

基于 SPH 的风沙运动的数值模拟¹⁾逯博²⁾ 买买提明·艾尼³⁾ 金阿芳 徐玉娟

(新疆大学机械工程学院, 乌鲁木齐 830047)

摘要 运用光滑粒子流体动力学 (smoothed particles hydrodynamics, SPH) 方法对沙粒和气流相互耦合运动特性进行了分析, 研究提出了风沙流的 SPH 数值方法并进行了数值模拟. 首先提出了风沙流的 SPH 建模方法和基本理论, 建立了风沙流动的 SPH 数值模拟平台. 其次通过建立风沙流的 SPH 模型并施加边界条件, 对自然风作用下沙粒的运动情况进行了数值模拟, 详细分析了沙粒运动轨迹及特性, 最后通过与相关研究成果对比分析, 验证了完善后的 SPH 方法有效性. 通过考虑气流场的可变性, 在风沙流 SPH 计算模型中引入了加载 (起风) 和卸载 (停风) 方式, 观察并对比分析了沙粒的运动轨迹和特性. 为进一步研究风沙流的实时动态非线性行为提供了 SPH 理论基础和数值分析方法.

关键词 光滑粒子流体动力学, 两相流, 风沙运动

中图分类号: O351.2 文献标识码: A DOI: 10.6052/0459-1879-12-312

引言

沙漠化及其带来的风沙环境问题是人类面临的重大自然灾害之一. 那么, 找到合理的防止沙漠化的技术就要从研究风沙流动的规律着手. 实验观测测量和数值模拟是研究风沙流动最有效的方法. 但是, 由于实验观测及测量在很大程度上会受到一些外界因素的影响而导致实验数据不准确, 加上场地及试验费用等的限制, 所以数值模拟方法正日益受到学者们的关注. 随着计算力学和数值模拟技术的发展, 学者们建立了各种各样的数学模型来研究风沙的气固两相流动问题^[1-5]. 目前用来对沙波纹等风沙流现象进行数值模拟的方法有元胞自动机方法^[6]、耦合映射格子法^[7]和离散元法^[8]. 这些方法的共同特征是结合沙粒的散体性和基于离散建模的计算机模拟方法. 此外, 郑晓静等^[9]也提出了离散粒子追踪法来模拟风成沙波纹. 他们提出的方法使风沙流数值模拟研究取得了一定的进展.

本文旨在通过数值模拟的方法对风沙流动的机理和特征进行深入研究. 运用一种新的无网格数值模拟方法——光滑粒子流体动力学 (smoothed particles hydrodynamics, SPH) 来对风沙流现象进行建模及模拟. 该算法中, 气固两相被离散为拉格朗日粒子, 流

体和固体力学的控制方程则转化为相应的粒子间作用力. 计算开始后, 粒子在这些力的作用下运动演化. 由粒子携带的信息, 通过插值核函数求得流场和固体的各种运动参数.

1 风沙流动的基本方程

风沙流动属于典型的两相流问题, 要考虑风场和沙粒场 (气相和固相) 2 种不同物质构成的场的交互作用. 它是一种复杂的、非线性、自组织的二相流^[10]. 沙粒在空中的移动因其大小不同, 受力不同等因素而产生不同的运动轨迹. 沙粒在风中的运动形式大致分为 3 种: 跃移、悬移和蠕移. 其中以跃移运动最为重要, 跃移颗粒占全部输沙量的 75% 以上. 所以颗粒的跃移运动机制一直是风沙两相流研究的重要内容.

1.1 气相控制方程

本文中气体的运动规律采用经典的黏性不可压缩 N-S 方程^[11]:

气相连续方程为

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

2012-11-08 收到第 1 稿, 2013-01-21 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金 (11102178) 和国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2011CB706601) 资助项目.

2) 逯博, 硕士研究生, 主要研究方向: 现代设计方法与数值仿真. E-mail: lunvbo@163.com

3) 买买提明·艾尼, 教授, 主要研究方向: 机械工程、现代设计方法、计算力学. E-mail: mgheni@263.net

气相动量方程为

$$\frac{d\mathbf{u}_i}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial \mathbf{x}_i} + \nu \nabla^2 \mathbf{u}_i + \mathbf{f}_i \quad (2)$$

式中, P 为压力, $\mathbf{f}_i$ 是气相所受的体力, $\nu = \mu/\rho$ 是气体的动力黏滞率.

1.2 沙相控制方程

建立和求解沙粒运动轨迹方程的关键是确定沙粒在气流中运动的受力情况. 研究发现, 一个沙粒在气流场所受到的力主要有^[12]: 气流拖曳力 $\mathbf{F}_D$, 重力 $\mathbf{F}_g$, 气流升力 $\mathbf{F}_L$, Magnus 力 $\mathbf{F}_M$, 电场力 $\mathbf{F}_E$, Saffman 力 $\mathbf{F}_S$ 和 Basset 力 $\mathbf{F}_B$. 为了简化计算, 做如下假设: (1) 忽略气流垂向运动和紊动作用; (2) 沙粒形状为球型体; (3) 暂不考虑电场力对风沙流场的影响; (4) 暂不考虑沙粒的转动. 根据前面的假设和跃移沙粒的受力分析. 按照运动学理论, 沙粒在气流中运动的轨迹方程可以表示为

$$m \frac{d\mathbf{u}_s}{dt} = \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_L + \mathbf{F}_S + \mathbf{F}_B \quad (3)$$

2 风沙流的 SPH 描述和离散

流体动力学问题的求解一般都是通过解偏微分方程组, 但很难求得解析解. 因此就要找到一种数值方法来对问题域进行离散化并获取目标点上的变量函数及其导数的近似值, 将偏微分方程组转化成一系列只与时间相关的常微分方程. SPH 方法就是随之诞生的其中一种数值方法, 它的基本思想是: (1) 将所要求解的问题域分解成一群任意分布的粒子, 这些粒子之间不需要用网格进行连接; (2) 用积分表示函数的核近似法对任意函数进行逐步积分; (3) 在计算的每一个时间步里, 利用支持域里的相邻粒子对应的值叠加求和来取代场函数及其导数的积分表示形式.

2.1 SPH 的基本方程

在 SPH 方法中, 函数 $f(\mathbf{x})$ 的积分表示式为^[13]

$$f(\mathbf{x}) = \int_{\Omega} f(\mathbf{x}') \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}') d\mathbf{x}' \quad (4)$$

式中, Ω 是包含 $\mathbf{x}$ 的积分体积, $\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}')$ 是狄拉克函数, 性质如下

$$\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}') = \begin{cases} 1, & \mathbf{x} = \mathbf{x}' \\ 0, & \mathbf{x} \neq \mathbf{x}' \end{cases}$$

如用光滑函数 $W(\mathbf{x} - \mathbf{x}')$ 来取代狄拉克函数, 则函数的积分表示式可写为

$$f(\mathbf{x}) = \int_{\Omega} f(\mathbf{x}') W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h) d\mathbf{x}' \quad (5)$$

式中, W 是光滑函数, h 是定义光滑函数影响范围的光滑半径. 对于式 (5) 可通过相邻粒子的值来叠加求和进行近似, 这样可以得到离散点处函数的粒子近似式. 用粒子的体积 ΔV_j 来取代前面积分式中邻近粒子 j 处的无穷小体元 $d\mathbf{x}'$, 那么粒子的质量为 $m_j = \Delta V_j \rho_j$. 最终在粒子 i 处的函数的粒子近似式可表示成

$$\langle f(\mathbf{x}) \rangle = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(\mathbf{x}_j) W(\mathbf{x} - \mathbf{x}_j, h) \quad (6)$$

式中, N 是支持域内粒子的总数. 同理可得, 粒子 i 处的函数空间导数的粒子近似式可写为

$$\langle \nabla \cdot f(\mathbf{x}_i) \rangle = - \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(\mathbf{x}_j) \cdot \nabla W_{ij} \quad (7)$$

其中, $\nabla W_{ij} = \frac{\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j}{r_{ij}} \frac{\partial W_{ij}}{\partial r_{ij}}$; r_{ij} 是粒子间距离, $r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$.

2.2 风沙两相流的 SPH 耦合问题

本文基于 SPH 方法给出考虑气固双向耦合作用的两相流算法. 该算法的基本思想是将固体相离散为与液体相一样的 SPH 粒子, 并赋予其物理信息. 通过模拟气体“颗粒”与固体“颗粒”间的相互耦合等作用, 来描述两相流动中的微观特性.

依据气相控制方程并结合 SPH 基本理论可以得到 SPH 方法中的气流场动量方程

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{u}_i^\alpha}{dt} = & - \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial \mathbf{x}_i^\alpha} + \\ & \nu \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} \mathbf{u}_{ij}^\alpha \frac{\partial^2 W_{ij}}{\partial x_i^{\alpha 2}} + \mathbf{f}_i^\alpha \end{aligned} \quad (8)$$

同理, 固体 SPH 颗粒的运动要满足动力学中的基本关系

$$m \frac{d\mathbf{u}_s}{dt} = \sum \mathbf{F}_{g-s} + \sum \mathbf{F}_{s-s} + \mathbf{F}_g \quad (9)$$

式中, m 为固相颗粒的质量; 由于沙粒在床面以外发生颗粒与颗粒碰撞的机会很少, 故这里忽略沙粒间的作用力 $\mathbf{F}_{s-s}$; $\mathbf{F}_g$ 为颗粒重力, 可表示为 $\mathbf{F}_g = \frac{1}{6} \pi D_s^3 \rho_s \mathbf{g}$, 式中 D_s 为沙粒直径, ρ_s 为沙粒密度; $\mathbf{F}_{g-s}$

表示气相对固相的作用力, 这里暂且只考虑空气拖曳力 F_D , 而 F_D 一般采用公式

$$F_D = \frac{1}{8} \pi C_D D_s^2 \rho v_{\text{rel}}^2$$

式中, v_{rel} 为气固滑移速度, $v_{\text{rel}} = \mathbf{u}_g - \mathbf{v}_s$. C_D 为流体拖曳力系数, 依据前人所做的试验和经验, 可如下取值

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}), & Re_p < 1000 \\ 0.44, & Re_p \geq 1000 \end{cases}$$

式中, Re_p 是固相颗粒雷诺数, $Re_p = \rho |\mathbf{u} - \mathbf{u}_s| \frac{D_s}{\mu}$, 其中, μ 为空气动力黏性系数.

2.3 光滑函数的选取

SPH 方法通过使用光滑函数引进积分表示式. 光滑函数决定了近似计算的一致性和精度. 常用的光滑函数有高斯型函数、三次样条函数、四次样条函数等. 在此, 根据研究中设定的光滑半径的范围, 选用的是五次样条函数来计算. 具体形式为

$$W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h) = \alpha_d \cdot \begin{cases} (3 - R)^5 - 6(2 - R)^5 + 15(1 - R)^5, & 0 \leq R < 1 \\ (3 - R)^5 - 6(2 - R)^5, & 1 \leq R < 2 \\ (3 - R)^5, & 2 \leq R < 3 \\ 0, & R \geq 3 \end{cases} \quad (10)$$

式中, α_d 在一维、二维和三维空间里分别为 $\frac{120}{h}$, $\frac{7}{478 \pi h^2}$, $\frac{3}{359 \pi h^3}$, $R = \frac{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|}{h}$. 五次样条函数具有光滑的高阶导数, 特别适合于模拟具有高阶导数的问题.

实际计算中, 在每一时间迭代步上, 通过流体力学控制方程和 SPH 数值算法计算出气体粒子的密度, 加速度和能量等信息, 再由此计算各个沙粒受风场的作用力等信息, 通过更新时间步, 更新两相信息, 为下一个时间步做准备.

3 计算条件

随着计算区域的增大和粒子数目的增多, 计算量增大、计算结果会更加准确, 但这需要更高配置的计算机来实现. 本文的主要目的在于通过 SPH 方法从单颗粒层次上获取沙粒运动轨迹的详细信息, 不必要进行大规模的建模计算. 因此, 本研究只考虑了 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的区域, 沙床只考虑了 20 层. 计算

时间步长为 $1.0 \mu\text{s}$. 初始床面上的风速遵循公式^[14] $\mathbf{u}_y = \frac{\mathbf{u}_*}{k} \ln\left(\frac{y}{y_0}\right)$. 其中, $\mathbf{u}_y$ 为床面高度 y 处的风速; k 为卡曼常数, 一般为 0.4; $\mathbf{u}_*$ 为摩阻风速, 在本算例中其值是人为给定的, 取 0.1 m/s ; $y_0 = \frac{D_s}{30}$. 气体的黏性系数为 1.5×10^{-5} . 沙粒直径 D_s 为 0.1 mm , 密度为 2650.0 kg/m^3 . 床面上共布置 1000 个颗粒, 进出口边界采用周期性边界描述, 上部和下部采用固定边界. 在计算区域的顶部和沙粒的最低层各设置一排虚粒子, 这些粒子对靠近它的其他粒子产生一个排斥力, 以防粒子穿透边界. 计算开始时, 沙床上方的气体向右运动, 来起动床面沙粒. 如图 1 所示.

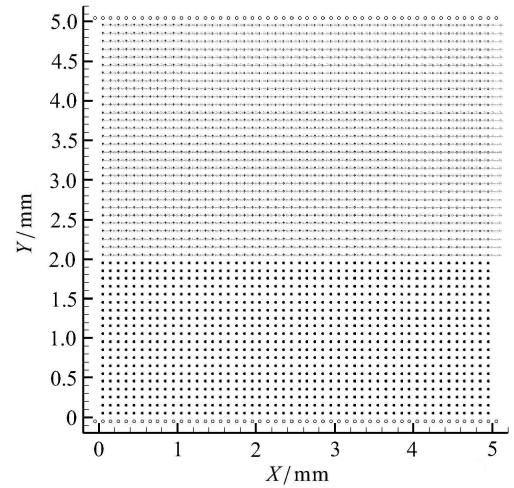


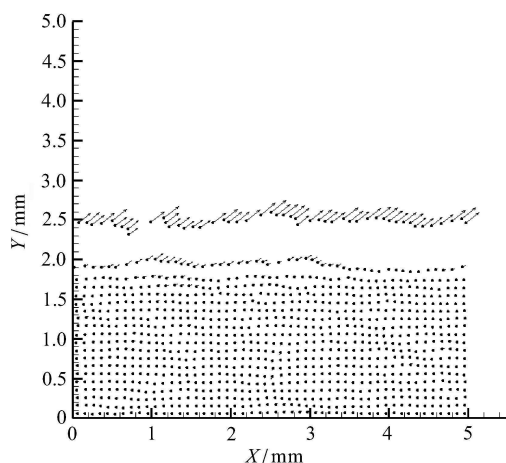
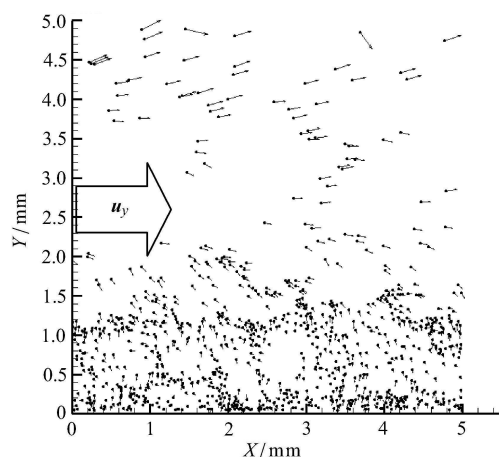
图 1 初始床面状态

Fig. 1 Initial state of the surface of the sand bed

4 计算结果与分析

4.1 颗粒空间分布特征

图 2 为 5.4 ms 时风沙运动过程中颗粒速度的空间分布, 图 3 为 18 ms 时地面附近颗粒速度的空间分布. 从图中可知, 沙粒的运动是各种力共同作用的结果. 在气流的作用下, 平整沙床从最上层沙粒开始受到气流的作用, 而产生起跃的速度. 随着时间的推移, 上层沙粒的速度逐步增大而导致从床面跃起, 而下层沙粒也开始受到气流和其他沙粒的带动作用而产生速度. 这些起跳沙粒在气流中不断加速, 又在重力作用下降落, 通过耦合再次将从气流中获得的动量转移到沙面, 如此不断的运动. 随着时间的发展, 颗粒从气流中不断地获得能量而加速, 又通过耦合作用不断地耗散能量, 从而发展到一个比较稳定的状态.

图2 颗粒速度空间分布 ($t = 5.4 \text{ ms}$)Fig. 2 The spatial distribution of the velocity of the particles ($t = 5.4 \text{ ms}$)图3 颗粒速度空间分布 ($t = 18 \text{ ms}$)Fig. 3 The spatial distribution of the velocity of the particles ($t = 18 \text{ ms}$)

4.2 颗粒的运动轨迹

图4为床面上2个典型粒子的运动轨迹.从图中可以看出,2个粒子的运动轨迹都呈现出一种非对称的抛物线形状,而这恰与风沙运动的动态摄影实验相符^[15].本文以为,沙粒在运动过程中,与气体粒子相互作用而获得较大的能量被带离地表进入气流场,在气流拖曳力和速度切变而产生的上升力的作用下飞到一定高度(沙粒从上升段到水平飞行段),很快就在气流的迎面阻力和重力的作用下,迅速向前向下运动(沙粒从水平飞行段到降落段),在此过程中,沙粒速度显著增大,从而形成了这种特殊的跃移轨迹.

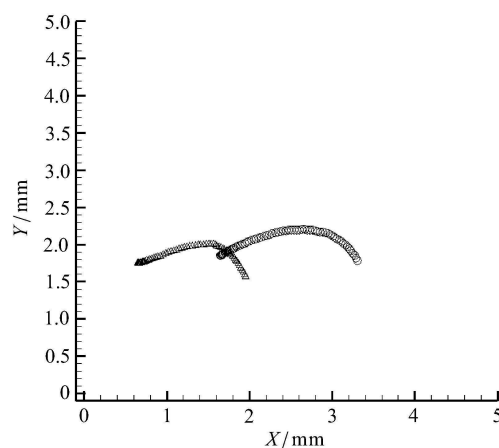


图4 颗粒的运动轨迹

Fig. 4 The trajectories of the particles

4.3 颗粒水平速度随高度变化的分布

计算得到的沙粒水平速度随高度的分布见图5所示.从图中可以看出,多数沙粒水平速度随高度而增加,可以用对数函数来表示.本文认为,沙粒的飞行高度越高,说明它在气流中运动的时间越长.在水平方向上气流对沙粒施加作用力,因此在气流中停留时间越长的沙粒受到的加速度作用就大,水平速度就相应增大. Dong 等^[16]在风洞中对砾石表面上的颗粒速度分布进行了实验测量,表明颗粒水平速度随高度成对数规律增加.从图5中可以看出,本文沙粒水平速度的计算结果与实验结果描述一致.

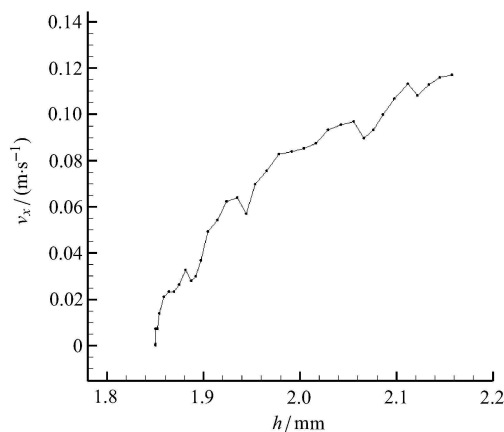


图5 单颗粒沙子水平速度随高度的分布

Fig. 5 The distribution of the changes of the velocity of the sand in the normal direction

4.4 沙粒数随高度变化的分布

分析得到的不同高度处的沙粒数的统计数据如表1所示.从表中可以看出沙粒数量随高度增加而渐渐减少.地面附近颗粒密集,而较高的地方颗粒分

布稀疏, 反映了风沙运动中离散颗粒非均匀分布的特征. 这与相关文献结果^[17]也是相符的.

表 1 沙粒数随高度变化的分布

Table 1 The distribution of the number of grains of sand with a variation in the height

h/mm	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
number of grains	20	15	13	11	10	6	2

4.5 对实验的进一步分析

从上述模拟结果可知, 本文模型程序能够比较准确地反映风沙运动的动态变化特性, 所以进行进一步的研究测试, 通过对程序进行修改, 研究沙粒在不同气流场下的运动轨迹.

图 6 为在沙粒上升过程的 8 ms 时卸载 (停风) 后 2 个典型粒子 I 和 II 的运动轨迹, 其中 III 和 IV 号粒子为不卸载时的对照粒子. 从图中可以看到沙粒在上升过程中卸载后上升的最高点位置明显偏下了. 图 7 为 I 号和 III 号粒子的法向速度变化分布, 从图中可知造成图 6 中运动状态的一个重要原因是撤掉速度后沙粒法向速度最大值的减小.

之所以出现这种现象, 本文认为, 可以从气体和沙子之间的相互耦合方面来分析. 在沙粒周围运动颗粒的带动下, 沙粒获得一定的动能. 当周围风速足够大时, 沙粒就会从地面跳起开始运动, 在上升过程中消耗自身动能的同时又通过和新的运动粒子进行耦合而获得能量. 突然改变风场 (卸载) 后运动沙粒一方面自身消耗动能转化为势能, 另一方面又将部分能量传递给气体粒子, 所以自身速度迅速减小.

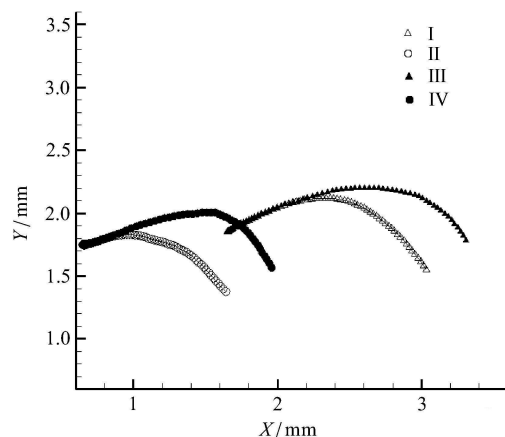


图 6 沙粒运动轨迹

Fig. 6 The trajectory of the sand

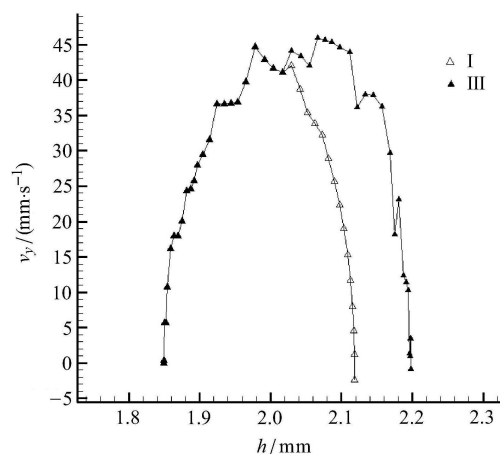


图 7 沙粒法向速度变化分布

Fig. 7 The distribution of the changes of the velocity of the sand in the normal direction

这一点也与图 7 所展现的结果一致, 并最终导致了图 6 的运动结果.

5 结 论

(1) 用 SPH 方法可从单颗粒层次上获取风沙运动的详细信息. 在均匀气流场的作用下, 沙粒的运动轨迹接近非对称抛物线轨迹. 多数沙粒水平速度随高度增大而呈现增加趋势, 而且颗粒空间分布不均匀, 越接近地面附近越稠密.

(2) 在气流场进行卸载后, 观察了沙粒的运动轨迹及法向速度变化过程. 结果表明, 沙粒在加载时法向速度递增, 当卸载后由于重力的作用迅速递减并落地, 卸载后的沙床面出现凹凸不平. 这表明, SPH 方法可以描述风沙流的基本运动特征和行为.

参 考 文 献

- 1 Ungar JE, Haft PK. Steady state saltation in Air. *Sedimentology*, 1987, 34(2): 289-299
- 2 Anderson RS, Haft PK. Wind modification and bed response during saltation of sand in air. *Acta Mechanica*, 1991, (Suppl.1): 21-51
- 3 Huang N, Zhang YL, Zheng XJ. A model of the trajectories and midair collision probabilities of sand particles in a steady saltation cloud. *Journal of Geophysics Research*, 2007, 112(11): D08206
- 4 Kok JF, Renno NO. A comprehensive numerical model of steady state saltation (COMSALT). *J Geophys Res*, 2009, 114: D17204, doi: 10.1029/2009JD011702
- 5 Huang N, Wang C, Pan X. Simulation of aeolian sand saltation with rotational motion. *Journal of Geophysics Research*, 2010, 115: D22211
- 6 Forrest S B, Haff P k. Mechanics of wind ripple stratigraphy. *Science*, 1992, 255: 1240-1243
- 7 Nishimori H, Ouchi H. Formation of ripple patterns and dunes by

- wind-blown sand. *Phys Rev Lett*, 1993, 71(1): 197-200
- 8 Werner BT. A physical model of wind-blown sand transport. [PhD Thesis]. California: California Institute of Technology, 1987
 - 9 郑晓静, 薄天利, 谢莉. 风成沙波纹的离散粒子追踪法模拟. 中国科学 G 辑, 2006, 37(4): 527-534 (Zheng Xiaojing, Bo Tianli, Xie Li. Discrete particle tracing method model on discrete Aeolian sand ripple. *Science in China*, 2006, 37(4): 527-534 (in Chinese))
 - 10 Shao Y. Physics and Modeling of Wind Erosion. Berlin: Springer Press, 2009: 49-85
 - 11 邓嘉胤, 杨健, 王乐勤等. 光滑粒子动力学方法的固液二相流研究. 浙江大学学报 (工学版), 2007, 41(5): 853-858 (Deng Jiayin, Yang Jian, Wang Leqin, et al. Simulate of liquid-solid two-phase flow by smoothed particle hydrodynamics method. *Journal of Zhejiang University (Engineering Sciences)*, 2007, 41(5): 853-858 (in Chinese))
 - 12 程旭. 风沙两相流中沙粒起动规律的实验研究. [硕士论文]. 北京: 清华大学, 2003 (Cheng Xu. Experimental research on sand incipience law in wind-blown-sand two phase Flow. [Mester Thesis]. Beijing: Tsinghua University, 2003 (in Chinese))
 - 13 韩旭, 杨刚, 强洪夫. 光滑粒子流体动力学: 一种无网格粒子法. 长沙: 湖南大学出版社, 2005 (Han Xu, Yang Gang, Qiang Hongfu. Smoothed Particle Hydrodynamics: A Meshfree Particle Method. Changsha: Hunan University Press, 2005 (in Chinese))
 - 14 冯大军, 倪晋仁, 李振山. 风沙流中不同粒径组沙粒的输沙量垂向分布实验研究. 地理学报, 2007, (11): 1194-1302 (Feng Dajun, Ni Jinren, Li Zhenshan. Vertical mass flux profiles of different grain size groups in aeolian sand transport. *Acta Geographica Sinica*, 2007, (11): 1194-1302 (in Chinese))
 - 15 凌裕泉, 吴正. 风沙运动的动态摄影实验. 地理学报, 1980, (6): 174-181 (Ling Yuquan, Wu Zheng. Experimentation on the dynamic photography of the movement of sand-driving wind. *Acta Geographica Sinica*, 1980, (6): 174-181 (in Chinese))
 - 16 Dong ZB, Wang HT, Liu XP, et al. Velocity profile of a sand cloud blowing over a gravel surface. *Geomorphology*, 2002, 45(3-4): 277-289
 - 17 王洪涛, 董治宝, 张晓航. 风沙流中沙粒浓度分布的实验研究. 地球科学进展, 2004, (10): 732-735 (Wang Hongtao, Dong Zhibao, Zhang Xiaohang. A study of the particle concentration in the sand flux -A wind tunnel investigation. *Advances in Earth Science*, 2004, (10): 732-735 (in Chinese))

(责任编辑: 周冬冬)

NUMERICAL SIMULATION OF WIND-BLOWN SAND MOVEMENT BASED ON SPH¹⁾

Lu Bo²⁾ Maimtimin·Geni³⁾ Jin Afang Xu Yujuan

(School of Mechanical Engineering, Xin Jiang University, Urumqi 830047, China)

Abstract The smooth particle hydrodynamics (SPH) method is used to analyze the mutual coupling motion characteristics between sands and the airflow, and the SPH numerical methods of sand flow is proposed and simulated in this study. Firstly, the SPH modeling method and basic theory about the sand flow is proposed and the SPH simulation platform of the flow of sand is established. Secondly, the SPH model and boundary conditions were used to simulate the movement of sand in the wind movement, the motion curve and characteristics of the sand are studied completely. Finally, by contrasting with the related research analysis, the effectiveness of the SPH method completed is verified. Allowing for the variability of the flow field, the way of loading (windy) and unloading (blowing-out) are applied in the SPH calculation model of sand flow, the motion curve and characteristics of the sand have been observed and comparatively studied. It will be helpful to further study of the constant dynamic nonlinear behavior of the sand flow by SPH theoretical basis and numerical analysis.

Key words smooth particle hydrodynamics (SPH), two-phase flow, wind-blown sand movement

Received 8 November 2012, revised 21 January 2013.

1) The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (11102178) and the National Basic Research Program of China (2011CB706601).

2) Lu Bo, post-graduate, research interests: modern design methods and numerical simulation. E-mail: lunvbo@163.com

3) Maimtimin·Geni, professor, research interests: mechanical engineering, modern design method and computational mechanics. E-mail: mgheni@263.net