

文章编号: 0258-7025(2006)03-0408-05

新一代超低碳贝氏体钢激光焊接 热影响区的组织和性能

赵 琳^{1,2}, 陈武柱^{1,2}, 张旭东^{1,2}

(清华大学¹ 机械工程系, ² 先进成形制造重点实验室, 北京 100084)

摘要 采用激光焊接和熔化极活性气体保护焊接(MAG 焊接)两种方法对 800 MPa 级新一代超低碳贝氏体(NULCB)钢进行了焊接,研究了焊接热影响区(HAZ)组织、性能的变化规律。实验结果表明,热影响区组织均为贝氏体板条和马氏体-奥氏体(M-A)组元组成的粒状贝氏体;在实验所采用的不同热输入情况下,随着热输入的增大,马氏体-奥氏体组元的平均宽度、总量、形状因子增大,但其线密度减少;在合适的激光焊接条件下,热影响区韧性高于母材;激光焊接接头显微硬度随热输入的增大而减小,均高于母材,未出现明显的软化区。

关键词 激光技术;超低碳贝氏体钢;激光焊接;热影响区;组织;韧性

中图分类号 TG 456.7 **文献标识码** A

Microstructure and Mechanical Properties of Laser Welded Heat-Affected Zone in New Ultra-Low Carbon Bainitic Steel

ZHAO Lin^{1,2}, CHEN Wu-zhu^{1,2}, ZHANG Xu-dong^{1,2}

(¹ Department of Mechanical Engineering, ² Key Laboratory for Advanced Manufacturing by
Materials Processing Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract 800 MPa grade new ultra-low carbon bainitic (NULCB) steel was welded by laser welding and melt-active gas (MAG) welding, and the microstructure and mechanical properties of the heat-affected zone (HAZ) were investigated. The experimental results indicate that the microstructure of the HAZ is only granular bainite which consists of the bainite lath and the martensite-austenite (M-A) constituent. As the heat input that was adopted in the experiment increases, the average width, gross and shape parameter of M-A increase, but the line density decreases. The toughness of HAZ is higher than base metal under appropriate laser welding conditions. With the heat input of laser welding increase, the hardness of welded joint decreases, but it is higher than that of the base metal, indicating no softened zone appeared after laser welding.

Key words laser technique; ultra-low carbon bainitic steel; laser welding; heat-affected zone; microstructure; toughness

1 引 言

在“新一代钢铁材料重大基础研究”项目中,800 MPa级新一代钢铁材料是一种新型的超低碳贝氏体(NULCB)钢,其采用超低碳、微合金化设计,通过特殊的控轧控冷+弛豫-析出-控制相变(TMCP+RPC)技术得到细的贝氏体组织,从而使钢材获得较好的强韧性^[1~3]。800 MPa级新一代超低碳贝氏

体钢将在桥梁、造船、汽车等行业有广泛的应用,而且此种钢材大部分以焊接结构使用,因此能否成功进行焊接将关系着此种钢研制的成败。所以,新一代超低碳贝氏体钢焊接性的研究具有十分重要的理论意义和实用价值。

激光焊接具有快的加热和冷却速度以及窄的热影响区,成为焊接新一代钢铁材料的最佳方法之

收稿日期:2005-06-29;收到修改稿日期:2005-09-15

基金项目:国家 973 计划(G1998061500)资助项目。

作者简介:赵 琳(1977—),男,清华大学博士研究生,主要从事激光材料加工方面的研究。E-mail:zhaolin99@mails.tsinghua.edu.cn

—^[4,5]。由于新一代超低碳贝氏体钢是通过特殊的工艺得到的,其焊接热影响区(HAZ)尤其是粗晶区(CGHAZ)又是焊接接头最薄弱环节,因此在新一代超低碳贝氏体钢激光焊接中,如何选择焊接工艺,使焊接影响区保持母材的性能,成为800 MPa级新一代超低碳贝氏体钢应用的关键之一。本文对新一代超低碳贝氏体钢进行了实际激光焊接,研究了焊接热影响区粗晶区组织、性能的变化规律,并同其他焊接方法进行了对比。

2 实验方法

实验材料为6 mm厚800 MPa级新一代超低碳贝氏体钢,其化学成分(质量分数,%)为:C(0.035), Si(0.251), Mn(1.502), P(0.012), S(0.003), Cu(0.538), Ni(0.304), Mo(0.156), Nb(0.043), Ti(0.021), Al(0.029), B(0.0012)。新一代超低碳贝氏体钢组织为粒状贝氏体(如图1扫描电子显微照片(SEM)所示),其平均晶粒尺寸约为12 μm ,贝氏体板条束宽度为8 μm 。

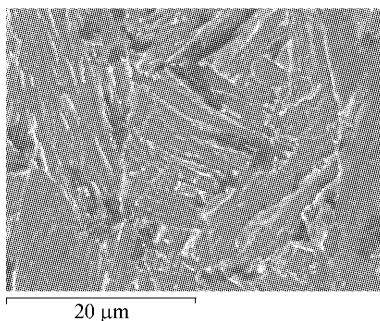


图1 800 MPa级新一代超低碳贝氏体钢组织
(扫描电子显微照片)

Fig. 1 Microstructure of NULCB steel (by SEM)

实验中为了进行激光焊和普通电弧焊的比较,采用了激光焊接和熔化极活性气体保护焊接(MAG焊接)两种方法焊接。激光焊接实验使用一台4 kW YAG激光器进行,连续输出模式,聚焦元件为焦距200 mm的铜镜,焦点位置光斑直径为0.6 mm。实验中,采用两种激光焊接规范:1) 激光功率为4 kW,焊接速度为0.36 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$,热输入为667 $\text{J} \cdot \text{mm}^{-1}$,对应的 $t_{8/5}$ (在焊接热循环的冷却过程中800~500 $^{\circ}\text{C}$ 的冷却时间)约为7.5 s;2) 激光功率为4 kW,焊接速度为0.30 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$,热输入为800 $\text{J} \cdot \text{mm}^{-1}$,对应的 $t_{8/5}$ 约为10 s。激光焊接实验采用的保护气体为Ar。熔化极活性气体保护焊接采用的热输入为

2 $\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$,对应的 $t_{8/5}$ 约为28 s^[6]。

焊接实验后,利用JSM-6301F型扫描电镜对焊接热影响区组织进行观察,并采用HX200显微硬度仪测量焊接接头的显微硬度,同时对焊接热影响区进行低温-40 $^{\circ}\text{C}$ 夏比冲击实验,冲击试样尺寸为10 mm×5 mm×55 mm。

3 实验结果与分析

3.1 显微组织

图2所示的是焊接热影响区粗晶区组织。粗晶区组织均为粒状贝氏体,粒状贝氏体是由贝氏体板条(图3中的黑色区域)和板条间呈方向性分布的岛状的马氏体-奥氏体(M-A)组元(图3中的白色小岛)组成。

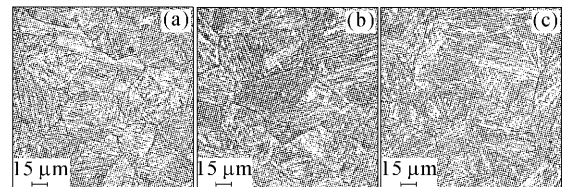


图2 焊接热影响区粗晶区组织(光学显微照片)

(a) 激光焊接 667 $\text{J} \cdot \text{mm}^{-1}$; (b) 激光焊接 800 $\text{J} \cdot \text{mm}^{-1}$;
(c) 熔化极活性气体保护焊接 2 $\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$

Fig. 2 Microstructure of coarse-grain heat-affected zone (CGHAZ) (OM)

(a) laser welding heat input 667 $\text{J} \cdot \text{mm}^{-1}$; (b) laser welding heat input 800 $\text{J} \cdot \text{mm}^{-1}$; (c) MAG heat input 2 $\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$

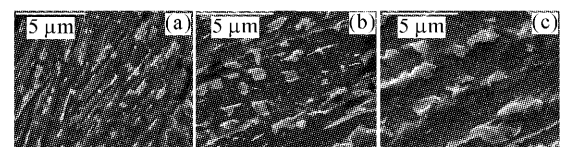


图3 焊接热影响区粗晶区组织(扫描电子显微照片)

(a) 激光焊接 667 $\text{J} \cdot \text{mm}^{-1}$; (b) 激光焊接 800 $\text{J} \cdot \text{mm}^{-1}$;
(c) 熔化极活性气体保护焊接 2 $\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$

Fig. 3 Microstructure of CGHAZ (SEM)

(a) laser welding heat input 667 $\text{J} \cdot \text{mm}^{-1}$; (b) laser welding heat input 800 $\text{J} \cdot \text{mm}^{-1}$; (c) MAG heat input 2 $\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$

由图3的扫描电镜照片可以定性地看出:随热输入的增大,马氏体-奥氏体组元的形态发生了显著的变化。马氏体-奥氏体组元的形态可用其四个特征参量综合表征,分别为马氏体-奥氏体组元平均宽度、马氏体-奥氏体组元总量、马氏体-奥氏体组元线密度和马氏体-奥氏体组元形状因子^[7]。马氏体-奥氏体组元平均宽度 a (μm)反映了其特征尺寸;马氏

体-奥氏体组元面积比例(马氏体-奥氏体组元所占面积比) S 是反映其总量的特征量;单位长度马氏体-奥氏体组元数量 N (mm^{-1})可表征其线密度;马氏体-奥氏体组元的形状有长条形和方块形两种,其形状的这种差别对材料韧性影响很大,为此要进行定量区分,定义长宽比 $Ra < 3$ 的马氏体-奥氏体组元为方块形, $Ra \geq 3$ 的马氏体-奥氏体组元为长条形,可用方块形马氏体-奥氏体组元占马氏体-奥氏

体组元数量比 R 来描述马氏体-奥氏体组元的形状,定义 R 为马氏体-奥氏体组元形状因子。图 4 所示的是不同热输入对马氏体-奥氏体组元平均宽度、总量、线密度、形状因子的影响(图 4 中也表示出了母材马氏体-奥氏体组元的四个特征参量)。可见,随热输入的增大,新一代超低碳贝氏体钢焊接热影响区粗晶区马氏体-奥氏体组元平均宽度、总量、形状因子增大,而马氏体-奥氏体组元线密度减少。

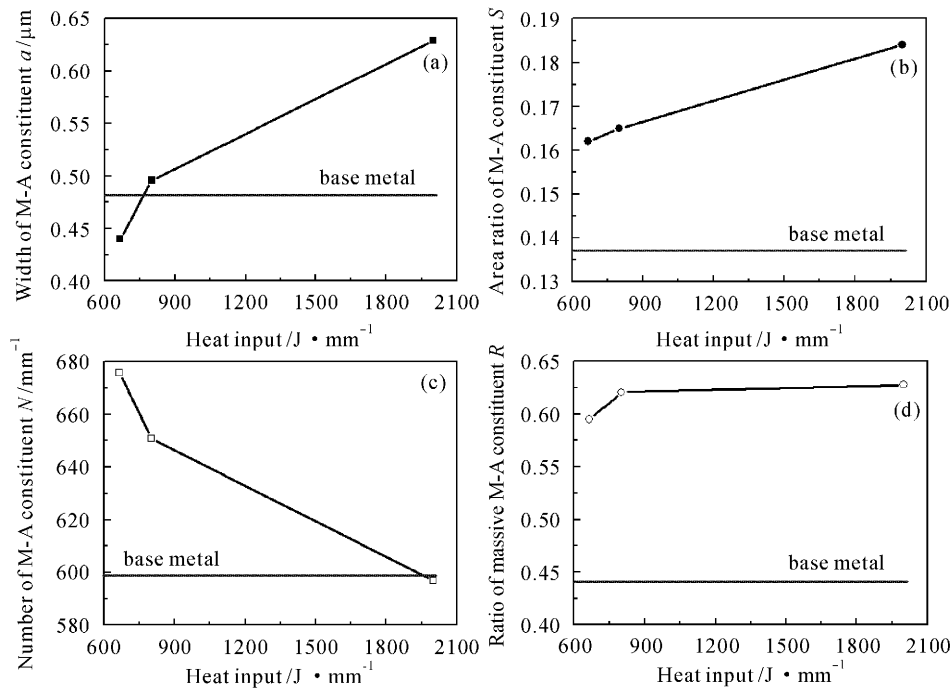


图 4 马氏体-奥氏体组元平均宽度尺寸(a),总量(b),线密度(c),形状因子(d)与热输入的关系

Fig. 4 Influences of heat input on the average width (a), gross (b), line density (c) and shape parameter (d) of M-A

3.2 冲击韧性

在焊接热影响区粗晶区上开缺口(缺口位置如图 5 所示),进行 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 夏比冲击,冲击结果如图 6 所示。由图 6 可以看出,激光焊接热影响区冲击吸收功高于母材,而熔化极活性气体保护焊接热影响区冲击吸收功低于母材。因此,选择合适的激光焊

接规范,激光焊接接头热影响区可具有良好的韧性,其低温冲击吸收功高于母材。

由实验结果可知,新一代超低碳贝氏体钢焊接

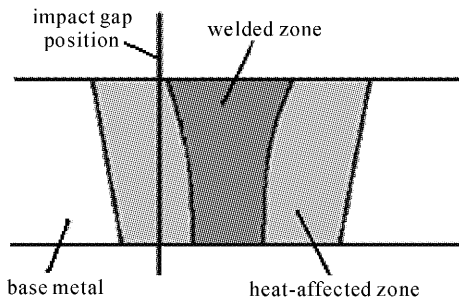


图 5 焊接热影响区冲击缺口位置示意图
Fig. 5 Impact gap position of HAZ

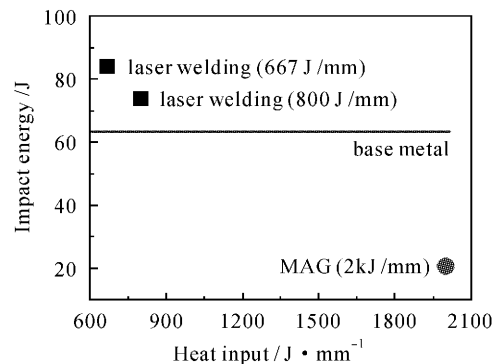


图 6 焊接热影响区冲击结果($-40\text{ }^\circ\text{C}$)
Fig. 6 Impact toughness of HAZ
($-40\text{ }^\circ\text{C}$ charpy impact)

热影响区粗晶区组织全为粒状贝氏体。在粒状贝氏体中,贝氏体板条是塑性相,具有良好的韧性,而马氏体-奥氏体组元是弱塑性相即脆性相,因此马氏体-奥氏体组元是粒状贝氏体韧性变化的主要因素。根据实验数据和相关文献,马氏体-奥氏体组元形态特征参量对粒状贝氏体韧性具有决定性作用。马氏体-奥氏体组元形态特征参量对粒状贝氏体韧性的影响可归结于马氏体-奥氏体组元平均宽度,总量 S , 线密度,形状因子对韧性的影响。有这样四条规律:在其他三个特征参量不变的前提下,马氏体-奥氏体组元平均宽度越小,韧性越好^[8];马氏体-奥氏体组元总量越小,韧性越好^[9];马氏体-奥氏体组元线密度越小,韧性越好^[10];马氏体-奥氏体组元形状因子越大,韧性越好^[11]。由图 4 可知,随着热输入的变化,马氏体-奥氏体组元平均宽度、总量、线密度、形状因子这四个形态特征参量均在变化。为了定量分析马氏体-奥氏体组元四个形态特征参量对韧性的综合影响,文献[7,12]提出了新一代超低碳贝氏体韧性模型,其模型数学表达式为

$$CVN = \alpha + \beta \cdot F = \alpha + \beta \cdot S \cdot a \cdot N/R, \quad (1)$$

式中, CVN 为冲击吸收功; F 为马氏体-奥氏体组元形态特征因子;在本文实验条件下,系数 α 为 254, β 为 -2.13。

由(1)式可知,马氏体-奥氏体组元形态特征因子 F 实际上是根据四个形态特征参量对韧性正面或反面影响而进行乘或除运算所得的结果,它与韧性成线性关系:马氏体-奥氏体组元形态特征因子越小,韧性越好。

根据新一代超低碳贝氏体韧性模型,新一代超低碳贝氏体钢激光焊接粗晶区马氏体-奥氏体组元形态特征因子 F 分别为 81, 86, 均低于母材(90), 而熔化极活性气体保护焊接粗晶区马氏体-奥氏体组元形态特征因子 F 为 110, 高于母材。由此可知,本实验条件下新一代超低碳贝氏体钢激光焊接热影响区韧性高于母材是由于较小的热输入获得较小的马氏体-奥氏体组元形态特征因子所致,而采用 $2 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$ 热输入熔化极活性气体保护焊接新一代超低碳贝氏体钢引起热影响区脆化的原因是过大的热输入造成马氏体-奥氏体组元形态特征因子太大。

根据(1)式,激光焊接影响区 $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 冲击吸收功预测值分别为 81 J(对应的激光焊接规范为 $4 \text{ kW}, 0.36 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$), 71 J(对应的激光焊接规范为 $4 \text{ kW}, 0.30 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$), 而对应的影响区冲击吸

收功实际值分别为 84 J, 74 J, 实际值高于预测值。这是因为激光焊接粗晶区很窄,冲击过程中裂纹扩展经过了不同的区域,反映的是热影响区的平均韧性;又因为粗晶区是热影响区最薄弱的环节,因此,冲击吸收功实测值高于预测值。

3.3 显微硬度

焊接接头力学性能的不均匀性及软化情况可以通过其硬度分布较好地得到反映,硬度与强度是有着一定的对应关系的。因此,焊接接头的硬度分布情况也反映了接头各部分强度的大小。对三种焊接规范下的焊接接头显微硬度进行了测量,硬度测试所采用的载荷为 0.2 kg , 测量结果如图 7 所示。由图 7 可看出,随着热输入的增加,焊接区的硬度值下降,当热输入在 $667 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1} \sim 2 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$ 范围内变化时,接头最高硬度在 $\text{HV}330 \sim \text{HV}290$ 之间变化。激光焊接均没有出现软化区,而熔化极活性气体保护焊接出现了明显软化现象。

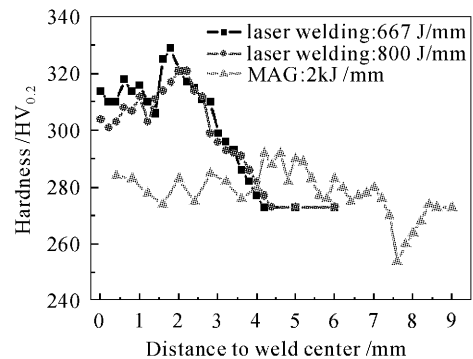


图 7 新一代超低碳贝氏体钢焊接接头硬度分布曲线

Fig. 7 Hardness distribution of weld joint

熔化极活性气体保护焊接头的软化出现在邻近母材的区域,对此区域进行光镜观察,发现熔化极活性气体保护焊接热影响区出现软化的区域晶粒尺寸明显比母材大,此区域发生再结晶,削弱了加工硬化的作用,因此熔化极活性气体保护焊接热影响区出现了明显的软化区。激光焊接比熔化极活性气体保护焊接有更快的冷却速度,在可能出现软化的区域停留的时间极短,因此焊接热影响区没有出现软化区。

4 结 论

1) 800 MPa 级新一代超低碳贝氏体钢焊接热影响区粗晶区组织为粒状贝氏体。随着热输入的增大,马氏体-奥氏体组元平均宽度、总量、形状因子增

大,而马氏体-奥氏体组元线密度减少。

2) 选择合适的激光焊接规范,使马氏体-奥氏体组元形态特征因子在合适的范围内,激光焊接接头热影响区就可具有良好的韧性,其低温冲击吸收功高于母材。

3) 激光焊接接头显微硬度随热输入的增大而减小,但均高于母材,未出现明显的软化区。

参 考 文 献

- Xuemin Wang, Chengjia Shang, Shanwu Yang *et al.*. Optimization of RPC technique for refining the intermediate transformation microstructure [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2002, **9**(3):193~196
- Shanwu Yang, Xuemin Wang, Chengjia Shang *et al.*. Relaxation of deformed austenite and refinement of bainite in a Nb-containing microalloyed steel [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2001, **8**(3):214~217
- Shang Chengjia, Yang Shanwu, Wang Xuemin *et al.*. Influence of RPC technique on the microstructure and mechanical properties of 800 MPa grade HSLA plate steel [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2002, **24**(2):129~132
尚成嘉,杨善武,王学敏等. RPC对800 MPa级低合金高强度钢的影响[J]. 北京科技大学学报, 2002, **24**(2):129~132
- Xudong Zhang, Wuzhu Chen, Cheng Wang *et al.*. Microstructures and toughness of weld metal of ultrafine grained ferritic steel by laser welding [J]. *J. Mater. Sci. Technol.*, 2004, **20**(6):755~759
- Peng Yun, Wang Cheng, Chen Wuzhu *et al.*. Laser welding of two super-fine grain steels [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2001, **22**(1):31~35
彭云,王成,陈武柱等. 两种规格超细晶粒钢的激光焊接[J]. 焊接学报, 2001, **22**(1):31~35
- Ma Chengyong, Tian Zhiling, Du Zeyu *et al.*. Effect of heat input on structure and mechanical properties of welded joint in a 800 MPa grade RPC steel [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2004, **25**(2):23~27
马成勇,田志凌,杜则裕等. 热输入对800 MPa级钢接头组织及性能的影响[J]. 焊接学报, 2004, **25**(2):23~27
- Zhao Lin. Study on laser weld ability of new ultra-low carbon bainitic steel [D]. Beijing: Tsinghua University, 2004. 68~77
赵琳. 新一代超低碳贝氏体钢激光焊接及其焊接性的研究[D]. 北京:清华大学, 2004. 68~77
- Fang Hongsheng, Liu Dongyu, Xu Pingguang *et al.*. The ways to improve strength and toughness of bainitic steel [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2001, **25**(6):1~5
方鸿生,刘东雨,徐平光等. 贝氏体钢的强韧化途径[J]. 机械工程材料, 2001, **25**(6):1~5
- Fukuhisa Matsuda, Kenji Ikeuchi, Jinsun Liao. Weld HAZ toughness and its improvement of low alloy steel SQV-2A for pressure vessels (Report 1) [J]. *Trans JWRI*, 1993, **22**(2):271~279
- Dewei Tian, L. Pentti Karjalainen, Bainian Qian *et al.*. Cleavage fracture model for granular bainite in simulated coarse-grained heat-affected zones of high-strength low-alloyed steels [J]. *JSME International Journal, Series A*, 1997, **40**(2):179~188
- Jing Hongyang, Huo Lixing, Zhang Yufeng. Effect of niobium on morphology of martensite-austenite constituents in weld HAZ [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 1997, **18**(1):37~41
荆洪阳,霍立兴,张玉凤. 铌对高强度钢焊接热影响区中马氏体-奥氏体组元形态的影响[J]. 焊接学报, 1997, **18**(1):37~41
- Zhao Lin, Zhang Xudong, Chen Wuzhu. Toughness of heat-affected zone of 800 MPa grade low alloy steel [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2005, **41**(4):392~396
赵琳,张旭东,陈武柱. 800 MPa级低合金钢焊接热影响区韧性的研究[J]. 金属学报, 2005, **41**(4):392~396