

# DP980 与 22MnB5 激光拼焊接头性能

王金凤, 房宇, 李兵, 张俊

湖北汽车工业学院材料科学与工程学院, 湖北 十堰 442002

**摘要** 通过激光焊接技术,制备了 DP980 和 22MnB5 的拼焊接头,并研究了其组织和性能。结果表明,DP980 侧的焊接热影响区(HAZ)存在明显的软化现象,软化区的最低硬度约为 DP980 母材的 75%;22MnB5 侧的 HAZ 无软化现象,HAZ 的硬度提高到了 22MnB5 母材的 2~2.4 倍。拼焊接头的拉伸断裂发生在 22MnB5 侧的母材中,抗拉强度为 670 MPa 左右。DP980 侧 HAZ 的软化区由回火马氏体和铁素体组成,两相区由少量的淬火马氏体和铁素体组成,硬化区基本由板条马氏体组成;22MnB5 侧 HAZ 不完全淬火区的组成跟 DP980 两相区的相似,完全淬火区全部为板条马氏体;焊缝区为粗大的板条马氏体。

**关键词** 激光技术;激光拼焊;22MnB5 热冲压成形钢;DP980 双相钢;微观组织;力学性能

**中图分类号** TG456.7

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP55.021410

## Properties of Laser Tailor-Welded Joints of DP980 and 22MnB5

Wang Jinfeng, Fang Yu, Li Bin, Zhang Jun

School of Materials Science & Engineering, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan, Hubei 442002, China

**Abstract** By use of the laser-welding technique, the tailor-welded joints of DP980 and 22MnB5 are fabricated, and their microstructures and properties are researched. The results show that an obvious softening occurs in the heat-affected zone (HAZ) of DP980 and the minimum hardness of the softening zone is about 75% of that of the DP980 base material, however, there is no softening phenomenon in the HAZ of 22MnB5 where the hardness is increased to 2-2.4 times that of 22MnB5 base material. The tailor-welded joints have fractures at the 22MnB5 base material, whose tensile strength is around 670 MPa. The softening zone of the HAZ of DP980 is composed of temper martensite and ferrite, the two-phase zone is of a small amount of quenched martensite and ferrite, and the hardening zone is basically of lath martensite. The incomplete quenching zone of the HAZ of 22MnB5 has a similar composition with the two-phase zone of DP980 side, the complete quenching zone is of all lath martensite, and the weld zone is of coarse lath martensite.

**Key words** laser technique; tailored blank laser welding; 22MnB5 hot-formed steel; DP980 dual-phase steel; microstructure; mechanical properties

**OCIS codes** 140.3390; 160.3380; 350.3390

## 1 引言

随着汽车轻量化要求和车身防撞安全要求的不断提高,先进高强钢(AHSS)及热冲压强化硼钢(HFS)受到学者们的广泛关注。其中,双相钢(DPS)具有屈强比低、碰撞吸能高和防撞凹性能好等优势<sup>[1]</sup>,在抗冲击和抗碰撞的车门加强板、B柱、保险杠等汽车构件的制造中得到了广泛应用;而

HFS 经过热冲压成形后的强度由 600 MPa 左右提升到 1200 MPa 以上<sup>[2]</sup>。因此,DPS 和 HFS 在汽车轻量化中发挥着重要的作用。

激光焊接具有能量密度大、焊接速度快、熔深大、变形小、热影响区窄、接头质量好和易于实现自动化等<sup>[3]</sup>优点,可优化产品部件结构,在保证产品刚度的条件下可以减轻产品重量并增强抗碰撞性,在汽车轻量化中发挥着重要作用。

**收稿日期:** 2017-09-01; **收到修改稿日期:** 2017-09-07

**基金项目:** 天津市应用基础与前沿技术研究计划(11JCYBJC06100)、先进焊接与连接国家重点实验室开放基金(AWPT-M12-08)、光电子技术湖北省协同创新中心专项

**作者简介:** 王金凤(1978—),女,博士,副教授,主要从事汽车轻量化材料焊接方面的研究。E-mail: iwwangjinfeng@126.com

AHSS 的激光拼焊技术结合了激光焊接和超高强钢的综合优势,成为汽车轻量化研究的热点之一。目前,有很多针对不同强度级别的 AHSS 的激光拼焊技术研究,如不同强度或不同厚度 DPS 的激光拼焊<sup>[4-5]</sup>、DPS 与高强度低合金钢<sup>[6]</sup>或相变诱发塑性钢<sup>[7]</sup>等的拼焊、高强度级别高强钢的力学性能研究等<sup>[8-9]</sup>,也有学者开展了 DPS 与 HFS 的激光拼焊研究<sup>[10]</sup>,但该方面的研究较少。

本文针对汽车部件中强度和抗碰撞性的不同要求,激光拼焊了 DP980 DPS 和 22MnB5 HFS,研究了拼焊板的组织和性能,为抗冲击和抗碰撞汽车构件的制造提供了参考。

## 2 试验材料及方法

### 2.1 试验材料

试验所用材料为 DP980 DPS 和 22MnB5 HFS,

表 1 DP980 与 22MnB5 的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of DP980 and 22MnB5(mass fraction, %)

Material	C	Si	Mn	P	S	B	Al	Ti	Nb	Mo	Ni	Cr	Fe
DP980	0.08	0.393	2.2	0.008	0.0011	0.0019	0.032	0.05	0.04	0.18	-	-	Bal.
22MnB5	0.21	0.28	1.35	-	-	0.003	-	0.036	-	0.005	0.23	0.17	Bal.

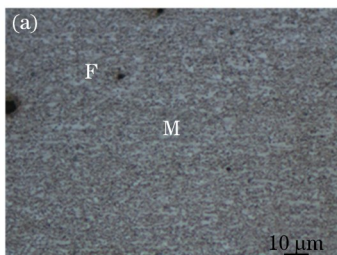
表 2 DP980 和 22MnB5 的力学性能

Table 2 Mechanical properties of DP980 and 22MnB5

Material	Tensile	Yield	Elongation / %
	strength / MPa	strength / MPa	
DP980	1011	732	11
22MnB5	621	390	22

### 2.2 试验方法

采用 Nd:YAG 固体激光器(JK2003SM,GSI 公司,英国)的连续激光模式对 DP980 和 22MnB5 进行



其厚度均为 1.58 mm,主要化学成分及力学性能见表 1 和表 2,材料的组织形貌如图 1 所示。图 1(a)所示为 DP980 DPS 在光学显微镜下的组织,其中亮色块状组织为铁素体(F),黑色网状组织为马氏体(M),这种双相组织不仅能保证 DP980 DPS 具有高强度,还能保证材料具有足够的塑性和韧性。22MnB5 HFS 为带 Al-Si 镀层的 HFS,镀层中 Al、Si、Fe 的质量分数分别为 87%,10%,3%。图 1(b)所示为 22MnB5 HFS 的基体组织形貌,其中黑色条状为珠光体(P),白色多边形为铁素体。珠光体呈层片状分布在铁素体基体上,晶粒沿轧制方向具有一定的变形,呈带状分布,铁素体晶粒中的黑色小点为硬化相硼颗粒。该组织特点使得 22MnB5 HFS 具有很好的塑韧性,硼在热冲压成形过程中起到强化作用,热冲压后其抗拉强度将大幅增大。

拼接焊,激光器的额定输出功率为 2 kW,聚焦镜头焦距为 160 mm,光斑直径为 0.6 mm。采用对接形式进行焊接时,用质量分数为 99.99%的纯氩气对焊接区进行保护。焊接前需对试样表面进行清洁,以去除板材表面的油污、杂质以及 22MnB5 侧待焊边缘 20 mm 范围内的 Al-Si 镀层。按照焊缝垂直于轧制方向装配试样,装夹完成后用丙酮对试样表面进行擦洗。激光拼焊的工艺参数:激光焊接功率为 1.3 kW,焊接速度为 8 mm·s<sup>-1</sup>,保护气体流量为 20 L·min<sup>-1</sup>。

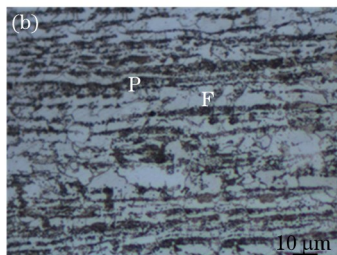


图 1 材料的组织形貌。(a) DP980;(b) 22MnB5

Fig. 1 Microstructure of materials. (a) DP980; (b) 22MnB5

激光拼焊接头拉伸试样如图 2 所示。采用液压拉伸机(SansCMT4000,深圳新三思材料检测有限公司,中国)进行单向拉伸试验,拉伸速度为 2 mm·min<sup>-1</sup>,抗拉强度和伸长率等拼焊接头的力学性能取三组数据的平均值。

对试样进行镶嵌、表面处理,用光学显微镜观察拼焊接头各区域的组织形貌。以金相试样作硬度测试试样,采用数显显微维氏硬度计(MHV-2000,优鸿测控技术有限公司,中国)进行试样硬度测试,加载载荷为 1.96 N,保压时间为 15 s,测试位置如图 3 所示。

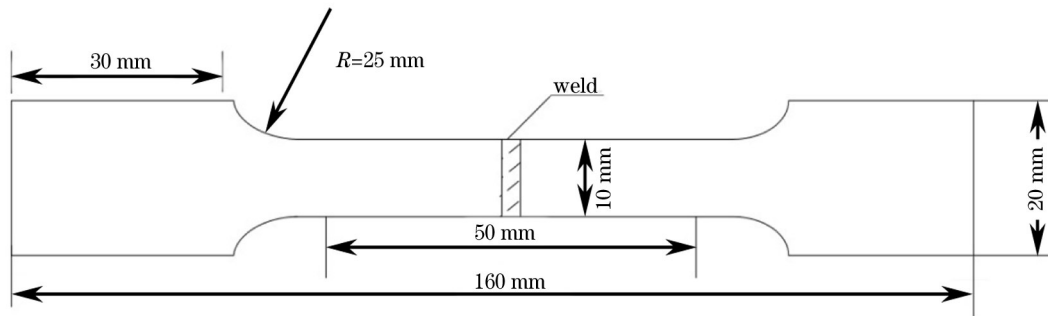


图 2 拉伸试样示意图

Fig. 2 Schematic of tensile specimen

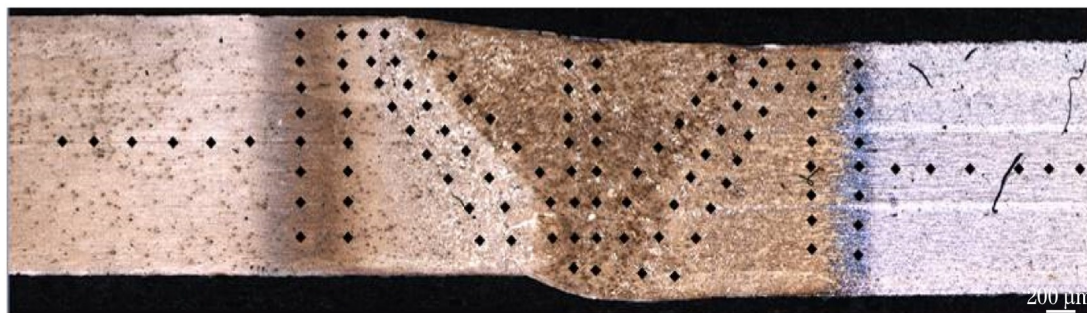


图 3 焊接接头横截面硬度打点示意图

Fig. 3 Schematic of hardness points on cross section of welded joint

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 拼焊接头的拉伸性能及断裂形貌分析

三组拼焊接头拉伸试验的结果见表 3。可以看出,拼焊接头的抗拉强度大于 22MnB5 母材的,而伸长率小于 22MnB5 母材的,其平均伸长率为母材的 60%左右。

拼焊接头拉伸试样的断裂位置如图 4 所示。可以发现,试样的断裂发生在 22MnB5 一侧的母材区 (BM)。DP980 与 22MnB5 的力学性能存在很大的差异,22MnB5 母材的抗拉强度约为 DP980 母材的 60%;焊接后焊缝金属 (WM) 区域受焊接热循环的影响,组织发生了较大的变化,其强度和硬度较 22MnB5 母材有所提高,但 DP980 侧的强度高于 22MnB5 侧的。此外,原始材料的力学性能有很大

差别,而在拉伸过程中,拼焊接头拉伸试样的受力相同,因此,虽然焊接接头拉伸试样断裂在 22MnB5 母材侧,但材料之间的相互影响和相互制约使得其强度比 22MnB5 的有所提高。在拼焊接头拉伸试样中,22MnB5 侧母材区变形最大,具有明显的颈缩现象,其他区域几乎没有变化,接头各区域变形的不协调性导致了伸长率明显减小,这与 DP980 同种高强钢的激光焊接的情况一致<sup>[11]</sup>。

表 3 焊接接头的力学性能

Table 3 Mechanical properties of welded joints

Sample number	Tensile strength /MPa	Elongation /%
1	629	13
2	655	14
3	670	13

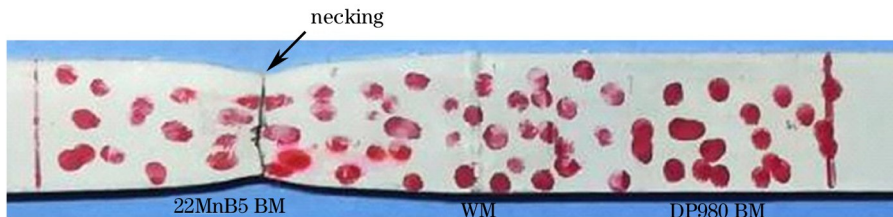


图 4 拉伸试样断裂位置

Fig. 4 Fracture position of tensile specimen

拼焊接头拉伸试样的断口扫描电镜(SEM)形貌如图5所示。由图5可知,断口中分布着大小不等、深浅各异的韧窝,结合图5和表3可以判断,该拼焊接头的断裂属于延性断裂。

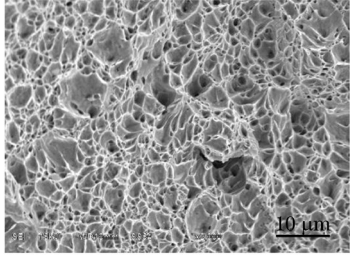


图5 拉伸试样的断口 SEM 形貌

Fig. 5 SEM morphology of tensile specimen fracture

### 3.2 拼焊接头的微观组织及分析

在激光焊接过程中,焊接热循环的作用使得焊接热影响区(HAZ)的变化较大<sup>[11]</sup>,根据文献[11]所提方法对拼焊接头 DP980 侧热影响区进行区域划分,根据文献[10]所提方法对 22MnB5 侧热影响区进行区域划分。拼焊接头横截面的整体形貌及区域划分如图6所示,各区域的微观组织形貌如图7所示。由图6可知,拼焊接头可分为 DP980 侧的热影响区、焊缝金属区、22MnB5 侧的热影响区以及两侧的母材区域,其中 DP980 侧的热影响区包含了回火区、两相区、细晶区和粗晶区,22MnB5 侧的热影响区包含了不完全淬火区和完全淬火区。

首先分析 DP980 侧热影响区不同区域的组织及变化规律。在激光热源的快速加热和快速冷却作用下,双相钢中的铁素体和马氏体会随着最高加热温度以及冷却速度的不同而产生不同的相变组织。拼焊接头各部分与热源中心的距离不同导致其受热及冷却情况也会有差异。距离焊缝中心较远区域的最高加热温度低于 Ac1 温度(经测定,DP980 的 Ac1 温度为 686 °C),如图7(a)所示,该温度区间为

马氏体的回火温度区间,在该温度区间,原始马氏体发生了回火作用,回火马氏体的强度和硬度均低于淬火马氏体的,因此,该区域亦成为 DP980 DPS 焊接热影响区的软化区。图7(b)为距离热源中心稍远的位置,该区最高温度位于 Ac1~Ac3(经测定,DP980 的 AC3 温度为 898 °C),为两相温度区间;马氏体和部分铁素体在热源作用下转变为奥氏体,随后在冷却过程中,奥氏体转变为马氏体、铁素体和少量贝氏体等,由于该区域经历了再结晶过程,因此,冷却后材料中的马氏体含量远低于原始材料中的含量,从而出现了软化现象。距离热源中心较近部分的峰值温度会超过 Ac3,原始组织中的马氏体和铁素体完全奥氏体化,冷却后转变成马氏体,如图7(c)、(d)中 DP980 侧热影响区的细晶区和粗晶区所示。

22MnB5 侧焊接热影响区的组织也发生了明显的变化。在焊接热源中心及距离热源中心较近区域的最高加热温度超过了 Ac3,因此,原始组织均转变为奥氏体并在冷却过程中全部转变为马氏体,如图7(g)~(i)中的粗晶区、细晶区和熔合区所示。图7(j)所示的区域为距离热源中心稍远的两相区,该区域最高加热温度为 Ac1~Ac3,在该温度区间,原始组织中的珠光体和部分铁素体发生了奥氏体转变,冷却后产生了马氏体、少量贝氏体以及铁素体,与母材相比,该区域的马氏体组织有所增加,因此,该区域硬度有所提高。图7(k)所示为 22MnB5 侧母材组织发生变化的区域,该区域最高加热温度低于 Ac1,原始组织有一定的正火作用,组织中的珠光体变细,数量有所增加。

除了焊接热影响区外,DP980 侧的熔合区、22MnB5 侧的熔合区以及焊缝金属区的组织分别如图7(e)~(f)所示,这些区域与热源中心距离近,加热峰值温度高,冷却速度快。因此,这三个区域的组织全部为与散热方向呈一定角度拉长的板条马氏体组织。



图6 焊接接头横截面宏观形貌及区域划分

Fig. 6 Cross-sectional macro-morphology of welded joint and its regional division

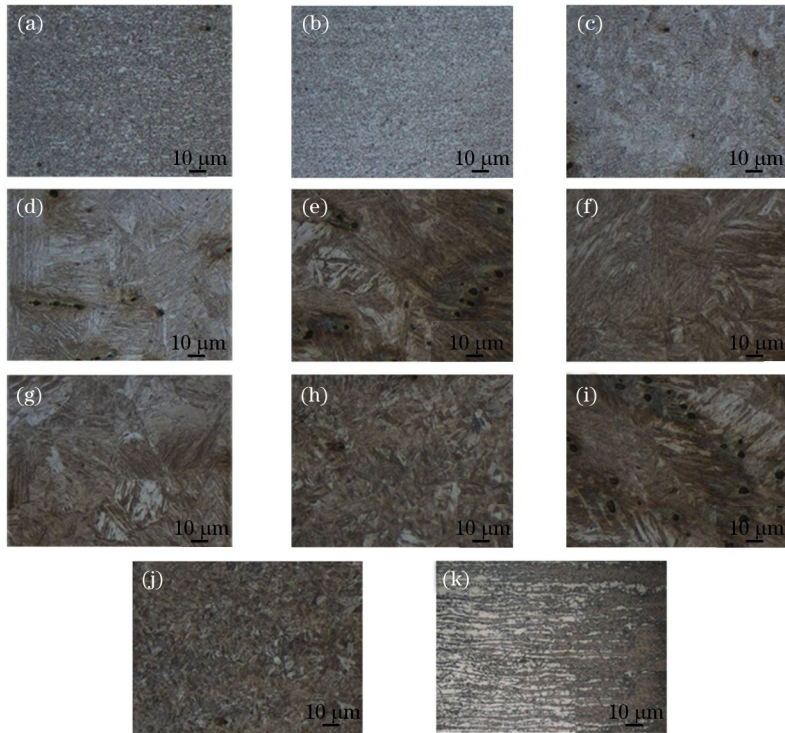


图7 焊接接头不同区域的组织形貌。(a) DP980 回火区(图6中a区);(b) DP980 两相区(图6中b区);(c) DP980 细晶区(图6中c区);(d) DP980 粗晶区(图6中d区);(e) DP980 熔合区(图6中e区);(f) 焊缝中心(图6中f区);(g) 22MnB5 粗晶区(图6中g区);(h) 22MnB5 细晶区(图6中h区);(i) 22MnB5 熔合区(图6中i区);(j) 22MnB5 两相区(图6中j区);(k) 22MnB5 硬化开始区(图6中k区)

Fig. 7 Morphologies of welded joint in different zones. (a) Tempered zone of DP980(zone a in Fig. 6); (b) two-phase zone of DP980 (zone b in Fig. 6); (c) fine-grain zone of DP980 (zone c in Fig. 6); (d) coarse-grain zone of DP980 (zone d in Fig. 6); (e) fusion zone of DP980(zone e in Fig. 6); (f) weld metal (zone f in Fig. 6); (g) coarse-grain zone of 22MnB5 (zone g in Fig. 6); (h) fine-grain zone of 22MnB5 (zone h in Fig. 6); (i) fusion zone of 22MnB5 (zone i in Fig. 6); (j) two-phase zone of 22MnB5 (zone j in Fig. 6); (k) beginning hardness zone of 22MnB5 (zone k in Fig. 6)

### 3.3 拼焊接头横截面的硬度分布

激光拼焊接头的横截面硬度分布如图8所示。可以看出,拼焊接头横截面不同区域的硬度存在明显的变化。DP980母材的硬度分布在295~320 HV之间,其热影响区的硬度变化极为明显,回火软化区最低硬度仅为236 HV,完全相变区硬度

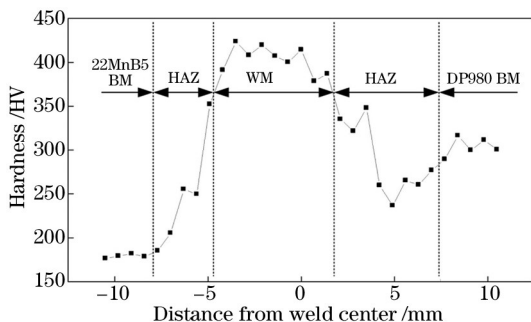


图8 焊接接头横截面的硬度分布

Fig. 8 Cross-sectional hardness distribution of welded joint

范围为315~375 HV,焊缝金属区域的硬度最高值达到460 HV;22MnB5 侧除母材区域外的其他区域均存在硬化现象,没有软化区域,硬度分布范围为350~490 HV,焊缝金属区及焊接热影响区的硬度为22MnB5 母材硬度的2~2.4倍。

## 4 结 论

激光拼焊了DP980 DPS和22MnB5 HFS,研究了拼焊板的组织和性能,得到以下结论:

1) DP980和22MnB5激光拼焊接头的抗拉强度为629~670 MPa,拼焊接头的拉伸断裂发生在22MnB5母材侧,断裂时有明显的颈缩现象,断口微观形貌为深浅不一的韧窝,属于延性断裂;

2) 拼焊接头横截面的硬度分布不均,DP980侧的热影响区有明显的软化现象,软化区平均硬度值约为DP980母材的75%,22MnB5侧的热影响区不

存在软化现象,热影响区硬度为 22MnB5 母材硬度的 2~2.4 倍,焊缝区域是拼焊接头横截面硬度最高的部分,平均硬度可达 450 HV。

### 参 考 文 献

- [1] Keeler S, Kimchi M. Advanced high strength steel: Application guidelines [M]. 5<sup>th</sup> ed. Brussels: World Auto Steel, 2014.
- [2] Jiang C, Shan Z D, Zhuang B L, *et al.* Microstructure and properties of hot stamping 22MnB5 steel[J]. 2012, 33(3): 78-81.  
姜超, 单忠德, 庄百亮, 等. 热冲压成形 22MnB5 钢板的组织和性能[J]. 材料热处理学报, 2012, 33(3): 78-81.
- [3] Li T, Li F, Wang S E, *et al.* Research on car galvanized tailor-welded blanks of fiber laser welding [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(1): 011406.  
李涛, 李芳, 王诗恩, 等. 车用镀锌钢板光纤激光拼焊工艺研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(1): 011406.
- [4] Rossini M, Spena P R, Cortese L. Investigation on dissimilar laser welding of advanced high strength steel sheets for the automotive industry[J]. Materials Science and Engineering A, 2015, 628: 288-296.
- [5] Dong D Y, Wang G J, Ma M, *et al.* Study on microstructure and properties of laser welding dual phase steel joints for an auto-body[J]. China Journal of Lasers, 2012, 39(9): 0903002.  
董丹阳, 王观军, 马敏, 等. 车用双相钢激光焊接接头组织性能研究 [J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0903002.
- [6] Cui Q L, Parkes D, Westerbaan D, *et al.* Tensile and fatigue properties of single and multiple dissimilar welded joints of DP980 and HSLA [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, 26(2): 783-791.
- [7] Han T K, Park B G, Kang C Y. Hardening characteristics of CO<sub>2</sub> laser welds in advanced high strength steel [J]. Metals and Materials International, 2012, 18(3): 473-479.
- [8] Wang X N, Zheng Z, Zeng P L, *et al.* Effect of microstructure on hardness and fatigue properties of 800 MPa high strength steel fiber laser weld joints [J]. China Journal of Lasers, 2016, 43(12): 1202010.  
王晓南, 郑知, 曾盼林, 等. 800 MPa 级高强钢光纤激光焊接接头微观结构对硬度及疲劳性能的影响 [J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1202010.
- [9] Song W, Cao S Y, Yan C. Study on growth of HAZ grain in laser welding of high strength steel based on temperature field[J]. Applied Laser, 2017, 37(3): 386-390.  
宋威, 曹轼毓, 鄢铿. 基于温度场的高强钢激光焊接 HAZ 晶粒长大研究 [J]. 应用激光, 2017, 37(3): 386-390.
- [10] Jin 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.
- [11] Wang J F, Wang L J, Yang L J, *et al.* Research on microstructure and properties of laser welding DP1000 high-strength steel weld joints [J]. China Journal of Lasers, 2014, 41(9): 0903003.  
王金凤, 王立君, 杨立军, 等. DP1000 高强钢激光焊接接头组织性能研究 [J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0903003.