

十六烷基三甲基氯化铵减阻流动实验

朱蒙生¹, 王悦¹, 曹慧哲¹, 蔡伟华^{2,3}, 岑仁海¹, 邹平华¹

(1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 150090 哈尔滨; 2. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 150001 哈尔滨;
3. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨)

摘要: 为了分析湍流减阻技术的可行性,探索减阻效果与溶液温度、浓度和流动雷诺数的关系及减阻水溶液的抗剪切特性,对阳离子表面活性剂十六烷基三甲基氯化铵(CTAC)水溶液进行减阻实验.结果表明,CTAC水溶液具有较强的抗剪切能力,但在高温条件下(70℃)减阻现象消失. CTAC水溶液减阻技术应用在集中供热/供冷系统中,尤其在地板辐射采暖系统中是可行的.

关键词: CTAC水溶液;减阻;抗剪切;节能

中图分类号: O357.1;O357.5

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)06-0062-03

Experimental study on drag-reducing flow with cetyltrimethyl ammonium chloride

ZHU Meng-sheng¹, WANG Yue¹, CAO Hui-zhe¹, CAI Wei-hua^{2,3}, CEN Ren-hai¹, ZOU Ping-hua¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;

2. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China;

3. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

Abstract: To analyze the feasibility of turbulent drag-reducing technique, and explore the relationship between drag reduction and solution temperature, concentration and flow Reynolds number and the characteristics of resisting the shear, cetyltrimethyl ammonium chloride (CTAC) aqueous solution have been investigated experimentally in this paper. The experimental results show that CTAC aqueous solution has strong ability of resisting the shear, and the drag-reducing effect of CTAC aqueous solution disappears when the solution temperature reaches 70℃. The experimental results will provide the important reference value and instruction meaning for the application of CTAC aqueous solution in a district heating/cooling (DHC) system, especially in the radiant floor heating (RFH) system.

Key words: CTAC aqueous solution; drag reduction; resisting the shear; energy saving

在液体中加入少量的高分子聚合物或表面活性剂可导致其湍流摩擦大幅度地降低,这一现象被称为添加剂湍流减阻或Toms效应^[1].由于投放少量的减阻剂就可产生显著的减阻效果,这对于节能具有重大意义^[2].添加剂湍流减阻技术在美国、加拿大和欧盟等国的一些城市集中供热/供冷系统中已有一定程度的应用^[3-4].该技术已成功地应用于丹麦

Herning城市一个中型集中供热系统中.试验表明:应用减阻剂之后,每年所节约的电量约为4 200 MWh;且每年CO₂排放量降低了约3 000 t^[5].

添加剂湍流减阻技术应用于集中供热/供冷系统中,极大地降低管道的沿程阻力损失,从而降低水泵的能耗,其节能效果非常显著^[6].与高分子聚合物相比,表面活性剂具有良好的光、热、机械稳定性和可控性,更适用于循环系统中,因此有更广泛的应用前景,受到极大关注^[7-8].

本文对阳离子表面活性剂十六烷基三甲基氯化铵(CTAC)水溶液进行减阻实验研究,分析重要参数,如溶液温度、溶液质量分数及流动雷诺数

收稿日期: 2011-07-16.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10872060);中国博士后基金资助项目(2011M500652);哈尔滨工业大学科研创新基金(HIT.NSRIF.2012070).

作者简介: 朱蒙生(1963—),男,副教授;
邹平华(1944—),女,教授,博士生导师.

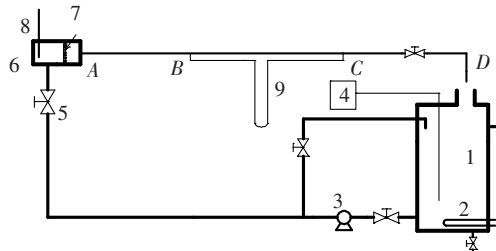
通信作者: 蔡伟华,caiwh@hit.edu.cn.

对其减阻特性的影响,同时研究其抗剪切特性.

1 减阻实验及评价

1.1 实验装置

实验装置如图 1 所示,主要由水箱、电加热器、循环水泵、温控仪及传感器、阀门、稳压器、整流过滤器、温度计以及 U 形管压差计等组成. AB 为入口稳定段, BC 为测量段, 管径为 0.01 m.



1—水箱; 2—电加热器; 3—循环水泵; 4—温控仪及传感器; 5—阀门; 6—稳压器; 7—整流过滤器; 8—温度计; 9—U 形管压差计.

图 1 实验装置示意图

实验水箱的容积为 0.12 m^3 , 离心泵功率为 0.75 kW , 转速为 $2\,830 \text{ r/min}$. 实验管段又分为 1 m 长的入口稳定段, 2 m 长的实验观测段和 0.5 m 长的出口段. 流量测量的不确定性小于 $\pm 1\%$. 计时仪器为手动秒表, 其最小分辨率为 0.01 s . 温度控制在 $\pm 1^\circ\text{C}$, 且压力测量的不确定性为 $\pm 0.5\%$.

1.2 CTAC 水溶液配置

用易溶于水的十六烷基三甲基氯化铵 (CTAC) 为减阻剂, 其相对分子质量为 320, 化学分子式为 $\text{C}_{16}\text{H}_{33}\text{N}(\text{CH}_3)_3\text{Cl}$. 为了使纤维状的聚合结构变得更加稳定, 在 CTAC 水溶液中加入相同质量浓度的水杨酸钠 (NaSal, $\text{HOC}_6\text{H}_4\text{COONa}$) 作为伴随补偿离子.

1.3 减阻相关实验公式及评价标准

对于牛顿流体的层流和湍流中范宁摩擦系数 C_f 的计算表达式分别为

$$C_f = \frac{16}{Re}; \quad (1)$$

$$C_f = 0.0791 Re^{-0.25}. \quad (2)$$

式中: 雷诺数 $Re = \frac{\rho v D}{\mu}$.

本文用 Zakin 线来评价表面活性剂水溶液的最大减阻效果, 其表达式为^[9]

$$C_f = 0.315 Re^{-0.55}. \quad (3)$$

在相同雷诺数下, 减阻剂湍流减阻百分比率为^[10]

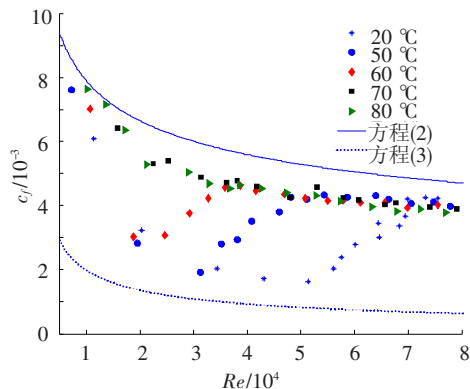
$$R_D = \frac{\Delta p_N - \Delta p_D}{\Delta p_N} \times 100\% = \frac{C_{fN} - C_{fD}}{C_{fN}} \times 100\%. \quad (4)$$

其中: C_{fN} 、 C_{fD} 分别表示牛顿流体 (非减阻) 和表面活性剂 (减阻) 流体的摩擦系数.

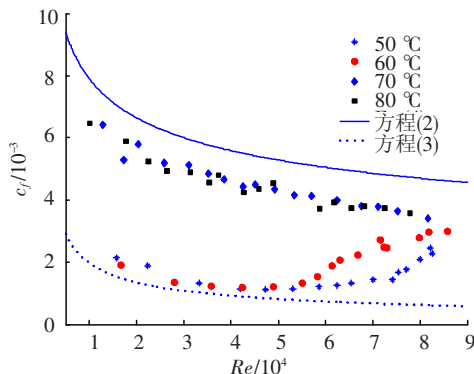
2 实验结果与讨论

2.1 温度效应

当 CTAC 水溶液质量分数分别为 2×10^{-4} 和 3×10^{-4} 时, 在温度分别为 50°C 、 60°C 、 70°C 、 80°C 下进行实验, 实验结果整理成 $C_f - Re$ 的关系, 如图 2 所示. 可见, 质量分数为 200×10^{-6} 和 300×10^{-6} 的 CTAC 水溶液, 在温度为 60°C 时仍出现明显的减阻效果, 但当溶液温度升高到 70°C 时, 减阻现象明显减弱. 这充分说明了 CTAC 水溶液存在产生减阻的最佳温度范围.



(a) 质量分数为 2×10^{-4}



(b) 质量分数为 3×10^{-4}

图 2 CTAC 水溶液在不同温度下的 $C_f = f(Re)$ 曲线

2.2 浓度效应

CTAC 水溶液的减阻效果与溶液质量分数密切相关. 根据实验数据分析溶液质量分数对其减阻效果的影响, 如图 3 所示.

从图中可见, CTAC 水溶液具有浓度效应: 在一定质量分数范围内, 质量分数越高, 减阻效果越好. 质量分数分别为 10^{-4} 和 2×10^{-4} 的 CTAC 水溶液在温度为 50°C 时, 减阻效果比较弱; 但质量分数分别为 3×10^{-4} 和 4×10^{-4} 的 CTAC 水溶液在温度为 50°C 时, 减阻效果却较好. 此外, 也发现流动临界雷诺数 Re_{crit} (范宁摩擦系数开始恢复时所对应的雷诺数) 随着 CTAC 水溶液质量分数的增加而增大. 但当温度为 70°C 时, 不同质量分数 CTAC 水溶液减阻效果均明显减弱.

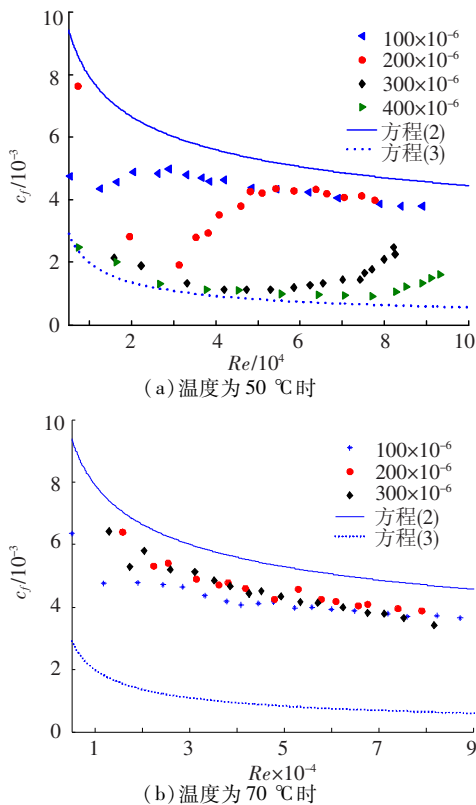


图 3 不同质量分数 CTAC 水溶液的 $C_f=f(Re)$ 曲线

2.3 抗剪切性

本文实验研究在泵的机械剪切作用下 CTAC 水溶液的减阻效果,从而评价其抗剪切能力,如图 4 所示。从图中可见,质量分数为 3×10^{-4} CTAC 水溶液在不同温度 and 不同雷诺数下连续运行 2 d 的实验结果并没有太大的区别,这表明 CTAC 水溶液受泵的机械剪切之后,仍保持良好的减阻效果。这主要是因为 CTAC 分子胶束结构受到泵的机械剪切而发生断裂,但断裂的分子结构又重新聚集成胶束结构(即具有自恢复能力),也就是说 CTAC 水溶液具有较强的抗剪切能力。这一重要结果为 CTAC 水溶液在实际循环系统中的应用提供重要的参考价值和指导意义。

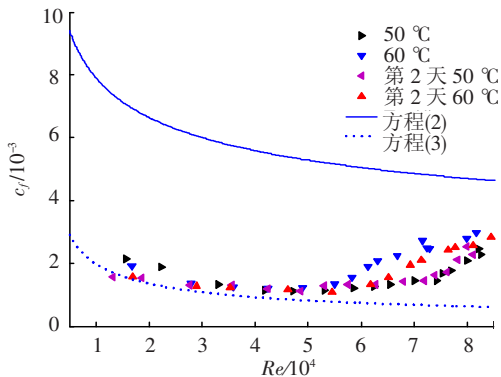


图 4 质量分数为 3×10^{-4} 的 CTAC 水溶液在不同温度和时间下的 $C_f=f(Re)$ 曲线

3 结 论

1)在紫铜管中对不同质量分数和不同温度

下 CTAC 水溶液进行减阻特性实验研究,发现 CTAC 水溶液与溶液温度和浓度密切相关,并存在一个适合的温度范围,即在该温度范围内,产生减阻效果。

2) CTAC 水溶液在一定的雷诺数范围内,表现出减阻特性;但当 Re 超过一定值时,管道壁面处的高剪切应力破坏了 CTAC 分子胶束结构,最终减阻现象消失。

3) CTAC 水溶液受泵的机械剪切之后,仍保持良好的减阻效果,即 CTAC 水溶液具有较强的抗剪切能力,这充分说明了其在实际循环系统中的应用是可行的。

参考文献:

- [1] TOMS B A. Some observation on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds number [C]//Proceedings of the first International Congress of Rheology. North Holland: Amsterdam, 1949: 135 – 148.
- [2] WHITE B, HEMMING J. Drag reduction by additives (Review and Bibliography) [M]. BHRA: Fluid Engineering Crenfield, 1976.
- [3] BANNAI M, KUWABARA K, ITASAKA H. Energy-saving in chilled-water supply system for clean room of semiconductor manufacturing plant: variable flow control of chilled-water and addition of drag reduction [J]. Tran Japan Soc Refrigerating & Air Conditioning Eng, 2006, 23:133 – 143.
- [4] POLLERT J, ZAKIN J L, MYSKA J, *et al.* Use of friction reducing additives in district heating system field test at Kladno-Krocehlavy [C]//Proceedings of Czech Republic Conf Int. Seattle, USA: DHC Association, 1994, 85:141 – 156.
- [5] EZRAHI S, TUVALU E, ASERIN A. Properties, main applications and perspectives of worm micelles [J]. Adv Colloid Interface, 2006, 21:77 – 102.
- [6] 焦利芳. 添加剂减阻技术在集中供暖系统中的节能应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [7] LI F C, KAWAGUCHI Y, SEGAWA T, *et al.* Reynolds-number dependence of turbulence structures in a drag-reducing surfactant solution channel flow investigated by PIV [J]. Phys Fluids, 2005, 17: 1 – 13.
- [8] CAI W H, LI F C, ZHANG H N, *et al.* Study on the characteristics of turbulent drag-reducing channel flow by particle image velocimetry combining with proper orthogonal decomposition analysis [J]. Phys Fluids, 2009, 21: 1 – 12.
- [9] ZAKIN J L, MYSKA J, CHARA Z. New limiting drag reduction and velocity profile asymptotes for nonpolymeric additives systems [J]. AICHE Journal, 1996, 42: 3546 – 3554.
- [10] SMITH K A, MERRILL E W, MICKLEY H S, *et al.* Influence of molecular weight upon drag reduction by polymers [J]. Chemical Engineering Science, 1967, 4 (22): 619 – 626.

(编辑 魏希柱)