

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230044

# 不同荷载管道车弯管启动时环隙流场数值模拟

王 成, 孙西欢, 李永业

(太原理工大学水利科学与工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:** 为研究不同荷载条件下管道车在弯管启动时环隙流场的分布, 采用数值模拟结合物理模型试验验证的方法研究不同荷载管道车水平弯管启动时环隙流场。结果表明, 荷载的增加不会改变缝隙流场流速的整体分布规律, 仅仅改变缝隙流场流速数值的大小; 不同荷载条件下, 水平弯管内管道车缝隙流场轴向流速从管道内壁到管道车外壁有先增大后减小的规律。周向流速在管道车缝隙流入口断面处和车中断面处分布较为均匀, 但在缝隙流出口断面处出现密封盖两侧流速相反分布。径向流速越远离支撑体和密封盖分布越均匀, 且在管道车缝隙流出口断面支撑体处出现流速明显增大现象。该研究解释了环状缝隙流场分布规律形成原因, 获得了不同荷载管道车在弯管处启动时缝隙流场的流速分布规律。在完善丰富环状缝隙流理论的同时, 为筒装料管道水力输送的应用提供了理论依据。

**关键词:** 管道车; 筒装料; 环隙流场; 数值模拟

**中图分类号:** TH137; TV134.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)11-0091-04

## 1 引言

管道水力输送技术<sup>[1]</sup>作为现代物流的一员, 具有运输效率高、建设周期短等一系列优点, 具备广阔的发展前景。筒装料管道水力输送技术<sup>[2]</sup>是管道水力输送技术的重要组成成员。它在包含管道水力输送技术诸多优点的同时, 通过其管道车独特的设计形成稳定同心环状缝隙流<sup>[3]</sup>, 解决运输过程中对于管道内壁磨损碰撞及阻力大的问题, 符合新时代人们对于节能、环保、高效、绿色运输方式的要求。管道车环状缝隙流流场的研究是筒装料输送技术研究的重要分支<sup>[4]</sup>, 研究管道车缝隙流场对于管道车能耗研究有重要意义<sup>[5]</sup>。本文结合数值模拟和物理试验验证的方法, 研究不同荷载条件下管道车在水平弯管启动时的环隙流场; 所谓临界启动状态<sup>[6]</sup>为管道车将动而未动瞬间, 临界启动状态下管道车的荷载会影响管道车的启动雷诺数, 不同荷载情况下会有与之对应的启动雷诺数, 而雷诺数的不同会直接影响到管道车能耗的高低, 进而决定管道车能否正常启动并稳定运行; 本文研究成果在丰富缝隙流理论的同

时, 弥补筒装料管道水力输送技术在弯管段缝隙流场研究的不足, 可为筒装料管道水力输送技术的工程应用提供理论依据。

## 2 模型构建及方案设计

### 2.1 几何模型构建

几何模型包括水平弯管模型(图 1(a))和管道车模型(图 1(b))。以上游直管段末端为弯管段 0°位置, 逆时针旋转, 将管道车放置在弯管 67.5°位置。管道车尺寸为 50 mm × 150 mm(直径 × 长度), 其主要由料筒、密封盖、支撑体三部分组成。管道车模型见图 2。设定管道车中心所在横断面为#2断面; 在#2断面上游方向, 沿着管道车中心轴线隔 74 mm 设置#1断面; 在#2断面下

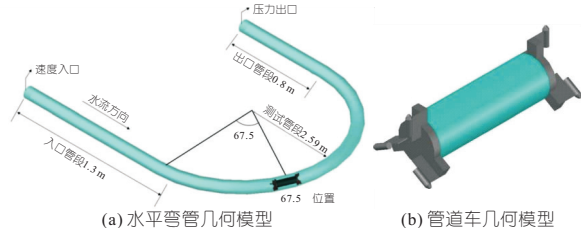


图 1 水平弯管及管道车几何模型

Fig. 1 Geometric model of a horizontal bend and pipeline truck

收稿日期: 2023-01-09, 修回日期: 2023-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179116)

作者简介: 王成(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向为流体力学与流体机械, E-mail: 1540044657@qq.com

通讯作者: 孙西欢(1960-), 男, 教授、博导, 研究方向为工业水力学, E-mail: sunxihuan@tyut.edu.cn

游方向,沿管道车中心轴线隔 74 mm 设置<sup>#</sup>3 断面,共三个断面。具体断面布置见图 2。

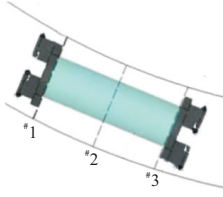


图 2 断面布置

Fig. 2 Layout of sections

## 2.2 控制方程

数值模拟过程中假设流体为不可压缩粘性流体,其连续性方程和雷诺时均 N-S 方程可表示为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i' u_j'} \right) + S_i \quad (2)$$

式中, $\rho$  为密度; $u_i, u_j$  均为速度分量时均值; $\mu$  为动力粘滞系数; $p$  为压力; $x_i, x_j$  均为坐标分量; $u_i', u_j'$  均为速度分量脉动值; $S$  为动量方程广义源项。

本试验过程中弯管管道内水流雷诺数  $Re > 2\ 320$ ,管道内水流属于湍流,对于充分发展的高雷诺数湍流模型,使用修正过的 RNG  $\kappa$ - $\epsilon$  湍流模型较为合适,其相关方程为:

$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\kappa u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\kappa \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right) + G_\kappa + \rho\epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho\epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\epsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{C_{1\epsilon} \epsilon}{\kappa} G_\kappa - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{\kappa} \quad (4)$$

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \quad (5)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \kappa^2 / \epsilon \quad (6)$$

$$C_{1\epsilon}^* = C_{1\epsilon} - \eta(1 - \eta/\eta_0)/(1 + \beta\eta^3) \quad (7)$$

$$\eta = (2E_{ij}E_{ij})^{1/2} \kappa / \epsilon \quad (8)$$

$$E_{ij} = (\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i) / 2 \quad (9)$$

$$G_\kappa = \mu_t (\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i) \partial u_i / \partial x_j \quad (10)$$

式中, $\kappa, \epsilon$  为湍动能、湍流耗散率; $\alpha_\kappa, \alpha_\epsilon$  分别为  $\kappa, \epsilon$  的普朗特数,均取 1.39; $\mu_{\text{eff}}$  为有效粘度; $G_\kappa$  为由于平均速度梯度而产生的湍动能  $\kappa$  的产生项; $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}$  为湍流模型系数,均为常数; $\mu_t$  为湍流黏性系数; $C_\mu$  为常数,取为 0.09; $\eta_0, \beta$  均为常数。

## 2.3 边界条件及网格划分

数值模拟管道入口边界条件采用速度入口。管道出口边界设置为压力出口条件。管道壁面与管道车壁面条件均设置为无滑移边界条件。网格

交界面为内部交界面,因为有流体通过,因此设置为 interior 边界。

本次模拟采用拼装网格的方法。管道车所在区域结构比较复杂,采用最大值为 3 mm 非结构化网格进行划分,管道上游区域及管道下游区域均为规则的圆柱体,采用最大值为 5 mm 的结构化网格进行划分。最后再将这两个部分的网格进行拼装,形成一个完整的网格。

## 2.4 数值模拟验证

为验证数值模拟结果的可靠性,需进行物理模型试验来对比结果。试验系统示意图见图 3。试验开始前先将钢水箱中注满水,与此同时加入适量示踪粒子,之后启动离心泵将钢水箱中的水抽入管道中,通过调节阀门和观察电磁流量计来控制管道中流量的大小。待管路中的水流稳定后,使用 PIV 测量方法<sup>[7]</sup>测量弯管段管道车周围缝隙流场流速。



图 3 试验系统布置图

Fig. 3 Layout of the test system

分别取荷载为  $G = 1\ 000, 1\ 400\ \text{g}$  管道车在弯管  $67.5^\circ$  启动时的<sup>#</sup>2 断面的轴向流速进行对比。结果表明,数值模拟结果与试验结果两者基本一致,最大相对误差不超过 5%,说明采用数值模拟方法研究不同荷载管道车在水平弯管启动时的水力特性可行。

## 3 结果与分析

### 3.1 环隙轴向流速分布特征分析

为分析不同荷载管道车在水平弯管内启动时环隙流断面轴向流速的分布特性,选择不同荷载管道车在弯管  $67.5^\circ$  位置启动时环隙流区域的<sup>#</sup>1、<sup>#</sup>2、<sup>#</sup>3 断面的轴向流速分布云图进行分析,具体见图 4。由图 4 可知:①环隙断面轴向流速分布呈现从管道内壁到管道车外壁先增大后减小的趋势。这主要是因为流体具有一定的粘滞性,管道车在水平弯管启动瞬间,管道内壁和管道车壁附近的流速近似看成粘附在管道壁和管道车壁的液体质点流速。因此管道内壁和管道车外壁流速均为零,所以环状缝隙流速整体呈现一个两边小中间大的趋势。②<sup>#</sup>1 断面为水流最先进入管道车环状缝隙的缝隙流入口断面,水流由于密封盖和支撑体的阻挡会产生一个绕流,因此在<sup>#</sup>1

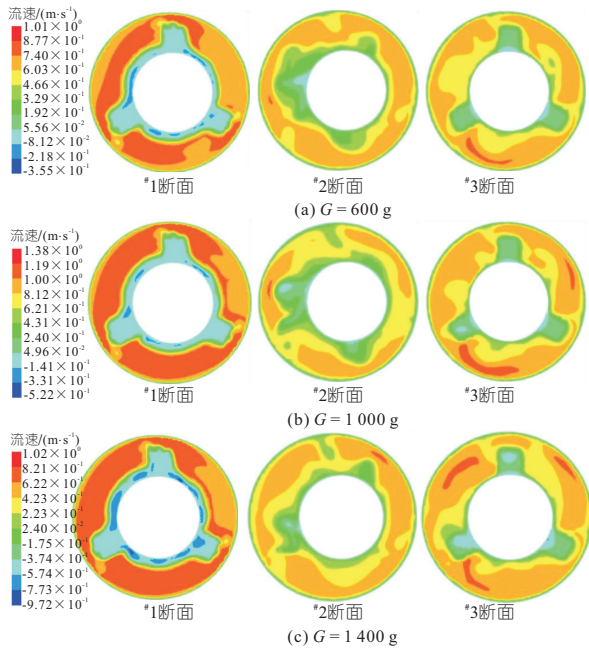


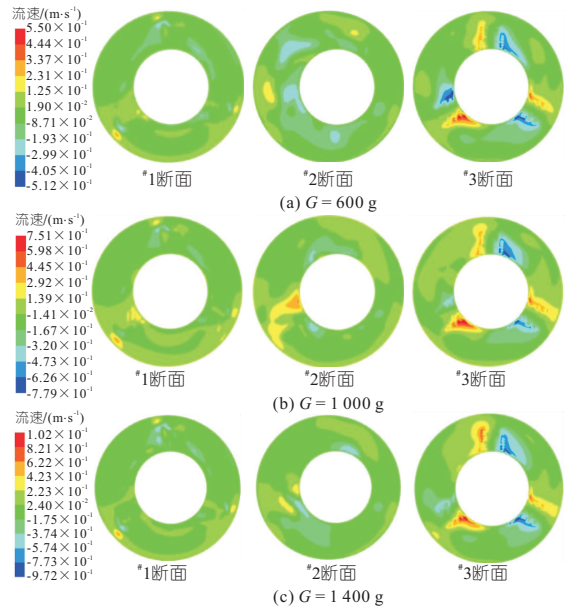
图 4 环隙流断面轴向流速分布云图 1

Fig. 4 Circumferential velocity distribution cloud diagram 1 of annulus flow section

断面内支撑体和密封盖对应区域内会产生一个低流速区,流速会迅速减小。水流向环状缝隙快速挤压,过水断面减少,流量不变,因此环隙流速增大。 $\# 2$ 断面为管道车环状缝隙流中心断面,该断面处缝隙流已经远离支撑体和密封盖,且缝隙流得到一定发展,从云图中可以看出相对于 $\# 1$ 断面, $\# 3$ 断面流速分布更加均匀,流速梯度更小。 $\# 3$ 断面为管道车缝隙流出口断面。在 $\# 3$ 断面处,受到支撑体和密封盖的影响,仍发生绕流现象,出现低速区,然而相对于 $\# 1$ 断面,其流速分布相对均匀,流速梯度相对较小。③随着荷载的增加,各个断面的轴向流速整体分布大致相同,改变的仅仅是流速值的大小。其主要原因是荷载的改变仅仅改变了管道车启动流量的大小,而启动流量的变化并未改变弯管内流场的整体分布,仅仅影响了流速值的大小。

### 3.2 环隙周向流速分布特征分析

选取不同荷载管道车在水平弯管的  $67.5^\circ$  位置启动时环隙流区域的三个断面的周向流速分布云图进行分析。规定逆时针方向为周向流速的正方向,顺时针方向为周向流速的负方向,具体见图 5。由图 5 可知:①环隙区域的 $\# 1$ 、 $\# 2$ 断面周向流速分布均匀,大部分区域无明显变化。云图中有明显变化的地方为水流进入环隙区域会由于绕流产生漩涡,当漩涡旋转方向为逆时针方向时则流速为正,且明显增大,当漩涡旋转方向为顺时针方向时则流速为负,且明显减小,而无漩涡产生的地方周向流速则几乎为零。并且流速在数量级上

图 5 环隙流断面周向流速分布云图 2  
Fig. 5 Circumferential velocity distribution cloud diagram 2 of annulus flow section

周向流速明显小于轴向流速。② $\# 3$ 断面均出现密封盖两侧流速大小截然相反分布。主要原因是当水流运动到 $\# 3$ 断面时由于密封盖的阻挡,水流会产生绕流,运动方向由原来的向前运动变为向密封盖左右两侧运动,那么密封盖的左侧水流运动方向为逆时针方向,则流速为正,而密封盖的右侧水流运动方向为顺时针方向,则水流为负。③与轴向流速相似,随着荷载的增加,各断面周向流速整体分布大致相同,改变的仅仅是流速值的大小。

### 3.3 环隙径向流速分布特征分析

同样选取不同荷载管道车在水平弯管的  $67.5^\circ$  位置启动时环隙流区域的三个断面的径向流速分布云图进行分析。规定背离圆心方向为径向流速的正方向,指向圆心方向为径向流速的负方向。具体见图 6。由图 6 可知:① $\# 1$ 断面相对于 $\# 2$ 断面径向流速更大,分布更加不均匀。这主要是因为 $\# 1$ 断面为水流最先进入环状缝隙的入口断面,当水流由于支撑体及密封盖的阻挡,会产生绕流现象,运动到了密封盖处的水流会向密封盖四周分散开来,因此水流方向由管道的轴向变为背离断面圆心方向,此时水流流速为正。随着水流进入缝隙并逐渐发展,水流会在环状缝隙产生漩涡,当漩涡中的水流方向指向断面圆心时则流速为负,因此也会有低速区慢慢出现。随着水流在缝隙不断发展,缝隙流速分布也逐渐均匀化。因此 $\# 2$ 断面相对于 $\# 1$ 断面速度分布更加均匀化。在流速的数量级上径向流速和周向流速相近,均比轴向流速小大约 2 个数量级。②在 $\# 3$ 断

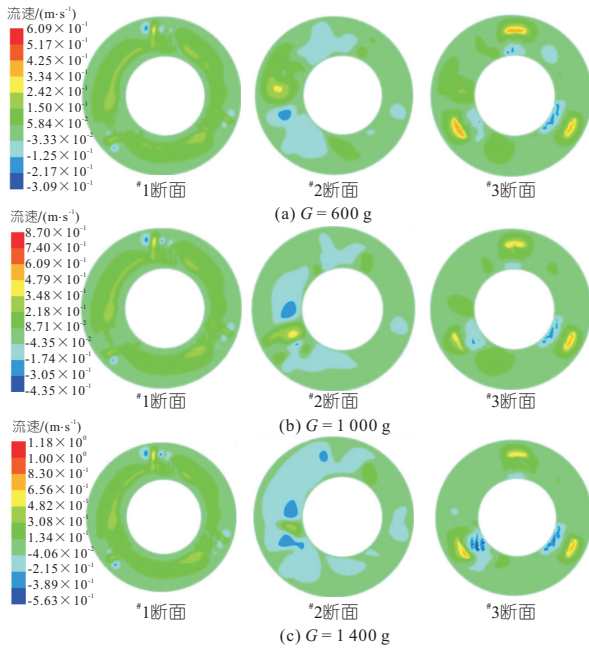


图 6 环隙流断面径向流速分布云图 3

Fig. 6 Circumferential velocity distribution cloud diagram 3 of annulus flow section

面支撑体所在区域流速明显增大。主要原因也是由于水流到了车前的密封盖会产生绕流现象,因此支撑体所在区域的水流方向均背离断面圆心,水流流速为正,流速明显增大。③随着荷载的增加,各断面径向流速整体分布大致相同,改变的仅仅是流速值的大小。

#### 4 结论

本文以荷载为主要控制变量,采用数值模拟和试验研究相结合的方法,研究了水平弯管内不同荷载管道车启动时环隙流场的水力特性,得到

弯管段不同荷载管道车启动时的缝隙流场的分布规律。研究结果补充了管道车缝隙流场在弯管段研究内容的缺失,为复杂弯管缝隙流场的研究提供了参考,有利于筒装料管道水力输送技术尽快实现工程应用。

#### 参考文献:

[1] PENG WENSHAN, MA LI, WANG PING, et al. Experimental and CFD investigation of flow behavior and sand erosion pattern in a horizontal pipe bend under annular flow[J]. Particuology, 2023, 75: 11-25.

[2] 孙西欢,李永业,阎庆斌.筒装料管道水力输送管道车启动条件的试验研究[C]//第二十届全国水动力学研讨会,2006.

[3] 许贤良,朱兵,张军,等.同心环形缝隙流理论研究[J].安徽理工大学学报(自然科学版),2004,24(3): 40-42.

[4] JIA XIAOMENG, SUN XIHUAN, SONG JIAORONG. Effect of concentric annular gap flow on wall shear stress of stationary cylinder pipe vehicle under different reynolds numbers [J]. Math. probl. eng., 2020, 2020(1): 1-19.

[5] 原源,李永业,张乐元,等.管道车平稳运移时的环隙流速分布特性[J].水电能源科学,2023,41(2): 141-144.

[6] 全炳欣,孙西欢.管道水力输送中料筒起动流速的试验分析[J].太原理工大学学报,2007,38(5): 412-414,419.

[7] ZHAO Y, LI Y, SONG X. PIV measurement and proper orthogonal decomposition analysis of annular gap flow of a hydraulic machine [J]. Machines, 2022, 10(645):645.

## Numerical Simulation of Annulus Flow Field of a Pipeline Truck Under Different Loads when Starting Horizontal Bend

WANG Cheng, SUN Xi-huan, LI Yong-ye

(College of Hydro Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** In order to study the distribution of the annular gap flow field during the bend start of the pipeline vehicle under different loading conditions. Numerical simulation combined with physical model test verification was used to study the annular gap flow field during the horizontal bend start of duct trucks with different loads. The results show that the increase of load does not change the overall distribution of the gap flow field velocity, but only changes the magnitude of the gap flow field velocity; Under different loading conditions, the axial flow velocity of the gap flow field of the pipe vehicle in the horizontal bend has the law of increasing and then decreasing from the inner wall of the pipe to the outer wall of the pipe vehicle. The circumferential flow velocity is more uniformly distributed at the section of the pipe vehicle gap inflow port and the section in the vehicle, but the opposite distribution of flow velocity on both sides of the sealing cover appears at the section of the gap flow outlet. The radial flow velocity is more uniformly distributed as far away from the support body and the seal cover, and the flow velocity increases significantly at the support body in the slit flow outlet section of the pipeline vehicle. This study explains the reasons for the formation of annular gap flow field distribution law and obtains the flow velocity distribution law of the gap flow field when the pipe vehicle is started at the bend with different loads. While improving and enriching the theory of annular gap flow, it provides theoretical basis for the application of hydraulic conveying in cartridge loading pipeline.

**Key words:** pipeline vehicle; tube-contained raw material; ring gap flow field; numerical simulation