

文章编号:2095-0411(2016)03-0065-05

## 90°弯管内流体流动特点数值模拟

饶永超<sup>1,2</sup>, 常 凯<sup>1,2</sup>, 王树立<sup>1,2</sup>, 李建敏<sup>3</sup>, 杨敏官<sup>4</sup>, 杭 越<sup>1,2</sup>

(1. 江苏省油气储运技术重点实验室(常州大学), 江苏 常州 213016; 2. 常州大学 石油工程学院, 江苏 常州 213016; 3. 中石化中原油建工程有限公司, 河南 濮阳 457001; 4. 江苏大学 能源与动力工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要:**采用标准  $k-\epsilon$  模型对 90°弯管内部流场进行了三维数值模拟研究。模拟中弯管曲率半径与管径之比  $\beta=R/d$  分别为 2.0、2.5、3.0 和 3.5, 表观液速为 0.5 m/s。通过建模和数值计算, 研究了弯管内流场分布、压力分布以及速度矢量和流动轨迹等规律, 并重点分析了不同  $\beta$  情况下的弯管中流场流动特点。结果表明: 流体速度在弯管内不同截面内是逐渐变化的。由于离心力的作用, 在流动后段出现二次流, 加强了流体的扰动。同时, 流体进入弯道后管道内部不同半径处压力不同, 弯管内壁面附近处压力较小, 弯管外壁面处压力较大。不同曲率半径与直径之比对管内流速分布有较大影响。 $\beta$  由小增大时, 内侧流速逐渐变小, 实际的管道设计与施工中尽量使用  $\beta$  较大的弯头附件以降低对管道内壁的冲击。

**关键词:** 90°弯管;  $k-\epsilon$  模型; 流动特点; 数值模拟

**中图分类号:** TE 83

**文献标志码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.2095-0411.2016.03.013

## Numerical Simulation of Fluid Flow Characteristic in 90° Bend Pipe

RAO Yongchao<sup>1,2</sup>, CHANG Kai<sup>1,2</sup>, WANG Shuli<sup>1,2</sup>, LI Jianmin<sup>3</sup>, YANG Minguan<sup>4</sup>, HANG Yue<sup>1,2</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Oil & Gas Storage and Transportation Technology, Changzhou University, Changzhou 213016, China; 2. School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213016, China; 3. Sinopec Zhongyuan Youjian Engineering Co., Ltd., Puyang 457001, China; 4. School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** The characteristic of fluid flow field in 90° bend pipe was numerically simulated using the standard  $k-\epsilon$  model. The ratio of bend radius of curvature and diameter  $\beta=R/d$  were respectively 2.0, 2.5, 3.0 and 3.5, and superficial liquid velocity was 0.5 m/s. The flow field distribution, pressure distribution and velocity vector and the flow path were investigated, and flow characteristics under different  $\beta$  in 90° bend pipe were intensively studied. The results showed that the flow field in the 90° bend pipe was gradually changing. The secondary flow would appear in the back, due to the effect of centrifugal force, which strengthened the disturbance of the fluid. The pressure on both sides of the inside and outside also changed because of the bend flow. The pressure was small inside the bend, and the pressure was big outside the bend. The different ratio of bend radius of curvature and diameter had a great influence on velocity distribution. The inside velocity became gradually smaller with an increase of  $\beta$ . The large  $\beta$  of bend pipe reduced the impact on the pipe wall in the actual pipeline design and construction.

**收稿日期:** 2015-08-17。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51574045)。

**作者简介:** 饶永超(1987—), 男, 江苏沛县人, 博士生。通讯联系人: 王树立(1957—), E-mail: wsl@cczu.edu.cn

**Key words:** 90° bend pipe;  $k$ - $\epsilon$  model; flow characteristics; numerical simulation

在石油天然气输送领域,管道输送是目前常用和安全性较高的输送方式。人们根据管道内流体流动的特点进行设计和建设原油、成品油或者天然气输送管道,目前说来相关研究人员在直管段内流体流动和压降计算等方面做了大量研究,基本掌握流动特点,且理论体系已基本建立。但是,实际工程上的管道系统往往带有很多附件,如法兰等,而且管道在建设过程中不可避免的会出现转弯的情况。与直管段相比,当流动速度、流体介质等发生变化时,弯管内的流场呈现出更为复杂的流动特性<sup>[1]</sup>。另外,弯管处内部流场的管壁附近容易成低压区,在管道内形成二次流动,不仅可造成流体总压和能量损失,而且对油气输送管道的正常安全运行存在巨大影响。当管道运行时间较长、流动速度过快时,极易造成弯管处管道的破裂和管线泄漏等问题。

目前,SUDO K 等<sup>[2]</sup>、TAYLOR 等<sup>[3]</sup>以及马皓晨等<sup>[4]</sup>通过探针技术、LDV 和 PIV 对  $\beta=2$  的 90° 弯管、以及方形弯管内的流场特点进行了相关的实验研究,得到了轴向截面的速度等值图、矢量图以及雷诺应力等值图等,并对弯曲段壁面的压力分布进行了计算。樊洪明等<sup>[5]</sup>和梁德旺等<sup>[6]</sup>分别采用 LES 和双层  $k$ - $\epsilon$  模型方形弯管内流场进行了数值模拟,都取得了较好的模拟结果。但是,他们主要是对方形截面的弯管进行数值模拟。在圆形截面的弯管内流场进行数值模拟的方面,龚斌等<sup>[7]</sup>以 90° 圆形截面弯管为研究对象,以水为介质对管内流场采用 4 种模型进行数值模拟,对各截面二次流的产生原因和情况进行分析。翟银平等<sup>[8]</sup>对 90° 弯管中的管

道螺旋流进行模拟,通过建模和数值计算研究了弯管中螺旋流的生成、发展和衰减规律。总体说来,弯管内的流体流动一直受到研究者的关注,但是弯管内部流场还需要进一步研究,且不同曲率半径与管道直径之比对流动的影响未见报道,这些参数也对实际的工程建设有重要影响。因此,本文将利用标准  $k$ - $\epsilon$  模型对不同曲率半径与管道内径之比的 90° 弯管进行数值模拟研究,考虑不同的流动工况,阐明流体在弯曲流道中的流动规律、压力分布等,加深对现场油气输送弯管内流场特点的理解。

## 1 数学模型

控制方程组主要包括连续性方程、动量守恒。湍流运动方程采用标准  $k$ - $\epsilon$  模型对弯管内流场进行数值模拟。

连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u \mathbf{u}) &= \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v \mathbf{u}) &= \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho w \mathbf{u}) &= \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \end{aligned} \quad (2)$$

标准  $k$ - $\epsilon$  模型中的湍动能  $k$  和耗散率  $\epsilon$ , 与之相对应的输运方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_m + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (4)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

在式(1)~(5)中,  $\rho$  是密度,  $t$  是时间,  $\mathbf{u}$  是速度矢量,  $u, v, w$  是速度矢量在  $x, y, z$  方向的分量。在式(2)中,  $S_u, S_v, S_w$  是动量守恒方程的广义源项。式(3)、(4)、(5)中,  $G_k$  是由于平均速度梯度引起的湍动能  $k$  的产生项, 模型常数  $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}, \sigma_k, \sigma_\epsilon$  的取值分别为 1.44、1.92、0.09、1.0、1.3。

## 2 数值计算方法

### 2.1 物理模型

本算例的研究对象为 90° 弯管, 其几何尺寸如图 1 所示,  $O$  点为原点。为了分析方便, 将弯管分为上游直管段、弯曲段和下游直管段。弯管曲率半径与管道直径之比  $\beta=R/d$  分别为 2.0、2.5、3.0 和 3.5, 弯管直径  $d$  为 25mm, 上下游直管段的长度均为曲率半径的 2 倍。  $\varphi$  为流动角, 文中选取了 0°、45° 和 90° 3 个

对比截面,同时选取了下游段的中间处作为第 4 处对比截面,定义为 D 截面。初始流速为 0.5 m/s,流动介质为水,不可压缩、常温,物性参数选取 Fluent 自带数据库中的参数。 $\rho_w = 998.2 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu_w = 0.001 \text{ 003 Pa} \cdot \text{s}$ 。网格划分采用结构化网格,网格尺寸取 1.0 mm,网格数为 5 万~10 万。

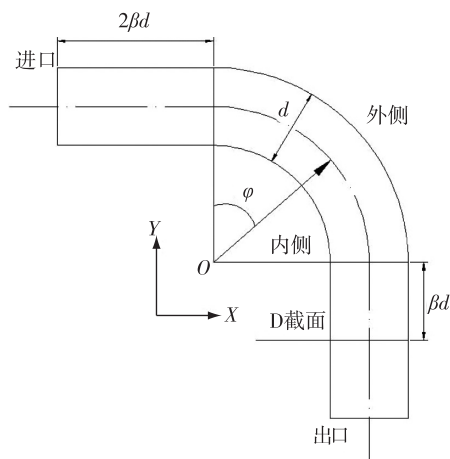


图 1 弯管二维结构示意图

Fig.1 Bend pipe two-dimensional structure diagram

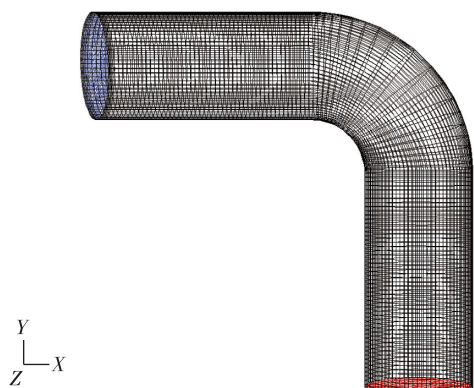


图 2 弯管网格图

Fig.2 Bend pipe grid figure

## 2.2 数值方法

采用三维、压力基、隐式分离算法。压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法,压力方程的离散采用标准算法,动量方程用一阶迎风格式,湍动能及耗散率采用一阶迎风格式。在壁面上使用标准壁面函数。当残差  $\epsilon_i < 10^{-3}$  时即可认为计算收敛。

## 3 结果与讨论

### 3.1 速度分析

如图 3 以及图 4(a)所示,在弯管进口段(截面  $\varphi = 0^\circ$ ),由于流体还未受到弯曲段的影响,截面上的

流体以相同速度流动,壁面处颜色变暗是由于边界层的存在降低了流体的速度。如图 4(b)所示,当流体继续向前运动,截面( $\varphi = 45^\circ$ )上的速度开始逐渐发生变化。在管道外侧速度逐渐变小,且越靠近外侧,速度减大幅度越大。在管道内侧,速度逐渐增加。断面上的轴向流速大小不同,且弯管内侧流速增加,弯管内侧最大速度达到 0.766 m/s,是初始速度的 1.53 倍;而弯管外侧速度减小至 0.345 m/s,是初始速度的 0.69 倍。这显然是由于流体进入弯管后的离心力所致。在弯管流道的中间部分,仍有一小束流动以初始速度向前运动。在弯管处尾部,靠近管壁外侧,流体以稍高于初始流速的速度向前运动,而在出口处附近的流体内部速度又会逐渐变大,这是由于管道内部的二次流动所致。当流体经过弯管流动时,由于离心力的作用,在流动后段会出现二次流<sup>[1]</sup>,二次流加强了流体的扰动,并使流动速度提高,速度约为 0.575 m/s,是初始流速的 1.15 倍。而在管道出口处的内侧,流动速度较小。在弯管处内侧壁面的后段,速度几乎为零,但是随着流动的进行,速度又逐渐增大,在出口处速度约为 0.383 m/s,是初始速度的 0.766 倍。这是由于弯管的特殊结构,使流动方向急剧转变,造成弯道内侧流体能量几乎完全损失,随后又由于相近流体的带动作用,流动速度逐渐增加。从图中可以看出,在管道出口处,内侧速度小于初始速度,外侧流体速度大于初始速度。呈现一种不同速度的流体共流的状态。

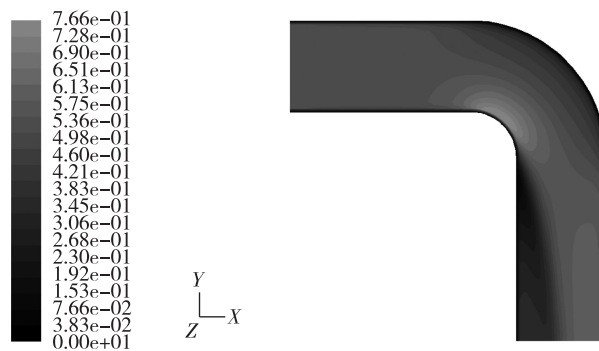


图 3 纵剖面速度分布( $\beta=2.0$ )

Fig.3 Velocity distribution of longitudinal section( $\beta=2.0$ )

如图 5 所示,在弯管处,弯道内侧流速大幅增加,当流体经过弯管处内侧内壁后速度急剧减小,同时流体的流动方向也发生变化。如图 4(c)、(d)所示,流体流动除了有向前的流向之外,也同时有了环向的流速,此时二次流发生。它是除了初始流动之外,由于管道内部的横向压力的作用,产生了平行于边界的偏移。二次流带动内侧流体穿过横截面中心

区域向外侧流动。

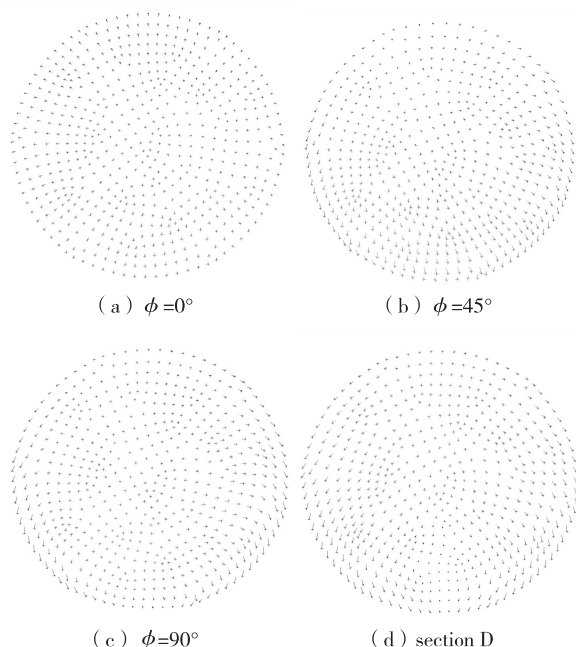


图 4 流动截面矢量图( $\beta=2.0$ )

Fig.4 Vector diagram of flow cross-section( $\beta=2.0$ )

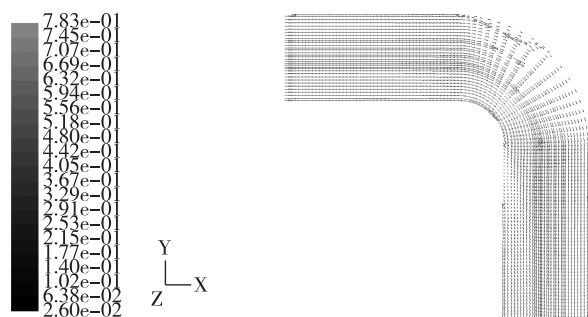


图 5 纵剖面速度矢量分布图( $\beta=2.0$ )

Fig.5 Velocity vector distribution of longitudinal section( $\beta=2.0$ )

### 3.2 压力分析

由图 6、图 7 可知,在弯管内侧压力较小,而在弯管外侧压力较大,且在内侧附近出现了负压,而外侧附近的压力约为初始进口压力的 1.31 倍。这是因为流体在运动过程中产生离心力,压力随速度的减小而增大。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。根据流线图所示,在流动出口处的内壁面,流动出现了分离现象,流动轨迹出现显著变化。在出口截面上,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。

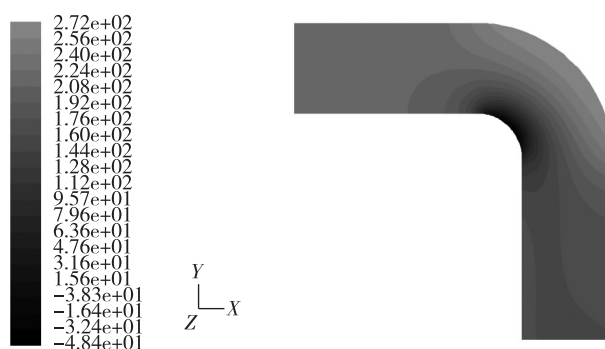


图 6 纵剖面压力分布图( $\beta=2.0$ )

Fig.6 Pressure distribution of longitudinal section( $\beta=2.0$ )

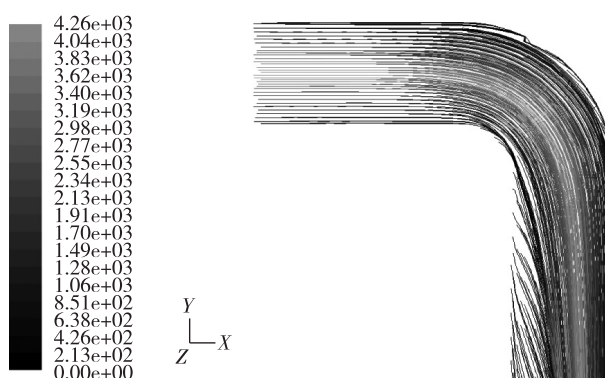


图 7 纵剖面流线图( $\beta=2.0$ )

Fig.7 Flow line of longitudinal section( $\beta=2.0$ )

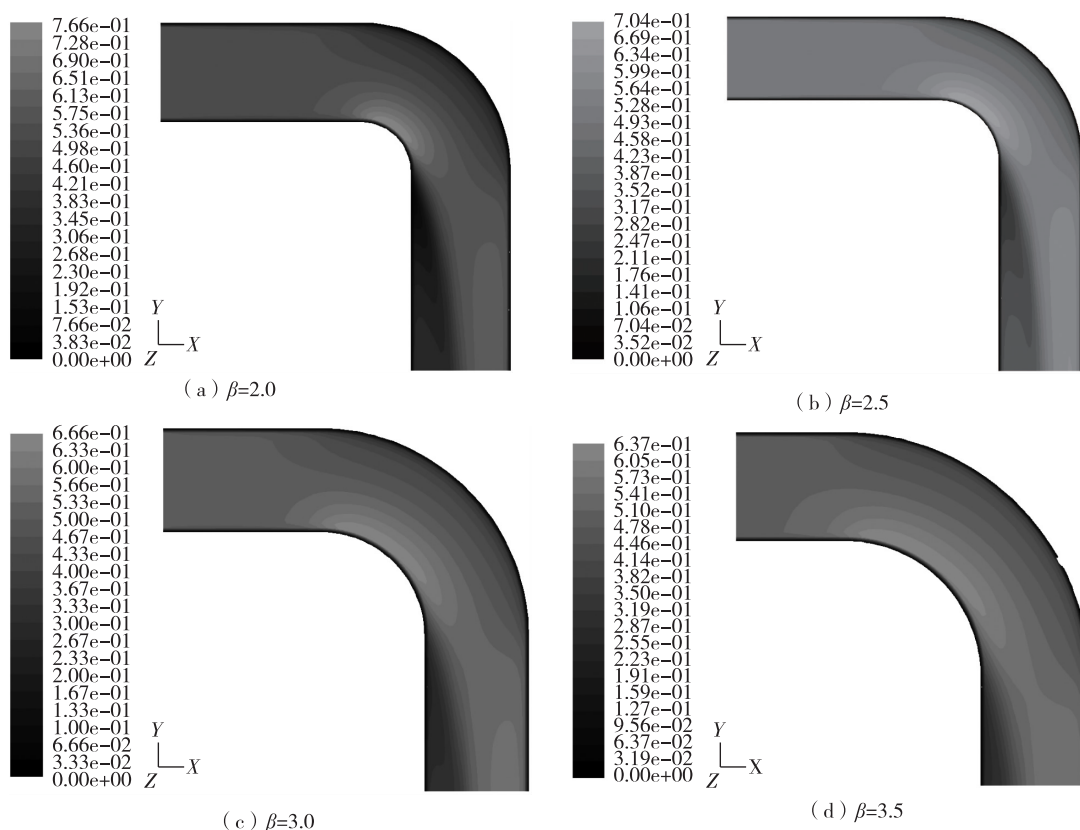
### 3.3 $R/d$ 影响因素分析

如图 8 所示,4 种  $\beta$  值的弯管内侧(截面  $\varphi=45^\circ$ )的最大流速均大于初始流速,但是增加的幅度不同。 $\beta$  逐渐变大时,内侧流速的最大值分别是初始流速的 1.53、1.41、1.33 和 1.27 倍,这说明较小  $\beta$  能够使正常流速提高到 1.5 倍左右的水平,实际的管道设计与施工中尽量使用  $\beta$  较大的弯头附件以降低对管道内壁的冲击。弯管内侧最大速度持续的范围也因  $\beta$  的不同而不同。当  $\beta=2.0$  时,弯管内侧最大速度持续的范围约为  $60^\circ$ ,而当  $\beta=3.5$  时,弯管内侧最大速度持续的范围约为  $80^\circ$ 。弯管外侧流速均小于等于初始流速,当  $\beta$  较小时,弯管外侧流速明显小于初始流速;而当  $\beta$  较大时,弯管外侧流速和初始流速基本相同。总体说来,弯管处外侧流速随着  $\beta$  的增大而逐渐增大。

## 4 结论

1) 流体在弯管内不同截面处流速逐渐变化,断面上的轴向流速大小不同;当流体经过弯管时,由于



图8 不同 $\beta$ 值纵剖面速度云图Fig.8 Velocity contours of longitudinal section under different  $\beta$ 

离心力的作用,在下游直管段出现二次流,加强了流体的扰动,并使流动速度提高。由于弯管处的特殊结构,弯道内侧流体能量几乎完全损失,随后又由于相近流体的带动作用,流动速度逐渐增加。在管道出口处,呈现一种不同速度的流体共流的状态。

2)弯管处内外两侧的压力也因弯管流动发生变化,流体在弯管内侧压力较小,而在弯管外侧压力较大,且在内侧出现负压。同时在流动出口处的内壁面,流动出现了分离现象,流动轨迹出现显著变化。

3)不同曲率半径与直径之比对管内流速分布有较大影响。 $\beta$ 逐渐变大时,内侧流速逐渐变小;弯管外侧流速随着 $\beta$ 的增大而逐渐增大。因此,实际的管道设计与施工中尽量使用 $\beta$ 较大的弯头附件以降低对管道内壁的冲击。

#### 参考文献:

[1]王树立,赵会军. 弯管中的气液两相流水击现象[J]. 西安石油大学学报(自然科学版),2005,20(1):54-56.

[2]SUDO K, SUNIDA M, HIBARA H. Experimental investigation on turbulent flow in a circular-sectioned 90-degree bend [J]. Experiments in Fluids, 1998, 25: 42-49.  
 [3]TAYLOR A, WHITELAW J H, YIANNESK I S M. Curved ducts with strong secondary motion, velocity measurements of developing laminar and turbulent flow [J]. Journal of Fluids Engineering, 1982, 104: 350-359.  
 [4]马皓晨,代翠,董亮,等. 90°方形弯管内部流场 PIV 试验 [J]. 水利水电科技进展,2013,33(5):31-34.  
 [5]樊洪明,何钟怡,王小华. 弯曲管段内流动的大涡模拟 [J]. 水动力学研究与进展,2001,16(1):78-83.  
 [6]梁德旺,王国庆,吕兵. 低速高湍流度 90 弯管流动数值模拟[J]. 南京航空航天大学学报,2000,32(4):381-387.  
 [7]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.  
 [8]翟银平,王树立. 90°弯管管道螺旋流的数值模拟[J]. 常州大学学报(自然科学版),2011,23(2):36-39.

(责任编辑:殷丽莉)