

刚柔耦合吸能支护煤岩巷道冲击破坏相似试验与数值计算对比分析

吕祥锋^{1, 2}, 潘一山²

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2. 辽宁工程技术大学力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 冲击地压巷道支护问题一直是研究的热点。采用相似模拟试验和数值模拟的研究方法, 对裸巷和刚柔吸能支护巷道的冲击破坏过程进行研究。试验和数值计算结果均表明, 无支护巷道冲击变形破坏较严重, 在巷道顶板和两帮壁面均出现裂缝扩展和贯通, 甚至出现抛出物冲入巷道和塌落现象; 刚柔吸能支护具有缓冲和吸收冲击能作用, 表现为巷道顶板和两帮壁面发生向巷道内部变形, 同时有局部壁面出现裂缝, 但巷道整体性完好; 裸巷和吸能支护巷道冲击破坏规律基本一致, 吸能支护巷道冲击破坏程度弱, 整体性好, 刚柔耦合支护更有利于冲击地压巷道支护。

关键词: 冲击地压; 刚柔吸能支护; 冲击破坏; 相似试验; 数值模拟

中图分类号: TD324 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4548(2012)03 - 0477 - 06

作者简介: 吕祥锋(1982 -), 男, 河北邢台人, 博士后, 主要从事矿山动力灾害发生与防治研究。E-mail: lvxiangfeng2006@126.com。

Simulation and numerical analysis of impact failure law of coal roadway under rigid-flexible energy absorbing support

LÜ Xiang-feng^{1,2}, PAN Yi-shan²

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: Roadway support is always the focus research of rockburst. Using similar simulation experiments and numerical simulation methods, the impact failure process of roadway under nude alley and rigid-flexible energy absorbing support is studied. Experimental and numerical results indicate that the deformation and failure without support are more serious than those with rigid-flexible coupled support. The cracks in the roof and at two side walls are extended and through, even objects are thrown into the roadway and collapse under nude alley. The rigid-flexible coupled support plays a good role in absorbing impact energy, and thus internal deformation occurs in the roof and two walls, while cracks take place in partial wall. But the roadway is good when the rigid-flexible energy absorbing support is used. The impact failure laws of coal roadway under nude alley and rigid-flexible coupled support are similar. The results also show that energy absorbing support has advantages of weak impact damage and good integrality, and the rigid-flexible coupled support is better for rockburst roadway.

Key words: rockburst; rigid-flexible energy absorbing support; impact failure; similar simulation experiment; numerical simulation

0 引言

冲击地压巷道安全支护问题一直是研究的热点。近些年来主要形成了锚网锚杆、锚注支护、锚索、锚网索、U型钢以及综采工作面液压支柱等主动和被动支护方式。以上支护方法是通过增强围岩体强度或者提高支护自身承载能力以实现承担上部载荷的作用。但这些方法对于提高支护结构的承载能力是有限的, 更不能承担深部开采过程中强动力载荷的冲击作用^[1-3]。

现场资料表明, 冲击地压巷道破坏呈现出围岩体和支护结构的整体破坏, 也即说明, 支护结构的破坏并非由于自身强度不够的原因, 而主要是由于支护结构整体强度不足而造成的。因此, 降低冲击载荷作用和增强支护结构整体强度是解决冲击地压^[4-6]巷道安全支

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973计划)项目(2010CB226803)

收稿日期: 2010-07-20

护的主要途径。

刚柔吸能支护是指建立巷道围岩-吸能材料-钢支架支护体系,吸能材料作为柔性材料具有缓冲和吸能特性,可起到有效降低冲击载荷作用;同时与钢支架为一体共同承担上部冲击载荷,也可增强支护结构整体强度。采用相似模拟试验和数值模拟相结合的研究方法,对裸巷和刚柔吸能支护巷道的冲击破坏过程进行研究,研究煤岩巷道冲击破坏规律,揭示冲击地压发生机理和刚柔吸能支护条件下巷道冲击破坏机制。通过试验和数值计算结果对比研究,分析刚柔吸能支护应用到冲击地压巷道支护中的可行性,为冲击地压巷道安全支护提供一种新的方法。

1 相似材料试验

1.1 相似模拟理论^[7]

设原型和模型问题的力学物理参数有抗压强度,用 σ_c^H 和 σ_c^M 表示;弹性模量分别用 E^H 和 E^M 表示;泊松比分别用 μ^H 和 μ^M 表示;内摩擦角分别为 ϕ^H 和 ϕ^M 表示;材料视密度分别用 ρ^H 和 ρ^M 表示;几何长度分别用 L^H 和 L^M 表示。冲击地压相似材料模拟试验中,必须遵循以下相似原则。

$$\frac{\sigma_c^H}{\sigma_c^M} = \frac{L^H}{L^M} \cdot \frac{\rho^H}{\rho^M}, \quad (1)$$

$$\frac{E^H}{E^M} = \frac{L^H}{L^M} \cdot \frac{\rho^H}{\rho^M}, \quad (2)$$

$$\mu^H = \mu^M, \quad (3)$$

$$\phi^H = \phi^M. \quad (4)$$

由冲击地压发生准则 $\frac{\Delta u}{\Delta P} = \frac{du}{dP} = \infty$,可得冲击地压发生准则的另一种表达形式为

$$\frac{\Delta P}{\Delta u} = \frac{dP}{du} = 0. \quad (5)$$

根据冲击地压判别准则可知,在应力-位移曲线中的极大值点即为冲击地压发生点。因此,只要绘制出应力-位移曲线,就可对冲击地压发生和破坏规律进行定量分析。

1.2 材料配比

冲击地压相似模拟试验中,主要骨料材料包括砂、石膏,制备相似材料^[8-9]的方法为:将一定量的松香溶于酒精中,再加入按照一定比例配制的砂、石膏、水混合物中,材料的比例为砂:水泥:石膏:水:松香:酒精=50:10:15:5:0.8:1,配制后的材料强度低,破坏前应变小于3%,脆性破坏特征明显,其抗压强度 $\sigma_c=0.85$ MPa,弹性模量 $E=90$ MPa,材料密度 $\gamma=1.54$ g/cm³。此材料适宜于模拟巷道冲击情况,整个模型材料相同,配比不变。

在模拟试验中,吸能支护结构由U型钢和吸能材

料组成。U型钢强度约为400 MPa左右,强度换算比例为0.02,则使用8 MPa左右的钢丝;吸能材料强度为25 MPa左右,用强度为0.5 MPa左右的泡沫铝以满足要求。在相似模型制作中,首先将巷道大小的预制块体放入模型中,待模型具有一定强度后抽出,实现先加载后开挖的过程,与各支护实际工序保持一致。

1.3 试验方法

冲击地压相似模拟试验中,几何尺寸相似比尺为1:100,取模型尺寸为200 mm×200 mm×100 mm(长×宽×厚),巷道截面尺寸为40 mm×30 mm,巷道上部岩层厚度为50 mm,下部岩层厚度为20 mm,模拟巷道尺寸与实际工程情况相符。模型使用6 mm厚钢板加工而成,为能观测巷道截面变形情况,在模型前后侧均采用12 mm后钢化玻璃代替钢板。相似试样模型如下图1所示。在试验中,分别进行裸巷和吸能支护条件下巷道冲击破坏过程。



图1 相似材料模拟试验模型

Fig. 1 Simulation model for similar materials

模拟试验中,在模型顶面加垂直载荷,四周水平约束,且不考虑相似材料与模型侧壁的摩擦作用。采用液压试验机加载,利用应力传感器、位移传感器和数据采集系统记录应力和位移数据。随着垂直载荷的不断增大,相似材料弹性逐渐增加,巷道顶板及两帮均产生位移,但并未发生冲击地压。当相似材料积聚足够弹性后,材料自身强度不能承担上部载荷而突然发生冲击地压,致使巷道围岩体破裂、抛出,甚至整体垮塌^[10-11]。冲击地压模拟试验原理如图2所示。

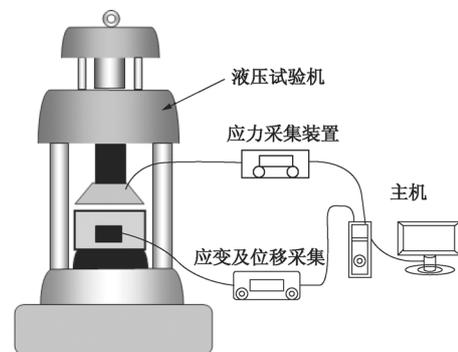


图2 冲击地压模拟试验原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of rockburst tests

2 试验结果分析

2.1 裸巷冲击破坏过程分析

图3表示裸巷冲击破坏图,图4表示巷道应力-位移关系曲线。从巷道整体位移随加载应力的变化曲线中可以看出,当加载应力 σ 达到0.52 MPa时,巷道发生第一次冲击失稳破坏,曲线中表现为出现跳跃点。同时从巷道宏观破坏图中也可以看到,巷道顶板和两帮壁面中部有片状碎屑剥离脱落,并伴有轻微响声。在 $\sigma=0.70$ MPa时,巷道壁面上发生第二次冲击破坏,应力-位移曲线中同样发生跳跃。从观测巷道内部变形破坏情况看,在巷道壁面上较大的弧形破碎块(最大长度和宽度约12 mm×5 mm)剥离。随着加载应力的继续增加,仍会有冲击发生。当加载应力 $\sigma=0.83$ MPa时,巷道顶板及两帮壁面严重破坏,从巷道宏观破坏图中可以看到,巷道顶板及两帮处出现明显的破碎冒落,沿巷道顶板和两帮向外裂缝扩展迅速,且顶板上部有明显的弯曲下沉,此时巷道顶部位移约为9.6 mm。通过巷道破坏图可以看到,破坏后的巷道变形表现为:顶板处整体向下弯曲,产生明显的冒落带、裂缝带和弯曲带;两帮处均出现向巷道内侧发生大变形弯曲,有大块破碎块剥离脱落,两帮壁面开裂破碎比较突出;在巷道底板处发生破裂,同时也出现底板略有起鼓现象;破坏后的巷道顶底板和两帮处聚脂薄膜均呈现出不同样式放置的V型。

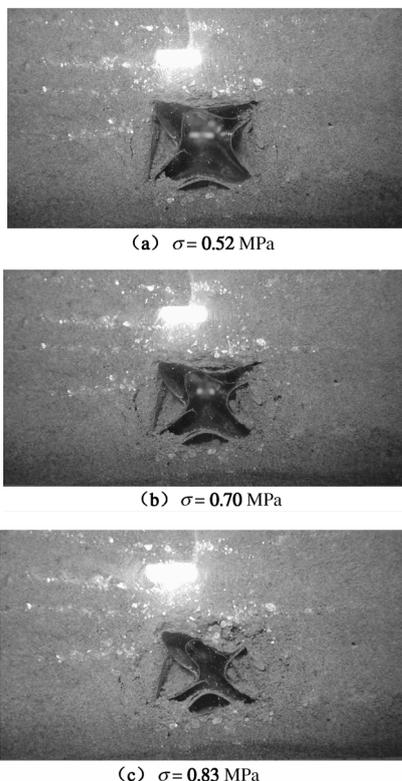


图3 巷道变形破坏图(裸巷)

Fig. 3 Diagram of roadway damage (nude alley)

裸巷时发生冲击地压的最大加载应力为0.83 MPa,换算为巷道围岩实际应力为42 MPa左右,此时,围岩体在无任何增强措施条件下也即将发生破坏,与实际工程情况基本一致。

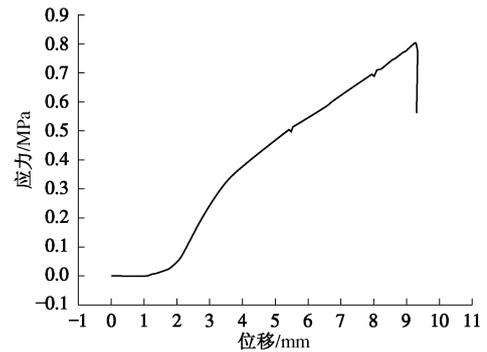


图4 巷道冲击破坏应力-位移曲线(裸巷)

Fig. 4 Stress-displacement curve of roadway under impact loads (nude alley)

2.2 吸能支护巷道冲击破坏过程分析

图5给出了吸能支护巷道冲击破坏图,图6给出了吸能支护巷道应力-位移关系曲线。由应力-位移关系曲线可知,当加载应力 $\sigma=0.20$ MPa时,应力和位移曲线上出现第一次跳跃,此次跳跃可以认为是一次冲击发生,并伴有有一定的声响。但在巷道宏观破坏图中巷道顶底板和两帮壁面上无明显的冲击裂缝出现,巷道顶底板和两帮壁面完整性较好,主要是由于吸能材料为柔性,能起到抗缓冲作用,对于较小的冲击载荷,可以很好的吸收,不会对巷道壁面产生冲击破坏作用。当加载应力继续增加,随着模型弹性能的不断积聚,类似的冲击现象也会发生,但由于柔性吸能材料的存在,曲线上表现出比较光滑,并无波动现象。当加载应力 $\sigma=1.82$ MPa,巷道发生第二次明显冲击,在应力-位移曲线上出现大的跳跃,并伴有明显的声响。巷道内部变形破坏观测结果表明,吸能材料受到强冲击载荷作用后被压密收缩,同时顶板向下弯曲变形,两帮壁面也受冲击作用后向巷道内侧方向弯曲变形,在巷道顶板和两帮均有明显的冲击破坏裂缝开展,并有较小的破碎块体从顶板和两帮壁面剥离脱落。在加载应力继续增加的情况下,当 $\sigma=1.96$ MPa,会有冲击继续发生,此时巷道变形破坏已经比较严重,应力降低非常明显,顶板位移下沉迅速,位移值达到约10 mm。随着加载应力的继续增加,在巷道顶板和两帮处有明显的片状突出,并有块状碎片崩出。通过吸能支护^[12-13]巷道变形破坏过程分析可知,在加载初期,由于模型中存在原始孔隙和裂缝,孔隙和裂缝压实后模型强度提高,曲线初期较平缓。随着加载应力增加,吸能材料起到良好的抗冲击作用,冲击发生时巷道无冲击破坏,且完整性好。当载荷继续增加,冲击会继续发生,且冲击更严重,同时吸能材料的存在,在吸收大量冲击能后巷道顶板和两帮发生弯曲变形,并有较小破碎块体剥离脱落,但巷道仍然具有完整性。说明了吸能材料应用于冲击地压巷道支护结构中可起到良好缓冲和吸收地压冲击能作用。

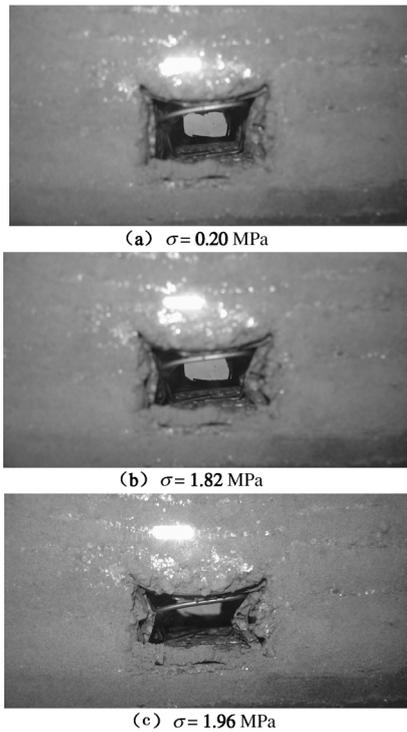


图5 巷道变形破坏图(吸能支护)

Fig. 5 Diagram of roadway damage (energy absorbing support)

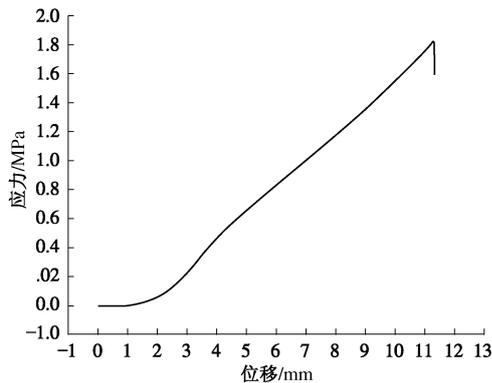


图6 巷道冲击破坏应力-位移曲线(吸能支护)

Fig. 6 Stress-displacement curve of roadway under impact loads (energy absorbing support)

采用吸能支护后,发生冲击地压的最大加载应力为 1.96 MPa,换算为巷道围岩实际应力应为 100 MPa 左右,此时,围岩体和吸能支护结构也将发生破坏。与裸巷相比,发生冲击地压破坏的载荷明显提高。当发生冲击破坏时,裸巷顶部最大位移约 9.6 mm,而吸能支护巷道顶板位移最大值可达 10 mm 左右,说明吸能支护一方面起到良好的缓冲作用,有效吸收冲击能和提高支护强度,另一方面可提供较大的变形空间,为冲击载荷的耗散提供了载体。根据大量实验和现场实践发现,对应于实际工程中围岩体抗压强度为 40 MPa,采取普通支护(如锚杆、锚注支护和 U 型钢支护)后围岩体支护强度可提高到 60~80 MPa 左右,与吸能支护相比也较低,也证明了吸能支护应用于实际工程的有效性。

3 巷道冲击破坏数值模拟

利用 FLAC^{3D} 计算软件,建立三维计算模型,模型尺寸为 24 m×17 m×25 m,巷道尺寸为 4 m×3 m×25 m,模拟巷道距离地面深度为 1000 m。计算中,采用弹塑性模型,将冲击波作为离散的动态冲击载荷施加在模型内部节点上,冲击波作用位置距离顶面 5 m 模型中心处。在顶板上方自巷道顶开始垂直方向共设置 10 个监测点,间距为 0.3 m,在左边帮和右边帮两侧水平方向上分别设置 5 个监测点,间距为 0.5 m,在底板处自巷道底开始垂直方向共设置 5 个监测点,监测点间距分别为 0.5 m。计算模型^[14-15]平面几何尺寸及监测点布置如图 7 所示,施加冲击载荷速度时程曲线如图 8 所示。

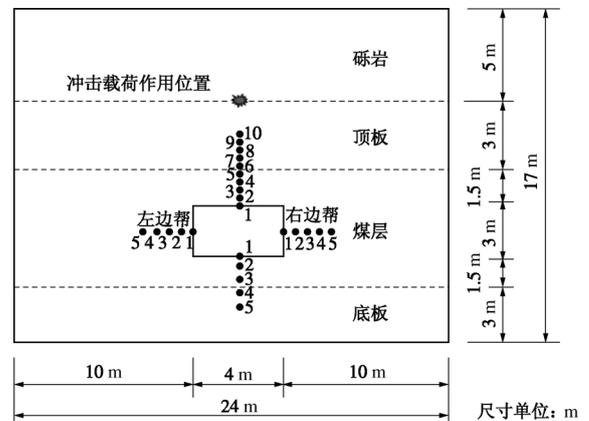


图7 模型平面几何尺寸及监测点分布图

Fig. 7 Geometrical sizes of model and distribution of monitoring points

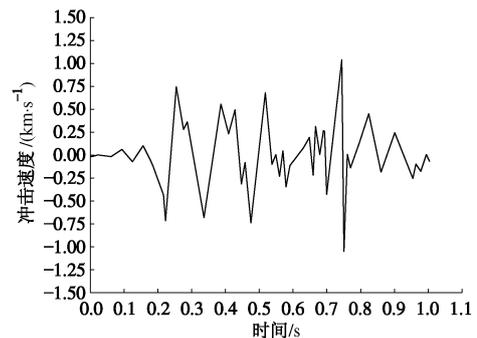


图8 冲击波速度时程曲线

Fig. 8 Velocity-time curve for impact waves

监测点截面选择模型中心截面,监测时间取 2.0 s,对监测点作用力和位移进行全程监测,裸巷和吸能支护条件下监测点结果如图 9~12 所示。图 9 表示裸巷时剪切应变率变化情况,在 $t=0.9$ s 前,剪切应变率出现了较明显的跳跃,在冲击载荷的反复作用下,当 $t=0.9$ s 时,顶板剪切应变率出现大的跳跃,并且剪切应变值迅速降低,说明冲击载荷对裸巷变形有很大的影响。图 10, 11 分别表示裸巷时左边帮监测点作用力和右边帮监测点位移分布情况。左边帮的监测点垂直

作用力最大约为 250 kN, 开始阶段作用力波动较小, $t=0.5$ s 开始作用力波动加剧, 说明开始时无冲击载荷缓冲作用。右边帮监测点位移表明, 右边帮向巷道内侧发生明显变形, 位移值最大为 0.16 m 左右。

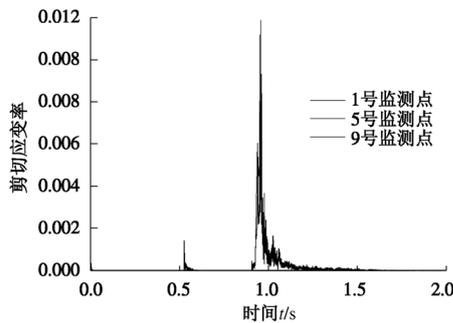


图 9 顶板监测点剪切应变率分布(裸巷)

Fig. 9 Distribution of shear strain rate at roof monitoring points (nude alley)

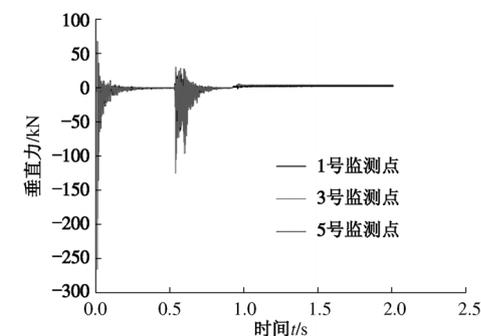


图 10 左边帮监测点垂直力分布(裸巷)

Fig. 10 Distribution of vertical force at left monitoring points (nude alley)

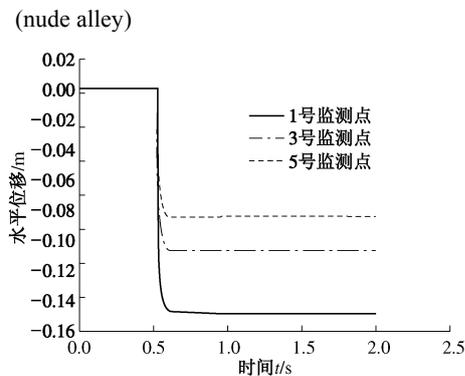


图 11 右边帮监测点水平位移分布(裸巷)

Fig. 11 Distribution of horizontal displacement at right monitoring points (nude alley)

图 12 表示顶板剪切应变率变化情况, 当 $t=0.4$ s 时, 顶板剪切应变率出现大的跳跃, 并且剪切应变值垂直上升后立即降低, 曲线斜率比裸巷时表现为更平缓, 说明吸能支护首先起到了缓冲作用, 对于减弱冲击载荷作用是明显的。图 13 和图 14 分别表示吸能支护条件下左边帮监测点作用力和右边帮监测点位移分布情况。左边帮的监测点垂直作用力最大为 250 kN 左右, 开始阶段作用力波动较大, $t=0.5$ s 时作用力波动反而明显减小, 与裸巷计算结果不同。右边帮监测点

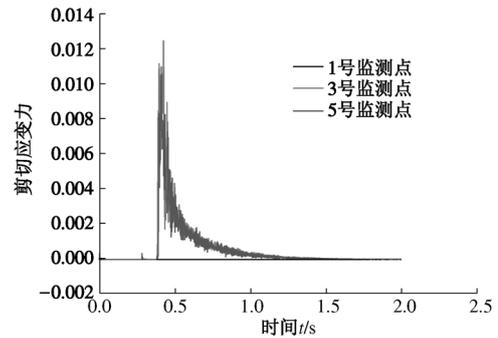


图 12 顶板监测点剪切应变率分布(吸能支护)

Fig. 12 Distribution of shear strain rate at roof monitoring points (energy absorbing support)

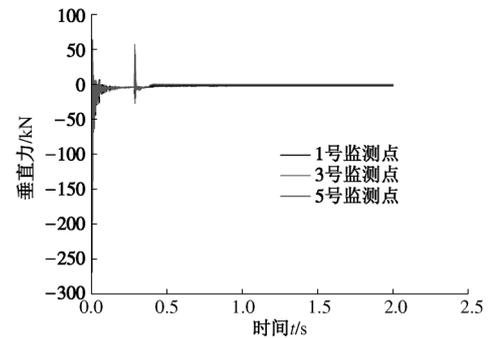


图 13 左边帮监测点垂直力分布(吸能支护)

Fig. 13 Distribution of vertical force at left monitoring points (energy absorbing support)

位移说明, 右边帮同样向巷道内侧发生变形, 位移值最大为 0.022 m 左右, 与裸巷计算结果相比明显减低。作用力和位移监测结果都表明, 采用吸能支护后, 吸能材料首先起到了较好的缓冲作用, 使得后期冲击作用明显减弱, 巷道变形和破坏程度也明显降低, 吸能支护应用到冲击地压巷道可起到良好的支护效果。

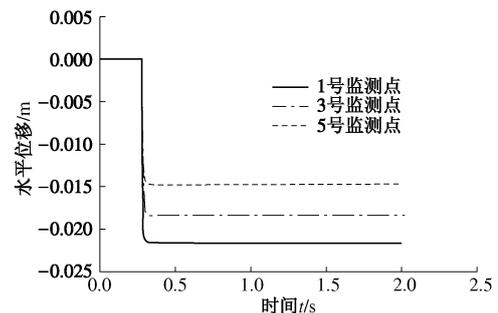


图 14 右边帮监测点水平位移分布(吸能支护)

Fig. 14 Distribution of horizontal displacement at right monitoring points (energy absorbing support)

4 结 论

通过对裸巷和吸能支护巷道冲击破坏规律的相似试验和数值模拟研究, 得到以下主要结论:

(1) 无支护巷道冲击破坏严重, 在巷道顶板和两帮壁面均出现裂缝扩展和贯通, 甚至出现抛出物冲入

巷道和塌落现象。

(2) 刚柔吸能支护后, 冲击次数和破坏程度均有所降低, 说明此支护具有缓冲和吸收冲击能作用, 表现为巷道顶板和两帮壁面发生向巷道内部变形, 同时有局部壁面出现裂缝, 但巷道整体性完好。

(3) 数值计算监测结果说明, 采用吸能支护后, 吸能材料首先起到了较好的缓冲作用, 使得后期冲击作用减弱, 巷道变形和破坏程度也明显降低, 说明吸能支护应用到冲击地压巷道可起到较好的支护效果。

参考文献:

- [1] 李鸿昌. 矿山压力的相似模拟试验[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1988. (LI Hong-chang. Similar simulation experiment on mine ground pressure[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1988. (in Chinese))
- [2] 窦林名, 何学秋. 冲击矿压防治理论与技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001. (DOU Lin-ming, HE Xue-qiu. Theory and technology of rock burst prevention[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2001. (in Chinese))
- [3] 姜福兴, 王同旭, 潘立友, 等. 矿山压力与岩层控制[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004. (JIANG Fu-xing, WANG Tong-xu, PAN Li-you, et al. Mine ground pressure and rockstrata control[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2004. (in Chinese))
- [4] 宋振骥, 蒋金泉. 煤矿岩层控制的研究重点与方向[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, **15**(2): 128 - 134. (SONG Zhen-qi, JIANG Jin-quan. The current research situation and developing orientation of strata control in coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, **15**(2): 128 - 134. (in Chinese))
- [5] VARDOULAKIS I. Rock bursting as a surface instability phenomenon[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1984, **21**(3): 137 - 144.
- [6] BURGERT W, LIPPMAN M. Models of translatory rock bursting in coal[J]. Int J Rock Mech Sci & Geomech, Abstr, 1981, **18**: 285 - 294.
- [7] 潘一山, 张永利, 徐颖, 等. 矿井冲击地压模拟试验研究及应用[J]. 煤炭学报, 1998, **23**(6): 590 - 595. (PAN Yi-shan, ZHANG Yong-li, XU Ying, et al. Rock burst simulation test and its application[J]. Journal of China Coal Society, 1998, **23**(6): 590 - 595. (in Chinese))
- [8] 李长洪, 张吉良, 蔡美峰, 等. 煤矿冲击性灾害类型实验研究[J]. 北京科技大学学报, 2009, **31**(1): 1 - 9. (LI Chang-hong, ZHANG Ji-liang, CAI Mei-feng, et al. Simulating test research of impacting disasters in coal mines[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, **31**(1): 1 - 9. (in Chinese))
- [9] 张晓春, 杨挺青, 缪协兴. 冲击矿压模拟试验研究[J]. 岩土工程学报, 1999, **21**(1): 66 - 70. (ZHANG Xiao-chun, YANG Ting-qing, MIAO Xie-xing. The simulation test of rockburst in coal mines[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(1): 66 - 70. (in Chinese))
- [10] 窦林名, 陆莱平, 牟宗龙, 等. 冲击矿压的强度弱化减冲理论及其应用[J]. 煤炭学报, 2005, **30**(6): 690 - 694. (DOU Lin-ming, LU Cai-ping, MU Zong-long, et al. Intensity weakening theory for rockburst and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2005, **30**(6): 690 - 694. (in Chinese))
- [11] 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 Ming-shi, DOU Lin-ming, 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. (in Chinese))
- [12] 何满潮, 齐干, 程骋, 等. 深部复合顶板煤巷变形破坏机制及耦合支护设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(5): 987 - 993. (HE Man-chao, QI Gan, CHENG Cheng, et al. Deformation and damage mechanisms and coupling support design in deep coal roadway with compound roof[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(5): 987 - 993. (in Chinese))
- [13] 冯学武, 张忠温, 曹荣平, 等. 深部煤巷刚柔二次耦合支护围岩控制技术[J]. 矿山压力与顶板管理, 2001(4): 18 - 21. (FENG Xue-wu, ZHANG Zhong-wen, CAO Rong-ping, et al. Surrounding rock controlling technique of rigid-yielding secondary coupling supporting in deep coal gate[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2001(4): 18 - 21. (in Chinese))
- [14] 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 Ming-shi, DOU Lin-ming, YAN Ru-ling, et al. Prevention mechanism of roadway supported by bolt-mesh subjected to rock burst and degree calculation[J]. Journal of Mining & safety Engineering, 2009, **26**(4): 402 - 406. (in Chinese))
- [15] 孙晓明, 何满潮. 深部开采软岩巷道耦合支护数值模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2005, **34**(2): 166 - 169. (SUN Xiao-ming, HE Man-chao. Numerical simulation research on coupling support theory of roadway within soft rock at depth[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2005, **34**(2): 166 - 169. (in Chinese))