

# 冷轧复相钢与低合金高强钢差厚板激光拼焊的焊缝组织与力学性能研究

张帆<sup>1</sup> 李芳<sup>1\*</sup> 华学明<sup>1</sup> 王诗恩<sup>2</sup> 褚卫东<sup>2</sup> 王大明<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** 为了研究冷轧复相钢和低合金高强钢(HSLA)差厚板的拼焊性能,采用10 kW级光纤激光器,改变激光功率和焊接速度进行拼焊实验。针对焊缝成形、金相组织、接头硬度、拉伸强度和成形性能进行一系列测试实验。结果表明,冷轧复相钢和低合金高强钢光纤激光拼焊可以得到成形良好的焊缝。焊缝组织以板条马氏体树枝晶为主,复相钢热影响区分为回火软化区、细晶等轴马氏体区和粗晶等轴马氏体区以及混合区等。拉伸试样断裂位置均位于低合金高强钢母材,焊缝杯突裂纹均位于薄板一侧并平行于焊缝。实验结果为冷轧复相钢和低合金高强钢差厚板激光拼焊提供一定的工艺和理论指导。

**关键词** 激光光学; 冷轧复相钢; 低合金高强钢; 差厚板激光拼焊; 金相组织分布; 力学性能

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0903010

## Research of Microstructure and Mechanical Properties of Laser Tailor-Welded Blank of Cold Rolled Multi-Phase Steel and HSLA

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

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

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

**Abstract** To research the tailor welding of cold rolled multi-phase steel and high strength low alloy (HSLA), tailor welding is conducted with 10 kW fiber laser varying laser power, welding velocity and defocusing amount. Weld seam formation, metallographic microstructure, hardness and formability are tested. The results show that the formation of weld seam is sound. The metallographic microstructure of weld seam is mainly lath martensite dendrites. Heat affected zone of multi-phase steel is combined with tempered softening zone, fine grain equiaxed zone, coarse grain equiaxed zone and the mixture zone. The width of softening zone is affected by welding velocity most severely. The tensile strength and formability of weld seam are sound. The fracture location of tensile specimen is base metal of HSLA consistently. The fracture location of Erickson LDH test is parallel with the weld seam on the side of HSLA. The results can provide guidance on welding processing and theory of tailor welding of multi-gauge cold rolled multi-phase steel and HSLA.

**Key words** laser optics; cold rolled multi-phase steel; high strength low alloy; multi-gauge laser tailor welding; microstructure distribution; mechanical properties

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

收稿日期: 2015-01-22; 收到修改稿日期: 2015-05-20

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方面的研究。

E-mail: xmhua@sjtu.edu.cn

\*通信联系人。E-mail: lifang302@sjtu.edu.cn

## 1 引 言

能源的日益紧张,以及化石燃料燃烧对环境压力的增大,使得汽车车身轻量化一直是众多汽车制造商追求的目标。激光拼焊技术作为激光焊接应用于汽车制造业效益最明显的一项技术,可以将不同牌号、不同种类、不同厚度的钢板拼焊起来,使得根据车身不同部位的性能要求所进行的优化设计得以实现,如纵梁、车门内板、立柱等部件,在拼焊后进行冲压成形,保证强度要求的同时减轻重量<sup>[1-2]</sup>。1985年,蒂森克虏伯公司首次在奥迪 100 的生产中实现这一技术的近 30 年中,已经有越来越多的车型采用激光拼焊技术进行车身零部件的制造<sup>[3]</sup>。

本文研究 1000 MPa 级别冷轧复相钢(MP)和低合金高强钢(HSLA)的差厚板光纤激光拼焊。低合金钢组织由大量铁素体和一定珠光体构成,同时合金元素含量较低,具备良好的焊接特性<sup>[4]</sup>。复相钢组织一般以铁素体、马氏体、贝氏体和析出强化为特征<sup>[5]</sup>,车身用复相钢板电阻点焊的焊接研究较多,在焊接过程中会出现热影响区(HAZ)软化,这主要是由于母材中的马氏体在热循环时发生回火,形成较软的回火马氏体<sup>[6]</sup>。对于复相钢激光拼焊板研究相对较少,激光焊接与电阻点焊的热循环过程差异较大。另外激光拼焊板一般需进行后续成形,其成形性也是需要研究的重要性能,所以研究激光焊接中 HAZ 区的软化现象对于成形性的影响也有重要意义<sup>[7]</sup>。对冷轧态复相钢和低合金高强钢差厚板进行不同焊接参数的激光拼焊,重点研究其焊缝组织与抗拉强度、成型性等力学性能,为冷轧态复相钢和低合金钢差厚板激光拼焊提供一定的工艺参考。

## 2 实验条件及方法

实验材料为冷轧复相钢(CR980T/700Y- MP-LCE,厚度为 1.5 mm,双面热镀锌,锌层厚度为 60 g/m<sup>2</sup>)和低合金钢(420 LA,厚度为 1.0 mm,双面热镀锌,锌层厚度为 60 g/m<sup>2</sup>),表面经热镀锌工艺进行镀层处理,两种钢材的化学成分和力学性能分别如表 1 和表 2 所示,母材的 1000 倍光学金相如图 1 所示。

表 1 冷轧态复相钢和低合金高强钢的化学成分[质量分数(最大值),%]

Table 1 Chemical components of multi-phase steel and high strength low alloy[mass fraction (max), %]

Chemical component	C	Mn	Al	Si	P	S	Cu	B
MP	0.15	3.00	0.010	0.8	0.020	0.005	0.10	0.005
HSLA	0.12	1.60	0.015	0.60	0.030	0.030	-	-

表 2 冷轧态复相钢和低合金高强钢的力学性能

Table 2 Mechanical properties of multi-phase steel and high strength low alloy

	Yield strength /MPa	Tensile strength /MPa	Total elongation in 80 mm /%
MP	700	980	8
HSLA	420	570	20

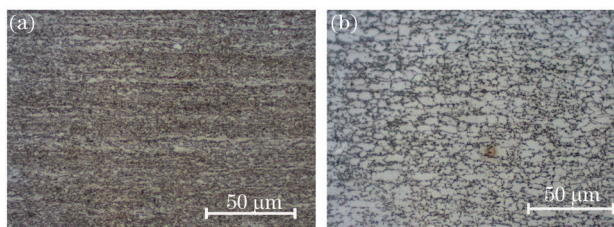


图 1 母材 1000 倍光学金相。(a)冷轧复相钢;(b)低合金钢

Fig.1 Metallograph of base metals ( $\times 1000$ ). (a) Multi-phase steel; (b) high strength low alloy

焊接实验平台及接头形式如图 2 所示。实验所用的激光器为 IPG-YLS-10000 光纤激光器,最大功率为 10 kW,光斑直径为 0.6 mm,连续输出激光。焊接时采用纯氩作为保护气,流量为 15 L/min。对焊件接头采用线切割截取焊缝横截面,镶嵌制样,经磨光、抛光后用质量分数为 4%硝酸乙醇溶液腐蚀,使用 Axio Imager A1m 金相显微镜拍摄接头熔合区(FZ)和热影响区(HAZ)金相照片。为了研究接头各区域的平均硬度,使用 Zwick 全自动硬度仪测试焊缝横截面显微维氏硬度分布。

为了测试焊件的力学性能,根据 GB/T 2651-2008 标准制备室温静态拉伸试样,使用 Zwick 拉伸试验机进

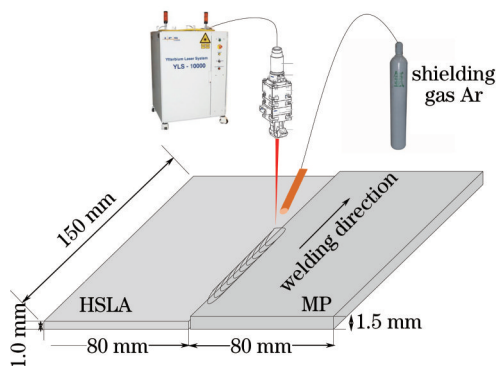


图2 焊接平台及接头示意图

Fig.2 Platform for lap welding experiments

行室温静态拉伸实验,拉伸试样尺寸如图3所示。每条焊缝分别制备3个拉伸试样,并进行拉伸测试。为了测试焊件接头处的深冲性能,依据 GB/T 4156-2007 进行 Erickson 杯突实验测试成型性能。

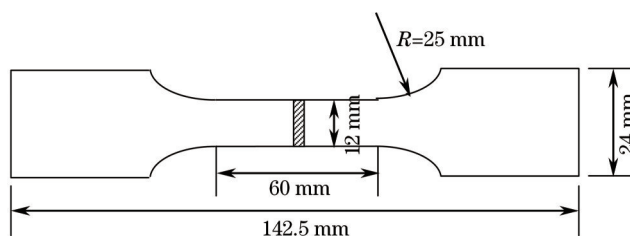


图3 拉伸试样尺寸示意图

Fig.3 Tensile test specimen

### 3 激光焊接实验

差厚板的激光拼焊工艺参数主要有激光功率  $P$ 、焊接速度  $v$ 、激光离焦量  $d$  等。不同的热输入量将直接影响拼焊焊缝的形貌,激光功率和焊接速度是决定焊接线能量大小的主要参数。离焦量的大小改变了作用于工件表面的光斑大小,而不同的离焦量具有不同的功率密度。因此实验方案如下:在零离焦条件下,第一组固定焊接速度(3 m/min),改变激光功率;第二组,在确定的激光功率(3 kW)条件下,改变焊接速度。焊接参数如表3所示。

表3 焊接参数表

Table 3 Welding parameters

No.	$P$ /kW	$v$ /( $m \cdot min^{-1}$ )
1	2	3
2	3	3
3	4	3
4	3	2
5	3	4
6	3	6

## 4 实验结果及分析

### 4.1 焊接接头形貌

实验所用参数均可以得到表面成形良好的焊缝,为了研究在不同热输入下的焊缝横截面形貌,拍摄50倍低倍金相,如图4所示。从金相照片中可以看出,焊缝均未出现明显的缺陷。当熔宽增大时,可以明显看到焊缝上表面倾角更小,两侧母材的连接更加平滑,故可以适当增大线能量以获得成形更良好的差厚板拼焊缝。

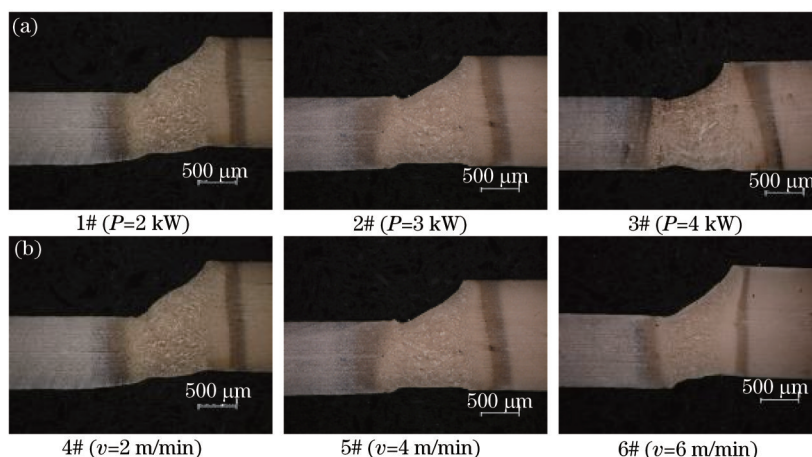


图4 焊接接头横截面50倍光学金相

Fig.4 Metallographs of cross sections of welding seams (×50)

当其他参数不变的情况下,激光功率和焊接速度主要影响焊缝熔深、熔宽以及热影响区的宽度。由于激光拼焊板的质量要求100%熔透,故激光功率和焊接速度的范围一般较大。对于焊接速度而言,焊接速度过低时,会导致材料发生强烈气化或焊穿;焊接速度过高时,焊缝可能产生未熔透,接头性能变差。

#### 4.2 焊接接头金相

利用光学金相显微镜拍摄的典型焊接接头金相如图5所示。图5(a)为200倍金相照片,左侧为厚度为1.5 mm的复相钢,右侧为厚度为1.0 mm的低合金钢,位置1与位置9分别对应复相钢母材与低合金钢母材,其金相照片见图1。从5(a)中可以看出,拼焊焊缝各区域之间有着较为明显的界线。由于实验所用复相钢的晶粒度非常细小,为了更清晰地展现从母材到熔合区的组织分布特性,对复相钢的母材和热影响区的典型组织进行扫描电镜的拍摄,电镜照片如图5(b)所示;5(c)为低合金钢侧热影响区1000倍金相照片,其中图5(b)中扫描电镜照片编号、图5(c)中1000倍金相照片编号与图5(a)中的各区域编号相对应。

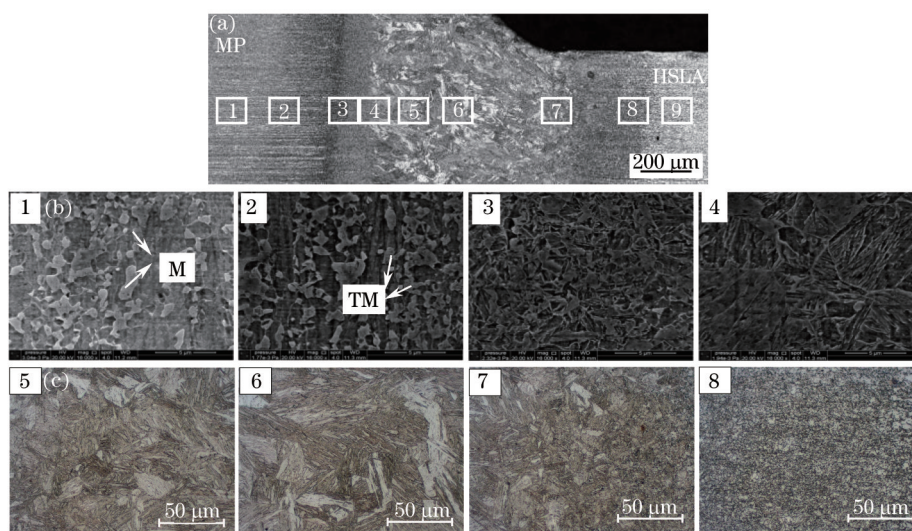


图5 焊接接头典型金相组织分布(焊接激光功率2 kW,焊接速度3 m/min,离焦量0)

Fig.5 Typical metallograph of weld seams (laser power is 2 kW, welding velocity is 3 m/min, defocusing amount is 0)

在熔合区,焊缝组织为典型的板条马氏体组成的树枝晶;树枝晶的生长方向对应温度梯度最大的方向,在熔合线的晶粒上形核结晶并向焊缝中心生长,最后在焊缝中部位置完成结晶并形成垂直方向的界线。熔合区焊缝组织为典型的树枝晶间的板条马氏体,同时有少量羽毛状的上贝氏体,如图5(c)所示。板条马氏体在熔合线处发生非均匀形核,初始晶粒大小与热影响区粗晶等轴晶马氏体相同。

在热影响区,组织并非均一,而是进一步形成了若干区域,并有着明显的界线。在热影响区,距离焊缝位置远近的不同位置有着不同的热循环过程。复相钢热影响区的组织分布主要分为4个部分靠近母材的区

域,温度低于  $A_{c1}$  温度,母材在焊接热循环过程中部分回火,出现回火马氏体,同时有少量粒状贝氏体在热影响区中部区域,形成了晶粒度非常小的马氏体等轴晶(FGHAZ);在热影响区靠近焊缝区域,形成了晶粒度较粗大的马氏体等轴晶(CGHAZ)。细晶等轴晶区和粗晶等轴晶区的焊接热循环温度高于  $A_{c3}$  温度,发生奥氏体化,在冷却过程中形成等轴晶马氏体。由于靠近熔合区的奥氏体化温度更高,保温时间更长,达到粗晶化临界温度时,奥氏体急剧粗大,形成了区别于细晶马氏体等轴晶区的粗晶马氏体等轴晶区。在回火马氏体区和马氏体等轴晶区中间存在混合区域,热循环温度介于  $A_{c1}$  与  $A_{c3}$  温度之间<sup>[8-12]</sup>。在低合金钢的热影响区,同样在焊接热循环过程中发生了回火或奥氏体化,越接近熔合区的位置马氏体含量越高,在熔合线附近完全奥氏体化的区域即以粗大马氏体等轴晶为主。

### 4.3 硬度实验与室温拉伸实验

通过硬度实验,发现母材、热影响区和焊缝的硬度分布特点,硬度实验结果如图6所示。从硬度分布图线可以看到,在复相钢热影响区出现了明显的软化区和硬化区。软化区的主要特点是硬度低于复相钢母材,位于热影响区靠近母材的位置,金相组织观察发现,该位置发生了马氏体的回火转变,回火马氏体的硬度较低,是形成热影响区软化的主要原因<sup>[13]</sup>。硬化区的主要特点是硬度高于焊缝,位于热影响区靠近熔合区的位置,从金相照片中可以看到,该位置的金相组织主要为马氏体等轴晶。进一步分析可以看到,硬度最高的区域为晶粒度较小的马氏体等轴晶区,而粗晶等轴晶区的硬度稍低,符合 Hall-Petch 关系<sup>[14]</sup>。在低合金钢区域,热影响区硬度呈现均匀变化趋势,随着位置靠近马氏体等轴晶区,马氏体含量逐渐增大,硬度从母材到熔合区逐渐增大<sup>[15]</sup>。

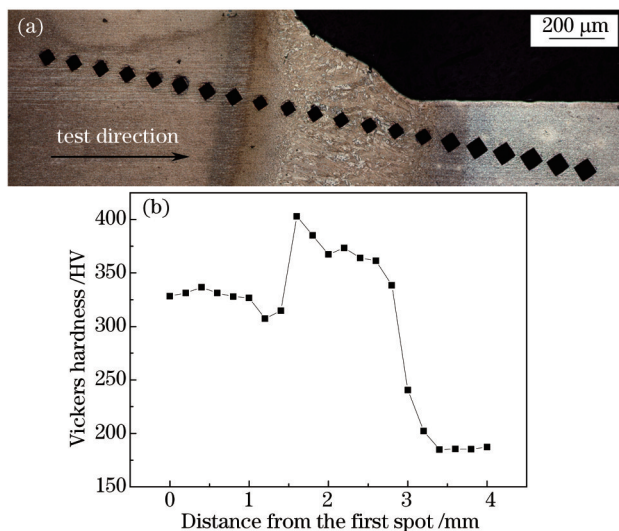


图6 焊接接头的硬度分布 (焊接激光功率 2 kW, 焊接速度 3 m/min, 离焦量 0)

Fig.6 Hardness distribution of welding seam (laser power is 2 kW, welding velocity is 3 m/min, defocusing amount is 0)

对于所有符合焊接规范的试样制备了3个拉伸试样,拉伸实验结果如图7所示,断裂位置如图8所示,可

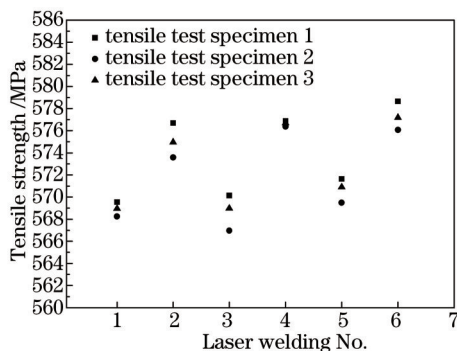


图7 焊接试样室温静态拉伸实验结果

Fig.7 Results of static tensile strength experiments at room temperature

见该断裂位置位于低合金钢的母材区域且远离焊缝。由于低合金钢的强度远远低于复相钢,同时其厚度较薄,即使复相钢一侧的热影响区发生了一定程度的软化,低合金钢的母材仍是焊缝拉伸试样最薄弱的位置。低合金钢母材的维氏硬度值约为 180 HV,而复相钢的软化区硬度最低值约为 300 HV,远远大于低合金母材,故断裂位置为低合金的母材位置,符合接头硬度分布的特征。拉伸结果得到了等强的稳定结果,实验得到的拉伸强度反应了低合金钢的强度。从表 2 所示的材料力学性能可以看到,低合金钢的屈服强度和抗拉强度均低于复相钢的屈服强度,在拉伸过程中,低合金钢首先发生屈服形变,在外力增大到低合金钢母材处的应力达到其抗拉强度时,低合金钢发生断裂,而复相钢仍然仅发生了弹性形变,故可以看到拉伸试样中的变形区域只在低合金钢的母材处。

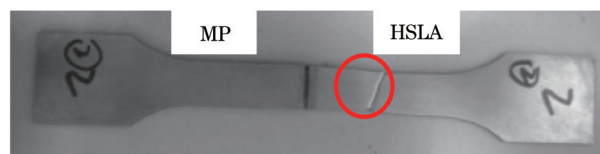


图 8 室温静态拉伸实验试样断裂位置

Fig.8 Location of fracture of static tensile strength experiments at room temperature

#### 4.4 Erickson 杯突实验

杯突(LDH)实验的结果如表 4 所示,破坏形式如图 9 所示。对于母材的杯突实验,含有马氏体的复相钢呈横向裂纹,方向与板材轧制方向相同;以铁素体和珠光体为主要组织的低合金高强钢,其塑性较高,呈圆形裂纹。对于差厚板拼焊板焊缝,理想裂纹位于焊缝薄板一侧,方向平行于焊缝<sup>[16]</sup>,实验所测试的试样均符合差厚板拼焊要求。从表 4 中低合金钢母材和焊缝的杯突值可以看到,焊缝相对于母材的成形性能均有不同程度下降。

表 4 焊接试板焊缝 Erickson 杯突实验结果

Table 4 Erickson LDH test results of the weld specimens

No.	LDH of HSLA /mm	LDH of Welding seam/mm	Ratio	Fracture's location
1	9.8	7.2	0.73	HSLA
2	8.4	6.4	0.76	HSLA
3	9.9	3.8	0.38	HSLA
4	8.2	6.4	0.78	HSLA
5	8.0	7.2	0.90	HSLA
6	9.6	7.0	0.73	HSLA

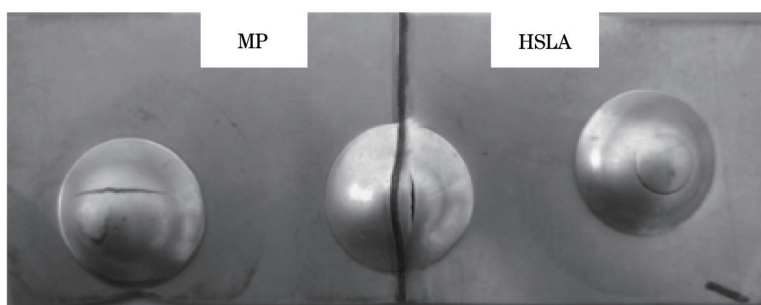


图 9 杯突实验典型破坏形式(激光功率 2 kW,焊接速度 3 m/min,离焦量 0)

Fig.9 Typical fracture modes of Erickson LDH test (laser power of 2 kW, welding velocity of 3 m/min, defocusing amount of 0)

## 5 结 论

激光功率为 2~4 kW,焊接速度为 2~6 m/min 范围内,进行复相钢和低合金高强钢差厚板拼焊实验,针对焊缝成形良好的焊接试样进行后续测试实验,得到以下结论:

1) 复相钢与低合金钢激光拼焊接头组织分为若干区域且分界线明显。焊缝金相组织以马氏体树枝晶为主,复相钢热影响区的组织分为回火马氏体(原始回火温度至 A<sub>1</sub>线温度)和细晶或粗晶马氏体区(A<sub>3</sub>线温度

以上),低合金钢热影响区有少量的马氏体;

2) 激光拼焊接头的拉伸性能良好,断裂位置位于低合金高强钢的母材处;根据硬度实验,复相钢热影响区部分区域硬度低于复相钢母材,而低合金热影响区硬度变化不大;

3) 拼焊试样的杯突实验结果满足要求,光纤激光拼焊工艺可以得到性能良好的拼焊板。

### 参 考 文 献

- 1 Li Shuhui, Lin Zhongqin, Ni Jun, *et al.*. Current development and trends of the tailored blank application in auto-body stamping[J]. Chinese J Mechanical Engineering, 2002, 38(2): 1-7.  
李淑慧,林忠钦,倪 军,等.拼焊板在车身覆盖件冲压成形中的研究进展[J].机械工程学报,2002,38(2):1-7.
- 2 Hernandez B, Hugo V. Effects of Martensite Tempering on HAZ-Softening and Tensile Properties of Resistance Spot Welded Dual-Phase Steels[M]. Canada: Mechanical Engineering Press, 2010.
- 3 Nayak S S, Zhou Y, Hernandez V H B, *et al.*. Resistance spot welding of dual-phase steels: Heat affected zone softening and tensile properties[C]. Trends in welding Research, Proceedings of the 9th International Conference, 2012: 641-649.
- 4 Xia M, Sreenivasan N, Lawson S, *et al.*. A comparative study of formability of diode laser welds in DP980 and HSLA steels[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2007, 129(3): 446-452.
- 5 Sreenivasan N, Xia M, Lawson S, *et al.*. Effect of laser welding on formability of DP980 steel[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2008, 130(4): 041004.
- 6 Panda S K, Hernandez V H B, Kuntz M L, *et al.*. Formability analysis of diode-laser-welded tailored blanks of advanced high-strength steel sheets[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2009, 40(8): 1955-1967.
- 7 Yu Qun, Chen Kai, Xiao Rongshi. Microstructure and properties of ultra-high strength steel DP780 welded by DISC laser[J]. Applied Laser, 2010, 30(3): 001.  
于 群,陈 铠,肖荣诗.超高强度钢 DP780 盘片激光焊接接头组织与性能研究[J].应用激光,2010,30(3):001.
- 8 Dong Qifeng, Yan Cuo, Liao Xianyu. Experimental investigation on laser welding dissimilar materials between galvanized steel and carbon steel plates[J]. Laser Technology, 2012, 36(5): 665-669.  
董其峰,鄢 铨,廖先宇.激光焊接镀锌钢/冷轧钢异种板材工艺试验研究[J].激光技术,2012,36(5):665-669.
- 9 Peças P, Henrique M, Miranda R M, *et al.*. Laser welding of low-thickness zinc-coated and uncoated carbon steel sheets[J]. Optical and Quantum Electronics, 1995, 27(12): 1193-1201.
- 10 Sreenivasan N, Xia M, Lawson S, *et al.*. Effect of laser welding on formability of DP980 steel[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2008, 130(4): 041004.
- 11 Biro E. Heat-Affected Zone Softening Kinetics in Dual-Phase and Martensitic Steels[D]. Hamilton: McMaster university, 2014.
- 12 Han Kun, Zeng Weiming, Zhang Mei, *et al.*. Welding Ability of Multiphase Steel CP800[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(7): 31-33.  
韩 坤,曾伟明,张 梅,等.复相钢 CP800 焊接性能的研究[J].热加工工艺,2011,40(7):31-33.
- 13 Chan S M, Chan L C, Lee T C. Tailor-welded blanks of different thickness ratios effects on forming limit diagrams[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 132(1): 95-101.
- 14 Mei L, Chen G, Jin X, *et al.*. Research on laser welding of high-strength galvanized automobile steel sheets[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(11): 1117-1124.
- 15 Sharma R S. Weldability of advanced high strength steels using an Yb:YAG disk laser[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(11): 1888-1897.
- 16 Hernandez V H B, Nayak S S, Zhou Y. Tempering of martensite in dual-phase steels and its effects on softening behavior[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2011, 42(10): 3115-3129.

栏目编辑:张浩佳