

文章编号: 0258-7025(2009)11-3068-06

超低碳贝氏体钢 CO₂ 激光-气体金属弧焊复合焊接成形特性

雷正龙 陈彦宾 宋国祥 王 群

(哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 针对 12 mm 厚超低碳贝氏体(ULCB)钢,采用中小功率 CO₂ 激光与气体金属电弧(GMA)复合进行了多层焊接试验。试验结果表明,采用 3 层焊接,且每层热输入均匀变化时即可获得良好的焊缝成形。焊接过程中,打底焊时激光焦点要严格控制焊缝坡口钝边金属之内,填充层对激光焦点位置的要求并不严格;为了充分发挥激光的作用,应采用较高的送丝速度。此外,焊缝的拉伸力学性能测试结果表明,超低碳贝氏体钢激光-GMA 电弧复合焊接接头的抗拉强度可达到母材的 95% 以上,甚至部分焊缝超过母材,其平均抗拉强度达到 829.5 MPa。当试样断于焊缝时,焊接缺陷是造成焊缝强度下降的主要原因。

关键词 激光技术; 激光焊接; 超低碳贝氏体钢; 多层焊; 焊缝成形; 力学性能

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093611.3068

Weld Appearance of CO₂ Laser-Gas Metal Arc Hybrid Welding for Ultra-Low Carbon Bainitic Steel

Lei Zhenglong Chen Yanbin Song Guoxiang Wang Qun

(State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract Ultra-low carbon bainitic (ULCB) steel plates with 12 mm thickness were welded by using CO₂ laser-gas metal arc (GMA) paraxial hybrid process and multipass technique. The experimental results indicated that the good weld can be obtained by controlling the change of heat input on each pass when adopting three passes welding. In hybrid welding process, the focal point position is very important for the first filling pass and should be in the scale of the roof face. For the other filling passes the focal point position could be changed in a large scale. At the same time, in order to increase the utilization of laser energy, the higher wire feeding rate was used. Furthermore, the mechanical property tests showed that the tensile strength of weld in laser-GMA hybrid welding was over 95% as much as that of the base metal, and even to exceed partially the tensile strength of base metal. The tensile strength of the joint is 829.5 MPa when the specimens were failed in base metal. When the specimens were failed in welds, the defects led the specimens to fracture mainly.

Key words laser technique; laser welding; ultra-low carbon bainitic steel; multipass welding; weld appearance; mechanical property

1 引 言

超低碳贝氏体(ULCB)钢是 21 世纪更新换代的新型钢种之一。由于具有高强度、高韧性、低温性能极佳、综合性能好等特点,因此在舰船、寒地设施

建造等军用领域以及工程机械、管线、容器、桥梁、汽车及海洋设施等民用领域受到广泛重视^[1~5],尤其是中厚板超低碳贝氏体钢的应用更为广泛。但是,采用传统的焊接方法焊接中厚板超低碳贝氏体钢

收稿日期: 2009-01-14; 收到修改稿日期: 2009-02-25

基金项目: 哈尔滨工业大学优秀青年教师培养计划(HITQNJS.2008.020)资助课题。

作者简介: 雷正龙(1977—),男,博士,讲师,主要从事激光-电弧复合焊接、特种材料激光焊接以及激光焊接质量检测等方面的研究。E-mail: leizhenglong@hit.edu.cn

时,存在焊接效率低、热输入较大以及焊接变形较大等问题。虽然采用激光焊接可以避免这些问题,但目前国内激光焊接超低碳贝氏体钢一般都主要集中在薄板焊接,而关于中厚板焊接还未见报道^[6,7]。此外,采用激光焊接中厚板时,一方面对焊缝装配间隙要求极严;另一方面中厚板焊接所需激光功率较高,导致成本大幅增加。同时,激光功率越大产生的等离子体越多,对激光能量损失越严重^[8,9]。

目前,激光-电弧复合热源焊接技术作为一种高效率、高适应性、低成本的焊接方法,已经引起了广泛关注。尤其是在中厚板焊接方面更是表现出了其独特的优势和良好的应用前景。因此,本文针对 12 mm 厚的超低碳贝氏体钢,开展中小功率 CO₂ 激光-气体金属电弧(GMA)复合多层焊接技术的研究。

2 试验条件及方法

建立的 CO₂ 激光-GMA 旁轴复合焊接试验装置如图 1 所示。激光器为德国 Rofin-Sinar 公司生产的 DC030 射频激励扩散冷却 CO₂ 激光器,最大输出功率为 3.0 kW,光斑聚焦最小直径为 0.2 mm。

表 1 超低碳贝氏体钢板的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of ultra-low carbon bainitic steel (mass fraction, %)

C	Mn	Ni	Mo	Nb	Si	S	P	Cu	B
0.038	1.70	0.381	0.237	0.060	0.347	0.006	0.025	0.364	0.002

表 2 WM960S 焊丝的化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical composition of the wire WM960S (mass fraction, %)

C	Mn	Ni	Mo	Si	S	P	Ti
0.028	1.48	2.36	0.239	0.493	0.0090	0.0094	0.118

表 3 激光-电弧复合焊接参数

Table 3 Welding parameters used in hybrid welding experiments

Welding parameters	Laser power /W	Arc current /A	Arc voltage /V	Distance between laser and arc /mm	Welding speed /(m/min)
	2000~2800	150~260	24~35	3.0	1.0

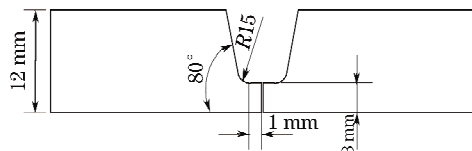


图 2 试验采用的坡口形式

Fig. 2 Groove geometry of weld in welding experiments

3 试验结果与讨论

3.1 CO₂ 激光-GMA 复合多层焊接的影响因素

试验中第 1 层焊道为打底层,第 2 层及其后面的诸层焊道为填充层。由于焊缝根部往往是出现缺

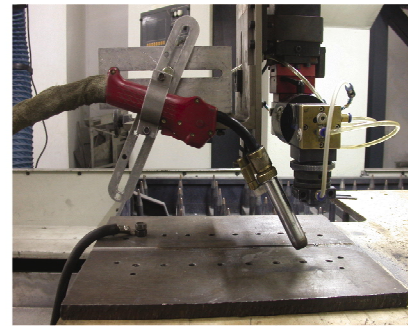


图 1 CO₂ 激光-GMA 旁轴复合焊接装置

Fig. 1 Setup of paraxial CO₂ laser-GMA hybrid welding
焊机为松下 YD-500AG 型 MIG/MAG 直流焊机,最大焊接电流 500 A。

试验用材料为 12 mm 厚的超低碳贝氏体钢,采用如图 2 所示焊缝坡口形式进行焊接,其材料成分如表 1 所示。焊丝采用直径 1.2 mm 的 WM960S 焊丝,焊丝成分如表 2 所示。焊接过程中,GMA 焊枪与激光束的夹角为 30°,保护气体中 Ar,He,CO₂ 的体积分数分别为 79%,20%和 1%,以 30 L/min 的流量由 GMA 焊枪送出对焊接区域进行保护。焊接时激光在前,电弧在后,其主要焊接参数如表 3 所示。

陷几率较大的部位,所以进行打底焊时关键是保证焊缝的背面成形和根部质量。对于填充层,在保证侧壁与根部熔合良好的情况下,要尽量提高填充高度,以此来提高焊接效率。多层复合焊接过程中,在其他焊接条件一定的情况下,影响焊缝成形的主要因素包括激光束离焦量、送丝速度和复合热源焊接能量输入等。

3.1.1 离焦量的影响

在多层复合焊接过程中,激光束离焦量是指激光束聚焦点在对接焊缝上表面以下为负离焦,反之为正离焦。

对于打底层焊接,由于激光焦点的位置对焊缝根部的熔透情况及背面成形有较大影响,因此对其离焦量要求较为严格。图3显示了在其他焊接参数相同的情况下,改变激光束离焦量对复合焊接打底层焊缝成形的影响。当激光束离焦量较小时,复合焊接焊缝熔深较浅,而且打底层焊缝容易产生凸形焊缝,导致后一层焊接时复合焊接能量很难对凸形焊缝两侧的尖角区域进行加热而容易产生气孔、未熔合等焊接缺陷,如图3(a)所示为离焦量为 -6 mm 的打底层焊缝形貌。因此,为了使复合焊接能量能够对焊缝根部进行充分的加热,焊接过程中一般将激光焦点置于钝边金属之内,如图3(b)所示离焦量为 -10 mm 的焊缝成形。

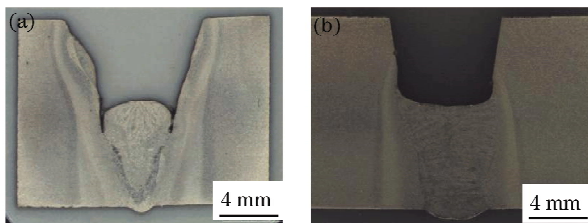


图3 不同激光束离焦量复合焊接打底层的焊缝成形(激光功率 $P=2500\text{ W}$, 电弧电流 $I=180\text{ A}$)。离焦量为(a) -6 mm ; (b) -10 mm

Fig. 3 Cross-section of the first filling pass weld by laser-GMA hybrid welding in different defocusing distance of laser beam (laser power $P=2500\text{ W}$, arc current $I=180\text{ A}$). Defocusing distance -6 mm (a) and -10 mm (b)

激光束离焦量对焊缝填充层的影响相对较小。图4显示了在其他参数相同的情况下,对于打底层焊缝熔深分别为 6 mm 和 7 mm 的焊缝采用不同激光束离焦量复合焊接填充层的焊缝成形。可以看出,利用

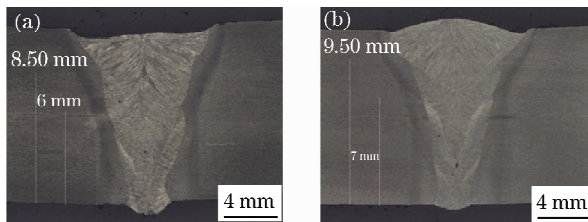


图4 离焦量对填充层焊缝成形的影响(第2层:激光功率 $P=2700\text{ W}$, 电弧电流 $I=210\text{ A}$)。第2层焊接离焦量为(a) -6.5 mm ; (b) -2 mm

Fig. 4 Effect of the defocusing distance on cross-section of the other filling pass weld (the second pass; laser power $P=2700\text{ W}$, arc current $I=210\text{ A}$). Defocusing distance at the second pass welding process -6.5 mm (a) and -2 mm (b)

激光-GMA 电弧复合进行第2层焊接时,采用 -6.5 mm 和 -2 mm 的离焦量所获得的第2层填充高度都是 2.5 mm 左右,且焊缝与侧壁熔合较好。

3.1.2 送丝速度的影响

一般来说,激光-GMA 电弧复合焊接过程中的送丝速度与相同焊接条件下的单 GMA 电弧送丝速度一样。但是,对于复合焊接来说,适当提高送丝速度,可以大大地提高焊接效率。图5显示了其他条件相同情况下激光-GMA 电弧复合焊接过程中不同送丝速度对焊缝成形的影响。当复合焊接送丝速度与相同焊接条件下普通 GMA 焊的送丝速度相同时,即送丝速度 v_f 为 5.3 m/min 时,此时激光-GMA 复合焊的热输入为 4.308 kJ/cm ,焊接得到的打底层焊缝高度只有 4.5 mm ,且需要4层焊接才能填充完整个焊缝坡口;而同样的焊接热输入情况下,当送丝速度 v_f 为 9.6 m/min 时,其打底层焊缝熔深可以达到 7 mm 以上,且只需要3层焊接即可填满焊缝,如图5(b)所示。这是因为激光焊接不仅可以引导和稳定 GMA 焊接电弧,也极大地提高了焊丝熔化效率的缘故。因此,对于 12 mm 厚超低碳贝氏体钢多层焊接,应选择较高的送丝速度可以提高焊接效率。

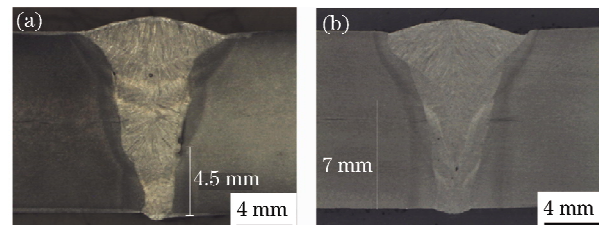


图5 送丝速度对复合焊接打底层焊缝成形的影响(激光功率 $P=2500\text{ W}$, 电弧电流 $I=180\text{ A}$)。(a) v_f 为 5.3 m/min 的4层焊接; (b) v_f 为 9.6 m/min 的3层焊接

Fig. 5 Effect of the wire feeding rate on cross-section of the other filling pass weld (laser power $P=2500\text{ W}$, arc current $I=180\text{ A}$). (a) Four passes welding of welding speed $v_f = 5.3\text{ m/min}$; (b) three passes welding of welding speed $v_f = 9.6\text{ m/min}$

3.1.3 复合焊接热输入的影响

不同的焊接热输入,对焊接层数、焊缝形态有较大影响,从而影响焊缝性能。图6显示了不同热输入焊接 12 mm 厚超低碳贝氏体钢的焊缝成形。在多层复合焊接过程中,焊接热输入从焊缝根部到焊缝表面是逐渐增大的。当焊接热输入过大或者过小,即焊接层数过少或者过多时,易导致焊缝轮廓变化不均匀,且容易产生气孔和未熔合等缺陷,如图

6(a)和(d)所示分别为采用 2 层和 5 层焊接的焊缝形态。当采用 2 层焊接时, 2 层的线能量之比为 1:1.80 左右, 其中第 1 层线能量为 514.8 kJ/m, 此时焊缝形态接近于三角形; 当采用 5 层焊接时, 线能量之比为 1:1.02:1.08:1.15:1.22 左右, 其中第 1 层线能量为 327 kJ/m。由于每层热输入很小, 所以焊缝根部宽度较小, 且出现了未融合缺陷。而对于中小功率的激光-GMA 电弧复合焊接 12 mm 厚超低碳贝氏体钢, 当采用 3 层(第 1 层线能量为 430.8 kJ/m, 各层线能量之比为 1:1.28:1.48 左右)或 4 层(第 1 层线能量为 390 kJ/m, 各层线能量之比为 1:1.03:1.09:1.16 左右)焊接时, 可以获得良好的焊缝成形和焊接质量, 焊缝轮廓变化均匀, 有利于焊缝均匀地承受载荷, 如图 6(b)和(c)所示。

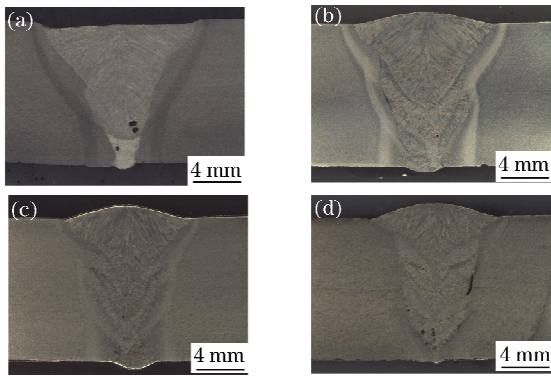


图 6 线能量输入及焊接层数对焊缝形态的影响。(a) 2 层焊接; (b) 3 层焊接; (c) 4 层焊接; (d) 5 层焊接

Fig. 6 Effect of the heat input and welding passes on cross-section. (a) Two passes welding; (b) three passes welding; (c) four passes welding; (d) five passes welding

3.2 超低碳贝氏体钢接头性能

3.2.1 硬度分析

采用 HVS-5 型维氏硬度计对超低碳贝氏体钢焊缝横截面不同部位的硬度进行测量, 其测量位置及其不同热输入下焊接接头不同部位的硬度变化趋

势如图 7 所示。可以看出, 不同焊接参数下焊接区域的硬度变化趋势相同, 焊缝区的硬度与母材相近, 略低于母材; 过热区、正火区的硬度是整个焊接区内最高的区域, 与母材相比有一定的升高; 未完全正火区的硬度与母材金属相比有所降低。焊缝、热影响区、母材的硬度一般在 270~330 HV 之间波动。与母材相比, 热影响区出现了小幅度的软化和硬化现象。尽管热影响区的硬度出现了一定程度的波动, 但由于热影响区的宽度较小, 且没有裂纹等缺陷, 因此, 拉伸试件无论在母材处断裂还是在焊缝处断裂, 热影响区都不是接头断裂的薄弱环节。

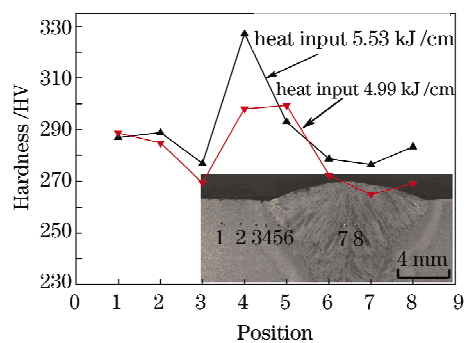


图 7 不同热输入时的焊接区硬度分布

Fig. 7 Hardness distribution of weld in different heat input

3.2.2 拉伸性能分析

超低碳贝氏体钢激光-GMA 复合焊接接头拉伸试样示意图如图 8 所示。对不同参数的试件进行拉伸试验发现, 试件的抗拉强度可以达到母材的 95% 以上, 甚至部分焊接接头的抗拉力学性能超过母材, 如表 4 所示。当焊缝不存在焊接缺陷时, 其拉伸试样一般断裂在母材, 且断裂位置距离焊缝和热影响区较远。当拉伸试样断裂在焊缝时, 其断裂位置一般处于焊缝内部靠近熔合线的区域, 如图 9 所示。断裂的起源往往是由于焊缝内部的缺陷引起的, 断裂的扩展通常是沿着焊缝熔合线在焊缝内进行。

表 4 激光-GMA 复合焊接 12 mm 厚超低碳贝氏体钢拉伸结果

Table 4 Tensile results of laser-GMA hybrid welding ultra-low carbon bainitic steel with 12 mm thickness MPa

No.	Base metal	Weld		
		Fracture in base metal	Fracture in weld	Fracture in weld
1	831.2	828.2	826.0	766.2
2	823.6	833.2	822.8	798.5
3	827.9	826.9	820.7	801.9
Average	827.6	829.5	823.2	788.9

对试样进行分析发现, 当焊接区没有与拉伸方向垂直的尖锐缺陷, 只有少量尺寸较小的气孔缺陷

且分散分布时, 对焊缝的强度影响较小, 其焊缝平均抗拉强度可达到 823.2 MPa 左右, 几乎与母材相

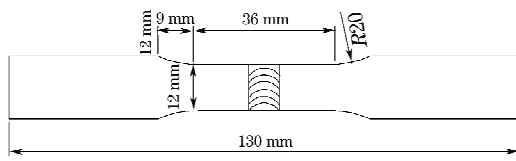


图 8 拉伸试样示意图

Fig. 8 Schematic of the tensile specimens

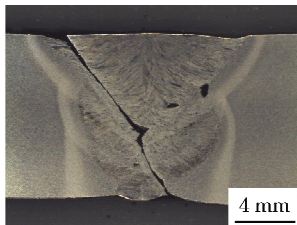


图 9 焊缝断裂位置

Fig. 9 Location of weld fracture

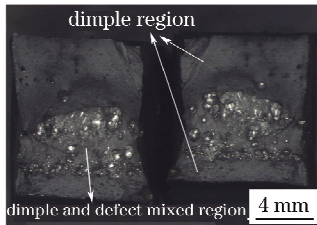


图 10 断口的宏观形貌

Fig. 10 Macrograph of the rupture specimen

当;当焊缝内部有较多气孔、夹渣缺陷时,对焊缝强度有较大的影响。尤其是当焊缝内存在尺寸较大的缺陷时,尽管数量较少,对焊缝强度的影响尤其明显,其最低抗拉强度只有 766 MPa 左右,仅为母材的 92%。

通过对焊缝的断口进行观察发现典型的断口分为 3 个区域:焊缝底层和焊缝上半部分的断口形貌为韧窝,中下部由气孔等缺陷和韧窝组成,如图 10 所示。焊缝韧窝区和缺陷区的具体形貌如图 11 所示,这也进一步证实对于在焊缝处断裂的试件,焊缝

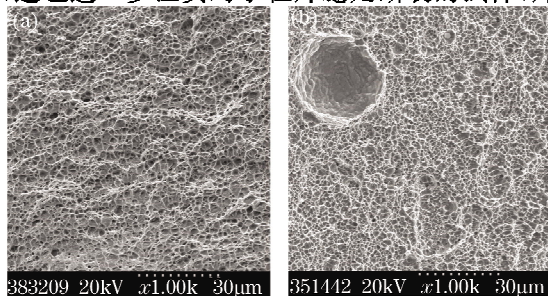
图 11 断口不同区域的 SEM 形貌 (a) 韧窝区;
(b) 韧窝、缺陷区

Fig. 11 SEM microstructure of different regions in fracture surface (a) dimple region; (b) dimple and defect region

中、下部的缺陷是导致试样在焊缝处断裂的重要因素。当焊缝中下部存在气孔缺陷时,在拉伸过程中,在拉应力的作用下,气孔会成为裂纹源,在其边缘产生应力集中。由于超低碳贝氏体钢具有良好的塑性,当应力集中达到某一临界值时就会通过塑性变形来缓解应力集中。但是,当该区域的塑性松弛能力不再能够抵消持续加载引起的加工硬化时,裂纹就会在这里萌生,如图 11(b) 所示。从图中可以清晰看出,气孔边缘发生了较大程度的塑性变形,这进一步证实了裂纹优先在这一区域产生的推论。对于超低碳贝氏体钢,激光-GMA 复合多层焊得到的焊缝组织韧性较好,当焊缝内缺陷较少时,焊缝的断口形貌基本为韧性断口。

4 结 论

对于 12 mm 厚超低碳贝氏体钢,采用激光-GMA 复合 3 层焊接时,打底层激光焦点应严格控制在钝边金属之内,而填充层对于激光焦点位置要求不严格。多层焊每层的热输入要均匀变化,并且采用较高的送丝速度,才能获得好的焊缝成形和较高的焊接效率。超低碳贝氏体钢激光-GMA 复合焊接的焊缝抗拉强度可以达到母材的 95% 以上。当试样断于母材时,接头强度达到 829.5 MPa。试样拉伸时,在缺陷处起裂,焊接缺陷的增多是接头强度下降的主要原因。超低碳贝氏体钢激光-GMA 复合焊接接头的硬度一般在 270~330 HV 之间波动。与母材相比,热影响区出现了小幅度的软化和硬化现象,而焊缝区的硬度与母材相近,略低于母材。

参 考 文 献

- Zhang Tao, Hou Huaxing, Ma Yupu *et al.*. Development of IIQ590DB heavy plate of super-low carbon bainite steel [J]. *Angang Technology*, 2005, 2: 27~30
张涛,侯华兴,马玉璞等.超低碳贝氏体钢 IIQ590DB 厚板的开发[J].鞍钢技术,2005,2:27~30
- A. K. Lis, J. Lis, L. Jeziorshi. Advanced ultra-low carbon bainitic steels with high toughness [J]. *J. Mater. Process. Tech.*, 1997, 64: 255~266
- Zhao Luyu. Ultra-low carbon bainite steel and its application in naval-ship [J]. *Development and Application of Materials*, 2006, 21(2): 34~37
赵路遇.超低碳贝氏体钢及其在舰船上的应用[J].材料开发与应用,2006,21(2):34~37
- A. A. Gorni, P. R. Mei. Austenite transformation and age hardening of IISLA-80 and ULCB steels [J]. *J. Mater. Process. Tech.*, 2004, 155: 1513~1518
- Wang Yanan. A study of weldability of ultra-low carbon bainitic steel [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2006. 1~20
王亚楠.超低碳贝氏体钢焊接性能研究[D].秦皇岛:燕山大学,2006.1~20

- 6 Zhao Lin, Chen Wuzhu, Zhang Xudong. Microstructure and mechanical properties of laser welded joint of NULCB steel[J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(4): 344~346
赵琳, 陈武柱, 张旭东. NULCB 钢激光焊接接头组织与性能的研究[J]. *激光技术*, 2006, **30**(4): 344~346
- 7 Zhao Lin, Chen Wuzhu, Zhang Xudong. Microstructure and mechanical properties of laser welded heat-affected zone in new ultra-low carbon bainitic steel [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(3): 408~412
赵琳, 陈武柱, 张旭东. 新一代超低碳贝氏体钢激光焊接热影响区的组织和性能[J]. *中国激光*, 2006, **33**(3): 408~412
- 8 Yang Xichen, Wang Yu, Ying Chaolong *et al.*. Microstructure and properties of high power laser welding of ship steel plate[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 866~870
杨洗陈, 王雨, 应朝龙等. 高功率激光焊接船板的组织性能[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 866~870
- 9 Zhang Song, Zhao Xudong, Wu Shikai. 10 kW class CO₂ laser welding of thick stainless steel plates [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(s1): 169~172
张松, 赵旭东, 吴世凯. 不锈钢厚板千瓦级 CO₂ 激光焊接[J]. *中国激光*, 2008, **35**(s1): 169~172