汽车高强钢 SG1000 激光复合焊接力学性能研究

倪晋尚

(常州工程职业技术学院 智能制造学院, 江苏 常州 213164)

摘要:目的 针对汽车高强钢 SG1000 焊接接头恶化等问题,研究了 SG1000 激光复合焊接的力学性能。 方法 选用等强匹配焊丝 MG90-G 对高强钢 SG1000 进行激光复合焊接,对焊接接头进行拉伸和低温冲击韧 性试验,并结合扫描和硬度监测等手段对焊缝组织和断口形貌进行分析。结果 由于激光的预热作用,高强 钢 SG1000 激光复合焊接成形件的焊缝美观,焊接过程稳定可靠,焊接熔池深度较大,有效改善了传统焊接 的咬边、飞溅、气孔等缺陷。焊缝组织主要由板条马氏体和奥氏体晶粒组成,热影响区的过热区内部板条 马氏体和奥氏体晶粒比较粗大,而焊接母材主要为细小的板条马氏体和奥氏体晶粒。焊接拉伸断口主要为 细小且较浅的韧窝,且韧窝底部存在第二相粒子及夹杂物,焊接拉伸断口断裂于热影响区且微观形貌为韧 性断裂;冲击微观形貌主要由准解理小平面及河流花样组成,且存在一定数量大小不一的韧窝交错分布, 焊接冲击断口断裂于热影响区自微观形貌也为韧性断裂。结论 焊缝热影响区的晶粒比非热影响区的晶粒和 大,拉伸和冲击断裂均发生于热影响区;随着激光功率的增大,复合焊接接头的力学性能呈现逐渐增强的 趋势;随着焊接速度的增大,复合焊接接头的力学性能呈现先增强后前弱的趋势。高强钢 SG1000 激光复合 焊接最佳工艺参数如下:激光功率为 9.5 kW,焊接速度为 0.8 m/min,对应屈服强度为 1 072 MPa,抗拉强 度为 1 175 MPa,断裂伸长率为 13.5%,冲击断裂吸收的能量为 30.8 J、焊缝中心显微硬度为 342 HV。 关键词:汽车高强钢 SG1000;激光复合焊接;焊接熔池;焊缝组织;力学性能 DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2023.10.021

中图分类号: TG146.2 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2023)10-0177-10

Laser Composite Welding Mechanical Properties for Automobile High-strength Steel SG1000

NI Jin-shang

(School of Intelligent Manufacturing, Changzhou Vocational Institute of Engineering, Jiangsu Changzhou 213164, China)

ABSTRACT: The work aims to address issues such as deterioration of welded joints for automobiles high-strength steel SG1000, and research the mechanical properties of SG1000 laser composite welding. Equal strength matching welding wire MG90-G was used to perform laser composite welding on high-strength steel SG1000. The welded joint was subject to tensile and low-temperature impact toughness tests. The microstructure and fracture surface of the weld were analyzed with scanning and hardness monitoring equipment. As a result, due to the preheating effect of the laser, the weld seam of the high-strength steel SG1000 laser composite welding forming part had good appearance, the welding process was stable and reliable, and the depth of the welding pool was deep, effectively mitigating defects such as undercut, spatter, and porosity in traditional welding. The

NI Jin-shang. Laser Composite Welding Mechanical Properties for Automobile High-strength Steel SG1000[J]. Journal of Net-shape Forming Engineering, 2023, 15(10): 177-186.

收稿日期: 2023-03-29

Received: 2023-03-29

基金项目:常州市社科联社科课题(11130100122114)

Fund: Project of the Changzhou Federation of Social Sciences(11130100122114)

引文格式: 倪晋尚. 汽车高强钢 SG1000 激光复合焊接力学性能研究[J]. 精密成形工程, 2023, 15(10): 177-186.

weld microstructure was mainly composed of flat noodles martensite and austenite grains. The flat noodles martensite and austenite grains in the overheated zone of the heat affected zone were relatively coarse, while the welding base metal was mainly fine flat noodles martensite and austenite grains, the tensile fracture of welding was mainly composed of small and shallow dimples, and there were anomalies such as second phase and inclusions at the bottom of the dimples, welding tensile fracture at the heat affected zone and had a microscopic morphology of ductile fracture. The impact microstructure was mainly composed of quasi cleavage small planes and river patterns, and there were a certain number of staggered distribution dimples for varying sizes, welding impact fracture at the heat affected zone and the microstructure was also ductile fracture. In conclusion, the grain size in the heat affected zone of weld is larger than that in the non heat-affected zone, and the tensile and impact fracture occurs in the heat affected zone. With the increase of laser power, the mechanical properties of composite welded joints show a gradually increasing and then decreasing. The optimal process parameters for laser composite welded joints show a trend of first increasing and then decreasing. The optimal process parameters for laser composite welding of high-strength steel SG1000 are laser power of 9.5 kW, welding speed of 0.8 m/min, corresponding yield strength of 1 072 MPa, tensile strength of 1 175 MPa, fracture elongation rate of 13.5%, energy absorbed of 30.8 J, and microhardness of the weld center of 342HV. **KEY WORDS:** automobile high-strength steel SG1000; laser composite welding; welding pool; weld microstructure; mechanical properties

高强钢板作为汽车、工程机械等领域的重要原材 料,其质量及综合力学性能的好坏直接影响了相关产 品的使用寿命。为了提升高强钢板的焊接质量、焊接 效率并控制焊接变形量,一种新型高效、高质激光复 合焊接技术应运而生。国内外学者对高强钢板的焊接 及激光复合焊接特性进行了较为深入的研究。罗应明 等^[1]以水电站用 800 MPa 级高强钢板 SX780CF 为研 究对象,开发了低焊接裂纹敏感性特殊钢。贾朋刚等^[2] 以某型抽蓄机组高强钢板为研究对象,对其焊接接头 的断裂韧性进行了研究。赵鹏等^[3]运用试验的方法对 某水电站压力管道高强钢开孔封焊及其风险进行了 分析。董现春等^[4]对 Q690CFD 高强钢板及 NM450 耐 磨钢板在 150 t 自卸矿车上的轻量化应用进行了研 究。赵国昌等^[5]研究了 500 MPa 级 S500QL 调质高强 钢板的在线直接淬火(DQ)工艺及该工艺在实际生 产中的应用。王丽敏等^[6]对调质高强度 Q890D 钢板 制备工艺及其焊接特性进行了研究。郭明星等^[7]对乌 东德 800 MPa 级高强钢蜗壳焊接的关键技术进行了 研究。祝小龙等^[8]运用试验的方法对 27SiMn 高强钢 板拉伸应力-应变全曲线和破坏形态进行了研究。王 宽贵等^[9]以白鹤滩水电站 800 MPa 高强钢为研究对 象,对其焊接性能进行了分析。程惠等[10]研究了多次 返修对白鹤滩水电站 800 MPa 高强钢板焊接接头组 织及性能的影响。宋新华等[11-12]运用数值模拟与试验 的方法对复合阻尼钢板激光深熔焊接特性进行了研 究。姚远等^[13]对后桥钢板激光-MIG 复合焊接进行了 优化分析。江国梁等[14]对薄板拼板激光复合焊接工艺 进行了研究。赵艳秋等[15]研究了激光功率对 2195 铝 锂合金光纤-半导体激光复合焊接形貌与气孔的影 响。史亚贝等[16]对蓝光半导体与光纤激光复合焊接紫 铜工艺进行了研究。曹忠民等^[17]研究了 Nd: YAG 激 光与半导体激光复合焊接对铝合金焊缝组织和性能

的影响。赵孔标等^[18]对激光-MAG 复合焊接工艺及焊 接接头性能进行了分析。刘昊等[19]对电子铜箔和液晶 聚合物的激光复合焊接进行了研究。马彦龙等^[20]对 1000 MPa 级超高强钢激光复合焊接头力学性能进行 了研究。王志鹏^[21]对 Q355C 激光-MAG 复合焊接工 艺及接头性能进行了研究。张瑜^[22]对船用高强度钢 Q355的激光复合焊接工艺进行了探究与优化。王琳^[23] 对大功率激光复合焊接匙孔形态及其对焊缝成形的 影响进行了研究。周愿愿等[24]对壳体激光复合焊接设 备进行了设计与仿真分析。吴虎^[25]对中厚板 Q345B 钢的激光复合焊接头微观组织与力学性能进行了研 究。温鹏等^[26]对摆动光纤激光-CMT 复合焊接 6A01-T5 铝合金型材接头的气孔特征及组织性能进行了研 究。李斌等^[27]对 BS960E 高强钢激光-电弧复合高速 焊接接头的组织及性能进行了研究。众多学者对高强 钢焊接性能及激光复合焊接进行了研究,但是对高强 钢板激光复合焊接的研究比较少。基于此,本文以汽 车高强钢 SG1000 为研究对象,对其激光复合焊接特 性进行了研究,以期为提升汽车高强钢产品焊接质量 和焊接效率及减小焊接变形等方面提供理论依据及 技术支持。

1 试验

焊接设备由额定功率为10000W的光纤激光器、 福尼斯焊机、法兰克机器人及采集和控制系统等组 成,激光复合焊接试验设备如图1所示。激光复合焊 接预先采用激光引导的方式,且以二氧化碳为激光头 保护气;焊接电弧保护气体为体积分数80%的氩气+ 体积分数20%的二氧化碳,激光复合焊接及焊缝激光 识别原理如图2所示。

由图1和图2可知,与激光焊接相比,激光复合





b 焊缝激光识别

图 2 激光复合焊接及焊缝激光识别原理

Fig.2 Principle of laser composite welding and weld laser identification: a) laser composite welding; b) weld laser identification

焊接具有独特的优势,由于复合焊接系统增加了电弧热 源,激光束对电弧有一定的引导和吸引作用,所以在焊 接工艺参数相同的情况下可以获得更深的焊缝熔池。 试验材料为 6 mm 厚的高强钢 SG1000,试样尺 MG90-G

寸为 200 mm×30 mm×6 mm,采用对接接头,对接间 隙为 1 mm。焊接填充材料为直径 1.2 mm 的实芯 MG90-G,焊接母材 SG1000 钢及焊丝填充材料的化 学成分如表 1 所示,对应的力学性能如表 2 所示。结 合表 1、表 2 与激光复合焊接试验原理,设计激光复 合焊接工艺参数,如表 3 所示。

利用表 3 中的激光复合焊接工艺参数进行高强 钢 SG1000 激光复合焊接试验。焊接前先对板材进行 打磨处理再用酒精清洗。按照 GB/T 2651—2008《焊接接 接接头拉伸试验方法》和 GB/T 2650—2008《焊接接

1 075

头冲击试验方法》对焊接完成后的试样进行加工拉伸和冲击试验,所有试验样均为6mm钢板,相关试样如图3所示。每种试样测试5组数据,去掉最大值和最小值后,取3组数据的平均值作为最终试验结果。 拉伸试验在DNS-300型电子万能拉伸机上进行,冲击试验在JBN-300型冲击试验机上进行。采用AXio Scope A1光学显微镜和 EVO18型扫描电子显微镜及 WILSON VH11.2 维氏硬度计对试样微观组织、冲击断口及维氏硬度进行扫描和测量,试样微观组织、冲击断口及维氏硬度试验设备如图4所示。

67

表一									
Tab.1 Chemical compositions of base metal SG1000 steel and welding wire filler material wt.%									wt.%
Туре	С	Мо	Si	Mn	Р	S	Cr	Cu	Other
SG1000	0.18	0.38	0.27	1.46	0.013	0.002	0.305	0.001	Bal.
MG90-G	0.07	0.63	0.40	1.75	0.006	0.006	0.65	0.00	Bal.

12

表 2 母材 SG1000 钢及焊丝填充材料的力学性能 Tab 2 Mechanical properties of base metal SC1000 steel and welding wire filler material								
Type Yield strength/MPa Tensile strength/MPa Elongation/% Energy absorbed by impact fracture at $-40 ^{\circ}\text{C/J}$								
SG1000	≥960	980-1 200	≥12	≥13				

表	3	激光复合焊接工艺参数
Tab.3 Process	par	ameters of laser composite welding

1 1 2 5

Туре	Welding speed/ $(m \cdot min^{-1})$	Wire feeding speed/ $(m \cdot min^{-1})$	Laser power/kW	Welding current/A	Welding voltage/V	Correction of welding gun arc length/%	Welding gun airflow/ $(L \cdot min^{-1})$
Backing welding	0.6-0.9	4.0	5-10	250	20	0-1	15-20
Filling capping welding	0.6-0.9	10	5-10	300	30	2-3	15-20



图 3 激光复合焊接拉伸、冲击试验试样

Fig.3 Laser composite welding tensile and impact test specimens: a) tensile test specimens; b) impact test specimens



a Axio Scope A1 光学显微镜

b EVO18 型扫描电子显微镜

c WILSON VH11.2 维氏硬度计

图 4 试样微观组织、冲击断口及维氏硬度试验设备

Fig.4 Specimen microstructure, impact fracture, and Vickers hardness testing equipment: a) Axio Scope A1 optical microscope; b) EVO18 scanning electron microscope; c) WILSON VH11.2 Vickers hardness tester

2 结果与分析

在不同焊接工艺条件下,采用激光复合焊接实现 焊接对接接头的双面成形,当激光功率不同、焊接速 度为 0.8 m/min 时,高强钢 SG1000 激光复合焊接宏 观形貌如图 5 所示。



a 8 kW





图 5 激光功率不同、焊接速度为 0.8 m/min 时的 高强钢 SG1000 激光复合焊接宏观形貌 Fig.5 Macro morphology of laser composite welding of high-strength steel SG1000 at different laser power when the welding speed is 0.8 m/min:

由图 5 可知,当激光功率为 9.5 kW、焊接速度 为 0.8 m/min 时,高强钢 SG1000 激光复合焊接成形 件的焊缝美观且其可靠性优于激光功率为 8 kW、焊 接速度为 0.8 m/min 时焊缝的。高强钢 SG1000 激光 复合焊接成形件的焊缝美观,焊接过程稳定可靠,主 要原因为在激光复合焊接过程中,激光的预热作用导 致焊接的能量损失大大减少,更多的热量作用在焊接 母材上,熔敷金属流动到焊缝两边及底部,导致熔池 深度增大,从而有效改善了传统焊接的咬边、飞溅、 气孔等缺陷。试验得到的激光功率为 9.5 kW、焊接 速度为 0.8 m/min 的高强钢 SG1000 激光复合焊接对 接接口及接口形貌如图 6 所示。

由图 6 可知,高强钢 SG1000 激光复合焊接成形件对接接口的焊缝美观,焊接熔池较深且无气孔和咬边等不良现象。焊缝正面双端为焊接电弧作用区即图 6 中横线上部区域,中间椭圆形区域的深熔池为激光作用区,焊缝与母材接触区域即矩形区域为焊接热影响区。试验得到的激光功率为 9.5 kW、焊接速度为 0.8 m/min 的高强钢 SG1000 激光复合焊缝探伤结果 如图 7 所示。由图 7 可知,高强钢 SG1000 激光复合焊缝基本不存在可见气孔,气孔产生率极低,焊接匙 孔稳定性好,无塌陷等缺陷。

为了研究不同激光功率对高强钢 SG1000 激光复 合焊接焊缝熔池的影响,通过试验得到不同激光功率 下高强钢 SG1000 激光复合焊接焊缝熔池形貌,如图 8 所示。可知,在激光复合焊接其他工艺参数不变的 情况下,激光功率越大,焊缝越均匀,焊缝余高过渡 段越圆滑,焊缝熔池深度和宽度越大且焊缝缺陷也越 少。这主要是因为随着激光功率的增大,激光密度和 能量增大,焊接的稳定性和成形性逐渐上升。

为了研究焊接速度对高强钢 SG1000 激光复合焊 接焊缝熔池的影响,通过试验得到不同焊接速度下高 强钢 SG1000 激光复合焊接焊缝熔池形貌,如图 9 所 示。可知,在激光复合焊接其他工艺参数不变的情况 下,随着焊接速度的增大,焊缝缺陷等呈现先增加后 减少的趋势,这主要是因为在焊接速度较低时,激光 和焊接电弧对一定长度的焊缝熔池作用的时间较长, 焊接能量较大,导致焊接过程不稳定,焊接不美观, 且存在气孔等不良缺陷;当焊接速度较高时,焊缝熔 池深度明显减小。

试验得到的激光功率为 9.5 kW、焊接速度为

 Arc action zone

 7
 28

 29
 30

 31
 32

 33
 34

 35
 122mm

 122mm
 122mm

 122mm
 500 μm









图 7 激光功率为 9.5 kW、焊接速度为 0.8 m/min 的高强钢 SG1000 激光复合焊缝探伤结果 Fig.7 Flaw detection results of weld seams of high-strength steel SG1000 laser composite welding when the laser power is 9.5 kW and the welding speed is 0.8 m/min



a 5.0 kW



Fig.8 Welding pool morphology of weld seams of high-strength steel SG1000 laser composite welding under different laser power



a 0.6 m/min b 0.7 m/min c 0.8 m/min d 0.9 m/min 图 9 不同焊接速度下高强钢 SG1000 激光复合焊接焊缝熔池形貌 Fig.9 Welding pool morphology of weld seams of high-strength steel SG1000 laser composite welding under different welding speeds

0.8 m/min 的高强钢 SG1000 激光复合焊接焊缝与热 影响边界组织形貌如图 10 所示,其中 HAZ 为激光作 用区,WZ为电弧作用区。可知,高强钢 SG1000 激 光复合焊接的热影响区与焊缝区的组织存在明显区 别且界限清晰,电弧作用区的热影响区比激光作用区 的宽,电弧作用区的晶粒比激光作用区的粗大。

试验得到的激光功率为 9.5 kW、焊接速度为 0.8 m/min 的高强钢 SG1000 激光复合焊接内部形貌 如图 11 所示。可知, 高强钢 SG1000 激光复合焊接 焊缝组织主要由板条马氏体和奥氏体晶粒组成,热影 响区中过热区内部的板条马氏体和奥氏体晶粒都比 较粗大,热影响区中正火区和不完全正火区内部的板 条马氏体比较粗大而奥氏体晶粒比较细小,而焊接母 材主要为细小的板条马氏体和奥氏体晶粒。

试验得到的不同激光功率、焊接速度为 0.8 m/min 的高强钢 SG1000 激光复合焊接拉伸、冲击断口 SEM 形貌如图 12 所示。可知,高强钢 SG1000 激光复合 焊接拉伸断口主要为细小且较浅的韧窝,目韧窝底部 存在第二相粒子及夹杂物,焊接拉伸断口断裂于热影 响区且其微观形貌为韧性断裂,激光功率为 9.5 kW 时的韧窝比8kW时的韧窝细小;冲击微观形貌主要 由准解理小平面及河流花样组成,且存在一定数量大 小不一的韧窝交错分布,焊接冲击断口断裂于热影响 区且微观形貌也为韧性断裂,激光功率为9.5 kW时 的韧窝也比8kW时的韧窝细小。

为了研究激光功率、焊接速度对屈服强度、抗拉 强度、断裂伸长率、冲击断裂韧性、焊缝中心显微硬 度等特性的影响,通过试验得到不同激光功率、焊接



图 10 高强钢 SG1000 激光复合焊接热影响边界组织形貌 Fig.10 Microstructure and morphology of heat affected zone boundary in high-strength steel SG1000 laser composite welding: a) weld seam zone; b) heat affected zone



图 11 激光功率为 9.5 kW、焊接速度为 0.8 m/min 的高强钢 SG1000 激光复合焊接内部形貌 Fig.11 Internal morphology of high-strength steel SG1000 laser composite welding when the laser power is 9.5 kW and the welding speed is 0.8 m/min: a) microstructure of weld seam; b) morphology of over heated zone; c) welded joint; d) normalized zone microstructure of heat affected zone; e) incomplete normalized zone microstructure of heat affected zone; f) base metal microstructure





c 冲击试验(8kW)

d 冲击试验 (9.5 kW)



速度下,复合焊接接头的力学性能,如表4所示。可 知,在焊接其他参数不变的情况下,随着激光功率的 增大,复合焊接接头的力学性能呈现逐渐增强的趋势;随着焊接速度的增大,复合焊接接头的力学性能 呈现先增强后削弱的趋势。综上可得,高强钢 SG1000 激光复合焊接的最佳工艺参数如下:激光功率为 9.5 kW,焊接速度为 0.8 m/min,对应屈服强度为 1 072 MPa,抗拉强度为 1 175 MPa,断裂伸长率为 13.5%,在-40 ℃下冲击断裂吸收的能量为 30.8 J,焊 缝中心显微硬度为 342HV。

Tab.4 Mechanical properties of composite welded joints under different laser power and welding speeds								
Laser power/kW	Welding speed/ $(m \cdot min^{-1})$	Yield strength/MPa	Tensile strength/MPa	Elongation/%	Energy absorbed by impact fracture at $-40 \ C/J$	Microhardness at the cen- ter of the weld seam(HV)		
5	0.8	1 034	1120	12.1	26.0	295		
6.5	0.8	1 048	1 136	12.4	27.3	308		
8	0.8	1 056	1 150	12.8	28.5	320		
9.5	0.8	1 072	1 175	13.5	30.8	342		
8	0.6	1 041	1 135	12.2	26.8	305		
8	0.7	1 048	1 142	12.5	27.6	312		
8	0.8	1 056	1 1 5 0	12.8	28.5	320		
8	0.9	1 050	1 143	12.6	28.0	315		

表 4 不同激光功率、焊接速度激光下,复合焊接接头的力学性能

3 结论

高强钢 SG1000 激光焊接接头拉伸、冲击试验均 断于热影响区, 表明母材的延伸率较好。激光热源对 焊接母材有预热作用,会导致焊接的能量损失大大减 少,熔池深度增大,从而有效改善了传统焊接的咬边、 飞溅、气孔等缺陷。高强钢 SG1000 激光复合焊接的 热影响区与焊缝区的组织存在明显区别且界限清晰, 电弧作用区的热影响区比激光作用区的宽,电弧作用 区的晶粒比激光作用区的晶粒粗大。焊缝组织主要由 板条马氏体和奥氏体晶粒组成,热影响区的过热区内 部板条马氏体和奥氏体晶粒比较粗大,而焊接母材主 要为细小的板条马氏体和奥氏体晶粒。随着激光功率 的增大,复合焊接接头的力学性能呈现逐渐增强的趋 势;随着焊接速度的增大,复合焊接接头的力学性能 呈现先增强后削弱的趋势。综上研究表明, 在对接焊 接接头下,激光复合焊接件的成形性性良好,无咬边、 飞溅、气孔等缺陷,激光复合焊接大大提高了生产效 率并降低了生产成本。但是高强钢 SG1000 激光焊接 成形件的低温冲击性能依然比较薄弱,有待进一步研 究。未来获得综合力学性能更加优异的高强钢激光复 合焊接件,需要开发相匹配的焊丝,同时结合激光复 合焊接热源对焊接工艺参数进行优化,激光复合焊接 新技术在各行各业中的应用必将有良好的发展前景。

参考文献:

- 罗应明, 王九清, 庞辉勇, 等. 水电站用 800 MPa 级 低焊接裂纹敏感性高强钢板 SX780CF 的开发[J]. 特 殊钢, 2022, 43(3): 21-24.
 LUO Ying-ming, WANG Jiu-qing, PANG Hui-yong, et al. Development of 800 MPa Low Welding Crack Sensitivity High-strength Steel Plate SX780CF for Hydropower Stations[J]. Special Steel, 2022, 43(3): 21-24.
- [2] 贾朋刚,卢从义,霍岩,等.抽蓄机组高强钢板焊接 接头的断裂韧性研究[J].上海大中型电机,2021(4): 34-38.

JIA Peng-gang, LU Cong-yi, HUO Yan, et al. Study on

Fracture Toughness of Welded Joints of High-strength Steel Plates for Pumping and Storage Units[J]. Shanghai Medium and Large Electrical Machines, 2021(4): 34-38.

- [3] 赵鹏, 吴疆, 徐江涛. 某水电站压力管道高强钢开孔 封焊试验及风险分析[J]. 小水电, 2021(6): 64-67. ZHAO Peng, WU Jiang, XU Jiang-tao. Opening and Sealing Welding Test and Risk Analysis of High-Strength Steel Pressure Pipes for a Hydropower Station[J]. Small Hydro Power, 2021(6): 64-67.
- [4] 董现春,张永青,黄家武,等. NM450 耐磨钢板及 Q690CFD 高强钢板在 150 t 自卸矿车上的轻量化应用
 [J]. 矿山机械, 2021, 49(6): 15-21.
 DONG Xian-chun, ZHANG Yong-qing, HUANG Jia-wu, et al. The Lightweight Application of NM450 Wear-resistant Steel Plate and Q690CFD High-Strength Steel Plate on 150 t Dump Trucks[J]. Mining & Processing Equipment, 2021, 49(6): 15-21.
- [5] 赵国昌,张海军,刘生,等. 500 MPa级 S500QL 调质 高强钢板在线直接淬火(DQ)工艺研究及应用[J]. 特 殊钢, 2021, 42(3): 57-62.
 ZHAO Guo-chang, ZHANG Hai-jun, LIU Sheng, et al. Research and Application of Online Direct Quenching (DQ) Process for 500 MPa Grade S500QL Quenched and Tempered High-Strength Steel Plate[J]. Special Steel, 2021, 42(3): 57-62.
- [6] 王丽敏. 调质高强度 Q890D 钢板制备工艺及其焊接 特性研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021: 8-10.
 WANG Li-min. Study on the Preparation Process and Welding Characteristics of Quenched and Tempered High Strength Q890D Steel Plate[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2021: 8-10.
- [7] 郭明星, 王志勇, 杜琼. 乌东德 800 MPa 级高强钢蜗 壳焊接关键技术[J]. 人民黄河, 2019, 41(S2): 203-206.
 GUO Ming-xing, WANG Zhi-yong, DU Qiong. Key Technology for Welding of 800 MPa High Strength Steel Spiral Case in Wudongde[J]. Yellow River, 2019, 41(S2): 203-206.
- [8] 祝小龙,陈力,郑宇宙,等. 27SiMn 高强钢板拉伸应 力-应变全曲线和破坏形态试验研究[C]// 第 28 届全 国结构工程学术会议论文集(第Ⅲ册), 2019: 151-161. ZHU Xiao-long, CHEN Li, ZHENG Yu-zhou, et al. Ex-

perimental Study on Tensile Stress-Strain Curves and Failure Modes of 27SiMn High Strength Steel Plates[C]// Proceedings of the 28th National Academic Conference on Structural Engineering (Volume Ⅲ), 2019: 151-161.

- [9] 王宽贵, 王永华, 张建中, 等. 白鹤滩水电站 800 MPa 高 强钢焊接性能研究[J]. 低碳世界, 2019, 9(9): 50-51.
 WANG Kuan-gui, WANG Yong-hua, ZHANG Jian-zhong, et al. Study on the Weldability of 800 MPa High-strength Steel for Baihetan Hydropower Station[J]. Low Carbon World, 2019, 9(9): 50-51.
- [10] 程惠,边俊军, 王永华,等. 白鹤滩水电站 800 MPa 高强钢板多次返修对焊接接头组织及性能的影响[J]. 低碳世界, 2019, 9(9): 63-64.
 CHENG Hui, BIAN Jun-jun, WANG Yong-hua, et al. The Effect of Multiple Repairs of 800 MPa High-Strength Steel Plate for Baihetan Hydropower Station on the Microstructure and Properties of Welded Joints[J]. Low Carbon World, 2019, 9(9): 63-64.
- [11] 宋新华. 复合阻尼钢板激光深熔焊接数值模拟与试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014: 10-16. SONG Xin-hua. Numerical Simulation and Experimental Study on Laser Deep Penetration Welding of Composite Damping Steel Plate[D]. Changsha: Hunan University, 2014: 10-16.
- [12] 宋新华,金湘中,修腾飞,等.复合阻尼钢板激光深 熔焊接数值模拟[J]. 热加工工艺, 2014, 43(7): 164-166.

SONG Xin-hua, JIN Xiang-zhong, XIU Teng-fei, et al. Numerical Simulation of Laser Deep Penetration Welding of Composite Damping Steel Plate[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(7): 164-166.

- [13] 姚远, WOUTERS M, POWELL J, 等. 后桥钢板激光-MIG 复合焊接优化研究[J]. 汽车技术, 2008(1): 54-57. YAO Yuan, WOUTERS M, POWELL J, et al. Optimization of Laser MIG Hybrid Welding of Rear Axle Steel Plates[J]. Automotive Technology, 2008(1): 54-57.
- [14] 江国梁, 韦青嵩, 刘博, 等. 薄板拼板激光复合焊接 工艺研究[J]. 广东造船, 2023, 42(1): 49-51.
 JIANG Guo-liang, WEI Qing-song, LIU Bo, et al. Research on Laser Composite Welding Process for Thin Plate Splicing[J]. Guangdong Shipbuilding, 2023, 42(1): 49-51.
- [15] 赵艳秋,李响,刘志强,等.激光功率对 2195 铝锂合 金光纤-半导体激光复合焊接形貌与气孔的影响[J]. 焊接学报, 2023, 44(1): 99-106.
 ZHAO Yan-qiu, LI Xiang, LIU Zhi-qiang, et al. The Effect of Laser Power on the Morphology and Porosity of 2195 Aluminum Lithium Alloy Fiber Semiconductor Laser Composite Welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(1): 99-106.
- [16] 史亚贝,田辉. 蓝光半导体与光纤激光复合焊接紫铜 工艺研究[J]. 应用激光, 2022, 42(11): 22-28.
 SHI Ya-bei, TIAN Hui. Research on the Composite Welding Process of Blue Semiconductor and Fiber Laser

for Copper[J]. Applied Laser, 2022, 42(11): 22-28.

- [17] 曹忠民,刘笑笑,李宏策. Nd: YAG 激光与半导体激光复合焊接对铝合金焊缝组织和性能的影响[J]. 精密成形工程, 2022, 14(8): 127-133.
 CAO Zhong-min, LIU Xiao-xiao, LI Hong-ce. Effect of Nd: YAG Laser and Semiconductor Laser Composite Welding on the Microstructure and Properties of Aluminum Alloy Welds[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(8): 127-133.
- [18] 赵孔标,李利娜. 激光-MAG 复合焊接工艺及焊接接 头性能分析[J]. 合成材料老化与应用, 2021, 50(6): 93-96.
 ZHAO Kong-biao, LI Li-na. Analysis of Laser MAG Composite Welding Process and Welding Joint Performance[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2021, 50(6): 93-96.
- [19] 刘昊,杨海峰,贺海东,等. 电子铜箔和液晶聚合物 的激光复合焊接[J]. 中国激光, 2022, 49(2): 116-128.
 LIU Hao, YANG Hai-feng, HE Hai-dong, et al. Laser Hybrid Welding of Electronic Copper Foil and Liquid Crystal Polymer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(2): 116-128.
- [20] 马彦龙,陈辉,赵旭,等.1000 MPa级超高强钢激光 复合焊接头力学性能研究[J].中国激光,2021,48(6): 163-174.
 MA Yan-long, CHEN Hui, ZHAO Xu, et al. Study on the Mechanical Properties of Laser Composite Welded Joints of 1000 MPa Grade Ultra-High Strength Steel[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(6): 163-174.
- [21] 王志鹏. Q355C 激光-MAG 复合焊接工艺及接头性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021: 12-20.
 WANG Zhi-peng. Research on Q355C Laser MAG Composite Welding Process and Joint Performance[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2021: 12-20.
- [22] 张瑜. 船用高强度钢 Q355 的激光复合焊接工艺的探 究与优化[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(2): 205-207.
 ZHANG Yu. Exploration and Optimization of Laser Composite Welding Process for High-Strength Steel Q355 in Ships[J]. Ship Science and Technology, 2021, 43(2): 205-207.
- [23] 王琳. 大功率激光复合焊接匙孔形态及其对焊缝成形影响的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2020: 16-25.
 WANG Lin. A Study on the Keyhole Morphology of High Power Laser Composite Welding and Its Influence on Weld Forming[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2020: 16-25.
- [24] 周愿愿,袁桢棣,李晓庆,等. 壳体激光复合焊接设备设计与分析[J]. 机床与液压, 2020, 48(21): 127-133.
 ZHOU Yuan-yuan, YUAN Zhen-di, LI Xiao-qing, et al. Design and Analysis of Shell Laser Composite Welding Equipment[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(21): 127-133.
- [25] 吴虎. 中厚板 Q345B 钢激光复合焊接头微观组织与 力学性能研究[J]. 焊接技术, 2020, 49(9): 10-12.

WU Hu. Study on the Microstructure and Mechanical Properties of Laser Composite Welded Joints of Q345B Steel for Medium and Thick Plates[J]. Welding Technology, 2020, 49(9): 10-12.

[26] 温鹏, 栗忠秀, 张松, 等. 摆动光纤激光-CMT 复合焊接 6A01-T5 铝合金型材接头的气孔特征及组织性能研究[J]. 中国激光, 2020, 47(8): 61-71.
 WEN Peng, LI Zhong-xiu, ZHANG Song, et al. Study

on the Pore Characteristics and Microstructure Properties of 6A01-T5 Aluminum Alloy Profile Joints Welded by Swinging Fiber Laser CMT Composite Welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 61-71.

[27] 李斌,朱勇辉,邓林,等. BS960E 高强钢激光-电弧复 合高速焊接接头组织及性能研究[J]. 电焊机, 2020, 50(5): 72-76.

LI Bin, ZHU Yong-hui, DENG Lin, et al. Study on the Microstructure and Properties of Laser Arc Composite High-Speed Welding Joints of BS960E High-Strength Steel[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(5): 72-76. 责任编辑:蒋红晨