

表面活性剂减阻水溶液突扩流的阻力特性¹⁾

蔡书鹏^{*,2)} 汪志能^{*} 段传伟^{*} 李丹[†]

^{*}(湖南工业大学机械学院, 湖南株洲 412007)

[†](武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘要 为揭示胶束水溶液突扩流的减阻特性, 实验研究了质量分数为 1×10^{-4} , 2×10^{-4} 的十六烷基三甲基溴化铵水溶液通过管径比为 1:1.52 的突扩的流动阻力行为. 实验结果表明, 在直管段最大减阻率都可达到 70% 的两给定质量分数的胶束水溶液, 其突扩局部阻力系数, 在较低雷诺数区域, 较牛顿流体仅有 10%~20% 程度的降低, 呈现局部低减阻特性; 在较高雷诺数区域远大于牛顿流体, 尤其当突扩进口流快失去减阻能力时, 甚至接近牛顿流体的 1.5 倍, 呈现明显的局部增阻行为. 胶束水溶液减阻流, 在突扩下游再次形成充分发展流所需的下游长度, 远大于牛顿流体的 7.8 倍下游管径 (45 倍突扩台阶高度), 流入突扩前完全失去减阻能力的质量分数为 2×10^{-4} 的胶束水溶液流, 所需的突扩下游长度达到最大, 约合 158 倍下游管径 (920 倍突扩台阶高度). 通过胶束水溶液流变特性的实验分析认为, 减阻水溶液突扩流的阻力行为与它的胶束网结构的形成及松弛的时间特性密切相关.

关键词 突扩, 局部阻力系数, 减阻, 胶束网状结构, 松弛

中图分类号: O373 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-17-328

DRAG CHARACTERISTICS OF A DRAG-REDUCING SURFACTANT SOLUTION FLOWING OVER A SUDDEN-EXPANSION PIPE¹⁾

Cai Shupeng^{*,2)} Wang Zhineng^{*} Duan Chuanwei^{*} Li Dan[†]

^{*}(School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, Hunan, China)

[†](State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract The minor loss characteristics of a drag-reducing surfactant solution flowing over a circular sudden-expanded pipe have been investigated experimentally with an expansion ratio of 1:1.52. The surfactant used is cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB) with concentrations of 1×10^{-4} and 2×10^{-4} by weight. The maximum drag reduction rate for both solutions is achieved 70% in the fully developed flow in straight pipes. But at lower inlet Reynolds numbers than the critical one, the expansion loss coefficient is only 10%~20% below that for water, while at inlet Reynolds numbers much higher than the critical one, it is found to be much greater than that for water and to approach 1.5 times one for water at the Reynolds number at which the friction factor reaches that for water. Furthermore, a much longer distance is required for the micelle solution flowing across the sudden-expanded step, than 7.8 times the diameter (45 times the step height) of expansion-downstream pipe for water in order to reform a fully developed flow in the downstream. And as inlet flow for the solution of concentration 2×10^{-4} loses its drag-reducing efficiency, approximately 158 times diameter (920 times

2017-09-28 收稿, 2018-02-28 录用, 2018-02-28 网络版发表.

1) 国家自然科学基金资助项目 (51476051).

2) 蔡书鹏, 教授, 主要研究方向: 流体流动减阻. E-mail: windowscsp@sina.com

引用格式: 蔡书鹏, 汪志能, 段传伟, 李丹. 表面活性剂减阻水溶液突扩流的阻力特性. 力学学报, 2018, 50(2): 274-283

Cai Shupeng, Wang Zhineng, Duan Chuanwei, Li Dan. Drag characteristics of a drag-reducing surfactant solution flowing over a sudden-expansion pipe. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2018, 50(2): 274-283

the step height) of the expansion downstream pipe is necessary for reforming the fully developed drag-reducing flow in the downstream. From the present rheological measuring results for the surfactant solutions, the drag and its development behaviour of the sudden expansion pipe can be considered to be closely related to the time characteristics in forming and relaxing of the netlike micelle structure induced by shearing.

Key words sudden expansion, local loss coefficient, drag reduction, netlike micelle structure, relaxation

引言

实际的流体流动绝大部分呈现湍流特性^[1-3], 如何降低湍流阻力是流体力学领域的热点课题之一. 稀薄的表面活性剂水溶液管流的湍流摩阻较之清水减幅可达 80%. 此项颇具魅力的节能技术已在欧美及日本等地的冬季城市采暖、大尺度建筑物的集中供热/冷水循环系统得到了一定程度的推广应用^[4-8]. 据已有文献报道, 目前已探知具有降阻功效的有: 阳离子^[9-11]、非离子^[12-14]及两性离子界面活性剂^[15]. 阴离子表面活性剂由于与水中金属离子的化学作用引起降解很少单独作减阻剂. 表面活性剂溶于水后形成胶束, 其水溶液也称为胶束水溶液. 超过临界质量分数, 胶束受流动剪切诱发会聚合成网状高次结构, 它与湍流相互作用可抑制湍流涡的生成及发育, 从而降低湍流摩阻, 这一观点已被很多学者接受^[9-10,12-13]. 细查此领域的研究文献易见, 绝大多数研究都针对直管内充分发展流. Li 等^[9,16]、Kawaguchi 等^[17]在矩形槽道胶束水溶液湍流结构研究中证实, 对湍流形成和维持起重要作用的猝发现象发生频率大幅降低, 垂向湍流强度显著小于纯水; 当流动雷诺数在临界值前后且减阻率相同时, 胶束水溶液的流动结构存异. Wei 等^[18]在矩形槽道流中, 详解了表面活性剂 CTAC 胶束溶液有效减阻温度范围与减阻剂质量分数和雷诺数之间的关系. Zhang 等^[19]发现阳离子表面活性剂 Habon 在混合不同阴离子结合强度的平衡离子添加剂后减阻率随温度出现上升、骤降又骤增的异常现象. Yu 等^[20]通过直接数值模拟分析流变参数对胶束水溶液流动结构的影响时获知, 流向涡弱化程度大, 且随减阻率增大被拉长. Fu 等^[21]等通过实验指出矩形槽道内由胶束诱发的流动结构具有与纯水不同的分区结构. Cai 等^[12]实验指出一种具有较弱弹性的非离子胶束稀液管流也能呈现不小的减阻功效. 而 Tamano 等^[13]通过向相同的非离子胶束液中加入一定量的有机酸提高了减阻的临界雷诺数和维持减阻效果的运行时

间.

偶见个别关于减阻剂水溶液通过突扩或突缩管路的阻力和流动结构的相关研究文献. Pak 等^[22]实验考察了聚合物 AP-273 水溶液突扩流的局部损失特性, 在 $2 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$ 的质量分数下, 聚合物突扩流的局部损失系数随雷诺数增大而加大, 且都低于纯水流, 但他们没讨论突扩下游形成充分发展流所需的发展长度与长链分子搭接结构形成之间的关系. Poole 等^[23-25]在圆形突扩中研究聚合物 PAAM 的流动结构中注意到, 较高质量分数下的强弹性导致了速度断面分布的非对称性; 在平面突扩中低质量分数下的弱弹性也可导致速度断面分布的非对称性. Dhinakaran 等^[26]等在一个 1:3 的平面突扩内研究幂律流体(非弹性)的层流结构时注意到, 剪切稀化的幂律流体会增加呈现流动结构非对称的临界雷诺数; 而剪切增稠则能减小临界雷诺数. Tamaddon 等^[27]基于不同本构模型数值模拟了博格流体(一种常黏度黏弹性流体)在一个突扩-突缩内局部压力损失异常增大的现象. Norouzi 等^[28]通过数值模拟指出一个通过二维对称渐扩的黏弹性非对称流的总阻力系数随雷诺数的变化规律与渐扩角有关. 今尾茂树等^[29]在管径比为 1:2 的突扩中实验研究了胶束水溶液流的局部阻力特性, 但由于该实验给出了下游粗管的临界雷诺数比上游细管的临界雷诺数还小的实验结果, 可以判断该文关于下游粗管内所谓的充分发展流的阻力测试结果实为正在发展流的, 所得结论令人生疑. Li 等^[30]在矩形槽道内利用添加剂减阻的管径效应, 通过一个突缩实现了上游减阻、下游为胶束网联结构被破坏的低减阻(从而实现强化传热)的流动系统. 焦利芳等^[31]对突缩和突扩等异形管件对管流胶束减阻效果的影响进行了实验研究, 但由于没有确认压降测试的取压位置是否受到异型管件的影响, 所得结论需进一步实验考证.

添加剂减阻流通过非直管流动的文献有限, 关于胶束水溶液在非直管流动中的研究更是鲜有. 然而, 在实际水循环输送系统中, 除直管外, 尚有很多

管路辅助元件,如弯管、接头、控制阀、换热器等通流截面突变的各种流动元件.可以预见,通过这些元件时以及通过后,胶束水溶液的阻力行为及相应流动结构与充分发展直管流必然不同.只有查明两者的差异,才能回答:直管已发展流中湍流摩阻降幅可达80%的胶束稀液,在实际水循环管网中降幅锐减、个别情况甚至不足20%^[5]的减阻问题.

仅有对充分发展段直管流的研究,不足以全面认识表面活性剂减阻现象.通过对通流横截面突然改变的胶束水溶液流展开研究,从流体力学基础层面洞察其在发展中的减阻行为更具有理论意义.突扩流在实际工业应用中是一种广泛的流动现象,还被认为是强化传热效果的一种手段.鉴于上述研究和实际应用背景,本实验拟在一个管径比为1:1.52的突扩水流中,加入质量分数为 1×10^{-4} , 2×10^{-4} 的阳离子表面活性剂十六烷基三甲基溴化胺(CTAB),使用不同量程的压差变送器和压力变送器研究:突扩进口为不同减阻率的流动时胶束减阻稀液突扩流的局部阻力行为、在突扩下游的阻力发展行为,结合胶束稀液的剪切诱发结构形成和松弛的流变特性实验,对上述行为给予力学解释,以进一步阐释胶束稀薄水溶液的减阻机理以及为合理设计添加剂减阻的水循环输送系统提供科学依据.

1 实验装置和实验方法

1.1 实验装置

本实验装置采用循环式,详见图1.它由突扩组件、 1.5 m^3 的不锈钢液罐、 1 m^3 的不锈钢整流室、低脉动防腐型多段叶片变频离心泵、防腐数字流量计、温控组件、搅拌器及其他管路连接件组成.突扩组件由长约为4 m、内径为 $d = 10.57 \text{ mm}$ 的细管和长约为6 m、内径为 $D = 16.12 \text{ mm}$ 粗管通过严格同轴的

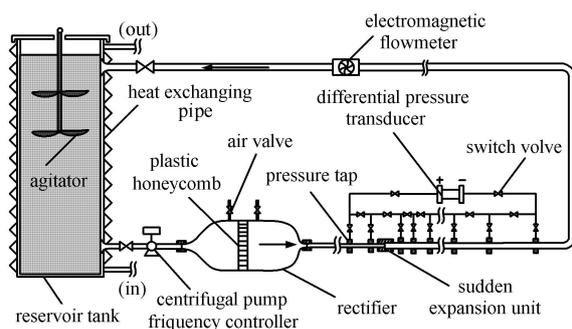


图1 流体循环装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the closed fluid loop and instrumentations

法兰连接组成,形成管径比为1:1.52的突扩.粗管由三根、细管由两根单根长约2 m的短管无缝连接组成.整流室由一个扩展段和一个收缩段通过一个圆筒光滑连接而成,在圆筒中部内置有由单根长100 mm、内径为5 mm塑料管扎堆而成的流动准直细管组,以便尽可能消除来流中较大尺度旋涡及脉动,尽可能使突扩上游细管进口为速度均匀分布流.

1.2 实验材料

将稳定胶束结构的反离子添加剂水杨酸钠与CTAB以2:1的摩尔比混合,按目标质量分数 1×10^{-4} 或 2×10^{-4} 称取若干,溶进 50°C 左右的水中,搅拌均匀,配制半浓缩液,将其倒入储液罐中,再利用配制半浓缩液的容器加足自来水以配制目标质量分数的稀液,温度设置成 $25^\circ\text{C} \pm 0.2^\circ\text{C}$,然后低速循环12 h,使稀液彻底达到热力学平衡状态,开始实验.

1.3 实验方法

1.3.1 压差和压力测试

通过压差测试,检查突扩上游来流是否充分发展,获得细管内充分发展胶束液流的减阻特性;考察不同减阻率的上游充分发展流通过突扩后在下游的阻力发展特性,进而结合电子流量计测量的流量,计算突扩局部阻力系数.通过压力测试,获取突扩上游管的基点压力,结合各段压差量测结果,揭示胶束稀液突扩流的压力分布行为.考虑到胶束聚合结构形成的缓慢时间特性会迟滞管内流动发展^[7],突扩上游细管长取 $380d$;再考虑突扩对下游胶束减阻稀液流动发展的影响,突扩下游粗管长取 $372D$.在距突扩界面不同距离的4个上游位置的细管壁上,分别沿圆周等间隔打3个直径为0.8 mm的静压孔;在下游从突扩界面起间隔从密到疏的20个粗管轴向位置,也分别沿圆周等间隔打3个直径为1 mm的静压孔.完全去除管内壁的钻孔毛边,以防对流动造成扰动.在每组静压孔的管外壁,套上两端带有O型密封圈的静压环,在静压环中部利用内螺纹旋入一个铜接头,通过一个扩张后紧套在铜接头上部的透明塑料软管将流体引至压差变送器或U形管.根据压差估值大小分别采用量程为0~23 mm,0~140 mm水柱的美国Validyne DP45的压差变送器和倒置U形管测试相邻两点压差.低压差测试的最大不确定度为2%;高压差为1%.流量测试的不确定度为读数的0.5%.

距突扩界面最远的上游静压测点作为基点,根据压力大小分别采用量程为0~225 cm和0~880 cm

水柱的 Validyne DP15 的压力变送器测试 (低压端开放) 基点压力, 其下游各测点压力等于基点压力减去该点到基点之间各测试段压差的代数和. 这种静压测试方略是基于压力变送器量程大绝对误差也大的考虑, 跨度很长的多段压差的累计误差也可通过压力变送器进行评估和补偿, 这样得到的压力分布比只用压力变送器测试要精确. 在本研究中最小静压大于 80 cm 水柱, 静压测试的最大不确定度为 1%.

本研究所用工作流体为质量分数很低的胶束稀液, 黏弹性较弱, 由流体黏弹性导致的“孔压误差”很小^[32], 因此在确定压差和压力不确定度时没有考虑黏弹性导致的“孔压误差”影响.

1.3.2 流变特性测试

为分析胶束稀液在直管内充分发展所需入口段长度、通过突扩后的局部阻力行为和阻力发展特性, 需要对剪切黏度对剪切速率的依存规律、剪切诱发的胶束聚合结构的形成和松弛时间特性进行测试. 利用吸管从备好的溶液中吸取少许, 注入到美国 TA 公司的 ARES G2 应变型控制流变仪的锥板之间, 然后封存测样, 加温至 $25.5^{\circ}\text{C} \pm 0.2^{\circ}\text{C}$, 为保证测样达到热力学平衡状态, 静置 45 min, 然后开始测试.

2 实验结果及分析

2.1 流变特性

两质量分数胶束稀液的剪切黏度如图 2 所示. 剪切黏度 μ (Pa/s) 对剪切速率 $\dot{\gamma}$ (1/s) 的依存是胶束结构随之演化的宏观力学体现^[33]. 观实验结果知, 随剪切速率从小到大, 两稀液依次呈现黏度不变的牛顿

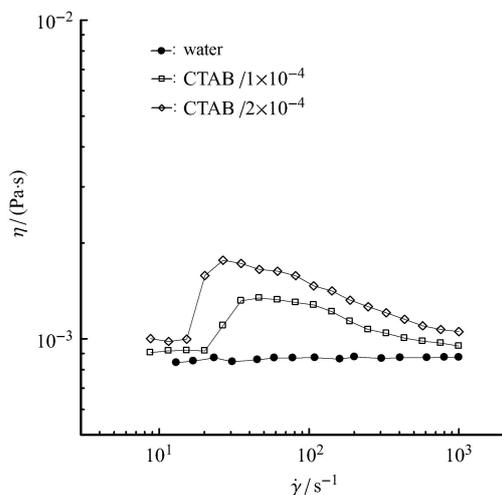


图 2 剪切黏度对剪切速率的依存 (25.5°C)

Fig. 2 Shear viscosity versus shear rate (25.5°C)

特性、剪切增稠及稀化的非牛顿流变特性. 这种胶束结构上的相变是在某一临界剪切速率后突然出现的. 很多研究人员认为这种改变是杆状胶束受剪切诱发相互钩织形成网联结构 (“SIS”) 的宏观力学行为, 这种胶束高次结构出现后, 胶束水溶液呈现黏弹性行为, 正是这种运动黏弹属性与湍流间的相互作用才导致了减阻^[10,16,33-34]. Olendorf 等^[33] 认为剪切稀化表示较弱剪切诱发结构的形成.

两胶束稀液的剪切加载、卸载时剪切应力的时间响应, 详见图 3. 加载剪切速率为 250 s^{-1} 的变形后, 剪切应力开始快速上升, 短时间缓升后达到一个稳定值; 突然卸载后, 剪切应力开始陡然松弛而后经过较长时间的缓慢松弛至零. 两水溶液的剪切加载和卸载的剪切应力的时间响应特性是类似的, 而纯水基本上表现出剪切应力随剪切加载瞬间达到稳定、又随剪切卸载瞬间完全松弛的力学行为. 胶束稀液内部剪切应力在突然施加一个剪切变形后、持续一段时间又突然卸载后的时间演变, 充分反映了水溶液内部胶束结构聚合和松弛的行为过程. 这种由剪切诱发的胶束聚合结构先随剪切加载发育、生长至形成后, 又随卸载快速松弛、缓慢松弛后转化成单个杆状或球状胶束. 这种胶束网联结构的动力学演变, 还可通过光学双折射来观察^[34].

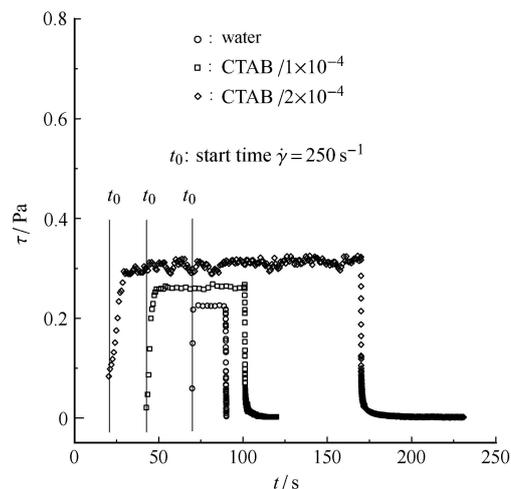


图 3 剪切应力对突然加载和卸载的瞬间响应
Fig. 3 Transient shear stress response with adding and removing a shear rate

从加载一个给定的剪切速率变形开始, 到稀液内部剪切应力达到一个稳定值, 这个时长就是该剪切速率对应的剪切诱发的杆状胶束网联结构的形成时间. 很显然剪切速率不同, 胶束网联结构的形成时

间长短也不同. Hu 等^[35]发现剪切诱发结构形成时间可用如下线性关系描述

$$t_s = c\dot{\gamma}^{-1} \quad (1)$$

式中, t_s 为剪切诱发结构的形成时间 (s), c 为比例常数, $\dot{\gamma}$ 为剪切速率 (s^{-1}). 除很小的剪切速率外, 其他剪切速率下的实验数据基本符合式 (1).

从图 3 数据可知, 质量分数为 1×10^{-4} 的和 2×10^{-4} 的稀液, 在 $250 s^{-1}$ 的剪切速率下剪切诱发结构形成的时间分别是 5 s 和 7 s, 按照式 (1) 计算的时间常数 c 分别为 1250 和 1750. 对于管内流, 形成管内充分发展流动需要形成稳定的胶束剪切诱发结构, 根据这一认识来分析胶束稀液管流形成充分发展的流动所需的入口段长度与牛顿流体的差异. 管径为 d 、平均流速和最大流速分别为 U_m 和 U_{max} 的圆管内平均剪切速率 $\dot{\gamma}_m$ 为

$$\dot{\gamma}_m = 2U_{max}/d \quad (2)$$

对于胶束减阻流断面速度分布靠近层流^[9,17], 因此粗略取管内平均流速为最大流速的一半, 于是根据胶束的剪切诱发结构形成时间式 (1) 计算入口段长度 L_s 为

$$L_s = t_s U_m = cd/4 \quad (3)$$

对于质量分数为 1×10^{-4} 的稀液, 常数 c 为 1250, 于是, 胶束剪切诱发结构的充分发展需要不小于 $312d$ 的入口段长度. 这个长度是针对圆管入口为流速均匀分布的条件下导出的, 它远比牛顿流体管内湍流充分发展所需的 $50d$ 大, 完全是由于胶束剪切诱发结构在管内的缓慢发展所致. 减阻剂不同、同一减阻剂但质量分数不同, 入口段长度也会有相应差异.

关于胶束减阻流湍流结构的实验研究, 绝大多数均是在来流经过严格碎涡整流后, 经过一段为形成充分发展流动而设置的入口长度的下游进行的. 正如上面分析, 胶束剪切诱发结构形成的迟滞性会导致管内流动的缓慢发展, 当测试手段不足以捕捉这种缓慢发展流的压力梯度变化时, 会将这种发展中流误判为已充分发展流, 在这种“充分发展流”中测得的湍流会出现剪切应力亏损. Nowak^[4]在距圆管入口 42 倍管径的下游断面、Li 等^[16]于距槽道入口 68 倍水力直径的下游断面测量了胶束减阻水溶液的湍流结构, 得出了上述剪切应力缺失的结论. 虽无证据表明他们所讨论的流动尚在发展, 但据 Suzuki 等^[34]在质量分数为 1×10^{-3} 的 Eothquad O/12 减阻剂

形槽道内所做的流动发展特性和胶束剪切诱发结构形成时间特性的研究结果 (他们认为在他们的实验条件下, 胶束流充分发展至少需要 1750 倍管径的入口长度), 结合本文上述实验分析, 可以认为 100 倍左右水力直径的入口长度对于快速松弛系统和牛顿流体是足够的, 但对胶束减阻流是否足够需要实验佐证. 这也是本实验装置中的突扩上游细管长取 $380d$ 的主要依据.

“SIS”的形成, 常使胶束溶液产生黏弹性^[34]. 剪切应力松弛时间常数是反映黏弹性强弱的一个指标. 参考 Hu 等^[35-36]的研究成果, 用如下的二阶麦克斯韦模型来拟合图 3 中的剪切应力松弛数据得

$$\tau = c_1 e^{-t/t_1} + c_2 e^{-t/t_2} \quad (4)$$

式中, τ 为剪切应力 (Pa), c_1 和 c_2 为时间拟合常数, t_1 和 t_2 为快速松弛和慢速松弛时间常数 (s). 拟合结果表明, 1×10^{-4} 和 2×10^{-4} 稀液快速松弛时间常数同为 0.9 s, 而慢速松弛时间常数分别为 11 s 和 18 s, 而纯水的两个松弛时间常数都接近 0. 快速松弛主要是黏性起支配作用, 而慢速松弛则是由弹性起主导作用^[33]. 实验结果表明, 2×10^{-4} 稀液的黏弹性比 1×10^{-4} 的强, 而纯水没有黏弹性.

2.2 直管减阻特性

图 4 给出了两种质量分数的减阻水溶液在系统中单独接入 10.57 mm 管和 16.12 mm 管时、各自充分发展段的阻力特性曲线.

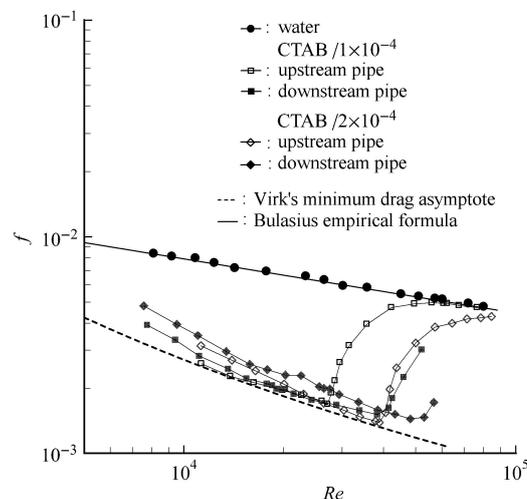


图 4 突扩上、下游管的范宁系数对雷诺数的依存
Fig. 4 Fanning factors versus Reynolds number for upstream and downstream pipes

图中的雷诺数 Re 以各自管径、管内平均流速和水的运动黏度定义, f 为范宁系数. 距管入口距离大于 300 倍管径、长度不小于 30 倍管径的下游两段的平均压力梯度相差低于 4% 时, 即可判断流动为充分发展. 纯水的实验数据与经典的 Blasius 经验式偏差小于 3%, 足见本实验装置和实验方法具有足够的精度. 减阻率按下式定义

$$DR = 100 \times (f_w - f_s) / f_w \quad (5)$$

$$f_w = 0.0791 \times Re^{-0.25} \quad (6)$$

式中, DR 为减阻率, f_w 和 f_s 分别为基于布拉休斯经验式的纯水和实验测试的胶束水溶液的范宁系数, Re 为纯水流的雷诺数. 据图 4, 当质量分数为 1×10^{-4} 时, 细管的临界雷诺数和最大减阻率分别为 27 500 和 71%, 而粗管则分别为 38 500 和 70%, 减阻的管径效应显著. 减阻剂质量分数增大提高了两管的临界雷诺数 Re_c , 这是由于质量分数增大不仅加大了棒状胶束的长度, 还会提高其密度, 从而导致胶束剪切诱发结构具有更强的抗剪能力.

2.3 减阻突扩流的局部阻力特性

管径突然扩大使流动先后经历分离、附壁、再发展以及再充分发展 4 个阶段. 突扩局部损失包括: 上游近突扩区域受突扩影响时相对充分发展流所产生的额外能量损失、下游近突扩区的反流涡流损失、流动附壁及其后的重新发展区相对下游阻力充分发展流的额外能量损失. 于是, 突扩局部阻力损失可通过如下伯努利方程求得

$$h_f = p_u / \rho g + U_1^2 / 2g - (p_d / \rho g + U_2^2 / 2g) \quad (7)$$

式中, h_f 为突扩局部阻力损失 (m), U_1 和 U_2 分别为突扩上/下游管的断面平均流速 (m/s), p_u 和 p_d 分别为根据上/下游充分发展段的压力分布数据线性外插到突扩界面处的静压 (Pa).

对于牛顿流体, 据已有文献研究成果^[37], 在距突扩界面一定距离的上游管和下游管各布两个静压测点, 确保其阻力系数与 Blasius 经验值之间的偏差在 4% 范围内, 即确保流动为充分发展流. 对于非牛顿流体, 需要在距突扩界面上/下游足够远的位置各布 3 个静压孔, 确保相邻两段所测平均压力梯度差在 4% 以内, 以证明流动已充分发展, 再利用上式计算突扩局部损失. 在实验中, 位于上游距突扩界面 $48d$ 位置前后各取长度为 $30d$ 的两段, 测试其阻力系

数来证实流动已充分发展, 同时获取压力分布线斜率. 近突扩的静压孔用来观察突扩对上游的压力影响. 于下游距突扩界面 $320D$ 位置前后也各取长度为 $30D$ 的两段, 测试其阻力系数来证实两段的流动为已恢复成阻力充分发展的流动, 并可知压力分布直线斜率. 将上游距突扩 $48d$ 和下游距突扩 $320D$ 的两点间压差减去两点到突扩界面的相应的充分发展流动的沿程阻力, 可计算 $(p_u - p_d) / 2g$, 再加上上/下游断面平均流速对应的动压差即可得突扩局部阻力.

图 5 表示两胶束稀液突扩流的局部阻力系数, Re_d 为细管的雷诺数.

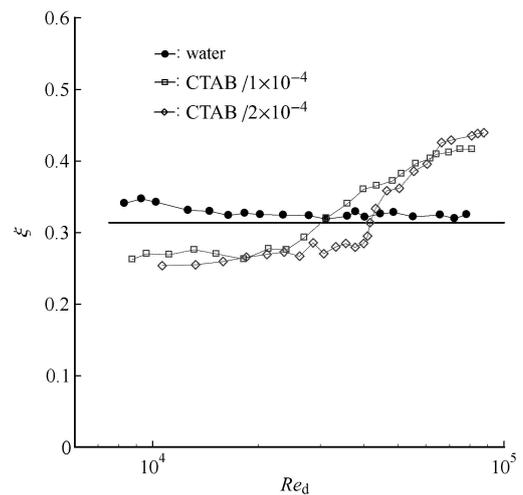


图 5 胶束稀液和水流的突扩局部阻力系数与雷诺数的关系

Fig. 5 Local loss coefficients of the sudden expansion pipe versus Reynolds number for both micelle solutions and water

观实验结果, 清水突扩流局部阻力系数 ξ 以小于 3% 的偏差略大于著名的 Borda Carnot 理论值, 而胶束稀液突扩流却表现出了不仅与纯水、而且与高分子突扩流也完全不同的局部阻力行为. 当质量分数为 1×10^{-4} 时, 在细管雷诺数小于最大减阻率对应的临界雷诺数 (27 500) 范围内, 突扩局部阻力系数以 10%~20% 的量级略小于纯水, 且随雷诺数增大略有变化; 当上游来流超过临界雷诺数逐渐失去减阻效果时, 减阻剂水溶液突扩流的局部阻力系数大于纯水, 尤其是突扩进口流完全丧失减阻效果后, 局部阻力系数最大. 2×10^{-4} 的稀液突扩流的局部阻力系数在趋势上与 1×10^{-4} 的稀液基本相同, 但最大局部阻力系数接近纯水的 1.5 倍. 突扩局部阻力行为因减阻剂质量分数引起的差异很小, 可能是两种水溶液的质量分数都较低的缘故.

当上游来流小于临界雷诺数时, 胶束网状结构

系受剪变形的弹性体, 内部存有弹性能, 经突扩后, 由于流束扩大致使剪切应力松弛, 从而释放出部分弹性能, 这部分弹性能降低了近突扩反流区涡流能量损失, 尽管流动附壁后相对纯水重新发展区长度显著加大, 相对下游充分发展流需要额外消耗一部分能量, 但整体上局部损失仍小于纯水. 当上游雷诺数略超过临界值后, 胶束聚合结构随雷诺数不同而遭受不同程度破坏, 内部存储的弹性能相应减少, 流经突扩后释放的弹性能非常有限, 不能显著降低突扩反流区涡流损失, 加上流动再发展相对下游恢复的阻力充分发展流动所额外消耗的能量, 使局部损失系数大于纯水. 当上游管雷诺数继续增大致使胶束聚合结构完全或接近完全被毁时, 内部没有剪切弹性能的胶束稀液流经过突扩后, 杆状胶束之间随流重新搭接、构筑新的网联结构需要更长的下游发展长度才能形成稳定的减阻流, 在这个长度内相对下游已恢复的阻力充分发展流额外消耗的能量损失更大, 导致突扩局部阻力系数最大. 突扩来流雷诺数略大于临界值后, 胶束聚合结构受不同程度破坏, 不能改变突扩反流区涡流损失大小, 这由后叙的压力恢复最大值与清水基本相同得到佐证.

2.4 压力分布特性

下游近突扩的 4 个静压孔位置距突扩界面的距离依次是 $0.8D$, $3.5D$, $5.8D$ 和 $7.8D$, 利用它们来观察流动扩大后压力恢复情况. 图 6 ~ 图 8 分别给出了纯水、两稀薄水溶液从上游充分发展流 $x/d = -48$ 到下游充分发展流的 $x/D = 190$ 之间的压力分布, 为清晰起见, 每种流体只选择了 5 个雷诺数工况示于图

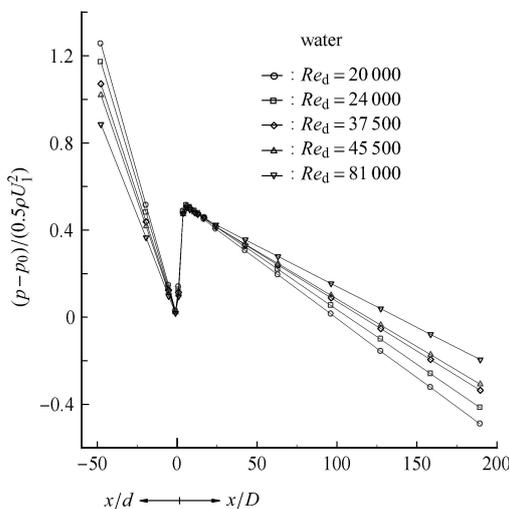


图 6 突扩上、下游管内水流的壁压分布

Fig. 6 Wall-pressure distributions in an expansion pipe flow for water

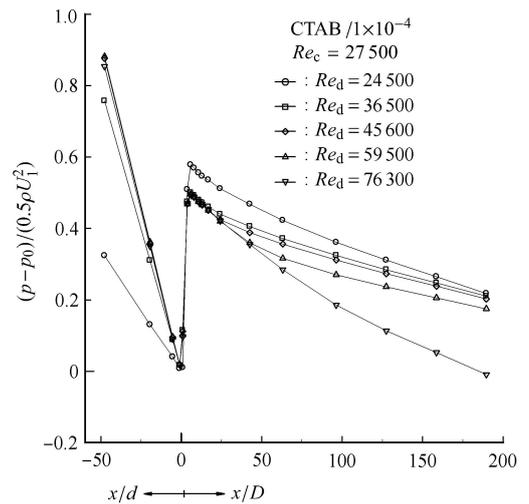


图 7 胶束稀液突扩流的管内壁压分布 (质量分数为 1×10^{-4})

Fig. 7 Wall-pressure distributions in an expansion pipe for 1×10^{-4} solution

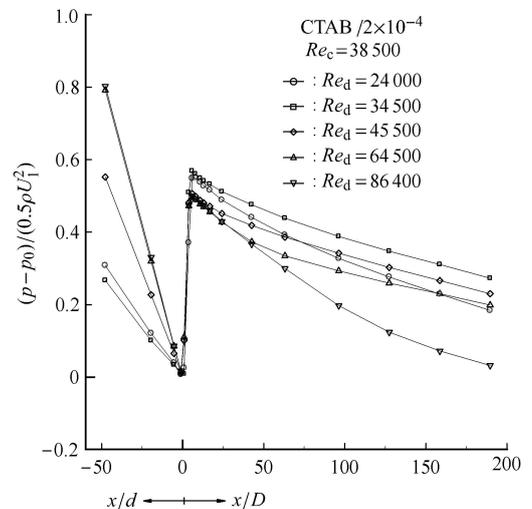


图 8 胶束稀液突扩流的管内壁压分布 (质量分数为 2×10^{-4})

Fig. 8 Wall-pressure distributions in an expansion pipe for 2×10^{-4} solution

中. 图中, x 为相对突扩界面的位置, 沿流向为正, 纵坐标为各点的无量纲压力, 大小为测点压力 p 相对上游逼近突扩界面处的压力 p_0 并除以该工况下上游管平均流速对应的动压.

上游压力分布线斜率表示阻力系数, 而下游压力分布线斜率为阻力系数乘以管径比的四次方, 相邻两段线的斜率相同表示流动已充分发展, 如明显不同则说明两段中的前段流动尚在发展. 因此, 从压力分布可解读阻力发展特性. 注意纯水的压力分布图 6 所用的纵坐标刻度范围与减阻胶束稀液不同,

该图表明, 胶束稀液突扩流的阻力发展特性与纯水截然不同。

在基本相同的上游雷诺数下, 观察胶束稀液流从上游近突扩点到下游充分发展点之间的压力变化, 与同区段的纯水比较易知: 当胶束稀液突扩流的局部阻力相对纯水仅有 10% 量级的减少时, 总压差却有 30% 到 40% 的量级减少; 而当胶束稀液突扩流的局部阻力大于纯水时, 其总压差仍有 10% 到 20% 量级的减少。比如, 当上游雷诺数约为 24 000 时, 质量分数为 1×10^{-4} 和 2×10^{-4} 的突扩流的局部阻力减小率只有 15% 和 22%, 而它们的总压差却分别有 38% 和 42% 的减小; 而当上游雷诺数约为 60 000 时, 它们的局部阻力相对纯水分别有 23% 和 34% 的增加, 但他们的总压差较纯水仍然有 10% 和 23% 的减小。上游减阻流再次于突扩管下游形成阻力充分发展的减阻流, 要经过远大于纯水的下游长度, 这使减阻突扩流的局部阻力减幅远不及直管内沿程阻力减幅, 甚至会超过纯水, 但在流动重新发展过程中管壁摩擦阻力仍然远小于同雷诺数下充分发展的水流, 因此总水头损失仍小于纯水。

此外, 对于纯水, 近突扩回流区的压力恢复最大值几乎不随雷诺数变化; 而对于胶束稀液, 当上游减阻率较大时, 近突扩下游三点 (当雷诺数较小时为四点) 压力恢复程度提高, 压力恢复最大值大于纯水, 当上游雷诺数略超过临界值后, 基本与纯水无异。突扩对近突扩上游管流动没有明显的影响。

图 9 表示突扩下游再次形成充分发展流所需下游长度, 即压力恢复长度与雷诺数的关系。该图传递了 3 个信息: 一是, 纯水的压力恢复长度基本不依存于雷诺数, 维持在 $7.8D$, 约合 $45h$ (h 为突扩台阶高度); 二是, 减阻流的压力恢复长度远大于纯水突扩流, 且在突扩来流维持减阻效果时, 其长度基本与雷诺数无关, 当上游管胶束稀液流减阻效果丧失时, 随雷诺数陡然增大。例如, 对于质量分数为 2×10^{-4} 的突扩流, 上游管雷诺数 $Re_d = 76\ 000$ (减阻率为 8%) 时, 压力恢复长度为 $158D$, 约合 $920h$; 三是减阻剂质量分数增大时, 最大压力恢复长度有所加大。

上游细管内充分发展减阻流通过突扩后于下游再次形成阻力充分发展的减阻流, 在所需下游长度上呈现上述特性, 主要与胶束网状结构的形成时间特性和松弛特性关联。当带有一定减阻率的来流经过突扩时, 相应的胶束网状结构由于流束扩大随流

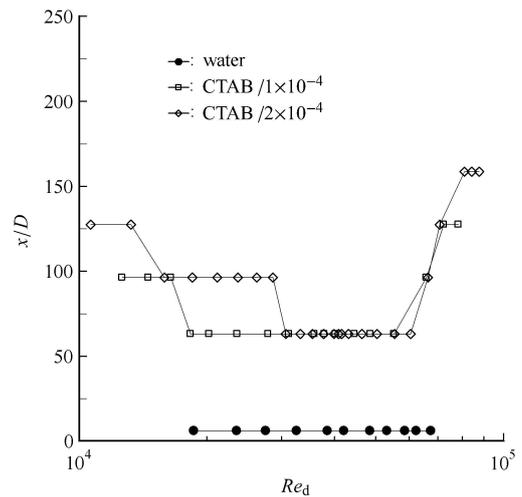


图 9 胶束水溶液突扩流下游流动发展长度随雷诺数的变化

Fig. 9 Flow development lengths in the downstream of a sudden expansion step versus Reynolds numbers for micelle solutions

动仅经过短时间松弛后, 随着继续向下游流动逐渐形成与新的剪切应力场相适应的稳定胶束网联结构, 这个流动过程所涉及的下流长度, 根据本文前述的关于进口流动发展长度的实验分析逻辑, 基本与雷诺数无关。但当上游来流在进入突扩前为快丧失减阻能力的流动时, 流体内部的胶束网状结构已被高雷诺数流的强力剪切所毁, 流体变成了少量棒状胶束和大量球状胶束游离分布的均匀水溶液。经突扩后, 剪切应力场变弱, 它与本文对胶束稀液从静止状态突然施加一定剪切速率的剪切荷载后形成胶束网状结构的实验情形类似, 完全从没有胶束搭接的状态开始随流受剪逐渐形成新的胶束网联结构, 与具有一定减阻效果的来流经过突扩虽有一定程度松弛但胶束网状结构尚存的来流情况不同, 相应的压力恢复长度必然增加, 突扩局部阻力系数增大。当来流雷诺数较小时, 经突扩后, 下游发展区壁面剪切速率进一步减小, 胶束聚合结构形成时间比式 (1) 计算值略有增加, 导致流动发展距离增大。

3 结论

通过管径比为 1:1.52 的一个突扩胶束减阻稀液流的阻力实验, 结合对 1×10^{-4} 和 2×10^{-4} 两低质量分数的 CTAB 稀液剪切诱发的胶束网联结构的形成和松弛时间特性的流变考察, 暂获新知如下:

(1) 当突扩进口流低于临界雷诺数时, CTAB 稀液突扩流局部阻力系数, 相对纯水约有 10%~20% 程度的降低; 当进口流雷诺数略大于临界值时, 呈现局

部增阻特性;当进口流为完全失去减阻效果时,局部阻力系数最大,接近纯水的 1.5 倍.这种局部阻力行为与高分子减阻剂完全不同.

(2) 当突扩进口流雷诺数低于临界值时,压力恢复最大值高于纯水;进口流为略大于临界雷诺数后的流动时,压力恢复最大值同清水.

(3) 胶束稀液在突扩管中形成新充分发展减阻流的长度,当进口流减阻时,远大于纯水,进口流失去减阻效果时,达到最大.质量分数为 2×10^{-4} 时,突扩下游最大发展长度达到 158 倍下游管径.

(4) 胶束稀液突扩流的局部阻力和突扩下游压力发展特性均与剪切诱发的胶束网结构的形成和松弛的时间特性有关.

参 考 文 献

- 1 吴应湘,林黎明,钟兴福.带有新型涡激振动抑制罩的圆柱体的水动力特性.力学学报,2016,48(2):307-317(Wu Yingxiang, Lin Liming, Zhong Xingfu. Investigation in hydrodynamics of a circular cylinder with the new suppressing shroud for vortex-induced vibration. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(2): 307-317 (in Chinese))
- 2 宋磊建,付世晓.剪切流下发生涡激振动的柔性立管阻力特性研究.力学学报,2016,48(5):300-306(Song Leijian, Fu Shixiao. Investigation of drag forces for flexible risers undergoing vortex-induced vibration in shear flow. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(5): 300-306 (in Chinese))
- 3 苏建,田海平,姜楠.逆向涡对超疏水壁面减阻影响的 TRPIV 实验研究.力学学报,2016,48(5):1033-1039(Su Jian, Tian Haiping, Jiang Nan. TRPIV experimental investigation of the effect of retrograde vortex on drag-reducing mechanism over hyperhydrophobic surfaces. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(5): 1033-1039 (in Chinese))
- 4 Nowak M. Time-dependent drag-reducing and ageing in aqueous solution of a cationic surfactant. *Experiments in the Fluids*, 2003, 34(2): 397-402
- 5 佐伯隆,徳原慶二.抵抗低減効果による流体輸送の省エネルギー技術の開発と普及.日本レオロジー学会誌,2015,42(5):279-284(Saeki K, Tokuhara K. Development and spread of energy saving technology for fluid transportation by using drag-reducing effect. *Nihon Reorogi Gakkaishi*, 2015, 42(5): 279-284 (in Japanese))
- 6 Matras Z, Kopiczak B. Intensification of drag reduction effect by simultaneous addition of surfactant and high molecular polymer into the solvent. *Chemical Engineering Research and Design*, 2015, 96(2): 35-42
- 7 Gasljevic K, Hoyer K, Matthys EF. Intentional mechanical degradation for heat transfer recovery in flow of drag-reducing surfactant solutions. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, 84(6): 251-265
- 8 Andrew M, Lucas W, Prathamesh K, et al. Heat transfer enhancement in turbulent drag reducing surfactant solutions by agitated heat exchangers. *Int. Heat Mass Transfer*, 2017, 109: 1044-1051
- 9 Li FC, Yasuo K, Bo Y, et al. Experimental study of drag-reducing mechanism for a dilute surfactant solution. *International of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51(7): 835-843
- 10 Yuli SI, Usui H, Suzuki H. Hydrodynamics and heat transfer characteristics drag-reducing trimethylolthane solution and suspension by cationic surfactant. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 2006, 39(6): 623-632
- 11 蔡书鹏,罗斌文,彭高.氯化钠对添加剂水溶液低雷诺数减阻效果的影响.机械工程学报,2016,52(24):164-169(Cai Shupeng, Luo Binwen, Peng Gao. Influence of NaCl on the drag-reducing effects in low Reynolds number water flow with additive drag reducers. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(24): 164-169 (in Chinese))
- 12 Cai SP, Higuchi Y. Drag-reducing behavior of an unusual non-ionic surface in a circle pipe turbulent flow. *Journal of Hydrodynamics*, 2014, 26(3): 400-406
- 13 Tamano S, Morinishi Y, Taga K. Drag reduction and degradation of nonionic surfactant solutions with organic acid in turbulent pipe flow. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2015, 215: 1-7
- 14 Cai SP, Hizuki H, Komoda Y. Drag-reduction of a nonionic surfactant aqueous solution and its rheological characteristics. *Science China Technological Sciences*, 2012, 42(4): 388-394
- 15 Wei JJ, Kawaguchi Y, Li FC, et al. Drag-reducing and heat transfer of a novel zwitterionic surfactant solution. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(3): 3547-3554
- 16 Li FC, Kawaguchi Y, Segawa T. Reynolds-number dependence of turbulence structures in a drag-reducing surfactant solution channel flow investigated by particle image velocimetry. *Physics of Fluids*, 2005, 17: 075104-075109
- 17 Kawaguchi Y, Sagawa T, Feng ZP. Experimental study on drag-reducing channel flow with surfactant additives-spatial structure of the turbulence investigated by PIV. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2004, 23(5): 700-709
- 18 Wei JJ, Wang JF, Zhang CW, et al. Combined effects of temperature and Reynolds number on drag-reducing characteristics of a cationic surfactant solution. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2012, 90(5): 1304-1309
- 19 Zhang Y, Qi YY, Schmidt J, et al. Unusual temperature gap in drag reduction of cationic surfactants with mixed coniferons. *Rheol Acta*, 2017, 56(5): 409-414
- 20 Yu B, Kawaguchi Y, Segawa T. Parametric study of surfactant-induced drag-reduction by DNS. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2006, 27(5): 887-894
- 21 Fu ZG, Iwaki Y, Motozawa M, et al. Characteristic turbulent structure of a modified drag-reduced surfactant flow via dosing water from channel wall. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2015, 53: 135-145
- 22 Pak B, Cho YI, Choi SUS. Turbulent hydrodynamic behavior of a drag-reducing viscoelastic fluid in a sudden-expansion pipe. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 1991, 39: 353-373
- 23 Poole RJ, Alves MA, Oliveira PJ, et al. Plane sudden expansion flows of Viscoelastic liquids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2007, 146: 79-91

- 24 dales C, Escudier MP, Poole RJ. Asymmetry of the turbulent flow of a viscoelastic liquid through an axisymmetric. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2005, 125: 61-70
- 25 Poole RJ, Escudier MP. Turbulent flow of a viscoelastic liquid through an axisymmetric sudden expansion. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2004, 117: 25-46
- 26 Dhinakaran S, Oliveria MSN, Pinho FT, et al. Steady flow of power-law fluids in 1:3 planar sudden expansion. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2013, 198(1): 48-58
- 27 Tamaddon-Jahromi HR, Loperz-Aguilar IJ, Webster MF. Predicting large experimental excess pressure drops for Boger fluids in contraction-expansion flow. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2016, 230: 43-47
- 28 Norouzi M, Shahbani Zahir A, Shahmardan MM, et al. A numerical study on pressure losses in asymmetric viscoelastic flow through symmetric planar gradual expansions. *European Journal of Mechanics, B/Fluids*, 2017, 65: 199-212
- 29 今尾茂樹, 小里泰章, 田中敏ら. 界面活性剤水溶液の急拡大のながれ. 日本機械学会論文集. B編, 2001, 67(658): 1319-1324 (Imao S, Kozato Y, Tanaka T. Flow of drag-reducing surfactant solution through a sudden expansion pipe. *JSME, B*, 2001, 67(658): 1319-1324 (in Japanese))
- 30 Li PW, Kawaguchi Y, Yabe A. Transitional heat transfer and turbulent characteristics of drag-reducing flow through a contracted channel. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 2001, 8(1): 23-40
- 31 焦利芳, 董泳, 苏文涛等. 表面活性剂溶液在不规则管件内的湍流减阻特性. 节能技术, 2009, 153(1): 7-14 (Jiao Lifang, Dong Yong, Su Wentao, et al. Turbulent drag reduction characteristics of surfactant solution in irregular tubing units. *Energy Conservation Technology*, 2009, 153(1): 7-14 (in Chinese))
- 32 Alcoutlabi M, Baek SG, Magda JJ, et al. A comparison of three different methods for measuring both normal stress differences of viscoelastic liquids in torsional rheometers. *Rheol Acta*, 2009, 48(2): 191-200
- 33 Ohlendorf D, Interthal W, Hoffmann H. Surfactant systems for drag reduction: Physico-chemical properties and rheological behavior. *Rheol Acta*, 1986, 25: 468-486
- 34 Suzuki H, Fuller G, Usui H. Development characteristics of drag-reducing surfactant solution flow in a duct. *Rheol Acta*, 2004, 43: 232-239
- 35 Hu YT, Mattys EF. Characterization of micellar structure dynamics for a drag-reducing cationic surfactant solution under shear: Normal stress studies and flow geometry effects. *Rheol Acta*, 1995, 34: 450-460
- 36 Hu YT, Wang SQ. Kinetic studies of a shear thickening micellar solution. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1993, 156(1): 31-37
- 37 Bae Y, Kim YI. Prediction of local pressure drop for turbulent flow in axisymmetric sudden expansion with chamfered edge. *Chemical Engineering Research and Design*. 2014, 92 (2): 229-239