

# 基于格子 Boltzmann 方法的液滴沿固壁铺展动态过程模拟\*

刘邱祖<sup>1)2)†</sup> 寇子明<sup>1)2)</sup> 韩振南<sup>1)</sup> 高贵军<sup>1)2)</sup>

1) (太原理工大学, 机械工程学院, 太原 030024)

2) (山西省矿山流体控制工程技术研究中心, 太原 030024)

(2013年5月17日收到; 2013年6月21日收到修改稿)

矿井喷雾降尘是利用水雾使粉尘润湿沉降的过程, 考虑到固体与液体间分子作用力, 本文采用格子 Boltzmann 方法对液滴沿固壁铺展的动力学行为进行了数值模拟, 结果发现铺展直径及动态接触角随时间呈指数规律, 确定了液滴表面张力与铺展最大直径间的关系, 固壁润湿性对铺展最大速度值影响较大, 这些与物理试验及文献结果符合良好. 进一步考察了疏水性强的固壁, 发现当液滴表面张力足够小时, 铺展接触角可以在  $90^\circ$  以下, 与理论公式符合. 研究发现铺展过程中伴随着振荡, 且铺展到最大时液膜有回缩趋势.

**关键词:** 液滴, 格子 Boltzmann 方法, 铺展, 数值模拟

**PACS:** 47.11.-j, 68.35.Ja, 68.08.Bc

**DOI:** 10.7498/aps.62.234701

## 1 引言

矿井粉尘浓度大时会引起粉尘(瓦斯)爆炸, 长期吸入呼吸性粉尘易导致尘肺病, 粉尘对煤矿安全存在很大危害<sup>[1]</sup>. 喷雾湿式降尘是最常用的降尘方法之一, 具有效率高, 成本低等优点<sup>[2]</sup>. 由于喷雾降尘的复杂性, 目前对它多从流体场方面进行数值仿真和实验研究, 尚缺乏从介观角度研究粉尘润湿过程的基础信息. 了解液滴与粉尘结合时液滴在粉尘表面的铺展润湿过程对改进喷雾系统设计和提高降尘效率有重要意义. 考虑到经高压喷雾形成的液滴直径接近纳米级, 且在粉尘表面的铺展过程属于流体流动范畴, 本文采用格子 Boltzmann 方法对其铺展动态过程进行数值模拟.

液滴沿固壁铺展的问题吸引了众多的研究者. Jiang<sup>[3]</sup> 和 Ma<sup>[4,5]</sup> 采用改进的光滑粒子动力学方法建立液滴冲击固壁铺展模型, 描述了液滴的自由面形态变化. Gao 等<sup>[6]</sup> 使用半经验原子嵌入法建立铺展过程分子动力学模拟, 发现了固液界面结构对

分子间作用影响强烈. Mei 等<sup>[7]</sup> 提出一个新的模型衡量液滴在粗糙固壁的润湿接触角, 很好的解释了实验现象. Wang 等<sup>[8]</sup> 利用前驱膜滑动来表现接触线的方法, 得到了铺展接触角的动力学方程. Gong 等<sup>[9]</sup> 通过建立疏水表面的半浸润模型分析了接触角与表面参数间的定量关系. Chang 等<sup>[10]</sup> 通过引入守力势函数的耗散粒子动力学对微尺度下液滴的形成及振荡进行了数值模拟. 上述研究工作就平衡态液滴沿固壁铺展润湿现象给出了理论描述, 但对其中动力学特性的研究尚有不足. 格子 Boltzmann 方法 (lattice Boltzmann method, LBM) 与以宏观连续方程为基础的传统计算流体力学方法不同, 它以流体微观模型和介观动理论为基础, 其本质适用于研究液滴运动的动力学特征, 而且还能考虑液滴变形振动等复杂情况<sup>[11]</sup>.

LBM 是根据分子运动理论和数理统计建立起来的动力学模型, 关于液滴沿固壁铺展动态过程, 已有不少学者建立了相应的 LBM 研究模型. Xing 等<sup>[12]</sup> 通过建立表面张力和润湿特性的单相自由面

\* 国家自然科学基金联合基金(批准号: U1261107)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: liuqizu@126.com

模型,得到了控制固壁润湿参数与接触角的线性关系. Dupuis 等<sup>[13]</sup>通过建立控制润湿边界条件的自由能最小化模型,模拟了液滴沿具有拓扑结构的固壁铺展行为. Wang 等<sup>[14]</sup>通过将固壁近似成有周期性的粗糙固壁建立两相流模型,探讨了微结构对固壁疏水性的影响. Kuwasaki 等<sup>[15]</sup>将固壁看成是不可变的流体层,建立流体与固体之间的界面流模型,成功地模拟了界面流动速度与接触角之间的关系.

本文把液滴沿固壁的铺展简化为液膜的流动,并考虑固体与液体间分子作用力,研究了液滴沿固壁铺展的动力学行为,分析了不同润湿性固壁和液滴表面张力对铺展动态过程的影响,考察了疏水性强的固壁随液滴表面张力变化的润湿情况.

## 2 理论模型

在介观层次,流体被离散成一系列的流体微团,通过构造符合一定物理规律的机理,演化推导数值结果. LBM 作为一种基于介观层次的新兴数值模拟方法,运用流体力学推导粒子分布函数,然后运用统计力学得到流速、位移等宏观变量. 应用最广泛的是 LBGK 模型<sup>[11]</sup>

$$f_a(r + e_a \delta_t, t + \delta_t) - f_a(r, t) = -\frac{1}{\tau} [f_a(r, t) - f_a^{eq}(r, t)], \quad (1)$$

式中,  $f_a(r, t)$  表示  $t$  时刻  $r$  点处沿  $a$  方向粒子的速度分布函数,  $\tau = \tau_0 / \delta_t$  为无量纲弛豫时间.  $f_a^{eq}(r, t)$  为平衡态分布函数. 此模型为低速流动,  $f_a^{eq}(r, t)$  可表示为

$$f_a^{eq} = \rho w_a \left[ 1 + \frac{e_a \cdot u}{c_s^2} + \frac{1}{2} \left( \frac{e_a \cdot u}{c_s^2} \right)^2 - \frac{u^2}{2c_s^2} \right], \quad (2)$$

式中,  $e_a, w_a$  分别为离散速度和数值积分公式的权重系数;  $c = \Delta x / \Delta t$  是格子速度, 其中  $\Delta x$  和  $\Delta t$  分别是它的网格步长和时间步长,  $c_s = \sqrt{3}/3c$ ; 宏观流体的密度  $\rho$  和动量  $\rho u$  可以通过分布函数得到

$$\rho = \sum_a f_a^{eq}, \quad \rho u = \sum_a f_a^{eq} e_a + \tau F_{吸}, \quad (3)$$

其中  $F_{吸}$  为固体粒子与流体粒子间的吸引力, 流体运动黏性系数  $\nu = c_s^2 (\tau - 1/2) \Delta t$ .

本文采用如图 1 所示的二维九速度方形格子模型 (D2Q9) 进行流场模拟.  $e_a, w_a$  可取值如下:

$$w_a = \frac{4}{q}, \quad e_a = (0, 0), \quad a = 0, \\ w_a = \frac{1}{q},$$

$$e_a = \left( \cos \left[ (a-1) \frac{\pi}{2} \right], \sin \left[ (a-1) \frac{\pi}{2} \right] \right), \\ a = 1, 2, 3, 4, \\ w_a = \frac{1}{36}, \\ e_a = \sqrt{2} \left( \cos \left[ (2a-1) \frac{\pi}{4} \right], \sin \left[ (2a-1) \frac{\pi}{4} \right] \right), \\ a = 5, 6, 7, 8. \quad (4)$$

利用表示固体与流体之间势的 Van der Waals 自由理论推导出固体粒子 ( $r_s$ ) 和流体粒子 ( $r_f$ ) 之间的吸引力  $F_{吸}^{[16]}$ , 方程表示为

$$F_{吸} = \begin{cases} k_w \rho(r_f) \cdot (r_s - r_f), & |r_s - r_f| = 1, \\ k_w \rho(r_f) \cdot (r_s - r_f) / 4\sqrt{2}, & |r_s - r_f| = \sqrt{2}, \\ 0, & \text{其他,} \end{cases} \quad (5)$$

式中  $k_w$  为吸引力项, 润湿接触角随  $k_w$  的增大而线性减小.

利用动量转换法, 计算液滴内部分子对液膜的作用力  $F$ , 选定格子所受流体作用力为格子发生碰撞的所有点作用之和<sup>[17]</sup>, 由下式计算:

$$F = - \sum_{\Omega} \sum_{a \neq 0} [f_a(r, t) + f_a(r + e_a \delta_t, t)] \times [1 - w_a(r + e_a \delta_t)]. \quad (6)$$

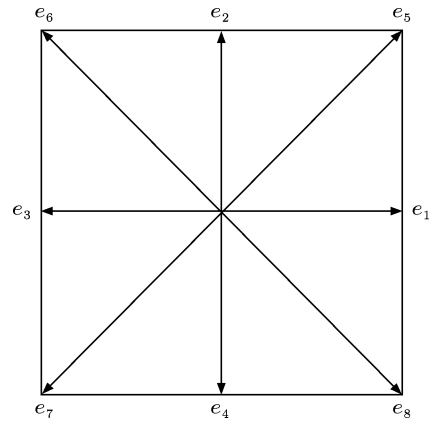


图 1 二维九速度方形 (D2Q9) 格子

## 3 LBM 物理模型

### 3.1 物理模型

为了简化模型, 把液滴铺展过程看成液膜沿固壁的流动过程, 认为液滴表面膜是一个完整的界面, 即不考虑液滴内部分子有运移到表面的可能. LBM 模型对两相流体做了一些基本假设<sup>[11]</sup>:

1) 气相与液相之间始终隔着界面层 (液膜), 需对界面层的演化做特殊处理;

2) 气相的密度总是足够小, 以致其对液相的动力学影响可以忽视, 气相自身会在界面层变形之后立刻重新达到平衡态;

3) 液相是在界面层变形过程中, 始终完全充满, 演化过程中遵从单相 LBM 的演化过程.

考虑膜的流动性, 定义每个格子的质量值为  $m$ ; 认为液相不可压缩, 定义质量值为当地密度值; 根据假设, 气相质量值定义为 0, 液滴表面膜为单分子膜层, 其质量值位于 0 与  $m$  之间. 为了保持界面处分布函数完整, 即总动量在流动过程中始终守恒, 认为液体的动量变化完全通过流体对膜的作用力  $F$  转化为膜的动量变化.

$$f_a(r + e_a \delta_t, t) + f_{a_{opp}}(r, t) = \frac{\partial F}{\partial t}, \quad (7)$$

式中  $a_{opp}$  为  $a$  反向.

### 3.2 边界处理和初始条件

在 LBM 中, 边界条件的处理对模型的计算精度和稳定性影响很大, 设计的原则是保证质量和动量的守恒<sup>[11]</sup>. 本模型在左右边界采用周期格式, 上下边界采用反弹格式, 即上边界为镜面, 下边界为固壁. 初始时刻液滴刚好与壁面接触, 宏观上没有速度, 液滴直径  $D = 20 \mu\text{m}$ , 液膜为单分子层, 厚度  $h = 2 \mu\text{m}$ . 通常用无量纲参数: Bond 数 (简称 Bo) 表征液滴表面张力.

### 4 铺展的动力学方程

液滴沿固壁铺展过程为液滴表面与固壁接触区的液膜流动变形过程. 将液膜离散化, 使得每一段膜的水平圆弧长度为  $\delta x$ , 并将其看作质点, 与相邻的质点以圆弧曲线连结, 并保证此质点的水平坐标与格子点的水平坐标一致.

由于膜的流动是沿水平方向进行的, 因此不考虑竖直方向的位移, 认为膜的位移只发生在水平方向. 对质点膜进行受力分析, 如图 2 和图 3 所示, 张力  $T$  是水平相邻质点膜与上方表面膜的共同作用, 认为这两个作用力均为液滴表面张力, 取张力  $T$  在空间与  $x$  轴成  $45^\circ$ , 作用在质点膜两端, 左右端点的张力  $T$  水平分量与  $x$  轴的夹角分别为  $\theta_1$  与  $\theta_2$ ;  $F_{吸}$  为壁面对水滴的作用力, 其值由 (5) 式给出;  $G$  为液滴自身的质量对质点膜的作用力;  $F$  为液滴整个流

体对液膜的作用力, 其值由 (6) 式给出, 方向为液滴质心与此质点膜的连线, 与  $x$  轴的夹角为  $\alpha$ . 单位质点膜的质量取  $m$ , 加速度取  $a$ .

建立水平方向膜的动力学方程:

$$(G - F) \tan \alpha_1 \cdot \delta_x - T \cdot \tan 45^\circ (\tan \theta_2 - \tan \theta_1) + F_{吸} = ma \delta_x. \quad (8)$$

质点膜夹角正切值由空间导数确定

$$\tan \theta = \frac{\partial y}{\partial x}. \quad (9)$$

$\alpha$  空间几何关系确定

$$\tan \alpha = \frac{h}{r} \times \frac{\partial y}{\partial x}. \quad (10)$$

由体积相等, 确定  $h$  与  $r$  的比值方程  $f_1(r)$ ,

$$V_0 = \frac{\pi}{6} (3r^2 + h^2) h = \frac{4}{3} \pi r_0^3. \quad (11)$$

将 (9), (10), (11) 式代入 (8) 式得

$$(G - F) \cdot f_1(r) \cdot \delta_x \frac{\partial y}{\partial x} - T \left( \frac{\partial y}{\partial x} \Big|_2 - \frac{\partial y}{\partial x} \Big|_1 \right) + F_{吸} = ma \delta_x, \quad (12)$$

由于  $\delta x$  足够小, 可得水平方向加速度表达式

$$a = \frac{G - F}{m} f_1(r) \cdot \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{T}{m} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{F_{吸}}{m}. \quad (13)$$

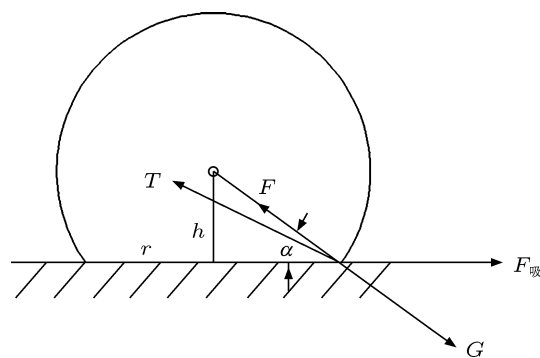


图 2 单元膜受力整体视图

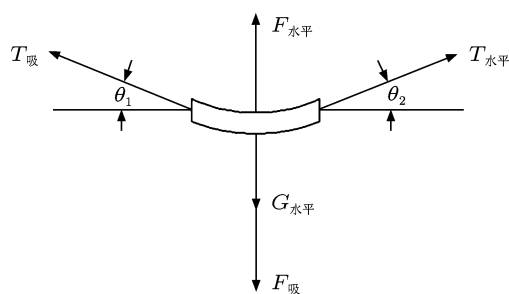


图 3 单元膜受力水平视图

## 5 数值模拟及结果分析

### 5.1 计算方法

LBM 是全离散的局部动力学模型, 不需建立和求解复杂的偏微分方程, 计算过程可看做一个循环演化过程, 计算流程如图 4 所示.

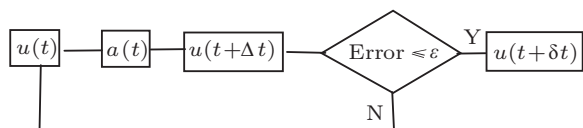


图 4 计算流程图

文字描述如下:

1) 由 LBM 方程和实际物理条件给程序相关节点赋值, 程序根据初始值计算所有节点的平衡态分布函数, 进而求得  $u(t)$ .

2) 由加速度动力学方程求得  $a(t)$ .

3) 计算  $t + \Delta t$  时刻速度,  $u(t + \Delta t) = u(t) + \Delta t a(t)$ , 取  $\Delta t = \delta_t / 100$ .

4) 返回第 1) 步, 循环 100 次迭代求解.

5) 由程序收敛判据判断计算过程是否收敛, 若收敛, 输出结果; 否则, 重新计算

$$E_{\text{error}} = \frac{\sum_{r \in \Omega} \|u(r, t + \delta_t) - u(r, t)\|^2}{\sum_{r \in \Omega} \|u(r, t + \delta_t)\|^2} \leq \varepsilon, \quad (14)$$

取  $\varepsilon = 10^{-12}$ .

6) 输出结果  $u(t + \delta_t)$ .

7) 根据  $y(t + \delta_t) = y(t) + \delta_t \cdot u(t + \delta_t)$ , 计算  $y(t + \delta t)$ .

### 5.2 结果分析

#### 5.2.1 液滴沿固壁铺展动态过程分析

选取直径  $20 \mu\text{m}$  的液滴为研究对象, 图 5 演示了不同时刻, 表征固壁润湿性能参数  $k_w$  取 0.3 和 0.1 时的液滴铺展过程. 前一列图显示: 固壁表现为亲水性时液滴明显铺展较好且速度较快,  $t=50$  时, 液滴头部受压, 液滴变为稍扁的椭圆形;  $t=200$  时, 液膜开始均匀的向四周流动, 液滴的形状变为球冠形状;  $t=600$  时, 液膜继续沿固壁向四周流动;  $t=1500$  时, 液滴变成小草帽形状;  $t=3000$  时, 形成一个圆盘形状, 此时液滴沿固壁铺展到最大程度. 后一系列图显示: 固壁表现为疏水性, 液滴明显铺展速度较慢,  $t=400$  时, 液膜才开始向四周铺展, 到

$t=5000$  时, 液滴才铺展到最大, 铺展的最大直径明显较小, 表现接触角是钝角. 以上仿真计算得到的图像与 Yang 等 [18] 的理论研究和试验结果定性分析基本一致.

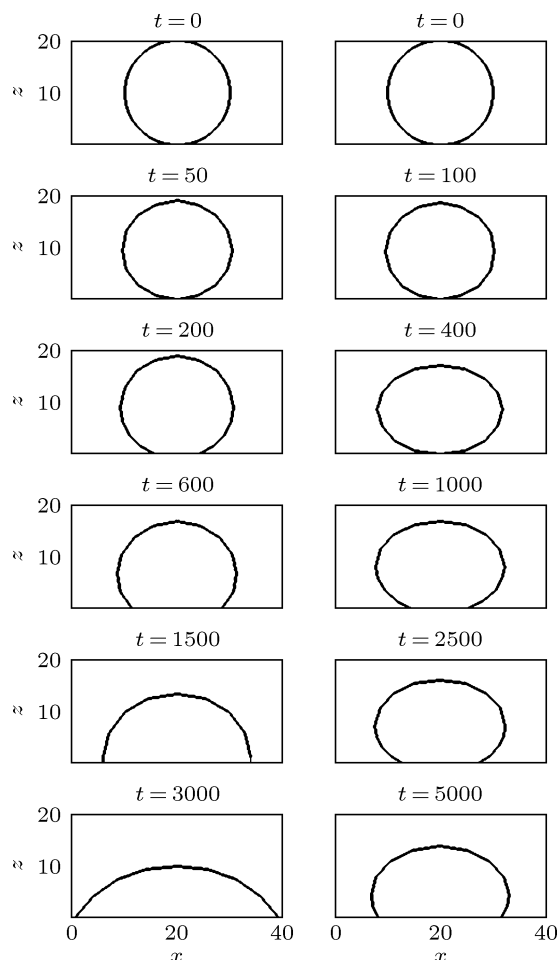


图 5  $k_w = 0.3$  和  $0.1$  的液滴铺展过程不同时刻的界面 ( $t$  为计算时间步)

#### 5.2.2 固壁润湿性对铺展过程的影响

对于同种液滴, 不同固壁对液滴的  $F_{\text{吸}}$  不同, 本文通过调节参数  $k_w$  研究不同润湿性固壁对液滴铺展的影响. 取  $k_w$  分别为 0.4, 0.2, 0.1, 0.05. 如图 6 所示,  $k_w = 0.4$  时,  $F_{\text{吸}}$  比较大, 即为亲水表面, 液滴的最大铺展半径较大、铺展速度较快;  $k_w = 0.2$  和  $0.1$  时,  $F_{\text{吸}}$  减小, 液滴的最大铺展半径明显变小、铺展速度明显减慢;  $k_w = 0.05$  时,  $F_{\text{吸}}$  很小, 即为疏水性表面, 此时铺展非常缓慢. 接触角随固壁润湿性的增大而减小, 说明固壁对液滴作用力越大越易铺展, 此规律符合降尘经验. 同时可见, 润湿角随时间呈指数变化, 这与文献 [19] 提到的规律符合. 图 7 给出了液滴铺展过程的最大速度和铺展时间与  $F_{\text{吸}}$  的关系, 可见固壁的润湿性对铺展时间影响较大. 对

疏水性强固壁 (接触角  $\theta \geq 135^\circ$ ), 较长的铺展时间可能会导致润湿效率的降低, 而且矿井空气中漂浮的粉尘表面润湿性的大小不易控制, 所以需要添加降尘剂降低液滴表面张力来提高液滴与粉尘的接合能力.

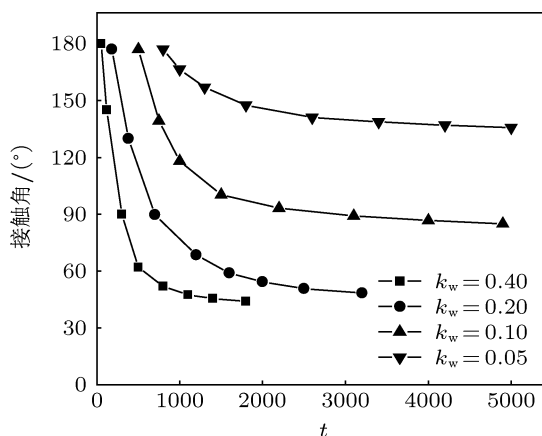


图6 不同  $k_w$  铺展接触角随时间的变化 ( $t$  为计算时间步)

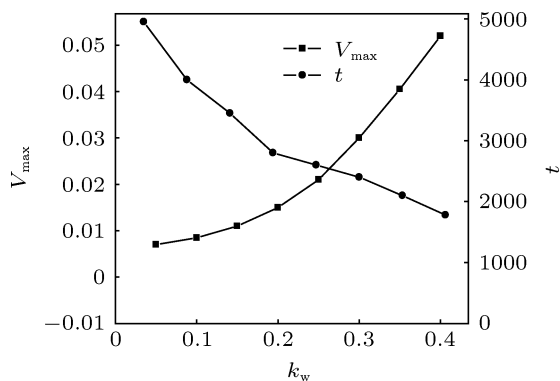


图7 铺展最大速度和铺展时间随  $k_w$  的变化 ( $t$  为计算时间步)

### 5.2.3 液滴表面张力对铺展动态过程的影响

对于同种固壁, 不同液滴表面张力对固壁的润湿过程不同, 煤矿实际降尘时, 多是通过添加降尘剂改变液滴表面张力, 本文通过调节参数  $Bo$  研究不同液滴对铺展过程的影响. 分别取  $Bo$  为 10, 100, 1000, 10000 进行模拟计算, 结果如图 8 所示: 接触角随时间呈指数变化规律, 且  $Bo$  越小接触角越小, 这与文献 [20] 所示规律符合, 观察图 9 可见, 液滴沿固壁铺展的最大相对直径与  $Bo^{1/4}$  似线性关系, 这与文献结论 [21] 符合, 液滴表面张力越小越容易在固体表面铺展开来, 此结论验证了通过添加降尘剂降低液滴表面张力可以提高粉尘的润湿性.

### 5.2.4 疏水性固壁铺展动态过程研究

疏水性粉尘的沉降一直是矿井喷雾降尘的难题, 由于疏水性粉尘的接触角大且润湿时间长, 现场多采用添加降尘剂的方法来提高粉尘的润湿性,

但实际应用中缺乏理论指导. 本文对  $k_w = 0.05$  的固壁, 从大到小取不同的  $Bo$  计算, 结果如图 10 所示. 计算结果显示:  $138^\circ$  的接触角随  $Bo^{1/4}$  从 8.8 降到 1.8 时, 接触角降为  $82^\circ$ , 小于  $90^\circ$ , 说明通过降低液滴的表面张力, 是可以让疏水性固壁表现为亲水性. 同时铺展过程需要的时间也从 5100 步时减为 3300 步时, 提高了润湿效率. 此结论为通过添加降尘剂来解决难溶水粉尘的沉降问题提供了理论方面的支撑, 但实际应用中液滴表面张力不会无限制的小, 一般情况通过添加降尘剂是可以使接触角减小约  $25^\circ$ 、润湿时间缩短约 3.5 s.

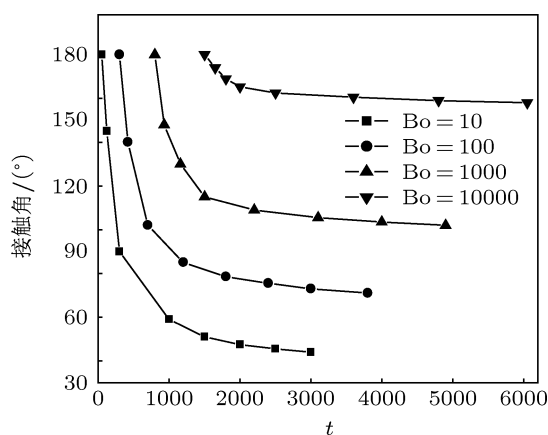


图8 不同  $Bo$  接触角随时间的变化 ( $t$  为计算时间步)

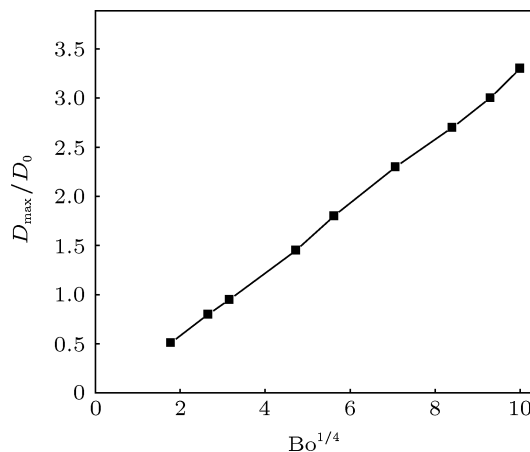


图9 铺展的最大相对直径与  $Bo^{1/4}$  的关系

### 5.2.5 铺展中的震荡及回缩现象

通过跟踪液膜运动速度分析其运动过程, 图 11 所示, 发现液滴经过一个短暂的力量蓄积过程, 在 200 时间步时速度突然增大, 类似于闸门, 之后液膜铺展速度随时间递减, 在整个铺展过程中速度值呈振荡变化且振幅先增大后减小, 最大值出现在 1400 时间步, 之后振荡慢慢消失. 文献 [22] 也发现了铺展过程中伴随着振荡现象, 其可能是蕴含着复杂的分子力学运动机理的缘故, 有待学者进一步研究.

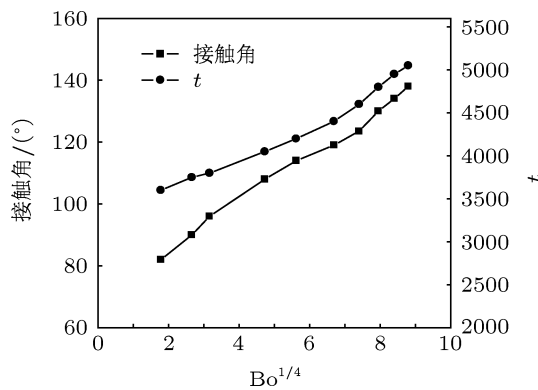


图 10  $k_w = 0.05$  时接触角和铺展时间随  $Bo^{1/4}$  的关系 ( $t$  为计算时间步)

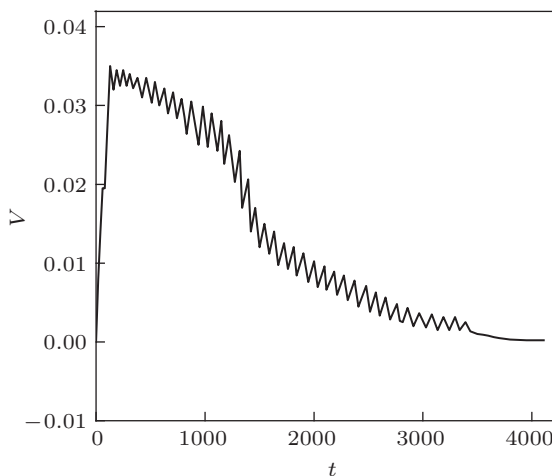


图 11  $k_w = 0.3, Bo = 1000$  时液膜速度随时间的变化 ( $t$  为计算时间步)

液滴达到平衡态后, 为了观察此时液膜的振荡情况, 增大模型程序中参数  $Bo$  值, 计算发现液膜的

速度几乎同时增大, 接触角明显变大, 说明铺展最大时刻液滴表面有回缩的趋势, 文献 [23] 也发现了此现象, 它是液滴黏度和表面张力相互作用的动态平衡复杂过程.

## 6 结论

如何提高粉尘润湿性一直是矿井喷雾降尘的难题, 格子 Boltzmann 方法因其属于介观动理论范畴, 成为模拟纳米级流体界面问题的有力工具. 本文采用 LBM 建立液滴沿固壁铺展的动力学模型, 首先模拟了不同润湿性固壁与液滴表面张力对铺展动力学行为的影响, 结果发现铺展直径及动态接触角随时间呈指数规律, 液滴铺展最大直径与表征液滴表面张力的  $Bo^{1/4}$  似线性关系, 铺展时间和铺展过程中的最大速度受固壁润湿性影响较大, 这些与前人的研究和经验符合良好. 进一步考察了疏水性强的固壁, 发现当液滴表面张力足够小时, 计算铺展接触角可以在  $90^\circ$  以下, 使得疏水性固壁表现出亲水性, 此结论对指导在喷雾系统中添加降尘剂有重要的意义. 通过跟踪液膜的运动速度发现, 液膜开始铺展时类似于闸门, 之后速度突然增大, 在铺展过程中伴随着振荡且振幅先增大后减小; 液滴铺展最大时表面有回缩的趋势, 其中的机理有待研究.

[1] Li Y Q, Qin Y P, Yang X B 2011 *Procedia Engineering* (Beijing: Elsevier Press) **26** 738

[2] Jin L Z, Li J P, Sun Y F 2010 *Prevention Theory of Mine Dust* (Beijing: Scientific Press) p156 (in Chinese) [金龙哲, 李晋平, 孙玉福 2010 矿井粉尘防止理论 (北京: 科学出版社) 第 156 页]

[3] Jiang T, Ouyang J, 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]

[4] Su T X, Ma L Q, Liu M B, Chang J Z 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 064702 (in Chinese) [苏铁熊, 马理强, 刘谋斌, 常建忠 2013 物理学报 **62** 064702]

[5] Ma L Q, Chang J Z, Liu H T, Liu M B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 054701 (in Chinese) [马理强, 常建忠, 刘汉涛, 刘谋斌 物理学报 **61** 054701]

[6] Gao Y F, Sun D Y 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 066802

[7] Mei M F, Yu B M, Luo L, Cai J C 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 076802

[8] Wang X D, Peng X F, Duan Y Y, Wang B X 2007 *Chin. J. Chem. Eng.* **15** 730

[9] Gong M G, Liu Y Y, Xu X L 2010 *Chin. Phys. B* **19** 106801

[10] 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 物理学报 **57** 3954]

[11] He Y L, Wang Y, Li Q 2011 *Theory and Applications of Lattice Boltzmann Method* (Beijing: Scientific Press) p48 (in Chinese) [何雅玲, 王勇, 李庆 2011 格子 Boltzmann 方法的理论及应用 (北京: 科学出版社) 第 48 页]

[12] Xing X Q, Butler D L, Yang C 2006 *Comp. Math. Sci.* **7** 1

[13] Dupuis A, Yeomans J M 2005 *Langmuir* **21** 2624

[14] Wang W X, Shi J, Qiu B, Li H B 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8371 (in Chinese) [王文霞, 施娟, 邱冰, 李华兵 2010 物理学报 **59** 8371]

[15] Kawasaki A, Onishi J, Chen Y, Ohashi H 2007 *Comp. Math. Appl.* **55** 1492

[16] Shi Z Y, Hu G H, Zhou Z W 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2595 (in Chinese) [石自媛, 胡国辉, 周哲玮 2010 物理学报 **59** 2595]

[17] Zu Y Q, Shi W Q 2005 *Acta Mech. Sin.* **37** 164 (in Chinese) [祖迎庆, 施卫平 2005 力学学报 **37** 164]

[18] Yang J, Tan Y Z, Wu X K, Li G P 2009 *Coal. Sci.* **34** 1105 (in Chinese) [杨静, 谭允祯, 伍修锬, 李改平 2009 煤炭学报 **34** 1105]

[19] Lee K S, Starov V M 2009 *Colloid. Interf. Sci.* **329** 361

[20] Zhu Z Q, Wang Y, Liu Q S 2012 *Jeng. Ther.* **33** 251 (in Chinese) [朱

- 志强, 汪洋, 刘秋生 2012 工程热物理学报 33 251]  
[21] Clanet C, Beguin C, Richard D 2004 *J. Fluid. Mech.* **517** 199  
[22] Hu G H, Xu A J, Xu Z, Zhou Z W 2008 *Phys. Fluids.* **20** 102101

- [23] Siddhartha F L, Vivek V B, Nigam K D P 2007 *Chem. Eng. Sci.* **62** 7214

# Dynamic process simulation of droplet spreading on solid surface by lattice Boltzmann method\*

Liu Qiu-Zu<sup>1)2)†</sup> Kou Zi-Ming<sup>1)2)</sup> Han Zhen-Nan<sup>1)</sup> Gao Gui-Jun<sup>1)2)</sup>

1) (Taiyuan University of Technology, College of Mechanical Engineering Taiyuan 030024, China)

2) (Shanxi Province Mine Fluid Control Engineering Technology Research Center, Taiyuan 030024, China)

(Received 17 May 2013; revised manuscript received 21 June 2013)

## Abstract

Spray dust mechanism is to use spray to wet and reduce the coal mine dust. Based on lattice Boltzmann method, the dynamic behaviors of droplet spreading on solid surface are simulated numerically in consideration of the molecules reaction between fluid and solid. Results show that the spreading diameter and dynamic contact angle change exponentially with time. The relationship between droplet surface tension and maximum spreading diameter is determined; it is shown that the wettability of solid surface has a great influence on the maximum spreading velocity. All the above numerical results are in good agreement with the experimental and theoretical results reported in the literature. Moreover, the solid surface with high hydrophobicity is further investigated. It is found that the spreading contact angle can be less than  $90^\circ$  if the droplet surface tension is small enough, which agrees well with the theoretical formula. The simulation also shows that there occurs oscillations in the spreading process and retraction when the droplet spreads to its maximum.

**Keywords:** droplet, lattice Boltzmann method, spread, numerical simulation

**PACS:** 47.11.-j, 68.35.Ja, 68.08.Bc

**DOI:** 10.7498/aps.62.234701

\* Project supported by the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U1261107).

† Corresponding author. E-mail: liuqizu@126.com