

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221009

有压管道内管道车稳定运行时下游水力特性研究

鲁一凡, 赵一名, 宋晓腾, 强懿鹏

(太原理工大学水利科学与工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 管道列车水力输送作为一种高效、环保、节能的物料运输方式, 具有较广阔的应用前景。当管道车在管内静止时可将其视为绕交汇式圆柱系结构, 而水流经过该结构后会产生漩涡, 从而造成部分能量损失。运用数值模拟、模型试验和理论分析法研究管道车绕流流场下游的水力特性与流场稳定后的空间涡结构。结果表明, 不同直径的管道车下游流场的近场区域可分为回流区与射流区, 随着向管道车下游距离增加, 断面平均流速呈先略微下降再升高的趋势, 在1倍管道车特征长度的距离时恢复接近管道来流的平均速度; 随着下游远场区域距离的增加, 断面平均流速的波动幅值逐渐减小, 流场逐渐趋于稳定; 流场内空间涡环结构高度破碎; 且涡结构在靠近环形缝隙一侧较多, 靠近管轴线一侧较少。

关键词: 囊体输送; 管道水力输送; 大涡模拟; 尾迹流场

中图分类号: TV134.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)03-0091-04

1 引言

管道列车水力输送是一种在有压管道内利用管道流场推动作为复杂圆柱系料筒进行输送的清洁、高效的物料运输方式, 从水力学及流体力学角度来说属于有压管道内的交汇柱系绕流问题。交汇式圆柱系绕流是一种具有复杂几何结构的钝体绕流。目前, 关于钝体绕流的研究成果较丰富, 如乔永亮等^[1]数值模拟了空间内圆柱绕流尾迹流场的速度特性, 认为 LES 类湍流模型对于空间内圆柱绕流问题的适用性较好; 杨彩虹等^[2]认为采用 LES 方法模拟圆柱绕流的尾迹流场时瞬态现象更为明显; 王智慧等^[3]使用动力学模态分解识别圆柱尾迹流场相干结构; 刘娟等^[4]发现阵列圆柱系的尾迹一定程度上存在相互干扰, 且仍在下游发展为涡街; TAICHI IGARASHI 等^[5]发现圆柱表面开孔有利于抑制尾迹内涡旋的产生, 当 $Re = 1.0 \times 10^5$ 时尾迹内涡旋破碎; PRASANTH T K 等^[6]研究了串列双圆柱系在层流流场中的绕流状态, 结果发现上游圆柱体的绕流现象与单圆柱绕流相似, 但下游圆柱明显受上游圆柱尾迹中不断脱落涡旋影响, 产生了较明显的涡激振动现象。目前, 已对不同形式圆柱运用不同研究方法进行

了大量研究, 但针对绕交汇式圆柱系这一结构所产生的绕流现象研究较少。因此, 本文通过 LES 湍流模型对管道车在运动状态下的尾迹流场进行研究, 以期工程实践及管道列车的推广应用提供参考。

2 研究方法

2.1 控制方程

为模拟湍流情况下的涡量场分布, 基于 ANSYS FLUENT 软件, 采用 LES-WALE 方法与盒式过滤器模拟有压管道内三维不可压缩流动。其中, 连续性方程为:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

动量方程为:

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \tau_{ij}^s}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \tag{2}$$

其中 $\tau_{ij}^s = -\rho(\overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j)$

式中, \bar{u}_i, \bar{u}_j 均为滤波后的速度分量; x_i, x_j 均为坐标分量; ρ 为密度; τ_{ij}^s 为亚网格的雷诺应力; \bar{p} 为滤波后的压力; μ 为动力粘滞系数。

收稿日期: 2022-05-14, 修回日期: 2022-06-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179116)

作者简介: 鲁一凡(1991-), 男, 博士研究生, 研究方向为水力学及河流动力学, E-mail: ultimate3333373@126.com

2.2 模型与特征断面

管道车主要构成部件为中空圆柱体料筒和 3 个类圆柱体支脚,支脚关于轴心 120° 对称安装,管道车尺寸 $L \times D$ (圆柱体料筒长 \times 圆柱体料筒直径) 分别为 $100 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 、 $100 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 、 $100 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 。管道为长 $2\,200 \text{ mm}$ 内径 100 mm 的水平直管,管道来流量为 $60 \text{ m}^3/\text{h}$ 。图 1(a) 为管道车及其所构成的交汇柱系。定义管道车下游距离管道车 1 倍料筒长度以内的区域为近场区域;1~2 倍料筒长度区域为远场区域,选择近场区域与远场区域沿流向中部的横断面作为特征断面。

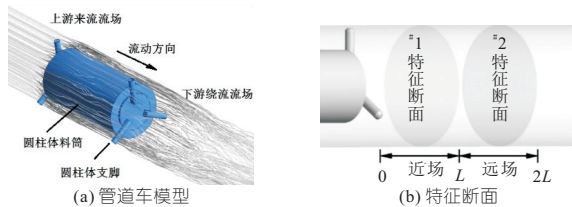


图 1 模型与特征断面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the model and sections

2.3 网格划分与边界条件

分别对尺寸为 2、3、4、5 mm 的四种网格进行模拟,综合模拟结果和计算时间,最终选取全局网格最大尺寸为 2 mm,并对交汇式柱系壁面网单独加密后进行计算,第一层网格高度 $Y+$ 小于 5,满足湍流模型对网格的要求。入口边界使用速度入口条件,根据水流来流速度而定。流量 $60 \text{ m}^3/\text{h}$,入口特征流速约为 2.122 m/s 。出口边界为压力出口,自由出流,故压力为 0 Pa 。管壁及交汇式圆柱系为静止墙体,其边界条件为无滑移壁面边界。采用 SIMPLE 算法进行瞬态计算,各项收敛精度设置为 $0.000\,1$ 。

2.4 模型验证

试验系统(图 2)主要包括动力系统、调节系统和测试系统三部分。动力系统主要为离心泵,调节系统包括电磁流量计和闸阀,测试系统包括 LDV 激光流速仪等。试验管路长 24.7 m ,由内径为 100 mm 的透明有机玻璃管构成。经计算,数值模拟值和试验值符合较好,两者之间最大相对误差不超过 7.5% ,证明了采用数值模拟方法的可行性。

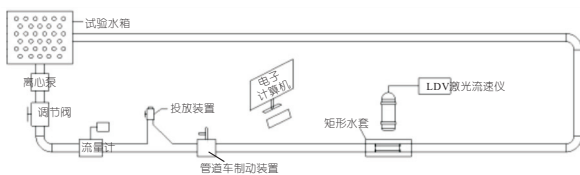


图 2 试验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test system

3 结果与分析

3.1 车体近场流速特性

图 3 为管道车下游的 #1 特征断面的流速分布。由图 3 可知,总体来说不同直径的管道车下游流场的近场区域可分为回流区与射流区两部分,其中回流区的速度较小,甚至产生了负向速度;射流区由于管道车的环隙流场到下游流场时,环隙内的水流速度较大,远高于管道内的水流平均速度(2.122 m/s)。在 $D=60 \text{ mm}$ 时,#1 特征断面内射流最大流速为 4.732 m/s ;当直径增加到 70 mm 时,最大速度为 5.178 m/s ; $D=80 \text{ mm}$ 时最大流速达 5.449 m/s 。但在射流最大速度增大的同时,在近场区域内由于上游环隙入口宽度缩小,射流区域的宽度未明显减小,#1 特征断面内射流区域均近似环形。

管道车下游近场区域内的断面平均流速以管道来流平均流速无量纲化结果表示,见图 3(d)。紧贴管道车下游的断面平均流速仅为管道平均流速的 $1/2$,说明管道车的存在使管道来流损失了大约一半动能。随着向管道车下游距离增加,断面平均流速呈先略微下降再升高的趋势,在一倍管道车特征长度的距离时恢复接近管道来流的平均速度。且随着管道车直径的增加,近场区域内平均流速达到的最小值有所下降且最小值出现的位置有所延后,说明下游流场动能损失是在管道车下游达到最大值,管道来流的恢复速率 $D=80 \text{ mm} > D=70 \text{ mm} > D=60 \text{ mm}$ 。

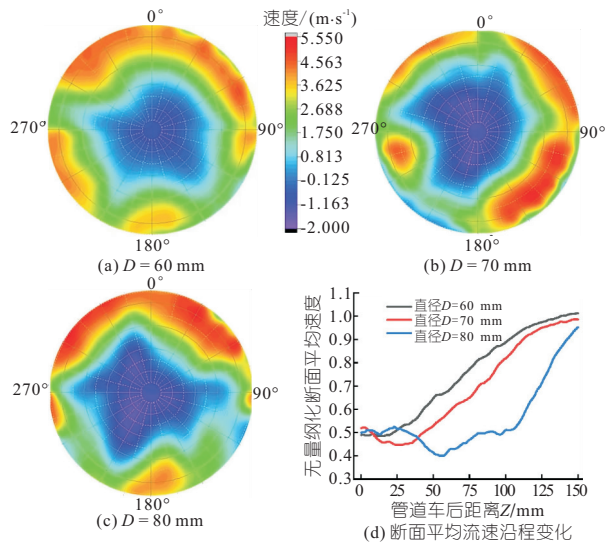


图 3 近场流速分布

Fig. 3 Contour of velocity of near-field

3.2 车体远场流速特性

图 4 为管道车下游远场区域内 #2 特征断面

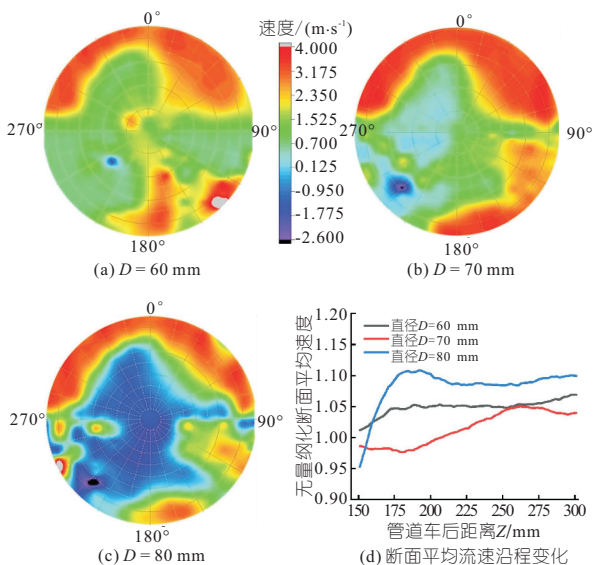


图 4 远场流速分布

Fig. 4 Contour of velocity of far-field

的流速分布。由图 4 可知,相对于近场区域内^{#1}特征断面的流速分布,在射流区远场区与近场区有一定相似性,均存在速度较大的射流区分布在断面内靠近管壁一侧;但回流区却有较大差别,主要体现于^{#2}特征断面靠近管轴线的一侧已无负向速度。^{#2}特征断面内,射流区的速度值最大已不超过 4 m/s,低于^{#1}特征断面的最大速度,说明环隙水流向下游射流的过程中其初始射流动能不断消耗,且射流区在^{#2}特征断面内相比^{#1}特征断面内已有一定程度扩大,但整体不再近似圆环形,在周向 90°~270°的区域内射流区有大范围中断。

管道车下游远场区域内的断面平均流速以管道来流平均流速无量纲化的结果表示,见图 4 (d)。远场区域内的断面平均流速沿流程在管道平均流速上下浮动,变化剧烈程度为 $D = 80 \text{ mm} > D = 70 \text{ mm} > D = 60 \text{ mm}$,说明管道车直径增大大会造成下游远场区平均流速的波动幅度增加。随着下游远场区距离的增加,断面平均流速的波动幅值渐渐减小,说明在 1~2 倍管道车特征长度之内,流场逐渐趋于稳定。

3.3 稳定后的流场涡结构

当流场逐渐发展稳定后,以 Q -判据识别流场中的涡结构, Q -判据基于 Euler 的流场观点,具有较好的伽利略不变性(即坐标改变对所识别的涡结构没有影响),其原理为:

$$Q = (\|\Delta \mathbf{V} - \Delta \mathbf{V}^T\|_F^2 - \|\Delta \mathbf{V} + \Delta \mathbf{V}^T\|_F^2) / 2 \quad (3)$$

式中, Q 为无量纲涡强度数值; $\Delta \mathbf{V}$ 为三维速度张量; $\|\cdot\|_F^2$ 为范数。

经过对流场的涡结构识别,得到绕流流场下

游紧贴料筒后方的空间涡结构,该结构对应的无量纲强度 $Q = 10\ 000$ 。由图 5 可知,料筒在管道内绕流下游流场的尾迹涡结构总体具有涡环特征,这与流速结构特征相符合。由于环形缝隙射流造成下游流场中流体微团靠近环隙处的线速度较大,靠近管道轴线一侧的线速度较小,于是靠近环隙一侧的流体微团有了较大速度剪切;且在该流场的子午面内均具有这种靠近环隙一侧剪切较强的趋势,因此在整个流场的周向形成了类似涡环的涡结构。在该流场中的涡环结构表现得较为破碎,其原因一方面在于料筒环形缝隙的射流有料筒端面三个支脚的干扰;另一方面在于此时的流场湍动程度较高,涡环很难保持一种较固定形状,沿流向涡环的破碎程度越来越高。

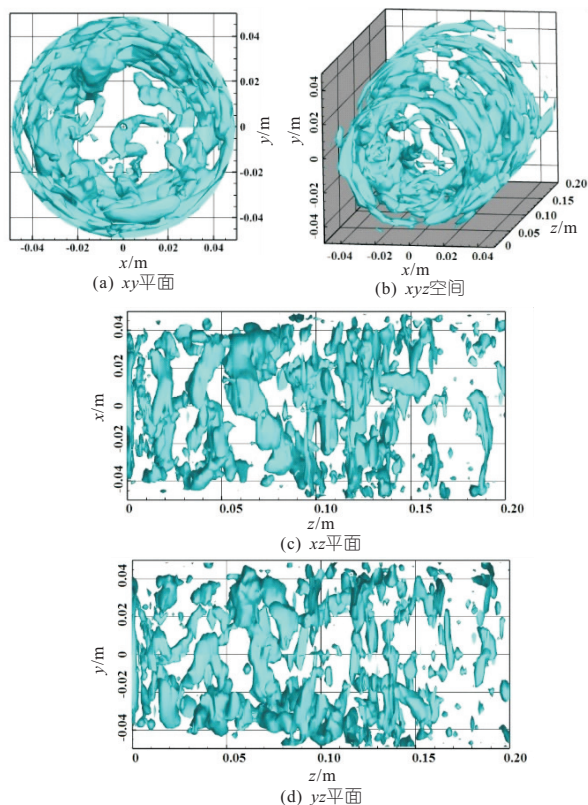


图 5 空间涡结构

Fig. 5 Vortex structures of space

4 结论

a. 不同直径的管道车下游流场的近场区域可分为回流区与射流区两部分,其中回流区产生了负向速度;紧贴管道车下游的断面平均流速仅为管道平均流速的 1/2,随着向管道车下游距离增加,断面平均流速呈先略微下降再升高的趋势,在 1 倍管道车特征长度的距离时恢复接近管道来流的平均速度。

b. 在射流区远场区存在速度较大的射流区分布在断面内靠近管壁的一侧,且范围较近场区

的射流区范围大;远场区内的断面平均流速沿流程在管道平均流速上下浮动,变化剧烈程度 $D = 80 \text{ mm} > D = 70 \text{ mm} > D = 60 \text{ mm}$;随着下游远场区距离的增加,断面平均流速的波动幅值渐渐减小,流场逐渐趋于稳定。

c. 管道车下游流场的空间涡结构具有类似涡环特征,但一方面由于管道车料筒端面支脚的影响,另一方面由于流场的高程度湍动,其空间涡环结构高度破碎;且涡结构在靠近环形缝隙一侧较多,靠近管轴线一侧涡结构较少。

参考文献:

[1] 乔永亮,桂洪斌,刘祥鑫. 三维圆柱绕流数值模拟湍流方法的选择[J]. 水利水电工程学报, 2016(3): 119-125.

[2] 杨彩虹,康庄,张橙. 基于改进 SPH 方法的圆柱绕流尾迹特性研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(3): 41-45, 68.

[3] 王智慧,翟红岩,李庆领,等. 椭圆柱绕流尾迹的 PIV 测量及 DMD 分析[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2020, 41(1): 91-96.

[4] 刘娟,董启明. 大涡模拟方法下的四圆柱绕流数值模拟[J]. 低温建筑技术, 2013(12): 86-87.

[5] TAICHI IGARASHI, HIROSHI NAITO, KOJI FUKAGATA. Direct numerical simulation of flow around a circular cylinder controlled using plasma actuators[J]. Mathematical problems in engineering, 2014: 591807.

[6] PRASANTH T K, MITTAL S. Flow-induced oscillation of two circular cylinders in tandem arrangement at low Re [J]. Journal of fluids and structures, 2009, 25(6): 1029-1048.

Downstream Hydraulic Characteristics of Stable Moving Wheeled Capsule in Pressured Pipeline

LU Yi-fan, ZHAO Yi-ming, SONG Xiao-teng, QIANG Yi-peng

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

Abstract: As an efficient, environmental and energy-saving transportation technology, the wheeled capsule transportation has promising application prospects. When the pipeline carriage was stationary in the pipe, it could be regarded as a crossing-cylinder structure. When water flowed around the structure, the vortices existed, which would cause energy loss. Therefore, the hydraulic characteristics at the downstream of the flow field around a pipeline car and the spatial vortices structure after the stabilized flow field were studied by numerical simulation, model test and theoretical analysis. The results show that the near-field areas of the downstream flow field of wheeled capsule with different diameters could be divided into the reflux zone and the jet zone. As the distance rose, the section-averaged velocity had a tendency of declining then rising in the near-field, and recovered the section-averaged velocity of pipe at the distance of the length of capsule. And in far-field, with the distance rose, the fluctuation of section-averaged velocity was gradually decreased, and the flow became stable. The eddy ring structures in the field were highly fractured, eddy structures were more on the side near the annular gap and less on the side near the pipe axis.

Key words: wheeled capsule transportation; hydraulic pipeline transportation; LES simulation; wake flow field

(上接第 135 页)

Research on Characteristics and Prevention of Dangerous Rock Collapse Based on Numerical Simulation

YANG Lan-yao^{1,2,3}, YI Wu^{1,2,3}, HUANG Xiao-hu^{1,2,3}, LI Na⁴

(1. National Field Observation and Research Station of Landslides in Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River, Yichang 443002, China; 2. Collaborative Innovation Center for Geo-Hazards and Eco-Environment in Three Gorges Area, Yichang 443002, China; 3. Hubei Key laboratory of Disaster Prevention and Reduction(China Three Gorges University), Yichang 443002, China; 4. Henan Vocational University of Science and Technology, Zhoukou 466000, China)

Abstract: Aiming at the collapse and failure of high dangerous rock in Zhaojiaya, Xingshan County, numerical simulation methods were used to simulate the stability, evolution law and movement characteristics of the regional dangerous rock mass, so as to obtain the movement track, bounce height and impact energy of the collapsed rock. The results show that the Zhaojiaya dangerous rock has good stability under natural conditions. Under continuous rainfall or rainstorm, the fissure water gradually permeates, and there is the possibility of collapse and failure of the main control structural plane. After the collapse and destruction of the dangerous rock, most of the fallen rock will stay on the slope, and a few of the fallen rock will stop on the road at the foot of the slope after the collision and rebound. Combined with the actual situation of the site and RocFall simulation, the governance measures of "danger clearing + slope leveling + passive protection net" were proposed. The research results can provide reference for similar disaster control projects of high dangerous rock collapse.

Key words: dangerous rock collapse; numerical simulation; stability analysis; motion characteristics; prevention and control engineering