

# 激光焊接 960 高强钢 T 型接头弯曲性能研究

熊孝义<sup>1</sup>, 乔及森<sup>1</sup>, 蒋小霞<sup>1</sup>, 朱亮<sup>1</sup>, 吴毅雄<sup>2</sup>, 陈剑虹<sup>1</sup>

(1. 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 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 201100)

**摘要:**主要研究了 I 型芯三明治板 T 型接头弯曲失效过程及焊接参数对接头弯曲性能的影响, 分析了相同焊接速度(1.5 m/min)下不同焊接功率所得接头的组织及性能。研究发现, 焊接功率为 11 kW 的 T 型接头在失效过程中有弹性阶段、弹塑性阶段、塑性阶段和断裂阶段, 而焊接功率为 9 和 10 kW 的 T 型接头经历较短的塑性阶段。根据弯矩与转角关系可知, 焊接功率为 9 和 10 kW 的 T 型接头转角为 4°~6°之间, 而 11 kW 接头转角为 11°。9、10 和 11 kW 焊接接头的旋转刚度平均值为: 86、89 和 99 kN。分析接头受力状态可知, 由于接头的几何不连续性使得接头应力集中状态不同, 连接宽度越大应力集中系数越小, 且间隙在一定范围增大时应力集中系数越小。

**关键词:**激光焊; 三明治板; 焊接接头; 失效

中图分类号: TG404

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2014)19-0158-04

## Study on Bending Behavior of Laser Welding T Joints of 960 High Strength Steel

XIONG Xiaoyi<sup>1</sup>, QIAO Jisen<sup>1</sup>, JIANG Xiaoxia<sup>1</sup>, ZHU Liang<sup>1</sup>, WU Yixiong<sup>2</sup>, CHEN Jianhong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 201100, China)

**Abstract:** The bending failure process of T-joint from I-core sandwich plate and the effects of welding parameters on the welding performance were studied. The microstructure of T-joint at different welding power while at the same welding speed (1.5 m/min) was analyzed. That four stages were contained in the failure process under the welding power of 11kW: elastic stage, elastic-plastic stage, plastic stage and fracture stage, while there is no plastic stage under the welding power of 10kW and 9kW, the moment rotation curve of the T-joint is drew, it showed the rotation angle is 4-6° under 9kW and 10kW, while the joint rotation angle is 11° under 11kW. The mean rotational stiffness of the welded joints is 86kN, 89kN and 99kN under 9kW, 10kW and 11kW. According to the stress state of T-joint, the stress concentration of the joint connection is different due to the geometric discontinuity. The stress concentration factor decreases with the increase of width connection, and the stress concentration factor can be smaller if the gap increases in a certain range.

**Key words:** laser welding; sandwich board; welded joint; failure

金属三明治板由上、下面板和芯板组成, 轻量化金属三明治板可为舰船轻型结构最大减重 50%, 最大空间节省 50%。三明治板具有独特的结构性能, 在海洋工程和船舶领域用于替代原加筋板结构的应用非常广泛<sup>[1-3]</sup>。激光焊接作为一种先进的加工手段, 由于焊接性能优越、简化结构、减轻构建的质量等而得到广泛应用<sup>[4-5]</sup>。兰州理工大学苟宁年等人对激光

焊三明治板的 H 型接头进行双边冲剪试验, 发现存在弹性弯曲阶段、塑性弯曲阶段和失稳断裂阶段等三个阶段<sup>[6]</sup>。

研究发现, 三明治板承载失效的过程中主要表现为接头断裂和面板弯曲。在三明治板中, 通过芯板连接上下两个面板, 对 T 型接头受力分析表明其主要有拉应力、压应力和剪应力等, 上下两个面板的载荷通过 T 型接头互相传递, 故 T 型接头的受力状态较复杂。本文主要针对接头失效展开研究, 一方面通过弯曲试验测定接头的旋转刚度与转角的关系, 然后分析接头的受力状态, 最终得出激光焊接 T 型接头弯曲性能与焊接功率及接头几何尺寸的关系。

收稿日期: 2014-01-13

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51035004)

作者简介: 熊孝义(1987-), 男, 湖北黄石人, 硕士在读, 主要研究方向: 高强钢三明治板激光焊接制造基础研究; 电话: 13893138956;

E-mail: qiaojisen@lut.cn

## 1 焊件装配及焊接方法

本试验母材选用屈服强度为 960 MPa 的 960 轧制钢板。三明治板焊接过程中, 激光束穿过面板使芯板和面板焊合在一起, 试验截取三明治板中的 T 型接头作为研究对象。面板和芯板都采用厚度为 5 mm 钢板, 焊接参数见表 1 所示。三明治板的整体结构、T 型接头及其焊缝形状及尺寸如图 1 所示。

表 1 焊接参数  
Tab.1 Welding parameters

焊接速度 / (m·min <sup>-1</sup> )	功率 / kW	保护气	流量 / (L·min <sup>-1</sup> )	离焦量 / mm
1.5	9、10、11	99%He	30	-2

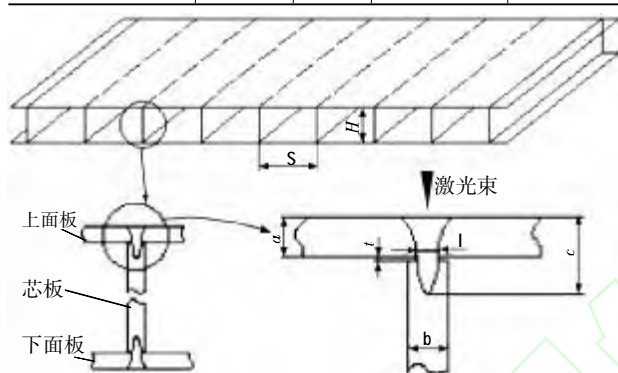


图 1 三明治板装配示意图  
Fig.1 Assembly diagram of sandwich plate

## 2 接头组织

图 2 为抛光、腐蚀等处理之后的焊接接头宏观形貌。可看出, 激光焊接接头呈 Y 型, 焊接功率越高熔深就越深; 焊缝处呈粗大的柱状晶, 熔合区较窄, 熔合区和热影响区晶粒细小; 焊缝根部存在气孔或者夹渣。

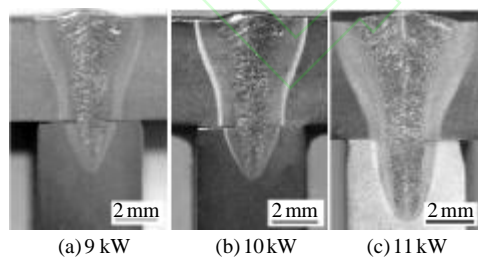


图 2 不同功率下焊接接头的宏观照片  
Fig.2 The macro morphology of welded joints under different power

在扫描电镜下观察接头的微观形貌, 母材主要是带状组织, 白色长条状铁素体和黑色细晶粒的片状贝氏体, 贝氏体均匀细小分布在条状铁素体之间, 见图 3(a)。焊缝组织晶粒粗大, 其中有较多层片状铁素体组织, 见图 3(b)。激光焊接速度快且热输

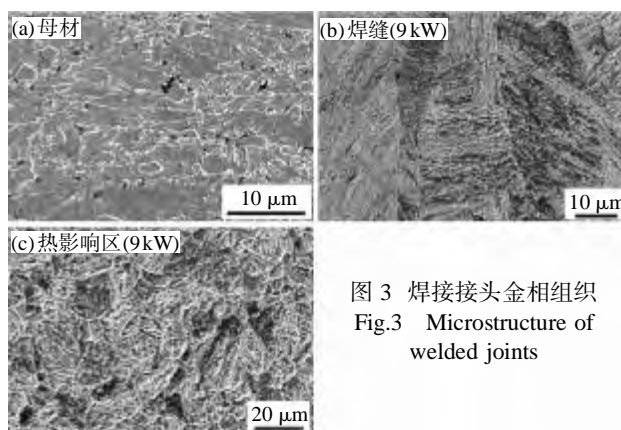


图 3 焊接接头金相组织  
Fig.3 Microstructure of welded joints

入量小, 焊缝的冷却速度快, 导致马氏体转变量较多。焊缝组织主要为铁素体、珠光体、马氏体和贝氏体的混合组织。热影响区分为完全重结晶区、不完全重结晶区和再结晶区。完全重结晶区的晶粒较大, 有粒状铁素体和珠光体组织; 不完全重结晶区由细小的铁素体和珠光体组成; 而再结晶区没有发生相变, 母材为轧制且晶粒细小狭长, 故再结晶区的组织更细小。熔合区的组织较为复杂, 有板条马氏体, 粒状铁素体和珠光体。

## 3 接头弯曲性能试验

### 3.1 试验前准备

本试验共设计了三组, 每组有三个平行试样, 一、二、三组试样的参数分别为 9、10 和 11 kW, 焊接速度均为 1.5 m/min。试样制作过程中对接头断面进行打磨、腐蚀等处理。

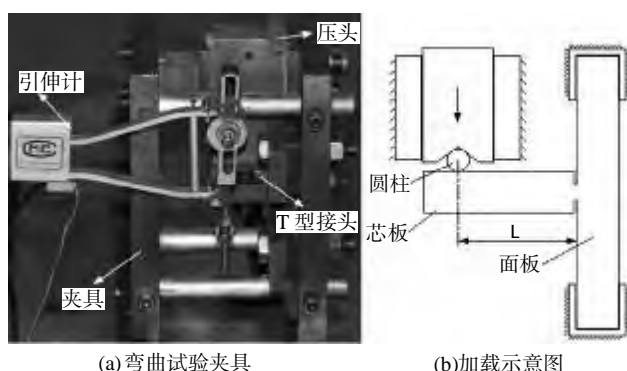
测量出接头试样尺寸如表 2 所示。

表 2 T 型接头试样尺寸  
Tab.2 T-joint sample size

	试样编号	熔深 c/mm	连接宽度 l/mm	间隙 t/mm
第一组	1 <sup>#</sup>	7.20	1.19	0.02
	2 <sup>#</sup>	7.02	1.2	0.06
	3 <sup>#</sup>	7.08	1.29	0.08
第二组	4 <sup>#</sup>	7.78	1.27	0.01
	5 <sup>#</sup>	7.44	1.31	0.01
	6 <sup>#</sup>	8.22	1.35	0.08
第三组	7 <sup>#</sup>	8.23	1.41	0.01
	8 <sup>#</sup>	9.55	1.42	0.09
	9 <sup>#</sup>	9.96	1.45	0.14

### 3.2 弯曲试验

对接头进行弯曲试验, 试验采用的夹具如图 4 (a) 所示。图 4 (b) 为加载示意图, 在试验过程中固定面板, 同时保证压头与芯板保持滑动关系。实验过程中夹持引伸计测量出接头的变形量。



(a) 弯曲试验夹具

(b) 加载示意图

图4 夹具及加载示意图

Fig.4 Fixture and loading schematic map

### 3.3 接头弯矩转角曲线与弯曲刚度

激光焊接接头的旋转刚度  $k_\theta$  影响三明治板横向弯曲刚度。定义接头承载下的弯矩  $M$  与旋转角  $\theta_c$  的比值为旋转刚度  $k_\theta$ , 见公式(1)<sup>[8]</sup>。旋转刚度表征接头抗弯的能力。图5为弯矩转角示意图, 其中  $M$  为芯板截

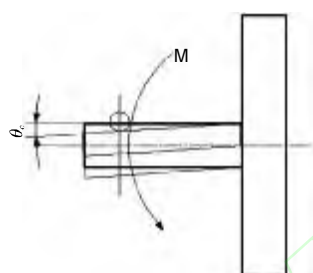


图5 弯矩转角示意图

Fig.5 Moment and rotation of T-joint

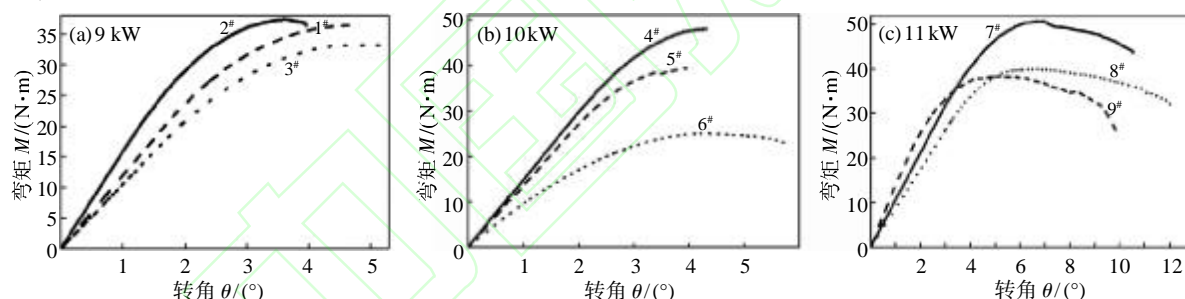


图6 弯曲试验转角-弯矩曲线

Fig.6 Moment-rotation curves under bending test

比较三组试验芯板的转角可以看出, 随着焊接功率的增加转角逐渐增大。从图6(c)可以看出, 其转角为  $10^\circ$  左右, 大于前两组试验的断裂转角, 这也表明功率越高接头的塑性愈好。焊接功率为 9 kW 的接头转角仅为  $5^\circ$  左右。从表3中不同焊接功率 T 型接头的弯曲刚度平均值可以看出, 9、10 和 11 kW 的接头弯曲刚度分别为 86、89 和 99 kN。

表3 T型接头旋转刚度

Tab.3 The rotational stiffness of T-joint

焊接功率 / kW	9			10			11		
试样编号	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#
$k_\theta$ / kN	85	93	81	93	85	51	117	91	91
$k_\theta$ 平均值 / kN	86			89			99		

面处到面板的弯矩,  $\theta_c$  为转角。式(1)中:  $L$  为压头距离面板的距离;  $d_v$  为引伸计的刀口距面板的距离;  $v$  为引伸计所测得的位移;  $F$  为压头压力。

$$k_\theta = \frac{M}{\theta_c} = 2Ld_v \frac{F}{v} \quad (1)$$

经试验和计算发现, 接头在整个弹性阶段其转角为  $3^\circ$  左右, 并且 T 型接头面板及芯板变形量很小, 且弹性段的位移较小, 计算弯矩时的作用力近似为压头压力  $F$ , 力矩为  $L$ , 所以可使用公式(1)近似代替接头的旋转刚度。

T 型接头的弯矩-转角曲线如图6所示, 其中(a)、(b)、(c)焊接功率分别为 9、10 和 11 kW, 焊接速度同为 1.5 m/min。

从图6可看出, T 型接头弯曲失效的过程有弹性阶段、弹塑性阶段、塑性阶段和断裂阶段。根据焊接功率的不同, 接头断裂过程中包含的断裂形态也不一样, 焊接功率为 9 和 10 kW 的接头断裂过程没有明显的塑性阶段, 其断裂形态为脆断, 而焊接功率为 11 kW 的 T 型接头包含了四个阶段, 表明接头具有良好的塑性。

### 3.4 接头受力分析

T 型接头在受弯曲载荷  $F$  作用下, 由于其结构的不连续性, 接头的应力状态比较复杂, 分析过程中把弯曲载荷分解为拉伸载荷和剪切载荷。定义局部屈服扩展到整个界面处的  $1/3$  处 T 型接头发生整体屈服, 此时界面所受正应力为  $\sigma = M/W$ , 其中  $M$  为屈服时 T 型接头受的弯矩  $F \times L$  ( $F$  为载荷,  $L$  为压头距离面板的距离)。抗弯截面系数:

$$w = I/y \quad (2)$$

式(2)中惯性矩:

$$I = bh^3/12 \quad (3)$$

由于定义了屈服扩展到整个界面的  $1/3$  处为 T 型接头发生整体屈服, 所以  $y = h/3$ 。由式(1)、(2)、(3)求



得:

$$\sigma = \frac{4FL}{bh^2} \quad (4)$$

对于此时截面的剪应力为:

$$\tau = F/S \quad (5)$$

式中:  $F$  为 T 型接头屈服时所受载荷;  $L$  为压头到根部的距离;  $S$  为 T 型接头连接部分面积。试验中  $L=14.5\text{ mm}$ 。参照钢结构设计规范, 折算应力公式如下:

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad (6)$$

式中:  $\sigma_t$  为折算应力;  $\sigma$  为正应力;  $\tau$  为切应力。

通过拉伸试验测量母材和不同焊接功率下接头的屈服强度和抗拉强度可知, 母材的屈服强度和抗拉强度分别为 1005、1023 MPa, 而不同焊缝的屈服强度和抗拉强度分别比母材都高。从表 4 中数据可以看出, 随着焊接功率的提高, 接头屈服和断裂时的

表 4 T 型接头所受的弯曲载荷

Tab.4 T-joint suffering bending load

组号	屈服状态				最大载荷状态				应力集中系数 $K_t$
	$F$ /kN	平均 $\sigma$ /MPa	平均 $\tau$ /MPa	$\sigma_t$ /MPa	$F$ /kN	平均 $\sigma$ /MPa	平均 $\tau$ /MPa	$\sigma_t$ /MPa	
1 <sup>#</sup>	1.63	251.81	94.47	300.30	2.37	366.12	137.35	436.63	3.42
2 <sup>#</sup>	1.63	251.81	93.68	299.56	2.66	410.92	152.87	488.84	3.61
3 <sup>#</sup>	1.63	251.81	87.14	293.58	2.59	400.11	138.47	466.49	3.42
4 <sup>#</sup>	2.05	316.69	111.32	370.77	2.80	432.55	152.05	506.42	3.21
5 <sup>#</sup>	2.20	339.86	115.82	394.65	3.42	528.33	180.05	613.50	3.42
6 <sup>#</sup>	2.18	336.77	111.37	388.10	3.21	495.89	163.98	571.47	2.80
7 <sup>#</sup>	2.64	407.83	129.13	465.14	3.42	528.33	167.28	602.56	2.59
8 <sup>#</sup>	2.85	440.28	138.42	501.32	3.61	557.68	175.33	635.01	2.66
9 <sup>#</sup>	2.88	444.91	136.98	504.22	3.42	528.33	162.66	598.76	2.37

折算应力逐渐增加, 说明在一定范围内焊接功率越高接头抗弯能力就越好。然而接头屈服时折算应力远未达到材料的屈服强度, 原因在于 T 型接头的间隙引起接头处应力集中而引起接头过早断裂。理论应力集中系数:

$$K_t = \sigma_{\max} / \sigma_n \quad (7)$$

$$\sigma_n = 6M / (T \cdot I^2) \quad (8)$$

其中  $T$  为芯板宽度。根据式(7)、(8)及《应力集中系数手册》得出应力集中系数如表 4 所示。根据 T 型接头连接宽度及表 4 中的应力集中系数可知, 连接宽度  $I$  影响接头的应力集中系数, 连接宽度越大

应力集中系数越小, 间隙越大应力集中系数越小。


## 4 结论

(1) 激光焊接的特性及功率决定了接头的连接宽度, 焊接功率越高连接宽度越大, 而间隙根据装配的精度变化。

(2) 弯曲试验表明, 连接宽度对接头的抗弯性能有较大影响, 连接宽度越大, 接头的抗弯性能越好。同时当焊接功率为 11 kW 时接头的塑形较好, 其转角在通过弯曲试验表明随着激光能量提高, 接头的力学性能逐渐提高, 较低的焊接功率使接头转角在  $10^\circ \sim 11^\circ$  之间, 而焊接功率为 9 和 10 kW 的接头转角仅仅  $4^\circ \sim 6^\circ$  之间。通过比较不同焊接功率接头的弯曲刚度可知, 焊接功率为 11、10 和 9 kW 的接头弯曲刚度分布为 86、89 和 99 kN。

(3) 分析接头弯曲过程中受力状态可知, 由于间隙的存在和连接宽度较小使得接头局部应力集中, 连接宽度越小局部应力集中系数较大, 所以应尽可能增大连接宽度以减小接头的应力集中状态。

## 参考文献:

- [1] 高俊, 黄坚, 阎启, 等. 不同厚度汽车用高强钢板激光焊接临界速度的研究[J]. 热加工工艺, 2010, 39(11): 133-135.
- [2] Jani Romanoff. Bending response of web-core sandwich plates [J]. Composite Structures, 2007, 81: 292-302.
- [3] Janiff Romanoff. Laser-welded web-core sandwich plates under patch loading [J]. Marine Structures, 2007, 20: 25-48.
- [4] Hans Kolsters. Optimisation of laser-welded sandwich panels with multiple design constraints [J]. Marine Structures, 2009, 22: 154-171.
- [5] 莫仲海, 黄文荣, 王亚荣, 等. 激光焊接工艺参数对 30CrMnSiA 钢气孔率的影响 [J]. 热加工工艺, 2008, 37(1): 47-51.
- [6] 苟宁宁. CCS\_B 激光焊三明治板接头大变形及损伤的研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学硕士学位论文, 2012.
- [7] Jelovica J, Romanoff J. Influence of weld stiffness on buckling strength of laser-welded web-core sandwich plates [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 77: 12-18. 

(上接第 157 页)

- [4] 焦向东, 潘际奎, 张骅. 交流 MAG 焊接电弧稳定性及其控制 [J]. 机械工程学报, 1998, 19(1): 47-53.
- [5] Fan C L, Sun Q J, Zhao B, et al. Stability of double wires narrow-gap gas metal arc welding [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(7): 265-269.
- [6] 李勇, 童彦刚, 曾钢. 电弧电压对混合气体保护电弧稳定性

的影响 [J]. 电焊机, 2005, 35(5): 30-33.

- [7] 傅希圣, 李春旭, 陈彪. 铝的熔化极氩弧焊电弧稳定性研究 [J]. 焊接学报, 1983, 4(4): 193-204.
- [8] 王宗杰, 刘金合, 杭争翔, 等. 熔焊方法及设备 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006. 