

高强砂浆材料爆炸作用下破坏分区试验研究^{*}

王启睿,孔福利,范俊奇,贺永胜

(军事科学院国防工程研究院,河南 洛阳 471023)

摘 要: 选用高强砂浆材料模拟同等强度岩石介质,开展TNT炸药在内部不完全封闭爆炸条件下对模拟岩石介质破坏效果的研究,采用宏观现象分析、钻芯取样及理论计算的方法确定破坏分区范围。结果显示:配制的高强砂浆材料强度可达105.6 MPa,能够模拟中等强度以上岩石介质;TNT炸药爆炸作用下高强砂浆模拟岩石介质分为粉碎、压碎、裂隙和弹性等4个区域,其范围与钻孔装药的尺寸参数有关;粉碎区半径约为钻孔装药半径的2.2倍,压碎区半径约为5.2倍,裂隙区半径约为32倍;3种分析方式结果相当,试验能够较真实地反映高强砂浆模拟岩石介质钻孔装药爆炸后的破坏情况。

关键词: 爆炸力学;高强砂浆材料;爆炸效应;破坏分区;试验研究

中图分类号:O389

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2018)06-1505-07

Experimental Study for Destructive Zone of High-strength Mortar Material under Explosion Effect

Wang Qirui, Kong Fuli, Fan Junqi, He Yongsheng

(National Defense Engineering Institute, Academy of Military Science of PLA, Luoyang, Henan 471023, P.R. China)

Abstract: High-strength mortar concrete material was used to simulate the rock with same strength. Research on the damage effect of TNT explosives on simulated rock media under incomplete closed explosion conditions was carried out. The scope of destruction zone was determined by three methods including macro-phenomenon analysis, core analysis and theoretical calculations. The results show that the strength of high-strength mortar can reach 105.6 MPa, thus the high-strength mortar can be used to simulate the rocks above medium strength. Under explosion damage, the simulated rock medium is divided into four zones including crush zone, compression zone, crack zone and elastic zone. Each damage zone's range is related to the radius of the borehole and the column of explosive. The radius of crush zone, compression zone and crack zone respectively are about 2.2, 5.2 and 32 times than the diameter of borehole. The results of the three methods are comparable. This experiment can truly show the drilling explosion damage of simulated rock medium by high-strength mortar.

Keywords: explosion mechanics; high-strength mortar material; explosive effect; damage zone; experimental study

0 引言

岩石介质中钻孔装药爆炸作用是一个复杂的动力学过程。岩石介质在爆炸冲击波和应力波的

作用下发生热熔、压密、碎裂、抛撒等破坏现象,给作用区域内的岩体及工程结构带来严重影响,常见于地下工程建设、矿业开采及国防领域的应用之中^[1]。爆炸作用下岩石发生脆性、塑性、剪切和完

^{*} 收稿日期:2018-04-28(修改稿)

作者简介:王启睿(1980-),男,河南潢川人,硕士,助理研究员,主要从事岩土工程抗爆加固及防灾减灾研究工作。

E-mail:lywqr3061@163.com

整无破坏等情况,国内外很多学者进行了详细研究,给出了基于工程实践的岩石各破坏范围的理论^[2-6]、数值计算^[7]或以试验为基础的半经验半理论方法^[8-11]。但对于 TNT 炸药在岩石内部不完全封闭条件下的爆炸来说,由于爆炸能量增加以及周围岩石介质的约束作用,致使岩石的破坏特征发生很大的变化。因此,采用多种方式进一步研究钻孔装药爆炸时的破坏分区特征,对指导应用具有重要意义。

在开展岩石介质爆炸效应的试验研究中,试件制作是一个关键技术。制作岩石试件可选择岩石原样和模拟材料两种。但是,岩石原样的开采加工难度很大,传感器内部安装困难,且不同试件由于其内部细微构造的差异,试件均匀性难以保证,导致试验结果离散度高等。水泥基混凝土类材料因材性均匀、易加工成型、各种传感器可预设等有利条件,成为一种理想的岩石模拟材料并广泛应用于研究中^[12-13]。本研究中设计了一种高强度砂浆混凝土,能够满足模拟中等强度以上均质岩石。采用这种高强砂浆构筑圆柱形试件,开展了钻孔装药爆炸破坏分区试验研究。

1 试验

1.1 高强砂浆材料制作

某地下国防工程修建于较坚硬至坚硬的石灰岩地层中,岩石强度为 60 MPa 以上。在选取岩石模拟材料过程中,普通砂浆由于存在大量微裂缝缺陷导致其力学性能不高,故在试验中不能使用。为提高强度,可采用超细掺合料优化级配和使用高效减水剂降低用水量两种方法,以提高密实度来提升强度,最终能够制成高强度砂浆材料。

高强砂浆材料设计制作主要以强度为根本指标。为满足岩石强度要求,首先判定强度影响因素,包括水胶比、水泥用量、砂率、高效减水剂及超细掺合料掺量。然后开展具体因素分析,即在其他因素不变下判明该因素变化对砂浆强度的影响,由此得到该因素影响的敏感性,同理依次得到其他影响因素的敏感性。最后根据数理统计极差分析和敏感性分析,最终确定最优的高强砂浆配合比。本试验中确定的高强砂浆配合比见表 1。

表 1 高强砂浆材料配合比

Table 1 Proportioning of high-strength mortar material

	比例	质量/kg
水泥	1	100.00
中砂	2.78	277.78
水	0.37	37.00
粉煤灰	0.5	50.00
硅粉	0.167	16.67
减水剂	1.5%	1.50

高强砂浆材料配比确定后,为判断分析过程的可靠性以及获得材料的力学参数,采用 500 t 材料试验机开展了静力试验,结果显示材料单轴抗压强度最高值为 97 MPa,最低值为 72 MPa,平均为 85 MPa,平均抗拉强度为 5.5 MPa,泊松比为 0.24,材料密度为 2 560 kg/m³,达到高强砂浆材料的强度设计要求,能够满足对岩石介质的模拟条件。

1.2 试验设计

试件设计为圆柱形,直径 1 500 mm,高 1 500 mm,用高强砂浆材料制作了 3 个试件。试件构筑方法为先用 5 mm 厚钢板制作成整体式外模板,再在内部浇筑砂浆材料,成型后钢板外模与砂浆材料成为一体,模拟实际岩石的边界条件。钻孔爆炸的位置位于圆柱形试件顶面正中心。先用轻便型地质钻机钻孔,孔径 50 mm,孔深 156 mm。再在孔内装药,采用爆炸威力高于常用工业炸药的 TNT 炸药,TNT 炸药密度为 1 600 kg/m³,爆速为 6 800 m/s。装药呈圆柱形,直径 48 mm,高 152 mm。由于药柱加工误差,实际试验中,3 次装药的直径分别为 47.6 mm、47.8 mm 和 48.2 mm,对应药量分别为 232 g、234 g 和 238 g。下文仅选取药量 234 g 的试验工况进行分析。上述钻孔及装药各参数均借鉴工程爆破参数并结合缩比理论进行计算确定^[14-15]。采用 PVDF 压力传感器测量试验过程中岩石介质爆炸压力。压力传感器埋置在试件中心轴线上,共 3 个测点,从上至下分别为测点 1、测点 2 和测点 3,测点间距为 150 mm,测点 1 至试件顶面 700 mm。圆柱形试件如图 1,试件尺寸及传感器埋置情况示意如图 2。爆炸结束后,通过宏观现象分析、钻芯取样分析和量测数据分析相结合的方法,判断高强砂浆材料模拟岩石介质的破坏分区。



图 1 圆柱形试件

Fig. 1 Cylindrical test piece

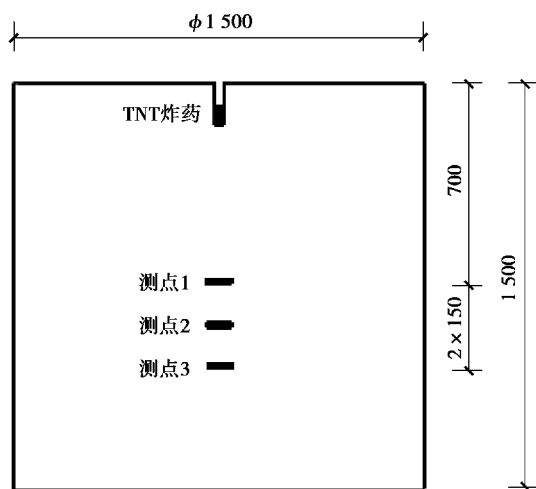


图 2 试件尺寸及传感器位置示意图

Fig. 2 Sketch of test piece size and sensors' location

2 试验结果分析

2.1 宏观破坏分析

图 3 为爆炸试验宏观破坏效果。从图 3 中可明显看出,高强砂浆模拟岩石试件在 TNT 爆炸作用下产生的破坏现象,其各种破坏区域区分明显。

由于装药爆炸的高温高压和强冲击作用,装药附近的结构遭到粉碎性破坏,砂浆材料粉碎成细小颗粒,为粉碎区。该范围较小,形状不规则,略成圆形,测量径长最大为 119 mm,最小为 99 mm,平均为 109 mm,约为钻孔直径的 2.2 倍。

随着爆炸冲击波的传播,其迅速衰减为强应力波。强应力波沿径向传播时对介质产生拉、压复合作用,且大于高强砂浆材料本身的动抗拉强度和动抗压强度,导致拉裂压碎并形成块度较小的压碎



图 3 爆炸试验宏观破坏效果

Fig. 3 Macroscopic effect of damage in the explosion test

区。该区颗粒组成相对较为均匀,粒径通常小于 50 mm,而且处于松散状态。对其范围进行测量,最大径长为 300 mm,最小径长为 255 mm,平均为 277.5 mm,约为钻孔直径的 5.55 倍。

超出压碎区直到边界的范围内,整个试件被各种径向、环向裂缝分割,形成大量裂隙。裂隙区范围至少超出试件直径,即与钻孔直径比值超过 30 倍。裂隙的分布特征表现为随着爆炸距离的增加,裂隙尺寸由大变小,分布由密变疏。裂隙区形成机制可描述为:强应力波传播过程中继续衰减,当径向压应力小于动抗压强度时压碎破坏消失,但此时切向拉应力仍大于动抗拉强度,拉断破坏仍持续发展并形成贯通压碎区的径向裂缝;径向压应力持续衰减到一定程度并继续压缩试件材料时,材料受压而产生弹性变形能,径向压应力传播过后弹性能释放并转变为卸载波,形成与压应力相反的向心拉应力,压、拉应力共同作用且大于动抗拉强度时,材料介质将被拉断并产生环向裂缝;在径向裂缝和环向裂缝形成的同时,材料介质还将受到切向应力作用而形成剪切裂缝^[11]。而随着径向裂缝、环向裂隙和剪切裂缝的形成、扩展与贯通,便逐渐发展成为裂隙区。

2.2 钻芯取样分析

宏观分析是从试件表面破坏情况出发,结合爆炸传播理论,对破坏分区现象进行了说明。而为了从试件内部作出判断,进一步说明破坏分区情况,则开展了钻芯取样分析。

在爆炸破坏后的试件上,从中心向外缘有代表性地选 4 孔,编号 1#~4#,用轻型地质钻机钻孔取芯,如图 4。孔中心距离试件中心分别为 0 mm、

160 mm、300 mm 和 700 mm,取芯长度直到试件底部。钻孔孔壁特征如图 5,芯样特征如图 6。

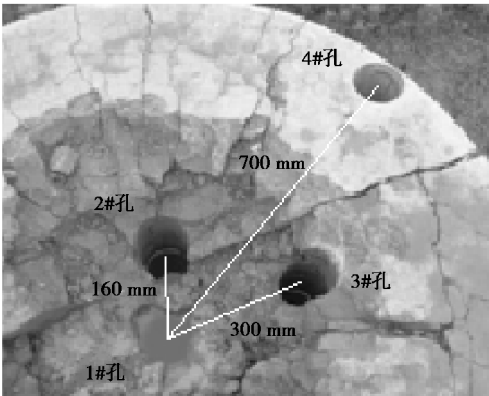


图 4 钻孔取芯情况

Fig. 4 Condition about boring core

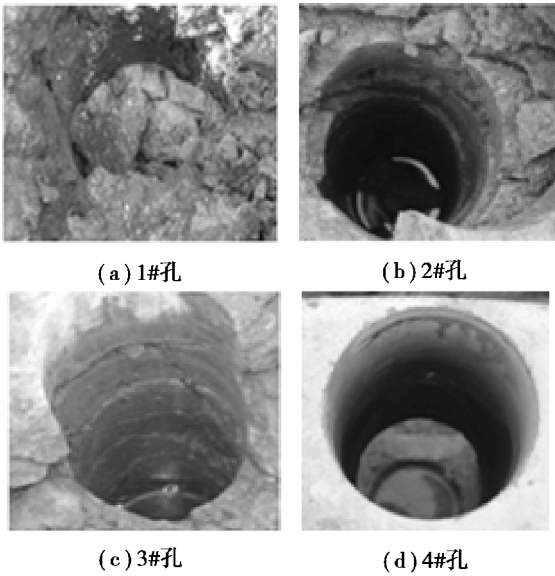


图 5 钻孔壁特征

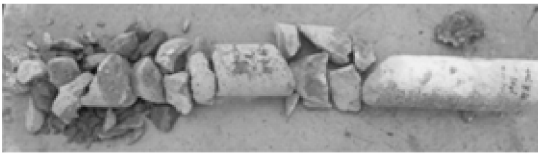
Fig. 5 Features of borehole wall

从芯样和钻孔的孔壁特征判断,试件中心位置破坏最严重,芯样完全破碎,钻孔壁裂缝密布;随着距中心的距离增大,爆炸作用影响越弱,芯样逐渐成形完整,钻孔壁逐渐光滑;在试件最边缘处,芯样基本完整。该判断与宏观现象描述一致。

为判断砂浆材料的强度变化,取芯后,选取较完整部位加工成 50× ϕ 100 mm 圆柱试块,进行静载试验并测量无侧限抗压强度,同时测量在试验初期浇筑试件时同批砂浆材料制作的 70 mm×70 mm×70 mm 立方试块的抗压强度,龄期约 150 d。由于 ϕ 100 mm 圆柱试件为非标试件,与 70 mm 立方标准试块强度值不能直接对比,仅作参考。强度测量值见表 2。



(a) 1#孔



(b) 2#孔



(c) 3#孔



(d) 4#孔

图 6 1~4#孔芯样特征

Fig. 6 Features of cores in holes from No.1 to No.4

表 2 砂浆混凝土无限限抗压强度

Table 2 Unconfined compressive strength of mortar concrete

试件	径、竖向距离/mm	强度/MPa
ϕ 100 mm 圆柱试块	160/453	26.9
	300/555	31.2
	700/58	51.1
	700/162	50.3
	700/275	58.1
	700/344	60.4
	700/470	66.9
70 mm 立方试块	平均值	106.5

注:径向-距圆柱形试件中心轴线;竖向-距圆柱形试件顶面。

能取出完整芯样的部位处于裂隙区和弹性区,裂隙区的上部是压碎区和粉碎区,粉碎区形成爆坑,这两部分均不能取出完整岩芯。从表 2 可知,随着到爆点距离的增加,强度逐渐增大,其中,裂隙区受爆炸作用影响大,损伤裂隙发育多,强度降低明显;弹性区受爆炸影响较小,强度变化小。按强度测量值判断,径向 700 mm、竖向 470 mm 处试块

强度为 66.9 MPa,已比较接近 85 MPa 的设计值,其直线距离约为 780 mm,可作为弹性区边界。而砂浆材料 150 d 龄期标准试件强度平均值为 106.5 MPa,已经远超设计值。根据钻芯取样及对试件抗压强度的测量结果分析,大致判断竖向深度方向的破坏分区范围为:爆坑深度为 185 mm,破碎区深度为 205 mm,裂隙区深度为 780 mm,超过 780 mm 的范围为弹性区,如图 7 所示。

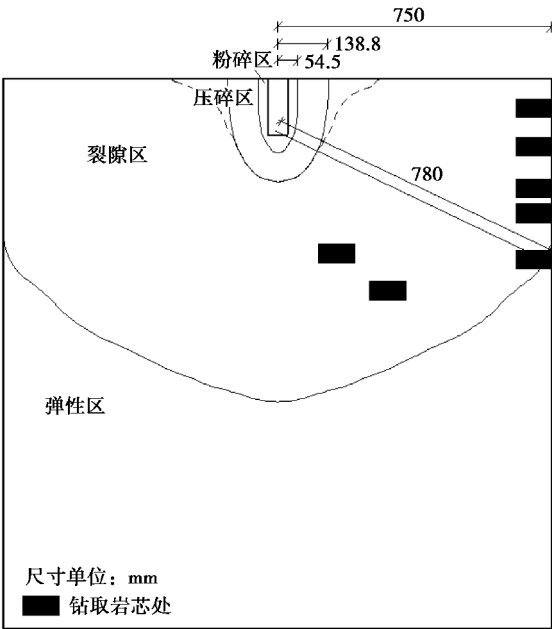


图 7 钻孔取芯判断的试件破坏分区示意
Fig.7 Sketch of damage zones discriminated
by boring cores

2.3 量测结果与计算分析

爆炸试验中所测得的径向应力波形如图 8,波形直接读取及部分计算数据见表 3。

表 3 各测点量测及计算数据

Table 3 Measure and calculation data of all points			
测点	1#	2#	3#
峰值压力/MPa	25.0	19.7	14.1
到达时间/ms	3.295	3.329	3.365
比例距离 r/r_b	25.83	32.08	38.33
衰减指数 α	2.033	1.975	1.970

据图 7 及表 3 分析可知,应力波到达测点 1 的时间为 3.295 ms,到达测点 3 的时间为 3.365 ms,两测点间距为 300 mm,则计算应力波波速 C_p

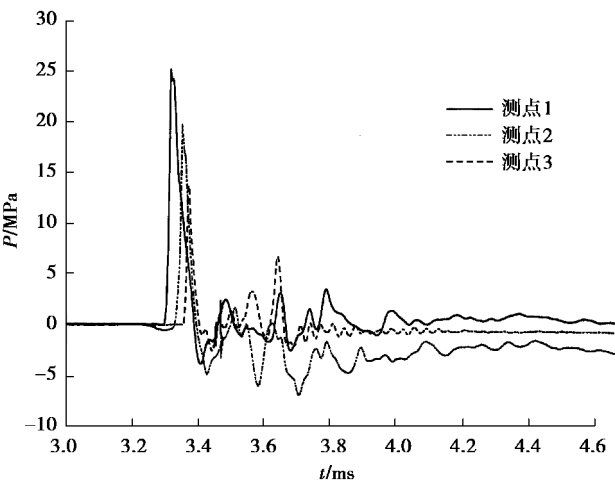


图 8 压力测点波形图

Fig. 8 Waveforms of all points for pressure measurement
为4 286 m/s。

根据应力波在介质中的传播衰减规律,径向应力与比例距离呈指数关系,见式(1):

$$\sigma_r = \frac{P}{R^\alpha} \tag{1}$$

式中: σ_r 为峰值压力,MPa; P 为冲击波初始压力,MPa; R 为比例距离, $R=r/r_b$,其中, r 为距装药中心距离, r_b 为装药半径; α 为介质中应力波衰减指数。

柱状耦合装药条件下,装药爆炸对岩石孔壁激发的冲击波初始压力 P 可按式(2)计算:

$$P = \frac{1}{4} \rho_0 D^2 \cdot \frac{2 \rho C_p}{\rho C_p + \rho_0 D} \tag{2}$$

式中: ρ_0 为装药密度,值为 1 600 kg/m³; D 为 TNT 炸药爆速,值为 6 800 m/s; ρ 为介质密度,值为 2 560 kg/m³; C_p 为介质中纵波速度。

通过式(1)和(2)并代入相关参数可计算出各测点的衰减指数 α ,见表 3。计算结果显示测点 1 的应力波衰减指数高于测点 2 和 3,这是由于爆炸近区冲击波衰减较快引起。随着应力波传播距离的增加,岩石模拟介质中应力波衰减指数趋于常数。

岩石介质爆炸破坏作用过程中,粉碎区与压碎区的分区界定即为冲击波衰减成强应力波,此时岩石介质受到压、拉和剪切力复合作用。将其看做平面应变问题,采用强度理论进行压碎区和裂隙区范围的计算。其中,径向应力 σ_r 可按式(1)计算。

切向应力 σ_θ 的计算式为式(3):

$$\sigma_\theta = - \frac{\mu}{1 - \mu} \sigma_r \tag{3}$$

式中: μ 为介质材料的泊松比,值为 0.24。

按照平面问题设定,与其垂直方向应力 σ_z 可按式(4)计算。

$$\sigma_z = \mu(\sigma_r + \sigma_\theta) \tag{4}$$

根据强度理论,介质中任一点应力 σ_s 可按式(5)计算。

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2]} \tag{5}$$

介质动屈服强度通常是 10~15 倍的单轴抗压强度 σ_c ,值为 85 MPa。若介质中任一点应力超过其动屈服强度时,则将发生破坏,判断准则为式(6):

$$\sigma_s \geq (10 \sim 15)\sigma_c \tag{6}$$

将上述(1)~(5)带入式(6),取 $\sigma_s = 10\sigma_c$,整理可得式(7):

$$r = \sqrt[1.97]{\frac{1.1535\rho_0 D^2 \rho C_p}{20\sigma_c(\rho C_p + \rho_0 D)}} \times r_b \tag{7}$$

代入数据计算得出压碎区半径 $r = 123.5 \text{ mm}$,比例距离 $R = 5.15$ 。

应力波传播过程中持续衰减,当衰减到小于介质的动抗压强度时,发生以拉裂为主的破坏,即当切向拉应力大于抗拉强度 σ_t ,值为 5.5 MPa,判断准则为式(8):

$$\sigma_\theta \geq \sigma_t \tag{8}$$

将上述式带入式(8)并整理可得式(9):

$$r = \sqrt[1.97]{\frac{\mu}{1 - \mu} \frac{\rho_0 D^2 \rho C_p}{2\sigma_t(\rho C_p + \rho_0 D)}} \times r_b \tag{9}$$

代入数据计算得出裂隙区半径: $r = 826.5 \text{ mm}$,比例距离 $R = 34.44$ 。

2.4 试验结果对比分析

3 次试验结果见表 4。从表中可知,随着爆炸药量的增加,模拟岩石材料介质中各破坏分区范围相应增大。针对 3 种具体分析方法而言,宏观现象分析和理论计算分析结果非常接近,而钻孔取芯方法由于取点数量有限、随机性较大,故分析结果与前两种方法偏差较大,但总体范围及变化趋势能够保持基本一致。3 次试验分析结果均如此,因此,能够确定 TNT 炸药在**高强砂浆模拟岩石介质内部**不完全封闭爆炸时的破坏分区范围。

表 4 各破坏分区半径
Table 4 Radius of all damage zones

试验工况	分析方法	粉碎区	压碎区	裂隙区	弹性区
$w = 232 \text{ g}$ $r_b = 23.8 \text{ mm}$	宏观现象	52	135.5	>750	—
	钻孔取芯	—	205	770	>770
	理论计算	—	122.3	817.3	—
$w = 234 \text{ g}$ $r_b = 23.9 \text{ mm}$	宏观现象	54.5	138.8	>750	—
	钻孔取芯	—	205	780	>780
	理论计算	—	123.5	826.5	—
$w = 238 \text{ g}$ $r_b = 24.1 \text{ mm}$	宏观现象	57.5	143.1	>750	—
	钻孔取芯	—	220	820	>820
	理论计算	—	124.6	834.8	—

3 结论

试验采用添加超细掺合料和高效减水剂的方法提高砂浆密实度,进而提高砂浆强度,优化配制的高强砂浆强度可达 105.6 MPa,可用于模拟中等以上强度的岩石介质。

钻孔装填 TNT 炸药在**高强砂浆模拟岩石介质内部**爆炸所形成的破坏形态分为 4 个区域,即:粉碎区、压碎区、裂隙区和弹性区,其中爆坑粉碎区半径约 55 mm,爆坑压碎区半径约 130 mm,爆坑口部裂隙区半径约 800 mm,分别是钻孔装药半径的 2.2 倍、5.2 倍和 32 倍。

根据爆炸冲击波传播衰减理论和三向应力状态下的岩石强度理论,分析了爆炸应力波与介质的相互作用过程及各破坏分区产生机理,给出了压碎区和裂隙区范围的计算公式,计算结果与宏观现象及钻孔取芯试验结果基本相符。

参考文献(References)

[1] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京:国防工业出版社, 2005. (Wang Lili. Foundation of stress wave [M]. Beijing: Nation Defense Industry Press, 2005. (in Chinese))

[2] 戚承志, 钱七虎, 陈灿寿, 等. 准脆材料动力强度的本质和侧向惯性约束作用[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(5): 975-980. (Qi Chengzhi, Qian Qihu, Chen Canshou, et al. The essence of dynamic strength of quasi-brittle materials and the role of lateral inertia confinement effect[J]. Chinese Journal of Underground

- Space and Engineering, 2013, 9(5): 975-980. (in Chinese))
- [3] 陈士海,王明洋,钱七虎. 岩体中爆破破坏分区研究[J]. 爆破器材, 2004, 33(3): 33-36. (Chen Shihai, Wang Mingyang, Qian Qihu. Study on distinction of blasting crack zones and time course of stress in rocks [J]. Explosive Materials, 2004, 33(3): 33-36. (in Chinese))
- [4] 徐干成,顾金才,袁伟泽,等. 洞室围岩交叉锚固结构抗爆新能模型试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(5): 1078-1085. (Xu Gancheng, Gu Jincai, Yuan Weize, et al. Model test study on explosive resistance of intercross bolted rock mass structure in underground space[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(5): 1078-1085. (in Chinese))
- [5] 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 Xiang, Wu Xiangyun, Ren Huiqi, 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))
- [6] 左建平,刘连峰,陈绍杰,等. 采动卸荷岩石破坏的理论模型与实验验证[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(5): 1002-1009. (Zuo Jianping, Liu Lianfeng, Chen Shaojie, et al. Investigation on constitutive model of rock failure under mining unload and its experimental validation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(5): 1002-1009. (in Chinese))
- [7] 刘红岩,秦四清,杨军. 爆炸荷载下岩石破坏的数值流形方法模拟[J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(1): 50-56. (Liu Hongyan, Qin Siqing, Yang Jun. Simulation of rock failure by numerical manifold method under blasting load[J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(1): 50-56. (in Chinese))
- [8] 马文伟,赵光明,孟祥瑞,等. 冲击载荷下砂岩强度特性及破坏规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(2): 374-380. (Ma Wenwei, Zhao Guangming, Meng Xiangrui, et al. Research on strength properties and failure law of sandstone under impact loading[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(2): 374-380. (in Chinese))
- [9] 葛涛,王明洋. 坚硬岩石在强冲击荷载作用近区的性状研究[J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(4): 306-311. (Ge Tao, Wang Mingyang. Characters near strong impact loading zone in hard rock [J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(4): 306-311. (in Chinese))
- [10] 王云飞,郑晓娟,褚怀保,等. 花岗岩高应力状态脆延破坏细观力学强度特性[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(5): 1180-1185. (Wang Yunfei, Zheng Xiaojuan, Chu Huaibao, et al. Brittle and ductile failure meso-mechanics strength properties of granite under high stress state[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(5): 1180-1185. (in Chinese))
- [11] 马少鹏,周辉. 岩石破坏过程中试件表面应变场演化特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1667-1673. (Ma Shaopeng, Zhou Hui. Surface strain field evolution of rock specimen during failure process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1667-1673. (in Chinese))
- [12] 耿晓阳,张子新. 砂岩相似材料制作方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(1): 23-28. (Geng Xiaoyang, Zhang Zixin. Study on preparation methods for similar materials of sandstone[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(1): 23-28. (in Chinese))
- [13] 唐仕英,古仁红,李捷,等. 早高强砂浆和混凝土的力学性能及抗爆实验[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2007, 8(5): 474-477. (Tang Shiyang, Gu Renhong, Li Jie, et al. Mechanical performance and blast-resistant test of early high-strength mortar and concrete[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2007, 8(5): 474-477. (in Chinese))
- [14] 李清,梁媛,任可可,等. 聚能药卷的爆炸裂纹定向扩展过程试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1684-1689. (Li Qing, Liang Yuan, Ren Keke, et al. Experimental study of propagation of directional cracks with shaped charge under blasting load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(8): 1684-1689. (in Chinese))
- [15] 郑云木,田强,王起帆,等. 有限长柱形装药爆炸应力波传播分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(5): 1030-1034. (Zheng Yunmu, Tian Qiang, Wang Qifan, et al. Analysis of stress wave propagation of finite cylindrical charge explosion [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(5): 1030-1034. (in Chinese))