

# 激光焊接三明治结构 T 型接头的研究

杨橄生 于治水 卢庆华 郭 崇 诸振涛

(上海工程技术大学材料工程学院, 上海 201620)

**摘要** 本试验采用 IPG YLS-5000 型激光焊接系统, 焊接舰船用高强钢 907A 三明治板。采用万能试验机、显微硬度仪、超景深三维数码显微镜以及扫描电镜, 测定了 T 型焊接接头的拉脱力学性能、显微硬度、显微组织和断口形貌。结果表明, 焊缝和热影响区的显微硬度均高于母材, 焊缝显微硬度在 330~360 HV<sub>0.2</sub> 之间; 焊缝组织为板条马氏体, 热影响区组织主要为马氏体、残余奥氏体及少量析出碳化物; T 型接头断口属于兼有韧性断裂和解理断裂的综合断裂; 焊接速度和离焦量一定时, 焊缝宽度和深度随激光功率的提高而增大; T 型搭接接头的力学性能主要取决于搭接处的焊缝宽度, 在当前工艺条件下进行 3 道次的激光焊, 能保证腹板和面板的接合强度比母材的强度大。

**关键词** 激光技术; 激光焊接; T 型接头; 显微组织; 力学性能

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0403003

## Study of Laser Welding T-Joint of Sandwich Structure

Yang Gansheng Yu Zhishui Lu Qinghua Guo Chong Zhu Zhentao

(College of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract** Laser welding high strength steel 907A sandwich structure by IPG YLS-5000 laser welding system in this experiment. Tensile properties, microstructure, fracture morphology and microhardness of T-joints are measured by universal testing machine, microhardness tester, super depth of field three-dimensional digital microscope and scanning electron microscope. The results show that, the microhardnesses of welding seams and heat affected zone are higher than that of base metal. The microhardness of weld seam is between 330 HV<sub>0.2</sub> and 360 HV<sub>0.2</sub>. Microstructures of weld seams are lathy martensites, and microstructures of heat affected zone mostly are martensites, residual austenite and a small amount of carbides. T-joint fracture is a composite fracture, which both have ductile fracture and cleavage fracture. In the case that welding speed and coke are certain, weld width and depth increase with higher laser power. Mechanical performance of T-joint mainly depends on the weld width. Under the conditions of this test process, it needs 3 times single laser welding, to ensure that the web and panel joint strength is bigger than the strength of the base metal.

**Key words** laser technology; laser welding; T-joint; microstructure; mechanical property

**OCIS codes** 140.3390; 350.3390

## 1 引 言

激光焊接具有无机械接触、焊接速度快、生产效率高、实现深熔焊接、焊缝深宽比大、焊接时热输入量小、焊缝和热影响区小、焊后工件变形小、加热冷却速度快、焊缝晶粒细小、焊缝质量高<sup>[1-2]</sup>等优点。焊接参数是决定焊接能力的重要因素, 直接影响焊

接质量, 主要工艺参数有: 激光功率密度、离焦量、焊接速度、材料的吸收率、保护气体等<sup>[3-4]</sup>。

激光焊接薄壁轻量化三明治结构是通过激光焊接上下底板和芯板而成的, 其接头形式以 T 型搭接接头为主, 具有激光深熔焊的优点, 在航空航天、造船、高速列车等产业具有广泛的应用<sup>[5-6]</sup>。德国

收稿日期: 2013-10-21; 收到修改稿日期: 2013-11-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(513052353, 513755294)

作者简介: 杨橄生(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光焊接方面的研究。E-mail: neuysg@163.com

导师简介: 于治水(1960—), 男, 教授, 博士, 主要从事新材料连接技术方面的研究。

E-mail: yu\_zhishui@163.com(通信联系人)

Meyer 船厂早在 1995 年时已经在船舶结构中首先采用了简单的三明治结构板,并在 1998 年时成功应用在了乘客舱<sup>[7]</sup>。此后,针对造船的激光焊接技术得到了越来越多学者的关注<sup>[3,7-8]</sup>。郭晓军<sup>[9]</sup>研究了激光焊接低合金高强钢 T 型搭接接头性能,苟宁年<sup>[10]</sup>研究了 CCS-B 激光焊三明治板接头大变形及损伤。他们主要对 T 型接头组织、显微硬度、扭转性能以及接头变形的有限元分析进行了研究。然而,三明治结构板 T 型接头的拉脱过程,拉脱性能,断裂机制仍需深入研究。

本文采用 IPG YLS-5000 型激光器,穿透焊接舰船用高强钢 907A 三明治结构板,研究激光焊接工艺参数对焊缝成形的影响、接头的显微组织和显微硬度情况, T 型搭接接头的拉脱力学性能及断口形貌、断裂机制等,以此确定合适的工艺参数范围并

为后续激光焊接或激光电弧复合焊接三明治结构板的工业应用提供一些基础数据和建议。

## 2 试验材料与方法

试验采用舰船用高强钢 907A 钢板,其化学成分及力学性能见表 1。焊接的三明治结构板尺寸:上下底板尺寸为 300 mm×200 mm×3 mm,芯板尺寸为 200 mm×120 mm×3 mm。选定 3.5、4、4.5、5 kW 4 种激光功率,1.2、1.5、1.8、2.1 m/min 4 种焊接速度,以及 -10、-15、-20、-25 mm 4 种离焦量,然后进行正交试验。焊接前,先用砂轮片打磨待焊表面,同时用丙酮清洗干净。焊接保护气体采用纯 Ar 气,流量为 25 L/min。图 1 所示为激光焊接过程示意图。

表 1 907A 钢板的化学成分和力学性能

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of 907A steel plate

Material	Chemical composition / %								Mechanical property		
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Yield strength / MPa	Tensile strength / MPa	Shrinkage / %
Steel 907A	0.061	0.600	0.910	0.014	0.005	0.480	0.651	0.644	480	600	30

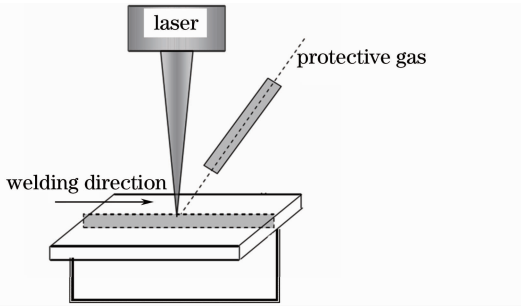


图 1 焊接过程示意图

Fig. 1 Schematic of welding process

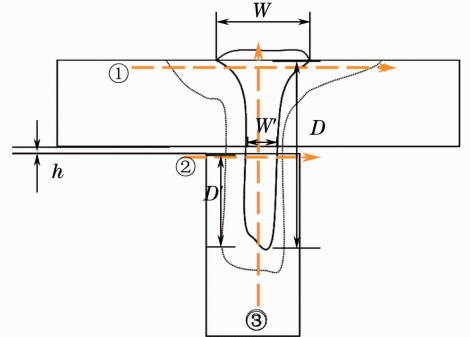


图 2 T 型接头的特征尺寸及显微硬度测试位置

Fig. 2 Dimensions of T-joint and position of microhardness test

## 3 结果与分析

### 3.1 激光功率对焊缝成形的影响

测定并记录如图 2 所示的 T 型接头特征尺寸,主要包括熔深、熔宽、芯板熔深及搭接处的焊缝宽度等。图 2 中黄线①、②和③为显微硬度的测试线,分别为面板下 0.2 mm 的位置、芯板下 0.2 mm 的位置和接头中间的位置,焊缝周围轮廓线为焊接热影响区的范围。

在焊接速度一定的情况下,激光功率的大小直接决定激光能量的大小,因而激光功率对焊接熔深的影响很大。激光功率增大,用于产生匙孔的激光能量也增大,从而熔深也增加。由图 3 分析可知,相

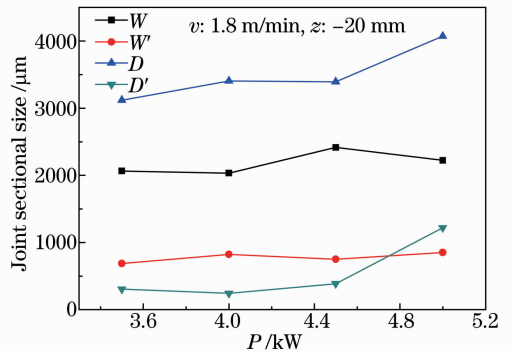


图 3 接头截面尺寸随激光功率 P 的变化情况  
Fig. 3 Relationship between joint sectional size and laser power P

焊缝进行比较发现,相同焊接速度 $v$ 和离焦量 $z$ 下,激光功率 $P$ 增加,芯板焊缝深度 $D'$ 增加,而 T 型搭接处焊缝宽度 $W'$ 也趋于增大,但所测的几组焊缝变化不明显。

### 3.2 接头显微组织和显微硬度分析

#### 3.2.1 接头显微组织分析

图 4 为激光焊接接头各区域的显微组织图片。图 4(a)为母材组织,由铁素体和珠光体组成。图 4(b)为热影响区粗晶区(CGHAZ)的显微组织,主要是粗大的马氏体和少量残余奥氏体组织,是激光焊接接头性能最恶劣的区域。因为激光焊接接头粗晶

区很窄,所以降低了其对焊接接头性能的影响。图 4(c)所示为热影响区细晶区(FGHAZ)的显微组织,主要是细小的马氏体、残余奥氏体及少量碳化物。图 4(d)是焊缝组织,主要为马氏体和少量残余奥氏体。焊缝金属依附于熔合区附近母材向焊缝中心生长形成柱状晶,而柱状晶内存在不同的结晶形态,焊缝的结晶形态主要取决于溶质浓度、结晶速度和温度梯度<sup>[11]</sup>。根据凝固理论,温度梯度与凝固速度的比值决定着凝固组织的形貌<sup>[12]</sup>。本试验激光焊接得到的焊缝中心区有部分均匀等轴晶,而边缘区和近中心区则为粗大的柱状晶组织。

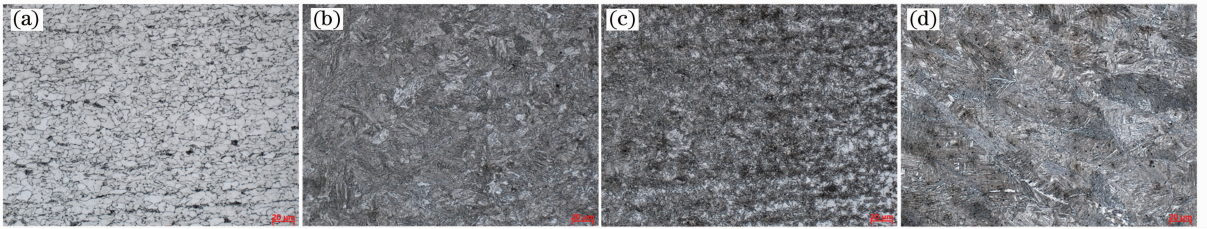


图 4 接头显微组织。(a) 母材;(b) 热影响区粗晶区;(c) 热影响区细晶区;(d) 焊缝区

Fig. 4 Joint microstructure. (a) Base metal; (b) CGHAZ; (c) FGHAZ; (d) weld zone

#### 3.2.2 接头显微硬度分析

按照图 2 所示的方向和顺序,对焊接接头进行显微维氏硬度测试,加载时间为 15 s,载荷为 200 g,相邻测点之间间隔为 0.1 mm。

图 5 所示为焊缝成形良好的编号 A5-1 焊缝显微硬度测试结果。由图 5(a)和(b)可见,焊缝

(WM)和热影响区的硬度都大于母材(BM)的硬度,焊缝显微硬度平均值为 320.8 HV<sub>0.2</sub>,热影响区显微硬度平均值为 276.7 HV<sub>0.2</sub>。从图 5 可见,面板焊缝中心显微硬度较稳定,而 T 型接头搭接处有间隙,散热不均匀,导致面板与芯板搭接处焊缝显微硬度有波动。

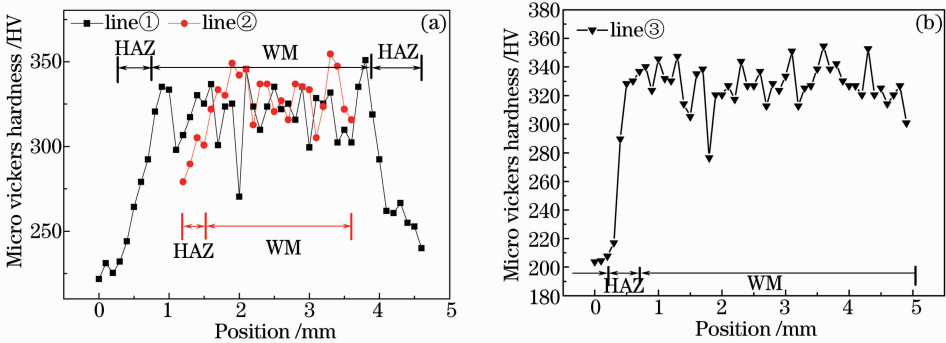


图 5 焊缝 A5-1(a)测试线①和②上以及(b)测试线③上的硬度变化

Fig. 5 Microhardnesses of welding bead A5-1 of (a) line①, line② and (b) line③

### 3.3 T 型接头力学性能与断口分析

#### 3.3.1 T 型接头的拉脱性能

T 型接头受力后载荷的传递只能通过面腹板的结合区而进行,因而结合区的宽度对接头的实际承受能力有重要影响<sup>[9]</sup>。焊接方法不同,结合区的宽度和性能也不同。对焊接后结构进行取样并进行力学性能测试,将三明治结构板进行线切割加工,得到两端带 T 型接头的试样并进行拉脱试验,其力学性

能如表 2 所示。

T 型搭接接头的力学性能主要取决于搭接处的焊缝宽度,搭接焊缝宽度越大则对应的拉伸强度也更大。试验中,单道焊和双道焊接的 T 型接头拉伸后都未断裂于母材,表明需要进一步加大搭接处的焊缝宽度,也就是说需要更大的焊接道数或者采用激光电弧复合焊接,使搭接处宽度大于立板宽度,面板与立板搭接处焊缝圆滑过渡,不引起应力集中,从

而能保证接头拉伸时断裂不发生在搭接接头处。对于 3 mm 厚的试验用高强钢板而言,在当前试验所用工艺下进行 3 道次的激光焊接时腹板和面板的接合强度比母材的强度大。经过组织和显微硬度的

测试,3 道次的焊接接头未见明显软化,这些说明,通过多道激光焊增大搭接处的焊缝宽度可以达到提高接头强度的目的。

表 2 T 型接头拉伸测试结果  
Table 2 Results of T-joint tensile test

Welding number	Sample number	Maximum force /N	Non-proportional force (0.2%) /N	Yield strength /MPa	Tensile strength /MPa	Fracture location
1	A1-1/A1'-1	54650.7	50625.8	604.5	541.2	Lap place A1'-1
1	A5-1/A5'-1	47823.9	47388.6	531.4	526.5	Lap place A5'-1
2	S1-1	54505.9	47900.7	605.6	532.2	Lap place S1-1
2	S2-2	55350.7	47183.8	615.0	524.3	Lap place S2-2
3	D3-6	55811.6	51024.1	620.1	566.9	Base metal

3.3.2 拉脱试验断裂过程分析

焊接时一般存在对中误差和热变形,焊缝不一定正好在立板中心或者面板正中间。但所有试样断裂过程是一致的,即从芯板和面板搭接面的两侧向中心裂开,最后在搭接面的焊缝中间脆断。所有试样载荷都是断前逐渐增大,最后下降。断裂时,载荷迅速降为零,如图 6 所示。断裂开始于面板挠曲,起源不是在焊接裂纹处,而是在像面板和腹板接触面这样的根部间隙处。最后焊接接头的断裂是非常迅速的脆性行为。

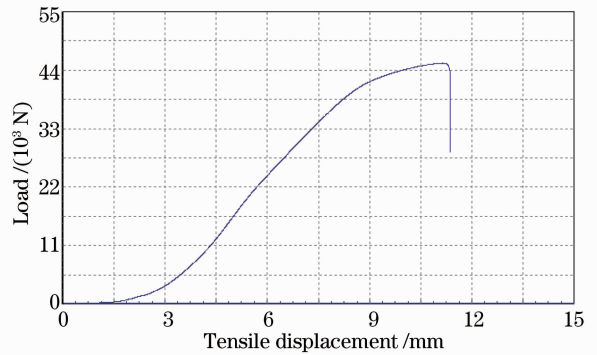


图 6 试验过程拉力的变化

Fig. 6 Behaviour of force during experiment

T 型接头的断裂机制可以分成 4 个阶段<sup>[13]</sup>: 1) 面板的弹性变形和根部开始裂开,如图 7(b)和(c); 2) 焊缝金属的颈缩,如图 7(c)和(d); 3) 由剪切引

起的焊缝金属和腹板边界材料的移动,如图 7(d)和(e); 4) 焊缝断裂,如图 7(f)。

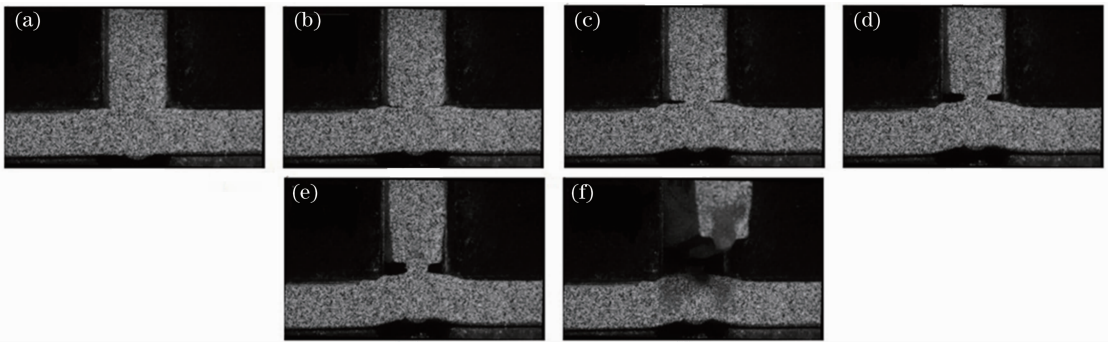


图 7 开裂过程图。(a) 弹性变形;(b) 根部起裂;(c) 面板凸起;(d) 颈缩;(e) 金属流动;(f) 断裂

Fig. 7 Fracture process diagram. (a) Elastic deformation; (b) root gap opening; (c) face plate raising; (d) necking; (e) metal flow; (f) joint fracture

3.3.3 T 型搭接接头拉脱断口分析

试样断口表面的微观形貌的研究是微观过程机制研究的重要手段,通过微观形貌分析可以帮助确定裂纹源的位置,从而为研究断裂的原因和机制提供依据。

焊缝宽度很窄,断口上焊缝区边部表面分布着许多等轴韧窝,韧窝细小而且较深,使得熔核区部分具有一定的韧性。在剪切过程中微裂纹在非金属夹杂物或第二相粒子上形核,成为多个显微孔洞,然后聚集、长大、汇合直至断裂,于是在断口表面留下了凹坑形的韧窝<sup>[14]</sup>。由图 8(b)和(c)可见从焊缝断口边缘到中心由韧窝过渡到解理面,焊缝中心处为解理

图 8 所示为激光焊接 T 型搭接接头的拉脱断口扫描电镜(SEM)形貌,图 8(a)为整体断口形貌,

断裂,即脆性断裂。图 8(c)为解理台阶和河流花样。图 8(d)为被放大的解理台阶,呈现出典型的解理断裂特征。总体而言,裂纹从两侧逐渐扩展至中

心,最后在焊缝中心位置发生解理断裂,该断裂兼有延性断裂和脆性断裂。

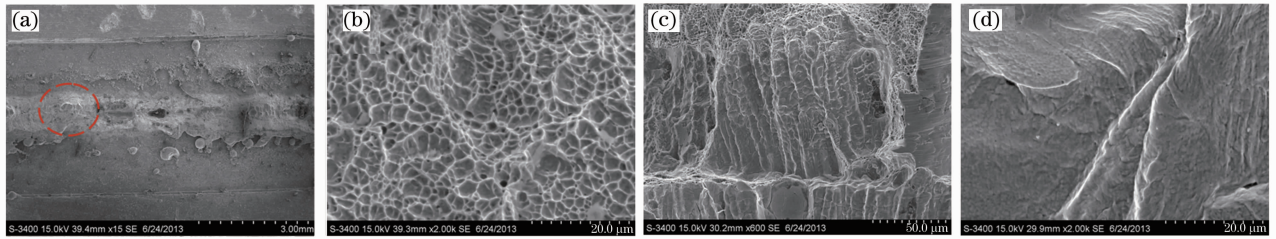


图 8 T 型搭接接头拉伸断口 SEM 形貌

Fig. 8 SEM photos of T-joint tensile fracture

## 4 结 论

1) 采用本试验工艺参数可以成功焊接变形较小、焊缝美观的船用三明治板。

2) 激光焊接焊缝组织细小,为板条马氏体;焊接热影响区很窄,约为 1 mm,其中细晶区组织主要为细马氏体、残余奥氏体和少量析出碳化物,粗晶区主要为较粗大马氏体和少量残余奥氏体组织。

3) 焊接速度和离焦量一定时,焊缝宽度和深度随激光功率的增大而增大。

4) T 型接头拉脱断裂兼有延性断裂和脆性断裂,裂纹从两侧逐渐扩展至中心,最后在焊缝中心位置发生解理断裂。

5) T 型搭接接头的力学性能主要取决于搭接处的焊缝宽度,在当前试验所用工艺下进行 3 道次的单一激光焊,可以使腹板和面板的接合强度比母材强度大。

## 参 考 文 献

- David Havrilla. Successful laser welding demands optimized laser joint design[J]. Laser Focus World, 2012, 48(9): 43-48.
- Zhong Minlin, Liu Wenjin. Leading areas and hot topics on global laser materials processing research[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(11): 1653-1659.  
钟敏霖, 刘文今. 国际激光材料加工研究的主导领域与热点[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1653-1659.
- Yin Haoshu. Laser welding in shipbuilding in Europe [J]. Electric Welding Machine, 2005, 35(7): 1-5.  
殷浩澍. 激光焊接在欧洲造船业的应用[J]. 电焊机, 2005, 35(7): 1-5.
- Zhang Yongkang. Laser Processing Technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. 68-76.  
张永康. 激光加工技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.

68-76.

- H Toftegaard, A Lystrup. Design and test of lightweight sandwich T-joint for naval ships [J]. Composites: Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005, 36(8): 1055-1065.
- Jeff Defalco. Practical applications for hybrid laser welding [J]. Welding Journal, 2007, 86(10): 47-51.
- Jens Klæstrup Kristensen. State of art in shipbuilding applications of hybrid laser-arc welding [C]. Copenhagen: NOLAMP Conference 12, 2009. 1-13.
- J Jelovica, J Romanoff, S Ehlers. Influence of weld stiffness on buckling strength of laser welded web-core sandwich plates [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 77: 12-18.
- Guo Xiaojun. Study on Properties of Laser Welded T-Lap Joint of High Strength Low Alloy Steel [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012. 27-31.  
郭晓军. 激光焊接低合金高强度 T 型搭接接头性能研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2012. 27-31.
- Gou Ningnian. Deformation and Damage Behaviour of CCS-B Laser Welding Joint in Sandwich Panels [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2012. 18-47.  
苟宁年. CCS-B 激光焊三明治板接头大变形及损伤的研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2012. 18-47.
- Zhang Wenyue. Welding Metallurgy (Basic Principle) [M]. Beijing: China Machine Press, 2003. 43-57.  
张文钺. 焊接冶金学(基本原理) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003. 43-57.
- 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.
- Mikko Jutila. Failure Mechanism of a Laser Stake Welded T-Joint [D]. Helsinki: Helsinki University of Technology, 2009. 29-31.
- Tian Yan. The Weld Zone Fracture Metallographic Analysis [M]. Beijing: China Machine Press, 1991. 67-73.  
田燕. 焊接区断口金相分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1991. 67-73.

栏目编辑: 宋梅梅