

DOI: 10.11858/gywlxb.20261087

球形靶爆炸混凝土抛掷试验与数值仿真*

杜永, 张雨平, 戴湘晖, 王可慧, 王凯强, 赵生伟

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 为研究工程爆破中爆破参数对碎石抛掷的影响, 设计了基于数字高速图像采集系统的球形靶爆炸混凝土抛掷实验系统, 开展了单孔和三孔装药条件下混凝土抛掷实验研究, 对比了单孔和三孔装药条件下球形靶爆炸后的破坏模式和抛掷质量。建立了球形靶爆炸仿真模型, 通过实验验证了模型的准确性, 并仿真计算了不同炸药孔数量和不同球形靶强度下混凝土的抛掷特性。结果表明, 炸药量为 5 g 时, 三孔装药比单孔装药的抛掷混凝土质量多 89%; 炸药量为 10 g 时, 三孔装药比单孔装药的抛掷混凝土质量多 82.1%。可见, 当炸药量不变时, 增加炸药孔数量能够有效提升混凝土抛掷质量和爆坑面积, 有利于提高生产效率、降低成本。仿真计算结果与试验数据吻合较好。

关键词: 球形靶; 爆炸; 混凝土抛掷; 抛掷质量

中图分类号: O389; O521.9

文献标识码: A

在工程爆破领域, 岩体爆炸后抛掷出的碎块质量和抛掷速度直接影响爆炸抛掷的生产效率和生产安全^[1]。岩体爆炸问题涉及炸药爆轰、岩土介质相变、岩体破坏等关键过程, 炸药爆轰产生的冲击波和爆生气体对周围岩石做功, 使岩石产生破碎^[2-4]。但破碎岩石的抛掷情况取决于炸药量、炸药埋深等爆破参数, 合理的爆破参数能够获得理想的爆坑面积、爆堆形态, 有效提高生产效率, 改善破碎效果, 降低生产成本^[5]。抛掷爆破技术源于美国的 McCoy Coal 露天矿山开采, 直到 2007 年黑岱沟露天煤矿开采才将抛掷爆破技术首次成功引入国内^[6-7]。如何有效利用爆破参数的调整, 实现爆炸抛掷动能合理化应用是许多爆破科研学者关心的问题。

目前有关爆炸碎石抛掷的研究方法主要分为三种: ①通过理论模型预测爆炸碎石抛掷规律; ②通过动力学软件对爆炸抛掷进行数值仿真计算; ③通过开展相关爆炸抛掷试验进行研究。在计算抛掷堆积时, “体积平衡法”和“弹道理论法”是国内工程界常用的两种方法, 这两种方法的计算结果都与药包布置、炸药能力有关。80 年代, 国内爆破工程领域就开展了爆炸碎石运动规律的研究。要分析爆炸碎石的运动规律, 首先需要确定其体积形态和抛掷速度分布及大小, 梁润^[8]基于能力守恒原理, 采用岩石爆破后的推移运动与流体运动的比拟方法提出破碎岩石抛掷速度的预测公式。90 年代, 于亚伦^[9]课题组提出了弹道理论的分条方法及抛掷轨道的计算公式, 同时将 Weibull 概率分布函数成功地引入爆堆形态的分布计算中, 以南芬露天铁矿为例, 根据实测值提出了爆堆初始高度的修正方法, 建立台阶爆堆形态的预测模型。张云鹏, 于亚伦^[10]认为岩石的抛掷过程遵循弹道理论, 爆堆的形成可以分为抛掷和堆积两个过程, 根据岩石抛掷的初速度和抛掷角两个参数确定了岩石的运动轨迹, 提出了台阶爆堆形态的预测模型。李克民^[11]基于理论结合经验公式的常规计算方法与 D' Appolonia “图解法”模型提出了抛掷爆破参数的过程及优化方法, 结果表明: 起爆延时时间和炸药类型等抛掷爆破参数直接影响抛掷爆破效果。周伟^[12]基于弹道理论和露天采矿学基本原理, 定义了有效抛掷率, 系统分析了影响抛掷爆破的参数, 建立了有效抛掷率预测模型。李祥龙^[13]通过开展台阶高度对抛掷率的影响实验, 分析了台阶高度对抛掷爆破效果的影响, 台阶高度的越高爆

*收稿日期: 2026-04-23; 修回日期: 2026-05-15

基金项目: 科工局预研项目 (KJSP2023020304)

作者简介: 杜永 (1992—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事冲击动力学研究. E-mail: duyong@nint.ac.cn

通讯作者: 王可慧 (1975—), 女, 博士, 研究员, 主要从事冲击动力学研究. E-mail: wangkehui@nint.ac.cn

堆最远抛距和抛掷率越大,爆堆形态也越平滑。韩亮^[14]引入 Weibull 概率分布模型作为数学模型对实测爆堆曲线进行模拟,建立了 BP 神经网络来预测 Weibull 模型的控制参数,发现 Weibull 预测曲线与真实爆堆曲线较为接近,各参数的预测误差均未超过 5%。丁小华^[15]运用非线性理论分析研究了爆区各排排距、倾角、孔深及单耗等因素对爆堆形态的影响,采用聚类分析、回归分析、线型插值等方法预测爆堆形态、有效抛掷率和爆堆松散系数。经现场实际检验,预测结果准确率达 90%以上,达到了现场应用的要求。李祥龙^[16]基于 AUTODYN 构建了爆破漏斗试验的等比例计算模型,对实心圆柱体模型鼓包运动的过程进行数值分析,发现鼓包运动受冲击波、爆生气体、碎石和地心引力等共同影响,数值结果和试验结果吻合较好,两者的爆破漏斗半径、深度较为一致。黄永辉^[4]以哈尔乌素露天矿高台阶抛掷爆破工程为背景,基于 AUTODYN 软件中 SPH-FEM 耦合方法,构建二分之一等比例的三维高台阶抛掷爆破模型,得到了抛掷速度规律。Lanari^[17]优化了有限元、离散元 2 维光滑粒子模型,模拟了岩石爆破过程,通过在模型中加入铜套管模拟有、无爆生气体作用的两种状态,将爆生气体和冲击波作用分开研究,证实爆堆的运动过程主要是由爆生气体推动。

现有文献研究重点主要集中在碎石抛掷速度和运动规律,对于碎石抛掷质量和爆坑面积的研究较少。本文建立球形靶爆炸抛掷试验系统,通过对球形靶爆炸后碎石抛掷情况分析,获得爆炸后碎石的抛掷质量;对比单孔和多孔爆炸的碎石抛掷质量,分析炸药孔数量对爆炸面积和碎石抛掷的影响;同时建立球形靶爆炸仿真模型,研究炸药孔数量、混凝土强度等参数对碎石抛掷质量和开坑情况的影响,以期为爆炸抛掷技术的发展提供技术支撑。

1 球形靶爆炸实验系统与高速采集系统

1.1 数字高速图像采集系统

本文设计了一种基于数字高速图像采集系统的球形靶爆炸运动轨迹测量系统。其中,数字高速图像采集系统由 AMETEK 公司 PHANTOM TMX-7510 高速数字相机主机和数据采集系统组成,考虑现场光照条件和相机距球形靶安全距离,设置拍摄范围为 4.3m \times 2.7m,照片分辨率 1280 \times 800 像素,分辨精度 3.38mm,图像幅间延时根据爆破实际情况设为 50ms。试验为保证起爆时间和拍照同步,将高速相机的触发线缠绕在雷管上,起爆器使雷管爆炸的同时启动相机系统拍照。图 1 是现场放置的数字高速图像采集系统。



图 1 高速摄像电控与数据采集系统图

Fig.1 Electronic control and data processing system of high-speed camera

1.2 爆炸实验方案设计

球形靶爆炸试验布局如图 2 所示。将球形靶吊装在试验支架上,吊绳长度为 1100mm,在球形靶一侧设置直径为 10mm 的开孔,深度为 50mm,填装炸药类型为 TNT,开孔方向与摆动方向平行,使得爆炸能量能够推动球形靶向一个方向摆动,这样将不会产生其他方向上的摆动,不影响抛掷动量计算。为避免次序起爆时球形靶摆动方向不唯一,影响球形靶摆动数据采集,因此三孔装药为同时起爆。单孔位于球形靶的几何中心水平方向上,三孔设置为等边三角形,边长为 100mm,等边三角形的几何中心与球形靶的几何中心在同一水平方向上,球形靶爆炸试验情况如表 1 所示。

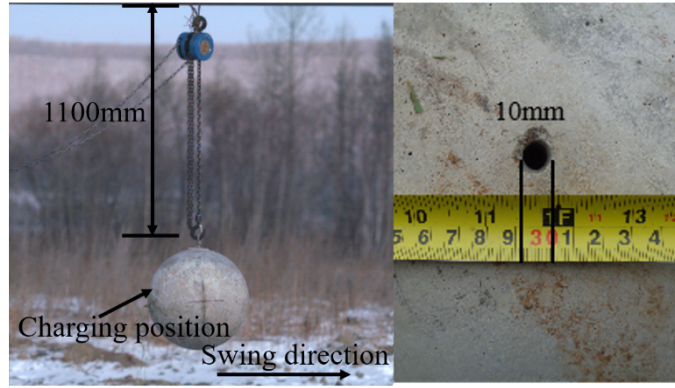






图2 球形靶爆炸试验布局
Fig.2 Layout explosion test of spherical target

表1 球形靶爆炸试验情况
Table 1 Explosion test of spherical target

Number	Target strength/MPa	Charge mass/g	Number of explosive charge	
			holes / pcs	Charge hole distribution
1	20	5	1	
2	20	10	1	
3	20	5	3	
4	20	10	3	

试验开始时，通过起爆装置引爆球形靶炸药孔内炸药，在爆炸空腔形成之后，冲击波对混凝土介质进行压碎密实和产生径向裂纹，经自由面反射后，稀疏波抛掷破碎混凝土，导致混凝土的自由飞散，球形靶在爆炸抛掷动量的反作用下进行摆动。采用数字高速图像采集系统记录混凝土的飞射过程和球形靶每一时刻的运动轨迹，计算得到球形靶的运动速度；同时称量试验后球形靶的质量，计算爆炸时混凝土抛掷对球形靶的反冲动量，根据总动量守恒可以得到碎石抛掷的总动量。

抛掷动量是抛出物体时所具有的动量，其大小为质量乘以初速度，方向与抛出方向一致，如式(1)所示。

$$\vec{p} = m\vec{v} \quad (1)$$

式中： p 为抛出物体时所具有的动量， m 为抛出物体的质量， v 为抛出物体的速度。

在混凝土爆炸过程中，碎石抛掷动量的大小取决于炸药能力、混凝土强度和炸药结构，碎石抛掷的最大飞行距离与初速度、角度有关，动量越大，越难被空气阻力迅速减速，飞行距离更远。在实际工况中，碎石抛掷往往是大量不同尺寸颗粒的集合，需要考虑每一块碎石的质量、初速度和抛射角等参数。基于式(1)可以得到每一块碎石的抛掷动量，总抛掷动量为

$$\vec{P}_{total} = \sum_{i=1}^N m_i \vec{v}_i \quad (2)$$

在静止状态下混凝土靶起爆后，因为总动量守恒所以碎石抛掷的总动量等于反冲动量，即起爆后剩余混凝土靶的动量。

2 实验结果

图3为三孔10g球形靶爆炸破坏情况，高速相机垂直于球形靶摆动方向拍摄的靶体运动过程，根据高速相机拍摄的画面可以确定球形靶的最大摆角为 10.91° ，此时球形靶已经完成了混凝土抛掷（试验后对球形靶称重可知抛掷质量为4.68kg），考虑到碎石抛掷的过程是在起爆瞬时完成，可以认为起爆瞬时球形靶的最大速度为混凝土抛掷后的球形靶速度0.61m/s。四种工况下球形靶速度时程曲线如图4所示，可以看出，与单孔装药相比，三孔装药条件下球形靶摆动速度明显更大；起爆瞬间球形靶获得最大的摆动速度，随后摆动速度逐渐减小直至为零（最高点）。

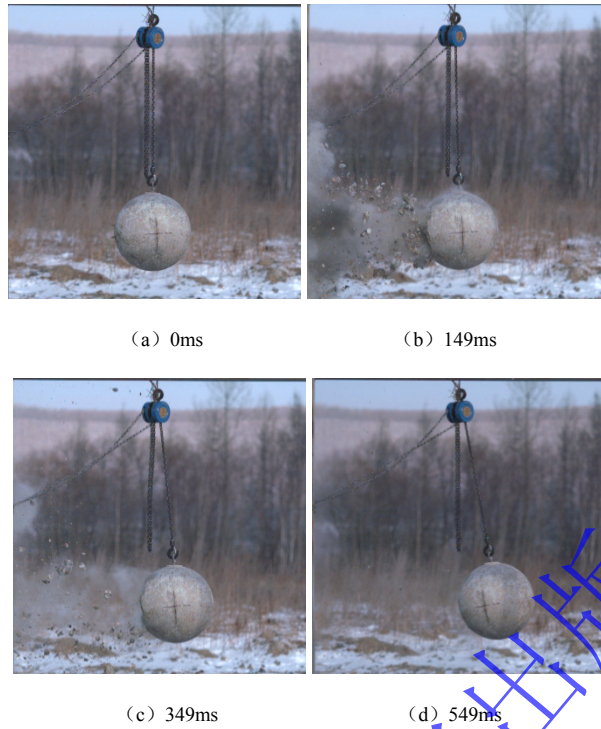


图3 球形靶运动过程图像

Fig.3 Spherical target motion image

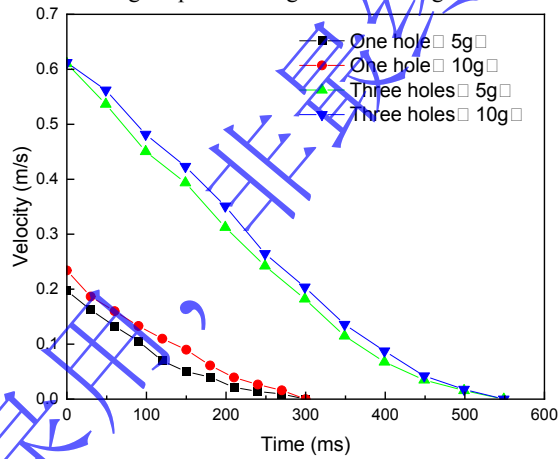


图4 球形靶速度时程曲线

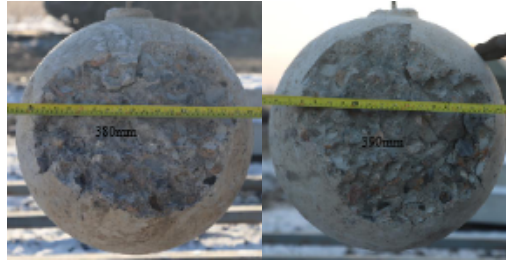
Fig.4 Spherical target velocity time history curve

图5为球形靶破坏情况，试验后靶体表面以炸药孔为中心，形成圆形的混凝土抛掷区域，抛掷区域外没有明显的裂纹。混凝土的抛掷主要是由于爆炸产生的爆生气体使混凝土内骨料间的胶结力减弱，当胶结力达到临界时碎石剥离混凝土靶。其中单孔装药时，5g和10g炸药的混凝土爆坑直径为240cm和245cm；三孔装药时，5g和10g炸药的混凝土爆坑直径为380cm和390cm。



(a) Single-hole 5g

(b) Single-hole 10g



(c) Three-hole charge 5g (d) Three-hole charge 10g

图5 球形靶破坏情况

Fig.5 Characteristics of the spherical target

试验后球形靶相关结果数据汇总如表 2 所示。当炸药量为 5g 时，三孔比单孔装药的抛掷的混凝土质量多 89.00%；炸药量为 10g 时，三孔比单孔装药的抛掷混凝土质量多 82.10%；当单孔装药时，10g 比 5g 炸药的抛掷混凝土质量多 17.89%；当三孔装药时，10g 比 5g 炸药的抛掷混凝土质量多 13.59%。上述结果对比表明靶板强度和炸药量不变时，增加炸药孔数量能够有效提升混凝土抛掷质量，提高矿石开采生产效率。

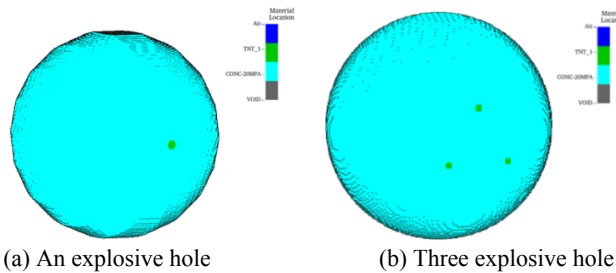
表 2 试验参数及结果数据
Table 2 Test parameters and results data

Number	Number of explosive charge holes / pcs	Charge mass/g	Target mass/kg	Remaining target mass/kg	Projectile mass/kg	Throw momentum/kg · m/s
1	1	5	162.86	160.68	2.18	31.670028
2	1	10	161.46	158.89	2.57	37.212038
3	3	5	164.32	160.2	4.12	97.78608
4	3	10	160.52	155.84	4.68	95.405248

3 球形靶爆炸仿真计算

3.1 建立模型

基于试验研究，建立球形靶爆炸仿真模型，混凝土强度为 20MPa，炸药孔直径为 10mm。球形靶爆炸模型主要包括球体靶、炸药两部分，全部采用 SPH 光滑粒子算法建立模型，图 6 为建立的球形靶爆炸仿真模型。根据炸药情况将仿真计算分为两种工况：①一个炸药孔，炸药孔深度为 50mm，炸药质量为 5g，混凝土球体靶标 SPH 粒子数 1730478 个，炸药 SPH 粒子数 2940 个；②三个炸药孔，炸药孔深度均为 50mm，每个炸药孔炸药质量为 1.67g，全部填充炸药，混凝土球体靶标 SPH 粒子数 1522032 个，炸药 SPH 粒子数 2926 个。三孔为等边三角形排列，边长为 100mm，其几何中心与球形靶的几何中心在同一水平方向上。混凝土主要材料参数如表 3 所示。



(a) An explosive hole (b) Three explosive hole

图 6 球体靶数值仿真模型

Fig.6 Spherical target numerical simulation model

表 3 混凝土材料参数

Table 3 Concrete material parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
-----------	-------	-----------	-------

Density	2.45×10 ³ kg/m ³	Elastic modulus	27
Compressive strength	20MPa	Poisson's ratio	0.20
Tensile strength	1.54MPa	Initial porosity	1.10
Compaction density ratio	0.90		

TNT 炸药爆轰产物使用 JWL 状态方程:

$$E_k = \frac{1}{2} m v_{\max}^2, \quad (3)$$

式中, p 为压强; ρ 为密度; E 为比内能; $\eta = \rho/\rho_0$ 为相对密度; $A, B, R1, R2, w$ 为相关参数。TNT 炸药密度为 1.63g/m³, 参数如表 4 所示, 其中 D 为爆速。

表 4 TNT 爆轰参数

Table 4 TNT detonation parameter

Parameter	Value	Parameter	Value
ρ_0	1.63g/cm ³	B	3.75GPa
D	6930m/s	$R1$	4.15
E	6×10 ³ kJ/m ³	$R2$	0.90
A	373.77GPa	w	0.35

3.2 仿真结果分析

图 7-图 9 为爆炸后球形靶破坏过程, 可以看出在爆炸开始后, 球形靶炸药孔处首先受爆炸影响发生破坏, 形成爆炸空腔, 爆炸冲击波对混凝土介质挤压破坏, 部分碎块以较高速度喷射而出, 同时反推球形靶朝碎石运动相反方向偏移。仿真和试验结果对比如表 5 所示, 与试验结果相比, 单孔装药时抛掷质量的仿真误差为 9.6%, 爆坑直径的仿真误差为 4.6%, 最大抛掷速度的仿真误差为 8.3%; 三孔装药时抛掷质量的仿真误差为 8.5%, 爆坑直径的仿真误差为 3.9%, 最大抛掷速度的仿真误差为 11.7%。对比图 7 和图 8, 随着球形靶强度的增加, 抛掷动量减小 34.31%。对比图 7 和图 9 可以看出, 5g 炸药在单孔爆炸时, 炸药孔周围为无限边界条件, 爆坑受到的边界效应较强; 在三孔爆炸时, 三个爆坑的中间区域受到三个方向炸药爆炸所产生的冲击波挤压破坏, 中间区域的混凝土处于有限边界条件, 导致中间区域产生一部分的混凝土抛掷, 增加总体的混凝土抛掷质量。由此可见, 当三个孔的距离较近时, 三孔爆炸后会将中间区域的混凝土完全抛掷, 形成单一的大爆坑, 此时的混凝土抛掷质量达到最大值。

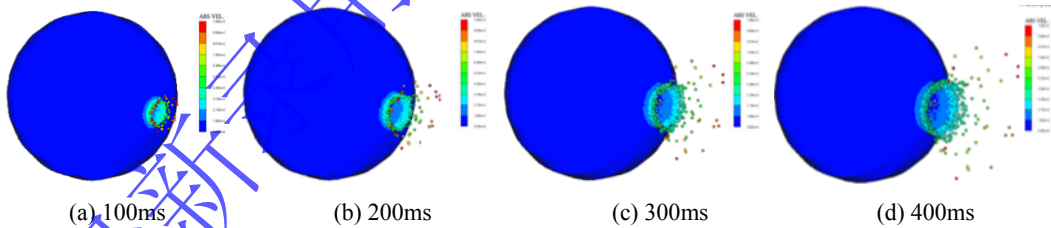


图 7 单孔 5g 炸药在 C20 球形靶中爆炸数值仿真计算

Fig.7 Numerical simulation calculation of C20 spherical target of 5g explosive at single hole

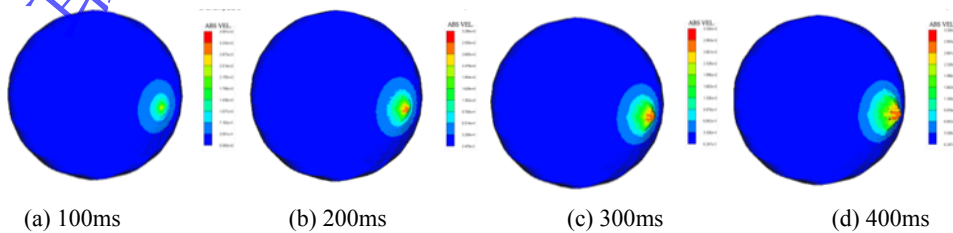


图 8 单孔 5g 炸药在 C40 球形靶中爆炸数值仿真计算

Fig.8 Numerical simulation calculation of C40 spherical target of 5g explosive at single hole

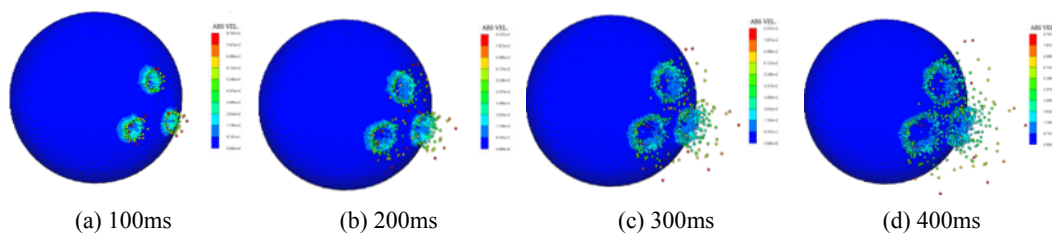


图9 三孔 5g 炸药在 C20 球形靶中爆炸数值仿真计算

Fig.9 Numerical simulation calculation of C20 spherical target of 5g explosive at three-hole

表 5 仿真和试验结果对比

Table 5 Comparison of simulation and test results

Result comparison	Number of explosive charge holes/pcs	Test results	Simulation results	Relative error/%
	1	2.18	2.39	9.6
Projectile mass/kg	1	-	1.57	-
	3	4.12	4.47	8.5
Crater diameter/mm	1	240	251	4.6
	3	380	395	3.9
Maximum throw velocity/m/s	1	0.1971	0.2135	8.3
	3	0.6104	0.6819	11.7

4 结 论

本文开展了球形靶爆炸抛掷试验，根据试验获取的球形靶破坏模式和抛掷质量，研究了单孔和多孔爆炸对混凝土抛掷的影响，同时建立球形靶爆炸模型，仿真结果同试验结果符合性较好。

(1) 炸药起爆后，以球形靶炸药孔为中心形成圆形的混凝土脱落区域，脱落区域外没有明显的裂纹。单孔装药时，10g 比 5g 炸药爆炸后爆坑面积大 4.21%；三孔装药时，10g 比 5g 炸药爆炸后爆坑面积大 11.42%。

(2) 炸药量不变时，增加炸药孔数量能够有效提升混凝土抛掷质量。当炸药量为 5g 时，三孔比单孔装药的抛掷的混凝土质量多 89.00%，药量增加至 10g 时，三孔比单孔装药的抛掷混凝土质量多 82.10%。

(3) 球形靶爆炸的数值计算结果与试验值吻合较好。在爆炸开始后，部分碎块以较高速度喷射而出，同时反推球形靶朝碎石运动相反方向偏移。当炸药量不变时，随着球形靶强度从 20MPa 增加到 40MPa，抛掷质量减小；球形靶强度不变时，三孔装药比单孔装药的抛掷质量更多。与试验结果相比，三孔装药时抛掷质量的仿真误差为 8.5%，爆坑直径的仿真误差为 3.9%，最大抛掷速度的仿真误差为 11.7%。

参考文献

- [1] 陈春超, 陈士海, 张智宇, 等. 台阶爆破模型试验下破碎岩石抛掷速度规律分析 [J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2023, 44(2): 157-165. (CHEN Chunchao, CHEN Shihai, ZHANG Zhiyu, et al. Analysis of throwing velocity law of broken rocks in bench blasting model experiment[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2023, 44(2):157-165.)
- [2] 冷振东, 卢文波, 胡浩然, 等. 爆生自由面对边坡微差爆破诱发振动峰值的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(9): 1815-1822. (LENG Zhendong, LU Wenbo, HU Haoran, et al. Studies on influence of blast-created free face on ground vibration in slope blasts with millisecond-delays[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(9): 1815-1822.)
- [3] 王志亮, 毕程程, 李鸿儒. 混凝土爆破损伤的 SPH-FEM 耦合法数值模拟 [J]. 爆炸与冲击, 2018,

- 38(6): 1419-1428. (WANG Zhiliang, BI Chengcheng, LI Hongru. Numerical simulation of blasting damage in concrete using a coupled SPH-FEM algorithm[J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(6): 1419-1428.)
- [4] 黄永辉, 刘殿书, 李胜林,等. 高台阶抛掷爆破速度规律的数值模拟 [J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(4): 495-500. (HUANG Yonghui, LIU Dianshu, LI Shenglin, et al. Numerical simulation on pin-point blasting of sloping surface[J]. Explosion and Shock Waves, 2014, 34(4): 495-500.)
- [5] 张墨, 张瑞新, 付士根,等. 露天矿抛掷爆破技术发展现状及应用前景 [J]. 振动与冲击, 2025, 44(13): 64-78+84. (ZHANG Zhao, ZHANG Ruixin, FU Shigen, et al. Development status and application prospects of open-pit mine cast blasting technology[J]. Journal of Vibration and Shock, 2025, 44(13): 64-78+84.)
- [6] 马军, 郭昭华. 露天煤矿应用抛掷爆破技术研究 [J]. 露天采矿技术, 2005, (5):43-45. (MA Jun, GUO Zhaohua. Study on application of throwing blasting technology in open-pit coal mine[J]. Opencast Coal Mining Technology, 2005, (5):43-45.)
- [7] 张勇. 黑岱沟露天煤矿高台阶抛掷爆破分析 [J]. 露天采矿技术, 2008, (5): 43+52. (ZHANG Yong. Analysis of high step throwing blasting in Heidaigou open-pit coal mine[J]. Opencast Coal Mining Technology, 2008, (5):43+52.)
- [8] 梁润. 抛掷爆破的岩石抛掷速度 [J]. 武汉水利电力学院学报, 1980, (3): 39-46. (LIANG Run. Rock throwing velocity of blasting[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1980, (3):39-46.)
- [9] 于亚伦, 高焕新, 张云鹏,等. 用弹道理论模型和 Weibull 模型预测台阶爆破的爆堆形态 [J]. 工程爆破, 1998, 4(2): 1-7. (YU Yalun, GAO Huanxin, ZHANG Yunpeng, et al. Prediction of muckpile profile for bench blasting with ballistics model and Weibull's distribution model[J]. Engineering blasting, 1998, 4(2):1-7,19.)
- [10] 张云鹏, 于亚伦. 露天矿台阶爆破岩石抛掷与堆积模型的研究 [J]. 金属矿山, 1995, (9): 19-22. (ZHANG Yunpeng, YU Yalun. Study on the models for rock throw and stack during bench blasting of open-pits[J]. Metal mine, 1995, (9):19-22.)
- [11] 李克民, 张幼蒂, 傅洪贤. 露天煤矿抛掷爆破参数分析 [J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(4): 423-426. (LI Kemin, ZHANG Youdi, FU Hongxian. Analysis of casting blast parameters in surface coal mines[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(4):423-426.)
- [12] 周伟, 才庆祥, 李克民. 露天煤矿抛掷爆破有效抛掷率预测模型 [J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(04): 614-617+622. (ZHOU Wei, CAI Qingxiang, LI Kemin. Prediction mode of effective stripping ratio of casting blast in open pit[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(4):614-617+622.)
- [13] 李祥龙, 刘殿书, 何丽华,等. 露天煤矿的台阶高度对抛掷率的影响 [J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(2): 211-215. (LI Xianglong, LIU Dianshu, HE Lihua, et al. Influences of bench height of an open-pit coal mine on cast percentage[J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(2):211-215.)
- [14] 韩亮, 刘殿书, 李红江,等. 基于 Weibull 模型的高台阶抛掷爆破爆堆形态 BP 神经网络预测 [J]. 煤炭学报, 2013, 38(11): 1947-1952. (HAN Liang, LIU Dianshu, LI Hongjiang, et al. BP neural network forecast of blasting muck pile form of high bench cast blasting based on Weibull model[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(11):1947-1952.)
- [15] 丁小华, 李克民, 狐为民,等. 基于非线性理论的抛掷爆破爆堆形态预测 [J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(05): 764-769. (DING Xiaohua, LI Kemin, HU Weimin, et al. Prediction of optimum muck pile casting shape during blasting: a nonlinear theory[J]. Journal of China University of Mining & Technology. 2012, 41(5):764-769.)
- [16] 李祥龙, 张松涛, 李明扬,等. 基于 AUTODYN 的岩石中爆炸鼓包运动模拟 [J]. 煤炭学报, 2016,

41(S2): 419-424. (LI Xianglong, ZHANG Songtao, LI Mingyang, et al. Simulation research of AUTODYN-based bulging motion of rock blast[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(S2):419-424.)

[17] LANARI M., FAKHIMI A. Numerical study of contributions of shock wave and gas penetration toward induced rock damage during blasting [J]. Computational Particle Mechanics, 2015, 2(2): 197-208.

Experimental and Numerical Simulation of Spherical Target Explosion Concrete

Throwing

DU Yong, ZHANG Yuping, DAI Xianghui, WANG Kehui, WANG Kaiqiang, ZHAO Shengwei

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the effect of blasting parameters on the throwing of crushed stone in engineering blasting, an experimental system for the throwing of spherical target explosive concrete based on digital high-speed image acquisition system was designed. Experiments on the throwing of concrete under the condition of single-hole and three-hole charge were carried out, and the failure modes and throwing quality of spherical target after blasting under the condition of single-hole and three-hole charge were compared. The simulation model of spherical target explosion is established, and the accuracy of the model is verified by experiments. The concrete throwing characteristics of different explosive holes and different spherical target strength are simulated and calculated. The results show that when the quantity of explosive is 5g, the mass of the three holes is 89% more than that of the single hole explosive; when the quantity of explosive is 10g, the mass of the three holes is 82.1% more than that of the single hole explosive; when the quantity of explosive is constant, increasing the quantity of the holes can effectively improve the quality of the throwing concrete and the area of the blasting pit, which is helpful to improve the production efficiency and reduce the cost. The simulation results are in good agreement with the experimental data.

Keywords: spherical target; explosion; concrete throwing; throwing mass