5\,300 \text{ mm}$,长3.2 m槽钢梁长,孔间距1.6 m,孔外端长度0.8 m。液压支架减震:锚网支护后,紧跟施工点在巷道中心沿走向架设1排液压支架减震(图11)。

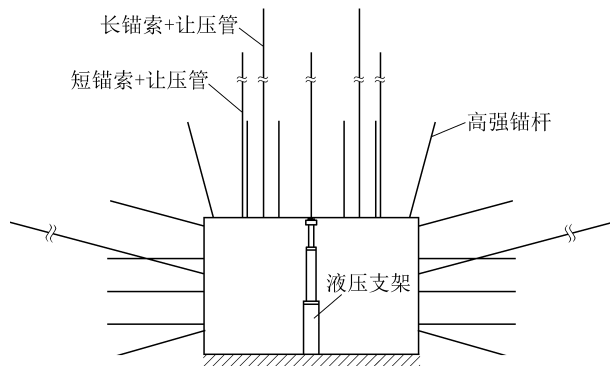


图11 巷道具体支护断面

Fig.11 Roadway support parameters

4.3 支护效果

1) 微震监测效果。有无隔震层微震能量监测结果对比如图12所示,隔震层实施后,巷道微震监测到的能量减小50%左右,煤体内的高应力显著降低。

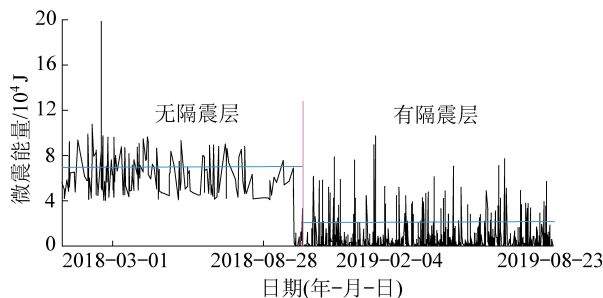


图12 有无隔震层微震能量监测

Fig.12 Microseismic energy monitoring before and after isolation structure

2) 巷道两帮表面位移变化监测。两帮位移变化如图 13 所示。随着维护时间的增加,巷道表面位移不断增加,两帮最大位移为 611 mm。两帮位移在 60 d 左右趋于稳定,由隔震层致裂前后对比可以看出,隔震层致裂对巷道内强小结构^[17]的影响较小,隔震层致裂后巷道在一定时间内并没有发生失稳现象。

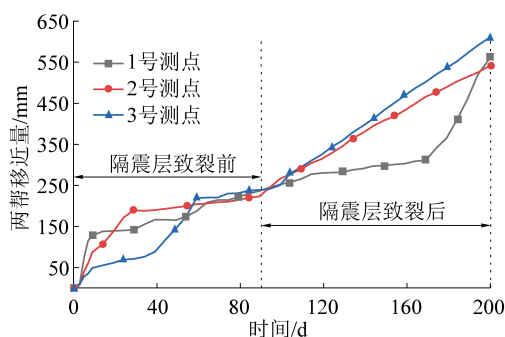


图 13 两帮位移变化

Fig.13 Roadway surface displacement

3) 顶板下沉量监测。顶板下沉量如图 14 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,隔震层致裂对巷道顶板没有很大影响,巷道顶板没有因隔震层致裂而发生较大的离层造成巷道失稳现象。

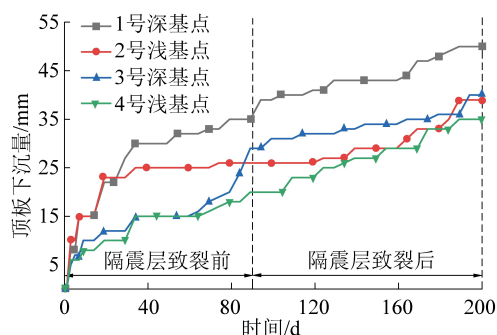


图 14 顶板下沉量

Fig.14 Roadway roof separation

4) 现场效果。减隔震技术对冲击地压巷道消波吸能及巷道支护起了重要作用。冲击地压巷道震动波通过隔震层后,能量明显减小,通过支护结构减震层的消波吸能后,巷道支护效果明显。减隔震支护方案明显改善了冲击地压巷道的支护情况,支护方案和参数选择合理有效,巷道变形得到了一定程度的抑制。

5 结 论

1) 基于建筑物及地下结构工程减隔震结构的动态反应特征及应用效果,提出了冲击地压巷道减隔震支护原理及支护体系,研究了冲击地压巷道减隔震技

术手段和实现方法,实现了冲击地压巷道隔震+减震的双重保护,有效控制冲击地压巷道围岩变形并降低了多次反复卸压对巷道支护带来的不良影响。

2) 基于强-弱-强结构控制模型,提出了反复钻孔+内置钢管技术致裂隔震层,通过致裂形成的弱结构隔震层(松散炭岩体)在剪切、摩擦等相互作用下具有良好的吸能特性。经过弱结构隔震层吸能后,动载冲击能逐渐转变为弱结构隔震层的弹性性能,有效减小了冲击动载对巷道的破坏。

3) 冲击地压巷道减震技术采用锚杆索、让压管和液压支架设置减震层或安装减震装置达到减震、吸能效果,安全经济的达到了减震消波的目的。研究成果有效减小了冲击地压对巷道的影响,有效控制了冲击地压巷道变形,显著改善了冲击地压巷道支护效果,可在类似冲击地压巷道进行推广应用。

参考文献 (References) :

- [1] 康红普,徐 刚,王彪谋,等. 我国煤炭开采与岩层控制技术发展 40 a 及展望[J]. 采矿与岩层控制工程学报,2019,1(1): 1-33.
KANG Hongpu, XU Gang, WANG Biaomou, et al. Forty years development and prospects of underground coal mining and strata control technologies in China[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2019, 1(1): 1-33.
- [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,吴昉政,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] 潘一山,肖惠惠,李国臻. 巷道防冲液压支架研究及应用[J]. 煤炭学报,2020,45(1): 90-99.
PAN Yishan, XIAO Yonghui, LI Guozhen. Roadway hydraulic support for rockburst prevention in coal mine and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 90-99.
- [5] 宫伟力,张自翔,高 霞,等. 双根并联恒阻大变形锚杆吸收冲击能量研究[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(1): 119-127.
GONG Wili, ZHANG Zixiang, GAO Xia, et al. Investigation on the impact energy for two bolts with constant resistance and large deformation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(1): 119-127.
- [6] 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.
- [7] 吴拥政,陈金宇,焦建康,等. 冲击载荷作用下锚固围岩损伤破坏机制[J]. 煤炭学报, 2018, 43(9): 2389-2397.
WU Yongzheng, CHEN Jinyu, JIAO Jiankang, *et al.* Damage and failure mechanism of anchored surrounding rock with impact loading [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(9): 2389-2397.
- [8] 高明仕,窦林名,张 农,等. 冲击矿压巷道围岩控制的强弱强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.
- [9] 谭云亮,郭伟耀,赵同彬,等. 深部煤巷帮部失稳诱冲机理及“卸-固”协同控制研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 66-81.
TAN Yunliang, GUO Weiyao, ZHAO Tongbin, *et al.* Coal rib burst mechanism in deep roadway and “stress relief support reinforcement” synergetic control and prevention [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 66-81.
- [10] 吕 可,王金安,李鹏波. 冲击地压巷道周边动力放大效应及支护参数调控策略[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(6): 1168-1177.
LYU Ke, WANG Jin'an, LI Pengbo. Amplification effect of rock burst around roadway and support parameter adjusting strategy [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(6): 1168-1177.
- [11] 付玉凯,孙志勇,鞠文君. 冲击地压巷道锚杆支护金属网静载和动载力学性能试验研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 2020-2029.
FU Yukai, SUN Zhiyong, JU Wenjun. Experimental study on static and dynamic mechanical properties of bolting wire mesh in rock burst roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 2020-2029.
- [12] 张 勇,孙晓明,郑有雷,等. 深部回采巷道防冲释能耦合支护技术及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(9): 1860-1869.
ZHANG Yong, SUN Xiaoming, ZHENG Youlei, *et al.* An anti-punching and energy-releasing coupling support technology in deep mining roadway and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(9): 1860-1869.
- [13] 刘金海,杨伟利,姜福兴,等. 先裂后注防治冲击地压的机制与现场试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(12): 3040-3049.
LIU Jinhai, YANG Weili, JIANG Fuxing, *et al.* Mechanism of cracking-before-injecting method to prevent coal burst and its field test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(9): 1860-1869.
- [14] 于 旭,庄海洋,陈国兴,等. 软弱地基上隔震结构地震反应及隔震效果的预测方法研究[J]. 振动工程学报, 2017, 30(5): 817-826.
YU Xu, ZHUANG Haiyang, CHEN Guoxing, *et al.* Prediction method research of seismic response and seismic isolation effect of isolated structure on soft soil foundation [J]. Journal of Vibration Engineering, 2017, 30(5): 817-826.
- [15] 季顺迎,李鹏飞,陈晓东. 冲击载荷下颗粒物质缓冲性能的试验研究[J]. 物理学报, 2012, 61(18): 1-7.
JI Shunying, LI Pengfei, CHEN Xiaodong. Experiments on shock-absorbing capacity of granular matter under impact load [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(18): 1-7.
- [16] 徐连满,潘一山,李忠华,等. 人工调控围岩防冲减振数值研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 829-835.
XU Lianman, PAN Yishan, LI Zhonghua, *et al.* Numerical research on surrounding rock rockburst prevention and damping by artificial regulation [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 829-835.
- [17] 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.* Research on the 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.
- [18] 王桂峰,窦林名,李振雷,等. 支护防冲能力计算及微震反求支护参数可行性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S2): 4125-4131.
WANG Guifeng, DOU Linming, LI Zhenlei, *et al.* Anti-impact abilities calculation and feasibility analysis of seismic reverse for supporting [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2): 4125-4131.
- [19] 高明仕,窦林名,严如令,等. 冲击煤层巷道锚网支护防冲机理及抗冲震级初算[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(4): 402-406.
GAO Mingshi, DOU Linming, YAN Ruling, *et al.* Prevention Mechanism of Roadway Supported by Bolt-Mesh Subjected to Rock Burst and Degree Calculation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 26(4): 402-406.