

湿颗粒堆力学特性的离散元法模拟研究*

赵啦啦¹⁾ 赵跃民^{2)†} 刘初升¹⁾ 李珺¹⁾

1)(中国矿业大学机电工程学院, 徐州 221116)

2)(中国矿业大学化工学院, 徐州 221116)

(2013年7月15日收到; 2013年11月3日收到修改稿)

利用基于线性黏聚接触模型的离散元法对不同颗粒系统的堆积过程进行了数值模拟研究, 分析了颗粒形状和湿颗粒间液桥力对颗粒堆积形态的影响机理, 获得了球形和块状湿颗粒堆基底表面所受的法向力以及堆中颗粒间的法向力和切向力“中心凹陷”式的分布规律, 讨论了颗粒形状和黏聚能量密度对基底表面作用力和颗粒间作用力的影响. 研究表明, 颗粒形状和液桥力对颗粒堆的堆积形态具有显著的影响. 堆积角随着黏聚能量密度的增加而增大, 并且相同条件下的块状颗粒堆积角大于球形颗粒. 颗粒形状和黏聚能量密度对基底表面所受作用力和堆中颗粒间的作用力变化及最大幅值均有影响作用. 当黏聚能量密度值逐渐增大时, 颗粒堆的作用力最大幅值均逐渐增大, 并且块状颗粒堆的作用力最大幅值大于球形颗粒堆. 当黏聚能量密度值过大时, 颗粒堆力学特性更加复杂, 液桥力对颗粒堆积特性的影响作用大于颗粒形状的影响.

关键词: 湿颗粒堆, 液桥力, 非球形颗粒, 离散元法

PACS: 45.70.Cc, 02.60.Cb, 81.05.Rm

DOI: 10.7498/aps.63.034501

1 引言

在自然界和工程实际中, 颗粒系统通常以自然堆积的形态存在^[1]. 颗粒堆积问题(如沙堆休止角、料仓效应)是一种较为简单的颗粒系统静力学现象, 但颗粒堆中的应力凹陷等奇异现象却引起了大量学者的关注, 并且关于颗粒堆的基本物理力学规律至今未形成统一的认识^[2-4]. 因此, 对颗粒系统堆积特性的研究具有重要的基础科学意义和工程应用价值.

颗粒堆底的应力“中心凹陷”现象是堆积问题的重点研究内容之一. Silbert等^[5]通过研究指出, 颗粒堆中的颗粒分布规律依赖于颗粒摩擦系数. 在此基础上, 孙其诚等^[6]从颗粒接触力链角度, 考察了颗粒摩擦系数对颗粒堆特性的影响. 赵永志等^[7]对颗粒堆积过程进行了数值模拟研究, 进一步讨论

了滑动摩擦和滚动摩擦对颗粒堆积过程的影响, 并模拟得到了“中心凹陷”式的地面作用力分布规律. 除了颗粒间的摩擦外, 颗粒堆底面粗糙度对颗粒堆积特性也具有较大的影响. 张庆武等^[8]的研究表明, 底面粗糙度较大时切向应力较大, 相应的法向应力“中心凹陷”现象越明显. Carlevaro等^[9]研究了颗粒堆中力链的形成和成拱机理, 指出成拱的力链结构能够支撑颗粒堆, 并承受颗粒堆中的大部分作用力. 谢晓明等^[2]通过研究颗粒堆密度的变化, 探讨了堆底压力分布规律及其形成机理.

上述研究者利用摩擦理论、颗粒接触力链理论等对颗粒堆形成以及底面应力凹陷机理进行了分析, 但所采用的颗粒主要是球形或圆形干燥颗粒, 未充分考虑颗粒形状和湿颗粒间由外在水分引起的液桥力对颗粒堆积过程的影响. 当颗粒形状为非球形时, 其材料特性、作用力特征、运动特征等物理特性发生了变化^[10-12]. 当颗粒为潮湿颗粒时,

* 国家重点基础研究发展计划(973计划)(批准号: 2012CB214900)、国家自然科学基金(批准号: 51134022, 51221462, 51204181)、高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20110095120004)、中国博士后科学基金(批准号: 20110491485, 2013T60576)和中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: 2011QNA10)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: ymzhao@cumt.edu.cn; zll_xz@cumt.edu.cn

其力学性质将发生改变, 从而影响颗粒的静力学和动力学特性^[13]. Zuriguél 等^[14]研究了颗粒形状对颗粒堆应力分布的影响, 并指出非球形颗粒的各向异性特征对中心应力凹陷具有增强的作用. Zhou 等^[15]的研究则进一步验证了颗粒形状对应力凹陷的增强作用. Samadani 等^[16]通过试验研究发现, 湿颗粒堆的休止角随着液桥力的增加而显著增大. 可见, 非球形湿颗粒具有与球形颗粒不同的堆积特性.

离散元法 (discrete element method, DEM) 是 20 世纪 70 年代发展起来的用于计算散体介质系统力学行为的一种数值方法, 在岩土工程、采矿工程、矿物加工、物料分选等散体工程技术领域得到了成功的应用, 成为目前研究颗粒系统行为的一种有效数值方法^[17]. 颗粒形状和湿颗粒间液桥力对颗粒堆积特性具有显著的影响, 然而目前颗粒堆积问题

的研究大多采用干燥的球形颗粒, 忽略了颗粒形状和由水分引起的颗粒间液桥力的影响. 因此, 本文利用基于线性黏聚接触模型的离散元法对湿颗粒系统的堆积过程进行数值模拟, 比较了干湿颗粒之间以及球形与块状颗粒堆之间的堆积特性, 并对颗粒堆内颗粒间的作用力及其分布特征进行了分析, 为深入理解和进一步完善颗粒堆积理论提供参考依据.

2 颗粒接触模型

本文采用等体积的球形和块状两种颗粒模型作为研究对象. 为了使非球形颗粒模型具有适中的计算复杂度和模拟精度, 采用多球叠加法构造块状颗粒模型^[18,19], 并将块状颗粒模型进行了相应的简化处理, 如图 1 所示.

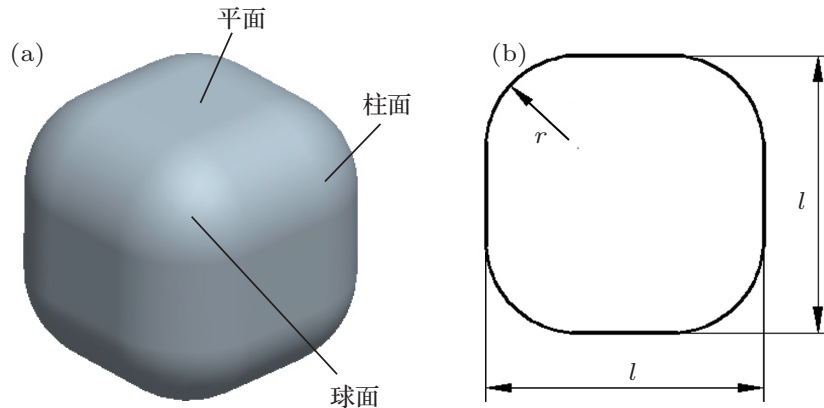


图 1 块状颗粒模型 (a) 三维模型; (b) 几何定义

由图 1(a) 可以看出, 该块状颗粒模型是由平面体、柱面体和球面体组成的复合几何体, 因此能够利用传统的分析方法进行碰撞检测和模型接触力计算^[20]. 块状颗粒模型的几何定义如图 1(b) 所示. 其中, r 为柱面体和球面体部分的半径, l 为块状颗粒模型的整体尺寸. 根据块状颗粒模型的几何定义, 即可准确建立与球形颗粒具有相同体积的块状非球形颗粒模型.

对于干燥颗粒系统的堆积, 文中采用传统的 Hertz-Mindlin 软球干接触模型进行离散元法模拟^[21,22], 如图 2 所示. 其中, k_n 和 d_n 分别为法向刚度和阻尼, k_t 和 d_t 为切向刚度和阻尼, k_r 和 d_r 为滚动刚度和阻尼. 另外, 由于块状颗粒是简单的球面体、柱面体和平面体的组合, 因此块状颗粒系统的

堆积过程的离散元法模拟仍可采用上述软球接触模型.

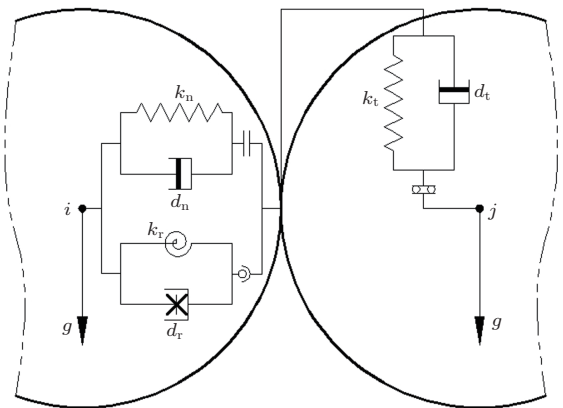


图 2 颗粒接触模型

对于湿颗粒系统的堆积, 由于接触颗粒间形成的液桥而引入了一个液桥力. 因此, 文中采用线性黏聚接触模型对湿颗粒进行离散元法模拟. 该模型是在传统 Hertz-Mindlin 软球干接触模型的基础上增加一个法向黏聚力. 由于本文的模拟对象为宏观颗粒系统 (粒度为 6 mm), 颗粒间的范德华力与液桥力相比非常微小, 而静电力一般对于干燥环境下的微细颗粒具有较明显的作用. 因此, 分析中范德华力和静电力均予以忽略, 计算模型中的黏聚力仅限于由外在水分引起的液桥力. 由颗粒接触模型可知, 颗粒在运动过程中主要受三种作用力, 即自身重力、颗粒间的法向及切向碰撞接触力和液桥力. 此外, 颗粒还受到两种力矩的作用, 即切向力造成的力矩和滚动摩擦力矩, 则第 i 个颗粒的运动方程 [23] 可由以下两式表示:

$$m_i \frac{d\mathbf{V}_i}{dt} = m_i \mathbf{g} + \sum_{j=1}^{n_i} (\mathbf{F}_{n,ij} + \mathbf{F}_{t,ij} + \mathbf{F}_{coh,ij}), \quad (1)$$

$$I_i \frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n_i} (\mathbf{T}_{t,ij} + \mathbf{T}_{r,ij}), \quad (2)$$

式中, m 和 I 分别表示小球的质量和转动惯量, n_i 表示与小球 i 接触的颗粒总数, \mathbf{V} 表示移动速度, $\boldsymbol{\omega}$ 表示角速度, t 表示时间, \mathbf{g} 为重力加速度, 法向作用力 $\mathbf{F}_{n,ij}$ 和切向作用力 $\mathbf{F}_{t,ij}$ 及切向力矩 $\mathbf{T}_{t,ij}$ 和滚动摩擦力矩均 $\mathbf{T}_{r,ij}$ 可由颗粒离散元法基本原理求得 [24], 线性黏聚接触模型中液桥力 \mathbf{F}_{coh} 的大小可由下式求得 [13]:

$$\mathbf{F}_{coh} = kA, \quad (3)$$

式中, A 是软球颗粒模型中颗粒的接触面积, k 表示黏聚能量密度 (J/m^3). 虽然在该线性黏聚接触模型中没有额外增加切向接触力, 但是由软球接触模型理论可知, 当法向接触力增加时, 颗粒间的切向作用也随之增强, 颗粒抵挡切向滑动的能力增加. 在上述力和力矩的综合作用下, 颗粒进行移动和滚动运动.

3 数值模拟及分析

3.1 颗粒系统堆积过程模拟

本文颗粒模型采用煤炭物料颗粒, 其材料性质及物理常量列于表 1 中 [21,22]. 由于如何解决 6 mm 粒级的潮湿煤炭物料高效分选问题是本文的具体工程背景, 因此为了进一步理解该粒级煤炭颗粒的

基本物理机理, 本文采用 6 mm 粒级的颗粒模型为研究对象. 模拟湿颗粒时, 线性黏聚接触模型中的黏聚能量密度 $k(\text{J}/\text{m}^3)$ 依据文献 [25] 中关于外在水分含量不同时煤炭物料的黏附强度 (kPa) 的测定试验进行选取和标定. 采用点源法模拟颗粒系统的堆积过程, 模拟系统的组成如图 3 所示. 模拟过程中, 将 6000 个球形 (或块状) 的干燥 (或者潮湿) 颗粒注入到位于圆盘形基底正上方的倒锥体形料斗中, 料斗位置保持不变, 颗粒系统在重力作用下从料斗出口排出, 并逐渐在基底上堆积而形成稳定的颗粒堆. 其中, 料斗的入料口处半径为 0.1 m, 出料口半径为 0.03 m, 高度为 0.2 m, 出料口至基底面的距离为 0.12 m. 基底半径为 0.3 m, 厚度为 0.01 m.

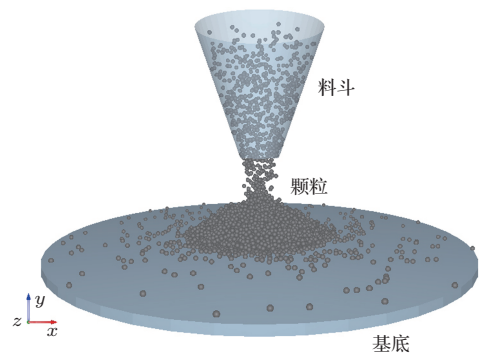


图 3 颗粒系统堆积过程

由图 3 所示的颗粒系统堆积过程可以看出, 颗粒物料由入料口进入料斗后, 在料斗内壁的作用下, 颗粒物料在排料口聚集并形成料流柱从排料口流出. 当颗粒物料到达基底表面时, 颗粒与基底发生具有能量损耗的非弹性碰撞并逐渐在基底中心位置处堆积. 与此同时, 在连续下落的颗粒流的作用下, 颗粒物料之间也不断发生碰撞, 位于料堆外层的颗粒在碰撞力的作用下向基底中心周围散落. 当散落的颗粒受到较小碰撞力的作用时, 颗粒在滚动过程中在摩擦力的作用下逐渐静止在基底表面. 与之相反, 少数散落的颗粒则从基底的边缘处落下并退出堆积模拟系统. 当所有颗粒落下后, 在基底表面最终形成稳定的具有轴对称外形特征的锥体状颗粒堆. 基于离散元法模拟所得到的颗粒堆与实际煤炭颗粒物料的堆积试验结果比较后发现, 当采用真实的材料参数以及合理的模拟参数时, 数值模拟和试验所得颗粒堆的堆积形态相似, 堆积角的大小基本相同, 表明利用离散元法对颗粒系统的堆积进行数值模拟研究具有一定的可靠性 [26].

表 1 模拟参数表

| 颗粒模型几何参数 | | |
|-----------------------|-----------|------------|
| 颗粒形状 | 球形 | 块状 |
| 颗粒尺寸/m | 0.006(直径) | 0.0053(棱长) |
| 颗粒数量 | 6000 | |
| 颗粒和基底材料性质及物理常量 | | |
| 物理参数 | 颗粒 (-颗粒) | 基底 (-颗粒) |
| 密度/kg·m ⁻³ | 1300 | 7861 |
| 杨氏模量/GPa | 1.0 | 79.92 |
| 柏松比 | 0.3 | 0.29 |
| 弹性恢复系数 | 0.5 | 0.5 |
| 静摩擦系数 | 0.6 | 0.4 |
| 滚动摩擦系数 | 0.05 | 0.05 |

3.2 颗粒形状和湿颗粒间黏聚力对堆积角的影响

具有不同形状的干燥和潮湿颗粒系统堆积时,所形成的颗粒堆如图 4 所示. 可以看出, 颗粒形状和颗粒间的液桥力对颗粒堆的堆积形态具有显著的影响. 具有相同体积的球形和块状干燥颗粒堆积时, 块状颗粒堆的堆积高度较高、堆积角较大, 如图 4(a) 和 (f) 所示. 对于同种形状的颗粒, 当颗粒间具有液桥力的作用时, 颗粒堆积形态发生较明显的变化. 随着液桥力(黏聚能量密度)的增加, 颗粒堆的高度和堆积角均逐渐增大, 并且球形湿颗粒堆的形态变化比块状湿颗粒堆的形态变化更加明显, 如图 4(b) 至 (e) 和 (g) 至 (j) 所示. 进一步对比球形湿颗粒和块状湿颗粒堆可以看出, 具有相同液桥力的两种颗粒, 块状颗粒堆的堆积高度较高、堆积角较大.

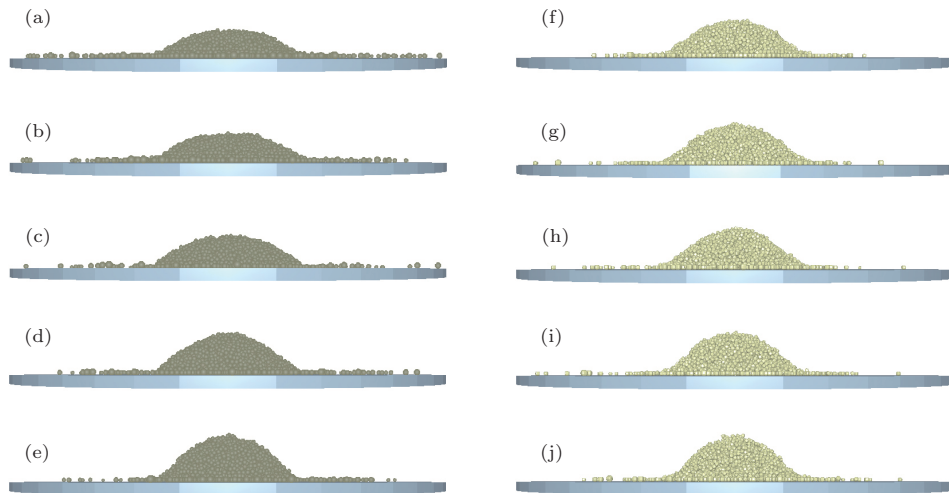


图 4 不同颗粒系统形成的颗粒堆 (a) 干燥球形颗粒; (b), (c), (d), (e) 潮湿球形颗粒; (f) 干燥块状颗粒; (g), (h), (i), (j) 潮湿块状颗粒 (湿颗粒的黏聚能量密度 k 依次为 10000, 30000, 50000, 70000(J/m³))

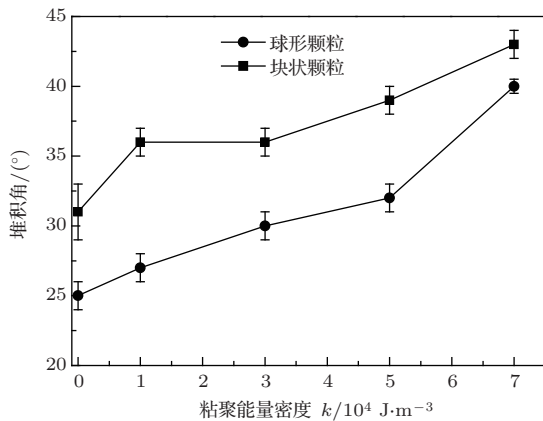


图 5 不同颗粒系统的堆积角

为更加准确分析颗粒形状和湿颗粒间的液桥力对颗粒堆形态的影响作用, 由图 4 可获得不同颗粒系统的堆积角变化情况, 如图 5 所示. 可以看出, 堆积角的总体变化趋势与上述对不同颗粒堆的堆积形态的变化相同. 对于干燥球形颗粒, 其堆积角最小, 仅为 25°(误差约 1°), 而干燥的块状颗粒由于颗粒外形的作用, 使其堆积角达到了约 31°. 随着颗粒间液桥力的增强, 颗粒系统的堆积角逐渐增大, 并且在黏聚能量密度由 50000 J/m³ 增加至 70000 J/m³ 时, 球形湿颗粒系统的堆积角增幅达到了最大值 8°. 块状颗粒的堆积角增幅最大值发生

在黏聚能量密度由 0 J/m^3 (干燥颗粒) 增加至 10000 J/m^3 时, 增幅为 5° , 并且当黏聚能量密度增加至 30000 J/m^3 时, 其堆积角基本保持不变, 表明湿颗粒间的液桥力较小时, 颗粒形状是影响堆积形态的主要因素. 当湿颗粒间的黏聚能量密度达到 70000 J/m^3 时, 球形颗粒和块状颗粒堆积角的值最为接近, 表明湿颗粒间的液桥力达到一定值时, 颗粒间的液桥力成为影响颗粒堆形态的主要因素.

基于上述结果, 颗粒形状和湿颗粒间液桥力对堆积特性的影响机理可从如下几个方面讨论: 1) 颗粒材料特性分析: 球颗粒具有较低的有效材料强度, 即抗剪切力能力较低, 微观结构及边坡容易屈服或过早失效. 非球形颗粒抗剪切能力较高, 边坡稳定性较强. 湿颗粒间的液桥力则能够改变材料特性, 增强颗粒的抗剪切能力. 2) 颗粒间作用力特征分析: 球颗粒的法向作用力均通过球心连线并且不产生扭矩, 而颗粒间扭矩完全由切向摩擦力引起并且较弱. 非球形颗粒的法向作用力不一定通过质心, 而颗粒间的扭矩在法向力和摩擦力的综合作用下产生. 当颗粒为湿颗粒时, 受到液桥力的影响, 颗粒抗扭转能力增强. 3) 能量交换及运动特征分析: 球颗粒运动平稳且形式相对简单, 而非球形颗粒的运动波动性大, 颗粒直线和转动运动方式之间的能量交换迅速. 当直线运动的非球形颗粒在远离质心的端部发生碰撞作用时, 颗粒运动方式则发生转换, 由直线运动变为旋转运动; 当高速旋转运动的颗粒之间发生碰撞后, 颗粒运动可变为低速旋转和高速直线运动方式. 颗粒变为湿颗粒时, 颗粒碰撞的能量损耗增加, 碰撞后的运动受到黏滞作用影响. 4) 颗粒系统的空隙率分布性质及剪胀特性分析: 球颗粒间的孔隙率分布与实际不符, 且填充容易且效率高, 而非球形颗粒间的孔隙率分布与实际物料颗粒相接近, 且填充困难且效率低. 球颗粒具有较小的剪胀特性, 原因为球颗粒形状各向同性, 绕球心转动容易, 转动时对颗粒群体积的影响作用小, 而非球形颗粒则具有较大的剪胀特性, 且转动困难, 转动时对颗粒群体积的影响作用较大. 显然, 湿颗粒时的剪胀特性将得到增强. 5) 颗粒表征特性分析: 颗粒由球形变为块状时, 颗粒堆积性好且具有自锁性, 限制了颗粒的旋转自由度, 减少了颗粒的滚动和流动, 因而堆积颗粒的边坡更加稳定. 颗粒为湿颗粒时, 其表征特性发生变化, 自锁性能增强, 相应颗粒堆边坡稳定性也得到增强.

3.3 颗粒堆中接触力的变化规律

颗粒系统的堆积特性除了可通过上述颗粒物料的各种特性进行定性分析外, 还可以通过研究颗粒堆与基底表面之间以及颗粒堆中颗粒之间的作用力变化规律进行更深入的定量分析.

如图 6 所示为颗粒堆中各颗粒间的接触矢量分布情况. 可以看出, 处于稳定状态的颗粒堆, 其组成颗粒之间的接触矢量呈网状分布结构, 并且其结构与颗粒堆的外观形态一样, 具有规律的轴对称分布结构. 在颗粒堆的内部, 由于接触颗粒较多, 因此接触矢量较密集, 相应图中的颜色较深. 相反, 在颗粒堆的底部边缘处, 接触颗粒数量少, 接触矢量稀疏并且清晰可见. 颗粒之间的这种接触网状结构类似于桁架结构, 能够起到支撑整个颗粒堆的作用.

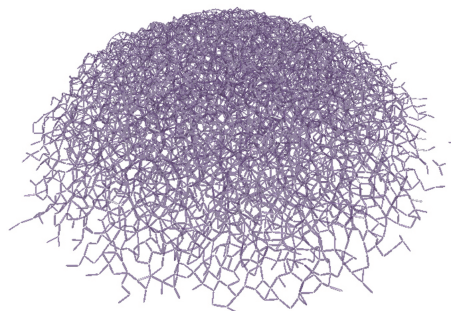


图 6 颗粒堆中的颗粒接触矢量网

颗粒堆与基底表面之间作用力的变化情况可通过基底表面所受作用力的变化进行分析, 如图 7 所示. 图 7(a) 和 (b) 分别为基底表面在球形和块状颗粒作用下的法向力大小沿其径向的分布情况. 可以看出, 不同颗粒系统形成的颗粒堆作用在基底表面的法向力均具有明显的“中心凹陷”式分布规律, 该结果与已有的研究成果相一致^[7,14].

由图 7(a) 可知, 对于球形颗粒堆, 基底所受法向力在 $0.06\text{--}0.084 \text{ m}$ 的径向距离范围内具有较大值, 并且颗粒堆为干燥球形颗粒系统时的峰值最小, 仅为 1.122 N 左右. 随着黏聚能量密度 k 值的增加, 基底法向力的峰值逐渐增大, 并且当 $k = 50000 \text{ J/m}^3$ 时, 其峰值达到最大的 1.335 N 左右. 当 k 值进一步增大时, 法向力的峰值反而有大约 0.002 N 的减小. 原因是颗粒间的液桥力增加时, 球形颗粒堆的堆积角和堆积高度增加, 在一定径向距离范围内的堆积颗粒增加, 因此基底所受法向力增大. 但

是,当液桥力非常大时,堆中颗粒受到来自各方向上的相邻颗粒的液桥力增加,从而减小堆中上层颗粒作用于下层颗粒的接触力.对于块状颗粒堆,基底所受法向力的变化规律整体上与球形颗粒堆相类似,但由于颗粒形状的影响作用, k 值对法向力的影响比球形颗粒堆弱,并且相同条件下,块状颗粒堆对基底的法向力峰值均大于球形颗粒堆,如图7(b)所示.

颗粒在堆积过程中,基底表面的剪切力同样具有重要作用,其大小和方向能够影响颗粒堆的堆底形状.基底表面在球形和块状颗粒作用下的剪切力(X 轴分量)沿径向的分布情况,分别如图7(c)和

(d)所示.可以看出,基底所受剪切力具有明显的波动变化规律,并且其方向与颗粒的运动趋势相反.在法向力具有较大值的径向距离范围内,相应的剪切力具有负向的较大值,负号表示颗粒堆底受到基底表面指向中心的剪切力作用,从而起到稳定颗粒堆形态的作用.在相同条件下,由于块状颗粒特殊的物理特性,其作用于基底表面剪切力的整体波动幅度大于球形颗粒.对于不同的颗粒堆,随着 k 值的增加,基底所受剪切力的整体波动幅度均有所增大,但负向最大值并未随 k 的增加而线性增大,而是在 $k = 50000 \text{ J/m}^3$ 时幅值明显减小.当 k 值进一步增大时,幅值再次增大.

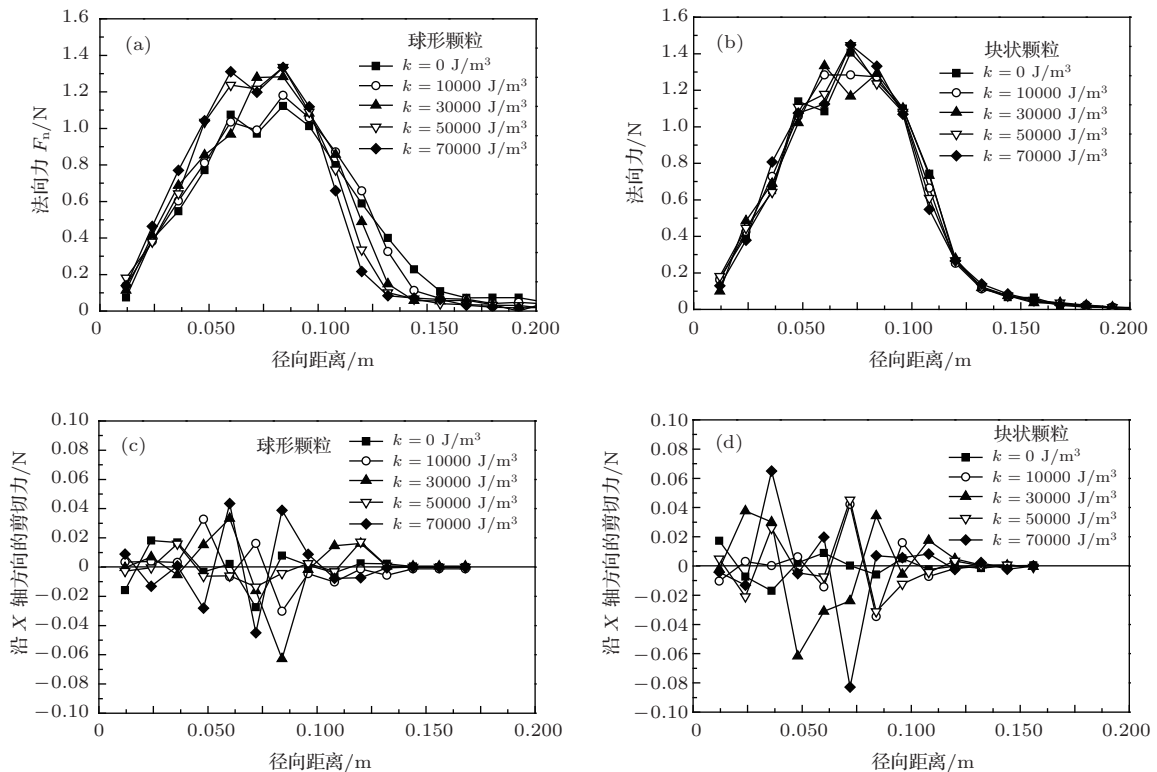


图7 基底表面所受作用力沿径向的变化 (a), (b) 球形和块状颗粒堆作用的法向力; (c), (d) 球形和块状颗粒堆作用的沿 X 轴方向的剪切力

由于颗粒形状和颗粒间的液桥力改变了颗粒间的作用力以及力的传递形式,从而影响了作用于基底表面的作用力,因此为进一步深入理解颗粒堆中的力学特性,需要对颗粒堆中颗粒间的作用力变化规律进行分析.此处,从颗粒堆底面开始,沿 Z 轴正向取 0.015 m 厚度的颗粒系统作为分析对象.

如图8所示为颗粒堆中颗粒间接触力(Z 轴方向上的分力)沿径向的变化规律.可以看出,颗粒间的接触力在整体上均具有“中心凹陷”式的分布规律,并且与基底表面所有作用力分布特征相类似,在径向距离为 0.06—0.084 m 的范围内,颗粒间

的法向力及相应的剪切力均具有较大的幅值.由图8(a)和(b)可知,当 k 值较小($\leq 30000 \text{ J/m}^3$)时,由于颗粒形状对颗粒堆积形态的影响,因此在相同条件下的块状颗粒间法向力的最大幅值大于球形颗粒.另外,球形颗粒和块状颗粒间的法向力最大幅值均未随着 k 的增加而线性增加,而是当 k 值较大($\geq 50000 \text{ J/m}^3$)时,法向力最大幅值反而逐渐减小.其原因是该径向距离范围内的颗粒受到来自周边接触颗粒的较强液桥力作用,从而削弱了这部分颗粒所受的法向力.

颗粒间的剪切力是保证颗粒堆稳定的重要因

素,其变化规律如图8(c)和(d)所示.当时,球形颗粒间剪切力的最大幅值随着 $k(\leq 50000 \text{ J/m}^3)$ 的增加而逐渐增大,但 k 进一步增大时,其最大幅值不再增加.块状颗粒间的剪切力最大幅值没有明显的变化规律,但由于块状颗粒具有较强的抗剪切能力,因此,相同条件下($k \leq 50000 \text{ J/m}^3$)块状颗粒间的剪切力最大幅值大于球形颗粒,但 k 进一步增

大时,其最大幅值反而略小于球形颗粒.表明 k 值较大时,液桥力对颗粒堆中接触力的影响作用大于颗粒形状的影响作用,颗粒堆除了受到由于作用力凹陷而产生的拍紧作用之外,还受到颗粒间较强液桥力的作用,使得颗粒间紧密聚集,颗粒堆结构更加稳定.

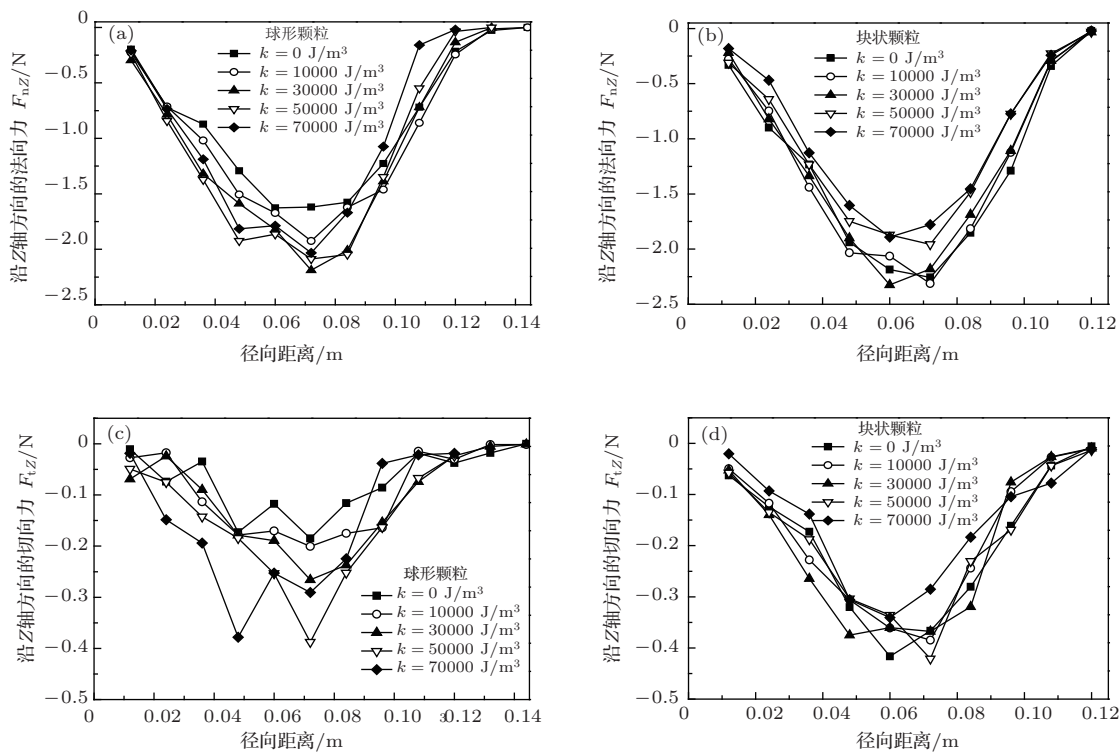


图8 颗粒堆中颗粒间接触力沿径向的变化 (a), (b) 球形和块状颗粒间的法向力; (c), (d) 球形和块状颗粒间的剪切力

4 结 论

本文利用基于线性黏聚接触模型的离散元法对球形和块状湿颗粒系统的堆积过程进行了数值模拟研究,分析了颗粒形状和湿颗粒间液桥力对颗粒堆积形态、基底表面所受力以及堆中颗粒间作用力分布规律的影响,可以得到以下结论:

1. 块状颗粒具有各向异性特征,其材料、作用力及运动等物理特性不同于球形颗粒.湿颗粒间的液桥力增加了颗粒间的作用力,增强了对运动的阻碍作用.因此,颗粒形状和液桥力对颗粒堆的堆积形态具有显著的影响,其堆积角随着液桥力的增加而增大,并且相同条件下的块状颗粒堆积角大于球形颗粒.

2. 球形和块状湿颗粒堆基底表面所受的力具有“中心凹陷”式的分布规律,并且随着黏聚能

量密度 k 的增加,球形颗粒堆基底法向力的峰值逐渐增大,但过大的 k 值反而使法向力峰值减小. k 值对块状颗粒堆基底法向力的影响较弱,并且相同条件下,块状颗粒堆对基地的法向力峰值均大于球形颗粒堆.颗粒堆基底表面所受的切向力具有波动变化规律,块状颗粒堆基底表面剪切力的整体波动幅度大于球形颗粒.在法向力具有较大幅值的径向距离范围内,相应的剪切力也具有负向的较大值,从而起到稳定颗粒堆形态的作用.

3. 球形和块状湿颗粒堆中颗粒间的法向力和切向力均具有“中心凹陷”式的分布规律.颗粒形状和黏聚能量密度 k 对堆中颗粒间的作用力变化及最大幅值均有影响作用.在相同条件下,块状颗粒间法向力的最大幅值均大于球形颗粒,并且颗粒间法向力的最大幅值均未随着 k 的增大而线性增加,而是当 k 值较大($\geq 50000 \text{ J/m}^3$)时,由于较强

液桥力作用, 法向力的最大幅值反而有所减小. 当 k 较小 ($\leq 50000 \text{ J/m}^3$) 时, 块状颗粒间的剪切力最大幅值大于球形颗粒, 并且球形颗粒间剪切力的最大幅值随着 k 的增大而逐渐增大, 但块状颗粒间的剪切力最大幅值没有明显的变化规律. 当 k 较大时, 球形颗粒间的剪切力最大幅值不再增加, 而块状颗粒间的剪切力最大幅值反而略小于球形颗粒.

4. 颗粒形状和湿颗粒间的液桥力对颗粒系统静态堆积过程中的力学特性具有显著的影响, 而非球形湿颗粒系统的动态特性也必将不同于球形干燥颗粒系统. 基于此, 作者将在今后的研究工作中, 对非球形湿颗粒系统在外力作用下所呈现出的基础力学特性进行研究.

参考文献

- [1] Li Y Y, Xia W, Zhou Z Y, He K J, Zhong W Z, Wu Y B 2010 *Chin. Phys. B* **19** 024601
- [2] Wittmer J P, Claudin P, Cates M E, Bouchaud J P 1996 *Nature* **382** 336
- [3] Xie X M, Jiang Y M, Wang H Y, Cao X P, Liu Y 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2194 (in Chinese) [谢晓明, 蒋亦民, 王焕友, 曹晓平, 刘佑 2003 物理学报 **52** 2194]
- [4] Geng J, Longhi E, Rehringer R P, Howell D W 2001 *Phys. Rev. E* **64** 060301
- [5] Silbert L E, Grest G S, Landy J W 2002 *Phys. Rev. E* **66** 061303
- [6] Sun Q C, Wang G Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4667 (in Chinese) [2008 物理学报 **57** 4667]
- [7] Zhao Y Z, Jiang M Q, Xu P, Zheng J X 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1819 (in Chinese) [2009 物理学报 **58** 1819]
- [8] Zhang Q W, Jiang Y M, Zuo J, Zheng H P, Peng Z, Fu L P, Jiang L 2010 *Chinese Sci. Bull.* **55** 316 (in Chinese) [张庆武, 蒋亦民, 左静, 郑鹤鹏, 彭郑, 符力平, 蒋礼 2010 科学通报 **55** 316]
- [9] Carlevaro C M, Pugnaroni L A 2012 *Eur. Phys. J. E* **35** 12044
- [10] Matutti H G, Luding S, Herrmann H J 2000 *Powder Technol.* **109** 278
- [11] Cleary P W 2009 *Eng. Comput.* **26** 698
- [12] Cleary P W 2010 *Particuology* **8** 106
- [13] Mitarai N, Nori F 2006 *Adv. Phys.* **55** 1
- [14] Zuriguel I, Mullin T 2008 *Proc. R. Soc. A* **464** 99
- [15] Zhou C, Ooi J Y 2009 *Mech. Mater.* **41** 707
- [16] Samadani A, Kudrolli A 2001 *Phys. Rev. E* **64** 051301
- [17] Zhu H P, Zhou Z Y, Yang R Y, Yu A B 2008 *Chem. Eng. Sci.* **63** 5728
- [18] Zhao J, Li S X 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 4034
- [19] Li S X, Zhao J, Zhou X 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 1724
- [20] Langston P A, Awamleh M A, Fraige F Y, Asmar B N 2004 *Chemical Engineering Science* **59** 425
- [21] Zhao L L, Liu C S, Yan J X, Xu Z P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1874 (in Chinese) [赵啦啦, 刘初升, 闫俊霞, 徐志鹏 2010 物理学报 **59** 1874]
- [22] Zhao L L, Liu C S, Yan J X, Jiao X W, Zhu Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2582 (in Chinese) [赵啦啦, 刘初升, 闫俊霞, 蒋小伟, 朱艳 2010 物理学报 **59** 2582]
- [23] Gao H L, Chen Y C, Zhao Y Z, Zheng J Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 12 (in Chinese) [高红利, 陈友川, 赵永志, 郑津洋 2011 物理学报 **60** 12]
- [24] Zhao Y Z, Cheng Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 322 (in Chinese) [赵永志, 程易 2008 物理学报 **57** 322]
- [25] Chen X M 2001 *M. E. Dissertation* (Xuzhou: China University of Mining & Technology) (in Chinese) [陈惜明 2001 硕士学位论文 (徐州: 中国矿业大学)]
- [26] Wang K 2012 *M. E. Dissertation* (Xuzhou: China University of Mining & Technology) (in Chinese) [王可 2012 硕士学位论文 (徐州: 中国矿业大学)]

Discrete element simulation of mechanical properties of wet granular pile*

Zhao La-La¹⁾ Zhao Yue-Min^{2)†} Liu Chu-Sheng¹⁾ Li Jun¹⁾

1) (School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

2) (School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

(Received 15 July 2013; revised manuscript received 3 November 2013)

Abstract

Discrete element method (DEM) simulations for pile-up processes of different particle systems were performed based on linear cohesion contact model. Effects of particle shape and liquid bridge force between wet particles on the piling form were analyzed. The significant central dip profiles of normal force acting on the base surface, normal force and tangential force between particles were predicted. Effects of particle shape and cohesion energy density on the forces on the base surface and inter-particles were described. The results show that particle shape and the liquid bridge force have significant impacts on the piling form. With the increase of the cohesion energy density the angle of repose for each granular pile increases. But the angle of repose of cubical particles is bigger than that of spherical particles under the same condition. Particle shape and the liquid bridge force also significantly affect the change and the maximum amplitude of the forces acting on the base surface and the forces between the particles. The maximum amplitude of the forces increases with the increase of the cohesion energy density, and the value of the maximum force on cubical particles is bigger than that on spherical particles. When the value of cohesion energy density is very large, the mechanical properties of granular piles become more complicated, so that the liquid bridge force has a larger impact on the packing characteristic of particles than the impact on particle shape.

Keywords: wet granular pile, liquid bridge force, non-spherical particle, discrete element method

PACS: 45.70.Cc, 02.60.Cb, 81.05.Rm

DOI: [10.7498/aps.63.034501](https://doi.org/10.7498/aps.63.034501)

* Project supported by the National Basic Research Program of China(Grant No. 2012CB214900), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51134022, 51221462, 51204181), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20110095120004), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant Nos. 20110491485, 2013T60576), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (Grant No. 2011QNA10).

† Corresponding author. E-mail: ymzhao@cumt.edu.cn; zll_xz@cumt.edu.cn