

DOI:10.19947/j.issn.1001-7208.2024.06.03

CP980 钢薄板激光焊接接头的组织和性能及熔池的数值模拟

田贻博¹ 王维坤¹ 陈杨飞¹ 汪 杨² 王 山² 岑琼瑛³ 张 梅¹

(1. 上海大学 材料科学与工程学院, 上海 200444; 2. 恺博座椅机械部件有限公司, 上海 201315;

3. 上海汇众汽车制造有限公司 CAE 中心, 上海 200122)

【摘要】 采用 IPG 激光焊接器对 1.4 mm 厚的 CP980 钢薄板进行激光焊接, 研究了两种不同热输入下激光焊接接头的显微组织和力学性能, 并采用 Simufact Welding 软件模拟焊接熔池。结果表明: CP980 钢焊接接头由焊缝、热影响区和母材组成, 焊缝区组织主要为板条马氏体, 硬度最高为 469 HV0.2, 较母材提高了约 40.4%, 热影响区由于受焊接热循环的影响组织差异较大, 软化区硬度最低为 277 HV0.2, 较母材下降了 17.1%。预测的焊接接头熔池形貌与实际接头基本吻合, 熔宽误差约为 10%。

【关键词】 激光焊接, CP980 钢, 显微组织, 数值模拟, 熔池

中图分类号: TG456.7

文章编号: 1001-7208(2026)04-0053-06

Microstructure and Properties of Laser Welded Joint of CP980 Steel Sheet and Numerical Simulation of Molten Pool

Tian Yibo¹ Wang Weikun¹ Chen Yangfei¹ Wang Yang² Wang Shan²
Cen Qiongying³ Zhang Mei¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. KEIPER Seating Mechanisms Co., Ltd., Shanghai 201315, China; 3. CAE Center,

Shanghai Huizhong Automotive Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200122, China)

【Abstract】 The 1.4-mm-thick CP980 steel sheet was laser welded by a IPG laser welding machine, the microstructure and mechanical properties of laser welded joints under two different heat inputs were researched, and the molten pool was simulated by Simufact Welding software. The results showed that welded joint of CP980 steel was composed of weld zone, heat affected zone and base metal, the microstructure of the weld zone was largely lath martensite, with the highest hardness being 469 HV0.2 which was 40.4% higher than that of base metal, the microstructure of heat affected zone was significantly different due to the influence of welding heat cycle, and the lowest hardness in the softening zone was 277 HV0.2 which was 17.1% lower than that of base metal. The predicted morphology of molten pool in the welded joint was basically consistent with the actual one, and the error of weld width was approximately 10%.

【Key Words】 laser welding, CP980 steel, microstructure, numerical simulation, molten pool

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0304402)

作者简介: 田贻博, 男, 硕士, 主要从事激光焊接数值模拟研究, E-mail: tianyibo0302@163.com

通信作者: 张梅, 女, 博士, 高级工程师, 主要从事轻量化金属材料开发和应用技术研究, E-mail: zmei@shu.edu.cn

复相钢是一种超高强度钢,由于添加了少量铌、钛、钒等元素,其晶粒细小且具有优良的弯曲、拉伸翻边和扩孔性能,可用于制造底盘悬挂件、B柱、座椅滑轨等形状复杂的工件^[1-5]。

焊接是钢制部件的主要制造工艺之一,决定了其最终力学性能。相较于传统熔化焊,激光焊具有能量高、热源集中、变形小、焊缝深宽比大等优点,并具备集成化、自动化等生产优势,无需真空环境,可在恶劣条件下实现复杂结构件的高精度焊接,因此被广泛应用于汽车制造^[6]。随着实验设备的升级及计算机技术的快速发展,新钢种的开发周期缩短、成本降低。为优化焊接工艺而采用的传统试验方法周期长、成本高,而借助 Simufact Welding 仿真软件进行数值模拟可快速

确定合适的焊接工艺,优化生产流程,已在企业得到了广泛应用^[7-8]。

本文对 CP980 钢薄板进行激光对接焊,分析了不同热输入下焊接接头的组织和力学性能,并采用 Simufact Welding 软件预测熔池形貌,为 CP980 钢的激光焊接技术应用提供参考。

1 试验材料与方法

试验材料为 1.4 mm × 150 mm × 300 mm 的 CP980 钢薄板,化学成分如表 1 所示,组织主要为铁素体、贝氏体、少量马氏体及残留奥氏体。焊接试验设备为 IPG 公司生产的 YLS-6000 型光纤激光器,热输入为 43.85 和 71.67 J/mm(分别编号为 5778 和 4336 工艺),焊接功率为 4.3 kW,焊接速度为 3.6 m/min。

表 1 试验钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of the tested steel

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr + Mo	碳当量
质量分数/%	0.12 ~ 0.20	≤1.0	1.4 ~ 2.0	≤0.05	≤0.005	≤0.8	0.51

沿垂直于焊缝方向切取金相试样,经磨、抛和腐蚀后,采用体视显微镜检验接头宏观形貌,使用金相显微镜和扫描电子显微镜检验接头显微组织;使用显微维氏硬度计测定接头硬度,试验力为 2 N,保压时间为 10 s,沿焊接接头中心 0.7 mm 厚度处测试,测点间距为 0.2 mm。

采用 Hyper Mesh 软件建立网格模型,对尺寸

为 1.4 mm × 150 mm × 300 mm 的薄板进行对接焊,其模型如图 1 所示,由待焊试板、装夹平台和支撑平台组成,为提高计算结果的准确性及运算速度,对焊缝及周围热影响区网格进行局部细化,模型共 55 796 个节点、39 680 个单元。采用高斯面热源与锥形热源相结合的复合热源模型,热源效率为 0.7,具体参数如表 2 所示。

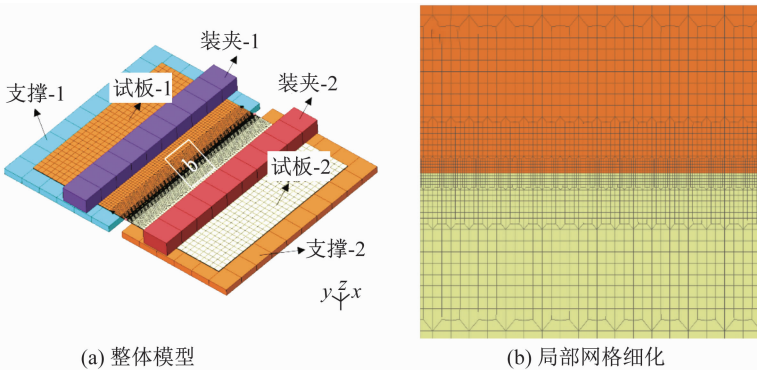


图 1 数值模拟模型

Fig. 1 Numerical simulation model

采用 JMatPro 计算与试验相结合的方法得到 CP980 钢的热物理性参数,如图 2 所示,导入

Simufact Welding 软件进行两种工艺焊接数值模拟。

表 2 数值模拟激光焊热源参数

Table 2 Heat source parameters for numerical simulation of laser welding

体热源参数	数值	面热源参数	数值
锥形热源上半径 r_u/mm	0.4	圆盘半径 r/mm	0.47
锥形热源下半径 r_l/mm	0.3	表面热源深度 h/mm	1.0
锥形热源深度 d/mm	1.4	高斯参数 M_2	2
高斯参数 M_1	1	效率	0.7
体积热流参数	0.7		

2 试验结果

2.1 显微组织

图 3 和图 4 为焊接接头不同区域的显微组

织。从图 3(a)可以看出,焊接接头大致可分为焊缝、粗晶区、细晶区、混晶区和母材^[9] 5 个区域。图4(b)为焊缝显微组织,焊缝区域热输入最大,其峰值温度高于 CP980 钢的熔点,两侧金属熔化并发生固态相变。由于激光焊冷速较大,焊缝区域温度变化剧烈,冷却时奥氏体全部转变为树枝状马氏体^[10]。激光焊加热时,峰值温度从焊缝中心向两侧逐渐降低,随后空冷至室温导致热影响区不同区域的显微组织不同^[11]。粗晶区的峰值温度高于 A_{c3} ,奥氏体晶粒较粗且呈多边形,冷却后形成无明显取向的板条马氏体,如图 4(c)所示;细晶区的峰值温度高于 A_{c3} 但未达到奥氏体化

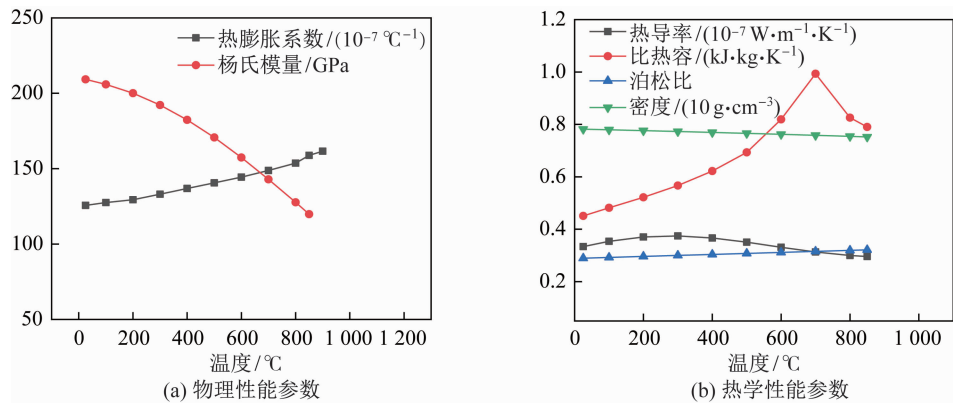


图 2 CP980 钢的热物性参数

Fig. 2 Thermo-physical performance parameters of CP980 steel

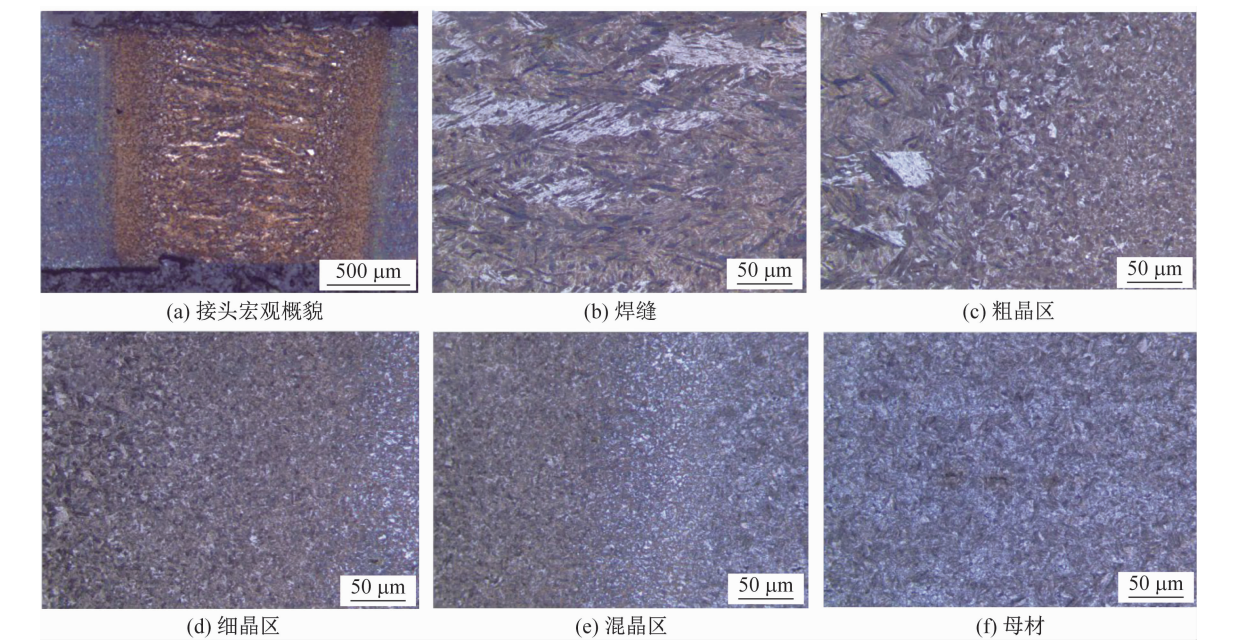


图 3 焊接接头不同区域的光学显微组织

Fig. 3 Optical microstructures of different regions in the welded joint

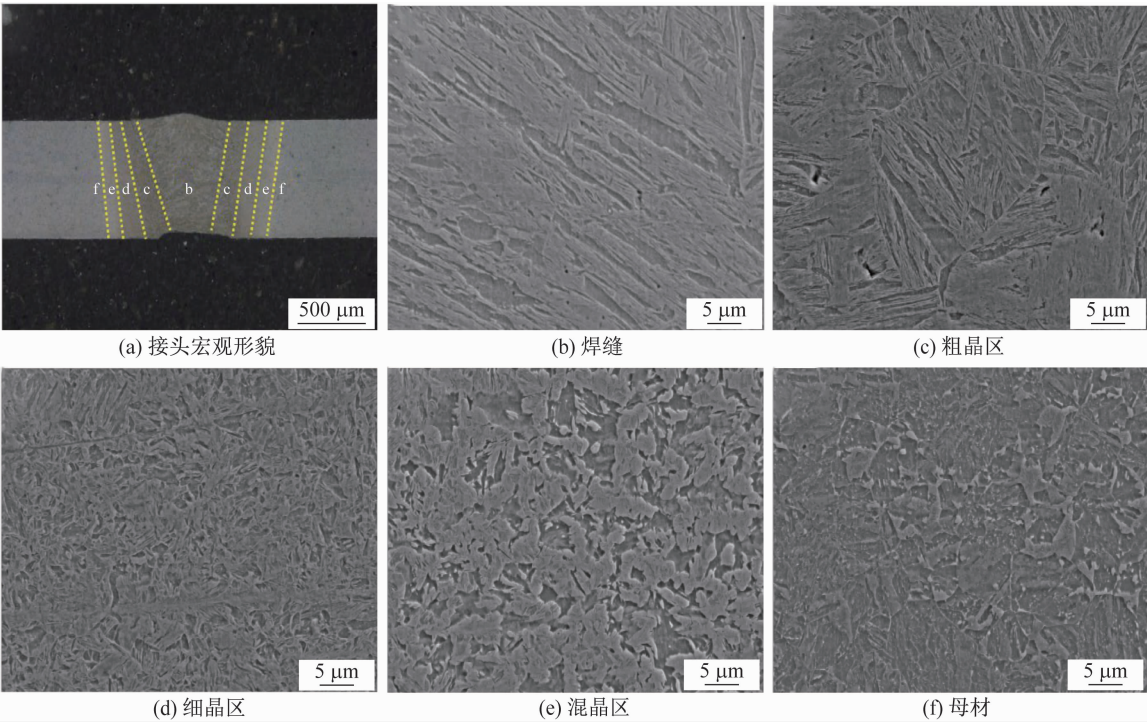


图 4 焊接接头不同区域的扫描电子显微镜图
Fig. 4 Scanning electron micrographs of different regions in the welded joint

温度,奥氏体晶粒未粗化,再结晶后得到细小的马氏体^[12],如图 4(d)所示。在热循环过程中混晶区峰值温度介于 $A_{c1} \sim A_{c3}$,贝氏体和铁素体再结晶后较细小,如图 4(e)所示。

2.2 拉伸性能和硬度

两种工艺焊接的接头显微硬度分布如图 5 所示。可见焊缝硬度为 450 HV0.2,母材硬度为 334 HV0.2,热影响区有明显的软化和硬化现象。4336 工艺焊接的接头软化区最低硬度为 277 HV0.2,硬化区最高硬度为 468 HV0.2;5778 工艺焊接的接头软化区最低硬度为 296 HV0.2,硬化区最高硬度为 469 HV0.2。形成软化区的主要原因是马氏体发生回火^[13-16]。将采用两种工艺对接焊的试板加工成标准 A50 拉伸试样,并以 3 mm/min 的应变速率室温拉伸至断裂,得到如图 6 所示的应力-应变曲线。可见试样均断裂于母材,说明焊接接头的拉伸性能良好。

2.3 数值模拟及验证

两种焊接工艺的实际熔池与模拟熔池的形貌及尺寸分别如图 7 和表 3 所示。可以看出:5778 工艺的实际熔池呈柱状,上宽下窄,熔池上熔宽、下熔宽、焊缝和热影响区宽度分别为 1.25、1.14、

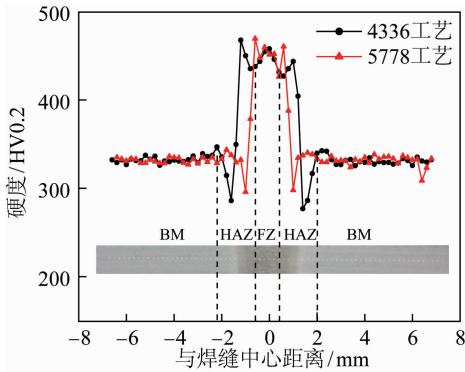


图 5 两种工艺焊接的接头显微硬度分布
Fig. 5 Microhardness distributions in the joints welded by two processes

1.94 mm,模拟熔池与实际熔池形貌基本一致,熔池上熔宽、下熔宽、焊缝和热影响区宽度分别为 1.35、1.17、2.16 mm,误差分别为 8.0%、2.6%、11.3%;相比 5778 工艺,4336 工艺的热输入更大,熔池熔宽较大,其上熔宽、下熔宽、焊缝和热影响区宽度的模拟与实测误差分别为 8.2%、10.0%、16.0%。图 8 为两种工艺的实际熔池与模拟熔池的熔宽对比,可见两者较吻合,表明 Simufact Welding 软件能较好地预测焊接接头熔

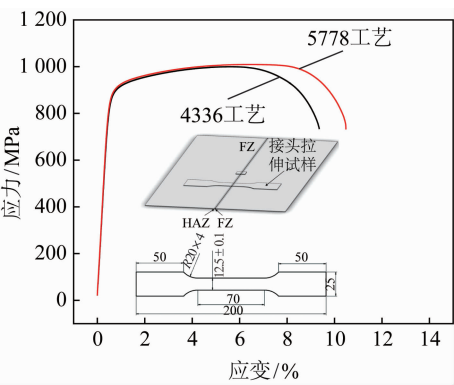


图 6 两种工艺焊接的接头应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of the joints welded by two processes

池的形貌和尺寸。

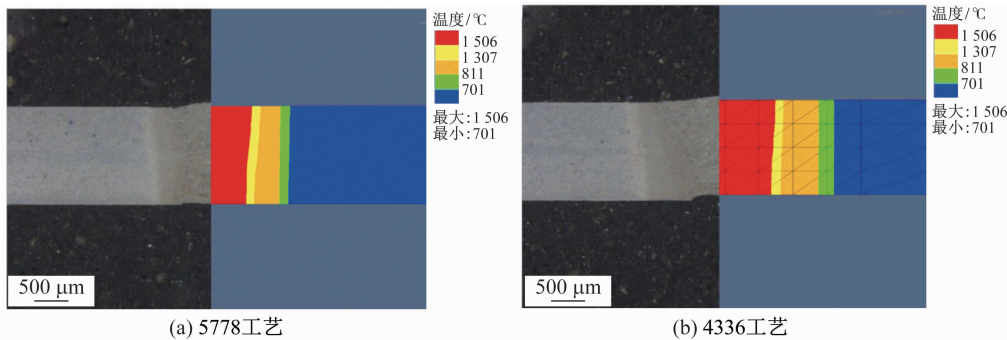


图 7 实际熔池与模拟熔池的形貌

Fig. 7 Morphologies of actual and simulated molten pools

表 3 实际熔池与模拟熔池的尺寸				
Table 3 Sizes of actual and simulated molten pools				
工艺编号	项目	上熔宽/mm	下熔宽/mm	焊缝和热影响区宽度/mm
5778	实测	1.25	1.14	1.94
	模拟	1.35	1.17	2.16
	误差/%	8.0	2.6	11.3
4336	实测	1.84	1.40	2.75
	模拟	1.69	1.54	3.19
	误差/%	8.2	10.0	16.0

3.2 硬化与软化现象及原因

高强钢激光焊接接头热影响区的软化和硬化会影响其使用性能。在激光焊接热循环过程中,CP980 钢焊接接头经历了快速加热和冷却,焊缝、粗晶区及细晶区均生成了高硬度的板条马氏体,高位错密度的微合金碳化物和熔融区细马氏体板条^[17],热影响区硬化和细晶区晶粒细化均显著提高了接头硬度^[18]。

3 分析与讨论

3.1 热输入对接头组织和性能的影响

由图 7 可知,两种工艺焊接的接头显微组织相似,但熔池形貌明显不同;5778 工艺的热输入小于 4336 工艺,其焊缝和热影响区宽度(1.94 mm)明显小于 4336 工艺(3.19 mm),软化区的范围和程度也小于 4336 工艺。两种工艺接头的应力-应变曲线连续光滑,无明显的屈服平台。4336 工艺接头的断后伸长率为 9.3%,抗拉强度为 999 MPa,5778 工艺接头的断后伸长率为 10.4%,抗拉强度为 1 008 MPa,拉伸性能没有明显差异。虽然两种工艺接头的热影响区均发生了软化,但由于热影响区较窄,软化程度较轻,接头强度未明显降低^[12]。

高强钢激光焊接接头热影响区的软化可能有两方面原因。牛靖等^[19]认为,混晶区出现大量粗大的粒状贝氏体和准多边形铁素体是软化的主要原因。邓彩艳等^[20]认为,亚临界热影响区因温度低于 A_{c1} ,部分板条马氏体分解为回火马氏体导致接头软化。而复相钢激光焊接接头软化则普遍归因于马氏体回火。在回火过程中,马氏体中过饱和碳会以碳化物形式析出,使铁素体中固溶碳含量降低,从而减弱了碳的固溶强化作用,导致硬度下降^[21]。

4 结论

(1)CP980 钢激光焊接接头由焊缝、热影响区、母材组成,焊缝组织为树枝状板条马氏体,粗晶热影响区组织为无明显取向的板条马氏体,细晶区为细晶马氏体,混晶区为贝氏体、细晶铁素体和铁素体。

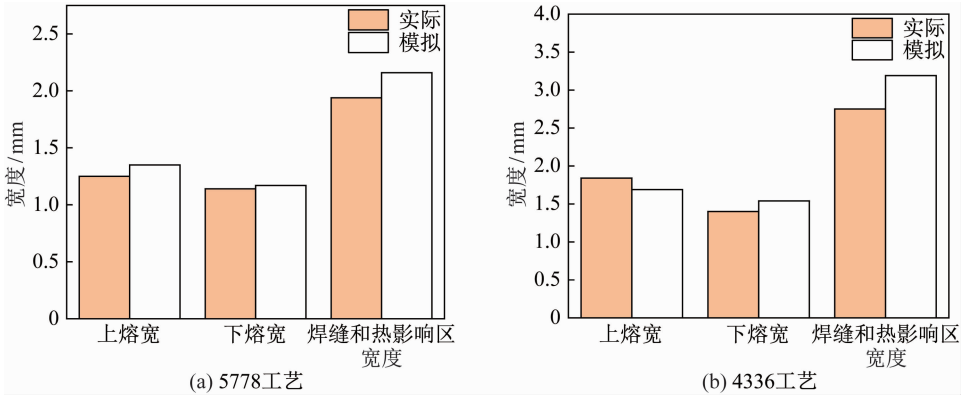


图 8 实际熔池与模拟熔池熔宽的对比

Fig. 8 Comparison of weld widths of actual and simulated molten pools

(2)CP980 钢焊缝硬度为 450 HV0.2,母材为 334 HV0.2,热影响区发生明显的软化和硬化,软化区最低硬度为 277 HV0.2,硬化区最高硬度为 469 HV0.2。接头拉伸性能良好,均断裂于母材。

(3)5778 和 4336 两种工艺的模拟熔池与实际熔池形貌基本一致,熔宽误差约为 10%,采用 Simufact Welding 能较好地预测焊接接头的熔池形貌。

参考文献

[1] Heshmati N, Sieurin H, Larsson J, et al. Correlation between microstructure and fatigue properties of hot-rolled thick-plate complex-phase steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2023, 885: 145624.

[2] 王鹏博, 张永强, 付参, 等. CP780 镀锌复相钢板电阻点焊焊接特性[J]. 机械工程材料, 2021, 45(5): 63-66,83.

[3] 张瀚龙, 张玉龙, 金鑫焱. 吉帕级复相钢中贝氏体微观形态的精细调控及其对复相钢力学性能的影响[J]. 宝钢技术, 2022(5): 1-6.

[4] Das H, Mondal M, Hong S T, et al. Comparison of microstructural and mechanical properties of friction stir spot welded ultra-high strength dual phase and complex phase steels [J]. Materials Characterization, 2018, 139: 428-436.

[5] 张梅, 陈杨飞, 许清, 等. 980 MPa 级先进高强钢的发展[J]. 上海金属, 2024, 46(2): 1-9.

[6] 王瑜, 舒乐时, 耿韶宁, 等. 汽车车身激光焊接技术的现状与发展趋势[J]. 中国激光, 2022, 49(12): 184-201.

[7] 田帅, 冯巧波, 王春亮, 等. CP980 钢电阻点焊数值模拟及接头力学性能分析[J]. 上海金属, 2024, 46(3): 1-9.

[8] Song Y, Wang Y, Zhang M. Experimental and numerical simulation on laser welding of high manganese TWIP980 steel [J]. Procedia Manufacturing, 2019, 37: 385-393.

[9] 杨蕾, 王晓南, 环鹏程, 等. 热输入对 CP800 复相钢激光焊接接头组织性能的影响[J]. 应用激光, 2018, 38(4): 562-

569.

[10] 朱晓欧, 刘占起, 尹桂丽, 等. CP780 复相高强钢激光焊接接头组织与性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2022, 45(5): 120-124.

[11] 尹燕, 康平, 路超, 等. 激光焊接异种钢组织及显微硬度分析[J]. 焊接学报, 2020, 41(7): 71-77,100-101.

[12] Xue J, Guo W, Zhang Y, et al. Local microstructure and mechanical characteristics of HAZ and tensile behavior of laser welded QP980 joints [J]. Materials Science and Engineering A, 2022, 854: 143862.

[13] 常建刚. 汽车用 CP 钢和 TRIP 钢激光焊接接头组织与性能研究[D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学, 2022.

[14] Pramanick A K, Das H, Lee J W, et al. Texture analysis and joint performance of laser-welded similar and dissimilar dual-phase and complex-phase ultra-high-strength steels [J]. Materials Characterization, 2021, 174: 111035.

[15] 刘曼, 周明星, 陈振业, 等. 中碳高硅 Q & P 钢马氏体相变动力学[J]. 钢铁, 2025, 60(3): 117-124.

[16] 齐祥羽, 严玲, 杜林秀. 煤矿液压支架用高强钢的焊接性能[J]. 钢铁, 2024, 59(1): 132-138.

[17] Das H, Mondal M, Hong S T, et al. Comparison of microstructural and mechanical properties of friction stir spot welded ultra-high strength dual phase and complex phase steels [J]. Materials Characterization, 2018, 139: 428-436.

[18] 曾凡. 吉帕级高强钢激光焊接接头组织及性能研究[J]. 金属加工(热加工), 2023(10): 31-35.

[19] 牛靖, 陈宏远, 刘甲, 等. X70 大变形钢焊接接头热影响区软化及其影响研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45(21): 176-179.

[20] 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(自然科学与工程技术版), 2021, 54(3): 311-317.

[21] 王金凤. DP1000 双相钢激光焊接 HAZ 软化及接头性能研究[D]. 天津:天津大学, 2017.