



CSTAM 2012-B03-0155

管道流中微藻多糖高聚物减阻特性的实验研究

郑晨晖, 赵文斌, 李明义, 禹燕飞, 魏家星, 李昌烽

江苏大学能源与动力工程学院

第七届全国流体力学学术会议

2012年11月12—14日 广西·桂林

管道流中微藻多糖高聚物减阻特性的实验研究¹⁾

郑晨晖, 赵文斌, 李明义²⁾, 禹燕飞, 魏家星, 李昌烽²⁾

(江苏大学能源与动力工程学院, 镇江 212013)

摘要 自从 Toms 发现高分子聚合物湍流减阻效应以来, 人们对其减阻已开展了大量的研究。近年来人们逐渐发现一些藻类多糖高聚物是很好的减阻剂, 但目前关于多糖高聚物在减阻实际应用方面的文献报道很少。藻类多糖高聚物还具有环境友好的特点。藻类多糖高聚物减阻值得进一步的研究。本文对小球藻多糖、螺旋藻多糖和黄原胶水溶液的减阻特性进行了试验研究, 绘制了减阻率 DR 与藻类多糖高聚物浓度 C 的关系曲线, 雷诺数 Re 对减阻率 DR 的影响曲线。试验结果分析表明: 藻类多糖高聚物是非常好的减阻剂; 藻类多糖高聚物具有特殊的 B 型减阻特性 (Virk & Wagger, 1989, "Aspects of mechanisms in Type-B drag reduction"), 属于 B 类减阻剂, 在不存在过度剪切引起降解的情况下, 其减阻率保持不变。本试验工作可作为藻类多糖高聚物减阻实际应用的预研。在此基础上, 分析藻类多糖高聚物的减阻现象和特性, 探索藻类多糖高聚物减阻应用的可行性, 并就进一步研究的方向和内容给出了建议。

关键词 藻类多糖高聚物, 减阻, B 类减阻剂, 试验

引言

在湍流流动中加入少量的添加剂就可以使其摩擦阻力大幅度减少, 这一现象被称为添加剂减阻。早在 19 世纪末, 美国海军部在水池使用标准船进行试验, 发现标准船在湍流流动中加入一定量的添加剂可减小 10% 的表面摩擦阻力。经水质分析表明, 其水质与纯水有显著差别, 推测是水中藻类产生的微量多糖高分子粘液所引起的。Gasljevic 等人^[1]在 Hoyt^[2]研究的基础上对藻类多糖减阻做了一个小结。过去的 10 年里, 多糖高聚物也逐渐被确认为是优良的减阻添加剂。

大量减阻流体实验研究结果表明, 流体的阻力曲线呈现三条曲线 (如图 1 所示), 分别为描述牛顿流体层流流动特性的曲线(L), 符合 Hagen-Poiseuille 定律; 描述牛顿流体湍流流动特性的曲线(T), 符合 Prandtl-Karman 定律; 描述减阻流体减阻效应的极限减阻渐近曲线(V), 即 Virk 最大减阻渐近线。许多实验表明 T 和 V 之间的区域为湍流减阻区。

本文将实验研究藻类多糖高聚物 (小球藻多糖、螺旋藻多糖和黄原胶水溶液) 在管道流中的减阻特性, 并将实验结果与上述的三条流体特征曲线进行比较, 以期得到多糖高聚物溶

液减阻性能变化的规律和范围, 分析藻类多糖高聚物的减阻现象和特性, 并探索这类高聚物减阻应用的可行性。

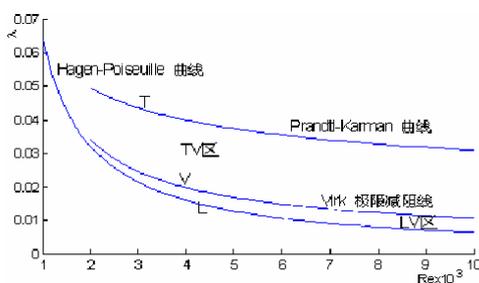


图 1 典型阻力区

Virk^[3]将高分子减阻剂分为 A 类(Type-A)和 B 类(Type-B)减阻剂, 它们不同的阻力系数曲线特性如图 2 所示。

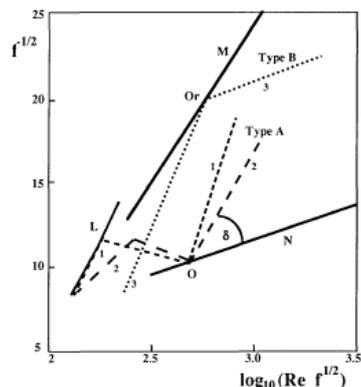


图 2 A 类减阻剂和 B 类减阻剂的阻力系数曲线^[4]

1) 基金资助项目: 国家自然科学基金项目 (10672069, 11072091); 教育部留学回国人员科研启动基金; 教育部科学技术研究重点项目 (210078)

2) Email: myli@ujs.edu.cn; cfli@ujs.edu.cn

1 试验装置及方法

试验装置原理图如图 3 所示, 试验装置由离心水泵、循环水箱、阀门、压差计、整流罐等组成。

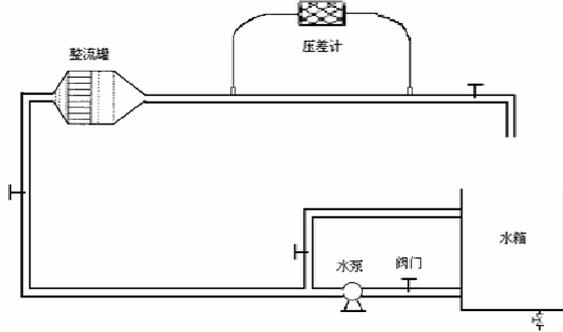


图 3 试验装置原理图

试验水平管段长度为 2.35 m, 分为 1 m 长的入口稳定段, 0.85 m 长的试验测量段、0.5 m 长的出口稳定段, 这样试验测量段的管道足够长, 同时入口有一整流装置, 保证进出试验测量段的流体具有较高的稳流性, 以保证测压点的流动稳定。

本试验对小球藻多糖、螺旋藻多糖高聚物的减阻特性进行研究, 并且以目前在减阻试验中研究最多的生物多糖(黄原胶)作为参考。对浓度变化范围为 5~300 ppm 的多糖高聚物进行减阻特性试验, 研究藻类多糖高聚物减阻特性与浓度和流动雷诺数(Re)的关系。

试验采用压差计测量试验测量段管道两端的压差, 其测量不确定度为 $\pm 0.5\%$ 。采用重量法测量流量。

2 试验结果及讨论

2.1 浓度效应

同一雷诺数 Re 下减阻率 DR 的表达式^[5]:

$$DR = 100 \times \left(1 - \frac{c_f}{c_{f,w}} \right) [\%] \quad (1)$$

式中: $c_{f,w}$ —清水的范宁阻力系数;

c_f —同一雷诺数下, 添加高聚物的水溶液的范宁阻力系数。

管路范宁阻力系数可由式(2)计算:

$$c_f = \frac{\pi^2 D^5 \Delta p}{32 \rho l Q^2} \quad (2)$$

$$\lambda = 4c_f \quad (3)$$

式中: l —实测管段长度, (m);

Δp —实测管段压差, (Pa);

ρ —流体的密度, (kg/m^3);

Q —体积流量, (m^3/s)。

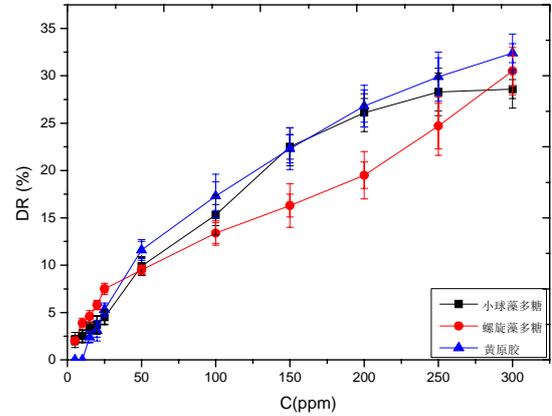


图 4 不同浓度下微藻多糖的减阻率

高聚物水溶液的减阻效果与高聚物的浓度有关。为评价微藻多糖的减阻效果, 在室温 15°C , 雷诺数 $\text{Re}=9000$ 时, 对浓度范围为 5 ppm 到 300 ppm 的多糖水溶液进行了试验研究。试验结果整理成 $C-DR\%$ 关系曲线, 如图 4 所示。

从图 4 可以看出微藻多糖水溶液的浓度效应很显著, 其减阻率随着浓度的增加而增加, 浓度越高, 减阻效果越好。在所测试浓度范围内, 小球藻多糖在浓度为 300 ppm 时达到最大减阻率 28.6%, 螺旋藻多糖在 300 ppm 的减阻率为 30.5%, 黄原胶在 300 ppm 达到最大减阻率为 32.4%。

从图 4 还可以看出小球藻多糖的减阻减阻率在浓度达到 200 ppm 后, 随着浓度的增加减阻减阻率增长的幅度降低, 250 ppm 和 300 ppm 浓度下的减阻率基本不变, 说明小球藻多糖在 250 - 300 ppm 浓度下已近达到其减阻极限值; 对于黄原胶在很低浓度下(低于 10 ppm)基本没有减阻效果, 随着浓度的增加其减阻减阻率增长幅度很大; 对于螺旋藻多糖其减阻减阻率随着浓度增长幅度低于黄原胶。对于后两种藻类多糖还需进一步实验, 增加浓度值, 找寻它们的减阻浓度效应规律和减阻极限值的大小。

2.2 减阻率 DR 与雷诺数 Re 的关系

由高聚物的减阻机理可知，高聚物的减阻率 DR 与雷诺数 Re 是密切相关的。我们对小球藻多糖和螺旋藻多糖以及黄原胶在不同雷诺数 Re 下进行的减阻特性实验结果整理成 $\lambda - DR$ 关

系曲线，如图 5 所示；试验结果曲线绘于 Prandtl - Karman 坐标上如图 6 所示；减阻率 $DR(\%)$ 与雷诺数 Re 的关系如图 7 所示。

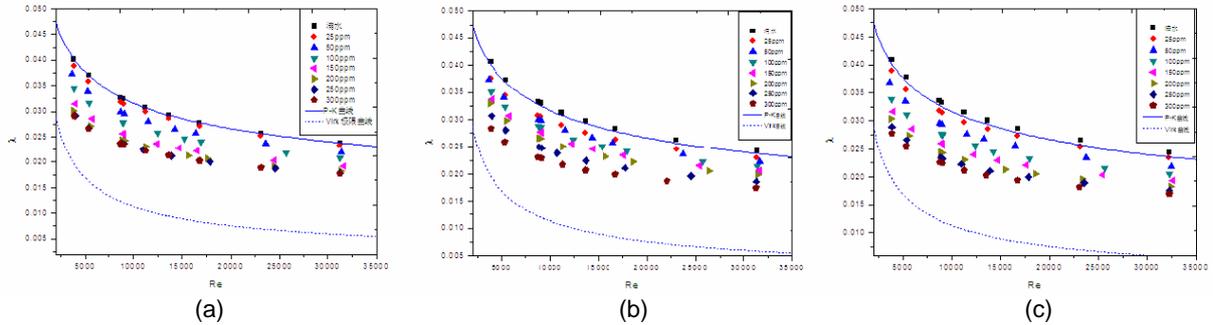


图 5 多糖水溶液在不同浓度下的 $\lambda - Re$ 曲线
(a) 小球藻多糖；(b) 螺旋藻多糖；(c) 黄原胶

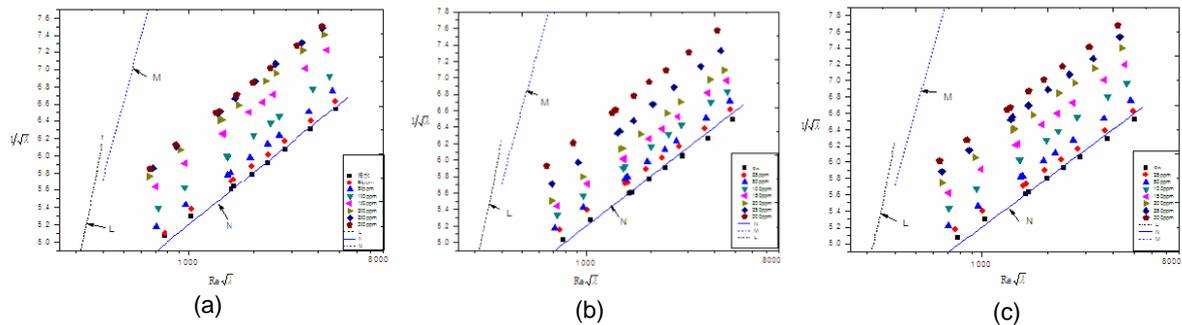


图 6 多糖水溶液的 Prandtl - Karman 对数坐标图
(a) 小球藻多糖；(b) 螺旋藻多糖；(c) 黄原胶

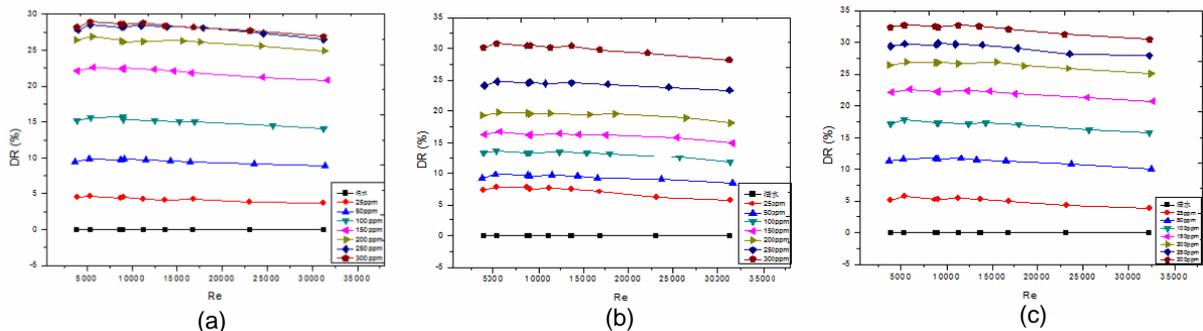


图 7 多糖水溶液在不同雷诺数 Re 下的减阻率曲线
(a) 小球藻多糖；(b) 螺旋藻多糖；(c) 黄原胶

从图 5 和图 6 可以看出随着雷诺数 Re 的增加，同一浓度的多糖溶液的阻力系数曲线大致与牛顿流体曲线平行，随着多糖浓度的增加，其阻力系数曲线距离牛顿曲线越远，即表现减阻率越大。从图 7 可以看出在同一浓度下，随着雷诺数的增加，多糖的减阻率基本保持不

变，与雷诺数无关。作为减阻剂，小球藻多糖和螺旋藻多糖以及黄原胶等生物高聚物的减阻特性与合成高分子聚合物有明显的不同。这些高聚物由于糖链上含有含有羧基和硫酸酯从而具有电解特性，通常是强阴离子。他们所带的强电荷使得多糖高分子聚合物受到电荷之间的

排斥力强于其他部分分子对它的亲和力，从而在溶液中往往维持着一种拉伸状态。拉伸状态的高分子溶液有一个独特的减阻特性，即 B 类减阻。

3 总结

本文对目前研究较少的微藻多糖高聚物溶液减阻开展试验研究，就其中有意义的试验结果进行讨论。总结如下：

小球藻多糖、螺旋藻多糖、黄原胶水溶液的减阻率随着多糖浓度的增加而增加；同浓度下螺旋藻多糖的减阻率略低于黄原胶，小球藻多糖的减阻率低于螺旋藻糖，微藻多糖高聚物是非常好的减阻剂；

微藻多糖由于具有强电解性，表现为 B 类减阻特性，属于 B 类减阻剂。在不存在由于过度剪切而引起的降解的情况下，其减阻率保持不变，即减阻率与壁面剪切应力、雷诺数无关，而不像合成高聚物只能在有限的雷诺数范

围内达到其减阻最大值，这种特性非常有利于其应用到实际工程；

还需进一步实验和分析来深入研究微藻多糖高聚物溶液的减阻减阻特性和实际应用的可行性（如微藻多糖高聚物分子量和结构的影响；添加微藻多糖高聚物溶液的流变性变化如何；更大范围的减阻浓度效应等）。

参考文献

- [1] Gasljevic K, Matthys EF. Ship Drag-reducing by Micro-algae Biopolymers: A Feasibility Analysis. *Journal of Ship Research*, 2007, 51(4): 326-337.
- [2] Hoyt JW. High molecular weight algal substances in the sea. *Marine biology*, 1970, 7: 93-99.
- [3] Virk PS, Wagger DL. Aspects of mechanism in type B drag reduction, in *Proceedings of the 2nd IUTAM Symposium on Structure of Turbulence and Drag Reduction*, Zurich, Switzerland, 1989.
- [4] Gry A, Bewersdorff H-W. *Drag reduction of turbulent flow by additives*. Kluwer Academic Publishers, 1995
- [5] Doulah MS. Mechanism of Drag Reduction in Turbulent Pipe Flow by the Addition of Fibers. *Ind. Eng. Chem. Fundam.* 1981, 20: 101-102.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON DRAG-REDUCTION OF MICRO-ALGAE POLYSACCHARIDES IN PIPE FLOWS

ZHENG Chenhui, ZHAO Wenbin, LI Mingyi, YU Yanfei, WEI Jiaying, LI Changfeng

(School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract Since Toms found the turbulence drag reduction induced by the polymer, a lot of researches have been done on the topic. In recent years, some algae polysaccharide polymers were slowly being recognized as good drag reducer as well. Micro-algae polysaccharides have biological degradation and environment friendly characteristics. But there were some limited efforts to use those polysaccharides as drag reducing polymer. In brief, the micro-algae polysaccharides as drag reducer concept to be an attractive and interesting proposition well worth investigating further. In this paper, we investigated the drag reducing characteristics of high molecular weight polysaccharides produced from micro-algae (chlorella, spirulina) and xanthan gum. We obtained the following conclusions: Polysaccharides produced by micro-algae are very good drag-reducing agents. They show type-B drag-reducing characteristics. In this case, the drag reduction is constant, independent of wall shear stress or Reynolds number, as long as degradation is not present due to excessive shear stress. This work can be used as pre-study of polysaccharide drag reduction in practical application. We can investigate the feasibility of using polysaccharides produced by marine microalgae to reduce the drag based on analyzing the drag reduction phenomenon and characteristics.

Key words micro-algae polysaccharides, turbulence drag reduction, type-B drag reducers, experiment