

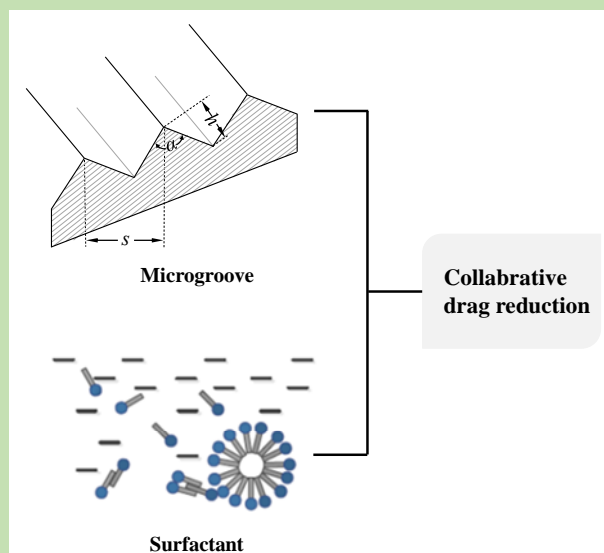
## Coupling effect of microgroove and surfactant on turbulent drag reduction in a pipe flow

Entian LI\*, Xiang HU, Lianghui GUO, Yang LIU, Wen LIU, Xiaofang LÜ

School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou, Jiangsu 213016, China

**Abstract:** At present, there are still few studies on the collaborative drag reduction of microgroove and surfactant in pipelines, there is still insufficient understanding of the mechanism of synergistic drag reduction between the two. In this work, the pressure drop was tested to compare the drag reduction performance of the grooved pipe on water and surfactant solution, and the turbulent structure of the flow field was analyzed by PIV system to explore the mechanism of coupling drag reduction. The microgrooves were longitudinal V-shaped grooves with three different structures, and cetyltrimethyl ammonium chloride (CTAC) was used as surfactant, and sodium salicylate (NaSal) was used as adjoint ion. The results showed that in a certain range of Reynolds number, both the wall microgroove and the surfactant solution had a drag reducing effect. The highest resistance reduction rate of water and surfactant were 6.72% and 7.12%, the highest drag reduction rate of surfactant solution was 45.14%, and the highest drag reduction ratio of coupling drag reduction was 48.26%. The drag reduction performance of the surfactant was closely related to the shear induced structure (SIS). When the critical Reynolds number was exceeded, the high shear force at the tip of the trench aggravated the damage to the SIS. The drag reduction of the microgroove on the surfactant mainly occurred in the near-wall region. By raising the average flow velocity in the near-wall region, reducing the Reynolds shear stress, and suppressing the pulsation strength of the phase velocity, the surfactant solution was provided more stable and orderly. Surfactants delayed the evolution of turbulent eddies and expanded the effective range of microgroove drag reduction. The effect of the microgroove on the drag reduction of the surfactant further improved the drag reduction rate and provided a basis for the combined drag reduction of the microgroove and the surfactant.

**Key words:** microgroove; surfactant; drag reduction rate; flow field characteristics; collaborative drag reduction



收稿: 2019-01-14, 修回: 2019-03-23, 网络发表: 2019-04-22, Received: 2019-01-14, Revised: 2019-03-23, Published online: 2019-04-22  
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51804046); 国家自然科学基金青年基金资助项目(编号: 51706024); 2017 年江苏省高校中青年骨干教师境外研修计划资助项目; 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(编号: KYCX17\_2077)  
作者简介: 李恩田(1977-), 男, 湖南省南县人, 硕士, 副教授, 油气储运工程, E-mail: let@cczu.cn.

**引用格式:** 李恩田, 胡祥, 郭良辉, 等. 壁面微沟槽与表面活性剂耦合对管道中湍流减阻特性的影响. 过程工程学报, 2019, 19(5): 959-966.  
Li E T, Hu X, Guo L H, et al. Coupling effect of microgroove and surfactant on turbulent drag reduction in a pipe flow (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2019, 19(5): 959-966. DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.219112.

# 壁面微沟槽与表面活性剂耦合对管道中湍流减阻特性的影响

李恩田\*, 胡 祥, 郭良辉, 刘 洋, 刘 雯, 吕晓方

常州大学石油工程学院, 江苏 常州 213016

**摘 要:** 通过矩形管道压降实验研究了壁面微沟槽和表面活性剂的减阻性能及联合减阻的增益效果, 用粒子成像测速仪分析了流场特性。实验所用的微沟槽为 3 种不同结构的顺流向 V 形沟槽, 表面活性剂为十六烷基三甲基氯化胺(CTAC), 水杨酸钠(NaSal)作为补偿离子。结果表明, 壁面微沟槽和表面活性剂溶液均有减阻效果, 二者耦合后减阻率进一步提升, 最高减阻率为 48.26%。微沟槽的减阻性能主要作用在近壁区, 通过影响边界层平均流速、速度脉动强度和涡结构, 减少表面活性剂的湍动能损耗。当超过表面活性剂的临界雷诺数后, 沟槽尖端的高剪切力会加剧胶束结构分解。表面活性剂能抑制湍流涡的演变, 扩大微沟槽有效减阻的雷诺数范围。

**关键词:** 壁面微结构; 表面活性剂; 减阻率; 流场特性; 耦合减阻

**中图分类号:** O357.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2019)05-0959-08

## 1 前 言

壁面微沟槽在不改变流体特性的情况下具有长期稳定的减阻效果, 且不污染环境。减阻添加剂因其生产工艺简便、性能高效等特征<sup>[1]</sup>, 广受国内外关注。

壁面微沟槽减阻技术起源于鲨鱼皮肤的仿生研究, Walsh 等<sup>[2,3]</sup>对鲨鱼表皮微结构进行简化, 研究了顺流向的 V、U 和 L 形微沟槽的减阻特性, 结果表明, 对称 V 形沟槽减阻性能最优, 其无量纲高度  $h^+$  和无量纲间距  $S^+$  均接近 15 时减阻性能最好, 减阻率为 8%。Bechert 等<sup>[4]</sup>和 Ibrahim 等<sup>[5]</sup>认为沟槽产生的二次涡可削弱沟槽上方流向涡的强度。Choi 等<sup>[6]</sup>和 Peet 等<sup>[7]</sup>证实沟槽通过抑制流向涡沿展向的扫掠运动可减小沟槽表面的摩擦阻力。

常用的减阻添加剂主要有高分子聚合物和表面活性剂, 而表面活性剂具有机械降解可逆、耐高温等优势, 更适用于密闭循环系统<sup>[8]</sup>。Hellsten<sup>[9]</sup>指出表面活性剂在剪切力作用下会形成胶束结构。Kawaguchi 等<sup>[10]</sup>发现剪切力增大时表面活性剂稀溶液内部会形成剪切诱导结构(SIS), 表观黏度随剪切应力的上升突然增大, 称为剪切增稠现象。Rózański 等<sup>[11]</sup>认为表面活性剂形成的剪切诱导结构能抑制湍流涡形成, 减少小涡数量, 使溶液内部处于大涡环境。

Huang 等<sup>[12]</sup>进行了二维管道内表面活性剂与沟槽耦合减阻实验, 发现表面活性剂溶液的减阻性能在纵向微沟槽通道内可进一步强化, 并放大了纵向微沟槽在表面活性剂溶液中的最优减阻尺寸, 为扩大两者的实际应用价值提供了思路。目前对沟槽与表面活性剂在管道中耦合减阻的研究较少, 对两者协同减阻的机理没有全面的认识。本工作通过压降实验, 对比了沟槽管道对水和

表面活性剂溶液的减阻性能, 用粒子成像测速(PIV)系统分析了流场的湍流结构, 探究了壁面微沟槽与表面活性剂的耦合减阻机理, 为微沟槽与表面活性剂耦合减阻提供参考依据。

## 2 实 验

### 2.1 压降测试装置

实验装置为水循环系统, 如图 1 所示, 由水箱、测试管段和压力测量系统组成。其中水箱为恒温系统, 维持流体温度在  $(25 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 。实验管段为三维矩形管道, 材料为透明有机玻璃, 测试段长 2800 mm, 方管横截面尺寸为 100 mm×60 mm。压力测量系统包括离心泵、变频器、压差计和电磁流量计, 变频器可调节流体流量, 通过电磁流量计测量循环管路的流量, 用差压变送器测定不同流量下测试管段的压降, 压差计使用前需调零。实验装置中各原件的参数见表 1。

### 2.2 PIV 实验系统

实验所用 PIV 系统由北京立方天地公司提供, 包括 KSP200 型 Nd:YAG 双脉冲激光发射器、IPX-4M15 型 CCD 高速相机(分辨率 1549×1697 pixels)、MicroPulse 810 型同步控制器和图像处理软件。图像处理软件采用 MicroVec 软件采集图像、Tecplot 软件分析流场。

PIV 硬件布置见图 2, 拍摄过程中激光片光源位于矩形管道流向轴线上方, 调节光源使片光平面与  $x$ - $y$  平面重合, CCD 相机固定在三维移动台上, 镜头平面平行于片光平面, 通过外部触发一次捕捉两帧图像, 触发信号由同步控制器提供, 保持与脉冲激光器完全同步。在光源与拍摄截面之间增加滤光镜, 保证打向拍摄界面的光是较薄的片光源, 并对拍摄段底部采用黑漆处理, 以解决近壁面的反光问题。示踪粒子(粒径 5  $\mu\text{m}$ )有良好

的跟随性和光散射性,可跟随流体流动。流场计算范围约为  $100\text{ mm}\times60\text{ mm}$  ( $x\times y$ ),实验段所拍摄的图片粒子清晰、分布均匀,对图片进行互相关计算,保证向量修正率不高于 4%,获得精确的切面内速度矢量分布。流场瞬时速度是判读区内的粒子在连续两张图片的位移与时间间隔的比值,即  $v=\Delta x/\Delta t$ ,进一步处理可得涡量、速度脉动等流场特性参数分布。

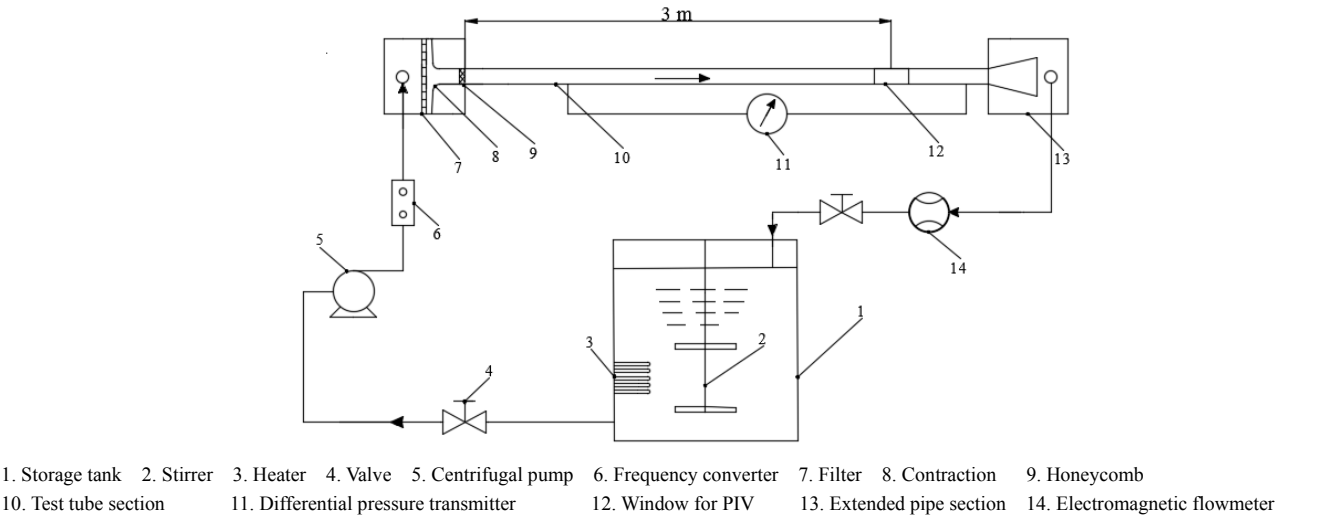


图 1 实验装置示意图  
Fig.1 Schematic of experimental system

表 1 实验装置中各原件的参数  
Table 1 Parameters of each original in the experimental device

Device	Model	Range	Accuracy
Centrifugal pump	ZS80-65-160/15.0SSC	0~20 m	$\pm 0.1\text{ m}$
Electromagnetic flowmeter	LDB-80	0~40 m <sup>3</sup> /h (0~1.85 m/s)	$\pm 0.01\text{ m}^3$
Differential pressure transmitter	TE2000	0~10 kPa	$\pm 0.1\text{ Pa}$

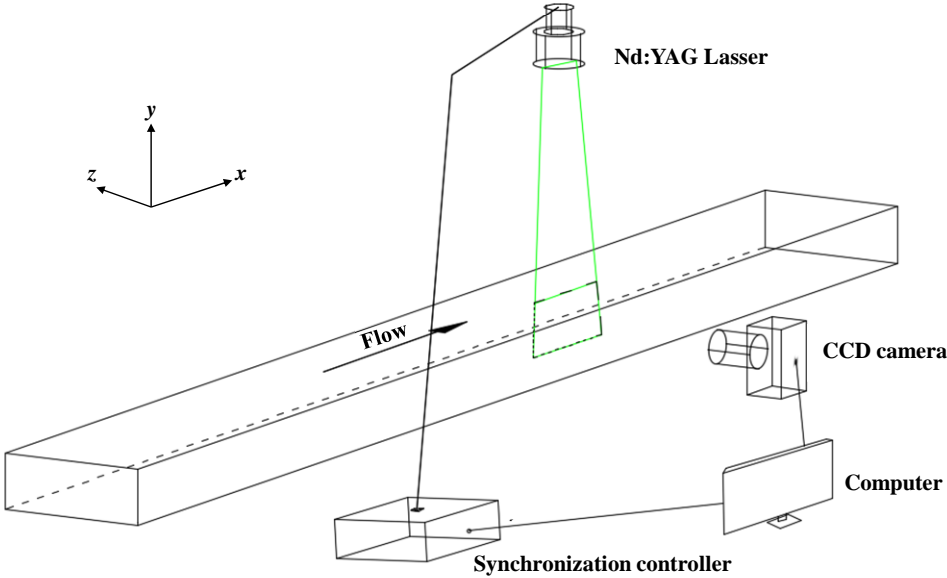


图 2 PIV 系统布置  
Fig.2 Schematic of PIV arrangement

2.3 壁面微沟槽

实验所用 3 种尺寸的 V 型微沟槽板( $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$ )是用激光在有机玻璃平板上雕刻而成,槽面经打磨粗糙度接近于光滑平板,微沟槽平板可在管道底面装卸。沟槽顺

流向布置,微沟槽结构见图 3,尺寸见表 2,其中  $h$ ,  $s$ ,  $\alpha$  分别代表微沟槽的槽深、槽间距和槽顶角。

2.4 表面活性剂

十六烷基三甲基氯化胺(CTAC)作为试剂,按质量

比 1:1 加水杨酸钠(NaSal)作为酸性补偿离子,使纤维状聚合结构更稳定。表面活性溶液易有气泡,不利于 PIV 对流场的测量,需多次循环、静置逐渐消除流体中的气泡<sup>[13]</sup>。溶液浓度较高时,气泡难以清除,因此表面活性剂浓度为  $100 \times 10^{-6}\%$ , 溶液入口温度为  $25^\circ\text{C}$ 。

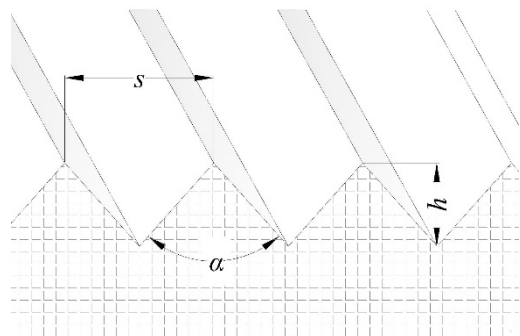


图 3 微沟槽示意图

Fig.3 Schematic diagram of microgroove

表 2 微沟槽尺寸参数

Table 2 Dimension parameter of microgrooves			
Case	$h/\text{mm}$	$s/\text{mm}$	$\alpha/^\circ$
G <sub>1</sub>	0.3	1	118
G <sub>2</sub>	0.5	1	90
G <sub>3</sub>	0.7	1	71

## 2.5 数据处理方法

计算范宁摩擦系数  $C_f$ :

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

式中,  $\tau_w$  为切应力,  $\Delta p$  为测试管段压降(Pa),  $H$ ,  $W$  和  $L$  分别为测试管段宽度、高度和长度(mm),  $\rho$  为流体密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $U$  为平均流速( $\text{m}/\text{s}$ )。

定义减阻率  $\text{DR}(\%)$ ,

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

式中,  $C_{f0}$  为水在光滑管道的范宁摩擦系数,  $C_{fi}$  为表面活性剂溶液在光滑管道、水在微沟槽管道、表面活性剂溶液在微沟槽管道的范宁摩擦系数。

计算雷诺数  $Re$ :

$$Re = \frac{UD_h}{\nu} \quad (3)$$

式中,  $D_h$  为矩形管道水力直径(m),  $\nu$  为运动粘性系数( $\text{m}^2/\text{s}$ )。

定义微沟槽的无量纲槽深  $h^+$ :

$$h^+ = \frac{su^*}{\nu} \quad (4)$$

式中,  $u^*$  为壁面摩擦速度( $\text{m}/\text{s}$ ), 计算式如下:

$$u^* = U \sqrt{\frac{C_f}{2}} \quad (5)$$

## 3 结果与讨论

### 3.1 实验误差

用流量计控制流量,测定特定流量下的压差。测量过程中压差的波动范围约为  $\pm 0.2 \text{ Pa}$ , 换算成范宁摩擦系数的误差约为  $0 \sim 1\%$ 。为降低压降误差对分析结果的影响,待流量稳定后连续记录 60 组数据,取平均值,获取更准确的压差,并通过多次实验反复验证,保证实验结果的可靠性。微沟槽槽面经抛光打磨,表面粗糙度  $R_a < 0.2 \mu\text{m}$ , 接近于光滑平板,在压降实验中可忽略壁面粗糙度对阻力的影响。

#### 3.1.1 微沟槽减阻

目前矩形管道的理论摩擦系数计算公式大多仅适用于工程上计算,Dean<sup>[14]</sup>给出水在二维槽道的范宁摩擦计算公式,可作为实验参照。图 4 为测量的  $25^\circ\text{C}$  下水在光滑壁面管道( $G_0$ )和 3 种微沟槽管道( $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$ )中的范宁摩擦系数随雷诺数的变化,并与 Dean 线进行对比。从图可看出,测量值与 Dean 线的变化趋势基本一致,但明显处于下方,原因是实验所用管道为矩形管道,管道中水所受阻力低于 Dean 线所用的二维管道。通过压降实验得到的范宁摩擦系数反映了微沟槽壁面在矩形管道内对流动的减阻性能。在雷诺数范围内  $G_1$  管道的范宁摩擦系数变化基本与水滑管道重合,难以看出明显的减阻效果,表明微沟槽的减阻性能与其尺寸密切相关。 $G_2$  和  $G_3$  管道在  $Re < 20000$  时,范宁摩擦系数与光滑管道重合,  $Re \geq 20000$  时,范宁摩擦系数下降速度逐渐高于光滑管道,并在一定范围内完全处于光滑管道下方,呈现明显的减阻效果,  $Re \geq 85000$  时,再次与光滑管道重合,失去减阻效果。

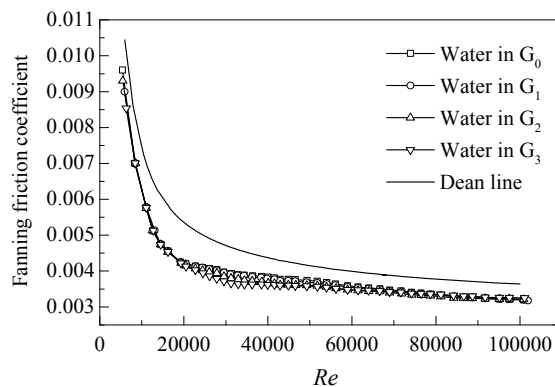


图 4 光滑管道与微沟槽管道的范宁摩擦系数曲线

Fig.4 Fanning friction coefficient curve of smooth and microgroove pipe

为研究微沟槽结构与对减阻性能的影响,对槽深作无量纲处理。图5为无量纲槽深 $h^+$ 与减阻率的关系。由图可知,在一定 $h^+$ 范围内( $G_1$ 为5~16,  $G_2$ 为5~27,  $G_3$ 为6~30),微沟槽具有减阻效果,超出该范围则没有。3种沟槽结构 $G_3$ 管道减阻效果最好, $G_1$ 管道最差,无量纲槽深 $h^+ \approx 10.5$ 时, $G_1$ 管道达最大减阻率为1.35%, $h^+ \approx 13$ 时, $G_2$ 和 $G_3$ 管道分别达最大减阻率4.35%和6.72%。

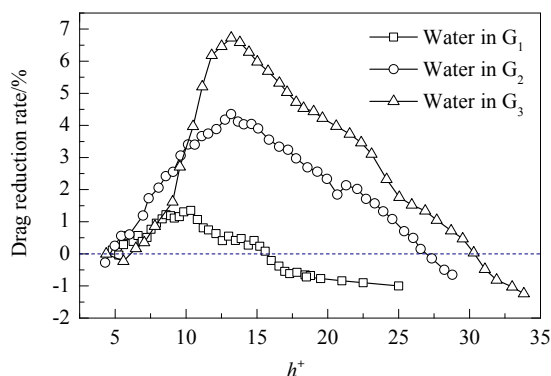


图5 不同结构的微沟槽减阻率

Fig. 5 Drag reduction rate of microgrooves with different structures

Walsh<sup>[3]</sup>通过压降实验所测V形沟槽板的最高减阻率为8%,大于本实验所测结果,原因可能是本实验选用的微沟槽尺寸和管道尺寸与其有所差别。微沟槽顶角 $\alpha$ 越接近60°,减阻效果越好,这与Rohr<sup>[15]</sup>的研究结果相符。壁面微沟槽结构对沟槽尖端与沟谷的动量交换具有抑制作用及约束效应,而沟槽尖端产生的高剪切力会导致湍流脉动增强及尖端效应<sup>[16]</sup>。在一定 $h^+$ 范围内,壁面微沟槽约束效应的减阻效果大于尖端效应,使 $G_2$ 和 $G_3$ 管道在一定雷诺数范围内具有减阻效果,而 $G_1$ 管道因其沟槽顶角过大,产生的约束效应与尖端效应微弱,减阻性能不佳。

### 3.1.2 表面活性剂与微沟槽联合减阻

图6为水在光滑管道及表面活性剂溶液在不同管道中的范宁摩擦系数。光滑管道中,100×10<sup>-6</sup>%浓度下表面活性剂的临界雷诺数 $Re_c$ 约为67000,雷诺数低于该值时,范宁摩擦系数下降;接近 $Re_c$ 时,范宁摩擦系数达最低值;超过 $Re_c$ 后,范宁摩擦系数快速上升,逐渐与水重合。沟槽管道中表面活性剂溶液的范宁摩擦系数变化趋势与光滑管道相同,但在一定雷诺数范围内,范宁摩擦系数较光滑管道更低,体现出沟槽面对表面活性剂溶液的减阻增益效果。

图7为表面活性剂溶液在不同管道中的减阻率。表面活性剂溶液在 $G_0$ 和 $G_1$ 管道中的 $Re_c \approx 66000$ ,最高减阻率分别为45.14%和43.82%。在 $G_2$ 和 $G_3$ 管道中,

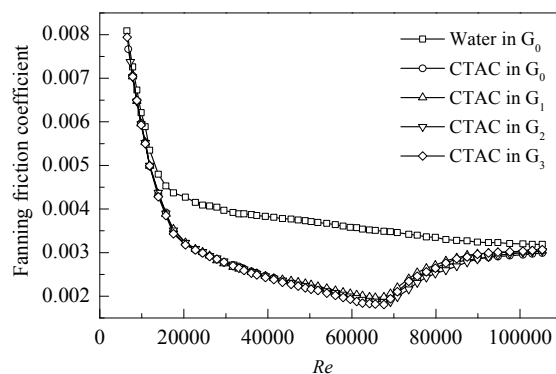


图6 水在光滑管道( $G_0$ )和CTAC溶液在不同微沟槽中的范宁摩擦系数

Fig. 6 Fanning friction coefficient of water in smooth pipe and CTAC solution in microgrooves

$Re_c \approx 68000$ 时,最高减阻率分别为46.57%和48.26%。由图可看出,表面活性剂在减阻中起主导作用,添加少量表面活性剂即产生明显的减阻效果, $G_2$ 和 $G_3$ 管道中的减阻率明显高于光滑管道中,表明沟槽管道不但对水有减阻效果,添加表面活性剂仍有较强的减阻性能。

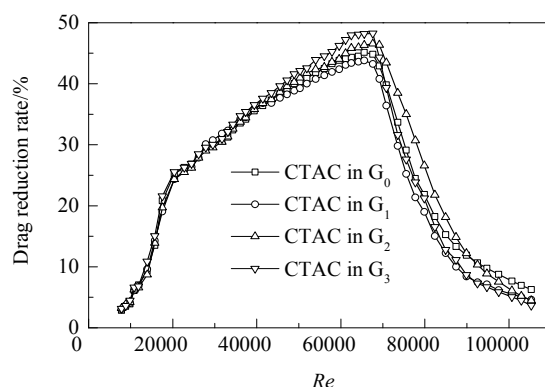


图7 CTAC溶液在不同管道中的减阻率

Fig. 7 Drag reduction rate of CTAC solution in different pipes

为分析微沟槽对表面活性剂溶液的减阻提升效果,以表面活性剂在光滑管道流动阻力为基准,图8给出了沟槽管道对表面活性剂溶液减阻率的提升值,对比表面活性剂在光滑管道的流动, $G_2$ 和 $G_3$ 管道在一定雷诺数范围内有明显的减阻效果, $G_1$ 管道却为增阻效果。表明微沟槽对表面活性剂溶液的减阻效果与其尺寸有关。与图5不同, $G_2$ 管道的最高减阻率为7.12%,高于 $G_3$ 管道。 $G_3$ 管道的高减阻区 $Re=60000 \sim 70000$ ,也是表面活性剂的高减阻区,导致 $G_3$ 管道与100×10<sup>-6</sup>%浓度下表面活性剂的耦合减阻效果更佳。当溶液雷诺数较高时, $G_2$ 和 $G_3$ 管道的减阻率均低于0,原因可能是微沟槽的减阻性能与湍流结构相关。高雷诺数下,近壁区的涡尺度小于沟槽尺度,微沟槽失去减阻效果,而沟槽尖端的高剪

切力破坏了表面活性剂的剪切诱导结构,使沟槽呈增阻效果。 $G_3$ 管道的减阻率先于 $G_2$ 管道下降,且下降速度更快,表明不同结构的微沟槽对SIS的破坏能力不同,可能与沟槽顶角角度相关。

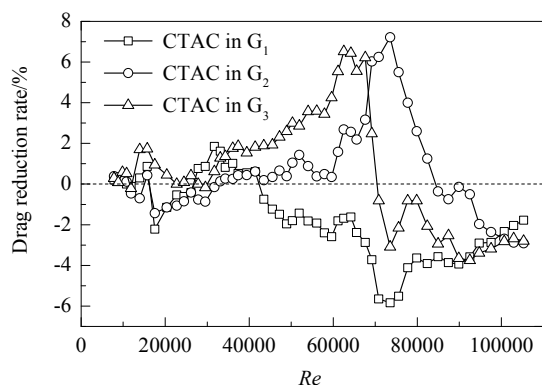


图8 沟槽管道对CTAC溶液的减阻率

Fig.8 Drag reduction rate of CTAC solution in microgroove pipe

### 3.2 流场特性分析

通过PIV获得流向( $x$ 方向)和法向( $y$ 方向)所在截面的瞬时速度场,并对同一工况下150个瞬时速度场平均化计算,利用所得数据分析流场特性。

#### 3.2.1 平均速度

由减阻率分析可知,雷诺数较高时, $G_3$ 管道对水和表面活性剂溶液都有明显的减阻效果,因此选择 $G_3$ 管道与光滑管道在 $Re=57000$ 时的流场进行对比分析,由无量纲平均速度和法相坐标 $U^+=U/u^*$ 和 $y^+=yu^*/\nu$ 得相同阻力系数下的无量纲平均速度分布曲线,并以牛顿流体及Zakin等<sup>[17]</sup>的最高减阻无量纲速度分布线为参照,如图9所示。

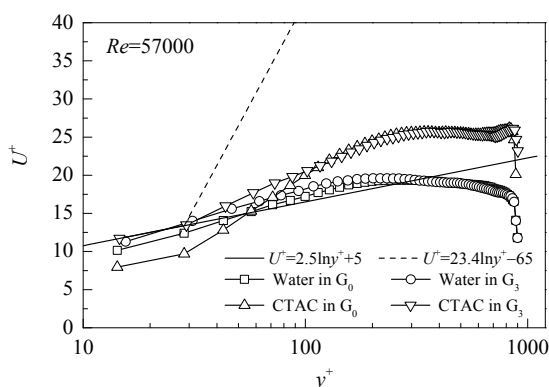


图9 平均速度分布曲线

Fig.9 Mean velocity distribution curves

由于条件限制,无法精确测量壁面附近 $0\sim 0.6$  mm ( $y^+$ :  $0\sim 10$ )的瞬时速度,但流体的速度曲线仍能反映平均

速度从近壁处到管道中心的变化。对比水和表面活性剂溶液的平均速度,表面活性剂溶液在近壁处的速度低于水,随着向湍流核心区靠近,表面活性剂溶液的速度梯度明显上升,逐渐高于水的平均速度,表明表面活性剂溶液在近壁处的剪切应力较低,到达湍流核心区后剪切应力开始增大,这也是减阻的主要原因。对比光滑管道和微沟槽管道的速度曲线,微沟槽管道中的表面活性剂溶液在近壁处的速度梯度与光滑管道相同,但平均速度明显升高,而在湍流核心区的速度变化无明显差别,这与水在微沟槽近壁区的速度升高类似,表明微沟槽在不改变表面活性剂溶液剪切应力的情况下,进一步降低了其在近壁区的阻力。

#### 3.2.2 雷诺切应力

表面活性剂形成的胶束结构与不同雷诺数下受到的雷诺切应力密切相关。根据表面活性剂范宁摩擦系数曲线,选取 $Re=25000$ (范宁系数下降区)和 $Re=88000$ (范宁系数上升区)的流场,图10为无量纲壁面摩擦速度 $u^*$ 的雷诺切应力 $-\overline{u^+v^+}$ 随无量纲法向坐标 $y^+$ 的分布情况。由图可见,水的无量纲雷诺应力较高且分布有规律,原因是水的粘性系数较低,粘性应力的影响低,在力平衡方程中雷诺切应力处于主导地位。与牛顿流体不同,表面活性剂能形成增大粘性应力的SIS,可大幅降低雷诺切应力。 $Re=25000$ 时,表面活性剂溶液在光滑管道和沟槽管道的雷诺切应力均接近0,极大降低了表面活性剂的湍动能损耗和近壁区摩擦耗散。 $Re=88000$ 时,表面活性剂溶液的无量纲雷诺切应力明显升高,原因是超过临界雷诺数后,表面活性剂内部SIS被破坏,溶液粘度降低,粘性剪切应力降低,雷诺应力随之提高。对比低雷诺数流场,此时表面活性剂溶液在沟槽管道中的雷诺应力与光滑管道差值较大,表明高雷诺数下微沟槽尖端的高剪切力加速破坏SIS,此时微沟槽呈增阻性能。

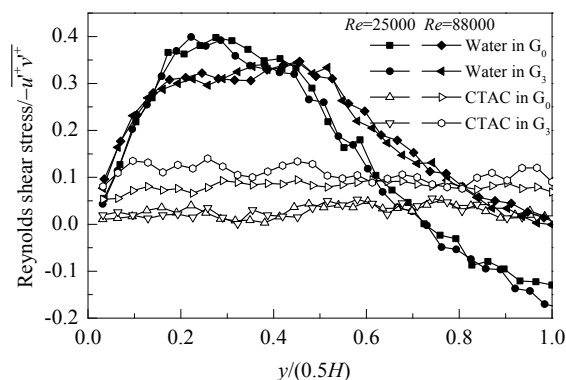


图10 无量纲雷诺切应力分布

Fig.10 Reynolds shear stress distribution



### 3.2.3 速度脉动强度

以壁面摩擦速度  $u^*$  对速度脉动强度进行无量纲处理, 得流向脉动速度  $u'^+$  和法向脉动速度  $v'^+$ 。图 11 为  $Re=57000$  时流向和法向速度脉动分布曲线。对于流向速度脉动, 表面活性剂溶液在近壁区的流向速度脉动高于水, 远离壁面到达湍流核心区接近于水。沟槽管道中水和表面活性剂溶液的流向速度脉动又进一步加强。对于法向速度脉动, 表面活性剂溶液在湍流区的法相速度脉动低于水, 表明表面活性剂溶液的法向速度脉动被抑制, 湍流在法向的输送能力被削弱。同时, 微沟槽也表现出对法向速度脉动的抑制作用。以上分析表明, 相同阻力水平下表面活性剂溶液流向速度脉动与水相当, 法向速度脉动明显降低, 而沟槽进一步削弱了流向涡的法向脉动, 湍流拟序结构受到抑制, 从而降低了近壁区的湍动能耗散。在沟槽与表面活性剂的耦合作用下, 流体更稳定有序地向前运动。

### 3.2.4 涡强度

涡是紊流流动能量传递的一种形式, 涡量强度反映能量损失大小<sup>[18]</sup>。通过处理 PIV 所测流场数据, 获得一定雷诺数下的流场涡量分布, 如图 12 所示。同一流体在沟槽管道中与光滑管道的涡量有一定差别, 但在图中

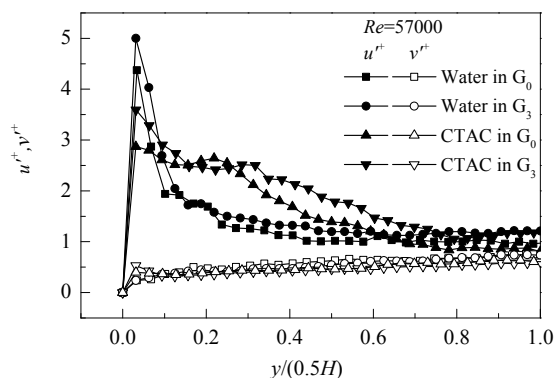


图 11 流向与法向速度脉动分布曲线

Fig.11 Distribution curves of velocity fluctuation in  $G_0$  and  $G_3$  channels

不明显。统一涡量尺度后, 可直观对比相同雷诺数时表面活性剂溶液与水的涡量分布。对比相同雷诺数下的涡量图, 表面活性剂溶液的涡量强度明显低于水, 与表面活性剂的减阻率对应。近壁区与湍流涡旋尺度有关, 表面活性剂溶液抑制了近壁区流向涡的演变, 延缓了低频大涡到高频小涡的演变, 极大抑制了微表面活性剂湍流涡的形成, 使整个流场流动环境更平稳。再次验证了微沟槽的减阻机理, 沟槽在较高雷诺数下仍有减阻效果。

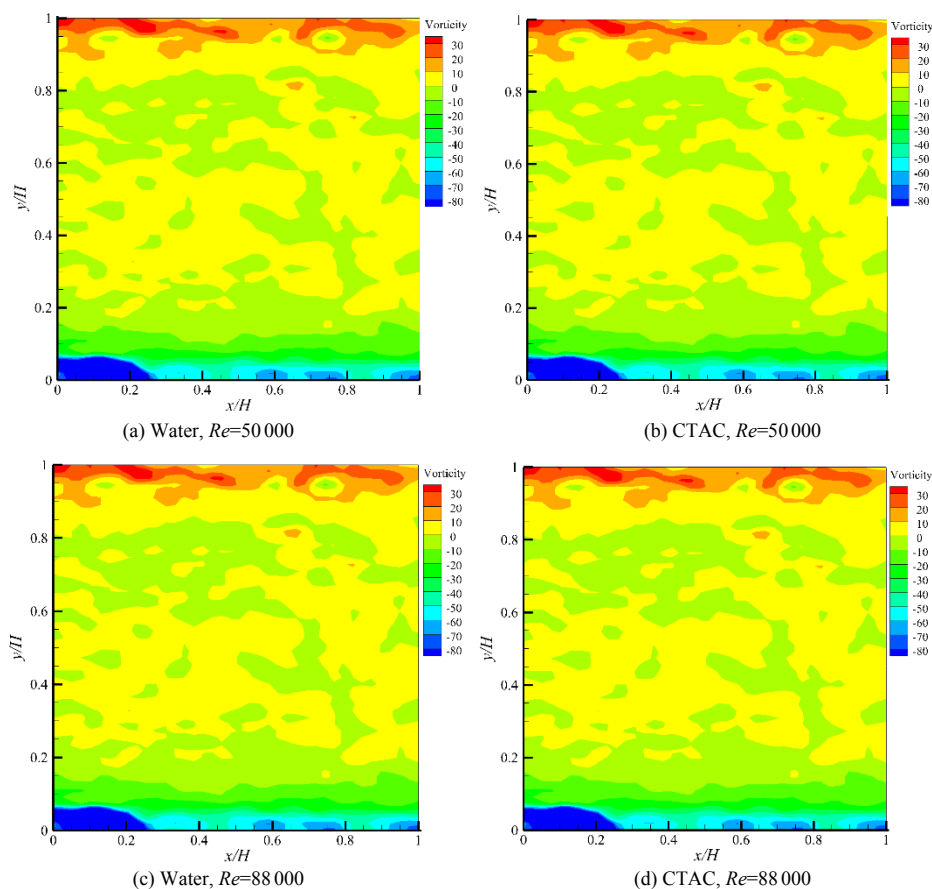


图 12 瞬时涡量分布

Fig.12 Distribution of instantaneous vorticity fluctuation

## 4 结 论

分别进行了水和表面活性剂溶液在光滑管道和沟槽管道中流动特性实验,对比了范宁摩擦系数、减阻率、平均速度、雷诺切应力、速度脉动强度及涡量等参数的分布,得到以下结论:

(1) 在矩形管道中,壁面微沟槽和表面活性剂均能发挥一定减阻作用。沟槽对水和表面活性剂的最高减阻率分别为 6.72% 和 7.12%。单独添加浓度为  $100 \times 10^{-6}\%$  的表面活性剂溶液,减阻率最高达 45.14%,该浓度的表面活性剂与壁面微沟槽( $h/s=0.7$ )联合,最高减阻率为 48.26%。

(2) 表面活性剂的减阻性能与诱导剪切结构(SIS)密切相关,当超过临界雷诺数后,沟槽尖端的高剪切力会加剧对 SIS 的破坏。

(3) 微沟槽对表面活性剂的减阻主要发生在近壁区,通过抬升近壁区平均流速、降低雷诺切应力、抑制法向速度脉动强度,为表面活性剂溶液提供了更稳定有序的流动环境。

(4) 表面活性剂延缓了湍流涡的演变,扩大了微沟槽减阻的有效范围,进一步提高了减阻率,为沟槽与表面活性剂联合减阻提供了依据。

### 参考文献

- [1] 魏进家,黄崇海,徐娜.表面活性剂湍流减阻研究进展[J].化工进展,2016,35(6):1660-1675.  
Wei J J, Huang C H, Xu N. Progress in research on surfactant turbulent drag reduction [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(6): 1660-1675.
- [2] Walsh M J. Turbulent boundary layer drag reduction using riblets [J]. AIAA Journal, 1982, 6(11): 769-787.
- [3] Walsh M J. Riblets as a viscous drag reduction technique [J]. AIAA Journal, 1983, 21(1): 485-486.
- [4] Bechert D W, Bruse M, Hage W, et al. Experiments on drag reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1997, 338: 59-87.
- [5] Ibrahim M D, Amran S N A, Yunus Y S, et al. The study of drag reduction on ships inspired by simplified shark skin imitation [J]. Applied Bionics and Biomechanics, 2018: 7854321.
- [6] Choi H, Moin P, Kim J. Direct numerical simulation of turbulent flow over riblets [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1993, 255: 503-539.
- [7] Peet Y, Sagaut P, Charron Y. Towards large eddy simulations of turbulent drag reduction using sinusoidal riblets [C]//Sohrab S H. 5th IASME/WSEAS International Conference on Fluid Mechanics and Aerodynamics. Vouliagmeni, 2007: 109-117.
- [8] Dmitry E. Modeling an effect of pipe diameter on turbulent drag reduction [J]. Chemical Engineering Science, 2017, 162: 66-68.
- [9] Hellsten M. Drag-reduction surfactant [J]. Journal of Surfactants and Detergents, 2002, 5(1): 65-70.
- [10] Kawaguchi Y, Feng Z. Experimental study on drag-reducing channel flow with surfactant additives spatial structure of turbulence investigated by PIV system [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2002, 23(5): 70-78.
- [11] Róžański J. Flow of drag-reducing surfactant solutions in rough pipes [J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2011, 166(5): 279-284.
- [12] Huang C H, Liu D J, Wei J J. Experimental study on drag reduction performance of surfactant flow in longitudinal grooved channels [J]. Chemical Engineering Science, 2016, 152: 267-279.
- [13] Erwin R, Chetan J, Christopher J. Skin friction drag reduction over staggered three dimensional cavities [J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 84: 520-529.
- [14] Dean R B. Reynolds number dependence of skin friction and other bulk flow variables in two-dimensional rectangular duct flow [J]. Journal of Fluids Engineering, 1978, 100(2): 215-223.
- [15] Rohr J. A comparison of the drag-reducing benefits of riblets in internal and external flows [J]. Experiments in Fluids, 1992, 13: 361-368.
- [16] 李恩田,吉庆丰,庞明军.方形管道内壁面微结构对湍流减阻效果的影响[J].化工进展,2017,36(11):3971-3976.  
Li E T, Ji Q F, Pang M J. Effect of microstructure of inner wall surface of square pipe on drag reduction effect [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(11): 3971-3976.
- [17] Zakin J L, Myska J, Chara Z. New limiting drag reduction and velocity profile asymptotes for nonpolymeric additives systems [J]. AIChE Journal, 1996, 42(12): 3544-3546.
- [18] 刘心洪,闵健,潘春妹.采用大涡 PIV 方法研究搅拌槽内湍流动能耗散率[J].过程工程学报,2008,8(3):425-431.  
Liu X H, Min J, Pan C M. Study on the energy dissipation rate of turbulent flow in a stirred tank by large eddy PIV method [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2008, 8(3): 425-431.