



基于 EDEM 软件的粉料压制过程仿真与分析

欧阳虎, 赵翼翔, 陈 新

(广东工业大学 广东省计算机集成制造系统重点实验室, 广东 广州 510006)

摘要: 为了验证在陶瓷墙地砖粉料压制过程中运用离散元软件 EDEM 分析的可行性, 利用 EDEM 对陶瓷墙地砖粉料压制过程进行数值模拟分析, 采用控制变量方法进行多组粉料压制过程的动态仿真实验, 通过对实验数据的分析得出压制速度和压制力之间的关系。结果表明, 在其他条件相同时, 压制力与压制坯体密度均随着粉料压制速度的增大而增大, 采用 EDEM 软件仿真的结果与压力机的实际工作情况是相符的。

关键词: 离散单元法; EDEM 软件; 粉料压制; 动态仿真

中图分类号: TG375+.9 **文献标志码:** A

文章编号: 1008-5548(2015)06-0076-06

Simulation and Analysis of Powder Pressing Based on EDEM Software

OUYANG Hu, ZHAO Yixiang, CHEN Xin

(Guangdong Provincial Key Laboratory of Computer Integrated Manufacturing System, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: To verify the feasibility of using discrete element analysis software EDEM in tile powder pressing, the process of tile powder pressing was simulated by the discrete element software EDEM. The dynamic simulation of multiple sets of tile powder pressing was conducted by the method of control variables. The relationship between pressing speed and pressing force was obtained through analysis of experimental data. The results show that both pressing force and density of the compacted body increase with the increase of pressing speed with other conditions being the same. The simulation results using EDEM software are consistent with actual working status of presses.

Keywords: discrete element method; EDEM software; powder pressing; dynamic simulation

颗粒离散元法 (DEM) 是由 Cundall 和 Strack 于

1979 年以不同本构关系的牛顿第二定律为基础理论, 提出的一种数值模拟方法。离散元法用以处理非连续介质的问题, 是基于动态松弛法求解方程。离散元法已成功应用于很多散体物料处理领域, 但是在粉料压制成形方面的应用很少^[1-2]。目前国外基于离散元法的软件主要有 EDEM、UDEC、PFC2D/PFC3D 和 3DEC 等, 国内有 2D-Block、TRUDEC 和 Super-DEM 等, 但是应用较多的是 EDEM 与 PFC。EDEM 是一款普遍适用于颗粒系统仿真与分析的计算机辅助工程 (CAE) 软件, 也是第一个使用最先进离散单元技术的 CAE 软件。本文中采用 EDEM 软件, 在压制速度不同的条件下, 对陶瓷墙地砖粉料进行数值模拟和分析。

1 离散单元法计算模型的建立

离散单元法计算模型所采用基本运动方程^[1]如下:

$$m \frac{d^2 s(t)}{dt^2} + c \frac{ds(t)}{dt} + ks(t) = f(t), \quad (1)$$

式中: m 为颗粒质量, kg; s 为颗粒位移, m; t 为颗粒运动时间, s; c 为颗粒间黏性阻尼系数, N/(m·s⁻¹); k 为颗粒刚度, N/m; f 为附加在单元上的载荷^[3]。

假设 t 与 $t+\Delta t$ 时刻之间的动态变化量 $f(t)$ 、 $s(t)$ 、 $s(t-\Delta t)$ 、 $ds(t-\Delta t)/dt$ 以及 $d^2s(t-\Delta t)/dt^2$ 等已知, Δt 为计算时步, 对式 (1) 应用中心差分法可得^[1]

$$m \frac{[s(t+\Delta t) - 2s(t) + s(t-\Delta t))]}{(\Delta t)^2} + c \frac{[s(t+\Delta t) - s(t-\Delta t))]}{2\Delta t} + ks(t) = f(t). \quad (2)$$

求解式 (2) 可得^[1]

$$s(t+\Delta t) = \{ (\Delta t)^2 f(t) + (c + \Delta t - 2m) \frac{s(t+\Delta t)}{2} + [2m - k(\Delta t)^2] s(t) \} / (m + c\Delta t/2). \quad (3)$$

求解式 (3) 可采用数值计算方法中的循环计算, 结合牛顿第二定律的运动方程和力学位移物理方程。离散元软件 EDEM 是以离散单元法为基础的, 该软件中基于软球模型的颗粒单元循环计算流程如图 1^[4]所示。

收稿日期: 2015-02-04, 修回日期: 2015-03-01。

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研项目, 编号: 20114420110001; 广东省战略性新兴产业专项基金项目, 编号: 2011A080303004, 2011A081301001。

第一作者简介: 欧阳虎 (1988—), 男, 硕士研究生, 研究方向为机械优化设计与仿真分析。E-mail: ouyanghu1988@sina.com。

通信作者简介: 赵翼翔 (1975—), 男, 博士后, 教授, 硕士生导师, 研究方向为机电系统建模与仿真。E-mail: 363061705@qq.com。

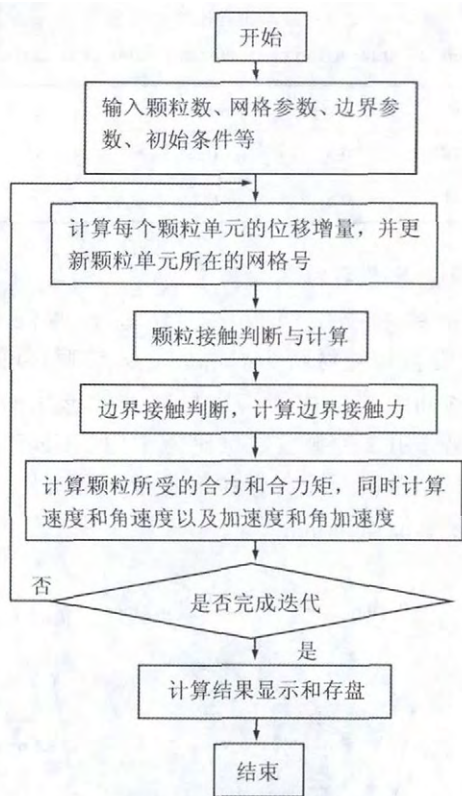
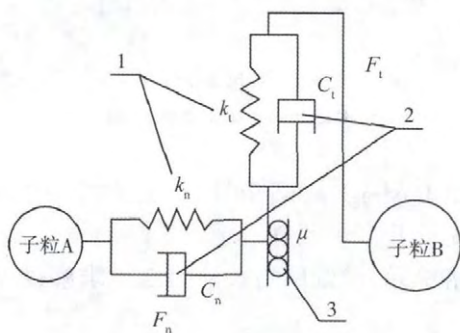


图1 基于软球模型的颗粒离散元模拟流程

Fig. 1 Particle discrete element simulation process based on soft ball model

2 压制接触力学模型的建立

墙地砖粉料压制的过程实质是陶瓷粉料各部分相互移动、变形,迫使孔隙率减小和坯体结构致密化的过程^[5]。该过程是通过模具与陶瓷粉料颗粒以及颗粒与颗粒之间的接触、碰撞来实现的。为了更正确地模拟模具与颗粒以及颗粒与颗粒之间的接触和碰撞过程,颗粒离散元方法采用弹性、阻尼、摩擦接触力学模型^[3],如图2所示。



1—弹簧,代表颗粒刚度;2—阻尼器;3—摩擦器; F_t 、 F_n —颗粒间的切向力、法向力,N; k_t 、 k_n —切向刚度、法向刚度,N/m; C_t 、 C_n —切向阻尼系数、法向阻尼系数,N/(m·s⁻¹); μ —摩擦系数。

图2 接触力学模型

Fig. 2 Contact mechanics model

对上述接触力学模型采用接触力学分析可得^[1]:

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^* \delta_n^3}, \quad (4)$$

$$F_t = -S_t \delta_t, \quad (5)$$

$$F_n^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n m^* v_n^{\text{rel}}}, \quad (6)$$

$$F_t^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_t m^* v_t^{\text{rel}}}, \quad (7)$$

其中

$$S_n = -2E^* \sqrt{R^* \delta_n}, \quad (8)$$

$$S_t = 8G^* \sqrt{R^* \delta_n}, \quad (9)$$

$$\beta = \frac{\ln e}{\sqrt{(\ln e)^2 + \pi^2}}, \quad (10)$$

式中: F_n 、 F_t 为颗粒间的法向力、切向力,N; F_n^d 、 F_t^d 为法向阻尼力、切向阻尼力,N; R^* 为等效颗粒半径,m; E^* 为等效弹性模量,Pa; S_n 、 S_t 为法向重叠刚度、切向重叠刚度,N/m; δ_n 、 δ_t 为法向重叠量、切向重叠量,m; m^* 为等效质量,kg; v_n^{rel} 、 v_t^{rel} 为法向相对速度、切向相对速度,m/s; G^* 为等效剪切模量,MPa; e 为恢复系数。

3 粉料压制 EDEM 建模与仿真分析

离散软件 EDEM(2.6 版)主要由 3 个模块构成^[6]:前处理器、求解器和后处理器。其中前处理器用于创建和初始化离散元模型,求解器进行模拟仿真和计算,后处理器则对仿真结果进行显示和分析。压制成型技术主要应用于金属及陶瓷等成形领域,本文中通过对粉料成形压制机的建模,并采用 EDEM 软件中的 Hysteretic Spring 接触模型进行仿真分析,该接触模型主要适用于颗粒受较大压力后产生塑性变形的场合,适合本文中所采用的黏性颗粒。

3.1 EDEM 前处理设置

3.1.1 设置全局模块参数及重力系数

1)设置接触模型。在物理特性 Physics 选项块中选择颗粒与颗粒间的交互项,去掉默认的 Hertz-Mindlin(No slip)接触模型,设置接触模型为 Hysteretic Spring,设置该模型的参数如图3所示。其中颗粒

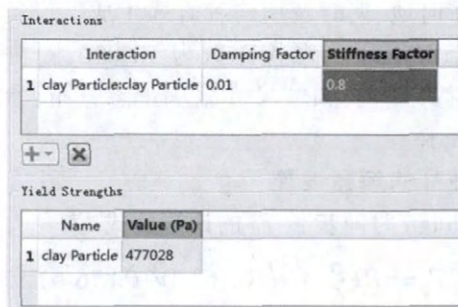


图3 Hysteretic Spring 接触模型参数设置

Fig. 3 Parameter setting of Hysteretic Spring contact model

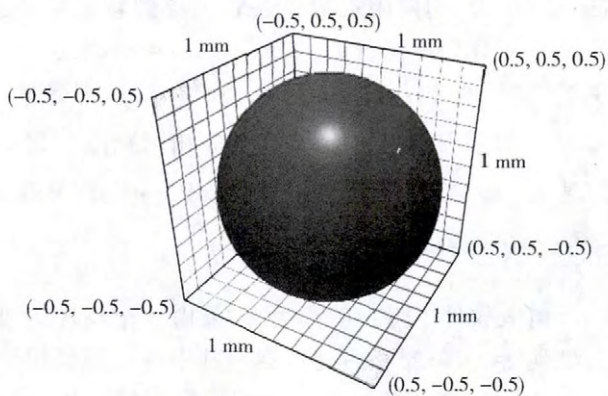
与几何体之间的接触模型采用默认。将重力系数设置为 -9.81 N/s^2 , 方向为 EDEM 软件内部坐标系 z 轴方向。

2) 定义物料颗粒特性及材料属性。创建陶瓷颗粒材料名为 Ceramic, 压机阴模和模冲的材料设置为钢, 材料特性设置如表 1 所示。材料间的相互作用参数设置如表 2 所示。

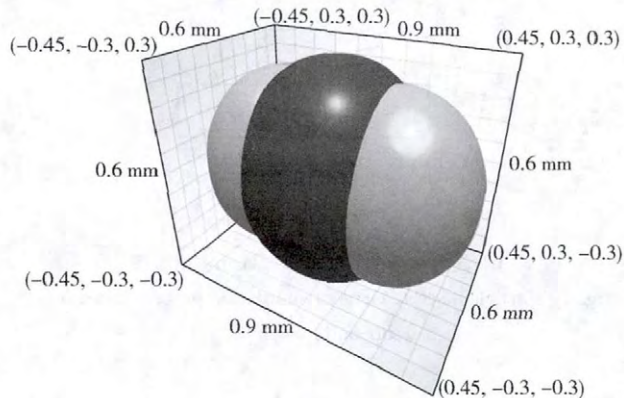
表 1 材料特性值

Tab. 1 Characteristic value of materials

材料	泊松比	剪切模量/GPa	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
陶瓷	0.25	0.22	2 500
钢	0.30	79.00	7 850



(a) 圆形颗粒



(b) 非圆形颗粒

图 4 物料颗粒形状及尺寸

Fig. 4 Shape and size of material particle

3.1.3 设置粉料压制机的几何特性

粉料压制机的三维模型^[7]是通过专业三维制图软件 CATIA 建立的, 并保存为 .igs 格式, 在 EDEM 软件的 Geometry 模块里导入上述模型, 该三维模型主要由以下 3 个部分组成: 上模冲、阴模和下模冲, 其中阴模的底面积尺寸为 $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 。同时在该模块里设置上模冲的压制速度为 0.05 m/s 。

3.1.4 设置颗粒工厂参数

通过对颗粒工厂参数的设置来定义仿真模型中的粒子在何地、何时及用何种方式生成。设置工厂类型为动态 Dynamic, 颗粒总数为 10 000, 颗粒产生的位置设置为随机, 颗粒尺寸服从正态分布, 参数设置如图 5 所示。

3.2 EDEM 求解器设置

Rayleigh 时间步长 T_R 的计算公式^[6]为

$$T_R = \pi R \left(\frac{\rho}{G} \right)^{1/2} / (0.163 1\nu + 0.876 6), \quad (11)$$

式中: R 为颗粒半径, m; ρ 为颗粒密度, kg/m^3 ; G 为剪切模量, MPa; ν 为泊松比。EDEM 会根据式(11)自

表 2 材料相互作用特性值

Tab. 2 Interaction characteristic value of materials

材料	恢复系数	静摩擦系数	滚动摩擦系数
陶瓷-陶瓷	0.3	0.6	0.05
陶瓷-钢	0.5	0.4	0.05

3.1.2 设置基本颗粒参数

在颗粒系统子面板中创建新的颗粒 Ceramic Particle, 设置颗粒材料为 Ceramic, 物料颗粒可以由多个不同的面组成, 由于陶瓷粉料颗粒形状的不确定性, 因此选用 2 种颗粒数量比为 1:1 的不同形状的模型代替陶瓷粉料颗粒。颗粒形状及尺寸如图 4 所示, 其中坐标单位均为 mm。

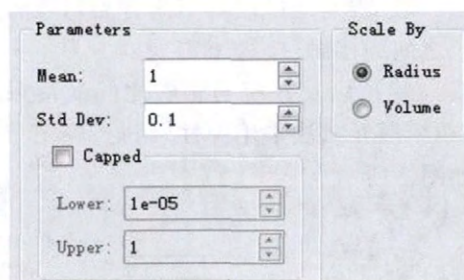


图 5 颗粒尺寸参数设置

Fig. 5 Parameter setting of particle size

动计算出 Rayleigh 时间步长, 本文中选用 $T_R \times 15\%$ 作为固定时间步长。设置仿真时间为 1.5 s , 同时设置仿真网格单元, 设置网格尺寸为 $2R$ 。求解过程如图 6 所示。

3.3 EDEM 后处理器设置

在后处理器中选择线形图, 并将 x 轴设定为仿真时间, y 轴设定为上模冲所受的挤压力, 得出上模冲压制速度为 0.05 m/s 时的压制力和时间的关系如图 7 所示。

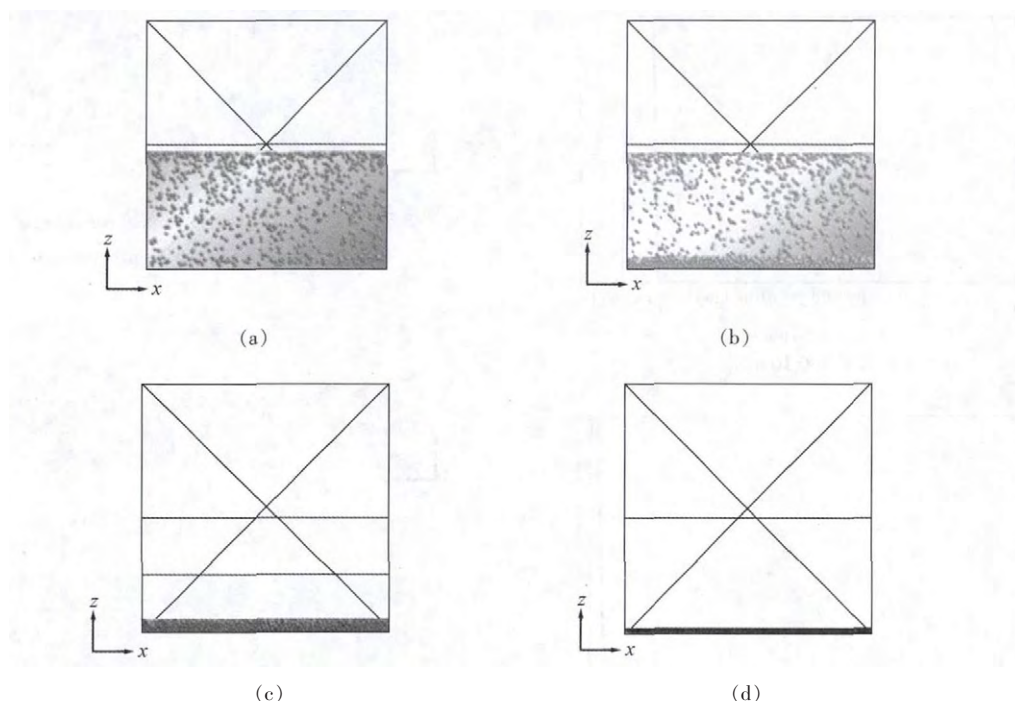
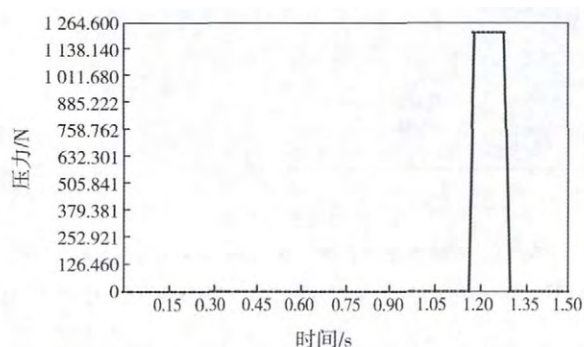
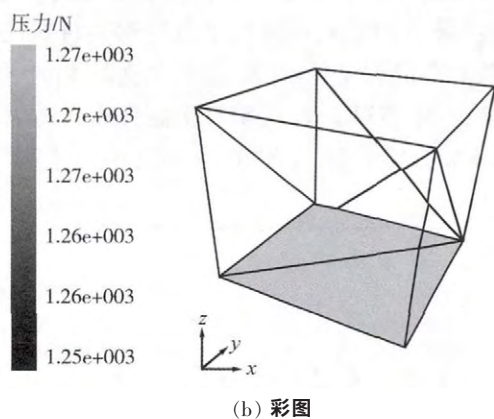


图6 EDEM 软件压制仿真过程

Fig. 6 Pressing simulation process of EDEM software



(a) 线形图



(b) 彩图

图7 压制速度为 0.05 m/s 时的压制力

Fig. 7 Pressing force with pressing speed of 0.05 m/s

同理可得相同条件下, 上模冲在 0.10、0.15、0.20 m/s 等速度条件下的压制力和时间的关系, 如图 8 所示。

根据以上 4 次仿真实验的结果, 上模冲压制速度

与相应压制力的关系如图 9 中实线所示。另外, 在广东省佛山市新鹏陶瓷机械有限公司采用海源牌 HP-4290 型陶瓷砖全自动液压机进行了实际压制实验, 得出压制速度分别为 0.05、0.10、0.15、0.20 m/s 时压制速度与压制力的关系如图 9 中虚线所示。可以看出, 仿真得出的曲线与实验得出的曲线基本相符, 说明了 EDEM 软件在粉料压制方面的实际可行性。还可以看出, 随着压制速度的增大, 上模冲所受的物料反作用力也在增大。主要原因是随着上模冲压制速度的增大, 物料间的气体排出时间减少, 未及时排出的气体在压制时对上模冲起到阻力作用, 增加了上模冲的受力。由此可知, 在采用高速压制时, 物料能否及时排气是必须要首先考虑的。

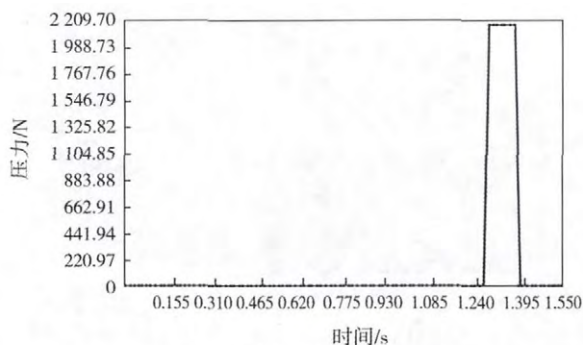
在压制速度为 0.20 m/s 的条件下, 采用 EDEM 后处理器里自带的 Ruler 工具, 可以测得最终粉料被压制的高度, 如图 10 所示, 其中数值的单位是 mm。由图可知, 最终粉料被压制的高度为 2 mm。

压模底面是尺寸为 70 mm×70 mm 的正方形。可以求得, 在压制速度为 0.20 m/s 时所得坯体的密度 $\rho_{0.20}$ 为

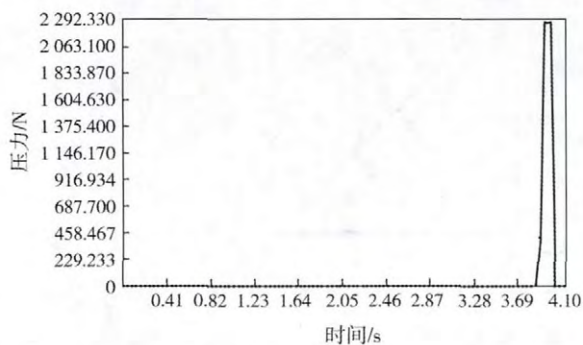
$$\rho_{0.20} = \frac{m_{\text{tot}}}{V} = \frac{0.05}{70 \times 70 \times 2} = 5.1 \text{ g/cm}^3,$$

式中: m_{tot} 为粉料总质量, kg; V 为粉料压制后的最终体积, mm^3 。

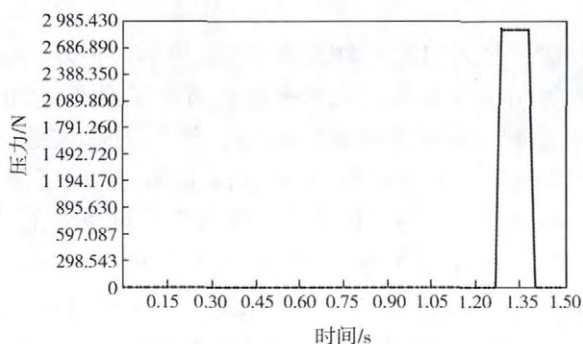
粉料在压制速度分别为 0.15、0.10、0.05 m/s 时的坯体高度如图 11 所示, 其中数值的单位是 mm。



(a) 压制速度为 0.10 m/s



(b) 压制速度为 0.15 m/s



(c) 压制速度为 0.20 m/s

图 8 压制速度为 0.10、0.15、0.20 m/s 时的压制力

Fig. 8 Pressing force with pressing speed of 0.10, 0.15, 0.20 m/s

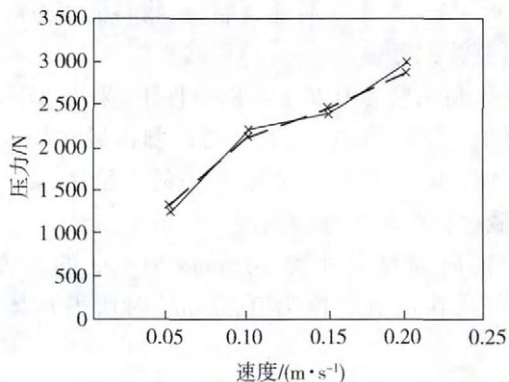


图 9 不同压制速度与对应压制力的关系

Fig. 9 Relationship between different pressing speeds and corresponding pressing forces

同理可以求得相应压制速度条件下坯体密度
 $\rho_{0.15}=3.4 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{0.10}=2.6 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{0.05}=2.04 \text{ g/cm}^3$ 。压制速



图 10 压制速度为 0.20 m/s 时的坯体高度

Fig. 10 Body height with pressing speed of 0.20 m/s



(a) 压制速度为 0.15 m/s



(b) 压制速度为 0.10 m/s



(b) 压制速度为 0.05 m/s

图 11 压制速度为 0.15、0.10、0.05 m/s 时的坯体高度

Fig. 11 Body heights with pressing speeds of 0.15, 0.10, 0.05 m/s

度与对应压坯密度的关系如图 12 所示。可以看出,最终得到的压制坯体密度随着压制速度的增大而增大。

邹霞^[8]采用 PFC 软件进行了压敏陶瓷材料压制过程的离散元模拟和实验研究。通过与文献^[8]的对比可以看出, EDEM 相对 PFC 在粉料压制方面具有以下优点: 1) EDEM 是全三维的, 也可以简化为二维, PFC 则

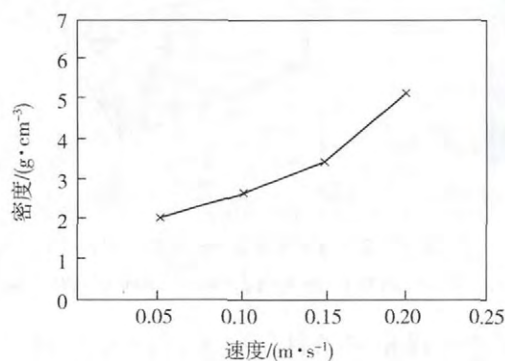


图 12 压制速度与对应压坯密度的关系

Fig. 12 Relationship between pressing speed and corresponding body density

是分别为二维和三维 2 个版本; 2) EDEM 能够支持 CAD 模型导入, 能够快速进行复制几何结构建模; 3) EDEM 能够实现与计算流体动力学(CFD)、有限元分析(FEA)及全三维基于特征(MBD)软件的耦合, 处理更加复杂的问题。

4 结论

1) 首次结合粉料压制的具体实例, 采用基于离散单元方法的离散元软件 EDEM 对粉料压制进行了分析, 并得到陶瓷墙地砖粉料压制的过程。

2) 在其他条件相同的情况下, 改变上模冲的压制速度, 根据多组实验结果, 对模拟效果进行综合分析得出压制力随着压制速度的增大而增大的结论; 同时利用实际实验进行了对比, 提出在采用高速压制方法时, 应将物料的排气作为首要考虑的问题。

3) 首次采用 EDEM 仿真得出最终得到的压制坯体密度随着粉料压制速度的增大而增大的关系。同时针对具体的仿真过程, 对 EDEM 及 PFC 这 2 种离散

元软件进行了对比。

4) 本文中的分析结果与压力机在企业工作的实际情况基本相符, 表明了运用 EDEM 进行粉料压制数值模拟的正确性和可行性。

参考文献(References):

- [1] 孙其诚, 王光谦. 颗粒物质力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [2] 李洪昌, 李耀明, 唐忠, 等. 基于 EDEM 的振动筛分数值模拟与分析[J]. 农业工程学报, 2011(5): 117-121.
- [3] 周照耀, 李元元. 金属粉末成形力学建模与计算机模拟[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2011.
- [4] 王舒昊. 排水抗裂型路面材料及结构一体化设计研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- [5] 汪刚, 向卫兵. 陶瓷墙地砖粉料压制成形机理及其 CAE 分析的探索研究[J]. 佛山陶瓷, 2008(8): 10-12.
- [6] 王国强, 郝万军, 王继新. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010.
- [7] 乔斌, 朱玲利, 雷晓娟. 基于 EDEM 软件的石灰石在回转窑内停留时间的模拟研究[J]. 矿山机械, 2010(19): 83-85.
- [8] 邹霞. 压敏陶瓷材料压制过程的离散元模拟和实验研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2012.

2016 全国粉体加工与应用市场信息交流会(吉安)通知

主题: 塑料涂料用矿物粉体填料

(时间: 2016 年 1 月 8—10 日)

主办单位: 中国建筑材料联合会粉体技术分会、国际粉体检测与控制联合会

承办单位: 江西广源化工有限责任公司

支持媒体: 中国粉体工业网、《中国粉体技术》(全国中文核心期刊、中国科技核心期刊)、《中国粉体工业》杂志

产业结构调整是一次残酷的企业洗牌过程, 适者生存, 别无选择。走“产品技术创新和优化工艺”之路, 是在低迷状态下生存与稳妥调整, 积极迎接经济复苏到来的必然选择。我们的企业扮演着全球原料车间的角色。产能过剩与产品同质化导致市场价格战, 能源、资源和环境负担日趋加重。在这种形势下, 原材料生产企业需要挖潜改造, 在“现有产品优化—维持老客户—开发新市场”方面下功夫, 将产品(下游客户的原料)多样化、功能化和适用化。

在当前经济下滑和低迷时期, 中国建筑材料联合会粉体技术分会致力于针对粉体下游用户的应用技术的交流, 以多品种服务型销售巩固用户与供应商之间的关系。江西广源化工有限责任公司在这方面做出了积极的努力, 而且取得了显著的效果。

粉体加工技术水平直接关系到最终产品质量和成本。影响产品性能的粉体技术指标有细度、粒度分布、比表面积、颗粒形状、颗粒结构、表面状态、流动性、分散性等。过去认为是简单粉碎混合过程的粉体加工环节, 则成为重要的突破口——“精工细作—突出功能—增加买点”。功能性超细粉体加工技术所能发挥作用的着力点就在于此。

此次会议将以江西广源化工为典型事例, 针对江西地方重质碳酸钙和矿物材料产业的发展, 邀请塑料制品、电缆和涂料等领域粉体填料应用方面的专家, 面向粉体填料生产企业进行技术交流和基础知识的培训。

会议前、后的信息交流, 请大家关注“中国粉体工业网 www.chinapowder.cn”和微信平台“小颗粒大世界”。

联系人: 陈先生 孙先生
传 真: 010-52706108

电话: 010-57212607 13811075116 13810222312
E-mail: huiyi1@chinapowder.com