

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.015

PVC三通管水流阻力与流动特征分析*

石喜 吕宏兴 朱德兰 孙斌 曹彪

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 对 DN75 × 75 和 DN75 × 50 两种 PVC 三通管进行了试验与数值模拟研究, 结果表明主管-侧管流向的局部阻力系数 ζ_{01} 和主管-直管流向的局部阻力系数 ζ_{02} 随雷诺数的增大而减小, 在雷诺数大于 1.5×10^5 之后基本趋于稳定; ζ_{01} 、 ζ_{02} 与分流比呈二次抛物线关系, 通过验证数值计算与试验结果基本吻合。在此基础上对 5 种常见型号的三通管进行了数值模拟, 表明 ζ_{01} 、 ζ_{02} 随管径比的增大而减小, ζ_{01} 的变化幅度远大于 ζ_{02} 的幅度, 并给出了局部阻力系数随分流比变化的定量表达式; 流动特征分析可知引起局部水头损失 ζ_{01} 的主要原因是水流方向变化的损失和离心力造成的速度分布变化损失, 而引起 ζ_{02} 的主要原因是较大分流比时水流的剪切和横向环流导致直管分岔处上侧的漩涡运动和流速梯度变化损失。

关键词: PVC 三通管 阻力特性 流动特征 数值模拟

中图分类号: TV134.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)01-0073-07

Flow Resistance and Characteristics of PVC Tee Pipes

Shi Xi Lü Hongxing Zhu Delan Sun Bin Cao Biao

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Two kinds of tee pipes DN75 × 75 and DN75 × 50 were discussed by test methods and numerical simulation. The results showed that local resistance coefficient of main branch to side branch ζ_{01} and main branch to straight branch ζ_{02} decreased with increasing Reynolds number and stabilized after the Reynolds number was greater than 1.5×10^5 . The local resistance coefficient ζ_{01} and ζ_{02} was correlated with the flow ratio by second-order parabolic equations. The numerical simulation results were in good with the experimental data. Through those variables other five kinds of tee pipes were simulated numerically. It showed that the local resistance coefficient ζ_{01} and ζ_{02} decreased with increasing diameter ratio, and the variable extent of ζ_{01} was greater than ζ_{02} . Also the expression equation of local resistance coefficient variation with the flow ratio was given simultaneously. Flow characteristics analysis showed that the main reason caused the local resistance coefficient ζ_{01} due to the loss of direction changes and velocity distribution caused by centrifugal force, and changes ζ_{02} was due to the vortex motion and velocity gradient in the straight branch caused by water shearing and transverse circulation in the large flow ratio.

Key words: PVC tee pipes Resistance characteristics Flow characteristics Numerical simulation

引言

喷灌、滴灌等技术近年来在我国得到了大面积的推广应用^[1]。在灌溉系统的输配水管网中往往

通过大量使用三通管来改变水流方向增加出水口。水流通过三通管时由于边界的突变产生强烈的紊乱, 消耗大量的机械能。在三通管分岔处水流流速分布、流态等因素复杂多变, 仅依靠理论和试验分析

收稿日期: 2012-07-11 修回日期: 2012-08-22

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2010AA10A302)、国家自然科学基金资助项目(50909083)和高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20090204110019)

作者简介: 石喜, 博士生, 主要从事工程水力学、计算流体力学研究, E-mail: shixi103@163.com

通讯作者: 吕宏兴, 教授, 博士生导师, 主要从事工程水力学、灌溉水力学研究, E-mail: lvhongxing@tom.com

变得比较困难,随着计算流体力学(CFD)技术的兴起,数值计算成为一种很好的方法^[2]。目前在实际工程中三通管水头损失的计算主要有以下几种方法:按照常数处理;按管道沿程水头损失的一定比率估算^[3];参照水力手册中的计算方法。按常数或沿程水头损失一定比率的估算在流量和管径不同时可能造成计算不准确;而流体手册中一般没有注明管道的适用性,不同材质管道的粗糙度不同,因而阻力系数也不同。在灌溉管网中常使用PVC管道,因此很有必要分析探讨PVC三通管的阻力特性及流动特征。

国内外学者对分岔管道进行了大量的研究^[4-16],但前人的研究大多针对等径分岔管,而对变径的研究较少。本文采用试验和数值模拟相结合的方法对灌溉系统中常见的不同型号PVC分流三通管进行研究,分析水流阻力、流场特征变化以及引起局部水头损失的原因。

1 试验系统与方法

试验在西北农林科技大学水利与建筑工程学院北校区水力学与泥沙实验室进行,试验系统由水泵、高位水箱、下水库、钢管、PVC管道、电磁流量计、60°三角量水堰、调节阀、球阀、地下回水渠道等组成,如图1所示。调节阀上游为钢管(DN100),下游为PVC管道(有De75×3.6和De50×2.4两种),试验三通管选用DN75×75和DN75×50两种,试验水温18℃,其运动粘度 $\nu = 1.0672 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。

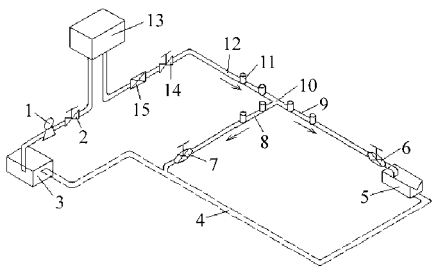


图1 试验系统布置示意图

Fig. 1 Plan of test system

1. 水泵 2. 闸阀 3. 下水库 4. 地下回水渠道 5. 三角量水堰 6. 球阀 7. 球阀 8. 侧管 9. 直管 10. PVC三通管 11. 压力传感器 12. 主管 13. 高位水箱 14. 调节阀 15. 电磁流量计

三通管由主管、直管和侧管组成,各管段流量的改变由上游调节阀、球阀1和球阀2控制调节,试验通过2种调节方式进行:①通过调节球阀1和球阀2使三通管保持一定的分流比,然后通过调节上游调节阀改变不同的进口流量,以探讨阻力系数随雷诺数的变化。②保持上游调节阀开度最大,然后调

节球阀1和球阀2改变不同的分流比,以寻求阻力系数变化的定量关系。主管流量采用精度为 $\pm 0.2\%$ 的IFM4080F型电磁流量计测量,直管流量由60°三角薄壁量水堰测量,然后对流量计和三角量水堰测量结果进行率定,测流精度为 $\pm 0.5\%$ 。侧管流量由主管流量减去直管流量得出。三角薄壁量水堰的流量计算公式为

$$Q = \frac{8}{15} C_e \tan \frac{\theta}{2} \sqrt{2gh_e^{\frac{5}{2}}} \quad (1)$$

式中 C_e ——三角形薄壁量水堰的流量系数,取0.577

θ ——三角堰的角度,取60°

h_e ——堰上水头,m

为了保证初始流态以及减小三通管上下游的影响范围,测压点布置在主管上游10倍和20倍管径处、侧管及直管下游的20倍和30倍管径处。各测压点处的压力采用精度为 $\pm 0.1\%$ 的硅压阻压力传感器实时监测,试验前对所有压力传感器进行标定,标定的压力传感器线性度相关系数均为0.9999以上。所有传感器信号由配有PCI8602型数据采集仪的个人计算机进行数据采集记录,为了保证数据的稳定性,数据采集仪由稳压电源供电。

2 数值计算方法与网格生成

2.1 湍流模型与计算方法

在 $k-\varepsilon$ 模型中,Realizable $k-\varepsilon$ 模型在模拟计算强逆压力梯度、射流扩散率以及模拟分离、回流和旋转时有较高的精度^[17]。本文选用Realizable $k-\varepsilon$ 模型对三通管的水流阻力及流场进行计算,其湍动能及耗散率输运方程为^[18]

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M \quad (2)$$

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b \quad (3)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (5)$$

其中 $C_1 = \max \left(0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right)$ $\eta = Sk/\varepsilon$

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad \tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k$$

$$\Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk} \omega_k \quad A_s = \sqrt{6} \cos \phi$$

$$\phi = \frac{1}{3} \arccos(\sqrt{6}W) \quad W = S_{ij} S_{jk} S_{ki} / (S_{ij} S_{ij})^{1/2}$$

式中 ρ ——流体密度 t ——时间

x_i, x_j ——坐标分量

ε_{ijk} ——三阶单位张量

μ ——流体动力粘度

μ_t ——湍流粘性系数

k ——湍动能 ε ——耗散率

σ_k ——湍动能 k 的湍流普朗特数,取 1.0

σ_ε ——耗散率 ε 的湍流普朗特数,取 1.2

G_k ——由平均速度梯度引起的湍动能产生项

G_b ——由浮力影响引起的湍动能的产生项
(本文中不计)

Y_M ——可压缩湍流中的扩张消散项(本文中
不计)

u_i, u_j ——速度分量

$C_{3\varepsilon}$ ——与浮力项有关的系数

$\bar{\Omega}_{ij}$ ——从角速度 ω_k 的参考系中观察到时均
转动速率张量

S_{jk}, S_{ki} ——应变率

$C_{1\varepsilon}, C_2, A_0$ ——常数,分别取 1.44、1.9、4.04

方程的离散采用有限体积法,扩散项采用中心差分格式离散,对流项采用二阶迎风格式离散,速度与压力的耦合计算采用 SIMPLEC 算法。边界条件进口断面垂直于水流方向,可认为水流速度均匀地分布在整个断面,故设置为速度进口,速度大小根据不同的雷诺数计算取值,其核心湍流强度计算公式为

$$I = u'/\bar{u} = 0.16 Re_D^{-1/8} \quad (6)$$

式中 u' ——湍流脉动速度

\bar{u} ——平均速度

Re_D ——按水力直径 D 计算得到的雷诺数

出口设置为自由出流边界条件;三通管的管壁采用无滑移边界条件,对靠近边壁区流动的计算利用标准壁面函数法进行处理,相应的壁面粗糙高度为 0.03 mm。

2.2 网格生成

三维建模及网格划分均由 Gambit 软件完成,计算区域选取试验段范围。坐标原点取在主管与侧管轴线交点, x 轴为沿主管-直管流动正方向, y 轴为沿主管-侧管流动负方向。网格划分采用混合网格,在三通管分岔处进行局部网格加密,采用贴合性较好的四面体网格,其余部位采用六面体网格。DN75 × 75 和 DN75 × 50 2 种三通管的网格数分别为 5.78×10^5 和 4.41×10^5 ,网格划分如图 2 所示。

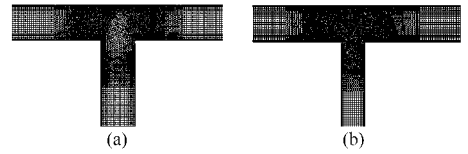


图 2 2 种三通管网格划分

Fig. 2 Grid mesh of tee pipes

(a) DN75 × 75 三通管 (b) DN75 × 50 三通管

3 结果与分析

3.1 局部阻力系数计算

根据伯努利方程^[19],主管上游-侧管下游、主管上游-直管下游断面间的能量守恒关系式为

$$P_0 + \frac{1}{2} \alpha_0 \rho v_0^2 = P_1 + \frac{1}{2} \alpha_1 \rho v_1^2 + \lambda_0 \frac{l_0}{d_0} \rho \frac{v_0^2}{2} + \lambda_1 \frac{l_1}{d_1} \rho \frac{v_1^2}{2} + \Delta P_{01} \quad (7)$$

$$P_0 + \frac{1}{2} \alpha_0 \rho v_0^2 = P_2 + \frac{1}{2} \alpha_2 \rho v_2^2 + \lambda_0 \frac{l_0}{d_0} \rho \frac{v_0^2}{2} + \lambda_2 \frac{l_2}{d_2} \rho \frac{v_2^2}{2} + \Delta P_{02} \quad (8)$$

式中 P ——对应的压强水头

α ——动能修正系数

v ——平均流速 λ ——沿程阻力系数

d ——管径 l ——管线长度

$\Delta P_{01}, \Delta P_{02}$ ——主管-侧管、主管-直管的局部水头损失

下标 0、1、2 分别指主管、侧管及直管。

三通管的局部阻力系数计算公式为

$$\zeta_{01} = \frac{\Delta P_{01}}{\frac{1}{2} \rho v_0^2} \quad (9)$$

$$\zeta_{02} = \frac{\Delta P_{02}}{\frac{1}{2} \rho v_0^2} \quad (10)$$

式中 ζ_{01}, ζ_{02} ——主管-侧管流向、主管-直管流向的局部阻力系数

雷诺数 Re 计算公式为

$$Re = \frac{D_0 v_0}{\nu} \quad (11)$$

式中 D_0 ——主管内径

3.2 三通管阻力特性分析

图 3a、3b 分别给出了不同分流比 q ($q = Q_1/Q_0$, Q_1, Q_0 分别为侧管段和主管段的流量)时 DN75 × 75 和 DN75 × 50 三通管局部阻力系数 ζ_{01}, ζ_{02} 随雷诺数 Re 变化的试验测试结果。从图中可以看出,2 种三通管的局部阻力系数均随雷诺数的增大呈减小的趋势。本试验最小雷诺数 $Re = 50\,032$,流动处于紊流

状态,由管道水动力学理论可知,粘性流体在处于紊流状态时,当雷诺数大于一定程度后,基本不影响流动状态及流速分布,此时流动处于阻力平方区,阻力系数基本保持恒定,阻力平方区一般针对沿程阻力系数而言。对于平顺的直管来说,水流进入阻力平方区的 Re 一般在 10^6 左右^[14],许多研究表明^[13,20]对于分岔管等形变件而言,水流通过时由于边界的突变增强了水流的掺混和紊动,使局部阻力系数在

远低于平顺直管阻力平方区的雷诺数时趋于稳定,进入阻力平方区。文献[21]指出,在雷诺数 $Re \geq 1 \times 10^5$ 时,几乎总是认为所有的局部阻力系数都与雷诺数无关。由本试验结果可已看出,当 $Re > 1.5 \times 10^5$ 之后,2种三通管的局部阻力系数变化幅度很小,基本趋于稳定值,因此可以认为三通管水流已进入阻力平方区。

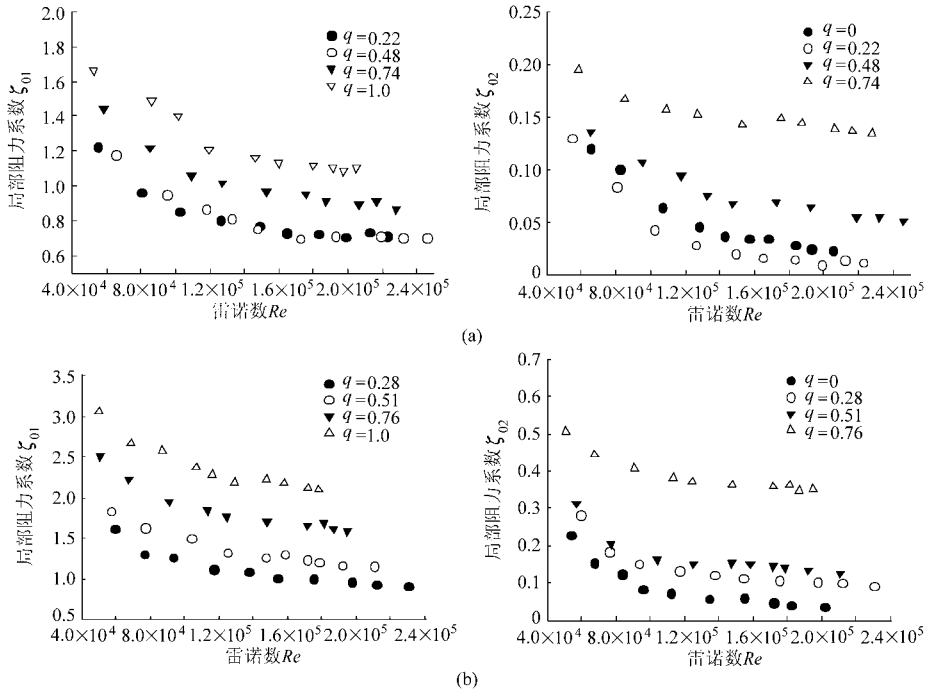


图3 2种三通管局部阻力系数随雷诺数的变化

Fig.3 Local resistance coefficient variation with Reynolds number of tee pipes

(a) DN75 × 75 三通管 (b) DN75 × 50 三通管

当三通管水流进入阻力平方区之后,可认为雷诺数对阻力系数的变化几乎没影响。图4a、4b分别给出了2种三通管在雷诺数 $Re > 1.5 \times 10^5$ 时局部阻力系数 ζ_{01} 、 ζ_{02} 随分流比 q 的变化趋势。可以看出,随着 q 的增加, DN75 × 75 三通管的 ζ_{01} 、 ζ_{02} 呈先减小后增大的趋势, ζ_{01} 的最小值出现在 $q = 0.4$ 左右时, ζ_{02} 的最小值出现在 $q = 0.2$ 时; DN75 × 50 三通管的 ζ_{01} 、 ζ_{02} 随 q 的增加而增大。纵向分析可知,在一定分流比时 DN75 × 50 三通管的 ζ_{01} 明显大于 DN75 × 75 的 ζ_{01} , 而 ζ_{02} 的值 DN75 × 50 略大于 DN75 × 75, 说明不同的型号对主管进入侧管的水流影响较大, 而对进入直管的水流影响相对较小。比较数值计算结果与试验结果可见计算值整体上略低于试验值, 但两者变化趋势基本一致, DN75 × 75 三通管 ζ_{01} 二者的平均误差为 0.072, DN75 × 50 三通管 ζ_{01} 的平均误差为 0.098, 表明数值模拟与试验结果基本吻合。与试验相比, 数值模拟具有操作方便、比较容易改变三通管型体结构而且能够准确获得三通管结构的

流动过程等优点。

准确地估算三通管不同水流方向局部阻力系数对整体管网的分析具有重要意义。根据最小二乘原理运用 Sigmaplot 软件对 2 种三通管局部阻力系数变化的试验与计算结果进行回归分析, 通过误差分析后得到的最佳数学表达式如表 1 所示。结果表明局部阻力系数与分流比之间呈较好的抛物线关系, R^2 在 0.97 以上; 2 种三通管的计算结果与试验结果表达式比较接近, 计算结果的 R^2 都高于试验结果, 拟合标准差小于试验结果, 表明应用数值模拟方法分析三通管阻力的变化是可行的。

为了与常规计算方法有所比较, 将本试验结果与常用的计算方法进行了对比分析, 如表 2 所示。可以看出, 等径三通管按常数值计算在所有分流比时阻力系数均不变, ζ_{01} 与试验结果在不同分流比时相差较大, ζ_{02} 与试验相差较小, 在许多水力学手册中未给出异径三通管的阻力系数值; 在《微灌工程技术规范》中建议局部水头损失按沿程水头损失的

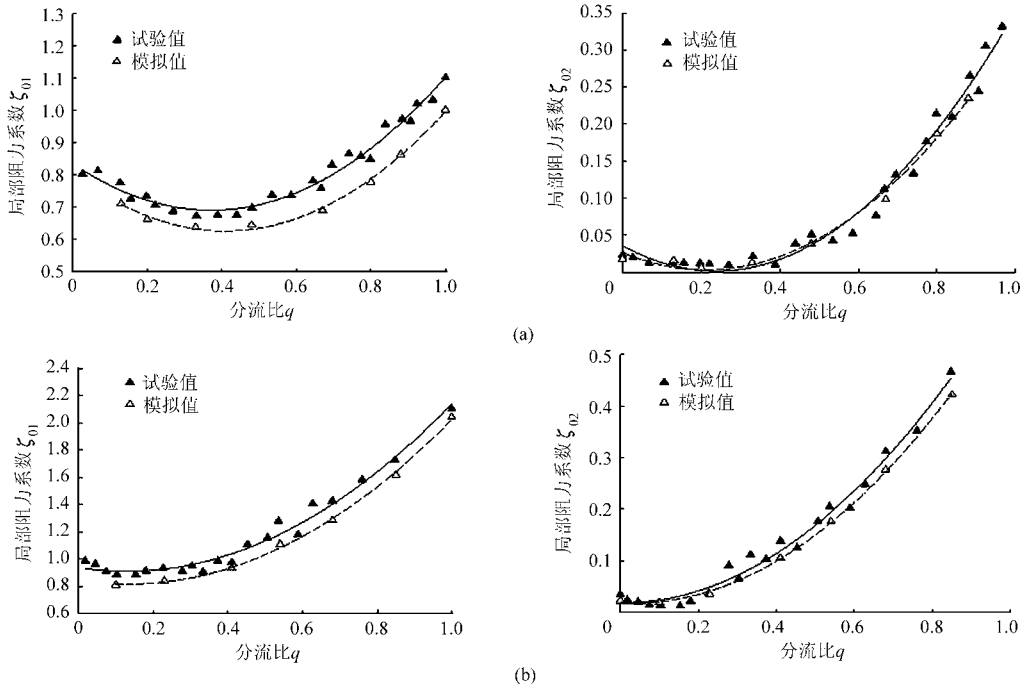


图 4 2 种三通管局部阻力系数随分流比的变化

Fig. 4 Local resistance coefficient variation with flow ratio of tee pipes

(a) DN75 × 75 三通管 (b) DN75 × 50 三通管

表 1 2 种三通管试验与数值计算结果曲线拟合

Tab. 1 Curves fitting of experimental results and numerical simulation

三通管型号	试验结果回归模型	标准差	R^2	数值计算回归模型	标准差	R^2
DN75 × 75	$\zeta_{01} = 1.047q^2 - 0.778q + 0.835$	0.021	0.974	$\zeta_{01} = 1.063q^2 - 0.87q + 0.804$	0.012	0.994
	$\zeta_{02} = 0.603q^2 - 0.286q + 0.036$	0.015	0.982	$\zeta_{02} = 0.516q^2 - 0.22q + 0.026$	0.010	0.993
DN75 × 50	$\zeta_{01} = 1.625q^2 - 0.422q + 0.937$	0.051	0.979	$\zeta_{01} = 1.608q^2 - 0.427q + 0.843$	0.023	0.996
	$\zeta_{02} = 0.616q^2 - 0.007q + 0.019$	0.016	0.983	$\zeta_{02} = 0.615q^2 - 0.045q + 0.019$	0.009	0.996

一定比例估算,即各级管道的所有局部水头损失为本级管道沿程水头损失的一定比例,一般为0.05 ~ 0.2,由于是估算所以其准确度有待进一步的探讨;《实用流体阻力手册》中也可以查到一些复杂的经验公式,但没有说明具体适用于何种材质的管道,由表 2 看出, ζ_{01} 在分流比较大时按手册中公式的计算结果与试验结果相差较小,随着分流比的减小与试验结果的差值增大, DN75 × 75 三通管在 $q = 0.2$ 时相差 4.5 倍, DN75 × 50 在 $q = 0.2$ 时相差 5.3 倍,手册中的公式关于 ζ_{02} 的计算只与分流比有关,与型号无关,实际上三通管型号对 ζ_{02} 的大小也有影响但影响不大,通过分析说明手册中的公式也不适用于计算 PVC 三通管。

3.3 其余常见三通管数值模拟分析

在试验与数值模拟分析的基础上对 DN110 × 90、DN110 × 75、DN90 × 63、DN90 × 40、DN75 × 40 等 5 种常见的三通管进行了数值计算,计算流速为 2.8 m/s。图 5 为局部阻力系数 ζ_{01} 、 ζ_{02} 随管径比 d_λ ($d_\lambda = d_1/d_0$, d_1 、 d_0 分别为侧管段和主管段的公称外

表 2 试验与常用计算方法结果对比分析

Tab. 2 Comparative analysis of experimental results and calculation methods

三通管型号	分流比 q	试验结果		实用流体阻力手册		常数(水力计算手册)	
		ζ_{01}	ζ_{02}	ζ_{01}	ζ_{02}	ζ_{01}	ζ_{02}
		DN75 × 75	0.2	0.721	0.003	0.162	0.014
	0.4	0.691	0.018	0.335	0.056	1.5	0.1
	0.6	0.745	0.081	0.532	0.126	1.5	0.1
	0.8	0.883	0.193	0.715	0.224	1.5	0.1
	1.0	1.104		0.780		1.5	0.1
DN75 × 50	0.2	0.918	0.042	0.174	0.014		
	0.4	1.028	0.115	0.435	0.056		
	0.6	1.269	0.237	0.869	0.126		
	0.8	1.639	0.408	1.464	0.224		
	1.0	2.140		1.950			

径)的变化趋势。由图 5 可见,在一定分流比 q 时, ζ_{01} 、 ζ_{02} 随 d_λ 的增大而减小, ζ_{01} 的变化幅度远大于 ζ_{02} 的幅度。由图可以看出, $\zeta_{01} - d_\lambda$ 曲线随分流比的增大逐渐变得陡峭。在管径比较小时 ζ_{01} 较大,这是因为在管径比较小时水流进入侧管变得困难,需要

消耗更多的机械能;管径比的变化对 ζ_{02} 的影响较小,主要在于不同型号的三通管其直管管径与主管管径始终相等,在分流比较大时水流在分岔处的环流作用使得管径比的变化对 ζ_{02} 略有影响,在较小分

流比时进入侧管的水流较少,分岔处的水流比较平稳, ζ_{02} 的变化很小。通过对不同类型三通管阻力系数与流量比的关系进行回归分析,表明相关性较好,决定系数均大于 0.992,表达式如表 3 所示。

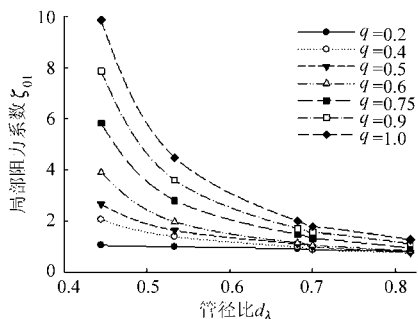


图 5 三通管局部阻力系数随管径比的变化

Fig. 5 Local resistance coefficient variation with diameter ratio of tee pipes

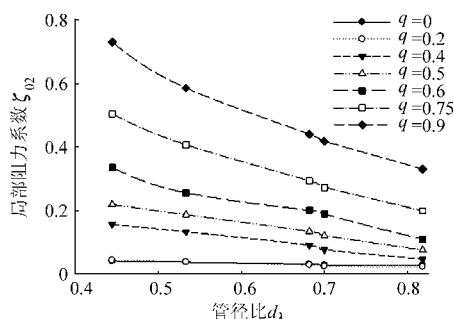


表 3 常见三通管局部阻力系数数值模拟结果

Tab. 3 Numerical simulation results of local resistance coefficient of other ball valves tee pipes

三通管类型	局部阻力系数 ζ_{01}	局部阻力系数 ζ_{02}
DN90 × 40	$\zeta_{01} = 10.045q^2 - 1.084q + 0.846$	$\zeta_{02} = 0.976q^2 - 0.105q + 0.036$
DN75 × 40	$\zeta_{01} = 4.436q^2 - 1.057q + 1.042$	$\zeta_{02} = 0.779q^2 - 0.089q + 0.034$
DN110 × 75	$\zeta_{01} = 1.608q^2 - 0.589q + 0.962$	$\zeta_{02} = 0.606q^2 - 0.09q + 0.028$
DN90 × 63	$\zeta_{01} = 1.587q^2 - 0.739q + 0.936$	$\zeta_{02} = 0.605q^2 - 0.113q + 0.027$
DN110 × 90	$\zeta_{01} = 1.487q^2 - 1.235q + 1.013$	$\zeta_{02} = 0.602q^2 - 0.221q + 0.034$

3.4 三通管流动特征分析

图 6 给出了 DN75 × 75 三通管不同流量比工况下 $Z = 0$ 截面流速分布及流线图,主管流速为

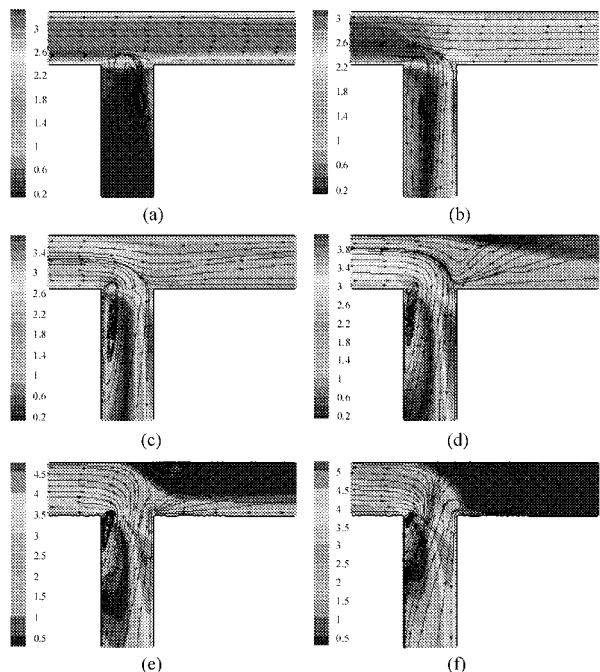


图 6 DN75 × 75 三通管流速分布及流线图

Fig. 6 Velocity distribution and streamline of

DN75 × 75 tee pipe

- (a) $q=0$ (b) $q=0.2$ (c) $q=0.4$
(d) $q=0.6$ (e) $q=0.8$ (f) $q=1.0$

2.8 m/s。

主管进入直管的水流流动特征分析:当分流比 $q < 0.6$ 时,主管进入直管的水流流态平顺,流速分布比较均匀,未出现大的流速梯度;当分流比 $q \geq 0.6$ 时,由主管进入直管内的水流流态变得不稳定,随着进入侧管流量的增加,在分岔处由于水流的剪切与横向环流作用使进入直管的水流出现较为明显的流速梯度,在直管分岔处上侧出现低速回流区,由图 6d、6e 可以明显地看到直管上侧的漩涡运动, $q = 0.8$ 时的漩涡尺度明显大于 $q = 0.6$ 时的尺度;当 $q = 1$ 时,直管处于不工作状态,主流通过 90° 转弯对整个直管内水流撞击诱发回流。通过分析可知主管一直管流向的局部水头损失主要是由流速梯度变化和直管内漩涡运动引起的,因此在较大分流比时阻力系数 ζ_{02} 也大。

主管进入侧管的水流流动特征分析:当 $q = 0$ 时,侧管内没有水流通过,由于主流对侧管水流的剪切作用,在侧管内形成若干尺度的漩涡,侧管内水流不稳定;在 $q > 0$ 时,主管进入侧管的水流在侧管分岔处左侧出现漩涡,并且漩涡尺度随分流比的增大而减小,这是由于随分流比的增大,进入侧管的流量增多,水流偏转角度增大,水流逐渐充满整个断面,在侧管分岔处左侧诱发漩涡的能力减弱。由于水流偏转时惯性力的强烈作用,在侧管内出现明显的流

速梯度,流速分布很不均匀,流速梯度随分流比的增大而增大,在侧管分岔处右侧出现局部高速区,其速度也随分流比的增大而增大。由上述分析可知,主管-侧管流向的局部水头损失主要是水流方向变化的损失和离心力造成的速度分布变化损失^[22]。

4 结论

(1) DN75 × 75 和 DN75 × 50 两种三通管的试验结果表明,局部阻力系数随雷诺数的增大而减小,在雷诺数大于 1.5×10^5 之后,三通管的阻力系数基本保持稳定,可认为水流此时已进入类似于圆管沿程阻力系数的阻力平方区。

(2) 基于试验与数值模拟方法通过定性定量分

析得到了 DN75 × 75 和 DN75 × 50 三通管局部阻力系数随分流比变化关系,通过验证表明数值模拟结果与试验基本吻合,在此基础上对常见的 5 种三通管进行了数值模拟,得到了阻力系数变化的定量表达式。

(3) 由水流流动特征分析可知,主管进入直管的水流在较大分流比时由于水流的剪切与横向环流引起直管分岔处上侧的漩涡运动和流速梯度的变化,是引起主管-直管流向局部水头损失的主要原因;主管进入侧管的水流随分流比的增大,流速梯度增大,在侧管分叉口右侧出现局部高速区,引起主管-侧管流向局部水头损失的主要原因是水流方向变化的损失和离心力造成的速度分布变化损失。

参 考 文 献

- 1 朱德兰,吴普特,王剑. 滴头制造偏差对灌水均匀度及毛管造价的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(2): 175 ~ 179. Zhu Delan, Wu Pute, Wang Jian. Effect of emitters manufacturing variation of micro-irrigation on uniformity and lateral cost[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(2): 175 ~ 179. (in Chinese)
- 2 Guo B Y, Tim A G L, David F F. CFD simulation of precession in sudden pipe expansion flows with low inlet swirl[J]. Applied Mathematical Modeling, 2002, 26(1): 1 ~ 15.
- 3 GB/T 50485—2009 微管工程技术规范[S]. 2009.
- 4 Blaisdell F W, Manson P W. Energy loss at pipe junctions[J]. ASCE Journal of Irrigation and Drainage Division, 1967, 93(3): 59 ~ 78.
- 5 Samagaio A, Vlachos N S. Calculation of three-dimensional laminar flows in T-shaped junctions[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1989, 75(1 ~ 3): 393 ~ 407.
- 6 Kuo T W, Khaligi B. Numerical study on flow distribution in T-junction and comparison with experiment[C] // Proceedings of ASME Internal Combustion Engine, 1995: 8 ~ 31.
- 7 Gan Guohui, Saffa B Riffat. Numerical determination of energy losses at duct junctions[J]. Applied Energy, 2000, 67(3): 331 ~ 340.
- 8 Volker Weitbrecht, David Lehmann, Andreas Richter. Flow distribution in solar collectors with laminar flow conditions[J]. Solar Energy, 2003, 73(6): 433 ~ 441.
- 9 Costa N P, Maia R, Proenca M F. Edge effects on the flow characteristics in a 90 deg tee junction[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2006, 128(6): 1 204 ~ 1 217.
- 10 Pérez-García J, Sanmiguel-Rojas E, Hernández-Grau J, et al. Numerical and experimental investigations on internal compressible flow at T-type junctions[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2006, 31(1): 61 ~ 74.
- 11 Pérez-García J, Sanmiguel-Rojas E, Viedma A. New experimental correlations to characterize compressible flow losses at 90-degree T-junctions[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2009, 33(2): 261 ~ 266.
- 12 Zachary B Sharp, Michael C Johnson, Steven L Barfuss. Energy losses in cross junctions[J]. ASCE Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 136(1): 50 ~ 55.
- 13 李玲, 陆豪, 陈嘉范. 抽水蓄能电站尾水岔管水流运动及阻力特性试验研究[J]. 水力发电学报, 2008, 27(3): 101 ~ 104. Li Ling, Lu Hao, Chen Jiafan. Experimental research on current resistant characteristics of tail water fork tube in the pumped-storage hydroelectric plant[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(3): 101 ~ 104. (in Chinese)
- 14 李玉梁, 李玲, 陈嘉范, 等. 抽水蓄能电站对称岔管的流动阻力特性[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2003, 43(2): 270 ~ 272. Li Yuliang, Li Ling, Chen Jiafan, et al. Flow resistant characteristics of symmetric fork tube used in a storage-pumped hydroelectric plant[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2003, 43(2): 270 ~ 272. (in Chinese)
- 15 毛根海, 章军军, 程伟平, 等. 卜型叉管水力模型试验及三维数值计算研究[J]. 水力发电学报, 2005, 24(2): 16 ~ 20. Mao Genhai, Zhang Junjun, Cheng Weiping, et al. Experimental study and 3-D numerical simulation on water flow in Y-type pipe [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(2): 16 ~ 20. (in Chinese)
- 16 戎贵文, 魏文礼, 刘玉玲. 分岔管道三维湍流水力特性数值模拟[J]. 水利学报, 2010, 41(4): 398 ~ 404. Rong Guiwen, Wei Wenli, Liu Yuling. 3D numerical simulation for hydraulic characteristics of turbulent flow in bifurcated duct [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(4): 398 ~ 404. (in Chinese)

- 4 孙久荣, 孙博宁, 韦建恒, 等. 蚯蚓表面电位的测定及其与运动的关系[J]. 吉林工业大学学报, 1991, 21(4): 18~24.
Sun Jiurong, Sun Boning, Wei Jianheng, et al. Measurement and determination earthworm skin potential related to moving [J]. Journal of Jilin University of Technology, 1991, 21(4): 18~24. (in Chinese)
- 5 Persson B N J. Study on the mechanism of adhesion in biological systems[J]. Journal of Chemical Physics, 2003, 118(16): 7 151~7 164.
- 6 Zu Y Q, Yan Y Y. Numerical simulation of electro osmotic flow near earthworm surface[J]. Journal of Bionic Engineering, 2006, 3(4): 179~186.
- 7 施卫平, 任露泉, Yan Yuying. 蚯蚓蠕动过程中非光滑波纹形体表的力学分析[J]. 力学与实践, 2005, 27(3): 73~74.
Shi Weiping, Ren Luquan, Yan Yuying. The creeping mechanism of the non-smooth wavy surface of earthworm [J]. Mechanics in Engineering, 2005, 27(3): 73~74. (in Chinese)
- 8 施卫平, 任露泉. 波纹形非光滑推土板减粘降阻的简化力学模型[J]. 农业机械学报, 2005, 36(1): 93~95, 103.
Shi Weiping, Ren Luquan. Simplified dynamic model of adhesion and resistance reduction for the corrugated non-smooth bulldozing plate [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(1): 93~95, 103. (in Chinese)
- 9 刘国敏, 李建桥, 田喜梅, 等. 蚯蚓非光滑表面减粘降阻试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(9): 138~143.
Liu Guomin, Li Jianqiao, Tian Ximei, et al. Experiment on reduction of soil adhesion force and sliding resistance of earthworm non-smooth surface [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9): 138~143. (in Chinese)
- 10 刘国敏, 邹猛, 李建桥. 蚯蚓体表与土壤接触界面动态行为仿真[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2010, 40(6): 1 609~1 613.
Liu Guomin, Zou Meng, Li Jianqiao. Interfacial dynamics simulation between soil and earthworm surface [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2010, 40(6): 1 609~1 613. (in Chinese)
- 11 周健, 苏燕, 池永. 颗粒流模拟土的工程特性[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 391~396.
Zhou Jian, Su Yan, Chi Yong. Simulation of soil properties by particle flowcode [J]. Chinese Journal of Geotechnical, 2006, 28(3): 391~396. (in Chinese)
- 12 Li J Q, Kou B X, Liu G M, et al. Resistance reduction by bionic coupling of the earthworm lubrication function [J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(11): 2 989~2 995.
- 13 郭志军, 杜干, 周志立, 等. 土壤耕作部件宏观触土曲面减阻性能研究现状分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 47~52.
Guo Zhijun, Du Gan, Zhou Zhili, et al. Actuality analysis of resistance-reducing properties on soil cultivating components with different macroscopic soil-engaging surfaces[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 47~52. (in Chinese)
- 14 杨望, 蔡敢为, 杨坚. 土壤直剪试验的动力学仿真[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 96~101.
Yang Wang, Cai Ganwei, Yang Jian. Dynamics simulation of direct shear test [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 96~101. (in Chinese)

~~~~~  
(上接第 79 页)

- 17 Shih T H, Liou W W, Shabbir A, et al. A new  $k-\varepsilon$  eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows-model development and validation[J]. Computers & Fluids, 1995, 24(3): 227~238.
- 18 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.
- 19 吕宏兴, 裴国霞, 杨玲霞. 水力学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- 20 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. (in Chinese)
- 21 华绍曾, 杨学宁. 实用流体阻力手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- 22 李玲, 李玉梁, 黄继汤, 等. 三叉管内水流流动的数值模拟与实验研究[J]. 水利学报, 2001, 32(3): 49~52.  
Li Ling, Li Yuliang, Huang Jitang, et al. Numerical simulation and experimental study on water flow in Y-type tube [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(3): 49~52. (in Chinese)