

# 基于 FLOW-3D 的筒装料管道水力输送数值模拟

李永业, 孙西欢, 许 飞

(太原理工大学 水利科学与工程学院, 太原 030024)

**摘 要** 为合理设计筒装料管道水力输送技术, 本文根据筒装料管道水力输送的水力特性, 建立了筒装料管道水力输送数学模型, 并采用 FLOW-3D 软件对该数学模型进行了数值求解, 同时与试验结果进行了比较, 发现筒装料管道水力输送的压力场和流速场的实测值与模型计算值吻合较好, 说明所建数学模型是正确的, 采用该软件求解是可行的, 可为该技术的工程应用提供理论依据。

**关键词** 筒装料; 管道; 水力输送; 数值模拟

## Numerical simulation on the piped hydraulic transportation of tube-contained raw material based on FLOW-3D

LI Yong-ye, SUN Xi-huan, XU Fei

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

**Abstract** In order to design the piped hydraulic transportation technique of tube-contained raw material reasonably, mathematical model on the piped hydraulic transportation of tube-contained raw material was established based on the hydraulic characteristics of the piped hydraulic transportation of tube-contained raw material in the paper. The mathematical model was solved by FLOW-3D and simulated values were compared with the experimental values. The results find simulated values and experimental values of the pressure field and flow field on the piped hydraulic transportation of tube-contained raw material are in substantial agreement. These show the mathematical model is right and the solve is feasible by the software. These will provide theoretical reference for the technical application of the technique.

**Keywords** tube-contained raw material; pipe; hydraulic transportation; numerical simulation

## 1 引言

基于传统运输工具存在的能耗大和环境污染问题<sup>[1-2]</sup>, 提出了筒装料管道水力输送技术<sup>[3]</sup>, 作为对现有运输体系的完善和补充。筒装料管道水力输送最大的优点是不仅经济实用, 而且将节能与环保有效的结合起来, 它主要是基于流体力学原理, 依靠水流的作用来推动管道车运动, 以达到输送物料的目的<sup>[4-6]</sup>。由于管道车为圆柱状且在管道中是运动的, 从而使所研究问题变成了圆柱绕流问题, 增加了试验的难度与复杂性。数值模拟作为研究问题的一种手段<sup>[7-8]</sup>, 为解决此类问题提供了一种切实可行的方法。对筒装料管道水力输送的水力特性进行数值模拟研究, 将有助于准确地掌握筒装料管道水力输送的流场及压力变化规律, 从而为合理确定筒装料管道水力输送的技术要素及准确评价其输送效果打下坚实的理论基础。本文将利用 Flow-3D 软件对管道车在稳定运行阶段时的水力特性进行数值模拟研究。模拟管道车结构  $L \times d = 150\text{mm} \times 60\text{mm}$ ; 输送流量  $Q_0 = 40\text{m}^3/\text{h}$  和  $Q_0 = 60\text{m}^3/\text{h}$ ; 管道车质量  $M = 1500\text{g}$ 。

## 2 筒装料管道水力输送数学模型

### 2.1 控制方程

对不可压缩粘性流体, 在直角坐标系下, 采用 RNG 方法应用于 Navier-Stokes 方程可得到如下控制方

收稿日期: 2010-09-08

资助项目: 国家自然科学基金 (51109155, 51179116)

作者简介: 李永业 (1977-), 男, 山西临猗人, 博士, 副教授, 研究方向: 工业水力学, E-mail: liyongye@tyut.edu.cn; 通讯作者: 孙西欢 (1960-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 工业水力学, E-mail: sunxihuan@tyut.edu.cn.

程.

连续性方程:

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

动量方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial u_j}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) \quad (2)$$

式中,  $u_i$  为流体沿  $x_i$  方向的速度分量 (三维情况下  $i = 1, 2, 3$ ); 其他符号同前.

## 2.2 边界条件和初始条件

进口和出口边界采用流量进出口边界条件; 壁面边界采用无滑移壁面条件. 初始条件: 输入初始流量  $Q_0$ 、管道水流的初始压力  $p_0$  和管道车速度  $v_0$ .

## 3 模型建立及网格划分

### 3.1 模型建立

(1) 管道的选取: 选取模拟管道长度  $l = 120\text{cm}$ , 其中用于计算的管段长度  $50\text{cm}$ . 管道半径  $R = 5\text{cm}$ .

(2) 管道车的构建: 车长  $L = 15\text{cm}$ , 管道车半径  $r = 3\text{cm}$ . 管道车质量  $M$  为  $1500\text{g}$ . 模拟构建的管道车模型如图 1 所示.

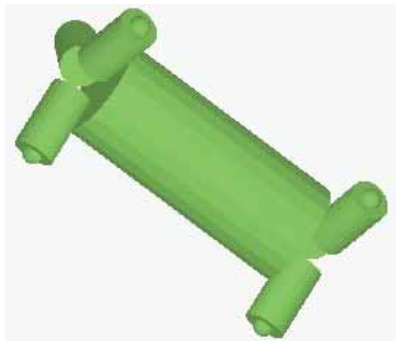


图 1 管道车模型

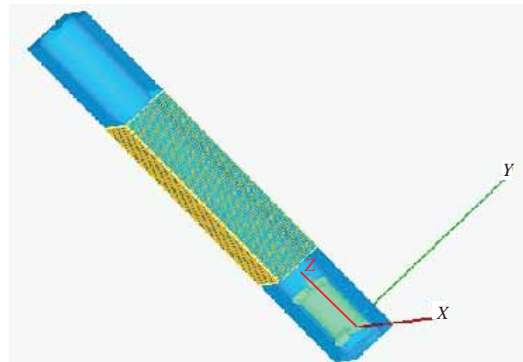


图 2 模拟管段的网格划分示意图

(3) 输入初始进口流量: 一种工况初始进口流量  $Q_0 = 40\text{m}^3/\text{h}$ ; 另一种工况初始进口流量  $Q_0 = 60\text{m}^3/\text{h}$ .

(4) 输入水流初始压力: 对于流量  $Q_0 = 40\text{m}^3/\text{h}$  工况, 水流初始压力  $p_0 = 1.03 \times 10^4\text{Pa}$ ; 对于流量  $Q_0 = 60\text{m}^3/\text{h}$  工况, 水流初始压力  $p_0 = 1.63 \times 10^4\text{Pa}$ . 两种工况的水流初始压力值都由试验得出.

(5) 输入管道车速度: 对于流量  $Q_0 = 40\text{m}^3/\text{h}$  工况, 管道车速度  $v_0 = 0.612\text{m/s}$ ; 对于流量  $Q_0 = 60\text{m}^3/\text{h}$  工况, 管道车速度  $v_0 = 1.273\text{m/s}$ . 两种工况的管道车速度都由试验得出.

为方便模型建立, 取重力加速度方向为  $X$  轴负方向, 将上述参数及其它相关参数输入, 建立模型.

### 3.2 网格划分

对所模拟的计算管段进行笛卡尔坐标系下网格划分, 三个方向的网格尺寸均为  $2\text{mm}$ , 则  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向上共划分了  $60 \times 60 \times 250 = 90$  万个网格. 具体网格划分如图 2 所示.

## 4 模型求解结果及试验验证

### 4.1 压力分布模拟与验证

结构为  $L \times d = 150\text{mm} \times 60\text{mm}$  管道车在流量  $Q_0 = 40\text{m}^3/\text{h}$  和  $Q_0 = 60\text{m}^3/\text{h}$  时, 运行于计算管段前后以及计算管段中间位置时沿水流方向管壁处的压力分布如图 3 所示.

从图中可以看出, 1) 模拟值与试验值基本一致, 最大相对误差不超过  $8\%$ , 说明该模型求解此类问题是可行的. 2) 在管道车进入计算区域之前, 区域内水流受车体运动影响较小, 压力曲线近似一条斜线, 其压力降主要由沿程水头损失所致. 3) 在管道车进入计算管段中间位置时, 当水流绕过管道车时会在计算管段内产生负压且出现两处压力转折点, 其原因主要是当水流绕过管道车时, 边界层内的流动从物面分离出来, 在管道车后端面形成尾涡区, 产生负压, 而由于管道车是运动的, 使得管道车的前端面受涡体的影响也形成负压. 同时由于管道车的存在使得过水断面的面积突然减小和扩大, 引起流线收缩和扩散, 都会损失一部分能量. 图中

两处压力转折点, 一处发生在管道车车身尾部的 1/3 处, 而另一处发生在管道车车身后的区域. 正是由于管道车前后端面形成的压力差, 作为管道车运动的动力来推动管道车向前运动, 以达到输送物料的目的. 4) 在管道车驶出计算区域之后, 计算管段内的压力分布整体沿程下降, 但与之之前比较都有所上升, 只是上升幅度不同. 这主要是由于压力分布与距离管道车的远近有关, 离管道车越远, 说明管道车经过该断面的时间较早, 管道车对水流的影响就较弱, 使得该断面的压力上升幅度较大, 计算管段出口附近由于离管道车较近, 管道车对水流的影响较强, 使得该区域的压力较之前上升幅度较小.

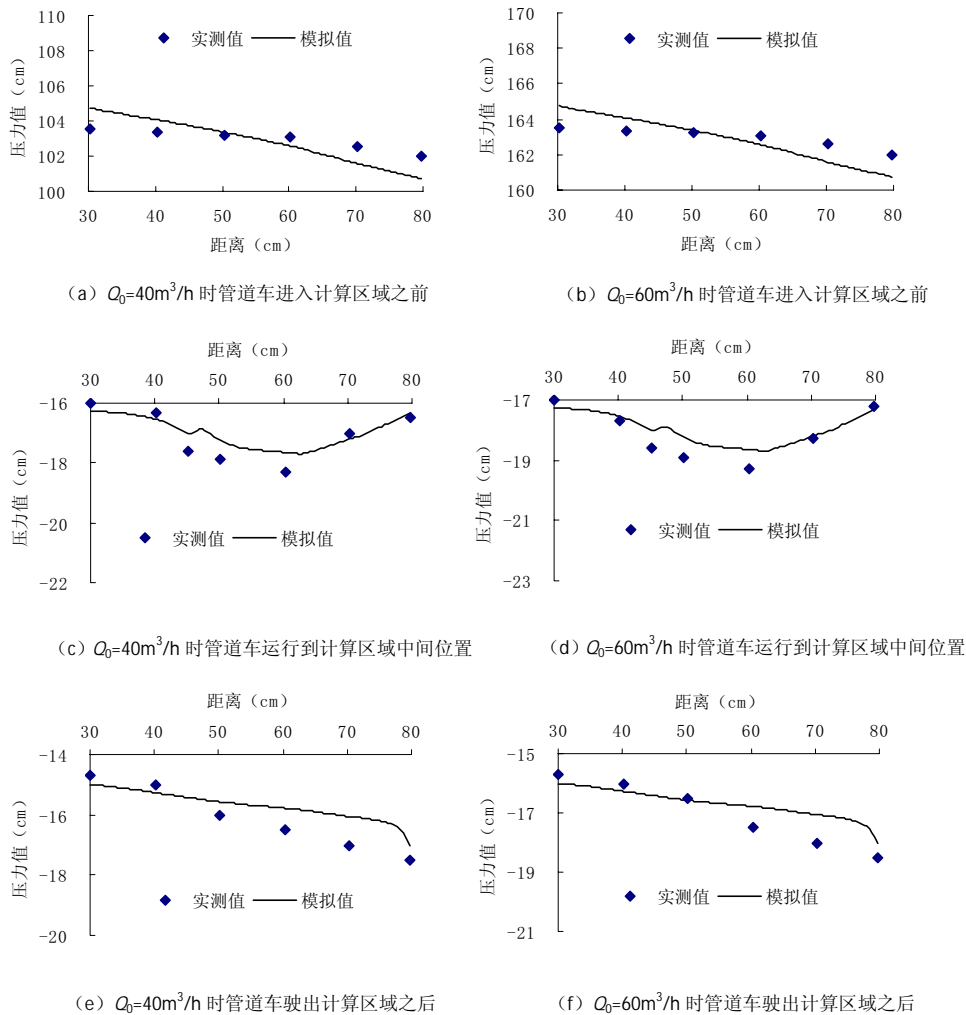


图 3 不同流量下管道车运动到计算区域不同位置处的压力分布对照图

#### 4.2 流速分布模拟与验证

结构为  $L \times d = 150\text{mm} \times 60\text{mm}$  的管道车在流量  $Q_0 = 40\text{m}^3/\text{h}$  和  $Q_0 = 60\text{m}^3/\text{h}$  时, 运行到计算管段区域前后以及计算管段区域中间位置时, 该断面管道中心水流的轴向速度分布如图 4 所示.

从图中可以看出: 1) 模拟值与试验值基本一致, 最大相对误差不超过 8.6%. 2) 在管道车进入计算区域之前, 区域内水流受车体运动影响较小, 断面水流流速基本服从紊流对数分布. 3) 在管道车进入计算管段中间位置时, 由于管道车的存在使得在管道车的尾部形成尾涡区, 产生负压, 改变了管道水流原有的压力分布, 从而影响其流速分布; 同时过水断面面积的减小, 也使得断面流速增大. 图中可以看出管道车运行到中间位置时, 该断面缝隙流的分布特点, 也可近似地认为其呈现对数分布, 但其最大值并不在管道车与管壁的中间位置, 而是发生在距管壁 0.75cm 处. 4) 在管道车驶出计算区域之后, 断面水流流速分布基本呈对数分布, 但其流速较管道车进入计算区域之前要大, 这主要是由于管道车的作用, 使得水流恢复到原状还需要一段时间.

下面以结构为  $L \times d = 150\text{mm} \times 60\text{mm}$  的管道车在流量  $Q_0 = 40\text{m}^3/\text{h}$  时的运动工况为例, 简要阐述管道车在运动过程中各断面在  $Z$  方向上的流速分布情况. 对应图 4(c) 中的  $X$ - $Y$ 、 $Y$ - $Z$ 、 $X$ - $Z$  截面的二维  $Z$  方向上的流速分布如图 5 所示.

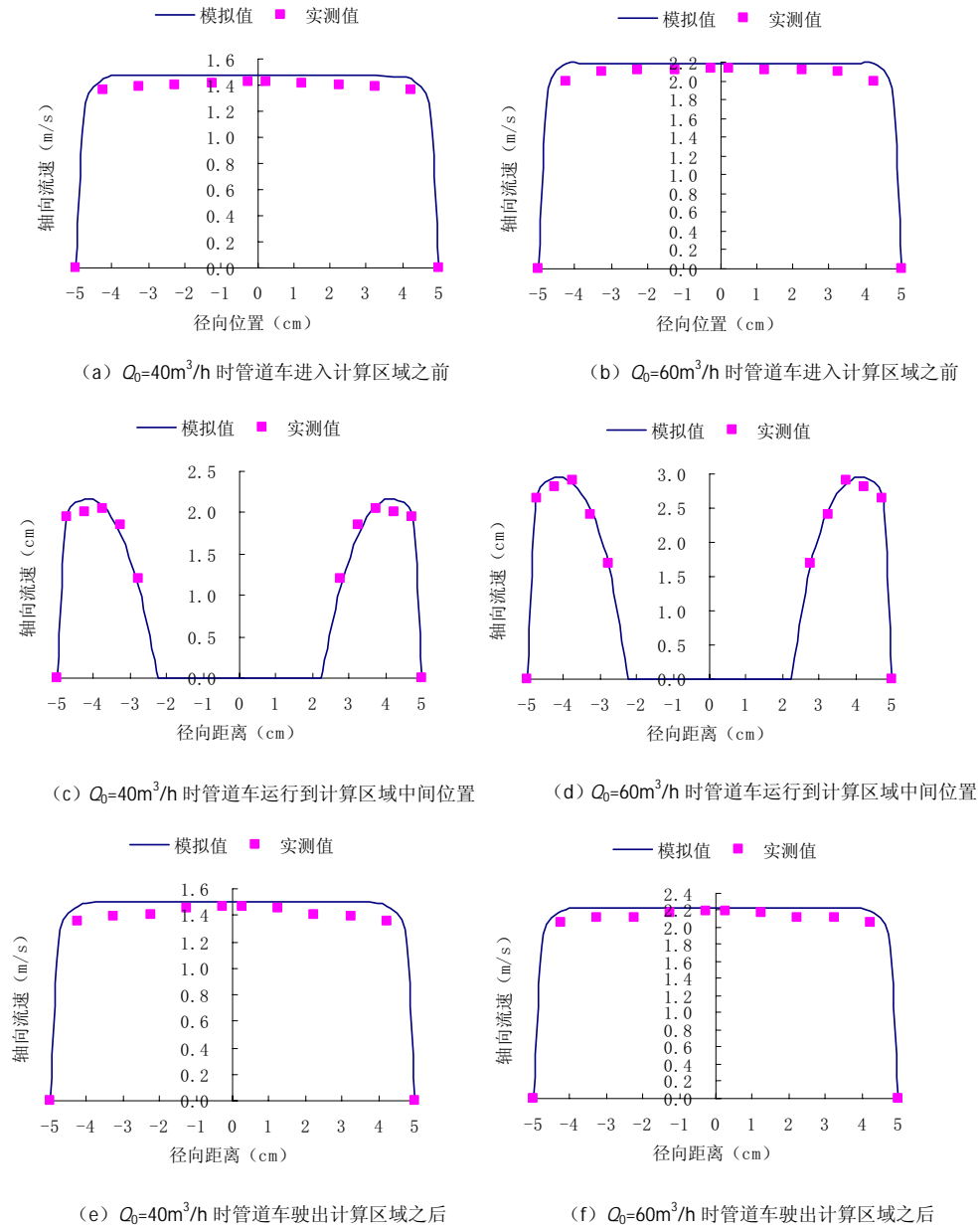


图 4 不同流量下管道车运动到计算区域不同位置处的该断面流速分布对照图

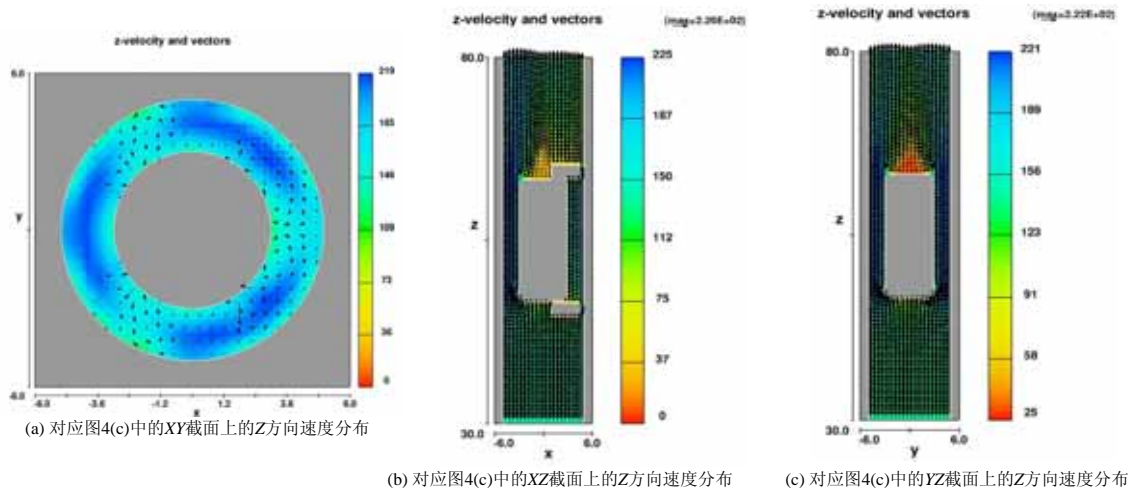


图 5 模拟管段内水流流速分布

通过观察图 5 中的三幅二维图片, 可以更加清晰、直观地观察到管道车驶过特定断面时, 附近区域内沿各断面  $Z$  方向水流流速的分布情况.

图 5(a) 中流速较小的地方为前后支脚中间部位, 中间阴影部分为车体; 图 5(b) 和图 5(c) 中的流速分布与图 4 中的各图解释相同, 在此不再赘述.

## 5 结语

数值模拟作为研究问题的一种手段, 为解决复杂问题提供了一种快捷、简便、可行的方法. 利用 FLOW-3D 软件对筒装料管道水力输送的压力场和流速场进行了数值模拟研究, 并与试验结果进行了对比分析. 结果表明模拟值与试验值比较吻合, 相对误差较小. 说明该软件用来模拟筒装料管道水力输送的水力特性是可行的. 本文的研究成果对该技术的推广应用具有重要的参考价值.

## 参考文献

- [1] 王建文. 高岭土露天矿技改设计中运输系统的选择 [J]. 矿冶, 2003, 12(3): 11-15.  
Wang J W. Selection of transport system in plan of technological transformation of kaolin opencut[J]. Mining & Metallurgy, 2003, 12(3): 11-15.
- [2] 石悦. 未来交通运输工具——真空管道运输系统的构想与展望 [J]. 内蒙古公路与运输, 2008(5): 44-48.  
Shi Y. Future transport tool — Evacuated pipeline transport system[J]. Highways & Transportation in Inner Mongolia, 2008(5): 44-48.
- [3] 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 20 届全国水动力学研讨会论文集, 2007: 425-431.  
Sun X H, Li Y Y, Yan Q F. Experimental study on starting conditions of the hydraulic transportation on the piped carriage[C]// Proceedings of the 20th National Conference on Hydrodynamics, 2007: 425-431.
- [4] 李永业, 孙西欢, 延耀兴. 管道车不同荷重时筒装料管道水力输送特性 [J]. 农业机械学报, 2008, 39(12): 93-96.  
Li Y Y, Sun X H, Yan Y X. Hydraulic characteristics of tube-contained raw material hydraulic transportation under different loads on the piped carriage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(12): 93-96.
- [5] 李永业, 孙西欢, 阎庆斌, 等. 不同导流条安放角条件下筒装料管道水力输送试验研究 [J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2008, 23(1): 86-89.  
Li Y Y, Sun X H, Yan Q F, et al. Experimental research on the piped hydraulic transportation with the different diversion angle[J]. Journal of Hydrodynamics, Series A, 2008, 23(1): 86-89.
- [6] 李永业, 孙西欢, 李飞等. 不同型号的管道车在管道中运移的水力特性 [J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(2): 174-178.  
Li Y Y, Sun X H, Li F, et al. Hydraulic characteristics of transportation of different piped carriages in pipe[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(2): 174-178.
- [7] 潘小强, 袁璟. CFD 软件在工程流体数值模拟中的应用 [J]. 南京工程学院学报: 自然科学版, 2004, 2(1): 62-66.  
Pan X Q, Yuan J. Numerical simulation of engineering fluid by using CFD software[J]. Journal of Nanjing Institute of Technology: Natural Science Edition, 2004, 2(1): 62-66.
- [8] 姜小放, 曹西京, 司震鹏. FLUENT 技术在工业管道设计中的应用 [J]. 化工设备与管道, 2009, 46(5): 46-48.  
Jiang X F, Cao X J, Si Z P. Application of fluent in design of industrial piping[J]. Process Equipment & Piping, 2009, 46(5): 46-48.