

超薄不锈钢片的微激光焊接工艺研究

Study on the Micro Laser Welding Parameter of Ultrathin
Stainless Steel Sheet

陈玉华^{1,2}, 柯黎明¹, 徐世龙², 邢 丽²

(1 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,
南昌 330063; 2 南昌航空大学 材料科学与工程学院, 南昌 330063)

CHEN Yu-hua^{1,2}, KE Li-ming¹, XU Shi-long², XING Li²

(1 National Defense Key Disciplines Laboratory of Light Alloy Processing Science
and Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2 School
of Materials Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

摘要: 采用微型脉冲激光实现了 0.2mm 厚 321 不锈钢片的对接焊, 并通过正交优化设计对工艺参数进行了优化, 研究了工艺参数对焊接接头微观形貌及组织的影响。结果表明, 焊接接头获得最大抗拉力的最优工艺参数是脉冲功率百分比为 15、脉冲频率为 5 Hz、脉冲宽度为 2.1 ms, 此时焊接接头的承载能力达到母材的 95%。当微激光焊的脉冲能量过大时会产生热量的积累、导致焊缝发生烧穿, 当脉冲宽度较小时激光脉冲的熔透能力较弱、导致焊缝未焊透, 这两者都会导致焊接接头的承载能力较差。承载能力较高的焊接接头其显微组织由焊缝中心区的等轴晶和焊缝边缘细小的柱状晶组成。

关键词: 超薄不锈钢片; 微激光焊接; 工艺参数

中图分类号: TG456.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2008)11-0028-04

Abstract: Butt welding of 0.2mm thick 321 stainless steel sheet was realized using micro impulse laser. The processing parameters were optimized by orthogonal experimental and influence of processing parameter on the morphology and microstructure of welded joint was studied. The results show that the optimized processing parameters that can get the maximum stretching resistance are: pulse power percentage is 15, pulse frequency is 5 Hz and pulse width is 2.1ms. With the optimized processing parameters, the stretching resistance of the welded joint can achieve 95% of base metal. Burn through in welded seam is easy to occur when laser pulse energy is too big and nonpenetration occurs when pulse width is too small. Both burn through and nonpenetration can lead to the decrease of stretching resistance. The microstructures of welded joint that has best stretching resistance are composed of equiax crystals in weld center and fine columnar crystals in weld edge.

Key words: ultrathin stainless steel sheet; micro laser welding; technology parameter

超薄(厚度为 0.2mm 左右)不锈钢片、带等材料在医疗器械、工业品及日用器皿中有着越来越广泛的应用。由于材料厚度太薄, 焊接难度显著增大, 因而常常会遇到超薄不锈钢材料的焊接问题。YAG 脉冲激光焊作为一种精密的连接方法, 具有功率密度高、速度快、焊缝窄和变形小等优点^[1-4], 因而较为适合超薄工件的焊接。但 YAG 脉冲激光在焊接过程中由于焊接工艺控制因素较多, 稳定的焊接质量对工艺规范要求极为严格^[5], 特别是对于超薄片状材料的对接焊, 由于材料本身很薄, 表面少量汽化都会使焊点成孔, 甚至形成烧穿。因此, 选择合适的工艺参数便成为超薄片状

材料激光焊接的关键之所在。本工作采用平均功率为 80W 的脉冲激光对厚度为 0.2mm 的 321 不锈钢片的对接焊工艺进行了研究, 采用正交优化方法对工艺参数进行了优化, 获得了最佳工艺参数, 并探讨了工艺参数对焊接接头微观形貌及显微组织的影响。

1 实验条件及方法

1.1 实验条件

实验用 321 不锈钢片的规格为 40mm × 25mm × 0.2mm。将焊接试样的表面和对接端面用 600 目砂

纸打磨,去除表面氧化层和油污,然后采用丙酮清洗干净并吹干。

激光焊设备为意大利 SYSMA 公司的 SL-80 型 Nd:YAG 脉冲激光焊机,平均功率为 80W,可控制的参数有光斑直径、脉冲功率百分比、脉冲频率、脉冲宽度和脉冲能量,脉冲能量随脉冲功率百分比和脉冲宽度的变化而变化。采用自制的专用夹具将两片焊接试样对接固定在激光焊接工作台上进行焊接。焊接时采用氩气进行保护,焊接速度固定为 0.3mm/s,光斑直径为 0.3mm。

对于超薄不锈钢片的脉冲激光焊接,由于不填充焊接材料,焊后焊缝区的厚度相对母材可能会发生减薄,而焊接接头在使用时也主要考虑其承受载荷的能力,因此采用焊接接头能承受的最大拉力而非抗拉强度作为工艺参数优化的目标。按照正交实验设计方案进行焊接实验,焊后采用线切割将每一种规范下的焊接试板加工成三组长 80mm、宽 3mm 的拉伸试样,在 INSTRON 5540 型电子精密拉伸实验机上测试其拉断时的最大拉力,取三个拉伸试样最大拉力的平均值作为该焊接规范焊接接头的抗拉力。

1.2 正交实验设计

根据前期预实验结果,在光斑直径、焊接速度一定

的情况下,影响微激光焊接头抗拉力的主要因素有脉冲功率百分比(P)、脉冲频率(f)、脉冲宽度(T)和脉冲能量(E),其中脉冲能量由脉冲功率百分比和脉冲宽度决定,因此正交实验主要考察脉冲功率百分比、脉冲频率、脉冲宽度 3 个因素。预实验结果表明,脉冲功率百分比小于 8 时产生焊缝未焊合的现象,大于 23 时焊缝金属汽化严重、发生烧穿;减小脉冲频率可减少焊缝单位长度的热量、有助于改善焊缝烧穿,但频率的减少同时降低了焊点之间的搭接量;脉冲宽度减小,单个脉冲传输给焊缝的热量也减少了、避免的烧穿的发生,但脉冲宽度过小,脉冲能量也很小,容易导致未焊透。因此每个因素确定 3 个水平,取值如表 1 所示。采用 $L_9(3^3)$ 三水平正交表安排实验,正交实验设计方案如表 2 所示。

表 1 正交实验因素水平表
Table 1 Factor level of orthogonal experiment

Level No	Factor		
	A Power percentage / %	B Frequency / Hz	C Pulse width / ms
1	23	9.0	2.8
2	15	7.0	2.1
3	12	5.0	1.5

表 2 正交实验设计方案
Table 2 Orthogonal experiment scheme

Serial No	Experiment scheme	A Power percentage/ %	B Frequency/ Hz	C Pulse width/ ms
1	$A_1B_1C_2$	1(23)	1(9.0)	2
2	$A_1B_2C_1$	1	2(7.0)	1(2.8)
3	$A_1B_3C_3$	1	3(5.0)	3
4	$A_2B_1C_3$	2(15)	1	1
5	$A_2B_2C_3$	2	2	3
6	$A_2B_3C_2$	2	3	2(2.1)
7	$A_3B_1C_3$	3(12)	1	3(1.5)
8	$A_3B_2C_2$	3	2	2
9	$A_3B_3C_1$	3	3	1

2 实验结果及分析

2.1 正交实验结果

各实验号对应的焊接接头的抗拉力及其极差分析如表 3 所示,表中 T_1, T_2, T_3 分别表示因素 A, B, C 的第 1, 2, 3 水平的抗拉力之和, $\overline{T_1}, \overline{T_2}, \overline{T_3}$ 分别表示因素 A, B, C 的第 1, 2, 3 水平的抗拉力平均值, R 为极差。

从表 3 的分析结果可知,因素 A, B, C 对应的水平

分别为 2, 3, 2 时抗拉力平均值最大,也即工艺参数为 $A_2B_3C_2$ (脉冲功率百分比为 15、脉冲频率为 5 Hz、脉冲宽度为 2.1 ms)能获得最大抗拉力,该组工艺参数为最佳工艺参数。该组工艺参数正好对应表 3 中实验号为 6 的参数,抗拉力是 9 组实验号中最大的,验证了优化结果的准确性。

测试同样尺寸母材的抗拉力为 372N,也即最佳工艺参数时焊接接头的承载能力达到母材的 95%,焊接接头的承载能力和母材基本匹配。

表 3 实验结果及其极差分析

Table 3 The range analysis of orthogonal experiment

Serial No	<i>P</i>	<i>f</i>	<i>T</i>	Stretching resistance/ N
1	23	9	2. 1	—
2	23	7	2. 8	—
3	23	5	1. 5	286
4	15	9	2. 8	309
5	15	7	1. 5	296
6	15	5	2. 1	352
7	12	9	1. 5	228
8	12	7	2. 1	346
9	12	5	2. 8	350
<i>T</i> ₁	286	537	659	<i>Y</i> = 309. 6
<i>T</i> ₂	957	642	698	
<i>T</i> ₃	924	988	810	
$\overline{T_1}$	286	268. 5	329. 5	
$\overline{T_2}$	319	321	349	
$\overline{T_3}$	308	329. 3	270	
<i>R</i>	33	60. 8	79	

2 2 各因素对焊接接头抗拉力的影响

为了直观分析, 以因素的水平数为横坐标, 各水平焊接接头的平均抗拉力为纵坐标, 绘出因素与抗拉力的关系图, 如图 1 所示。由图 1 可见, 各个因素水平的改变对实验指标的影响是不同的, 对于脉冲频率, 焊接接头的抗拉力随着三个水平的改变而不断增加; 对于脉冲宽度和功率百分比, 焊接接头的抗拉力随着三个水平的改变先增大后减小。脉冲宽度水平的改变对接头抗拉力的影响最大, 脉冲频率次之, 脉冲功率百分比水平的改变对接头抗拉力的影响最小。这说明对于 0. 2 mm 厚不锈钢薄片的微激光对接焊, 脉冲宽度对接头的抗拉力的影响最大。

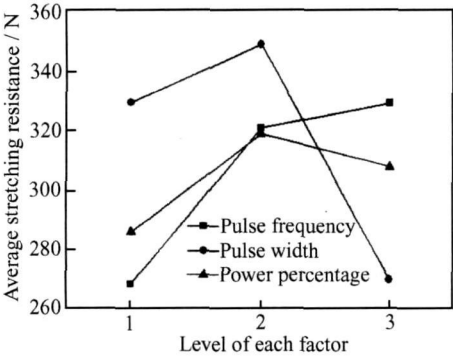


图 1 焊接接头的平均抗拉力与因素水平的关系
Fig. 1 Relationship between average stretching resistance of welded joint and factor level

2 3 接头微观形貌及组织和工艺参数的关系

对于薄片状材料的微激光对接焊, 工艺参数是通过对接焊缝成型和微观组织结构的变化而对焊接接头的承载能力产生影响。为揭示正交实验中表 3 所列 9 组参数所对应接头的抗拉力不同的产生原因, 对 9 组参数接头的焊缝成形和金相组织进行了观察。

对接焊缝表面成形进行观察, 发现 1, 2 号试样均发生了烧穿, 而其它试样焊缝表面成形良好, 如图 2 所示。微小尺寸工件的焊接和常规焊接有很大不同, 由于工件本身尺寸小, 其热容量很小, 导热能力差, 在焊接热源作用下就会出现热量积累, 有可能产生烧穿、孔洞等缺陷^[6]。从表 4 中各试样号参数对应的激光脉冲能量可以得出结论, 导致 1, 2 号试样烧穿的主要原因是该两组参数对应的脉冲能量过大、产生了热量的积累。

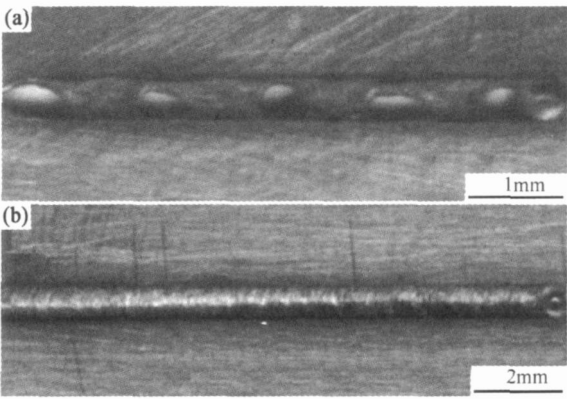


图 2 焊缝的表面成形
(a) 发生烧穿的焊缝形貌; (b) 成形良好的焊缝形貌
Fig. 2 Surface morphology of weld seam
(a) morphology of burn through; (b) good formation

表 4 各实验号对应的脉冲能量

Table 4 Pulse energy of each welded joint

Serial No	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pulse energy/ J	2. 9	3. 9	2. 1	2. 8	1. 5	2. 1	1. 2	1. 7	2. 2

观察 3- 9 组试样的焊缝横截面形貌, 发现 4, 6, 9 号试样焊缝横截面形貌较好, 而 3, 5, 7 号试样焊缝存在不同程度的未焊透, 如图 3 所示。这主要是由于实验号 3, 5, 7 号对应的脉冲宽度较小(均为 1. 5 ms), 激光脉冲的熔透能力较弱导致焊缝未焊透, 影响了焊接接头的实际承载面积, 因此这三组试样接头的抗拉力均不大。

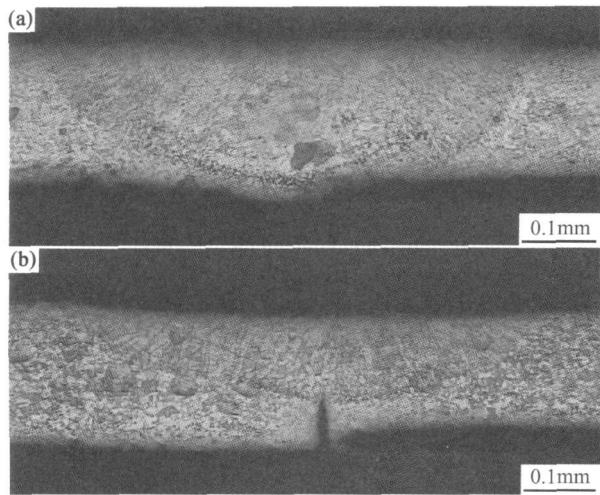


图3 焊接接头的横截面形貌 (a) 成形良好; (b) 未焊透
Fig. 3 Cross-section morphology of welded joint
(a) good formation; (b) nonpenetration

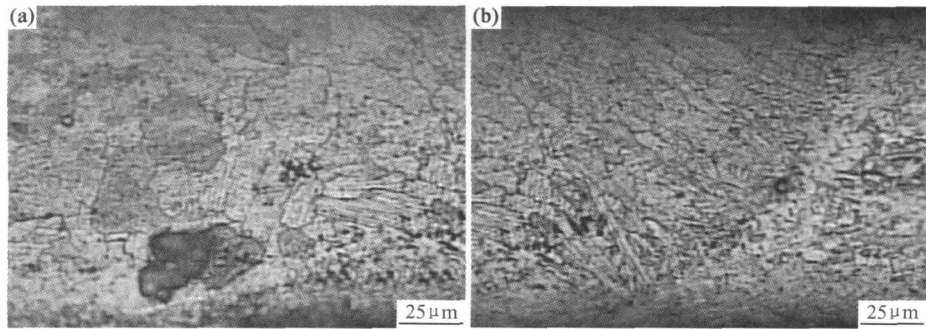


图4 焊接接头的显微组织 (a) 焊缝中心区; (b) 焊缝边缘
Fig. 4 Microstructure of welded joint (a) weld seam center; (b) weld seam edge

3 结论

(1) 采用微激光对0.2mm 厚的321 不锈钢片进行对接焊时, 其最优工艺参数是脉冲功率百分比为 15、脉冲频率为 5 Hz、脉冲宽度为 2.1ms, 此时焊接接头能获得最大抗拉力。

(2) 采用最佳工艺参数获得的焊接接头的承载能力达到母材的 95%, 和母材基本匹配。

(3) 当微激光焊的脉冲能量过大时会产生热量的积累、导致焊缝发生烧穿, 当脉冲宽度较小时激光脉冲的熔透能力较弱、导致焊缝未焊透, 这两者都会导致焊接接头的承载能力较差。承载能力较高的焊接接头其显微组织由焊缝中心区的等轴晶和焊缝边缘细小的柱状晶组成。

参考文献

[1] 胡席远, 熊建钢, 胡伦骥, 等. 薄板激光焊接质量影响因素研究 [J]. 应用激光, 1998, 18(1): 38- 40.

[2] 陈涛, 王智勇, 丁岳, 等. 脉冲激光(固体 YAG) 焊接中参数制约

采用金相显微镜在高倍下观察抗拉力较高的 6 号和 9 号焊接接头的显微组织发现, 焊缝中心区基本由等轴晶组成, 如图 4a 所示, 因而焊缝金属具有良好的力学性能, 在激光焊时表面发生少量汽化、焊缝区厚度小于母材的情况下其抗拉力仍然和母材匹配。焊缝边缘和母材交界处组织由细小的柱状晶组成, 在焊缝和母材的交界处几乎看不到热影响区, 如图 4b 所示。6 号和 9 号工艺参数对应的这种组织特征的形成是由于微激光焊接的能量非常集中, 焊接时焊接接头只有局部区域加热, 母材受到的热作用较小、基本没有升温, 因此热影响区非常小; 在焊缝的边缘, 由于靠近母材, 受到母材的冷却作用, 温度梯度很大, 有利于生成柱状晶; 而在焊缝中心, 温度分布相对均匀, 温度梯度较小, 和晶粒的生长速度较为接近, 因此易于生成等轴晶。

的分析[J]. 应用激光, 1998, 18(4): 145- 147.

[3] 梁春雷, 李晓延, 巩水利, 等. TC4 钛合金薄板激光焊接接头疲劳性能研究[J]. 材料工程, 2006, (4): 48- 51.

[4] TZENG Y F. Process characterization of pulsed Nd: YAG laser seam welding [J]. Advanced Manufacturing Technology, 2000, 16(1): 10- 18.

[5] 阎小军, 杨大智, 刘黎明. 316L 不锈钢薄板脉冲激光焊工艺参数及接头组织特征[J]. 焊接学报, 2004, 25(3): 121- 123.

[6] BIRO E, WECKMAN D C, ZHOU Y. Plused Nd: YAG laser welding of copper using oxygenated assist gases[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2002, 33(7): 2019- 2030.

基金项目: 江西省自然科学基金项目(2007GQC1513); 南昌航空大学科研基金项目(EA200601186)

收稿日期: 2007-10-28; 修订日期: 2008-08-20

作者简介: 陈玉华(1979-), 男, 工学博士, 讲师, 主要从事先进材料及其连接技术方面的教学和科研工作, 联系地址: 江西省南昌市丰和南大道 696 号南昌航空大学材料学院(330063)。E-mail: ch. yu. hu@ 163. com