

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.01.005

## PBM 算法在近场爆炸数值模拟中的运用研究\*

徐自强<sup>1</sup>, 王丽娟<sup>1</sup>, 朱洁<sup>1</sup>, 李闯<sup>2</sup>, 宋长杰<sup>1</sup>, 时小凡<sup>2</sup>

(1. 中煤科工集团 沈阳设计研究院, 沈阳 110168; 2. 沈阳建筑大学, 沈阳 110168)

**摘要:** 为探究爆炸粒子算法(PBM)在近场爆炸问题中的适用性,分别采用PBM法及任意拉格朗日-欧拉算法(ALE&S-ALE),开展AL-6XN不锈钢板近场爆炸的仿真模拟。结合T Børvik的试验结果,对比了ALE、S-ALE和PBM方法的计算精确度和运算效率;采用PBM算法对不同爆心距的钢板近场爆炸工况进行仿真计算,分析了粒子总数和粒子个数比对PBM算法计算精度的影响;通过对150 mm爆心距、球状C4炸药近场爆炸场景进行仿真,分析了不同算法运算时效占比规律。结果表明:不同工况下PBM算法得到的钢板挠度最大误差为20%,离散系数0.12,优于ALE和S-ALE算法;相同的网格划分,PBM算法运算用时仅为ALE和S-ALE算法的十分之一;粒子总数一定时,粒子数量比越接近粒子质量比或粒子个数比一定,粒子总数越多,PBM算法精度越高,模拟效果越好。

**关键词:** 近场爆炸;数值模拟;模拟方式;任意拉格朗日-欧拉算法;PBM算法

**中图分类号:** TJ55 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)01-0029-07

## Application of Particle Blast Method on Near-field Blast Numerical Simulation

XU Zi-qiang<sup>1</sup>, WANG Li-juan<sup>1</sup>, ZHU Jie<sup>1</sup>, LI Chuang<sup>2</sup>, SONG Chang-jie<sup>1</sup>, SHI Xiao-fan<sup>2</sup>

(1. CCTEG Shenyang Engineering Company, Shenyang 110168, China;

2. Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

**Abstract:** In order to explore the applicability of particle blast method(PBM) in near-field blast problems, PBM and arbitrary Lagrange Eulerian algorithm(ALE & S-ALE) were used to simulate near-field blast tests of AL-6XN stainless steel plates. PBM was used to simulate the near-field blast of a steel plate with different distances to the explosion center. During this process, how the total number of particles and the particle number ratio influence the calculation accuracy of PBM was analyzed. Combined with the test results of T. Børvik, the calculation accuracy and operation efficiency of PBM, ALE and S-ALE methods were compared. By simulating the near-field blast of spherical C4 explosive 150 mm away from the explosion center the steel plate, the time proportion of different algorithms was also analyzed. The results show that under different conditions, the maximum error of steel plate deflection obtained by PBM is 20%, and the dispersion coefficient is 0.12, which is better than ALE and S-ALE algorithm. For the same mesh generation, the operation time of PBM algorithm is only one tenth of that of ALE or S-ALE algorithm. PBM has a higher accuracy and better simulation effect when the particle number ratio is closer to the particle mass ratio under certain total number of particles, or when the total number of particles is higher under certain particle number ratio.

**Key words:** near field blast; numerical simulation; simulation mode; Arbitrary Lagrange-Euler; Particle Blast Method

收稿日期:2021-09-19

作者简介:徐自强(1992-),男,助理工程师、硕士,任职于中煤科工集团沈阳设计研究院有限公司,主要从事民爆工程设计与抗爆结构研发工作,(E-mail)xuziqiang2014@163.com。

基金项目:中国煤炭科工集团有限公司科技创新创业资金专项项目基金资助(2019-MS001)

爆炸的成因直接决定爆炸的形式和冲击作用,因此,对爆炸的内部机理和发展过程进行研究显得尤为重要。在研究远场爆炸时,可以假设荷载为自

由场中的无限域,进一步利用强冲击荷载作用下的基本方程进行求解,国内外研究人员相继开展大量研究试验,得到较多成果<sup>[1]</sup>;但研究近场爆炸时,这种假设难以成立,由于其边界情况复杂,导致理论求解极为困难<sup>[2,3]</sup>,此外,由于近场爆炸破坏力强,约束条件苛刻,受到技术和经济等因素的制约,导致相关试验研究较少<sup>[4,5]</sup>。为降低经费,并且达到研究目的,采用数值模拟是现在较好的研究手段之一<sup>[6,7]</sup>。

近场爆炸数值模拟大多采用任意拉格朗日-欧拉算法(ALE)和流固耦合算法。ALE既能保持合理的网格形状,又能准确地描述物体运动,但同时也使计算更加复杂,对方程求解造成困难<sup>[8,9]</sup>;流固耦合法不需要耦合面上的流体单元和结构单元一一对应,能够大幅减少工作难度,但会造成精度偏低<sup>[10]</sup>。近年来,逐渐出现新型数值模拟方法,如爆炸粒子算法(Particle blast method, PBM)。PBM基于分子运动理论,能够更好地表征高温下的气体行为,在一定条件下可以更准确的模拟爆炸产物、空气和结构之间的相互作用<sup>[11,12]</sup>。

为探究 PBM 算法在近场爆炸问题中的适用性,仿真模拟以 T Børvik 的 AL-6XN 不锈钢板近场爆炸试验为依据,对比了 ALE、S-ALE 和 PBM 方法的计算精确度和运算效率;采用 PBM 算法对不同爆心距的钢板近场爆炸工况进行仿真计算,分析了粒子总数和粒子个数比对 PBM 算法计算精度的影响;通过对 150 mm 爆心距、球状 C4 炸药近场爆炸场景进行仿真,分析了不同算法运算时效占比规律。

## 1 PBM 方法理论

PBM 是在微粒子法(Corpuscular particle method, CPM)的基础上发展而来的。CPM 是一种基于动力学分子理论(Kinetic molecular theory, KMT)的粗粒度多尺寸粒子方法,多用于气体动力学模拟。其中,KMT 理论是研究气体粒子及其微观相互作用进而得出宏观气体规律的理论,它源于 Daniel Bernoulli 的活塞理论,后因麦克斯韦方程的建立,得以广泛运用<sup>[13]</sup>。

KMT 理论基于以下假设:①气体由大量分子构成,这些分子是刚性球状的物体,始终处于随机运动状态;②分子尺寸远小于分子间的平均距离;③分子遵循牛顿运动定律;④分子之间及分子与结构间仅存在弹性相互作用;⑤分子之间不存在排斥力和吸引力。

KMT 理论可以准确描述理想气体的各项特性,但计算量巨大,难以在实际模拟中得到运用。为弥补这一缺陷,降低运算量,Olovsson 博士提出了将大

量分子聚集成一个粒子的方法,即 CPM 法。但 CPM 法的下述特征使其无法直接用于爆炸问题模拟:①理想气体定律无法得到绝热膨胀条件下爆炸进程中的急剧降压;②系统处于热平衡的假设无法满足高温高压气体动力学的要求。

PBM 改进了 CPM,使其可以模拟高温高压下的真实气体规律。PBM 算法引入了协体积效应参数,能够更好地反映气体在极端压力下的行为。PBM 将许多分子合并为一个微粒,使系统的计算对象数量降低了十几个数量级,见图 1。结合增加的计算临界时间步长,这种方法使得模拟宏观系统和长时间问题成为可能。

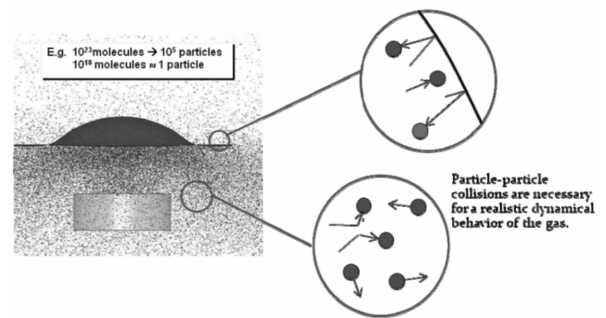


图 1 爆炸粒子法(PBM)(出自文献[13])  
Fig. 1 Particle Blast Method(PBM)

## 2 近距离爆炸试验仿真模拟

### 2.1 试验场景及分析模型

仿真模拟试验参数出自 T Børvik 的钢板抗爆试验<sup>[14]</sup>。试验对象为四边固定的正方形 3.4 mm 厚的 AL-6XN 钢板,面密度为 27.4 kg/m<sup>2</sup>,详见图 2。试验装置使用夹板和螺栓将试验钢板的四边完全加紧,起爆物为球状 C-4 炸药,质量 150 g。钢板的迎爆面尺寸为 406 × 406 mm,下部区域中空无支撑,可自由变形。C-4 炸药球心至钢板上表面的距离分别为 150、200、250 mm,共开展 3 组爆炸试验,试验工况见表 1,试验简图见图 3。

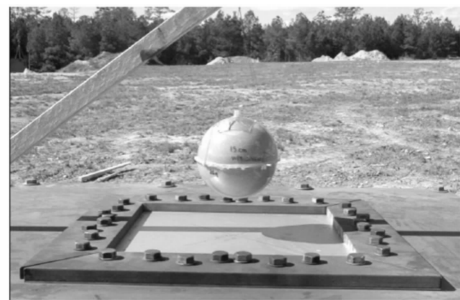


图 2 试验装置(出自文献[14])  
Fig. 2 Test device

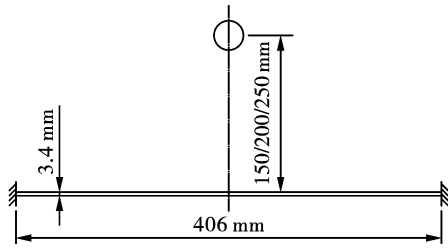


图 3 试验简图(作者自绘)

Fig. 3 Test diagram

表 1 AL-6XN 钢板近场爆炸试验工况  
Table 1 Near field explosion test conditions of AL-6XN steel plate

C4 药量 $m/g$	爆心距 $L/mm$	跨中最终挠度 $Z/mm$
150	150	17.0
150	200	12.7
150	250	11.3

表 2 AL-6XN 钢板材料参数

Table 2 Material parameters of AL-6XN steel plate

$E/GPa$	$\nu$	$\rho/(kg \cdot m^{-3})$	$A/MPa$	$B/MPa$	$n$	$\dot{\epsilon}_0/(s^{-1})$
195	0.30	8060	410	1902	0.82	0.001
$C$	$T_r/K$	$T_m/K$	$m$	$C_p/(J/kg \cdot K)$	$\chi$	$\alpha/(K^{-1})$
0.024	296	1700	1.03	500	0.90	$1.5 \times 10^{-5}$

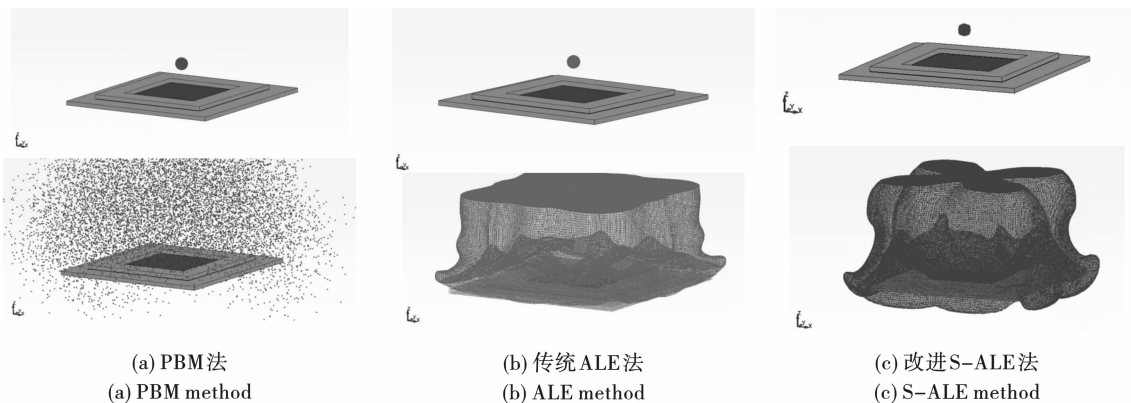


图 4 不同的模拟方式

Fig. 4 Different simulation methods

表 3 C4 炸药材料参数

Table 3 Material parameters of C4

$\rho_0/(kg \cdot m^{-3})$	$L/(m \cdot s^{-1})$	$\gamma$	$b$	$E_0/(GJ \cdot m^{-3})$
1601	8190	1.4	0.35	8.7

### 2.3 ALE 与 S-ALE 仿真计算

作为对照组,建立了基于传统 ALE 和改进 S-ALE 的完整有限元模型,见图 3(b)及(c)。相较于传统 ALE,LS-DYNA 中改进 S-ALE 使用关键字创建流体单元网格,即建模时仅需创建结构有限元网格,简化了建模流程,便于模型的修改处理。ALE 和 S-

仿真计算采用 LS-Dyna 有限元软件,分别采用传统 ALE 法、改进的 S-ALE 法及 PBM 法开展仿真模拟。根据试验场景建立 1:1 仿真模型,如图 4 所示。AL-6XN 钢板采用全积分壳体单元,网格单元尺寸为 7 mm,考虑应变率效应,材料选用关键字 MAT\_MODIFIED\_JOHNSON\_COOK 来定义,主要参数见表 2。夹具为刚体,采用常应力实体单元,网格单元尺寸为 10 mm,材料选用关键字 MAT\_RIGID 来定义。

### 2.2 PBM 仿真计算

根据试验工况,由模型坐标计算得出爆心位置,采用 DEFINE\_PBLAST\_GEOMETRY 关键字定义炸药位置及形状特征;采用 DEFINE\_PBLAST\_AIR-GEO 关键字定义空气域特征;采用 DEFINE\_PARTICLE\_BLAST 关键字设置 C4 炸药材料参数并定义粒子与结构的耦合关系,C4 炸药材料参数见表 3。基于 PBM 算法的有限元模型见图 3(a)。

ALE 的模型尺寸、网格划分方式和单元总数均相同。流体域采用单点积分的 ALE 多物质单元,轮廓尺寸均为 900 mm × 900 mm × 540 mm。其中,空气视为初始压强 100 kPa 的理想气体,网格单元尺寸为 9 mm,材料选用关键字 MAT\_NULL 定义,密度为 1.293 kg/m<sup>3</sup>,状态方程选用关键字 EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL 定义,参数见表 4。C4 炸药材料选用关键字 MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 定义,状态方程选用 EOS\_JWL 定义,材料参数同表 3,状态方程见表 5。

表4 空气状态方程参数

Table 4 Parameters of air equation of state

$C_0/\text{Pa}$	$C_1$	$C_2$	$C_2$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$E_0/\text{J}$	$V_0$
$-1 \times 10^5$	0	0	0	0.4	0.4	0	$2.58 \times 10^5$	1.0

表5 C4炸药状态方程参数

Table 5 Parameters of C4 equation of state

$\rho_0/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$D/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E_0/(\text{GJ} \cdot \text{m}^{-3})$
1601	8190	597.4	13.9	4.5	1.5	0.32	8.7

### 3 计算结果

#### 3.1 PBM 算法计算结果

PBM 算法精度与粒子总数  $N$  和粒子数量比  $\gamma$  相关,其中  $N = N_{HE} + N_{AIR}$ ,  $\gamma = N_{HE}/N_{AIR}$ ,  $N_{HE}$  为炸药

粒子个数,  $N_{AIR}$  为空气粒子个数。依据模拟经验,每种工况选用 6 种粒子总数进行模拟,模拟结果见图 5。可知当  $\gamma$  不变时,基本上 PBM 算法精度随着  $N$  值增加而提高。但对于不同模型,都存在精度的增幅率随  $N$  值增加而衰减的现象。

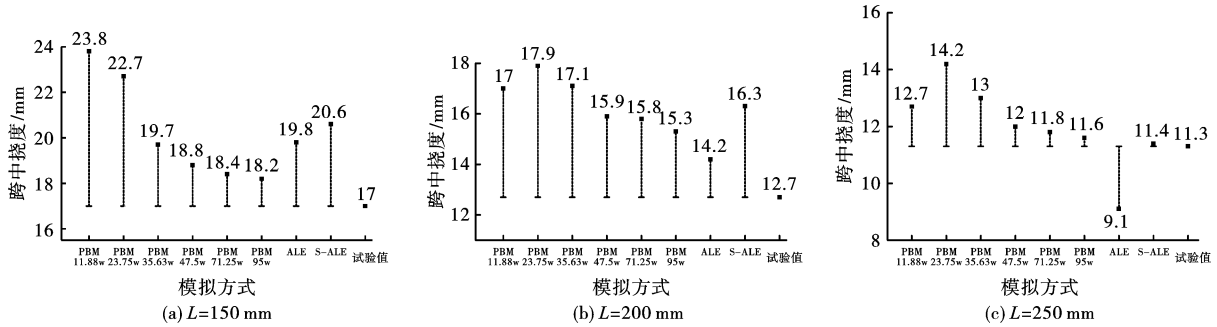


图5 不同粒子总数下的跨中挠度

Fig. 5 Deflection at different particle counts

为研究粒子数量比  $\gamma$  对 PBM 算法精度的影响,考虑计算精度和时间消耗的情况下,以下述三种工况为基础:①  $L = 150 \text{ mm}$ ,  $N = 47.5 w$ ;②  $L = 200 \text{ mm}$ ,  $N = 47.5 w$ ;③  $L = 250 \text{ mm}$ ,  $N = 47.5 w$ 。每种工况选用 5 组  $\gamma$  进行仿真模拟。由试算得知三种工况的粒子质量比均为  $M_{HE}:M_{AIR} = 1:8.5$ ,其中  $M_{HE}$  为初始爆

炸粒子总质量,  $M_{AIR}$  为初始空气粒子总质量。参考上述粒子质量比设置  $\gamma$  值,模拟结果见图 6,可以看出  $\gamma$  对模拟精度的影响十分明显,当  $\gamma$  值接近粒子质量比时,模拟精度较高, $\gamma$  值偏离粒子质量比时,模拟精度较低。

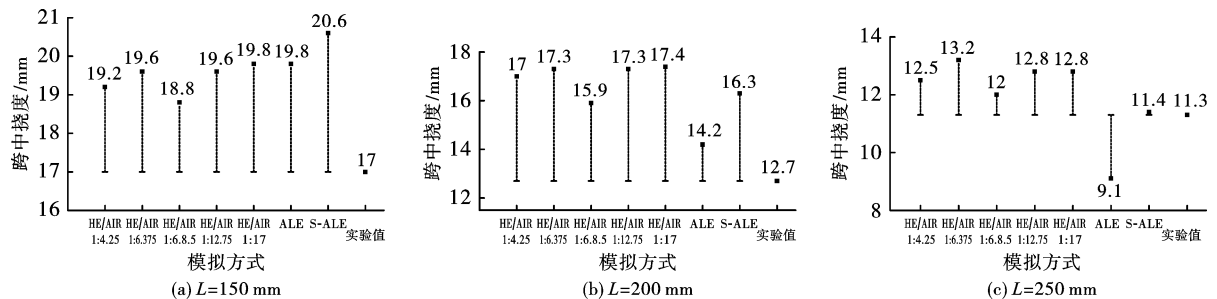


图6 不同粒子个数比下的跨中挠度

Fig. 6 Deflection at different Particle number ratio

#### 3.2 不同模拟算法结果对比

##### 3.2.1 模拟精度方面

对比在 PBM、ALE 和 S-ALE 算法下,钢板跨中

最终挠度  $Z$ 、钢板总能量  $E$  及 CPU 运算耗时  $t$ ,不同模拟工况结果见表 6。

表 6 不同模拟工况结果

Table 6 Results of different simulation conditions

爆心距 $L/\text{mm}$	模拟方法	跨中最终 挠度 $Z/\text{mm}$	钢板总能量 $E/\text{J}$	CPU 运算 耗时 $T/\text{s}$
150	PBM( $N=95w$ )	18.2(1.07)	2760	1658.0
	ALE	19.8(1.16)	2010	20 711
	S-ALE	20.6(1.21)	2430	19 191
200	PBM( $N=95w$ )	15.3(1.20)	1960	1950.0
	ALE	14.2(1.12)	1310	21 283
	S-ALE	16.3(1.28)	1680	19 348
250	PBM( $N=95w$ )	11.6(1.03)	1370	2148.0
	ALE	9.10(0.81)	810.0	21 585
	S-ALE	11.4(1.01)	1170	19 120

(括号内数字为模拟值与试验值之比)

由表 6 数据可以得出, ALE、S-ALE 和 PBM 算法模拟结果的离散系数分别为 0.16、0.20 和 0.12。由此可知, 试验中 S-ALE 算法模拟结果离散性最大, 模拟效果较差; ALE 算法次之, 但出现了模拟结果小于试验值的情况; PBM 算法离散性最小, 最大误差不超过 20%, 模拟效果最好。

此外, 爆心距分别为 150 mm、200 mm 和

250 mm 时, 由 PBM 算法模拟得到的钢板总能量  $E$  (包括动能及变形产生的内能) 最大, 约为 S-ALE 算法的 1.15 倍, 约为 ALE 算法的 1.5 倍。三种算法得到的  $E$  值曲线趋势大致相同, 但是, 在 PBM 和 ALE 算法  $E$  值曲线均趋于平稳后, S-ALE 算法仍表现出缓慢下降趋势, 如图 7 所示。

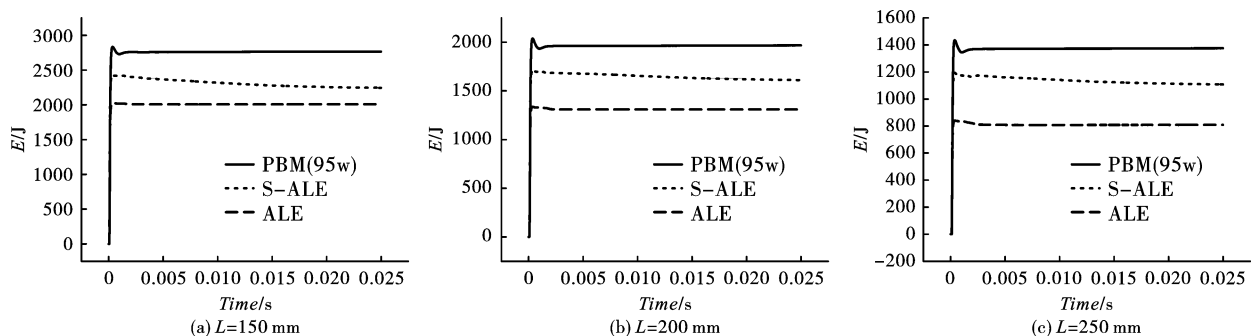


图 7 钢板总能量

Fig. 7 Total energy of steel plate

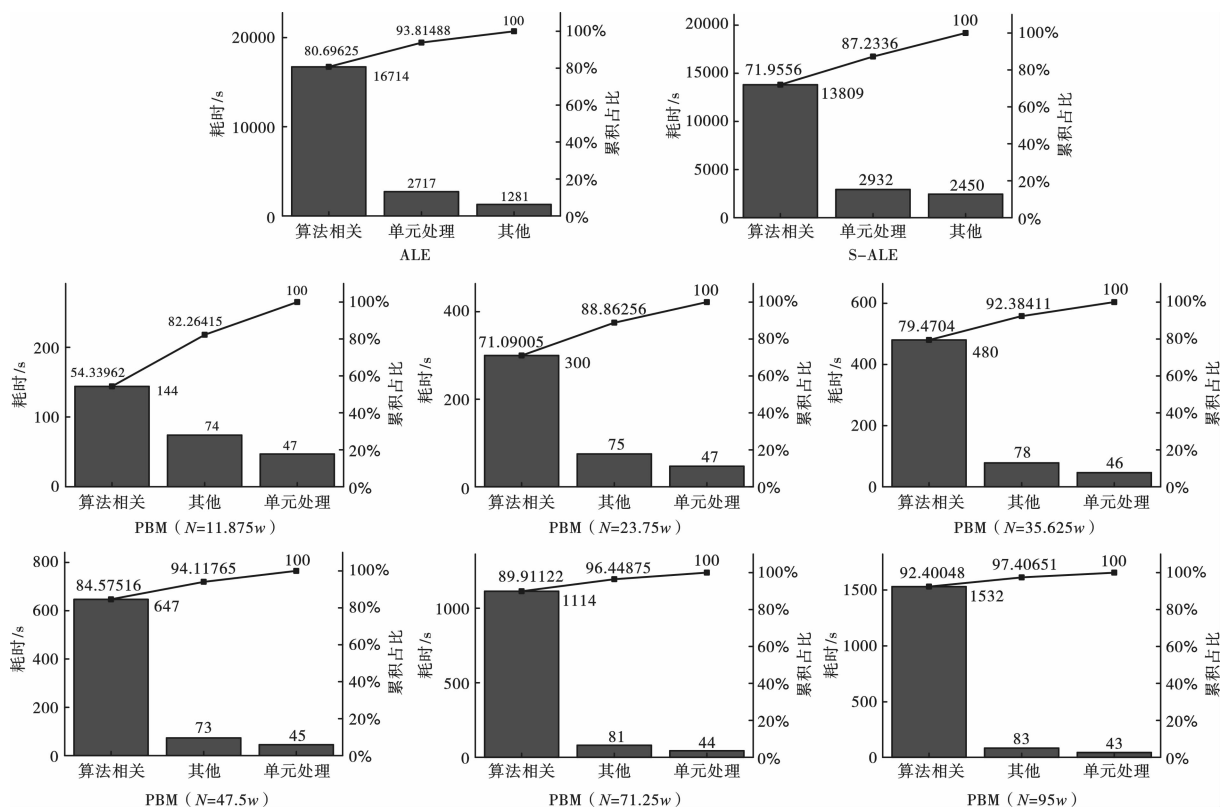
比例距离不同的三种工况下, ALE 算法的平均 CPU 运算耗时为 21 193 s; S\_ALE 算法的平均 CPU 运算耗时为 19 220 s; PBM 算法的平均 CPU 运算耗时为 1919 s。ALE 与 S\_ALE 算法 CPU 耗时相差不多, PBM 算法的 CPU 耗时约为 ALE 和 S\_ALE 算法的十分之一。由此可知, PBM 算法的运算耗时远小于 ALE 算法和 S-ALE 算法, 具有更高的运算效率。

### 3.2.2 模拟时效方面

模拟采用戴尔台式工作站, CPU 单核基频 3.60 GHz, 多核心同时工作可超频至 4.3 GHz。LS-DYNA 求解器为 R12\_MPP 求解器, 授权算力为 8 核芯。  $L=150$  mm 工况下, 不同算法 CPU 耗时的帕累托图见图 8。

对比 ALE 和 S-ALE 的 CPU 总耗时及各处理环节耗时占比, 发现 S-ALE 与 ALE 的 CPU 总耗时差距并不明显, 但算法相关耗时占比上, S-ALE 显著优于 ALE, 可见改进后的 S-ALE 算法在算法处理机制上进行了优化, 但由于授权核心较少并未有效体现 S-ALE 在多核心运算上的优势。

对 PBM 算法而言, 粒子总数  $N$  对 CPU 总耗时  $t$  影响巨大, 两者基本上呈线性关系。PBM 算法相关耗时随着  $N$  的增加不断增加, 占比不断提高, 但单元处理和其他耗时基本未发生变化。在可接受的仿真精度范围内, PBM 算法效率比 ALE 和 S-ALE 算法效率提高 10 倍以上。

图8  $L = 150$  mm时不同算法CPU耗时占比Fig. 8 CPU time consumption of different algorithms when  $L = 150$  mm

## 4 结论

(1) PBM方法适用于近场爆炸问题的仿真计算。不同工况下, PBM方法仿真得到的钢板跨中最终挠度与T. Bφrvik试验结果相近, 在最大误差和离散系数上均优于ALE和S-ALE方法的计算结果。

(2) PBM方法精度受粒子量值影响较大。不同工况下, 粒子个数比一定时, 粒子总数越多, PBM算法模拟精度越高; 粒子总数一定时, 粒子个数比越接近粒子质量比, PBM算法精度越高。

(3) 相同条件下, PBM算法运算效率更高。PBM算法CPU运算用时与粒子总数基本呈线性递增关系。结构单元划分方式与数量相同时, PBM算法的计算用时仅为ALE和S-ALE算法的十分之一, 便能得到相同精度的模拟结果。

### 参考文献 (References)

- [1] 郝宁. 舰船远场水下爆炸低频冲击环境测试研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
- [1] HAO Ning. Research on Low-frequency Impact environment test of Ship's far-field underwater Explosion [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020. (in Chinese)
- [2] HUNG C W, TSAI Y K, CHEN T A, et al. An experimentally validated numerical model for the near-field explosion of an ammunition storage magazine [J]. Applied Sciences, 2020, 10(6849): 19.
- [3] 沈达佳, 胡志坚, 李杨. 近场爆炸时斜拉索抗爆性能分析[J]. 振动与冲击, 2020, 39(21): 250-257.
- [3] SHEN Da-jia, HU Zhi-jian, LI Yang. Anti-explosion performance of stay cable under near field blast load [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(21): 250-257. (in Chinese)
- [4] YONG Chen, FENG Chen, ZHI Peng-du, et al. Protective effect of polymer coating on the circular steel plate response to near-field underwater explosions [J]. Marine Structures, 2015, 40: 247-266.
- [5] 邱清水, 陈莹玉, 古滨, 等. 水下近场爆炸载荷数值预报研究[J]. 四川轻化工大学学报(自然科学版), 2020, 33(5): 44-50.
- [5] QIU Qing-shui, CHEN Yin-yu, GU Bin, et al. Numerical prediction of underwater near field explosion load [J]. Journal of University of Science & Engineering (Natural Science Edition), 2020, 33(5): 44-50. (in Chinese)
- [6] 缪广红, 马雷鸣, 吴建强, 等. 基复板间距对爆炸焊接质量影响的数值模拟[J]. 爆破, 2020, 37(2): 106-114.
- [6] MIAO Guang-hong, MA Lei-ming, WU Jian-qiang, et al. Numerical simulation of influence of spacing between base plate and flyer plate on welding quality [J]. Blasting, 2020, 37(2): 106-114. (in Chinese)
- [7] 申双俊, 廖维张, 张春磊. 爆炸作用下高强钢绞线网片-

- 聚合物砂浆加固钢筋混凝土板的数值模拟[J]. 爆破, 2018,35(1):167-174.
- [7] SHEN Shuang-jun, LIAO Wei-zhang, ZHANG Chun-lei. Numerical simulation of reinforced concrete slabs retrofitted with high strength steel wire mesh and polymer mortar subjected to explosion loading [J]. *Blasting*, 2018, 35(1):167-174. (in Chinese)
- [8] 游俊. 爆炸冲击波与破片联合作用下砌体墙数值模拟[D]. 湘潭:湘潭大学,2020.
- [8] YOU Jun. Numerical simulation of masonry wall under combined action of blast and fragments [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2020. (in Chinese)
- [9] 胡嘉辉,吴昊,方秦. 近区爆炸作用下砌体填充墙损伤破坏与动态响应的数值模拟[J]. 振动与冲击, 2021,40(9):1-11.
- [9] HU Jia-hui, WU Hao, FANG Qin. Numerical simulation of damage and dynamic response of masonry infilled wall under near zone explosion [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(9):1-11. (in Chinese)
- [10] 彭玉祥. 改进的无网格计算方法及其在结构流固耦合冲击毁伤中的应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2019.
- [10] PENG Yu-xiang. Improved meshfree methods and its application in structural damage analysis under fluid-structure impact [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019. (in Chinese)
- [11] 李臻,刘彦,黄风雷,等. 接触爆炸和近距离爆炸比冲量数值仿真研究[J]. 北京理工大学学报, 2020, 40(2):143-149.
- [11] LI Zhen, LIU Yan, HUANG Feng-lei, et al. Investigation of specific impulse under contact explosion and close-in explosion conditions using numerical method [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2020, 40(2):143-149. (in Chinese)
- [12] 吴梦阳,周云波,赵丰,等. 浅埋炸药冲击试验台架数值模拟方法研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(10):117-124.
- [12] WU Meng-yang, ZHOU Yun-bo, ZHAO Feng, et al. Research on numerical simulation method of impact test bench for shallow buried explosives [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2020, 41(10):117-124. (in Chinese)
- [12] WU Meng-yang, ZHOU Yun-bo, ZHAO Feng, et al. Research on numerical simulation method of impact test bench for shallow buried explosives [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2020, 41(10):117-124. (in Chinese)
- [13] SHAHRIN M I, ABDULLAH R A, JEON S, et al. Numerical simulation of rock fragmentation by blasting using Discrete Element Method and Particle Blast Method [J]. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2019, 527:012032.
- [14] T B Rvik, L Olovsson, A G Hanssen, et al. A discrete particle approach to simulate the combined effect of blast and sand impact loading of steel plates [J]. *Journal of the Mechanics & Physics of Solids*, 2011, 59(5):940-958.

英文编辑:黄刚

(上接第15页)

- [15] 陈亚楠,潘城. 多次爆破振动下巷道围岩松动圈变化规律研究[J]. 煤矿安全, 2016, 47(3):44-47.
- [15] CHEN Yan-nan, PAN Cheng. Research on roadway surrounding rock loose circle change law under multiple blasting vibrations [J]. *Safety in Coal Mines*, 2016, 47(3):44-47. (in Chinese)
- [16] 朱辉云,孙猛,郭亚永,等. 某钻爆法施工隧道围岩松动圈测试与分析[J]. 工程勘察, 2019, 47(6):19-22, 78.
- [16] ZHU Hui-yun, SUN Meng, GUO Ya-yong, et al. Testing and analysis of surrounding rock loose circle of certain tunnel construction by using drilling and blasting method [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2019, 47(6):19-22, 78. (in Chinese)
- [17] 贺永年. 隧道工程[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 2002:124-126.
- [17] HE Yong-nian. *Tunnel engineering* [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2002:124-126. (in Chinese)
- [18] 余永强,王伟富,皮乾勇,等. 鹤煤十矿巷道围岩物理力学性质及其松动圈测试[J]. 现代矿业, 2014, 30(9):13-14, 20.
- [18] YU Yong-qiang, WANG Wei-fu, PI Qian-yong, et al. Testing on surrounding rocks loose circle and physical and mechanical properties of rock of roadway of No. 10 Hebi coal mining roadway [J]. *Modern Mining*, 2014, 30(9):13-14, 20. (in Chinese)
- [19] 褚怀保,叶红宇,杨小林,等. 基于损伤累积的爆破振动传播规律试验研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(2):173-177.
- [19] CHU Huai-bao, YE Hong-yu, YANG Xiao-lin, et al. Experiments on propagation of blasting vibration based on damage accumulation [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(2):173-177. (in Chinese)
- [20] 刘亮,卢文波,陈明,等. 钻爆开挖条件下岩体临界破碎状态的损伤阈值统计研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(6):1133-1140.
- [20] LIU Liang, LU Wen-bo, CHEN Ming, et al. Statistic damage threshold of critical broken rock mass under blasting load [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(6):1133-1140. (in Chinese)

英文编辑:陈东方