

文章编号: 0258-7025(2007)06-0866-05

高功率激光焊接船板的组织性能

杨洗陈¹, 王 雨¹, 应朝龙², 纪执中²

(¹ 天津工业大学激光技术研究所, 天津 300160; ² 天津新港造船厂焊接实验室, 天津 300456)

摘要 采用高功率激光进行船板材料的焊接实验。实验条件为: 10 kW 快轴流 CO₂ 激光器和 5 轴数控机床; 船用 St370-2 低碳钢板; SG 填充焊丝; Y 型坡口。采用光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)和 X 射线衍射仪(XRD)研究了激光焊缝组织和结晶特性, 讨论了抑制裂纹生长因素, 并进行了焊缝强度实验、硬度实验和 X 光探伤实验。结果表明, 在 8~10 kW 激光功率和焊速 1 m/min 参数下, 在 12 mm 厚船板上获得了无裂纹的良好焊缝, 实现单面焊双面一次成形。与常规埋弧焊(SAW)焊接相比, 激光焊接变形很小, 激光焊缝宽度窄(最宽处 5 mm), 热影响区小(0.3 mm)。焊缝组织为细小板条马氏体加少量残余奥氏体, 硬度 HV350, 抗拉强度 536 N/mm², 经 180° 冷弯不断裂, 具有良好的综合力学强韧性。

关键词 激光技术; 焊接; 熔深; 造船; 钢板

中图分类号 TN 249; TG 456.7 **文献标识码** A

Microstructure and Properties of High Power Laser Welding of Ship Steel Plate

YANG Xi-chen¹, WANG Yu¹, YING Chao-long², JI Zhi-zhong²

(¹ Institute of Laser Technology, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)
(² Welding Laboratory, Tianjin Newport Ship Manufacturing Group, Tianjin 300456, China)

Abstract Experiments of high power laser welding of Y gap ship plate have been performed using fast axial flow 10 kW CO₂ laser, five-axial computer numerically controlled (CNC) table, St370-2 ship mild-steel plates and SG filling wire. Morphology and microstructure of laser welding seam have been widely examined by optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM) and X-ray diffractometer (XRD). It is shown that no crack full penetration welding in 12 mm thickness ship plate can be achieved at laser power of 8~10 kW and welding speed of 1 m/min. Comparing with submerged-arc welding (SAW), laser welding has a narrow seam width of 5 mm and a small heat-affected zone of 0.3 mm. Microstructure of fine martensite and a small amount residual austenite has been observed in the laser seam, which has a good synthesis mechanical obdurability. Mechanical tests of hardness of HV350, tensile strength of 536 N/mm² and 180° cold bend without fracture have been measured.

Key words laser technique; welding; penetration; shipbuilding; steel plate

1 引 言

我国船舶制造业近年来获得飞速发展, 其产量已跃居世界第三位, 但仍满足不了国内外市场日益增长的需求。传统船舶制造主要使用气体金属弧焊(Gas Metal Arc Welding, GMAW)和埋弧焊(SAW)两种连接技术。但由于热注入大, 在焊接中

薄板时易产生热应力变形, 需要较长时间进行焊后校正, 影响船体的生产进度。由于气体金属弧焊和埋弧焊两种方法热穿透深度较浅, 较厚船板难于实现单面焊双面一次成形, 常使船体翻转两面焊接, 降低了生产速度, 增加了工人的劳动强度。发展一种单面焊双面一次成形且热应力变形小的焊接技术成为船舶制造业的重要课题。由于激光具有能量密度

收稿日期: 2006-10-27; 收到修改稿日期: 2007-01-19

基金项目: 天津市重点科技攻关项目(033188011)资助课题。

作者简介: 杨洗陈(1941—), 男, 吉林人, 教授, 博士生导师, 主要从事激光材料相互作用和激光加工理论及应用方面的研究。E-mail: yangxich@126.com

高、焊接穿透能力强等特点,近年来采用高功率激光进行船板焊接已受到国内外广泛关注^[1~3],无论从激光焊接设备还是激光焊接机制和工艺等方面都开展了大量的工作。万瓦级高光束质量的 CO₂ 激光器、激光二极管抽运的 Nd:YAG 激光器以及光纤激光器相继开发成功用于激光造船研究。在焊接工艺方面,对于中薄板为克服激光焊缝搭桥困难主要采用激光填充焊丝方法,对于中厚板为弥补激光功率不足发展了一种激光-电弧混合焊接方法,上海交通大学在激光混合焊接方面开展了很好的工作^[4]。但激光焊接造船技术是多学科交叉的综合技术,仍处于发展阶段,许多机制尚待探讨^[5~9],深入开展高功率激光焊接船板的基础研究,对推进该项技术的产业应用具有重要的实用价值和科学意义。本文针对中薄板激光焊接,采用填充焊丝方法,重点研究了高功率激光焊接船板的组织和力学性能,以期给出激光焊接船板技术的一些基本特征,为激光焊接技术在船舶制造业中应用提供参考。

2 实验方法

2.1 实验设备

选用 RS10000RF 快轴流 CO₂ 激光器进行激光焊接实验,适用功率 10.5 kW,波长 $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ 。5 轴数控工作台用于移动试件以调整激光焊接速度。采用奥林巴斯光学显微镜(OM)和 JSM-5600LV 型扫描电子显微镜(SEM)观察焊缝形貌,用 XHD-1000T 型维氏硬度计测试焊缝硬度。采用 DMAX-2500 X 射线衍射(XRD)仪进行相分析。

2.2 实验材料

选用船用 St370-2 钢板进行焊接实验,厚度 $\delta = 12 \text{ mm}$ 。其化学成分(质量分数)为:0.17% C, 0.25% Si, 1.40% Mn, 0.04% P, 0.04% S, 0.30% Cr, 0.30% Ni 和 0.30% Cu。填充焊丝型号为 SG₂, 其化学成分(质量分数)为:0.07% C, 0.84% Si, 1.40% Mn, 0.007% P, 0.012% S, 0.03% Cr, 0.03% Ni 以及 0.07% Cu。

2.3 激光焊接工艺选择

焊板间隙及坡口形状直接影响焊件制造精度以及焊接冶金质量,通常有 I, Y 和 V 型三种焊接坡口。I 型坡口也称对焊,不加填充焊丝。为了不使聚焦激光束从坡口间隙漏过,最大间隙宽度为 0.1~0.2 mm,为此需预先创边,提高了焊板制造精度和焊接定位精度。从焊接冶金学角度来看,这种很窄

的平行间隙容易产生热裂纹,在中厚板激光焊接中一般不选择 I 型坡口。Y 型和 V 型坡口大大降低了激光焊接的精度要求,需要填充焊材来补充坡口。V 型坡口上表面开口大,激光焊接时不能一次焊满,需进行多次焊接,增加了成本和产生热裂纹的风险。因此实验中选 Y 型坡口,开口角度为 8°。采用激光同步送丝焊接方法,焦距 365 mm,焦点直径 0.4 mm,送丝角度 45°,激光焦点和丝位于试件表面。采用 He 气作保护气体并用于控制高功率激光焊接产生的等离子体,He 气流量 15~20 L/min。经实验优选激光焊接参数为:对于厚度为 12 mm 的船板,激光功率 $P = 8 \sim 10 \text{ kW}$,焊接速度 $V = 1 \text{ m/min}$ 。为与传统焊接方法对比,同时进行了厚度为 12 mm 船板的埋弧焊接实验,双面焊接,焊接速度 0.4 m/min。

3 实验结果

3.1 激光焊缝宏观形貌

图 1(a)是激光焊缝横断面照片,图 1(b)是埋弧焊焊缝横断面照片。可以看出,与传统焊接技术埋弧焊相比,激光焊缝形貌具有三个明显的不同:1)激光焊缝很窄,测得激光上表面焊缝宽度 5 mm,下表面焊缝宽度 1 mm;埋弧焊上表面焊缝宽度 12 mm,下表面焊缝宽度 11 mm。2)激光焊缝横断面总体呈 Y 型结构,埋弧焊焊缝断面呈 X 型结构。3)激光焊缝单面一次焊透,埋弧焊是双面焊接。由于填充焊丝的加入激光焊缝顶部呈现微凸形貌,未出现咬边现象;焊缝底部也出现一个小凸起。标志着激光可一次焊透船板材料,实现单面焊双面一次成形工艺。埋弧焊则呈现双 V 型坡口双面焊接形貌。

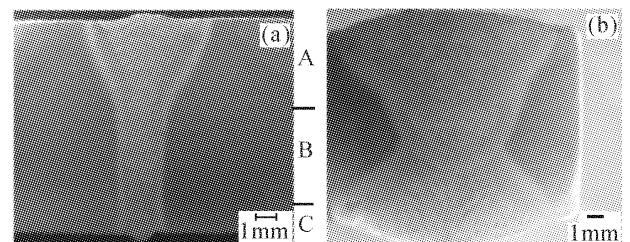


图 1 激光焊缝(a)和埋弧焊缝(b)横断面照片

Fig. 1 Photograph of cross section for the laser welding seam (a) and the SAW welding seam (b)

与传统焊接技术埋弧焊相比,激光焊接另一个特点是具有很窄的热影响区。图 2(a)为激光焊缝

左侧热影响区形貌,依次为基体(白色),热影响区(黑色),固态相变淬火区(浅白色)和熔化凝固区(柱状枝晶)。采用光学显微镜或扫描电子显微镜测得激光焊缝上表面热影响区宽度约为0.3 mm,下表面热影响区宽度约为0.2 mm。图 2(b)是埋弧焊焊缝热影响区形貌,依次为很宽的热影响区(黑色),较窄的固态相变区(浅白色)和熔化凝固区(也呈现柱状晶形貌)。从图 1(b)测得埋弧焊的上下表面热影响区宽度均为2 mm,由于热影响区太宽,基体区未能包含在图 2(b)中。

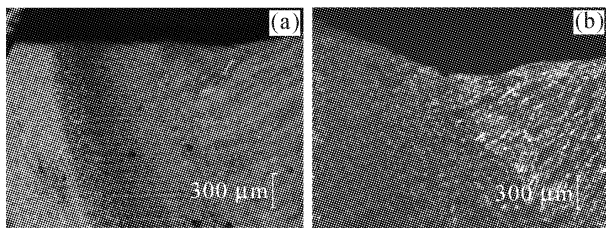


图 2 激光焊缝(a)和埋弧焊缝(b)的热影响区
Fig. 2 Heat-affected zone for the laser welding seam (a) and the SAW welding seam (b)

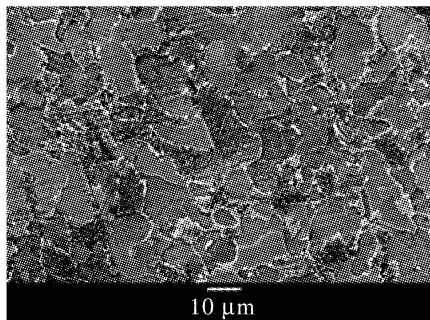


图 3 激光焊缝基体组织
Fig. 3 Microstructure of substrate for laser welding

图 3 是激光焊接基体材料高倍组织照片,可以看出,它是由铁素体和珠光体组成的。无论在激光焊接中或埋弧焊焊接中,基体材料都一样,具有相同的组织。

经无损探伤检查,在激光焊缝内未发现裂纹等缺陷。但实际上,如果激光焊接参数选择不当,也会产生裂纹^[10]。激光注入能量 E ,焊接速度 V 以及材料成分是激光焊接产生裂纹的主要影响因素。在不同的激光焊接参数下可以形成三种不同的典型熔池形状,从而导致不同的裂纹生成倾向:在激光注入能量 E 较低,焊接速度 V 也较小时,产生近似椭圆形的熔池,结晶等温面生成的柱状晶以较大角度向焊缝中心线生长,中心线上结晶强度较高不易产生裂纹;在激光注入能量 E 增大,焊接速度 V 也增大时,激光熔池变成细长形,结晶等温面法线近垂直于焊缝中

心线,则熔池两侧生成的柱状晶将低熔点相或杂质推向中心线处集聚,导致中心处结合强度较弱容易诱发裂纹;当激光注入的能量 E 很大,焊接速度 V 很高时,熔池中心线附近形成细小的等轴晶,从而可减少裂纹生成倾向。

3.2 激光焊缝结晶特征

从图 1 中可以看出,激光焊缝与常规埋弧焊焊缝具有不同的结晶特征:埋弧焊可分为上下两个结晶区,而激光焊接呈现三个不同的结晶区。

A 区:位于激光焊接熔池的顶部至焊缝 V 型收口区。在熔池边界上生长着柱状晶,柱状晶生长方向与熔池凝固界面垂直,即沿热流方向指向熔池表面;两侧柱状晶生长方向关于焊缝中心线对称分布,如图 4(a)所示。这种现象可根据凝固理论解释^[11]:激光熔池上表面是大气,其温度远低于激光熔池内部金属熔液温度,熔池内外形成了很大的温度梯度,则柱状晶沿热流梯度方向生长直指熔池表面。在此区域内由于柱状晶的生长方向指向熔池表面,熔池内低熔点相或杂质易于被推向熔池表面,致使此区域内裂纹敏感性降低。图 4(b)是埋弧焊焊缝组织,也呈柱状晶形貌,也是沿热流方向生长。这表明,激光焊缝与埋弧焊焊缝具有类似的结晶特征,无论激光焊接或是常规埋弧焊都遵循同一凝固理论和热流生长规律。但是埋弧焊的柱状晶尺寸比激光的大得多。

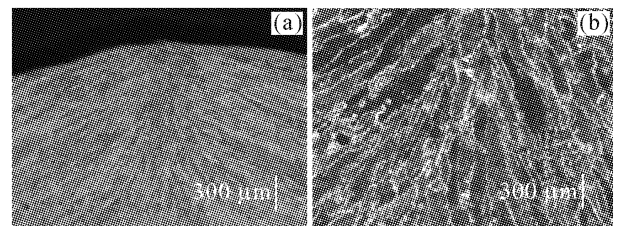


图 4 激光焊缝(a)和埋弧焊缝(b)A 区低倍形貌照片
Fig. 4 Morphology of A region for the laser welding seam (a) and the SAW welding seam (b)

B 区:位于激光焊缝中下部 I 型坡口区,其低倍形貌示于图 5。由于此区焊缝两侧呈平行状态,且间隙很窄,柱状晶由两侧熔合线开始向中心线对称相向生长,在中心线处相接,形成细小的等轴晶,如图 6 所示。可见,B 区柱状晶的生长方式是符合上述凝固理论的。这种细小等轴晶增强了基体的韧性,有利于降低焊缝内裂纹敏感性。

C 区:位于激光焊缝的根部,其低倍形貌如图 7 所示。由于焊缝根部是试件下表面,熔池内液态金

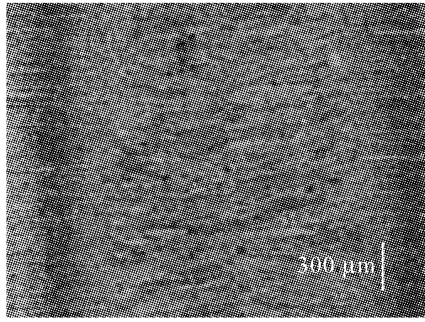


图 5 激光焊缝 B 区低倍形貌照片

Fig. 5 Column grains morphology in B region of the laser welding seam

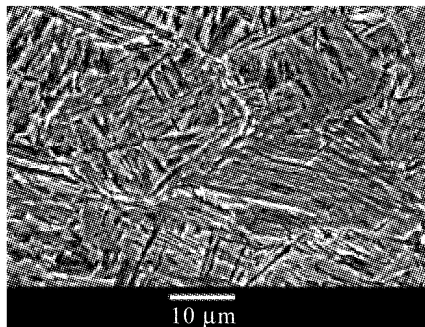


图 6 激光焊缝 B 区中心等轴晶组织

Fig. 6 Quasi-axial crystal in B region center of the laser welding seam

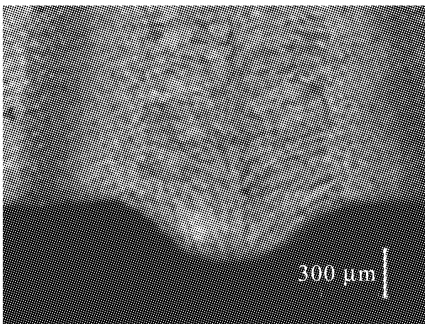


图 7 激光焊缝 C 区低倍形貌照片

Fig. 7 Morphology in C region of the laser welding seam

属在重力作用下以液滴形式从焊缝根部下垂,形成饱满的流滴呈微凸状,使焊缝全部焊透,下部没有出现咬边。金属熔滴外是大气,温度远低于金属熔液,形成很高的温度梯度。按照凝固理论,垂直于熔池根部生成的细小的柱状晶沿热流梯度方向生成,指向熔滴表面,并关于焊缝中心线左右对称分布。

3.3 激光焊缝组织和相分析

采用金相显微镜观察激光焊缝和埋弧焊缝高倍组织,如图 8(a)和(b)所示。采用 X 射线衍射进行激光焊缝组织的相分析,其结果如图 9 所示。

根据图 8(a)和图 9 的结果,可以看出,激光焊缝组织主要由细小的板条马氏体和少量的残余奥氏

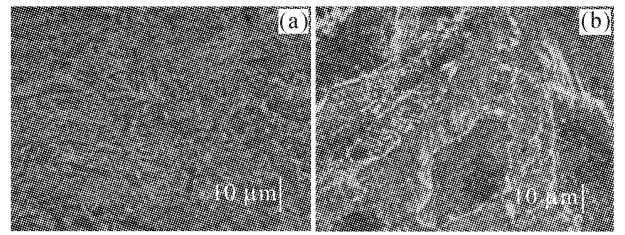


图 8 激光焊缝(a)和埋弧焊缝(b)高倍组织

Fig. 8 Microstructure of the laser welding seam (a) and the SAW welding seam (b)

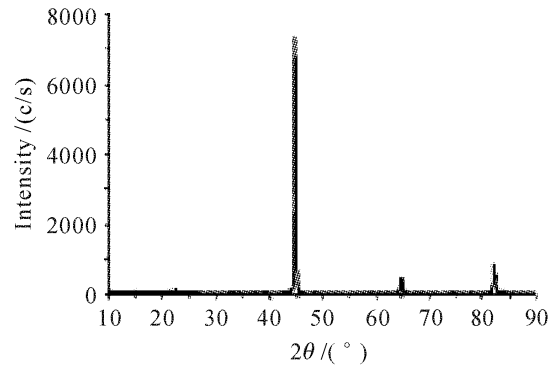


图 9 激光焊缝的 X 射线衍射图

Fig. 9 Patterns of X-ray diffraction of the laser welding seam

体组成。

在高功率激光作用下,基体材料和填充材料快速熔化,转变为高温奥氏体。虽然基体材料和填充材料均为低碳钢,但在激光快速熔凝作用产生很大过冷度下,低碳高温奥氏体也会转变成马氏体,它主要由大量细小的板条马氏体组成。由于快速冷凝产生的热应力、组织应力和原材料组织遗传的影响,激光焊缝内板条马氏体中存在大量位错。显然,高位错密度的低碳板条马氏体不仅使焊缝具有较高的强度和硬度,同时也具有良好的韧性^[12]。此外,由于激光熔凝时间十分短暂,熔凝时间大约 0.1 s,冷却速度高达 $10^6 \sim 10^8 \text{ }^\circ\text{C/s}$,因此奥氏体向马氏体转变过程中,会有少量的奥氏体来不及转变,在冷却过程中形成残余奥氏体与马氏体共同存在。这种残余奥氏体有利于提高组织的韧性。图 8(b)是埋弧焊接组织照片,呈现与激光焊接不同的组织形貌,它主要由铁素体和珠光体组成。铁素体沿奥氏体晶界析出,勾勒出粗大柱状晶的轮廓。比较图 8(a)和(b)还可以看出,埋弧焊接组织比激光焊接组织要粗大得多。应当指出,在常规焊接埋弧焊下,焊接速度不同也会使焊缝内铁素体和珠光体的比例产生很大差别。一般来说,焊接速度越快,焊缝冷却速度也越快,珠光体的含量也越多,硬度也越高。

3.4 激光焊缝的力学性能

使用维氏硬度计对激光焊缝硬度进行测试,载荷1.96 N。在图1激光焊缝横截面的A、B和C区内,从基体一侧横穿焊缝到基体另一侧,测试横向硬度分布,所测试曲线如图10所示。沿激光焊缝中心线从上至下逐点测试焊缝硬度的纵向分布,其硬度曲线如图11所示。

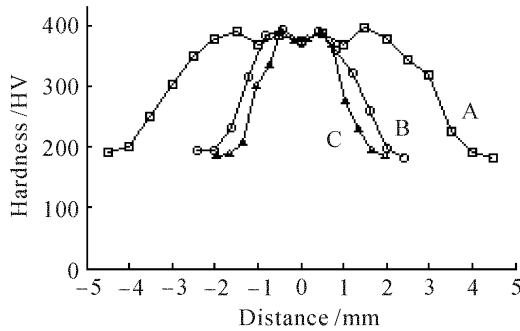


图10 激光焊缝硬度横向分布

Fig. 10 Hardness traverse distribution in the laser welding seam

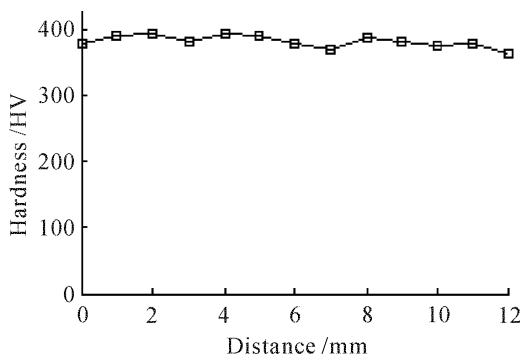


图11 激光焊缝中心线硬度分布

Fig. 11 Hardness distribution in the welding seam center line

从图10,图11硬度曲线得知,在激光焊缝内硬度分布基本均匀,硬度平均值为HV350,基体硬度平均值为HV200。垂直于焊缝取拉伸试片,测得抗拉强度为536 MPa,断裂处位于母材,在焊缝内未发现裂纹;平行于焊缝,取冷弯试片,经180°冷弯,未产生断裂;冲击韧性145。对常规焊接试样进行相同力学性能测试,得到自动埋弧焊的抗拉强度为510 MPa,硬度为HV280,冲击韧性为140,180°冷弯合格。力学实验表明,激光焊缝具有较好的综合力学性能,既有良好的抗拉强度,又有良好的抗弯曲韧性。这种现象可从激光焊接组织分析中得到解释。

4 结 论

1) 采用高功率CO₂激光焊接船板材料,可实现

单面焊接双面一次成形;与埋弧焊常规技术相比焊接速度可提高1倍以上。2) 与埋弧焊常规技术相比,激光焊缝宽度很窄,热影响区很小。3) 组织和性能实验表明,激光焊接具有与传统焊接方法相比拟的组织强度和强度等综合性能。4) 根据上述结果可以预期,激光焊接船板技术在提高船舶生产效率、提高船舶制造精度和质量方面具有较高的竞争优势。

参 考 文 献

- Tommi Jokinen, Teppo Viherva, Hannu Riikonen *et al.*. Welding of ship structural steel A36 using Nd:YAG laser and GMAW [C]. *Proceedings of ICALEO*, 1999. 225~228
- C. Fuhrmann, D. Petring, R. Poprawe. Recent results on high power CO₂- and Nd:YAG-laser-arc welding of thick steel plates [C]. *Proceedings of the Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing*, 2005. 185~192
- Guo Zeliang. Applications of laser welding in shipbuilding industry [J]. *Ship Science and Technology*, 2005, **27**(4):81~84
郭泽亮. 激光焊接技术在舰船建造中的应用[J]. *舰船科学技术*, 2005, **27**(4):81~84
- Gao Zhiguo, Wu Yixiong, Huang Jian *et al.*. Application of high power laser welding for shipbuilding [J]. *Electric Welding Machine*, 2006, **36**(5):55~58
高志国,吴毅雄,黄坚等. 船用大功率激光焊接技术[J]. *电焊机*, 2006, **36**(5):55~58
- Wang Hailin, Huang Weiling, Zhou Zhuoyou *et al.*. Laser welding of 8 mm thick stainless steel plates [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(5):463~466
王海林,黄维玲,周卓尤等. 8 mm厚不锈钢板的Nd:YAG激光焊接[J]. *中国激光*, 2003, **30**(5):463~466
- Duan Aiqin, Hu Lunji, Wang Yajun. Research on weld penetration monitoring by laser plasma optical signal in laser welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1):131~134
段爱琴,胡伦骥,王亚军. 激光深熔焊缝的熔透性监测研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1):131~134
- S. Katayana, Y. Naito, S. Uchiumi *et al.*. Penetration and porosity prevention mechanism in laser arc hybrid welding [C]. *Proceedings of 3rd International WLT-Conference on Laser in Manufacturing*, 2005. 193~198
- Gao Ming, Zeng Xiaoyan, Hu Qianwu *et al.*. Shielding gas method of CO₂ laser-TIG hybrid welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10):1422~1427
高明,曾晓雁,胡乾午等. CO₂激光-TIG复合焊接气体的保护方式[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10):1422~1427
- Chen Tao, Chen Jimin, Wang Zhiyong *et al.*. Welding property comparison study between two major high power industrial lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(2):185~187
陈涛,陈继民,王智勇等. 两种大功率工业激光焊接特性的比较[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(2):185~188
- Zuo Tiechuan *et al.*. *Laser Materials Processings of High Strength Aluminum Alloy* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 66~76
左铁川等. 高强度铝合金的加工[M]. 北京:国防工业出版社, 2002. 66~76
- Zhou Yaohe, Hu Zhuangqi, Wan Jieqi. *Solidification Technology* [M]. Beijing: China Machine Press, 1998. 299~302
周尧和,胡壮麟,万介奇. 凝固技术[M]. 北京:机械工业出版社, 1998. 299~302
- Zou Molian. *Welding Theory and Technical Foundation* [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1994. 186~189
邹茉莉. 主编. 焊接理论及工艺基础[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 1994. 186~189