

# 井下抽油泵吸入口附近腐蚀模拟 试验装置研制

高斐<sup>1</sup>, 楼一珊<sup>1</sup>, 吴琼<sup>2</sup>, 唐礼骅<sup>3</sup>, 闵江本<sup>1</sup>, 李贻浩<sup>1</sup>, 姜美婷<sup>1</sup>

1. 长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室; 长江大学石油工程学院, 武汉 434023
2. 中石化河南油田分公司勘探开发研究院, 河南南阳 473132
3. 中石化江苏油田分公司石油工程技术研究院, 江苏扬州 225008

**摘要** 油田井下抽油泵吸入口附近套管腐蚀穿孔现象比较普遍, 严重影响油田的稳产。为研究其腐蚀机制, 自行设计和制造了一种井下抽油泵吸入口附近动态腐蚀模拟试验装置。该装置采用单柱塞泵和与现场一致的油套管柱结构, 真实模拟了抽油泵间歇性的生产方式以及泵吸入口附近流体的流动状态, 实现了不同温度、CO<sub>2</sub>分压、流速等条件下腐蚀速率的测定及腐蚀行为的研究, 可为套管选材提供参考。试验结果表明, 抽油泵吸入口附近腐蚀介质的流速流态是造成该处套漏的主控因素, 并以CO<sub>2</sub>局部腐蚀为主, 与现场套损状况一致。

**关键词** 腐蚀; 抽油泵吸入口; 腐蚀速率

**中图分类号** TE983

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.36.007

## Development of Dynamic Simulation Test Device for the Corrosion Near Downhole Pump Suction Port

GAO Fei<sup>1</sup>, LOU Yishan<sup>1</sup>, WU Qiong<sup>2</sup>, TANG Lihua<sup>3</sup>, MIN Jiangben<sup>1</sup>, LI Yihao<sup>1</sup>, JIANG Meiting<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, MOE, Yangtze University; Department of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan 434023, China
2. Research Institute of Exploration and Development, Henan Oilfield Company, Sinopec, Nanyang 473132, Henan Province, China
3. Engineering and Technology Institute, Jiangsu Oilfield Company, Sinopec, Yangzhou 225008, Jiangsu Province, China

**Abstract** The corrosion of the casing near a downhole pump suction port is common in some domestic oilfields, and it has a serious impact on the stable production of the oilfield. In order to study the corrosion mechanism, we have designed and manufactured a dynamic simulation test device for the corrosion of the casing near the downhole pump suction port. The device consists of a single plunger pump and a tube and casing strings in line with the site structure to simulate the intermittent production mode of the pump as well as the fluid flow state near the pump inlet adequately, and the corrosion velocity measurement can be made and the corrosion behavior can be studied under different temperatures, CO<sub>2</sub> partial pressures, and velocities to provide important data for the casing materials. The test results show that the flow rate and flow pattern of the corrosive medium near the oil pump suction port are the main factors of casing-leakage, and CO<sub>2</sub> local corrosion is the main way, which is in accordance with the casing damage status.

**Keywords** corrosion; pump suction port; corrosion rate

收稿日期: 2013-07-09; 修回日期: 2013-08-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51274047)

作者简介: 高斐, 博士研究生, 研究方向为岩石力学与钻井工程, 电子信箱: fgat163@163.com; 楼一珊(通信作者), 教授, 研究方向为岩石力学与石油工程、钻完井, 电子信箱: louys2006@126.com

## 0 引言

腐蚀模拟试验装置是研究腐蚀机制及其影响因素的重要方法和手段。目前,动态腐蚀模拟试验装置大致有两类<sup>[1-14]</sup>:一类是管流式,如管道流动法,该类试验装置是模拟管道动态腐蚀的最好方法,不但试验参数容易控制,而且有良好的流体力学模型支持,缺点是造价和运转费用都很高,实验所需溶液量很大,试验周期长;另一类是旋转式,如旋转圆盘法、旋转圆柱体法,该类试验装置是利用试样或流体的旋转使试样与液相间产生相对运动,具有简单、价格低、测试用溶液量小、实验周期短等优点,其缺点主要是试样与液相流间的相对流速较低,而且流速的精确值很难确定。上述两类试验装置最主要的缺陷是内部都没有生产管柱结构,无法真实模拟井下抽油泵吸入口附近多相流体实际的流速、流态<sup>[15]</sup>、腐蚀气体等因素对套管腐蚀的影响,测定结果必然偏差较大,无法进行横纵向比较。因而有针对性地设计新型的、模拟现场工况的试验装置,研究泵吸入口附近套管的腐蚀状况非常必要。

在充分的国内外调研及吸收现有技术的基础上,综合考虑影响腐蚀的各个因素、井下抽油泵的生产工况及油管管柱结构,研制井下抽油泵吸入口附近动态腐蚀模拟试验装置,并进行试验应用。

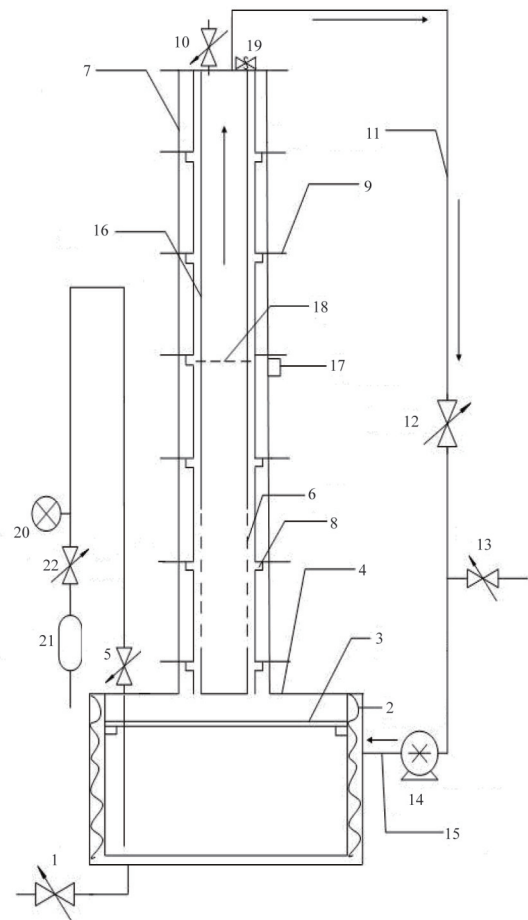
## 1 技术分析

动态腐蚀模拟试验装置的设计和制造要注重装置的实用性、合理性和科学性<sup>[7]</sup>。为了保证获得的试验数据具有最大程度上的有效性和可靠性,装置设计过程中主要考虑:①油水井套管处在井下高温高压、地层水和油气混合物的复杂环境中,并且长期受到流体的冲蚀作用,因此,试验装置应选择能承受高温高压及耐腐蚀的材料;②动态模拟,由于非泵等其他方法都不能模拟抽油泵的间歇式输送方式,为此选用有代表性的单柱塞柱塞泵,其活塞直径和冲程可选范围都较大,电机转速高,因此现场抽油泵的排量范围都能覆盖;③为能真实模拟油套环空和抽油泵吸入口附近流体的流动状态,在试验装置内设置与现场相同的生产管柱结构,并根据现场抽油泵生产动态特征和运行参数确定室内泵的排量;④腐蚀介质与试样间的相对运动方式至关重要。该试验装置将环形试样嵌入在设计的凹槽内,并保证试样的内表面与管道内表面平齐,尽可能实现研究试样在流体介质中仅受切向力的作用;⑤为了防止流体的扰动作用,在缓冲容器内设置合适的阻流隔板,使缓冲容器内流体在泵的输送作用下能消除漩涡,形成层流的流动状态,模拟地层流体进入井筒的方式;⑥高可靠、高稳定、易维修,满足高温高压环境下连续工作的要求。

### 1.1 装置结构

井下抽油泵吸入口附近腐蚀模拟试验装置由缓冲容器、柱塞式计量泵、筛管、油管、主立管、高压双层软管、连接法兰等组成,如图1所示。其中筛管和油管设置在主立管内,主立

管由若干立管单体叠加连接而成,每一立管单体上均设置有用于安装试样的试样槽。



1—排液阀;2—加热器;3—阻流隔板;4—缓冲容器;5—加气阀;  
6—筛管;7—主立管;8—试样槽;9—法兰;10—排气阀;  
11—高压双层软管;12—截止阀;13—加液阀;14—柱塞式计量泵;  
15—回液管;16—油管;17—观察窗;18—动液面;19—安全阀;  
20—压力表;21—气压装置;22—阀门

图1 井下抽油泵吸入口附近腐蚀模拟试验装置

Fig. 1 Simulation test device for the corrosion near downhole pump suction port

### 1.2 工作原理

工作时,将试样安放在试样槽中,打开加液阀并启动泵,向缓冲容器内注入反应介质,通过观察窗控制液面位置大致在筛管顶部,并保持该液位;然后向缓冲容器中通入高纯腐蚀性气体2h,之后升压到试验设计压力,升温至试验所需的温度。此时,液体从筛管向上运动,气体进入主立管内,在动液面上部形成分压。反应介质充满缓冲灌并经过筛管、油管、高压双层软管和截止阀进入柱塞式计量泵,形成工作循环。柱塞式计量泵循环工作,经过一段时间的工作后,可以观察筛管孔眼、油管、试样的腐蚀状况,并测定抽油泵吸入口处、液面和筛管以下等处的套管腐蚀速率。

### 1.3 性能特点

(1) 采用单柱塞泵模拟抽油泵间歇性生产方式, 真实模拟了油套环空及泵吸入口附近流体的流动状态; 通过改变泵排量可研究不同流速流态对套管腐蚀速率和状态的影响。

(2) 试样放置在聚四氟乙烯衬套槽内, 并保证试样的内表面与管道内表面平齐, 模拟了现场工况下流体流经试验试样表面时仅受切向力的作用, 同时又克服了现有设备中试样对流体流动的阻碍作用, 真实模拟了套管内腐蚀的状况。通过更换试样, 可以确定不同套管材料的耐腐蚀性及何种材料适合井下腐蚀环境。

(3) 主立管采用单个立管单体叠加而成, 通过调节立管单体的位置研究动液面以上、动液面附近、动液面以下、泵吸入口附近以及筛管以下等不同位置的腐蚀速率和腐蚀状况,

不仅便于横纵向比较, 而且克服了现有设备中1次试验只能测定1个位置的腐蚀情况。

(4) 温度和压力控制程度高, 可以评价相同排量下温度或腐蚀性气体分压对套管腐蚀的影响。

## 2 系统的可行性试验测试

为了检验新型动态腐蚀模拟试验装置的功能、性能及可靠性, 开展了模拟现场工况及腐蚀环境下的挂片腐蚀试验, 包括不同温度、CO<sub>2</sub>分压、日产量条件下的腐蚀试验。现场测得某油田油井日产量为15~30m<sup>3</sup>, CO<sub>2</sub>分压范围为0.1~0.2MPa, 套损位置温度范围为60~80℃。试验介质采用取自现场X7-14井的油层采出水, 水质检测数据如表1所示。腐蚀失重试验及挂片电镜扫描结果分别见表2和图2。

表1 X7-14井水质检测数据

Table 1 Water-quality testing data of Well X7-14

层位	pH值	离子指标/(mg·L <sup>-1</sup> )						总铁/ (mg·L <sup>-1</sup> )	总矿化度/ (mg·L <sup>-1</sup> )	水型
		Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>			
Ef1	6.0	12423.7	161.0	25.9	17335.8	1601.4	1684.1	90.0	33232.0	NaHCO <sub>3</sub>

表2 不同条件下套管的腐蚀速率

Table 2 Casing corrosion rate under different conditions

试验分组	温度/℃	CO <sub>2</sub> 分压/ MPa	日产量/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	套管 材质	时间/ d	腐蚀速率/(mm·a <sup>-1</sup> )				
						筛管以下	泵吸入口	动液面 以下	动液面 附近	动液面 以上
1	60	60	20	N80	7	0.3023	0.3641	0.3205	0.2080	0.1550
2	70	70	20	N80	7	0.3434	0.3776	0.3594	0.2234	0.1676
3	80	80	20	N80	7	0.3916	0.4321	0.4157	0.2376	0.1693
4	70	70	20	N80	7	0.2438	0.3292	0.2835	0.1994	0.1501
5	70	70	20	N80	7	0.3029	0.3616	0.3301	0.2106	0.1599
6	70	70	20	N80	7	0.3434	0.3776	0.3594	0.2234	0.1676
7	70	70	15	N80	7	0.2895	0.3555	0.3224	0.2201	0.1533
8	70	70	20	N80	7	0.3434	0.3776	0.3594	0.2234	0.1676
9	70	70	25	N80	7	0.4539	0.5231	0.4799	0.2927	0.1699
10	70	70	30	N80	7	0.4911	0.5618	0.5146	0.3457	0.1715

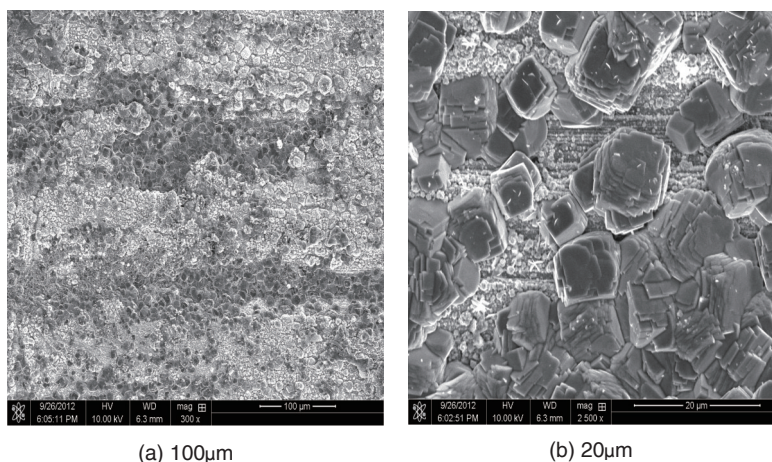


图2 泵吸入口挂片表面腐蚀形貌电镜扫描图(70℃, 0.2MPa, 20m<sup>3</sup>/d)

Fig. 2 Electron microscope scanning results of coupon surface corrosion morphology of pump inletting (70℃, 0.2MPa, 20m<sup>3</sup>/d)

从表2可以看出,泵吸入口挂片的腐蚀速率最大,筛管以下和动液面以下次之,动液面附近较小,动液面以上挂片的腐蚀速率最小,并且不同位置的挂片腐蚀速率随温度、CO<sub>2</sub>分压、日产液量(流速)的增大而增大,这与文献16~文献20的结果相符合。

从取出的泵吸入口附近挂片的电镜扫描结果(图2)可以看出,挂片表面具有明显的冲蚀形貌,腐蚀产物非常疏松,局部腐蚀产物膜被剥离基体表面,出现腐蚀坑,蚀坑主要属于开放式蚀坑<sup>[6]</sup>,这与现场取出的套管腐蚀形貌一致,以局部腐蚀为主。通过横向比较不同位置的试验条件和试验结果可以看出,造成井下抽油泵吸入口附近套漏的主要原因为该处腐蚀介质流速流态影响下的CO<sub>2</sub>局部腐蚀。

试验运行结果表明,这种动态腐蚀模拟试验装置完全满足室内模拟现场抽油泵吸入口附近套管腐蚀状况的要求,并且能作为研究现场流体动态腐蚀机制和评价腐蚀状态的有效手段。该试验装置结构合理,性能稳定,具有很强的模拟性、实用性和良好的应用前景。

### 3 结论

(1) 自行设计和制造了井下抽油泵吸入口附近动态腐蚀模拟试验装置,该装置采用单活塞柱塞泵和与现场一致的油套管柱结构,较好地解决了反应介质的间歇性流动方式,并真实模拟了泵吸入口附近流体的流动状态,实现了温度、分压、流速等影响因素下的腐蚀机制研究。

(2) 该试验装置结构合理,性能稳定,具有很强的模拟性、实用性,为室内研究腐蚀机制和制定防腐技术措施奠定了重要基础,并具有良好的应用前景。

### 参考文献(References)

- [1] 秦永妮,李春福,尤郭群. 高温高压下CO<sub>2</sub>对N80钢的腐蚀实验研究[J]. 全面腐蚀控制, 2008, 22(6): 19-21.  
Qin Yongni, Li Chunfu, You Guoqun. Total Corrosion Control, 2008, 22(6): 19-21.
- [2] 李珣,姜放,陈文梅,等. 高温高压下N80的CO<sub>2</sub>腐蚀[J]. 天然气与石油, 2006, 24(6): 21-23.  
Li Xun, Jiang Fang, Chen Wenmei, et al. Natural Gas and Oil, 2006, 24(6): 21-23.
- [3] 陈尧,白真权,熊惠. N80钢在高温高压下的抗CO<sub>2</sub>腐蚀性能[J]. 石油与天然气化工, 2006, 35(6): 470-472.  
Chen Yao, Bai Zhenquan, Xiong Hui. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2006, 35(6): 470-472.
- [4] 周建龙,李晓刚,程学群,等. 新型环烷酸腐蚀动态模拟试验装置的研制[J]. 材料保护, 2010, 43(2): 53-56.  
Zhou Jianlong, Li Xiaogang, Cheng Xuequn, et al. Materials Protection, 2010, 43(2): 53-56.
- [5] 梁明华,赵国仙,冯耀荣,等. KO110与3Cr110钢的CO<sub>2</sub>腐蚀实验对比研究[J]. 腐蚀与防护, 2005, 26(6): 240-243.  
Liang Minghua, Zhao Guoxian, Feng Yaorong, et al. Corrosion & Protection, 2005, 26(6): 240-243.
- [6] 郭少强,许立宁,常炜,等. 3Cr管线钢CO<sub>2</sub>腐蚀实验研究[J]. 金属学报, 2011, 47(8): 1067-1074.  
Guo Shaoqiang, Xu Lining, Chang Wei, et al. Acta Metallurgica Sinica, 2011, 47(8): 1067-1074.
- [7] 林玉珍,雍兴跃,徐瑞芬. 动态腐蚀模拟实验装置的研制[J]. 全面腐蚀控制, 1995, 9(2): 7-10.  
Lin Yuzhen, Yong Xingyue, Xu Ruifen. Total Corrosion Control, 1995, 9(2): 7-10.
- [8] 李珣,姜放,陈文梅,等. 井下油套管二氧化碳腐蚀[J]. 石油与天然气化工, 2006, 35(4): 300-303.  
Li Xun, Jiang Fang, Chen Wenmei, et al. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2006, 35(4): 300-303.
- [9] 郑玉贵,姚治铭,龙康,等. 液/固双相流冲刷腐蚀实验装置的研制及动态电化学测试[J]. 腐蚀科学与防护, 1993, 5(4): 286-290.  
Zheng Yugui, Yao Zhiming, Long Kang, et al. Corrosion Science and Protection Technology, 1993, 5(4): 286-290.
- [10] 郑玉贵,阎永贵,龙康,等. 双相流冲刷腐蚀激光多普勒测试装置及其校正[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1999, 19(5): 301-305.  
Zheng Yugui, Yan Yonggui, Long Kang, et al. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 1999, 19(5): 301-305.
- [11] 姜胜利,郑玉贵,乔岩欣,等. 高速喷射式冲刷腐蚀实验装置的研制及其实时动态电化学测试[J]. 腐蚀科学与防护, 2009, 21(5): 489-491.  
Jiang Shengli, Zheng Yugui, Qiao Yanxin, et al. Corrosion Science and Protection Technology, 2009, 21(5): 489-491.
- [12] 郑玉贵,姚治铭,柯伟. 冲刷腐蚀的研究近况[J]. 材料科学与工程, 1992, 10(3): 21-26.  
Zheng Yugui, Yao Zhiming, Ke Wei. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 1992, 10(3): 21-26.
- [13] Heitz E. Investigation of hydrodynamic test systems for the selection of high flow rate resistant materials[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 1979, 9(2): 243-253.
- [14] Dean S W. Velocity-accelerated corrosion testing and prediction[J]. Materials Performance, 1990, 29(9): 61-67.
- [15] Chen T Y, Moccari A A. Development of controlled hydrodynamic techniques for corrosion testing[J]. Corrosion, 1992, 48(3): 239-255.
- [16] 赵景茂,顾明广,左禹. 碳钢在二氧化碳溶液中腐蚀影响因素的研究[J]. 北京化工大学学报, 2005, 32(5): 71-74.  
Zhao Jingmao, Gu Mingguang, Zuo Yu. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2005, 32(5): 71-74.
- [17] 万里平,孟英峰,梁发书. 油气田开发中的二氧化碳腐蚀及影响因素[J]. 全面腐蚀控制, 2003, 17(2): 14-17.  
Wan Liping, Meng Yingfeng, Liang Fashu. Total Corrosion Control, 2003, 17(2): 14-17.
- [18] 龙凤乐,郑文军,陈长风,等. 温度、CO<sub>2</sub>分压、流速、pH值对X65管线钢CO<sub>2</sub>均匀腐蚀速率的影响规律[J]. 腐蚀与防护, 2005, 26(7): 290-293.  
Long Fengle, Zheng Wenjun, Chen Changfeng, et al. Corrosion & Protection, 2005, 26(7): 290-293.
- [19] 张学元,邸超,雷良才. 二氧化碳腐蚀与控制[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.  
Zhang Xueyuan, Di Chao, Lei Liangcai. Corrosion and control of carbon dioxide[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000.
- [20] 赵章明. 油气井腐蚀防护与材质选择指南[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011.  
Zhao Zhangming. Corrosion protection of oil and gas wells and material selection guide[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.

(责任编辑 王媛媛)