

60 mm 厚 304 不锈钢板超窄间隙光纤激光焊接 接头组织性能研究

张国伟 肖荣诗

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

摘要 利用 IPG 公司 YLS-6000 光纤激光器及 5 mm 超窄间隙焊接了 60 mm 厚 304 不锈钢板, 并利用光学显微镜、扫描电镜、能谱仪和低温拉伸试验机分析了接头组织性能。结果表明, 超窄间隙激光焊接方法可得到成形良好无明显缺陷的焊接接头, 焊缝上下宽度一致约 3.8 mm。焊缝组织为柱状奥氏体与均匀分布的骨架状和板条状铁素体。热影响区并无明显晶粒长大, 少量铁素体沿熔合线向母材方向扩散生长。Cr、Ni 等合金元素在焊缝及热影响区分布均匀, 无明显偏析。焊缝与母材显微硬度相当, 略低于热影响区。接头拉伸强度随温度降低而上升, 最高达 1260 MPa, 在 183 K、213 K、243 K、273 K 温度下接头拉伸强度分别为母材的 86%、96.7%、94.5% 和 92.6%。试样弯曲 180° 无裂纹及其他缺陷产生。

关键词 激光技术; 不锈钢大厚板; 超窄间隙激光焊接; 微结构; 力学性能

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0803007

Microstructure and Mechanical Property of 60 mm-Thick 304 Stainless Steel Joint by Ultra-Narrow Gap Fiber Laser Beam Welding

Zhang Guowei Xiao Rongshi

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract 304 stainless steel plates of 60 mm thick are welded using IPG YLS-6000 fiber laser and 5 mm wide groove. The microstructure and mechanical property of joint are tested by optical microscope, scanning electron microscope, energy disperse spectroscopy and tensile testing machine at low temperature. The result shows that complete defect free butt joints are obtained with ultra-narrow gap laser welding. The width of weld is uniform and is about 3.8 mm. Microstructure of joint are consist of columnar austenitic, the skeletal and the lath ferrite. There is a little ferrite diffuses and grows to the direction of the base metal and no obvious coarse grain in heat affected zone (HAZ). Main alloy elements such as Cr, Ni are even distributed in the weld and HAZ. The microhardness of the HAZ is slightly higher than that of weld metal and base metal. The tensile strength at temperature of 183 K, 213 K, 243 K and 273 K temperature are 86%, 96.7%, 94.5% and 92.6% of base metal, respectively, which increases when temperature decreases and the maximum is up to 1260 MPa. Samples are bended by 180° without any cracks or other defects.

Key words laser technique; heavy section of stainless steel; ultra-narrow gap laser beam welding; microstructure; mechanical property

OCIS codes 060.2310; 140.3510; 140.3390; 350.3850; 350.4600

1 引言

随着全球工业的发展, 不锈钢厚板的应用越来

越多, 板厚尺寸也越来越大, 对厚板的焊接质量要求也越来越高, 例如国际热核聚变实验堆 (ITER) 计划

收稿日期: 2014-03-17; **收到修改稿日期**: 2014-04-18

作者简介: 张国伟 (1983—), 男, 博士研究生, 主要从事超窄间隙激光焊接工艺及机理等方面的研究。

E-mail: erxia1983@163.com

导师简介: 肖荣诗 (1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光先进制造理论与技术等方面的研究。

E-mail: rsxiao@bjut.edu.cn (通信联系人)

中的真空室就是由 9 个大厚度不锈钢组件拼焊成的双层环形结构,环形外径为 19.4 m,使用的不锈钢板厚达 60 mm^[1-3]。由于巨大的体型、拼焊的形式及低温等严苛的工作条件,ITER 真空室的焊接对接头质量及焊接变形提出了很高的要求。窄间隙氩弧焊、窄间隙埋弧焊和窄间隙熔化极气体保护焊等传统焊接方法由于较大的热输入量、坡口间隙及焊接变形,较难满足 ITER 真空室焊接的要求。

相比常规焊接方法,窄间隙激光填丝焊结合了激光焊接和窄间隙焊接的双重优势,且能够适应比常规焊接方法更窄的间隙,具有热输入小、焊接热影响区小、焊接变形小及焊接质量高等优点,作为一种高效的厚板焊接方法,越来越受到重视,非常适合于焊接 ITER 真空室等厚板结构^[4-5]。由于通常采用聚焦光束及深熔多层焊方式,厚板窄间隙激光焊存在较严重的侧壁未熔合及气孔问题,虽然已有研究利用多光斑组合或光束摆动等手段避免这些问题,

表 1 实验材料的化学成分及含量(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition and mass fraction of experimental materials (mass fraction, %)

	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	N	Mo	Nb	Fe
304	0.07	2.00	0.045	0.03	0.075	18.28	8.15	0.1	—	—	Bal.
ER347	0.08	1.0~2.5	0.03	0.03	0.30~0.65	19~21.5	9~11	—	0.75	0.8~1.0	Bal.

实验采用 IPG 公司的 YLS-6000 光纤激光器,最大输出功率为 6 kW,测得的光束质量因子 M^2 为 23.4。激光束采用芯径为 200 μm 的光纤传输,选用 120 mm 焦距的准直镜及 250 mm 焦距的聚焦透镜,正离焦 30 mm,功率 3 kW 时光束能量分布如图 1 所示。

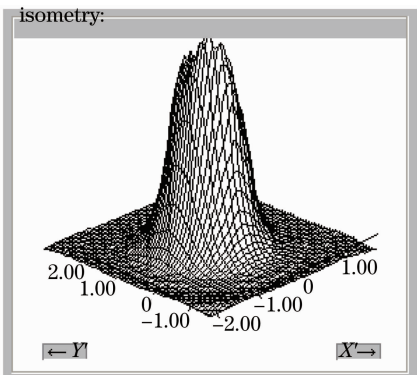


图 1 正离焦时的光束能量分布(单位为 mm)

Fig. 1 Energy distribution of laser beam at defocus condition (unit: mm)

焊接方式如图 2 所示,采用正离焦激光束,光束同时作用于坡口底部及侧壁。填充焊丝以前送丝方式进入熔池,通过熔池加热熔化,填充间隙形成焊缝,采用单道多层焊接的方式实现厚板的连接。保

但成本较高且会造成焊接间隙增大和焊接变形增加^[6-13]。利用正离焦激光束作用于坡口底部及侧壁的超窄间隙激光热导焊接方法是解决这些问题的不错选择。在采用超窄间隙坡口形式的大厚度板材激光填丝焊接条件下,离焦光束低功率密度热源是否会对接头组织性能产生较大影响及接头组织性能是否满足应用要求等相关研究鲜有报道。因此本文利用光纤激光器及 5 mm 超窄间隙焊接了 60 mm 厚 304 不锈钢板,利用光学显微镜、扫描电镜及低温拉伸等手段研究了 304 不锈钢厚板超窄间隙激光焊接头的微观组织与性能。

2 实验条件及方法

实验材料为 304 不锈钢厚板,尺寸为 250 mm \times 200 mm \times 60 mm。焊丝选用了抗裂纹性能较好的 ER347 奥氏体不锈钢焊丝,直径为 1 mm,厚板及焊丝的名义成分见表 1。

护气体为纯度 99.9% 的氩气,喷嘴内径为 7 mm 配合矩形横截面的尾保护喷嘴,尾保护喷嘴内壁尺寸为 5 mm \times 20 mm。焊接过程中,光斑与焊丝距离固定为 3 mm,保护气喷嘴紧贴工件表面使保护气体顺利进入窄间隙坡口以保证保护效果。通过工艺试验优化后的工艺参数为:激光功率 3.8~4.4 kW,焊接速度 0.36 m/min,送丝速度 2.0~3.7 m/min,侧吹气体流量 25 L/min,离焦量为 +40~+54 mm,焊丝与激光束夹角为 45°,保护气喷嘴与激光束夹角为 30°。不控制层间温度,待冷却至室温后焊接下一道。

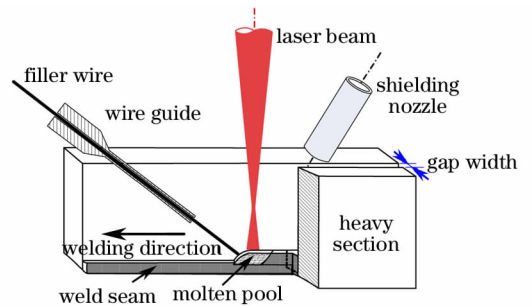


图 2 窄间隙激光填丝热导焊布置示意图

Fig. 2 Experimental diagram of narrow gap laser beam welding

60 mm 厚板的窄间隙激光焊坡口形式如图 3 所示,底部采用了“U”型坡口以减少侧壁未熔合的产生。

接头取样如图 4 所示,采取距焊接起点及结束点

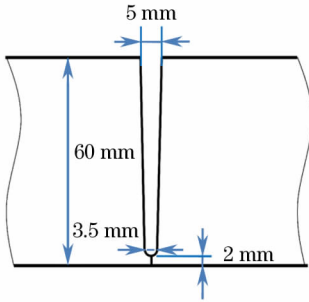


图 3 60 mm 厚板焊接坡口示意图

Fig. 3 Groove diagram for welding of 60 mm thick section

25 mm 以内的焊缝范围内线切割取样,用于分析组织缺陷的金相试样不同位置取三次。拉伸及弯曲测试试样分层取样,使测试焊缝区域涵盖整个焊缝厚度,拉伸试样尺寸如图 5 所示。采用光学显微镜观察接头组织形貌。利用 JEOL JSM7001F 型扫描电镜配合 Genesis 7000 型能谱仪观察接头显微组织观察及成分分析。接头的显微硬度测量仪器为 Future Tech 公司 FM300e 型显微硬度计,加载载荷为 200 g,加载时间为 15 s。低温拉伸试验在美国 MTS 公司的 MTS Landmark 型号电液伺服材料试验系统上进行,低温拉伸试验温度分别为 183 K、213 K、243 K 及 273 K。弯曲试验在 WE-800 型液压万能材料试验机上进行,抗弯试验中压力滚轮直径为 12 mm,支辊直径为 20 mm,支辊距离 20 mm,试样尺寸为 150 mm × 25 mm × 3 mm,取样方法图 4 所示。

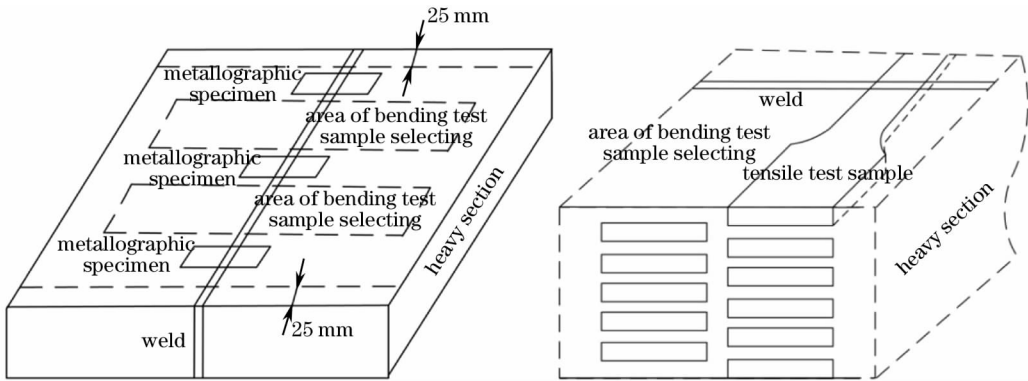


图 4 金相及力学试样取样方法

Fig. 4 Metallographical and mechanical sample selecting method

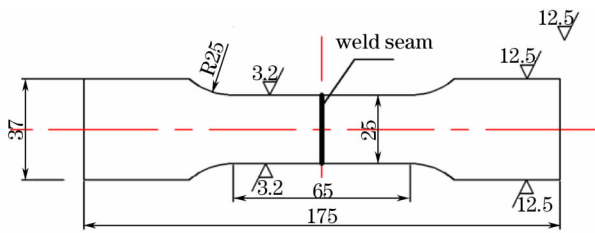


图 5 304 不锈钢厚板拉伸试样尺寸

Fig. 5 Dimension of tensile test sample for 304 stainless steel section



图 6 60 mm 厚 304 不锈钢窄间隙激光焊接接头横截面
Fig. 6 Section view of the welds of 60 mm thick 304 stainless steel achieved by narrow gap laser beam welding

3 实验结果和分析

3.1 接头显微组织分析

60 mm 厚 304 不锈钢板超窄间隙激光焊接接头形貌如图 6 所示。焊接接头由 20 层组成,每层填充高度约 3 mm,焊缝宽度约 3.8 mm,宽度上下变化不大,焊缝形状齐整,未发现侧壁未熔合、气孔等缺陷。

图 7(a)为不锈钢厚板超窄间隙激光焊缝局部

组织形貌,由图可知焊缝具有典型的快速凝固组织特征,柱状组织从熔合线边缘垂直向焊缝中心生长。图 7(a)标示(b)~(g)区域的高倍显微观察结果如图 7(b)~图 7(g)所示。图 7(b)为母材显微组织,为奥氏体基体中均匀分布着长条状铁素体,这是母材在热轧凝固时铁素体生成元素(主要是铬)发生偏

聚而产生的高温 δ 铁素体。图 7(c) 为熔合线及热影响区(HAZ)显微组织, 可知热影响区晶粒未见明显长大, 这表明多道焊的重复加热未造成热影响区组织的明显变化。在母材靠近熔合线附近铁素体含量明显增多, 呈现出由熔合区向母材延伸生成形态。图 7(d) 为焊缝区显微组织, 由快速冷却形成的柱状奥氏体及骨架状铁素体组成, 铁素体枝晶间距约为 $10\ \mu\text{m}$ 左右。图 7(e) 为柱状奥氏体晶界出现的板条状铁素体, 这说明超窄间隙激光焊缝铁素体表现

为骨架状与板条状铁素体共存形态。图 7(f) 为焊缝中心组织形貌, 为无方向性及不均匀的块状的柱状晶粒群, 这与熔池中心区域相比焊缝边缘温度梯度较小且熔池流动速度较快有关。图 7(g) 为焊道间交界处组织形貌, 此处形成了纵横垂直的两部分柱状晶区域, 交界面柱状晶连接紧密且无气孔等缺陷产生, 这种柱状晶的多方向性有利于提高接头的综合力学性能。

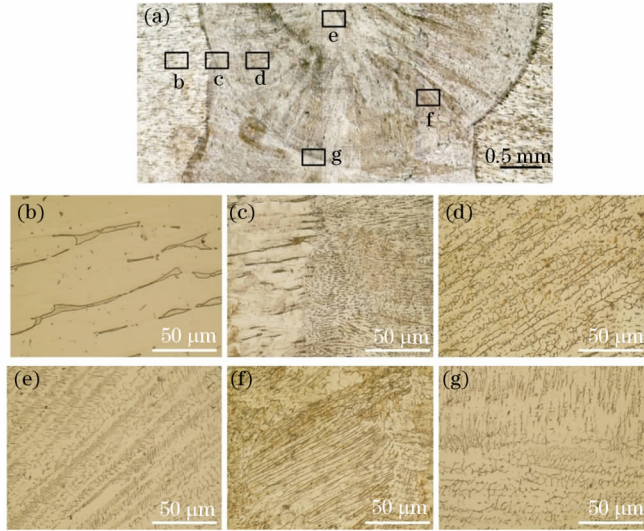


图 7 焊缝微观组织及成分分析。(a) 接头的焊缝宏观组织;(b) 母材;(c) 熔合线及热影响区;(d) 骨架状铁素体;(e) 焊缝中心;(f) 板条状铁素体;(g) 焊道底部位置

Fig. 7 Microstructure and component analysis of welded joints. (a) Macrostructure of welded joint; (b) base metal; (c) fusion line and HAZ; (d) skeletal ferrite; (e) center of weld; (f) lath ferrite; (g) bottom of molten pool

图 8 为 Cr-Ni 伪二元相图与凝固模式^[15]。由图 8 及奥氏体不锈钢铬镍当量的公式:

$$\text{Cr}_{\text{eq}} = \text{Cr} + 1.37\text{Mo} + 1.5\text{Si} + 2\text{Nb} + 3\text{Ti}, \quad (1)$$

$$\text{Ni}_{\text{eq}} = \text{Ni} + 0.31\text{Mn} + 22\text{C} + 14.2\text{N} + \text{Cu}, \quad (2)$$

可知, 304 不锈钢的 $\text{Cr}_{\text{eq}}/\text{Ni}_{\text{eq}}$ 为 1.57, 而焊丝 ER347 的 $\text{Cr}_{\text{eq}}/\text{Ni}_{\text{eq}}$ 为 1.88, 焊缝金属的凝固模式为 FA 模

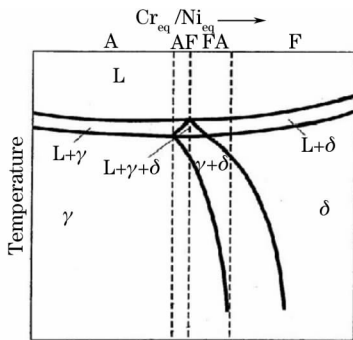


图 8 凝固模式与 Cr-Ni 伪二元相图的关系

Fig. 8 Relationship of solidification mode and pseudo-binary phase diagram of Cr-Ni

式, 即凝固时呈现出铁素体转变为奥氏体的过程, 最终形成骨架状或板条状铁素体存留在奥氏体晶界^[14]。铁素体的最终形态取决于熔池冷却速度, 当冷却速度较慢时, 铁素体多表现为骨架状, 当冷却速度较快时, 铁素体多呈现为板条状。由于厚板超窄间隙良好的热传导结构及激光焊接热源特点, 熔池冷却速度较快, 使铁素体-奥氏体相变扩散受到限制, 在一些区域未形成骨架状铁素体, 形成了如密集排布在一起的短横线, 即板条状铁素体形态, 如图 7(f) 中所示。另外, 由图 8 可知, 在焊接材料成分区域当温度稍低于固相线时则会生成铁素体(通常沿奥氏体晶界), 但在冷却转变过程中, 由于冷却速度较快, 这些铁素体来不及扩散转变为奥氏体而保存下来, 形成图 7(c) 所示的热影响区铁素体形态^[15]。

对焊缝、熔合线及热影响区进行了能量色散光谱(EDS)成分线扫描, 如图 9 所示, 主要合金元素 Cr、Ni 在焊缝及热影响区中分布均匀, 无显著的偏析区域。

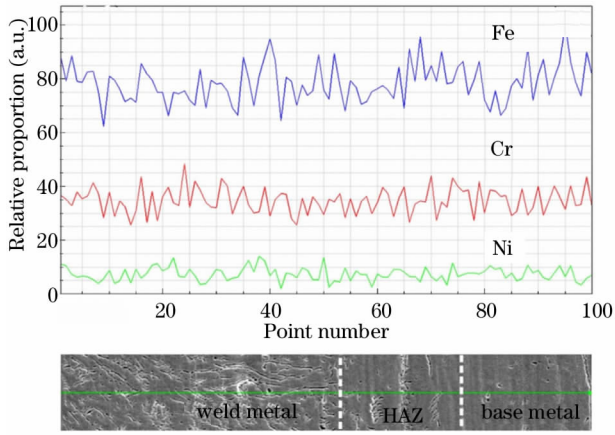


图 9 熔合线附近的元素分布曲线

Fig. 9 EDS analysis of area near welded joint

3.2 接头力学性能

3.2.1 接头显微硬度

接头的显微硬度分布如图 10 所示。焊缝区显微硬度相比母材略有降低,约为 280 Hv,母材的显微硬度约为 300 Hv,热影响区的显微硬度较高,可达 340 Hv 左右。由于热影响区被加热到接近于合金固相线温度,使其中一些析出物溶解,奥氏体达到过饱和,而在迅速冷却过程中各种碳化物和氮化物重新析出导致了影响区显微硬度的增加。由显微硬度测量结果可知大厚板不锈钢超窄间隙激光焊接接头各区域硬度差异较小,焊缝未见明显软化现象,热影响区显微硬度略高,热影响区较窄对接头性能影响不大。

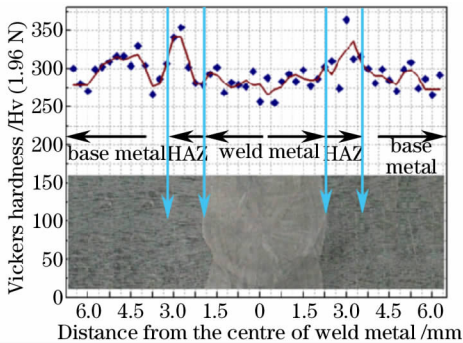


图 10 焊缝接头的显微硬度分布

Fig. 10 Hardness distributions of the welded joint

3.2.2 接头低温拉伸强度

由于 ITER 真空室所处低温气候环境及受到周边超导边校正场线圈(SCC)的液氮(77K)冷却的影响,对结构低温性能提出要求,因此进行了焊接接头的低温力学测试。图 11 为 304 不锈钢厚板超窄间隙激光焊接接头的低温拉伸试验结果,并与母材拉伸结果进行了对比。由试验结果可知,在 273 K、

243 K、213 K 及 183 K 温度下接头拉伸强度分别为 651、1180、1220、1260 MPa,分别为母材的 86%、96.7%、94.5% 和 92.6%,接头低温时抗拉强度明显增大,并随着温度降低而上升,这和低温时位错滑移受到限制有关。接头屈服强度随温度变化较小,在 275~320 MPa 之间,与母材大致相同;接头延伸率随着温度降低而降低,接头延伸率在 24.5%~29.4% 之间,低于母材的 31.5%~48.6%。奥氏体不锈钢相变强化作用较弱以及轧制状态使母材强度提高是焊接接头强度略低于母材的两个主要原因。超窄间隙激光焊接接头强度与母材相差不多说明了由于厚板窄间隙良好的冷却条件及焊缝细小均匀组织,使接头整体性能损失较少,另一方面也表明采用离焦光束的低功率密度热源也可获得高质量焊接接头。

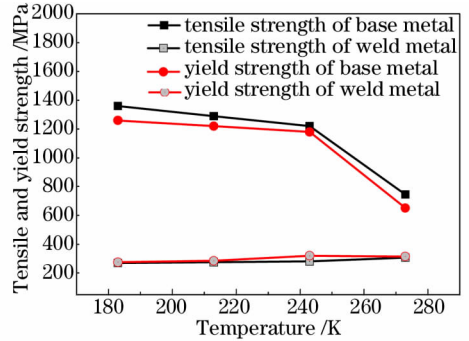


图 11 304 厚板焊接接头和母材拉伸与屈服强度对比

Fig. 11 Comparison of tensile strength and yield strength of 304 stainless steel joints and base metal



图 12 弯曲试样实验结果

Fig. 12 Result of bending test samples

3.2.3 接头抗弯曲性能

图 12 为接头弯曲试样经 180°正弯后照片,弯曲试验结果表明试样均能达到 180 度弯曲且焊缝区域无任何裂纹或其他缺陷出现。这表明 304 不锈钢厚板超窄间隙激光焊接接头具有较高的塑性,一方面由于采用离焦激光光束焊接时稳定性较高,焊接缺陷少,另一方面由于采用 ER347 焊丝中铬镍比值较高,焊缝中铁素体含量增多在一定程度上可以抑制凝固裂纹等缺陷的产生,保证了焊缝完整性和性能均匀性。

4 结 论

利用超窄间隙激光焊接 60 mm 厚度不锈钢板可获得无气孔及侧壁未熔合等缺陷的完整焊接接头,焊缝由 20 层组成,宽度上下一致且仅为 3.8 mm 左右。

焊接接头组织为柱状奥氏体及在奥氏体晶界均匀分布的骨架状铁素体和板条状铁素体,这是由大厚板超窄间隙特殊结构及离焦激光束热源特点决定的。热影响区未见晶粒明显长大,有少量铁素体生成。主要合金元素 Cr、Ni 在焊缝及热影响区中分布均匀,无显著的偏析区域。

接头热影响区显微硬度略高于焊缝和母材,焊缝显微硬度与母材相当。低温情况下随着温度的降低拉伸强度明显上升,最高可达 1260 MPa,接头拉伸强度在 183K、213K、243K 及 273K 时分别为母材的 86%、96.7%、94.5%、92.6%,抗弯曲试验中试样弯曲 180°无裂纹及其它缺陷产生。

参 考 文 献

- 1 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 Engineer and Design, 2001, 55(4): 397-410.
- 2 F Coste, L Sabatier, O Dubet, *et al.*. Nd:Yag laser welding of 60 mm thickness 316L parts using multiple passes[C]. Laser Inst America, 2001. 502-509.
- 3 Qin Hao, Lei Zhenglong, Chen Yanbin. Mechanical property of laser-MAG hybrid welding on low alloy high strength steel[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(10): 1003005.
秦浩,雷正龙,陈彦宾,等.低合金高强度钢激光-MAG 复合多层焊接头力学性能[J].中国激光,2011,38(10):1003005.
- 4 Hu Lianhai, Huang Jian, Ni Huifeng, *et al.*. CO₂ laser hybrid welding processes and microstructures of 10Ni3CrMoV Steel in T joint form[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0303003.
胡连海,黄坚,倪慧峰,等.10Ni3CrMoV 钢 T 型接头 CO₂ 激

- 光复合焊工艺与组织[J].中国激光,2011,38(3):0303003.
- 5 Wen Peng, Zheng Shiqing, Shinozaki Kenji, *et al.*. Experimental research on laser narrow gap welding with filling hot wire[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(11): 1103004.
温鹏,郑世卿,荻崎贤二,等.填充热丝激光窄间隙焊接的实验研究[J].中国激光,2011,38(11):1103004.
- 6 T Jokinen, M Karhu, V Kujanpaa. Welding of thick austenitic stainless steel using Nd:yttrium-aluminum-garnet laser with filler wire and hybrid process[J]. Journal of Laser Applications, 2003, 15(4): 220-224.
- 7 Coste F, Janin F, Hamadou M, *et al.*. Deep penetration laser welding with Nd:YAG lasers combination up to 11 kW laser power[C]. SPIE, 2003, 4831: 422-427.
- 8 Wu Shikai, Xiao Rongshi, Chen Kai. Laser welding of heavy section of stainless steel plants[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 Yoshiaki Arata, Hiroshi Maruo, Isamu Miyamoto, *et al.*. High power CO₂ laser welding of thick plate-multipass welding with filler wire[J]. Transactions of JWRI, 1986, 15(2): 27-34.
- 10 A S Salminen, V P Kujanpaa. Effect of wire feed position on laser welding with filler wire[J]. Journal of Laser Applications, 2003, 15(1): 2-10.
- 11 Li Liqun, Tao Wang, Zhu Xianliang. Wire filling laser multilayer welding of high strength steel thick plate[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(5): 1251-1255.
李俐群,陶汪,朱先亮.厚板高强度钢激光填丝多层焊工艺[J].中国激光,2009,36(5):1251-1255.
- 12 Zhang X D, Ashida E, Tarasawa S, *et al.*. Welding of thick stainless steel plates up to 50 mm with high brightness lasers[J]. Journal of Laser Applications, 2011, 23(2): 022002.
- 13 T Tsukamoto, H Kawanaka, Y Maeda. Laser narrow gap welding of thick carbon steels using high brightness laser with beam oscillation[C]. ICALCO, 2011. 141-146.
- 14 Lippold J C, Savage W F. Solidification of austenitic stainless steel weldments. 1: A proposed mechanism[J]. Welding Journal, 1979, 58(12): 362-374.
- 15 John C Lippold, Damian J Kotecki. Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels [M]. Chen Jianhong Transl. Beijing: China Machine Press, 2008. 140-155.
利波尔德,科特基.不锈钢焊接冶金学及焊接性[M].陈剑虹译.北京:机械工业出版社,2008.140-155.

栏目编辑:韩峰