

文章编号: 1001-4888(2012)03-0311-08

煤岩巷道冲击破坏过程相似模拟试验研究^{*}

吕祥锋^{1,2}, 王振伟³, 潘一山¹

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190;
3. 中国煤炭科工集团沈阳研究院, 辽宁 抚顺 113122)

摘要: 采用相似材料模拟试验研究方法, 利用单轴加载系统和数字散斑光测技术, 根据相似材料配比制备脆性材料, 对标准试块和三维巷道模型进行了相似试验研究。对相似模拟试验结果分析可知, 实验室制备脆性材料模拟冲击地压巷道破坏过程是可行的, 冲击破坏特征较明显; 散斑计算结果说明, 试块位移和应变变化与裂缝出现、扩展和贯通具有一致性, 且竖向裂缝开展数量多、速度快; 相似模拟试验结果也表明巷道顶板受冲击作用和下沉位移较大, 两边帮向巷道内部弯曲变形也较大, 甚至出现煤岩抛出和巷道垮塌。本试验也为进一步揭示煤岩巷道冲击破坏规律提供了新的途径。

关键词: 冲击地压; 煤岩巷道; 破坏过程; 相似试验

中图分类号: TD324 **文献标识码:** A

0 引言

冲击地压是煤矿生产中的主要动力灾害之一, 它是煤岩巷道或工作面围岩在高应力作用下积聚的弹性能超过煤岩体强度后, 发生的能量瞬时释放而产生的一种动力破坏现象^[1-3]。同时, 伴有一定的响声, 大量抛出物冲入巷道, 常常造成煤岩巷道破坏, 给煤矿安全生产带来严重的威胁^[4-7]。然而, 冲击地压现场研究受到多方面的影响, 甚至存在很多局限性。因此, 在实验室再现冲击地压破坏过程, 研究煤岩巷道冲击破坏具有一定的理论意义和工程价值。

相似模拟试验研究在冲击地压研究中具有重要地位, 是研究冲击破坏发生机理和破坏位置及再现冲击破坏过程的重要手段^[8-9]。目前冲击地压相似材料模拟试验中存在着许多问题有待于进一步研究, 主要体现在: (1) 冲击地压发生机理还不够完全清晰; (2) 模拟冲击地压发生过程的材料配比需要进一步完善。以上方面的研究已成为冲击地压研究中的热点, 本文的研究也旨在以上两个方面做出突破。

采用相似材料模拟试验研究方法, 配制适合模拟冲击地压的脆性材料, 利用单轴加载系统和数字散斑光测技术, 首先对标准试块进行单轴压缩破坏研究, 揭示煤岩冲击破坏机理, 寻求合理的材料强度; 进而利用合理材料强度模拟矩形巷道冲击破坏过程, 研究巷道冲击破坏应力和位移变化, 进一步探讨煤岩巷道冲击破坏规律, 为更好的揭示冲击地压发生机理和破坏过程提供新的途径。

1 相似材料试验

1.1 相似模拟理论

原型和模型的力学物理参数: 抗压强度分别用 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

^{*} 收稿日期: 2011-06-21; 修订日期: 2011-10-24

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973 计划)项目(2010CB226803); 国家自然科学基金项目(50774046)

通讯作者: 吕祥锋(1982-), 男, 博士后, 主要从事矿山动力灾害发生理论及试验研究。E-mail: lvxiangfeng2006@126.com

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^[9]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 相似模拟材料及配比

冲击地压相似模拟试验中^[9-10],主要骨料材料包括砂、石膏,制备相似材料的方法为:将一定量的松香溶于酒精,再加入到按照一定比例配制的砂、石膏、水混合物中,1[#]、2[#]和3[#]试样材料的比例为砂:水泥:石膏:水:松香:酒精=60:9:12:6:0.9:1,50:10:15:5:0.8:1和40:11:17:4:0.7:1。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 $\sigma_c = 0.17\text{MPa}$ 、 0.85MPa 和 1.3MPa ,试验中比较三种材料强度的冲击破坏情况,根据试验结果确定适宜于模拟巷道冲击的材料配比,进而模拟巷道冲击破坏。在模拟冲击地压过程中,考虑到相似材料会塌落到巷道内,沿巷道设置一层聚酯薄膜防止对传感器产生影响。同时聚酯薄膜刚度小、易变形,也可反映巷道变形情况。按照以上配比制作的试样如图1所示,冲击地压巷道相似模拟试验模型如图2所示。

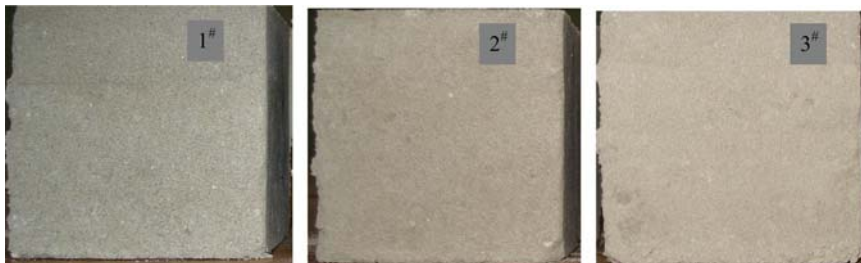


图1 试验试样

Fig. 1 The test samples



图2 相似材料模拟试验模型

Fig. 2 Simulation model for similar material

1.3 试验方法

1.3.1 单轴加载冲击破坏试验方法

本试验中采用单轴加载液压式压力试验机,数据由应力传感器和数据采集仪直接传至电脑,同时采用位移传感器记录试样位移变化情况,使用数据采集装置记录位移,传送至电脑储存数据。在试验中为

记录试样表面位移和应变随时间的动态变化情况,利用高速数据采集系统——数字散斑光测装置(digital speckle correlation method, DSCM)监测试样表面位移和应变动态变化过程^[11]。该系统位移测试精度为0.01像素,且系统计算速度快,每秒可完成多于200个散斑点的搜索。

试样尺寸为70mm×70mm×70mm,试验过程中,试验正面用于数字散斑观测,试验上方用于单轴加载,加载方式为均匀缓慢加载,加载速率为3mm/min。为了更好的研究数字散斑和变形破裂之间的对应关系,数字散斑和应力—位移曲线的采集速率相等,均为1次/s。同时为减小试样与压力机之间的端部效应,在试块和加载装置接触部位设置青壳纸。

1.3.2 巷道冲击破坏模拟试验方法

在液压式试验机加压装置上进行冲击地压相似材料试验,在加载过程中,装置四周水平位移约束,试验机载荷由压力传感器接到记录仪的Y坐标上,通过位移传感器,将位移信号接入记录仪的X坐标。通过应力和位移传感器就可以把加载过程中的应力 σ 和位移 u 的关系曲线自动绘制出来。巷道应变测量采用自行研制的内卡式传感器,内卡式传感器放置在试验模型中心位置,以便测试数据更可靠。自行研制的内卡式传感器采用双悬臂梁电阻应变片全桥测量,该传感器精度高,线性重复性好,量程大,1号和2号通道(测量两帮)量程可达6mm左右,3号和4号通道(测量顶板)量程可达12mm左右。利用弹性好的钢片固定在传感器底座上,在钢片上分别贴好应变片,并使得钢片与巷道顶板及两帮紧密接触,这样使得巷道微小变形都能准确测量出来。应变的测量共4个通道,1号和2号通道分别测量为巷道上帮和下帮应变数据,3号和4号通道分别测量巷道顶板处应变数据,其中,3号通道测量巷道深度为14.5cm处应变数据,4号通道为深度为5.5cm处应变数据。模拟试验装置如图3和图4所示。



图3 相似模拟试验装置

Fig. 3 Similar simulation test device



图4 数据采集装置

Fig. 4 Data acquisition device

模拟试验过程中,采用非等压加载方式,在垂直方向加压,水平方向不加载荷,但位移全约束为零。为了实现平面应变条件,在模型材料与试验装置侧壁之间均放置聚脂薄膜,以减少相似材料和有机玻璃板之间的摩擦。

2 试验结果分析

2.1 基于数字散斑的冲击破坏试验研究

2.1.1 冲击变形特性分析

图5给出了试样冲击变形破坏后的形貌,从图中破坏结果可以看出,试样在压缩应力作用下产生较大的变形,且有明显的裂缝开展,主要表现为竖向裂缝发育比较良好,甚至产生贯通裂缝,对冲击地压发生具有很大的危险性。同时在图中还可以看出,试样底部出现裂缝和破坏,表明在试样底部产生了集中应力,致使试样在该部位出现破裂和垮落。

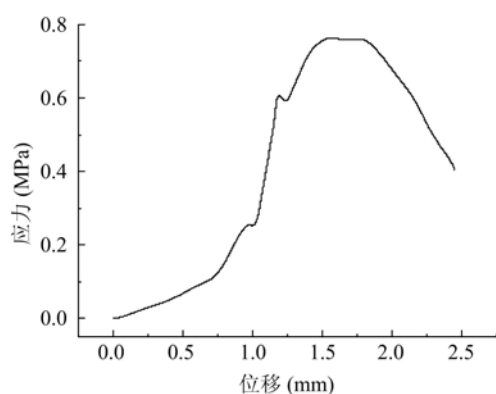
图6表示试样冲击过程应力—位移曲线。由图可以看出,加载开始阶段,位移增长速率较应力增长速率快,曲线较平缓,分析其原因主要为试样中的孔隙和裂缝逐渐被压密所致。随着应力的增加,曲线表现为明显的向上变弯趋势,应力增长速率增加,应力—位移曲线变现为线性增长特征,说明此阶段试样进入线弹性阶段,试样表面无明显的裂纹出现。同时试样体内积聚弹性能,弹性能的增加达到试样材



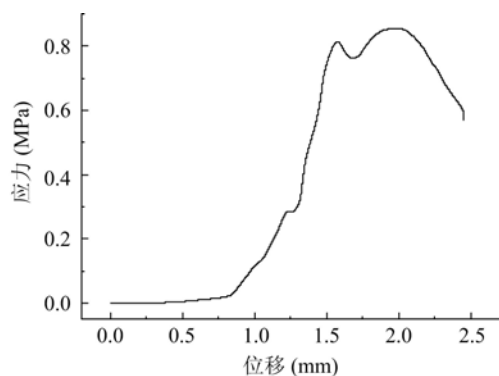
图 5 试样冲击破坏结果

Fig. 5 Sample results of impact damage

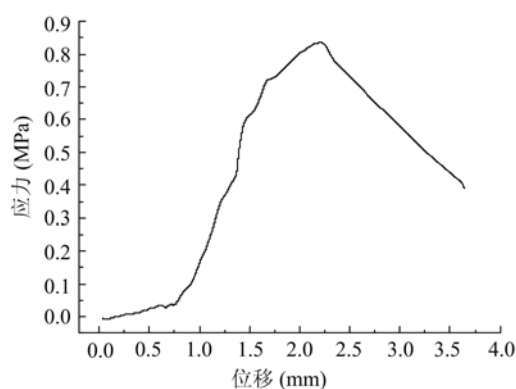
料的破坏强度,在试样体内局部产生较多的破坏,在应力—位移曲线中表现为应力的突跳^[12,13],此处称为“冲击点”。当应力继续增加时,冲击破坏后材料裂缝会继续被压密,同样会出现应力随着位移的增加而逐渐增大的过程,并且在增加的同时,弹性能继续增加,在试样内出现局部破坏的现象,在应力—位移曲线中表现为多处的“冲击点”。当应力再继续增加,原有裂缝已经处于压密状态,并开始出现新的裂缝开展,表明试样开始进入塑性变形阶段,在试样的表面出现大量的竖向裂纹扩展贯通和横向裂纹扩展。当试样达到极限强度峰值时,试样迅速破坏,应力随位移的增加而迅速降低,试样表面出现明显的竖向贯通裂缝和横向贯通裂纹,在试样顶部出现局部压酥破坏,停止加载。



(a) 1# 试样



(b) 2# 试样



(c) 3# 试样

图 6 试样冲击破坏应力—位移曲线

Fig. 6 Stress-displacement curve of sample by impact loads

2.1.2 冲击变形破坏的数字散斑分析

选择 4 个代表性时间点 ($t = 10\text{ms}$ 、 50ms 、 100ms 和 120ms) 表征试样表面的位移和应变变化过程。图 7 给出了 1# 试样在时间 $t = 10\text{ms}$ 、 50ms 、 100ms 和 120ms 时的水平应变数字散斑计算结果。随着应力的增加,散斑图中表现为明显的裂纹出现、发育、扩展和破坏的过程。在初始加载阶段,试样中存在大量的孔隙和裂缝,孔隙和裂隙逐渐被压密,在散斑图^[14]中位移和应变变化表现为较均匀分布。在弹性阶段,当试样中孔隙和裂隙被压实后,随着应力的继续增加,试样变形将继续增大。在散斑图中左上角位移和应变变化表现的较为集中,且应变数值也较大。随着应力的增加,试样进入塑性变形破坏阶段,顶部左上角应力集中区应力上升较

快,并且出现新的裂纹扩展和发育,竖向裂纹扩展明显,且很快形成贯通裂缝。在应变散斑计算图中,表现为 $t = 50\text{ms}$ 时散斑计算图中出现明显的竖向贯通裂缝和横向裂纹发展。当应力达到试样的极限强度后,试样破坏,在试样的底部边角处产生应力集中破坏,有局部塌落现象,由于散斑点从试样表面剥离脱

落,散斑图底部边角处应变值接近为零。在 $t=100\text{ms}$ 散斑图中应变变化表现得非常快,并且出现多条竖向裂纹扩展和横向裂纹发展。当应力达到峰值以后,试样应力迅速降低,试样表面出现局部的破坏,并脱离试样表面。散斑计算应变结果表明,在 $t=120\text{ms}$ 时出现局部破碎区并脱离试样表面,散斑观测结果与试样宏观破坏吻合较好。

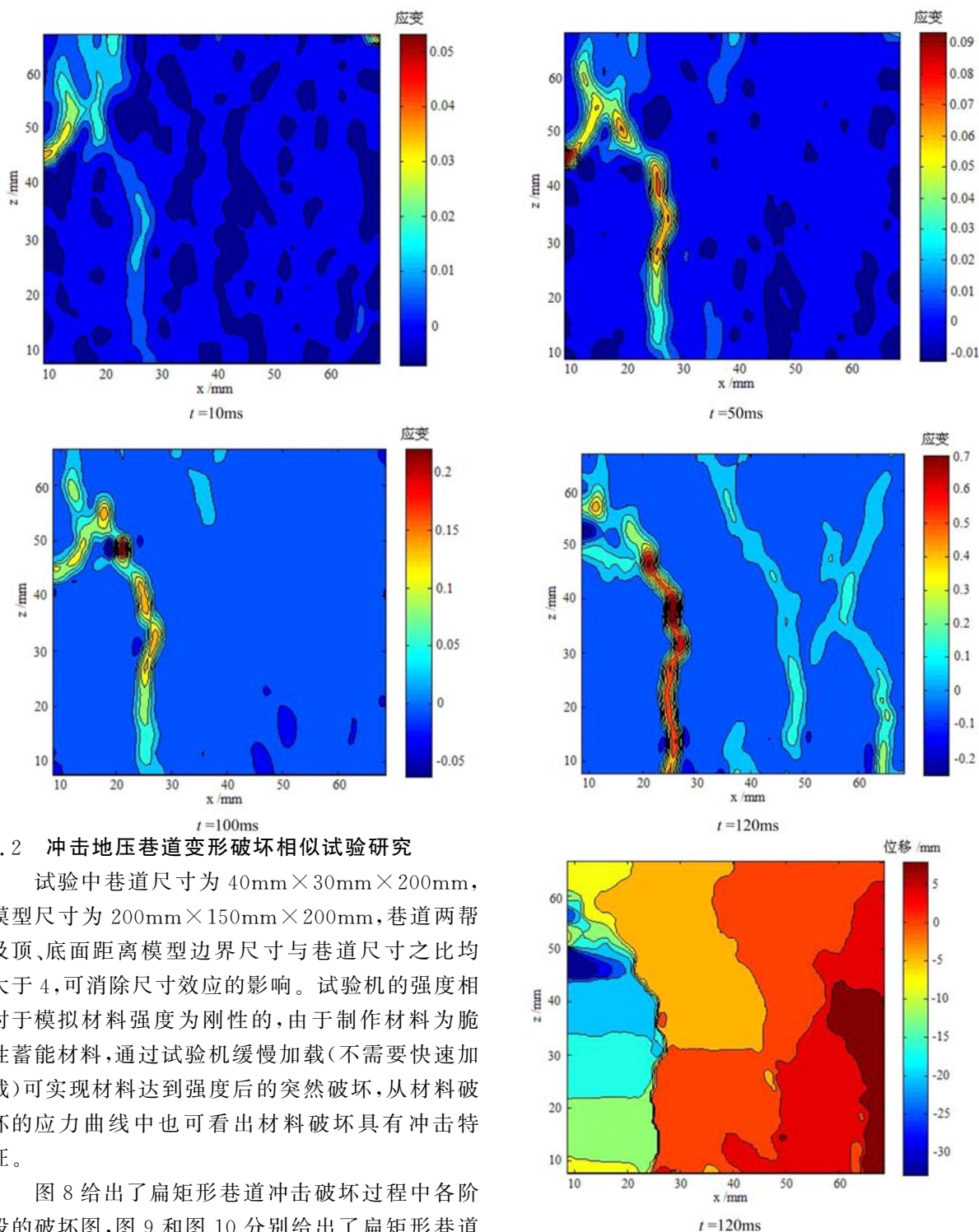


图7 1[#]试样水平应变和位移数字散斑计算结果

Fig.7 Horizontal strain and displacement digital speckle results for sample 1

2.2 冲击地压巷道变形破坏相似试验研究

试验中巷道尺寸为 $40\text{mm} \times 30\text{mm} \times 200\text{mm}$, 模型尺寸为 $200\text{mm} \times 150\text{mm} \times 200\text{mm}$, 巷道两帮及顶、底面距离模型边界尺寸与巷道尺寸之比均大于4,可消除尺寸效应的影响。试验机的强度相对于模拟材料强度为刚性的,由于制作材料为脆性蓄能材料,通过试验机缓慢加载(不需要快速加载)可实现材料达到强度后的突然破坏,从材料破坏的应力曲线中也可看出材料破坏具有冲击特征。

图8给出了扁矩形巷道冲击破坏过程中各阶段的破坏图,图9和图10分别给出了扁矩形巷道变形应变和应力—位移关系曲线。通过分析可知,在加载应力 $\sigma=0.4\text{MPa}$ 时,扁矩形巷道发生第一次冲击,在各关系曲线中表现为出现明显的跳

跃,也称为“冲击点”。当加载应力继续增加,随着弹性能的不断积聚,类似的冲击破坏现象会不断发生,并且冲击破坏程度也会越来越严重。在加载应力 $\sigma=0.57\text{MPa}$ 时,巷道发生第二次明显冲击,在应力一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,在巷道顶板和两帮均有明显的冲击破坏裂缝开展,并有较大的破碎块体(最大长度和宽度约 $18\text{mm}\times 4\text{mm}$)分别从顶板和两帮壁面剥离脱落,且巷道发生整体的倾斜变形,在加载应力继续增加的条件下,会有冲击继续发生。当加载应力 $\sigma=0.8\text{MPa}$ 时,巷道壁面上发生第三次冲击破坏,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 13mm ,同时内卡式传感器失效。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,且巷道整体下沉位移和倾斜位移严重。对巷道破坏过程进行分析可以得知,巷道变形破坏表现为:巷道顶板和两帮均出现片状碎片剥离和块状破碎体脱落现象,且产生明显变形;顶板处整体向下弯曲变形;两帮处均出现向巷道内侧发生大变形弯曲,两帮壁面开裂破碎较明显。相似材料模拟巷道的冲击破裂和片状碎块剥离脱落,反映巷道壁面裂纹出现、发育、扩展、贯通并形成层裂结构,随着加载应力的增加,薄层弯曲破坏进而造成冲击地压,与现场冲击现象具有一致性。也说明了利用相似材料模拟巷道冲击破坏过程,在实验室再现冲击地压发生和破坏规律是可行的。

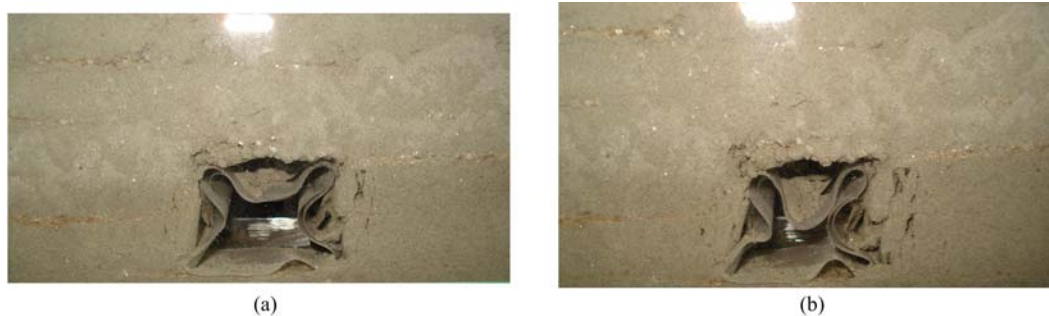


图 8 巷道变形破坏图

Fig. 8 The diagram of roadway damage

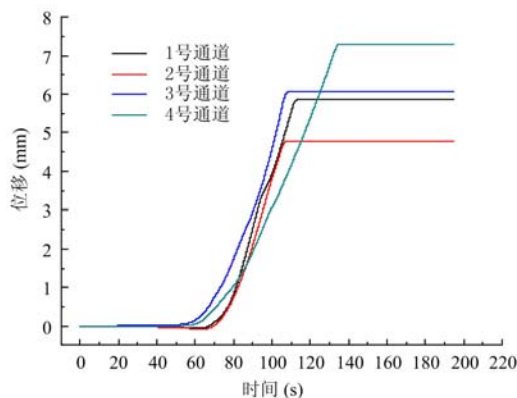


图 9 巷道变形应变曲线

Fig. 9 The strain curves of roadway deformation

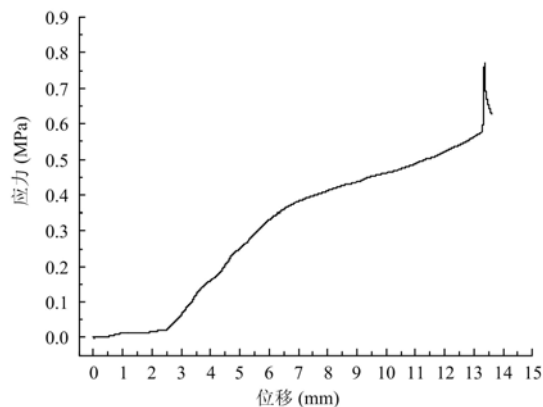


图 10 巷道冲击破坏应力一位移曲线

Fig. 10 Stress-displacement curve of roadway by impact loads

3 结论

利用相似材料模拟试验方法,对煤岩巷道冲击过程进行试验研究,得到以下主要结论:

(1) 利用单轴加载系统,借助数字散斑光侧手段,对标准试块进行压缩试验研究。试验结果表明,试块位移和应变变化与裂缝出现、扩展和贯通具有一致性,竖向裂缝开展数量多、速度快,实验室制备脆性材料模拟冲击地压巷道破坏过程是可行的。

(2) 采用相似材料模拟试验方法,对煤岩巷道冲击破坏过程进行研究,结果表明,巷道顶板整体向

下弯曲变形,两帮向巷道内侧发生大变形弯曲,出现片状碎片剥离和块状破碎体脱落现象,呈现了巷道壁面裂纹出现、发育、扩展、贯通,进而发生冲击地压的过程,也说明了利用相似材料模拟方法可再现冲击地压发生和破坏规律。

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 Hongchang. 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 Linming, HE Xueqiu. Theory and technology of rock burst prevention[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2001 (in Chinese))
- [3] 宋振骐, 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 Zhenqi, JIANG Jinquan. 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))
- [4] 李海波, 蒋会军, 赵坚 等. 动荷载作用下岩体工程安全的几个问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1887—1891 (LI Haibo, JIANG Huijun, ZHAO Jian, et al. Some problems about safety analysis of rock engineering under dynamic load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11):1887—1891(in Chinese))
- [5] Linkov A M. Rockbursts and the instability of rock masses[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1996, 33(7):727—732.
- [6] Vardoulakis I. Rock bursting as a surface instability phenomenon[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1984, 21(3):137—144.
- [7] Burgert W, Lippman M. Models of translatory rock bursting in coal[J]. Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr., 1981, 18:285—294.
- [8] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16):2803—2813 (HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16):2803—2813(in Chinese))
- [9] 潘一山, 章梦涛, 王来贵 等. 地下硐室岩爆的相似材料模拟试验研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(4):49—56 (PAN Yishan, ZHANG Mengtao, WANG Laigui, et al. Study on Rockburst by Equivalent Material Simulation Tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(4):49—56(in Chinese))
- [10] 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 Xiaochun, YANG Tingqing, MIAO Xiexing. The simulation test of rockburst in coal mines [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(1):66—70(in Chinese))
- [11] 梁冰, 孙维吉, 杨冬鹏 等. 抛掷爆破对内排土场边坡稳定性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 28(4):710—715 (LIANG Bing, SUN Weiji, YANG Dongpeng, et al. Experimental study of influence of cast blasting on inner dump slope stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 28(4):710—715(in Chinese))
- [12] 徐学锋, 窦林名, 刘军 等. 煤矿巷道底板冲击矿压发生的原因及控制研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(6):1977—1981 (XU Xuefeng, DOU Linming, LIU Jun, et al. Research of reasons and controlling for floor burst in coal mine roadway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6):1977—1981(in Chinese))
- [13] 李长洪, 蔡美峰, 乔兰 等. 岩石全应力—应变曲线及其与岩爆关系[J]. 北京科技大学学报, 1999, 21(6):513—515 (LI Changhong, CAI Mei-feng, QIAO Lan, et al. Rock Complete Stress-strain Curve and Its Relationship to Rock Burst[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 1999, 21(6):513—515 (in Chinese))
- [14] 马少鹏, 金观昌, 潘一山. 白光 DSCM 方法用于岩石变形观测的研究[J]. 实验力学, 2002, 17(1):10—16 (MA Shaopeng, JIN Guanchang, PAN Yishan. Study on the White Light DSCM Method for Deformation Measurement of Rock Materials[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2002, 17(1):10—16(in Chinese))

Similar Simulation Experimental Study of Impact Failure Process of Coal Roadway

LV Xiang-feng^{1,2}, WANG Zhen-wei³, PAN Yi-shan¹

(1. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Shenyang Branch of China Coal Technology and Engineering Group, Fushun 113122, China)

Abstract: Similar simulation experimental study of a standard test block and a three-dimensional coal roadway model made of brittle materials by the similar material ratio was carried out based on uniaxial loading system and digital speckle pattern measurement technology. The impact failure process of coal roadway was discussed. Results show that similar simulation for the impact failure process of roadway model made of brittle material in laboratory is feasible, and the impact failure characteristics are evident. Speckle results show that the model displacement and strain variation are consistent with the emergence, expansion and transfixion of cracks, and a large number of vertical crack appears fast. Experimental results also indicate that the roadway roof subsides a large displacement due to the intense impact loading, and the both sides of roadway present a large internal deformation, even the coal and rock are thrown out and roadway is collapsed. This study also provides a new method for further revealing the impact failure of rockburst.

Keywords: rockburst; coal roadway; impact failure process; similar simulation test