

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.01.007

抵抗线对水下台阶爆破效果影响的 模型试验及其数值分析*

吴亮,刘琳,余创,周俊汝

(武汉科技大学理学院 湖北省智能爆破工程技术研究中心,武汉 430065)

摘要: 抵抗线作为爆破设计中的核心参数,与岩石的抛掷距离以及破碎程度都有着密切的关系,从而直接影响破碎效果以及最终的爆堆形状。由于水下爆破工程具有显著的复杂性,影响水下爆破效果的因素错综复杂,因此,探究抵抗线参数对水下台阶爆破的影响规律是不可避免的。通过设置不同抵抗线参数的水下台阶钻爆试验,并采用 FLUENT-EDEM 耦合方法对抵抗线为 2 cm、4 cm、5 cm、6.5 cm 四种情况下的爆破试验进行数值模拟,将试验与数值模拟相结合综合评估了抵抗线参数对水下台阶爆破效果的影响。结果表明:抵抗线参数增加初期,用于破碎岩石的有效能量占比增加,且爆破漏斗体积也进一步增大,但随着抵抗线的进一步增加,岩体单位体积所承担的爆炸能量反而降低,另外应力波反射作用强度也减弱了,因此爆破块度的不均匀性呈现出随抵抗线先减小后增大的规律。此外,数值计算能较好地模拟模型试验的爆破效果,且结果一致,说明运用 FLUENT-EDEM 流固耦合方法来探究水下台阶爆破块度破碎问题是切实可行的。

关键词: 水下爆破;流固耦合;FLUENT;EDEM;抵抗线

中图分类号: TD235 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2025)01-0056-07

Model Test and Numerical Analysis of Resistance Line Influence on Underwater Bench Blasting

WU Liang, LIU Lin, YU Chuang, ZHOU Jun-ru

(Engineering Technology Research Center in Intelligent Blasting of Hubei Province,
College of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China)

Abstract: The resistance line, as a core parameter in a blast design, is closely related to rock throwing distance and fragmentation degree, thereby directly affecting the fragmentation effectiveness and the final shape of the blast pile. Due to the significant complexity of an underwater blasting project, the factors affecting the effect of underwater blasting are intricate and complex, so it is essential to explore the impact of resistance line parameters on underwater bench blasting law through both drilling and blasting tests and numerical simulations using the FLUENT-EDEM coupling method. Four resistance line cases (2 cm, 4 cm, 5 cm, and 6.5 cm) were tested. The results indicate that as the resistance line parameter increases, the proportion of adequate energy used for rock fragmentation increases, resulting in a larger blasting funnel volume. However, with further increases in the resistance line, the explosive energy per unit volume of rock decreases, and the stress wave reflection intensity weakens. Consequently, the inhomogeneity of blasting block size first decreases and then increases with the resistance line. Additionally, numerical calculations effectively replicate the model test blasting effects, demonstrating that using the FLUENT-EDEM fluid-solid coupling

收稿日期 (Date of reception): 2024-05-28

网络首发日期 (Published online): 2024-07-20

作者简介: 吴亮 (1980-), 男, 湖北汉川人, 博士, 副教授, 主要从事工程爆破与岩石动力学研究方面的工作, (E-mail) wuliangwust@sina.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51779193, 51979205)

About the author: WU Liang (1980-), male, born in Hanchuan city, Hubei province, Ph. D, associate professor, mainly engaged in engineering blasting and rock dynamics research, (E-mail) wuliangwust@sina.com.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (51779193, 51979205)

method to study underwater bench blasting fragmentation is practical and feasible.

Key words: underwater blasting; fluid solid coupling; FLUENT; EDEM; resistance line

众所周知,抵抗线是爆破设计中的重要参数,它与岩石的抛掷距离以及破碎程度都有着直接的关联^[1]。若抵抗线太小,自由面距离炮孔的距离过短,爆炸能量主要以气体形式溢出造成能量浪费,而高压气体推动碎石运动,容易造成飞石^[2,3]。若抵抗线太大,单位岩石中爆炸能量变小从而出现较多大块,最终影响爆破效果^[4]。因此,在爆破设计中,选择适当的抵抗线大小至关重要。丁汉堃将压杆稳定理论引入推导炮孔抵抗线的计算中^[5],旨在解决在爆破过程中因抵抗线选择不当而导致飞石、冲击波传播不规律以及残留根底等问题。为了探究不同抵抗线对破碎质量的影响,郑瑞春采用室内砂浆模型进行试验研究^[6]。试验显示:若抵抗线持续增大, K_{50} (即筛下累积百分率为50%时的筛孔尺寸)将表现为单调递增。林爱民在针对实际工程爆堆的深入研究中^[7],观察到爆堆特征块度 X_0 和均匀指数 n 随着抵抗线长度的增长均呈现出上升趋势。由此可以得出,在某一限定的范围内,当抵抗线长度增加时,爆破产生的岩石块度会相应增大,并且其分布将变得更为不均匀。此外,在爆破过程中,爆炸荷载作用集中程度体现在抵抗线方向,不仅能有效地缩短了爆炸应力波的行程,且最小化了爆轰能量的损失^[8]。不同抵抗线的选择也会影响应力波和爆轰气体作用于岩石的方式和持续时间,进一步影响爆轰能量的扩散和分布状态^[9]。这种变化往往导致岩石破碎后的块体尺寸差异增加,从而对整体爆破效果产生重要影响。因此,在爆破工程中,抵抗线对于优化爆破能量的利用效率以及实现理想的岩石破碎效果具有举足轻重的作用。

目前,对于抵抗线对水下台阶爆破效果的影响的研究还处于相对初步的阶段。水下爆破工程具有显著的复杂性,由于多种因素交织影响爆破效果,导致许多实际工程只能依赖于相关的经验公式和试验

数据进行近似估算。爆破效果涉及破碎程度、岩石位移、水下冲击波传播情况等多个指标。通过试验和数值模拟相结合的方法,可以更全面地评估抵抗线对水下台阶爆破效果的影响。

近年来,CFD-DEM在工程领域中的应用日益广泛,尤其在处理水下岩塞爆破^[10]、深海采矿等复杂问题中展现出显著优势^[11,12]。例如,XU通过CFD-DEM来研究水合物聚集和沉积导致的水合物堵塞过程^[13],并分析在连续水相和离散水合物颗粒间双向相互作用,为模拟水合物堵塞过程提供了理论基础。此外,HE等人运用动态网格方法^[14],旨在明确捕捉自由移动大型物体引发的流动,并将其与传统CFD-DEM方法相结合,以精确模拟颗粒流体流动中小颗粒的行为。FU等人则借助CFD-DEM耦合技术^[15],揭示了渗流对水下隧道掌子面破坏机理的显著影响,使研究得到了进一步的丰富和深化。同时,WU等学者针对水下台阶爆破块体的运动及其爆后形态^[16,17],运用DEM颗粒接触模型,结合Fluent-EDEM耦合技术,展开了深入的探究与分析。

因此,通过设置不同抵抗线的钻爆试验,探讨了抵抗线对水下台阶爆破效果的影响。此外,在模拟分析过程中,运用了基于UDF开发的Fluent-EDEM耦合方法,并全面考虑颗粒间的相互作用,构建了相应的数值模型。

1 试验方案

水下台阶模型采用C25水泥,混凝土浇筑按照水泥:黄沙:水=2:1:0.65的比例进行制备。台阶模型为300 cm×300 cm×15 cm的长方体,模型周边钻深10 cm且孔径8 mm炮孔。试验时,距离混凝土板顶部的水深为20 cm,抵抗线参数分别为0 cm、2 cm、4 cm、5 cm、6.5 cm、8 cm、10 cm、15 cm。混凝土台阶爆破模型见图1。

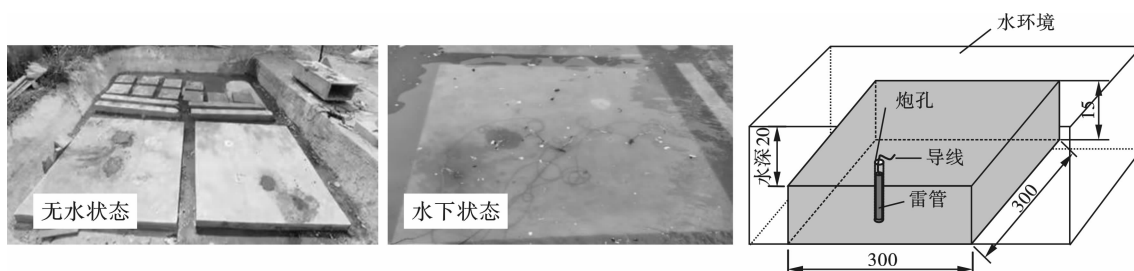


图1 混凝土台阶爆破模型(单位:cm)

Fig. 1 Concrete bench blasting model(unit:cm)

2 试验结果及分析

水下混凝土介质钻爆试验中不同抵抗线破坏情况见图2。当 $W=0$ cm为水下雷管接触爆炸,受水介质的覆盖作用,炸药爆炸产生的冲击荷载在混凝土台阶表面形成深1 cm、直径约6 cm的凹坑;当 $W=2$ cm时,由于炸药中心距离台阶侧面的距离小于台阶顶部,爆炸能量过早地通过侧面的爆破漏斗缝隙泄出,因此,炸药爆炸后只在台阶侧面形成了深约4.5 cm、直径约10 cm的爆破漏斗;当 $W=4$ cm

时,随着抵抗线的逐渐增加,用于台阶破碎的爆炸能量也呈递增趋势,台阶上表面受应力波反射拉伸以及高压气体作用而剥离,台阶上表面破裂线长约25 cm,台阶底部混凝土介质约束大于台阶上表面,其破裂线长约11 cm;当 $W=5$ cm时,台阶上表面破裂线长约24 cm,台阶底部破裂线长约20 cm;当 $W=6.5$ cm时,台阶上表面破裂线长约30 cm,台阶底部破裂线长约20 cm;当 $W=8$ cm时,台阶上表面有张裂裂纹,但未见块体剥离;当 $W \geq 10$ cm时,在台阶表面未发现明显的裂纹。

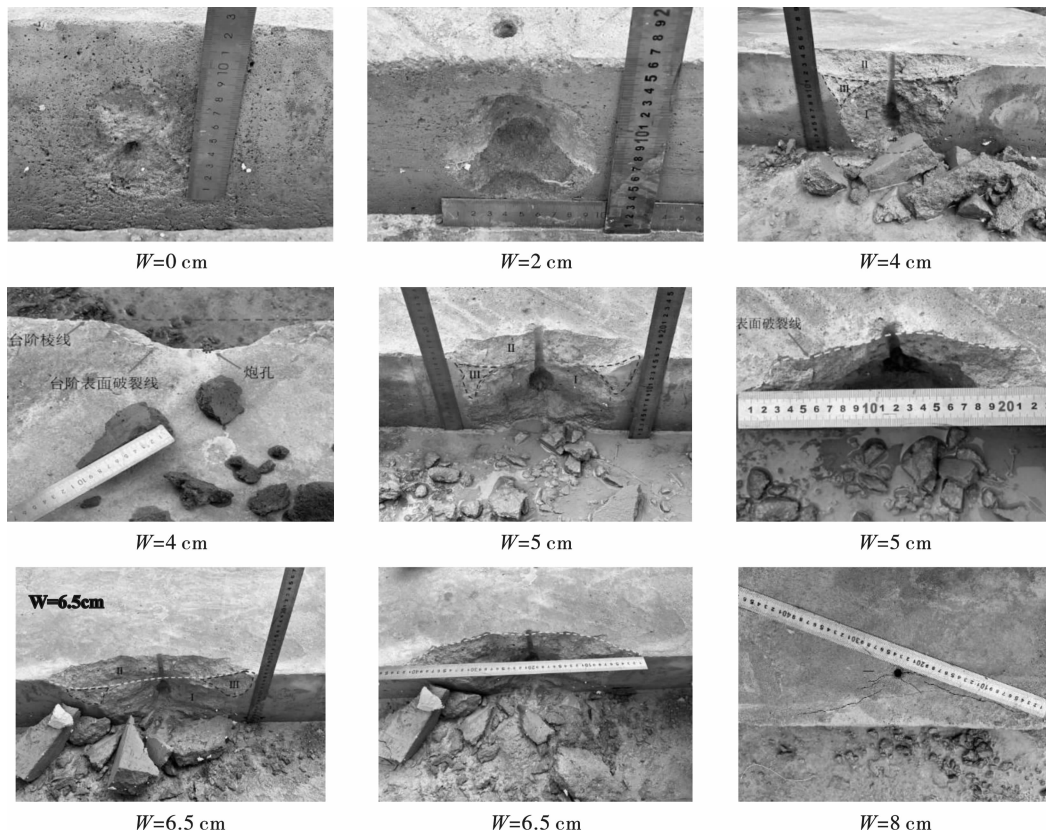


图2 不同抵抗线钻爆试验的破坏情况

Fig. 2 The damage of different resistance lines in drilling and blasting test

试验中,不考虑粉碎区,当 $W \geq 4$ cm时,作为集中爆源的单发雷管在台阶爆破时产生的破坏区分为3个部分,见图2。破坏区I区为炸药爆炸在抵抗线方向形成的爆破漏斗,主要为爆炸压缩剪切与应力波反射拉伸引起;破坏区II区为应力波在台阶上表面反射拉伸引起破裂,从台阶上表面看,破裂区最大的深度为抵抗线,破裂线范围与抵抗线成正比,从台阶侧面看,破裂区也形似一个扁平的爆破漏斗,漏斗的深度与应力波的强度相关;破坏区III区为抵抗线方向与台阶上表面反射应力波共同影响的剥离区。

投影面积法是一种计算几何体体积的方法。它的基本原理是将一个三维的立体物体投影到一个平

面上,然后根据投影的面积和高度来计算物体的体积,吕林在处理图像时^[18],选用了投影面积法来分析块度分布。该方法的核心在于通过图像处理技术,准确测量每个碎块的投影面积,进而以这些数据为基础,深入分析块度的分布情况。另一项研究则深入探讨了投影面积法与网筛尺寸法之间的关系^[19],发现两者在描述块度分布上虽角度不同,但结果一致,均表现出高度的准确性。这一发现不仅证明了投影面积法的有效性,也表明在实际应用中,可以根据研究需求灵活选择这两种方法进行分析。

不同抵抗线爆破试验的块度情况见图3。将不同的抵抗线的块度收集后按以上的方法进行处理,

$W=4\text{ cm}$ 时最大块度为 3551.93 mm^2 , 平均块度为 2123.789 mm^2 ; $W=5\text{ cm}$ 时最大块度为 5814.73 mm^2 , 平均块度为 1242.86 mm^2 ; $W=6.5\text{ cm}$ 时最大块度

为 11991.06 mm^2 , 平均块度为 3132.16 mm^2 。抵抗线 $W=6.5\text{ cm}$ 试验的块度色块图见图4。

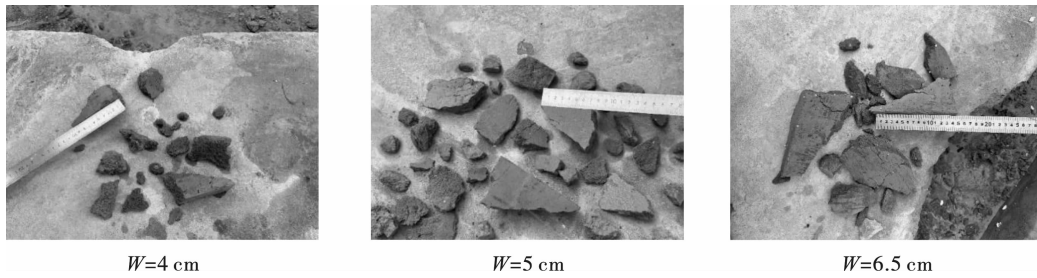


图3 不同抵抗线爆破试验的块度情况

Fig. 3 Fragmentation of different resistance line blasting test



图4 抵抗线 $W=6.5\text{ cm}$ 试验的块度色块图

Fig. 4 Fragment block diagram of resistance line $W=6.5\text{ cm}$ test

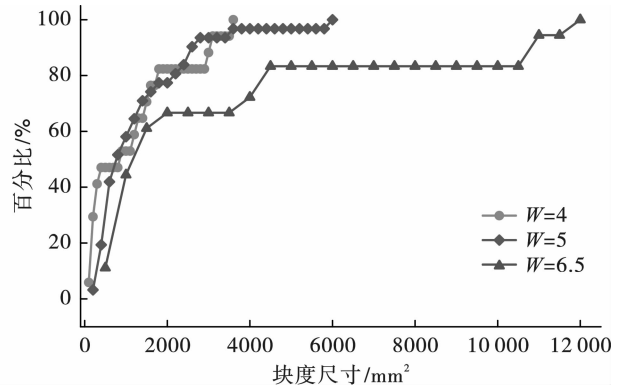
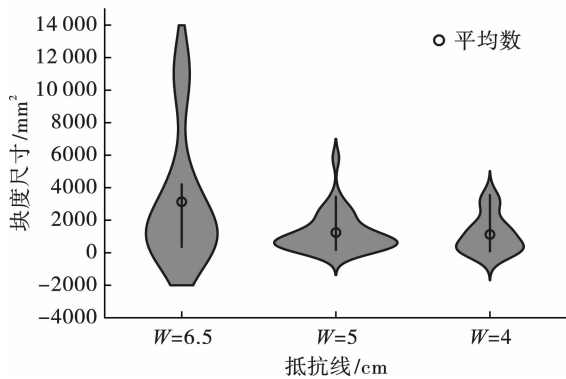


图5 不同抵抗线爆破块度分布图

Fig. 5 Distribution of fragmentation with different resistance lines

3 计算方法

3.1 流体基本原理

在计算流体力学领域内,通过将有限数量的空间离散点上的变量值集合进行近似。基于这些离散点,构建了描述场变量之间关系的代数方程组。这些方程组依据流体力学的基本守恒原理,即质量守恒、动量守恒和能量守恒方程。通过求解这些离散的代数方程组,能够获得场变量的近似解,从而对流场进行数值模拟。式(1)和式(2)分别为质量守恒

方程和动量守恒方程。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} - \vec{F} \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度; ∇ 为哈密顿算子; t 表示时间; \vec{u} 为流体速度矢量; \vec{g} 为加速度矢量; p 为流体介质压力; \vec{F} 为颗粒与流体之间的相互作用力; $\vec{\tau}$ 为应力张量。

3.2 DEM 颗粒接触模型

在 DEM(离散元方法)模型中,颗粒的运动状态基于牛顿第二定律,这一定律不仅涵盖了颗粒的平移运动,还涉及了它们的旋转运动。颗粒的动力学行为通过其运动方程(即动量守恒方程)来具体表达,如方程(3)和(4)所示

$$m_i \frac{\partial \vec{v}_i}{\partial t} = \sum_j \vec{F}_{ij} + \vec{F}_g + \vec{F}_f \quad (3)$$

$$I_i \frac{\partial \vec{\omega}_i}{\partial t} = \sum_j \vec{T}_{ij} + T_f \quad (4)$$

式中: v 、 ω 分别为颗粒的速度和角速度; m 为颗粒质量; F_{ij} 和 F_g 分别为颗粒间的接触力和引力; F_f 为流体和颗粒的相互作用力; I 是颗粒转动惯量; T 是颗粒间的力矩; T_f 是流体引起的扭矩。

为了更好地计算 DEM 颗粒之间的作用力,本文采用具备滚动摩擦特性的 Hertz-Mindlin 接触模型计算^[20],如图 6 所示。

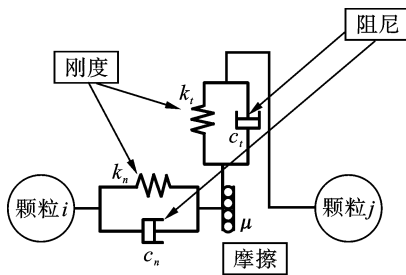


图 6 Hertz-Mindlin 接触模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of Hertz-Mindlin's contact model

3.3 DEM 颗粒平行键模型

在 DEM 中,颗粒被视为离散的实体,需要通过接触力来模拟颗粒之间的相互作用,而平行键模型(Parallel Bond Model, PBM)是一种常用的接触力模型,一般用于模拟微观结构如何影响宏观行为。它基于平行键模型的概念,应用于颗粒接触界面的力学行为,它将颗粒之间的接触力分为切向力和法向力。切向力由颗粒表面之间的摩擦行为导致,而法向力则受到颗粒重叠程度的影响。PBM 假设颗粒表面的接触区域可以看作是由一系列平行排列的键所组成,这些键在接触过程中可以变形和断裂。

4 水下台阶爆破计算模型

4.1 计算模型

根据水下台阶爆破试验,台阶模型为 $100 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ 的长方体,距离混凝土板顶部的水深为 20 cm ,抵抗线分别为 2 cm 、 4 cm 、 5 cm 、 6.5 cm 。颗粒采用直径 10 mm 的球形颗粒,共填充 $90\ 839$

颗,如图 8 所示。爆源区域大小与实际雷管一致,爆炸荷载压力为 2 GPa ,本节离散元的计算步长为 $5 \times 10^{-6} \text{ s}$,流体的计算步长为 $1 \times 10^{-4} \text{ s}$ 。

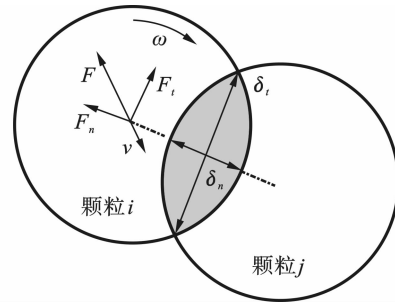


图 7 平行键模型示意图

Fig. 7 Schematic diagram of parallel bond model

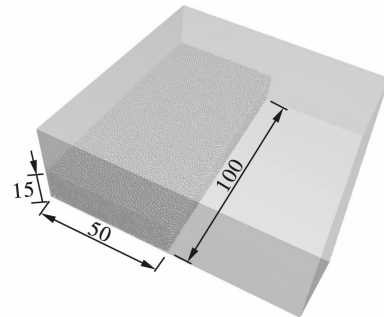


图 8 水下台阶 EDEM 模型(单位:cm)

Fig. 8 Underwater bench EDEM model(unit:cm)

4.2 模型参数

在 EDEM 模型中,通过接触力来模拟离散颗粒之间的相互作用,而平行键模型是一种常用的接触力模型,能够更精确地模拟连续的岩体介质。此模型除了设置密度、杨氏模量等一些基本的参数以外,还需要输入法向刚度、切向刚度等其他平行键参数,以更精确地在微观上描述岩体的力学行为特性。已知平行键的半径被设定为与颗粒半径相同,但其他平行键参数当前尚未能与实验中获得参数联系起来,且两者之间的明确数学关系也无法得知。因此,为确保数值计算的精确性和可靠性,对平行键模型的参数进行精确标定显得尤为重要。

为此,众多学者已经利用离散元方法(DEM)进行了巴西劈裂数值计算实验,通过与实际实验结果的对比和校验,成功地对平行键模型的参数进行了标定,并且利用标定后的平行键模型参数,能够成功地将颗粒建模为具有平行键的堆积体系。详细的参数设置列于表 1 中。

4.3 模拟结果

抵抗线大小对水下岩石爆破破坏影响见图 9。结果表明:随着抵抗线的增加,爆破破坏区域也在增

加,爆破块度的不均匀性随抵抗线先减小后增大;数值计算能较好地模拟模型试验的爆破效果进行模拟且结果一致。

表 1 岩体 EDEM 模型参数
Table 1 EDEM model parameters of rock mass

参数名称	颗粒	岩体壁面	平行键参数
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2650	2650	法向刚度/($\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$) 30.52
杨氏模量/GPa	44.09	44.09	切向刚度/($\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$) 12.208
泊松比	0.35	0.35	最大法向应力/MPa 15.76
恢复系数	0.2	0.15	最大切向应力/MPa 7.9
静摩擦系数	0.5	0.5	平行键半径/mm 10.2
滚动摩擦系数	0.01	0.01	

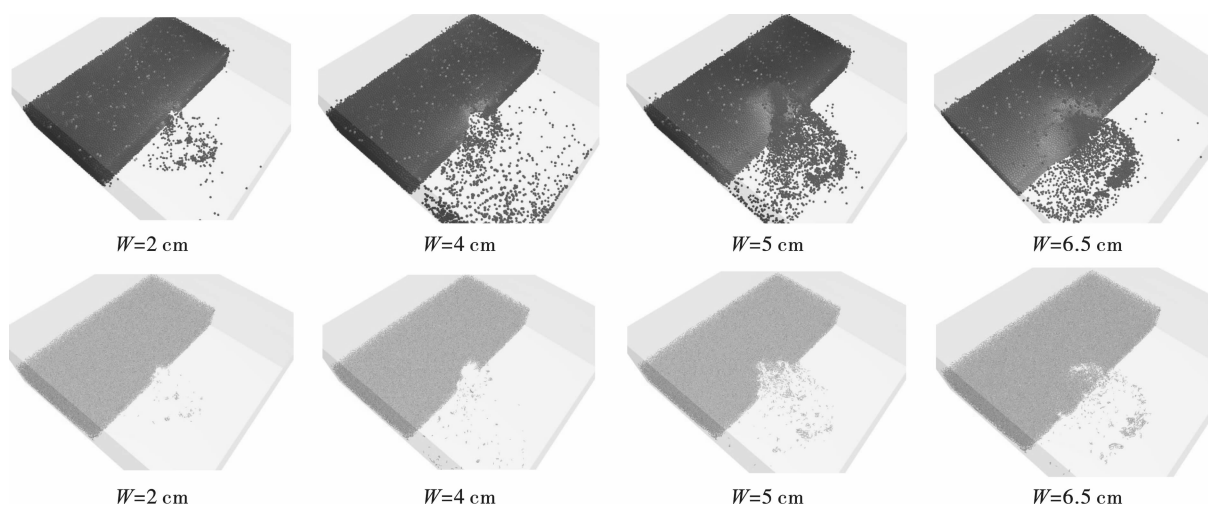


图 9 不同抵抗线爆破破碎效果

Fig. 9 Blasting breakage effect of different resistance lines

5 结论

开展了不同抵抗线参数下的水下台阶钻爆试验。在试验的基础上,利用 UDF 开发的 Fluent-EDEM 耦合方法,并充分考虑到颗粒间的相互作用,构建了相应的数值模拟模型。通过数值分析模型对试验过程进行了精准地模拟。基于模拟结果,得出了以下结论:

(1)从台阶上表面看,破裂区最大的深度为抵抗线,破裂线范围与抵抗线成正比。表明随着抵抗线的适当增加,会导致台阶破坏面的扩大,且爆堆总质量也呈增大趋势。

(2)随着抵抗线的增加,初期用于破碎岩石的有效能量占比会增加,但随后岩体单位体积所承担的爆炸能量会下降。因此,爆破块度的不均匀性随抵抗线先减小后增大。

(3)数值分析结果显示,随着抵抗线的增加,爆破破坏区域也会增加,爆破块度的不均匀性随抵抗

线先减小后增大。该模拟结果与试验现象相吻合,说明运用 FLUENT-EDEM 流固耦合方法来探究水下台阶爆破块度破碎问题是切实可行的。

参考文献 (References)

- [1] 李萍丰,王秀龙,闫小兵,等. 柱状药包侧向爆破下抵抗线对岩石破碎特性的影响研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(5): 1388-1396.
- [1] LI Ping-feng, WANG Xiu-long, YAN Xiao-bing, et al. Effects of burden on rock crushing characteristics under lateral detonation of cylindrical charges[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(5): 1388-1396. (in Chinese)
- [2] 于建新,孟鹏展,张馨,等. 不同抵抗线影响下层状岩体爆破的破岩规律[J/OL]. 煤炭科学技术: 1-10. [2024-07-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20240306.1645.006.html>.
- [2] YU Jian-xin, MENG Peng-zhan, ZHANG Xin, et al. Rock breaking regularity of layered rock mass blasting under the influence of different resistance lines[J/OL]. Coal Sci-

- ence and Technology; 1-10. [2024-07-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20240306.1645.006.html>. (in Chinese)
- [3] 曾晓辉,张学民,戴 斌,等. 考虑自由面数量和抵抗线影响的隧道爆破振速预测[J]. 中国安全生产科学技术,2023,19(6):83-89.
- [3] ZENG Xiao-hui,ZHANG Xue-min,DAI Bin,et al. Prediction of tunnel blasting vibration velocity considering influence of number of free surfaces and resistance line[J]. Journal of Safety Science and Technology,2023,19(6):83-89. (in Chinese)
- [4] 蒲传金. 炮孔因素对露天台阶爆破效果的影响分析[J]. 爆破,2008(1):25-28.
- [4] PU Chuan-jin. Analysis on the influence of borehole factors on open bench blasting effect [J]. Blasting,2008(1):25-28. (in Chinese)
- [5] 丁汉堃,西子阳,王彦军. 露天浅孔爆破抵抗线计算方法的探讨及其应用[J]. 采矿技术,2020,20(5):164-166.
- [5] DING Han-kun,XI Zi-yang,WANG Yan-jun. Exploration and application of resistance line calculation method for shallow open-pit blasting [J]. Mining Technology,2020,20(5):164-166. (in Chinese)
- [6] 郑瑞春,马柏令,高士才. 爆破参数对破岩质量的影响规律及小抵抗线大孔距爆破机理的探讨(上)[J]. 爆破,1987(2):5-10.
- [6] ZHENG Rui-Chun,MA Bai-Ling,GAO Shi-cai. Influence of blasting parameters on the quality of rock breaking and exploration of the mechanism of blasting with small resistance line and large hole spacing (I) [J]. Blasting,1987(2):5-10. (in Chinese)
- [7] 林爱民,马增光,徐全军,等. 台阶爆破抵抗线对块度影响试验研究[J]. 工程爆破,2006(2):36-39.
- [7] LIN Ai-min,MA Zeng-guang,XU Quan-jun,et al. Experimental study on the effect of resistance line on blockiness in bench blasting[J]. Engineering Blasting,2006(2):36-39. (in Chinese)
- [8] 李显寅,张继春,肖定军,等. 最小抵抗线对层间充填土运动速度影响的实验[J]. 爆破,2009,26(3):28-31.
- [8] LI Xian-yin,ZHANG Ji-chun,XIAO Di-jun,et al. Testing study of effect of burden on motion speed of interlayer fill soil[J]. Blasting,2009,26(3):28-31. (in Chinese)
- [9] 周 游,陈作彬,王 静,等. 最小抵抗线对深孔岩石爆破块度的影响[J]. 工程爆破,2016,22(6):70-74.
- [9] ZHOU You,CHEN Zuo-bin,WANG Jing,et al. Effects of minimum burden on deep-hole rock blasting block size [J]. Engineering Blasting,2016,22(6):70-74. (in Chinese)
- [10] WU Liang,LIANG Zhi-jian,CHEN Ming,et al. Experiments and fluent-engineering discrete element method-based numerical analysis of block motion in underwater rock-plug blasting [J]. Applied Sciences-Basel,2023(13):348.
- [11] WAN Chu-yi,ZHU Hong-bo,XIAO Sheng-peng,et al. Prediction of pressure drop in solid-liquid two-phase pipe flow for deep-sea mining based on machine learning [J]. Ocean Engineering,2024,304:117880.
- [12] LI Yuan-wen,LIU Shao-jun,HU Xiao-zhou. Solid-liquid two-phase flow in deep-sea mining pipelines based on CFD-DEM [J]. Ships and Offshore Structures,2023,18(11):1617-1625.
- [13] DUAN Xu,SHI Bo-hui,WANG Jun-ao,et al. Simulation of the hydrate blockage process in a water-dominated system via the CFD-DEM method[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering,2021,96:104241.
- [14] HE Yi,ANDREW E B,ALI H. Coupling CFD-DEM with dynamic meshing: A new approach for fluid-structure interaction in particle-fluid flows[J]. Powder Technology,2018,325:620-631.
- [15] FU Yan-bin,ZENG De-qi,XIONG Hao,et al. Seepage effect on failure mechanisms of the underwater tunnel face via CFD-DEM coupling [J]. Computers and Geotechnics,2022,146:104591.
- [16] 吴 亮,余 创,梁志坚,等. 基于 Fluent-EDEM 流固耦合算法的水下台阶爆破爆堆形成过程研究[J]. 爆破,2023,40(4):37-43,123.
- [16] WU Liang,YU Chuang,LIANG Zhi-jian,et al. Study on formation process of underwater bench blasting pile based on fluid-structure coupling algorithm of Fluent-EDEM[J]. Blasting,2023,40(4):37-43,123. (in Chinese)
- [17] WU Liang,LIANG Zhi-jian,CHEN Ming. Experiments and simulation of block motion in underwater bench blasting[J]. Scientific Reports,2023,13(1):4703.
- [18] 吕 林,尹 君,胡振襄. 基于图像处理的岩体块度分析系统[J]. 金属矿山,2011(2):118-121.
- [18] LV Lin,YIN Jun,HU Zhen-xiang. Rock fragmentation statistics program based on image processing technology [J]. Metal Mine,2011(2):118-121. (in Chinese)
- [19] 李 遥,吴 亮,钟冬望. 空气间隔装药混凝土爆破试验块度分析[J]. 爆破,2014,31(1):10-15.
- [19] LI Yao,WU Liang,ZHONG Dong-wang. Lumpiness distribution analysis of concrete blasting test with air-decking charge[J]. Blasting,2014,31(1):10-15. (in Chinese)
- [20] 梁志坚. 基于 Fluent 与 EDEM 耦合算法的水下爆破块体运动规律研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2022.
- [20] LIANG Zhi-Jian. Study on the motion law of underwater blasting blocks based on Fluent-EDEM coupling [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology,2022. (in Chinese)