

DP1000 高强钢激光焊接接头组织性能研究

王金凤^{1,2} 王立君¹ 杨立军^{1*} 李 慷¹ 李笑雨¹ 刘 桐¹ 王浪平³

¹ 天津大学材料科学与工程学院, 天津 300072

² 湖北汽车工业学院材料科学与工程学院, 湖北 十堰 442002

³ 哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 针对先进高强双相钢的激光焊接问题,通过拉伸试验、显微硬度测试、扫描电镜(SEM)和光学显微镜(OM)等手段分析研究 1.5mm 厚 DP1000 钢板对接接头的性能和组织,讨论了接头强度和塑性降低的主要原因。研究发现激光焊接 DP1000 双相钢的焊接接头热影响区(HAZ)存在严重的软化现象,软化区集中在其回火区和不完全结晶区,该软化区造成焊接接头的抗拉强度下降了 10%~15%,塑性下降了 60%以上。强度下降的主要原因是回火区域出现了回火马氏体,其强度低于淬火马氏体;塑性下降的主要原因是焊接热影响区的软化使得焊接接头的不同区域在拉伸过程中出现不协调的变形,变形主要集中在热影响区的软化区,而焊缝金属区、母材区及焊接热影响区的硬化区几乎没有变形。

关键词 激光技术;DP1000 双相钢;激光焊接;热影响区;力学性能;变形不协调

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.0903003

Research on Microstructure and Properties of Laser Welding DP1000 High-Strength Steel Weld Joints

Wang Jinfeng^{1,2} Wang Lijun¹ Yang Lijun¹ Li Kang¹ Li Xiaoyu¹
Liu Tong¹ Wang Langping³

¹ School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

² School of Materials Science and Engineering, Hubei University of Automotive Technology,
Shiyan, Hubei 442002, China

³ State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology,
Haerbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract Studies on the microstructure and properties of butt joints by laser welding 1.5 mm thickness DP1000 dual phase advanced high strength steel used tensile test, microhardness test, scanning electron microscope (SEM) and optical microscope(OM) are presented. The reason of the decrease of joint's strength and ductility is discussed. The results show that a serious softening has occurred in heat-affected zone (HAZ) of the welding joints, and the most serious locates in the tempered zone and the incomplete crystalline zone of HAZ. The strength of welding joints decrease by 10%~15%, and the ductility of welding joints exceed 60%. The main reason of the joint's strength descent is the existence of tempered martensite which is obtained in the welding process, and the tempered martensite's strength is lower than the quenching martensite. The main reason of the joint's ductility descent is the uncoordinated tensile deformation of different joint subareas, and the deformation mainly takes place on the softened zone of HAZ. The welding fusion zone, the base metal and other zones of HAZ hardly occur deformation.

Key words laser technique; DP1000 dual phase steel; laser welding; heat affected zone; mechanical property;

收稿日期: 2014-03-24; **收到修改稿日期:** 2014-04-14

基金项目: 国家自然科学基金(51175374)、天津市应用基础及前沿技术研究计划(11JCYBJC06100)、先进焊接与连接国家重点实验室开放基金(AWPT-M12-08)

作者简介: 王金凤(1978—),女,博士研究生,讲师,主要从事汽车轻量化材料焊接方面的研究。

E-mail: ivwangjinfeng@126.com

导师简介: 王立君(1951—),男,教授,博士生导师,主要从事焊接工艺、焊接结构断裂与服役行为等方面的研究。

E-mail: wanglijun@tju.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: tdyjljabc@163.com

uncoordinated deformation

OCIS codes 140.3390; 160.3390; 350.3390

1 引 言

汽车制造业的轻量化需求促进了高强钢的应用与发展,出现了多个新的钢种,从初期应用的高强低合金(HSLA)钢发展到了先进高强钢[AHSS,包括双相(DP)钢、相变诱发塑性(TRIP)钢、马氏体(MS)钢、孪晶诱发塑性(TWIP)钢等];强度级别也从初期的 450 MPa 发展到了目前的 1500 MPa 左右^[1]。双相钢是汽车制造业中应用较多的一类先进高强钢,是在钢的原始组织奥氏体化后,通过控制冷却速度使一部分奥氏体转变为铁素体,再快冷使剩余的奥氏体转变为马氏体或贝氏体。在微观组织上,双相钢是以较软的铁素体加硬相马氏体(或贝氏体)所构成;在力学性能方面较好地兼顾了强度与塑韧性的要求,以较高的原始加工硬化速率、较低的屈强比、较高的变形能力,成为汽车轻量化用钢的理想材料^[2]。据报道^[3],在汽车行业轻量化项目(ULSAB-AVC)中,双相钢在汽车白车身上的用量达到了钢材总用量的 74%,主要用于汽车的前内纵梁、保险杠、B 柱等结构件和安全件。

对于这类以相变为基础的新型高强钢,国内外有关学者和技术人员对其焊接技术进行了大量的研究工作,包括焊接工艺和焊接性,研究的重点主要集中在焊接工艺参数对组织^[4-6]、性能^[7-12]等的影响。由于双相钢的制造特点决定了其在焊接受热过程中会出现热影响区的严重软化现象^[13-16],影响了其在汽车中的使用,尤其是强度级别高的双相钢,因此焊

接过程热输入的控制便成了接头性能优劣的关键因素,而激光焊接具有能量密度高、热输入小^[17-18]等优点,在双相先进高强钢的焊接中^[8,11-12,19-20]得到了极大关注,成为重要的研究方向。

汽车轻量化的发展趋势之一就是使用强度级别更高的先进高强钢,国内对 1000MPa 强度级别的双相钢(DP1000)激光焊接技术研究较少,而未来车辆轻量化技术的发展必然会增加对该强度级别的先进高强钢的使用,因此本文对该强度级别双相钢的激光焊接进行深入研究,全面了解其焊接性能和力学性能的变化。

2 试验材料及方法

2.1 试验材料

试验材料选用瑞典 SSAB 公司生产的连续冷轧 DP1000 双相钢,厚度为 1.5 mm,切割成 100 mm×60 mm 的试板,其基体组织如图 1 所示,主要化学成分和力学性能见表 1。图 1(a)为 DP1000 在光学显微镜(OM)下的组织,图中亮色块状组织为铁素体,黑色网状组织为马氏体,而图 1(b)为扫描电镜(SEM)下的显微组织图,图中黑色块状部分(基底)为铁素体,灰色凸起部分为马氏体;由图可以看出马氏体呈网状分布在铁素体基体上,这种双相的组织特点保证了该钢在强度提高的同时,具有足够的塑性和韧性。

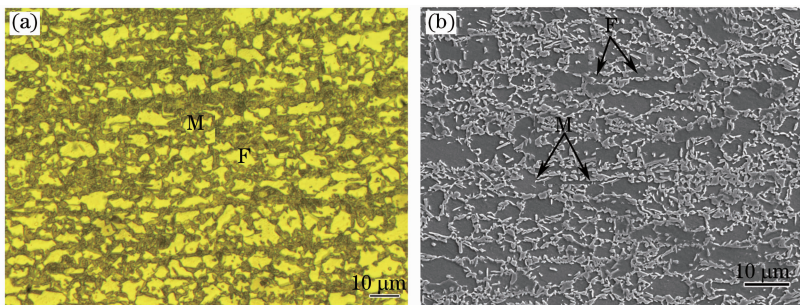


图 1 DP1000 双相钢的微观组织。(a) 光学显微镜下的微观组织;(b) 扫描电镜下的微观组织

Fig. 1 Microstructure of DP1000. (a) OM microstructure; (b) SEM microstructure

表 1 DP1000 双相钢的主要化学成分和力学性能

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of DP1000

Chemical composition (mass fraction, %)									Mechanical properties		
C	Si	Mn	Cu	Al	Cr	Ni	Nb	V	Tensile strength /MPa	Yield strength /MPa	Elongation / %
0.141	0.49	1.47	0.02	0.041	0.03	0.04	0.016	0.01	1034	680	11

2.2 激光焊接

DP1000 双相钢的对接试验采用 JK2003SM 型 Nd:YAG 固体激光器,额定输出功率为 2 kW,聚焦镜镜头焦距为 160 mm,纯氩气作为保护气体,气体流速为 20 mL/min。焊接试样采用对接形式,由于是自熔化焊接,中间不留间隙,采用连续激光模式进行焊接。

焊接试板在焊前采用砂纸打磨待焊边缘 20 mm 范围,采用丙酮对试样进行清洗,试样按照焊缝垂直于轧制方向装配,为了防止装夹过程对试样的污染,装夹后再次用丙酮对试样表面进行擦洗。

在激光焊接中,不同的金属材料以及不同的材料表面状况对材料的吸收率有一定的差异,但是对于相同材料以及经过相同处理方式的焊接试件来

说,其对激光的吸收率是相同的,因此采用相对焊接热输入来代表焊接热输入(以下简称热输入)。有研究^[21]指出,激光焊接过程中的小孔成形与热传导成形主要由激光功率密度控制,为了保证同一成形模式,试验中激光输出功率保持不变(1700 W),在离焦量(-2 mm)固定的情况下,通过改变焊接速度来改变激光焊接的热输入;经过反复试验发现,焊接热输入低于 121 J/mm 不能达到背面焊透的焊缝;而在热输入为 425 J/mm 的时候表面即有凹陷现象,所以更高的热输入会造成更大的表面凹陷现象,不符合使用要求,因此试验中采用的热输入范围为 121~425 J/mm(即焊接速度为 14~4 mm/s),试验参数见表 2。

表 2 激光焊接 DP1000 双相钢的工艺参数及接头力学性能

Table 2 Laser welding parameters and mechanical properties of DP1000 laser weld joints

No	Power /W	Welding speed /(mm/s)	Heat input /(J/mm)	Tensile strength /MPa	Elongation /%
1	1700	4	425	892	2.8
2	1700	6	283	914	2.9
3	1700	8	212	921	3.55
4	1700	10	170	938	3.84
5	1700	12	142	931	4.16
6	1700	14	121	910	4.08

2.3 力学性能测试

将激光焊接头按照《GB/T2651-2008 焊接接头拉伸试验方法》标准加工成标距为 25 mm,平行段宽度为 12.5 mm 的拉伸试件,单向拉伸试验采用 CSS 电子万能试验机,拉伸试验时拉伸速度为 2 mm/min,抗拉强度和延伸率等焊接接头的力学性能取三组数据的平均值。

硬度测量根据 GBT4340.1-2009 金属材料维氏硬度试验(第 1 部分:试验方法)进行,采用 MHV-2000 型数显微维氏硬度计,载荷为 200 g,保压时间为 15 s,测试位置选择在距离焊缝上表面三分之一处。

2.4 显微组织观察与断口形貌观察

利用 Neophot32 型光学显微镜和 JSM6360LV 型 SEM 观察 DP1000 原始组织、焊接接头横截面的显微组织和拉伸断口形貌。

3 试验结果与分析

3.1 热输入对焊接接头力学性能的影响

在选用的试验条件下获得的焊接接头力学性能如表 2 所示。从表 2 可以看出,在所采用的焊接工

艺参数下,所有焊接接头的抗拉强度达到了原始母材抗拉强度的 85% 以上;而延伸率下降严重,最低的延伸率为 2.8%,最高的也只有 4.16%,最高的延伸率是原始母材延伸率(11%)的 38%。从表 2 还可以看出,随着焊接速度的增大(即焊接热输入的减小),接头的抗拉强度先增加后减少,而延伸率也呈现出了相同的变化趋势,如图 2 所示。在焊接速度为 10 mm/s(热输入为 170 J/mm)时,抗拉强度达到了最高值 938 MPa,其延伸率为 3.84%,而当焊接

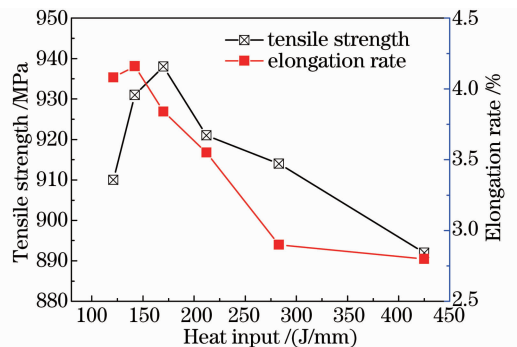


图 2 焊接热输入对接头力学性能的影响

Fig. 2 Effect of heat input to the joints' mechanical properties

速度为 12 mm/s(热输入为 142 J/mm)时,焊接接头的抗拉强度略有降低,达到了 931 MPa,而延伸率达到了最高值 4.16%,当焊接速度继续增大,达到 14 mm/s(121 J/mm)时,无论是焊接接头的强度还是延伸率均有下降,根据表面观察分析,此时由于焊接速度过快,产生了焊缝金属凹陷现象,造成其性能有所下降,因此综合考虑接头的强度和塑性以及焊接效率问题,认为在焊接速度为 10~12 mm/s 时均能获得较好的焊接接头状态。

3.2 焊接接头拉伸断裂分析

对拉伸断裂后的试件断裂位置进行观察可知,断裂均发生在焊接接头的热影响区域(HAZ)。对拉伸试验前后试件(选取在较优参数下的试样之一——焊接速度为 12 mm/s 的焊接试件)不同区域进行标定和测量(如图 3 所示)发现,拉伸试验时只有热影响区发生了伸长,焊缝区(FZ)、母材区(BM)的长度几乎没有变化;拉伸断裂时变形主要集中在发生断裂侧的热影响区,另一侧热影响区则发生了相对较小的变形,但没有发生最终的断裂,焊接接头的母材区及焊缝区长度均没有明显伸长;单纯计算焊接热影响区的延伸率可达到 16%,高出母材的延伸率(11%),但是由于接头的其他部位没有参与变形,造成接头整体延伸率下降严重,由此可知该焊接接头不同区域的变形程度存在明显差别,这也是导致焊接接头塑性严重下降的主要原因。

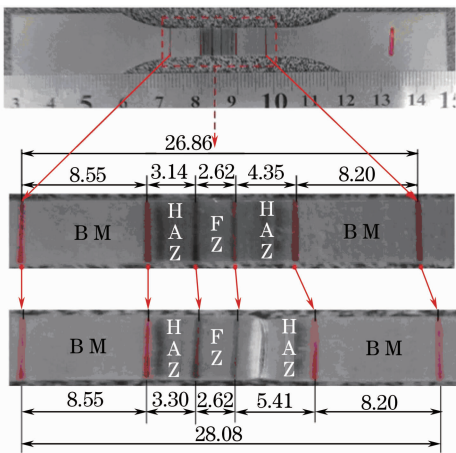


图 3 焊接拉伸试验前后接头不同区域的尺寸

Fig. 3 Sample size of joints at different areas before and after welding tensile test

为了更加明确断裂的具体位置及断裂类型,将典型断裂试样(焊接速度为 12 mm/s 的焊接接头)的断裂部位做成金相试样,如图 4 所示,可以看出其断口呈典型的杯锥状,断裂侧的热影响区(即断裂区域)发生了明显的塑性变形,另一侧的热影响区也有

变形,但变形很小,而在接头的其他区域(如焊缝区域、焊接热影响区的硬化区、母材)几乎没有发生变形,这也说明了在整个焊接接头中由于不同区域的性能不均匀导致了变形的不协调,最终造成了接头整体塑性的严重下降。

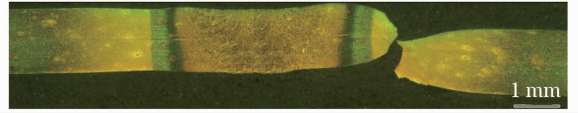


图 4 典型拉伸试样断口金相图

Fig. 4 Metallographic fracture of typical tensile sample

为了进一步了解该焊接接头的断裂形式,对断口进行详细分析。宏观观察可以看出断口表面没有光泽,断面有较明显的收缩,属于延性断裂。图 5 是图 4 的断口 SEM 形貌,可以看出,拉伸断口均有大小不等的韧窝,但是韧窝错乱分布,深浅不一,说明拉伸断裂虽然是塑性断裂,但是塑性较差,这可能与断裂处材料组织中的变形硬化能力差有关,将在后续组织分析中进一步深入分析。

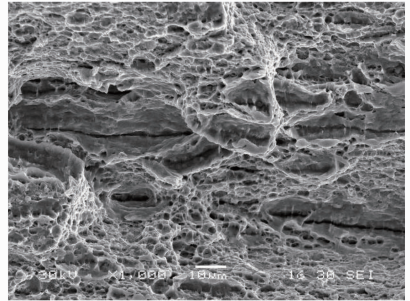


图 5 典型拉伸断裂试样断口 SEM 形貌

Fig. 5 Morphology of SEM fracture of typical tensile sample

3.3 焊接接头硬度测试

由以上分析可知 DP1000 双相钢经过激光焊接后接头的力学性能变化很大,为了详细了解整个焊接接头性能的变化,对焊接接头进行了硬度测量及分析,图 6(a)是焊接接头硬度分布情况。从图 6(a)可以看出焊接接头不同区域的硬度存在明显变化,由于母材本身是双相钢(马氏体+铁素体),因此母材的硬度存在一定的波动,维氏硬度范围基本在 300(HV0.2)~320(HV0.2)之间,而热影响区的软化区硬度下降明显,最低的硬度只有 215(HV0.2),软化区宽度(从焊接接头的上表面测量,其他区域均为该测量方式)约为 1.5 mm;热影响区硬化区靠近焊缝,范围较窄,约为 0.3 mm,硬度较母材有所升高,硬度范围在 320(HV0.2)到 390(HV0.2)之间;焊缝金属区域硬度最高,最高硬度值达到 400(HV0.2)以上。

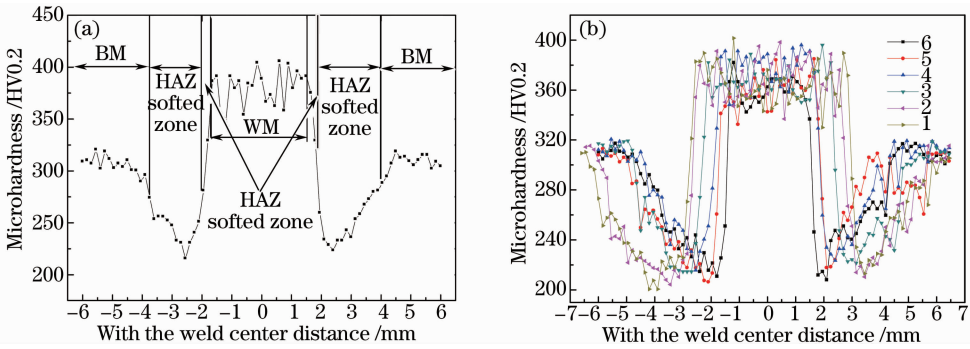


图 6 焊接接头截面硬度分布曲线。(a) 焊缝硬度分布分区图；(b) 不同热输入下的硬度分布图

Fig. 6 Hardness distribution of laser welding joints. (a) Hardness partition map; (b) hardness distribution with different heat inputs

图 6(b)为不同热输入条件下的焊接接头硬度分布图,从图中可以看出,硬度分布趋势基本相同,但是其最高硬度、最低硬度以及软化区宽度有明显不同,随着焊接热输入的增加(焊接速度的减小),焊缝区及软化区宽度均所有增加,并且最低硬度有所降低,但

是当焊接速度达到 14 mm/s 时,软化区宽度又增大(相对焊接速度为 12 mm/s 的),这与上述力学分析中的结果一致,焊缝区宽度、热影响区软化区宽度以及最低硬度值及其分布见表 3[该测量基于图 7(a)焊接接头分区图的上表面进行测量]所示。

表 3 不同热输入下的焊接接头性能对比表

Table 3 Welding joints mechanical properties with difference heat inputs

No.	1	2	3	4	5	6
Weld width /mm	3.45	2.55	2.25	2.10	1.8	1.8
Softening region width /mm	2	1.75	1.6	1.5	1.1	1.5
Lowest hardness value (HV0.2)	200	204	214	215	206	210
Distance between the lowest hardness location and the weld center line /mm	3.9	3.45	3	2.55	2.1	1.8

3.4 焊接接头显微组织分析

由上述分析可以看出,DP1000 双相钢在激光焊接后接头的力学性能如拉伸性能、硬度等变化都很大,存在软化现象,这也是造成接头力学性能下降的主要原因。而力学性能的变化是与材料中微观组织的变化密切相关的,这节主要从整个焊接接头不同区域的组织分布情况来分析造成焊接接头力学性能下降的原因。

众所周知,激光功率密度高(可达 $10^7 \sim 10^9 \text{ W/cm}^2$),焊接所得接头成形美观,热影响区小,能得到性能较好的焊接接头。但是由于本研究中的材料是双相高强钢,它是通过连续冷却控制轧制得到的以铁素体为基体、马氏体为强化相的超高强钢,激光焊接的快速加热和快速冷却会使得母材中的铁素体和马氏体发生组织变化,在高于 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,马氏体会发生回火。不同的温度范围获得的回火组织不同,在远离焊缝中心位置,材料温度升高较低(温度约 $150 \text{ }^\circ\text{C} \sim 250 \text{ }^\circ\text{C}$),获得了回火马氏体组织,随着与焊缝中心距离的减小,材料升温较高,达到了中温回火及高温回火的温度,因此该区域获得了回火托

氏体和回火索氏体组织。回火组织(如回火马氏体、回火托氏体、回火索氏体等)硬度较淬火马氏体低,因此在焊接热影响区出现了回火软化现象,造成整个接头变形不协调,下面详细分析焊接接头不同区域的组织变化情况。

通过焊接试验发现,激光焊接 DP1000 双相先进高强钢时,焊接接头组织变化比其他钢种明显且多样,根据组织变化及硬度分布将焊接接头分为过热粗晶区、细晶区、两相区和回火区,如图 7(a)所示。回火区组织粗大,有明显的碳化物析出,如图 7(b)所示;两相区(不完全重结晶区)温度达到 A_{c1} 以上,母材中的部分铁素体和马氏体生成了奥氏体,在快速冷却条件下生成了部分马氏体和铁素体,该区域有相变产生的铁素体和未发生相变的铁素体,因此铁素体含量较母材有所增加,如图 7(c)所示,其硬度亦有所下降,该区域与回火区共同组成了焊接接头的软化区域;而图 7(d)为完全重结晶区的细晶区,该区域距离熔合线较近,温升大,达到了 A_{c3} 及以上温度,原始组织全部奥氏体化,在快速冷却条件下,奥氏体完全转变为马氏体,该马氏体为较细的等

轴马氏体;热影响区的粗晶区温升更大,奥氏体得到了均匀化,因此冷却后获得了较粗大的等轴马氏体,如图 7(e)所示;焊缝中心区域温度达到熔点以上,过

热度很大,奥氏体晶粒严重长大,在冷却后得到了粗大的垂直于熔合线的板条马氏体,如图 7(f)所示。

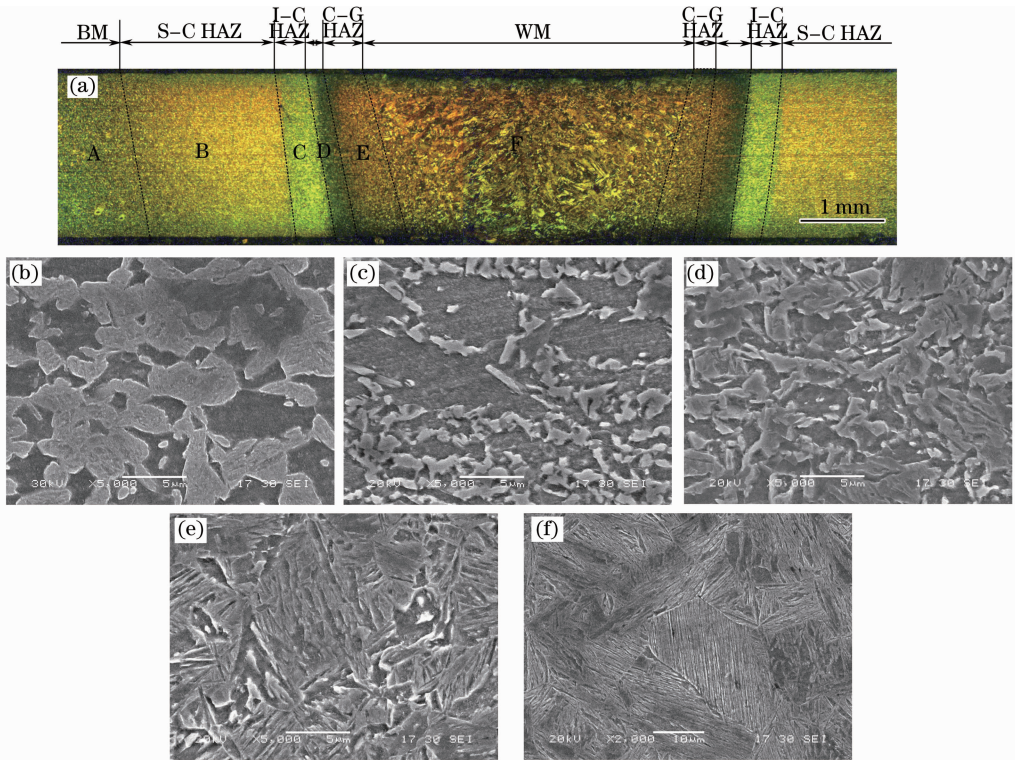


图 7 焊接接头不同区域显微组织。(a) 焊接接头宏观形貌;(b) 回火区组织(图 a 中 B 位置);(c) 两相区组织(图 a 中 C 位置);(d) 细晶区组织(图 a 中 D 位置);(e) 粗晶区组织(图 a 中 E 位置);(f) 焊缝中心组织(图 a 中 F 位置)
Fig. 7 Microstructure of laser welding joint at different areas. (a) Macro-profile of welding joint; (b) sub-critical HAZ [position B in Fig(a)]; (c) inter-critical HAZ [position C in Fig(a)]; (d) fine-grained HAZ [position D in Fig(a)]; (e) coarse-grained HAZ [position E in Fig(a)]; (f) weld metal

4 结 论

1) 激光焊接 DP1000 双相先进高强钢时,在本试验条件下的焊接接头中,强度最多下降 15%,抗拉强度高的焊接接头达到了母材的 85%以上;但是接头的塑性下降严重,在拉伸试验中焊接接头的延伸率下降了 60%以上。

2) 焊接接头力学性能下降的主要原因是整个焊接接头性能不均匀,塑性变形仅发生在焊接接头热影响区的软化区,而母材区、热影响区的硬化区及焊缝区几乎没有变形,拉伸过程中接头变形不协调是造成接头整体塑性严重下降的主要原因;而强度下降则主要是由于断裂发生在热影响区的回火区域,回火马氏体的强度较淬火马氏体的强度低造成的。

3) DP1000 双相钢在激光焊接头焊接热影响区软化的原因主要是热影响区的回火区出现了回火马氏体以及不完全相变区铁素体数量增多,回火马氏

体及铁素体的硬度比淬火马氏体硬度低,导致了该区域平均硬度严重下降。

参 考 文 献

- 1 Lightweighting Material[R]. 2010 Annual Progress Report.
- 2 World Auto Steel. Advanced High Strength Steel (AHSS)—Application Guidelines (Version4)[M]. 2009. 1-1—1-6.
- 3 Liu Chao, Wang Lei, Liu Yang. Development of advanced high-strength steel used for automobile and its application in body design[J]. Special Steel Technology, 2012, 18(2): 1—4,9.
- 4 刘超,王磊,刘杨. 汽车用先进高强钢的发展及其在车身设计中的应用[J]. 特钢技术, 2012, 18(2): 1—4,9.
- 5 D Parkes, W Xu, D Westerman, *et al.*. Microstructure and fatigue properties of fiber laser welded dissimilar joints between high strength low alloy and dual-phase steels[J]. Materials and Design, 2013, 51: 665—675.
- 6 S K Panda, V H Baltazar Hernandez, M L Kuntz, *et al.*. Formability analysis of diode-laser-welded tailored blanks of advanced high-strength steel sheets [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2009, 40A(8): 1955—1967.
- 7 Mingsheng Xia, Elliot Biro, Zhiling Tian, *et al.*. Effects of heat input and martensite on HAZ softening in laser welding of dual phase steels[J]. ISIJ International, 2008, 48(6): 809—814.

- 7 M Pouranvari, S P H Marashi, D S Safanama. Failure mode transition in AHSS resistance spot welds. part II: experimental investigation and model validation [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2011, 528(8): 8344–8352.
- 8 N Farabi, D L Chen, J Lib, *et al.*. Microstructure and mechanical properties of laser welded DP600 steel joints [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2010, 527(9): 1215–1222.
- 9 Sylvain Dancette, Veronique Massardier-Jourdan, Damien Fabrège, *et al.*. HAZ microstructures and local mechanical properties of high strength steels resistance spot welds [J]. *ISI International*, 2011, 51(1): 99–107.
- 10 Fatih Hayat, Brahim Sevim. The effect of welding parameters on fracture toughness of resistance spot-welded galvanized DP600 automotive steel sheets [J]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2012, 58(9): 1043–1050.
- 11 N Farabi, D L Chen, Y Zhou. Tensile properties and work hardening behavior of laser-welded dual-phase steel joints [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2012, 21(2): 222–230.
- 12 W Xu, D Westerbaan, S S Nayak, *et al.*. Tensile and fatigue properties of fiber laser welded high strength low alloy and DP980 dual-phase steel joints [J]. *Materials and Design*, 2013, 43(7): 373–383.
- 13 V H Baltazar Hernandez, Sushanta Kumar Panda, Yasuaki Okita, *et al.*. A study on heat affected zone softening in resistance spot welded dual phase steel by nanoindentation [J]. *J Mater Sci*, 2010, 45(6): 1638–1647.
- 14 S S Nayak, V H Baltazar Hernandez, Y Zhou. Effect of chemistry on nonisothermal tempering and softening of dual-phase steels [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2011, 42(11): 3242–3248.
- 15 E Biro, J R Mcdermid, J D Embury, *et al.*. Softening kinetics in the subcritical heat-affected zone of dual-phase steel welds [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2010, 41(9): 2348–2356.
- 16 V H Baltazar Hernandez, S S Nayak, Y Zhou. Tempering of martensite in dual-phase steels and its effects on softening behavior [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2011, 42(10): 3115–3129.
- 17 Zhao Lin, Tsukamoto Susumu, Arakane Goro, *et al.*. Influence of welding parameters on weld depth and porosity in high power fiber laser welding [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(11): 1103004.
赵琳, 塚本进, 荒金吾郎, 等. 大功率光纤激光焊接过程中工艺参数对熔深和气孔的影响 [J]. *中国激光*, 2013, 40(11): 1103004.
- 18 Wu Dongjiang, Zhang Tianwu, Ma Guangyi. Influence of welding parameters on the morphology of Fe-Ni alloy with continuous wave YAG laser [J]. *China J Lasers*, 2013, 40(3): 0303003.
吴东江, 张天武, 马广义, 等. 连续激光焊接 Fe-Ni 合金工艺参数对焊缝形貌的影响 [J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0303003.
- 19 Dong Danyang, Wang Guanjun, Ma Min, *et al.*. Study on microstructure and properties of laser welding dual phase steel joints for an auto-body [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 32(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, 32(9): 0903002.
- 20 Zhang Yi, Tan Lipeng, Zhang Chenglei. Research on gap margin in laser butt welding of high-strength automobile steel with hot wire filler [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(7): 0703003.
张屹, 谭力鹏, 张成磊. 车用高强度钢激光填充热丝对接焊间隙裕度研究 [J]. *中国激光*, 2013, 40(7): 0703003.
- 21 Jao-Hwa Kuang, Tsung-Pin Hung, Chih-Kuan Chen. A keyhole volumetric model for weld pool analysis in Nd:YAG pulsed laser welding [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(5): 1521–1528.

栏目编辑: 韩峰