

# 力学与电化学作用下 X80 钢焊接接头 SCC 行为分析

谢 飞, 孙 岩, 王 丹, 吴 明

(辽宁石油化工大学 石油天然气工程学院, 抚顺 113001)

**摘要:** 采用动电位扫描技术及慢应变速率拉伸试验(slow strain rate test, SSRT)研究了X80钢焊接接头在库尔勒模拟溶液中应力腐蚀开裂(stress corrosion cracking, SCC)行为,并利用扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)对不同应变速率下试样断口形貌进行表征。结果表明,随着应变速率的增加,X80钢焊接接头的腐蚀速率则呈现持续增大的趋势。当应变速率为 $1 \times 10^{-5}/\text{s}$ 时,试样的腐蚀情况最为严重。X80钢焊接接头在不同应变速率下的腐蚀机制是由电化学-力学交互作用共同决定的。试样发生应力腐蚀后断裂于焊缝处,这是由于焊接过程导致焊缝晶格存在大量的缺陷,使得晶格活性较高所致。

**关键词:** X80钢; 焊接接头; 电化学; 应变速率; 应力腐蚀开裂

中图分类号: TG 404 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2015)02-0047-04

## 0 序 言

应力腐蚀开裂(SCC)是威胁油气管线安全运行的主要因素之一<sup>[1]</sup>。在土壤环境中金属发生SCC行为是在力学与电化学共同作用下的复杂过程<sup>[2]</sup>。目前国内学者对SCC行为研究多集中于实验室常用的近中性pH值和高pH值溶液环境<sup>[3-5]</sup>,但对实际土壤中力学与电化学作用下的SCC行为研究尚未全面开展<sup>[6]</sup>。国内西气东输二线大量铺设了X80管线钢,管线途经新疆库尔勒地区。有报道称<sup>[7]</sup>,现场管线运行中出现的SCC行为多发生于焊缝附近。因此探索力学与电化学作用下X80管线钢焊接接头在库尔勒土壤中发生SCC行为的可能性是非常必要的。

## 1 试验方法

选用西气东输二线用X80钢焊接接头作为试验材料,其化学成分(质量分数,%)为母材C 0.044, Si 0.19, Mn 1.83, P 0.011, S 0.002, Mo 0.09, Ni 0.23, Cr 0.025, Fe为余量;焊缝C 0.12, Si 0.21, Mn 1.57, P 0.013, S 0.003, Mo 0.03, Ni 0.06, Cr 0.031, Fe为余量。试验所采用库尔勒土壤模拟溶液,其化学成分(质量分数,%)为Cl<sup>-</sup> 0.231 7, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 0.085 2,

HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 0.010 6, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 0.013 2, pH值为9.0。

拉伸试样尺寸按照图1所示制作。试样表面采用水磨砂纸从60号~1000号逐级打磨,然后用去离子水冲洗,吹干备用。空拉( $1 \times 10^{-6}/\text{s}$ )及不同应变速率 $5 \times 10^{-7}$ ,  $1 \times 10^{-6}$ ,  $5 \times 10^{-6}$ ,  $1 \times 10^{-5}/\text{s}$ 条件下,在WDML-3型慢应变速率拉伸机上进行SSRT试验,并在负荷达到抗拉强度后利用PARSTAT2273型电化学工作站,采用三电极体系对试样进行极化

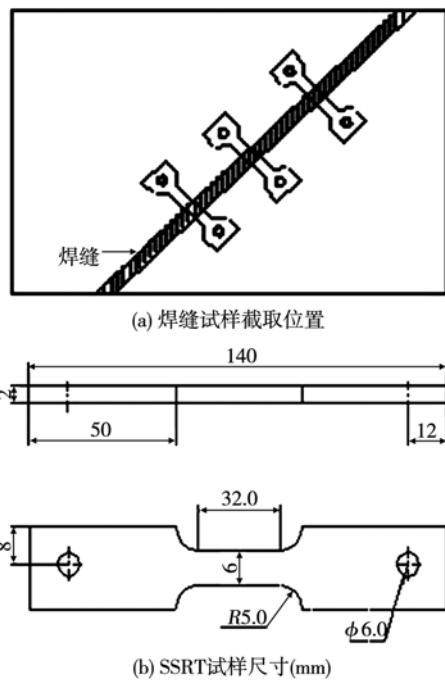


图1 SSRT 试样截取位置及尺寸

Fig. 1 Specimen for SSRT

收稿日期: 2013-06-20

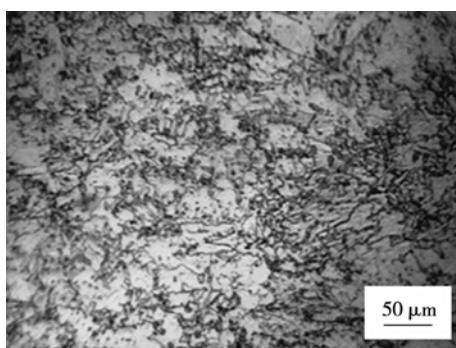
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50771053);辽宁省教育厅科学研究基金资助项目(L2014156);辽宁石油化工大学科学基金资助项目(2013XJJ-019)

曲线测量,扫描速率为0.5 mV/s,扫描范围为-1.0 ~ -0.2 V. 拉断后用SEM对试样断口进行分析. 试验温度为室温. 通过机械抛光方法将X80钢母材和焊缝金相试样抛光,用4%硝酸酒精侵蚀后,利用金相显微镜(OM)观察试样的显微组织.

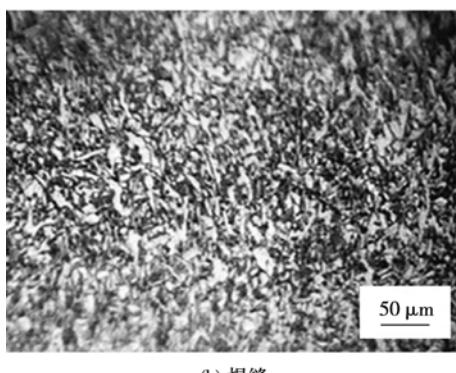
## 2 试验结果

### 2.1 金相形貌

图2为X80钢母材和焊缝的形貌. 由图2可以看出,母材组织以针状铁素体为主,具有高密度的位错,并伴随黑色细小均匀的M-A岛组织(图2a),属于典型的针状铁素体(AF)形态. 焊缝组织则是以晶内形核针状铁素体(IAF)为主,晶粒不规则、多位向、相互交错(图2b).



(a) 母材



(b) 焊缝

图2 X80钢焊接接头的显微组织形貌

Fig. 2 Microstructure of welded X80 steel

### 2.2 极化曲线

图3为X80钢焊接接头在库尔勒土壤模拟溶液中的极化曲线. 图4为试样的腐蚀电流密度 $j_c$ 与应变速率的关系曲线. 由图4可以看出,应变速率从 $5 \times 10^{-7}/s$ 增至 $1 \times 10^{-5}/s$ ,试样的 $j_c$ 分别为23.75, 81.38, 89.59, 93.01  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . 随着应变速率的增加,试样的腐蚀速率则呈现持续增大的趋势,应变速率为 $1 \times 10^{-5}/s$ 时,试样腐蚀最为严重.

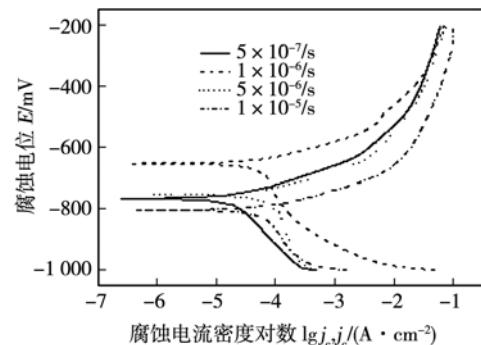


图3 不同应变速率下的极化曲线

Fig. 3 Polarization curves in different strain rates

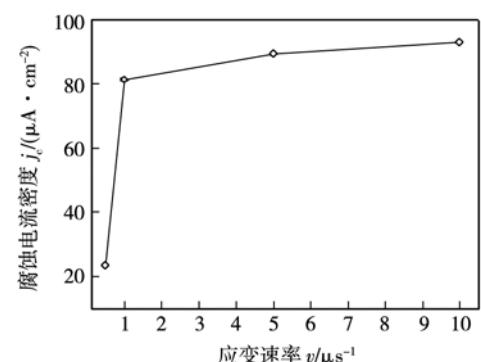


图4 腐蚀电流密度与应变速率的关系曲线

Fig. 4 Curve of corrosion current density vs strain rate

### 2.3 SSRT试验

图5为不同应变速率下X80管线钢焊接接头断面收缩率的分析结果. 由图5可知,从空拉、 $5 \times 10^{-7}/s$ 增加至 $1 \times 10^{-5}/s$ 时,试样的断面收缩率Z在空拉状态下最大,其Z值在溶液中随着应变速率的增大而减小. 这表明在库尔勒土壤模拟溶液中,X80钢焊接接头的SCC敏感性 $I_{\text{sc}}^{\text{c}}$ 由大到小为: $I_{\text{sc}}^{\text{c}}(1 \times 10^{-5}/s) > I_{\text{sc}}^{\text{c}}(5 \times 10^{-6}/s) > I_{\text{sc}}^{\text{c}}(1 \times 10^{-6}/s) > I_{\text{sc}}^{\text{c}}(5 \times 10^{-7}/s) > I_{\text{sc}}^{\text{c}}(\text{空拉})$ ,这与极化曲线分析结果一致.

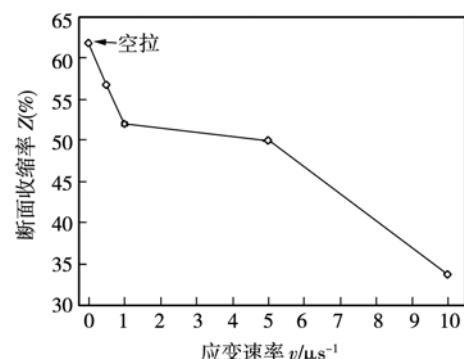


图5 应变速率与断面收缩率的关系曲线

Fig. 5 Curve of strain rate vs reduction of area

## 2.4 断口形貌

X80钢焊接接头在不同应变速率下SSRT后的断口和侧面形貌如图6所示。由图6可知,应变速率 $5 \times 10^{-7}/\text{s}$ 时,断口形貌以不规则韧窝为主,属于韧性断裂。断口侧面出现了明显的点蚀坑。在 $1 \times 10^{-6}$ 和 $5 \times 10^{-6}/\text{s}$ 条件下,断口形貌以浅韧窝居多,且韧窝形状不规则,分布不均匀,并伴随有撕裂棱痕迹,亦属于韧性断裂。侧面断口存在二次裂纹,说明此时SCC敏感性较高。应变速率为 $1 \times 10^{-5}/\text{s}$ 时,试样断口出现了河流花样的准解理断口特征,属于脆性断裂。而试样的侧面断口除 $5 \times 10^{-7}/\text{s}$ 外,均出现了二次裂纹,而且随着应变速率的增加,二次裂纹越来越明显,其深度和长度亦有所增大。

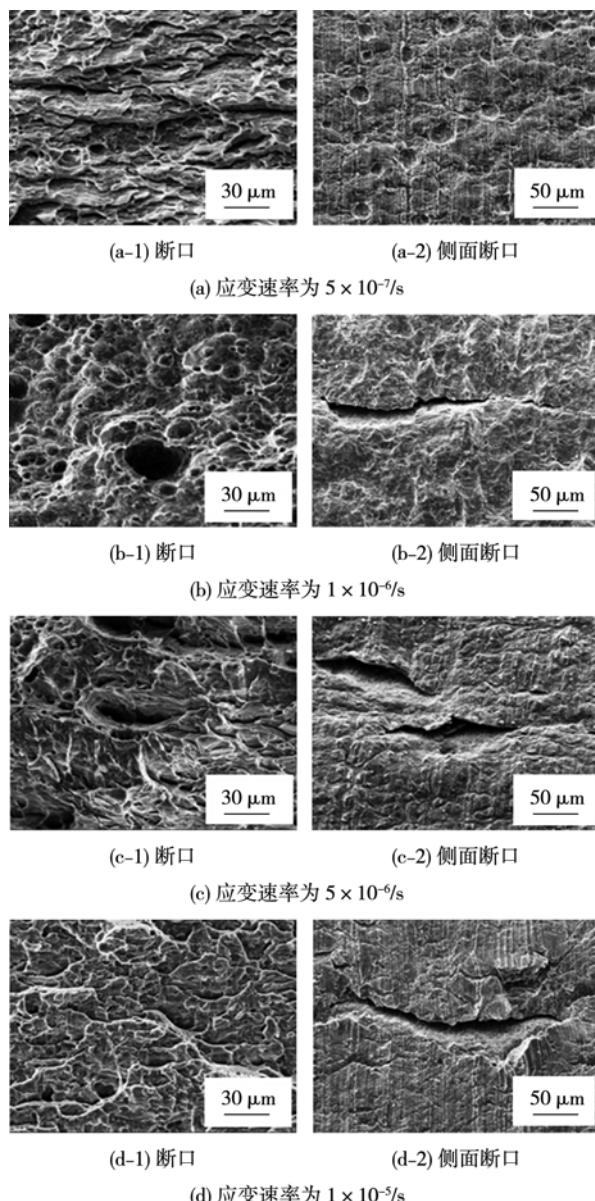


图6 不同应变速率下焊接接头断口及侧面的SEM形貌  
Fig. 6 SEM images of fracture surface and side near fracture surface of weld joint in different strain rates

## 3 分析及讨论

X80管线钢焊接接头在库尔勒土壤模拟溶液中的应力腐蚀行为是电化学腐蚀和力学因素协同作用的复杂腐蚀过程,两者之间具体作用机理由于不同应变速率有所差异。

当应变速率为 $5 \times 10^{-7}/\text{s}$ 时,应变速率较低,试样与模拟溶液接触时间长,电化学腐蚀充分进行,阳极溶解严重,见式(1),使得溶液中的溶解氧被消耗掉,见式(2),试样表面与溶液接触处出现贫氧区,阴极反应受到抑制。



阴阳极电流间平衡状态遭到破坏,为了重新达到平衡状态,库尔勒溶液中大量的 $\text{Cl}^-$ , $\text{SO}_4^{2-}$ 等阴离子发生电迁过程,富集到试样阳极溶解处,从而抑制了产物膜的生成<sup>[8]</sup>,使阳极局部新鲜的电极表面暴露在溶液中,加速阳极溶解反应的进行,阳极溶解处的金属晶格间结合力被削弱,晶界遭到电化学腐蚀作用的破坏,最终导致腐蚀坑形成(图6a)。在此过程中,电化学腐蚀起决定性作用。与 $5 \times 10^{-7}/\text{s}$ 时相比,应变速率增大至 $1 \times 10^{-6}$ 和 $5 \times 10^{-6}/\text{s}$ 时力学作用明显加大,电化学作用被削减,两者共同作用于金属电极表面。当试样因电化学作用产生蚀坑后,在拉应力的作用下蚀坑内基体部分晶界被破坏,晶格发生畸变,微裂纹从蚀坑内萌生,并相互聚合、连接。裂纹逐渐增大扩展,SCC敏感性明显增大,故试样断口侧面出现二次裂纹(图6b)。在此过程中电化学和力学作用相互促进,加速腐蚀的进行,其共同作用导致金属SCC行为的发生。在此过程中,力学作用占主导地位,电化学腐蚀则起辅助作用。故试样的断面收缩率比 $5 \times 10^{-7}/\text{s}$ 时低,腐蚀程度较高。

当应变速率为 $1 \times 10^{-5}/\text{s}$ 时,试样与模拟溶液接触时间很短,电化学反应不能充分进行,电化学作用很小,无法形成局部腐蚀坑。单一的力学作用集中于金属本身位错、空位等缺陷处,与金属晶格间结合力相抵消。当拉应力超过晶格结合力时,晶界破裂,应力腐蚀开裂发生。通过微观组织观察可知,母材晶界以富碳层 $\text{Fe}_3\text{C}$ 形式存在,晶粒较小,晶间结合力较大,单一的力学作用不足以抵消缺陷处的大部分晶间力,晶格基本完好。而焊缝由于焊接过程造成其组织结构不均匀,晶格存在大量的夹杂物、位错、空位等缺陷,这些缺陷使得晶间结合力较弱,晶格活性较高<sup>[9]</sup>。在 $1 \times 10^{-5}/\text{s}$ 下单一应力作用足以破坏焊缝的晶界表面,使其发生晶格畸变,并且作用

时间最短,SCC行为发生的最快.因此试样断口形貌表现为脆性断裂(图6d),腐蚀程度最严重.

## 4 结 论

(1) 随着应变速率的增加,X80钢焊接接头在库尔勒溶液中的腐蚀速率呈现持续增大的趋势;当应变速率为 $1 \times 10^{-5}/\text{s}$ 时,试样的腐蚀情况最为严重.

(2) X80钢焊接接头断口形貌表明,试样除了在 $1 \times 10^{-5}/\text{s}$ 下为脆性断裂以外,其余情况下均为韧性断裂. $5 \times 10^{-7}/\text{s}$ 时,电化学腐蚀起决定性作用; $1 \times 10^{-6}$ 和 $5 \times 10^{-6}/\text{s}$ 时,电化学和力学协同作用,加速了腐蚀的进行,且力学作用占主导地位. $1 \times 10^{-5}/\text{s}$ 时,力学因素起决定性作用,直接影响SCC行为的发生.

(3) 应力腐蚀开裂主要发生在焊接接头处,这是由于焊接过程导致焊缝组织结构不均匀,晶格活性较高造成的.

## 参考文献:

- [1] Albaran J L, Aguilar A, Martinez L. Corrosion and cracking behavior in an API X80 steel exposed to sour gas environment [J]. Corrosion, 2002, 58(9): 783-787.
- [2] Lu B T, Luo J L. Relationship between yield strength and near-neutral pH stress corrosion cracking resistance of pipeline steels-an effect of microstructure [J]. Corrosion, 2006, 62(2): 129-138.
- [3] Chen W, King F, Vokes E. Characteristics of near-neutral pH stress corrosion cracks in an X-65 pipeline [J]. Corrosion, 2002, 58(3): 267-277.
- [4] Wang J Q, Atrens A. SCC initiation for X65 pipeline steel in the high pH carbonate bicarbonate solution [J]. Corrosion Science, 2003, 45(10): 2199-2217.
- [5] 王炳英, 霍立兴, 张玉凤, 等.  $\text{CO}_3^{2-}-\text{HCO}_3^-$ 溶液中X80管线钢焊接接头的应力腐蚀开裂分析 [J]. 焊接学报, 2007, 28(7): 85-88.  
Wang Bingying, Huo Lixing, Zhang Yufeng, et al. The SCC analysis of welded X80 pipeline steel in  $\text{CO}_3^{2-}-\text{HCO}_3^-$  solution [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(7): 85-88.
- [6] 黄毓晖, 杨博, 轩福贞, 等. 316L不锈钢扩散焊接头在酸性氯化钠溶液中的应力腐蚀行为 [J]. 焊接学报, 2011, 32(7): 67-70.  
Huang Yuhui, Yang Bo, Xuan Fuzhen, et al. Stress corrosion behavior of diffusion bonding joints of 316L stainless steel in environment of acid NaCl solution [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(7): 67-70.
- [7] 周贤良, 李晖榕, 华小珍, 等. X80管线钢埋弧焊焊接接头的组织和腐蚀性能 [J]. 焊接学报, 2011, 32(1): 37-40.  
Zhou Xianliang, Li Huirong, Hua Xiaozhen, et al. Microstructures and corrosion properties of submerged arc welded joint for X80 pipeline steel [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(1): 37-40.
- [8] 谢飞, 吴明, 陈旭, 等.  $\text{SO}_4^{2-}$ 对X80管线钢在库尔勒土壤模拟溶液中腐蚀行为的影响 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(1): 424-430.  
Xie Fei, Wu Ming, Chen Xu, et al. Effects of  $\text{SO}_4^{2-}$  on corrosion behavior of X80 pipeline steel in simulated Ku'erle soil solution [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(1): 424-430.
- [9] 孙智, 江利, 应鹏展. 失效分析: 基础与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.

**作者简介:** 谢飞,男,1983年出生,博士,讲师. 主要从事管线钢腐蚀与防护方面的研究. 发表论文20余篇. Email: xiefei0413@163.com

**通讯作者:** 王丹,女,博士,讲师. Email: wd841015@163.com