

油气输送管道多相流磨损腐蚀的研究现状与进展

吾兰·巴克达什^{1,2}, 刘建国^{1,2}, 李自力^{1,2}, 胡宗武^{1,2}, 祁明华^{1,2}, 张超^{1,2}

(1.山东省油气储运安全省级重点实验室, 青岛市环海油气储运技术重点实验室, 山东 青岛 266580;
2.中国石油大学 储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要:介绍了金属管道在多相流环境中磨损腐蚀的研究近况, 并从材料因素、流体力学因素、多相流因素分析了多相流金属管道磨损腐蚀的影响机制。从实验研究和数值模拟研究两方面介绍了目前多相流金属管道磨损腐蚀的研究方法, 对目前油气输送中多相流磨损腐蚀的防护措施进行了总结, 并对多相流金属管道磨损腐蚀的研究进行了展望。

关键词:多相流; 磨损腐蚀; 计算流体力学

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.03.022

中图分类号: TG174 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2017)03-0112-05

Research Status and Progress in Erosion-Corrosion of Oil and Gas Transmission Pipelines in Multiphase Flow

WULAN Ba-ke-da-shi^{1,2}, LIU Jian-guo^{1,2}, LI Zi-li^{1,2}, HU Zong-wu^{1,2}, QI Ming-hua^{1,2}, ZHANG Chao^{1,2}

(1. Shandong Provincial key laboratory of Oil & Gas Storage and Transportation Safety, Qingdao Key Laboratory of Circle Sea Oil & Gas Storage and Transportation Technology, Qingdao 266580, China;
2. College of pipeline and civil engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

ABSTRACT: Recent researches on erosion-corrosion of metal pipelines in multiphase flow were introduced. The erosion-corrosion mechanism of pipelines in multiphase flow was analyzed from factors on material, fluid mechanics and multiphase flow. Current research methods on erosion-corrosion of metal pipelines in multiphase flow were introduced from experimental study and numerical simulation study. Safeguard procedures for erosion-corrosion of oil and gas transmission pipelines in multiphase flow were summarized. The developed trend of erosion-corrosion research on erosion-corrosion of metal pipelines in multiphase flow was also predicted.

KEY WORDS: multiphase flow; erosion-corrosion; CFD

多相物体在体系中的流动称为多相流。多相流通常分为两相流、三相流、四相流等, 如气液两相流、油气水三相流、油气水砂四相流。多相流混输是一种经济的油气输送方式^[1], 但在油气储运过程常常会出现多相流介质对金属管道造成严重磨损腐蚀的现象,

因为由油气水等多种介质组成的多相流流动状态不稳定, 极易对金属管道造成磨损腐蚀, 从而影响管道的使用寿命^[2]。磨损腐蚀是指磨损与腐蚀的重复过程^[3], 微观上磨损腐蚀具体可以分为磨损和腐蚀, 磨损指的就是金属管道的力学损伤, 而腐蚀指的是金属管道的

收稿日期: 2016-10-31; 修订日期: 2016-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(51301201); 山东省自然科学基金(ZR2013EMQ014); 青岛市自主创新计划(15-9-1-70-jch); 黄岛区重点科技计划(2014-1-52); 中央高校基本科研业务费专项资金(14CX02209A, 16CX02037A)

作者简介: 吾兰·巴克达什(1989—), 男, 新疆阿勒泰人, 硕士研究生, 主要研究方向为油气储运系统安全工程。

通讯作者: 刘建国, 男, 内蒙古乌兰察布人, 博士, 副教授, 主要研究方向为腐蚀与防护。

电学损伤。按照介质的不同^[4]，磨损腐蚀分为单相流磨损腐蚀、双相流磨损腐蚀、多相流磨损腐蚀等。近年来，由于金属磨损腐蚀而造成的管线破坏事故频频发生，磨损腐蚀逐渐成为油气储运系统发生穿孔泄露的主要原因之一^[5]。文中从研究方法、影响机制、防护措施等方面分析了多相流磨损腐蚀的研究进展，并提出了展望。

1 研究方法的现状与进展

随着石油与天然气工业的飞速发展，油气输送管道多相流磨损腐蚀的研究方法越来越多，目前国内外多相流磨损腐蚀的研究方法主要有两种：实验研究和数值模拟研究^[6]。

1.1 实验研究

油气输送管道工程中，由于多相流磨损腐蚀等关键问题很难得到理论解析结果，因此需要借助于实验研究方法^[7]。目前国内多相流金属管道磨损腐蚀的研究在实验研究方面取得了一定成果。多相流磨损腐蚀的实验研究方法主要包括失重法、电化学测量法、丝束电极法和形貌观察法等。

失重法操作简单、直接，容易实现，因此在磨损腐蚀研究中应用最为广泛，但其实验周期较长。

电化学测量法^[8-9]主要包括电化学噪声谱测量、极化曲线测量、阻抗谱测量等。通过电化学方法既可以测定磨损腐蚀速率的大小，又可以深入地研究磨损腐蚀的机制。电化学测量的测量周期短。由于电化学特征在管道内壁是不均一的，因此通常采用丝束电极^[10]，其主要是由有一系列规则排列的金属丝束截面组成的复合电极。现阶段，丝束电极法已广泛用于多相流磨损腐蚀的研究领域^[11]。使用该方法比传统的电化学测试更适合表征局部腐蚀的分布。

腐蚀形貌观察^[12]是利用扫描电镜（SEM）、表面光度仪、透射电镜（TEM）、光学显微镜、X射线光电子能谱（XPS）等技术对磨损腐蚀后的金属试片、微观组织结构和腐蚀产物等进行形貌观察，用来确定金属磨损腐蚀的损伤特征现象。

最新出现的实验研究方法有激光测速法，适合于扰流条件下的磨损腐蚀实验。还有 Mclaury, Santos 等学者^[13-14]针对多相流弯曲管道的磨损腐蚀行为展开实验研究，利用厚度测量等方法测得了冲刷速率。

实验过程中采用的研究装置主要有旋转式装置、喷射式装置和管流式装置等^[15]。

1.2 数值模拟研究

数值模拟是研究多相流金属管道磨损腐蚀的主要研究方法之一。数值模拟计算的整个过程主要包括

建立模型、网格划分、数值计算等三大步骤，通过数值模拟计算，可得管道中流体速度场、温度场、固体颗粒和磨损腐蚀区域的分布^[16]，预测磨损腐蚀。数值模拟工作的优点是耗费较少，花费时间短^[17]，缺点是对其结果的准确性还需要经过实验验证。多相流的数值模拟通常使用 FLUENT 等成熟的 CFD 软件^[18]。现在有两种典型的处理多相流的数值计算研究方法^[19]：欧拉（Euler）-拉格朗日（Lagrange）方法和欧拉（Euler）-欧拉（Euler）方法。离散相（DPM）模型是在单相流的基础上发展起来的，适合做多相流金属管道磨损腐蚀模拟的数值模拟计算方法，通过 DPM 模型，可以对金属管道的侵蚀率进行数值计算。

2 磨损腐蚀的影响机制

多相流金属管道磨损腐蚀的过程复杂^[20]，其影响机制^[21]主要包括材料因素、流体力学因素、多相流因素和腐蚀因素等。

2.1 材料因素

材料因素包括材料的力学性能，材料的组织结构和合金元素的影响。材料的力学性能影响还包括机械强度、硬度、残余应力、弹性模量等。金属材料硬度对冲蚀率的影响也不容小觑，但是材料硬度与抗腐蚀能力并不呈正相关关系，材料的抗腐蚀性通常在合适的强度范围内才能发挥作用^[22]。材料的组织结构^[23]对磨损腐蚀的影响不可忽视。在强磨损-弱腐蚀工况条件下，马氏体具有较高的硬度，因而具有良好的耐磨性；而在强腐蚀-弱磨损工况条件下，奥氏体则具有较高的耐蚀性，因而具有良好的耐磨性^[24]。材料中合金元素、杂质元素会影响材料的磨损腐蚀特征。材料中加入铬，有利于耐磨性的提高，并易于形成钝化膜^[24]。材料中加入镍会提高材料耐蚀性，但在强磨损-弱腐蚀的工况下，过量镍的加入会使基体硬度下降，反而导致耐磨性下降^[24]。在强磨损-弱腐蚀条件下，含碳量的增加有利于材质耐磨性的提高，但在弱磨损-强腐蚀条件下，含碳量的增加则不利于材质耐磨性的提高^[24]。硅的加入可使材质表面形成致密的钝化膜，提高材质耐磨性，但同时会导致材料的脆性增加^[24]。

2.2 流体力学因素

大量实证研究表明，流速与多相流金属管道磨损腐蚀情况呈正相关关系^[25-26]。研究者们以为：无论是垂直放置还是水平放置，冲刷角度的不同，对多相流管道腐蚀的影响也不同^[27]。根据郑玉贵^[28]等研究的磨损腐蚀的影响机制，可知金属管道的磨损腐蚀随冲刷角度的变化较为复杂，在液/固双相流冲刷腐

蚀条件下,延性材料在低速条件下最大冲蚀率发生在 90° 处,在高速条件下冲蚀率出现两个极大值($30^\circ\sim 60^\circ$ 和 90°)。

影响金属管道磨损腐蚀的固相颗粒的主要参数^[29]包括溶液中颗粒的浓度、形状大小、硬度和锋利度等。随着颗粒浓度的增大,磨损腐蚀速率也会变大,但是在高浓度溶液条件下,因为颗粒之间的屏蔽效应^[30],金属的磨损腐蚀速率会有所减小。颗粒粒径、颗粒硬度与磨损腐蚀速率呈正相关关系。多角颗粒往往比圆形颗粒造成更大的冲刷腐蚀^[28]。

2.3 多相流因素

流动状态对多相流金属管道磨损腐蚀也有较大的影响^[31],而流态本身与流速、介质、管道的几何形状等等因素有关。多相流体的流动状态主要有分层流、湍流、段塞流等^[32],不同的流动状态有不同的磨损腐蚀规律^[33]:在层流状态下,流体对金属管道的剪切应力较小,因而磨损腐蚀效率较低;在湍流状态下,随着流体对金属管道的剪切应力不断增大,磨损腐蚀效率不断增强,从而促进磨损腐蚀;高速紊流状态的段塞流,会对管壁产生强烈的磨损腐蚀。气相对金属管道多相流的影响取决于温度、压力等因素^[34],温度升高促进磨损腐蚀^[35],而磨损速率与气体压力呈负相关关系^[36]。

2.4 腐蚀因素

腐蚀因素^[37]是在基于多相流因素的基础上发展的关键因素。之所以磨损腐蚀速率大于纯腐蚀速率和纯磨损速率之和,是因为磨损和腐蚀之间存在着交互作用^[38]。流体力学因素与电化学腐蚀的交互作用在金属管道磨损腐蚀的整个过程当中起到重要的作用。流体中 O_2 、 CO_2 和 H_2S 组分会造成腐蚀速率的增加,从而导致磨损腐蚀速率的增加,但目前还没有可以描述 O_2 、 CO_2 、 H_2S 与含砂量的磨损腐蚀模型。

3 油气输送中多相流磨损腐蚀的防护措施

研究多相流金属管道磨损腐蚀的最终目的就是为油气工业生产提供指导性的研究经验^[39]。目前应用在油气输送中多相流磨损腐蚀的防护措施主要有:

1) 耐多相流腐蚀材料^[40]。耐磨及耐蚀材料的研发和选择可以有效地减小磨损腐蚀速率,但在油气输送中还需要兼顾材料强度及经济成本。日本钢铁公司根据法国ELF公司提出的预测多相流磨损腐蚀的数学模型,研发了预防 CO_2 多相流腐蚀的特种钢材^[41]。郑玉贵等通过旋转失重实验表明高含量、大尺寸的相能显著提高Cr30-N22-Mo3钢在各种条件

下的抗磨损腐蚀性能,从而导致其交互作用和总质量损失率的显著降低,寻求耐蚀性与耐磨损性能间的最佳平衡以使交互作用量最小,是发展抗磨损腐蚀材料的最佳途径^[42]。

2) 多相分离分输^[43]。对多相流体进行分离分输,尤其是对多相流体中固体颗粒的分离可以有效地改善多相流磨损腐蚀问题。但考虑到成本问题时,从井口到联合站往往采用油气水多相混输。

3) 覆盖层保护^[44]。为了提高金属管道的耐磨损腐蚀性能,可在其表面涂/镀/沉积Co基合金层、硅化物合金层等。其他的内防腐技术有聚乙烯粉末涂层、环氧树脂粉末涂层、热喷涂塑料、聚苯硫醚(PPS)粉末涂层等^[45]。

4) 材料表面改性。通过渗氮、氮碳共渗和渗碳等表面改性工艺能够明显提高材料耐磨性和抗蚀性能^[46]。

5) 缓蚀剂保护^[47]。在多相流体中添加缓蚀剂是目前油气集输过程中常采用的有效防蚀方法,常用的缓蚀剂有咪唑啉衍生物等。在多相流环境中,缓蚀剂的缓蚀作用会受缓蚀剂种类、缓蚀剂浓度、温度、流速、含砂量等多种因素的影响^[48-49]。大量缓蚀剂会吸附在砂粒表面、气/液界面以及液/液界面,导致缓蚀剂有效浓度降低,因此若要达到最佳保护效果,需要提高缓蚀剂的浓度^[50-51]。弯管内侧流速高、剪切应力大、湍流能量大,容易破坏试片表面形成的保护膜,但流体流动会加速缓蚀剂分子的质量传输速率,使分子更易到达试片表面。多方面因素共同作用使弯管各个部位的缓蚀效率有所不同,但弯管内侧的缓蚀效率要低于外侧^[52]。在严重冲蚀(20 m/s)条件下,缓蚀剂对碳钢的缓蚀效率为50%左右,对13Cr马氏体不锈钢为30%~45%,而对于超级双相不锈钢几乎没有效果^[53]。

4 结语

多相流磨损腐蚀是影响油气储运系统安全工程的重要因素,因此国内外的研究学者们仍在不断地探索多相流磨损腐蚀的规律。多相流金属管道磨损腐蚀的研究方法还存在不足,因此需要采用现代科技,创新发展试验研究方法,将声发射技术、原位观测技术等引入到多相流金属管道磨损腐蚀的研究,实现对磨损腐蚀过程的在线测量和动态观测,将有助于揭示磨损腐蚀机制并提高磨损腐蚀速率的预测精度。采用数值模拟研究金属的磨损腐蚀仍是未来发展趋势。需要考虑由于磨损腐蚀引起流道变化,寻找准确的模型,预测磨损腐蚀分布区域,确定多相流磨损腐蚀的薄弱环节及作用机制,从而指导多相流环境下管道防蚀结构设计,为油气安全运行提供保障。

参考文献:

- [1] GHORAI S, SURI V, NIGAM K D P. Numerical Modeling of Three-phase Stratified Flow in Pipes[J]. *Chemical Engineering Science*, 2005, 60(23): 6637—6648.
- [2] 代真, 沈士明, 丁国铨. 金属在固液两相流体中的冲刷腐蚀及其防护[J]. *腐蚀与防护*, 2007, 27(2): 86—89.
- [3] EZUBER H M. Metallurgical and Environmental Factors Affecting the Pitting Behavior of UNS S 32205 Duplex Stainless Steel in Chloride Solutions[J]. *Materials and Corrosion*, 2012, 63(2): 111—118.
- [4] RAJAHRAM S S, HARVEY T J, WOOD R J K. Electrochemical Investigation of Erosion-Corrosion Using A Slurry Pot Erosion Tester[J]. *Tribology International*, 2010, 44(3): 325—327.
- [5] ZHANG G A, CHENG Y F. Electrochemical Characterization and Computational Fluid Dynamics Simulation of Flow-accelerated Corrosion of X65 Steel in a CO₂ Saturated Oilfield Formation Water[J]. *Corrosion Science*, 2010, 52(8): 2716—2724.
- [6] STACK M M, ABDELRAHMAN S M, JANA B D. Some Perspectives on Modeling the Effect of Temperature on the Erosion-Corrosion of Fein Aqueous Conditions [J]. *Tribol Int*, 2010, 43(12): 2279—2297.
- [7] 李智利. 冲蚀与腐蚀运行环境下多相流管道设计标准 [J]. *油气储运*, 1996, 15(4): 48—50.
- [8] WHARTON A, WOOD R J K. Electro-Mechanical Interactions during Erosion-Corrosion[J]. *Wear*, 2009, 267(11): 1900—1908.
- [9] 邢建东, 高义民, 张国赏. 不锈钢与高碳钢的冲刷腐蚀磨损试验研究[J]. *西安交通大学学报*, 2004, 38(5): 38—42.
- [10] NEVILLE A, WANG C. Erosion-Corrosion of Engineering Steels—Can It be Managed by Use of Chemicals[J]. *Wear*, 2009, 267(11): 2018—2026.
- [11] 翁永基, 赵海燕. 用丝束电极评价不锈钢在 NaCl 溶液中点蚀敏感性[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2003, 23(6): 326—329.
- [12] TIAN H H, ADDIE G R, VISINTAINER R J. Erosion-Corrosion Performance of High-Cr Cast Iron Alloys in Flowing Liquid-Solid Slurries[J]. *Wear*, 2009, 267(11): 144—146.
- [13] MCLAURY B S, SANTOS G, MAZUMDER Q, et al. Distribution of Sand Particles in Horizontal and Vertical Annular Multiphase Flow in Pipes and the Effects on Sand Erosion[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2011, 133(2): 180—190.
- [14] SANTOS G, MAZUMDER Q, SHIRAZI S A, et al. Effect of Sand Distribution on Erosion in Annular Three-phase Flow[C]// *Asme/jsme Joint Fluids Summer Engineering Conference*. 2003: 871—880.
- [15] 翁永基. 含沙多相流对金属管道腐蚀-磨损及其监测 [J]. *管道技术与设备*, 2002(4): 26—29.
- [16] BONIZZI M, ISSA R I. On the Simulation of Three-Phase Slug Flow in Nearly Horizontal Pipes Using the Multi-Fluid Model[J]. *Multiphase Flow*. 2003, 29(11): 1719—1747.
- [17] 刘景军. 高速多相海水中材料流动腐蚀的数值模拟与实验验证[D]. 北京: 北京化工大学, 2006.
- [18] 江克, 杨铁成, 陈学东, 等. 高温高流速环烷酸冲刷腐蚀流场数值模拟研究[J]. *压力容器*, 2010, 27(10): 199—201.
- [19] MICHELE V, HEMPEL, D. Liquid Flow and Phase Holdup-measurement and CFD Modeling for Two and Three Phase Bubble Columns[J]. *Chemical Engineering Science*, 2002, 57(11): 1899—1908.
- [20] 刘宏波, 王书淼, 高铸, 等. CO₂/H₂S 对油气管道内腐蚀影响机制[J]. *油气储运*, 2007, 26(12): 43—46.
- [21] OKA Y I, OKAMURA K, YOSHIDA T. Practical Estimation of Erosion Damage Caused by Solid Particle Impact[J]. *Wear*, 2005, 259(S 1-6): 95-101.
- [22] GNANAVELU A, KAPUR N, NEVILLE A, FLORES J. An Integrated Methodology for Predicting Material Wear Rates Due to Erosion[J]. *Wear*, 2009, 267(11): 1935—1944.
- [23] 蔡峰, 柳伟, 樊兴华, 等. 流体喷射条件下金属材料冲刷腐蚀的研究进展[J]. *摩擦学学报*, 2011, 31(5): 521—527.
- [24] 饶启昌, 吕振林, 周平安. 腐蚀磨损及耐磨蚀材料的选择[J]. *铸造*, 2000, 49(S1): 585—591.
- [25] GRAHAM L J W, LESTER D R, WU J. Quantification of Erosion Distributions in Complex Geometries[J]. *Wear*, 2010, 268(9/10): 1066—1071.
- [26] 吴成红, 甘复兴. 金属在两相流动水体中的冲刷腐蚀 [J]. *材料保护*, 2000, 33(4): 33—35.
- [27] 杨雪, 吴先策. 液体石油管道内腐蚀直接评价方法[J]. *管道技术与设备*, 2011(2): 256—258.
- [28] 郑玉贵, 姚治铭, 柯伟. 流体力学因素对冲刷腐蚀的影响机制[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2000, 12(1): 36—40.
- [29] 邓晓辉, 邓卫东, 廖伍彬, 等. X65 海底管线在多相流中的冲刷腐蚀[J]. *石油化工腐蚀与防护*, 2011, 28 (1): 188—190.
- [30] 代真, 沈世明. 液固两相流中金属冲刷腐蚀的研究[J]. *四川化工*, 2006, 9(4): 31—33.
- [31] NOUI-MEHIDI M N, GRAHAM L J, WU J, et al. Study of Erosion Behavior of Paint Layers for Multilayer Paint Technique Applications in Slurry Erosion[J]. *Wear*, 2008, 264(7/8): 737—743.
- [32] STACK M M, ABDELRAHMAN S M, JANA B D. A New Methodology for Modeling Erosion-Corrosion Regimes on Real Surfaces: Gliding Down the Galvanic Series for a Range of Metal-Corrosion Systems[J]. *Wear*, 2010, 268(3/4): 533—542.
- [33] STACK M M, ABDELRAHMAN S M. Mapping Erosion-Corrosion of Carbon Steel in Oil Exploration Conditions: Some New Approaches to Characterizing Mechanisms and Synergies[J]. *Tribology International*, 2010, 43(7): 1268—1277.
- [34] LU B T. Erosion-corrosion in Oil and Gas production (Part1)[J]. *Chemical Engineering of Oil & Gas*, 2013, 42(1): 1—10.
- [35] 宋承毅. 石油工业多相混输技术研究进展[J]. *油气储运*, 2003, 22(9): 26—29.
- [36] MONTOYA D, VITAL G. Mathematical Model for Bubbly Water-heavy Oil-Gas Flow in Vertical Pipes[J]. *Pe-*

- trol Sci Technol. 2009, 27(15): 1715—1726.
- [37] ODDIE G, SHI H, DURLOFKY L J, et al. Experimental Study of Two and Three Phase Flows in Large Diameter Inclined Pipes[J]. Multiphase Flow, 2003, 29(4): 527—558.
- [38] 张会强, 陈昌麒. 改进的随机轨道模型[J]. 工程热物理学报, 1999, 20(5): 647—651.
- [39] 徐姚. 液固两相流冲刷腐蚀数值模拟研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2001.
- [40] RAJAHRAM S S, HARVEY T J, WOOD R J K. Erosion-Corrosion Resistance of Engineering Materials in Various Test Conditions[J]. Wear, 2009, 267(1—4): 244—254.
- [41] GROLET J L, BONIS M R. Prediction of the Risks of CO₂ Corrosion in Oil and Gas Wells[J]. Spe Production Engineering, 2013, 6(4): 449—453.
- [42] 郑玉贵, 姚治铭, 张玉生, 等. 冲刷与腐蚀的交互作用与耐冲刷腐蚀合金设计[J]. 金属学报, 2000, 36(1): 51—54.
- [43] 张昆. 油气管道冲刷腐蚀与防护对策研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2013.
- [44] MALAURY B S. Generalization of API RP 14E for Erosive Service in Multiphase Production[C]// Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Houston, 1999: 201—210.
- [45] 王德国, 何仁洋, 董山英. 长距离油、气、水混输管道内壁流动腐蚀的研究进展[J]. 天然气与石油, 2002, 20(4): 24—29.
- [46] 刘静, 钱林茂, 董汉山. 碳化、氮化与碳氮化对 316LVM 不锈钢微动腐蚀磨损性能的影响[J]. 摩擦学报, 2009, 29(5): 399—404.
- [47] LOPEZ D, ALONSO N, PAULO A. Effect of Nitrogen on the Corrosion-Erosion Synergism in an Austenitic Stainless Steel[J]. Tribology International, 2011, 44(5): 610—616.
- [48] LIU X, OKAFOR P C, ZHENG Y G. The Inhibition of CO₂ Corrosion of N80 Mild Steel in Single Liquid Phase and Liquid/Particle Two-phase Flow by Aminoethyl Imidazole Derivatives[J]. Corrosion Science, 2009, 51(4): 744—751.
- [49] JIANG X, ZHENG Y G, KE W. Effect of Flow Velocity and Entrained Sand on Inhibition Performances of Two Inhibitors for CO₂ Corrosion of N80 Steel in 3% NaCl Solution[J]. Corrosion Science, 2005, 47(11): 2636—2658.
- [50] CANTO C, BROWN B, NESIC S. Integrity of Corrosion Inhibitor Films in Multiphase Flow[C]// NACE International, Corrosion 2011. Houston, 2011.
- [51] MCMAHON A, HARRIS L, MARTIN J. Effects of Sand and Interfacial Adsorption Loss on Corrosion Inhibitor Efficiency[C]// Corrosion 2005. NACE International, Houston, 2005.
- [52] ZENG L, ZHANG G A, GUO X P, et al. Inhibition Effect of Thioureidoimidazole Inhibitor for the Flow Accelerated Corrosion of an Elbow[J]. Corrosion Science, 2015, 90(1): 202—215.
- [53] NEVILLE A, WANG C. Erosion-Corrosion of Engineering Steels-can it be Managed by Use of Chemicals[J]. Wear, 2009, 267(11): 2018—2026.