

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.08.13

激光功率对Q890钢-MIG复合焊接温度场 及接头组织与性能的影响

张盛林, 严春妍, 周凌川, 田展鹏, 刘欣怡, 梁基剑

河海大学 材料科学与工程学院, 江苏 常州 213200

摘要: 为探究激光功率对16 mm厚Q890高强钢激光-MIG复合焊接温度场、接头显微组织及硬度的影响规律, 采用双椭球+柱状复合热源模型, 基于SYSWELD软件建立了多层多道焊接温度场有限元模型。系统研究了打底焊和盖面焊激光功率变化对焊接热循环特征、接头显微组织演变及硬度分布的影响。温度场模拟结果显示, 打底焊激光功率从6.0 kW增加到7.0 kW时, 打底焊焊接熔池最高温度达到2 013 °C; 盖面焊激光功率从2.0 kW增加到3.0 kW时, 盖面焊焊接熔池最高温度达到2 631 °C。盖面焊激光功率为2.0 kW时, 盖面焊激光区焊缝的显微组织主要为针状铁素体、粒状贝氏体和少量条状贝氏体, 粗晶热影响区显微组织主要由板条马氏体和条状贝氏体组成。打底焊激光功率为6.0 kW时, 打底层激光区焊缝的显微组织主要为板条马氏体, 粗晶热影响区的显微组织主要由板条马氏体和条状贝氏体构成。随着激光功率的增加, 焊接熔池峰值温度增加, 盖面焊激光区焊缝贝氏体含量减少, 打底焊激光区焊缝形成了条状贝氏体, 粗晶热影响区晶粒尺寸增大。

关键词: Q890钢; 激光-MIG复合焊; 温度场; 复合热源模型; 显微组织

中图分类号: TG456.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2026)08-0123-10

Effect of Laser Power on Temperature Field and Joint Microstructure and Properties in Laser-MIG Hybrid Welding of Q890 Steel

ZHANG Shenglin, YAN Chunyan, ZHOU Lingchuan, TIAN Zhanpeng, LIU Xinyi, LIANG Jijian

College of Materials Science and Engineering, Hohai University, Changzhou 213200, China

Abstract: To investigate the effects of laser power on the temperature field, joint microstructure, and hardness distribution in laser-MIG hybrid welding of 16 mm thick Q890 high-strength steel, a finite element model for multi-pass welding temperature field was established using a combined double-ellipsoid and columnar heat source model based on SYSWELD software. The influences of root weld laser power and cap weld laser power on thermal cycle characteristics, microstructural evolution, and hardness distribution of the welded joints were systematically studied. The temperature field simulation results show that when the laser power for the root weld increases from 6.0 kW to 7.0 kW, the maximum temperature of the weld pool reaches 2 013 °C. For the cap weld, when the laser power increases from 2.0 kW to 3.0 kW, the maximum temperature of the weld pool reaches 2 631 °C. When the laser power for the cap weld is 2.0 kW, the microstructure in the laser zone consisted mainly of acicular ferrite, granular bainite, and a small amount of banded bainite, while the coarse grained heat affected zone (CGHAZ) is mainly composed of lath martensite and lath bainite. When the laser power for the root weld is 6.0 kW, the microstructure of the laser weld zone in the root weld primarily consists of lath martensite, while the microstructure of the CGHAZ is mainly composed of lath martensite and lath bainite. The results indicate that with increasing laser power, the peak temperature of the welding pool increases, the bainite content in the laser weld zone of the cap weld decreases, the lath bainite forms in the laser weld zone of the root weld, and the grain size in the CGHAZ increases.

收稿日期: 2025-07-14 修回日期: 2026-01-29

基金项目: 江苏省研究生科研创新计划项目(KYCX25_0909); 江苏省研究生科研创新计划项目(KYCX24_0826)

作者简介: 张盛林(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事高强钢复合焊接研究。E-mail: 19956468007@163.com。



重点
专利
—
高强
钢优
质高
效焊
接

Keywords: Q890 steel; laser-MIG hybrid welding; temperature field; hybrid heat source model; microstructure

引用格式:张盛林,严春妍,周凌川,等. 激光功率对 Q890 钢-MIG 复合焊接温度场及接头组织与性能的影响[J]. 电焊机,2026,56(8):123-132.

Citation:ZHANG Shenglin, YAN Chunyan, ZHOU Lingchuan, et al. Effect of Laser Power on Temperature Field and Joint Microstructure and Properties in Laser-MIG Hybrid Welding of Q890 Steel[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(8): 123-132.

0 引言

激光-MIG(Metal Inert Gas, MIG)复合焊是一种将激光焊和熔化极惰性气体保护焊相结合的高效焊接技术^[1-4]。该技术通过两种热源的协同作用,充分发挥各自优势并弥补单一焊接方法的不足。激光焊接凭借高能量密度和深熔焊接能力^[5-6],具有焊接速度快、热影响区小、熔深大等优点,在较低热输入下能够有效减少焊接变形和热影响区宽度,适用于高精度焊接场合。MIG 焊焊接效率高、成本低,其连续送丝特性提供了良好的熔池填充能力和工艺灵活性^[7-8],适用于复杂几何结构和大厚度焊缝的多层多道焊接。两种热源的相互作用会产生“增强效应”,即激光可稳定 MIG 电弧,而 MIG 焊能改善材料对激光的吸收率,这种协同作用使得复合焊接的工艺稳定性优于单一焊接方法,焊缝成形更加均匀美观^[9-10]。激光-MIG 复合焊接能量集中,热输入相对集中在焊接区域,加热和冷却速度快,焊接热影响区小,从而有效减少了焊接变形^[11-12]。

随着工业技术的不断革新,传统的碳素钢产品已难以满足市场对高品质、高性能材料的要求^[13]。在此背景下,低合金高强钢(high strength low alloy, HSLA)得到了发展和应用。目前,HSLA 钢已广泛应用于建筑机械部件、航空航天、石油天然气、海洋船舶、桥梁建设及车辆制造等领域^[14]。激光-MIG 复合焊凭借其独特优势,在 HSLA 钢的焊接研究中已取得一定的进展。刘政君等^[15]研究了 3 mm 厚 HSLA 钢在不同对接间隙条件下的激光-MIG 复合焊缝成形,结果表明,有间隙时焊缝及热影响区的上下宽度基本一致(呈 U 形),无间隙时则呈现上宽下窄的 Y 形。ZHANG 等^[16]研究了 20 mm 厚 Q355B 钢板的激光-MIG 复合焊焊接工艺,结果表明,在选定的工艺参数下,焊接接头的正反表面成形质量良好。周勇等^[17]利用 ANSYS 有限元软件对 12 mm 厚

HG785D 高强钢的激光-MIG 复合焊接温度场进行了数值模拟,结果显示复合焊接过程中热源中心最高温度达 2 200 °C。

Q890 钢作为一种 HSLA 钢,具有优秀的强度、韧性和抗疲劳性能,广泛应用于工程机械、船舶设备及航空航天领域。目前关于高强钢激光-MIG 复合焊的研究较多,但针对 Q890 钢的研究仍存在不足,尤其是在中厚度钢板焊接中的应用尚需深入研究。本文以 16 mm 厚 Q890 钢为研究对象,采用试验与有限元模拟相结合的方法,建立双椭球-柱状复合热源温度场模型,分析 Q890 钢激光-MIG 复合焊接过程中温度场的分布特征,并探讨不同激光功率对接头微观组织及硬度的影响。该研究可为该类高强度钢的焊接工艺优化提供理论和技术参考。

1 试验材料与方法

试验母材为板厚 16 mm 的 Q890 低合金高强钢板,焊丝为直径 1.2 mm 的 JM-80 气保护焊丝。母材与焊丝的化学成分及力学性能分别如表 1、表 2 所示。

表 1 母材和焊丝的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of base metal and welding wire(wt. %)

材料	C	Si	Mn	Ni	Mo	Cu
Q890	0.20	0.80	2.00	2.00	0.70	0.50
JM-80	0.08	0.67	1.60	0.01	0.01	—

表 2 母材和焊丝的力学性能

Table 2 Mechanical properties of base metal and welding wire

牌号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%
Q890	≥890	940~1100	≥11
JM-80	660~740	≥760	≥18

采用激光-MIG 焊接方法,试样尺寸为 200 mm×100 mm×16 mm。焊接时将两块试板对接,采用钝边为 6 mm、夹角为 30°的 V 形坡口,装配间隙 0.5 mm。采用德国 IPG 公司的 YLS-10000 型激光发射器和



福尼斯公司生产的 TPS-500 MIG/MAG 焊机构建激光-MIG 复合焊接系统。使用纯度为 99.99% 的氩气作为保护气体, 流量为 20 L/min。焊接采用激光前置、电弧后置的排列方式, 光丝间距为 2 mm, 依次完成打底焊、填充焊和盖面焊。打底焊激光离焦量为 -2 mm, 填充和盖面焊激光离焦量为 0 mm。焊件初始温度为 20 ℃, 层间温度控制在 150 ℃。焊接过程中, 使用研华 USB-4718 型温度采集卡记录焊件上表面典型位置的热循环曲线。具体焊接参数如表 3 所示。

表 3 激光-MIG 复合焊接工艺参数

Table 3 Welding parameters of laser-MIG hybrid welding

No.	道次	激光功率/kW	焊速/(m·min ⁻¹)	电流/A
1	打底	6.0	1.2	170
	填充	2.5	0.5	230
	盖面			260
2	打底	6.5	1.2	170
	填充	2.5	0.5	230
	盖面			260
3	打底	7.0	1.2	150
	填充	2.0	0.5	230
	盖面			260
4	打底	7.0	1.2	150
	填充	3.0	0.5	230
	盖面			260

焊后采用线切割机截取金相试样。试样表面依次经 240~2000 目砂纸打磨抛光, 再用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀 5~10 s, 随后用无水乙醇冲洗并吹干。使用蔡司 Axio Imager 2 体式显微镜观察焊接接头的宏观形貌, 使用日本电子公司 JSM-6510 扫描电镜观察焊接接头的显微组织。硬度测试依据 GB/T 4340.1—2024《金属材料维氏硬度试验》标准, 使用华银 HV-1000 显微硬度计, 施加载荷为 1.96 N, 加载时间 20 s。基于 GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法》制备拉伸试样。焊缝位于试样中心, 采用三思 UTM5105 拉伸试验机进行拉伸试验, 拉伸速度为 2 mm/min。

2 温度场数值模型

2.1 几何模型定义和网格划分

在有限元仿真中, 焊件模型通过 SolidWorks 创

建, 并导入 Visual Mesh 进行网格划分。根据实际激光-MIG 复合焊焊件的形状和尺寸建立了各组焊接试样的三维模型, 第 3 组焊接试样最终的网格划分结果如图 1 所示。焊缝由打底层、填充层和盖面层组成。由于远离热源的母材区域几乎不受温度变化的影响, 为提高计算效率, 母材区域采用了较稀疏的网格划分, 焊缝及热影响区部位采用了较细的网格划分。

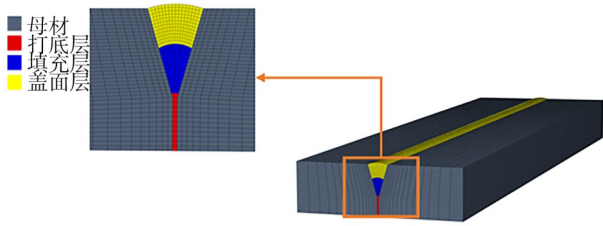


图 1 第 3 组焊接试样的网格划分

Fig. 1 Meshing of the welding specimen for group 3

2.2 热源模型和材料属性

激光-MIG 复合焊接结合了 MIG 焊电弧热源和激光焊热源的特点, 焊缝截面呈现独有的酒杯状形貌, 因此需选用两种热源模型进行组合^[18]。电弧区的熔池宽而浅, 适合采用双椭球热源模拟其热源密度和形状; 激光区的焊缝窄而深, 故选用柱状热源以更好地反映其焊接过程的特点。

双椭球热源的特点在于其热流密度沿空间的前后分布可视为两个半椭球, 其形状较为符合 MIG 电弧区熔池的几何特征。此外, 前后两个半椭球的热流密度分布不同, 能量分布方程如下:

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}Q\eta f_1 \sin\beta \sin\gamma}{a_1 bc \cos\theta\pi\sqrt{\pi}} \exp\left[-\frac{3x^2}{(a_1/\sin\beta)^2} - \frac{3y^2}{(b/\sin\gamma)^2} - \frac{3z^2}{(c\cos\theta)^2}\right] \quad (1)$$

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}Q\eta f_2 \sin\beta \sin\gamma}{a_2 bc \cos\theta\pi\sqrt{\pi}} \exp\left[-\frac{3x^2}{(a_2/\sin\beta)^2} - \frac{3y^2}{(b/\sin\gamma)^2} - \frac{3z^2}{(c\cos\theta)^2}\right] \quad (2)$$

式中 f_1 和 f_2 分别为前、后椭球热流密度的能量分配系数, 且 $f_1 + f_2 = 2$; Q 为双椭球热源的热输入, $Q = UI/v$ (U 为电弧电压, I 为焊接电流, v 为焊接速度, 由表 3 工艺参数计算); η 为电弧热效率; a_1, a_2, b, c 为双椭球热源模型尺寸参数, 由焊接电流确定; β, γ, θ 分别

为电弧主轴及 x 、 y 、 z 方向的夹角。

柱状热源模型通常将焊接热源视为具有一定直径和长度的圆柱体,能够反映激光焊接的实际能量分布特征,其能量分布方程为:

$$q(r, z) = \frac{3Q\eta}{\pi R^2 H} \exp\left(-\frac{3r^2}{R^2}\right) \exp\left(-\frac{3z^2}{H^2}\right) \quad (3)$$

式中 $q(r, z)$ 表示在柱坐标系中距离圆柱中心轴线径向距离为 r 、轴向距离为 z 处的热流密度; $Q=P$ (P 为激光功率,由表 3 参数确定); η 为激光热效率; R 是柱状热源的半径; H 是柱状热源的高度。

焊接过程中 Q890 钢和 JM-80 焊丝的热物理性能参数通过 JMatpro 软件获得,相关数据如表 4、表 5 所示。

表 4 Q890 钢的热物理性能参数

Table 4 Thermal and physical properties of Q890 steel

温度/°C	比热容/(J·g ⁻¹ ·K ⁻¹)	密度/(g·cm ⁻³)	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
25	0.45	7.82	55.61
100	0.49	7.80	52.39
200	0.53	7.80	47.58
400	0.69	7.69	38.22
800	0.61	7.60	25.87
1 200	0.67	7.38	30.75
1 500	0.80	6.95	33.08

表 5 JM-80 焊丝的热物理性能参数

Table 5 Thermal and physical properties of JM-80

温度/°C	比热容/(J·g ⁻¹ ·K ⁻¹)	密度/(g·cm ⁻³)	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
25	0.45	7.80	35.47
100	0.48	7.80	37.19
200	0.52	7.74	38.23
400	0.63	7.66	36.36
800	0.91	7.54	28.82
1 200	0.66	7.38	30.97
1 500	0.81	7.02	33.24

3 结果及讨论

3.1 温度场计算结果

为研究不同激光功率对打底焊温度场的影响,选取试样 1、试样 2、试样 3 的计算结果进行分析。图 2 为不同激光功率下的打底焊温度场云图。

由图 2 可见,打底焊阶段双椭球热源与柱状热源组成的复合热源使温度场熔池形貌呈上宽下窄。当激光功率为 6.0 kW 时,熔池最高温度为 1 897 °C,

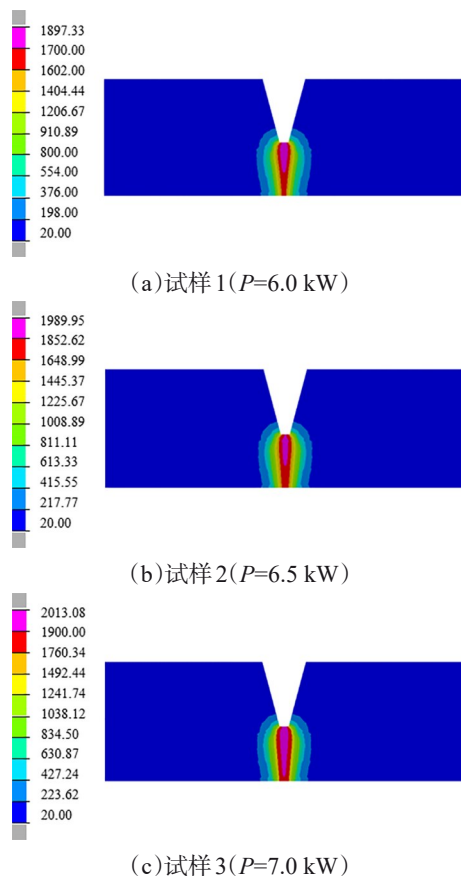


图 2 不同激光功率下打底焊温度场云图

Fig. 2 Temperature field contour map of root welds under different laser powers

熔池宽度较窄;随着激光功率增加至 7.0 kW,熔池最高温度上升至 2 013 °C,熔池体积有所增大。

不同激光功率下盖面焊温度场模拟结果如图 3 所示。在盖面焊阶段,由于焊接坡口为 30° 的 V 形坡口,且盖面焊的激光功率比电弧的功率要小一些,此时双椭球热源对温度场的分布和熔池形态起主导作用。模拟结果显示,熔池呈近似椭圆形,激光作用的指状熔深不明显。当激光功率为 2.0 kW 时,熔池的最大温度达到 2 459 °C,而当激光功率提高至 3.0 kW 时,熔池的最大温度上升至 2 631 °C。随着激光功率的增加,熔池体积增大,焊接热影响区范围亦相应增大。

图 4 为不同激光功率下打底焊焊缝表面中心点的热循环曲线。由于进行了三道焊接,打底焊热循环曲线出现 3 个峰值温度,且呈递减趋势,反映了后续焊道对前道焊缝的回火效应。打底焊激光功率从 6.0 kW 增加到 6.5 kW 时,第一次热循环峰值温度



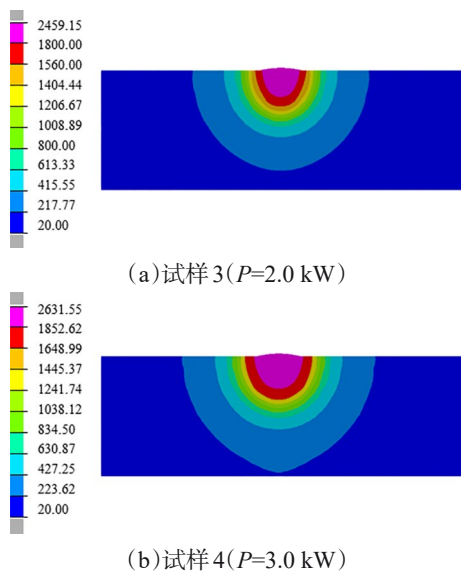


图3 不同激光功率下盖面焊温度场云图

Fig. 3 Temperature field contour map of cap welds under different laser powers

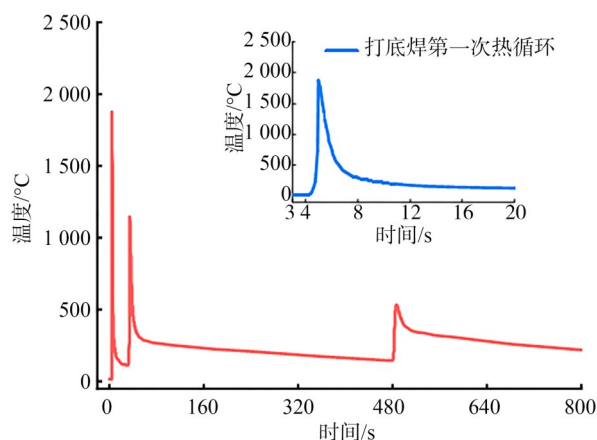
从1 876 °C升至1 968 °C,涨幅约为4.9%;激光功率为7.0 kW时,峰值温度约为1 980 °C。上述结果表明,增大激光功率可有效提高热循环的峰值温度。

图5为试样盖面焊表面典型位置(P1点位于焊缝表面中心点,P2点位于熔合线1.5 mm处)的热循环曲线。由图5可知,盖面焊焊缝表面的峰值温度约为2 500 °C,明显高于打底焊的峰值温度。当填充和盖面焊的激光功率为2.0 kW时,P1和P2点的峰值温度分别为2 375 °C和767 °C;当激光功率提升至3.0 kW时,P1和P2的温度分别上升至2 531 °C和900 °C,分别增加了156 °C和133 °C。此外,图5显示P2点的计算结果与实际测试结果较为接近,验证了温度场计算的准确性。

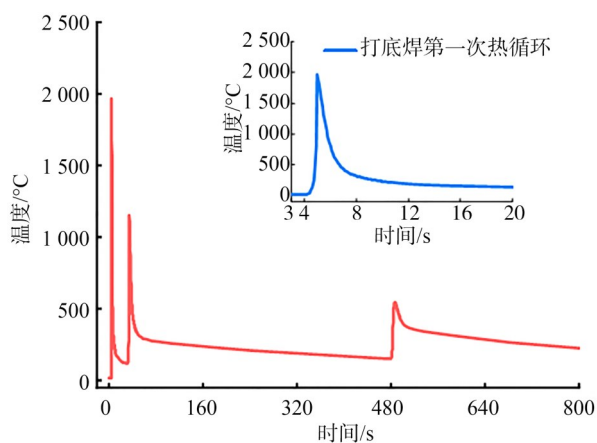
3.2 显微组织和力学性能

Q890钢母材的显微组织如图6所示,主要由回火索氏体构成。图7为第3组焊接试样的激光-MIG复合焊接头的宏观形貌,由下至上依次为打底层、填充层和盖面层。

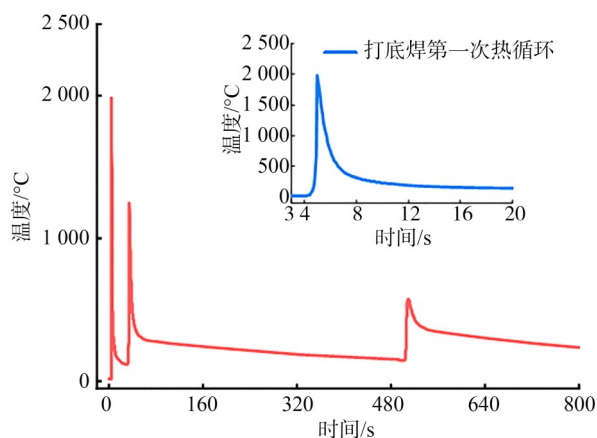
在打底层中,由于采用较高的激光功率和焊接速度,激光功率大于MIG电弧功率,焊缝形貌接近激光焊特征,熔宽较小、熔深较大,经计算深宽比为7.39。相比之下,在填充层和盖面层中,由于激光功率较低、电流较大,激光功率低于MIG电弧功率,加之坡口的约束作用,焊缝形貌更接近电弧焊焊缝形



(a) 试样1 ($P=6.0$ kW)



(b) 试样2 ($P=6.5$ kW)



(c) 试样3 ($P=7.0$ kW)

图4 不同激光功率下打底焊表面中心点热循环曲线

Fig. 4 Thermal cycle curves at the center point of the surface in root welding under different laser powers

貌,经计算,填充焊和盖面焊的深宽比分别为0.97和0.81。

图8为不同激光功率下盖面焊焊缝的显微组



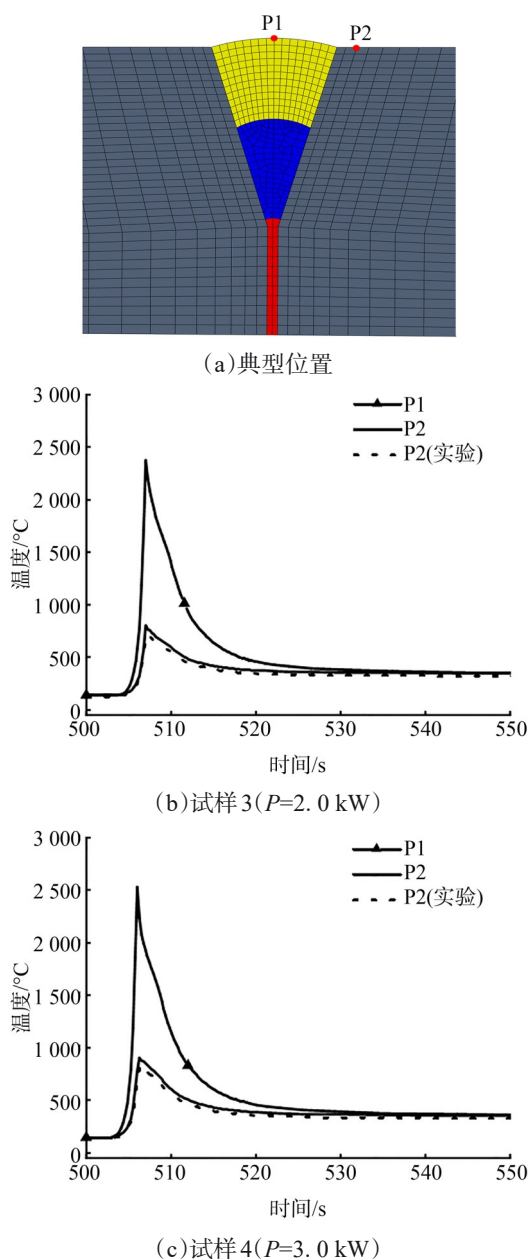


图5 不同激光功率下盖面焊表面典型位置的热循环曲线
Fig. 5 Thermal cycle curves at typical points of the surface in cap welding under different laser power

织。当激光功率为2.0 kW时,盖面焊电弧区焊缝组织主要由针状铁素体(AF)和粒状贝氏体(GB)组成,盖面焊激光区焊缝组织则由AF、GB和条状贝氏体(LB)组成。当激光功率增大至3.0 kW时,盖面焊激光区焊缝组织以AF为主,贝氏体含量明显减少;盖面焊电弧区焊缝组织主要由AF和少量GB组成。

上述组织演变与温度场模拟结果高度吻合。

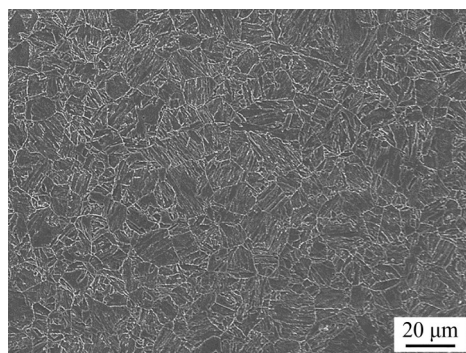


图6 Q890钢母材显微组织

Fig. 6 Microstructure of Q890 steel base metal

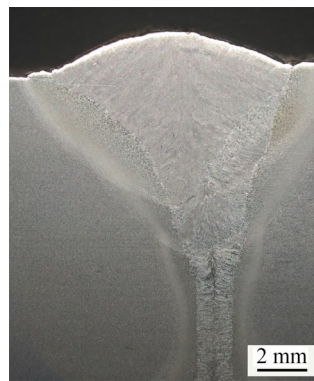


图7 Q890钢激光-MIG复合焊接头宏观形貌

Fig. 7 Macroscopic morphology of Q890 steel hybrid welded joint

如图3、图5的分析可知,当激光功率从2.0 kW增至3.0 kW时,熔池峰值温度升高,冷却过程中的热循环发生变化。较高的热输入和峰值温度为奥氏体向AF的转变提供了更有利的条件,从而导致贝氏体含量的相对减少。

图9为不同激光功率下打底焊激光区焊缝的显微组织。激光功率为6.0 kW时,打底焊激光区焊缝组织主要为板条马氏体(LM);激光功率为7.0 kW时,打底焊激光区焊缝组织主要由LM和LB组成,组织明显粗化。根据温度场计算结果,随激光功率增大,焊接熔池峰值温度升高,冷却速度变慢。可以看出,温度升高使组织粗化,7.0 kW条件下的LM较6.0 kW条件下明显粗大。此外,打底焊激光作用区域周围受高温影响的范围较为局限,加之焊接速度较快,冷却速度较高,因此形成了LM。随着激光功率的增大,冷却速度变慢,打底焊激光区焊缝中LB数量增加。

粗晶热影响区(CGHAZ)处于焊接熔池附近,原始组织经历了高温奥氏体化后快速冷却的过程,晶



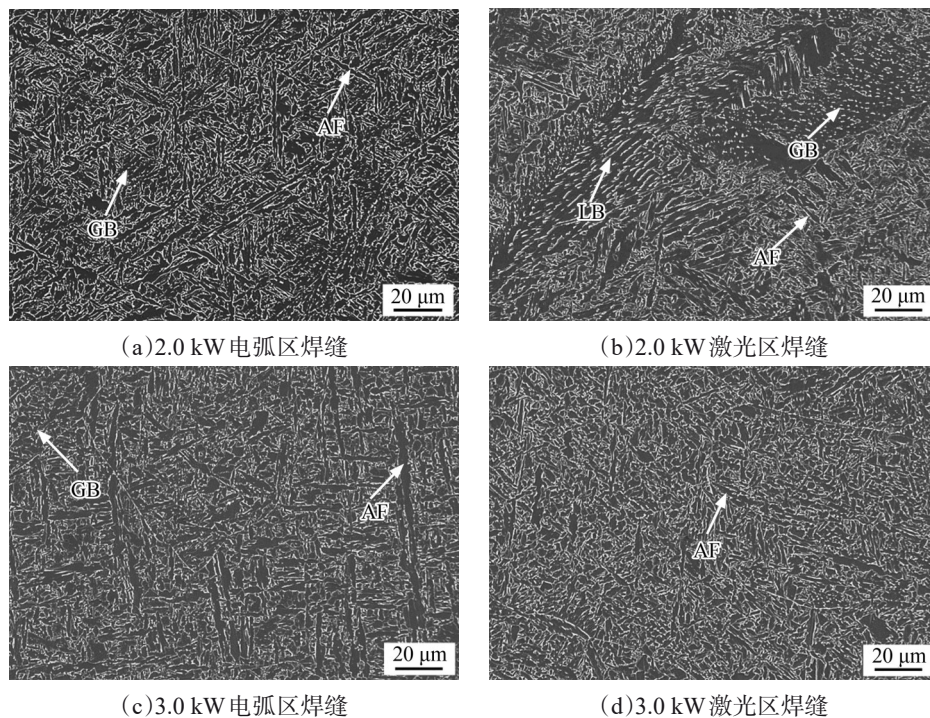


图8 不同激光功率下盖面焊焊缝显微组织

Fig. 8 Microstructure of cap welds under different laser powers

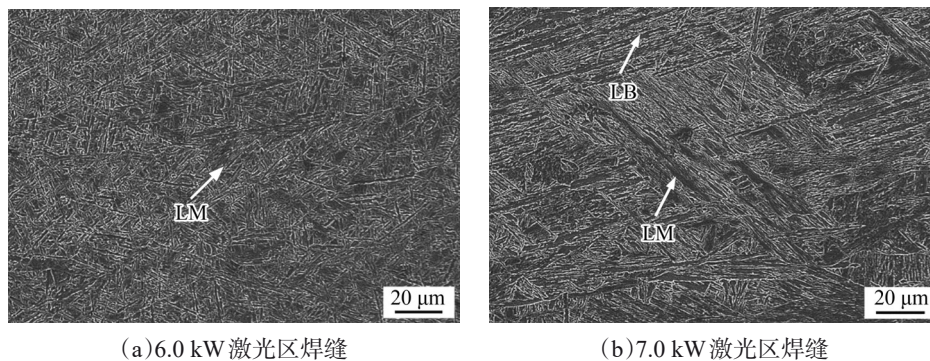


图9 不同激光功率下打底焊激光区焊缝显微组织

Fig. 9 Microstructure of laser zone root welds under different laser powers

粒较为粗大。图10、图11分别为不同激光功率下盖面焊激光区CGHAZ和打底焊激光区CGHAZ的显微组织。由图可知,无论是打底焊还是盖面焊,CGHAZ的显微组织均由LM和LB组成。当打底焊激光功率从6.0 kW增加到7.0 kW、盖面焊激光功率从2.0 kW增加到3.0 kW时,CGHAZ的晶粒均有所增大。由计算结果可知,在更大的激光功率下,温度场的峰值温度升高,使得晶粒尺寸变大。

各组拉伸试样的性能参数如表6所示。4组激光功率的拉伸试样抗拉强度为984.98~1 008.18 MPa,断裂位置均位于母材,表明焊缝强度高于母材。

图12为打底焊和盖面焊不同激光功率下激光区的硬度分布。由图12a可知,打底焊激光区焊缝和热影响区的硬度均高于母材,这是因为打底焊激光区焊缝和CGHAZ的组织类型为LM和LB,马氏体的高硬度特征使得该区域成为接头的硬度峰值区。图12b为盖面焊激光区的硬度分布,热影响区硬度明显高于焊缝和母材。这是由于盖面焊激光区CGHAZ形成了高硬度的LM,故热影响区硬度最高;而焊缝组织为LB、GB和AF,硬度相对较低。焊接接头硬度的不均匀性根本上是由温度场分布不均所导致的不同区域显微组织差异决定的。



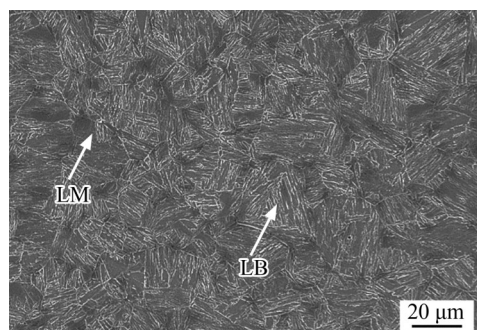
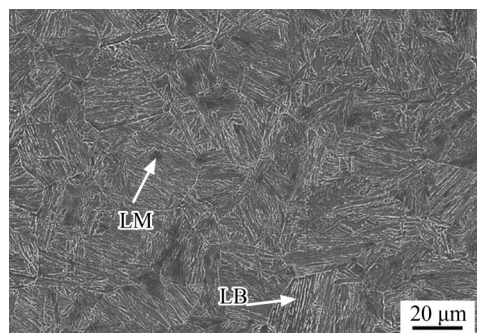
(a) $P=2.0$ kW(b) $P=3.0$ kW

图 10 不同激光功率下盖面焊激光区 CGHAZ 显微组织

Fig. 10 Microstructure of the laser zone CGHAZ under different laser powers in cap welding

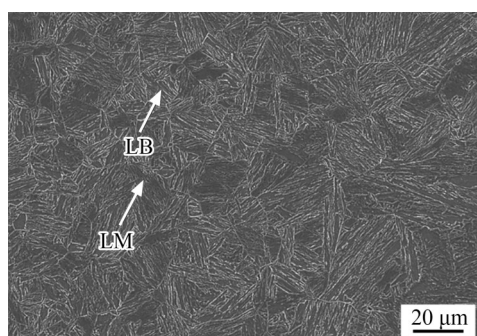
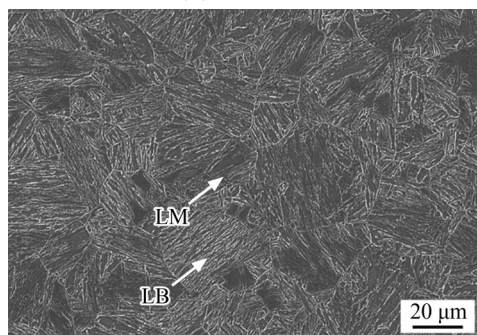
(a) $P=6.0$ kW(b) $P=7.0$ kW

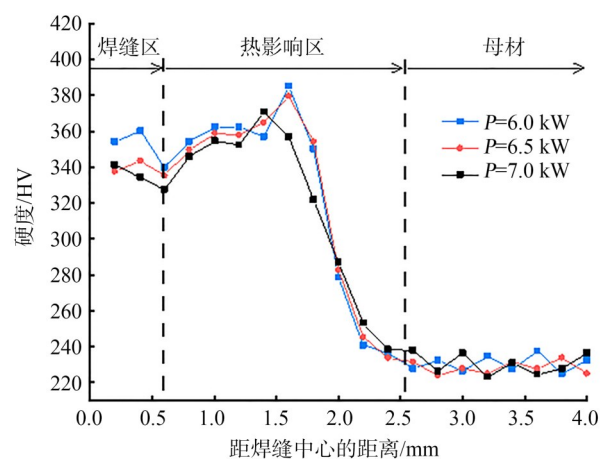
图 11 不同激光功率下打底焊激光区 CGHAZ 显微组织

Fig. 11 Microstructure of the laser zone CGHAZ under different laser powers in root welding

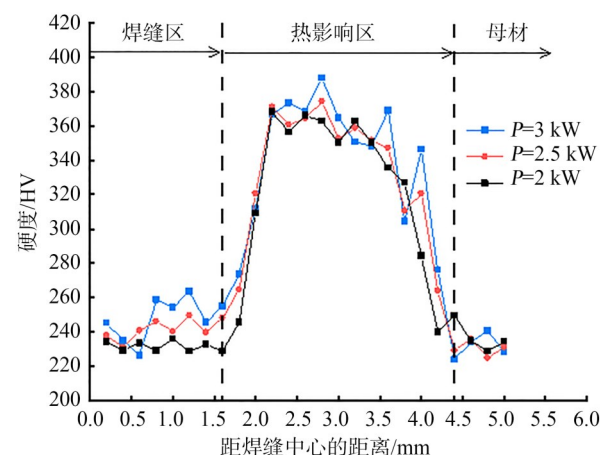
表 6 拉伸试样性能参数

Table 6 Performance parameters of tensile specimens

序号	抗拉强度 R_m /MPa	断裂位置
1	984.98	母材
2	989.89	母材
3	1 006.73	母材
4	1 008.18	母材



(a) 打底焊激光区硬度



(b) 盖面焊激光区硬度

图 12 不同激光功率下 Q890 钢焊接接头硬度

Fig. 12 Hardness in Q890 steel weld joints under different laser powers

3.3 讨论

试验结果表明,激光功率的变化改变了焊接热循环特征和熔池形貌,进而影响接头的显微组织和硬度分布。

增大激光功率可提高熔池峰值温度并扩大熔池体积,但打底焊和盖面焊的响应程度不同。打底焊阶段激光热源占主导,功率从 6.0 kW 增至 7.0 kW,熔池最高温度由 1 897 °C 升至 2 013 °C。不过热循





环峰值温度的增幅仅约4.9%~5.5%,远低于激光功率16.7%的增幅,说明增大功率所增加的热输入有相当一部分经母材热传导和表面辐射散失,并未全部作用于熔池升温。盖面焊阶段电弧热输入占比较大,同时受V形坡口约束,激光功率从2.0 kW增至3.0 kW时,熔池最大温度由2 459 °C升至2 631 °C。位于热影响区附近的P2点峰值温度增幅(17.3%)明显高于焊缝中心的P1点(6.6%),说明提高盖面焊激光功率对热影响区的热循环强度提升更为显著。

打底焊和盖面焊的热循环条件差异较大,导致激光功率对两个焊道显微组织的影响规律不同。打底层焊速快(1.2 m/min)、冷却速率高,奥氏体主要以切变方式转变为LM。功率从6.0 kW增加至7.0 kW后冷却速率有所降低,部分区域的相变条件从马氏体区偏移至贝氏体区,组织中开始析出LB,同时更高的峰值温度使奥氏体晶粒长大,LM和LB整体粗化。盖面层焊速低(0.5 m/min)、电弧热输入占主导,冷却条件相对缓和,有利于扩散型相变产物AF和GB的形成。功率从2.0 kW增至3.0 kW时,峰值温度虽然更高,但高温停留时间延长使奥氏体成分趋于均匀,且800~500 °C区间冷却速率降低,AF比例上升而贝氏体减少。盖面层出现的这种“温度越高、组织反而越细”的现象,与打底层“功率越大、组织越粗”的趋势正好相反,这是两个焊道热力学条件不同所致。CGHAZ紧邻熔池,其峰值温度超过1 100 °C,无论打底焊还是盖面焊,其组织均为LM和LB的混合组织。

接头硬度分布取决于各区域的主导组织。打底焊激光区和CGHAZ以LM为主,硬度明显高于以AF和GB为主的盖面焊焊缝区。盖面焊热影响区虽也因含LM而硬度偏高,但因LM含量低于打底焊区,硬度稍逊。盖面焊缝区AF含量较高,硬度最低。四组试样抗拉强度相差不大(985~1 008 MPa),断裂均发生在母材。这说明在试验参数范围内,激光功率的变化主要改变接头的局部组织和硬度分布,对静载强度的影响有限。与已有研究相比,本研究不仅证实了激光功率对焊接温度场和组织性能的影响,还揭示了复合焊接不同阶段(打底焊与盖面焊)的差异化。这些发现为优化高强度钢激光-MIG复合焊接工艺提供了理论依据。

4 结论

(1)建立了适合Q890钢的有限元模型,利用SYSWELD软件采用双椭球热源和柱状热源的复合模型,实现了Q890钢激光-MIG复合焊接温度场的数值模拟。

(2)盖面焊激光功率为2.0 kW时,盖面焊电弧区焊缝的显微组织由AF和GB组成,激光区焊缝的显微组织主要由AF、GB和LB组成。激光功率增加,盖面焊焊缝贝氏体含量减少;打底焊激光功率为6.0 kW时,打底焊激光区焊缝由LM组成,激光功率增加,打底焊焊缝出现了LB。CGHAZ的显微组织主要由LM和LB组成,随着激光功率的增加,CGHAZ晶粒变大。

(3)随着激光功率的增加,焊接熔池的最大温度和焊缝表面中心点的峰值温度逐渐升高。模拟显示,当打底焊激光功率由6.0 kW提升至7.0 kW时,熔池最大温度达2 013 °C,焊缝表面中心点第一次热循环峰值温度从1 876 °C升至1 980 °C;当盖面焊激光功率从2.0 kW增至3.0 kW时,熔池最大温度达到2 631 °C,焊缝表面中心点峰值温度由2 375 °C升至2 531 °C。

(4)温度场模拟与组织分析表明,激光功率通过改变焊接热循环过程直接影响接头显微组织。打底焊较高的冷却速率促进了LM形成,而盖面焊相对较缓的冷却过程有利于AF和GB的生成。热影响区晶粒粗化程度与经历的峰值温度呈正相关。

参考文献:

- [1] Li Y, Geng S, Jiang P. Fatigue inhomogeneity of thick 316L stainless steel joints fabricated by ultra-high power laser-MIG hybrid welding [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 290: 109480.
- [2] 徐锴,武鹏博,李琳琳,等. 铝合金激光-多股绞合焊丝MIG复合焊接头组织与性能分析[J]. 焊接学报, 2022, 43(11): 43-49.
XU K, WU P B, LI L L, et al. Microstructure and performance analysis of laser-MIG hybrid welding joints of aluminum alloy with multi-stranded wire [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(11): 43-49.

- [3] Unni A K, Vasudevan M. Computational fluid dynamics simulation of hybrid laser-MIG welding of 316 LN stainless steel using hybrid heat source [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 185: 108042.
- [4] Zhan X, Liu X, Li Y, et al. Molten pool behavior and solidification characterization in steady magnetic field assisted laser-MIG hybrid welding of aluminum alloy [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 84: 622-638.
- [5] 彭杏娜, 乔亚霞, 张浩, 等. 800 MPa级水电用高强度钢激光-电弧复合焊接工艺及组织性能研究[J]. 电焊机, 2025, 55(6): 42-48.
- PENG X N, QIAO Y X, ZHANG H, et al. Study on the Welding Process and Microstructural Properties of 800 MPa-Grade High-Strength Steel for Hydropower Applications Using Laser-Arc Hybrid Welding [J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(6): 42-48.
- [6] Fan X, Qin G, Jiang Z, et al. Comparative analysis between the laser beam welding and low current pulsed GMA assisted high-power laser welding by numerical simulation [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 22: 2549-2565.
- [7] Wang W, Yamane S, Wang Q, et al. Visual sensing and quality control in plasma MIG welding [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 86: 163-176.
- [8] Cui X, Chen J, Xia C, et al. The mechanism study of TIG-MIG hybrid welding process based on simulation [J]. Vacuum, 2023, 215: 112341.
- [9] Li X, Zhao S, Jiang L, et al. Droplet detachment and motion behaviors in laser-MIG hybrid welding of aluminum alloy [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, 210: 124165.
- [10] Acherjee B. Hybrid laser arc welding: state-of-art review [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 99: 60-71.
- [11] 马国龙, 马寅, 李帅贞, 等. 中厚板铝合金激光-MIG复合焊接工艺及组织性能[J]. 电焊机, 2024, 54(9): 24-29.
- MA G L, MA Y, LI S Z, et al. Process and Microstructure Properties of Laser MIG Hybrid Welding for Medium-thick Aluminium Alloy Plate [J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(9): 24-29.
- [12] 严春妍, 姜心怡, 周倩雯, 等. X80/X100异种钢激光-MIG复合焊接接头显微组织和性能[J]. 焊接学报, 2023, 44(1): 20-26.
- YAN C Y, JIANG X Y, ZHOU Q W, et al. Microstructure and properties of laser-MIG hybrid welded X80 and X100 steel dissimilar joint [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(1): 20-26.
- [13] Bjorhovde R. Development and use of high performance steel [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(3): 393-400.
- [14] Chen M T, Cai A, Pandey M, et al. Mechanical properties of high strength steels and weld metals at arctic low temperatures [J]. Thin Walled Structures, 2023, 185: 110543.
- [15] 刘政君, 顾思远, 张培磊, 等. 高强度钢激光-MIG复合焊对接间隙下的焊缝成形机理[J]. 中国激光, 2019, 46(9): 113-119.
- LIU Z J, GU S Y, ZHANG P L, et al. Welding Seam Forming Mechanism of High-Strength Steel Laser-Metal Inert Gas Hybrid Welding with Butt Gap [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(9): 113-119.
- [16] Zhang L, Peng G, Chi J, et al. Effect of process parameters on the formability, microstructure, and mechanical properties of laser-arc hybrid welding of Q355B steel [J]. Materials, 2023, 16(12): 4253.
- [17] 周勇, 张成文, 张国军, 等. 高强度钢激光电弧复合焊接温度场的数值模拟与试验研究[J]. 精密成形工程, 2022, 14(1): 153-158.
- ZHOU Y, ZHANG C W, ZHANG G J, et al. Numerical Simulation and Experimental Study of Temperature Field of Hybrid Laser Arc Welding Joint of High Strength Steel [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(1): 153-158.
- [18] 洪小龙, 黄本生, 李天宁, 等. 几种常见焊接工艺热源模型的研究进展[J]. 材料热处理学报, 2023, 44(05): 25-38.
- HONG X L, HUANG B S, LI T N, et al. Research Progress of Heat Source Models for Several Common Welding Processes [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2023, 44(05): 25-38.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

