

爆炸冲击载荷作用下吸能支护巷道变形规律研究

吕祥锋, 潘一山, 李忠华, 代树红

(辽宁工程技术大学力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 利用低能爆炸加载方式, 采用相似材料模拟试验方法, 借助数字散斑光测手段(DSCM), 研究高速冲击载荷作用下吸能支护巷道变形规律。试验结果表明, 巷道顶板首先出现微裂缝, 顶板向下位移约为 0.6 mm, 顶板岩层与煤层交界处无错动现象, 冲击波重复作用使得模型顶面出现贯通裂缝, 但巷道及周围岩体并无破坏, 说明吸能支护可吸收大量冲击能, 从而有效降低对巷道的冲击破坏。通过模拟试验结果可知, 采用吸能支护可大大降低巷道的破坏程度, 对于采矿工程安全生产具有实际意义, 同时为巷道支护提供一种新方法。

关键词: 爆炸载荷; 吸能支护; 巷道变形; 数字散斑相关法(DSCM); 相似模拟试验

中图分类号: TD353 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2011)08-1222-05

作者简介: 吕祥锋(1982-), 男, 河北邢台人, 博士研究生, 主要从事冲击地压试验研究。E-mail: lvxiangfeng2006@126.com。

Law of roadway deformation of energy absorbing support under explosive loading

LÜ Xiang-feng, PAN Yi-shan, LI Zhong-hua, DAI Shu-hong

(School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: Using the low-energy explosive loading and the digital speckle correlation method, the law of roadway deformation of energy absorbing supports is studied by similarity simulation experiments. The experimental results illustrate that cracks firstly appear in the roof under explosive loading, and transverse cracks appear at the top of the model by repeated action of impact wave. Also, digital speckle pattern observations show that the roof has sinking deformation about 0.6 mm. But, there is no displacement between coal body and upper roadway, and the roadway and the surrounding rock have no damage. It is proved that the energy absorbing support can absorb large impact energy and reduce the roadway damage effectively. The simulated results show that the energy absorbing support can reduce the roadway destruction evidently. It is practical for safety mining engineering and also provides a new method for roadway support.

Key words: explosive loading; energy absorbing support; roadway deformation; digital speckle correlation method; similarity simulation experiment

0 引言

中国煤矿资源开采逐渐向深部发展, 冲击地压发生的频次和危害程度也急剧增加, 其释放冲击能作用于巷道, 造成巷道围岩体破裂^[1], 甚至整体破坏和坍塌^[2], 给煤矿工程安全生产和人民生命安全带来严重的威胁。因此, 冲击地压巷道稳定支护成为我国亟需解决的关键问题之一。近些年来, 中国力学科技工作者对巷道支护理论和支护方法等方面开展了许多研究工作。在理论方面, 高明仕等^[3-4]建立了冲击矿压巷道围岩稳定性控制的强弱结构力学模型, 得到了巷道支护体发生冲击震动破坏的应力判据和能量准则, 并对锚网支护吸能防冲能力进行了计算, 研究表明冲击载荷作用下巷道围岩发生较大变形, 但锚网支护体结构能保持一定的结构稳定性; 何满潮等^[5-6]对软岩巷道

破坏变形机制及耦合支护力学原理进行了分析, 提出锚网索耦合支护方法。在支护方法方面, 近些年来主要形成的支护方法有: 锚杆、锚网、锚网锚杆联合支护、锚网索、钢拱架和锚网喷以及综采工作面液压支架等支护方式。冯学武等^[7]分析了深部巷道围岩变形特点和刚柔二次支护理论, 并确定了锚杆与锚索支护参数; 华心祝等^[8]对沿空留巷锚网索支护技术进行应用研究, 取得较好的支护效果; 陈士海等^[9]对软岩巷道锚索带网支护技术进行了研究, 证明该技术在软岩巷道支护中的可行性。以上对于巷道支护理论和方法的研究没有考虑在高速冲击载荷作用下吸能支护结构

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

收稿日期: 2010-06-09

的应用分析, 对其在冲击载荷作用下巷道变形破坏研究更少, 吸能支护巷道破坏机理并不完全清晰。因此, 研究高速冲击载荷作用下吸能支护巷道变形规律, 对于煤矿安全开采和冲击地压巷道安全支护具有指导意义。

基于冲击波理论, 利用低能爆炸加载方式, 采用相似材料模拟试验方法^[10-14], 借助数字散斑光测手段, 对冲击载荷作用下吸能支护巷道变形规律进行研究。试验结果对深部煤矿安全开采提供了有力依据, 同时为冲击地压巷道支护提供了一种新方法。

1 相似模拟试验

1.1 相似模型

(1) 几何相似

根据研究的实际情况和试验条件, 模拟巷道试验^[15-17]模型选择比尺为 1 : 30, 即将原模型缩小为 1/30, 各基本物理量满足以下比例关系:

$$\alpha_L = L_H / L_M = 30 \quad , \quad (1)$$

式中, L_H 和 L_M 分别代表原型和模型长度 (m), α_L 为相似长度比尺。

(2) 动力相似

考虑重力作用影响, 要求重力相似。在几何相似条件下对重力相似, 还要求 γ_H 和 γ_M 的比尺 α_γ 为常数, 则

$$\alpha_\gamma = \gamma_H / \gamma_M \quad , \quad (2)$$

$$\alpha_\sigma = \sigma_H / \sigma_M = (\gamma_H / \gamma_M) \alpha_L \quad , \quad (3)$$

式中, γ_H 和 γ_M 分别为原型和模型的岩层视密度 (g/m^3), σ_H 和 σ_M 分别为原型和模型的岩层单向抗压强度 (MPa), α_γ 为视密度比尺, α_σ 为抗压强度比尺。

设 P_H , V_H 和 P_M , V_M 分别表示原型和模型对应部分的重力和体积, 可知

$$P_H / P_M = \frac{\gamma_H}{\gamma_M} \frac{V_H}{V_M} = \frac{\gamma_H}{\gamma_M} \alpha_L^3 \quad . \quad (4)$$

模型配比满足式 (1) ~ (4), 即可满足动力相似条件。

根据以上各参数比尺关系, 可得模型上相应的参数量:

$$L_M = (1/30)L_H \quad , \quad (5)$$

$$\sigma_M = (\gamma_M / \gamma_H \alpha_L) \sigma_H = 0.02 \sigma_H \quad . \quad (6)$$

(3) 相似材料配比

相似材料模型选取硅砂、碳酸钙和石膏按照规定的抗压强度配比作为骨料, 加以适量配有缓凝剂的蒸馏水溶液, 搅拌均匀后, 按照模型尺寸进行填装建模, 每次装填厚度一般为 5~20 mm。相似材料视密度为 $1.5 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。硅砂粒径限定在 50~100 目, 层间采用云母粉分层, 相似材料配比如表 1 所示。利用泡沫铝 (Al 基 CCAF) 作为吸能支护材料, 抗压强度为 0.1 MPa, 刚性支护材料选择抗压强度为 2.5 MPa 的钢片, 形成吸能支护结构体。

(4) 相似模拟模型

相似模拟模型尺寸为 $1500 \text{ mm} \times 1100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$, 巷道尺寸为 $\phi 150 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$, 试验中炮孔与巷道距离为 200 mm。模型四周全约束, 正面为自由面, 背面为水平约束。模型制备中采用槽钢架结构, 两侧面封闭, 模型前、后两面采用宽 200 mm 的可拆卸槽钢护板对模型进行定型、加固。

吸能材料工作原理通过三阶段完成: ①第一阶段, 主要靠基体材料的弹性变形来吸收弹性能; ②第二阶段, 基体材料发生屈服变形, 主要依靠多孔金属材料较大孔隙度, 具有良好压缩变形空间, 从而吸收大部分能量; ③第三阶段, 基体材料破坏而致密, 主要是碎片的破坏消耗能量以及碎片间空隙的压缩密实吸收能量, 另外能量的吸收也包括碎片在压缩密实过程中的摩擦力消耗。

吸能支护作用机理体现在吸能材料与围岩体、刚性支护之间的耦合关系。吸能材料吸收大量冲击地压能, 有效降低冲击载荷, 与围岩体存在耦合作用; 吸能材料属于弱刚度材料, 起到缓冲作用, 与刚性支护存在耦合作用; 吸能材料置于围岩和刚性支护之间形成吸能支护体系, 与围岩和刚性支护两者之间存在耦

表 1 相似材料强度配比

Table1 Intensity proportion of similar materials

岩层名称 (由上至下)	抗压强度/MPa	岩石厚度		配比号	质量/g				
		L_H/m	L_M/mm		硅砂	碳酸钙	石膏	层总质量	水
泥岩	0.100	2.60	300	755	146672	10477	10476	167600	18621
含砾粗砂岩	0.163	4.70	300	637	144643	7232	16875	168750	18746
中粒砂岩	0.212	1.60	200	437	90000	6750	15750	112500	12497
细砂岩	0.234	3.71	200	437	90427	6750	15825	112500	12497
煤	0.076	0.20	150	773	78750	7875	3375	90000	9998
细砂岩	0.219	1.80	100	437	45000	3375	7875	56250	6249
粉砂岩	0.104	5.60	50	755	24609	1758	1757	28125	3124

合关系。吸能支护材料应用到现场中,可建立围岩-吸能材料-钢支架刚柔耦合支护体,吸能材料可起到有效缓冲和吸能的作用,对降低煤矿动力灾害具有实际意义,且切实可行。

模型四周全约束,利用岩层自重模拟初试地应力状态。相似材料模型如图1所示。数字散斑法实验^[17]装置主要包括图像记录设备、散斑场、高分辨率 CCD 摄像机、图像记录计算机、图像处理器和 DSCM 计算软件等。散斑观测示意如图2所示。

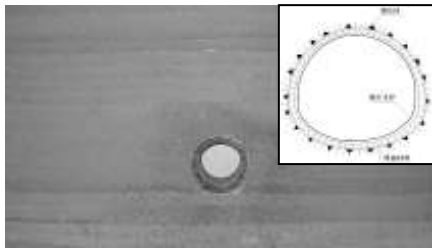


图1 相似材料模型简图

Fig. 1 Model of similar materials

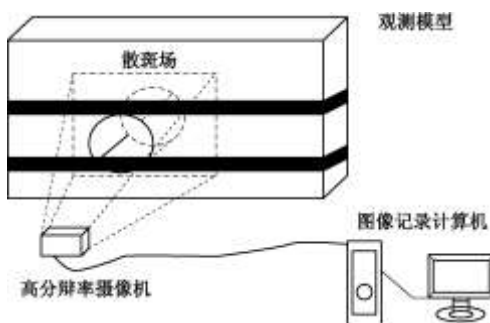


图2 散斑观测示意图

Fig. 2 Sketch map of DSCM

1.2 爆炸参数确定

爆破相似模拟试验需要满足动力相似,假设爆炸应力场和变形场只受爆炸能量的影响,原型和模型在几何、时间和强度上相似,即

$$\alpha'_L = R_M / R_H, \quad (7)$$

$$\alpha_T = t_M / t_H, \quad (8)$$

$$\sigma'_H = \sigma'_M, \quad (9)$$

式中, R_H , R_M , t_H , t_M 和 σ'_H , σ'_M 分别为原型和模型爆炸中的长度、时间和应力。

相似试验中,选择比尺为 1:30,用能量相似定律确定药量,即

$$\alpha'_L = \frac{R_M}{R_H} = \sqrt[3]{\frac{W_M}{W_H}} = \sqrt[3]{\frac{Q_M}{Q_H}}, \quad (10)$$

式中, W_H , W_M 和 Q_H , Q_M 分别为原型和模型爆炸用药量和炸药能量。

试验过程中,选用硝铵炸药作为试验用药,并采用特制雷管为起爆用药。模型爆破区域为 400 mm×

400 mm×200 mm,冲击地压释放能量约为 2.0 MJ,根据能量相似条件,采用衡量炸药对外做功的爆力值代替炸药能量进行相似计算,实际计算模型起爆硝铵炸药总药量为 6.0 g。

2 试验结果分析

由图3,4可知,在冲击载荷作用下,巷道顶板首先出现微裂缝^[18],顶板岩层与煤层交界处无错动现象。在冲击波重复作用下,模型顶面出现贯通裂缝,但巷道及周围岩体并无破坏^[19-20],由此说明吸能支护吸收了大量冲击能,可有效降低对巷道的破坏程度。



图3 模型顶部贯通裂缝图

Fig. 3 Transverse crack at top surface

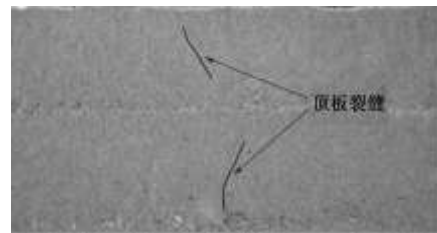
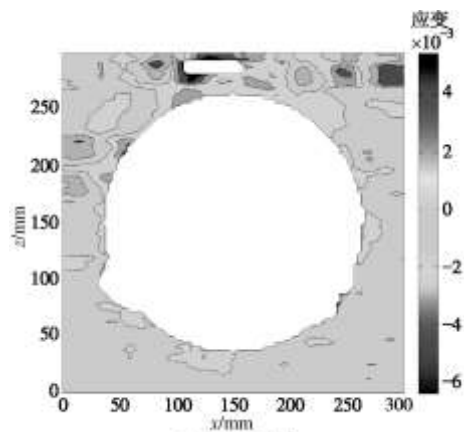


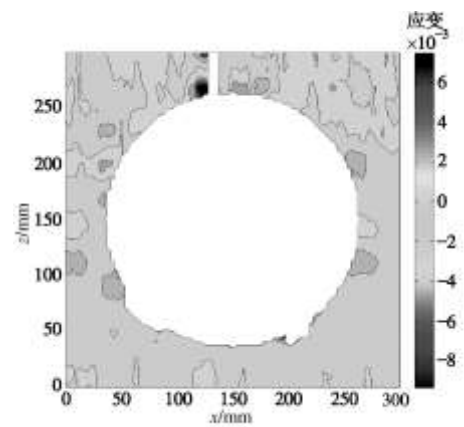
图4 巷道顶板裂缝

Fig. 4 Cracks in tunnel roof

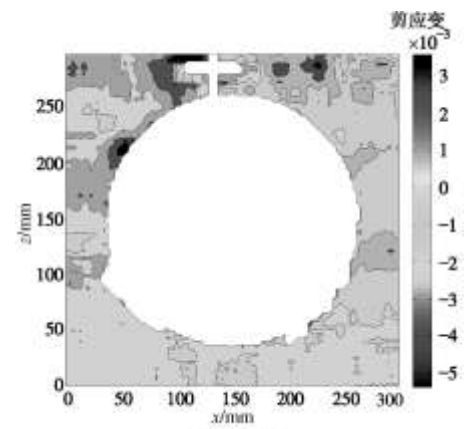
数字散斑场各观测点云图如图5所示,由各观测点云图可知,在高速冲击载荷作用下,巷道顶板岩层首先发生裂缝,由于设置吸能支护,使得冲击波被吸能材料大量吸收,冲击波向巷道上方传播加快,使得模型顶面出现贯通裂缝,但对巷道没有任何的影响。由于吸能材料吸收大量冲击能,作用于巷道的冲击能大大减小,且吸能支护使得冲击波作用于巷道更均匀。由数字散斑应变和位移云图可知,高速冲击载荷作用下,巷道变形和下沉位移更趋于均匀,这样更有利于巷道的安全使用。



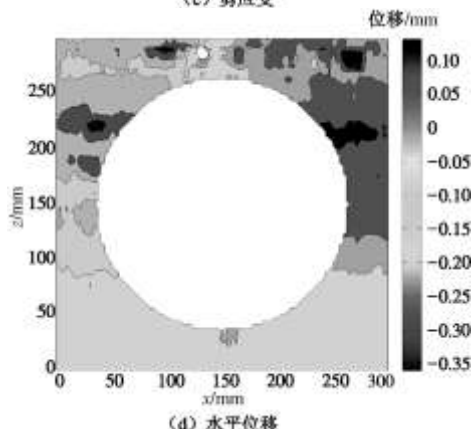
(a) 水平应变



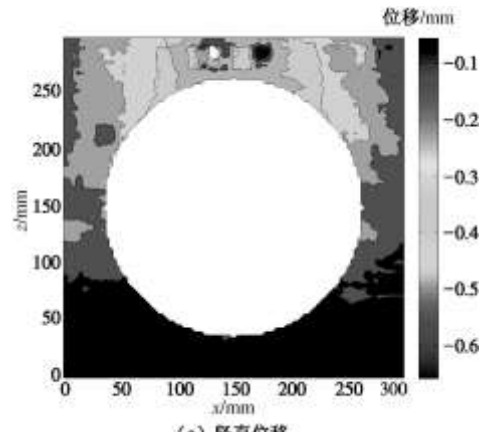
(b) 竖直应变



(c) 剪应变



(d) 水平位移



(e) 竖直位移

图5 散斑场观测点计算云图

Fig. 5 Nephogram of roadway speckle field

引爆后巷道顶板裂缝发展和数字散斑观测结果可知, 高速冲击载荷冲击波向下传播过程中, 大量冲击能被吸能支护吸收, 冲击波重复作用使得顶板产生微裂缝, 顶板向下位移约为 0.6 mm, 但裂缝发育较缓慢, 巷道四周无破裂发展。同时冲击波大幅弱化并向上传播, 在重复拉剪作用下模型顶面出现贯通裂缝, 但对于整体围岩并没有产生破坏^[14-15]。可知吸能支护起到大幅降低冲击载荷, 有效缓冲和吸收冲击能作用, 提高巷道安全程度, 对于采矿工程具有实际意义, 也为巷道支护提供了一种新方法。

3 结 论

(1) 在高速冲击载荷作用下, 巷道顶板首先出现微裂缝, 顶板向下位移约为 0.6 mm, 顶板岩层与煤层交界处无错动现象。

(2) 在冲击波重复作用下, 模型顶面出现贯通裂缝, 但巷道顶板及周围岩体并无破坏, 且巷道四周围岩体受力更均匀, 说明吸能支护可吸收大量冲击能, 有效降低对巷道的破坏程度。

(3) 相似模拟试验结果可知, 采用吸能支护可大大降低冲击载荷对巷道的破坏程度, 对于采矿工程安全生产具有实际意义, 同时也为冲击地压巷道支护提供了一种新方法。

参考文献:

- [1] 范天佑. 断裂动力学引论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990: 370 - 371. (FAN Tian-you. Introduction to fracture dynamic mechanics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1990: 370 - 371. (in Chinese))
- [2] 陈炎光, 陆士良. 中国煤矿巷道围岩控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1994. (CHEN Yan-guang, LU Shi-liang. The control of surrounding rocks roadway of coal mine in China[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1994. (in Chinese))

- [3] 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))
- [4] 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震等级初算[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))
- [5] 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))
- [6] 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))
- [7] 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))
- [8] 华心祝, 赵少华, 朱 昊, 等. 沿空留巷综合支护技术研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2225 - 2228. (HUA Xin-zhu, ZHAO Shao-hua, ZHU Hao, et al. Research on combined support technique of gob-side entry retaining[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(12): 2225 - 2228. (in Chinese))
- [9] 陈士海, 乔卫国, 孔德森. 大兴煤矿软岩巷道锚索带网支护技术应用研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(增刊): 902 - 904. (CHEN Shi-hai, QIAO Wei-guo, KONG De-sen. Research on bolt, anchor cable, steel strap and mesh combined support technique applying to daxing coal mine for soft-rock tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(S): 902 - 904. (in Chinese))
- [10] 蒋金宝, 林英松, 阮新芳, 等. 爆炸波对水泥试样损伤破坏的实验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(6): 922 - 926. (JIANG Jin-bao, LIN Ying-song, RUAN Xin-fang, et al. Experimental research on damage and fracture by exploding waves on surface of samples in deep water[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(6): 922 - 926. (in Chinese))
- [11] 张亮亮, 夏元友, 顾金才. 爆炸波作用下预应力锚索受力特征研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(7): 1099 - 1104. (ZHANG Liang-liang, XIA Yuan-you, GU Jin-cai. Stress characteristics of prestressed anchor cables under explosive waves[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(7): 1099 - 1104. (in Chinese))
- [12] 王明洋, 钱七虎. 爆炸应力波通过节理裂隙带的衰减规律[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(2): 42 - 46. (WANG Ming-yang, QIAN Qi-hu. Attenuation law of explosive wave propagation in cracks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(2): 42 - 46. (in Chinese))
- [13] 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))
- [14] 潘一山, 章梦涛, 王来贵. 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 Yi-shan, ZHANG Meng-tao, WANG Lai-gui. Study on rockburst by equivalent material simulation tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(4): 49 - 56. (in Chinese))
- [15] 范 新, 王明洋, 谭可可. 爆炸荷载作用下深部块体变形运动规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 1019 - 1025. (FAN Xin, WANG Ming-yang, TAN Ke-ke. Study on rule of block deformation and movement under explosion loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 1019 - 1025. (in Chinese))
- [16] 颜 峰, 姜福兴. 爆炸冲击载荷作用下岩石的损伤实验[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(3): 275 - 280. (YAN Feng, JIANG Fu-xing. Experiment on rock damage under blasting load[J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(3): 275 - 280. (in Chinese))
- [17] 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 Wei-ji, YANG Dong-peng, 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))
- [18] 胡柳青, 李夕兵, 龚声武. 冲击载荷作用下裂纹动态响应的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(3): 214 - 221. (HU Liu-qing, LI Xi-bing, GONG Sheng-wu. Simulation on dynamic

- response of crack subjected to impact loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2006, **26**(3): 214 - 221. (in Chinese))
- [19] 戴 俊, 钱七虎. 高地应力条件下的巷道崩落爆破参数[J]. 爆炸与冲击, 2007, **27**(3): 273 - 277. (DAI Jun, QIAN Qi-hu. Break blasting parameters for driving a roadway in rock with high residual stress[J]. Explosion and Shock Waves, 2007, **27**(3): 273 - 277. (in Chinese))
- [20] 王礼立. 爆炸与冲击载荷下结构和材料动态响应研究的新进展[J]. 爆炸与冲击, 2001, **21**(2): 81 - 88. (WANG Li-li. Progress in studies on dynamic response of structures and materials under explosive/ impact loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2001, **21**(2): 81 - 88. (in Chinese))