

文章编号: 1005- 8893 (2006) 04- 0001- 04

相邻过流截面突然缩小与扩大阻力相互影响的研究*

秦志坚^{1,3}, 庞明军², 张锁龙^{2,3}, 裴峻峰^{2,3}

(1. 江苏金石机械集团 工程部, 江苏 淮安 211600; 2 江苏工业学院 机械工程系, 江苏 常州 213016; 3 江苏省油气井口装备工程技术研究中心)

摘要: 运用 CFD 软件, 对相邻管路截面突然缩小与突然扩大二者产生的局部阻力和它们之间的相互影响关系作了研究。分别对 d/D 为 0.3 和 0.5 的两种情况进行了数值模拟, 通过改变小管子的长度来观察突然缩小、突然扩大和总阻力的变化情况。

关键词: 过流截面; 局部损失; 相互影响

中图分类号: O 368 文献标识码: A

Study of Loss of Flow Section on the Border of Sudden Shrink and Sudden Expansions in Pipeline

QIN Zhi-jian^{1,3}, PANG Ming-jun², ZHANG Suo-long^{2,3}, PEI Jun-feng^{2,3}

(1. Department of Technical and Engineering, Jiangsu Jinhua Petroleum Machine Group, Huian 211600, China; 2. Department of Mechanical Engineering, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213016; 3. Oil and Gas Well-Head Equipment of Jiangsu Engineering Research Center)

Abstract: CFD software is applied to study local loss of flow section on suddenly shrunken and expanded border, and to research how they influence each other. Two instances of d/D for 0.3 and 0.5 are simulated. By changing tubule's length, three losses including sudden shrink, sudden expansions and the total loss of the system, are investigated.

Key words: flow section; local loss; interactional influence

有关管路局部损失的研究是个老课题, 各种流体力学书籍都有介绍, 如弯头、阀门、管道截面突然扩大、管道截面突然缩小等带来的局部阻力。然而这些书籍所提供的局部损失的计算方法都只适用于互不干扰的情况, 即两种截面突变相距甚远互不影响。但工程中经常会遇到一些相互干扰的情况, 如液压调节阀和组合式调节阀, 管路截面突然扩大与突然缩小距离很近, 两种邻近局部阻力有没有影响、如何影响、变化规律如何等等, 诸如此类型的问题研究不多, 本文就此作了研究。

1 两种阻力产生的原因^[1,2]

1.1 管路截面突然缩小阻力产生的原因

管路截面突然缩小会产生 4 项损失: 撞击损失、转向损失、涡流损失和加速损失。①如图 1 所示, 当流体从 1-1 截面向前流动时, 部分流体与 2-2 截面的壁面发生碰撞改变流向, 产生撞击损失。②受 2-2 截面阻碍的外层流体要改变流向向中心靠拢, 由此产生垂直于轴线的速度分量, 且在

* 收稿日期: 2006- 05- 06

作者简介: 秦志坚 (1968-), 男, 江苏金湖人, 工程师。

2-2 截面和 4-4 截面间出现过流截面“颈缩”现象，导致流速重新分布，在整个过程中，由于外层流体与中心流体动量交换的结果，产生了流体的转向损失。③在 2-2 和 3-3 截面处出现涡流区，由于涡流要维持运动，必须从主流获得能量，这就导致了进一步的损失，这部分能量损失称之为涡流损失。④从 3-3 截面到 4-4 截面，流体经过减速扩压的流动过程，该过程由于流体的加速、减速导致能量的进一步的损失，称为加速损失。

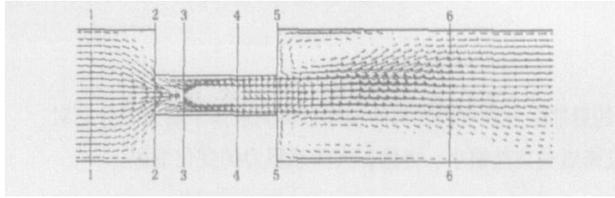


图 1 过流截面突然缩小与突然扩大速度矢量图

Fig. 1 Velocity vectorgraph of flow section on sudden shrink and expansion

1.2 管路截面突然扩大阻力产生的原因

如图 1 所示，由于过流截面的突然扩大，在 5-5 截面后的主流外边形成了涡流区，造成涡流损失。当流体从小截面流入大截面后，原来的速度分布被打乱，进行重新分布，在速度分布调整的过程中，由于主流区速度梯度的增大，导致内摩擦力增加，使能量损失增加。由于速度重新调整带来的摩擦损失和涡流损失合起来就构成了过流截面突然扩大的局部阻力。值得一提的是，涡流区的形状与两管径比值相关。当小管子直径较小时，可能形成不对称的涡流区，相关研究见文献 [3]。

2 控制方程和求解方法

由于该流动的理论最小雷诺数已接近于 10000，所以属于湍流流动的范畴。下面给出二维湍流流动的相关方程^[4,5]：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$\begin{cases} -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 u_x = \frac{du_x}{dt} \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 u_y = \frac{du_y}{dt} \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} \right] + \frac{c_1 \epsilon}{k} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - c_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \\ \rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \end{cases} \tag{3}$$

$$\mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \rho \epsilon \tag{4}$$

其中 $k = \frac{1}{2} \frac{u_j u_j}{l}$, $\epsilon = c_D \frac{k^{3/2}}{l}$, $\mu_t = c_\mu \rho k^2 / \epsilon$ 。

上述方程中， ρ 为密度； u, v 为速度； P 为压强； μ 是分子粘度系数； μ_t 是湍流粘性系数； k 为单位质量流体湍流脉动动能； ϵ 为单位质量流体脉动动能的耗散率； l 为湍流长度标尺。其中 c_1, c_2, c_μ 为经验系数； $\sigma_\epsilon, \sigma_k, c_D$ 为经验常数；相关值可查阅文献 [4]。

求解采用二维非耦合求解方法，湍流模型选择标准的 K- ϵ 模型，整个流场采用 SIMPLE 算法，动量方程、K 方程和 ϵ 方程都采用二阶迎风格式离散。

3 模拟算例

3.1 几何模型

以水为介质，保持管径不变，通过改变 L 来观察两个阻力的变化。共模拟了两种情况：① $D = 10 \text{ mm}$, $d = 3 \text{ mm}$ ；后面图中出现的曲线编号 1~14 分别对应 L 的长度为 (0、1、5、10、15、25、35、50、65、85、100、130、150、200) mm。② $D = 10 \text{ mm}$, $d = 5 \text{ mm}$ ；后面图中曲线 1~10 分别对应 L 的长度为 (0、10、15、25、40、50、70、100、150、250) mm。几何模型详见图 2。

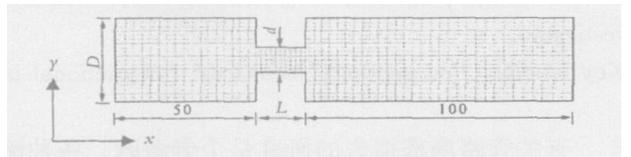


图 2 几何模型与网格划分

Fig. 2 Geometry and mesh model

3.2 网格划分与边界条件的设置

先对每条边进行网格节点的划分，在此基础上，对面创建二维的四边形单元结构化网格，过渡区域的网格划分的相对密一些，详见图 2。图中，两端大管子的长度已足够长，不会对模拟结果产生影响，即不会产生回流现象。

由于实验数据不充分，对入口处设置了速度进口条件 $u = 1 \text{ m/s}$ ；出口处设置了自由出流边界条件；管壁设置为无滑移固壁条件。当 $L = 0$ 时，把节流口设置为内部流动区域。

4 结果分析

①给出轴线上的压力和速度沿横坐标变化曲线; ②给出不同 L 下, 管壁上突然缩小、突然扩大和总的阻力损失对比曲线图 (因管壁处的压力变化易于判断, 故对管壁处的损失作了比较)。

4.1 轴线上速度与压力分布情况

图 3 给出两种情况下不同 L 的轴线速度变化曲线。从图中可以看出: ①同种情况速度变化在两端的大管子基本相同; 小管子内, 速度在一定的 L 范围内不断的增加, 但是不同 L 小管子速度变化趋势是一样的, 分布曲线基本重合。②两种情况下速度变化曲线基本相似。③ $d = 3 \text{ mm}$, $L > 35 \text{ mm}$ 时, 在过流截面突然扩大处出现了速度波动的现象, 这是由于涡流引起的不对称流动导致的。

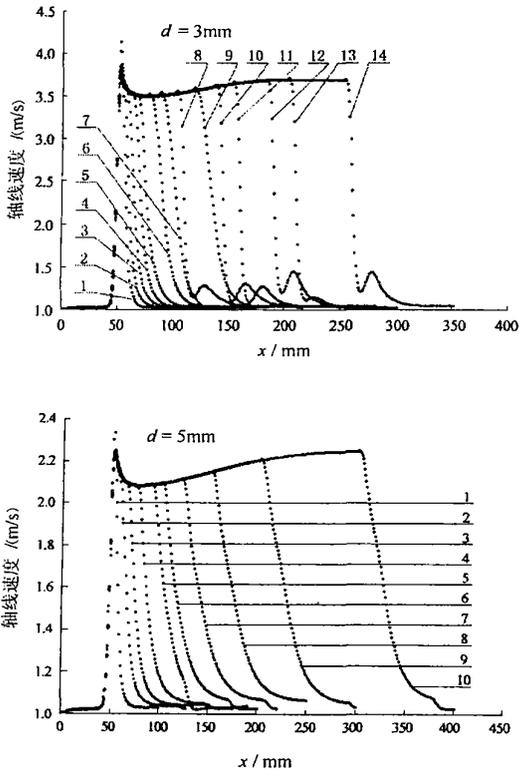


图 3 不同 L 轴线速度沿横坐标的变化曲线

Fig. 3 Hub velocity curve on different value of L

图 4 给出轴线处的压力变化曲线。从图中可以看出, 两种情况的压力变化曲线基本相似, 两端大管子的压力基本不变, 而小管子压力随着横坐标的增加不断的减小, 这正好与速度变化趋势相反。另外压力与速度不同的是压力不会达到一个恒定值。

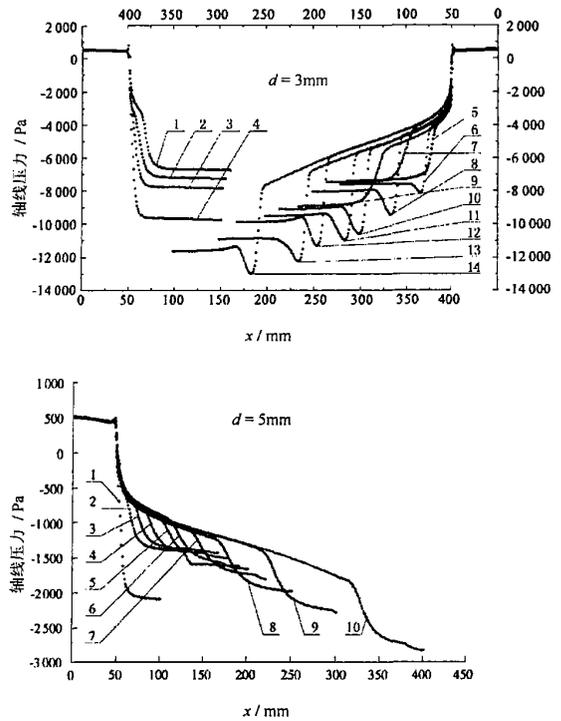


图 4 不同 L 轴线压力沿横坐标变化曲线

Fig. 4 Hub pressure curve on different value of L

4.2 局部阻力和总阻力分布情况

图 5 给出两种情况不同 L 的突然缩小、突然扩大产生的局部阻力与总阻力的对比曲线, 从图中可以看出: ①在一定的 L 范围内 ($d = 3 \text{ mm}$ 时, $L \approx 10 \text{ mm}$; $d = 5 \text{ mm}$, $L \approx 50 \text{ mm}$), 管路截面突然缩小所产生的局部阻力几乎不变, 超过该值开始减小, 但幅度变化不大。说明 L 对管路截面突然缩小的影响不大。②管路截面突然扩大与总阻力的变化曲线基本相同, 这说明总阻力受截面突然扩大产生的影响很大。③管路截面突然扩大的压力损失与总的损失随着 L 的增大, 先急剧减小, 再逐渐增大, 中间会出现一个最小值。这说明该局部阻力受 L 的影响很大。为了便于对比, 给出两种横坐标图形: 一组横坐标为线性坐标, 另一为对数坐标。

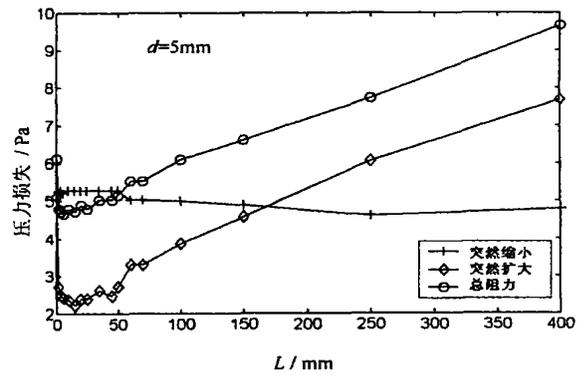
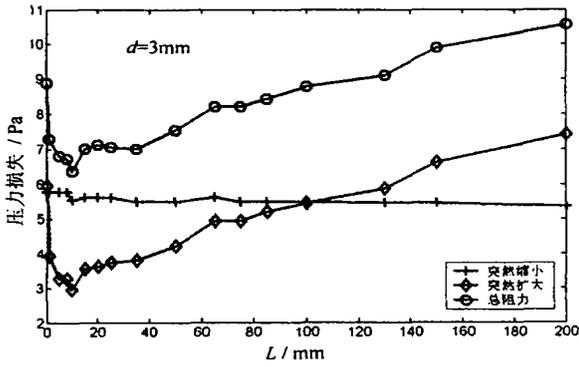
图 5 中 $d = 3 \text{ mm}$ 时, 纵坐标一个单位约等于 1200 Pa ; $d = 5 \text{ mm}$ 时, 纵坐标一个单位约等于 460 Pa 。

5 结论

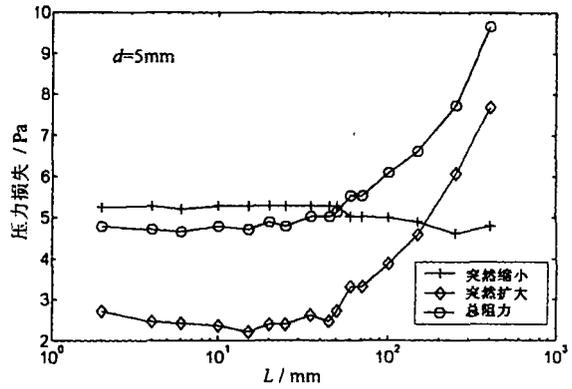
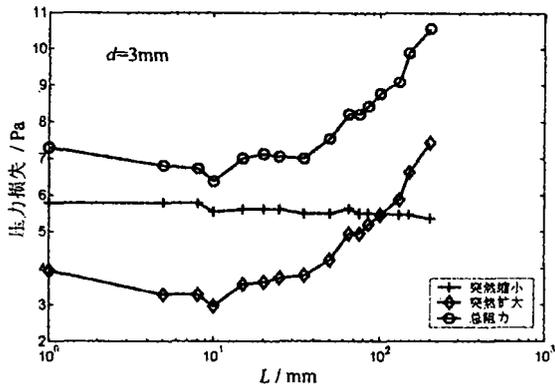
①不同 L 轴线上的速度与压力沿横坐标的分布曲线基本相似, 速度随着 L 的增加而增大, 当达到一定的值后, 保持一个定值不再改变, 而压力

却随着 L 的增加, 不断地减小。②过流截面突然缩小带来的局部损失受 L 的影响不大, 但过流截面突然扩大产生的局部损失受 L 的影响较大。③

系统总阻力变化与突然扩大产生的局部损失的变化曲线形状基本相同, 说明受之影响较大。



(a) 横坐标为线性坐标



(b) 横坐标为对数坐标

图5 不同 L 下突然缩小、突然扩大局部阻力与总阻力的变化曲线

Fig 5 Pressure loss curve of sudden shrink, sudden expansion and the total on different value of L

参考文献:

[1] 周爱平. 过流截面突然扩大和突然缩小时局部阻力的测量与分析 [J]. 焦作工学院学报 (自然科学版), 2000, 19 (1): 45 - 49.
 [2] 钱汝鼎. 工程流体力学 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1989.

[3] Manica R, De bortoli A L. Simulation of Sudden Expansion Folws for Power- Law Fluids [J]. J Non- Newtonian Fluid Mech, 2004, 121 (2): 35- 40.
 [4] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
 [5] 梁在潮. 工程湍流 [M]. 武昌: 华中理工大学出版社, 1994.