

高含硫气田湿气集输管道冲蚀风险预测研究

陈思维^{1, 2} 覃明友³ 刘德绪² 龚金海²

1.中国人民解放军后勤工程学院, 重庆 401311;

2.中原石油工程设计公司, 河南 濮阳 457001;

3.西南石油大学教务处, 四川 成都 610500

摘要:通过对普光气田集输管道现场检测发现,管道多处发生明显的冲刷腐蚀,造成壁厚减薄。基于湿气集输管流流体动力学数值模型,开展气液两相冲蚀风险预测与评价研究。结果表明,普光气田集输管道气液相交界面上剪切应力较大,易发生冲蚀;上倾管段为段塞流型,其下部管底区域剪切应力较大,流动腐蚀风险较高,是腐蚀监测的重点区域;集气站内集输管道环形障碍物后、分流支管入口、接管两侧及管汇主管中下部区域冲蚀风险高。研究结果为普光气田集输管道腐蚀监测与控制及安全管理提供了技术参考。

关键词:冲蚀;湿气集输管道;风险预测;剪切应力

DOI: 10.3969/j.issn.1006-5539.2015.01.019

0 前言

普光气田是我国迄今为止规模最大、丰度最高的特大型整装高含硫海相气田, H_2S 体积含量高达 15% 左右。在高含 H_2S 、 CO_2 气质条件下腐蚀控制是气田安全高效运行需要关注的核心问题^[1-3]。普光气田采用湿气集输工艺,集输管路具有气液混输、大流量高流速的多相湍流流动特性,在强腐蚀介质条件下,集输管网面临严峻的冲蚀失效风险^[4-8]。现场检测发现:集输管道系统多处出现了明显冲刷腐蚀特征的腐蚀现象,造成壁厚减薄。为此,本文以湿气集输条件下管流流体动力学数值模型为基础,通过数值模拟并结合现场检测结果,开展了气液两相冲蚀规律、冲蚀失效风险预测研究。

1 集输管道气液两相流动动力学模型

在湿气集输条件下,流体在集输管道内的流动为典型的多相流动过程。模拟管道中气液两相流动的基本模型有双流体模型(TFM)、漂移流动模型(DFM)和无压波模型(NPM)。双流体模型又称分离流模型,它分别对气液两相建立连续性方程和动量方程,并考虑了气液相间

作用,可用于多种流型。本文以多相流双流体模型为基础,耦合天然气物性计算及物质质量传递模型,构建了集输管道气液两相流动仿真模型^[9]。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

应力张量由式(3)给出:

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \quad (3)$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i(\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_j h_j J_j + u_j (\tau_{ij})_{\text{eff}} \right) + S_h \quad (4)$$

物质质量传递模型:

$$U_j \frac{\partial c}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D \frac{\partial c}{\partial x_j} - \bar{c}' \bar{u}_j' \right) \quad (5)$$

收稿日期:2014-03-16

基金项目:国家科技油气重大专项“高含硫气藏安全高效开发技术”(2011 ZX 05017-004)

作者简介:陈思维(1978-),男,四川南充人,讲师,博士,从事油气储运安全理论与技术研究。

式中: t 为时间, s; u, v, w 为不同方向速度, m/s; ρ 为密度, kg/m³; p 为压强, Pa; E 为单位质量气体总能, J/kg; C 为摩尔(体积)分数; τ_{ij} 为应力张量, Pa; $\rho g_i, F_i$ 为 i 方向上的重力体积力和外部体积力(如离散相相互作用产生的升力), N; k_{eff} 为有效热传导系数; J_j 为组分 j 的扩散流量; 式(3)等号右边的前三项分别描述热传导、组分扩散和黏性耗散带来的能量输运; S_h 为包括化学反应热以及其他用户定义的体积热源项; U_j 为传质系数; D 为对流传质系数。

湍流模型: 标准 $k-\varepsilon$ 模型为工程流场计算中主要的模型工具, 对于管流气液两相流的流动, $k-\varepsilon$ 模型具有计算稳定性、经济性和计算结构的准确性, 故数值模拟采用 $k-\varepsilon$ 模型。

2 集输干管冲蚀风险预测

以普光气田集输 3 号线 P 301 集气站—集气末站管段为研究对象, 运行工艺参数: 气量 $1\,007 \times 10^4$ m³/d, 液量 60.03 m³/d, 运行压力 8 MPa, 管径 DN 508 mm×22.2 mm。

利用模型对集输管道流型进行预测, 结果表明, 普

光气田运行工况下集输管道平直段及下坡段为分层流型, 管线持液率很小, 积液主要集中在管线低处爬坡段, 即上坡段多为地形诱导段塞流, 见图 1。

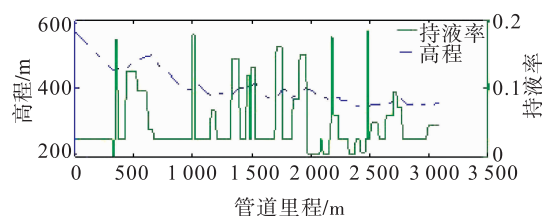


图 1 P 301—总站积液分布特征

利用所建立的数值模型对集输管道不同流型下的流动特性进行模拟研究。对于集输管道平直段及下坡段, 在运行工况下, 气液两相流呈分层流特性, 水相主要集中于管道底部。管道中、下部液相区域湍流度较大, 紊流脉动较剧烈, 在管道底部及气液交界面上剪切应力较大的区域易发生冲蚀。集输管道漏磁检测表明, 管道内部局部腐蚀点均靠近管道底部及管道气液面交界区域, 见图 2。图 2 的数值模拟预测与现场检测结果一致。

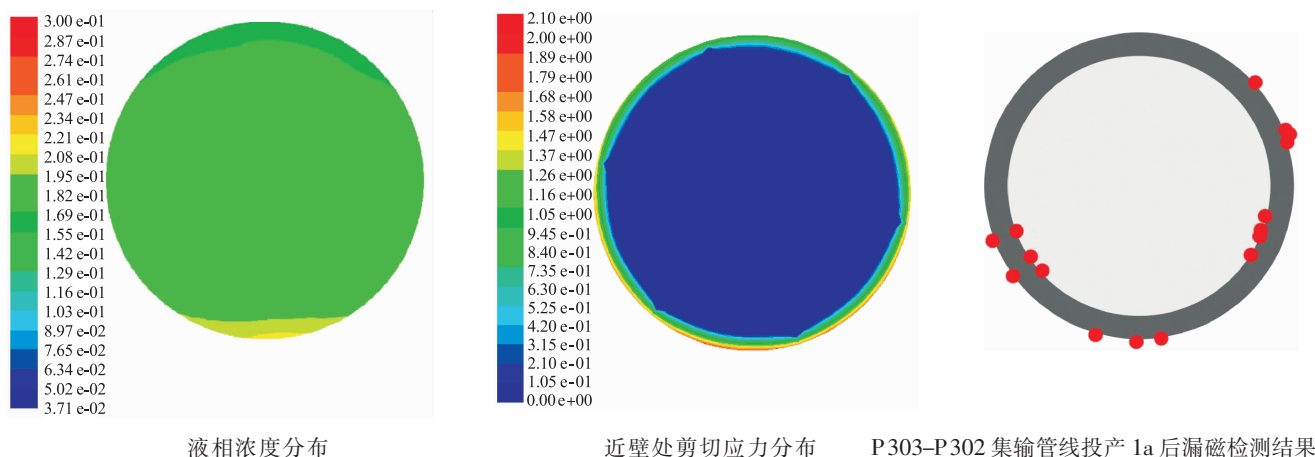


图 2 集输干管流动特性及腐蚀检测结果

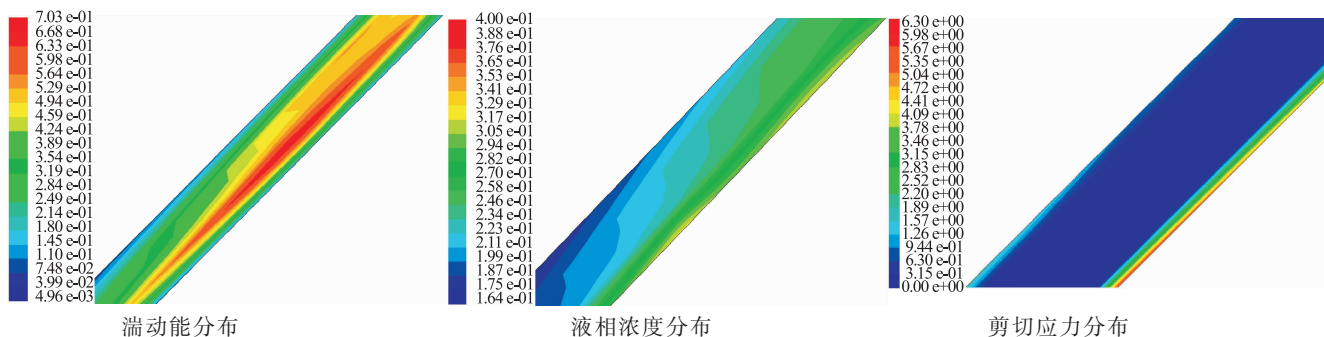


图 3 断塞流管段流动特性

对 P 301—总站典型多起伏段上倾管道进行流场仿真, 上倾管道呈典型段塞流流动特性, 液塞核心区紊流度较大; 液相与管壁之间的剪切力较大并随管道长度增加逐渐下降, 气相与管壁之间的剪切力相对液相来说

较小。管道内检发现该段管道上 27# 阀室附近出现了一特征面积 8 mm×14 mm、特征深度为 21% 的局部腐蚀, 该点正处于 V 型管道上倾段下部区域。可以推论, 上倾管段为段塞流流型, 其下部管底区域剪切应力较大, 流动

腐蚀风险较高,是腐蚀监测的重点区域。

3 集气站内集输管道冲蚀风险预测

集气站内特殊管件多、流动复杂,流动腐蚀风险较高。基于所建立的仿真模型,对典型流动突变处(环形障碍物、三通、接管及汇管)进行流场模拟,以剪切应力表征气液两相流动对管壁的冲刷破坏作用,以湍流强度表征流体强化传质对腐蚀强化作用,对冲蚀风险进行预测,为集输管路腐蚀监测优化及安全管理提供技术支撑。

流动在环形障碍物后(阀门、法兰突出垫圈、节流阀等管道内流动障碍物处)约 $0.6D$ 接近壁面处形成涡流,在该区域湍流度较强,流动剪切应力值较大,在这一区域冲蚀风险较大;同时流场模拟表明在分流支管处,分流支管入口流动复杂,湍流度较大,流动剪切应力在支管入口外侧壁面较大,显示该处流动冲蚀风险大,见图4、5。

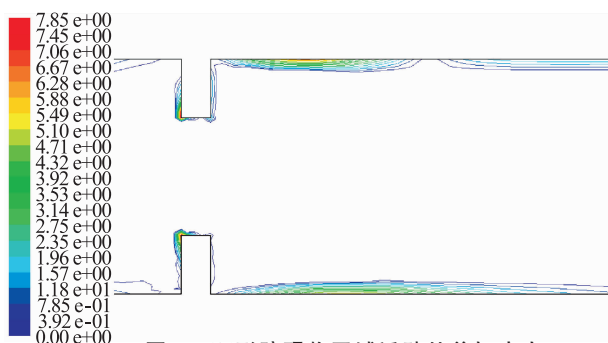


图4 环形障碍物区域近壁处剪切应力

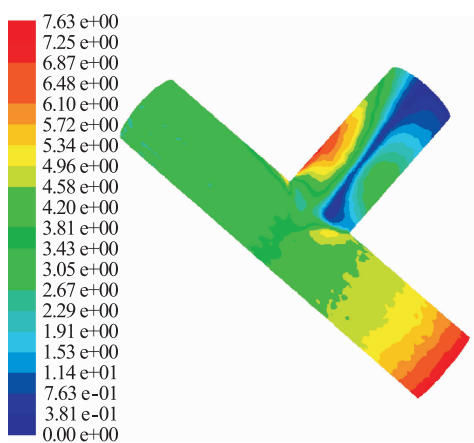
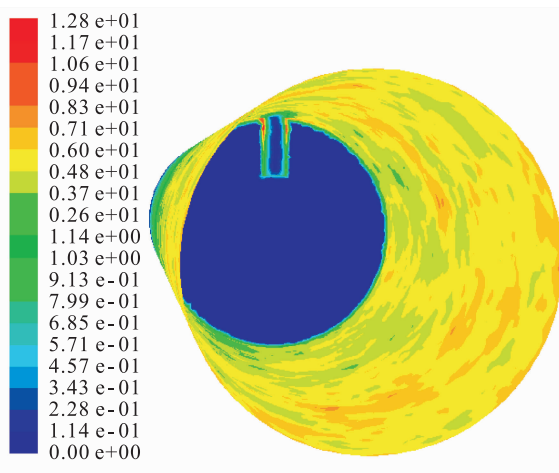


图5 分流支管处近壁剪切应力分布

为了满足站场内管道运行的要求,需要在主管上开孔以连接各类监测及工艺设备。流场模拟表明由于接管的阻碍挤压作用,在接管左右两侧壁面局部区域流动复杂,紊流度大,流动对腐蚀存在较大影响;在接管两侧主管壁面剪应力较大,最大值达 12 N/m^2 ,见图6。由此可预见该处是冲蚀发生的高风险区,这与现场停产检测结果一致。



剪切应力分布



开孔接管处腐蚀情况现场检测图

图6 接管处流动特性及腐蚀检测结果

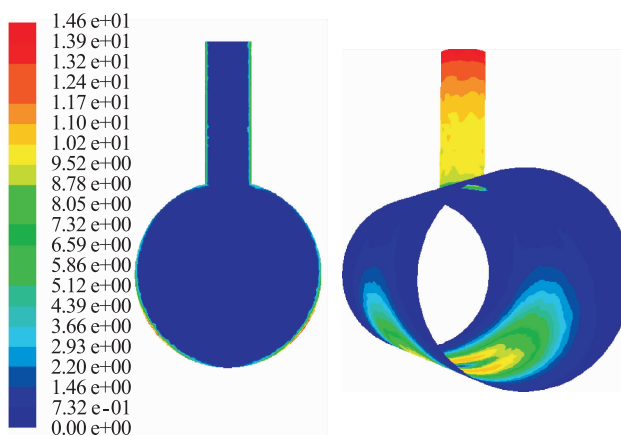


图7 三通汇管处壁面剪切应力分布

三通汇管流动剪切应力分布见图7,由于进流支管高压天然气的剧烈冲击作用,在支管进流附近主管中下部靠近壁面区域壁面剪切应力较大,最大剪切应力达 14 N/m^2 ,这些区域流动对腐蚀的影响较大,是腐蚀监控的重点区域。

4 流动腐蚀速率与剪切应力关系研究

剪切应力对流动腐蚀具有重大影响,通过数值模拟计算剪切应力值即可判断流动腐蚀状态。本文基于普光气田典型腐蚀监测数据,对监测点流动动力学参数进行了模拟计算,见表 1。

表 1 典型线路腐蚀监测速率及剪切应力

线路管段	管径/ mm	气量/ (10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	液量/ (m ³ ·d ⁻¹)	压力/ MPa	最大剪 切应力/ Pa	平均腐 蚀速率/ (mm·a ⁻¹)
P 301-总站	DN 508 × 22.2	1 007	60	8.2	2.1	0.028 10
P 303-P 302	DN 406.4 × 17.5	293	25	9.0	1.6	0.022 07
P 304-P 303	DN 323.9 × 14.2	57	11	8.6	3.5	0.047 2
P 202-P 201	DN 323.9 × 14.2	223	28	8.8	3.1	0.029 6
P 203-P 202	DN 219.1 × 10.0	41	10.31	8.3	5.8	0.109 6
P 104-P 102	DN 406.4 × 17.5	325	38.8	8.7	1.1	0.003 5
P 107-P 106	DN 168.3 × 8.8	83	16.6	8.6	0.51	0.000 5
P 105-P 104	DN 219.1 × 10.0	189	22.2	8.8	2.6	0.030 6

剪切应力与腐蚀速率之间的关系见图 8,当剪切应力在 3.0 N/m² 以下时,腐蚀速率随剪切应力的增加而缓慢增大;当剪切应力值超过 3.0 N/m² 后,腐蚀速率自 0.029 6 mm/a 迅速增大。由此可见,剪切应力值 3.0 N/m² 在工程上具有重要意义。

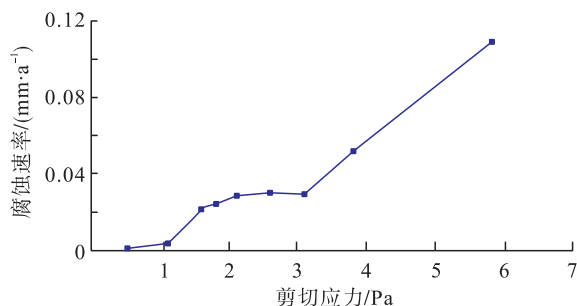


图 8 剪切应力与腐蚀速率之间的关系

5 结论

结合流体动力学数值模拟技术及现场检测腐蚀数据,研究了普光高含硫气田集输管道气液两相流动腐蚀规律,并对流动腐蚀趋势进行了定性预测分析,所得结果为高含硫气田腐蚀监测系统优化及安全风险管理提供了技术支撑。建议下一步应结合数值模拟及室内动态腐蚀实验,深入研究流体动力学参数与流动腐蚀之间的

定量关系,建立冲蚀速率预测模型,进一步充实高含硫腐蚀控制研究理论体系。

参考文献:

- [1] 孔凡群,王寿平,曾大乾. 普光高含硫气田开发关键技术[J]. 天然气工业,2011,31(3):1-4.
Kong Fanqun, Wang Shouping, Zeng Daqian. Key Techniques for the Development of the Puguang Gas Field with a High Content of H₂S [J]. Natural Gas Industry, 2011,31(3): 1-4.
- [2] 何生厚. 普光高含 H₂S、CO₂ 气田开发技术难题及对策[J]. 天然气工业,2008,28(4):82-85.
He Shenghou. Development Technology Problems and Countermeasures of Puguang Gas Field of High Content of H₂S, CO₂ [J]. Natural Gas Industry, 2008,28(4):82-85.
- [3] 鲜宁,孙素芬,姜放,等. CO₂ 气田开发的腐蚀预测与控制措施[J]. 天然气与石油,2011,29(2):62-25.
Xian Ning, Sun Sufen, Jiang Fang, et al. Corrosion Prediction and Control Measure of CO₂ Gas Field Development [J]. Natural Gas and Oil, 2011,29(2):62-65.
- [4] 王勇. 高含硫天然气集输系统硫沉积研究进展[J]. 天然气与石油,2014,32(4):15-17.
Wang Yong. Research Progress of Sulfur Deposition of High Sour Gas Gathering and Transportation System [J]. Natural Gas and Oil, 2014,32(4):15-17.
- [5] Lowmunkhong P, Ungtharak D, Sutthivaiyakit P. Tryptamine as a Corrosion Inhibitor of Mild Steel in Hydrochloric Acid Solution [J]. Corrosion Science, 2010,52(5):30-36.
- [6] Jeyaprabha C, Sathiyarayanan S, Venkatachari G. Effect of Cerium Ions on Corrosion Inhibition of PANI for Iron in 0.5 M 1-12 S04 [J]. Applied Surface Science, 2006,25(3):432-438.
- [7] Bouklah M, Ouassini A, Hammouti B, et al. Corrosion Inhibition of Steel in Sulphuric Acid by Pyrrolidine Derivatives [J]. Applied Surface Science, 2006,25(2):2178-2185.
- [8] Schmitt G. Drag Reduction by Corrosion Inhibitors—a Neglected Option for Mitigation of Flow Induced Localized Corrosion [J]. Materials and Corrosion, 2001,(52):329-343.
- [9] 周力行. 多相湍流反应流体力学 [M]. 北京:国防工业出版社,2002.385-386.
Zhou Lixing. Multiphase Turbulent Reacting Fluid Mechanics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 385-386.