

集中力作用下球形颗粒六角密排堆积体的传力研究^{*}

苗天德 宜晨虹[†] 齐艳丽 慕青松 刘 源

(兰州大学土木工程与力学学院, 兰州 730000)

(2006 年 4 月 7 日收到 2007 年 1 月 24 日收到修改稿)

采用铝塑板技术和复写纸技术相结合,当球形颗粒堆积体在不同的六角密排情况下受集中力作用时,对堆积体底面力的分布情况进行了定量的实验研究.结果表明 在所有排列情形下都存在明显的拱效应,且在堆积体的每一水平层面上力的分布都具有 120°对称性.证实了颗粒排列形式对力的传递有很大影响.发现在纯六角密排排列时,底部颗粒的受力最为平均,单个颗粒受力的最大值在所有排列中为最小.还发现了非主力链的‘聚焦’现象.对实验结果做出了理论解释.

关键词:颗粒介质,六角密排,力链

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,越来越受到各国学者的重视^[1,2].近年来我国学者在这一研究领域也作了一些很有益的工作^[3-6].对于静态的颗粒堆,在外力作用下其内部的应力分布具有明显的空间不均匀性和加压膨胀的特性,并且在某些堆积系统中有拱效应(arching effect)的存在.对于三维颗粒堆中力的传递与分布,目前的研究主要集中在从统计的观点出发来建立堆积体中力的传递模型.在此类的研究中,活塞产生的力作为均布载荷完全施加在颗粒介质的上表面,没有研究集中力(力只施加在颗粒堆表面的一个颗粒上)作用的情况^[7-10].颗粒研究中常用的光弹实验只能对二维的颗粒系统做系统研究,迄今为止,对于三维颗粒系统还不能用光弹试验从整体上得到结果.对于三维有序颗粒排列力链传递的研究,目前所见的文献很少. Mueggenburg 等^[11]进行了这方面的工作,他们主要是利用均一的球形颗粒建立了完整的面心立方(fcc)晶体点阵和六角密排(hcp)晶体点阵排列,研究了在上表面很小的区域(直径为 6 个颗粒)在竖直力作用下晶体底部的受力情形,得出 hcp 晶体底部主要受力颗粒的分布为一个“圆环”,但没

有进一步对这个“圆环”的特点进行研究. Spannuth 等^[12]研究了有排列缺陷的 fcc 晶体受力时晶体底面力的分布情况,并根据实验推断出极限缺陷排列的 fcc 晶体底面力的分布与 hcp 晶体相同,即从纯 fcc 晶体底部的三个点受力增加到更多的点受力,最后得到 hcp 晶体的受力.

本文采用大钢珠 hcp 堆积形式,在堆积体(我们有时亦称此为晶体)上表面中心位置的钢珠上施加竖直压力,排除了以前的研究中在多颗珠子上施加作用力时力链传递的相互干扰.通过实验详细研究了堆积体底部力的分布区域的形状、特点及其形成原因.给出了主要力链和非主要力链的定义,并研究了主要力链的传递特征.以前的研究大多采用复写纸技术(有的研究者称之为“指纹技术”(fingerprints))记录受力情况^[13,14],本文则采用铝塑板与复写纸相结合的技术来记录晶体底部力的分布.

2. 实验装置与方法

将直径为 30 ± 0.15 mm 的钢珠(表面抛光),放入直径为 310 mm 的圆柱形钢制容器中,进行紧密的晶体点阵排列.为了保持对晶体约束的均匀性,对晶体边和圆柱容器之间的空隙,用直径为 3 mm 的光滑

^{*} 国家自然科学基金(批准号:50172041)和国家自然科学基金青年基金(批准号:50402012)资助的课题.

[†] E-mail: yichh04@lzu.cn

小钢珠填满. 晶体中间不含有小钢珠.

在容器的底部放置一块厚为 3 mm, 直径为 305 mm 的圆形铝塑板. 铝塑板上依次放置同样大小的复写纸和宣纸. 晶体底面的珠子与宣纸直接接触, 当珠子受力时, 会在宣纸上留下直径不同的印痕, 通过测量印痕的直径可计算出珠子对底部的压力.

为了确定力的大小和印痕直径之间的关系, 我们进行了标定试验. 测定单个珠子在给定压力时印痕的直径, 通过实验得到一系列力和印痕直径的对应关系, 并用多项式拟合. 试验所得的标定曲线如图 1(a) 所示, 曲线拟合方程为

$$F_l = 465 - 275x + 49x^2 + 1.6x^3 - 0.1x^4, \quad (1)$$

式中 F_l 为力, 单位为 N, x 为印痕的直径, 单位为 mm. 图 1(b) 为标定测量的标准偏差.

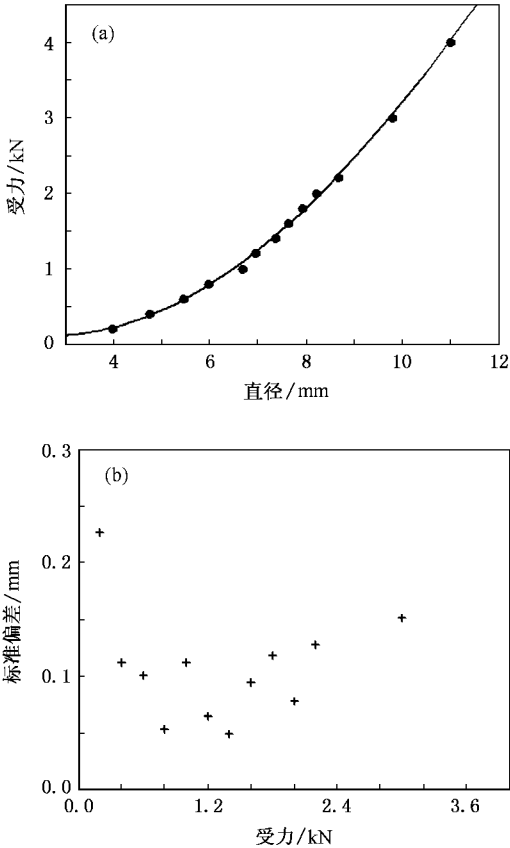


图 1 标定的曲线与标准偏差 (a) 力与印痕直径的标定曲线, (b) 标定测量的标准偏差

对于珠子在水平层面的排列方式, 根据文献 [15] 我们做如下定义: 如图 2(a) 所示, 取实心圆所处的平面为 β 平面, J, K, L, M, N, P, O 表示 β 平面上各个珠子的位置, O 位于平面中心. 空心圆表

示 β 平面上方或者下方的珠子位置. 晶体中心处珠子按照 ABC 方式排列的平面称为 α 平面 (图 2(a)); 按照 DEF 方式排列的平面称为 γ 平面 (图 2(b)). 在三维图中, y 坐标轴的正方向与图 2(a) 中 α 平面的三角形 ABC 的指向一致. y 坐标轴的负方向与图 2(b) 中 γ 平面中的三角形 DEF 的指向一致. β 平面在容器中排列时珠子数为 85, 晶体直径为 30 cm, 相当于 10 个大珠子的直径; α 和 γ 平面在容器中排列时珠子数为 78, 晶体直径也是 30 cm. α 和 γ 平面周围与容器之间的空隙比 β 平面与容器之间的空隙大, 这三种平面与容器的空隙都用 3 mm 的小珠子填满.

图 3(a) 为颗粒在钢珠容器中的排列照片. 我们主要构造了三种层高的颗粒堆积体: 3 层、5 层和 7 层. 3 层堆积体从上至下平面排列情况依次为 $\beta\alpha\beta$, 由于此时堆积体为对称结构, 也可称其排列为 $\beta\gamma\beta$. 5 层堆积体分两种排列情形, 平面从上到下排列分别为 $\beta\alpha\beta\alpha\beta$ 和 $\beta\gamma\beta\alpha\beta$. 7 层堆积分四种情形, 平面排

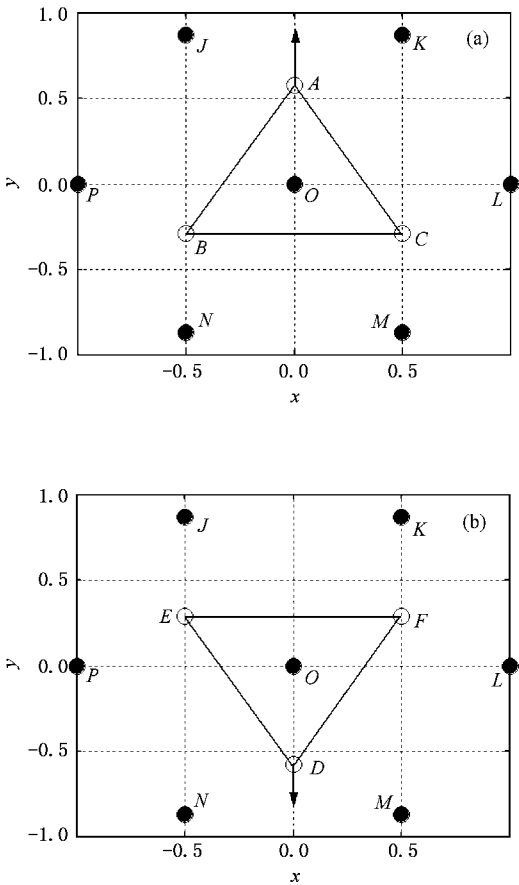


图 2 颗粒在水平层面排列示意图 (a) α 平面与 β 平面, (b) γ 平面与 β 平面

列分别为 $\beta\alpha\beta\alpha\beta\alpha\beta$, $\beta\gamma\beta\alpha\beta\alpha\beta$, $\beta\alpha\beta\gamma\beta\alpha\beta$ 和 $\beta\gamma\beta\gamma\beta\alpha\beta$. 对于上述所有堆积形式,作用力都施加在顶层 β 平面的 O 点处的珠子上,作用力大小为 30 kN.

采用 500 t 压力试验机进行加载,加载速度控制在 0.5 kN/s 左右. 荷载加到 30 kN 后,停顿 3 s,然后开始卸载. 加载装置如图 3(b) 所示. 每一种排列均作 10 次试验,根据底部宣纸的压痕由(1)式计算出作用力,求出同一位置 10 次试验的平均力. 底部珠子在每次试验时位置固定,因此每个位置在同一种排列时都有相同的受力情况.

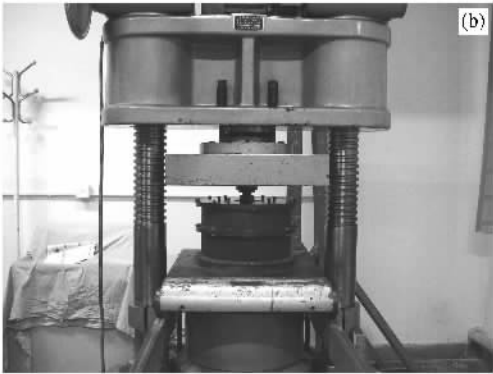
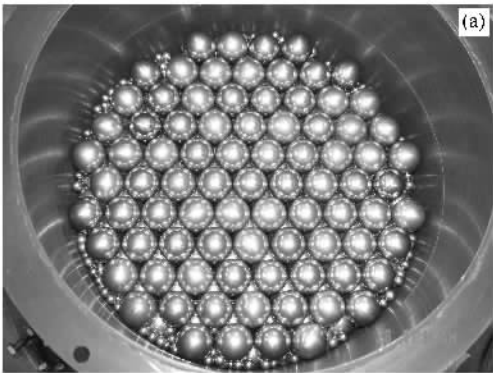


图 3 颗粒排列与加载装置照片 (a) 颗粒排列, (b) 加载装置

3. 实验结果

图 4(a) 为堆积层数为 5 时实验得到的印痕照片. 图 4(b) 为堆积层数为 3 时堆积体底部的力分布,此时,底部共有 7 颗珠子受力,这 7 颗珠子是相邻的,位于晶体的正中间,排列成一个规则的六边形. 位于六边形顶点处的 6 颗珠子所受的力大小基本相等,数值较大,而处于中心位置的 1 颗珠子所受的力很小.

图 5 为堆积层数为 5 时堆积体底部的受力分

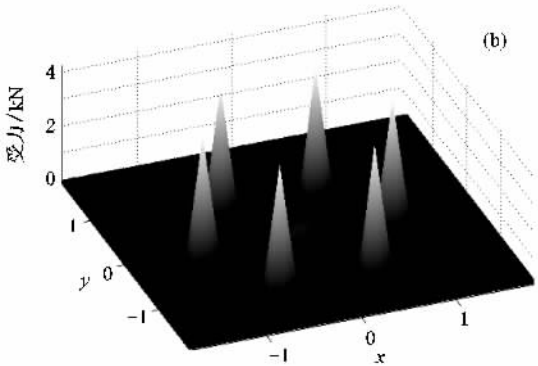
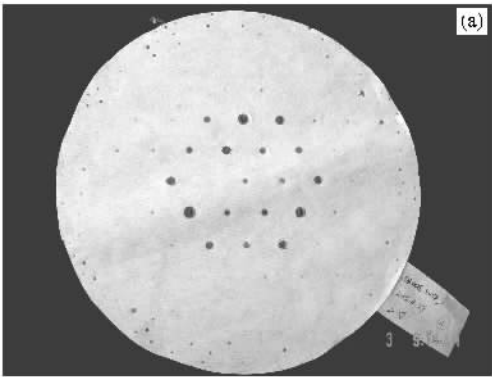


图 4 堆积层数为 5 时实验得到的印痕照片和 3 层堆积体底部的力分布 (a) 堆积层数为 5 时实验得到的印痕照片, (b) 3 层堆积体底部的力分布

布. 此时,底部受力区域共有 19 颗珠子,力的分布随堆积体排列形式的不同而改变. 对于 $\beta\alpha\beta\alpha\beta$ 排列,位于最外圈的六边形每个边中点处的珠子受力最大,中心处颗粒几乎不受力(图 5(a)). 而对于 $\beta\gamma\beta\alpha\beta$ 排列,只有最外圈的六边形三个边中点的 3 颗珠子受力最大,与这 3 颗珠子同边的 2 颗珠子受力较小,而其余珠子受力非常小(图 5(b)).

堆积层数为 7 时底部受力区域共有 37 颗珠子,底部的力分布随堆积体的排列形式改变而不同. 排列形式为 $\beta\alpha\beta\alpha\beta\alpha\beta$ 时,较大受力区域在最外面的两圈,中心处珠子受力较小,但不是最小(图 6(a)),这是一种新现象. 六边形的对角线上的 7 颗珠子的受力情况见图 7. 排列形式为 $\beta\gamma\beta\alpha\beta\alpha\beta$ 时,除了位于最外圈六角形的三个边中间处的 6 个珠子受力明显较大外,其余珠子受力都较小(图 6(b)). 排列形式为 $\beta\alpha\beta\gamma\beta\alpha\beta$ 时,较大受力区域仍在外面的两圈,中心处珠子几乎不受力(图 6(c)). 排列形式为 $\beta\gamma\beta\gamma\beta\alpha\beta$ 时,较大受力区域在外面两圈的部分区域,呈三角形布局,位于最外圈六角形的三个边中间处的 6 颗珠子受力最大(图 6(d)).

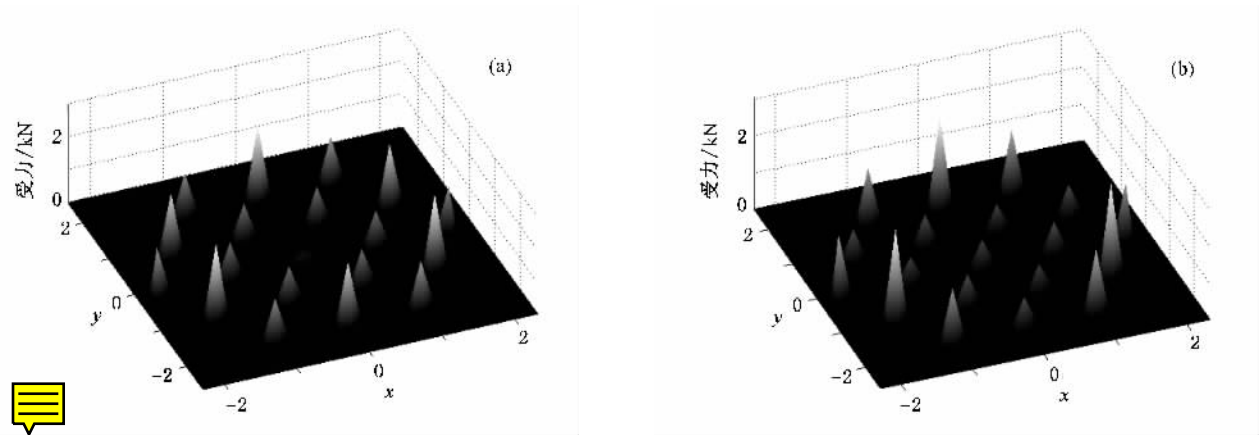


图 5 堆积层数为 5 时堆积体底部的受力分布 (a) $\beta\alpha\beta\alpha\beta$ 排列, (b) $\beta\gamma\beta\alpha\beta$ 排列

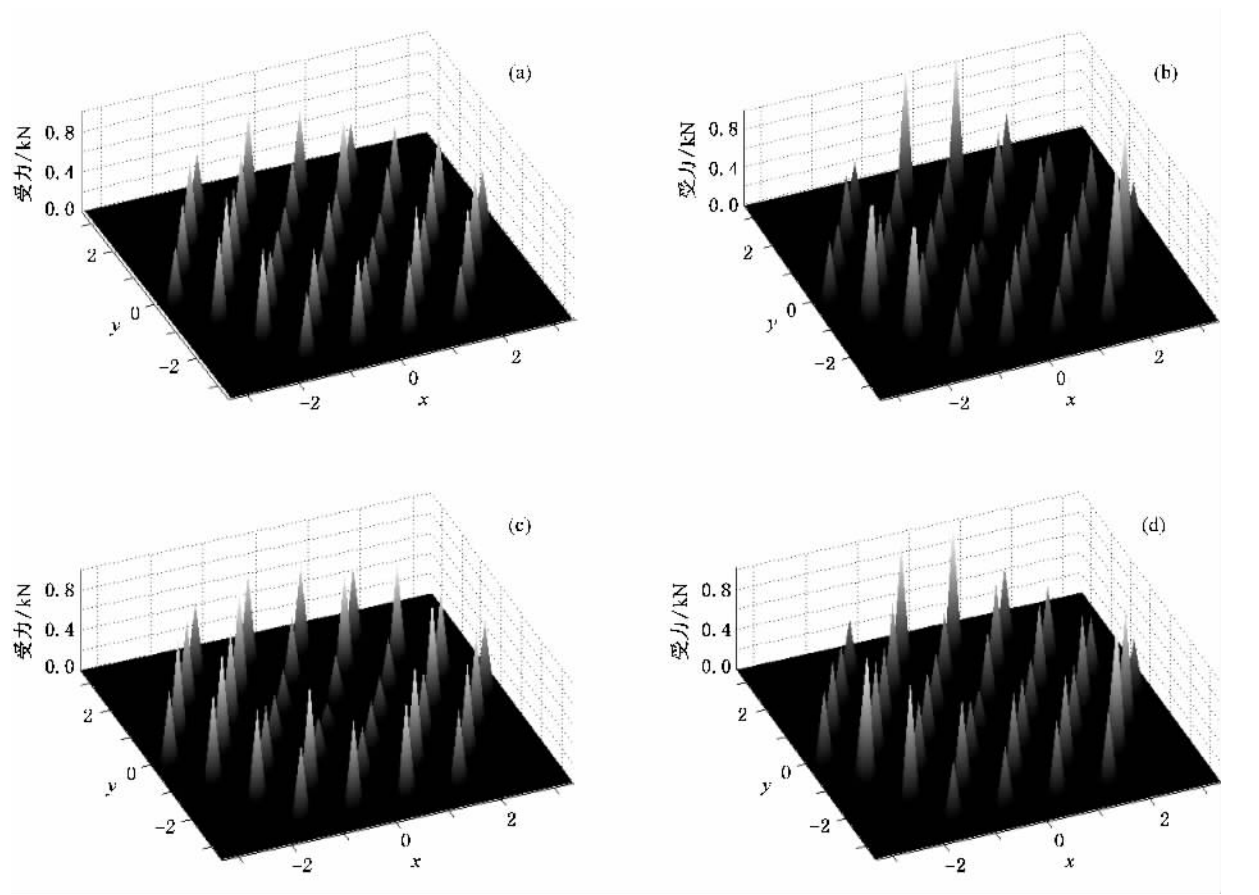


图 6 堆积层数为 7 时堆积体底部的受力分布 (a) $\beta\alpha\beta\alpha\beta\alpha\beta$ 排列, (b) $\beta\gamma\beta\alpha\beta\alpha\beta$ 排列, (c) $\beta\alpha\beta\gamma\beta\alpha\beta$ 排列, (d) $\beta\gamma\beta\gamma\beta\alpha\beta$ 排列

4. 讨 论

与文献[11]类似,本文实验所得的结果可以用力的传递模型来解释.如图 8 所示,处于 i 层的珠子 4 向下一层($i+1$ 层)的珠子传力的形式有两种:一种是 i 层的珠子 4 将它受到的 $i-1$ 层珠子的力传到 $i+1$ 层的两个珠子上,称为 I 型传力(如图 8 虚

线箭头所示).另一种是珠子 4 将受到 $i-1$ 层的力传到 $i+1$ 层的一个珠子上,称为 II 型传力(如图 8 实线箭头所示). I 型传力中 i 层的珠子 4 从上层得到的力有两种情况:第一种是上层的一个珠子 1 传给它的力 F (图 8(a)虚线箭头), F 与竖向的夹角为 θ (图 9(a)).第二种是 $i-1$ 层的两个珠子(珠子 1、珠子 3)传给珠子 4 的力(图 8(b)虚线箭头),这两个力可合成力 F' , F' 与竖向的夹角为 λ (图 9(b)).

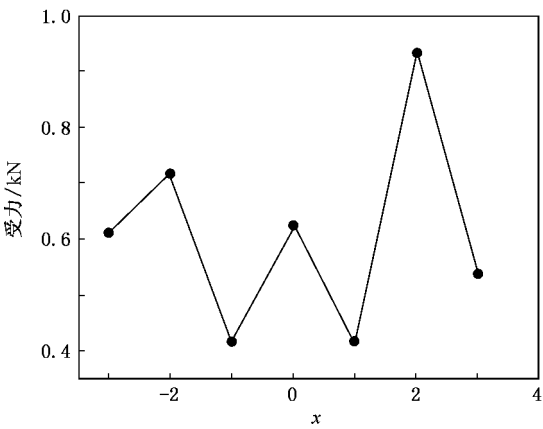


图7 六边形对角线上7个珠子的受力情况 x 轴表示7个珠子的位置

同理, II 型传力中 i 层珠子 4 从上层得到的力也是这两种情况. I 型传力和 II 型传力中竖向力的分配系数共有 8 个, 分别记为 a, b, c, d, e, f, g, h . 图 8 (a) 中, 1—4—6(7) (此处表示 $i-1$ 层的珠子 1 上的力经 i 层珠子 4 传递到 $i+1$ 层的珠子 6 和珠子 7, 以下意义类似) 的传递系数为 a ; 1—4—5 传递系数为 b ; 2, 3—4—5 传递系数为 g ($i-1$ 层的珠子 2 和

珠子 3 的合力经 i 层珠子 4 传递到 $i+1$ 层的珠子 5) 2, 3—4—6(7) 传递系数为 h . 图 8 (b) 中, 1, 3—4—6(7) 传递系数为 c ; 1, 3—4—5 传递系数为 d ; 2—4—5 传递系数为 e ; 2—4—6(7) 传递系数为 f . 系数之间的关系为

$$\begin{aligned} 2a + b &= 1, \\ 2c + d &= 1, \\ e + 2f &= 1, \\ g + 2h &= 1. \end{aligned}$$

力链的传递系数仅由 a, c, e, g 中一种或几种组成的力链定义为主要力链, 只要存在有 b, d, f, h 的力链传递系数的力链则定义为非主要力链. 非主要力链的传递情况比较复杂, 本文重点对主要力链进行研究.

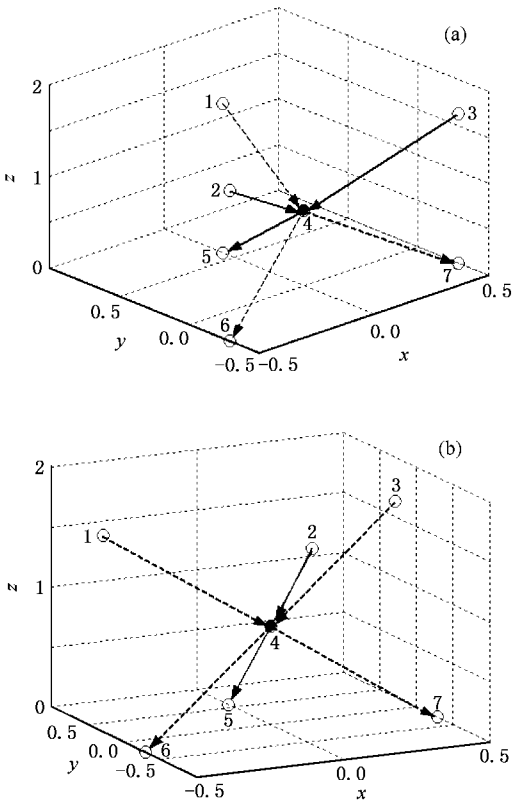


图8 力链示意图 (a) I 型传力的第一种情况和 II 型传力的第二种情况, (b) I 型传力的第二种情况和 II 型传力的第一种情况

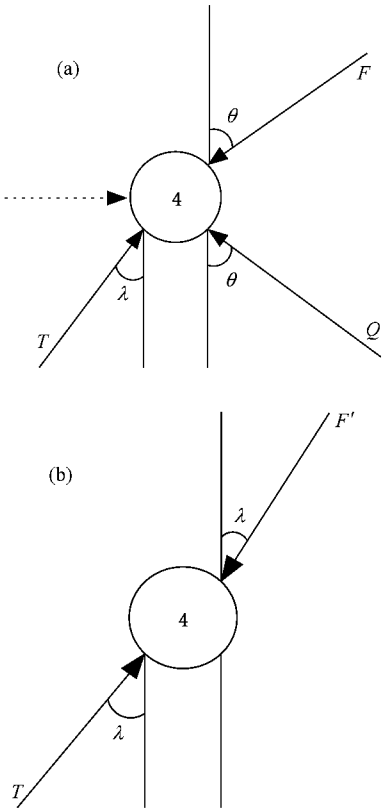


图9 I 型受力分析 (a) 对应于第一种情况, (b) 对应于第二种情况

下面对 I 型传力中第一种情况进行受力分析. 设 $i-1$ 层珠子 1 传给珠子 4 的力为 F , 由于对称关系, 珠子 6 和珠子 7 所受的力是相等的, 其反作用于珠子 4 的合力方向为珠子 6 和珠子 7 连线的中点指向珠子 4 的中心. 设其合力大小为 T , 并设珠子 5 反作用于珠子 4 的力为 Q , 假定珠子 4 不受同层的水

平力可以平衡,则可在 F, T 所确定的平面对珠子 4 作受力分析(图 9(a)),

$$F \sin \theta + Q \sin \theta = T \sin \lambda, \tag{2}$$

$$F \cos \theta = T \cos \lambda + Q \cos \theta. \tag{3}$$

(2) 式为平面内水平方向的平衡方程, (3) 式为竖向的平衡方程, 根据几何关系可得到 $\theta = 35.2^\circ, \lambda = 19.5^\circ$. 解方程 (2), (3) 得到

$$T = 1.15 F,$$

$$Q = -0.33 F.$$

由于我们研究的是没有粘结力的珠子, 因此 Q 值不可能为负值, 所以在水平方向珠子 4 必定受同层珠子给它的水平力, 如图 9(a) 中虚线所示.

对于 I 型传力中的第二种情况, 由于上层珠子 1 和珠子 3 对珠子 4 的合力 F' 与竖向的夹角为 λ , F' 与合力 T 的方向一致(见图 9(b)), 可以在没有其他方向力的情况下保持稳定平衡, 因此其他方向产生的力只是为了保持它们的稳定性, 所以系数 d 数值很小. 对于 II 型传力的第一种情况(图 10(a)), 与 I 型传力中第二种情况相似, 这里不再作分析. 对

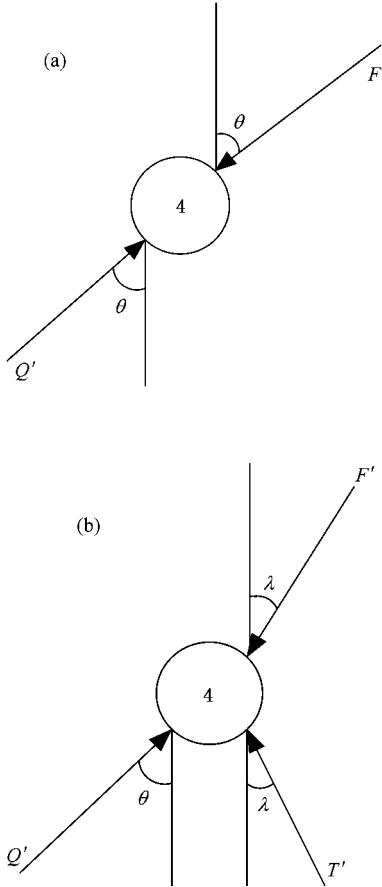


图 10 II 型受力分析 (a) 对应于第一种情况, (b) 对应于第二种情况

II 型传力的第二种情况(图 10(b)) 分析珠子受力,

$$Q' \sin \theta = F' \sin \lambda + T' \sin \lambda, \tag{4}$$

$$Q' \cos \theta + T' \cos \lambda = F' \cos \lambda. \tag{5}$$

解方程 (4), (5) 得

$$Q' = 0.76 F',$$

$$T' = 0.47 F'.$$

由于 T' 值很大, 所以力的分配系数 h 比较大.

根据上述的受力模型我们依次对实验中 7 种排列形式的颗粒堆积体传力情形进行分析.

图 11 是堆积层数为 3 时主要力链传递情况, 图中实心圆表示第一层的中间受力的珠子, 集中力加在此珠子上, 空心圆表示第二层与上层实心球相邻的 3 颗珠子, 星号表示第三层受主要力的 6 颗珠子, 箭头表示力的传递方向. 第二层与第三层属于 I 型传力的第一种情况, 第三层正中间还有 1 颗珠子, 但它与第一层中间珠子的位置重叠而被遮挡, 这颗珠子受第二层的 3 颗珠子对它的非主要力. 从图 11 可以看出, 颗粒堆积体受集中力时, 力的传递具有 120° 对称. 这与实验结果(图 4(b))是一致的.

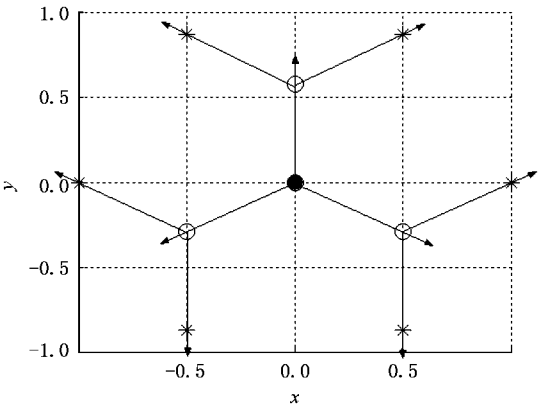


图 11 3 层 $\beta\beta$ 排列时主要力链传递情况 ●, ○, * 分别表示第一层到第三层的珠子

图 12(a) 中有 3 颗第四层的珠子(箭头相交处, 即力链交汇处)传给第五层珠子的力属于 II 型传力的第二种情况, 其余的都属于 I 型传力的第一种情况. 在底层的受力区域中, 外层六边形的三条边中点处的珠子位于两条力链的交汇处(图 12(a)), 因此该珠子受的力大于其两边的两颗珠子, 而另外三条边中间的珠子的力链在第四层也有交汇, 因此这三个位置的力比其旁边的也要大, 由于有传递系数 h (如上所述, h 的值比较大), 所以图 5(a) 中次外圈的珠子所受的力也比较大(与非主要力链有关). 分析结果与图 5(a) 的试验结果完全相符. 图 12(b) 中

第二层的珠子对第三层的珠子以及第四层的珠子对第五层的珠子的传力属于Ⅰ型传力的第一种情况，第三层的珠子对第四层的珠子的传力情况属于Ⅱ型

传力的第一种情况. 底部外层六边形中有三条边中点处的珠子没有力链经过, 因此受力很小. 由此可知, 分析结果与实验结果(图 5(b))符合很好.

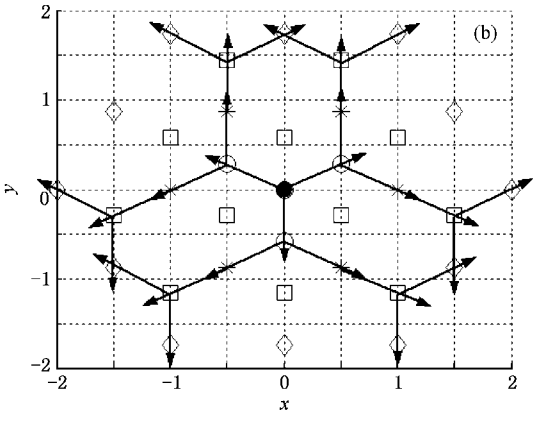
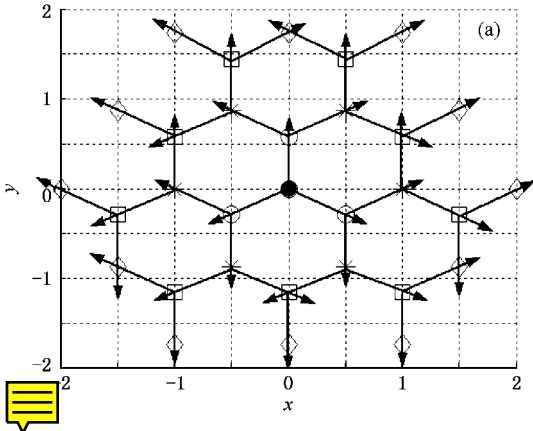


图 12 5 层堆积时主要力链传递情况 (a) 5 层 $\beta_1\beta_1\beta_1\beta_1\beta_1$ 排列, (b) 5 层 $\beta_1\gamma_1\beta_1\beta_1\beta_1$ 排列. ●, ○, *, □, ◇ 分别表示第一层到第五层的珠子

7 层的 $\beta_1\beta_1\beta_1\beta_1\beta_1\beta_1\beta_1$ 堆积中, 由于存在Ⅱ型传力的第二种情况, 即因有传递系数 h , 所以图 6(a) 中紧靠中心位置的那一圈颗粒受力比其他排列时同一位置的

值大. 而中心位置的局部最大值的出现, 则是由于“聚焦”现象, 即图 13(a) 中第四层所有主要力链上的 9 颗珠子所传递的非主要力链都汇交于底层的中

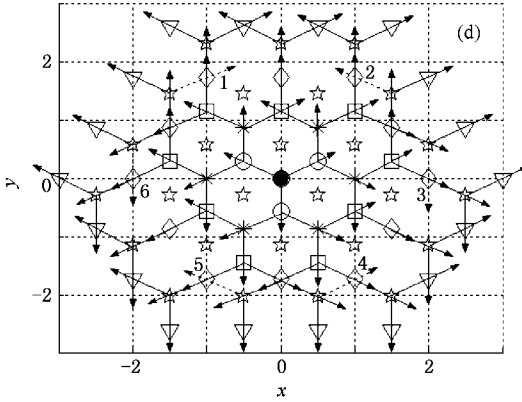
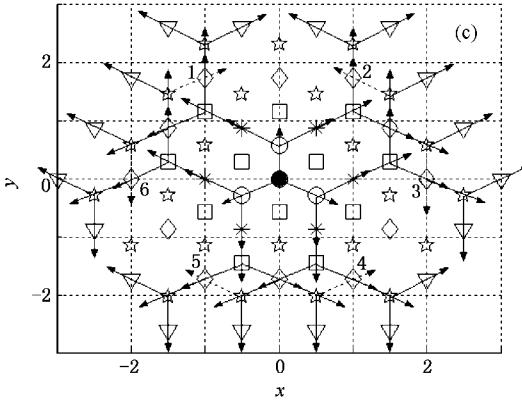
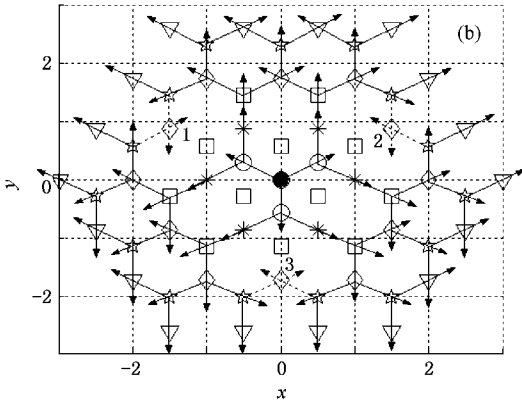
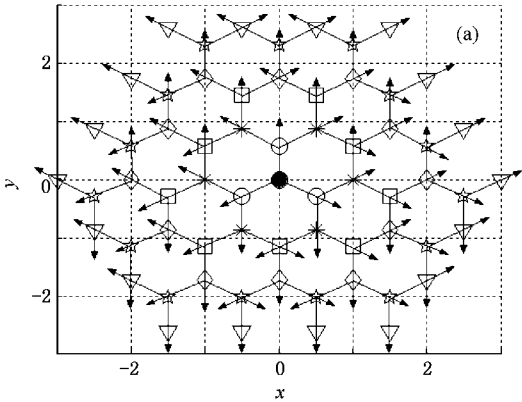


图 13 7 层堆积时主要力链传递情况 (a) 7 层 $\beta_1\beta_1\beta_1\beta_1\beta_1\beta_1\beta_1$ 排列, (b) 7 层 $\beta_1\gamma_1\beta_1\beta_1\beta_1\beta_1\beta_1$ 排列, (c) 7 层 $\beta_1\beta_1\gamma_1\beta_1\beta_1\beta_1\beta_1$ 排列, (d) 7 层 $\beta_1\gamma_1\beta_1\gamma_1\beta_1\beta_1\beta_1$ 排列. ●, ○, *, □, ◇, ☆, ▽ 分别表示第一层到第七层的珠子

心点,见图 14. 图 13(a)和图 14 就能很好地解释图 6(a)的现象.

图 13(b),(c),(d)中的虚线箭头表示主力链没有传递到底层的六边形最外层,而传到了次外层(图中 1,2,3,4,5,6 所表示的位置).这几个位置应该为第七层的珠子,但是由于被第 5 层的珠子所遮挡,所以看到的是代表第五层的珠子的符号,而实际传递到的是第 7 层的珠子.采用以上的分析方法,通过分析图 13(b),(c),(d),我们可以得到图 6(b),(c),(d)现象的解释.

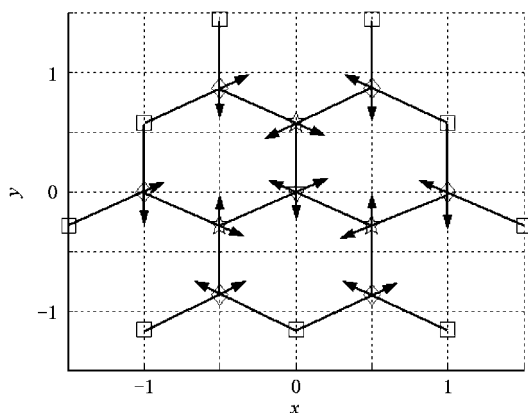


图 14 非主力链的‘聚焦’现象 □,◇,☆,▽ 分别分别表示第四到第七层的珠子

对于 7 层的纯 hcp 堆积(即 $\beta\alpha\beta\alpha\beta\alpha\beta$ 堆积)出现的‘聚焦’现象,在文献[11]中未见提及,这是否由于层数的增加(文献[11]为 19 和 25 层,而本文为 3—7 层)或加力模式(文献[11]中的力施加在顶层中间直径为 6 个珠子的区域,而本文的力施加在顶层中间的一个珠子)的不同导致这一现象的消失,对此还需要进一步的实验研究.

本文给出理论模型的不足之处是:只考虑了主力链效应,所以只适用于分析较少层数.当层数增多时,该理论模型的可扩展性受到限制.原因是越来越多的力会分散到非主力链上,使得主力链在力传递中的作用逐渐丧失主导地位,此时非主力链开始起主导作用.只有引入了考虑非主力链效应的数学方法对理论模型予以修正后,才可用于对较多层数的

分析.另外,本文的主力链模型只能解释晶体底部受力区域最外层珠子的受力情况,而对于内部的受力珠子情况则不能完全说明.这两点是我们今后工作的研究重点.

5. 结 论

本文利用大钢珠和大尺寸的钢罐,把集中力施加在一颗珠子上,并首次采用铝塑板和复写纸相结合的技术来记录颗粒堆底部的受力情况.通过实验研究了排列形式不同的 7 种颗粒堆积体,得到如下主要结论:

- 1) 纯 hcp 的排列在所有 hcp 情况中颗粒底部的受力最为均匀,单个珠子的受力峰值最小.
- 2) 对于 7 层的纯 hcp 排列,在颗粒堆积体的底部中心处存在一个局部最大值,底部力的分布整体呈现出同心的双圆环峰形结构(外环峰最高).
- 3) 在所有排列情形下都存在明显的拱效应:在堆积体的每一水平层面上力的分布都具有 120° 对称性.
- 4) 相同颗粒数不同排列形式的颗粒堆积体,其底部力的分布有很大不同.

5) 分析了两种传力形式的四种情况,并定义了主力链和非主力链.利用主力链对实验结果进行了分析,分析结果与实验结果符合很好.

现有的实验条件还不能直接得到颗粒堆的三维直观力链图,也不能直接观测到内部的结构.实验表明:随着堆积排列形式的不同,堆积体底部力的分布情形亦不同,每一种排列形式都对应着不同的力分布.正如有的学者所称,颗粒体底部受力情况是颗粒堆积排列方式的‘指纹’(fingerprints),它可以反映颗粒的内部结构.通过研究颗粒体底部力的分布,就可以知道颗粒堆积体的内部结构.如何得到一个堆积体底部受力分布与其内部结构的对应规律,还有待于进一步的实验和理论研究.此外,本研究对晶体结构及纳米材料合成等问题都有着重要的借鉴作用.

感谢康国瑾高级实验师在实验工作中的指导.

[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] 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]

[4]

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]

[5]

Zhang Q Y, Wu Y Y, Peng Z, Liu R, Lu K Q, Hou M Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6203 (in Chinese) [张权义、吴耀宇、彭政、刘锐、陆坤权、厚美瑛 2006 物理学报 **55** 6203]

[6]

Hu M B, Kong X Z, Wu Q S, Wu Y H 2005 *Chin. Phys.* **14** 1844

[7]

Liu C H, Nagel S R, Schecter D A, Coppersmith S N, Majumdar S, Narayan O, Witten T A 1995 *Science* **269** 513

[8]

Coppersmith S N, Liu C H, Majumdar S, Narayan O, Witten T A 1996 *Phys. Rev. E* **53** 4673

[9]

Erikson J M, Mueggenburg N W, Jaeger H M, Nagel S R 2002 *Phys. Rev. E* **66** 040301

[10]

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]

[11]

Mueggenburg N W, Jaeger H M, Nagel S R 2002 *Phys. Rev. E* **66** 031304

[12]

Spannuth M J, Mueggenburg N W, Jaeger H M, Nagel S R 2004 *Granular Matter* **6** 215

[13]

Mueth D M, Jarger H M, Nagel S R 1998 *Phys. Rev. E* **57** 3164

[14]

Blair D L, Mueggenburg N W, Marshall A H, Jaeger H M, Nagel S R 2001 *Phys. Rev. E* **63** 04130

[15]

Charles R, Lorenzo S 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 015502

Force transmission in three-dimensional hexagonal-close-packed granular arrays submitted to a point load^{*}

Miao Tian-De Yi Chen-Hong[†] Qi Yan-Li Mu Qing-Song Liu Yuan
(College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)
(Received 7 April 2006 ;revised manuscript received 24 January 2007)

Abstract

In this article, the aluminium-plastic board and carbon paper technique are combined to investigate the contact force at bottom boundary of three-dimensional ordered granular arrays in response to a point load. Arching effects were observed with all arrays, and the force distribution markedly depends on the crystal structure and has a 120°-symmetry at every layer of the crystals, while the heterogeneity in force distribution in the pure hcp arrays is minimal of all the arrays. Non-main force chains were observed to have the “focalization” phenomena. These results can be explained by a force-transmission model.

Keywords : granular matter, hexagonal-close-packed array, force chain
PACC : 4610, 6170, 6210

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10172041) and the National Natural Science Foundation for Young Scientists of China (Grant No. 10402012).
[†] E-mail : yichh04@lzu.cn