

# 非熔透激光搭接焊 SUS304 奥氏体不锈钢 无焊缝侧变形机理

刘恩泽<sup>1</sup>, 姚成武<sup>1\*</sup>, 谢雨凌<sup>2</sup>, 张旭东<sup>2</sup>

<sup>1</sup>上海交通大学材料科学与工程学院上海市激光制造与材料表面改性重点实验室, 上海 200240;

<sup>2</sup>日立(中国)研究开发有限公司, 上海 200020

**摘要** 利用光纤激光器对 DC01 镀锌钢板和 SUS304 奥氏体不锈钢薄板进行了激光非熔透搭接焊实验、反变形焊接实验,测得了 SUS304 钢板(下板)表面微凸起的变形量和变形轮廓,研究了非熔透焊后 SUS304 钢板表面微凸起变形产生的机理。研究表明:角变形是 SUS304 钢板表面微凸起产生的重要原因;通过反变形法矫正角变形可降低微凸起的最大高度,但微凸起区域的塑性凸起变形仍存在;焊接过程中的角变形和热膨胀引起的塑性变形是非熔透搭接焊下 SUS304 不锈钢板无焊缝一侧微凸起变形的的主要原因。

**关键词** 激光技术; 非熔透激光焊; 微凸起变形; 变形机理; 角变形; 塑性变形

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0402004

## Deformation Mechanism of SUS304 Austenitic Stainless Steel at Weldless Side in Partial Penetration Laser Welding

Liu Enze<sup>1,2</sup>, Yao Chengwu<sup>1,2\*</sup>, Xie Yuling<sup>3</sup>, Zhang Xudong<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

<sup>2</sup>Hitachi (China) Research & Development Corporation, Shanghai 200020, China

**Abstract** Partial penetration laser welding experiment of DC01 galvanized steel plate and SUS304 austenite stainless steel as well as pre-deformation experiment are conducted by fiber laser. The deflection and deformation profile of SUS304 steel plate (lower plate) are measured and the mechanism of the micro bulging distortion of SUS304 steel plate surface after partial penetration laser welding. The results show that angular distortion is an important reason that lead to the micro bulging distortion of austenite stainless steel surface. Pre-deformation can decrease the maximum deformation height significantly. However, the plastic bulging distortion still occurs in micro bulging distortion area. It is concluded that the main reason of micro bulging distortion of SUS304 steel plate at weldless side in partial penetration laser welding is the combination of angular distortion and plastic deformation caused by thermal expansion during welding.

**Key words** laser technique; partial penetration laser welding; micro bulging distortion; deformation mechanism; angular distortion; plastic deformation

**OCIS codes** 350.3390; 350.3850; 140.3510

## 1 引言

奥氏体镜面不锈钢和镀锌钢薄板连接件常用于家用厨具、电梯和建筑饰板等装饰性结构或建筑中,具有美观、耐腐蚀和经济性高等优点。这些领域对薄板连接件的强度要求较低,但外观要求

极高,奥氏体不锈钢镜面上的任何缺陷都会降低消费者对产品的主观评价。常用的此类薄板连接方法有胶接和焊接。胶接相比于焊接,其优点在于连接件无变形,加工难度较低,但胶接的缺点也很明显,如:胶接接头随时间推移老化严重,容易发生胶接件失效<sup>[1-3]</sup>。非熔透薄板焊接件的优点

收稿日期: 2018-10-23; 修回日期: 2018-12-24; 录用日期: 2019-01-08

\* E-mail: yaochwu@sjtu.edu.cn

在于焊接接头质量稳定,并且可以保证无焊缝一侧,即奥氏体不锈钢镜面一侧的表面质量<sup>[4-5]</sup>。相比于其他焊接方法,非熔透激光焊接的能量更加集中,故焊缝和热影响区更小,焊接变形更小<sup>[6-10]</sup>。此外,采用激光非熔透焊接的方式焊接镀锌钢与不锈钢薄板时,选择合理的焊接工艺可以有效避免气孔、飞溅和裂纹等缺陷<sup>[11-15]</sup>。但在奥氏体不锈钢无焊缝一侧,焊缝对应区域会出现表面微凸起变形,尽管此变形尺度十分小,但也会严重影响奥氏体不锈钢镜面一侧的表面质量,这是一个亟待解决的问题。

国内外众多学者对薄板在激光焊接过程中出现的各类变形展开了研究<sup>[16-21]</sup>。Huang等<sup>[16]</sup>以固有应变理论为基础,利用壳体模型重现了薄板在激光焊接过程中的失稳变形,并通过相关实验验证了模拟结果。Chakraborty等<sup>[17]</sup>利用有限元模型分析了激光焊接碗形薄板时板材内部应力和变形的分布,解释了出现焊后弯曲变形的原因。Ai等<sup>[18]</sup>研究了激光非熔透焊接过程中小孔演变的模型,并以此为基础充分阐明了激光非熔透焊接过程中焊缝的演变和缺陷产生的机制。Choobi等<sup>[19]</sup>利用自建的人工神经网络模型再现了304不锈钢薄板焊接过程中出现的角变形。孙向伟等<sup>[20]</sup>利用数值模拟预测了钢板钨极氩弧焊(TIG)时的失稳变形,并辅以三维(3D)光学面扫描测量系统和小孔法验证了数值模拟的结果。刘佳<sup>[21]</sup>在研究厚度分别为0.8 mm和1.2 mm的301不锈钢板非熔透搭接焊时,结合理论分析与数值计算结果得出了焊接过程中薄板产生的

表1 实验钢板的化学成分

Table 1 Chemical composition of experimental steel plates

| Plate  | Mass fraction / % |      |       |       |      |      |      |      |      |
|--------|-------------------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|
|        | C                 | Mn   | P     | S     | Si   | Cr   | Ni   | Al   | Fe   |
| SUS304 | 0.027             | 1.6  | 0.01  | 0.002 | 0.36 | 18.5 | 11.6 |      | Bal. |
| DC01   | 0.1               | 0.5  | 0.035 | 0.025 |      |      |      | 0.02 | Bal. |
| Q235   | 0.14              | 0.55 | 0.025 | 0.008 | 0.19 |      |      |      | Bal. |

激光器采用德国IPG公司生产的YLS-10000型光纤激光器。激光焊接零离焦,焦点处光斑的直径约为0.72 mm,焊接时的波长为1070~1080 nm。焊接时采用纯激光焊接的方式,未采用保护气体或其他焊接材料,焊接速率为70 mm·s<sup>-1</sup>,激光功率为1.9~2.6 kW。

## 2.2 实验与表征方法

实验所用工装夹具如图1(a)所示。将两块试板叠放并装入夹具槽中,上板为DC01钢板,下板

角变形会导致无焊缝一侧发生凸起变形这一结论。当前,国内外研究人员对薄板激光焊接方面的研究主要集中于薄板焊接常出现的角变形和翘曲变形这类大尺度的宏观变形,而对于微凸起变形的研究比较少,且仅限于理论推测,缺乏实验验证。

为了表征微凸起变形的特点,并分析非熔透焊后出现的微凸起变形的机理,本文以激光非熔透薄板焊接实验为基础,研究了激光功率对微凸起变形的影响程度,即对最大变形高度的影响规律。结合反变法,在不同的反变形量条件下,研究了微凸起变形的变化规律。采用电子背向散射衍射(EBSD)技术分析了微凸起区域的显微组织演变,提出了微凸起变形的变形机理,研究结果对薄板非熔透焊接变形理论与应用具有一定的参考价值。

## 2 实验材料和方法

### 2.1 实验材料和设备

激光非熔透搭接焊实验选用表面尺寸为110 mm×110 mm的DC01镀锌钢板和SUS304奥氏体不锈钢板,DC01钢板的厚度为1.2 mm,SUS304钢板的厚度为1.5 mm。SUS304钢板的一面为镜面,另一面为轧制后的原始表面。镜面一侧为不锈钢板使用过程中的工作表面,同时也是激光非熔透焊接过程中需要重点保护的无焊缝一侧。为了对比非熔透焊接时下板SUS304不锈钢的变形特征,并分析微凸起变形的成因,采用相同规格的Q235碳钢与DC01钢板进行激光非熔透搭接实验。实验钢板的化学成分如表1所示。

为SUS304钢板。两块压板分别压在试板待焊区域两侧,螺栓穿过螺栓孔压在压板上,两螺栓中心间距约为36 mm,通过调节螺栓的旋入程度来控制两块试板间的压紧程度。试板待焊区域下部有一块可更换工艺垫块的槽,该槽可装入上表面与夹具平齐的工艺垫块,进行常规焊接状态下的对照实验,或装入表面有预制平滑凸起的工艺垫块进行反变形实验,如图1(c)所示。反变形实验中所使用的工艺垫块为表面预加工有宽度约为

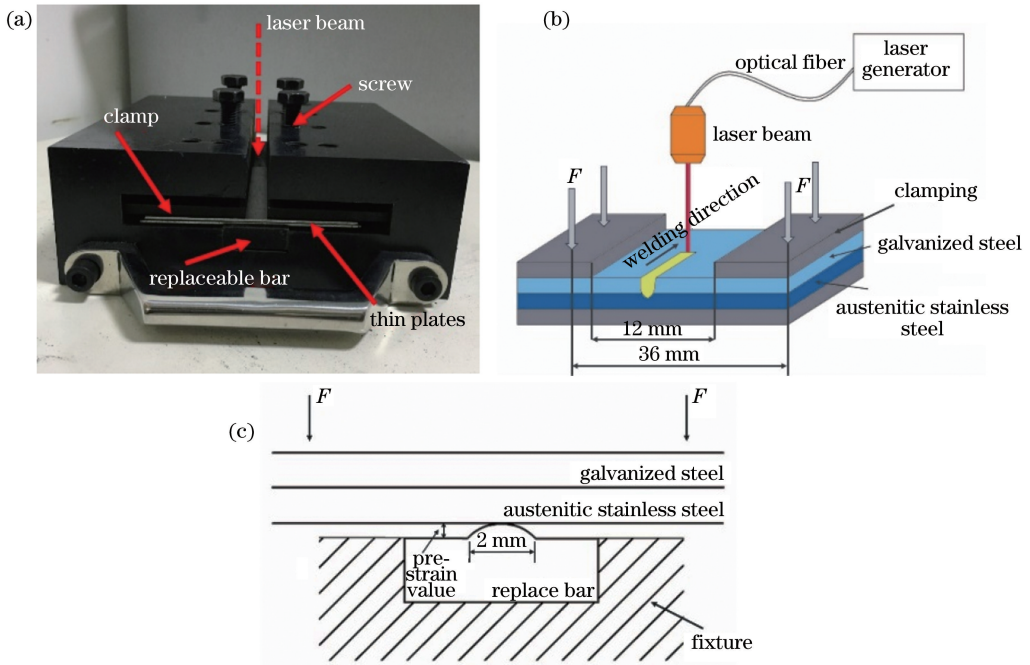


图 1 激光非熔透焊接实验示意图。(a)焊接夹具实物图;(b)激光非熔透焊接示意图;(c)反变形实验示意图  
 Fig. 1 Schematics of partial penetration laser welding experiment. (a) Physical map of welding fixture;  
 (b) schematic of partial penetration laser welding; (c) schematic of pre-deformation experiment

2 mm,高度为所需反变形量的平滑凸起。焊前利用螺栓压紧待焊试板边缘,获得预置反变形。激光焊接时,激光从夹具中部的槽照射到试板表面,形成非熔透搭接焊接接头。

采用美国 ZYGO 公司生产的 ZeGage 型三维表面轮廓仪测量焊后不锈钢镜面一侧的微凸起变形。轮廓仪将特定波长的激光投射到待测板材表面,接收来自板材表面的反射光,并在计算机中进行处理,从而获得待测材料的表面形貌数据。焊缝截面经磨抛后,用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀,然后利用德国蔡司公司生产的 MCK-50MC 型金相显微镜观察焊接接头的显微组织。SUS304 钢板表面微凸起部位经机械抛光和振动抛光后,利用美国 FEI

公司生产的型号为 NOVA NanoSEM 230 的电子显微镜拍摄 EBSD 图像。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 非熔透搭接焊缝及其横截面的宏观形貌

图 2 为非熔透搭接焊缝的宏观形貌。图 2(a)为焊缝的正面形貌,焊缝成形良好,无明显的宏观缺陷。图 2(b)为下板 SUS304 钢板的背面形貌,由于镜面反光难以正常拍摄,故将一张印有黑色平直条纹的白纸置于镜面不锈钢对面,利用不锈钢镜面反射纸上的条纹。可见:在试板中央的平行线发生了明显的扭折,此处即微凸起变形印痕,发生视觉上明显扭折的区域约为 2 mm 宽。

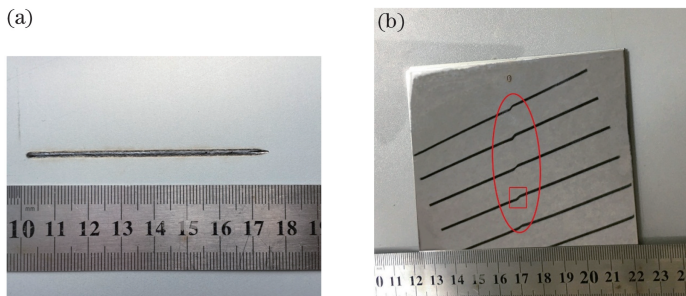


图 2 非熔透激光搭接焊缝与微凸起变形的宏观形貌。(a)焊缝侧;(b)无焊缝侧

Fig. 2 Macro appearances of weld obtained by partial penetration laser lap welding and micro bulging distortion.  
 (a) Weld side; (b) weldless side



图3为不同功率下的非熔透搭接焊缝的横截面,图4为统计获得的不同功率下下板 SUS304 钢板的熔深,可见:当激光功率为 1.9,2.0 kW 时,下板侧的熔深较小,下板 SUS304 钢板的熔深分别约为 140  $\mu\text{m}$  和 180  $\mu\text{m}$ ,如图 3(a)、3(b)所示;当激光功

率为 2.1 ~ 2.5 kW 时,激光功率每增大 0.1 kW,下板 SUS304 钢板的熔深约增加 130  $\mu\text{m}$ ,如图 3(c)~ 3(f)所示;当激光功率由 2.5 kW 升至 2.6 kW 时,两板的结合深度迅速由 800  $\mu\text{m}$  左右增大至 1200  $\mu\text{m}$ ,此时下板已接近完全熔透,如图 3(g)、(h)所示。

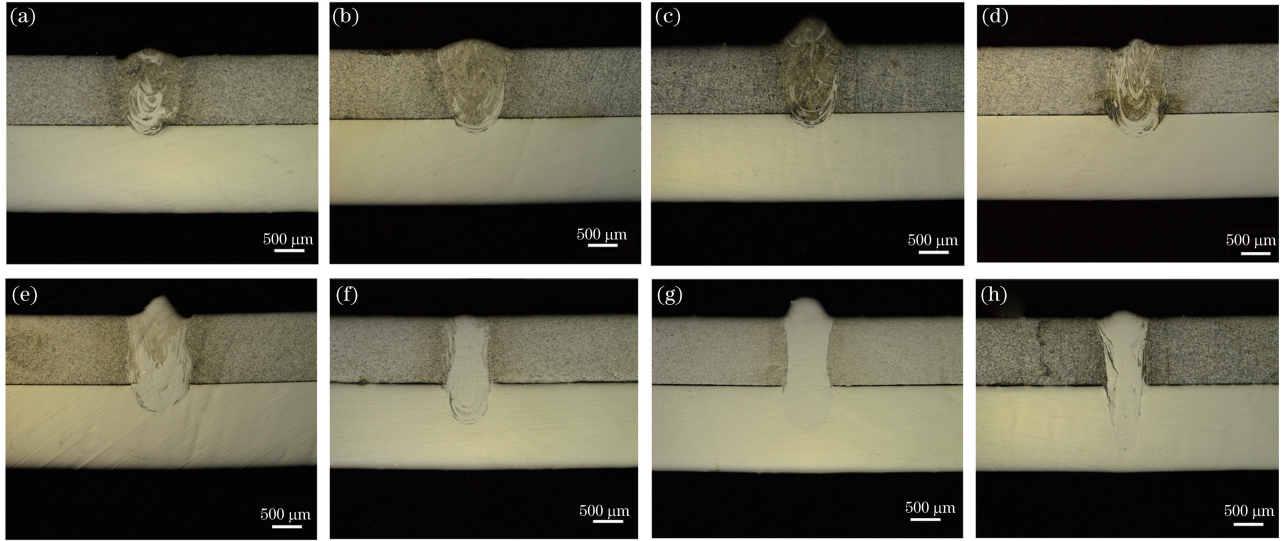


图3 不同功率下激光非熔透焊接接头的横截面形貌。(a) 1.9 kW;(b) 2.0 kW;  
(c) 2.1 kW;(d) 2.2 kW;(e) 2.3 kW;(f) 2.4 kW;(g) 2.5 kW;(h) 2.6 kW

Fig. 3 Cross-sectional morphology of partial penetration laser welding joint obtained at different laser powers.  
(a) 1.9 kW; (b) 2.0 kW; (c) 2.1 kW; (d) 2.2 kW; (e) 2.3 kW; (f) 2.4 kW; (g) 2.5 kW; (h) 2.6 kW

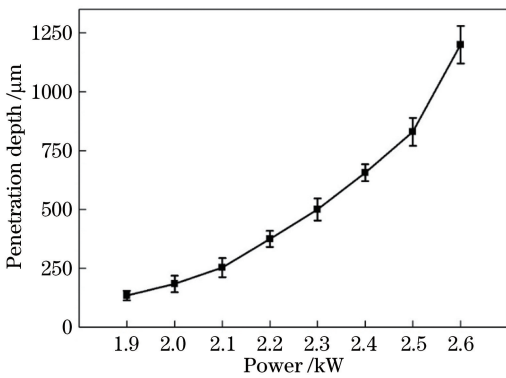


图4 不同功率下 SUS304 钢板的熔深

Fig. 4 Penetration depth of SUS304 steel plate at different laser powers

### 3.2 不同激光功率下的微凸起变形

轮廓仪拍摄到的镜面不锈钢无焊缝区域如图 5(a)所示,微凸起变形区域的 3D 模型如图 5(b)~5(j)所示。轮廓仪对检测区域中每一点的高度取平均值, $S_q$  和  $S_a$  分别为所有数据相对这一平均值的标准差和平均偏离量。图 5(a)为镜面不锈钢的原始状态,其表面起伏程度的  $S_q$  和  $S_a$  均约为 0.03  $\mu\text{m}$ ,表面平整程度良好。上述两个数据适合描述无变形区域,而对于凸起变形的变形程度则

适合用极差来表征。图 5(b)为在 2.4 kW 激光功率下,以微凸起变形中心区域为轴线,宽度为 8 mm 区域的 3D 模型,可以发现:变形呈现出比较明显的角变形形貌,但主要集中在变形中心宽为 2 mm 的范围内,在 2 mm 范围外,凸起变形逐渐平缓。其他功率下的变形也具有类似的特点。对比图 2(b)所示的外观检测可知,产生视觉扭曲的区域主要为变形中心宽为 2 mm 的范围内。这是由于此处的高度差变化幅度大,光线折射明显。因此,研究的重点为变形中心宽 2 mm 范围内微凸起变形的特点。图 5(c)~5(j)为激光功率为 1.9~2.6 kW 时,2 mm 宽微凸起变形区域的 3D 模型,可见:当激光功率为 1.9~2.0 kW 时,中心凸起区域为光滑的圆弧;随着激光功率增加,中心凸起区域转变成较为尖锐的凸峰。

为了更直观地描述该凸起的形貌,从轮廓仪中导出 3D 轮廓中的一条高度数据,获得不同功率下凸起变形的二维(2D)轮廓,如图 6(a)所示。图 6(a)为以微凸起变形区域为中心,宽度为 8 mm 的区域,图中两条虚线内的部分为视觉上变形最为明显的宽为 2 mm 的区域,可以发现:微凸起变形轮廓基本呈左右对称的曲线;当激光功率为 2.0 kW 时,微凸起



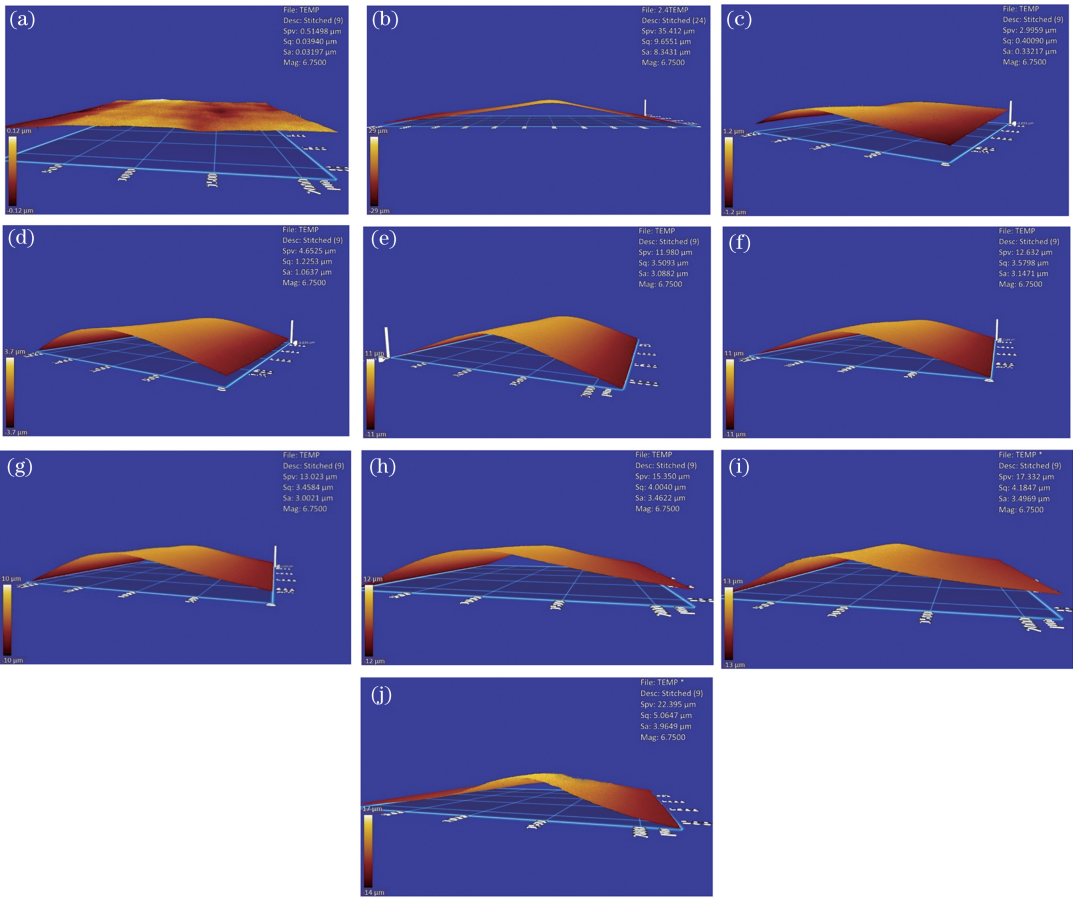


图 5 不同功率下微凸起变形的 3D 模型(测量区域宽 2 mm)。(a) 镜面区域;(b) 2.4 kW,测量区域宽 8 mm;  
(c) 1.9 kW;(d) 2.0 kW;(e) 2.1 kW;(f) 2.2 kW;(g) 2.3 kW;(h) 2.4 kW;(i) 2.5 kW;(j) 2.6 kW

Fig. 5 Three-dimensional model of micro bulging distortion at different powers( width of measurement area is 2 mm). (a) Mirror region; (b) 2.4 kW, and width of measurement area is 8 mm; (c) 1.9 kW; (d) 2.0 kW; (e) 2.1 kW; (f) 2.2 kW; (g) 2.3 kW; (h) 2.4 kW; (i) 2.5 kW; (j) 2.6 kW

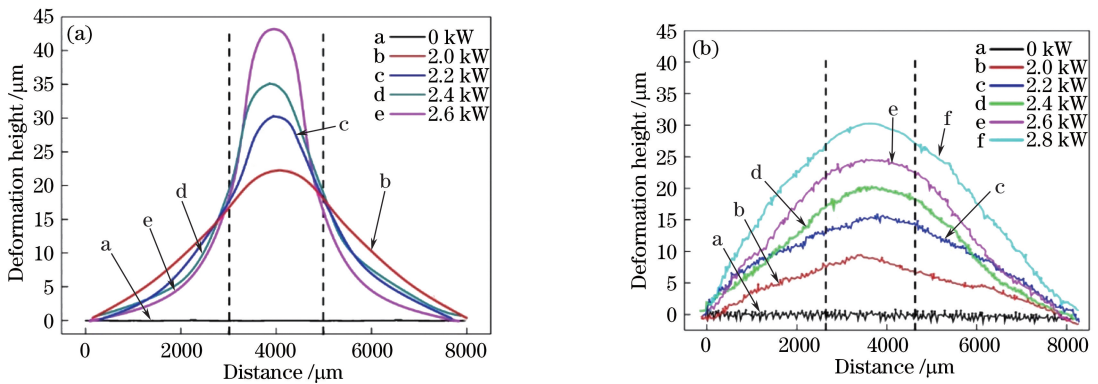


图 6 下板无焊缝侧微凸起变形的 2D 轮廓。(a) DC01-SUS304 焊接接头;(b) DC01-Q235 焊接接头  
Fig. 6 Two-dimensional profile of micro bulging distortion of the lower steel plate at weldless side.

(a) DC01-SUS304 welding joint; (b) DC01-Q235 welding joint

变形曲线比较平缓,顶点处的曲率半径较大,曲线各位置点的斜率变化较小,具有微区内角变形的特征;随着激光功率增加,微凸起变形曲线变陡,顶点处的曲率半径逐渐减小,曲线各位置点的斜率变化较大,当激光功率达到并超过 2.2 kW 时,曲线已不再呈

现微区角变形的特征,微凸起曲线的斜率急剧增大,变形高度主要集中在变形中心宽 2 mm 的区域。图 6(b)为 DC01-Q235 搭接接头无焊缝侧的轮廓,因 Q235 钢的导热性优于 SUS304 钢,故当激光功率为 2.8 kW 时,DC01-Q235 接头接近完全熔透。当激

光功率为 1.9~2.8 kW 时,经目测检查,下板 Q235 钢板的无焊缝侧并没有出现相同功率下奥氏体不锈钢焊后明显的凸起印痕,仅在大功率下出现了轻微的凸起印痕。此外,由图 6(b)可以发现:下板 Q235 钢板表面的变形轮廓为典型的角变形,以焊缝对应的区域为中心,呈现平缓的弯曲凸起特征。对比图 6(a)与图 6(b)可以发现:在各个功率下,Q235 钢板的最大变形高度小于 SUS304 钢板,且 Q235 钢板表面凸起的斜率明显小于 SUS304 钢板。例如:当激光功率为 2.6 kW 时,下板 Q235 钢板的凸起变形高度约为 23  $\mu\text{m}$ ,而下板 SUS304 钢板的变形高度约为 43  $\mu\text{m}$ ;在变形中心 2 mm 区域,Q235 钢板变形轮廓的斜率约为 0.005,而 SUS304 钢板变形轮廓的斜率约为 0.024。由于 Q235 钢板无焊缝侧表面的凸起程度较低,凸起变形轮廓更为平坦,因而未引起明显的光线偏折,没有出现视觉上较为明显的凸起变形特征。

### 3.3 反变形法焊后的变形

在不同的反变形量下分别进行激光非熔透搭接焊实验,并测量下板 SUS304 钢板的最大凸起高度。图 7 为不同反变形量下 SUS304 钢板表面以微凸起区域为中心,8 mm 范围内微凸起的变形高度,可见:当反变形量为 1 mm 时,1.9 kW 和 2.0 kW 下微凸起的变形高度、宽度与不添加反变形时的基本相当;当功率增大至 2.1~2.6 kW 时,微凸起的最大变形高度相比不添加反变形时约减小了 10%;当反变形量增大至 2 mm 时,不同激光功率下的变形高度比不添加反变形时约降低了 25%;当反变形量分别增大至 3 mm 和 4 mm 时,最大变形高度比不添加反变形时分别约降低了 60%和 75%。在反变形作用下,随着反变形量增大,搭接焊下板非熔透不锈钢背面凸起的变形量逐渐减小,凸起变形程度减轻,但不能完全消除微凸起变形印痕,尤其是在较高的激光功率下。

### 3.4 非熔透搭接焊缝背面微凸起处的 EBSD 分析

为了分析非熔透搭接焊背面微凸起的显微组织,对非熔透侧微凸起处的下板表面进行 EBSD 表征,取样位置为图 2(b)中的方框区域。图 8 为搭接焊下板 SUS304 不锈钢微凸起区域的 EBSD-IPF 图,此时的激光功率为 2.2 kW。图 8(a)为距变形区域中心约 1.5 mm 处下板 SUS304 钢板表面的 EBSD 形貌,图 8(b)为距变形区域中心约 1 mm 处下板 SUS304 钢板表面的 EBSD 形貌。图 8(a)中的纤维状组织为母材 SUS304 奥氏体不锈钢经热

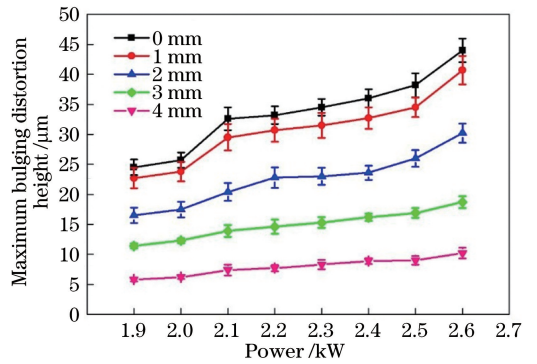


图 7 不同反变形量下 SUS304 钢板背面的最大凸起变形高度

Fig. 7 Maximum bulging distortion height of SUS304 steel back at different pre-deformation values

轧和冷轧后形成的纤维状奥氏体晶粒,但至中间区域(虚线框位置)的微凸起变形区,织构组织发生了改变,在纤维组织中出现了破碎的等轴晶粒。这是因为母材在冷轧后保存着较高的形变储存能,在激光焊接过程的高温 and 应力作用下发生再结晶,生成了细小均匀的奥氏体晶粒。同时可以发现,在这些等轴晶内部也产生了部分孪晶,如图 8(b)所示,A、B 区域位于同一晶粒内,根据划线可知,相邻的 A、B 区域之间的取向差约为 60°,取向指数为 $[\bar{1}\bar{1}1]$ ,即 A、B 所属条带的取向呈现 60° $[111]$ 转轴关系,表明其取向关系为孪晶取向。微凸起处的孪晶说明此处组织在焊接过程中受到了较大的变形应力作用。

### 3.5 分析与讨论

反变形法是抑制焊接角变形的常用方法<sup>[22]</sup>。本实验采用的焊接反变形虽与全熔透焊反变形存在一定差异,但仍遵循焊前预制与焊后变形方向相反的变形这一原则。针对非熔透激光搭接焊,在不同的反变形量下,下板 SUS304 钢板的微凸起变形程度随反变形量增加均得到明显抑制,表明角变形机制是搭接下板非熔透不锈钢表面微凸起变形的重要原因。然而,凸起变形主要集中于变形中心宽 2 mm 的区域内,通过反变形可明显降低微凸起变形的最大变形量,但并不能完全消除凸起变形的印痕,可见引起非熔透搭接焊下板 SUS304 奥氏体不锈钢微凸起变形的机制并不仅是角变形。

在实验条件下,如图 6 所示,采用相同尺寸的 Q235 钢板代替 SUS304 奥氏体不锈钢板在相同的装夹条件下进行非熔透激光搭接焊,搭接下板 Q235 钢板背面并未出现类似的微凸起变形,这表明微凸起变形与奥氏体不锈钢自身的特性相关。根据图 8 的 EBSD-IPF 图可知:非熔透搭接焊下板 SUS304

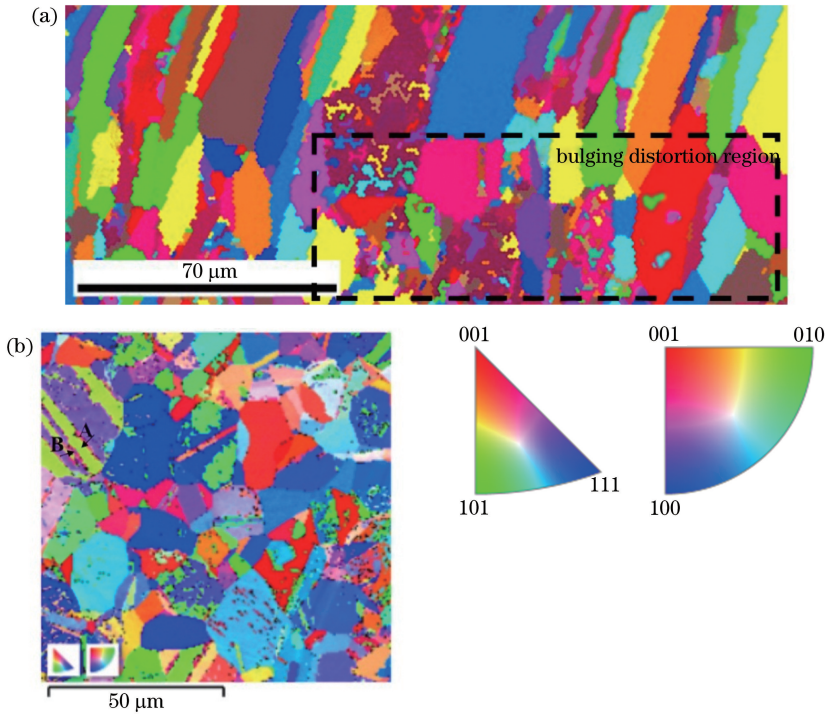


图 8 微凸起区域的 EBSD-IPF 图。(a)距微凸起变形中心约 1.5 mm 处的形貌;(b)距微凸起变形中心 1 mm 处的形貌  
Fig. 8 EBSD-IPF images of micro bulging distortion area. (a) Morphology of region about 1.5 mm away from bulging distortion center; (b) morphology of region about 1 mm away from bulging distortion center

钢板背面微凸起区域不仅发生了回复和再结晶,而且再结晶后的晶粒内生成了孪晶,表明该局部区域的晶粒在激光焊接的热应力作用下产生了塑性变形。SUS304 奥氏体不锈钢的线膨胀系数大,约为低碳钢的 3 倍<sup>[23]</sup>,在激光焊接过程中,与 Q235 钢相比,SUS304 奥氏体不锈钢焊缝热影响区受热后的膨胀更大,由于受到两侧温度更低的材料的拘束,热影响区邻近区域产生了较大的热应力。实验采用夹具对搭接试板进行刚性约束,且在需要激光焊接的部位留有开口,如图 1(a)所示,因此试板在长度和宽度方向上受到的拘束程度大于厚度方向,故可能会产生热影响区材料向上和向下“挤出”的应力作用,如图 9 所示。

当向下“挤出”的应力高于 SUS304 奥氏体不锈钢的屈服强度时,搭接非熔透焊下板 SUS304 钢板背面便会发生塑性变形而隆起,在焊接试板冷却后保留在表面形成微凸起变形。随着激光功率增大,塑性材料受到的挤压程度越发明显,故微凸起变形越明显。由此可见:下板为 SUS304 奥氏体不锈钢的搭接非熔透焊缝背面的微凸起变形是在角变形和挤压塑性变形的共同作用下产生的。

## 4 结 论

通过激光非熔透薄板焊接实验、反变形法和碳

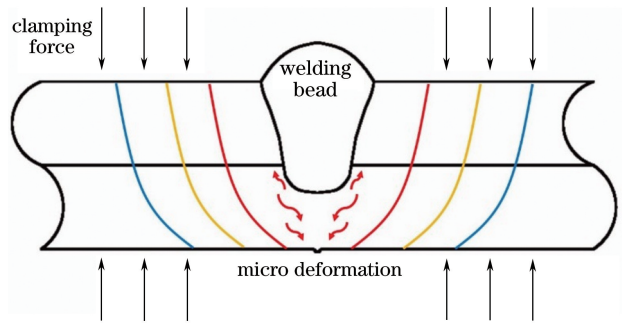


图 9 微凸起变形塑性挤压示意图  
Fig. 9 Schematic of micro bulging distortion plastic compression

钢对比实验,以及非熔透下板不锈钢微凸起变形程度和变形区域微观组织的测试与分析,得到以下结论:激光非熔透焊薄板焊接件无焊缝一侧的凸起变形在宏观上表现为平滑的拱形,微凸起主要集中于变形中心宽为 2 mm 的区域,该中心的凸起区域呈圆弧形;随着激光功率增加,中心凸起区域逐渐增大,并由圆弧形转变成较为尖锐的凸峰。由反变形法实验结果可知:反变形法可对激光非熔透焊薄板焊接件无焊缝一侧的凸起变形起到一定的抑制作用,焊接角变形是微凸起变形的成因之一。同时,非熔透激光搭接焊接件无焊缝一侧的微凸起变形与材料特性有关,下板 SUS304 奥氏体不锈钢在激光焊



接过程中,金属受热膨胀后受到两侧材料的约束并向下挤出形成凸起。SUS304 钢板无焊缝侧的微凸起变形是在激光焊接过程中的角变形和热影响区材料挤压塑性变形的共同作用下形成的。

## 参 考 文 献

- [1] Zheng R, Lin J P, Wu Q Q, *et al.* Progress in research on environmental corrosion-resistance of structural adhesive bonding automotive-body metal joint[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2015, 43(3): 98-105.  
郑锐, 林建平, 吴倩倩, 等. 结构胶胶接汽车车身金属接头抗环境腐蚀性能研究进展[J]. *材料工程*, 2015, 43(3): 98-105.
- [2] You M, Zheng X L. Connection structure analysis [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2004.  
游敏, 郑小玲. 连接结构分析[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004.
- [3] Ma H Q, Wang Q N, Qian L, *et al.* Damage mode and failure mechanism of cementing structure [J]. *Failure Analysis and Prevention*, 2012, 7(3): 162-166.  
马海全, 王倩妮, 钱雷, 等. 胶接结构破坏模式及失效机理[J]. *失效分析与预防*, 2012, 7(3): 162-166.
- [4] Wang H Z, Nakanishi M, Kawahito Y. Effects of welding speed on absorption rate in partial and full penetration welding of stainless steel with high brightness and high power laser [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 249: 193-201.
- [5] Bai P F, Wang Z J, Hu S S, *et al.* Sensing of the weld penetration at the beginning of pulsed gas metal arc welding[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 28: 343-350.
- [6] Liang H, Kan Y, Jiang Y L, *et al.* Mechanical properties of laser overlap welded joints of stainless steel sheets[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(6): 0602001.  
梁行, 阚盈, 姜云禄, 等. 不锈钢薄板激光搭接焊接头的力学性能[J]. *中国激光*, 2018, 45(6): 0602001.
- [7] Zeng Q, Zhu S W, Fu Z H. Effects of different welding processes on microstructure and mechanical properties of SUS301L-MT stainless steel joints[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(3): 031405.  
曾强, 朱绍维, 付正鸿. 不同焊接工艺对 SUS301L-MT 不锈钢接头组织和力学性能的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(3): 031405.
- [8] Zhou X K, Mi G Y, Liu S, *et al.* Laser lap welding of 304 stainless steel/T2 red copper ultra-thin sheets [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(8): 0802006.  
周学凯, 米高阳, 刘森, 等. 304 不锈钢/T2 紫铜超薄板激光搭接焊[J]. *中国激光*, 2017, 44(8): 0802006.
- [9] Turichin G, Tsibulskiy I, Kuznetsov M, *et al.* Influence of the gap width on the geometry of the welded joint in hybrid laser-arc welding [J]. *Physics Procedia*, 2015, 78: 14-23.
- [10] Hou Z G. Prediction and control of welding deformation of sheet structures [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.  
侯志刚. 薄板结构焊接变形的预测与控制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [11] Meng X H, Li M X, Wu L X, *et al.* Analysis and countermeasure of defects in welding automobile galvanized steel sheet [J]. *Foundry Technology*, 2018, 39(3): 625-627.  
孟祥海, 李孟星, 吴丽学, 等. 汽车镀锌钢板焊接缺陷分析及对策[J]. *铸造技术*, 2018, 39(3): 625-627.
- [12] Chen W, Ackerson P, Molian P. CO<sub>2</sub> laser welding of galvanized steel sheets using vent holes[J]. *Materials & Design*, 2009, 30(2): 245-251.
- [13] Reimann W, Pfriend S, Hammer T, *et al.* Influence of different zinc coatings on laser brazing of galvanized steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 239: 75-82.
- [14] Ji D P. Spot welding process of galvanized steel & failure of spot welding research [D]. Changsha: Hunan University, 2012.  
姬大鹏. 镀锌钢板点焊工艺及焊接缺陷研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [15] Liao Y C, Yu M H. Effects of laser beam energy and incident angle on the pulse laser welding of stainless steel thin sheet [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 190(1/2/3): 102-108.
- [16] Huang H, Wang J D, Li L Q, *et al.* Prediction of laser welding induced deformation in thin sheets by efficient numerical modeling[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 227: 117-128.
- [17] Chakraborty S S, Racherla V, Nath A K. Thermo-mechanical finite element study on deformation mechanics during radial scan line laser forming of a bowl shaped surface out of a thin sheet[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 31: 593-604.
- [18] Ai Y W, Jiang P, Wang C M, *et al.* Experimental and numerical analysis of molten pool and keyhole

- profile during high-power deep-penetration laser welding[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 126: 779-789.
- [19] Choobi M S, Haghpanahi M, Sedighi M. Prediction of welding-induced angular distortions in thin butt-welded plates using artificial neural networks [J]. *Computational Materials Science*, 2012, 62: 152-159.
- [20] Sun X W, Yin X Q, Wang J C, *et al.* Analysis of buckling distortion caused by welding using 3D optical measurement technology[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2013, 34(6): 109-112, 118.  
孙向伟, 殷咸青, 王江超, 等. 采用三维光学测量技术对薄板焊接失稳变形的分析[J]. *焊接学报*, 2013, 34(6): 109-112, 118.
- [21] Liu J. Research on laser lap welding technology of SUS301L austenitic stainless steel for railway vehicles [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012.  
刘佳. 轨道客车用 SUS301L 奥氏体不锈钢激光叠焊技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- [22] Fang H Y. *Welding structure* [M]. Beijing: China Machine Press, 2008.  
方洪渊. *焊接结构学* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [23] Deng D A, Murakawa H. Numerical simulation of temperature field and residual stress in multi-pass welds in stainless steel pipe and comparison with experimental measurements [J]. *Computational Materials Science*, 2006, 37(3): 269-277.