边界层中 CTAB 表面活性剂减阻水溶液的 湍流特性¹⁾

蔡书鹏*.2) 杨 林† 唐川林*

*(湖南工业大学水射流研究所,株州 412008) [†](重庆交通大学机电与汽车工程学院,重庆 400074)

摘要 为阐明表面活性剂水溶液的减阻作用,使用 LDV 对零压梯度的二维湍流平板边界层中的 CTAB 表面 活性剂水溶液的湍流特性进行了实验研究.结果表明:与牛顿流体相比, CTAB 水溶液边界层的黏性底层增 厚;主流时均速度分布有被层流化的趋势,对数分布域上移;主流方向速度湍动强度峰值减小,且远离壁面, 在靠近边界层中部,出现第2峰值;垂直于主流方向的速度湍动强度受到了大幅度抑制,雷诺应力沿着边界层 厚度方向几乎为零.结果说明 CTAB 水溶液具有减弱湍流湍动各个成分相关度的作用,从而能够使雷诺应力 降低、湍流能量生成项减小最终降低流体的输送动力.

关键词 表面活性剂水溶液,湍流边界层,湍流强度,剪切诱导状态

中图分类号: O357.5 文献标识码: A 文章编号: 0459-1879(2008)02-0250-05

引 言

节能减阻对于解决能源渐枯与经济高速发展对 能源需求成倍增长之间的矛盾,凸显重要.高分子聚 合物在溶剂中所形成的链网结构经过水泵等高局阻 元件的剪切后发生机械降解进而失去减阻作用,因 此聚合物添加剂减阻仅适用于非循环式流体输送系 统;表面活性剂溶于溶剂中形成的棒状胶束在一定 范围的剪切力作用下,定向排列构成大规模的剪切 诱导结构使溶液具有黏弹性进而产生减阻效果^[1~3], 棒状胶束在经过水泵等高局阻的超过临界剪切应力 的高剪切作用下其结构遭到破坏,虽一度失去减阻 效果,但当从高剪切应力状态释放后棒状胶束会迅 速得到修复进而恢复减阻能力,因此表面活性剂添 加剂减阻对循环和非循环流体输送系统都适用.

迄今为止对于表面活性剂添加剂减阻机理的研 究,大多针对圆管以及矩形管的管内流.对于圆管 内流,湍流时均速度分布在低雷诺数减阻工况下, 与高分子减阻流类似;在最大减阻工况下靠近层流 分布^[4].对于矩形管内流^[5~7],主流方向速度湍动 强度的峰值出现的位置与牛顿流体相比远离壁面, 减阻率越高,峰值出现的位置离壁面越远;横向速度 的湍动强度比牛顿流体减小;雷诺应力在整个横断 面上大幅降低.表面活性剂减阻水溶液的雷诺应力 大幅度被削弱主要是第2和第4象限的脉动强度被 抑制到与第1和第3象限的脉动强度相当的水平所 致^[8].此外对表面活性剂减阻水溶液在边界层的流 动特性,国内外研究甚是少见.为揭示表面活性剂 水溶液在边界层中的减阻作用,本文拟对 CTAB 表 面活性剂减阻水溶液在平板边界层中的湍流特性使 用二维 LDV (laser Doppler velocimetry) 展开研究, 以期获得在管内流中无法观测到的湍流特性.

1 实验装置和实验方法

1.1 实验材料

表面活性剂为工业用阳离子表面活性剂十六烷 基三甲基溴化胺 (CTAB),分子量为 365;伴随盐 为水杨酸钠 NaSal,分子量为 160. CTAB 和 NaSal 的配比为等摩尔,水溶液的质量分数为 1×10⁻⁴;摩 尔浓度为 0.274 mmol/l(为叙述方便,以下简称为减 阻水溶液).示踪粒子采用尼龙粉,粒径为 4μm、密

2007-07-04 收到第 1 稿, 2007-11-22 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金 (50504021), 教育部科学技术研究重点项目 (206122), 湖南省教育厅科研项目 (06C265) 和湖南省重点学科建设项目 资助.

2) E-mail: nagoya_cai@sohu.com

度为1020 kg/m³. 投放浓度以 LDV 能够获得最大的 有效数据率为原则.

1.2 实验装置

图 1 为开放式二维循环水槽的示意图. 除进口 和出口部分用不锈钢制作之外,装置的主体段由有 机玻璃构成. 为去除来流中的湍流成分,在进口段 设有由直径 5 mm、长 85 mm 的塑料管层状叠加而 成的蜂窝状整流管,其前后各有一层和两层同为 16 目的孔帘. 为把温度控制在 23±0.2°C 的范围内,连 接管路外套一个保持恒温的套管. 在水深为 300 mm 的流路中直立一块 1800×350×20 的测试板,首尾部 加工成 10° 的流线型,在距测试板前端 100 mm 处沿 展向黏固一根直径为 2 mm 的不锈钢激流丝以加快 边界层的发展. 为实现沿流向零压梯度,测试板沿 流向向外成 0.5° 放置,同时于尾端设置可调整角度 的挡流板. *x* 坐标的原点取在测试板前端、方向与 主流相同; *y* 坐标原点取在测试板壁面上,方向为 横向,垂直主流.



♥ inlet-tank
♥ outlet-tank
♥ flow rectifier
♥ trip wire
♥ test plate
♥ test plate
♥ test plate
♥ valve
♥ stainless pump



1.3 实验方法

二维 LDV 为日本 KANOMAX 公司生产、型号 为 2D-8835. 激光源为氦离子激光器,功率可调范 围为 50-300mW,激光被分光系统分解成波长分别为 545.5 nm,488 nm 的绿光和蓝光.频移为 40 MHz. 激 光探头安装在精度为 0.01mm 的可移动坐标架上. 测 试位置为距测试板前端 750 nm,距流道底面 150 nm 处. 对清水及减阻水溶液在主流速度 U = 300 nm/s 的工况下进行零压梯度平板边界层中的湍流特性进 行测试. 采集的示踪粒子的散射光信号经过蓝绿分 光后经过光电倍增管转变为电信号,再经过滤波处 理、放大、 A/D 转换后进行数字信号处理得出瞬时 速度信息.

2 实验结果及分析

2.1 减阻水溶液的剪切黏度特性

利用细管黏度测试装置,对减阻水溶液在温度 为 23±0.2°C 时的剪切黏度测试结果如图 2. 从测试 结果可知:剪切速率小于 19s⁻¹,剪切黏度与牛顿流 体类似基本不随剪切速率变化;大于 19s⁻¹ 后减阻 水溶液进入被认为与减阻效果的产生有直接关联的 "SIS"(shear induced state)即剪切诱导状态,被赋予 黏弹性;在剪切黏度达到最大后呈现剪切稀化现象 (shear thinning).因此,本研究使用的减阻水溶液是 先切稠后切稀的流变特性非常复杂的非牛顿流体.





Fig.2 Shear viscosity versus the shearing rate

2.2 减阻水溶液在平板边界层中的湍流特性

由 LDV 实测出主流方向和横向瞬时速度信息 u, v, 经算术统计平均可得主流方向时均速度 $\bar{u},$ 湍 动速度 u', 湍动强度 u'_{rms} ,横向湍动速度 v', 湍动强 度 v'_{rms} , 雷诺应力 $-\overline{u'v'}$ (各速度单位: mm·s⁻¹). 2.2.1 边界层减阻率

根据 Clauser 法则求出清水的壁面摩擦流速 $u_{\tau w}$; 由黏性底层流速线形分布 $u^+ = y^+$ 反求出减 阻水溶液的 $u_{\tau s}$. 边界层厚度 δ 定义为 u = 0.99U的 y 值,由时均速度分布求出边界层的厚度 δ,动量 损失厚度 θ 以及动量损失厚度为特征长度的雷诺数 $Re_{\theta} = \theta U/\nu$.

边界层减阻率定义为

$$DR = 100\% \times (\tau_{ww} - \tau_{ws})/\tau_{ww} \tag{1}$$

$$\tau_w = \rho u_\tau^2 \tag{2}$$

式中, τ_{ww} 和 τ_{ws} 分别为清水和减阻水溶液的壁面 摩擦应力 (Pa/m²), ρ 为流体密度 (kg/m³), ν 为流体 的运动黏度 (Pa·s).

清水和减阻水溶液在 *x* = 750 mm 处的边界层 厚度分别为 27.1 mm 和 19.7 mm, 壁面摩阻流速分别 为 14.5 mm/s 和 9.8 mm/s, 边界层动量损失厚度分别 为 3.29 mm 和 2.34 mm, 动量损失厚度雷诺数分别为 990 和 510. 由此计算的减阻水溶液的边界层减阻率 为 55%.

2.2.2 湍流时均速度分布特性

图 3(a) 为减阻水溶液的主流方向时均流速分 布,同时给出了牛顿流体二维层流的边界层的 Blasius 理论速度分布和湍流的幂律分布. 可以看出减 阻水溶液在湍流平板边界层中主流方向速度分布明 显地趋向于层流分布,即流动有被层流化的趋势. 图 3(b) 为主流方向流速 ū 和横向坐标 y 分别被 u_{τ} 和 v/u_{τ} 无量纲化的时均流速分布,同时给出 了 Virk 在最大减阻工况下得出的极限速度分布: $\bar{u}^+ = 11.7 \ln y^+ - 17.0$, 牛顿流体的速度对数分布: $\bar{u}^+ = 2.44 \ln y^+ + 5.0$, 以便进行比较. 从实验结果可 知减阻水溶液边界层的黏性底层明显增厚;速度分 布明显出现了两个直线分布即对数分布区域. 第1 个对数分布区域是表面活性剂减阻流特有的;第2 个对数分布区域对应着聚合物减阻流的速度对数分 布,是表面活性剂减阻流在流变特性上由"SIS"向 非 "SIS" 转变进而牛顿化的结果. 由此也可看出表面 活性剂减阻流在边界层中也具有一定的近壁效应.



(a) 基于外尺度的时均速度分布(a) Mean velocity distribution by outer scale





2.2.3 湍流强度特性

报

图 4(a) 为主流方向流速湍动强度沿横向的变 化. 从中可知,减阻水溶液的主流方向流速湍动强 度的峰值小于清水,峰值出现的位置也较清水远离 壁面,说明纵向涡的尺度远大于牛顿流体,这与矩 形管路的实测结果一致;另外与清水相反,在达到 最大值后,湍动强度并没有一直单调减小,而是约 在 *y* = 0.55δ 前后出现第 2 个峰值,结合时均速度分







图 4 速度湍动强度在边界层中的分布 (续)



布图 3(a), 可知第 2 峰值出现的位置其剪切速率远 小于 19 s⁻¹, 未能形成 "SIS" 状态, 后续的 PIV 流场 实测结果表明该处受间歇性展向强涡诱导使湍流强 度在该处出现了峰值.

图 4(b) 为横向流速湍动强度沿横向的变化. 从 结果可知和牛顿流体比较, 表面活性剂水溶液横向 速度湍动强度受到了强烈的抑制, 也未出现牛顿流 体出现的湍动峰值, 沿边界层厚度方向变化不大, 横向湍动受到大幅削弱, 这表明减阻水溶液在边界 层中的湍流涡扩散受到了强烈的抑制.

2.2.4 雷诺剪切应力分布特性

图 5 为雷诺应力沿边界层厚度方向的变化.减



阻水溶液的雷诺应力在整个边界层厚度方向几乎为 零,导致能量方程中的湍流能量生成项较牛顿流体 大幅降低,这样边界层内部的能量耗散以及边壁的 摩擦耗散必将会减少,进而使流体输送的动力消耗 降低.

图 6 为主流方向湍动速度和横向湍动速度相关 系数在边界层内的分布.从图中可知在主流方向和 横向速度湍动强度都不为零但雷诺剪切应力却被大 幅削弱,其主要原因是表面活性剂添加剂对湍动速 度成分之间的关联产生了解耦作用.由此可推测表 面活性剂水溶液的剪切诱导结构 "SIS" 使减阻水溶 液具有黏弹性产生新的湍动剪切应力补充了雷诺应 力的亏损 ^[9],正是这种在牛顿流体湍流中不存在的 湍动剪切应力在表面活性剂水溶液流动中,从时均 流中获得湍流能量,从而使湍流得以维持.





Fig.6 Distribution of correlation coefficient of fluctuating velocities

3 结 论

通过对质量分数为 1×10⁻⁴ 的减阻水溶液在零 压梯度平板边界层中湍流特性与清水流的实验比较 研究得出以下结论:

(1) 和牛顿流体相比, 黏性底层明显增厚.

(2) 湍流时均速度分布有层流化的趋势, 较牛顿 流体对数分布上移.

(3) 主流方向的速度湍动强度小于牛顿流体,且 峰值出现位置较牛顿流体远离壁面,沿横向并非一 直单调减小,在靠近边界层中心的非 "SIS" 处出现 第 2 峰值. 力

(4) 横向湍动大幅受抑, 沿边界层厚度方向基本 不变.

(5) 雷诺应力沿边界层厚度方向几乎为零, 各湍 动速度成分之间的关联被大大减弱.

为进一步揭示减阻表面活性剂水溶液在边界层 中的湍流特性,还需要阐明其湍流得以生成的各种 流动拟序结构,这是本研究的后续课题.

参考文献

- 1 Lindner J, Bewersdorff HW, Heen R. Drag-reducing surfactant solutions in laminar and turbulent flow investigated by small-angle neutron scattering and lightscattering. Progress in Colloid and Polymer Science, 1990, 50(1): 107~112
- 2 Ohlendorf D, Interthal W, Hoffmann H. Surfactant systems for drag reductuon: physicohemical properties and rheological behavior. *Rheol Acta*, 1986, 25(2): 468~486
- 3 Bewerdorff HW, Ohlendorf D. The behavior of drag reducing cationic surfactant solutions. Colloid & Polymer Sci, 1988, 26(10): 941~953
- 4 Warholic MD, Schmidt GM. The influence of a dragreducing surfactant on a turbulent velocity field. *Fluid*

Mech, 1999, 388: 178~190

报

- 5 Itoh M, Kurokawa Y. Visualization of turbulent structure in the drag-reducing flow of aqueous surfactant solution.
 In: Proceedings of the 14th Australasian Fluid Mechanics Conference. Adelaide University, 2001. 877~880
- 6 Kawaguchi Y, Segawa Γ. Experimental study on dragreducing channel flow with surfactant additives spatial structure of turbulence investigated by PIV system. Int J Heat Mass Transfer, 2002, 23(2): 700~709
- 7 李培文. 界面活性剂添加物对水湍流阻力抑制的实验研究. 西 安交通大学学报, 2001, 35(1): 37~42 (Li Peiwen. Experimental study of the characteristics of turbulence in drag reducing flow using surfactant additives. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2001, 35(1): 37~42 (in Chinese))
- 8 蔡书鹏. 表面活性剂减阻水溶液在边界层中的流动结构. 四川 大学学报, 工程科学版, 2007, 39(3): 51~56 (Cai Shupeng. Turbulent structure of drag-reducing surfactant solutions flow in boundary layers on flat plates. *Journal of Sichuan University*, (Engineering Science Edition in Chinese), 2007, 39(3): 51~56 (in Chinese))
- 9 Bewersdorff HW. Drag reducing in surfactant solutions. Gyr A. Structure of Turbulence and Drag Reductin. In: IUTAM Symposium, Zurich, Switzerland, 1989. 293~312

TURBULENT CHARACTERISTICS OF CTAB SURFACTANT SOLUTION FLOWS IN TURBULENT BOUNDARY LAYERS¹⁾

Cai Shupeng^{*,2)} Yang Lin[†] Tang Chuanlin^{*}

*(Institute of High Pressure Water Jet, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412008, China) †(School of Mechtronic & Automobile Engineering, Chongging Jiaotong University, Chongging 400074, China)

Abstract In order to clarify the drag-reducing mechanism with a surfactant solution, the turbulent characteristics of CTAB surfactant solution flow for a zero-pressure gradient boundary layer on flat plates is investigated by using a two dimensional LDV system. The results obtained are found as follows compared with the corresponding statistics for water flow. The viscous sublayer for the surfactant solution is thicker than that for water flow. The mean streamwise velocity profile falls between those of laminar and turbulent velocity profiles in Newtonian fluid flow. The peak of the streamwise turbulence intensity is smaller than that for water, the location where it appears is further away from the wall and the second peak appears near the center of the boundary layer. The wall-normal turbulence intensity is greatly suppressed and the Reynolds shear stress is almost zero throughout the boundary layer, which shows that the surfactant solution can weaken the correlation between the two components of velocity fluctuation, thus, it can reduce the production of turbulent kinetic energy so that the driven power for transporting fluids can be saved.

Key words surfactant solution, turbulent boundary layer, turbulent density, shear-induced state

Received 4 July 2007, revised 22 November 2007.

¹⁾ The project supported by the National Natural Science Foundation of China (50504021), the key Science and technology project of Ministry of Education of the PRC (206122) and Hunan Provincal Educational Department (06C265) and the Construct Program of the Key Discipline in Hunan Province.

²⁾ E-mail: nagoya_cai@sohu.com