

带有点缺陷的二维颗粒系统离散元模拟*

宜晨虹^{1)†} 慕青松²⁾ 苗天德²⁾

1) 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室, 绵阳 621900)

2) 兰州大学土木工程与力学学院力学系, 兰州 730000)

(2007 年 10 月 14 日收到, 2007 年 11 月 16 日收到修改稿)

首先用离散元方法研究了颗粒系统在各向同性挤压和纯剪切状态下粒子间力的分布情况, 并与相同条件下的实验结果进行对比. 然后模拟了带有不同数目点缺陷的二维颗粒系统在各向同性挤压和纯剪切时粒子间力的分布情况, 并与无缺陷的情况做了比较, 发现了点缺陷对颗粒系统的影响规律.

关键词: 颗粒系统, 离散元, 点缺陷, 力概率分布

PACC: 4610, 6170, 6210

1. 引 言

颗粒介质有着不同于一般常态介质(固体、液体、气体)的性质, 它的认识水平对于土木工程、采矿、化工、制药、环境变化等方面有着重要的意义. 近年来越来越受到各国学者的重视^[1,2]. 我国学者在这一研究领域也做了一些很有益的工作^[3-9], 但总的来说, 我国对于颗粒介质的研究还是处于起步阶段. 对于二维颗粒系统的实验研究, Behringer^[10]在 2005 年用两种尺寸的光弹圆盘组成颗粒系统, 分别施加各向同性挤压和纯剪切, 根据实验得到的光弹图片, 利用某种算法进行处理后得到了粒子间的法向力和切向力概率分布. 而用离散元方法模拟颗粒系统的文章^[11,12]有很多, 但是对于有缺陷的颗粒系统的研究则目前没有文献报道. 本文首先用离散元方法模拟了与 Behringer 实验相同条件的颗粒系统加载, 比较了模拟结果与 Behringer 的实验结果, 得到一致结论. 然后使用有限元中“生死单元”的研究思想, 人为地创造出颗粒缺陷, 研究了随机分布的点缺陷对颗粒系统中粒子间力分布的影响. 在模拟程序中当正常的粒子与点缺陷接触而相互作用时, 把它们的弹簧刚度 k 降低到正常刚度的 $1/10$, 这样就相当于正常的颗粒中间有一部分非常软的颗粒(点缺陷). 然后得到颗粒系统在受各向同性挤压和纯

剪切时粒子间力的响应.

2. 物理模型

模拟采用的圆形混合颗粒, 直径分别为 9 mm 和 8 mm, 总数目为 3600 个. 大小两种颗粒所占的比例是 25% 和 75%, 与 Behringer^[10]的实验相同.

首先进行无缺陷的模拟, 然后设置不同数目的点缺陷进行模拟. 点缺陷的数目分别为总数目的 10%、5% 和 2%, 每种样本的模拟加载条件都一样. 颗粒先整齐排列在二维空间, 粒子间有很小的间隔, 半径不同的两种颗粒位置随机分布, 点缺陷的位置也是随机分布(如图 1), 图中的实心球表示点缺陷位置, 空心球表示正常颗粒的位置. 图 1 和 2 中, 点缺陷的数目均为 10%. 模拟开始时每个颗粒给一个初速度, 大小是 0 到 1 之间的随机分布数, 方向随机给定. 不考虑重力作用, 计算过程中只有边界对颗粒的作用及颗粒之间的相互作用. 颗粒间接触时, 考虑法向和切向变形, 即考虑法向力和切向力. 颗粒与边界发生作用时, 既考虑法向力又考虑切向的摩擦力. 在计算过程中, 粒子平动和转动时均考虑阻尼力, 阻尼力的大小和方向与颗粒运动的速度大小和方向有关.

颗粒系统的尺寸是 540 mm × 540 mm, 颗粒系统有四个边界, 边界材料与正常粒子的材料一样, 即

* 国家自然科学基金(批准号:10172041)和国家青年科学基金(批准号:10402012)资助的课题.

† E-mail: yichh04@st.lzu.edu.cn

边界与正常颗粒的刚度系数取一样的值。计算参数选取见表 1。模拟时先让粒子自由运动一段时间(边界不动,考虑粒子之间及与粒子与边界之间的相互作用),目的是错开粒子整齐排列的格局。等粒子基本稳定后,就形成模拟的样本。

各向同性挤压时,四个边界同时以相同的速度向里面挤压,边界的挤压运动速度为 0.06 m/s。各个边界的挤压总位移都是 0.03 m。挤压完后再让粒子“冷却”一段时间。总的时间步数为 20 万。

表 1 计算参数

粒子间的法向弹簧系数 k_n (N/m)	10^7
粒子间的切向弹簧系数 k_t (10^6 N/m)	6.6
粒子和墙的法向弹簧系数 k_w (N/m)	10^7
粒子间的摩擦系数	0.3
粒子和墙之间的摩擦系数	0.3
粒子的密度 (kg/m^3)	1180
法向阻尼系数	0.15—0.2
切向阻尼系数	0.15—0.2
平动全局阻尼系数	0.2
转动全局阻尼系数	2×10^{-5}
时间步长/ 10^{-6} s	5

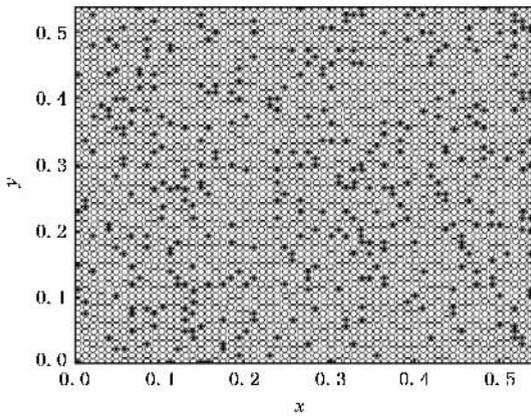


图 1 挤压前颗粒的初始排列(缺陷为 10%)

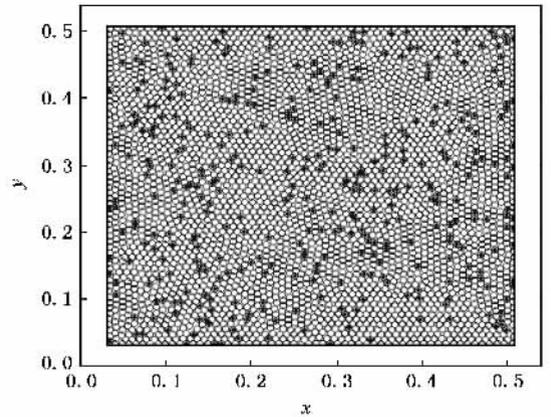


图 2 挤压后的颗粒排列图(缺陷为 10%)

结果图 3(b)中粒子间的作用力按照法向力和切向力分成两部分(粒子之间的力,法向力起主导作用。)而我们的模拟结果是粒子间法向力和切向力的合力。通过比较图 3(a)与(b),发现模拟结果与计算结果基本一致。

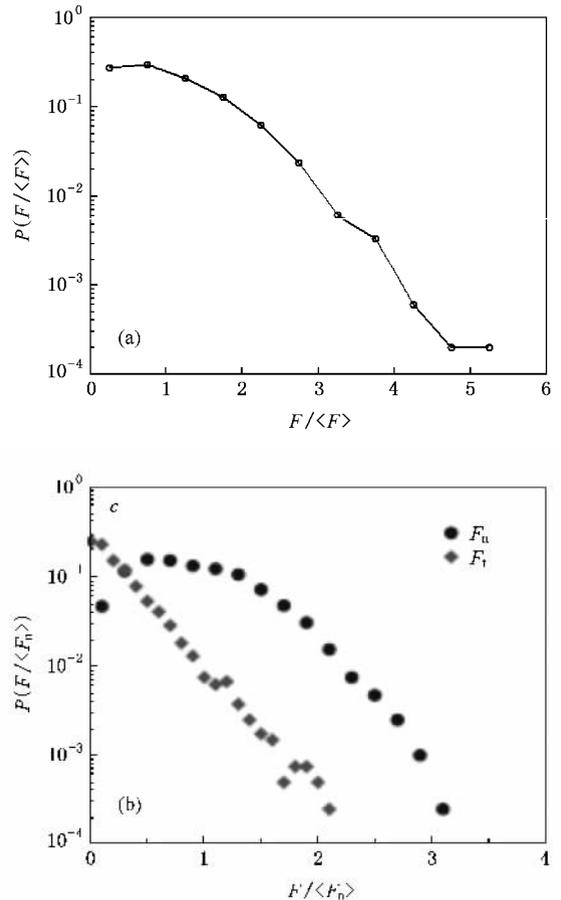


图 3 无缺陷时力的分布图 (a)模拟结果(无缺陷); (b) Behringer 的实验结果(Nature)

3. 模拟结果

3.1. 各向同性模拟结果

图 3 是无缺陷情况下粒子间力的分布图。为了便于结果之间的相互比较,把力标准化后,图 3(a)中用半对数坐标表示。图 3(b)是 Behringer^[10]的实验

图 4 是各向同性挤压时不同缺陷数目模拟情况下粒子之间力的分布图 (a) 是力的分布图 (b) 是标准化后, 半对数坐标表示图. 当缺陷数目占 10% 时, 粒子间的平均作用力是 247 N. 从粒子间力的分布图可以看到, 在 0 到 0.5 倍平均力的区域, 力的分布概率远大于 0.5 倍平均力和平均力之间的概率, 这与没有缺陷的分布有很大不同, 而在大于平均力时, 力的分布和没有缺陷时相比变化不大, 呈指数衰减.

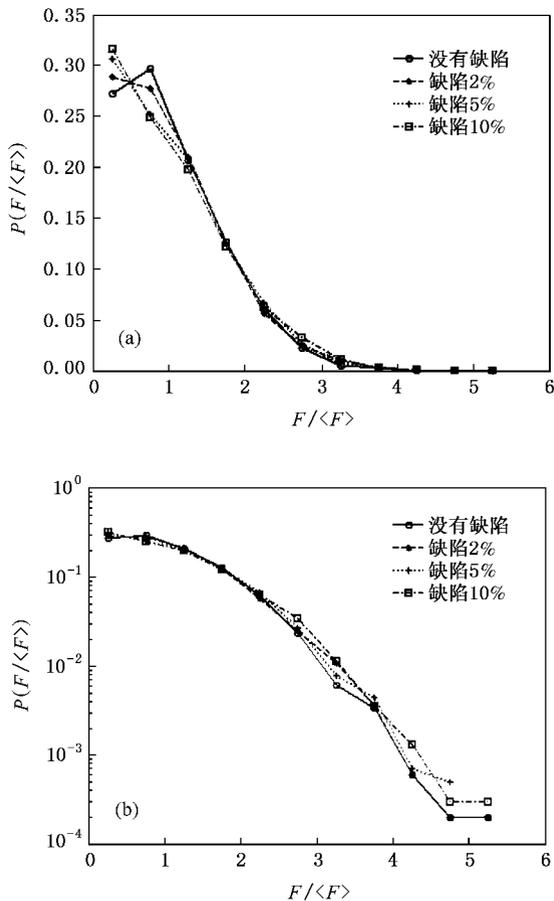


图 4 粒子间力的分布图 (a) 力的分布图 (b) 半对数坐标表示力的分布图

当没有缺陷时, 粒子间的平均作用力为 272.4 N, 缺陷为 2% 时平均力为 276.6 N, 缺陷为 5% 时, 平均作用力为 269.4 N; 当缺陷为 10% 时平均作用力为 247 N. 从总的趋势来看, 当排列情况和加载条件不变时, 随着缺陷数目的增加, 粒子间的平均力有减小的趋势.

从图 4 可以看到大于平均力的分布情况都类似, 都是随着力的增大, 概率呈指数衰减的. 而小于平均值时分布有很大的不同. 在 0 到 0.5 倍平均力的区域, 缺陷数目越多, 力的取值概率越大; 而在

0.5 倍平均力和平均力之间, 则是随着缺陷的增加, 力的取值概率变小; 在平均力与 1.5 倍的平均力之间的区域, 也是随着缺陷的增加, 力的取值概率变小; 1.5 到 2.5 倍平均力的区域则力值的概率相近; 2.5 到 4.5 倍平均力的区域, 也是缺陷数目越多, 力的取值概率越大. 4.5 倍平均力之后的区域, 由于值很少, 研究价值不大. 由此可得, 在各向同性挤压的系统中, 缺陷使颗粒系统颗粒之间力的分布发生了很大的变化, 增加了较小的力和较大的力, 而平均力附近的力概率变小. 并且缺陷数目越多, 这种变化越明显, 缺陷使颗粒系统中力分布的均匀性变差.

3.2. 纯剪切情况下的模拟结果

对于有缺陷的颗粒系统的纯剪切模拟, 模拟样本与各向同性挤压的相同. 模拟过程是先进行各向同性挤压, 等粒子密集后, 让水平方向的左右边界继续向里面挤压, 而竖直方向的上下边界向外扩展. 这样就会对颗粒堆积体产生纯剪切作用. 产生剪切时各个边界在不同的方向的位移仍然为 0.030 m. 时间步长取 5×10^{-6} , 总的时间步数为 30 万. 图 5 为加载后的粒子排列图.

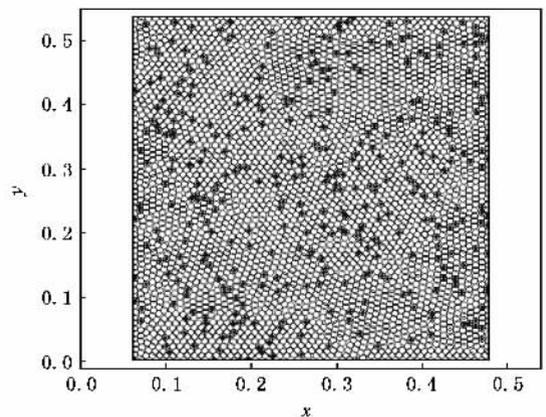


图 5 剪切后的粒子排列图

图 6 是没有缺陷时粒子间力的分布图. 通过比较 (a) 与 (b), 发现模拟结果与实验结果符合很好.

图 7 是纯剪切时各种模拟情况下粒子之间力的分布图. 从图 7 可以看到大于平均力的分布情况都类似, 都是随着力的增大, 分布概率呈指数衰减. 而小于平均值时分布有很大的不同. 缺陷数目越多, 在 0 到 0.5 倍平均力的区域, 力的取值概率越大, 而在 0.5 倍平均力和平均力之间, 则是随着缺陷的增加, 力的取值概率变小; 在平均力与 1.5 倍的平

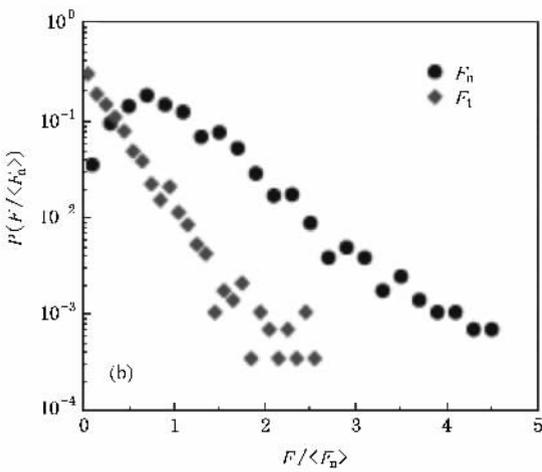
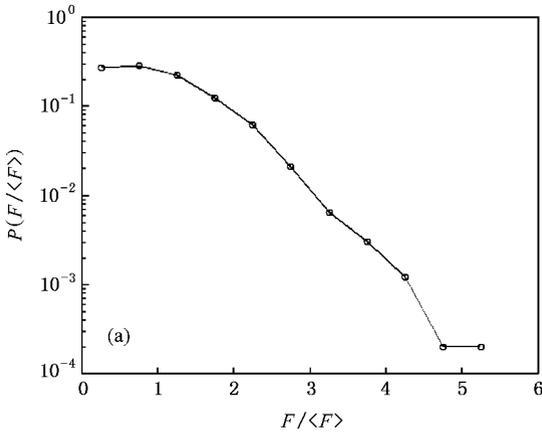


图6 无缺陷时力的分布图 (a)模拟结果(无缺陷); (b)Behringer 的实验结果(Nature)

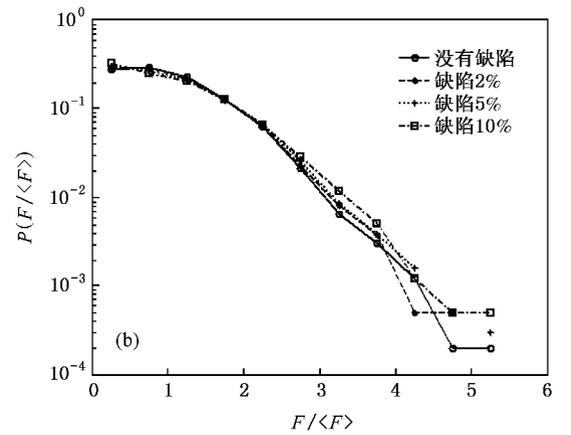
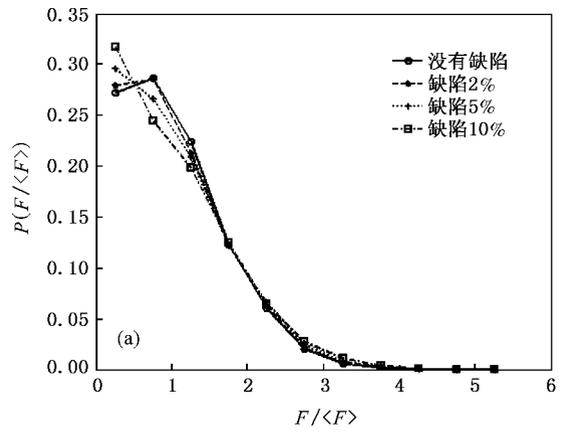


图7 粒子间力的分布比较图 (a)粒子间力的分布比较图; (b)粒子间力的分布半对数坐标比较图

均力之间的区域,也是随着缺陷的增加,力的取值概率变小;1.5到2.5倍平均力的区域则力值的概率相近;2.5到4.5倍平均力的区域,也是缺陷数目越多,力的取值概率越大.由此可知,在纯剪切的系统中,缺陷使颗粒系统颗粒之间力的分布发生了很大的变化,增加了较小的力和较大的力概率,而平均力附近的概率变小,并且缺陷数目越多,这种变化越明显;缺陷使颗粒系统中力分布的均匀性变差.这与各向同性挤压得到的结论一致.

4. 结 论

通过计算机模拟,首先用离散元方法研究了颗

粒系统在各向同性挤压和纯剪切状态下力的概率分布情况,并与相同条件下的实验结果进行对比,得到一致的结论.然后用离散元方法做了带点缺陷的颗粒系统的探索性模拟研究,发现了点缺陷对颗粒系统的影响规律.在力的概率分布方面,两种受力状态对于颗粒系统力的概率分布影响是一致的,缺陷的出现增加了较小的力和较大的力概率分布,而使平均力附近的力概率变小,并且缺陷数目越多,这种变化越明显;点缺陷使颗粒系统中力分布的均匀性变差.本文只研究了力大小的概率分布,而点缺陷对于颗粒系统中力链的几何分布的影响,则需要做进一步的研究.本研究结果对于纳米工程、土木工程、化工制药及军事方面,均有重要的意义.



- [1] Jaeger H M , Nagel S R , Behringer R P 1996 *Rev. Mod. Phys.* **68** 1259
- [2] Herrmann H J 2002 *Physica A* **313** 188
- [3] Hou M Y , Chen W , Zhang T , Lu K Q , Chan C K 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 204301
- [4] Jiang Z H , Lu K Q , Hou M Y , Chen W , Chen X J 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2244 (in Chinese) [姜泽辉、陆坤权、厚美瑛、陈 唯、陈相君 2003 物理学报 **52** 2244]
- [5] Bao D S , Zhou Y , Zhang X S , Tang X W 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 798 (in Chinese) [鲍德松、周 英、张训生、唐孝威 2005 物理学报 **54** 798]
- [6] 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]
- [7] Miao T D , Liu Y , Miao F X , Mu Q S 2005 *Chinese Science Bulletin* **50** 726
- [8] Miao T D , Yi C H , Qi Y L , Mu Q S , Liu Y 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4713 (in Chinese) [苗天德、宜晨虹、齐艳丽、慕青松、刘 源 2007 物理学报 **56** 4713]
- [9] Yi C H , Liu Y , Miao T D , Mu Q S , Qi Y L 2007 *Granular Matter.* **9** 195
- [10] Majmudar T S , Behringer R P 2005 *Nature* **435** 1079
- [11] Goldenberg C , Goldhirsch I 2005 *Nature* **435** 188
- [12] Ostojic S , Somfai E , Nienhuis B 2006 *Nature* **439** 828

The DEM simulation for two-dimension granular system with point defects *

Yi Chen-Hong^{1)†} Mu Qing-Sun²⁾ Miao Tian-De²⁾

1) *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research , Institute of Fluid Physics , China Academy of Engineering Physics , Mianyang 621900 , China)*

2) *Department of Mechanics , Lanzhou University , Lanzhou 730000 , China)*

(Received 14 October 2007 ; revised manuscript received 16 November 2007)

Abstract

In this article , the discrete element method is used to research the force distribution of two-dimensional granular system under the condition of isotropic compression and pure shear . The simulation results are compared with the experimental results under the same conditions . Then we simulate the force distribution of two-dimensional granular system with point defects under the condition of isotropic compression and pure shear and compare the results with the results without point defects . The affects of point defects to granular system are found .

Keywords : granular system , discrete element method (DEM) , point defect , force distribution

PACC : 4610 , 6170 , 6210

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10172041) and the National Science Foundation for Young Scientists of China (Grant No. 10402012).

† E-mail : yichh04@st.lzu.edu.cn