

文章编号: 1672-9897(2011)06-0054-05

## 非离子表面活性剂在水流中的减阻机理

蔡书鹏<sup>1</sup>, 铃木洋<sup>2</sup>, 萩田悦之<sup>2</sup>

(1. 湖南工业大学水射流研究所, 湖南 株洲 412008; 2. 日本神户大学大学院工学研究科, 日本 神户 657-8501)

**摘要:**为探讨非离子表面活性剂的减阻机理,在实验确认表面活性剂 APG 水溶液(Alkyl Polyglucoside)具有湍流减阻功效的基础上,对其剪切粘度、应力松弛特性以及剪切双折射效应,使用锥板流变仪及流动双折射测试仪进行了实验研究。最大减阻率可达 70% 的 APG 水溶液,其剪切粘度在低剪切速率区域表现为牛顿流体特性,在大于临界剪切速率区域表现为“SIS”(Shear-Induced Structure),呈现非牛顿流体特性;APG 水溶液的剪切应力松弛特性与纯水基本相似,表明“SIS”并不具有粘弹性特性。由剪切双折射效应证实的的棒状胶束聚合结构和具有的较大拉伸粘度可认为是 APG 水溶液能够实现湍流减阻的主要原因。

**关键词:**非离子表面活性剂; 减阻机理; 剪切粘度; 剪切应力松弛; 拉伸粘度

中图分类号: TV131 文献标识码: A

### Study of drag-reducing mechanism of nonionic surfactant in a water flow

CAI Shu-peng<sup>1</sup>, SUZUKI Hiroshi<sup>2</sup>, KOMODA Yoshiyuki<sup>2</sup>

(1. Institute of High Pressure Water Jet, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China; 2. School of Science and Engineering, Kobe University, Kobe 657-8501, Japan)

**Abstract:** To explore the mechanism of turbulent drag-reduction by adding non-ionic surfactants additives into a water flow, the shear viscosity, shear stress relaxation, and flow birefringence effects were experimentally investigated by a cone-plate rheometer and a birefringence device, after experimentally identified the turbulent drag-reducing for APG (Alkyl Polyglucoside) solution in a circle pipe flow. APG solution showing to be drag-reducing up to 70%, has Newtonian shear viscosities at smaller shear-rates, non-Newtonian shear viscosities at larger shear rates, and it also shows SIS (Shear-Induced Structure) at a critical shear rate. The shear stress relaxation behavior is identical to that for water, which implies that APG solution is drag-reducing, but shows SIS rheological characteristics without viscoelasticity. The rod-like micelles proved from the birefringent effects, and higher extensional viscosity could be considered to be essential for the drag-reduction.

**Key words:** nonionic surfactant; drag-reducing mechanism; shear viscosity; shear stress relaxation; extensional viscosity

### 0 引言

在实际的流体输送工程中,流动形态绝大多数是湍流,降低湍流摩擦阻力对减少泵耗、降低输水成本无疑具有重要的经济意义。减低湍流摩擦阻力的方法很多,但对长距离流体输送以及短距离流体的循环输送,较为有效的减阻方法之一就是利用高分子或表面活性添加剂进行减阻。对于沿程可能存在较多高局部阻力元件的流动系统如反复经过水泵等循环式流体输送系统,由于表面活性剂对超过临界雷诺数的机械剪切降解具有快速可反复修复特性,故使用表面

活性剂降低湍流阻力具有不可替代的优势<sup>[1]</sup>。

近 30 年来,国内外学者对阳离子表面活性剂减阻做了大量研究,揭示了不同的减阻表面活性剂在不同的流动工况下的减阻、流变特性<sup>[2-4]</sup>以及流场特性<sup>[5-8]</sup>。对阳离子表面活性剂减阻机理,大部分学者认为水溶液受剪后诱导出(Shear-Induced Structure)“SIS”,“SIS”带来的粘弹特性与湍流场的相互动力学响应导致减阻<sup>[9-11]</sup>。虽然减阻阳离子表面活性剂具有减阻功效强、减阻效果维持时间长的优点,但它必须与反离子添加剂复配才能产生减阻效果,且还具有毒性强、生物降解能力差的缺陷。在重环保的欧洲以

及日本等国,对阳离子表面活性剂作为减阻剂使用做了极为严格的限制规定。

非离子表面活性剂具有生物毒性很弱、生物降解能力强的优点,因此开发非离子表面活性剂减阻剂越来越受到关注。本研究利用对环境非常温和的非离子表面活性剂添加剂 APG(主要成分: Alkyl Polyglucoside,商品名: Glucopon 600UP,由日本Cognis公司提供),对其水溶液在5mm圆管中的流动阻力对雷诺数、温度、溶液浓度的依存特性,使用气压流体输送装置进行了研究。为研究其减阻机理,使用流动双折射测试仪测试了APG水溶液在剪切状态下聚合胶束的形状;使用锥板流速仪考察了在减阻条件下剪切粘度对剪切速率的依存特性、粘弹性效果与剪切诱导结构“SIS”的关系以及与拉伸粘度密切相关的流变现象。

## 1 实验装置和实验方法

### 1.1 实验装置

#### 1.1.1 压送流体阻力测试装置

图1为气压输送流体阻力测试装置示意图。测试管直径 $D=5\text{mm}$ ,为在压力损失测试段获得充分发展的湍流,取入口段为 $360D$ ,远大于牛顿流体湍流发展所需的人口段长度 $50D$ 。在储液罐外围缠有与温控机相连的冷却套以实现温控。压差计采用美国公司Validyne生产的DP15-38型,电磁流量计为东京计装株式会社生产的IMF5800型。

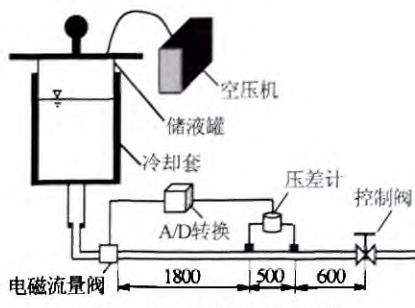


图1 流动阻力测试示意图  
Fig. 1 Schematic of pressure loss test apparatus

#### 1.1.2 流变特性实验装置

剪切粘度测试使用德国生产的MCR301应力控制型流变仪。测试流路为锥板式。锥角 $\beta=0.04\text{rad}$ ;锥板间隙 $G=0.099\text{mm}$ ;锥板直径 $D=50\text{mm}$ 。图2为锥板流路示意图。

剪切应力的松弛特性测试采用美国生产的应变控制型ARES-LS流变仪。测试流路也为锥板式。锥板流路的几何参数为,锥角 $\beta=0.0398\text{rad}$ ;锥板间隙 $G=0.0483\text{mm}$ ;锥板直径 $D=50\text{mm}$ 。

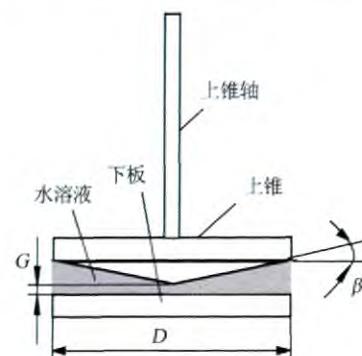


图2 锥板流路示意图  
Fig. 2 Cone-plate flow cell

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 减阻实验方法

将事先配置好的APG水溶液倒入储液罐中密闭,设定温度下恒温静置4h后将压缩空气充入罐中,待压力升至 $3\times 10^5\text{Pa}$ 后停止充气。然后打开控制阀使流体经测试管流出,同步采集流动过程中的压力损失和流量信号。罐内压力随水溶液流出必然下降,因此流动过程是一个准定常流动,约持续60s。实验前通过纯水验证表明,湍流实验数据与Blasius经验公式误差小于4%,表明使用本装置基于上述方法测试流动阻力具有足够的可信度。

#### 1.2.2 流变特性实验方法

测试剪切粘度时,应使测样在锥板间密闭放置30min后进行以达到充分的热力学平衡,剪切速率采用连续扫描方式进行测试。

测试剪切应力松弛特性时,先使锥板上的溶液从静止状态突然接受某一恒定剪切速率,待剪切应力达到稳定值后,瞬间消除施加的剪切荷载,观察运动骤停后剪切应力的松弛直至为零,记录整个过程的剪切应力随时间的变化。

#### 1.2.3 流动双折射实验方法

采用德国Anton Paar公司提供的与MR301流变仪配套的激光测试系统。光路采用内圆筒外直径为30mm、外圆筒内直径为33mm的Couette Cell,激光从底部穿过,光路长度为25mm。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 APG水溶液的减阻特性

采用处理准定常流动的时均法得出时均的压力损失和断面平均流速,并通过以下两式计算出雷诺数与摩擦阻力系数:

$$Re = \frac{\rho Du_m}{\mu} \quad (1)$$

$$f = \frac{1}{4} \frac{D}{L} \frac{\Delta p}{0.5 \rho u_m^2} \quad (2)$$

式中,  $Re$ : 雷诺数;  $u_m$ : 断面平均流速( $m/s$ );  $D$ : 管径( $m$ );  $f$ : 摩擦阻力系数;  $L$ : 测试段长度( $m$ );  $\Delta p$ : 压力损失( $Pa$ );  $\rho$ : 水溶液密度( $kg/m^3$ );  $\mu$ : 水的粘度( $Pa \cdot s$ )。

雷诺数计算采用同温下水的粘度, 主要是在阻力特性曲线中便于观察实际粘度对摩阻系数的影响, 也便于比较同一流量下压力损失的大小。

图3为质量分数为  $2 \times 10^{-4}$ 、 $4 \times 10^{-4}$ 、 $6 \times 10^{-4}$  的APG水溶液在  $20^\circ\text{C}$ 、 $30^\circ\text{C}$ 、 $40^\circ\text{C}$  时的阻力特性曲线, 为便于比较图中还给出了 Blasius经验公式结果曲线和层流曲线。

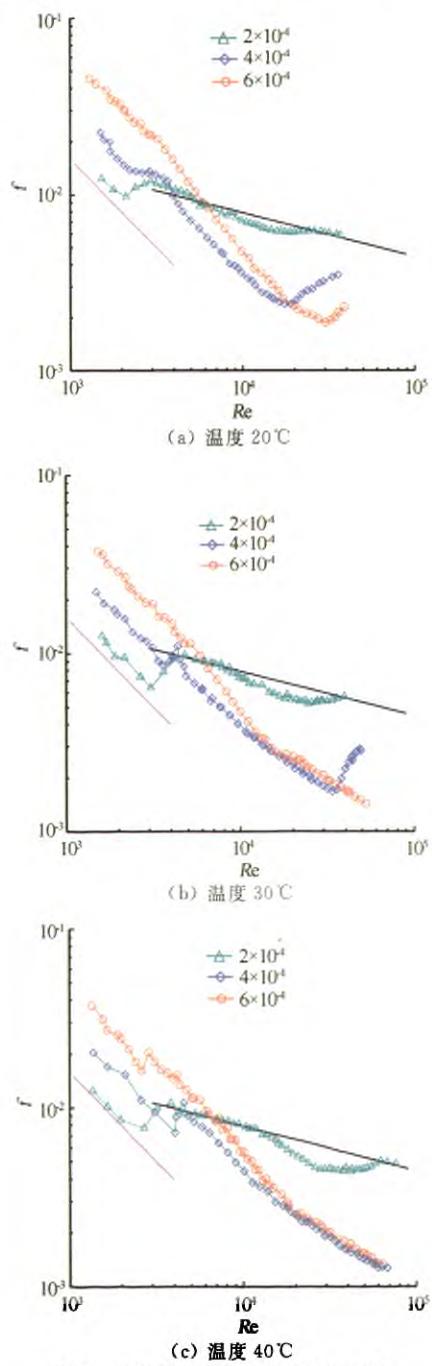


图3 摩擦阻力系数随雷诺数的变化  
Fig. 3 Friction coefficient versus  $Re$

APG水溶液在质量分数大于  $2 \times 10^{-4}$  时开始呈现减阻功效, 最大减阻率可达 70%; 临界雷诺数  $Re_{crit}$  随温度升高而增大, 同温下随质量分数增加而提高, 表明温度升高或质量分数增加能够增强 APG水溶液胶束结构的抗剪强度, 更能抑制湍流涡体的能量耗散, 这与阳离子表面活性剂减阻剂相同。此外在较低的质量分数下, 在经过了低速流动后出现了类似于牛顿流体的摩阻系数随雷诺数而增加的区域, 这表明在剪切速率较低时, APG水溶液胶束网状结构不足以抗拒外扰, 有向湍流过渡的趋势。但随雷诺数加大而增大的剪切速率提高了内部胶束网状结构强度, 阻止了局部湍流的进一步发展, 从而使摩阻系数进一步快速下降, 直至内部胶束网状缠绕结构在临界雷诺数下开始解缠, 摩阻系数随雷诺数进一步增大而增大, 最后胶束网状结构完全解缠恢复到球状胶束状态, 摩阻系数也就随之恢复到牛顿流体的水平上。

## 2.2 剪切粘度对剪切速率的依存特性

图4为APG水溶液的剪切粘度对剪切速率的依存特性曲线。从结果可知, 在较低的剪切速率区域, 特别是质量分数为  $2 \times 10^{-4}$  的水溶液在整个所测的剪切速率和温度范围内, 剪切粘度基本不随剪切速率而改变, 与牛顿流体类似。质量分数为  $4 \times 10^{-4}$ 、 $6 \times 10^{-4}$  的APG水溶液, 在温度为  $20^\circ\text{C}$ 、剪切速率分别大于  $180\text{s}^{-1}$ 、 $400\text{s}^{-1}$  时及在  $30^\circ\text{C}$ 、剪切速率分别大于  $300\text{s}^{-1}$ 、 $500\text{s}^{-1}$  时, 剪切粘度突然增加, 呈现“SIS”流变特性<sup>[9]</sup>。但在温度为  $40^\circ\text{C}$  时, 未能观察到“SIS”, 这与阳离子减阻表面活性剂水溶液的剪切粘度对剪切速率的依存特性基本相同, 只是阳离子呈现剪切诱导结构的临界剪切速率一般都小于  $100\text{s}^{-1}$ 。

## 2.3 剪切应力松弛特性

通过观察剪切载荷突然加载和卸载后剪切应力随时间的变化, 可以判断一些表面活性剂水溶液的粘弹效果以及推测内部胶束结构的改变情况。很多学者通过实验研究认为“SIS”出现后, 阳离子表面活性剂减阻水溶液呈现粘弹性特性。

图5为APG水溶液在温度  $20^\circ\text{C}$  时突然加载后剪切应力的发展和卸载后的松弛行为曲线。施加的剪切速率为  $600\text{s}^{-1}$ , 都大于出现“SIS”的临界剪切速率。从图中看出APG水溶液的剪切应力的松弛行为与水完全一样, 在  $0.3\text{s}$  内完全松弛, 这与施加大于出现“SIS”的临界剪切速率后需经几分钟、甚至几十分钟才能完全松弛的阳离子减阻表面活性剂完全不同。说明APG水溶液在受到剪切后, 内部的胶束结构体没有积蓄任何弹性剪切应变能, 即APG减阻水

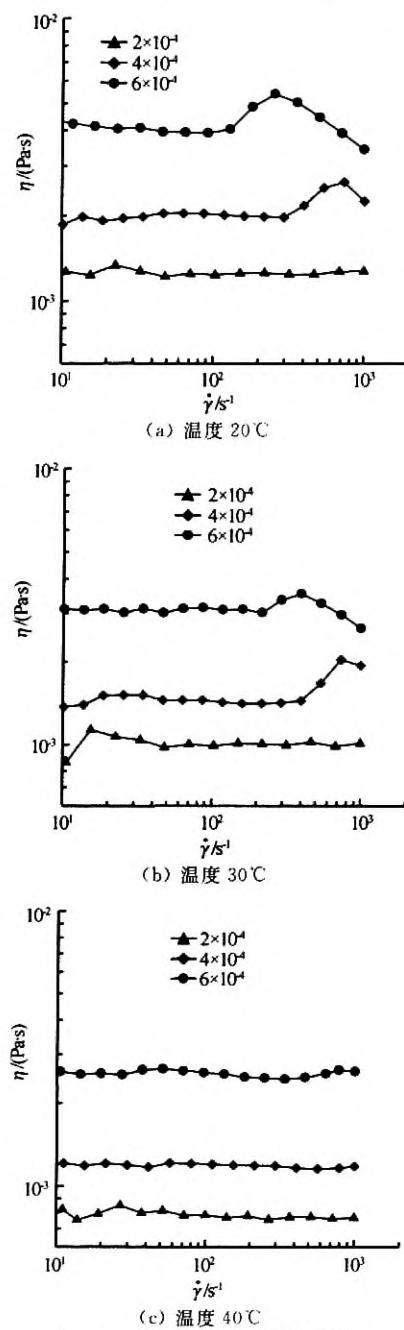


图 4 剪切粘度随剪切速率的变化  
Fig. 4 Shear-viscosity versus shear rate

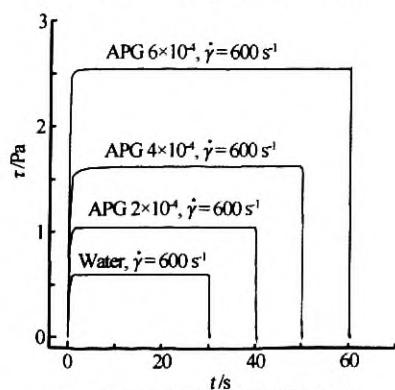


图 5 剪切应力随时间的松弛曲线  
Fig. 5 Relaxation of shear stress versus time

溶液虽然具有“SIS”流变特性,但却没有象阳离子减阻表面活性剂那样呈现出粘弹性特性。

#### 2.4 减阻机理的讨论

图 6 为 APG 水溶液的流动双折射测试结果。很明显,水溶液在剪切状态下出现剪切双折射效应。

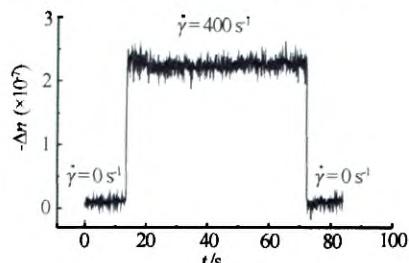


图 6 剪切下 APG 水溶液的双折射效应  
Fig. 6 Birefringent effects of APG solution in shearing

在剪切态下胶束的聚合形状是球形时,则不论沿着流动方向如何排列,因光学上的各向同性,表面活性剂水溶液也不会观察到双折射效应,只有当静止状态下水溶液内存在棒状胶束,或者在受剪切后球状胶束重新沿着剪切平面排列、重新聚合变成棒状胶束,表面活性剂水溶液在光学特性上由于各向异性才会有剪切流动双折射现象发生<sup>[12]</sup>。根据图 6 的实验结果,说明 APG 水溶液在剪切状态下明显存在棒状胶束,这与迄今为止所有具有减阻功效的阳离子表面活性剂的流动双折射观察结果相吻合。但是,阳离子表面活性剂水溶液,当剪切速率大于临界剪切速率时会表现为“SIS”流变行为,进入“SIS”后,还会呈现明显的粘弹性特性,如观察到几十或上百 Pa 以上的第一法向应力差,以及突然施加剪切荷载后表现出剪切应力超越现象。很多学者认为正是这种粘弹性力学行为抑制了小尺度湍流涡体的能量耗散导致了减阻<sup>[12]</sup>。但对于 APG 水溶液,剪切流变特性虽表现为“SIS”,但剪切应力松弛特性测试结果表明它不具有任何粘弹性特性,其减阻机理与阳离子表面活性剂完全不同,应存在导致减阻的其它流变因素。

在进行剪切粘度测试时发现,放置在上锥板和下底板之间的 APG 水溶液,当施加的剪切速率大于 2700 s<sup>-1</sup> 时,由于高速旋转产生的离心力的作用,外边缘的水溶液便会飞出,该剪切速率远大于纯水开始飞溅的剪切速率 2100 s<sup>-1</sup>。图 7 是外边缘流体的径向受力分析示意图。

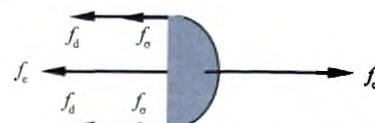


图 7 测试流体在边缘的径向受力平衡图  
Fig. 7 Force equilibrium of tested fluid at the edge

图7中,  $f_e$ 、 $f_c$ 、 $f_s$  及  $f_d$  分别是测试流体的内拉伸力、离心力、表面张力的径向分力以及上锥及下板提供的阻止流体外滑的摩擦力, 重力引起的静压力由于锥板间隙太小会很小, 因此纯水和表面活性剂水溶液之间的差异更小可忽略。由于表面活性剂具有降低水的表面张力的作用, 所以纯水的表面张力自然大于APG水溶液, 纯水和表面活性剂水溶液的径向摩擦力可认为基本相同。在边缘流体刚刚开始飞溅时, APG水溶液的旋转速度远大于纯水, 因此与旋转速度的平方成正比的离心力更大于纯水, 由径向的受力平衡方程:  $f_e = f_c - 2f_s - 2f_d$  易知APG水溶液的内拉伸力远大于纯水, 据此观测结果可推知APG水溶液的拉伸粘度远大于纯水。但目前还没有找到有效的测试仪器或手段, 能够准确定量测试像APG水溶液那样剪切粘度低的流体的拉伸粘度。

我们知道, 在内流和外流的壁面湍流中, 在湍流猝发过程中准流向涡的形成及大尺度涡体向小尺度涡体的分裂过程中, 涡的拉伸运动起着决定性作用。表面活性剂APG添加后, 在剪切流场作用下, 原来的球状胶束重新聚合形成棒状胶束, 棒状胶束相互搭接、缠绕形成大规模网状结构后拉伸粘度增加, 从而增大了抵抗涡体拉伸的阻力, 这将会阻止对湍流猝发的形成起重要作用的准流向涡的形成以及湍流中大尺度涡体向小尺度涡体破裂的涡的拉伸运动, 这样湍流动能的耗散在一定程度上会被抑制, 从而导致减阻。

### 3 结 论

通过对非离子表面活性剂APG水溶液的湍流减阻机理实验研究得出如下结论:

(1) APG水溶液在质量分数大于 $2 \times 10^{-4}$ 时, 开始呈现明显的减阻效应, 最大减阻率可达70%, 达到最大减阻率的临界雷诺数随温度升高及质量分数的增大均增大;

(2) APG水溶液在质量分数大于 $2 \times 10^{-4}$ 、温度小于40℃时, 在远大于阳离子表面活性减阻剂的某一临界剪切速率后, 剪切粘度突然上升, 水溶液呈现“SIS”。但与纯水基本相同的剪切应力的松弛特性表明, APG水溶液虽然呈现“SIS”流变特性, 但没有产生任何粘弹性特性, 这与呈现“SIS”并产生粘弹性特性从而具备减阻能力的阳离子表面活性剂不同, 在减阻机理上是独特的;

(3) 流动双折射测试结果表明, APG水溶液在剪切力场的作用下, 内部存在棒状胶束。棒状胶束在湍流态下大量聚合重新排列搭接形成棒状胶束聚合结构, 存在这种聚合的棒状胶束结构的水溶液具有远大于纯水的拉伸粘度, 从而使水溶液能够有效抵抗近壁区准流向涡的发展所需的拉伸运动以及大尺度涡体向小尺度涡体分裂的涡体拉伸运动, 进而导致湍流减阻。

### 参 考 文 献:

- [1] TAMANO Shinji, ITOH Motoyuki, YOKOTA Kazuhiko. Effects of concentration of surfactant solution on drag reducing turbulent layer [J]. JSME B, 2008, 74 (741): 1075-1082.
- [2] LIN Z, ZHENG Y, DAVIS H T. Unusual effects of counterion to surfactant concentration ratio on viscoelasticity of a cationic surfactant drag reducer [J]. Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2000, 9(2): 363-373.
- [3] LI Feng-chen, KAWAGUCHI Yasuo, HISHDIA Koi-chi. Structural analysis of turbulent transport in a heated drag reducing channel flow with surfactant additives [J]. Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(5): 965-973.
- [4] BEWERDORFF H W, OHLENDORF, D. The behavior of drag reducing cationic surfactant solutions [J]. Colloid & Polymer Sci, 1988, 26(10): 941-953.
- [5] GE Wu, ZHANG Ying, ZAKIN L. Surfactant turbulent drag reduction in an enclosed rotating disk Apparatus [J]. Experiments in Fluids. 2007, 42 (4): 459-469.
- [6] 魏进家, 川口靖夫. 零下温度时二维通道内界面活性剂减阻流动的实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2006, 40 (1): 79-83.
- [7] SUZUKI Hiroshi, FULLER G, NAKAYAMA Tomoe, et al. Development characteristics of drag reduction surfactant solution flow in a duct [J]. Rheol Acta, 2004, 43(2): 232-239.
- [8] USUI Hiromoto, ITOH Takayasu, SAEKI Takashi. On pipe diameter effects in surfactant drag-reducing pipe flows [J]. Rheol Acta, 1998, 37 (1): 122-128.
- [9] TAMANO Shinji, ITOH Motoyuki. Turbulence statistics and structures of drag-reducing turbulent boundary layer in homogeneous aqueous surfactant solutions [J]. Physics of Fluids, 2009, 21, 45101-19.
- [10] 蔡书鹏. 表面活性剂水溶液的减阻机理分析 [J]. 湖南工业大学学报, 2010, 24(4): 43-45.

(下转第65页)

- 1987, 30: 1007-1015.
- [7] NISHIMURA T, MURAKAMI S, AWAMURA Y. Mass transfer in a symmetric sinusoidal wavy-walled channel for oscillatory flow[J]. Chem. Engng Sci, 1993, 48: 1793-1800.
- [8] NISHIMURA T. Oscillatory flow and mass transfer within asymmetric and symmetric channels with sinusoidal wavy walls[J]. Heat and Mass Transfer, 1995, 30: 269-278.
- [9] NISHIMURA T, BIAN Y N, MASUMOTO Y, et al. Fluid flow and mass transfer characteristics in a sinusoidal wavy-walled tube at moderate Reynolds numbers for steady flow[J]. Heat and Mass Transfer, 2003, 39: 239-248.
- [10] YALAMANCHILI R C, SIRIVAT A, RAJAGOPAL K R. An experimental investigation the flow of dilute polymer solutions through corrugated channels[J]. J. Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1995, 58: 243-277.
- [11] DRAAD A A, KUIKEN G D C, NIEUWSTADT F T M. Laminar-turbulent transition in pipe flow for Newtonian and non-Newtonian fluids [J]. J. Fluid Mech, 1998, 377: 267-312.
- [12] 林先成, 葛绍岩. 方形通道内非牛顿流体的强化传热[J]. 工程热物理学报, 1994, 8: 298-303.
- [13] 肖青, 王昂. 非牛顿流体在周期性突扩突缩通道中的流动阻力特性[J]. 化学工程, 1996, 12: 42-46.
- [14] 郑永刚, 谢翠丽. 非牛顿流体在圆管中的分层流动及减阻规律[J]. 水动力学研究与进展, 2000, 1(1): 314-319.
- [15] 林芸, 方道斌. 聚丙烯酰胺水溶液粘度的依时性及其稳定剂[J]. 分析化学, 1995, 23(9): 1073-1076.

#### 作者简介:



张亮(1983-),男,山东淄博人,大连理工大学博士研究生,从事流体流动特性的研究。  
通讯作者:卞永宁,大连市甘井子区凌工路2号,大连理工大学力学系。电话:0411-84707330;E-mail: ybian@dlut.edu.cn

#### (上接第58页)

- [11] INDARTONO Y S, USUI Hiromoto, SUZUKI Hiroshi. Hydrodynamics and heat transfer characteristics drag-reducing trimethylethane solution and suspensions by cationic surfactant[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 2006, 39(6): 623-632.
- [12] LIN Z, LU B, ZAKIN J L. Influence of surfactant concentration and counterion to surfactant ratio on rheology of wormlike meccelles[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2001, 71(239): 543-554.

#### 作者简介:



蔡书鹏(1963-),男,河北迁安人,工学博士。研究方向:流体流动减阻。通讯地址:湖南省株洲市天元区,湖南工业大学机械学院(412007)。联系电话:13873345925;E-mail:nagoya\_cai@sohu.com.