

高速列车用 6A01-T5 铝合金 MIG 焊接接头软化行为研究

毛镇东¹, 郑自芹², 李帅贞¹, 韩晓辉¹, 梁景恒², 徐智宝²

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111; 2. 中国兵器工业第五二研究所烟台分所有限责任公司, 山东 烟台 264003)

摘要:利用万能材料拉伸试验机、显微硬度计、金相显微镜、扫描电镜、透射电镜、能谱仪等设备研究了 6A01-T5 铝合金 MIG 焊接接头的微观组织与力学性能, 重点针对其软化行为进行了分析。结果表明, 焊缝心部为等轴晶的典型铸态组织, 靠近熔合线附近的焊缝为柱状晶组织。在距离两侧熔合线约 6 mm 处的热影响区均存在一软化区, 为焊接接头的最薄弱区。焊接接头抗拉强度 159 MPa, 断后伸长率 10.2%, 断裂位置为硬度最低的软化区。软化区受焊接热影响产生时效作用, Mg_2Si 析出相聚集长大是导致该区域硬度降低的主要因素。

关键词: 6A01-T5 铝合金; 焊接接头; 软化区; 显微组织; 析出相

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20191169

中图分类号: TG444⁺.74

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2021)1-0035-05

Softening Behavior of MIG Welded Joint of 6A01-T5 Aluminum Alloy for High-speed Trains

MAO Zhendong¹, ZHENG Ziqin², LI Shuaizhen¹, HAN Xiaohui¹,
LIANG Jingheng², XU Zhibao²

(1. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, China; 2. Yantai Branch of China North Industries Group Corporation No.52 Institute Co., Ltd., Yantai 264003, China)

Abstract: The microstructures and mechanical properties of metal inert gas (MIG) welded joints of 6A01-T5 aluminum alloy were investigated by tensile testing machine, micro-hardness tester, optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), transmission electron microscope (TEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS), its softening behavior was analyzed particularly. The results show that the microstructure of weld zone is a typical equiaxial as-cast microstructure, the columnar grains form near the fusion line. Softened regions exist in the two side of heat-affected zone (HAZ) 6 mm far away from fusion line which are the weakest zone of the welded joint. The tensile strength of the welded joint is 159 MPa, and the elongation after fracture is 10.2%. And the location of the fracture is the softened zone with lowest hardness. The softening zone is over-aged under the influence of welding heat, and the Mg_2Si precipitates grow, which is the main factor of hardness reduction in this area.

Key words: 6A01-T5 aluminum alloy; welded joint; softened zone; microstructure; precipitates

6A01 铝合金属于 Al-Mg-Si 热处理强化铝合金, 其凭借良好的焊接性能、耐蚀性、挤压成型性和中等强度等特点, 被广泛应用于轨道列车、航空航天及船舶等领域^[1-4]。目前, 熔化极惰性气体 (metal inert gas, MIG) 保护焊接仍是铝合金车体焊接中最为主要的方法^[5]。然而 MIG 焊接较高的热输入通常会导

致焊接接头软化现象, 通常焊接接头的抗拉强度仅能达到母材强度的 60% 左右, 不仅造成了母材强度利用率的损失, 还在一定程度上降低了焊接接头的安全服役性能^[1,4-6]。虽然, 近年来已有一些关于 6xxx 系铝合金焊接接头软化行为的研究^[1-2,4-7], 但研究多集中于 6005、6061 等应用成熟的进口铝合金材料, 对于国产 6A01-T5 铝合金 MIG 焊接接头软化行为的研究报道还较少。因此, 本文通过研究 6A01-T5 铝合金焊接接头组织与性能, 着重分析探讨了软化区的形成机理和影响因素, 对推进我国高速列车制造技术的发展和长期安全运行具有重要意义。

收稿日期: 2019-04-12

作者简介: 毛镇东 (1987-), 男, 浙江江山人, 硕士, 主要从事轨道车辆车体焊接制造技术及工艺研究; 电话: 17852619667;
E-mail: maozhendong2018@163.com

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验母材为 6A01 铝合金型材, 供货状态为 T5。采用直径为 1.2 mm 的进口 ER5356 焊丝进行 MIG 焊接。母材及焊丝化学成分如表 1 所示。

表 1 6A01 铝合金及焊丝化学成分(质量分数, %)
Tab.1 Chemical compositions of 6A01 aluminum alloy and filler metal (wt%)

材料	Mg	Si	Mn	Cr	Ti	Fe	Cu	Zn	Al
6A01 母材	0.4~0.80	0.40~0.90	≤0.50	≤0.30	≤0.10	≤0.35	≤0.35	≤0.25	余量
ER5356 焊丝	4.90	0.13	0.057	0.065	0.11	0.12	0.011	<0.13	余量

1.2 试验方法

采用 IGM 自动焊机进行 MIG 焊接, 焊接参数如表 2 所示。焊接接头示意图如图 1 所示, 拉伸试样为从焊接接头中间取料加工。焊接接头试样经机械磨抛后, 采用 Keller 腐蚀液(体积比, HF:HCL:HNO₃:H₂O=1:1.5:2.5:95) 腐蚀 60 s 后在金相显微镜(OM, AXIO Observer. A1m)下观察焊接接头不同区域微观组织形貌。试样经机械磨抛后直接在扫描电镜(SEM, Zeiss EVO 18)下观察第二相形态及分布, 并对第二相成分进行能谱 (energy dispersive spectroscopy, EDS) 分析。从试验料上切取 0.3 mm 厚薄片, 经机械减薄至 50 μm 后进行双喷减薄获得薄膜试样, 双喷液为 30% (体积分数) 硝酸 + 70% 甲醇, 在透射电镜(TEM, Hitachi H-800)下观察焊接接头不同区域析出相形貌, 工作电压 30 V。阳极覆膜试验中, 制膜液成分为 38 mL 98% (V/V) 硫酸 + 43 mL 85% (V/V) 磷酸 + 19 mL 水, 电压 25 V, 电流密度 0.5 A, 时间 2 min, 温度 25 ℃。采用 HVS-1000 型数显维氏硬度计对焊接接头横截面(图 1 中虚线)显微硬度分布进行测定, 载荷大小 100 g, 保荷时间 10 s。

表 2 主要焊接工艺参数
Tab.2 Main parameters of weld process

焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊丝直径 /mm	送丝速度 /(mm·s ⁻¹)	焊接速度 /(mm·min ⁻¹)	氩气流量 /(L·min ⁻¹)
180	20	1.2	8.2	400	14

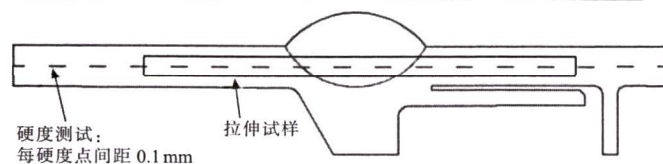


图 1 焊接接头示意图
Fig.1 Schematic of welded joint

在万能材料拉伸试验机进行拉伸试验, 拉伸速率 4 mm/min。在 SEM 下观察拉伸试样断口形貌。

2 试验结果与分析

2.1 焊接接头不同区域硬度分布

焊接接头的硬度分布曲线如图 2 所示。从图 2 中可见, 焊缝两侧硬度呈对称分布, 焊缝宽度约为 11 mm, 焊缝金属(weld metal, WM)硬度值约为 58 HV0.1, 随着远离熔合线, 硬度值先升高后降低, 约在距熔合线 6 mm 处的热影响区(heat affected zone, HAZ)硬度值降到最低, 约为 55 HV0.1, 说明在此处存在一个软化区, 之后硬度逐渐增加, 在距离熔合线约 10 mm 处硬度达到母材(base metal, BM)水平, 硬度约为 90 HV0.1。

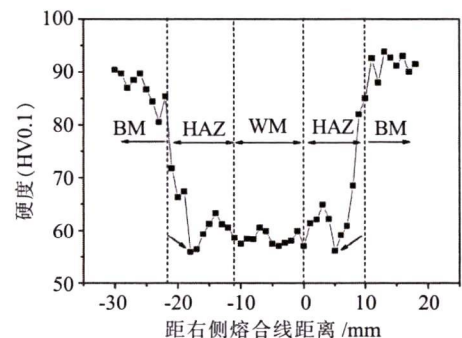


图 2 焊接接头硬度分布
Fig.2 Hardness distribution of welded joint

2.2 焊接接头的显微组织

6A01 铝合金焊接接头不同区域微观组织如图 3 所示。从图 3(a)可见, 焊缝金属为典型的急冷铸造组织, 由粗大的等轴晶和树枝晶组成。由于电弧焊接热输入大, 焊缝金属受高温作用时间长, 焊缝心部区域的冷却速度较慢, 导致焊缝组织变得较粗大。图 4 为焊缝区域阳极覆膜形貌, 可见, 由于焊缝区域冷速差别, 在靠近熔合线的焊缝区域为沿热扩散方向生长的典型柱状晶组织, 细长晶粒垂直于熔合线(图 3(b)), 焊缝心部区域为等轴晶。图 3(c)和图 3(d)分别为软化区和母材的微观组织形貌, 可见, 二者均为典型的再结晶组织, 其上弥散分布着大量条状第二相颗粒, 与母材相比, 软化区晶粒未发生明显长大。

母材及软化区中第二相的形态、大小、分布及成分结果如图 5、6 所示。第二相颗粒的形成, 消耗了大量用于形成强化相的溶质原子, 因此, 第二相的存在将间接影响材料强化水平。从图 5 可见, 母材与软化区中的第二相形态、大小和分布均无明显差别。通过

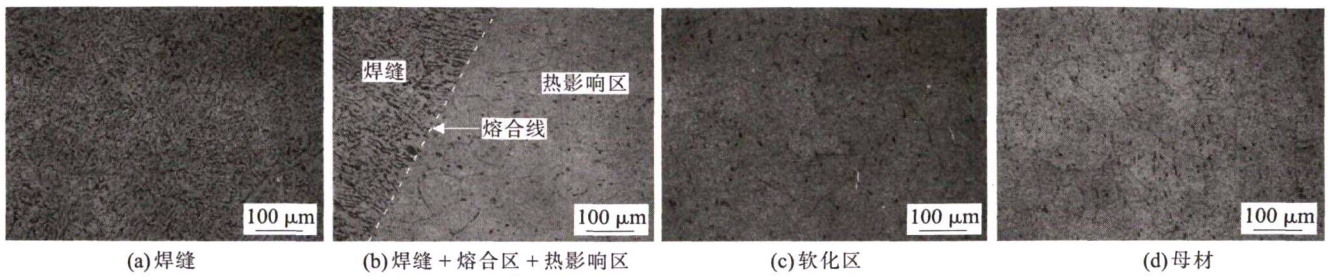


图 3 6A01 铝合金焊接接头显微组织形貌

Fig.3 Microstructures of welded joint of 6A01 aluminum alloy



图 4 焊缝区域阳极覆膜形貌

Fig.4 Micrograph of anodic film mulching of weld metal

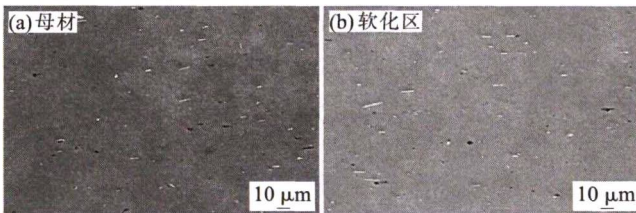


图 5 第二相分布

Fig.5 Distribution of second-phase

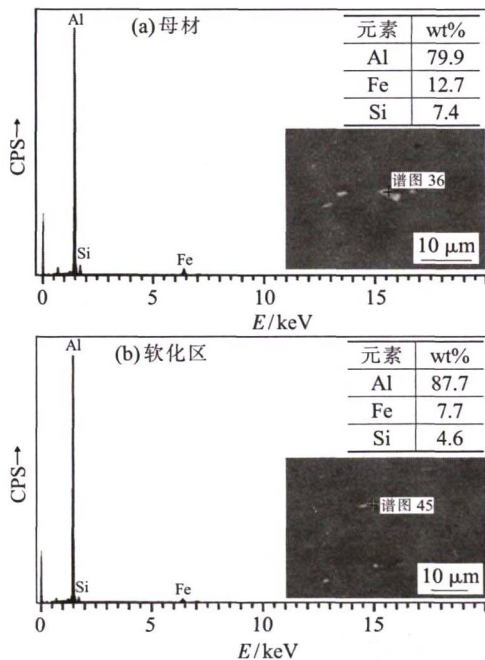


图 6 第二相成分

Fig.6 Chemical composition of second-phase

对第二相颗粒进行 EDS 分析发现,这些弥散分布的第二相均为 AlFeSi 相。这与另一种 Al-Mg-Si 合金的研究结果相同^[8]。以上结果表明,尽管受焊接热循环作用,在焊接热影响区形成了硬度较低的软化区,

但软化区中的第二相并未发生明显变化。

焊接接头不同区域 TEM 显微照片如图 7 所示。可见,在母材晶粒中分布着较多的针状或棒状 β'' 相以及 β' 相,密度较大,该析出相与基体之间为完全共格或半完全共格关系,这将产生较大的晶格畸变作用导致母材金属硬度提高。软化区中析出相大小较母材相比明显长大(长轴直径:20 nm→300 nm),数量减少,密度降低。

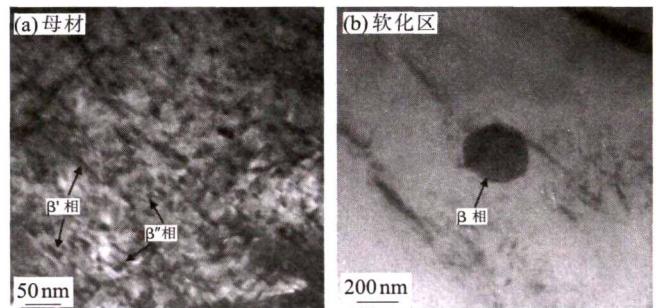


图 7 焊接接头透射显微照片

Fig.7 TEM images of welded joint

2.3 焊接接头的力学性能

6A01 铝合金母材及焊接接头力学性能如表 3 所示。母材抗拉强度为 265 MPa,焊接接头的抗拉强度为 159 MPa,达到母材的 60%,焊接接头伸长率与母材相当,均为 10%左右。焊接接头拉伸断裂试样宏观形貌如图 8 所示,试样断裂位置位于距离熔合线约 7 mm 处热影响区,与硬度测试中软化区位置相符。铝合金中这些力学性能变化的相似性也说明了其抗拉强度与硬度之间的联系。

表 3 6A01 铝合金母材及焊接接头力学性能

Tab.3 Mechanical properties of 6A01 aluminum alloy and its weld joints

材料	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ (%)	断裂位置
6A01 母材	265	239	9.8	—
6A01 焊接接头	159	102	10.2	热影响区

焊接接头与母材相比,抗拉强度与硬度降低百分比分别为:

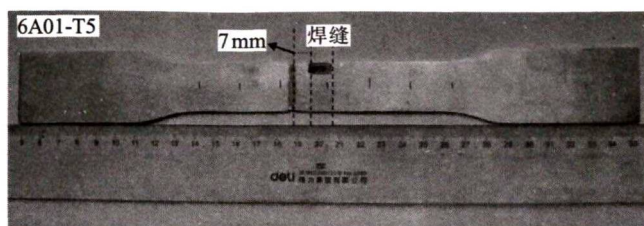


图8 6A01 铝合金焊接接头拉伸断裂试样
Fig.8 Tensile sample of welded joint of 6A01 aluminum alloy after fracture

$$\begin{aligned} \% \text{reduction-}\sigma_b &= \frac{\sigma_b(\text{母材}) - \sigma_b(\text{接头})}{\sigma_b(\text{母材})} \times 100\% \\ &= \frac{265 - 159}{265} \times 100\% = 40.0\% \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \% \text{reduction-HV} &= \frac{HV(\text{母材}) - HV(\text{接头})}{HV(\text{母材})} \times 100\% \\ &= \frac{90 - 55}{90} \times 100\% = 38.9\% \end{aligned} \quad (2)$$

图9为6A01 铝合金母材及焊接接头拉伸试样断口形貌。可见,对于母材拉伸试样,其断口特征为表面伴有较浅韧窝的延性沿晶断口(图9(a)),说明断裂脆性较大。而焊接试样拉伸断口为典型的韧窝状断口(图9(b)),韧窝大而深,在韧窝底部存在大量第二相颗粒(图9(b)中箭头所指),这些第二相粒子容易作为裂纹源导致焊接接头伸长率下降^[9]。从断口中可以看到,焊接试样塑性要明显优于母材,然而由于焊接接头抗拉强度较低,在软化区域优先产生塑性变形导致缩颈,在拉伸试样其他部位未完全发生

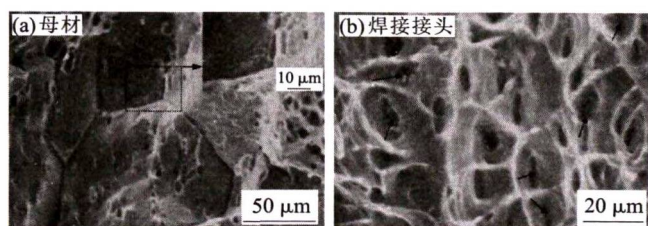
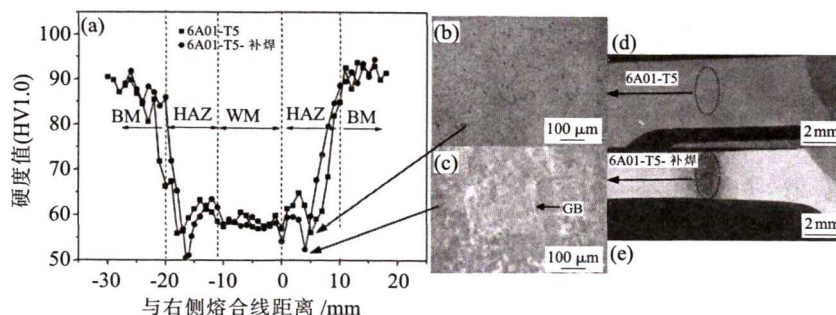


图9 焊接接头拉伸断口形貌
Fig.9 Fracture morphology of tensile sample of welded joint



(a) 硬度分布; (b) 原焊接热影响区; (c) 补焊热影响区; (d) 原焊接接头宏观形貌; (e) 补焊接头宏观形貌

图10 原焊接接头与补焊试样的硬度分布及宏观与微观组织形貌
Fig.10 Hardness distribution and macro morphology & microstructures of original welded joint and repairing welded specimen

均匀变形前就率先开裂断裂。这一结果同另一种A6N01 铝合金 MIG 焊接力学性能的研究结果相似^[9]。

3 讨论

6xxx 系铝合金经固溶淬火后人工时效析出序列一般为: α' (过饱和固溶体) $\rightarrow$ GP $\rightarrow \beta'' \rightarrow \beta' \rightarrow \beta$, 其中, 铝合金中的主要强化相为与 $\alpha(\text{Al})$ 基体完全共格关系的 β'' 相以及半共格关系的 β' 相, 而与 $\alpha(\text{Al})$ 基体完全非共格关系的平衡态 β 相由于晶格畸变最小已基本不具有强化效果^[10]。如图7所示, 在焊接过程中, 焊接热迅速扩散到热影响区中, 导致基体中起主要强化作用的 β'' 相以及 β' 相脱溶析出转变为平衡 β 相 (Mg_2Si), 在焊接热的作用下 Mg_2Si 不断聚集长大, 使该区域强度和硬度进一步降低^{[4][11]}。

通过对上述试验结果的分析认为, 纵观整个焊接接头硬度分布曲线, 接头最薄弱区在热影响区中的软化区, 通过对比母材与软化区的微观组织未发现明显区别(图3), 母材与软化区中第二相形态、大小、分布以及成分也未发现明显区别(图5、6)。因此, 认为受焊接热循环作用发生过时效, 析出相聚集长大是导致该区域硬度降低的主要原因(图7)。

为进一步验证以上结论, 将焊接接头焊缝熔池金属挖出进行一次补焊, 考察二次焊接热输入对软化区组织及硬度的影响, 结果如图10所示。可见, 补焊试样与原焊接接头相比软化区硬度进一步降低, 受焊接热影响晶粒发生些微长大, 软化区中析出相进一步聚集粗化使组织更易被腐蚀, 晶界 (grain boundary, GB) 受腐蚀较浅, 这可能与在晶界附近发生 Mg、Si 共晶偏聚有关^[6]。这进一步说明, 焊接热循环作用是导致焊接接头软化区硬度降低的主要原因。对于整个焊接接头, 在靠近焊缝金属一侧的热影响区中, 由于受焊接热较高, 基体中原有的析出相全

部发生了溶解,冷却后形成了较大的过饱和度,所以在焊后的时效过程中会析出一定量的团簇,使得硬度要高于软化区一些;而靠近母材的热影响区中,由于受焊接热影响作用较弱,基体中原有的析出相发生了部分溶解或粗化,导致硬度低于母材水平^[4,8]。

4 结论

(1) 由于焊缝区域冷速差别,6A01-T5 铝合金 MIG 焊接接头焊缝中心为等轴晶铸态组织,靠近熔合线附近的焊缝金属为柱状晶组织,受焊接循环影响热影响区硬度降低,但该区域晶粒未发生明显粗化。

(2) 6A01-T5 铝合金焊缝硬度值约为 58HV0.1,距离焊缝两侧熔合线约 6mm 处的热影响区均存在硬度软化区,软化区硬度值约为 55HV0.1,母材硬度约为 90HV0.1,热影响区宽度约为 10mm。

(3) 6A01-T5 铝合金 MIG 焊接接头抗拉强度为 159MPa,达到母材强度的 60%。焊接接头断裂位置为硬度软化区。

(4) 软化区微观组织及第二相与母材相比均未发生明显变化,软化区的形成主要是受焊接热循环的影响发生过时效导致析出相聚集长大造成的。建议在保证焊接质量的前提下,尽量减少焊接热输入以降低软化程度。

参考文献:

- [1] 吕晓春,雷振,张健,等. 高速列车 6005A-T6 铝合金焊接接头软化分析[J]. 焊接学报,2014,35(8):25-29.
- [2] Yan Shaohua, Chen Hui, Zhu Zongtao, et al. Hybrid laser-metal inert gas welding of Al-Mg-Si alloy joints: Microstructure and mechanical properties[J]. Materials and Design, 2014, 61: 160-167.
- [3] 王立夫,唐衡彬,王金山,等. 轨道车辆用铝合金焊接缺陷分析[J]. 焊接技术,2012,41(10):14-17.
- [4] 杨尚磊,林庆琳. A6N01 铝合金焊接接头的微观组织与力学性能[J]. 中国有色金属学报,2012,22(10):2720-2725.
- [5] 刘建,沈正超,何长树. 国产 A6N01 铝合金型材 MIG 焊接头的微观组织与力学性能 [J]. 材料与冶金学报,2014,13(3):181-185.
- [6] Nie Fuheng, Dong Honggang, Chen Su, et al. Microstructure and mechanical properties of pulse MIG welded 6061/A356 aluminum alloy dissimilar butt joints [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34: 551-560.
- [7] Javier A, Vargas Jaime E, Torres Jovanny A, et al. Analysis of heat input effect on the mechanical properties of Al-6061-T6 alloy weld joints[J]. Materials and Design, 2013, 52: 556-564.
- [8] 朱东晖. 6xxx 系铝合金焊接接头热影响区的微观组织与力学性能[D]. 长沙:湖南大学,2015:53-54.
- [9] 朱东晖,陈江华,刘春辉,等. 焊后热处理对 Al-Mg-Si-Cu 合金激光焊接接头微观结构和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报,2015,25(9):2342-2349.
- [10] 丁科,李炜,毕娟娟,等. 铝合金中 Mg₂Si 相的时效析出过程[J]. 特种铸造及有色合金,2009,29(12):1160-1164.
- [11] 尹志民,张爱琼,王炎金. 6005A 铝合金型材焊接接头组织与性能[J]. 轻合金加工技术,2001(1):32-34. 

(上接第 34 页)

- [4] 张瑄琚,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,2016,36(3):321-325.
- [5] 陈玉华,柯黎明,徐世龙,等. 超薄不锈钢片微激光焊接的焊缝成形[J]. 金属热处理,2008,33(10):95-98.
- [6] 景财年,倪晓梅,范吉超,等. 激光焊接工艺对 TRIP590 钢焊接接头组织性能的影响 [J]. 材料热处理学报,2014,35(6):96-101.
- [7] Hao K, Li G, Gao M, et al. Weld formation mechanism of fiber laser oscillating welding of austenitic stainless steel [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 225: 77-83.
- [8] Alcock J A, Baufeld B. Diode laser welding of stainless steel 304L [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 240: 138-144.
- [9] 杨立军,孙贵铮,王金杰,等. A304 不锈钢薄板激光焊工艺试验研究[J]. 电焊机,2011,41(1):66-69.
- [10] 姜泽东,陈保国,史维琴. 304 不锈钢薄板脉冲激光焊焊接热

过程数值分析[J]. 热加工工艺,2011,40(13):148-150.

- [11] Mousavi S A A, Gharedaghi A, Mastoori M. Metallurgical investigations of laser welding of AISI 304 stainless steel [J]. Materials Science Forum, 2008, 580-582:41-44.
- [12] 陈英杰,朱加雷,焦向东. 304 不锈钢激光搭接焊接头的组织及力学性能[J]. 电焊机,2017,47(2):76-79.
- [13] Zhang L, Lu J Z, Luo K Y, et al. Residual stress, micro-hardness and tensile properties of ANSI 304 stainless steel thick sheet by fiber laser welding [J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 561: 136-144.
- [14] Yan J, Gao M, Zeng X. 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.
- [15] Anawa E M, Olabi A G. Using Taguchi method to optimize welding pool of dissimilar laser-welded components[J]. Optics and Laser Technology, 2008, 40(2):379-388. 