基于 API579 准则对弯管腐蚀数值模拟的分析

崔晔晖[1]，曾祥国[1,2]，李 洋[1]，盛 鹰[1]

（1. 四川大学建筑与环境学院，四川 成都 610065；
2. 四川大学能源工程安全与灾害力学教育部重点实验室，四川 成都 610065）

摘 要： 为定量描述高压回注管道弯管处由于流体速度与方向的改变而引起的物理冲刷腐蚀，本文以川西北气矿的高压回注水管道为例，利用 Fluent 软件建立了垂直弯管冲刷腐蚀模型，并利用 API579 准则对相应弯管处的剩余强度进行评价和研究。结果表明，腐蚀速率最大区域发生在弯管段外壁。同时，根据数值模拟计算对各控制参数根据遗传算法进行优化处理。针对管道内壁结垢无法测量准确数据的情况，建立了一套相对完整的评价优化分析系统。

关键词： 数值模拟；API579 准则；冲刷腐蚀；腐蚀速率

中图分类号： TG174.1 **文献标识码：** B **文章编号：** 1009－5438(2017)02－0053－05

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2017.02.017

Numerical Simulation Analysis of Elbow Erosion Based on API579 Criterion

CUI Ye－hui[1], *ZENG Xiang－guo*[1,2], *LI Yang*[1], *SHENG Ying*[1]

(1. *College of Architecture & Environment, Sichuan University, Chengdu* 610065, *Sichuan, China*;
2. *Key Laboratory of Energy Engineering Safety and Disaster Mechanics, Ministry of Education, Sichuan University, Chengdu* 610065, *Sichuan, China*)

Abstract: In order to quantitatively describe the physical elbow erosion of high pressure reinjection pipeline caused by changes of fluid velocity and direction, taking the high pressure reinjection pipeline of NGPD (northwest of Sichuan gas production district) as an example, Fluent software is used to establish a vertical elbow erosion model, the residual strength of corresponding elbow is evaluated and studied by using API579 criterion. The result shows that the maximum erosion rate occurs on the outer wall of elbow pipe. Meanwhile, according to numerical simulation calculation, the control parameters are optimized by the genetic algorithm. In view of the fact that the scale of the pipeline inner wall cannot be measured accurately, a set of relatively complete evaluation and optimization analysis system is established.

Key words: numerical simulation; API579 criterion; erosion; erosion rate

众所周知，管道在工业生产生活中作为一种常见的输油输气工具，对其安全性和经济性的评定有着十分重要的地位。物理冲刷腐蚀是影响管道的安全性与经济性重要因素之一，目前国内外对于管道的物理冲刷腐蚀的评价方法和研究有很多。例如最常见的 ASME B31G 剩余强度评价标准[1]，除此之

收稿日期： 2017－02－06

作者简介： 崔晔晖(1994－)，男，内蒙古包头市人，在读硕士。

外，现在比较常用的管道剩余强度评价标准还有API579准则。上述标准的执行需要对管道的壁厚做准确的测量，但是由于管道内结垢严重等原因，管道的厚度往往无法直接进行准确的测量，这时候就需要用数值模拟对管道冲蚀后的厚度进行计算。数值模拟管道冲蚀方面，国内外的主要研究根据数值模拟的结果对管道腐蚀规律和腐蚀特点的研究。例如，李洋等利用Fluent有限元软件对气液双相流在弯管处的腐蚀情况和腐蚀规律进行了定量的分析和研究[2]。再例如，刘勇峰、吴明等人以凝析气田为例，利用数值模拟对不同工况下的管道进行模拟，得到了流速和湍流强度随管道结构形式改变进而受到影响的结论[3]。

本文以川西油气田为例，主要针对由于管道内结垢较厚，无法直接准确测量到管道冲刷腐蚀速率的情况，对管道进行数值模拟分析，得到相应的腐蚀规律与腐蚀数据，根据其规律和数据应用API579准则进行剩余强度评价，得到定量的安全指标与使用年限。

1 数学描述

1.1 控制方程[4]

在管道中的流体主要为液体，满足连续性的条件，故有连续方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_i}=0 \tag{1}$$

其流体运动满足牛顿定律的运动方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)+\rho g_i+F_i \tag{2}$$

颗粒在流体中的运动满足方程：

$$\frac{\overrightarrow{du_p}}{dt}=\frac{\overrightarrow{u}-\overrightarrow{u_p}}{\tau_r}+\frac{\overrightarrow{g}(\rho_p-\rho)}{\rho_p}+\overrightarrow{F} \tag{3}$$

其中：$\tau_r=\frac{\rho_p d_p^2}{18\mu}\cdot\frac{24}{C_d\mathrm{Re}}$，$\rho,\mu,g_i,u_i,F_i,d_p,C_d$ 分别为流体的密度，动力黏性系数，重力加速度分量，速度分量，外部体积力，固体颗直径，曳力系数；入口压力为25 MPa，温度为20 ℃。

1.2 冲刷腐蚀模型

根据实际工程经验分析，冲刷腐蚀速率与流体的速度，颗粒冲刷的角度，以及颗粒的大小形状有关，故采用颗粒磨蚀与沉积模型；根据该模型，冲刷腐蚀速率 R 可表示为：

$$R=\sum_{p=1}^{N}\frac{\dot{m}_p C(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A} \tag{4}$$

其中：$C(d_p)$ 为颗粒直径函数取为1.8e－09；$f(\alpha)$ 为冲击角度函数取值0 ~ 1，v 相对粒子速度，$b(v)$ 为相对粒子速度的函数取2.6。

2 数值模拟

2.1 几何模型

几何模型采用垂直弯管，管道的外直径为108 mm，管道壁厚为16 mm，旋转半径为114 mm，料为20号钢，直管长度为300 mm。其XOZ平面图如图1所示。

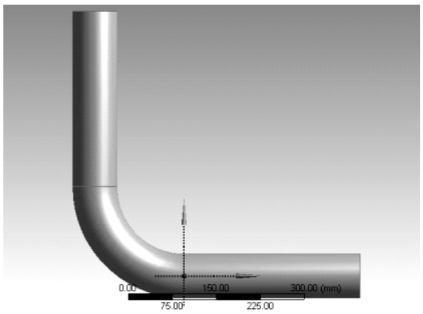


图1 计算模型XOZ平面图

2.2 网格划分及模型选择

网格划分采用三维六面体网格进行划分。网格单元尺寸为6 mm，节点数为118972，单元数为112515。流体模型采用标准模型，固体颗粒的运动采用拉格朗日轨道模型，采用Simple方法对速度与压力进行耦合。网格划分结果如图2所示。

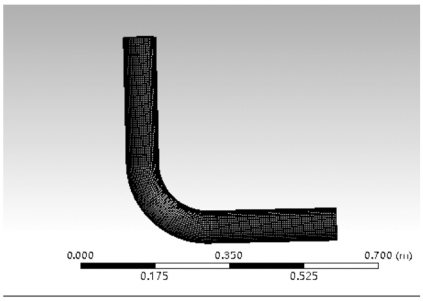


图2 模型网格划分

2.3 计算结果分析

图3为弯管内流体的湍流强度云图，图4为颗粒流在经过弯管处时的轨迹云图，图5为弯管管壁在XOZ平面内剪切应力云图，图6为弯管管内流体在XOZ平面内速度矢量云图。

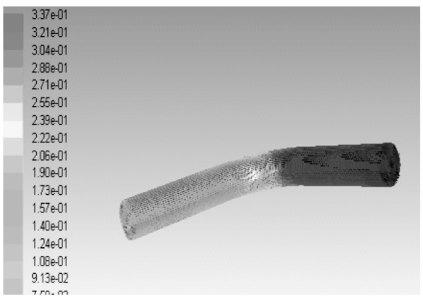


图 3　湍流强度

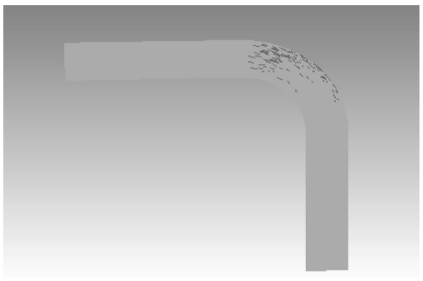


图 4　颗粒运动轨迹

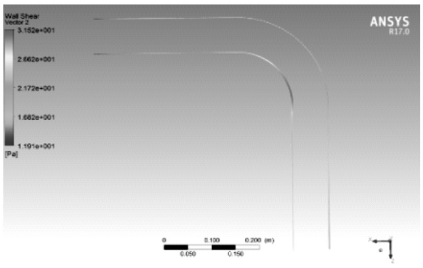


图 5　管壁剪切应力

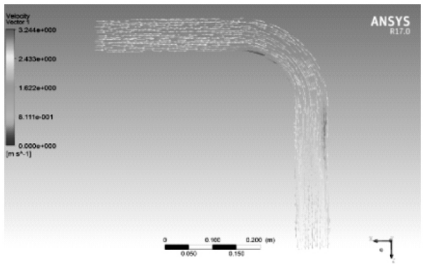


图 6　流体速度矢量

根据云图结果可以直观的看出: 由于流体在弯管处速度方向产生改变,流体的湍流强度在弯管段达到最大,同时管道外壁将对流体的速度方向改变产生较大的约束,但相应的内壁对管道约束相应较小。这是由于管壁主要以表面受压的方式为颗粒及流体提供速度转变时所需要的向心力,当流体流经弯管处时,颗粒和流体产生的离心力使得管壁外侧受压较大,内侧受压较小。可以从图 4 中看出,颗粒在流经整个管道弯段处会有明显的在管道外壁的聚集趋势。从图 6 中可以看出,管道中流体在流经管道弯段处,其管道内侧的流体速度要大于管道外侧,同时由于流体的粘性,使得流体在管道内侧引起的剪切应力要大于外侧。图 7 是整个弯管管壁冲刷腐蚀速率云图。从云图中看出,冲刷腐蚀速率较大的区域发生在管道弯段的外壁侧。根据已选定的冲刷腐蚀模型进行分析可知,腐蚀速率大小与流体的速度,颗粒冲刷的角度,以及颗粒的大小形状有关。虽然管道内侧的流体速度大于管道外侧,但是由于颗粒运动轨迹在该处在管道外壁侧有明显的聚集趋势,而这样的运动轨迹也就造成了颗粒主要对弯段处管道外壁的冲击大于相应内壁。故管道弯段处的外壁侧的冲刷腐蚀较为严重。

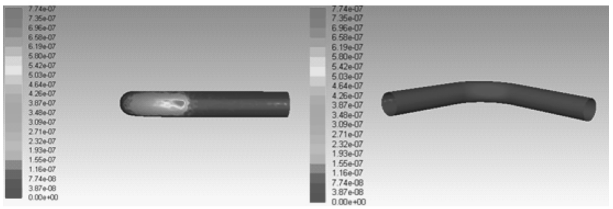


图 7　管道外壁腐蚀速率

3　管道剩余强度评价

3.1　API579 准则介绍

API579 准则对管道的剩余强度评价采用的基本评价方式是分级评级,即将管道剩余强度评价分为一、二、三等三个不同等级。一个等级比一个等级更加接近实际情况。其中第一等级的评价较为保守,第三等级评价则是最接近管道实际状况的评价,先对管道进行第一级评价,如果第一级评价不满足则进入第二级评价,第二级评价不满足进入第三级评价[5]。API579 准则的评价过程如图 8 所示。

3.2　管道实际评价及寿命预测

因管道内结垢严重,无法对管道壁厚进行直接准确的测量,故采用数值模拟结果进行剩余强度评价。中 013 – U2 材料为 20 钢的管道的各种参数为: 管道的外直径为 108 mm,管道壁厚为 16 mm,根据数值模拟所得腐蚀速率计算腐蚀最大深度 d 为 4 mm(1.326 mm/a × 3),管道设计运行压力 $MAWP_0$

为 29.1 MPa，管道材料泊松比 ν 为 0.3，焊缝系数 E_W 为 1.0，未来腐蚀裕量 FCA 为 1.326 mm，钢材最小屈服强度 σ_s 为 245 MPa，许用剩余强度系数 RSF_a 为 0.9，测量的最小壁厚 t_{mm} 为 12 mm。轴向的最大长度 L_m 为 298.3 mm，环向的最大长度 C 为120 mm。设计系数 S 取为 0.72。

$$t_{min}^{c} = \frac{PD_0}{2SE_W} = \frac{29.1 \times 108}{2 \times 0.72 \times 245 \times 1.0} = 8.91 \text{ mm} \quad (5)$$

$$t_{min}^{l} = \frac{\beta PD_0}{4SE_W} = \frac{0.6 \times 29.1 \times 108}{4 \times 0.72 \times 245 \times 1.0} = 2.67 \text{ mm} \quad (6)$$

$$t_{min} = \max(t_{min}^{c}, t_{min}^{l}) = 8.91 \text{ mm} \quad (7)$$

出于保守计算考虑，腐蚀区域的腐蚀厚度均相等(利用最大腐蚀速率计算)，则厚度值最小值为 t_{mm} = 12 mm；腐蚀区域算术平均剩余厚度 t_{am} = 12 mm。

$$R_t = \left[\frac{t_{mm} - FCA}{t_{min}}\right] = \frac{12 - 1.326}{8.91} = 1.198 > \frac{4RSF_a}{4 + \beta RSF_a} = \frac{4 \times 0.9}{4 + 0.6 \times 0.9} = 0.79 \quad (8)$$

$$L = 50\sqrt{D_i t_{min}} = 50 \times \sqrt{76 \times 8.9} = 1\,271.6 \text{ mm} > L_m \quad (9)$$

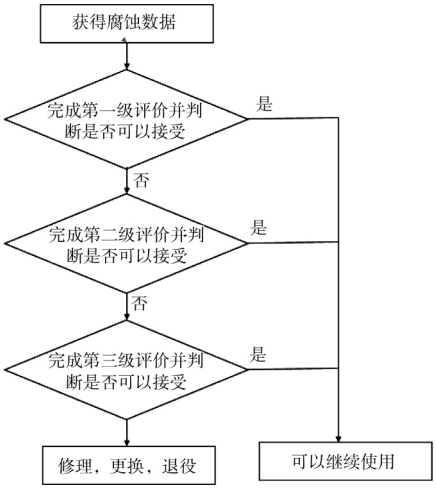


图 8 API579 程序框图

说明腐蚀的轴向长度是可以接受，该管道能够在此运行压力下继续服役，并且允许轴向腐蚀长度 L 远大于轴向最大腐蚀长度 L_m 表明该回注井站的冲刷腐蚀现象不明显。管道寿命预测是根据 API579 准则中管道要求的最小壁厚 t_{min} 来获得的，当管道减薄到要求最小壁厚时，除以相对应的冲蚀速率即可保守估计使用年限。各参数值见表 1。

表 1 剩余年限预测

回注井站	设计壁厚/mm	测量壁厚/mm	最大冲蚀速率/(mm·a^{-1})	预测剩余使用时间/a	备注
中 013 - U2 井	16	16.07	1.326	5.3	管道结垢

4 回注参数优化

4.1 遗传算法介绍[6]

遗传算法是基于生物中的进化与遗传的寻找最优解的方法。其基本的运算思路是首先选取一个适应度函数，计算整个种群当中的个体适应度，采用轮盘赌的方法将新生代种群保存出来，对染色体进行交叉与变异得到新的种群，不断重复此过程，直到得到相应的最优解。其运算程序框图如图 9 所示。

4.2 回注参数优化计算[6]

实现各控制参数的优化，使得每天的回注量达到最大值。工程流体力学中流量与管道直径和压力差相关。根据上述分析，而管道直径的变化与管壁的冲刷速率与结垢速率有关，故流体流量与相关参数间的关系表达式如下：

$$Q = \mu \cdot A \cdot \sqrt{2\Delta P/\rho} \quad (10)$$

$$A = \pi D^2/4 \quad (11)$$

$$D = D_0 - 2(v_a - v_e)t \quad (12)$$

$$Q = \frac{\mu \cdot \pi [D_0 - 2(v_a - v_e)t]^2}{4 \times 10^3} \cdot \sqrt{2\Delta P/\rho} \quad (13)$$

其中：Q 为流体流量，m^3/s；μ 流量系数，与阀门或管子的形状有关，0.60 ~ 0.65；D_0 管道的初始内径；v_a 管道内结垢速率；v_e 管道内壁冲蚀速率；t 为管道回注运行时间；P 通过阀门前后的压力差，单位 Pa；ρ 流体的密度。经过计算初步估计，v_a 的范围为 0 ~ 1 mm/a；v_e 的范围约为 0 ~ 1.326 mm/a；通过以上分析，得到相应问题的参数集，根据遗传算法对回注量目标函数进行求解。表 2 为各参数在达到最大回注量时的取值：

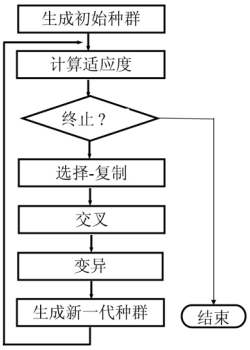


图 9　遗传算法程序框图

5　结论

(1) 通过数值模拟管道中流体及颗粒对管道的冲刷腐蚀，发现由于颗粒在弯管段速度方向的改变颗粒主要集中在管的外壁，这就造成了管道腐蚀最严重的区域为弯管段管道外壁，而不是流速相对较大的管的内壁。

(2) 本文根据遗传算法，求解出了最优回注量相对应的各参数，可以通过控制各参数的大小来达到最优回注水平。

表 2　工艺参数优化

结垢速率/(mm·a^{-1})	冲蚀速率/(mm·a^{-1})	时间/a	压差/MPa	最优回注量/(m^3·h^{-1})
0.006 289 5	1.316 1	0.995 932	0.002 994 07	25

(3) 通过对川西北气矿高压回注水管道的腐蚀研究，针对管道内壁结垢无法测量准确数据的情况，建立了一套相对完整的评价优化过程。即通过数值模拟得到相应的腐蚀速率，利用 API579 准则进行评价，根据结垢速率及冲蚀速率等确定各回注参数的参数集，通过遗传算法求解相应回注参数集下可能的最大回注量。

参　考　文　献

[1] ASME B31G—1991, Manual for determining the remaining strength of corroded pipeline [S].

[2] 李洋，曾祥国. 气液两相流在油气弯管处冲刷腐蚀的数值模拟 [J]. 石油机械，2015，43(12)：104－108.

[3] 刘勇峰，吴明，赵玲，等. 凝析气田集输管道弯管冲刷腐蚀数值计算 [J]. 腐蚀与防护，2012，33(2)：132－135.

[4] Lin C H, Ferng Y M. Predictions of hydrodynamic characteristics and corrosion rates using CFD in the piping systems of pressurized－water reactor power plant [J]. Annals of Nuclear Energy, 2014, 65: 214－222.

[5] 王春兰. 油气长输腐蚀管道剩余强度评价技术研究 [D]. 成都：西南石油学院，2003.

[6] 徐鸣泉. 管道冲蚀破坏的多相流数值模拟研究 [D]. 杭州：浙江大学，2005.

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2017.02.030

启　事

本刊已加入“万方数据库”、“中国知网”、“维普数据库”等。凡向本刊投递的稿件一经采用，即视为作者同意将作品的网络传播权及电子版使用权授予本刊，本刊一次性给付的稿酬已包含上述授权的费用。若不同意上述内容者，请在投递的稿件上予以特别声明，以便本刊酌情处理。

《包钢科技》编辑部