

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.06.003



端部加密锚固洞室在重复顶爆作用下的 应力波传播及衰减规律

王光勇^{1,2}, 陈安敏², 徐景茂²

(1. 河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 总参工程兵科研三所, 河南 洛阳 471023)

摘要:利用实验室抗爆模型试验装置,研究了端部加密和普通长密锚杆锚固洞室在重复顶爆作用下的应力波传播及衰减规律。端部加密锚固洞室和普通长密锚固洞室每一炮的拱顶压力峰值随着比例距离的增加呈幂函数逐渐衰减,并拟合出相应的幂函数曲线,前两炮拟合的应力波衰减指数均小于未受扰动岩石的衰减指数。两个洞室在爆炸应力波作用下,锚固区附近的岩石先被密实,然后不断损伤破坏。在相同的爆炸条件作用下,随着比例距离增加,两个洞室在相同比例距离时的压力差值逐渐减小;相同比例距离端部加密锚固洞室峰值压力比普通长密锚杆加固洞室峰值压力先大后小;端部加密锚杆加固洞室与普通长密锚杆加固洞室离加固范围最近测点的压应力峰值衰减规律比较相近,并且压应力峰值大小也比较相近。

关键词:地下工程;顶爆;应力波;传播规律;衰减规律

中图分类号:TU452 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)06-0015-07

Stress wave propagation and attenuation laws of underground openings reinforced by dense bolts at anchor top under repeated top explosions

Wang Guangyong^{1,2}, Chen Anmin², Xu Jingmao²

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, P. R. China;

2. The Third Research Institute of the Corps of Engineers, General Staff of CPLA, Luoyang 471023, Henan, P. R. China)

Abstract: Stress wave propagation and attenuation laws of underground openings reinforced by dense bolts at anchor top and long-dense bolts are studied by anti-explosion model tests under repeated top explosions. After each explosion, with the increase of scaled stance, peak pressure stresses on vault gradually decrease in the form of a power function, and the corresponding power functions to fit the curves are obtained, of which the indexes of fitting stress wave attenuation are smaller than those of undisturbed rock. Under the action of explosion stress waves, the rock near the anchorage zone is compacted firstly, and then damaged

收稿日期:2017-12-07

基金项目:国家自然科学基金(51304067);河南省科技攻关项目(142102210433);河南省高等学校青年骨干教师资助计划(2015GGJS-069);深部矿井建设省级重点实验室开放基金(2014KF-05)

作者简介:王光勇(1977-),男,博士,副教授,主要从事岩土工程动载试验研究,E-mail:wgy2003@mail.ustc.edu.cn.

Received:2017-12-07

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51304067); Science and Technology Research Project in Henan Province (No. 142102210433); Youth Backbone Teacher Funding Plan of Henan Provincial Higher Education School (No. 2015GGJS-069); Opening Project of Key Laboratory of Deep Mine Construction (No. 2014KF-05)

Author brief: Wang Guangyong (1977-), PhD, associate professor, main research interest: geotechnical engineering dynamic test, E-mail: wgy2003@mail.ustc.edu.cn.

continuously. Under the same conditions of explosions, with the increase of scaled stance, the difference of pressure stresses with two underground openings is reduced gradually at the same scaled stance and peak pressure stress on vault of the underground opening reinforced by dense bolts at anchor top is greater than that of the underground opening reinforced by long-dense bolts firstly at the same scaled stance, and then smaller. Under the same conditions of explosions, the stress wave attenuation law and peak pressure stress of the nearest measuring points from two underground openings are similar.

Keywords: underground engineering; top explosions; stress waves; propagation laws; attenuation laws

炸药在介质里发生爆炸时,会在介质中产生应力波,从破坏和防护两方面考虑,都需要知道应力波在介质中的传播及衰减规律。应力波在岩石中的传播及衰减规律主要受到爆炸条件和岩石的地质条件两方面影响。由于涉及许多复杂多变的因素,到目前为止,爆炸应力波的传播及衰减规律一直是国防工程及工程爆破研究的热点问题。因此,研究应力波在岩体中的传播与衰减规律,对国防建设和国民经济均具有重大意义^[1]。

由于爆炸应力波的传播及衰减规律涉及工程的各个环节,只有充分认识应力波扰动规律,才能确保工程结构的安全性及稳定性。许多学者开展了这方面的研究,并取得了丰富的成果。胡刚等^[2]采用一维撞杆法,得到了爆炸作用下岩石的应变历程曲线,并导出应力波衰减规律。王占江等^[3]根据在花岗岩中进行的 1~150 kg TN 系列化爆试验的应力波测试数据,给出了相应的自由场应力波衰减规律。何翔等^[4]基于现场试验得到了石灰岩中的冲击传播规律。左魁等^[5]研究发现,应力波峰值压力随比例距离衰减遵循一定规律,并给出的衰减公式。《常规武器防护设计原理》^[6]中给出了爆炸应力波峰值计算公式。文献^[7]利用数值分析方法,得到了应力波在岩体传播过程中的衰减规律,并证明 PFC 可以较好地模拟爆破过程。Yankelevsky 等^[8]、Feldgun 等^[9]利用试验和数值方法分别研究了应力波在土中的衰减规律。Pandya 等^[10]分析了在平面弹道冲击下纵向应力波在编织物复合材料中的衰减规律。李新平等^[11-12]、FAN 等^[13]、俞缙等^[14]、范新等^[15]考虑岩体结构面(节理、裂隙等)和初始应力对应力波传播规律的影响。

学者们虽然对自由场的爆炸应力波传播及衰减规律进行了大量研究,并考虑了一些因素的影响,但地下工程经过加固,会使围岩强度得到提高,从而改变围岩的波阻抗,影响地下工程上方岩石中的应力波强度,从而影响力波的传播及衰减规律。目前,地下工程中锚杆支护应用比较广泛,对锚固洞室上方爆炸应力波传播及衰减规律的研究一般与锚固洞

室的抗爆性能一起研究^[16-21],大多数成果只对一次爆炸应力波传播及衰减规律进行分析。然而,随着军事上常规钻地武器的精度越来越高,重复打击已经成为可能。另外,地下工程开挖也会导致岩石受到重复动载作用,导致岩体中的损伤不断积累,从而影响爆炸应力波在岩石中的传播及衰减规律。为了提高普通长密锚杆支护洞室的抗爆能力,文献^[21]通过在锚杆端部增加短锚杆而设计端部加密锚杆支护形式。由于锚固洞室有可能受到重复动载的作用,为了进一步提高端部加密锚固洞室受重复动载作用的抗爆能力,有必要研究端部加密锚固洞室在重复顶爆作用下应力波传播及衰减规律。

1 试验概况

1.1 试验模型及相似要求

试验采用的装置尺寸、测点和洞室布置的位置见图 1。试验中的相似条件按药量的立方根比尺和

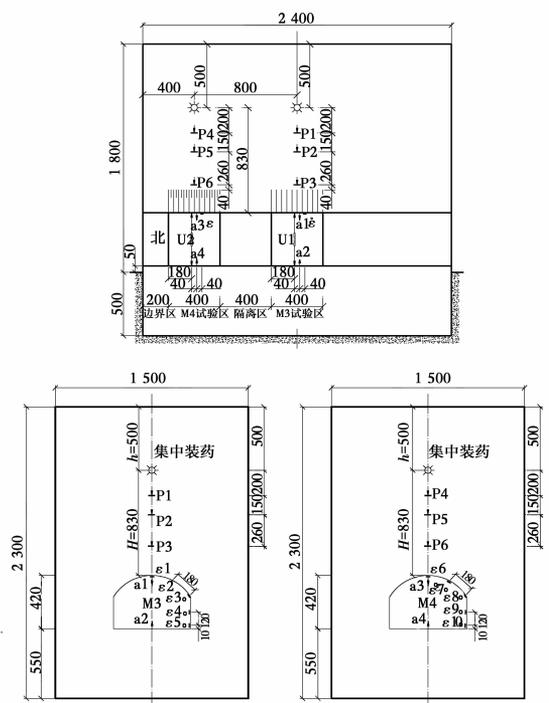


图 1 试验模型及测点布置图(单位:mm)

Fig. 1 Test model and measuring points arrangement

弗鲁德(Froude)比尺进行综合考虑后确定,其中,岩体模拟材料、几何比例系数和爆炸力相似系数的选取与文献[21]一样。

1.2 试验步骤

试验一共准备5炮,但第4炮洞室已经破坏,实际只进行了4炮。当岩体中炸药埋置较浅时,爆轰产物作用于药包上覆岩体形成喷射物抛掷现象,部分爆炸能可能溢出地表,为了确保每次爆炸条件对岩体的影响可以忽略^[22],每次比例埋深($h/W^{1/3}$)均为 $17.1 \text{ cm}/\text{g}^{1/3}$,每次装药量见表1。

表1 模型试验药量及埋深

Table 1 Explosive quantity of model test and embedded depth of explosion

放炮顺序	装药量 W/g	埋深 h/cm	爆距 H/cm	比例埋深 ($h/W^{1/3}$)/ ($\text{cm} \cdot \text{g}^{-1/3}$)	比例距离 ($H/W^{1/3}$)/ ($\text{cm} \cdot \text{g}^{-1/3}$)
第1炮	25.0	50.0	83.0	17.1	28.4
第2炮	39.4	58.2	74.8	17.1	22.0
第3炮	64.9	68.7	64.3	17.1	16.0
第4炮	118.2	83.9	49.1	17.1	10.0
第5炮	190.9	98.5	34.5	17.1	6.0

2 试验结果分析

2.1 应力波传播规律

图2是M3和M4两个洞室第1炮拱顶垂直压应力时程曲线图。从图中可以看出:爆心距越短,越先起跳,各条时程曲线形态相似,每根曲线由上升段和下降段两部分组成。随着爆心距的增加,上升时间越来越长,M3的P1~P3的上升时间分别从195、325到545 us,M4的P4~P6的上升时间从240、360到515 us。以上规律符合应力波时程曲线特征,说明所测曲线合理。

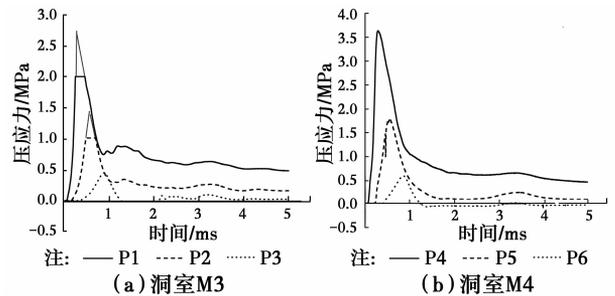


图2 第1炮拱顶垂直压应力时程曲线

Fig. 2 Time-history curves of vault vertical compression stresses after the first blasting

表2 拱顶的峰值垂直压力

Table 2 Peak value of vault vertical compression stresses

洞室	测点	第1炮		第2炮		第3炮		第4炮	
		比例距离/ ($\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$)	压力/ MPa						
M3	P1	0.684	2.75	0.347	9.76	0.032			
	P2	1.197	1.42	0.788	3.36	0.406		0.022	
	P3	2.086	0.45	1.534	1.06	1.053		0.552	4.17
M4	P4	0.684	3.64	0.347	5.55	0.032			
	P5	1.197	1.80	0.788	2.40	0.406	7.78	0.022	
	P6	2.086	0.58	1.534	0.72	1.053	1.79	0.552	4.16

2.2 应力波衰减规律

由表2中的第1炮和第2炮的拱顶垂直压力峰值和比例距离关系绘制图3和图4。从图中可以看出:两个洞室每一炮的拱顶压力峰值都随比例距离的增加逐渐减小,符合一定的衰减规律,根据《常规武器防护设计原理》^[6]中给出的应力波的衰减公式,可以拟合出相应的幂函数关系曲线,其中,公式中R是指爆心距即爆心到相应测点的直线距离。根据文献[14-15]可知,试验中采用的衰减指数为1.8718,拟合出来的两炮所有应力波衰减指数都

小于未受扰动岩石的衰减指数,这是因为两个洞室都通过锚杆支护加固洞室围岩,围岩的强度超过了原岩的强度,从而使经过拱顶围岩的应力波能量衰减减慢。

从拟合曲线可以发现,随着比例距离增加,两个洞室在相同的比例距离压力差值逐渐减小,两个锚固洞室最终在某比较大的比例距离处压应力峰值没有差值。如果锚固区及其附近的比例距离小于压应力峰值相等处的比例距离,即使端部加密锚杆相对于普通长密锚杆对洞室锚固区的抗动强度有所提

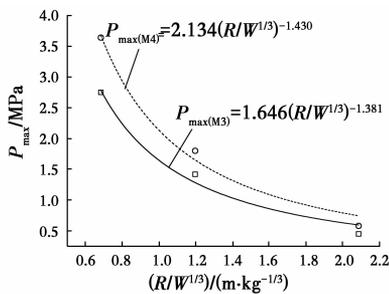


图 3 第 1 炮洞室拱顶垂直压力峰值与比例距离的关系

Fig. 3 Relation between peak value of vault vertical compression stresses and scaled stance after the first blasting

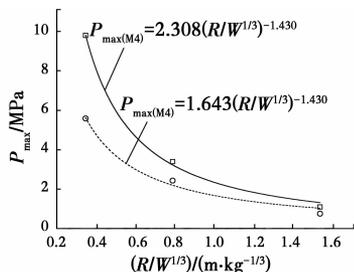


图 4 第 2 炮洞室拱顶垂直压力峰值与比例距离的关系

Fig. 4 Relation between peak value of vault vertical compression stresses and scaled stance after the second blasting

高,也有可能出现端部加密洞室的抗爆能力得不到提高。第 1 炮 M4 的 3 个监测点都比 M3 相同比例距离的 3 个监测点垂直压应力峰值分别大 32.4%、26.8%、28.9%,而第 2 炮 M4 洞室的 3 个监测点分别比 M3 洞室相同比例距离的 3 个监测点垂直压应力峰值小 43.1%、28.6%、32.1%。这可能主要是由于第 1 炮的主要作用是压实,在压实的过程中使得锚杆起到加固围岩的作用,也使加固范围之外的围岩强度得到提高,尤其离加固范围较近的岩石;由于端部加密锚杆支护比普通长密锚杆支护加固效果更好,即端部加密锚杆影响的岩石波阻抗较普通长密锚杆大,导致其应力波强度增量更大,故第 1 炮的端部加密洞室较普通长密锚杆在相同比例距离应力波强度要大。造成第 2 炮相同位置 M4 洞室的垂直压应力峰值比 M3 洞室小,有可能是由于第 1 炮的强度较小,在监测范围内第 1 炮时 M4 密实效果比 M3 洞室好, M3 洞室密实滞后 M4 洞室,第 2 炮作用时两个洞室已开始由密实向损伤破坏转变,而 M3 可能进一步进行密实,并且 M3 洞室损伤滞后 M4 洞室。从第 3 炮开始,普通长密锚杆加固洞室的大部分压力数据没有测到,这主要是由于压力过大而导致的(第 3 炮 P3 除外),这说明,在第 3 炮作用下,相同比例距离普通长密锚杆加固洞室受到的应力波强度比端部加密锚杆加固洞室要大。从第 1 炮和第

2 炮的应力波上升时间分析可以发现,第 2 炮的应力波上升时间均比第 1 炮应力波上升时间短,进一步证明拱顶在应力波的作用下是先进行压密。

图 5 和图 6 分别是 M3 和 M4 所测到几炮应力波衰减曲线图。从图中可以发现:两个洞室第 2 炮的衰减指数都比第 1 炮的衰减指数小, M3 第 2 炮的衰减指数与第 1 炮衰减指数差不多,只小 1.2%, M4 第 2 炮的衰减指数比第 1 炮衰减指数减小了 19.1%,这进一步表明第 1 炮起到密实的作用,并且 M4 明显比 M3 的加固效果好。图 6 中 M4 洞室 3 炮的衰减指数分别为 1.430、1.157、1.542,衰减指数随着放炮的顺序先减小后增加,这也说明了第 1 炮密实作用,从第 2 炮开始端部加密洞室顶部的岩石开始损伤。

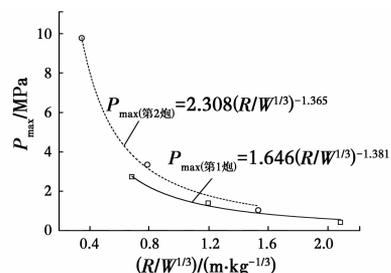


图 5 M3 第 1、2 炮洞室拱顶垂直压应力峰值与比例距离关系

Fig. 5 Relation between peak value of vault vertical compression stresses and scaled stance of M3 after the first blasting and the second blasting

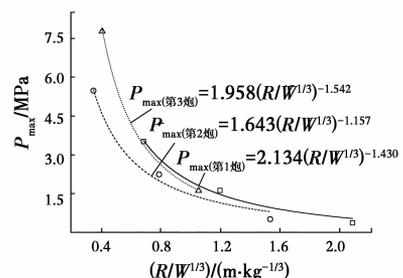


图 6 M4 第 1、2、3 炮洞室拱顶垂直压应力峰值与比例距离的关系

Fig. 6 Relation between peak value of vault vertical compression stresses and scaled stance of M4 after the first blasting, the second blasting and the third blasting

图 7 是端部加密锚固洞室根据 4 炮的比例距离绘制的拱顶垂直压应力峰值与比例距离的关系曲线,并利用幂函数拟合出 P5 和 P6 相应的曲线,它们的衰减指数分别为 1.572 和 1.483,这说明越离爆心近的点在相同的爆炸条件下损伤越严重,这也与实际一致。

在研究爆炸荷载对地下工程的影响时,大家最关心是离地下结构最近点的动载强度,其大小直接影响到地下工程的稳定性和安全。图8是离两个加固洞室最近位置P3和P6测点与比例距离的关系曲线,从曲线中可以看出:在相同爆炸条件作用下,离加固范围最近的测点所得压应力峰值衰减规律比较相近,P3和P6衰减指数分别为1.462、1.483,相差仅1.4%,并且压应力峰值大小也比较相近。

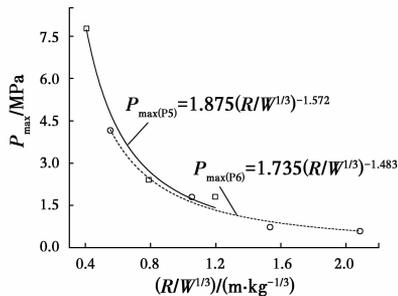


图7 M4洞室P5、P6洞室拱顶垂直压应力峰值与比例距离的关系

Fig. 7 Relation between peak value of vault vertical compression stresses and scaled stance of P5 and P6

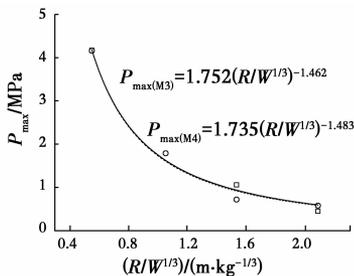


图8 P3、P6洞室拱顶垂直压应力峰值与比例距离的关系

Fig. 8 Relation between peak value of vault vertical compression stresses and scaled stance of P3 and P6

3 结论

通过抗爆模型试验研究端部加密锚杆加固洞室在重复顶爆作用下应力波的传播及衰减规律,得出以下结论:

1)随着应力波传播,离爆心越近的测点越早起跳;所有的曲线规律性比较相似,每根曲线主要由上升和下降两个阶段组成,并且上升时间比下降时间短;随着爆心距的增加,上升时间越来越长。

2)两个洞室每一炮的拱顶压力峰值随着比例距离的增加成幂函数逐渐衰减,并拟合出相应的幂函数曲线。两炮所拟合的应力波衰减指数都小于未受扰动岩石的衰减指数。

3)在相同的爆炸条件作用下,随着比例距离增

加,两个洞室在相同的比例距离时压力差值逐渐减小。两个洞室受到爆炸应力波作用时,由于应力波主要先对锚固区附近的岩石进行密实,然后不断损伤破坏,造成端部加密锚杆加固洞室相同比例距离峰值压力比普通长密锚杆加固洞室峰值压力先大后小。

4)在相同的爆炸条件作用下,端部加密锚杆加固洞室与普通长密锚杆加固洞室离加固范围最近测点的压应力峰值衰减规律比较相近,压应力峰值大小也比较相近。

参考文献:

- [1] 黄理兴. 岩石动力学研究成就与趋势[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 2889-2900.
HUANG L X. Development and new achievements of rock dynamics in China [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 2889-2900. (in Chinese)
- [2] 胡刚, 郝传波, 景海河. 爆炸作用下岩石介质应力波传播规律研究[J]. 煤炭学报, 2001, 26(3): 270-273.
HU G, HAO C B, JING H H. Study on the laws of stress wave propagation in rock bar under blasting loading [J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(3): 270-273. (in Chinese)
- [3] 王占江, 李孝兰, 戈琳, 等. 花岗岩中化爆的自由场应力波传播规律分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1827-1831.
WANG Z J, LI X L, GE L, et al. Free-field stress wave propagation induced by underground chemical explosion in granite [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1827-1831. (in Chinese)
- [4] 何翔, 吴祥云, 任辉启, 等. 石灰岩中爆炸成坑和地冲击传播规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 725-729.
HE X, WU X Y, REN H Q, et al. Testing study on crater formed by explosion and propagation laws of ground shock in limestone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(5): 725-729. (in Chinese)
- [5] 左魁, 张继春, 王启睿, 等. 重复爆炸条件下岩石介质破坏效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(Sup1): 2675-2680.
ZUO K, ZHANG J C, WANG Q R, et al. Experimental research on rock breakage effect under repeated explosions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Sup1): 2675-2680. (in Chinese)

- [6] 美国陆军水道试验站. 常规武器防护设计原理[M]. 方秦, 吴平安, 张育林, 等, 译. 南京: 中国人民解放军工程兵工程学院, 1997: 57-59.
American army waterway experimental station. Fundamentals of protective design for conventional weapons [M]. Translated by FANG Q, WU P A, ZHANG Y L, et al. Nanjing: Engineering Institute of Engineer Corps of PLA, 1997: 57-59. (in Chinese)
- [7] 陈文昭, 刘夕奇, 李斌. 岩体爆炸应力波衰减规律的颗粒流数值模拟[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2016, 30(1): 118-123.
CHEN W Z, LIU X Q, LI B. Numerical simulation of stress wave attenuation of rock [J]. Journal of University of South China (Science and Technology), 2016, 30(1): 118-123. (in Chinese)
- [8] YANKELEVSKY D Z, KARINSKI Y S, FELDGUN V R. Re-examination of the shock wave's peak pressure attenuation in soils [J]. International Journal of Impact Engineering, 2011, 38(11): 864-881.
- [9] FELDGUN V R, KARINSKI Y S, YANKELEVSKY D Z. The effect of an explosion in a tunnel on a neighboring buried structure [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 44(3): 42-55.
- [10] PANDYA K S, KULKARNI M D, WARMAN A, et al. Simulation of stress wave attenuation in plain weave fabric composites during in-plane ballistic impact [J]. Composite Structures, 2017, 160: 748-757.
- [11] 李新平, 董千, 刘婷婷, 等. 不同地应力下爆炸应力波在节理岩体中传播规律模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(11): 2188-2196.
LI X P, DONG Q, LIU T T, et al. Model test on propagation of blasting stress wave in jointed rock mass under different in-situ stresses [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(11): 2188-2196. (in Chinese)
- [12] 李新平, 赵航, 罗忆, 等. 深部裂隙岩体中弹性波传播与衰减规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2319-2326.
LI X P, ZHAO H, LUO Y, et al. Experimental study of propagation and attenuation of elastic wave in deep rock mass with joints [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2319-2326. (in Chinese)
- [13] FAN L F, SUN H Y. Seismic wave propagation through an in-situ stressed rock mass [J]. Journal of Applied Geophysics, 2015, 121(1): 13-20.
- [14] 俞缙, 钱七虎, 赵晓豹. 岩体结构面对应力波传播规律影响的研究进展[J]. 兵工学报, 2009, 30(Sup2): 308-316.
YU J, QIAN Q H, ZHAO X B. Research progress on effects of structural planes of rock mass on stress wave propagation law [J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(Sup2): 308-316. (in Chinese)
- [15] 范新, 王明洋, 施存程. 初始应力对应力波传播及块体运动规律影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(Sup2): 3442-3446.
FAN X, WANG M Y, SHI C C. Study on effects of initial stress on stress wave propagation and block movement law [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Sup2): 3442-3446. (in Chinese)
- [16] 王光勇, 顾金才, 陈安敏, 等. 锚固洞室在顶爆作用下破坏形式及破坏过程研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(8): 1381-1389.
WANG G Y, GU J C, CHEN A M, et al. Failure modes and process of tunnels reinforced by rockbolts under top explosion [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(8): 1381-1389. (in Chinese)
- [17] 沈俊, 张向阳, 陈安敏, 等. 爆炸应力波在洞室围岩中的分布及洞库稳定性研究[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(5): 55-60.
SHEN J, ZHANG X Y, CHEN A M, et al. Distribution of an explosive stress wave in surrounding rock and the relevant stability of an underground cavern [J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(5): 55-60. (in Chinese)
- [18] 徐干成, 袁伟泽, 顾金才, 等. 地下洞库围岩外加固抗炸弹爆炸性能研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(9): 1767-1776.
XU G C, YUAN W Z, GU J C, et al. Explosive resistivity of anchored cavern surface rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(9): 1767-1776. (in Chinese)
- [19] CHANG X, WANG G Y, TANG C N, et al. Dynamic behavior of cement-mortar cavern reinforced by bars [J]. Engineering Failure Analysis, 2015, 55: 343-354.
- [20] 王亚军, 陈太林, 郭常颖, 等. 外交叉锚固洞室抗爆性能数值模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(3): 680-686.
WANG Y J, CHEN T L, GUO C Y, et al. Numerical simulation of the anti-explosion performance of underground caverns reinforced by external cross-anchoring [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(3): 680-686. (in Chinese)
- [21] 王光勇, 顾金才, 陈安敏, 等. 端部消波和加密锚杆支护

- 洞室抗爆能力模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 51-58.
- WANG G Y, GU J C, CHEN A M, et al. Model test research on anti-explosion capacity of underground openings with end weakened by holes and anchor top reinforced by dense rock bolts [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(1): 51-58. (in Chinese)
- [22] 王维国,陈育民,张意江,等. 饱和砂土中浅埋单药包爆炸液化特性分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(2): 355-361.
- WANG W G, CHEN Y M, ZHANG Y J, et al. Characteristics of liquefaction induced by single shallow-buried detonation in saturated sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(2): 355-361. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)