基于 SPH 方法的液滴撞击可湿润固壁模拟

王志超^{1*}, 李大鸣², 李杨杨², 牛娇¹

1. 江西省水利科学研究院, 南昌 330029;

2. 天津大学建筑工程学院, 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300073

* 联系人, E-mail: wzc_tju@sina.com

2016-10-31 收稿, 2017-03-06 修回, 2017-03-06 接受, 2017-05-25 网络版发表

国家自然科学基金(51079095, 51369011)资助

摘要 液滴撞击固体壁面是一种常见的自然现象和工业过程, 在这些现象和过程中液滴运动往往受到壁面可湿润性的影响. 本文提出了一种可湿润性固壁边界条件的计算方法, 即假设壁面粒子的亲水性以及毛细吸附作用统一表现为对支持域内流体粒子的吸附力. 吸附力的大小与流体压强、材料饱和度及亲水性有关. 基于光滑粒子流体动力学(SPH)方法, 模拟了静态液滴在不同可湿润性壁面上由变形至稳定的过程. 考虑壁面可湿润性的影响, 模拟了液滴撞击疏水壁面的过程. 结合试验数据, 分析了壁面可湿润性对液滴运动过程的影响. 研究表明: 根据模拟液滴静态接触角的变化特点, 本文可湿润性固壁边界条件可以较好地反映出壁面可湿润性; 液滴撞击输水表面的模拟数据与试验结果趋势上吻合良好, 液滴回弹时在壁面可湿润性的影响下形成液柱; 壁面可湿润性对撞击后液滴的铺展过程影响很小, 在该阶段壁面摩擦力起主要作用, 回缩和回弹阶段壁面可湿润性对液滴运动特征的影响较明显.

关键词 光滑粒子流体动力学, 固体壁面, 可湿润性, 液滴

自由表面流与壁面的相互作用在自然界和人类生活中是一种常见现象. 从物理学角度分析, 该现象同时也是一个复杂的气、液和固多相条件下的耦合作用过程: 从力学的宏观角度分析, 流体与壁面间存在法向和切向的作用力和反作用力; 从力学的介观角度分析, 不同相界面上还应存在界面张力作用; 从力学的微观角度分析, 同性质分子之间应存在相互吸引作用. 微型液滴撞击壁面问题几乎包含了上述自由表面流与固体壁面耦合作用的力学特征. 因此针对该问题开展研究, 不仅有利于多相耦合理论的完善, 而且有利于解决涉及流固耦合作用的工程问题, 具有重要的学术价值和工程意义.

事实上关于液滴撞击的问题, 前人已经进行了大量的探索. 2002年Thoroddsen^[1]发现, 当液滴撞击

壁面的韦伯数大于40时, 液滴与壁面接触的位置存在一定射流, 且射流速度可达到液滴撞击壁面初始速度的10倍. 2009年权生林等人^[2]通过实验研究了相同直径的水滴($\phi=1.8$ mm)以不同角度撞击不同材料且不同粗糙度壁面的运动情况, 发现撞击角度、壁面材质、粗糙度对液滴撞击后的润湿行为有显著影响, 随着韦伯数由50增加到300, 液滴撞击壁面依次出现部分反弹、反弹、飞溅的现象, 并且相同固体表面粗糙度增大, 撞击过程中的接触角变小. 在数值模拟方面, 截止目前针对存在液滴撞击问题的模拟已经发展出了许多方法, 按照模型点面线的拓扑结构关系主要分为传统的网格方法和无网格方法. 传统的网格法包括: VOF (volume of fluid)^[3], Level Set^[4], FTM (front tracking method)^[5]等. 目前常见的无网格法有:

引用格式: 王志超, 李大鸣, 李杨杨, 等. 基于 SPH 方法的液滴撞击可湿润固壁模拟. 科学通报, 2017, 62: 2788–2795

Wang Z C, Li D M, Li Y Y, et al. Numerical studies on droplet impact to wettable solid boundary based on SPH method (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 2788–2795, doi: 10.1360/N972016-01288

LBM (lattice-Boltzmann method)^[6]和SPH (smoothed particle hydrodynamics)^[7]方法等. 然而以上诸多研究主要偏重于表面张力、壁面反作用力和液滴内部压应力对液滴运动的影响, 针对壁面可湿润性影响的关注较少.

目前针对壁面可湿润性对液滴运动影响的数值研究主要集中于液滴在壁面的滑动过程^[8]、液滴在导管中的运动过程^[9]和液滴静态接触角^[10]等方面. 而关于液滴撞击壁面受壁面可湿润性影响的数值研究则较少. 本文在SPH模型中引入范德瓦尔斯状态方程中的吸引力来模拟液滴的表面张力, 并在此基础上提出一种壁面可湿润性的模拟方法. 通过模拟壁面上静止方形液滴变形过程, 研究壁面可湿润性对静态接触角的影响. 通过模拟液滴撞击可湿润壁面的过程, 并结合试验, 研究壁面可湿润性对液滴运动过程的影响.

1 模型理论

1.1 SPH控制方程

SPH控制方程是通过采用SPH基本理论分别对拉格朗日形式下的自由表面流体连续方程和运动方程进行空间离散得到的, 如下式:

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \sum_{j=1}^N m_j v_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dv_i}{dt} = & - \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_j}{\rho_j^2} + \frac{p_i}{\rho_i^2} \right) \nabla_i W_{ij} \\ & - \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{\tilde{p}_j}{\tilde{\rho}_j^2} + \frac{\tilde{p}_i}{\tilde{\rho}_i^2} \right) \nabla_i \tilde{W}_{ij} + f_{\eta i} + X_i, \end{aligned} \quad (2)$$

式中, m 为粒子质量; W 为核函数; ∇W 为核函数的一阶导数; $\tilde{W}$ 为专门用于计算拉应力的核函数, 在本文中用于计算自由表面流体的表面张力作用, 一般 $\tilde{W}$ 的光滑长度 $\tilde{h}$ 会大于 W 的光滑长度 h ; ρ 和 $\tilde{\rho}$ 分别为与压应力和拉应力相对应的密度, 分别由核函数 W 和 $\tilde{W}$ 插值计算; 各向同性压强 p 的求解采用Monaghan^[11]在求解自由表面流动问题时提出的水的状态方程如式(3); $\tilde{p}$ 为流体粒子间存在的拉应力, 该拉应力的计算根据了Nugent等人^[12]的方法, 即利用范德华形式的负压状态方程在粒子间施加吸引力如式(4); 黏性 f_η 采用Morris等人^[13]提出的简化的层流黏性如式(5).

$$p = \frac{c_0^2 \rho_0}{\gamma} \left((\rho/\rho_0)^\gamma - 1 \right), \quad (3)$$

$$\tilde{p} = -k \tilde{\rho}^2, \quad (4)$$

$$f_\eta = \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{4v_0 x_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij}}{(\rho_i + \rho_j) r_{ij}^2} \right) v_{ij}, \quad (5)$$

式中, ρ_0 为参考密度; c_0 为初始声速; γ 为常数; k 为度量分子间引力的参数, 从受力的角度也可以认为是范德瓦尔斯拉力系数; v_0 为层流的运动黏度; $x_{ij} = x_i - x_j$, $r_{ij} = |x_{ij}|$.

1.2 应力和核函数修正

Swegle等人^[14]对SPH应力不稳定问题进行了理论分析, 给出了判断应力不稳定的条件 $TW'' > 0$, 其中 T 为应力, W'' 为核函数二阶导数. 杨秀峰等人^[15,16]在Swegle研究的基础上, 提出了一种二阶导数非负的双曲型核函数来改善模型的应力稳定性, 并成功地模拟了液滴变形问题. 根据SPH形式的流体运动方程式(2), 粒子的受力与核函数一阶导数 W' 的变化趋势有关. 理想的核函数在粒子间表现为排斥力时一阶导数的绝对值 $|W'|$ 应随粒子间距的减小而增加, 粒子间表现为拉力时 $|W'|$ 应随粒子间距的增加而增加. 传统SPH方法中常面临着应力不稳定问题的影响, 导致粒子的聚集和发散等非物理现象. 本文针对压应力不稳定问题采用一种改进的Quintic核函数

$$\begin{cases} W(R, h) = \alpha_d \left(1 - \frac{R}{2} \right)^4 \left(\frac{3}{4} R + 1 \right), \\ \frac{\partial W(R, h)}{\partial R} = \frac{5}{64} \alpha_d (R-2)^3 (3R+2), \\ \frac{\partial W^2(R, h)}{\partial R^2} = \frac{15}{16} \alpha_d R (R-2)^2, \end{cases} \quad (6)$$

式中, 正则化系数 α_d 在一维、二维和三维条件时分别等于 $2/h$, $21/8\pi h^2$ 和 $21/10\pi h^3$.

如图1所示, 改进的Quintic核函数的优点在于该函数在支持域内具有连续而又光滑的一阶和二阶导数, 并且可以使得粒子间的排斥力随着粒子间距的减小而增大. 改进后的核函数相较于传统“钟形”核函数, 粒子影响域中心区域不再出现排斥力减小的区域, 从而消除了流体介质的压应力不稳定.

由于考虑表面张力作用, 粒子间的拉应力同样面临着拉应力不稳定问题, 即拉伸状态下 $|W'|$ 随着粒子间距增加而增加, 显然改进的Quintic核函数不能

图1 改进的Quintic型核函数及其一阶、二阶导数
Figure 1 Improved Quintic kernel function and its derivatives

满足该要求. 针对拉应力不稳定问题, 本文采用增加“钟形”核函数光滑长度的办法, 将拉应力不稳定区域移动到原支持域以外, 从而增大拉应力稳定区域的范围.

图2为自由液滴的稳定形态模拟结果, 包括采用改进的Quintic核函数计算压应力的模拟结果(图2(a))与相同条件下采用一般“钟形”核函数的模拟结果(图2(b)), 图2(b)中出现较显著的粒子聚集现象, 而图2(a)中这一现象有着明显的改善. 一般“钟形”核函数在计算压应力时有着一定缺陷, 当粒子相互靠近时粒子密度和压应力增加, 然而插值核函数的导数项则在减小, 导致粒子间的排斥力失真和粒子聚集现象. 而改进的Quintic型核函数较之一般“钟形”核函数可以有效地改善SPH方法中的压应力不稳定问题.

为了解决计算域中边界处粒子缺失问题, 并且提高粒子式插值精度, 采用CSPM^[17]方法对核函数以

图2 采用不同核函数的模拟结果. (a) 改进的Quintic核函数; (b) 一般“钟形”核函数

Figure 2 Simulation results using different kernel functions. (a) Improved Quintic kernel function; (b) general “bell-shaped” kernel function

及核函数梯度进行修正, 分别得到修正后的核函数 W^c 以及梯度项 W_{xi}^c 和 W_{yi}^c

$$W^c = \frac{W}{\sum_j W A_j}, \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} W_{xi}^c \\ W_{yi}^c \end{bmatrix} = L(x_i)^{-1} \begin{bmatrix} W_{xi} \\ W_{yi} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$L(x_i) = \begin{bmatrix} \sum_j x_{ji} W_{xi} A_j & \sum_j y_{ji} W_{xi} A_j \\ \sum_j x_{ji} W_{yi} A_j & \sum_j y_{ji} W_{yi} A_j \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中, $x_{ji} = (x_j - x_i)$, $y_{ji} = (y_j - y_i)$; A 为粒子的体积, $A = m/\rho$.

1.3 可湿润固壁边界条件

液滴撞击固体壁面的过程中, 壁面浸润性会影响碰撞的结果. 因此本文基于SPH方法提出了一种模拟液滴与固体壁面作用时壁面浸润性的处理方法. 水与可湿润壁面作用原理如图3所示, 壁面的可湿润性可以反映水在壁面上的铺展能力, 从分子结构的角度体现了亲水性分子结构中的极性基团对水分子的亲和能力.

从受力分析的角度来看, 壁面可湿润性最直观的表现表现为液滴在壁面上的吸附力. 因此本文将壁面的可湿润性, 近似地通过液滴对壁面的吸附作用来体现. 从分子力角度分析, 水溶液与壁面之间有着类似于水分子间的相互拉扯力, 从而可以得到水粒子和可湿润壁面粒子之间吸附作用的粒子表达式

图3 水与可湿润壁面作用

Figure 3 Interaction between liquid and wettable surface

$$aw_L = -\sum_s m_s \left(\frac{\zeta \tilde{p}_L}{\tilde{\rho}_L \tilde{\rho}_s} \right) \nabla \tilde{W}, \quad (10)$$

式中, ζ 为壁面可湿润系数; L 代表流体粒子; S 代表固体粒子; aw 为水粒子和可湿润壁面粒子之间吸附作用产生的加速度。

通过考虑壁面粒子的饱和度, 可以避免壁面粒子对流体粒子的无限制吸附而导致的相界面处流粒子的非正常聚集. 壁面粒子 i 的饱和程度可以假定为

$$S_i = \sum_{j=1}^N V_j W_{ij}, \quad (11)$$

当 $S_i > 1.0$ 时 (S_i 界限的大小应该跟核函数 W 有关), 认为壁面达到饱和状态, 壁面粒子的湿润性对流体粒子没有影响, 反之则认为壁面对流体仍有吸附作用, 应该考虑壁面湿润性对流体粒子的影响。

2 模拟与分析

2.1 接触角

壁面可湿润性比较直观地表现为对液滴的静态接触角的影响. 为了验证可湿润壁面边界条件式(10)的有效性, 以及研究壁面可湿润系数 ζ 与液滴静态接触角 θ 之间的关系, 本算例模拟了考虑重力条件下, 静止的方形液滴在不同 ζ 值壁面上变形直至稳定的过程. 初始条件下液滴为正方形, 尺寸为 $2 \text{ mm} \times 2$

mm, 粒子间距为 0.04 mm , 液滴置于水平光滑壁面之上. 任其在表面张力、重力、壁面排斥力和吸附力的共同作用下自由变形, 最终达到稳定状态. 计算时间步长为 $dt = 1.0 \times 10^{-7} \text{ s}$, 流体粒子初始密度为 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, 重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, 范德瓦尔斯拉力系数 $k = 9.66 \times 10^{-3}$. 采用改进的 Quintic 核函数 W 计算压力, 采用 B 样条型核函数 $\tilde{W}$ 计算拉应力, $\tilde{h} = 1.8 h$. $\zeta = 0.08$ 的壁面上液滴变形过程模拟如图4所示。

图4中静止方形液滴置于壁面上, 液滴四角受到表面张力会大于平直的四条边区域, 所以首先向内部收缩. 收缩伴随着液滴的内部压力增加, 使得液滴沿束缚较小的四条边的法线方向膨胀, 如 1 ms 所示. $2 \sim 3 \text{ ms}$ 同理液滴表面较尖锐处受表面张力会大于平直区域, 液滴又回到类似方形状态. $3 \sim 10 \text{ ms}$ 经过剧烈振荡变形原有的表面能急剧耗损, 最终形成稳定圆形液滴状态. $1 \sim 3 \text{ ms}$ 液滴剧烈振荡变形过程中由于壁面的约束, 液滴受到一个向上的反作用力. 壁面的可湿润性体现在对液滴的吸扯作用, 如图5所示, 同一时刻在可湿润性较小的壁面, 液滴在壁面反作用力影响下反弹脱离壁面, 而在可湿润性较大的壁面液滴的吸附力抵消了这部分反作用力。

静态接触角常常作为衡量表面可湿润性的指标之一, 本文模拟了一系列不同 ζ 值壁面上方形液滴自由变形过程. 不同 ζ 值壁面上液滴模拟结果分别如图6

图4 $\zeta = 0.08$ 壁面上液滴变形模拟

Figure 4 Numerical simulation of static droplet's deformation on solid surface with $\zeta = 0.08$

图5 同时刻 ζ 分别为0.02(a)和0.08(b)壁面上的液滴状态

Figure 5 At the same time, droplet's deformation on different solid surface with $\zeta=0.02$ (a) and 0.08 (b)

所示, 系数 ζ 与静态接触角 θ 之间的关系如图7所示.

从图6和7可以看出本文可湿润壁面边界条件(10)式可以较好地反映壁面的可湿润性, 可以有效地改变液滴在壁面上的静态接触角. 液滴的静态接触角 θ 随着壁面湿润性系数 ζ 的增大而减小. θ 和 ζ 的关系曲线整体曲率较小, $0 < \zeta \leq 0.2$ 区间内成线性变化, $\zeta > 0.2$ 区间内斜率逐渐变缓成曲线变化特征.

2.2 液滴撞击壁面

通过模拟液滴撞击湿润性较大的疏水壁面后的运动过程, 可以更进一步地研究壁面可湿润性对液

滴运动过程的影响. 液滴的整个运动过程受到了重力、黏性、表面张力和壁面作用力的影响. 壁面作用力包含了壁面反作用力、摩擦力和可湿润性导致的吸附作用力. 模拟液滴直径为2.18 mm, 计算所采用的时间步长为 $dt=10^{-7}$ s, 流体运动黏度系数 $\nu=10^{-6}$ m²/s, 流体粒子初始密度为 $\rho=1000$ kg/m³, 重力加速度 $g=9.8$ m/s², 范德瓦尔斯引力系数取 $k=9.66 \times 10^{-3}$. 流体与固体壁面的接触部分可近似为边界层, 因此摩擦阻力采用Morris等人^[13]的层流黏性. 流体与固体壁面的运动黏度系数 $\nu'=10^{-6}$ m²/s, 壁面湿润系数 $\zeta=0.2$. 采用Mao等人^[18]的试验结果与本文模拟结果

图6 不同 ζ 值壁面上液滴模拟结果

Figure 6 Numerical results of static droplet on solid surface with different ζ

图7 系数 ζ 与静态接触角 θ 之间的关系

Figure 7 Relation between coefficient ζ and static contact angle θ

进行对比,如图8和9所示.为了方便比较分析,本算例中液滴采用与试验相同的韦伯数,因此模拟液滴的初始速度为0.95 m/s.

图8为液滴以0.95 m/s的初速度撞击固体石蜡表面(接触角为97°)的试验结果,图9为相对应阶段的本文模拟结果.液滴冲击壁面后各个阶段模拟结果与实验结果基本吻合.从能量转换的角度分析,0~1 ms为液滴在固壁表面的扩展过程,此阶段液滴在惯性力作用下向下运动,遇到壁面的阻挡之后沿着壁面铺展开来,液滴动能一部分转化为表面能,另一部分

在黏性作用下耗散掉;随着液滴表面积的增加,表面张力对于液滴铺展的抵制作用越来越明显直至动能为零;8~12 ms为液滴收缩并发生回弹的过程,这一阶段中,液滴主要受到表面张力的作用,液滴表面积不断缩小,液滴蓄积的表面势能逐步转换成回缩的动能,且由于表面张力的“回拉”作用,液滴边缘处厚度大于中心处的厚度,液滴与固壁的接触面积逐渐减小;12.0 ms时由于壁面湿润性和摩擦阻力导致的拖拽作用,液滴上表面动能要大于底部接触面处,因此最先发生挤压和回弹形成“凸起”;16 ms时随着回弹的进行液滴动能不断向势能转化,由于壁面吸附力作用液滴未能立刻产生整体回弹,而是被拉伸形成“液柱”.

理论上壁面可湿润性的影响贯穿了液滴在壁面上运动的整个过程.其中液滴回弹形成液柱的过程明显受到壁面可湿润性的影响.而铺展阶段和回缩阶段受到壁面可湿润性的影响程度,可以通过液滴在不同 ζ 值壁面上相对湿润直径 w_d 的变化过程来体现.同一液滴以相同条件撞击可湿润系数 ζ 分别为0, 0.02和0.04的壁面,液滴 w_d 值随时间的变化如图10所示.

通过对比模拟结果,在以上壁面边界条件下液滴整体运动趋势相近.铺展阶段液滴 w_d 达到最大值以及到达最大值的时间几乎一致.因此该阶段液滴运动受壁面可湿润性影响较小,起主要作用的是壁

图8 液滴撞击超疏水壁面试验结果

Figure 8 Experiment results of droplet impact on super hydrophobic surface

图9 液滴撞击超疏水壁面模拟结果

Figure 9 Simulation results of droplet impact on super hydrophobic surface

图10 不同 ζ 条件下, w_d 随时间变化过程

Figure 10 w_d varying process in different ζ

面摩擦阻力. 回缩阶段液滴受到壁面可湿润性的影响较大, 液滴的回缩速度随着 ζ 值的增大而减小, 液

滴与壁面接触时间随着 ζ 值的增大而延长.

3 结论

文章选用两种不同形状的核心函数分别计算拉应力和压应力, 不仅可以较好地模拟自由表面流的表面张力作用, 而且改善了传统SPH方法中的应力不稳定问题, 即使在大变形运动后计算域内依然能保持均匀的粒子分布. 可湿润性壁面边界条件(10)式可以有效地改变液滴在壁面上的静态接触角, 且符合壁面可湿润性与液滴静态接触角关系变化规律, 较好地体现了壁面的可湿润性. 壁面可湿润性对液滴的铺展过程影响很小, 该阶段壁面摩擦阻力起到主要作用, 回缩和回弹阶段壁面可湿润性对液滴运动特征的影响较明显. 文章的研究不仅完善了自由表面流体与固体壁面相互作用理论, 改进了传统SPH方法中的应力计算模式, 更为进一步研究自由表面流体与可渗透介质以及散粒体颗粒的作用问题提供了参考.

参考文献

- Thoroddsen S T. The ejecta sheet generated by the impact of a drop. *J Fluid Mech*, 2002, 451: 373–381
- Quan S L, Li W Z, Zhu W Y. Experimental study of water droplet impacted onto solid surfaces (in Chinese). *J Dalian Univ Tech*, 2009, 49: 832–836 [权生林, 李维仲, 朱卫英. 水滴撞击固体表面实验研究. *大连理工大学学报*, 2009, 49: 832–836]
- Wang H, Zhang Z Y, Yang Y M, et al. Numerical investigation of the deformation mechanism of a bubble or a drop rising or falling in another fluid. *Chin Phys B*, 2008, 17: 03847
- Wang J F, Yang C, Mao Z S. Numerical simulation of Marangoni effects of single drops induced by interphase mass transfer in liquid-liquid extraction systems by the level set method. *Sci China Ser B: Chem*, 2008, 38: 150–160
- Liu L L, Tang H, Quan S P. Shapes and terminal velocities of a drop rising in stagnant liquids. *Comput Fluids*, 2013, 81: 17–25
- Cheng M, Lou J. Lattice Boltzmann simulation of a drop impact on a moving wall with a liquid film. *Comput Math Appl*, 2014, 67: 307–317
- Ma L Q, Liu M B, Chang J Z, et al. Numerical simulation of droplet impact onto liquid films with smoothed particle hydrodynamics (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2012, 61: 244701 [马理强, 刘谋斌, 常建忠, 等. 液滴冲击液膜问题的光滑粒子动力学模拟. *物理学报*, 2012, 61: 244701]
- Pitambar R, Amaresh D. Influence of viscosity ratio and wettability on droplet displacement behavior: A mesoscale analysis. *Comput Fluids*, 2014, 102: 15–31
- Kang Q, Zhang D, Chen S. Displacement of a two dimensional immiscible droplet in a channel. *J Fluid Mech*, 2005, 545: 41–66
- Shigeyasu A, Masahiro H, Takshi O, et al. Wettability effect on the flattening ratio of molten metal droplets. *Surf Coat Technol*, 2001, 138: 211–219
- Monaghan J J. Simulating free surface flows with SPH. *J Comput Phys*, 1994, 110: 399–406
- Nugent S, Posch H A. Liquid drops and surface tension with smoothed particle applied mechanics. *Phys Rev E*, 2000, 62: 4968–4975
- Morris J P, Fox P J, Zhu Y. Modeling low Reynolds number incompressible flows using SPH. *J Comput Phys*, 1997, 136: 214–226
- Sweble J W, Hicks D L, Attaways S W. Smoothed particle hydrodynamics stability analysis. *J Comput Phys*, 1995, 116: 123–134
- Yang X F, Liu M B. Improvement on stress instability in smoothed particle hydrodynamics (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2012, 61: 224701 [杨秀峰, 刘谋斌. 光滑粒子动力学 SPH 方法应力不稳定性的一种改进方案. *物理学报*, 2012, 61: 224701]
- Yang X F, Liu M B, Peng S L. Smoothed particle hydrodynamics modeling of viscous liquid drop without tensile instability. *Comput Fluids*, 2014, 92: 199–208
- Chen J K, Beraun J E, Carney T C. A corrective smoothed particle method for boundary value problems in heat conduction. *Int J Numer Meth Eng*, 1999, 46: 231–252
- Mao T, Kuhn D C S, Tran H. Spread and rebound of liquid droplets. *AIChE J*, 1997, 43: 2169–2179

Summary for “基于 SPH 方法的液滴撞击可湿润固壁模拟”

Numerical studies on droplet impact to wettable solid boundary based on SPH method

WANG ZhiChao^{1*}, LI DaMing², LI YangYang² & NIU Jiao¹

¹ Jiangxi Provincial Institute of Water Sciences, Nanchang 330029, China;

² State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300073, China

* Corresponding author, E-mail: wzc_tju@sina.com

Droplet impact on solid surface is a common natural phenomenon and industrial process which is also a complex polyphase conditions coupling process with gas, liquid and solid. And during the droplet's deformation and movement, it is often affected by the wettability of solid wall. In this paper, a lagrange SPH numerical method, with the attraction of the van der Waals state equation added to simulate the surface tension of the droplet, is applicated to simulate the process of single droplet impact on wettable surface and investigate the influence mechanism of surface wettability to the droplet's deformation and movement. Several improvements for traditional SPH methd are presented such as, a Lagrange wettable solid wall boundary condition of which solid wall paritcles' hydrophilia and capillary action are unified supposed to be a adsorption force to the liquid particles of support domains. The force is deemed relevant to fluid pressure, saturation and solid wall's hydrophilia. Then a stress correction method is proposed for the stress instability caused by the SPH kernel function. The method uses two different shapes of kernel functions to calculate the tensile and compressive stresses, respectively. After that, a SPH model compiled in Fortran language and based on the above two improved methods is established to simulate static and dynamic droplets' deformation processes on different wettable wall. The following studies were carried out based on the simulation results. Firstly, the effect of stress correction method is investigated by the comparison between simulating results with the stress correction before and after used. Secondly, the validity of the wettable solid wall boundary condition is studied based on the simulation results of static droplet deformation. Finally, the influence of the wall wettability on the droplet movement process after the collision is analyzed. Researches show that, the stress correction method improves the stress instability problem in the traditional SPH method, even in the large deformation movement can still maintain a uniform particle distribution. In addition, the stress correction method can better simulate the surface tension of free surface flow, and can get a more smooth free surface. According to the change characteristics of droplet's static contact angle, the mentioned wettable solid wall boundary condition can clearly reflect the wall's wettability. Simulation of dopleit impact on wettable wall shows good agreement with the experiment result. During rebound stage, a large enough wettability will induce droplet deforming into liquid column. The wettability have a little influence to droplet's spreading stage, the wall friction force plays a major role. While during retraction and rebound stages, the influence of wettability is obvious. This study improves the theory of the interaction between free surface fluid and solid wall, and can provide a reference for further study of the effects between free surface fluids and wettable media or discrete particles.

smoothed particle hydrodynamics, solid wall, wettability, droplet

doi: 10.1360/N972016-01288