

·灌溉技术与装备·

文章编号: 1672-3317(2024)02-0017-08

# 弯管与三通管组合形变件局部阻力及相邻影响特性

石喜, 田云霞, 贡力, 陶虎, 谭春彬  
(兰州交通大学, 兰州 730070)

**摘要:** 【目的】探究灌溉输水管网中的弯管与三通管组合形变件的局部阻力及其相邻影响特性。【方法】采用 Realizable  $k-\varepsilon$ 模型对不同雷诺数、管径比、分流比和相对间距下的组合形变件进行数值模拟, 研究局部阻力系数和相邻影响系数的变化规律, 分析不同相对间距下的流场分布。【结果】弯管—竖直支管的局部阻力系数 $\zeta_{01}$ 和弯管—水平支管的局部阻力系数 $\zeta_{02}$ 随雷诺数的增大而减小; $\zeta_{01}$ 、 $\zeta_{02}$ 随分流比的增加先减小后增大;随着管径比的增大, $\zeta_{01}$ 、 $\zeta_{02}$ 均呈减小趋势,且 $\zeta_{01}$ 的减小幅度更加明显;随着相对间距的增大, $\zeta_{01}$ 、 $\zeta_{02}$ 呈先减小后增大的趋势。弯管—竖直支管的相邻影响系数 $C_{01}$ 和弯管—水平支管的相邻影响系数 $C_{02}$ 随雷诺数、管径比、分流比和相对间距的变化呈不同的变化规律。局部阻力系数和相邻影响系数的变化取决于弯管二次流的发育、竖直支管涡流与水平支管涡流之间的相互作用。【结论】分流比、管径比、相对间距是弯管与三通管组合形变件管道系统的局部阻力、相邻影响的主要因素。

**关键词:** 组合形变件; 阻力特性; 相邻影响

中图分类号: TV134.2

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023121

OSID: 

石喜, 田云霞, 贡力, 等. 弯管与三通管组合形变件局部阻力及相邻影响特性[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(2): 17-24.

SHI Xi, TIAN Yunxia, GONG Li, et al. Responsive change in local resistances and adjacent influencing characteristics to the combined deformation of elbow and tee pipes[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(2): 17-24.

## 0 引言

【研究意义】弯管、三通管是灌溉输水管网中的主要形变件。为了适应地形和输水需求, 常常出现弯管与三通管组合的布设方式。研究表明, 当2个形变件紧密连接时, 流出第一个形变件的水流流态尚未恢复便进入第二个形变件, 因此存在相邻影响, 其阻力和流动特性与各自独立条件下的阻力和流动特性不同<sup>[1-2]</sup>。因此, 开展弯管与三通管组合形变件的水力特性研究对于输水管网技术发展具有重要的科学意义。

【研究进展】Rahmeyer<sup>[3]</sup>研究了不同管径下组合弯头的压力损失; Sami等<sup>[4]</sup>采用CFD方法研究了双弯头、三弯头组合形变件的压力损失; Salehi等<sup>[5]</sup>以直径为305 mm的圆形五戈尔弯头的组合形变件为研究对象, 分析了压力损失的变化; Li等<sup>[6]</sup>探讨了楔形构件在弯头和T形接头组合形变件中对局部阻力的影响, 并采用PIV技术和CFD模拟得到了管内流场分布; 王亚林等<sup>[7]</sup>对滴灌设计中相邻影响系数的取值提供了依据; 司徒菲等<sup>[8]</sup>为长距离、大管径输水管道提供

了可靠的局部阻力系数参考值; 李涛等<sup>[9]</sup>基于空调风道, 采用试验和数值模拟探讨了90°弯管Z型组合形变件局部阻力相邻影响的变化规律; 赵懿珺等<sup>[10]</sup>通过监测不同相对间距下Z形组合弯管沿程断面的流速, 分析了不同工况下轴向流速和二次流的分布; 陈磊<sup>[11]</sup>对弯头与三通近距离耦合管内的水动力进行了研究, 分析了减阻构件的机理并对其结构进行优化; 唐博等<sup>[12]</sup>探讨了90°四片U形组合弯管的局部水头损失及相邻影响系数, 提供了可减小阻力损失的措施; 陈晓等<sup>[13]</sup>采用在分离流、管道内及边界层流动中更具优势的Realizable  $k-\varepsilon$ 湍流模型, 对相对间距为0和5的2种组合弯管进行了数值模拟, 分析了流速、二次流及阻力损失的变化; 白兆亮等<sup>[14]</sup>、李琳等<sup>[15]</sup>研究了管道总局部阻力系数随孔板相对间距的变化规律, 并强调了相邻影响在局部水头损失计算中的重要性。【切入点】以往研究主要集中在双弯管组合方面, 但对弯管与三通管组合形变件阻力及相邻影响特性的研究甚少。【拟解决的关键问题】鉴于此, 本研究以输水系统中弯管与三通管组合形变件为研究对象, 基于数值模拟, 探讨不同雷诺数、管径比、分流比及相对间距下的局部阻力系数与相邻影响系数的变化规律, 并揭示流场特性, 以期对管网的水力设计和优化提供科学参考。

收稿日期: 2023-03-24 修回日期: 2023-09-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51969011); 甘肃省自然科学基金项目(20JR10RA239); 甘肃省高等学校产业支撑计划项目(2022CYZC-32)  
作者简介: 石喜(1985-), 男, 副教授, 主要从事工程水力学与计算流体力学研究。E-mail: shixi103@163.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

# 1 数值模型与方法

## 1.1 几何模型

采用Workbench ICEM建立弯管与三通管组合形变件的几何模型，图 1 为相对间距 $L_y/D=1.5$ 、弯径比 $R/D=1.5$ 条件下的模型示意图，其内径为 57 mm，壁厚为 3 mm，计算区域取上游主管长 $L_0=10D$  ( $D$ 为管道内径)，下游垂直支管和水平支管长 $L_1=L_2=14D$ 。上、下游取压点的布设位置 $P_0$ 、 $P_1$ 、 $P_2$ 如图 1 所示，其中 $l_0=8D$ ， $l_1=l_2=12D$ 。管道内水流温度为 20 °C，运动黏度 $\nu=1.007\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

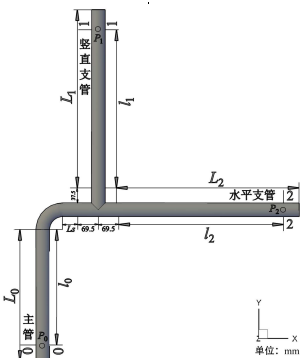


图 1 几何模型

Fig.1 Geometric model

## 1.2 数学模型

与标准 $k-\epsilon$ 模型和RNG  $k-\epsilon$ 模型相比，Realizable  $k-\epsilon$ 模型在雷诺应力方面与实际湍流高度一致，其在强逆压力梯度的边界层和分离流的计算领域更加准确，同时在射流的扩散、旋转流动以及二次流模拟方面更具优势<sup>[16]</sup>，湍动能 $k$ 及耗散率 $\epsilon$ 输运方程参见文献[17]。

## 1.3 网格划分和无关性检验

采用ICEM软件对几何模型划分O型结构化网格（图 2），在几何形状变化处进行网格加密以保证网格质量。为验证网格划分的合理性，以弯管的弯径比 $R/D=1.5$ 、相对间距 $L_y/D=1.5$  的组合形变件为例，取主管入口流速为 2.5 m/s。经计算，当网格数大于 380 000 后，网格数量的增长对局部阻力系数与网格质量的影响甚小，最终选用的网格数为  $39.003\times 10^4$ ，网格划分见图 2。所有工况下的网格数量介于  $37.654\times 10^4\sim 47.208\times 10^4$ ，网格质量均在 0.75 以上。

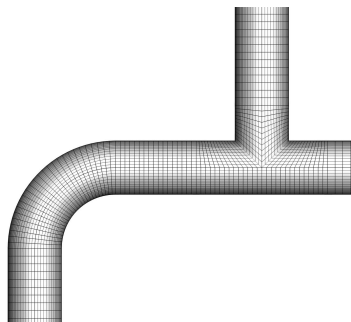


图 2 O型网格划分

Fig.2 O-type grid division diagram

## 1.4 数值求解方法与边界条件

采用三维稳态模型对数学模型进行求解，Z轴负方向设置重力加速度  $9.81 \text{ m/s}^2$ ，SIMPLEC算法用于计算流场，湍动能、湍流耗散率离散格式均采用二阶迎风格式。主管进口边界为速度入口，水流速度均匀地分布于整个断面，2 个支管出口边界条件均设为自由出流，壁面采用无滑移边界条件，近壁面区的流动采用标准壁面函数进行计算，粗糙壁面高度为 0.001 5 mm，残差收敛值为 0.000 1。

## 1.5 模型可行性分析

为了验证Realizable  $k-\epsilon$ 模型在数值模拟计算中的可行性，建立参考文献[11]中未添加减阻件的管道模型，管道壁厚为 4 mm，内径为 $D=32 \text{ mm}$ ，弯管与三通管的相对间距 $L_y/D=1.125$ ，弯管相对弯曲半径为 1。为减小进出管段对流体的影响，上、下游管道长度均为  $20D$ ，将 4 种试验流动工况下监测面的最大流速值与模拟结果进行对比，并分析误差。如表 1 所示，I区域G工况为支管 2 平均流速 $V_{m2}=0$  的极限情况，故误差较大，达到了 10.5%，其余工况下误差均小于 5%。

表 1 PIV试验与CFD数值模拟的最大流速对比

Tab.1 Comparative analysis of maximum velocity between PIV experiment and CFD numerical simulation m/s

计算结果	II 区域	I 区域	I 区域	I 区域
	D 工况	E 工况	F 工况	G 工况
	$V_{2max}$	$V_{1max}$	$V_{1max}$	$V_{1max}$
文献值	1.157	2.430	2.110	2.190
数值模拟值	1.180	2.390	2.140	1.960
误差/%	1.99	1.65	1.42	10.50

## 1.6 局部水头损失及相邻影响系数

在计算弯管与三通管组合形变件的局部水头损失时，取主管测压断面 0-0、竖直支管断面 1-1 和水平支管断面 2-2，0-0—1-1 断面、0-0—2-2 断面之间的能量守恒方程如下：

$$Z_0 + \frac{P_0}{\gamma} + \frac{V_0^2}{2g} = Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + h_{w01}, \quad (1)$$

$$Z_0 + \frac{P_0}{\gamma} + \frac{V_0^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_{w02}, \quad (2)$$

式中： $Z_0$ 、 $Z_1$ 、 $Z_2$ 分别为断面 0-0、1-1、2-2 计算点的位置水头 (m)； $g$ 为重力加速度 ( $\text{m/s}^2$ )； $\gamma$ 为水的重度 ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s}^2)$ )； $P_0$ 、 $P_1$ 、 $P_2$ 分别为各断面计算点的压强 ( $\text{N/m}^2$ )； $V_0$ 、 $V_1$ 、 $V_2$ 分别为各断面的平均流速 (m/s)； $h_{w01}$ 、 $h_{w02}$ 分别为断面 0-0—1-1、0-0—2-2 之间的总水头损失 (m)。

总水头损失计算式为：

$$h_{w01} = \sum h_{j01} + \sum h_{f01}, \quad (3)$$

$$h_{w02} = \sum h_{j02} + \sum h_{f02}, \quad (4)$$

式中： $\sum h_{j01}$ 、 $\sum h_{f02}$ 分别为弯管—竖直支管、弯管—水平支管间的沿程水头损失； $\sum h_{j01}$ 、 $\sum h_{j02}$ 为断面 0-0—1-1、0-0—2-2 之间的局部水头损失。

沿程水头损失计算式为：

$$\sum h_{f01} = \lambda_0 \frac{l_0 v_0^2}{d 2g} + \lambda_1 \frac{l_1 v_1^2}{d 2g}, \quad (5)$$

$$\sum h_{f02} = \lambda_0 \frac{l_0 v_0^2}{d 2g} + \lambda_2 \frac{l_2 v_2^2}{d 2g}, \quad (6)$$

式中： $\lambda_0$ 、 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  分别为主管、竖直支管和水平支管的沿程阻力系数； $d$  为管径 (m)； $l$  为管线长度 (m)。

管道雷诺数  $Re$  和湍流强度  $I$  的计算式为：

表 2 主管进口流速、雷诺数、湍流强度

Tab.2 Value of inlet velocity, Reynolds number and turbulence intensity of pipeline

入口流速 $v/(m\ s^{-1})$	0.5	1	1.5	2	2.5	3
雷诺数 $Re$	28 302	56 604	84 906	113 208	141 509	169 811
湍流强度 $I/\%$	4.44	4.07	3.87	3.74	3.63	3.55

由文献[18]可知，所有计算工况下管道内的流动均处于紊流光滑区。

$$2\ 000 < Re < 59.7/\varepsilon^{8/7}, \quad (9)$$

$$\varepsilon = \frac{2\Delta}{D}, \quad (10)$$

式中： $\varepsilon$  为相对粗糙度； $\Delta$  为绝对粗糙度。

采用布拉修斯方程计算沿程阻力系数<sup>[19]</sup>，如下：

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}, \quad (11)$$

式中： $Re$  为雷诺数。

局部阻力系数计算式如下：

$$\zeta_{01} = \frac{(h_{w01} - \sum h_{f01})}{V_0^2/2g}, \quad (12)$$

$$\zeta_{02} = \frac{(h_{w02} - \sum h_{f02})}{V_0^2/2g}, \quad (13)$$

式中： $\zeta_{01}$ 、 $\zeta_{02}$  分别为弯管—竖直支管、弯管—水平支管间的局部阻力系数；根据实际工况，局部阻力系数的计算以上游主管的流速水头  $V_0^2/2g$  为基准。

当弯管与三通管之间的安装距离  $L_s$  小于单个形变件的上、下游影响长度时会产生局部阻力相邻影响，采用相邻影响系数来分析弯管与三通管之间的相互影响程度，计算式为：

$$Re = \frac{vD}{\nu}, \quad (7)$$

$$I = 0.16 \times Re^{-1/8}, \quad (8)$$

式中： $v$  为断面平均流速 (m/s)； $D$  为管道内径 (m)； $\nu$  为运动黏度 ( $m^2/s$ )。

主管进口流速介于 0.5~3.0 m/s，雷诺数、湍流强度如表 2 所示。

$$C_{01} = \frac{\zeta_{01}}{\zeta_1 + \zeta_2}, \quad (14)$$

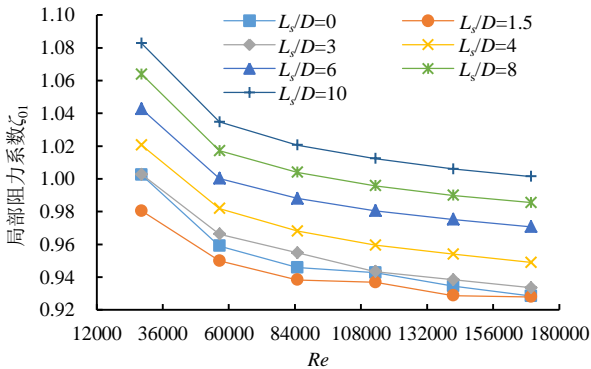
$$C_{02} = \frac{\zeta_{02}}{\zeta_1 + \zeta_3}, \quad (15)$$

式中： $C_{01}$ 、 $C_{02}$  分别为弯管与竖直支管、水平支管之间的相邻影响系数； $\zeta_1$  为单个弯管的局部阻力系数； $\zeta_2$ 、 $\zeta_3$  分别为单个三通管的主管—竖直支管、主管—水平支管的局部阻力系数。

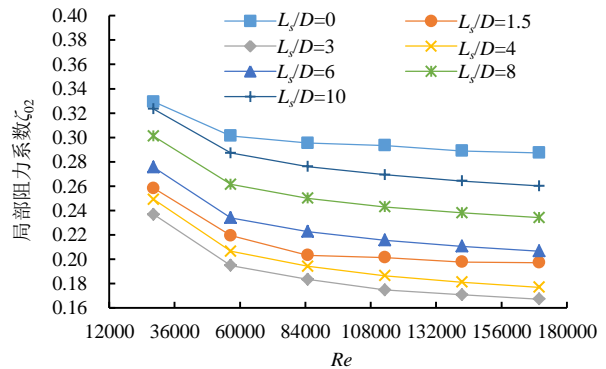
## 2 结果与分析

### 2.1 局部水头损失及相邻影响系数随雷诺数的变化

图 3 和图 4 分别为局部阻力系数  $\zeta_{01}$ 、 $\zeta_{02}$  及相邻影响系数  $C_{01}$ 、 $C_{02}$  在  $L_s/D=0\sim 10$  条件下随雷诺数  $Re$  的变化。由图 3 可知， $\zeta_{01}$ 、 $\zeta_{02}$  均随雷诺数的增大呈减小趋势，当  $Re < 6 \times 10^4$  时， $\zeta_{01}$ 、 $\zeta_{02}$  的降低幅度较大，在  $Re > 6 \times 10^4$  后下降幅度减缓。计算雷诺数的范围在 28 302~169 811 之间，组合形变件中惯性力具有主导作用。在一定的  $L_s/D$  条件下， $\zeta_{01}$  大于  $\zeta_{02}$ ，这是因为主流进入竖向支管的偏转角度更大，对主流的能量耗散较多。由图 4 可知，随着雷诺数的增大，相邻影响系数  $C_{01}$  基本趋于平稳，而  $C_{02}$  呈逐渐减小趋势，表明雷诺数的变化对水平方向的相邻影响程度较大。



(a)  $\zeta_{01}$  随  $Re$  变化



(b)  $\zeta_{02}$  随  $Re$  变化

图 3 弯管与三通管组合形变件局部阻力系数随  $Re$  的变化

Fig.3 Variation of local resistance coefficient of combined deformed parts of elbow and tee with Reynolds number

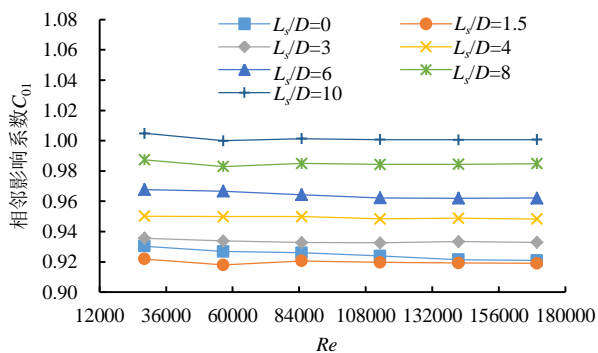
### 2.2 局部水头损失及相邻影响系数随分流比的变化

图 5 和图 6 分别为组合形变件管径比  $d=1$ 、弯管

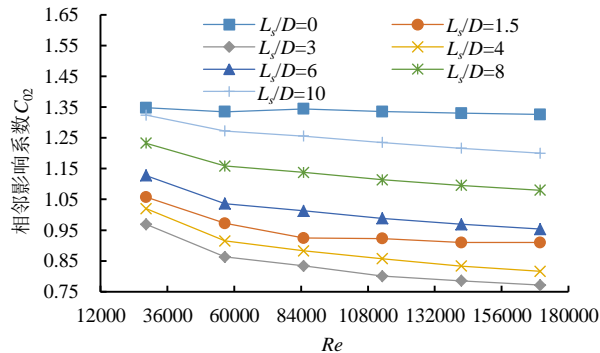
$R/D=1.5$ 、雷诺数  $Re=141\ 509$  时，局部阻力系数  $\zeta_{01}$ 、 $\zeta_{02}$  及相邻影响系数  $C_{01}$ 、 $C_{02}$  随分流比  $q$  ( $q=Q_1/Q_0$ ，其中

$Q_0$ 、 $Q_1$  分别为上游主管、三通管的竖直支管流量) 的变化。由图 5 可知, 在不同相对间距下, 随着  $q$  的增加, 局部阻力系数  $\zeta_{01}$ 、 $\zeta_{02}$  呈先减小后增大的变化趋势,  $\zeta_{01}$  的最小值出现在  $q=0.4$  条件下;  $\zeta_{02}$  的最小值出现在  $q=0.2$  或  $0.4$  条件下。在  $q$  逐渐增大的过程中, 更多流经弯管的水流需克服惯性, 改变水流方向进入竖直支管, 管内流速分布急剧变化, 出现分离区; 水

平支管因撞击和剪切作用也会产生小涡流区,  $\zeta_{01}$ 、 $\zeta_{02}$  持续增大。由图 6 可知, 随着  $q$  的增大,  $C_{01}$  呈先增大后减小再增大的变化, 不同相对间距下  $C_{01}$  的最小值均出现在  $q=0.1$  条件下; 相邻影响系数  $C_{02}$  呈先上升后下降趋势。当  $L_s/D < 6$  时,  $C_{02}$  的最大值、最小值分别出现在  $q=0.2$ 、 $0.6$  条件下。从变化幅度来看, 弯管与三通管的相互影响在水平支管方向更加明显。



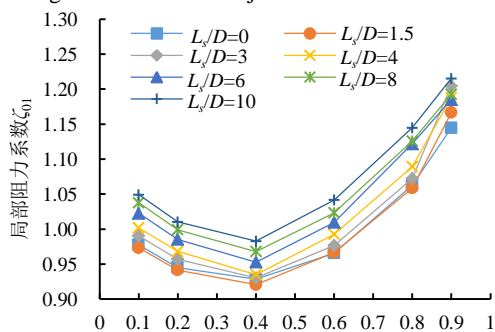
(a)  $C_{01}$  随  $Re$  变化



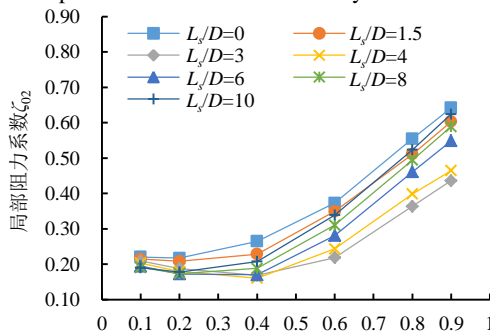
(b)  $C_{02}$  随  $Re$  变化

图 4 弯管与三通管组合形变件相邻影响系数随  $Re$  的变化

Fig.4 Variation of adjacent influence coefficient of combined deformed parts of elbow and tee with Reynolds number



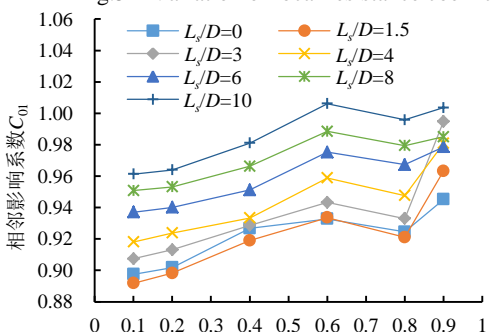
(a)  $\zeta_{01}$  随  $q$  变化



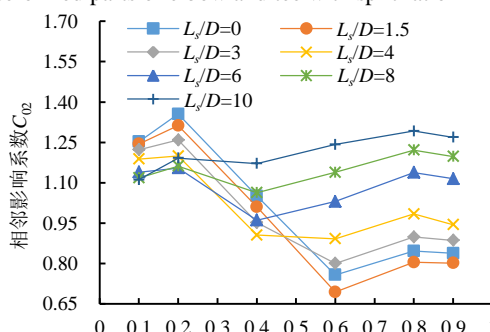
(b)  $\zeta_{02}$  随  $q$  变化

图 5 弯管与三通管组合形变件局部阻力系数随分流比的变化

Fig.5 Variation of local resistance coefficient of combined deformed parts of elbow and tee with split ratio



(a)  $C_{01}$  随  $q$  变化



(b)  $C_{02}$  随  $q$  变化

图 6 弯管与三通管组合形变件相邻影响系数随分流比的变化

Fig.6 Variation of adjacent influence coefficient of combined deformed parts of elbow and tee with split ratio

### 2.3 局部水头损失及相邻影响系数随管径比的变化

图 7、图 8 分别为组合形变件分流比  $q=0.5$ 、弯管  $R/D=1.5$ 、 $Re=141\ 509$  条件下的局部阻力系数  $\zeta_{01}$ 、 $\zeta_{02}$  及相邻影响系数  $C_{01}$ 、 $C_{02}$  随管径比  $d$  ( $d=D_1/D_0$ , 其中  $D_0$ 、 $D_1$  分别为主管和竖直支管管径) 的变化, 在调整管径比时, 只改变竖直支管的管径, 主管管径不变。如图 7 所示, 当管径比  $d$  由  $0.4$  增加至  $1$  时, 局部阻

力系数  $\zeta_{01}$ 、 $\zeta_{02}$  均减小,  $\zeta_{01}$  的减小幅度更加明显。对于  $\zeta_{02}$ , 管径比减小时, 水平支管的管径维持不变, 竖直支管管径的减小对水平支管的影响程度降低, 故  $\zeta_{02}$  的变化幅度不大。因此, 在实际工程中应尽量选择主管、支管管径差异较小的三通管。由图 8 可知, 以  $d=0.63$  为分界点, 相邻影响系数  $C_{01}$  先减小后增大, 最小值为  $0.93$ ;  $L_s/D=8$  时,  $C_{02}$  先减小后增大, 最小



值出现在 $d=0.5$ ，其余相对间距下，均随管径比的增大而增大，最小值为0.70。

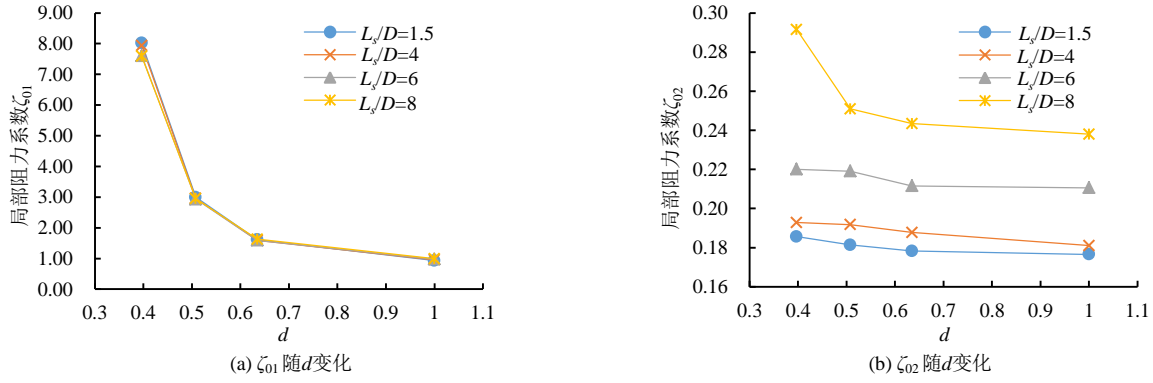


图 7 弯管与三通管组合形变件局部阻力系数随管径比的变化

Fig.7 Variation of local resistance coefficient of combined deformed parts of elbow and tee with pipe diameter ratio

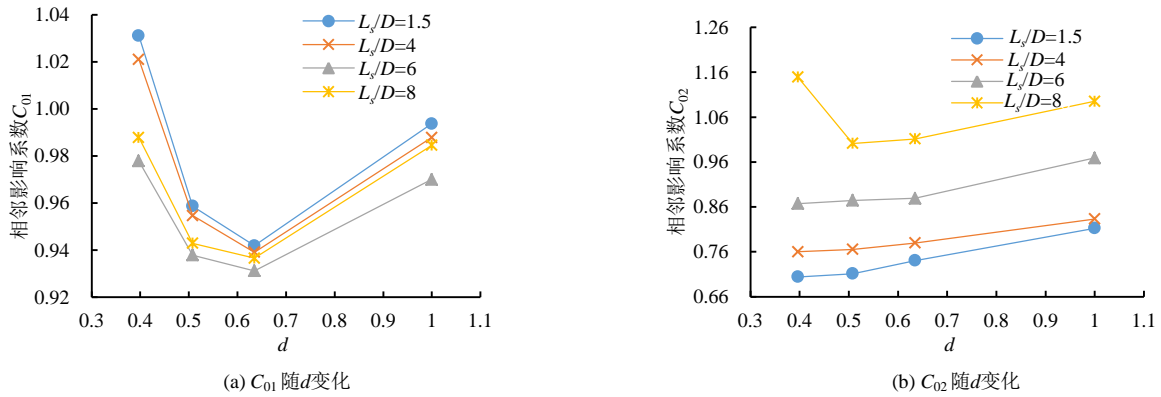


图 8 弯管与三通管组合形件相邻影响系数随管径比的变化

Fig.8 Variation of adjacent influence coefficient of combined deformed parts of elbow and tee with pipe diameter ratio

### 2.4 局部水头损失及相邻影响系数随相对间距的变化

图9和图10分别为组合形变件局部阻力系数 $\zeta_{01}$ 、 $\zeta_{02}$ 及相邻影响系数 $C_{01}$ 、 $C_{02}$ 随相对间距 $L_s/D$ 的变化，所有计算条件下的分流比 $q=0.5$ 、弯径比 $R/D=1.5$ 、管径比 $d=1$ 。由图9可知， $\zeta_{01}$ 、 $\zeta_{02}$ 随相对间距的增加呈先减小后增大的趋势。 $L_s/D>1.5$ 条件下， $\zeta_{01}$ 随 $L_s/D$ 的增大而增大，这是由于随着相对间距的增大，弯管内的二次流得到了充分发育，使局部水头损失增加；虽然相对间距的增大使垂直支管受弯管的影响减弱，支

管内涡流区有所减小，但二次流的影响起主导作用。当 $L_s/D<3.0$ 时， $\zeta_{02}$ 随相对间距的增加而下降，在 $L_s/D>3.0$ 后呈增加的趋势。不同雷诺数下 $\zeta_{02}$ 增长幅度为36.6%~55.6%， $\zeta_{02}$ 的变化取决于弯管二次流以及水平支管外壁形成的涡流。如图10所示，相邻影响系数 $C_{01}$ 、 $C_{02}$ 的变化与 $\zeta_{01}$ 、 $\zeta_{02}$ 一致， $C_{01}$ 的最小值出现在 $L_s/D=1.5$ 条件下，当 $L_s/D=10$ 时， $C_{01}\approx 1$ ，表明弯管与三通管垂直支管脱离相互影响区； $C_{02}$ 的最小值出现在 $L_s/D=3$ 条件下。

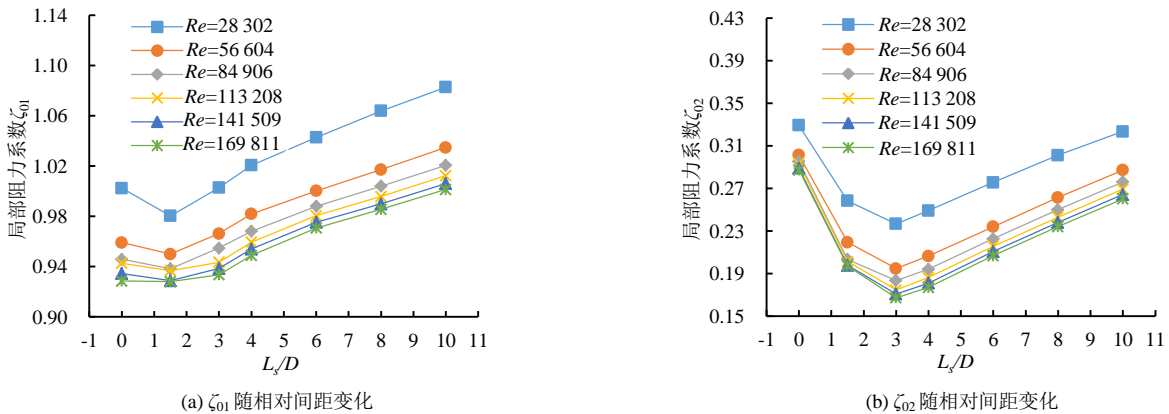


图 9 弯管与三通管组合形变件局部阻力系数随相对间距的变化

Fig.9 Variation of local resistance coefficient of combined deformed parts of elbow and tee with relative spacing

### 2.5 压力云图

图 11 为主管雷诺数 $Re=141\ 509$ 、弯径比 $R/D=1.5$ 、

分流比 $q=0.5$ 条件下，相对间距分别为0、1.5、4和8时 $Z=0$ 截面的压力分布。不同相对间距下弯管内部的

压强分布基本一致，由于离心力、惯性力的作用，弯管出现压力梯度，凸壁处压强减小，凹壁处压强增大；当 $L_s/D=0$ 时，管内压强梯度明显，其余相对间距下管内压强分布相似，表明相对间距的增大对垂直支管压

力分布影响较小；当 $L_s/D=0$ 时，水平支管的压强较小，当 $L_s/D=1.5$ 时，水平支管的压强增大，当 $L_s/D>1.5$ 后，水平支管内的压强随相对间距的增大而减小。可见，水平支管压力分布受相对间距变化的影响较大。

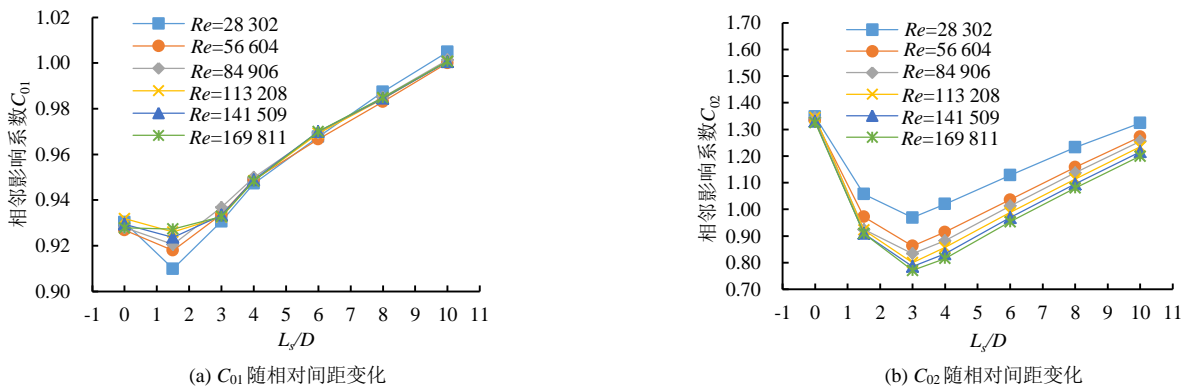


图 10 弯管与三通管组合形变件相邻影响系数随相对间距的变化

Fig.10 Variation of adjacent influence coefficient of combined deformed parts of elbow and tee with relative spacing

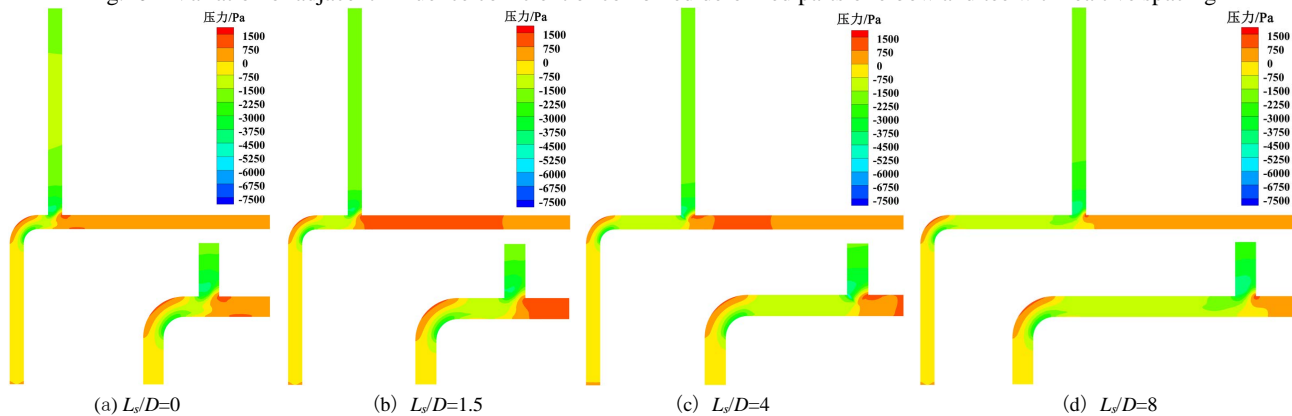


图 11 不同相对间距时压力云图 ( $Re=141\ 509$ )

Fig.11 Pressure cloud map at different relative distances ( $Re=141\ 509$ )

### 2.6 速度与流线云图

图 12 和图 13 为管道入口雷诺数 $Re=141\ 509$ 、弯径比 $R/D=1.5$ 、分流比 $q=0.5$ 条件下，相对间距分别为 0、1.5、4、8 时 $Z=0$  截面的速度和流线分布。不同相对间距下，弯管内的流速分布变化相似，进口分布均匀。 $L_s/D=0$  时，流出弯管的主流直接进入垂直支管，其余相对间距下流出弯管的主流先靠近弯管出口外壁，发生偏转后再进入垂直支管，形成流速梯度，竖

直支管右侧形成高速区；当 $L_s/D=1.5、4$  和 8 时，在水平支管的下侧形成低速区，且随着间距的增加低速区域增大。结合图 13 可知，垂直支管中的涡流区随相对间距的增加而减小；在 $L_s/D=0$  和 1.5 时，水平支管中出现明显的二次流， $L_s/D=4$  和 8 时，水平支管无明显的二次流，但在水平支管的外侧形成涡流。说明水头损失主要取决于二次流与涡流的相互作用。

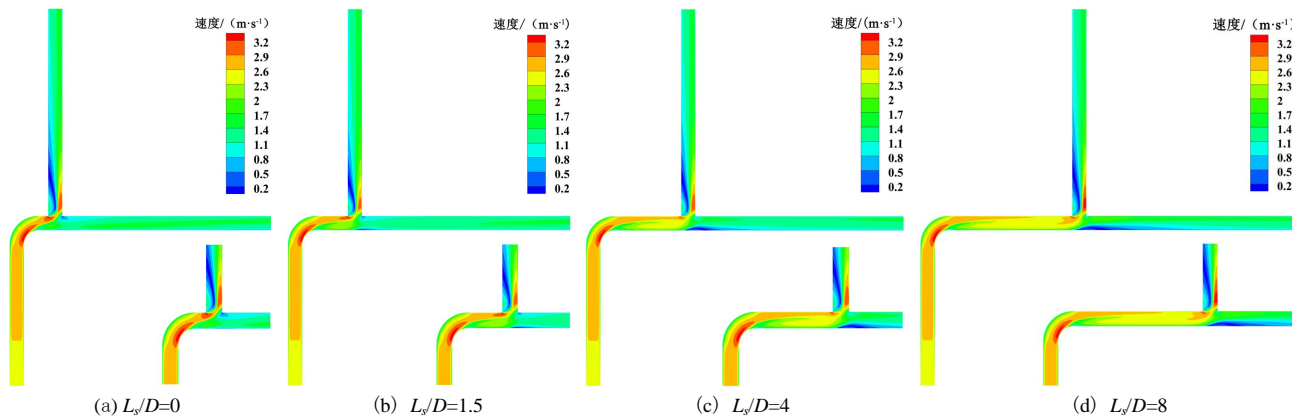
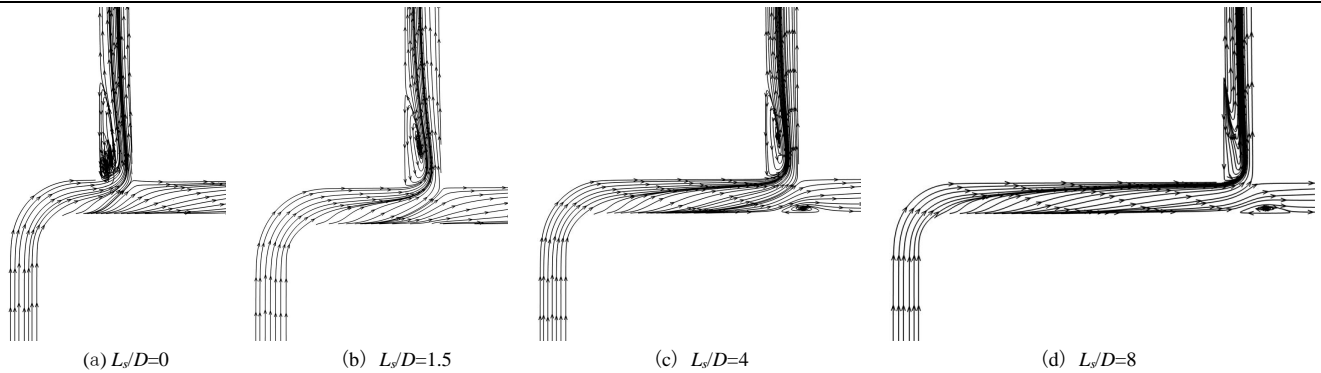


图 12 不同相对间距时速度云图 ( $Re=141\ 509$ )

Fig.12 Velocity cloud map at different relative distances( $Re=141\ 509$ )

图 13 不同相对间距时流线分布 ( $Re=141\ 509$ )Fig.13 Streamline distribution at different relative distances ( $Re=141\ 509$ )

### 3 讨论

实际输水工程中,为了适应地形并实现水资源的高效利用,局部构件的组合形式愈发多样。相比于以往研究<sup>[1-2,9-10,12-13,18-21]</sup>中对单个形变件阻力特性及双弯管局部阻力和相邻影响的研究,本研究以弯管与三通管组合形变件为研究对象,建立文献[11]中未添加减阻件的弯头与三通近距离耦合管道的几何模型,将数值模拟结果与PIV试验、SST  $k-\omega$ 模型计算获得的特征断面最大流速进行对比,对模型可靠性进行了验证。采用Realizable  $k-\varepsilon$ 模型对管内流场进行数值模拟,计算不同工况下弯管—竖直支管、弯管—水平支管的局部阻力系数和相邻影响系数,并分析其变化规律。当2个局部构件安装较近时,组合形变件局部阻力系数并不等于二者局部阻力系数的累加<sup>[2]</sup>。随着雷诺数、分流比、管径比的增大, $\zeta_{01}$ 、 $\zeta_{02}$ 与文献[18, 20]中弯管、三通管独立条件下的变化规律类似。对于给定的2个形变件的组合,相邻影响系数的变化与雷诺数、相对间距及组合的形状参数相关<sup>[2]</sup>,相邻影响系数随雷诺数 $Re$ 的变化等同于弯管、三通管单个形变件局部阻力系数与 $Re$ 的相关关系,这与贺益英等<sup>[2]</sup>研究结果一致。组合形变件工况的改变对三通管水平支管的影响更加显著。雷诺数增大的过程中, $\zeta_{01}$ 、 $\zeta_{02}$ 逐渐减小; $C_{01}$ 基本趋于平稳,而 $C_{02}$ 逐渐减小。随着 $q$ 的增加, $\zeta_{01}$ 、 $\zeta_{02}$ 均先减小后增大;相邻影响系数 $C_{02}$ 变化幅度大于 $C_{01}$ 。管径比较小时,由主管-竖直支管沿着水流方向过水断面面积变化较大,三通管分叉处流速剧烈变化,消耗能量较多。随着 $d$ 的增大, $\zeta_{01}$ 、 $\zeta_{02}$ 均减小; $C_{01}$ 在不同相对间距下均呈先减小后增大的变化趋势,而 $C_{02}$ 在 $L_s/D=1.5\sim 6$ 下随管径比的增大而增大。 $L_s/D>1.5$ 后, $\zeta_{01}$ 随 $L_s/D$ 的增大而增大,这是由于相对间距增大时,弯管内二次流的充分发育迫使主流流速发生再分布,导致局部水头损失增加。 $\zeta_{02}$ 在 $L_s/D>3.0$ 后呈增加趋势,弯管二次流以及水平支管外壁涡流区的发育程度是 $\zeta_{02}$ 变化的主要影响因素。

### 4 结论

- 1) 随着雷诺数的增大,局部阻力系数 $\zeta_{01}$ 、 $\zeta_{02}$ 变化与单个形变件相似,均呈减小趋势; $C_{01}$ 基本趋于平稳, $C_{02}$ 逐渐减小。
- 2) 随管径比的增大, $\zeta_{01}$ 、 $\zeta_{02}$ 均减小; $C_{01}$ 以 $d=0.63$ 为分界点先减小后增大,而 $C_{02}$ 在 $L_s/D<8$ 时持续增大,最小值为0.70。
- 3) 相对间距增大时, $\zeta_{01}$ 、 $\zeta_{02}$ 及 $C_{01}$ 、 $C_{02}$ 呈先减小后增大的趋势。
- 4) 结合流场特性分析,局部阻力及相邻影响变化取决于弯管二次流的发育、竖直支管涡流及分岔处水平支管涡流等作用。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

#### 参考文献:

- [1] 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,2003,34(11):54-58.  
HE Yiyang, ZHAO Yijun, SUN Shuqing, et al. Experimental study on local loss coefficient of bend in pipeline[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(11): 54-58.
- [2] 贺益英,赵懿珺,孙淑卿,等.输水管线中弯管局部阻力的相邻影响[J].水利学报,2004,35(2):17-20.  
HE Yiyang, ZHAO Yijun, SUN Shuqing, et al. Interaction of local loss between bends in pipe line[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(2): 17-20.
- [3] RAHMEYER W J. Pressure loss data for large pipe ells, reducers, and expansions[J]. ASHRAE Transactions, 2002, 108(1): 360-375.
- [4] SAMI S, CUI J. Numerical study of pressure losses in close-coupled fittings[J]. HVAC&R Research, 2004, 10(4): 539-552.
- [5] SALEHI M, IDEM S, SLEITI A. Experimental determination and computational fluid dynamics predictions of pressure loss in close-coupled elbows (RP-1682)[J]. Science and Technology for the Built Environment, 2017, 23(7): 1 132-1 141.
- [6] LI Angui, CHEN Xi, CHEN Lei, et al. Study on local drag reduction effects of wedge-shaped components in elbow and T-junction close-coupled pipes[J]. Building Simulation, 2014, 7(2): 175-184.
- [7] 王亚林,朱德兰,张林,等.插入式滴灌管局部阻力相邻影响研究[J].农业机械学报,2015,46(11):187-194.  
WANG Yalin, ZHU Delan, ZHANG Lin, et al. Local resistance interaction in trickle laterals equipped with integrated on-line emitters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 187-194.
- [8] 司徒菲,陈才高,李金印,等.长距离大口径输水管线摩阻系数及局部水头损失系数研究[J].给水排水,2011,37(8):108-111.

- [9] 李涛, 李安桂. 通风管道 90° 弯管 Z 型组合局部阻力相邻影响系数的实验与数值模拟[J]. 流体机械, 2006, 34(8): 9-14.  
LI Tao, LI Angui. Numerical and experimental study of ratio of net closed coupled  $\xi$ /uncoupled  $\xi$  of 90° ells in Z-shape[J]. Fluid Machinery, 2006, 34(8): 9-14.
- [10] 赵懿珺, 贺益英. 直角 Z 形组合双弯管流动特性的研究[J]. 水利学报, 2006, 37(7): 778-783.  
ZHAO Yijun, HE Yiyong. Hydraulic characteristics of Z-type pipe combination with two similar rectangular bends[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(7): 778-783.
- [11] 陈磊. 弯头耦合三通降阻 PIV 实验及 CFD 研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.  
CHEN Lei. Study on the drag reduction of elbow and T-junction close-coupled pipes by PIV and CFD[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009.
- [12] 唐博, 李进平, 罗文. 2 个 U 型组合的 90° 4 片弯管的局部水头损失及相互影响[J]. 武汉大学学报(工学版), 2013, 46(5): 557-561, 571.  
TANG Bo, LI Jinping, LUO Wen. Local head loss and interaction of U-shaped 90° ducts[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2013, 46(5): 557-561, 571.
- [13] 陈晓, 赵懿珺, 贺益英, 等. 90° 弯管 Z 形组合局部阻力特性研究[J]. 人民黄河, 2015, 37(5): 107-111.  
CHEN Xiao, ZHAO Yijun, HE Yiyong, et al. Numerical simulation investigation of local resistance characteristics of Z-type combination with two 90° bends[J]. Yellow River, 2015, 37(5): 107-111.
- [14] 白兆亮, 李琳. 有压输水管道孔板局部阻力相邻影响试验[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(2): 28-31, 42.  
BAI Zhaoliang, LI Lin. Test on local resistance adjacent influence of pressure water pipe[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(2): 28-31, 42.
- [15] 李琳, 白兆亮. 有压管道孔板局部阻力相邻影响系数研究[J]. 水电能源科学, 2016, 34(5): 107-109, 97.  
LI Lin, BAI Zhaoliang. Study on orifice plate's local resistance adjacent influence coefficient in pressure pipe[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(5): 107-109, 97.
- [16] SHIH T H, LIOU W W, SHABBAR A, et al. A new  $k-\epsilon$  eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows[J]. Computers & Fluids, 1995, 24(3): 227-238.
- [17] 江帆, 黄鹏. Fluent 高级应用与实例分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [18] 赵月. 基于 CFD 的管道局部阻力的数值模拟[D]. 大庆: 东北石油大学, 2011.  
ZHAO Yue. Numerical simulation on local resistance based on CFD[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2011.
- [19] 杨校礼. 三岔管水流数值模拟及水流特性研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2004.
- [20] 石喜, 吕宏兴, 朱德兰, 等. PVC 三通管水流阻力与流动特征分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 73-79, 89.  
SHI Xi, LYU Hongxing, ZHU Delan, et al. Flow resistance and characteristics of PVC tee pipes[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 73-79, 89.
- [21] 曹彪, 吕宏兴, 朱德兰, 等. 灌溉管网中变径管水力特征的试验研究与数值模拟[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(3): 24-27.  
CAO Biao, LYU Hongxing, ZHU Delan, et al. Experimental study and numerical simulation on hydrodynamic characteristics of adapter bonnet in irrigation pipe network[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(3): 24-27.

## Responsive change in local resistances and adjacent influencing characteristics to the combined deformation of elbow and tee pipes

SHI Xi, TIAN Yunxia, GONG Li, TAO Hu, TAN Chunbin

(Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** 【Objective】 The objective of this paper is to explore the response of local resistance and adjacent influence characteristics to combined deformation of elbow and tee pipes in irrigation water transmission network.

【Method】 The combined deformation parts with different Reynolds number, tube diameter ratio, shunt ratio and relative spacing were numerically simulated using the  $k-\epsilon$  model, from which we studied the variation in local resistance coefficient and adjacent influence coefficient, as well as the flow distribution with different relative spacings. 【Result】 The local resistance coefficient  $\zeta_{01}$  of the curved pipe-vertical branch pipe and the local resistance coefficient  $\zeta_{02}$  of curved pipe-horizontal branch pipe both decrease with the increase in the Reynolds number. With the increase in shunt ratio, both  $\zeta_{01}$  and  $\zeta_{02}$  decrease at first and then increase. With the increase in pipe diameter ratio,  $\zeta_{01}$  and  $\zeta_{02}$  decrease, especially  $\zeta_{01}$ . With the increase in relative spacing,  $\zeta_{01}$  and  $\zeta_{02}$  decrease at first and then increase. The adjacent influence coefficient  $C_{01}$  of the curved pipe-vertical branch pipe and the adjacent influence coefficient  $C_{02}$  of curved pipe-horizontal branch pipe also vary but differently with the Reynolds number, pipe diameter ratio, shunt ratio and relative spacing.  $C_{02}$  varies more than  $C_{01}$ . It is shown that the degree of mutual influence in the horizontal direction is sensitive. The analysis of the flow field shows that the changes in the local resistance coefficient and the adjacent influence coefficient depend on the development of secondary flow in the curved pipe and interaction of the eddy current in the vertical branch and the horizontal branch. 【Conclusion】 Shunt ratio, pipe diameter ratio and relative spacing are the main factors influencing local resistance and adjacent influence of elbow and tee combined deformation parts.

**Key words:** combined deformation parts; resistance characteristics; adjacent influence

责任编辑: 韩洋