



含 CO₂ 多相流相态的非均匀性对输油管冲刷腐蚀的影响

魏丹^{1,2}, 叶东³, 王献窻¹, 陈长风¹, 白真权⁴, 李鹤林⁴

1. 中国石油大学材料科学与工程系, 北京 102249
2. 中国科学技术协会学会服务中心, 北京 100081
3. 新疆科技政策研究所, 乌鲁木齐 830011
4. 中国石油天然气集团公司石油管力学和环境行为重点实验室, 西安 710065

摘要 以研究含 CO₂ 多相流相态的非均匀性对输油管冲刷腐蚀的影响为目的, 利用多相流环路实验装置进行冲刷腐蚀试验, 并借助高速数字摄像系统观测多相流相态, 考查石油多相混输管中的冲刷腐蚀与多相流的相态结构相关性。对水平管弹状流下的 CO₂ 腐蚀试验研究表明, 水平管的底部较之于顶部有更为显著的冲刷腐蚀, 这种冲刷腐蚀在管道上、下不同部位的差异性源于弹状流相态的非均匀分布。提出了含 CO₂ 多相流冲刷腐蚀的水动力学模型, 模型计算结果表明, 弹状流流型下水平管下部的冲刷腐蚀速率高于上部的冲刷腐蚀速率。水平管弹状流条件下腐蚀产物膜的磨损程度随流体速度的增大而增大。计算结果与试验观测相符, 均表明多相流相态的非均匀性使管道下部更易遭受腐蚀损坏。

关键词 多相流; 弹状流; 连续波

中图分类号 TE988.2

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)16-0049-04

Effect of Nonuniformity of Multi-phase Flow with CO₂ on Erosion Corrosion of Pipeline

WEI Dan^{1,2}, YE Dong³, WANG Xianfang¹,
CHEN Changfeng¹, BAI Zhenquan⁴, LI Helin⁴

1. Department of Materials Science and Engineering,
University of Petroleum, Beijing 102249, China
2. Service Center for Societies, China Association for Science
and Technology, Beijing 100081, China
3. Xinjiang Institute of Science and Policy, Urumqi 830011,
China
4. The Key Laboratory for Mechanical and Environmental
Behavior of Tubular Goods, China National Petroleum
Corporation, Xi'an 710065, China

Abstract The paper studies the effect of non-uniformity of multi-phase flow with CO₂ on erosion corrosion of pipeline. The erosion corrosion tests were carried out in the multi-phase flow loop test

system and the non-uniform structure of multi-phase flow in horizontal pipeline was measured by using high-speed digital photography system. The relationship between the erosion corrosion of pipeline and the structure of the flow was examined. The tests of the CO₂ corrosion of horizontal pipeline under slug flow show that the bottom surface of the pipe is corroded more distinctly than the upper surface due to the non-uniform distribution of the slug flow. A hydrodynamic model of erosion corrosion of multi-phase flow with CO₂ is proposed to determine the corrosion rates of the up- and down- walls of the horizontal pipelines. The wearing degree of corrosion film under the condition of slug flow increases with the increase of flow velocity. The computed results agree with the actual measured results, to show that the non-uniformity of multi-phase flow will result in a more severe corrosion of the bottom of a horizontal pipe than of the upper surface.

Keywords multi-phase flow; slug flow; continuous wave

金属管材的 CO₂ 腐蚀速率受阴极析氢动力学控制, 腐蚀电化学反应将在金属表面形成以 FeCO₃ 为主的腐蚀产物膜, 从而有效抑制金属腐蚀^[1]。然而, 腐蚀产物膜的保护作用与膜的完整性密切相关。Palacios 等^[2-4]研究 CO₂ 腐蚀产物膜的结

收稿日期: 2009-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(50231020), 中国石油天然气集团公司石油管力学和环境行为重点实验室基金项目(ZYT-0202)

作者简介: 魏丹, 博士研究生, 研究方向为石油天然气管道的腐蚀与防护, 电子信箱: weidan@cast.org.cn



构特征发现,腐蚀产物膜的附着力、致密性、厚度、表面晶粒大小等因素会影响膜对基体的保护能力。林冠发等^[5]研究了多相介质中金属材料的腐蚀与磨损的交互作用,包括原油、水相及其夹带的固体颗粒的冲刷作用对碳钢 CO₂ 腐蚀产物磨损性能的影响,发现在水、砂两相体系中,温度和压力的变化对 CO₂ 腐蚀产物膜的表面状态影响十分显著。上述研究主要针对多相介质环境中单因素对 CO₂ 腐蚀产物膜的影响,而对含 CO₂ 多相介质的流动状态对腐蚀的影响研究则较少,尤其是对于水平管不同部位的腐蚀程度与多相流体相态的关系缺乏清楚认识。实际上,较之于层流,湍流因其壁面摩擦力的增大更易使腐蚀产物膜磨损^[6]。对于多相流体,相间的相互作用使流体湍动,导致与壁面摩擦力进一步增大,加剧流体对管壁的冲刷腐蚀作用。含气、液多相流水平管中因重力作用会引起相态的非均匀分布,使气相与液相所产生的壁面摩擦力大小不同,可能引起管道不同部位具有不同的冲刷腐蚀速率。本文研究相态的非均匀性对含 CO₂ 多相流体水平金属管壁的冲刷腐蚀影响程度,以期揭示多相流体冲刷腐蚀较之于单相液体冲刷腐蚀的特性。

1 试验研究

采用图 1 所示的可进行温度控制的多相流腐蚀实验装置进行试验,观测窗水平玻璃管内径为 25 mm, P 为压力表, T 为热电偶温度计。试验所用材料为 N80 钢,其化学成分的质量百分数为: C 0.42%, Si 0.24%, Mn 1.55%, P 0.012%, S 0.004%, Cr 0.051%, Mo 0.18%, Ni 0.034%, V 0.005%, Ti 0.010%, Cu 0.06%, 其余为 Fe。试样加工成 2 mm×5 mm×20 mm 规格试片, 试验前工作面用金相砂纸逐级打磨至 1 000 #, 冲洗后用丙酮除油干燥, 分别嵌入水平玻璃管内壁上 12 点钟和下部 6 点钟处。多相流体介质以 4% 的 NaCl 水溶液为液相, 以 CO₂ 为气相, 试验温度为 40℃, 压力为常压, 试验时间为 72 h。采用失重法测量试样的腐蚀速率, 腐蚀失重采用感量为 0.1 mg 的 BP221S 型电子天平称量, 试样表面腐蚀产物膜磨损形貌采用 Philips 公司 XL220 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察, 应用速度为 1 000 帧/s 的 SpeedCam 高速数字摄像系统观测多相流相态分布 (图 2)。

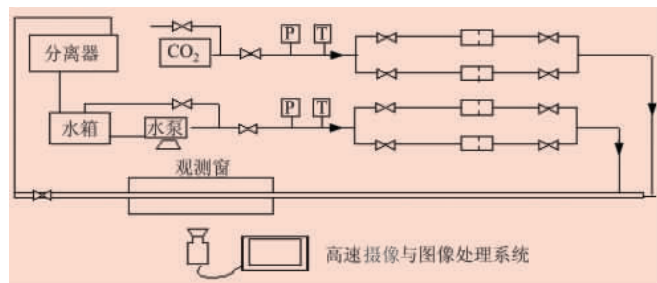


图 1 多相流环路实验系统示意

Fig. 1 Schematic diagram of multi-phase flow loop test system

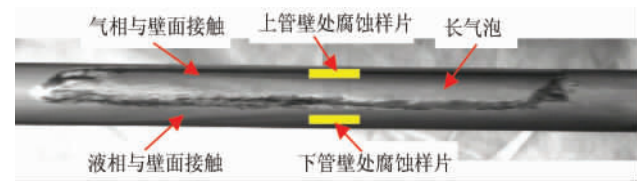


图 2 水平管线中多相流的非均匀相态结构

Fig. 2 Non-uniformity structure of multi-phase flow in horizontal pipeline

2 理论模型

图 2 所示的弹状流过程可简化为图 3, 由重力引起的相态非均匀分布使上管壁间歇性地与气体接触, 而下管壁则一直与液体接触, 管壁上下部位所受的摩擦切应力不平衡。这种摩擦剪切力与流体冲刷腐蚀密切相关, 从而导致管壁上下部位冲刷腐蚀速率不同。

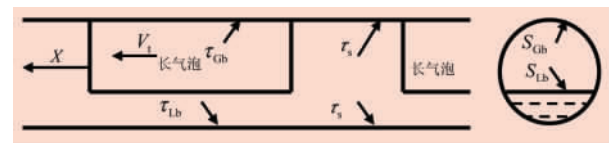


图 3 水平管线中弹状流的简化模型

Fig. 3 Simplified model of slug flow in horizontal pipeline

图 3 中各壁面摩擦切应力为^[7]

$$\tau_s = \frac{1}{2} f_{ls} \rho_m v_s^2 \quad (1)$$

$$\tau_{lb} = -\frac{1}{2} f_{lb} \rho_l v_{lb} |v_{lb}| \quad (2)$$

$$\tau_{gb} = -\frac{1}{2} f_{gb} \rho_g v_{gb} |v_{gb}| \quad (3)$$

式中, f_{ls} 为液弹的范宁摩擦系数, f_{lb} 和 f_{gb} 分别为长气泡处液体和气体的范宁摩擦系数, v_{lb} 和 v_{gb} 分别为液体和气体的平均流速, τ_{lb} 和 τ_{gb} 分别为液膜和气体层壁面切应力, ρ_l 、 ρ_g 和 ρ_m 分别为气体、液体和气泡混合体密度。切应力 τ 与摩擦阻力降压 Δp 的关系为

$$\tau = \frac{D}{4} \cdot \frac{\Delta p}{L} \quad (4)$$

式中, D 为管径, L 为管长。摩擦阻力、压力降与冲刷腐蚀速率 u (mm/a) 按 Bhongale^[8] 计算式有如下关系

$$u = 31.15 (\Delta p / L)^{0.3} \varphi_w^{0.6} p_{CO_2}^{0.8} T e^{\left(\frac{-2671}{T}\right)} \quad (5)$$

式中, T 为热力学温度, φ_w 为液相含水率, p_{CO_2} 为 CO₂ 分压。由式 (4) 和式 (5) 可得, 腐蚀速率与摩擦切应力的关系为

$$u = 31.15 (4\tau / D)^{0.3} \varphi_w^{0.6} p_{CO_2}^{0.8} T e^{\left(\frac{-2671}{T}\right)} \quad (6)$$

在温度、压力、含水率已知的条件下, 如果计算出式 (1)~(3) 中的各摩擦切应力, 即可由式 (6) 计算相应的腐蚀速率。

若要计算式 (1)~(3) 中的各摩擦切应力, 首先要计算出不同部位气、液两相的平均流速。依据多相流体力学理论, 液

弹处的平均流速等于气液两相的混合流速^[9],而长气泡处气、液两相的平均流速则必须对两相作质量与动量平衡分析才能获得,平衡方程为

$$\frac{d[H_{lb}(V_i-v_{lb})]}{dX}=0 \quad (7)$$

$$\frac{d[(1-H_{lb})(V_i-v_{lb})]}{dX}=0 \quad (8)$$

$$\rho_L \frac{d}{dX} [H_{lb}(V_i-v_{lb})^2] + H_{lb} \frac{\partial p_b}{\partial X} - \frac{\tau_{lb} S_{lb}}{A} + \frac{\tau_i S_i}{A} = 0 \quad (9)$$

$$\rho_G \frac{d}{dX} [(1-H_{lb})(V_i-v_{lb})^2] + (1-H_{lb}) \frac{\partial p_b}{\partial X} - \frac{\tau_{gb} S_{gb}}{A} + \frac{\tau_i S_i}{A} = 0 \quad (10)$$

式中, H_{lb} 为液膜持液率, X 为弹状流方向, p_b 为长气泡压力, A 为内管径横截面积, S_{lb} 和 S_{gb} 分别为液膜湿周和气体湿周, S_i 为横截面内的相界面长度。 τ_i 为界面切应力, 表示为^[7]

$$\tau_i = -12 f_i \rho_G (v_{gb} - v_{lb}) |v_{gb} - v_{lb}| \quad (11)$$

V_i 为长气泡的平移速度, 表示为^[10]

$$V_i = 1.2 v_m + 0.54 \sqrt{gD} \quad (12)$$

式(12)中 g 为重力加速度; v_m 为混合流速, 等于表观气速 J_G 与表观液速 J_L 之和, 即

$$v_m = J_G + J_L \quad (13)$$

由以上方程可计算出液弹区的腐蚀速率 u_s 、长气泡区管道上部的腐蚀速率 u_{cb} 、长气泡区管道下部的腐蚀速率 u_{lb} 。依

据多相流理论, 图 3 中的液弹长度 L_s 通常假设为 $30D$, 长气泡长度 L_b 则可由如下气体质量平衡近似关系确定

$$J_G = \frac{1}{L_b + L_s} \int_0^{L_b} (1 - H_{lb}) v_{gb} dX \quad (14)$$

由 L_s 和 L_b 可计算出管道上下部位的平均腐蚀速率, 即

$$u_{up} = (u_{cb} L_b + u_s L_s) / (L_b + L_s) \quad (15)$$

$$u_{down} = (u_{lb} L_b + u_s L_s) / (L_b + L_s) \quad (16)$$

3 结果及讨论

图 4 为 2 组试样经腐蚀后在扫描电镜下观察到的结果。每组试样分上、下 2 片, 其中, 图 4(a) 为上部样片, 图 4(b) 为下部样片。图 4(a)、4(b) 对应的流动工况为: 表观液流速 $J_L = 0.23$ m/s, 表观气流速度 $J_G = 0.37$ m/s; 图 4(c)、4(d) 对应的流动工况为: $J_L = 0.68$ m/s, $J_G = 0.75$ m/s。比较图 4(a) 和图 4(b) 可以看出, 上部腐蚀试样表面腐蚀产物膜的磨损程度明显较下部轻微; 比较图 4(c) 和图 4(d), 也看到类似现象。这表明, 水平管弹状流腐蚀一直与液体接触的下部管壁, 其冲刷腐蚀要比间歇性地与气体接触的上部管壁的冲刷腐蚀严重。比较图 4(a)、图 4(c) 及 4(b)、4(d) 可以看出, 水平管弹状流条件下腐蚀产物膜的磨损程度随流体速度的增大而增大。图 5 分别给出了水平管线上部和下部的腐蚀速率。

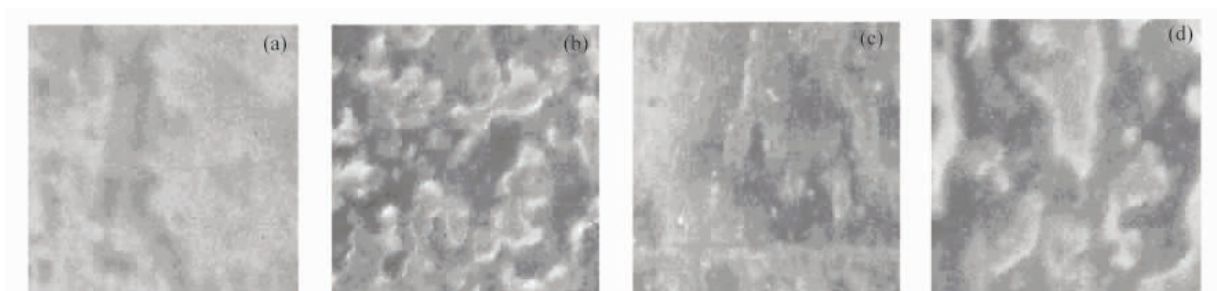
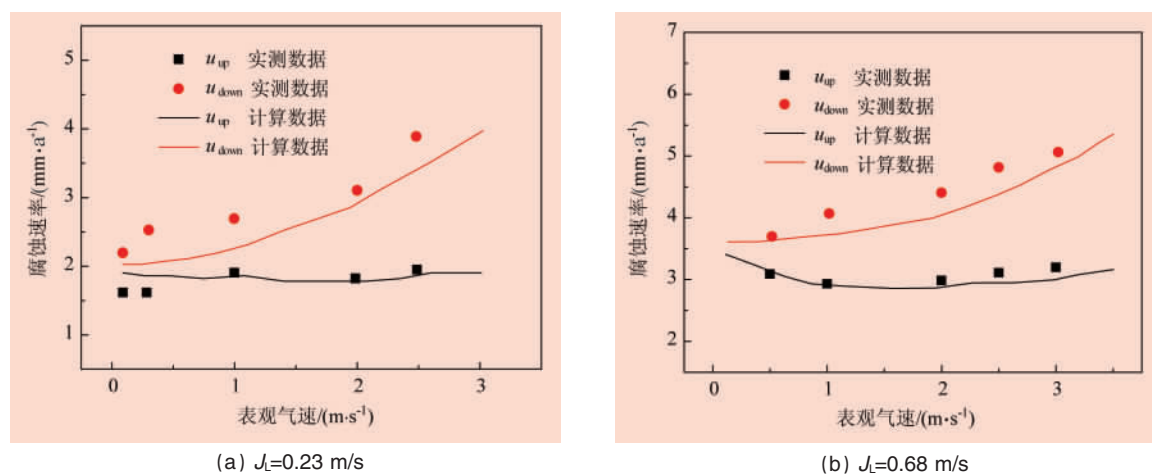


图 4 水平管线的上部 and 下部管壁的冲刷腐蚀形貌

Fig. 4 SEM morphologies of erosion corrosion of the horizontal pipeline



(a) $J_L = 0.23$ m/s

(b) $J_L = 0.68$ m/s

图 5 水平管线的上部及下部管壁的腐蚀速率

Fig. 5 Corrosion rates of up- and down-walls of the horizontal pipelines

4 结论

水平管弹状流中相态的非均匀分布可引起管道内壁上下部位冲刷腐蚀程度的差异,与液体直接接触的下部管壁,其冲刷腐蚀要比间歇性地与气体接触的上部管壁的冲刷腐蚀严重。当多相流体含气较少时,上、下管壁处的腐蚀速率比较接近;多相流体含气较多时,上管壁处的腐蚀速率较下管壁处腐蚀速率明显增大。理论模型计算结果与试验结果同时证实,多相流相态的非均匀性使管道下部较之管道上部更易遭受 CO_2 腐蚀损坏。

参考文献 (References)

- [1] Burke P A. Synopsis, recent progress in the understanding of CO_2 corrosion [C]//Corrosion/85, Paper No. 1, Houston: NACE International, 1985.
- [2] Palacios C A, Shadley J R. Characteristics of corrosion scales on steels in CO_2 -saturated NaCl brine[J]. *Corrosion*, 1991, 47(2): 122-127.
- [3] 陈长风, 路民旭, 赵国仙. N80 油套钢 CO_2 腐蚀产物膜特征[J]. 金属学报, 2002, 38(4): 411-416.
Chen Changfeng, Lu Minxu, Zhao Guoxian. *Acta Metallurgica Sinica*, 2002, 38(4): 411-416.
- [4] 林冠发, 白真权, 赵国仙, 等. CO_2 压力对金属腐蚀产物膜形貌结构的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2004, 24(5): 284-288.
Lin Guanfa, Bai Zhenquan, Zhao Guoxian, et al. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2004, 24(5): 284-288.
- [5] 林冠发, 郑茂盛, 白真权, 等. N80 钢 CO_2 腐蚀产物膜在水砂两相流介质中的磨损性能[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(1): 78-82.
Lin Guanfa, Zheng maosheng, Bai Zhenquan, et al. *Tribology*, 2005, 25(1): 78-82.
- [6] Poulson B. Advances in understanding hydrodynamic effects on corrosion[J]. *Corrosion Science*, 1993, 35(4): 655-665.
- [7] Liu Lei, Sun Hedong, Hu Zhihua, et al. A new hydrodynamic model for slug frequency in horizontal gas-liquid two-phase flow [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2003, 11(5): 508-514.
- [8] Bhongale S. Effect of pressure, temperature and Froude number on corrosion under horizontal multiphase slug flow [D]. Athens: Department of Chemical Engineering, Ohio University, 1996.
- [9] Kvernold O, Vindoy V, Sontvedt T. Velocity distribution in horizontal slug flow [J]. *Int J Multiphase Flow*, 1984, 10(4): 441-457.
- [10] Taitel Y, Barnea D. Two phase slug flow: Advances in heat transfer [M]. New York: Academy Press, 1990: 83-132.

(责任编辑 吴晓丽)

· 学术动态 ·



“第 15 次全国电化学学术会议”征文

“第 15 次全国电化学学术会议”定于 2009 年 12 月 16-20 日在长春市举行。本次大会由中国化学会主办,吉林大学承办,中国科学院长春应用化学研究所协办。全国电化学学术会议是国内规模化、系列化的学术会议之一,每两年举办一次,以此推动国内电化学领域的学科发展和科技进步,促进科研合作和技术转化。这次会议将围绕电化学和技术发展中的基础问题,提出创新观点,交流学术思想,展示最新成果,探索如何进一步推动电化学科学和技术在国民经济发展中的应用。

会议论文征集范围包括:电化学基础(包括谱学电化学和电催化),锂离子电池,超级电容器与其他电池,燃料电池,工业电化学和电化学工程(电解、电镀、金属腐蚀与防护、电沉积和表面处理技术),生物电化学,有机电化学和环境电化学,电分析化学和传感器,材料电化学(纳米电化学、高功能金属和金属合金、高功能电化学聚合物、电极和电活性物质的分子设计),电化学设备与技术及其产业发展研讨会(电解工业、电镀与修饰、湿法冶金、腐蚀与防护、电化学仪器和设备)等。

征稿截止日期:2009 年 9 月 30 日。

联系方式:长春市前进大街 2699 号吉林大学化学学院 (130012) 陆海彦, 黄卫民, 施峥; 电话:0431-85155189; 传真:0431-85155358; 会议网站: <http://09cse-online.org>; 电子信箱: luhy@jlu.edu.cn, huangwm@jlu.edu.cn, shizheng@jlu.edu.cn。



“第 3 届国际动力学、振动与控制学术会议”征文

近年来,动力学、振动与控制已成为科技的前沿研究领域。由中国力学学会主办的“第 3 届国际动力学、振动与控制学术会议(ICDVC-2010)”将致力于汇聚该领域权威科学家并展现其开创性研究成果,涵盖动力学、振动与控制的大多数研究方向,并突出各学科之间的交叉贯穿。大会议题将包括数学理论,数值仿真,物理实验,工程设计,信息技术,生物与经济方面的动力学理论研究以及各种应用。同时,为各个科学研究、工程应用领域的科技工作者提供一个良好的叙述交流氛围与机会,共享与会者的新思想、成功的经验和最新研究成果。共同探讨动力学、振动与控制领域在 21 世纪内的新方向和面临的新问题。

会议主要范围包括:离散与连续系统的非线性动力学,机械振动与控制,控制理论与应用,多体系统动力学与控制,分析动力学,工业、生物、经济等领域的动力学问题等。论文摘要截稿日期:2009 年 9 月 30 日。

联系方式:杭州市浙大路 38 号浙江大学航空航天学院应用力学研究所 (310027) 黄伟伟; 电话:0571-87953102; 电子信箱: weiqiuzhu@zju.edu.cn。