

厚钢板激光焊接的研究*

王 涛 郑启光 陶星之 辜建辉 李家熔

(华中理工大学激光技术国家重点实验室 武汉 430074)

提要 通过能量平衡原理研究了厚钢板激光深熔焊接的热源模型, 得出了激光功率与光斑大小、焊接速度等的关系, 并讨论了激光光束质量. 实验采用非稳腔输出的 6~8 kW 高功率高质量的激光焊接 4, 6, 8 mm 厚的 A₃ 钢板, 其焊接速度分别为 3.2, 2.2, 0.9 m/min, 焊接深宽比均超过 2:1, 其中 6 mm 钢板深宽比达到 4:1. 着重研究了激光焊接工艺, 并对焊接试样进行了拉伸强度测试和过轧机实验.

关键词 激光, 焊接, 钢板

1 引 言

聚焦激光束由于具有约 10^6 W/cm² 的功率密度以及几千瓦以上的功率, 因而可实施厚钢板激光深熔焊接. 本实验使用非稳腔高功率 CO₂ 激光器对厚钢板进行了较深入的激光深熔焊接研究.

2 实验条件及过程

激光深熔焊接使用的是激光器输出的平行光束, 激光功率为 0~8 kW 可调. 为克服透镜的热畸变和金属球面镜带来的较大像差, 我们采用了非球面抛物镜传输聚焦系统, 焦点位置可连续调节. 焊接材料采用 $400 \times 200 \times 4$ mm³, $400 \times 200 \times 6$ mm³ 和 $80 \times 20 \times 8$ mm³ 的低碳冷轧钢板, 经专用夹具安装在数控工作台上. 工作台行程为 450 mm, 速度为 0.1~4 m/min 可调. 氩气作为保护气体, 与激光束同轴环形吹出, 以保护聚焦系统, 同时单向侧吹以抑制金属等离子体的形成.

用 XJ-02 型金相显微镜对激光焊接试样进行观察和照相, 同时深入地研究了各种工艺参数及其关系; 焊接了不同厚度的冷轧钢板; 用拉伸试验机进行了焊接钢板的拉伸强度试验; 在冷轧机上对焊接钢板进行了轧制.

3 激光工艺研究及其焊接结果

3.1 激光功率和激光光束质量

激光深熔焊接与激光功率密度密切相关. 当激光功率密度达到 10^6 W/cm² 才能形成深熔

* 国家“八·五”重点攻关项目.

焊, 并且熔深与激光功率的密度的 0.7 次方成正比^[1]. 图 1 示出了熔深与激光功率的关系曲线, 从图可见熔深与激光功率几乎成直线关系, 提高激光功率可直接得到大的熔深. 光束经过聚焦系统被聚成直径 0.8 mm 的光斑, 用 8.7 kW 成功地穿透焊接了 8 mm 厚钢板. 实验发现激光光束质量对熔深有着重要影响. 图 2 示出高阶模和低阶模时钢板焊接区的形貌照片. 由于激光谐振腔失谐引起高阶模式使光斑光强分布不均匀对称, 此时同样高的激光功率只能得到深宽比低得多(约 1·1)的焊缝, 且熔深很浅; 谐振腔输出高质量的光束时即可出现小孔效应, 实现深穿透焊接, 焊缝的深宽比达 4·1.

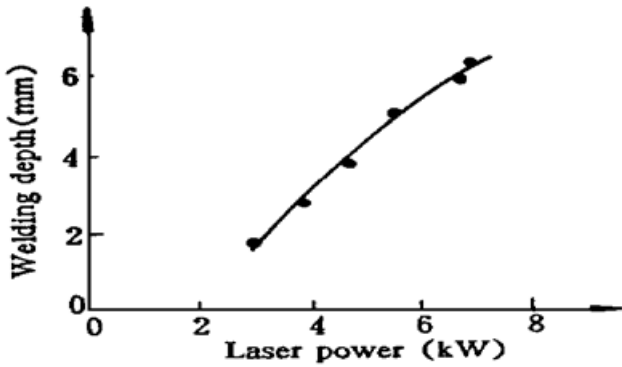


图 1 焊接深度与激光功率的关系
(焊接速度: 2.2 m/min)
Fig. 1 Welding depths vs. laser power;
welding speed 2.2 m/min

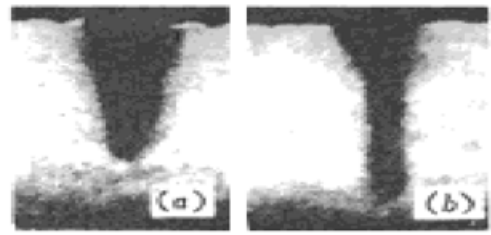


图 2 高阶 (a)、低阶 (b) 模对熔区形状的影响
Fig. 2 High and low modes vs. the shape of molten zone: (a) high mode; (b) low mode

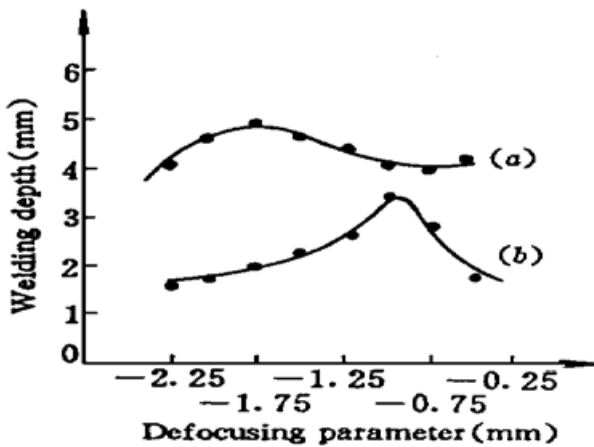


图 3 焊接深度与离焦量的关系(激光功率 6 kW, 焊接速度 2.5 m/min)
Fig. 3 Welding depths vs. defocusing; laser power 6 kW, welding speed 2.5 m/min
(a) 4 mm; (b) 6 mm

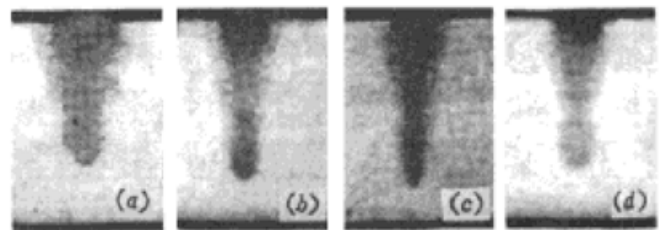


图 4 受离焦量影响的熔区照片(激光功率 6.1 kW, 焊接速度 2.5 m/min, 钢板厚 6 mm)
Fig. 4 Photographs of the molten zone influenced by defocusing, laser power 6.1 kW, welding speed 2.5 m/min, 6 mm steel plate. (a) - 2.25 mm; (b) - 1.75 mm; (c) - 1.25 mm; (d) - 0.25 mm

3.2 聚焦光斑离焦量

研究表明, 激光束离焦量的选取对激光深熔焊有很大的影响, 激光束腰处的功率密度最大, 使用它可充分熔化及气化被辐射部分的材料以形成小孔效应. 当束腰落入钢板内可实现深穿透焊接; 而束腰在钢板表面上时, 钢板获得的激光功率密度相应降低, 难以形成小孔效应,

即我们需要负的离焦量. 而最佳离焦量与聚焦镜的焦距有关, 短焦距相应的离焦量要比长焦距的离焦量小, 且焦点位置调节余量较小, 稍有变化就会引起显著的熔深损失, 但它可获得大的熔深. 我们使用的是焦距为 125 mm 的抛物球面镜, 焦深为 1.3 mm. 同时最佳离焦量与钢板的厚度有关. 图 3 示出了激光焊接 4 mm 钢板和 6 mm 钢板时熔深与相应离焦量的关系. 可以看出 4 mm 的最佳离焦量比 6 mm 的最佳离焦量要小一些. 图 4 示出了 6 mm 钢板几种离焦量相对应的熔池照片, 在最佳离焦量处获得最大的熔深, 并且熔池形貌要好, 深宽比最大.

3.3 焊接速度

在一定的激光功率下, 焊接速度与焊接熔深几乎成反比关系, 随着焊接速度的增加熔深变浅. 焊接速度过快, 难以形成小孔效应, 以至金属未熔透和自淬速度过快; 焊接速度过慢, 焊道向侧向扩展, 热影响区扩大, 并且熔区金属大量蒸发, 整个焊道出现凹陷. 图 5 给出焊区熔深、熔宽在一定激光功率情况下与焊接速度的关系, 在 1~ 4 m/min 速度范围内随速度的增加, 熔深与熔宽尺寸均下降, 但深宽比却在增加, 在保证一定的熔深情况下提高速度能得到较好形貌的熔区.

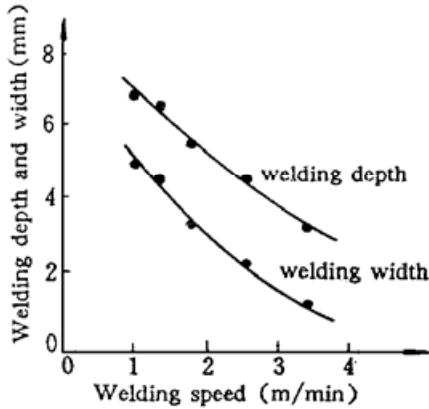


图 5 焊接深度、宽度与焊接速度的关系(功率 7 kW)

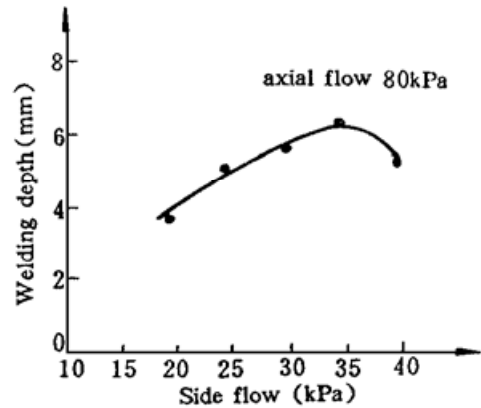


图 6 侧吹气嘴吹气参量与焊接深度的关系

Fig. 5 Welding depths and widths and their ratios vs. welding speeds (laser power 7 kW) Fig. 6 Flow parameters of nozzle vs. welding depth

3.4 等离子体的抑制

当激光功率密度超过 10^6 W/cm^2 时, 小孔中金属被大量蒸发, 同时金属蒸气进一步吸收激光能量以至电离, 在小孔上方形成等离子体云. 当小孔上方是稀薄的等离子体时, 等离子体可阻止工件表面光的反射, 有利于工件的焊接; 当等离子体浓度增加时, 等离子体对激光的吸收增大, 甚至完全截断激光的入射, 直至等离子体消失, 对焊接不利. 我们采用吹气控制等离子体的方式: 气流从与光轴同轴的夹层喷嘴吹出, 利用气流的径向分力将等离子体吹向四周; 单向侧吹采用直铜管喷嘴, 对准等离子体的中部将其吹散. 实验中发现, 采用吹气方向与工件运动方向相反焊接比吹气方向与工件运动方向同向焊接效果要好.

3.4.1 吹气量 因采用同向侧吹与单向侧吹相结合, 各个吹气嘴的方位、角度以及气流量的大小对等离子体处的流场均有影响. 我们测量同轴侧吹与单向侧吹的气流量对激光焊接深度的影响, 见图 6. 对同一正吹量, 侧吹存在一个最佳值, 过小时等离子体团较大, 激光深穿不下去; 侧吹量过大时, 熔池被吹翻; 而在最佳值时, 等离子体被压在小孔上方 1 mm 以内, 且均匀地发出“嘶嘶”的啸声. 正吹量 0.08 MPa 效果最好, 可获得最大的熔深.

3.4.2 侧吹角度 实验中测量了在一定同轴侧吹吹气量下, 不同的单向侧吹气嘴角度与激光

熔深的关系, 见图 7. 不同角度的气流对等离子体的抑制效果不同, 其中 33°为最佳.

3.4.3 辅助气体 变化辅助气体的种类对熔深和焊接区质量均有影响, 我们选用了 Ar 气和 CO₂ 气体作为辅助气体. CO₂ 气体焊接的工件熔深没有 Ar 气的深, 且熔区中还含有少量的气孔(图 8).

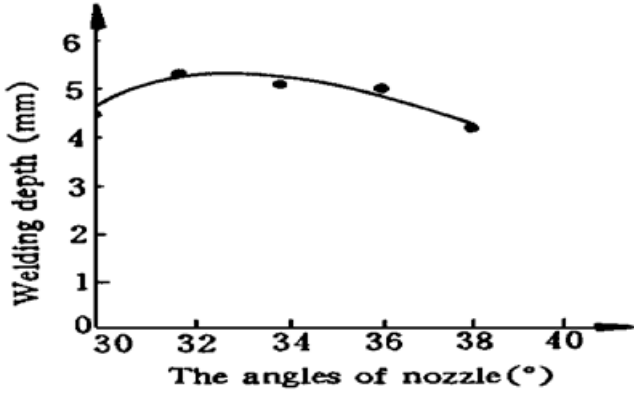


图 7 吹气嘴角度与焊接深度的关系

Fig. 7 Welding depths vs. angles of the nozzle

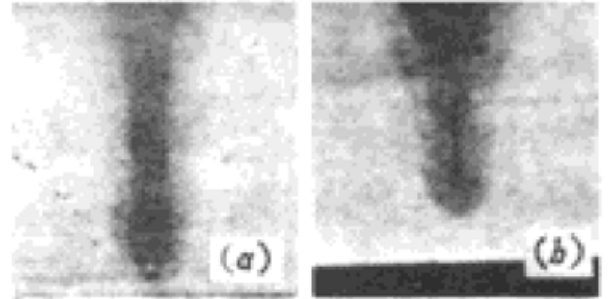


图 8 保护气体对焊区形状与质量的影响

(a) Ar 气; (b) CO₂ 气体

Fig. 8 Welding zone shape and quality vs. protecting gases. (a) Ar gas; (b) CO₂ gas

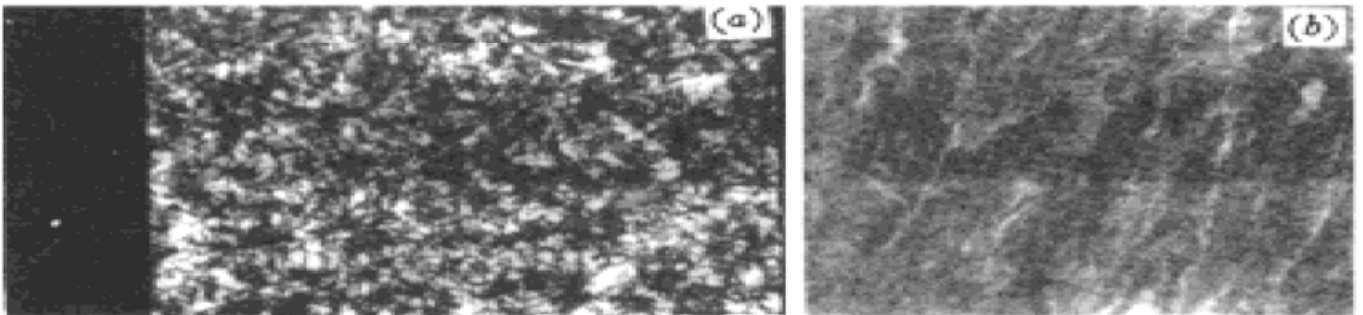


图 9 焊区微观结构照片

(a) 熔区的微观结构; (b) 热影响区的微观结构

Fig. 9 Photograph of microstructure of the welding zone

(a) Microstructure of the molten zone; (b) Microstructure of the hot influenced zone

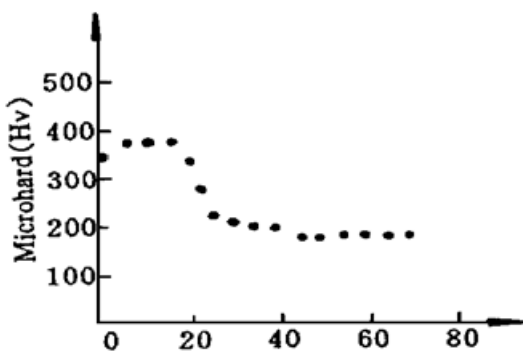


图 10 焊区的硬度分布

Fig. 10 Hard distraction of welding zone, ● is the centre of the molten zone (mm)

3.5 金相组织及焊接区缺陷分析

高功率激光焊接与常规手工焊接反映在工件焊区金相组织结构上有许多差别. 我们采用的材料为低碳钢, 其组织为约 90% 的铁素体加 10% 的珠光体, 组织分布均匀. 因激光焊接焊速快, 热影响过渡区很小, 特别在熔区的中下部, 熔区很快过渡到基体. 熔区为板条状马氏体, 见图 9 (a), 方向朝着熔区中轴. 热影响区主要为铁素体和索氏体的混合物, 还残杂少量的奥氏体, 见图 9 (b). 三部分区域硬度有明显不同, 图 10 示出焊区到基体的材料硬度分布, 熔区硬度在 Hv350~ Hv380 之间.

通常焊件可产生横向裂纹和纵向裂纹, 本实验中主要产生的是纵向裂纹, 分布在熔区的两侧(图 11) 或熔区的正中(方向垂直向下). 这是因为在焊接的快速冷却过程中, 熔化或受热膨胀部分向两侧收缩, 使熔区产生了纵向裂纹, 裂纹往往对称于焊缝中线. 产生裂纹与焊件的组织结构、化学成分如含 S, P 等有关, 为此我们对不同化学成分的碳钢进行筛选, 在激光熔焊的同时对焊区部分火焰退火以消除应力裂纹, 效果良好.



图 11 焊区的裂纹缺陷

Fig. 11 Crack defects of welding zone

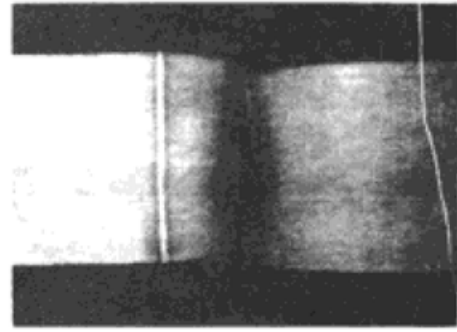


图 12 拉伸样品照片

Fig. 12 Photograph of tensile sample

3.6 焊接钢板强度检测及分析

表 1 示出激光焊接试样拉伸强度数据, 从表中可得出试样的屈服强度和抗拉强度均不低于母材的屈服强度 ($\sigma_b = 24 \text{ kgf/mm}^2$) 和抗拉强度 ($\sigma_s = 36 \sim 42 \text{ kgf/mm}^2$). 这是因为激光深熔焊接过程中熔区化学成分的纯化在起作用^[2]. 其中熔区含氧量比母材含氧量大幅度减少, 使它在具有相当或高于母材的抗拉强度和硬度的同时还显示出高的韧性值. 从拉伸样品(图 12) 可见拉伸断裂在母材处; 6 mm 钢板焊接后, 经火焰退火, 在武钢冷轧机上成功地轧成 0.4 mm 带状薄板. 这些均证明了以上结构.

表 1 激光焊接试样拉伸参数

Table 1 The tensile parameters of laser welding samples

samples	plate thick (nm)	plate width (nm)	area (mm ²)	limit of yielding (KN)	breaking stress (KN)	strength of extension (MPa)	result
1	5.28	25.00	132.00	33.8	58.7	444.70	breaking at masterbatch
2	3.24	24.70	80.028	21.2	30.3	378.62	breaking at masterbatch
3	3.24	24.70	80.028	21.1	30.2	377.37	breaking at masterbatch

参 考 文 献

- 1 C. M. Banas. Evaluation of basic laser welding capabilities. *United Tech. Res. Cen. Rep.*, R76-912260-2, Feb., 1977
- 2 C. M. Banas. High power laser welding. *Opt. Engineering*, 1978, 17(3): 210

Study of Laser Welding of Thick Steel Plates

Wang Tao Zheng Qiguang Tao Xingzi Gu Jianhui Li Jiarong

(*National Key Lab. of Laser Tech., Huazhong Univ. of Sci. and Tech., Wuhan 430074*)

Abstract A heat mode of laser penetrating of thick steel plates has been investigated and the relations between laser power and beam size as well as welding speed have been obtained through energy balance. Meanwhile, the laser beam quality has been discussed. The 4 mm, 6 mm and 8 mm A₃ steel plates have been welded by 6 ~ 8 kW high power from an unstable resonator high quality laser in the experiment. The welding speeds were 3.2 m/min, 2.2 m/min, and 0.9 m/min respectively. The welding depth/width ratio of these samples were more than 2·1 while that of the 6 mm steel plate was 4·1. The technology of laser welding was emphasized. The testing of tensile strength and the experiment of rolling of steel plates through a rolling mill were carried out also.

Key words laser, welding, steel plate