

文章编号: 0258-7025(2010)02-0577-04

低活化马氏体钢激光焊接接头的组织与性能

吴小虎 赵 飞 谢文佳 吕昌伟 梁任锦

(贵州大学材料与冶金学院贵州省材料结构与强度重点实验室, 贵州 贵阳 550003)

摘要 对核聚变反应堆用低活化马氏体钢进行了激光焊接试验,并对焊接接头的显微组织和力学性能进行了测试分析。结果表明,对低活化马氏体钢进行激光焊接可以获得高质量的焊接接头;焊缝组织主要为板条状马氏体,硬度可达 530 HV;热影响区(HAZ)包括粗晶区和细晶区,粗晶区为粗大的珠光体,细晶区为细小的珠光体和铁素体的混合组织,最低硬度为 220 HV;焊接接头有很好的力学性能,抗拉强度高达 775 MPa。

关键词 激光技术;激光焊接;低活化;马氏体钢;显微组织;力学性能

中图分类号 TG456.7 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103702.0577

Microstructure and Properties of Laser Weld Joints of Reduced Activation Martensitic Steel

Wu Xiaohu Zhao Fei Xie Wenjia Lü Changwei Liang Renjin

(Guizhou Key Laboratory for Materials, Behavior and Microstructure of Materials, The Materialies and Metallurgy College, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550003, China)

Abstract Laser welding experiment was done on the reduced activation martensitic steel which is used in fusion reactor, the microstructure and mechanical properties of the welding joint were tested in this paper. The results show that the joints with good quality can be obtained by laser welding. The microstructure in weld is lath martensite, while the heat affect zone (HAZ) comprised coarse grain zone and fine grain zone. The structure of coarse grain zone is coarse pearlite and a mixed structure which comprises fine pearlite and ferrite in fine grain zone. The hardness of the weld was about 530 HV, while minimum hardness was about 220 HV in HAZ. The tensile strength of the weld joint reached 775 MPa.

Key words laser technique; laser welding; reduced activation; martensitic steel; microstructure; mechanical properties

1 引 言

由于聚变堆包层材料处于高温、强磁场、中子辐照、液态金属腐蚀等严酷的环境,因此对材料的性能要求非常高,同样对包层的焊接制造技术也提出了巨大的挑战。低活化马氏体钢被认为是未来聚变反应堆包层的首选结构材料。目前各国正针对聚变堆包层及试验包层模块(TBM)的制造需求,对低活化马氏体钢的各种焊接技术进行全面的,包括热等静压(HIP)固态扩散焊接技术、电子束焊接(EB)、氩弧焊接(TIG)、激光焊接等,以研究适合于

聚变堆包层等部件的制造加工工艺与技术^[1~5]。

低活化马氏体钢现用的焊接方法中 TIG 的熔深浅、焊接速度慢、热影响区(HAZ)大,常常会造成变形、热裂纹倾向大等缺点。EB 需良好的真空条件,被焊工件尺寸和形状受到真空室的限制,电子束易受杂散电磁场的干扰,影响焊接质量。HIP 固态扩散焊接,除需要良好的真空条件外,对焊接工件的形状同样也有很高的要求,复杂形状工件的焊接受到很大的限制且生产率较低^[6,7]。而激光焊接作为一种高质量、高精度、低变形、高效率和高速度的焊

收稿日期:2009-02-18;收到修改稿日期:2009-05-03

基金项目:贵州大学 SRT 计划资助项目。

作者简介:吴小虎(1986—),男,本科,主要从事激光材料加工方面的研究。E-mail:85233281@qq.com

导师简介:赵 飞(1978—),男,博士,副教授,主要从事核材料以及激光材料加工方面的研究。

E-mail:mm.fzhao@gzu.edu.cn

接方法受到了人们的关注。其激光束能量密度大、加热过程极短、焊点小、热影响区窄、焊接变形小、焊件尺寸精度高,可以焊接复杂形状的材料^[8~15]。目前激光焊接已成功应用于电子仪表、航空、航天、原子核反应堆等领域^[16~19]。本文采用激光焊接方法对用于核聚变反应堆包层的低活化马氏体钢进行焊接试验,并对焊接接头的显微组织和力学性能进行观察测试,研究激光焊接在聚变反应堆制造中应用的可行性。

2 试验材料与方法

将各高纯金属按设计成分(如表 1)配好后,于真空感应炉中熔炼,浇铸成钢锭。对浇铸好的铸锭进行车削去皮后在 1200 °C 下热加工成 12 mm 厚的板材,然后进行热处理;热处理主要包括

表 1 低活化马氏体钢的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of the reduced activation martensitic steel (mass fraction, %)

Composition	Fe	Cr	W	V	Ta	Mn	C	Y
Design	Bal.	9.00	1.50	0.20	0.25	0.45	0.10	0.800
Test	Bal.	8.72	1.55	0.20	0.23	0.67	0.14	0.011

3 试验结果与讨论

激光焊接的加热速度极快,焊接熔池迅速冷却,试件焊接时各区域经历着不同的热循环,不同区域有着不同的加热峰值和冷却速度,造成了不同区域上显微组织和晶粒尺寸的区别。激光焊接熔池是在快速加热熔化、快速移动冷却下结晶的,熔池体积较小。由马氏体相变动力学可知,温度低于冷却时形成马氏体的开始温度(M_s)点时,能够形成马氏体的晶核瞬时快速形成,随着温度继续降低,晶核大量增加,成片形成马氏体。低活化马氏体钢经激光焊接后,焊接件主要分为焊缝区、热影响区和母材 3 个区域。其中热影响区作为焊缝区和母材的过渡,由于受热过程不同导致微观组织形态不一样,又进一步分为熔合区、粗晶区(又称过热区)、细晶区(又称相变重结晶区)和过渡区(又称不完全重结晶区)。

图 1(a)为焊缝区的金相显微组织形貌,从照片上可以看出全部板条状、针状的为马氏体,这是因为在焊接时焊缝温度很高,远远超过了奥氏体化温度,且钢中含大量提高淬透性的合金元素,由于快速加热和快速冷却,在焊缝处发生了马氏体相变,形成了大量板条状、针状马氏体。图 1(b)为熔合区的显微组织图,由图中可以看出,板条状、针状的马氏体显

980 °C/30 min(水冷淬火)+750 °C/90 min(空冷回火)。热处理后采用线切割制成 1 mm 厚的薄板。采用 TJ-HL-T5000 型 5 kW 横流 CO₂ 激光器进行焊接试验,额定功率为 5 kW(多模),焊接过程中采用氩气作为保护气体,光斑直径 2 mm,焊接功率 2 kW,扫描速度 2.0 mm/s。

焊接完成后将焊接件加工成拉伸试样和光学显微镜观察试样,进行力学性能测试和显微组织观察。在金相观察前采用氯化铁-盐酸水溶液(用量比为分析纯级的 FeCl₃ 5 g, 50 mL 12 mol/L 的 HCl, 100 mL 水)进行浸蚀,硬度测试在金相试样上进行。相应的试验设备为:拉伸试验采用 INSTRON 电液伺服数字式材料试验系统;金相观察采用 OLYMPUS PMG-3 型金相显微镜;用 GX-51HVS-1000 型显微硬度计测量硬度,施加载荷为 200 g。

微组织逐渐趋向颗粒状,显微组织颗粒较分散,并且尺寸较大;形成这种组织不均匀的原因是在焊接过程中只是部分发生了熔化,而另一部分虽然受到高温作用,但是没有熔化,只是由于过热作用使晶粒发生了一定的长大。图 1(c)为粗晶区的金相显微组织形貌,激光焊接热影响区很小,粗晶区紧靠焊缝,其同样受到较高温度(固相线以下到 1100 °C 左右)的加热作用,金属处于过热的状态,奥氏体晶粒发生严重的长大现象,冷却后便得到粗大的颗粒状珠光体。图 1(d)为细晶区显微组织形貌,其组织也呈现颗粒状,但颗粒尺寸较小,由于其加热温度较低(在亚共析钢加热时铁素体全部消失的最低温度 Ac₃ 以上的部位),将发生重结晶,在冷却过程中就会得到均匀而细小的珠光体和铁素体,相当于热处理时的正火组织。图 1(e)为母材与细晶区的过渡区(不完全重结晶区),这一区域在焊接过程中由于温度不高,只有部分达到相变温度,而剩下的部分都低于奥氏体化温度,因此在试样的焊接过程中有一部分发生相变重结晶成为细小的晶粒,而另一部分相当于进行了回火处理,成为粗大的马氏体,其显微组织已明显趋近于母材。图 1(f)为试件母材金相显微组织形貌,母材由于离接头较远,受到的热影响不大,仍保持原有的组织形貌。

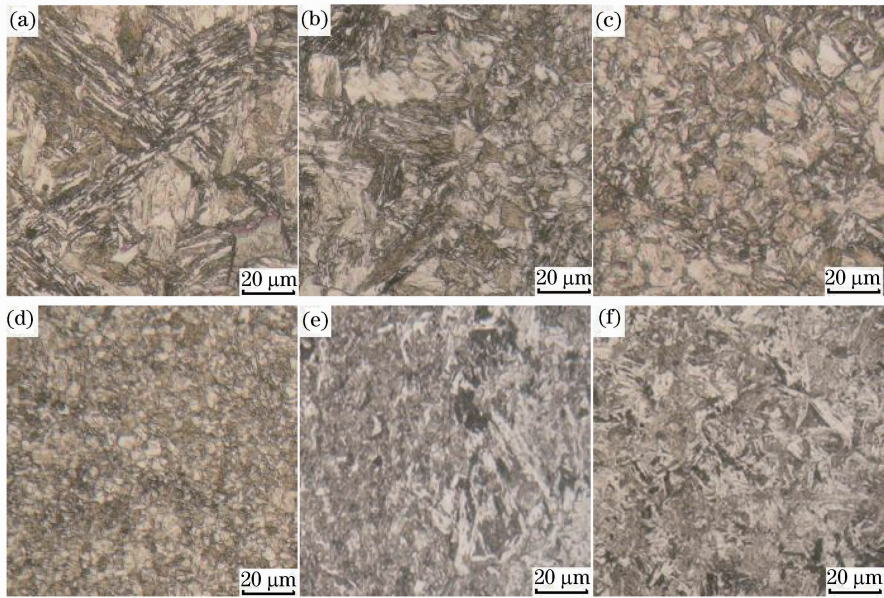


图 1 低活化马氏体钢激光焊接试样的金相显微组织。(a) 焊缝;(b) 熔合区;(c) 粗晶区;(d) 细晶区; e) 细晶区和基材的过渡区;(f) 基材

Fig. 1 Micro-structure of the reduced activation martensitic steel. (a) weld; (b) fusion zone; (c) coarse grained zone; (d) fine-grained zone; (e) transition zone between fine-grained and based metal; (f) based metal

图 2 为焊接接头的显微硬度分布曲线。焊缝(图中约 6~9 mm 处)的硬度值高于其他区域,最大硬度值为约 530 HV;热影响区近母材侧的硬度与母材差别不大,最低硬度值约为 220 HV。对于热影响区,珠光体组织使其硬度值较焊缝处出现了下滑,而靠近焊缝一侧的硬度却比较高,这是由于其紧靠焊缝,在焊接过程中温度也比较高,极易超出奥氏体化温度,在焊接完成后的快速冷却过程中靠近焊缝处会发生部分马氏体相变,产生一定量的粗大马氏体。远离焊缝的热影响区在焊接过程中同样受到加热的作用,但由于温度不够高,低于奥氏体化温度,相当于回火处理,消除内应力,使硬度有所降低;近热影响区焊接件母材在焊接时虽然受到一定的加热作用,但温度比较低,微观结构基本无变化(可以从图 1 中得到体现),因此仍保持原有的硬度,约为

230 HV。

对焊接件进行拉伸试验的结果显示,低活化马氏体钢经过激光焊接以后接头强度很高,接头屈服强度 σ_s 为 615 MPa,接头抗拉强度 σ_b 达 775 MPa。而低活化马氏体钢母材的拉伸试验结果显示,母材屈服强度为 612 MPa,抗拉强度为 750 MPa。焊接接头发生断裂的部位不是焊缝和热影响区,而是远离焊缝的母材上(如图 3 所示),这充分说明对低活化马氏体钢进行激光焊接何以获得比较理想的焊接强度。仅从强度要求考虑,适合在反应堆中加以采用。但是,低活化马氏体钢作为聚变反应堆的包层材料,除了对强度要求较高外,抗中子辐照、材料的韧性、高温稳定性等性能也是必须加以考虑的,因此,要将激光焊接方法在聚变堆包层上加以应用,还需要对另外几个性能进行研究测试。

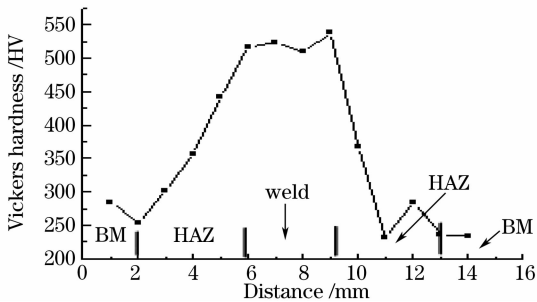


图 2 焊接试样显微硬度分布

Fig. 2 Microhardness distribution of weld specimen

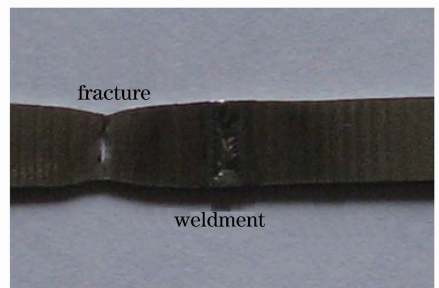


图 3 焊接试样的宏观断裂形貌

Fig. 3 Macro photo of the cracked weld specimen

4 结 论

1) 低活化马氏体钢激光焊接接头各个区的显微组织分别为:焊缝为板条马氏体;热影响区包括粗晶区和细晶区,粗晶区主要为粗大的珠光体,而细晶区为细小的珠光体和铁素体的混合组织;母材的显微组织没有发生明显变化,仍然是回火马氏体。

2) 焊缝的硬度明显高于热影响区和母材,最高硬度值约为 530 HV;热影响区的硬度从近焊缝区到近母材侧逐渐降低,最低硬度为 220 HV;母材靠近热影响区处的硬度与焊前相比几乎没有变化,硬度约为 230 HV。

3) 低活化马氏体钢焊接件的抗拉强度高,高达 775 MPa,屈服强度为 615 MPa,并且断裂部位不在热影响区,焊接强度高,完全能够满足聚变堆包层对强度的要求。

参 考 文 献

- 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
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, 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):56~65
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):56~65
- Q. Huang, C. Li, Y. Li *et al.*. Progress in development of china low activation martensitic steel for fusion application [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2007, **367-370**:142~146
- Y. Wu, F. D. S. Team. Design status and development strategy of china liquid lithium-lead blankets and related material technology [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2007, **367-370**:1410~1415
- J. P. Qian, Y. C. Wu, J. G. Li. Strategy of fusion reactor materials R and D in China [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2002, **307-311**:1637~1642
- Q. Huang, C. Li, M. Chen *et al.*. Progress in development of China low activation martensitic steel for fusion application [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2007, **367-370**:142~146
- Huang Qunying, Zhang Maolian, Zhu Zhiqiang *et al.*. Corrosion experiment in the first liquid metal LiPb loop of China [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2007, **82**(10):15~24
- Liu Qibin. *Laser Processing Technology and Application* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007
刘其斌. 激光加工技术及其应用[M]. 北京:冶金工业出版社, 2007
- D. Downs, S. Mulligan. Hybrid CO₂ laser-MAG welding of carbon steel—a literat review and initial study: Report of TWI [R]. Cambridge, UK: TWI, 2002
- L. Quingino, P. Vilaca, R. Rodriques *et al.*. Laser beam welding of automobile hines [J]. *Weling Journal*, 2001, **80**(11):261~267
- Liu Bili, Xie Songjing, Yao Jianhua. Application and developmen trend of laser welding [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(9):43~47
刘必利,谢颂京,姚建华. 激光焊接技术及其发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2005, **42**(9):43~47
- Peng Hansheng. Ultraintense solid-state lasers and applications to the frontiers of sciences [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6):721~729
彭翰生. 超强固体激光及其在前沿学科中的应用(1)[J]. 中国激光, 2006, **33**(6):721~729
- Sun Tongkun. Experimental research on laser welding of 1 mm stel sheet [J]. *Chinese J. Lasers*, 1993, **A20**(12):939
孙同坤. 1 mm 薄钢板焊接试验研究[J]. 中国激光, 1993, **A20**(12):939
- Zheng Qiguang, Tao Xingzhi, Wang Chaocheng *et al.*. Study on laser deep penetration welding of metallic materials [J]. *Chinese J. Lasers*, 1991, **A18**(2):122~127
郑启光,陶星之,王朝诚等. 高功率 CO₂ 激光深穿透焊接的研究[J]. 中国激光, 1991, **A18**(2):122~127
- Wu Dongjiang, Yin Bo, Zhang Weizhe *et al.*. Nd:YAG laser beam welding invar36 alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11):1773~1777
吴东江,尹波,张维哲等. Nd:YAG 激光焊接殷钢材的工艺研究[J]. 中国激光, 2008, **35**(11):1773~1777
- He Fei, Cheng Ya. Femtosecond laser micromachining: frontier in laser precision micromachining [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5):595~622
何飞,程亚. 飞秒激光微加工:激光精密加工领域的新前沿[J]. 中国激光, 2007, **34**(5):595~622
- Zuo Tiechuan, Chen Hong, Zhang Dongyun *et al.*. Application of laser manufacturing technology in aviation industry [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2008, (21):32~35
左铁钊,陈红,张冬云等. 激光制造技术在航空领域中的应用[J]. 航空制造技术, 2008, (21):32~35
- Shen Yifu, Gu Dongdong, Chen Wenhua *et al.*. Typical welding and forming technology in aerospace industry [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2008, (21):40~44
沈以赴,顾冬冬,陈文华等. 航空航天焊接及成型典型技术[J]. 航空制造技术, 2008, (21):40~44
- Wang Naiyan. Nuclear laser physics [J]. *Physics*, 2008, **7**(9):621~624
王乃彦. 激光核物理[J]. 物理, 2008, **7**(9):621~624