

# 油气田现场腐蚀检测装置设计与应用

朱培珂<sup>1</sup>, 邓金根<sup>1</sup>, 黄凯文<sup>2</sup>, 罗宇维<sup>3</sup>, 朱江林<sup>3</sup>, 吴山<sup>1</sup>

1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249
2. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 湛江 524000
3. 中海油田服务股份有限公司, 廊坊 065200

**摘要** 针对储层流体中高含CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>S腐蚀性气体的油气田,为了优化防腐选材,使用现场腐蚀检测装置开展实验。指出了现有腐蚀检测装置存在的不足,分析了以辅助评价材质现场腐蚀为目的的腐蚀检测装置应具备的结构特点,并设计加工了油气田现场腐蚀检测装置。在设计阶段对现场腐蚀检测装置进行了强度校核,设计了聚四氟乙烯材质的腐蚀挂片悬挂件及与之匹配的梯形横截面腐蚀挂片;在加工完成后进行了试压,确保能够满足现场的最高工作压力。针对该现场腐蚀检测装置提出了具体的应用方法。在米桑油田选择有代表性的生产井,在井口缓释剂投注点之前安装该腐蚀检测装置,进行现场腐蚀实验。设备能够满足现场要求,在规定的时间内完成了预定数量和不同材质的测试,实验结果表明,在含有0.2 MPa CO<sub>2</sub>储层中,油套管应选用马氏体不锈钢13Cr不锈钢材质,在含有1.3 MPa CO<sub>2</sub>及0.8 MPa H<sub>2</sub>S的储层中,超级13Cr不锈钢未发现局部腐蚀且腐蚀速率极低。

**关键词** 腐蚀挂片;材质优选;腐蚀检测;悬挂件;腐蚀速率

**中图分类号** TG172.3

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.19.011

## Design and Application of On-line Detecting Device for Corrosion in Oil & Gas Field

ZHU Peike<sup>1</sup>, DENG Jingen<sup>1</sup>, HUANG Kaiwen<sup>2</sup>, LUO Yuwei<sup>3</sup>, ZHU Jianglin<sup>3</sup>, WU Shan<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Petroleum Resource & Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
2. CNOOC (China) Co., Ltd., Zhanjiang Branch, Zhanjiang 524000, China
3. China Oilfield Services Limited, Langfang 065200, China

**Abstract** In optimizing the selection of corrosion-resistant materials and safe and economic casing and tubing materials for oil & gas fields with high content of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S, the oilfield coupon corrosion test plays an important role. The weakness of the current detecting devices of corrosion is shown and the structural features that a detecting device of corrosion should have for the assessment of the steel corrosion under oilfield conditions are analyzed. Based on these analyses, an on-line detecting device of corrosion is designed and manufactured. During the design phase, the strength of the on-line detecting device of corrosion is checked and a PTFE (polytetrafluoroethylene) holder and the coupons with the trapezoidal cross sectional shape are specially designed. After the device is manufactured, the pressure test is carried out to check the device for the maximum working pressure and the specific operation method. The corrosion detecting devices are installed in wells of the Missan oilfield. The device is in the wellhead and before the injection point of the corrosion inhibitor and can meet the requirement of the oilfield. The oilfield test covers the scheduled amount for different materials of coupons during 3 months. The results show that 13Cr martensitic stainless steel can work under the condition of 0.2 MPa CO<sub>2</sub> and under the condition of 1.3 MPa CO<sub>2</sub>, 0.8 MPa H<sub>2</sub>S, the 13Cr super-martensitic stainless steel shows no local

收稿日期:2014-01-20;修回日期:2014-04-26

基金项目:米桑油田油套管防腐研究项目

作者简介:朱培珂,博士研究生,研究方向为油套管的腐蚀与防护,电子信箱:zhupeik@163.com

引用格式:朱培珂,邓金根,黄凯文,等.油气田现场腐蚀检测装置设计与应用[J].科技导报,2014,32(19):68-72.

corrosion with a very low corrosion rate.

**Keywords** corrosion coupon; optimization of material selection; detecting of corrosion; holder; corrosion rate

针对储层含有  $\text{CO}_2$  和  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  共存的工况, 优选防腐管材需要了解系统的腐蚀因素, 开展现场实验或室内模拟腐蚀实验, 为选择合适材质的油气田生产管柱提供参考<sup>[1]</sup>。材质优选的腐蚀实验分为两类: 1) 根据储层温度<sup>[2]</sup>、 $\text{CO}_2$  分压、 $\text{H}_2\text{S}$  分压<sup>[3]</sup>、地层水离子组分和流速<sup>[4]</sup>开展的室内模拟实验; 2) 现场实验, 该类实验对于评价材质更有参考价值, 同时能够矫正室内模拟实验结果。

本研究面临的主要问题是 Missan 油田 A 和 M 两个储层的生产井优选防腐管材, 其中 A 储层仅含有腐蚀性气体  $\text{CO}_2$ , 最高分压 0.2 MPa; M 储层含有最高分压 1.3 MPa 的  $\text{CO}_2$  和 0.8 MPa 的  $\text{H}_2\text{S}$ 。目前因腐蚀性流体对油套管腐蚀速率在理论研究和实际应用情况偏差较大, 或者防腐级别过高, 增加开发成本, 或者防腐级别过低, 达不到防腐效果。因此开展现场腐蚀实验, 能够为合理选择油套管材质提供重要参考依据。

为了较全面和准确地检测现场的腐蚀情况, 国内外普遍采用悬挂腐蚀挂片的方法<sup>[5,6]</sup>。腐蚀挂片是片状金属块, 材质可以与主工艺管线相同, 也可以是其他需要评价的材质。腐蚀挂片根据需要设计加工, 图 1 所示为 50 mm×10 mm×3 mm、一端加工有孔的片状金属块, 其中圆孔的作用是通过螺栓固定腐蚀挂片。



图 1 50 mm×10 mm×3 mm 条状腐蚀挂片  
Fig. 1 50 mm×10 mm×3 mm coupon

通过调研目前用于现场腐蚀检测的典型装置, 分析了这些装置的结构特点, 认为现有的腐蚀检测装置不能满足本研究开展现场防腐实验的要求, 有必要设计并加工新的油气田现场腐蚀检测装置, 对其进行试压, 确保能够满足现场要求。同时在目标油气田, 选择有代表性的油井安装设备, 完成预定的现场实验, 从实验角度分析适用于现场油套管的材质。

## 1 现有装置技术分析

目前国内外的腐蚀挂片悬挂装置主要包括螺纹连接悬挂件、法兰悬挂件、带压拆卸式悬挂件和可伸缩式悬挂件<sup>[7]</sup>。

### 1.1 螺纹连接悬挂件

螺纹连接悬挂件的使用需要借助在主工艺管线上开孔并焊接的承压底座, 采用螺纹连接的形式将悬挂件固定于承压底座上, 而腐蚀挂片借助螺栓固定在悬挂件的底部。采用螺纹连接悬挂件安装腐蚀挂片不能控制挂片安装的朝向。使用螺纹连接悬挂件在安装、拆卸腐蚀挂片时需要管线停输

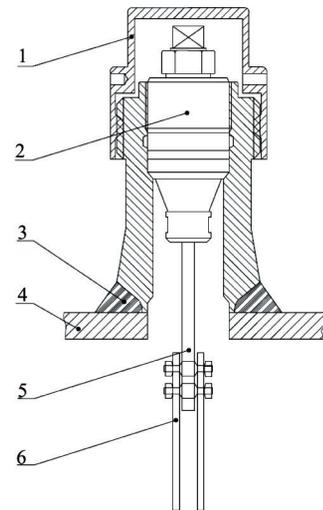
泄压, 适用场合相对较少。

### 1.2 法兰悬挂件

法兰悬挂件同样要求在主工艺管线上预装承压底座, 与螺纹连接悬挂件的区别在于法兰悬挂件与承压底座之间采用法兰连接。使用法兰悬挂件固定防腐挂片能够控制腐蚀挂片安装的朝向, 但在安装、拆卸腐蚀挂片时同样需要管线停输泄压。

### 1.3 带压拆装式悬挂件

带压拆装式悬挂件能够在管道运行时拆卸或安装腐蚀挂片, 不影响管道正常运行, 因此应用较为广泛。带压拆装式悬挂件(图 2)由保护罩、旋塞式紧固件、高压承载底座、腐蚀挂片支架等部分组成。打开保护罩, 借助一套类似带压开孔的工具, 通过与旋塞式紧固件的配合能够实现主工艺管线不停输的情况下安装、拆卸腐蚀挂片, 管道内流体不会泄漏。



1—保护罩; 2—连接紧固件; 3—承载底座;  
4—主工艺管线; 5—连接杆; 6—腐蚀挂片

图 2 带压拆卸式悬挂件

Fig. 2 Demountable holder under pressure

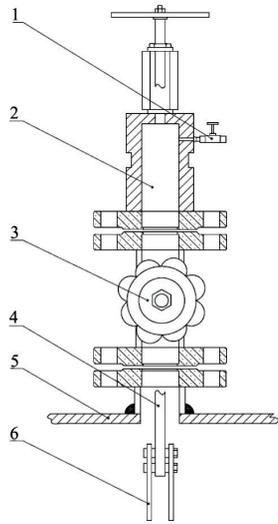
### 1.4 可伸缩式悬挂件

可伸缩式悬挂件(图 3)借助承压底座固定在主工艺管线上, 包括球阀、挂片仓、泄压阀、密封螺丝和安全闸板等部件。

如图 3 所示, 具体的操作步骤为:

- 1) 将该悬挂件安装在主工艺管线 5 的承压底座上;
- 2) 关闭球阀 3;
- 3) 将腐蚀挂片 6 悬挂在支架 4 上, 将挂片连同挂片架放入挂片仓 2 中;
- 4) 关闭泄压阀 1;
- 5) 打开球阀 3, 将装有腐蚀挂片的支架送入主工艺管线上, 开始实验;

- 6) 实验结束后,将挂片支架末端提升到挂片仓2中;
- 7) 关闭球阀3,打开泄压阀1,将挂片仓2中的液体放出;
- 8) 打开挂片仓2,取出腐蚀挂片。



1—泄压阀;2—挂片仓;3—球阀;  
4—支架;5—主工艺管线;6—腐蚀挂片

图3 可伸缩式悬挂件

Fig. 3 Retractable holder under pressure

可伸缩式悬挂件的优点包括:

- 1) 能够借助自身的球阀、密封装置、泄压阀等部件实现带压安装、拆卸腐蚀挂片;
- 2) 可调节腐蚀挂片在管道内的朝向。

在分析上述腐蚀挂片测试装置结构特点及使用方法基础上,结合本研究中现场实验的目的,认为上述现有的腐蚀挂片悬挂装置普遍存在以下缺点:

- 1) 需要在主工艺管线上开孔并安装承压底座,增大现场作业量;
- 2) 需要其他复杂工具辅助才能完成挂片的安装和拆卸;
- 3) 明显改变了主工艺管内径,对管道内流体的流速和流态影响较大;
- 4) 单次装夹腐蚀挂片数量较少,无法装夹多个平行试样,难以完成对多种材质在较长周期的实验评价;
- 5) 腐蚀挂片和流体的接触形式与油井管实际接触腐蚀介质的形式有显著区别。

为了完成以辅助评价材质现场腐蚀为目的的现场实验,有必要设计一种操作简单、安全可靠,在安装、拆卸挂片时不影响管道正常输送流体,对管道内流体的流速、流态影响较小且腐蚀挂片和流体接触形式与管道实际接触腐蚀介质形式相同的腐蚀检测装置。

## 2 现场腐蚀检测装置的设计

### 2.1 设计目的及用途

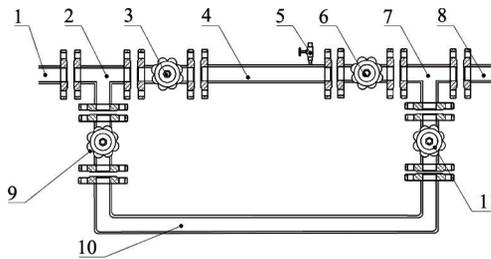
设计装置的目的是通过检测管道输送流体对挂片的腐

蚀,分析井下腐蚀状况,为油气开采中完井管柱的设计提供参考依据。

考虑井下工况复杂,为了防止挂片悬挂件在井筒内失效,造成井底落物,影响油气井正常生产作业,应在井口附近、缓释剂投注点之前进行测试,能够检测井筒内流体的实际腐蚀情况,同时,记录测试点的温度、压力和流速等。设计装置若安装在采油树附近的地面集输管线上,管线内的温度、压力和流态等与井下存在明显差异,其测试结果不能直接应用于井下管柱。但井口集输管线中原油及携带地层水所含的化学组分与井下一致,在明确井口处温度、压力、管线尺寸和单井产液量之后能够分析集输管线内流体的流速和流态,结合相应条件下的室内实验所得规律,能够辅助分析井下管柱的腐蚀状况。

### 2.2 现场腐蚀检测装置的结构特征

结合本研究的目的,设计了现场腐蚀检测装置(图4),其主要部件为1根长100 cm的实验短接(图4中部件4)。实验短接包括短接主体、悬挂件底座、法兰接头、腐蚀挂片悬挂件和梯形横截面腐蚀挂片。



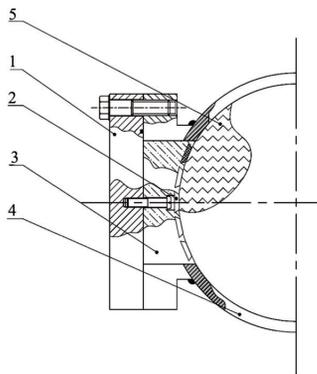
1—来流管线;2—三通接头 1;3—球阀 1;4—实验短接;  
5—泄压阀;6—球阀 2;7—三通接头 2;8—去流管线;  
9—球阀 3;10—旁通管;11—球阀 4

图4 现场腐蚀检测装置

Fig. 4 Installation of on-line detecting device of corrosion

为防止腐蚀挂片与短接主体或其他金属材料接触,实验短接中的腐蚀挂片悬挂件采用具有绝缘特性的聚四氟乙烯材料加工。

实验短接通过短接主体两端的法兰接头与现场管线连接,短接主体是与现场管线相同的圆形管道,悬挂件底座与短接主体外端面连接,且开设贯穿悬挂件底座和短接主体管壁的方形通孔,腐蚀挂片悬挂件的横截面为与该方形通孔相匹配的方形,且置入该方形通孔中,腐蚀挂片悬挂件的固定部件与悬挂件底座连接,腐蚀挂片嵌入悬挂件的弧形端面且腐蚀挂片的待测试表面裸露于该弧形端面,腐蚀挂片的待测试表面、悬挂件的弧形端面、短接主体的管壁内表面共同形成一近似圆柱面(图5)。每个腐蚀挂片悬挂件可装夹5个挂片,每个实验短接设计有4组共8个左右对称的腐蚀挂片悬挂件,因此每个实验短接可装夹40个挂片。



1—盖板;2—梯形横截面腐蚀挂片;3—悬挂件;  
4—主工艺管线;5—管线内输送的流体

图5 实验短接工作状态示意

Fig. 5 Schematic diagram of joint in working state

其中腐蚀挂片采用梯形横截面设计(图6),尺寸与图5所示的挂片悬挂件的梯形截面槽相匹配。测试过程中,该挂片嵌入腐蚀挂片悬挂件,凭借自身与悬挂件挂片槽相匹配的梯形截面设计实现牢固装夹,无需加工螺孔,减小对实验结果分析的影响。梯形横截面腐蚀挂片只有上底面一个表面与腐蚀介质接触,这与油井管实际接触腐蚀介质的形式相同。

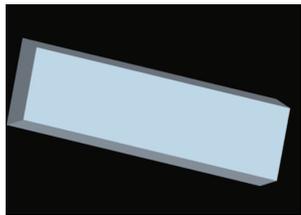


图6 梯形横截面腐蚀挂片

Fig. 6 Coupon with trapezoidal cross sectional shape

现场腐蚀检测装置中实验短接为主要部件,使用需要辅以阀门(图4中的3、6、9和11)、三通接头(图4中的2和7)及旁通管(图4中10)。在安装和拆卸腐蚀挂片时,关闭三通阀3和6,打开三通阀9和11,使管道内流体从旁通管流过,用泄压阀5排出实验短接4内的液体;待安装腐蚀挂片后,打开三通阀3和6,关闭三通阀9和11,使流体从实验短接4流过,与腐蚀挂片接触,开始正常实验。

### 2.3 现场腐蚀检测装置的强度校核

重点对腐蚀挂片悬挂件的安装端口进行强度校核,端口横截面为70 mm×80 mm的矩形,端盖采用12支A2-70的M10×45螺栓连接。

按照GB/T 3098.6—2000<sup>[8]</sup>的要求进行强度校核。螺栓标记(GB/T 3098.6—2000):A2-70,奥氏体钢、冷加工、最小抗拉强度为700 N/mm<sup>2</sup>(700 MPa);M10×45(GB/T 5783 M10×45)<sup>[9]</sup>。螺距 $P=1.5$  mm;小径 $d_1=8.376$  mm<sup>[10]</sup>。

设计时,首先根据连接的受力情况,计算螺栓所承受的总工作拉力 $F_0$ :

$$F_0 = PS = 22400 \text{ N}$$

$S$ 为受力面积,mm<sup>2</sup>;则单个螺栓所承受的工作拉力 $F$ 为

$$F = \frac{F_0}{n} = 1866.67 \text{ N}$$

再针对连接的具体工作要求,即保证密封性,选取残余预紧力 $F_1$ ,则

$$F_1 = 1.8F = 3360 \text{ N}$$

计算单个螺栓承受的总拉力 $F_2$ :

$$F_2 = F + F_1 = 5226.67 \text{ N}$$

考虑到螺栓在总拉力 $F_2$ 的作用下可能需要补充拧紧,故将总拉力增加30%,以考虑扭转切应力的影响。因此螺栓危险截面的拉伸强度条件为<sup>[11]</sup>

$$\sigma = \frac{1.3F_2}{\frac{\pi}{4}d_1^2} \leq [\sigma]$$

$$\sigma = 123.3 \text{ MPa}$$

$$[\sigma] = 700 \text{ MPa}$$

$$\sigma \leq [\sigma]$$

$d_1$ 为螺栓危险截面的直径,以螺纹小径作为危险截面的计算直径,mm; $[\sigma]$ 为螺栓材料的许用拉应力,MPa; $\sigma$ 为工作状态下螺栓危险截面的拉伸应力,MPa。

经校核,12支A2-70的M10×45螺栓能够满足最高工作压力下的拉伸强度条件。

### 2.4 水压实验

根据GB/T 13927—2008<sup>[12]</sup>标准要求,对腐蚀挂片悬挂装置进行了液体壳体实验和液体密封实验。

考虑现场最大工作压力为4 MPa,向设备内打入液体至最大工作压力的1.5倍,即6 MPa,实际保压时间达到24 h,超过标准规定的15 min,未掉压。结果表明,对于液体壳体实验,现场腐蚀检测装置未见结构损伤,在设备表面没有明显的液滴或表面潮湿;现场腐蚀检测装置在实验压力持续时间内无可见泄漏。

## 3 腐蚀检测装置现场应用

该现场腐蚀检测装置能够一次悬挂40个挂片,针对同一种材质如N80、3Cr、13Cr、超级13Cr和镍基合金等油井管材料,制备4个试样,其中3个(2个平行试样)用于计算平均腐蚀速率,1个用于扫描电子显微镜(scanning electron microscopy, SEM)观察、能谱分析(energy dispersive spectroscopy, EDS)(包括截面SEM和EDS)<sup>[13]</sup>和X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)。

### 3.1 实验准备

实验前,依次用320#、600#、1000#砂纸逐级打磨腐蚀挂片,蒸馏水清洗,丙酮除油,冷风干燥后称重。

将少量704硅胶均匀地涂在聚四氟乙烯悬挂件的梯形槽中,使其覆盖槽内与梯形挂片接触的3个面。将腐蚀挂片装夹,将聚四氟乙烯材质的端盖紧固在聚四氟乙烯悬挂件的两端。待704硅胶凝固后,剥去悬挂件外表面的固态硅胶残渣。

### 3.2 实验操作

将聚四氟乙烯悬挂件装入腐蚀挂片悬挂装置,调节阀

门,使管道中的液体沿实验短接运移,开始测试。测试周期分为30、90、180 d。

### 3.3 结果处理

实验结束后,调节阀门,使管道中的液体沿旁通管线运移,打开位于腐蚀挂片悬挂装置上的泄压阀(图4部件5),排出实验短接内的液体,取出腐蚀挂片。

1) 对计算平均腐蚀速率的挂片,用蒸馏水冲去腐蚀介质,用清洗液(体积比为10:1的蒸馏水、浓盐酸(31%~38%)和适量的缓蚀剂)处理,用棉签反复擦除产物膜后,用丙酮清洗、烘干,取微距照相并称重,按照NACE RP 0775—2005<sup>[14]</sup>的规定计算试样的平均腐蚀速率。

$$CR = \frac{365000\Delta W}{ATD}$$

式中,CR为腐蚀速率,mm/a;  $\Delta W$ 为腐蚀前后平行试样即挂片的平均失重,g;A为腐蚀挂片的表面积,mm<sup>2</sup>;D为腐蚀挂片的密度,g/cm<sup>3</sup>;T为实验时间,d。

2) 对进行SEM、EDS和XRD测试的试样,用蒸馏水浸泡,去除腐蚀介质,再用丙酮浸泡,干燥后进行上述3项测试(包括截面SEM和EDS)。

### 3.4 现场应用

选择某油田开发储层含有H<sub>2</sub>S和CO<sub>2</sub>气体的一口生产井,该井产液量为224 m<sup>3</sup>/d,管线尺寸为6-5/8、管线压力为3 MPa,为其安装本研究设计的腐蚀检测设备,装夹了碳钢N80,低合金抗硫钢P110S,马氏体不锈钢13Cr,超级13Cr,双相不锈钢22Cr、25Cr,镍基合金SM2550、825等8种材质共40个挂片试样。测试周期为90 d,该设备提供的试样满足腐蚀速率、微距观察、SEM、EDS和XRD测试分析的要求。若采用本文1.1和1.2所述的挂片悬挂件,完成相同数量和测试周期的挂片实验,需要1800 d,使用该现场腐蚀检测装置仅需要90 d。实验结果表明,在含有0.2 MPa CO<sub>2</sub>储层中,油套管应选用马氏体不锈钢13Cr不锈钢材质,在含有1.3 MPa CO<sub>2</sub>及0.8 MPa H<sub>2</sub>S的储层中,超级13Cr不锈钢未发现局部腐蚀且腐蚀速率极低。

## 4 结论

1) 设计了能够装夹多种材质和多个平行试样腐蚀挂片,与油井管实际接触腐蚀介质的形式相同,不影响管道内流体的流速、流态的腐蚀检测装置及与之匹配的腐蚀挂片。

2) 完成该腐蚀检测装置的加工,参照国家标准完成了液体壳体实验和液体密封实验。

3) 针对该腐蚀检测装置,设计了合理的实验操作方法及实验数据处理方法。现场选择生产井安装该设备,能够满足设计要求,能够满足不同试样在同一条件下测试分析的需要,达到了预期的实验目的。

### 参考文献(References)

[1] Hideki T, Masakatsu U, Yamamoto E, et al. Research into material selection for down-hole tubing by using dynamic field tester[C]. 10th

Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, Abu Dhabi, October 13-16, 2002.

[2] 陈长风, 路民旭, 赵国仙. 温度, Cl<sup>-</sup>浓度, Cr元素对N80钢CO<sub>2</sub>腐蚀电极过程的影响[J]. 金属学报, 2003, 39(8): 848-854.

Chen Changfeng, Lu Minxu, Zhao Guoxian. Effects of temperature, Cl<sup>-</sup> concentration and Cr on electrode deactions of CO<sub>2</sub> corrosion of N80 steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2003, 39(8): 848-854.

[3] Kermani B, Martin J W, Esaklul K A. Materials design strategy: Effects of H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub> corrosion on materials selection[C]. Corrosion, San Diego, California, March 12-16, 2006.

[4] 李建平, 赵国仙, 郝士明. 几种因素对油套管钢CO<sub>2</sub>腐蚀行为影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2005, 25(4): 241-244.

Li Jianping, Zhao Guoxian, Hao Shiming. Dynamic corrosion behaviors of N80, P105 and SM110 steel[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2005, 25(4): 241-244.

[5] Moosavi A N, Rumash K, Kadri M. Material selection for downhole sour environments[C]. 2008 Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, Abu Dhabi, November 3-6, 2008.

[6] 孙海. 天然气压气站内腐蚀挂片监测管道内腐蚀[J]. 腐蚀与防护, 2011(3): 239-242.

Sun Hai. Internal corrosion monitoring of pipelines in natural gas compression stations using corrosion coupons[J]. Corrosion & Protection, 2011(3): 239-242.

[7] 史涛, 梁爱国, 李甫, 等. 油气管道腐蚀挂片悬挂装置的研制与应用[J]. 油气储运, 2012(9): 695-697.

Shi Tao, Liang Aiguo, Li Fu, et al. Development and application of corrosion coupon suspension device for oil and gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2012(9): 695-697.

[8] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. GB/T 3098.6—2000 紧固件机械性能 不锈钢螺栓、螺钉和螺柱[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the Peoples Republic of China. GB/T 3098.6—2000 Mechanical properties of fasteners—bolts, screws and studs made of stainless-steel[S]. Beijing: China Standards Press, 2001.

[9] 国家质量技术监督局. GB/T 5783—2000 六角头螺栓 全螺纹[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.

The State Bureau of Quality and Technical Supervision. GB/T 5783—2000 Hexagon head bolts—full thread[S]. Beijing: China Standards Press, 2000.

[10] 吴宗泽, 罗圣国. 机械设计课程设计手册[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

Wu Zongze, Luo Shengguo. Curriculum design manual of machinery [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.

[11] 濮良贵, 纪名刚. 机械设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

Pu Lianggui, Ji Minggang. Design of machinery[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.

[12] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. GB/T 13927—2008 工业阀门 压力试验[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the Peoples Republic of China. GB/T 13927—2008 Industrial valves—pressure testing[S]. Beijing: China Standards Press, 2009.

[13] 万里平, 孟英峰, 李皋, 等. 气体钻井井口腐蚀(冲蚀)检测装置设计与应用[J]. 石油机械, 2012, 40(10): 15-17.

Wan Liping, Meng Yingfeng, Li Ao, et al. Design and application of the wellhead corrosion (Erosion) detection device for gas drilling[J]. China Petroleum Machinery, 2012, 40(10): 15-17.

[14] The Corrosion Society. NACE RP 0775—2005 preparation, installation, analysis, and interpretation of corrosion coupons in oilfield operations [S]. Houston: NACE International, 2005.

(责任编辑 王媛媛)