DOI: 10.3901/JME.2019.04.226

截面积突然扩大的胶束减阻流的紊流基本特性*

蔡书鹏¹ 汪志能¹ 李 丹²

(1. 湖南工业大学机械工程学院 株洲 412007;

2. 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: 为揭示胶束减阻水溶液突扩流的紊流基本特性,对质量分数分别为 1×10^{-4} 、 4×10^{-4} 的季铵盐 CTAB 稀薄水溶液通过一个横截面积比为 1:4 的突扩管的流动局部阻力、阻力发展及压力分布特性进行了试验研究。结果显示,胶束减阻突扩流在紊流基本特性上与高分子减阻剂完全不同。当突扩进口流的雷诺数小于 1.2 倍的临界值时,突扩局部阻力损失系数以小于 10% 的量级小于纯水,压力恢复最大值大于纯水;当突扩来流大于 1.2 倍的临界值雷诺数时,突扩局部阻力损失略大于纯水,而压力恢复最大值与纯水基本相同。突扩进口为具有一定减阻效果的胶束减阻流,在突扩下游再次形成充分发展流所需要的压力恢复长度远大于纯水。突扩进口为暂时失去减阻效果的 1×10^{-4} 稀液流,于下游粗管内再次恢复稳定的减阻能力需要 110 倍下游管径。胶束稀液突扩流的上述紊流基本特性与胶束聚合结构的形成特性有关。

关键词: 胶束; 突扩; 紊流基本特性

中图分类号: TV131

Fundamental Characteristics of Drag-reducing Micelle Solution Turbulent Flow Across Abrupt Expansion Pipe

CAI Shupeng¹ WANG Zhineng¹ LI Dan²

(1. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007;

2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072)

Abstract: To reveal the fundamental characteristics of a drag-reducing micelle solution flowing turbulently in a suddenly expanded pipe, the expansion loss coefficients, drag development and pressure distributions have been investigated experimentally in an expansion pipe with an area ratio of 1:4, using two weight concentrations of 1×10^{-4} and 4×10^{-4} of hexadecyl trimethyl ammonium bromide solutions. The drag-reducing micelle solutions in abruptly expanded pipes are different from drag-reducing polymer solutions in turbulent fundamental characteristics. At inlet Reynolds numbers of less than 1.2 times of the critical value, the pressure recovery maximum is greater than that for water, and the expansion loss coefficient is order of 90% of that for water, while at inlet Reynolds numbers greater than 1.2 times of the critical value, it is almost the same as for water, and the expansion loss coefficient is slightly above that for water. Furthermore, the pressure recovery length required to regain a fully developed flow in the expansion pipe is well above that for water. For the 1×10^{-4} concentration of micelle solutions lost its drag-reducing ability in the upstream, 110 times of the downstream pipe diameter is necessary for recovering a fully developed drag-reducing flow. It can be concluded that these characteristics are associated with the reforming time characteristics of the micelle shear-induced structure.

Key words: micelle; abrupt expansion; turbulence fundamental characteristics

0 前言

紊动水流中加入微量的某种水溶性物质可使摩擦阻锐减的减阻现象,已有很多研究文献和评述^[1-2]。极为稀薄的高分子水溶液能够产生非常显著的减阻

效果,而且基本没有毒性,因此高分子减阻最早受到关注。由于高分子长链大分子结构在高雷诺数下受到局部管路元件如水泵、节流阀等的强烈剪切后易断裂,使高分子不可逆的失去减阻能力,致使其应用范围受限。另一方面,一些表面活性剂在水溶液状态下形成的胶束,在流动剪切作用下形成的胶束聚合的大分子结构,也能显著地抑制水流的紊流摩擦^[3]。虽然在受到流动强剪后结构被肢解,胶束

* 国家自然科学基金资助项目(51476051)。20180626 收到初稿,20181029 收到修改稿

稀液一时也会失去减阻功效,但当流过强剪流域后,被肢解的胶束分子在自组装物理机制下会重新搭接,再次形成大分子结构,进而恢复减阻功效,这使得胶束减阻技术在由水泵驱动的循环水输送系统的减阻中备受青睐。

应该看到,在添加剂减阻领域,绝对多数研究是在流动充分发展的直管中进行的^[4-7]。WEI 等^[3]试验研究了十六烷基三甲基氯化胺减阻的温度特性对减阻剂质量分数及雷诺数的依存行为。蔡书鹏等^[4]通过向胶束稀液中添加不同摩尔比的无机盐,增强了低雷诺数域的减阻效果。TAMANO 等^[5]向非离子胶束稀液中加入有机酸,提高了最大减阻的临界雷诺数。蔡书鹏等^[6]试验证实,较弱的黏弹性非离子胶束水溶液也可实现良好的减阻。KAWAGUCHI 等^[7]在矩形流道胶束减阻稀液流动结构研究中发现,紊流猝发现象发生频率大幅降低,垂直主流向的紊流强度小于纯水。这些研究揭示了胶束稀液充分发展流的减阻行为、阐释了其流动结构。

偶尔可见在横截面积突变的异形流道内进行添加剂减阻的研究。PAK 等^[8]试验表明,高分子聚丙烯酰胺减阻稀液突扩流局部损失系数随雷诺数而加大,但都低于纯水。NOROUZI 等^[9]数值模拟认为,平面对称渐扩的粘弹性非对称流的总阻力系数对雷诺数的依存与渐扩角有关。LI 等^[10]利用添加剂减阻的管径效应,在矩形流道内,通过一个突缩实现了上游减阻、下游为胶束聚合结构被破坏的减阻弱化从而实现强化传热的胶束流动系统,但他没有涉及当突缩长度改变时,减阻率降幅沿流向的改变特性。今尾茂树等^[11]通过试验,研究了管径比为 1:2 的突扩管路中胶束稀液流的局部损失特性,但在他的论文中给出了突扩下游粗管的临界雷诺数比上游细管还小的试验结果,这与前人经过大量试验和理论证明的添加剂减阻的“管径效应”相悖。可能因为突扩下游粗管内胶束流动结构的发展过于缓慢,而采用的压力传感器精度不足以捕捉这种异常缓慢发展流沿流向的压力梯度变化,误将还在发展的流动判断为充分发展流所引起的。焦利芳等^[12]对通流横截面积突变管件对胶束减阻流的局部阻力特性进行了试验研究,但由于没有确认压力测点位置是否受通流截面积突变的影响,所得结论有待试验进一步证实。

在民用及工业水循环系统中,存在许多如弯管、分/合流接头、阀、热交换器等通流截面突变的管路附件,它们使下游乃至一部分上游的流动都处于水力学发展中。因此研究胶束稀薄水溶液发展流的减

阻特性,对深入揭示胶束稀液的减阻机理、合理设计基于添加剂减阻的水循环管网系统,具有流体力学层面的学术意义和经济价值。在这种研究现状和应用背景下,我们拟在一个面积比为 1:4 的突扩管水流中,添加质量分数为 1×10^{-4} 、 4×10^{-4} 的表面活性剂减阻剂 CTAB,使用高分辨率的压差变送器研究上游为不同减阻率的充分发展来流时,突扩的局部阻力、下游突扩管内的阻力发展和压力恢复及分布特性,尤其是受上游管高雷诺数流的强剪使胶束稀液丧失减阻功效的来流,在进入低剪切流的突扩管内,需要多长的流动距离才能恢复它的减阻能力。结合胶束剪切诱发结构的形成特性对上述紊流基本特性做出分析,以便为设计基于表面活性剂减阻的管网输水系统提供科学依据。

1 试验

1.1 试验装置

含突扩组件的试验装置见图 1,它由三部分组成:流体供应部、突扩测试部、流体回送部。流体供应部含不锈钢储水箱、变频泵、内有流动准直组件的整流箱及连接件。突扩测试部含内径 d 为 10.45 mm 的细管和内径 D 为 20.48 mm 的粗管、同轴法兰、压力、压差、流量及温控组件,其中细管由两根、粗管由三根(单根长为 2 m)的有机玻璃管无缝对接而成。流体回送部由直径 30 mm 的主管和管连接件组成。

图 1 试验装置示意图

1.2 试验材料

选用季铵盐 CTAB 作减阻剂,为增强胶束结构抗剪能力,采用水杨酸钠作为伴随离子剂。按摩尔比 1:2 称取减阻剂和伴随离子剂(配置质量分数为 1×10^{-4} 时溶液时,分别为 45 g 和 39.5 g; 4×10^{-4} 时,分别为 180 g 和 158 g),缓慢倒入盛有温水的塑料桶中,使用搅拌器搅拌 50 min,然后将半浓缩液倒

入储水箱中,依目标质量分数,加足自来水,将温度设成 25.5 ℃,启动水泵循环一晚,第二天开始试验。

1.3 试验方法

突扩局部阻力、突扩管内阻力发展及压力恢复特性都通过管壁压力试验数据获得。为此,在上游距突扩界面由近及远布 4 个静压测点,前两段用来检查突扩来流是否已充分发展,靠近突扩的两个测压点用来判断突扩对上游是否有影响,在突扩下游距突扩界面不同位置由密到疏布 18 个静压测点。按压差估值,分别采用量程为 0~22.5 mm、0~140 mm 水柱的 DP45 型美国 Validyne 压差变送器和 U 型管测试两测点间的压差。使用量程为 0~225 cm 和 0~880 cm 水柱的 DP15 型美国 Validyne 压力变送器测量上游基点静压。每个测点压力等于基点压力减去基点到该点的压差。仅使用压力变送器测压,无法避免因其测试分辨率低于压差传感器而导致压力梯度测试精度低的问题。因此我们设计了这种静压测法,它可避免将沿流向压力梯度变化缓慢的胶束稀液发展流误判为充分发展流。流量采用测试误差为读数的 0.5% 的电磁流量计计量。试验中静压测试的最大不确定度低于 1%,低压差测试的最大不确定度为 1.5%,高压差为 1%。流量计的测试误差为 0.5%,阻力系数的最大测试不确定度低于 3%。

2 试验结果及分析

2.1 直管减阻的管径效应

图 2 表示两胶束稀液在突扩上、下游管内充分发展流中的阻力特性。图中,横轴为上/下管的雷诺数,纵轴为沿程阻力系数,通过式(1)计算

$$\lambda = \frac{\Delta P D}{L} \frac{2}{\rho U^2} \quad (1)$$

式中, λ 为阻力系数; L 为两静压测点间距(m); ΔP 为两测点间压差(Pa); ρ 为稀液密度(kg/m^3)(稀液取水的物性值); U 为管平均流速(m/s); D 为各自的管径(m)。

透过图 2 中的试验数据可知, 1×10^{-4} 或 4×10^{-4} 稀薄水溶液上游管的临界雷诺数(也就是摩擦因数开始上升、减阻率最大的雷诺数)分别为 27 500 和 50 400。因泵的最大流量限制,未能在下游粗管内测到它们的临界雷诺数,但试验结果明示了下游粗管的临界雷诺数大于上游细管,即减阻的管径效应。胶束减阻的管径效应是由于胶束聚合结构被肢解破

坏的临界剪切应力基本不变、而在粗管内要达到该值需要比细管更大的雷诺数。增加减阻剂质量分数,能够加大胶束聚合的大分子结构的密度和尺度,从而会提高结构被肢解的雷诺数。

图 2 沿程阻力系数随雷诺数的改变行为

2.2 胶束稀液突扩流的阻力发展

两胶束稀液在突扩下游不同区段的阻力发展特性表示在图 3 中。 Re 为下游管雷诺数,阻力系数仍由式(1)计算,当流动尚在发展阶段,阻力系数必然大于充分发展流的阻力系数,偏离量能够说明流动发展程度。相邻两测试段在同一雷诺数下阻力系数基本相同,意味着阻力沿流向已充分发展,否则,至少说明上游的一个测试段阻力还在发展。由图 3 可见,在较低雷诺数下,距突扩界面 $45D \sim 60D$ 测试段阻力系数,低于下游 $60D \sim 110D$ 测试段,这说明流动经过分离附壁后,该区段流动疑似层流的程度大,随流发展到 $60D \sim 110D$ 测试段,紊流强度提高,疑似层流程度降低,导致阻力增加,从距突扩界面 $110D$ 开始,胶束稀液流的阻力系数减小至稳定值,说明胶束聚合结构起到了衰减来流的部分紊流成分使其层流化的作用。随雷诺数加大, $45D \sim 60D$ 测试段阻力系数大于其下游每个测试段,这意味着惯性力加大使流动呈现紊流边界层的特点,主因是稳定的胶束搭接结构尚未完全形成、未能有效抑制紊流涡体的形成和发育,致使阻力增加,随胶束稀液继续向下游流动,胶束大分子结构逐渐形成,紊流层流化作用开始显现,阻力系数逐渐降低至稳定值。在阻力发展特性上,两胶束稀液流基本一致,但质量分数高的 4×10^{-4} 的胶束稀液在相对较高的雷诺数下,紊流层流化的作用更加显著。相对于胶束稀液突扩流,纯水的阻力系数在距突扩界面的 $8D \sim 25D$,其分布基本符合布拉休斯经验值,说明流动已充分发展。

(a) 1×10^{-4} 稀液 (b) 4×10^{-4} 稀液

图3 胶束稀液突扩流下游阻力的发展

2.3 胶束稀液突扩流的局部阻力

流动横截面积被扩, 流动将经历循环流区、附壁区、再发展区以及再充分发展区。突扩局部损失包括上游近突扩区相对充分发展流所产生的额外能量损失、下游近突扩区的循环流涡流损失、流动附壁后重新发展区相对下游充分发展流的额外能量损失, 计算方法如下

$$h_f = [p_1 / \rho g + (1 - \lambda_1 l_1 / d) U_1^2 / 2g - p_2 / \rho g - (1 + \lambda_2 l_2 / D) U_2^2 / 2g] \quad (2)$$

$$\xi = h_f / (U_1^2 / 2g) \quad (3)$$

式中, h_f 为突扩局部损失水头(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_1 、 l_1 、 λ_1 和 p_2 、 l_2 、 λ_2 分别为上/下游流动充分发展区内测点压力(Pa)、测点到突扩界面的距离(m)及沿程阻力系数, ξ 为突扩局部阻力系数。

试验时, 在获得距突扩界面足够远的上、下游充分发展段内的阻力系数后, 再测得跨突扩的上、下游充分发展段内两点压差 $p_1 - p_2$, 即可按式(2)、(3)式计算突扩局部损失及系数。

图4为突扩损失系数 ξ 随上游管雷诺数 Re_d 的变化行为, 为了与来流减阻量级建立关联, 图中还给出了各雷诺数下对应的上游管的减阻率 DR (大小为相同条件下减阻溶液的摩擦阻力系数相对于纯水减小的百分比)。纯水的局部阻力系数略大于 Borda-Canot 理论预测值 0.55, 其偏差小于 2%, 雷诺数大于 20 000, 大小基本不变。然而, 两减阻稀液的突扩局部阻力特性与纯水及高分子减阻水溶液迥异。当 Re_d 小于 1.2 倍临界雷诺数时, 局部阻力损失系数以小于 10% 的量级低于纯水, 显示突扩局部阻力减小的紊流特性; 当 Re_d 大于临界雷诺数的 1.2 倍时, 局部阻力系数略大于纯水, 呈现突扩局部增阻特性。

图4 突扩局部阻力系数随雷诺数的改变

根据本文作者的先前研究^[13], 本研究所用胶束稀液均为黏弹性流体。当突扩进口流的雷诺数较小时, 稀液内部储存有弹性能, 经突扩时, 因剪切速率降低, 胶束大分子结构释放出一部分弹性能, 这部分弹性能, 抵消了近突扩区涡流能量损失和流动再发展损失总和的一部分, 致使突扩局部阻力损失小于纯水; 而当突扩进口流的雷诺数较大时, 胶束聚合结构遭到较大程度破坏, 内部储存的弹性能减少, 释放的弹性能不足以抵消流动附壁后再发展所额外消耗的能量损失, 致使突扩局部损失大于纯水。

2.4 胶束稀液突扩流的压力恢复

纯水和两胶束稀液流在突扩上下游管中的压力分布描述在图5~7中。图中, x/d 、 x/D 分别为各压力测点到突扩界面距离的无量纲坐标, 沿流向为正, 纵坐标为各测点相对于突扩界面的压力并除以上游管内平均流速对应的动压, 即

$$p_r = (p - p_0) / (0.5 \rho U_1^2) \quad (4)$$

式中, p_r 为各测点相对于突扩界面的无量纲压力, p 为每个测点压力(Pa), p_0 为上游近突扩两点的压力线性外插到突扩界面的压力(Pa)。相邻两测点之间

的阻力系数与其压力连线的直线斜率唯一关联,如相邻两测试段的压力分布线的斜率差异明显,至少说明上一段流动尚在发展。

图5 纯水突扩流的压力分布

图6 1×10^{-4} 胶束稀液突扩流的压力分布

图7 4×10^{-4} 胶束稀液突扩流的压力分布

首先看突扩循环流区的压力恢复。纯水在近突扩区压力恢复基本不随雷诺数而改变,压力恢复最大值为 $0.387 \sim 0.376$, 与 Borda-Canot 理论预测值 (0.385) 非常接近。而质量分数为 1×10^{-4} 的胶束稀液突扩流, 当突扩进口流雷诺数 Re_d 小于临界雷诺数

($27\,500$), 如 $Re_d = 20\,000$ (减阻率为 66%) 和 $24\,500$ (减阻率 70%) 时, 压力恢复最大值分别为 0.47 和 0.45 ; 而当 Re_d 大于临界雷诺数时, 如 $Re_d = 45\,000$ (减阻率为 15%) 和 $76\,000$ (减阻率为 5%) 时, 压力恢复最大值分别为 0.384 和 0.372 , 基本与纯水一致。质量分数为 4×10^{-4} 的减阻稀液, 在最大压力恢复特性上, 与 1×10^{-4} 胶束减阻稀液基本一致, 仅是当突扩来流雷诺数较小时, 如 $Re_d = 20\,000$ 时, 压力恢复最大值出现位置明显比纯水和 1×10^{-4} 的胶束稀液滞后, 说明质量分数的提高使胶束稀液突扩分离流的再附长度增加。

近突扩的循环流区的压力恢复最大值与它的涡流损失大小密切相关, 压力恢复最大值增加说明循环流区的旋涡损失降低, 从而使突扩局部阻力系数减小, 这佐证了第 2.3 节中关于胶束稀液突扩流的局部阻力特性的试验结果。胶束稀液突扩流在循环流区的这些紊流基本特性可能源于胶束大分子结构在一定程度上阻止了分离流中小尺度旋涡的出现。

最后来看压力恢复长度的变化特性。从突扩界面到下游压力沿轴向以同一斜度线性下降的开始位置之间的距离, 定义为压力恢复长度, 也就是下游重新形成充分发展流所需的下游距离。对于纯水, 见图 5, 压力恢复长度约为 $8D$, 且基本与雷诺数无关。对于 1×10^{-4} 的胶束稀液流, 见图 6, 当 Re_d 较小时, 压力恢复长度为 $130D$, 随 Re_d 提高, 恢复长度稳定在 $110D$ 。当质量分数为 4×10^{-4} 时, 低 Re_d 的压力恢复长度为 $150D$, 随雷诺数加大, 压力恢复长度也基本稳定在 $110D$ 。

对于纯水突扩流, 脱壁分离流在循环区尾部附壁, 经过很短的流动调整后, 便形成发展到管中心的紊流边界层, 进入充分发展流态。然而, 对于胶束减阻突扩流, 由于突扩导致剪切应变场变弱, 上游稳定的胶束结构, 要经过循环区剪切层内的松弛、流动附壁后边界层内的张紧, 随流缓慢的形成新的稳定胶束聚合结构后, 流动才能进入新的充分发展状态。这个过程中胶束大分子结构的动态演变决定着突扩流的局部阻力、阻力发展、压力恢复等基本的紊流特性。根据 SUZUKI 等^[14]利用双折射试验对表面活性剂胶束结构的形成和松弛特性进行研究的结果, 剪切诱导的胶束聚合结构形成时间与剪切速率成反比, 但在剪切速率较小时, 比例系数较大, 大于一定的剪切速率后该比例系数渐趋一个较小的稳定值。胶束减阻管流的流态疑似层流, 断面平均剪切速率与平均流速可简单地视作正比关系, 因此剪切诱导的胶束聚合结构形成所需的流动长度仅与上述比例系数有关。这样, 当突扩上游来流在

低雷诺数范围时, 相应的胶束结构形成所需的压力恢复长度自然增大。当质量分数提高时, 胶束聚合结构的形成需要较长的时间, 与低剪切速率对应的比例系数增大, 因此 4×10^{-4} 的胶束稀液突扩流在低雷诺数范围内压力恢复长度大于 1×10^{-4} 的稀液。由于试验中泵速限制, 即使是远超过胶束结构开始被破坏的临界雷诺数的突扩来流, 在经过近突扩下游循环流区的松弛后, 下游粗管内胶束聚合结构所受的剪切应力也未达到临界值, 压力恢复长度基本稳定在一定值。

3 结论

通过在突扩面积比为 1:4 的突扩水流中添加胶束减阻剂 CTAB 后紊流基本特性的试验研究, 收获以下结论。

(1) 添加胶束减阻剂后, 当突扩来流雷诺数低于 1.2 倍的临界值时, 以低于纯水 10% 的量级, 呈现突扩局部减阻特性; 当来流雷诺数高于 1.2 倍的临界值时, 胶束稀液呈现突扩局部低增阻特性。

(2) 当突扩来流未达到临界雷诺数时, 压力恢复最大值以 10% 的量级高于纯水; 当来流雷诺数略高于临界值后, 减阻稀液突扩流的压力恢复最大值完全恢复到与纯水相当的水平。这与局部阻力特性形成整合。

(3) 当突扩进口流雷诺数较小时, 胶束减阻稀液突扩流的压力恢复长度较大, 且减阻剂质量分数的提高使压力恢复距离延长。当突扩来流雷诺数较大时, 在本试验条件下, 压力恢复长度基本稳定在 110 倍下游管径, 且未见质量分数引起的明显差异。

参 考 文 献

[1] REIS L, OLIVEIRA I, PIRES R, et al. Influence of structure and composition of polyacrylamide propylene oxide copolymers on drag reduction of aqueous dispersions[J]. Colloids and Surfaces Physicochemical and Engineering Aspects, 2015, 502(5): 121-129.

[2] GASLJEVIS K, HOYER K, MATTYS E. Intentional mechanical degradation for heat transfer recovery in flow of drag-reducing surfactant solutions[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017, 84(6): 251-265.

[3] WEI J, WANG J, ZHANG C, et al. Combined effects of temperature and Reynolds number on drag-reducing characteristics of a cationic surfactant solution[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2012, 90(5):

1304-1309

- [4] 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[J]. 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 flow with additive drag reducers[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(24): 164-169.
- [5] TAMANO S, MORINISHI Y, TAGA K. Drag reduction and degradation of nonionic surfactant solutions with organic acid in turbulent pipe flow[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2015, 215(2): 1-7
- [6] 蔡书鹏, 鈴木洋, 菰田悦之. 一个非离子表面活性剂水溶液的管流减阻与它的流变特性[J]. 中国科学, E, 2012, 42(4): 388-394.
- CAI Shupeng, HIZUKI Hiroshi, KOMODA Yishiyuki. Drag-reduction of a nonionic surfactant aqueous solution and its rheological characteristics[J]. Science China Technological Sciences, 2012, 42(4): 388-394.
- [7] KAWAGUCHI Y, SAGAWA T, Feng Ziping. Experimental study on drag-reducing channel flow with surfactant additives-spatial structure of the turbulence investigated by PIV[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2004, 23(5): 700-709.
- [8] PAK B, CHOI Y, CHOI S. Turbulent hydrodynamic behavior of a drag-reducing viscoelastic fluid in a sudden-expansion pipe[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1991, 39(3): 353-373.
- [9] NOROUZI M, SHAHBANI Z. et al. A numerical study on pressure losses in asymmetric viscoelastic flow through symmetric planar gradual expansions[J]. European Journal of Mechanics, B/Fluids, 2017, 65(4): 199-212.
- [10] LI PW, KAWAGUCHI Y, YABE A. Transitional heat transfer and turbulent characteristics of drag-reducing flow through a contracted channel[J]. Journal of Enhanced Heat Transfer, 2001, 8(1): 23-40.
- [11] 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[J]. 日本機械学会論文集. B 編, 2011, 67(658): 1319-1324.
- IMAO S, KOZATO Y, TAHARA T, et al. Flow of Drag-reducing surfactant solutions through a sudden expansion pipe[J]. JSME, B series, 2011, 67(658): 1319-1324.
- [12] 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[J]. 节能技术, 2009, 153(1): 7-14.

- JIAO Lifang, DONG Yong, SU Wentao. Turbulent drag reduction characteristics of surfactant solution in irregular tubing unit[J]. Energy Conservation Technology, 2009, 153(1): 7-14.
- [13] CAI Shupeng. Drag reduction and its shear stress relaxation characteristics of a cationic surfactant solution[J]. Journal of Hydrodynamics, 2012, 24(2): 202-206.
- [14] SUZUKI H, FULLER G, USUI H. Development characteristics of drag-reducing surfactant solution flow in a duct[J]. Rheol Acta, 2004, 43(4): 232-239.

作者简介: 蔡书鹏, 男, 1963 年, 教授, 博士。主要研究方向为流体流动减阻。

E-mail: windowscsp@sina.com