

硼钢镀层对热成形激光拼焊板组织及性能的影响

陈晓莞^{1,2}, 李 芳^{1,2*}, 林文虎^{1,2}, 金 鑫^{1,2}, 华学明^{1,2}

¹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 200240;

²高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240

摘要 研究了不同 Al-Si 镀层去除状态下 Usibor 1500 钢激光拼焊后和热成形后焊接接头的组织特征, 并采用室温拉伸试验测试了热成形后焊接接头的力学性能。结果表明, 拼焊后的焊缝区显微组织为粗大板条马氏体和光学显微镜下呈白色不均匀的第二相, 白色相随着去除镀层部位的增多而减少。接头拉伸断裂模式与焊缝中白色相的分布情况相关。镀层去除状态对激光拼焊板性能有着显著影响, 上表面镀层的去除可显著提升接头性能; 随着下表面镀层去除部位的增多, 接头拉伸性能提升, 且在上下表面镀层全部去除的情况下, 接头的抗拉强度达到最大。

关键词 激光技术; 光纤激光拼焊; 镀层去除状态; 力学性能; 热成形; Al-Si 镀层

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0402011

Effect of Boron Steel Coating on Microstructure and Property of Laser Tailor-Welded Blanks After Hot Stamping

Chen Xiaoguan^{1,2}, Li Fang^{1,2}, Lin Wenhui^{1,2}, Jin Xin^{1,2}, Hua Xueming^{1,2}

¹Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification,

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

²Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China

Abstract The microstructure features of welded joints after laser tailor-welding and hot stamping of Usibor 1500 steels are investigated. The mechanical properties of welded joints after hot stamping are tested by the room temperature tensile test. The results show that the microstructure of the weld seam is composed of coarse lath martensite and the unevenly distributed second phase with white color under the optical microscope. The white phase number decreases with the increase of coating removal parts. The tensile fracture pattern of the welded joint is related to the distribution of white phase in the weld seam. The removal state of coating has a significant effect on the performance of laser tailor-welded blanks. The removal of upper coating can significantly improve the performance of welded joints. The tensile property of welded joints is significantly improved with the number of the lower coating removal parts increases. The tensile strength of welded joint reaches the maximum value when all of the coatings are removed.

Key words laser technique; fiber laser tailor-welding; coating removal states; mechanical property; hot forming; Al-Si coating

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 160.3900; 060.3510

1 引 言

热成形钢具有强度高特点, 在汽车的 A 柱、B 柱、横梁等车身组件上得到广泛应用^[1]。硼钢 22MnB5 热成形后得到全马氏体组织的工件, 其强度高达 1500 MPa^[2]。为防止热成形过程中工件发生氧化和脱碳,

收稿日期: 2016-11-30; 收到修改稿日期: 2016-12-20

作者简介: 陈晓莞(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: xiaoguanf@163.com

导师简介: 金 鑫(1965—), 男, 博士, 研究员, 硕士生导师, 主要从事焊接自动化装备方面的研究。

E-mail: jinxin@sjtu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: lifang302@sjtu.edu.cn

在热成形钢的上、下表面镀有 Al-Si 镀层。在激光拼焊过程中, Al-Si 镀层扩散到焊缝中形成 Al-Fe 金属间化合物,导致焊缝的抗拉强度降低^[3]。

激光焊接具有能量密度高、焊接速度快、热影响区小和焊缝质量高等优点,已在白车身的制造中得到广泛应用^[4-5]。目前,国内外许多学者开展了对热成形硼钢的激光焊接研究。Jia 等^[6]研究了焊缝的组织、显微硬度、抗拉强度和疲劳性能,发现焊缝组织主要为板条马氏体,热影响区分为淬火区、不完全淬火区和回火区。伍强等^[7]采用 CO₂ 激光焊接汽车专用高强钢,得到了性能良好的激光焊接件。Kim 等^[8]对抗拉强度为 1500 MPa 的热成形硼钢进行 CO₂ 激光拼焊试验,研究发现可以通过快速冷却减小热影响区的宽度,进而减少热影响区的软化。

对于有镀层的 Usibor 1500 钢的焊接,张帆等^[9]开展了热成形前 Usibor 1500 钢板激光拼焊时 Al-Si 镀层对焊缝影响的研究,结果表明 Al 元素会在焊缝中偏聚,去除镀层后可改善焊缝力学性能。关于热成形后的 Usibor 1500 钢板的激光焊接研究主要以拼焊和搭接焊等居多^[10]。Kim 等^[11]对比了有 Al-Si 镀层和无镀层的 Usibor 1500 钢板的激光搭接焊焊缝性能,分析得出 Al-Si 元素进入焊缝中形成金属间化合物进而导致试样断裂。Lee 等^[12]通过激光烧蚀和砂纸打磨等方法去除热成形钢表层 Al-Si 镀层,在后续激光焊接试验中发现激光烧蚀去除两层镀层能够使试样力学性能达到理想状态。Norman 等^[13-14]对热成形后有镀层的硼钢进行了激光搭接焊,得出 Al-Si 镀层是导致焊缝力学性能降低的主要原因。

目前热成形钢激光拼焊前,需要提前采用砂轮、刮刀等机械方法去除待焊位置的 Al-Si 镀层。采用机械法去除镀层时,无法同时去除待焊区域上下表面的镀层,只能单面去除后,将板材翻转 180°后再去除另一表面的镀层,该方法需要耗费大量的时间,降低了激光拼焊生产线整体效率。本文针对 Usibor 1500 钢的不同镀层去除状态,设计了 9 种组合模式进行激光拼焊试验,研究了在不同 Al-Si 镀层去除状态下光纤激光拼焊接头在激光拼焊后和热成形后对焊缝组织与接头力学性能的影响。

2 试验内容

2.1 试验材料与试验平台

焊接试验平台如图 1 所示。试验所用激光器为美国 IPG 公司 YLS-10000 光纤激光器,激光模式为多模,最大功率为 10 kW。

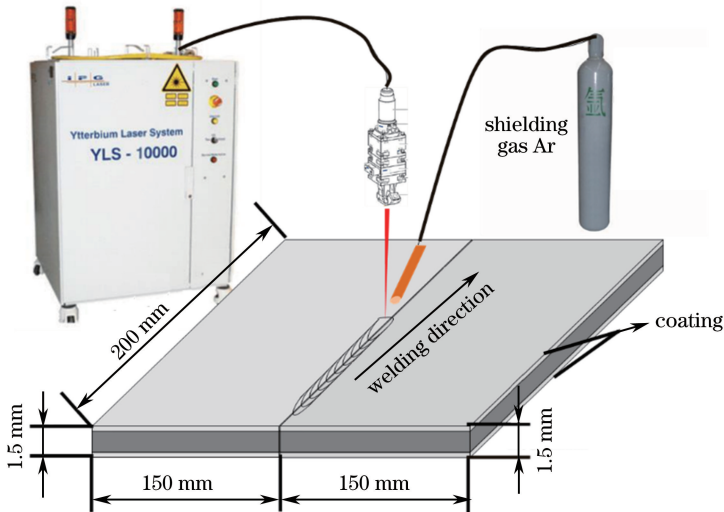


图 1 焊接平台示意图

Fig. 1 Schematic diagram of welding platform

试验材料为 Arcelor 公司生产的未经过热成形的 Usibor 1500 钢板,板材厚度为 1.5 mm,出厂状态为冷轧态,其化学成分见表 1。母材组织为铁素体(F)和珠光体(P),如图 2 所示。Usibor 1500 钢板上、下两面均有两层镀层,如图 3(a)所示。顶层是厚度为 20~30 μm 的 Al-Si 层,硬度约为 60 HV;中间层为 Al-Fe 金属

间化合物层,厚度为 10 μm 左右,硬度约为 170 HV。两层镀层的硬度存在明显差异,通过选择适当的砂轮打磨试板表面,能够完全去除顶层 Al-Si 镀层而不会损伤基体。具体去除过程为:选用硬度适中的百洁布砂轮,利用精密磨床沿镀层表面向下精磨 30 μm ,去除效果如图 3(b)所示。

表 1 Usibor 1500 钢板的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of Usibor 1500 steel sheet (mass fraction, %)

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

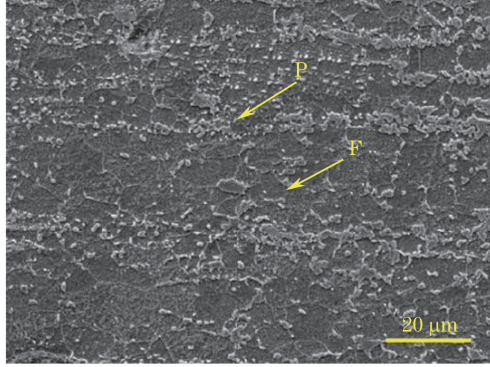


图 2 Usibor 1500 钢板母材组织

Fig. 2 Base metal structure of Usibor 1500 steel blank sheet

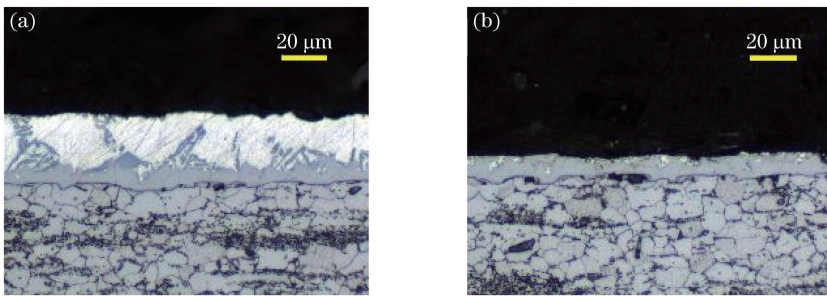


图 3 Usibor 1500 钢板表面镀层。(a) 原始镀层;(b) 去除顶层镀层

Fig. 3 Coating on surface of Usibor 1500 steel sheet. (a) Original coating; (b) coating after removing top layer

2.2 试验设计

试验中采用的焊接参数如下:激光功率为 3 kW;焊接速度为 5.8 m/min;保护气体为纯 Ar 气,气体流量为 20 L/min,采用侧吹方式进行保护,侧吹方向与焊接方向相反;气体导管与水平方向成 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,激光状态为连续输出。

为了对比分析不同镀层存在状态对激光拼焊板焊缝组织与性能的影响,对拼焊板待焊边上、下表面镀层分别进行不同的处理,不同组合模式如图 4 所示。所有试板采用机械的方法去除镀层,去除宽度为 1.5 mm。

激光焊接后,在热处理炉中模拟热成形工艺,将拼焊板加热到 950 $^{\circ}\text{C}$,保温 5 min,取出后放入水中冷却。根据 ASTM E8M 标准试验方法,在热成形后的接头上制备出室温静态拉伸试样,尺寸如图 5 所示。使用德国 Zwick 公司 Z100 万能材料试验机进行室温静态拉伸试验,拉伸速度为 1 mm/min,并观察试样拉伸断裂位置和断口形貌。用线切割机切割试样后制备出金相试样,经镶嵌、磨光、抛光后,用质量分数为 4% 的硝酸酒精腐蚀 5 s 后,分别用金相显微镜和场发射扫描电子显微镜(SEM)进行拍摄与分析。

3 试验结果与讨论

3.1 镀层完全去除时焊接接头的组织

以 9 # 试样为例,分析激光拼焊后和热成形后焊接接头的组织变化情况,其激光拼焊后接头的显微组织如图 6 所示。图 6(a)为焊接接头金相图。由图 6(b)可知,Usibor 1500 钢拼焊后热影响区分为粗晶(CG)

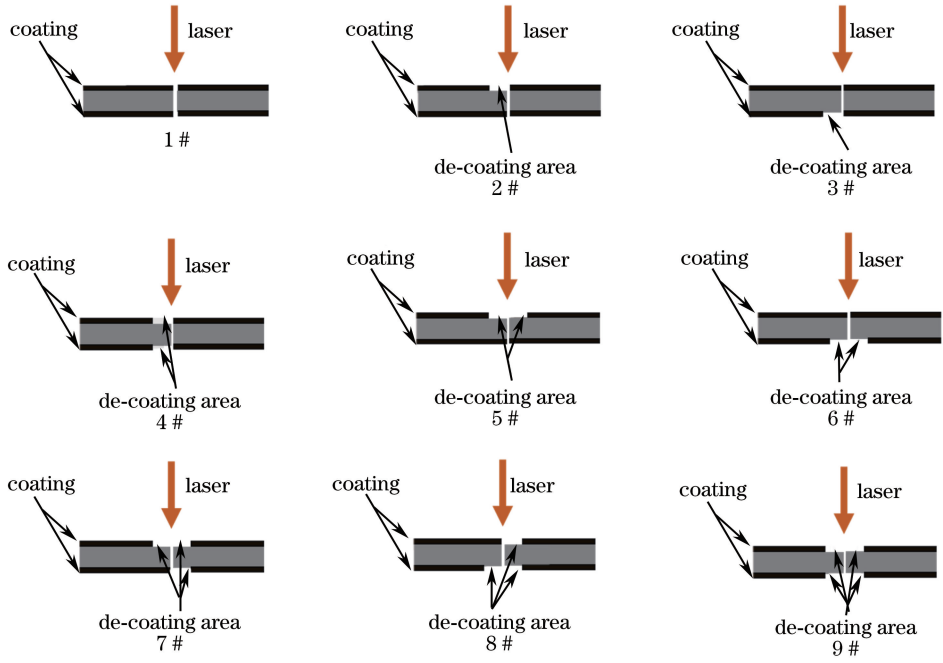


图 4 不同镀层去除状态下激光拼焊示意图

Fig. 4 Schematic diagram of laser tailor-welding under different coating removal conditions

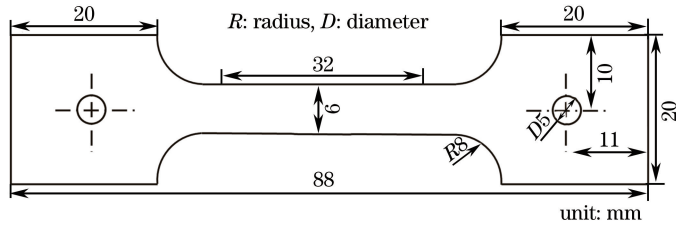


图 5 拉伸试样尺寸示意图

Fig. 5 Schematic diagram of tensile specimen size

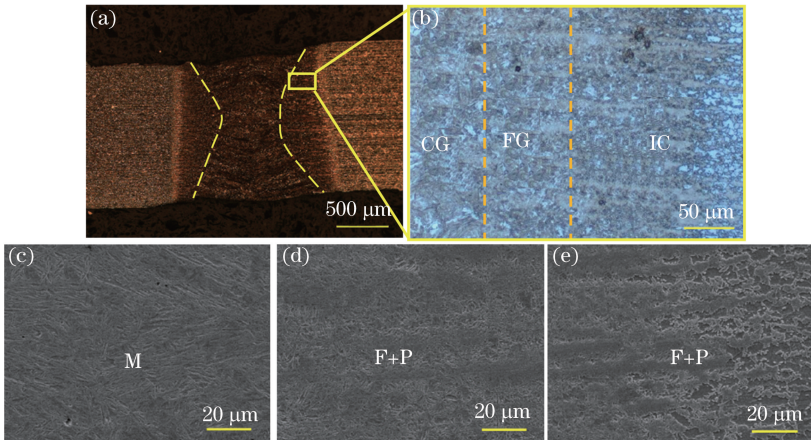


图 6 9 # 激光拼焊接头的显微组织。(a) 焊接接头金相图；(b) 热影响区金相图；

(c) 粗晶区 SEM 图；(d) 细晶区 SEM 图；(e) 不完全结晶区 SEM 图

Fig. 6 Microstructures of 9 # laser tailor-welded joint. (a) Metallograph of welded joint;

(b) metallograph of heat-affected zone; (c) SEM image of coarse-grain zone; (d) SEM image of fine-grain zone;

(e) SEM image of incomplete-crystalline zone

区、细晶(FG)区和不完全结晶(IC)区。图 6(c)~(e)是图 6(b)中各分区的 SEM 图。在粗晶区,由于加热温度在固相线温度与晶粒开始急剧长大的温度(约为 1100 °C)之间,因此奥氏体晶粒发生严重粗化,冷却之后

得到粗大的马氏体组织(M)^[15]。加热时珠光体开始向奥氏体转变的温度为 A_1 , 铁素体全部转变为奥氏体时的温度为 A_3 。在细晶区, 由于焊接过程中该区域温度超过了 A_3 , 原始铁素体和珠光体将发生重结晶, 全部转变为奥氏体(A), 形成的奥氏体晶粒尺寸小于原铁素体和珠光体的, 冷却后得到细小而均匀的珠光体和铁素体。在不完全结晶区, 焊接时温度处于 $A_1 \sim A_3$ 之间, 只有一部分组织奥氏体化, 另一部分则是始终未能溶入奥氏体的残余铁素体, 因此该区晶粒大小不均匀, 组织不均一。

热成形后焊缝组织及热影响区组织的变化如图 7 所示。图 7(a) 为焊接接头热成形后的金相图。对于热影响区, 在热成形过程中, 粗晶区、细晶区和不完全结晶区组织全部转变为奥氏体, 在相同的冷却速率下, 奥氏体一致转变成板条马氏体, 如图 7(b) 所示。热成形前焊缝组织为板条马氏体组织, 热成形过程马氏体重结晶, 冷却后变成晶粒更细小的马氏体组织, 如图 7(c) 所示。由于热成形温度为 $950\text{ }^\circ\text{C}$ 且保温 5 min, 因此母材区铁素体和珠光体发生重结晶, 全部转变成奥氏体, 在相同的冷却速率下, 奥氏体最终全部转变为马氏体, 如图 7(d) 所示。

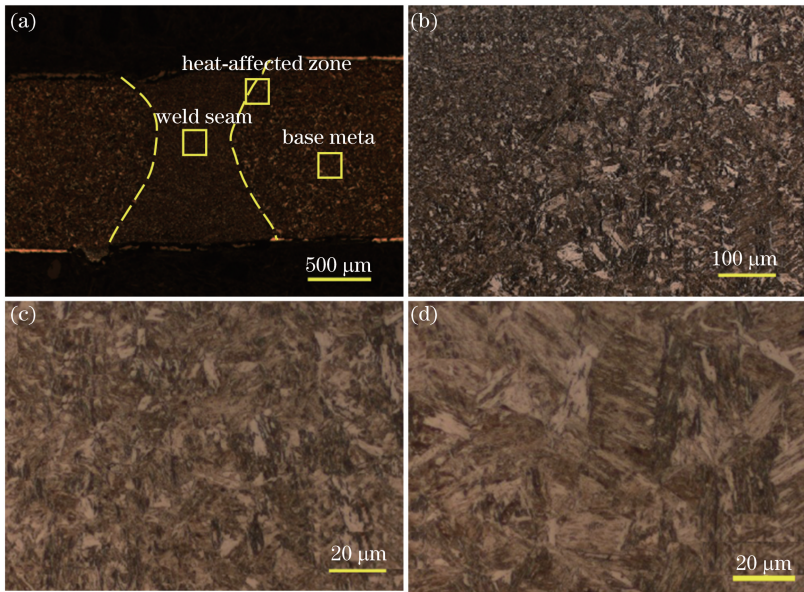


图 7 9 # 激光拼焊接头热成形后金相图。(a) 焊接接头;(b) 热影响区;(c) 焊缝;(d) 母材

Fig. 7 Metallographs of 9 # laser tailor-welded joint after hot stamping. (a) Welded joint; (b) heat-affected zone; (c) weld seam; (d) base metal

对于热成形前后激光拼焊接头焊缝组织的演变, 可由图 8 所示的硼钢 22MnB5 连续冷却 (CCT) 曲线进行分析。马氏体转变开始温度为 $425\text{ }^\circ\text{C}$, 马氏体转变结束时的温度为 $280\text{ }^\circ\text{C}$ 。当冷却速率大于 27 K/s 时, 22MnB5 钢组织中已奥氏体化的铁素体和珠光体完全转变为马氏体, 最终得到全马氏体组织。当冷却速率小于 27 K/s 时(如图 8 中 0.2 K/s), 奥氏体将有残留, 冷却后得到铁素体+珠光体+残余奥氏体的混合组

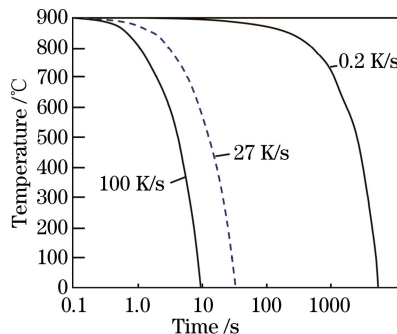


图 8 硼钢 22MnB5 的 CCT 曲线^[1]

Fig. 8 CCT curves of 22MnB5 boron steel^[1]

织,使该钢性能下降,故热成形过程应控制冷却速率大于 27 K/s。Usibor 1500 钢板的出厂状态组织为铁素体和珠光体,激光焊接过程中,工件吸收激光能量发生熔化,温度超过 A_3 ,此时铁素体和珠光体完全奥氏体化;由于激光焊接具有快速冷却凝固的特点,奥氏体化的铁素体和珠光体在瞬间重结晶,因此观察到焊缝中马氏体呈图 6(a)所示的板条状。由于热成形温度为 950 °C,且保温 5 min,在热成形过程中焊缝中原始板条马氏体发生重结晶,且在水淬过程中冷却速率更快,从而使得原始板条马氏体晶粒细化,因此观察到热成形后焊缝马氏体板条更细小,如图 7(c)所示。

3.2 不同镀层去除状态下焊接接头的组织

不同镀层去除状态下,激光拼焊接头及其热成形后的金相照片如图 9、10 所示。由图可知,不同镀层去除状态对热影响区组织基本没有影响。然而,随着去除镀层部位的增多,焊缝中形成的白色相呈减少趋势;由图 9 和图 10 中 5 #、6 # 试样的金相图可知,去除上边镀层或下边镀层后,焊缝中都形成了一定量的白色相;5 # 试样待焊板下表面镀层没去除,则在焊缝下半部分观察到较多的白色相;6 # 试样待焊板上表面镀层没有去除,则在焊缝上半部分观察到较多的白色相。由此可知,焊缝中白色相的产生及其在焊缝中存在的位置与镀层的存在部位有关。

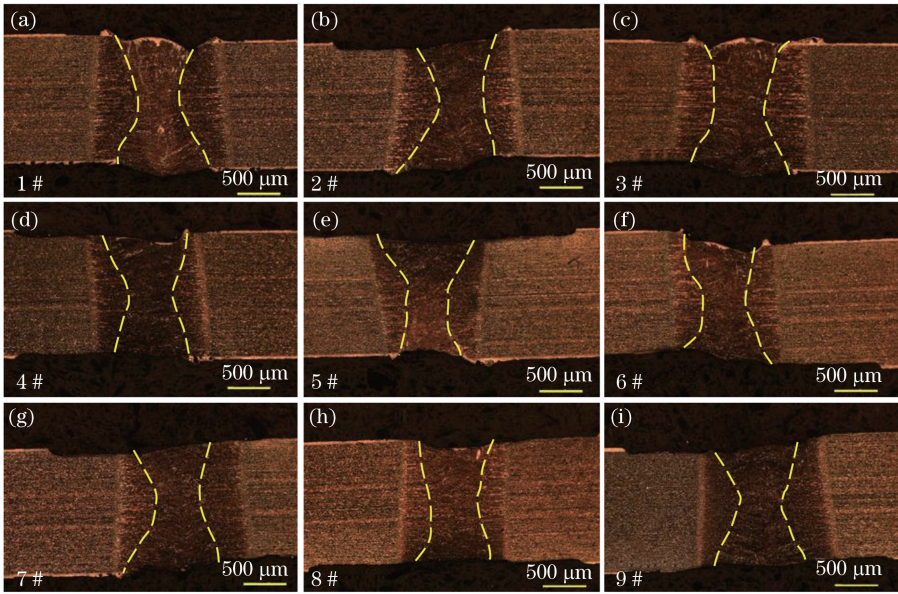


图 9 不同镀层去除状态下激光拼焊接头的金相图

Fig. 9 Metallographs of laser tailor-welded joints under different coating removal states

由图 10(a)~(f)中 1 #~6 # 试样的金相图可知,热成形后焊缝中白色相增多且分布更加均匀;仔细观察焊缝中白色相的分布情况,发现白色相在焊缝中的分布一方面与镀层的存在部位有关,另一方面与焊缝金属的流动及焊缝中元素的扩散密切相关^[16]。对比图 9 与图 10 中 1 #~8 # 试样热成形前后的金相图可发现,热成形后白色相比热成形前的明显增多。由于焊接过程的快速升温与快速冷却,Al、Si 元素在焊缝中偏聚,来不及扩散到焊缝中,因此拼焊后焊缝中白色相分布比较集中且相对较少,如图 9(a)~(h)所示。在热成形过程中,在较高的温度和较长的保温时间下,Al 元素与焊缝中 Fe 元素有足够的时间生成金属间化合物,同时偏聚的 Al、Si 元素有足够的时间向焊缝中扩散,因此热成形后焊缝中白色相分布更加均匀且含量增多,如图 10(a)~(h)所示。

3.3 焊接接头拉伸性能分析

为了研究镀层存在部位对激光拼焊接头拉伸性能的影响,在热成形后 9 组激光拼焊接头上截取制备了拉伸试样。拉伸结果如图 11 所示,9 组试样断裂位置均为焊缝。由于 1 #~8 # 试样待焊边上都存在镀层,焊缝中存在强度比马氏体低的白色相,因此在白色相处容易产生应力集中,进而萌生裂纹;断口均沿着焊缝中白色相断裂。由此可知,裂纹源位于焊缝中的白色相区域。

通过 SEM 分析 9 组试样的断口形貌可知,在图 12 所示 1 # 试样断口边缘观察到明显的河流花样,该处

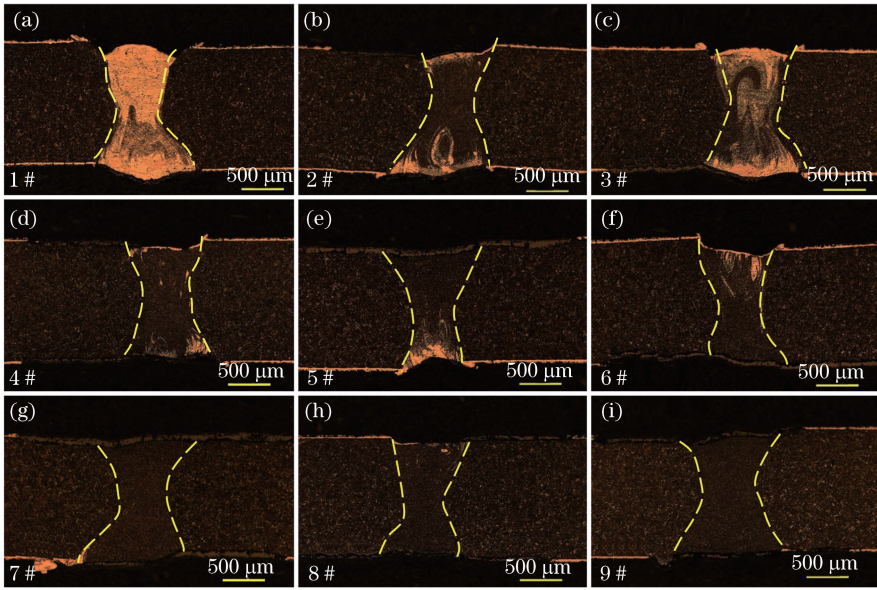


图 10 热成形后不同镀层去除状态下激光拼焊接头的金相图

Fig. 10 Metallographs of laser tailor-welded joints under different coating removal states after hot stamping

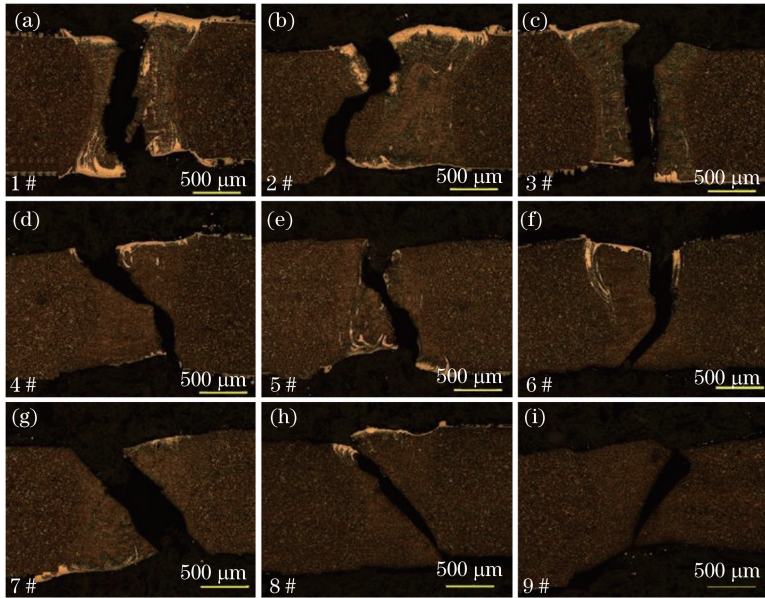


图 11 不同镀层去除状态下试样断裂位置

Fig. 11 Failure locations of specimens under different coating removal states

主要断裂模式为解理断裂；在断口中心，解理面变小，而且观察到很多撕裂棱，该处主要断裂模式为准解理断裂。由于 1 # 试样未去除镀层，由 3.2 节分析可知其在焊缝中存在较多白色相，尤其在焊缝上下边缘白色相较多，因此 1 # 试样的断口边缘为解理断裂，中心为准解理断裂。对图 13 所示 2 # 试样断口的 SEM 照片进行分析可知，断口上边缘观察到许多韧窝，该处主要为韧性断裂，下边缘则为脆性断裂，中心为准解理断裂。进一步观察图 11(c)~(h) 所示 3 # ~ 8 # 试样断口的微观形貌，发现随着去除镀层部位的增多，断裂模式由脆性断裂向韧性断裂过渡。根据图 14 中 9 # 试样断口形貌的微观照片可知，该试样断裂模式主要为韧性断裂。由此可知，试样断裂模式与去除镀层部位相关，即与焊缝中白色相存在状态与分布情况相关。

9 组热成形后焊接接头的常温拉伸应力-应变曲线如图 15 所示，其中 10 # 为热成形后母材的拉伸应力-应变曲线。由图可知，试样的抗拉强度、伸长率与镀层存在状态密切相关。对于上表面镀层都没去除的 1 #、3 # 和 6 # 试样，其抗拉强度分别为 1220, 1230, 1240 MPa，伸长率分别为 0.9%、1.1% 和 1.0%；在上表

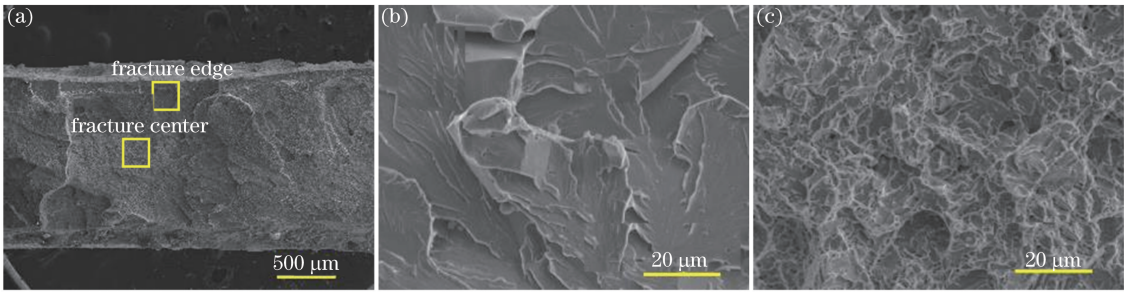


图 12 1 # 试样断口 SEM 照片。(a) 断口全貌;(b) 断口边缘;(c) 断口中心

Fig. 12 SEM images of 1 # specimen fracture. (a) Full view of fracture; (b) fracture edge; (c) fracture center

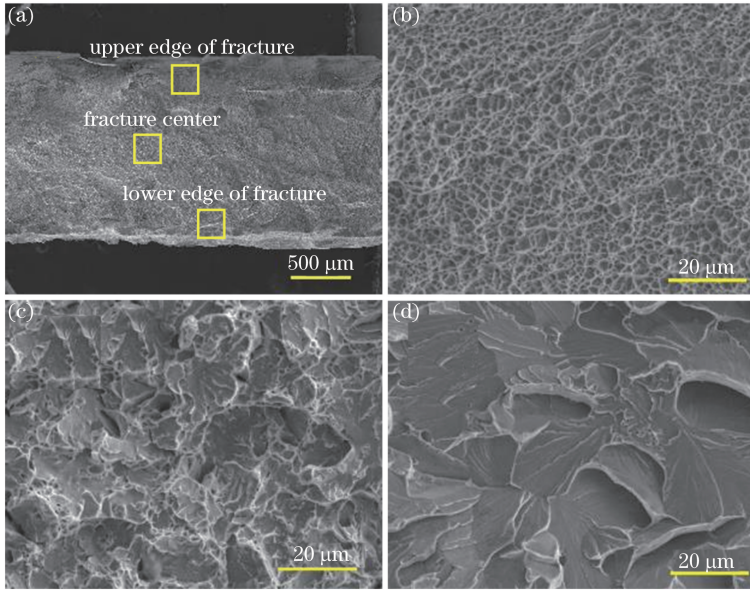


图 13 2 # 试样断口 SEM 照片。(a) 断口全貌;(b) 断口上边缘;(c) 断口中心;(d) 断口下边缘

Fig. 13 SEM images of 2 # specimen fracture. (a) Full view of fracture; (b) upper edge of fracture; (c) fracture center; (d) lower edge of fracture

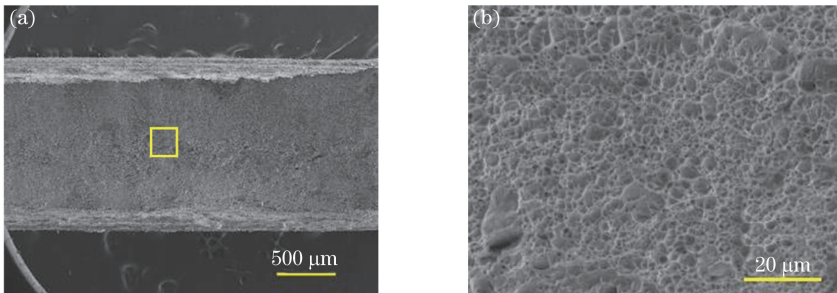


图 14 9 # 试样断口 SEM 照片。(a) 断口全貌;(b) 断口中心

Fig. 14 SEM images of 9 # specimen fracture. (a) Full view of fracture; (b) fracture center

面镀层存在的情况下,下表面镀层的去除与否对试样性能的影响极其微小;仅去除了待拼焊两块试板中一块试板的上表面镀层的 2 #、4 # 和 8 # 试样,其抗拉强度分别为 1340,1370,1370 MPa,伸长率分别为 1.8%、1.5%和 1.7%,可见去除上表面镀层可以提高试样的抗拉强度与伸长率;对于待拼焊两块试板上表面镀层全部去除的 5 #、7 # 和 9 # 试样,其抗拉强度分别为 1410,1420,1510 MPa,伸长率分别为 1.6%、2.4%和 4.4%。在上表面镀层全部去除的情况下,随着下表面镀层去除部位的增多,试样的抗拉强度与伸长率都增大;其中,在上下表面镀层全部去除的情况下,试样的抗拉强度与伸长率都达到最大值,与母材的接近。

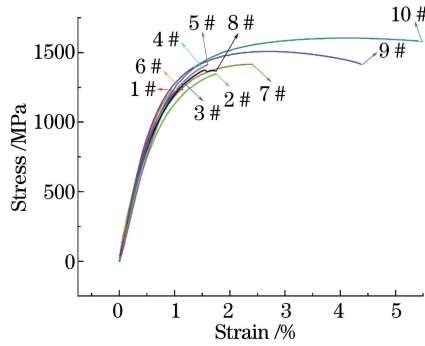


图 15 热成形后试样的应力-应变曲线

Fig. 15 Stress-strain curves of specimens after hot stamping

4 结 论

采用组合的方式对具有上下表面不同 Al-Si 镀层去除状态的 Usibor 1500 钢板进行了激光拼焊焊接及热变形试验,得到了以下结论:1) 激光拼焊后 Usibor 1500 钢焊接接头的热影响区包括粗晶区、细晶区和不完全结晶区;热成形后,母材与热影响区组织全部转变成板条马氏体,而焊缝则由原始粗大板条马氏体转变为晶粒更细小的板条马氏体;2) 保留 Al-Si 镀层的激光拼焊焊缝的组织不均匀,由马氏体和白色析出相组成,在热成形过程中白色相分布趋于均匀但是数量明显增多;3) Usibor 1500 钢激光拼焊接头试样的常温拉伸断裂模式与镀层去除部位相关,且在上下表面镀层全部去除的情况下,接头性能达到最优,接近母材性能。

综上所述,镀层的去除部位对热成形激光拼焊板的力学性能有重要的影响,研究结论为实际生产中设计镀层去除设备提供了借鉴,具有一定的工程指导意义。在实际生产中,结合考虑拼焊板实际服役条件与生产效率,在满足激光拼焊板性能的前提下,可采用仅去除上表面镀层再进行激光拼焊的工艺方法。

参 考 文 献

- [1] Karbasian H, Tekkaya A E. A review on hot stamping [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(15): 2103-2118.
- [2] Merklein M, Lechler J, Geiger M. Characterisation of the flow properties of the quenchenable ultra high strength steel 22MnB5 [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2006, 55(1): 229-232.
- [3] Kang M, Kim C, Bae S M. Laser tailor-welded blanks for hot-press-forming steel with arc pretreatment [J]. International Journal of Automotive Technology, 2015, 16(2): 279-283.
- [4] Liu Guocheng, Tian Jieping, Shi Yusheng, *et al.* Review of welding technologies for automotive steel sheets [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(1): 010004.
刘国承, 田杰平, 史玉升, 等. 汽车用钢焊接技术研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(1): 010004.
- [5] Wei Jing, Wang Huan, Shi Shaojian, *et al.* Microstructure and properties of fiber laser wire welded joints of 10CrSiNiCu high strength shipbuilding steel [J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(3): 0303003.
魏菁, 王欢, 石少坚, 等. 10CrSiNiCu 船用高强度钢光纤激光焊接接头组织和性能 [J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0303003.
- [6] Jia J, Yang S L, Ni W Y, *et al.* Microstructure and mechanical properties of fiber laser welded joints of ultrahigh-strength steel 22MnB5 and dual-phase steels [J]. Journal of Materials Research, 2014, 29(21): 2565-2575.
- [7] Wu Qiang, Xu Lanying, Yang Yongqiang, *et al.* Study on laser welding residual stress of high strength steel [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0603007.
伍强, 徐兰英, 杨永强, 等. 高强度钢激光焊接残余应力的研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0603007.
- [8] Kim C H, Choi J K, Kang M J, *et al.* A study on the CO₂ 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.
- [9] Zhang Fan, Li Fang, Hua Xueming, *et al.* Research of effects with Al-Si coating on distribution and performance of tailored laser [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0503005.

- 张帆, 李芳, 华学明, 等. Al-Si 镀层在激光拼焊板焊缝中分布及性能影响研究[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0503005.
- [10] 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.
- [11] Kim C, Kang M J, Park Y D. Laser welding of Al-Si coated hot stamping steel[J]. Procedia Engineering, 2011, 10: 2226-2231.
- [12] 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, 2014, 228(4): 540-552.
- [13] Norman P, Wiklund G, Janiak P, *et al.* Comparison of 22MnB5-steel with and without AlSi-coating during laser hybrid arc welding[C]. Conference on Laser Materials Processing in the Nordic Countries, 2011, 13.
- [14] Kang M, Kim C, Lee J. Weld strength of laser-welded hot-press-forming steel[J]. Journal of Laser Applications, 2012, 24(2): 022004.
- [15] Davis C L, King J E. Cleavage initiation in the intercritically reheated coarse-grained heat-affected zone: Part I. Fractographic evidence[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1994, 25(3): 563-573.
- [16] Kang M, Kim Y M, Kim C. Effect of heating parameters on laser welded tailored blanks of hot press forming steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 228: 137-144.