

# 基于离散元法的颗粒高速压制模拟及动态力学分析

张璐栋<sup>1)</sup>, 刘军<sup>1,2,3)✉</sup>, 罗晓龙<sup>1)</sup>, 张超<sup>1)</sup>, 林立<sup>1)</sup>, 周纯<sup>1)</sup>, 王海陆<sup>1)</sup>

1) 宁波大学机械工程与力学学院, 宁波 315211 2) 宁波大学浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室, 宁波 315211

3) 宁波大学冲击与安全工程教育部重点实验室, 宁波 315211

✉通信作者, E-mail: liujun@nbu.edu.cn

**摘要** 采用三维离散单元法对高速压制条件下铝粉颗粒的动态响应进行了数值模拟, 并与实验结果进行对比分析。结果表明, 数值模拟与实验所测得的结果基本相同; 在高速压制过程中, 粉体的扰动呈不规则的弧形分布; 在压制初期, 会出现整体受力不均匀的现象, 随着压制的进行, 不均匀现象得到改善, 粉体表现出较强的自组织性; 在单次加载过程中, 颗粒会发生多次碰撞; 在致密化阶段, 上层的部分颗粒会先发生变形并重排, 中下层颗粒以重排为主; 进入变形阶段后, 所有颗粒的受力情况基本相同。

**关键词** 离散单元法; 高速压制; 数值模拟; 动态响应; 致密化

**分类号** TF122

## High velocity compaction simulation and dynamic mechanical analysis of particles based on discrete element method

ZHANG Lu-dong<sup>1)</sup>, LIU Jun<sup>1,2,3)✉</sup>, LUO Xiao-long<sup>1)</sup>, ZHANG Chao<sup>1)</sup>, LIN Li<sup>1)</sup>, ZHOU Chun<sup>1)</sup>, WANG Hai-lu<sup>1)</sup>

1) Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China

2) Part Rolling Key Laboratory of Zhejiang Province, Ningbo University, Ningbo 315211, China

3) MOE Key Laboratory of Impact and Safety Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China

✉Corresponding author, E-mail: liujun@nbu.edu.cn

**ABSTRACT** Three-dimensional discrete element method (DEM) was applied to simulate the dynamic response of aluminum powders under the high velocity compaction (HVC), and the results were compared with the experimental data. In the results, the numerical simulation is basically the same as the experiment results. The powder disturbance shows the irregular arc distribution during the high velocity compaction. There will be an uneven phenomenon of overall force in the initial stage of compaction; as the compaction keeps going, the uneven problem will be improved, and the powders exhibit the strong self-organization. In the single-pass loading process, the particle impact will occur repeatedly; in the densification stage, the upper particles will deform and rearrange, and the middle and lower layers will be dominated by the granular rearrangement; in the deformation stage, the force of all the particles is basically the same.

**KEY WORDS** discrete element method; high velocity compaction; numerical simulation; dynamic response; densification

收稿日期: 2019-04-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11372148)

DOI: 10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2019040013; <http://journals.ustb.edu.cn>

粉末高速压制技术 (high velocity compaction, HVC) 是瑞典的 Hoganos 和 Hydro-pulsor 共同开发的一项粉末材料快速成形新技术, 其压制速度通常在 10 m/s 以上, 并且具有成形密度高、分布均匀、弹性后效低、脱模压力小、成本低、生产效率高等诸多优势<sup>[1-4]</sup>。目前, 粉末高速压制技术已在机械、电子、航空航天等诸多领域中得到广泛应用, 特别是在汽车零件的生产中, 应用尤为广泛。

对于非连续体力学行为的研究主要使用离散单元法<sup>[5-7]</sup> (discrete element method, DEM), 特别是在求解大数量且不连续结构的问题中效果显著, 目前已广泛应用于工程领域。近年来, 许多学者尝试利用离散元法揭示粉末冶金中微、细观介质的运动情况。Jerier 等<sup>[8]</sup>应用 YADE 开源离散元软件模拟了在冷等静压加载条件下, 高密度粉末的压实过程。Martin 等<sup>[9-10]</sup>利用离散元原理模拟了在冷等静压和闭模压制条件下, 粉末颗粒的重排以及不同硬度颗粒复合材料的压实过程。杨霞和果世驹<sup>[11]</sup>应用离散元技术分别对铁粉恒速加载条件下的冷压-常规温压和模壁润滑温压过程进行了模拟, 分析了铁粉颗粒的致密化过程。郑洲顺等<sup>[12-13]</sup>和王爽等<sup>[12]</sup>根据离散元原理利用 PFC2D 软件对粉末的高速压制过程进行了模拟, 得到了压坯内部应力传播的波形, 并利用数值模拟软件进一步探讨了摩擦因数、高径比、双向压制以及阻尼系数的变化对压坯密度分布的影响。胡仙平等<sup>[15]</sup>利用 PFC2D 软件探讨了碰撞过程中摩擦因素、碰撞速度、剪切模量对接触力传递的影响, 并研究了颗粒在压制过程中的运动规律, 研究发现, 在压制过程中, 颗粒会在自身位置的微小区域内振动并发生转动。

目前, 基于离散元原理对粉末高速压制过程的模拟多限于二维平面模型, 对于颗粒群中质点速度的变化以及应力应变的研究也多限于一维应力波理论<sup>[16]</sup>。在实际压制中, 三维情况要比二维模型更为复杂, 特别是在颗粒配位情况和颗粒系统空隙情况等方面; 上述这些问题会直接影响颗粒受力以及颗粒运动, 因此无法准确的模拟出颗粒的动态响应情况。本文基于离散元原理尝试利用 PFC3D 软件对粉末高速压制过程进行三维模拟, 并将模拟结果与实验所测透射波波波形进行对比, 分析了在三维情况下颗粒扰动的传播情况, 并对模型在单次加载过程中的颗粒受力情况进行初步分析。

## 1 离散元模型

离散单元法是由 Cundall 在 20 世纪 70 年代提

出的用于求解非连续体的数值方法, 该方法最先被 Cundall 和 Strack<sup>[17]</sup>应用于分析研究岩土力学的相关问题。基本思想是把被研究体看作由众多能够独立运动的、非连续的单元构成, 每个单元都有相应的几何特性和物理特性; 其运动规则遵循牛顿第二定律, 每个单元都只能和相邻的单元发生作用, 通过各单元之间的力和位移关系求出材料整体的变化情况。其中, 基于软球模型<sup>[18]</sup>的颗粒离散元法把颗粒间接触过程简化为弹簧振子的阻尼运动, 不考虑颗粒表面变形, 根据颗粒间的重叠量和切向位移计算接触力, 依此更新每个颗粒的速度和位置, 进而确定性的演化整个颗粒系统。其运动方程如式 (1) 所示。

$$m\ddot{x} + \eta\dot{x} + kx = 0 \quad (1)$$

式中:  $x$  是偏离平衡位置的位移;  $m$  是振子质量;  $\eta$  和  $k$  分别为弹簧阻尼系数和弹性系数。软球模型结构如图 1 所示, 颗粒  $i$  在惯性或者外力的作用下在  $C$  点和颗粒  $j$  接触, 虚线表示开始接触时颗粒  $i$  的位置; 模型只考虑两颗粒法向重叠量 ( $\alpha$ ) 和切向位移 ( $\delta$ ), 不考虑颗粒表面变形, 进而得到接触力。

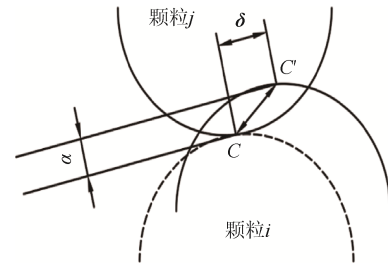


图 1 基于软球模型的颗粒接触示意图

Fig.1 Particles contact diagram based on the soft ball model

图 2 是利用软球模型计算颗粒接触力的简化模型, 软球模型在颗粒  $i$  和颗粒  $j$  间设定了弹簧、阻尼器、滑动器和耦合器等。耦合器是用来确定发生接触的颗粒配对关系, 不引入任何引力。颗粒间接触力的法向力是弹簧和法向阻尼器作用在颗粒  $i$  上的弹性力和阻尼力的合力, 对于三维球形颗粒, 法向力 ( $F_{nij}$ ) 和切向力 ( $F_{tij}$ ) 表示为式 (2) 和式 (3)。

$$F_{nij} = (-k_n \alpha^{3/2} - \eta_{ni} G n) n \quad (2)$$

$$F_{tij} = -k_t \delta - \eta_{tj} G_{ct} \quad (3)$$

式中:  $\alpha$  是法向重叠量;  $G$  是颗粒  $i$  相对于颗粒  $j$  的速度,  $G = v_i - v_j$ ;  $n$  是从颗粒  $i$  球心到颗粒  $j$  球心的单位矢量;  $k_n$  和  $\eta_{ni}$  是颗粒  $i$  的法向弹性系数和法向

阻尼系数； $k_t$  和  $\eta_{ij}$  是颗粒  $j$  的切向弹性系数和切向阻尼系数； $\delta$  是接触点的切向位移； $G_{ct}$  是接触点的滑移速度。在颗粒浓度较高时，颗粒  $i$  可能同时与多个颗粒接触，则作用于颗粒  $i$  上的总力 ( $F_i$ ) 和总

力矩 ( $T_i$ ) 为式 (4) 所示。

$$\begin{cases} F_i = \sum_j (F_{nij} + F_{tij}) \\ T_i = \sum_j (\alpha_i n \times F_{tij}) \end{cases} \quad (4)$$

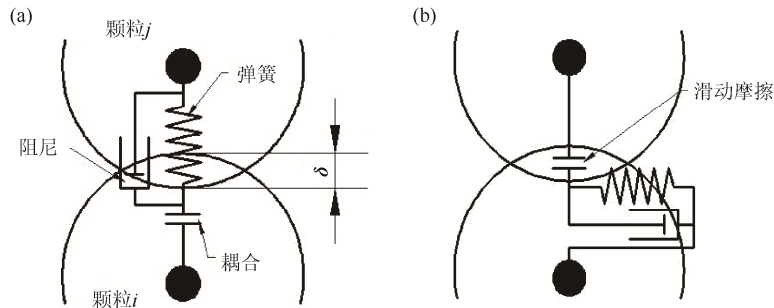


图 2 软球模型对颗粒间接触力的简化处理：(a) 法向力；(b) 切向力

Fig.2 Simplified model of the soft ball model for the contact force between particles: (a) normal force; (b) tangential force

## 2 模拟过程及参数选择

使用 PFC3D 离散元计算软件建立铝粉高速单向压制的三维离散元模型。PFC 软件中生成大量颗粒的命令主要有 ball generate 和 ball distribute 两种<sup>[19]</sup>，其中 generate 生成方式不容许生成的颗粒间发生重叠，而 distribute 方式可以。为了能够模拟出金属颗粒在弹塑性条件下发生的小范围内振动现象，本次模拟选择 distribute 颗粒生成方式。令颗粒间分布着大小不等的作用力，经过适当的循环计算，颗粒间的作用力被均匀地分布在各颗粒之间。去除上方墙壁后，受颗粒间作用力和重力的共同作用，颗粒会在小范围内发生位移，因此颗粒间产生了不均匀分布的间隙，并且模型表面部分颗粒会凸起。这样的模型比较接近实际压制情况。

为了便于模型尺寸参数的设定，本次模拟的模型为：在直径 10 mm、高 5 mm 的圆柱形空间，建立直径为 0.15 mm 的 14092 个圆形颗粒，如图 3 所示，颗粒直径根据实验颗粒目数给定。经计算得到模拟中选择的铝粉质量和实验铝粉质量基本一致。实验中在 1 MPa 气压下，Hopkinson 杆子弹打出的速度约为 10.25 m·s<sup>-1</sup>。为了使模拟更加贴合实验参数，设定压板以 10 m·s<sup>-1</sup> 的速度沿 Z 轴向下运动。铝粉的摩擦系数根据查取常用材料的摩擦系数确定。本次模拟步长设置为 1 × 10<sup>-8</sup>，压板下行时间为 25 × 10<sup>-6</sup> s，加载前颗粒重排用时 1000 步，加载完成后运算时间略不计，总共进行计算 3500 时步。模拟主要参数如表 1 所示。

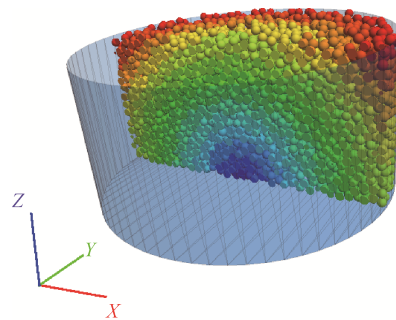


图 3 离散元模型剖面图

Fig.3 Cross-section drawn of the 3D discrete element model

表 1 模拟中使用的主要参数

材料密度 / (kg·m <sup>-3</sup> )	颗粒直径 / mm	颗粒间摩擦系数	模壁摩擦系数	刚度系数	冲击速度 / (m·s <sup>-1</sup> )
2700	0.15	0.3	0.1	10 <sup>8</sup>	10

## 3 结果及分析

图 4 是在高速压制模拟中从底板处采集到的铝粉透射波波形，这与图 5 中罗晓龙等<sup>[20]</sup>在 1 g 铝粉未预压情况下使用 1 MPa 气压的分离式 Hopkinson 杆撞击试验中采集的透射波（红线）波形图基本一致。从实验结果可以看出，在单次加载试验中会发生二次加载，且第二次脉冲幅值要高于第一次加载的幅值，这主要是由于经过第一次加载作用之后，颗粒之间的空隙减小，压坯更加密实，更有利于应力的传播。从图 4 可以看出，在单次加载过程中，透射波曲线显示出明显的非线性特性，曲线前期振

荡剧烈, 整体呈现出振荡上升趋势。和连续体不同, 粉体材料具有离散特性, 颗粒之间具有一定空隙; 在高速压制的过程中, 颗粒之间相互撞击传递扰动, 因而在曲线上可看到明显的振动; 随着粉末的压实, 振动逐渐减弱。

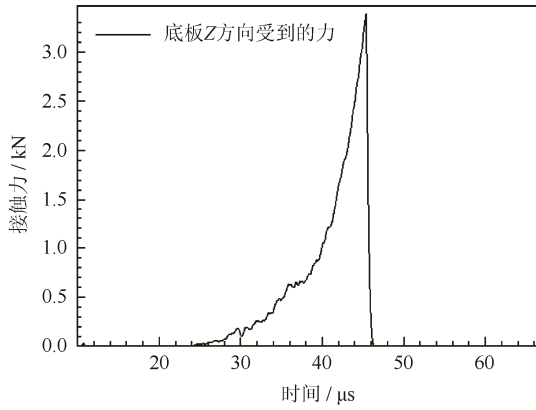


图 4 透射波波形的模拟结果

Fig.4 Transmission waveform in the simulation

### 3.1 应力波传播特性的纵向对比分析

图 6 为压制过程中不同时步模型的中轴向截面颗粒波动分布情况, 其中 X 方向为横向, Z 方向为

纵向。由图可以看出, 1500 时步时, 模型外围颗粒的速度要大于模型中心的速度, 随着压制的进行, 颗粒速度的横向分布呈现出不完全的轴对称状态, 纵向为不规则弧形分布, 这是由于粉末颗粒分布不均匀、颗粒之间随机交错排列等原因, 在压制初期, 压坯上层与压板接触表面部分率先受力, 出现粉末整体横向受力不均现象。但由于粉体具有自组织特性, 颗粒所受扰动具有更好的流动性, 从而使压制过程中的横向受力不均匀现象得到改善。

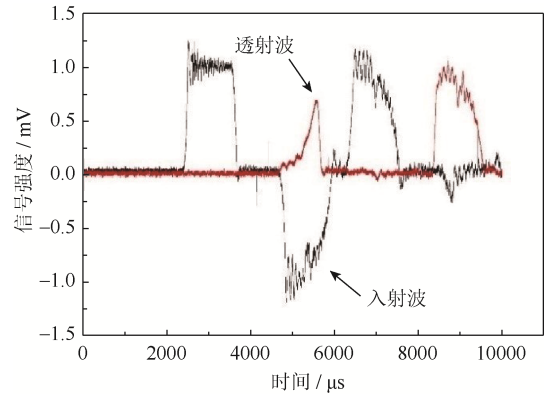


图 5 透射波波形的实验结果<sup>[20]</sup>

Fig.5 Transmission waveform in the experiment<sup>[20]</sup>

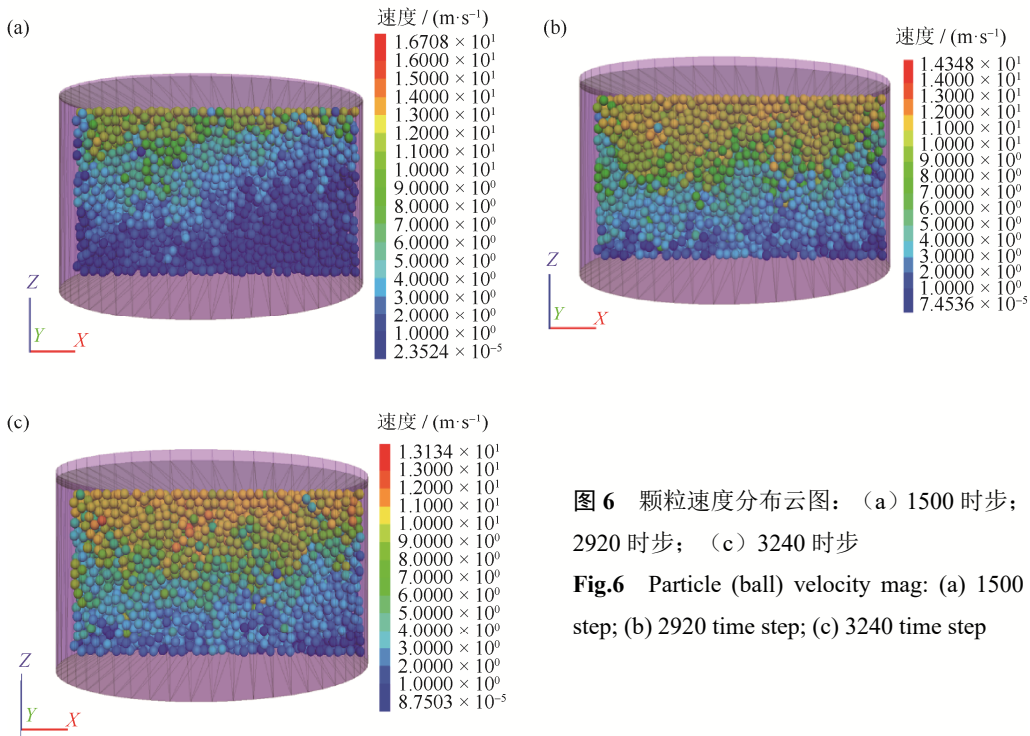


图 6 颗粒速度分布云图: (a) 1500 时步; (b) 2920 时步; (c) 3240 时步

Fig.6 Particle (ball) velocity mag: (a) 1500 time step; (b) 2920 time step; (c) 3240 time step

### 3.2 颗粒速度和接触力对比分析

#### 3.2.1 颗粒速度纵向对比分析

选取位于相互垂直的中截面上较为均匀分布的

45 个颗粒, 因与底板接触的颗粒运动状态不明显, 所以不选取此处颗粒。考虑到模型为中心对称, 通过综合对比中截面上两侧相对称的颗粒速度与接触



力变化规律，发现两者的变化规律大致相同。因此选取中截面上颗粒速度与受力变化较为明显的一侧进行分析，颗粒位置如图7所示。图8为纵向三列颗粒在加载方向上的速度时程曲线，三列从左向右依次排列，每列5个颗粒曲线的颜色按从上到下的顺序依次为红色、深蓝、绿色、黄色和黑色。从图8可以看出，撞击大约发生在10 μs左右，碰撞初期由于颗粒之间存在较大的空隙，表层的颗粒会因冲击而在一瞬间获得很高的速度，因此波形在10 μs时有巨大振

动。从图7和图8可以看出，位于表层的颗粒（球109190、球68844、球55028）的波形均为较为规则的矩形波，随着扰动向下传播，能量逐渐衰减，波阵面变得不再严格；位于模型上半部分的红、深蓝、绿三条曲线衰减较为明显，位于模型下半部分的黄色和黑色两条曲线则变动不大。对比图8可以发现，图8（a）和图8（b）中各颗粒图形更为接近，衰减程度相对较小；图8（c）中颗粒可能是因为受到模壁摩擦力的作用，波形差距较大，衰减十分明显。

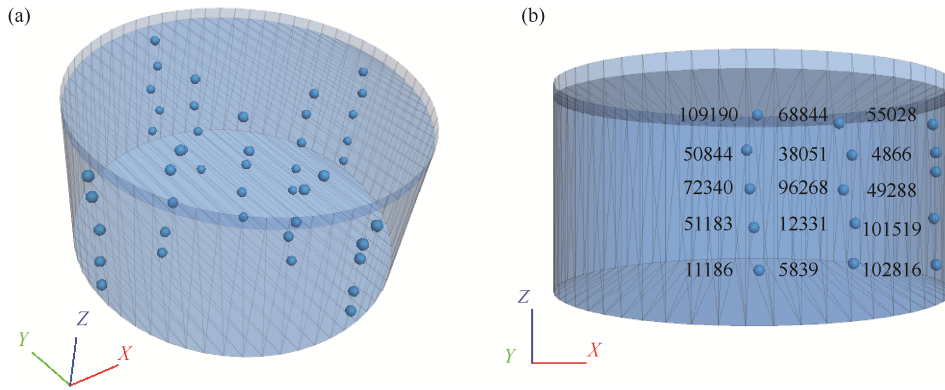


图7 所选颗粒位置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the selected particle positions

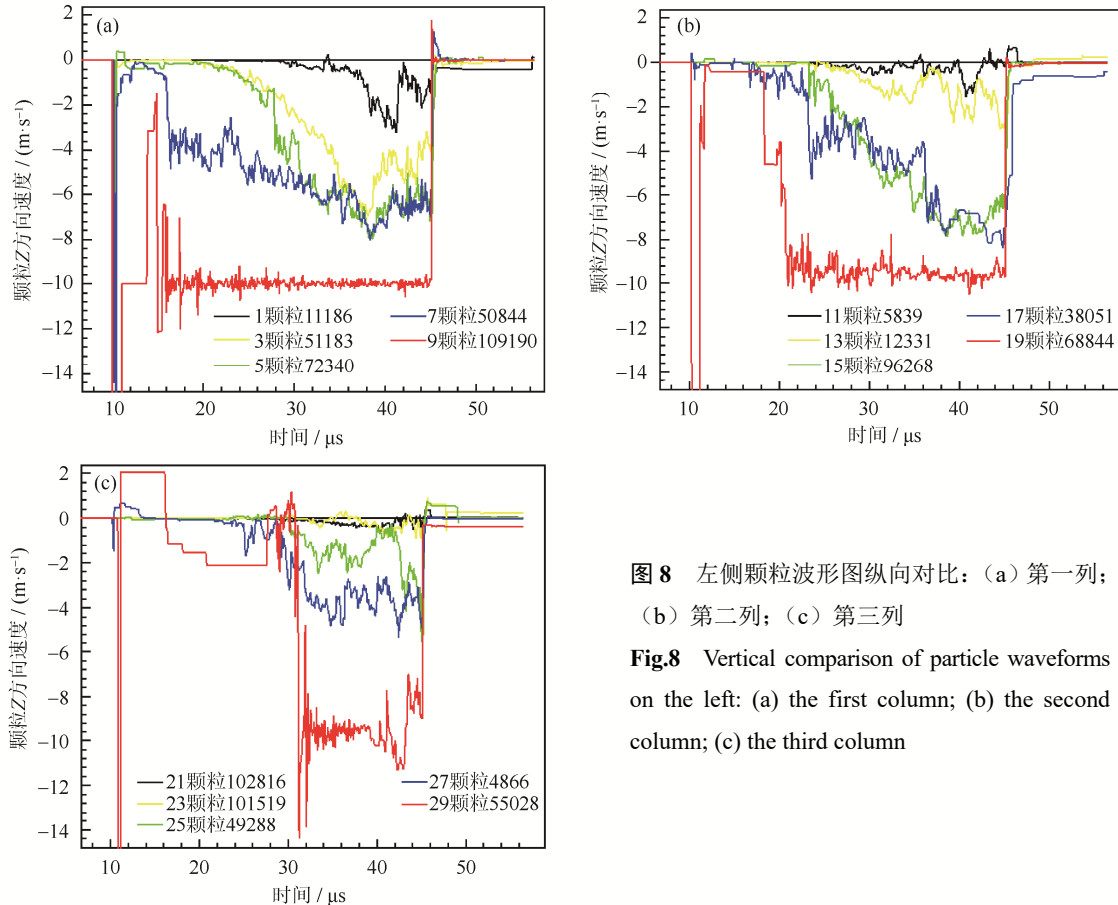


图8 左侧颗粒波形图纵向对比：（a）第一列；（b）第二列；（c）第三列

Fig.8 Vertical comparison of particle waveforms on the left: (a) the first column; (b) the second column; (c) the third column

### 3.2.2 颗粒速度横向对比分析

分别选取位于表层、中层、底层的第 1、第 3、第五行的颗粒进行波形图横向对比, 每行 3 个颗粒曲线的颜色按从左到右的顺序依次为红色、绿色、蓝色, 如图 9 所示。从图 9 (a) 中可以看出, 位于表层的三个颗粒图形皆为矩形波, 位于中心的

109190 球的最大速度为约为  $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 震动程度相对平均, 冲击较小; 与模壁接触的 55028 球 (蓝色曲线) 在加载前期出现了剧烈震动现象, 所受冲击最大, 速度最大值约为  $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。图 9 (b) 和图 9 (c) 都表现出从内向外逐渐衰减的趋势, 且图 9 (b) 中颗粒的衰减程度略要大于图 9 (c) 中的颗粒。

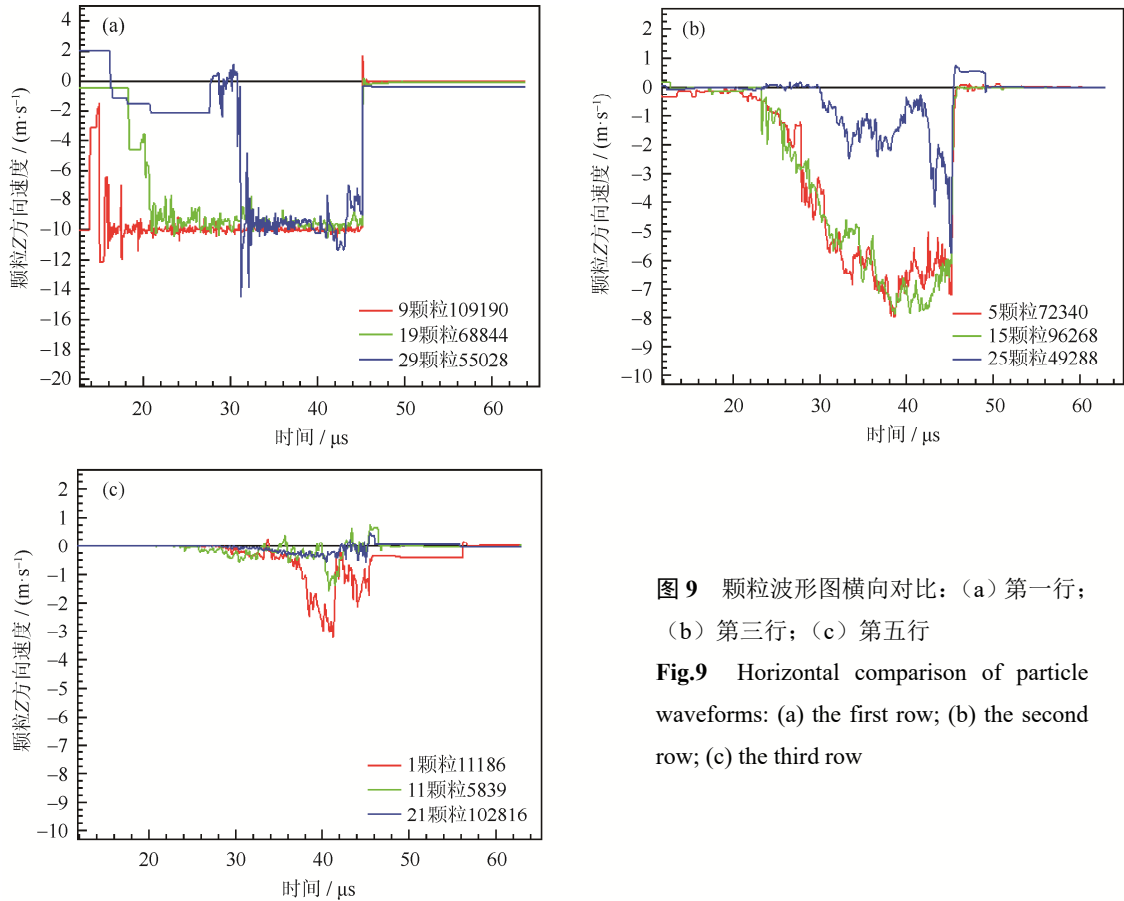


图 9 颗粒波形图横向对比: (a) 第一行; (b) 第三行; (c) 第五行  
Fig.9 Horizontal comparison of particle waveforms: (a) the first row; (b) the second row; (c) the third row

### 3.3 单次加载中颗粒的受力情况

图 10 为单次加载过程中, 位于表层、中层、底层的第 1、第 3、第五行的颗粒 Z 轴方向所受合力的横向对比, 每行 3 个颗粒的颜色按从左到右的顺序依次为红色、绿色、蓝色。从图中可以看出, 在单次加载过程中, 颗粒会发生多次撞击。加载初期, 位于表层中间的颗粒 109190 (红色曲线) 最大受力为 27 N, 与模壁接触的颗粒 55028 (蓝色色曲线) 和两球之间的颗粒 68844 (绿色曲线) 受力相对较小, 约 3~5 N。位于粉体中层 (图 10 (b)) 和底层 (图 10 (c)) 区域的颗粒, 在加载初期并无剧烈震动, 图形呈逐渐递增趋势, 中层颗粒最大受力约 3~4 N, 底层颗粒最大受力约 1~2 N。对于粉末高速压制, 目前普遍认为可分为两个阶段, 首先是以颗粒重排和填充孔隙为主的阶段, 称为致密阶段; 第二个是以颗粒弹塑性变形为主的变形阶段。从图 10 中可以看出, 在加

载前期, 位于表层的颗粒会受到剧烈冲击, 金属颗粒会先发生塑性变形, 之后颗粒再继续重排; 中下层颗粒在加载前期主要以颗粒重排为主; 进入变形阶段后, 所有颗粒受力基本相同且振动频率相差不大。

## 4 结论

利用 PFC3D 软件模拟出的透射波波形, 符合金属粉末冲击加载条件下透射波波形所具有的一般特性, 通过与实验结果的对比, 进一步验证了模拟的准确性。由于颗粒直径较小, 并且金属材质在高速冲击条件下, 会表现出极强的应变率效应, 应力应变曲线越接近于线性, 所以在一定范围内, 使用线性方程可以有效地模拟出粉末高速压制过程。但想要获得更高速度、更精准的模拟结果, 就需要确定建立小尺寸的金属颗粒在冲击条件下的本构方程。通过对模型的动力学分析, 可得如下结论:

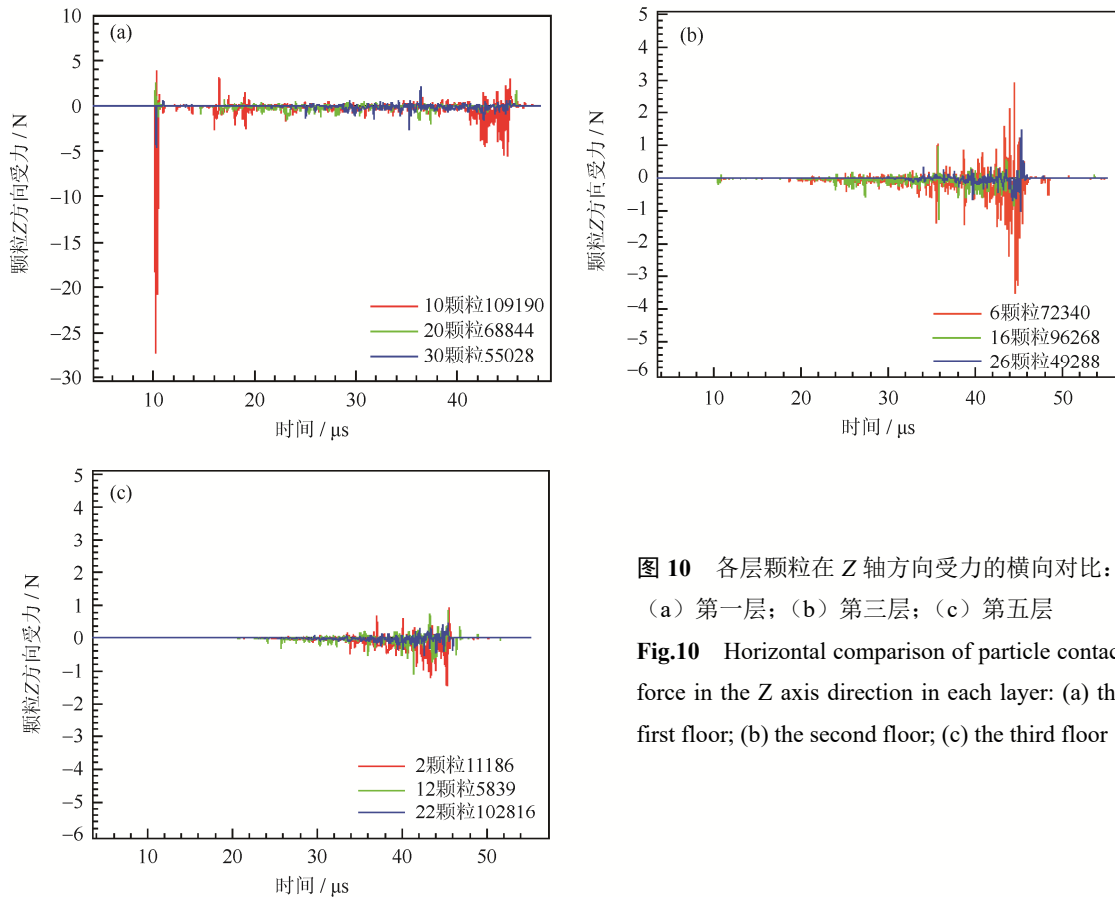


图 10 各层颗粒在 Z 轴方向受力的横向对比：  
(a) 第一层；(b) 第三层；(c) 第五层

Fig.10 Horizontal comparison of particle contact force in the Z axis direction in each layer: (a) the first floor; (b) the second floor; (c) the third floor

(1) 在三维情况下粉末材料所受冲击扰动呈不规则弧形传播。在压制初期，可能会出现粉末整体横向受力不均的现象。但在高速压制中，粉末会表现出极强的自组织性，动量能更好的传递，使压制过程中的横向受力不均匀现象得到改善。

(2) 通过对颗粒速度的对比分析，可以看出粉末扰动的传播规律为：沿传播方向扰动逐层衰减，外围区域颗粒衰减速度快于中心区域。表层颗粒的衰减程度要大于底层颗粒。

(3) 在单次加载过程中，颗粒会发生多次撞击。在致密阶段，位于表层的部分颗粒会先发生塑性变形并重排，中下层以颗粒重排为主。进入变形阶段后，所有区域颗粒受力基本相同且振动频率相差不大。

参 考 文 献

[1] Yan Z Q, Cai Y X, Chen F. High velocity compaction in powder forming and the promising applications. *Powder Metall Technol*, 2009, 27(6): 455  
(闫志巧, 蔡一湘, 陈峰. 粉末冶金高速压制技术及其应用. *粉末冶金技术*, 2009, 27(6): 455)

[2] Chi Y, Guo S J, Meng F, et al. High velocity compaction

in powder metallurgy. *Powder Metall Ind*, 2005, 15(6): 41  
(迟悦, 果世驹, 孟飞, 等. 粉末冶金高速压制成形技术. *粉末冶金工业*, 2005, 15(6): 41)

[3] Chelluri B, Knoth E. Powder forming using dynamic magnetic compaction // *4th International Conference on High Speed Forming*. Columbus, 2010: 26

[4] Skoglund P. HVC punches PM to new mass production limits. *MPR*, 2002, 57(9): 26

[5] Jin L, Zeng Y W, Li H, et al. Numerical simulation of large-scale triaxial tests on soil-rock mixture based on DEM of irregularly shaped particles. *Chin J Geotech Eng*, 2015, 37(5): 829  
(金磊, 曾亚武, 李欢, 等. 基于不规则颗粒离散元的土石混合体大三轴数值模拟. *岩土工程学报*, 2015, 37(5): 829)

[6] Deng Y B, Yang Y C, Shi D D, et al. Refinement and application of variable particle-size methods in 3D discrete element modelling for large-scale problems. *Chin J Geotech Eng*, 2017, 39(1): 62  
(邓益兵, 杨彦骋, 史旦达, 等. 三维离散元大尺度模拟中变粒径方法的优化及其应用. *岩土工程学报*, 2017, 39(1): 62)

(下转第 362 页)