DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201511112

活性剂对水下航行体减阻特性的影响

张孝石,王 聪,曹 伟,许 昊

(哈尔滨工业大学 航天学院,哈尔滨 150001)

摘 要:为减小水下航行体的阻力,研究通活性剂溶液的水下航行体湍流减阻的流动特性.通过从航行体头部向航行体边界通活性剂溶液的方法,分别对不同质量浓度和不同速度情况进行减阻实验研究,并分析了不同攻角下活性剂溶液对阻力和升力的影响.实验中活性剂溶液质量浓度分别为200、400、600、800和1 000 mg/L,流速为4~10 m/s,对比分析了阻力系数.实验结果表明:在活性剂溶液质量浓度为200 mg/L时航行体减阻效果较弱,当活性剂溶液质量浓度增加到1 000 mg/L时,减阻百分比高达40.8%;在活性剂质量浓度为1 000 mg/L时,当水流速度从4 m/s逐渐增大到10 m/s,减阻百分比在12.5%和40.8%之间变化;活性剂对有攻角的航行体仍然有减阻效果并且对升力产生较小影响.

关键词:水下减阻;活性剂;航行体模型;水洞实验;升力

中图分类号:TV131.32 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2017)04-0137-05

Influence of surfactant on drag reduction characteristic of an underwater vehicle

ZHANG Xiaoshi, WANG Cong, CAO Wei, XU Hao

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To reduce the drag of underwater vehicle, experiment is carried out to study the turbulent drag-reducing of underwater vehicle injected with surfactant in a water tunnel. For the experimental work presented here, surfactant is injected from the head of the vehicle. The drag reduction (DR) of surfactant as a function of fluid velocity and surfactant concentration are investigated. The influences of the surfactant on the lift-force and drag-force with different attack angle are analyzed. Surfactant solutions at different concentrations, namely 200, 400, 600, 800 and 1000 mg/L, are used to examine the influence of surfactant on drag coefficient. The flow velocities are set between 4 and 10 m/s. The present results show the DR effect is weak when the surfactant concentration is 200 mg/L. With the increase of the surfactant concentration to 1 000 mg/L, the drag coefficient is reduced by about 40.8%. The DR ratio ranges between 12.5% and 40.8% at all flow velocities up to 10 m/s from 4 m/s when the surfactant concentration is 1 000 mg/L. With the increase of surfactant concentration, the drag coefficient of the vehicle with angle of attack is also reduced and there is slight effect on the lift-force coefficient.

Keywords: drag reduction; surfactant; vehicle model; tunnel experiment; lift-force

水下运动体受到的流体黏性阻力约占其总阻力的70%左右,对于管道液体输送黏性阻力几乎占总阻力100%左右[1].减小摩擦阻力可以提高水中航行体速度,增强水下航行体攻击能力,因此了解水中航行体阻力产生的原因,研究其减阻机理意义重大.

目前减阻方法主要有:空化减阻、主动通气减阻、柔性波减阻、微沟槽减阻、表面涂层减阻、高分子聚合物减阻等.高分子聚合物减阻是通过聚合物分子变形的有序性产生两种作用:1)通过阻碍漩涡的产生降低涡旋的发生频率;2)通过降低已经形成漩涡的转动速率.这两个效果减小了高分子溶液的猝发周期,从而达到了湍流减阻效果.文献[2]首次发现在水中添加少量的高分子聚合物可以使湍流阻力大幅降低,当高分子聚合物溶于水后,在一定的温度和质量浓度条件下会形成链式分子聚合体,由于此类分子聚合体可以伸缩、弯曲并随流体一起流动,从而可以吸收并缓冲湍流脉动动能,降低湍流强度并达到降低阻力的效果.文献[2]首次发表水中添加高分子聚合物可以达到减阻效果后,学者们开始广泛、深入和细致地研究添加剂减阻问题,并得出在流体中加入特定添加剂,例如高分子聚合物、表面活性剂等物质,则流体变为非牛顿流体,流体的壁面摩擦阻力最大可降低80%.大量研究表明,高分子聚合物存在抗剪切性能、易降解、受温度影响大等缺点,在受到湍流流动的高剪切力或在高温状态下,分子链易断裂并降低或者失去减阻能力[3].

近年来大量研究表明,相比高分子聚合物表面活性剂在应用于流体的减阻过程中不但可以克服不

收稿日期:2015-11-30
基金项目:黑龙江省自然科学基金(A201409)
作者简介:张孝石(1987—),男,博士;
王 聪(1966—),男,教授,博士生导师
通信作者:王 聪,alanwang@hit.edu.cn

稳定、易降解、不可控等缺点,而且表面活性剂的减阻性能比高分子聚合物好.文献[4]通过实验对比分析了同一流道分别加有 CTAC 溶液与高聚物无溶液的减阻和传热效果,实验结果表明,CTAC 溶液有更好稳定性的同时减阻效果要比相同条件下的高聚物溶液好,而两种溶液的传热性能基本相同.文献[5]进行了表面活性剂 CTAC 溶液的封闭水循环实验,在系统中加入 40 mg/L 的表面活性添加剂 CTAC 可使循环系统达到 60%的减阻率;并利用 PIV 观察到通道内湍流的近壁拟序结构的发生频率和强度都有降低,从而摩擦系数的湍流项降低,即发生湍流减阻.文献[6]研究了水平管内空气和表面活性剂水溶液的两相流流动特性,研究结果表明,由于表面活性剂水溶液表面张力下降导致在较高的气体流速范围内光滑分层流转变为波状分层流,这一现象归因于液体表面张力的下降.文献[7]通过实验和数值仿真进行了 CTAC 表面活剂溶液减阻机理研究,CTAC 溶液中产生了弹性应力并增加了摩擦阻力,同时抑制了湍流漩涡的产生并降低了湍流剪切应力,从而减小了摩擦阻力,整体呈现为减阻效果.文献[8]通过实验研究了不同雷诺数条件下表面活性剂质量浓度对管道湍流影响,表面活性剂溶液中,由于过渡区和黏性底层的厚度增加导致速度脉动的峰值远离壁面,黏性剪切应力占主导作用,雷诺剪切应力在壁面处有大幅减小,此时减阻率最大约为 63%.文献[10]通过实验研究了不同质量浓度 CTAC 溶液管内流动的减阻效果,发现在雷诺数范围为 7 000~18 500,表面活性剂质量浓度为 30、70、80、90 mg/L 这 4 种溶液相对应的减阻效果分别达到 7%、30%、50%和 55%.文献[11]通过粒子图像测速系统,观察水和 CTAC 表面活性剂溶液的瞬时速度分布.在实验中发现由于湍流能量产生和湍流扰动,使得低速流体区域向高速流体区域渗透,近壁面处的漩涡波动消失,并且添加活性剂主流中的湍流脉动更小.文献[12]进行了不同表面活性剂减阻的实验研究,实验结果表明,在温度为 50℃~60℃ 范围内时,当 CTAC 水溶液质量浓度在 1 000~2 000 mg/L 范围内时,减阻率达到 60%~80%.但是随着温度的升高,当温度在 70℃~80℃ 范围内的时候,只产生较弱减阻效果.活性剂减阻潜在的应用场合有减小原油输送的泵功耗、降低远距离流体供热供冷的功耗等[13-14].大量的研究主要针对活性剂对流道中液体的减阻,物体在活性剂液体中的减阻研究等,所以可以通过对水下航行体表面通活性剂的方法进行航行体减阻研究.本文主要针对水下航行体从头部设计的缝中向外通有表面活性剂溶液开展减阻实验研究,在原有水下通气航行体实验台的基础上对设备进行了升级,设计加工了在航行体头部通活性剂的装置,该设备可通过实验台把活性剂液体以一定速度通入到航行体头部缝处,从航行体头部缝处流出包裹在整个航行体周围,并对表面活性剂的减阻机理进行了一定的探讨.

1　实验设备及方法

实验主要依托哈尔滨工业大学循环式高速通气空泡水洞进行,实验系统包括水洞如图 1 所示.控制系统,水洞工作段的长度为 1 m,横截面为 260 mm×260 mm 的正方形.为便于观察工作段上下部及前后侧面装有透明的有机玻璃.航行体模型、流体力测试系统、通溶液控制系统、光学测试系统和其他辅助系统如图 2 所示.

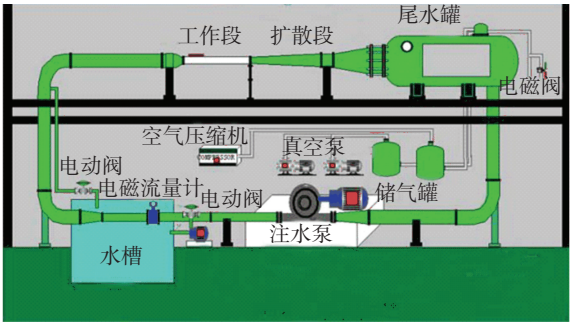


图 1　水洞示意

Fig.1　The sketch of water tunnel

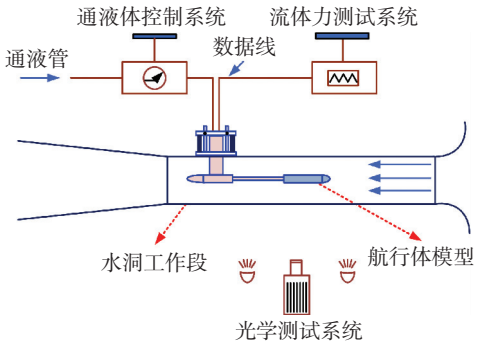


图 2　水洞实验示意

Fig.2　The sketch of water tunnel experiment

图 3 给出了改变模型攻角示意图,从图 3 中可以看出模型与水洞工作段的连接支撑结构,通过调节螺栓可以使支撑板转动,模型由连接支撑结构与支撑板连接进而随之转动,模型攻角发生改变.实验的航行体模型,材质为铝合金,水下航行体模型长为 L,直径为 D,如图 4 所示.图 4 中模型内部装有六分力天平、通活性剂溶液管和数据线.航行体模型通活性剂溶液角度可以通过更换不同的头部调节,通活性剂的角度与为航行体中轴线夹角,分别为:35°、45°、90°.

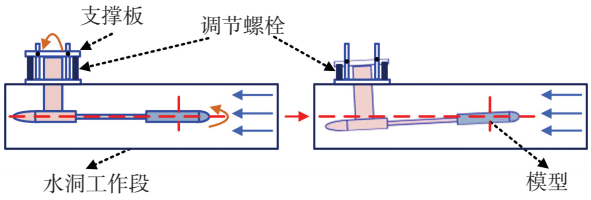


图 3　模型攻角改变示意

Fig.3　The sketch of changing the angle of attack

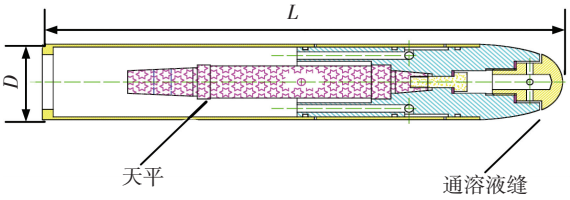


图 4　航行体模型

Fig.4　The vehicle model

在不同工况的水洞实验中,研究通有不同质量浓度的活性剂溶液水下航行体的流体动力特性,通过使用通活性剂溶液控制系统实现相同流量不同质量浓度的实验;研究不同流速下通活性剂方式对水下航行体流体动力特性影响;通过调节模型与水洞工作段连接支撑结构实现模型攻角改变,研究不同攻角下通活性剂溶液对水下航行体流体动力特性影响.

实验的基本方法概述如下:将配置好的特定质量浓度和配比的溶液均匀混合,在一定的流速范围和恒定的温度下,利用通活性剂控制系统控制溶液的流量保持在恒定的速度通入不同质量浓度的溶液,调节水洞的流速并改变攻角,测量流动过程中航行体受到的力情况.本实验将使用易溶于水的十六烷基三甲基氯化铵(CTAC)为减阻剂,其化学分子式为 C16H33N(CH3)3Cl,分子量为 160.为得到一定的质量浓度和配比的溶液,首先将预先配比好的对应质量分数为 99.99% CTAC 放入烧杯,根据需要配置的溶液,把水加入到烧杯指定液面高度.CTAC 用电子天秤称得,其精度为±0.001 g.每种配制溶液单独使用一个杯子,溶液配置完成后,检查系统各个设备是否正常,然后将模型调整到一定攻角,并调整好水洞来流速度,同时触发通活性剂系统和天平测力系统,通活性剂系统以 10 mL/s 的速度向航行体通入活性液体持续 10 s,同时记录 10 s 的天平测力数据,结束后关闭通活性剂系统并保存数据,准备下一个实验工况.实验分别开展不同通活性剂和通活性剂质量浓度为 200、400、600、1 000 mg/L,水洞中水流速度为 4、6、8、10 m/s 和模型攻角为 0°、6°的不同实验工况.

2　结果分析

2.1　通活性剂溶液角度对减阻率的影响

为了研究通活性剂溶液角度对航行体减阻特性的影响,本文对通活性剂溶液角度分别为 35°、45°、90°时的减阻效果进行实验研究.图 5 为 0°攻角条件下不同角度的阻力系数的对比,从图 5 中可以看出,在相同流速和攻角条件下,不同通活性剂溶液角度减阻效果基本一致,因此通活性剂的角度对溶液减阻的影响可以忽略.

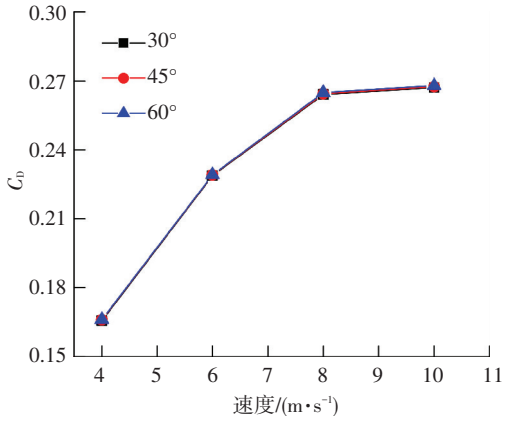


图 5　不同角度阻力系数对比

Fig.5　Comparison of drag coefficient at different angles

2.2　航行体减阻实验分析

通活性剂溶液航行体的减阻效果是与温度、活性剂种类、活性剂溶液质量浓度和来流速度有关的函数,在相同温度和流速下无表面活性剂和不同质量浓度表面活性剂溶液进行对比,阻力系数定义为

$$C_D = \frac{F}{0.5\rho V_\infty^2 A}.$$

式中:F 为轴向力;ρ 为流体密度;V_∞ 为来流速度;A 为航行体横截面面积.为了便于比较 CTAC 水溶液的减阻效果,减阻百分比 DR 定义如下:

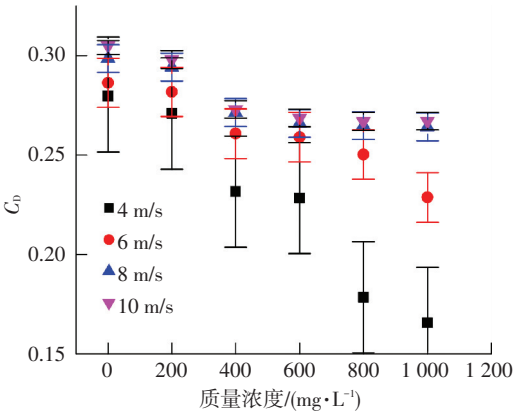
$$\mathrm{DR} = \left(1 - \frac{C_{D2}}{C_{D1}}\right) \times 100\%.$$

式中:C_{D1}、C_{D2}分别为无活性剂条件下和不同质量浓度活性剂条件的阻力系数.从而可以计算出质量浓度为 200、400、600、800、1 000 mg/L 的 CTAC 水溶液在相同温度下的减阻百分比,不同条件下航行体阻力系数对比如图 6(a)所示,不同条件下的 CTAC 水溶液减阻百分比如图 6(b)所示.

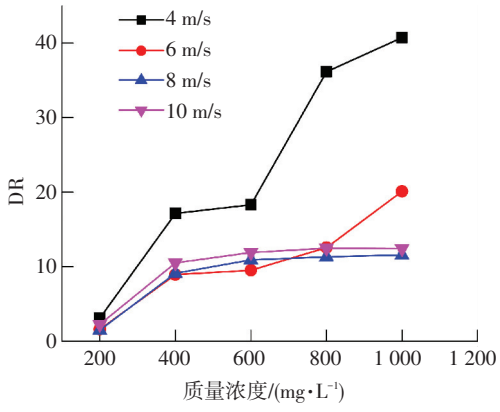
表面活性剂 CTAC 溶液的质量浓度对航行体阻力有较大影响如图 6(a)所示,相同流速条件下,航行体的减阻百分比随着活性剂溶液质量浓度的增高而增大.质量浓度为 200,400 mg/L 的 CTAC 水溶液只会产生较弱的减阻效果;水下航行体在相同流速

下的减阻效果随着 CTAC 溶液质量浓度的增加而增强;当溶液质量浓度增加到 800、1 000 mg/L 时,航行体的减阻百分比分别达到 36.2% 和 40.8%, 如图 6(b)所示,这两种不同质量浓度溶液的减阻百分比相差较小,说明当溶液质量浓度增大到一定值后减阻百分比会趋于稳定.

对于通有 CTAC 溶液的航行体阻力系数明显减小,这是由于表面活性剂分子在溶剂中达到一定质量浓度后单个胶束会聚合成球状胶束;质量浓度进一步增加时,多个球状胶束再汇合成两端为半球形的杆状胶束.在一定的剪切力作用下,杆状胶束会相互缠绕并沿流场方向排列形成高次胶束结构[15],对航行体壁面紊流的形成和发展形成抑制,通有 CTAC 溶液的航行体出现减阻效果.



(a) 不同条件下航行体阻力系数

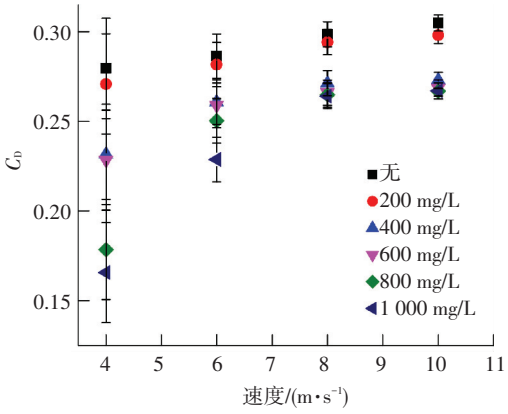


(b) 不同条件下的 CTAC 水溶液减阻百分比

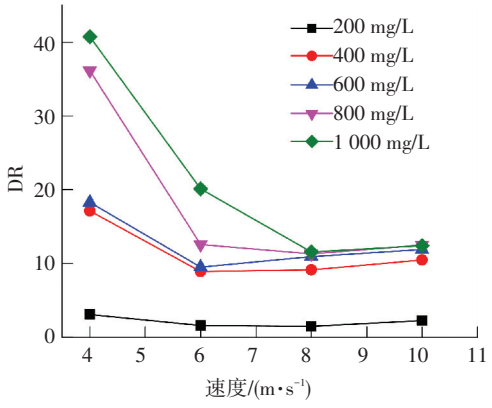
图 6　不同速度条件下阻力随着质量浓度的变化

Fig.6　Drags change with concentration at different velocities

通表面活性剂溶液航行体的减阻效果跟速度的大小密切相关如图 7(a)所示,随着速度的增加航行体的阻力系数逐渐增大,对于相同质量浓度的 CTAC 溶液航行体的阻力系数仍然随着速度的增加呈现增长趋势,减阻效果表现在一定的速度范围内.在低速情况下随着 CTAC 溶液质量浓度的增加,通活性剂溶液航行体减阻效果明显,减阻率达到40.8%,如图 7(b)所示,这是因为剪切应力使筛网结构发生倾斜和拉伸,但由于表面活性剂溶液的黏弹性作用,这种变化在一定剪切应力范围内可以受到束缚,减阻流体的流动性能随速度的增大而增大,最后达到最大减阻效果;当速度增大时,减阻效果增长幅度下降.这主要是因为在较高速度下,壁面的剪切应力增大,从而对 CTAC 水溶液产生更大的剪切,从而导致减阻效果变缓.当速度达到一定值后,在高剪切应力的作用下,筛网结构发生集中断裂,表面活性剂溶液表现出和溶剂相似的特性,减阻现象消失[4].



(a)阻力系数随质量浓度的变化



(b) 减阻百分比随速度的变化

图 7　不同质量浓度条件下阻力随着速度的变化

Fig.7　Drags change with velocity at different concentrations

实验结果表明不同质量浓度 CTAC 水溶液对航行体减阻效果有较大影响.这是由于随着 CTAC 水溶液质量浓度的增大棒状胶束长度逐渐增大,从而使得胶束沿着流动方向延伸并抑制了航行体近壁面处的湍流流动,降低了航行体壁面与流动的流体之间的表面摩擦阻力;同样随着 CTAC 水溶液质量浓度增大,棒状结构也会越大,从而产生更高的减阻百分比[15].

2.3　不同攻角减阻实验分析

航行体在水中航行时受到横流作用在俯仰方向会产生偏转,为研究对通有活性剂溶液对有攻角的航行体的影响,进行了 6°攻角实验研究,并得到了不同速度条件下的阻力系数,并分析了 0°和 6°攻角的升力系数.

图 8 为 6°攻角条件水下航行体在不同质量浓

度活性剂溶液条件下的阻力系数的变化,在速度为 6 m/s 时,随着通活性剂溶液质量浓度的增大阻力呈现减小趋势;当速度增大到 8 m/s 时,随着活性剂质量浓度的增大,航行体减阻效果逐渐减小;当速度达到 10 m/s 时,随着活性剂质量浓度的增大,有攻角时减阻不受到通活性剂的影响.

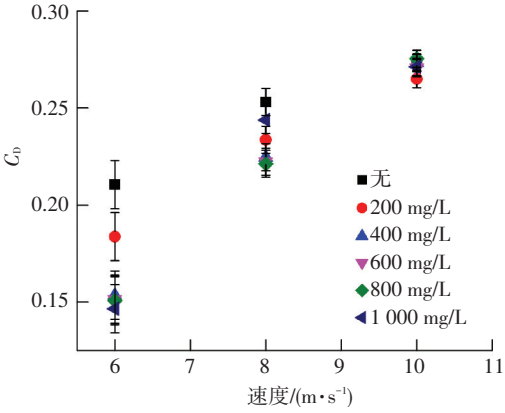
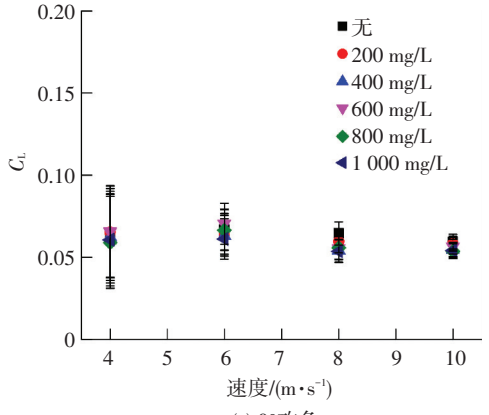


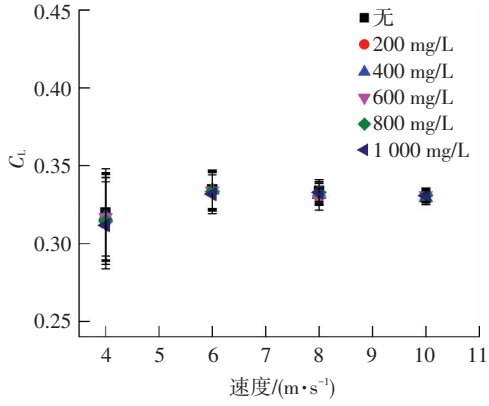
图 8　6°攻角下阻力系数随质量浓度的变化

Fig.8　Drags coefficient change with concentration at 6 degree angle of attack

图 9 为 0°和 6°攻角条件水下航行体在不同质量浓度活性剂条件下的升力系数的对比,随着水下航行体攻角的变化航行体的俯仰力逐渐增大,0°和 6°攻角时通活性剂航行体对升力未产生明显的影响.



(a) 0°攻角



(b) 6°攻角

图 9　不同攻角下升力系数

Fig.9　Lift-force coefficient at different angle of attack

3　结　论

1)随着 CTAC 水溶液质量浓度的增加,水下航行体的减阻效果逐渐增强,当 CTAC 水溶液质量浓度为 200 mg/L 时,减阻百分比为 3.2%,产生较弱的减阻效果;随着 CTAC 水溶液质量浓度的增加,在相同流速下减阻效果会呈现增强趋势,当水溶液质量浓度为 800 mg/L 时,减阻最大百分比达到36.2%;当水溶液质量浓度增大到 1 000 mg/L 时,减阻最大百分比为 40.8%,相比水溶液质量浓度为 800 mg/L 减阻百分比变化较小,随着质量浓度的继续增大减阻效果趋于减阻上限.

2) CTAC 水溶液在一定流速范围内对航行体有较好的减阻效果,当流速超过一定值时,减阻效果减弱,这主要是因为在较高速度下,航行体壁面的剪切应力逐渐增大,从而对 CTAC 水溶液产生更大的剪切,导致减阻效果减弱.当流速达到一定值时,高剪切应力导致 CTAC 水溶液表现出和水相似的湍流特性,减阻效果逐渐消失.

3)对于不同攻角条件下,CTAC 水溶液对航行体的减阻效果仍然和速度的大小有关系,低速时有一定减阻效果,当流速达到 10 m/s 时,减阻效果消失;不同攻角时,通活性剂航行体升力未发生明显改变.

参考文献

[1] BEWLEY T R, MOIN P, TEMAM R. DNS-based predictive control of turbulence: an optimal benchmark for feedback algorithms[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2001, 447:179-225. DOI: 10.1017/S0022112001005821.

[2] TOMS B A. Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds numbers[C]//Proceedings of the First International Congress on Rheology. Amsterdam: North-Holland,1948(2): 135-141.

[3] CHOI U S, KASZA K E. Long-term degradation of dilute polyacrylamide solutions in turbulent pipe flow[C]//Fourth International Conference on Drag Reduction. Davos, Switzerland: Argonne National Lab., IL (USA), 1989, 163-169.

[4] AGUILAR-MENDOZA G. An experimental study of drag and heat transfer reductionsin turbulent pipe flows for polymer and surfactant solutions [D]. Santa Barbara: University of California Santa Barbara,1999.

[5] LI Fengchen, KAWAGUCHI Y, YU Bo, et al. Experimental study of drag-reduction mechanism for a dilute surfactant solution flow[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(3/4): 835-843. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.04.048.

[6] HAND N P, SPEDDING P L, RALPH S J. The effect of surface tension on flow pattern, holdup and pressure drop during horizontal air—water pipe flow at atmospheric conditions[J]. The Chemical Engineering Journal, 1992, 48(3): 197-210. DOI: 10.1016/0300-9467(92)80036-A.

(下转第 172 页)