

# 双金属锯带用钢的固体激光焊接

牛振

北京奔驰汽车有限公司车身二工厂, 北京 100176

**摘要** 利用 Nd:YAG 固体激光器对 50CrNiMoVA 弹簧钢进行了扫描实验, 并与 W2Mo9Cr4VCo8 高速钢进行了对接焊。分析讨论了激光工艺参数对焊缝成形的影响, 观察了焊接接头显微组织, 进行了焊接接头性能实验, 并讨论了焊后热处理对焊接接头组织和性能的影响。实验结果表明, 在功率为 1000~1100 W、焊接速度为 3 m/min、氩气保护气体流速为 15 L/min 的条件下, 得到的焊缝平滑、无明显缺陷、深宽比大, 且表面成形好, 焊缝强度高, 齿部材料与背部材料结合牢固。焊后经过热处理, 接头的抗弯性能和抗拉伸能力得到明显改善, 弯曲角超过 90°, 焊缝沿纵向和横向均未发生开裂。锯切寿命测试结果表明, 接头符合锯带生产要求。

**关键词** 激光技术; 双金属锯带; 激光焊接; 弹簧钢; 高速钢

**中图分类号** TN249; TG456.7 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.121406

## Solid-State Laser Welding of Steels Used for Two-Metal Saw Belts

Niu Zhen

MRA2 Welding, Beijing Benz Automotive Co., Ltd., Beijing 100716, China

**Abstract** By using Nd:YAG solid-state lasers, the scanning test of 50CrNiMoVA spring steels is performed, and the butt welding with W2Mo9Cr4VCo8 high-speed steels is also done. The influences of laser process parameters on weld formation are analyzed, the microstructures of welding joints are observed, the welding joint performance tests are carried out, and the effect of heat treatment on the microstructures and properties of welding joints are discussed. The test results show that, when the laser power is 1000-1100 W, the welding speed is 3 m · min<sup>-1</sup>, and the flow rate of protecting gas Ar is 15 L · min<sup>-1</sup>, the smooth welding seams without obvious defects and also with a high aspect ratio, a good surface forming, a high strength, and a firm joining between tooth and back materials can be obtained. After welding, the heat treatment makes the bending and tensile properties of joints improve obviously, and the bending angle is larger than 90°. The welding seam does not crack along the longitudinal and transverse directions. The sawing life test result shows that the joints can meet the requirements of saw belt production.

**Key words** laser technique; two-metal saw belt; laser welding; spring steel; high-speed steel

**OCIS codes** 140.3390; 350.3390; 350.3850

## 1 引言

锯条在锯切过程中,受到周期性拉应力、间断冲击力、弯曲应力及扭转力等的共同作用,主要失效形式为背部材料疲劳断裂和齿部材料严重磨损。为延长锯条的使用寿命,常把锯条做成双金属锯带条。双金属锯带条是高速钢(简称齿部材料)与超高强度合金钢带(简称背部材料)焊接后,再经过一系列冷、热加工工艺制造而成的复合锯切工具,具有高效、低耗、节能、节材的特点,在我国机械行业应用广泛。

为保证锯齿部位的强度,要使焊缝尽量窄,即焊缝深宽比要大。电弧焊接热输入量大,焊接速度慢,不能满足这种生产要求;电子束焊接和激光焊接都能得到高的焊缝深宽比,符合焊件的焊接要求。低功率时电子束焊接和激光焊接获得的熔深大致相等,在高功率、焊接速度快时电子束焊能够获得更大的熔深,因此电子

**收稿日期:** 2017-06-30; **收到修改稿日期:** 2017-08-03

**作者简介:** 牛振(1982—),男,硕士,高级工程师,主要从事激光焊接方面的研究。E-mail: niuzhen@bbac.com.cn

束焊接对于厚板焊接更为有利。对于厚度为 1 mm 的薄板进行焊接实验,电子束焊接和激光焊接都能获得很好的焊缝。但是电子束焊接通常需要真空室,对焊件的尺寸、形状有很大限制,不易实现自动化。非真空室电子束焊接存在熔深较小、需要放射线防护等多方面的问题。电子束焊接的操作复杂,维护成本和加工成本比激光焊接的高。激光焊接不受真空室的限制,激光束控制比较灵活,柔性大,更容易实现自动化。因此,激光焊接对于加工强度要求较高的薄板具有非常重要的意义<sup>[1]</sup>。

## 2 实验设备及材料

锯带结构如图 1 所示。

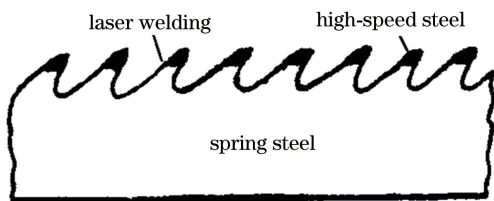


图 1 锯带示意图

Fig. 1 Schematic of saw belt

双金属锯带的齿部材料和背部材料均由某机床厂提供,厚度均为 1 mm。实验试样的齿部材料为高速钢 W2Mo9Cr4VCo8(2%、9%、4%、8%分别表示对应组分的质量分数),宽 1.5 mm,属于钼系高碳含钴(Co)超硬型高性能高速工具钢,红硬性和耐磨性极佳,可加工性较好,广泛用于刀具的制造。背部材料为弹簧钢 50CrNiMoVA(50 表示 Cr 的质量分数为 5%),宽为 25 mm,属于中碳合金弹簧钢。焊接实验前用丙酮清洗材料端面 and 表面,以除去油污。

为了保证对接焊缝质量,要求钢带必须有高尺寸精度、良好的表面状态及低表面粗糙度,钢带冷轧及剪裁后的外形尺寸与精度要求如图 2 所示,其中纵切面垂直尺寸偏差  $b \leq 0.02$  mm,纵向弯曲尺寸偏差  $t \leq 0.012$  mm。表面粗糙度不低于  $2.5 \mu\text{m}$ ,钢带的尺寸偏差不大于 0.05 mm。



图 2 外形尺寸偏差

Fig. 2 Boundary dimension deviation

为满足焊接要求,设计图 3 所示的夹具,此夹具不仅能够使材料精确对齐,而且可使齿部材料与背部材料被夹紧。

焊接设备采用的是德国 Rofin Sinar 公司生产的 CW2500 Nd:YAG 激光器和安川首钢机器人有限公司

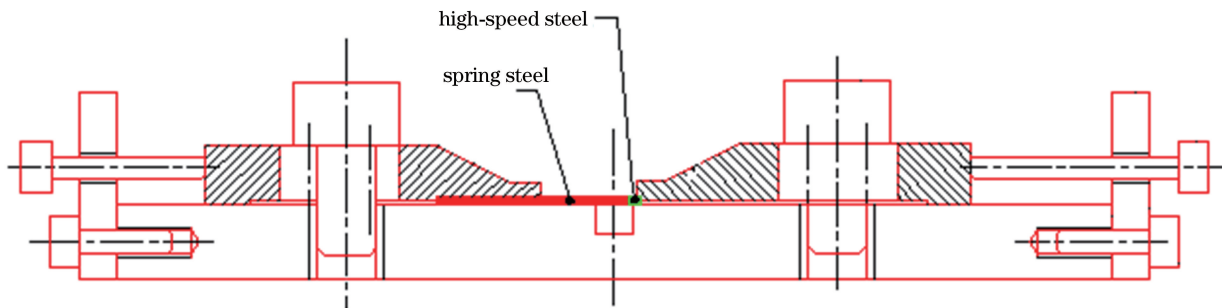


图 3 锯带焊接实验用夹具

Fig. 3 Jig used for saw belt welding experiment

生产的六轴机械手,采用内径为 0.6 mm 的光纤传输激光,聚焦镜焦距为 120 mm,聚焦光斑直径为 0.36 mm。在六轴机械手上安装可调焦的激光焊接头,激光在焊接头内经过反射和聚焦后照射在工件上,对弹簧钢进行一系列扫描实验及对接实验,保护气体氩气(Ar)通过自行设计的喷嘴输送至焊接位置。实验装置如图 4 所示。沿焊接方向分别采用前吹和后吹两种方式吹送保护气体进行实验。

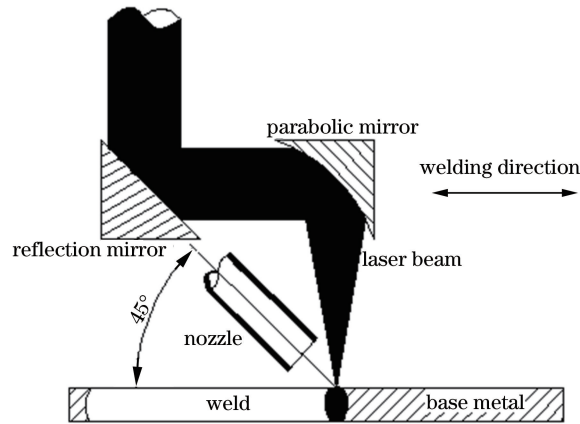


图 4 锯带焊接实验装置示意图

Fig. 4 Schematic of experimental setup for saw belt welding

### 3 实验方法及结果分析

两种材料中含硫(S)、磷(P)等高挥发性的合金元素较少,不易产生低熔点共晶物,因此未发现焊接过程中焊缝有严重的焊接热裂纹倾向。两种材料的碳质量分数均高于 0.3%,高含碳量增加了冷裂纹倾向及材料在疲劳和低温条件下的脆断倾向<sup>[2]</sup>,增加了焊接难度。对于这两种含碳量较高的材料,为了降低焊缝和热影响区产生残余应力和裂纹的倾向,在接头设计中应预先考虑到焊缝具有一定的收缩量。由于两种材料的碳质量分数差别较大,在焊接时采用偏置焊缝形式有利于限制马氏体的转变,减少裂纹和咬边的产生。根据二氧化碳激光焊接的经验,在对接焊实验时设定激光焦点每次偏向高速钢一侧,偏移量为 0.1 mm。由于材料的碳质量分数较大,减小淬火速度可以减小裂纹倾向<sup>[3]</sup>,因此在保证熔深的前提下,尽量采用较低的功率和焊接速度,但是为了提高生产效率,焊接速度又不能太低,且在熔深大致相同的情况下,高功率、高速度时得到的深宽比比低功率、低速度时的大,因此设置适当的激光功率和焊接速度才能得到较好的焊缝。通过一系列实验,发现在焊接速度为 3 m/min 时,焊缝成形较好,焊接过程比较稳定并且无明显裂纹。

#### 3.1 激光工艺参数对焊缝成形的影响

在弹簧钢材料上进行扫描焊接实验,使用的功率范围为 600~1200 W,保护气体为 Ar,气体流速为 0~25 L/min,气流方向分别为沿焊接移动方向从前往后吹(前吹)和从后往前吹(后吹),离焦量分别设为 0 mm 和 -1 mm。

##### 3.1.1 功率的影响

随着激光功率的增加,熔深逐渐增加,为了增大焊缝深宽比、减小热影响区,需要减小热输入量,在保证焊缝成形的基础上,应当控制激光功率不能太大。当功率太大时,会产生过烧裂纹,光压的增大和熔池的增宽也会使熔池下塌<sup>[4]</sup>。因此需要改变激光功率,进行多次扫描实验来寻找合适的焊接功率,实验测得焊缝的熔深随功率密度的变化曲线如图 5 所示。

实验结果表明,在焊接速度为 3 m/min 的情况下,功率最低为 900 W 时刚好熔透,如图 6(a)所示。当功率为 1000 W 时,焊缝熔透较好,成形较好,且焊缝较窄,如图 6(b)所示。因此将激光功率控制在 1000 W 左右为宜。

##### 3.1.2 离焦量的影响

功率为 1000 W、焊接速度为 3 m/min、离焦量分别为 -1 mm 和 0 mm 时焊缝的剖面形状如图 7 所示,

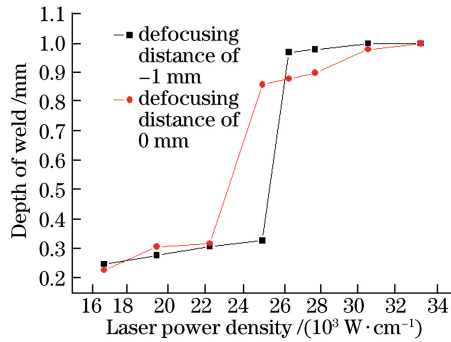


图5 焊缝熔深随功率密度的变化曲线

Fig. 5 Welding seam depth versus laser power density

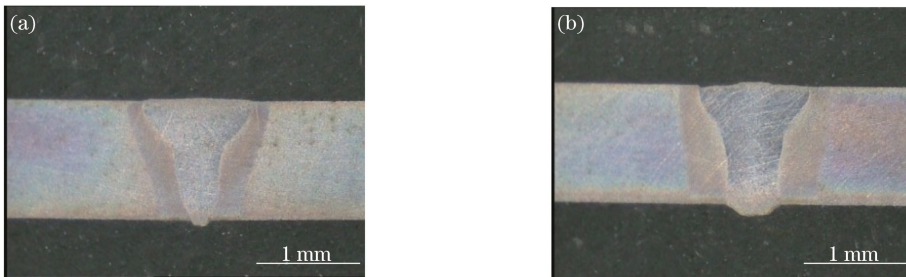


图6 不同功率时焊缝的熔透状态。(a) 900 W;(b) 1000 W

Fig. 6 Penetration status of welding seam under different laser powers. (a) 900 W; (b) 1000 W

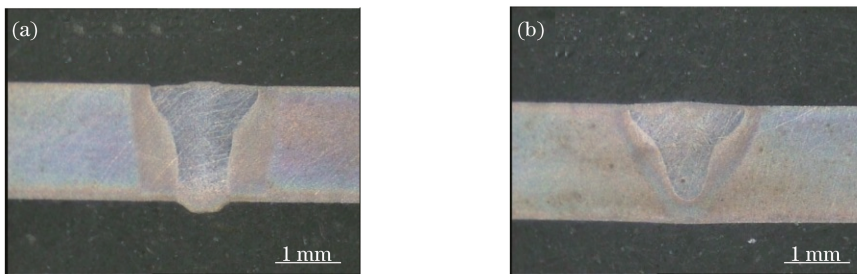


图7 不同离焦量时焊缝的熔透状态。(a) -1 mm;(b) 0 mm

Fig. 7 Penetration status of welding seam under different laser defocusing distances. (a) -1 mm; (b) 0 mm

可以看出,当离焦量为-1 mm(即激光焦点位于工件下部)时,熔透状态较好,而且离焦没有引起熔池表面的增宽。由此可见,适当的离焦量能增加熔深、减小熔宽,并且得到良好的焊缝成形。

### 3.1.3 保护气体的影响

保护气体的主要作用是防止焊缝氧化和控制等离子体,对于Nd:YAG激光焊接,由于激光波长较短,等离子体吸收的激光能量较少,保护气体对等离子体的抑制不如二氧化碳激光焊接下的重要<sup>[5]</sup>,因此保护气体一般不采用价格昂贵的氦气(He)。由于Ar价格相对便宜且保护效果好,因此实验中采用Ar作为保护气体,实验中发现Ar的流速对于焊缝的熔深影响非常明显。

首先研究气体流动方向的影响。功率分别为900,1000,1100 W,速度为3 m/min时的焊接剖面图如图8所示。图8(a)~(c)所示为保护气体沿焊接方向前吹的结果,图8(d)~(f)所示为保护气体沿焊接方向后吹的结果,可以看出气体前吹效果稍好,熔深较深,焊缝成形较好,且表面鱼鳞纹比较平缓。这是因为气体前吹减慢了熔池的冷却速度。

对保护气流速的影响进行实验研究。激光功率为1000 W、焊接速度为3 m/min时的焊缝剖面图如图9所示,保护气体沿焊接方向前吹,只改变气体流速。可以看出,气体流速对熔透性的影响非常明显,在0~15 L/min气体流速范围内,随着流速的加大,熔深逐渐增大,且焊缝无下塌缺陷。

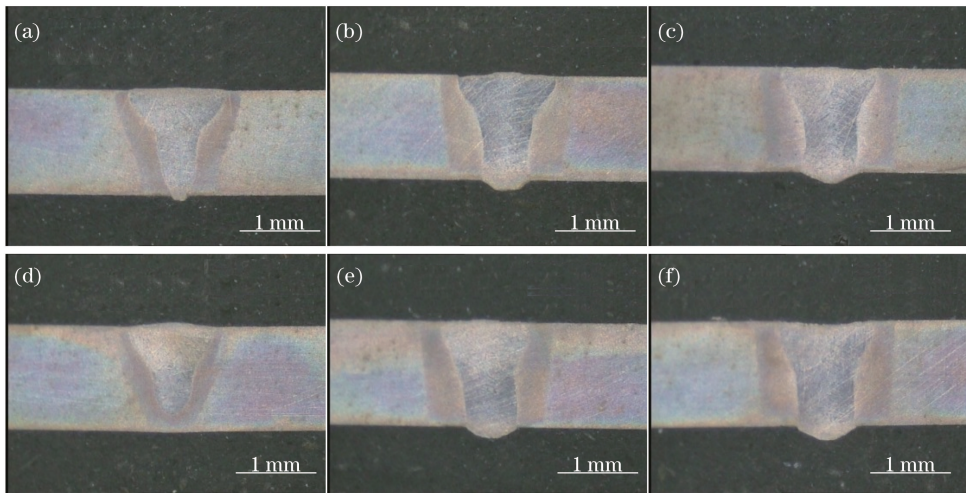


图 8 不同激光功率、不同保护气体方向下焊缝的熔透状态。(a) 900 W, 前吹; (b) 1000 W, 前吹; (c) 1100 W, 前吹; (d) 900 W, 后吹; (e) 1000 W, 后吹; (f) 1100 W, 后吹

Fig. 8 Penetration status of welding seam under different laser powers and different protecting gas directions.

(a) 900 W, fore blow; (b) 1000 W, fore blow; (c) 1100 W, fore blow; (d) 900 W, after-blow; (e) 1000 W, after-blow; (f) 1100 W, after-blow

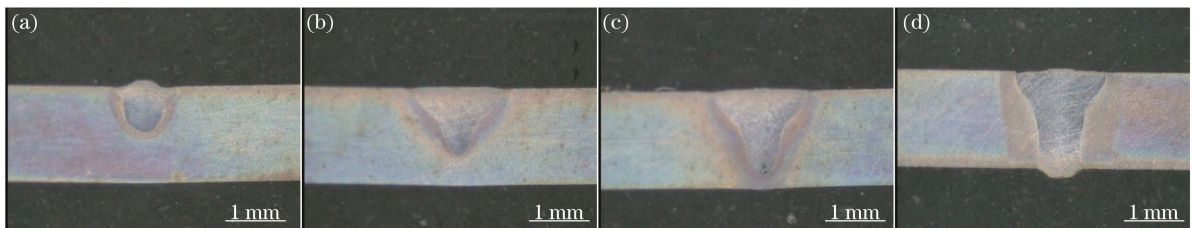


图 9 不同保护气体流速时焊缝的熔透状态。(a) 0 L/min; (b) 5 L/min; (c) 10 L/min; (d) 15 L/min

Fig. 9 Penetration status of welding seam under different flow rates of protecting gas.

(a) 0 L · min<sup>-1</sup>; (b) 5 L · min<sup>-1</sup>; (c) 10 L · min<sup>-1</sup>; (d) 15 L · min<sup>-1</sup>

当气体流速继续增大时,保护气体会扰动熔池,由于背部没有采取气体保护,焊缝还会出现下塌现象,形成的焊缝表面如图 10 所示。因此接焊时采用的气体流速不宜太大,15 L/min 较为合适,保护气体沿焊接方向前吹,吹向熔池前端的冷金属,以减小气体对熔池的扰动。

焊缝表面的鱼鳞纹与金属冷却方向有关。鱼鳞纹与焊缝冷却方向垂直,焊缝冷却的方向与焊接速度和保护气体的方向、流速都有关系,在保护气体沿焊接方向前吹、流速为 15 L/min、激光功率为 1000 W 左右、焊接速度为 3 m/min 时,弹簧钢扫描实验得到的焊缝表面鱼鳞纹较为平缓,而且焊缝成形较为理想,无明显缺陷,焊缝切面如图 9(d) 所示,表面如图 11 所示。

根据前述基础扫描实验数据,对弹簧钢和高速钢两种金属进行对接实验,设定激光焦点每次偏向高速钢一侧的偏移量为 0.1 mm。在弹簧钢激光扫描实验中得到的规律在对接实验中也同样适用,在激光功率为 1000~1100 W、焊接速度为 3 m/min、保护气体 Ar 的流速为 15 L/min、保护气体沿焊接方向前吹的条件下得到了理想的焊缝,焊缝的正、背面宏观图像如图 12 所示。

通过上述激光焊接实验得到了焊缝窄、焊缝深宽比大的样件,且表面成形较好,平整、光滑、不下塌,焊缝强度高,焊缝及过渡区域无裂纹、气孔、夹杂、咬边等缺陷,齿部材料与背部材料牢固结合,焊缝组织性能符合锯带生产要求。

### 3.2 焊接接头显微组织

用 20% (质量分数) 硝酸水溶液腐蚀试样,并在显微镜下观察到图 13 所示的金相组织。可以看出,凝固

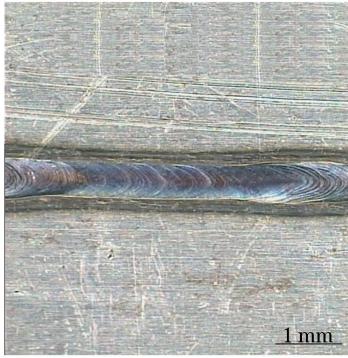


图 10 气体流速过大时产生的焊缝表面

Fig. 10 Welding seam surface under excessively high flow rate of protecting gas

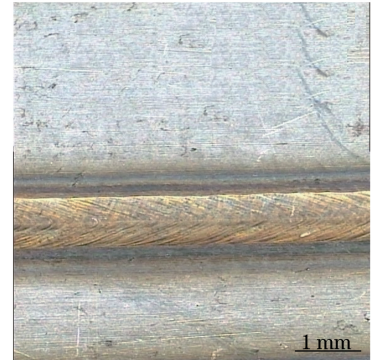


图 11 参数优化后的焊缝表面

Fig. 11 Welding seam surface under optimized parameters

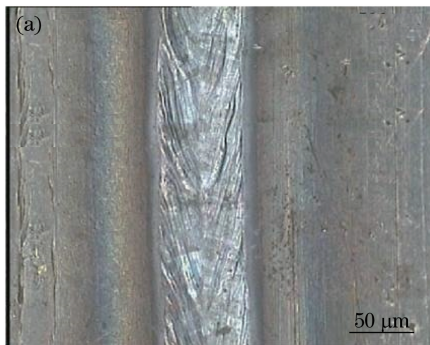


图 12 理想焊缝的宏观图像。(a)正面;(b)背面

Fig. 12 Macroscopic images of ideal welding seam. (a) Front side; (b) rear side

后接头组织主要由板条马氏体、少量孪晶马氏体、少量板条边界残留奥氏体薄膜及极少量未熔碳化物组成。板条马氏体形态主要有平行状、宽大板条状、交织状,其中以平行状和宽大板条状为主。焊缝中部为粗大的树枝晶和大量板条马氏体,并呈一定的方向性排列,还有少量碳化物;焊缝上部中心处出现一个细小的等轴晶区域,两侧仍为树枝晶。在靠近弹簧钢一侧的熔合线附近,枝状晶尺寸逐渐变小,马氏体数量减少,碳化物数量有所增加,存在一个细小的等轴晶区域,出现回火索氏体组织,各特征区域中的索氏体较细密且分布均匀,无原有马氏体的位向形貌;在靠近高速钢一侧,树枝晶的方向性被打乱,柱状晶特征消失,这主要是由于未熔碳化物的存在阻止了柱状晶的生长。在激光的快速加热条件下,热影响区相变过程中虽存在碳及合金元素的扩散和迁移,但扩散距离极短,因此在熔合线外侧存在一个脱碳层。合金碳化物的数量分布以母材部位最多,由于热影响区和焊缝区相变重结晶的完善程度不同,其数量由热影响区到焊缝区逐渐减少;母材部位的合金碳化物尺寸较大,由于相变重结晶完善程度和机械破碎作用不同,其尺寸由热影响区到焊缝区逐渐减小。

### 3.3 焊接接头性能实验

焊接接头的显微硬度测试结果表明,焊缝和热影响区硬度很高,平均硬度约为 1100 HV,而冷轧态弹簧钢的约为 300 HV,退火态高速钢的约为 700 HV,均低于相关文献报道的硬度值<sup>[6]</sup>。由于焊缝和热影响区硬度高、脆性大,这种硬度结构使得高速钢一侧的熔合线附近成为整个焊缝的薄弱区,在锯切过程中容易开裂。对焊接接头进行弯曲实验和拉伸实验,结果表明,接头抗弯性能和抗拉伸能力较差,起裂位置全部位于高速钢一侧的熔合线附近,在显微镜下看到裂纹位于晶界处沿熔合线方向,为纵向裂纹。

由于被焊材料都属于易淬硬材料,且激光焊接速度快,熔池具有加热快、冷却快的特点,焊后双金属锯带条激光焊接接头组织主要是马氏体和少量残余奥氏体,焊缝区的硬度高达 1100 HV。由图 13 可以看出,焊接热影响区的组织特征较为明显,这说明热影响区相变过程中仍然存在碳及合金元素的扩散。焊接过程中母材金属与焊缝液态金属之间进行了碳元素的扩散交换,导致熔化阶段及凝固后的高温阶段在不完全熔化

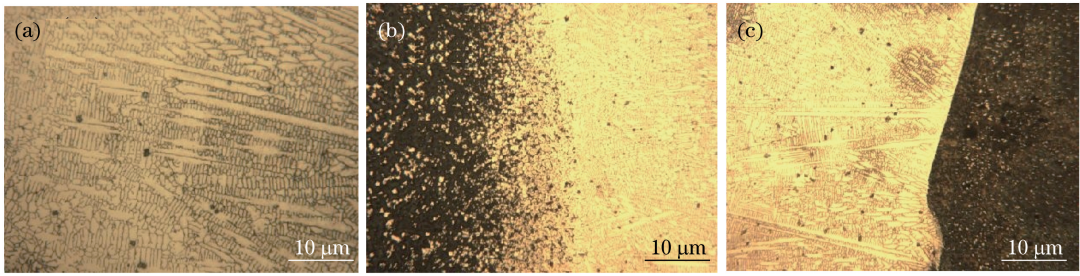


图 13 参数优化后焊缝的金相照片。(a)焊缝中心;(b)靠近高速钢一侧;(c)靠近弹簧钢一侧

Fig. 13 Metallographic images of welding seam under optimized parameters. (a) Center of welding seam; (b) near high-speed steel side; (c) near spring steel side

区紧靠熔合线一定宽度范围内碳含量的下降,形成脱碳层[图 13(b)]。但激光焊接的冷却速度非常快,致使碳元素的扩散迁移行程较短,主要集中于熔合线焊缝区,造成该区硬度值较高,脆性较大。弯曲实验结果表明,断裂位置位于焊缝靠近高速钢一侧的熔合线附近。可以通过焊件的热处理降低焊缝的脆性。

焊件的热处理是在高纯氮气( $N_2$ )保护气氛中进行,先在加热炉中于  $1190\text{ }^\circ\text{C}$  下使焊件奥氏体化,再在冷却箱中分级淬火,分级前冷却源为  $10\sim 12\text{ }^\circ\text{C}$  的循环水,然后回火炉中于  $530\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $2\text{ h}$  条件下进行三次回火处理。在金相显微镜上进行组织观察和显微硬度测量。热处理后得到的焊缝区硬度基本与高速钢母材持平,硬度大约为  $900\text{ HV}$ ,高速钢的硬度也相应得到提高。图 14 所示为热处理前后焊缝及母材的硬度分布。

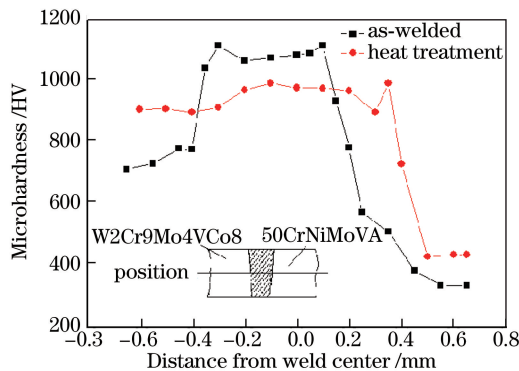


图 14 热处理前后焊缝及母材的硬度分布

Fig. 14 Microhardness distributions of welding seam and base metal before and after heat treatment

分别对焊态和焊后热处理态的双金属锯带条异种接头沿焊缝纵向进行折弯实验,结果见表 1。焊态下,接头抗弯性能较差,起裂位置全部位于高速钢一侧的熔合线附近,沿熔合线方向形成纵向裂纹;焊后经过热处理,接头的抗弯性能得到明显改善,弯曲角超过  $90^\circ$ ,焊缝沿纵向和横向均未发生开裂。然后对接头进行拉伸实验,结果表明,热处理后焊接接头的抗拉伸能力也得到明显改善。

表 1 弯曲实验结果

Table 1 Bending test results

Condition	Specimen No.	Angle /( $^\circ$ )	Fracture position
As-welded	1	90	Fusion boundary near W2Mo9Cr4VCo8
	2	90	Fusion boundary near W2Mo9Cr4VCo8
	3	90	Fusion boundary near W2Mo9Cr4VCo8
Heat treatment	4	$\geq 90$	None
	5	$\geq 90$	None
	6	$\geq 90$	None

上述实验结果表明,热处理后焊缝的硬度减小,脆性降低,这种硬度结构非常符合锯带的要求;经过热处理后,齿部抗冲击性能、背部抗弯折性能以及焊缝强度均得到明显改善。锯切寿命实验在锯带床上进行,锯切材料为 45 号钢,锯切速度为  $80\text{ m/min}$ ,测试结果表明,所提工艺满足锯带的强度要求<sup>[7]</sup>。

## 4 YAG 激光焊与二氧化碳激光焊、电子束焊的比较

对于双金属锯带用弹簧钢和高速钢的焊接,电子束焊、二氧化碳激光焊和 YAG 激光焊都具有热输入量小、焊缝深宽比大、焊缝热影响区小、无污染、焊接速度快、变形小等优点,均能得到理想的焊缝。电子束焊接焊缝窄,深宽比最大,焊缝强度高。对于激光焊接,齿部材料很窄,要求焊缝的宽度很窄,因此对激光光束质量有很高的要求,光斑直径要足够小才能获得较小的焊缝。随着激光器光束质量的不断提高,激光焊接越来越多地应用于精密件的焊接,在锯带焊接中也会起到越来越重要的作用。YAG 激光和二氧化碳激光在光束质量上存在差异,焊接的精度和焊缝宽度也有不同,且 YAG 激光的波长比二氧化碳激光的短,导致激光对材料的吸收率增大,产生的等离子体较弱,故等离子体吸收的激光能量较少,在保护气体、功率、焊接速度等方面,两者有很大差别。

## 5 结 论

利用 Nd:YAG 固体激光器对 50CrNiMoVA 弹簧钢进行了一系列扫描实验,并与 W2Mo9Cr4VCo8 高速钢进行了对接焊实验。分析讨论了激光工艺参数对焊缝成形的影响,观察了焊接接头显微组织,并进行了焊接接头性能的测试实验,讨论了焊后热处理对焊接接头组织、性能的影响,得到如下结论。

1) 在无填充材料情况下,利用 YAG 激光可实现锯带用弹簧钢和高速钢的焊接,焊缝窄、深宽比大,且表面成形好,平整、光滑、不下塌,焊缝强度高,焊缝及过渡区域无裂纹、气孔、夹杂、咬边等缺陷,齿部材料与背部材料结合牢固,焊缝组织性能符合锯带生产要求。

2) 激光的功率、离焦量、保护气体的流速和方向等都会直接影响焊缝的成形,在功率为 1000~1100 W、离焦量为 -1 mm、保护气体流速为 15 L/min、保护气体沿焊接方向前吹的条件下能得到较为理想的焊缝。

3) 热处理后的焊件接头性能得到明显改善,接头性能符合锯带生产的要求。

## 参 考 文 献

- [1] Lu Bin, Zhang Siqi, Liang Ying, *et al.* The effect of quenching process on the structure and property of the bimetal saw[J]. *Journal of Central South University of Technology (Natural Science)*, 1999, 30(1): 67-70.  
卢斌, 章四琪, 梁英, 等. 淬火工艺对双金属锯带条组织及力学性能的影响[J]. *中南工业大学学报(自然科学版)*, 1999, 30(1): 67-70.
- [2] Costa A P, Quintino L, Greitmann M. Laser beam welding hard metals to steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 114: 163-173.
- [3] Zhou Zhenfeng. *Welding metallurgy and technology*[M]. Beijing: Publisher of Mechanical Industry, 1981: 145-162.  
周振丰. *金属熔焊原理及工艺*[M]. Beijing: 机械工业出版社, 1981: 145-162.
- [4] Ma Guolong, Li Liqun, Chen Yanbin. Effect of energy ratio on dual beam laser welding characteristics[J]. *Chinese J Lasers*, 2017, 44(3): 0302003.  
马国龙, 李俐群, 陈彦宾. 能量比对双光束激光焊接特性的影响[J]. *中国激光*, 2017, 44(3): 0302003.
- [5] Zhao Shengbin, Yang Lijun, Liu Tong, *et al.* Electrical signal characteristics of plasma in YAG laser welding of A304 stainless steels under different modes[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(12): 1202005.  
赵圣斌, 杨立军, 刘桐, 等. 不同焊接模式下的 A304 不锈钢 YAG 激光焊等离子体的电信号特征[J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1202005.
- [6] Xiong Ying, Yao Jianhua, Chen Zhijun, *et al.* Research for welding high-speed steel and spring steel using laser beam[J]. *Applied Laser*, 2002, 22(2): 209-212.  
熊纓, 姚建华, 陈智君, 等. 高速钢与弹簧钢的激光焊接研究[J]. *应用激光*, 2002, 22(2): 209-212.
- [7] Zhang Siqi, Lu Bin, Shen Jian. Effect of load on the lifetime and fracture behavior of bimetal composite saw blade[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 1995, 26(3): 369-372.  
章四琪, 卢斌, 沈健. 载荷对双金属复合锯带条锯切寿命及断口特征的影响[J]. *中南工业大学学报*, 1995, 26(3): 369-372.