

基于 ANSYS 的输油管道弯头冲蚀分析与优化

徐磊¹

摘要：在常规输油过程中，油品经过管件弯头部位时速度和压力会有所突变，弯头部件外侧会受到极大的作用力，容易发生冲蚀作用，甚至会造成穿孔、破裂等。利用软件 Ansys Workbench 14.0 对常规输油管道弯头处进行流固耦合分析，研究了不同流速、弯径比等因素对弯头冲蚀失效的影响。研究表明，管道弯头外侧最容易受到冲蚀作用；弯头处的变形损坏受到多因素的影响，适当降低流速、增大弯径比能够有效地缓解冲蚀所引起的破坏；采用盲通管代替弯头也可以大大缓解弯头受到的冲蚀作用。

关键词：Ansys 软件；输油管道；弯头；流固耦合；冲蚀

Doi:10.3969/j.issn.1006-6896.2016.9.003

Pipeline Elbow Erosion Analysis and Optimization Based on the ANSYS

Xu Lei

Abstract: In the process of conventional oil transportation, the speed and pressure will change suddenly as the oil pass through the pipe elbow, and the elbow part will be in a great pressure, it will be prone to erosion, and even cause perforation, rupture, etc. The fluid structure interaction analysis was carried out on the elbow of conventional oil pipeline through the general calculation software Ansys Workbench14.0, the effects of different flow velocity and bending radius ratio on the erosion failure of the elbow were analyzed. The results show that: the outside of the pipe elbow is the most vulnerable to be eroded; the deformation and damage of elbow is affected by many factors, reducing the flow rate and increasing the ratio of the bending diameter can effectively alleviate the damage caused by erosion; using blind pipe to replace the elbow can also greatly ease the impact of the elbow.

Key words: Ansys software; oil pipeline; elbow; Fluid-structure interaction; erosion

在常规输油管道输油过程中，介质流动所造成的冲蚀破坏是管道常见的失效形式，而弯头是管道的重要组成部分，其结构的特殊性使得弯头相对于其他部位更容易遭受到流体介质的冲蚀腐蚀作用。有报道称，弯头部位的冲蚀损坏相比直管段的损坏大约要严重 50 倍左右^[1]。国内外学者对管道的冲蚀问题进行了一些研究，取得了一些重要的成果^[2]。鉴于输油管道冲蚀实验周期很长，费用较高，更多的是采用有限元分析的方法来进行定性分析^[3]。

1 模型的建立

1.1 物理模型

以规格为 640 mm × 40 mm 的 90° 弯管为例进行分析，物理模型由进口段、弯头段和出口段组成。进口段和出口段的长度均为 3 m，弯管段的弯

径比为 2，入口速度为 1.6 m/s，出口压力为 0，弯管水平放置，所选输油管道全管模型如图 1 所示。

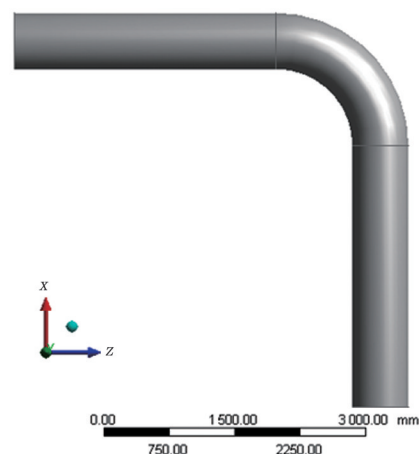


图 1 物理模型

¹长江大学石油工程学院

1.2 流体控制方程

三维空间坐标下, 对不可压缩黏性流体而言, 控制方程^[4]包括连续性方程、动量方程和能量方程。

连续性方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量方程为

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_x \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_y \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_z \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (4)$$

能量方程为

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot [\vec{u}(\rho E + p)] = \nabla \cdot \left[k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j h_j J_j + (\tau_{\text{eff}} \cdot \vec{u}) \right] + S_h \quad (5)$$

式中: u_x 、 u_y 、 u_z 分别为 x 、 y 、 z 三个方向的速度分量, m/s; t 为时间, s; ρ 为密度, kg/m³; p 为流体微元体上的压强, Pa; τ_{xx} 、 τ_{xy} 、 τ_{xz} 等是因分子黏性作用而产生的作用在微元体表面上的黏性应力 τ 的分量, Pa; f_x 、 f_y 、 f_z 为三个方向的单位质量力, m/s²; E 为流体微团的总能, J/kg; h_j 为组分 j 的焓, J/kg; k_{eff} 为有效热传导系数, W/(m·k); J_j 为组分 j 的扩散通量; τ_{eff} 为黏性耗散系数, N·s/m²; S_h 为由于化学反应引起的放热和吸热, 或其他自定义的热源项, kJ/mol。

湍流模型采用 $k-\varepsilon$ 模型^[5], 湍流脉动动能方程 (k 方程) 为

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (6)$$

湍流动能能耗方程 (ε 方程) 为

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon} \cdot \varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

式中: G_k 为平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项; G_b 为浮力引起的湍动能 k 的产生项; Y_M 为可压缩湍流中脉动扩张贡献; u_i 为时均速度, m/s;

ε 为湍流耗散率; μ_t 为湍流黏度, Pa·s; k 为湍流动能; ρ 为流体密度, kg/m³; σ_k 和 σ_ε 分别为 k 方程和 ε 方程的湍流数; $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $C_{3\varepsilon} = 1$, $C_\mu = 0.09$ 为经验常数。

1.3 网格和边界条件

对物理模型主要采用六面体网格来进行划分, 划分结果精度相对较高。设置三种边界条件: 入口速度设置为 1.6 m/s; 为了防止出现负压的情况, 出口设置为压力出口边界; 管道弯头中间截面设置为对称边界条件, 管道壁面为壁面边界。设置湍流强度为 5%, 水力直径为 0.055 m。

2 数值模拟与结果分析

通过数值模拟可得弯头处的压力场与速度场分布, 如图 2、图 3 所示。从弯头压力分布图可见, 流体在进入弯头之前, 截面上的压力大致呈均匀分布。流体进入弯头部分后由于离心力的作用大量流体流向曲率半径较大的外侧壁面, 动能转化为静压能, 压力呈现明显的不均匀分布, 弯管外侧处的压力明显大于内侧压力, 这就使得外侧壁面更容易受

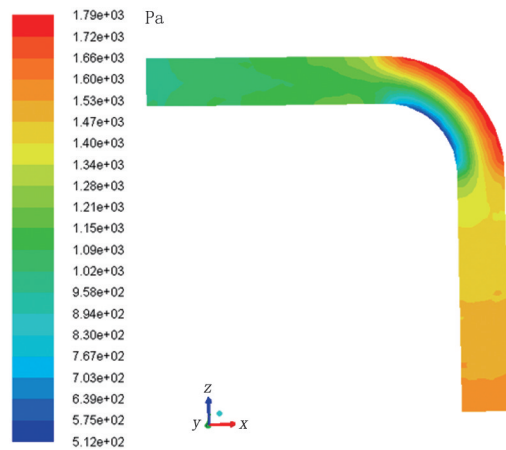


图2 压力场分布图

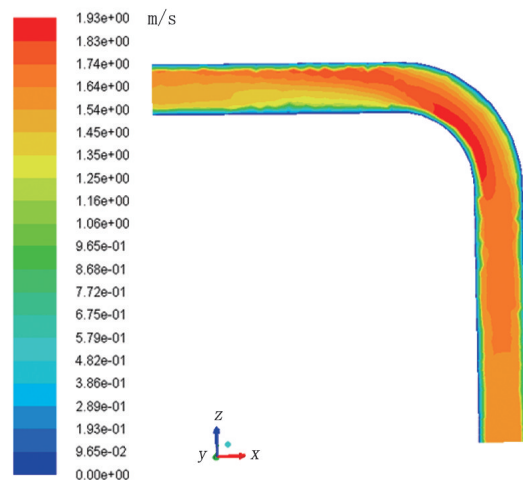


图3 速度场分布图

到冲蚀作用，流体流出弯头部位之后流体大致稳定，截面上的压力大致呈均匀分布。

由速度的分布图可知弯管外侧速度明显小于内侧速度，与压力分布成一个相反的趋势。由伯努利方程可知，同一流线上各点的单位质量流体的总比能为一个常数。因此，在其他因素不变的情况下，比压能的减小必然会造成动能的增加。

通过流固耦合分析可得输油管道的冲蚀变形图，如图 4 所示，由于入口处流速与管道轴线平行，对管壁几乎没有冲击力，所以这段的磨损很小，直到流体靠近弯头冲蚀磨损才逐渐加深，主要是由于流道几何形状的改变而造成流体对弯头外侧的冲击。由图 4 可知弯头部位是冲蚀变形量最大的部位，而弯头的冲蚀变形主要集中在弯头外侧，这与前面压力和速度的分布图分析得出的结果一致。

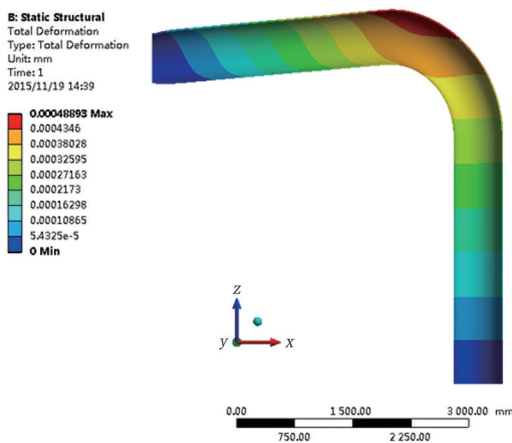


图 4 冲蚀变形分布图

3 冲蚀破坏影响因素分析

在其他因素不变的情况下考虑单因素变化，通过 Ansys Workbench 14.0 对不同入口流速造成弯头的冲蚀情况进行研究。如图 5 所示，可知入口速度的增大会加深弯头外侧受到的冲蚀损坏，主要是因为流速的增大会造成弯头外侧处的静压能增大，而内侧处的静压能会下降，压力下降到液体温度相应的气化压力时就会使部分液体气化形成气泡，再结合弯头处的流速方向急剧转变成涡流，涡流携带着气泡撞上弯头管壁会使气泡破灭，气泡的不断生成和破灭会持续产生极大的冲击波，就会反复对弯头管壁冲击，进一步形成空泡腐蚀，加剧对弯头外侧的冲蚀^[6]。

分析表明，弯径比的适当增大会缓解冲蚀所带来的损坏，如图 6 所示，这主要是因为随着弯径比的增大，当流体流经管道时，流向变化较为平缓，主流动以及二次流对管头的冲击角度减小，流动对

管壁造成的冲击作用因此逐渐减小，故而弯径比的适当增大能够有效减缓冲蚀带来的影响。

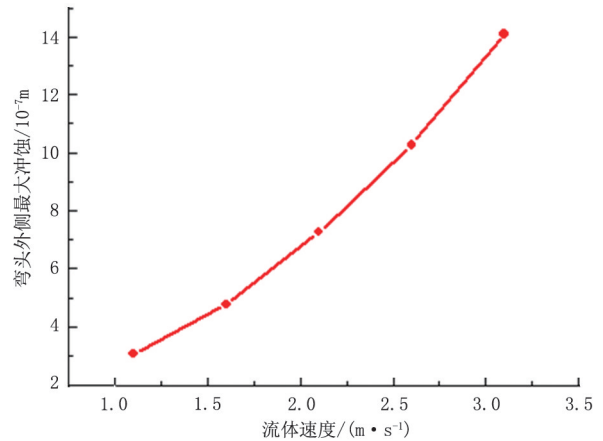


图 5 流速对冲蚀破坏的影响

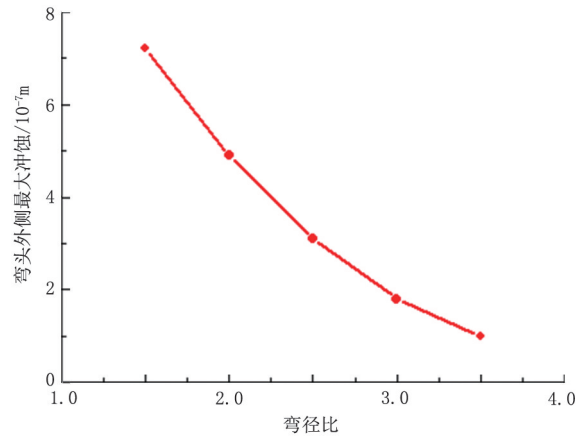


图 6 弯径比对冲蚀破坏的影响

通过上述分析可知，流速与弯径比的适当改进可以有效缓解冲蚀作用，而对于弯头本身而言，在流向急剧改变处加一个盲管^[7-9]也可以减缓冲蚀作用。如图 7 所示，冲蚀带来的损坏主要集中在盲管部位，弯头部位所带来的损坏相比之前大大减小，而盲管拆卸方便，可以直接更换，避免磨损弯管的整体更换，大大缩减了成本。

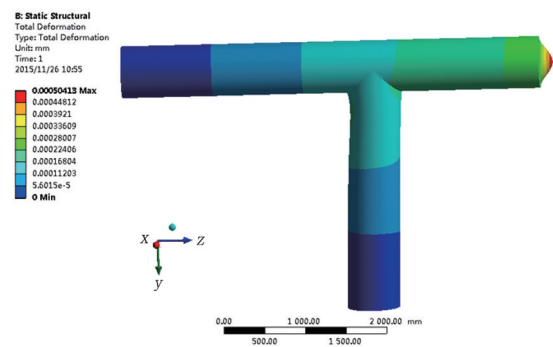


图 7 盲通管对冲蚀破坏的影响

4 结论

从流体力学的角度利用计算流体力学软件 An-

sys Workbench 14.0对输油管道弯头部位进行了冲蚀的数值模拟^[10]分析, 得出了弯头部位的冲蚀规律以及不同相关因素对弯头冲蚀失效的影响, 可得出如下结论及认识:

(1) 采用有限元分析方法, 对弯头流速、压力以及冲蚀变形进行研究分析, 得出弯头外侧所受压力最大、流速较小, 是最容易受到冲蚀的地方。

(2) 对不同入口流速以及不同弯径比的分析可知, 适当地减小入口流速、增大弯径比会减缓弯头外侧所受到的冲蚀作用; 采用盲通管代替弯头可以减缓冲蚀作用, 盲管拆卸方便, 可以避免磨损弯管的整体更换, 大大减小了成本。

(3) 分析结果为研究相关流体力学因素对输油管道冲蚀的影响提供了理论依据。

参考文献

- [1] 黄勇, 蒋晓东, 施哲雄. 弯头的冲蚀问题及其预测和预防[J]. 炼油技术与工程, 2005, 35 (2): 33-36.
- [2] 徐鸣泉, 王乐勤, 杨健, 等. 石化管道冲蚀破坏的流动仿真及其结构优化[J]. 流体机械, 2005, 33 (7): 24-26.
- [3] 高万夫, 郑雁军, 崔立山, 等. 管道弯头磨损特性的研究[J]. 石油化工高等学校学报, 2003, 16 (4): 56-60.

(上接第5页)

看出, 淹没射流的阻力非常大, 在出口附近射流由初速度迅速衰减到较小值, 之后速度缓慢递减。在1 200 mm处, 20、30、40、50 m/s的喷射速度分别减小为5.51、8.11、10.78、13.32 m/s, 速度衰减率分别为72.45%、72.97%、73.05%、73.36%。随着喷射速度的增加, 射流出口处的速度衰减程度相差不大, 只是略有提升。不同的射流在离开出口后速度衰减到一较稳定值的距离都在1 200 mm范围内, 出口速度的变化对这一距离影响不大。

3 结论

(1) 淹没射流在前进过程中不断向周围扩散, 能量损失大, 导致沿轴向速度衰减迅速, 在出口1 200 mm范围内, 速度衰减大于70%, 之后速度衰减变缓慢。

(2) 射流初始段非常短, 在射流初始段横断面不断扩大, 在主体段横断面不断减小直至消失。出射速度大于20 m/s的射流破碎分散能力较强, 在各方向均形成不同程度的涡流, 随着射流速度的增加, 这种扰动逐渐增强, 搅拌效果不断提高。在垂直方向各模型内流体有着不同程度的扰动。

- [4] 杜明俊, 张振庭, 张朝阳, 等. 多相混输管道90°弯管冲蚀破坏应力分析[J]. 油气储运, 2011, 30 (6): 427-430.
- [5] WANG X S, JIN L, LI Y, et al. Effect of equal channel angular extrusion process on deformation behaviors of Mg3Al-Zn alloy[J]. Materials Letters, 2008, 62 (12): 1 856-1 858.
- [6] 梁光川, 聂畅, 刘奇, 等. 基于FLUENT的输油管道弯头冲蚀分析[J]. 腐蚀与防护, 2013, 34 (9): 822-824.
- [7] 吴欢欢, 梁晓瑜, 邓智强. 含砂石油对管道冲蚀的CFD模拟[J]. 石油机械, 2014, 42 (3): 115-119.
- [8] 孙鑫, 范世峰, 邱秀云, 等. 两种流道形式三通内部流场数值模拟[J]. 中国农村水利水电, 2009, 12 (3): 59-62.
- [9] 韩方军, 孙鑫, 张原. T型三通管内部流场数值模拟与结构优化[J]. 新疆水利, 2010, 10 (4): 1-3.
- [10] 偶国富, 裘杰, 朱祖超, 等. 异径管冲蚀失效的流固耦合数值模拟[J]. 力学学报, 2010, 42 (2): 197-204.

作者简介

徐磊: 在读硕士研究生, 2014年毕业于长江大学石油工程学院(本科), 主要从事热流固耦合数值模拟研究, 13071247220, 13071247220@163.com, 湖北省武汉市蔡甸区特一路长江大学, 430100.

收稿日期 2015-11-22

(栏目编辑 李艳秋)

(3) 综合考虑, 30 m/s为最佳喷射速度, 其射流末速度可达0.53 m/s, 具有较好的搅拌效果。

参考文献

- [1] 李洪河, 王红艳. RJM喷射搅拌混合器在仪征15万m³储油罐上的应用[J]. 石油化工建设, 2006, 28 (5): 38-39.
- [2] 刘立焯, 孟凡力, 王卫强, 等. 搅拌器在原油储罐中的应用与发展[J]. 当代化工, 2015, 44 (2): 386-388.
- [3] 王军丽. 液力驱动旋转射流搅拌器内部流动数值仿真及水力特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007: 7-12.
- [4] 田艳丽, 黄列群. 旋转射流搅拌器全场数值模拟分析[J]. 机电工程, 2008, 25 (10): 86-90.
- [5] 张梓雄, 董曾南. 粘性流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999: 255-267.

作者简介

范大为: 工程师, 2009年毕业于大庆石油学院化工过程机械专业, 主要从事机械设计工作, 0459-5903344, favorer@163.com, 黑龙江省大庆市让胡路区西苑街46号, 163712.

收稿日期 2016-02-26

(栏目编辑 李艳秋)