

# 5083 铝合金厚板超窄间隙光纤激光焊接接头 组织与性能

张国伟 肖荣诗

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

**摘要** 铝合金厚板由于焊接难度大、效率低和变形大等问题使其难以得到广泛应用。利用厚板超窄间隙激光焊方法及 IPG 公司 YLS-6000 光纤激光器焊接了 25 mm 厚的 5083 铝合金厚板, 并利用光学显微镜、扫描电镜和低温拉伸试验机分析了接头组织及低温性能。结果表明, 超窄间隙激光焊方法可得到成形良好无明显缺陷的焊接接头, 焊缝由 7 层构成, 上下宽度一致且小于 4.5 mm。焊缝组织为细小柱状晶且均匀分布有不连续的点状析出物。热影响区晶粒并无明显长大, 有部分析出物析出。焊缝与母材显微硬度相当, 热影响区软化现象不明显。在 273 K、243 K、213 K 及 183 K 温度下焊接接头抗拉强度与屈服强度随温度降低略有升高, 且与母材强度相当。接头弯曲试样弯曲 180° 后缺陷较少, 焊缝塑性较好。

**关键词** 激光光学; 5083 铝合金厚板; 超窄间隙激光焊接; 接头组织; 力学性能

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0903006

## Microstructure and Mechanical Properties of 5083 Aluminum Alloy Joint of Heavy Section by Ultra-Narrow Gap Fiber Laser Beam Welding

Zhang Guowei Xiao Rongshi

(Institute of Laser Engineer, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract** Application of aluminum alloy heavy section is limited for its worse weldability, low welding efficiency and large welding deformation. 5083 aluminum alloy plates of 25 mm thick are welded using IPG YLS-6000 fiber laser and ultra-narrow gap fiber laser beam welding method. The microstructure and mechanical properties of joint are tested by optical microscope, scanning electron microscope and tensile testing machine for low temperature. The results shows that defect free butt joints with 7 layers are obtained with ultra-narrow gap laser welding. The width of weld is uniform and less than 4.5 mm. Microstructure of weld consists of columnar grain and some discontinuous dot-like precipitated phases. There are no obvious coarse grains but some precipitation in heat affected zone (HAZ). The microhardness of the HAZ is slightly lower than that of weld metal and base metal, and the microhardness of base metal is the same to that of the joint. The tensile strength of joint increases a bit when temperature decreases (such as at 273 K, 243 K, 213 K and 183 K), which performs as well as the base metal. Samples are bended by 180° without large defects observed, which shows the joint has excellent plasticity.

**Key words** laser optics; heavy section of 5083 aluminum alloy; ultra-narrow gap laser beam welding; joint microstructure; mechanical property

**OCIS codes** 140.3390; 350.4600; 350.3850; 140.3510; 060.2310

收稿日期: 2014-03-26; 收到修改稿日期: 2014-04-22

作者简介: 张国伟(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事窄间隙激光焊接工艺及机理等方面的研究。

E-mail: erxia1983@163.com

导师简介: 肖荣诗(1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光先进制造理论与技术方面的研究。

E-mail: rsxiao@bjut.edu.cn(通信联系人)(中国光学学会会员号: S040111702)

# 1 引言

随着铝合金新材料的不断研发,铝合金综合性能越来越好,但由于焊接性差、焊接效率低及变形大等问题,相比钢铁材料厚板,铝合金厚板的应用水平仍然较低,应用范围也较小<sup>[1-2]</sup>。传统焊接方法如窄间隙氩弧焊及窄间隙熔化极气体保护焊都存在焊接变形大、热影响区大及接头软化等问题,在一些极端应用条件如航空航天、军用装甲及高压容器等领域这些问题显得尤其严重。被认为是焊接铝合金最有潜力的搅拌摩擦焊在厚板焊接方面也存在着焊接速度低、焊接柔性较差及弱连接等问题,要实现铝合金厚板结构的广泛应用,仍面临着不小的挑战<sup>[3]</sup>。

窄间隙激光填丝焊结合了激光焊接和窄间隙焊接的双重优势,能够适应比常规焊接方法更窄的间隙,具有热输入小、焊接热影响区小、焊接变形小及焊接质量高等优点,作为一种高效的厚板焊接方法,越来越受到重视<sup>[4-6]</sup>。由于通常采用聚焦光束及深熔多层焊方式,厚板窄间隙激光焊存在较严重的侧壁未熔合及气孔问题,因此关于铝合金厚板(如20 mm及以上)窄间隙激光焊接研究报道较

少<sup>[7-11]</sup>。2013年,Dittrich等<sup>[12]</sup>报道了其利用窄间隙激光多层焊方法焊接20 mm以上厚度6060铝合金厚板的试验结果,他们认为虽然可通过光束摆动解决侧壁未熔合等问题,但焊接气孔问题十分严重,是后期研究亟待解决的主要问题。

利用离焦激光束及激光束同时作用于坡口底部及侧壁的超窄间隙激光焊接方法焊接了25 mm厚的5083铝合金厚板。由于采用特有的光斑形式及热导焊接模式,接头组织性能是否满足应用要求,以及大厚板超窄间隙结构和特殊热源条件对接头组织性能产生怎样的影响等问题亟待研究。因此本文利用光学显微镜、扫描电镜(SEM)及低温拉伸等手段研究了5083铝合金厚板超窄间隙激光焊接头的微观组织与性能。

## 2 试验条件及方法

试验用5083铝合金为轧制态厚板,尺寸为250 mm×200 mm×25 mm,填充焊丝选用Indalco Alloys公司生产的5087焊丝,焊丝直径为1.2 mm,厚板及焊丝成分如表1所示。

表1 试验材料及填充焊丝化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of experimental materials and filling wire (mass fraction/%)

| Type   | Si    | Fe   | Cu    | Mn      | Mg      | Cr        | Zr    | Zn   | Ti   | Al   |
|--------|-------|------|-------|---------|---------|-----------|-------|------|------|------|
| 5083   | 0.40  | 0.40 | 0.10  | 0.4~1.0 | 4.0~4.9 | 0.05~0.25 | —     | 0.25 | 0.15 | Bal. |
| ER5087 | 0.022 | 0.15 | 0.005 | 0.9     | 4.8     | —         | 0.082 | —    | —    | Bal. |

试验采用IPG公司的YLS-6000光纤激光器,最大输出功率为6 kW,测得的光束质量因子 $M^2$ 为23.4。正离焦30 mm,功率3000 W时光束能量分布如图1所示。

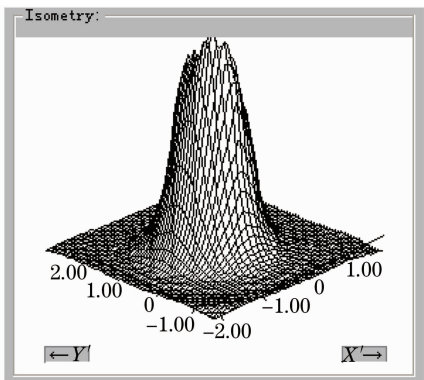


图1 正离焦时的光束能量分布(单位: mm)  
(离焦: +30 mm, 功率: 3000 W)

Fig. 1 Energy distribution of laser beam at defocus condition in millimeter (unit: mm) (defocused: +30 mm, power: 3000 W)

焊接方式如图2所示,采用正离焦激光束,光束同时作用于坡口底部及侧壁。填充焊丝以前送丝方式进入熔池,通过熔池加热熔化,采用单道多层焊接的方式实现厚板的连接。保护气体为纯度99.9%的氩气,喷嘴内径为7 mm配合矩形横截面的尾保护喷嘴,尾保护喷嘴内壁尺寸为5 mm×20 mm。焊接过程中,保护气喷嘴紧贴工件表面使保护气体顺利进入窄间隙坡口以保证保护效果。通过工艺试验优化后的工艺参数为:激光功率为3.0~4.4 kW,焊接速度0.42 m/min~0.6 m/min,送丝速度2.0 m/min~4.5 m/min,侧吹气体流量25 L/min,离焦量为+30 mm~+54 mm。不控制层间温度,待冷却至室温后焊接下一道。焊接坡口形式如图3所示。

接头取样如图4所示,在距焊接起点及结束点25 mm以内的焊缝范围内进行线切割取样,不同位置取三次金相试样用于分析组织缺陷。拉伸及弯曲测试试样分层取样,使测试区域涵盖整个焊缝厚度。

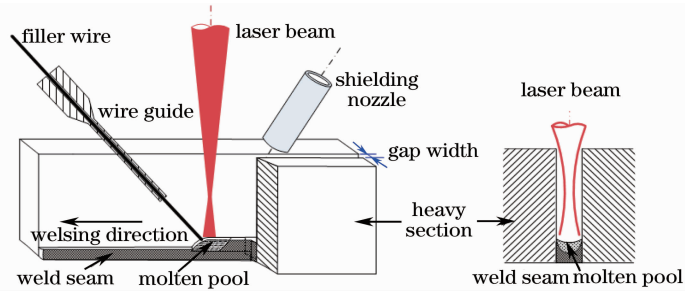


图 2 超窄间隙激光填丝焊布置示意图

Fig. 2 Experimental set-up of ultra-narrow gap laser beam welding

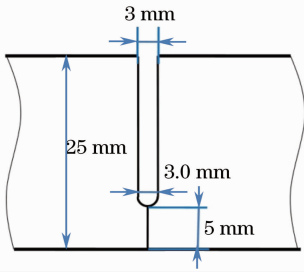


图 3 铝合金厚板超窄间隙激光焊接坡口

Fig. 3 Groove shape for ultra-narrow gap laser beam welding of aluminum alloy heavy section

采用光学显微镜观察接头组织形貌。利用 JEOL JSM7001F 型扫描电镜观察接头断面组织形貌。接头的显微硬度测量仪器为 Future tech 公司 FM300e 型显微硬度计,加载载荷为 100 g,加载时间为 15 s。低温拉伸试验温度分别在 183 K、213 K、243 K 及 273 K 温度下进行,采用 BS EN895-1995 标准规定的拉伸试样尺寸,试样厚度为 2 mm。抗弯试验中压力滚轮直径为 16 mm,支辊直径为 20 mm,支辊距离 22 mm,试样尺寸为 150 mm×12 mm×2 mm,拉伸及弯曲试样取样方法图 4 所示。

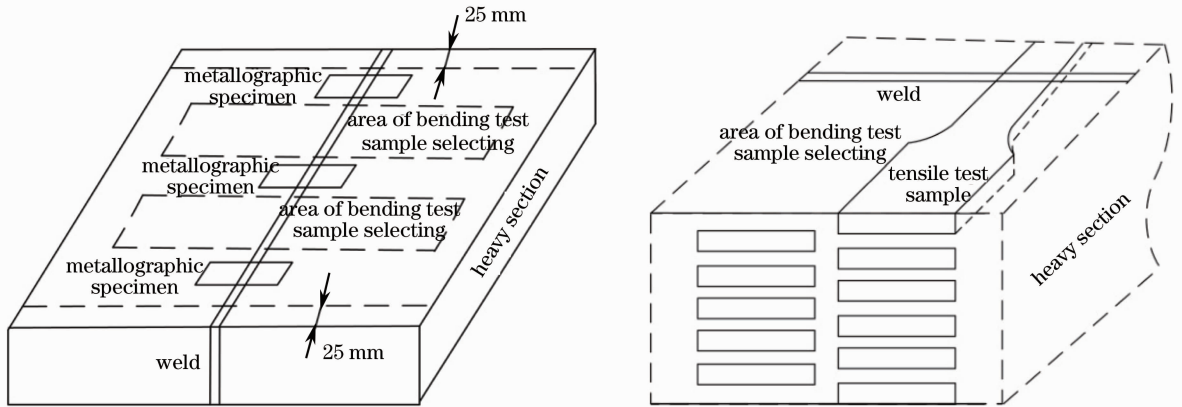


图 4 力学试样取样方法

Fig. 4 Sample selecting method in laser welding joint

### 3 试验结果和分析

#### 3.1 接头显微组织分析

对 5083 铝合金 25 mm 厚板进行了超窄间隙激光焊接试验,焊缝宏观形貌如图 5 所示。超窄间隙激光焊接 5083 铝合金厚板得到了成形良好的填充焊缝,焊缝由 7 层组成,上下宽度较为一致,约为 4.2 mm,未发现有气孔、侧壁未熔合等缺陷。

图 6(a)为 25 mm 铝合金厚板超窄间隙激光焊缝局部组织形貌,由于 5083 铝合金属于典型防锈铝,普通金相技术无法看到焊接接头的晶粒组织,但表面第二相析出粒子的分布形貌可以反映出焊缝显

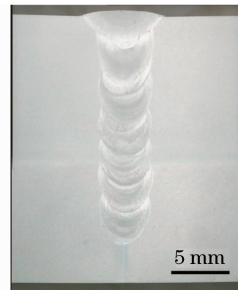


图 5 25 mm 厚 5083 铝合金窄间隙激光焊接接头宏观组织  
Fig. 5 Macrostructures of the welds of 25 mm thick 5083 aluminum (Al) alloy achieved by ultra-narrow gap laser beam welding

微组织结构。图 6(a) 中标示 (b)~(g) 区域的高倍显微观察结果如图 6(b)~(g) 所示。由图 6(a) 可知焊缝具有典型的快速凝固组织特征, 柱状组织从熔合线边缘垂直向焊缝中心生长。图 6(b) 为母材显微组织, 为轧制态长条形组织, 晶粒沿轧制方向被拉长。图中深色点状物为第二相析出物, 弥散分布在铝基体上。图 6(c) 为熔合线及热影响区 (HAZ) 显微组织, 热影响区极窄, 晶粒未见明显长大, 但析出物含量明显增多, 区域颜色加深。图 6(d) 为焊缝区高倍显微组织, 可知焊缝内部柱状晶排列极为细密,

不连续的点状析出物分布于基体之间, 呈一定方向性, 枝晶间距小于  $5\ \mu\text{m}$ 。图 6(e) 为图 6(a) 中 e 处所示两层焊道交界处组织形貌, 此处形成了不同晶粒大小的两部分柱状晶区域, 上部焊道相比下部柱状晶更为粗大, 且柱状特征明显, 下部焊道晶粒更为细小, 方向性较小。图 6(f) 为焊缝靠近热影响区的不同晶粒柱状晶分层现象, 边缘处为厚度约  $300\ \mu\text{m}$  的明显柱状晶层, 内部为细小晶粒层, 这种柱状晶分层现象与冷却速度的差异及熔池搅拌作用有关。

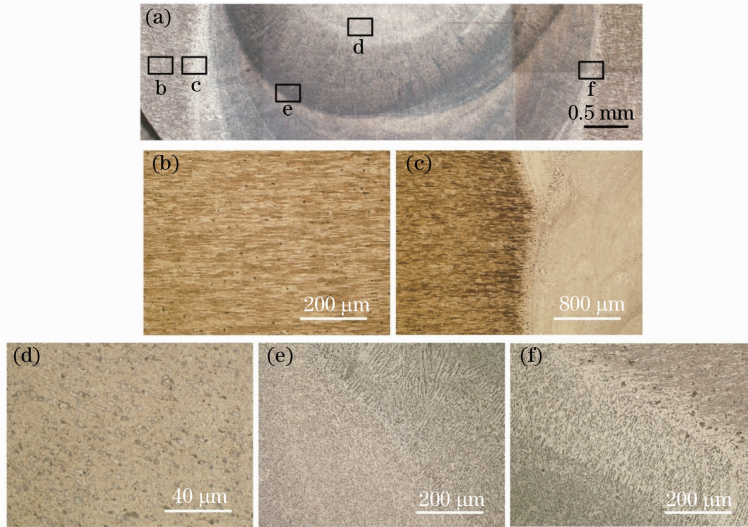


图 6 5083 铝合金厚板接头焊缝微观组织。(a) 局部焊缝宏观组织; (b) 母材; (c) 熔合线及热影响区; (d) 焊缝中心组织; (e) 焊道底部位置显微组织; (f) 熔合区柱状晶

Fig. 6 Microstructure of welded joints of 5083 Al joint. (a) Macrostructure of local weld; (b) base metal; (c) fusion line and HAZ; (d) center of weld; (e) bottom of molten pool; (f) columnar grain near fusion zone

5083 铝合金厚板超窄间隙激光焊缝组织全部为细小的柱状晶组织, 熔池中心也未见粗大树枝晶或等轴晶存在, 较母材相比晶粒及析出物更细小, 析出物分布更均匀, 这一方面与厚板超窄间隙结构具有良好的冷却条件、高的冷却速度及熔池搅拌作用有关, 另一方面这与多层焊道的重熔重叠有关。由于多层焊道的重叠使上道焊缝中心的粗大树枝晶被重新熔化, 每层焊道厚度较小, 宽度较大, 扁平状的焊缝形态保留了性能良好的细小柱状晶组织, 有利于提高接头整体性能。由于厚板超窄间隙结构良好的冷却条件, 热影响区晶粒未见明显长大, 多层焊热循环作用使热影响区析出物增多反而有利于组织强化。

### 3.2 接头力学性能

#### 3.2.1 接头显微硬度

图 7(a)~(c) 为 5083 铝合金厚板激光焊缝上中下三部分的显微硬度分布。由图 7(a) 可知接头焊缝上部显微硬度略低于母材, 为  $85\ \text{HV}$  左右。焊

缝上部区域由于冷却条件变差, 较其他区域组织略粗大。另外, 由于母材为形变强化后的纤维组织, 而 5083 铝合金属于不可相变强化的铝镁系合金, 焊缝区形变强化性能消失及析出强化作用较小导致了焊缝显微硬度略低于母材。由图 7(b) 可知, 在熔合区附近硬度有下降现象, 但范围很小。在焊缝最下部由于第一道焊接时母材温度较低, 熔池的冷却速度较快, 晶粒更加细小, 热影响区也小, 故在显微硬度上母材、焊缝与热影响区相差不大, 平均值在  $85\ \text{HV}\sim 90\ \text{HV}$  之间, 如图 7(c) 所示。

#### 3.2.2 接头低温拉伸强度

图 8 为 5083 铝合金厚板超窄间隙激光焊接接头的常温拉伸试样及试验结果, 由结果可知焊缝强度与母材接近, 近一半试样断裂位置在母材, 平均强度达到母材强度的 98%。图 9 为不同温度环境下接头拉伸及屈服强度分布曲线。可知在  $273\ \text{K}$ 、 $243\ \text{K}$ 、 $213\ \text{K}$  及  $183\ \text{K}$  温度下接头抗拉强度与屈服

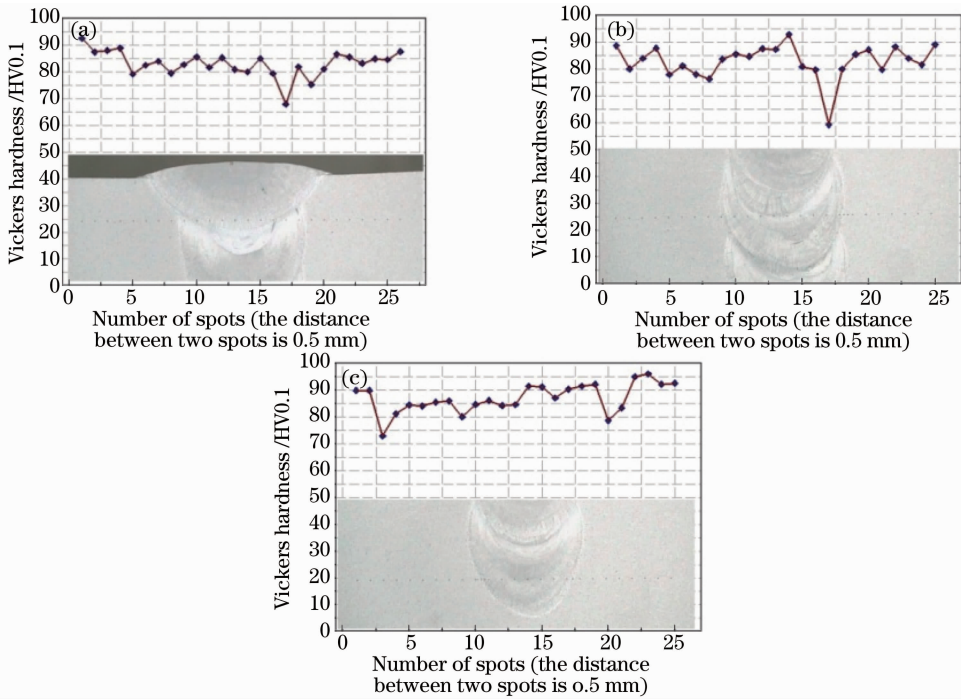


图7 5083 铝合金焊缝接头的显微硬度分布。(a) 上部;(b) 中部;(c) 下部

Fig.7 Hardness distributions of the 5083 Al welded joint. (a) On the top; (b) on the middle; (c) on the bottom

强度都随着温度降低略有升高,这和低温时位错滑移受到限制有关。接头延伸率随着温度降低变化不大,在 24.5%~28%之间,表明了焊接接头保持了较好的塑性。铝镁系铝合金相变强化作用较弱以及轧制状态使母材强度提高是焊接接头强度在常温下略低于母材的两个主要原因。接头强度与母材相差较小一方面表明细小均匀的焊缝组织使接头整体性能损失较少,另一方面表明采用的低功率密度热源的热导焊接方式保证了焊接质量稳定性,有效避免了焊接气孔及未熔合等缺陷产生。

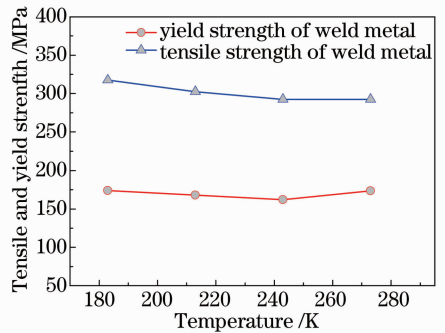


图9 5083 铝合金焊缝抗拉强度与屈服强度  
Fig.9 Results of tensile test for 5083 Al joint

出现由于焊接缺陷造成的接头整体塑性的损失。

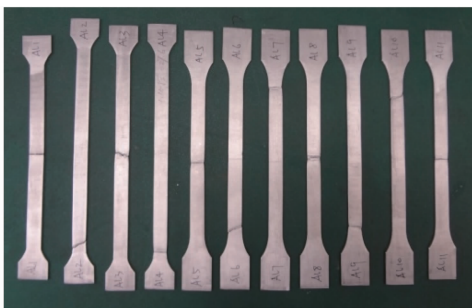


图8 5083 铝合金焊接接头拉伸试样

Fig.8 Tensile test samples for 5083 Al joint

### 3.2.3 接头抗弯曲性能

图10为接头弯曲试样经180°正弯后照片,由图可知接头试样抗弯曲性能较好,试样均能达到180°弯曲且焊缝区域无任何裂纹或其他缺陷出现,这表明5083 铝合金超窄间隙激光焊缝具有较高的塑性,未



图10 抗弯曲试样试验结果

Fig.10 Bending test samples of 5083 Al joint

### 3.2.4 接头断口形貌分析

图 11 及图 12 为 5083 铝合金超窄间隙激光焊接接头拉伸断裂断口位置及断口显微形貌。由图 11 可知断裂位置在焊缝中心，断口存在约 45°的斜面。焊缝中心为柱状晶交汇处且可能存在合金元素偏析或低熔点共晶物，性能较差成为断裂起源。图 12(a)为断口宏观形貌的扫描电镜图片，未发现明显的放射区，只有大片纤维区及边缘处较窄的剪切唇。图 12(b)和(c)分别为纤维区中的低倍和高倍图片，可知 5083 铝合金焊缝发生的断裂是典型的韧性断裂过程，断口大部分区域为细小韧窝形貌，韧窝大小较为均匀，在韧窝中分布着小颗粒状强化相。在铝合金柱状晶滑移面上由于晶界第二相与晶粒之间的结合较弱，在位错塞积引起的应力集中或者在高应变条件下，强化相粒子与基体塑性变形不协调而萌

生微孔，这些空洞不断形核、长大、连接聚集并继续产生新的微孔，最终导致整个金属材料的断裂。图 12(d)为断口斜面处的扫描电镜照片，为由部分剪切力形成的层状剥离断口形貌，但仍有不少韧窝及撕裂棱存在。细小韧窝及大面积纤维区都表明 5083 铝合金厚板超窄间隙激光焊接接头为韧性断裂，无脆性薄弱区域存在，整体性能可靠，在断口中未发现焊接气孔等缺陷也表明了焊接方法的适用性及焊接质量的稳定性。

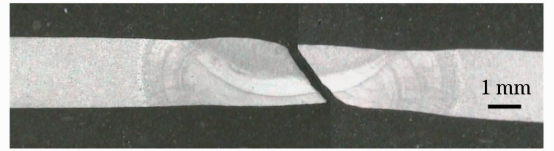


图 11 5083 铝合金厚板接头断口位置  
Fig. 11 Fracture locations for 5083 Al joint

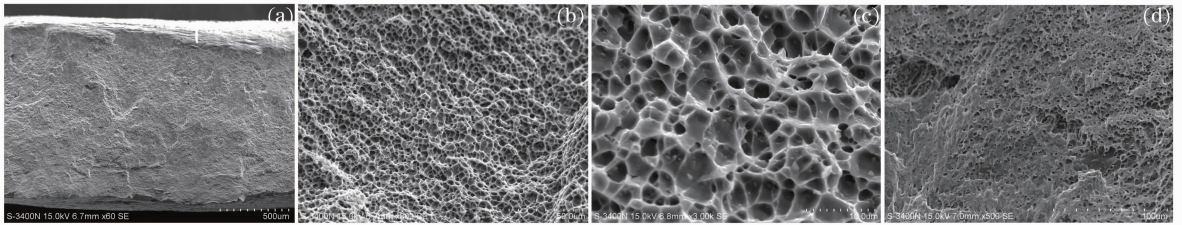


图 12 5083 铝合金厚板接头断口宏观形貌。(a) 局部宏观形貌；(b) 纤维区低倍组织；  
(c) 纤维区高倍组织；(d) 斜面断口处组织形貌

Fig. 12 Fracture cross for 5083 Al joint. (a) Local SEM image of fractograph; (b) low magnification image of fiber area; (c) high-magnification image of fiber area; (d) SEM image of inclined plane

## 4 结 论

利用超窄间隙激光焊方法焊接了 25 mm 厚度的 5083 铝合金厚板，获得了无气孔及侧壁未熔合等缺陷的焊接接头，焊缝由 7 层组成，宽度上一致且仅为 4.2 mm 左右。焊缝组织为细小柱状晶且均匀分布有不连续的点状析出物，热影响区晶粒并无明显长大，有部分析出物析出。焊缝与母材显微硬度相当，热影响区软化现象不明显。在 273 K、243 K、213 K 及 183 K 温度下焊接接头抗拉强度与屈服强度随温度降低略有升高，且与母材强度相当。接头弯曲试样弯曲 180°后无明显缺陷，接头的强度与韧性较好。通过断口形貌的观察，细小韧窝及大面积的纤维区都表明 5083 铝合金厚板超窄间隙激光焊接接头为韧性断裂，无脆性薄弱区域存在，整体性能可靠，在断口中未发现焊接气孔等缺陷也表明了焊接方法的适用性及焊接质量的稳定性。

## 参 考 文 献

- Xiao Rongshi, Kang Li, Yang Wuxiong, *et al.*. Innovative laser beam welding process of high strength aluminum alloy with thick plate[J]. *New Technology & New Process*, 2006, (5): 63-65. 肖荣诗, 康黎, 杨武雄, 等. 高强铝合金厚板窄间隙激光焊接新工艺[J]. *热加工技术与装备*, 2006, (5): 63-65.
- Dausinger F. Laser welding of aluminum alloys: from fundamental investigation to industrial application[C]. *SPIE*, 2000, 3888: 367-379.
- Ren Shurong, Ma Zongyi, Chen Liqing. Research status and prospect of friction stir welding and friction stir processing[J]. *Materials Review*, 2007, 21(1): 86-92. 任淑荣, 马宗义, 陈礼清. 搅拌摩擦焊接及其加工研究现状与展望[J]. *材料导报*, 2007, 21(1): 86-92.
- Wen Peng, Zheng Shiqing, Shinozaki kenji, *et al.*. Experimental research on laser narrow gap welding with filling hot wire[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 38(11): 1103004. 温鹏, 郑世卿, 荻崎贤二, 等. 填充热丝激光窄间隙焊接的实验研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(11): 1103004.
- T Jokinen, M Karhu, V Kujanpää. Welding of thick austenitic stainless steel using Nd:yttrium-aluminum-garnet laser with filler wire and hybrid process[J]. *Journal of Laser Applications*, 2003, 15(4): 220-224.
- Coste F, Janin F, Hamadou M, *et al.*. Deep penetration laser welding with Nd:YAG lasers combination up to 11 kW laser power[C]. *SPIE*, 2003, 4831: 422-427.
- Li Liqun, Tao Wang, Zhu Xianliang. Wire filling laser multilayer

- welding of high strength steel thick plate[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(5): 1251-1255.
- 李俐群, 陶 汪, 朱先亮. 厚板高强度激光填丝多层焊工艺[J]. 中国激光, 2009, 36(5): 1251-1255.
- 8 Wu Shikai, Xiao Rongshi, Chen Kai. Laser welding of heavy section of stainless steel plants[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(9): 2422-2425.
- 吴世凯, 肖荣诗, 陈 铠. 大厚度不锈钢板的激光焊接[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2422-2425.
- 9 A S Salminen, V P Kujanpää. Effect of wire feed position on laser welding with filler wire[J]. Journal of Laser Applications, 2003, 15(1): 2-10.
- 10 R Phaoniam, K Shinozaki, M Yamamoto, *et al.*. Development of a highly efficient hot-wire laser hybrid process for narrow-gap welding-welding phenomena and their adequate conditions[J]. Welding in the World, 2013, 57(5): 607-613.
- 11 Yoshiaki Arata, Hiroshi Maruo, Isamu Miyamoto, *et al.*. High power CO<sub>2</sub> laser welding of thick plate[J]. Transactions of JWRI, 1986, 15(2): 27-34.
- 12 D Dittrich, R Schedewy, B Brenner, *et al.*. Laser-multi-pass-narrow-gap-welding of hot crack sensitive thick aluminum plates[J]. Physics Procedia, 2013, 41(3): 225-233.

栏目编辑:张浩佳