



CSTAM 2012-B03-0047

**三维圆球颗粒与流场相互作用的格子
Boltzmann 模拟**

曹传胜, 陈胜, 栗晶, 包胜, 柳朝晖, 郑楚光

华中科技大学煤燃烧国家重点实验室

第七届全国流体力学学术会议

2012 年 11 月 12—14 日 广西·桂林

三维圆球颗粒与流场相互作用的格子 Boltzmann 模拟¹⁾

曹传胜, 陈胜, 栗晶, 包胜, 柳朝晖²⁾, 郑楚光

(华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要 流体流动与颗粒(群)之间的相互作用机理研究一直是多相流领域中的热点难点问题, 而格子 Boltzmann (LB) 方法是一种天然并行、易于处理复杂边界的介观方法, 本文采用格子 Boltzmann 方法模拟了多颗粒在三维流场中的自由沉降问题, 首先再现了双颗粒沉降过程中产生的 DKT (Drafting-Kissing-Tumbling) 现象, 并详细讨论了此现象产生的微观机理, 包括其涡量场、压力场等, 结果表明后面的颗粒进入前面颗粒产生的低压尾涡区内时, 其所受的阻力将减小而加速运动, 并与前颗粒产生碰撞。同时本文研究了并列双颗粒沉降产生的排斥现象, 讨论了颗粒相对距离及颗粒旋转运动对其产生的影响, 结果表明颗粒越近排斥作用越明显, 同时并列颗粒旋转将产生排斥力。最后本文模拟了三个及以上颗粒的沉降问题, 讨论了颗粒群与流场的相互作用, 发现同样存在 DKT 现象以及颗粒间的排斥运动; 同时在相对多的颗粒数时, 发现了颗粒相互吸引而产生的团聚现象, 并给出了流场结构, 包括流场、压力场、涡量场等。

关键词 格子 Boltzmann 方法, 颗粒(群)沉降, DKT 现象, 排斥作用, 颗粒团聚

引言

颗粒(群)与流体之间的相互作用机理研究一直是多相流领域中的热点问题, 流体颗粒系统广泛存在于化工、环境、能源等领域, 其与流化床、燃烧、颗粒悬浮等应用密切相关。无论是从应用角度还是从基础研究角度, 研究流体与颗粒直接的相互作用都非常重要, 因此吸引了众多研究者进行实验以及模拟方面的研究[1-3]。

在实际的流体颗粒系统中, 颗粒数量相对较大, 其相互间的作用非常复杂, 且流体流动是三维的, 但是在已有的文献中, 对于单颗粒及二维圆柱的研究较多, 而对三维多颗粒的研究相对较少。同时, 对于复杂的实际流体颗粒系统, 直接进行数值模拟等研究几乎是不可能的, 因此, 简化流体颗粒系统是一个可行的方法, 首先研究少量颗粒的系统, 掌握颗粒与流体直接的相互作用机理, 然后逐渐扩展到多颗粒系统。

本文采用格子 Boltzmann 方法模拟了三维大流场中双颗粒、三个及以上颗粒的沉降过程 ($Re_p = O(100)$, Re_p 与颗粒直径及沉降速度有

关), 详细讨论沉降颗粒之间以及颗粒流场之间的相互作用机制。

1 格子 Boltzmann 方法简介

格子 Boltzmann (LB) 方法是以编程简单、天然并行、易于处理复杂边界为特色的介观方法, 数十年来, 格子 Boltzmann 方法在复杂流动等领域有了很大发展[1,4]。本文采用 LBGK 模型进行模拟, 速度模型是 D3Q15, 详细介绍见文献[1,4,5]。

对于边界处理部分, 考虑到 Wu & Aidun (2010)[6]提出的附加边界应力方法非常适合于处理运动边界, 本文球形曲面边界处理均使用该方法, 详见文献[1,6]。

颗粒碰撞部分的处理采用 Glowinski et al.(2001)[7]提出的处理方法, 该方法假设当两颗粒间的距离小于给定的阈值时, 颗粒间将产生排斥作用力, 避免颗粒边界相互穿透, 详细分析见文献[7]。

2 数值方法验证

1) 基金资助项目(国家重大基础研究专项基金 No. 2010CB227004; 国家自然科学基金 No. 50936001, 50976042, 51021065, 51006043, 51176061; 中国博士后科学基金 No. 2011M501202)

2) Email: zliu@hust.edu.cn

2.1 三维单颗粒沉降验证

验算算例的模拟区域大小为 $12.5D \times 12.5D \times 100D$ ，球形颗粒直径为 $D=0.8\text{mm}$ ，颗粒与流体的密度分别为 7.71g/cm^3 及 1.0g/cm^3 ，流体运动粘度为 $0.009\text{cm}^2/\text{s}$ ，重力加速度为 $g=981\text{cm/s}^2$ ；，图 1 给出了不同网格分辨率情况下，颗粒沉降速度随时间变化的曲

线图，并与文献结果[8,9]进行了对比，同时从表 1 中可以看出在网格分辨率为 $D=16dx$ 与 $D=32dx$ (dx 为每个计算网格大小) 时的结果相差很小且都非常精确，但是 $D=32dx$ 的计算量偏大，因此在保证计算精度的情况下，考虑计算效率则选择 $D=16dx$ 作为后面计算中网格分辨率。

表 1 不同网格分辨率下最终沉降速度与参考值的比较

	V (cm/s)	Relative Error
Lucci et al.(2010)[8]	30.9	--
Mordant & Pinton(2000)[9]	31.6	2.26%
D=32dx	31.05	0.48%
D=16dx	31.08	0.58%
D=8dx	31.4	1.62%

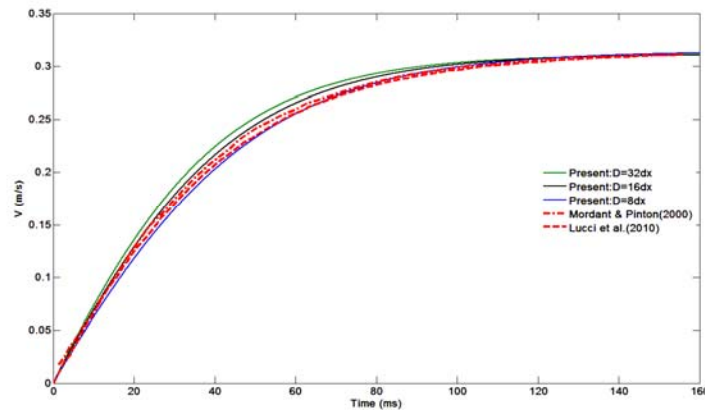


图 1，不同网格大小情况下单颗粒沉降速度随时间变化曲线图

2.1 三维单颗粒沉降验证

下面进行双颗粒沉降计算程序的验证。计算区域为 $(0, 6D) \times (0, 6D) \times (0, 30D)$ ，球形颗粒直径为 $D=1/6\text{cm}$ ，网格分辨率为 $dx=D/16$ ；在初始时刻，两颗粒的位置分别为 $(3D, 3D, 27D)$ 及 $(3D, 3D, 25D)$ ，流体与颗粒密度分别为 1.0g/cm^3 及 1.14g/cm^3 ，流体运动粘度为 $0.01\text{cm}^2/\text{s}$ ，重力加速度为 $g=981\text{cm/s}^2$ 。图 2 给出了两颗粒的运动轨迹及不同时刻颗粒的位置图，可以明显的看出后面颗粒追赶前面颗粒 (Drafting)，经过一段时间后，后面颗粒追赶上前面颗粒并碰撞

(Kissing)，两颗粒一起向下运动并发生翻转 (Tumbling)，最后两个颗粒分开，这种现象即为 DKT 现象[3,7,10-11]。在三维颗粒沉降中，对于这种现象的研究还不够深入，本文在后面的介绍中将详细讨论此现象发生的原因。同时，由图 3 可以看出两表面颗粒之间的距离随时间变化曲线与 Apte et al.(2009)[12]的结果比较符合，虽然两颗粒分离时刻相对于 Glowinski et al.(2001)的结果有所延迟，但是可以看出程序在可以很好的捕捉到 DKT 现象，能够很好的模拟颗粒运动及颗粒间相互作用。

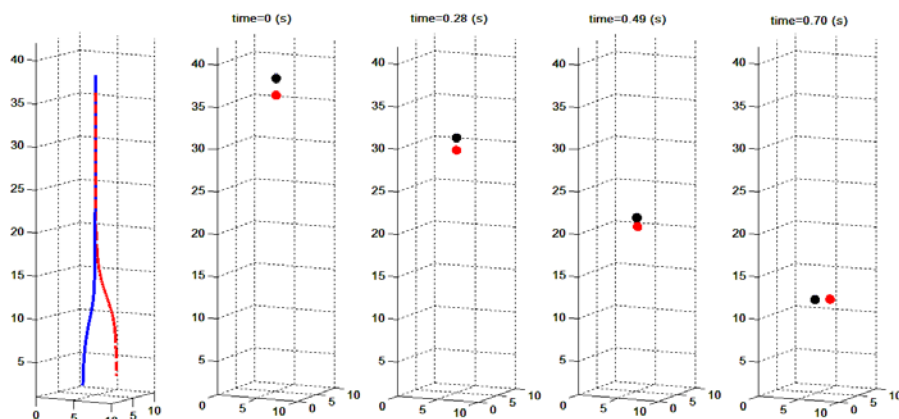


图2, 两颗粒的运动轨迹 (左边一图) 及两颗粒在不同时刻的位置图 (右边四图)

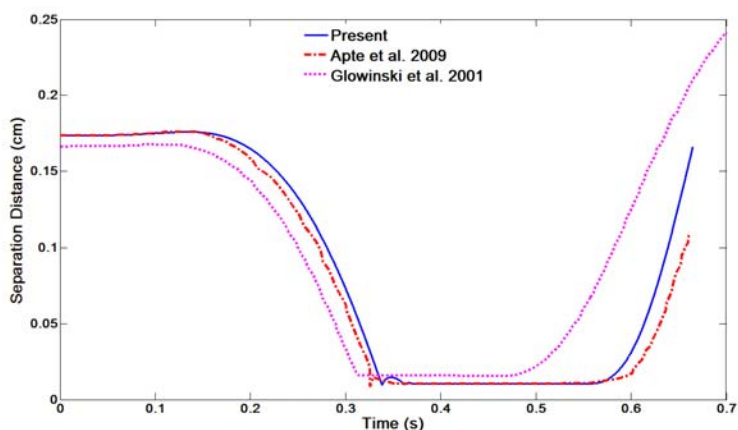


图3, 两颗粒之间的距离随时间变化曲线

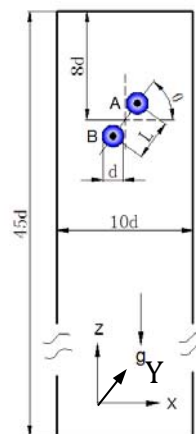


图4, 模拟区域示意图

3 数值方法验证

前面已经提到在两个颗粒自由沉降过程中将发生 DKT 现象, 下面的模拟中将详细分析在两个颗粒初始位置在重力方向一上一下排列时, 颗粒沉降过程中发生的 DKT 现象。同时, 本文将分析颗粒初始位置在垂直于重力方向上并排排列时, 颗粒沉降过程中发生的排斥现象。另外, 本文模拟了 3 个及 3 个颗粒以上情况下的颗粒沉降问题, 并对产生的现象给出了分析。

3.1 双颗粒沉降中的颗粒相互作用

本节的模拟区域如图 4 所示, 模拟区域足够大 ($10d \times 10d \times 45d$, 其中 d 为颗粒直径), 上下边界条件均为自由边界, 其他边界为壁面边界。流体密度、颗粒直径、重力加速度依次为 $\rho_f = 1.0 \text{ g/cm}^3$, $d = 1/6 \text{ cm}$, $g = -981 \text{ cm/s}^2$, 沉降颗粒密度与流体密度的比为 1.14。假设两颗粒中心在 $Y=5d$ 平面 (为方便起见, 后面将此平面称为主平面) 上, 两颗粒中心初始距离

为 $L=2d$, 颗粒中心连线与水平面的相对夹角满足 $\theta=90^\circ$ 及 $\theta=0^\circ$, 即颗粒竖直排列及水平排列。下面将详细分析两种情况下产生的现象及其产生的原因。

图 5 给出了两颗粒在初始竖直及并列排列时, 颗粒中心距离及相对角度随时间的变化曲线。可以看出, 当颗粒竖直排列时 ($L/d=2.0$, $\theta=90^\circ$), 颗粒间的距离将在一段时间内保持不变, 因为此时颗粒间的相互作用还不足以改变颗粒的惯性作用, 颗粒将各自独立运动。当时间为 0.18s 时, 颗粒间的相互作用开始对颗粒间运动产生影响, 颗粒间距离逐渐减小, 即发生 Drafting 现象, 位置在上面的颗粒将加速追赶下面的颗粒。在时间为 0.32s 时, 颗粒发生碰撞, 即 Kissing 现象, 随后颗粒距离保持不变, 但是颗粒将发生翻转 (Tumbling), 如图 5 (右) 所示, 颗粒间的相对角度大幅减小。大约在时间为 0.6s 是, 颗粒发生分离, 此时的相对角度为 20° , 此后颗粒渐行渐远, 同时上面的颗粒超过下面的颗粒。

同时从图 5 中还可以看出，当颗粒并列排列时 ($L/d=2.0, \theta=90^\circ$)，颗粒间的距离在保持一段不变后将逐渐增大，但相对角度几乎变化不大，可以认为其在运动过程中也是保持并列排列的。

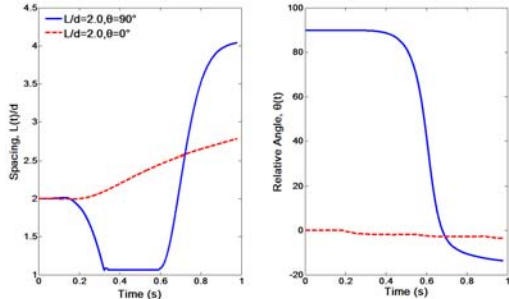


图 5，两颗中心距离（左）及相对角度（右）随时间的变化曲线

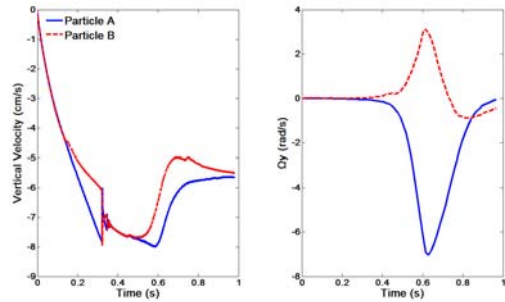


图 6，颗粒竖直排列时 ($L/d=2.0, \theta=90^\circ$) 的竖直沉降速度（左）及 Y 方向上的旋转角速度（右）随时间的变化曲线

下面将分别分析颗粒在竖直排列及并列排列时产生的现象其背后的原因。如图 6（左）所示，颗粒在初始竖直排列时，在时间大约为 0.18s 时，上面的颗粒将加速运动，其加速的原因可以从图 7（a-b）中找到答案，在此过程中（Drafting），上面的颗粒进入下面颗粒的尾涡低压区中，其受到的阻力将大大减少，其竖直方向的速度大于下面的颗粒速度，因此其加速运动并在在 0.32s 时与下面的发生碰撞。在发生碰撞以后，两个颗粒组合为一个大颗粒一起向下运动，如图 7（右）所示，它们周围的压力分布与单个颗粒的类似，但是这种组合并不稳定，将发生翻转现象。如图 6（右）所示，在此过程中颗粒产生旋转运动，并在颗粒分离时（0.6s）达到最大值，此后，颗粒将相互分开运动。

图 8 给出了两颗初始粒并列排列时，颗粒中心在三个平面上的轨迹投影，颗粒看出颗粒在 XZ 平面上相互排斥运动，而在 Y 方向上的位置保持不变，因为颗粒处于区域的中心平面（主平面）上，前后壁面对其的作用相等。同时，在运动过程中，两颗粒在竖直方向上的沉降速度几乎相等（如图 9（左）所示）。图 9（右）给出了颗粒在 Y 方向上的旋转角速度，表明颗粒在沉降过程中朝相反的方向旋转，旋转作用产生 Magnus 升力将推动颗粒相互排斥。

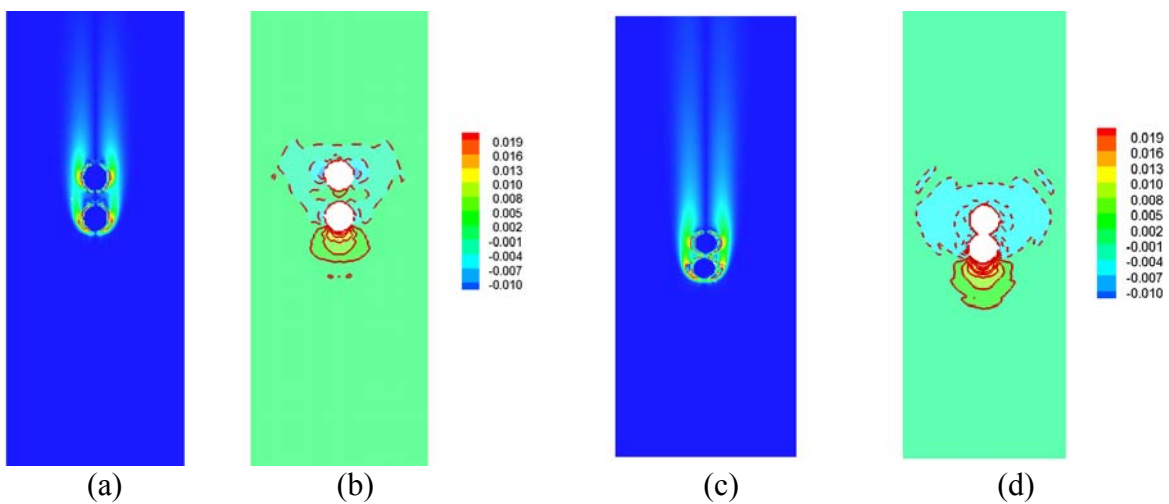


图 7，Time=0.28s 时涡量图（a）、压力云图（b）及 Time=0.35s 时涡量图（c）、压力云图（d）

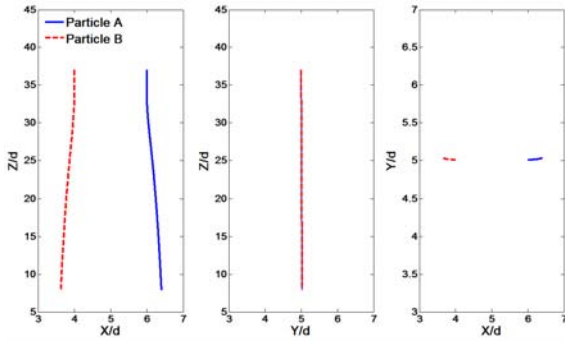


图 8, 两颗粒初始并列排列时 ($L/d=2.0, \theta=0^\circ$), 颗粒中心在三个平面上的轨迹投影

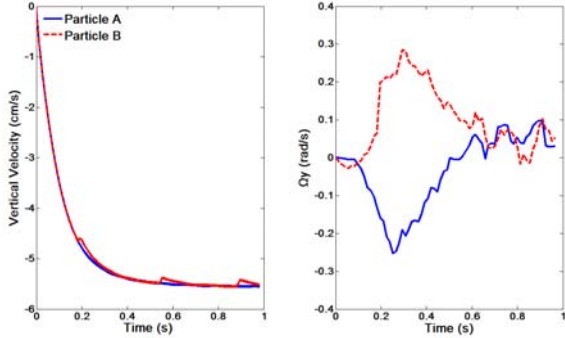


图 9, 两颗粒初始并列排列时 ($L/d=2.0, \theta=0^\circ$), 颗粒

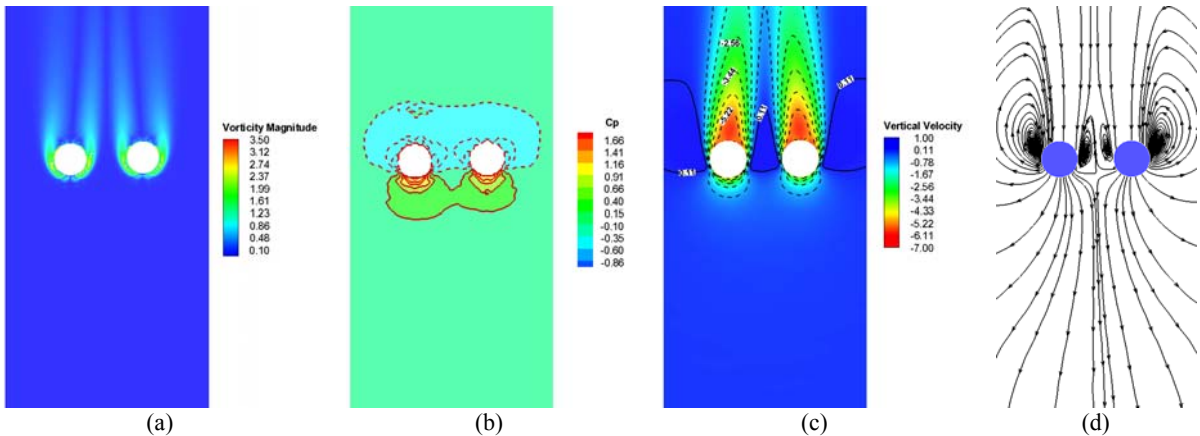


图 10, 两颗粒初始并列排列时 ($L/d=2.0, \theta=0^\circ$), Time=0.42s 主平面流场的 (a) 涡量图, (b) 压力云图, (c) 竖直速度分布, (d) 流线图

粒竖直方向速度 (左) 及 Y 方向上旋转角速度 (右) 随时间的变化曲线

图 10 给出了颗粒初始并列排列时, 0.42s 时刻的流场信息。如图 10(a)所示, 颗粒间的相互作用使得颗粒产生的尾涡并不是对称分布的, 而是非对称的, 值得注意的是两个颗粒的尾涡有相互靠近的现象。两个颗粒的前面产生的高压区连城一片, 并且后面的低压区也有同样的现象 (图 10(b))。颗粒后面的流体速度最大, 这一点可以从图 10 (c) 明显的看出来, 同时如图 10 (d) 所示, 颗粒后面产生的封闭环流不再和单颗粒后面的环流一样对称分布在颗粒后面, 表明颗粒间的相互作用改变了流场的结构, 流场驻点的位置也向颗粒间中心线靠近, 预示着颗粒周围的压力分布的改变, 使得靠近中心线的颗粒表面的平均压力比另一面的平均压力大, 这也将推动颗粒相互排斥作用。

3.2 三个颗粒沉降中的颗粒相互作用

本节的模拟区域大小为 $10d \times 10d \times 60d$ (d 为颗粒直径), 上下边界条件均为自由边界, 其他边界为壁面边界。流体密度、颗粒直径、重力加速度依次为 $\rho_f = 1.0 \text{ g/cm}^3, d = 1/6 \text{ cm}, g = -981 \text{ cm/s}^2$, 沉降颗粒密度与流体密度的比为 1.14。假设三个颗粒中心在主平面 $Y=5d$, 颗粒中心间初始距离为 $L=2d$, 且 (1) 颗粒竖直排列在通道的中心线上。为方便起见, 给三个颗粒从上到下编号为 1,2,3 号颗粒; (2) 颗粒并

列排列在主平面上, 同样方便起见, 从右到左编号为 1,2,3 号颗粒。

图 11 给出了竖直排列时, 颗粒运动轨迹及不同时刻的位置, 发现了两次 DKT 现象, 首先是 2 号颗粒追赶 3 号颗粒, 并与之发生碰撞后分离; 随后, 1 号颗粒追赶 2 号颗粒, 并与其发生碰撞, 然后分离运动。对于 DKT 现象发生的过程及原因本文第 2 节有详细的讨论, 这里不再累述。

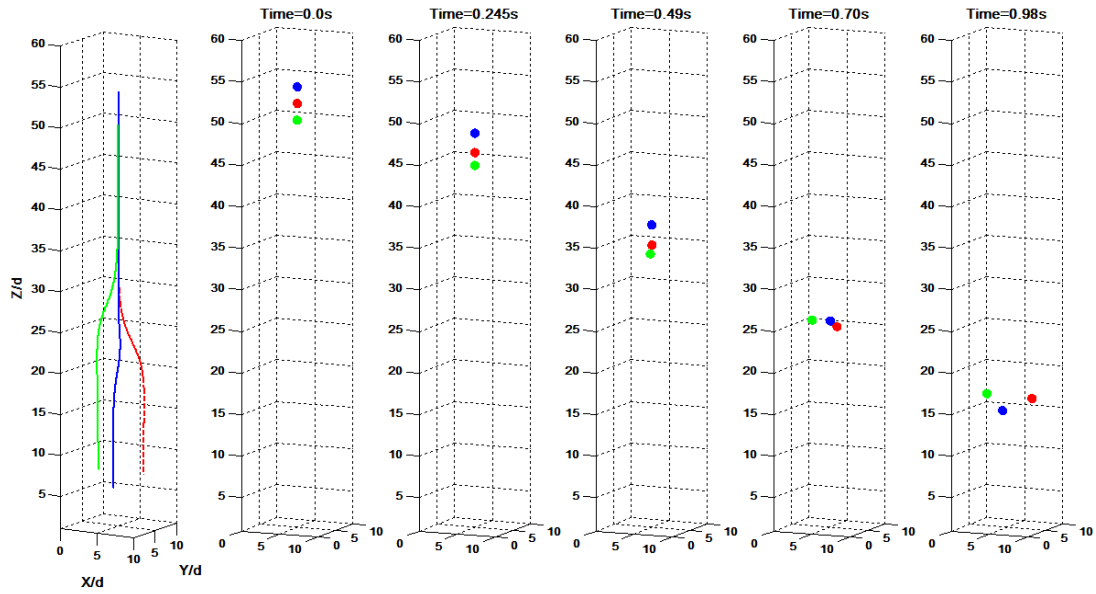


图 11, 三颗粒竖直排列时的轨迹图 (左边一图) 及不同时刻的位置 (右边五图)

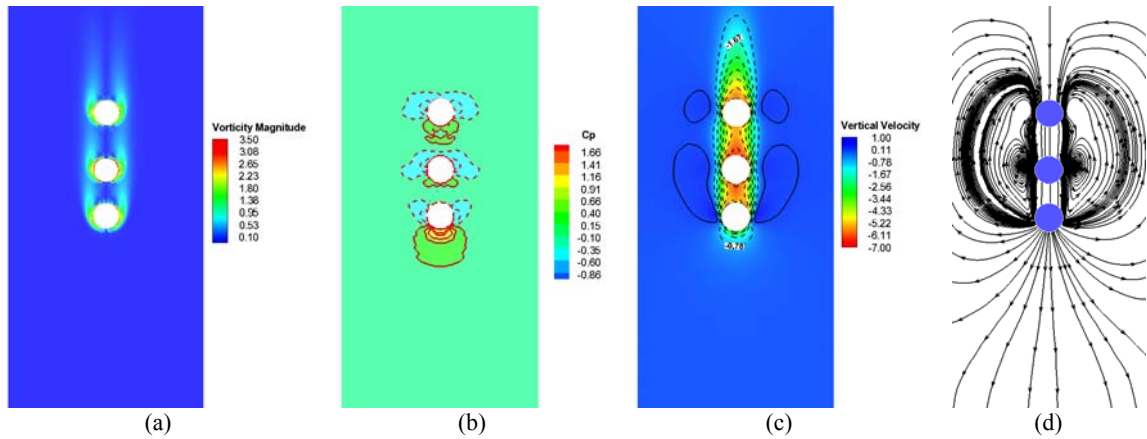


图 12, 三颗粒初始竖直排列时, Time=0.21s 时主平面流场的 (a) 涡量图, (b) 压力云图, (c) 竖直速度分布, (d) 流线图

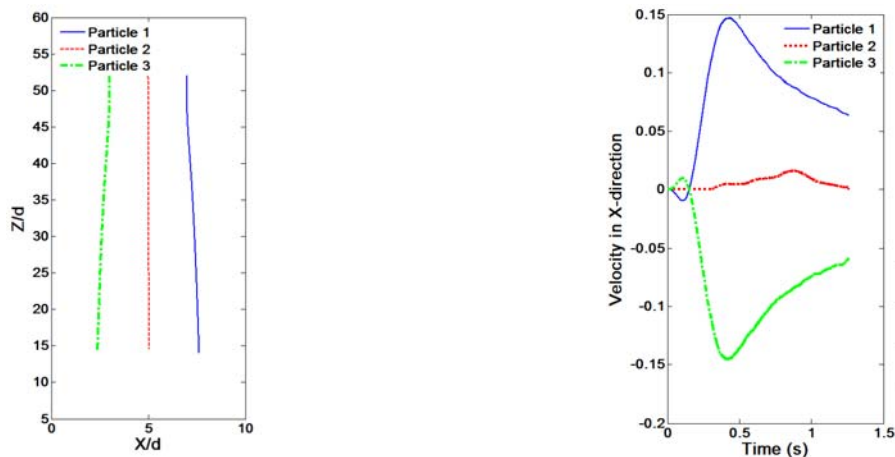


图 13, 三颗粒并列排列时, 颗粒在主平面上的运动轨迹 (左) 及颗粒在 X 方向上的速度随时间变化曲线(右)

图 12, 给出了三颗粒初始竖直排列时在 0.21s 时刻主平面上的流场信息, 包括涡量, 压

力场, 竖直速度分布及流线。与两颗粒类似, 上面颗粒将进入下面颗粒产生的低压尾涡区

内。值得注意的是，在 0.21s 时，1 号颗粒前的高压区范围明显比 2 号颗粒的大，也就是说 2 号颗粒在此时会具有更大的竖直沉降速度，这也就解释了上面发现的 2 号颗粒先与 3 号颗粒发生 DKT 运动的现象。图 12 (d) 的流线图显示，三个颗粒两边产生了大的环流，表明了颗粒的运动对流场的结构产生了影响。

下面将分析三颗粒并列排列时的情况，图 13 (左) 的颗粒轨迹显示，1 号及 3 号颗粒向壁面运动，而中间的 2 号颗粒几乎沿直线运动。从 13 (右) 图也可以看出，1 号及 3 号颗粒在运动过程中具有相反方向的速度，而 2 号颗粒的速度几乎为零。产生此现象的原因是颗粒 2 及颗粒 3 对颗粒 1 具有大小相同方向相反的作用力，使得颗粒 1 在 X 方向上所受的力达到平衡，但是颗粒 2 对颗粒 1 及颗粒 3 的反作用力却使得这两个颗粒产生远离颗粒 2 的运动，及排斥运动。

图 14 给出了三颗粒竖直排列时，在时刻 0.21s 时主平面上的流场信息。可以看出两边颗粒产生的尾涡向中心颗粒方向偏移 (图 14(a))，表明颗粒间的强烈相互作用。从图 14 (b) 所示的压力云图可以看出，三个颗粒前后分别形成了高压与低压区，这与第 2 节中两个颗粒并列运动的情况类似。同样，图 14 (c) 表明颗粒后面的流体流速最高。如图 14 (d) 所示，在颗粒的后面形成的环流，且两边颗粒的环流与图 10 (d) 中的类似，均为非

对称环流，但是中间颗粒的环流是对称的，这也说明，两边颗粒对中间颗粒的作用可以抵消，但是中间颗粒的对两边颗粒的作用会使得两边的颗粒分别向壁面运动。同样在图 14 (d) 中也发现了与图 10 (d) 类似的驻点偏移的现象，这也可以解释排斥作用力的产生。因此，三颗粒并列沉降中的排斥现象与两颗粒并列沉降中的类似，详细的分析可以参考第 2 节的分析。

3.3 三个以上颗粒沉降中的颗粒相互作用

本文模拟了 3×3 颗粒的沉降过程，其中流场区域的大小为 $8d \times 8d \times 60d$ ，两个颗粒间距离为 $2d$ ，颗粒及流场的参数均与 3.2 节中参数数值相同。9 个颗粒以 3×3 的形式分布在主平面上，且根据模拟结果，在模拟的沉降全过程中，颗粒的中心始终保持在主平面上。图 15 给出了沉降过程中不同时刻，颗粒的位置分布。可以看出，颗粒间将发生前面分析过的 DKT 及排斥现象。在沉降初始阶段，位于中间线上的颗粒运动速度相对于两边颗粒的速度更快。图 16 给出了 0.84s 时刻，主平面上流场的信息，包括涡量、压力场、竖直速度分布及流线等。从此图中，可以发现与 3.1 及 3.2 节中介绍的非对称尾涡、颗粒后低压区等流场结构，因为进入下面颗粒产生的尾涡区内而加速并碰撞聚集，这可以解释在颗粒沉降过程中产生的团聚现象。

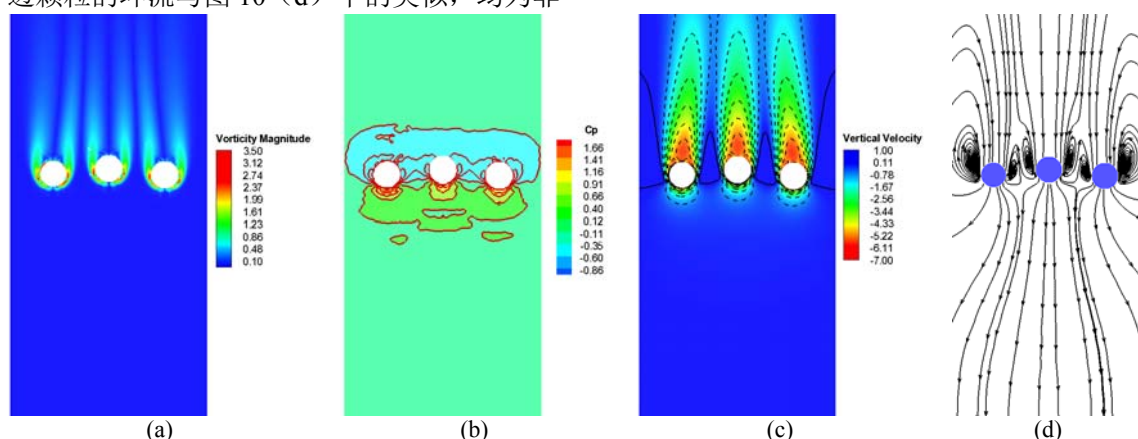


图 14，三颗粒初始竖直排列时，Time=0.21s 时主平面流场的 (a) 涡量图，(b) 压力云图，(c) 竖直速度分布，(d) 流线图

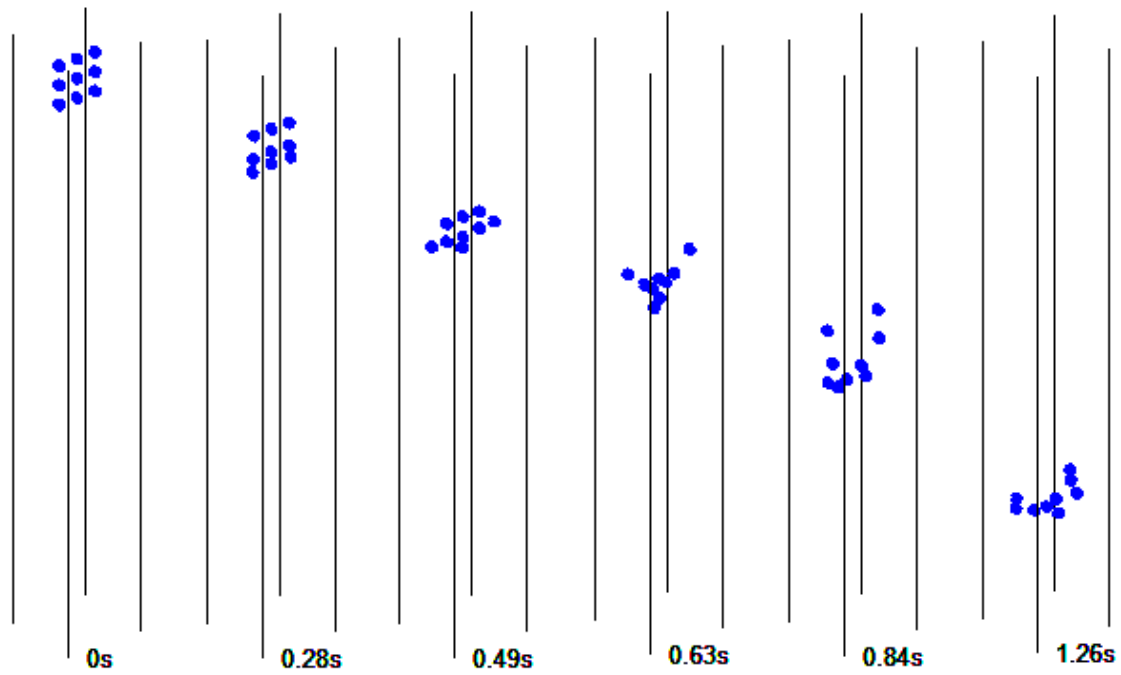


图 15, 3×3 排列的颗粒沉降过程中不同时刻的位置分布

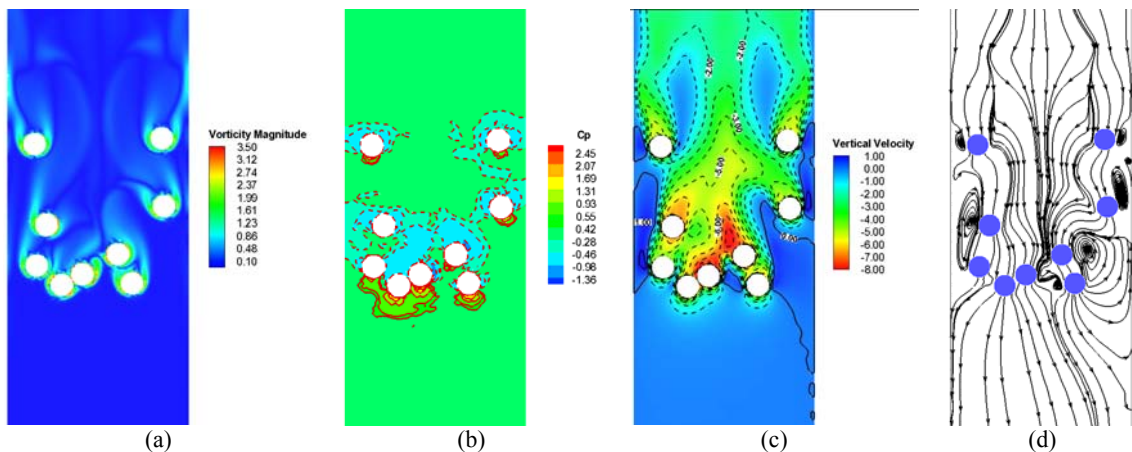


图 16, 3×3 排列的颗粒沉降过程中, Time=0.84s 时主平面流场的 (a) 涡量图, (b) 压力云图, (c) 竖直速度分布, (d) 流线图

4 结论

本文模拟研究了 $Re_p = O(100)$ 的三维圆球颗粒在静止流体中的沉降规律, 并分析了颗粒运动及颗粒间相互作用的机理。本文的工作主要体现在以下方面:

(1) 两个颗粒在流场中一上一下竖直排列时, 在沉降过程中颗粒间将产生吸引作用, 并随即发生 DKT 现象。本文通过给出流场的涡量及压力云图, 分析了此现象发生的原因, 即为上面的颗粒进入了下面颗粒产生的低压尾

涡区内, 其受到的阻力减少因此加速运动, 并与下面颗粒发生碰撞翻转分离。

(2) 两个颗粒在流场中并列排列时, 在沉降过程中颗粒将相互排斥渐行渐远。由于颗粒的旋转以及驻点的偏移引起的压力分布不平衡, 颗粒间产生排斥作用力。同时随着颗粒间距离的增大, 排斥作用会减小。本文给出了颗粒排斥过程中的流场涡量、压力云图、速度分布及流线图。

(3) 三个颗粒初始位置为竖直排列时, 在沉降过程中, 将发生两次 DKT 现象, 本文同样给出了流场的涡量及压力云图。当三个

颗粒初始位置为并列排列时，在沉降过程中，中间位置的颗粒将在一条直线上运动，而两边的颗粒将向两边的壁面运动。在此过程中同样发现并列颗粒间存在排斥作用力。与双颗粒并列沉降一样，我们发现了非对称的尾涡、颗粒前的高压区、颗粒后的低压区及偏移的驻点等流场结构。

(4) 对于三个以上颗粒，本文模拟了 3×3 排列的颗粒沉降问题，同样发现了DKT现象及颗粒间的排斥作用。在沉降的初始阶段，中间位置的颗粒运动的较快，而在两边靠近壁面的颗粒运动得较慢。同时，我们还发现了颗粒相互吸引而产生的团聚现象，并给出了流场结构，包括流场、压力场、涡量场等。

参考文献 (5号黑体, 段前段后各12磅)

- 1 Aidun C K, Clausen J R. Lattice-boltzmann method for complex flows[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2010, 42: 439-472.
- 2 Avci B, Wriggers P. A DEM-FEM Coupling Approach for the Direct Numerical Simulation of 3D Particulate Flows[J]. Journal of Applied Mechanics, 2012, 79(1): 10901-10907.
- 3 Feng Z G, Michaelides E E. The immersed boundary-lattice Boltzmann method for solving fluid-particles interaction problems[J]. Journal of Computational Physics, 2004, 195(2): 602-628.
- 4 郭照立, 郑楚光, 李青, 王能超. 流体动力学的格子 Boltzmann 方法. 湖北科学技术出版社. 2002.
- 5 Kandhai D, Koponen A, Hoekstra A, et al. Implementation aspects of 3D lattice-BGK: boundaries, accuracy, and a new fast relaxation method[J]. Journal of Computational Physics, 1999, 150(2): 482-501.
- 6 Simulating 3D deformable particle suspensions using lattice Boltzmann method with discrete external boundary force[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2010, 62(7): 765-783.
- 7 Glowinski R, Pan T W, Hesla T I, et al. A fictitious domain approach to the direct numerical simulation of incompressible viscous flow past moving rigid bodies: application to particulate flow[J]. Journal of Computational Physics, 2001, 169(2): 363-426.
- 8 Lucci F, Ferrante A, Elghobashi S. Modulation of isotropic turbulence by particles of Taylor length-scale size[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2010, 650: 5-55.
- 9 Mordant N, Pinton J F. Velocity measurement of a settling sphere[J]. European Physical Journal B, 2000, 18(2): 343-352.
- 10 Fortes A F, Joseph D D, Lundgren T S. Nonlinear mechanics of fluidization of beds of spherical particles[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1987, 177: 467-483.
- 11 Feng J, Hu H H, Joseph D D. Direct simulation of initial value problems for the motion of solid bodies in a Newtonian fluid part 1. Sedimentation[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1994, 261: 95-134.
- 12 Apte Sourabh V, Martin M, Patankar N A. A numerical method for fully resolved simulation (FRS) of rigid particle-flow interactions in complex flows[J]. Journal of Computational Physics. 2009, 228(8): 2712-2738.

SIMULATING INTERACTIONS BETWEEN 3D SPHERICAL PARTICLES AND FLUID USING LATTICE BOLTZMANN METHOD

CAO Chuansheng CHEN Sheng LI Jing BAO Sheng LIU Zhaohui ZHENG Chuguang

(State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract Dynamics of the interactions between particles and fluid in suspensions are still not well understood, and the lattice-Boltzmann method has been used widely to study the particle-fluid interactions inspired by the easy implementation and parallelization. The sedimentation processes of spherical particles in the 3D channel are simulated employing lattice-Boltzmann method with discrete external boundary force (LBM-EBF). At first, the DKT motion is reproduced in the settling process of two particles vertically one behind the other. The trailing particle is sucked into the low pressure region of the leading particle's wake. And the trailing one accelerates to kiss with the leading one and followed by the tumbling process. The repulsion process is found in the settling process of two particles initially placed side by side. And the repulsive effect will reduce with the increasing of separation distance between the two particles. In the end, we simulated the sedimentation of

three particles and nine particles to investigate the particle-particle and particle-fluid interactions. The DKT motions and repulsion processes are again discovered in these many particle sedimentations. And the wake interactions are found to dominate the formation of particle clusters. The fluid patterns like the vorticity field, pressure distributions, vertical velocity field and streamlines are presented in this paper.

Key words lattice-Boltzmann method, particle sedimentation, DKT motion, repulsion, cluster