

# FeSiB 非晶薄带激光焊焊缝成形及接头力学性能

龚玉兵 王善林 陈玉华 柯黎明

南昌航空大学轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室, 江西 南昌 330063

**摘要** 采用微脉冲激光技术实现了厚度约为 25  $\mu\text{m}$  FeSiB 非晶薄带的搭接,研究了脉冲功率  $P$ 、脉冲宽度  $T$ 、脉冲频率  $F$  等主要工艺参数对焊缝成形的影响,分析了接头力学性能的变化规律。研究表明,当  $P$  与  $T$  搭配恰当时( $P$  为 4.8~7.2 W、 $T$  为 1.5~1.9 ms、对应脉冲能量  $E$  为 0.9~1.2 J)才可以获得焊缝成形良好、力学性能优异的焊接接头。随着  $T$  的增加,热影响区和焊缝区显微硬度逐渐降低,而随着  $P$  的增加,显微硬度先增大后减小;接头抗拉强度随着  $T$  和  $P$  的增大呈先增大后减小的趋势变化。当  $P=7.2$  W、 $T=1.7$  ms、 $F=1.5$  Hz 时,热影响区和焊缝区平均硬度值最高,约为 1300 HV 和 1000 HV,抗拉强度可达 363 MPa。

**关键词** 激光技术; FeSiB 非晶薄带; 焊缝成形; 力学性能

中图分类号 TG174.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0303001

## Forming and Mechanical Properties of FeSiB Amorphous Ribbon Joint by Laser Welding

Gong Yubing Wang Shanlin Chen Yuhua Ke Liming

National Defense Key Disciplines Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology,  
Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China

**Abstract** Overlap joint of the FeSiB amorphous ribbon with thickness about 25  $\mu\text{m}$  is successfully fabricated by micro pulsed laser. Effect of main process parameters including pulse power  $P$ , pulse width  $T$ , pulse frequency  $F$  on the weld forming is studied, and then the variation trend of mechanical properties is analyzed. The results indicate that the perfect weld forming and excellent mechanical properties can be obtained when  $P$  and  $T$  are matched appropriately, *i.e.*  $P$  is 4.8~7.2 W,  $T$  is 1.5~1.9 ms, and corresponding energy  $E$  is 0.9~1.2 J. With the increase of  $T$ , the microhardness of heat affected zone and weld zone decreases gradually. However, with the increase of  $P$ , the microhardness increases first and then decreases. With the increase of  $P$  and  $T$ , tensile strength of joint increases first and then decreases. The highest average microhardness of about 1300 HV and 1000 HV in the heat affected zone and weld zone is obtained, respectively, and the tensile strength exceeds 363 MPa, when  $P$  is 7.2 W,  $T$  is 1.7 ms, and  $F$  is 1.5 Hz.

**Key words** laser technique; FeSiB amorphous ribbon; weld forming; mechanical properties

**OCIS codes** 140.3538; 160.2750; 160.3900

## 1 引言

铁基非晶合金是一种类似玻璃结构的新型材料<sup>[1-2]</sup>,具有高强度、高硬度、优异的软磁性能、低成本等优点<sup>[3-5]</sup>,一直受到研究者的广泛关注。然而,其韧性小、不易加工和切割、可焊性差、制备尺寸有限等问题限制了其作为复杂构件的应用<sup>[6]</sup>。焊接技术可以改变铁基非晶合金材料的尺寸及构件的形状,已成为扩展其应用前景的有效方法。激光焊接是一种能量密度高、焊接速度快的焊接方法,激光束可以会聚在很小的区域

收稿日期: 2015-09-29; 收到修改稿日期: 2015-10-31

基金项目: 国家自然科学基金(51461031)、国家重点实验室开放基金(2013-Z05)、江西省教育厅科技落地计划(KJLD14055)

作者简介: 龚玉兵(1990—),男,硕士研究生,主要从事铁基非晶合金方面的研究。E-mail: 983858346@qq.com

导师简介: 王善林(1977—),男,副教授,硕士生导师,主要从事非晶的制备及应用、特种连接技术等方面的研究。

E-mail: slwang70518@nchu.edu.cn(通信联系人)

内,有利于能量高度集中,使被焊件在极短时间内熔化甚至气化,实现极快的加热和冷却速度,因而特别适合非晶合金的焊接<sup>[7-11]</sup>。王刚等<sup>[12]</sup>通过对Ti<sub>40</sub>Zr<sub>25</sub>Ni<sub>3</sub>Cu<sub>12</sub>Be<sub>20</sub>非晶合金薄板的焊接,获得完全非晶态接头。李波等<sup>[13]</sup>研究了Zr<sub>45</sub>Cu<sub>48</sub>Al<sub>7</sub>非晶合金块体的可焊性,发现热影响区比熔化区更容易晶化。但是对于铁基非晶合金材料,目前主要采用微电阻点焊<sup>[14]</sup>、超声波焊<sup>[15]</sup>、爆炸焊<sup>[16]</sup>等方法进行焊接或制备非晶合金材料,对激光焊接头的力学性能和成形规律并不清楚。因此,本文选用工业化生产的铁基非晶薄带FeSiB作为母材,采用微脉冲激光焊接技术<sup>[17-18]</sup>,通过优化脉冲功率*P*、脉冲宽度*T*、脉冲频率*F*等工艺参数,分析铁基非晶薄带微激光焊缝成形规律及接头力学性能,为铁基非晶合金材料的工程化应用提供试验依据。

## 2 试验材料与方 法

采用材料是商业化的Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub>非晶薄带(牌号:1k101),具有优异的耐磨、热稳定、软磁等性能,已经作为功能材料应用在电子元器件、转换器等行业。焊接试样规格为40 mm×15 mm×25 μm,焊前对试样进行打磨,去除表面氧化层和污渍,然后采用无水乙醇清洗并吹干,使用80 W SL-80型Nd:YAG脉冲激光焊设备(SISMA,意大利)进行搭接试验。由于材料极薄,容易变形,焊接时需要将试样夹持在专用焊接工装上,保证焊接位置与垫板紧密贴合。焊接过程中,采用侧吹氩保护气,气体流量为8 L/min;光斑表面聚焦,直径为0.3 mm;焊速为0.3 mm/s。采用单一变量法改变YAG脉冲激光主要参数*P*、*T*和*F*,其中脉冲能量*E*与*P*、*T*成正比关系,具体工艺参数如表1所示。

采用MR5000倒置显微镜(江南永新光学公司,中国)观察焊缝表面形貌及接头截面形貌,并用显微镜的测量工具测量焊缝尺寸;采用X射线衍射仪(XRD,Empyrean, Panalytical公司,荷兰)对接头进行微区X射线衍射分析(Cu靶,加速电压40 kV,电流40 mA,衍射范围20°~90°,衍射速度4°/min,步长0.02°);采用401MVD数显显微维氏硬度计(沃伯特测量仪器公司,中国)对铁基非晶薄带接头显微硬度进行测试,点距为0.05 mm,加载载荷为100 gf,加载时间为10 s;在INSTRON5540型电子精密拉伸试验机(NUMBER公司,美国)上进行拉伸试验,试验温度为常温,拉伸速率为0.4 mm/min。试验共测三组试样,取平均值。

表1 激光焊接工艺参数

Table 1 Processing parameters of laser welding

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
<i>P</i> /W	12.8	9.6	9.6	9.6	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	6.4	4.8	4.8
<i>T</i> /ms	0.9	1.7	1.5	1.1	2.1	1.9	1.7	1.5	1.5	1.5	1.3	1.7	2.1	1.7
<i>F</i> /Hz	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.0	0.5	1.5	1.5	1.5	1.5
<i>E</i> /J	0.9	1.3	1.2	0.9	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.3	0.9

## 3 试验结果与分析

### 3.1 工艺参数对焊缝宏观成形的影响

图1为*P*=7.2 W、*T*=1.5 ms时不同频率下的焊缝宏观形貌(表1中第8、9、10组参数)。由图1可以看出,随着*F*从0.5 Hz增加到1.5 Hz,焊点叠加率越来越高,焊缝成形越来越好。当*F*=0.5 Hz时,熔化斑点不能相互

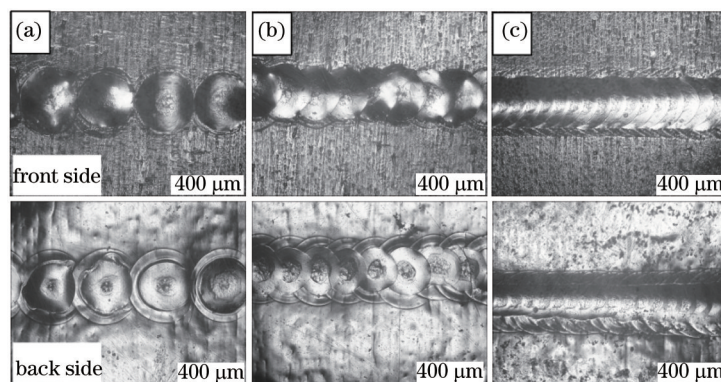


图1 不同频率下的焊缝表面和背面形貌。(a) *F*=0.5 Hz; (b) *F*=1.0 Hz; (c) *F*=1.5 Hz

Fig.1 Weld appearance under different frequencies. (a) *F*=0.5 Hz; (b) *F*=1.0 Hz; (c) *F*=1.5 Hz

贴合,未形成连续焊缝;当 $F$ 增加到1.0 Hz时,焊缝表面成形有所改善,但因热量不够,导致焊缝背面焊点之间不能形成良好结合;当 $F$ 增加到1.5 Hz时,双面焊点叠加十分均匀平整,焊缝双面成形良好。增加 $F$ ,即增加单位时间脉冲激光束,在焊接速度一定时,即增加单位长度焊缝的焊点数,导致单位长度焊缝的热输入量增加,因此焊缝双面成形良好。如果 $F$ 过高,使得焊点之间的时间间隔减少,即前一个焊点还没来得及冷却,又会因后一焊点的形成而引起其温度升高,导致其冷却速率下降,则接头晶化的几率随之增大。为保证焊缝成形良好且避免晶化, $F=1.5$  Hz最佳。

图2为不同脉冲宽度下的焊缝表面形貌(表1中第5、6、7、11组参数),图3为图2中典型焊缝的宏观表面形貌。从图2可以看出,当 $T$ 从2.1 ms依次减小到1.9、1.7、1.3 ms时,焊缝表面宽度变化不明显,分别为567、556、514、506  $\mu\text{m}$ 。然而,焊缝背面的宽度明显变窄,即从 $T=2.1$  ms时的516  $\mu\text{m}$ 降低到413、338、110  $\mu\text{m}$ 。当 $T=2.1$  ms时,焊缝成形较好[图2(a)],但焊接过程不稳定,易出现异常现象,如烧穿[图3(a)];当 $T$ 降到1.3 ms时,焊缝出现部分未熔透现象[图2(d)];而当 $T$ 适中时,焊缝表面成形良好,焊接过程稳定,未见烧穿及未熔透缺陷[图2(b)、2(c)及图3(b)]。在 $P$ 一定的条件下, $T$ 降低,单个脉冲作用在焊缝上的时间减少,即单位焊缝吸收的能量降低<sup>[7]</sup>,因此,焊缝宽度越来越窄,熔深越来越浅,甚至出现未熔透,如图2(d)所示。

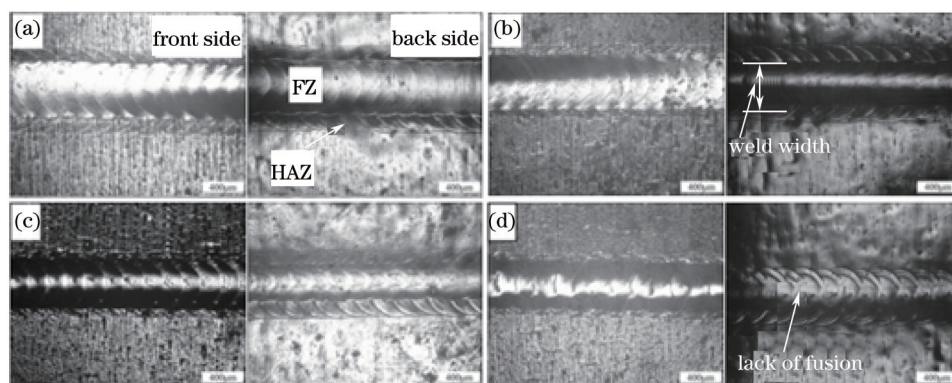


图2 不同脉宽下的焊缝形貌。(a)  $T=2.1$  ms; (b)  $T=1.9$  ms; (c)  $T=1.7$  ms; (d)  $T=1.3$  ms

Fig.2 Weld appearance under different pulse widths. (a)  $T=2.1$  ms; (b)  $T=1.9$  ms; (c)  $T=1.7$  ms; (d)  $T=1.3$  ms

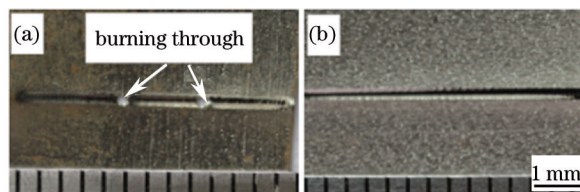


图3 典型焊缝表面形貌。(a) 图2(a)焊缝; (b) 图2(b)焊缝

Fig.3 Surface appearance of the typical weld seam. (a) Weld seam in Fig. 2(a); (b) weld seam in Fig. 2(b)

图4为不同参数下的焊缝背面形貌(表1中的1、2、4、7、11、14组参数)。当 $P=12.8$  W时,焊缝出现横、纵向裂纹;当 $P=9.6$  W时,不管脉冲宽度长短( $T=1.1\sim 1.7$  ms),焊缝均会出现横向裂纹;当 $P$ 降低到7.2 W时,焊缝表面裂纹消失[图4(d)],但如果此时 $T$ 过小,焊缝容易出现未熔透,如图4(e)所示。当 $P$ 降低到4.8 W, $T=1.7$  ms时,焊缝成形良好,未出现裂纹、未熔透等缺陷,如图4(f)所示。

当 $E$ 一定时[图4(a)、(c)、(e)、(f)], $P$ 降低,则 $T$ 相应增加,即热源作用焊缝时间增加,减小焊缝冷却速度,熔化金属冷却过程产生的内应力降低,故焊缝裂纹倾向减小。但当 $P$ 降低到一定程度后,如果 $T$ 过小,导致 $E$ 过低,焊缝热输入量太小,无法实现焊缝整体熔透,如图4(e)所示。适当增大 $T$ ,可以提高 $E$ ,从而提高焊缝热输入,实现焊缝良好成形,如图4(d)所示。当 $E$ 一定[图4(e)、(f)中 $E=0.9$  J], $P$ 高而 $T$ 小时,能量密度大,导致焊缝熔深大,但作用时间短,焊缝熔宽窄,焊缝背面焊点与焊点之间未完全熔合[图4(e)]; $P$ 低而 $T$ 大时,虽能量密度有所下降,但还足以熔透薄带,且热源作用时间长,熔池尺寸增大,焊缝宽度也随之增大,因此,焊缝背面焊点与焊点之间能完成熔合,形成外观良好的焊缝[图4(f)]。因此,在 $E$ 相同的情况下,采用 $P$ 高而 $T$ 小的方式焊接,单位焊缝热输入增加,导致焊缝表面成形较差,且焊缝较窄;采用 $P$ 低而 $T$ 大的方式焊接时,单位时间焊缝热输入减小,焊缝成形更容易控制,焊接效果较好。

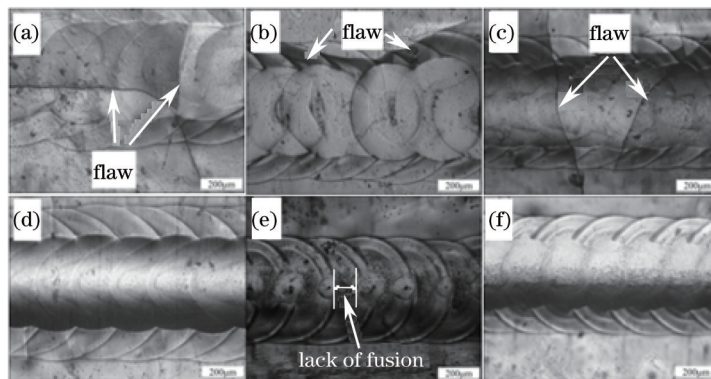


图4 不同参数下的焊缝背面形貌。(a)  $P=12.8\text{ W}$ ,  $T=0.9\text{ ms}$ ; (b)  $P=9.6\text{ W}$ ,  $T=1.7\text{ ms}$ ; (c)  $P=9.6\text{ W}$ ,  $T=1.1\text{ ms}$ ;  
(d)  $P=7.2\text{ W}$ ,  $T=1.7\text{ ms}$ ; (e)  $P=7.2\text{ W}$ ,  $T=1.3\text{ ms}$ ; (f)  $P=4.8\text{ W}$ ,  $T=1.7\text{ ms}$

Fig.4 Weld back appearance under different parameters. (a)  $P=12.8\text{ W}$ ,  $T=0.9\text{ ms}$ ; (b)  $P=9.6\text{ W}$ ,  $T=1.7\text{ ms}$ ;  
(c)  $P=9.6\text{ W}$ ,  $T=1.1\text{ ms}$ ; (d)  $P=7.2\text{ W}$ ,  $T=1.7\text{ ms}$ ; (e)  $P=7.2\text{ W}$ ,  $T=1.3\text{ ms}$ ; (f)  $P=4.8\text{ W}$ ,  $T=1.7\text{ ms}$

图5是焊缝表面成形良好的接头横截面形貌(表1中的第7、8、14组参数)。从图5可以发现,焊缝横截面中未形成气孔、裂纹、未熔合等缺陷;熔宽 $W_1$ 、 $W_2$ 和 $W_3$ 随着 $E$ 的降低逐渐变窄,分别为 $517$ 、 $460$ 、 $277\text{ }\mu\text{m}$ ,其变化规律与图2、图4一致。焊缝中心厚度明显比焊缝周围薄。激光能量密度集中,在焊接过程中,因中心温度过高,导致金属气化,形成小孔效应。当光束向前移动,小孔也随之向前移动,其四周液态金属向中心流动;因冷却速度快,焊缝金属未达到平衡就已凝固,导致中心厚度较小。

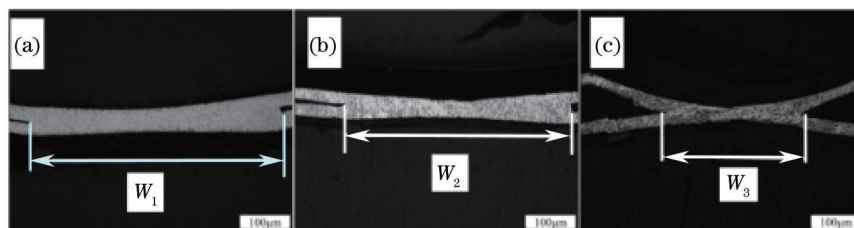


图5 焊接接头横截面形貌。(a)  $P=7.2\text{ W}$ ,  $T=1.7\text{ ms}$ ; (b)  $P=7.2\text{ W}$ ,  $T=1.5\text{ ms}$ ; (c)  $P=4.8\text{ W}$ ,  $T=1.7\text{ ms}$

Fig.5 Cross-section appearance of the welded joint. (a)  $P=7.2\text{ W}$ ,  $T=1.7\text{ ms}$ ; (b)  $P=7.2\text{ W}$ ,  $T=1.5\text{ ms}$ ; (c)  $P=4.8\text{ W}$ ,  $T=1.7\text{ ms}$

### 3.2 接头相结构及力学性能分析

图6为母材(BM)与不同参数下接头的X射线衍射图,其中图6(a)为不同功率下接头的XRD图谱(表1中的第2、7、14组参数),图6(b)为不同脉冲宽度下接头的XRD图谱(表1中的第5、7、11组参数)。显然,母材和各参数下接头的XRD曲线均呈“馒头状”漫散射峰,未见尖利的结晶峰出现。叶斌等<sup>[9]</sup>利用激光焊接Zr基非晶合金时,XRD图谱呈“馒头状”漫散射峰,认为接头依然是非晶结构。然而,Zhou等<sup>[19]</sup>制备铁基非晶涂层时,XRD图谱呈“馒头状”漫散射峰,但从透射电子显微镜图中发现有纳米相析出。

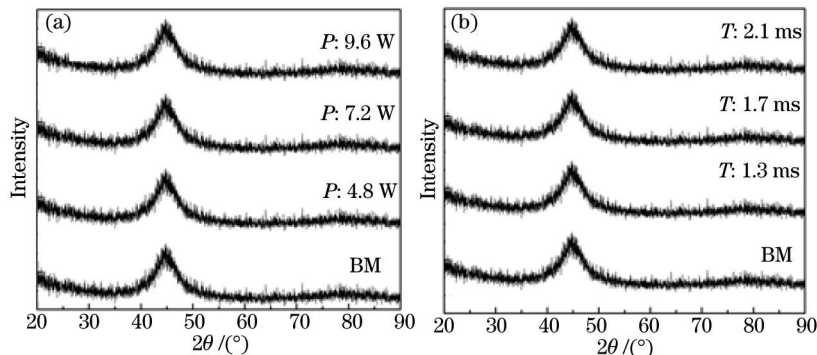


图6 母材与不同参数下微激光焊接接头的微区X射线衍射图。(a) 不同功率;(b) 不同脉冲宽度

Fig.6 Micro-X ray diffraction patterns of BM and welded joint by micro laser welding under different parameters.

(a) Different powers; (b) different pulse widths

图7为沿焊缝横截面中心水平线的平均硬度分布曲线,其中图7(a)为不同脉冲宽度下的平均硬度分布曲线(表1中第5、6、7、11组参数),图7(b)为不同功率下的平均硬度分布曲线(表1中第1、2、7、14组参数)。从图7可以看出,所有焊接参数下,接头的硬度均呈典型的M状分布。焊缝热影响区显微硬度最高,焊缝区次之,母材最低,约为800 HV。随着 $T$ 的增加,热影响区和焊缝区显微硬度逐渐降低。热影响区最高硬度超过1300 HV,最低为1120 HV;焊缝区最高硬度为1030 HV,最低仅950 HV。随着 $P$ 的增加,显微硬度先增大后减小。当 $P=4.8$  W时,热影响区最高硬度约为1130 HV,焊缝中心最高硬度为1000 HV;当 $P$ 增大到7.2 W时,热影响区最高硬度高达1300 HV,焊缝中心最高硬度为1050 HV;当 $P$ 增大到12.8 W时,热影响区最高硬度降低到1000 HV,焊缝中心最高硬度也降低到不足900 HV,但还是比母材硬度高约100 HV。

激光束中心温度远高于其他区域温度,因此在激光焊接非晶合金过程中,焊缝区的温度比热影响区的温度高得多,温度的不均匀加大了热影响区残余应力。另一方面,热影响区的散热速度较慢,因而冷却速度也较慢,可能导致淬态纳米相的析出,纳米相的析出对焊缝力学性能起强化作用<sup>[1]</sup>。随着 $T$ 的增加,单个脉冲作用时间变长,焊缝区与热影响区温差变小,从而使残余应力减弱;另外,焊缝宽度变宽,冷却速度降低,可能会导致该区域内析出纳米相含量过多,降低非晶合金的力学性能<sup>[14]</sup>,使硬度值下降。当 $P$ 在低于7.2 W的范围内增加时,该区域内开始析出纳米相,显微硬度提高;但当 $P$ 超过9.6 W时,焊接热输入量很大,可能使冷却速度小于晶化临界冷却速度,使得此区域内纳米相过多,显微硬度值下降。

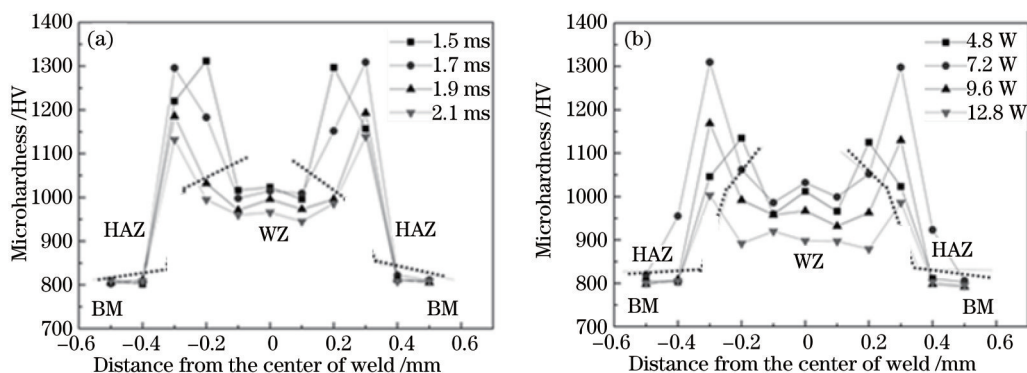


图7 不同工艺参数下焊接接头截面的显微硬度分布(HAZ:热影响区;WZ:焊缝区)。(a)不同脉冲宽度;(b)不同功率

Fig.7 Microhardness distribution of the interface of welding joint under different parameters (HAZ: heat affected zone; WZ: weld zone). (a) Different pulse widths; (b) different powers

图8为不同工艺参数下接头的抗拉强度,其中图8(a)为不同脉冲宽度下接头的抗拉强度曲线(表1中第5、6、7、8、11组参数),图8(b)为不同功率下接头的抗拉强度曲线(表1中第2、7、12、14组参数)。从图8(a)可以看出,随着 $T$ 的增大,接头的抗拉强度先增大后减小; $T=1.3$  ms时,接头抗拉强度最低,仅为132 MPa;当 $T$ 增加到1.7 ms时,抗拉强度达到最高,为363 MPa;当 $T$ 增加到2.1 ms时,拉伸强度降低到210 MPa。随着 $P$ 的增大,接头的抗拉强度先增大后减小, $P$ 在4.8~7.2 W范围内时,接头抗拉强度逐渐增大,最高为410 MPa; $P$ 超过7.2 W时,强度显著下降; $P=12.8$  W时强度仅为210 MPa,如图8(b)所示。

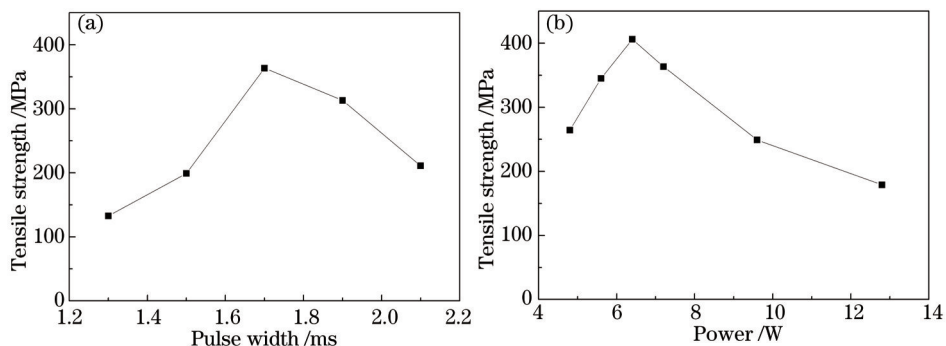


图8 不同工艺参数下焊接接头的抗拉强度。(a)不同脉冲宽度;(b)不同功率

Fig.8 Tensile strength of welding joint under different parameters. (a) Different pulse widths; (b) different powers

当 $T=1.3$  ms时,能量过小,焊缝反面熔透很少,焊接接头强度不高;随着 $T$ 的增大,焊缝反面熔透量增多,接头强度提高;当 $T$ 增大到 $1.7$  ms时,焊缝双面成形最佳,无烧穿等缺陷,接头强度为 $363$  MPa。然而,当 $T=1.9$  ms时,焊缝宽度明显变宽,单位焊缝吸收的能量增大明显;当 $T=2.1$  ms时,能量过高,易出现烧穿缺陷[图3(a)]; $T$ 过高时冷却速率会下降,析出纳米相过多,接头拉伸性能下降。随着 $P$ 的增大,纳米相逐渐析出,接头的抗拉强度相应增大; $P$ 过大时纳米相析出过多,另外,热输入量过高,存在裂纹也越多,强度下降明显。

## 4 结 论

采用微脉冲激光技术实现FeSiB非晶薄带的焊接,研究了脉冲功率、脉冲宽度及频率对焊缝成形及接头力学性能的影响,结论如下:

1)  $T$ 越低,焊缝熔透量越少; $P$ 越低,熔宽越窄;随着 $T$ 的增大,焊缝背面明显变宽,随着 $P$ 的升高,焊缝裂纹增多; $T$ 过高时焊接过程不稳定,焊缝表面易出现烧穿缺陷; $P$ 过高时焊缝表面成形差,易出现裂纹缺陷;

2) 当 $E$ 一定时,采用低 $P$ 高 $T$ 时焊接过程较为稳定,焊缝成形更容易控制,焊接效果较好。当 $P$ 为 $4.8\sim 7.2$  W, $T$ 为 $1.5\sim 1.9$  ms时,对应的 $E$ 为 $0.9\sim 1.2$  J的范围内都可以获得良好的焊缝表面形貌;

3) 随着 $T$ 的增加,热影响区和焊缝区显微硬度逐渐降低;随着 $P$ 的增加,显微硬度先增大后减小;接头抗拉强度随着 $T$ 和 $P$ 的增大呈先增大后减小的趋势变化。当 $P=7.2$  W、 $T=1.7$  ms、 $F=1.5$  Hz时,接头焊缝区平均显微硬度值最高,约为 $1000$  Hv,热影响区硬度最高可达 $1300$  Hv,此时接头抗拉强度为 $363$  MPa。

## 参 考 文 献

- 1 Wei Dandan, Chen Qingjun, Gao Jiwen, *et al.*. Current status of Fe-based bulk amorphous alloy research[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(s1): 80-85.  
魏丹丹, 陈庆军, 高吉文, 等. 铁基大块非晶合金的发展现状[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(s1): 80-85.
- 2 Pilarczyk W. The study of glass forming ability of Fe-based alloy for welding processes[J]. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2012, 52(2): 83-91.
- 3 Jo H I, Choi-Yim H. Glass formation and magnetic properties in the Co and Fe-based amorphous alloy with small Mo or Nb additions[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2012, 60(3): 477-480.
- 4 Han B K, Choi-Yim H. Soft magnetic properties of  $\text{Fe}_{(87-x)}\text{Ti}_7\text{Zr}_6[\text{B}_x\text{Si}_x]_{0.5}$  amorphous metallic ribbons prepared by melt-spinning [J]. Journal of the Korean Physical Society, 2014, 64(2): 301-304.
- 5 Li Hong, Sun Ke, Li Yanping, *et al.*. Thermal expansion properties and relaxation of  $\text{Fe}_{80}\text{Si}_8\text{B}_{11}$  amorphous alloy ribbon[J]. Metallic Functional Materials, 2010, 17(1): 4-9.  
李 红, 孙 克, 李艳萍, 等.  $\text{Fe}_{80}\text{Si}_8\text{B}_{11}$ 非晶合金薄带热膨胀特性和结构弛豫分析[J]. 金属功能材料, 2010, 17(1): 4-9.
- 6 Song Hui, Zhu Zhenghou. Preparation and mechanics properties of FeSiB amorphous alloy's strip[J]. New Technology and New Process, 2005, (2): 47-48.  
宋 晖, 朱正吼. FeSiB非晶带材的制备及其力学性能[J]. 新技术新工艺, 2005, (2): 47-48.
- 7 Gong Weihuai, Chen Yuhua, Ke Liming, *et al.*. Microstructure and properties of 0.2 mm thick sheet GH4169 by laser microwelding[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0603008.  
龚伟怀, 陈玉华, 柯黎明, 等. 0.2 mm厚GH4169薄片激光微焊接接头的组织性能[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603008.
- 8 Ding Wenbing, Tong Yangang, Deng Dean, *et al.*. Microstructural and mechanical properties of laser welded AZ91D wrought magnesium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0203003.  
丁文兵, 童彦刚, 邓德安, 等. AZ91D变形镁合金激光焊接头的微观组织与机械性能[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0203003.
- 9 Ye Bin, Xiong Jiangang, Li Bo, *et al.*. Laser welding of Zr-base bulk amorphous alloy[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(3): 423-428.  
叶 斌, 熊建钢, 李 波, 等. Zr基大块非晶合金的激光焊接[J]. 中国激光, 2006, 33(3): 423-428.
- 10 Lu Weiwei, Chen Yuhua, Huang Yongde, *et al.*. Microstructural and mechanical property analysis about laser welding joint around heat treatment[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1003001.  
陆巍巍, 陈玉华, 黄永德, 等. NiTiNb激光焊接接头退火前后的显微组织和力学性能分析[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1003001.
- 11 Liu Lala, Hu Shengsun, Shen Junqi, *et al.*. Effect of laser weld heat input on microstructural and properties of 26Cr-3.5Mo

- ferritic stainless steel[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0203005.
- 刘腊腊, 胡绳荪, 申俊琦, 等. 激光焊接热输入对26Cr-3.5Mo铁素体不锈钢组织性能的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0203005.
- 12 Wang Gang, Huang Yongjiang, Shen Jun, *et al.*. Laser welding behavior of TiZrNiCuBe bulk metallic glass and numerical simulation of temperature fields[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(11): 2713-2719.
- 王 刚, 黄永江, 沈 军, 等. TiZrNiCuBe 块体非晶合金激光焊接行为及温度场数值模拟研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(11): 2713-2719.
- 13 Li Bo, Li Zhiyuan, Xiong Jiangang, *et al.*. Influence of laser welding on crystallization behaviour of  $Zr_{45}Cu_{48}Al_7$  bulk metallic glass[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(9): 1338-1342.
- 李 波, 李志远, 熊建钢, 等. 激光焊接对块体非晶合金  $Zr_{45}Cu_{48}Al_7$  晶化行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(9): 1338-1342.
- 14 Ling Shiquan, Wu Xiaoyu, Xu Bin, *et al.*. Rapidly tiny resistance welding of  $Fe_{78}Si_6B_{13}$  amorphous foils[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(2): 45-50.
- 凌世全, 伍晓宇, 徐 斌, 等.  $Fe_{78}Si_6B_{13}$  非晶箔快速微细电阻焊接[J]. 焊接学报, 2013, 34(2): 45-50.
- 15 Wang Xiaolong. Study on Ultrasonic Welding Preparation of Bulk Metallic Glass  $Fe_{78}Si_6B_{13}$ [D]. Nanchang: Nanchang University, 2014: 23-40.
- 王小龙. 块体非晶合金  $Fe_{78}Si_6B_{13}$  超声波焊接制备研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2014: 23-40.
- 16 Yan Honghao. Research of Explosive Welding for Amorphous Alloys Ribbons[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003: 20-40.
- 闫鸿浩. 非晶态合金薄带的爆炸焊接研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2003: 20-40.
- 17 Fan Wenzhong, Zhao Quanzhong. Recent progress in ultrashort pulsed laser microwelding of glasses[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 080001.
- 范文中, 赵全忠. 超短脉冲激光微焊接玻璃进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 080001.
- 18 Li Yang, Hu Shengsun, Shen Junqi. Microstructural characteristics and mechanical properties of pulsed Nd:YAG laser welded copper and 316L stainless steel[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(7): 0703008.
- 李 扬, 胡绳荪, 申俊琦. 紫铜与不锈钢脉冲激光焊微观组织及力学性能[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 0703008.
- 19 Zhou Z, Wang L, He D, *et al.*. Microstructure and electrochemical behavior of Fe-based amorphous metallic coatings fabricated by atmospheric plasma spraying[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2011, 20(1-2): 344-350.

栏目编辑: 吴秀娟