

# 凹槽结构强化液滴合并弹跳的数值研究

吴卫民, 郑佳宜\*, 王芳

(南京理工大学 能源与动力工程学院 电子设备热控制工信部重点实验室, 南京 210094)

**摘要:** 目的 为研究凹槽结构对液滴合并弹跳现象的影响, 提高液滴自弹跳的速度和能量转化率。方法 通过有限元方法模拟, 研究了液滴在凹槽结构上的动态行为和槽深  $H$ 、槽宽  $W$  及液滴尺寸对 V 型槽和矩形槽上液滴的弹跳速度、无量纲速度、表面能转化率、动量和总动能的影响。结果 凹槽内与槽外液滴间的合并弹跳包含液滴接触、产生液桥、三相线收缩和液滴弹离表面 4 个过程; 宽高比相同时, 液滴弹跳速度和表面能转化率均随液滴半径先增大后减小, 凹槽宽高比为 1.5, 液滴合并弹跳半径为 0.25 mm 工况下表面能转化效率最高; 矩形槽与 V 型槽, 宽高比为 1.5, 液滴合并弹跳半径为 0.25 mm 时, 液滴弹跳速度与表面能转化率随半径比先增大后减小, 在半径比为 1 时达到峰值, 二者表面能转化率最大值为 27.87% 和 30.66%。槽宽恒定时, 凹槽结构强化液滴合并弹跳存在最佳凹槽宽高比和最优弹跳半径, V 型槽提升液滴弹跳效率比矩形槽高约 12%。结论 合并后液滴撞击 V 型槽侧壁的反作用力使液滴旁瓣较矩形槽更早受到侧壁面抑制而发生回流, 从而提升了其能量转化效率, 减少了液滴的振荡损失与黏性耗散。研究结果在设计高效的自清洁功能表面、提高冷凝表面换热效率、预防和抑制换热器表面结冰、成霜等工业领域有重要的应用意义。

**关键词:** 凹槽结构; 超疏水表面; 液滴合并; 液滴弹跳强化; 有限元方法模拟

中图分类号: TB34 文献标志码: A 文章编号: 1001-3660(2024)02-0193-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.02.019

## Numerical Study of Enhanced Droplet Merging and Bouncing by Groove Structure

WU Weimin, ZHENG Jiayi\*, WANG Fang

(MIIT Key Laboratory of Thermal Control of Electronic Equipment, School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**ABSTRACT:** In recent years, the phenomenon of droplet agglomeration and bouncing, which is a characteristic of superhydrophobic surfaces, has received close attention from scholars. The results of the study have important industrial applications in enhancing heat transfer, anti-icing and frost protection and surface self-cleaning. The construction of various groove structures on superhydrophobic surfaces is highly effective in enhancing droplet merging and bouncing and improving surface energy conversion efficiency. In order to improve the bouncing speed and energy conversion rate of droplet self-bounce, the effect of groove structure on droplet merging bounce phenomenon was studied. The effects of droplet size on the droplet momentum, total droplet kinetic energy, dimensionless bounce velocity, bounce velocity and surface energy conversion rate in

收稿日期: 2022-11-02; 修订日期: 2023-04-13

Received: 2022-11-02; Revised: 2023-04-13

基金项目: 国家自然科学基金 (51706101)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51706101)

引文格式: 吴卫民, 郑佳宜, 王芳. 凹槽结构强化液滴合并弹跳的数值研究[J]. 表面技术, 2024, 53(2): 193-200.

WU Weimin, ZHENG Jiayi, WANG Fang. Numerical Study of Enhanced Droplet Merging and Bouncing by Groove Structure[J]. Surface Technology, 2024, 53(2): 193-200.

\*通信作者 (Corresponding author)

different directions of droplet merging, and bouncing on V-shaped and rectangular troughs were investigated by numerical simulations with deionized water as the working medium for the same trough width  $W$  and the ratio of trough depth to trough width  $H/W=1, 1.5$  and  $2$ . The simulations were based on a two-dimensional model of two-phase laminar flow with a pair of spherical droplets of equal diameter bouncing together on a superhydrophobic surface with a fluted structure. The phase field method was used to calculate the problem. The simulation results showed that the combined bouncing between droplets inside and outside the groove consisted of four processes: droplet contact, liquid bridge generation, three-phase line contraction and droplet bouncing off the surface. When the ratio of groove width to groove depth was the same, the droplet bounce speed and surface energy conversion rate increased and then decreased with the droplet radius. At this point, the combined bounce velocity of the rectangular trough droplets was  $0.318$  m/s and the dimensionless bounce velocity was  $0.562$ . The combined bounce velocity of the V-shaped trough droplets was  $0.355$  m/s and the dimensionless bounce velocity was  $0.627$ . Both rectangular and V-shaped grooves broke the capillary-inertial scalar law for super-sparse horizontal surfaces. And the optimal droplet combined bounce radius was  $0.25$  mm when the width to height ratio was  $1.5$ . For rectangular grooves, when the ratio of groove width to groove depth was  $1$  and  $2$ , the optimal droplet merging bounce radius was  $0.2$  mm. At this point the droplet bounces was  $0.329$  m/s and  $0.301$  m/s respectively, with dimensionless velocities of  $0.52$  and  $0.47$ . The V-shaped groove was better than the rectangular groove in enhancing droplet bounce. For rectangular grooves and V-shaped grooves, the surface energy conversion rate reached a maximum of  $27.87\%$  and  $30.66\%$  for both with a width to height ratio of  $1.5$ . The notch structure enhanced the droplet merging and bouncing with optimal bounce radius and notch aspect ratio. The droplet bounce speed and surface energy conversion rate increased and then decreased with the radius ratio, reaching a peak at a radius ratio of  $1$ . V-shaped grooves improved droplet bounce efficiency by approximately  $12\%$  compared with rectangular grooves. In conclusion, the reaction force of the merged droplet hitting the side wall of the V-shaped groove makes the droplet side flap be inhibited by the side wall surface earlier than that of the rectangular groove and backflow occurs, thus enhancing its energy conversion efficiency and reducing the oscillation loss and viscous dissipation of the droplet.

**KEY WORDS:** fluted structure; superhydrophobic surfaces; droplet merging; droplet bounce enhancement; finite element method simulation

两个液滴在超疏水表面发生合并,因表面积增加使合并后的液滴表面能增加,多余的表面能释放后有部分转化为液滴的动能,使合并后液滴自发弹离表面,这一现象被称为合并诱导的液滴弹跳<sup>[1]</sup>。合并诱导的液滴弹跳行为可促进液滴离开表面,在表面自清洁<sup>[2-4]</sup>、强化冷凝传热<sup>[5-7]</sup>、防冰抑霜<sup>[8-10]</sup>等领域有极大的应用前景。然而已有研究表明,微尺度液滴受内部流体动力学限制,多余的表面能转化为有效弹跳动能的效率低于  $4\%$ <sup>[11-13]</sup>。当液滴尺寸远小于水的毛细长度  $2.7$  mm<sup>[14]</sup>时,忽略重力势能的影响,液滴合并前后释放的表面能恒定,在合并过程中转化为动能和黏性耗散,其中黏性耗散主要为液滴克服表面黏附性和接触角滞后所消耗的能量<sup>[15]</sup>。动能可分为弹跳和振荡两部分,其中弹跳动能是液滴弹跳的主要诱因<sup>[16]</sup>。因此减小液滴在融合过程中的黏性耗散,提高液滴弹跳动能的转化率,是强化液滴合并弹跳的关键。为提高液滴合并弹跳行为的能量转化率,学者们尝试在超疏水表面构建特殊的微观或宏观结构来调控液滴合并过程中与表面的相互作用。Wen 等<sup>[17]</sup>构建了 Cu 纳米线微柱阵列的层级超疏水表面,由于受到微结构空间限制,冷凝液滴在其内部受限生长变形,液滴两端曲率半径不同导致内部形成 Laplace 压力差,使变形液滴自发向上运动。这一现象有利于减弱液滴在表面

的黏附性,延迟冷凝液泛现象<sup>[18]</sup>的形成。Han 等<sup>[18]</sup>制备了具有纳米草特征的锯齿状结构,导致冷凝液滴受限变形在表面上自发运动,使冷凝液滴合并弹跳频率提高了  $17$  倍以上,显著提高了冷凝表面的水回收效率。Lu 等<sup>[19]</sup>在超疏水表面上设计了不同夹角的 V 型槽结构,使液滴在合并过程中撞击槽脊,将液滴表面能转化率提升了  $7$  倍。

虽已有学者在超疏水表面构建了不同形状的凹槽<sup>[20-26]</sup>并对其强化液滴合并弹跳的效果进行了研究,但以上研究多为单一结构工况,在相同接触角与槽深、槽宽等条件下,何种类型的凹槽结构强化液滴合并弹跳效率最高依然缺乏研究定论,而矩形槽与 V 型槽可通过定量控制槽深、槽宽,改变凹槽宽高比和液滴尺寸,得到凹槽几何参数和液滴尺寸对液滴合并弹跳的定性结论。凹槽宽高比应从模拟可行性和模拟误差两方面考量,槽宽  $W$  恒定,  $W/H>2$  时,液滴合并后液桥撞击凹槽边缘所需时间越长,受到壁面的反作用力越小,产生的振荡损失与黏性耗散越大,不利于液滴弹跳;槽宽  $W$  恒定,  $W/H<1$  时,当液滴直径小于槽宽时液滴会陷落槽内,使液滴弹跳阻力增加,甚至难以与槽外液滴发生接触。此外凹槽宽高比差值不宜过小,否则在一定程度上会增大计算误差,无法区别其对液滴合并弹跳的影响。因此本研究模拟计算

了槽宽  $W$  相同且宽高比  $W/H=1$ 、1.5 和 2 时, 液滴尺寸对 V 型槽和矩形槽上液滴合并弹跳的液滴动量、液滴总动能、无量纲弹跳速度、弹跳速度和表面能转化率的影 响, 研究了槽内与槽外液滴间的合并弹跳特性, 并对其进行了动力学分析。

1 计算模型与方法

1.1 控制方程

模型基于不可压缩流体的 Navier-Stokes 方程模拟流体的质量和动量传递, 方程如下:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-P\mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)] + \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_{st} \quad (1)$$
$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

式中:  $\rho$  为密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\mathbf{u}$  为速度矢量,  $\text{m/s}$ ;  $P$  为流体压力,  $\text{Pa}$ ;  $\mu$  为流体黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $\mathbf{F}_{st}$  为表面张力,  $\text{N/m}^3$ ;  $\mathbf{I}$  是单位矩阵;  $\mathbf{F}_g$  为重力,  $\mathbf{F}_g=\rho\mathbf{g}$ , ( $\mathbf{g}$  为重力加速度),  $\text{m/s}^2$ 。

在超疏水表面液滴聚结跳跃行为中, 液滴界面的变化是研究的关键, 采用相场变量  $\Phi$  跟踪界面变化,

液体界面由相场变量  $\Phi$  的 0 等值线表示, 在空气中  $\Phi=-1$ , 在水中  $\Phi=1$ , 因此分割两个相态的  $\Phi$  方程为:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \Phi = \gamma \nabla^2 \Phi - \Phi(1 - \Phi) \frac{\nabla \Phi}{|\nabla \Phi|} \quad (3)$$

$\varepsilon$  为界面厚度控制参数。当相场方程使用数值稳定方法时, 界面厚度可设定为  $\varepsilon=h_c/2$ ,  $h_c$  是界面经过的区域中的特征网格尺寸。 $\gamma$  参数决定重新初始化的数量,  $\gamma$  过小, 界面厚度不会保持稳定,  $\gamma$  过大, 界面移动不准确。

1.2 物理模型

本模拟建立的是一对等直径微米级球形液滴在超疏水凹槽表面上进行合并弹跳的二维模型, 液滴分别放置在凹槽外与槽内的超疏水面上, 环境介质为空气, 采用有限元模拟软件 COMSOL Multiphysics, 在多相流模式下求解。采用相场算法和层流模型来捕捉液气界面在合并过程中的演化, 两相流层流计算域为  $8\text{ mm}\times12\text{ mm}\times5\text{ mm}$ , 润湿壁接触角设为  $165^\circ$ , 对网格进行较细化处理, 取液滴将要弹离和弹离基底后 3 帧的平均速度作为液滴合并弹跳速度, 图 1 为模型示例。

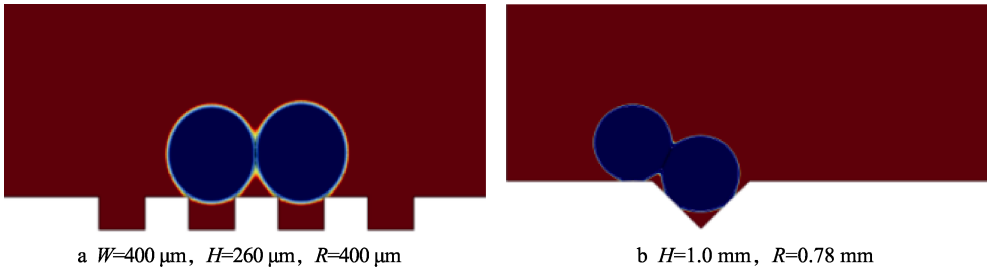


图 1 超疏水凹槽表面上等直径液滴对聚结-跳跃行为模型主视图  
Fig.1 Main view o.f model of agglomeration-jumping behavior of equal diameter droplet pairs on a superhydrophobic grooved surface

1.3 网格独立性验证及模型验证

为验证所建模型的合理性, 与 Wang 等<sup>[20]</sup>和 Peng 等<sup>[26]</sup>的实验结果进行了比较。实验中矩形槽的槽深、槽宽和间距分别为 260、400 和 380  $\mu\text{m}$ , 表观接触角为  $168.6^\circ\pm2.7^\circ$ , 有限元方法模拟中的微柱尺寸参数与实验中完全相同, 润湿壁接触角设置为  $168.6^\circ$ 。实验中 V 型槽的槽深  $H=1.0\text{ mm}$ , 槽角  $\alpha=90^\circ$ , 润湿壁接触角为  $163^\circ\pm2^\circ$ , 模拟中 V 型槽参数与实验一致, 为使模拟结果更精确, 忽略了超疏水表面的纳米结构, 视作无接触角滞后的无滑移壁面, 表面接触角取其变化范围内的平均值。模拟与实验中液滴物性参数 ( $T=20\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P=1\text{ atm}$ ) 对比见表 1。

图 2 为矩形槽与 V 型槽上液滴合并弹跳行为的模拟与文献结果在同一时刻的形态变化, 结果显示液滴在各个时刻下的形态变化基本一致。由图 3a 可知, 当网格数量达到 40 980 时, 液滴弹跳速度的计算结果变化趋于水平, 与网格数量为 80 070 时相比误差

在 0.5% 以下。图 3b~c 表明相同液滴合并半径下, V 型槽最大液滴弹跳速度, 模拟结果为 0.162  $\text{m/s}$ , 文献结果为 0.158  $\text{m/s}$ , 误差为 2.5%, 模拟与文献结果误差最小值为 1.8%, 最大值为 5.03%; 矩形槽最大液滴弹跳速度, 模拟结果为 0.211  $\text{m/s}$ , 文献结果为 0.201  $\text{m/s}$ , 误差为 4.9%, 模拟与文献结果误差最小值为 1.33%, 最大值为 9.85%。综上, 可认为矩形槽与 V 型槽液滴合并弹跳的数值模拟和实验结果吻合良好, 证明了模型的适用性。

表 1 物性参数  
Tab.1 Physical parameters

Deionised water	Dynamic viscosity/ (Pa·s)	Density/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	Surface tension/ ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$ )	Contact angle/ ( $^\circ$ )
Simulation	0.001	1 000	0.072	163/168.6
V-groove	0.001	998	0.072	163±2
Rectangular groove	0.001	998.2	0.072	168.6±2.7

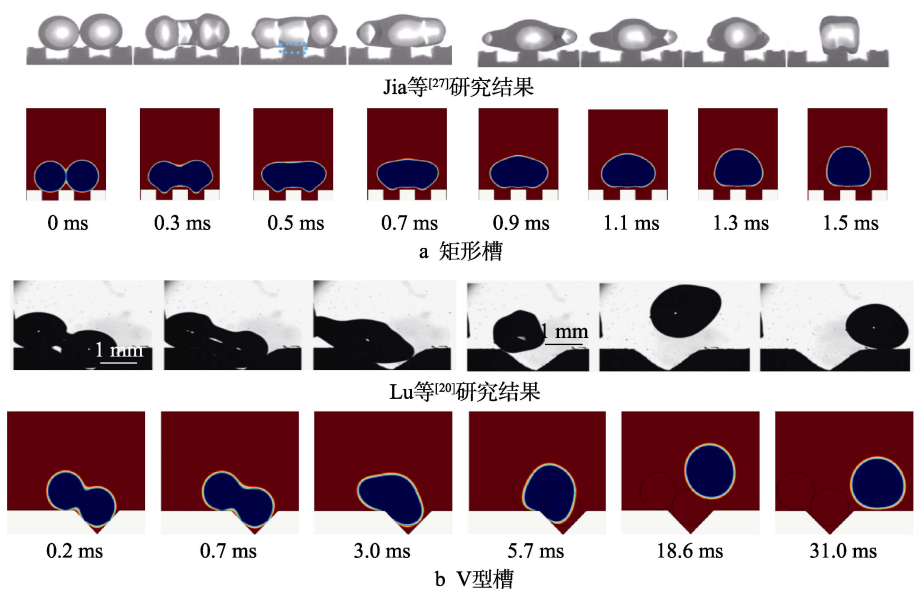


图 2 自发跳跃的动态演化：实验和有限元方法模拟的比较  
Fig.2 Dynamic evolution of spontaneous jumps: Comparison of experiments and simulations:  
a) rectangular groove b) V-groove

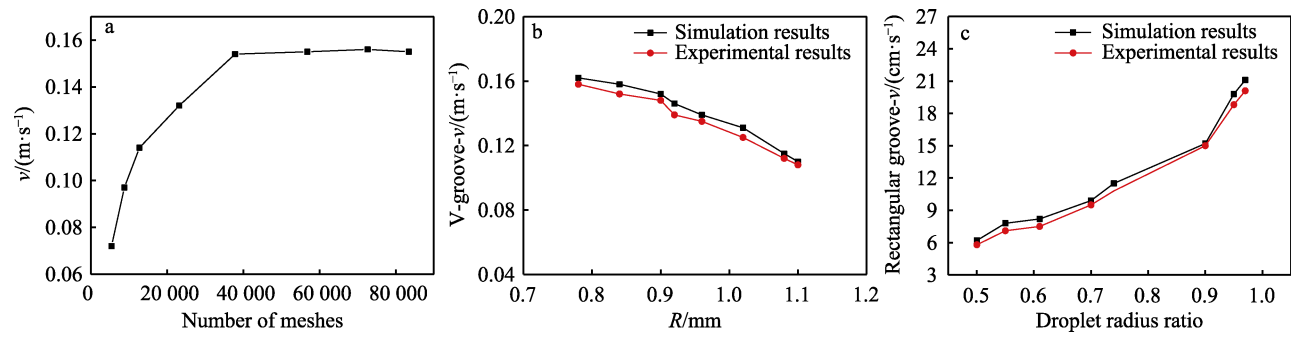


图 3 网格独立性及模型验证  
Fig.3 Grid independence verification and model validation

## 2 结果与分析

### 2.1 液滴合并弹跳的形态演化

液滴合并弹跳过程（见图 4）可分为 4 个阶段：液桥生长、液桥撞击壁面、三相线收缩和液滴弹跳：1）液滴接触后在范德瓦耳斯力的作用下，在接触处破裂形成液桥。液桥颈部初始为凹液面，在拉普拉斯力驱动下迅速扩张（0~0.4 ms）；2）随着液桥扩

张，大量液体从液滴主体部分涌入中部液桥区域，使液桥颈部由凹液面演变为凸液面，直至液桥撞击槽脊。此时固液接触面积增大，三相线沿水平方向逐渐铺展至最大，两液滴合并为一个液滴（0.4~0.7 ms）；3）液滴撞击壁面受阻，其纵向平衡被打破，受到壁面的反作用力使液滴除在平面内振荡外开始向远离壁面的方向运动，三相线开始收缩（0.7~1.0 ms）；4）当水平方向三相线长度收缩为 0 时，液滴弹离表面（1.0~4.9 ms）。由图 4 可知，V 型槽的演化过程较矩形槽更为迅速，提升了 0.3 ms 以上。

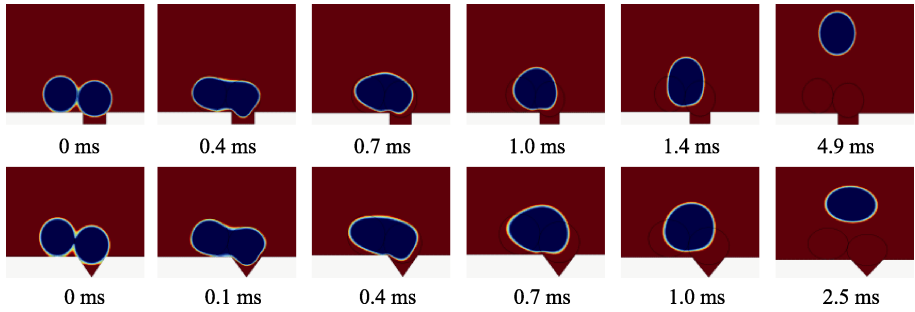


图 4 矩形槽与 V 型槽上的液滴合并  
Fig.4 Droplet merging in rectangular and V-shaped grooves

## 2.2 凹槽宽高比对液滴弹跳速度与能量转化效率的影响

针对两个等径液滴在两种凹槽和 3 种凹槽宽高比下进行数值模拟, 模型中凹槽宽度  $W=0.4$  mm, 改变槽深从而得到 3 种宽高比下的液滴弹跳速度和能量转化率, 以及相同宽高比下, 液滴尺寸和凹槽形状对液滴弹跳速度、无量纲速度及表面能转化率的影响, 结果如图 6a~i 所示。其中液滴弹跳速度  $v$ 、无量纲速度  $u_{ic}$ 、表面能转化率  $\eta$  计算公式如下:

假设两个球形液滴的半径为  $R$ , 则合并后半径为  $2^{1/2}R$ , 液滴合并前后体积不变, 质量不变, 但表面积大幅度减小, 所以液滴合并后释放的多余表面能为:

$$\Delta E_s = 4\pi\sigma R^2(2 - 2^{3/2}) \quad (4)$$

其中  $\sigma$  为表面张力。如果液滴合并后表面能全部转化为动能, 则理论液滴弹跳速度为:

$$\bar{v}_j = \sqrt{2\Delta E_s / m} \approx 1.11\sqrt{\sigma / (\rho R)} \quad (5)$$

式中:  $m$  为液滴总质量;  $\rho$  为液滴密度。

为表征能量转化效率, 定义  $u_{ic}$  和  $\eta$ , 其表达式如下:

$$u_{ic} = \frac{v}{\bar{v}_j} \quad (6)$$

$$\eta = \frac{0.5mv^2}{\Delta E_s} = \frac{mv^2}{8\pi\sigma R^2(2 - 2^{3/2})} \quad (7)$$

由图 5a 可知,  $W/H=1$  时, 随着液滴半径增加, 矩形槽液滴弹跳速度与液滴半径呈负相关, 液滴弹跳速度最大值为  $R=0.2$  mm 处。在  $0.2 < R < 0.35$  mm 时, V 型槽的液滴弹跳速度显著高于矩形槽, 最高可达 1.5 倍。由图 6b~c 可知,  $W/H > 1$  时, 随着  $R$  增大, V 型槽与矩形槽的液滴弹跳速度均先增大后减小,  $W/H=1.5$  时, 速度  $v$  峰值在  $R=0.25$  mm 处;  $W/H=2$  时, 速度  $v$  峰值为  $R=0.2$  mm 处。

图 5d~f 为宽高比和液滴尺寸对两种形状凹槽上液滴合并弹跳的无量纲速度的影响。在 3 种宽高比下, V 型槽的无量纲速度  $u_{ic}$  总体大于矩形槽,  $u_{ic}$  以  $R=0.25$  mm 为拐点先增大后减小, 直至趋近超疏水平

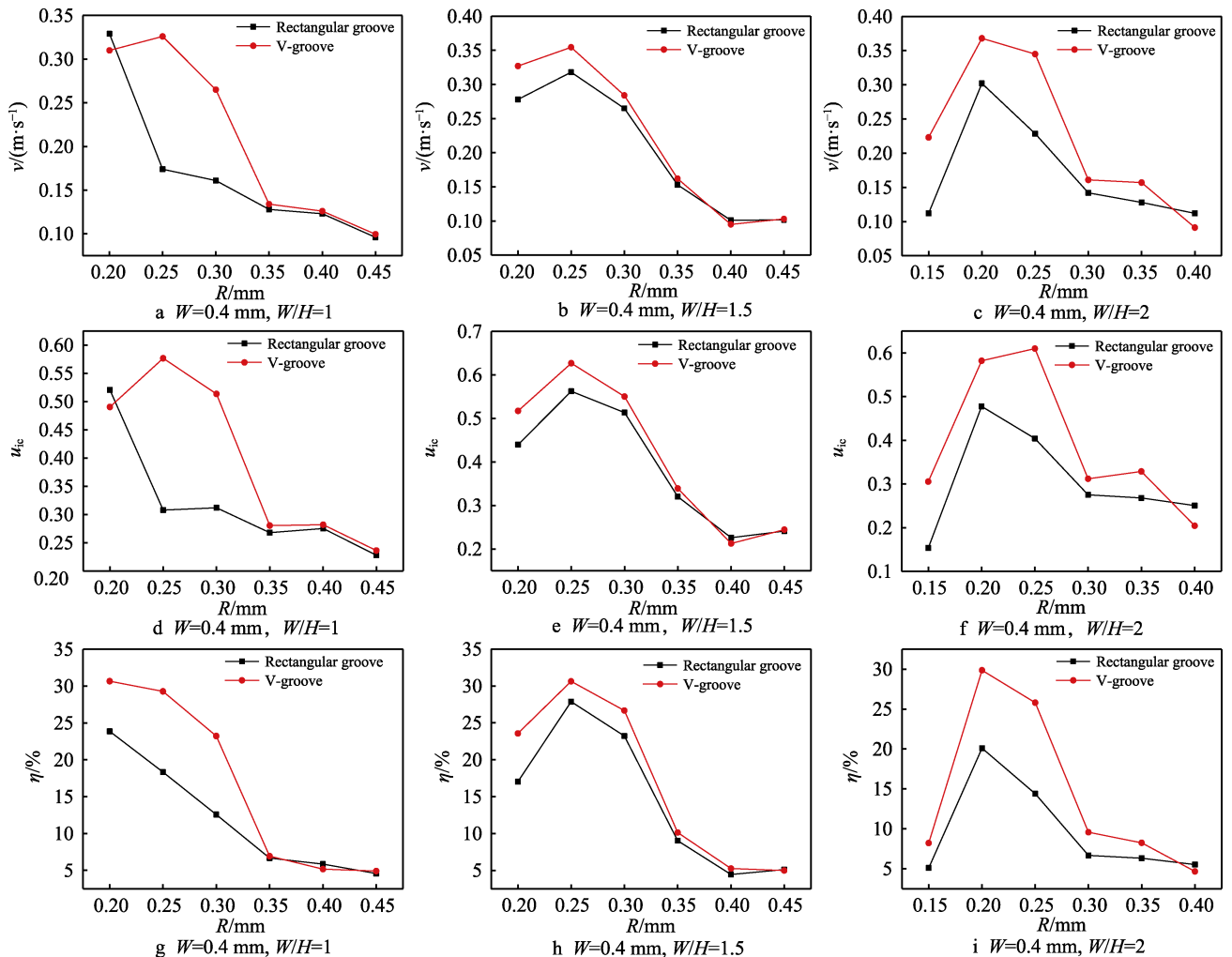


图 5 凹槽宽高比对液滴弹跳速度、无量纲速度和表面能转化率的影响  
Fig.5 Effect of groove width-to-height ratio on bounce rate and energy conversion rate of combined droplets



面液滴合并弹跳的  $u_{ic}$  值。V 型槽的  $u_{ic}$  峰值均在  $R=0.25$  mm 处, 与宽高比无关, 在  $W/H=1.5$  时  $u_{ic}$  最大值为 0.627, 是普通超疏水平面  $u_{ic}$  的 2.726 倍。矩形槽  $u_{ic}$  峰值在  $W/H=1.5$ ,  $R=0.25$  mm 处,  $W/H=1$  和 2 时为  $R=0.2$  mm 处, 其变化趋势在  $W/H=1$  时线性下降, 在  $W/H>1$  后与 V 型槽  $u_{ic}$  变化趋势一致, 在  $W/H=1.5$  时有最大值  $u_{ic}=0.562$ , 是普通超疏水平面  $u_{ic}$  的 2.44 倍, 相比同一工况下 V 型槽减小了约 12%。图 5g~i 为不同宽高比下, 两种形状凹槽上液滴尺寸对液滴合并弹跳能量转化率  $\eta$  的影响, 其变化趋势与液滴弹跳速度  $v$  的变化趋势一致, 矩形槽在  $W/H=1.5$  时  $\eta_{\max}=27.87\%$ , 相比超疏水平面提高了 6.96 倍, V 型槽在  $W/H=1.5$  时  $\eta_{\max}=30.66\%$ , 相比超疏水平面提高了 7.66 倍。

图 5a、d、g 中矩形槽液滴弹跳性能变化规律与图 5b、c、e、f、h、i 中不同, 其原因为: 当  $W=0.4$  mm,  $W/H=1$ ,  $R=0.2$  mm 时, 槽内液滴与凹槽相切, 与槽外液滴对称合并, 液桥中心点恰好撞击槽脊; 随着  $R$  增大, 槽内液滴受限变形, 与槽外液滴合并时, 产生非对称液桥, 液桥撞击槽脊点远离液桥中心点, 所受凹槽反作用力远小于液桥对称合并工况, 故矩形槽液滴弹跳性能变化规律呈线性下降。而  $W/H>1$  时, 由于槽深减小, 在额定槽宽内, 液滴发生对称合并的临界半径增大, 故出现矩形槽液滴弹跳性能变化规律先增大后减小的情况。液滴半径  $R>0.35$  mm 时, 液滴弹跳速度变化速率趋于水平, 其原因是随着液滴半径增加, 合并液滴产生的液桥逐渐远离速度  $v$  达到最大值时液桥撞击壁面的位置, 使液桥撞击壁面时间延后, 最终趋向平面上的液滴合并弹跳过程。

### 2.3 液滴尺寸对液滴弹跳速度与能量转化率的影响

由 2.2 节可知, 液滴在  $W/H=1.5$ ,  $R=0.25$  mm 工

况下弹跳性能最佳, 但以上研究均为液滴等径合并, 为深入阐释液滴尺寸对其弹跳性能的影响, 研究了  $W/H=1.5$ ,  $R=0.25$  mm 时非等径液滴合并的弹跳性能。由图 6 可知, 随着液滴半径比  $R_1/R_2$  的增大, 矩形槽与 V 型槽上合并液滴的弹跳速度、无量纲速度和表面能转化率均先增大后减小, 并在  $R_1/R_2=1$  时达到峰值。 $R_1/R_2$  愈接近 1, 愈多的表面能转化为液滴动能, 这是由于合并液滴尺寸越接近, 当表面能开始释放时, 凹槽结构介入液滴合并时间越早, 并且在合并液滴的显著振荡之前, 减小了液滴的振荡损失, 液滴早期与凹槽间的相互作用导致释放的表面能可有效转化为其弹跳动能。且该效果在 V 型槽上愈发显著, 其原因为大的拉普拉斯压力差和变形液滴中存储的额外表面能以及槽壁的限制抑制了合并液滴的横向膨胀, 从而进一步提高了合并液滴的弹跳速度和能量转换效率。

### 2.4 凹槽宽高比与凹槽形状对液滴弹跳速度及动能的影响

为探究矩形槽与 V 型槽提高表面能转化率的物理原理, 模拟研究了凹槽宽高比对两种凹槽上液滴合并弹跳过程中的速度与动能的影响。矩形槽与 V 型槽在液滴合并半径相同时, 液滴弹跳速度和表面能转化率达到峰值时宽高比皆为 1.5。究其原因, 此时槽深  $H=0.26$  mm, 槽宽  $W=0.40$  mm, 液滴合并半径在  $R=0.25$  mm 时, 正处于液滴在凹槽中伸展的临界值, 不会因凹槽过宽或过窄导致液桥无法准确撞击槽脊, 使液滴在撞击时产生额外的振荡损失。图 7a~c 为合并液滴在  $x$  (水平)、 $y$  (竖直) 方向上的动量和动能变化。在液滴离开表面前, 液滴在竖直方向动量不断增加, 水平方向动量先增加后减小。液滴弹跳动能在液滴即将离开表面时达到峰值, 其原因是液滴在两侧旁瓣脱离壁面时达到最大振荡, 振荡动能随后快速衰减, 使总动能转化为弹跳动能的效率快速提高。

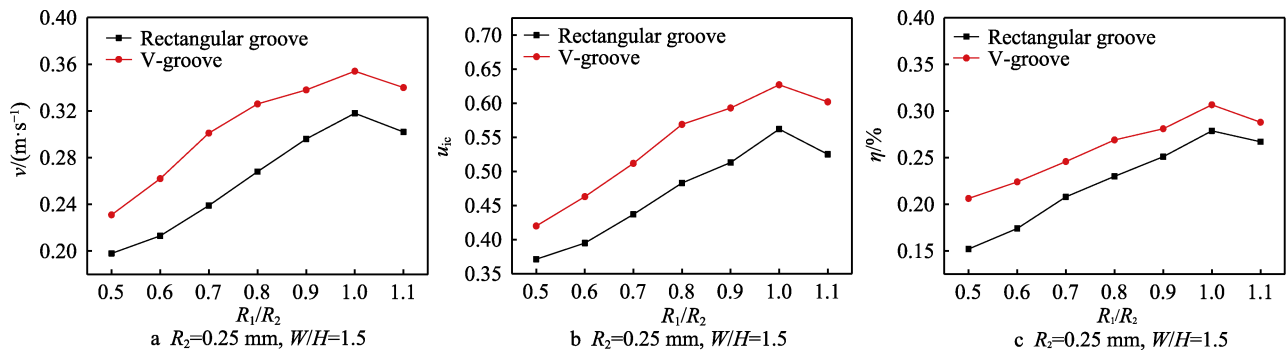


图 6 液滴尺寸对合并液滴弹跳速度与能量转化率的影响

Fig.6 Effect of droplet size on bounce rate and energy conversion rate of combined droplets

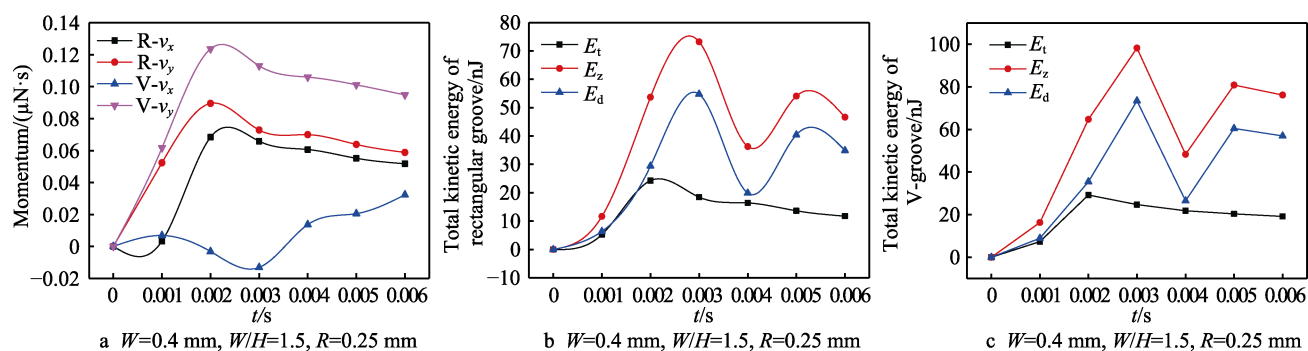


图 7 超疏水凹槽表面上液滴动量及动能变化

Fig.7 Variation of droplet momentum and kinetic energy on surface of superhydrophobic grooves

### 3 结论

本文通过数值模拟研究了槽深  $H$ 、槽宽  $W$  及液滴尺寸对凹槽结构强化液滴合并弹跳的影响。结果表明: 1) 槽宽恒定时, 相同液滴尺寸合并弹跳存在最优宽高比为  $W/H=1.5$ , 对应最优液滴合并弹跳半径为 0.25 mm; 2) 宽高比为 1.5 时, 矩形槽与 V 型槽都突破了超疏水平面的毛细-惯性标度定律, 且液滴弹跳速度与表面能转化率随半径比先增大后减小, 在半径比为 1 时达到峰值, V 型槽最大能量转化率为  $\eta_{\max}=30.66\%$ , 液滴弹跳效率比矩形槽高约 12%; 3) 宽高比为 1.5 时, V 型槽使液滴合并后旁瓣较矩形槽更早受到侧壁面抑制而产生回流, 从而提升了其能量转化效率, 减少了液滴的振荡损失与黏性耗散; 4) 合理的凹槽尺寸设计与几何形状有助于增强表面的自清洁能力, 在提高表面冷凝换热效率和防冰抑霜等领域亦有重大的应用意义。

#### 参考文献:

- [1] BOREYKO J B, CHEN C H. Self-propelled Dropwise Condensate on Superhydrophobic Surfaces[J]. Physical Review Letters, 2009, 103(18): 184501.
- [2] WISDOM K M, WATSON J A, QU X P, et al. Self-Cleaning of Superhydrophobic Surfaces by Self-Propelled Jumping Condensate[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(20): 7992-7997.
- [3] 史维秀, 李惟毅, 谈西峰, 等. 机械加工表面强化管管外全凝与部分凝结换热实验[J]. 天津大学学报, 2011, 44(6): 529-534.
- [4] WANG X, XU B, CHEN Z Q, et al. Review of Droplet Dynamics and Dropwise Condensation Enhancement: Theory, Experiments and Applications[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2022, 305: 102684.
- [5] TANG G H, HU H W, NIU D, et al. Advances in Vapor Dropwise Condensation Heat Transfer[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(17): 1653-1676.
- [6] LAN Z, CHEN Y S, HU S B, et al. Droplet Regulation and Dropwise Condensation Heat Transfer Enhancement on Hydrophobic-Superhydrophobic Hybrid Surfaces[J]. Heat Transfer Engineering, 2018, 39(17/18): 1540-1551.
- [7] LEE J, HWANG S H, YOON S S, et al. Evaporation Characteristics of Water Droplets in Cassie, Wenzel, and Mixed States on Superhydrophobic Pillared Si Surface[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2019, 562: 304-309.
- [8] 丁云飞, 殷帅, 廖云丹, 等. 纳微结构疏水表面结霜过程及抑霜特性[J]. 化工学报, 2012, 63(10): 3213-3219.
- [9] DING Y F, YIN S, LIAO Y D, et al. Frosting Mechanism and Suppression on Nano/Micro-Structured Hydrophobic Surfaces[J]. CIESC Journal, 2012, 63(10): 3213-3219.
- [10] MAHVI A J, BOYINA K, MUSSER A, et al. Superhydrophobic Heat Exchangers Delay Frost Formation and Enhance Efficiency of Electric Vehicle Heat Pumps[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 172: 121162.
- [11] BOREYKO J B, SRIJANTO B R, NGUYEN T D, et al. Dynamic Defrosting on Nanostructured Superhydrophobic Surfaces[J]. Langmuir: The ACS Journal of Surfaces and Colloids, 2013, 29(30): 9516-9524.
- [12] LIU T Q, SUN W, SUN X Y, et al. Mechanism and Condition Analysis of Condensed Drop Jumping on Super-Hydrophobic Surfaces[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2012, 28(5): 1206-1212.
- [13] 彭本利, 兰忠, 徐威, 等. 液滴合并 LB 模拟及液滴弹跳的理论分析[J]. 工程热物理论, 2013, 34(9): 1731-1734.
- [14] PENG B L, LAN Z, XU W, et al. Droplet Coalescence Simulation by Lattice Boltzmann Method and Theoretical Analysis of Droplet Jumping Phenomenon[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(9): 1731-1734.

- [13] ENRIGHT R, MILJKOVIC N, SPRITTLES J, et al. How Coalescing Droplets Jump[J]. ACS Nano, 2014, 8(10): 10352-10362.
- [14] TANG H D, LIU X H. Experimental Study of Dew Formation on Metal Radiant Panels[J]. Energy and Buildings, 2014, 85: 515-523.
- [15] LV C J, HAO P F, YAO Z H, et al. Condensation and Jumping Relay of Droplets on Lotus Leaf[J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(2): 021601.
- [16] WANG K, LI R X, LIANG Q Q, et al. Critical Size Ratio for Coalescence-Induced Droplet Jumping on Superhydrophobic Surfaces[J]. Applied Physics Letters, 2017, 111(6): 061603.
- [17] WEN R F, XU S S, ZHAO D L, et al. Hierarchical Superhydrophobic Surfaces with Micropatterned Nanowire Arrays for High-Efficiency Jumping Droplet Condensation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(51): 44911-44921.
- [18] HAN T, KWAK H J, KIM J H, et al. Nanograsped Zigzag Structures to Promote Coalescence-Induced Droplet Jumping[J]. Langmuir: The ACS Journal of Surfaces and Colloids, 2019, 35(27): 9093-9099.
- [19] LU D Q, ZHAO M R, ZHANG H L, et al. Self-Enhancement of Coalescence-Induced Droplet Jumping on Superhydrophobic Surfaces with an Asymmetric V-Groove[J]. Langmuir: The ACS Journal of Surfaces and Colloids, 2020, 36(19): 5444-5453.
- [20] WANG X, CHANG J Y, CHEN Z Q, et al. Mesoscopic Lattice Boltzmann Simulation of Droplet Jumping Condensation Heat Transfer on the Microstructured Surface[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2021, 127: 105567.
- [21] QI P, LI J A, YI D A, et al. Influence of Groove Orientation on Dropwise Condensation on Hydrophobic and Hierarchical Superhydrophobic Surfaces with Microgroove ArrayScienceDirect[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2020, 112: 104492.
- [22] DING Y, JIA L, YIN L F, et al. Anisotropic Wetting Characteristics of Droplet on Micro-Grooved Surface[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2022, 633: 127850.
- [23] YUAN Z C, WEN J, MATSUMOTO M, et al. Anti-Wetting Ability of the Hydrophobic Surface Decorated by Submillimeter Grooves[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2020, 131: 103404.
- [24] CHENG Y Q, LIU Y B, YE X, et al. Macrotextures-Enabled Self-Propelling of Large Condensate Droplets[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 405: 126901.
- [25] PU J H, WANG S K, SUN J, et al. Growth and Self-Jumping of Single Condensed Droplet on Nanostructured Surfaces: A Molecular Dynamics Simulation[J]. Journal of Molecular Liquids, 2021, 340: 116902.
- [26] PENG Q, YAN X, LI J Q, et al. Breaking Droplet Jumping Energy Conversion Limits with Superhydrophobic Microgrooves[J]. Langmuir: The ACS Journal of Surfaces and Colloids, 2020, 36(32): 9510-9522.

(上接第 174 页)

- [19] BUN-ATHUEK N, YOSHIMOTO Y, SAKAI K, et al. Study on Effect of the Surface Variation of Colloidal Silica Abrasive during Chemical Mechanical Polishing of Sapphire[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2017, 56(7S2): 07KB01.
- [20] DONG Y, LEI H, CHEN Y, et al. Preparation of Irregular Silica Nanoparticles by the Polymer Templating for Chemical Mechanical Polishing of Sapphire Substrates[J]. Journal of Electronic Materials, 2019, 48(7): 4598-4606.
- [21] 陈刚, 肖强. 单晶蓝宝石基片抛光工艺研究进展[J]. 工具技术, 2018, 52(3): 3-9.
- CHEN G, XIAO Q. Progress Research in Polishing Process of Single Crystal Sapphire Substrate[J]. Tool Engineering, 2018, 52(3): 3-9.
- [22] 甘阳, 张飞虎. 单晶碳化硅和蓝宝石基片化学机械抛光的表面反应层形成机制的研究进展[J]. 科学通报, 2016, 61(36): 3930-3939.
- GAN Y, ZHANG F H. Review on Formation Mechanism of Chemical Reaction Layer during Chemical Mechanical Polishing of Monocrystalline SiC and Sapphire Substrates[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(36): 3930-3939.
- [23] 慕卿. YAG 晶体研抛加工中的材料去除过程研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- MU Q. Research on Material Removal of YAG Crystal during Lapping and Polishing[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [24] 陈国美, 杜春宽, 倪自丰, 等. 两性离子表面活性剂对 A 向蓝宝石晶片化学机械抛光的影响[J]. 现代制造工程, 2020(12): 83-87.
- CHEN G M, DU C K, NI Z F, et al. Effect of Amphoteric Surfactant on the Chemical Mechanical Polishing of A-Plane Sapphire Wafer[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020(12): 83-87.