

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.03.006

不耦合装药对炸药能量利用率影响的实验研究*

岳中文¹, 胡晓冰¹, 陈志远¹, 魏格平², 魏正², 于蒙洲², 宋家旺²

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 内蒙古康宁爆破有限责任公司, 鄂尔多斯 017000)

摘要: 通过实验室实验以及数值模拟的方法, 对不同不耦合系数装药下炸药在混凝土模型中爆炸所产生的爆破漏斗进行对比分析。得到在相同装药量情况下, 不耦合系数分别为 1.0、1.4 和 1.8 时, 爆破振速的衰减速度随着不耦合系数的增大呈现先减小后增大的趋势, 爆破漏斗的体积随着不耦合系数的增大同样呈现先减小后增大的趋势。通过对爆破后粉碎区大小以及炸药爆炸所引起的爆破振动进行比较, 发现存在一个最佳不耦合系数使得炸药的能量能够更加充分的利用, 提高炸药爆炸时的能量利用率。

关键词: 不耦合装药; 能量利用率; 爆破振动; 爆破漏斗; 数值模拟

中图分类号: TD804 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)03-0034-06

Experimental Study of Effect of Uncoupled Charge on Energy Utilization Efficiency of Explosives

YUE Zhong-wen¹, HU Xiao-bing¹, CHEN Zhi-yuan¹, WEI Ge-ping²,
WEI Zheng², YU Meng-zhou², SONG Jia-wang²

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 2. Inner Mongolia Kangning Blasting Co., Ltd., Ordos 017000, China)

Abstract: The blasting craters generated by the explosion in the concrete model under different decoupling coefficients were compared by model experiments and numerical simulation methods. It was observed that the attenuation speed of the blasting vibration velocity decreased firstly and then increased with the increase in decoupling coefficient (1.0, 1.4 and 1.8) under the same charging amount. Similarly, the volume of the blasting crater also decreases firstly and then increases with the increase of the decoupling coefficient. It is found that there is an optimal decoupled charge so that the energy of the explosive can be more fully utilized and energy utilization efficiency of the explosive is improved.

Key words: uncoupled coefficient; energy utilization efficiency of explosives; blasting vibration; blasting funnel; numerical simulation

在煤矿井巷爆破以及露天矿山的爆破作业中, 如何提高炸药的能量利用率, 提高爆破效果, 降低爆破成本, 一直以来都是一个亟待解决的问题。随着

爆破技术理论在实际工程领域中的应用日益成熟, 许多专家学者通过理论研究、数值模拟以及实验手段寻找能够提高炸药能量利用率的方法。朱红兵等对轴向不耦合装药爆破炮孔内的爆轰产物运动及其相互作用过程进行了推导与分析, 解释了轴向不耦合装药的作用机理^[1]。瑞典的 Langefors 发现裂纹数目随着不耦合系数的增大而减少, 不耦合系数为 1.67 时爆破裂纹总长度和平均长度均达到最大值^[2]。钟明寿等研究了装药不耦合系数对爆炸地

收稿日期: 2020-04-15

作者简介: 岳中文(1975-), 男, 教授, 博士, 主要从事岩石动态断裂力学方面的教学与研究工作, (E-mail) zwyue75@cumtb.edu.cn。

通讯作者: 胡晓冰(1996-), 男, 硕士, 主要从事岩石动态断裂力学方面的研究, (E-mail) 1069014210@qq.com。

基金项目: 国家重点研发计划专项资助(2016YFC0600903)

震波能量的影响^[3]。姜鹏飞等采用动力学软件 ANSYS/LS-DYNA 进行了数值模拟研究,得到了不耦合装药爆炸时岩石应力、振动速度的衰减规律以及不与耦合系数、间隙介质之间的关系^[4],分析了不耦合效应对爆炸地震波能量的影响。杨仁树等进行了切缝药包不耦合装药爆破爆生裂纹动态断裂效应的实验研究^[5],同样得出在不耦合系数为 1.67 时切缝药包的爆破效果最理想。王伟等通过理论计算与推导得出,不耦合装药爆破降低了孔壁处岩石的冲击波初始压力,但是可以增加孔壁后岩石的冲击波压力^[6],合理的不耦合系数可以使岩石不形成粉碎区,大幅度减低能量的耗散。岳中文等通过焦散线方法以及数值模拟的方法,得出在不耦合装药条件下,爆生裂纹的扩展距离更长,扩展速度与应力强度因子更大,不耦合装药结构使得爆轰波对炮孔壁的冲击作用降低,爆生气体的准静态作用加强^[7]。龚玖等进行了空气以及水不耦合装药对爆破块度的影响分析,得到当不耦合系数为 1.67 时,空气和水耦合介质下爆破块度和大块率都为最小值^[8]。李汉坤进行了不同不耦合系数及孔间距对煤层爆生裂隙扩展影响的实验研究^[9]。

综上所述,关于不耦合装药对爆破效果的影响的研究已经取得了长足的进步,但是对不耦合装药对炸药能量利用率的影响的研究还不够深入。通过混凝土模型实验,对比分析不同不耦合系数装药条件下产生的爆破漏斗以及试件表面所产生的爆破振动从而反应爆破效果以及炸药的能量利用情况,并且通过 ANSYS/LS-DYNA 软件对实验进行模拟,通过模拟结果对实验结果进行验证,得到不同不耦合系数装药条件下爆炸能量的分布与传递,为爆破技术在实际工程中的应用提供了参考。

1 不同不耦合系数下爆破模型实验

1.1 实验材料及参数

本次模型实验模型采用混凝土试件,设计为水平模型,模型为尺寸为 1800 mm × 400 mm × 300 mm 的长方体试件,测点布置及装药位置如图 1。经过对混凝土试件的各项物理参数进行测量得到混凝土的物理力学参数为:密度 = 2.2 g/cm³,弹性模量 = 24.7 GPa,泊松比 = 0.23,抗压强度 = 38.86 MPa,抗拉强度 = 1.6 MPa,纵波波速 = 3888 m/s,横波波速 = 2186 m/s。炸药选用的是黑索金单质炸药,炸药量为 2 g,由雷管引爆,黑索金参数为:密度 = 1.82 g/cm³,摩尔质量 = 222.117 g/mol,爆速 = 8350 m/s,爆热 = 5.4 MJ/mol,熔点 = 204.1 °C。

实验主要通过爆破振动大小,爆破漏斗体积以

及粉碎区大小三个指标衡量不耦合装药对提高炸药能量利用率的效果。通过对得出的振动数据进行分析,得出振动速度随不耦合系数改变的变化规律。爆破漏斗体积选用物理测量,测量漏斗底部面积以及漏斗高度,进而通过数学方法估算出漏斗体积。最后对炮孔扩腔进行测量,得到粉碎区的大小。最终通过以上数据分析得出不同不耦合系数下装药的爆破效果。

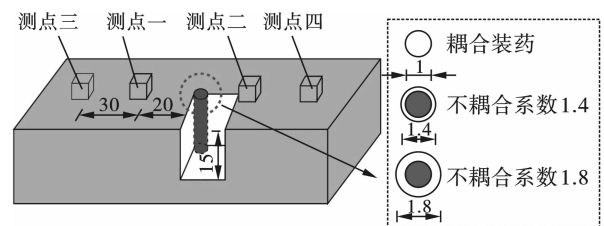


图 1 模型实验示意图(单位:cm)

Fig. 1 Schematic diagram of model experiment(unit:cm)

1.2 实验结果与分析

图 2 为不同不耦合系数装药下各测点振动速度曲线图。通过对振动数据进行分析,振动数据大小呈现出较明显规律,由于空气柱的存在使得传递到炮孔壁的炸药爆炸能量减小,因此在距离爆源较远的位置振动速度呈现出随着不耦合系数增加而减小的趋势。在距炮孔 20 cm 的两个测点上,振动数据由于爆破漏斗的产生使得炮孔处振动数值较大且与爆炸形成的爆破漏斗体积呈现正相关关系。由振动值的变化曲线可以得到,不耦合系数为 1.8 时,爆破振动数值随着距离提高衰减速度最快,耦合装药次之,不耦合系数为 1.4 时最小。

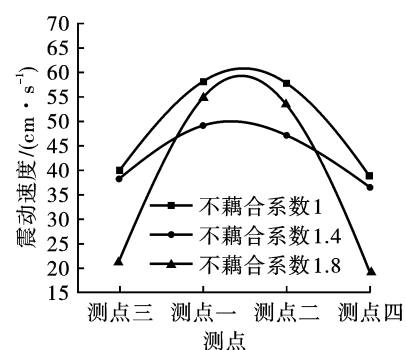


图 2 不同不耦合系数装药下不同测点振动速度

Fig. 2 Vibration velocity of different measuring points under different decoupling coefficient of charge

表 1 为不同不耦合系数下爆破漏斗参数。通过对爆破后爆破漏斗的参数进行分析得到,当不耦合系数为 1 时,炸药爆炸所形成的爆破漏斗体积为 1955.3 cm³,爆前炮孔直径为 10 mm,爆后炮孔直径为 29 mm。当不耦合系数为 1.4 时,爆破漏斗体积

为 990.57 cm^3 , 爆前炮孔直径为 14 mm , 爆后炮孔直径为 17 mm 。当不耦合系数为 1.8 时, 爆炸所形成的爆破漏斗体积为 1201.05 cm^3 , 爆前炮孔直径为 18 mm , 爆后直径为 20 mm 。总体看来, 爆破漏斗体积随着不耦合系数的增加先减小后增大。

表 1 不同不耦合系数下爆破漏斗参数
Table 1 Blasting funnel parameters under different decoupling coefficient

不耦合系数	1	1.4	1.8
漏斗顶面直径/cm	35	26	30
漏斗高度/cm	6.1	5.6	5.1
爆破漏斗体积/ cm^3	1955.30	990.57	1201.05
爆前炮孔直径/mm	10	14	18
爆后炮孔直径/mm	29	17	20

图 3 为不同不耦合系数下产生的爆破漏斗。通过观察爆破后的试件表面裂纹情况, 在不耦合系数为 1.4 时在试件表面形成明显裂纹, 而不耦合系数为 1.0 和 1.8 时试件表面并没有产生明显裂纹。

通过对以上实验数据的分析可以得出由于药柱与炮孔之间的不耦合, 使得药柱与炮孔壁之间存在环形空气柱, 由于空气柱的存在, 使得炸药爆炸的作用时间变长, 不耦合装药爆炸时, 爆轰波需要通过空气介质传播到孔壁岩石中, 爆轰波通过空气时, 空气可将爆轰初始阶段的气体产物能量储存起来, 削弱作用于炮孔的初始压力峰值而后受压气体又将大量储存的能量释放出做功, 延长了爆轰气体产物作用的时间^[10-12]。由不耦合系数为 1.4 时产生较明显裂缝可以得到空气的存在使得模型粉碎区减小, 裂隙区变大。

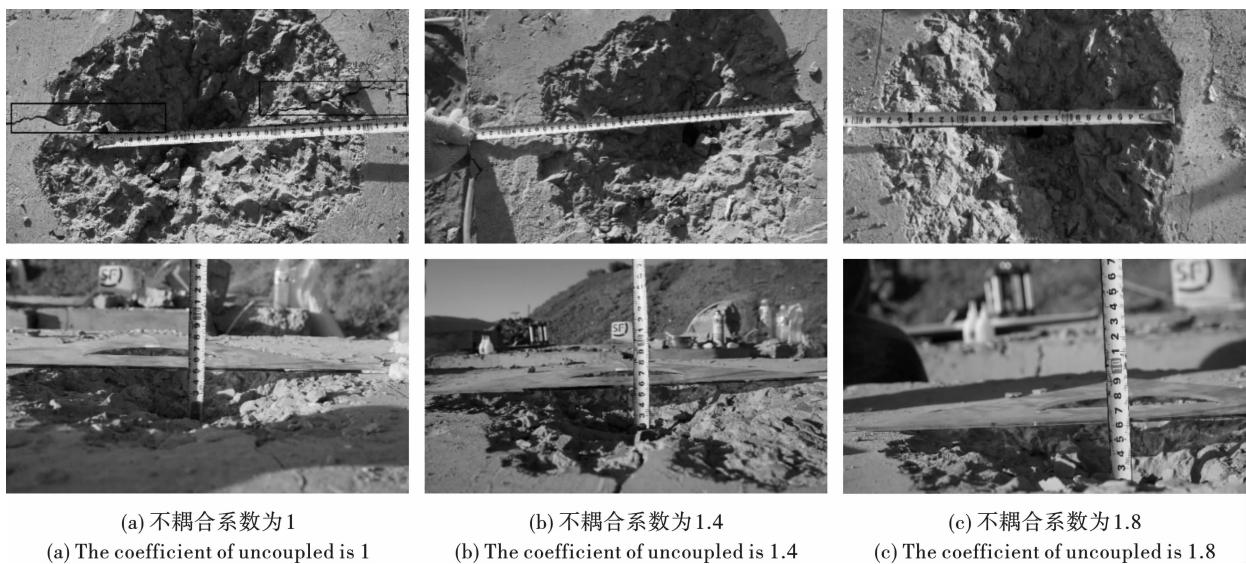


图 3 不同不耦合系数下爆炸产生的爆破漏斗

Fig. 3 Blasting funnel produced by different uncoupled coefficients

分析各不耦合系数装药下爆破效果, 首先对比不耦合装药和耦合装药的爆破漏斗体积, 可以发现耦合装药时产生的爆破漏斗体积大于不耦合装药, 这是因为药卷与岩石之间空气柱的存在可以减小能量过多的用于岩石粉碎, 让能量更多的用于爆生裂纹的产生和岩石的抛掷, 所以相较于耦合装药, 不耦合装药时炸药能量利用率更高; 再对比两组不耦合装药下产生的爆破漏斗, 发现当不耦合系数稍增大到 1.4 时, 爆破漏斗体积最小, 并且产生了明显的爆生裂纹, 说明此时用于岩石粉碎的那部分炸药能量最小, 炸药能量利用率相较于不耦合系数为 1.0 和 1.8 时是最高的, 但是当不耦合系数再增大到 1.8 时, 爆破漏斗体积又开始增大, 但是仍小于耦合装

药, 这是因为过大的空气柱会降低爆轰波与岩壁的初始压力, 同时过多空气会造成爆炸能量的损耗, 使得能够破碎岩石的能量降低, 从而使得爆炸能量向自由面泄露, 这就是爆破漏斗体积随着不耦合系数的增加先减少后增大的原因, 也是爆破振速的衰减速度随着不耦合系数的增大呈现先减小后增大的原因。因此, 存在一个最优不耦合系数 1.4 使得爆破能量利用率最高, 爆破效果最好。

2 数值模拟

2.1 模型参数

本次数值模拟建模为边长为 40 cm 的正方体, 炮孔位于正中心, 炮孔深度 15 cm , 炮孔直径分别为

1 cm、1.4 cm、1.8 cm, 药包直径为 1 cm, 药包长度 5 cm, 填塞长度 10 cm。

2.2 模型的建立

数值模拟采用 ANSYS/LS-DYNA 显示动力分析有限元软件, 模型选用 4 种材料, 炸药材料本构选用 * MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN, 配合状态方程 * EOS_JWL; 填塞材料本构选用 * MAT_PLASTIC_KINEMATIC, 空气材料本构选用 * MAT_NULL, 配合状态方程 * EOS_LINEAR_POLYNOMIAL; 为了对岩石内部损伤有更加直观的认识, 岩石本构采用能够

体现压缩损伤和拉伸损伤的 * MAT_RHT。炸药与空气在模拟中视为流体, 炸药与空气之间通过共节点来实现炸药能量传递; 填塞与岩石视为固体; 流体与固体之间采用流固耦合 * CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID, 从而实现爆炸能量在流固体之间传递。

2.3 岩石内部损伤模拟结果

为了观察不同不耦合系数装药下岩石内部损伤演化规律, 得到的损伤云图如图 4。

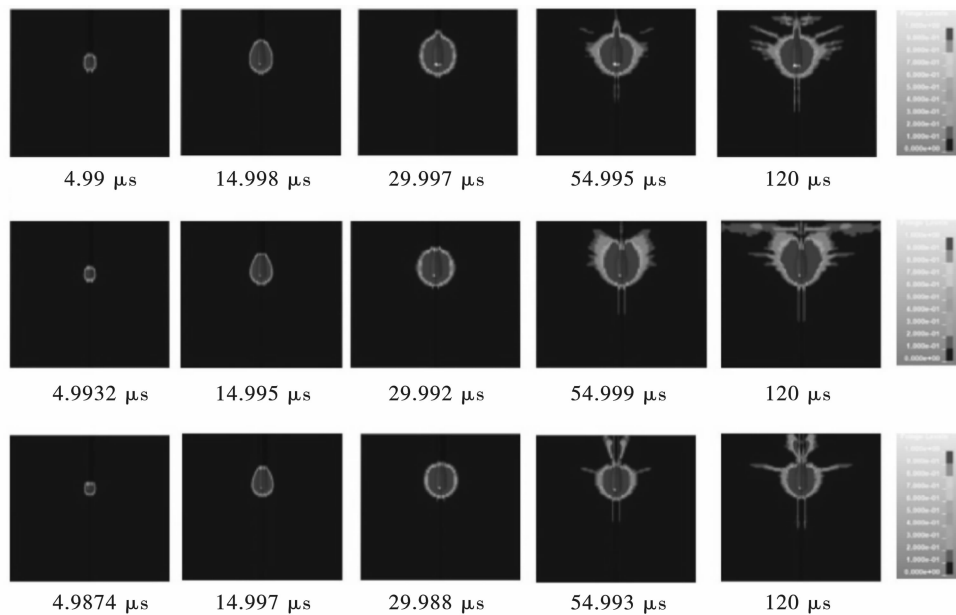


图 4 不同装药不耦合系数下岩石内部损伤演化

Fig. 4 Damage evolution in rock under different decoupling coefficient of charge

通过对图 4 分析可以得到, 不耦合系数大小对炸药在炮孔中爆炸时向岩石传递能量有很大影响, 对比 5 μs 和 15 μs 时损伤云图可以发现, 损伤区大小随着不耦合系数的增加逐渐减小, 在 30 μs 可以看到耦合装药条件下损伤区有向上发展趋势, 而不耦合系数为 1.4 和 1.8 时并没有产生损伤区向上发展的趋势, 在 55 μs 后, 耦合装药条件下和不耦合系数为 1.8 时内部损伤区大小基本不再变化, 但是损伤有明显的向上演化的趋势, 并且不耦合系数为 1.4 时损伤区还在继续扩大。在 120 μs 时, 可以看到不耦合系数为 1.4 时岩石内部损伤面积明显大于其他两种装药形式。

2.4 岩石内部应力变化模拟结果

岩石内部的应力云图可以直观的反应爆炸荷载下岩石内部的应力变化, 因此选取不同不耦合系数下各模型 30 ~ 50 μs 时间段的应力变化, 得到的应

力云图如图 5。

由内部的应力云图可以清楚地得到岩石内部的应力随着时间的变化关系, 在 30 μs 时应力分布差距较小, 在 35 μs 时开始产生较大的差异, 可以看到此时不耦合装药由于空气柱的存在, 不耦合装药炮孔壁会产生较明显的低压力区, 并且低压力区随着时间推移向上移动, 在 50 μs 时, 由应力云图分布可以发现在模型顶部, 耦合装药应力值最大, 不耦合系数为 1.8 时应力值次之, 不耦合系数为 1.4 时最小, 这也印证了模型实验中爆破漏斗体积与不耦合系数的相关关系。

3 结论

通过混凝土试件模型实验, 结合数值模拟, 进行了不同不耦合系数下的模型爆破实验, 分析了装药不耦合系数对炸药能量利用率的影响规律, 实验结

果表明:

(1)爆炸产生的爆破漏斗体积随着装药不耦合系数的增加呈现先减小后增大的趋势,并且耦合装药产生的爆破漏斗体积最大。

(2)通过模型实验以及数值模拟结果可以得到,不耦合装药条件下可以明显减小粉碎区大小,扩大裂隙区,从而减小能量浪费,提高炸药能量利

用率。

(3)若炮孔压力过大,则会造成孔壁周围过度粉碎而损失过多的能量,减少了输送给粉碎区以外介质的能量;反之,若炮孔压力过小,则无充分的应力波能量在岩石中形成足够大的破裂区。因此最佳不耦合系数为1.4,当不耦合系数为1.4时,炸药能量利用率最高。

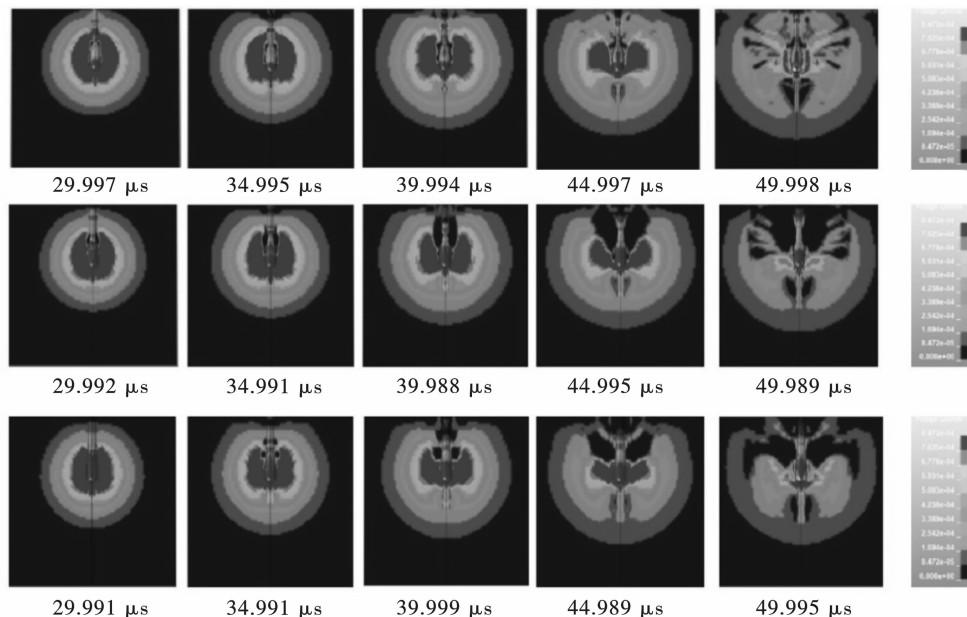


图5 不同装药不耦合系数下岩石内部应力演化

Fig. 5 Stress evolution in rock under different decoupling coefficient of charge

参考文献 (References)

- [1] 朱红兵,卢文波,吴亮.空气间隔装药爆破机理研究[J].岩土力学,2007,28(5):986-990.
- [1] ZHU Hong-bing, LU Wen-bo, WU Liang. Study on blasting mechanism of air interval charge[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5):986-990. (in Chinese)
- [2] LANGEFORS U, KIHLSTRÖM M B. The modern technique of rock blasting[M]. Wiley, 1978:96-97.
- [3] 钟明寿,龙源,谢全民,等.装药不耦合系数对碳酸盐岩爆炸地震波能量的影响[J].爆炸与冲击,2011,31(6):612-618.
- [3] ZHONG Ming-shou, LONG Yuan, XIE Quan-min. Effect of decoupling coefficient of charge on seismic wave energy of carbonate rock explosion[J]. Explosive and Shock Waves. 2011, 31(6):612-618. (in Chinese)
- [4] 姜鹏飞,唐德高,龙源.不耦合装药爆破对硬岩应力场影响的数值分析[J].岩土力学,2009,30(1):275-279.
- [4] JIANG Peng-fei, TANG Gao-de, LONG Yuan. Numerical analysis of the effect of uncoupling charge blasting on stress field in hard rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1):275-279. (in Chinese)
- [5] 杨仁树,王雁冰.切缝药包不耦合装药爆破爆生裂纹动态断裂效应的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(7):1337-1343.
- [5] YANG Ren-shu, WANG Yan-bing. Numerical analysis of the effect of uncoupling charge blasting on stress field in hard rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(7):1337-1343. (in Chinese)
- [6] 王伟,李小春,石露,等.深层岩体松动爆破中不耦合装药效应的探讨[J].岩土力学,2008,29(10):369-374.
- [6] WANG Wei, LI Xiao-chun, SHI Lu. Discussion on coupling charge effect in deep rock blasting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(10):369-374. (in Chinese)
- [7] 岳中文,张士春,邱鹏,等.装药结构对切缝药包爆破效果影响的研究[J].振动与冲击,2018,37(10):27-34.
- [7] YUE Zhong-wen, ZHANG Shi-chun, QIU Peng, et al. Influence of charge structures on the slotted cartridge blasting effect[J]. 2018, 37(10):27-34. (in Chinese)

- [8] 龚 玖,汪海波,王梦想,等. 空气和水不耦合装药对爆破块度影响分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2018,14(9):105-110.
- [8] GONG Jiu, WANG Hai-bo, WANG Meng-xiang. Analysis on influence of water and air decoupling charge on blasting fragmentation [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018(9):105-110. (in Chinese)
- [9] 李汉坤. 不同耦合系数及孔间距对煤层爆生裂隙扩展影响的试验研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2018.
- [9] LI Han-kun. Experimental research on the influence of different coupling coefficients and hole space on explosion fracture expansion coal bed[D]. Huainan: Anhui University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [10] 吴 亮,钟冬望,卢文波. 空气间隔装药爆炸冲击荷载作用下混凝土损伤分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(10):3109-3114.
- [10] WU Liang, ZHONG Dong-wang, LU Wen-bo. Study of concrete damage under blast loading of air-decking[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10):3109-3114. (in Chinese)
- [11] 杜俊林,周胜兵,宗 琦. 不耦合装药时孔壁压力的理论分析和求算[J]. 西安科技大学学报, 2007, 27(3):347-351.
- [11] DU Jun-lin, ZHOU Sheng-bing, ZONG Qi. Theoretical analysis on pressure on bore wall of uncouple charge[J]. Journal of Xi'an university of science and technology, 2007, 27(3):347-351. (in Chinese)
- [12] 谭元军,陈继府. 空气间隔径向不耦合装药条件下柱状药包的破岩机理研究[J]. 爆破, 2011, 28(1):325-327.
- [12] TAN Yuan-jun, CHEN Ji-fu. Theory research of powder destroying with cylinder charge in rock under the condition of air interval decoupling charge along diameter[J]. Blasting, 2011, 28(1):325-327. (in Chinese)

英文编辑:袁必和

(上接第14页)

- [10] 严 鹏,赵振国,卢文波,等. 深部岩体地应力瞬态卸载诱发振动效应的影响因素[J]. 岩土力学, 2016, 37(2):545-553.
- [10] YAN Peng, ZHAO Zhen-guo, LU Wen-bo, et al. Factors influencing vibration effects induced by insitu stress transient unloading of deep rock mass[J]. Rock & Soil Mechanics, 2016, 37(2):545-553. (in Chinese)
- [11] 范 勇,王 奋,卢文波,等. 考虑地应力瞬态卸荷低频放大效应的深埋隧洞爆破开挖振动安全评估[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S2):387-400.
- [11] FAN Yong, WANG Fen, LU Wen-bo, et al. Safty evaluation of deep tunnel blasting excavation vibration considering low-frequency amplification effect of transient un-loading of in-situ stress [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2018, 37(S2):387-400. (in Chinese)
- [12] 杨建华,吴泽南,蒋水华,等. 深埋隧洞爆破开挖地应力瞬态卸荷诱发围岩振动控制方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(12):2751-2761.
- [12] YANG Jian-hua, WU Ze-nan, JIANG Shui-hua, et al. Study on controlling methods for transient unloading inducing rock vibration due to blasting excavation of deep tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(12):2751-2761. (in Chinese)
- [13] 严 军,肖培伟,孙继林. 瀑布沟水电站地下厂房开挖施工综述[J]. 水力发电, 2010, 36(6):56-59.
- [13] YAN Jun, XIAO Pei-wei, SUN Ji-lin. Underground Powerhouse Excavation of Pubugou Hydropower Station [J]. Water Power, 2010, 36(6):56-59.
- [14] 苏鹏云. 瀑布沟地下厂房优化设计和洞室群围岩稳定数值模拟分析[D]. 武汉:武汉大学, 2004.
- [14] SU Peng-yun. The design and optimizati-on of pubugou underground powerhouse, and numerical simulation and analyse of wall rock's stabilization [D]. Wuhan: Wuhan University, 2004. (in Chinese)
- [15] 罗 忆,卢文波,周创兵,等. 高地应力条件下地下厂房开挖动态卸荷引起的变形突变机制研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5):1553-1560.
- [15] LUO Yi, LU Wen-bo, ZHOU Chuang-bing, et al. Mechanism study of abrupt deformation of underground powerhouse induced by excavation unloading under high in-situ stress [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5):1553-1560. (in Chinese)
- [16] 孙林锋,朱维申,张乾兵,等. 地下洞群主厂房边墙裂缝带监测与研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(3):543-547.
- [16] SUN Lin-feng, ZHU Wei-shen, ZHANG Qian-bing, et al. Study and monitoring on the side wall fracture zones of the main power house in underground cavern groups [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(3):543-547. (in Chinese)
- [17] 郑 俊,邓建辉,谭升魁,等. 瀑布沟电站地下厂房洞室群施工期监测分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(2):346-353.
- [17] ZHENG Jun, DENG Jian-hui, TAN Sheng-kui, et al. Monitoring analysis of the underground cavities in Pubugou Hydropower Station during the construction period [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(2):346-353. (in Chinese)

英文编辑:何 松