

doi: 10.3969/j.issn.1671-7775.2010.05.009

热处理对 CLAM 钢 TIG 焊接接头显微组织影响

雷玉成¹, 邵奇栋¹, 朱 强¹, 尹 莎¹, 巨 新²

(1. 江苏大学 材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 北京科技大学 物理系, 北京 100083)

摘要: 采用 TIG 焊接方法对中国低活化马氏体钢 (CLAM 钢) 进行了平板对接试验, 分别对焊接接头采用不同温度的焊后热处理, 试验温度分别为 610, 660, 710, 760, 810 °C, 保温 30 min. 结果表明, 焊后进行热处理与不做热处理两种情况下, CLAM 钢焊接接头微观形貌和硬度存在很大不同; 随温度增加, 焊接接头焊缝中马氏体板条分布及尺寸均匀性得到提高, 热处理温度 710 °C 以上时板条均匀性最好, 但晶粒尺寸与板条也会随温度升高而长大. 焊后热处理使焊接接头各部分硬度随热处理温度的升高而逐渐降低, 焊缝金属硬度下降值比母材和焊缝热影响区大得多, 尤其在 810 °C 时焊缝金属硬度下降值最大, 降至与母材硬度相当.

关键词: CLAM; TIG; 热处理; 微观结构; 硬度

中图分类号: TG404 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-7775(2010)05-0535-04

Effect of post weld heat treatment on microstructure and hardness on CLAM steel TIG weld

Lei Yucheng¹, Shao Qidong¹, Zhu Qiang¹, Yin Sha¹, Ju Xin²

(1. School of Material Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 2. Physics Department, University of Science and Technology of Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: China Low Activation Martensitic (CLAM) steel was butt-welded by tungsten-inert-gas welding. Post welding heat treatment (PWHT) was performed at different temperatures (610, 660, 710, 760, 810 °C) for 30 min. There is great difference on microstructure and hardness of CLAM steel TIG weld before and after PWHT. With the rise of PWHT temperature, the distribution and size of martensitic lath are more uniform, especially above 710 °C. But the size of crystal and the martensitic lath width are growing. PWHT made the hardness of the welding joint lower. The higher the post welding heat treatment temperature is, the lower the hardness results are. The hardness of weld metal decreased more than that of the heat affected zone and the base metal. When the PWHT temperature reached 810 °C, the hardness of the weld material dropped obviously, almost reaching the hardness of the base metal.

Key words: CLAM; TIG; heat treatment; microstructure; hardness

低活化铁素体/马氏体钢 (reduced activation ferritic/martensitic, 简称 RAFM) 具有耐高温、耐腐蚀、抗辐照肿胀以及较高的热物理性能和力学性能, 是聚变反应堆第一壁和聚变反应堆包层的首选结构材

料^[1]. 通过运用 W, Ta 和 V 等合金元素取代常规铁素体/马氏体钢中的 Mo, Nb 和 Ni 等元素来实现材料的低活化性能^[2].

近年来, 国际聚变堆研究形势发展迅速, 各国均

收稿日期: 2009-07-30

基金项目: “973”国家重点基础研究计划项目 (2008CB717802); 江苏省研究生创新计划项目 (CX09B_195Z)

作者简介: 雷玉成 (1962—), 男, 天津人, 教授, 博士生导师 (ylei@ujs.edu.cn), 主要从事焊接工艺及设备、焊接过程控制及模拟等研究.
邵奇栋 (1984—), 男, 浙江湖州人, 硕士研究生 (shao9@126.com), 主要从事 CLAM 钢焊接性能的研究.

在发展和研究各自的低活化铁素体/马氏体钢,如 JLF-1, F82H, EUROFER97, 9Cr-2WVTa 等^[3-5]. 我国聚变反应堆设计研究人员在充分了解和掌握目前聚变堆设计研究中对结构材料的要求、国际发展趋势及最新研究成果的基础上,设计并研制了具有中国自主知识产权、成分及性能优化的中国低活化马氏体钢(china low activation martensitic, 简称 CLAM).

焊接是制造聚变反应堆包层模块的一道必不可少的生产工序. 研究 RAFM 钢采用不同焊接方法时接头的性能^[6-7], 成为 RAFM 钢成分设计研究之外又一研究重点. 焊接接头中焊缝金属微观结构和性能与母材有所不同, 对焊接接头进行焊后热处理, 可以有效提高微观组织均匀度, 消除焊后残余应力. 所以选择合适的焊后热处理工艺, 对于焊接接头性能有着重要的影响.

国内外有文献报道, 焊后热处理可改善 RAFM 钢焊接接头性能^[8-10], 但关于如何选择 CLAM 钢熔化焊接接头焊后热处理工艺的相关报道很少. 本研究拟对 CLAM 钢 TIG 焊接接头焊后热处理工艺进行初步研究, 以获得理想的 CLAM 钢 TIG 焊接接头性能.

1 试验

试验采用的材料是 CLAM 钢板材, 厚 10 mm, 微观组织为板条马氏体, 并在晶内和晶界处分布着起到弥散强化作用的尺寸约为 30~100 nm 的析出碳化物, 主要为 $M_{23}C_6$ 型碳化物^[3-4]. 其中 $w(\text{Cr})=8.91\%$, $w(\text{W})=1.44\%$, $w(\text{V})=0.20\%$, $w(\text{Ta})=0.15\%$, $w(\text{Mn})=0.35\%$, $w(\text{C})=0.12\%$, $w(\text{Al})=0.18\%$, 其余为 Fe.

经如下热处理: 980 °C/30 min/水冷淬火, 760 °C/90 min/回火处理. 采用线切割的方法将板材加工成 5 mm 厚板材. 焊丝直径为 2 mm, 材质为同炉次的 CLAM 钢. 将 2 块 90 mm × 40 mm 的矩形板材用手工氩弧焊对焊(沿板材轧制方向), 在 90 mm 的长边上开 V 型坡口, 焊层数为 2 层, 如图 1 所示.

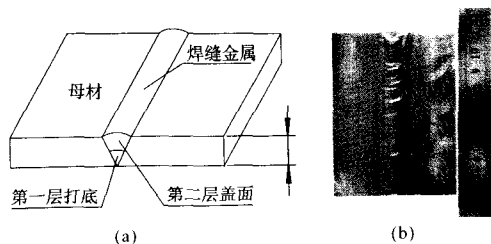


图1 焊接示意图与实际焊接接头

Fig. 1 Welding schematic and welding joint

焊接前对焊件进行清理, 以免有油污、水锈等残留在焊接部位, 从而产生缩孔或裂纹. 在第 1 层打底焊时, 采用氩气背面保护, 完成打底焊后用钢刷清根. 层间温度达到 200 °C 时, 进行第 2 层盖面层焊接.

沿垂直于焊缝方向, 将试样用线切割成 6 个试样. 对试样进行标号. 1 号试样不进行焊后热处理, 2 至 6 号试样分别进行 610, 660, 710, 760, 810 °C 的焊后热处理, 保温 30 min.

试验结束后, 截取焊接接头的横截面, 进行硬度测试、金相观察和扫描电镜观察. 金相显微镜为 LEICA DM 2500M 正置透反射显微镜, 扫描电镜机器型号为 JEOL-JSM-7001F.

2 结果与讨论

2.1 光学显微观测

图 2 为 1 号试样(未经焊后回火热处理)的焊接接头光学显微镜照片.

焊接接头各部位晶粒尺寸有明显差异, 从母材—焊缝热影响区—第 1 层打底层—第 2 层盖面层晶粒尺寸依次变大.

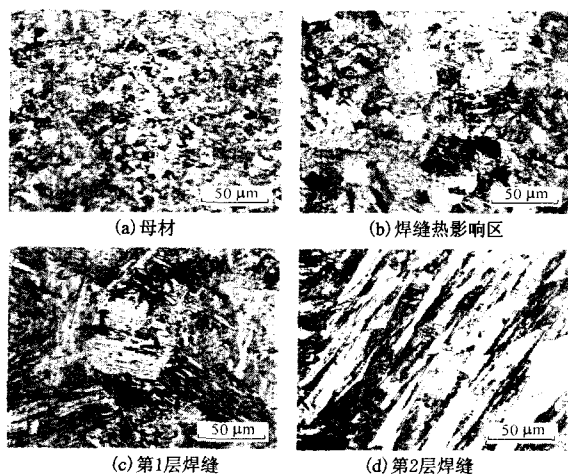


图2 未经焊后热处理的焊接接头 OM 形貌

Fig. 2 OM macrostructure of joint without post weld heat treatment

图 2a 为 CLAM 钢焊接接头母材, 由图可以看出 CLAM 钢的显微组织为马氏体和少量铁素体, 原奥氏体晶粒尺寸大都在 5~10 μm, 分布较均匀. 焊接过程中, 焊缝边缘受到焊接热循环的作用, 导致其晶粒长大.

图 2b 为焊缝热影响区的组织形貌, 为典型的马氏体结构, 晶粒尺寸在 40 μm 左右.

在焊接过程中, 焊缝金属的温度在 1 700 °C 以

上,晶体重熔结晶,晶粒尺寸变大,但不同层上的显微形貌又有明显不同. 比较图 2c 和 2d,不难发现,第 2 层盖面层晶粒尺寸更大,图 2d 中存在粗大的马氏体板条,而第 1 层打底层虽同为马氏体板条结构,马氏体板条明显小于第 2 层,晶粒尺寸在 100 μm 左右.

第 1 层与第 2 层焊缝区别明显,主要原因在于热输入量及散热环境都不同. 假设单位横截面上热输入量相同,第 1 层焊缝横截面积小,总的热输入量小,同时热量通过两边母材进行快速散失. 而第 2 层焊缝热输入量大,同时第 1 层焊缝焊接时预热并未完全散失(层间温度),导致了第 2 层焊缝晶粒变大.

2.2 扫描电镜观测

图 3 为 CLAM 钢 TIG 焊接接头扫描电镜金相显微图. 由图可知,焊缝金属与母材的微观结构有很大区别. 图 3a 是未受热处理焊缝金属,可以看出在焊缝金属中其金相组织为马氏体组织,在原奥氏体晶粒中存在的马氏体板条表现出 2 个特性:板条分布不均;板条粗细不均. 而经热处理后马氏体板条形状和分布发生明显变化,随焊后热处理温度增加,板条存在进一步均匀化的趋势. 图 3b-d 中板条所占面积较图 3a 进一步扩大. 当热处理温度达到 710 $^{\circ}\text{C}$ 以上时,从图 3e 和 3f 中可以发现密集排列的马氏体板条,且板条均匀度也更高. 但同时热处理温度的提高使得板条较未热处理焊缝板条(图 3a)有长大趋势,晶粒度也随之增加.

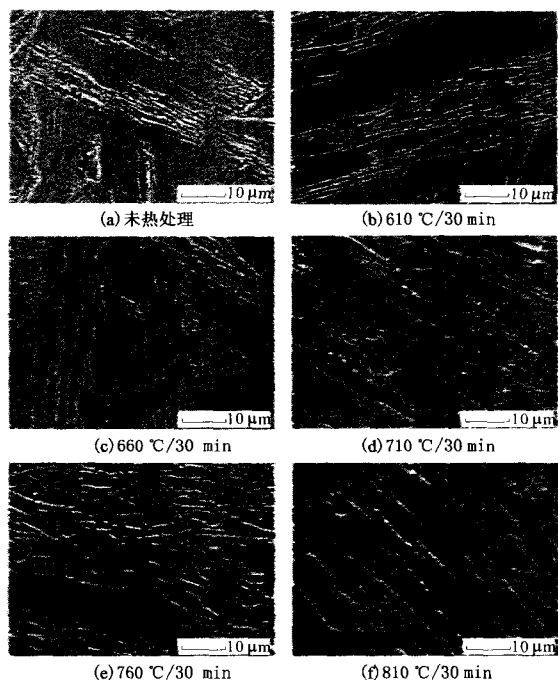


图 3 焊缝金属 SEM 形貌

Fig. 3 SEM macrostructure of welding material

图 4 为经 760 $^{\circ}\text{C}/30\text{ min}$ 热处理的焊接接头碳化物分布图. 由图可知,在原奥氏体晶界和板条上存在大量碳化物,且碳化物多为 M_{23}C_6 型,弥散分别于晶界与晶粒之上^[4]. 在焊缝区,碳化物的尺寸较小,多为棒状(图 4a);母材内的碳化物多为颗粒状,并且出现球化现象(图 4b). 这是由于低碳钢的板条马氏体形成温度高,发生自回火现象,即在板条马氏体形成后过饱和的碳发生部分分解,在马氏体晶体内析出碳化物质点.

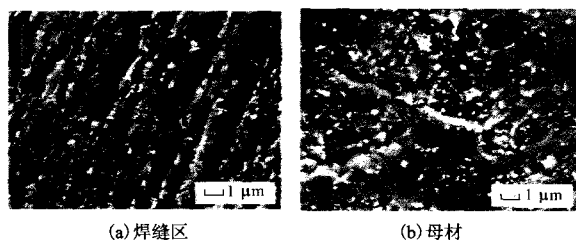


图 4 经 760 $^{\circ}\text{C}/30\text{ min}$ 热处理的焊接接头碳化物分布

Fig. 4 Carbide distributions in welding joints after PWHT at 760 $^{\circ}\text{C}/30\text{ min}$

2.3 微观硬度分析

如图 5 所示,1 号试样为未经焊后热处理焊接接头硬度分布图(焊缝中心为坐标 0). 从硬度曲线可以发现,在焊缝中心处的硬度为 390 HV,明显高于母材平均硬度 260 HV,而焊缝热影响区的硬度较低,为 220 HV. CLAM 钢易淬硬,焊缝金属和附近部分热影响区(Ac_3 温度以上)的冷却使得奥氏体区域很容易获得板条马氏体(如图 3a 所示),所以焊缝硬度比母材高. 靠近母材的热影响区,受焊接热循环的作用,温度在 Ac_3 以下(大部分在 Ac_1 附近),相当于经历了一次回火,导致硬度略微下降.

图 5 中 2 至 6 号试样为经不同焊后热处理焊接接头硬度分布. 与 1 号试样相比,不难发现,焊接接头各处硬度值都存在一定下降,但是总的硬度分布趋势与未经热处理的接头类似. 热处理温度每上升 50 $^{\circ}\text{C}$,母材硬度下降 5~10 HV,焊缝硬度下降幅度比母材明显,为 20 HV 左右. 在 810 $^{\circ}\text{C}$ 时焊缝金属硬度下降幅度最大,图 4 中 6 号试样焊缝金属的硬度已降至与母材硬度相当.

从图 5 中可以发现:焊后热处理温度升高,导致焊接接头各部分存在不同程度的硬度降低. 这是由于焊接接头各部分组成成分为马氏体,随着焊后热处理温度的提高,马氏体在高温回火状态下分解量增加,因而导致硬度下降. 当热处理温度为 810 $^{\circ}\text{C}$ 时,硬度的下降值最大,降至与母材硬度值相当.

610 ℃至760 ℃时硬度下降缓慢,这是因为在这个温度范围内,虽然马氏体板条存在分解,但在晶界和板条区域存在碳化物(如图3所示),碳化物所带来的弥散强化作用对马氏体分解导致的硬度降低起到了一定的缓解作用.热处理温度在810 ℃时,由于焊缝马氏体分解速度加快,以及弥散碳化物球化而导致硬度的大幅降低.

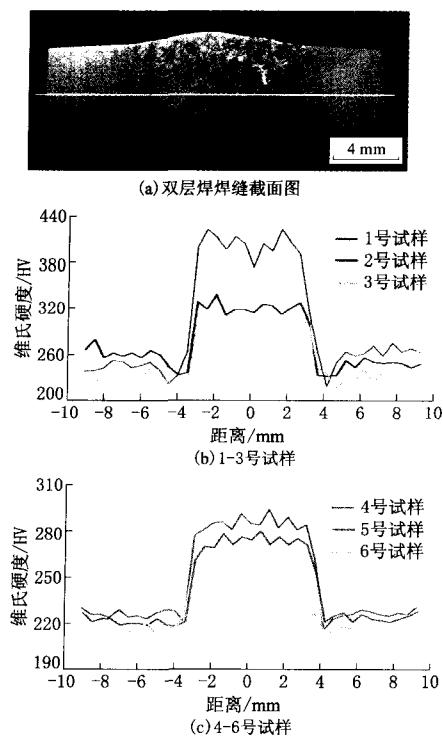


图5 焊接接头硬度
Fig. 5 Hardness of welding joint

3 结 论

(1) 焊后进行热处理与不做热处理两种情况下,CLAM 钢焊接接头微观形貌和硬度存在很大不同,热处理温度不同对接头微观性能影响明显.

(2) 焊后热处理使焊缝金属板条分布均匀性和尺寸均匀性都有提高,焊后热处理温度在710 ℃以上其均匀性达到最高.但同时温度提高也导致了焊缝马氏体板条变大.接头各部分存在碳化物析出.

(3) 焊后热处理使 CLAM 钢焊接接头各部分硬度降低,并随热处理温度的升高而逐渐降低,硬度下降值比母材和热影响区大得多,尤其在810 ℃时焊缝金属硬度下降值最大,降至与母材硬度相当.

参考文献(References)

[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. (in Chinese)

[2] 黄群英,李春京,李艳芬,等. 中国低活化马氏体钢 CLAM 研究进展[J]. 核科学与工程,2007,27(1):41-50.

Huang Qunying, Li Chunjing, Li Yanfen, et al. R&D status of China low activation martensitic steel[J]. *Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering*, 2007, 27(1):41-50. (in Chinese)

[3] Hong B G, Lee D W, Wang S J, et al. Basic concepts of DEMO and a design of a helium-cooled molten lithium blanket for a testing in ITER[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2007,82: 2399-2405.

[4] Zeman A, Debarberis L, Kořík J, et al. Microstructural analysis of candidate steels pre-selected for new advanced reactor systems[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2007, 362:259-267.

[5] Li Y, Huang Q, Wu Y, et al. Mechanical properties and microstructures of China low activation martensitic steel compared with JLF-1[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2007, 367-370: 117-121.

[6] Hirose T, Shiba K, Ando M, et al. Joining technologies of reduced activation Ferritic/Martensitic steel for blanket fabrication[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2006,81: 645-651.

[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] Wakai E, Ando M, Sawai T, et al. Effect of heat treatments on tensile properties of F82H steel irradiated by neutrons[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2007, 367-370: 74-80.

[9] Sample T, Kolbe H. Liquid metal embrittlement (LME) susceptibility of the 8%~9% Cr martensitic steels F82H-mod, OPTIFER IVb and their simulated welded structures in liquid Pb-17Li[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2000, 283-287: 1336-1340.

[10] 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. (in Chinese)

(责任编辑 赵 鸥)