

高雷诺数下减阻聚合物材料的选型试验研究

孙海浪*, 季锦梁, 朱爱军, 韩文骥, 张 璇

(中国船舶科学研究中心 水动力学重点实验室 深海技术科学太湖实验室, 无锡 214082)

摘要:文章采用水箱中转盘和转筒测扭矩相结合的方法,开展高雷诺数(最高达 2.2×10^7)下减阻聚合物材料的选型试验研究。以目前在减阻方面较为广泛使用的高分子聚合物——聚氧化乙烯(PEO)、聚丙烯酰胺(PAM)、瓜胶等为试验对象,并以 PEO 为主,研究浓度、数均分子量、混合其他聚合物、剪切、海水等对其减阻效果的影响。获得以下主要结论:(1)减阻率总体上随浓度的增加而增加,就数均分子量为 1×10^7 的 PEO 而言,低雷诺数($Re < 1 \times 10^7$)下,5 mg/L 的浓度已饱和,最大减阻率约为 60%;(2)减阻率总体上随数均分子量的增加而增加, $Re < 1.3 \times 10^7$ 时,数均分子量大于 8×10^6 后,减阻率已基本不变;(3)抗剪切性能随浓度、数均分子量的增加而增加,但浓度大于 5 mg/L、数均分子量大于 8×10^6 后,增幅降低;(4)增加浓度,或者混合 PAM,均可提升减阻率和抗剪切性能,前者效果更好;(5)海水中与淡水中减阻率相当,但海水中抗剪切能力稍差。

关键词:减阻; 高分子聚合物; 选型; 高雷诺数; 试验

基于“汤姆斯(Toms)效应”^[1,2]的高分子聚合物减阻技术以其减阻率高而备受关注,在消防、灌溉、石油管道运输等内流减阻中获得了较为广泛的应用^[3~7]。相对而言,由于效费比低(需要持续注入,用量大)、高雷诺数(Re)下易失效(因强剪切作用而降解)等原因,在水下航行体等外流减阻中应用较少。因此,高效、抗剪切的聚合物材料是实现水下航行体减阻应用的基础。

聚氧化乙烯(PEO)、聚丙烯酰胺(PAM)、瓜胶是较为广泛使用的水溶性高分子聚合物^[8~10]。目前,针对特定的高分子聚合物,开展浓度、温度、剪切等对其减阻效果影响的研究较多^[10~12],而不同类型聚合物及其混合物溶液减阻效果的比较研究较少。许多研究者^[10,13]认为,PEO 综合减阻效果最佳,但近期工艺技术合成的、数均分子量(M_n)大于 6×10^6 的 PEO 试验数据较少。此外,面向外流应用的、高 Re ($> 10^7$)下聚合物材料的选型研究较少。

本文以 PEO 为主,试验研究高 Re 下浓度、 M_n 、混合其他聚合物、剪切、海水等对其减阻效果的影响。

1 试验方法

参照国标 GB/T 7791-1987^[14]和 GB/T 7791-2014^[15],采用水箱中转盘和转筒测扭矩相结合的方法,通过测量以一定转速转动的转盘和转筒在不同高分子聚合物溶液中的扭矩变化,比较不同溶液的减阻性能。

1.1 设备仪器

转筒由外围的环带和中心的支撑结构组成,环带外径 296 mm,内径 288 mm,平均直径 292 mm,高 200 mm。中心支撑结构与转盘的尺寸相同,直径 288 mm,厚度 4 mm。转盘和转筒实物如图 1 所示。

扭矩测量采用敞水动力仪(型号 H390),如图 2 所示。最高转速 50 r/s,精度 0.1%;扭矩测量量程 50 N·m,精度 0.1%。

1.2 试验工况

详细试验工况如表 1 所示,其中,各试验工况下转速均由低到高设为 4~28 r/s,间隔 3 r/s,称为

10.14028/j.cnki.1003-3726.2022.12.020

收稿:2021-07-27;修回:2021-11-23;

基金项目:中船重工集团公司联合基金(6141B042705);

* 通讯联系人:孙海浪(1987-),男,高级工程师,主要从事船舶水动力减阻、实验流体力学方面的研究。

E-mail: sunhailang@cssrc.com.cn.

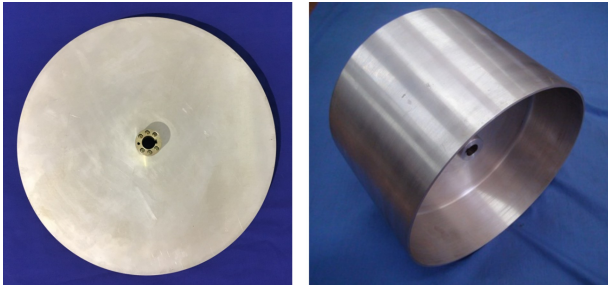


图 1 转盘(左)和转筒(右)

Figure 1 Rotating disc (left) and rotating cylinder (right)

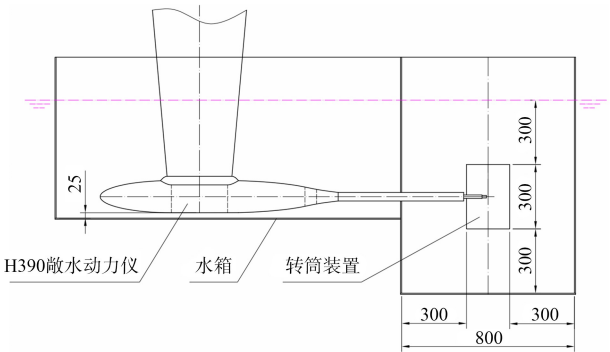


图 2 试验方法示意图

Figure 2 Schematic diagram of the experimental method

“1 次测量”。为考察试验对象的抗剪切性能(对于试验工况 C3~C15)或者重复测量结果情况(对于试验工况 C1~C2),每个试验工况均进行了 2 次测量,即完成第 1 次测量后接续完成第 2 次测量。为便于表达,试验工况 a 记为 Ca,试验工况 a 的第 b 次测量记为 Ca-b。

表 1 试验工况
Table 1 Working condition of the experiment

代号	试验对象/ M_n	质量分数 (mg/L)	溶剂	备注
C1	—	—	淡水	获得重复测量结果;研究海水对测量结果的影响;海水用海水晶按盐度 2.91% 配制
C2	—	—	海水	
C3	PEO ($M_n=1\times10^7$)	5	海水	研究海水对 PEO 减阻性能的影响
C4			淡水	
C5	PEO ($M_n=1\times10^7$)	1	淡水	研究浓度对 PEO 减阻性能的影响
C6		2		
C7		4		
C8		10		
C9	PEO ($M_n=8\times10^6$)	5	淡水	研究 M_n 对 PEO 减阻性能的影响
C10	PEO ($M_n=6\times10^6$)	5		
C11	PEO ($M_n=1\times10^7$)、PAM ($M_n=2\times10^7$)	5、5	淡水	研究混合 PAM、瓜胶对减阻性能的影响
C12	PEO ($M_n=1\times10^7$)、PAM ($M_n=1.2\times10^7$)	5、5		
C13	PEO ($M_n=1\times10^7$)、PAM ($M_n=5\times10^6$)	5、5		
C14	PEO ($M_n=1\times10^7$)、瓜胶	5、5		
C15	PEO ($M_n=1\times10^7$)、PAM ($M_n=2\times10^7$)	5、5	海水	研究海水对 PEO、PAM 混合溶液减阻性能的影响

各转速下采样频率均为 2000 Hz,采样时间均为 6 s。

1.3 数据处理和表达

分别测量转盘、转筒的扭矩,记为 q_{0i} 、 q_{1i} , i 代表转速。忽略环带厚度以及转筒中心支撑结构和外围环带之间的流动干扰影响,则各转速下作用在环带内外侧表面上的扭矩 Q_i 为:

$$Q_i = q_{1i} - q_{0i}$$

(1)

取环带平均直径 $\overline{D}$,则作用在环带内外侧表面上的摩擦阻力为:

$$F_{fi} = \frac{2Q_i}{D} \tag{2}$$

对应的摩擦阻力系数为：

$$C_{fi} = \frac{F_{fi}}{0.5\rho(i\pi D)^2 S} = \frac{2Q_i}{\rho i^2 \pi^3 \overline{D^4} h} \tag{3}$$

其中， ρ 为溶液的密度， S 为环带表面积， h 为环带高。

记淡水中的摩擦阻力系数为 C_{f0} ，则相应高分子聚合物溶液的减阻效果为：

$$\delta_{efi} = \frac{C_{f0} - C_{fi}}{C_{f0}} = 1 - \frac{C_{fi}}{C_{f0}} \tag{4}$$

试验 Re 记为：

$$Re = \frac{i\pi \overline{D} \cdot \pi \overline{D}}{\nu} = \frac{i\pi^2 \overline{D^2}}{\nu} \tag{5}$$

其中， ν 为淡水的运动粘度 $1.066 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (试验水温 $18\text{ }^\circ\text{C}$)。

2 结果与分析

2.1 重复测量结果及海水对测量的影响

试验工况 C1、C2 的测量结果如图 3 所示。可以发现：(1) 淡水和海水中扭矩随转速增加而增加，大致呈幂关系。(2) 除低转速(4、7 r/s)外，重复测量偏差(两次测量值之差与第 1 次测量值的比值)均小于 1.6%。(3) 海水相对淡水，转矩测量值更大，平均大 3%。

2.2 海水对 PEO 减阻性能的影响

试验工况 C3、C4 测量结果如图 4 所示。可以发现：(1) PEO 的减阻率随转速增加呈先增加后减小趋势，5 mg/L 的 PEO ($M_n = 1 \times 10^7$) 最大减阻率约为 60%。可能的原因是低转速作用下，聚合物的线型、柔性分子链得以充分舒展，顺流、抑湍作用增加，从而减阻效果增强，而高转速下，聚合物分子链在强剪切下断裂，从而减阻效果减弱。(2) 第 2 次测量的减阻率均比第 1 次小，且低转速下降幅更大。说明对 PEO 而言，这种剪切破坏是不可自动修复的。另外，长分子链对低转速下的减阻影响更显著。(3) 就第 1 次测量的减阻率而言，海水中与淡水中效果相当；就第 2 次测量的减阻率而言，海水中小于淡水中(小约 4%)。因此，可以认为，PEO 在海水中与淡水中减阻率相当，但海水中抗剪切能力更差。后续考虑

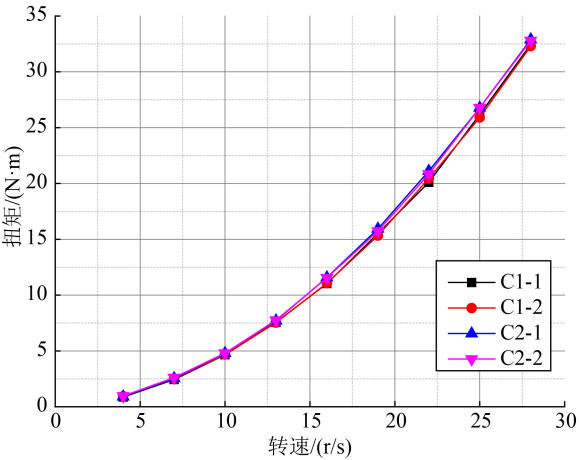


图 3 重复测量结果及海水对测量结果的影响
Figure 3 Repeated measurement results and the influence of seawater

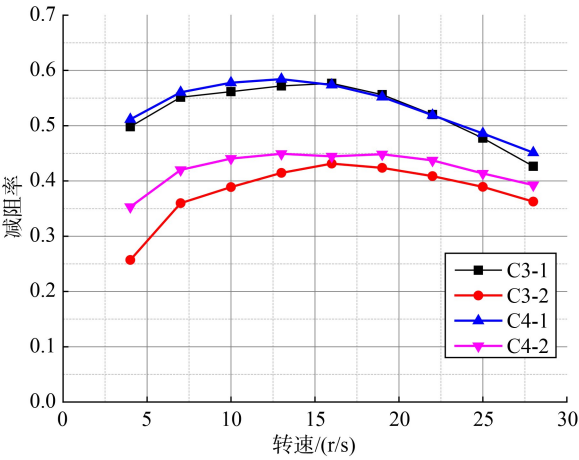


图 4 海水对 PEO 减阻性能的影响
Figure 4 Effect of seawater on drag reduction performance of PEO

试验方便,多采用淡水进行试验。

2.3 浓度对 PEO 减阻性能的影响

试验工况 C4~C8 测量结果如图 5 所示。可以发现:(1) 就第 1 次测量而言,低转速($<13 \text{ r/s}$, $Re < 1 \times 10^7$)下,4~5 mg/L 的 PEO ($M_n = 1 \times 10^7$) 浓度已饱和。(2) 随着浓度的增加,PEO ($M_n = 1 \times 10^7$) 溶液抗剪切性能增加,但超过 5 mg/L 后,抗剪切性能的增加幅度相对低浓度时已明显降低。因此,后续试验浓度多以 5 mg/L 为主。

2.4 M_n 对 PEO 减阻性能的影响

试验工况 C4、C9~C10 测量结果如图 6 所示。可以发现:(1) 就第 1 次测量而言,低转速($<16 \text{ r/s}$, $Re < 1.3 \times 10^7$)下, M_n 大于 8×10^6 后,PEO 减阻率已基本不变。(2) 随着 M_n 的增加,PEO 溶液抗剪切性能增加,但抗剪切性能增加幅度有所降低。

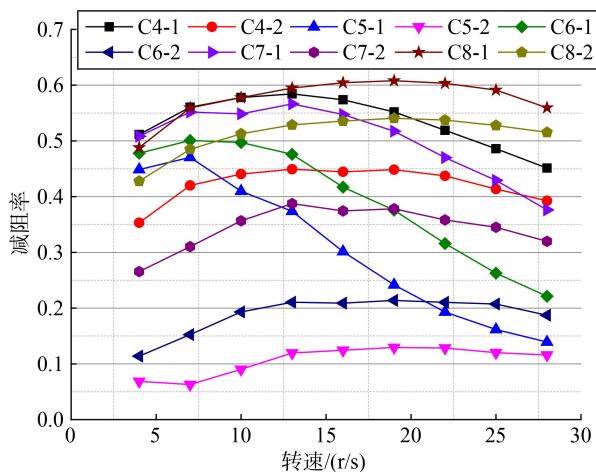


图 5 浓度对 PEO($M_n = 1 \times 10^7$)减阻性能的影响

Figure 5 Effect of concentration on drag reduction performance of PEO ($M_n = 1 \times 10^7$)

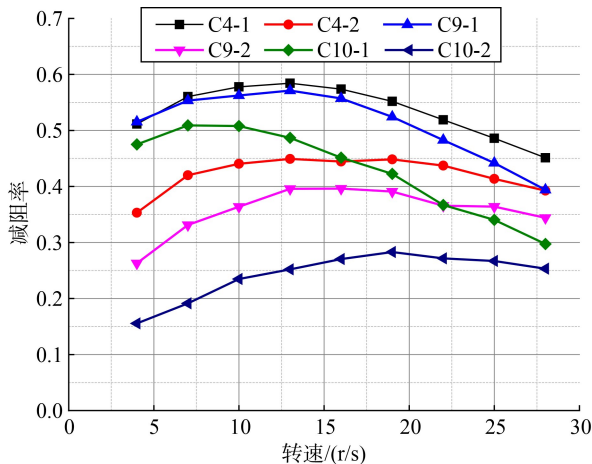


图 6 M_n 对 PEO 减阻性能的影响

Figure 6 Effect of M_n on drag reduction performance of PEO

2.5 混合 PAM 和瓜胶对 PEO 减阻性能的影响

试验工况 C4、C8、C11~C14 测量结果如图 7 和图 8 所示。可以发现:(1) 就第 1 次测量而言,低转速($<13 \text{ r/s}$, $Re < 1 \times 10^7$)下,混合 PAM 和瓜胶后,与单独添加 5 mg/L 的 PEO ($M_n = 1 \times 10^7$) 相比,减阻效果并没有明显提升;高转速($>16 \text{ r/s}$, $Re > 1.3 \times 10^7$)下有较明显提升,特别是混合 PAM ($M_n = 2 \times 10^7$) 的情况。(2) 混合瓜胶、PAM ($M_n = 5 \times 10^6$) 和 PAM ($M_n = 1.2 \times 10^6$) 后抗剪切性能并没有显著提升,混合 PAM ($M_n = 2 \times 10^7$) 后抗剪切性能则有显著提升。(3) 混合 PAM 的减阻效果优于混合瓜胶,可能的原因是 PAM 与 PEO 同为柔性分子结构,且 PAM 具有吸附、增强作用,因此顺流、抑湍作用得以增强;而瓜胶分子的柔性、与 PEO 分子的结合力则相对较差。(4) 若按同等聚合物添加量比较,即与 10 mg/L 的 PEO ($M_n = 1 \times 10^7$) 相比,则混合 PAM 和瓜胶,无论是减阻效果还是抗剪切性能,均不如前者。可能是因为 PEO 的分子量分布较窄,PAM、瓜胶的分子量分布较宽,而分子量分布趋于一致时对减阻更为有利。因此,需要考虑抗强剪切的情况,可通过混合 PAM ($M_n = 2 \times 10^7$) 或者适当增加 PEO ($M_n = 1 \times 10^7$) 的浓度两种途径。

2.6 海水对 PEO、PAM 混合溶液减阻性能的影响

试验工况 C11、C15 测量结果如图 9 所示。可以发现:就第 1 次测量的减阻率而言,海水中与淡水中效果相当;就第 2 次测量的减阻率而言,海水中稍小于淡水中(小约 2%)。因此,PEO、PAM 混合溶液在海水中与淡水中减阻率相当,但海水中抗剪切能力稍差。

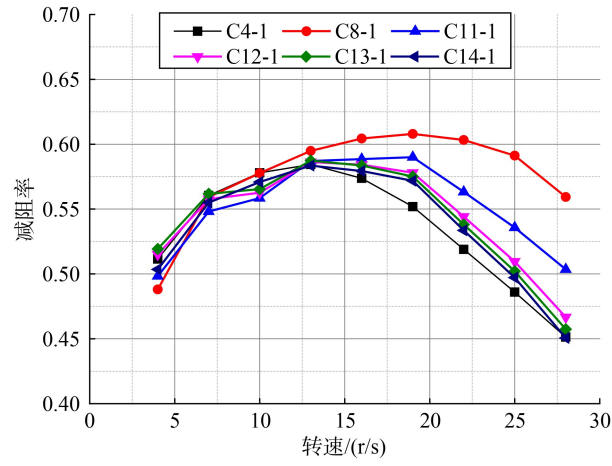


图 7 混合 PAM 和瓜胶对减阻性能的影响(第 1 次测量)
Figure 7 Effect of mixing PAM and guar gum
(1st measurement)

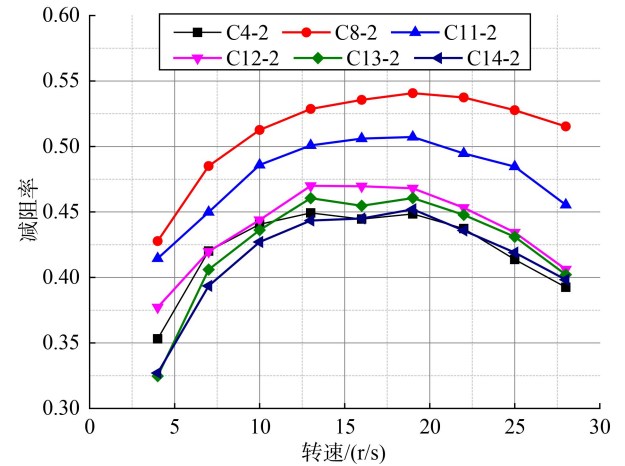


图 8 混合 PAM 和瓜胶对减阻性能的影响(第 2 次测量)
Figure 8 Effect of mixing PAM and guar gum
(2nd measurement)

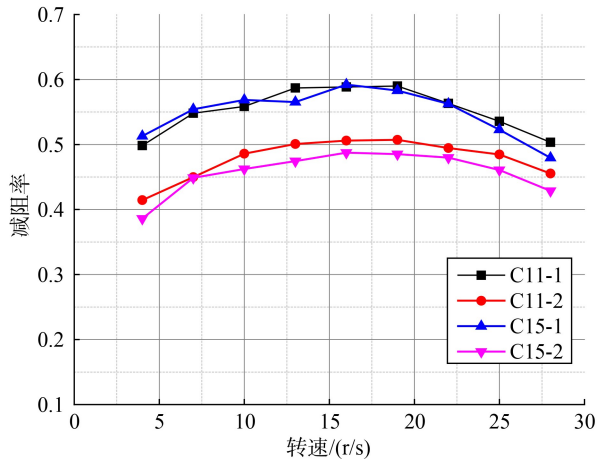


图 9 海水对 PEO、PAM 混合溶液减阻性能的影响
Figure 9 Effect of seawater on drag reduction performance of PEO and PAM mixed solution

3 结论

- Re 为 $3.2\times10^6\sim2.2\times10^7$ 范围内,以 PEO 为主的减阻聚合物材料选型试验研究表明:
- (1)减阻率总体上随浓度的增加而增加,就 PEO($M_n=1\times10^7$)而言,低雷诺数($Re<1\times10^7$)下,5 mg/L 的浓度已饱和,最大减阻率约为 60%;
 - (2)减阻率总体上随 M_n 的增加而增加, $Re<1.3\times10^7$ 时, M_n 大于 8×10^6 后,减阻率已基本不变;
 - (3)抗剪切性能随浓度、 M_n 的增加而增加,但浓度 >5 mg/L, $M_n>8\times10^6$ 后,增幅降低;
 - (4)增加浓度,或者混合 PAM,均可提升减阻率和抗剪切性能,前者效果更好;
 - (5)海水中与淡水中减阻率相当,但海水中抗剪切能力稍差。

参考文献:

[1] Toms B A. Some Observations on the Flow of Linear Polymer Solutions Through Straight Tubes at Large Reynolds Numbers// Proceedings of the 1st International Congress on Rheology, 1948.

[2] Virk P S, Mickley H S, Smith K A, Smith K A, Mollo E L. J Fluid Mechanics, 1967, 30(2):305~328.

[3] 张文龙, 伊卓, 杜凯, 祝纶宇, 刘希, 林蔚然. 石油化工, 2015, 44(1):121~126.

[4] 李永飞, 王彦玲, 曹勋臣, 王刚霄. 精细化工, 2018, 35(1):7~15.

[5] 输气管道添加减阻剂输送减阻效果测试方法. SY/T 7032-2016, 2016.

[6] Fu Z, Kawaguchi Y. Adv Mech Eng, 2013, (5):1~12.

[7] Xi L. Phys Fluids, 2019, 31,121302(2019).

[8] 代晓东, 李冰, 印树明, 王涛, 张梅梅, 杨光辉, 梁月, 刘焕荣. 科学技术与工程, 2017, 17(27):184~189.

[9] 焦利芳, 李凤臣. 力学进展, 2019, (3):339~357.

[10] 任刘珍, 张庆辉, 陈少强, 黄昭源, 胡海豹. 实验力学, 2019, (2):217~223.

[11] 刘晓瑞, 周福建, 石华强, 刘致屿, 丁里, 杨钊. 石油化工, 2017, (1):97~102.

[12] 张孝石, 王聪, 曹伟, 许昊. 哈尔滨工业大学学报, 2017, (4):143~147.

[13] 王锡良, 丁永宣, 夏长生, 王桂芹. 中国造船, 1979, (3):47~60.

[14] 自抛光防污漆降阻性能试验方法——圆盘转矩法. GB/T 7791-1987, 1987.

[15] 防污漆降阻性能试验方法. GB/T 7791-2014, 2014.

Experimental Study on Selection of Drag Reduction Polymer Materials at High Reynolds Number

SUN Hai-lang*, JI Jin-liang, ZHU Ai-jun, HAN Wen-ji, ZHANG Xuan

(National Key Laboratory of Science and Technology on Hydrodynamics, TAIHU Laboratory of Deepsea Technological Science, China Ship Scientific Research Center (CSSRC), Wuxi 214082, China)

Abstract: The type selection experiment of drag reduction polymer materials at high Reynolds number (up to 2.2×10^7) is carried out by using the method of measuring torque on the rotating disc and rotating cylinder in water tank. Taking poly(ethylene oxide) (PEO), polyacrylamide (PAM) and guar gum, which are widely used in drag reduction at present, as experimental objects, the effects of concentration, relative molecular mass, mixing with other polymers, shearing and seawater on drag reduction were studied. The main conclusions are as follows: (1) the drag reduction rate generally increases with the increase of concentration. As far as PEO($M_n = 1 \times 10^7$) is concerned, the concentration of 5 mg/L is saturated at low Reynolds number ($Re < 1 \times 10^7$), and the maximum drag reduction rate is about 60%. (2) The drag reduction rate generally increases with the increase of relative molecular mass. When $Re < 1.3 \times 10^7$, the drag reduction rate is basically unchanged when the relative molecular mass is greater than 8×10^6 . (3) The ability to resist shearing increases with the increases of concentration and relative molecular mass, but the increase decreases when the concentration > 5 mg/L and relative molecular mass $> 8 \times 10^6$. (4) Increasing the concentration or mixing PAM can improve the drag reduction rate and the ability to resist shearing, and the former has better effect. (5) The drag reduction rate in seawater is equivalent to that in fresh water, but the ability to resist shearing in seawater is slightly poor.

Key words: Drag reduction; High molecular polymer; Selection; High Reynolds number; Experiment