

焊接热输入对 Q890/Q550 异种钢激光-MAG 复合焊接头组织及力学性能的影响



雷正龙

雷正龙¹ 熊鹰¹ 黎炳蔚¹ 海卫东² 卫国强²

(1. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001;

2. 山西平阳重工机械有限责任公司, 山西 侯马 710025)

摘要 采用激光-MAG 复合焊进行了 Q890/Q550 异种钢焊接试验, 研究不同焊接热输入对异种钢焊接接头显微组织和力学性能的影响。试验结果表明, 在相同热输入下, 焊缝两侧过热区主要由板条马氏体和少量贝氏体组织组成, 细晶区为致密的板条马氏体组织, Q890 钢侧的马氏体含量比 Q550 侧多, 板条更加粗短, 焊缝冲击断口具有剪切切窝特征, 冲击韧性优于热影响区; 随着热输入从 3.5 kJ/cm 增加到 9.6 kJ/cm, 过热区晶粒粗化, 贝氏体逐渐增多, 马氏体含量减少, 焊缝和热影响区冲击吸收能量略微减小。三种热输入下拉伸试件均断在母材 Q550 钢, 断后伸长率相当, 断裂方式为韧性断裂, 焊接接头强度高于母材。

关键词: Q890/Q550 异种钢焊接接头 激光-MAG 复合焊 焊接热输入 显微组织 力学性能
中图分类号: TG456.7

0 前言

低合金高强钢具有高强度、优良塑韧性的特点, 目前广泛应用于车辆制造、建筑桥梁、船舶工程等领域^[1-2], 在大量的工程应用中需要进行焊接, 还可能采用异种钢结构, 来满足服役环境下对材料的不同要求, 充分发挥材料各自的优势性能。大量工程实践表明,

低合金高强钢焊接接头质量, 尤其是异种钢接头, 已经成为影响服役期间可靠性的重要因素^[3]。但传统的弧焊工艺会导致低合金高强钢焊接接头的过热区晶粒粗大脆化, 具有较强的冷裂纹倾向等问题, 成为接头性能的薄弱环节^[4-5], 而且厚板焊接工序多, 生产周期长, 劳动强度大, 大大降低了工程效率。杨景华等人^[6]采用 CO₂ 气体保护焊对低合金高强钢 GR. 65 钢进行焊接试验发现, 大热输入 (40 kJ/cm) 下抑制粗晶区晶粒长大的第二相粒子完全溶解, 并生成上贝氏体等低韧

性组织;陈玉喜^[7]发现大热输入会导致 Q690E 钢焊缝与过热区产生联生结晶,焊缝柱状晶粗大,显著降低焊缝冲击性能。许红等人^[8]针对 Q890/Q960 异种低合金高强钢进行 MAG 焊,试验发现热输入过大时,焊缝的针状铁素体组织与过热区板条马氏体的接触界面存在高密度位错,熔合区易形成裂纹源,减小热输入可将接头裂纹率控制在较低水平。

激光-电弧复合焊由于具有能量密度高、焊接热输入小、适应性和稳定性好等特点,尤其是厚板焊接时可以增大钝边,一方面可以减小热输入,从而可以减少变形,缩小热影响区,有效抑制接头微观组织粗化,提高焊接接头综合力学性能;另一方面可以减少填充量,减少焊接工序,降低经济和时间成本等^[9-11]。Minhyo Shin 等人^[12]对 12 mm 厚 SM490 钢(Q345 钢)实现了光纤激光-MAG 焊单道全焊透,且接头无脆性相产生。C. Roepke 等人对 DH36 和 EH36 船板钢进行 CO₂ 激光-MIG 复合焊,研究发现减小电弧热输入和光丝间距有利于促进针状铁素体的生成,可实现接头韧性与母材相当^[13-14]。马志华等人^[15]采用激光-MIG 复合焊对钝边 12 mm 的奥氏体不锈钢进行双面单道焊接,结果表明热影响区较窄,软化区较小,抗拉强度可达母材的 93.8%。姚为等人对厚板铝合金进行激光-MIG 复合焊,结果表明采用打底焊+盖面焊的工艺方式对解决焊缝表面成形缺陷问题有显著成效,焊接接头强度优于母材^[16-17]。张熊等人^[18]对 20 mm 厚 16MnDR 钢进行激光-MIG 复合焊,结果表明多层多道激光复合焊与传统弧焊工艺相比,焊接热输入降低 45%,焊接效率提高 1.5 倍,且焊缝内部无明显缺陷产生。基于激光-电弧复合焊对厚板焊接的低热输入和高焊接效率的优势及目前对 Q890/Q550 厚板异种钢的高能束焊接的研究相对较少。文中将以 Q890 钢和 Q550 钢为母材,进行厚板 Q890/Q550 异种钢激光-MAG 复合焊接试验,分析热输入对焊缝和热影响区的组织转变及力学性能的影响规律。

1 试验材料及方法

试验所选用的母材为 Q890 和 Q550 低合金高强钢,尺寸均为 500 mm × 200 mm × 25 mm。焊丝型号为 BHG-5,直径为 1.2 mm。母材和焊丝的成分和力学性能见表 1 和表 2。激光器采用 IPG 公司生产的 YLS-10 000 高功率光纤激光器,焊机采用 Fronius 公司生产的 TPS4 000 MIG/MAG 焊机,保护气体为 80% Ar +

20% CO₂。焊接接头采用单边坡口角度为 10° 的 U 形坡口,钝边 8 mm,组对间隙 1.2 mm,其坡口示意图如图 1 所示。

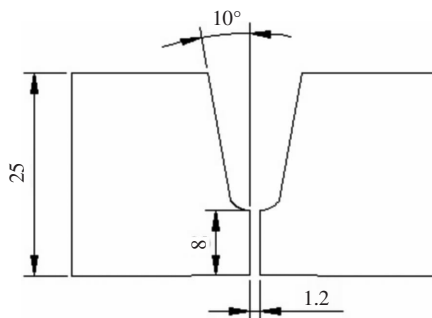


图 1 试样焊接坡口示意图

焊前用角磨机对坡口两侧进行清理,打磨出母材金属光泽,并用丙酮清洗,以去除表面油污。将两板组合配对并点固,首先采用激光-MAG 复合焊进行打底层焊透,再以多层单道方式进行 MAG 焊填充、盖面工艺,填充、盖面焊过程中加入小功率(500 W)激光有助于提高电弧稳定性,并且每道焊后及时清除表面焊渣,层间温度控制在 150 ~ 200 °C,主要工艺参数见表 3。焊后将试件冷却至室温,通过线切割截取焊接接头金相试样,依次采用 60 号、240 号、400 号、600 号、800 号、1 000 号金相砂纸研磨并用酒精抛光后,用 4% 硝酸酒精溶液进行腐蚀,然后采用 VHX-1 000E 光学显微镜观察接头微观组织。采用 HVS-5 型维氏硬度计进行硬度测试,试验载荷为 100 g,加载时间为 10 s。按照 GB 2651-2008 在 CSS 44 300 电子万能试验机上对焊接接头试样进行拉伸试验,并采用 INSTRON 9 250 HV 型落锤冲击试验机进行室温冲击试验,在接头焊缝和两侧热影响区分别开缺口,缺口方向垂直于板厚方向,每个位置取 3 个试样,试样尺寸为 55 mm × 10 mm × 5 mm(图 2),最终冲击吸收能量取平均值。

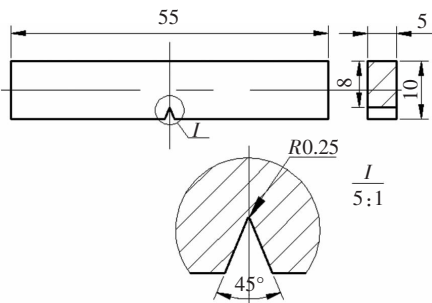


图 2 缺口冲击试样尺寸示意图

表1 试验材料和焊丝的化学成分(质量分数,%)

试验材料	C	Mn	P	S	Si	Nb	Mo	Cr	Ni	Ti
Q550	0.18	1.60	0.018	0.007	0.50	0.050	0.50	0.80	0.80	0.017
Q890	0.20	1.60	0.015	0.005	0.40	0.050	0.65	1.20	1.50	0.017
BHG-5	0.07	1.71	0.006	0.004	0.62	—	0.45	0.32	2.35	0.040

表2 试验材料和焊丝的力学性能

试验材料	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	抗拉强度 R_m /MPa	断后伸长率 A (%)
Q550	622	790	17.0
Q890	970	1 040	16.0
BHG-5	918	1 010	16.0

表3 焊接工艺参数

打底焊					填充、盖面焊			
焊接速度 $v/(m \cdot min^{-1})$	激光功率 P/kW	焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊接热输入 $E/(kJ \cdot cm^{-1})$	激光功率 P/kW	焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	层间温度 $T/^\circ C$
0.6 ~ 1.2	5.0 ~ 6.0	120 ~ 170	16 ~ 21	3.5 ~ 9.6	500	220 ~ 250	25 ~ 28	150 ~ 200

2 试验结果及分析

2.1 焊接接头显微组织

2.1.1 焊接热输入对焊缝组织的影响

不同热输入下的焊接接头整体形貌相似,如图3所示。其中焊缝打底层组织具有明显的方向性如图4所示,这主要由两个因素造成:一是坡口形状,打底层位于坡口钝边区域,其两侧被母材包围,根部间隙小,焊缝冷却速度快;二是采用激光-MAG复合焊工艺,热输入较小,高温停留时间短,焊缝冷却速度快。快的冷却速度使焊接接头形成很大的温度梯度,熔合线附近的焊缝晶粒与热影响区晶粒联生结晶,以柱状晶的形式优先从熔池两侧向中心迅速生长,并且当生长至熔池中心后,由于上下表面与焊缝存在较大的温度梯度,靠近上下表面的焊缝晶粒会分别向上和向下生长,因

此焊缝打底层上部向上弯曲如图4a所示,下部向下弯曲如图4c所示。图5显示了激光-MAG复合焊接时,不同热输入下的焊缝显微组织,可以看出焊缝金属组织类型基本相同,均为板条状马氏体和少量贝氏体的混合组织。随着热输入的增加,原奥氏体晶界更加明显,马氏体板条更加粗短,贝氏体含量增多。

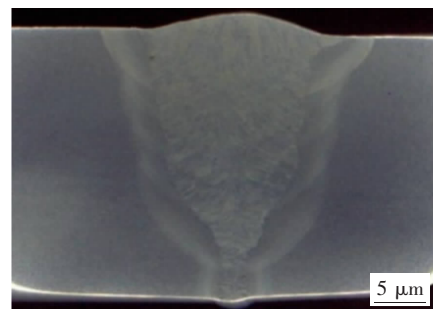
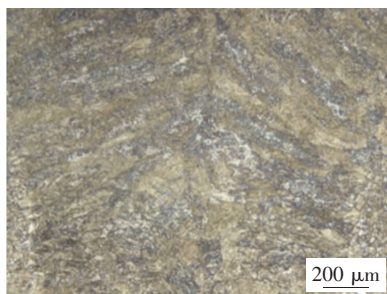
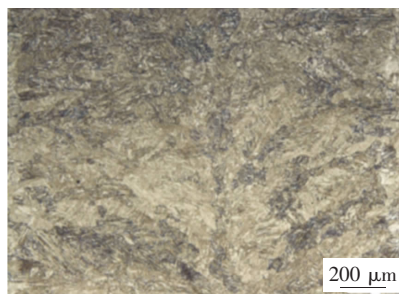


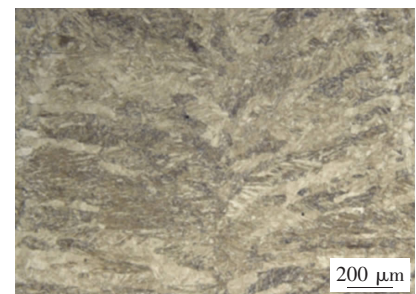
图3 焊接接头形貌



(a) 上部

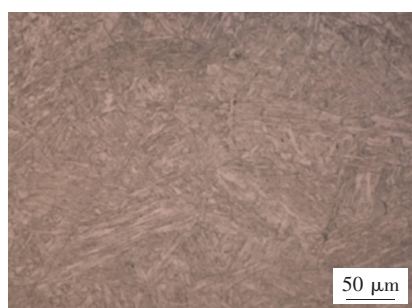


(b) 中部

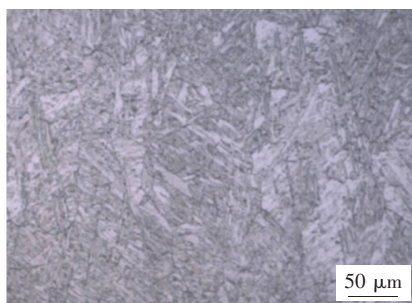


(c) 下部

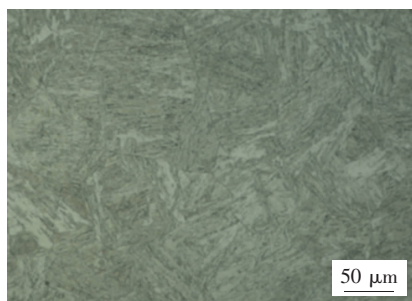
图4 焊缝打底层形貌



(a) 3.5 kJ/cm



(b) 5.4 kJ/cm



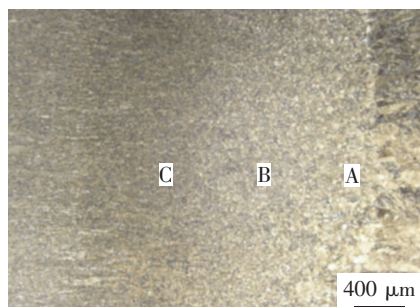
(c) 9.6 kJ/cm

图5 不同热输入焊缝显微组织

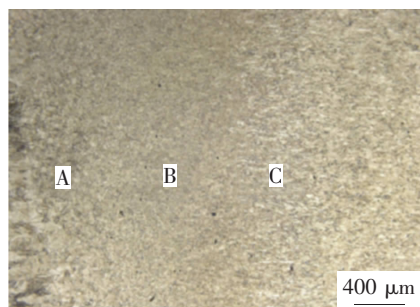
2.1.2 焊接热输入对热影响区组织的影响

三种热输入下焊接接头 Q550 钢侧和 Q890 侧的热影响区分布大致相同,以热输入 3.5 kJ/cm 时的焊接接头为例,两侧热影响区均由完全淬火区和不完全淬火区(如图 6a 及图 6b 中 C 区域)组成,其中完全淬火区包括过热区(如图 6a 及图 6b 中 A 区域)和细晶区(如图 6a 及图 6b 中 B 区域)。但在同一热输入下接头两侧完全淬火区的显微组织存在差别,Q550 钢侧的过热区晶粒长大,为板条马氏体和少量贝氏体的混合组织(图 7a),细晶区为细小的板条马氏体组织(图 7b),这是由于激光-MAG 复合焊热输入低,熔合线母材一侧的焊接热循环峰值温度稍高于 A_{c3} ,在快速冷却下得到大量细小的板条马氏体;Q890 钢侧的过热区组织类型与 Q550 钢侧相同(图 7c),但板条马氏体的含量比 Q550 钢侧多,且板条更加粗短,由于在相同热输入下

两侧冷却速度一致,因此马氏体含量差异只能是 Q550 钢和 Q890 钢母材成分组成不同导致的。从表 1 可知,Q890 钢的合金元素含量比 Q550 钢高,尤其是 Mo 能显著增强过冷奥氏体的稳定性^[19],CCT 曲线右移,在同样热输入作用下马氏体含量更多。

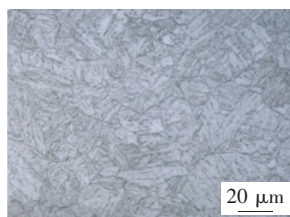


(a) Q550 钢侧

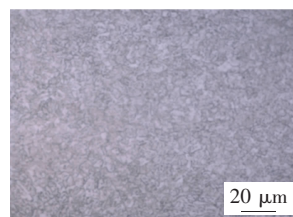


(b) Q890 钢侧

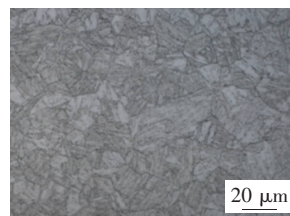
图6 激光-MAG 复合焊打底层热影响区整体形貌(3.5 kJ/cm)



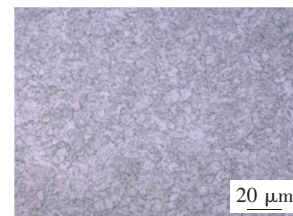
(a) Q550 钢侧过热区



(b) Q550 钢侧细晶区



(c) Q890 钢侧过热区



(d) Q890 钢侧细晶区

图7 接头热影响区显微组织

过热区是焊接接头较薄弱的区域,Q890 钢和 Q550 钢焊接热影响区组织分布不均匀,过大的热输入会导致过热区晶粒粗大易发生脆化。图 8 和图 9 反映了激

光-MAG复合焊条件下三种热输入对焊接接头两侧过热区显微组织的影响。由图可知,不同热输入下过热区均为板条马氏体和贝氏体的混合组织,但随着热输入增大,晶粒尺寸变大,且马氏体含量减少,贝氏体含量增加。具体地,当热输入为3.5 kJ/cm时晶粒尺寸为5~20 μm ,而热输入为9.6 kJ/cm时最大晶粒尺寸可达50 μm ,这是由于热输入增大使焊接接头冷却速度变慢,过冷度减小,临界形核尺寸增加,形核率降低,焊接

热循环中停留在 A_{c3} 线以上的高温时间增加,晶粒尺寸逐渐增大。另一方面,热输入增大使冷却速度减慢,贝氏体转变时间延长,增加了贝氏体转变量,而马氏体含量减少。在焊接热循环的连续冷却阶段,贝氏体组织先在奥氏体晶界生成,对后形成的马氏体板条起了细化作用,提高了亚晶界密度,有利于阻碍裂纹在此区域的进一步扩展,因此贝氏体组织提高了焊接接头的韧性^[20]。

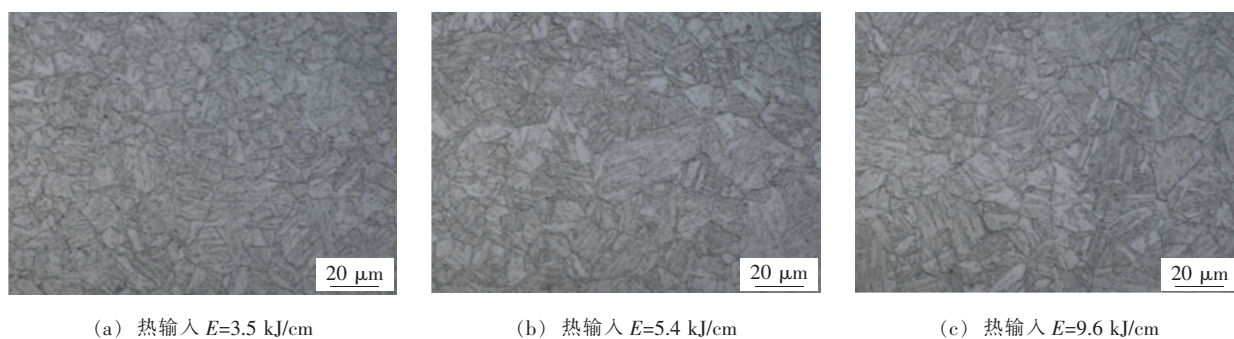


图8 Q890侧过热区显微组织

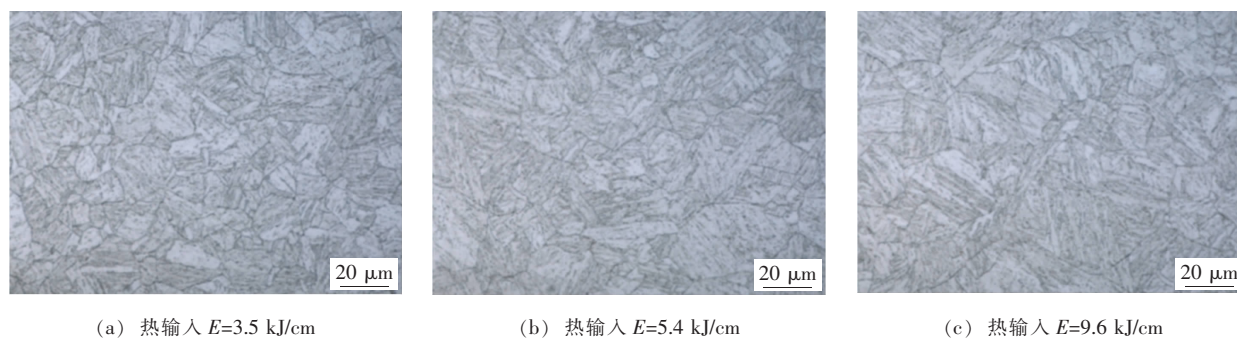


图9 Q550钢侧过热区显微组织

2.2 焊接接头显微硬度

图10为不同热输入下焊接接头的硬度分布。结果表明不同热输入下焊接接头硬度分布均呈驼峰状,焊缝硬度值有一定的波动,但高于母材,峰值硬度位于两侧热

影响区,其中Q890钢侧硬度高于Q550钢侧。分析认为这是由于细晶区大量生成细小板条马氏体,相比于焊缝,晶界密度大,具有大量的晶格畸变和高密度位错亚结构,硬度得到显著提高,而且Q890钢侧热影响区的马氏体

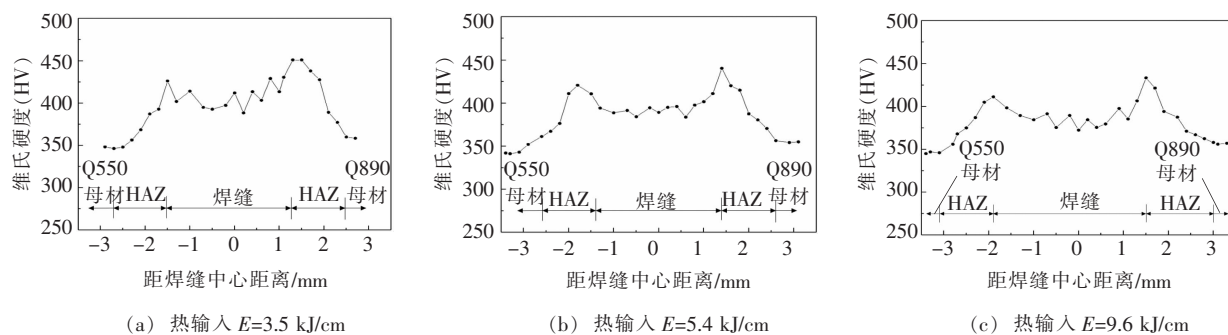


图10 不同热输入下Q890/Q550钢焊接接头硬度分布

淬硬组织的含量高于 Q550 钢侧,最高硬度出现在 Q890 钢侧。随着热输入增大,焊缝和热影响区硬度均有下降的趋势。这归因于热输入增大,焊缝和热影响区发生贝氏体转变导致马氏体淬硬组织减少的结果。

2.3 接头综合力学性能测试结果

对 Q550/Q890 异种钢激光复合焊接接头打底层进行拉伸及室温冲击试验。不同热输入下的试验结果见表 4。三种热输入下拉伸试样均以韧性断裂的方式断裂

于母材 Q550 钢,断后伸长率相当,如图 11 所示,说明在 3.5~9.6 kJ/cm 的热输入范围内,激光-MAG 复合焊均能较好地保证焊接接头强度高于母材,焊接接头拉伸性能无明显差异。同一热输入下焊缝的冲击吸收能量高于热影响区,Q550 钢侧的冲击吸收能量略高于 Q890 钢侧,焊缝和热影响区两侧的冲击断口放射区典型形貌如图 12 所示,三个部位均为韧窝断口,但焊缝处为剪切韧窝,且韧窝较深,热影响区两侧为小尺寸韧

表 4 不同热输入下 Q890/Q550 钢焊接接头综合力学性能

热输入 $E/(kJ \cdot cm^{-1})$	拉伸性能			冲击吸收能量 KV/J		
	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 $A(\%)$	断裂位置	焊缝处	Q550 钢侧	Q890 钢侧
3.5	795	15.5	母材	94	74	68
5.4	769	16.0	母材	90	73	65
9.6	784	15.0	母材	91	70	63

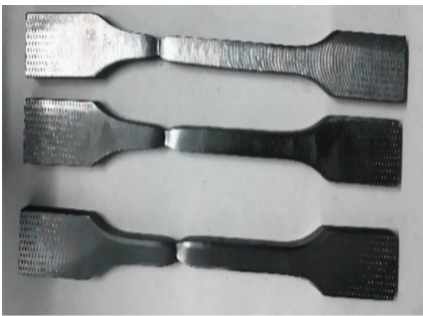
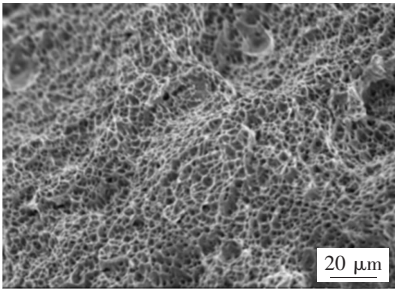
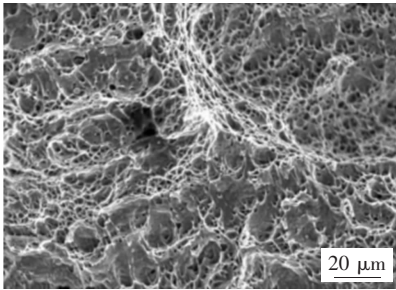


图 11 拉伸试样

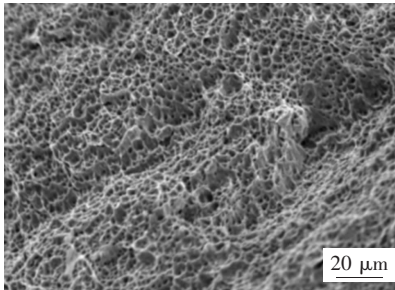
窝,说明热影响区在剪切应力作用下,没有沿着剪切方向被拉长,因此接头焊缝的冲击韧性比热影响区好。随着热输入从 3.5 kJ/cm 增大到 9.6 kJ/cm,焊接接头冲击吸收能量仅仅略有减小,结合之前的组织分析,虽然热输入增大会使熔合线附近的热影响区过热度增大,导致晶粒粗大,但激光-MAG 复合焊接输入小,其程度还不足以大幅度削弱焊接接头韧性,另一方面马氏体淬硬组织含量减少,贝氏体对马氏体板条的细化作用有利于提高焊接接头韧性。



(a) Q550 钢侧



(b) 焊缝



(c) Q890 钢侧

图 12 冲击断口形貌

3 结论

(1) Q890/Q550 异种钢激光-MAG 复合焊接接头两侧热影响区组织相同,过热区为板条马氏体+少量贝氏体组织,细晶区为细小的板条马氏体组织。但 Q890 钢侧的板条马氏体的含量比 Q550 钢侧多,且板

条更加粗短,这是由于 Q890 钢含有较多增强过冷奥氏体稳定性的合金元素,导致在同样热输入作用下马氏体含量更多。

(2) 随着焊接热输入从 3.5 kJ/cm 增加到 9.6 kJ/cm, Q890/Q550 异种钢激光复合焊接接头两侧热影响区晶粒尺寸从 5 μm 增加到 50 μm 左右,贝氏体转变时间延

长,贝氏体转变量增加,而马氏体含量减少。

(3)三种热输入下拉伸试件均断在母材 Q550 钢,断后伸长率相当,断裂方式均为韧性断裂;冲击试验表明焊缝断口存在剪切韧窝,冲击韧性优于两侧热影响区。随着热输入增大,接头冲击吸收能量仅略有减小,这是由激光-MAG 复合焊的小热输入特点和贝氏体转变共同决定的。

参考文献

- [1] 张晓刚. 近年来低合金高强度钢的进展[J]. 钢铁, 2011,46(11):1-9.
- [2] 张有为,周细应,贾涵浩,等. 低合金高强钢不预热焊接技术的研究与发展[J]. 热加工工艺,2016,45(11):11-13.
- [3] 黄本生,黄龙鹏,李慧. 异种金属焊接研究现状及发展趋势[J]. 材料导报,2011,25(12):118-121.
- [4] 张华军,张广军,王俊恒,等. 低合金高强钢双面双弧焊热循环对组织性能的影响[J]. 焊接学报,2007,28(10):81-84.
- [5] Seo J S, Kim H J, Ryoo H S. Microstructure parameter controlling weld metal cold cracking[J]. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2008, 27(2): 199-202.
- [6] 杨景华,周继烈,叶尹,等. 焊接热输入对低合金高强钢焊接热影响区组织性能的影响[J]. 热加工工艺,2011,40(3):140-143.
- [7] 陈玉喜,刘亮,张华军,等. 焊接热输入对低合金高强钢焊缝组织和韧性的影响[J]. 上海交通大学学报,2015,49(3):306-309, 314.
- [8] 许红,李亚江,马群双,等. 液压支架用 Q890/Q960 高强钢焊接裂纹敏感性研究[J]. 现代焊接,2015(6):30-33.
- [9] 杨臻,张平,蔡志海,等. 高强钢激光-电弧复合焊接接头力学性能研究[J]. 兵工学报,2017,38(3):449-554.
- [10] Katayama S, Naito Y, Uchiyumi S, et al. Laser-Arc Hybrid Welding[J]. Solid State Phenomena, 2007, 127:295-300.
- [11] 史鹏飞,黄坚,澹台凡亮,等. 27SiMn 高强钢激光-MAG 复合焊接头组织和性能[J]. 中国激光,2017,44(10):1002001-1-7.
- [12] Shin M, Nakada K. Single pass full penetration welding of high-tensile steel thick-plate using 4 kW fiber laser and MAG arc hybrid welding process[J]. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 2009, 27(2):80-84.
- [13] Roepke C, Liu S, Kelly S, et al. Hybrid laser arc welding process evaluation on DH36 and EH36 steel[J]. Welding Journal, 2010, 89(7):140-149.
- [14] 徐国建,祝影,杭争翔,等. 高强钢 CO₂ 激光-MAG 复合焊接性能[J]. 焊接学报,2016,37(7):17-21.
- [15] 马志华,陈东高,刘红伟,等. 中厚度高氮钢激光-MIG 复合焊接头组织与性能研究[J]. 热加工工艺,2014,43(11):194-196.
- [16] 姚为,王志敏,李宏伟,等. 中厚板铝合金激光-MIG 复合双层焊接方法[J]. 焊接学报,2011,32(7):21-24.
- [17] 许良红,彭云,田志凌,等. 激光-MIG 复合焊接工艺参数对焊缝形状的影响[J]. 应用激光,2006,26(1):5-9.
- [18] 张熊,黎硕,米高阳,等. 厚板 16MnDR 窄间隙激光-MIG 复合焊接工艺研究[J]. 中国激光,2016(1):46-54.
- [19] 崔忠圻,覃耀春. 金属学与热处理[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [20] 徐祖耀. 条状马氏体形态对钢力学性质的影响[J]. 热处理,2009,24(3):1-6.

作者简介:

雷正龙,1977 年出生,博士,副教授,博士生导师。主要从事多能场激光复合加工基础与应用、绿色激光清洗理论与技术、激光连接界面行为与基础理论、激光焊接过程质量检测与智能控制等方面研究。现任中国光学学会激光加工专业委员会委员,中国机械工程学会机器人分会委员。作为项目负责人和主要技术负责人,承担了国家重点研发计划、国家自然科学基金、国防技术基础、总装预研重点基金等纵向和航天航空、船舶、兵器、中石油、中石化和高铁等横向项目共 30 余项项目的研究。近年来作为主要作者共发表 SCI/EI 学术论文 70 余篇,其中以第一或通讯作者发表 SCI/EI 论文 40 余篇;申请国家发明专利(软件著作权)50 余项,授权 35 余项;获得 2013 年度黑龙江省技术发明一等奖 1 项,中国科协优秀科技论文 1 项,中国创新创业军民大赛三等奖 1 项。