

船用高强度钢 E36 激光焊接接头组织和性能的研究

贾 进¹ 杨尚磊^{1,2} 倪维源¹ 白建颖¹ 丁 波¹

(¹ 上海工程技术大学材料工程学院, 上海 201620
² 上海交通大学上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240)

摘要 为了促进船用高强度钢 E36 激光焊接技术的发展,利用 YAG 激光器对 3.2 mm 厚的 E36 钢板进行对接焊接处理。分析了焊接接头的微观组织形貌与硬度特性;研究了焊接速度对接头性能的影响。结果表明,E36 钢激光焊缝(WZ)金属主要由马氏体构成,其硬度高于母材(BM)。焊接接头硬度分布不均匀,在焊缝边缘有着最高硬度;热影响区(HAZ)很窄,且硬度急剧下降。随着焊速变化焊接接头的性能以及硬度特性也发生变化:当焊接速度达到 70 mm/s 时,焊缝区域的最高硬度达到 448.9 HV,为所有试样中最高,而其热影响区硬度值下降最快。在垂直于焊缝的负载下,焊接速度为 20~60 mm/s 的拉伸试样均断裂在母材,而焊接速度为 70 mm/s 的试样却断在熔合线附近,塑性明显差于断在母材的试样。

关键词 激光技术; E36 钢; 激光焊接; 微观组织; 力学性能

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0203002

Study on Microstructure and Properties of Laser Welding Joints of Marine High Strength Steel E36

Jia Jin¹ Yang Shanglei^{1,2} Ni Weiyuan¹ Bai Jianying¹ Ding Bo¹

(¹ College of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China
² Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract It is important to accelerate the development of the laser welding technology of marine high strength steel E36. Laser butt welding of 3.2-mm thick E36 is performed by using a Yb:YAG laser. The microstructure and hardness of weld joints are analysed and the effects of the welding speed on properties of the weld joints are studied. The result shows that the microstructure of weld zone (WZ) is mainly martensite, and the microhardness of WZ is higher than that of base metal (BM). The hardness distribution of weld joint is non-uniform. The weld edge has an highest hardness. Heat affected zone (HAZ) is very narrow and the hardness in this zone drops quickly. With the increase of the welding speed, the properties and microhardness also change. When the welding speed is 70 mm/s, the highest hardness of the WZ is 448.9 HV, which is the highest of all the samples, and the hardness in its HAZ drops most quickly. The tensile samples which are welded at speed from 20 mm/s to 60 mm/s are all broken in base metal. When the welding speed is 70mm/s, the samples are all broken in fusion line and its ductility is obviously worse than that broken in base metal.

Key words laser technology; E36 steel; laser welding; microstructure; mechanical property

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 180.5810; 350.3390

1 引 言

船舶制造业是为我国航运交通和海洋开发提供

主要装备的战略性产业,而船舶建造的轻量化是人类应对能源短缺的必然趋势^[1],其结合了先进的激

收稿日期: 2013-07-12; 收到修改稿日期: 2013-08-31

基金项目: 国家自然科学基金(51075256),上海市教育委员会科研创新重点项目(11ZZ177),上海市激光制造与材料改性重点实验室(上海交通大学)开放课题(MLPM2012-1)

作者简介: 贾 进(1989—),男,硕士研究生,主要从事金属的激光焊接技术方面的研究。E-mail: yzjiajin@126.com

导师简介: 杨尚磊(1968—),男,教授,博士,主要从事材料连接及疲劳性能等方面的研究。E-mail: ysl@126.com

光焊接技术与高性能的高强钢三明治结构夹芯钢板,在船舶制造业中具有广阔的发展前景^[2]。国外在该领域的研究要早于国内:20世纪90年代,美国海军就开始小范围使用激光技术制造三明治钢板;而德国于1994~1999年间由 Meyer Werft 船厂主持的一个大型项目就是三明治板的制造和应用的研究;此外芬兰赫尔辛基理工大学船舶实验室最早于1988年开始了三明治板的研究^[3]。

激光焊接具有能量集中、焊接速度快、深度大、变形小、热影响区(HAZ)小、接头质量好和易于自动化等优点,正在逐步发展成为焊接高强度钢的主要工艺^[4-5]。由于船用高强钢板的大厚度以及焊接结构的大量使用,对焊缝熔透、变形、接头组织和性能等方面提出了很高要求,自20世纪90年代中期起,国内外许多学者将激光焊接方法应用到造船工业上,而在

高强钢激光焊接领域上还存在着许多问题有待进一步研究^[6]。E36是一种典型的低温高强度结构钢,广泛运用于船舶与海洋平台。本文分析了强度级别为550 MPa的E36钢板的激光对接焊接接头组织和力学性能,目的是深入理解E36钢的激光焊接技术特点,为在工业生产中推广采用激光焊接船用高强钢提供理论基础和实践经验,同时也为后续激光焊接制造E36三明治结构板领域提供指导和建议。

2 试验材料及试验方法

试验采用牌号E36高强度钢板,供货状态为正火态,材料厚度为3.2 mm,化学成分见表1。钢板金相组织主要由铁素体和少量弥散分布的细珠光体组成,化学成分如图1所示。

表1 E36钢的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical component of E36 steel (mass fraction, %)

C	Si	Mn	P	S	Al	Nb+Ni	C _{eq}
≤0.15	≤0.40	1.0~1.5	≤0.015	≤0.010	≥0.015	≤0.35	≤0.38

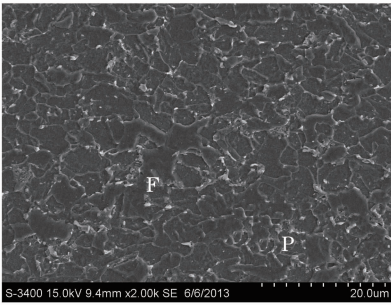


图1 E36母材原始组织

Fig. 1 Original organization of the E36 base metal

试验采用IPG公司生产的YLS-5000型光纤激光器,激光波长约为1.07 μm,光斑直径为0.2 mm,最大功率可达5 kW,保护气体为Ar,气体流量为25 L/min,在保持功率为3.5 kW、离焦量为-0.5 mm不变的情况下,改变焊接速度以分析焊接接头组织和力学性能的变化。选用平板对接形式,焊前利用砂纸对基体进行打磨,去除试样边缘的毛刺及表面氧化膜,再用丙酮乙醇溶液清洗钢板表面,避免表面杂质和油污影响焊接质量,保证装配精密和均匀的对接间隙。试验中通过VHX-600型超景深和S3400型扫描电镜(SEM)观察焊接接头微观组织形貌和类型;采用维式硬度计焊接接头的显微硬度;使用AG-25TA型材料万能试验机对焊接试样进行拉伸试验。

3 试验结果及分析

3.1 激光焊接接头宏观与显微组织形貌

图2是焊缝(WZ)的宏观形貌,在本试验焊接参数下焊接试样均焊缝成形良好、变形小、飞溅少。当焊接速度较低时[图2(a)],焊道呈现出比较粗糙的表面,焊缝(约0.53 mm)与热影响区(约0.42 mm)较宽。而随着焊接速度的提高,焊缝成形取得进一步改善[图2(b)],焊缝(约0.50 mm)和热影响区(约0.18 mm)宽度均有减小,尤其是热影响区宽度,焊缝表面也较光滑。

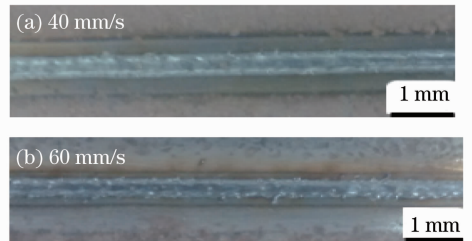


图2 E36不同焊接速度下焊缝形貌

Fig. 2 Weld macrography of the E36 steel at different welding speeds

图3为E36焊接接头组织的低倍金相照片。由图可以看出,接头未产生裂纹、气孔等缺陷产生。焊缝外形深而窄,呈现匙孔型焊缝,热影响区很窄,具有典型的激光深熔焊特征。由于没有填丝或由于

焊接过程温度过高使焊缝材料略有气化现象,焊缝表面出现凹陷。可见,焊接接头由焊缝区、热影响区

和热影响区附近母材(BM)区组成。

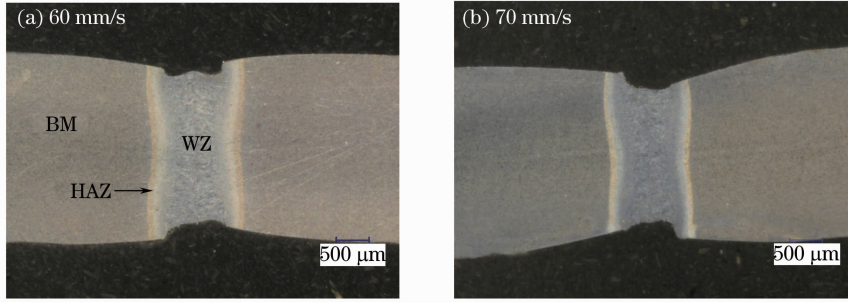


图 3 E36 激光焊接接头微观形貌

Fig. 3 Microstructure of the E36 laser welded joint

图 4 为 E36 钢激光焊接接头不同区域的组织形貌。激光焊接具有极高的加热和冷却速率,焊接完成后,焊缝冷却速率高于马氏体的临界冷却速度,使得原焊缝奥氏体晶粒发生马氏体转变,所以焊缝组织主要为板条马氏体,如图 4(a)和(b)所示。焊缝金属结晶时,原奥氏体晶粒依附母材在温度梯度方向上以柱状晶方式生长^[7]。焊缝在熔池凝固后的冷却时发生 A→M 的转变,马氏体相首先在奥氏体晶界处形核,由于金属含碳量少,初生马氏体细小并向晶内呈列状生长[图 4(a)],所以最终生成的马氏体呈现长条状。焊接过程中金属在热源的作用下,经历了温度随时间而变化的焊接热循环^[8]。由于焊接接头上各点到焊

接热源的距离不同,因此所经历的热循环也不同,这就使得热影响区中出现了不同的微观组织与形貌。图 4(c)和(d)为热影响区的微观组织,在靠近焊缝的热影响区主要组织仍为马氏体,相对于焊缝组织有所长大;而在距离母材较近处的热影响区则保留了部分铁素体和珠光体。在两相区,原珠光体和铁素体组织的加热温度较低,在 $A_{C1} \sim A_{C3}$ 之间,这一区域在焊接热循环作用下,发生奥氏体转变不完全化和重结晶,焊后得到的主要组织与母材类似。因此,在激光焊接过程中,由于焊接接头的不同位置经受的焊接热循环不同,其微观组织形貌也有所不同,进而带来焊接接头力学性能的改变^[9]。

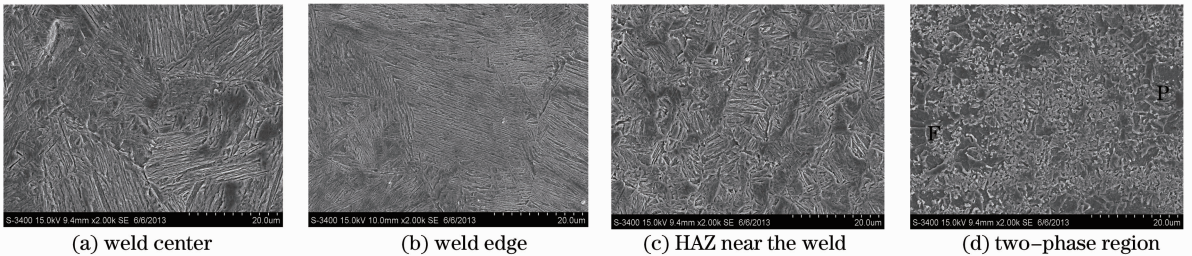


图 4 E36 焊接接头不同位置微观组织和形貌(50 mm/s)

Fig. 4 Microstructure of the E36 welded joint at different welding zones (50 mm/s)

3.2 焊接速度对接头力学性能的影响

图 5 为 E36 钢板在 40~70 mm/s 的焊接速度下,焊接接头的硬度分布。如图 5 所示,焊接接头的最高硬度均出现在焊缝,从焊缝向热影响区过渡时硬度稍有升高,这是因为焊缝边缘的冷却速度要高于焊缝中心。由 5(a)和(b)可见,焊缝边缘形成的组织略为细小而且马氏体含量增多,所以硬度值偏高,焊缝中心和其边缘组织都是板条马氏体,硬度虽然有所上升但幅度并不大。热影响区过渡到母材时,硬度值急剧下降,但是并未出现软化区,而后向母材过渡时硬度趋于平稳,这是因为激光焊接的热

影响区的尺寸很小,且由于距离焊接热源越远该处

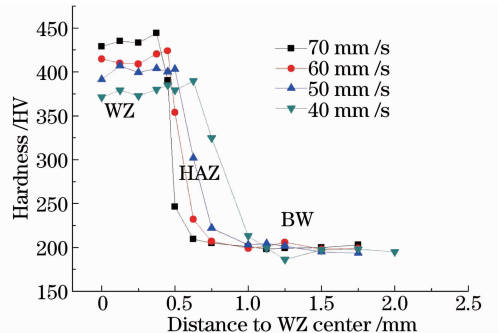


图 5 E36 焊接接头显微硬度分布

Fig. 5 Microhardness distribution of the E36 welded joints

热循环的最高温度越低,冷却速度也相应减小,所以马氏体含量也会迅速降低,也因此硬度值出现骤降。船用高强度 E36 母材焊前是正火态,在经历焊接热循环后热影响区发生了组织和性能的转变,虽然在母材附近出现了一个两相区,但加热温度不足以使原始组织全部发生相变,所以依然大量保留母材原有组织,并且在此期间,部分原始组织还会受热长大,因而该区域焊后所测得硬度也和母材硬度相近。

由接头的硬度分布还可以看出,焊缝和热影响区的宽度均随着焊接速度的增加而逐渐变窄。距离焊缝中心线相同位置处,硬度值随着焊接速度的增加而升高,且随着焊接速度的增加,组织硬度值变化加快。这是因为焊接速度增加时,金属吸收的热量减少,形成的焊缝和热影响区面积也减小。同时,焊接热输入的减小会使得金属冷却速度升高,使焊缝和热影响区的组织变得更加细小,从而导致显微硬度的升高。当焊接速度增加时,热影响区变窄,组织

的快速转变导致了硬度值变化的加快:70 mm/s 时焊接接头最低硬度为 210.2 HV,60 mm/s 时最低硬度为 206.1 HV,50 mm/s 时最低硬度为 201.3 HV,40 mm/s 时则为 198 HV。这是由于随着焊接速度的升高,焊接接头各个区域冷却速度增加,热输入减小使得焊接热循环时间变短,一方面使得马氏体含量较焊接速度慢的多,另一方面使得部分马氏体来不及自回火导致软化程度降低。

E36 拉伸试验结果如表 2 所示。在焊接速度为 20~60 mm/s 时试样均断裂在母材,强度均在 600 MPa 左右。由此可见,采用合适的焊速焊接后,E36 钢板焊接接头强度均高于母材,且激光焊接接头残余应力小开裂倾向小^[10],接头抗拉性能得到了提高。而当焊接速度达到 70 mm/s 时,试样断在焊缝边缘近熔合线处,强度与母材相差不多,延伸率显著下降,且无颈缩发生,塑性明显变差。

表 2 E36 钢激光焊接试样拉伸试验结果

Table 2 Tensile test results of E36 laser welded sample

Number	Welding speed / (mm/s)	Tensile strength /MPa	Elongation /%	Fracture sites	Occurrence of necking
1	20	604.0、606.6	23.3、24.2	BM	yes
2	30	600.4、599.7	26.6、23.4	BM	yes
3	40	599.8、602.7	22.6、24.1	BM	yes
4	50	602.0、601.4	23.0、22.9	BM	yes
5	60	602.4、601.8	25.0、23.7	BM	yes
6	70	887.6、878.2	4.3、4.8	fusion line	no

图 6 为不同断裂位置的断口形貌图,图 6(a)和 (b)为试样 3 的断口形貌图,断口边缘处形貌如图 6(a)所示,断口表面以等轴状韧窝为主,虽然韧窝小而浅,但还是可以看出是韧性断裂;图 6(b)是断口中心处微观形貌,此处断口表面依然以韧窝为主,韧窝与边缘几乎一样大,但韧窝稍深,总体与断口边缘处组织塑性一致。图 6(c)和 (d)为试样 6 断口形貌图,断口边缘处如图 6(c)所示,此处存在部分韧窝以及大量解理小平面,呈明显准解理断裂特征;图 6(d)为断口

中心形貌,此处断口表面虽仍以韧窝为主,但此处韧窝小而浅,尺寸分布均匀,且存在大量明显的撕裂棱,塑性依然不好,仍有表现出准解理断裂特征,但塑性要好于断口边缘,这是由于断口中心位置组织在焊接过程中冷却速度比断口边缘小,得到的组织更均匀,硬脆相马氏体要少,所以塑性要好于断口边缘处组织。对比图 6(a)、(c)和 (b)、(d),可见断口在母材处的塑性明显高于断在焊缝边缘,当断口位置在近熔合线附近的焊缝边缘时,塑性明显不足,为脆性断裂;而

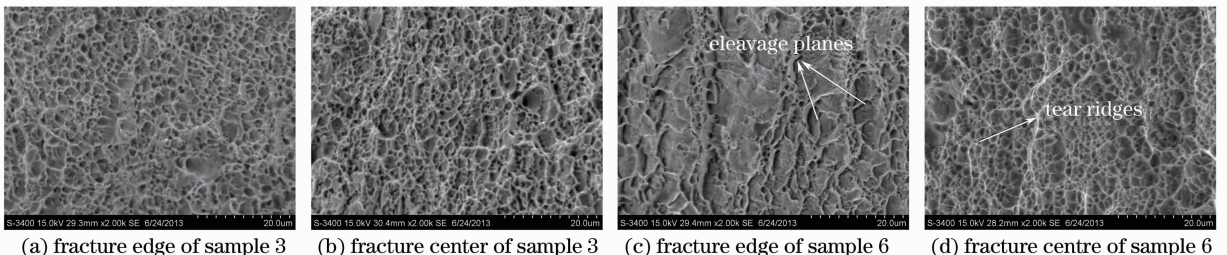


图 6 不同断裂位置的断口微观形貌

Fig. 6 SEM morphology of tensile fracture at different fracture locations

断在母材时,塑性良好,为韧性断裂。

准解理断裂是一种在以板条马氏体为主的焊接区中常见的断裂形式,这种形式的断口形貌与表现出的性能往往能通过该断裂区域的马氏体形貌与含量来解释^[11]。如图 7(a)所示,随着焊接速度的增加断口处马氏体含量增多,焊接速度越大,冷却速度越大,所以当焊速达到 70 mm/s 时,马氏体条状变得很细密,另外此处几乎尽为板条马氏体,几乎未发生“自回火”现象,这是因为激光焊接是一种冷却速度极快的焊接手段,且焊速越快冷却速度越大,使得焊缝边缘处马氏体“自回火”率相对于焊速小的来说变得更小。而其他焊速得到的接头焊缝边缘马氏体含量少于焊速为 70 mm/s 马氏体的量且还有其他组织如贝氏体、珠光体,如图 7(b)所示,并且“自回火”现象明显高于焊速为 70 mm/s 的情况,产生了塑韧相铁素体。可见焊速为 70 mm/s 时,熔合线附近马

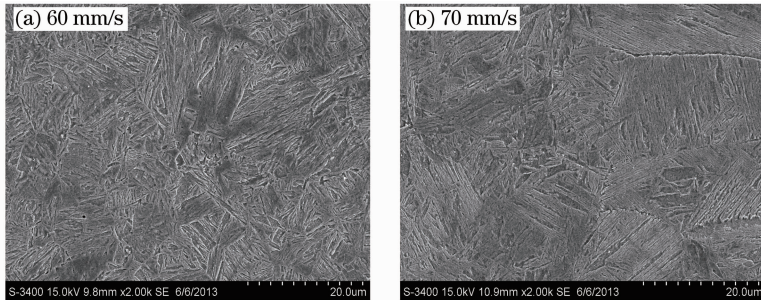


图 7 不同焊速的焊缝边缘 SEM 微观组织与形貌

Fig. 7 SEM microstructure of weld edge at different welding speeds

4 结 论

1) 采用 Yb:YAG 光纤激光可实现 E36 钢板对接深熔焊接,焊接接头无明显气孔等缺陷,焊接质量良好;

2) 焊接接头组织和硬度分布不均匀,焊缝和近缝的热影响区主要为马氏体组织,其硬度高于母材,最高硬度出现在焊缝边缘。从热影响区过渡到母材由于马氏体含量减少导致硬度迅速降低;

3) 焊接速度升高,焊接接头硬度分布发生变化,最大硬度也随之变大,热影响区宽度减小;

4) 当焊接速度达到 70 mm/s 时,拉伸试样断在焊缝边缘,无颈缩,呈准解理断口,属脆性断裂;小于 70 mm/s 的拉伸试样均断在母材,断口为韧窝形貌,呈韧性断裂。

参 考 文 献

1 Shang Gaofeng. Study on Ultimate Strength of Lightweight Ship Structures[D]. China Ship Scientific Research Center, 2011. 1

氏体含量高于其他焊速,且塑性相几乎没有,使得该区域塑性明显下降。此外,当焊速达到 70 mm/s 时,由于焊速较快,焊缝区域的能量尤为集中,冷却速度极快,因此在该组试验中发生飞溅,使得更多金属蒸发,板材厚度减少较多,焊缝与母材过渡处下陷较深(约为 60 mm/s 的两倍,如图 3 所示)且坡度几乎为垂直,所以会在焊缝边缘产生较大的应力集中。当外载荷增加时,由于该区域材料不能发生塑性变形使应力均匀化,从而造成了局部的破坏,所以该组拉伸试样均在熔合线处发生了脆性断裂。另外,熔合线组织不均匀、应力集中、空位密度高、晶界液化严重,诸多缺陷均限制了熔合线附近材料的各种性能。

因此在研究 E36 钢板激光焊接接头时要控制好焊速,避免出现焊缝组织过硬现象,此外还要做好焊后热处理以及防止焊接时焊缝处形成严重的金属气化现象,以免给接头带来拉伸性能的缺陷。

尚高峰. 轻量化船舶结构极限强度研究[D]. 中国船舶科学研究中心, 2011. 1

2 Chen Yanbin. Laser Welding Technology[M]. Beijing: Science Press, 2005. 140-144.

陈彦宾. 现代激光焊接技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 140-144.

3 Guo Xiaojun. Study on Properties of Laser Welded T-Lap Joint of High Strength Low Alloy Steel [D]. Shanghai Jiao Tong University, 2012. 14

郭晓军. 激光焊接低合金高强钢 T 型搭接接头性能研究[D]. 上海交通大学, 2012. 14

4 Kou Jilei, Liu Qibin. Effect of laser welding technology parameters on microstructure and properties of steel 40CrNi₂Si₂MoVA[J]. Applied Laser, 2011, 31(2): 141-146.

寇继磊, 刘其斌. 激光焊接工艺参数对 40CrNi₂Si₂MoVA 钢组织和性能的影响[J]. 应用激光, 2011, 31(2): 141-146.

5 Chen Genyu, Chen Fei, Zhang Yi, et al.. Effect of butt joint gap to high-strength automobile steel of fiber laser welding [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0603013.

陈根余, 陈飞, 张屹, 等. 对接间隙对车用高强钢光纤激光焊接的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603013.

6 张文斌. 焊接冶金学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996. 189.

7 Yu Sibin. Research on Laser Welded Joint Weld Ability of Ultra-High Strength Steel[D]. Jilin University, 2012. 39

于思彬. 超高强度钢激光熔焊焊接接头焊接性研究[D]. 吉林大

- 学, 2012, 39
- 8 Dong Danyang, Wang Guanjun, Ma Min, *et al.*. Study on microstructure and properties of laser welding dual phase steel joints for an auto-body[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(9): 0903002.
董丹阳, 王观军, 马敏, 等. 车用双相钢激光焊接接头组织性能研究[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0903002.
- 9 Wang Wenquan, Shang Yangeng, Li Xiujian, *et al.*. Microstructure and property of laser welded 650 MPa transformation induced plasticity steel sheet[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2012, 42(5): 1203-1207.
王文权, 商延赓, 李秀娟, 等. 激光焊接 650 MPa 相变诱发塑性钢的组织与性能[J]. 吉林大学学报(工学版), 2012, 42(5): 1203-1207.
- 10 Liu Qibin, Bai Lifeng. Microstructure and properties of ultra-high strength steel 30CrMnSiNi₂A by laser welding[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(8): 2182-2186.
刘其斌, 白丽锋. 超高强度 30CrMnSiNi₂A 钢的激光焊接组织及性能[J]. 中国激光, 2009, 36(8): 2182-2186.
- 11 Yu Ming, Yu Sibin, Gu Zhengwei, *et al.*. Analysis on ultra high strength steel of laser welding microstructure and fracture[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2010, 40(S1): 239-242.
于鸣, 于思彬, 谷净巍, 等. 超高强度钢激光焊接的微观组织与断口分析[J]. 吉林大学学报(工学版), 2010, 40(S1): 239-242.

栏目编辑: 宋梅梅