

焊接活性剂对低碳钢焊缝成形性能的影响

戴明佳¹, 张皓², 郑小春¹, 张浩云², 付云龙², 宫晓峰¹

1. 烟台职业学院 山东烟台 264000

2. 哈尔滨工业大学(威海) 山东威海 264200

摘要: 焊缝的熔深和熔宽决定了低碳钢的应用普及, 控制焊接速度、改变离焦量、引入保护气体和调整焊接姿态等方法虽然可以改善焊接效果, 但是通常需要高功率激光器。在低功率下通过引入焊接活性剂提高焊缝熔深和焊缝晶粒相的形态。引入单一焊接助剂二氧化钛和氧化镁, 焊缝熔深从2383 μm 分别增加到2822 μm 和2747 μm , 调整复合助剂中二氧化钛和氧化镁的质量分数, 焊缝熔深进一步提高, 最高熔深达到3390 μm , 比无焊接助剂的焊缝熔深提高42%以上, 提高的焊接熔深归因于两种焊接助剂的协同作用。研究结果提供了一种在低功率下提高焊缝熔深的一般方法。

关键词: 低碳钢; 激光焊接; 低功率; 熔深; 焊接助剂

Effect of welding active agent on forming property of low carbon steel

DAI Mingjia¹, ZHANG Hao², ZHENG Xiaochun¹, ZHANG Haoyun², FU Yunlong², GONG Xiaofeng¹

1. Yantai Vocational College, Yantai 264000, Shandong, China

2. Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264200, Shandong, China

Abstract: The penetration depth and width of the weld determine the popularity of the application of low carbon steel. Controlling the welding speed, changing the defocus amount, introducing protective gas and adjusting the welding attitude can improve the welding effect, but usually require high power laser. In this paper, the weld penetration and the grain phase morphology of the weld are improved by introducing active flux at low power. By introducing single welding additives titanium dioxide and magnesium oxide, the weld penetration depth increased from 2383 μm to 2822 μm and 2747 μm , adjusting the mass fraction of titanium dioxide and magnesium oxide in the composite additives, the weld penetration depth was further improved, and the maximum penetration depth reached 3390 μm , which was more than 42% higher than the weld penetration depth without welding additives. The improved welding penetration is attributed to the synergistic action of the two welding AIDS. This paper provides a general method for improving weld penetration under low power.

Keywords: low carbon steel; laser welding; low power; penetration; welding auxiliary

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2024QB387); 国家自然科学基金(52305346)。

通信作者: 郑小春, 讲师, 博士, 主要从事二维纳米材料的制备研究、低碳钢焊接助剂和重金属离子的检测等研究,

E-mail: 15053132811@163.com。

1 序言

作为一种含碳量低的碳素结构钢，低碳钢具有表面易处理、力学性能优异和焊接性能良好等特性，其广泛应用于汽车、仪表壳、管道、化工设备等领域^[1-6]，其中，焊接效果决定了低碳钢的应用普及。传统焊接方法难以同时提高焊缝深度和质量，这不利于低碳钢材料的结构强度和使用寿命，限制了其在特定领域的进一步应用。近年来，具有穿透能力强、能量密度高和焊接质量好的激光焊接技术被广泛探索，其能够缩短熔池冷却的速度并加大焊缝的深宽比。激光焊接通常包括深熔焊、传导焊和激光-MIG复合焊等多种焊接方法，已经在降低气孔率、下塌、凹坑等方面取得了一定的成就^[7-9]，但是仍然存在焊缝熔深不足的问题。

提高焊接性能的常用方法包括改变焊接速度、离焦量，引入保护气体和控制焊接姿态等。例如，SHIN等^[10]利用大功率光纤激光焊接SS400钢，并探究了不同离焦量（-16~16mm）时的焊缝深度，结果表明，焊缝的最大深度达到16mm，并可实现全熔透。KAWAHITO等^[11]分析了聚焦光斑和焊接速度对304不锈钢板焊缝成形的影响，当焊接速度为5mm/s且使用氮气作为保护气体时，得到了18.2mm的单道最大焊接熔深。张旭东等^[12]以12mm厚的低碳钢为研究对象，分析了保护气体（CO₂和Ar）对其焊缝的影响。试验结果表明，在CO₂保护气条件下形成的接头组织硬度较低、显微冲击韧度较高。值得注意的是，上述方法利用高功率激光器分析了工艺参数对焊接效果的影响，需要比较严苛的焊接条件。通过在母材表面涂上一层活性焊剂在达到相同熔深的条件下热输入会降低，提高焊接效率，特别是在TIG焊领域^[13, 14]。利用二氧化硅、二氧化钛、三氧化二铬和卤化物的混合物作为焊接助剂，焊缝的熔深增加3倍，焊缝的化学成分不变^[15]。基于上述研究情况，本文设想利用活性焊剂在低功率下提高焊接熔深，从而提高焊接性能。

2 试验过程

2.1 试验材料

试验采用EH36钢，试样材料尺寸为240mm×75mm×9mm，其主要成分包括： $w_C=0.1\%$ 、 $w_{Si}=0.17\%$ 、 $w_{Mn}=1.58\%$ 、 $w_P=0.013\%$ 、 $w_S=0.002\%$ ，

焊前低碳钢需要进行表面处理，利用有机溶剂（丙酮）清除EH36钢表面的油污，然后用砂纸多次擦拭工件以完全去除其表面的氧化膜，最后利用无水乙醇彻底清洗工件并真空烘干，为了保证工件彻底烘干，烘干的温度和时间分别设为40℃和1h。

2.2 试验设备与方法

采用山东海富光子科技股份有限公司生产的HCFM-6000型激光器进行焊接试验，最大输出功率6000W，波长1080nm，为了防止发生氧化，试验中采用氩气作为保护气体，其流量设为100L/min，此流量是相同参数范围内保护效果较好的一个数值。此外，离焦量、焊接速度和功率分别设为0、10mm/s和3500W。

本文主要探究活性剂对焊接效果的影响，考虑到丙酮是一种优异的有机溶剂，能够溶解多数金属氧化物，特别是其挥发性好，试验前将适量的活性剂均匀分散在丙酮中，并涂敷在工件上的特定区域，待自然风干后进行焊接试验，焊接过程中采用多种活性焊剂，样品的具体参数见表1。

表1 不同活性焊剂中各组分的质量分数（%）

项目	二氧化钛	氧化镁
样品1	0	0
样品2	100	0
样品3	20	80
样品4	40	60
样品5	50	50
样品6	60	40
样品7	80	20
样品8	0	100

焊接试验完成后，使用电火花线切割将所有工件切割成金相试样（14mm×7mm×5mm），为了对其表面更好地抛光处理，选择200~2000目的砂纸机，利用混合液（4mL HNO₃+96mL C₂H₆O）腐蚀抛光后的工件。利用光学金相显微镜观察、探究和测量焊缝熔深及熔宽，并在高倍数下分析晶粒的尺寸和类别，最后在特定区域进行硬度分析。

3 试验结果与分析

为比较研究不同焊接助剂条件下的焊缝成形特征，得到了焊接区域的宏观形貌，如图1所示。从图1中可以看出，所有焊接区域的长度大约为10cm。值得注意的是，图1a~h的宏观形貌属于表1中的样

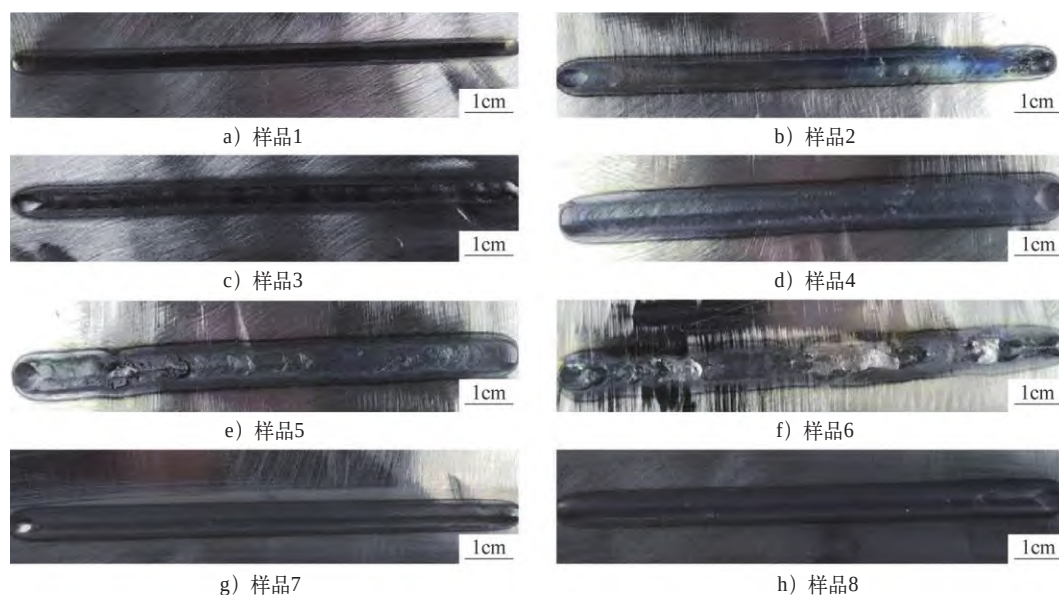


图1 不同焊接助剂下焊接区域宏观形貌

品1~样品8,复合焊接助剂中二氧化钛的比例从0增加到100%。所有工件处于未焊透的状态,这可能归因于所用激光器的功率较低,焊缝区域成形良好、均匀,飞溅较少,焊道略有凹陷。

图2所示为不同焊接助剂下焊缝横截面形貌,由

图2可见,焊缝截面呈较规则的钉子状结构,上部较宽而中下部细长,为了便于观察焊缝的熔合区,在热影响区周围标注了熔合线,如图2中虚线所示。相较于没有添加焊接助剂工件的熔深(见图2a),其余涂覆焊接助剂工件的熔深均增加(见图2b~h),

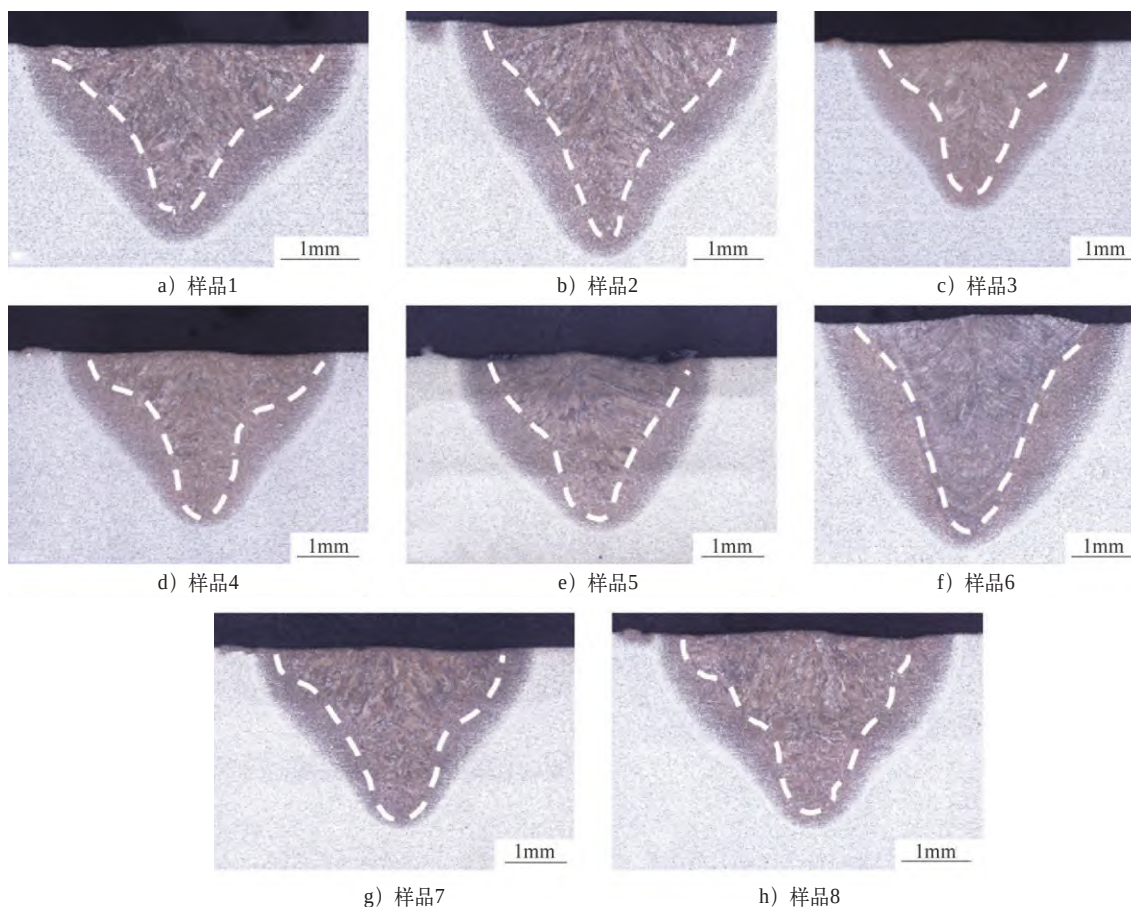


图2 不同焊接助剂下焊缝横截面形貌

其余熔宽也有所变化。为了便于比较,测量和汇总了涂覆8种焊接助剂焊接区域的焊缝熔深及熔宽。

当焊接区域无焊接助剂时,熔深和熔宽分别为2383 μm 和3603.5 μm ,在焊接区域分别引入单一活性助剂二氧化钛(样品2)和氧化镁(样品8)之后,焊缝的熔深分别增加到2822 μm 和2747 μm 。此外,分析了复合焊接助剂对焊缝熔深的影响,当二氧化钛的质量分数从20%增加到60%,焊缝的熔深逐渐增加,继续增加复合焊接助剂中二氧化钛的含量,熔深与二氧化钛的含量成反比,即复合助剂中二氧化钛的质量分数为60%时(样品6),焊缝的熔深最深(3390 μm),比无焊接助剂存在时焊缝熔深提高42%以上,如图3所示。为了便于比较焊缝的熔深和熔宽,在图3中添加了具体的数值,此外,较小的误差说明测量结果良好的重复性。相较于单一活性助剂,增加的焊缝深度和减小的焊接熔宽归因于复合焊接助剂中两种组分的协同作用。存在焊接助剂时,在较低功率下可以实现较高的热输入,这促使激光束可以熔化更多的金属,实现较大的熔深。

图4所示给出了有无涂覆活性剂热影响区和熔覆

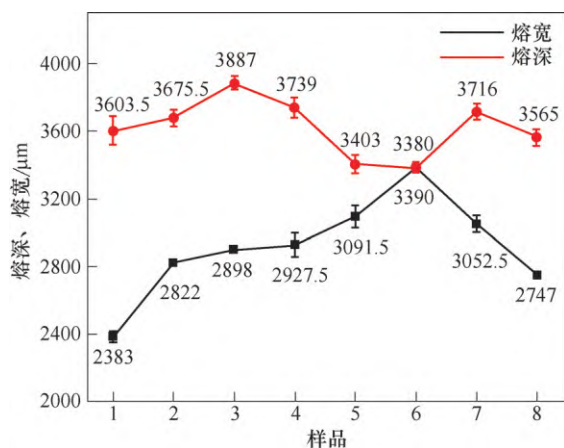


图3 不同焊接助剂下焊缝熔深与熔宽变化

层的图像。活性剂的存在导致激光焊过程温度变化速率快,在激光焊开关过程中能实现低碳钢表面快速升温 and 降温。低碳钢表面在短时间内大温度骤变导致熔池金属发生非平衡凝固过程,奥氏体扩散分解受到抑制,发生了无扩散相变,生成了马氏体。由于空间限制,还有部分因高温热循环析出铁素体,剩余奥氏体以残余奥氏体的形式存在。在低碳钢表面涂覆活性剂使熔池趋向于非平衡凝固,导致金属相从奥氏体到马氏体和铁素体的转变,不仅能

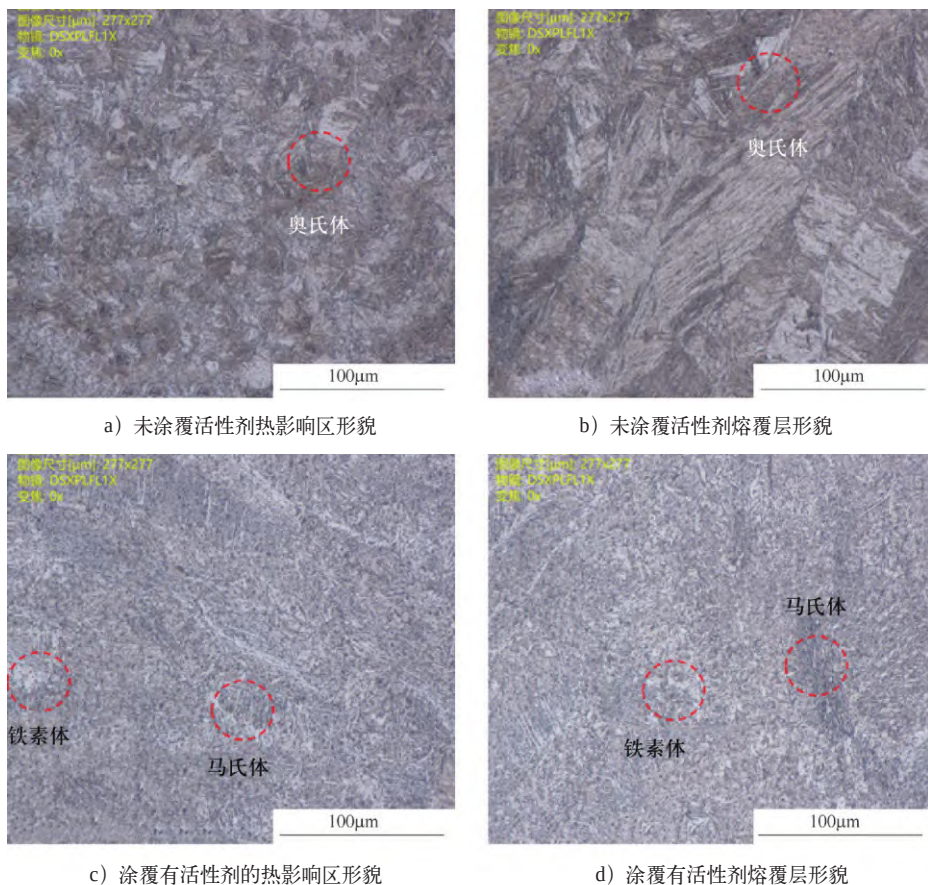


图4 有无涂覆活性剂的热影响区和熔覆层形貌

够增强焊接区域的熔深还能调节焊接区域材料的强度和韧性。

如图5所示,焊接材料表面涂覆活性剂后相多以马氏体的形式存在且马氏体的尺寸分布更趋向均匀,而没有涂覆活性剂的焊接材料表面相的形态多为奥氏体且分布不均匀。马氏体晶粒分布更为均匀,能够有效地调节焊缝强度及韧性。

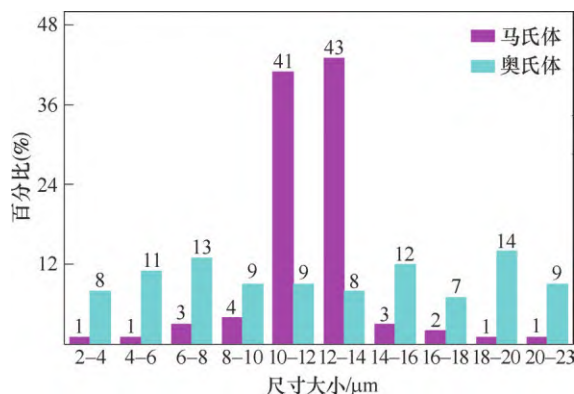


图5 马氏体和奥氏体不同尺寸大小分布情况

4 结束语

本文研究表明,在较低激光功率、合适的离焦量、焊接速度条件下,通过在焊接区域涂覆二氧化钛和氧化镁复合焊接助剂成功实现较高的热输入,从而提高了焊缝的熔深。此外,在低碳钢表面涂覆活性剂使熔池趋向于非平衡凝固,实现焊接区域晶粒相从奥氏体到马氏体的转变,调节了焊缝的强度和韧性。试验结果表明,焊缝的熔深随复合焊接助剂中二氧化钛的质量分数先变大后变小,在最优条件下,即复合助剂中二氧化钛的质量分数达到60%,焊缝的熔深达到3390μm,比无焊接助剂的焊缝熔深提高42%以上。

参考文献:

[1] 殷武佳,李敬勇,钱鹏,等.退火处理对异种钢激光焊接接头组织及性能的影响[J].精密成形工程,2024,16(5):1-10.

[2] ZHANG J X, LIU G Y, LIU S E, et al. 12Cr2Mo1R heat-resistant steel/304 stainless steel welding of dissimilar steel[J]. Welding & Joining, 2020(10):7-13.

[3] SHAO X F, WANG C W, LIU X. Study on micro-structure and corrosion fatigue of Q355NE+SUS304 dissimilar steel welded joint[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2021(2):143-145.

[4] 李晓峰,宋浩源,张有为,等.低合金高强钢激光焊接组织性能的探讨[J].物理测试,2015,33(1):1-5.

[5] 李园园,娄安东.Q235B碳素结构钢单双丝埋弧焊焊接接头性能研究[J/OL].金属加工(热加工),1-7[2025-02-16].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5627.TH.20250305.1657.004.html>.

[6] 尤君,黄志鹏,黄舒文,等.热输入对地铁转向架典型结构温度场的影响[J/OL].金属加工(热加工),1-9[2025-02-16].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5627.TH.20250305.1449.002.html>.

[7] GAO X, YOU D, KATAYAMA S. Infrared image recognition for seam tracking monitoring during fiber laser welding[J]. Mechatronics, 2012, 22(4):370-380.

[8] 王诗洋,王旭友,滕彬,等.激光全熔透工艺参数对不锈钢焊接气孔率的影响[J].焊接,2015(6):30-34.

[9] 陈高,高子英.焊接工艺参数对低碳钢CO₂激光深熔焊接气孔形成的影响[J].金属学报,2013,49(2):181-186.

[10] SHIN M, NAKATA K. Weld bead formation by 10 kW class high power fiber laser on 16mm thickness carbon steel plate[J]. Transactions of JWRI, 2010, 39:33-38.

[11] KAWAHITO Y, MATSUMOTO N, ABE Y, et al. Relationship of laser absorption to keyhole behavior in high power fiber laser welding of stainless steel and aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(10):1563-1568.

[12] 张旭东,陈武柱,芦田荣次,等.CO₂气体保护的激光焊接12mm厚低碳钢板[J].焊接学报,2002,23(6):51-54.

[13] 刘自刚,周晓静,朱婷婷,等.A-TIG焊接方法研究现状及展望[J].材料导报,2021,35(S2):353-357.

[14] 赵伟,王尊祥,张扬扬.活性剂A-TIG焊的工艺研究[J].特种设备安全技术,2021(4):59-60.

[15] 张瑞华,樊丁.低碳钢A-TIG焊活性剂的焊接性研究[J].甘肃工业大学学报,2003(1):19-21.

(收稿日期:20250325)