

HTAB 在固液两相流中的减阻特性研究

申正辉, 蔡书鹏, 戴 杰, 彭绍府

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 为了探究添加 HTAB 下不同稠密粗细固体颗粒固液两相流的流动特征, 采用直径为 10 mm 的不锈钢管作为实验管道, 对影响固液两相流阻力特性的主要因素进行了研究。结果表明, 影响固液两相流阻力特性的主要因素为固体质量浓度和固体颗粒粒径。通过改变固体质量浓度和颗粒粒径, 观察添加表面活性剂对固液两相流的减阻特性影响情况, 发现在相同表面活性剂质量分数以及颗粒粒径不变的情况下, 摩擦阻力系数随着固体质量分数的增大而增大; 在相同表面活性剂质量分数以及固体质量浓度不变的情况下, 摩擦阻力系数随着颗粒粒径的增大而增大。

关键词: 固液两相流; 固体质量浓度; 固体颗粒粒径; HTAB; 减阻特性

中图分类号: Q357.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2021)03-0068-06

引文格式: 申正辉, 蔡书鹏, 戴 杰, 等. HTAB 在固液两相流中的减阻特性研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2021, 35(3): 68-73.

Research on Drag Reduction Characteristics of HTAB in Solid-Liquid Flows

SHEN Zhenghui, CAI Shupeng, DAI Jie, PENG Shaofu

(College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: For an investigation of the flow characteristics of solid-liquid flows with HTAB, with stainless steel pipe with a diameter of 10 mm used as the experimental pipe, a research has thus been conducted on the main factors affecting the resistance characteristics of solid-liquid flows. The experimental results show that solid mass concentration and solid particle size are the main factors which affect the resistance characteristics of solid-liquid flows. By changing the solid mass concentration and particle size, the effects of surfactant on drag reduction characteristics of solid-liquid flows can be observed. It is found that the friction coefficient increases positively with that of the solid mass fraction under the same surfactant mass fraction and particle size. Meanwhile, the friction resistance coefficient increases positively with that of the particle size under the same surfactant mass fraction and solid mass concentration.

Keywords: solid-liquid flow; solid mass concentration; solid particle size; hexadecyl trimethyl ammonium bromide(HTAB); drag reduction characteristics

1 研究背景

自然界的水流中, 常常伴随着一些泥沙、颗粒等

其他杂质, 因而固液两相流成为自然界水流运动最普遍的现象^[1]。在能源、化工以及水利工程等领域中, 固液两相流造成的问题普遍存在, 如水利方面的水

收稿日期: 2020-09-30

作者简介: 申正辉(1994-), 男, 湖南怀化人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为流体减阻,

E-mail: 624545595@qq.com

通信作者: 蔡书鹏(1963-), 男, 河北迁安人, 湖南工业大学教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事水流动减阻方面的教学与研究, E-mail: windowscsp@sina.com

轮机磨损^[2]、水沙运动、河床变化、管道输送磨损、泵的输送效率及磨损等问题^[3]。在生产过程中,减少工业产能损耗、改善产能现有的能源利用率等问题,这也成为了研究管道流动减阻技术发展的主要动力。从第二次工业革命开始,经过前人的不懈努力,总结出了减少管道流动中的摩擦阻力是提升管道流动能量利用率的首要办法,常通过改变管路粗糙度物理性能和在输送的流体中加入微量的高分子材料或者表面活性减阻剂以减小管道与流体间的摩擦阻力^[4]。但是在实际工作中,高分子材料由于易受水泵等器械的剪切作用而导致其机械降解^[5],从而失去了减阻作用。因而需要了解高分子材料的减阻特性。如蔡书鹏等^[6]通过对表面活性剂十六烷基三甲基溴化铵(hexadecyl trimethyl ammonium bromide, HTAB)的减阻特性进行了研究,发现 HTAB 水溶液在浓度增大的情况下能够抑制雷诺应力的发生,因而其减阻效果良好。并且 HTAB 表面活性剂的抗降解能力比高分子聚合物的强,减阻效果更佳,更适合被运用在本次研究的开式流体输送系统中。

在流体中添加活性减阻剂以便减小摩擦的方法,现已在实际运用中受到了广泛的关注。在流体运动初始状态下,溶液中的胶束容易形成球状胶束,而球状胶束可以进行自由旋转运动。随着活性减阻剂浓度的增加,当达到其临界值 CMC II (使得溶液中胶束结构由球状向棒状变化的表面活性剂分子浓度被学者命名为 CMC II) 时^[7],溶液中的球状胶束开始向棒状胶束转变,从而使得添加了表面活性剂的溶液具有减阻效果。常与表面活性减阻剂一起添加的还有伴随离子,例如 NaCl 或 NaSal,伴随离子会使得水溶液中的棒状胶束系统达到静电平衡效果,并且会使得棒状胶束的结构聚集得更加有序、紧密,从而更有利于由球状胶束结构向棒状胶束结构的转变(降低了 CMC II 值)^[7]。大量的减阻实验数据表明,棒状胶束结构的产生是溶液减阻的必要因素^[8-10]。根据减阻率的变化状态可以将减阻区域划分为 3 个区域,即不完全减阻区、完全减阻区和过度减阻区。因此,添加表面活性剂的溶液只有处于某一流速范围内才具有减阻能力。

添加固体颗粒两相流的运动方式以及水头损失计算较为复杂,且因为在固液两相流中有诸多因素会影响其运动方式,如固体颗粒质量浓度、固体颗粒粒径、流速、固体颗粒级配、颗粒密度、管道直径、管道壁面粗糙度、流体黏度、颗粒形状等。本研究拟通过改变固液两相流中的固体颗粒质量浓度以及固体颗粒粒径探究其减阻特性。

2 减阻实验装置与方案

图 1 所示为本研究采用的压力损失测试实验装置示意图。

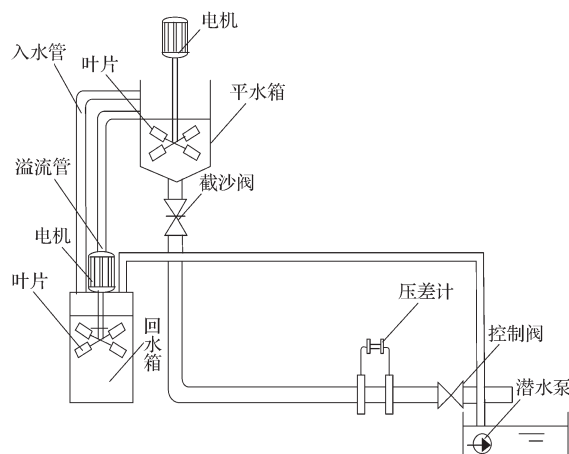


图 1 压力损失测试装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

图 1 所示压力损失测试装置采用的是完全对环境敞开的开式系统,水箱位于距离地面 3.95 m 处,在平水箱上放置电机搅拌装置,以防止沙粒在运行过程中由于蓄水沉淀造成的竖直管堵塞,因此采用截沙阀及搅拌装置,以确保实验的顺畅进行。同样,在回水箱中也安装了一个电机搅拌装置。为了保证平水箱中液面不变和保持实验提供的压力恒定,在平水箱中添加了一个溢流设计,入水口和溢流管口距离箱底分别为 25 cm 和 40 cm。采用的竖直管道为 $\phi=40$ mm 的三丙聚丙烯(polypropylene random, PPR)管,水平管道为 $\phi=10$ mm 的不锈钢管,使用 U 型压差计读取测量段的压力值。

本实验使用的表面活性剂为十六烷基三甲基溴化铵(HTAB),并且以 NaSal 为伴随盐,其作用是使得 HTAB 的胶束结构趋于稳定。首先,取一定量的 HTAB 与平衡离子 NaSal,将两者在烧杯中充分混合均匀后倒入 50 °C 的温水中,持续均匀搅拌 30 min,直到配置母液中的块状物完全溶解为止。此时的母液黏度较大,因而将其倒入装有半箱水的水箱中,并用清水洗涤盛母液的容器,且将洗涤后的溶液也倒入稀释溶液中。然后,继续添加水稀释母液混合溶液,直到既定目标计算体积为止。最后,用泵将溶液充分搅拌 6 h。将溶液密封静置 12 h 后,倒入平水箱中,为了确保表面活性剂减阻水溶液达到完全紊流状态。压力损失测试段设置在距离入口 $110d$ (d 为水平管道直径)处,测试段长度为 $110d$ 与 $210d$ 之间的距离。通过调节下游出水口的控制阀调节流量大小,并通过计时称重法测量平均流量。将整个测试系统温

度控制在 25 ℃, 通过改变沙粒固体颗粒的质量分数、颗粒粒径, 测试不同工况下的沿程阻力, 并将其分别与同等条件下的清水进行比较分析。

3 实验结果及分析

3.1 测试段有关参数的定义及计算

通过读取装置中的压差计读数, 可以获得测试段的压差 ΔP , 即测试段的阻力。雷诺数 Re 、沿程阻力系数 λ , 以及流速 u 分别由以下公式定义或计算得出:

$$Re = uD/\nu, \quad (1)$$

$$\lambda_1 = 2\Delta PDg/L\alpha_x u_1^2, \quad (2)$$

$$\lambda_2 = 2\Delta PDg/Lu_2^2, \quad (3)$$

$$u_1 = m/\alpha_x St, \quad (4)$$

$$u_2 = m/St_0. \quad (5)$$

式 (1) ~ (5) 中: u 为系统中平均流速, m/s;

ν 为清水的运动黏度, m^2/s ;

D 为系统测试段的管径, m;

ΔP 为测试段的两点压差, kPa;

g 为重力加速度, m/s^2 ;

L 为系统测试段长度, m;

λ 为系统测试段的沿程阻力系数;

m 为去皮称量后测得的两相流质量, kg;

S 为管道截面积, m^2 ;

α_x 为级配计算系数, α_{1-4} 分别为固体颗粒质量浓度为 4%, 8%, 12%, 16% 的级配计算系数, 取值依次为 1 025.4, 1 052.1, 1 080.3, 1 123.6;

u_1 为添加 HTAB 工况下, 固液两相流的平均流速, m/s;

u_2 为不添加 HTAB 工况下, 固液两相流的平均流速, m/s;

λ_1 为添加 HTAB 工况下的摩擦阻力系数;

λ_2 为不添加 HTAB 工况下的摩擦阻力系数。

Re 的计算, 是通过称重法根据流量除以时间的方法测得当前工况的流速, 再根据实验管径和当前温度的液体黏度计算得出。

λ_1 和 λ_2 的计算, 是先通过在实验装置测试段上的压差计读取 ΔP 值, 由称重法测得流速, 添加 HTAB 工况下计算出其工况的级配系数, 以及已知测试段长度和管径, 再根据公式求得 λ 值。

u_1 和 u_2 的计算, 首先是通过称重法测得两相流的净质量和测量时间, 然后根据管径计算出口截面积, 并在添加 HTAB 工况下计算出其工况的级配系数, 最后根据公式即可求得 u 值。

3.2 HTAB 浓度对减阻率的影响

在溶液中分别添加质量分数为 2%, 3%, 4% 的

HTAB, 探究 HTAB 浓度对溶液减阻率的影响, 图中的雷诺数由流速计算而来, 不同质量分数 HTAB 溶液的摩擦阻力系数与雷诺数的关系如图 2 所示。

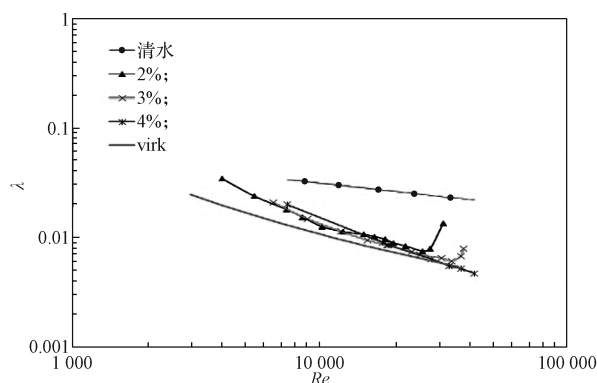


图 2 添加不同质量分数 HTAB 溶液的摩擦阻力系数与雷诺数关系曲线

Fig. 2 Relationship between the friction coefficient and Reynolds numbers of HTAB solution with different mass fraction

由图 2 可以发现, 溶液减阻率不仅与雷诺数有关, 也与添加的 HTAB 溶液的质量分数有关, 在小雷诺数 4 000~28 000 工况下, HTAB 溶液的沿程阻力系数与溶剂数据相近。但是之后, 随着雷诺数的不断增大, HTAB 溶液的摩擦阻力系数也不断变大。当雷诺数达最大临界值 Re_{ct} 时, HTAB 的减阻率 $((\lambda_2 - \lambda_1)/\lambda_1)$ 达最大值, 从减阻开始阶段到 Re 的最大临界值的范围称为完全减阻区; 达最大临界值后虽然溶液的值增大, 减阻率减小, 但仍然小于同一雷诺数工况下清水的值, 即仍然具有减阻效果, 但之后会随着雷诺数的继续增大, 减阻效果逐渐减小, 并最终与清水的摩擦阻力系数曲线重合, 从而失去了减阻效果。其主要原因是由于小雷诺数时, 溶液工况处于层流或者部分处于紊流状态下, HTAB 水溶液中的胶束所受的剪切力较小, 可进行无阻碍的自由运动。之后雷诺数增大, 胶束所受剪切力也增大, 当达到临界值 (CMC II) 时, 胶束结构由球状结构变成了棒束状结构。继续增加雷诺数后, 大量的棒状胶束因为运动纠缠形成 SIS (剪切诱导结构) [11-14], 此时流体处于最大减阻状态 (即完全减阻区域 III)。但是超过临界值之后, 过大的剪切力促使溶液中的剪切结构破坏, 导致 HTAB 溶液的 λ 急剧向溶剂的摩擦阻力系数曲线靠拢, 并且其减阻效果与水溶液的减阻效果几乎一致。

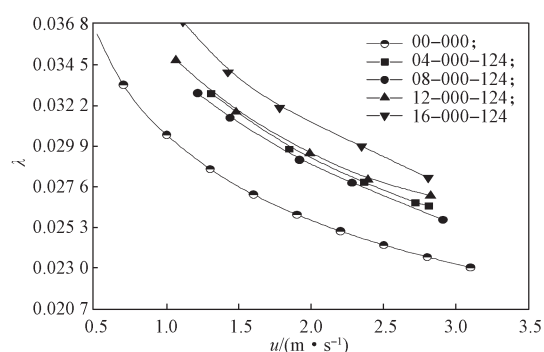
从 3 种添加不同质量分数的 HTAB 减阻曲线可以观察到, 其不同的 Re_{ct} 值, HTAB 溶液的质量分数为 2%, 3%, 4% 时, 对应的最大临界值分别约为 26 000, 31 000, 37 000, 在完全减阻区, 减阻率与溶液浓度呈正相关关系增大, 即牛顿液体的层流

范围被扩大, 流动状态趋于层流化。其中 3 种不同质量分数的 HTAB 溶液在达到最大临界值 Re_{ct} 所对应的值时, 非常靠近 virk (最大减阻渐近线) 曲线:

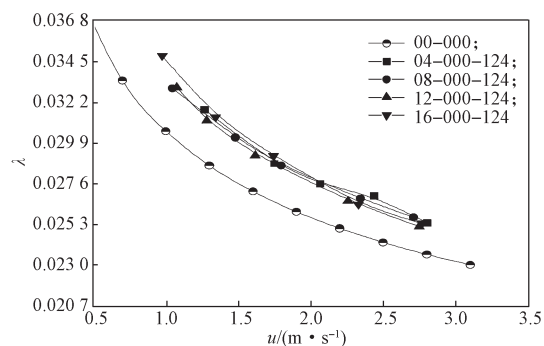
$$1/\sqrt{\lambda} = 19.011g(Re\sqrt{\lambda}) - 32.4。$$

3.3 不同固体质量浓度时固液两相流的阻力分析

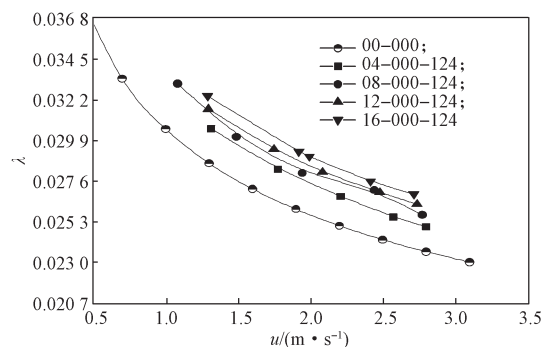
在室内恒温 25 °C 工况下, 采用 4 种固体质量分数 (4%, 8%, 12%, 16%), 选取 3 种不同的固体颗粒粒径 (>74~124 μm、>44~74 μm、>34~44 μm), 将不添加 HTAB 溶液的固液两相流工况与添加质量分数为 4% 的 HTAB 固液两相流工况下所测得的阻尼系数 λ 和流速 u 进行对比分析, 得到固液两相流 λ 和 u 的变化曲线, 如图 3 和 4 所示。



a) 粒径为 >74~124 μm



b) 粒径为 >44~74 μm



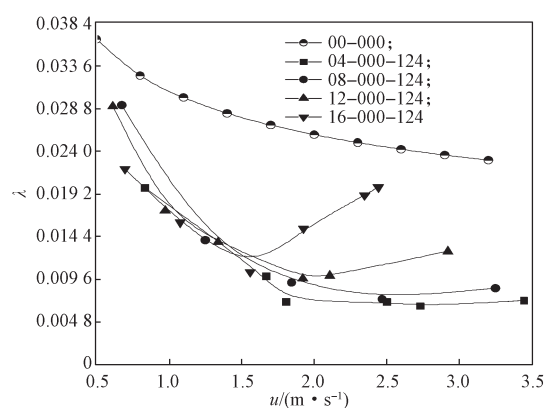
c) 粒径为 >34~44 μm

图 3 不同粒径时固液两相流中阻力系数与流速的关系曲线

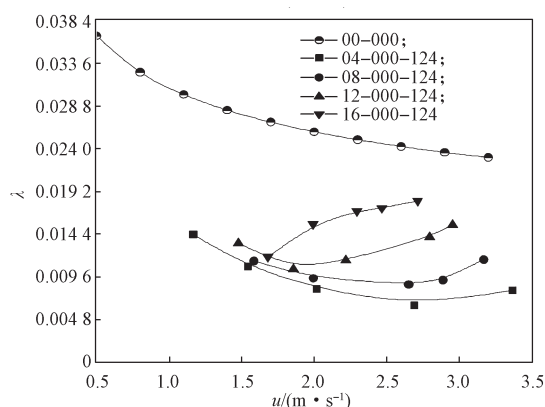
Fig. 3 Relationship between resistance coefficient and velocity in solid-liquid flows with different particle sizes

图 3~4 中为便于简化因变量名称, 对其进行编号, 例如 04-000-124 编号中的 04 表示固体颗粒质量浓度为 4%, 000 表示 HTAB 的质量分数为 0, 124 表示固体颗粒粒径大小为 124 μm。

图 3 是没有添加 HTAB 的工况下的关系曲线, 此时, 固液两相流的平均流速和摩擦阻力系数分别为 u_2 与 λ_2 。由图 3 中的关系曲线可以得知, 相同流速工况下, 固液两相流的摩擦阻力系数随着添加固体质量浓度的增大而增大。在固液两相流中, 固相与液相是相互耦合的关系, 液相影响了固体颗粒的运动方式, 固相通过消耗系统的动能和湍动能, 从而影响液相, 固体颗粒的运动不仅靠液相带动, 也受到固体颗粒自身的影响。在高固体质量分数工况时, 固体颗粒会影响混合介质的流动特性, 并且超过一定阈值后固体颗粒运动的微观特性以及宏观特性均会发生变化, 呈现出非牛顿流体特征。并且由于在流体运动空间当中, 固体颗粒质量浓度的增大, 也就是固体所占空间比例增大, 这使得固体颗粒之间发生非弹性碰撞的概率增大。面对固体颗粒强约束作用等造成的阻力损失, 同时流体运动会使得固体颗粒所需悬浮的能量更大, 也就是说损失的能量会增大, 即会导致整个管道系统的水头损失增加。



a) 粒径为 >74~124 μm



b) 粒径为 >44~74 μm

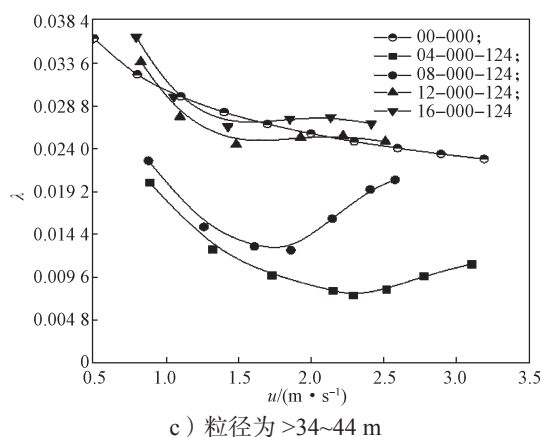


图4 不同粒径时添加4%HTAB溶液的固液两相流中阻力系数与流速的关系曲线

Fig. 4 Drag reduction characteristics of solid-liquid flows with 4% HTAB of different particle sizes

图4是添加HTAB工况下的关系曲线,此时所使用的平均流速和摩擦阻力系数分别为 u_1 与 λ_1 。由图4可知,当添加HTAB表面活性剂后,固液两相流所测得的摩擦阻力系数较未添加HTAB的固液两相流的摩擦阻力系数小。在相同添加质量分数(4×10^{-2})HTAB的减阻剂溶液和颗粒粒径工况下,可以得知溶液的摩擦阻力系数随着固体颗粒质量浓度的增大而增大。在低流速工况下,溶液处于湍流或者部分处于紊流的状态,由于胶束所受的剪切应力较小,可以在溶液中做无阻碍的自由运动旋转。随着流速的不断增大,胶束所受剪切应力增大。达到第一临界值后,减阻率随着流速的不断增大而增大,并且胶束开始由球状胶束向束状胶束转变。当流速继续增大后,大量的束状胶束开始相互纠缠,导致了SIS的形成;之后,达到最大临界 u_{ct} 值,最终其摩擦阻力系数曲线与清水的摩擦阻力系数曲线基本相同。同时,通过观察,发现固体颗粒质量浓度的增大会使得最大临界值 u_{ct} 提前出现,完全减阻区域减少,究其原因主要有以下3个方面:1)摩擦阻力的损失。2)固体颗粒沉降的阻力损失。固体颗粒的质量浓度增加会导致两相流溶液中汲取做悬浮运动的能量增多。3)固体颗粒的碰撞。固体颗粒质量浓度的增大,导致在溶液中颗粒相互碰撞以及与管壁边界发生非弹性碰撞的概率增加。

3.4 粒径大小对固液两相流的减阻影响

在工况室内恒温25℃,采用3种固体质量浓度(4%, 8%, 12%),并选取3种不同的固体颗粒粒径(>74~124 μm, >44~74 μm, >34~44 μm),将不添加HTAB溶液的固液两相流工况下所测得的阻力系数 λ 和流速 u ,与添加质量分数为4%HTAB的固液两相

流工况下所测得的阻力系数 λ 和流速 u 进行对比分析,得到固液两相流 λ (摩擦阻力系数)和 u (流速)间的关系。为便于简化,对因变量名称进行编号,编号含义同前文。因为粒径大小对于固液两相流的减阻特性数据也来自于以上不同颗粒浓度的数据,所以省略 λ (摩擦阻力系数)和 u (流速)的数量关系图,通过比较图4中改变粒径大小曲线,可以推断出以下结论:

1)在相同的流速、固体颗粒质量浓度工况下,通过比较不同颗粒粒径,发现固液两相流溶液的摩擦阻力系数随着添加的固体颗粒粒径的增大而增大,固体颗粒会在漩涡的挟带作用下进入流体速度核心区域进行悬浮运动,与此同时,固体颗粒的粒径越小,则固体颗粒越易呈现出悬浮运动状态,颗粒从流体中汲取的能量越小。粒径越大越不易被挟带,固体颗粒则会以推移质的方式进行输送,液相与固相之间存在着一个速度差,推移过程中会损耗掉更多能量,这种损耗能量以固体颗粒与管壁壁面的摩擦损耗为具体的表现形式。

2)在相同的固体颗粒质量浓度、HTAB浓度以及流速工况下,溶液的摩擦阻力系数随着固体颗粒粒径的增大而增大。在流速较低的情况下,固体颗粒粒径越小使得固液两相流溶液的黏度越大,在同等流速工况下,剪切力越大,导致最大临界值 u_{ct} 提前发生,以及完全减阻区域减小。之后,随着流速的继续增加,当 u 达到最大临界值 u_{ct} 时,其减阻率增大至最大值,之后摩擦阻力系数呈反向上升的趋势增大,但是其仍然小于同一布拉修斯值,仍具有减阻效果。究其原因,一是在同样的固体颗粒质量浓度工况下,颗粒粒径越小则颗粒的数目以及整个系统的表面积越多,则在单位时间内颗粒与颗粒之间发生非弹性碰撞次数的比例增加,导致能量损失增加;二是固相与液相相互接触的面积增大,造成两者相互运动的摩擦能量损耗加大。

4 结论

通过试验,分别对清水以及添加相应质量分数HTAB减阻剂的固液两相流进行了比较,研究两种工况下固体颗粒质量分数和固体颗粒粒径大小对于两相流体的减阻特性,结论如下:

1)在相同的HTAB质量分数和固体颗粒粒径工况下,随着固体颗粒质量分数的增加,摩擦阻力系数增大。固体质量浓度的增加使得两相流的变形速率增大,导致临界雷诺点提前,以及完全减阻区域减小,

并且固体质量浓度的增加还会造成颗粒相互碰撞等能量损失,导致阻力增大。

2) 在相同的 HTAB 质量分数和固体颗粒质量浓度工况下,随着固体颗粒粒径的增大,摩擦阻力系数随之增大。固体颗粒的粒径越大越不易被流体挟带,从而可能在输送过程中损耗更多的能量。

参考文献:

- [1] 吴玉林,唐学林,刘树红.水力机械空化和固液两相流体动力学[M].北京:中国水利水电出版社,2007: 1-6.
WU Yulin, TANG Xuelin, LIU Shuhong. Cavitation of Hydraulic Machinery and Solid-Liquid Two-Phase Hydrodynamics[M]. Beijing: China Water Power Press, 2007: 1-6.
- [2] 卢金玲,张欣,王维,等.沙粒粒径对水力机械材料磨蚀性能的影响[J].农业工程学报,2018, 34(22): 53-60.
LU Jinling, ZHANG Xin, WANG Wei, et al. Effect of Silt Diameter on Abrasion Performance of Hydraulic Mechanical Materials[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(22): 53-60.
- [3] 李文锋,冯建军,朱国俊,等.基于CFD的固液两相离心泵内部流动及磨蚀特性研究[J].西安理工大学学报,2017, 33(1): 46-52.
LI Wenfeng, FENG Jianjun, ZHU Guojun, et al. Investigation in Internal Flow and Abrasion Characteristics of Solid-Liquid Two-Phase Centrifugal Pump Base on CFD[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2017, 33(1): 46-52.
- [4] 赵新学,金有海,孟玉青,等.旋风分离器壁面磨蚀的数值分析[J].流体机械,2010, 38(4): 18-22.
ZHAO Xinxue, JIN Youhai, MENG Yuqing, et al. Numerical Analysis on the Erosion of Cyclone Separator's Surface Wall[J]. Fluid machinery, 2010, 38(4): 18-22.
- [5] 赵志勇,董守平.沟槽面在湍流减阻中的应用[J].石油化工高等学校学报,2004, 17(3): 76-79.
ZHAO Zhiyong, DONG Shouping. Application of Micro-Grooved Surface for Turbulent Drag Reduction[J]. Journal of Petrochemical Colleges and Universities, 2004, 17(3): 76-79.
- [6] 蔡书鹏,杨林,唐川林.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, YANG Lin, TANG Chuanlin. Turbulent Characteristics of CTAB Surfactant Solution Flows in Turbulent Boundary Layers[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2008, 40(2): 250-254.
- [7] 蔡书鹏,李大明. CTAB表面活性剂水溶液的减阻特性[J].石油化工高等学校学报,2006, 19(4): 68-71.
CAI Shupeng, LI Damei. Behavior of Drag Reduction for CTAB Surfactant Aqueous Solution[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2006, 19(4): 68-71.
- [8] REHAGE H, HOFFMAN H. Rheological Properties of Viscoelastic Surfactant Systems[J]. The Journal of Physical Chemistry, 1988, 92(16): 4712-4719.
- [9] BEWERSDORFF H W. Drag Reduction in Surfactant Solution[C]//Structure of Turbulence and Drag Reduction. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1990: 293-312.
- [10] SAVINS J G. A Stress-Controlled Drag-Reduction Phenomenon[J]. Rheologica Acta, 1976, 6(4): 323-325.
- [11] DEBYE P, ANACKER E W. A Microscopy Structure of Surfactant Solution with Salt[J]. J. Phys. Coll. Chem., 1951, 5(5): 644-647.
- [12] HOFMANN S, STERN P, MYSKA J. Rheological Behavior and Birefringence Investigations on Drag-Reducing Surfactant Solutions of Tallow-(Tris-Hydroxyethyl)-Ammonium Acetate/Sodiumsalicylate Mixtures[J]. Rheologica Acta, 1994, 33(2): 419-430.
- [13] MYSKA J, STERN P. Significance of Shear Induced Structure in Surfactants for Drag Reduction[J]. Colloid & Polymer Science, 1998, 276(9): 816-823.
- [14] SAVINS J G. A Stress-Controlled Drag-Reduction Phenomenon[J]. Rheologica Acta, 1967, 6(4): 323-330.

(责任编辑:廖友媛)