

黄原胶溶液减阻特性实验

张根广^{1,2}, 张鸣远¹, 杨万英¹, 朱宪然¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100, 杨凌)

摘要: 采用较粗水平圆管对两种温度多种浓度黄原胶溶液进行了较系统的实验研究, 并应用 Metzner-Reed 广义雷诺数定义, 对管道中不同流动状态的广义雷诺数进行了计算, 得到了 Fanning 系数和广义雷诺数关系图, 发现黄原胶溶液从层流到紊流转捩点的广义雷诺数随着溶液浓度的升高而增大, 给出了转捩点广义雷诺数与溶液浓度变化的关系表达式. 此外还发现: 在层流区, 黄原胶溶液的 Fanning 阻力系数与广义雷诺数之间具有良好的线性关系, 与牛顿流体阻力系数图吻合, 这与前人的理论分析及实验研究结果一致; 在紊流区, 黄原胶溶液具有明显的减阻效应, 减阻效应随着溶液浓度的升高而增大.

关键词: 黄原胶水溶液; 非牛顿流体; 减阻效应

中图分类号: TK123 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)09-1092-04

Drag Reduction in Turbulent Pipe Flows of Aqueous Xanthan Gum Solutions

Zhang Genguang^{1,2}, Zhang Mingyuan¹, Yang Wanying¹, Zhu Xianran¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China)

Abstract: An experimental investigation on friction pressure drop of aqueous Xanthan gum solutions in a horizontal pipe with an inside diameter of 25 mm was conducted. Measurements were performed and the generalized Reynolds numbers of laminar-turbulent transition were calculated according to the definition by Metzner-Reed at 15 °C and 20 °C for the solution concentrations of 0.04%, 0.06%, 0.1%, and 0.2%, respectively. It is found that the critical generalized Reynolds number of laminar-turbulent transition increases with the solution concentration, and a correlation between the critical Reynolds number and the solution concentration can be derived. In the laminar flow region the Fanning friction factor is linearly dependent on the generalized Reynolds number, and the friction factor chart resembles that of Newtonian fluid. In the turbulent flow region, however, distinct drag reduction can be observed, and it increases with the increase of solution concentration.

Keywords: aqueous Xanthan gum solution; non-Newtonian fluid; drag reduction

黄原胶(Xanthan gum)是以碳水化合物为主要原料经发酵生成的一种水溶的微生物酸性多糖(1963年由 Jeans 等^[1]提出), 相对分子质量为 $2 \times 10^6 \sim 1.2 \times 10^7$. 文献[2-5]的研究发现, 黄原胶是一种由 D-葡萄糖、D-甘露糖、D-葡萄糖醛酸、乙酸和丙酮酸组成的“五糖重复单元”结构聚合体, 分子的一

级结构由 β 键连接的 D-葡萄糖基主链与三糖单位的侧链组成, 主链和侧链间通过氢键形成双螺旋和多重螺旋结构, 在水溶液中可以形成类似棒状的刚性结构, 并进一步聚合成螺旋网状聚合体或双螺旋缔合体. 在高温、离子强度很低时或高剪切速率下, 分子结构由棒状变成无规则线团状, 且这种不同构

象的变化是可逆的。

黄原胶溶液无色、无毒副作用,具有较强的抗降解性和极高的黏度,是典型的剪切稀化流体,其表观黏度随着液体温度的升高而下降,随着液体浓度的升高而升高。黄原胶这些独特的流变性能使其作为添加剂或助悬剂广泛应用于食品、医药、采油、纺织、陶瓷、印染、香料、化妆品及消防等领域^[5]。此外,黄原胶溶液的透明性、无毒性、抗降解性及与血液流体比较相似的剪切稀化特性,使其与其他高分子溶液相比,能更好地作为血液替流体^[6-8]进行一些用量大、实验周期长的实验研究。

在早期对黄原胶溶液流变特性的实验研究中,Kenis^[9]和 Bewersdorff 等^[10]分别利用毛细管式流变仪发现了黄原胶溶液的减阻特性。前者主要阐述了黄原胶溶液的减阻现象、溶液浓度与降解的关系,以及减阻在管道中的应用等问题;后者则从不同的管径(3.146 mm、5.186 mm 和 6.067 mm)、商用和食用黄原胶、添加 NaCl 和不添加 NaCl 等方面进行了实验,其中用 3.146 mm 管径进行了两种浓度黄原胶溶液(不添加 NaCl)的实验。上述实验的共同特点是:均采用毛细管式流变仪进行减阻实验,实验管径小,黄原胶溶液浓度范围窄,数据处理时均用牛顿流体雷诺数计算方法来计算非牛顿流体雷诺数。此外,Sohn 等^[11]用转盘装置也进行了黄原胶溶液减阻特性的实验研究,得到了与上述实验一致的结论。Escudier 等^[12-13]采用 100 mm 的圆管和方形流槽主要对羧甲基纤维素钠(CMC,0.25%,0.3%和0.4%)、黄原胶(XG,0.2%)、CMC/XG(0.09%/0.09%)和聚丙烯酰胺(PAA,0.125%和0.2%)几种溶液(溶液含量均为质量分数)的减阻特性进行了比较,雷诺数的计算方法同上。此外,Pereira 等^[14]在圆管中研究聚合体减阻特性时,也采用了两种浓度的黄原胶溶液进行对比实验。总之,前人对黄原胶溶液减阻特性的认识实验主要是建立在毛细管流变仪实验的基础上的。后来的一些研究者虽然也采用了一些较粗的管径,但一般仅采用一种浓度的黄原胶溶液,且实验主要侧重于对黄原胶溶液和其他高分子聚合物减阻特性之间的比较,缺乏对黄原胶溶液减阻特性较系统的实验和认识。鉴于上述情况,作者在黄原胶溶液流变特性实验^[8]的基础上,采用较粗的水平圆管对水和不同浓度的黄原胶溶液进行减阻特性实验,得到了 Fanning 阻力系数和广义雷诺数的关系图,发现:黄原胶溶液从层流到紊流转捩点的广义雷诺数随着溶液浓度的升高而

增大,并与溶液浓度之间存在着良好的相关性;在层流区,黄原胶溶液的 Fanning 阻力系数关系图与牛顿流体的关系图完全吻合;在紊流区,黄原胶溶液具有明显的减阻效应,减阻效应随着溶液浓度的升高而增大。

1 黄原胶溶液减阻特性实验

实验在直径为 25 mm 的水平有机玻璃圆管中进行,观测压力段长度为 1 m,观测段前后各有 1.5 m 的稳定段,距观测段 1.5 m 后接数显式电磁流量计,圆管中的压差采用电容式 1151DP 型差压计测量。

实验所采用的黄原胶原材料系山东淄博中轩生物制品公司生产的食品级黄原胶粉末,黄原胶溶液由黄原胶粉末加入一定量的自来水通过搅拌调配并稀释而成,然后静置 48 h 以上,质量分数分别为 0.04%、0.06%、0.1% 和 0.2%。在实验观测过程中,流体温度分别控制在 15 ℃ 和 22 ℃,温差变化在 ±0.3 ℃ 之间。

2 实验结果与分析

2.1 非牛顿流体运动特性参数

Metzner-Reed 1955 年从研究非时变性黏性流体圆管层流基本运动出发,得出适用于所有非时变黏性流体的广义雷诺数^[15]

$$Re' = \frac{\rho D^{n'} U^{(2-n')}}{k' 8^{(n'-1)}}$$

式中: U 为管道中流体的流速, m/s; D 为管道直径, m; μ 为水流动力黏滞系数, Pa·s; ρ 为液体密度, kg/m³; n' 为非牛顿流体流变指数; k' 为非牛顿流体流变系数。

对于牛顿流体, $n'=1$, $k'=\mu$, 代入上式后, 即可得到牛顿流体雷诺数 $Re=\rho UD/\mu$ 。

如已知幂律流体的本构方程(可通过实验测量求得)

$$\tau = k \dot{\gamma}^n$$

则广义雷诺数中 n' 和 k' 可计算为

$$n' = n$$

$$k' = k \left(\frac{1+3n}{4n} \right)^n$$

式中: τ 为剪切应力, Pa; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s⁻¹; k 为稠度系数, Pa·s⁻¹; n 为流动指数。

有关黄原胶溶液的流变特性实验, 作者已在文

献[8]中详细阐述,图1和图2分别给出了15℃和22℃下不同质量分数(0.04%、0.06%、0.1%和0.2%)黄原胶溶液的流变特性曲线.由图可见,两个

温度下不同质量分数的溶液均具有很好的幂律关系(相关系数 R^2 均在0.99以上),其相应的 k 、 n 、 n' 和 k' 的统计计算结果见表1.

表1 黄原胶溶液的流变特征值及转捩点的广义雷诺数值

$w(\text{XG})/\%$	15℃				22℃		
	n, n'	k	k'	Re'	n, n'	k	k'
0.00	1			2 100			
0.04	0.796 5	0.009 6	0.010 1	2 597	0.810 2	0.007 6	0.008 0
0.06	0.621 6	0.046 4	0.050 7	2 650	0.648 6	0.037 1	0.040 3
0.10	0.510 4	0.131 9	0.147 2	2 990	0.550 1	0.103 2	0.114 3
0.20	0.439 6	0.325 0	0.367 0	3 820	0.523 0	0.168 5	0.187 6

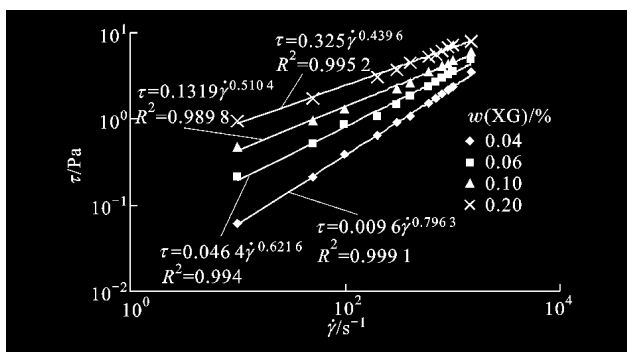


图1 15℃时黄原胶溶液的流变特性曲线

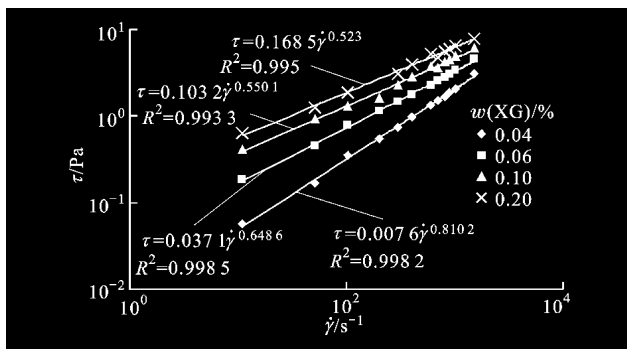


图2 22℃时黄原胶溶液的流变特性曲线

Fanning 阻力系数^[15]为

$$f = \frac{\tau_w}{(1/2)\rho U^2}$$

式中: τ_w 为壁面切应力,Pa; f 和阻力系数 λ 的关系为 $\lambda=4f$.

2.2 黄原胶溶液减阻特性分析

图3为22℃时水和黄原胶溶液单位管长压降 Δp 和管内平均流速 U 的关系.由图可见:在相同流速下,黄原胶溶液的压降明显小于水流压降,这说明黄原胶溶液具有明显的减阻效应;随着管内流速的增大及溶液浓度的升高,溶液和水的压降差值也变大,说明黄原胶溶液减阻效应更明显.

图4为22℃时水和黄原胶溶液的广义雷诺数

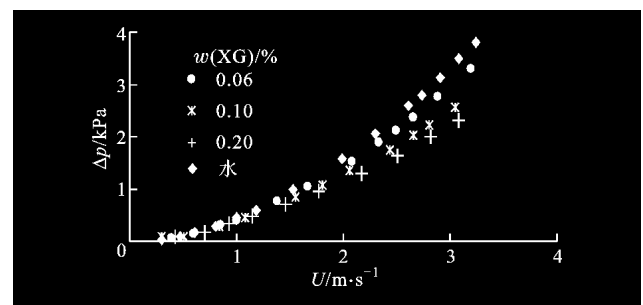


图3 22℃时单位管长水及黄原胶溶液的压降比较

与Fanning 阻力系数的关系.由图可见,溶液点群明显位于水流点群之下,且浓度越高,点群越靠下,说明黄原胶溶液的紊流减阻效应随着溶液浓度的升高而增大,与前述的结论一致.

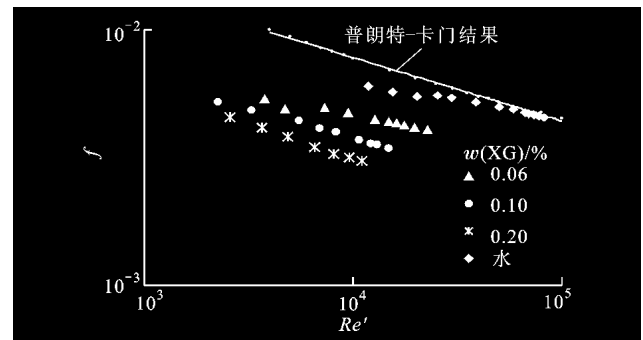


图4 22℃时水平圆管内水及黄原胶溶液的阻力系数图

图5为15℃时水和黄原胶溶液的广义雷诺数与Fanning 阻力系数的关系.由图可见,不同浓度的曲线均存在着一个明显的转折点,这个转折点就是管内流态从层流向紊流变化的转捩点(转捩点广义雷诺数值见表1),在转捩点左侧的点群属于层流区,在转捩点右侧的点群属于紊流区.在层流区,溶液的点群均落在 $f-Re'$ 关系曲线的两侧,即层流区溶液的阻力系数和水的阻力系数均满足 $f=16/Re'$ 的线性关系,这与前人的理论分析及实验结果是一致的;在紊流区,位于水流点群下方的依次为质量分数0.04%、0.06%、0.1%和0.2%溶液的的点群,与

22℃实验的结论一致,区别在于在15℃时,质量分数0.2%溶液的减阻效应增幅较小,与0.1%溶液的减阻效应接近。

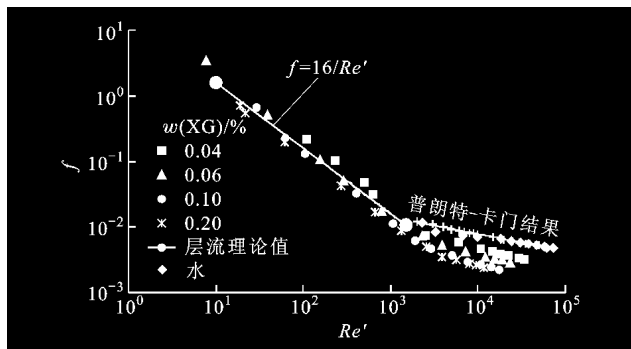


图5 15℃时水平圆管内水及黄原胶溶液的阻力图

图6给出了15℃时溶液质量分数与转捩点广义雷诺数的关系图。由图可见,转捩点广义雷诺数与溶液质量分数之间具有很好的线性关系(相关系数 $R^2=0.9911$),即

$$Re' = 0.8333 w(XG) + 2164.8$$

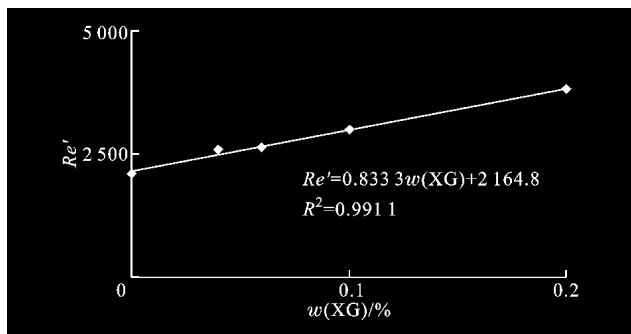


图6 15℃时溶液浓度和转捩点广义雷诺数的关系

3 结论

在两个温度下对水平圆管内多种浓度的黄原胶溶液进行了实验研究,得到了 Fanning 阻力系数和广义雷诺数的关系图,发现黄原胶溶液从层流到紊流转捩点的广义雷诺数随着溶液浓度的升高而增大;给出了转捩点广义雷诺数与溶液浓度变化的关系表达式。在层流区,黄原胶溶液 Fanning 阻力系数和广义雷诺数的关系图与牛顿流体阻力系数图相吻合;在紊流区,黄原胶溶液具有明显的减阻效应,减阻效应随着溶液浓度的升高而增大。

参考文献:

- [1] Jeanes A, Pittsley J E. Viscosity profiles for aqueous dispersions of extracellular anionic microbial polysaccharides[J]. Journal of Applied Polymer Science Volume, 1973, 17(5): 1621-1624.
- [2] Holzwarth G. Conformation of the extracellular poly-

- saccharide of *Xanthomonas campestris*[J]. Biochemistry, 1976, 15(19): 4333-4339.
- [3] Milas M, Rinaudo M. Conformational investigation on the bacterial polysaccharide xanthan[J]. Carbohydr Research, 1979, 76(1):189-194.
- [4] Morris E R, Rees D A, Young G, et al. Order-disorder transition for a bacterial polysaccharide in solution: a role for polysaccharide conformation in recognition between *Xanthomonas* pathogen and its plant host [J]. Journal of Molecular Biology, 1977, 110: 1-16.
- [5] Garcia-Ochoa F, Santos V E, Casas E, et al. Xanthan gum: production, recovery, and properties[J]. Biotechnology Advances, 2000, 18(77):549-579.
- [6] Brookshier K A, Tarbell J M. Evaluation of a transparent blood analog fluid: aqueous Xanthan gum/glycerin[J]. Biorheology, 1993, 30(22): 107-116.
- [7] Mann D E, Tarbell J M. Flow of non-Newtonian blood analog fluids in rigid curved and straight artery models [J]. Biorheology, 1990, 27(7): 711-733.
- [8] Zhang Genguang, Zhang Mingyuan, Yang Wanying, et al. An experimental investigation on rheological properties of aqueous xanthan gum as a blood analog fluid[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering (English Edition), 2006, 15(3): 121-126.
- [9] Kenis P R. Turbulent flow friction reduction effectiveness and hydrodynamic degradation of polysaccharides and synthetic polymers[J]. Journal of Applied Polymer Science Volume, 1971, 15(3): 607-618.
- [10] Bewersdorff H W, Singh R P. Rheological and drag reduction characteristics of xanthan gum solutions[J]. Rheologica Acta, 1988,27(6): 617-627.
- [11] Sohn J I, Kim C A, Choi H J, et al. Drag-reduction effectiveness of xanthan gum in a rotating disk apparatus[J]. Carbohydrate Polymers, 2001, 45(1):61-68.
- [12] Escudier M P, Presti F, Smith S. Drag reduction in the turbulent pipe flow of polymers [J]. J. Non-Newtonian Fluid Mech, 1999, 81(3):197-213.
- [13] Escudier, M P, Smith S. Fully developed turbulent flow of non-Newtonian liquids through a square duct [J]. Royal Society of London Proceedings Series: A, 2001, 457(2008):911-923.
- [14] Pereira A S, Pinho F T. Turbulent characteristics of shear-thinning fluids in recirculating flows[J]. Experiments in Fluids, 2000, 28(3): 266-278.
- [15] Chhabra R P, Richardson J F. Non-Newtonian flow in the process industries [M]. Oxford: Butterworth-Heinemann,1999.

(编辑 荆树蓉)