

T91 马氏体耐热钢激光填丝焊工艺

祁小勇^{1,2}, 叶兵^{1,2}, 余世文^{1,2}, 喻亮^{1,2}

(1. 激光先进制造技术湖北省重点实验室, 武汉 430223; 2. 武汉华工激光工程有限责任公司, 武汉 430223)

摘要: 对 5 mm 厚 T91 马氏体耐热钢板激光填丝焊工艺进行研究, 分析了热输入对焊缝成型、微观组织、内部气孔数量的影响规律, 并对最佳参数焊缝的力学性能进行了检测。结果表明, 采用同质焊丝焊接 T91 钢时, 随着热输入的增加, 焊缝宽度变大, 焊缝内部气孔数量减少, 晶粒度变化不明显, 焊缝区与热影响区组织均为回火马氏体; 采用功率 5 600 W、速度 1.2 m/min、送丝速度 1.2 m/min 的参数焊接可获得内部基本无气孔的焊缝, 焊缝显微硬度 300 HV, 抗拉强度 697 Mpa, 断裂在母材, 180°正弯与背弯曲均未出现裂纹, 20, 0, -20 °C 下冲击性能均高于母材。

关键词: 激光填丝焊; T91 马氏体耐热钢; 微观组织; 气孔; 力学性能

中图分类号: TG 456.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.201940

0 序 言

T91 钢^[1-4]是改进型的 9Cr1Mo 钢, 是一种新型耐热合金, 它在原 9Cr1Mo 钢的基础上添加少量微量 Nb, V, N 等, 热处理工艺为正火加高温回火, 正火温度不低于 1 040 °C, 回火温度不低于 730 °C, 组织为回火马氏体, 既具有低碳板条马氏体的高强度又因高温回火形成亚稳态多变化结构, 热强度和热稳定性优异, 可在 A1 相变点以下高温长时间服役, 广泛应用于蒸汽锅炉、原子能工业、石油工业的高温环境下工作的管道、部件等。

T91 钢中铬含量为 9%, 钼含量为 1%, 还有铌、钒等, 合金元素含量较高, 且铬、钼、钒为强碳化物形成元素, 焊缝组织为马氏体, 淬硬倾向大, T91 钢焊接极易产生冷裂纹。目前 T91 钢常采用氩弧焊或焊条电弧焊^[5-6]进行焊接, 由于焊缝金属合金含量较高, 熔池流动性不好, 所以需严格控制焊接热输入, 对焊接手法要求很高。

激光填丝焊^[7]作为激光焊接技术的一种, 继承了激光焊能量密度高、深宽比大、焊后变形小等优点, 且它对焊件装配间隙的敏感度降低, 可实现较小功率焊接较厚较大焊件, 因此激光填丝焊有着广阔的应用的前景。魏菁, 王欢^[8]等人采用 10 000 W 光纤激光器对 8 mm 10CrSiNiCu 船用高强钢进行激光填丝焊工艺研究, 添加 ER50-6 焊丝, 研究了热输出

对焊缝质量的影响, 获得了成型良好的焊缝, 拉伸试验断裂在母材, 冲击性能与母材相当, 但焊缝弯曲性能较母材差。目前国内外很多学者已经采用激光填丝焊工艺对各种材料进行焊接, 不仅在中薄板焊接^[9-15]取得一定成果, 在厚板焊接^[16-19]也取得较大突破。

但因 T91 马氏体耐热钢的特殊性, 其对焊缝质量要求更高, 故采用激光填丝焊焊接 T91 马氏体耐热钢的研究鲜有报道。本文采用光纤激光填丝焊接 T91 马氏体耐热钢, 添加同质焊丝, 探究激光填丝焊热输入对 T91 钢焊缝组织及内部气孔数量的影响, 以获取内部质量优异的焊缝, 并对较优参数下获得的焊缝进行力学性能的分析。

1 试验方法

1.1 试验设备

试验采用多功能激光焊接平台, 如图 1 所示, 平台配备 10 000 W IPG 光纤激光器(波长 1 080 nm)、光纤芯径 200 μm; 焊接头为 Precitec YW52 型焊接头, 聚焦光斑 0.5 mm; 送丝机构采用奥地利 Fronius 推拉丝送丝机; 运动机构为 KUKA 60HA 机器人。

1.2 试验材料

试验采用 5 mm 厚 T91 马氏体耐热钢板料, 微观组织为板条马氏体, 晶粒度 11.5 级, 如图 2 所示, 成分如表 1 所示, 抗拉强度 700 MPa, 屈服强度 540 MPa, 延伸率 20%。激光填丝焊采用同材质材料拉拔焊丝、焊丝直径 1.0 mm。

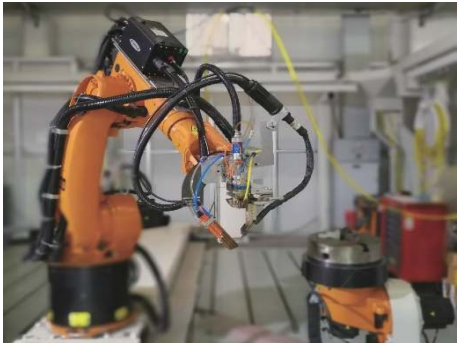


图 1 试验设备
Fig. 1 Experimental installation

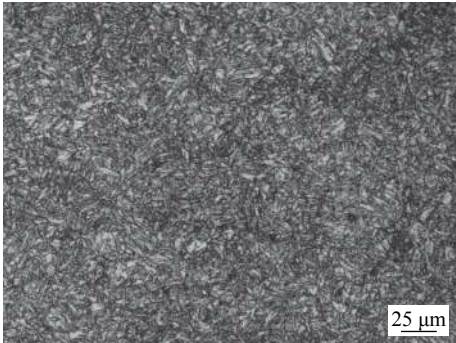


图 2 母材微观组织
Fig. 2 Microstructure of base metal

表 1 T91 马氏体耐热钢化学成分 (质量分数, %)
Table 1 Chemical component of T91

元素	Cr	Mo	V	Nb	N	Ni	Si	C	Mn	P	S	Fe
	8~9.5	0.85~1.05	0.18~0.25	0.06~0.1	0.03~0.07	≤0.04	0.2~0.4	0.08~0.12	0.30~0.60	≤0.02	≤0.01	余量

1.3 试验方法

1.3.1 焊接方法

将 5 mm 厚 T91 板材加工为 100 mm × 100 mm 标准试板,采用激光清洗的方式去除板材表面油污等杂质,然后用丙酮清洗以进一步去除其表面残留杂质.将清理好的板材装夹在拼焊夹具上,并检查拼缝质量,使得拼缝间隙小于 0.1 mm,错边量小于 0.1 mm.调整焊接头工作距离,保持离焦量为 2 mm,采用表 2 中的焊接参数分别进行激光填丝焊接,然后对三组试板进行热处理,热处理工艺为 730 ℃ 保温 90 分钟后空冷,对热处理后的焊缝进行 RT 检测,分析焊缝内部气孔状态、微观组织,最后对气孔状态最佳的焊缝进行力学性能检测.

表 2 焊接参数
Table 2 Welding parameters

序号	功率 <i>P</i> /W	焊接速度 <i>vw</i> (mm/s)	送丝速度 <i>vf</i> (m/min)	线能量 <i>E</i> (kJ/cm)
1	5 600	20	1.2	2.8
2	6 000	25	1.5	2.4
3	6 400	30	1.8	2.13

1.3.2 检测方法

将金相试样镶嵌后磨抛,采用苦味酸盐酸水溶液进行腐蚀,在 USB 便携式电子显微镜下对焊缝截面形貌进行观察;采用金相显微镜分析焊缝各区域组织形态,并用显微硬度计测量各区域显微硬度;将焊缝余高去除后采用电子万能试验机对拉伸试样进行拉伸试验,测量焊缝抗拉强度,并采用弯

曲试验机测试焊缝弯曲性能;采用摆锤式冲击试验机,分别在温度 *T* 为 20, 0, -20 ℃ 下进行冲击试验,非标试样尺寸为 55 mm × 10 mm × 2.5 mm(试样厚度由 5 mm 磨削至 2.5 mm),分别在母材/焊缝/热影响区位置开 V 型缺口,测量冲击吸收能.

2 试验结果与分析

2.1 激光填丝焊焊缝宏观形貌及微观组织

试验过程中对焊缝正反采用 Ar 保护,三组参数均可以获得成型良好的焊缝,如图 3 所示,焊缝表面纹路均匀,无微裂纹、气孔等不良缺陷.

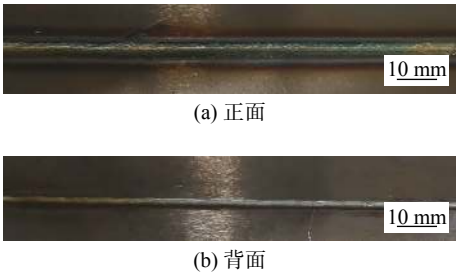


图 3 焊缝外观形貌
Fig. 3 Weld appearance

图 4 为不同热输入下焊缝截面低倍形貌,当线能量由 2.8 kJ/cm 降低到 2.13 kJ/cm 时,焊缝表面宽度由 4 mm 降低到 3.2 mm,焊缝中部宽度由 1.4 mm 降低到 0.9 mm,焊缝表面塌陷有轻微改善,背面凸起减小.主要是因为线能量降低时,焊缝熔池受热作用时间减短,熔化母材面积减少,熔宽变窄,

同时熔池在高温下停留时间减短,熔池受重力及金属蒸汽压的作用向下流淌的现象减缓,因而背面凸

起减小。但三组参数整体成型均较好,上表面无明显塌陷,截面呈典型钉子头形貌。

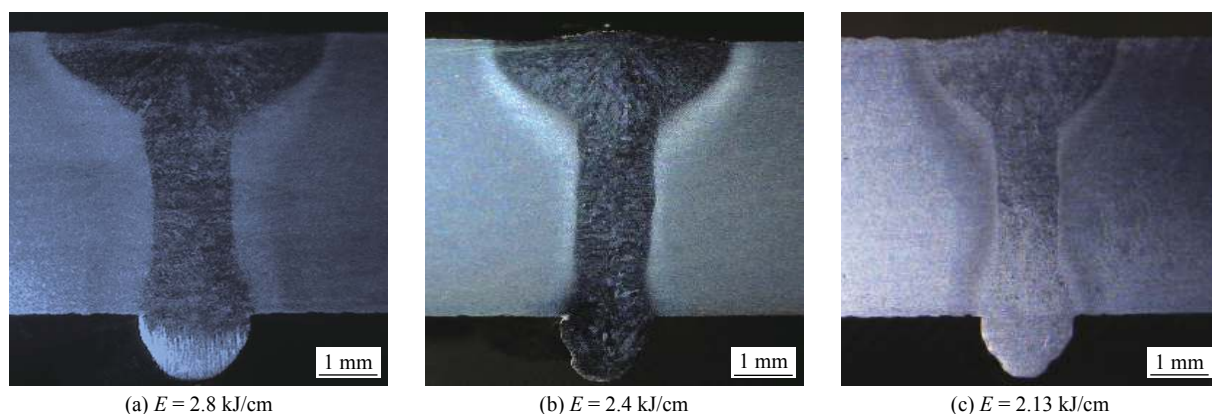


图 4 焊缝截面形貌

Fig. 4 Weld section morphology

图 5 为接头低倍下各区域的分布图,从左往右依次为焊缝区 (WZ)、热影响区 (HAZ)、母材区 (BM)。图 6 为不同热输入下接头各区域微观组织,焊缝、热影响均为回火马氏体组织,焊缝区晶粒较热影响区与母材区粗大一些,热影响区晶粒度与母材相当,达到 11 级,焊缝区晶粒度为 8 级。随着焊接热输入的变化,焊缝晶粒尺寸未见明显变化,说明合适的激光参数焊接 T91 钢时,不会带来明显的晶粒长大现象,焊缝区组织均匀细小。



图 5 接头各区域分布图

Fig. 5 Regional distribution of the weld section

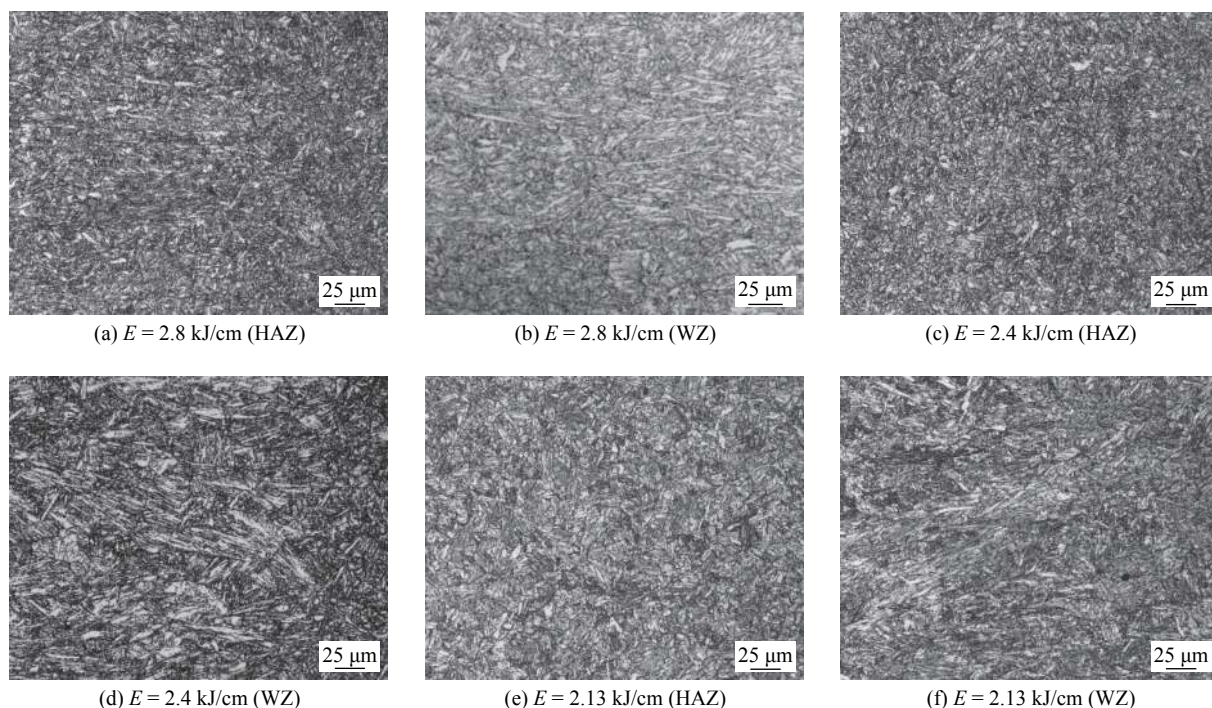


图 6 不同热输入下接头焊缝与热影响区微观组织

Fig. 6 Microstructure of HAZ and WZ at different weld heat input

2.2 激光焊参数对内部气孔的影响

激光深熔焊时功率输入远大于热传导、对流及辐射散热的速率,材料表面发生汽化而形成小孔,孔内金属蒸汽压力与四周液体的静力和表面张力形成动态平衡,激光可以通过孔中直射到孔底,这种现象称为小孔效应。小孔能将射入的激光能量完全吸收,使包围着这个孔腔的金属熔化,孔壁外液体的流动和壁层的表面张力与孔腔内连续产生的蒸汽压力相持并保持动态平衡,光束携带着大量的光能不断地进入小孔,小孔外材料在连续流动,随着光束向前移动,小孔始终处于流动的稳定状态,小孔随着前导光束向前移动后,熔融的金属填充小孔移开后所留下的空腔并随之冷凝成焊缝,完成焊接过程。而当激光入射能量或其他原因导致小孔效应失稳,会使得运动的小孔被剪断在焊缝内部,故而形成工艺性气孔。

图 7 为不同热输出下焊缝 X 射线探伤结果,当 $E = 2.8 \text{ kJ/cm}$ 时,焊缝内部基本无气孔,随着热输入的降低,焊缝内部气孔逐渐增多。激光深熔焊气孔主要分为工艺性气孔与氢气孔,而各组参数的试验条件相同,焊缝内部的气孔差异主要为工艺性气孔。因为当线能量降低时,激光能量输入降低,加之焊丝熔化需消耗部分能量,导致小孔吸收的激光能量降低,小孔效应失稳,焊缝熔透率降低,残留在焊缝内部的由小孔被剪断产生的气孔数量增加。同时,线能量降低时,焊缝宽度变窄,小孔效应的通道变窄,也会导致焊缝内部残留较多工艺性气孔。

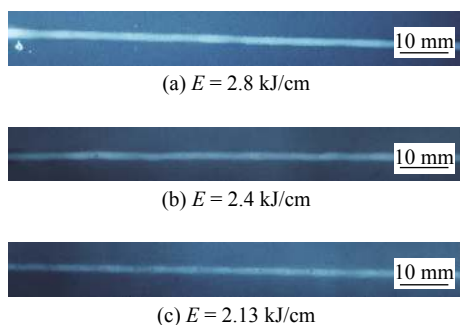


图 7 不同热输入下的焊缝 X 射线探伤结果
Fig. 7 Result of RT at different weld heat input

2.3 激光填丝焊缝力学性能

在不同热输入下,激光焊缝的微观组织差别不大,而当采用 $E = 2.8 \text{ kJ/cm}$ 的激光参数焊接时,焊缝基本无气孔,达到 ISO13919 I 级焊缝,因此仅对该组参数下的焊缝力学性能进行分析,以评估激光

焊接 T91 钢焊缝的力学性能。

2.3.1 焊缝显微硬度

图 8 为 $E = 2.8 \text{ kJ/cm}$ 时激光填丝焊缝上、中、下区域显微硬度 H 对距离焊缝中心距离 S 的分布,从图中可以看出,焊缝与热影响区硬度均高于母材,因焊缝宽度差异使得高硬度区宽度存在差异,上中下三个区域的硬度分布趋势及各区域硬度值基本相同,焊缝区 290 HV,热影响区平均 240 HV,母材区 200 HV,也说明了尽管采用焊后高温回火的热处理方法,也无法获得与母材硬度相当的焊缝组织。

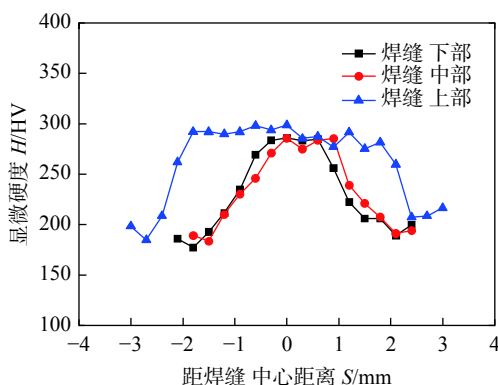


图 8 焊缝各区域显微硬度分布
Fig. 8 The microhardness distribution at different position of the weld section

2.3.2 焊缝力学性能

拉伸试验结果如表 3、图 9 所示,抗拉强度 697 MPa,屈服强度 545 MPa,延伸率 17%,试样断裂在母材,焊缝抗拉强度、屈服强度均与母材相当,但延伸率略低于母材。因为激光焊接后,虽然采用回火方式提升焊缝塑性,但焊缝硬度仍无法降低到母材水平,虽然焊缝强度与母材相当,但延伸率较母材低。

表 3 拉伸试验结果
Table 3 Result of tensile test

编号	抗拉强度 R_m (MPa)	屈服强度 $R_{p0.2}$ (MPa)	延伸率 δ (%)	断裂位置
1	695	545	17	母材
2	697	550	15	母材



图 9 拉伸试样断裂示意图
Fig. 9 Tensile sample fracture morphology

T91 激光焊试样弯曲结果如图 10 所示,对试样进行 180°正弯与背弯,弯曲半径为 15 mm,均为发现裂纹。虽然焊缝拉伸试验结果表面其延伸率较母材有所降低,焊缝塑性有所降低,但弯曲试验结果表明 T91 钢激光焊缝仍具有良好的塑性。

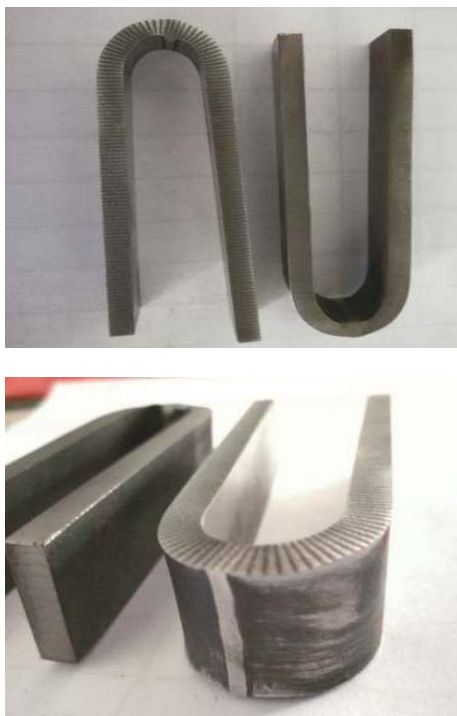


图 10 180°弯曲后试样形貌

Fig. 10 180 °C bending sample morphology

表 4 为焊缝接头分别在 20, 0, -20 °C 下的冲击试验结果,可以看出,在三个温度梯度下,热影响区与焊缝的冲击吸收能量均大于母材,即冲击性能优于母材。

表 4 20, 0, -20 °C 下接头各区域冲击试验结果
Table 4 Impact test results of different area at 20/0/-20 °C

编号	缺口位置	测试温度 $T(^{\circ}\text{C})$	冲击吸收能量 $K_{V2}(\text{J})$
1	BM	20	24
2	HAZ	20	26
3	WS	20	28
4	BM	0	26
5	HAZ	0	29
6	WS	0	25
7	BM	-20	23
8	HAZ	-20	31
9	WS	-20	28

从上述检测结果可以看出,采用激光填丝焊接

T91 马氏体耐热钢,可以获得基本无气孔的优质焊缝,且焊缝强度,弯曲性能、冲击性能均达到母材水平。

3 结 论

(1) 采用激光填丝焊接 5 mm T91 马氏体耐热钢,添加同种材质焊丝,当焊接热输入增加时,焊缝变宽,焊缝区晶粒度基本不变,焊缝内部气孔减少;

(2) 焊缝与热影响区组织为回火马氏体,焊缝区晶粒度 8 级,热影响区晶粒度 11 级,与母材相当;

(3) 当采用功率 5 600 W,速度 1.2 m/min,送丝速度 1.2 m/min 的参数进行焊接时,可获得基本无气孔的优质焊缝,其显微硬度达 300 HV,抗拉强度与母材相当,180°正弯曲与背弯曲均不开裂,20, 0, -20 °C 下冲击功均高度母材。

参考文献

- [1] 刘晨曦. 新型高 Cr 铁素体耐热钢的相变行为研究 [D]. 天津大学, 2012.
- [2] 束国刚. T/P91 钢国产化工艺组织和性能改进的研究与应用 [D]. 武汉大学, 2004.
- [3] 唐燕玲, 王志红. 采用国产焊接材料 (KJ 系列) 焊接 P91 钢的工艺研究 [J]. 电力建设, 2007, 28(6): 77 - 80.
Tang Yanling, Wang Zhihong. Research on P91 steel welding process using domestic (KJ series) welding materials [J]. Electric Power Construction, 2007, 28(6): 77 - 80.
- [4] Chen S, Tang H, Zhao P. A two-step transient liquid phase diffusion bonding process of T91 steels [J]. China Welding, 2017, 26(2): 52 - 57.
- [5] 郑中甫, 陈 泉. 工艺参数及焊接材料对 T91/P91 钢焊缝性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2006, 35(15): 41 - 43.
Zheng Zhongfu, Chen Quan. Influence of technological parameter and welding consumable on weld performance of T91/P91 steel [J]. Hot Working Technology, 2006, 35(15): 41 - 43.
- [6] 何 秀, 曾志超, 王若蒙, 等. T91/P91 钢配套焊条 CHH717 的研制 [J]. 焊接, 2009(12): 43 - 46.
He Xiu, Zeng Zhichao, Wang Ruomeng, et al. Development of matching electrode CHH717 to T91/P91 steel [J]. Welding & Joining, 2009(12): 43 - 46.
- [7] 刘红兵, 陶 汪, 陈 洁, 等. 激光填丝焊焊丝熔入行为特征 [J]. 焊接学报, 2013, 34(11): 73 - 77.
Liu Hongbing, Tao Wang, Chen Jie, et al. Filler wire melting dynamics during laser beam welding with filler wire [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(11): 73 - 77.

- [8] 魏 菁, 王 欢, 石少坚, 等. 10CrSiNiCu 船用高强度钢光纤激光焊接接头组织和性能 [J]. 中国激光, 2016, 43(3): 44 – 51.
Wei Jing, Wang Huan, Shi Shaojian, *et al.* Microstructure and properties of fiber laser wire welded joints of 10CrSiNiCu high strength shipbuilding steel[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(3): 44 – 51.
- [9] 王文政, 张永康, 姜福银, 等. 20 钢光纤激光填丝焊工艺与焊缝组织的研究 [J]. 热加工工艺, 2013, 42(19): 26 – 32.
Wang Wenzheng, Zhang Yongkang, Jiang Fuyin, *et al.* Study on fiber laser wire filling welding process and weld microstructure of 20 steel[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(19): 26 – 32.
- [10] 吴世凯, 杨武雄, 肖荣诗, 等. 电站锅炉用 HR3C 新型奥氏体耐热钢的激光焊接 [J]. 焊接学报, 2008, 29(6): 93 – 96.
Wu Shikai, Yang Wuxiong, Xiao Rongshi, *et al.* Laser welding of new type austenite heat-resistant steel HR3C for ultra-supercritical boilers[J]. Transactions of The China Welding institution, 2008, 29(6): 93 – 96.
- [11] 王振国, 王春明, 王 军, 等. 间隙对 5754 铝合金激光填丝焊气孔的影响 [J]. 中国激光, 2012, 39(12): 49 – 54.
Wang Zhenguo, Wang Chunming, Wang Jun, *et al.* Effects of gap on porosity during laser lap welding with filler wire of Al 5754 sheets[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(12): 49 – 54.
- [12] 王金凤, 孙 乔. 激光填丝焊接超薄不锈钢工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2014, 43(3): 211 – 216.
Wang Jinfeng, Sun Qiao. Research on laser filler welding process for ultra-thin stainless steel sheet[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(3): 211 – 216.
- [13] 黄 宇, 冯爱新, 罗敬文, 等. TC4 钛合金激光填丝焊工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2016, 45(19): 23 – 30.
Huang Yu, Feng Aixun, Luo Jingwen, *et al.* Research on laser filler wire welding process of TC4 titanium alloy[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(19): 23 – 30.
- [14] Y.W.Park, J. Yu, S.Rhee A study on the weld characteristics of 5182 aluminum alloy by Nd: YAG laser welding with filler wire for car bodies[J]. International Journal of Automotive Technology, 2010, 11(5): 729 – 736.
- [15] 杨雨禾, 雷正龙, 黎炳蔚, 等. D406A 超高强度钢激光-TIG 复合填丝焊接气孔特性分析 [J]. 焊接学报, 2017, 38(12): 114 – 118.
Yang Yuhe, Lei Zhenglong, Li Bingwei, *et al.* Analysis of porosity characteristics using laser-TIG hybrid wire filling weld D406A[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2017, 38(12): 114 – 118.
- [16] 吴世凯, 肖荣诗. 大厚度不锈钢板激光填丝焊 [J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2422 – 2425.
Wu Shikai, Xiao Rongshi. Laser welding of heavy section stainless steel plants[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(9): 2422 – 2425.
- [17] 徐国建, 钟丽明, 杭争翔, 等. SUS304 不锈钢窄间隙激光填丝焊性能 [J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1003001–1 – 6.
Xu Guojian, Zhong Liming, Hang Zhengxiang, *et al.* Performance of narrow gap laser welding with filling wire for SUS304 stainless steel[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(10): 1003001–1 – 6.
- [18] 张 波, 黄 坚, 孙志远, 等. 40mm 高强度窄间隙激光填丝焊接接头组织与性能 [J]. 热加工工艺, 2016, 45(17): 70 – 73.
Zhang Bo, Huang Jian, Sun Zhiyuan, *et al.* Microstructures and properties of narrow-gap multi-pass high strength thick plate steel joint by fiber laser welding with filler wire[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(17): 70 – 73.
- [19] 赵 勇, 黄 坚, 吴毅熊, 等. 50 mm 转子钢超窄间隙激光填丝焊接接头组织与性能 [J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0203007–1 – 7.
Zhao Yong, Huang Jian, Wu Yixiong, *et al.* Microstructures and properties of ultra-narrow-gap multi-pass welded joint of 50 mm turbine rotor steel by laser welding with filler wire[J]. Chinese journal of lasers, 2015, 42(2): 0203007–1 – 7.

第一作者简介: 祁小勇, 男, 1987 年出生, 工程师, 从事激光加工技术研究及其工程应用. 发表论文 3 篇. Email: qxy52160@126.com