

微液滴振荡过程的光滑粒子动力学方法数值模拟

马理强 苏铁熊 刘汉涛 孟青

Numerical simulation on oscillation of micro-drops by means of smoothed particle hydrodynamics

Ma Li-Qiang Su Tie-Xiong Liu Han-Tao Meng-Qing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 134702 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.134702

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.134702>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I13>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

液滴在梯度微结构表面上的铺展动力学分析

Spreading dynamics of liquid droplet on gradient micro-structured surfaces

物理学报.2015, 64(15): 154705 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154705>

脉动流在分叉管中通栓效果的晶格玻尔兹曼方法研究

Pulsation effect on thrombus in a bifurcation pipe by the lattice Boltzmann method

物理学报.2015, 64(14): 144701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.144701>

低速湍流模拟的预处理技术研究

Study of precondition for simulating low-speed turbulence

物理学报.2015, 64(13): 134701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.134701>

基于范德瓦尔斯表面张力模式液滴撞击疏水壁面过程的研究

Study on the droplet impact on hydrophobic surface in terms of van der Waals surface tension model

物理学报.2015, 64(11): 114701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114701>

一种新型光滑粒子动力学固壁边界施加模型

A new boundary treatment method in smoothed particle hydrodynamics

物理学报.2015, 64(9): 094701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094701>

微液滴振荡过程的光滑粒子动力学方法数值模拟*

马理强[†] 苏铁熊 刘汉涛 孟青

(中北大学朔州校区, 朔州 036000)

(2014年9月29日收到; 2014年12月25日收到修改稿)

本文对传统的光滑粒子动力学方法进行了改进, 改进的光滑粒子动力学方法对传统粒子方法中的核梯度进行了修正, 采用了一种新型的核函数和离散格式, 应用改进的光滑粒子动力学方法对微液滴振荡过程进行了数值研究. 研究了不同纵横比和雷诺数 (Re) 下振荡阻尼与振荡的周期、振幅与 Re 数的关系. 研究表明: 对于纵横比 $\lambda \leq 4$ 时的微液滴振荡过程, 其他参数恒定不变的前提下, Re 数越大, 液滴形状变化越剧烈, 波的阻尼作用越弱, 液滴振荡周期变长; 在 Re 数一定的前提下, 随着液滴初始的纵横比的增大, 液滴振动的振幅增大, 液滴振荡的周期变长.

关键词: 液滴振荡, 表面张力, 光滑粒子动力学, 数值模拟

PACS: 47.11.-j, 47.85.-g

DOI: 10.7498/aps.64.134702

1 引言

液滴振荡问题的研究及相关处理技术对生物工程、高分子材料与工程、医药纳米工程等不同领域具有极其重要的意义^[1]. 如化工业中聚合物材料的成型加工以及原油脱水, 高分子材料与工程中的聚合物聚合、黏合剂、复合材料的合成, 医药工程中细胞的振荡, 生物纳米工程中的DNA植入以及生物薄膜等等.

国内外的许多研究人员通过理论分析、实验研究和数值模拟等方法对微液滴的振荡问题进行了研究. 早期 Rayleigh^[2] 基于线性近似理论推导了无黏球形液滴的小振幅振荡的频率方程. Apfel 等^[3] 对哥伦比亚号航天飞机上的微重力作用下水珠的大幅振荡现象进行了实验研究. Nugen 和 Posch^[4] 采用 SPAM 方法对 van der Waals(vdW) 液滴的周期性振荡现象进行了研究. 常建忠等^[5] 采用新的含近距排斥远程吸引的保守力权函数的耗散粒子动力学 (DPD) 方法对微尺度下液滴的形成及液滴在微重力下的大幅度振荡变形进行了数值模拟. 蒋

涛等^[6] 采用 KGC-SPH 方法研究了 vdW 液滴的周期性振荡现象, 并提出一种新的表面张力处理技术来准确追踪液滴的变形过程. 陈全等^[7] 采用 YB 模型相同于实验的参数和条件下对大振幅剪切下黏性液滴在黏性基质中形态变化进行了研究, 研究表明取向角的预测与实验结果相近, 长轴的预测比实验值略小. 邱流潮^[8] 采用粒子移位技术解决了张力失稳导致的粒子非物理簇集问题, 并采用基于投影算法的 ISPH 方法模拟了圆形黏性液滴的拉伸变形过程以及方形液滴的旋转变形过程, 得到了不同时刻液滴内部的压力变化特征. 解文军等采用实验的方法对自由液滴的非轴对称振荡问题进行了前沿性的研究^[9-11].

本文在传统 SPH 方法的理论基础上对密度和核梯度进行了修正^[12], 采用一种新型的核函数及离散格式, 采用范德华模型中的分子内聚力项来作为表面张力的物理表征, 数值模拟中考虑了热传导和黏性的影响, 不考虑液滴的旋转作用. 应用改进的 SPH 方法对 van der Waals 液滴振荡过程进行了数值模拟研究.

* 国家自然科学基金(批准号: 11172306, 51476150)、中国博士后科学基金(批准号: 2013M540034)、山西省科技攻关项目(批准号: 20140321022-02)、朔州市科技攻关项目(批准号: 2013-33-38, 2013-33-40)和中北大学校基金资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: maliqiang007@163.com

2 光滑粒子动力学

SPH方法使用一组粒子离散和代表所模拟的介质(流体或固体),并且基于粒子体系近似和估算介质运动的控制方程.

2.1 SPH方法核近似与粒子近似

在SPH方法中,任一粒子的宏观变量 $f(x)$ 都可以表示为影响域内一组无序点上的值表示成积分插值计算得到

$$\langle f(x) \rangle = \int_{\Omega} f(x') W(x - x', h) dx', \quad (1)$$

式中 Ω 为支持域, h 为光滑长度, W 为光滑函数(smoothing function)或核函数.

$f(x)$ 的离散形式的粒子近似是对相关粒子 i 支持域内所有粒子进行加权求和

$$\langle f(x_i) \rangle = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) W_{ij}, \quad (2)$$

式中 N 为粒子 i 的支持域内所有粒子总数; ρ_j 和 m_j 为粒子 j 的密度和质量; W_{ij} 为粒子 j 对粒子 i 产生影响的光滑函数.(2)式表明粒子 i 处的任一函数值可通过应用光滑函数对其紧支域内所有粒子相对应的函数值进行加权平均进行近似.

粒子近似的最终形式可以写为

$$\langle \nabla f(x_i) \rangle = - \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) \nabla W_{ij}, \quad (3)$$

其中

$$\nabla W_{ij} = \frac{\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j}{r_{ij}} \frac{\partial W_{ij}}{\partial r_{ij}} = \frac{\mathbf{x}_{ij}}{r_{ij}} \frac{\partial W_{ij}}{\partial r_{ij}}. \quad (4)$$

(4)式表明:粒子 i 处的函数梯度值可通过应用光滑函数的梯度对粒子 j 的支持域内所有粒子函数的加权平均近似得到,而这个权重由光滑函数的梯度来决定^[13].

2.2 SPH方法应力不稳定性及改进方案

应力不稳定是传统SPH方法中严重的内在缺陷.应力不稳定性在某些计算中会导致粒子聚集、飞散、形成局部线性结构,甚至导致计算中断或计算崩溃.国际上许多研究人员提出了许多不同的解决方案以改进或者缓解数值不稳定.傅学金等针对固体介质中SPH方法的拉伸不稳定性问题进行了

比较系统的综述^[14].Swegle等对传统SPH方法在一维情形下做了von Neumann稳定性分析^[15].最早Morris通过合理选择光滑函数以改善数值不稳定^[16],这一方案针对一些特殊的算例有效,但是不具备通用性.Liu等构造出了一种新型的具有更光滑的二阶导数和更小的二阶动量矩的四次光滑函数,相比较传统的SPH方法而言,具有更好的稳定性和精度^[17].CSPM算法也能在一定程度上改善传统SPH方法的数值不稳定.典型的一些解决方案还包括拉格朗日型核函数法^[18]和守恒光滑法(conservative smoothing)^[19].

杨秀峰和刘谋斌对应力不稳定性产生和改进方案进行了详细的分析和说明^[20],他们认为,应力不稳定性的根本原因在于应力状态与核函数的不匹配;负压状态下粒子间产生吸引力,吸引力随着粒子间距的减小而增大,导致拉伸不稳定性;正压状态下粒子间产生排斥力,排斥力随着粒子间距的减小先增大后减小,导致压缩不稳定性.传统SPH方法使用的核函数是钟形函数,以三次样条函数为例,不论应力处于拉伸状态还是压缩状态,都存在不稳定区域.由于光滑长度通常取值等于或者略大于粒子间距,所以粒子通常都处于拉伸失稳区域,这就解释了为什么拉伸状态下容易出现应力不稳定现象.如果粒子距离减小,进入压缩失稳区域,就会导致压缩不稳定.有鉴于此,杨秀峰和刘谋斌提出一种新型的特殊核函数方法^[20],通过改进SPH方法的核函数和离散格式,使得无论在正压还是负压状态下,粒子间的作用力恒为排斥力,且排斥力随着粒子间距的减小而增大,从而防止粒子聚集现象.

2.3 SPH离散形式Navier-Stokes方程

非等温可压缩黏性流体的质量、动量、能量守恒控制方程为

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{u}, \quad (5)$$

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \mathbf{S} + \mathbf{g}, \quad (6)$$

$$\frac{de}{dt} = \frac{1}{\rho} \mathbf{S} : \nabla \mathbf{u} - \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \mathbf{q}, \quad (7)$$

其中 ρ 为流体密度, \mathbf{u} 为流体速度, p 为流体压强, μ 为流体的动力黏性系数, \mathbf{g} 为作用在流体上的体积力,如重力等. \mathbf{q} 为热通量矢量, \mathbf{S} 为总应力张量,

总应力张量 \mathbf{S} 由各向同性压力 p 和黏性应力张量 $\boldsymbol{\tau}$ 两部分组成, 即

$$\mathbf{S} = -p\mathbf{I} + \boldsymbol{\sigma}, \quad (8)$$

其中 \mathbf{I} 为单位张量分量, $\boldsymbol{\sigma}$ 为黏性应力张量分量, $\boldsymbol{\sigma}$ 的表达式为

$$\boldsymbol{\sigma} = \eta(\nabla\mathbf{u} + \mathbf{u}\nabla) + \left(\zeta - \frac{2}{d}\eta\right)(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I}, \quad (9)$$

其中 η 为流体剪切, ζ 为体积黏度, T 为温度, d 为空间维数.

假设热通量 \mathbf{q} 遵从 Fourier 法则, 即

$$\mathbf{q} = -\kappa\nabla T, \quad (10)$$

其中 κ 表示热传导系数, T 为流体温度.

为使方程 (5)—(7) 封闭, 采用下面基于 van der Waals 模型的压力和内能状态方程 [4]

$$p = \frac{\rho\bar{k}T}{1 - \rho\bar{\beta}} - \bar{\alpha}\rho^2, \quad (11)$$

$$e = \frac{\xi}{2}\bar{k}T - \bar{\alpha}\rho, \quad (12)$$

其中 $\bar{k} = k_B/m$, $\bar{\alpha} = \alpha/m^2$, $\bar{\beta} = \beta/m$, ξ 为粒子自由度. k_B 是 Boltzmann 常数, α 为控制相邻粒子间吸引力的参数, β 为取决于粒子有限尺寸的常数, m 表示粒子质量.

利用 SPH 方法的核近似和粒子近似的方案, 可以得到 SPH 形式的非等温可压缩黏性流体的流体控制方程:

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \sum_j m_j (\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_j) \cdot \nabla_i W_{ij}, \quad (13)$$

$$\frac{d\mathbf{u}_i}{dt} = \sum_j m_j \left(\frac{\mathbf{S}_i}{\rho_i^2} + \frac{\mathbf{S}_j}{\rho_j^2} \right) \cdot \nabla_i W_{ij} + \mathbf{g}_i, \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{de_i}{dt} = & \frac{1}{2} \sum_j m_j \left(\frac{\mathbf{S}_i}{\rho_i^2} + \frac{\mathbf{S}_j}{\rho_j^2} \right) : (\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_j) \nabla_i W_{ij} \\ & - \sum_j m_j \left(\frac{\mathbf{q}_i}{\rho_i^2} + \frac{\mathbf{q}_j}{\rho_j^2} \right) \cdot \nabla_i W_{ij}. \end{aligned} \quad (15)$$

在 van der Waals 模型液滴的数值模拟中, (10) 式中热通量 \mathbf{q} 通常可以写为

$$\mathbf{q}_i = -\kappa \sum_j 2m_j \frac{T_j - T_i}{\rho_i + \rho_j} \nabla_i W_{ij}. \quad (16)$$

对 (16) 式采用 SPH 粒子近似法, 可得

$$\left(\frac{1}{\rho} \nabla \cdot \mathbf{q} \right)_i = \left(\frac{1}{\rho} \nabla \cdot (-\kappa \nabla T) \right)_i$$

$$= -\kappa \sum_j \frac{2m_j (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) \cdot \nabla_i W_{ij}}{\rho_i \rho_j (r_{ij}^2 + \eta)} (T_j - T_i). \quad (17)$$

因此, 流体能量控制方程可以写为

$$\begin{aligned} \frac{de_i}{dt} = & \frac{1}{2} \sum_j m_j \left(\frac{\mathbf{S}_i}{\rho_i^2} + \frac{\mathbf{S}_j}{\rho_j^2} \right) : \mathbf{u}_{ij} \nabla_i W_{ij} \\ & + \kappa \sum_j \frac{2m_j (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) \cdot \nabla_i W_{ij}}{\rho_i \rho_j (r_{ij}^2 + \eta)} (T_j - T_i). \end{aligned} \quad (18)$$

文献 [4] 中, 为了得到稳定的液滴, 范德华流体状态方程中内部压力项的相互作用被假定超过 SPH 动量方程中的其他的相互作用力, 按照文献中的这个假设, 内部压力项 $-\bar{\alpha}\rho^2$ 应该被单独考虑, 相应的 SPH 形式方程可以写为

$$\left(\frac{d\mathbf{u}_i}{dt} \right)^{\text{cp}} = 2\bar{\alpha} \sum_j m_j \nabla_i W_{ij}^H, \quad (19)$$

$$\left(\frac{de_i}{dt} \right)^{\text{cp}} = \bar{\alpha} \sum_j m_j (\mathbf{u}_j - \mathbf{u}_i) \cdot \nabla_i W_{ij}^H, \quad (20)$$

其中, 上标 cp 表示内部压力项, H 表示内部压力项对应的大尺度光滑长度.

3 算例及分析

3.1 初始参数及粒子分布

液滴采用 van der Waals 流体液滴. 初始椭圆形液滴由平衡态下圆形液滴通过纯剪切变形得到, 考虑了热传导和黏性的影响. 与液滴振荡相关的物理量主要包括: 椭圆形液滴的纵横比 $\lambda = a/b$, 液滴的密度 ρ , 液滴的半径 R , 以及表面张力系数 σ , 流体剪切黏度 η , 流体体积黏度 ζ , 液滴振荡相关的无量纲参数为: 雷诺数 $Re = (\rho\sigma R)^{1/2}/\eta$. 物理参数选取无量纲的值: $m = 1$, $\bar{\alpha} = 2$, $\bar{\beta} = 0.5$, $\bar{k}_B = 1$, $\xi = 2$, $\kappa = 5$, $\eta = 1$, $\zeta = 0.1$; 初始光滑长度 $h_0 = 1.8d_0$, 时间步长 $dt = 0.005$, 大尺度光滑长度 $H = 2h_0$.

平衡态下圆形液滴通过纯剪切变形

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1+\varepsilon)^{-1} & 0 \\ 0 & 1+\varepsilon \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

(ε 为伸长率, $(1+\varepsilon)/(1+\varepsilon)^{-1}$ 为椭圆长、短半轴比值) 转化为椭圆形液滴, 则椭圆形液滴表面会聚集一定的能量, 液滴将处于非平衡状态. 由于不考虑重力因素, 在自由能和表面能的相互作用下, 随着

液滴表面能量的不断变化, 液滴内外密度、压力梯度随之变化, 液滴将呈现周期性振荡变形.

3.2 数值算例及结果分析

首先对微液滴大振幅振荡过程所涉及的动力学特性进行了数值模拟研究(忽略重力的影响). 所研究的微液滴初始为扁平形状, 从达到准平衡态的圆形大微液滴截取获得. 而准平衡态的圆形大微液滴是由 2500 个 SPH 粒子, 应用初始状态参量 $m = 1, \bar{a} = 2, \bar{b} = 0.5, \bar{k}_B = 1, \xi = 2, \kappa = 5, \eta = 1, \zeta = 0.1$; 粒子间初始间距 $d_0 = 0.75$, 初始状态每个粒子温度 $T = 0.2$, 初始光滑长度 $h_0 = 1.8d_0$, 时间步长 $dt = 0.005$, 大尺度光滑长度 $H = 2h_0$, 基于 N-S 方程, 其压力-密度关系由范德华(van der Waals) 状态方程的 SPH 方法进行计算得到.

图 1 显示了 8 个典型时刻 SPH 方法模拟得到的微液滴形状, 研究所截取的扁平微液滴的初始形状长宽比为 5. 由于初始的微液滴为扁平形状, 在较大的表面张力作用下, 扁平微液滴逐渐收缩变粗, 然后在惯性力的作用下, 变粗的微液滴挤压而向与初始方向垂直的方向扩展变得扁平, 达到最大位移后在表面张力的作用下, 扁平微液滴在垂直的方向逐渐收缩变粗. 如此循环往复, 形成一个振幅较大的振荡过程. 与文献 [5] 中利用 DPD 方法数值模拟得到的结果进行比较可知, SPH 方法模拟得到的结果与文献结果基本符合. 由于 SPH 方法的光滑特性, SPH 模拟得到的微液滴形状比文献中 DPD 方法模拟得到的微液滴形状更加光滑, 而且与哥伦比亚号航天飞机上所做实验中液滴在微重力下历经大振幅振荡的形状基本符合 [3]. 这充分显

示改进 SPH 方法在数值模拟微液滴动力学特性上的有效性.

图 2 和图 3 分别给出了核函数为三次样条插值函数和新型双曲函数的液滴振荡变形过程 ($Re \approx 6, \lambda = a/b = 4$). 传统 SPH 方法使用的核函数是钟形函数, 以三次样条函数为例, 在初始规则分布、应力一致的一组粒子上施加张力, 利用传统的 SPH 核近似与粒子近似的算法, 在极短的时间内会产生不符合物理规律的极大变形, 数值不稳定从而导致粒子聚集, 导致应力不稳定性, 有时甚至导致计算中断或计算崩溃. 比较图 2 和图 3 可以看出, 核函数为三次样条插值函数的液滴振荡变形过程中, 尽管液滴变化形状与核函数为新型双曲函数的液滴变化形状基本一致. 由于应力不稳定性导致核函数为三次样条插值函数的液滴振荡变形过程粒子聚集现象较为严重. 而采用新型的双曲核函数能够有效的改进应力不稳定性, 粒子分布较为均匀, 没有出现粒子聚集现象.

由图 3 可知, 初始时刻起椭圆形液滴 ($Re \approx 6, \lambda = a/b = 4$) 沿长半轴开始收缩, 形成扁长液滴 ($t = 15$), 随时间延长液滴逐渐呈近似圆形, 之后又开始扩张形成扁圆形液滴 ($t = 50$), 此过程与文献 [21] 中结果符合. 至 $t = 80$ 时, 未消失的内部运动能量变成了表面能量, 然后液滴又开始沿短半轴开始收缩, 从图 3 中可以看出, 椭圆形液滴变形初期因表面能量释放较快而导致液滴形状变化即振幅较快, 以后的振荡幅度逐步减小, 能量逐渐衰减, 如此往返运动形成周期性振荡变化, 直到趋于稳定 ($t = 400$).

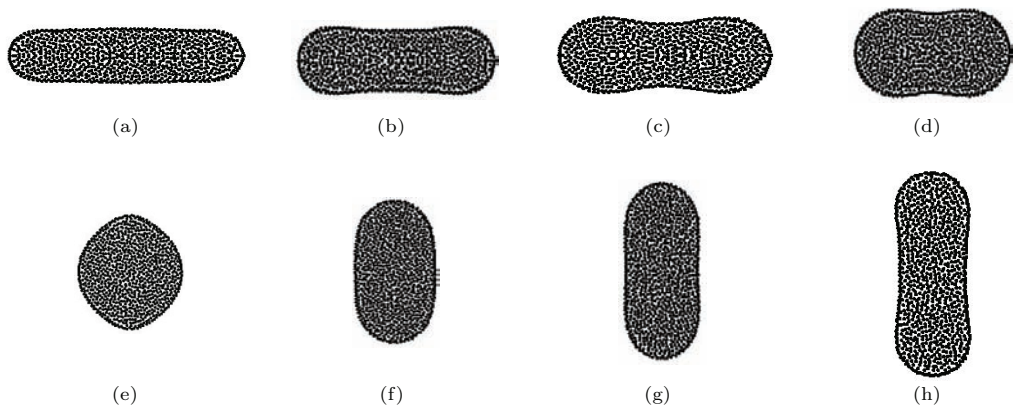


图 1 8 个典型时刻 SPH 方法模拟得到的微液滴形状

Fig. 1. Micro liquid drop shapes of 8 typical moments obtained with SPH method.

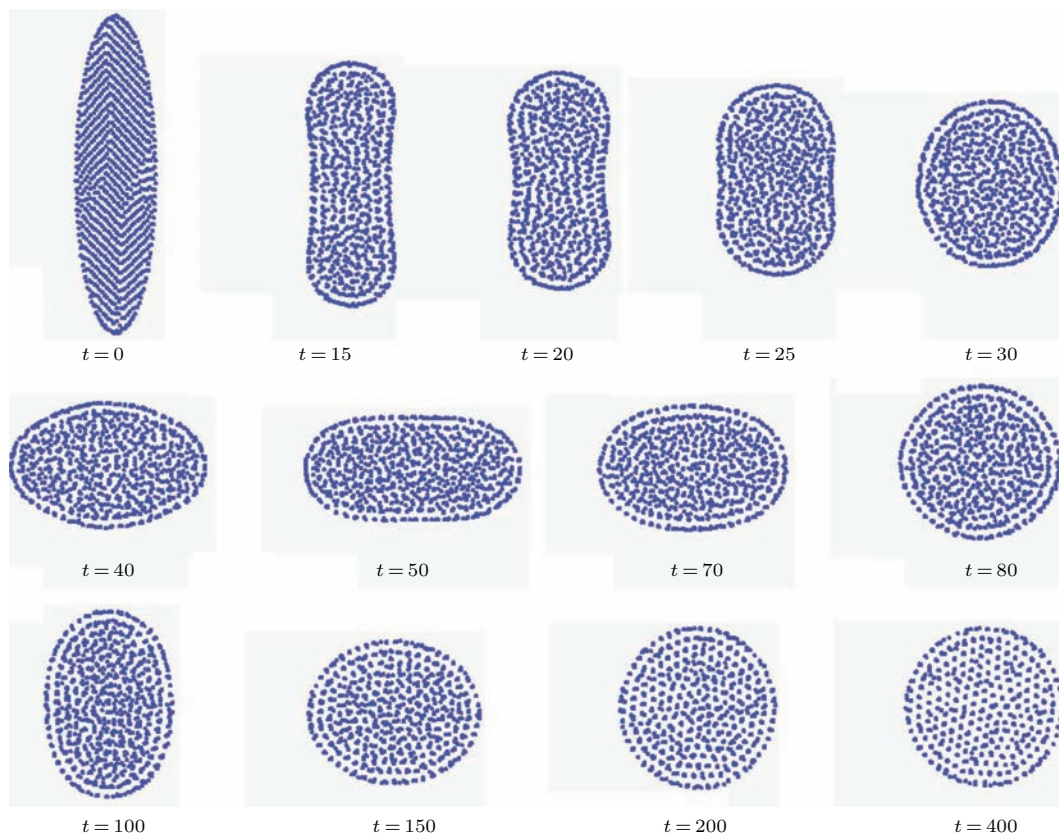


图2 液滴周期性振荡变形过程 (核函数为三次样条插值函数, $Re \approx 6$, $\lambda = a/b = 4$)

Fig. 2. The periodic oscillation process of a micro liquid drop (using the cubic spline kernel function $Re \approx 6$, $\lambda = a/b = 4$).

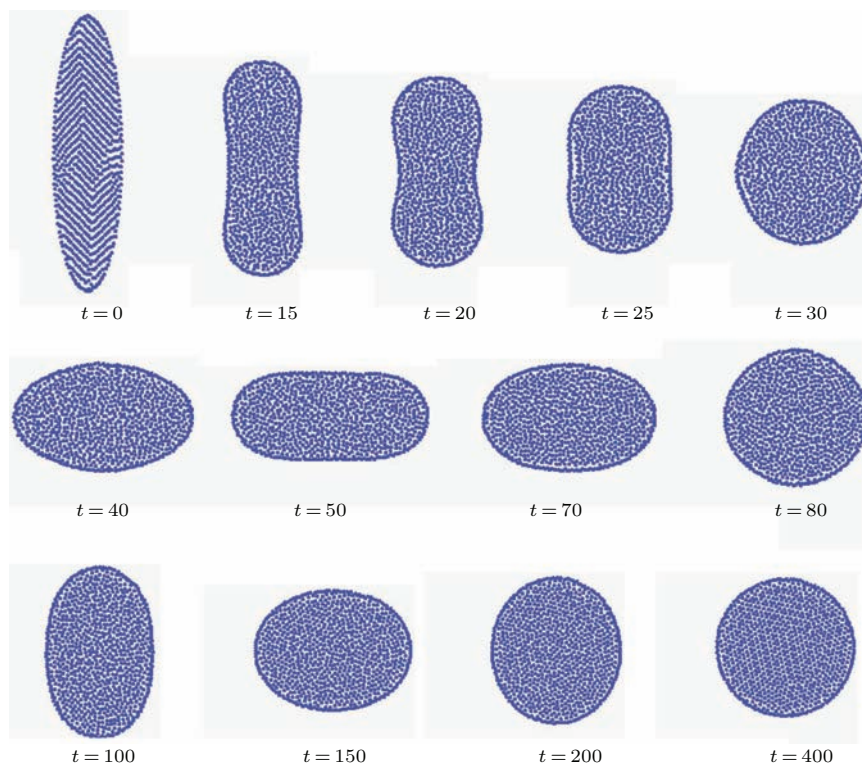


图3 液滴周期性振荡变形过程 (核函数为新型双曲函数, $Re \approx 6$, $\lambda = a/b = 4$)

Fig. 3. The periodic oscillation process of a micro liquid drop (using the hyperbolic-shaped kernel function, $Re \approx 6$, $\lambda = a/b = 4$).

椭圆形液滴的半长轴为 $a = (1 + \varepsilon)R$, 半短轴为 $b = (1 + \varepsilon)^{-1}R$, 其中 R 为准稳态圆形液滴的半径. 液滴振荡过程中, ε 取值不同, 液滴的纵横比 $\lambda = a/b$ 不同, 本文研究了纵横比 $\lambda \leq 4$ 时, 液滴的振荡过程. 从图 4 和图 5 中可以看出, 其他参数恒定不变的前提下, Re 数越大, 液滴形状变化越剧烈, 波的阻尼作用越弱, 液滴振荡周期变长; 在 Re 数一定的前提下, 随着液滴初始的纵横比的增大, 液滴振动的振幅增大, 液滴振荡的周期变长.

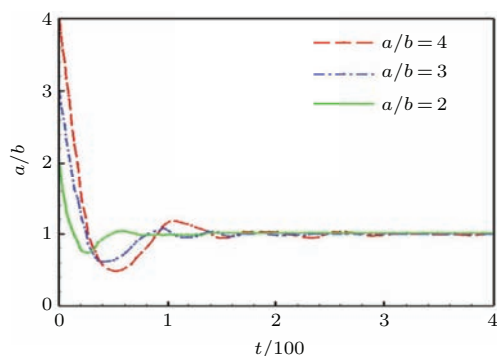


图 4 (网刊彩色) 不同纵横比下椭圆液滴形态随时间的变化曲线 ($Re \approx 6$)

Fig. 4. (color online) Variation of the drop aspect ratio, a/b , with time for different initial elliptic drop deformations at $Re \approx 6$. The time is given in reduced units.

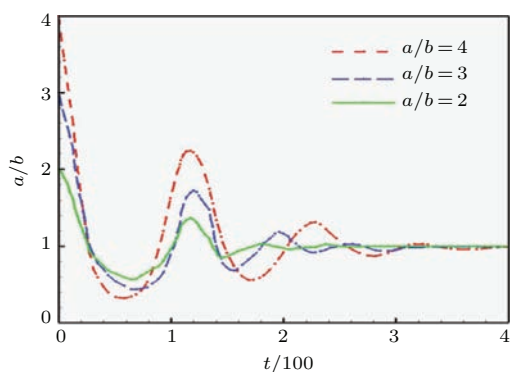


图 5 (网刊彩色) 不同纵横比下椭圆液滴形态随时间的变化曲线 ($Re \approx 60$)

Fig. 5. (color online) Variation of the drop aspect ratio, a/b , with time for different initial elliptic drop deformations at $Re \approx 60$. The time is given in reduced units.

4 结 论

本文采用改进的 SPH 方法对范德华液滴的振荡变形过程进行了数值研究. 初始椭圆形液滴由准稳定状态圆形液滴经过纯剪切变形得到. 研究了不同振幅下黏性耗散、热传导和表面张力对振荡阻尼

的影响, 以及振荡的周期、振幅与 Re 数的关系. 研究表明: 对于纵横比 $\lambda \leq 4$ 时的微液滴振荡过程, 其他参数恒定不变的前提下, Re 数越大, 液滴形状变化越剧烈, 波的阻尼作用越弱, 液滴振荡周期变长; 在 Re 数一定的前提下, 随着液滴初始的纵横比的增大, 液滴振动的振幅增大, 液滴振荡的周期变长.

参考文献

- [1] Melean Y, Sigalotti L D, Hasmy A 2006 *Rev. Mex. Fis.* **52** 38
- [2] Rayleigh L 1879 *Proc. Roy. Soc. London* **29** 71
- [3] Apfel R E, Tian Y, Jankovsky J, Shi T, Chen X, et al 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 1912
- [4] Nugent S, Posch H A 2000 *Phys. Rev. E* **62** 4968
- [5] Chang J Z, Liu M B, Liu H T 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3954 (in Chinese) [常建忠, 刘谋斌, 刘汉涛 2008 物理学报 **57** 3954]
- [6] Jiang T, Jie O Y, Zhao X K, Ren J L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 054701 (in Chinese) [蒋涛, 欧阳洁, 赵晓凯, 任金莲 2011 物理学报 **60** 054701]
- [7] Chen Q, Yu W, Zhou C X 2007 *Acta Mech Sinica* **39** 528 (in Chinese) [陈全, 俞炜, 周持兴 2007 力学学报 **39** 528]
- [8] Qiu L C 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 124702 (in Chinese) [邱流潮 2013 物理学报 **62** 124702]
- [9] Shen C L, Xie W J, Wei B 2010 *Phys. Rev. E* **81** 046305
- [10] Shen C L, Xie W J, Wei B 2010 *Phys. Lett. A* **374** 2301
- [11] Yan Z L, Xie W J, Shen C L, Wei B B 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 064302 (in Chinese) [鄢振麟, 解文军, 沈昌乐, 魏炳波 2011 物理学报 **60** 064302]
- [12] Ma L Q, Liu M B, Chang J Z 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 244701 (in Chinese) [马理强, 刘谋斌, 常建忠 2012 物理学报 **61** 244701]
- [13] Liu M B, Xie W P, Liu G R 2005 *Appl. Math. Model.* **29** 1252
- [14] Fu X J, Qiang H F, Yang Y C 2007 *Advances in Mech.* **37** 375 (in Chinese) [傅学金, 强洪夫, 杨月诚 2007 力学进展 **37** 375]
- [15] Swegle J W, Hicks D L, Attaway S W 1995 *J. Comput. Phys.* **116** 123
- [16] Morris J P 1996 *Ph. D. Dissertation* (Melbourne: Monash University)
- [17] Liu M B, Liu G R, Lam K Y 2003 *J. Comput. Appl. Math.* **155** 263
- [18] Xiao S P, Belytschko T 2005 *Adv. Comput. Math.* **23** 171
- [19] Hicks D L, Liebrock L M 2004 *Appl. Math. Comput.* **150** 213
- [20] Yang X F, Liu M B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 224701 (in Chinese) [杨秀峰, 刘谋斌 2012 物理学报 **61** 224701]
- [21] Lopez H, Sigalotti L 2006 *Phys. Rev. E* **73** 051201

Numerical simulation on oscillation of micro-drops by means of smoothed particle hydrodynamics*

Ma Li-Qiang[†] Su Tie-Xiong Liu Han-Tao Meng-Qing

(Shuozhou, North University of China, Shuozhou 036000, China)

(Received 29 September 2014; revised manuscript received 25 December 2014)

Abstract

In this paper, we present a modified smoothed particle hydrodynamics (SPH) method. SPH is a Lagrangian meshfree particle method, and it is attractive in dealing with free surfaces, moving interfaces, and deformable boundaries. The improved SPH method modifies the kernel gradient in the traditional SPH method with a new kernel function and a modified SPH discrete form. Use of improved smoothed particle hydrodynamics is made to carry out numerical analysis on micro liquid drop oscillation process. The study focuses on the relation between the micro liquid drop oscillation damping and the oscillating period and amplitude in different aspect ratio and Re number. It is shown that for the micro liquid drop oscillation process with aspect ratio $\lambda \leq 4$, under the circumstance of constancy of other parameters, the larger the Re number, the more intense the change of liquid drop's shapes, the weaker the damping effect, and the longer the period of liquid drop's oscillation. Under the circumstance of constancy of Re number, as the initial aspect ratio of liquid drop increases, the amplitude of liquid drop oscillation is stronger, and the period of liquid drop's oscillation is longer.

Keywords: liquid drop oscillation, surface tension, smoothed particle hydrodynamics, numerical simulation

PACS: 47.11.-j, 47.85.-g

DOI: 10.7498/aps.64.134702

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11172306, 51476150), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2013M540034), the Shanxi Provincial Programs for Science and Technology Development, China (Grant No. 20140321022-02), the Shuozhou Municipal Programs for Science and Technology Development, China (Grant Nos. 2013-33-38, 2013-33-40), and the Science Foundation of North University of China.

[†] Corresponding author. E-mail: maliqiang007@163.com