



阴极极化条件下 X80 钢及其焊缝的氢渗透行为

陈旭^{1,2}, 何川¹, 张威^{1,3}, 王福明², 李晓刚²

1. 辽宁石油化工大学石油天然气工程学院, 辽宁抚顺 113001
2. 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083
3. 中国寰球工程公司辽宁分公司, 辽宁抚顺 113008

摘要 钢中吸收的氢会导致其机械性能损失。采用电化学氢渗透技术,研究了阴极极化条件下 X80 管线钢及其焊缝在鹰潭土壤环境中氢渗透行为,并利用光学显微镜观察了实验后的试样形貌。结果表明,阴极极化条件下,氢在 X80 钢中的扩散行为既取决于阴极极化电位,又与显微组织结构有关。随着阴极极化程度增加,氢在 X80 管线钢中母材和焊缝的可扩散氢浓度和氢陷阱数逐渐增大,氢致开裂敏感性增加。X80 钢焊缝氢致开裂敏感性高于母材。阴极极化程度低于 $-1000\text{mV}(\text{SCE})$ 时,母材和焊缝的析氢反应动力学不同。当阴极极化程度高于 $-1100\text{mV}(\text{SCE})$ 时,焊缝内氢压超过其塑性极限,氢鼓泡破裂。母材中氢浓度持续增加,氢鼓泡继续长大。母材中针状铁素体和珠光体对氢扩散的阻碍作用,大于焊缝热影响区粗大的贝氏体和熔合线先共析铁素体。

关键词 X80 钢; 焊缝; 阴极极化; 氢渗透; 显微组织

中图分类号 TG174.4

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.

Hydrogen Permeation Behaviors of X80 Steel and Weld Joint Under Cathodic Polarization

CHEN Xu^{1,2}, HE Chuan¹, ZHANG Wei^{1,3}, WANG Fuming², LI Xiaogang²

1. School of Petroleum Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, Liaoning Province, China
2. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
3. China Huanqiu Contracting and Engineering Corporation Liaoning Subcompany, Fushun 113001, Liaoning Province, China

Abstract Absorption of hydrogen in steel could lead to the loss of mechanical properties. The electrochemistry hydrogen permeation technology was used to study the hydrogen permeation of the X80 steel base metal and weld joint in Yingtan soil simulation solution under cathodic polarization potentials. The morphologies were observed by optical microscopy after hydrogen permeation experiments. The results show that the behavior of hydrogen diffusion in X80 steel depended on both the cathodic polarization potential and the microstructure. The hydrogen concentration and traps in X80 steel base metal and weld both increased with the cathodic potential moving negatively, which indicated hydrogen induced cracking(HIC) sensitivity increased. The HIC sensitivity of weld joint was higher than that of base metal. The hydrogen evolution reaction kinetics was different between base metal and weld when the cathodic potential was higher than $-1000\text{mV}(\text{SCE})$. The hydrogen bubble burst on the weld surface because of hydrogen pressure inside the metal exceeding the plastic limit. However, hydrogen concentration kept increasing in base metal when the cathodic potential reached $-1200\text{mV}(\text{SCE})$. The inhibition of acicular ferrite and pearlite on hydrogen diffusion in base meal was greater than coarse bainite in HAZ and proeutectoid ferrite in fusion line.

Keywords X80 steel; weld; cathodic polarization; hydrogen permeation; microstructure

0 引言

埋地钢质管线通常采用涂层和阴极保护联合使用以防止在土壤环境中发生腐蚀。阴极极化电位值决定了管线钢发生析

氢反应的敏感程度^[1-3],特别是在酸性土壤环境中。钢中吸收的氢占据间隙原子的位置使其脆化,导致材料机械性能大幅降低,在应力作用下容易发生脆断,往往造成灾难性后果。国

收稿日期: 2013-07-12; 修回日期: 2013-08-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51201009)

作者简介: 陈旭,副教授,研究方向为金属材料腐蚀与防护,电子信箱: cx0402@sina.com

内外学者对于氢在钢中的扩散行为及其导致材料性能发生的变化进行了广泛的研究。张颖瑞等^[4]采用电化学充氢方法证明了氮化物夹杂并不是充氢裂纹的必然形核位置,而 Mg、Al、Ca 等的氧化物是更为有害的氢致裂纹源。任学冲等^[5]认为氢和空位复合能降低空位形成能,从而使空位浓度大幅度升高,这些带氢的过饱和空位很容易聚集成空位团,揭示了完整晶体中氢鼓泡形核、长大和开裂机制。Han 等^[6]证明钢中扩散的氢使局部氢浓度迅速积累至裂纹萌生所需阈值,并促进裂纹扩展。已有工作表明^[7-9],管线钢是一种易于遭受氢脆的金属,X80 强度级别管线钢的氢脆敏感性较高。对一般钢来说,含氢量在 $5 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6}$ 以上时才会产生氢致裂纹,但对高强度钢,即使钢中氢含量小于 3×10^{-6} ,由于应力作用,处在点阵间隙中的氢原子会通过扩散集中于缺口的应力集中处,也可能产生氢脆;此外,高强度钢管壁厚通常较薄,对于凹坑和裂纹的容忍能力较弱,更易于导致应力腐蚀裂纹的扩展而发生破坏。焊缝处由于冶金相变、应力集中而成为裂纹萌生的主要位置,焊缝热影响区一般是管线钢抗氢致开裂的薄弱区域^[10-12]。而关于阴极极化条件下焊缝组织对氢渗透性能的影响研究的较少。目前,氢致开裂的研究方法多采用在 H_2SO_4

溶液中恒电流充氢,但该方法中试样表面的阳极溶解速率与金属中溶解中的氢浓度相互依赖,并不能反应材料抗氢致开裂性能与阴极保护电位的关系。管线钢抗氢致开裂性能并不随氢浓度增加而单调降低^[13],氢浓度阈值的研究对于理解管线钢氢致开裂现象至关重要,因此有必要对阴极极化条件下管线钢母材和焊缝开展相关性能的研究。

中国东南地区的红壤土是典型的酸性土壤。这些地区温度较高、土壤致密、含水量高、含氧量低,含有较高的腐质酸,pH 值为 3~6.5,是发生氢致开裂最可能的土壤环境之一^[9]。因此,研究阴极极化条件下 X80 管线钢在江西鹰潭土壤模拟溶液中的氢渗透行为具有重要意义。本文采用电化学氢渗透技术和微观观察方法研究不同阴极极化电位对 X80 钢及其焊缝在鹰潭土壤环境下的氢渗透行为。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

本实验采用的 X80 钢及其焊缝板取自西气东输管线用钢。其中母材及焊缝的化学成分见表 1。图 1 分别是 X80 钢焊缝、熔合线、热影响区 (HAZ) 和母材的显微形貌。可以看出,焊

表 1 X80 管线钢母材及焊缝的化学成分 (质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of the base metal and weld joint of X80 pipeline steel (mass fraction,%)

材料	Si	Mn	Nb	Cu	Zn	Cr	B	Mo	C	Fe
母材	0.003	1.93	0.022	0.009 8	0.020	0.30	0.017	0.065	0.091	余量
焊缝	0.21	1.12	0.049	0.035	—	0.32	—	0.03	0.13	余量

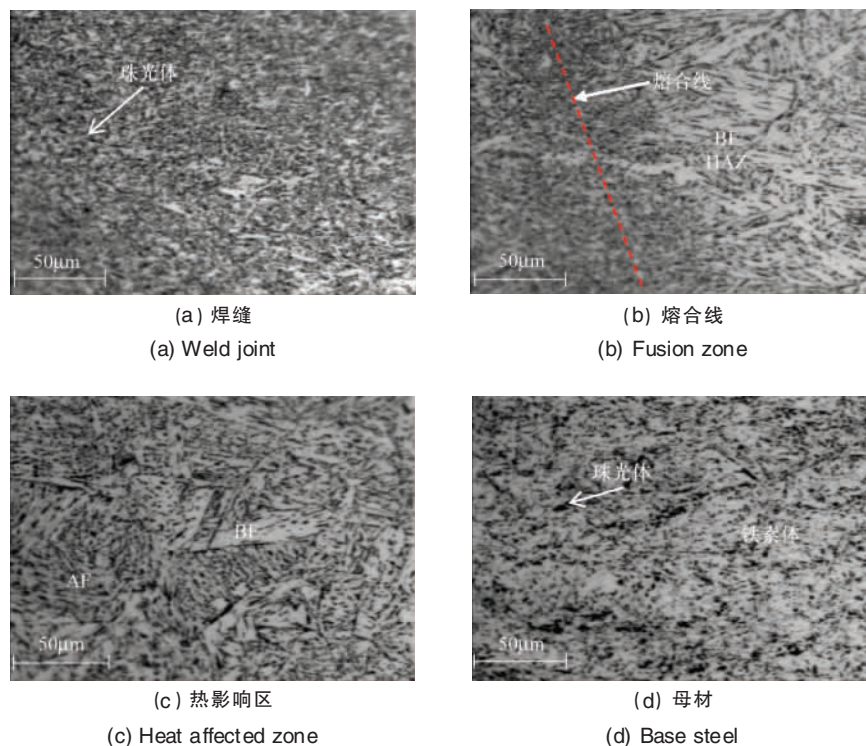


图 1 X80 钢焊接接头不同区域的 OM 像 (AF 为针状铁素体, BF 为贝氏体铁素体)

Fig. 1 Optical microscopic images of weld metal (AF is acicular ferrite, BF is bainite ferrite)



缝组织主要为晶内形核的针状铁素体和珠光体,晶粒较母材更加均匀细小。图1(b)和(c)分别为热影响区中的熔合区和热影响区,晶粒明显粗大,熔合区组织主要为先共析铁素体和贝氏体。HAZ则主要为贝氏体和铁素体。母材组织主要以针状铁素体和珠光体为主,呈细小而多方向分布(图1(d))。

1.2 实验介质

实验用鹰潭土壤取自国家材料自然环境腐蚀实验站鹰潭站地下1.5m处。将该土烘干、粉碎、筛出残存植物根系,再干燥24h。然后,将干土与蒸馏水1:1(质量比)比例混合,充分搅拌后沉淀过滤,得到澄清的浸出液,对浸出液进行理化数据分析检测。根据检测结果中土壤的浸出液主要成分和pH值等理化数据特性,用分析纯化学试剂和去离子水配制实验室模拟鹰潭土壤溶液,最终得到模拟溶液化学成分为:0.0111g/L CaCl₂,0.0468g/L NaCl,0.0142g/L Na₂SO₄,0.0197g/L MgSO₄·7H₂O,0.0293g/L KNO₃,0.0151g/L NaHCO₃。用醋酸调节溶液pH值到4.7。

1.3 氢渗透实验

实验采用双电池装置。将X80管线钢及其焊缝试样加工

成0.8mm厚的薄片,双面机械抛光之后在热碱液及无水乙醇中浸洗除油。清洗干净的试样表面单面电镀镍,电镀时试样为阴极,Pt片为阳极。电镀镍的成分为:250g/L NiSO₄·7H₂O+45g/L NiCl₂·7H₂O+40g/L H₃BO₄,电镀温度25℃,电流密度为10mA·cm⁻²,时间为60s,镀层厚度约为0.20μm。将未镀镍的一面作为阴极,带有镀层的一面为阳极。参比电极为饱和甘汞电极。双电池阴极池的溶液为鹰潭土壤模拟溶液+250mg/L As₂O₃,双电池阳极池的溶液为0.1mol/L NaOH,并控制阳极电位为300mV(SCE)。在进行氢渗透实验前对双电池阳极池通入氮气以去除溶液中的溶解氧,其中,鹰潭土壤模拟溶液一侧始终通入95%N₂+5%CO₂。通过PS-168恒电位仪在阴极一侧分别施加-850,-1000,-1100,-1200mV(SCE)阴极极化电位。通过EG&PAR2273电化学工作站测量出的阳极电流I随时间的变化,可以求出氢扩散系数及进入试样内的可扩散氢浓度C₀。实验结束后,采用光学显微镜对试样表面进行观察。

2 实验结果

图2为实验测得的X80钢及其焊缝的氢渗透曲线。渗透通过试样的氢量用饱和电流I_∞测定,饱和电流与氢扩散通量

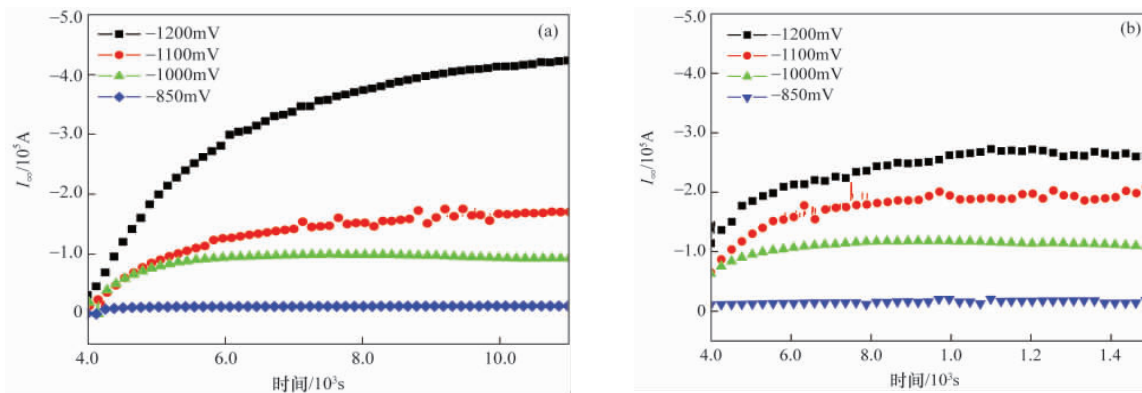


图2 X80钢的氢渗透曲线,其中(a)为母材,(b)为焊缝

Fig. 2 Hydrogen permeation curves of X80 steel: (a) base metal and (b) weld joint

之间的关系为^[14]

$$J_{\infty} = \frac{I_{\infty}}{FA} \quad (1)$$

其中,A为试样面积,F为法拉第常数。氢的有效扩散系数D_{eff}可由下式计算^[15]:

$$D_{eff} = \frac{d^2}{6t_L} \quad (2)$$

其中,d为试样厚度;t_L为滞后时间,是III_∞=0.63对应的时间。阴极侧的氢浓度C₀可通过下式估算:

$$C_0 = \frac{J_{\infty} \cdot d}{D_{eff}} \quad (3)$$

实验中,试样面积A=1.767cm²,试样平均厚度d=0.0542cm,带入式(1)~(3)可得出可扩散氢浓度C₀和扩散系

数D_{eff},见图3。

氢陷阱密度可通过式(4)、(5)估算^[16]:

$$\ln\left(\frac{D_L}{D_{eff}} - 1\right) = \ln\left(\frac{N_T}{N_L} + \frac{E_b}{R} \cdot \frac{1}{T}\right) \quad (4)$$

$$N_T = N_L \left(\frac{D_L}{D_{eff}} - 1\right) e^{-\frac{E_b}{RT}} \quad (5)$$

式中,N_T为单位体积的氢陷阱数,cm⁻³;D_L为点阵扩散系数,cm³·s⁻¹;N_L为间隙位置密度,cm⁻³;E_b为陷阱结合能,eV。

本试验中没有测量点阵扩散系数D_L,陷阱结合能E_b,以及间隙位置密度N_L,采用α-Fe的系数代替,即D_L=128×10⁻⁴cm²·s⁻¹,E_b=0.3eV,N_L=7.52×10²²cm⁻³,D_{eff}的数值由式(2)计算得出。将上述数值带入式(5)可得X80管线钢母材和焊缝氢陷阱数,具体结果见图3。

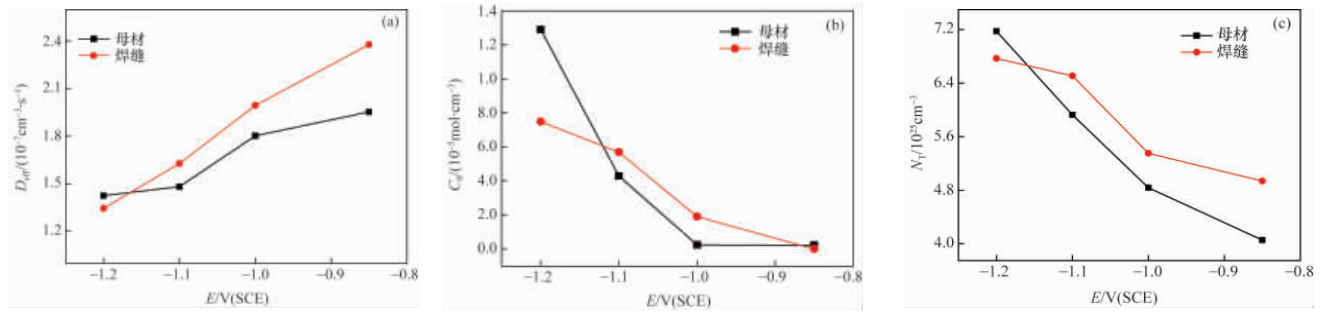


图3 不同电位下 X80 管线钢母材及焊缝氢扩散系数 D_{eff} (a)、可扩散氢浓度 C_0 (b)和氢陷阱数 N_T (c)
 Fig. 3 Hydrogen diffusion coefficient D_{eff} (a), hydrogen concentration C_0 (b) and traps N_T (c) of X80 steel base metal and weld joint under various cathodic polarization potential

从图3可知,随着阴极极化程度增加,氢在 X80 管线钢中母材和焊缝的扩散系数 D_{eff} 均呈减小趋势,可扩散氢浓度 C_0 和氢陷阱数 N_T 逐渐增大,表明被捕获的氢增加,即氢致开裂敏感性增加。图4和图5是充氢实验结束后母材和焊缝光学显微观察结果。可以看出,在阴极极化条件下,X80钢表现出不同程度的氢鼓泡。在外加-850mV 电位下,母材和焊缝出现少量的氢鼓泡。随着外加阴极极化电位的负移,氢鼓泡的数量逐渐增多,甚至连成一片(图4(b)),单个氢鼓泡的面积

逐渐增大。X80 钢焊缝在电位为-1100mV(图5(c))和母材在电位-1200mV(图5(d))的强极化电流下,在光学电子显微镜下可以看见单个氢鼓泡面积明显增大,这种严重的氢鼓泡甚至直接用肉眼也可以从试样上看见。但焊缝在-1200mV 电位下氢鼓泡数量少,出现较多的裂纹。可见,随着外加阴极极化电位的负移,渗氢电流增大,出现更多更大的氢鼓泡,氢脆敏感性增强,容易发生腐蚀开裂。

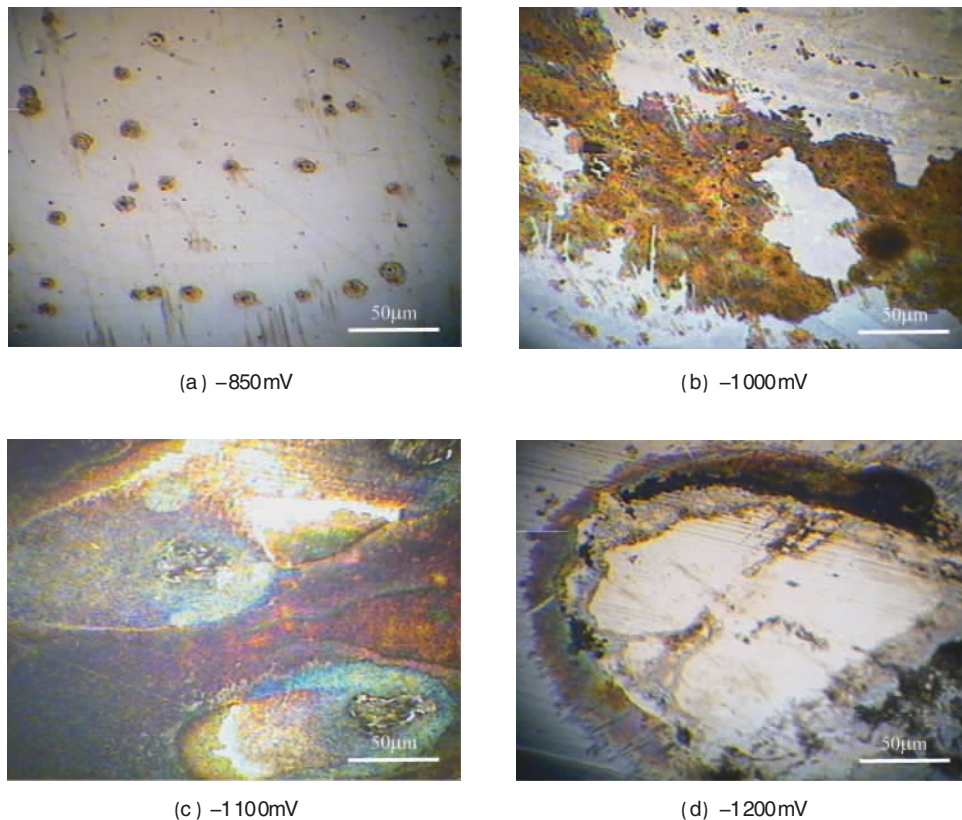


图4 不同阴极极化电位下 X80 钢母材试样中的氢鼓泡
 Fig. 4 Hydrogen bubble on X80 base steel under various cathodic polarization potential

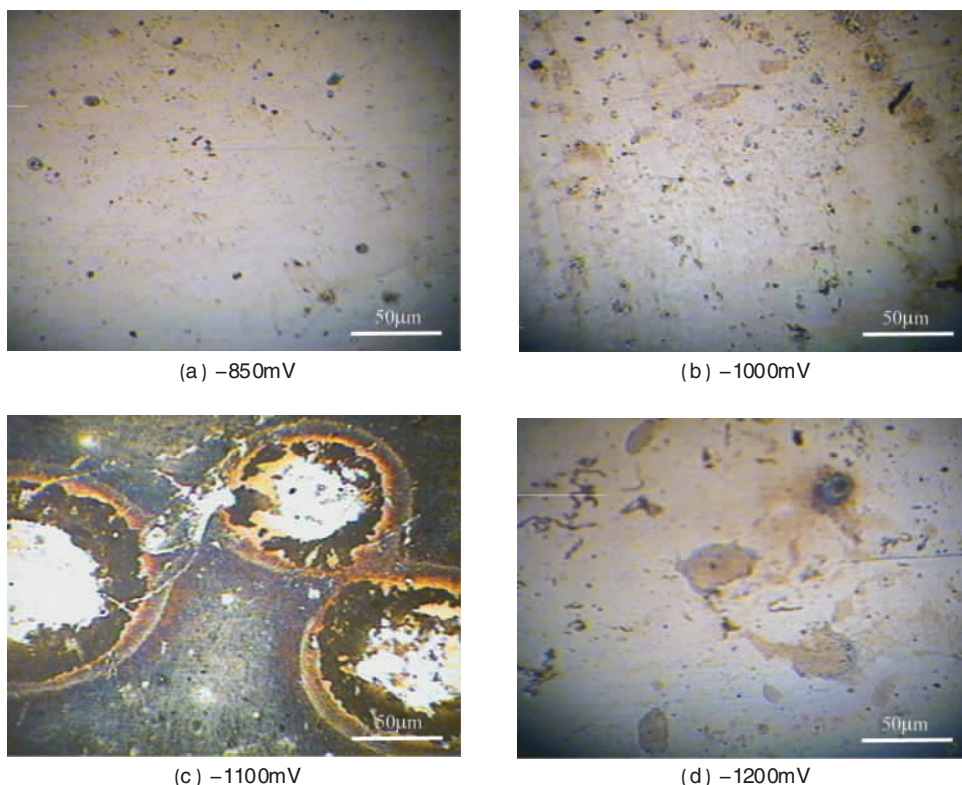


图5 不同阴极极化电位下 X80 钢焊缝试样中的氢鼓泡

Fig. 5 Hydrogen bubble on X80 weld joint under various cathodic polarization potential

3 分析及讨论

阴极极化条件下,析氢反应是 X80 钢及其焊缝在除氧的鹰潭土壤模拟溶液中主要的去极化阴极还原反应,有



氢渗透曲线结果表明,随着阴极极化程度增加,试样表面饱和阳极电流 I_{∞} 增加, I_{∞} 数值变化会反映可扩散氢浓度 C_0 的变化,即金属表面吸附氢原子所覆盖的面积增加。对于一种金属来说,吸附氢原子所覆盖的面积愈大,向金属内部渗氢的速度愈大,材料的氢脆危险性愈大。电极表面的析氢反应分为 3 个步骤,即:① H^+ 放电而成为吸附在金属表面上的氢原子;② 形成的氢原子在金属表面上氢分子;③ H_2 分子离开电极表面。然而,步骤②中有两种不同的途径,即化学脱附(式(7))和电化学脱附(式(8))。



随着两种反应途径和控制步骤的不同,反应机理也不同。若氢离子放电后是化学脱附,且化学脱附反应很快,则 C_0 随阴极电位 E 的变化成线性关系;若氢离子放电后是电化学脱附,且电化学脱附反应很快,则可扩散氢浓度基本不随阴极电位 E 变化^[7]。由图 3(b)可知,焊缝在 -850~-1200mV 范围内,均表现出化学脱附,可扩散氢浓度成线性增加;而母材在 -850~-1000mV 时为电化学脱附,可扩散氢浓度基本不变,在 -1000~-1200mV 时为化学脱附。两者的电极反应动力学不

同,即前者为法拉第过程,后者为非法拉第过程。

随着外加电位负移,母材和焊缝均表现出氢扩散系数降低,可扩散性氢浓度和氢陷阱数增加的趋势,表明阴极极化程度增加导致试样内部氢压增大,氢致开裂敏感性增加。Yen 等^[8]认为,只有在间隙位置的氢原子才能发生迁移,此时由于氢原子复合成氢分子,氢原子在间隙位置间移动困难,导致激活扩散所需能量增加,从而使扩散系数表现出下降趋势。此外,渗入到钢中的氢使表面膜的致密性遭到破坏,保护性降低,试样表面的缺陷数量增加。而这些缺陷一般具有较高的活化能,容易成为点蚀的萌生处,部分缺陷会和进入到膜中的部分氢结合而成为氢陷阱^[9]。

值得注意的是,当阴极极化程度低于 -1100mV 时,焊缝的氢扩散系数和氢陷阱数均高于母材。这表明此时焊缝的氢致开裂敏感性高于母材。然而,当阴极极化电位达到 -1200mV 时,X80 钢母材的氢扩散系数、可扩散氢浓度及氢陷阱数均高于焊缝。但这并不意味着此时母材的氢致开裂敏感性高于焊缝。氢在金属中扩散受到两个因素的影响:一是钢表面氢浓度,即阴极极化程度;二是组织结构,即缺陷位置的氢捕获点,如溶质原子、空位、夹杂物和沉淀物^[9]。氢致开裂的发生显然与焊缝处的组织结构有关,焊接过程中在焊缝和 HAZ 区发生了冶金相变,这种微观结构的转变显著地改变了金属固有的腐蚀行为,使母材的加工硬化基本丧失^[20]。对于焊接熔合线,先共析铁素体和晶粒内大量的铁素体组成,晶界面比较

宽,为氢在钢内的扩散提供了阻力比较小的通道,有利于氢在其内的扩散和渗透^[2];在 HAZ 过热区,存在粗大的贝氏体组织,这种组织具有更高的俘获 H 原子的能力,且 HAZ 具有大量的位错和杂质,位错运动导致氢迁移速度高于正常扩散的速度,从而表现出较高的氢扩散系数和氢陷阱数。而母材针状铁素体和珠光体间的界面以及 FeC₃ 都阻碍氢的扩散^[3]。当阴极极化程度增加至 -1200mV,钢表面氢浓度增加,氢渗透引起材料塑性降低而脆性增加,此时焊缝中氢聚集导致局部位置塑性变形达到临界值,直接导致氢致裂纹,氢被释放出来。而母材在 -850~-1000mV 时钢中氢浓度基本不变,但在 -1000~-1200mV 时氢压大幅增加。这一方面由于显微组织导致渗入的氢由于扩散阻力大,使可扩散氢浓度增加;另一方面,母材比焊缝具有较高的韧性,因此氢鼓泡能够继续长大。由此可见,对于 X80 钢焊缝,阴极电位 -1100mV 是临界值,当阴极极化程度超过此门槛值,焊缝中氢鼓泡将发展成氢致裂纹,导致氢致开裂。

4 结论

采用电化学氢渗透技术和微观观察方法研究不同阴极极化电位对 X80 钢及其焊缝在鹰潭土壤环境下的氢渗透行为。

(1) 氢在 X80 钢扩散行为既取决于阴极极化程度,又与组织结构有关。

(2) 随着阴极极化程度增加,X80 钢母材和焊缝氢致开裂敏感性均增加。焊缝的氢致开裂敏感性高于母材。阴极极化程度低于 -1000mV 时,母材和焊缝的析氢反应动力学不同。

(3) 当阴极极化程度大于 -1100mV 时,X80 钢焊缝表面氢鼓泡破裂,母材中氢浓度继续增加。母材的针状铁素体和珠光体对氢扩散的阻碍作用大于焊缝 HAZ 区粗大的贝氏体和熔合线先共析铁素体。

参考文献 (References)

- [1] Chen X, Du C W, Li X G, et al. Effects of cathodic potential on the local electrochemical environment under a disbonded coating [J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2009, 39(5): 697-704.
- [2] Liang P, Li X G, Du C W, et al. Stress corrosion cracking of X80 pipeline steel in simulated alkaline soil solution [J]. Materials and Design, 2009, 30(5): 1712-1717.
- [3] 王志英,王俭秋,韩恩厚,等.剥离涂层条件下 X70 管线钢的应力腐蚀裂纹萌生行为[J].金属学报,2012,48(10):1267-1272.
Wang Zhiying, Wang Jianqiu, Han Enhou, et al. Acta Metallurgica, 2012, 48(10): 1267-1272.
- [4] 张颖瑞,董超芳,李晓明,等.电化学充氢条件下 X70 管线钢及其焊缝的氢致开裂行为[J].金属学报,2006,42(5):521-527.
Zhang Yingrui, Dong Chaofang, Li Xiaogang, et al. Acta Metallurgica, 2006, 42(5): 521-527.
- [5] 任学冲,周庆军,褚武扬,等.金属中氢鼓泡形核的机理[J].科学通报,2007,52(6):725-729.
Ren Xuechong, Zhou Qingjun, Chu Wuyang, et al. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(6): 725-729.
- [6] Han Y D, Jing H Y, Xu L Y. Welding heat input effect on the hydrogen permeation in the X80 steel welded joints [J]. Materials Chemistry and Physics, 2012, 132(1): 216-222.
- [7] 张涛,姚远,褚武扬,等.管线钢氢致附加应力与氢致门槛应力的相关性[J].金属学报,2002,38(8):844-848.
Zhang Tao, Yao Yuan, Chu Wuyang, et al. Acta Metallurgica, 2002, 38(8): 844-848.
- [8] 曲炎森,黄峰,刘静,等.显微组织对 X80 钢氢致裂纹敏感性和氢捕获效率的影响[J].材料研究学报,2010,24(5):508-512.
Qu Yanmiao, Huang Feng, Liu Jing, et al. Chinese Journal of Materials Research, 2010, 24(5): 508-512.
- [9] 陈旭,何川,徐杨,等.氢对 X80 钢在土壤模拟溶液中电化学行为的影响[J].石油化工高等学校学报,2011,24(6):84-89.
Chen Xu, He Chuan, Xu Yang, et al. Journal of Petrochemical University, 2011, 24(6): 84-89.
- [10] 陈旭,吴明,何川,等.外加电位对 X80 钢及其焊缝在库尔勒土壤模拟溶液中 SCC 行为的影响[J].金属学报,2010,46(8):951-958.
Chen Xu, Wu Ming, He Chuan, et al. Acta Metallurgica, 2010, 46(8): 951-958.
- [11] Olden V, Alvaro A, Akselsen O M. Hydrogen diffusion and hydrogen influenced critical stress intensity in an API X70 pipeline steel welded joint: Experiments and FE simulations [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(15): 11474-11486.
- [12] Guedes F M F, Maffi S, Razzini G, et al. Scanning photoelectrochemical analysis of hydrogen permeation on ASTM A516 grade60 steel welded joints in a H₂S containing solution [J]. Corrosion Science, 2003, 45(10): 2129-2142.
- [13] Wang R. Effect of hydrogen on fracture of pre-cracking specimens of X70 pipeline steel [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2008, 28(2): 81-85.
- [14] Wang S H, Lu W C, Hou K F, et al. Hydrogen permeation in a submerged arc weldment of TMCP steel [J]. Materials Chemistry and Physics, 2002, 77(2): 447-454.
- [15] Kumkum B, Chatterjee U K. Hydrogen permeation and hydrogen content under cathodic charging in HSLA 80 and HSLA 100 steels [J]. Scripta Materialia, 2001, 44(2): 213-216.
- [16] Hardie D, Charles E A, Lopez A H. Hydrogen embrittlement of high strength pipeline steels [J]. Corrosion Science, 2006, 48 (12): 4378-4385.
- [17] 曹楚南.腐蚀电化学原理[M].2版,北京:化学工业出版社,2004:84.
Cao Chunan. Principles of electrochemistry of corrosion [M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 84.
- [18] Yen S K, Huang I B. Hydrogen permeation tests in laminates: Application to grain/grain boundary of AISI430 stainless steel [J]. Corrosion, 2003, 80(11): 995-998.
- [19] Yang Q, Qiao L J, Chiowell S, et al. Effects of hydrogen on pitting susceptibility of type 310 stainless steel [J]. Corrosion, 1998, 54 (8): 628-632.
- [20] 王晓燕,张雷,路明旭.双相不锈钢与微合金钢异金属焊接接头的组织及性能[J].北京科技大学学报,2008,30(2):131-136.
Wang Xiaoyan, Zhang Lei, Lu Mingxu. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30(2): 131-136.
- [21] 唐建群,巩建鸣. SPV50Q 钢焊接接头腐蚀和氢渗透性能分析 [J]. 焊接学报,2012,33(1):57-60.
Tang Jianqun, Gong Jianming. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(1): 57-60.

(责任编辑 朱宇)