

量杯式计量精度离散元法仿真研究

段能全, 王俊元, 高永宏, 杜文华, 王文涛

(中北大学, 太原 030051)

摘要: **目的** 探讨离散元法在预估量杯式计量精度中的应用。**方法** 通过分析计量过程中小米颗粒的运动及能量损耗形式, 构建具有质量阻尼和刚度阻尼的颗粒接触模型, 并对照实测休止角(34.9°), 利用此模型试算反演诸如阻尼比等颗粒的细观参数。在量杯规格为 $26\text{ mm}\times 17\text{ mm}$ 、充填速度为 150 mm/s 的条件下, 仿真计算每个充填周期中从料斗迁移出的颗粒数目变化(用以表征计量精度), 对实验和仿真数据作对比分析。**结果** 仿真休止角为 34.7° , 与实测值吻合较好。在显著性水平为 0.05 时, 仿真与实验计量精度无明显不同。**结论** 离散元法可用于量杯式计量的分析研究, 且模型的构建及参数的设定是合理的

关键词: 量杯式计量; 离散元法; 计量精度; 颗粒; 休止角

中图分类号: TB486; TB24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2014)05-0073-06

DEM Simulation Study on the Accuracy of Measuring Cup Filling

DUAN Neng-quan, WANG Jun-yuan, GAO Yong-hong, DU Wen-hua, WANG Wen-tao

(North University of China, Taiyuan 030051, China)

ABSTRACT: **Objective** To investigate the application of the discrete element method (DEM) in the accuracy estimation of measuring cup filling. **Methods** Based on the characteristics of motion and energy dissipation of the millet grains in the process of packaging, the contact model was constructed, in which mass dashpots and stiffness dashpots were specified. Based on the model and the experimental angle of repose (34.9°), the micro-parameters, e. g. damping ratio, were investigated and assigned. The changes in the number of particles migrated from the hopper in each packaging cycle were calculated by the model and regarded as characterization of measuring accuracy, where the size of cup and packaging speed were $26\text{ mm}\times 17\text{ mm}$ and 150 mm/s , respectively. The data of the experiment and the simulation were compared. **Results** The simulative angle of repose was 34.7° , well fitted to the experimental result. At the 0.05 level, the distribution of accuracy was not significantly different between the experiment and the simulation. **Conclusion** It was proved that DEM can be used to investigate measuring cup filling, in addition, construction of the model and choice of parameters were reasonable.

KEY WORDS: measuring cup filling; DEM; measurement accuracy; particles; angle of repose

量杯作为重力式容积计量装填的一种形式, 因具有结构简单、调节方便、装填效率较高和成本较低等特点^[1-2], 因而被广泛应用于食品、制药等行业中的包装设备。对于颗粒包装设备多采用经验设计和试制调整相结合的方法, 以保证所配备的不同规格量杯能够适应不同物料和量程的计量效率与精度要求。

对于这种计量装填方式, 从一开始就认识到不同物料所能控制的允差存在较大差异, 但国内针对其开展的研究多在装置结构或控制仪表等方面, 对被称物料物理性能的研究很少^[3], 使得诸如调整量杯结构形式、改进供料装置和优化控制策略与装填工艺等时, 缺乏对计量装填过程中颗粒物料的运动和能量变化等^[4]

物理过程进行深入分析,因而当物料、结构或工艺发生变化时,很难精确预测充填量及计量精度。

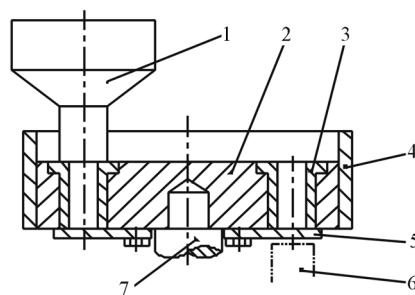
离散元法 (DEM) 作为一种用于非连续介质力学的数值计算方法,是将非连续介质离散为独立的单元,考虑相邻单元之间存在作用力,运用牛顿第二定律计算每个单元的细观运动,从而得到非连续介质的力、热等状态分布及变化规律,能够反映过程的本质机理^[5]。通过 DEM 或联合某些相关技术与方法,李艳洁针对玻璃球等散体的堆积研究指出颗粒间摩擦因数是影响休止角的重要参数^[6]。L. C. R Schneider 等人研究了 7 种药粉在药片成形模腔填料过程中质量转移,认为平均充填质量可表示为料仓移动速度的幂函数^[7]。EN Nwose 等人研究了空气和静电对灌装速度的影响^[8]。李兴尚等人模拟了垮落研石注浆充填等动态发展过程^[9]。Y. Guo 等人分析了 2 种粒度混合物料在灌装过程中的偏析规律^[10]。就量杯式颗粒充填计量过程来看,实质上就是大量颗粒物料运动转移的过程,根据 DEM 对非连续单元的假设与运动描述可以看出,运用此方法有助于理解物料转移过程的物理本质,从而使得在解决量杯规格、工艺制定等问题时,实现对预期充填量和计量精度的精确预估成为可能。

1 过程分析与模型建立

1.1 充填计量过程

量杯式容积计量装置结构见图 1,计量转盘 2 上周向均布 4~6 个量杯,量杯 3 为轴对称形状,其规格可以依据计量要求替换,依靠活门 5 封堵下口构成一定容积的空腔。在重力场下,当量杯 3 随计量转盘 2 绕转盘主轴 7 回转:物料由料斗 1 进入量杯 3,完成填充过程;当该量杯转至设置在挡板上的卸料位置时对应活门,物料落入后续封包装置从而实现计量。此过程中,在重力、空气阻力、物料与腔壁的摩擦力和运动部件的机械力等共同作用下,颗粒会出现自由跌落、碰撞、碾压等现象,往往也会发生颗粒的破碎。这些现象可理解为颗粒物料体系在载荷作用下的机械能、声能和热能等之间的能量转化。

不计颗粒破碎等现象,能量变化直观地表现为颗粒的运动与重排,即颗粒在其平衡状态破坏后获得初始速度,之后在颗粒间、颗粒与墙壁间相互接触碰撞后,动能发生传递耗散、位姿发生改变,颗粒群从一稳



1. 料斗 2. 计量转盘 3. 量杯 4. 护罩 5. 活门 6. 粉袋 7. 转盘主轴

图 1 量杯式容积计量示意

Fig. 1 Diagram of measuring cup filling

态向另一稳态变化^[11]。当颗粒不发生接触时,势能转化为动能过程中受空气阻力作用产生能量损耗;接触过程中,动能的损耗主要由碰撞、应变和摩擦等方式体现。

忽略转盘主轴的极限转速、结构间隙或离心力等导致的卸料是否彻底、物料散落、破碎等引起的计量变化^[12-13],当量杯恰好离开料斗口时,把由料斗迁移出的物料质量或颗粒数目当作计量依据,质量波动反映了该量杯在相应物料和充填工艺下的计量精度变化。

1.2 模型建立

DEM 采用刚体颗粒的动态模型,颗粒接触时的应变由颗粒间或与边界墙的重叠量表示,假定颗粒之间的作用力与它们之间的相对位移量成正比,然后应用牛顿力学建立单元的运动方程,计算颗粒单元不同步时的力-位移状态。结合充填计量过程分析所描述的物理现象,引入粘性阻尼和摩擦阻尼等耗能装置^[14-15],建立颗粒之间或颗粒与墙的接触模型,见图 2。

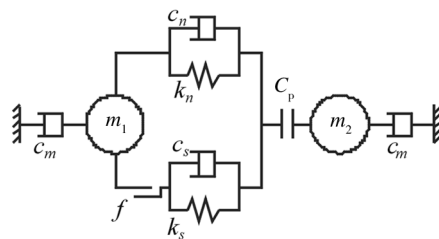


图 2 接触模型

Fig. 2 Contact model

图 2 中, C_p 为接触状态检测装置; m_1, m_2 为参与接触的 2 个单元质量(单元 2 为边界墙时 m_2 为无穷大,不考虑对应阻尼的影响); f 为摩擦因数; k_n, k_s, c_n 和 c_s 为系统的等效刚度和刚度阻尼系数(n 为法向, s

为切向,下同); c_m 为质量阻尼系数。当 C_p 为检测单元间无接触时,单元只受重力和空气阻力作用;当 C_p 为检测单元间存在接触时,单元除了受到空气阻力的影响,法向和切向阻尼也同时作用于颗粒接触过程,和 f 一起消耗动能。

对于 2D 计算模型,带有由阻尼系数 c_m 附加的阻尼力的运动方程可表示为式(1)。

$$F_{(i)}-c_m|F_{(i)}|\text{sign}(\dot{u}_{(i)})=\begin{cases}m\ddot{x}_{(i)} & (i=1,2) \\ I\ddot{\omega}_{(i)} & (i=3) \end{cases}$$

(1)

式中: $\ddot{x}_{(i)}$, $\ddot{\omega}_{(i)}$ 和 $F_{(i)}$ 分别为单元的平动加速度、角加速度和不平衡力; m, I 分别为单元的质量和转动惯量; $\text{sign}(x)$ 为符号函数; $\dot{u}_{(i)}$ 为广义速度; i 为颗粒自由度,其值为 1,2 时表示平动,为 3 时表示转动。

单元间接触时,由法向和切向阻尼器形成的阻尼力 D_i 可表示为式(2)。

$$\begin{cases} D_i=c_i|V_i| \\ c_i=b_i c_i^{\text{crit}}=b_i\cdot 2\sqrt{mk_i} \end{cases} \quad (i=n,s)$$

(2)

式中: c_i 为阻尼系数; V_i 为接触处法向(切向)相对速度; c_i^{crit}, m 和 k_i 分别为系统临界阻尼比、等效质量和等效刚度; b_i 为阻尼比(无量纲)。

同时,当单元接触并发生滑动时,摩擦力 $P_d=fF_n$ 给单元附加一个与切向相对速度相反的作用力,随相对位移的增加而逐步消耗单元动能。

2 仿真与实验

依据颗粒在重力堆积这一动态过程中所形成的休止角,通过离散元方法试算以确定某些不易测定的颗粒力学参数,以便分析充填过程和计量精度。

2.1 堆积与休止角

重力堆积过程中势能转化为动能,且随着气阻、碰撞和摩擦等发生,动能逐渐耗损,最终颗粒趋于静止,堆积成堆。此时,颗粒物料的边坡与水平面的夹角称为休止角,该角度是颗粒物质较易测量的一个重要参数。

小米颗粒经过筛、扬尘等处理以尽可能地抑制粒径分布和麸皮等杂质的影响,通过固定高度的锥形料斗,堆积结果见图 3a,休止角约为 34.9° 。采用等径 2D 圆盘,按试算得到见表 1 所列参数模拟堆积过程,

仿真结果见图 3b,休止角约为 34.7° 。

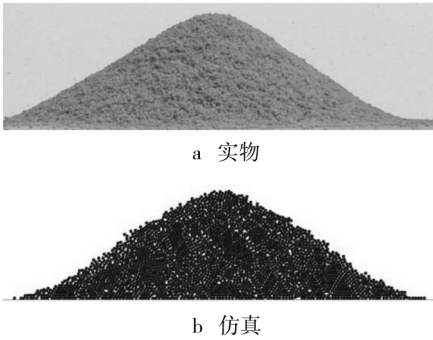


图 3 小米堆积
Fig. 3 Millet stack

表 1 仿真参数

Tab. 1 Main parameters of simulation		
参数	数值	
粒径/mm	1.4	
密度/(kg·m ⁻³)	1400	
k_i /(N·m ⁻¹)	颗粒	1.0×10^5
	边界	1.0×10^8
f	颗粒-颗粒	0.75
	颗粒-边界	0.35
i	颗粒-颗粒	0.5
	颗粒-边界	0.8
c_m	0.1	

由图 4 所示的堆积过程中的颗粒速度分布可以看出,随着堆积高度的增大,内部颗粒趋于静止,颗粒的运动表现为表面流,与实际的堆积过程相符,结合实物和仿真测得的休止角,可以认为相关参数的选取具有一定的合理性和现实意义。

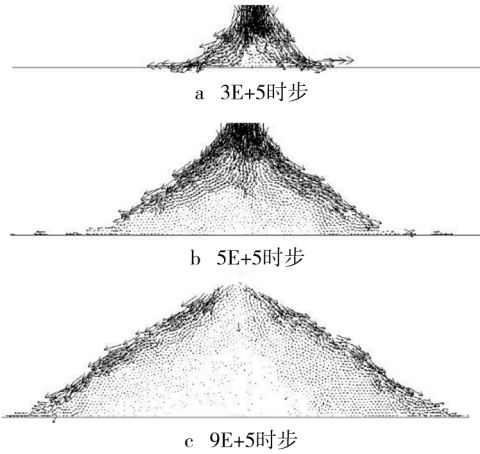


图 4 堆积过程的速度分布
Fig. 4 Velocity distribution in stacking process

2.2 充填计量

采用图 1 所示的结构为实验装置,周向均布 6 个 $\phi 26\text{ mm}\times 17\text{ mm}$ 量杯,沿量杯轴线所在圆柱面展成 2D 形式,根据结构尺寸和装填速度折算量杯轴线的线速度约为 150 mm/s ,6 个量杯依次充填并循环 4 次,采用表 1 所列参数,进行 DEM 计算,记录每次充填过程中从料斗转移出的颗粒数量,见表 2。

表 2 仿真结果
Tab.2 Simulation results

杯号	循环			
	1	2	3	4
1	238	239	232	237
2	239	235	236	235
3	235	240	233	238
4	234	240	238	235
5	236	237	232	231
6	240	238	233	233

由于假设颗粒为刚性、不可破碎的,见图 5a,当量杯相对料斗口沿箭头方向运动时,颗粒逐渐填入量杯,颗粒间相互挤压流动,会在迎着量杯运动方向一侧的料斗壁处形成一个较大的作用力。当量杯逐渐移出料斗口时,可能会出现某 1 个和几个颗粒恰好被夹在量杯与料斗之间而处于一个“极端”平衡状态,该颗粒承受着极大的挤压力作用而不破碎,甚至影响时步混乱,导致量杯出现“静止”不动的状态,见图 5b。当该挤压力释放时,该颗粒会瞬间获得极大的能量向已填入量杯的颗粒撞击,从而导致颗粒飞溅,影响计量的准确性和计算的正常进行,见图 5c。因此,仿真计算过程中,针对可能出现此种情况区域内的颗粒,需要检测其速度或受力情况,超出某个限度应予以修正。

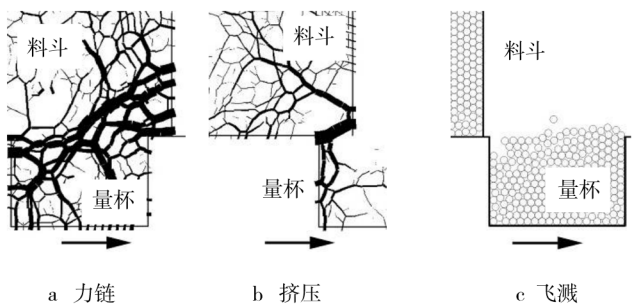


图 5 异常受力
Fig.5 Abnormal force

采用该装置作实物实验,充填并计量 36 次,经天平测量记录数据(数据精度 0.001),见图 6。

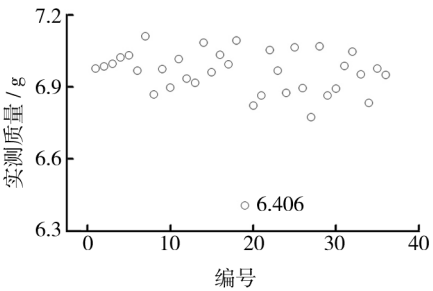


图 6 实测结果
Fig.6 Experiment results

3 分析

表 2 所列数据为无量纲的颗粒数目,而图 5 所记录的数值单位为 g,而且数据的数量级也存在差异,2 组数据不便直接考察。若将 3D 充填空间看作由若干 2D 薄片拼合而成,假设每片薄片具有相似的空隙率分布,则 2D 计量的数目乘以某一常量 k 就可表示为实际计量质量,相应的该系列数值的均值和标准方差也缩放了 k 倍,从而实现对 2 组数据直接分析。其中常数 k 可由密度和空隙率等表征。然而,实际的堆积填充下,2D 和 3D 颗粒的空隙率(或填充率)之间的关系较为复杂,影响假想切片的厚度,因而实际确定常数 k 是较为困难的。

通常情况下,颗粒充填计量包装装置多以相对误差 δ 表征充填设备的计量精度,相对误差表示为:

$$\delta = \frac{x_i - \bar{x}_i}{\bar{x}_i} \times 100\% \tag{3}$$

式中: x_i 为计量观察值; $\bar{x}_i$ 为观察值均值。由式(3)可见相对误差与常数 k 无关。若使用相对误差方式对仿真和实验数据进行标准化处理,则能消除 2 组数据间因量纲与数量级差别而带来的影响,便于数据的比较与分析。

2 组数据都可认为是分别在不同条件下实施等精度测量的结果,一般而言,计量精度(相对误差)应服从正态分布规律。对标准化处理后的 2 组数据作箱图分析可知编号 19 的实测数据(6.406 g)异常,予以剔除,见图 7。剔除异常数据后 2 组数据统计量描述见表 3。

对 2 组数据作 Lilliefors 和 Shapiro-Wilk 正态性检验,见表 4。结果显示仿真与实测数据的检验统计

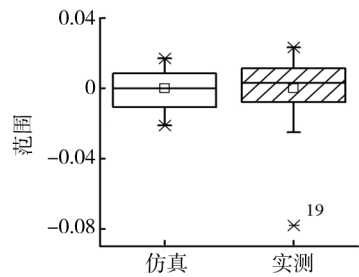


图 7 箱图分析
Fig. 7 Box analysis

表 3 统计量描述
Tab.3 Descriptive statistics

分组	N	极小值	极大值	均值		标准差
				统计量	标准误	
仿真	24	-0.021	0.017	0	0.0239	0.0117
实测	35	-0.027	0.021	0	0.0202	0.0119

表 4 正态性检验
Tab.4 Normality tests

	Lilliefors			Shapiro-Wilk		
	统计量	df	Sig.	统计量	df	Sig.
实测	0.089	35	0.200	0.979	35	0.732
仿真	0.140	24	0.200	0.945	24	0.209

量相伴概率均大于 0.05,表明 2 组数据样本均不拒绝服从正态分布的假设。

当接受两者均符合正态分布的假设时,采用独立样本 T 检验方法,在显著性水平 0.05 下对 2 组数据总体分布一致性作显著性检验,检验结果见表 5。结果表明,2 组数据采样总体不存在显著差异,也就是说 2 组数据具有统计意义上的一致性。

表 5 独立样本 T 检验结果
Tab.5 Independent-sample T test

	F	Sig.	t	df	Sig. (双侧)
方差相等	0.039 *	0.843 *	0.000	57	1
方差不相等			0.000	50.163	1

注: * 为方差方程的 Levene 检验。

即便认为 2 组数据采样总体分布特征不一定服从正态分布,当采用 K-S 和 Moses 非参数检验方法,检验 2 个独立样本观察值的散布范围是否有差异存在,也可推断 2 个样本是否具有相同分布的总体或来自于同一总体,检验统计量见表 6。

表 6 非参数检验
Tab.6 Nonparametric tests

K-S		Moses			
Z	Sig. (双侧)	跨度	Sig. (单侧)	截头 跨度	Sig. (单侧)
0.445	0.989	54	0.209	51	0.460

表 6 的数据表明,在显著性水平 0.05 上,2 组数据不存在显著差异,因而也可以认为 2 个样本的总体具有较显著的一致性。

4 结语

通过对小米颗粒在堆积和充填过程中的物理现象分析,以较易实现的堆积实验试算反演出颗粒的主要仿真参数,仿真休止角为 34.7°,与实测的 34.9°吻合。结合试验用的颗粒充填装置,仿真模拟获取了 24 个充填样本数据,并对比实际充填计量的 36 样本,以相对误差标准化数据以消除不同数据间的量纲和数量级差异。采用 Lilliefors、T 检验和 K-S 等典型统计检验方法分析得知,仿真与实验数据吻合较好,可以认为以相对误差表征的仿真和实验数据样本总体相同或来自同一总体。结果表明,DEM 方法可用于量杯式计量的充填过程和精度分析;构建的包含质量阻尼和刚度阻尼的颗粒接触模型与颗粒在填充、堆积过程中的主要物理现象较为一致;可考虑采用测算堆积休止角的方法来反演颗粒细观参数,为填充过程中的参数设定提供可靠依据。

参考文献:

[1] 马蕾,田怀文.一种自动计量装置设计研究[J].机械设计与制造,2013(6):21—23.
MA Lei, TIAN Huai-wen. Design Study of a Automatic Measuring Equipment [J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(6):21—23.
[2] 呼英俊,刘志平,钱继春.食用碘盐容积可测量杯式计量装置的研制[J].天津轻工业学院学报,2002(3):44—46.
HU Ying-jun, LIU Zhi-ping, QIAN Ji-chong. Research on Adjustable Volume Dosing-cup Type Metering Device for Edible Iodize Salt[J]. Journal of Tianjin University of Light Industry, 2002(3):44—46.
[3] 周祖瀛.定量秤综述[C]//称重科技——第九届称重技

- 术研讨会论文集,2010:194—205.
- ZHOU Zu-lian. Review of Quantitative Weigher [C]// Weighing Technology Symposium of the 9th Weighing Technology Proceedings,2010:194—205.
- [4] ZHONG Wen-zhen, HE Ke-jing, XIA Wei, et al. Research on the Energy Conversion in the Packaging Process of Spherical Particles [J]. Sci Tech Engng, 2009, 9 (7): 1880—1882.
- [5] 徐泳,孙其诚,张凌,等. 颗粒离散元研究进展[J]. 力学进展,2003,33(2):251—260.
- XU Yong, SUN Qi-cheng, ZHANG Ling, et al. Advances in Discrete Element Methods for Particulate Material [J]. Advances in Mechanics, 2003, 33 (2): 251—260.
- [6] 李艳洁. 堆积问题的离散元模拟—实验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- LI Yan-jie. The Experimental-simulative Study on the Granular Piling Using the Discrete Element Method [D]. Beijing: China Agricultural University, 2005.
- [7] SCHNEIDER L C R, SINKA I C, COCKS A C F. Characterisation of the Flow Behaviour of Pharmaceutical Powders Using a Model Die-shoe Filling System [J]. Powder Technology, 2007, 173 (1): 59—71.
- [8] NWOSE E N, PEI C, WU C Y. Modelling Die Filling with Charged Particles Using DEM/CFD [J]. Particology, 2012, 10 (2): 229—235.
- [9] 李兴尚, 许家林, 朱卫兵, 等. 垮落矸石注浆充填体压实特性的颗粒流模拟[J]. 煤炭学报, 2008, 33 (4): 373—377.
- LI Xing-shang, XU Jia-lin, ZHU Wei-bing, et al. Simulation of Backfill Compaction Character by Particle Flow Code [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33 (4): 373—377.
- [10] GUO Y, WU C Y, KAFUI K D, et al. 3D DEM/CFD Analysis of Size-induced Segregation During Die Filling [J]. Powder Technology, 2011, 206 (1/2): 177—188.
- [11] 孙其诚, 厚美瑛, 金峰, 等. 颗粒物质物理与力学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- SUN Qi-cheng, HOU Mei-ying, JIN Feng, et al. Particulate Matter Physics and Mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [12] 袁华祥, 潘坡. 颗粒型全自动包装机计量转盘极限转速的分析计算[J]. 包装工程, 2007, 28 (2): 75—76.
- YUAN Hua-xiang, PAN Po. Analysis and Calculation of Rev Limit of Measurement Turnplate of Pellet Full-automatic Packaging Machine [J]. Packaging Engineering, 2007, 28 (2): 75—76.
- [13] 杜文华, 赵慧文, 段能全, 等. 一种颗粒包装机摆动式充填机构的设计[J]. 包装工程, 2013, 34 (3): 77—79.
- DU Wen-hua, ZHAO Hui-wen, DUAN Neng-quan, et al. Design of a Swing-type Filling Device of Particle Automatic Packaging Machine [J]. Packaging Engineering, 2013, 34 (3): 77—79.
- [14] 杨洋, 唐高寿, 王居林. 颗粒离散元法中阻尼系数、刚度系数和时步的选取方法[J]. 计算机辅助工程, 2007, 16 (3): 65—68.
- YANG Yang, TANG Shou-gao, WANG Ju-lin. Selection Methods on Damping Coefficient, Stiffness Coefficient and Time Step in Granular Distinct Element Method [J]. Computer Aided Engineering, 2007, 16 (3): 65—68.
- [15] 周国庆, 周杰, 陆勇, 等. 颗粒流程序(PFC^{2D})中阻尼参数的适用性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40 (5): 667—671.
- ZHOU Guo-qing, ZHOU Jie, LU Yong, et al. Selection of Damping Parameters Used in a Particle Flow Code (PFC^{2D}) [J]. Journal of China University of Mining Technology, 2011, 40 (5): 667—671.

(上接第66页)

- [12] 谢逸泉. 利用有限元分析软件 ANSYS 计算轴的刚度[J]. 现代机械, 2005 (1): 55—56.
- XIE Yi-quan. ANSYS Finite Element Analysis Software to Calculate the Stiffness of the Shaft [J]. Modern Machinery, 2005 (1): 55—56.
- [13] 曹风利, 薛孟君. 基于有限元的坦克变速箱体模态分析[J]. 装甲兵工程学院学报, 2004 (4): 38—40.
- CAO Feng-li, XUE Meng-jun. Modal Analysis of Gearbox for Tank Based on Finite Element [J]. Armored Force Engineering Academy Journal, 2004 (4): 38—40.
- [14] YIN W L. Free-edge Effects in Anisotropic Laminates under Extension, Bending and Twisting, Part I: A Stress Function-based Variational Approach [J]. ASME Journal of Applied Mechanics, 1994, 61 (2): 410—415.
- [15] YIN W L. Free-edge Effects in Anisotropic Laminates under Extension, Bending and Twisting, Part I: A Stress Function-based Variational Approach [J]. ASME Journal of Applied Mechanics, 1994, 61 (2): 410—415.