

文章编号: 1006-2467(2010)S-0171-04

CLAM 钢等离子焊接接头组织与性能

沈 政¹, 陈希章¹, 雷玉成¹, 黄群英²

(1. 江苏大学 材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘 要: 以低活化马氏体(CLAM)钢为研究对象, 采用等离子弧焊接方法研究该材料的焊接接头微观组织和性能. 发现采用等离子弧焊焊接可以获得成形性良好、无缩孔、裂纹等缺陷的焊缝. 对焊接接头的显微结构、硬度和冲击性能进行测试分析, 结果表明焊缝区为回火马氏体组织, 经 760 °C/30 min 焊后热处理, 焊缝区硬度由 480 HV 左右下降到 320 HV, 冲击韧性明显提高.

关键词: 低活化马氏体钢; 等离子弧焊; 显微结构; 维氏硬度

中图分类号: TL 61.3 文献标志码: A

Microstructure and Mechanical Properties of CLAM Steel Joined by Plasma Arc Welding

SHEN Zheng¹, CHEN Xi-zhang¹, LEI Yu-cheng¹, HUANG Qun-ying²

(1. School of Material Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;
2. Institute of Plasma Physics, CAS, Hefei 230031, China)

Abstract: Reduced activation ferritic/martensitic steels (RAFM) is considered as the primary structural materials for ITER test blanket module. In this paper, China low activation martensitic (CLAM) steel was welded by plasma arc welding and its microstructure and mechanical properties were researched. Good welding quality was achieved when plasma arc welding was applied because no casting cracks and porosity were found in the welded zone. Microstructure, hardness and impact properties of the welded joints were tested and analyzed. The results show that the microstructure of seam is tempered martensite. After heat-treated at 760 °C for 30 min, the hardness of the welded zone declines from about 480 HV to 320 HV, and the impact properties of joints increased significantly.

Key words: CLAM steel; plasma welding; microstructure; vickers hardness

2003 年以来, 为顺应国际热核聚变实验堆 (ITER) 国际合作计划以及相关包层的发展需求, 中国科学院、中国原子能研究院等单位合作进行了 ITER 实验包层模块的设计研究, 并且取得了较好的进展^[1-3]. 低活化马氏体/铁素体钢 (RAFM) 被公认为是该系列包层设计的首选结构材料^[4], 而

RAFM 钢的焊接是其走向实际应用的关键技术之一.

目前, RAFM 钢的焊接方式主要有扩散焊接和熔化焊接两大类. 扩散焊接可用于复杂形状的大面积焊接, 无热影响区存在, 不需相关的性能恢复工序, 但是其接头冲击性能不理想. 李春京等研究显

收稿日期: 2010-06-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50905079)

作者简介: 沈 政 (1985-), 男, 江苏盐城市人, 硕士生. 主要研究方向为新材料焊接.

陈希章 (联系人), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师. 电话 (Tel.): 0511-88780191; E-mail: kernel.chen@gmail.com.

示,热等静压扩散焊(HIP)焊接接头冲击性能不及母材的10%^[5],其进一步改进措施正在研究中。RAFM钢的熔化焊所选用的焊接方法有钨级氩弧焊(TIG^[6])、电子束焊(EB^[7])等。与TIG焊相比,等离子弧焊接具有电弧挺度大、能量集中、热影响区小、焊接变形小等特点;与电子束焊接相比,等离子焊接不需要真空环境,所需的设备简单,现场操作性强。本文采用等离子焊作为焊接热源对CLAM钢进行焊接,通过对焊接接头各部分性能测试,利用金相显微镜和扫描电镜观察CLAM钢焊接接头微观组织、断口形貌,以对等离子焊接方法实用性加以初步评估。

1 实验工艺

本实验样品取自中科院FDS编号为CLAM HEAT 0912A的材料。CLAM钢铸件经去除表面氧化部分,在1200℃热加工成所需尺寸,再进行热处理,过程为:980℃/30min奥氏体化处理后水淬,经760℃/90min回火处理所得,其化学成分见表1。

表1 CLAM钢的化学成分

Tab.1 The chemical composition of CLAM steel

成分	Cr	W	V	Ta	Mn	C	Fe
设计	9.00	1.50	0.20	0.25	0.45	0.10	余量
测试	8.91	1.44	0.20	0.15	0.35	0.12	余量

等离子焊接过程中,使用纯氩气保护,氩气流量为10L/min,CLAM钢焊接单面焊双面成型,背部垫有铜板。焊接钢板厚为3mm,板厚较薄,所采取的焊接工艺选择为:焊接速度50mm/min,焊接电流60A。焊接完成后,焊缝经过外观检查,未发现未焊透、裂纹等焊接缺陷。焊后取出其中部分试样进行焊后回火处理,以方便比较热处理对于焊接接头组织与性能的影响。热处理工艺选择为随炉升温至760℃保温30min后空冷^[8]。

2 实验结果与分析

2.1 光学显微观测与分析

制备金相试样时,在垂直于焊缝的方向,截取焊接接头横截面,利用镶嵌机镶嵌成 $\varnothing 30$ mm的试样,使用200#、400#、600#、800#、1000#金相砂纸逐级打磨,随后在抛光机上进行抛光,最后使用苦味酸-盐酸酒精溶液(苦味酸:盐酸:酒精=5g:5ml:100ml)对试样进行侵蚀,使能够清晰观察到金相组织。利用金相显微镜分别对焊接接头的焊缝、熔合

线、正火区、回火区的组织进行观察。图1为等离子弧焊接接头各部分金相组织图。

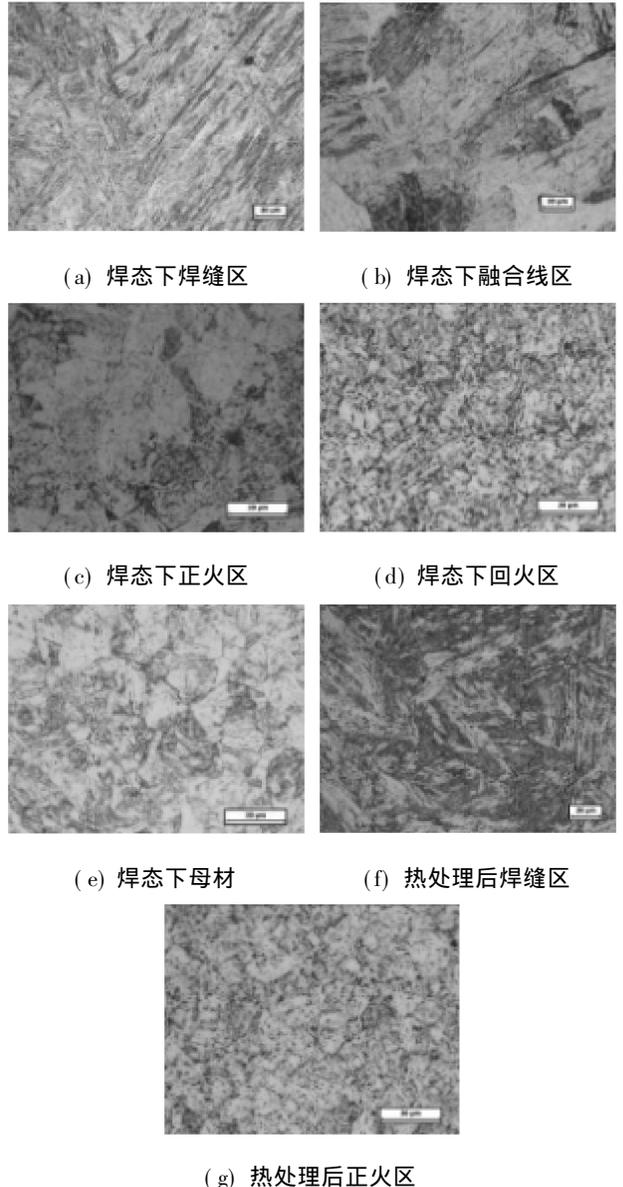


图1 焊接试样各区显微组织

Fig.1 Microstructure of welded sample

观察各区域的金相组织图,可以看到焊接接头各区域金相组织有明显差异,图1(a)是焊缝区的金相组织图,在焊接过程中,焊缝金属的温度在1700℃以上,晶体重熔结晶,结晶后焊缝区形成的板条马氏体晶粒尺寸较大,焊缝处全部是粗大的板条马氏体结构,从图中可以明显观察到密集排列分布的粗大的马氏体板条束。图1(b)为CLAM钢焊接接头的熔合区,焊接过程中,熔合区形成温度为CLAM钢的熔化温度。此处晶粒内部局部熔化,晶界处全部熔化,与液态金属熔池相连接,形成连生结晶,材料组织性能不均匀。熔合区为马氏体、少量的铁素体和少量魏氏体组织。

图 1(c) 为 CLAM 钢焊接件的正火区, 此部分靠近焊缝区域, 由于受焊接热循环影响, 受热温度较高, 金属处于过热状态(固相线以下到 1 100 °C 左右), 同时高温持续时间较长, 致使此区域奥氏体晶粒急剧长大, 奥氏体晶粒所处温度越高生长速度越快, 由此靠近焊缝的热影响区也形成了粗大的奥氏体晶粒, 并且越靠近熔合线附近的晶粒尺寸越大. 由于焊接板件较薄, 其背部垫有铜块, 粗大的奥氏体晶粒快速冷却, 最终形晶粒较为粗大的板条马氏体+铁素体.

图 1(d) 和图 1(e) 分别为回火区、母材区金相组织图. 回火区离焊缝较远, 受热温度较低且高温持续时间短, 金属未能转变为奥氏体或者奥氏体晶粒来不及长大, 所以会获得和母材相似的马氏体+少量的铁素体组织. 从图 1(d) 中可以看出, 回火区组织较母材而言, 晶粒发生了粗化, 马氏体组织含量有所降低, 出现了大量的等轴晶粒, 这说明在进行焊接的过程中回火区发生了再结晶.

图 1(f) 为热处理后焊缝区金相组织图, 与图 1(a) 相比, 可以看出焊后热处理焊件焊缝区的马氏体组织较焊态情况下更加细密均匀. 图 1(g) 为焊后热处理焊件正火区金相组织图, 从图 1(c) 中可以看到有少量颗粒状碳化物的析出, 而在图 1(g) 中可以看到大量的碳化物弥散析出. 经回火后, 马氏体部分分解, 细粒状的碳化物从马氏体中析出, 并聚集粗化, 最终成为较大的颗粒.

2.2 冲击性能实验

冲击实验是检验材料在快速载荷作用下韧性大小的实验方法. 实验根据 GB/T 229-2007 焊接接头冲击实验方法, 制取 V 缺口冲击试样, 利用夏比冲击实验机测试了 CLAM 钢焊缝在室温下的冲击功. 所制试样为 55 mm × 10 mm × 2.5 mm 的小尺寸试样.

从表 2 的冲击实验的数据结果来看, 在相同的条件下, 未经热处理件冲击功明显较低, 其冲击功为 10 J/cm², 只为经 760 °C/30 min 焊后回火处理件冲击功的 12% 左右.

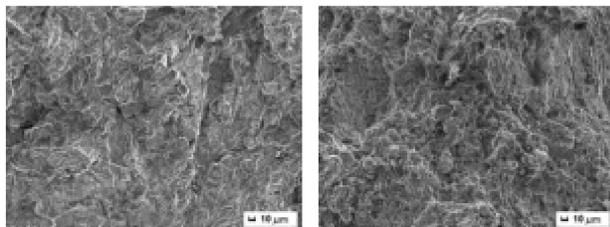
表 2 冲击韧性实验结果

Tab. 2 Impact toughness results

试样	实验温度/°C	冲击功/(J·cm ⁻²)	备注
760 °C/30 min	20	80	塑断
未热处理	20	10	脆断

图 2(a) 为未经热处理焊缝冲击断口 SEM 图, 图像显示: 其断裂方式为脆性解理断裂, 冲击断口如

图所示, 可以看到明显的河流花样. 图 2(b) 为热处理后焊缝冲击断口 SEM 图, 可以看出热处理后焊件焊缝断裂方式为塑性断裂, 以韧窝为主. 试样焊缝处金相显微组织见图 1(a)、图 1(f), 焊后热处理对焊件组织有一定的均匀化作用, 试样回火以后, 马氏体部分分解, 晶粒细化, 碳化物弥散分布.



(a) 未热处理 (b) 热处理

图 2 室温冲击断口形貌

Fig. 2 Impact fractographs of joint (rm)

由以上讨论可知, 等离子焊接焊件在焊态条件下冲击性能不太理想, 但 760 °C/30 min 回火处理以后, 焊接接头的冲击性能具有明显改善, 冲击韧性大幅度提高. 其原因是焊后回火热处理改善焊缝组织性能, 使焊缝组织更加均匀, 焊缝区的组织应力和内应力再次减小了, 降低了其局部显微结构开裂倾向, 使裂纹扩展阻力增大, 同时细小的第二相析出可以阻碍加热时位错的重新分布, 又可以阻碍界面的迁移, 可以控制晶粒生长, 细化晶粒. 从而提高了焊件冲击韧性.

2.3 硬度性能实验

硬度测试采用 HVS-1000 型显微硬度计对焊接接头的横截面进行显微硬度测量. 所加载荷为 0.98 N, 加载时间为 20 s, 测试点间距为 1 mm.

在焊接过程中距离焊缝越远的区域, 焊接时最高受热温度越低, 母材所受热影响最小, 硬度变化不大. 焊缝内部组织为完全马氏体组织, 硬度明显高于其他区域的硬度, 所以焊件硬度由焊缝到两侧母材呈从高到低的对称分布, 接头各区域硬度分布见图 3.

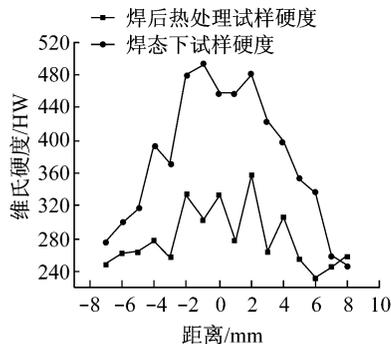


图 3 焊接接头硬度

Fig. 3 The hardness of welding joint

由图3(以焊缝中心为原点)可以看出,未经焊后热处理试样焊缝的平均硬度在480 HV左右,热影响区的平均硬度约为350 HV,母材的平均硬度约为260 HV.焊后热处理试样焊缝的平均硬度值约为320 HV,母材的平均硬度约为250 HV,热影响区的平均硬度与母材区的硬度大致相同,约为260 HV.

马氏体的形貌数量可以间接地反映焊接区域的硬度.由上面金相分析可知,经焊后热处理,马氏体组织经过了再次回火处理后,产生回火马氏体,细化了晶粒并使得部分碳化物弥散分布,热处理后焊件各区域硬度有不同程度的下降.图3显示焊接接头焊缝、热影响区处的硬度有较大的下降,降值约为160、100 HV.从总体分布情况来看,焊接件的硬度分布规律没有太大改变,试样的硬度分布比较均匀.

3 结论

本文采用等离子弧焊方法,通过对CLAM钢等离子焊接件不同部位的硬度测量、冲击性能检测和显微结构分析表明:

(1) CLAM钢可以采用等离子弧焊的焊接方法进行焊接,在焊缝区成型良好.硬度测量发现,从焊缝向两边经热影响区到母材区硬度成对称分布.

(2) CLAM钢等离子焊接接头在焊态条件下其性能不太理想.但经过760 °C/30 min的焊后热处理后,焊缝的硬度明显降低,焊缝金属韧性由10 J/cm²提高到80 J/cm².焊缝区硬度由480 HV左右下降到320 HV,与母材区硬度相近.这说明焊后热处理对改善等离子焊接性能有显著的效果.

参考文献:

[1] 黄群英, 郁金南, 万发荣, 等. 聚变堆低活化马氏体钢的发展[J]. 核科学与工程, 2004, 24(1): 56-64.
HUANG Qunying, YU Jinnan, WAN Farong, *et al.* The development of low activation martensitic steels for fusion reactor [J]. **Chinese Journal of Nuclear**

Science and Engineering, 2004, 24(1): 56-64.

- [2] ZHAO Fei, YU Kuibei, WAN Farong, *et al.* The structure and properties of Low activation ferritic/martensitic steels [C]. **Materials Science Forum**, 2005, 475-479: 1383-1386.
- [3] 赵飞, 万奎贝, 乔建生, 等. 低活化马氏体钢的微观结构与力学性能[J]. 核科学与工程, 2007, 27(1): 59-63.
ZHAO Fei, WAN Kuibei, QIAO Jiansheng *et al.* The microstructure and mechanical properties of China low activation martensitic steel [J]. **Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering**, 2007, 27(1): 59-63.
- [4] Tamura M, Hayakasa H, Tanimura M, *et al.* Development of potential low activation ferritic and austenitic steels [J]. **Journal of Nuclear Materials**, 1986, 141-143: 1067-1073.
- [5] 李春京, 黄群英, 吴宜灿, 等. 中国低活化马氏体钢 CLAM 热等静压扩散焊接初步研究[J]. 核科学与工程, 2007, 27(1): 55-58.
LI Chunjing, HUANG Qunying, WU Yican, *et al.* Preliminary study on hot isostatic pressing diffusion welding for China low activation martensitic (CLAM) steel [J]. **Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering**, 2007, 27(1): 55-58.
- [6] 乔建生, 赵飞, 黄依娜, 等. CLAM 钢的钨极氩弧焊及焊接后的结构与性能[J]. 核科学与工程, 2008, 28(4): 354-361.
QIAO Jiansheng, ZHAO Fei, HUANG Yina, *et al.* The microstructure and mechanical properties of China low activation martensitic steel joined by tungsten inert gas welding [J]. **Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering**, 2008, 28(4): 354-361.
- [7] Alamo A, Castaing A, Fontes A, *et al.* Effects of thermal aging on the mechanical behavior of F82H Weldments [J]. **Journal of Nuclear Materials**, 2000, 283-287: 1192-1195.
- [8] 邵奇栋. 中国低活化马氏体钢 TIG 焊微观组织与力学性能的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2010.