

激光与光电子学进展

双光束能量比对 Q355ND 钢激光 MAG 复合焊接头组织性能的影响

尹燕^{1*}, 张潇¹, 肖梦智², 龚岩¹, 周炜¹, 张瑞华^{2,3}¹兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050;²中国钢研科技集团有限公司, 北京 100081;³阳江市五金刀剪产业技术研究院, 广东 阳江 529533

摘要 采用高功率双光束激光-金属活性气体(MAG)复合焊接技术对 Q355ND 钢进行焊接。通过调整双光束能量比分析激光能量密度分布对焊缝横截面成形、熔深及熔宽的影响,并获得了 27 mm 厚板“Y”型单面焊双面成型良好的对接接头。然后分析了焊缝区、热影响区的显微组织和主要元素分布,测定了焊接接头的显微硬度。试验结果表明,随着激光能量比的增大,焊缝熔深表现为先减小后增大的变化趋势,能量比的变化对熔宽影响较小,在激光能量比为 0.75 时获得了最深的焊缝熔深。通过调整能量比,所焊接的对接接头焊缝显微组织主要为铁素体和贝氏体。在焊接接头熔合线附近元素均匀分布,未出现元素迁移现象。硬度峰值出现在靠近熔合线热影响区附近,焊缝区硬度明显高于母材,热影响区硬度随着与焊缝中心距离的增加而逐渐减小。

关键词 激光技术; 高功率激光; 双光束复合焊接; 能量比; 焊缝成形; 显微组织; 性能

中图分类号 TG456.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1714003

Effect of Dual-Beam Energy Ratio on Microstructure and Properties of Q355ND Steel Laser-MAG Hybrid Welding Joint

Yin Yan^{1*}, Zhang Xiao¹, Xiao Mengzhi², Gong Yan¹, Zhou Wei¹, Zhang Ruihua^{2,3}¹State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China;²China Iron & Steel Research Institute Group, Beijing, 100081, China;³Yangjiang Hardware Knife Cut Industrial Technology Research Institute, Yangjiang 529533, Guangdong, China

Abstract We investigated the effect of dual-beam energy ratio on the microstructure and properties of Q355ND steel laser-metal active gas (MAG) hybrid welding joint. Here, the Q355ND steel was welded using high-power dual-beam laser-MAG hybrid welding. Subsequently, we analyzed the effect of laser energy density distribution on weld cross section forming, weld penetration depth, and weld width by adjusting the energy ratio of dual-beam and obtained the well-formed butt joint of 27 mm thick plate Y-type single side welding. Furthermore, we analyzed the microstructure and distribution of the main elements of the welding seam, weld zone, and heat-affected zone, and measured the microhardness of the welded joint. Results show that the weld penetration depth first decreases and then increases with increasing laser energy ratio. Additionally, the change in the energy ratio has insignificant effect on the weld width, and the deepest weld penetration depth is obtained when the laser energy ratio is 0.75. Moreover, the microstructure of the butt joint welded with the optimum energy ratio is mainly ferrite and bainite, and the elements are evenly distributed near the fusion line of the welded joint without element migration. The hardness peak near the heat-affected zone of the fusion line and that of the weld zone was considerably higher than that of the base metal. The hardness of the heat-affected zone decreased with the increasing distance from the weld center.

Key words laser technique; high-power laser; dual-beam hybrid welding; energy ratio; weld formation; microstructure; property

收稿日期: 2021-11-09; 修回日期: 2021-12-24; 录用日期: 2021-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(52161007)、2018 广东省科技计划项目(20180902)、阳江市科技计划项目(SDZX2020009)

通信作者: *yinyan@lut.cn

1 引言

随着激光技术的广泛应用,激光功率作为激光技术的主要参数已由千瓦级向万瓦级乃至更高功率发展^[1]。高功率激光器的研发制造以及基于高功率激光器开发的高功率激光焊接技术为中大厚壁结构的高效制造提供了重要手段。与传统焊接相比,高功率激光焊接技术进一步增大了焊缝熔深和提高了焊接效率,拓宽了激光焊接的应用领域^[2-4]。目前激光焊接技术广泛应用于航空航天、汽车与船舶制造等领域^[5-7],正逐步迈向高功率、高效率、智能化、产业化发展^[8-9]。

随着激光功率的不断提高,激光能量作用方式不断丰富。Xie^[10]提出了一种双光束激光焊接方法,通过对比单、双光束可以发现,双光束激光焊接能够改善焊缝成形质量,减小飞溅、气孔^[11]等缺陷,对激光焊接工艺具有一定的优化作用^[12]。近年来,常规功率激光的双束焊接,在熔池形态及其影响因素方面已有较多研究报告^[13-16]。然而,由于高功率激光厚板焊接过程中熔池流动非常剧烈^[17],激光能量的高度集中造成匙孔内喷射出大量的金属蒸气/等离子体,使材料发生强烈的气化蒸发现象,这些金属蒸气等离子体严重阻碍了激光能量的传输过程,导致激光能量难以稳定传输到母材表面,进而造成匙孔与熔池流动出现不稳定性。本文针对高功率激光焊接厚板的上述难点及海上风电快速发展伴随而来的焊接效率有待提高的问题,利用双光束能够更灵活调控激光输出能量比^[18],在增大激光能量密度作用面积的同时减小了熔融金属的蒸发的优点,采用高功率双光束激光加金属活性气体(MAG)的复合焊接技术对海上风电塔筒用 Q355ND 厚板进行焊接。通过改变激光能量分布,利用复合焊接过程中 MAG 电弧对激光等离子体一定的稀释作用,减小等

离子体对能量传输造成的不利影响,从而实现能量的有效传输,获得 27 mm 厚板单面焊双面成型良好的焊接接头。并分析了双光束不同能量比对焊缝成型、接头微观组织、熔合线附近元素分布以及显微硬度的影响。以期对高功率激光-MAG 复合焊接海上风电塔筒用 Q355ND 厚板的生产应用提供一定的理论依据与试验数据。

2 试验材料及方法

试验采用 Q355ND 低合金高强度钢,因其具有良好的强度、塑性和韧性等特点而被广泛应用于海上风电塔筒的建造。试验件尺寸为 300 mm×150 mm×27 mm,母材交货状态为正火轧制。

母材的组织照片如图 1 所示,可以看出其显微组织由晶粒尺寸较小的铁素体和镶嵌在铁素体中多边形珠光体组成,且晶粒沿轧制方向被拉长。试验采用平板堆焊和对接两种方式,选用 ER50-6 型焊丝作为填充材料,母材与焊丝成分如表 1 所示。

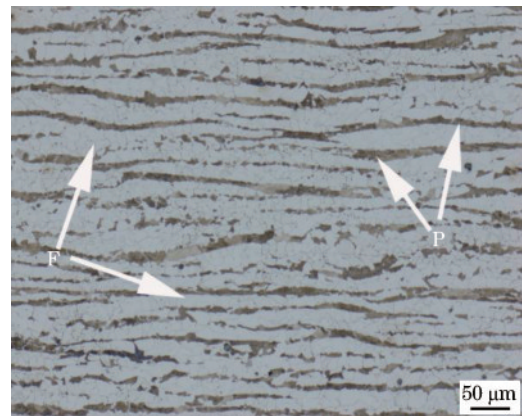


图 1 母材的显微组织

Fig. 1 Microstructure of base metal

表 1 Q355ND 钢和 ER50-6 型焊丝的化学成分

Table 1 Chemical composition of Q355ND steel and ER50-6 welding wires

Material	Mass fraction / %								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Fe
Q355ND	0.161	0.232	1.480	0.014	0.001	0.006	0.016	0.009	Bal.
ER50-6	0.080	0.860	1.420	0.012	0.011	0.017	0.028	0.125	Bal.

焊接设备主要由 TruDisk 32001 碟片激光器、TransPuls Synergic 5000 福尼斯焊机及机器人控制系统组成,图 2 为双光束激光-MAG 复合焊接示意图。高功率激光焊接系统由两套功率为 16 kW 的激光器共同组成,最大输出功率为 32 kW,波长为 1030 nm,光斑直径为 200 μm,双光束间距为 360 μm,熔池内匙孔数量为 1。

通过改变两台激光器出光比例系数来调整激光能量密度分布,能量比调节范围为 0~1,能量比如图 3 所示。定义能量比 E_r 为激光束 1 输出功率与总的激光输

出功率之比。福尼斯焊机采用一元化直流焊操作模式,MAG 焊枪保护气体采用体积分数为 80% 的 Ar 与 20% 的 CO₂ 混合气体。焊前用砂纸将母材焊接区域打磨至金属光泽,并用乙醇擦拭干净。随后将试件用螺旋紧固手柄固定在焊接工作台上,防止试件在焊接过程中发生扭转。最后进行工艺参数匹配并完成焊接操作。焊后采用线切割以焊缝为中心且垂直于焊缝方向进行取样,尺寸为 35 mm×8 mm×27 mm,制备金相试样。用体积分数为 4% 的硝酸乙醇溶液对试样进行腐蚀。利用体式显微镜对试样横截面宏观形貌进行

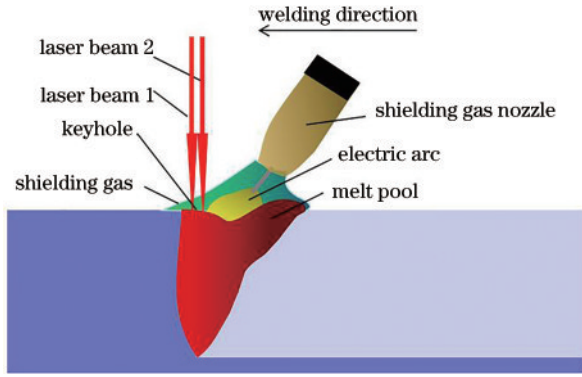


图 2 双光束激光-MAG 复合焊接示意图

Fig. 2 Schematic diagram of dual-beam laser-MAG hybrid welding
采集,并用激光共聚焦显微镜分析焊接接头的组织与成分。使用 EPMA-1600 电子探针分析仪对焊接接头部分区域进行线分析。采用 X 射线衍射仪(XRD)对

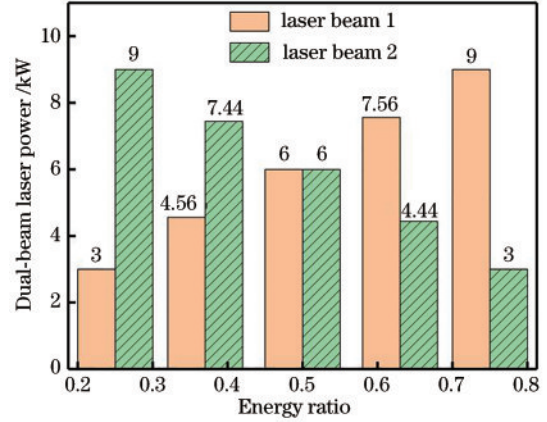


图 3 双光束激光能量比

Fig. 3 Energy ratio of dual-beam laser

焊缝区进行相分析。通过前期试验,获得较好的激光-MAG 复合焊接工艺参数如表 2 所示。

表 2 双光束激光-MAG 复合焊接参数

Table 2 Parameters of dual-beam laser-MAG hybrid welding

Laser power /kW	Arc current /A	Welding voltage /V	Welding speed / (m·min ⁻¹)	Flow rate of shielding gas /(L·min ⁻¹)	Heat sources distance /mm	Defocus amount /mm	Welding process
12	325	26.5	0.7	20	3	+5	Surfacing
23	325	26.5	0.7	20	3	-2	Butt welding

试板对接采用“Y”型坡口,对接坡口尺寸如图 4 所示。依据 GB/T 2654—2008 以及 GB/T 4340.1—2009,利用 HV-1000 型显微硬度计对焊接接头距离上表面 2 mm 的电弧主作用区和距离背面 5 mm 的激光主作用区两个位置进行显微硬度测试,硬度测量间距为 0.5 mm,加载载荷为 100 g,载荷加载时间为 10 s。图 5 为焊缝横截面显微硬度测试位置示意图。

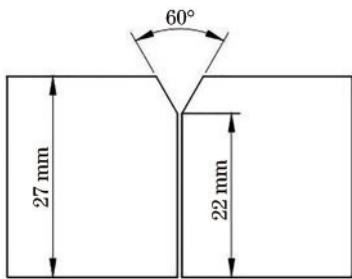


图 4 坡口示意图

Fig. 4 Schematic of the groove

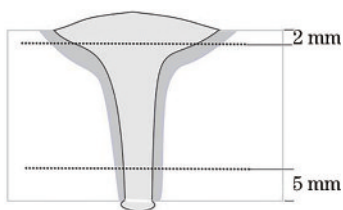


图 5 焊缝横截面显微硬度测试位置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of microhardness test position of weld cross section

为了分析熔池凝固过程中组织转变,利用热力学软件对母材与焊丝进行模拟计算,得到平衡相与温度之间的关系,为后期材料组织性能分析提供参考。

3 结果与分析

3.1 热力学平衡相模拟及接头 XRD 分析

利用热力学软件计算出焊接材料平衡相与温度之间的关系,如图 6 所示,设定温度为 1800~50 °C。从图 6(a)可以看出:母材 Q355ND 在 1513 °C 开始从液相中结晶出铁素体 δ 相;随着温度的逐渐降低,当温度冷却到 1486 °C 时,先结晶出的 δ 固溶体转变为奥氏体 γ 相,在 1473 °C 时液相消失;当温度冷却到 816 °C 时开始析出 α 相,随着 α 相数量的不断增多,在 698 °C 时 γ 相转变为 α 相和渗碳体 Fe₃C,在 457 °C 时析出碳化物 M₇C₃。室温下 Q355ND 主要为 α 相、Fe₃C 以及 M₇C₃。从图 6(b)可以看出:焊丝 ER50-6 在 1508 °C 以上全为液相,当温度降低至 1508 °C 时开始从液相中结晶出 δ 相;当温度降低到 1472 °C 时开始出现 γ 相;在 1455 °C 时 δ 相全部转变为 γ 相;当温度冷却到 865 °C 时析出 α 相;温度继续降低至 701 °C 时析出 α 相与渗碳体 Fe₃C;在 478 °C 时渗碳体固态扩散形成 M₇C₃;在 185 °C 时 M₇C₃ 转变为 M₂₃C₆。室温下焊丝为 α 相、M₂₃C₆ 碳化物。

图 7 为母材与对接焊缝区域的 XRD 试验结果,母材与焊缝的基体相均为 α 铁素体,在母材和焊缝区均未出现 M₇C₃ 和 M₂₃C₆ 衍射峰,主要是由于焊缝快速非平衡凝固来不及析出且其含量非常少。与母材的相

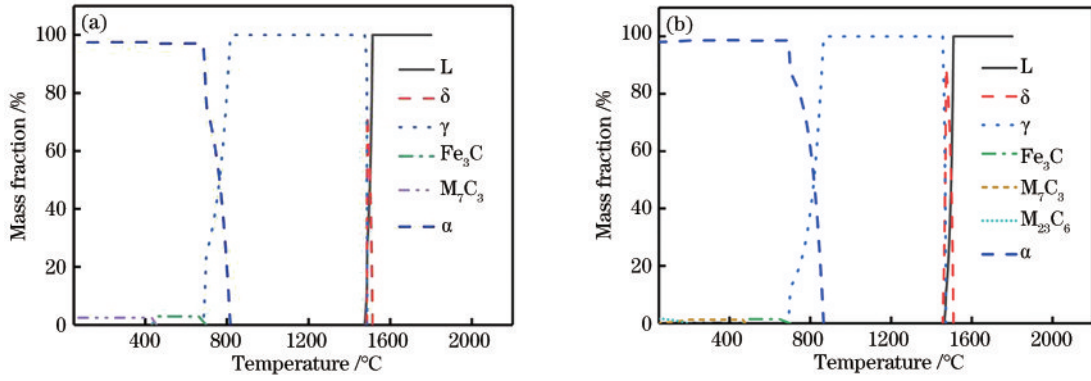


图 6 焊接材料平衡相与温度之间的关系。(a) Q355ND; (b) ER50-6

Fig. 6 Relationship between equilibrium phase and temperature of welding materials. (a) Q355ND; (b) ER50-6

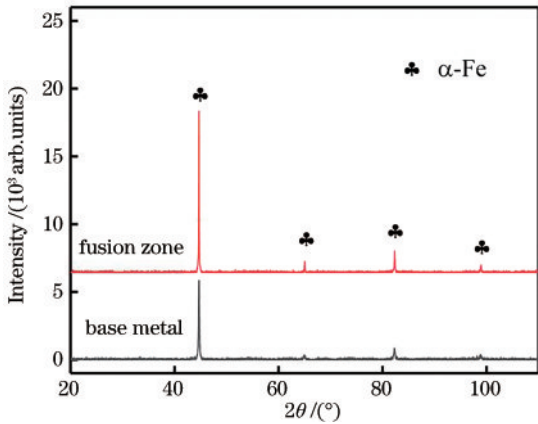


图 7 焊接接头不同区域 XRD 衍射图谱

Fig. 7 XRD patterns of different regions of welded joints

比,焊缝区各衍射峰的强度都有所提高。分析可知其主要原因是焊缝晶粒尺寸较小,参与衍射的晶面较多。而母材在正火轧制过程中可能存在晶粒择优取向,不利于取向的晶面不能参与衍射,导致参与衍射的晶粒数减少,相应的衍射峰强度降低。

3.2 激光能量比对焊缝横截面成形及熔深、熔宽的影响

表 3 为不同能量比下焊缝横截面宏观形貌及相关数据。

通过对比焊缝横截面及焊缝熔深可以发现,双光束激光-MAG 复合焊缝横截面呈“高脚杯”状,其中:当能量比为 0.75 时焊缝熔深为 19.16 mm,达到最大值;当能量比为 0.5 时焊缝的熔深最小。由于能量比改变了双光束激光能量密度分布,导致焊缝熔深发生变化。随着峰值功率(激光束 1 与激光束 2 中的最大功率)的减小,焊缝熔深逐渐减小,当双光束激光输出功率相等时,焊缝熔深达到最小值,此时激光峰值功率最低,表明激光峰值功率是影响焊缝熔深的主要因素。同时,随着峰值功率的增加,焊缝根部的熔宽逐渐减小,表明能量比对焊缝根部熔宽存在影响。图 8 为焊缝熔深、熔宽与复合焊接能量比的关系曲线。从图 8 可以看出,焊缝宽度在 0~0.53 mm 的范围内变化,表明双光束激光能量比对焊缝熔宽的影响较小。

通过调整激光能量密度分布可以发现,当激光能量比为 0.25 时,激光束 1 对母材表面具有预热作用,与电弧相邻的激光束功率密度较大,主要产生并维持匙孔的稳定性,焊接过程中熔化焊丝能够迅速补充到熔池中从而获得较好的填充深度,有利于提高熔化焊丝对母材的稀释作用。但由于焊丝对匙孔的填充速率过快导致匙孔内气体来不及溢出,气体在上浮的过程中遭遇快速冷却使得电弧主作用区出现气孔缺陷。由于靠近电弧侧的激光功率较高,电弧等离子体对激

表 3 不同能量比下焊缝横截面宏观形貌及相关数据

Table 3 Macro morphology and related data of weld cross section under different energy ratios

Parameter	Energy ratio				
	0.25	0.38	0.5	0.63	0.75
Weld cross section					
Width /mm	19.56	19.69	19.48	19.20	19.16
Penetration depth /mm	17.97	16.12	15.47	16.10	18.15

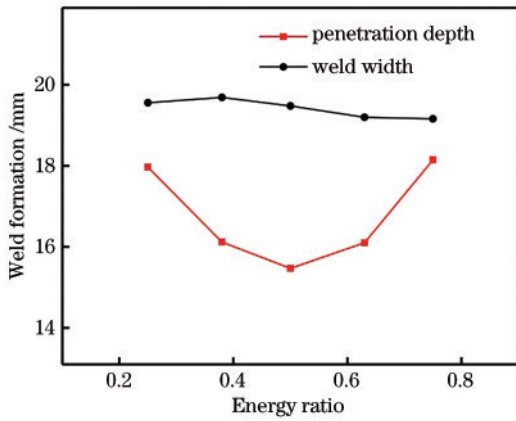


图 8 焊缝熔深、熔宽与复合焊接能量比关系曲线

Fig. 8 Relationship between weld penetration depth, weld width, and hybrid welding energy ratio

光等离子体的稀释作用减小,总的等离子体团削弱了激光作用于母材表面的能量,激光-电弧的耦合效应主要表现为激光作用下的匙孔效应与焊丝熔化对焊道产生的填充盖面作用。当激光能量比为 0.75 时,与电弧相邻的激光束 2 功率较低,电弧等离子体的稀释作用明显加强,造成电弧相邻侧激光电弧总的等离子体密度下降,激光与电弧之间的耦合作用加强了双光束的匙孔效应,促进了母材对激光能量的吸收,获得较好的焊缝熔深。

3.3 对接焊缝成形及组织分析

结合前期的堆焊试验分析可知,通过调节双光束能量比能够在相同激光功率下获得范围较大的焊缝熔深,验证了通过双光束能量比能够调控激光-MAG 复

合焊缝熔深的可行性。随后进行对接焊试验,采用表 2 所示工艺参数,通过调整激光总输出功率为 23 kW,双光束能量比为 0.6,焊接速度为 0.7 m/min,离焦量为 -2 mm,获得了板厚为 27 mm 的对接接头。焊缝及横截面宏观形貌如图 9 所示。

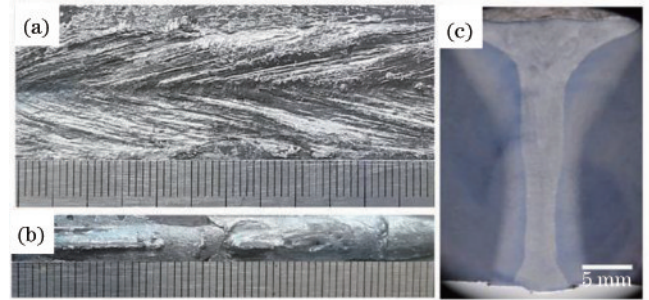


图 9 焊缝及横截面宏观形貌。(a)正面形貌;(b)背面形貌;(c)接头横截面

Fig. 9 Macro morphology of weld and cross section. (a) Front morphology; (b) back morphology; (c) cross section of joint

从图 9(a)可以看出,焊缝表面成形均匀,焊缝边沿与母材之间的熔合线线性度较好,未出现咬边等缺陷。图 9(b)为带有陶瓷衬垫的焊缝背部宏观形貌。在焊缝背面施加陶瓷衬垫是为了防止出现熔融金属的顶部缺欠以及背面驼峰等缺陷,确保背面焊缝成形饱满。如图 9(c)所示,接头熔池形貌具有典型激光-MAG 复合焊的熔池形貌特征。

图 10 为 27 mm 对接接头的焊缝与热影响区显微组织。

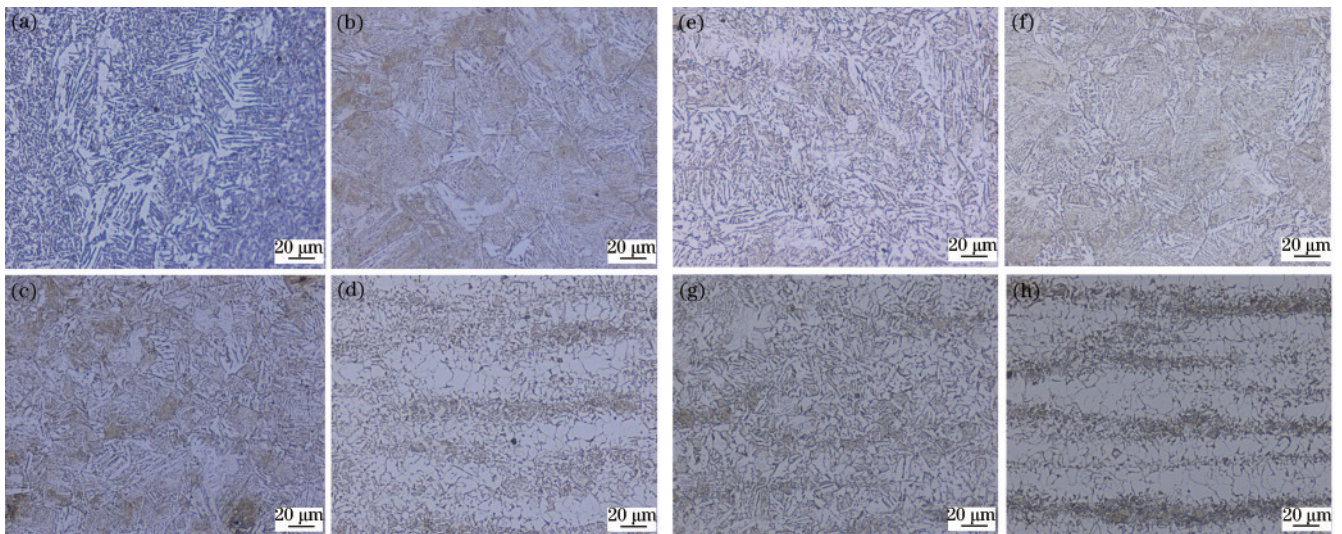


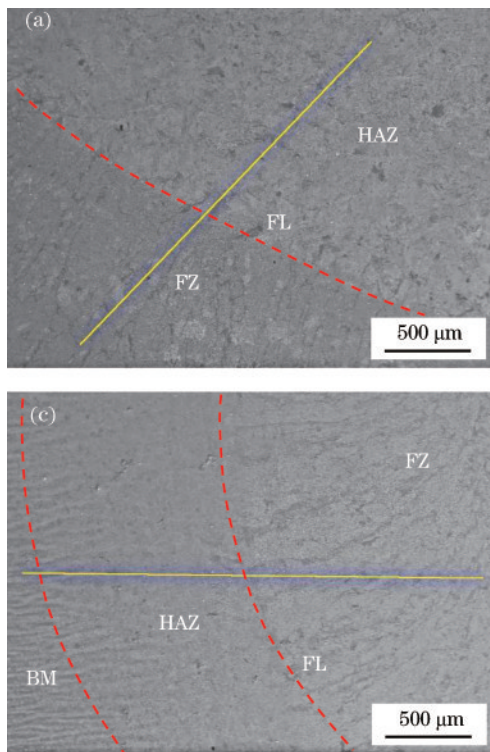
图 10 焊缝与热影响区显微组织。电弧主作用区(a)焊缝中心、(b)粗晶区、(c)细晶区、(d)不完全重结晶区;激光主作用区(e)焊缝中心、(f)粗晶区、(g)细晶区、(h)不完全重结晶区

Fig. 10 Microstructure of weld zone and heat affected zone. Main arc action zone (a) weld center, (b) coarse grain zone, (c) fine grain zone, and (d) incomplete recrystallization zone; main laser action zone (e) weld center, (f) coarse-grained zone, (g) fine-grained zone, and (h) incomplete recrystallization zone

从图 10(a)可以看出,焊缝组织存在大量的先共析铁素体(PF)、侧板条铁素体(FSP)、针状铁素体

(AF)以及少量的粒状贝氏体(GB)组织。从图 10(e)可以看出,激光主作用区焊缝组织主要存在大量的

AF 和 GB 组织,且数量明显多于电弧主作用区焊缝。对比发现,电弧主作用区焊缝中的 FSP 数量明显多于激光主作用区焊缝。由于热影响区距离焊缝中心 (WZ) 的距离不同造成各区域的峰值温度与冷却速率不同,对接接头的热影响区分为粗晶区 (CGHAZ)、细晶区 (FGHAZ) 和不完全重结晶区 (ICHAZ)。从图 10(b)、(c) 可以看出,热影响区中 CGHAZ、FGHAZ 的显微组织主要是由奥氏体相变和先共析铁素体结合形成的 GB 组织以及粗大的板条马氏体 (LM) 组成。对比图 10(b)、(f) 可以发现,激光主作用区 CGHAZ 中 LM 的数量明显少于电弧主作用区。对比图 10(c)、(g) 可以发现,与电弧主作用区 FGHAZ 相比,激光主作用区 FGHAZ 还包括均匀细小的块状铁素体和少量的珠光体。由图 10(d)、(h) 可以看出,热影响区 ICHAZ 主要由粗细晶粒混合形成的铁素体和珠光体组成,其中的铁素体为母材受热影响作用但尚未发生相变的组织,铁素体与珠光体集聚组织中的珠光体为重结晶相变组织。



3.4 焊接接头元素分布

图 11 为焊接接头熔合线附近区域电子探针线扫描结果。其中图 11(b)、(d) 分别是电弧主作用区和激光主作用区熔合线附近 C、Cr、Si 元素线分布变化。根据 EPMA-1600 电子探针分析仪试验结果可知:C 元素在电弧主作用区和激光主作用区熔合线靠近热影响区侧均出现较小的峰值变化,热影响区 C 元素的变化主要是由于母材被加热至 A_{c1} 以上某一温度,奥氏体首先在珠光体中铁素体和渗碳体相界面上形核,历经渗碳体的溶解、碳在奥氏体与铁素体中的扩散以及铁素体向奥氏体转变等过程促使晶粒长大。由于激光焊接过程冷却速度较快,较大的过冷度阻碍了受热长大奥氏体的扩散分解,渗碳体和铁素体相邻界面上奥氏体的碳含量不均匀性被保留下来,造成热影响区 C 元素发生波动。图 11(d) 中,C、Si 元素在激光主作用区焊缝侧出现较高的峰值,这种突变是由于添加焊丝导致在焊缝中形成了 Si 含量较高的碳化物,具体有待后续深入研究。Cr 元素在焊缝熔合线附近的分布变化较为平稳。

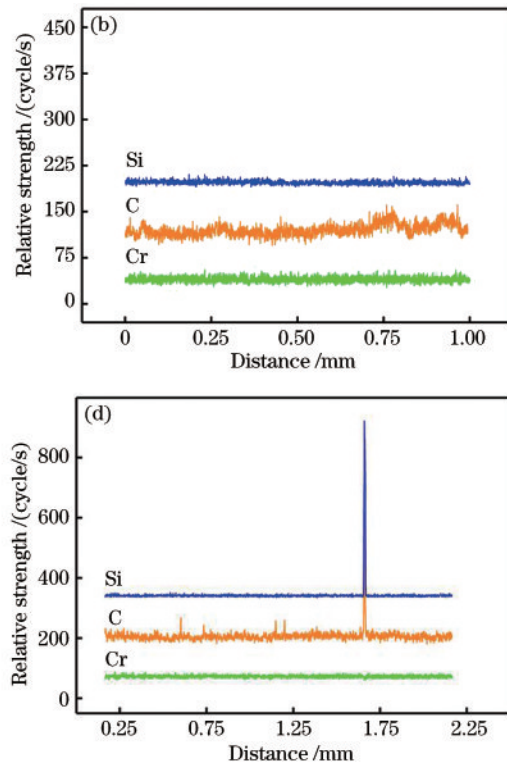


图 11 熔合线附近区域元素分布。(a)电弧主作用区熔合线附近照片;(b)图(a)的元素分布;(c)激光主作用区熔合线附近照片;(d)图(c)的元素分布

Fig. 11 Element distributions in the region near the fusion line. (a) Photo of the fusion line near the main arc action zone; (b) element distribution of Fig. (a); (c) photo of the fusion line near the main laser action zone; (d) element distribution of Fig. (c)

3.5 焊接接头硬度分布

图 12 为焊接接头显微硬度与距焊缝中心距离的关系曲线。从图 12 可以看出,焊接接头硬度呈“M”型轴对称分布。硬度最大值均位于靠近熔合线的热影响区附近,主要是由于接头热影响区部分区域存在晶粒尺寸较大的板条马氏体,热影响区硬度随着与焊缝中

心距离的增加而逐渐减小。

接头硬度变化出现上述特征,是由于在电弧主作用区,起始于熔合线的柱状晶和逐渐趋向于余高中心位置的细小等轴晶构成焊缝,其组织主要是铁素体。由于较快的冷却速度使得晶粒来不及长大,形成的细小晶粒提高了焊缝硬度,与母材相比整个焊缝硬度具

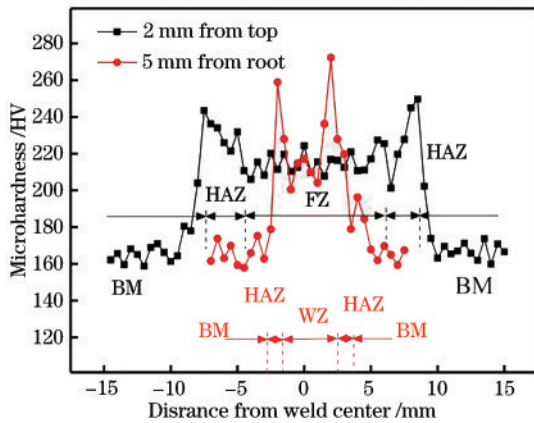


图 12 焊接接头的显微硬度与焊缝中心距离关系

Fig. 12 Relationship between microhardness of welded joint and distance from weld center

有明显提升。焊缝熔融金属在冷却过程中,杂质原子随着枝晶的长大逐渐向焊缝中心富集,造成焊缝区不同位置的显微硬度值具有明显不均匀性。激光主作用区主要受激光作用,其位置处于焊缝中下部。随着焊缝熔透深度增加,受激光作用产生的匙孔直径不断减小,再加上焊接过程中激光作用时间短,冷却速度较快,与电弧主作用区相比,焊接热循环对激光主作用区的影响较小,焊缝熔融面积以及热影响区面积能够很好地反映这一点。

4 结 论

模拟结果显示,平衡条件下母材与焊缝基体相均为 α 相,母材存在极少量的碳化物 M_7C_3 。XRD结果表明,母材与焊缝的基体相均为 α 相,但焊缝各衍射峰的强度均高于母材。

双光束激光能量比改变了激光能量密度分布,焊缝熔深随着能量比的增加表现为先减小后增加的趋势,引起焊缝熔深发生明显变化,但对焊缝熔宽变化影响较小。当双光束能量比为0.75时,可以获得较好的焊缝熔深。当双光束激光总输出功率为12 kW时,通过调整双光束能量比改变能量密度分布,焊缝的熔透深度由15.47 mm增加至18.15 mm,增长率达到17.32%。能量比的变化影响焊缝根部熔宽,这也给大厚板激光焊接背部熔透面临的工艺窗口较窄等问题提供了新的解决思路。在对接焊时,调整双光束能量比为0.6,应用功率为23 kW激光-MAG复合焊接技术实现27 mm厚板良好对接,进一步验证了能量比对焊缝熔深影响的显著性。

对接接头焊缝组织主要是铁素体,电弧主作用区熔融金属凝固取向垂直于熔合线逐渐趋向于余高中心,热影响区粗晶区域组织包括粗大的板条马氏体、粒状贝氏体组织,细晶区主要是尺寸较小的板条马氏体和贝氏体组织,不完全重结晶区主要是珠光体和铁素体组织。焊接接头熔合线附近元素均匀

分布。

焊接接头硬度峰值出现在靠近熔合线的热影响区内,热影响区硬度随着与焊缝中心距离的增加而逐渐降低,焊缝区的硬度明显高于母材。

参 考 文 献

- [1] 凌纯, 孟威. 高功率光纤激光焊接研究现状及展望[J]. 热加工工艺, 2017, 46(15): 15-18, 24.
Ling C, Meng W. Research status and prospect of high power fiber laser welding[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(15): 15-18, 24.
- [2] 冯立晨. Q235低碳钢厚板30 kW级超高功率激光深熔焊接特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
Feng L C. Research on characteristics of deep penetration welding of thick Q235 steel plates with 30 kW level laser [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [3] Helm J, Schulz A, Olowinsky A, et al. Laser welding of laser-structured copper connectors for battery applications and power electronics[J]. Welding in the World, 2020, 64 (4): 611-622.
- [4] Lahdo R, Springer A, Pfeifer R, et al. High-power laser welding of thick steel-aluminum dissimilar joints[J]. Physics Procedia, 2016, 83: 396-405.
- [5] 许平, 毕世权, 张伟宁, 等. 激光焊接大型整体壁板设计与考核方法[J]. 飞机设计, 2021, 41(4): 49-55.
Xu P, Bi S Q, Zhang W N, et al. Design and assessment method of laser welded large integral panel[J]. Aircraft Design, 2021, 41(4): 49-55.
- [6] 刘帅. 激光焊接技术在汽车零部件生产中的实际应用[J]. 时代汽车, 2021(18): 148-149.
Liu S. The practical application of laser welding technology in the production of auto parts[J]. Auto Time, 2021(18): 148-149.
- [7] Rong Y M, Mi G Y, Xu J J, et al. Laser penetration welding of ship steel EH36: a new heat source and application to predict residual stress considering martensite phase transformation[J]. Marine Structures, 2018, 61: 256-267.
- [8] Kawahito Y, Wang H Z, Katayama S, et al. Ultra high power (100 kW) fiber laser welding of steel[J]. Optics Letters, 2018, 43(19): 4667-4670.
- [9] 汪健坤, 李强, 黄磊, 等. 激光焊接技术最新研究进展及应用现状[J]. 金属加工(热加工), 2020(3): 4-10.
Wang J K, Li Q, Huang L, et al. The latest research progress and application status of laser welding technology [J]. Machinist Metal Forming, 2020(3): 4-10.
- [10] Xie J. Dual beam laser weld[J]. Welding Journal, 2002, 81(9): 222-230.
- [11] 杨海锋, 王旭友, 王威, 等. 铝合金双光束激光焊接过程稳定性分析[J]. 焊接学报, 2016, 37(6): 13-18, 129.
Yang H F, Wang X Y, Wang W, et al. Process stability analysis of double beam laser welding of aluminum alloy [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(6): 13-18, 129.
- [12] 赵燕春, 张培磊, 顾俊杰. 双束激光焊接的研究现状[J]. 材料导报, 2018, 32(S1): 345-349.

- Zhao Y C, Zhang P L, Gu J J. Research status on dual-beam laser welding[J]. *Materials Review*, 2018, 32(S1): 345-349.
- [13] 韩晓辉, 马寅, 马国龙, 等. 双光束激光焊匙孔动态特征分析[J]. *焊接学报*, 2020, 41(2): 93-96, 102.
Han X H, Ma Y, Ma G L, et al. Dynamic characteristic analysis of keyhole in double beam laser welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2020, 41(2): 93-96, 102.
- [14] 马国龙, 李俐群, 陈彦宾. 单/双光束激光焊接熔池行为及焊缝成形特性比较[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0202002.
Ma G L, Li L Q, Chen Y B. Comparative study of molten pool behavior and weld formation characteristic in single/dual beam laser welding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0202002.
- [15] 马国龙, 李俐群, 陈彦宾, 等. 十字交叉型接头双光束光纤激光焊接特性[J]. *中国激光*, 2017, 44(3): 0302002.
Ma G L, Li L Q, Chen Y B, et al. Dual beam fiber laser welding characteristics of cross-type joint[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(3): 0302002.
- [16] Harooni M, Carlson B, Kovacevic R. Dual-beam laser welding of AZ31B magnesium alloy in zero-gap lap joint configuration[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 56: 247-255.
- [17] Zhang M J, Chen G Y, Zhou Y, et al. Observation of spatter formation mechanisms in high-power fiber laser welding of thick plate[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 280: 868-875.
- [18] 张迪, 赵琳, 刘奥博, 等. 激光能量对激光焊接接头熔化形状、气孔和微观组织的影响及其调控方法[J]. *中国激光*, 2021, 48(15): 1502005.
Zhang D, Zhao L, Liu A B, et al. Understanding and controlling the influence of laser energy on penetration, porosity, and microstructure during laser welding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(15): 1502005.