

保护气体对奥氏体不锈钢激光焊接的影响

刘 键 石 岩 刘 佳* 张 宏

长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 为了研究保护气体对奥氏体不锈钢焊接接头力学性能的影响,在相同线能量条件下对加保护气体与不加保护气体两种焊接方式进行了对比研究。采用Nd:YAG激光器对厚度为0.7 mm的奥氏体不锈钢进行激光焊接,用扫描电子显微镜、显微硬度计、材料试验机对焊接接头的微观组织及力学性能进行表征及测试。结果表明,在相同的激光工艺参数下,两种焊接方式均实现完全焊透,且焊缝成型良好。不加保护气体时,随着焊接速度的降低,接头抗拉强度随之降低,最多降低了20%。加入保护气体后,接头的抗拉强度变化平稳,均为母材强度的90%以上。

关键词 激光技术;激光焊接;奥氏体不锈钢;保护气体;抗拉强度

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.051402

Effect of Shielding Gas on Laser Welding of Austenitic Stainless Steel

Liu Jian Shi Yan Liu Jia Zhang Hong

College of Mechanical and Electric Engineering Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China

Abstract In order to study the effect of shielding gas on mechanical properties of austenitic stainless steel welding joint, a comparison between weld with shielding gas and weld with no shielding gas in the same line energy is studied. Austenitic stainless steel in 0.7 mm thick is welded by using Nd:YAG laser, the microstructure and mechanical properties of the welding joint are analyzed by means of scanning electron microscope (SEM), micro-hardness tester and material testing machine. Results show that two types of welding both achieve full penetration, and have good weld-forming in the same laser processing parameters. When welding with no shielding gas, with the decrease of welding speed, the tensile strength of welded joints also decrease. The decrease rate reaches 20% at most. After adding shielding gas, the tensile strength of welded joints changes smoothly, all tensile strength are over 90% of matrix.

Key words laser technique; laser welding; austenitic stainless steel; shielding gas; tensile strength

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 350.3850; 160.3900

1 引 言

奥氏体不锈钢是常温下具有奥氏体组织的不锈钢。当钢中含Cr约18%、Ni 8%~10%、C约0.1%(质量分数)时,具有稳定的奥氏体组织^[1]。近年来,不锈钢薄板的应用范围十分广泛,在航空航天、电子器件、医疗器械、核工业、机械仪表等方面的应用越来越多^[2-5],如已在国内外广泛应用的板式换热器,其板片材料就以奥氏体不锈钢为主,而板式换热器的密封性能及抗压性能在一定程度上可以影响其使用寿命^[6],因此薄板不锈钢的封装和焊接变得十分重要。

激光焊接具有能量集中、热输入小、焊缝成形好等显著优势,因而已经广泛应用于不锈钢焊接生产中^[1]。奥氏体不锈钢由于含有较高含量的Cr、Ni等元素,在高温熔化过程中容易发生氧化生成金属氧化物(如Cr₂O₃)使焊缝质量恶化^[7]。与此同时,高功率密度的激光束与工件表面作用产生的等离子体对激光与工件的耦合也

收稿日期: 2013-11-29; 收到修改稿日期: 2013-12-16; 网络出版日期: 2014-03-28

基金项目: 吉林省科技支撑计划重点项目(20120353)

作者简介: 刘 键(1988—),男,硕士研究生,主要从事激光焊接工艺方面的研究。E-mail: ljfly1988@163.com

导师简介: 石 岩(1972—),男,工学博士,教授,主要从事激光加工方面的研究。E-mail: shiyan@cust.edu.cn

*通信联系人。E-mail: longwind111@126.com

有着很大的影响,而采用保护气体能在一定程度上抑制、消除这些现象^[8-9]。因此,保护气体在激光焊接过程中起到了相当大的作用。但当利用激光焊接一些性能要求较低或者难以进行气体保护的构件时,不得不在大气环境下进行。为了研究保护气体对奥氏体不锈钢焊接接头力学性能的影响,本文在相同线能量条件下对加氩气保护与不加气体保护两种焊接方式进行了对比研究,分析了奥氏体不锈钢在大气环境下进行激光焊接的工艺方法。

2 试验材料、设备与试验方法

2.1 试验材料

试验材料采用0.7 mm厚的SUS304不锈钢板,其化学成分如表1所示。将板材加工成120 mm×70 mm的样品用于激光焊接试验。焊接前,用丙酮清洗,除去试件表面的氧化物和油污,将清洗后的样件长边叠放于焊接工作台上,并用压板压紧,进行激光叠焊试验。

表1 SUS304奥氏体不锈钢化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of SUS304 austenitic stainless steel (mass fraction,%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
0.07	0.46	0.78	0.032	0.006	8.1	18.32	other

2.2 试验设备

试验所使用的激光器为德国Trumpf公司生产的HL4006D型Nd:YAG激光器。激光通过芯径为600 μm的光纤传输到KUKA机器人,由机器人对试件进行焊接。试验采用的焊接方式为激光叠焊,激光焊接后将试件沿垂直焊接方向切开,经研磨、抛光后制备成分析用试样,腐蚀剂采用氯化铁盐酸水溶液(30 g三氯化铁+120 mL盐酸+380 mL水)。焊接接头抗拉强度是利用MTS.810.22M电、液伺服材料测试系统以6 mm/min的加载速度进行测试获得的。拉伸试件尺寸如图1所示。采用德国ZEISS公司生产的EVO18型扫描电子显微镜对激光焊接接头断口及焊缝微观组织进行观察。采用MH-60型数字式显微硬度计对焊接接头进行显微硬度测试。

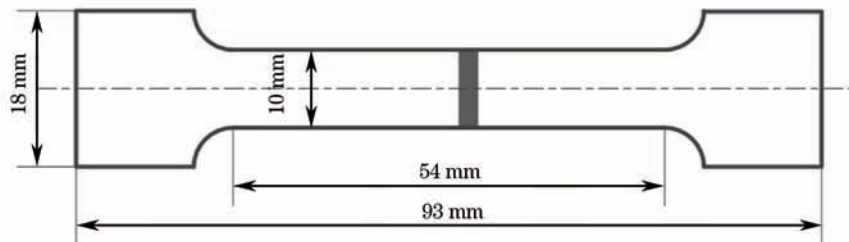


图1 接头抗拉强度测试试样图

Fig.1 Specimen of welded joint tensile strength test

2.3 试验方法

试验采用定线能量(50 J/mm)的方法,在加氩气保护与不加气体保护两种条件下对激光功率及焊接速度两个工艺参数组合进行了优化,并对其焊接接头的宏观形貌及力学性能进行了对比分析。激光焊接试验的工艺参数如表2所示。

表2 激光焊接工艺参数

Table 2 Parameters of laser welding

Number	Laser power /kW	Welding Speed /(m/s)	Defocusing distance /mm	Gas flow /(L/min)
B1W	4.0	0.08	0	0
B2W	3.5	0.07	0	0
B3W	3.0	0.06	0	0
B4W	2.5	0.05	0	0
B5W	2.0	0.04	0	0
B1Q	4.0	0.08	0	30
B2Q	3.5	0.07	0	30
B3Q	3.0	0.06	0	30
B4Q	2.5	0.05	0	30
B5Q	2.0	0.04	0	30

3 结果与讨论

3.1 保护气体对焊缝表面形貌的影响

图2所示为激光功率 $P=3\text{ kW}$ 、焊接速度 $v=0.06\text{ m/s}$ 时焊缝表面形貌图。由图可见,两种焊接方式的焊缝均成形良好,无明显的焊接缺陷。图2(a)所示为经氩气保护后的焊缝形貌,其表面大体呈金黄色,被空气轻微氧化,焊缝平顺光滑,无焊接飞溅。图2(b)所示为在空气中直接焊接的焊缝形貌,其表面呈浅灰色,焊缝表面凹凸不平,被空气氧化严重。

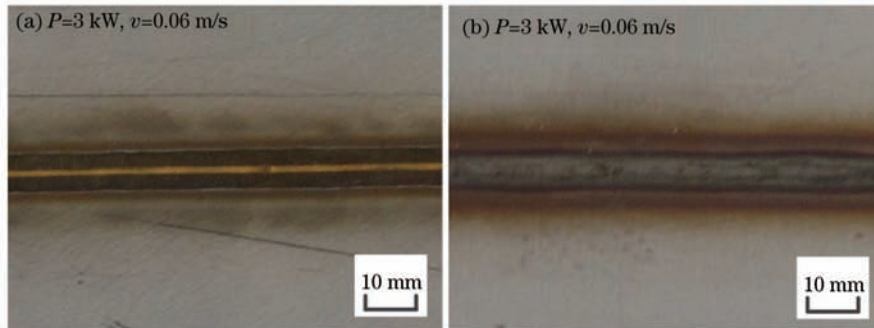


图2 焊缝表面形貌图。(a)经氩气保护的焊缝形貌;(b)无保护的焊缝形貌

Fig.2 Morphology of welding face. (a) Morphology of welding face with shielding Ar; (b) morphology of welding face with no shielding gas

3.2 力学性能分析

3.2.1 拉伸性能分析

对所有的焊接试件进行了拉伸测试,在上板焊缝区靠近熔合线位置均发生了韧性断裂,图3(a),(b)所示分别为试件B3Q的断裂样品宏观形貌和截面形貌图。

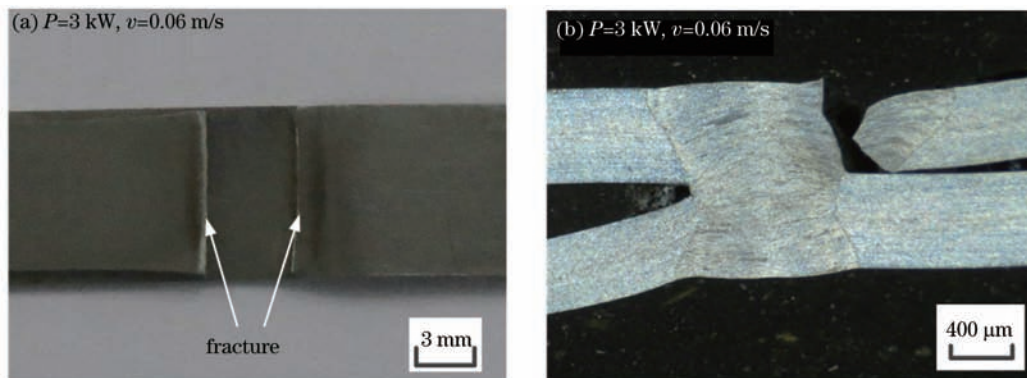


图3 (a)断裂样品宏观形貌;(b)拉伸件断裂部位

Fig.3 (a) Macro-morphology of fracture sample; (b) fracture location of tensile specimen

图5为不同工艺参数下的抗拉强度结果。试验测试结果表明,当焊接线能量为 50 J/mm ,氩气保护时,接头抗拉强度变化平稳,均为母材强度(707 MPa)的90%以上;无保护气体时,试件抗拉强度随焊接速度的降低而降低。这是由于无保护气体焊接条件下,速度越低,熔池高温停留时间越长,焊缝被氧化的程度就越严重,从而使得焊缝强度变低。此外,在相同激光工艺参数下,氩气保护时试件的拉伸强度均高于没加保护气体的试件。而在焊接速度较大时,强度相差较小。这是由于氩气的密度远远大于空气的密度,因此可以有效隔绝空气,防止焊接接头被空气氧化,增强接头拉伸强度。而在不加保护气体时,应增加焊接速度,从而减小接头被空气氧化的程度。

由于不锈钢是一种亚稳态材料,在拉伸应变过程中会诱发马氏体进行转变,因此,奥氏体不锈钢在常温下应力-应变曲线应为连续过渡型,没有明显的物理屈服现象^[10]。图6为试样B3Q拉伸试验的应力应变曲线,由曲线可知该拉伸试样在拉伸测试过程中为连续过渡,没有出现明显的屈服现象,因此从拉伸力-位移曲线中无法直接判断其断裂方式,需通过拉伸断口微观形貌进一步分析。

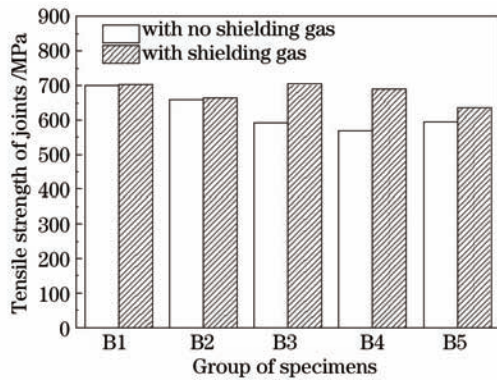


图5 不同工艺参数时试件拉伸强度

Fig.5 Tensile strength with different process parameters

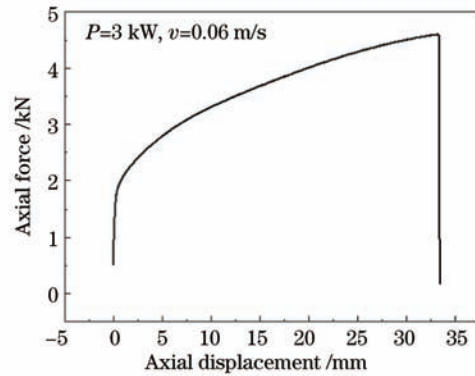


图6 B3Q 拉伸应力应变曲线

Fig.6 Tensile stress-strain curve of B3Q

图7所示为激光功率 $P=3\text{ kW}$ 、焊接速度 $v=0.06\text{ m/s}$ 时焊缝断面形貌图。图7(a)所示为无保护气体情况下的断面形貌,图7(b)为氩气保护时的断面形貌。从图片中可以清晰地看到,两种焊接方式的断面处均出现了大小不均的等轴韧窝,可以说明两种拉伸件断裂方式均属于韧性断裂。图7(c)所示为无保护气体时断面表面的低倍图,从图中可以清晰地看到断面表面存在的气孔。气孔的产生不仅影响焊缝的致密性,而且还会减小焊缝的有效工作截面积,造成应力集中,从而降低焊缝的力学性能。

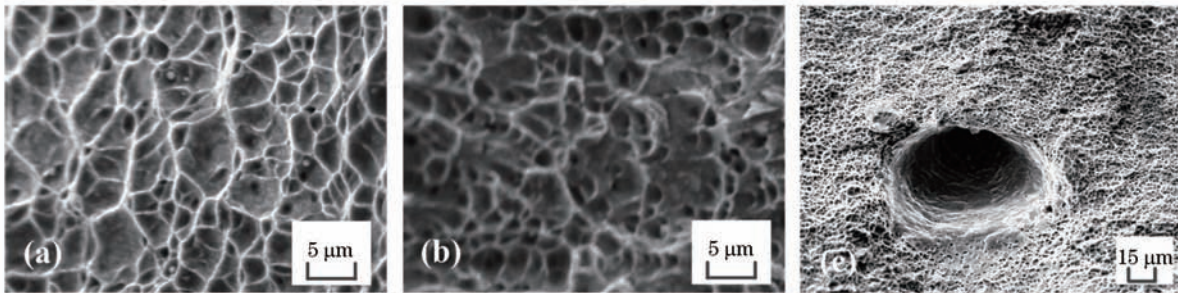


图7 断面形貌(SEM)。(a)无保护气体接头断面形貌;(b)经氩气保护接头断面形貌;(c)焊接气孔

Fig.7 Fracture morphology. (a) Fracture morphology of welded joint with no shielding gas; (b) fracture morphology of welded joint with shielding Ar; (c) stomata in weld

3.2.2 焊缝显微硬度分析

为进一步对接头力学性能进行检测,对奥氏体不锈钢焊接接头进行显微硬度测试,测试载荷为 100 g ,以焊缝中心为基准,向左右两侧每隔 0.1 mm 取一点,测试其显微硬度,图8、9分别为焊接功率 3 kW 、焊接速度 0.06 m/s 时,氩气保护和无保护气体焊接接头的显微硬度图。

由图8可知,在氩气保护情况下,焊缝区的平均显微硬度最低,约为 $214\text{ HV}_{0.1}$,母材的平均显微硬度次之,约为 $221\text{ HV}_{0.1}$,而热影响区的平均显微硬度最高,约为 $230\text{ HV}_{0.1}$,且焊缝的热影响区极窄。由图9可知,

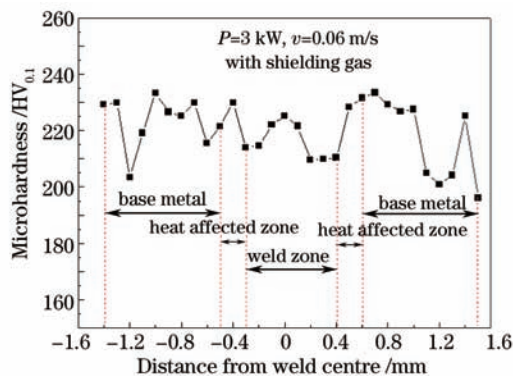


图8 气体保护时焊接接头显微硬度

Fig.8 Microhardness of weld joint with shielding gas

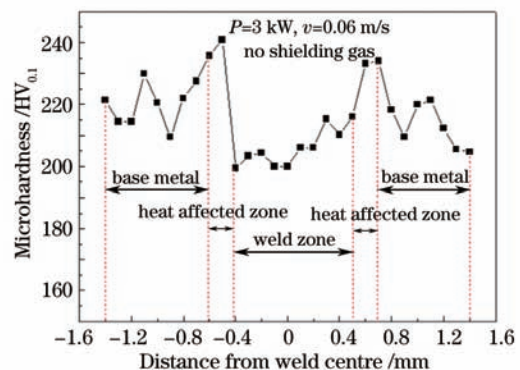


图9 无保护气体时焊接接头显微硬度

Fig.9 Microhardness of weld joint with no shielding gas

在无保护气体的情况下,同样是焊缝区的平均显微硬度最低,约为 $206\text{ HV}_{0.1}$,母材的平均显微硬度次之,约为 $218\text{ HV}_{0.1}$,热影响区的平均显微硬度最高,约为 $235\text{ HV}_{0.1}$ 。由此可见,无论是否加保护气体显微硬度的大小顺序均为热影响区>母材>焊缝区。其原因可能是母材在冷拔过程中会产生塑性变形,这种变形使其自身产生内应力,从而使母材力学性能增加,而在焊接过程中,母材金属局部熔化后重新凝固结晶,此过程使母材的畸变能和内应力得以释放,焊缝区得到软化,所以焊缝的显微硬度最低^[1]。焊缝的热影响区由于冷却速度不同,焊缝组织常常具有不均匀性,这种组织的不均匀性使得其力学性能与母材及焊缝存在较大差异。加入保护气体以后,焊缝区的显微硬度有所增加,这可能是由于加入保护气体后,焊缝被氧化程度减弱而且气孔形成较少,因此使得硬度有所增加。与此同时加保护气体之后焊接过程更稳定,因此显微硬度波动没有不加保护气体时大。

3.3 微观组织分析

图10(a)~(c)分别为试件B3Q在扫描电镜下拍摄焊接接头不同位置的微观组织形貌。从图10(a)可以看出母材主要是由大小不一、较为粗大的奥氏体等轴晶粒组成,其中发现夹杂着少量的铁素体。图10(b)为焊缝与母材交界处,从图中几乎看不到焊缝的热影响区,这是由于激光焊接功率高,焊接速度快,晶粒没有充足时间生长,使得热影响区极窄。经过激光焊接后,焊缝区的晶粒明显得到了细化,靠近熔合线的焊缝区,主要是细小柱状晶体,垂直于熔合线向焊缝中心方向生长。图10(c)为焊缝区,可以看到焊缝中心主要为细小的树枝晶及少量的胞状晶,这是由于激光焊接时熔态金属的过冷度很大,所以有利于树枝晶及胞状晶的生长。

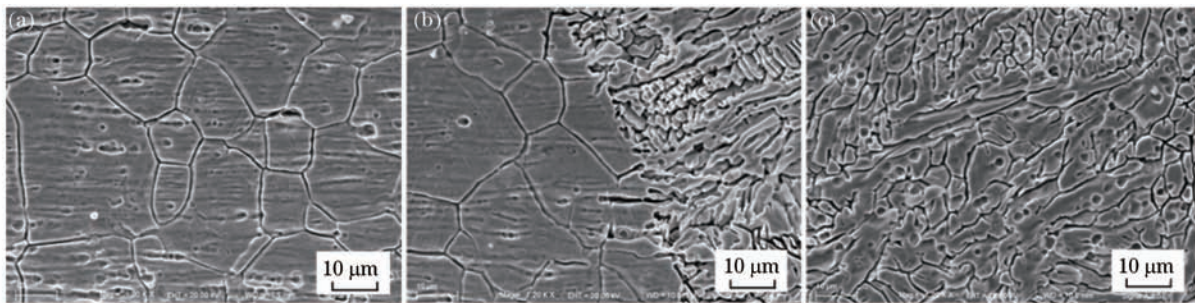


图10 微观组织形貌。(a)母材;(b)熔合线;(c)焊缝

Fig.10 Microstructure morphology. (a) Base metal; (b) fusion line; (c) welding seam

4 结 论

研究了厚度为 0.7 mm 奥氏体不锈钢激光焊接工艺,并比较了氩气保护条件下与大气环境下,焊接接头焊缝宏观形貌及力学性能,得出以下结论:

1) 在相同的激光工艺参数下,两种焊接方式均实现完全焊透,且焊缝成形良好,但是与氩气保护条件下相比,在大气中焊接过程不稳定,焊缝存在被严重氧化现象;

2) 拉伸试验结果表明,在氩气保护条件下,接头抗拉强度变化平稳,均为母材强度的90%以上。在无保护气体时,试件抗拉强度随焊接速度的降低而降低。当激光功率 $P=4\text{ kW}$, $v=0.08\text{ m/s}$ 时,两种焊接方式接头抗拉强度基本相同,均达到母材强度的99%。由此可见,在无保护气体进行不锈钢激光焊接时,应选用高功率、高速度的激光焊接参数,使焊接过程尽快完成,从而减小焊接接头被空气氧化的程度;

3) 无论是否加保护气体显微硬度的大小顺序均为热影响区>母材>焊缝区,但是加入保护气体以后,焊缝区的显微硬度有所增加,且由于焊接过程稳定,显微硬度波动没有不加保护气体时大;

4) 奥氏体不锈钢激光叠焊焊缝热影响区极窄,焊缝区边缘主要为柱状晶,垂直于熔合线向焊缝中心生长,焊缝中心为树枝晶组织。

参 考 文 献

- 1 Zhang Weizhe. Research on Laser Welding 304 Austenitic Stainless Steel Sheet [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.

- 张维哲. 304 不锈钢薄板激光焊接技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- 2 Geng Ping, Yang Yuling, Zhang Duo. Low power Nd:YAG laser welding of 18-8 type austenitic stainless steel [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(1): 34-36.
- 耿平, 杨玉玲, 张多. 18-8 型奥氏体不锈钢低功率 Nd:YAG 激光焊接研究[J]. *激光与红外*, 2007, 37(1): 34-36.
- 3 T Zacharia, S A David, J M Vitek, *et al.*. Heat transfer during Nd:YAG pulsed laser welding and its effect on solidification structure of austenitic stainless steels [J]. *Metallurgical Transaction A*, 1989, 20(5): 957-967.
- 4 Li Yanli, Hu Fangyou, Liu Hongjun, *et al.*. Analysis on microstructure and tensile property of laser melting 1Cr18Ni9Ti [J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 33(s): 450-452.
- 李艳丽, 胡芳友, 刘洪军, 等. 1Cr18Ni9Ti 激光焊接接头的结构与性能[J]. *中国激光*, 2006, 33(s): 450-452.
- 5 S Celen, S Karadeniz, H Ozden. Effect of laser welding parameters on fusion zone morphological, mechanical and microstructural characteristics of AISI304 stainless steel [J]. *Materialwissenschaft und Werkstofftech*, 2008, 39 (11): 845-850.
- 6 Kong Wenbin. Research on the Failure Analysis of Plate Heat Exchanger [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- 孔文彬. 板式换热器失效分析研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- 7 Li Lei. Microstructure and Mechanical Behavior on Lap Laser Welding Joint of Stainless Steel Sheet for Railway Vehicle [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2012.
- 李磊. 城轨客车用不锈钢薄板激光搭接焊接头组织与力学行为研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2012.
- 8 M T Liao, W J Chen. The effect of shielding-gas compositions on the microstructure and mechanical properties of stainless steel weldments [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 1998, 55(2): 145-151.
- 9 Chen Junjie. The Characteristics Research on Laser Full Penetration Welding Molten Pool and the Temperature Field of 304 Stainless Steel [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- 陈俊杰. 激光全熔透焊接 304 不锈钢的熔池及温度场特征研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- 10 Liu Jia. Research on Laser Lap Welding Technology of SUS301L Austenitic Stainless Steel for Railway Vehicles [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012.
- 刘佳. 轨道客车用 SUS301L 奥氏体不锈钢激光叠焊技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- 11 Tjong S C, Zhu S M, Ho N J, *et al.*. Microstructural characteristics and creep rupture behavior of electron beam and laser welded AISI 316L stainless steel [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 1995, 227(12): 24-31.