

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2019.08.002

## 0.9强度比异种钢接头的氢脆性能

高心心<sup>1</sup>, 梁晓明<sup>1\*</sup>, 刘雨<sup>2</sup>, 杨化林<sup>1</sup>, 于立华<sup>1</sup>

(1. 青岛科技大学, 山东 潍坊 261500; 2. 青岛地铁运营分公司, 山东 青岛 266000)

**摘要:** 在海水环境中, 为探索新型异种钢接头的氢脆性能, 采用金相试验、氢渗透试验、动态充氢拉伸试验研究了该材料的氢渗透行为及氢脆敏感性, 并利用了扫描电镜观察断口组织形貌。结果表明: 焊接接头焊缝区氢的溶解度位于两母材之间, 与其致密的针状铁素体组织有关; 靠近低强度一侧母材的热影响区氢的有效扩散系数相对较小、氢溶解度较大, 具有明显的吸氢倾向, 与其区域金相显微组织粗大、缺陷较多有关。动态充氢拉伸试验结果表明: 随着极化电位的负移, 异种钢焊接件的断口延伸率和断面收缩率逐渐减小, 形貌特征由塑性向解理断裂方向转变, 氢脆敏感性增强; 当极化电位达到约-950 mV时, 氢脆现象显著, 断裂位置在靠近熔合线的焊缝区。

**关键词:** 异种钢接头; 显微组织; 电化学充氢; 氢脆性能

**中图分类号:** TG111.91

**文献标识码:** A

## Hydrogen Embrittlement of Dissimilar Steel Welded Joints with 0.9 Strength Ratio

GAO Xinxin<sup>1</sup>, LIANG Xiaoming<sup>1\*</sup>, LIU yu<sup>2</sup>, YANG Hualin<sup>1</sup>, YU Lihua<sup>1</sup>

(1. Qingdao University of Science and Technology, Wei fang 261500, China;

2. Qingdao Metro Operating Branch, Qingdao 266000, China)

**Abstract:** To explore the hydrogen embrittlement of new dissimilar steel welded joints in seawater, the hydrogen permeation behavior and hydrogen embrittlement sensitivity of the material were studied by metallographic test, hydrogen permeation test and dynamic hydrogen stretching test, and the fracture morphology was observed with SEM. The results show that the solubility of hydrogen in weld area of weld joint is between two base metal and its compact acicular ferrite structure. The effective diffusion coefficient of hydrogen is relatively small and the hydrogen solubility is large in HAZ near the side of low strength steel, which has obvious tendency of hydrogen absorption. And it is related to the large size and many defects of the metallographic microstructure of HAZ. The results of dynamic hydrogen stretching test showed that the fracture elongation and the section shrinkage of the dissimilar steel weldments gradually decreased with the negative shift of the polarization potential, and the fracture morphology gradually changes from plastic fracture to cleavage fracture direction, and the sensitivity of hydrogen embrittlement increases. When the polarization potential was about -950 mV, the hydrogen embrittlement phenomenon was obvious, and the fracture location was near the fusion line.

收稿日期: 2019-04-26

修回日期: 2019-05-05

通信作者: 梁晓明, email: 398386555@qq.com

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2018GNC112007), 山东省高校科研计划项目(J18KA015)

**Keywords:** dissimilar steel welded joints; microstructures; electrochemical hydrogen charging; hydrogen embrittlement

异种钢焊接件不但具有组件金属的优异性能,还可提高生产效益,已广泛应用于航海、化工等领域<sup>[1-2]</sup>。为了抑制其在介质中的腐蚀速度,一般采用阴极保护技术对其进行防护<sup>[3-4]</sup>;但是对材料施加电位的同时,氢会向金属内部扩散,在氢和应力的交互作用下,钢件易在较低强度极限作用下失效;因而对于一种新型异种钢焊接件,在服役前判定其性能时,研究氢对焊接接头的作用尤其重要<sup>[5-6]</sup>。目前学者针对 907、921A 等高强钢的部分性能进行了研究,但对屈服强度大于 900 MPa 的异种钢焊接件的阴极保护及析氢特性探索的研究较少<sup>[7]</sup>。因此,论文研究了新型异种钢接头的氢渗透行为及氢脆敏感性,对材料的使用和工程指导具有重大意义。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

材料为屈服强度为 900 MPa 和 1000 MPa 的钢件(用 A、B 表示)对焊而成。焊接时采用 CO<sub>2</sub> 气保焊,900 MPa 级气保焊丝,V 形坡口,余 3 mm 的钝边,焊接电流为 220 A,焊接电压为 24 V,焊接速度为 30 cm/min。

### 1.2 试样制备

金相试验所用试样尺寸为 60 mm×30 mm×5 mm,氢渗透试验试样为 Φ20×0.5 mm 的薄片,分别利用水砂纸进行逐级打磨,后抛光至镜面。其中氢渗透试样先用 4% 的酒精硝酸溶液进行浸蚀,区分出热影响、母材等区域后,沿各区域平行方向切取圆形薄片,两面抛光,在其两侧边缘焊接导线后,即刻进行试验。

动态充氢拉伸试验采用棒状试样,规格符合 GB/T228-2010 标准;中间为焊材,工作段尺寸为 Φ5×80 mm。

### 1.3 试验方法

金相试样的浸蚀液为 5% 的硝酸酒精溶液,设备为金相显微镜。

氢渗透试验利用电化学工作站监测、记录实验数据,试验装置选用 Devnathan-Stachurski 双电解池<sup>[8]</sup>。阴极侧主要对材料电化学充氢,阳极可检测

材料的氢扩散行为。首先对材料的阳极侧进行化学镀镍,后倒出镀镍液加入 0.2 mol/L 的 NaOH 溶液,并施加 150 mV(vs Hg/HgO)恒电位进行钝化;直到背景电流密度小于 10<sup>-7</sup> A/cm<sup>2</sup>时,在阴极室一侧加入青岛海域海水进行阴极极化,施加电位为 -1100 mV(vs SCE);两边电解池均采用铂铌丝为辅助电极。

拉伸试验设备使用型号为 CMT5205/5305 的电子万能试验机,拉伸速率设置为 0.005 mm/min;试验介质选用空气和海水,采用恒电位仪施加电位,利用饱和甘汞电极作为参比电极,铅板为辅助电极,极化电位区间为 -800~-1000 mV(vs SCE)。试验结束后立即用 XL-30 扫描电镜对断口形貌观察;部分断裂试样清洗并打磨后,用 5% 的酒精硝酸溶液浸蚀,观察断裂位置。

## 2 结果与分析

### 2.1 金相组织

图 1 为 900 MPa、1000 MPa 级高强钢母材(BM)、热影响区(HAZ)及焊缝(WM)的显微组织图,如图,母材区晶粒尺寸最大,其次为热影响区、焊缝区。各强度级别钢母材以片间距较小的索氏体为主,并含有少量碳化物和珠光体(图 1(a)、1(e));焊缝区主要由片状铁素体组成,致密性强,具有不定向性,呈短条状分布(图 1(d))。热影响区主要包括三个区域,粗晶区(CGHAZ)、熔合区(FZ)、焊缝,可见其晶粒大小不一,分布不均匀,可能与焊接温度和冷却速度有关。粗晶区分布有细小碳化物,主要由回火索氏体组成;熔合区是接头的组织突变地带,由贝氏体和铁素体组成。但两侧热影响区组织差异性略小<sup>[9]</sup>(图 1(b)、1(c))。

### 2.2 氢扩散行为

接头的氢渗透电流密度曲线如图 2 所示。可以发现,随时间延长,渗氢电流先增加后趋于稳定<sup>[10]</sup>;然而各区电流密度达到稳定时间较短,氢含量变化不大,可见静态充氢进入试样中的氢含量很少,对氢脆性能影响不明显。然而,对于母材 B(B-BM),饱和渗氢电流密度最小,为 1.54×10<sup>-2</sup> A/m<sup>2</sup>;焊

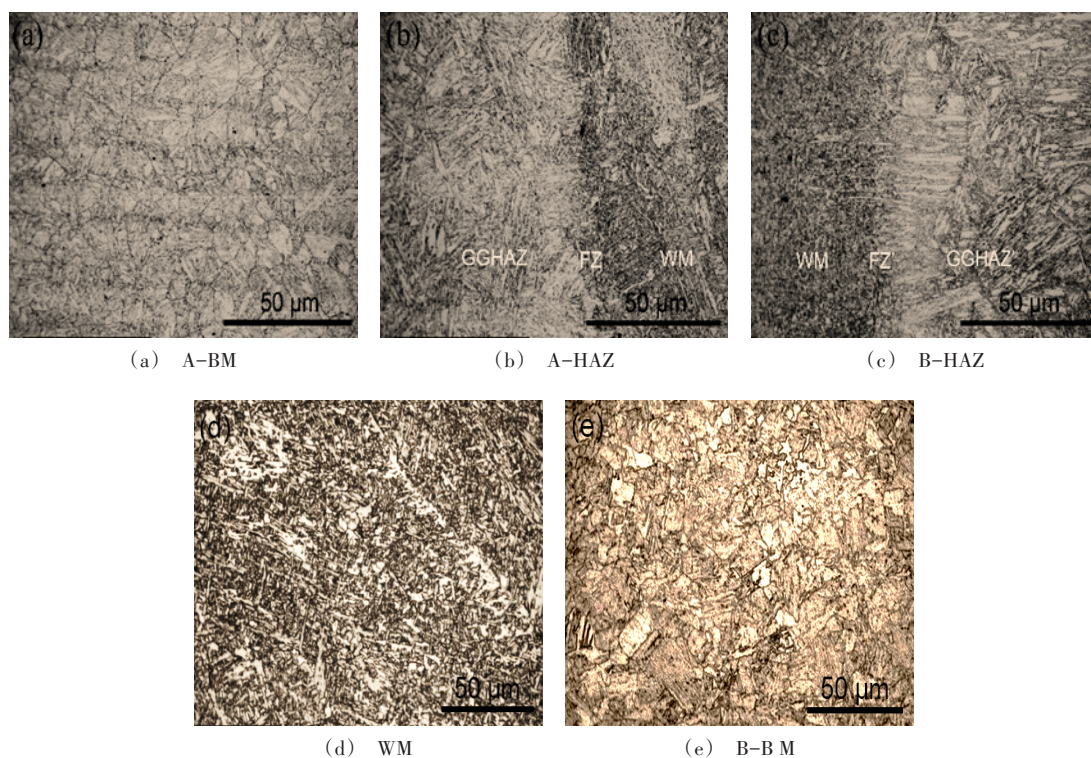


图1 异种钢接头的显微组织

缝区的电流密度为  $1.68 \times 10^{-2} \text{ A/m}^2$ , 介于母材 A(A-BM)、B 之间; A 侧热影响区(A-HAZ)的电流密度为  $3.23 \times 10^{-2} \text{ A/m}^2$ , 略高于 B 侧热影响区(B-HAZ)。可见, 接头两侧热影响区的渗氢电流密度最大, 具有较大的吸氢倾向。

由氢渗透公式<sup>[11]</sup>可得接头各微区的氢渗透参

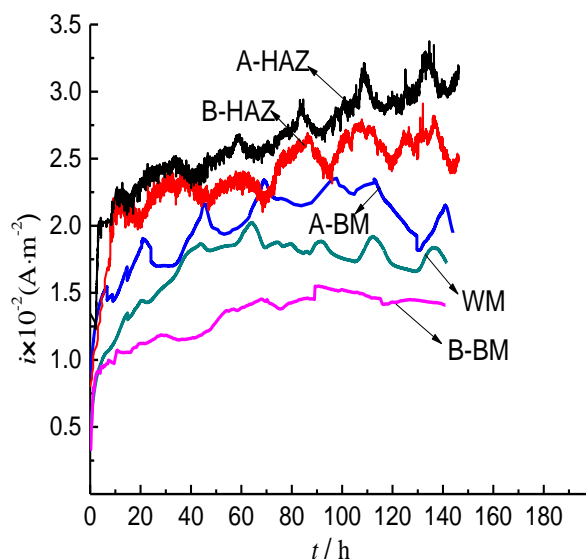


图2 异种钢焊接接头的氢渗透电流密度曲线

数如表1所示。各微区氢的有效扩散系数值差别较小, 不具有明显的规律性, 原因可能与两高强钢母材的成分相近有关; 其中, 氢在两侧热影响区的扩散系数相对较小, 与其区域显微组织粗大、缺陷较多会阻碍氢在金属内部渗透相关<sup>[12]</sup>。材料内部氢的溶解度由高到低依次为: A-HAZ、B-HAZ、A-BM、WM、B-BM。A-HAZ的溶解度最大, 为  $57.98 \text{ mol/Lm}^3$ ; WM的溶解度位于两母材之间, 为  $23.89 \text{ mol/m}^3$ , 可能与其致密的针状铁素体组织有关; B-BM的溶解度最小, 为  $22.33 \text{ mol/m}^3$ 。可见, 在海水腐蚀介质中, 氢原子更容易通过两侧 HAZ, 且通过速率在两区域相差不明显。

表1 异种钢接头的氢渗透参数

区域	$J_{\infty}/$ ( $\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ )	$D/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$C/$ ( $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$ )
A-HAZ	$3.34 \times 10^{-7}$	$1.44 \times 10^{-12}$	57.98
B-HAZ	$2.88 \times 10^{-7}$	$1.51 \times 10^{-12}$	47.68
A-BM	$2.38 \times 10^{-7}$	$1.64 \times 10^{-12}$	36.30
WM	$1.73 \times 10^{-7}$	$1.81 \times 10^{-12}$	23.89
B-BM	$1.59 \times 10^{-7}$	$1.78 \times 10^{-12}$	22.33



### 2.3 异种钢焊接件的氢脆敏感性

不同动态充氢条件下拉伸结果如图3所示,力学性能参数如表2所示。由应力-应变图可知,在

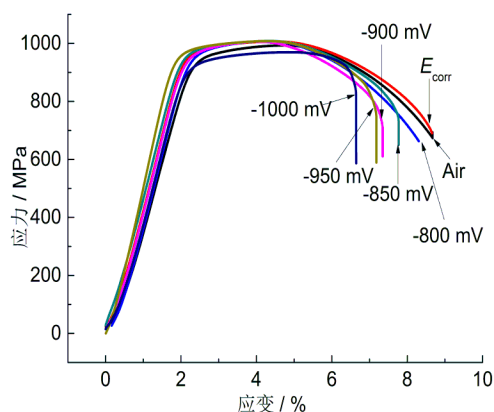


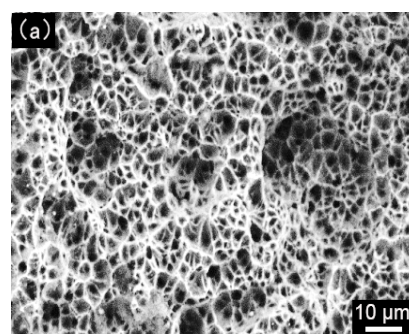
图3 异种钢接头的应力-应变曲线

弹性阶段,曲线的趋势一致,波动性不大,可见动态充氢对材料的弹性变形、屈服强度 $R_{p0.2}$ 和抗拉强度 $R_m$ 的影响很小;此外,曲线的最终断裂强度值接近母材A和焊缝的强度值,并且断裂位置均在A侧的焊缝区(靠近熔合线),这是由于焊缝区材料的自身强度较低,且组织分布不均导致的。随着极化电位负移,试样的延伸率和断面收缩率呈现下降趋势,当极化电位为-1000 mV时,分别为8.76%、38.53%,可见此时电位对材料的保护已不明显,有明显的氢脆趋向。

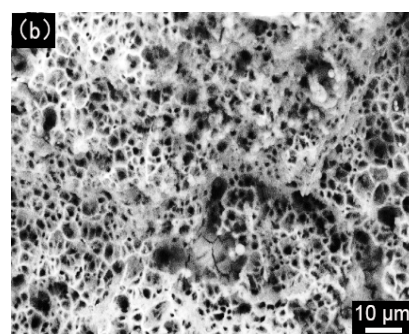
表2 异种钢接头的力学性能参数

$E/\text{mV}$	$R_{p0.2}/$ (MPa)	$R_m/$ (MPa)	$R_t/$ (MPa)	$A/\%$	$Z/\%$
Air	906	990	693	11.43	63.27
$E_{\text{corr}}$	914	999	690	11.41	62.30
-800	902	1003	662	11.01	60.81
-850	916	1005	650	9.92	58.01
-900	907	1001	613	9.73	51.83
-950	906	1004	589	9.61	46.12
-1000	889	970	592	8.76	38.53

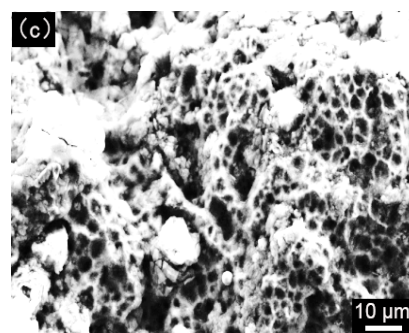
图4为材料焊接接头的断口组织图。在自腐蚀海水中,断口为等轴韧窝状,放射区面积较小,表现为韧性(图4(a));随电位变负,断口放射区所占面积逐渐增大,当电位为-800 mV时,仍为韧窝状



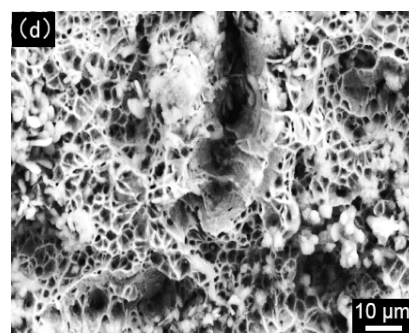
(a) 海水



(b) -800 mV



(c) -900 mV



(d) -950 mV

图4 异种钢焊接接头的断口微观形貌

断口形貌,但韧窝较浅且尺寸减小,有明显撕裂痕并有部分区域出现河流花样(图4(b));当极化电位

加增至 $-900\text{ mV}$ 时,有面积河流花样,断口边缘有细小裂纹,可见接近脆断危险区(图4(c));直至电位达到 $-950\text{ mV}$ 时,裂纹痕迹明显,出现解理平面,氢脆现象显著(图4(d))。

由于拉伸过程能加快材料内部位错运动,从而促进内部氢的扩散形成局部微裂纹,裂纹长大逐渐使材料发生断裂<sup>[13-14]</sup>。由氢渗透实验发现,随着施加电位的负移,材料内部充入的氢越多;因此,拉伸过程中韧性断裂会逐渐转变为脆性,且在电位负于 $-950\text{ mV}$ 时,为明显的氢脆断裂。

### 3 结 论

(1)通过氢渗透试验发现:异种钢焊接接头各微区的氢有效扩散系数值差别不大,但靠近低强度一侧母材的热影响区数值相对较小,与其区域显微组织粗大、缺陷较多有关。焊缝区氢的溶解度位于两母材之间,靠近低强度一侧母材的热影响区的氢溶解度相对较大,具有明显的吸氢倾向,更容易引起氢腐蚀。

(2)动态充氢拉伸试验结果表明:在海水介质下,随着施加电位变负,焊接件的延伸率和断面收缩率逐渐减小,断裂位置在低强度钢一侧靠近熔合线的焊缝区,断口组织特征由塑性向解理方向转变,氢脆敏感性能增强。且在极化电位达到 $-950\text{ mV}$ 时,氢脆断裂特征明显。

### 参考文献

- [1] Zhou C, Huang Q, Guo Q, et al. Sulphide stress cracking behaviour of the dissimilar metal welded joint of X60 pipeline steel and Inconel 625 alloy [J]. Corrosion Science, 2016, 110: 242-252.
- [2] Seifert H P, Ritter S, Shoji T, et al. Environmentally-assisted cracking behaviour in the transition region of an Alloy 182/SA508 Cl.2 dissimilar metal weld joint in simulated boiling water reactor normal water chemistry environment [J]. Journal of Nuclear Materials, 2008, 378 (2): 197-210.
- [3] Batt C, Ddodson J, Robinson M J. Hydrogen embrittlement of cathodically protected high strength steel in sea water and seabed sediment [J]. British Corrosion Journal, 2002, 37(3): 194-198.
- [4] Lindley C, Rudd W J. Influence of the level of cathodic protection on the corrosion fatigue properties of high strength welded joints [J]. Marine Structures, 2001, 14 (4): 397-416.
- [5] 刘玉, 李焰, 李强. 阴极极化对 X80 管线钢在模拟深海条件下氢脆敏感性的影响 [J]. 金属学报, 2013, 49 (9): 1089-1097.
- [6] 高心心, 郭建章, 张海兵. 1000MPa 级高强钢焊接件的氢脆敏感性研究 [J]. 材料导报, 2017, 31 (3): 93-104.
- [7] 孙永伟, 陈继志, 刘军. 1000MPa 级 0Cr16Ni5Mo 钢的氢脆敏感性研究 [J]. 金属学报, 2015, (11): 1315-1324.
- [8] LI H, WANG Z, CHEN L, et al. Research on Advanced Materials for Li-ion Batteries [J]. Advanced Materials, 2010, 21(45): 4593-4607.
- [9] 刘全坤. 材料成形基本原理 [M]. 合肥: 机械工业出版社, 2010.
- [10] Capelle J, Dmytrakh I, Pluvinau G. Comparative assessment of electrochemical hydrogen absorption by pipeline steels with different strength [J]. Corrosion Science, 2010, 52(5): 1554-1559.
- [11] Wang S H, Lu W C, Ho K F, et al. Hydrogen permeation in a submerged arc weldment of TMCP steel [J]. Materials Chemistry and Physics, 2003, 77 (2): 447-454.
- [12] 褚武扬. 断裂与环境断裂 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [13] 郭建章, 高心心, 张海兵. 异种高强钢气保焊焊接接头的氢脆敏感性 [J]. 金属热处理, 2017, 42 (7): 55-60.
- [14] 高心心. 异种高强钢焊接接头腐蚀及氢脆性能研究 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2017.