

圆断面 90°弯管局部水头损失的数值模拟

谢海英

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 利用 fluent 软件,选取标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,对 90°圆断面弯管在雷诺数为 60000 时的局部损失进行了数值模拟。结果表明:标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型能较好地预测弯管内由于离心力造成的二次流,弯管内流场及压强分布与试验值吻合较好,计算得到的局部损失系数与试验值基本一致,从而验证了数值模拟方法对弯管局部损失计算的有效性。

关键词: 弯管; 局部水头损失; $k-\varepsilon$ 湍流模型

中图分类号:TV139.1

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2014)05-0190-03

Numerical simulation of local water pressure loss for bend pipe of circular section at 90 degrees

XIE Haiying

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Choosing standard $k-\varepsilon$ turbulence model, the paper simulated the local head loss of bend with circular section at 90 degrees by use of fluent software when Re equal to 6000. The results showed that the turbulence model can better predict the second flow in the pipe caused by centrifugal force. The simulated sectional flow field and pressure distribution in the pipe all agreed well with the experiment results. The coefficient of local head loss gotten by calculation is almost consistent with the experiment data. Therefore the efficiency of the numerical simulation for local flow loss of bend was validated.

Key words: bend; local head loss; $k-\varepsilon$ turbulence model

弯管是管路系统中用来改变流动方向的典型配件,广泛应用于市政给水、建筑给水排水及其他工程设备中。在确定弯管的局部水头损失系数时,除了查找设计手册、现场试验的方法,还可利用成本低、周期短的数值模拟方法进行分析和计算^[1-6],并可根据计算结果进行设计优化^[1]。本文利用 Fluent 软件,对 90°圆断面弯管的流动和局部损失进行了数值模拟,分析弯管流动的特征,并将计算值与试验值进行对比,以验证数值模拟方法的有效性。

1 数学模型

为与试验值进行对比,弯管的几何参数取值同试验文献[7]。管道水平放置,图 1 是弯管在水平面上的投影图,计算域和坐标系选取如图 1 所示,弯管管径 $d = 0.104$ m,曲率半径 $R = 2d$,弯管的断面位置用 φ 表示,弯管前、后的直管段长度分别为 $40d$ 和 $100d$,弯管前、后直管段的位置分别用 s'/d 及 s/d 表示,且 $\varphi = 0^\circ$ 时, $s'/d = 0$, $\varphi = 90^\circ$ 时, $s/d = 0$ 。弯管

各断面上的坐标原点位于管道轴线上, x 轴如图所示, y 轴垂直于纸面向里。将通过管道轴线的水平面与弯管内壁面的交线分别定义为内侧和外侧,见图 1。流动模拟的空气温度为 14°C ,断面平均流速为 $w_a = 8.65$ m/s, $Re = 60000$,弯管内流量为 0.09 kg/s。

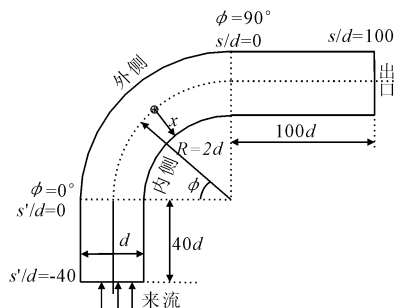


图 1 弯管计算域设置

计算域进口按来流情况取为速度进口边界条件,计算域出口取为出流条件,管道壁面材料为钢管,取当量粗糙度 K_s 为 0.1 mm,相对粗糙度 $K_s/d = 9.62 \times 10^{-4}$ 。数值模拟的控制方程为连续性方程、

动量方程和湍流模型方程。壁面附近采用壁面函数法处理。采用 ICEM - CFD 软件进行区域离散,网格类型为三维六面体非结构化网格,当距离壁面最近的网格大小约为 0.5 mm 时,计算结果基本无变化,可认为该结果为网格独立解。本文采用有限体积法离散方程,对流项选用二阶迎风格式,速度与压力的耦合采用 SIMPLE 算法。

龚斌等^[5]用大涡模拟的方法对弯管流动获得了满意的预测,但由于湍流模拟中的涡粘模型对网格要求较低、计算量小且数值计算的稳健性较好,因此本文仍选用涡粘模型。笔者分别采用 Spalart - Allmaras、标准 $k - \varepsilon$ 、RNG $k - \varepsilon$ 、relizable $k - \varepsilon$ 等湍流模型的模拟结果表明,上述几种模型的模拟结果基本相同,这与文献[8]的结论一致,限于篇幅,文

中仅给出标准 $k - \varepsilon$ 模型的模拟结果。

2 计算结果与分析

图 2 是模拟的弯管及前后直管段的各断面流场及轴向流速的等值线图,由于各断面上的流动上下对称,图 2 仅给出了弯管下半断面的流动情况,图 2 仅给出了弯管下半断面的流动情况,图 2 中等值线上的数值为轴向速度与 w_a 的比值。限于篇幅,此处未给出试验值,经与文献[7] 对比可知,模拟的速度场与试验值基本吻合。定义压力系数 $C_p = (p - p_{ref})/(\rho w_a^2/2)$,其中 ρ 为空气密度, p_{ref} 按试验取为弯管前 $s'/d = 17.6$ 处管壁的静压, p 是弯管壁面上的静压,图 3 是弯管内侧、外侧及底部内壁面 C_p 计算值和试验值的比较,由图知模拟值与试验值吻合较好。

由图 2(a) 知,在 $s'/d = -1$ 处,断面上的轴向速

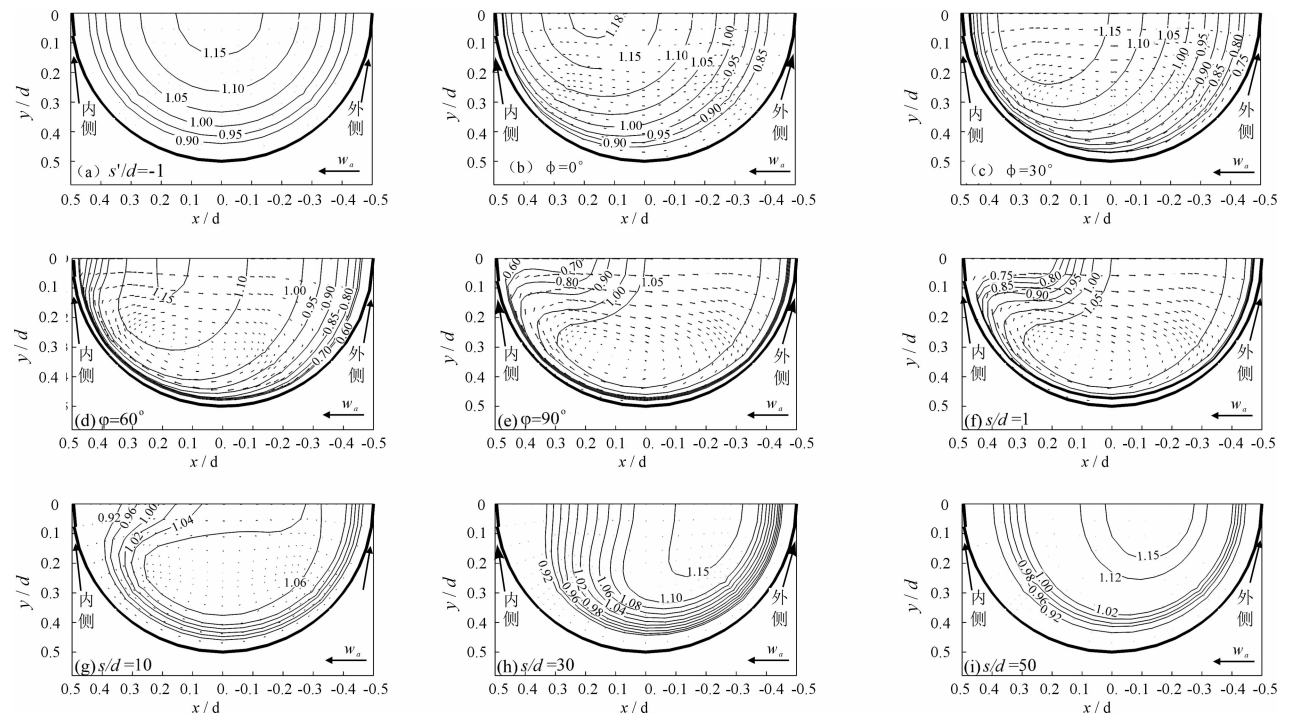


图 2 弯管及前后直管段各断面流场图

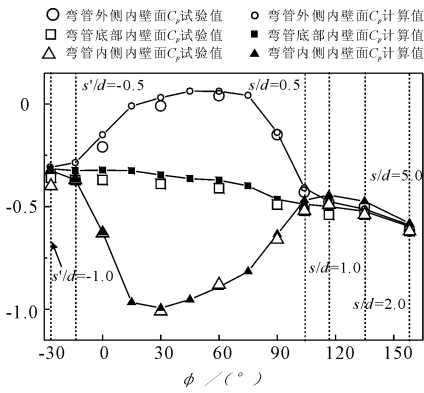


图 3 弯管内壁面 C_p 的模拟值与试验值比较

度对称分布,而在 xy 面上的速度几乎为 0,图 3 表明该断面上弯管内侧、外侧和底部的 C_p 值基本相同,速度和压强的分布特征说明此处流动尚未受到弯管的影响。

在 $\varphi = 0^\circ$ 面上,流动已明显受到弯管的影响,断面上的轴向流速不对称,并在弯管内侧附近加速, xy 面上的速度也明显增加,见图 2(b)。图 3 表明该断面上弯管内侧的 C_p 值减小、外侧的 C_p 值增加,底部的 C_p 值变化不大,这显然是由于流体进入弯管后的离心力所致。弯管内外侧的压强差造成外侧流体沿壁面流向内侧,由于连续性,内侧流体在管道轴线附近又流回外侧,形成了弯管内的二次流。在 $\varphi =$

30°面上,可明显看到二次流的漩涡,见图2(c)。图3显示,在 $\varphi = 0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内,弯管内侧压强值始终低于外侧值,但当 $\varphi > 30^\circ$ 时,弯管内侧 C_p 值开始增加,而当 $\varphi > 60^\circ$ 时,弯管外侧 C_p 值逐渐变小,弯管底部的压强略减小,但变化不大,上述压强分布维持着弯管内的二次流,该流动一直延续到弯管下游。由图3知,在 $\varphi > 30^\circ$ 时,随着内侧压强值逐渐回升,弯管内侧的轴向流速逐渐变小;同时,二次流造成的内侧附近的高速区逐渐向管中心迁移,轴向流速的等值线分布产生变形,见图2(d)~(e)。

从图2(f)~(i)知,在弯管下游 $s/d = 10$ 的断面上, x 和 y 向的速度明显减小。在 $s/d = 50$ 的断面上,轴向速度的等值线变形已基本消失,但仍未完全恢复为轴对称分布,表明二次流产生的影响还未完全消除。

弯管局部损失系数 ζ 按以下方式计算:首先由模拟值得到弯管断面 $s'/d = -1$ 和断面 $s/d = 50$ 上的总压(Pa),分别表示为 $p_{s'/d=-1}$ 和 $p_{s/d=50}$,则上述两断面间的能量损失 $\Delta p = p_{s'/d=-1} - p_{s/d=50}$, Δp 中包括了弯管前后段的沿程损失 p_f (Pa)和弯管的局部损失 p_j (Pa),其中 $p_f = i \cdot l$, i 是单位管长的沿程损失($\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$), l 为断面 $s'/d = -1$ 到断面 $s/d = 50$ 间扣除弯管段的管长,为5.304 m,而弯管的局部损失 $p_j = \zeta \times 1/2 \times \rho u_a^2$ 。

为了计算单位管长的沿程损失 i ,图4给出了弯管后直管段 $s/d = 1 \sim 50$ 断面上能量损失 $\Delta p_L/L$ 的变化情况, L 是相邻两断面间的距离, Δp_L 是相邻两断面间的能量损失。由图4知,在 $s/d = 1 \sim 20$ 的管长内, $\Delta p_L/L$ 变化剧烈,且急剧变小,说明此处的损失仍受到弯管的影响,即流动处于弯管的影响长度内。当 s/d 大于30时, $\Delta p_L/L$ 基本不再变化,说明弯管对能量损失的影响已基本消失,可认为此处的 $\Delta p_L/L$ 为管路的单位管长沿程损失 i ,其值为 $8.8 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$ 。按文献[9]查莫迪图(工业管道沿程损失的计算),管道在 $Re = 60000$ 、相对粗糙度 $K_s/d = 9.62 \times 10^{-4}$ 时的 $\lambda = 0.0202$,则按此 λ 计算得到的单位管长沿程损失为 8.94 Pa ,可见模拟值与按莫迪图得到的计算值基本一致。

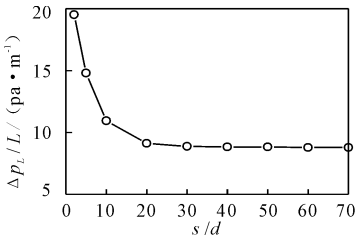


图4 弯管 $\Delta p_L/L$ 沿管长的变化

表1是 ζ 的计算过程。由此计算得到的弯管局部损失系数 ζ 为0.242。根据文献[9]可得弯管 $Re = 60000$ 、相对粗糙度 $K_s/d = 9.62 \times 10^{-4}$ 时 ζ 的实测值为0.257,模拟值较实测值略小。

表1 数值模拟弯管局部损失系数 ζ					Pa
$P_{s'/d=-1}$	$P_{s/d=50}$	Δp	P_f	P_j	ζ
80.920	23.651	57.269	46.145	11.124	0.242

3 结 语

本文采用 fluent 软件,对圆断面弯管在 $Re = 60000$ 的流动进行了数值模拟。从计算结果和分析可知,采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型能较好地模拟圆断面弯管内的二次流动,弯管内断面流速、管壁上的压强分布及局部损失系数与试验值吻合较好,验证了数值模拟方法的正确性和有效性。因此,对于类似的管道配件,可通过数值模拟的方法进行流动和能量损失的分析,并为试验设计、管道内流动分析及设计优化等提供有效参考。

参考文献:

[1] 王小强,郭顺生. 基于 Fluent 的弯头结构改进[J]. 石油化工设备技术,2009,30(2):39-40+48.

[2] Marco Pellegrini, Hiroshi Endo, Hisashi Ninokata. Numerical investigation of bent pipe flows at transitional Reynolds number[J]. Progress in Nuclear Energy, 2011, 53(7): 916-920.

[3] Ghazali M F, Rahim M F A. CFD Prediction of heat and fluid flow through U-Bends using high reynolds-number EVM and DSM Models[J]. Procedia Engineering, 2013, 53(1):600-606.

[4] Kalpakli A, Orlu R. Turbulent pipe flow downstream a 90°pipe bend with and without superimposed swirl[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2013, 41(6):103-111.

[5] 龚 斌,刘喜兴,杨 帅,等. 90°圆形截面弯管内流动的大涡模拟[J]. 过程工程学报, 2013, 13(5):760-765.

[6] Abhari M N, Ghodsian M, Vaghefi M, et al. Experimental and numerical simulation of flow in a 90° bend[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2010, 21(3):292-298.

[7] Sudo K, Sumida M, Hibara H. Experimental investigation on turbulent flow in a circular-sectioned 90-degrees bend [J]. Experiments in Fluids, 1998,25(1):42-49.

[8] Pruvost J, Legrand J, Legentilhomme P. Numerical investigation of bend and torus flows, part I: effect of swirl motion on flow structure in U-bend[J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59(16):3345-3357.