

含聚丙烯酰胺的管道螺旋流流动特性试验

胡旭跃^{1,2}, 刘高¹, 李志威^{1,2}

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 湖南长沙 410114;

2. 长沙理工大学水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南长沙 410114)

摘要:为了解聚丙烯酰胺(PAM)对管道螺旋流流动特性的影响,搭建管道试验系统和制作多导叶式局部起旋装置,使用5孔直头球形测针和1套水压力测压系统,测量含PAM管道螺旋流的管道边壁静水压强和测针内动水压强,分析管道螺旋流流速分布、输固能力和压力特性。结果表明:加入少量PAM(100 mg/L)之后,管道螺旋流的流速分布相比清水发生变化,管道螺旋流发展过程(产生—发育成型)延长67%,管道螺旋流的输固能力增大79.1%~91.5%,阻力损失降低18.0%~23.8%。

关键词:管道螺旋流;聚丙烯酰胺;流动特性;输固能力;阻力损失;管道试验

中图分类号:TV134

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2019)04-0019-08

Experiment study on flow characteristics of pipeline spiral flows containing PAM//HU Xuyue^{1,2}, LIU Gao¹, LI Zhiwei^{1,2}(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to reveal the effects of polyacrylamide (PAM) on pipeline spiral flows, an experimental facility of pipeline system and a revolving device consisted of a multi-guide vane were built. The hydrostatic pressure near the pipe wall and the dynamic pressure inside the probes in the pipeline spiral flow containing PAM were measured by a 5-hole spherical head probe and a piezometer tube, respectively. The velocity distribution, the capacity of mass transport, and the pressure characteristics of the pipeline spiral flow were analyzed. The experimental results show that the velocity distribution of the pipeline spiral flow is slightly different from that of clear water after the addition of a small quantity of PAM (100 mg/L), and the generation-development process of the pipeline spiral flow is extended by 67%. Besides, the mass transport capacity of the pipeline spiral flow is increased by 79.1%~91.5%, and the loss of pipeline drag force is reduced by 18.0%~23.8%.

Key words: pipeline spiral flow; polyacrylamide; flow characteristics; mass transport capacity; drag loss; pipeline experiment

螺旋流是一种同时存在轴向与切向速度分量,且切向速度分量能够发挥重要作用的特殊流动形式。螺旋流理论广泛应用于流体机械、石油化工、水利工程、管道输送、机械加工等诸多领域^[1-9]。武鹏林等^[10-12]提出“旋浮”这一概念,采用装置把普通直流转化为平轴强制旋流与普通直流复合而成的螺旋流,进而把泥沙颗粒从推移质转变为悬移质,极大地降低了管道输沙的颗粒阻力,为管道泥沙的高效输

移问题提供了新的解决思路。

外力作用(起旋装置)和流体的黏滞性是形成稳定螺旋流、影响螺旋流流动特性的两大前提条件^[10]。王树立等^[13]对各类螺旋流起旋装置进行了较系统的总结,得出不同起旋装置对螺旋流的流动特性影响较大,但各种装置具有各自的优缺点,目前还没有一种起旋装置能够适用于各种水流条件。在起旋装置设计理论尚不成熟的条件下,通过改变水

基金项目:国家自然科学基金(51709020);港口航道泥沙工程交通行业重点实验室开放基金(2018GKHD06);湖南省科技重大专项(2018SK1010)

作者简介:胡旭跃(1962—),男,教授,博士,主要从事河流泥沙动力学和航道整治研究。E-mail:huxuyue62@163.com

通信作者:李志威(1984—),男,副研究员,博士,主要从事高原河流动力学研究。E-mail:lzhiwei2009@163.com

流的黏滞性以强化螺旋流的旋流强度并减小螺旋流衰减提高输送效果,在理论与实际应用中都具有可操作性。高分子聚合物材料作为基础减阻方法之一,在减阻节能领域中已得到较广泛运用^[14]。关于聚合物的减阻机理有多种不同的理论,但是可确定的是柔性高分子聚合物分子链可改变清水的物理特性(主要是黏性)是减阻的重要原因^[15]。相对分子质量越大,聚丙烯酰胺(PAM)分子组成的线性长链及网链越复杂,PAM水溶液的黏度也相应更大^[16]。

目前,通过添加高分子聚合物改变水流物理性质,研究管道螺旋流问题的报道较少。夏国栋等^[17]通过添加少量的表面活性剂以降低气液之间的表面张力,增强二者之间的溶解性,从而改变了气液两相螺旋流的运动学特性。李建敏等^[18]的研究表明,气液管流加入少量的SDS(十二烷基硫酸钠)之后,气液两相螺旋流的流型以弥散型为主,这种形态大大增加气液之间的接触面积、强化了气液之间的传热效应,并且少量SDS降低气液界面张力,从而减小管流与管壁之间的摩擦阻力,最终降低管道的压降损失。然而,现有少量研究成果主要集中于石油化工领域,主要关注表面活性剂对气液两相流型和压降的影响,高分子聚合物对单相管道螺旋流的流动特性影响的研究还较少。因此,本文通过管道试验,建立循环管路测量系统,测量含PAM管道螺旋流的管道边壁静水压强和测针内动水压强,采用有效起旋距离和边壁压力损失2个重要参数,分析高分子聚合物对单相流体管道螺旋流的作用效果,以为管道输送技术中的应用研究提供参考。

1 研究方法

1.1 试验装置

试验在长沙理工大学水利实验中心进行,试验装置布置见图1。不同的研究人员给出管流完全发展至紊流的直线段长度不尽相同^[19-21],尚无一个确定的理论或者试验结果符合全部的试验工况。为了避免试验段受到入口的影响,考虑到试验场地的限制和经济性要求,设置管流发育直线段长度为 $57D$,其中 D 为管道直径, $D=0.1\text{ m}$ 。

试验采用光滑程度较高的有机玻璃圆管,共设置了7个静压孔:ps00、ps01、ps1、ps2、ps3、ps4、ps5,分别位于直管入口下游 5.7 m 、 6.0 m 、 6.5 m 、 7.5 m 、 8.5 m 、 9.5 m 、 10.5 m 。设置了5个测量管道水流流速的水平测孔:ck1~ck5,其位置分别与ps1~ps5一一对应,测孔截面见图1(a)。测量孔在进行加工时需要避免毛刺的现象,因为毛刺会影响水压传感器的读数。

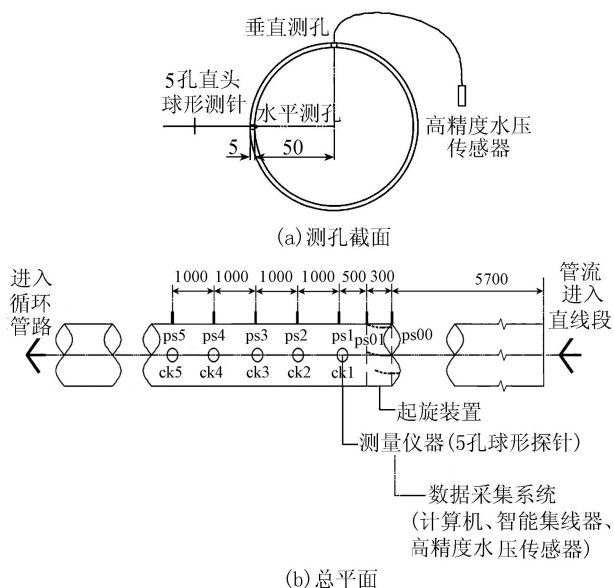


图1 试验装置布置(单位:mm)

1.2 测量仪器

管道内流体的速度由变频控制器控制电机的转速间接控制,流速由四川德阳东汽公司研制的5孔直头球形测针来测量,球头直径为 5 mm ,感受孔直径为 0.35 mm ,测量直杆采用变直径结构,杆身长 350 mm 。采用成都泰斯特公司研制的CY201高精度水压传感器测量管道边壁静压孔静压值和5孔直头球形测针测孔内动压值。该款传感器的量程为 $-15\sim 20\text{ kPa}$,精度为 0.1% ,12支传感器采用智能集线器与计算机相连接。起旋装置对产生的螺旋流流动特性起决定性作用,本试验起旋装置采用多导叶式局部起旋。多导叶式局部起旋装置的导流条参数如图2所示,导流条的模板选取长度为 300 mm ,高度为 20 mm ,厚度为 5 mm 的有机玻璃板。导流条前部直线段长度为 100 mm (B 点为分界点),后部弯曲段的长度为 200 mm ,最大切向角为 20° (最末端 C 点处的切线与直线段的夹角)。为了减小导流条对来流的影响,前端 A 处削成尖角。导流条有3条,导流条之间的夹角为 120° 。起旋装置(导流条)设置在直管首部下流 $5.7\sim 6.0\text{ m}$ 之间的位置(图1)。

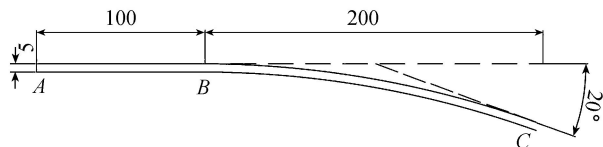


图2 导流条结构参数(单位:mm)

1.3 PAM水溶液

试验选取爱森(中国)絮凝剂有限公司所生产的阴离子型PAM为管流添加剂,相对分子质量为 $1400\text{ 万}\sim 1600\text{ 万}$,总固形物含量为 90.1% ,残余丙烯酰胺的质量浓度为 225 mg/L 。配置PAM水溶液

时,将母液充分搅拌后静置 24 h,使得固体颗粒完全溶解,形成质地较均一的水溶液。若 PAM 水溶液絮凝成团则会影响它形成均一的高分子链网结构,降低抑制紊动猝发效果。在本试验工况条件下,PAM 的质量浓度为 100 mg/L。

2 验证试验

2.1 流速测量系统验证试验

整个测量系统包括 1 支 5 孔直头球形测针和 5 支高精度水压力传感器及其他附属设备(如软管、智能集线器),因为组成的部件较多,因此该测量系统的可靠度需要通过试验进行验证。

首先是对试验的可重复性进行验证,这是长时间进行试验研究的基础。在不同时间采用相同的试验流量(39.5 m³/h)进行两次试验(工况 1、工况 2),

结果见图 3。图 3 中 $v_x^+ = \frac{v_x}{v_r}, y^+ = \frac{y}{R}$,其中 v_x 为任一点的轴向流速, v_r 为管道轴心处的流速, y 为水平测孔方向上任一点距边壁距离, R 为管道内壁半径, $R = 0.05$ m。由图 3 可见,工况 1、工况 2 沿径向各点流速分布可用经典指数分布曲线(指数 $n=1/8$)拟合,

相关性显著(相关系数大于 0.9),表明操作的程序步骤正确、管道系统满足长时间测量的要求。同时,实测值与理论曲线有一定的误差,这是因为 5 孔直头测针作为一种侵入式测量设备,对测量流场有一定的影响。当靠近边壁时测针球头阻滞了壁面流体的运动,因而相较于经典管流理论值,实测值较小。当测针深入到管道中心时,测针本身相对于管道截面就不可忽略,相当于减小了管道截面面积,导致相比于经典管流理论值,实测值较大。

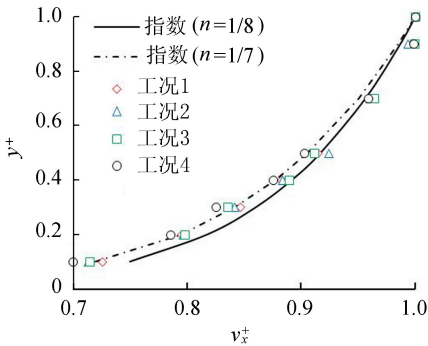


图 3 实测轴向流速沿径向分布

在试验段,管流需要达到完全紊流状态,满足完全紊流状态的流速必定符合经典的管流指数分布。图 3 中工况 4(流量为 25.5 m³/h)下雷诺数 Re 小于 10^5 ,实测流速分布与理论指数分布曲线($n=1/7$)拟合良好;工况 1、2、3(工况 3 流量为 31.5 m³/h)下雷诺数大于 10^5 ,实测流速分布与理论指数分布曲线

(指数 $n=1/8$)拟合良好,这证明试验测量段的水流达到完全紊流状态。此外,将实测流速值和理论计算值沿径向进行积分计算流量,结果见表 1。表 1 中 Q_1 为电磁流量计实测流量; Q_2 为尼古拉兹光滑管速度分布公式得出的理论流速分布进行积分计算得到的流量; Q_3 为实测流速分布进行积分得到的流量; E_r 为 Q_2 与 Q_3 之间的相对误差, $E_r = \frac{Q_2 - Q_3}{Q_2} \times 100\%$ 。

由表 1 可见, E_r 值很小,表明在本试验工况内,不同流量条件下的流速测量值是可靠的。

表 1 流量计算结果

工况	$Q_1 / (m^3 \cdot h^{-1})$	Re	$Q_2 / (m^3 \cdot h^{-1})$	$Q_3 / (m^3 \cdot h^{-1})$	$E_r / \%$
1	39.5	138 389.6	36.8	36.1	1.7
2	39.5	138 389.6	36.8	35.9	2.3
3	31.5	110 361.4	29.3	29.2	0.5
4	25.5	89 340.1	23.9	23.9	0.0

2.2 压力测量系统验证试验

整个测压系统由 7 支高精度水压力传感器及其附属设备(如软管、智能集线器、计算机)所组成。由于组成的部件较多,该测压系统的可靠度也有必要通过试验来验证。通过传感器测量管道的沿程边壁压力 P ,计算得到沿程压力损失,再利用如下达西公式得到理论沿程阻力损失 h_{f2} :

$$h_{f2} = \lambda \frac{L}{4R} \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

其中

$$\lambda = 0.0032 + 0.221Re^{-0.237}$$

式中: L 为试验段长度; V 为管道断面平均流速; λ 为沿程阻力损失系数; g 为重力加速度。将沿程压力损失和 h_{f2} 进行对比分析可验证压力测量系统的可靠性。

首先是对试验的可重复性进行验证,这是长时间进行试验研究的基础。工况 1、工况 2 试验结果见图 4 和表 2。表 2 中 h_{f1} 为实测阻力损失, E_h 为 h_{f1} 与 h_{f2} 之间的相对误差;图 4 中 x 为沿流向位置(ps01 设置为起始点),边壁压力沿程分布的拟合曲线斜率(单位距离边壁压力损失)即为表 2 中的 h_{f1} 。图 4 中工况 1 和工况 2 边壁压力沿程分布一致性很好,表 2 中这两种工况的 E_h 值分别为 5.6%、1.2%,二者相差较小,表明压力测量程序和管道系统满足长时间、多频次的压力测量要求。工况 3、工况 4 的实测边壁压力值拟合的曲线同样满足线性分布,表 2 中这两种工况的 E_h 值分别为 6.5%、6.7%,二者吻合很好,这说明不同流量下的压力测量数据是可靠的。

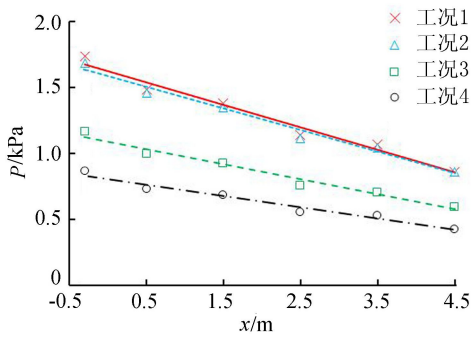


图4 实测边壁压力沿程分布

表2 沿程阻力损失计算结果

工况	$Q_1 / (\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	Re	$h_{n1} / (\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1})$	$h_{n2} / (\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1})$	$E_h / \%$
1	39.5	138389.6	171	162	5.6
2	39.5	138389.6	164	162	1.2
3	31.5	110361.4	114	107	6.5
4	25.5	89340.1	80	75	6.7

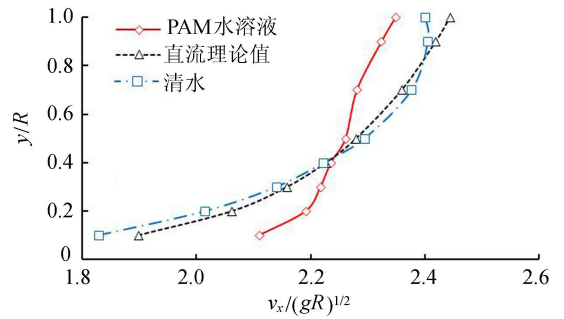
3 试验结果及其分析

3.1 轴向速度分布

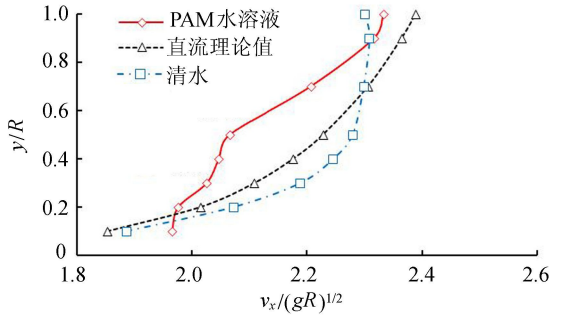
PAM 分子组成的线性长链及网链形成弹性的微观结构,对微观水流结构的动力学过程如紊流猝发等能量交换过程有一定影响,因而在宏观表现上含 PAM 的管道螺旋流流速分布与清水管道螺旋流有一定的区别。

图 5 显示了含 PAM 管道螺旋流轴向速度分布,图中工况 5 的流量为 $35.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。图 5(a) 显示了工况 1 测点 ck5 处加入 PAM 前后轴向速度分布。由图 5(a) 可见,清水螺旋流的轴向速度分布与直流理论值几乎重合,这是因为经过 $45D$ (起旋装置形成螺旋流后 45 倍管径) 的衰减,在管壁边壁阻力和水流内部的摩阻力双重作用下,管流逐渐由螺旋流转变为普通直流。然而含 PAM 的管道螺旋流并没有衰减至清水管道螺旋流在测点 ck5 处的状态,表明加入少量 PAM 之后,减弱了管壁边壁阻力和水流内部的摩阻力对管道螺旋流旋转能力的衰减作用。

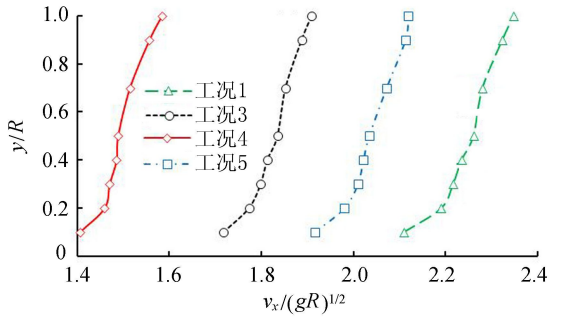
图 5(b) 给出了工况 1 测点 ck2 处加入 PAM 前后轴向速度分布。由图 5(b) 可见, $y/R=0.65$ 附近可以作为清水管道螺旋流轴向流速的一个分界点,相较于普通直流,上部区域高速流体速度降低,下部区域低速流体速度提升。这是因为在起旋装置的影响下,壁面 20 mm 以内的水流受到有机玻璃板阻隔产生周向的旋转速度,其余核心区的水流没有受到物理阻隔,但是水流的黏滞性使得管道中心部分的高速流体与近壁处的流体相互交换,引起了水流能量的重新分配而使得速度分布更为扁平化,这与张红霞^[22]得出的结论是一致的。而含 PAM 管道螺旋



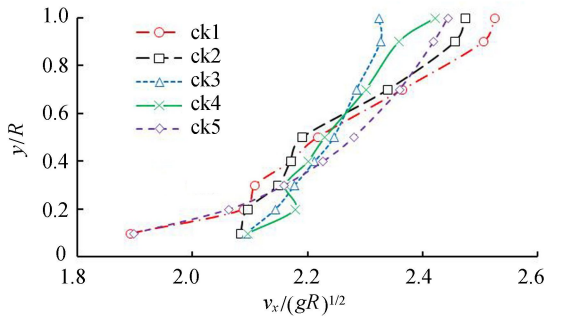
(a) 工况1测点ck5处加入PAM前后



(b) 工况1测点ck2处加入PAM前后



(c) 不同工况测点ck5处



(d) 工况1不同测点处

图5 含 PAM 管道螺旋流轴向速度分布

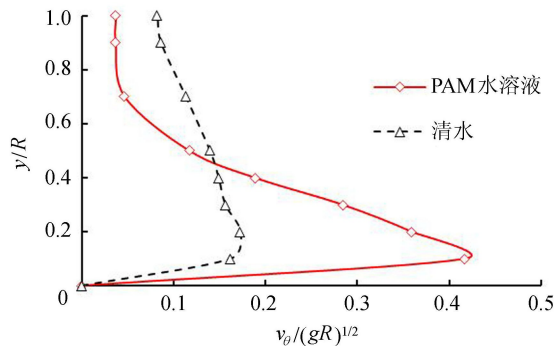
流的速度分布很不规律,并没有清水时的高速流体降低、低速流体提升的现象,这是因为加入 PAM 之后在测点 ck2 处 ($15D$) 螺旋流能量重新分配还未完成,加入 PAM 有助于延长管道螺旋流的“产生—发育完全”这一过程。

图 5(c) 显示了不同工况测点 ck5 处含 PAM 管道螺旋流轴向速度分布。由图 5(c) 可见,不同流量下含 PAM 管道螺旋流轴向速度分布规律是一致的,不随流量的变化而变化。图 5(d) 显示了工况 1 不同测点处含 PAM 管道螺旋流轴向速度沿程分布,由

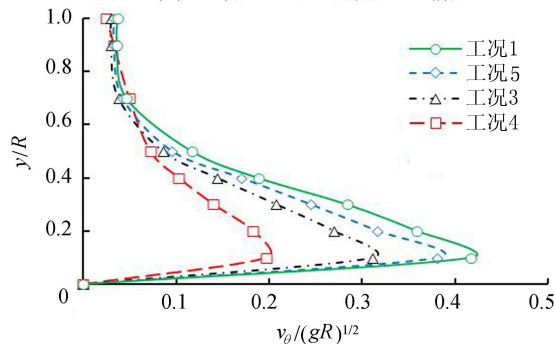
图可见,测点 ck1、ck2 处的速度分布“双峰”现象较明显,随着衰减的推进,测点 ck3、ck4、ck5 处的速度分布趋向于“单峰”形式。

3.2 周向速度分布

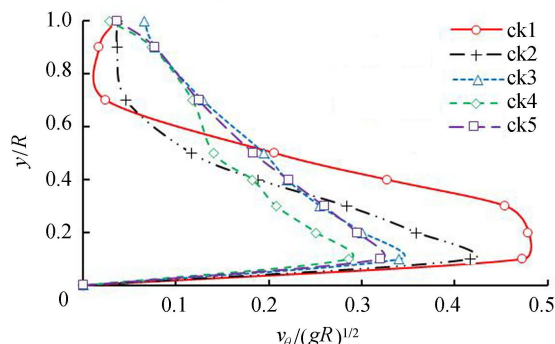
图 6 显示了含 PAM 管道螺旋流周向速度分布,图中 v_θ 为周向速度, $v_{\theta m}$ 为最大周向速度。图 6(a) 为工况 1 测点 ck2 处的周向速度分布。由图 6(a) 可见,加入 PAM 之后,管道螺旋流周向速度要比清水时数值更大,峰值增大了 224%,即加入少量 PAM



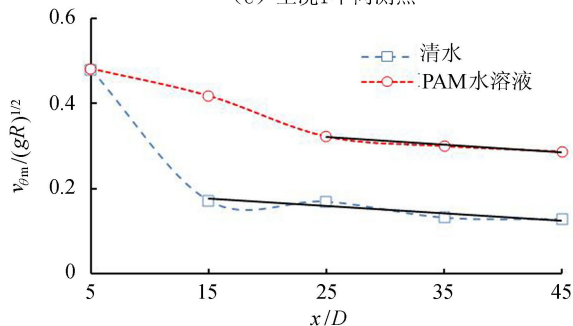
(a) 工况1测点ck2处加入PAM前后



(b) 测点ck2不同工况



(c) 工况1不同测点



(d) 工况1加入PAM前后

图 6 含 PAM 管道螺旋流周向速度分布

之后管道螺旋流强度有所提升。在 ck2 截面处,清水时周向速度传递到轴心处,即经过 $15D$ (起旋装置形成螺旋流后 15 倍管径) 螺旋流已完全发展,而加入 PAM 之后在此处周向速度未传递到轴心处,可以判断螺旋流未完全发展,表明加入 PAM 延长了管道螺旋流的“产生—发育完全”的过程。

图 6(b) 给出了测点 ck2 处不同工况含 PAM 螺旋流周向速度分布,由图可见,不同流量下的周向速度分布规律是类似的,不随流量的变化而变化。图 6(c) 显示了工况 1 不同测点位置处含 PAM 螺旋流周向速度分布。由图 6(c) 可见,含 PAM 管道螺旋流在测点 ck1、ck2 处的周向速度未传递到轴心处,螺旋流没有完全发展,在测点 ck3、ck4、ck5 处的周向速度完全传递到轴心处,即螺旋流已经发育完全。螺旋流发育完全之后的周向速度在达到最大值之后总体上呈线性衰减。

图 6(d) 给出了工况 1 加入 PAM 前后最大周向速度沿程分布。由图 6(d) 可见,PAM 水溶液曲线整体在清水曲线之上,在边壁阻力和流体内部的摩阻力双重作用下,两种介质条件下的最大周向速度皆沿程递减。其中清水螺旋流在测点 ck2 ($15D$) 处完全发展之后,最大周向速度沿程线性衰减的拟合公式为

$$\frac{v_{\theta m}}{\sqrt{gR}} = -0.0017 \frac{x}{D} + 0.2011 \quad \left(\frac{x}{D} > 15\right) \quad (2)$$

PAM 水溶液螺旋流在测点 ck1、ck2 处还未发展完全,在测点 ck3 ($25D$) 处螺旋流完全发展之后,最大周向速度沿程线性衰减的拟合公式为

$$\frac{v_{\theta m}}{\sqrt{gR}} = -0.0017 \frac{x}{D} + 0.3556 \quad \left(\frac{x}{D} > 25\right) \quad (3)$$

清水时螺旋流在 $15D$ 处完全发展,加入 PAM 之后螺旋流在 $25D$ 处完全发展,即加入少量 PAM 之后管道螺旋流发展过程(产生—发育成型)延长了 67%。此外,图 6(d) 清水管道螺旋流在测点 ck1 至 ck2 (开始线性衰减)之间最大周向流速下降约 64%,而加入少量 PAM 之后,管道螺旋流在测点 ck1 至 ck2 之间最大周向速度下降约 13%,测点 ck1 至 ck3 (开始线性衰减)之间的下降幅度约为 33%。这说明管流由直流经过起旋装置之后,在水流的黏性作用下旋转能量衰减率由清水时的 64% 降低至 33%。

3.3 重要参数分析与讨论

3.3.1 管道螺旋流边壁压差

为探究 PAM 对于管道螺旋流的管道内边壁压力变化的影响,采用边壁压差这一参数来分析 PAM 对管道螺旋流的压力特性影响。

图 7 是不同流量下含 PAM 管道螺旋流边壁压

力 P 沿程变化曲线,可见不同流量下含 PAM 管道螺旋流的边壁压力沿程变化规律是一致的,即先线性衰减随之衰减变弱,这是因为随着螺旋流沿程衰减,管道边壁阻力与螺旋流内部的阻力损失有一个由大变小的过程。由图 8 可知,加入 PAM 后,管道螺旋流边壁压差 ΔP (ps1 处边壁压力与 ps5 处边壁压力的差值)相较于清水介质整体上降低,但二者皆随流量的增大而线性增长。从表 3 可知,加入少量 PAM 之后管道螺旋流的边壁压差降低率为 18.0% ~ 23.8%。

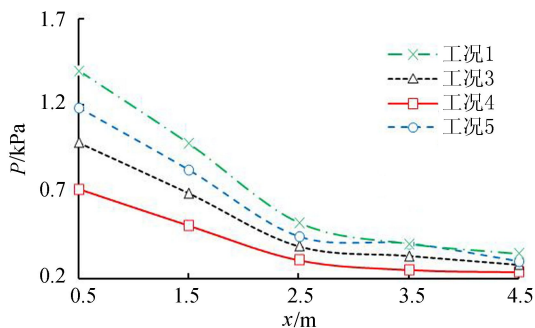


图 7 含 PAM 管道螺旋流边壁压力沿程变化

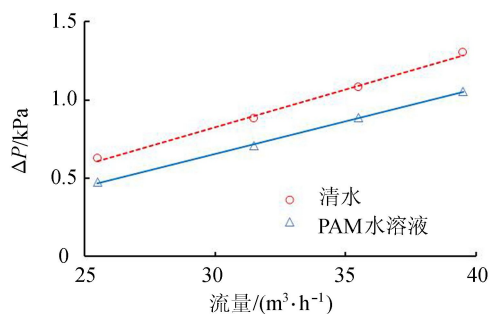


图 8 边壁压差随流量变化

表 3 管道边壁压差计算

工况	流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	ΔP_w /kPa	ΔP_p /kPa	ε /%
1	39.5	1.303	1.056	19.0
5	35.5	1.082	0.888	18.0
3	31.5	0.880	0.706	19.8
4	25.5	0.625	0.476	23.8

注: ΔP_p 为含 PAM 管道螺旋流边壁压差(点 ps1 与点 ps5 之间的差值); ΔP_w 为清水管道螺旋流边壁压差(点 ps1 与点 ps5 之间的差值); ε 为加入 PAM 之后边壁压差降低率, $\varepsilon = \frac{\Delta P_w - \Delta P_p}{\Delta P_w} \times 100\%$ 。

3.3.2 管道螺旋流边壁压差与阻力损失的关系

测点 ck1、ck2、ck3 和 ck4 处管道螺旋流轴向平均速度无量纲数 $v_{xm}/(gR)^{1/2}$ 分别为 2.23、2.24、2.23 和 2.23 (v_{xm} 为断面轴向平均速度),可知沿程各断面的轴向平均速度无量纲数基本一致,即各个断面的动能相同。此外,本试验管道为水平管道,沿程的位势能不变,由不可压缩实际液体恒定总流的能量方程,即可以认为管道螺旋流边壁压差的数值与阻力损失的数值大小相等。

加入 PAM 之后,管道螺旋流边壁压差降低了 18.0% ~ 23.8%,也可以说管道螺旋流阻力损失降低了 18.0% ~ 23.8%,即加入 PAM 有助于降低管道螺旋流的阻力损失。原因可认为是加入少量的 PAM 之后形成的分子链网有效减小管道螺旋流边壁内部的紊动猝发活动和流体内部的阻力,因此减小了能量损失。

3.3.3 管道螺旋流对输送固粒的影响

在管道内螺旋流中,泥沙颗粒有 4 种运动状态,即旋浮、贴壁推移、斜位沙波、部分淤积^[23]。当泥沙颗粒经过起旋装置完全起旋,再经过衰减之后由旋浮状态转变为贴壁推移时,张红霞^[22]认为这一段距离为管道螺旋流的有效起旋距离。有效起旋距离越大,表明管道螺旋流的输固能力越强。

$d=0.075 \text{ mm}$ 为粗、细颗粒的分界粒径,此处进行理论分析时选取 $d=0.075 \text{ mm}$ 粒径作为参考粒径。由斯托克斯公式,可估算泥沙颗粒的沉速 ω :

$$\omega = \frac{1}{18} \frac{\gamma_s - \gamma}{\nu} g d_{50}^2 \quad (4)$$

式中: γ_s 为泥沙重度; γ 为水的重度; d_{50} 为泥沙颗粒中值粒径; ν 为水的黏度系数。当泥沙颗粒粒径小于 0.076 mm ,式(4)可适用。

将 $v_{\theta m} = \omega$ 带入到式(2)和式(3)即可得到在流量为 $39.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 的条件下,清水与 PAM 水溶液螺旋流对 $d=0.075 \text{ mm}$ 泥沙颗粒的有效起旋距离,计算结果见表 4。表 4 中 L_1 为 PAM 水溶液管道螺旋流的有效起旋距离, L_2 为清水管道螺旋流的有效起旋距离,提升效果 T_L 的计算公式为

$$T_L = \frac{L_1 - L_2}{L_2} \times 100\% \quad (5)$$

表 4 有效起旋距离计算

流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	L_1/m	L_2/m	$T_L/\%$
25.5	18.4	9.6	91.5
31.5	18.8	10.0	87.8
35.5	19.0	10.6	79.1
39.5	20.0	11.1	79.9

由表 4 可知,在一定的理想条件下(泥沙颗粒为 0.075 mm),PAM 水溶液(100 mg/L)管道螺旋流相较于清水管道螺旋流,有效起旋距离提高 79.1% ~ 91.5%。随着流量的增大,加入 PAM 前后,有效起旋距离线性增大(图 9)。需要说明的是,有效起旋距离只是一个概化的参数,实际管流中作用在泥沙颗粒上的周向速度值不一定为最大周向速度值,应该为最大周向速度的某一比例值,具体的数值还是要进行加沙试验才能确定,有待于下一步开展研究。

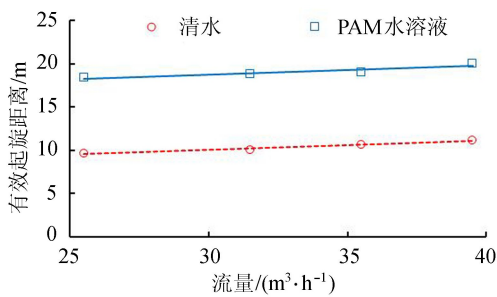


图9 有效起旋距离随流量的变化

4 结论

a. 加入少量 PAM 之后,轴向速度相较于清水时分布更加均匀,周向速度相较于清水时数值更大,周向速度峰值增大 2.24 倍,管道螺旋流的发展过程(产生—发育成型)相较于清水时延长了 67%。

b. 管道螺旋流的各断面平均动能相同,能量守恒条件下边壁压力差与阻力损失的数值大小相同。

c. 加入少量 PAM 之后,管道螺旋流阻力损失降低 18.0% ~ 23.8%,即加入 PAM 有助于降低管道螺旋流的阻力损失。

d. 加入少量 PAM 之后,管道螺旋流的输固能力较清水时增大 79.1% ~ 91.5%,即固体颗粒在相同水流条件下可旋移更长距离。

参考文献:

[1] 王成. 螺旋流恒压泵结构设计改进及性能试验研究[J]. 流体机械, 2014, 42(12): 12-16. (WANG Cheng. Experimental study on improvement of properties and structure design of spiral flow constant pressure pump [J]. Fluid Machinery, 2014, 42(12): 12-16. (in Chinese))

[2] 饶永超,王树立,武玉宪,等. 天然气水合物强化生成技术与方法研究进展[J]. 油气储运, 2012, 31(10): 725-732. (RAO Yongchao, WANG Shuli, WU Yuxian, et al. Research progress in generation strengthening technology and method of natural gas hydrate[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2012, 31(10): 725-732. (in Chinese))

[3] 唐毅,周著,吴持恭. 排沙漏斗切向流速分布规律的研究[J]. 四川水力发电, 1997, 16(4): 77-81. (TANG Yi, ZHOU Zhu, WU Chigong. Study on regulation for tangential flow velocity distribution in sand hopper [J]. Sichuan Water Power, 1997, 16(4): 77-81. (in Chinese))

[4] 张羽,张仙娥,彭龙生. 圆管螺旋流输沙特性试验研究[J]. 泥沙研究, 2005, 30(2): 34-38. (ZHANG Yu, ZHANG Xian'e, PENG Longsheng. Experimental study on sediment transportation of spiral flow in pipes [J].

Journal of Sediment Research, 2005, 30(2): 34-38. (in Chinese))

[5] 何根旺. 液粒两相螺旋流光整加工技术的理论研究及螺旋流仿真分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2006.

[6] 张志雁,牧振伟,杨力行. 垂直螺旋管道内单颗粒悬浮运动的试验[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(4): 56-59. (ZHANG Zhiyan, MU Zhenwei, YANG Lixing. Experimental study on suspended motion of a single particle in vertical spiral duct [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(4): 56-59. (in Chinese))

[7] 张霞,袁寿其,张金凤,等. 螺旋形蜗壳型式对高比转数离心泵性能的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(1): 25-31. (ZHANG Xia, YUAN Shouqi, ZHANG Jinfeng et al. Effects of spiral volute type on performance of high specific speed centrifugal pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(1): 25-31. (in Chinese))

[8] 张华,陈斌,施卫东,等. 单叶片螺旋离心泵内部流场数值计算及油膜试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(5): 381-385. (ZHANG Hua, CHEN Bin, SHI Weidong, et al. Numerical simulation and oil film observation on flow field in impeller of screw centrifugal pump with single-blade [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(5): 381-385. (in Chinese))

[9] 朱荣生,林鹏. 螺旋轴流泵的固液两相流动数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(1): 6-11. (ZHU Rongsheng, LIN Peng. Numerical simulation of solid-liquid two-phase flow in screw axial-flow pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(1): 6-11. (in Chinese))

[10] 武鹏林,彭龙生. 水平圆管中螺旋流的形成与衰减[J]. 太原工业大学学报, 1997, 28(4): 33-36. (WU Penglin, PENG Longsheng. Formation and decay of spiral flow in horizontal pipe [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 1997, 28(4): 33-36. (in Chinese))

[11] 武鹏林,彭龙生. 螺旋管流输移固粒与起旋器效率[J]. 太原工业大学学报, 1997, 28(3): 41-44. (WU Penglin, PENG Longsheng. Solid grain transport in the pipe spiral flow and efficiency of the pipe cyclone [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 1997, 28(3): 41-44. (in Chinese))

[12] 武鹏林. 夹沙螺旋管流能耗的试验研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 60-63. (WU Penglin. Experimental study on energy gradient of sediment transportation in spiral pipe flow [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(1): 60-63. (in Chinese))

[13] 王树立,饶永超,韩永嘉,等. 螺旋流发生装置的对比分

- 析研究[J]. 流体机械, 2013, 41(2): 30-38. (WANG Shuli, RAO Yongchao, HAN Yongjia, et al. Comparative analysis and research on spiral flow generator[J]. Fluid Machinery, 2013, 41(2): 30-38. (in Chinese))
- [14] 焦利芳,李凤臣. 添加剂湍流减阻流动与换热研究综述[J]. 力学进展, 2008, 38(3): 339-357. (JIAO Lifang, LI Fengchen. Review of turbulent drag reducing flow and heat transfer with additives [J]. Advances in Mechanics, 2008, 38(3): 339-357. (in Chinese))
- [15] BIRD R B. Dynamics of polymeric liquids [M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 1987.
- [16] 陈琨. 部分水解聚丙烯酰胺水溶液流变性研究[D]. 济南:山东大学, 2012.
- [17] 夏国栋,赵庆国,彭岩,等. 表面活性剂对倾斜上升气液两相流流型的影响[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(4): 613-615. (XIA Guodong, ZHAO Guoqing, PENG Yan, et al. Influence of surfactant on gas-liquid two-phase flow regimes in an inclined pipe [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(4): 613-615. (in Chinese))
- [18] 李建敏,王树立,饶永超,等. 表面活性剂对气液两相螺旋管流流动特性的影响[J]. 水动力学研究与进展: A辑, 2015, 30(1): 18-23. (LI Jianmin, WANG Shuli, RAO Yongchao, et al. Influence of surfactant on flow characteristics of gas-liquid two phase spiral pipe flow [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2015, 30(1): 18-23. (in Chinese))
- [19] PATEL V C, HEAD M R. Some observations on skin friction and velocity profiles in fully developed pipe and channel flows [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1969, 38(1): 181-201.
- [20] ABELL C J. Scaling laws for pipe flow turbulence [D]. Melbourne: University of Melbourne, 1974.
- [21] 郭子中,廖应承,吴文波,等. 自制勃莱斯顿(Preston)管的率定及其应用[J]. 华东水利学院学报, 1985, 13(4): 49-63. (GUO Zizhong, LIAO Yingcheng, WU Wenbo, et al. Calibration and application of laboratory-manufactured preston tube [J]. Journal of East China Technical University of Water Resources, 1985, 13(4): 49-63. (in Chinese))
- [22] 张红霞. 局部起旋式圆管螺旋流三维湍流的试验研究及数值模拟[D]. 太原:太原理工大学, 2004.
- [23] 张羽,彭龙生,李昭峰. 平轴螺旋管流中的泥沙起旋[J]. 泥沙研究, 2002, 27(2): 71-75. (ZHANG Yu, PENG Longsheng, LI Zhaofeng. Rotation starting of sediments in spiral flow in the horizontal pipe [J]. Journal of Sediment Research, 2002, 27(2): 71-75. (in Chinese))

(收稿日期:2018-06-27 编辑:雷燕)

(上接第 18 页)

- [19] Thames Water. Thames Tunnel; main report on Phase 2 consultation [DB/OL]. [2018-10-28]. <https://www.tideway.london/>.
- [20] Environment Agency. River Thames Scheme; strategy appraisal report[DB/OL]. [2018-10-28]. <https://www.gov.uk/government/publications/river-thames-scheme-strategy-appraisal-report>.
- [21] WOODS-BALLARD B, KELLAGHER R, MARTIN P, et al. The SUDS manual [R]. London: Construction Industry Research and Information Association, 2007.
- [22] MATTINGLEY P S, MOORE R J, COLE S J, et al. Hydrological assessment of radar-raingauge merging techniques using the grid-to-grid model[DB/OL]. [2018-10-28]. <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2015/EGU2015-6028.pdf>.
- [23] 张念强, 黄海雷. 英国洪水风险图编制应用及对我国的借鉴[J]. 中国防汛抗旱, 2018, 28(3): 62-67. (ZHANG Nianqiang, HUANG Hailei. Flood risk mapping and application in the United Kingdom and its reference to China[J]. China Flood & Drought Management, 2018, 28(3): 62-67. (in Chinese))
- [24] Department for Environment, Food and Rural Affairs. Water Bill: Part 4-Flood Insurance Scope of Flood Re [DB/OL]. [2018-10-28]. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/292353/water-bill-flood-insurance-scope-flood-re.pdf.
- [25] FLOOD R E. The first flood re transition plan. [DB/OL]. [2018-10-28]. <https://www.floodre.co.uk/wp-content/uploads/Flood-Re-Transition-Plan-Feb-2016-FINAL.-1.pdf>.
- [26] SURMINSKI S, ELDRIDGE J. Flood insurance in England; an assessment of the current and newly proposed insurance scheme in the context of rising flood risk[J]. Journal of Flood Risk Management, 2017(10): 415-435.
- [27] MARK S. The Bellwin Scheme[DB/OL]. [2018-10-28]. <https://researchbriefings.parliament.uk/ResearchBriefing/Summary/SN00643>.
- [28] 贾绍凤. 我国城市雨洪管理近期应以防涝达标为重点[J]. 水资源保护, 2017, 33(2): 13-15. (JIA Shaofeng. China should prioritize waterlogging prevention for recent urban storm water management [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(2): 13-15. (in Chinese))

(收稿日期:2018-10-28 编辑:郑孝宇)