

离焦量对 1Cr17Ni2 薄钢板激光焊接接头组织与性能的影响

舒林森^{1,2*}, 王家胜¹

¹陕西理工大学机械工程学院, 陕西 汉中 723001;

²陕西省工业自动化重点实验室, 陕西 汉中 723001

摘要 利用 YAG 脉冲激光焊接系统对 1 mm 厚的 1Cr17Ni2 不锈钢薄板进行对接焊接试验, 通过焊缝组织分析、拉伸测试和显微硬度测试, 研究了离焦量对焊接接头组织与性能的影响。结果表明: 采用激光对 1Cr17Ni2 薄钢板进行对接焊后, 焊接接头出现了组织分区, 母材区组织主要是铁素体和马氏体, 热影响区组织为板条马氏体组织和少量呈带状分布的 δ 铁素体, 而焊缝区组织则主要以马氏体为主; 随着离焦量增加, 焊缝熔深逐渐减小, 熔宽先增大后减小, 焊缝处的马氏体含量逐渐减少, 接头的抗拉强度先增大后减小; 焊缝区的硬度最大, 母材区的硬度最小, 热影响区的硬度介于两者之间; 焊缝区的整体硬度随着离焦量的增大而减小; 当离焦量为 -5.5 mm 时, 热影响区中马氏体板条束群细小均匀, 焊接成形质量好, 接头的拉伸性能优良。

关键词 激光技术; 离焦量; 1Cr17Ni2; 微观结构; 抗拉性能; 硬度

中图分类号 TG457.5; TG47

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.011401

Effect of Defocusing Distance on Microstructure and Properties of Laser Welded Joint of 1Cr17Ni2 Stainless Steel Plate

Shu Linsen^{1,2*}, Wang Jiasheng¹

¹College of Mechanical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723001, China;

²Shaanxi Key Laboratory of Industrial Automation, Hanzhong, Shaanxi 723001, China

Abstract A YAG pulsed laser welding system was used to analyze the microstructure of welded 1Cr17Ni2 stainless steel plates, tensile properties and microhardness of the joints, and effects of different defocusing distances on the microstructure and properties of the welded 1Cr17Ni2 stainless steel plates. The results show that the laser self-melting butt welding in the 1Cr17Ni2 stainless steel plate weld shows a microstructure division. The main structure of the base material area comprises ferrite and martensite, the heat-affected area comprises lath martensite and a small amount of banded ferrite, and the weld area comprises mainly martensite. Weld penetration gradually decreases with increasing defocusing distance. Further, the weld width increases and subsequently decreases, the martensite content at the weld gradually decreases, and the joint's tensile strength increases and subsequently decreases. The joint hardness in descending order is weld zone > heat affected zone > base material zone. Thus, the joint's overall hardness decreases with increasing defocusing distance. When the defocusing distance is -5.5 mm, the martensite beam group in the heat affected zone is fine and even, the welding forming quality is good, and the joint has excellent tensile performance.

Key words laser technique; defocus distance; 1Cr17Ni2; microstructure; tensile strength; hardness

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390

收稿日期: 2019-05-27; 修回日期: 2019-06-24; 录用日期: 2019-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(51505268); 陕西省教育厅专项科研计划(15JK1142); 陕西理工大学人才启动基金(SLGKYQD-26)

* E-mail: shulinsen19@163.com

1 引言

1Cr17Ni2 钢是一种马氏体-铁素体型双相不锈钢,因具有较高的强度及良好的耐蚀性而被广泛应用于飞机发动机压气机叶片和工业风机叶片的制造中^[1]。与普通碳素钢相比,不锈钢的热胀系数大、热导率小,在焊接过程中化学成分和组织形态会发生改变,从而严重影响了焊后结构的力学性能,甚至使焊接接头成为整个焊接结构的薄弱部位。因此,研究 1Cr17Ni2 不锈钢薄板焊后的组织与性能很重要。

与传统的焊接方式相比,Nd:YAG 脉冲激光焊接具有热源密度大、易于控制焊接轨迹、热影响区较窄、焊缝成形好等优点,更适合不锈钢薄板的焊接^[2-5]。离焦量、焊接速度、焊接频率和激光功率是影响脉冲激光焊接质量的主要工艺因素^[6-9]。其中,离焦量决定着作用在工件上的激光功率密度,影响焊缝成形的稳定性。过大的离焦量会使光斑区域的功率密度过低,导致金属材料无法焊接熔透,而离焦

量过小则容易造成金属飞溅和烧穿破坏。文献[10-11]研究了离焦量对不同焊缝形貌、熔深和熔宽的影响;文献[12-13]对 304 不锈钢等材料的焊接工艺参数进行了研究。上述研究是以中厚及厚钢板的焊接工艺分析及参数优化为主,但关于 1Cr17Ni2 不锈钢薄板激光焊接工艺的研究甚少,缺少相关的试验数据。

本文采用 LSSK009 型数控脉冲激光焊接系统,对 1 mm 厚 1Cr17Ni2 不锈钢钢板进行焊接,分析了离焦量对焊缝的形貌、组织和显微硬度的影响,并对焊接试件的拉伸性能进行了测试,以获取离焦量对激光焊接 1Cr17Ni2 不锈钢薄板力学性能的影响规律。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料及设备

试验材料为 1 mm 厚的 1Cr17Ni2 不锈钢冷轧板,其淬火方式为油淬,淬火温度 950~1050 °C,化学成分如表 1 所示。试验钢的抗拉强度和断后伸长率分别为 960 MPa 和 10%。

表 1 1Cr17Ni2 不锈钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of 1Cr17Ni2 stainless steel

Element	C	Cr	Ni	Mn	S	P	Si	Fe
Mass fraction / %	0.11~0.17	16~18	1.5~2.5	≤0.8	≤0.03	≤0.035	≤0.8	Bal.

焊接前,先对试件进行清洗,去除其表面的油污,再用砂纸打磨试件对边的加工痕迹以及表面的氧化层,最后用体积分数为 95% 的乙醇溶液将试件清洗干净,并进行干燥处理。采用 LSSK009 型数控 YAG 脉冲激光焊接系统进行激光焊接试验,激光焊接系统由 Nd:YAG 固体脉冲激光器、冷却机组、配

电系统、加工工作台以及夹具等部分组成。激光的波长为 1064 nm,平均功率≤900 W、标准光斑直径为 1 mm,控制系统在 X、Y、Z 方向上具有自由度,精度可达 0.01 mm。在激光焊接过程中,工件装夹在专用夹具中,激光光源按预设路径单面扫描焊接。激光焊接过程及离焦量预设示意图如图 1 所示。

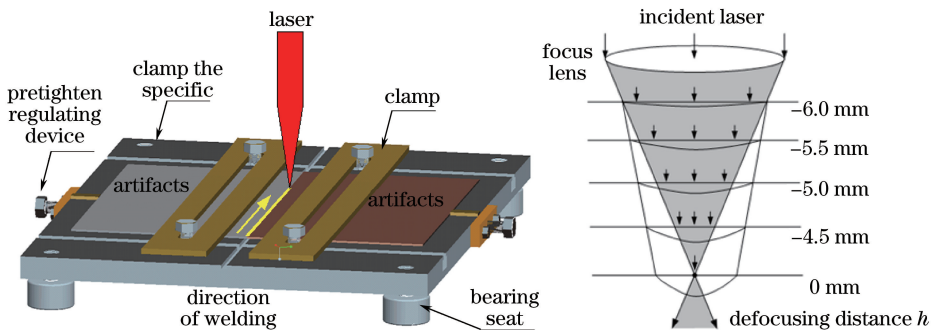


图 1 焊接过程及离焦量预设示意

Fig. 1 Schemes of welding process and preset defocusing distance

为保证试验的准确性,每个焊接参数下取 4 个试样进行拉伸试验,对得到的试验数据取平均值再进行对比分析。采用宝时格中走丝线切割机将焊接后的不锈钢板按国标 GB/T 228—2002 切

割成标准拉伸试件^[14-16],再在切割后剩余部分上制取金相试样。采用现配王水溶液腐蚀金相试样后,采用放大倍率为 50~1000 的 4XC 倒置金相显微镜观察试样的组织。拉伸试件及金相试样的制

取及拉伸试件的尺寸如图 2 所示。利用 HV-1000 型显微硬度计对焊接接头的硬度进行测定,采用

WAW-300 万能拉压机进行室温拉伸试验,拉伸速度为 5 mm/min。

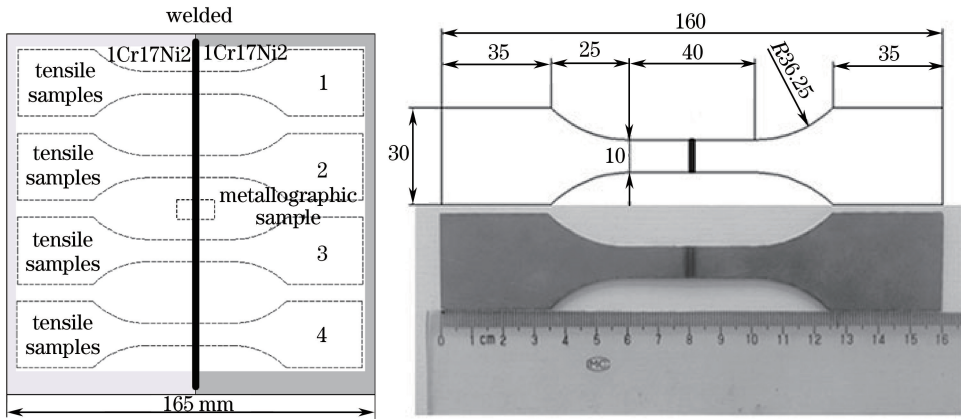


图 2 试件制作过程及工件尺寸

Fig. 2 Diagrams of making process and dimension of specimen

2.2 正交试验设计

通过大量试验发现,工艺参数对焊缝熔深具有显著影响。在正交试验寻优过程中,以焊缝熔池深度作为评价指标,将各单因素试验结果的较好范围均分为三个水平,进行多因素正交试验,正交数据表

设计为四因素三水平 $L_9(3^4)$,如表 2 所示,其中电流为因素 A,脉宽为因素 B,焊接速度为因素 C,离焦量为因素 D。采用极差分析法对正交试验结果进行分析,以获取影响激光焊接接头熔深的各因素的主次顺序和最优水平组合。

表 2 正交试验表

Table 2 Orthogonal test table

Test number	Factors				Test plan	Depth of fusion /mm
	A /A	B /ms	C /(mm · min ⁻¹)	D /mm		
1	140	2.0	250	-7.0	$A_1 B_1 C_1 D_1$	0.67
2	140	2.4	275	-6.0	$A_1 B_2 C_2 D_2$	0.84
3	140	2.8	300	-5.0	$A_1 B_3 C_3 D_3$	0.92
4	150	2.0	275	-5.0	$A_2 B_1 C_2 D_3$	0.97
5	150	2.4	300	-7.0	$A_2 B_2 C_3 D_1$	0.69
6	150	2.8	250	-6.0	$A_2 B_3 C_1 D_2$	0.87
7	160	2.0	300	-6.0	$A_3 B_1 C_3 D_2$	0.82
8	160	2.4	250	-5.0	$A_3 B_2 C_1 D_3$	>1
9	160	2.8	275	-7.0	$A_3 B_3 C_2 D_1$	0.87
Average 1	0.810	0.820	0.847	0.743		
Average 2	0.843	0.843	0.893	0.843		
Average 3	0.897	0.887	0.810	0.963		
Range R	0.087	0.067	0.083	0.220		
Order of factors	$D > A > C > B$					
Optimal level	A_3	B_3	C_2	D_3		
Optimal combination	$A_3 B_3 C_2 D_3$					

采用极差分析可以确定影响试验结果的主次因素,极差越大,表明该因素对试验结果的影响越大,是主要因素;反之则为次要因素。通过极差分析可以得到影响焊接接头熔深的因素的主次顺序是 $D > A > C > B$,即离焦量对焊接接头熔深的影响最为显

著,其次是电流和焊接速度,脉宽对熔深的影响最小,最优焊接工艺参数组合是 $A_3 B_3 C_2 D_3$,即电流、脉宽、焊接速度和离焦量分别为: $I = 160$ A, $b = 2.8$ ms, $v = 275$ mm/min, $h = -5.0$ mm,此时焊缝熔池深度超过 1 mm。为了进一步确定出最优的焊

接工艺参数,离焦量 h 取 -4.5 , -5.0 , -5.5 , -6 mm再次进行激光焊接试验,并通过金相组织、显微硬度及接头的拉伸性能研究离焦量对焊接接头质量的影响规律。

3 试验结果与讨论

3.1 接头的宏观形貌

图3所示为在不同离焦量下进行焊接得到的焊缝的宏观形貌及截面形貌。可知:当离焦量为 -4.5 mm时,焊接接头处有明显的气孔和飞溅,焊

缝表面有塌陷;随着负离焦量增加,焊缝表面成形美观,呈现出均匀光滑的鱼鳞纹焊缝;从截面廓形来看,随着负离焦量增加,熔深逐渐减小,熔宽先增加后减小;当离焦量取 -6.0 mm时,材料未能焊透。这是因为当离焦量为 -4.5 mm时,激光束能量比较集中,导致焊接的热输入过高,使得母材金属蒸发,在焊缝上表面出现飞溅、气孔和塌陷等焊接缺陷;随着负离焦量增大,激光束能量发散,焊接时的热输入减少,焊缝表面未出现焊接缺陷;随着负离焦量进一步增加,熔深逐渐减小,导致材料未被焊透。

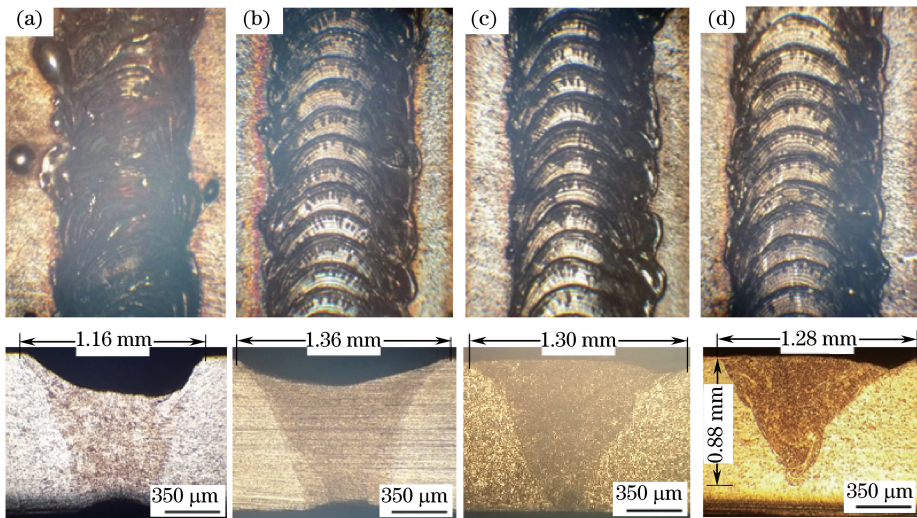


图3 在不同离焦量下焊接得到的焊缝及其截面形貌。(a) -4.5 mm;(b) -5.0 mm;(c) -5.5 mm;(d) -6.0 mm

Fig. 3 Weld appearances and cross-sections under different defocusing distances.

(a) -4.5 mm; (b) -5.0 mm; (c) -5.5 mm; (d) -6.0 mm

3.2 接头的显微组织

图4所示为离焦量为 -6.0 mm时1Cr17Ni2不锈钢薄板激光焊接接头的显微组织,可知:接头焊缝大致分为母材区(BM)、热影响区(HAZ)和焊缝区(WZ);母材区组织为铁素体+马氏体+少量奥氏体,热影响区很窄,呈现出明显的柱状晶特征,组织以粗大的板条马

氏体为主,且出现了带状分布的 δ 铁素体;焊缝区以板条马氏体为主,另有少量铁素体及部分残余奥氏体。此外,母材中的铁素体含量最高,体积分数约为60%。由母材向焊缝中心,铁素体含量逐渐减少,焊缝区铁素体的体积分数约为10%,马氏体含量显著增加,从而极大地提高了材料的强度和硬度。

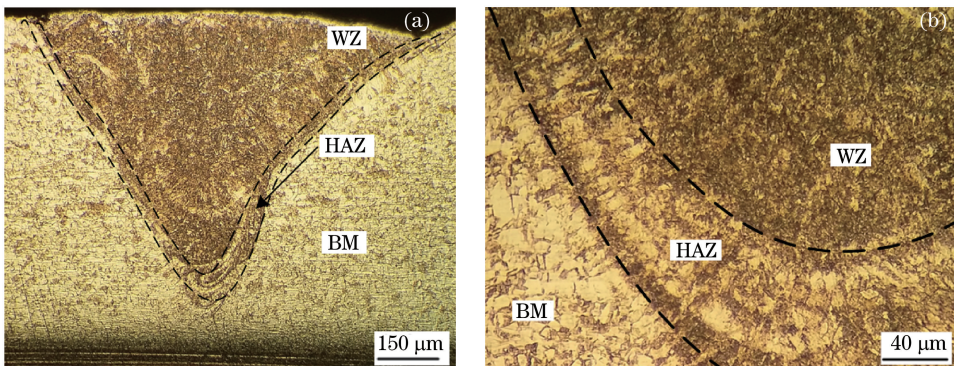


图4 焊接接头的显微组织。(a)全貌;(b)局部放大

Fig. 4 Microstructures of welded joint. (a) Overview; (b) partial enlarged drawing

由图 4 可知,1Cr17Ni2 不锈钢焊接接头热影响区的粗晶区出现了 δ 铁素体,该区域容易失效,所以重点研究离焦量对热影响区粗晶区组织的影响。从图 5 可以看出:热影响区组织主要为马氏体+铁素体+少量残余奥氏体;随着负离焦量减小,组织中 δ

铁素体的数量增加,且马氏体变得粗大,导致材料的强韧性降低。这是因为随着负离焦量减小,焊接热输入增大,导致马氏体晶粒急剧长大。从图 5 可以看出,当离焦量为 -5.5 mm 时,组织中的马氏体板条束群细小均匀。

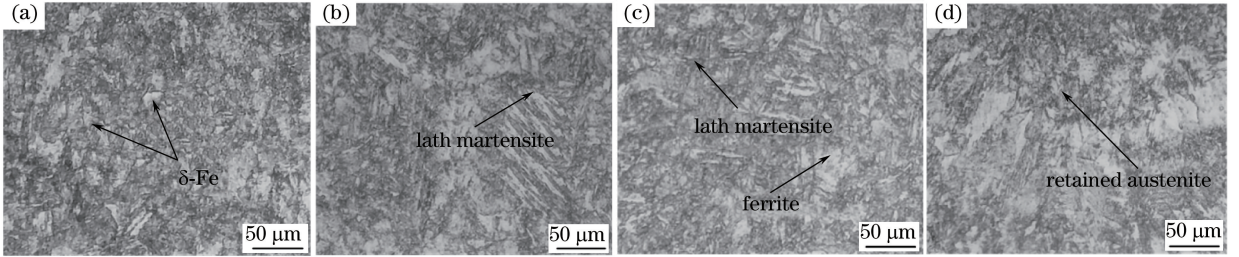


图 5 不同离焦量下焊接得到的焊接接头热影响区的显微组织。(a) -4.5 mm ; (b) -5.0 mm ; (c) -5.5 mm ; (d) -6.0 mm
 Fig. 5 Microstructures of heat affected zone of sample under different defocusing distances.

(a) -4.5 mm ; (b) -5.0 mm ; (c) -5.5 mm ; (d) -6.0 mm

3.3 接头的拉伸性能

图 6 所示为不同离焦量下焊接得到的焊件的拉伸性能。由图 6(a) 可知:1Cr17Ni2 不锈钢母材的抗拉强度最高,约为 940 MPa ;在 -4.5 mm 离焦量下焊接得到的焊件的抗拉强度最低,约为 600 MPa ,随着负离焦量增大,焊件的抗拉强度总体呈现先增大后减小的趋势,在 -5.5 mm 离焦量下焊接得到的焊件的抗拉强度最高,达到了 840 MPa 。从图 6(b) 可以看出:当离焦量为

-4.5 mm 时,断裂位置出现在焊缝中心处,这与焊缝金属飞溅和塌陷等缺陷造成的有效抗拉截面减小有关;当离焦量为 $-5.0, -5.5\text{ mm}$ 时,断裂位置出现在热影响区,这是因为此时焊缝金属飞溅少,增大了有效抗拉截面,但焊缝热影响区的晶粒变得粗大,并出现了 δ 铁素体(图 5),使得该部位的脆性增加,所以容易在此位置发生断裂失效;当离焦量为 -6.0 mm 时,材料未被完全焊透,所以其抗拉强度大幅降低。

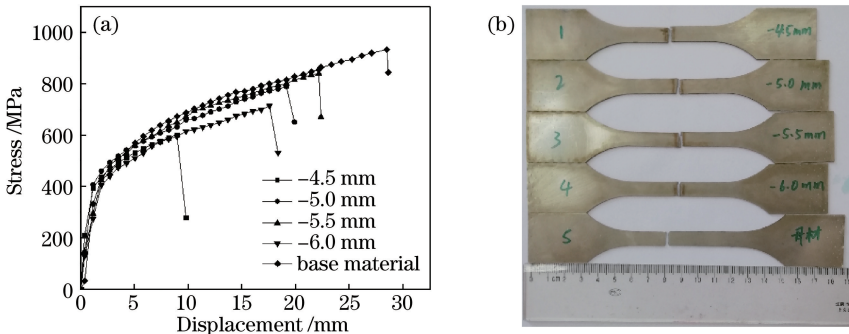


图 6 离焦量对 1Cr17Ni2 钢板激光焊接接头拉伸性能的影响。(a) 应力-位移曲线; (b) 拉断试样
 Fig. 6 Tensile strength of welded joint in 1Cr17Ni2 steel plate under different defocusing distances.

(a) Stress-displacement curve; (b) tensile specimen

3.4 接头的显微硬度

显微硬度测量结果如图 7 所示。图 7(a) 给出了测试点的位置分布,图 7(b) 为不同离焦量下焊接得到的焊接接头的硬度分布曲线。在焊缝区域均匀分布着 9 个检测点,两侧母材区也各分布着 5 个检测点。4 种离焦量下焊接得到的焊接接头的显微硬度具有相似的趋势。焊缝区的硬度最高,且随着距离焊缝中心线距离的增大,显微硬度逐

渐降低。此外,随着负离焦量增加,焊接接头焊缝的硬度呈现为逐渐减小的趋势,从离焦量为 -4.5 mm 时的 324.6 HV 减小至离焦量为 -6.0 mm 时的 306 HV ,焊接接头硬度最低的位置出现在热影响区。这是因为从母材区到焊缝中心晶粒尺寸逐渐减小,晶粒尺寸越细小,存在的晶界越多,对位错运动的阻碍作用越大,导致越靠近焊缝中心的硬度越高。

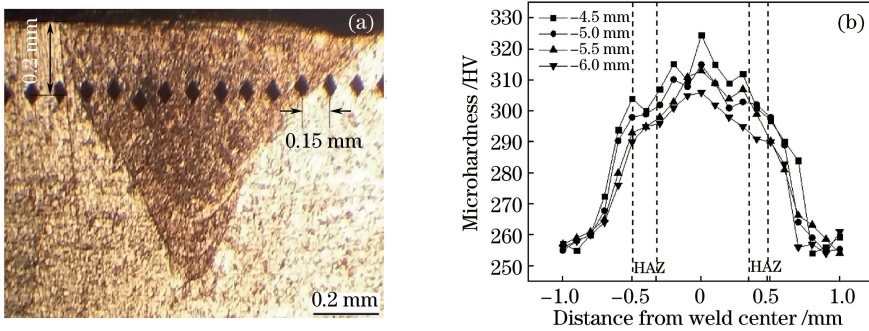


图7 不同离焦量下1Cr17Ni2不锈钢激光焊接接头硬度分布曲线。(a)硬度测试点位置分布;(b)硬度分布曲线

Fig. 7 Hardness distribution curves of welding joint of 1Cr17Ni2 stainless steel plate under different defocusing distances.

(a) Distribution of positions of hardness test points; (b) hardness distribution curves

4 结 论

采用YAG脉冲激光对1 mm厚的1Cr17Ni2不锈钢薄板进行对接焊接,能够形成均匀连续的鱼鳞纹焊缝,焊接接头分为母材区、热影响区、焊缝区3个部分。母材区主要为铁素体+马氏体,热影响区和焊缝区以马氏体为主。热影响区组织晶粒出现了粗化,且随着负离焦量减小,晶粒粗化越严重, δ 铁素体增多。离焦量为-5.5 mm时,焊缝理想,热影响区晶粒细小均匀。

焊接接头的显微硬度按焊缝区、热影响区、母材区依次减小。在不同离焦量下,焊缝区的整体显微硬度分布规律具有相似性,均随负离焦量的增加而逐渐减小。

焊接接头试样的抗拉强度总体呈现出随负离焦量增加而先增大后减小的趋势。当离焦量为-4.5 mm时,试样的拉伸性能最差,抗拉强度仅为600 MPa;当离焦量取-5.5 mm时,拉伸性能最好,抗拉强度可达840 MPa。

参 考 文 献

- [1] Luo J M, Zhang L X, Huang J. Preparation of multilayer film on 1Cr17Ni2 stainless steel and its corrosion resistance [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(2): 491-495.
罗军明, 章刘喜, 黄俊. 1Cr17Ni2 压气机叶片多层膜制备及耐蚀性研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(2): 491-495.
- [2] Kim K, Lee J, Cho H. Analysis of pulsed Nd : YAG laser welding of AISI 304 steel [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(11): 2253-2259.
- [3] Zhang Y, Sun D Q, Gu X Y, et al. Nd/YAG pulsed laser welding of TC4 titanium alloy to 301L stainless

steel via pure copper interlayer [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90: 953-961.

- [4] Wu X H. Experiment study of carbon steel continuous-pulsed laser welding process [J]. Applied Laser, 2014, 34(1): 57-61.
吴晓红. 碳钢连续-脉冲激光焊接工艺对比实验研究 [J]. 应用激光, 2014, 34(1): 57-61.
- [5] Qin G L, Meng X M, Fu B L, et al. High speed tandem TIG welding of thin-walled stainless steel pipe [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(12): 83-88.
秦国梁, 孟祥萌, 付邦龙, 等. 薄壁不锈钢管列置双TIG电弧高速焊接工艺 [J]. 机械工程学报, 2015, 51(12): 83-88.
- [6] Zhu J L, Xu S L, Jiao X D, et al. Study on laser lap welding of 304 stainless steel sheet [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(7): 071404.
朱加雷, 徐世龙, 焦向东, 等. 304 不锈钢薄板激光搭接焊工艺研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 071404.
- [7] Wang L L, Xue J X, Zhou Y Q, et al. Effect of welding speed on double pulsed GMAW of aluminum alloy [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(7): 115-118, VI.
王磊磊, 薛家祥, 周漓清, 等. 焊接速度对铝合金双脉冲GMAW的影响 [J]. 焊接学报, 2017, 38(7): 115-118, VI.
- [8] Gao F, Zhang F F, He K, et al. Assembly and welding sequences of AP1000 NPP shield building steel dome [J]. Hot Working Technology, 2017, 46(21): 158-161.
高飞, 张芳芳, 贺凯, 等. AP1000 核电屏蔽厂房钢穹顶拼装焊接顺序 [J]. 热加工工艺, 2017, 46(21): 158-161.
- [9] Wang X D, Zhang X B, Zhang X P, et al. Influence

of laser pulse energy and pulse duration on change of states in laser hole drilling[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2013, 42(S2): 205-208.

王学东, 张晓兵, 张晓鹏, 等. 脉冲能量及脉冲宽度对激光打孔物态转化的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2013, 42(S2): 205-208.

- [10] Zhang J, Lin S J, Su S X, et al. Effect of defocusing amount on weld shaping in fiber laser welding of aluminum alloy [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(12): 121405.

张健, 林仕君, 苏绍兴, 等. 光纤激光焊接铝合金离焦量对焊缝成形的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(12): 121405.

- [11] Ma X Y, Gong S L, Zhang J X, et al. Influence of the welding conditions on weld defects in double-sided laser beam welded T-joints of Ti-6Al-4V alloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(2): 0203006.

马旭颐, 巩水利, 张久兴, 等. 焊接参数对 Ti-6Al-4V 合金双侧同步激光焊接 T 型接头缺陷的影响[J]. *中国激光*, 2016, 43(2): 0203006.

- [12] Wang W J, Gong W T. Study on laser welding process and microstructure of 304 stainless steel [J]. *Applied Laser*, 2018, 38(2): 245-249.

王文军, 龚五堂. 304 不锈钢激光焊接工艺及微观组织研究[J]. *应用激光*, 2018, 38(2): 245-249.

- [13] Zhang Y C, Zhao Z X, Liu W, et al. Study on

welding parameter of Nd : YAG pulsed laser welding for thin aluminum alloy plate [J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45(9): 219-221, 226.

张亦弛, 赵占西, 刘文, 等. 铝合金薄板 Nd : YAG 脉冲激光焊焊接参数研究[J]. *热加工工艺*, 2016, 45(9): 219-221, 226.

- [14] Li Y Q, Meng C J, Wang X D, et al. Corrosion resistance property of 316L stainless steel welding joints treated by laser shock peening [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(6): 061402.

李玉琴, 孟长军, 王学德, 等. 激光冲击强化 316L 不锈钢焊接接头的耐腐蚀性能[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(6): 061402.

- [15] Li S C, Xu W, Wu Q P. Effect of filler wire on laser welding process [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 120005.

李时春, 许伟, 伍俏平. 填充焊丝对激光焊接过程的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(12): 120005.

- [16] Xie C J, Yang S L, Liu H B, et al. Microstructures and mechanical properties of 7050 ultrahigh-strength aluminum alloy joints by laser welding [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(3): 031403.

谢超杰, 杨尚磊, 刘浩博, 等. 7050 高强铝合金激光焊接接头的组织性能[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(3): 031403.