

文章编号: 1001-6112(2011)S1-0174-04

# 弯管含砂流流场与磨损模拟

马国建<sup>1</sup>, 吴学东<sup>1</sup>, 周全<sup>1</sup>, 邓小卫<sup>2</sup>, 李琪<sup>3</sup>, 何昶<sup>4</sup>

(1. 中国石化西北油田分公司塔河采油三厂, 新疆轮台 841604;

2. 中国石化西北油田分公司工程监督中心, 新疆轮台 841604;

3. 中国石化西北油田分公司完井测试中心, 新疆轮台 841604;

4. 中国石化西北油田分公司塔河采油一厂, 新疆轮台 841604)

**摘要:**含砂流在石油工业中较为常见,是引起设备失效和材料破坏的重要原因之一。引起的这些故障可能导致不可预测的停工和风险,严重影响油井的正常生产。利用 FLUENT 软件对较易产生磨损的 90°弯管含砂油流流动情形进行了模拟,得到了不同流速下含砂油流在管内的压力场、速度场分布规律,以及管壁处磨损量的分布规律,得出不同速度与冲蚀角对磨损量的影响,此结果可为油品安全运输、流动参数控制及管线磨损防护提供一定的参考依据。

**关键词:**含砂油流;流场;磨损;离散相模型;模拟

中图分类号:TE28

文献标识码:A

## Simulation of velocity field and erosion of sand-bearing oil flowing in bend pipe

Ma Guojian<sup>1</sup>, Wu Xuedong<sup>1</sup>, Zhou Quan<sup>1</sup>, Deng Xiaowei<sup>2</sup>, Li Qi<sup>3</sup>, He Chang<sup>4</sup>

(1. No. 3 Tahe Production Plant, SINOPEC Northwest Company, Luntai, Xinjiang 841604, China;

2. Engineering Supervision Center, SINOPEC Northwest Company, Luntai, Xinjiang 841604, China;

3. Well Completion Test Management Center, SINOPEC Northwest Company, Luntai, Xinjiang 841604, China;

4. No. 1 Tahe Production Plant, SINOPEC Northwest Company, Luntai, Xinjiang 841604, China)

**Abstract:** Sand-bearing oil flow is very common in petroleum industry. It is one of the main reasons for equipment failure and material damage, which may cause unpredictable shutdown and risk, seriously embarrassing normal production. The FLUENT software was used to simulate sand-bearing oil flow in 90° bend pipes which are more likely to be wore. Characteristics of pressure and velocity fields of sand-bearing oil flows with different velocities as well as abrasion volume at pipe wall were put forward. The relationship between abrasion volume and velocity, erosion angle was found out, providing references for safe transport of oil, control of flow parameter and prevent of pipe.

**Key words:** sand-bearing oil flow; velocity field; abrasion; discrete phase model; simulation

含砂流在石油工业中较为常见,在钻井过程中泥浆携带岩屑至地面完成钻进,采油生产中由于地层出砂都可能出现含砂流动的情况。含砂流的危害极大,钻进中岩屑对钻具管壁、管线会造成严重磨损;采油生产中,含砂将对井下设备、井口装置、地面管线产生冲蚀,使得检泵、洗井、地面清罐等维护工作量剧增,严重缩短设备、管线的使用寿命,影响油井的正常生产。

国外学者对磨损问题进行了大量的研究<sup>[1-2]</sup>,国内赵学增<sup>[3]</sup>、张涛<sup>[4]</sup>、陆军平<sup>[5]</sup>、孟庆武<sup>[6]</sup>等对磨损也作了大量的工作,取得了一定的成果,但是对弯管含砂流对管壁磨损的研究相对较少。本文利

用 FLUENT 软件针对弯管含砂流情形进行了模拟研究,得到在不同流速下的压力场、速度场分布以及管壁磨损量的分布云图,并对其规律进行了分析,为生产提供一定的参考依据。

## 1 研究问题及模型

### 1.1 研究问题

选取某地面输油 90°水平弯管段作为研究对象,其管径为 80 mm,弯径比为 3,弯管前后各取 1 m 直管段建模,得到的几何模型如图 1 所示;选用 Cooper 的划分方法、Hex/Wedge 的划分类型对其进行网格划分,得到的网格模型如图 2。在计算出

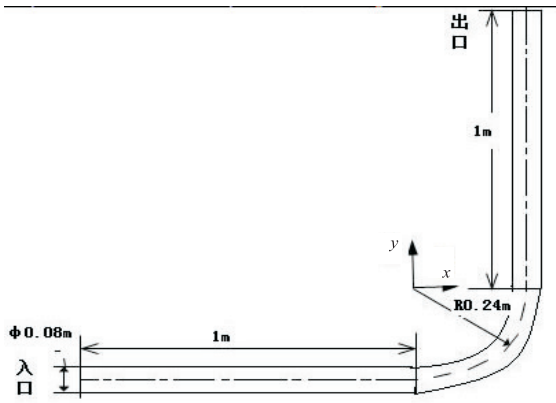


图 1 几何模型

Fig.1 Geometric model

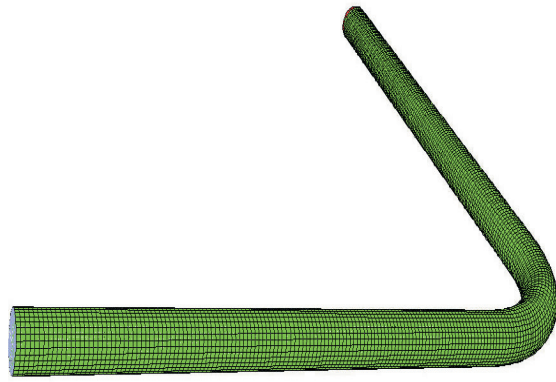


图 2 网格模型

Fig.2 Grid model

粘性流场后加入直径为 0.001 m、质量流量为 0.005 kg/s 的固体颗粒,颗粒密度为 2 600 kg/m<sup>3</sup>。

### 1.2 控制方程

定常拉格朗日稀疏相 DPM 多项流模型的离散相公式假设第二项(离散相)足够稀,在此假设下颗粒间的相互作用及颗粒体积对液相的影响可以忽略,要求离散相满足较低的体积百分率,通常要小于 10%~12%<sup>[7]</sup>,本文满足此要求。采用可实现  $k-\epsilon$  模型,其控制方程如下:

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \sum \frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Reynolds 方程:

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u'_i u'_j} \right) + \rho g_i \quad (2)$$

质量输运方程:

$$\frac{\partial(\rho \bar{c})}{\partial t} + \sum_j \frac{\partial(\rho \bar{u}_j \bar{c})}{\partial x_j} = \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu}{Pr} \frac{\partial(\rho \bar{c})}{\partial x_j} - \overline{\rho u'_j c'} \right] \quad (3)$$

湍动能及耗散率输运方程:

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

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b \quad (5)$$

其中:

$$\left\{ \begin{aligned} C_1 &= \max(0.43, \frac{\eta}{\eta + 5}) \\ \eta &= (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\epsilon} \\ E_{ij} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \\ \mu_i &= \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \\ C_\mu &= \frac{1}{A_0 + A_S U^* k / \epsilon} \\ A_S &= \sqrt{6} \cos \varphi \\ \varphi &= \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6} W) \\ W &= \frac{E_{ij} E_{jk} E_{ik}}{(E_{ij} E_{ij})^{1/2}} \\ U^* &= \sqrt{E_{ij} E_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}} \\ \tilde{\Omega}_{ij} &= \Omega_{ij} - 2\epsilon_{ijk} \bar{\omega}_k \\ \Omega_{ij} &= \bar{\Omega}_{ij} - 2\epsilon_{ijk} \bar{\omega}_k \\ G_k &= \rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

磨损方程采用改进的 Hashish 剪切模型<sup>[8]</sup>:

$$M = \frac{100}{2\sqrt{29}} r_p^3 \left( \frac{V_p}{C_k} \right)^{2.54} \sin 2\alpha \sqrt{\sin \alpha} \quad (7)$$

式中： $\rho$  为密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ； $u$  为速度， $\text{m}/\text{s}$ ； $t$  为时间， $\text{s}$ ； $\mu$  为动力粘度， $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ； $c'$ 、 $\bar{c}$  分别为油的脉动浓度和体积时均浓度； $\text{Pr}$  为层流普朗特数； $k$  为流体的湍流动能， $\text{m}^2/\text{s}^2$ ； $\varepsilon$  为湍动耗散率， $\text{m}^2/\text{s}^3$ ； $\Omega_{ij}$  为在柱坐标下带有角速度的  $\omega_k$  层流旋度； $G_k$  为由于平均速度梯度引起的湍动能产生， $\text{N}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ； $G_b$  为由于浮力引起的湍动能产生， $\text{N}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ； $Y_M$  为可压缩湍流脉动膨胀对总耗散率的影响， $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^3)$ ； $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 、 $C_2$ 、 $A_0$  为经验常数， $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ， $C_{3\varepsilon} = 0.09$ ， $C_2 = 1.9$ ， $A_0 = 4.0$ ； $\sigma_k$ 、 $\sigma_\varepsilon$  分别为湍动能和湍动耗散率对应的普朗特数， $\sigma_k = 1.0$ ， $\sigma_\varepsilon = 1.2$ ； $M$  为磨损量， $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ； $V_p$  为颗粒的入口速度， $\text{m}/\text{s}$ ； $r_p$  为颗粒直径， $\text{m}$ ； $\alpha$  为冲击角度； $C_k$  是剪切磨损特征速度，与颗粒及管道材料有关。

## 2 模拟结果及分析

假设油流与颗粒在入口处具有相同的速度，在此对不同流速情况下速度场、压力场及磨损量分布进行研究，取入口速度分别为  $2 \text{ m}/\text{s}$ 、 $4 \text{ m}/\text{s}$ ，得到了管内速度场、压力场的分布，使用 FLUENT 中的 DMP 离散相模型得到管壁磨损量分布。

### 2.1 速度场

为了便于观察，在研究体上截取具有代表性的不同面（入口断面、出口断面、直管段中间断面、弯管断面以及  $z=0$  断面）作为显示的载体。得到入口速度为  $2 \text{ m}/\text{s}$ 、 $4 \text{ m}/\text{s}$  时管内流场分布分别如图 3 和图 4。

从图中可以看出：速度在管中心处较大，靠近壁面逐渐减小，这是由于流体粘性的作用导致在靠近壁面处的速度梯度较大，管中心处速度梯度小，壁面处的速度为零，此现象可以用附面层理论得到

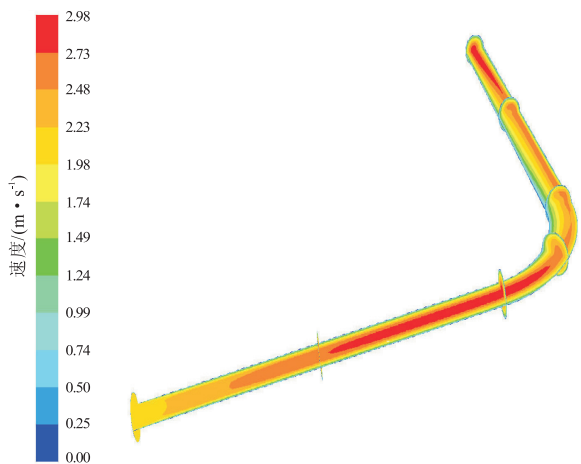


图 3 入口速度为  $2 \text{ m}/\text{s}$  时速度场

Fig. 3 Velocity field, inlet velocity  $2 \text{ m}/\text{s}$

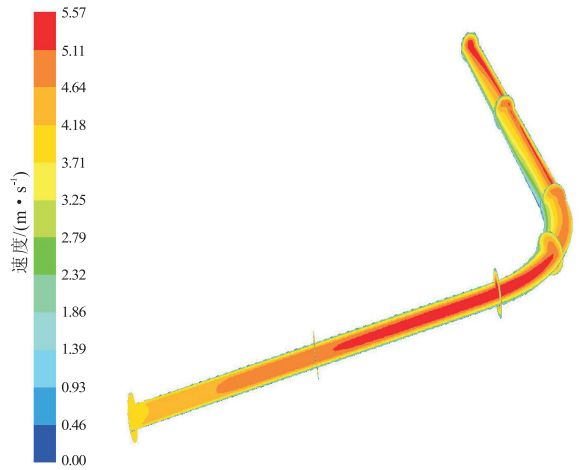


图 4 入口速度为  $4 \text{ m}/\text{s}$  时速度场

Fig. 4 Velocity field, inlet velocity  $4 \text{ m}/\text{s}$

解释。流体在通过弯曲部分时，由于供流体通过的流道发生变化以及流体运动惯性，导致在靠近弯管内侧处速度小，而在靠近外侧处速度增加。当流体通过弯管后，靠近内拱壁一侧速度有所增加，在靠近出口的直管段速度分布规律转换为靠近弯管内侧速度小外侧速度大的稳定状态。

### 2.2 压力场

假设入口处的压力相同，为  $1 \text{ MPa}$ ，得到的压力场分别如图 5 和图 6 所示。

压力沿着流动方向降低，流体的势能减少用于克服阻力。在弯管处，发生局部阻力，引起局部水头损失，表现为图中压力下降幅度较大。在弯管的内侧由于惯性的作用混合流体被甩向管的外侧，导致在内侧形成低压区，而在外侧压力相应增加，并且这种外侧压力大于内侧压力的现象在通过弯管后的直管段的一定距离内仍然得到保持，只是两侧压差减小。通过图 5 与图 6 对比，不同入口速度时

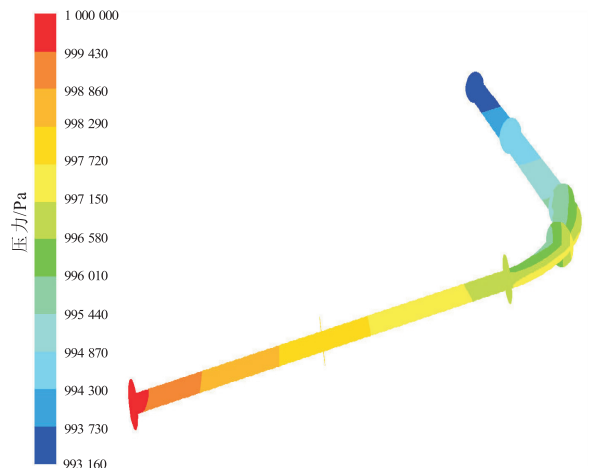


图 5 入口速度为  $2 \text{ m}/\text{s}$  时压力场

Fig. 5 Pressure field, inlet velocity  $2 \text{ m}/\text{s}$

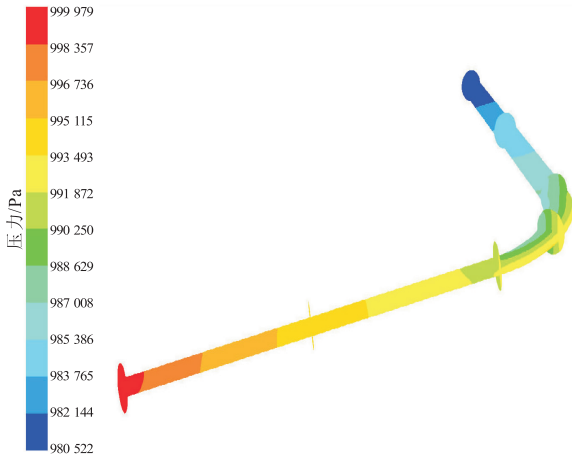


图 6 入口速度为 4 m/s 时压力场

Fig. 6 Pressure field, inlet velocity 4 m/s

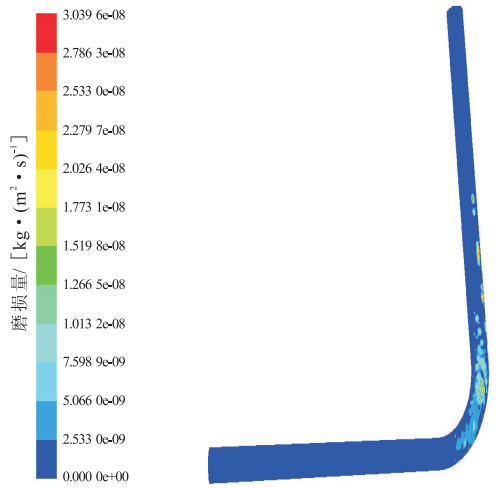


图 8 入口速度为 4 m/s 时磨损量

Fig. 8 Abrasion volume, inlet velocity 4 m/s

压力在沿程变化趋势相同,但随着入口速度的增加,入口与出口间的压差也增加。

### 2.3 磨损量分布

根据 FLUENT 中的 DMP 离散相模型得到管壁磨损量在不同入口速度下的磨损量分布如图 7 和图 8。

冲蚀角是影响磨损量大小的一个重要因素,流体在直管段流动时,冲蚀角为零,因此在入口端的直管段没有磨蚀;流体进入弯管部分后,冲蚀角增大,开始出现磨损,尤其在管壁的外拱侧尤为明显;靠近出口端的直管段的磨损相比弯管部分有所减弱。磨损云图显示,磨损的区域为非连续分布,这与离散相的非连续相关。磨损量大小在很大程度上也依赖于入口速度的大小,速度越大,受磨损的范围越大,磨损的程度越严重。

## 3 结论及建议

1) 含砂弯管流速度分布受粘度影响,靠近壁

面小,中间大,在弯管段,外拱侧速度大,内拱侧速度小。

2) 压力沿程减小,特别在弯管段,局部水头损失较大,压力下降幅度最大,且在弯管外拱侧压力大,内侧小。

3) 磨损发生在弯管和靠近出口的直管,尤其在弯管外拱侧特别严重,冲蚀角越大磨损越严重,流速增大会大大增加颗粒对管壁的磨损;磨损的分布在管壁呈非连续分布。在生产中应适当控制流速以减少磨损,且可以尽量减少弯管的使用而选用直管以减少管道磨蚀。

### 参考文献:

- [1] Wood R J K, Jones T F, Ganeshalingam J, et al. Comparison of predicted and experimental erosion estimates in slurry ducts [J]. *Wear*, 2004, 256(9-10): 937-947.
- [2] Forder A, Thew M, Harrison D. A numerical investigation of solid particle erosion experienced within oilfield control valves [J]. *Wear*, 1998, 216(2): 184-193.
- [3] 赵学增, 刘长运, 陈芳. 恒流堵塞器冲刷磨损特性的数值模拟[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2008, 40(5): 727-730.
- [4] 张涛, 陈次昌, 李丹. 低固相含量液流中磨蚀翼型空化特性研究[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2009, 31(6): 152-155.
- [5] 陆军平, 刘建新, 齐宏伟, 等. 预提升管内部流动的数值计算及磨损分析[J]. *炼油技术与工程*, 2009, 39(6): 29-32.
- [6] 孟庆武, 韩文静, 王宪明, 等. 油管材料在砂油水液条件下的冲蚀磨损性能[J]. *石油矿场机械*, 2008, 32(2): 52-54.
- [7] 陈作炳, 李硕, 李丽君. 用 DPM 模型模拟预热器内两相流场研究[J]. *机械工程与自动化*, 2007, 32(2): 51-55.
- [8] 付林. 油煤浆输送管道弯头部位冲击磨损预测与壁厚监测[D]. 唐山: 河北工业大学, 2009.

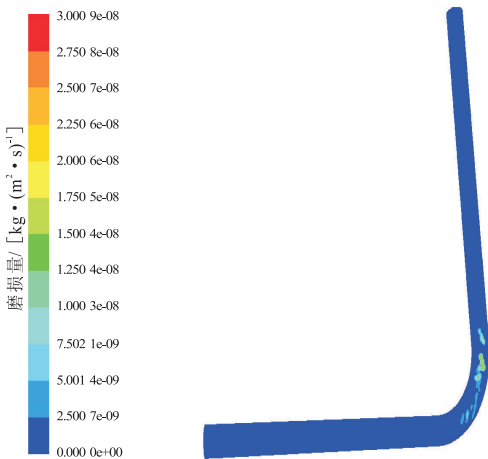


图 7 入口速度为 2 m/s 时磨损量

Fig. 7 Abrasion volume, inlet velocity 2 m/s