

文章编号: 1001-3806(2006)04-0344-03

NULCB 钢激光焊接接头组织、性能的研究

赵 琳^{1,2}, 陈武柱^{1,2*}, 张旭东^{1,2}

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

摘要: 为了研究新一代超低碳贝氏体 (NULCB) 钢的焊接性, 利用 3kW CO₂ 激光对 NULCB 钢进行了焊接, 并分析了焊接接头组织、性能的变化规律。试验结果表明, 激光焊接接头显微硬度均高于母材, 未出现明显的软化区; 焊缝区和热影响区粗晶区组织均为贝氏体板条和 M-A 组元组成的粒状贝氏体; 热输入由 120J/mm ~ 600J/mm 范围内变化时, 随着热输入的增大, M-A 组元的平均宽度、总量、形状因子增大, M-A 组元线密度减少; 随热输入的增大, 激光焊接焊缝区冲击吸收功先增大然后减小。合适的激光焊接条件下, 激光焊接焊缝区具有良好的韧性, 其低温冲击吸收功高于母材。

关键词: 激光技术; 超低碳贝氏体钢; 组织; 性能

中图分类号: TG456.7 **文献标识码:** A

Microstructure and mechanical properties of laser welded joint of NULCB steel

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

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

Abstract In order to investigate the weldability of a new ultra low carbon bainitic (NULCB) steel, the steel is welded with a 3kW CO₂ laser and the microstructure and mechanical properties of the weld joint are investigated. The experimental results indicate that the hardness of welded joint is higher than that of the base metal while the laser heat input is between 120J/mm and 600J/mm, and no obvious zone is softened after laser welding. The microstructure of the weld metal and the coarse grained heat affected zone are both granular bainite that consists of the bainite lath and the M-A constituent. When the heat input increases from 120J/mm to 600J/mm, the average width, gross and shape parameter of M-A increases but the line density decreases. As the heat input of laser welding increases, the impact energy of the weld metal increases at first and then decreases, and it is higher than that of the base metal under appropriate laser welding conditions.

Key words laser technique; ultra low carbon bainitic steel; microstructure; mechanical property

引 言

在我国新一代钢铁材料中, 有两种结构钢: 400MPa 级超细晶粒碳素钢和 800MPa 级新一代超低碳贝氏体 (NULCB) 钢 (超细组织)。这两种钢大部分通过焊接成为焊接结构而得到使用, 能否成功进行焊接将关系着这两种钢研制的成败。因此, 新一代钢铁材料焊接的研究具有十分重要的理论意义和实用价值。

激光焊接是一种先进的焊接技术, 它具有快的加热和冷却速度以及窄的热影响区。目前, 利用激光焊接, 已成功焊接了 400MPa 级超细晶粒碳素钢^[1~4]。

而 800MPa 级 NULCB 钢采用超低碳、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, 从而钢材获得较好的强韧性^[5,6]。对于 800MPa 级 NULCB 钢, 其化学成分、轧制工艺、组织和强化机制与 400MPa 级超细晶粒碳素钢均不相同, 能否成功地进行焊接和如何焊接是必须回答的问题。因此, 作者利用 3kW CO₂ 激光对 800MPa 级 NULCB 钢进行了焊接, 研究了焊接接头组织、性能的变化规律。

1 试验材料及方法

实验材料为 3mm 厚 800MPa 级 NULCB 钢, 其化学成分 (质量分数) 为: 0.035% C, 0.251% Si, 1.502% Mn, 0.012% P, 0.003% S, 0.538% Cu, 0.304% Ni, 0.156% Mo, 0.043% Nb, 0.021% Ti, 0.029% Al, 0.0012% B。NULCB 钢组织为粒状贝氏体 (见图 1)。

实验中使用 3kW 快轴流 CO₂ 激光器, 光束模式为

基金项目: 国家重点基础研究规划资助项目 (G1998061500)

作者简介: 赵 琳 (1977-), 男, 博士研究生, 主要从事激光材料加工方向的研究。

* 通讯联系人。E-mail: owzdm@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2005-07-17; 收到修改稿日期: 2005-09-20

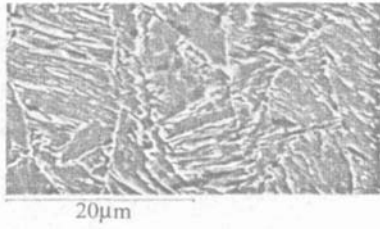


Fig 1 SEM photo of microstructure of NULCB steel

TEM₀₀₊₀₁, 聚焦元件为焦距 190mm 的 ZnSe 透镜。采用 3 种激光焊接规范: (1) 激光功率为 2.4kW, 焊接速度为 1.20m/min, 热输入为 120J/mm, 对应的 $t_{8/5} \approx 1.5s$ (2) 激光功率为 2.4kW, 焊接速度为 0.60m/min, 热输入为 240J/mm, 对应的 $t_{8/5} \approx 5s$ (3) 激光功率为 2.4kW, 焊接速度为 0.24m/min, 热输入为 600J/mm, 对应的 $t_{8/5} \approx 18s$ 。焊接实验后, 利用光镜和扫描电镜对焊接接头组织进行观察, 并测量焊接接头的显微硬度, 同时对焊接接头进行低温 -40℃ 艾氏冲击实验, 冲击试样尺寸为 10mm × 2.5mm × 70mm。

2 试验结果及讨论

2.1 显微硬度

对 3 种激光焊接规范下的焊接接头显微硬度进行了测量, 测量结果如图 2 所示。由图 2 可看出: 随着热

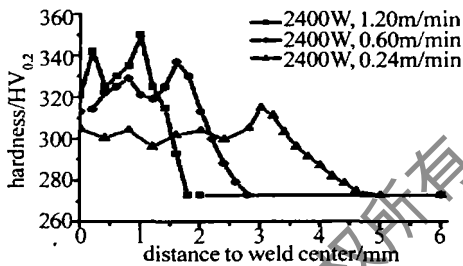


Fig 2 Hardness distribution of weld joint

输入的增加, 焊缝区的平均硬度值下降; 当热输入在 120J/mm ~ 600J/mm 范围内变化时, 接头最高硬度在 HV₃₅₀ ~ HV₃₁₅ 之间变化。激光焊接接头硬度均高于母材, 未出现明显的软化区。这是由于激光焊接具很快的冷却速度, 在可能出现软化的区域停留的时间极短, 因此, 焊接接头没有出现软化区。

2.2 组织特征

图 3 和图 4 所示的是扫描电镜下激光焊接接头焊缝区和焊接热影响区粗晶区 (CGHAZ) 的显微组织。可以看出, 热输入在 120J/mm ~ 600J/mm 的范围内,

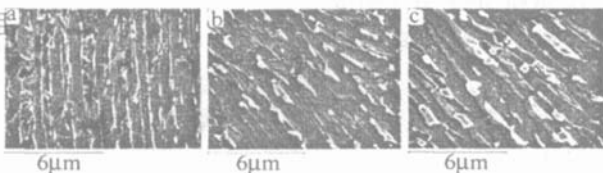


Fig 3 SEM photos of microstructure of weld metal a- 120J/mm b- 240J/mm c- 600J/mm

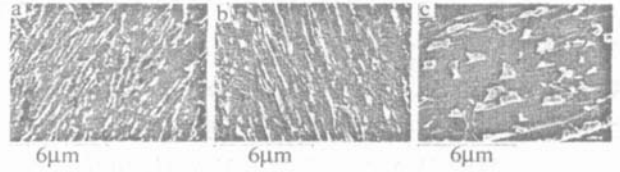


Fig 4 SEM photos of microstructure of coarse grained heat affected zone (CGHAZ)

a- 120J/mm b- 240J/mm c- 600J/mm

织均为单一的粒状贝氏体, 粒状贝氏体是由贝氏体板条和岛状的 M-A 组元 (图 3 图 4 中的白色小岛) 组成。

由图 3 和图 4 还可定性地看出: 随热输入的增大, M-A 组元的形态发生了显著的变化。由于 M-A 组元形态的变化将会明显地影响焊接接头的机械性能尤其是韧性, 因此需要对其进行定量的描述, 可用 M-A 组

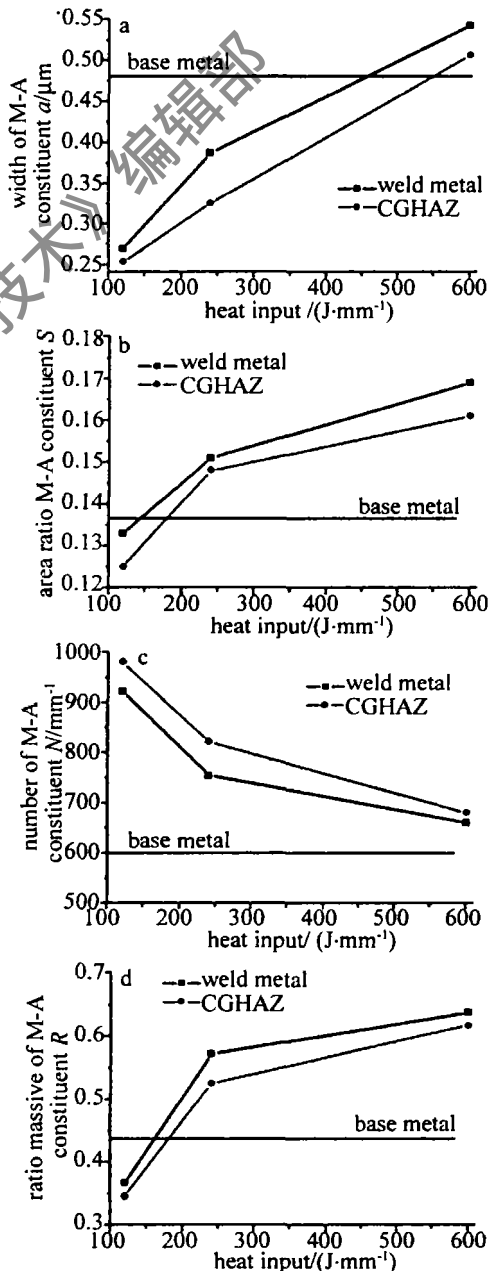


Fig 5 Influence of heat input on the average of M-A a- width b- gross c- line density d- shape param eter

元平均宽度、总量、线密度、形状因子等 4 个特征参数综合表征 M-A 组元的形态^[7]。M-A 组元 4 个特征参数定义如下: M-A 组元平均宽度 a (μm) 反映了 M-A 组元特征尺寸; M-A 组元面积比例 (M-A 组元所占面积比) S 是反映 M-A 组元总量的特征量; 单位长度 M-A 组元数量 N (mm^{-1}) 可表征 M-A 组元线密度; M-A 组元的形状有长条形和方块形两种, M-A 组元形状的这种差别对材料韧性影响很大, 为此要对此进行定量区分, 定义长宽比 $R_a < 3$ 的 M-A 组元为方块形, $R_a \geq 3$ 的 M-A 组元为长条形, 可用方块形 M-A 组元占 M-A 组元数量比 R 来描述 M-A 组元的形状, 定义 R 为 M-A 组元形状因子。

利用定量金相法对 M-A 组元平均宽度、总量、线密度、形状因子进行统计, 图 5 所示的是不同热输入对 a , S , N , R 的影响 (图 4 中也相应的表示出了母材 M-A 组元 4 个特征参数)。可见, 随热输入的增大, NULCB 钢激光焊接焊缝区和 CGHAZ M-A 组元平均宽度、总量、形状因子增大, 而 M-A 组元线密度减少。

2.3 冲击韧性

在焊缝中心上开缺口, 对不同激光焊接规范下的焊缝进行低温 -40°C 艾氏冲击试验, 试验结果如图 6 所示。随热输入的增大, 激光焊接焊缝区冲击吸收功

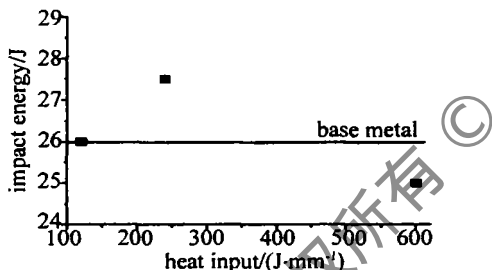


Fig 6 Impact toughness of welded metal (-40°C Izod impact)

先增大然后减小。热输入为 $120\text{J}/\text{mm}$, 激光焊接焊缝区冲击韧性与母材相当; 热输入为 $240\text{J}/\text{mm}$, 激光焊接焊缝区冲击韧性高于母材; 热输入为 $600\text{J}/\text{mm}$, 激光焊接焊缝区冲击韧性低于母材。因此, 在合适的激光焊接条件下, 激光焊接焊缝区具有良好的韧性, 其低温冲击吸收功高于母材。冲击断面形貌如图 7 所示, 断裂方式均为韧性断裂。

焊缝区韧性的变化趋势主要与焊缝区的组织有关。NULCB 钢焊缝区组织全为粒状贝氏体, 在粒状贝氏体中, M-A 组元是弱塑性相即脆性相, 其是粒状贝氏体韧性变化的主要因素, 因此, M-A 组元对粒状贝氏体韧性具有决定性作用^[8]。M-A 组元对粒状贝氏体韧性的影响可归结于 M-A 组元平均宽度、总量、线密度、形状因子对韧性的影响, 可归结为: 在其它 3 个特征参数不变的前提下, a 越小, S 越小, N 越小, R 越

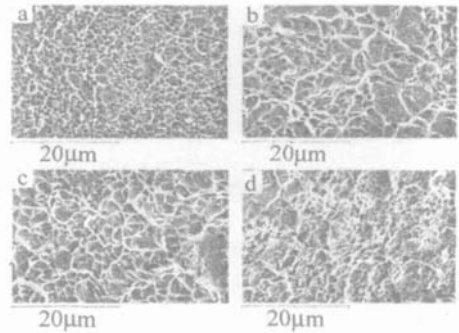


Fig 7 SEM photos of fracture surface of welded metal and base metal
a—heat input $120\text{J}/\text{mm}$ b—heat input $240\text{J}/\text{mm}$ c—heat input $600\text{J}/\text{mm}$ d—base metal

大, 韧性越好^[9-12]。对于 NULCB 钢, 为了定量分析 M-A 组元 4 个形态特征参数对韧性的综合影响, ZHAO 等人^[7,8]提出了 M-A 组元形态特征因子 F 的概念, 其定义如下:

$$F = S \cdot a \cdot N / R \quad (1)$$

式中, S 表示 M-A 组元总量; a 表示 M-A 组元平均宽度; N 表示 M-A 组元线密度; R 表示 M-A 组元形状因子。

M-A 组元形态特征因子 F 实际上是根据 4 个形态特征参数对韧性正面或反面影响而进行乘除运算所得的结果, F 越小, 韧性越好。

NULCB 钢激光焊接焊缝区 M-A 组元形态特征因子 F 如表 1 所示, 热输入为 $120\text{J}/\text{mm}$, 焊缝区 $F = 90$

Table 1 Toughness factor of M-A of welded metal and base metal

Na	heat input/ $(\text{J} \cdot \text{mm}^{-1})$	F
1	120	90
2	240	77
3	600	95
4	base metal	90

与母材 F (90) 一样, 其韧性与母材相当; 热输入为 $240\text{J}/\text{mm}$, 焊缝区 $F = 77$, 小于母材 F , 其韧性高于母材; 热输入为 $600\text{J}/\text{mm}$, 焊缝区 $F = 95$, 小于母材 F , 其韧性低于母材。故在合适的激光焊接条件下, NULCB 钢激光焊接焊缝区低温冲击韧性高于母材是由于适中的热输入获得较小的 M-A 组元形态特征因子所致。

3 结 论

(1) 800MPa 级新一代超低碳贝氏体钢激光焊接中, 焊缝区和 CGHAZ 组织均为粒状贝氏体, 其由板条贝氏体和 M-A 组元组成。

(2) 激光热输入在 $120\text{J}/\text{mm} \sim 600\text{J}/\text{mm}$ 的范围内, M-A 组元形态变化很大。随着热输入的增大, M-A 组元平均宽度、总量、形状因子增大, 而 M-A 组元线密度减少。

(下转第 359 页)

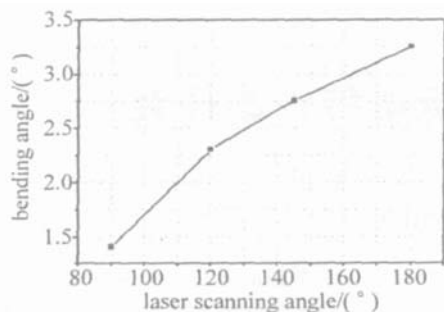


Fig 10 Effect of laser scanning angle on bending angle
 $P = 1000W, v = 20mm/s, n = 1$

的增加意味着加热区域的增大,使得产生压缩塑性变形的区域变长,另外弯曲角内拱面中间横截面上、中、下 3 层轴向塑性压缩应变随之增加,因此,最终弯曲成形角度增大。

5 结 论

(1) 采用有限元进行了激光弯曲钢管的温度场和应变场的数值模拟,解释了钢管激光弯曲的温度场和应变场的变化规律。

(2) 在给定技术参数下,激光扫描处横截面沿壁厚方向均产生压缩塑性变形,且下表面的压缩塑性应变比上表面要大,并解释了其机理。得出的技术参数与弯曲角度之间关系,其趋势与实验结果相一致。

参 考 文 献

[1] LIU Sh H, ZHOU L Z, LI Zh Y. Developing direction and research

(上接第 346 页)

(3) 激光焊接接头最高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。

(4) 随热输入的增大,激光焊接焊缝区冲击吸收功先增大然后减小。在合适的激光焊接条件下,激光焊接焊缝区具有良好的韧性,其低温冲击吸收功高于母材。

参 考 文 献

- [1] PENG Y, WANG C, CHEN W Zh *et al* Laser welding of two superfine grain steels [J]. Transactions of the China Welding Institution 2001, 22(1): 31~35 (in Chinese).
- [2] ZHANG X D, CHEN W Zh, WANG C *et al* Microstructures and toughness of weld metal of ultrafine grained ferritic steel by laser welding [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2004, 20(6): 755~759
- [3] BAO G, WANG C, PENG Y *et al* Effect of EM field on the plasma during CO₂ laser beam welding [J]. Laser Technology, 2002, 26(2): 81~83 (in Chinese).
- [4] YANG W G, LIU C, CHEN W Zh *et al* Study on the control system for the weld appearance quality during laser welding with filler wire [J]. Laser Technology, 2003, 27(3): 193~196 (in Chinese).
- [5] WANG X M, HE X L, YANG S W *et al* Optimization of RPC techn

state on laser bending [J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11 (suppl): 23~29 (in Chinese).

- [2] LIW Ch, YAO Y L. Laser bending of tubes mechanism, analysis and prediction [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering 2001, 123(11): 674~681
- [3] LIU Sh H, FANG X, FAN X R. Experiment investigation on rules of laser tube bending [J]. Laser Technology, 2004, 28(4): 340~343 (in Chinese).
- [4] HAO N, LI L. An analytical model for laser tube bending [J]. Applied Surface Science 2003, 208~209(3): 432~436.
- [5] HAO N, LI L. Finite element analysis of laser tube bending process [J]. Applied Surface Science, 2003, 208~209(3): 437~441
- [6] DEBCCARIM P. Prediction of welding distortion [J]. Welding Journal 1997, 76(4): 172~181
- [7] ANSYS Inc. ANSYS elements reference [M]. Pittsburgh: SAS IP, Inc, 2001, 224~294
- [8] CHEN G F, XU X F, POON C C *et al*. Laser assisted microscale deformation of stainless steels and ceramics [J]. Opt Engng 1998, 10(3): 2837~2842
- [9] HU Z, LABUDOVIC M, WANG H *et al*. Computer simulation and experimental investigation of sheet metal bending using laser beam scanning [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture 2001, 41(4): 589~607.
- [10] GUAN Y J, SUY Sh. Study on buckling mechanism of laser bending of the sheet metal [J]. Laser Technology, 2001, 25(1): 11~14 (in Chinese).
- [11] RADAJ D. Heat effects of welding temperature field residual stress distortion [M]. Beijing: China Machine Press, 1997, 41~135 (in Chinese).
- [12] LIU Sh H, WAN P T, FANG X. FEM simulation of the stress strain field during the laser forming of sheet metal [J]. Electromachining & Mould 2003(3): 39~43 (in Chinese).
- nique for refining the intermediate transformation microstructure [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing (English edition), 2002, 9(3): 193~196
- [6] WANG X M, SHANG C J, YANG S W *et al*. RPC processing to refine bainite [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(6): 661~666 (in Chinese).
- [7] ZHAO L. Study on laser weldability of new ultra-low carbon bainitic steel [D]. Beijing Tsinghua University, 2004, 68~77 (in Chinese).
- [8] ZHAO L, ZHANG X D, CHEN W Z. Toughness of heat affected zone of 800MPa grade low alloy steel [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2005, 41(4): 372~376 (in Chinese).
- [9] FANG H S, LU D Y, XU P G *et al*. The ways to improve strength and toughness of bainitic steel [J]. Materials for Mechanical Engineering 2001, 25(6): 1~5 (in Chinese).
- [10] MATSUDA F, KEUCHIK, LIAO J W. HAZ toughness and its improvement of low alloy steel SQV-2A for pressure vessels (report 1) [J]. Transactions of Joining and Welding Research Institute 1993, 22(2): 215~221
- [11] TIAN D W, KARJALAINEN L P, QIAN B N *et al*. Cleavage fracture model for granular bainite in simulated coarse-grained heat affected zones of high strength low-alloyed steels [J]. JSM International Journal Series 1997, A40(2): 179~188
- [12] JING H Y, HUO L X, ZHANG Y F. Effect of MA constituent on fracture behavior of weld HAZ [J]. Journal of Tianjin University, 1997, 30(4): 485~488 (in Chinese).