

纳米限域 Couette 流边界气泡减阻机理*

张鹏¹⁾ 张彦如¹⁾ 张福建¹⁾ 刘珍^{2)†} 张忠强^{1)3)‡}

1) (江苏大学机械工程学院, 镇江 212013)

2) (江苏科技大学船舶与海洋工程学院, 镇江 212003)

3) (大连理工大学, 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024)

(2024 年 4 月 6 日收到; 2024 年 6 月 5 日收到修改稿)

气泡减阻技术对于提高水下航行器推进效率, 降低航行过程中的综合能耗具有重要意义. 本文采用分子动力学方法研究了气-液两相 Couette 流在平行壁板纳米通道内的流动特性和气泡边界减阻特性, 分析了表面润湿性、壁面粗糙度和气体浓度对边界滑移速度和减阻效果的影响规律. 研究表明: 气泡减阻效果随边界滑移速度的增大而增强; 在气-液两相流动区域, 随着剪切速度的增大, 边界吸附气泡的横向变形和边界滑移速度增大, 边界气泡减阻效果增强. 固-气相互作用强度和气体浓度增大均导致气体原子在近壁面的富集现象增强, 提高了壁面上气泡的铺展特性, 从而增大了固-液界面滑移速度. 壁面粗糙度会改变气泡的铺展特性, 影响边界滑移速度, 进而改变流固界面减阻效果; 随着肋高的增大, 气体原子在肋条间凹槽中聚集, 肋条上表面气体原子吸附量减少, 导致固-液界面边界滑移速度减小, 并最终降低了减阻效果. 研究结果将对大型舰船和 underwater 航行器边界减阻技术提供重要理论指导.

关键词: 气泡减阻, 边界滑移, Couette 流, 分子动力学**PACS:** 47.85.lb, 47.45.Gx, 83.50.Ax, 02.70.Ns**DOI:** 10.7498/aps.73.20240474

1 引言

据航运业中相关数据统计, 船舶在低速航行中的摩擦阻力可占总阻力的 80%^[1], 是造成能源消耗的重要原因之一. 为减小大型船舶和 underwater 航行器在航行过程中的摩擦阻力, 相关研究者提出了诸多固-液界面调控减阻的方法, 按照是否需要额外的能量输入主要分为主动减阻、被动减阻和复合减阻^[2]. 主动减阻包括仿生射流表面减阻^[3,4]、壁面振动减阻^[5]、加热壁面减阻^[6]和气泡减阻^[7-9]等; 被动减阻包括柔顺壁面减阻^[10]、超疏水涂层减阻^[11,12]等; 复合减阻则通过将上述两种方法相结合, 谋求最佳的减阻效果, 例如仿鲨鱼皮微观结构表面添加

聚合物减阻剂实现高效复合减阻^[13,14]. 然而, 微纳结构表面加工繁琐、制备难度大, 强度和鲁棒性不足, 且超疏水涂层和聚合物添加剂可能会造成一定的环境污染. 相比之下, 气泡减阻的减阻效果稳定性好, 具有绿色环保、可适应多种流动环境和适用于船舶的所有水下部件等优势, 因此深入研究流体边界层气泡减阻机理对高速舰船及水下特种装备减阻技术具有重要理论意义和工程价值.

目前关于气泡减阻的研究主要分为主动喷射气泡减阻和气泡自捕获减阻两类. 在主动喷射气泡减阻方面, 通过槽状喷射器将压缩氮气注入水通道湍流边界层, 发现了减阻效果与注入气体的体积流量和边界层静压密切相关^[15]; 基于空气注入多孔介质板生成微气泡的水下减阻实验, 揭示了流场速

* 国家自然科学基金 (批准号: 12272151, 52005222, 92248301) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liuzhen@just.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: zhangzq@ujs.edu.cn

度对微气泡生成及其减阻效果的影响规律,发现了船舶不同区域与气泡减阻需求的匹配性不同^[16];采用重复注入气泡替代连续注入气泡的方式,可将减阻效果的耐久性提高 15 倍^[17];循环垂直 Taylor-Couette 流微气泡减阻实验表明,气泡对涡流的影响是阻力减小的主要原因^[18].虽然主动喷射气泡减阻研究提升了减阻性能,但需要空气压缩机等气体供应装置,造成了额外的能量消耗和成本增大,限制了其应用范围.而气泡自捕获减阻则利用粗糙织构疏水表面自主捕获空气形成气穴,实现空气层减阻^[19].通过对疏水表面织构设计,提高了捕获和维持空气层的能力,进而提升了气泡减阻效率和稳定性,为气泡高效减阻方法提供了新思路^[20].然而,针对气泡的生成和控制及与液体的相互作用等关键问题的研究,目前实验研究主要集中于实船应用研究,已有的机理研究也主要通过等效流体或测量空隙率大小、分布等方法进行,对气-液两相流内部流动的研究较少,仅利用实验手段难以实现气泡减阻机理研究和微纳尺度的数据测量与分析.引入分子动力学方法,可以在微纳尺度上更准确地描述和预测气泡的生成及与液体分子的相互作用,进一步完善气泡减阻机理,对于优化气泡减阻效果和实船应用具有重要意义.

本文利用分子动力学方法建立了平行壁板纳米通道内气-液两相 Couette 流剪切模型,探究了表面润湿性、壁面粗糙度和气体浓度等因素对 Couette 流剪切作用下纳米通道内气泡生成、气泡动态铺展特性、流体边界滑移和气泡减阻效果的影响规律.由于纳米限域内液体的结构和性质会发生显著变化^[21],本文将结合固体壁面和气泡的微观

构型深入阐明纳米限域流边界气泡减阻机理,为水下航行器中气泡减阻技术提供理论指导.

2 模型和方法

船舶航行过程中,船舶底部与水的相对运动形成类似 Couette 流的流动状态.为了计算统计固-液界面的界面摩擦和边界滑移用于表征边界气泡减阻效果,本文构建了平行壁板纳米通道内气-液两相 Couette 流剪切分子动力学模型,如图 1(a)所示,模型包括上下两个平行壁板(红色)、液体原子(蓝色)和气体原子(绿色).平行壁板上带有 x 方向均匀分布肋条结构(图 1(b)),上下两个平行壁板构成纳米通道.纳米通道的尺寸为 $11\text{ nm} \times 5\text{ nm} \times 10\text{ nm}$,纳米通道高度为 H ,单层固体壁面厚度为 1 nm .初始肋条宽度 $a = 1\text{ nm}$,高度 $h = 1\text{ nm}$,长度为 5 nm ,肋间距 $b = 1.4\text{ nm}$,将 x 和 y 方向设置为周期性边界.上下平行壁板沿 x 方向做速度恒定方向相反的剪切运动,对纳米通道中的两相流进行剪切作用, z 方向为纳米通道宽度方向.固体壁面设置为面心立方晶格结构,晶格常数 $a = 0.4\text{ nm}$.

本文的主要研究内容集中在剪切作用下纳米通道内气-液两相流流动特性和气泡边界减阻特性,因此不考虑热交换对模拟结果的影响,并将平行壁板设置为刚体.通过势函数相互作用参数设置使得纳米通道中的两种流体原子在系统温度 300 K 下分别呈液态和气态,气体浓度以气体原子数量占气-液两相流流体原子总数的百分比表示,两相流中初始气体浓度设置为 5% ,固-液-气三相均由原子构成.任意两个原子之间的相互作用势能均选用 Lennard-Jones (L-J) 势能函数^[22],公式为

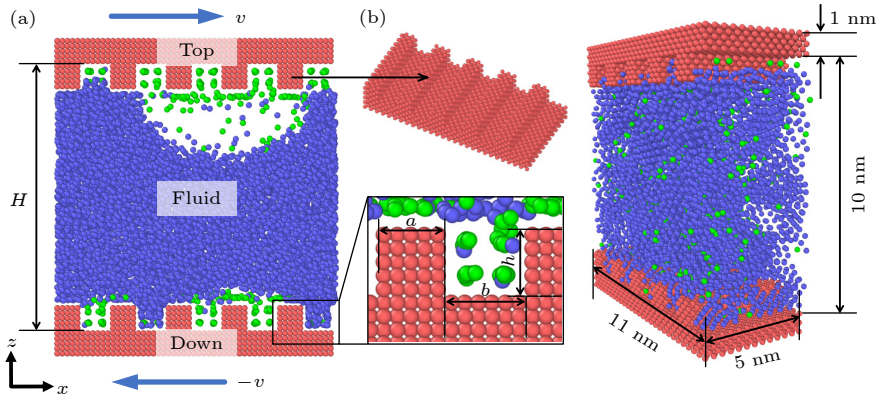


图 1 (a) 两相 Couette 流流动系统模型示意图; (b) 纳米通道和粗糙结构模型图

Fig. 1. (a) Schematic diagram of a two-phase Couette flow system model; (b) diagram of the nanochannel and rough structure model.

$$U_{LJ}(r) = 4\epsilon \left[\left(\frac{\sigma}{\gamma} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{\gamma} \right)^6 \right], \quad (1)$$

式中, ϵ 为势阱深度, σ 为截断半径, γ 为任意两原子间的距离. L-J 势函数中的截断半径 $\sigma = 1.7$ nm, 固-液-气三相内部原子之间的相互作用势能参数根据已有研究中气泡成核分子动力学研究确定^[23], 固体壁面原子与气-液原子及液体原子和气体原子之间的相互作用势能参数如表 1 所列.

表 1 三相相互作用势能参数

Table 1. Potential energy parameter of three-phase interaction.

两相类型	$\epsilon/(\text{kcal}\cdot\text{mol}^{-1})$	$\sigma/\text{\AA}$
固-液	0.41712825	3.4
固-气	0.5958975	4.2
气-液	0.238359	4.488

本文的数据结果由 LAMMPS 模拟软件计算获取, 模拟时间步长为 2 fs, 采用 velocity-Verlet 积分算法进行原子路径的更新, 由于 x 方向上存在速度影响, 故只在 y 和 z 方向上采用 Langevin 热浴法^[24], 系统温度为 300 K. 整个分子动力学模拟持续时长为 10 ns, 前 2 ns 采用 NVT 系综模拟两相流的弛豫和气泡成核、融合与动态吸附过程, 使系统达到稳定状态; 后 8 ns 对两相流施加剪切作用, 其中前 4 ns 用于使两相 Couette 流达到稳定的流动状态, 后 4 ns 用于数据输出与采集, 模拟过程中每 0.2 ns 对数据信息进行统计平均. 通过 OVITO 软件进行可视化处理^[25].

3 模拟结果讨论与分析

3.1 速度轮廓和密度分布

在弛豫过程中, 气泡开始成核, 并吸附于单侧平行壁板. 对上下平行壁板分别施加大小相同方向相反的沿 x 方向的剪切速度 (20—60 m/s), 研究纳米通道内的两相 Couette 流流动和气泡边界减阻特性. 不同剪切速度下, 壁面粗糙度保持不变, 气体浓度保持为 5%. 对纳米通道内的液体原子沿通道宽度方向进行分层统计, 分层高度为 0.4 nm. 图 2(a) 为在上下平行壁板剪切作用和边界吸附气泡影响下, 纳米通道内液体沿通道宽度方向 (z 方向) 的速度轮廓图, 其中横坐标表示与纳米通道中心位置的距离 ($Z = \pm H/2$), 纵坐标表示每分层体积内的液体原子平均速度. 结果表明, 两相流中由于气泡的生成与吸附在壁板边界, 导致其 Couette 流速度轮廓不同于单相流沿通道宽度方向上的近似呈线性分布^[26,27]. 液体在通道宽度方向上的速度轮廓图可划分为两部分: 气-液两相流动区域 ($Z > 2$ nm) 和液相流动区域 ($Z \leq 2$ nm). 在液相流动区域内, 液体流动的速度轮廓曲线近似呈线性分布, 其近壁面界面处称为未吸附气泡一侧; 在气-液两相流动区域内, 液体流动的速度轮廓曲线不再呈线性分布, 主要原因是气体的存在改变了液体的平均密度和黏度^[28], 并影响了固-液间正常的动量传递^[29], 其近壁面称为吸附气泡一侧. 随着

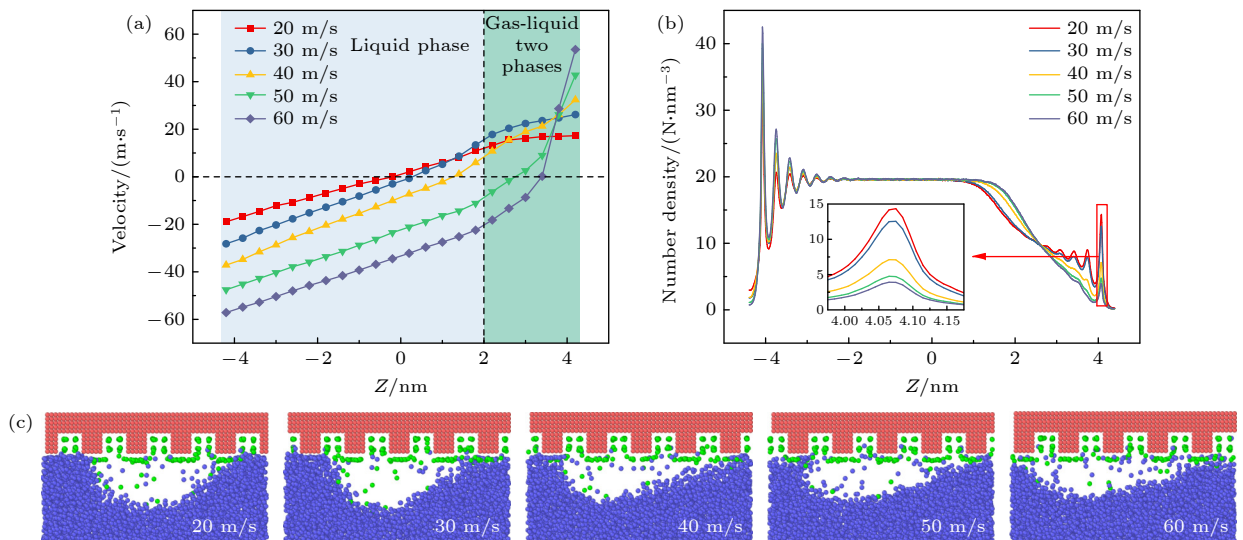


图 2 不同剪切速度下的液体原子 (a) 速度轮廓图和 (b) 密度分布图; (c) 稳态气泡形貌图

Fig. 2. Influence of shear velocity on (a) velocity profile and (b) density profile of liquid atoms; (c) steady-state bubble morphology.

剪切速度的增大, 气-液两相流动区域内的速度轮廓曲线斜率即剪切应变率和边界滑移速度都随之增大。

不同剪切速度下液体原子沿通道宽度方向的数密度分布如图 2(b) 所示。可以看出, 液相流动区域液体原子密度分布曲线变化趋势大致相同, 在未吸附气泡一侧距离固体壁面肋条上表面约 0.8 nm 范围内的液体原子密度分布曲线出现较大振荡, 这是因为平行壁板对液体原子存在壁面效应^[30]。在吸附气泡一侧则表现出靠近边界层的液体原子分布密度随剪切速度的增大而减小, 表明剪切作用能提高壁面处气泡铺展特性。不同剪切速度下的稳态气泡形貌也表明随着剪切速度的增大, 吸附气泡的横向变形增大, 促进了气泡在壁面处的铺展 (图 2(c))。

已有研究表明, 固-气界面的存在能有效促进固-液界面滑移, 产生较为明显的减阻效果^[31]。并且, 气泡形貌即气-液界面的形态演化受到流体流动剪切作用的影响, 沿剪切作用方向变形后将改变流体边界的滑移性能^[32]。因此, 本文计算了平行壁板两侧液体流动边界滑移速度, 并由此表征边界吸附气泡后的减阻效果。基于刘汉伦等^[27] 计算纳米孔隙内混合气体流动的边界滑移速度分区拟合方法, 选取图 2(a) 中液相流动区域 ($Z \leq 2$ nm) 液体速度轮廓曲线进行线性拟合, 得到液体流动速度与 Z 的函数关系, 从而获取壁板边界处液体原子流动速度 v_b , 与设定的壁面剪切速度 v 相减即可得到固-液边界滑移速度 v_s 。不同剪切速度下的固-液边界滑移速度分布曲线如图 3(a) 所示。随着剪切速度的增大, 吸附气泡一侧的边界滑移速度逐渐增大, 而未吸附气泡一侧的边界滑移速度趋于零且无明显变化趋势, 表明纳米通道边界吸附气泡能显

著提升减阻效果。

为了进一步探究纳米通道内边界吸附气泡后的减阻特性, 通过 $\tau_{xz} = F_x/A$ 计算了不同剪切速度下液相剪切应力, 其中 F_x 为固-液界面相互作用的切向力即摩擦阻力, A 为单侧固体壁面面积。剪切应力与剪切速度的关系如图 3(b) 所示, 由于上下平行壁板施加的剪切作用方向不同, 图中正负号用于表示剪切应力的方向。纵坐标距离零刻度线越近, 表明液体流动所受壁面的摩擦阻力越小, 气泡减阻效果越好。由图 3(b) 可知: 随着剪切速度的增大, 未吸附气泡一侧的剪切应力逐渐减小并趋于稳定; 吸附气泡一侧的剪切应力的绝对值先快速减小, 而后略有增大, 但相同剪切速度下的剪切应力绝对值始终小于未吸附气泡一侧, 表明吸附气泡对于提升减阻效果的影响较为显著。

3.2 表面润湿性对液体流动及边界减阻的影响

目前的研究主要集中在探究两相流中气泡与近壁面流体之间的相互作用^[33] 和单相流中表面形貌和表面润湿性对固-液界面滑移和摩擦的影响^[29,34], 气-液两相流中表面润湿性对两相流流动特性和吸附气泡减阻的影响规律尚未揭示。因此, 本文通过调整势函数中固-气相互作用的势阱深度 ϵ_{sg} 来体现固体壁面在表面润湿性上的差异, 具体调整方法为在初始 L-J 势函数中固-气相互作用势阱深度 ϵ_{sg} 的基础上乘以系数 k , 通过系数来体现不同的表面润湿性, k 值越大表示固体壁面的疏水亲气性越强。

当剪切速度为 20 m/s 时, 不同固-气相互作用强度下液体原子的速度轮廓如图 4(a) 所示。在 $k = 0.5$ 时, 液体原子速度轮廓曲线在接近通道中

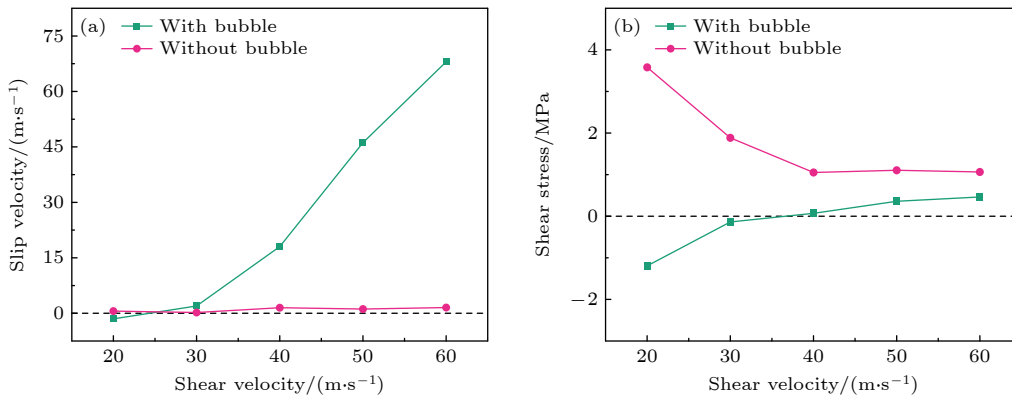


图 3 (a) 边界滑移速度随剪切速度的变化; (b) 剪切应力随剪切速度的变化

Fig. 3. (a) Plot of boundary slip velocity as a function of shear velocity; (b) plot of shear stress as a function of shear velocity.

心流域的斜率几乎为零, 在靠近两侧平行壁板流域的速度轮廓曲线近似呈线性变化. 这是因为平行壁板亲水疏气, 成核的气泡位于纳米通道中央, 未能吸附到平行壁板 (图 5(a)), 改变了气泡宽度范围内的流体黏性, 阻碍了各层流体之间正常的运动传递. 当系数 $k \geq 0.75$ 时, 随着固-气相互作用强度增强, 气-液两相流动区域 ($Z > 2$ nm) 液体剪切应变率随之增大, 液相流动区域 ($Z \leq 2$ nm) 液体剪切应变率随之减小. 同样对图 4(a) 中液相流动区域液体速度分布曲线进行线性拟合, 获取不同固-气相互作用强度对应的边界滑移速度 v_s (图 4(b)). 由于 $k = 0.5$ 时气泡游离于纳米通道中且未吸附于边界, 因此在计算边界滑移速度时未考虑 $k = 0.5$ 的情况. 随着固-气相互作用强度的增强, 吸附气泡一侧的边界滑移速度逐渐增大且变化趋势显著, 未吸附气泡一侧的滑移速度整体变化趋势平缓并趋于零刻度线, 表明增强固-气相互作用强度即提高壁面疏水性有利于增强气泡边界减阻效果. 此外, 讨

论了固-气相互作用强度对液体原子分布密度的影响, 如图 5(b) 所示. 在吸附气泡一侧的边界层液体原子分布密度随固-气相互作用强度的增大而降低, 即壁面越疏水越有利于气体原子在壁面吸附和铺展 (图 5(a)), 从而提高了固-液界面滑移速度, 提升了减阻效果.

3.3 固体壁面粗糙度对液体流动及边界减阻的影响

已有研究表明, 在疏液表面增大微沟槽结构能够提高表面疏水性, 降低壁面摩擦阻力 [35-37], 故本文在平行壁板上设置了一定数量的肋条以形成微沟槽表面. 为了方便研究壁面粗糙度对液体流动及边界减阻的影响, 本文采用壁面粗糙面积分数 f 来表征粗糙度, $f = a/(a+b)$, 其中 a 为肋宽, b 为肋间距, h 为肋高. 在肋高 h 固定的情况下, 可以通过调整肋间距 b 来改变壁面粗糙度, 具体面积分数的数值如表 2 所列. 液体原子在不同粗糙面积分数下

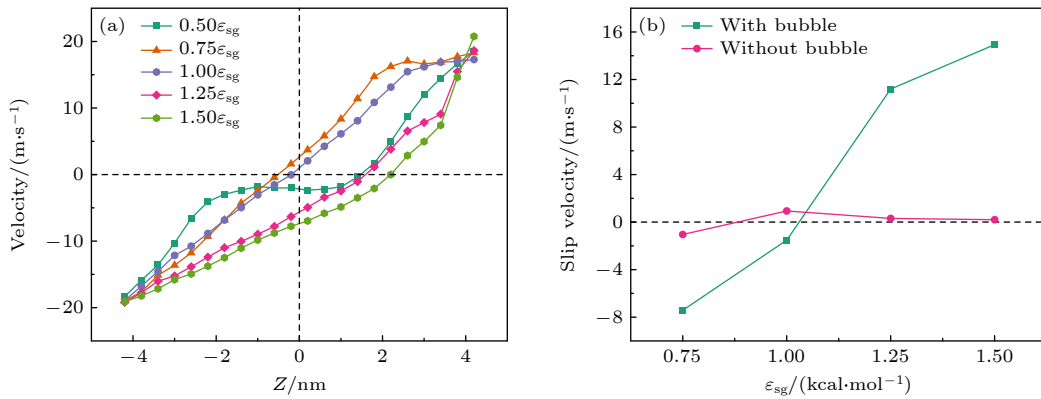


图 4 (a) 不同固-气相互作用强度下的液体原子速度轮廓图; (b) 边界滑移速度随固-气相互作用强度的变化

Fig. 4. (a) Velocity profiles of liquid atoms at different solid-gas interaction strength; (b) plot of boundary slip velocity as a function of solid-gas interaction strength.

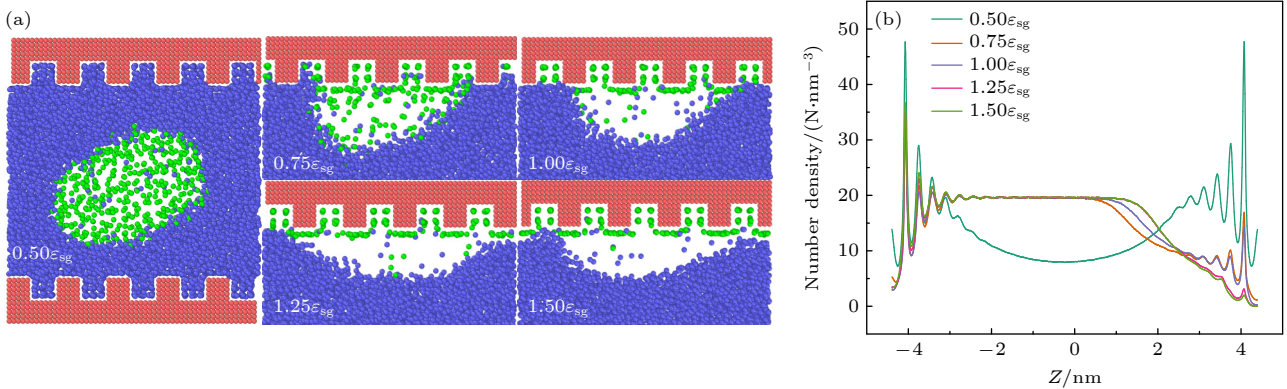


图 5 不同固-气相互作用强度下的 (a) 稳态气泡形貌图和 (b) 液体原子密度分布图

Fig. 5. (a) Steady-state bubble morphology and (b) density profiles of liquid atoms under different solid-gas interaction strength.

表 2 不同肋间距对应的粗糙面积分数
Table 2. Rough area fraction corresponding to different rib spacing.

粗糙面积分数 f	肋间距 b/nm					
	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2
0.5	0.4545	0.4167	0.3846	0.3571	0.3333	

沿通道宽度方向上的速度轮廓如图 6(a) 所示. 结果表明, 当粗糙面积分数为 0.5 和 0.4545 时, 速度轮廓曲线整体变化趋势几乎相同; 当粗糙面积分数减小至 0.4167 和 0.3846 时, 液相流动区域的剪切应变率增大, 气-液两相流动区域的剪切应变率减小; 随着粗糙面积分数继续减小, 液相流动区域的剪切应变率逐渐减小, 气-液两相流动区域的剪切应变率逐渐增大. 同样对图 6(a) 中液相流动区域液体速度分布曲线进行线性拟合, 获取不同粗糙面积分数对应的边界滑移速度 v_s (图 6(b)). 随着粗糙

面积分数的减小, 边界滑移速度出现先减小再增大的变化趋势. 这是因为粗糙面积分数较大 (0.5—0.4545) 时, 肋条间的凹槽宽度较小, 为气体原子提供的滞留空间体积较小, 导致肋条上表面吸附的气体原子较多, 气泡初始铺展长度较小但铺展特性较好; 粗糙面积分数减小 (0.4167—0.3846) 后, 肋条间的凹槽宽度即为气体原子提供的滞留空间体积增大, 使得肋条上表面吸附气体原子减少, 吸附气泡一侧边界层的液体原子分布密度增大, 减弱了气泡铺展特性, 降低了减阻效果; 当粗糙面积分数继续减小 (0.3571—0.3333) 后, 肋条间的凹槽宽度增大, 使得吸附气泡初始铺展长度增大, 重新提高了固-液界面边界滑移速度, 提升了减阻效果 (图 7(a), (b)). 因此, 边界滑移速度即减阻效果与壁面粗糙面积分数密切相关, 对于本文而言, 面积分数为 0.3571—0.3333 时具有最佳减阻效果.

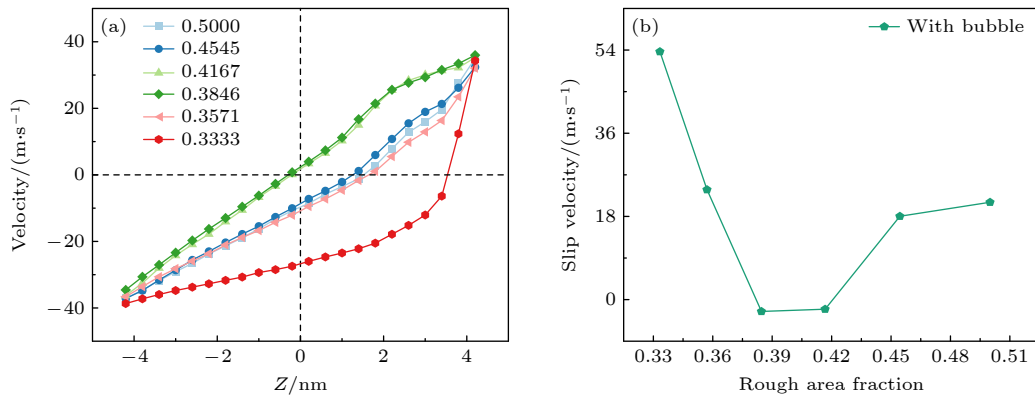


图 6 剪切速度为 40 m/s 时, (a) 不同粗糙面积分数下的液体原子速度轮廓图; (b) 边界滑移速度随粗糙面积分数的变化
Fig. 6. When the shear velocity is 40 m/s, (a) velocity profile of liquid atoms at different rough area fraction; (b) plot of boundary slip velocity as a function of rough area fraction.

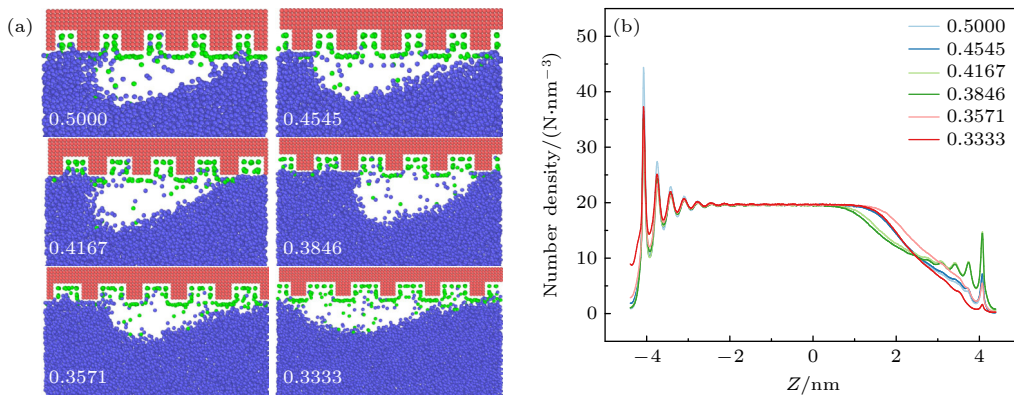


图 7 剪切速度为 40 m/s 时, 不同粗糙面积分数下的 (a) 稳态气泡形貌图和 (b) 液体原子密度分布图
Fig. 7. When the shear velocity is 40 m/s, (a) steady-state bubble morphology and (b) density profiles of liquid atoms under different rough area fraction.

3.4 肋高对液体流动及边界减阻的影响

为了研究肋高 h 对液体流动及边界减阻的影响, 构建了 4 组带有不同肋高平行壁板的 Couette 流剪切模型, 肋高 h 分别为 0.8, 1.0, 1.2 和 1.4 nm. 液体原子在不同肋高下沿通道宽度方向上的速度轮廓如图 8(a) 所示. 随着肋高的增大, 液相流动区域的剪切应变率随之增大, 气-液两相流动区域的剪切应变率随之减小. 肋高由 1.2 nm 增大至 1.4 nm 时的速度轮廓变化趋势接近. 同样对图 8(a) 中液相流动区域液体速度分布曲线进行线性拟合, 获取不同肋高对应的边界滑移速度 v_s (图 8(b)), 随着肋高的增大, 边界滑移速度不断减小. 这是因为肋高增大后, 肋条间的凹槽深度随之增大, 为气体原子提供的滞留空间体积增大, 导致肋条上表面附着的气体原子减少, 在吸附气泡一侧边界层的液体原子分布密度增大 (图 9(a), (b)), 阻碍了气泡受剪切作用后的铺展行为. 因此, 较大的肋高有利于剪切作用下边

界气泡的稳定吸附, 但边界减阻效果会有所减弱.

3.5 气体浓度对液体流动及边界减阻的影响

最后, 讨论了气体浓度对液体流动及边界减阻效果的影响, 通过将纳米通道内一定比例的液体原子直接替换为气体原子, 从而准确控制两相流液体原子数量比例. 分别计算了气体浓度为 2.5%, 5%, 7.5% 和 10% 时剪切作用下的两相流流动行为. 液体原子在不同气体浓度下沿通道宽度方向上的速度轮廓如图 10(a) 所示. 结果表明, 气体浓度由 2.5% 增大至 7.5% 时, 气-液两相流动区域的液体流速剪切应变率随之增大, 液相流动区域的剪切应变率随之减小; 当气体浓度由 7.5% 继续增大时, 液体流动速度轮廓曲线的变化趋势差异较小 (图 10(a)). 同样对图 10(a) 中液相流动区域液体速度分布曲线进行线性拟合, 获取不同气体浓度对应的边界滑移速度 v_s (图 10(b)), 随着气体浓度增大,

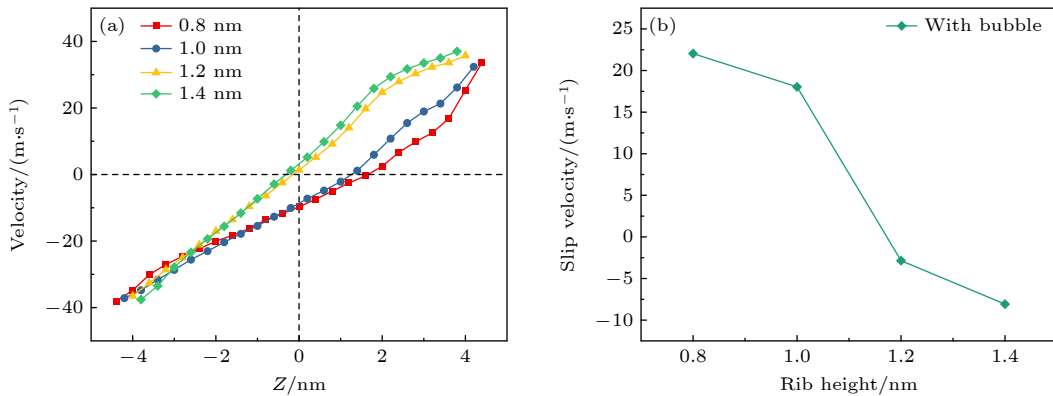


图 8 剪切速度为 40 m/s 时, (a) 不同肋高下的液体原子速度轮廓图; (b) 边界滑移速度随肋高的变化

Fig. 8. When the shear velocity is 40 m/s, (a) velocity profiles of liquid atoms at different rib heights; (b) plot of boundary slip velocity as a function of rib height.

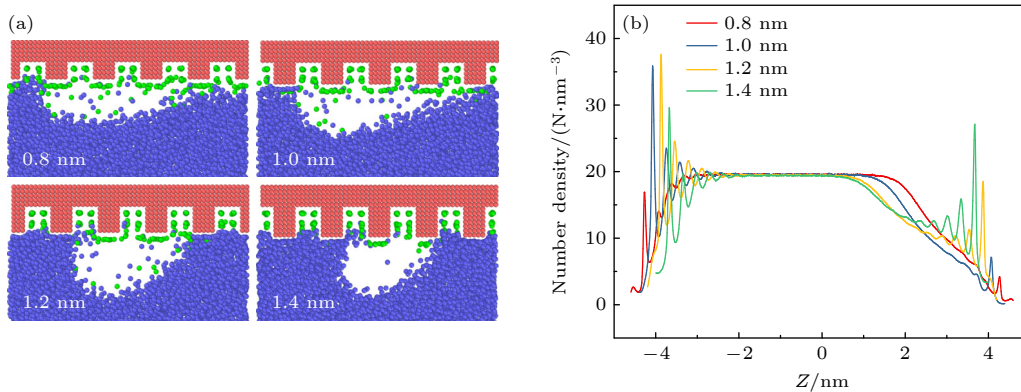


图 9 剪切速度为 40 m/s 时, 不同肋高下的 (a) 稳态气泡形貌图和 (b) 液体原子密度分布图

Fig. 9. When the shear velocity is 40 m/s, (a) steady-state bubble morphology and (b) density profiles of liquid atoms under different rib heights.

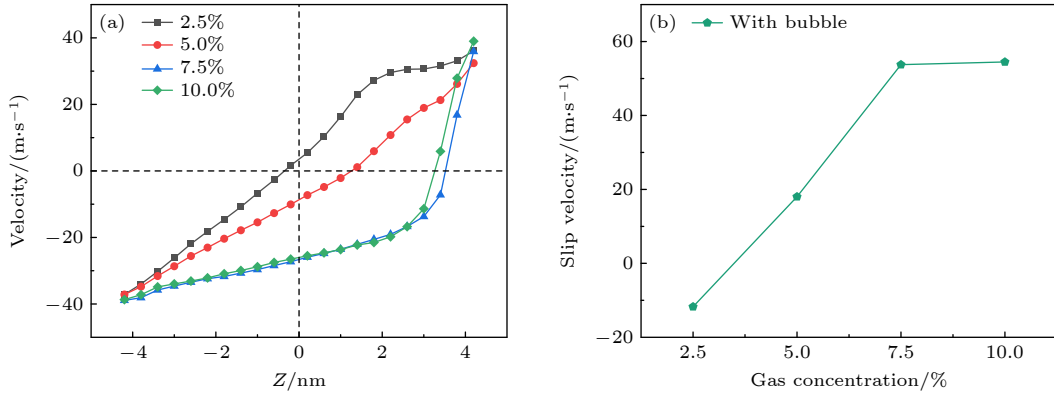


图 10 剪切速度为 40 m/s 时, (a) 不同气体浓度下的液体原子速度轮廓图; (b) 边界滑移速度随气体浓度的变化

Fig. 10. When the shear velocity is 40 m/s, (a) velocity profiles of liquid atoms at different gas concentrations; (b) plot of boundary slip velocity as a function of gas concentration.

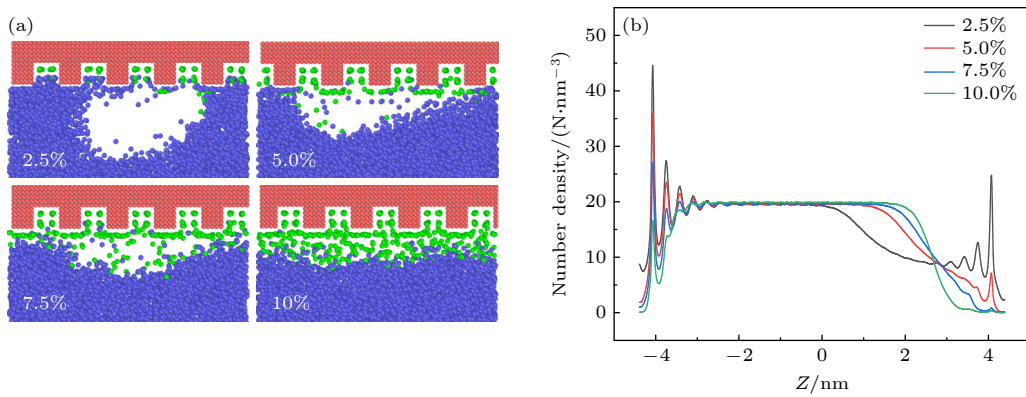


图 11 剪切速度为 40 m/s 时, 不同气体浓度下的 (a) 稳态气泡形貌图和 (b) 液体原子密度分布图

Fig. 11. When the shear velocity is 40 m/s, (a) steady-state bubble morphology and (b) density profiles of liquid atoms under different gas concentration.

滑移速度逐渐增大, 气体浓度由 7.5% 继续增大时滑移速度趋于稳定. 这是因为, 随着气体浓度的增大, 气体原子在壁面处大量聚集, 壁面边界处液体原子数量快速减小. 三相接触线从肋条上表面脱钉扎, 吸附气泡与相邻凹槽内的气体原子融合, 形成了具有一定厚度的连通空气层 (图 11(a), (b)), 降低了固-液相互作用, 从而提高了边界滑移速度 [32], 有利于提高减阻效果.

4 结 论

本文运用分子动力学方法研究了纳米限域气-液两相 Couette 流中的吸附边界气泡对纳米通道内液体流动特性和边界滑移速度的影响, 探究了吸附气泡形态对气泡边界减阻效果的影响机理, 讨论了剪切速度、表面润湿性、壁面粗糙度和气体浓度对纳米通道内液体流动特性和气泡边界减阻效果的影响, 主要研究结论如下: 壁板剪切速度的增大

会导致吸附气泡的横向变形增大, 吸附气泡一侧的边界滑移速度随之增大, 界面剪切应力随之减小, 从而增强气泡边界减阻效果; 增强固-气相互作用强度即提高壁面疏水性有利于气体原子在壁面积聚, 促进气泡铺展行为, 提高边界滑移速度; 边界滑移速度即减阻效果与壁面粗糙面积分数密切相关, 对于本文而言, 面积分数为 0.3571—0.3333 时最佳; 肋条高度过大会造成气体原子在肋条间凹槽中聚集, 减少肋条上表面气体原子吸附量, 减小固-液界面边界滑移, 即降低气泡边界减阻效果; 当气体浓度增大时, 气体原子吸附于壁面倾向于形成空气层, 降低固-液界面相互作用, 提升减阻能力. 研究结果将对大型船舶和水中航行器中气泡减阻结构设计提供理论指导.

参考文献

- [1] Sindagi S, Vijayakumar R 2020 *Ships Offshore Struct.* **16** 968
- [2] Fu Y F, Yuan C Q, Bai X Q 2017 *Biosurf. Biotribol.* **3** 11

- [3] Gu Y Q, Zhao G, Zheng J X, Li Z Y, Liu W B, Muhammad F K 2014 *Ocean Eng.* **81** 50
- [4] Li F, Zhao G, Liu W X, Zhang S, Bi H S 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 034703 (in Chinese) [李芳, 赵刚, 刘维新, 张殊, 毕红时 2015 物理学报 **64** 034703]
- [5] Kang X X, Hu J X, Lin Z W, Pan D Y 2023 *Acta Mech. Sinica.* **55** 1087 (in Chinese) [康晓宣, 胡建新, 林昭武, 潘定一 2023 力学学报 **55** 1087]
- [6] Shi T Y 2020 *M. S. Thesis* (Dalian: Dalian Maritime University) (in Chinese) [史同雨 2020 硕士学位论文 (大连: 大连海事大学)]
- [7] Wang H W, Wang K Y, Liu G H 2022 *Ocean Eng.* **258** 111833
- [8] Zhao C, Lyu M L, Jia W G 2022 *Ship Eng.* **44** 69 (in Chinese) [赵超, 吕明利, 贾文广 2022 船舶工程 **44** 69]
- [9] Zhan J M, Lu S P, Li Y H, Li Y T, Hu W Q 2023 *Ocean Eng.* **41** 1 (in Chinese) [詹杰民, 陆尚平, 李熠华, 李雨田, 胡文清 2023 海洋工程 **41** 1]
- [10] Zhang C Y, Zhang Z J, Cong W W, Wei H, Zhang S S 2023 *Chem. Bull.* **86** 863 (in Chinese) [张晨远, 张智嘉, 丛巍巍, 魏浩, 张松松 2023 化学通报 **86** 863]
- [11] Moaven K, Rad M, Taeb-Rahni M 2013 *Exp. Therm. Fluid. Sci.* **51** 239
- [12] Gao J, Zhang K, Li H, Lang C, Zhang L X 2023 *Prog. Org. Coat.* **183** 107769
- [13] Chen H W, Zhang X, Che D, Zhang D Y, Li X, Li Y Y 2014 *Adv. Mech. Eng.* **2014** 425701
- [14] Luo Y, Zhang D, Liu Y, Li Y, Ng E Y K 2015 *J. Mech. Med. Biol.* **15** 1550084
- [15] Shen X, Ceccio S L, Perlin M 2006 *Exp. Fluids* **41** 415
- [16] Zhao X J, Zong Z 2022 *Ocean Eng.* **251** 111032
- [17] Tanaka T, Oishi Y, Park H J, Tasaka Y, Murai Y, Kawakita C 2023 *Ocean Eng.* **272** 113807
- [18] Maryami R, Javadpoor M, Farahat S 2016 *Heat Mass Transfer* **52** 2593
- [19] Bidkar R A, Leblanc L, Kulkarni A J, Bahadur V, Ceccio S L, Perlin M 2014 *Phys. Fluids* **26** 085108
- [20] Mail M, Moosmann M, Häger P, Barthlott W 2019 *Phil. Trans. R. Soc. A* **377** 20190126
- [21] Wang F C, Qian J H, Fan J C, Li J C, Xu H Y, Wu H A 2022 *Sci. China Phys. Mech.* **65** 264601
- [22] Shi X Y, Zeng D L, Cai Z Y 2005 *J. Therm. Sci. Technol.* **4** 195 (in Chinese) [石小燕, 曾丹苓, 蔡治勇 2005 热科学与技术 **4** 195]
- [23] Weijs J H, Snoeijer J H, Lohse D 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 104501
- [24] Cao B Y, Chen M, Guo Z Y 2006 *Phys. Rev. E* **74** 066311
- [25] Stukowski A 2010 *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.* **18** 015012
- [26] Zhang Z Q, Liu H L, Liu Z, Zhang Z, Cheng G G, Wang X D, Ding J N 2019 *Appl. Surf. Sci.* **475** 857
- [27] Liu H L, Zhang Z Q, Hao M L, Cheng G G, Ding J N 2018 *Phys. Gases* **3** 32 (in Chinese) [刘汉伦, 张忠强, 郝茂磊, 程广贵, 丁建宁 2018 气体物理 **3** 32]
- [28] Ceccio S L 2010 *Annu. Rev. Fluid Mech.* **42** 183
- [29] Kitagawa A, Denissenko P, Murai Y 2019 *Exp. Therm. Fluid Sci.* **104** 141
- [30] Xing H W, Chen Z X, Yang L, Su Y, Li Y H, Huhe C 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 094701 (in Chinese) [邢赫威, 陈占秀, 杨历, 苏瑶, 李源华, 呼和仓 2024 物理学报 **73** 094701]
- [31] Hu H B, Wang D Z, Ren F, Bao L Y, Priezjev N V, Wen J 2018 *Int. J. Multiphase Flow* **104** 166
- [32] Lyu P Y, Xue Y H, Duan H L 2016 *Adv. Mech.* **46** 179 (in Chinese) [吕鹏宇, 薛亚辉, 段慧玲 2016 力学进展 **46** 179]
- [33] García-Magariño A, Lopez-Gavilan P, Sor S, Terroba F 2023 *J. Mar. Sci. Eng.* **11** 1315
- [34] Tretyakov N, Müller M 2013 *Soft Matter* **9** 3613
- [35] He Y Y, Fu Y H, Wang H, Yang J 2021 *Tribol. Int.* **162** 107144
- [36] Tang S N, Zhu Y, Yuan S Q 2023 *J. Bionic Eng.* **20** 2797
- [37] He Y Y, Fu Y H, Wang H, Yang J 2022 *J. Manuf. Process.* **75** 1089

Mechanism of boundary bubble drag reduction of Couette flow in nano-confined domain*

Zhang Peng¹⁾ Zhang Yan-Ru¹⁾ Zhang Fu-Jian¹⁾
Liu Zhen^{2)†} Zhang Zhong-Qiang^{1)3)‡}

¹⁾ (School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

²⁾ (School of Ship and Ocean Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

³⁾ (State Key Laboratory of Structural Analysis of Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

(Received 6 April 2024; revised manuscript received 5 June 2024)

Abstract

Bubble drag reduction technology is of great significance in improving the propulsion efficiency of underwater vehicle and reducing the comprehensive energy consumption during navigation. Bubble drag reduction is a highly effective method of reducing the frictional resistance encountered by large ships and underwater vehicles during navigation. It exhibits excellent stability in drag reduction, and has advantages such as environmental friendliness, adaptability to various flow environments, and suitability for all underwater components of ships. Therefore, it is greatly significant to conduct in-depth research on bubble drag reduction and its underlying mechanism. In this work, the flow characteristics and the boundary bubble drag reduction mechanism of gas-liquid Couette flow in parallel wall nanochannels are studied by molecular dynamics method, and the influences of surface wettability, wall roughness, and gas concentration on boundary slip velocity and bubble drag reduction effect are analyzed. The results indicate that the bubble drag reduction effect is enhanced with the increase of boundary slip velocity. In the gas-liquid two-phase flow region, with the increase of shear velocity, the lateral deformation of boundary adsorbed bubble and boundary slip velocity increase, thus enhancing the bubble drag reduction effect. The increase of solid-gas interaction strength and gas concentration can lead to the enrichment of gas atoms near the wall, improve the bubble spreading characteristics on the wall, and thus increase the slip velocity of the solid-liquid interface. The wall roughness can change the spreading characteristics of bubble, affect the boundary slip velocity, and then change the drag reduction effect of the fluid-solid interface. As the rib height increases, gas atoms accumulate in the grooves between ribs and the adsorption quantity of gas atoms on the upper surface of the rib decreases, which leads to the decrease of the boundary slip velocity of the solid-liquid interface and ultimately reduces the drag reduction effect. The research results will provide important theoretical guidance for implementing the boundary drag reduction technology in large ships and underwater vehicles.

Keywords: bubble drag reduction, boundary slip, Couette flow, molecular dynamics

PACS: 47.85.lb, 47.45.Gx, 83.50.Ax, 02.70.Ns

DOI: [10.7498/aps.73.20240474](https://doi.org/10.7498/aps.73.20240474)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12272151, 52005222, 92248301).

† Corresponding author. E-mail: liuzhen@just.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: zhangzq@ujs.edu.cn

纳米限域Couette流边界气泡减阻机理

张鹏 张彦如 张福建 刘珍 张忠强

Mechanism of boundary bubble drag reduction of Couette flow in nano-confined domain

Zhang Peng Zhang Yan-Ru Zhang Fu-Jian Liu Zhen Zhang Zhong-Qiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 154701 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240474

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240474>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

冲击波诱导水中纳米气泡塌陷的分子动力学分析

Molecular dynamics analysis of shock wave-induced nanobubble collapse in water

物理学报. 2021, 70(13): 134702 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210058>

非对称纳米通道内界面热阻的分子动力学研究

Molecular dynamics study of interface thermal resistance in asymmetric nanochannel

物理学报. 2020, 69(22): 224701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200491>

不凝性气体对纳米通道内水分子流动传热影响的分子动力学模拟

Molecular dynamics simulation of effect of non-condensable gases on heat transfer of water molecule flow in nanochannels

物理学报. 2024, 73(9): 094701 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240192>

润湿性影响薄液膜沸腾传热的分子动力学研究

Molecular dynamics study on effect of wettability on boiling heat transfer of thin liquid films

物理学报. 2024, 73(9): 090201 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20232026>

非牛顿流体剪切稀化特性的分子动力学模拟

Molecular dynamics simulation on shear thinning characteristics of non-Newtonian fluids

物理学报. 2021, 70(12): 124701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202116>

大规模、量子精度的分子动力学模拟: 以极端条件液态铁为例

Large scale and quantum accurate molecular dynamics simulation: Liquid iron under extreme condition

物理学报. 2023, 72(18): 187102 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231258>