

文章编号: 1000-5862(2018)04-0336-06

不锈钢薄板激光点焊工艺对金相组织的影响分析

简弃非, 曹颂阳, 赵 晶, 肖金平

(华南理工大学机械与汽车工程学院 广东 广州 510640)

摘要: 以厚度为 0.5 mm 的 304 不锈钢薄板作为研究对象, 通过实验探讨了不同工艺下激光点焊的金相组织、力学性能。经过焊点金相微观组织的观察和焊点拉伸强度的试验, 可得出结论: 激光点焊焊接质量好, 很少出现气孔、飞溅、焊接裂纹、未熔透、未熔合等焊接缺陷, 而且不同的激光功率密度或加热时间, 对焊点的形貌、尺寸和金相组织有很大影响; 焊点处的耐腐蚀性强度比母材低, 而且大部分焊点拉伸位移达到 1.5 mm 左右就会断裂, 平均拉伸强度比母材低 281.2 MPa, 但平均屈服强度比母材高, 满足不锈钢薄板作为换热器的需求。

关键词: 激光焊接; 304 不锈钢薄板; 金相分析; 力学性能

中图分类号: TG 115.21 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2018.04.02

0 引言

激光焊接是一种现代化的焊接工艺, 与传统焊接工艺相比具有高功率密度, 可以提高焊缝熔深和焊接速度, 可以减小焊缝热影响区, 适应更广, 已被广泛应用于航空航天、汽车制造和造船等领域^[1]。

由于激光焊接比传统焊接更有优势, 所以越来越多的国内外学者从焊接质量、工艺参数、焊接母材和焊接类型等不同角度对其进行了大量研究^[2-15]。周学凯等^[2]采用光纤激光对厚度为 0.3 mm 的不锈钢超薄板进行搭接焊, 并对焊缝显微组织进行了研究; 霍宏伟等^[3]比较了 0.8 mm 厚 304 不锈钢薄板的搭接连续激光焊工艺和电阻焊工艺, 结果表明激光焊接成型较好, 焊缝更均匀; 张瑄珩等^[4]研究了不同激光焊接速度对 1.0 mm 厚的 304 不锈钢薄板焊缝形貌的影响, 结果表明焊接速度影响焊缝的表面形貌和平整度; J. Yan 等^[5]通过对钨极氩弧焊、激光焊接和激光 TIG 复合焊 3 种焊接方式下的 304 不锈钢接头组织和力学性能的对比研究, 得出激光焊接接头在所有接头中抗拉强度最高与枝晶尺寸最小, TIG 焊接头抗拉强度最低与枝晶尺寸最大, 激光焊接和复合焊接由于其高的焊接速度和优异的机械性能, 更适用于焊接 304 不锈钢; 文献[6]通过实验对比电弧激光混合焊接 (ALHW) 和激光电弧复合焊接

(LAHW) 2 种工艺对焊缝组织的影响, 得出 ALHW 生产的焊缝形状更好, 板条马氏体组织更均匀, 而 LAHW 焊缝具有板条马氏体和奥氏体不均匀结构; 文献[7]对一种新型的固态点焊技术进行实验数值研究, 得出研究材料中相反的剪切应力方向和超过一定阈值的有效塑性应变, 对于成功实现这种新颖开发的焊接工艺来说是必不可少的; 文献[8]研究了激光功率对接头组织和力学性能的影响, 结果表明通过将激光功率调整到 2 000 ~ 3 000 W 的范围可以获得可接受的接头。C. Kumar 等^[9]通过对 5.0 mm 厚的 Ti-6Al-4V 合金进行了光纤激光焊接的实验研究, 建立了焊接功率、焊接速度、激光束聚焦位置与熔合区宽度、热影响区尺寸和溶区面积的关系。A. Vandewynckéle 等^[10]研究激光焊接工艺对热交换器焊接质量的研究, 文献[11]研究了铜基纳米复合吸波材料在纯铜激光焊接中的应用效果, 以提高焊接纯铜的激光焊接效率。M. Miyagi 等^[12]以铜为激光焊接对象, 研究了光束旋转对焊接质量的影响; S. Liebl 等^[13]通过实验研究, 确定了多模光纤激光器激光焊接纯铜材料时出现的工艺极限。S. V. Kuryntsev 等^[14]对奥氏体不锈钢和工业纯铜在无填料或中间材料的情况下, 对接接头形式的光纤激光焊接工艺进行了研究。F. Caiazza 等^[15]主要研究了激光焊接在钛合金连接方面应用和优化。

本文主要是以厚度为 0.5 mm 的 304 不锈钢薄

收稿日期: 2018-04-06

基金项目: 国家自然科学基金(21776095)和广州市科学研究(201804020048)资助项目。

作者简介: 简弃非(1963-), 男, 湖南邵阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事传热节能与新能源装备研究。E-mail: tcjqf@scut.edu.cn

板为研究对象,通过擦拭王水,打磨抛光,拉伸强度等试验,观察激光点焊的微观金相组织及测试机械强度研究激光点焊的焊接质量,为改进以后的激光点焊提供一定的参考.

1 实验概况

1.1 实验器材

1) 切割加工设备:DK7740 线切割机床;2) 腐蚀剂:王水;3) 观察设备:DMI5000 倒置金相显微镜;4) 电子式万能材料试验机.

1.2 实验方法

金相实验的具体步骤:1) 试样截取时走刀按照图 1 中 1-2-3-4 顺序,其中为了观察焊点截面,某个试样焊点的切割截取如图 1 红圈标注所示.操作时需要注意切割焊点(走刀 1)时,只切除焊点的 1/3,要预留一定的磨样余量;2) 从焊好的波纹板片中随机选取 5 个焊点,使用线切割机截取试样,拉伸强度试验开始前要注意保护焊点,避免焊点处的强度受到影响;3) 试样加工完成后,按照操作规程,以 $1\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度进行试样拉伸实验,如图 2 所示.

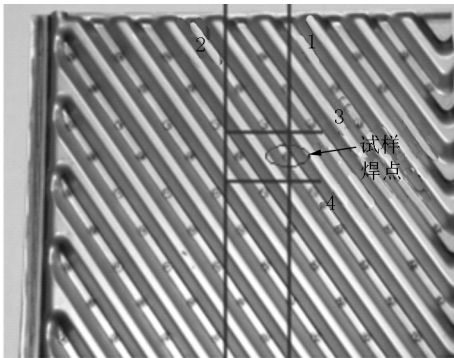


图 1 试样截取

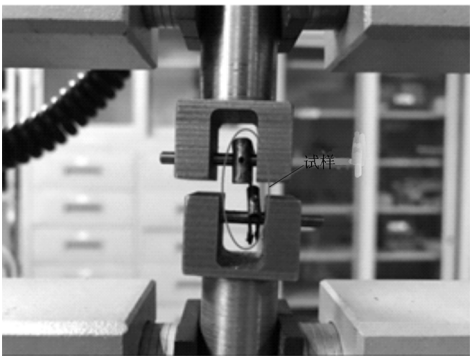


图 2 试样断裂

2 实验结果与分析

在工艺 1 条件下,即激光功率 $3\,000\text{ W}$,光斑直径 0.4 mm ,离焦量 0 mm ,焦距 110 mm ,持续加热

50 ms ,对加工好的焊点进行研究.

2.1 熔池尺寸

测量统计各个试样的上端开口尺寸、板片之间接合处的尺寸和下端开口尺寸,如图 3 所示.为了进一步研究激光点焊的稳定性,分别计算出各个试样熔池 3 个尺寸的平均值以及方差,如表 1 所示.从表 1 可以看出熔池上端开口尺寸、下端开口尺寸以及上下板片接合处尺寸的平均值为 2.63 mm 、 2.03 mm 、 1.69 mm ,标准方差分别为 0.14 mm 、 0.07 mm 和 0.16 mm ,方差所占平均值的比例分别为 5.32% 、 3.45% 、 9.47% ,由此可看出激光点焊波动较小,这种结果主要是点焊过程中激光不稳定和工作台微小振动造成的.

表 1 熔池尺寸平均值和标准方差 mm		
统计的尺寸	平均值	标准方差
熔池上端开口直径	2.63	0.14
熔池下端开口直径	2.03	0.07
板片接合处直径	1.69	0.16

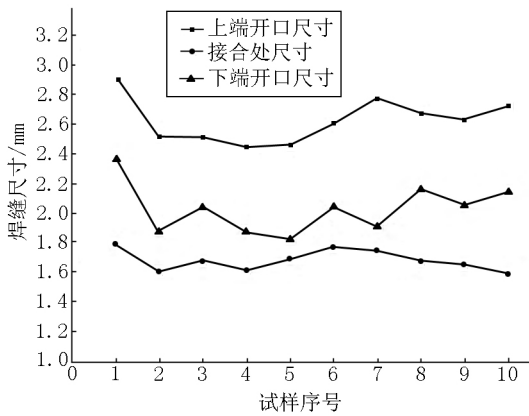


图 3 熔池尺寸

2.2 点焊金相分析

从焊点的横截面图中可看出,熔池正面和背面都有凹陷,且向两边过渡曲线平滑,但熔池正面的过渡曲线的斜率相对于背面的过渡曲线斜率较大,如图 4 是用 VHX-600 超景深 3 维显微镜拍摄的焊点横截面外观图.

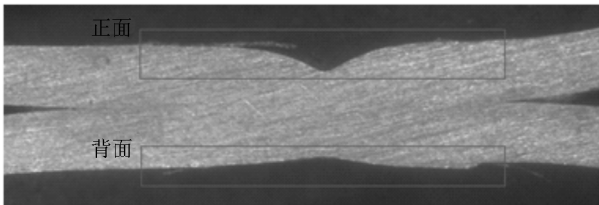


图 4 焊点截面图

图 5 为某个试样的焊点横截面形貌,从图 5 可以看出形类似一个沙漏,焊缝、融合线和母材可以清晰的分辨出来.焊点正面和背面都有凹陷.激光点焊不同于其他焊接方式,其在焊接过程中会发生蒸气

反作用、等离子体等,会对金属溶液流动、凝固造成影响,可能引起焊接缺陷.

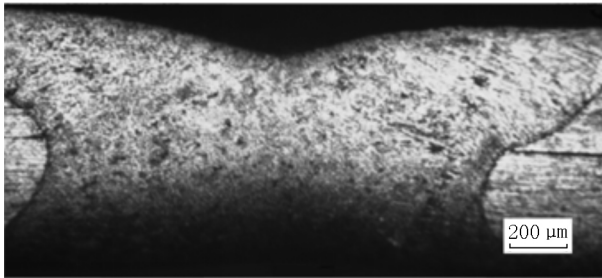


图5 试样焊点横截面形貌

在显微镜下观察,发现试样中只有一个存在焊接缺陷,局部放大观察有很大的黑斑,如图6中的红色圈内,这是因为在热源加热过程中,出现一个轻微的溅射形成一个灼热点,引起局部受热不平衡,导致金属内部结构发生变化形成内部缺陷.该缺陷对焊点处的强度和抗疲劳能力有一定影响.通过对全部试样的观察,焊点内部缺陷较少,未出现焊接裂纹、未熔透等缺陷.

为进一步研究激光点焊的性能,需要对焊点组

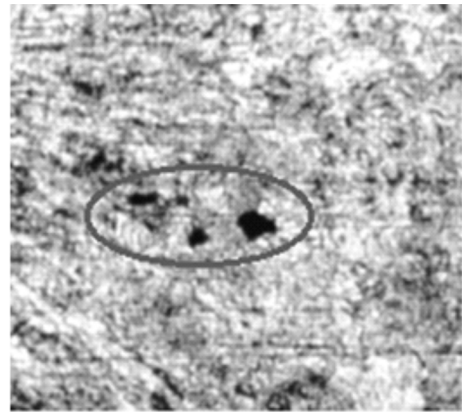
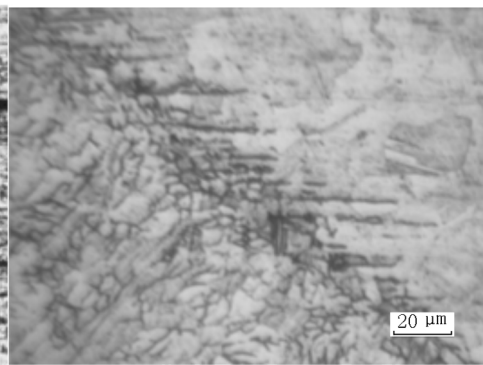
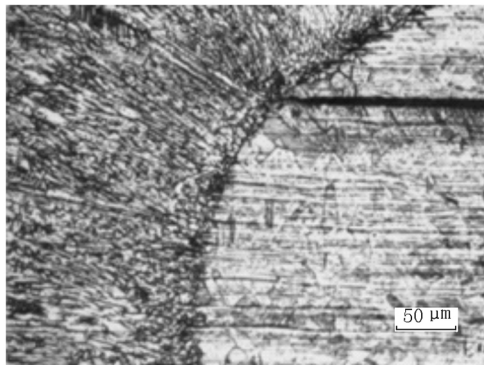
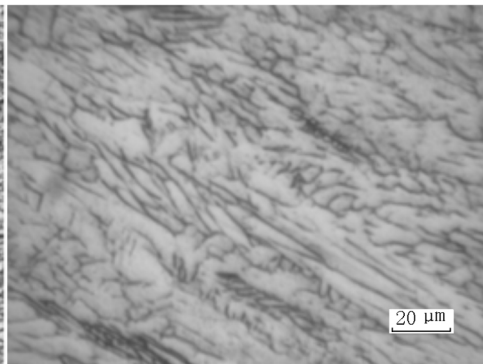
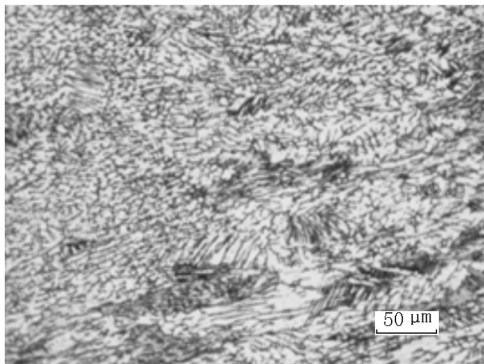


图6 焊点内部缺陷

织结构进行更深一步的金相观察.图7(a)分别为融合线放大200倍和500倍的金相图.从金相图中可看出,融合线附近的焊缝和母材组织还是有很大区别,不同于304不锈钢母材中含有大量的形变马氏体,而是以含有铁素体的胞状奥氏体为主.图7(b)分别为焊缝放大200倍和500倍的金相图.从低倍的金相图可看出,焊缝组织为胞状结构,而且从高倍金相图中还可看出,胞状奥氏体具有向枝晶状变化的倾向,这是冷却速度过快造成的.



(a) 融合线



(b) 焊缝

图7 焊点不同部位的金相显微组织图

所研究的对象304不锈钢薄板具有良好耐腐蚀性,但是经过焊接之后,内部组织发生改变,其本身的耐腐蚀性受到影响.将焊点完全浸入到硝酸酒精溶液中15 s、30 s、60 s,母材和焊点都未发生腐蚀现

象,说明焊点具有一定耐腐蚀性.但是当将焊点完全浸入到王水10 s时(观察到的金相图如图8所示)经过王水腐蚀后,母材和焊缝以融合线为界结构组织区别更加明显.母材结构组织基本没有发生变化,焊缝金相组

织因被腐蚀而变得较深,说明焊缝的耐腐蚀性比母材低.经过点焊之后,波纹薄板整体耐腐蚀性降低.

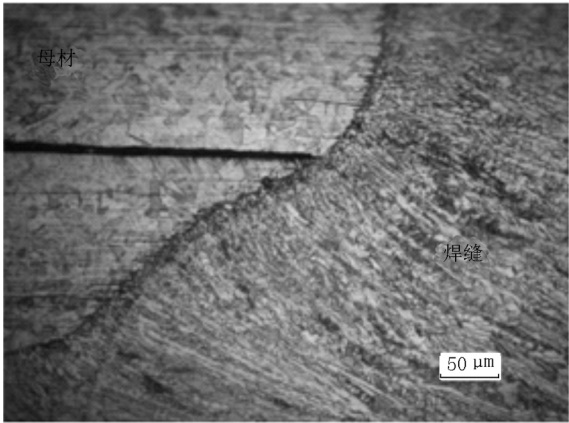


图 8 腐蚀后焊点金相图

2.3 不同工艺对焊点的影响

不同的焊接工艺对焊点的形貌和焊接质量也有很大影响,如表 2 中列出的是第 2 种工艺条件和第 3 种工艺条件下熔池的金相对比分析,即不同的工艺对焊点的影响.

表 2 不同工艺参数					
mm					
激光器参数	功率/W	光斑直径	持续加热时间	离焦量	焦距
工艺 2	3 000	0.4	35	0	110
工艺 3	3 000	0.8	50	0	220

图 9 是在 3 种工艺条件下,对熔池的上端开口、下端开口以及 2 个板片之间接合处的尺寸对比分析.从图 9 中可看出在工艺 1 条件下,熔池的各个尺寸都比其他 2 种工艺较大,工艺 2 比工艺 1 减少加热时间,也就是减少热量的输出,所以熔池的各个尺寸和在工艺 1 条件下相比就比较小,而工艺 3 和工艺 1 相比,增加了光斑直径和焦距,其实就是减少了能量密度.在工艺 3 的条件下,熔池的各个尺寸不仅比工艺 1 条件下小,而且比工艺 2 的条件下也小.这是因为在工艺 3 的条件下,功率密度低,熔池达到的峰值温度也比较低,不会发生蒸气反作用和等离子

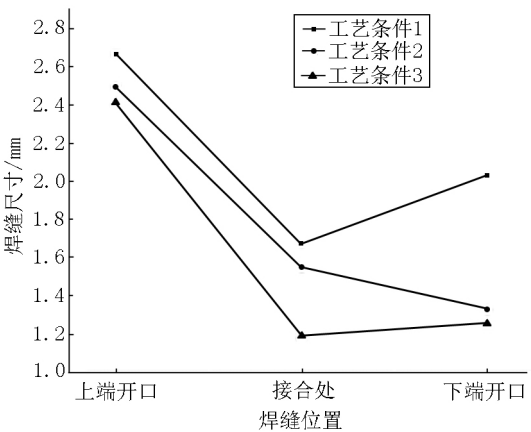


图 9 不同工艺条件下的熔池尺寸

体扰动,也不会形成匙孔,所以熔池尺寸也相对较小,形成的焊缝较为平缓.

不同的工艺条件下的熔池形貌和金相组织结构也有不同.在工艺 1 的条件下,熔池的形状类似一个“沙漏”(见图 5),而在工艺 2 和工艺 3 的条件下,熔池的形状更像一个“钉头”,熔池下端并没有像工艺 1 一样向外扩展.在工艺 2 条件和工艺 3 条件下的熔池形貌也有区别,在工艺 2 条件下,熔池的上端和下端都有凹陷,而在工艺 3 条件下,熔池上端平整,下端却略有凸起,如图 10(b).这是因为焊接功率密度和能量不同造成流场的不同,从而造成熔池的形貌形成也不同.形成工艺 3 条件下的熔池形貌,是激光点焊过程主要以热导焊形式进行热量传递,随着加热时间增加,熔池的面积和深度相应增加,并将薄板片熔透,形成一个“钉头”形貌,此时温度并未达到金属溶液沸点,由于金属溶液表面张力较小,熔池下端表现为微微向外凸起.激光点焊的功率进一步增加就形成了工艺 2 条件下的熔池形貌,此时出现金属蒸气反作用,逐渐形成“匙孔”,并不断加深,金属蒸气沿着“匙孔”向外射流,同时下端也形成部分金属蒸气,金属蒸气和金属溶液之间的作用力使金属溶液形成强烈的对流,并向四周扩散,最终形成有凹陷的形貌,如图 10(a).形成工艺 1 条件下的熔池形貌,激光点焊加热时间需要再进一步增加,此时“匙孔”的深度进一步增加,最终把熔池完全通透形成通孔.此时生成的金属蒸气一部分在熔池上端口向外射流,一部分通过下端口向外射流,同时上端口和下端口处的金属溶液在金属蒸气的作用下也形成强烈的对流,并表现为向外扩张.最后凝固时,在表面张力的作用下,上端和下端都表现出凹陷的特征.

通过观察 3 种工艺条件下的金相组织,可以看出 3 种工艺金相组织都较为均匀,呈现出胞状组织形态,并且 3 种工艺条件很少存在气孔、飞溅、焊接裂纹、未熔透、未熔合等焊接缺陷,整体焊接质量较好,如图 11.相比之下,在工艺 2 条件下,金相组织更加细化均匀,熔合线更窄,工艺 1 和工艺 3 条件下金相组织更多以胞状奥氏体为主,与以马氏体为主母材有很大区别,熔合线更宽,更加清晰.

2.4 拉伸强度

经过点焊之后的不锈钢薄板的力学性能也会发生改变,表 3 为 304 不锈钢薄板的力学性能.

表 3 304 不锈钢力学性能			
抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	延伸率/%	硬度/HV
518	202	38.4	198

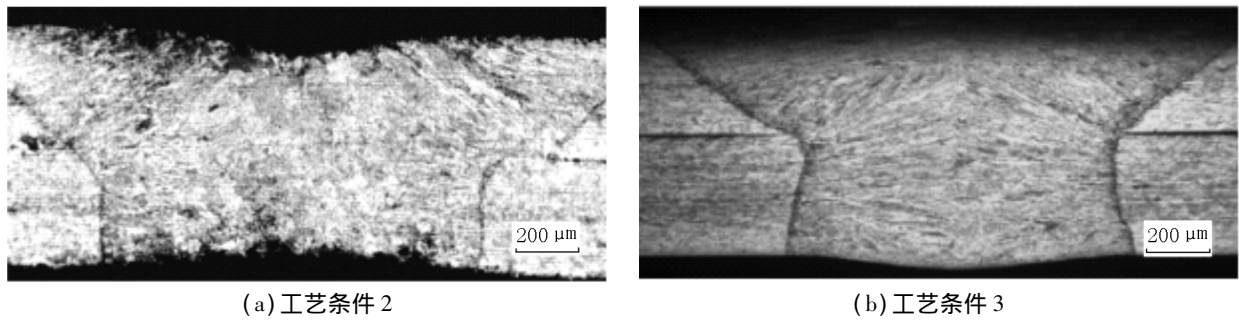


图 10 不同工艺条件焊缝形貌

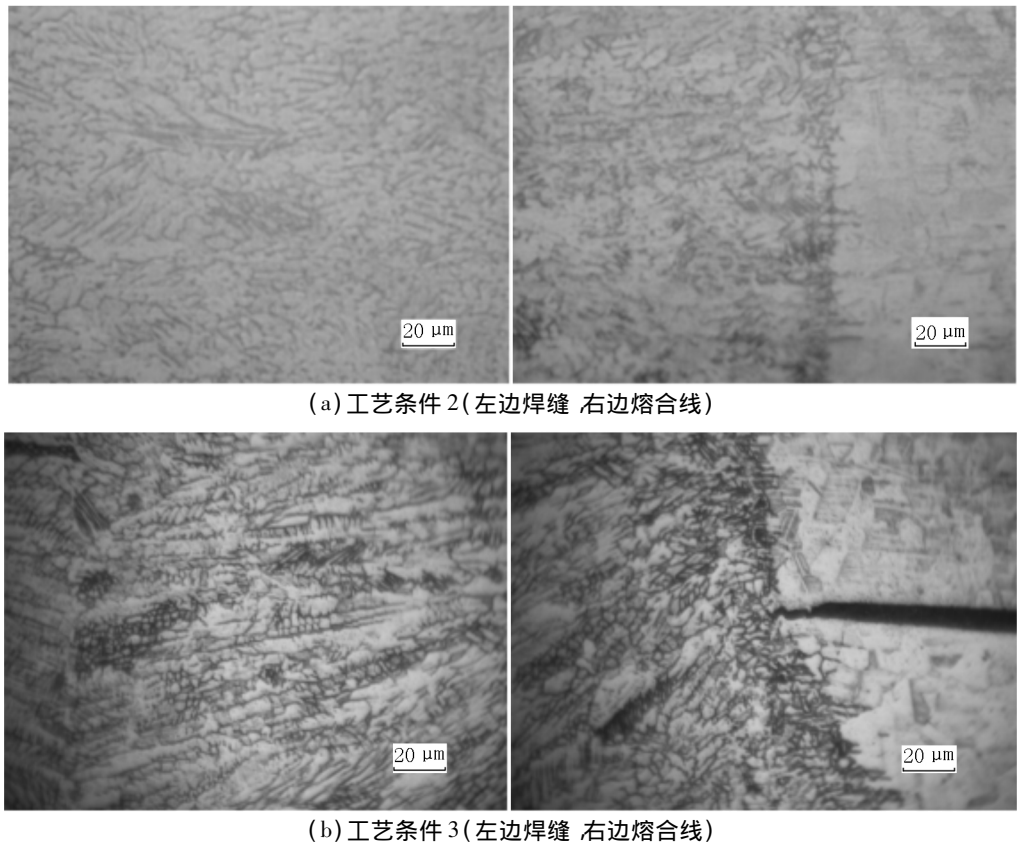


图 11 不同工艺参数下金相组织

图 12 是 5 个试样做拉伸试验的拉力-位移变化图,从图 12 可看到,随着拉力不断增加,试样的位移不断增加,除了试样 1 外,其他试样基本在拉伸位移 1.5 mm 左右就断裂,各个试样拉伸断裂时的拉

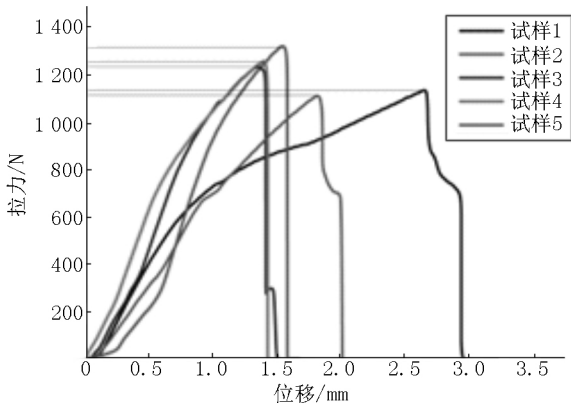


图 12 焊点试样拉力-形变位移曲线

力值已统计列入表 4 中,5 个焊点试样能够承载的平均拉力为 1 230 N,平均抗拉剪切强度为 236.8 MPa.虽然其抗拉剪切强度低于常温下母材的拉伸强度 518 MPa,但屈服强度高于常温下母材的屈服强度 202 MPa,其抗拉性能相对较好,可以满足换热器的使用要求,充分发挥母材的力学性能可提高换热器的承压能力.

表 4 焊点试样统计数据

试样编号	1	2	3	4	5
断裂时拉力值/N	1 143	1 330	1 242	1 270	1 120
抗拉剪切强度/MPa	222	258	241	246	217

3 结论

本文主要通过金相微观组织观察和拉伸强度试

验对不锈钢薄板激光点焊进行研究,分析观察的结果和拉伸强度试验数据表明:1)焊缝金相组织以胞状奥氏体为主,与母材金相组织不同;2)不同的激光功率或加热时间对焊缝尺寸、形貌和金相组织有很大影响;3)温度未到金属溶液沸点的熔池上端平整,下端微微凸起,而开始出现金属蒸气反作用的熔池上端凹陷,出现通孔的熔池上下两端都凹陷,形似一个“沙漏”;4)焊点的耐腐蚀性比母材差,拉伸强度比母材差,但屈服强度比母材高。

4 参考文献

- [1] 王志,胡芳友,崔爱永,等.激光焊接技术的研究现状及发展趋势[J].新技术新工艺,2016(3):42-44.
- [2] 周学凯,米高阳,闫飞,等.不锈钢超薄板光纤激光焊接工艺和性能研究[J].应用激光,2017(4):521-526.
- [3] 霍宏伟,胡海军,李治国,等.304不锈钢薄板激光焊搭接接头组织及性能[J].电焊机,2016,46(3):44-47.
- [4] 张瑄珺,孙小兵,潘涌,等.304不锈钢薄板外观件激光焊接工艺研究[J].应用激光,2016(3):321-325.
- [5] Yan Jun, Gao Ming, Zeng Xiaoyan. Study on microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel joints by TIG laser and laser TIG hybrid welding [J]. Optics and Lasers in Engineering 2010, 48(4):512-517.
- [6] Liu Shuangyu, Li Yanqing, Liu Fengde, et al. Effects of relative positioning of energy sources on weld integrity for hybrid laser arc welding [J]. Optics and Lasers in Engineering 2016, 81:87-96.
- [7] Wang Xiao, Gu Yuyuan, Qiu Tangbiao, et al. An experimental and numerical study of laser impact spot welding [J]. Materials and Design 2015, 65:1143-1152.
- [8] Tan Caiwang, He Wenxiong, Gong Xiangtao, et al. Influence of laser power on microstructure and mechanical properties of fiber laser-tungsten inert gas hybrid welded Mg/Cu dissimilar joints [J]. Materials and Design 2015, 78:51-62.
- [9] Kumar C, Das M, Paul C P, et al. Experimental investigation and metallographic characterization of fiber laser beam welding of Ti-6Al-4V alloy using response surface method [J]. Optics and Lasers in Engineering 2017, 95:52-68.
- [10] Vandewynckéle A, Vaamonde E, Fontón M, et al. Laser welding head tailored to tube-sheet joint requirements for heat exchangers manufacturing [J]. Physics Procedia, 2013, 41:144-152.
- [11] Chen Huichi, Bi Guijun, Nai M L S, et al. Enhanced welding efficiency in laser welding of highly reflective pure copper [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 216(216):287-293.
- [12] Miyagi M, Zhang Xudong, Kawahito Y, et al. Surface void suppression for pure copper by high-speed laser scanner welding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 240:52-59.
- [13] Liebl S, Wiedenmann R, Ganser A, et al. Laser welding of copper using multi mode fiber lasers at near infrared wavelength [J]. Physics Procedia 2014, 56:591-600.
- [14] Kuryntsev S V, Morushkin A E, Gilmudinov A K. Fiber laser welding of austenitic steel and commercially pure copper butt joint [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 90:101-109.
- [15] Caiazza F, Alfieri V, Corrado G, et al. Investigation and optimization of laser welding of Ti-6Al-4V titanium alloy plates [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering 2013, 25(135):1367-1374.

The Effects of Stainless Steel Laser Spot Welding on Metallographic Analysis

JIAN Qifei, CAO Songyang, ZHAO Jing, XIAO Jinping

(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: The microstructure and mechanical properties of laser spot welding of 304 stainless steel sheet with thickness of 0.5 mm are investigated by experiments. After the test of solder joint microstructure observation and tensile strength of the solder joints, the conclusion is drawn that the laser spot welding quality is good, less porosity, spatter, welding cracks, incomplete penetration, incomplete fusion welding defects, and different laser power density or heating time has a great influence on the morphology, size and solder joint microstructure. Corrosion resistance of the solder joint strength is lower than the parent metal, and most of the solder joints tensile displacement reaches about 1.5 mm will break, the average tensile strength is 281.2 MPa lower than the parent material, but the average yield strength is higher than that of base metal. Stainless steel sheet is used as a heat exchanger to meet the material requirement.

Key words: laser welding; 304 stainless steel sheet; metallographic analysis; mechanical properties

(责任编辑:王金莲)