

# 脉冲激光焊缝凝固特征及组织与硬度关系的研究

计遥遥<sup>1</sup> 洪永昌<sup>1</sup> 张武<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>安徽工业大学材料科学与工程学院, 安徽 马鞍山 243002)

<sup>2</sup>马钢技术中心, 安徽 马鞍山 243000

**摘要** 用 Nd:YAG 固体脉冲激光焊接器对厚度为 0.65 mm 的 DP500 双相钢进行了激光焊接试验, 对脉冲激光焊缝表面和横截面形貌进行了分析, 重点研究了不同脉冲激光频率下焊缝凝固特征及晶粒组织与硬度的关系。试验结果表明, 在形成焊缝的每个焊斑可分为重叠区和未重叠区, 并且随着脉冲激光频率不同, 不但形成的焊缝形态和焊斑重叠率不同, 而且还存在晶粒组织的差异。同时, 硬度出现波动性, 最低硬度值出现在焊斑重叠区, 最高硬度值出现在焊斑未重叠区。随着脉冲激光频率的提高和焊斑重叠率的增大, 晶粒组织的差别不但逐渐减小, 而且沿焊缝正剖面中心线的硬度波动性也逐渐降低。

**关键词** 激光技术; 脉冲激光焊接; 焊缝凝固特征; 显微组织; 双相钢; 显微硬度

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0403003

## Study of Weld Metal Solidification Characteristics and Relationship between Microstructure and Microhardness in Pulsed Laser Welding

Ji Yaoyao<sup>1</sup> Hong Yongchang<sup>1</sup> Zhang Wu<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>School of Material Science & Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243002, China)

<sup>2</sup>Technical Center of Ma'anshan Iron & Steel Company, Ma'anshan, Anhui 243000, China

**Abstract** The welding test of DP500 dual-phase steel sheet of 0.65 mm is implemented by the Nd:YAG solid pulsed laser welder. The pulsed laser weld surface and cross-section morphology are analyzed, and the paper focuses on the weld solidification characteristics under different pulse laser frequencies and the relationship between microstructure grain and microhardness. The result shows that each of the welding spots forming the weld seam can be divided into two parts: welding spot overlap region and unoverlap region. With the change of the pulse laser frequency, the morphology of weld and the welding spot overlapping ratio both change, and the microstructure grain exhibits heterogeneity. Meanwhile, microhardness distribution appears to be fluctuant, the minimum microhardness value appears in the welding spot overlap region, while the maximum microhardness value appears in the unoverlap region. With the pulse laser frequency increasing, the difference of microstructure grain decreases and the fluctuation of the microhardness distribution along the longitudinal section of the weld center is also gradually reduced.

**Key words** laser technique; pulsed laser welding; weld solidification characteristics; microstructure; dual-phase steel; microhardness

**OCIS codes** 140.3390; 140.3538; 160.3900

## 1 引 言

激光焊接技术是利用激光的辐射能量来实现有效焊接的一种先进焊接方法, 可分为热传导焊和深熔焊, 与传统焊接方法相比具有速度快、热影响区小、成形性好等特点。国内外学者除了钢铁, 还针对

铜、铝合金以及异种材料之间的连接方法做了大量的研究和应用工作<sup>[1~3]</sup>。与波长为 10.6  $\mu\text{m}$  的 CO<sub>2</sub> 激光器相比, 选择波长为 1.06  $\mu\text{m}$  的 Nd:YAG 固体脉冲激光器不但生产效率高、体积小、重量轻、冷却系统简单, 而且脉冲频率高, 金属对激光束的吸收

**收稿日期**: 2012-10-23; **收到修改稿日期**: 2012-11-26

**作者简介**: 计遥遥(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事金属材料激光焊接方面的研究。E-mail: jq504@126.com

**导师简介**: 洪永昌(1952—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事金属材料表面改性和焊接性能方面的研究。

E-mail: hyc9303@ahut.edu.cn(通信联系人)

率高于 CO<sub>2</sub> 激光器。一般具有尖峰结构波型的脉冲激光器,激光辐射的动力特性范围大,在相同平均功率条件下可获得更大的熔深,有利于提高深度熔化的效果,使得脉冲激光焊得到了较为普遍的应用<sup>[4,5]</sup>。随着机械制造工业要求的不断提高,特别是在汽车制造业中,传统焊接方法已经逐渐被激光焊接所取代<sup>[6]</sup>。

脉冲激光焊具有间歇脉冲式热源的特征,可以看作是连续焊和点焊方法的结合,既具有连续焊的特点又同时具有点焊的特征,它是通过一次次脉冲的连续输入,使得前后脉冲作用形成的熔池相互重叠,经过冷却和凝固来实现对材料的连续连接<sup>[7]</sup>。在金属材料焊接过程中,由于脉冲激光具有光辐射的高峰值功率与间断作用特性,其作用过程显示出动态规律性变化的特点,将会使得脉冲激光焊形成的熔池及凝固后的焊缝组织具有不同于连续激光焊接过程的特征,但有关这方面的研究报道却很少。本文重点研究不同脉冲激光频率下焊缝凝固特征与晶粒组织的差别,并测定和分析不同焊斑重叠率下的硬度分布特点,为高强度薄板的焊缝能获得良好成形性提供试验和理论依据。

## 2 试验材料及方法

### 2.1 试验材料

本试验所用的材料为马钢生产的厚度为 0.65 mm 的 DP500 双相钢汽车用板,其化学成分如

表 1 所示。焊接试验设备采用德国 Rofin 公司生产的 SW-500 型 Nd:YAG 固体脉冲激光器,其中控制系统采用 CNC2000 数控软件进行焊接编程控制,焊接工作台采用计算机控制,步进机驱动,可以实现 X、Y、Z 三轴联动。

表 1 DP500 钢的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of DP500 steel (mass fraction, %)

C	Si	Mn	Cr	P	S	Al
0.046	0.31	1.47	0.23	0.013	0.0013	0.047

### 2.2 试验方法

首先在剪板机上截取尺寸为 200 mm × 150 mm × 0.65 mm 的平板焊接试板,焊前需严格去除试板表面氧化层、油污和毛刺。实验过程中保证工作台水平,焊接过程中采用纯氩气保护,保证离焦量为零和吹气角度为 30° 位置不变,保护气体流速为 20 L/min。试验设定的脉冲激光焊接工艺参数如表 2 所示。焊接完成后使用 VHX-900 型超景深数码显微镜对焊接接头的表面形貌进行拍照分析,并进行焊斑重叠率测定,然后制成金相试样,腐蚀剂为 100 mL 的 4% (体积分数) 苦味酸水溶液加 2 滴盐酸,经 65 °C 水浴加热 15 min 进行适当腐蚀。在 OLYMPUS-BX51 金相显微镜下观察分析焊缝正剖面组织与横截面的形貌并拍照,在 HV-1000 型维氏显微硬度计下进行硬度分布测定。

表 2 脉冲激光焊接工艺参数

Table 2 Process parameters of pulsed laser welding

Number	Pulse	Pulse	Pulse	Welding	Laser
	frequency /Hz	voltage /V	duration /ms	speed / (mm · min <sup>-1</sup> )	power /W
1	12	250	4	300	60
2	20	250	4	300	108
3	28	250	4	300	165
4	32	250	4	300	189

## 3 试验结果与分析

### 3.1 脉冲激光焊缝凝固特征

图 1 是其他工艺参数一定,不同脉冲激光频率 ( $f$ ) 下的焊缝表面和对应的焊缝横截面形貌。其右图为左图白线所标示的焊斑中心处横截面形貌,箭头所示为焊接方向。经测定得到的焊斑重叠率 ( $O_f$ ) 值如表 3 所示。比较表 3 和对应的图 1(a) ~ (d) 可以看出,随着脉冲频率的逐渐提高,其焊斑重叠率不但逐渐增大,而且对应的焊缝横截面上重叠

的焊斑数量也随之增多。进一步分析可知,当脉冲激光频率较小时,对应的焊斑重叠率为 48.5%,如图 1(a) 所示。从图 1(a) 的右图可以看出,经焊斑中心的白线处的整个焊缝横截面上只有一个熔池边界,由此说明,在脉冲激光频率较小的焊接工艺参数条件下,在焊斑的中心处横截面没有熔池重叠。随着脉冲激光频率逐渐提高,对应的焊斑重叠率也逐渐增大。图 1(b) 为脉冲激光频率为 20 Hz 条件下,对应的焊斑重叠率为 72.9% 时形成的焊缝表面与

对应白线处的焊缝横截面形貌图,可以看出在焊斑的中心处焊缝具有两层重叠层。而当脉冲激光频率继续增大至32 Hz,对应的焊斑重叠率可达到85.5%时,在焊斑的中心处焊缝出现多个重叠层。图1(c)为在脉冲激光频率为28 Hz条件下焊缝的表面与对应的焊缝横截面形貌图,其焊斑重叠率为81.8%,观察分析其焊斑中心处的焊缝横截面特征,可以明显看出,整个焊缝从内向外共有三个熔池边界。其中,最外层为第一个焊斑在中心处的焊缝横截面形态,次层为第二个焊斑在中心处的焊缝横截面形

态,最内层为第三个焊斑在中心处的焊缝横截面形态。而当脉冲激光频率为32 Hz,其焊斑重叠率为85.5%时,可以看到有更多的焊斑重叠层在焊缝横截面中心处相交。经仔细观察比较发现,由其形成的焊缝正面的每个焊斑形态和对应的焊缝横截面形貌已开始变得不规则,如图1(d)所示。

表3 不同脉冲频率下焊斑重叠率

Table 3 Overlapping ratios for various pulse frequencies

Pulse frequency /Hz	12	20	28	32
Overlapping ratio $O_f$ /%	48.5	72.9	81.8	85.5

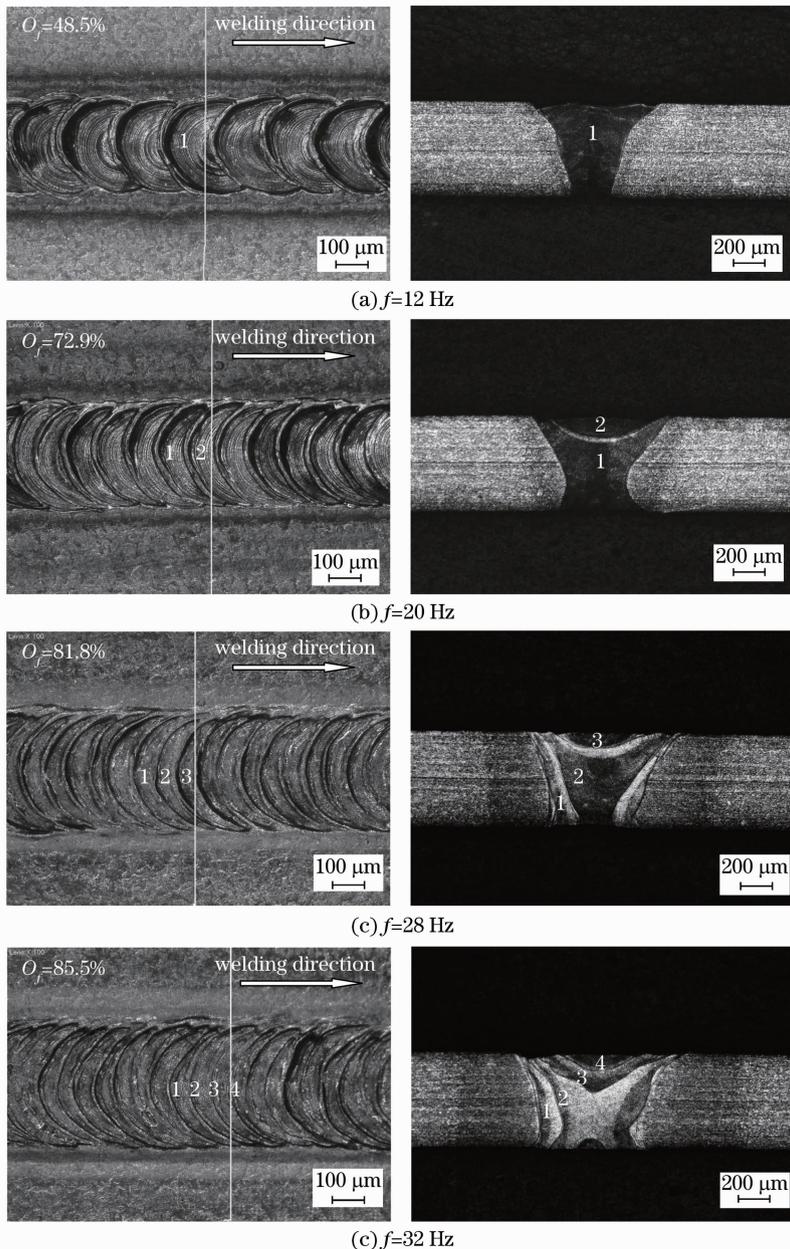


图1 不同脉冲频率下,焊缝表面与对应的焊缝横截面形貌

Fig. 1 Weld surfaces and corresponding cross-sections morphology with various pulse frequencies

分析可知,在焊斑的中心处焊缝横截面出现不同凝固层状形貌主要与脉冲激光能量的间断作用特性有关。在进行脉冲激光焊接时,由于脉冲激光焊是由单个脉冲间歇性地作用于材料,激光与金属间相互作用是一种脉冲式热源的方式,整条焊缝的形成是由各个脉冲先后作用所形成的熔池,在加热、熔化、蒸发、冷却、结晶凝固后相互重叠连接而成,进而形成一条光滑密实的完整焊缝<sup>[8]</sup>。对于这些相互重叠的熔池,由于脉冲式热源关系使得熔池的产生具有先后顺序,尽管相邻脉冲激光的热作用有累积交互影响,但由于激光的快速冷却特点,组成脉冲激光焊缝的熔池仍具有各自的凝固边界<sup>[9]</sup>,并且随着脉冲激光频率的提高,产生的焊斑重叠层的层数增多。当其他工艺参数一定,焊斑中心处形成不同的凝固层数主要受脉冲激光频率的控制。但当脉冲激光频率提高到一定值时,相邻脉冲激光热作用的累积效应产生的交互影响将对焊缝的形态起主要作用,会使得焊斑中心处的焊缝横截面凝固层状形貌受到较大的影响而形成一种不规则的形态。

### 3.2 脉冲激光焊缝晶粒组织

图 2(a)~(c)分别是其他工艺参数一定,在脉冲激光频率分别为 12、20、32 Hz 条件下,焊缝的正剖面金相显微组织图。经观察对比分析可以发现,当脉冲激光频率为 12 Hz 和 20 Hz 时,即焊斑重叠率分别为 48.5%和 72.9%时,每个焊缝中每个焊斑清晰可辨,如图 2(a)和(b)中左图所示;而当脉冲激光频率为 32 Hz,焊斑重叠率增大到 85.5%时,焊缝中各个焊斑已不能清晰分辨,类似形成一条连续激光焊缝。这是因为,在脉冲激光频率较小时,脉冲占空比较小,使得高的冷却速率下形成的焊斑,在下一脉冲作用前已经完全凝固,此时后一脉冲的作用除了使得相交区域重熔之外仍会保留自己的凝固边界,前一熔池形态并不会受后一脉冲的作用而改变。而当脉冲激光频率较大时,由于脉冲占空比的增大,使得后一脉冲作用时前一脉冲形成的焊斑没有足够的时间冷却,仍保留在很高的温度以致此时的焊斑仍处在熔化或半熔化状态,则此时后一脉冲作用后将对熔池的形态产生一定的影响,同时焊缝凝固

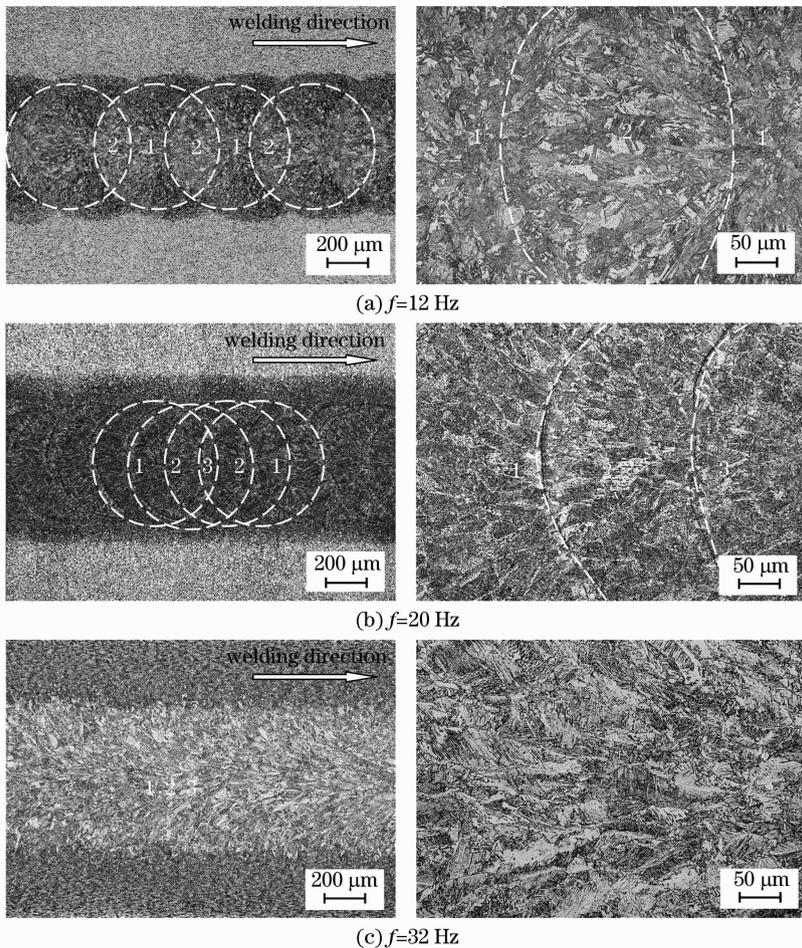


图 2 不同脉冲频率下焊缝正剖面组织比较

Fig. 2 Contrast of microstructures of the welds with various pulse frequencies as viewed from top direction

之后使得每个焊斑的区分不明显<sup>[10]</sup>。对于不同脉冲频率下激光焊接形成的焊缝,根据脉冲激光焊缝形成过程每个焊斑都可分为两部分,如图 2(a)中区域 1 和区域 2。其中区域 1 为相邻焊斑的未重叠区域,区域 2 为相邻焊斑的重叠区域。对于脉冲激光频率为 12 Hz,焊斑重叠率为 48.5% 时区域 1 和区域 2 的晶粒组织,进一步观察比较可以看出,两者存在一定的差别,在区域 1 的焊斑晶粒组织尺寸较区域 2 细小。当脉冲激光频率增大到 20 Hz,相邻焊斑重叠率为 72.9% 时,除了起始焊斑,随后每个焊斑均有三个后续脉冲焊斑与其相重叠,如图 2(b)左图中区域 1、2、3 所示,这是焊斑的重叠区部分经历了二次和三次快速重熔和凝固的结果。尽管此时焊斑内部全都经历了重新熔化过程,但可以发现每个脉冲焊斑的熔合线仍然清晰存在,同时从图 2(b)右图可看出其每个焊斑内焊缝的晶粒组织尺寸已无明显差别。而当脉冲激光频率为 32 Hz,焊斑重叠率为 85.5% 时,焊缝中不但各焊斑熔合线消失,而且每个焊斑之间形成的晶粒组织尺寸有所长大,并由脉冲激光频率为 12 Hz 时晶粒组织明显不均匀而变得较为均匀,同时其生长方式也出现明显一致的择优取向,如图 2(c)所示。

在不同脉冲激光频率下,由于焊斑重叠率不同,使得焊缝内形成的晶粒组织不同。其主要原因为:在脉冲激光焊中,由于是间歇式的激光辐射,使得在热源相交的区域有多次峰值温度,将会使该区域多次重新熔化<sup>[11]</sup>。由于部分区域的重新熔化,改变了先前的温度梯度以及冷却速度,将会在同一焊斑内不同区域具有不同的散热路径。当脉冲激光作用在金属上时,熔融金属由固液边界向焊斑中心凝固,此时凝固过程的散热路径主要是由焊斑中心转向母材处,此为散热路径一。由于近母材处散热快、温度梯度大,按照此种散热路径凝固后得到的晶粒尺寸相对细小。但由于后一激光脉冲的作用使得已按散热路径一凝固的前一激光脉冲形成焊斑发生部分重熔,因此一个焊斑内只有未重熔部分按照散热路径一凝固,即为图 2(a)中区域 1。而对于区域 2,在受到后一脉脉冲的重新熔化后,该区域的峰值温度较与之相邻的前一焊斑未重熔区明显升高,使得该区域的熔融金属以向温度较低的前一焊斑未重熔区散热为主,晶粒将不再朝着当前激光斑点的中心长大而是向前一个激光斑点的中心长大,此为散热路径二<sup>[12]</sup>。由于此时重叠区域具有更高温度,使得以该路径散热为主的区域形成的晶粒尺寸相对较大,如

图 2(a)中区域 2。正是由于上述不同区域散热路径的不同而导致脉冲激光焊中同一个焊斑内晶粒组织的不均匀性。随着脉冲激光频率的提高,焊斑重叠率的增大,同时脉冲激光功率也逐步提高,使得后一脉脉冲的热影响范围扩大,导致区域 1 变得越来越小;当脉冲激光频率继续提高,焊斑重叠率进一步增大时,脉冲激光热源的累积交互作用加强,使得后续脉冲进入时焊斑仍处于熔化或半熔化状态,但焊斑内部的不同区域之间已没有很大的温度梯度,导致重叠区域与未重叠区域在散热路径上趋于一致,因而得到的是一种类似连续激光热源作用的焊缝。此时焊缝的晶粒组织尽管较粗大但变得较均匀,如图 2(c)所示,同时可明显看出晶粒组织的连贯性和一定的方向性。

### 3.3 脉冲激光焊缝硬度分布

图 3 为其他工艺参数一定,三种不同脉冲激光频率下沿焊缝正剖面中心硬度分布的测定结果。从硬度分布比较可以看出,当脉冲激光频率较低时,由于焊斑重叠率较少,硬度分布的波动性表现为起伏较大;当脉冲激光频率较高时,由于焊斑重叠率的增大,硬度分布的波动性表现为较平缓。经分析比较可知,尽管脉冲激光频率不同,但是每条硬度曲线的最高硬度与最低硬度的出现都具有周期性规律。经测定表明,其最低硬度值出现在焊斑重叠区,而最高硬度值出现在焊斑未重叠区。当脉冲激光频率为 12 Hz,焊斑重叠率为 48.5% 时,形成的焊缝其硬度分布的波动性较大,最高硬度值为 335 HV,最低硬度值为 270 HV,其平均硬度值为 290 HV;当脉冲激光频率为 20 Hz 时,焊斑重叠率为 72.9%,其焊缝正剖面最高硬度值为 280 HV,最低硬度值为 250 HV,平均硬度值为 265 HV;而当脉冲激光频

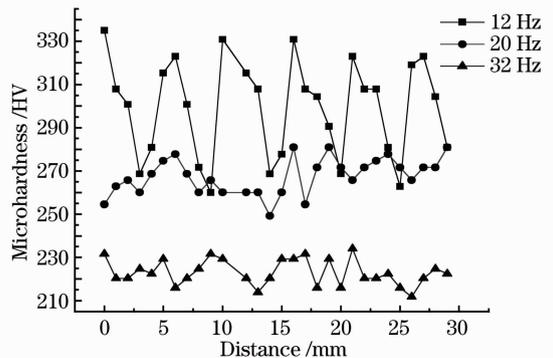


图 3 不同脉冲频率下焊缝正剖面中心硬度分布比较  
Fig. 3 Contrast of microhardness distribution along the weld center as viewed from top direction under various pulse frequencies

率增大至 32 Hz 时,焊斑重叠率为 85.5%,此时形成的焊缝其硬度分布的波动较小,最高硬度值为 230 HV,最低硬度值为 215 HV,平均硬度值为 220 HV。由此可以看出,随着脉冲激光频率的提高,焊缝的平均硬度呈现出逐渐下降的趋势。

造成这种现象的原因主要与不同脉冲激光频率下形成的焊缝晶粒组织不均匀性密切相关。因为在焊斑未重叠区主要是以路径一方式散热冷却,进而导致获得的晶粒组织较细小,因此该区域的硬度较高;而在焊斑重叠区域,由于脉冲激光热源的累积交互作用,使得峰值温度较高,冷却速度较小,导致该区域形成的晶粒组织相对较粗大,因此硬度相对较低。尽管脉冲激光频率不同,但是形成的焊缝其硬度分布都呈现出规律性的起伏特征。另外,随着脉冲激光频率的提高,焊斑重叠率的增加,焊缝平均硬度值呈现出降低的趋势,这是由于焊斑重叠率的增加需要更大的脉冲激光功率,而较大脉冲激光功率将会使得形成的焊缝冷却速度减小,最终导致了脉冲激光焊缝平均硬度值的降低。试验结果表明,提高脉冲激光功率,尽管焊缝的波动性较平缓但使得焊缝成形性变差,显然在其他工艺参数一定时,需要选择合适的脉冲激光频率,才能获得硬度波动性不大但成形性较好的脉冲激光焊缝。

## 4 结 论

1) 不同脉冲激光频率下焊接形成的焊缝,具有不同的焊斑重叠率;焊缝横截面熔合线的不同反映了焊缝熔池的重熔凝固特征。

2) 不同脉冲激光频率下焊接形成的焊缝,其晶粒组织差别主要在每个焊斑的焊斑重叠区与焊斑未重叠区。当脉冲激光频率较低时,焊斑未重叠区晶粒组织较焊斑重叠区细小但不均匀;当脉冲激光频率较大时,其晶粒组织有所长大但趋于均匀,同时生长方式出现一定方向性。

3) 不同脉冲激光频率下焊接形成的焊缝沿焊缝中心硬度分布呈周期性变化,最高硬度出现在焊斑未重叠区,最低硬度出现在焊斑重叠区;随着脉冲激光频率的不断提高,焊斑重叠率的不断增大,焊缝平均硬度呈逐渐下降趋势,同时其波动性也逐渐

减小。

## 参 考 文 献

- Zhang Wenyu. Research situation and application of laser welding technology[J]. *New Technology & New Process*, 2009, (1): 48~50  
张文毓. 激光焊接技术的研究现状与应用[J]. *新技术新工艺*, 2009, (1): 48~50
- Mei Lifang, Chen Genyu, Jin Xiangzhong *et al.*. Study on fiber laser overlap welding of automobile aluminum alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2091~2097  
梅丽芳, 陈根余, 金湘中等. 车用铝合金光纤激光搭接焊的研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2091~2097
- Yu Gang, Zhao Shusen, Zhang Yongjie *et al.*. Research on key issues of laser welding of dissimilar metal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 261~268  
虞 钢, 赵树森, 张永杰等. 异种金属激光焊接关键问题研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 261~268
- Wang Hailin, Huang Weiling, Zhou Zhuoyou *et al.*. Laser welding of 8 mm thick stainless steel plates[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(5): 463~466  
王海林, 黄维玲, 周卓尤等. 8 mm 厚不锈钢板的 Nd:YAG 激光焊接[J]. *中国激光*, 2003, **30**(5): 463~466
- Gao Lanlan. The application of Nd:YAG laser in welding[J]. *OME Information*, 2004, (5): 6~7  
高兰兰. Nd:YAG 激光器在焊接中的应用[J]. *光机电信息*, 2004, (5): 6~7
- Lu Bingbing. Analysis and optimization for auto roof to body-side laser welding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1375~1379  
卢兵兵. 白车车身顶侧围激光焊接工艺参数分析与优化[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1375~1379
- M. J. Torkamany, M. J. Hamedi, F. Malek *et al.*. The effect of process parameters on keyhole welding with a 400 W Nd:YAG pulsed laser[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2006, **39**(21): 4563~4567
- Y. F. Tzeng. Process characterisation of pulsed Nd:YAG laser seam welding[J]. *Advanced Manufacturing Technology*, 2000, **16**(1): 10~18
- F. Malek Ghaini, M. J. Hamedi, M. J. Torkamany *et al.*. Weld metal microstructural characteristics in pulsed Nd:YAG laser welding[J]. *Scripta Materialia*, 2007, **56**(11): 955~958
- M. Y. Krasnoperov, R. R. G. M. Pieters. Solidification features of the thin steel sheets in keyhole welding[C]. 22nd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, 2003. 285~293
- Chen Hao, Gao Chuanyu, Cao Min *et al.*. Simulation research on temperature field of laser welding for magnesium alloy thin sheet[J]. *Hot Working Technology*, 2012, **41**(3): 154~159  
陈 浩, 高传玉, 曹 敏等. 薄板镁合金激光焊接温度场分布的模拟研究[J]. *热加工工艺*, 2012, **41**(3): 154~159
- F. Mirakhorli, F. Malek Ghaini, M. J. Torkamany. Development of weld metal microstructures in pulsed laser welding of duplex stainless steel[J]. *J. Materials Engineering and Performance*, 2012, **21**(10): 2173~2176