

# Al-Si 镀层在激光拼焊板焊缝中分布及性能影响研究

张帆<sup>1</sup> 李芳<sup>1\*</sup> 华学明<sup>1</sup> 王诗恩<sup>2</sup> 王大明<sup>2</sup> 褚卫东<sup>2</sup>

<sup>1</sup>上海交通大学激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240

<sup>2</sup>上海拖拉机内燃机有限公司, 上海 200433

**摘要** 针对热成形前 Usibor1500 钢板激光拼焊时 Al-Si 镀层对焊缝的影响进行研究, 对比分析了保留 Al-Si 镀层与去除顶层镀层后的激光拼焊焊缝金相特征, 通过能量色散 X-射线光谱(EDS)的方法分析了镀层元素在焊缝中的分布特征, 采用室温拉伸实验研究了去除顶层镀层前后力学性能的差异。研究表明: Al 元素分布于焊缝各个部位并存在局部偏聚, Al 在不同合金相中质量百分比分别为 1.76% 和 2.65%; Al-Si 镀层进入焊缝形成的脆性相降低焊缝力学性能, 焊缝断裂的抗拉强度为 458~479 MPa, 而断裂于母材时为 500 MPa 左右; 去除顶层镀层可以改善焊缝力学性能, 拉伸断裂位置均为母材。

**关键词** 激光光学; 光纤激光拼焊; 热成形钢; 铝硅镀层; 元素分布; 力学性能

**中图分类号** TG456.7

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201542.0503005

## Research of Effects with Al-Si Coating on Distribution and Performance of Tailored Laser

Zhang Fan<sup>1</sup> Li Fang<sup>1</sup> Hua Xueming<sup>1</sup> Wang Shien<sup>2</sup> Wang Daming<sup>2</sup> Chu Weidong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laser Processing and Material Modify Key Laboratory, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

<sup>2</sup>Shanghai Tractor & Internal Combustion Engine Co., LTD, Shanghai 200433, China

**Abstract** The metallographic phases and tensile strength of tailored fiber laser welded blanks of Al-Si coated Usibor1500 and Usibor1500 without coating are investigated, and the distribution of Al in the weld seams is investigated by energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). Ambient tensile strength is tested to study the difference with or without top coating layer. The results show that, Al enters the weld seam and distributes in the whole area of weld seam and be with local segregation, the mass percent of Al in two phases are 1.76% and 2.65%, respectively. Al-Si coating which entering the weld seam decreases the mechanical properties of weld seam due to the formation of brittle phase, whose strength is 458~479 MPa, while the strength of base metal is around 500 MPa. After removing the top layer of the coating, the mechanical properties increase distinctly, whose fracture locations are consistently at the base metal.

**Key words** laser optics; fiber laser tailored welding; hot stamping steel; Al-Si coating; element distribution; mechanical property

**OCIS codes** 140.3390; 350.3390; 160.3900; 060.3510

## 1 引言

为了实现汽车车身轻量化,同时提高车身结构的弯曲和扭转刚性,超高强钢在车身上的应用愈加普遍。目前, Arcelor 公司开发 Usibor1500 用于热成形的钢板在淬火后强度可达 1500 MPa 级别,通过采用热成形技术,同时满足冲压和淬火强化的需求,在 A 柱、B 柱、横梁、中通道等车身组件的优化设计中已经得到了

收稿日期: 2014-11-18; 收到修改稿日期: 2015-01-04

作者简介: 张帆(1990—),男,硕士研究生,主要从事汽车车身用钢激光焊接方面的研究。

E-mail: koslowskizhang@outlook.com

导师简介: 华学明(1965—),男,博士,教授,主要从事焊接电弧物理及高效焊接新技术等方面的研究。

E-mail: xmhua@sjtu.edu.cn

\*通信联系人。E-mail: lifang302@sjtu.edu.cn

应用,在保证强度的前提下降低了重量,具有重要的应用价值<sup>[1]</sup>。热成形技术同时促进了拼焊板的发展,数家汽车制造厂商采用了拼焊板热压技术,在热成形前进行激光拼焊,通过结合拼焊与热成形的解决方案实现了大幅减重。

由于热成形工艺的温度达到 900 ℃,已超出了常见的镀锌层的熔点(约 400 ℃),为了满足热成形工艺的需求,热成形 Usibor1500 的防腐镀层主要为 Al-Si 镀层<sup>[2]</sup>。Al-Si 镀层在热成形所达到的高温下有好的稳定性,并对钢板基体有良好的防腐作用。但在激光焊接时,Al-Si 镀层熔化进入焊缝,在焊缝中形成金属间化合物,降低接头力学性能。对于有镀层的 Usibor 1500 焊接,焊接过程可能在热成形前或热成形后,其中研究热成形后的激光焊接较多,且主要研究针对搭接焊和补丁焊<sup>[2]</sup>。Kim 和 Kang 等<sup>[3-4]</sup>对热成形后的 Usibor 1500 进行了拼焊实验,对焊缝组织和硬度分布进行了研究,得到热影响区的马氏体回火是降低焊缝力学性能的重要原因;并结合实验和模拟的手段分析了激光焊接和电阻点焊过程中热循环对全马氏体钢组织的影响。Manzenreiter 等<sup>[5]</sup>分别对 Zn 镀层和 Al-Si 镀层的 22MnB5 钢激光拼焊进行了研究,证实了 Zn 镀层不会进入焊缝中形成 Zn-Fe 合金相,而 Al-Si 镀层进入焊缝中会形成 Fe-Al-Si 三元合金相。Kim、Lee、Norman 等<sup>[6-8]</sup>以及 Kang 等<sup>[9]</sup>各自针对 Al-Si 镀层在热成形后的激光搭接焊中的影响进行了研究,通过不同的实验研究了 Al-Si 镀层对激光搭接焊力学性能的不利影响。相比搭接焊,有关热成形前的激光拼焊的报道较少, Moon 等<sup>[10]</sup>针对 Al-Si 镀层对拼焊焊缝的不利影响,采用激光去除镀层的方法,研究了去除镀层对焊缝性能的改善作用。对于 Al-Si 镀层进入拼焊焊缝中的分布尚未有相关报道,尤其未见国内学者研究该内容的报道,本文通过研究 Al-Si 镀层与无镀层 Usibor1500 钢板在热成形前的光纤激光拼焊接头,分析 Al-Si 镀层在焊缝中的分布以及其对激光拼焊接头的影响。

## 2 实验内容

### 2.1 实验材料与实验平台

本文研究 Usibor1500 等厚光纤激光拼焊,板材厚度为 1.0 mm,焊接实验平台和实验现场如图 1 所示。实验所使用激光器为 IPG-YLS-10000 光纤激光器,激光模式为多模,最大功率为 10 kW。

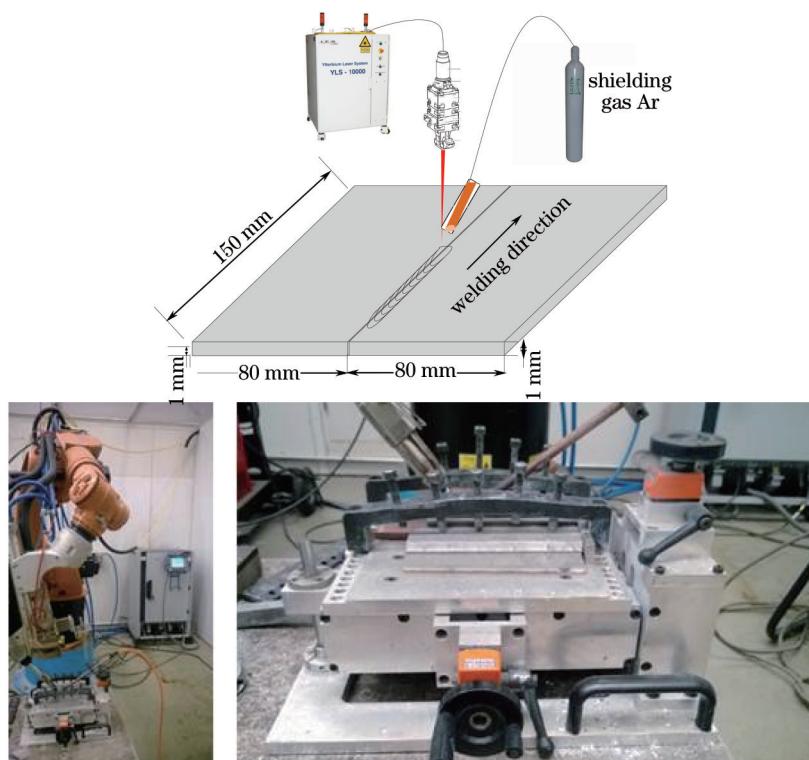


图 1 焊接平台、接头示意图及实验现场照片

Fig.1 Platform for lap welding experiments and experiment site

实验所用材料为 Arcelor 公司生产的未经过热成形的 Usibor1500 钢板,其化学成分如表 1 所示(出厂状态),母材屈服强度为 497 MPa,抗拉强度为 672 MPa,总延伸率为 15.8%。Usibor1500 钢板的两面均有镀层,图 2(a)为 Usibor1500 钢板某表面镀层的情况。可以看出,出厂状态的镀层分为两层。采用能量色散 X-射线光谱(EDS)分析了母材基体、镀层中间层和顶层的重要元素含量,如图 3 所示。可以看出,顶层镀层主要为 Al-Si 层,镀层中间层为 Al-Fe 化合物层。为了研究 Al-Si 镀层对激光拼焊接头性能的影响,采用机械的方法将顶层 Al-Si 镀层去除,如图 2(b)所示。

表 1 实验材料的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical component of experiment materials (mass fraction, %)

C	Si	Mn	P	S	N	Al	Ti	B	Cr
0.23	0.27	1.13	0.013	0.001	0.0042	0.037	0.038	0.0025	0.16

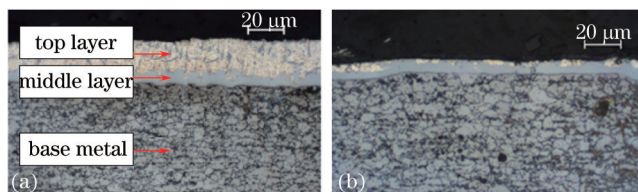


图 2 实验材料镀层情况。(a) 出厂状态;(b) 去除顶层镀层

Fig.2 Coating condition of the experiment materials. (a) Original coating condition; (b) after removing the top layer

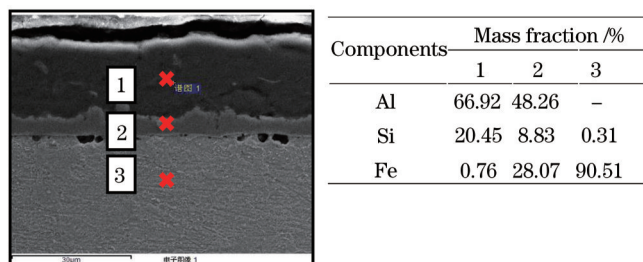


图 3 实验材料镀层与基体元素分布(Al, Si, Fe)

Fig.3 Chemical components of the coating and base metal of experiment materials (Al, Si, Fe)

## 2.2 实验设计

前期进行了工艺参数的实验,通过目视焊缝表面成形寻找可以获得良好焊缝的工艺参数范围,本文中焊接参数如表 2 所示。其他参数保持不变,保护气体为纯氩,采用侧吹方式进行保护,气体流量为 15 L/min,侧吹方向与焊接方向相反,气体导管与水平方向呈 45°,导管内径为 8 mm,末端为圆形。激光离焦量为 0,光斑直径为 0.6 mm,连续输出激光。作为对比实验,将母材镀层的顶层去除(以下简称“去镀层”)后进行了一组焊接实验。

表 2 焊接参数表

Table 2 Welding parameters

Specimen number	Coating condition	Laser power $P$ /kW	Welding velocity $v$ /(m·min <sup>-1</sup> )
1#	Al-Si	2	3
2#	Al-Si	2	4
3#	Al-Si	2	5
4#	No coating	2	5

对实验母材及焊缝进行拉伸实验,根据 GB/T 2651-2008 标准制备室温静态拉伸试样,尺寸如图 4 所示。使用 Zwick Z100 万能材料实验机进行室温静态拉伸实验,拉伸速度为 2 mm/min,得到最大拉剪力,并观察断裂位置。金相制样在镶嵌、磨光、抛光后,用质量分数为 4%的硝酸乙醇进行 3 s 腐蚀后,分别用金相显微镜和场发射扫描电子显微镜(SEM) JSM7600F 进行光学金相照片拍摄和 SEM/EDS 拍摄与分析。

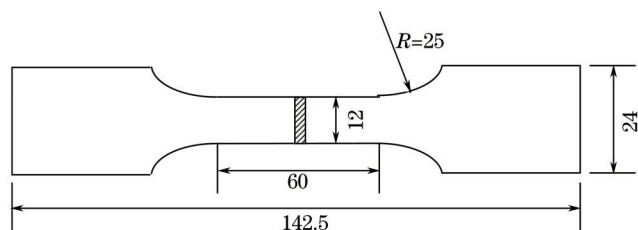


图4 拉伸试样尺寸示意图(单位: mm)

Fig.4 Tensile test specimen (unit: mm)

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 焊缝成形

通过前期工艺参数实验,确定了目视质量良好的焊接参数,为了进一步确定焊缝成形,截取焊缝进行镶样,并拍摄焊缝横截面金相,如图5所示。从金相中可以看到,焊缝中没有气孔等缺陷,熔池金属较好地填充了两侧薄板拼接的间隙。焊缝上表面均有不同程度的下塌,且随着焊接速度的增加,下塌程度有所减小。



图5 焊缝横截面金相( $\times 50$ )。 (a) 1#,  $P=2$  kW,  $v=3$  m/min; (b) 2#,  $P=2$  kW,  $v=4$  m/min; (c) 3#,  $P=2$  kW,  $v=5$  m/min

Fig.5 Metallographic phase of laser tailor of weld seams( $\times 50$ ). (a) 1#,  $P=2$  kW,  $v=3$  m/min; (b) 2#,  $P=2$  kW,  $v=4$  m/min;

(c) 3#,  $P=2$  kW,  $v=5$  m/min

#### 3.2 焊缝金相与元素分析

为了对比有无镀层对焊缝金相的影响,制备了相同工艺参数下 Al-Si 镀层拼焊板和机械去除顶层镀层后拼焊板的焊缝金相,分别如图6(a)和图6(b)所示。从金相图中可以看到两者形貌的区别,Al-Si 镀层拼焊板焊缝中分布了浅灰色的组织,在浅灰色的组织之间为板条状马氏体树枝晶。作为对比,去镀层拼焊板焊缝中为典型的板条状马氏体树枝晶。

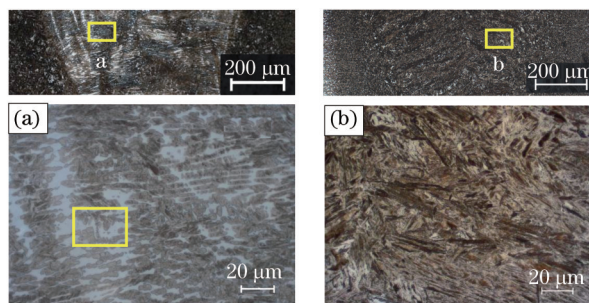


图6 激光拼焊焊缝金相( $\times 1000$ )。 (a) Al-Si 镀层 Usibor1500; (b) 去除顶层镀层后 Usibor1500

Fig.6 Metallographic phase of laser tailor weld seam ( $\times 1000$ ). (a) Al-Si coated Usibor1500; (b) decouated Usibor1500

进一步研究 Al-Si 镀层拼焊板的焊缝中形成的浅灰色组织,对焊缝进行了 EDS 分析。如图7所示,电子扫描图像中点 A 对应光学金相马氏体区域,点 B 即为光学金相中浅灰色组织区域位置。EDS 元素分析结果表明,光学金相中浅灰色组织的 Al 含量约为马氏体的两倍,同时 Si 元素在马氏体中分布极少,而主要分布在浅灰色组织中。通过 EDS 线扫描实验结果(图8所示),表明由于镀层的存在,焊缝的上部和下部 Al 元素含量均有显著增加。结合点扫描可知,镀层在熔化过程中完全进入熔池,在熔池中不同部位均有分布;在凝固过程中,Al、Si 元素存在局部偏聚现象,形成了富铝硅相。



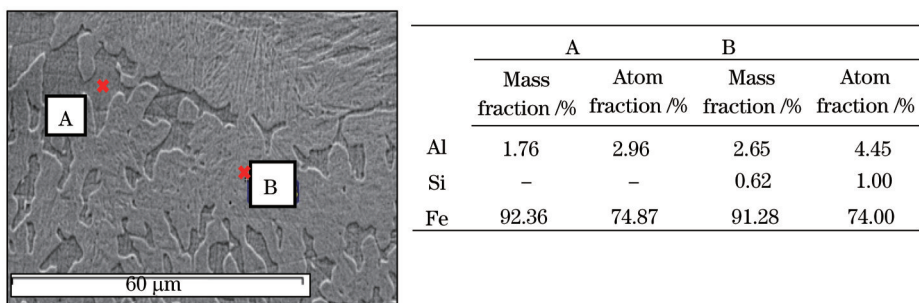


图7 焊缝内部EDS点扫描(Al, Si, Fe)

Fig.7 EDS spot scan in weld seam (Al, Si, Fe)

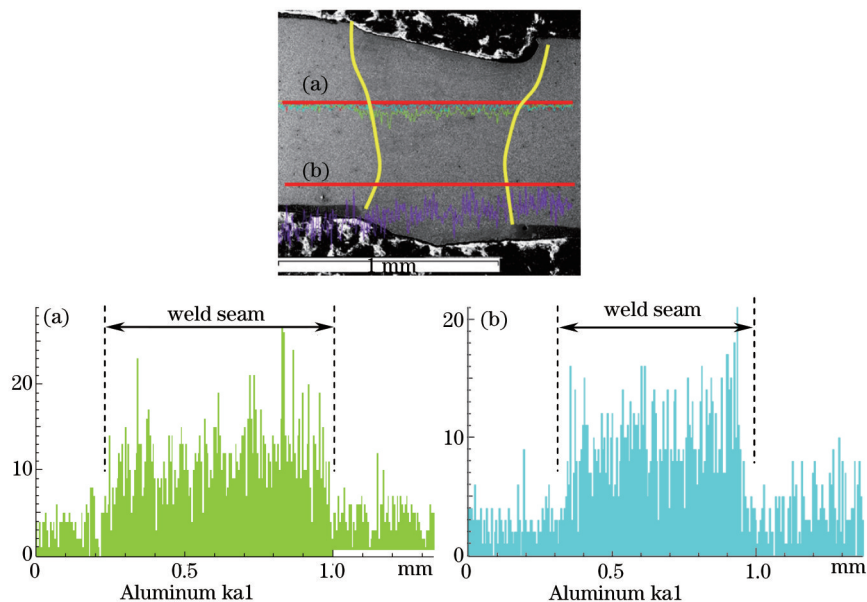


图8 Al元素EDS线扫描

Fig.8 EDS line scan of Al component

根据熔池流动理论,在激光焊接中,匙孔壁内的液态金属进行高速流动,流动速度可达0.4 m/s,处于高速波动状态。在整个熔池中,形成金属液流的震荡,其机理是功率的激光辐射作用与小孔前壁突起的部位,会引起金属的急剧蒸发,该蒸发过程非常剧烈,相当于局部大爆炸,具有极高能量的金属蒸气由于空间限制会作用于小孔后壁,从而造成了金属液流的震荡,该震荡过程形成数个向后翻转的漩涡,以相当大的能量进行旋转。Arata<sup>[11]</sup>和 Matsunawa<sup>[12]</sup>用钨颗粒进行熔池搅拌过程的示踪实验,如图9所示,可以看到,钨几乎流遍了全部熔池。根据这一过程,可以充分解释本文 Al-Si 镀层钢板在焊接过程中镀层元素分布在焊缝的所有位置,与实验结果相吻合。

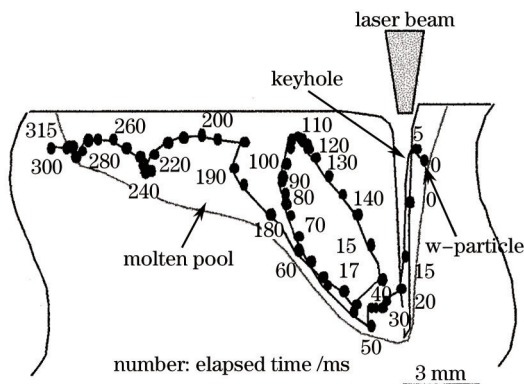


图9 钨颗粒显示激光焊熔池液体的流动情况

Fig.9 Liquid motion in laser welding as marked by tungsten pellet

### 3.3 焊缝接头拉伸实验

为了研究镀层对拼焊板拉伸性能的影响,对 Al-Si 镀层拼焊板和去镀层拼焊板均制备了拉伸试样。1~3#Al-Si 镀层拼焊板的拉伸破坏位置如图 10 所示,表 3 为拉伸强度的结果,三种工艺参数下均有断裂位置为焊缝的拉伸试样。

对断裂在焊缝的断口位置进行分析,如图 11 所示,断口均位于焊缝横截面较小的位置,主要位于靠近熔合线易发生下塌的位置附近,其拉伸性能对于焊缝形状较为敏感。对断裂位置进一步放大,如图 12 所示,断口沿着光学金相中浅灰色组织断裂,表明该组织为焊缝中的薄弱位置,易在该相的位置首先出现断裂。图 13 为断口位置分别为焊缝和母材的断口微观形貌照片,焊缝处的断口为典型的解理断裂形式,发生脆性断裂;而母材处的断口呈现典型的韧窝特征,发生韧性断裂。作为对比,去镀层拼焊板拉伸试样的断裂形式如图 14 所示,断裂位置均为母材。

实验结果表明,Al-Si 镀层在进入拼焊板焊缝后对其拉伸性能有明显的降低作用。Al-Si 镀层进入焊缝而形成的浅灰色组织是造成拉伸性能下降的主要原因,该组织为脆性相,使得焊缝易在此处发生脆性断裂。

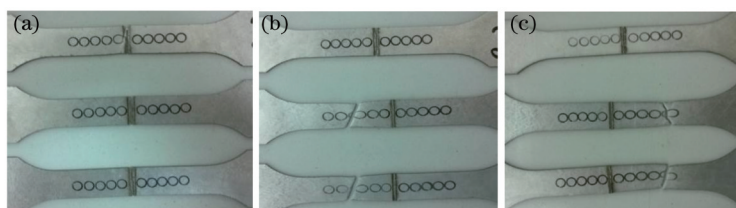


图 10 1~3#拼焊板拉伸试样断裂位置。(a) 1#,  $P=2\text{ kW}$ ,  $v=3\text{ m/min}$ ; (b) 2#,  $P=2\text{ kW}$ ,  $v=4\text{ m/min}$ ; (c) 3#,  $P=2\text{ kW}$ ,  $v=5\text{ m/min}$   
 Fig.10 Fracture location in tensile experiments of 1~3# weld seams. (a) 1#,  $P=2\text{ kW}$ ,  $v=3\text{ m/min}$ ; (b) 2#,  $P=2\text{ kW}$ ,  $v=4\text{ m/min}$ ; (c) 3#,  $P=2\text{ kW}$ ,  $v=5\text{ m/min}$

表 3 拉伸实验结果

Table 3 Tensile strength of specimen

	Tensile strength /MPa	Fracture location	Tensile strength /MPa	Fracture location	Tensile strength /MPa	Fracture location
1#	457.99	Weld seam	463.36	Weld seam	464.91	Weld seam
2#	496.39	Base metal	496.63	Base metal	450.12	Weld seam
3#	508.49	Base metal	508.13	Base metal	479.23	Weld seam

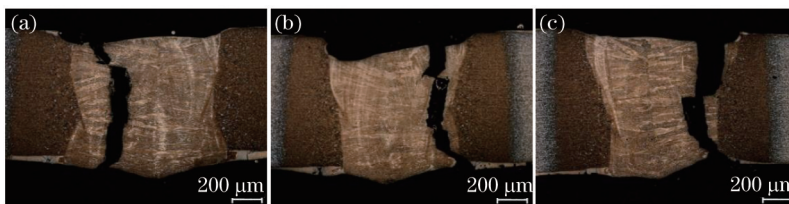


图 11 1~3#焊缝断裂时的断裂位置( $\times 100$ )。(a) 1#,  $P=2\text{ kW}$ ,  $v=3\text{ m/min}$ ; (b) 2#,  $P=2\text{ kW}$ ,  $v=4\text{ m/min}$ ; (c) 3#,  $P=2\text{ kW}$ ,  $v=5\text{ m/min}$

Fig.11 Location when fractures occur in weld seams ( $\times 100$ ). (a) 1#,  $P=2\text{ kW}$ ,  $v=3\text{ m/min}$ ; (b) 2#,  $P=2\text{ kW}$ ,  $v=4\text{ m/min}$ ;

(c) 3#,  $P=2\text{ kW}$ ,  $v=5\text{ m/min}$

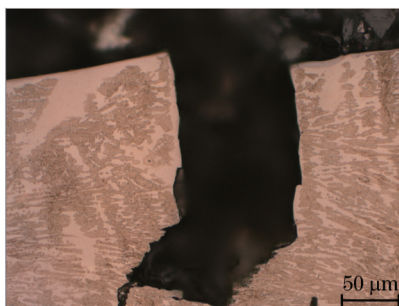


图 12 断裂位置( $\times 500$ )

Fig.12 Fracture location ( $\times 500$ )

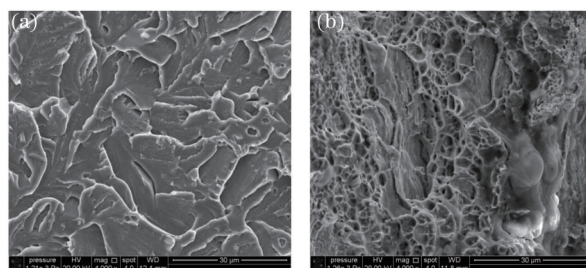


图 13 断裂位置分别为(a)焊缝和(b)母材的断口形貌

Fig.13 Micro fracture appearances located in (a) weld seam and (b) base metal

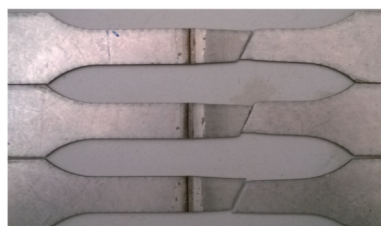


图 14 4#拼焊板拉伸试样断裂位置

Fig.14 Fracture location in tensile experiments of 4# specimen

从拉伸实验的结果中可以看到,在去除顶层镀层前,焊缝与母材的强度差距较小。由于实验所采用的拉伸试样为标准哑铃型拉伸试样,在试样平行段为均匀的应力分布<sup>[13]</sup>,如图 15 所示,故断裂位置决定于焊缝与母材强度的大小关系,所以焊缝与母材强度相近的情况下,在静态拉伸实验中断裂在焊缝或母材的情况均可能发生。同时,如图 11 所示的焊缝成形中下塌得到改善后,断裂在母材的几率有所增加。去除顶层镀层后,断裂位置不再出现在焊缝上而均位于母材,说明焊缝的抗拉强度增加,比母材强度高。该结果说明去除顶层镀层对于改善激光拼焊接头的静态拉伸性能有重要意义。

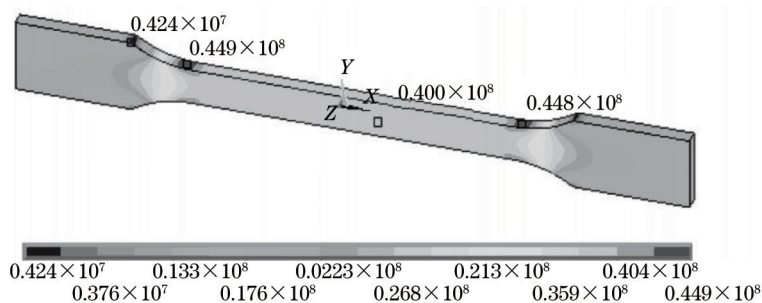


图 15 哑铃形试样拉伸时 x 轴方向的应力分布(单位: Pa)

Fig.15 Stress distribution of x-axis direction during tensile testing of the dumb-bell specimens (unit: Pa)

## 4 结 论

通过研究 Al-Si 镀层 Usibor1500 拼焊板和去除顶层镀层后的拼焊板的金相特征和拉伸性能,表明了 Al-Si 镀层对拼焊板性能有不利影响,得到了以下结论:

- 1) Al-Si 镀层进入焊缝,在熔化过程中完全进入熔池,在熔池中不同部位均有分布;在凝固过程中,Al、Si 元素局部偏聚,在光学金相中呈现浅灰色组织形貌;
- 2) Al-Si 镀层在进入拼焊板焊缝后使得拉伸性能有明显下降。Al-Si 镀层进入焊缝而形成的浅灰色组织为造成拉伸性能下降的主要原因,该组织为脆性相,使得焊缝易在此处发生脆性断裂;
- 3) 去除顶层镀层后,焊缝力学性能即可得到显著的提升。若在激光拼焊之前对拼接边缘进行一定手段的顶层镀层的去除处理,可以大大改善拼焊板的性能,更好地进行后续加工处理。

## 参 考 文 献

1 Tian Zhiqiang. Current status of hot forming steel and hot stamp technology[C]. AMAS Conference, 2012.

- 田志强. 热成形钢与热成形技术的应用及发展现状[J]. 第十四届中国科协年会第8分会场: 钢材深加工研讨会论文集, 2012.
- 2 Iordachescu D, Blasco M, Lopez R, *et al.*. Recent achievements and trends in laser welding of thin plates[J]. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 2011, 13(7-8): 981-985.
- 3 Kim C H, Choi J K, Kang M J, *et al.*. A study on the CO<sub>2</sub> laser welding characteristics of high strength steel up to 1500 MPa for automotive application[J]. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2010, 39(1): 79-86.
- 4 Kang M J, Kim C H. Analysis of laser and resistance spot weldments on press-hardened steel[J]. Materials Science Forum, 2011, 695: 202-205.
- 5 Manzenreiter T, Rosner M, Kurz T, *et al.*. Challenges and advantages in usage of zinc-coated, press-hardened components with tailored properties[J]. BHM Berg-und Hüttenmännische Monatshefte, 2012, 157(3): 97-101.
- 6 Kim C, Kang M J, Park Y D. Laser welding of Al-Si coated hot stamping steel[J]. Procedia Engineering, 2011, 10: 2226-2231.
- 7 Lee M S, Moon J H, Kang C G. Investigation of formability and surface micro-crack in hot deep drawing by using laser-welded blank of Al-Si and Zn-coated boron steel[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2014, 228(4): 540-552.
- 8 Norman P, Wiklund G, Janiak P, *et al.*. Comparison of 22MnB5-steel with and without AlSi-coating during laser hybrid arc welding [J]. 13th NOLAMP Conference, 2011.
- 9 Kang M, Kim C, Lee J. Weld strength of laser-welded hot-press-forming steel[J]. Journal of Laser Applications, 2012, 24(2): 022004.
- 10 Moon J H, Seo P K, Kang C G. A study on mechanical properties of laser-welded blank of a boron sheet steel by laser ablation variable of Al-Si coating layer[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2013, 14(2): 283-288.
- 11 Arata Y. Challenge of laser advanced materials processing[C]. Proc Conf Laser Advanced Materials Processing Applications, 1987: 3-11.
- 12 Matsunawa A. Science of laser welding-mechanisms of keyhole and pool dynamics[C]. ICALEO 2002 proceedings, Phoenix, 2002.
- 13 Deng Ke, Bu Haitao, Hong Jiancheng, *et al.*. Study on the stress distribution and fracture location of dumb-bell specimens of brittle materials[J]. China Plastics, 2009, 23(2): 88-92.
- 邓 可, 卜海涛, 洪剑城, 等. 脆性材料哑铃形拉伸试样的应力分布及断裂位置研究[J]. 中国塑料, 2009, 23(2): 88-92.

栏目编辑: 张浩佳