

不同强度级别双相不锈钢激光焊接头的组织与力学性能

谭海林¹, 赖春明^{1*}, 周家林², 莫金竹³, 聂慧³

(1. 湖南化工职业技术学院, 湖南 株洲 412011; 2. 武汉科技大学 钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081; 3. 株洲天一自动焊接装备有限公司, 湖南 株洲 412000)

摘要: **目的** 为了合理制定不同强度等级 DP 钢同种和异种接头的激光焊接工艺, 研究激光焊接工艺对接头组织性能的影响。**方法** 采用 SEM、硬度试验、拉伸试验等手段, 研究不同强度等级 DP 钢同种和异种激光焊接接头的微观组织和力学性能。**结果** 对于同种 DP 钢激光焊接, 由于接头各个区域经历的热循环不同, 因此其马氏体体积分数和形态、含碳量等存在明显差异。在焊缝熔合区, 由于冷却速度较高, 因此马氏体体积分数较高且为细条状, 硬度高于母材硬度。在热影响区, 由于马氏体发生了回火分解, 因此其硬度值低于母材硬度, 且软化的程度和范围大小与 DP 钢的强度级别相关。软化的热影响区成为接头的薄弱区域, 降低了接头的拉伸性能。在异种 DP 钢激光焊接接头中, 焊缝熔合区的硬度也明显高于母材硬度。靠近高强度级别母材侧的热影响区范围更大, 软化程度更明显, 接头硬度分布不再对称。接头的抗拉强度与低等级 DP 钢母材的抗拉强度基本一致。**结论** 激光焊接工艺对不同强度等级 DP 钢同种和异种接头组织性能的影响存在较大的差异, DP 钢强度级别越高, 接头或接头对应侧的热影响区软化程度越明显, 这在制定焊接工艺以及焊后处理工艺过程中需要予以考虑。

关键词: 双相不锈钢; 激光焊接; 显微组织; 力学性能; 马氏体体积分数

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2024.06.015

中图分类号: TG456.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-6457(2024)06-0122-07

Microstructure and Mechanical Properties of Laser Welded Joints of Duplex Stainless Steel with Different Strength Grades

TAN Hailin¹, LAI Chunming^{1*}, ZHOU Jialin², MO Jinzhu³, NIE Hui³

(1. Hunan Chemical Vocational Technology College, Hunan Zhuzhou 412011, China; 2. Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 3. Zhuzhou Tianyi Welding & Cutting Automatic Equipment Co., Ltd., Hunan Zhuzhou 412000, China)

ABSTRACT: The work aims to understand the effect of laser welding process on the microstructure and properties of welded

收稿日期: 2023-06-12

Received: 2023-06-12

基金项目: 湖南省教育厅科学研究项目 (23B0966); 湖南省自然科学基金 (2022JJ60042)

Fund: Scientific Research Project of the Education Department of Hunan Province (23B0966); Natural Science Foundation of Hunan Province (2022JJ60042)

引文格式: 谭海林, 赖春明, 周家林, 等. 不同强度级别双相不锈钢激光焊接头的组织与力学性能[J]. 精密成形工程, 2024, 16(6): 122-128.

TAN Hailin, LAI Chunming, ZHOU Jialin, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Laser Welded Joints of Duplex Stainless Steel with Different Strength Grades[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2024, 16(6): 122-128.

*通信作者 (Corresponding author)

joints to formulate the laser welding process for joints of similar and dissimilar DP steel with different strength grades. The microstructure and mechanical properties of laser welded joints of DP steel with different strength grades were studied by means of SEM, hardness and tensile testing. For laser welding of similar DP steel, the volume fraction of Martensite, the existing morphology and carbon content in each area of the joint were significantly different due to different thermal cycles. In the weld fusion zone, due to the high cooling rate, the volume fraction of Martensite was high and it was thin strip, and the hardness was higher than that of the base metal. In the heat affected zone, due to tempering decomposition of Martensite, the hardness was lower than that of the base metal, and the degree and range of softening were related to the strength level of DP steel. The softened heat affected zone became the weak area of the joint, reducing its tensile performance. In the laser welded joints of dissimilar DP steels, the hardness of the weld fusion zone was also significantly higher than that of the base metal. The heat affected zone near the side of the high strength base metal was larger, and the softening degree was more obvious, which made the hardness distribution of the joint no longer symmetrical. The tensile strength of the joint was basically consistent with the base material of low grade DP steel. In conclusion, the influence of laser welding process on the microstructure and properties of DP steel joints with different strength grades is quite different. The higher the strength grade of DP steel is, the more obvious the softening degree of the heat affected zone on the joint of the corresponding side of the joint is. This needs to be taken into account in the development of welding process and post weld treatment process.

KEY WORDS: duplex stainless steel; laser welding; microstructure; mechanical properties; volume fraction of martensite

采用先进高强钢代替传统钢铁材料进行汽车轻量化设计与制造是在保障安全的前提下降低能耗、减少碳排放的重要手段^[1-3]。双相 (Dual Phase, DP) 钢作为先进高强钢的典型代表, 一般通过亚温退火和快速冷却来生产, 其显微组织一般由铁素体软韧相和马氏体强化相组成, 还可能存在少量的贝氏体和残余奥氏体^[4-7]。这种微观组织构成使 DP 钢具备良好的综合力学性能, 如强度高、塑韧性好、初始加工硬化率高, 这些特性使其在汽车用钢中极具优势^[3-4,7]。为了适应不同的使用要求, 通过成分和工艺设计开发出了不同强度级别的 DP 钢, 目前使用较为成熟的是 500~1 000 MPa 级的 DP 钢。

激光焊接因其焊接质量好、自动化程度高、柔性好等优点, 在汽车制造领域获得了广泛的应用^[7-10]。已有的 DP 钢激光焊接研究表明, 焊接会导致热影响区 (HAZ) 的亚临界区域形成软区, 这是因为在该区域局部最高温度不足以产生奥氏体, 但暴露在高温下又会导致马氏体相回火。软区的存在会使接头的力学性能明显变差, 并最终影响板材的成形性能。已有的研究也表明, 焊接参数和母材马氏体体积分数对这种软化现象有重要影响^[11-18]。由于较高焊接速度下的热输入减少, 因此 HAZ 软化区域的宽度和深度变小。此外, 随着 DP 钢强度等级的提高, 软化程度通常会增大。翟战江等^[11]研究表明, 与母材相比, 焊接 DP600 钢具有更高的屈服强度和更高的极限抗拉强度

(UTS), 软区的影响不明显。激光焊接 DP980 钢拉伸试验结果表明, 焊接后屈服强度和 UTS 均降低, 且断裂总是发生在软区的外部 HAZ, 钢板的成形率随着母材强度的增大而降低^[12-14]。韦春华等^[14]和 Xia 等^[15]也得出了与 DP980 焊接接头类似的结果, 认为 DP980 焊接件中的 HAZ 软化区完全主导了断裂模式。这表明, 软区对高强度级别 DP 钢的影响更为显著。

汽车不同部位和不同零部件的强度要求有所差异, 在实际使用中, 往往会涉及不同级别 DP 钢的焊接, 不同级别的 DP 钢在焊接过程中性能变化的差异使焊接工艺参数的制定尤为重要。为此, 本文针对不同级别 DP 钢进行了激光焊接试验, 明确了不同级别 DP 钢激光焊接接头的组织性能特征, 以期制定正确的焊接工艺以及相关焊后热处理工艺提供依据。

1 试验

焊接试验用的 DP 钢分别为 DP600 和 DP980, 由江苏某钢铁企业提供, 板厚均为 1.2 mm, 板材表层均有镀锌涂层, 厚度约为 7 μm (50 g/m²)。2 种 DP 钢的化学成分如表 1 所示, 其微观组织的 SEM 形貌如图 1 所示。2 种 DP 钢的微观组织都主要由马氏体相和铁素体相构成, 由于 DP980 碳含量比 DP600 的要高很多, 因此其马氏体含量要明显高于 DP600 的。图像分析结果表明, DP600 钢的马氏体体积分数约为

表 1 焊接母材的化学成分
Tab.1 Chemical composition of welding base metal

Specimen	C	Mn	Si	Al	Mo	Cr	Cu	S	P
DP600	0.09	1.84	0.36	0.05	0.01	0.02	0.03	0.006	0.01
DP980	0.15	1.50	0.31	0.05	0.006	0.02	0.02	0.006	0.01

25%，而 DP980 钢的马氏体体积分数近 52%。更高的马氏体体积分数是 DP980 的强度性能要明显高于 DP600 的主要原因。

采用线切割机将板材加工成 200 mm×100 mm 的焊接试样，用砂纸对接口附近上下面和对接面进行打磨，并使用乙醇进行清洗，以去除接口位置的镀层和其他氧化物与油污等。激光焊接装备采用的是松下电机的 YL-G40AA1 二极管激光发生器，配合松下 TM-1400 GIII 焊接机器人完成激光焊接，如图 2 所示。YL-G40AA1 激光发生器的光斑尺寸为 12 mm×0.9 mm，焦距为 90 mm，采用负离焦，离焦量为 1.0 mm。焊接时，采用 I 型剖口对接焊接，装配间隙为 0 mm，同种接头和异种接头的焊接参数相同，输出功率为 4 kW，焊接速度为 1 000 mm/min，并用流速为 16.5 L/min 超高纯度氩气作为保护气体。

激光焊接完成后，采用线切割机沿焊接接头中部横断面切开试样，在断面中部位置切取金相样品，经

打磨、抛光、清理后，进行化学腐蚀，腐蚀剂为 4%（体积分数）的硝酸酒精溶液，腐蚀时间为 45 s。使用 HV-1000A 显微维氏硬度计对接头样品进行硬度测试，硬度测试的载荷为 3 kg，加载时间为 15 s。拉伸试验参照 GB/T 228—2010 进行，拉伸试样长度方向为焊缝的宽度方向，标距长度为 25 mm，平行段宽度为 6 mm，厚度为 1.2 mm。拉伸试样采用线切割加工，加工完成后使用 600# 的砂纸研磨试样表面，并用乙醇清洗样品表面的油垢。试验设备为上海精密 WEW-300B 万能拉伸试验机，拉伸速率为 2 mm/min，对应变速率约为 $0.001\ 3\ s^{-1}$ 。采用 Zwick Sigma 扫描电子显微镜观察金相样品的微观结构及拉伸试样的断口形貌，并通过图像分析软件对微观组织的组成比例进行分析测定。

2 结果与分析

2.1 接头的微观组织

DP600 和 DP980 同种和异种激光焊接接头焊缝熔合区（Fusion Zone, FZ）和热影响区（Heat Affect Zone, HAZ）的 SEM 组织形貌如图 3 所示。可以看出，所有焊接接头的微观组织与母材的相同，都是由马氏体和铁素体构成，但是不同区域各个相的存在形态有明显差异。其中，FZ 的显微组织主要由细条状的马氏体以及板条状铁素体组成，这主要是由于熔合区在激光焊接过程中会形成熔池，由于激光焊接能量密度比较集中，熔池宽度较小，其后续的冷却速度非常快，最终形成片层交替存在的马氏体和铁素体组织。由于在凝固冷却过程中，高的冷却速度会促进马氏体组织的形成，因此相比于母材，焊接接头 FZ 中马氏体的体积分数明显提高。在焊接过程中，HAZ 未发生熔化，但经历了一个加热-冷却的历程，如果加热温度未超过奥氏体化温度，则相当于经历了一次高温回火，其组织主要由块状或岛状的回火马氏体和铁素体构成，并存在一定量的贝氏体或珠光体且是以铁素体为主，块状的马氏体散布在铁素体基体上。对比 HAZ 和图 1 中母材的 SEM 形貌，可以发现，在不同接头的 HAZ 中，马氏体的体积分数都有一定程度的降低，尤其是 DP980 接头（见图 3d），马氏体体积分数约为 35%，相较于母材，降低了约 1/3，说明该区域马氏体回火程度较大。此外，在 DP600-DP980 异种接头中，从 SEM 组织形貌来看，位于 DP600 侧和 DP980 侧的 HAZ 没有明显差异，其马氏体体积分数介于 2 种焊接母材的马氏体体积分数之间，但明显比 DP980 接头中的马氏体体积分数高。

2.2 接头的硬度分布

激光焊接 DP600 和 DP980 钢不同焊接接头的硬度分布如图 4 所示。不同接头的硬度分布规律基本相

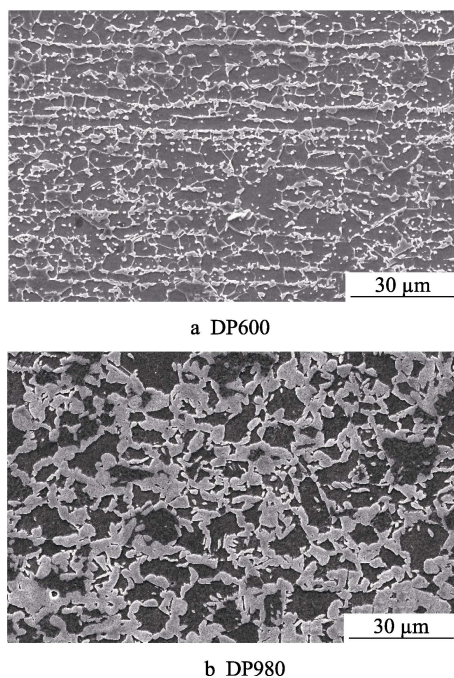


图 1 2 种焊接母材的 SEM 组织形貌
Fig.1 SEM morphology of two base metals

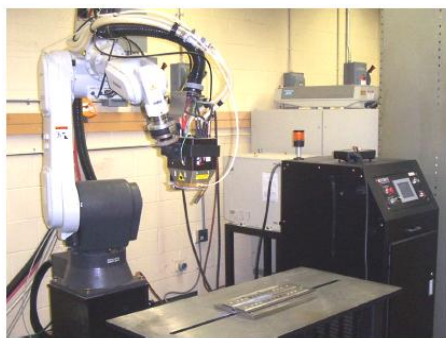


图 2 工业机器人激光焊接试验装置
Fig.2 Laser welding equipment with industrial robot

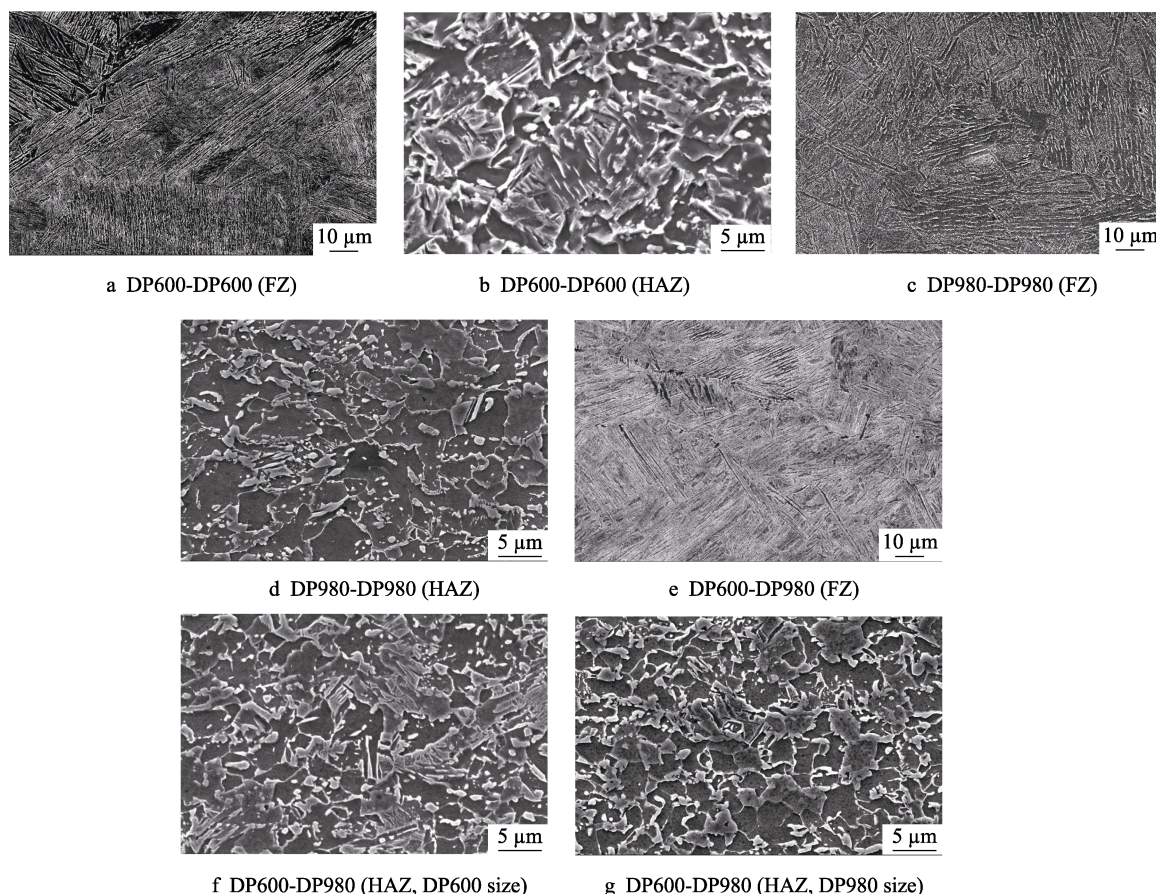


图 3 焊接接头不同区域的典型 SEM 组织形貌
Fig.3 Typical SEM morphology at different areas of welded joints

同, FZ 的硬度最高, 而在 HAZ 区域存在一个明显的硬度值低谷, 表面 HAZ 都发生了不同程度的“软化”现象, 这种硬度分布规律与图 3 中不同区域微观组织的差异基本相符。由于 FZ 中马氏体含量更高, 且马氏体呈细条状, 因此其硬度最高; 由于 HAZ 中的马氏体体积分数低于母材和 FZ 的, 且为碳含量更低的回火马氏体, 因此其硬度值最低。

除了上述共性的分布规律之外, 不同接头的硬度分布特点也存在明显差异。首先, 与母材相比, 不同接头中 FZ 硬度的提升程度有一定差异。在 DP600-DP600 接头中, FZ 的硬度值相较于母材硬度提高得更为明显, 最高超过了母材硬度的 1.5 倍; 在 DP980-DP980 接头中, 虽然 FZ 的硬度值比母材硬度高, 但是提升程度比较低。而在 DP600-DP980 的接头中, FZ 的硬度值高于 DP980 和 DP600 两种母材的硬度, 且略高于 DP980-DP980 接头中 FZ 的硬度值, 这与 DP600-DP980 的 FZ (图 3e) 中的马氏体体积分数比 DP980-DP980 的 FZ (图 3c) 中的更高的结论相符。其次, 不同接头中 HAZ 的范围以及软化程度存在较大差异。对于 DP600-DP600 接头, 其 HAZ 宽度较小, 且硬度变低的幅度也较小, 软化程度较低, 而在 DP980-DP980 接头中, HAZ 的范围更宽, 且其硬度相比于母材硬度下降的幅度更为明显, 与母材相

比, 硬度最低下降了近 50%, 软化程度非常严重。这主要是由于 DP980-DP980 接头 HAZ (图 3d) 中马氏体回火的程度更大。在其他高强度等级双相钢中也出现了相同的结论, 即高强度等级双相钢焊接接头的硬度分布明显区别于低强度等级双相钢焊接接头的硬度分布, 双相钢强度级别越高, 激光焊接接头 HAZ 中的软化程度越明显^[8,11-14]。由于采用的焊接参数相同, 这 2 种强度等级的钢的物理性能基本相当, 焊接时接头位置的温度分布应该基本一致, 因此接头热影响区范围上的差异可能与它们的回火抗性不同有关, 这也说明不同强度等级的 DP 钢在焊接参数上应有不同, 需要合理设定。

在 DP600-DP980 的异种接头中, 两侧母材性能的差异导致其硬度分布相对于焊缝中心并不对称, 两侧的 HAZ 硬度分布存在明显差异。其中靠近 DP600 侧的硬度分布比较类似于 DP600-DP600 接头 HAZ 中的硬度分布, 即软化程度较低, 软化范围较小; 而靠近 DP980 侧的硬度分布则接近于 DP980-DP980 接头 HAZ 中的硬度分布, 即软化程度更高, 软化范围更大。但是应该注意的是, 尽管 DP980 侧的软化程度更大, 但整个异种接头的最低硬度值仍然位于 DP600 侧的 HAZ 中。DP980 侧 HAZ 的硬度值比 DP980 母材的硬度值明显要低, 而与 DP600 侧 HAZ 的硬度值

更为接近,这与 DP980 侧 HAZ (图 3f) 和 DP600 侧 HAZ (图 3g) 中马氏体体积分数基本相当的结论吻合,而 DP980 侧 HAZ 的硬度仍然更高,主要得益于马氏体中的碳含量更高。

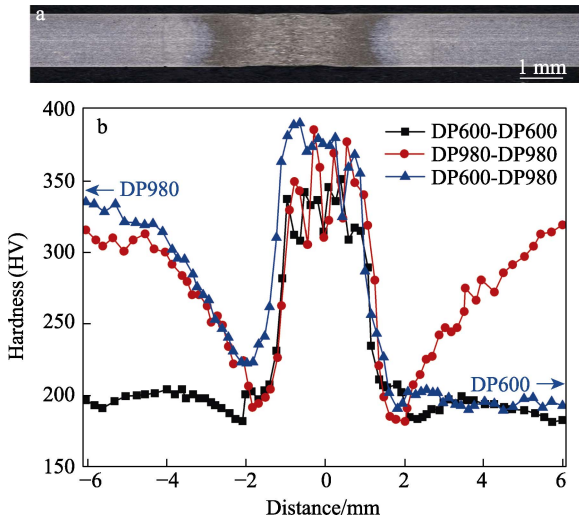


图 4 激光焊接接头的宏观形貌 (a) 以及硬度分布 (b)
Fig.4 Macro morphology (a) and hardness distribution (b) of laser welded joints

2.3 拉伸性能与断口分析

DP600 和 DP980 母材和激光焊接接头的拉伸试验结果如图 5 和表 2 所示。DP600 和 DP980 母材的应力-应变曲线都比较光滑且连续。其中 DP600 的强度更低,塑性更好,而且 DP600 表现出更为明显的屈服现象。

DP600-DP600 接头的抗拉强度与母材抗拉强度基本相当,焊接接头系数为 95.28%,与母材相比,其延伸率有所降低,而屈服强度更高。DP980-DP980 接头的抗拉强度为 714 MPa,相比于母材的 1 090 MPa,下降得更为明显,焊接接头系数仅为 65.50%,且焊接接头的延伸率也同时下降了近 50%。焊接接头性能的降低主要是由 HAZ 引起的软化造成的。仔细观察拉伸试验过程中试样的变化,发现屈服开始发生在 HAZ 中的软区,且在后续的拉伸中,大部分塑性变形都在该区累积,直至最终失效,其断口都出现在 HAZ。受热循环的影响,HAZ 中的马氏体多为回火

马氏体,且占比也在明显减小,使强度降低。接头各个区域的组织差异较大可能是造成接头塑性性能大幅度降低的原因。DP600-DP600 接头的抗拉强度仅略低于母材抗拉强度,而 DP980-DP980 接头的抗拉强度显著降低,这与 DP600-DP600 接头 HAZ 的软化程度非常小,而 DP980-DP980 接头 HAZ 的软化程度非常显著的分析结果相一致。同种 DP 钢焊接接头的屈服特征与母材的比较相似,即 DP600-DP600 接头出现了比较明显的屈服,而 DP980-DP980 接头的屈服则不明显。

对于 DP600-DP980 异种接头,其抗拉强度低于 DP980 的抗拉强度,与 DP600 的抗拉强度基本相当,延伸率则与 DP980 的延伸率基本相当,其屈服现象则接近 DP980 的,屈服强度低于 DP980 的且明显高于 DP600 的。由于钢的抗拉强度一般与其硬度值成正比,因此,虽然 DP600-DP980 接头在焊缝两侧的 HAZ 都发生了软化,但是 DP600 侧 HAZ 的软化程度非常小,而 DP980 侧 HAZ 的软化程度则非常大,这使得整个焊接接头的抗拉强度与 DP600 母材的几乎相同。

当材料屈服后,均匀变形阶段的应力-应变关系可用 Hollomon 方程表示,即 $\sigma = K \cdot \varepsilon^n$,其中 σ 和 ε 分别为应力和应变, K 为材料常数, n 为应变硬化指数。根据 Hollomon 方程计算得到的 DP980 钢母材和不同状态下焊接接头的 n 值如表 2 所示。 n 值是材料成形

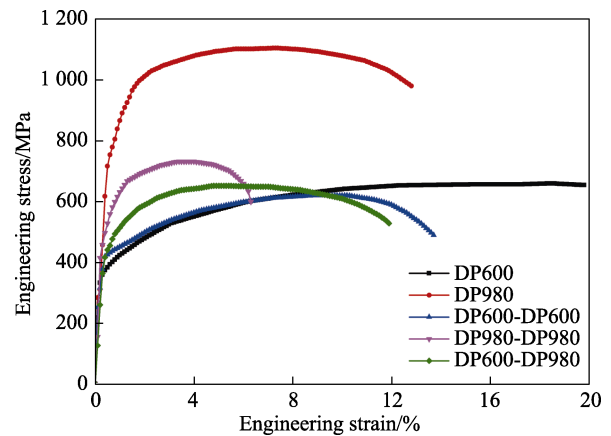


图 5 DP980 母材、无焊后热处理和有焊后热处理的焊接接头的应力-应变曲线
Fig.5 Stress-strain curves of DP980 base metal, welded joints without and with PWHT

表 2 DP980 钢母材和焊接接头的拉伸性能
Tab.2 Tensile properties of DP980 base metal and welded joints

Joints	Yield strength/MPa	Tensile strength/MPa	Elongation/%	Fracture location	Strain hardening exponent n
DP980	717	1103	12.8	—	0.165 3
DP600	362	658	19.8	—	0.209 1
DP600-DP600	418	627	13.7	HAZ	0.176 7
DP980-DP980	516	730	6.3	HAZ	0.184 5
DP980-DP600	446	651	11.9	HAZ (DP600 side)	0.185 8

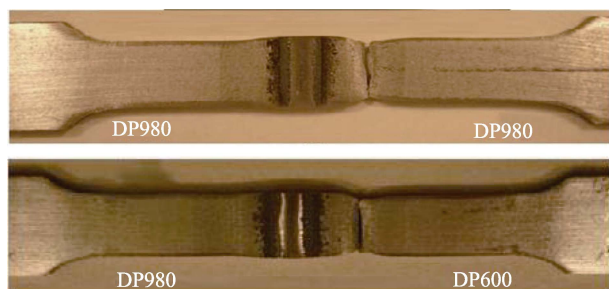


图 6 典型焊接接头拉伸试验后的形貌

Fig.6 Morphology of typical welded joints after tensile testing

性能的重要指标, n 值越大, 板材的成形极限曲线越高, 其拉胀性能越好, 对汽车用钢至关重要。从表 2 可以看出, DP600 的加工硬化指数比 DP980 的更大, 这是因为 DP600 中铁素体占比更高, 其变形能力更强, 而 DP980 中马氏体体积分数增大, 使其 n 值更低。激光焊接对 DP 钢的加工硬化指数有一定影响, 其中 DP600-DP600 的 n 值低于母材的 n 值, DP980-DP980 的 n 值高于母材的 n 值, 而 DP600-DP980 的 n 值则是介于 2 种母材 n 值之间。这说明 DP 钢的强度

等级越高, 激光焊接对其接头成形性能的影响越有利。

焊接母材以及各激光焊接接头的拉伸断口形貌如图 7 所示。所有母材及其焊接接头的断口特征基本相似, 断口存在大量等轴的杯状韧窝, 表明断裂模式以韧性破坏为主, 韧性都比较好, 在断裂前可发生较大程度的变形。其中, DP600 断口区域的韧窝尺寸更大更深, 说明其塑韧性最好, 与 DP600 相比, DP980 断口中的韧窝尺寸更小更浅, 说明其塑韧性比 DP600 的差, 这与拉伸试验的结果一致。在同种 DP 钢的激光焊接接头拉伸断口中, 相比于母材, 其韧窝数量更少、尺寸更小且深度更浅, 断口呈现出少量的解理断裂特征, 尤其是在 DP980-DP980 的接头中, 解理台阶尺寸更大且更光整, 说明脆性更强, 这与拉伸试验结果相符。对于 DP600-DP980 异种接头, 在 DP600 侧的 HAZ 软区失效, 拉伸断裂表面在中心显示出大量等轴凹坑, 表明发生的仍然主要是韧性断裂, 试样表面位置的裂纹边缘主要为等轴和细长凹坑的组合, 表明此处发生了剪切运动, 裂纹从表面开始产生再扩展至宽口其他位置。

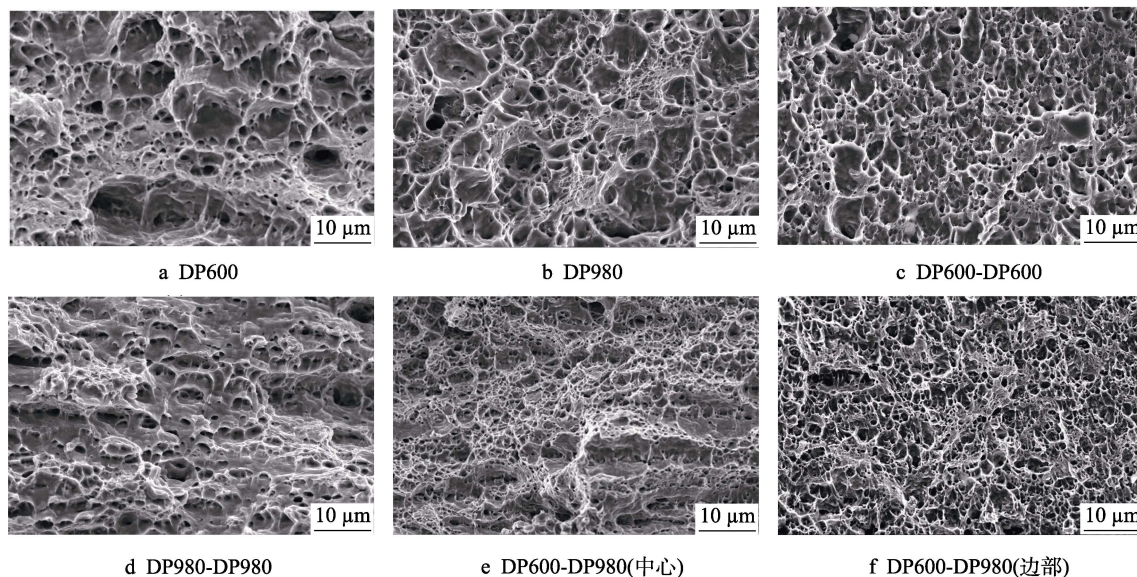


图 7 不同焊接接头的拉伸断口形貌

Fig.7 Tensile fracture morphology of different welded joints: a) DP600; b) DP980; c) DP600-DP600; d) DP980-DP980; e) DP600-DP980 (center); f) DP600-DP980 (edge)

3 结论

1) 在 DP 钢的激光焊接接头中, 熔合区由于快速冷却而形成了大量细长的马氏体与铁素体组织, 且马氏体体积分数提高, 导致硬度相较于母材硬度显著提高, 热影响区则由于马氏体的部分回火分解和粗化而导致硬度降低, 在靠近熔合区附近出现明显的软区。软区的存在使接头的强度与塑性性能相较于母材都有不同程度的降低, 而且母材 DP 钢的强度等级越高, 其热影响区软化程度越明显, 接头力学性能下降

的程度越大。

2) 激光焊接后, 不同强度等级 DP 钢接头两侧的热影响区软化程度存在差异, 使接头的硬度分布不再对称, 两侧热影响区的软化程度和宽度范围取决于这一侧的母材材质, 接头的抗拉强度与强度等级低的 DP 钢母材的抗拉强度基本一致。

参考文献:

[1] 彭云, 宋亮, 赵琳, 等. 先进钢铁材料焊接性研究进

- 展[J]. 金属学报, 2020, 56(4): 601-618.
- PENG Y, SONG L, ZHAO L, et al. Research Status of Weldability of Advanced Steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(4): 601-618.
- [2] KUZIAK R, KAWALLA R, WAENGLER S. Advanced High Strength Steels for Automotive Industry[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2008, 8(2): 103-117.
- [3] 孙耀祖, 王旭, 王运玲, 等. 汽车用双相钢的研究进展[J]. 中国材料进展, 2015, 34(6): 475-481.
- SUN Y Z, WANG X, WANG Y L, et al. Research Progress on DP Steel for Automobiles[J]. Materials China, 2015, 34(6): 475-481.
- [4] KALHOR A, TAHERI A K, MIRZADEH H, et al. Processing, Microstructure Adjustments, and Mechanical Properties of Dual Phase Steels: A Review[J]. Material Science Technology, 2021, 37: 561-591.
- [5] JAHANARA A H, MAZAHERI Y, SHEIKHI M. Correlation of Ferrite and Martensite Micromechanical Behavior with Mechanical Properties of Ultrafine Grained Dual Phase Steels[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 764: 138206.
- [6] YIN D X, QIN Y M, DAI Z, et al. Investigating Microstructural Properties of Ferrite/Bainite Dual-Phase Steel Through Simple Process Control[J]. Materials Science and Technology, 2022, 38(16): 1348-1357.
- [7] 储双杰, 毛博, 胡广魁. 汽车用先进高强度冷轧双相钢的显微组织调控和强韧化机理[J]. 金属学报, 2022, 58(4): 551-566.
- CHU S J, MAO B, HU G K. Microstructure Control and Strengthening Mechanism of High Strength Cold Rolled Dual Phase Steels for Automobile Applications[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2022, 58(4): 551-566.
- [8] 邓彩艳, 刘策, 刘秀国, 等. DP800 双相钢激光焊接接头软化区力学性能和组织分析[J]. 天津大学学报, 2021, 54(3): 311-317.
- DENG C Y, LIU C, LIU X G, et al. Mechanical Properties and Microstructure in the Softened Zone of the DP800 Steel Joint by Laser Welding[J]. Journal of Tianjin University, 2021, 54(3): 311-317.
- [9] 王凯, 李天庆, 陈阳, 等. 超级双相不锈钢 2507 焊接工艺研究现状[J]. 精密成形工程, 2022, 14(12): 160-169.
- WANG K, LI T Q, CHEN Y, et al. Research Status of Welding Process on Super Duplex Stainless Steel 2507[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(12): 160-169.
- [10] 张攀. 激光焊接工装设计及双相钢焊接工艺研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2019.
- ZHANG P. Design of Laser Welding Tool and Research on Welding Technology of Dual-Phase Steel[D]. Hengyang: University of South China, 2019.
- [11] 翟战江, 曹洋, 赵琳, 等. 热输入对 DP600 激光焊组织和力学性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2019, 31(6): 582-591.
- ZHAI Z J, CAO Y, ZHAO L, et al. Effect of Heat Input on Microstructure and Mechanical Properties of Laser Welded DP600 Steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2019, 31(6): 582-591.
- [12] 翟战江, 赵琳, 彭云, 等. DP980 钢及 DP980 钢激光焊接接头的高周疲劳性能[J]. 钢铁研究学报, 2022, 34(7): 679-686.
- ZHAI Z J, ZHAO L, PENG Y, et al. High Cycle Fatigue Behavior of DP980 Steel and DP980 Steel Laser Welded Joints[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2022, 34(7): 679-686.
- [13] 翟战江, 赵琳, 彭云, 等. DP980 钢激光焊接接头的低周疲劳性能[J]. 中国激光, 2021, 48(18): 1802003.
- ZHAI Z J, ZHAO L, PENG Y, et al. Low Cycle Fatigue Behavior of Laser Welded DP980 Steel Joints[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(18): 1802003.
- [14] 韦春华, 张立研, 王承辉. DP980 高强双相钢激光焊接接头力学性能研究[J]. 热加工工艺, 2022, 51(23): 33-36.
- WEI C H, ZHANG L Y, WANG C H. Study on Mechanical Properties of Laser Welded Joints of DP980 High Strength Dual Phase Steel[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(23): 33-36.
- [15] 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 & Technology ASME Transaction, 2007, 129: 446452.
- [16] 邵天巍, 薛俊良, 万占东, 等. QP980-DP980 异种先进高强钢激光焊接头微观组织及力学性能[J]. 焊接, 2019(7): 5-9.
- SHAO T W, XUE J L, WAN Z D, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Laser Welded Joint of Dissimilar Advanced High Strength Steels QP980-DP980[J]. Welding & Joining, 2019(7): 5-9.
- [17] XUE J L, PENG P, GUO W, et al. HAZ Characterization and Mechanical Properties of QP980-DP980 Laser Welded Joints[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34(1): 80.
- [18] XIA M S, KUNTZ M L, TIAN Z L, et al. Failure Study on Laser Welds of Dual Phase Steel in Formability Testing[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2008, 13: 378-387.