

粉末高速压制成形过程中的应力波分析*

王爽 郑洲顺[†] 周文

(中南大学数学科学与计算技术学院,长沙 410083)

(2011年1月14日收到;2011年8月10日收到修改稿)

应用离散单元法,模拟了粉末高速压制成形过程中的压力传播过程.根据粉末高速压制成形的工艺特性,把一次压制过程分为弹性加载、塑性变形、弹性卸载三个阶段;基于离散单元法的基本理论,分别建立了三个阶段的控制方程;应用 PFC2D 软件对粉末高速压制过程模腔内部颗粒的运动状态进行了数值模拟,给出了压坯内部的压力分布,得出了实验中无法测量的压坯内部应力传播波形.数值模拟结果显示,压力作用曲线表现出明显的弛豫现象,形成了倾斜度不同的锯齿状加载波形和卸载波形,压坯底层的应力波与实验得到的应力波相符.

关键词: 高速压制成形, 离散单元法, 接触模型, 应力波

PACS: 81.20.Ev, 83.50.-v

1. 引言

粉末高速压制成形(HVC)技术是瑞典的Hoaganas公司在2001年美国金属粉末联合会上推出的一项新技术^[1].该技术采用动态单向压制,通过液压机驱动重锤以2—30 m/s的速度高速锤击粉末,重锤产生的高频冲击波通过上模冲传递到粉末上,使粉末在20 ms之内快速成形.HVC得到的成形坯密度高、密度分布均匀,国内外学者对其高致密化机理进行了研究.Azhdar等^[2]对径向单轴压实过程进行了研究,发现高速压制会产生有别于常规压制的高频应力波;果世驹等^[3]对高速压制致密化机理进行了研究,发现HVC过程中在颗粒表面形成高温剪切带,使局部温度迅速升高,颗粒容易发生塑性变形;易明军等^[4]用不同的冲击速度对相同装粉高度的粉体进行了压制试验,发现压制速度及应力波决定了压坯的致密化程度,应力波在粉末中传播,通过上下模冲的反射作用对粉末反复作用.

由于实验中仅能通过连接下模冲的高频传感器接收到底层应力波信号,无法测得压坯内部的应力波传播情况,所以模拟粉体内部的作用力传播波形对深入研究粉末变形行为、揭示致密化机理有重

要意义.本文应用离散单元法(DEM)通过建立单个颗粒与相邻粉末颗粒之间的运动响应模型,在每个时步上求解颗粒在不平衡力作用下的位移,在下一时步更新其接触关系,最终得到粉体内部不同高度层的受力情况以及实验中无法测得的作用力传播波形.DEM已被广泛用于模拟粉末的堆积、流动和压制过程^[5-7],对于持续时间为20 ms的高速压制过程,DEM可以通过调整刚度系数得到一般模拟方法难以达到的小计算时步.

2. 金属粉末压制的离散单元模型

假设粉末是刚性圆盘颗粒,每个颗粒作为一个计算单元.同时假定所计算单元仅有位置的改变,没有自身沿平面的转动,即不考虑角速度及力矩的作用.基于粉末发生塑性变形的特点,将单个颗粒的变形过程分为弹性加载、塑性变形和弹性卸载三个阶段,分别建立控制方程.尽可能小地选取计算时步,使扰动在单个时间步内不能超过最小计算单元的直径.

搜索与目标单元*i*相邻的接触单元*j*,假设有*N*个单元与其接触,接触点受力为 F_{ij} .将 F_{ij} 分解到*x*方向和*y*方向,并在目标单元*i*的形心叠加,则单元

* 国家自然科学基金(批准号:50874123,51174236)、国家重点基础研究发展计划(批准号:2011CB606306)和中南大学优秀博士学位论文扶植基金(批准号:2010YBFZ074)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: persever1019@yahoo.com.cn

i 所受接触力 F_i 为

$$F_i = F_i^x + F_i^y = \sum_{j=1}^N F_{ij}^x + \sum_{j=1}^N F_{ij}^y. \quad (1)$$

全局坐标系下的接触力由接触点所受的法向接触力 F_{ij}^n 和切向接触力 F_{ij}^t 转换得到, 设 φ 为接触面与惯性坐标系的夹角, 接触面外法向单位矢量 $\hat{n} = (\cos\varphi, \sin\varphi)$, 则

$$\begin{pmatrix} F_{ij}^x \\ F_{ij}^y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_{ij}^n \\ F_{ij}^t \end{pmatrix}. \quad (2)$$

计算单元所受的接触力 F_{ij}^n 和 F_{ij}^t 由如下计算模型得到: 压制过程开始时金属粉末以大量的点接触为主, 当受到重锤撞击后, 颗粒迅速由点接触变为面接触. 如图 1 所示, 二维惯性坐标系下颗粒的接触面为圆盘叠合处长度为 2α 的虚线, 根据 Hertz 接触理论可知接触弦长

$$2\alpha = 2\sqrt{u_n R}.$$

当颗粒发生弹性形变时, 法向接触力 F^n 可表示为

$$F^n = -\frac{4E}{3R}\alpha^3 = -K_n u_n^{3/2}, \quad (3)$$

其中 $K_n = \frac{4}{3}E\sqrt{R}$ 为法向刚度系数, E 为剪切模量, $\bar{R} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ 为两个不等径颗粒的有效半径, u_n 为颗粒沿法向的相对位移, 即接触半径.

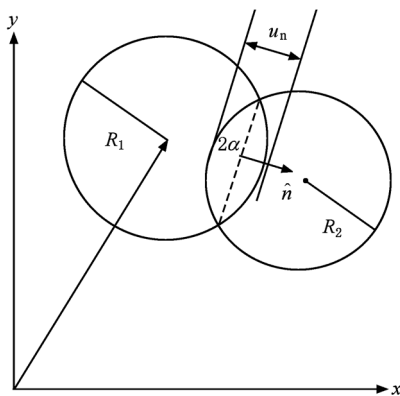


图 1 两颗粒单元接触示意图

由塑性变形的 von-Mises 屈服准则, 在平面应变条件下材料发生塑性变形的法向等效应力 $\sigma = 3\sigma_0$, 其中 σ_0 为材料的屈服强度. 所以, 法向屈服力

F_0^n 为

$$F_0^n = -\sigma_0 2\alpha = -6\sigma_0 \sqrt{u_n R}.$$

又由

$$F_0^n = -K_n u_n^{3/2},$$

可得

$$u_n^{\max} = \frac{9\sigma_0}{2E}.$$

当 $u_n \geq u_n^{\max}$, $F^n \geq F_0^n$ 时, 颗粒发生塑性变形, 随着加载继续进行, F^n 所作的功一部分支持塑性形变, 一部分仍作为弹性能保存在颗粒中, 此时

$$F^n = -6\sigma_0 \sqrt{(u_n - u_n^{\max})R} - K_n u_n^{3/2}. \quad (4)$$

当 $u_n \leq 0$ 时发生弹性卸载, 法向接触力为

$$F^n = -K_n (u_n - u_n^{\max})^{3/2}. \quad (5)$$

切向接触力由 Mindlin-Deresiewicz 相对滑移理论^[8]得到

$$F^t = -K_t \theta u_t + (-1)^k \lambda (1 - \theta) F^n, \quad (6)$$

其中 u_t 为切向相对位移; K_t 为切向刚度, K_t 可以由 K_n 计算得到^[9]; λ 为颗粒间摩擦系数; 当颗粒处于加载过程时 $k = 0$, 卸载过程时 $k = 1$; 当 $|F^t| < \lambda |F^n|$ 时 $\theta = 1$, 当 $|F^t| \geq \lambda |F^n|$ 时 $\theta = 0$.

在每个时间步内应用牛顿第二定律,

$$m\ddot{u}(t) = F_{\text{int}} + \sum_N F_c,$$

其中 F_{int} 为边界单元所受的初始载荷; $\sum_N F_c$ 为作用在单元上的接触合力, N 为与该单元接触的颗粒数, F_c 分别由(1)–(6)式确定.

3. 模拟中的应力计算及模拟参数

文献[10]在对模具侧压和压坏弹性后效的研究中发现, 高速压制过程中粉体在加载时的应力响应比致密体的应力响应缓慢得多, 并且随着粉末体致密化程度的提高传播速度加快. 给粉末一个瞬时压制力, 该力会在粉体中产生应力波, 当应力波进入表层粉末时, 表层粉末获得动能在小范围内振荡, 通过颗粒之间的碰撞将能量传递给相邻粉末, 最终引起深层粉末受力运动. 这一过程虽然没有严格的波阵面, 但是对于颗粒大小均匀、排列规则的理想粉体, 不同颗粒层之间仍然存在应力相继现象. 在 t 时刻, A 层颗粒运动而 B 层颗粒静止; 在 $t + \Delta t$ 时刻, A 层扰动传播到 B 层, B 层颗粒运动而 A 层

颗粒运动衰减. 颗粒的接触状态和致密化程度决定了应力波的传播速率和衰减快慢.

假设 A 层颗粒传播到 B 层颗粒的路径是随机的, 统计一个带状区域内的平均输入应力 P 为

$$P = \frac{\sum F_y \Delta y}{V}, \quad (7)$$

其中 Δy 为颗粒进入带状区域沿 y 轴方向的最大弦长, V 为带状区域的体积. 平均输入应力随时间演变的曲线即为该带状区域所受的应力波.

基于文献[11]中实验条件, 用纯度为 99.5% 的水雾化铁粉为粉末原料进行数值试验. 建立高为 25 mm, 底面半径为 10 mm 的圆柱形容器, 受计算量限制设置 14000 个半径分布在 38.4—76.8 μm 之间的圆盘颗粒. 数值模拟中相关参量的取值如下: 压制速度为 5.7 m/s, 压力 F_{in} 为 900 kN, 泊松比 μ 为 0.3, 其他参数列于表 1.

表 1 高速压制成形过程数值模拟中的参量取值

E/GPa	μ	$K_n / \text{N} \cdot \text{m}^{-3/2}$	λ	$\sigma_0 / \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$
206	0.3	2.29×10^{10}	0.091	3.94×10^9

采用计算软件 PFC2D 模拟单次压制过程, 沿轴向把整个压坯分为体积均等的五部分, 形成包括顶层和底层的六个高度不同的截面, 相邻两个截面高度差为 5 mm.

4. 数值模拟结果及分析

透过各截面的压力如图 2 所示. 选取计算时间步长为 5.5×10^{-5} ms, 整个过程共耗费 40000 时步, 耗时约为 2.2 ms. 颗粒受瞬间撞击后发生高频振荡, 开始时顶层波形振荡剧烈, 其后趋于平稳. 压制力瞬间作用于粉末, 当顶层受力时, 第二层粉末没有明显运动, 可见粉体存在应变延迟. 作用力经过 7500 个时步 (0.4 ms) 传播到第二层粉末, 传播速度约为 12.5 m/s. 以第二层为例, 相邻两个波峰之间存在一定的时间间隔, 随着粉末被压实, 应力的传播速度越来越快.

对比各层波形的最大峰值可以发现, 不同于致密体, 压力在粉体中分布不均匀, 底层粉末由于受下模冲反射波的影响, 表现出明显的不规律性. 随着力的传播及应力波的耗散, 振幅衰减并逐渐趋于零. 压制后期应力自发地由高压区域向低压区域转移, 最终各层应力值趋于一致, 这一现象与文献

[12] 中分析一致.

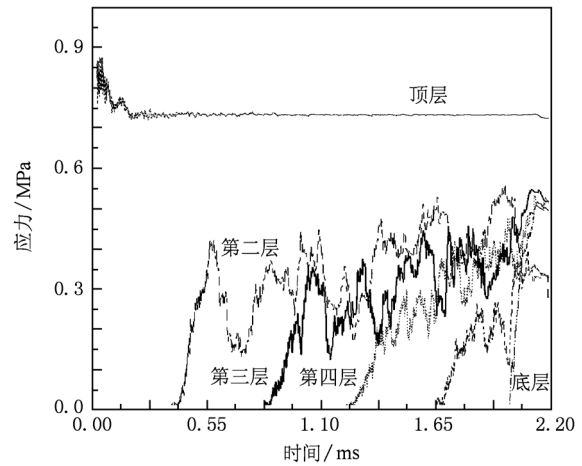


图 2 各切面应力波传播波形

图 3 为数值模拟得到的底层应力波波波形和实验结果, 其中图 3(a) 为本文数值模拟得到的压坯底层应力波传播波形, 图 3(b) 为文献[11]得到的水雾

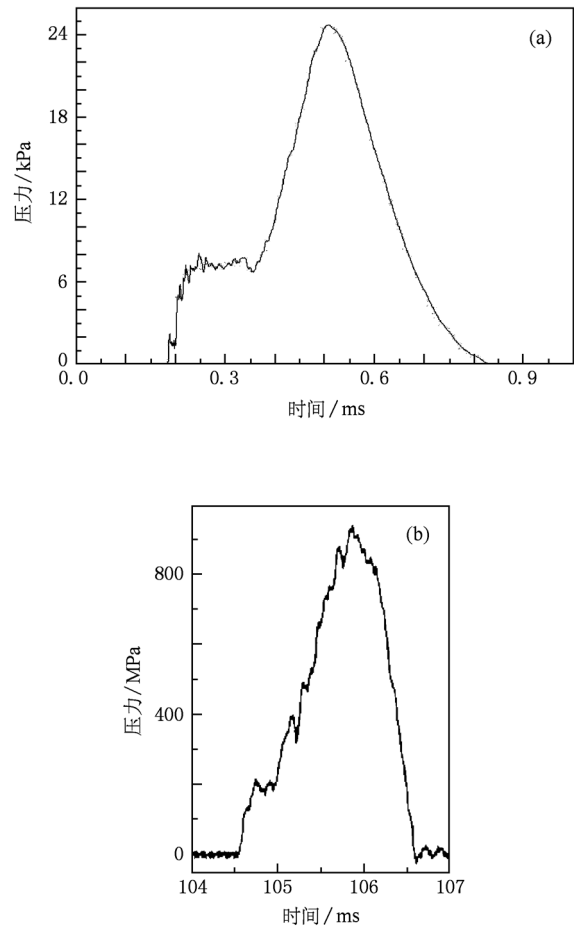


图 3 数值模拟得到的压坯底层压力和实验结果 (a) 本文模拟结果, (b) 文献[11]实验结果

化铁粉在 897.5 MPa 的压制压力下单次压制时底层的应力波波形,由连接在压机底层的传感器测得.由图 3 可知,模拟结果与实验在 104.5—105.5 ms 时间段内测得的整体波形相符.由于弹性加载和塑性加载的交互作用,加载波呈现逐渐上升的锯齿状波形;而卸载过程主要体现为弹性卸载,所以卸载波相对光滑且衰减速度较加载波快.

5. 结 论

本文应用 DEM 模拟了粉末高速压制成形过程中的应力传播过程.首先将单个颗粒的变形过程分为弹性加载、塑性变形、弹性卸载三个阶段,通过分别建立接触模型描述了高速压制金属粉末的成形

过程.然后借助 PFC2D 软件模拟得到压坯内部不同切面的应力波传播波形,得出了实验无法测得的压坯内部应力波.研究表明:颗粒受瞬间撞击后发生高频振荡,开始时振荡剧烈其后趋于平稳;压制力瞬间作用于粉末,当顶层受力时,第二层粉末没有明显运动,粉体存在应变延迟;加载波形和卸载波形能够体现出弹性加载、卸载与塑性变形的交替作用;动态压制后期应力发生松弛,自发地由高压区域向低压区域转移.数值模拟结果与实验结果^[11]整体波形相符,说明应用 DEM 模型可以模拟封装状态下金属粉末的高速压制过程.

感谢中南大学计算地球科学研究中心刘亮明教授为本文工作提供计算软件.

- [1] Skoglund P 2001 *The International Conference on Power Transmission Components* (Ypsilanti: Metal Powder Industries Federation) p16
- [2] Azhdar B, Stenberg B, Kari L 2006 *Polymer Test.* **25** 114
- [3] Guo S J, Chi Y, Meng F, Yang X 2006 *Mater. Sci. Eng. Powder Metall.* **11** 41 (in Chinese) [果世驹、迟悦、孟飞、杨霞 2006 粉末冶金材料科学与工程 **11** 41]
- [4] Yi M J, Yin H Q, Qu X H, Wang J Z, Yuan X J 2009 *Powder Metall. Technol.* **27** 207 (in Chinese) [易明军、尹海青、曲选辉、王建忠、原现杰 2009 粉末冶金技术 **27** 207]
- [5] Sun Q C, Wang G Q 2009 *Mechanical Introduction on Granular Materials* (Beijing: Science Press) p15 (in Chinese) [孙其诚、王光谦 2009 颗粒物质力学导论 (北京:科学出版社) 第 15 页]
- [6] Wu C Y, Thornton C, Li L Y 2003 *Adv. Powder Technol.* **14** 435
- [7] Matuttis H G, Luding S, Herrmann H J 2000 *Powder Technol.* **109** 278
- [8] Mindlin R D, Deresiewicz H 1953 *J. Appl. Mech.* **19** 327
- [9] Wang Y J, Xing J B 1991 *Discrete Element Method and Application for Geomechanics* (Shenyang: Northeastern University Press) p63 (in Chinese) [王泳嘉、邢纪波 1991 离散单元法及其在岩土力学研究中的应用 (沈阳:东北工学院出版社) 第 63 页]
- [10] Azhdar B, Stenberg B, Kari L 2006 *Polymer Test.* **25** 1069
- [11] Wang J Z, Yin H Q, Qu X H, Johnson J L 2009 *Powder Technol.* **195** 184
- [12] Chen Z H 1994 *Rare Metal Mater. Eng.* **33** 2 (in Chinese) [陈振华 1994 稀有金属材料与工程 **33** 2]

The pressure wave analysis in high velocity compaction process *

Wang Shuang Zheng Zhou-Shun[†] Zhou Wen

(*Institute of Mathematical Sciences and Computing Technology, Central South University, Changsha 410083, China*)

(Received 14 January 2011; revised manuscript received 10 August 2011)

Abstract

The pressure propagation in high velocity compaction process is simulated based on the discrete element method in this paper. Because the full process is divided into elastic loading, plastic deformation and elastic unloading, the governing equations are established in three stages respectively. With the help of computing software PFC2D, the impacting force through different layers of powders can be obtained, which cannot be observed in experiment. The simulation results show obviously a delay phenomenon and serrate waves with different gradients in loading and unloading processes. Finally, the simulated low-level stress waves are compared with available experimental data, which are consistent with each other.

Keywords: high velocity compaction, discrete element method, contact model, stress waves

PACS: 81.20.Ev, 83.50.-v

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50874123, 51174236), the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2011CB606306), and the Excellent Doctoral Dissertation Fostering Foundation of Central South University, China (Grant No. 2010YBFZ074).

[†] Corresponding author. E-mail: persever1019@yahoo.com.cn