

表面活性剂水溶液的减阻机理分析

蔡书鹏

(湖南工业大学 水射流研究所, 湖南 株洲 412008)

摘要: 为探讨表面活性剂水溶液的减阻机理, 介绍了表面活性剂减阻特点, 评述各减阻机理假说, 提出确保入口段长度, 对基于PIV及LDV流场测试技术揭示表面活性剂减阻水溶液流的紊流结构和水动力学机理的重要性, 指出准确测定剪切诱导状态的形成时间和松弛时间对确定形成充分发展紊流所需入口段距离的必要性。

关键词: 表面活性剂; 减阻机理; 紊流; 松弛时间

中图分类号: TV 131

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2010)04-0043-03

Analysis on Drag Reduction Mechanism of Aqueous Solution with Surfactant Additives

Cai Shupeng

(Institute of High Pressure Water Jet, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China)

Abstract: To explore the drag-reducing mechanism of turbulent water flow with surfactant additives, the drag-reducing features of surfactants are introduced and hypotheses for the drag reduction mechanism are reviewed. It is indicated that based on LDV and PIV, the appropriate entrance length is important for revealing the turbulent structure and hydrodynamic mechanism of surfactant drag-reducing water flow, and exact measurement of forming time and relaxation time of shear-induced state is necessary for determining the entrance length for creating the full-developed turbulent flow.

Keywords: surfactant; drag-reducing mechanism; turbulent flow; relaxation time

最大可降低 80% 紊流阻力的表面活性剂减阻, 主要通过其分子聚合形成的杆状胶束与湍流涡的相互作用进而改变紊流结构实现。由于表面活性剂聚合成的杆状胶束具有快速自修复特性, 当流动进入低于使减阻能力丧失的强剪切应力状态后, 表面活性剂会迅速恢复减阻能力。表面活性剂减阻尤其适用于流路中局部存在强剪元件的输水系统, 如各种水循环系统、沿途可能承受强剪切应力的越站明渠输水等。表面活性剂减阻是欧洲和日本等国家在减阻方面的研究热点, 受政府财政支持, 已在中央空调和区域供冷/热水系统成功引进此项技术。若将这项技术引入我国的明渠

输水灌溉及北方冬季区域热水供暖系统, 既符合环保国策, 还会产生可观的经济效益。

1 表面活性剂减阻的特点

表面活性剂水溶液达到 CMC (critical micelle concentration) 浓度后, 单个胶束会聚合成球状胶束; 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^[1], 对紊流的形成和发展形成抑制, 从而实现减阻。

在流变特性上, 当剪切速率达到某一临界值时,

收稿日期: 2010-03-06

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(09JJ6068)

通信作者: 蔡书鹏(1963-), 男, 河北迁安人, 湖南工业大学副教授, 工学博士, 主要从事水流动减阻方面的研究,

E-mail: nagoya_cai@sohu.com

表面活性剂水溶液的剪切粘度会突然出现“SIS”(shear induced states),开始呈现粘弹性^[2]。大多数阳离子表面活性剂减阻水溶液都会呈现这种粘弹性,因此很多学者认为,粘弹性特性是表面活性剂水溶液减阻的必要条件,但如后文指出,并非如此。

在阻力特性上,在最低减阻浓度以上,当达到某一雷诺数后,阻力系数突然下降,开始显现减阻,之后减阻率随着雷诺数加大而加大,达到临界雷诺数时减阻率达最大,其后减阻率下降直至消失。在有效减阻范围内且雷诺数不变的工况下,减阻率随浓度的提高而提高,但达到最大有效浓度后,再增加浓度反而使减阻率减少^[1]。表面活性剂水溶液的另一阻力特性是随着温度的敏感性变化,在有效减阻温度范围内且浓度和雷诺数不变时,减阻率随温度的提高而降低,其原因是杆状胶束的长度及强度会随着温度的提高而减小,导致对紊流涡的抑制能力减弱,从而减阻效果减小^[2]。表面活性剂减阻还存在管径效应,即其它条件不变时,小管径比大管径表面活性剂的减阻效果好,更容易实现减阻,这可从表面活性剂水溶液的流变特性及溶液的胶束结构剪切效应得到解释。由于其化学结构各异,表面活性剂水溶液目前还没有学界公认的象高分子聚合物那样的最大减阻渐近线,Zakin^[3]虽总结多位学者的减阻实验数据,并提出了表面活性剂水溶液的最大减阻渐近线,但该结论缺乏普适性。

2 表面活性剂水溶液减阻机理假说

1) 剪切稀化假说^[4]。该机理假说认为,表面活性剂添加后,在流变特性上,其剪切粘度会随着剪切速率的提高而减小,因而导致阻力下降,但事实上很多剪切稠化的表面活性剂也具有好的减阻功效。

2) 弹性缓冲层减阻假说。该机理假说认为,在外流和内流的边界层紧邻粘性底层的缓冲层内,速度梯度较大,表面活性剂的胶束能在缓冲层内形成高次结构并与紊流涡体相互作用,导致缓冲层增厚,使得紊流核的速度增加,从而导致阻力减小。此假说未能给出详细的力学模型,仅说明速度分层结构的改变。

3) 紊流强度抑制假说。该机理假说认为,表面活性剂添加后抑制了绝对紊流强度,尤其是横向脉动强度。这一观点得到了众多实验研究的佐证。

4) 解耦假说。该机理假说认为,杆状胶束的高次结构与紊流场的互动,使得交叉脉动之间的关联被解,因而雷诺剪切应力减弱,从而导致紊流减阻。但这种假说不能解释交叉脉动之间的关联完全被解,以至于雷诺剪切应力为0,但减阻率并非最大的现象。

5) 粘弹性假说^[5]。该机理假说认为,表面活性剂水溶液受剪后呈粘弹流变特性,使高剪切区域的胶束

微观结构能够吸收小尺度涡的耗散能量,高剪切状态被解除后能释放给含能的大尺度涡,从而实现减阻。该假说缺乏足够的粘弹性流体的动态流变学实验数据佐证。

此外还有其它减阻假说,但都是从某一方面解释减阻现象的。在以上减阻假说中,3)和4)符合大部分实验观察结果,且与表面活性剂减阻流的拟序结构的改变也有整合关系。表面活性剂的种类及流道形式的不同,对减阻率、相应工况下的紊流特性及结构会产生较大影响,这也是迄今为止没有一公认的减阻假说能够解释每种减阻现象及流动机理的主要原因。

3 表面活性剂水溶液减阻的紊流结构

探索表面活性剂减阻机理的重要手段之一就是揭示减阻工况下的紊流结构。

Kawaguchi^[6]和 Wahoic^[7]在二维矩形管流道内,分别对不同表面活性剂减阻流紊流统计量的LDV测试表明,横向速度脉动强度大幅降低;主流方向速度脉动强度峰值远离壁面;雷诺剪切应力在整个测试横断面基本为0。他们都认为,胶束与紊流场之间的相互作用产生了附加的弹性应力,该应力补充了雷诺剪切应力的缺失。但新的问题是,附加弹性应力的作用机理如何及紊流又是怎样得以维持的?

Kawaguchi^[8]用PIV对CTAC/NaSal的混合水溶液进行了瞬时紊流场测试。速度矢量图表明,壁面低速流体的上喷流和高速流体的下扫流明显被抑制;雷诺剪切应力在流道高度方向很小,这源于主流方向与横向脉动速度的耦合被解。但从雷诺剪切应力测试结果看,对横向脉动强度的测试精度较低,原文没有给出PIV测试的不确定度,也未给出足够的实验数据以说明测试位置是否是充分发展的紊流。

Li^[9]在二维矩形管流道入口约175倍流道高度位置,用PIV对CTAC/NaSal的混合水溶液在完全减阻区、减阻衰减区和减阻消失区共5个雷诺数工况进行了瞬时紊流场测试。结果表明,尽管减阻率基本相同,完全减阻区的主流时均速度的上移幅度大于减阻衰减区,前者的主流方向速度脉动强度在整个横断面上都小于纯水,而后者却在近壁区增加;前者的雷诺剪切应力消弱程度也远大于后者;减阻能力刚刚消失的主流方向时均速度分布、主流方向及横向速度脉动强度都与纯水不同。该研究具有开拓性,但他的PIV流场拍摄帧率仅8帧/s,需进一步从剪切应力的松弛特性确证紊流场拍摄帧率较低是否对实验结果产生影响。

Gurka^[10]在明槽中使用PIV表面活性剂进行的紊流场测试表明,主流方向和展向平面内的雷诺剪切应力,以及紊流能量生成项的时均值大小和标准方差均

较纯水大幅度降低。但水槽宽深比为3,展向的二次流会影响紊流的发展,且测试位置为28倍水深,入口段长度太短,流场的总拍摄帧数也只有50对帧,得出的结论缺乏足够的说服力。

Hetsroni^[11]使用红外线感温摄像技术,分别在矩形和圆管流道考察了表面活性剂减阻流近壁区的低速条带结构,发现被壁面粘性长度尺度无量纲化的低速条带展向间距远大于纯水,且随减阻率增大而加大。

笔者^[12]使用LDV对CTAB/NaSald在紊流边界层中流动结构进行的研究发现,主流方向速度脉动强度远离壁面,这与Chara^[13]结果一致,还发现边界层中部出现了第二峰值。作者认为这与边界层外部势流间歇性侵入内部致使表面活性剂的胶束网络结构遭到破坏有关,这一紊流结构是表面活性剂减阻管流中未曾发现的。

由于表面活性剂对初期紊流的形成和产生皆有抑制作用,因此对于管内流要形成充分发展的紊流需要更长的入口段距离,但迄今为止的大部分研究对所测试的流场位置是否是充分发展的紊流,没有给出足够的实验数据。

4 结论

直至今日,表面活性剂水溶液减阻机理仍是研究热点。笔者认为,在研究方向上应侧重其流场紊流结构的研究。而测试紊流结构,首先应确保流场测试位置是充分发展的紊流。因如果紊流未充分发展,高阶有序脉动呈现非恒定层流特性,表现为雷诺应力很小、横向脉动强度很弱等疑似紊流特点。但由于表面活性剂的水溶液的流变特性完全与牛顿流体不同,紊流发展的入口段距离与表面活性剂的种类、流道的几何形状及雷诺数有关。预估紊流入口段距离需详细研究表面活性剂减阻水溶液的流变特性,尤其对具有粘弹特性的水溶液需掌握“SIS”的建立时间,同时还应准确测试应力的松弛时间,否则PIV及LDV的测试结果即使使用同一种表面活性剂、同一浓度及相同流动工况,也会因测试位置及拍摄帧率而异。铃木^[14]在一个矩形流道对阳离子表面活性剂减阻水溶液沿流向的发展特性测试研究中指出:距入口距离 $180D$ (D 为水动力学直径)位置,压力梯度仍在强势下降,断面的紊流强度最大值在该位置也远未稳定,而牛顿流体形成成熟的紊流只需 $50D$ 的入口段距离。

由于阳离子表面活性剂虽然具有良好的减阻功效,但由于其具有很强的毒性,直接排放或运行过程中发生泄漏会造成环境污染,因此,开发无毒性的非离子表面活性剂具有重要的环保意义。

参考文献:

- [1] Ohlendorf D, Interthal W, Hoffmann H. Surfactant Systems for Drag Reduction: Physico-Chemical Properties and Rheological Behavior[J]. *Rheol. Acta*, 1986, 25(5): 468-486.
- [2] Bewerdorff H W, Ohlendorf D. The Behaviors of Drag Reducing Cationic Surfactant Solutions[J]. *Colloid & Polymer Science*, 1988, 266(10): 941-953.
- [3] Zakin J, Myska Z. New Limiting Drag Reduction and Velocity Profile Asymptotes for Surfactant Additives Systems [J]. *AIChE J.*, 1996, 42(3): 3544-3546.
- [4] Shinji Tamano. Drag-Reducing Effect of Nonionic Surfactant Solutions[J]. *JSME: Series B*, 2009, 75(756): 38-47.
- [5] Zakin Y. Unusual Effects of Counterion Surfactant Concentration Ration on Viscoelasticity of a Cationic Surfactant Drag Reducer[J]. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 2000, 93(3): 363-373.
- [6] Kawaguchi Y. A Turbulent Transport Mechanism in a Drag-Reducing Flow with Surfactant Additive Investigated by LDV [J]. *Phys. Fluids*, 2004, 16: 3281-3296.
- [7] Warholic M D, Schmidt G M, Hanratty J. The Influence of a Drag Reducing Surfactant on Turbulent Velocity Field[J]. *Journal of Fluid Mech.*, 1999, 388: 1-20.
- [8] Kawaguchi Y. Structure of Thermal Boundary Layer and Heat Transfer Characteristics in Drag Reducing Flow with Surfactant Additive[J]. *JSME: Series B*, 2001, 67(756): 1311-1318.
- [9] Li F C, Kawaguchi Y, Yu B, et al. Experimental Study of Drag-Reduction Mechanics for a Dilute Surfactant Solution Flow[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51: 835-843.
- [10] Gurka R. Characterization of Turbulent Flow in a Flume with Surfactant[J]. *ASME J. Fluid Eng.*, 2004, 126: 1054-1057.
- [11] Hetsroni G, Zakin J L A. Low-Speed Streaks in Drag-Reduced Turbulent Flow[J]. *Phys. Fluids*, 1997, 9(3): 2397-2404.
- [12] 蔡书鹏. 边界层中CTAB表面活性剂减阻水溶液的湍流特性[J]. *力学学报*, 2008, 40(2): 250-254.
Cai Shupeng. Turbulent Characteristic of CTAB Surfactant Solution Flows in Turbulent Flow Boundary Layers[J]. *China Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2008, 40(2) : 250-254.
- [13] Chara Z. Turbulence Measurements of Drag Reducing Surfactant Systems[J]. *Exp. Fluids*, 2003, 16: 36-41.
- [14] Suzuki H, Nakayama T. Development Characteristics of Fluctuating Velocity of Drag Reducing Surfactant Solution Flow in a Duct[J]. *Rheol Acta*, 2005, 44(5): 457-464.

(责任编辑:廖友媛)