

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.02.019

基于 PBM-SPH 耦合算法的立柱钻孔爆破 数值模拟研究^{*}

黄小武^{1a,1b,2}, 贾永胜^{1a,1b,2}, 江国杰², 伍岳², 袁方^{1a}

(1. 江汉大学 a. 精细爆破全国重点实验室, b. 爆破工程湖北省重点实验室, 武汉 430056;
2. 武汉爆破有限公司, 武汉 430056)

摘 要: 钢筋混凝土立柱是建构筑物的主要承载构件,也是拆除爆破工程中接触最多的爆破对象,其爆破破碎效果直接影响拆除对象的可靠失稳倒塌。为真实再现钻孔爆破条件下炸药爆轰和立柱破碎的全过程,在 LS-DYNA 软件计算平台,采用 PBM-SPH 耦合算法结合 1:1 物理模型试验,对炸药的爆轰过程、立柱的破碎特征和飞石的飞散规律进行了研究。研究表明:相较于传统 FEM 方法,粒子爆破法(PBM)可以更加精准地模拟炸药爆轰和爆生产物的动态过程,在钻孔爆破工况条件下,揭示了立柱不同边界条件约束下爆生产物的力学作用机理;通过 SPH 算法将立柱离散为光滑粒子流,克服了传统有限元算法中无法真实模拟介质破碎、断裂和抛掷过程的弊端,通过粒子运动表征立柱的破碎形态与实际爆破效果更加贴近;通过粒子运动过程表征立柱爆破后飞石的飞散,计算得到立柱正面炮孔位置处的粒子飞散速度为 37.7 m/s,对比各时刻的水平位移值结果,得到仿真结果的平均误差值为 8.9%。PBM-SPH 耦合算法真实再现了炸药爆轰和立柱爆破破碎的全过程,有助于揭示钻孔爆破机理,指导爆破工程设计。

关键词: 拆除爆破;数值模拟;耦合算法;破碎效果;爆破飞石

中图分类号: TU746.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)02-0188-08

Study on Numerical Simulation of RC Column Drilling Blasting based on PBM-SPH Coupling Algorithm

HUANG Xiao-wu^{1a,1b,2}, JIA Yong-sheng^{1a,1b,2}, JIANG Guo-jie², WU Yue², YUAN Fang^{1a}

(1. a. State Key Laboratory of Precision Blasting, b. Hubei Key Laboratory
of Blasting Engineering, Jiangnan University, Wuhan 430056, China;
2. Wuhan Explosion & Blasting Co., Ltd., Wuhan 430056, China)

Abstract: Reinforced concrete columns serve as primary load-bearing components in building structures and represent the most frequently encountered demolition targets in blasting projects. Their fragmentation effectiveness directly determines structural instability and the reliability of collapse during demolition. To accurately simulate the complete process of explosive detonation and column fragmentation under borehole blasting conditions, this study employs a PBM-SPH coupling algorithm in combination with 1:1-scale physical modeling. The investigation focuses on explosive detonation dynamics, column fragmentation characteristics, and the flying law of flying stones using the LS-

收稿日期 (Date of reception): 2025-11-24

网络首发日期 (Published online): 2025-12-11

作者简介: 黄小武 (1989-), 男, 高级工程师、工学博士, 主要从事工程爆破研究与实践工作, (E-mail) 840022742@qq.com。

通信作者: 贾永胜 (1970-), 男, 教授, 主要从事工程爆破理论与技术研究, (E-mail) jason03566@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目 (E0810)

About the author: HUANG Xiao-wu (1989-), male, senior engineer, Ph. D, mainly engaged in engineering blasting research and practice work, (E-mail) 840022742@qq.com.

Corresponding author: JIA Yong-sheng (1960-), male, professor, mainly engaged in engineering blasting theory and technology, (E-mail) jason03566@163.com.

Fund Programs: Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (E0810)

DYNA software calculation platform. Results demonstrate that the Particle Blasting Method(PBM) achieves superior accuracy in simulating explosive detonation dynamics and fragmentation processes compared to conventional Finite Element Methods(FEM). The study reveals the mechanical response mechanism of column fragmentation under varied boundary conditions during borehole blasting. By implementing the SPH algorithm, which discretizes columns into smooth particle flows, this approach effectively addresses traditional FEM limitations in modeling material fracture, fragmentation, and the throwing process. Particle dynamics effectively characterize column fragmentation patterns, yielding more realistic blasting simulation results. The particle migration process accurately models the scattering of flying stones after column blasting, with a particle scattering velocity of 37.7 m/s. Comparative analysis of temporal horizontal displacement data reveals an average simulation error of 8.9%. The PBM-SPH-coupled methodology successfully replicates the complete sequence of explosive detonation and structural fragmentation, providing mechanistic insights for borehole blasting optimization and engineering design refinement.

Key words: blasting demolition; numerical simulation; coupling algorithm; crushing effect; blasting flying rock

钢筋混凝土(RC)立柱是建构筑物的主要承载构件,也是拆除爆破工程中面临最多的爆破对象。其爆破破坏效果,直接影响承载构件的可靠失稳,进而影响待拆建构筑物的整体失稳倒塌^[1]。随着超高层建筑的数量日益增多,建筑抗震等级逐渐提高,RC立柱呈现出尺寸大、配筋多、强度高等特征,对钻孔爆破参数设计和飞石安全防护提出了巨大的挑战。RC立柱的钻孔爆破机理是拆除爆破领域的基础问题,对提升爆破拆除技术的安全性及可靠性具有重要的理论与实践意义。相比理论分析和模型试验等研究手段,数值模拟方法可以再现爆破破碎过程,揭示钻孔爆破机理,指导工程设计,是一种更高效、更经济和更安全的研究手段^[2,3]。近年来,随着计算机技术和有限元/离散元算法的更新迭代,介质爆破破碎数值模拟技术正朝着实体模型精细化、求解速度高效化和仿真效果精准化的方向发展。

在钻孔爆破条件下,工业炸药在炮孔内起爆,瞬间产生数千兆帕的爆轰压力,爆破近区的介质受爆炸能量冲击,处于高压、大变形和高应变率状态,产生破碎、断裂和抛掷的现象。RC立柱钻孔爆破破碎效果数值模拟主要涉及炸药爆轰和介质破碎两个过程的模拟与计算。目前,数值求解方法主要分为基于连续介质力学的模拟方法、基于离散元的非连续模拟方法以及连续与非连续耦合模拟方法3大类。其中,基于连续介质力学的方法包括有限元、有限差分等,可以准确地模拟应力、应变等场量分布规律,但是难以刻画介质由连续转变散体以及之后的散体运动过程。非连续模拟方法主要是在离散元法框架内,根据单元间连接模型不同而产生的各种方法,如采用弹簧链接的应用单元法,采用梁链接的颗粒-梁模型等。可以模拟介质由连续转变为散体的相变过程,以及散体的大变形运动过程,但是连接模型的力学参数难以确定,每个时步都要进行单元的

碰撞检测,计算量大,耗时长。连续与非连续耦合方法主要包括有限元-离散元耦合、离散元与物质点耦合等,充分发挥了连续模拟方法对场量模拟的高精度特点与非连续方法对于大变形模拟的优势,既可以模拟介质破坏前的场量分布,也可以体现介质由连续转变为散体的相变过程以及散体的运动特征。但是计算量大,尚未出现成熟的商业软件。

在有限元和离散元理论框架下,炸药爆轰与介质破碎两个过程的数值模拟方法主要有:(1)建立炸药和介质的有限元实体模型,炸药单元采用Jones-Wilkins-Lee(JWL)状态方程,描述爆轰产物的压力-体积-能量关系,以及爆轰产物的等熵膨胀过程;炸药单元与介质单元采用Lagrange、Euler或多物质流固耦合(ALE)算法^[4-6],在自带损伤变量的材料本构模型中通过单元节点力的迭代计算,模拟爆破介质的损伤破碎状态。该方法能够精确模拟爆炸冲击波的传播、反射,以及与结构的复杂相互作用,但是炸药单元在大变形下极易发生网格畸变,可能导致计算中断,且难以模拟介质的破碎、断裂和抛掷过程。(2)仅建立介质的有限元模型,在孔壁单元或等效界面上直接施加类三角形荷载或通过CONWEP加载方法表征爆炸荷载的产生和衰减过程^[7-9],简化爆轰产物的作用过程。该方法的计算效率高,一般用于计算结构在爆破远区的介质动力响应,但是忽略了爆轰产物的产生与传播过程,且难以模拟介质的破碎状态。(3)采用光滑粒子法(SPH)或SPH-FEM耦合的方法^[10-13],将炸药和爆破近区的介质离散为SPH粒子,炸药采用JWL状态方程描述爆轰产物的演化过程,模拟炸药爆炸,介质破碎、断裂和抛掷过程;爆破远区的介质采用FEM网格,通过在界面处定义接触或约束传递变量,采用HJC模型或其他弹脆性损伤模型,通过损伤变量模拟裂纹的萌生和扩展过程。该方法克服了FEM网格大

变形,以及模拟介质破碎、抛掷等过程的难题,但是粒子较多时计算成本高,需要采取自适应粒子细化、并行计算和 SPH-FEM 耦合等策略。(4)采用粒子爆破法(PBM)模拟炸药的爆轰过程^[14-16],相较于传统 FEM 方法中将炸药材料结合 JWL 状态方程,PBM 方法是基于分子动力学理论对粒子法的改进,考虑了协体积效应,可以更精准地描述爆轰产物在高温高压下的气体行为。该方法无需定义状态方程,仅需输入爆炸的特征参数:炸药密度、内能、爆速、余容参数、定压比热与定容比热的比值 C_p/C_v ,算法的稳定性更高。爆破近区的介质可根据需要,采用 SPH 或 DEM 方法进行描述,爆破远区的介质可采用 FEM 方法进行描述。因此,形成了 PBM-SPH、PBM-DEM 和 PBM-DEM-FEM 等一系列耦合算法。

本文通过 RC 立柱钻孔爆破物理模型试验,采用工业电子雷管实现 RC 立柱多炮孔一次齐爆,真实还原了建构筑物承载构件爆破拆除过程。基于 PBM-SPH 耦合算法开展数值模拟计算,并结合试验结果分析,再现 RC 立柱的爆破破碎过程,揭示 RC 立柱在钻孔爆破条件下的破坏机制。

1 PBM 算法的基本原理

粒子爆破法(PBM)的基本原理是分子动力学理论,认为爆轰压力是爆轰产物气体分子与孔壁碰撞的结果。处于平衡状态的气体,每个分子瞬时速度的方向、大小都在随机变化,Maxwell 认为大量分子的速度分布遵从一定的统计规律,并得到热平衡时分子速率的分布函数

$$f(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 \cdot e^{\left(\frac{-mv^2}{2kT} \right)} \quad (1)$$

式中: $f(v)$ 是分子速率的分布函数; v 为分子速率; m 为摩尔质量; k 为气体常数; T 为温度。该理论解释了气体宏观热学性质和微观过程本质,推导了理想气体宏观量与微观量平均值的关系。

每克炸药的分子量可达 $10^{22} \sim 10^{23}$,为建模方便,提升计算效率,需要对基于分子动力学理论对粒子做如下假设:(1)粒子视为刚性球体;(2)每个粒子代表许多分子,分子数量根据应用场景设定;(3)每个粒子的平动动能 W_t 和转动动能 W_s 之间的平衡关系由 $\gamma = C_p/C_v$ 确定。 C_p 、 C_v 分别表示恒定压力和恒定体积下的热容。

$$\frac{W_s}{W_t} = \frac{5 - 3\gamma}{3\gamma - 3} \quad (2)$$

式中, W_s 是每个粒子总的标量变量,粒子没有

分配任何转动/振动自由度。当粒子撞击移动的结构时, W_t 将发生变化,而 W_s 则假定不受影响。因此, W_t 和 W_s 之间的值将发生改变。当 2 个粒子碰撞时,它们之间的能量将重新分配以维持 W_t 和 W_s 之间比值的恒定,以确保总能量和动量平衡。

2 立柱钻孔爆破 PBM-SPH 耦合计算模型及结果分析

2.1 PBM-SPH 耦合计算模型

以某个 RC 立柱作为研究对象,其截面尺寸为 800×1000 mm,高度为 5.0 m,底部固定、顶端自由。立柱主筋为 $24\phi 22$,箍筋为 $\phi 12@100$,混凝土设计标号为 C30,回弹仪实测强度为 46 MPa。沿立柱短边中心线布置 8 排炮孔,孔径 $\phi 40$ mm,孔距 40 cm。炸药选用 2#岩石乳化炸药,药卷直径 $\phi 32$ mm;工业电子雷管起爆时间统一设置为 300 ms。孔内采用连续装药,单孔装药量为 500 g,总装药量为 4000 g,综合炸药单耗为 1562.5 g/m^3 。见图 1、图 2。

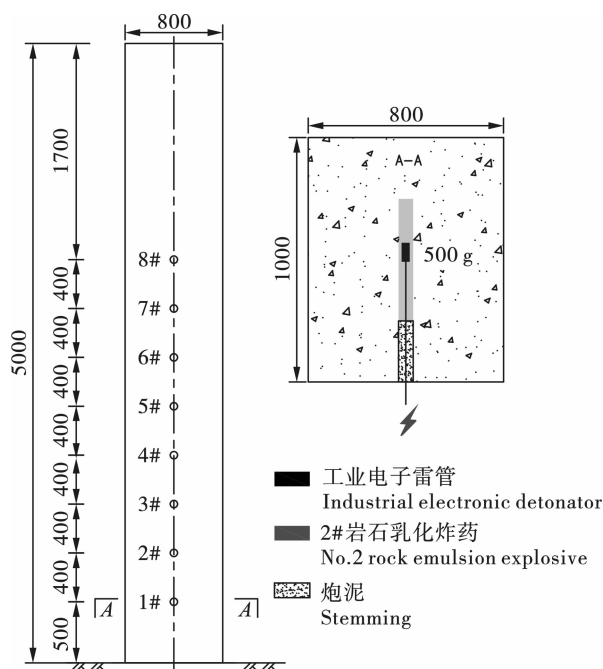


图 1 RC 立柱钻孔爆破方案(单位:mm)

Fig. 1 Drilling blast scheme of RC column(unit:mm)

在 LS-DYNA 有限元计算程序中建立 RC 立柱 PBM-SPH 耦合计算模型,其中主要包含 2#岩石乳化炸药、混凝土、炮泥和空气 4 种介质,不考虑钢筋的耦合和黏结作用。混凝土和炮泥采用 SPH 粒子进行描述,粒子总数为 508 784 个。2#岩石乳化炸药与空气采用 PBM 爆炸粒子进行描述,设置空气粒子包裹炸药粒子。粒子数量根据炸药的质量进行调整,综合考虑计算效率,设置炸药粒子密度为

200 个/g,空气粒子定义为 300 个/g。

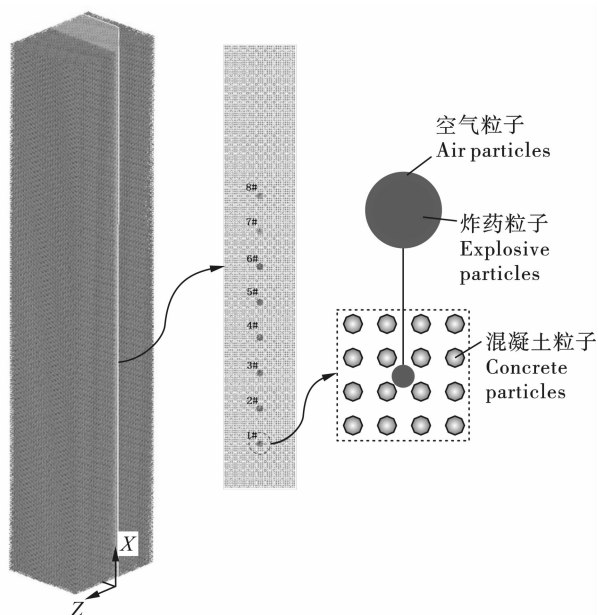


图2 PBM-SPH 耦合计算模型

Fig. 2 Coupled PBM-SPH computational model

2.2 材料参数设置

2#岩石乳化炸药和空气通过 PBM 爆炸粒子法进行描述,其中炸药仅需输入爆炸的特征参数,密度

$\rho = 1100 \text{ kg/m}^3$,内能 $E = 2.67 \text{ kJ}$,爆速 $D = 5166 \text{ m/s}$,余容参数 $C = 0.57$,定压比热与定容比热的比值 $C_p/C_v = 1.56$ 。空气采用计算程序默认的材料参数,无需额外设置。炮泥采用土壤材料本构模型,密度 $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$,剪切模量 $G = 16.0 \text{ MPa}$ 。混凝土采用 HJC 材料本构模型,参考文献[17]选取材料参数,密度 $\rho = 2600 \text{ kg/m}^3$,剪切模量 $G = 17.8 \text{ GPa}$,最大拉伸静水压力 $T = 5.7 \text{ kN}$,损伤参数 $D_1 = 0.04$,损伤参数 $D_2 = 1.0$ 。混凝土材料损伤通过等效塑性应变和塑性体积应变的累积来描述,损伤演化方程为

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p + \Delta \mu_p}{\varepsilon_p^f + \mu_p^f} \quad (3)$$

$$\varepsilon_p^f + \mu_p^f = D_1 (P^* + T^*)^{D_2} \geq \varepsilon_{f \min} \quad (4)$$

式中: $\Delta \varepsilon_p$ 和 $\Delta \mu_p$ 分别为一个积分循环内的等效塑性应变和塑性体积应变; $\varepsilon_p^f + \mu_p^f$ 为常压下材料破坏的塑性应变; $T^* = T/f_c$ 为材料的最大特征化等效拉应力; T 为材料的最大拉伸应力; D_1 和 D_2 为模型的损伤参数; $\varepsilon_{f \min}$ 为使材料断裂的最小塑性应变。

2.3 数值模拟结果及分析

采用 PBM-SPH 耦合算法,通过数值模拟计算得到炸药粒子的爆破过程,以及立柱在钻孔爆破条件下的损伤与破碎过程,如图3所示。

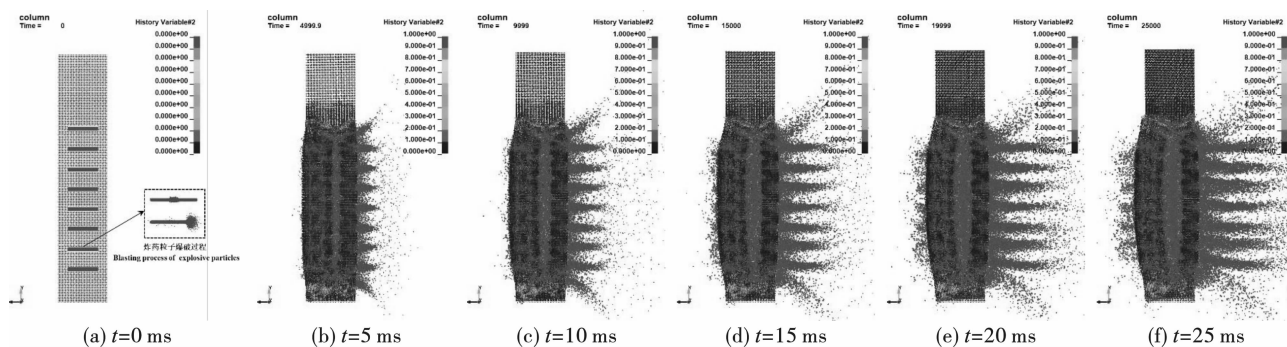


图3 立柱侧面损伤破碎过程

Fig. 3 Failure process on the side of RC column

数值模拟结果表明,通过设置起爆点和延期时间,PBM 法可以复现炸药粒子从药卷中间向两端传爆的爆轰过程。通过炸药粒子的高速运动,很好地模拟了爆轰产物在炮孔内部作用,以及从炮孔孔口方向逸出的过程,克服了以往算法中无法真实模拟介质破碎、断裂和抛掷过程的弊端,验证了炸药爆炸能量分布的不均匀性,使得仿真效果更加贴近真实爆破情况。见图4。

对比立柱侧面、正面和背面的爆破损伤破坏特征,可以发现,两侧的混凝土粒子抛掷幅度最大,正面飞散的混凝土损伤粒子最多。由于炮孔堵塞段内

炮泥的约束作用有限,炸药粒子从孔口冲出炮孔后会造成立柱正面区域的混凝土发生损伤和破坏,从而导致正面和背面的损伤的不对称性,研究规律与参考文献[16]非常契合。

3 立柱钻孔爆破物理模型试验

为观察立柱在钻孔爆破条件下多药包协同爆破时的破碎过程,验证数值模拟的精准性,研究团队在野外试验场选用工业电子雷管开展了立柱钻孔爆破试验。观测设备采用 Vision Research 公司的 Phantom V1612 型高速摄像机,其可在 1280×800 像素分

分辨率下以 16 600 fps 帧率采集图像。考虑现场实际光线情况,设置拍摄速率为 8000 fps,即每帧采集间隔时间为 $125\ \mu\text{s}$ 。在立柱完全裸露的情况下,采集得到立柱侧面的爆破破坏过程及爆破飞石的抛掷特征,如图 5 所示。

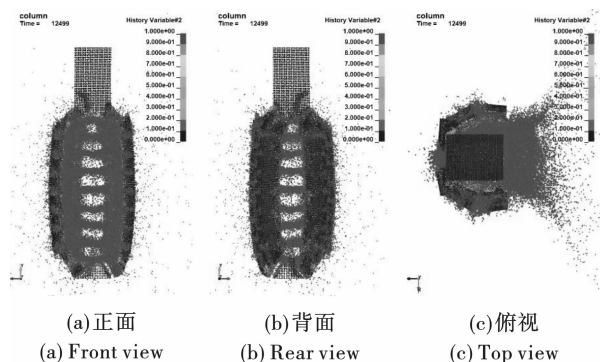


图 4 立柱其他方向损伤破碎情况

Fig. 4 Failure conditions of the column from other perspectives

3.1 立柱爆破破碎过程分析

由于无法在图像中观察到起爆信号,以最先看到 1#炮孔中有炮泥朝外冲出动作的第 2627 帧图像作为药包起爆的初始时刻。历经 $0\ \mu\text{s}$ 、 $375\ \mu\text{s}$ 、

$625\ \mu\text{s}$ 、 $750\ \mu\text{s}$ 、 $1000\ \mu\text{s}$ 、 $1375\ \mu\text{s}$ 和 $1500\ \mu\text{s}$,炮孔 1#→8#→5#→2#→7#→4#→3#、6#中的炮泥依次冲出。经过 $1625\ \mu\text{s}$,立柱发生明显鼓包,表面可见明显的竖向裂纹,且基本都集中在药包区域附近。随后,立柱中的混凝土进一步鼓包,正面(炮泥侧)的鼓包幅度略小于背面,竖向裂纹之间逐渐相互贯通。经过 $4125\ \mu\text{s}$,立柱表面逐渐出现明显的横向裂纹。历经 $4750\ \mu\text{s}$,立柱表面沿着起爆药包的两端位置呈现两条贯通的竖向裂隙,数条裂纹的扩展端部在立柱上部总体呈现“] [”状。竖向裂纹扩散范围主要集中在 $0.0\sim 4.1\ \text{m}$ 。经过 $12\ 875\ \mu\text{s}$,立柱两侧裂纹贯穿至顶部,立柱顶端出现“下沉”趋势。爆破过程中伴有混凝土碎块向四周抛散,由于爆生气体的冲击作用以及炮泥的弱约束,更多混凝土碎块随着爆生气体沿着孔口方向抛掷,造成立柱正面和背面抛掷混凝土碎块的不对称性。立柱爆破破碎过程及裂纹扩展形态的试验结果与数值模拟结果比较吻合。相比参考文献[18]描述的长延时导爆管雷管爆破试验,数码电子雷管的延时精度显著提高,多个药包协同爆破破碎立柱的同步性更好,更有利于立柱的破碎。

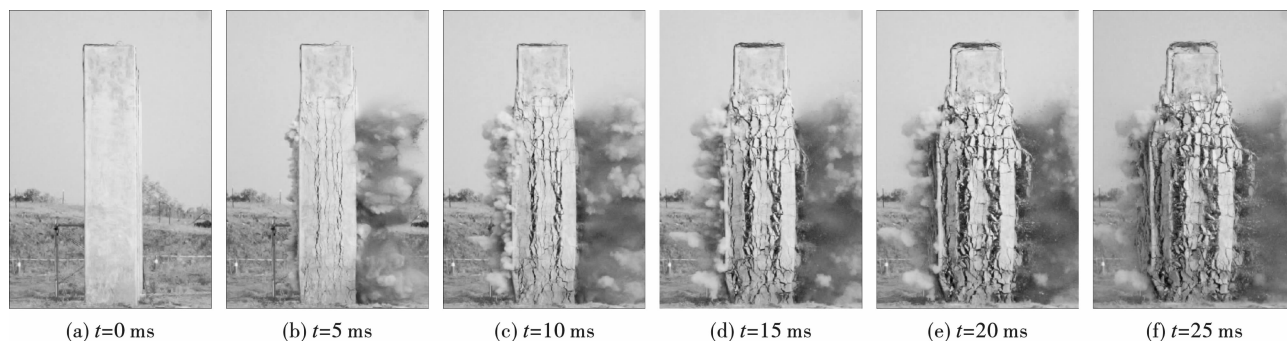


图 5 立柱爆破破坏过程

Fig. 5 Experimental failure process of the column during blasting

立柱炮孔内所有药包起爆后,5 ms 时的裂纹扩展形态,如图 6 所示。在立柱背面的高程方向每隔 50 cm 选取特征点,并读取各时刻的鼓包位移值,绘制鼓包位移曲线,如图 7 所示。

由裂纹扩展演化规律可知,立柱表面主要在装药区域及附近产生纵向裂纹,并沿着装药区域朝着上下两端呈散射状,少量沿着正面和背面两侧自由面产生横向裂纹。由此可知,药包区域及附近的混凝土主要受爆炸荷载作用发生压剪破坏,非药包区域的混凝土主要由爆炸冲击波在自由面反射发生拉伸破坏。分析立柱背面各时间点的鼓包位移曲线,发现立柱表面的鼓包位移随着时间增长而逐渐增大,即立柱的破碎离散状态越严重。对比立柱背面

各时刻的鼓包位移曲线,发现除 400 cm 高程附近的鼓包形态偏差较大之外,立柱其他区域数值模拟计算的鼓包位移结果总体贴合模型试验的观测结果,并且计算的位移值总体偏小。20 ms 以内的鼓包位移的最大计算误差为 9.5%,25 ms 时鼓包位移计算结果的最大误差为 15.8%。

3.2 爆破飞石运动规律分析

依次选取立柱正面和背面爆破飞散范围内的飞石像素点 A 和 B,如图 8 所示。通过追踪 A、B 两点的运动轨迹,记录各个时刻点的水平位移值,对比立柱正面粒子特征点的仿真计算结果和参考文献[18]中 A 点的水平运动位移情况,如表 1 所示。绘制爆破飞石水平位移的时间历程曲线,如图 9 所示。

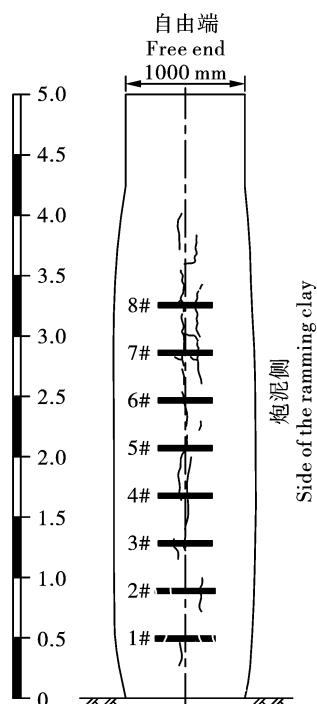


图6 立柱爆破裂纹扩展形态(单位:m)

Fig. 6 Blast-induced crack propagation in column(unit:m)

分析爆破飞石的运动轨迹,发现其在高速摄像捕捉的时间范围内(25 ms),两个像素点基本是沿着水平方向运动,与参考文献[18]描述的规律一致。对各类计算结果的数据进行线性拟合,得到实测过程中A点的飞散速度 $V_A = 29.5$ m/s,B点的飞散速度为 $V_B = 29.2$ m/s,数据量级与文献[18]基本接近。而数值模拟计算得到爆破飞石的飞散速度为37.7 m/s,相比模型试验的结果偏大;对比各时刻的水平位移值结果,仿真结果的平均误差值为8.9%。

4 研究结论

基于PBM-SPH耦合算法对钢筋混凝土立柱的爆破过程进行数值模拟,并结合1:1物理模型试验,对立柱的爆破破碎过程和飞石的飞散规律进行了研究,得到以下结论:

(1)相较于传统FEM方法,粒子爆破法(PBM)可以更加精准地模拟炸药爆轰和爆生产物的动态过程,在钻孔爆破工况条件下,揭示了立柱不同边界条件约束下爆生产物的力学作用机理。

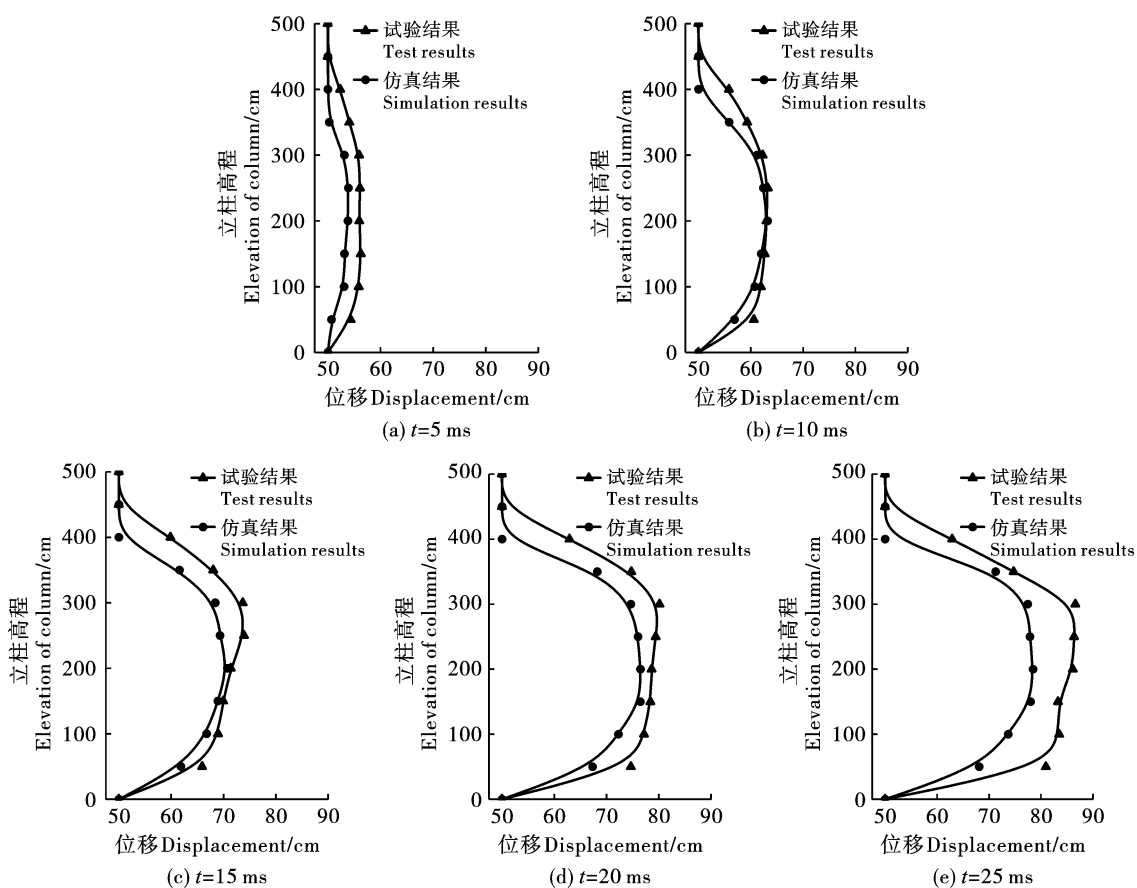


图7 立柱背面鼓包位移曲线

Fig. 7 Bulge displacement profile on the rear side of column

表 1 爆破飞石各时刻的水平位移值

Table 1 Horizontal displacement of blasting flying rock at different times

项目 Project	0 ms	5 ms	10 ms	15 ms	20 ms	25 ms
A 点 Point A	50	66.40	85.85	99.09	109.13	125.13
B 点 Point B	50	62.52	85.02	95.35	106.22	123.92
仿真结果 Simulation results	50	60.05	83.56	104.52	126.35	138.06
文献[18] Reference[18]	45	83.00	92.20	101.15	109.80	118.85

注:(1)仿真结果的取值对象为立柱正面炮孔位置处的粒子;(2)文献[18]的取值对象是 A 点的水平位移,5 ms、15 ms 和 25 ms 时刻的位移值是通过线性插值法得到。

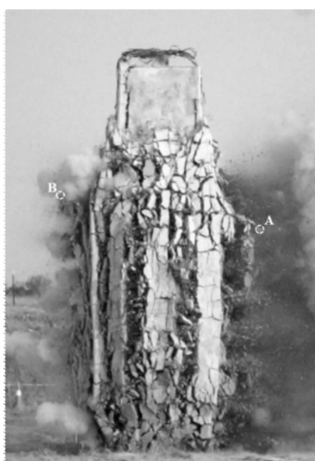


图 8 爆破飞石特征点

Fig. 8 Tracking points on the blasting flying rock

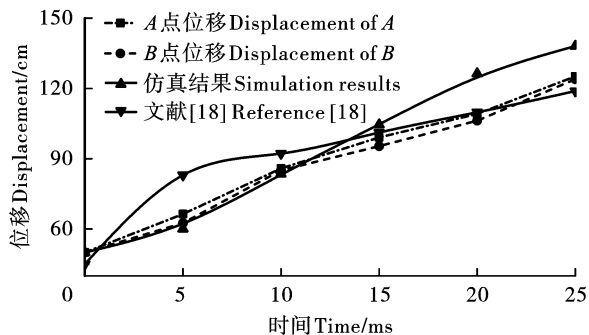


图 9 爆破飞石水平位移时间历程曲线

Fig. 9 Time-history curve of horizontal displacement for the blasting flying rock

(2)通过 SPH 算法将立柱离散为光滑粒子流,克服了有限元算法中无法真实模拟介质破碎、断裂和抛掷过程的弊端,通过粒子运动表征立柱的破碎形态与实际爆破效果更加贴近。

(3)通过光滑粒子运动过程表征立柱爆破后飞石的飞散,计算立柱正面炮孔位置处的粒子飞散速度为 37.7 m/s,对比各时刻的水平位移值结果,仿真结果的平均误差值为 8.9%。

参考文献 (References)

- [1] 谢先启. 拆除爆破技术的发展与展望[J]. 爆破, 2019, 36(2): 1-12.
- [1] XIE Xian-qi. Development situation and trend of demolition blasting technology[J]. Blasting, 2019, 36(2): 1-12. (in Chinese)
- [2] 谢先启. 拆除爆破数值模拟与应用[M]. 湖北: 科学技术出版社, 2008.
- [2] XIE Xian-qi. Numerical simulation and application of demolition blasting [M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2008. (in Chinese)
- [3] 杨 军, 杨国梁, 张国雄. 建筑结构爆破拆除数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [3] YANG Jun, YANG Guo-liang, ZHANG Guo-xiong. Numerical simulation of building structure demolition by blasting [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)
- [4] ZHANG Hao, XING Xue-yang, DU Yi-teng, et al. An approach of rock blasting simulation of equivalent blasting dynamic-static action [J]. Underground Space, 2025(23): 68-88.
- [5] QIAN Rong, DENG Shu-xin, LIN Jin, et al. Numerical simulation study on dynamic response of caisson wharf subjected to internal blast loading [J]. Structures, 2024(70): 107751.
- [6] ZHAO Jun-jie, LI Di-yuan, RANJITH P G, et al. Innovative cut blasting method for rock excavation at depth based on numerical simulation and field tests[J]. Tunneling and Underground Space Technology 2025 (155): 106211.
- [7] 许红涛, 卢文波, 周小恒. 爆破震动场动力有限元模拟中爆破荷载的等效施加方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2008, 41(1): 67-71.
- [7] XU Hong-Tao, LU Wen-bo, ZHOU Xiao-heng. An equivalent approach for acting blasting load in dynamic finite element simulation of blasting vibration [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2008, 41(1): 67-71. (in Chinese)
- [8] 操 鹏, 钟冬望, 何 理, 等. 临近边坡精确延时控制爆破实验及数值模拟研究[J]. 科学技术与工程,

- 2016,16(3):6-10.
- [8] CAO Peng, ZHOU Dong-wang, HE Li, et al. Experimental and numerical simulation study of controlled blasting with precision delay time nearby slope[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(3):6-10. (in Chinese)
- [9] 张帝, 杨军, 曾丹, 等. 钢筋混凝土排架结构的抗爆破坏等级[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(12):46-57.
- [9] ZHANG Di, YANG Jun, ZENG Dan, et al. Damage grade of reinforced concrete bent structures against blast[J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(12):46-57. (in Chinese)
- [10] CAO Xiao-rui, LIANG Rui, ZHOU Wen-hai, et al. SPH FEM Numerical simulation of empty-hole cut blasting in rock masses[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2025, 43(8):388.
- [11] 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.
- [11] WANG Zhi-liang, BI Cheng-cheng, LI Hong-ru. Numerical simulation of blasting damage in concrete using a coupled SPH-FEM algorithm[J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(6):1419-1428. (in Chinese)
- [12] 胡英国, 卢文波, 陈明, 等. SPH-FEM 耦合爆破损伤分析方法的实现与验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1):2740-2748.
- [12] HU Ying-guo, LU Wen-bo, CHEN Ming, et al. Implementation and verification of SPH-FEM coupling blasting damage analytical method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1):2740-2748. (in Chinese)
- [13] 程兵, 汪海波, 宗琦. 基于 SPH-FEM 耦合法切缝药包爆破机理数值模拟[J]. 含能材料, 2020, 28(4):300-307.
- [13] CHENG Bing, WANG Hai-bo, ZONG Qi. Numerical simulation on blasting mechanism of slotted cartridge based on coupled SPH-FEM algorithm[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2020, 28(4):300-307. (in Chinese)
- [14] 张绍彦, 王显会, 彭兵, 等. 基于 PBM 算法的冲击波载荷数值模拟研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(10):130-136.
- [14] ZHANG Shao-yan, WANG Xian-hui, PENG Bin, et al. Research on numerical simulation of shock wave load based on PBM Algorithm[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(10):130-136. (in Chinese)
- [15] 尤元元, 杨仁树, 左进京, 等. 基于相似模型和 PBM-FEM-DEM 耦合算法的大结构采场爆破参数优化[J]. 中国矿业大学学报, 2025, 54(4):796-810.
- [15] YOU Yuan-yuan, YANG Ren-shu, ZUO Jinjing, et al. Optimization of blasting parameters in large structure mining sites based on similarity models and PBM-FEM-DEM coupling algorithm[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(4):796-810. (in Chinese)
- [16] 黄小武, 谢先启, 贾永胜, 等. 钢筋混凝土立柱钻孔爆破破坏过程数值分析与试验研究[J]. 爆破, 2025, 42(2):1-12.
- [16] HUANG Xiao-wu, XIE Xian-qi, JIA Yong-sheng, et al. Numerical analysis and experimental study on failure process of drilling and blasting in reinforced concrete columns[J]. Blasting, 2025, 42(2):1-2. (in Chinese)
- [17] 任根茂, 吴昊, 方秦, 等. 普通混凝土 HJC 本构模型参数确定[J]. 振动与冲击, 2016, 35(18):9-16.
- [17] REN Gen-mao, WU Hao, FANG Qin, et al. Determinations of HJC constitutive model parameters for normal strength concrete[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(18):9-16. (in Chinese)
- [18] 黄小武, 谢先启, 贾永胜, 等. 钢筋混凝土立柱爆破破坏过程及个别飞散物试验研究[J]. 爆破, 2020, 37(1):13-18.
- [18] HUANG Xiao-wu, XIE Xian-qi, JIA Yong-sheng, et al. Experimental study on failure process and flyrock of reinforced concrete columns induced by blasting[J]. Blasting, 2020, 37(1):13-18. (in Chinese)

《爆破》论文网络首发及著作权使用声明

《爆破》为使录用论文首发权及时获得确认,自2019年12月起与中国知网合作启动“网络首发”在线优先数字出版项目,即《中国学术期刊(网络版)》(简称CAJ-N),统一连续出版物号ISSN 2096-418/CN 11-6037/Z。

作者稿件经审稿录用后,将会以“录用定稿”模式第一时间上传至中国知网“网络首发”平台发布。每篇网络首发论文均可下载一份“中国知网学术期刊网络首发论文出版证书”,其效力等同于纸质出版论文。

为避免出现一稿多投的现象,凡已投《爆破》的稿件,在未确认录用或退稿前,请勿再投他刊!

《爆破》是中文核心期刊要目总览、中国科学引文数据库(CSCD)、科技期刊世界影响力指数(WJCI)报告、高质量科技期刊分级目录总汇、中国科技核心期刊、中国学术期刊评价研究报告(RCCSE)、中国应用型期刊评价研究报告(CACJ)等评价体系收录期刊。《爆破》还是Scopus科研检索分析和学科规划管理数据库、SciFinder CAS美国化学文摘数据库、Ulrich's 乌利希国际期刊指南、JST日本科学技术振兴机构数据库、中国知网知识发现网络平台、万方数据知识服务平台、超星期刊域出版平台、维普资讯中文期刊服务平台、SciOpen平台、SciEngine发布平台、Researching中国光学期刊网、楚天科技期刊论文在线开放平台等数据库和平台收录期刊。本刊已许可上述机构以数字化方式网络传播本刊全文。所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。如有异议,请在投稿时说明,本刊将按作者说明处理。