

环境试验与评价

管流式冲刷腐蚀实验装置的设计及性能试验

王坤, 吴敬权, 邓培昌, 王贵, 胡杰珍

(广东海洋大学 机械与动力工程学院, 广东 湛江 524088)

摘要: 研究腐蚀因素对管道内壁腐蚀机理与腐蚀行为的影响, 为加速管道内壁腐蚀, 自主设计一种管流式冲刷腐蚀实验装置。该装置属于机电一体化产品, 包括总体结构设计、控制系统硬件设计和软件设计, 其中控制系统 PLC 为中央处理器, 触摸屏为人机控制界面, 并对腐蚀因素温度和流速进行调控。另外, 对装置进行性能试验。结果显示, 温度的控制精度可达到 $-0.5\sim+0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, 流速的控制精度可达到 $\pm 0.01\text{ m/s}$ 。该装置运行可靠, 测试范围较广, 装置性能较好, 为管道冲刷腐蚀研究奠定实验基础。

关键词: 冲刷腐蚀; 结构设计; 控制系统; 腐蚀机理

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.12.009

中图分类号: TG172.5 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2019)12-0056-05

Design and Performance Test of Pipeline Erosion-corrosion Apparatus

WANG Kun, WU Jing-quan, DENG Pei-chang, WANG Gui, HU Jie-zhen

(College of Mechanical and Power Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

ABSTRACT: Objective To accelerate the corrosion of pipeline inner wall, study the influence of corrosion factors on corrosion mechanism and corrosion behavior of pipeline inner wall, and design a pipeline erosion-corrosion apparatus independently.

Methods The apparatus belongs to mechatronics product which includes the overall structure design as well as hardware design and software design of the control system. PLC was used as the central processing unit and touch screen was used as the man-machine interface in the control system. The temperature and flow rate of corrosion factors were regulated. In addition, the performance of the device was tested. **Results** The control precision of temperature could be -0.5°C to $+0.8^{\circ}\text{C}$; and the control precision of flow velocity could reach $\pm 0.01\text{ m/s}$. **Conclusion** The device has reliable operation, wide testing range and good performance, which establishes the experimental foundation for studying the erosion-corrosion of pipeline.

KEY WORDS: erosion-corrosion; structure design; control system; corrosion mechanism

随着我国海洋工程装备的创新发展, 以及“建设海洋强国”等政策的实施, 管道的利用率大幅度增加。管道腐蚀问题长期存在于国计民生的各个方面, 尤其对海洋工程装备造成巨大损失。我国海域达 300 万 km^2 , 开发海洋资源, 发展沿海经济, 对我国海洋经济发展具有重要意义^[1]。管道作为开发海洋资源的重要运输工具, 广泛应用于海底石油和深海矿产的开

采, 船舶和海洋平台的建设等。近年来, 海洋管道在单相流、两相流以及多相流冲刷腐蚀介质的协同作用下, 致使管道的腐蚀速率加快, 对大型海洋工程装备造成巨大危害。因此, 研究管道的冲刷腐蚀意义重大。

目前, 冲刷腐蚀实验装置分为旋转式、喷射式和管流式^[2]。旋转式冲刷腐蚀实验装置通过把金属试样挂在旋转的圆盘上, 分析金属样品在流动溶液中的腐

收稿日期: 2019-06-26; 修订日期: 2019-09-03

基金项目: 国家青年科学基金项目 (51801033); 湛江市科技计划项目 (2015A06003); 广东大学生科技创新培育专项资金项目 (pdjh2019b0231)

作者简介: 王坤 (1990—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋装备及材料腐蚀与防护。

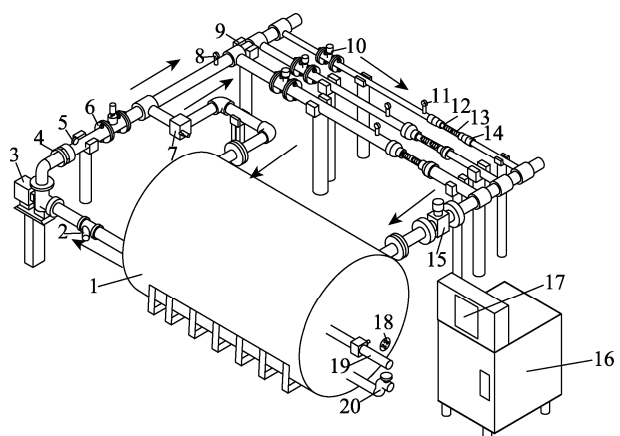
通讯作者: 王贵 (1963—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向金属材料腐蚀与防护。

蚀。该类装置应用较广,设计简单,成本较低,但容器内液体流动状态不稳定,金属样品的轴向和周向受力与实际腐蚀环境相差较大^[3-4]。喷射式冲刷腐蚀实验装置通过液体的高速流动,连续喷射在金属样品表面,实验周期短,但该装置的控制精确度较差,金属样品尺寸较小^[5-7]。管流式冲刷腐蚀实验装置通过将金属样品固定在管道中,利用流动的腐蚀溶液研究金属样品表面的腐蚀^[8-9]。该装置能很好地模拟管道冲刷的实际工况,实验数据可靠,应用价值较高,但实验周期较长,控制系统较为复杂,在国内外管流式冲刷腐蚀实验装置都比较稀缺。基于上述情况,文中设计了管流式冲刷腐蚀实验装置,可对直径 40~100 mm 的测试管进行试验,具有调控温度和流速,并及时保存数据,在线修改环境参数等功能。

1 装置设计

1.1 结构及工作原理

管流式冲刷腐蚀实验装置总体结构如图 1 所示,箭头为水流走向。该装置能够同时对直管段、弯管段和焊接管段进行加速腐蚀实验,测试管直径在 40~100 mm 之间可调。冲刷腐蚀实验装置包括水箱进口管、水箱出水口,水泵进水口,主管路,测试分支管路、回水管路。主管路依次设有过滤器、水泵、单向阀、压力表、温度传感器;测试分支管路设有 DN100、DN80、DN50 三条管段,每条管段依次设有电动调节阀、压力表、异径接头、测试管、超声波流量计;回水管路设有两条,一条通过溢流阀回到水箱,另一条通过背压阀回流到水箱。考虑工作人员操作方便配有控制箱,并设计了人机界面对控制系统进行控制。



1.水箱 2.过滤器 3.水泵 4.单向阀 5.压力表 6.电动调节阀 7.溢流阀 8.温度传感器 9.支架 10.电动调节阀 11.压力表 12.测试管 13.流量传感器 14.异径接头 15.背压阀 16.控制箱 17.触摸屏 18.加热管 19.进水管 20.出水管

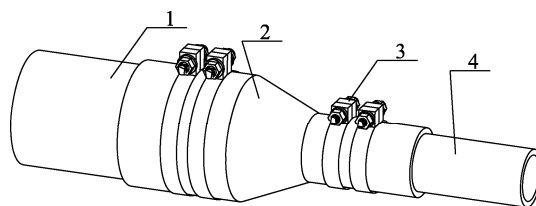
图 1 管流式冲刷腐蚀实验装置结构

该装置的工作过程是:首先将海水注入水箱到一

定位置后,控制加热器进行加热,定时加热一段时间后,电磁闸阀打开,并选择打开 DN100 或 DN80 或 DN50 的电磁调速阀门。然后离心泵运转,离心泵将一定量的海水送达到测试管段后,经过背压阀流回水箱,离心泵将多余液体经过溢流阀流回水箱。控制箱里安置有可编程控制器(PLC)以及相关控制模块,触摸屏设有操作界面,操作者通过点动触摸屏相关按钮控制离心泵、电磁闸阀、电磁调速阀等启动,进而液体沿着管路循环工作。

1.2 异径管连接方式

根据设计要求,管段测试范围在 40~100 mm 之间,并且定期更换测试管。测试管属于金属材料,而金属与金属在电解质溶液中会发生氧化还原反应,进而发生电偶腐蚀^[10],故采用硅胶软管异径接头。硅胶软管异径接头易于加工制造,成本较低,安装方便,通过双卡箍紧固连接在固定管段上,避免出现泄漏现象。测试管的连接如图 2 所示。



1.固定管段 2.异径接头 3.卡箍 4.测试管段

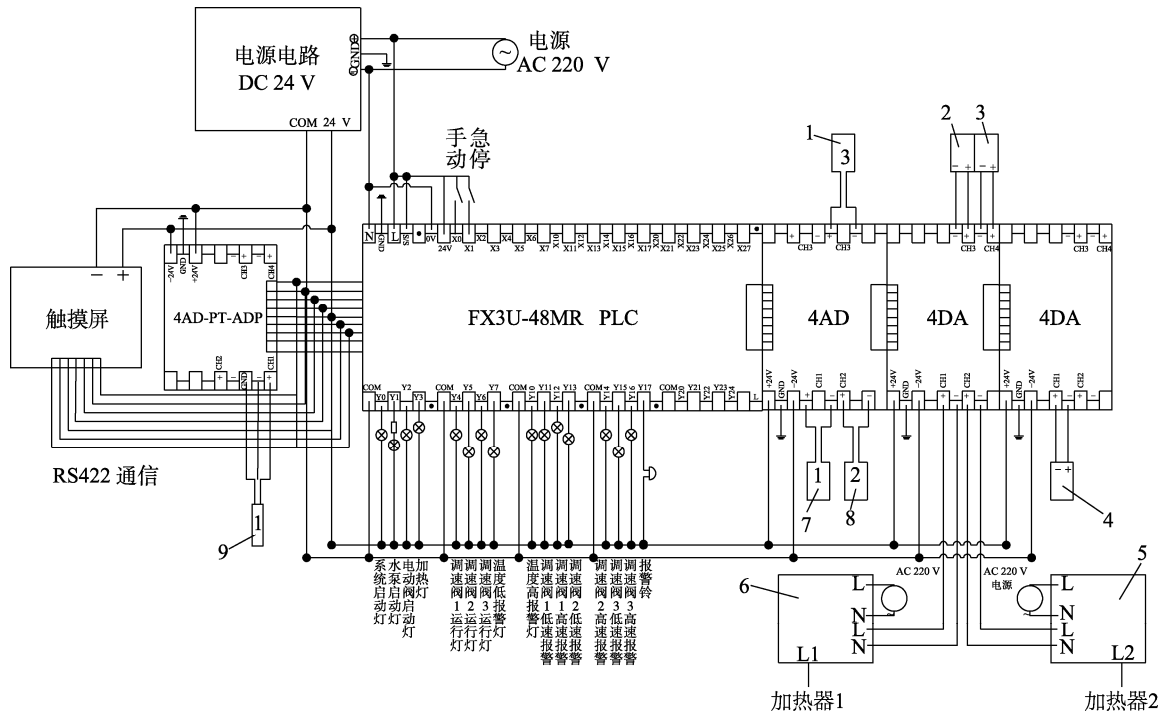
图 2 测试管连接示意

2 控制系统设计

该控制系统包括硬件和软件两部分:硬件主要对温度控制系统、流速控制系统以及报警系统等进行设计;软件主要是对控制系统的动作进行编程,并制作人机界面监控系统的运行状态。PLC 通过 RS422 电缆与触摸屏连接,利用触摸屏的人机界面控制、查看、存储数据。软件部分采用 GX-WORK2 软件对控制系统的程序进行编写,采用 EasyBuilder Pro 软件对人机界面进行制作。控制系统的电路接线如图 3 所示。

2.1 硬件设计

硬件设计主要对温度控制系统、流速控制系统以及报警系统等进行设计,由控制箱、离心泵、电磁阀、传感器、加热管、触摸屏等组成。控制箱是整个控制系统的核心,包括可编程控制器(PLC)、空气开关、4AD 模块、4DA 模块、铂电阻输入模块、可控硅调压器、指示灯和按钮、24 V 电源等组成完整控制系统,集设备操作、数据处理为一体,操作方便,控制精度相对较高。为适应海洋环境,控制箱采用 316 不锈钢制造,保障外露操作设备元件的使用寿命。



1. 超声波流量计I 2. 调速阀I 3. 调速阀II 4. 调速阀III 5. 可控硅调压器I 6. 可控硅调压器II
7. 超声波流量计II 8. 超声波流量计III 9. 温度传感器

图3 控制系统电路接线

实验装置的控制过程是各传感器经过 A/D 转换器，由模拟信号转换为数字信号被 PLC 识别，并经过 PLC 内部计算，输出数字信号。数字信号再经过 D/A 转换器，输出电流或电压传送给执行器。当 PLC 接收到错误信号后会发出报警响应，并通过指示灯和蜂鸣器暗示操作人员。

2.1.1 温度控制系统

温度控制系统包括温度传感器、铂电阻输入模块、PLC、4DA、可控硅调压器、加热管等，如图 4 所示。温度控制过程为：温度传感器检测的模拟信号经 4DA 转化为数字信号传给 PLC，PLC 经过内部 PID 计算，输出的数字信号经 4AD 转换为模拟信号，可控硅调压器接收到模拟信号，输出给加热器，进而控制加热器的连续工作状态。当检测温度低于 58℃时，PLC 输出最大电压控制加热器的工作状态。当检测温度高于 62℃时，PLC 输出 0V 电压控制加热器的工作状态。当检测温度介于 58~62℃之间时，采用 PID 控制算法进行调控温度。

2.1.2 流速控制系统

流速控制系统包括超声波流量计、FX3U-4AD 模块、PLC、FX3U-4DA 模块、电动调速阀等。流速控制过程为：超声波流量计检测到被测信号，存入 FX3U-4AD 转换器，并将被测信号转换为数字信号。数字信号与设定参数作对比得出偏差，偏差信号经过 PLC 中 PID 运算后，输出数字信号。FX3U-4DA 将数

字信号转换为模拟信号，直接控制电动调速阀的开口角度，进而达到控制流速的目的。流速控制系统结构如图 5 所示。

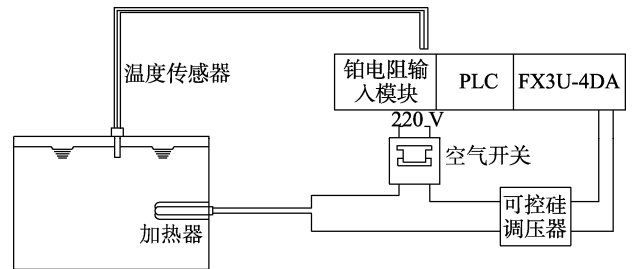


图4 温度控制系统结构

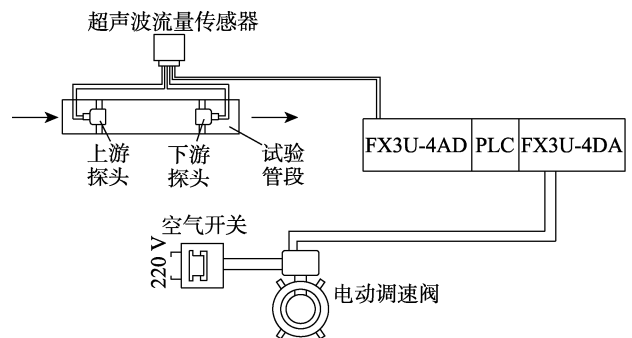


图5 流速控制系统结构

2.2 软件设计

软件设计主要包括控制系统 PLC 程序的设计和

人机界面的制作。PLC 程序主要采用 GX-WORK2 软件进行编写。GX-WORK2 软件通过 FX-USB-AW ICO 电缆将程序导入 PLC 中。人机界面采用威纶通触摸屏 MT8103iE, 使用 EasyBuilder Pro 软件进行触摸屏控制界面的编辑。EasyBuilder Pro 软件通过双绞线将人机界面程序导入触摸屏中。

2.2.1 PLC 程序设计

PLC 程序采用 GX-WORK2 软件进行编写, 主要功能包括控制水泵、电动闸阀的启停, 温度、流速控制程序, 以及系统报警。对应的 PLC 网络程序包括: 系统初始化、水泵电机运行、温度模数转换、流速的模数转换、PID 程序、4DA 转换程序、指示灯和报警程序。触摸屏根据辅助继电器的启停控制系统运行, 节省输入端子的数量。温度控制系统比较指令梯形图

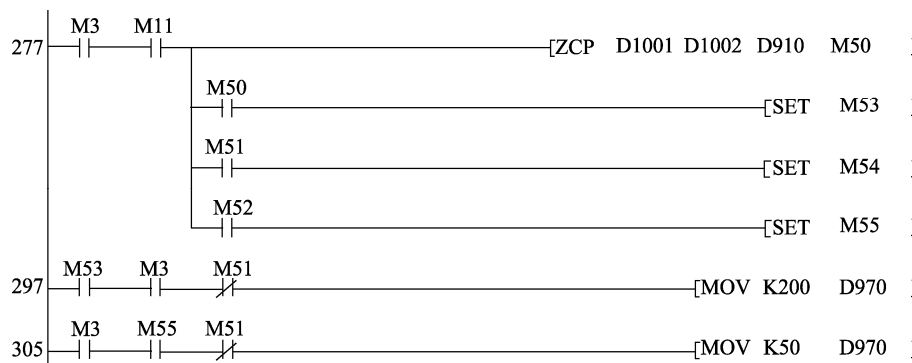


图 6 温度控制系统比较指令梯形图

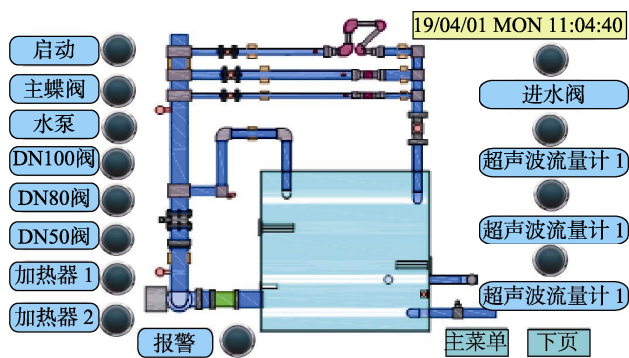


图 7 状态监控画面

3 装置样机制作与实验

3.1 装置样机

为了验证自主设计的管流式冲刷腐蚀实验装置的性能, 试制了装置物理样机, 并对控制系统和零部件进行调试。由于管段存在高度差, 因此各管段采用螺杆支架支撑固定。该试验在室外进行调试, 打开空气开关, 装置运行。温度采样时间为 3 s, 流速

如图 6 所示。

2.2.2 触摸屏软件设计

触摸屏程序采用 EasyBuilder Pro 软件进行编写, 主要界面包括系统设置、温度查询、DN100 查询、DN80 查询、DN50 查询、参数监测、状态监控、报警系统。系统设置主要对系统启动、停止、手动、急停等选择设置。温度查询、DN100 查询、DN80 查询、DN50 查询主要是显示参数, 以及实时记录并保存温度或流速数据。参数监测主要包括显示温度的检测值和设定值, 显示 DN100 管、DN80 管和 DN50 管的流速检测值和设定值。状态监控主要监视外围设备是否正常工作, 并及时报警。报警系统主要包括低温或高温报警、各支管低速或高速报警, 以及实时记录报警数据。状态监控画面如图 7 所示。

采样时间为 6 s, 采样数据通过触摸屏的 USB 端口存储在 U 盘中。运行一段时间后, 关闭电源装置停止运行。

3.2 实验结果分析

温度测试结果如图 8 所示。温度由常温加热到 60 °C 时, 控制系统以恒定的电压输出, 存在加热过程, 温度曲线缓慢上升。当温度接近 60 °C 时, 温度的上升斜率高于下降斜率, 在上限温度 (61 °C) 和下限温度 (59 °C) 之间波动。这是由于温度控制系统未设置冷却系统, 当温度接近设定温度 60 °C 时, 温度的加热速度大于自然冷却速度。流速测试结果如图 9 所示。当流速未达到设定值 2.5 m/s 时, 由于电磁阀输入电流与流速一一对应, 在调速阀接收到模拟信号时, 能够快速作出反应, 因此电磁阀快速响应达到设定值并趋于稳定。由流速曲线可知, 当流速接近设定值时, 开启调速阀, 液体湍动能较大, 对电磁阀门有冲击作用, 出现超调现象。而后湍动能趋于稳定, 但流速过高, 流态为紊流, 因此流速达到设定值后存在轻微的波动。

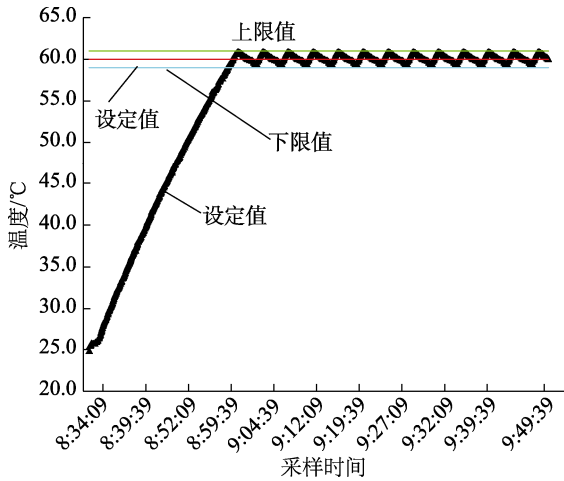


图8 温度测试曲线

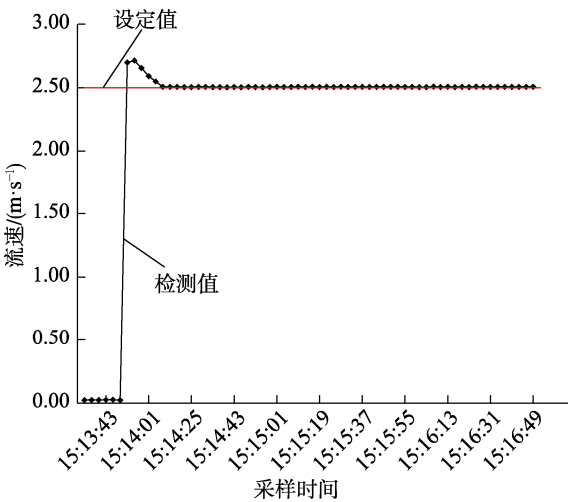


图9 流速测试曲线

4 装置性能分析

该装置选用 100ZX100-40 离心式海水泵, 额定流量为 27.8 L/s。故 DN100 分支管、DN80 分支管、DN50 分支管最高流速分别为:

$$v_1 = \frac{4Q_1}{\pi d_1^2} = 3.54 \text{ m/s}, \quad v_2 = \frac{4Q_2}{\pi d_2^2} = 5.73 \text{ m/s}, \quad v_3 = \frac{4Q_3}{\pi d_3^2} = 14.165 \text{ m/s}。$$

另外, 温度检测采用 PT100 铂电阻传感器, 其温度控制范围为-50~150 °C。采用超声波流量计检测流速, 其流速范围在 0~10 m/s 之间。人机界面监控系统采用威纶通触摸屏制作, 可以在线显示、远程传输和自动存储数据。测试管冲刷腐蚀实验后, 计算腐蚀质量损失率, 拍摄整体宏观形貌, 采用切割机对管样进行切割, 拍摄切割后宏观形貌, 并进行表面、截面 SEM 和 EDS 分析, 表面 EIS、MS 和 LSV 分析, 表面锈层 XRD 和 XPS 分析。装置性能指标见表 1。

表 1 装置性能指标

性能	参数
管段类型	可对直管段、焊接管段、弯管段进行试验
流体物质相态	可对单向流、固液两相流的物质进行冲刷腐蚀试验
测试管直径	可对直径 $\phi 40 \sim \phi 100$ mm 之间的测试管进行试验
测试管长度	根据超声波流量计的检测条件, 测试管的长度应大于 300 mm
流速	测试管 $\phi 50$ mm 流速范围 0~5 m/s, $\phi 80$ mm 流速范围 0~3 m/s, $\phi 100$ mm 流速范围 0~2 m/s
温度	根据传感器监测范围, 在常温至 60 °C 之间可控
控制精度	温度控制精度-0.5~+0.8 °C, 流速控制精度 ± 0.01 m/s

5 结论

基于南海高温、高湿、高盐的特殊环境, 自主设计了一种管流式冲刷腐蚀实验装置, 利用硅胶软管异径接头实现不同公称直径的测试管快速连接, 控制系统能对监测数据在线显示和自动存储。同时, 对温度控制系统和流速控制系统进行测试, 结果表明, 装置运行可靠, 性能较多, 温度的控制精度可达到 -0.5~+0.8 °C, 流速的控制精度可达到 ± 0.01 m/s, 能够满足装置设计要求, 具有重要的实际应用价值。

参考文献:

- [1] 王坤, 胡杰珍, 王贵, 等. 管流式冲刷腐蚀实验装置的研究进展[J]. 广东海洋大学学报, 2018, 38(3): 92-98.
- [2] 曾莉. 管道弯管段冲刷腐蚀机理与流体动力学特征[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [3] 胡育瑞. 特级双相不锈钢耐冲刷腐蚀性能的研究[D]. 福州: 福州大学, 2016.
- [4] 王春放. 动态模拟装置上流体对 Q235 碳钢腐蚀性行为研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
- [5] 程从前, 曹铁山, 王冬颖. 等. Cr13 不锈钢在盐酸溶液喷射冲刷作用下的表面腐蚀形貌表征[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2014, 34(5): 439-444.
- [6] BASUMATARY J, WOOD R J K. Different Methods of Measuring Synergy between Cavitation Erosion and Corrosion for Nickel Aluminium Bronze in 3.5% NaCl Solution[J]. Tribology International, 2017(8): 1-12.
- [7] ZHENG Z B, ZHENG Y G, SUN W H, et al. Effect of Applied Potential on Passivation and Erosion-corrosion of a Fe-based Amorphous Metallic Coating under Slurry Impingement[J]. Corrosion Science, 2014, (82): 115-124.
- [8] 王贝. 含 Cr 合金钢在含 CO₂ 湿气管道中的腐蚀及冲蚀机理研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.
- [9] 秦龙. 管流式液固两相流冲蚀实验装置的研发[D]. 西安: 西安石油大学, 2016.
- [10] 许立坤. 海洋工程的材料失效及防护[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.