

文章编号: 1004-7220(2019)04-0352-06

粉碎机管腔内肝脏颗粒堆积流动过程的接触参数

岳艳丽^{1,2}, 李文卓¹, 柴永生¹, 李岩¹, 牟玲龙¹, 殷守民¹, 刘希宽¹, 王琦¹

(1. 烟台大学机电汽车工程学院, 山东烟台 264005; 2. 海军航空大学航空基础学院, 山东烟台 264001)

摘要:目的 实现肝脏组织颗粒离散元模型接触参数的标定。方法 基于 MATLAB 图像处理技术, 测量肝脏组织颗粒的堆积角; 采用“Hertz-Mindlin with JKR”接触模型对肝脏组织颗粒进行堆积角的仿真试验, 以滚动摩擦系数和 JKR 表面能作为因素设计正交试验; 采用批处理方法标定接触模型的参数, 将结果中最优参数组合进行二次仿真标定验证。结果 物理试验所得到的堆积角为 $11.2^{\circ} \pm 0.86^{\circ}$, 正交试验中第 6 组参数组合得到的堆积角为 11.8° , 相对误差为 5.1%, 即物理试验与仿真试验在堆积角度和形状上具有较高的相似性; 影响堆积角的因素顺序依次为: 组织颗粒与不锈钢板之间 JKR 表面能 > 组织颗粒与不锈钢板之间滚动摩擦系数 > 组织颗粒与组织颗粒之间 JKR 表面能 = 组织颗粒与组织颗粒之间滚动摩擦系数。结论 可利用该优化参数对生物组织开展进一步的组织颗粒与粉碎机间的离散元仿真, 从而揭示组织颗粒在肌瘤粉碎机作用下的流动堆积状态。

关键词: 肝脏; 堆积流动; 接触参数; 粉碎机

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2019.04.003

Contact Parameters of Liver Particle Accumulation Flow in the Cavity of a Pulverizer

YUE Yanli^{1,2}, LI Wenzhuo¹, CHAI Yongsheng¹, LI Yan¹, MOU Linglong¹, YIN Shoumin¹, LIU Xikuan¹, WANG Qi¹

(1. School of Electromechanical Engineering, Yantai University, Yantai 264005, Shandong, China; 2. Aeronautical Basic Institute, Naval Aeronautical University, Yantai 264001, Shandong, China)

Abstract: Objective To calibrate contact parameters of liver tissue discrete element model. **Methods** Based on MATLAB image processing technology, the accumulation angle of liver tissues was measured. The ‘Hertz-Mindlin with JKR’ contact model was used to simulate the accumulation angle of liver tissues. The orthogonal experiment was designed with the coefficient of rolling friction and the energy of JKR surface as factors. The parameters of the contact model were calibrated by batch processing, and the optimal parameter combination was verified by secondary simulation calibration. **Results** The accumulation angle obtained by the physical test was $11.2^{\circ} \pm 0.86^{\circ}$. In the orthogonal experiment, the accumulation angle of the 6th set of parameter combinations was 11.8° , and the relative error was 5.1%. The simulation test and the physical test had a high similarity in accumulation angle and shape. The sequence of factors affecting the accumulation angle was the JKR surface energy between the tissue particles and the stainless steel plate > the rolling friction coefficient between the tissue particles and the stainless steel plate > the JKR surface energy between the tissue particles and the tissue particles = the rolling friction coefficient between the tissue particles and the tissue particles. **Conclusions** The optimization parameter could be used to further conduct the discrete element simulation between the tissue particles and the pulverizer, so as to reveal the accumulation and flow state of the tissue particles under the action of myoma pulverizer.

Key words: liver tissues; accumulation flow; contact parameters; pulverizer

收稿日期: 2018-07-17; 修回日期: 2018-08-25

基金项目: 烟台大学 2018 年研究生科技创新基金重点项目 (YDZD1804), 山东省自然科学基金博士基金 (ZR2018BEE022)

通信作者: 李文卓, 教授, 博士研究生导师, E-mail: lwzytu@163.com

腹腔镜手术中的电动肌瘤粉碎机是一种带管状刀片的能量器械,配有各种附件。工作时,高速旋转的刀片将标本袋内的组织标本粉碎成颗粒,然后将其经腹部切口取出,从而达到微创的目的。然而,目前电动肌瘤粉碎机旋切完后需要再手动拉出来,不能自动往外输送,给医生增加了手术工作量,并且拉动的过程中会造成标本袋与切口的摩擦或对切口的扩张等,引起相关的并发症^[1-3]。为解决这一问题,改进肌瘤粉碎器的结构设计迫在眉睫。设计一种能够在旋切组织的同时向外输送组织颗粒的粉碎机,首先需要了解组织颗粒在粉碎机中的流动堆积性能。

本文采用离散单元法研究组织颗粒堆积流动过程中的接触参数。离散元仿真中参数可以分为3类:①物性参数,包括密度、泊松比和剪切模量。物性参数与材料本身的性质有关,比较固定,且已进行了深入研究。Sedef等^[4]通过在体压痕试验测量猪肝的材料属性、松弛时间常数、剪切模量等参数。②接触参数,包括碰撞恢复系数、静摩擦系数以及滚动摩擦系数,目前尚未见明确报道,一般需进行试验或虚拟标定。③模型参数,通常采用虚拟试验进行标定,利用离散元软件进行物料参数的虚拟试验。例如,堆积角试验通过不断调整参数,使模拟出来的物料特性与真实情况一致,则认为该离散元模型参数是准确的。

本研究采用具有颗粒间黏结力的“Hertz-Mindlinwith JKR”接触模型,进行组织颗粒的堆积角试验,确定组织颗粒的接触模型参数,为进一步研究组织颗粒与粉碎器的关系提供参考,有助于肌瘤粉碎器的设计与创新^[5]。

1 材料与方法

1.1 试验材料

所用生物软组织为新鲜猪肝组织,材料均从市场获取,冷藏运输至实验室,保证组织离体时间不超过4 h^[6]。由于设计的肌瘤粉碎机直径为20 mm,为保证组织在粉碎机管腔内顺利通过,螺旋管输送机端部进料口加料的物料粒度小于螺旋直径的1/4^[7]。因此,将肝脏组织用手术刀切割成粒径为4~5 mm的颗粒。

1.2 堆积角物理试验方法

散状物料在堆放时能够保持自然稳定状态的最大角度(单边对地面的角度),称为堆积角^[8]。采用侧壁坍塌法,将方形容器置于不锈钢薄板上,填充一定体积的肝脏组织颗粒,静置后将一侧的挡板突然撤去,容器中的组织颗粒将会从此侧面发生坍塌形成堆积角。得到肝脏组织颗粒堆积形态后,应用MATLAB图像处理技术测出堆积角大小^[9]。

首先,利用MATLAB读取肝脏组织堆积角图像,并将其进行二值化处理;搜索图像边界,选取并进行线性拟合,获取拟合方程,得到方程斜率 k 。最终堆积角测定公式为:

$$\theta = \frac{\arctan |k| \times 180^\circ}{\pi} \quad (1)$$

1.3 堆积角虚拟试验方法

1.3.1 接触模型选取 由于试验对象为新鲜猪肝组织颗粒,颗粒之间具有黏性,故考虑具有颗粒间黏结力的“Hertz-Mindlin with JKR”接触模型^[10](见图1)。图1中, k_n 和 d_n 分别为法向刚度和阻尼; k_t 和 d_t 分别为切向刚度和阻尼; k_r 和 d_r 分别为滚动刚度和阻尼; g 为颗粒重力; F_{JKR} 为颗粒间法向弹性接触力。该模型考虑到接触区域中范德华力的影响,允许用户模拟黏性的系统^[11],例如干燥的粉末或湿颗粒。

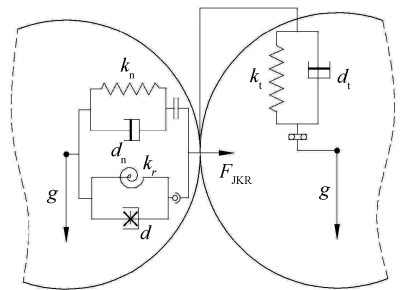


图1 “Hertz-Mindlin with JKR”接触模型

Fig.1 ‘Hertz-Mindlin with JKR’ contact model

JKR法向弹性接触力 F_{JKR} 基于重叠量 δ 和相互作用参数、表面能量 γ ,即:

$$F_{JKR} = -4\sqrt{\pi\gamma E^*} a^{\frac{3}{2}} + \frac{4E^*}{3R^*} a^3 \quad (2)$$

式中: F_{JKR} 为JKR法向弹性接触力; γ 为表面张力; E^* 为当量弹性模量; R^* 为当量半径; a 为切向重叠量。

法向重叠量 δ 与切向重叠量 a 之间的关系为:

$$\delta = \frac{a^2}{R^*} - \sqrt{\frac{4\pi\gamma a}{E^*}} \quad (3)$$

该模型提供吸引凝聚力,即使颗粒并不是直接接触。颗粒间具有非零凝聚力的最大间隙通过下列公式计算:

$$\delta_c = \frac{a_c^2}{R^*} - \sqrt{\frac{4\pi\gamma a_c}{E^*}} \quad (4)$$

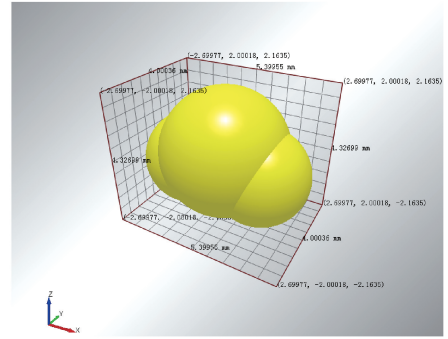
$$a_c = \left[\frac{9\pi\gamma R^{*2} \left(\frac{3}{4} - \frac{1}{\sqrt{2}} \right)}{2E^*} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

式中: δ_c 为颗粒间具有非零凝聚力的最大间隙; a_c 为颗粒间具有非零凝聚力的切向最大间隙。当 $\delta < \delta_c$, 模型返回 0。当颗粒并非实际接触并且间隔小于 δ_c 时,凝聚力达到最大。该最大凝聚力称为 pull-out force, 即:

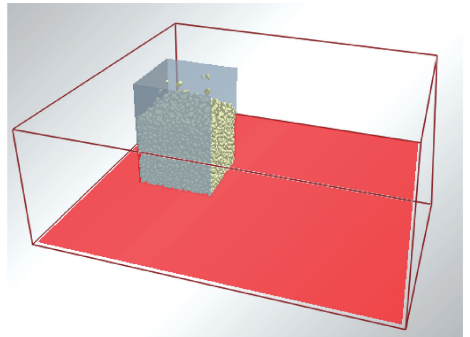
$$F_{\text{pullout}} = -\frac{3}{2}\pi\gamma R^* \quad (6)$$

1.3.2 几何模型建立 在 EDEM 2.7 软件中建立堆积角虚拟试验几何模型。打开软件,在前处理器中创建全局变量,将已知的物性参数和接触模型参数填入相关的选项中,在颗粒模式下,建立组织颗粒模型。由于新鲜肝脏组织比较湿滑、质地软,很难切割成标准的立方体,棱角也不是很明显,故在建模时选择使用不同球心、不同大小圆球所组成的不规则形状作为模型。为保证颗粒尺寸尽量符合实际情况,在软件中设置颗粒尺寸为标准大小的 0.8~1.2 倍[见图 2(a)]。在几何模式下,建立 1 个长、宽、高分别为 75、75、100 mm 方形容器模型,并将其静置于不锈钢板上。在工厂模式下建立颗粒工厂,将一定体积的颗粒物料填充于方形容器中,待颗粒静置后,去掉方形容器的一个侧面。在模拟求解器中,点击仿真开始,容器中的肝脏颗粒将从此侧发生坍塌,从而形成堆积角[见图 2(b)]。

1.3.3 模型参数确定 在 EDEM 中,设置肝脏组织的泊松比、剪切模量、密度分别为 0.499、10 kPa、1.052 kg/m³, 不锈钢的泊松比、剪切模量、密度分别为 0.25、10 GPa、7.85 kg/m³; 肝脏组织颗粒之间的碰撞恢复系数、静摩擦系数分别为 0.01、0.41, 肝脏组织颗粒与不锈钢之间的碰撞恢复系数、静摩擦系数分别为 0.01、0.37; 滚动摩擦系数待标定。



(a) 肝脏组织颗粒



(b) 堆积角虚拟试验

图2 堆积角几何模型建模

Fig.2 Modeling for geometric model of accumulation angle (a) Liver tissue particles, (b) Virtual test of accumulation angle

由于滚动摩擦系数难以通过试验获得,故利用 EDEM 材料数据库(Generic EDEM material model database, GEMM)来查找其取值范围。GEMM 由英国 DEM Solution 公司于 2015 年推出,是世界上首个离散元颗粒模型数据库,包含了数千种具有代表性的颗粒物料,如岩石、土壤、矿石等^[10]。将肝脏组织堆积角试验中测得的堆积角与密度输入 GEMM 数据库中,便可获得材料滚动摩擦系数的参考值范围为 0.02~0.20;而对于肝脏组织这种含湿颗粒,所应用的是具有 JKR 凝聚力的赫兹-梅德林模型(Hertz-Mindlin with JKR Cohesion),需要用 JKR 表面能来表征其凝聚力大小。通过数据库得到 JKR 表面能的参考值范围为 0~0.01 J/m²。

1.3.4 参数标定试验设计 得到滚动摩擦系数和 JKR 表面能的参考值范围后,采用正交试验对其进行参数标定设计。以堆积角作为指标,以肝脏组织颗粒与不锈钢板间滚动摩擦系数(A)、肝脏组织颗粒与肝脏组织颗粒间滚动摩擦系数(B)、肝脏组织颗粒与不锈钢板间 JKR 表面能(C)和肝脏

组织颗粒与肝脏组织颗粒间 JKR 表面能(D)作为因素,设计并开展四因素、三水平的正交试验(见表 1)。

表 3 正交因素和水平表

Tab.3 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素			
	A	B	C	D
1	0.05	0.05	0.000 1	0.000 1
2	0.10	0.10	0.000 5	0.000 5
3	0.15	0.15	0.001 0	0.001 0

2 结果与讨论

2.1 物理试验结果

肝脏组织颗粒从方形容器的一侧面发生坍塌,形成堆积角,其堆积形态如图 3 所示。



(a) 装满肝脏颗粒的方形容器

(b) 形成堆积角

图 3 堆积角物理试验

Fig.3 Physical test of accumulation angle (a) A square container filled with liver particles, (b) Formation of accumulation angle

图 4 所示为经过图像处理技术实现的肝脏组织颗粒堆积角测量过程,采取图像像素点为坐标点, x 、 y 分别代表水平和垂直像素点,不具有实际量纲。将 5 组肝脏组织堆积轮廓采用最小二乘法拟合出线性方程(见表 2),该方程能够描述图像轮廓的线性趋势,根据式(1)能够计算出各组堆积角,取其平均值作为具有实际意义的堆积角大小。

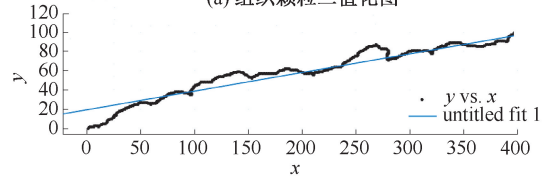
采用同样的方法,5 次重复堆积角试验过程所得到的计算值分别为 10.8° 、 12.6° 、 11.1° 、 10.3° 及 11.2° ,均值为 11.2° ,标准偏差为 0.86° ,即试验所得肝脏组织颗粒的堆积角为 $11.2^\circ \pm 0.86^\circ$ 。

2.2 仿真试验结果

在 EDEM 2.7 中利用批处理实例对 9 种排列组合进行仿真实验进行处理。仿真结束后,在后处理器中利用剪切功能对组织堆进行切片处理,然后根



(a) 组织颗粒二值化图



(b) 组织颗粒轮廓线及线性拟合图

图 4 肝脏组织颗粒堆积角数值测量

Fig.4 Numerical measurement for accumulation angle of liver tissues

(a) Two-value diagram of tissue particles,

(b) Tissue particle contour line and linear fitting diagram

表 2 堆积角数值测量结果

Tab.2 Numerical results of accumulation angle

组序号	拟合方程	斜率	堆积角/ $(^\circ)$
1	$y=0.19x+19.54$	0.19	10.8
2	$y=0.22x+25.01$	0.22	12.6
3	$y=0.20x+18.75$	0.20	11.1
4	$y=0.18x+22.30$	0.18	10.3
5	$y=0.19x+24.23$	0.20	11.2
平均值	—	0.20	11.2

据量角器测量出各排列组合中堆积角的数值,试验因素组合及仿真结果见表 3。

表 3 堆积角仿真试验设计及结果

Tab.3 Simulation test design and results of accumulation angle

序号	因素				堆积角/ $(^\circ)$
	A	B	C	D	
1	0.05(1)	0.05(1)	0.000 1(1)	0.000 1(1)	13.6
2	0.05(1)	0.10(2)	0.000 5(2)	0.000 5(2)	—
3	0.05(1)	0.15(3)	0.001 0(3)	0.001 0(3)	—
4	0.10(2)	0.05(1)	0.000 5(2)	0.001 0(3)	14.8
5	0.10(2)	0.10(2)	0.001 0(3)	0.000 1(1)	—
6	0.10(2)	0.15(3)	0.000 1(1)	0.000 5(2)	11.8
7	0.15(3)	0.05(1)	0.001 0(3)	0.000 5(2)	—
8	0.15(3)	0.10(2)	0.000 1(1)	0.001 0(3)	12.4
9	0.15(3)	0.15(3)	0.000 5(2)	0.000 1(1)	12.9

2.3 结果讨论

对比仿真结果与物理试验结果发现,第 6 组的参数组合仿真得出的堆积角与试验值最为接近,较真实试验所得的堆积角误差为 5.1% (见图 5)。从堆积形态上来看,两者也基本相似,但仿真所得到的组织堆形态较真实试验在坡面的平滑性

上有细微差别,这源于真实试验情况的组织颗粒形状更为多样,而仿真中组织颗粒形状完全相同,只是粒径大小有所区别。该结果表明,采用离散元法结合图像处理技术预测颗粒物料的堆积角是可行的。

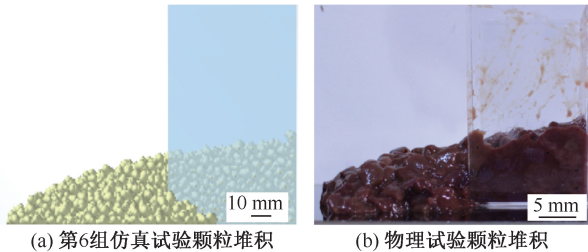


图5 仿真试验与物理试验堆积形态图

Fig.5 Stacking shape diagram of simulation test and physical test

- (a) Particle accumulation in the 6th group of simulation test,
(b) Particle accumulation in physical test

表4中的 $h_j(j=1,2,3)$ 代表对应各指标的算数平均值, R 为对应各水平的极差^[12]。由极差分析结果可知,影响堆积角的因素顺序依次为:组织颗粒与不锈钢板间JKR表面能对堆积角的影响最大,组织颗粒与不锈钢板间滚动摩擦系数次之,而组织颗粒与颗粒间JKR表面能和组织颗粒与颗粒间滚动摩擦系数对堆积角的影响最小且影响大小一致,即 $C>A>D=B$ 。

表4 极差分析结果

Tab.4 Results of range analysis

影响因素	指标				主次
	h_1	h_2	h_3	R	
堆积角	A	13.6	13.3	15.5	2.2
	B	14.2	12.4	12.4	1.8
	C	12.6	13.9	—	13.9
	D	13.3	11.8	13.6	1.8

3 二次标定验证

为了进一步验证第6组参数为最佳组合,采用空心筒法对肝脏组织颗粒进行堆积角仿真试验。

空心筒法是在底部敞开的圆筒中填充一定体积的颗粒物料,静置后缓慢向上提升圆筒,颗粒从圆筒底部逐步漏出形成堆积角。圆筒规格根据预测颗粒的粒径确定^[13]。圆筒直径应至少大于组织颗粒最大粒径的4~5倍,圆筒高径比一般为3:1。因为肝脏组织颗粒的粒径为4~5 mm,故圆筒参数

确定为直径25 mm,高度75 mm。在EDEM 2.7中的几何模式下建立一个圆筒模型,去掉底面,将其平稳放置在不锈钢板上。在颗粒工厂中将一定体积的肝脏组织颗粒填充于圆筒中,将组织颗粒与圆筒间的滚动摩擦系数和JKR表面能参数设置为正交试验排列组合中的第6组参数,待组织颗粒在圆筒中静置后,以缓慢的速度向垂直于不锈钢板的正向移动,组织颗粒会逐步流出,从而形成颗粒堆(见图6)。

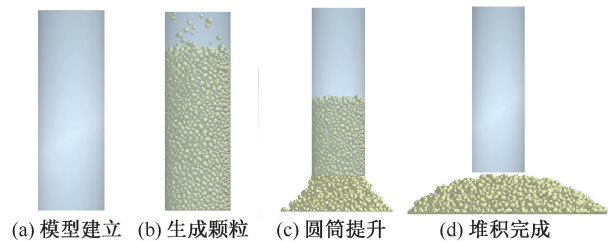


图6 肝脏组织颗粒堆积模拟过程

Fig.6 Simulation of particle accumulation in liver tissues

- (a) Modeling, (b) Particle formation, (c) Lifting cylinder,
(d) Stacking completion

待颗粒堆稳定后,测量空心筒法所形成的单侧堆积角为 10.8° ,与侧面坍塌法所形成的堆积角非常接近,误差仅为3.6%。比较图5(a)与图6(d),可以看出通过两种堆积角测量方法所得到的颗粒堆积形态基本类似,进一步证明正交试验排列组合中第6组参数为仿真的最佳参数组合。

4 结论

本文在Hertz理论的基础上考虑了含湿颗粒间凝聚力对颗粒运动状态的影响,以此模型作为接触模型对肝脏组织颗粒进行堆积角仿真试验,实现了肝脏组织颗粒离散元参数的标定。借助GEMM数据库并结合正交试验法对EDEM参数设置进行校准,得到校准参数水平组合,缩小了参数标定范围,避免了标定试验的盲目性,提高了标定效率^[14]。由此,可得出如下结论:

- (1) 基于MATLAB图像处理技术,对肝脏组织颗粒的堆积角进行测量,物理试验所得到的堆积角为 $11.2^\circ \pm 0.86^\circ$ 。
- (2) 正交试验中第6组参数组合得到的堆积角为 11.8° ,与物理试验结果的相对误差为5.1%,且

仿真试验与物理试验在堆积角度和形状上具有较高的相似性。因此,最优参数组合为组织颗粒与不锈钢板之间滚动摩擦系数 0.10,组织颗粒与组织颗粒之间滚动摩擦系数 0.15,组织颗粒与不锈钢板之间 JKR 表面能 10^{-4} ,组织颗粒与组织颗粒之间 JKR 表面能 5×10^{-4} 。

(3) 由极差分析结果可知,滚动摩擦系数和 JKR 表面能参数对颗粒的流动性具有显著影响,使组织切块具有不同的堆积形态。影响堆积角的因素顺序依次为:组织颗粒与不锈钢板之间 JKR 表面能 > 组织颗粒与组织颗粒之间滚动摩擦系数 > 组织颗粒与组织颗粒之间 JKR 表面能 = 组织颗粒与组织颗粒之间滚动摩擦系数。

因此,本研究参数可为腹腔镜手术中组织颗粒与肌瘤粉碎机间相互作用的进一步离散元仿真提供依据,从而揭示组织颗粒在肌瘤粉碎机作用下的堆积流动状态。

参考文献:

- [1] HUTCHINS FL, REINOEHL EM. Retained myoma after laparoscopic supracervical hysterectomy with morcellation [J]. *Am Assoc Gynecol Laparosc*, 1998, 5(3): 293-295.
- [2] COURSIERE DY, KENNEDY J, HOFFMAN CP. Retained fragments after total laparoscopic hysterectomy [J]. *J Minim Invasive Gynecol*, 2005, 12(1): 67-69.
- [3] LIENG M, ISTRE O, BUSUND B, *et al.* Severe complications caused by retained tissue in laparoscopic supracervical hysterectomy [J]. *Minim Invasive Gynecol*, 2006, 13(3): 231-233.
- [4] SEDEF M, SAMUR E, BASDOGAN C, *et al.* Visual and haptic simulation of linear viscoelastic tissue behavior based on experimental data [C]// *Proceedings of the 14th Symposium on Hepatic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems*. Alexandria: [s.n.], 2006: 201-208.
- [5] 徐泳,孙其诚,张凌,等. 颗粒离散元法研究进展 [J]. *力学进展*, 2003, 33(2): 251-260.
- [6] 董红建,张勤河,刘明,等. 生物软组织超弹性及夹持过程仿真分析 [J]. *医用生物力学*, 2017, 32(4): 313-318.
- [7] DONG HJ, ZHANG QH, LIU M, *et al.* Hyperelasticity of biological soft tissues and simulation analysis on the clamping process [J]. *J Med Biomech*, 2017, 32(4): 313-318.
- [8] 李彦. 基于螺旋输送机的设计计算 [J]. *湖南农机*, 2014, 41(9): 55-57.
- [9] 韩燕龙,贾富国,唐玉荣,等. 颗粒滚动摩擦系数对堆积特性的影响 [J]. *物理学报*, 2014, 63(17): 173-179.
- [10] 贾富国,韩燕龙,刘扬,等. 稻谷颗粒物料堆积角模拟预测方法 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30(11): 254-260.
- [11] 武涛,黄伟凤,陈学深,等. 考虑颗粒间黏结力的黏性土壤离散元模型参数标定 [J]. *华南农业大学学报*, 2017, 38(3): 93-98.
- [12] JOHNSON KL, KENDALL K, ROBERTS AD. Surface energy and the contact of elastic solids [J]. *Proc R Soc London A*, 1971, 324(1558): 301-313.
- [13] 盛伟,纪爱敏,陈长胜,等. 基于正交试验的股骨干骨折内固定系统螺钉布局的参数化研究 [J]. *医用生物力学*, 2018, 33(1): 62-69.
- [14] SHENG W, JI AM, CHEN CS, *et al.* Parametric study on screw layout of internal fixation system of femoral shaft fracture based on orthogonal experiment [J]. *J Med Biomech*, 2018, 33(1): 62-69.
- [15] 吴爱详,孙业志,刘湘平. 散体动力学理论及其应用 [M]. 北京:冶金出版社,2002.
- [16] 夏鹏,李郁,杨公波. 散粒物料堆积角离散元仿真研究 [J]. *起重运输机械*, 2015(2): 107-110.