

基于Fluent的波纹管流阻性能分析及改进研究

许兆岩^{1,2}, 李 伦^{1,2}, 张小文³, 薛玉君^{1,2}, 闫廷来³

¹河南科技大学, 机电工程学院, 河南 洛阳

²河南科技大学, 河南省机械设计及传动系统重点实验室, 河南 洛阳

³中船双瑞(洛阳)特种装备股份有限公司, 河南 洛阳

收稿日期: 2023年10月24日; 录用日期: 2023年11月23日; 发布日期: 2023年11月30日

摘 要

基于流体力学仿真软件Fluent, 对城市大管径供热波纹管的内部流场及其改进结构进行了数值模拟, 以摩擦因子为表征, 研究不同结构参数和工况下波纹管内部阻力的变化。研究表明: 相较于光滑管, 波纹结构会增强流体的扰动, 进而导致更显著的压降; 波纹高度对流阻特性影响较为显著。采用正交设计方法对波纹管的主要参数进行组合并对其流阻进行了仿真分析, 以探究多个因素耦合作用下波纹管流阻的变化情况。三种因素中, 波纹高度对流阻的影响程度最大, 而波纹间距影响最小。仿真结果表明, 改进后的结构对降低压力损失有一定的帮助, 该研究可为城市大管径供热波纹管的设计和 optimization 提供借鉴。

关键词

波纹管, 摩擦因子, 压降, 流体仿真

Research on Flowing Resistance of Corrugated Pipe and Improvement Based on Fluent

Zhaoyan Xu^{1,2}, Lun Li^{1,2}, Xiaowen Zhang³, Yujun Xue^{1,2}, Tinglai Yan³

¹School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan

²Henan Key Laboratory for Machinery Design and Transmission System, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan

³China Shipbuilding Shuangrui (Luoyang) Special Equipment Co., Ltd., Luoyang Henan

Received: Oct. 24th, 2023; accepted: Nov. 23rd, 2023; published: Nov. 30th, 2023

文章引用: 许兆岩, 李伦, 张小文, 薛玉君, 闫廷来. 基于 Fluent 的波纹管流阻性能分析及改进研究[J]. 建模与仿真, 2023, 12(6): 5973-5983. DOI: 10.12677/mos.2023.126541

Abstract

Based on the fluid dynamics simulation software Fluent, using the friction factor as a representation, the internal flow field of the Urban heating large diameter corrugated pipes and improved structures were numerically simulated to study the changes of the internal resistance of the corrugated pipes under different structural parameters and working conditions. The results indicate that the corrugated structure enhances the disturbance of the fluid compared to the smooth tube, resulting in more significant pressure drops. The height of the corrugations has a significant effect on the flow resistance characteristics. The orthogonal design method was used to combine the main parameters of the bellows and simulate the flow resistance to explore the change of the flow resistance of the bellows under the coupling of multiple factors. Among these factors, the height of the corrugations has the greatest impact on the flow resistance, while the gap between the corrugations has the least impact. The simulation results indicate that the pressure losses are reduced due to the improved structure. This research can provide reference for the design and optimization of large diameter helical finned tubes for urban district heating.

Keywords

Corrugated Pipe, Friction Factor, Pressure Drop, Fluid Simulation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

金属波纹管具有柔性好、补偿能力强、减振降噪和使用寿命长等优点,广泛应用于石油、化工、船舶和航空等领域[1]。波纹管作为流体管道中重要的组成元件,由于其波纹的特殊结构,流体在流经波纹管后常常会伴随着压力损失,从而引起能量损耗,致使介质输送成本增高。目前,国内外学者对波纹管的研究主要集中在其换热效果和位移补偿方面,而针对大管径、长距离波纹管流阻性能的研究方面还较为匮乏。因此,探究不同参数以及不同工况下大管径、长距离波纹管的流阻性能,对掌握波纹管研发关键技术、降低介质运输过程中的能量损耗都具有十分重要的意义。

流阻特性是波纹管极其关键的性能指标之一,其不仅与波纹管的结构参数、材料因素和工况有关,还与波纹管内部流体介质和温度状态等因素有关。长期以来,国内外学者针对小管径、短距离波纹管的流阻特性进行了大量的理论分析和实验研究。

Ki Bea Hong 等[2]对不同波纹间距和波高比以及不同雷诺数的波纹管的压降进行了数值研究,结果表明,流体再循环面积随波纹高度的增加而增大,同时发现雷诺数越大,压降越大。Al-Obaidi A R 等[3]基于 Fluent 仿真软件对内径为 21.2 mm,波纹间距分别为 2、4 和 6 mm 波纹管内流体的流动进行了数值研究,研究表明:当波纹间距为 2 mm 时压降最大。Wei W 等[4]基于 Fluent 软件,对内径为 20mm 的横向向外波纹管和螺旋波纹管内湍流流动和传热进行了数值模拟,结果表明,二次涡流和湍流受到螺旋流的抑制,能显著降低流动阻力。S.Y 等[5]研究了制冷剂在光滑管和内径为 8.7 mm 波纹管中的压降特性,结果表明,R-404A 在波纹管中的压降明显增大,其压降是光滑管压降的 1.15 倍。

汤涛等[6]对直径分别为 68.6、73.3、80.0、87.3 和 96.0 mm 的波纹管进行了不同流量下的 CFD 仿真计算,结果表明流量越大、直径越小,压降越大。张亮等[7]对最大直径为 12 mm 的换热器波纹管进行了

数值模拟分析, 研究表明, 与光滑管相比, 波纹管压力损失增大, 摩擦阻力系数增加。万宏强等[8]基于 Fluent 软件, 对波纹管内部流场进行了数值模拟, 得到波纹管内部流阻变化规律, 即随着管口直径的增大, 出口速度降低, 静压增加, 出现逆压力梯度; 随着管口直径的减小, 出口速度升高, 静压降低。廖文玲等[9]基于 ANSYS 软件, 建立了内径为 19 mm 波纹管有限元模型, 研究了雷诺数为 10,000~40,000 时波纹组合类型及凸凹波纹宽度比例对流动的影响规律, 研究表明: 相同雷诺数条件下, 凸起波纹与凹坑波纹的比例越小, 波纹管中流体的压降越大。

综上所述, 尽管国内外诸多学者在小管径、短距离波纹管的换热效果等研究上进行了大量的工作, 而针对不同结构参数、不同工况的波纹管, 尤其对大管径、长距离波纹管流阻性能的研究较为缺乏。本文基于 Fluent 仿真软件, 以不同结构参数下的大管径、长距离波纹管为研究对象, 对波纹管内部流场进行数值模拟, 以摩擦因子为表征, 研究不同结构参数下波纹管摩擦因子的变化情况, 分析不同工况下波纹管摩擦因子随入口速度的变化规律, 并对波纹管结构进行了改进, 为大管径、长距离波纹管在工程上的应用提供依据。

2. 数值分析模型

2.1. 几何模型

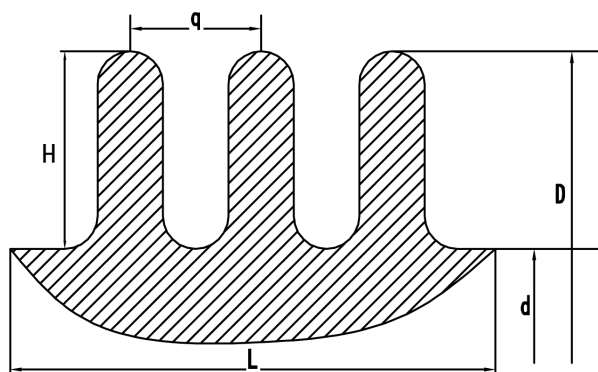
本文针对城市大管径供暖管道中起补偿作用的波纹管的流阻特性进行研究, 波纹管的几何特征参数见表 1。

Table 1. The characteristic size of the corrugated pipe

表 1. 波纹管特征尺寸

外径 D/mm	内径 d/mm	波距 q/mm	波高 H/mm	管长 L/mm
1870	1700	110	85	880

依据 Solidworks 软件对波纹管进行建模, 波纹管模型简图如图 1 所示。



H 为波高; q 为波距; d 为波纹管内径; D 为波纹管外径; L 为波纹管长度。

Figure 1. Corrugated pipe view

图 1. 波纹管模型结构简图

2.2. 边界条件

数值模拟软件为 Fluent, 模拟介质为水, 入口设置为速度入口, 入口工作压力为 2.5 MPa, 出口设置为压力出口, 进口直管段的壁面和波纹管壁面的边界条件设定为绝热无滑移。计算选用基于压力的求解

方式，湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型，由于考虑重力的影响，在 **Fluent** 中将 y 方向的重力加速度设置为 -9.81 m/s^2 [10]。因为管内流体的阻力主要是流体与壁面间的作用产生的，在壁面和波纹附近会有较大的速度与压力梯度，所以近壁面和波纹处的网格进行加密处理，使仿真过程更接近真实情况[11] [12] [13]，计算步数为 500 步，图 2 所示为波纹管网格划分图。

整个模拟过程中做出以下的假设：

- ① 流体内无其他热源，且为不可压缩牛顿流体；
- ② 不考虑热辐射和热传导对流体的影响；
- ③ 流体中各项指标与各项参数均不受温度的影响。

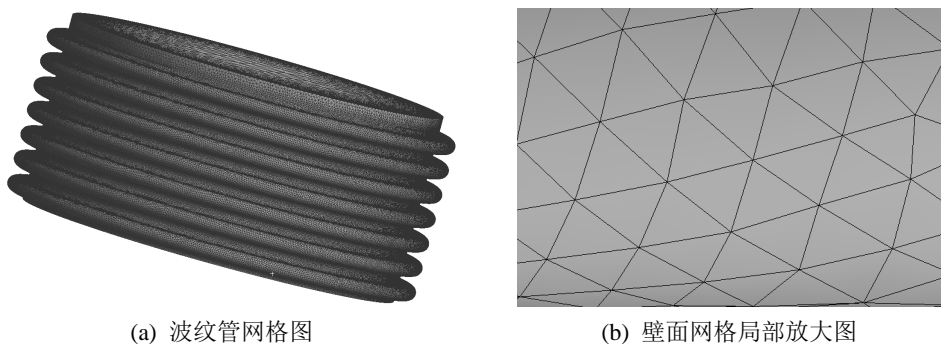


Figure 2. Corrugated pipe meshing
图 2. 波纹管网格划分图

网格数是影响仿真结果的关键因素之一。所以，在对波纹管进行仿真计算之前，需要对网格进行无关性验证选取，以减小网格数量对最终仿真结果的影响。设置 10×10^6 、 15×10^6 、 20×10^6 、 25×10^6 、 30×10^6 、 35×10^6 、 40×10^6 、 45×10^6 、 50×10^6 ，9 组网格数，图 3 所示为 9 组网格数分别对应的压降。

从图 3 可以看出，当网格数达到 30×10^6 后，波纹管输出的压降趋于稳定，说明网格数大于等于 30×10^6 时，网格数量对仿真的压降结果几乎没有影响。但网格数量过多，会增加计算时长，使计算变得繁琐。因此，选取 30×10^6 为划分的网格数量。

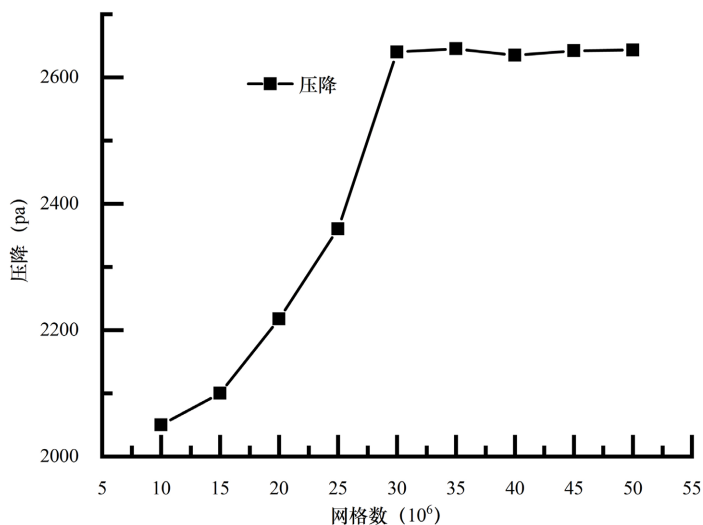


Figure 3. Grid independence validation diagram
图 3. 网格无关性验证图

2.3. 计算原理

基于 Fluent 软件中的报告功能, 可以获取管道任一端面的压强值[14]。所以, 使用此功能可以分别得到波纹管进、出口压强值, 记为 p_1 , p_2 , 通过计算压强差得到波纹管内的沿程阻力, 进而计算摩擦因子 f , 公式[15]如下:

$$f = \frac{2d(p_1 - p_2)}{Lv^2\rho} \quad (1)$$

式中: d 表示波纹管的管径, m; p_1 , p_2 分别为进出口的压强, Pa; ρ 为介质的密度, kg/m^3 ; v 表示流速, m/s; L 表示管道长度, m。

3. 波纹管结构参数对流动阻力的影响

3.1. 波纹高度对流动阻力的影响

为了研究波纹高度对波纹管流阻特性的影响, 选取波纹高度分别为 85、105、125 和 145 mm, 波纹间距为 110 mm, 管径为 1700 mm 的波纹管作为研究对象, 它们具有相同的管径与波纹间距。

分析进口速度设置在 2~5 m/s 时, 摩擦因子随波高和入口速度的变化关系。图 4 所示为波纹管 XY 截面压力云图。

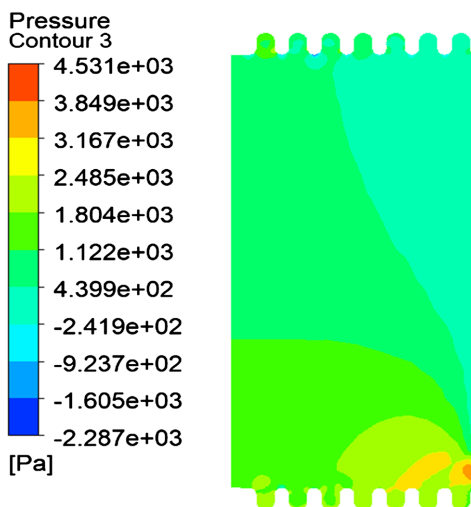


Figure 4. Pressure cloud diagram of XY section of wave height 85mm corrugated pipe

图 4. 波纹管 XY 方向截面压力云图

由图 4 可知, 由于波纹结构导致波纹管内部流体及压力较为复杂多变, 但总体上波纹管内部的压力沿 X 轴线方向依次降低, 进口处最大, 出口处最小。波纹管进出口压降反应能量损耗大小, 压强差越大, 能耗越大。

图 5 为不同波高下摩擦因子随速度变化的曲线图。

由图 5 可知, 摩擦因子随入口速度的增加而减小, 且随着波高的增大摩擦因子逐渐增加。这是因为随着波高的增加, 流体在波纹结构内受到扰动的时间进一步增长, 流体在管内的再循环面积也进一步增大, 波高的增加使流体的扰动进一步增强, 在波峰处产生漩涡, 最终导致阻力的增加, 能量损耗增大。随着波高的减小, 此时波纹管在形状上与光滑管更相似, 波纹管横截面积周期性的变化逐渐趋于平稳, 液体受到的扰动变小, 波纹管在性能上更趋近于光滑管。

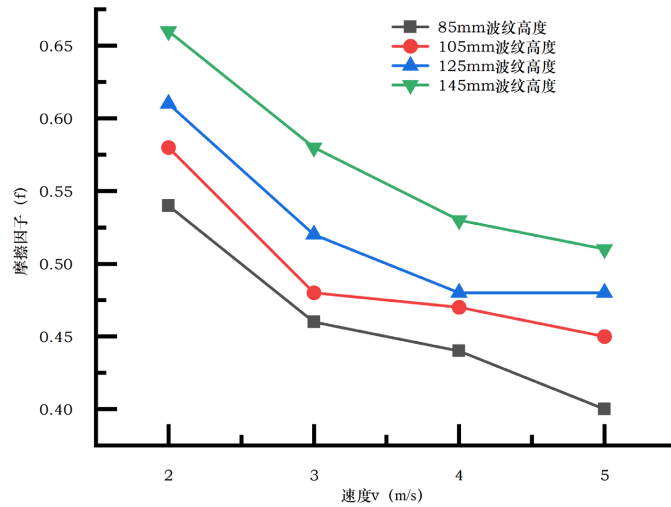


Figure 5. The change of friction factor f with speed v at different wave heights
图 5. 不同波高下摩擦因子 f 随速度 v 的变化

3.2. 波纹间距对流动阻力的影响

为了研究波纹间距(简称波距)对流体阻力的影响,选取波距分别为 110、120、130 和 140 mm,波高为 85 mm,管径为 1700 mm 的波纹管作为研究对象,同时选取等距的光滑管作为对比研究对象。

由图 6 可知虽然光滑管压降变化趋势不明显,但总体上随着入口速度的增加压降逐渐增大,不同波距的波纹管拥有相似的变化趋势,由于增加了波纹结构,波纹管进出口的压降值明显高于光滑管。当波距为 140 mm 时,波纹管与光滑管的压降比达到最小值,此时比值为 6.2。由压降得出不同波距下摩擦因子随入口速度变化的曲线如图 7 所示。

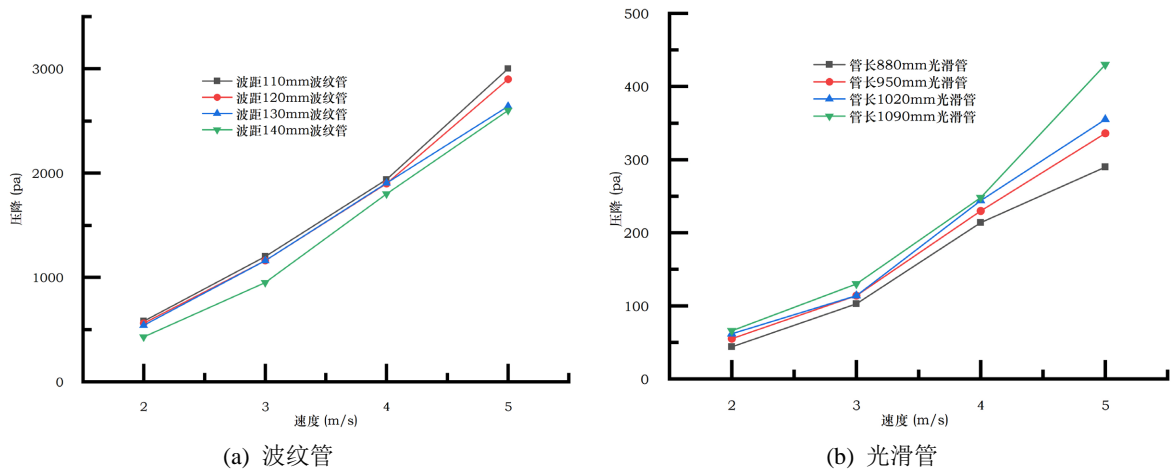


Figure 6. Comparison of corrugated pipe with different wave pitches and pressure drop between smooth tubes
图 6. 不同波距的波纹管与光滑管压降对比图

由图 7 可知总体上摩擦因子随波距的增大而减小,随着入口速度的增加逐渐减小,这是因为随着波距的增加,波纹管两波纹间的直管段长度增加,结构上更加趋近于光滑管,同时液体受到波纹结构扰动的频率也逐渐降低,流体在单位长度上的收缩扩张频率减小,在流体经过每一个波纹结构后,留给流体从扰动状态恢复到稳定状态的时间增加,速度与压力的梯度变化减小,从而使摩擦因子降低。

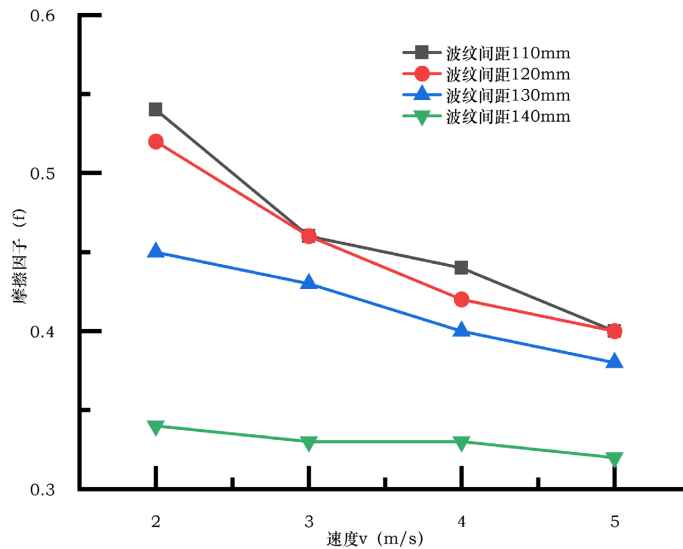


Figure 7. The change of friction factor f with speed v at different wave distances
图 7. 不同波距下摩擦因子 f 随速度 v 的变化

3.3. 波纹管径对流动阻力的影响

为了研究管径对波纹管流动阻力的影响，分别选取管径为 1600、1700、1800 和 1900 mm，波距为 110 mm，波高为 85 mm 的波纹管作为研究对象，同时选取同等管径的光滑管作为对比研究，仿真结果见图 8。

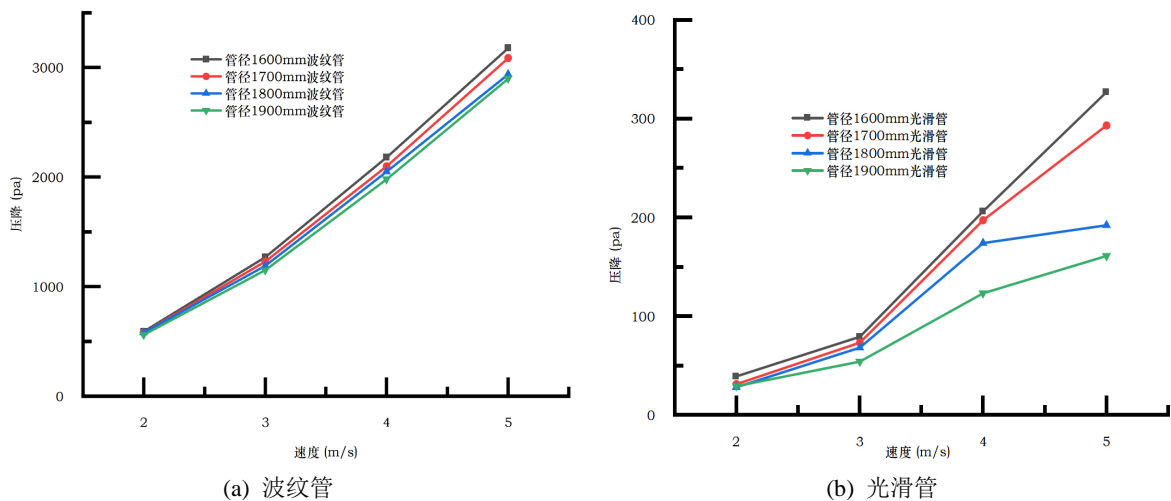


Figure 8. Corrugated pipe with different pipe diameters compared to smooth pipe pressure drop
图 8. 不同管径的波纹管与光滑管压降对比

由图 8 可知当管径为 1600 mm，波纹管与光滑管压降比值达到最大的 9.7 倍。由压降得出不同管径下摩擦因子随速度变化的曲线如图 9 所示。

图 9 可知总体上摩擦因子随着波纹管管径的增加而逐渐增大，随着入口速度的增加而减小。在流量不变的情况下，介质流速仅与管径的大小有关系，随着管径的增大，内部流体流动速度变低，所以致使流体对波纹管管壁的压力增大，总静压变大，最终导致摩擦因子呈上升的趋势。

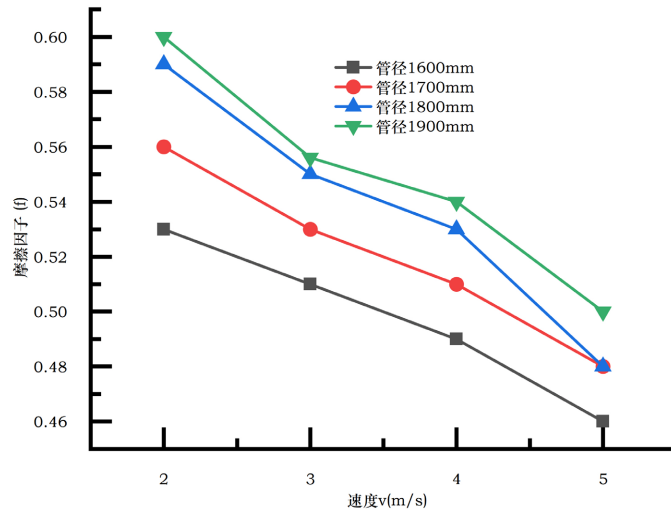


Figure 9. The change of friction factor f with speed v at different pipe diameters
图 9. 不同管径下摩擦因子 f 随速度 v 的变化

4. 多因素影响下流动阻力的变化

为了研究多因素多水平下，波纹管流动阻力的变化，设置正交仿真组，对多因素多水平下波纹管内的流阻的变化进行仿真分析，通过对不同仿真结果平均值的极差分析，以找出影响波纹管流阻特性的主次因素和不同因素组合下的较优水平。本次正交仿真组设计三个要素三个水平，仿真因素与水平表如表 2 所示。

Table 2. Simulation factors and level tables
表 2. 仿真因素与水平表

水平 \ 因素	波纹间距/mm	波纹高度/mm	波纹管径/mm
1	120	105	1700
2	130	125	1800
3	140	145	1900

正交仿真设计表如表 3 所示。1、2、3 分别对应三种因素的不同水平。

Table 3. Quadrature simulation design table
表 3. 正交仿真设计表

编号	因子 1	因子 2	因子 3
1	1	1	1
2	1	2	3
3	1	3	2
4	2	1	3
5	2	2	2

Continued

6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

仿真结果的极差分析表如表 4 所示。

Table 4. Range analysis table

表 4. 极差分析表

项	水平	波纹间距	波纹高度	波纹管径
K 值	1	1.271	1.153	1.244
	2	1.223	1.316	1.282
	3	1.25	1.265	1.208
K avg 值	1	0.424	0.384	0.415
	2	0.408	0.439	0.427
	3	0.417	0.422	0.403
最佳水平		2	1	3
R		0.016	0.055	0.024

据正交仿真组和极差分析表的结果显示,影响摩擦因子的主次因素按重要性从高到低依次为:波纹高度、波纹管径、波纹间距。其中,波纹高度对摩擦因子的影响非常显著,波纹高度越大,摩擦因子也越大。

5. 优化结构流阻分析

上述研究表明,常规波纹管存在流阻较高和能量损失等问题,为了优化其流体动力性能并拓宽波纹管的应用领域,需要对波纹管的结构进行改进。以上研究可知波纹管摩擦因子随速度的增大是逐渐变小的。因此,从这一点出发提出对波纹管结构的改进思路。在压力等因素不变的情况下,作出添加渐扩管结构的设想,以达到缩小管径,提高速度的目的。下文对此思路进行建模并仿真计算,以验证改进结构的可行性。从结构优化的角度入手对波纹管结构进行改进,结构改进后如图 10 所示。

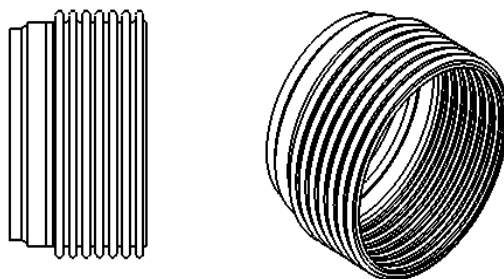


Figure 10. Schematic diagram of bellows structure improvement

图 10. 波纹管结构改进示意图

在波纹管前方添加类似渐扩管的结构，总损失的计算公式[16]可以表示为：

$$h_f = \frac{\lambda}{8 \sin \frac{\alpha}{2}} \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \frac{v_1^2}{2g} \quad (2)$$

$$h_e = k \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2 \frac{v_1^2}{2g} \quad (3)$$

$$\xi = \frac{\lambda}{8 \sin \frac{\alpha}{2}} \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) + k \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2 \quad (4)$$

其中 h_f 为摩擦损失， h_e 为水头损失， K 为与扩散角有关的系数。 n 为扩大面积之比， α 为扩散角。

由公式可知当 n 一定时，渐扩管的摩擦损失随 α 的增大和管段的缩短而减小，但扩散损失却随之增大，因此在 α 取某一值时总损失必达到极值。经计算 α 控制在 10° 时总损失最小，下图 11 为渐扩管示意图。

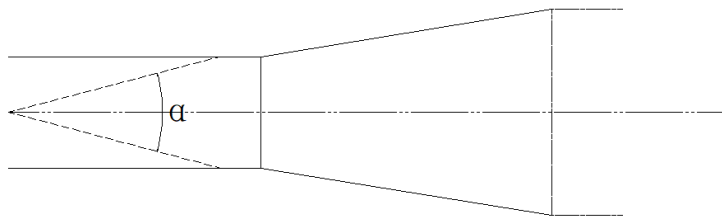


Figure 11. Schematic diagram of the gradual expansion tube
图 11. 渐扩管示意图

对改进后的结构采用相同的参数进行仿真计算结果如表 5。

Table 5. The pressure drop is reduced by value and proportion after structural improvement
表 5. 结构改进后压降减小值及比例

速度 m/s	2	3	4	5
改进前压降 Pa	560	1090	1840	2640
改进后压降 Pa	377	826	1508	2215
压降减小值 Pa	183	264	332	495
减小比例	32%	24%	18%	19%

仿真结果表明与理论计算预期结果吻合，说明改进结构对波纹管降低流阻，减少压力损失有一定的效果。

6. 结论

(1) 采用 Fluent 分析软件，模拟波纹管在不同速度、不同参数变化下波纹管内部的流动特性。仿真结果表明当介质流经波纹管时，由于波纹管特有的波纹结构，会造成明显的压力损失，形成进出口的压强差，与光滑管相比，波纹管的压降明显要高的多。

(2) 由正交仿真设计可知最佳组合为波纹高度 105 mm、波距 130 mm、管径 1900 mm，仿真结果表现较优，摩擦因子最小，波纹管内流体流动阻力小。

(3) 通过分析波纹管结构和压降产生的机理,对波纹管结构进行改进,改进后的结构能有效减少波纹管的流动阻力,压力损失平均减少 23%。

基金项目

洛阳市重大科技创新专项(项目编号: 2101001A)。

参考文献

- [1] 崔永龙, 赵术伟, 范荣超, 等. 波纹管流阻特性实验研究与数值模拟[J]. 机械研究与应用, 2018, 31(3): 28-31.
- [2] Ki Bea Hong, D.W.K. and Ryou, H.S. (2021) Numerical Study on the Effect of a Groove of D type on Internal Flow and Pressure Drop in a Corrugated Pipe. *Journal of Korean Society of Disaster and Security*, **14**, 1-8.
<https://doi.org/10.3390/en14092614>
- [3] Al-Obaidi, A.R. and Alhamid, J. (2021) Investigation of Flow Pattern, Thermohydraulic Performance and Heat Transfer Improvement in 3D Corrugated Circular Pipe under Varying Structure Configuration Parameters with Development Different Correlations. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **126**, 105394.
<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105394>
- [4] Wei, W., Yaning, Z., Jian, L., *et al.* (2019) Large Eddy Simulation of Turbulent Flow and Heat Transfer in Outward Transverse and Helically Corrugated Tubes. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, **75**, 456-468.
<https://doi.org/10.1080/10407782.2019.1608763>
- [5] Yarmohammadi, S. and Farhadi, M. (2016) Optimization of Thermal and Flow Characteristics of R-404A Vapor Condensatio-N Inside Corrugated Tubes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **79**, 1-12.
<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.06.012>
- [6] 汤涛, 闫畅迪, 黄永华. 结构参数对波纹管液氮流动与能量损失的影响[J]. 低温与超导, 2016, 44(11): 23-27, 57.
- [7] 张亮, 原亚东, 孙志强, 等. 波纹管对管壳式换热器内流体传热及流动特性的影响[J]. 热动力工程, 2019, 34(4): 73-78.
- [8] 万宏强, 汪亮. 波纹管过流流场的数值模拟[J]. 压力容器, 2007, 24(7): 17-20.
- [9] 廖文玲. 组合波纹管流动及传热性能仿真研究[J]. 低温与超导, 2021, 49(6): 74-80.
- [10] 王世明, 马晨倍, 张成林, 等. 基于 Fluent 油田注水管道余压发电水轮机叶轮优化[J]. 制造业自动化, 2023, 45(1): 144-148.
- [11] 高全杰, 汤红军, 汪朝晖, 等. 基于 Fluent 的超音速喷嘴的数值模拟及结构优化[J]. 制造业自动化, 2015, 37(4): 88-90.
- [12] 赵小英, 杜飞龙, 向贤礼. 基于 Fluent 的搅拌槽内多相流数值仿真及研究[J]. 制造业自动化, 2015, 37(13): 109-112.
- [13] 吴永海, 包海涛, 范钦满. 基于 FLUENT 的高频电控电磁泵动态特性研究[J]. 制造业自动化, 2018, 40(8): 71-74
- [14] 姚雪蕾, 袁成清, 付宜风, 等. 管道内壁粗糙度对沿程阻力影响的 FLUENT 数值模拟分析[J]. 船海工程, 2015, 44(6): 101-106.
- [15] 咎永超, 李永华. 波纹管流动和传热特性的数值模拟[J]. 节能, 2018, 37(10): 58-62.
- [16] 龙天渝, 蔡增基. 流体力学[M]. 第 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013: 122-123.