

DOI: 10.7652/xjtub201801005

阳离子型表面活性剂与非离子型聚合物 相互作用减阻研究

王青会¹, 刘冬洁¹, 魏进家^{1,2}

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 西安交通大学化学工程与技术学院, 710049, 西安)

摘要: 为探究表面活性剂与聚合物相互作用的减阻效果,对阳离子型表面活性剂 CTAC 和非离子型聚合物 PAM 的纯溶液和混合溶液进行湍流减阻实验测量。结果表明:表面活性剂 CTAC 溶液中加入不同浓度非离子型 PAM,混合溶液减阻的临界温度均相同但低于相应纯 CTAC 溶液的临界温度,而超过临界温度后混合溶液减阻能力的下降趋势更缓;各个温度下混合溶液的减阻稳定区和纯 CTAC 溶液基本一致,且减阻稳定区内的摩擦系数也都相同;在超过临界雷诺数的减阻破坏区,混合溶液减阻效果更好,且 PAM 浓度升高,溶液减阻能力增强。提出了表面活性剂胶束联结在聚合物长链上形成了内部交联密集、结构稳定的混合网状结构模型,应用此模型合理解释了 CTAC 溶液中加入非离子型 PAM 形成的混合溶液的湍流减阻现象。

关键词: 减阻;混合网状结构模型;阳离子型表面活性剂;非离子型聚合物

中图分类号: TK02 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)01-0026-07

Investigation on the Drag Reduction by Interaction of Cationic Surfactant with Nonionic Polymer

WANG Qinghui¹, LIU Dongjie², WEI Jinjia^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To investigate the drag reduction effect of the interaction of surfactant with polymer, turbulent drag reduction tests with pure cationic surfactant CTAC and nonionic polymer PAM and their mixed solutions were carried out. As nonionic polymer PAM with different concentrations were added into the CTAC solution, the critical temperatures for drag reduction of the mixed solutions were all the same, but below the one for the corresponding pure CTAC solution. And the drag reduction tendency of the mixed solution decreased more slowly when exceeding the critical temperature. Both the drag reduction stable zones of the mixed solutions and the friction coefficient in the stable zones were basically the same as that of the pure CTAC solution at each temperature. The mixed solution's drag reduction ability was good even in the drag reduction damage zones, and this ability could be enhanced with the increase of PAM concentrations. Surfactant micelles were attached to the polymer chains, forming stable mixed network structures because of the dense inner cross-linkings. Turbulent drag reduction

收稿日期: 2017-06-21。 作者简介: 王青会(1991—),女,硕士生;魏进家(通信作者),男,教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51225601)。

网络出版时间: 2017-10-18

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20171018.1636.016.html>

phenomena of the mixed solutions can be well explained using the mixed network structure model.

Keywords: drag reduction; mixed network structure model; cationic surfactant; nonionic polymer

添加剂湍流减阻技术即是在流体输运或者流体循环系统中加入微量(一般以 10^{-6} 计)添加剂,使得湍流摩擦阻力显著降低的流体输运技术^[1]。因为其减阻效果显著、原料易得、操作实施简单而成为一项性价比极高的减阻方法。湍流减阻的实际效果表现为输运相同量的流体时,所需要的输运动力大大减小,或者相同输运动力时,输运的流体流量得到提高^[2]。

当添加剂为阳离子型表面活性剂时需加入抗离子如水杨酸钠,才能实现高效的减阻能力。这是因为抗离子可以中和表面活性剂分子带电头基的电荷,从而在溶液中形成了球状或棒状胶束,当受到适度的剪切力时可以形成网状胶束结构,即所谓的剪切诱导结构(SIS),溶液内的这种微观结构会引起流体湍流减阻效应,并且这种微观结构具有强剪切破坏后剪切消失时的结构自我修复能力^[1-5]。在湍流过强超过临界雷诺数时,强剪切作用会使得微观结构遭到破坏,减阻能力快速降低,使得表面活性剂在高于临界雷诺数区域内的应用受到限制。自 Toms 发现聚合物湍流减阻^[6]之后,随后人们进行了大量关于聚合物减阻的研究。目前通常认为在剪切力作用下聚合物链会由卷曲变为伸展状态,使得溶液的黏弹性发生变化,从而存在减阻效应,在大于临界雷诺数的区域,聚合物减阻能力也会下降,但是相比表面活性剂而言下降缓慢,故减阻能力仍然较高^[7-10]。在高剪切作用下聚合物链被破坏之后,聚合物没有自我修复能力^[11],因此在日常循环系统中的应用受到了限制。

前人关于聚合物和表面活性剂两者混合后溶液物理特性的研究较多^[12-14],而关于混合溶液减阻的研究相对缺少。结合以上表面活性剂和聚合物单独减阻时各自的优缺点,本文旨在研究非离子型聚合物加入阳离子型表面活性剂溶液中后对溶液减阻效果的影响,以探究一种更高效且实用的减阻方法,并尝试解释阳离子型表面活性剂与非离子型聚合物相互作用后对溶液减阻能力产生影响的原因。

本实验采用了常用且减阻性能优良的阳离子型表面活性剂 CTAC,配以水杨酸钠(NaSal)作为抗离子,对于不同类型的聚合物经过多次溶液配制,并观测其溶解性与稳定性后,最终选用了非离子型聚

丙烯酰胺(PAM),其增稠和减阻性能良好。

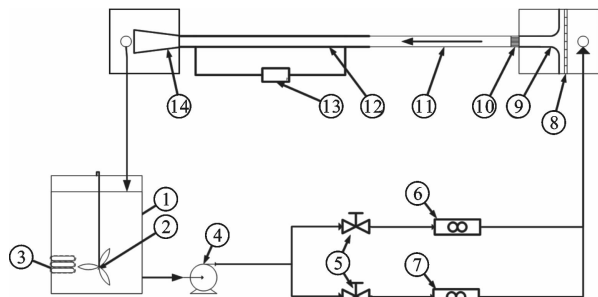
1 实验材料和方法

1.1 材料

非离子型聚丙烯酰胺(PAM),义乌市鑫邦环保科技有限公司生产,摩尔质量为 $6 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$;阳离子型表面活性剂 CTAC,天津市光复精细化工研究所生产;质量分数为 99% 的分析纯,摩尔质量为 $320 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$;水杨酸钠(NaSal),天津市盛奥化学试剂厂生产,摩尔质量为 $160.11 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$;实验溶剂为自来水。按照 CTAC 和 NaSal 摩尔比为 1:1 配置得到 CTAC 质量分数为 0.01% 的阳离子型表面活性剂溶液^[15-17](文中称为纯 CTAC 溶液),同时配得非离子型 PAM 的质量分数为 0.000 75% 和 0.001 5% 的两种溶液,分别记为 0.000 75% 纯 PAM 溶液和 0.001 5% 纯 PAM 溶液。将纯 CTAC 溶液分别与 0.000 75% 和 0.001 5% 的纯 PAM 溶液混合后所得的两种混合溶液分别记为混合溶液 1 和混合溶液 2,以上所有溶液均需充分静止均匀后才可用于实验。

1.2 实验装置与方法

流体湍流减阻实验测量装置如图 1 所示^[17],它由电磁流量计、差压变送器、离心泵、搅拌器、加热器以及亚克力材料制成的光滑测量槽道等组成。



1: 储水箱; 2: 搅拌器; 3: 加热器; 4: 不锈钢离心泵; 5: 阀门;
6、7: 电磁流量计; 8: 过滤器; 9: 收缩段; 10: 蜂巢;
11: 二维通道; 12: 测试段; 13: 差压变送器; 14: 扩张段

图 1 实验系统示意图

因为本实验所用溶液的浓度都较低,故溶液相关的物性参数取用溶剂水的数值,所需公式如下

$$C_f = \frac{\tau_w}{\rho u^2 / 2} \quad (1)$$

$$\tau_w = \frac{\Delta PD}{4L} \quad (2)$$

$$Re = \frac{\rho u D}{\eta} \quad (3)$$

式中: C_f 为范宁摩擦系数; τ_w 为壁面剪切力; ρ 为水的密度; u 为溶液的平均流速; ΔP 为测量段的压降; L 为测量段的长度; η 为水的动力黏度; D 为管道的水力直径。

摩擦系数的两条渐近线为:

$$\text{Dean 渐近线}^{[18]} \quad C_f = 0.073 Re^{-0.25} \quad (4)$$

$$\text{Zakin 渐近线}^{[19]} \quad C_f = 0.32 Re^{-0.55} \quad (5)$$

2 实验结果与分析

减阻实验测量时应先检查管道的安装和测量误差情况,故首先进行牛顿流体水的测量,结果如图2所示。从图中可知,水的减阻测量结果与 Dean 渐近线重合良好,说明此次实验管路是可靠的。

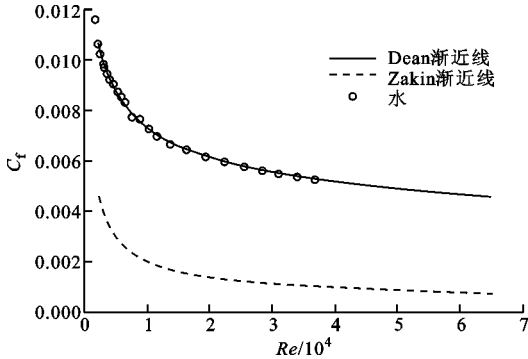


图2 水的实验结果与 Dean 和 Zakin 渐近线的对比

本实验研究中范宁摩擦系数的不确定性分析公式为

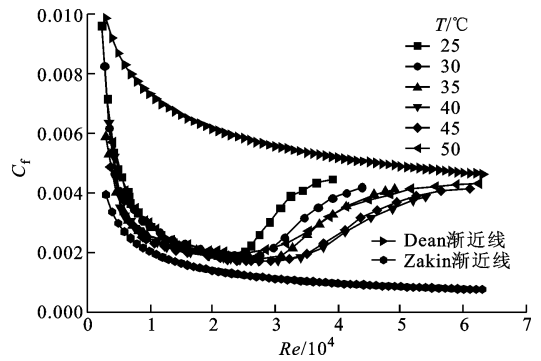
$$\begin{aligned} \frac{\Delta C_f}{C_f} \approx & \left\{ \left(\frac{\Delta(\Delta P)}{\Delta P} \right)^2 + \left(\frac{2\Delta U_b}{U_b} \right)^2 + \right. \\ & \left[\frac{W\Delta H}{H(H+W)} \right]^2 + \left[\frac{H\Delta W}{W(H+W)} \right]^2 + \\ & \left. \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} \right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (6) \end{aligned}$$

式中: W 和 H 分别为测量通道的宽度和高度。根据该式计算可得湍流流动时,本实验误差取值范围为 2.5%~7.5%。

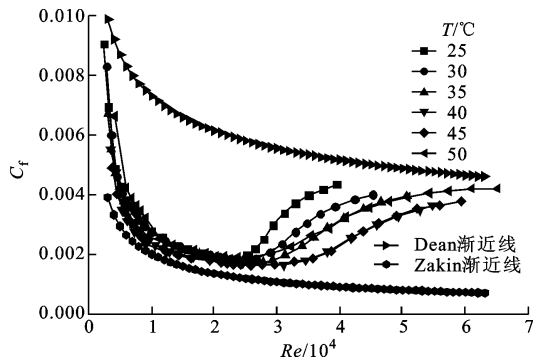
2.1 温度对混合溶液减阻的影响

根据图3的综合实验结果,对比分析了温度对混合溶液减阻能力的影响,得到如下结论。

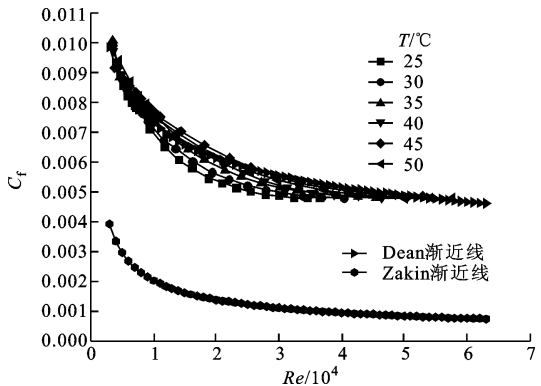
(1) 纯 CTAC 溶液单独减阻时的临界温度为 45℃。0.000 75% 和 0.001 5% 的纯 PAM 溶液均是最低温 25℃ 时摩擦系数最小、减阻能力最好,而且因浓度较低溶液减阻效果很差,以上特性与文献



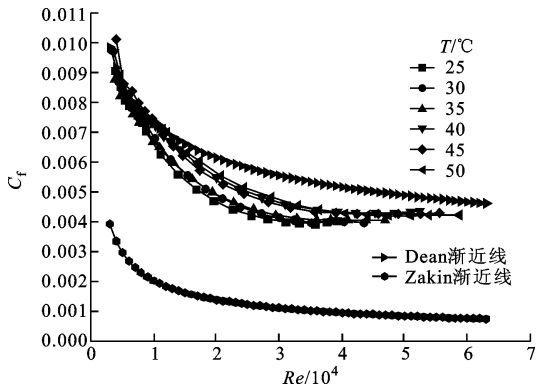
(a) 混合溶液 1



(b) 混合溶液 2



(c) 0.000 75% 纯 PAM 溶液



(d) 0.001 5% 纯 PAM 溶液

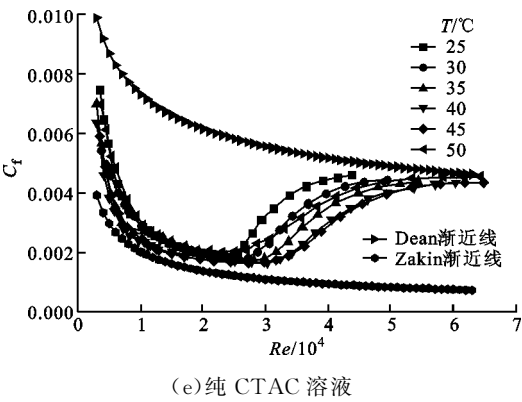


图 3 不同温度时纯 CTAC 溶液、纯 PAM 溶液及混合溶液的减阻效果比较

[20]中实验结果保持一致。混合溶液 1 和 2 减阻的临界温度保持为 40 ℃。

(2)对比纯 CTAC 溶液和两种混合溶液最高温度 50 ℃时的曲线和表 1 中列出的代表性数据,可以发现加入 PAM 和提高 PAM 的浓度对减阻的影响着重表现在:超过临界温度后继续升高温度,溶液减阻能力下降趋势变缓,且 50 ℃时混合溶液摩擦系数更小,因此能维持较好的高温区减阻能力。

(3)两混合溶液减阻时每一温度下对应的减阻起始雷诺数和临界雷诺数与相应温度纯 CTAC 溶液的值基本相同,表明加入非离子型 PAM 未能扩大纯 CTAC 溶液的减阻稳定区;对比两混合溶液和纯 PAM 溶液的摩擦系数曲线,减阻起始雷诺数分别为 3 000 和 10 000(25~50 ℃均适用),临界雷诺数最小分别为 25 000 和 35 000(25 ℃时)、最大分别为 30 000 和 45 000(40 和 45 ℃时),表明 CTAC 的存在使得 PAM 的减阻稳定区向小雷诺数方向移动,综上可知减阻时混合体系受胶束影响较大。

表 1 高温 50 ℃下 3 种溶液摩擦系数对比

溶液类型	C_f			
	$Re=$	$Re=$	$Re=$	$Re=$
	15 000	25 000	35 000	45 000
纯 CTAC 溶液	0.002 31	0.002 03	0.003 17	0.004 17
混合溶液 1	0.002 23	0.001 94	0.002 71	0.003 76
混合溶液 2	0.002 16	0.001 92	0.002 65	0.003 58

2.2 聚合物浓度对混合溶液减阻的影响

取临界温度和大于临界温度两种实验条件进行聚合物 PAM 浓度影响的研究,实验结果如图 4 所示。

(1)在临界雷诺数之前,纯 CTAC 溶液中加入质量分数在 0~0.001 5%范围内的不同浓度的

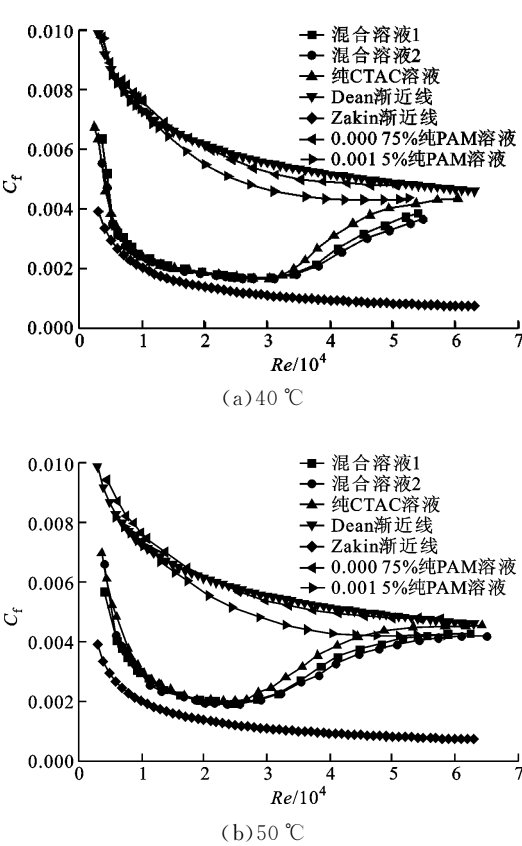


图 4 加入不同浓度 PAM 溶液后混合溶液的减阻效果

PAM 溶液,其摩擦系数曲线基本重合(见图 4a 和 4b);在大于临界雷诺数的区域内,PAM 浓度越高,混合溶液摩擦系数越小,减阻效果越好。这表明纯 CTAC 溶液中加入 PAM 对稳定区减阻无改善,但可以明显提高减阻破坏区溶液的减阻能力。

(2)在实验全雷诺数范围内,混合溶液的摩擦系数小于对应浓度的纯 PAM 溶液摩擦系数,特别是在临界雷诺数之前,两者之差非常明显,说明加入 CTAC 可以使 PAM 溶液的减阻能力得到有效提高。

2.3 混合溶液的减阻机理

通过对聚合物与表面活性剂相互作用物理性质的研究,前人提出了一些描述这种相互作用的理论模型如:球体模型^[21]、“三阶段”模型^[22]和串珠模型^[23]等。在本次研究中阳离子型表面活性剂 CTAC 与非离子型聚合物 PAM 发生作用的驱动力主要是疏水相互作用^[24],分析总结已有的研究^[25-28],针对本次减阻实验中混合溶液的减阻表现,提出了采用如图 5 所示结构解释减阻机理,即表面活性剂分子形成的胶束结构既有完全联结在同一条非离子型聚合物分子链上的,也有胶束两端依平行或交叉方向联结在不同聚合物分子链上实现不同结构之间连接作用的。综合作用的结果是形成了实现减阻流动的

混合网状聚集体结构,这一结构使得湍流内的流动有分层流动的趋势,分层会使流动中的摩擦阻力降低。

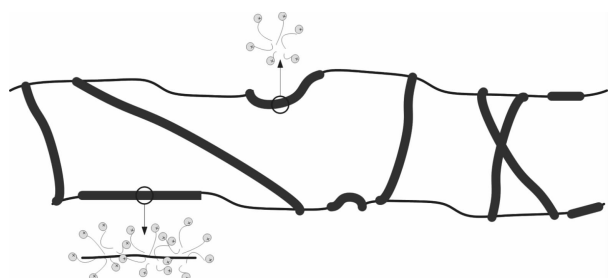


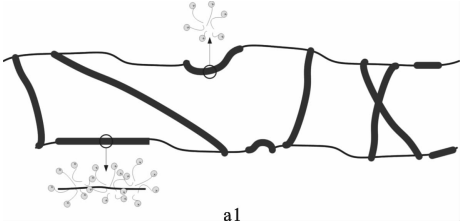
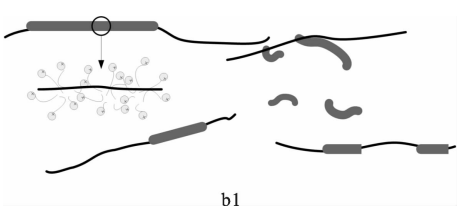
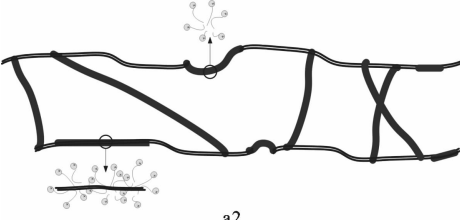
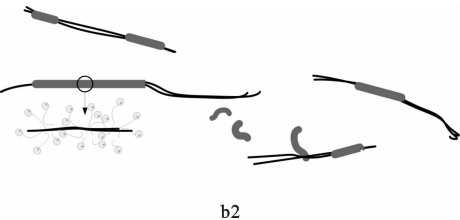
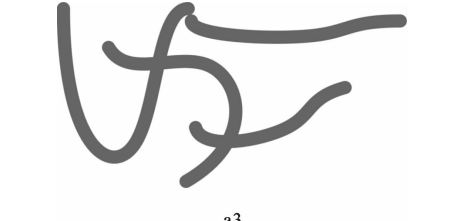
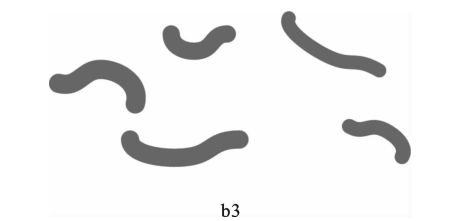
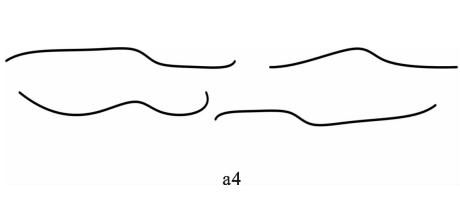
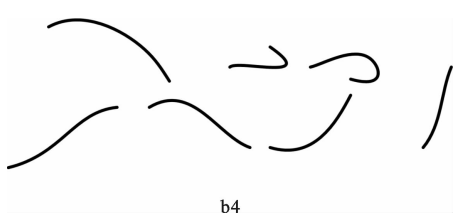
图 5 阳离子型表面活性剂-非离子聚合物的混合网状结构模型

2.3.1 温度影响的原因 因为纯 CTAC 溶液的减阻临界温度为 45℃,而非离子型 PAM 在低温时减阻效果最好,实验中混合溶液 1 和混合溶液 2 的减阻临界温度均为 40℃,说明 PAM 与 CTAC 形成的

减阻结构的临界温度是这两种物质平衡综合后的结果且 CTAC 占主导作用,如图 5 所示,而且可知 PAM 浓度提高对该混合网状结构的正常有效构成无明显提高。正是因为表面活性剂胶束在混合网状结构形成中的主导作用,使得这种网状结构稳定减阻区的雷诺数范围和纯 CTAC 溶液基本一致,且其减阻能力随温度的变化趋势也与纯 CTAC 溶液相同。加入 PAM 的作用在超过临界温度后的网状结构损毁状态中得到体现,此时聚合物分子链和胶束之间的联结使得混合网状结构抗高温破坏的能力强于由纯胶束形成的结构。

2.3.2 聚合物浓度影响的原因 随着溶液湍流强度的逐渐增强,溶液内部的减阻结构也会发生相应改变,表 2 中是各个溶液在最佳减阻区和雷诺数超过临界值后的减阻破坏区时,内部减阻结构的示意图集合。

表 2 溶液减阻结构示意图汇总

溶液类型	减阻结构	
	最佳减阻区	减阻破坏区
混合溶液 1		
	a1	b1
混合溶液 2		
	a2	b2
纯 CTAC 溶液		
	a3	b3
0.000 75%或 0.001 5% 纯 PAM 溶液		
	a4	b4

在溶液中聚合物的质量分数由0提高至0.0015%的过程中,对于纯表面活性剂溶液而言,溶液中已形成的胶束结构在流动剪切力的作用下会发生联结形成更大尺寸的胶束(剪切诱导结构, SIS),如表2中a3所示,这种网状结构和混合溶液中所形成的混合网状结构a1、a2类似,因此结构未被破坏前不同溶液减阻能力基本相同。继续提高PAM浓度,混合网状结构如表中a2所示,非离子型聚合物分子链自身缠绕在一起,因表面活性剂浓度不变,故胶束数目不变,则胶束联结在聚合物链上形成的网状聚集结构基本不变。当湍流强度超过临界雷诺数时,因强剪切作用混合网状结构中联结在不同聚合物链上的胶束首先被剪断,混合溶液中的减阻结构变为如表2中b1、b2所示的串珠结构,此时PAM浓度越高该结构内部相互作用越强,则抗剪切能力越强,因此减阻效果更好;随着剪切强度的继续增大,串珠结构也会被逐渐破坏,最终溶液的减阻能力丧失。但是,相比纯表面活性剂胶束构成的减阻结构和纯聚合物链对强剪切破坏的敏感性,如b3和b4所示,这种串珠减阻结构在强湍流区更稳定且维持时间较长,因此混合溶液减阻能力下降趋势较缓。

3 结 论

(1)溶液中加入阳离子型表面活性剂和非离子型聚合物,两者之间存在疏水相互作用,根据该混合溶液湍流流动中的独特减阻特性,提出了混合网状减阻结构模型,用该模型良好地解释了溶液湍流减阻时的温度效应和聚合物浓度变化时的减阻变化。

(2)对改变聚合物浓度的研究发现,纯CTAC溶液中加入不同浓度的非离子型PAM溶液,减阻的临界雷诺数以及临界雷诺数之前流动范围内的范宁摩擦系数基本相同。这是因为根据混合网状减阻结构的构成,当溶液中CTAC浓度恒定时,则胶束数量恒定,PAM浓度提高,聚合物链之间会发生缠绕,当胶束联结到已发生缠绕后的聚合物链上时所形成的阳离子型表面活性剂-非离子型聚合物混合网状结构未出现明显改变。湍流强度超过临界雷诺数后,网状结构内的部分胶束首先被破坏,形成了串珠减阻结构,此结构中表面活性剂和聚合物的相互作用仍存在,因此在减阻破坏区,与纯CTAC或纯PAM溶液相比混合溶液仍具备较好的减阻能力,且PAM浓度提高可以使得串珠结构更稳定,减阻效果更高,如40℃时减阻率平均可提高约15%。

(3)混合网状结构构成中胶束和聚合物链均起

作用且胶束占主导,因此混合溶液在所有温度下的减阻稳定区与纯CTAC溶液基本保持一致;减阻临界温度是溶液中两种物质综合平衡的结果,因受PAM低温高效减阻的影响而略低于CTAC的临界温度值;纯CTAC溶液中加入不同浓度的非离子型PAM溶液,临界温度均相同,保持为40℃,这与结论(2)中PAM浓度升高后正常有效状态时混合网状结构基本未发生变化的解释保持一致。PAM的减阻作用重点体现在超过临界温度后的高温区,聚合物链和胶束的联结使得混合网状结构抗高温破坏能力有所提高,即使在高温时的减阻破坏区,混合溶液减阻率最大可提高近20%。

参考文献:

- [1] 李凤臣, 宇波, 魏进家, 等. 表面活性剂湍流减阻[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 1-8.
- [2] MOTIER J F, CHOU L C, KOMMAREDDI N S. Commercial drag reduction: past, present, and future [C] // Proceedings of the ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting. New York, USA: ASME, 1996: 229-231.
- [3] HADRI F, GUILLOU S. Drag reduction by surfactant in closed turbulent flow [J]. International Journal of Engineering Science & Technology, 2010, 2(12): 6876-6879.
- [4] WANG Y, YU B, Zakin J L, et al. Review on Drag Reduction and Its Heat Transfer by Additives [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2011, 2011: 1-17.
- [5] GE W, ZHANG Y, ZAKIN J L. Surfactant turbulent drag reduction in an enclosed rotating disk apparatus [J]. Experiments in Fluids, 2007, 42(3): 459-469.
- [6] TOMS B A. Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds numbers [C/OL] // International Congress on Rheology; 2. 1948: 135-143. [2017-05-28]. https://www.researchgate.net/publication/235411578_Some_Observations_on_the_Flow_of_Linear_Polymer_Solutions_Through_Straight_Tubes_at_Large_Reynolds_Numbers.
- [7] WHITE C M, MUNGAL M G. Mechanics and Prediction of Turbulent Drag Reduction with Polymer Additives [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2008, 40(1): 235-256.
- [8] HINCH E J. Mechanical models of dilute polymer solutions in strong flows [J]. Physics of Fluids, 1976, 20(10): S22-S30.

- [9] METZNER A B, METZNER A P. Stress levels in rapid extensional flows of polymeric fluids [J]. *Rheologica Acta*, 1970, 9(2): 174-181.
- [10] LUMLEY J L. Drag reduction in turbulent flow by polymer additives [J]. *Journal of Polymer Science Macromolecular Reviews*, 1973, 7(1): 263-290.
- [11] MOHSENIPOUR A A, PAL R. Drag reduction in turbulent pipeline flow of mixed nonionic polymer and cationic surfactant systems [J]. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2013, 91(1): 190.
- [12] DAROCHA C M, PATRUYO L G, RAMIREZ N E, et al. Porous media flow of poly(ethylene oxide)/sodium dodecyl sulfate mixtures [J]. *Polymer Bulletin*, 1999, 42(1): 109-116.
- [13] HOU Z, LI Z, WANG H. Interaction between poly(ethylene oxide) and sodium dodecyl sulfonate as studied by surface tension, conductivity, viscosity, electron spin resonance and nuclear magnetic resonance [J]. *Colloid and Polymer Science*, 1999, 277(11): 1011-1018.
- [14] SUKSAMRANCHIT S, SIRIVAT A, JAMIESON A M. Polymer-surfactant complex formation and its effect on turbulent wall shear stress [J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 2006, 294(1): 212-221.
- [15] 马宁, 魏进家. 中等浓度表面活性剂溶液流变特性的实验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2012, 46(1): 30-34.
- MA Ning, WEI Jinjia. Experimental study on rheological properties of semidilute surfactant solutions [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2012, 46(1): 30-34.
- [16] XU N, WEI J J. Time-dependent shear-induced non-linear viscosity effects in dilute CTAC/NaSal solutions; mechanism analyses [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014(2): 1-8.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] ZAKIN J L, MYSKA J, CHARA Z. New limiting drag reduction and velocity profile asymptotes for non-polymeric additives systems [J]. *AIChE Journal*, 1996, 42(12): 3544-3546.
- [20] 蔡伟华. 聚丙烯酰胺水溶液减阻特性实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [21] NAGARAJAN R. Thermodynamics of nonionic polymer-micelle association [J]. *Colloids & Surfaces*, 1985, 13(1): 1-17.
- [22] BIGGS S, SELB J, CANDAU F. Effect of surfactant on the solution properties of hydrophobically modified polyacrylamide [J]. *Langmuir*, 1992, 8(3): 838-847.
- [23] SHIRAHAMA K, TSUJII K, TAKAGI T. Free-boundary electrophoresis of sodium dodecyl sulfate-protein polypeptide complexes with special reference to SDS-polyacrylamide gel electrophoresis [J]. *Journal of Biochemistry*, 1974, 75(2): 309-319.
- [24] 樊明红. 表面活性剂与聚合物相互作用的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2004.
- [25] KIM J T, KIM C A, ZHANG K, et al. Effect of polymer-surfactant interaction on its turbulent drag reduction [J]. *Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects*, 2011, 391(1/2/3): 125-129.
- [26] MATRAS Z, MALCHER T, GZYL-MALCHER B. The influence of polymer surfactant aggregates on drag reduction [J]. *Thin Solid Films*, 2008, 516(24): 8848-8851.
- [27] MOHSENIPOUR A A, PAL R. Synergistic effects of anionic surfactant and nonionic polymer additives on drag reduction [J]. *Chemical Engineering Communications*, 2013, 200(7): 935-958.
- [28] MOHSENIPOUR A A, PAL R, PRAJAPATI K. Effect of cationic surfactant addition on the drag reduction behaviour of anionic polymer solutions [J]. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2013, 91(1): 181.

(编辑 荆树蓉)