

基于 SPH 算法的混凝土单孔爆破试验与数值模拟验证研究

Research on Single-Hole Concrete Blasting Experiments and Numerical Simulation Verification Based on the SPH Algorithm

吴昊燕¹, 黄颖杰^{2,4}, 李浩¹, 杨灿群^{2,3}

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 国家超级计算天津中心, 天津 300457;
3. 国防科技大学, 湖南长沙 410073; 4. 先进计算与关键软件(信创)海河实验室, 天津 300450)

摘要: 钻爆法开采目前仍是我国金属矿山开采的主导工艺, 爆破仿真模拟是优化设计的核心环节。我国在爆破仿真领域长期依赖 ANSYS/Autodyn、LS-DYNA 等国外软件, 国产化替代需求迫切。本文以混凝土单孔爆破漏斗试验为基础, 首次系统对比了国产显式动力学仿真软件 GalaxyEDS 和国际商业软件 Autodyn 的数值模拟再现能力, 验证国产软件在矿山爆破领域的适用性与准确度。研究结果表明, GalaxyEDS 在爆破漏斗形态、鼓包运动规律、爆破作用指数等关键指标上与试验数据及 Autodyn 模拟结果高度吻合, 为国产软件工程化应用提供数据支撑。

关键词: SPH 算法; 爆破漏斗; GalaxyEDS; Autodyn; 数值模拟

中图分类号: TD672 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)05-0024-05

Abstract: Drilling-and-blasting remains the predominant method for metal mining in China, and blast simulation is the key to optimizing blast design. For years, the Chinese blasting-simulation community has relied heavily on foreign codes such as ANSYS/Autodyn and LS-DYNA, creating an urgent need for domestic alternatives. Based on single-hole blasting-crater tests in concrete, this paper presents the first systematic comparison between GalaxyEDS—a Chinese explicit-dynamics software—and the international commercial code Autodyn. The comparison evaluates their ability to reproduce the physical phenomena numerically and assesses the domestic software's accuracy and suitability for mining applications. The results show that GalaxyEDS closely matches both experimental data and Autodyn predictions in crater morphology, bulging motion, and blasting action index, providing quantitative support for the engineering deployment of the domestic code.

Key words: SPH algorithm; blasting crater; GalaxyEDS; Autodyn; numerical simulation

1 前言

爆破漏斗作为岩体爆破破碎的基本单元, 其几何形态与能量分配规律直接决定破岩效率与成本。传统研究方法包括理论解析、相似试验、现场试验与数值模拟。随着计算力提升与材料模型精细化, 数值模拟已成为唯一能兼顾可重复性、全尺度与参数敏感性的研究手段, 尤其适用于深部矿山爆破的参数优化。

利文斯顿(1956)提出的能量平衡理论首次建立了药包埋深与漏斗体积的定量关系, 并成功应用于后退式采矿法。但该理论假设岩体均匀、药包球

形, 未考虑岩体非均质性与气体准静态膨胀, 导致对深部岩体的预测偏差显著。矿山、隧道等工程岩体各向异性显著, 现场试验结果离散性大, 可重复性差。因此, 基于相似材料的物理试验与高精度数值模拟成为揭示漏斗形成机制的重要手段。

本文基于单孔混凝土爆破漏斗试验, 系统比较国产 GalaxyEDS 软件与国际商业软件 Autodyn 的数值模拟再现能力, 旨在验证国产显式动力学计算软件在金属矿山爆破中的可靠性。

2 混凝土单孔爆破试验

张智宇等^[1]综合利用爆破漏斗模型试验、高速

[作者简介] 吴昊燕(1990—), 女, 博士后, 高级工程师, 主要从事矿山岩石力学研究。

[基金项目] 信创海河实验室专项“显式动力学数值模拟软件”(课题编号: 22HHXCJC00005)。

[引用格式] 吴昊燕, 黄颖杰, 李浩, 等. 基于 SPH 算法的混凝土单孔爆破试验与数值模拟验证研究[J]. 中国矿山工程, 2025, 54(5): 24-28.

摄影系统及数值模拟,研究爆破漏斗的鼓包运动规律并对鼓包运动速度进行理论分析。李祥龙等^[2]为探究爆破机理,采用河砂、碎石、石膏、水泥、水等材料开展爆破模拟相似材料试验,通过单孔爆破漏斗试验为高台阶抛掷爆破提供了配比参数。袁文华^[3]根据相似基本理论,开展六种掏槽模型的爆破相似试验,从掏槽体积、炮眼利用率等角度定量分析对比不同掏槽方式的爆破效果。

2.1 模型浇筑

本研究浇筑混凝土单孔爆破模型作为爆破漏斗相似试验模型。具体尺寸为直径 600 mm,高度 500 mm。预制炮孔直径 12 mm,深度分别为 100 mm、180 mm、210 mm。模具直径(D)与炮孔直径(ϕ)之比为 50,可有效抑制边界效应。如图 1 所示,漏斗模型浇筑后,表面覆盖塑料薄膜,间隔 12 h 浇水养护一次,养护周期为 28 d,塑料桶模具无需拆除。

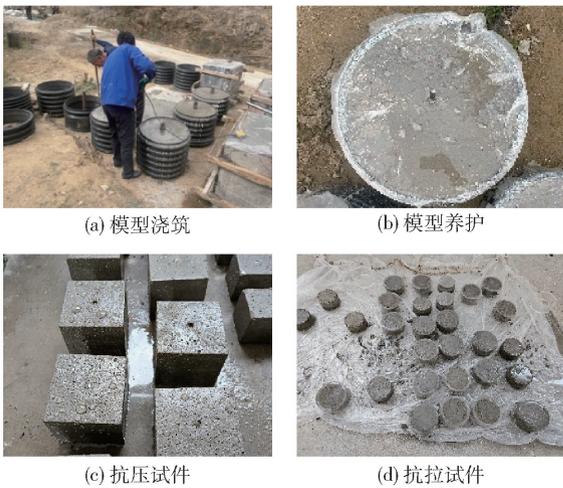


图 1 试样浇筑与养护

浇筑漏斗模型的同时,取少量水泥砂浆浇入标准试件模具制作水泥砂浆抗压、抗拉标准试件,与漏斗模型在同等条件下进行 28 d 养护,其物理力学试验测试结果见表 1。

2.2 试验设计

漏斗试验共设计 5 个漏斗模型,炸药材料采用二号岩石乳化炸药。为确定模型尺寸、装药量及炮孔深度的合理匹配关系,试验策略如下:首先通过大药量浅孔装药观察爆破效果,再通过小药量深孔装药确定合理装药深度,最终综合前两次爆破结果确定合适的装药方案。采用卷尺测量漏斗半径及深度,通过灌装纯净水确定漏斗体积。如图 2 所示,采用 Phantom v2012 超高速摄像机记录爆破漏斗抛掷

过程,现场布设 5 cm × 5 cm 标尺布,以精确捕捉岩石鼓包运动位移。

表 1 物理力学试验结果

试件编号	密度/ kg·m ⁻³	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa
1	2 067.26	21.43	3.87
2	2 115.97	21.30	3.58
3	2 113.62	18.37	4.06
4	2 181.21	26.04	3.23
5	2 143.69	21.88	4.8
6	1 992.84	18.37	3.31
7	2 078.98	18.49	\
8	2 073.07	19.61	\
9	2 179.48	24.21	\
10	1 969.74	16.62	\
11	2 046.12	18.03	\
12	2 109.30	17.23	\
平均值	2 091.27	20.13	3.8



图 2 爆破过程记录设备

本文最终选取 8 g 装药、孔深 100 mm 工况的爆破漏斗试验结果作为模拟对象。如图 3 所示,爆破漏斗形态呈不规则状,清理碎石后对漏斗进行多方位半径测量取均值,得到平均半径约 13 cm,深度约 13.5 cm,体积 2 432 cm³。

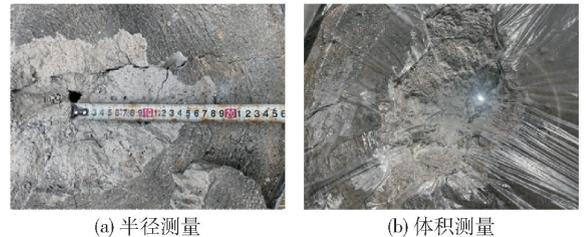


图 3 爆破漏斗测量

高速摄像机针对自由面的和自由面的正上部区域进行拍摄,为保护相机将相机放置于保护罩内,视场区域放置防弹玻璃阻挡飞石。相机参数设为 46 000 fps,分辨率为 768 × 576,时间间隔为 21.74 μs,总拍摄时间为 0.208 8 s。图 4 展示了部分爆破

过程图像序列。图中小标题为照片帧数,“20”即第20帧,对应的时刻为 $20 \times 21.74 \mu\text{s} = 434.8 \mu\text{s}$ 。

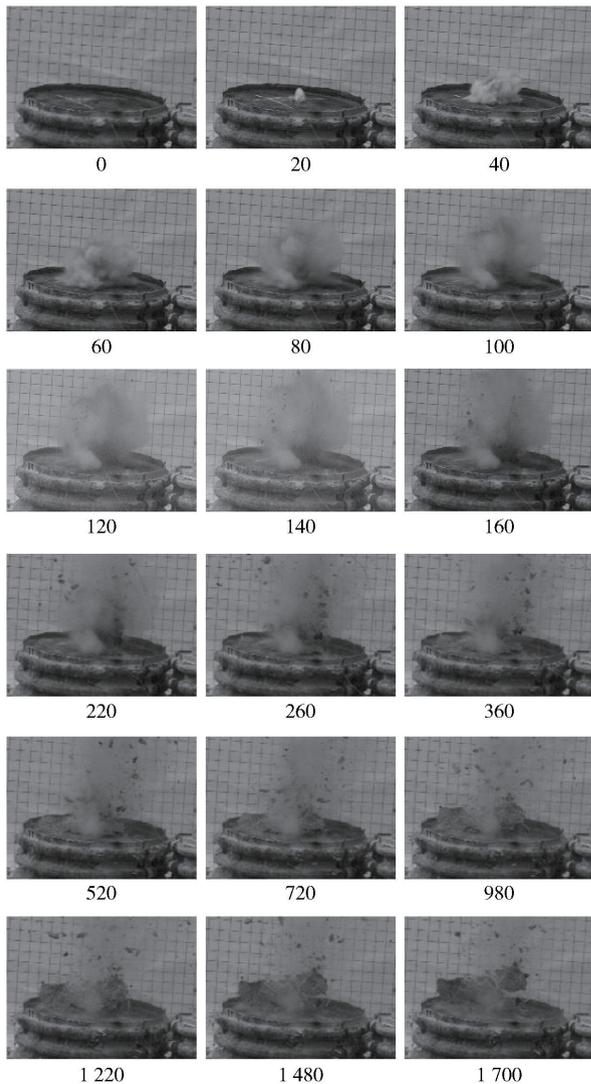


图4 部分爆破过程记录

3 Autodyn 数值模拟

3.1 概述

相似材料模型爆破试验虽然能在一定程度上克服岩石材料的各向异性与不确定性,但存在模型制作周期长、成本高等局限。数值模拟因而成为研究爆破漏斗形成机制的高效手段。李二宝等^[4]以某地下铜矿为研究对象,通过 ANSYS/LS-DYNA 对比条形药包和集中药包爆破漏斗成形差异,模拟结果可指导现场试验参数优化。雷涛等^[5]基于光滑流体动力学理论,借助 LS-DYNA 软件,对爆破漏斗的形成过程、力学破坏方式和漏斗体积进行研究,并将爆破漏斗的形成过程分为地表隆起、裂隙扩展和岩

块抛掷 3 个阶段。罗毓等^[6]利用 LS-DYNA 模拟条形药包和集中药包起爆时爆破漏斗的形成过程和形态,结果显示,近炸药部位岩石呈压缩破坏,岩体表面呈拉伸破坏,压缩破坏区和拉伸破坏区存在较明显分界线。王志亮等^[7]采用 SPH-FEM 耦合法模拟混凝土爆破,对 HJC 模型进行敏感性分析,模拟结果与实测数据吻合度高,该研究为爆破模拟参数确定提供参考。杨冬梅等^[8]通过算例比较 Lagrange 算法和 SPH 算法在混凝土爆炸中模拟的表现,结论发现 Lagrange 算法对炸点近处的高冲击压力更敏感,SPH 算法对仿真计算爆坑形态及抛掷速度等具有明显优势。杨刚等^[9]对比混凝土爆炸模拟的不同算法,结果发现:Euler 算法计算的应力最大,SPH 和 Lagrange 耦合算法计算的应力最小;Euler 算法和 SPH 算法计算的应力衰减过程存在显著扰动。

3.2 模拟试验及结果

本文根据相似试验进行同尺寸建模开展模拟分析。SPH 粒子直径为 3.7 mm,炸药直径为 10mm,长 40 mm,堵孔长度 60 mm,起爆点位于药柱中心。炸药采用 JWL 状态方程,堵孔材料选用砂石材料,默认状态方程、强度模型及失效模型。混凝土采用 P- α 状态方程,RHT 混凝土强度与失效模型。RHT 模型是由 HJC 模型发展而来,通过屈服失效面、最大失效面和残余失效面分别进行混凝土的初始屈服强度、峰值失效强度以及峰值后残余强度。

图 5 所示为 0 ~ 10 ms 鼓包演化时序,与试验高速摄影帧一一对应。

如图 6 所示,对比 3.0 ms 时刻数值模拟与相似试验抛掷形态。数值模拟爆破过程无粉尘扩散、混凝土块体大小不均、四散抛掷的效果,抛掷形态相对收敛。相似试验抛掷形态更发散,且炮烟浓密导致难以观测实际抛掷形态。

如图 7 所示,对比数值模拟与相似试验的漏斗形态:数值模拟漏斗形态较为规则,因无法清理爆破碎石,取损伤剖面观察,根据网格标定爆破漏斗深约 148 mm、半径 126 mm。

4 GalaxyEDS 数值模拟

4.1 概述

GalaxyEDS 是由国家超级计算天津中心联合国防科技大学与信创海河实验室共同研制的国产通用显式动力学仿真软件,该软件包含前处理、求解器、后处理等功能模块,实现几何建模、网格划分、物理

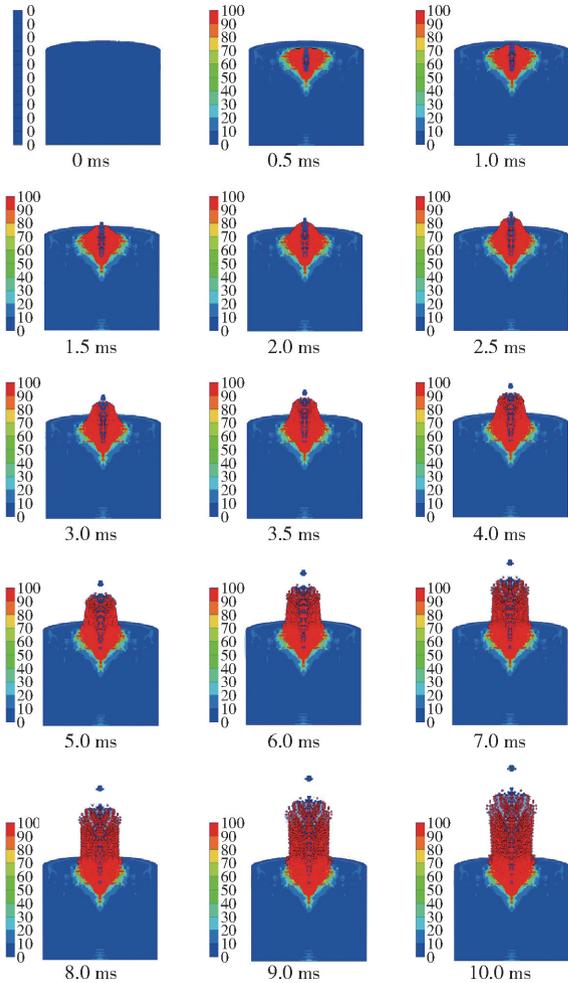


图 5 Autodyn 数值模拟爆破过程图

条件定义、数值求解及结果分析的一体化仿真流程。其求解器涵盖拉格朗日 (Lagrange) 求解器 (用于结构动力学分析)、欧拉 (Euler) 求解器 (用于流体动力学分析)、光滑粒子 (SPH) 求解器 (基于无网格法) 等, 及适用于多物理场叠加等复杂场景的多求解器耦合。

4.2 模拟试验及结果

光滑粒子 (SPH) 求解器无需依赖网格, 在模拟连续体结构解体、碎裂、固体层裂、脆性断裂等大变形问题上具有独特优势, 本文研究的混凝土单孔爆破恰好符合这些特点。因此本研究基于 GalaxyEDS 仿真软件建立与混凝土单孔爆破试验、Autodyn 计算模型同尺寸的混凝土、堵孔材料、炸药混合粒子模型。按照粒子直径 3.7 mm 建模, 炸药直径 10 mm、长 40 mm (填充 120 个粒子), 堵孔材料直径 10 mm、长 60 mm (填充 192 个粒子), 混凝土直径 600 mm、高 500 mm (填充 2 787 696 个粒子), 模型共计 2 788 008 个粒子, 与 Autodyn 建立的模型 SPH 粒子总数和粒子分布均保持一致。各部分材料均与 Autodyn 选用的相同的状态方程、强度模型和失效模型及参数。上述设置确保了两款软件仅存在算法与并行策略差异, 为后续误差来源分析提供单一变量条件。

清晰展示混凝土内部损伤, 采用模型中截面图展示爆破过程, 具体如图 8 所示, 图中损伤云图红色部分代表损伤 100% (混凝土完全破碎失效), 蓝色部分代表损伤 0% (混凝土未破坏), 中间其他颜色代表不同程度的损伤。0 ms 时炸药起爆; 在 0.1 ms 时混凝土中间出现明显损伤, 损伤区域成漏斗状; 0.2 ms 时中间区域损伤进一步扩大, 漏斗形状更明显, 同时应力波从起爆中心传播至侧壁面形成反射, 造成侧壁沿线轻微损伤; 0.3 ~ 0.5 ms 时上半部分损伤持续扩大, 底部出现轻微损伤; 0.5 ms 时损伤基本完成, 爆破漏斗形态固定, 失效部分开始向上抛掷飞散; 1 ms 时上方形成明显鼓包, 1 ms 后鼓包逐渐增大; 3 ms 时, 鼓包形态达到最大, 之后鼓包上方碎石粒子向四周飞散, 向上抛掷的碎石呈“上细下粗”圆柱形; 随碎石进一步扩散, 7 ms 时向上抛掷的碎石呈“上下等粗”圆柱形; 7 ms 之后碎石继续向外抛散。综上, GalaxyEDS 准确模拟了混凝土单孔爆破过程。

如图 9 所示, 对比 3 ms 时刻爆破鼓包形态: GalaxyEDS 计算的碎石粒子抛掷飞散高度为 154.244 mm, Autodyn 计算结果为 157.80 mm, 误差为 2.3%。

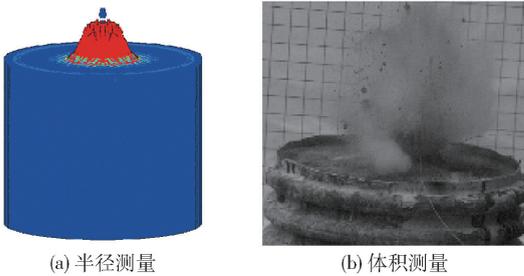


图 6 对比 3 ms 时刻抛掷形态

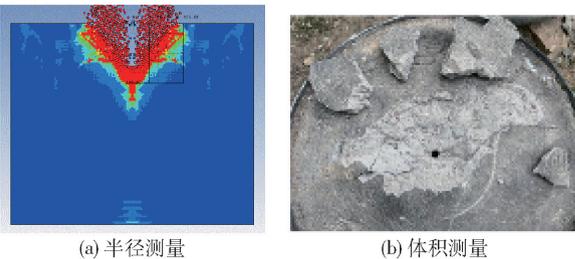


图 7 爆破漏斗形态

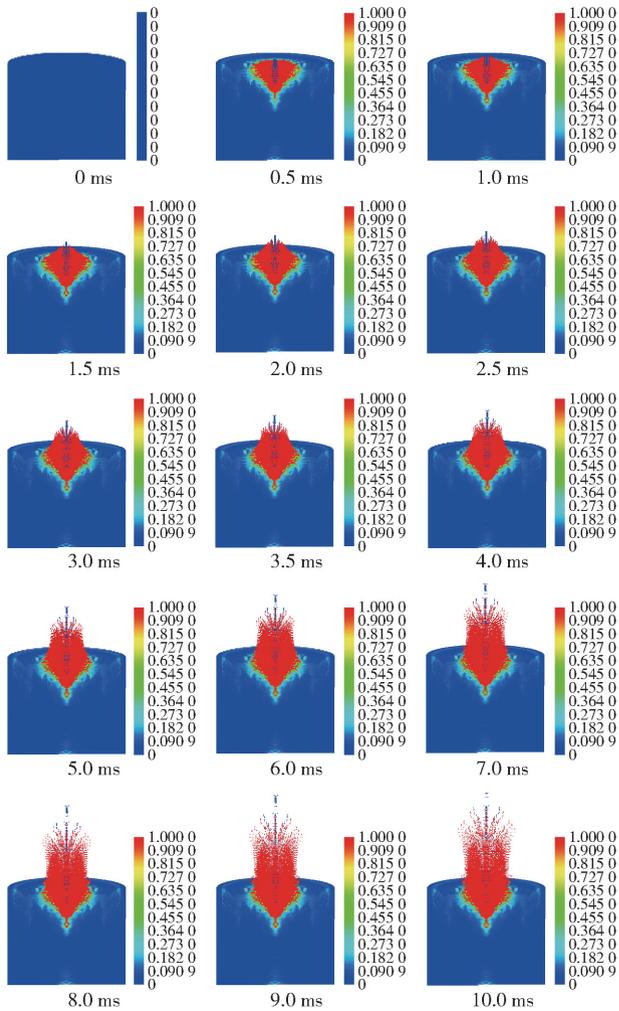


图8 GalaxyEDS 数值模拟爆破过程图

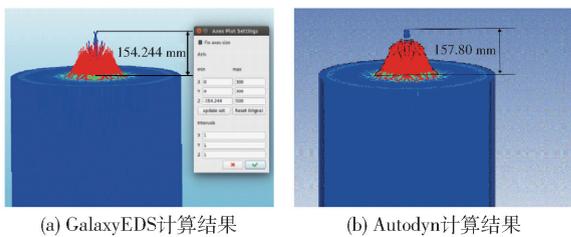


图9 相同时刻鼓包形态对比

针对 GalaxyEDS 计算结果,采用利文斯顿爆破漏斗理论验证,选取碎石粒子抛掷飞散基本完成后的结果,如图 10 所示,图中显示爆破漏斗深度 W 为 148.0 mm,形成的漏斗半径 r 为 129.4 mm,漏斗半径与漏斗深度的比值 $r/W = 1.14$,与利文斯顿理论基本吻合;并同图 7 中 Autodyn 计算结果对比,爆破漏斗深度一致,半径误差仅为 2.6%。

5 结论

本文浇筑混凝土相似模型,开展单孔爆破漏斗

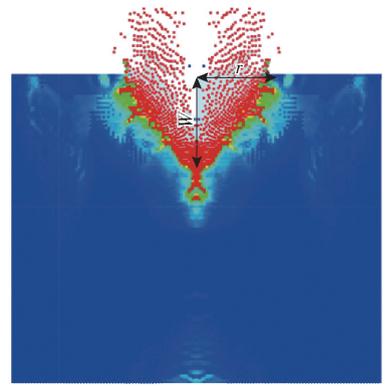


图10 GalaxyEDS 计算结果利文斯顿爆破漏斗验证

试验,采用灌水-卡尺联合法测得平均漏斗半径 13 cm、深度 13.5 cm、体积 2 432 cm³。采用相同参数设置,分别用 Autodyn 软件和国产 GalaxyEDS 进行同步模拟,结果显示:模拟漏斗深度相对误差 < 3%,3 ms 时鼓包高度误差 2.3%;利文斯顿爆破作用指数 r/W 试验结果 1.14, GalaxyEDS 模拟结果 1.13, Autodyn 模拟结果 1.09。

综上, GalaxyEDS 在单孔爆破场景下已具备与国际商业软件同等的计算精度与工程适用性,为国产爆破仿真平台的推广提供了定量依据,也为金属矿山爆破领域数值仿真试验的相关研究与工程应用提供了参考和借鉴。

[参考文献]

- [1] 张智宇,陈春超,黄永辉,等. 爆破漏斗鼓包运动模型的构建及验证[J]. 北京理工大学学报, 2020, 40(8):8.
- [2] 李祥龙,刘俊轩,胡涛,等. 黑岱沟露天煤矿高台阶地掷爆破混凝土模型的相似材料配比试验研究[J]. 煤炭学报, 2015(S2):8.
- [3] 袁文华. 煤矿硬岩巷道不同阶段微差抱槽爆破试验与应用研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2010.
- [4] 李二宝,杨恒,杨海涛,等. 爆破漏斗成形规律数值模拟及试验研究[J]. 现代矿业,2020,36(4):59-63.
- [5] 雷涛,许浩明,蒋复量,等. 爆破漏斗形成过程的 SPH-FEM 数值模拟[J]. 金属矿山, 2018(5):6-12.
- [6] 罗毓,覃振华,李博文. 爆破漏斗形成过程的数值模拟研究[J]. 爆破,2007,24(3):20-22.
- [7] 王志亮,毕程程,李鸿儒. 混凝土爆破损伤的 SPH-FEM 耦合数值模拟[J]. 爆炸与冲击,2018,38(6):1419-1428.
- [8] 杨冬梅,王晓鸣. 混凝土中爆炸数值仿真算法研究[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(6):5-10.
- [9] 杨刚,胡德安,韩旭. 混凝土中爆炸模拟的数值方法比较[J]. 应用力学学报, 2011, 28(4):4-10.