物理学报 Acta Physica Sinica

圆锥料仓内颗粒周期性脉动特征研究

王会 贾富国 韩燕龙 张亚雄 曹斌

Cyclical pulsation properties of particles in cone silo

Wang Hui Jia Fu-Guo Han Yan-Long Zhang Ya-Xiong Cao Bin

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 66, 014501 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.014501 在线阅读 View online: http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.014501 当期内容 View table of contents: http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I1

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

水平激励下颗粒物质的有效质量及耗散功率的研究

Effective mass spectrum and dissipation power of granular material under the horizontal and vertical excitation

物理学报.2016, 65(23): 234501 http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.234501

类固态颗粒物质的剪切弹性行为测量

Measurement of shear elasticity of granular solid 物理学报.2016, 65(12): 124501 http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.124501

基于离散元方法的颗粒材料缓冲性能及影响因素分析

Buffer capacity of granular materials and its influencing factors based on discrete element method 物理学报.2016, 65(10): 104501 http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.104501

倾斜沙漏流与颗粒休止角研究

Inclined glass-sand flow and the angle of repose 物理学报.2016, 65(8): 084502 http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.084502

垂直载荷下颗粒物质的声波探测和非线性响应

Acoustic detection and nonlinear response of granular materials under vertical vibrations 物理学报.2016, 65(2): 024501 http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024501

圆锥料仓内颗粒周期性脉动特征研究^{*}

王会 贾富国† 韩燕龙 张亚雄 曹斌

(东北农业大学工程学院,哈尔滨 150030)

(2016年6月4日收到; 2016年10月14日收到修改稿)

料仓卸料过程中的颗粒脉动会引起料仓振动甚至导致结构失效.为了明晰颗粒脉动特征,本文进行了椭 球颗粒在不同半锥角深仓的模拟卸料实验,将料仓圆筒部划分为4个固定区域以研究区域内颗粒的运动信息, 分析了料仓圆筒部颗粒系统的运动特征.研究结果表明:整个卸料过程颗粒速度始终处于波动变化中,卸料 前期表现为大振幅、周期性的剧烈脉动,卸料后期平均速度的变化则是小振幅无规律的波动;剧烈脉动时段各 区域的颗粒层平均受力的变化规律与颗粒速度脉动特征相似,越接近储料顶端颗粒脉动振幅越大,表现出更 规律的周期性脉动,相邻颗粒层间的脉动波形相似且周期相同,剧烈脉动过程中顶面颗粒呈周期性的自由落 体运动,该时段内顶层颗粒每一次的自由落体运动都会引起该范围内颗粒间接触力消失;料仓半锥角越小时 剧烈脉动频率越高、振幅越大且脉动持续时间也越长,卸料速度越稳定,且颗粒速度不会出现带有上升趋势的 波动.研究结果可为卸料设备的安全设计提供参考.

关键词:料仓,卸料,颗粒脉动,接触力 PACS: 45.50.-j, 83.80.Fg, 02.60.Cb

DOI: 10.7498/aps.66.014501

1引言

颗粒物质是由大量单体颗粒相互作用而形成 的复杂系统^[1],往往表现出类固-类液的运动特 性^[2],常被视作除固、液、气之外的第四态物质,激 起了国内外研究者的广泛关注.颗粒物质的密集流 动^[3]、二元混合^[4]、堆积^[5]、结拱堵塞^[6]等更是研 究的热点和难点.在食品工程、农业工程、化学工 程、岩土力学等领域都会遇到颗粒物质的加工、运 输以及贮存等问题^[7-10].散体的运动表现出显著 的"散"和"动"的特性,其"动"是指散体运动过程 中的瞬态、碰撞、波动和破碎等特性^[11].作为贮存 散体物质的主要设备,料仓卸料属于典型的散体流 动问题.料仓内颗粒物质的波动性主要体现在卸料 率^[12]、颗粒速度^[13]、应力场^[14]和加速度等^[15]方 面,颗粒的脉动常常引起称为"料仓音乐"和"料仓 振动"的动态效应^[16-20],甚至导致料仓结构失效.

早期, Phillip^[16]进行了沙子在平底料仓内的 卸料试验, 卸料口打开后, 上方沙子向下的运动 表现出了间歇性的运动特性,即使在料仓内加 入部分水银、部分沙子,自由表面处沙子的向下 运动也是间歇性的, 甚至上自由表面以下的部分 颗粒发生运动分离现象,颗粒的这种运动特性在 Li和Kwauk^[17]的试验中也得到了验证. Yang和 Hsiau^[18] 通过试验和二维数值模拟的方法研究 楔形料仓内的颗粒流型,在装填和卸料的过程中 观察到了由动态拱引起的脉动现象. Brown和 Richards^[19]在试验研究中指出卸料时料仓出口处 会形成2 Hz的短暂振动现象. 沙子在有机玻璃管 中流动时 Teichman 和 Gudehus^[20]发现了颗粒脉 动及其引起的料仓振动的现象,其研究结果表明料 仓初始振动频率为25-40 Hz,随着储料高度的下 降上升至60-80 Hz. 前人的研究表明存在临界储 料高度,当储料高度大于临界高度时则会因为颗粒

© 2017 中国物理学会 Chinese Physical Society

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 51575098)、黑龙江省自然科学基金(批准号: E201322)和哈尔滨市优秀学科带头人基金(批准号: RC2013XK006004)资助的课题.

[†]通信作者. E-mail: jfg204@163.com

脉动而产生料仓振动. Mukesh和Kranthi^[21]进行 了底部装有活塞的试管实验,结果表明颗粒下落速 度在较小的范围内时,临界高度随着颗粒下落速度 的增大而降低.同时研究者指出料仓的自然频率 可能会对颗粒的脉动频率造成影响,甚至引起共 振. Benson 等^[22]进行了碎玻璃和玻璃球等材料在 不同自然频率料仓内的卸料试验,实验结果表明, 料仓出料口的大小对颗粒脉动频率没有影响:颗粒 的摩擦等特性直接决定是否会发生料仓振动; 当料 仓自然频率小于25 Hz时,颗粒脉动频率与自然频 率无关,当其自然频率大于25 Hz时,脉动频率与 其呈正相关关系, 这表明材料摩擦特性和料仓结构 对料仓内颗粒脉动频率有影响. 在其他类似的研 究中, Tejchman^[23]指出脉动出现与否也受到环境 因素的影响,如温度、湿度、静电特性.有研究也指 出颗粒脉动的产生是由料仓内流动的颗粒如何从 压缩密实状态到松散释放状态所决定的^[22].颗粒 脉动和料仓振动的原因也与颗粒物质滑移特性相 关^[24,25].

大量具有争议性的研究结果并没有给料仓设 计者一个简单的模型理解脉动产生的物理机理,受 到实验手段和方法的限制,大多数研究依然集中在 噪声、影响因素等表面现象上,料仓内各局部范围 内的颗粒脉动特征以及各区域间的运动联系仍未 得到合理解释;计算机技术的发展和离散元法的进 步为这项研究的深入带来了可能,为揭示颗粒系统 受力、料仓局部如何作用于整个颗粒系统并最终引 起颗粒脉动提供了行之有效的方法.

本文基于离散元法模拟了椭球颗粒在圆锥料 仓内的卸料试验.旨在通过颗粒速度脉动和受力的 变化探究颗粒脉动产生的机理,剖析料仓内各区域 颗粒脉动特征的相关性和差异,探求料仓半锥角对 颗粒脉动的影响规律,揭示颗粒系统与局部间的运 动联系.

2 离散元模型

2.1 颗粒与料仓的离散元模型

本文模拟所用颗粒原型为稻谷脱壳后的糙米, 糙米颗粒体积较小,外形结构复杂,为了简化模 型,研究者将糙米视为对称的椭球体^[26].测量取 平均值后得出椭球颗粒长半轴为3.5 mm,短半轴 1.4 mm,使用"球元填充法"对糙米颗粒建模,椭 球颗粒二维模型及在 EDEMTM 中完成后的模型如 图1所示. 糙米物理特性参数与前期研究^[26] 相同, 具体值参见表1.

适宜仓储的糙米含水率较低,颗粒间不存在表面液桥力,所以视糙米颗粒为非黏性体,并假设颗粒在运动过程中力、位移、速度等变化是由颗粒与接触体碰撞时产生的微小形变引起的.基于以上假设和推论,选择Hertz-Mindlin作为力学接触模型,将法向方向的Hertz理论和Mindlin的无滑动模型结合在一起,该模型兼顾颗粒材料的弹性和非弹性特性,将碰撞力分解为切向力和法向力两个方向的力,属于弹簧与阻尼并联的形式.该力学模型适用于糙米^[26],力学接触模型如图2所示.

基于该接触模型计算颗粒相互接触时的受力, 颗粒*i*主要受力为自身重力*m_ig*和颗粒间法向碰撞 接触力*F*_n、切向碰撞力*F*_t.根据牛顿第二定律,每 个颗粒的运动方程为

$$m_i \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{u}_i}{\mathrm{d}t} = m_i \boldsymbol{g} + \sum_{j=1}^{n_i} (\boldsymbol{F}_{\mathrm{n}} + \boldsymbol{F}_{\mathrm{n}}^{\mathrm{d}} + \boldsymbol{F}_{\mathrm{t}} + \boldsymbol{F}_{\mathrm{t}}^{\mathrm{d}}). \quad (1)$$

此外,作用在颗粒上的切向力还会引起切向力矩和 滚动摩擦力矩:

$$I_i \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\omega}_i}{\mathrm{d}t} = \sum_{j=1}^{n_i} \left(\boldsymbol{T}_{\mathrm{t}} + \boldsymbol{T}_{\mathrm{r}} \right), \qquad (2)$$

式中, F_n^d 为法向阻尼, F_t^d 为切向阻尼, T_t 为切向 力矩, T_r 滚动摩擦力矩、 I_i 为颗粒转动惯量, n_i 为与 颗粒i接触的颗粒总数, u_i 为颗粒速度, ω_i 为颗粒 角速度. 该模型的详细分析和计算见文献[1].





Fig. 1. The model of brown rice particle: (a) Two dimensional model of brown rice particle; (b) three dimensional model of brown rice in $EDEM^{TM}$.

表 1 仿真中所用到的颗粒和料仓的物理特性 Table 1. The parameters of brown rice and silo in simulation.

参数	数值
糙米泊松比	0.25
糙米与糙米恢复系数	0.6
不锈钢泊松比	0.29
糙米与不锈钢恢复系数	0.5
糙米弹性模量/MPa	375
糙米与糙米静摩擦系数	0.3
不锈钢弹性模量/MPa	75000
糙米与不锈钢静摩擦系数	0.5
糙米密度/kg·m ⁻³	1350
时间步长/s	1.35×10^{-6}
糙米与糙米滚动摩擦系数	0.01

圆锥料仓是应用最广泛的贮存设备,通常由 圆柱部分和料斗部分组成,圆柱部分的高度和直 径的比值称为高径比,高径比大于1.5的料仓称为 深仓^[27],深仓结构已被证实更易发生由颗粒脉动 引起的料仓振动问题^[22];通过圆锥料斗轴截面上 料斗中心轴线和母线间的角度称之为半锥角,如 图3所示. 料斗半锥角直接影响料仓内颗粒流型是 整体流还是漏斗流,通常认为45°是两种流型转变 的临界角度.为了探究料仓半锥角对颗粒脉动特 征的影响,本研究设计了7组料仓模型,其中料仓 圆筒部结构全部相同,料斗半锥角分别为30°,35°, 40°, 45°, 50°, 55°, 60°. 料仓材料为不锈钢, 高径 比2.5:1,料仓直径100mm,规定圆筒部和料斗结 合处为储料高度的零点,方向向上为正值,料仓具 体结构尺寸详见图3, 仿真中涉及到有关料仓的参 数见表1.









基于离散元软件 EDEMTM,颗粒工厂设置在 圆筒部 250 mm 处,颗粒受重力作用以"落雨法"^[2] 在料仓内自然堆积,颗粒初始速度为零,储料高度 达到 200 mm 时,关闭颗粒工厂,颗粒总数约 38000. 静置 1 s 以使颗粒完全静止,后打开卸料口,颗粒在 重力作用下流出料仓,直至卸料完成.EDEMTM 仿 真每隔 0.01 s 自动记录每个颗粒的位置、速度、能 量等信息.在计算机的配置为两个 Xeon 2620 v2 CPU、内存为 24 GB 的情况下,一组仿真所需花费 时间约为 96 h.

2.2 速度波动分析方法

关于料仓内颗粒流动的研究中,通常提取料斗部分的颗粒速度以研究颗粒的流型^[28],然而料斗部颗粒速度大,还伴随着不断形成和崩塌的动态拱^[29],这为研究的开展带来了一定的困难.所以本文选择提取相对稳定的圆筒部内颗粒速度以研究颗粒脉动特性.

若**u**_{zi}表示圆筒部内第*i*个颗粒沿重力方向的 速度,该时刻圆筒部内所有颗粒的平均速度*ū*为

$$\bar{u} = \frac{1}{n} \sum_{1}^{n} \boldsymbol{u}_{z_i}.$$
(3)

一定时间段t内圆筒部颗粒的平均速度ū'为

$$\bar{u}' = \frac{1}{t} \sum_{0}^{\iota} \bar{u}.$$
(4)

通常采用标准偏差评定数据的离散程度,本文 采用标准偏差σ定量的评价平均速度波动程度,以 表征颗粒的脉动特性.平均速度的标准偏差求法见 (5)式.

$$\sigma = \sqrt{\sum_{j=1}^{t} \frac{(\bar{u}_j - \bar{u}')^2}{t - 1}},$$
(5)

式中t为采样总步时步, \bar{u}_j 表示在卸料j时刻的平均速度.

3 颗粒平均速度波动研究

3.1 不同储料高度上颗粒平均速度脉 动特征

为了揭示料仓内颗粒的纵向脉动特征和颗粒 层与层间脉动的联系,提取了四个不同储料高度和 顶面上层颗粒的平均速度进行归纳和分析,本文颗 粒速度提取方法分为两种,一种是固定几何区域获 得各个时刻下该区域内颗粒的平均速度;另一种 是追踪选中颗粒的速度. 平均速度方向为重力方 向,四个固定的位置分别为0-20,20-40,60-80, 100-120 mm, 分别称之为区域1, 2, 3, 4, 如图3所 示.顶部颗粒为选中的上自由表面以下20 mm范 围的颗粒,以消除随着卸料进行储料高度逐渐降低 带来的影响.以半锥角为60°的实验为例,依据(3) 式提取每个时刻下不同储料高度的颗粒平均速度, 总体提取时间长度为3.5 s, 3.5 s时储料高度已下降 至147 mm,此时顶面颗粒未发生明显的漏斗流现 象,亦未与其他高度范围内的颗粒发生重合,数据 波动相对稳定,结果如图4—图8所示. 卸料过程 中颗粒速度波动表现出两种显著不同的波形,前期 表现的是规律的、大振幅的周期性脉动,称其为剧 烈脉动时段;另一种是无规律、小振幅的非周期性 波动,称其为无规律波动时段.本文将以剧烈脉动 时段为主要研究对象以表征颗粒系统和各区域内 颗粒脉动特性及其相互联系.

卸料口打开后,区域1内颗粒平均速度逐渐上 升,平均速度升至20 mm/s左右时开始出现稳定波 动,速度波动范围约15—25 mm/s,双峰和多峰几 乎遍布整个波动过程,颗粒速度变化属于无规律的 波动,不存在稳定的波动周期.

相对最底层颗粒,区域2内颗粒平均速度上升 较慢,平均速度升至17.5 mm/s左右时开始出现波 动,速度波动范围约10—25 mm/s,相对区域1颗 粒速度波动更大,波动过程中开始出现少量的周期 性波动,双峰和多峰在波动过程中明显减少. 区域3内颗粒平均速度波形与区域2相似,振 幅变大,0.5—1.7 s内平均速度出现规律的周期性 波动,波峰波谷清晰可辨且双峰和多峰较少.

区域4内颗粒平均速度升至10 mm/s左右时 便开始出现波动,速度波动范围约5—35 mm/s, 平均速度最小达到0 mm/s,波动振幅大于底层 颗粒,0.5—1.7 s内平均速度出现规律的周期性波 动,该阶段几乎不存在双峰和多峰,0.5—1.7 s和 1.7—3.5 s表现出两种显著不同的波形.



图 4 区域 1 内颗粒平均速度随时间的变化 Fig. 4. The velocity variation with time of particles in area 1.



图 5 区域 2 内颗粒平均速度随时间的变化 Fig. 5. The velocity variation with time of particles in area 2.



图 6 区域 3 范围内颗粒平均速度随时间的变化 Fig. 6. The velocity variation with time of particles in area 3.





Fig. 7. The velocity variation with time of particles in area 4.



图 8 顶面 20 mm 范围内颗粒平均速度随时间的变化 Fig. 8. The velocity variation with time of particles in top of the storage.

顶层被选中的颗粒平均速度波动表现出两类 显著不同的波形, 0.5—1.7 s内平均速度振幅很大, 波动范围为0—50 mm/s, 是各高度上平均速度振 幅最大的区域, 该阶段速度的波谷值多次接近于 0 mm/s, 最大速度50 mm/s, 且双峰和多峰不再出 现, 波峰波谷清晰可辨, 可直接统计速度波动在该 阶段的脉动频率. 2—3.5 s 平均速度依然是无规律 的波动, 波峰波谷难以辨识, 1.7—2 s 平均速度处于 过渡期, 该阶段峰值基本可以辨识, 亦存在相对稳 定的周期, 但相比前一阶段振幅较小, 最小值亦未 达到0 mm/s.

以上结果表明, 越接近储料顶端, 颗粒脉动越 剧烈, 越表现出规律的周期性脉动. 卸料过程中颗 粒速度波动具有两种显著不同的波形, 卸料前期颗 粒速度逐渐上升, 升至一定程度后开始出现大振幅 的稳定波动, 属于典型的周期性波动; 周期性波动 之后表现出无规律的波动, 后期颗粒平均速度的变 化更倾向于随机过程. 上层颗粒速度的变化与下方 毗邻颗粒层速度波形变化相似, 但表现出更大幅度 和更规律的周期性变化, 这表明料仓内各颗粒层之 间存在必然的联系,但彼此间的运动又不尽相同, 料仓内颗粒脉动具有逐渐向上传递且在传递过程 中脉动特征被逐渐放大的特性.

在0—3.5 s 的卸料时间段内越接近储料顶端颗 粒层的平均速度越小,如图9所示.这主要是因为 出料口在底部,靠近出料口的颗粒率先流出料仓, 上部的颗粒不可能超越下方的颗粒流率先出料仓, 所以,虽然顶部颗粒脉动最剧烈、速度振幅很大,但 该时段内其平均速度是各颗粒层中最小的.

更深层次的颗粒层受力的变化是产生颗粒脉 动的根源,本文提取了各高度的颗粒层料仓轴线方 向(z轴)上受力(含重力)的变化,以平均受力表示 颗粒层的受力,如图10所示.从图10中更能清晰 地观察到相邻颗粒层间波动波形相似且周期相同, 各处的颗粒在卸料过程中均表现出与速度脉动相 一致的周期性脉动,其中顶部颗粒受力波动最大, 每一个最小值几乎都接近重力值,这也表明在脉动 过程中顶部颗粒发生了自由落体运动,与重力相反 方向的受力的最大值远大于重力,这是因为顶层颗 粒在振荡的过程中与毗邻层颗粒恢复接触时会受 到的方向向上的巨大的反作用力,底层颗粒向下或 向上的运动都会受到相邻颗粒层的阻碍,顶部的颗 粒则不会受到更上层颗粒的阻碍,所以相对而言顶 面颗粒层拥有更高的自由度,这导致了在脉动过程 中顶层颗粒受到重力方向上的力更大以及速度脉 动比下层颗粒脉动更剧烈. 从能量的角度讲, 底部 的颗粒的能量变化并不能全部体现在自身的运动, 而是要向上传递给颗粒系统,最终由顶部颗粒将该 运动变化更大程度地表现出来.



图 9 0—3.5 s内各区域颗粒的平均速度 Fig. 9. The average velocity of particles at different height during 0–3.5 s.





Fig. 10. (color online) The variation of force with time on the direction of z-axis of particle layers.

颗粒系统不连续的特性使得颗粒层与层间的 运动表现出显著的差异,如不同储料高度的颗粒层 速度脉动程度的差异;而各单体之间的相互作用 又使彼此的运动相互联系,如颗粒层间速度脉动波 形相似且脉动周期相同.这表明颗粒系统运动是 复杂的系统工程问题,该系统限制单体颗粒在整体 运动中的波动,又允许单体或局部群体表现出独立 的运动特征.图10中所示顶层颗粒周期性的自由 落体运动而引起的顶层颗粒间接触力消失现象,如 图11所示.

卸料过程中颗粒状态如图 11 所示. 图 11 (a) 中 颗粒以正常模式显示, 卸料时刻为0.77 s; 图 11 (b) 不显示颗粒, 仅显示颗粒间的接触力, 卸料时刻与 图 11 (a) 相同, 图 11 (b) 中紫色线条表示颗粒间的 法向接触力, 线条越粗、颜色越深表示接触力越大, 线条越密集表示颗粒间接触力更集中; 图 11 (c) 中 只显示接触力, 卸料时刻为0.78 s.

图 11 (a) 中未见任何异常, 正常卸料过程料仓 内接触力结构如图 11 (c)(静态堆积时与此相似)所 示,可以看出,圆筒部颗粒间接触力分布相对均匀, 底部接触力较上部略密集。在观察动态卸料过程 颗粒间接触力结构变化时,发现了上自由表面以下 一定范围内的颗粒间接触力消失现象,如图 11 (b) 所示.

经过细致观察和统计,发现该现象发生在卸料开始后不久,发生接触力消失的范围通常为储料顶部颗粒,该范围约为30—50 mm,较小时仅有10 mm,最大范围约80 mm,单次持续时间基本为

0.01 s, 有时大于 0.01 s 但小于 0.03 s. 卸料前期的 大振幅周期性波动时段内, 顶层颗粒的每一次自由 落体运动都会引起接触力消失现象.

颗粒脉动会导致料仓振动,带来安全隐患和 "料仓音乐"的噪音污染,Benson等^[22]的研究指出 卸料前期颗粒加速度表现为大振幅的规律性脉动, 当储料高度下降到临界高度^[21]后便不再发生料仓 振动,卸料后期则表现为小振幅的波动,加速度的 这种变化与本文中颗粒受力变化规律相一致,由此 可以判断本文中剧烈脉动时段即是料仓振动的时 段,甚至可能引起"料仓音乐".



图 11 (网刊彩色)接触力消失现象对比示意图 (a) 0.77 s 显示颗粒模式时的卸料状态; (b) 0.77 s 显示颗粒间接触力时的 卸料状态; (c) 0.78 s 显示颗粒间接触力时的卸料状态

Fig. 11. (color online) The comparison diagram of contact force disappearance phenomenon: (a) The discharging state by displaying particles at 0.77 s; (b) the discharging state by displaying contact force among particles at 0.77 s; (c) the discharging state by displaying contact force among particles at 0.78 s.

3.2 半锥角对颗粒系统脉动特征的影响

以上研究揭示了不同高度上颗粒层的脉动特 征和层与层间运动的联系和差异,但是为了明晰颗 粒系统整体的脉动特性,旨在分析不同半锥角下颗 粒系统的整体运动变化,本文对圆筒部所有颗粒的 平均速度随时间的变化进行了研究.

依据(3)式得出的卸料过程中圆筒部颗粒平均 速度变化如图12所示,图中红色曲线为移动平均 曲线,周期为30.为了尽量减小移动平均值的滞后 性并相对精确的描述平均速度值,本文采用前后各 取15个值将求取的平均值作为第16个数据值.从 平均速度围绕移动平均曲线的波动可以看出,颗粒 系统平均速度波动与上文顶部颗粒层脉动特征相 似,颗粒速度在整个卸料过程都处于波动状态,约 0.5—2 s期间平均速度波动振幅较大,该阶段曲线 波峰波谷可明显辨识,经统计该段亦存在较稳定的 周期,本文称该阶段为剧烈脉动时段(图12中第II 段),而之后的平均速度曲线波动振幅较小,双峰甚 至多峰时常出现,峰值难以辨识,属于无规律波动, 无法统计颗粒脉动周期,本研究称该时段为无规律 波动时段(图12中第IV段).

在7组不同半锥角卸料实验中,颗粒平均速度 变化都出现了剧烈脉动时段,这也意味着7组卸料 实验都发生了周期性接触力消失现象.为了清晰地 对比料仓半锥角对剧烈脉动时段内的速度波动的 影响,本文取半锥角为30°,45°,60°的三组卸料实 验剧烈脉动时段内1s的数据进行直观的比较分析, 如图13—图15所示.

对比图 13—图 15 可以看出,随着半锥角的增 大,颗粒平均速度逐渐减小,相应的振幅也在变小, 这表明随着半锥角的增大颗粒脉动的幅度减小;半 锥角为 45°和 60°时平均速度随着时间的变化有增 大的趋势,如图中红色线性趋势线所示,半锥角为 30°时基本没有增大趋势.所以可得出结论:半锥 角较小时颗粒平均速度随着时间相对稳定,基本不 会出现增大的趋势,但相应的速度值更大,颗粒脉 动更剧烈;另一方面对比三组速度波动曲线可发 现,随着半锥角的增大,速度曲线波峰或波谷出现 的次数明显减小,这意味随着半锥角的增大颗粒脉



图 12 (网刊彩色) 半锥角为 60° 的料仓卸料时颗粒平均速度的变化

Fig. 12. (color online) The velocity variation with time of the test with 60° half-cone angle.



图 13 (网刊彩色) 半锥角 30° 时 1 s 内平均速度随时间的变化

Fig. 13. (color online) The enlarged view of velocity variation with time during 1 s of the test with 30° half-cone angle.



图 14 (网刊彩色) 半锥角 45° 时 1 s 内平均速度随时间的变化

Fig. 14. (color online) The enlarged view of velocity variation with time during 1 s of the test with 45° half-cone angle.





Fig. 15. (color online) The enlarged view of velocity variation with time during 1 s of the test with 60° half-cone angle.

动的频率逐渐降低(后文将继续探讨). 这表明料仓 半锥角较小时虽然卸料速率稳定,卸料速率随卸料 进行未出现图14和图15所示的显著上升趋势,但 料仓内颗粒速度较大,速度波动幅度更大且频率 更高.

3.3 脉动评价

为了定量地评价不同半锥角时剧烈脉动时段 内速度的波动程度差异,我们提取了各组仿真实验 剧烈脉动时段1s时间内的速度求取其标准差,以 表征半锥角对剧烈脉动时段的影响,标准差既能体 现脉动振幅的大小,也能表征速度波动的频率差异 (相同数量和幅值的数据点,频率越大标准差越大). 然而,速度随时间的波动存在明显的上升趋势,如 图13—图15中的线性趋势线所示.这与标准差的 定义是不相符的,不能够准确评价数据的波动.为 此我们对原始速度数据进行差分处理再求取标准 差,图12所示数据经差分后得到的曲线见图16,经 该处理后,数据基本围绕0刻度线上下波动,这意 味着平均值基本不变,差分处理未改变数据波动的 周期,波动大的数据处理后振幅依然保持较大值, 这也更利于清晰地观察颗粒平均速度的脉动特征, 处理后求取的标准差见图17.

图 17 表明标准差随着半锥角的增大而减小, 其中 30°—45°时标准差减小较快,45°—60°标准 差降低缓慢,这可能是因为通常45°被认为是整体 流向漏斗流转变的临界角度.

为了评定整个卸料过程中颗粒系统的脉动强度,此处亦采用上述差分的方法求取整个卸料过程 中速度波动的标准差.不同半锥角时平均速度的标 准差结果见图 18,可见随着半锥角的逐渐增大,平 均速度标准偏差逐渐减小.这主要是因为具有较 大振幅的剧烈脉动时段的持续时间和波动振幅都 随着半锥角的增大而减小.这表明料仓半锥角较 小时,料仓内颗粒脉动更剧烈,这种变化趋势定量 地表征了半锥角对颗粒脉动程度的影响规律,能为 料仓设计者提供依据,即料仓半锥角较小时虽然卸 料流畅稳定,但是仓体受到物料的冲击更大且更频 繁,所以设计者选用较小半锥角时应适当增大仓体 强度.



图16 差分后示意图

Fig. 16. The schematic diagram of velocity variation with time of the test with 60° half-cone angle after difference processing.



图 17 剧烈脉动时段 1 s 内平均速度的标准差随半锥角的 变化

Fig. 17. The standard deviation variation with halfcone angle during 1 s of intense pulsation stage.



Fig. 19 十世用和弦触力相入频中的影响 Fig. 19. The influence of half-cone angle on pulsation frequency of intense pulsation stage.

研究发现,只有在剧烈脉动时段(如图12中第 II段)内才会发生接触力消失现象,该时段速度波 动的波峰波谷可明显辨识,波动振幅较大且存在稳 定周期,所以我们以各组卸料试验的相似时段为对 象,研究料仓半锥角对该现象发生频率和持续时间



图 18 整个卸料时段内平均速度的标准偏差随半锥角的 变化

Fig. 18. The standard deviation variation with halfcone angle during the whole discharging process.



图 20 半锥角对接触力消失持续时间的影响 Fig. 20. The influence of half-cone angle on duration of intense pulsation stage.

(亦是剧烈脉动时段颗粒脉动频率及剧烈脉动时段 持续时间)的影响.如图 19 和图 20 所示,接触力消 失现象发生的频率以及持续的时间随着半锥角的 增大而减小,其中剧烈脉动持续时间在 40° 到 45° 时下降明显.

4 结 论

1) 卸料开始后圆筒部下层颗粒速度整体表现 为无规律、小振幅的脉动特征,达到某一临界高度 的料层在开始的数秒内表现为大振幅剧烈脉动,越 接近顶端颗粒脉动幅度越大,表现出更规律的周期 性脉动,之后与下层颗粒速度波动特征相似.

2)卸料过程中颗粒重力方向上的受力也存在 周期性的变化,颗粒受力变化与速度脉动特征相 似;剧烈脉动时段内顶层颗粒呈周期性的自由落体 运动,每一次自由落体运动都会引起顶层颗粒间接 触力消失现象.

3)颗粒速度脉动随着料仓半锥角的增大而频 率降低、振幅减小,剧烈脉动时段持续的时间也变 短,且在半锥角小于45°之前上述特征下降较快; 颗粒速度随着料仓半锥角增大表现为逐渐上升的 波动.

参考文献

- Wang G Q, Hao W J, Wang J X 2010 Discrete Element Method and its Application in EDEM (Xi'an: Xi'an Technological University press) p14 (in Chinese) [王国 强,郝万军, 王继新 2010 离散单元法及其在 EDEM 上的实 践 (西安:西安工业大学出版社) 第 14 页]
- [2] Sun Q C, Hou M Y, J F 2011 Physics and Mechanics of Granular Materials (Beijing: Science Press) p242 (in Chinese) [孙其诚, 厚美瑛, 金峰 2011 颗粒物质物理与力学 (北京: 科学出版社) 第 242 页]
- [3] Khalilitehrani M, Abrahamsson P J, Rasmuson A 2014 Powder Technol. 263 45
- [4] Liu Y, Han Y L, Jia F G, Yao L N, Wang H, Shi Y F 2015 Acta Phys. Sin. 64 114501 (in Chinese) [刘扬, 韩 燕龙, 贾富国, 姚丽娜, 王会, 史字菲 2015 物理学报 64 114501]

- [5] Chan K W, Kwan A K H 2014 Particulogy 16 108
- [6] Ouyang H W, Huang S C, Liu Z M, Wang Q 2009 Rare Met. Mater. Eng. 07 1310 (in Chinese) [欧阳鸿武, 黄誓 成, 刘卓民, 王琼 2009 稀有金属材料与工程 07 1310]
- [7] Nathalie J, Albert D, Jean P P 2009 J. Food Eng. 91 118
- [8] Liu H X, Xu X M, Guo L F 2014 Trans. Chin. Soc. Agric. Eng. 21 9 (in Chinese) [刘宏新, 徐晓萌, 郭立峰 2014 农业工程学报 21 9]
- [9] Silvia V, Riccardo A, Andrea C S 2014 Chem. Eng. Res. Des. 92 256
- [10] Osinov VA 1998 Soil Dyn. Earthq. Eng. 17 13
- [11] Liu Y 2015 M. S. Dissertation (Harbin: Northeast Agricultural University) (in Chinese) [刘扬 2015 硕士学位论 文 (哈尔滨:东北农业大学)]
- [12] Uñac R O, Vidales A M, Benegas O A, Ippolito I 2012 Powder Technol. 225 214
- [13] Garcimartín A, Zuriguel I 2011 Phys. Rev. E 84 031309
- [14] Kmita J 1985 J. Struct. Eng. 111 190
- [15] Wilde K, Rucka M, Tejchman J 2008 Powder Technol. 186 113
- [16] Phillips C E S 1910 Proc. R. Inst. G. B 19 742
- [17] Li H, Kwauk M 1989 Chem. Eng. Sci. 44 261
- [18] Yang S C, Hsiau S S 2001 Powder Technol. 120 244
- [19] Brown R L, Richards J C 1960 Trans. Inst. Chem. Eng. 38 243
- [20] Tejchman J, Gudehus G 1993 Powder Technol. 76 201
- [21] Mukesh L D, Kranthi K J 2006 Powder Technol. 167 55
- [22] Benson K M, Shandon F Quinna, Sankaran S 2004 Powder Technol. 145 190
- [23] Tejchman J 1999 Powder Technol. 1 7
- [24] Géminard J C, Losert W, Gollub J P 1999 Phys. Rev. E 59 5881
- [25] Krim J 2002 Am. J. Phys. 70 890
- [26] Han Y L, Jia F G, Zeng Y, Jiang L W, Zhang Y X, Cao B 2016 Powder Technol. 297 153
- [27] Code for Design of Grain Steel Silos 2011 GB 50322 (in Chinese) [粮食钢板筒仓设计规范 2011 GB 50322]
- [28] Ketterhagen W R, Curtis J S, Wassgren C R, Hancock B C 2009 Powder Technol. 1 1
- [29] Vivanco F, Rica S, Melo F 2012 Granul. Matter 5 563

Cyclical pulsation properties of particles in cone silo^{*}

Wang Hui Jia Fu-Guo[†] Han Yan-Long Zhang Ya-Xiong Cao Bin

 $(Department \ of \ Engineering \ Northeast \ Agricultural \ University, \ Harbin \ 150030, \ China)$

(Received 4 June 2016; revised manuscript received 14 October 2016)

Abstract

Intense particle pulsation during discharging may lead to the vibration of silo, even the failure of silo structure. To date, the studies related to particle pulsation have mainly concentrated in the following aspects: the noise caused by vibration of silo, the minimum decisive height to produce silo music and the factors affecting particle pulsation. However, the above studies cannot in depth analyze the motion state nor the flow law of all particles in silo. To explore the pulsation characteristics of particles, in this paper we simulate the discharging tests of ellipsoidal particles in deep silo with different half-cone angles based on the discrete element method, in order to reveal the mechanisms of particle pulsation and variation of contact force among the particles in the silo. In each simulation discharging test, the cylinder section of silo is divided into 4 fixed areas where flow behavior and the motion characteristics of particles are analyzed. The simulation results show that the velocity fluctuation of particles exists in the whole discharging process. At the early stage of discharging, the cyclical pulsation with large amplitude appears while irregular fluctuation with small amplitude occurs in the later stages. The study also finds that the dynamic characteristics of the axial force among particles are the same as those of velocity pulsation in the corresponding areas. Besides, the amplitude of particle pulsation shows an increase trend and the contact force of particles presents more periodic pulsation along the negative direction of outlet. The pulsation characteristics (velocity pulsation and force pulsation) of adjacent particle layers are similar, including similar waveform and identical cycle. During the intense pulsation stage, each minimum of the axial force of particles in the top layer is close to the gravity, indicating that the contact force among these particles disappears. Furthermore, the periodic pulsation of particles causes the contact force among particles to periodically disappear. It is noted that the stability of discharging, frequency, amplitude and duration of the intense pulsation increase with the decrease of the half-cone angle. In order to evaluate the fluctuation degree of the velocity pulsation, the standard deviation of particle velocities is used. Note that the particle velocities are no longer subjected to the influence of rising trend, which result is obtained by the finite difference method. The results show that the standard deviation gradually increases with the decrease of half-cone angle. This is because the increase of half-cone angle causes the time and amplitude of stable fluctuation to decrease. This numerical study of particle pulsation will provide the reference for safety design of discharging devices.

Keywords: silo, discharging, particles pulsation, contact force

PACS: 45.50.–j, 83.80.Fg, 02.60.Cb

DOI: 10.7498/aps.66.014501

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51575098), the National Science Foundation of Heilongjiang Province, China (Grant No. E201322) and the Harbin Foundation for Outstanding Academic Leaders, China (Grant No. RC2013XK006004).

[†] Corresponding author. E-mail: jfg204@163.com