

疏水表面减阻的格子 Boltzmann 方法数值模拟

张娅 潘光 黄桥高

Numerical investigation on drag reduction with hydrophobic surface by lattice Boltzmann method

Zhang Ya Pan Guang Huang Qiao-Gao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 184702 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.184702

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.184702>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I18>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

流体力学拉氏守恒滑移线算法设计

[Conservative sliding algorithms for hydrodynamics](#)

物理学报.2015, 64(19): 194701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.194701>

干斜压大气拉格朗日原始方程组的半解析解法和非线性密度流数值试验

[Semi-analytical solution of the dry baroclinic Lagrange primitive equation and numerical experiment of a non-linear density current](#)

物理学报.2015, 64(19): 194702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.194702>

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>

## 疏水表面减阻的格子 Boltzmann 方法数值模拟\*

张娅 潘光† 黄桥高

(西北工业大学航海学院, 西安 710072)

(2015年3月10日收到; 2015年5月5日收到修改稿)

采用格子 Boltzmann 方法的多松弛模型和 Shan-Chen 多相流模型对雷诺数为 100 的疏水表面方柱绕流进行了数值模拟, 分析了疏水表面接触角和来流含气率对方柱绕流流场的影响. 研究表明: 疏水表面接触角一定时, 来流含气率在一定范围内, 疏水表面具有减阻的能力, 超出这一范围时会出现阻力系数、升力系数升高的现象, 同时在方柱近壁面处伴随涡的形成产生了气团脱落; 当来流含气率处于适当水平时, 接触角越大, 绕流物体近壁面处含气率越稳定, 减阻效果越明显. 分析发现疏水表面减阻的关键在于保证近壁面处气层的稳定性, 此时接触角越大, 减阻效果越明显. 本文从含气率角度出发分析疏水表面的减阻现象, 为进一步探索疏水表面减阻机理提出了新的思路.

**关键词:** 格子 Boltzmann 方法, 疏水表面, 两相流, 减阻

**PACS:** 47.11.-j, 02.60.Cb, 47.85.Dh

**DOI:** 10.7498/aps.64.184702

## 1 引言

近年来, 疏水表面在减阻方面的应用潜力引起了人们的广泛关注. 理论上用接触角来反映润湿性, 接触角是指在固、液、气三相交点处所做的固液界面的切线经液体内部与气液界面切线的夹角. 接触角大于  $90^\circ$  的固体表面称为疏水表面, 此时液体不润湿固体表面<sup>[1]</sup>. 接触角越大, 固体表面疏水性越强.

对于疏水表面的减阻机理, 学者们从各个角度提出了相关理论. Choi 和 Kim<sup>[2]</sup> 对微通道内水流动时的滑移效果进行了研究, 发现相同压力下疏水表面微通道内的流速大于常规微通道内的流速, 并且采用滑移理论解释疏水表面的减阻机理. Cao 等<sup>[3]</sup> 采用分子动力学方法研究了流体在纳米结构表面通道内的流动, 提出纳米结构对表面湿润性有着双重效应, 即纳米结构可以提高疏水表面的疏水性, 增加流体的滑移速度, 但同时又扰乱了通道表面附近流场的流线, 并阻塞了纳米流, 使表现滑移

长度降低. Ou 等<sup>[4]</sup> 采用光刻法在硅片上加工微槽, 再用有机硅烷进行低表面能处理获得疏水表面, 对疏水表面微槽内的气液界面形状进行了测试, 证实了疏水表面上设计合理的微形貌能够驻留气体, 形成自由剪切面, 导致滑移流动发生. 田军等<sup>[5]</sup> 采用低表面能物质修饰平板表面, 发现在低流速下可降低平板阻力 18%—30%, 并提出低表面能涂层的疏水性导致了平板湍流边界层增厚和转捩点后移, 从而造成了平板阻力的降低. 潘光等<sup>[6]</sup> 将疏水表面减阻技术用于水下航行器, 实验测试发现通过降低固体表面能可以减小固体分子与液体分子间的黏附力, 从而减小流体流经固体表面时的阻力. 宋保维等<sup>[7]</sup> 构造了具有棋盘状微结构的疏水表面, 考虑表面张力的影响, 研究了湍流状态下的减阻特性以及微结构内气体封存的效果, 认为表面张力削弱了壁面切应力的影响, 使得低雷诺数下微结构内气体能够有效封存, 进而减小壁面阻力. 王宝等<sup>[8]</sup> 认为疏水表面实现稳定减阻的关键在于疏水表面流场附近形成稳定驻留的气相结构, 展向沟槽可以使气相结构在微结构内稳定驻留, 且有利于新的气相结

\* 国家自然科学基金 (批准号: 51279165, 51479170) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [panguang601@163.com](mailto:panguang601@163.com)

构生成.

已有的疏水表面减阻理论广泛认可疏水表面附近流场处于气液共存状态<sup>[1-8]</sup>, 而且对气液两相流的相关研究<sup>[9]</sup>也证明了流体中的含气率对流场特性会有显著影响. 因此, 本文研究来流含气率与疏水表面接触角对减阻效果的影响, 进而探索疏水表面的减阻机理.

## 2 LBM 模型介绍

格子 Boltzmann 方法 (lattice boltzmann method, LBM) 起源于格子气动机, 根据分子运动理论和统计力学原理建立粒子系统, 利用粒子分布函数代替粒子系统状态量进行演化<sup>[10]</sup>. 与传统的数值方法相比, LBM 方法具有物理意义清晰、边界条件处理简单、程序易于实施、并行性好等优点, 且对不同流体相态间的界面动力学行为模拟优于传统计算流体力学方法<sup>[11]</sup>.

从描述相互作用力的角度出发, LBM 模拟两相流主要有两种方法: 一种是从系统自由能角度求得分子间作用力, 即自由能方法, 该方法满足局部质量和动量守恒, 但是在密度变化较大的区域如两相界面处不满足伽利略不变性, 会导致一些非物理现象出现<sup>[12]</sup>; 另一种是以 Shan-Chen 多相流模型为代表的引入微观分子作用力的方法, 这种方法直接对微观相互作用力进行描述, 能够反映多相流动力学的物理本质<sup>[13]</sup>. 根据所研究问题的不同, Shan-Chen 多相流模型可分为单组分模型和多组分模型. 本文的研究对象为疏水表面附近处于气液共存状态的单一流体, 单组分模型即可满足模拟要求. 多松弛模型在碰撞过程中使用多个松弛时间, 碰撞过程在速度矩空间执行, 迁移过程在粒子速度空间执行, 不需要知道速度空间的平衡态分布函数形式, 而是在速度矩空间构造对应的平衡态函数, 能提高稳定性和精度, 在物理原理、参数选取和数值稳定性方面都有很大的优势<sup>[14]</sup>. 故本文采用 LBM 的多松弛模型和 Shan-Chen 多相流模型模拟疏水表面方柱绕流.

### 2.1 多松弛模型

多松弛模型在碰撞过程中使用多个无量纲松弛时间. 其演化模型可以表示为

$$f_i(\mathbf{x} + \mathbf{e}_i \delta t, t + \delta t) - f_i(\mathbf{x}, t)$$

$$= -\Omega(f_i(\mathbf{x}, t) - f_i^{\text{eq}}(\mathbf{x}, t)), \quad (1)$$

其中,  $f_i(\mathbf{x}, t)$  表示  $t$  时刻  $\mathbf{x}$  点处方向为  $i$  的粒子分布函数,  $\mathbf{e}_i$  是离散速度,  $f_i^{\text{eq}}(\mathbf{x}, t)$  为平衡态分布函数,  $\delta t$  为时间步长,  $-\Omega$  是碰撞矩阵, 该方程描述了速度分布函数速度空间内的时空演化过程. 根据分布函数  $f$  可惟一确定速度矩  $\mathbf{m}$ , 即有  $\mathbf{m} = \mathbf{M}f$ , 矩阵  $\mathbf{M}$  为变换矩阵. 则其演化模型可表示为

$$f_i(\mathbf{x} + \mathbf{e}_i \delta t, t + \delta t) - f_i(\mathbf{x}, t) = -\mathbf{M}^{-1} \mathbf{S}(\mathbf{m}(\mathbf{x}, t) - \mathbf{m}^{\text{eq}}(\mathbf{x}, t)), \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{S}$  为松弛矩阵,  $\mathbf{m}^{\text{eq}}$  为速度矩的平衡态.

在 D2Q9 多松弛模型<sup>[15]</sup>中,  $\rho$  为密度,  $u$  为速度, 声速

$$c_s = 1/\sqrt{3}, \quad (3)$$

离散速度

$$\mathbf{e}_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

变换矩阵  $\mathbf{M}$  及其逆  $\mathbf{M}^{-1}$  为

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -4 & -1 & -1 & -1 & -1 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 4 & -2 & -2 & -2 & -2 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & -2 & 0 & 2 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -2 & 0 & 2 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & -1 \end{pmatrix}, \quad (5a)$$

$$\mathbf{M}^{-1} = \lambda \begin{pmatrix} 4 & -4 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & -1 & -2 & 6 & -6 & 0 & 0 & 9 & 0 \\ 4 & -1 & -2 & 0 & 0 & 6 & -6 & -9 & 0 \\ 4 & -1 & -2 & -6 & 6 & 0 & 0 & 9 & 0 \\ 4 & -1 & -2 & 0 & 0 & -6 & 6 & -9 & 0 \\ 4 & 2 & 1 & 6 & 3 & 6 & 3 & 0 & 9 \\ 4 & 2 & 1 & -6 & -3 & 6 & 3 & 0 & -9 \\ 4 & 2 & 1 & -6 & -3 & -6 & -3 & 0 & 9 \\ 4 & 2 & 1 & 6 & 3 & -6 & -3 & 0 & -9 \end{pmatrix}, \quad (5b)$$

其中,  $\lambda = 1/36$ . 速度矩的平衡态  $\mathbf{m}^{\text{eq}}$  为

$$\mathbf{m}^{\text{eq}} = \left( \rho, -2\rho + 3(j_x^2 + j_y^2), \rho - 3(j_x^2 + j_y^2), \right. \\ \left. j_x, -j_x, j_y, -j_y, (j_x^2 - j_y^2), j_x j_y \right)^{\text{T}}, \quad (6)$$

$j_x, j_y$  分别为  $x, y$  方向的动量, 表示为

$$j_x = \rho u_x = \sum_i f_i^{\text{eq}} e_{ix}, \quad (7a)$$

$$j_y = \rho u_y = \sum_i f_i^{\text{eq}} e_{iy}. \quad (7b)$$

模型松弛矩阵  $\mathbf{S} = \text{diag}(s_0, s_1, \dots, s_8)$ ,  $s_i$  为对应于第  $i$  个速度矩的松弛因子, 本文取  $\mathbf{S} = \text{diag}(1.0, 1.4, 1.4, 1.0, 1.2, 1.0, 1.2, 1/\tau, 1/\tau)$ , 其中  $\tau$  为松弛因子,  $\tau = 3\nu + 0.5$ ,  $\nu$  为运动黏性系数.

## 2.2 单组分 Shan-Chen 多相流模型

Shan-Chen 多相流模型中假设流体粒子之间存在相互作用力, 对于 D2Q9 模型  $\mathbf{x}$  处的流体粒子受到周围流体粒子的作用力为

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}, t) = -G\psi(\mathbf{x}, t) \sum_{i=1}^8 w_i \psi(\mathbf{x} + \mathbf{e}_i \delta t, t) \mathbf{e}_i, \quad (8)$$

其中  $w_i$  是不同方向作用力的权系数, 其值为  $w_{1-4} = 1/9$ ,  $w_{5-8} = 1/36$ ,  $G$  为流体粒子之间的相互作用强度, 调整  $G$  的值可以改变流体的表面张力.  $\psi$  表示各相的有效密度

$$\psi(\rho) = \psi_0 \exp(-\rho'/\rho), \quad (9)$$

状态方程为

$$p = \rho c_s^2 + G\psi^2/6, \quad (10)$$

本文取  $\psi_0 = 4$ ,  $\rho' = 200$ . 由文献 [16] 可知, 上式中所表达的压力-密度曲线是否单调的临界值为  $G' = -92.4$ , 故取  $G = -120$ , 此时压力-密度曲线非单调, 会产生相分离, 适用于模拟疏水表面附近流场的气液共存状态.

在单组分 Shan-Chen 多相流模型中流体粒子和固体粒子之间的作用力  $\mathbf{F}_{\text{ads}}$  可以表示成如下形式

$$\mathbf{F}_{\text{ads}}(\mathbf{x}, t) \\ = -G_{\text{ads}}\psi(\mathbf{x}, t) \sum_{i=1}^8 w_i s w_i(\mathbf{x} + \mathbf{e}_i \delta t) \mathbf{e}_i, \quad (11)$$

其中  $G_{\text{ads}}$  称为吸附参数, 表示固体表面对流体粒子的作用强度, 在  $G$  确定时可以通过调整  $G_{\text{ads}}$  来改变液体在固体表面的接触角大小;  $s w_i$  是指示器

函数, 当  $\mathbf{x} + \mathbf{e}_i \delta t$  为固体表面格点时取值 1, 为流体格点时取值 0. 通过改变平衡态分布函数中的平衡态速度  $\mathbf{u}^{\text{eq}}$  来体现粒子间相互作用力的影响

$$\mathbf{u}^{\text{eq}}(\mathbf{x}, t) = \frac{\sum_{i=0}^8 \mathbf{e}_i f_i(\mathbf{x}, t) + \tau(\mathbf{F} + \mathbf{F}_{\text{ads}})}{\rho(\mathbf{x}, t)}. \quad (12)$$

宏观密度和速度分别为

$$\rho(\mathbf{x}, t) = \sum_{i=0}^8 f_i(\mathbf{x}, t), \quad (13a)$$

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \frac{\sum_{i=0}^8 \mathbf{e}_i f_i(\mathbf{x}, t) + \frac{\tau}{2}(\mathbf{F} + \mathbf{F}_{\text{ads}})}{\rho(\mathbf{x}, t)}. \quad (13b)$$

## 2.3 算法有效性验证

首先采用单组分 Shan-Chen 多相流模型在一定的流体粒子间相互作用强度  $G$  下通过调整吸附参数  $G_{\text{ads}}$  来获得不同的表面接触角. 数值模拟区域为  $400 \times 200$ , 采用格子单位, 左右边界采用周期边界格式, 上下壁面采用标准反弹格式, 一个直径为 200 的半圆形液滴置于下壁面中间位置, 初始速度为零. 由于固体表面对液体的作用力不同, 体系达到平衡时液滴呈现不同的形态, 如图 1 所示.

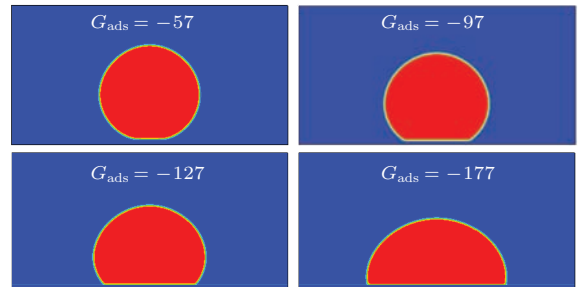


图 1 (网刊彩色) 不同吸附参数下的液滴形态

Fig. 1. (color online) Droplet shape with different  $G_{\text{ads}}$ .

本文经最小二乘拟合获得吸附参数  $G_{\text{ads}}$  与接触角  $CA$  关系为  $CA = 0.62711 \times G_{\text{ads}} + 207.73382$ , 与文献 [16] 的结果符合良好, 如图 2 所示.

接下来, 利用单相二维槽道方柱绕流来验证多松弛模型有效性. 方柱绕流的基本模型如图 3 所示, 方柱边长  $D = 30$ , 方柱中心距入口的距离  $C_x = 20D$ , 计算区域的长高分别为:  $L_x = 60D$ ,  $L_y = 8D$ , 模拟中均采用格子单位. 入口设置为速度边界, 出口设置为压力边界, 上下边界及固体表面均采用标准反弹格式的无滑

移边界. 初始密度  $\rho_0 = 1.0$ , 入口速度分布规律为  $U_{in} = 4U_{max}(L_y - y)y/L_y^2$ ,  $U_{max} = 0.1$ , 特征速度  $U = U_{max}$ . 雷诺数  $Re = 100$ , 运动黏性系数  $\nu = UD/Re$ , 阻力系数  $C_d = F_{drag}/0.5\rho U^2 D$ , 升力系数  $C_l = F_{lift}/0.5\rho U^2 D$ , 斯特劳哈尔数  $St = aD/U$ , 频率  $a$  及波动幅值由升力系数  $C_l$  经快速傅里叶变换获得. 方柱绕流模拟结果与文献 [17, 18] 的对比列于表 1.

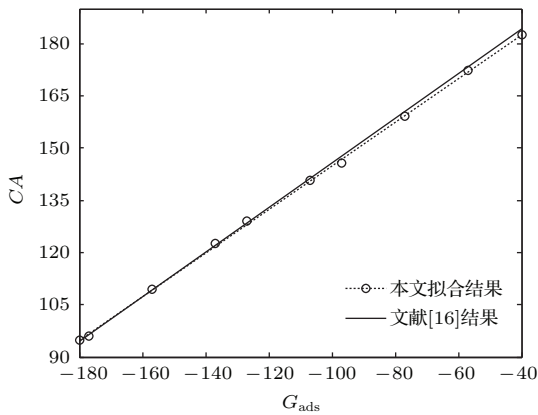


图2 接触角与吸附参数之间的关系

Fig. 2. Relationship between  $CA$  and  $G_{ads}$ .

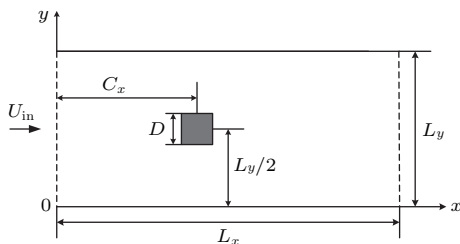


图3 方柱绕流模型示意图

Fig. 3. Sketch map of flow around a square column.

表1 方柱绕流模拟结果比较

Table 1. Simulation results of flow around a square cylinder.

	边界条件	计算区域	$C_d$	$C_l$	$St$
文献 [17]	无滑移边界	$50D \times 8D$	1.33	—	0.133
文献 [18]	无滑移边界	$60D \times 8D$	1.4018	0.1268	0.1356
本文	无滑移边界	$60D \times 8D$	1.3890	0.1314	0.1327

模拟结果与文献 [17,18] 方柱绕流模拟结果对比符合良好, 验证了多松弛模型模拟方柱绕流的有效性. 图 4 为模拟获得的方柱绕流速度云图. 图 5 为方柱绕流沿  $x$  方向 400—1000 范围内的流线图.

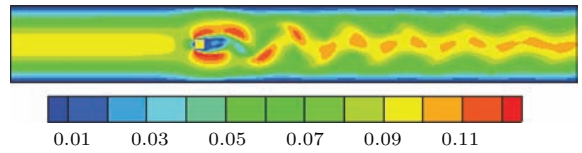


图4 (网刊彩色) 方柱绕流速度云图

Fig. 4. (color online) Velocity contour of flow around a square column.

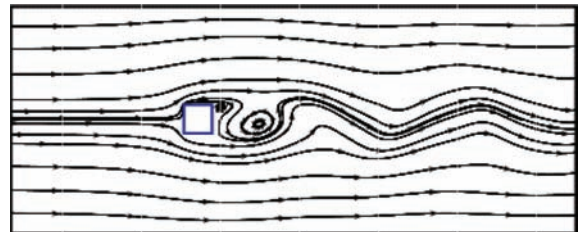


图5 方柱绕流流线图

Fig. 5. Streamline pattern of flow around a square column.

### 3 数值模拟

根据文献 [9] 定义气液两相流均匀混合来流的密度  $\rho_{in} = \alpha\rho_g + (1 - \alpha)\rho_l$ , 含气率  $\alpha = (\rho_l - \rho)/(\rho_l - \rho_g)$ , 其中  $\rho_g, \rho_l$  分别为接触角为零度、固液界面水平时的气液密度.

本节仍采用图 3 中的方柱绕流基本模型模拟疏水表面方柱绕流. 结合图 4 的模拟结果取  $D = 30, C_x = 400$ , 计算区域的长高分别为:  $L_x = 40D, L_y = 10D$ . 上下边界采用滑移边界, 方柱表面采用标准反弹格式的无滑移边界. 初始密度  $\rho_0 = \rho_{in}$ , 入口速度分布规律为  $U_{in} = 0.1$ , 特征速度  $U = U_{in}$ . 对其余如出入口边界条件, 流体动力参数  $Re, \nu, C_d, C_l, St$  等的设置或定义与 2.3 节相同.

#### 3.1 不同含气率疏水表面方柱绕流的数值模拟

本节通过控制来流含气率改变绕流物体周围流场含气率, 以研究含气率变化对疏水表面减阻能力的影响. 分别对接触角为  $120^\circ, 170^\circ, 175^\circ$ , 来流含气率为 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10 的疏水表面方柱绕流进行数值模拟. 阻力系数  $C_d$ , 升力系数  $C_l$  随来流含气率的变化分别如图 6 (a) 和图 6 (b) 所示.



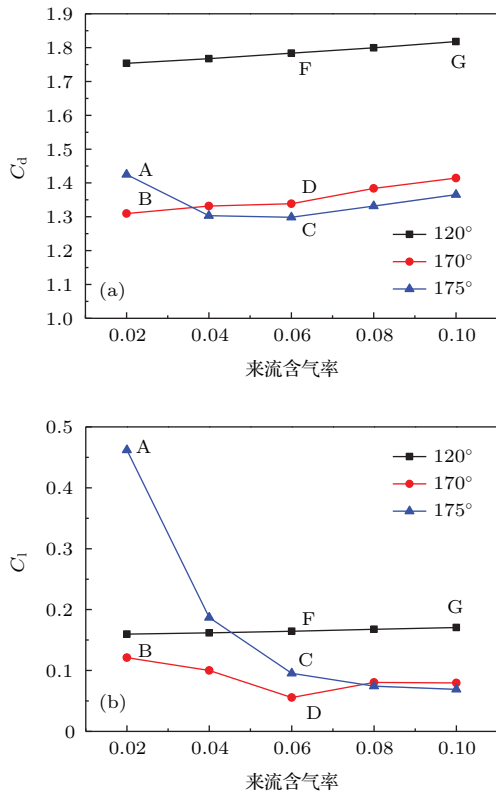


图6 来流含气率对流体动力的影响 (a) 对  $C_d$  的影响; (b) 对  $C_l$  的影响

Fig. 6. The influence of gas holdup of the inlet flow on hydrodynamic: (a) The influence on  $C_d$ ; (b) the influence on  $C_l$ .

分析图6可以发现,接触角为 $120^\circ$ 时,随着来流含气率的升高,阻力系数随含气率增加有微弱升高,而升力系数基本保持在同一水平;接触角为 $170^\circ$ 时,随着来流含气率的升高,阻力系数单调增加,而升力系数从0.02处就开始下降,至0.06处达到最低,之后又开始回升并保持在同一水平;接触角为 $175^\circ$ 时,升阻系数对来流含气率的变化最敏感,阻力系数在来流含气率为0.02时大于接触角为 $170^\circ$ 时对应的阻力系数,在来流含气率大于0.04时则小于接触角为 $170^\circ$ 时对应的阻力系数,并在来流含气率处于0.04—0.06之间时达到最小值,此后单调上升;在来流含气率处于0.02—0.10间时升力系数单调递减,且随着来流含气率的增加降幅逐渐减小,并逐渐小于接触角为 $170^\circ$ 和 $120^\circ$ 时对应的升力系数.

### 3.2 不同接触角疏水表面方柱绕流的数值模拟

根据3.1节的模拟结果对来流含气率为0.06、接触角分别为 $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $140^\circ$ ,  $160^\circ$ ,  $170^\circ$ 的方柱

绕流进行数值模拟,对应的阻力系数 $C_d$ ,升力系数 $C_l$ ,斯特劳哈尔数 $St$ 分别如图7所示.

由图7可知,随着接触角增大,方柱绕流的升力系数、阻力系数及波动幅值明显下降,斯特劳哈尔数变化非常小.

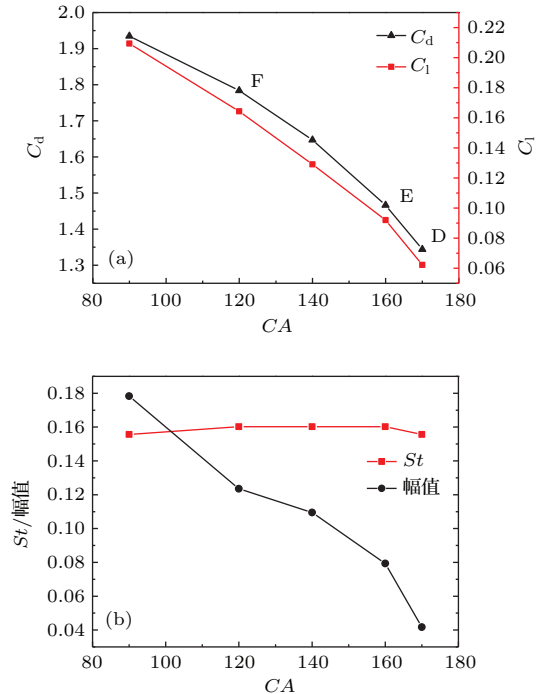


图7 接触角对流体动力的影响 (a) 对  $C_d$ ,  $C_l$  的影响; (b) 对  $St$  及其幅值的影响

Fig. 7. The influence of contact angle on hydrodynamic: (a) The influence on  $C_d$ ,  $C_l$ ; (b) the influence on  $St$  and the amplitude.

## 4 分析讨论

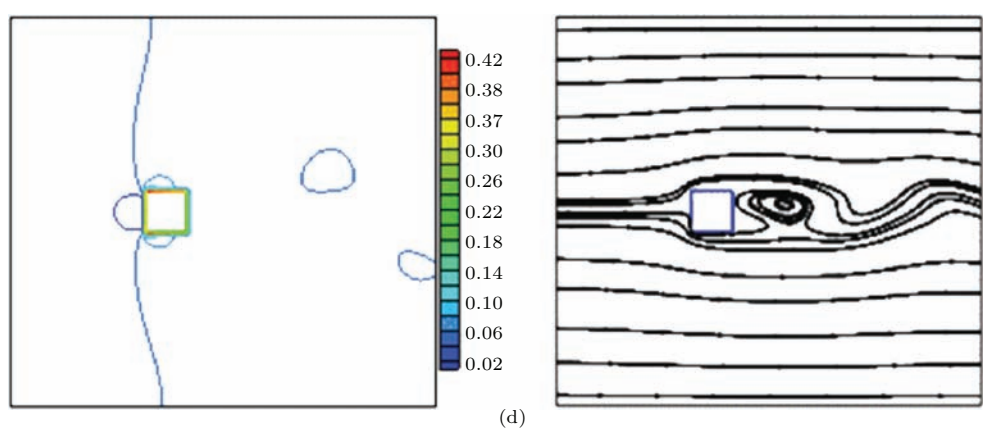
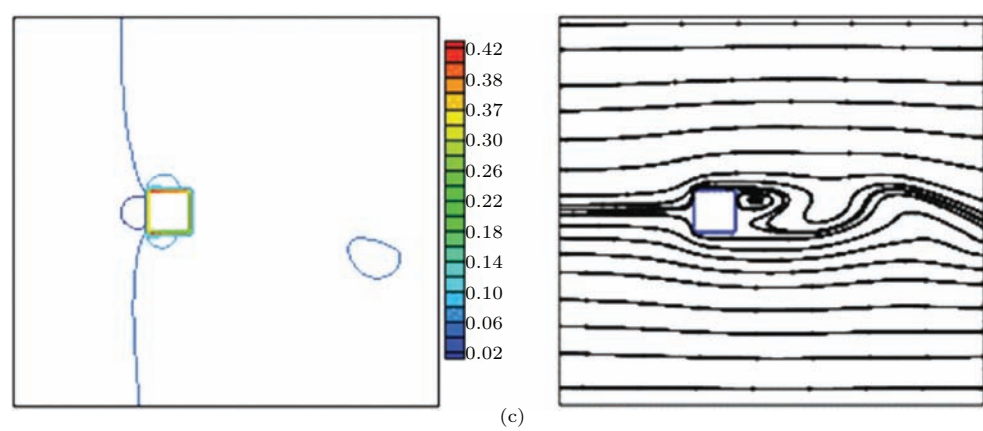
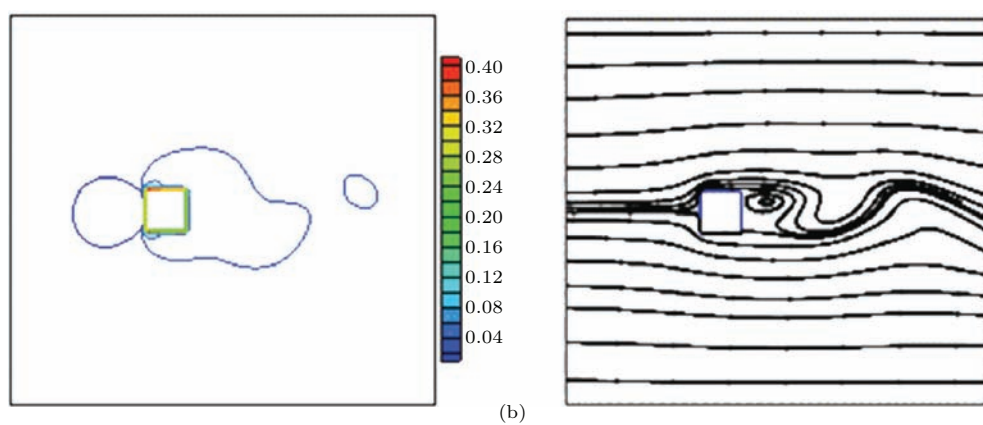
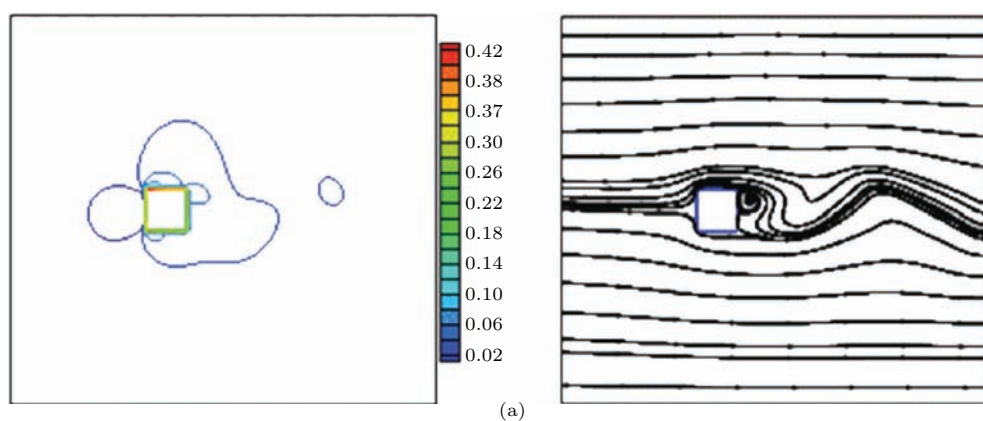
根据以上模拟结果对图6和图7中的点A—G处的流场进行分析,表2中列出了各点所对应的来流含气率和接触角.定义方柱周围 $11D \times 10D$ 的区域为绕流物体附近流场,以下仅对这一区域进行分析.图8中依次为各点某一时刻的含气率等高线图及对应的流线图.

表2 点A—G条件设置  
Table 2. Variables at points A—G.

	A	B	C	D	E	F	G
来流含气率	0.02	0.02	0.06	0.06	0.06	0.06	0.10
接触角	$175^\circ$	$170^\circ$	$175^\circ$	$170^\circ$	$160^\circ$	$120^\circ$	$120^\circ$

基于模拟结果,结合图8做出以下四组对比分析.

- 1) 点A, B的含气率等高线图、流线图分析.



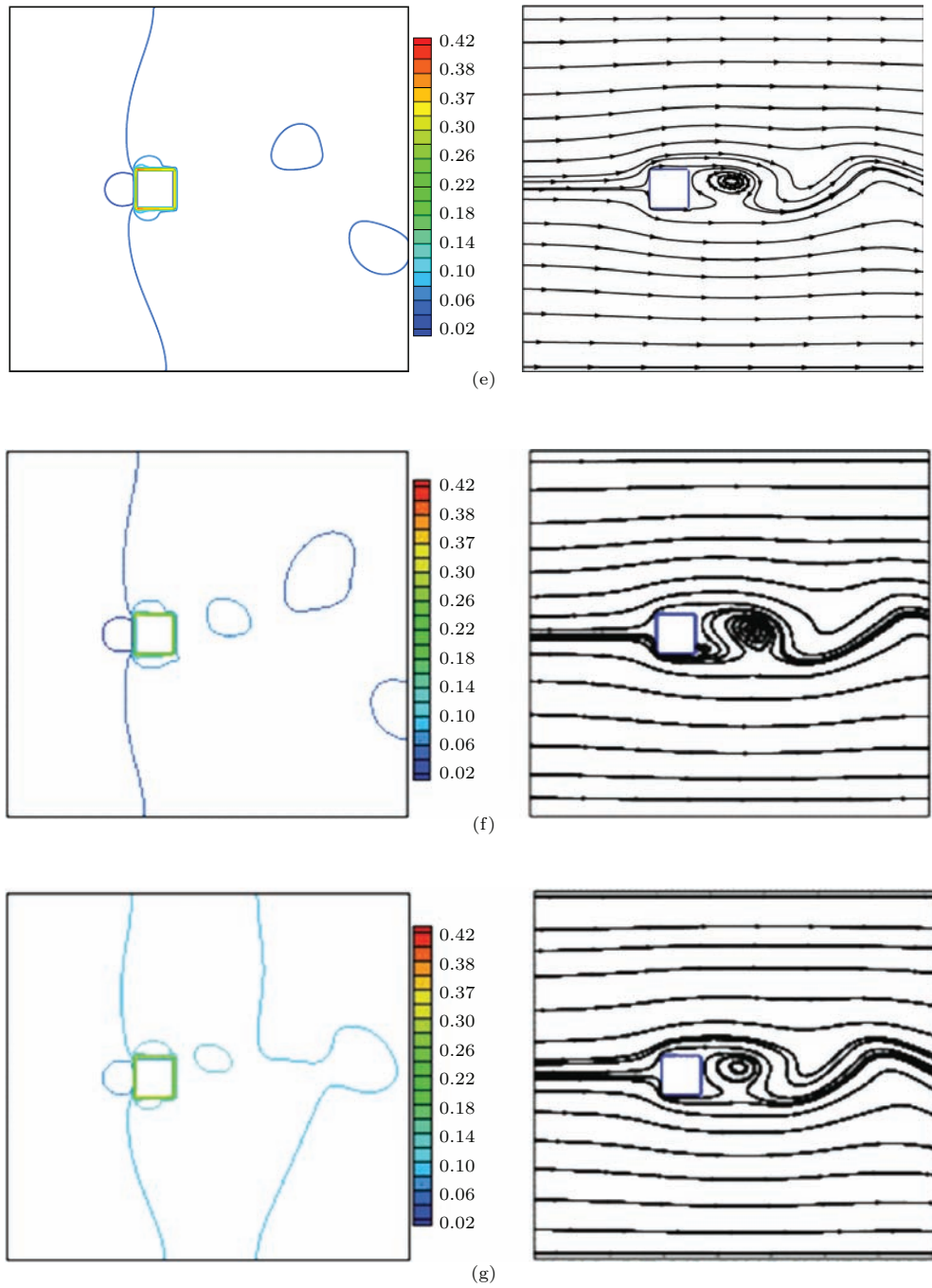


图8 (网刊彩色) 含气率等高线图及相应流线图 (a) A点; (b) B点; (c) C点; (d) D点; (e) E点; (f) F点; (g) G点  
 Fig. 8. (color online) Gas holdup contours and the streamline patterns: (a) Point A; (b) point B; (c) point C; (d) point D; (e) point E; (f) point F; (g) point G.

点 A, B 对应的来流含气率为 0.02, 接触角分别为  $175^\circ$ ,  $170^\circ$ . 对比图 8(a) 和图 8(b) 发现, 图 8(a) 绕流物体近壁面处高含气率区域面积较大, 同时绕流物体后方形形成完整涡时, 图 8(a) 相应位置出现了新气团脱落的迹象, 而图 8(b) 处并没有发生相应变化. 结合图 6 中 A, B 点之间的阻力系数、升力系数的差异, 说明 A 点处高升阻系数的产生与近壁面涡形成处的气团脱落有关. 同时图 8(a) 中近壁

面处高含气率区域面积的增大也增加了气团在近壁面处脱落的可能.

2) 点 A, C 的含气率等高线图、流线图分析.

点 A, C 对应的来流含气率分别为 0.02, 0.06, 接触角为  $175^\circ$ . 对图 8(a) 和图 8(c) 分析发现, C 中流场的含气率整体较高, 近壁面处高含气率区域面积较小, 且涡形成处并未出现气团脱落的迹象. 而且图 6 中 A 点到 C 点阻力系数和升力系数大幅下



降. 这说明人为将流场整体含气率提高到一定水平, 有助于减少绕流物体附近流场内的气团脱落, 从而降低升力系数和阻力系数.

### 3) 点F, G的含气率等高线图、流线图分析.

点F, G对应的来流含气率分别为0.06, 0.10, 接触角为 $120^\circ$ . 观察图8(f)和图8(g)可发现通过控制来流含气率的确可以明显改变绕流物体附近流场的含气率. 在表面性能一定、疏水表面含气率趋近饱和时, 单纯提高来流含气率会加剧绕流物体附近流场内的含气率不稳定, 但近壁面处含气率变化较小. 结合图6中阻力系数的微弱升高, 说明含气率不稳定区域离绕流物体越远对阻力系数的影响越小.

### 4) 点D, E, F的含气率等高线图、流线图分析.

观察图8(d)—(f)可以发现, 来流含气率为0.06时, 接触角越大, 方柱后方脱落气团的数量及面积越小. 结合图7中对应的阻力系数下降, 说明了在来流含气率处于适当水平时, 疏水表面接触角越大, 吸附流场中气体的能力越强, 近壁面处含气率越稳定, 伴随涡形成发生气团脱落的可能性越小, 而且在总含气率一定的前提下减少了流入尾部气团的气体量, 削弱了绕流物体后方气团脱落对流场的影响, 从而使阻力系数和升力系数降低.

## 5 结 论

本文采用LBM方法的多松弛模型和Shan-Chen多相流模型模拟并分析了疏水表面的减阻性能与接触角及绕流物体附近含气率的关系, 得到以下结论:

1) 近壁面处伴随涡形成产生的气团脱落对疏水表面的减阻效果有较大影响, 因此减阻的关键在于保证近壁面处气层的稳定性;

2) 保证近壁面处气层稳定的同时, 提高疏水表面的疏水性可以将气体有效地聚集在固体表面, 减少气团脱落的数量和面积, 增强减阻效果;

3) 在流体含气率处于较低水平时采用高接触角的疏水表面会导致气团脱落发生在近壁面, 使流场的阻力系数和升力系数大幅增加, 在这种情况下人为采取措施提高绕流物体附近流场的含气率可以有效发挥该表面材料的潜能, 呈现减阻效果;

4) 疏水表面的接触角越大对流场含气率的变

化越敏感, 减阻效果越不稳定, 实际应用中接触角不宜过大.

## 参考文献

- [1] Yu Y S, Wei Q D 2005 *J. Exp. Fluid Mech.* **19** 60 (in Chinese) [余永生, 魏庆鼎 2005 实验流体力学 **19** 60]
- [2] Choi C H, Kim C J 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 066001
- [3] Cao B Y, Chen M, Guo Z Y 2006 *Phys. Rev. E* **74** 066311
- [4] Ou J, Perot B, Rothstein J P 2004 *Phys. Fluids* **16** 4635
- [5] Tian J, Xu J F, Xue Q J 1997 *J. Hydrodyn.* **12** 27 (in Chinese) [田军, 徐锦芬, 薛群基 1997 水动力研究与进展 **12** 27]
- [6] Pan G, Hang Q G, Liu Z Y, Hu H B, Song B W 2011 *J. Shanghai Jiaotong Univ.* **45** 1440 (in Chinese) [潘光, 黄桥高, 刘占一, 胡海豹, 宋保维 2011 上海交通大学学报 **45** 1440]
- [7] Song B W, Ren F, Hu H B, Guo Y H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 054708 (in Chinese) [宋保维, 任峰, 胡海豹, 郭云鹤 2014 物理学报 **63** 054708]
- [8] Wang B, Wang J D, Chen D R 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 074702 (in Chinese) [王宝, 汪家道, 陈大融 2014 物理学报 **63** 074702]
- [9] Hong W P 2010 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: North China Electric Power University) (in Chinese) [洪文鹏 2010 博士学位论文 (北京: 华北电力大学)]
- [10] Guo Z L, Zheng C G 2009 *Theory and Applications of Lattice Boltzmann Method* (Vol. 1) (Beijing: Academic Press of China) p29 (in Chinese) [郭照立, 郑楚光 2009 格子 Boltzmann 方法的原理及应用 (第1版) (北京: 科技出版社) 第29页]
- [11] Aidun C K, Clausen J R 2010 *Annu. Rev. Fluid Mech.* **42** 439
- [12] Guo Z L, Zheng C G 2009 *Theory and Applications of Lattice Boltzmann Method* (Vol. 1) (Beijing: Academic Press of China) p166 (in Chinese) [郭照立, 郑楚光 2009 格子 Boltzmann 方法的原理及应用 (第1版) (北京: 科技出版社) 第166页]
- [13] Shan X, Chen H 1993 *Phys. Rev. E* **47** 1815
- [14] Lallemand P, Luo S L 2000 *Phys. Rev. E* **61** 6546
- [15] Mohamad A A 2011 *Lattice Boltzmann Method Fundamentals and Engineering Applications with Computer Codes* (London: Springer) pp101–105
- [16] Sukop M C, Thorne D T 2006 *Lattice Boltzmann Modeling An Introduction for Geoscientists and Engineers* (Berlin: Springer) pp67–93
- [17] Guo W B, Wang N C, Shi B C, Guo Z L 2003 *Chin. Phys.* **12** 0067
- [18] Wang G C, Shi B C, Deng B 2003 *J. Basic Sci. Engineer.* **11** 335 (in Chinese) [王广超, 施保昌, 邓滨 2003 应用基础与工程科学学报 **11** 335]

# Numerical investigation on drag reduction with hydrophobic surface by lattice Boltzmann method\*

Zhang Ya Pan Guang<sup>†</sup> Huang Qiao-Gao

(School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

( Received 10 March 2015; revised manuscript received 5 May 2015 )

## Abstract

In recent years, hydrophobic surface has attracted much attention for its potential applications in flow drag reduction. This article focuses on the drag reduction mechanism of hydrophobic surface by the multi-relaxation-time scheme and the Shan-Chen multiphase model of lattice Boltzmann method. At first, we validate our method through the multiphase cases of wall adhesion effect and the single-phase cases of flow around a square column, showing that the results from our method are in good consistence with those in previous literature. Then, we simulate and analyze the typical problem of flow around a square column with hydrophobic surface while Reynolds number is 100, in order to investigate the influences of contact angle and gas holdup of the inlet flow on drag coefficient and lift coefficient. The simulation results show that for a given contact angle, hydrophobic surface is capable of reducing drag when gas holdup of the inlet flow is in a certain range; otherwise, drag coefficient will increase. With an appropriate gas holdup of the inlet flow, both drag coefficient and lift coefficient will decrease as the contact angle becomes larger. Finally, we compare gas holdup contours and the corresponding streamline patterns under different drag coefficients. Analyses suggest that the increases of drag coefficient and lift coefficient are related to the gas mass shedding near the square column wall where the eddy forms. Increasing the gas holdup of the inflow is properly conducive to reducing the gas mass shedding and also both drag coefficient and lift coefficient greatly if contact angle is too large. However, if the near-wall gas holdup is saturated, it will aggravate the instability of gas holdup and change the near-wall gas holdup a little, which makes drag coefficient increase slightly. When gas holdup of the inlet flow is appropriate, the near-wall gas holdup becomes steadier with a larger contact angle. Through analysis we note that for hydrophobic surface, the key factor of drag reduction is to keep the near-wall gas layer stable, with which the effect of drag reduction becomes better as the contact angle becomes larger. However, the larger the contact angle, the more sensitive to the change of gas holdup both drag coefficient and lift coefficient are, so it is not recommended to adopt the hydrophobic surface with very large contact angle. With the analysis of the gas holdup near hydrophobic surface with different contact angles, in this article we put forward a new approach to the further exploration of the drag reduction mechanism of hydrophobic surface.

**Keywords:** lattice Boltzmann method, hydrophobic surface, two-phase flow, drag reduction

**PACS:** 47.11.-j, 02.60.Cb, 47.85.Dh

**DOI:** 10.7498/aps.64.184702

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51279165, 51479170).

† Corresponding author. E-mail: [panguang601@163.com](mailto:panguang601@163.com)