

# 管道弯头和三通近距离耦合 阻力系数实验研究<sup>\*</sup>

西安建筑科技大学 李安桂<sup>★</sup> 张新记 何思凤  
宝鸡市热力公司 张永岐 李 波

**摘要** 对供热制冷系统管段内弯头和三通近距离的流动情况建立了实验模型。采用 PIV 对实验模型内部的流动进行分析,用 Fluent 软件 SST 模型对管道内的流动进行数值计算,并对比分析了 PIV 与 CFD 的计算结果。根据实验提出了 4 种改进方案,并用 Fluent 软件对不同方案的各种连接方式进行了数值计算分析,给出了局部阻力系数变化曲线。为供热制冷系统管网的阻力平衡计算提供了科学依据。

**关键词** 供热管网 弯头 T 形三通 近距离耦合 粒子图像测速技术(PIV) CFD 流动阻力

## Experiments on the pressure loss coefficient of pipe sections around elbow and tee junction

By Li Angui<sup>★</sup>, Zhang Xinji, He Sifeng, Zhang Yongqi and Li Bo

**Abstract** Establishes the experimental model, analyses the fluid flow with PIV technique and calculates with the SST turbulent model. According to the comparison results, proposes four improving types of junctions, and by simulation with the Fluent software gives the local resistance coefficient curve, providing a rational basis for the pipe network resistance balance calculation.

**Keywords** heating network, elbow, T-junction, close coupled, particle image velocimetry, computational fluid dynamics, flow resistance

★ Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, China

①

### 0 引言

流体管道弯头和三通近距离耦合是暖通空调、化工及动力工程设计中经常遇到的问题;深入研究管道弯头和三通近距离耦合时的流动和阻力特性,对降低系统能耗、提高管网系统特别是多热源联网技术运行可靠性有重要的意义。多热源联网技术是在综合运用水泵调速技术和控制技术的基础上发展起来的一项先进的水热水管网运行技术,实施联网运行能明显地减少能源消耗、降低供热成本,同时还可提高供热的安全可靠性<sup>[1]</sup>。例如,宝鸡热电厂和玉润堡锅炉房联网进行供热,二者的管网在连接时采用 90°垂直连接,因为在较短的距离内存在

较多的局部阻力构件,弯头和三通的近距离耦合使得该局部管段内流场复杂,流动稳定性差。因此,笔者对供热、制冷系统管道弯头和三通近距离耦合的共性问题建立了实验模型,采用 PIV(粒子图像测速技术)对实验模型内部的流动进行分析。用 CFD 软件 Fluent 采用 SST 模型对管道内的流动进行数值计算,并对 PIV 与 CFD 计算的结果进行对比分析。根据实验提出 4 种改进方案,并用 Fluent 软件对目前的连接方式及提出的 4 种改进方案进行数值计算分析,对其阻力情况进行统计,

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(编号:50778145),教育部高校博士点基金资助项目(教技发中心函[2004]196号),陕西省教育厅产业化重点项目基金资助项目(编号:04JC19)

①☆ 李安桂,男,1963 年 9 月生,工学博士,教授,博士生导师  
710055 西安建筑科技大学环境与市政工程学院  
(029) 82202507  
E-mail:liag@xauat.edu.cn  
收稿日期:2008-03-13  
修回日期:2008-08-07

最后整理成以局部阻力系数表示的结果,从中选出最优方案。

## 1 研究现状

### 1.1 管道阻力及管件近距离耦合

减小阻力长期以来就是工程流体力学的一个重要研究课题。热水在城市集中供热系统中的输送需要消耗大量的能量,研究如何减小输送管网的阻力对于减少能源消耗、降低运行费用等都有重要意义,另外,阻力的减小还可以降低设备的装机容量,是另一种意义上的节约资源。在热水供热系统中,局部阻力占沿程阻力的 30%~50%<sup>[2]</sup>,局部阻力的形成是流体经过局部阻力构件时由于边壁或流量的改变,均匀流在这一局部地区遭到破坏,引起了流速大小、方向或分布的变化。只要采取的措施得当局部阻力就非常容易改善而且效果明显。

近距离耦合的管件在暖通空调领域和其他工业管道中广泛应用。流动方向的改变和流动的混合与分离都需要消耗能量,管件的压力损失在整个管网系统的阻力损失中占有很大的比例,因此了解管道系统中流动的特性和湍流结构对优化管网设计有至关重要的作用。管件内部流动复杂,表征管件压力损失的损失系数主要由实验确定,针对各种不同的管件配置方式已经进行了许多实验研究,然而,大部分已发表的关于管件压力损失的文献都是针对单个、非耦合的管件<sup>[3]</sup>。因此对近距离耦合管件进行三维的流动分析是非常有必要的。

### 1.2 管道阻力研究的现状

使用损失系数来预测管道系统中管件的能量损失的历史已经超过了—个世纪<sup>[4]</sup>。Jones 等人估算了圆形斜接弯头和 T 形接头的损失系数<sup>[5]</sup>。Rahmeyer 对规则的大直径弯头、渐缩弯头、渐缩管和渐扩管进行了测试,得出的结论是损失系数随着速度而改变<sup>[6]</sup>。Sethuraman 分析了单个弯头和两个耦合弯头之间距离不同时对损失系数的影响<sup>[7]</sup>,其结果表明,当两个弯头间的距离大于或等于 12 倍管径时压力损失系数不再变化。

Rahmeyer 确定了 50.8 mm(2 in)和 101.6 mm(4 in)管径的近距离耦合弯头的压力损失系数,并对耦合管件和非耦合管件的损失系数进行了对比,结果表明对于管件间距离小于 20 倍管径的耦合管件其净损失系数小于非耦合管件损失系数之和<sup>[8]</sup>。

近年来,CFD 方法已经被用来有效和精确地预测 HVAC 系统中的损失系数。Mumma 等人使用三维求解器应用  $K-\epsilon$  湍流模型计算了椭圆形弯头中的湍流流场。Smith 等人的数据说明 CFD 方法可以有效和精确地预测 HVAC 系统中的损失系数。Mumma 等人使用数值方法预测了 9 种 HVAC 管件的损失系数,其计算结果与已发表的实验数据的误差基本上都在 15% 以内<sup>[3]</sup>。

Jorgen 等人对分流和合流 T 形连接三通进行了数值实验<sup>[9]</sup>。研究针对主干管管径恒定的圆形 T 形连接。与实验数据的对比表明,分流 T 形连接的支管和合流 T 形连接的主管间存在明显的差异。

Sujan Sami 等人应用 CFD 软件 CFX5.5 对近距离耦合管件的压力损失进行了计算<sup>[3]</sup>。他们应用 RANS 方程对单个弯头、两个弯头(U 形、Z 形和 T 形)和三个弯头(S 形)进行了三维流动计算,说明了应用 SST 模型比  $K-\epsilon$  模型更能准确地预测耦合管件的损失系数,这是因为其中存在的流动分离现象。计算结果也印证了实验现象,对于距离小于 20 倍管径的管件来说,其损失系数小于相应的非耦合管件的损失系数,而对于距离大于 20 倍管径的管件来说,其损失系数等于相应的非耦合管件的损失系数。

## 2 实验方案和实验模型

### 2.1 PIV 实验方案

#### 2.1.1 实验仪器

##### 1) PIV 系统

激光器:Beamtech,Vlite200 脉冲固体激光器系统,最大工作面积区域 200 mm×200 mm,最大传输能量 300 mJ,重复频率 1~15 Hz。

相机:TSI,630157 PowerView™Plus 2MP。

镜头:Micro-Nikkor60mmf/2.8D。

同步器:TSI,610034 LaserPulse Synchronizer。

##### 2) 其他

超声波流量计:LCZ-803B 便携式超声波流量计,测量准确度±1.5%。

水泵:GRUNDFOS UPS 32-80。

#### 2.1.2 实验台

实验台如图 1a 所示,由 PIV 系统和实验管网系统组成。实验管段采用有机玻璃加工,为减小光的折射对实验结果的影响,在实验管段的外面附加

一个方形罩,方形罩和有机玻璃管段之间充满纯净水,如图 1b 所示。下文为叙述方便,左侧带弯头的管段及三通下游管段称为干管,右侧连接管段称为支管,图 1d 中 1,2,3 处管道内平均流速分别为  $v_{m1}$ ,  $v_{m2}$ ,  $v_{m3}$ 。实验中,水泵从放置于地面上的小水箱吸水,由于管入口、支管进入有机玻璃模型,混合后由于干管出口流出进入水箱。实验中用超声波流量计同步记录通过每段管段的流量,超声波流量计的安装如图 1c 所示。本次实验中 PIV 拍摄区域位置如图 1d 所示,区域 I 在三通连接点下游的干管上;区域 II 在支管上。

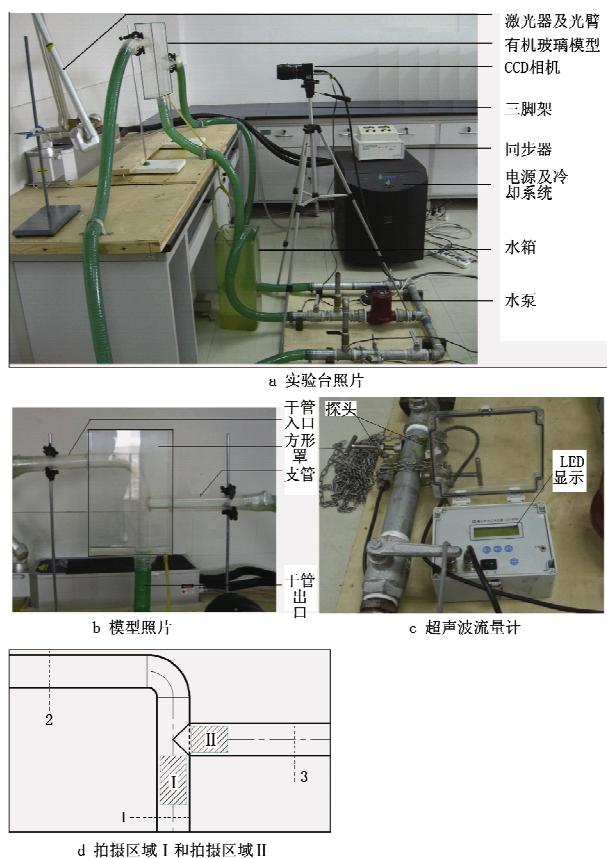


图 1 实验台及实验装置照片

## 2.2 CFD 数值计算方案

### 1) 计算区域

为保证流动充分发展,管件上游管段长度为 80 倍管径,下游为 25 倍管径。

### 2) 前处理

几何模型及网格划分均在 Gambit 中实现,采用结构化网格划分方案。网格划分之后的模型如图 2 所示。

### 3) 边界条件设定

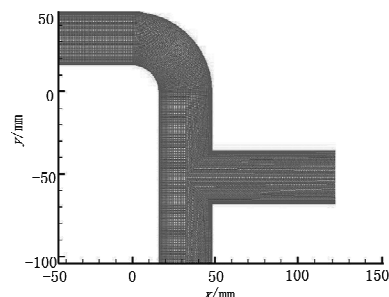


图 2 模型网格划分方案图

边界条件及初始条件的选择参数设定,速度入口边界条件和自由出流出口边界的设定。

### 4) 计算求解

采用分离式求解器, SIMPLE 压力耦合算法,二阶离散格式, SST 湍流模型,近壁区采用标准壁面函数法处理。

### 5) 后处理

最后统计压力损失时,截面选取在局部阻力构件上游 2 倍管径、下游 12 倍管径处。

## 3 结果处理及分析

### 3.1 PIV 与 CFD 结果比较

$v_{m1}$ ,  $v_{m2}$  分别为 0.75 m/s 和 0.88 m/s 时的 CFD 计算结果与 PIV 结果如图 3 所示。从总体上看,二者结果较为接近,在管道中心远离支管侧流速最大;在支管侧出现旋涡区。在 CFD 计算结果中,旋涡区的范围接近管道中心位置,如图 3a 所示;但在 PIV 实验结果中,旋涡区的范围较 CFD 计算结果要小一些,如图 3b 所示。另外,CFD 计算结果的最大速度值比 PIV 小 8% 左右。

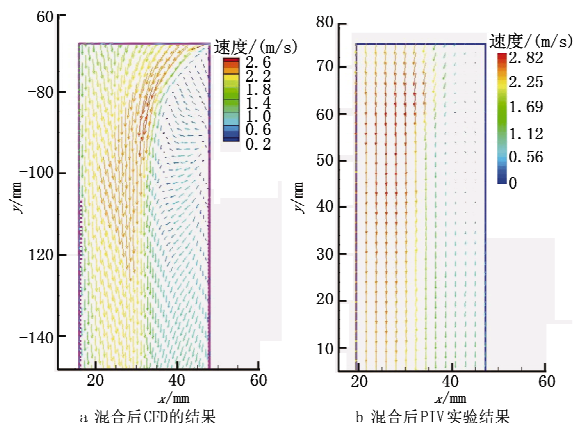


图 3  $v_{m1}=0.75$  m/s,  $v_{m2}=0.88$  m/s 时的 CFD 计算结果与 PIV 结果

$v_{m1}$ ,  $v_{m2}$  分别为 1.21 m/s, 0 m/s 时的 CFD 计算结果与 PIV 结果对比如图 4 所示。从图 4a 和

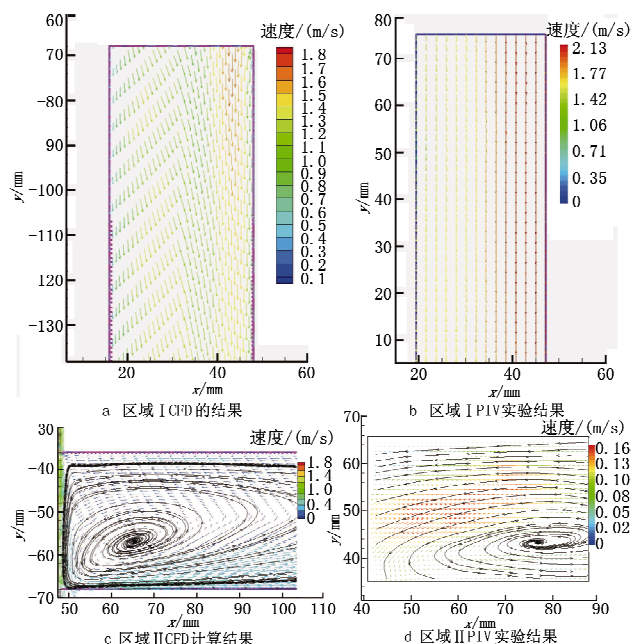


图 4  $v_{m1}=1.21\text{ m/s}$ ,  $v_{m2}=0\text{ m/s}$  时的  
CFD 计算结果与 PIV 结果

图 4b 可以看出,混合段二者结果较为接近,但 CFD 计算结果的速度场在管道中心附近有向支管侧偏的趋势,而 PIV 实验结果没有出现;且 CFD 计算的最大速度值比 PIV 小 15% 左右。支管流速为零时,主流对支管道流体的引射作用形成的速度场如图 4c 和图 4d 所示,CFD 计算得到的旋涡中心距主流更近,距离主管道管壁有 0.5 倍管径,而 PIV 实验旋涡中心距主管道管壁有 1.2 倍管径。

### 3.2 CFD 计算近距离耦合管段局部阻力系数

从上述 PIV 与 CFD 结果的比较可以看出,CFD 并不能完全反映流体的真实流动情况,但 CFD 与 PIV 的最大误差在 15% 以内,说明 CFD 计算结果可以接受。本文对根据实际情况和经验提出的 4 种可能改善阻力的连接方式进行了数值计算,并把结果用局部阻力系数的形式进行分析。几种连接方式示意如图 5 所示,图中箭头为合流时的流向,分流时流向与之相反。

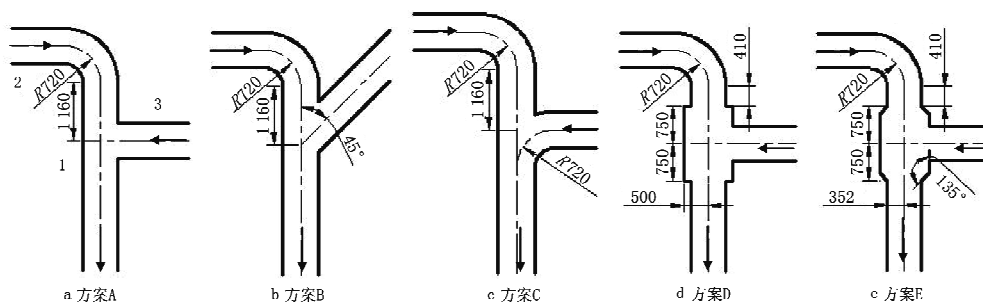


图 5 几种连接方式的示意

对于分流情况,  $\zeta_{12}$  由式(1)~(3)定义。

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_{m1}^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_{m2}^2}{2} + \zeta_{12} \frac{v_{m1}^2}{2} \quad (1)$$

式中  $p_1, p_2$  分别为图 5a 所示位置 1, 2 处的管道静压, Pa;  $\rho$  为流体密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\zeta_{12}$  为图 5a 所示位置 1, 2 之间的阻力系数。

由此得出

$$\Delta p_{12} = \zeta_{12} \rho \frac{v_{m1}^2}{2} \quad (2)$$

式中  $\Delta p_{12}$  为图 5a 所示位置 1, 2 之间的全压差, Pa。

$$\zeta_{12} = \frac{2}{v_{m1}^2} \left[ \frac{1}{\rho} (p_1 - p_2) + \frac{1}{2} (v_{m1}^2 - v_{m2}^2) \right] \quad (3)$$

#### 3.2.1 合流时 $\zeta_{21}, \zeta_{31}$ 的分析

在合流三通情况下,图 6a 是在干管入口流速与干管出口流速不同时,CFD 计算出的 2-1 之

间阻力系数  $\zeta_{21}$  在不同连接方案下的对比。2-1, 3-1 的阻力系数分别表示为  $\zeta_{21}, \zeta_{31}$ 。从图中可以看出,方案 A 的  $\zeta_{21}$  随着  $v_{m2}/v_{m1}$  增大而减小,从 0.76 减小到 0.45;而方案 B 的  $\zeta_{21}$  随着  $v_{m2}/v_{m1}$  增大有先增大后减小的趋势,  $v_{m2}/v_{m1} < 0.8$  时,  $\zeta_{21}$  随着  $v_{m2}/v_{m1}$  的增大而增大,从 -0.46 增大到 0.53,  $v_{m2}/v_{m1} > 0.8$  时,  $\zeta_{21}$  随着  $v_{m2}/v_{m1}$  的增大而减小,从 0.53 减小到 0.51;方案 C 的  $\zeta_{21}$  随着  $v_{m2}/v_{m1}$  的增大而增大,从 -0.09 增大到 0.45;方案 D 的  $\zeta_{21}$  随着  $v_{m2}/v_{m1}$  的增大总体变化不大,在 0.65~0.71 之间;方案 E 的  $\zeta_{21}$  随着  $v_{m2}/v_{m1}$  的增大先减小后增大,但变化比较平稳,在 0.43~0.68 之间。方案 A 阻力系数较大,尤其是在流速比  $v_{m2}/v_{m1}$  较小时;方案 D, E 的阻力系数也比较大,并且随着  $v_{m2}/v_{m1}$  的增大变化比较平稳,可能与方案 D, E 中流动更为

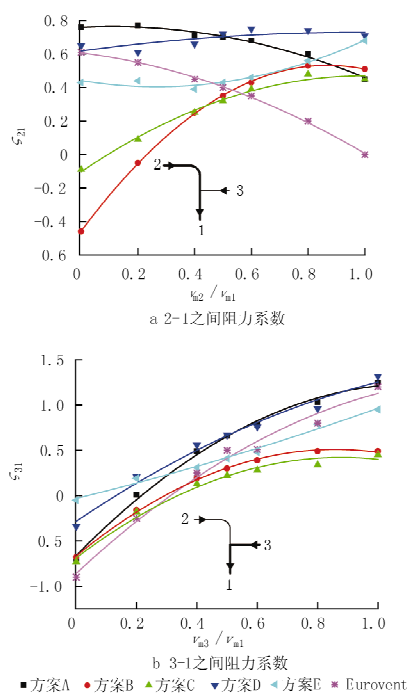


图6 合流时2-1与3-1之间的阻力系数

复杂有关;方案B,C有很大改进,在  $v_{m2}/v_{m1}$  较小时阻力系数为负值,在  $v_{m2}/v_{m1}$  较大时,方案C的阻力系数更小一些。

文献[9]给出了 Gardel(1957)和 Idelchik(1986)的回归模型以及 Eurovent(1996)给出的实测数据的对比,Eurovent 给出的 T形三通的阻力系数  $\zeta_{21}$  的实测值与本次研究的对比如图 6a 所示,给出的值在 0~0.61 之间变化,本次研究中方案 A 的变化趋势与之相同,但数值较之大 0.15~0.45,尤其是流速比  $v_{m2}/v_{m1}$  增大时二者的差别更大。

图 6b 是在支管流速与干管出口流速比不同时,CFD 计算出的 3-1 之间阻力系数  $\zeta_{31}$  在不同连接方案下的对比。从图中可以看出,5 个方案中  $\zeta_{31}$  均随着  $v_{m3}/v_{m1}$  的增大而增大, $\zeta_{31}$  在  $v_{m3}/v_{m1}$  较小时均为负值; $v_{m3}/v_{m1}=0$  时,方案 A,B,C 的阻力系数值较为接近,在 -0.7 左右,而方案 D,E 分别为 -0.34 和 -0.05; $v_{m3}/v_{m1}=1$  时,方案 B,C 的阻力系数值分别为 0.49 和 0.45,而方案 A,D,E 分别为 1.25,1.32 和 0.95,方案 C 仅为方案 A 的 36%。

文献[9]给出的 Eurovent 实测的 T 形三通的  $\zeta_{31}$  结果与本次研究的对比如图 6b 所示, $\zeta_{31}$  的值在 -0.9~1.2 之间,本次研究中方案 A 的阻力系数变化范围在 -0.7~1.25 之间,与之有很好的一致

性;而方案 B,C 的阻力系数在  $v_{m3}/v_{m1}=0$  时与文献中结果较接近,但在  $v_{m3}/v_{m1}=1$  时均大幅度减小,仅为文献[9]中结果的 35%左右。说明改变连接方式,方案 B,C 的阻力系数有很大改善。

### 3.2.2 分流时 $\zeta_{12}$ , $\zeta_{13}$ 的分析

在分流三通情况下,图 7a 为在干管入口流速与干管出口流速比不同时,CFD 计算出的 1-2 之间阻力系数  $\zeta_{12}$  在不同连接方案下的对比。从图中可以看出,5 种方案中  $\zeta_{12}$  都随着  $v_{m2}/v_{m1}$  的增大先减小后增大, $\zeta_{12}$  最小时的  $v_{m2}/v_{m1}$  在 0.2~0.5 之间变化。方案 A 的最小阻力系数出现在  $v_{m2}/v_{m1}=0.5$  左右,方案 B 出现在  $v_{m2}/v_{m1}=0.2$  左右,方案 C,E 出现在  $v_{m2}/v_{m1}=0.3$  左右,方案 D 出现在  $v_{m2}/v_{m1}=0.4$  左右。方案 A 及方案 B,C 在  $v_{m2}/v_{m1}=0.4\sim0.6$  时阻力系数很接近,都在 0.16~0.22 之间变化;在  $v_{m2}/v_{m1}<0.4$  时,方案 B,C 的阻力系数小于方案 A,而在  $v_{m2}/v_{m1}>0.6$  时,方案 B,C 的阻力系数大于方案 A;方案 D,E 的阻力系数较大,分别在 0.61~0.84 和 0.29~0.65 之间变化。

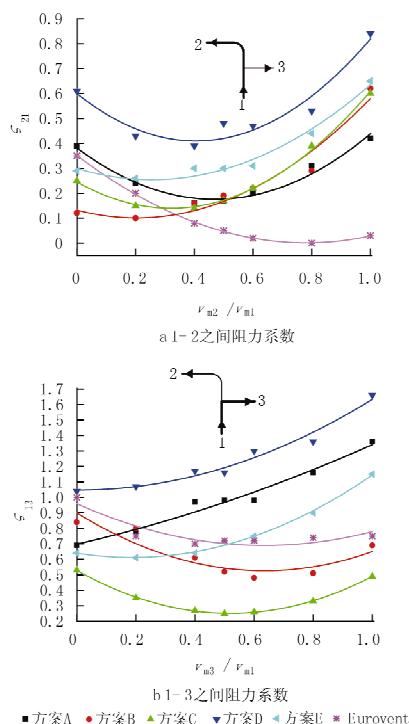


图7 分流时1-2与1-3之间的阻力系数

文献[9]给出的 Gardel 的回归模型的 T 形三通的阻力系数  $\zeta_{12}$  的结果与本次研究结果的对比如图 7a 所示, $\zeta_{12}$  的值在 0~0.35 之间,并且最小阻力系数值出现在  $v_{m2}/v_{m1}=0.8$  左右,而本次研究中

各种方案的阻力系数变化趋势与 Gardel 的结果一致,但最小阻力系数值的出现位置不同;在  $v_{m2}/v_{m1} > 0.4$  时本研究中几种方案均较文献[9]中给出的结果偏大,并且  $v_{m2}/v_{m1}$  越大偏差越大,这与本次研究中三通和弯头的耦合有关。

图 7b 是在支管流速与干管出口流速比不同时,CFD 计算出的 1-3 之间阻力系数  $\zeta_{13}$  在不同连接方案下的对比。方案 A、D 的  $\zeta_{13}$  随着  $v_{m3}/v_{m1}$  的增大而增大,方案 A 的  $\zeta_{13}$  在 0.69~1.36 之间,方案 D 的  $\zeta_{13}$  在 1.04~1.66 之间;对方案 B、C 和 E,  $\zeta_{13}$  随着  $v_{m3}/v_{m1}$  的增大先变小后增大,方案 B 在  $v_{m3}/v_{m1} = 0.6$  左右时,  $\zeta_{13}$  最小,为 0.48,方案 C 在  $v_{m3}/v_{m1} = 0.5$  时的  $\zeta_{13}$  最小,为 0.25;而方案 E 在  $v_{m3}/v_{m1} = 0.2$  时的  $\zeta_{13}$  最小,为 0.61。

文献[9]给出的 Eurovent 实测的 T 形三通  $\zeta_{13}$  的结果与本次研究的比较如图 7b 所示,  $\zeta_{13}$  的值在 0.7~1.0 之间,本次研究中方案 A 的阻力系数较文献中的值大,并且变化趋势也不相同;方案 B、C 的变化趋势与文献中结果相同,方案 C 的阻力系数仅为文献中值的 50% 左右。说明改变连接方式,方案 B、C 的阻力系数有很大改善。

#### 4 结论及建议

##### 4.1 CFD 与 PIV 实验结果分析

CFD 可以很好地反映流场的结构信息,其结果与 PIV 流场的结构很相近,但 CFD 计算的旋涡区的位置与 PIV 的结果有一定的差异,所有 CFD 计算结果的速度数值方面有最大 15% 的误差,说明 CFD 和 PIV 实验比较吻合。PIV 和 CFD 技术应用于流动现象的研究,二者可以相互结合、相互检验。PIV 可以为 CFD 计算提供边界设置信息,检验 CFD 计算结果的正确性;CFD 可以为 PIV 实验提供一定的指导。

##### 4.2 阻力系数的改善措施

从本次研究的 5 种方案看,不同的支管连接方式对弯头和三通近距离耦合管件的阻力系数影响很大。与 Eurovent 和 Gardel 的回归模型给出的 T 形三通的阻力系数相比,本次研究中方案 A 的变化趋势除分流情况下  $\zeta_{13}$  外均与之一致,但值较大; $\zeta_{13}$  和  $\zeta_{31}$  的值在方案 B 和方案 C 情况下有较大的改善。

综合考虑上述 5 种方案在合流和分流时的阻力系数值,改变支管与干管的连接方式,采用支

管中流体流动方向与干管尽量接近、减小合流和分流时形成的旋涡区范围的方案,可以起到减小局部阻力的效果;而在连接时采用混合箱的做法,因其中的流动更为复杂,起不到减小阻力的作用。方案 C 在各种情况下的值最优,方案 B 也比方案 A 有很大改进,但方案 D、E 没有达到预期的效果。

#### 参考文献:

- [1] 张琪欣. 浅谈多热源联网技术的优越性[J]. 科技情报开发与经济, 2003, 13(6)
- [2] 李善化, 康慧. 集中供热设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 1996
- [3] Sujan Sami, Jie Cui. Numerical study of pressure losses in close-coupled fittings [J]. HVAC&R Research, 2004, 10(4): 539-552
- [4] Rahmeyer P. Pressure loss data for large pipe tees [G]// ASHRAE Trans, 2002, 108(1): 376-389
- [5] Jones C D, Sepsy C F. An experiment study of losses in round mitered elbows, mitered tees and capped crosses[R]. Westerville, Ohio: United McGill Corp, 1969
- [6] Rahmeyer J. Pressure loss coefficients of threaded and forged weld pipe fittings for elbows, reducing elbows and pipe reducers [G]// ASHRAE Trans, 1999, 105(2): 334-351
- [7] Sethuraman. Laboratory study to determine the loss coefficient of two closed-coupled fittings [D]. Cookeville, Tennessee: Tennessee Technological University, 2000
- [8] Rahmeyer W J. Pressure loss coefficients for closed-coupled pipe tees [G]// ASHRAE Trans, 2002, 108(1): 390-406
- [9] Jorgen B E, Tor-Goran M. Pressure drops in T-junctions—a comparison [G]// ASHRAE Trans, 2000, 106(1): 359-364
- [10] Nanda K M, Stephen I. Pressure loss coefficient measurements of two close coupled HVAC Elbows [J]. HVAC&R Research, 2005, 11(1): 133
- [11] Rahmeyer W J. Pressure loss data for PVC pipe tees [G]// ASHRAE Trans, 2003, 109(1): 252-271
- [12] Rahmeyer W J. Pressure loss data for PVC pipe elbows, reducers, and expansions [G]// ASHRAE Trans, 2003, 109(1): 230-251