

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220894

# 管道车平稳运移时的环隙流速分布特性

原 源<sup>1</sup>, 李永业<sup>1</sup>, 张乐元<sup>2</sup>, 陈 润<sup>1</sup>, 赵一名<sup>1</sup>, 宋晓腾<sup>1</sup>, 鲁一凡<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学水利科学与工程学院, 山西 太原 030024; 2. 运城市河湖务管理中心, 山西 运城 044099)

**摘要:** 管道车平稳运移时环隙内水流流速分布特性关系着管道车与水流相互作用, 从而也会影响管道车的运动特性与管道内的水力特性。通过物理试验与理论分析的方法研究了管道车平稳运移时环隙内水流流速整体与局部分布特性, 对比了不同直径的管道车环隙内水流流速分布特性与输送效率之间的关系。结果表明, 管道车平稳运移时, 环隙进口断面处的流速最大, 其次为车中断面, 车后断面处的流速最小; 靠近管道车壁面处的流速沿程变化较大, 且流速大小与管道车速度有关, 靠近管壁处的流速沿程变化较小; 不同直径的管道车环隙水流流速分布情况影响着管道车的输送效率, 当环隙水流流速与管道内水流流速之比接近于1时, 管道车的输送效率最大。

**关键词:** 水力输送; 管道车; 平稳运移; 环隙流速; 输送效率

**中图分类号:** TV134.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)02-0141-04

## 1 引言

在第二十届全国水动力学研讨会上, 正式提出了筒装料管道水力输送作为一种新型的管道水力输送技术<sup>[1]</sup>, 该技术是对囊体管道水力输送技术<sup>[2-4]</sup>的改进, 通过在圆柱形囊体两侧分别安装辐射状支脚, 使囊体在运行过程中几乎与管道保持同心状态。由于这种改进过的囊体在管道中可以像汽车一样输送物料, 故称作管道车。当管道内的水流流经管道车时, 会形成区别于传统的环状缝隙流, 同时由于管道车运移时的轴向速度远大于液压原件, 因此环状缝隙内的流动情况也更复杂。对此, 李永业等<sup>[5]</sup>根据水力学理论分析了动边界环状缝隙内的流速分布, 并根据流体力学理论推导出环隙平均流速与管道车前后压降之间的关系式; 井元昊等<sup>[6]</sup>探究了环隙平均流速、管道车速度、管道内水流流速三者随雷诺数的变化规律, 并提出根据三者的大小关系来判别最佳输送雷诺数的方法; 张琪琦等<sup>[7]</sup>拟合出环隙的轴向流速和水力损失关于直径比的表达式, 发现直径比为0.6的管道车环隙内的水力损失最小; 贾晓萌等<sup>[8]</sup>通过数值模拟研究了管道车环隙流场流速分

布特性, 发现在车前断面环状缝隙流流速大于车中和车后断面。本文通过研究管道车平稳运移时环隙内的水流流速分布特性, 可进一步解释运行过程中管道车与环隙水流的相互作用, 通过分析不同直径的管道车环状缝隙内的水流流速分布与其各自输送效率之间的关系, 获得特定工况下输送效率最大的管道车所对应的直径, 从而为筒装料管道水力输送的工业应用提供一定的理论依据。

## 2 试验设计

### 2.1 管道车结构

管道车主要由料筒、密封盖、支撑体3部分组成, 料筒两侧各安装3个支撑体, 每侧支撑体间隔 $120^\circ$ , 支撑体与密封盖通过螺钉结合, 密封盖与料筒通过螺纹连接, 这3部分共同组成了管道车。由于支撑体的作用, 管道车在管道内平稳运移时几乎与管道保持同心运动状态, 当管道内的水流流经管道车时, 便会在料筒周围形成同心环状缝隙流。管道车结构示意图见图1。

### 2.2 试验系统

试验系统主要由动力与调节装置、投放接收装置、测试装置及试验管道组成<sup>[9]</sup>。其中动力装

收稿日期: 2022-05-02, 修回日期: 2022-05-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179116)

作者简介: 原源(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水力学及河流动力学, E-mail: sxauyuan@163.com

通讯作者: 李永业(1977-), 男, 博士、副教授、硕导, 研究方向为水力学及河流动力学, E-mail: liyongye@tyut.edu.cn



沿程逐渐发展,在车中断面处管道车壁面附近的流动分离区逐渐减小或消失,因此整体上水流流速有一定的减小,在车后断面处水流流速由于受到车后回流区的影响,因此比车中断面更小。②分析管轴线所在水平面右侧的测点,可看出车前断面处的流速最大值相对更靠近管道车壁面,靠近管道车近壁面区域的流速值较小,而管壁与管道车壁面中间测点的流速值基本相同,这也进一步验证了管道车壁面附近流动分离区的存在,车中断面处整体的流速梯度减小,且该断面处的流速最大值出现在靠近管壁位置,车后断面处整体上的流速梯度最小,流速最大值也出现在靠近管壁位置,同时车后断面处管道车壁面附近的流速梯度比车中断面的更大,这是由于该断面位于环隙出口,水流从管壁向管中心收缩使管道车壁面附近的流速值较小。

为比较环隙水流流速沿程分布情况,选取坐标为  $x=0.035、0.040、0.045$  m 的测点,3 个测点分别表示距管道车壁面 5、10、15 mm 的位置,分析直径  $d=60$  mm 的管道车关于 3 个测点的流速沿 7 个测试断面的变化,具体见图 5。

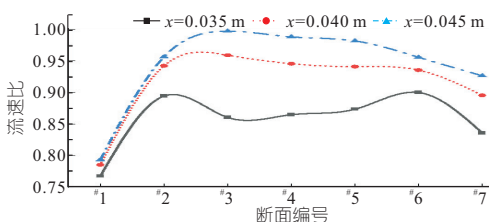


图 5 测点流速沿程变化

Fig. 5 Velocity changes along measuring points

由图 5 可看出,靠近管道车壁面处的测点的流速沿程变化较大,在车前、车后断面处均经历了较大的波动,这主要是由于该测点进出口处的流速受管道车壁面的影响较大,而另外两个测点由于距管道车壁面相对较远,因此沿程变化较平缓。同时,距管道车壁面越远的测点,流速比越大,说明环隙内靠近管壁水流流速值总体上大于管道车壁面附近的流速值。对于距管道车壁面不同距离的 3 个测点,在环状缝隙区域内 # 3~# 5 断面之间的流速能保持一定程度上的稳定,说明水流在

环隙车中断面附近发展较稳定,另外靠近管道车壁面附近的测点在 # 2、# 5 断面处出现极值,而另外 2 个测点未出现这种情况,这主要是由于环隙进出口处管道车壁面附近分别出现的流动分离和边界层分离<sup>[10]</sup>现象。

### 3.2 不同直径的管道车平稳运移时流速分布特性及输送效率

分析不同直径的管道车平稳运移时环隙水流流速分布特性,以车中断面为例,得到不同直径的管道车关于车中断面的整体流速分布情况,同样对管轴线所在水平面右侧的测点进行局部分析,得到不同直径管道车环隙车中断面流速的局部分布情况,为更直观展示,将每个测点流速值  $u_i$  与管道流体平均流速值  $u_p$  之比作为流速比进行无量纲化处理。不同直径管道车平稳运移时环隙车中断面流速分布情况见图 6。由图 6 可看出:①直径为 50、60 mm 的管道车环隙车中断面流速比基本均大于 1,直径为 70 mm 的管道车环隙车中断面的流速比约为 1,而直径为 80 mm 的管道车流速比基本小于 1,表明直径为 50、60 mm 的管道车平稳运移时环隙内水流流速整体上大于管道内水流流速值,此时环隙内的水流会对管道车产生沿水流方向的切应力,直径为 70 mm 的管道车平稳运移时环隙内水流流速与管道内水流流速值基本相同,此时环隙内水流流速、管道内水流流速与管道车速度基本相同,环隙水流于管道车之间的相互作用力很小,直径为 80 mm 的管道平稳运移时环隙内水流流速整体上小于管道内水流流速值,此时管道车速度大于管道内水流流速,又大于环隙内的水流流速,管道车此时的向前运动会受到环隙水流向后的切应力。②分析管轴线所在水平面右侧的测点,可看出直径为 50、60、70 mm 的管道车车壁面附近的流速比均小于 1,而除了管壁附近其他测点的流速比基本均大于 1,且流速最大值均出现在靠近管壁处,说明在该工况下,管道车速度均小于环隙水流流速的影响,环隙水流流速极值均出现在靠近管壁处,对于直径为 80 mm 的管道车,管道车壁面附近的流速最大且流

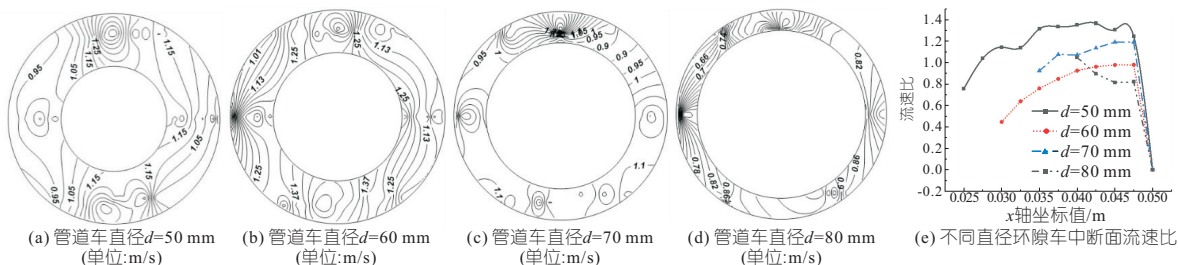


图 6 不同直径的管道车平稳运移时环隙车中断面流速分布情况

Fig. 6 Velocity distribution in the middle section of angular gap when pipeline vehicle with different diameters moves smoothly

速比大于 1, 环状缝隙流速从管道车车壁到管壁基本呈先降低再上升再降低的趋势, 说明当管道车速度大于管道内水流流速时, 环状缝隙流速极大值同样会在靠近管壁位置处出现。

由此可知, 不同直径管道车平稳运移时环隙内水流流速分布情况不同, 从而影响管道车运移时的速度及管道内的能耗, 故本文结合工程实际提出输送效率  $\eta$  的概念, 即在一定的输送距离下, 单位时间内产生单位能耗所能输送的总荷载, 定义其表达式为:

$$\eta = M / (tW) = Mv / (sW) \quad (1)$$

式中,  $M$  为输送的总荷载,  $M = 450 \text{ g}$ ;  $t$  为输送时间;  $W$  为能耗值, 可通过布置在测试管段前后两测压管的读数之差并根据伯努利方程得出;  $v$  为管道车速度, 可通过光电传感器测出;  $s$  为测试管段长度,  $s = 2 \text{ m}$ 。

根据试验所测得的能耗值和管道车速度计算出 4 种直径管道车的输送效率, 输送效率计算结果见表 1。

表 1 不同直径的管道车平稳运移时的输送效率

Tab. 1 Conveying efficiency of pipeline vehicle with different diameters when moving smoothly

管道车直径/mm	50	60	70	80
输送效率	0.146	0.157	0.172	0.161

由表 1 可看出, 随着管道车直径的增加, 输送效率先增大再减小, 管道车直径为 70 mm 时输送效率最大, 此时管道车速度、环隙水流流速、管道内水流流速三者最为接近, 管道内水流的前进速度与管道车几乎一致, 因此在这种情况下的能耗值最小, 而直径为 80 mm 的管道车速度的增加量不及输送能耗的增加量, 因此其输送效率较低, 直径为 50、60 mm 的管道车速度较小, 且环隙水流流经管道车时也会产生很大的能耗, 因此这两种直径管道车的输送效率更低。

## Characteristics of Annular Gap Velocity Distribution Under Pipeline Vehicle Moving Smoothly

YUAN Yuan<sup>1</sup>, LI Yong-ye<sup>1</sup>, ZHANG Le-yuan<sup>2</sup>, CHEN Run<sup>1</sup>, ZHAO Yi-ming<sup>1</sup>, SONG Xiao-teng<sup>1</sup>, LU Yi-fan<sup>1</sup>  
(1. College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;  
2. Yuncheng River and Lake Affairs Management Center, Yuncheng 044099, China)

**Abstract:** When the pipeline truck moves smoothly, the velocity distribution characteristics of the water flow in the annular gap are related to the interaction between the pipeline truck and the water flow, which will also affect the motion characteristics of the pipeline truck and the hydraulic characteristics in the pipeline. This paper studied the overall and local distribution characteristics of the water flow velocity in the annular gap when the pipeline car moves smoothly by means of physical experiments and theoretical analysis. The relationship between the distribution characteristics of the water flow velocity in the annular gap of the pipeline car with different diameters and the transmission efficiency were compared. The results show that when the pipeline car moves smoothly, the velocity at the inlet section of the annulus is the largest, followed by the middle section of the car, and the velocity at the rear section of the car is the smallest; The flow velocity near the wall of the pipeline truck changes greatly along the way, and the flow velocity near the pipe wall changes less along the process; The distribution of the water flow velocity in the annular gap of the pipeline car with different diameters affects the transportation efficiency of the pipeline car. When the ratio of the water flow velocity in the annular gap to the water flow velocity in the pipeline is close to 1, the transportation efficiency of the pipeline car is the highest.

**Key words:** hydraulic conveying; pipeline car; smooth movement; annular gap velocity; conveying efficiency

## 4 结论

a. 管道车平稳运移时, 环隙车前断面处的流速最大, 其次为车中断面, 车后断面处的流速最小。

b. 不同直径的管道车在环隙靠近管壁处均会出现流速极大值, 而在管道车壁面附近的流速与管道车速度有关。

c. 同一工况下, 不同直径的管道车平稳运移时环隙内的水流流速分布不同, 当环隙内的水流流速与管道车速度、管道内水流流速最接近时, 输送效率最大。

### 参考文献:

- [1] 孙西欢, 李永业, 阎庆斌. 筒装料管道水力输送管道车起动条件的试验研究[C]//第二届全国水动力学研讨会文集, 2007:425-431.
- [2] BROWN R A S. Capsule pipeline research at the Alberta Research Council, 1958-1978[J]. Pipelines, 1987, 6:75-82.
- [3] LIU H. Hydraulic capsule pipeline[J]. Pipelines, 1981, 1:11-23.
- [4] LIU H. Pipeline engineering[M]. USA: CRC press, 2017.
- [5] 李永业, 孙西欢, 李飞, 等. 动边界同心环状缝隙流研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3):230-234.
- [6] 井元昊, 郭向红, 孙西欢, 等. 管道车环状缝隙流水力特性[J]. 水电能源科学, 2014, 32(7):151-155.
- [7] 张琪琦, 孙西欢, 李永业. 圆柱体绕流环隙流场轴向流速及水力损失试验研究[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(4):51-54, 58.
- [8] 贾晓萌, 孙西欢, 李永业. 不同雷诺数条件下静止管道车环状缝隙流场数值模拟[J]. 振动与冲击, 2021, 40(3):10-18.
- [9] 童学卫, 李永业, 孙西欢. 筒装料管道水力输送试验系统设计研究[J]. 山西水利, 2008(2):42-43.
- [10] 张春晋, 孙西欢, 李永业, 等. 基于流固耦合的管道车振动运移水力特性数值模拟与试验[J]. 振动与冲击, 2019, 38(5):251-258.