

30CrMnSiNi2 钢 TIG 焊接头电化学充氢后
扩散氢逸出特征及示踪

张敬强^{1,2}, 方洪渊¹, 王佳杰¹, 杨建国³

(1. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001;
2. 佳木斯大学 材料科学与工程学院, 佳木斯 154007; 3. 浙江工业大学 化工机械设计研究所, 杭州 310032)

摘 要: 高强度钢焊接接头不同区域组织对氢扩散与聚集的影响存在差异,采用显微镜摄影测氢法研究了电化学充氢条件下,30CrMnSiNi2 钢 TIG 焊接头不同区域扩散氢的逸出规律,观察了氢气泡大小及分布特征;采用氢原子微印技术对焊缝区的扩散氢进行了示踪研究,探讨了高强度钢焊接头扩散氢逸出分布特征与低碳钢完全相反的原因,结果表明,30CrMnSiNi2A 钢 TIG 焊接头扩散氢主要聚集在焊缝区及热影响区,焊缝区亚晶界为氢扩散和聚集的优先通道,组织中的内应力场是导致扩散氢聚集的根本原因. 研究结果对于研究焊接接头不同区域组织与扩散氢的关系提出了有益的思路.

关键词: 高强度钢焊接接头; 扩散氢; 氢气泡; 氢示踪

中图分类号: TG 457 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2015)10-0105-04

0 序 言

依据和有益的思路.

1 试验方法

1.1 试验材料

试验材料选用 30CrMnSiNi2 钢,化学成分见表 1. 焊接方法采用不填丝单道 TIG 自动焊,使用氩气做保护气体,焊接电流 140 A,电弧电压 20 V,焊接速度 100 mm/min,氩气流量 10 L/min,试件尺寸 70 mm×50 mm×2 mm,TIG 自动焊沿试样中心焊接一道,保证背面焊透,试件焊后表面磨平. 图 1 为焊接接头截面金相照片,其中焊缝区、熔合区和HAZ

表 1 材料化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of materias

C	Cr	Mn	Si	Ni	Cu	P	S	Fe
0.32	1.10	1.21	1.00	1.58	0.15	0.009 2	0.001	余量

焊接氢致裂纹是低合金高强度钢焊接时最容易产生的焊接缺陷,临氢环境使用的焊接接头也会产生氢致裂纹从而导致焊接结构服役过程中发生低应力脆断,造成灾难性事故^[1].

氢是影响焊接接头氢致裂纹的重要因素^[2],它在焊接接头中的行为与焊缝及母材显微组织有关,因此研究扩散氢在不同组织中溶解、扩散和聚集与分布状况的差异是彻底了解氢致裂纹的关键^[3,4]. 文献[5]采用显微镜下录像测氢法研究了低合金高强度钢焊接区扩散氢的微观行为. 焊接过程中焊接接头的氢源来自于焊缝,焊缝中的扩散氢会向热影响区和母材继续扩散,该方法无法对比研究相同氢环境下接头不同组织对扩散氢的影响. 相同的临氢环境,氢在低合金钢焊接接头中扩散及逸出微观行为尚未见报道.

以 30CrMnSiNi2A 钢 TIG 焊接头作为研究对象,通过电化学充氢的方法对焊接接头进行充氢处理,采用显微镜摄影测氢试验法^[6]对比研究在相同的渗氢条件焊接接头不同区域显微组织与扩散氢局部聚集、逸出规律之间的关系. 研究结果对于揭示焊接区组织状态、扩散氢与氢致裂纹的关系提供了试验

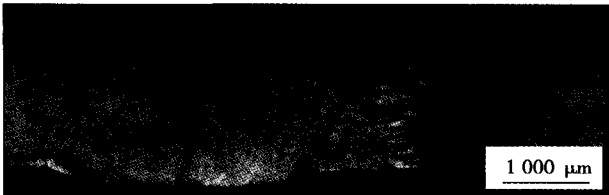


图 1 焊接接头金相组织

Fig. 1 Microstructure of welded joint

粗晶区为板条马氏体组织,母材区为回火索氏体组织。

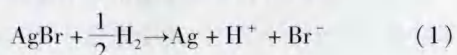
1.2 电化学充氢及扩散氢逸出观察试验

采用线切割方法将焊接试件加工成带有焊接接头的尺寸为20 mm×20 mm×2 mm试样,制备成金相试样后进行电化学充氢,充氢溶液0.5 mol/L H₂SO₄,充氢电流密度20 mA/cm²,充氢时间1 h。充氢时,铂电极为阳极,充氢试样为阴极。

扩散氢逸出观察试验采用显微镜摄影测氢法,充氢完毕的试样为准确观察扩散氢逸出情况,需再次进行机械抛光,用4%硝酸酒精溶液抛光表面进行浸蚀处理。此时在表面涂一层甘油作为扩散氢收集液,在甘油上加盖一个盖玻片,扩散氢从接头逸出以后进入甘油膜中形成氢气泡。这种在焊接接头表面逸出氢量的分布与接头内部扩散氢量的分布有一定的对应关系,因此可以通过考察金属表面逸出氢量的分布来研究电化学充氢以后焊接接头内部不同区域扩散氢的分布状况。把试块安放到GX71型光学显微镜下观察气泡逸出及分布情况进行拍照。

1.3 扩散氢示踪试验

采用线切割方法将焊接试件焊缝区加工成尺寸为10 mm×10 mm×2 mm试样,试样双面抛光,将其中一面粘贴保护膜,准备完毕进行电化学充氢,充氢溶液采用0.5 mol/L H₂SO₄溶液,加入250 mg/L的As₂O₃作为毒化剂,充氢电流密度采用5 mA/cm²,充氢时间为1 h。充氢完毕采用蒸馏水和乙醇进行清洗,吹干。将抛光面保护膜去掉,采用2%硝酸酒精溶液腐蚀30 s,在暗室中准备10 g AgBr与20 mL浓度为1.4 mol/L NaNO₂溶液的混合液,并在水浴锅中45℃加热半小时。将混合溶液均匀涂在试样抛光腐蚀面一侧,此时从组织中逸出的扩散氢会将银离子还原成银单质,反应方程如下,即



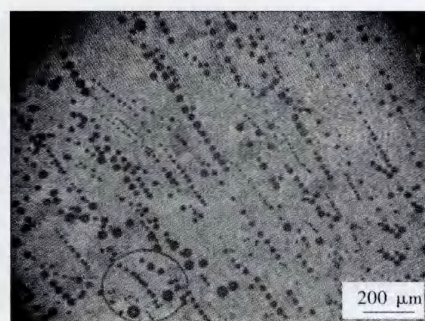
经过一定反应时间以后,使用0.6 mol/L Na₂S₂O₃与1.4 mol/L NaNO₂溶液的混合液对试样表面清洗3 min,去除未发生反应的AgBr。最后对试样表面进行SEM和能谱分析,银颗粒所处的位置正是扩散氢聚集和逸出位置。

2 试验结果

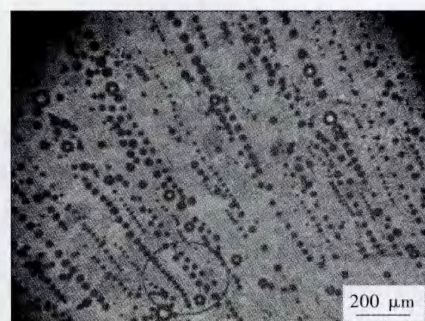
2.1 扩散氢逸出观察试验结果

图2为焊缝中心同一位置扩散氢逸出初期氢气泡形成及分布连续拍摄照片,取样位置见图1框选焊缝区,两次拍摄时间间隔10 s,图1中黑色小球即为扩散氢逸出以后在甘油膜中形成的氢气泡,呈链

条状分布,仔细观察时发现,这种链条式分布的氢气泡是从同一个位置连续发射出的氢气泡形成的。如图1中标记位置,这个位置类似于扩散氢“发射井”,10 s之内就能连续迅速发射出大量的氢气泡,该位置的本质应该是一个贮存扩散氢的氢陷阱,同时也发现该位置附近的两个氢气泡发生长大,但是从长大程度看,显然逸出扩散氢量远远小于“发射井”,可以判断,焊缝区至少存在两种氢陷阱,扩散氢逸出速度存在显著差异。



(a) 初始拍照时刻



(b) 10 s后

图2 焊缝区相同位置氢气泡逸出观察(间隔10 s)

Fig. 2 Macrograph of hydrogen bubbles in same position

为进一步研究扩散氢在焊接接头各区的分布和逸出特征,迅速对焊接接头每个区域进行拍摄,尽量达到同一时刻连续拍摄整个焊接接头各区氢逸出分布特征。获得的焊接接头显微组织扩散氢逸出照片如图3所示。

图3a为母材区氢气泡分布特征,尺寸为几十微米的黑色小球即为氢气泡,大部分呈线性分布,偶尔发现零星分布的气泡。仔细观察,还发现许多黑色细线,由更小尺寸的氢气泡组成。接近HAZ时发现一些相对较大的链条式分布的氢气泡,这些氢气泡实际来源于焊接区,如图3b所示。此时,粗晶区、熔合区已经发现大量长大了的氢气泡,焊缝区相应位置的氢气泡体积发生明显长大,这些大型氢气泡就

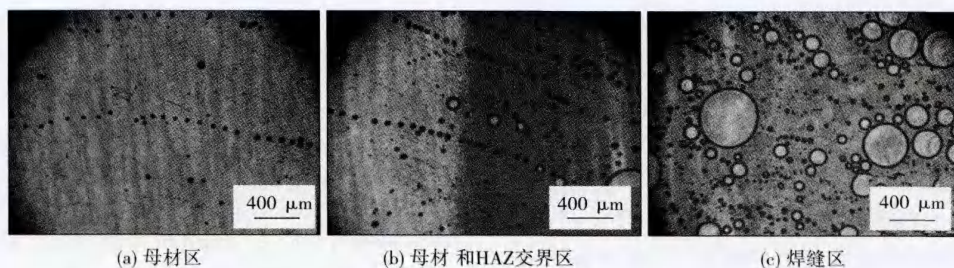


图 3 相同时刻焊接接头不同区域氢气泡逸出特征

Fig. 3 Distribution of hydrogen bubbles at joint in same moment

是最初观察的链条式气泡长大合并而成的(图 3c)。由图 3 可见,焊接接头各区氢气泡分布存在明显差异,焊接区的氢气泡数量和体积远大于母材区,这一现象表明焊接接头组织的变化对扩散氢聚集和逸出存在显著的影响。

2.2 扩散氢示踪试验结果

氢气泡逸出观察试验能够反应扩散氢在焊接接头局部区域的扩散和聚集规律的差异,但是无法确定扩散氢在组织中的逸出位置,而扩散氢的聚集和逸出位置对于研究氢致裂纹的产生具有重要意义,因此,通过氢原子微印技术对 30CrMnSiNi2A 钢焊缝区扩散氢逸出位置进行示踪研究。图 4 为焊缝区经过扩散氢示踪后的 SEM 分析。由图 4 可见,试样表面存在呈网状分布白色球颗粒,分布规律与焊缝胞状晶截面蜂窝状亚晶界相对应。对黑色金属 A 点及表面白色球形颗粒 B 点进行能谱分析,如图 5 所

示,分析结果显示黑色金属为母材,白色颗粒为 Ag 颗粒。这一试验结果说明,高强度钢焊缝中的亚晶界是扩散氢聚集的主要场所。

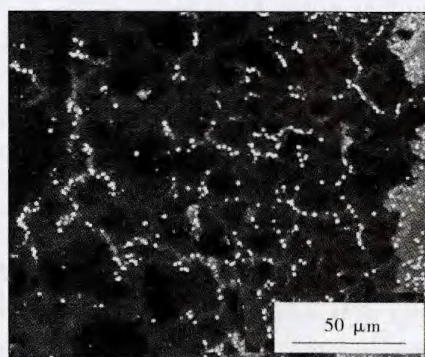


图 4 焊缝氢示踪后表面 SEM 形貌

Fig. 4 Surface morphology of weld metal (HMT)

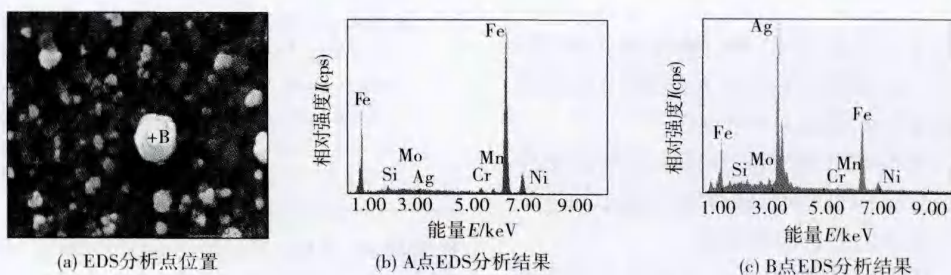


图 5 焊缝表面氢示踪后能谱分析

Fig. 5 EDS result at boundary of dendrites

3 结果分析与讨论

综上所述,在相同的充氢条件下,30CrMnSiNi2A 钢焊接接头的氢气泡大多数是从焊缝区析出的,相同观测时间内,焊缝区氢气泡数量多,气泡尺寸也大;母材区氢气泡数量少,尺寸也小。随着观测时间的推移焊接接头中各部位的扩散氢量增加,焊缝区

域扩散氢量随时间增加的量最多,这一特征与低碳钢焊接接头完全相反,文献[7]在进行低碳钢焊接接头扩散氢逸出分布规律研究时发现氢气泡主要分布在母材区。

根据氢陷阱理论,该现象的产生是由于接头不同组织中与扩散氢发生交互作用的晶格缺陷类型、性质存在差异所造成的;从本质上说,是由于不同组织中具有不同的内应力场所造成的。低碳钢焊接接

头焊缝组织和母材组织差别不大,主要是珠光体+铁素体类组织,二者之间的差异主要在晶界密度上,焊缝区由于晶粒粗大因此晶界密度比母材区要低,因此扩散氢在母材区扩展途径延长,扩散系数小,这已被试验所证明^[7]。对于 30CrMnSiNi2A 钢焊接接头,焊缝组织为板条马氏体组织,亚结构是位错,位错作为晶格缺陷存在着较大的内应力;母材为回火索氏体组织,碳化物从原马氏体板条析出以后,内应力获得释放,因此焊缝区的内应力要比母材区大。这种由于焊接过程中材料发生相变而产生的组织应力对扩散氢的影响,会掩盖晶界内应力场的作用,因此从宏观上看,扩散氢主要富集在焊缝区;另外,氢在板条马氏体中的扩散系数也比回火索氏体小也证明了这一点。

示踪试验显示焊缝区亚晶界为扩散氢扩散和聚集的优先通道。根据金属学和应力诱导氢扩散理论,对于一个晶粒的范围内,晶粒表面区即晶界位置是一个具有弹性扩张的区域,当间隙原子体积与基体金属原子相差很大时,如果基体金属晶格畸变引起弹性应力场,则“上坡扩散”机理控制应力对间隙原子扩散的诱导作用,也就是说间隙溶质原子易存在于受弹性扩张的点阵空间。因此氢原子作为间隙原子倾向于向晶界区富集,并且沿着晶界扩散。对于焊缝金属柱状晶的胞晶亚晶界同样也是一个弹性扩张区,电化学充氢后其中聚集的扩散氢浓度较高。

4 结 论

(1) 电化学充氢条件下,30CrMnSiNi2A 钢 TIG 焊接头扩散氢主要聚集在焊缝区及热影响区,焊接区的氢气泡数量和体积远大于母材区。

(2) 30CrMnSiNi2A 钢 TIG 焊接头不同区域中均发现呈线性分布的氢气泡,线性氢气泡由同一个氢陷阱中的扩散氢连续逸出而形成。

(3) 30CrMnSiNi2A 钢焊缝区马氏体组织亚结构位错形成的内应力对扩散氢具有诱导富集作用,亚晶界为扩散氢扩散和聚集的优先通道。

参考文献:

- [1] Liu X Y, Kameda J, Anderegg J W, *et al.* Hydrogen-induced cracking in a very-high-purity high-strength steel [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 492(1): 218–220.
- [2] Park G T, Koh S U, Jung H G, *et al.* Effect of microstructure on the hydrogen trapping efficiency and hydrogen induced cracking of linepipe steel [J]. *Corrosion Science*, 2008, 50(7): 1865–1871.
- [3] 谭长瑛, 张显辉. 焊接氢致裂纹的模拟与预测 [J]. *焊接学报*, 2002, 23(5): 1–4.
Tan Changying, Zhang Xianhui. Mathematical modeling and prediction of welding hydrogen-induced crack [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2002, 23(5): 1–4.
- [4] 陈忠孝, 张筑耀, 杨德新. 30CrMnSiNi2A 钢焊接 HAZ 的组织对氢行为和性能的影响 [J]. *焊接学报*, 1987, 8(2): 74–84.
Chen Zhongxiao, Zhang Zhuyao, Yang Dexin. Effect of HAZ of structure formed in welding steel of behavior of hydrogen and other properties [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 1987, 8(2): 74–84.
- [5] 杜则裕, 索伯雄, 张 智. 合金钢焊接区显微组织与扩散氢的动态分布关系 [J]. *焊接学报*, 1994, 15(4): 254–261.
Du Zeyu, Qin Boxiong, Zhang Zhi. Relation between microstructure and microdistributions of diffusible hydrogen in welded zone of alloyed steels [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 1994, 15(4): 254–261.
- [6] 任振安, 孙大谦. 灰口铸铁焊接区氢的微观分布及逸出特点 [J]. *焊接学报*, 1998, 19(4): 236–241.
Ren Zhenan, Sun Daqian. Microscopic redistribution behaviours and bubbling-up characteristic of residual diffusible hydrogen in the grey iron weldment [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 1998, 19(4): 236–241.
- [7] 张敬强, 付 雷, 王佳杰, 等. 低碳钢焊接接头氢渗透与氢损伤行为分析 [J]. *焊接学报*, 2014, 35(9): 23–27.
Zhang Jingqiang, Fu Lei, Wang Jiajie, *et al.* Hydrogen permeation and hydrogen damage behavior of low carbon steel welded joint. [J] *Transactions of the China Welding Institution*, 2014, 35(9): 23–27.

作者简介: 张敬强,男,1977 年出生,工学博士,副教授. 主要从事焊接力学与可靠性方面的科研和教学工作. 发表论文 10 余篇.
Email: jingqiangz@126.com

通讯作者: 方洪渊,男,教授. Email: hyfang@hit.edu.cn