

# 50 mm 转子钢超窄间隙激光填丝焊接头组织与性能

赵 勇<sup>1,2</sup> 王清墨<sup>2</sup> 黄 坚<sup>1</sup> 吴毅雄<sup>1</sup>

<sup>1</sup>上海交通大学材料科学与工程学院上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240

<sup>2</sup>江苏科技大学材料科学与工程学院先进焊接技术省级重点实验室, 江苏 镇江 212003

**摘要** 设计了窄间隙的坡口并采用CO<sub>2</sub>激光填丝多道焊的方法焊接了厚度为50 mm的30Cr2Ni4MoV转子钢, 焊后观察并分析了接头不同区域的组织特征, 通过接头的拉伸、弯曲试验及显微硬度评定了接头的性能, 结果表明: 选取优化的窄间隙激光填丝焊接工艺焊接的50 mm厚30Cr2Ni4MoV钢对接焊接头成形良好, 无侧壁未熔合等缺陷。接头中部填充焊缝中心由大量的针状铁素体和少量的粒状贝氏体组成, 冲击韧性良好, 表层填充焊缝由马氏体及少量的粒状贝氏体组成, 冲击韧性有所下降。焊接接头拉伸试样均断于母材, 接头最大硬度位于接头表层填充焊热影响区(HAZ)粗晶区, 焊缝区的硬度较HAZ低很多。

**关键词** 光学制造; 转子钢; 超窄间隙; 激光填丝焊; 微观组织; 力学性能

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0203007

## Microstructures and Properties of Ultra-Narrow-Gap Multi-Pass Welded Joint of 50 mm Turbine Rotor Steel by Laser Welding with Filler Wire

Zhao Yong<sup>1,2</sup> Wang Qingzhao<sup>2</sup> Huang Jian<sup>1</sup> Wu Yixiong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Key Laboratory of Material Laser Processing and Modification, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

<sup>2</sup>Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology, School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, Jiangsu 212003, China

**Abstract** A type of groove targeted on ultra-narrow-gap multi-pass welding is designed and 50 mm thick 30Cr2Ni4MoV turbine rotor steel is welded by CO<sub>2</sub> laser welding with filler wire based on the groove. After welding process, the microstructures of different zones of joint are observed and analyzed. The tensile test, bending test and measurement of microhardness are conducted to evaluate the properties of joint. The results show that the joint of 50 mm thick 30Cr2Ni4MoV turbine rotor steel has fine appearance without defect under the optimized parameters of ultra-narrow-gap multi-pass laser welding with filler wire. The middle zone of weld consists of a mass of acicular ferrite and a few of granular bainite and it shows good impact toughness. The surface layer of weld consists of martensite and a few of granular bainite and its impact toughness decreases a little. The fractures occur on the base metal of tensile test specimens. The peak value of microhardness is achieved in the coarse grain zone in heat affected zone (HAZ) of surface layer of weld and the microhardness in weld is much lower than that in HAZ.

**Key words** optical fabrication; turbine rotor steel; ultra-narrow-gap; laser welding with filler wire; microstructures; mechanical properties

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3850

收稿日期: 2014-06-20; 收到修改稿日期: 2014-08-18

基金项目: 上海市重大技术装备研制专项(ZB-ZBYZ-03-11-0485)

作者简介: 赵 勇(1978—), 男, 博士研究生, 主要从事激光焊、搅拌摩擦焊等方面的研究。E-mail: yongzhao418@gmail.com

导师简介: 黄 坚(1967—), 男, 博士, 副教授, 主要从事材料激光焊接、厚板焊接技术等方面的研究。

E-mail: jhuang@sjtu.edu.cn(通信联系人)

## 1 引 言

转子是汽轮机的核心部件,随着机组容量的增大,转子锻件的尺寸和重量也不断增加。近年来,焊接转子在汽轮机产品中占据重要地位,经过几十年的努力,转子焊接技术和装备不断完善,目前,窄间隙氩弧焊和埋弧焊技术已应用于大型转子的焊接中<sup>[1-2]</sup>。但考虑到焊枪尺寸的限制,窄间隙坡口仍需较多道次的焊接材料进行填充,同时埋弧焊较大的热输入会恶化焊缝及接头热影响区(HAZ)的性能,从而带来裂纹等冶金缺陷。

相比于传统弧焊方法,激光焊接的优势在于热输入低、焊接速度快、热影响区小、热变形小等优点<sup>[3-6]</sup>。Webster等<sup>[7]</sup>采用20 kW的CO<sub>2</sub>激光实现了板厚为15~25 mm的单道激光焊接;吴世凯等<sup>[8]</sup>采用CO<sub>2</sub>激光实现了厚度超过10 mm的不锈钢对接焊,结果表明,激光焊可以获得焊缝成型良好,无气孔、裂纹等缺陷的接头。虽然激光焊在焊接厚板方面有着显著的优势,但激光自熔焊单道可焊厚度主要取决于激光器的功率,限制了其在厚板焊接的应用。激光填丝焊技术通过焊丝的添加可实现坡口间隙的填充,可降低对工件装夹精度的苛刻要求,方便焊缝冶金调整<sup>[9-11]</sup>。上海交通大学的王柏平等<sup>[12]</sup>采用窄间隙激光填丝焊的方法焊接了16 mm的304不锈钢,焊后焊缝成形较好,无明显的焊接冶金缺陷。

本文使用窄间隙CO<sub>2</sub>激光填丝焊技术焊接了50 mm厚的30Cr2Ni4MoV转子钢,测试和分析了焊接接头不同区域的组织及性能,为窄间隙激光填丝多道焊在厚板结构的焊接应用提供了工艺及冶金学参考。

## 2 试验材料及方法

### 2.1 焊接试验

试验板材为30Cr2Ni4MoV钢,板厚为50 mm,焊丝牌号为ER100S-G(直径为1.2 mm)。母材(BM)和焊丝的化学成分如表1所示。焊接试验采用TRUMPF公司的TLF15000 CO<sub>2</sub>激光器,其最大输出功率为15 kW,焦距为350 mm,焦点半径为0.4 mm。侧吹气体为纯氦气,起到抑制等离子体与保护焊接熔池的作用。为保证焊丝和保护气能送至窄间隙坡口底部,专门制作了外径为4 mm的送丝导管及侧吹气管。焊接过程如图1所示,焊接试样的坡口尺寸如图2所示,焊接工艺参数如表2所示。

表1 母材和焊丝的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of BM and filler wire (mass fraction, %)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
Base metal	0.28	0.06	0.4	≤0.007	≤0.007	3.66	1.59	0.43	0.09
Welding wire	0.08	0.60	1.7	≤0.015	≤0.015	1.50	0.20	0.50	0.03

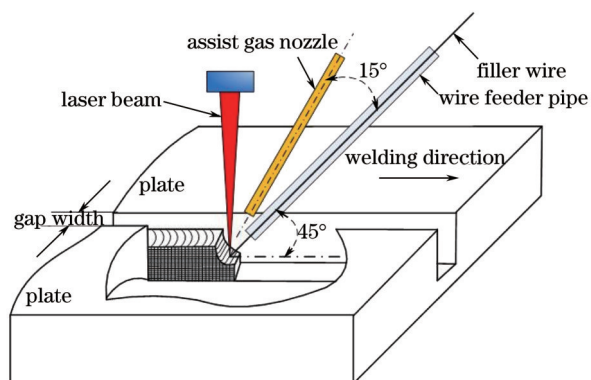


图1 窄间隙激光焊接装置

Fig.1 Experimental setup of narrow-gap laser welding

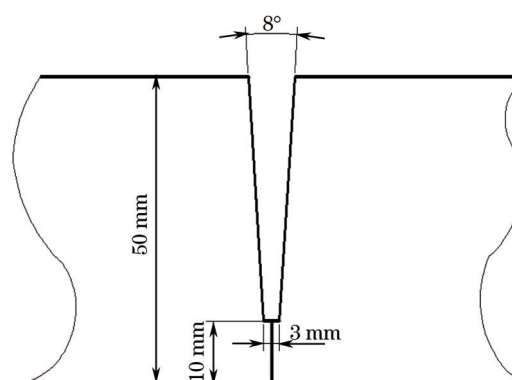


图2 工件坡口尺寸

Fig.2 Groove geometry of workpiece

### 2.2 接头组织分析

截取焊接接头的横截面制备成金相试样,经研磨抛光后用4%硝酸酒精腐蚀,对接头不同部位的微观组织进行观察和分析。

### 2.3 接头力学性能测试与分析

在板厚方向上分3层截取了接头的拉伸试样,其中下层拉伸试样厚度为10 mm,余下的平均分成2层,

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Welding parameters

Welding sequence	Laser power / kW	Welding speed / (mm/min)	Wire feed rate / (m/min)	Defocusing amount / mm	Heat input / (kJ/cm)
1	10	1000	0	0	6
2~10	6.5	300	4.5	+20	13
11	8.5	300	6.5	+20	17

每层厚度为 20 mm。拉伸试样按照 ASME 第 IX 卷 QW462.1 标准进行截取。

针对 50 mm 焊接接头分别测试了接头不同部位的显微维氏硬度,具体位置如图 3 中虚线及数字编号(1、2、3)所示。

在接头的不同部位按照 GB2652-2008 截取冲击试样,取样位置如图 3 中的三个矩形框 A、B、C 位置所示。冲击试样缺口均开在焊缝中心,冲击试验在室温下进行,冲击试样的断口形貌采用 JM6460 电子显微镜进行观察和分析。

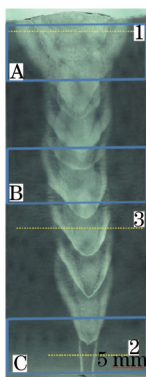


图 3 焊接接头的宏观形貌

Fig.3 Macrostructure of welding joint

为考核窄间隙接头侧壁熔合情况,对接头进行了横向侧弯试验。将试板上下表面各去除 3 mm,在厚度方向上平均分为两层截取,三点弯曲试验按照 ASME 第 IX 卷 QW-163 的标准在 CMT5105 电子万能试验机上进行。

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 窄间隙激光填丝焊接头宏观形貌

50 mm 厚 30Cr2Ni4MoV 转子钢窄间隙激光填丝焊对接接头的横截面的形貌及表面成形分别如图 3 和图 4 所示。对接接头共焊接了 11 道,包括 1 道底层 10 mm 钝边的激光自熔焊及 10 道窄间隙坡口内的激光填丝焊。结果表明,采用前期优化的焊接工艺进行焊接,接头成形良好,内部无气孔、咬边、裂纹及侧壁未熔合等缺陷。



图 4 焊接接头的表面成形

Fig.4 Appearance of welding joint

#### 3.2 接头不同区域微观组织分析

50 mm 对接接头中不同区域的微观组织分别如图 5~8 所示。图 5 是母材的微观组织,母材的供货状态为调质态,微观组织为回火索氏体。图 6 为第一道激光自熔焊焊缝中心的微观组织。激光自熔焊时,焊接热输入较小(6 kJ/cm),厚板的散热能力强,熔池的冷却速率高,焊缝组织垂直于熔合线向焊缝中心凝固结晶,生成



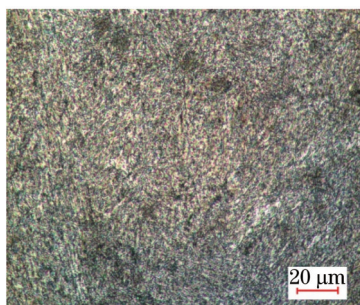


图5 母材的微观组织

Fig.5 Microstructure of base metal

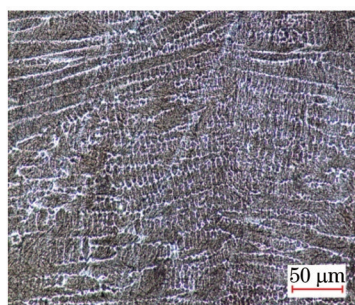


图6 激光自熔焊焊缝中心的微观组织

Fig.6 Microstructure of laser welding center

典型的柱状晶形貌。由于激光自熔焊的焊接热输入小,所以接头的HAZ很窄,宽度小于1 mm。

图7(a)为中部填丝焊(焊接热输入为13 kJ/cm)焊缝中心的微观组织形貌,焊缝中心由大量的针状铁素体和少量的粒状贝氏体组成。针状铁素的形核主要与焊缝中化合物的成分、大小、密度和尺寸分布有关<sup>[7]</sup>。焊丝含有Cr、Mo、V等合金元素,在焊接熔池中会与C、N等形成化合物,弥散分布的化合物可成为针状铁素体的形核核心。焊接接头的液态金属高温停留时间比较短,在冷却过程中化合物集聚和长大的程度小,使得针状铁素体的形核核心多,所以焊缝金属中针状铁素体的含量较多。

图7(b)是表层填丝焊焊缝中心的微观组织,主要是以板条马氏体为主。表层填丝焊的焊接热输入较大(17 kJ/cm),虽然熔池高温停留时间长,冷却速度减慢,但是由于熔合比大,母材中大量的合金元素溶入到焊缝中,所以冷却到室温时生成了大量的板条状马氏体。

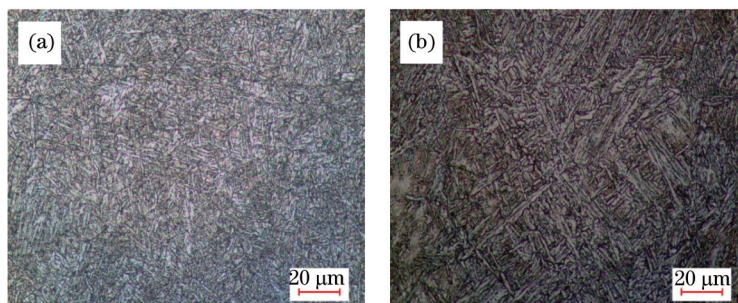


图7 填丝焊焊缝中心的微观组织。(a) 接头中部; (b) 接头表层

Fig.7 Microstructure of weld center by laser welding with filler wire. (a) Middle zone of joint; (b) surface layer of joint

图8(a)、(b)分别为中部填丝焊和表层填丝焊的HAZ粗晶区的微观组织形貌。由图可知,中部填丝焊HAZ粗晶区主要由回火马氏体组成。表层填丝焊HAZ粗晶区含有大量的板条马氏体,与中部填丝焊HAZ粗晶区相比,由于焊接热输入的增加,原奥氏体晶粒长大趋势增加,马氏体板条和马氏体束群尺寸随之长大。

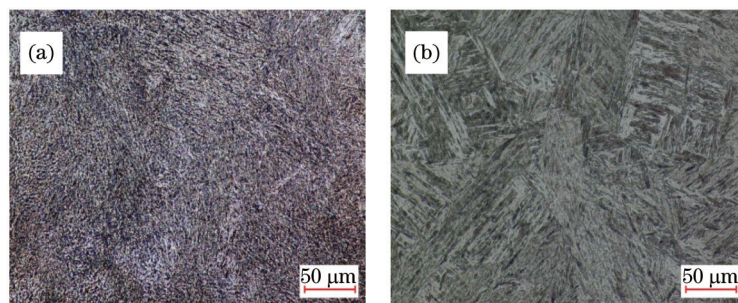


图8 填丝焊HAZ粗晶区的微观组织。(a) 接头中部; (b) 接头表层

Fig.8 Microstructure of coarse grain heat affected zone by laser welding with filler wire. (a) Middle zone of joint; (b) surface layer of joint

### 3.3 接头性能测试及分析

#### 3.3.1 拉伸、弯曲及冲击试验

焊接接头的拉伸试验结果如表3所示。

表3 拉伸试验结果

Table 3 Results of tensile test

	Specimen thickness /mm	Tensile strength /MPa	Yield strength / MPa	Elongation /%	Fracture position
Base metal		875	780	22	
Upper	20	886	781	19.5	Base metal
Middle	20	892	783	20	Base metal
Bottom	10	889	782	18.5	Base metal

结果表明:拉伸试样均断裂于母材,表明焊缝的强度均高于母材的强度,接头拉伸性能良好。此外,上下两层的弯曲试样弯曲180°后均未开裂,说明所选焊接工艺合适,侧壁熔合良好,同时激光填丝焊缝金属中含有较多数量的针状铁素体,使得塑韧性得到提高,因此弯曲性能良好。冲击试验结果见表4,冲击试样的断口形貌如图9所示。

表4 冲击试验结果

Table 4 Results of impact test

Specimen number	Test position	Impact absorbing energy /J	Remark
	Base metal	195	
A	Upper	106.5	Qualified
B	Middle	125	Qualified
C	Bottom	88.5	Qualified

由表4可知,50 mm30Cr2Ni4MoV钢窄间隙激光填丝焊接头不同部位的冲击试验结果均合格。由于母材中的合金元素较高,焊接淬硬倾向较大,接头下层部位激光自熔焊的焊缝组织为马氏体组织,所以冲击韧性最低。接头中部填丝焊缝中形成了大量的针状铁素体,所以冲击韧性最高。与中部填丝焊相比,表层填丝焊的焊接热输入较大(17 kJ/cm),形成了较大尺寸的焊接熔池,接头熔合比增大,母材中大量的合金元素溶入到焊缝中,所以冷却到室温时生成了大量的板条状马氏体及少量的粒状贝氏体,韧性有所下降。

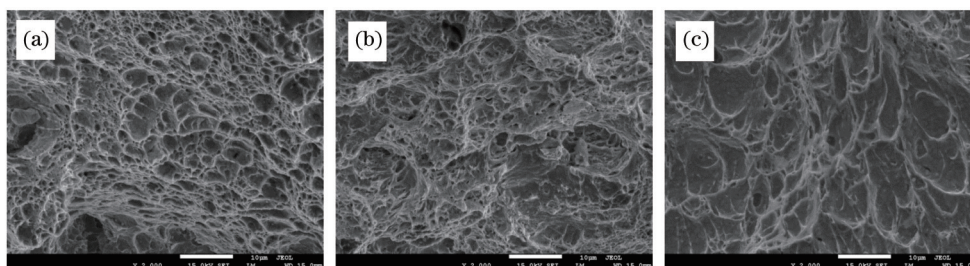


图9 冲击试样的断口形貌。(a)中层(B区);(b)上层(A区);(c)下层(C区)

Fig.9 Fracture of impact specimen. (a) Middle layer (zone B); (b) upper layer (zone A); (c) bottom layer (zone C)

图9为接头不同区域冲击试样非结晶区的冲击断口形貌,由图可知,填丝焊部位(A区和B区)试样的非结晶断口区的SEM断口形貌均为韧窝断裂,中部填丝焊(B区)焊缝冲击断口中在大的塑性变形撕裂斜面上存在大量的韧窝,韧窝变形痕迹明显,韧窝较深,显示其具有较高的韧性;上层填丝焊(A区)焊缝冲击断口形貌由韧窝和少量的准解理组成,韧窝尺寸比较小;底层焊缝冲击断口已存在部分解理断裂的形貌,所以底层焊缝的冲击韧性最低。

#### 3.3.2 接头显微硬度

硬度试验结果如图10所示。

激光自熔焊部位焊缝区的硬度值最高,达到420~430 HV,这是由于第一道的激光自熔焊焊接热输入小,而厚板的散热能力强,熔池的高温停留时间短,焊缝冷却速率高,冷却到室温后焊缝为马氏体组织,同时较

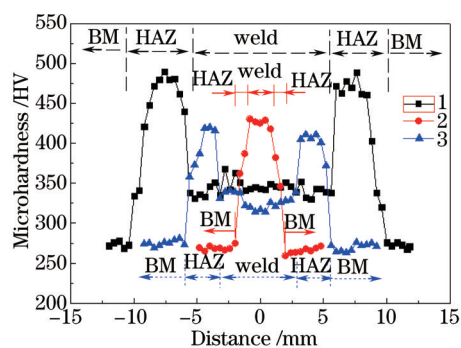


图10 硬度分布(1-表层, 2-底层, 3-中部)

Fig.10 Microhardness distribution (1-surface layer of joint, 2-bottom layer of joint; 3-middle zone of joint)

小的焊接热输入也使得 HAZ 很窄, 硬度值从焊缝的 430 HV 很快降到母材的硬度(270 HV)。中部填丝焊部位(焊接热输入为 13 kJ)和最后一道填丝焊部位(焊接热输入为 17 kJ)的硬度分布有着大体相同的趋势, 硬度的最大值均出现在 HAZ 的粗晶区。最后一道激光填丝焊的热输入最大, 其焊接热影响区也最宽, 靠近熔合线附近的 HAZ 粗晶区经历了较高的加热峰值温度且高温停留时间长, 原奥氏体晶粒长大趋势增加, 在随后的冷却过程中, 发生无扩散型共格切变的马氏体相变产物, 所以此区域的硬度值最高, 达到了 490 HV。与 HAZ 的硬度相比, 填丝焊缝区的硬度要低很多, 在 320~350 HV 范围内, 这是因为焊缝区的金属主要是焊丝熔化后形成的, 而焊丝中碳、镍、铬等主要合金元素的含量比母材低, 焊接过程中淬硬倾向小, 同时焊接热输入与激光自熔焊相比要大很多, 焊缝金属高温停留时间增加, 冷却速度减慢, 冷却至室温后生成大量的针状铁素体和贝氏体, 硬度较 HAZ 下降很多。

## 4 结 论

1) 选取优化的焊接工艺, 采用超窄间隙激光填丝焊的方法成功地实现了 50 mm 厚 30Cr2Ni4MoV 转子钢的对接焊, 焊接道数共 11 道, 焊后焊缝成形良好, 接头的横向侧弯试验表明接头无侧壁未熔合缺陷。

2) 底层的激光自熔焊由于激光能量密度高, 焊接热输入小, 接头 HAZ 很窄, 焊缝组织为马氏体, 焊缝室温冲击韧性最低, 为 88.5 J; 中部填丝焊焊缝中心由大量的针状铁素体和少量的粒状贝氏体组成, 焊缝的冲击断口中韧窝变形痕迹明显, 韧窝较深, 显示出良好的冲击韧性; 表层填丝焊随着焊接热输入增大 (17 kJ/cm), 接头熔合比增加, 焊后焊缝由马氏体及少量的粒状贝氏体组成, 韧性有所下降。

3) 焊接接头各部位的拉伸试样均断于母材, 表明焊缝的强度均高于母材; 接头最大硬度位于接头表层填丝焊 HAZ 粗晶区, 而填丝焊焊缝区的硬度较其 HAZ 和自熔焊焊缝低很多。

## 参 考 文 献

- Bertilsson J E, Faber G, Kuhnen G. 50 years of welded turbine rotors[J]. *Brown Boveri Review*, 1981, 12(68): 467-473.
- Adolph Luthy. Some advantages of welding turbine rotors[J]. *Naval Engineers Journal*, 1969, 1(81): 69-78.
- M Onozuka, J P Alfile, P Aubert, *et al.*. Manufacturing and maintenance technologies developed for a thick-wall structure of the ITER vacuum vessel[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2001, 55(4): 397-410.
- Tang Zhuo, Zhao Lianglei, Cai Yan, *et al.*. Technological effect on bead characteristics of homemade thick plate welded by high power laser with filler wire[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, 29(5): 81-84.  
唐 卓, 赵良磊, 蔡 艳, 等. 国产厚板大功率激光填丝焊 Y 形焊缝的焊接工艺性[J]. *焊接学报*, 2008, 29(5): 81-84.
- Zhang Guowei, Xiao Rongshi. Microstructure and mechanical property of 60 mm-thick 304 stainless steel joint by ultra-narrow gap fiber laser beam welding[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(8): 0803007.  
张国伟, 肖荣诗. 60 mm 厚 304 不锈钢超窄间隙光纤激光焊接接头组织性能研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(8): 0803007.
- Xu Guojian, Zhong Liming, Huang Zhengxiang, *et al.*. Performance of narrow gap laser welding with filling wire for SUS304 stainless steel[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(10): 1003001.  
徐国建, 钟立明, 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.
- Webster S, Kristensen J K, Petring D. Joining of thick section steels using hybrid laser welding[J]. *Ironmaking and Steelmaking*,



- 2008, 35(7): 496-504.
- 8 Wu Shikai, Xiao Rongshi, Chen Kai. Laser welding of heavy section stainless steel plates[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(9): 2422-2425.  
吴世凯, 肖荣诗, 陈 铠. 大厚度不锈钢板的激光焊接[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2422-2425.
- 9 Hu Lianhai. A Study on Laser Welding Stability, Joint Microstructures and Properties of 10Ni3CrMoV Thick Steel[D]. Shagnhai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.  
胡连海. 10Ni3CrMoV 钢厚板激光焊接稳定性与接头组织及性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- 10 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.  
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.
- 11 Wang Hongying, Mo Shouxing, Li Zhijun. CO<sub>2</sub> laser welding of AZ31 magnesium alloys with filler wire[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(6): 93-96.  
王红英, 莫守形, 李志军. AZ31 镁合金 CO<sub>2</sub>激光填丝焊工艺[J]. 焊接学报, 2007, 28(6): 93-96.
- 12 Wang Baiping, Zhao Yong, Huang Jian. Investigation on microstructure of thick plate stainless steel joint welded by multi-pass laser welding with filler wire[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0203008.  
王柏平, 赵 勇, 黄 坚. 厚板不锈钢激光填丝多道焊的接头组织分析[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0203008.

编辑栏目: 史 敏