

文章编号: 1001-3806(2004)01-0016-04

# 高硅钢板的 YAG 激光在线拼接新工艺

刘建华, 张群莉, 胡伦骥

(华中科技大学 材料科学与工程学院 模具技术国家重点实验室, 武汉 430074)

**摘要:** 采用 4kW 的 YAG 固体激光器, 利用激光切割焊接热处理组合工艺对热轧酸洗线上硅钢卷板拼接进行了试验研究, 以解决高牌号硅钢难焊的问题。对 Hrb 钢进行了组合工艺试验, 论证了该方案的可行性, 探索了在不同工艺规范条件下焊缝成形、接头机械性能和金相组织的变化情况, 得出了最佳工艺参数, 通过了在线生产试验。

**关键词:** 激光加工; 激光切割焊接 热处理组合工艺; 高功率 YAG 激光器; 高硅钢

**中图分类号:** TG156.99 **文献标识码:** A

## New technology of on-line laser joining for hot rolled high silicon steel sheets

LIU Jian-hua, ZHANG Qun-li, HU Lun-ji

(National Laboratory of Die Technology, School of Materials Science & Engineering, HUST, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** To solve the difficulty of high silicon steel welding on the hot rolled sheet pickling line, new joining technology composed of laser cutting, laser welding and laser heat treating by a 4kW YAG laser has been presented. After testing on Hrb steel, this paper has explored the effects of welding parameters on the joint mechanical properties, profile and microstructure, and then optimized technological parameters. The study has proved feasibility of the presented method which has succeeded in industrial on-line production testing.

**Key words:** laser processing; laser cutting welding heat treating combined processing; high power YAG laser; high Si steel

## 引 言

硅钢片是一种广泛应用的电磁材料, 具有良好的电磁性能, 特别是硅含量越高, 其铁损越低, 所以人们一直在努力提高硅钢中的硅含量。但当硅含量提高到 3% 左右时, 硅钢的塑性急剧下降, 使高牌号硅钢在生产过程中遇到了许多技术难题。硅钢厂对热轧卷板开卷后进行酸洗, 在去除氧化层的过程中, 先行钢带与后行钢带必须进行在线焊接, 才能保证酸洗机组的连续作业。硅钢板带焊后在线运行时, 需要经过 20 多次“S”型反复弯曲变形, 并承受一定的运行张力, 因此对焊接接头的弯曲塑性有较高的要求。

目前, 硅钢板在线拼接一般采用 MIG 焊, 国内

外尚未见采用激光拼焊的报道。MIG 焊存在的主要困难是焊接接头尤其是 HAZ 的脆化, 焊态下接头的反复弯曲次数低, 以致在运行过程中造成有时断带<sup>[1,2]</sup>。作者利用大功率的 YAG 激光器, 采用激光切割焊接热处理组合工艺, 以高硅钢作为试验材料, 研究硅钢薄板激光拼焊过程中的接头组织和性能, 得出最佳工艺参数。

## 1 试验过程

### 1.1 试验材料和设备

为了论证该组合工艺的可行性, 采用最难焊的高牌号取向硅钢 Hrb 钢为试验材料, 板厚 2.4mm, 其化学成分见表 1。

Table 1 Chemical composition of Hrb steel/%

C	Si	Mn	Al	Cu	P	S
0.072	3.18	0.08	0.027	0.09	0.008	0.024

**作者简介:** 刘建华(1946), 男, 教授, 现从事材料激光加工和焊接冶金研究与教学。

E-mail: liuji@wuhan.cnbg.com

收稿日期: 2003-03-04; 收到修改稿日期: 2003-10-27

与 CO<sub>2</sub> 激光器相比, YAG 激光器具有易于实

现光纤传输和操作方便等优点。而且 YAG 激光的波长比  $\text{CO}_2$  激光的波长短一个数量级, 因此, 金属材料对 YAG 激光的吸收率较  $\text{CO}_2$  的大。此外, YAG 激光器对间隙敏感性小, 有利于焊缝成形, 保证接头的下凹度<sup>[3]</sup>。故采用德国 HAAS 公司的 4kW 大功率 YAG 激光器 HL4006D。

硅钢的拼接所用的激光切割焊接-热处理组合工艺在华工激光公司与武钢联合研制的硅钢酸洗线激光拼焊机上进行。激光切割时双光纤传输, 前后板分别自动夹紧后, 两个激光切割头顺序切割前后板边, 完成对接边的高精度预加工。然后夹具推进, 两板边对紧后进行焊接。热处理焊接和用同一激光头, 焊后将激光头升高一定距离, 使激光束散聚成一定大小的光斑, 便可对工件进行激光热处理。所有工序在同一激光加工机, 且在同一加工位上进行, 不仅保证了加工精度, 而且大大提高了生产效率。

试验时先对  $1000\text{mm} \times 1000\text{mm} \times 2.4\text{mm}$  大板进行拼接, 然后按  $180\text{mm} \times 18\text{mm}$  的尺寸对板接头试件进行拉伸和弯曲试样取样。拉伸试验在美国进口的 Gleeble 1500 热模拟机上进行, 弯曲试验采用 WJ-10B 型机械式万能试验机, 金相照片由扫描电镜分析得到。

## 1.2 激光切割-焊接-热处理组合工艺

激光拼焊是一种精密而无填充金属的“自熔焊”工艺, 对板边拼对的精度要求很高, 以保证接头的几何形状(主要是焊缝下凹度)及其机械性能。一般剪床在剪切断面形状及其直线上都难以达到。与其它切割方法相比, 激光切割不仅可以确保拼焊板边的质量, 而且无刀刃磨损之忧, 保证了长期生产的重复精度。试验得出的最佳工艺参数如表 2 所示, 在此工艺条件下的切口平整无挂渣, 且切口垂直度良好。

Table 2 Optimized parameters of Hi B steel laser combined processing

	laser power / W	speed / ( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )	working gas	gas pressure / kPa	defocusing / mm
cutting	3000	5.5	$\text{N}_2$	1360	-0.7
welding	4000	5	—	—	0
heat treating	2500	1	$\text{N}_2$	300	57

激光焊接热影响区极小, 不产生 HAZ 脆化组织; 且焊缝结晶时过冷度大, 硅钢板激光焊焊缝柱状晶比 MIG 焊小很多, 所以, 用激光焊接热轧硅钢板

比 MIG 焊可以取得更好的接头质量和更高的生产效率。高牌号的硅钢由于 Si 含量高(3%左右), 加热过程中只有少量奥氏体相变, 焊缝晶粒很容易长大, 而且焊接过程会产生少量马氏体, 焊后热处理对改善上述组织条件是有帮助的。为了不额外增加热处理设备和保证连续作业的需要, 用激光进行热处理是一个较理想的选择。对硅钢焊后接头进行一次激光回火, 准确控制接头回火部位及温度分布, 可以改善焊缝的脆性。为了准确控制接头的温度分布和处理深度, 采用大型通用有限元软件(ANSYS)对硅钢激光热处理过程中的温度场进行模拟。通过选定不同的激光功率和光斑直径, 利用 ANSYS 软件进行优化计算, 最后得出当功率为 2500W, 光斑直径为 14mm 时, 可获得较好的温度分布, 见图 1。所以在此热处理参数下能达到最佳处理效果, 即在工件上表面不熔化的前提下, 下表面达到  $860^\circ\text{C}$ 。

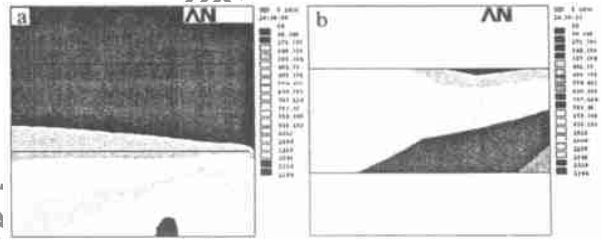


Fig. 1 Temperature nephograms for different sections of the joint  
a—upper surface b—longitudinal section

通过试验, 确定了激光切割-焊接-热处理组合工艺的最佳工艺参数, 见表 2, 将采用此优化的工艺参数规范得到的宽 1m 的大试板接入酸洗生产线运行, 顺利通过了生产条件运行试验, 实际验证了其工艺的可行性。

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 拉伸试验

Hi B 钢板在酸洗过程中要通过高温加热炉, 承受一定高温运行张力, 以及常温时带板张力。因此, 将焊接试样在 Gleeble 热模拟机上进行高温拉伸试验,  $1100^\circ\text{C}$  时  $\sigma_b = 36.8\text{N}/\text{mm}^2$ ;  $1300^\circ\text{C}$  时  $\sigma_b = 11.4\text{N}/\text{mm}^2$ , 大于炉内的最大运行张力 ( $4\text{N}/\text{mm}^2$ ), 满足厂方要求。

拉伸试验结果表明, Hi B 钢激光焊接接头在常温下其强度高于母材, 试样全部断于母材。

### 2.2 弯曲试验

为确保该组合工艺能够满足实际生产的需要, 将试样进行 2 种弧度的反复弯曲试验, 要求接头  $\varnothing 250\text{mm}$  反复弯曲次数  $\geq 5$ ,  $\varnothing 600\text{mm}$  反复弯曲次

数  $\geq 20$ 。试验表明,在所选的所有工艺规范下焊出的焊缝均能满足  $\varnothing 600\text{mm}$  弧面上的弯曲次数要求,而  $\varnothing 250\text{mm}$  反复弯曲次数与焊接规范有关,用氩气或氮气保护时试样反复弯曲次数较低,而无保护时反复弯曲次数都远大于 6 次,满足要求。这可能是因为钢材中的高硅含量,使其具有很强的脱氧能力,在空气中无须保护,反而因氧化使含硅量的减低,对焊缝金属塑性有利。另外,试验结果表明,在一定范围内提高焊接速度,或降低焊接功率,都能提高试样反复弯曲次数,即提高焊缝的塑性。

### 2.3 焊缝的微观组织及接头成形分析

焊缝全貌见图 2a,采用激光焊接对硅钢板进行拼焊,可以得到正反面成形良好的焊接接头。焊态下焊缝中心的金相组织见图 2b,由图可看出,HiB 钢焊缝组织为先共析铁素体、少量无碳贝氏体混合组织,铁素体晶粒粗大,呈多面体,晶粒内有少量的针状组分,由晶间向晶内沿特定的晶面析出,晶内某些沉淀相呈短杆状。焊缝几何形状和尺寸、焊缝质量以及焊接工艺参数之间有内在联系,焊缝几何形

状影响着焊缝质量,而焊缝几何形状和尺寸又取决于选定的各个焊接工艺参数。

由 HiB 钢的焊缝显微组织知,焊缝中心的柱状晶几乎垂直的向焊缝轴向生长,且晶粒尺寸几乎达到了焊缝宽度的一半。焊缝越宽,则柱状晶拉得越长,晶粒越粗大。故从晶粒细化的角度考虑,焊缝越窄,越有利于晶粒的细化,提高其塑性。另一方面,激光拼焊过程中,由于间隙的客观存在,焊缝的上部和下部不可避免地有不同程度的凹陷。焊缝在承受弯曲变形时,凹陷部分相当于一个缺口,形成应力集中,易于断裂。而焊缝越窄,则势必形成较深的下凹。所以从降低 HiB 钢的脆性的角度考虑,焊缝越宽,越有利于提高接头的弯曲性能。故要综合考虑激光焊接的各个参数,以找到最佳组合工艺参数。

热输入(焊接线能量)综合考虑了焊接功率和焊接速度两个因素。热输入过大,熔宽增大,导致晶粒粗大;热输入过小,焊缝细窄,会使下凹程度加大,甚至可能导致未焊透。因此热输入应取适中,既不能太大,也不能太小。

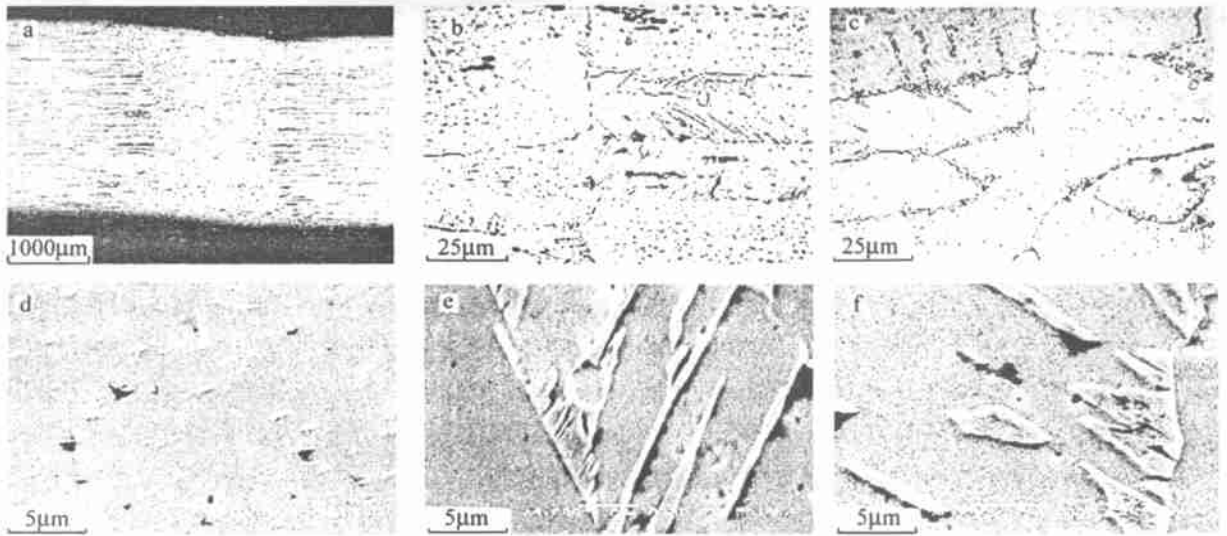


Fig. 2 Macrostructure and microstructure of HiB steel WM

a—one joint b—as welded microstructure at weld metal center c—heat treated microstructure at weld metal center d—as welded precipitations e—as welded acicular precipitation at grain boundary f—heat treated acicular precipitation at grain boundary

### 2.4 焊后热处理对焊接质量的影响

由于碳含量低,硅含量高,其焊缝基体组织为粗大的铁素体。从图 2d 可以看出,焊态下焊缝中铁素体晶内存在呈一定位向分布的某些沉淀相,它多呈短杆状。它在  $\alpha$  相晶粒中的分布,在平行于轧向的 (100) 晶面(试样表面)上观察,大体与 {100} 晶向相对应。晶内沉淀相一方面由于比容差,在沉淀相近邻引起点阵畸变,使基体相塑性降低;另一方面,相互垂直的盘状沉淀相比球粒状对位错运动的阻滞作

用大,以致反复弯曲时易产生宏观脆性断裂。从图 2c 可以看出,焊后进行激光热处理后晶内沉淀相大大减少。由硬度试验得知,进行焊后热处理后,其硬度由 252HV 降为 209HV。

从图 2b 还可看出,铁素体晶界上出现了一些析出相。HiB 钢的含碳量为 0.072%,在高温区存在一封闭的  $\alpha+\gamma$  双相区,从理论推断和实际观察可以确认室下晶界上的析出相是高温奥氏体区的过冷转变产物。通过扫描电镜观察,图 2e 所示的条块状组

织为无碳贝氏体, 因为硅在贝氏体转变过程有强烈抑制碳化物析出的特性, 所以贝氏体板条之间无碳化物, 板内亦无碳化物析出, 贝氏体条间分布有细条状残余奥氏体, 这种残余奥氏体沿贝氏体长轴方向分布, 将贝氏体分成亚片条, 这种形态分布的富碳残余奥氏体具有较高的稳定性<sup>[4]</sup>。另外, 在晶界上还存在着一些针状组份, 用扫描电镜观察, 焊态下试样的针状组份白亮, 针中心地带灰暗, 见图 2e, 说明针状区内有碳化物析出, 其边缘区为贫碳区, 相对于基体相针状组份本身是高碳区。因此在焊态下这个区域实质为过冷奥氏体转变的 M-A 型复合组织。而细长状 M-A 组元的存在对焊缝的脆性是有很大影响的。焊后经过高温回火后, 针状组份由细长状变为块状, 见图 2f。研究表明, 含细长状 M-A 组元的焊缝比含块状 M-A 组元的焊缝更容易产生裂纹。由弯曲试样的断裂情况知, 断裂基本上是发生在焊缝中心, 经过热处理后在焊缝中心线和晶界上出现的析出相, 可以起到适当阻碍沿焊缝中心线扩展的裂纹的作用, 从而降低了焊缝的脆性。

### 3 结 论

高硅钢板的一种新的 YAG 激光切割焊接热

处理组合在线拼接工艺是切实可行的, 不仅其接头性能优于 MIG 焊, 而且可集成于一台激光加工机床, 有利于轧钢生产上在线拼接。

高硅钢的脆性是焊接时的主要困难, 激光焊工艺优化的关键是找到合适的规范参数, 既要能保证焊缝的几何形状, 即要用较大的焊接线能量, 确保熔透并有足够的熔宽以减小下凹程度; 又要尽可能减小线能量, 以提高冷速, 限制焊缝粗晶的发展空间, 提高其塑性。

焊后将激光散焦后直接对接头进行激光热正火热处理, 可以减少晶内沉淀相, 在一定程度上改善硅钢焊缝的塑性。

### 参 考 文 献

- [1] 章应霖, 陈 序, 裴大荣. 焊接学报, 1982, 3(3): 115~ 122.
- [2] 威 廉, 浦绍康, 敖碧群. 金属学报, 1980, 16(3): 331~ 334.
- [3] H<sup>1</sup>GEL H. Optics and Lasers in Engineering, 2000, 34(2): 213~ 229.
- [4] CHEN T L, GUAN Y H, WANG H G *et al.* Journal of Material Processing Technology, 1997, 63(5): 546~ 549.

(上接第 15 页)

声性能, 噪声系数均低于 4dB。因此, 给双包层 Er-Yb 共掺光纤放大器增加反射镜, 不但能有效地提高输出信号功率, 还能改善其噪声性能。这一结论对双包层 Er-Yb 共掺光纤放大器的优化设计具有一定的指导意义。

### 参 考 文 献

- [1] HOFER R, HOFER M, REIDER G A. Opt Comm un, 1999, 169(1~ 6): 135~ 139.
- [2] DOMINIC V, MACCORMACK S, WAARTS R *et al.* Electron Lett, 1999, 35(14): 1158~ 1160.

- [3] SORBELLO G, TACCHEOS, LAPORTA P. Optical and Quantum Electron, 2001, 33(6): 599~ 619.
- [4] 夏贵进, 赵尚弘, 董淑福 *et al.* 光电子·激光, 2003, 14(5): 473~ 477.
- [5] PASQUALE F D, FEDERIGHI M. IEEE J Q E, 1994, 30(9): 2127~ 2131.
- [6] ACHTENHAGEN M, BEESON R J, PAN F *et al.* J of Lightwave Technol, 2001, 19(10): 1521~ 1526.
- [7] WHITLEY T J, WYATT R. IEEE Photon Technol Lett, 1993, 5(11): 1325~ 1327.
- [8] LESTER C, BJARKLEVA, RASMUSSEN *et al.* J of Lightwave Technol, 1995, 13(5): 740~ 743.
- [9] FEDERIGHI M, PASQUALE F D. IEEE Photon Technol Lett, 1995, 7(3): 303~ 305.