

DOI: 10.7652/xjtuxb201903021

表面活性剂与纵向微沟槽协同减阻实验研究

黄崇海¹, 魏进家², 魏伟¹, 王伟¹, 肖颀¹

(1. 武汉第二船舶设计研究所热能动力技术重点实验室, 430205, 武汉;

2. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 根据表面活性剂溶液发生减阻时可放大近壁湍流涡尺度的特性,以及纵向微沟槽通过约束近壁流向涡运动实现减阻的机理,指出了两者在减阻机理上存在互补的可能性,并对两者的协同减阻性能进行实验研究验证,分析两者的协同强化减阻机理。通过研究 0.22 mmol/L 表面活性剂 CTAC/NaSal 溶液在两种不同尺寸的纵向壁面微沟槽通道内的变温度协同减阻性能,发现 20℃ 时溶液能在纵向微沟槽的作用下强化减阻性能,最大减阻率从光滑通道的 66% 分别增大到 G1 沟槽的 71% 和 G2 沟槽的 74%;减阻溶液的临界雷诺数及临界温度在 G1 沟槽通道内比在 G2 通道内小,但在 G2 沟槽通道内则与光滑通道的基本相同;微沟槽的减阻尺寸在减阻溶液中得到了放大;表面活性剂与纵向微沟槽的协同强化减阻机理在于表面活性剂放大了近壁湍流涡尺度,使微沟槽能约束住更多的近壁流向涡,同时也使微沟槽能在更高雷诺数下仍有减阻强化性能。

关键词: 湍流;表面活性剂;纵向微沟槽;协同减阻;近壁流向涡

中图分类号: TH132.44 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)03-0150-07

Experimental Study on the Collaborative Drag Reduction of Surfactant and Longitudinal Microgrooves

HUANG Chonghai¹, WEI Jinjia², WEI Wei¹, WANG Wei¹, XIAO Qi¹

(1. Laboratory on Thermal Energy and Power, Wuhan Second Ship Des. & Res. Ins., Wuhan 430205, China;

2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Based on the principle that the scale of near-wall vortices could be enlarged in the drag-reducing surfactant solution and the longitudinal microgrooves could reduce drag by restricting the motions of near-wall streamwise vortices, the possible complementary mechanism of drag reduction with surfactant and microgrooves was proposed, and their collaborative drag-reducing performance was verified by experiments. The collaborative drag-reducing performances of 0.22 mmol/L CTAC/NaSal surfactant solution in longitudinal microgroove channels with different sizes at different temperatures were investigated. It is found that the drag reduction performance of 0.22 mmol/L CTAC/NaSal solution can be enhanced by microgrooves at 20℃, the maximum drag reduction rate increases from 66% in smooth channel to 71% in G1 channel and 74% in G2 channel, respectively. The critical Reynolds number and critical temperature of drag-reducing solution in G1 channel are lower than that in G2 channel, but they are almost the same for G2 channel and smooth channel. The drag-reducing size of microgroove could be enlarged in the drag-

收稿日期: 2018-08-31。 作者简介: 黄崇海(1990—),男,博士,工程师;魏进家(通信作者),男,教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51225601);国家自然科学基金青年基金资助项目(51706158,51706159)。

网络出版时间: 2018-12-05

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20181204.1100.002.html>

reducing solution. The collaborative drag-reducing mechanism of surfactant and microgroove might be that the scale of near-wall vortices is enlarged in surfactant solutions, resulting in that microgrooves restrict more near-wall streamwise vortices and maintain the drag reduction performance at higher Reynolds number.

Keywords: turbulence; surfactant; longitudinal microgroove; collaborative drag reduction; near-wall streamwise vortex

管道内的流动大部分均为湍流流动,而能量损失主要来源于管道表面的摩擦阻力,因此减阻成为现今湍流节能研究的焦点,由此出现了许多的减阻技术。将微量的高分子聚合物溶液或表面活性减阻剂加入到湍流流体中后,流阻能大幅减小,最大减阻率约为60%~80%。相比高聚物来说,表面活性减阻剂具有可逆的机械降解特性,即表面活性剂分子能在剪切力的作用下形成剪切诱导结构(SIS),该结构会在高温和高剪切的作用下发生破坏,但当温度和剪切力减小到一定程度后,SIS能重新生成,从而使溶液恢复减阻能力,且其减阻效果可达60%~80%,因此是一种很有前景的高效减阻剂^[1]。同时,壁面纵向微沟槽减阻技术具有结构简单、无污染、减阻时不改变流体组成等优点,且又是一种被动式减阻手段,也受到研究者们普遍关注。

针对表面活性剂溶液的减阻机理,国内外学者进行了大量的研究工作。Xu等发现,稀溶液的表面活性减阻剂能够发生剪切增稠转变,即其表观黏度随剪切力增大而突然增大的行为,原因是减阻剂分子在剪切力的作用下形成了SIS,剪切增稠转变被认为是表面活性剂产生减阻的重要因素之一^[2-3]。Kawaguchi等通过利用PIV技术,发现加入表面活性剂后能在一定程度上抑制小湍流涡产生,从而使溶液内的湍流涡平均尺度增大,这就形成了一个具有大尺度涡的湍流环境,能为与涡尺度相关的其他减阻技术提供优良的环境^[4]。

在被动减阻方法中,国内外学者对壁面纵向微沟槽进行了大量的实验和数值模拟研究,发现微沟槽的存在虽使表面积和表面摩擦增加,但其尖峰却可以破坏流向涡,并能约束流向涡的展向运动,从而抑制了低速条带的形成,使得湍动能交换和总的表面摩擦力减小;同时在微沟槽槽谷内流体可以保持低速状态,虽然沟槽尖峰附近的表面剪切应力有所增加,但其槽谷内的剪切应力却能大幅减小,最终使得表面摩擦出现净减少^[5-6]。Chamorro等通过对表面覆盖有纵向微沟槽的机翼模型进行模拟研究,发现微沟槽的尺寸对其减阻效果有很大影响,这意味

着微沟槽的湍流减阻需要其尺度与近壁湍流涡尺度相当^[7]。

通过对表面活性减阻剂与壁面纵向微沟槽现有的减阻机理和现象的分析研究可知,微沟槽能通过对近壁流向涡运动的约束来产生减阻,其约束作用与流向涡尺度有很大关系;然而,表面活性减阻剂能够在较大的雷诺数范围内抑制流体内小涡的形成,放大涡的尺度,使流体内形成平均涡尺度较大的流动环境。从以上对涡尺度的分析可以猜测出表面活性剂和纵向微沟槽两者在减阻机理上可能具有互补性:两者的耦合能进一步提高表面活性剂溶液的减阻性能,同时通过利用活性剂减阻时形成的平均涡尺度较大的流动环境来使微沟槽在更宽的雷诺数区间内仍有减阻性能,并使微沟槽的减阻尺寸在减阻溶液中得以扩大。然而,至今对两者的协同减阻研究很少,因此本文将对表面活性剂溶液与壁面纵向微沟槽的协同减阻性能进行实验研究,验证两者之间存在互补性的猜测,并分析两者的协同减阻机理。

1 实验设备及样品

1.1 实验装置

实验在如图1所示的封闭管路中进行。二维通道高10 mm、宽125 mm、总长3 m,由长1.5 m的测试段与充分发展段相连而成。充分发展段足够长以保证测试段内流体已进入充分发展湍流状态,可通过更换测试段来进行光滑或微沟槽通道的测试。实验采用两个并联的流量计(阀门控制)分别对大流量范围($>3 \text{ m}^3/\text{h}$)和小流量范围($<3 \text{ m}^3/\text{h}$)进行测量,测量精度分别为0.01、0.001 m^3/h 。测试段压降 ΔP 可利用差压变送器通过测量间距 $L=1.1 \text{ m}$ 的两个测压孔得到,差压变送器的量程为0~10 kPa,测量精度为5 Pa。流体温度可以通过位于储水箱内的精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 的6 kW加热器来控制。

1.2 实验样品

实验使用几乎不受水中金属离子影响的阳离子型表面活性剂CTAC(分子式为 $\text{C}_{16}\text{H}_{33}\text{N}(\text{CH}_3)_3\text{Cl}$,摩尔质量为320 g/mol),自来水用作溶剂。与

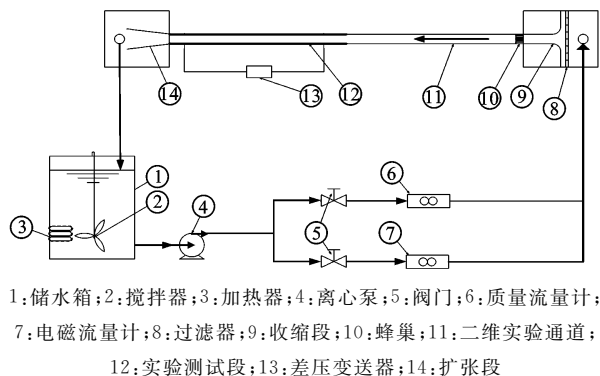


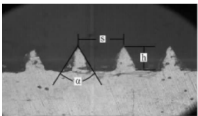
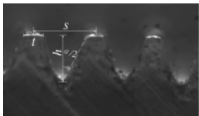
图1 实验系统示意图

CTAC等质量的NaSal(分子式为 $C_7H_5NaO_3$,摩尔质量为160.1 g/mol)被用作平衡离子与CTAC混合溶解于溶液中。表面活性剂溶液用CTAC的溶度作为标记。实验将在不同温度和雷诺数下对0.22 mmol/L的CTAC溶液进行减阻实验。

1.3 微沟槽

实验中所使用的微沟槽具体参数见表1。两个沟槽面均以半沟槽深度为基准面,组成高度 $H=10$ mm的二维通道。两种纵向微沟槽壁面均是通过铣削方式制成,因沟槽尺寸较小,因此在加工过程中会使微沟槽壁面出现不同的粗糙度。对于实验中所用的微沟槽来说,G1沟槽的表面加工质量较差,粗糙度较大,而G2沟槽通过更精细的操作,从而表面加工质量较好。

表1 实验中使用的两种尺寸微沟槽的参数

沟槽种类	G1 沟槽	G2 沟槽
形状		
夹角 $\alpha/(^\circ)$	53	54
高度 h/mm	0.4	0.2
间距 s/mm	0.7	0.3
尖峰宽度 t/mm	0	0.1

1.4 数据处理及测量不确定性分析

实验中的范宁摩擦系数 C_f 和减阻率 D_R 定义为

$$C_f = \frac{2\tau_w}{\rho U_b^2} = \frac{\Delta P H W}{\rho U_b^2 (H+W)L} \quad (1)$$

$$D_R = \frac{C_{f0} - C_{fi}}{C_{f0}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: τ_w 表示壁面剪切应力; ρ 为溶剂密度; W 为二维通道的宽度; U_b 为流体的平均速度; C_{f0} 表示光滑

壁面下的范宁摩擦系数; C_{fi} 表示在沟槽、表面活性剂及两者同时存在的情况下的摩擦系数。

为了更好地对本文实验数据及结论的正确性进行评估,先对 C_{fi} 和 D_R 的不确定度采用如下公式进行估算

$$\frac{\Delta C_{fi}}{C_{fi}} \approx \left(\left(\frac{\Delta \Delta P}{\Delta P} \right)^2 + \left(\frac{2\Delta U_b}{U_b} \right)^2 + \left[\frac{W\Delta_H}{H(H+W)} \right]^2 + \left[\frac{H\Delta_w}{W(H+W)} \right]^2 + \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} \right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (3)$$

$$\Delta D_R \approx \frac{\Delta C_{fi}}{C_f} \quad (4)$$

式中 Δ 表示各个相关物理量的不确定度。

2 结果与讨论

2.1 沟槽尺寸对减阻性能的影响

图2给出了20℃下0.22 mmol/L CTAC表面活性剂溶液分别在光滑通道、G1和G2两种壁面微沟槽通道内的减阻性能和减阻率曲线,也给出了水在这两种微沟槽通道内的性能曲线,并引入Dean拟合的光滑通道内的摩擦阻力曲线^[8]和Zakin等提出的表面活性剂最大减阻渐近线^[9]来作对比。由图2a可知,水在光滑通道内的实验结果与Dean曲线几乎完全重合,说明了本实验系统的可靠性。因此,为了方便地处理数据,下文中将用Dean曲线对应的摩擦系数 C_{D0} 来代替式(2)中的 C_{f0} 作为参照标准进行数据处理。从图2a还可以看出,G1沟槽在水中没有表现出减阻性能,而G2沟槽则表现出了约9%的最大减阻效果。两者的差异主要是因为G1沟槽的尺寸较大且表面粗糙度较大,大尺寸微沟槽无法有效约束近壁流向涡运动反而会增大摩擦面积和阻力,而G2微沟槽的尺寸小,能较好地约束流向涡,故展现出了较好的减阻性能。

从图2中可以看出,在光滑和两种微沟槽通道内表面活性剂都展现了非常优异的减阻性能,且在微沟槽通道内减阻性能更好, $D_{R_{\max}}$ 从66%(光滑通道)分别提高到71%(G1沟槽)和74%(G2沟槽)。从图2b的减阻率不确定度曲线可以看出,当雷诺数大于6 000以后,减阻率的不确定度小于3%,表明这种增强效果是真实有效的。这说明微沟槽在一定的条件下能增强表面活性剂的减阻性能,同时表面活性剂溶液也能放大微沟槽的减阻尺寸。这一发现可以为扩大微沟槽尺寸,从而降低沟槽制造成本和加工难度,提高微沟槽在实际工业领域中的应用价值提供新思路,尤其是在非牛顿流体的场合,如石油

和化工原料输送等。

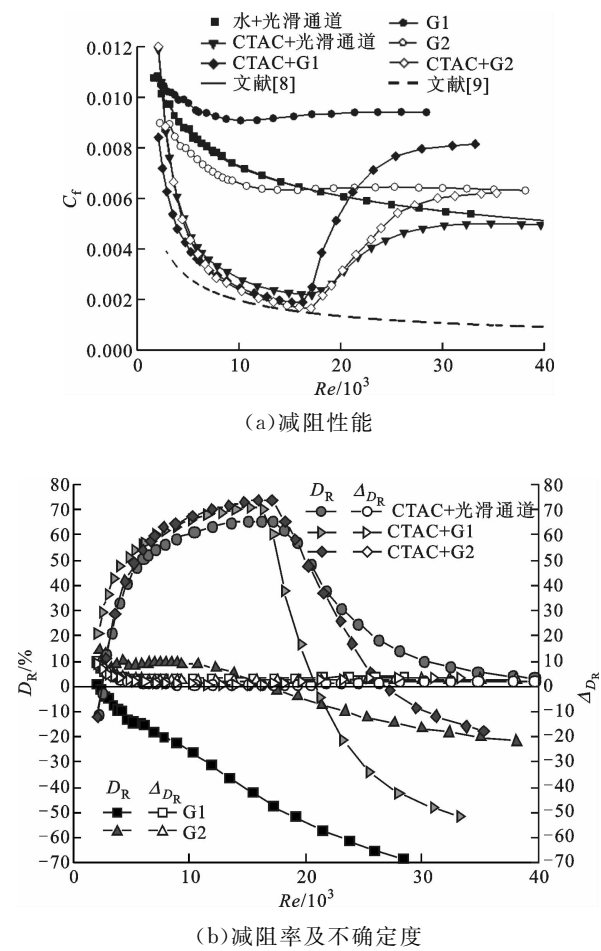


图 2 不同微沟槽下 0.22 mmol/L CTAC 的性能

2.2 温度对减阻性能的影响

图 3 为不同温度的 0.22 mmol/L CTAC 溶液分别在光滑通道和 G1、G2 两种沟槽通道下的减阻性能。从图 3 中可知,表面活性剂在 3 种通道内的临界雷诺数 Re_c (减阻率开始下降时对应的雷诺数) 均随温度升高先增后减。这反映了过大的剪切力致使表面活性剂分子形成的 SIS 发生破坏, Re_c 发生转折时所对应的温度称为临界温度 T_c 。当 $T < T_c$

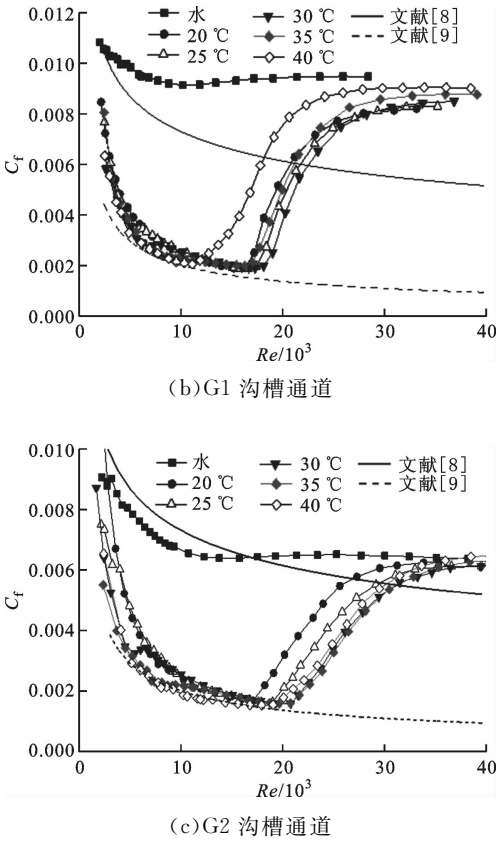
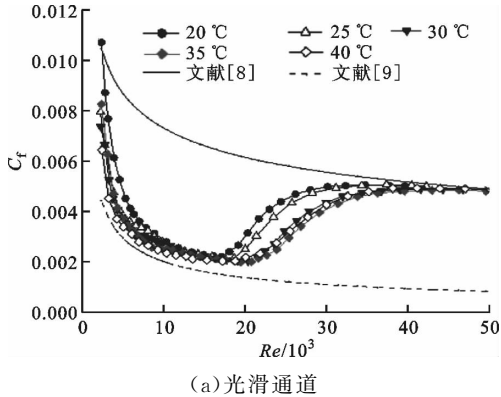


图 3 不同通道内 0.22 mmol/L CTAC 的减阻性能

时,温度升高增强了分子热运动,能促进 SIS 形成同时增强其抗剪切破坏能力,导致 Re_c 增大;当 $T > T_c$ 时,分子热运动过于剧烈反而会破坏 SIS,此时较小的剪切能就可破坏 SIS,故 Re_c 减小。图 4 给出了不同通道内 0.22 mmol/L CTAC 溶液的临界雷诺数与温度的关系。从图 4 可以看出,0.22 mmol/L CTAC 溶液在光滑通道内和 G2 通道内的 T_c 约为 35 °C,两者相差不大,然而 G1 通道内的 T_c 约为 30 °C,比光滑通道低了 5 °C 左右。两种沟槽通道内溶液的临界温度差别较大的主要原因仍然是这两种沟槽的尺寸不同造成的。G1 沟槽尺寸较大,会突入更

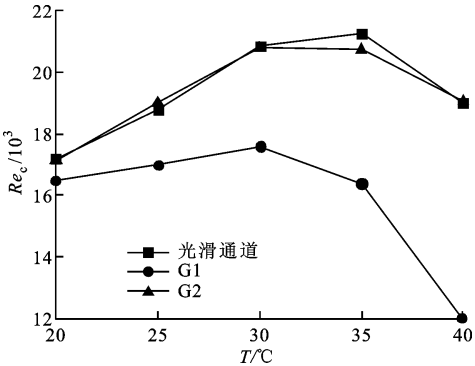


图 4 不同通道内 0.22 mmol/L CTAC 临界雷诺数与温度的关系

深层的流体内部,导致尖峰处有较高剪切力,能在较低温度下破坏 SIS 的动态平衡导致减阻性能下降,因此 G1 的临界温度较低,而 G2 沟槽对 SIS 的影响较小,故其临界温度与光滑通道相差不大。同理,临界雷诺数也有相似的结果。

2.3 表面活性剂在微沟槽通道内减阻增强机理分析

纵向微沟槽能约束近壁尺度匹配的流向涡的展向运动并防止大流向涡侵入槽谷,使槽谷内流速、湍流脉动和剪切应力降低^[10-11],该现象称之为沟槽的“正约束作用”,其对应一个最匹配的涡尺度,而尺度过大或过小的流向涡均会使“正约束作用”削弱,且当微沟槽无法有效防止绝大多数流向涡侵入槽谷时,则会起到增阻效果,此时沟槽表现为“负约束作用”。由此可见,微沟槽的“约束作用”视情况可正可负。同时,微沟槽尖峰突入较深层流体内,受较高速流体冲刷,尖峰附近具有较高的剪切应力^[12-14],对减阻不利,我们称之为沟槽的“第一尖峰作用”。在表面活性剂溶液中,在临界雷诺数以前,沟槽尖峰附近较高的剪切应力对 SIS 的形成会起促进效果,为正作用;当超过临界雷诺数后,则会加速 SIS 的破坏,为负作用。我们将这种沟槽尖峰对减阻溶液的附加作用称为“第二尖峰作用”,其也可正可负,在水中是没有这种作用效果的。以上 3 种作用(约束作用、第一和第二尖峰作用)可能是影响表面活性剂溶液在微沟槽通道内展现减阻强化性能的主要因素。因此,可以用下式来描述表面活性剂的减阻强化性能 D_{RE}

$$D_{RE} \xrightleftharpoons[\text{相互竞争}]{\text{主要因素}} \begin{cases} \text{第一尖峰作用} & (-) \\ \text{第二尖峰作用} & (+ \text{ or } -) \\ \text{约束作用} & (+ \text{ or } -) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $D_{RE}(=D_{Rgs}-D_{Rs})$ 表示沟槽通道内表面活性剂溶液的减阻强化性能; D_{Rgs} 和 D_{Rs} 分别表示表面活性剂溶液在微沟槽通道和光滑通道内的减阻率;“+”或“-”号分别表示这种作用对于减阻是起到促进的或抑制的作用效果。本文的研究只是初步分析这 3 种主要作用对表面活性剂溶液在微沟槽通道内的减阻强化性能的可能影响。

为了分析上述 3 个主要因素对表面活性剂溶液在微沟槽通道中减阻强化性能的影响,用 20 °C 下 0.22 mmol/L CTAC 溶液在 G2 通道内的减阻性能来进行更直观的分析,如图 5 所示。

从图 2b 中的减阻率不确定度曲线可知,当 $Re < 6\,000$ 时,因流速较小,测量误差较大,且接近过渡区时减阻性能曲线变化大,故本文主要针对 $Re >$

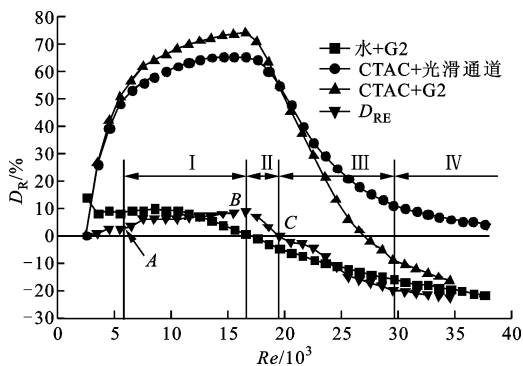


图 5 20 °C 下 0.22 mmol/L CTAC 在 G2 通道内的减阻性能

6 000 时的曲线变化进行分析。如图 5 所示,点 A 为分析的起点,也是阶段 I 的起点, D_{RE} 曲线大致可以分为 4 个阶段。图 6 给出了 D_{RE} 曲线各阶段可能的涡与微沟槽尺寸间的对比,用来作为辅助分析。

(1)点 A:①图 5 中 CTAC 曲线在点 A 对应位置的减阻率处于增加状态,据早期研究,溶液此时表现为剪切增稠状态,表观黏度增加,比水大^[15],故点 A 具有较强的负的第一尖峰作用;②CTAC 曲线在点 A 对应位置具有较大斜率,意味着雷诺数的增大对减阻率的影响相对较大,对 SIS 的附加作用较强,即该点处具有较强的第二尖峰作用,又因此时 $Re < Re_c$,故点 A 处第二尖峰作用为正;③因 CTAC 曲线在点 A 位置的减阻效果已经很显著了($D_R = 60\%$),此时小尺度涡受到溶液的抑制作用较强,使得近壁流向涡尺度比 G2 沟槽的开口要大,且数量较多,如图 6 所示,故点 A 处为较弱的正约束作用,因此最终使得点 A 处具有较小的 D_{RE} 值。

(2)阶段 I:类似点 A 的分析,①由图 5 可知,阶段 I 溶液仍表现为剪切增稠状态,故雷诺数的增大不仅使溶液表观黏度逐渐增大,也使沟槽尖峰上方的速度梯度增大,故第一尖峰作用不断增强;②该阶段 $Re < Re_c$,此时第二尖峰作用为正,但此阶段 CTAC 曲线斜率变缓,故其正作用逐渐变弱;③近壁流向涡尺度随雷诺数增加而逐渐减小,尺度匹配的涡的数量渐增且占据数量优势(如图 6 所示),故正约束作用逐渐增强,并趋于主导地位,从而补偿了因负的第一尖峰作用增强产生的不利影响,最终使得阶段 I 的 D_{RE} 曲线逐渐增大至点 B,正约束作用效果于点 B 处达到最大。

(3)阶段 II:①从图 5 中可知,该阶段的 CTAC 曲线减阻率随雷诺数增大迅速减小,说明溶液表现为剪切稀化状态,表观黏度变小但仍然比水大,但因

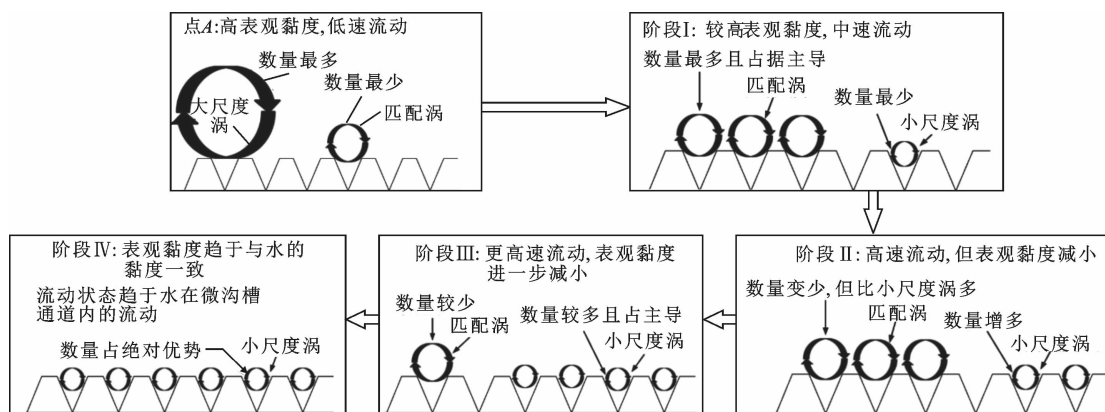


图6 各阶段近壁流向涡的发展变化

此时流速很高,沟槽尖峰处的速度梯度很大,故第一尖峰作用依然是不断增强的;②此阶段第二尖峰作用因 $Re > Re_c$ 而转变为逐渐增大的负作用;③该阶段的 SIS 随 Re 的增大逐渐被破坏,表面活性剂对小涡的抑制作用逐渐变弱,近壁小尺度涡数量逐渐增多,但尺度匹配的涡的数量仍占优,故此阶段的约束作用效果在不断减弱,但仍为正,最终使得阶段 II 的 D_{RE} 曲线逐渐减小至 0(点 C 处)。

(4)阶段 III:该阶段对两种尖峰作用的分析与阶段 II 相同,但因雷诺数更大,小尺度涡已占主导,故阶段 III 表现出负的约束作用,且负效果不断增强,如图 6 所示,最终使得阶段 III 的 D_{RE} 值变成负数,并不断变小,最后有可能低于水在微沟槽通道内的性能曲线(即“水+G2”曲线)。

(5)阶段 IV:①从图 5 中可知,该阶段的 CTAC 曲线减阻率很小,溶液物性随 Re 的增大逐渐趋于水的物性,故第一尖峰作用随雷诺数增大而逐渐增强,但却逐渐向相同 Re 下的沟槽在水中表现的作用效果趋近;②该阶段 CTAC 曲线变化渐缓,故第二尖峰作用的负效果逐渐减弱,并随着溶液物性趋于水的物性而最终消失;③同理,约束作用的负作用也逐渐趋于沟槽在水中的效果,最终使得阶段 IV 中的 D_{RE} 曲线不断趋近“水+G2”曲线。

3 结 论

本文通过对已有的表面活性剂和微沟槽的减阻机理进行分析,推测两者减阻机理存在互补性,并通过实验得到了证实,所得主要结论如下。

(1)微沟槽在水中的减阻主要归因于其自身对流向涡的“约束作用”及沟槽尖峰提供的“尖峰作用”这两个主要因素的相互竞争的结果,而表面活性减阻剂在微沟槽通道内的减阻增强效果则是由微沟槽

本身具有的“第一尖峰作用”和“约束作用”,以及沟槽尖峰对表面活性剂溶液提供的附加的“第二尖峰作用”3 个主要因素相互竞争的结果。

(2)表面活性剂溶液能放大微沟槽的减阻尺寸,即在水中已失去减阻性能的尺寸较大的 G1 微沟槽在表面活性减阻剂溶液中仍能展现减阻性能,微沟槽减阻尺寸的扩大能降低制造成本和加工难度,提高了微沟槽在实际应用中的潜在价值。

(3)本文实验中,表面活性剂溶液在 G1 通道内的临界温度和临界雷诺数比在 G2 通道内的要小,而表面活性剂溶液在 G2 通道内的临界温度和临界雷诺数与其在光滑通道内基本相同。

参考文献:

- [1] GASLJEVIC K, HOYER K, MATTHYS E F. Temporary degradation and recovery of drag-reducing surfactant solutions [J]. Journal of Rheology, 2007, 51 (4): 645-667.
- [2] XU N, WEI J. Time-dependent shear-induced nonlinear viscosity effects in dilute CTAC/NaSal solutions: mechanism analyses [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014(2): 1-8.
- [3] XU N, WEI J, KAWAGUCHI Y. Dynamic and energy analysis on the viscosity transitions with increasing temperature under shear for dilute CTAC surfactant solutions [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, 55(8): 2279-2286.
- [4] KAWAGUCHI Y, SEGAWA T, FENG Z, et al. Experimental study on drag-reducing channel flow with surfactant additives: spatial structure of turbulence investigated by PIV system [J]. Int J Heat Fluid Flow, 2002, 23: 700-709.
- [5] YANG S Q, LI S, TIAN H P, et al. Tomographic PIV investigation on coherent vortex structures over

- shark-skin-inspired drag-reducing riblets [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2016, 32(2): 284-294.
- [6] SASAMORI M, IIHAMA O, MAMORI H, et al. Parametric study on a sinusoidal riblet for drag reduction by direct numerical simulation [J]. *Flow Turbulence & Combustion*, 2017(2): 1-23.
- [7] CHAMORRO L P, ARNDT R E A, SOTIROPOULOS F. Drag reduction of large wind turbine blades through riblets: evaluation of riblet geometry and application strategies [J]. *Renew Energy*, 2013, 50: 1095-1105.
- [8] DEAN R B. Reynolds number dependence of skin friction and other bulk flow variables in two-dimensional rectangular duct flow [J]. *J Fluids Eng*, 1978, 100: 215-223.
- [9] ZAKIN J L, MYSKA J, CHARA Z. New limiting drag reduction and velocity profile asymptotes for non-polymeric additives systems [J]. *AIChE Journal*, 1996, 42(12): 3544.
- [10] EL-SAMNI O A, CHUN H H, YOON H S. Drag reduction of turbulent flow over thin rectangular riblets [J]. *Int J Eng Sci*, 2007, 45(2): 436-454.
- [11] HANN N J, JAIMAN R K, LIM T T. Direct numerical simulation of geometric effects on turbulent flows over riblets [C/OL]//7th AIAA Flow Control Conference, June 2014. [2018-07-15]. DOI: 10.2514/6.2014-2649.
- [12] CHOI H, MOIN P, KIM J. Direct numerical simulation of turbulent flow over riblets [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1993, 255(1): 503-539.
- [13] ZHANG D Y, LUO Y H, LI X, et al. Numerical simulation and experimental study of drag-reducing surface of a real shark skin [J]. *J Hydrodyn*, 2011, 23(2): 204-211.
- [14] MARTIN S, BHUSHAN B. Fluid flow analysis of continuous and segmented riblet structures [J]. *RSC Adv*, 2016, 6(13): 10962-10978.
- [15] LIN Z, ZHENG Y, TALMON Y, et al. Comparison of the effects of methyl-and chloro-substituted salicylate counterions on drag reduction and rheological behavior and micellar formation of a cationic surfactant [J]. *Rheologica Acta*, 2016, 55(2): 117-123.

[本刊相关文献链接]

- 钱晨, 杨从新. 高压端出流条件对多级泵径向力的影响. 2019, 53(1): 106-113. [doi:10.7652/xjtuxb201901014]
- 王青会, 刘冬洁, 魏进家. 阳离子型表面活性剂与非离子型聚合物相互作用减阻研究. 2018, 52(1): 26-32. [doi:10.7652/xjtuxb201801005]
- 刘璐萱, 李志刚, 李军. 进口端壁不重合对跨声速透平叶栅端壁流动和传热特性影响的研究. 2018, 52(11): 37-44. [doi:10.7652/xjtuxb201811006]
- 高炎, 晏鑫, 李军. 尾缘开缝透平叶片内流动传热特性研究. 2018, 52(10): 31-40. [doi:10.7652/xjtuxb201810005]
- 邵翔宇, 蒲亮, 雷刚, 等. 液氢泄漏事故中氢气可燃云团的扩散规律研究. 2018, 52(9): 102-108. [doi:10.7652/xjtuxb201809014]
- 魏铭, 熊仲营, 刘小民, 等. 集流器结构对多翼离心风机气动性能的影响. 2018, 52(9): 109-117. [doi:10.7652/xjtuxb201809015]
- 张垚垣, 李志刚, 宋立明, 等. 槽缝射流旋流比和密度比对涡轮端壁冷却和吸力面泛冷性能的影响. 2018, 52(9): 95-101. [doi:10.7652/xjtuxb201809013]
- 郭迁, 韦静思, 武珊, 等. 发动机水套缸垫水孔局部参数化优化设计. 2018, 52(8): 154-160. [doi:10.7652/xjtuxb201808023]
- 梁雪琪, 罗慧强, 吴一宁, 等. 地铁用电机传热特性数值模拟与实验研究. 2018, 52(9): 148-154. [doi:10.7652/xjtuxb201809020]
- 吴凡, 杜长河, 王杰枫, 等. 周向喷嘴数对旋流冷却流动传热特性的影响. 2018, 52(7): 94-100. [doi:10.7652/xjtuxb201807014]
- 庾明达, 徐自力, 范志飞, 等. 核电超长末叶气动稳定性的流固耦合数值研究. 2018, 52(7): 101-107. [doi:10.7652/xjtuxb201807015]
- 王振林, 李祥晟, 庄士超, 等. 旋进涡核与火焰面耦合作用对燃烧稳定性影响的数值研究. 2018, 52(7): 60-67. [doi:10.7652/xjtuxb201807009]
- 王梦豪, 吴立明, 刘小民, 等. 采用仿鸭翼叶片降低空调用离心风机气动噪声的研究. 2018, 52(6): 55-61. [doi:10.7652/xjtuxb201806009]
- 李晓良, 徐浩, 延卫. 十二烷基二甲基甜菜碱对 Ti/PbO₂ 电极的改性研究. 2017, 51(5): 1-8. [doi:10.7652/xjtuxb201705001]

(编辑 荆树蓉)