doi:10.3969/j.issn.1005－0329.2025.01.009

弯管内部流场及减阻优化研究

王　捷,宋翀芳,潘武轩,闫亚婧,赵　可
(太原理工大学 土木工程学院,太原 030024)

摘　要:为了给管道的布置和优化运行提供理论指导,降低建筑运行能耗,通过试验和数值模拟相结合的方法,比较了在不同管径和速度下弯管局部阻力系数、流体运动状态以及黏性耗散的变化,并利用沟槽法对弯管进行构件优化。结果表明:随着管径增大,形变构件对弯管内流体的影响逐渐减小,转折段和下游直管段内低速区面积逐步减小。当入口速度为 1.1 m/s 时,不同管径弯管的局部阻力系数未完全按照已有的幂函数规律变化,DN40~DN65 弯管的局部阻力系数大小近似相等,DN100~DN125 局部阻力系数也大致相等,这与其内部流体运动状态和受力有关。利用上述理论研究进行构件优化,在质壁分离区域加入沟槽,可减少弯管局部阻力损失,同时缩减低速区域范围,减小机械能消耗。加入沟槽后的弯管,在较小的入口流速 v=0.5 m/s 处局部阻力的优化最为明显,局部阻力降低了 63.96%。研究结果可为工程中弯管的设计布置以及结构优化提供参考。

关键词:弯管;局部阻力系数;黏性耗散;减阻优化
中图分类号:TH12;O357.1　　**文献标志码:**A

Research on the internal flow state of bent pipes and optimization of component drag reductio

WANG Jie,SONG Chongfang,PAN Wuxuan,YAN Yajing,ZHAO Ke
(School of Civil Engineering,Taiyuan University of Technology,Taiyuan 030024,China)

Abstract: In order to provide theoretical guidance for pipeline layout and optimized operation in engineering design,and reduce building operation energy consumption,the variations in local resistance coefficients,fluid motion states,and viscous dissipation of elbows under different pipe diameters and velocities were compared by the method of combining the experiments and numerical simulation,and the groove method was utilized to optimize the components of the elbows. The results reveal that as the pipe diameter increases,the influence of deformed components on the fluid within the elbow gradually decreases,and the area of the low-velocity zone in both the turning section and downstream straight pipe section gradually decreases. At an inlet velocity of 1.1 m/s,elbows of varying diameters exhibit deviations from the established power function law regarding local resistance coefficients. Specifically,elbows ranging from DN40 to DN65 demonstrate nearly identical resistance coefficients,as do those from DN100 to DN125. This phenomenon is attributed to the internal fluid dynamics and stress distribution within the elbows. Using the aforementioned theoretical study for component optimization,adding grooves in the separation area of the material wall can reduce the local resistance loss of the elbow,reduce the range of low-velocity areas,and reduce mechanical energy consumption as well. In the elbow with added grooves,the optimization of local resistance is most significant at a smaller inlet flow rate of v=0.5 m/s,the local resistance is reduced by 63.96%. These research findings offer valuable insights for the design layout and structural optimization of elbows in engineering applications.

Key words:elbow;local resistance coefficient;viscous dissipation;resistance reduction optimization

0　引言

弯管作为流体输运系统中的常用构件,具有效率高、维护管理简单、占地面积小、容易调度等特点[1],其阻力损失在管道系统阻力损失中占有较大比重。流体流经弯曲管段,流向发生变化,过流截面改变的同时质点产生分离,流动形态发生急剧变化,产生涡旋[2-3],这是导致弯管产生局部

收稿日期: 2024－02－01　**修回日期:** 2024－05－08
基金项目: 山西省自然科学基金项目(202103021224091);山西省自然科学基金项目(202203021212246)

阻力损失的重要原因。所以了解其内部流体的运动形态，解析阻力产生机制，有利于设计合理的弯管构件，从而减少其阻力，有效地降低流体输运能耗，降低建筑运行能耗。

自从 DEAN[4-5] 采用理论解析，首次发现了截面弯曲管道内存在二次流动之后，众多学者利用试验测量对弯管内流态及其阻力损失机制进行了系统研究。SUDO 等[6] 深化探讨了 90°弯管中流体纵向现象的转变和湍流的结构。贺益英等[7] 研究了弯管局部阻力的影响因素，并推导出一些常用的弯管局部阻力系数经验公式。随着计算流体力学（CFD）的发展，数值模拟在局部构件复杂流场的研究上显示了强大优势。FELIPE 等[8] 研究了曲率半径、管壁粗糙度、流体温度参数对弯管内流体运动的影响，发现弯曲段的二次流现象导致了能量耗散。江国栋等[9] 着重讨论了不同弯管曲率半径下局部阻力和沿程阻力损失变化情况，以及外壁面压力系数的沿程分布。但植华等[10-11] 通过对不同弯曲角度的弯管进行数值模拟，揭示内部流场和压力分布，拓宽了弯管的研究方向。不难发现，弯管的现有研究大多为流体流经弯曲管段处的流动特征，但是对于弯管内压力分布不均匀的动力机制、力学特性等研究寥寥无几。因此，本文通过改变弯管的管径和入口速度进行弯管内局部阻力的研究，从流体的流态和受力情况进行弯管机械能耗散分析，明确弯管内流体的流动机理和优化方向，加强弯管的结构优化理论支撑。

对于管路来说，其减阻方向一般聚焦于将一些化合物添加到流动中，改变流体的物理和化学性质从而达到减阻效果，但这种方法，目前还无法完全避免减阻物对环境产生污染[12-13]。壁面沟槽减阻法[14-15] 在针对管路沿程阻力减阻方面也取得了不错的效果。但是，对于减小弯管等形变构件局部阻力，现在还处于一个积极探索阶段。本文采取沟槽法，在弯管下游直管段处加入沟槽，抑制质点分离，从而削弱二次流的强度，达到减阻效果。

1 黏性耗散原理

当流体在弯头内流动时，由于内部流体分子之间的相对运动以及流动过程中流体的边界条件发生形变而产生流动阻力，也就产生了阻力问题[16]。用内能 e 和温度 T 表示的能量方程为：

$$\rho\frac{D_e}{D_t}=\mathrm{div}\left(\lambda\mathrm{grad}T\right)+\varphi \tag{1}$$

式中，λ 为流体的导热系数；φ 为黏性耗散函数，即黏性效应使机械能不可逆地转化为热能，且始终为正值，计算式如下：

$$\varphi=2\mu\left\{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2\right\} \tag{2}$$

对整个流场来说，黏性耗散消耗的能量可以表示为 Φ，计算式如下：

$$\Phi=\iiint_{\Omega}\varphi\mathrm{d}V \tag{3}$$

2 研究方法

2.1 试验方案

弯头试验装置如图 1 所示。测试弯头选择管径为∅20、曲率半径为 1.0 的 PVC 管件，连接管材的管路内径为 14 mm。在试验过程中，启动水泵向恒压水箱不断供水，通过气阀排除管内空气，打开流量调节阀，水流经过 16 个静压值测量点后排出管道，待流量稳定后，记录各个测压管液面数据。

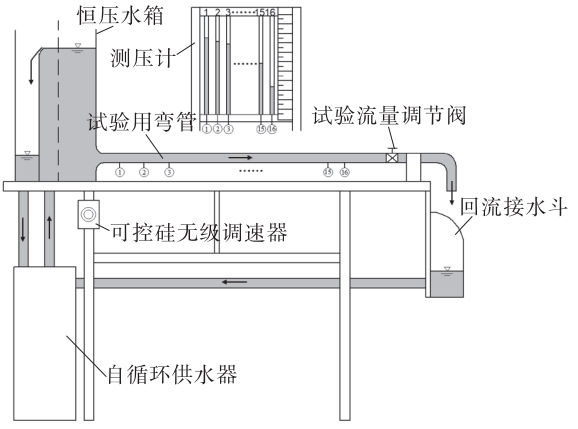


图 1 弯头试验装置

Fig.1 The layout of the experiment device of elbow

2.2 数值方法

2.2.1 模型建立及参数设置

本次研究对象为 90°圆弧弯管上游直管段取 20D，下游直管段取 10D，该弯管是一个较为规整的几何模型，因此在模型的网格划分过程中进行结构化网格划分，如图 2 所示。

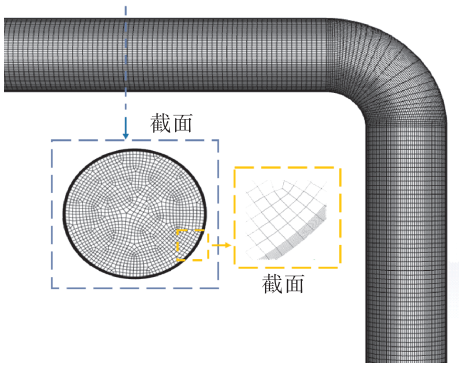


图 2 网格划分示意

Fig.2 Schematic diagram of meshing

选择温度为 298 K，密度为 998.2 kg/m^3 的不可压缩液态水作为弯管中流动的流体，此次研究忽略流体与管壁的热交换[17]。使用SIMPLE算法，将 continuity，x-velocity，y-velocity，z-velocity，k，Epsilon 等物理项残差值的收敛标准均定为 10^{-6}。边界层的设置参照文献[17]进行，弯管的入口被定义为速度入口，出口被定义为自由出流。

2.2.2 湍流模型的选取

在进行 CFD 数值模拟之前，为了选择最合适弯管的湍流模型，在初始计算条件相同的前提下，对 3 种常用的 k-ε模型进行模拟运算。将试验得出的 16 个测点的静压值，与上述各模型同位置测点测得的静压值进行比较，结果如图 3 所示。选择最吻合的湍流模型作为之后 CFD 数值模拟的模型。由图 3 可以看出，最接近试验测量值的湍流模型为 Realizable k-ε模型。此次研究选择 Realizable k-ε模型进行数值模拟。

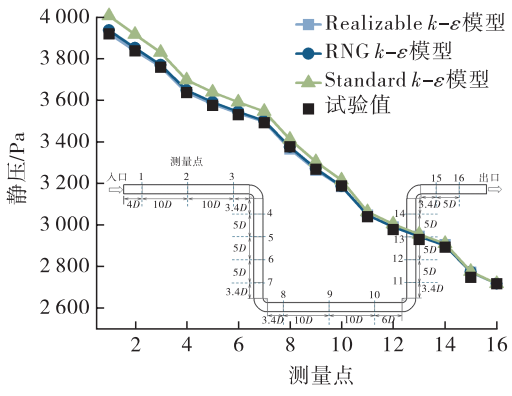


图 3 试验数据与不同模型模拟结果的静压比较

Fig.3 Static pressure comparison between experimental data and static pressure of simulation results of different models

控制方程包括不可压缩流体的连续方程、动量方程，湍动能和耗散率输运方程，所有方程联立解出流场质点三维速度值和压强值[11,18]。控制方程如下。

连续方程为：

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=0 \tag{4}$$

动量方程为：

$$\rho u_j\frac{\partial u_i}{\partial x_j}=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu\frac{\partial u_i}{\partial x_j}-\rho u_i'u_j'\right) \tag{5}$$

湍流动能为：

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]-\rho\overline{u_i'u_j'}\frac{\partial u_i}{\partial x_j}-\rho\varepsilon \tag{6}$$

湍流耗散率为：

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varepsilon u_j)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]-C_1\frac{\varepsilon}{k}\rho\overline{u_i'u_j'}\frac{\partial u_i}{\partial x_j}-\rho C_2\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{7}$$

μ_t，C_μ按照下式计算：

$$\mu_t=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon};\ C_\mu=1/\left(A_0+A_s\frac{kU^*}{\varepsilon}\right)$$

$$A_0=4.0,A_s=\sqrt{6}\cos\phi,\phi=\frac{1}{3}\cos^{-1}\left(\sqrt{6}W\right)$$

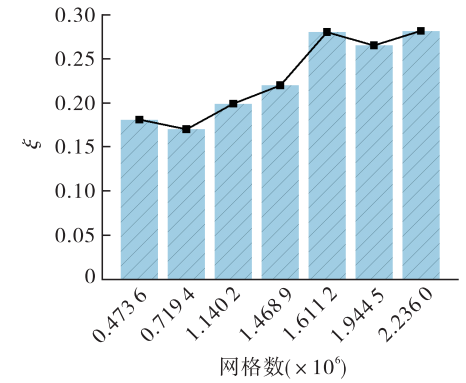
$$W=\frac{E_{ij}E_{jk}E_{ki}}{\left(E_{ij}E_{ij}\right)^{3/2}},U^*=\left(E_{ij}E_{ij}+\tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}\right)^{1/2}$$

$$\tilde{\Omega}_{ij}=\Omega_{ij}-2\varepsilon_{ijk}\omega_k,\Omega_{ij}=\overline{\Omega_{ij}}-\varepsilon_{ijk}\omega_k \tag{8}$$

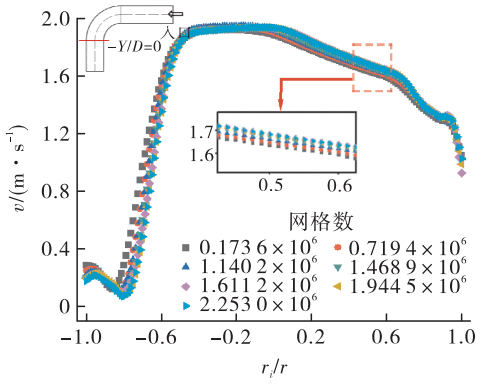
式中，σ_k，σ_ε分别为湍动能和湍动能耗散率对应的湍流普朗特数，且 C_1=1.44，C_2=1.92，σ_k=1.0，σ_ε=1.3。

2.2.3 网格独立性验证

在不影响计算结果准确性和精度的前提下，为了提高计算效率，还需要进行网格独立性验证，来确定合适的网格数。由图 4 可以看出，当网格数量大于或等于 1.611 2×10^6 时，局部阻力系数的差异较小。同时，在流体离开转折段处截面进行中心速度的监测，当网格数大于 1.468 9×10^6 时，近壁面及中心处流体速度已经无限重合，在误差范围内。因此，此次模拟模型选择的网格数量在 1.611 2×10^6~2.253 0×10^6 内。



(a) 局部阻力系数变化



(b) 中心速度垂直分布

图 4　网格独立性验证

Fig.4　Grid independence verification

3　结果与讨论

3.1　入口速度、管径与局部阻力系数的关系

已有研究[7]表明，90°弯管局部阻力系数的影响因素主要有：雷诺数 *Re*、曲率半径与管径之比 *R*/*D*、管壁相对粗糙度Δ/*D*。改变入口流速和管径，即探究雷诺数 *Re* 对于局部阻力系数的影响。当曲率半径 *R*/*D*=1.0 时，如图 5 所示，研究不同弯管尺寸下的局部阻力系数随着入口速度的变化趋势。贺益英等[7]通过模型试验研究得出，当入口雷诺数 $Re \geqslant 6\times10^5$ 时，雷诺数不再影响局部阻力系数的变化。此次研究在 DN15~DN150、入口流速为 0.5~1.5 m/s 条件下弯管局部阻力系数的变化，其流体入口雷诺数在 $0.75\sim18.66\times10^4$ 的范围内，理论上雷诺数依旧是影响局部阻力系数的重要参数，局部阻力系数 ξ 应随着管径的增大或者是速度的增大成幂函数减小。图 5 中曲线整体的变化趋势大致符合上述规律，但是在相同速度下，DN40，DN50 和 DN65 弯管求得的局部阻力系数 ξ 大小几乎相等，DN100 和 DN125 弯管的局部阻力系数也近似相等。因此，之后的研究主要围绕在入口速度 *v*=1.1 m/s 下，DN15，DN40，DN65，DN100 和 DN125 共 5 种管径内流体的运动和受力情况。

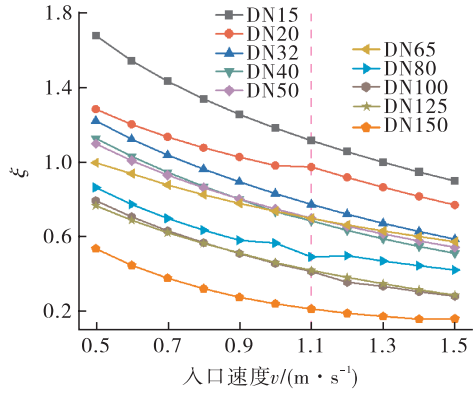


图 5　不同管径和入口速度下局部阻力系数的变化

Fig.5　Changes in local resistance coefficient under the different diameters and inlet velocity

3.2　流体内部流场分析

图 6，7 示出不同管径弯管局部压力云图及速度流线。从图中可以看出，流体的速度和压力在弯曲段发生了剧烈的变化。主流在转折段受到离心力的作用向内壁面侧偏移，并在拐弯后受惯性力的作用，冲刷外壁面，此时内壁面质点出现分离从而产生回流，出现明显的二次流，导致流体的压力和流速出现巨大波动。流体的压力在弯管的转折段处出现较大的压强梯度，此时流体受惯性力冲刷外壁面，最大压强出现在此时的外壁面，并在内壁面处形成负压。管径越小，弯管内负压的相对面积越大，DN15 和 DN40 弯管下游管道形成负压的相对面积比其余管径弯管大很多。

截取弯管在转折段 30°和转折段出口区域下游直管道 −*Y*/*D*=0.5 处的纵断面，速度分布和二次流的运动轨迹如图 7 所示。在转折段 30°处，靠近管壁的两侧有清晰的涡流，2 个涡关于中心轴对称，旋向相反。同时，在该阶段高流速区的面积随着管径的增大而减小，涡核处流线分布更为密集。所以弯管局部损失主要源于结构变化导致的流动方向改变和内壁面附近出现的二次流，从而引起的动量和能量损失[12]。同时，此处回流区形态出现的位置和大小与管径大小密切相关，管径的增大会抑制并削弱弯管二次流的出现。管径为 15 mm 或 40 mm 的小管径弯管在 −*Y*/*D*=0.5 处时，已经明显出现第二对涡流。而对于较大管径的弯管，在 −*Y*/*D*=0.5 处第一对涡的强度有所削弱，还未出现第二对涡。管径的增大，使弯管内流体的受力变化有所延后。

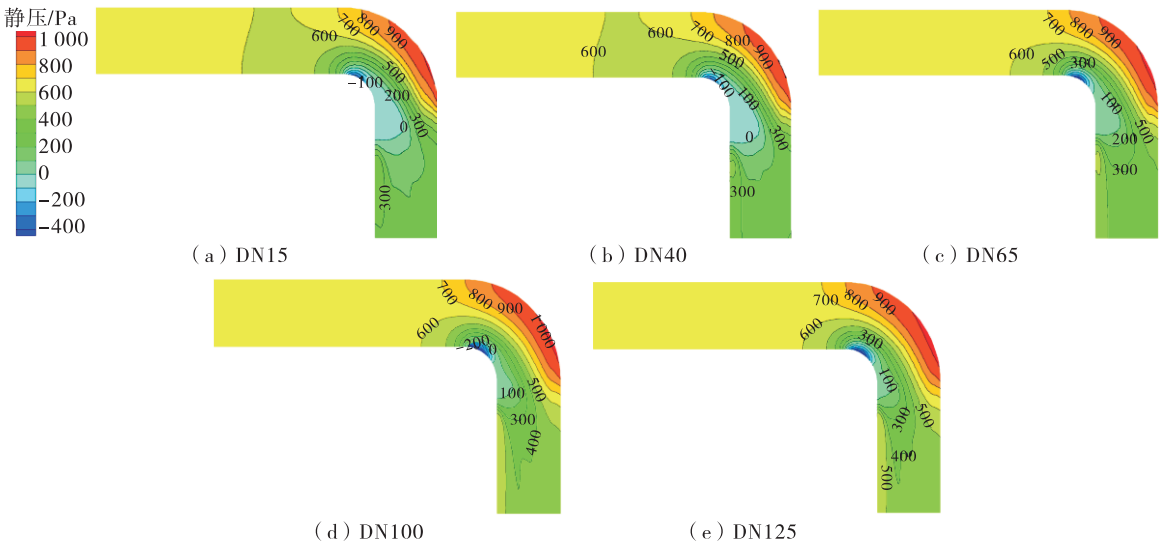


图 6　不同管径弯管局部压力云图

Fig.6　Local pressure cloud map of elbows with different pipe diameters

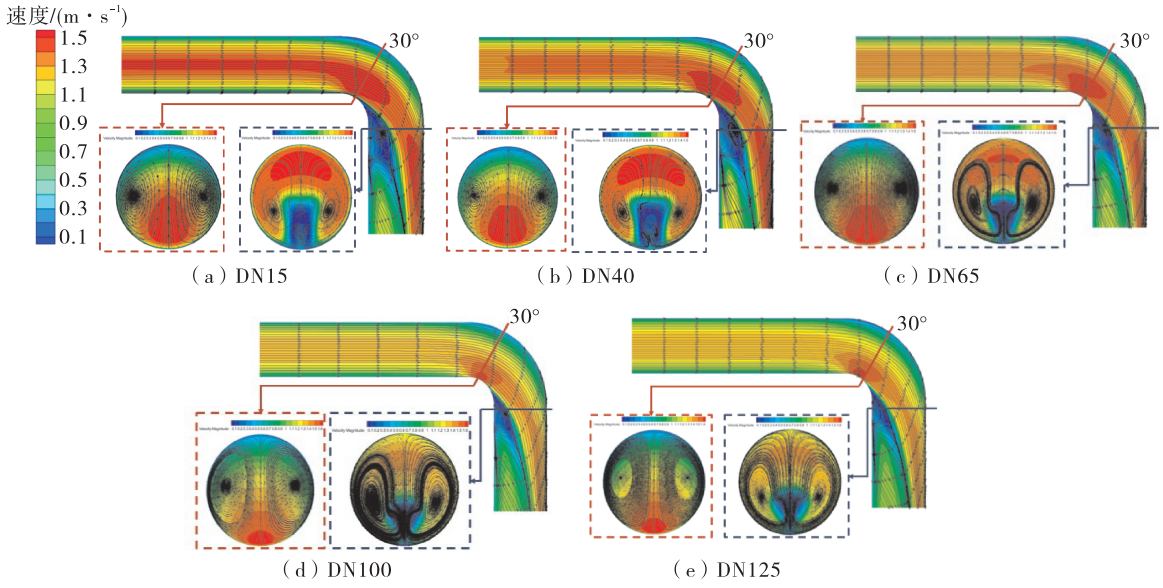


图 7　不同管径弯管内速度流线分布云图

Fig.7　Velocity streamline map of elbows with different pipe diameters

3.3　黏性耗散分析

入口速度一致，湍流脉动随着管径减小而增强，弯管内流体的涡旋强度也增强，消耗的机械能增加。对不同管径的弯管黏性耗散进行计算，并分析局部弯管的能量损耗情况，如图 8 所示。当流体还未进入形变构件内时，流体主要受管壁的影响，黏性耗散主要发生在近壁面附近，而此时管内流动充分发展，未出现高平均剪切层，几乎没有机械能消耗。边界层处湍动能在大体上随着管径的增大而减小，黏性耗散随着管径的增大而降低。形变构件不仅影响其内部流体，还影响未进入形变构件时上游直管段内流体。当流体还未进入形变构件时出现波动，管径内部出现能量耗散。当流体进入形变构件后，受形变构件的影响，流体间动量交换的区域扩大，弯管处呈现明显的能量波动，黏性耗散也较为明显。在 3.2 节中显示流体进入下游直管段后，受惯性力的影响，此时的弯管在内壁面附近出现质点分离，产生第二个涡流，弯管内侧的湍流运动逐渐加强，此处的黏性耗散突增。随着管径的增大，流体的相对湿周减小，管壁对流场的影响减小，湍流运动随着管径增大逐渐衰弱，机械能消耗相对减小，黏性耗散的波动也逐渐平缓。

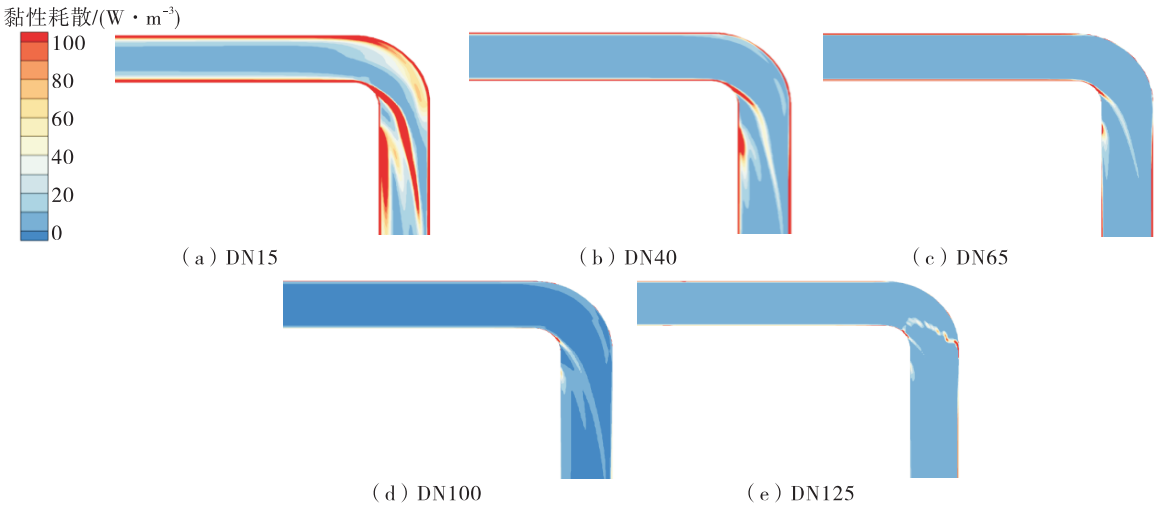


图 8　黏性耗散分布云图

Fig.8　The viscous dissipation distribution cloud image

3.4　构件减阻优化

在上述研究的理论支撑下，进行构件的优化。在流体出现二次流即形变构件出口的下游直管段进行构件优化。优化后的弯管模型如图 9 所示。利用沟槽法，在内壁面处加入长度为 2 mm，宽度为 1 mm 的微型沟槽，且沟槽弧度θ为 180°，如图 9(a)所示，利用微型沟槽对流体流动进行干预，削弱二次流强度。优化后的构件采用非结构化网格进行划分，并在沟槽附近进行网格加密，网格划分如图 9(b)所示。



(a)优化后的模型　　(b)网格划分

图 9　优化后的弯管模型

Fig.9　Optimized elbow model

选择管径为 100 mm，相对曲率半径为 1.0 的弯管进行优化，并在入口速度为 0.5~1.5 m/s 的情况下，对优化后的模型进行数值模拟，求得优化后的局部阻力系数，并与优化前求得的弯管局部阻力系数进行比较，结果如图 10 所示。从图中可以发现，沟槽的加入使得弯管局部阻力出现大幅度降低。当入口速度为 0.5 m/s 时，弯管局部阻力系数变化最为明显，0.79 变为 0.285，局部阻力下降了 63.96%。随着入口速度的增大，局部阻力变化幅度变小，但当入口速度为 1.5 m/s 时，局部阻力下降也达到了 20%。

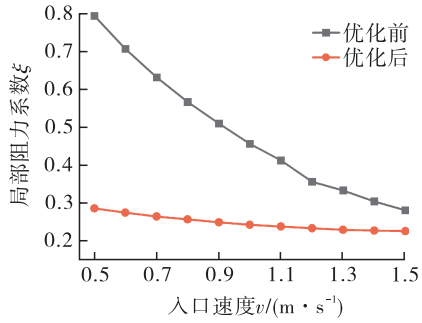
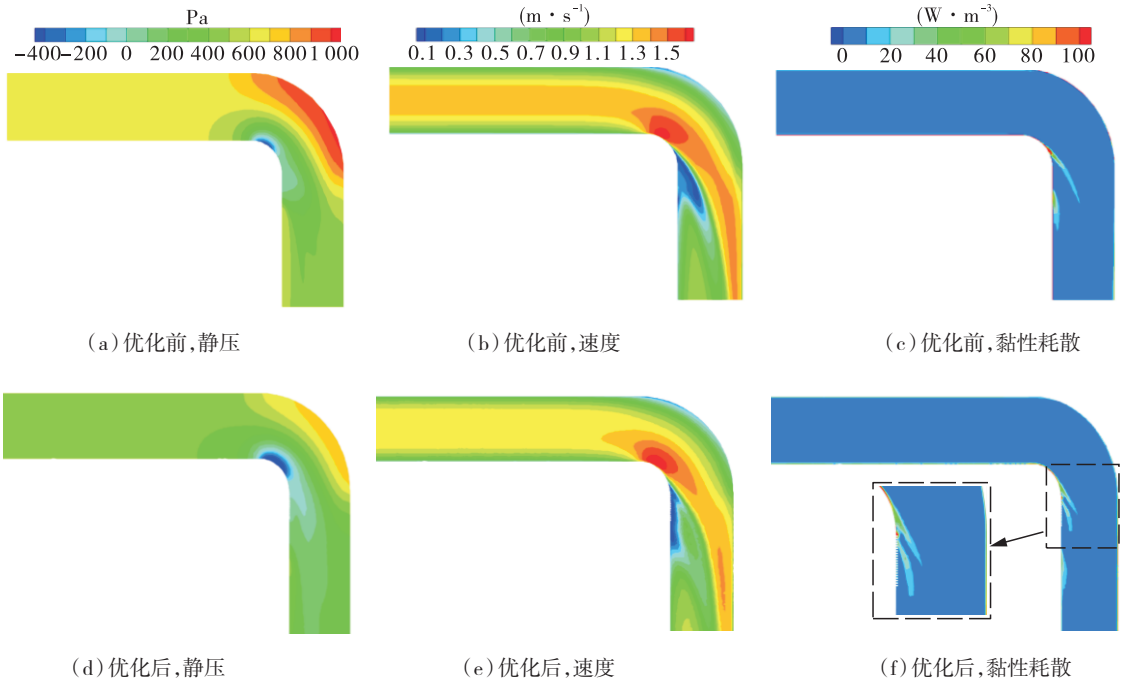


图 10　局部阻力系数随着入口速度的变化

Fig.10　Changes in local resistance coefficient of components with inlet velocity

比较优化前、后弯管的压力、速度和黏性耗散云图，如图 11 所示。优化后的弯管，在转折段外壁面处压力大幅度下降，下游直管段内壁面附近出现二次流的区域，沟槽的建立使得低速区域明显缩小，削弱了涡流的强度，该处黏性耗散也有所减小。因此，可以通过沟槽法进行弯管构件减阻优化。



(a) 优化前，静压　(b) 优化前，速度　(c) 优化前，黏性耗散

(d) 优化后，静压　(e) 优化后，速度　(f) 优化后，黏性耗散

图 11　优化前、后弯管的云图

Fig.11　Nephograms of the elbows before and after optimization

4　结论

(1) 在整体上局部阻力系数随着管径和入口速度的增大而降低，但该规律不适用于 DN40~DN65 和 DN100~DN125 区间，各自的局部阻力系数差别不大。

(2) 在还没有进入形变构件时，流体运动已受形变构件影响而发生变化，无论管径大小，在转折段 30°截面处，第一对涡已经形成，并且涡关于中心轴对称。当流体进入下游直管段，在 $-Y/D$ =0.5 处，第二对涡在大管径弯管处还未完全成形，而小管径弯管已经出现多个涡流。大管径弯管会削弱下游直管段涡流的出现。

(3) 利用沟槽法对弯管进行构件减阻优化，入口速度越小，减阻效果越明显，当速度为 0.5 m/s 时，局部阻力可降低 63.96%。同时，优化后的弯管抑制了下游直管处的质壁分离现象，减小了此处的机械能消耗。

参考文献：

[1] 郭永鑫，郭新蕾，杨鹏志，等 . 管道水力摩阻系数的敏感性分析[J]. 水利学报，2019，50(8)：1021 – 1028.
GUO Y X，GUO X L，YANG P Z，et al.Sensitivity analysis of the hydraulic conveyance coefficients of pipes[J].Journal of Hydraulic Engineering，2019，50(8)：1021 – 1028.

[2] 江山，张京伟，吴崇健，等 . 基于 FLUENT 的 90°圆形弯管内部流场分析[J]. 中国舰船研究，2008(1)：37 – 41.
JIANG S，ZHANG J W，WU C J，et al.Numerical simulation of inner flow in 90° bending duct of circular-section based on fluent[J].Chinese Journal of Ship Research，2008(1)：37 – 41.

[3] CHEN K K，ROWLEY C W，STONE H A.Vortex dynamics in a pipe T-junction：recirculation and sensitivity[J].Physics of Fluids，2015，27(3)：167 – 197.

[4] DEAN W R.Note on the motion of fluid in a curved pipe[J].The London，Edinburgh，and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science，1927(4)：208 – 223.

[5] DEAN W R.The stream-line motion of a fluid in a curved pipe(second paper)[J].The London，

Edinburgh,and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science,1928,5(30):673 – 695.

[6] SUDO K,SUMIDA M,HIBARA H.Experimental investigation on turbulent flow in a circular-sectioned 90-degree bend[J].Experiments in Fluids,1998,25(1):42 – 49.

[7] 贺益英,赵懿珺,孙淑卿,等.弯管局部阻力系数的试验研究[J].水利学报,2003(11):54 – 58.
HE Y Y,ZHAO Y J,SUN S Q,et al.Experimental study on local loss coefficient of bend in pipeline[J].Journal of Hydraulic Engineering,2003(11):54 – 58.

[8] FELIPE G,SHAH S N.Friction pressure correlations for turbulent flow of drag reducing polymer solutions in straight and coiled tubing[J].Journal of Petroleum Science and Engineering,2009(65):147 – 161.

[9] 江国栋,孙列鹏,施龙波,等.压管式水冷板90°弯管内流动及传热特性研究[J].流体机械,2023,51(4):51 – 57.
JIANG G D,SUN L P,SHI L B,et al.Numerical study on the flow and heat transfer characteristics in a 90° -bend extruded pipe setted in water-cooled plate[J].Fluid Machinery,2023,51(4):51 – 57.

[10] 但植华,吴森林,管英柱,等.基于CFD的弯管数值计算及水力特性分析[J].中国测试,2023,49(3):142 – 151.
DAN Z H,WU S L,GUAN Y Z,et al.Numerical calculation and hydraulic characteristics analysis of elbow based on CFD[J].China Measurement & Test,2023,49(3):142–151.

[11] 弋鹏飞,马奭文,张建鹏,等.节水承插式折角弯管水流流动特性研究[J].节水灌溉,2021(4):35 – 40.
YI P F,MA S W,ZHANG J P,et al.Study on flow characteristics of water-saving socket type bend pipe[J].Water Saving Irrigation,2021(4):35 – 40.

[12] 龚志明,王瑞祥,邢美波.CTAB表面活性剂脉动热管性能研究[J].流体机械,2020,48(1):14 – 20.
GONG Z M,WANG R X,XING M B.Investigation on performance of CTAB surfactant pulsating heat pipe[J].Fluid Machinery,2022,48(1):14 – 20.

[13] ABDULBARI H A,YUNUS R M,ABDURAHMAN N H,et al.Going against the flow—A review of non-additive means of drag reduction[J].Journal of Industrial & Engineering Chemistry,2013,19(1):27 – 36.

[14] 晏飞,王德强.V沟槽圆柱后流流动特性[J].流体机械,2022,50(5):8 – 14.
YAN F,WANG D Q.Flow characteristics of V-grooved cylinder backflow[J].Fluid Machinery,2022,50(5):8 – 14.

[15] 葛铭纬,许春晓,黄伟希,等.基于壁面主动变形的湍流减阻控制研究[J].力学学报,2012,44(4):653 – 663.
GE M W,XU C X,HUANG W X,et al.Drag reduction control based on active wall deformation[J].Chinese Journal of Theoretical & Applied Mechanics,2012,44(4):653 – 663.

[16] YIN Y F,LI A G,WEN X Q,et al.Resistance reduction of an elbow with a guide vane based on the field synergy principle and viscous dissipation analysis[J].Journal of Building Engineering,2022(54):104649.

[17] 仿真联盟.ANSYS Fluent中文版超级学习手册[M].北京:人民邮电出版社,2023.
Simulation Alliance.ANSYS Fluent chinese super learning handbook[M].Beijing:Posts & Telecom Press,2023.

[18] 杨肖,杨冬梅,王启扬,等.蓄冰槽U形盘管模拟与结构优化[J].流体机械,2022,50(10):98 – 104.
YANG X,YANG D M,WANG Q Y,et al.Simulation and structural optimization of U-shaped coil in ice storage tank[J].Fluid Machinery,2022,50(10):98 – 104.

作者简介：王捷(1998)，女，硕士研究生，研究方向为局部构件流动减阻，E – mail:787844992@qq.com。

通信作者：宋翀芳(1974)，女，博士，副教授，主要从事开放空间的空气流动数值模拟、空气污染物运动和动力机制的理论解析与数值模拟、供热新技术的应用和建筑节能新技术应用研究工作，通信地址:030024 山西省太原市万柏林区千峰南路29号太原理工大学迎西校区土木工程学院，E – mail:songchongfang@tyut.edu.cn。

本文引用格式：
王捷,宋翀芳,潘武轩,等.弯管内部流场及减阻优化研究[J].流体机械,2025,53(1):68 – 75.
WANG J,SONG C F,PAN W X,et al.Research on the internal flow state of bent pipes and optimization of component drag reductio[J].Fluid Machinery,2025,53(1):68 – 75.