

# 层状金属复合材料激光穿透 共熔池焊接研究\*

张建勋, 苟宁年

(西安交通大学金属材料强度国家重点实验室, 西安 710049)

**[摘要]** 介绍了一种适用于层状金属复合材料的高效连接技术。在激光穿透焊接时, 熔池中液态金属会受到横向温度梯度引起的表面张力和穿透匙孔中喷射蒸汽摩擦力的共同作用而产生上下两个相对独立的涡流, 这一现象会使熔池中上部和下部金属保持相对独立, 从而促成焊缝金属的上下层状分布特征, 利用这一现象, 提出了层状金属复合材料的单道激光穿透共熔池高效焊接技术。利用该技术, 成功实现了 X65/DSS2205 双金属层状复合材料的对接焊, 焊接接头组织和成分分析结果表明, 焊缝组织上部和下部具有明显的差异性和独立特征, 焊缝上下部的合金元素发生了相对较小的流动交换, 优化的工艺条件可使复层焊缝金属的稀释率小于 3%, 使得复合板上层焊缝和下层焊缝金属达到了最大的相对独立性。

**关键词:** 双金属复合板; 激光穿透共熔池焊; 组织; 元素分布; X65/DSS2205

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2018.17.016



张建勋

教授, 博士生导师, 长期从事先进材料接合与连接、精密加工与成形技术、结构服役安全性分析与评价等教学研究, 致力于将材料科学、信息与计算机技术、人工智能及数字化技术引入到材料连接与接合理论与技术的研究中。

层状双金属复合材料是将强度、熔点等热物理性能不同的两种金属材料通过爆炸、轧制、反向凝固、喷射沉积等方法复合而成的一类低成本高性能的新型材料<sup>[1-3]</sup>, 因制造工艺的不同, 其结合形式有机械结合和冶金结合。层状双金属复合材料结合了两种材料的优点于一身, 使得材料能充分发挥其各自的优异特性, 可有效降低设备和结构的制造成本, 使稀贵金属在更多的领域得到应用。由于层状双金属复合材料是由两种热物理性能、化学成分、组织构成都不相同的材料组成, 其焊接工艺往往要比均质材料困难得多, 其中涉及薄复层材料焊接问题、异质金属的连接及其过渡问题等。

\* 基金项目: 国家高技术研究发展计划 863 项目(2013AA031303HZ); 国家自然科学基金项目(51375370, 51875442)。

对于层状双金属复合材料的焊接接头而言, 除了要具有满足要求的力学性能外, 还要保证其具有和其母材相当的导电性能和耐腐蚀性能等。目前, 层状双金属复合材料的对接主要是通过逐层焊接的方法实现, 对于其复层而言, 由于其厚度往往较薄(约 1~2mm), 通常采用添加和其匹配的填充焊丝, 并以小热输入的单道或者多道 TIG 焊实现其连接。对于层状双金属复合材料的基层而言, 一般会根据其厚度尺寸, 开取相应的坡口, 并以多层多道的 MIG 或者 SAW 焊方式进行连接。对于大多数的层状双金属复合材料而言, 在其基层焊缝和复层焊缝之间往往还需要添加一层过渡层焊缝, 以防止基层焊缝金属对复层焊缝金属的稀释和破坏, 从而影响其最终性能<sup>[4-6]</sup>。综上所述, 目前层状双金属复合材料的对接焊

接工艺较复杂,焊接效率较低。

本文在前期的研究中创新性地提出了采用激光小孔全穿透焊接方法进行层状双金属复合板的单道对接焊新思路。本文在介绍层状双金属激光穿透共熔池焊原理的基础上,从减小基层材料对复层材料稀释的角度,结合正交试验研究了焊接速度、激光功率、离焦量和背保护气体  $N_2$  含量对焊缝上下部金属组织和成分的相对独立性的影响规律,并对得到的复合板接头的力学性能和抗腐蚀性进行了基本评价。

### 激光穿透共熔池焊原理

基于激光穿透焊接时,熔池中液态金属受到横向温度梯度引起的表面张力和穿透匙孔中喷射蒸汽摩擦力的共同作用而产生上下两个相对独立的涡流,从而使熔池中上部和下部金属保持相对独立的特点<sup>[7-10]</sup>,巧妙地实现了基层和复层等厚度的 X65/DSS2205 双金属复合板的单道激光穿透共熔池对接焊,其工作原理

如图 1 所示。

文献 [11] 通过对基层和复层等厚度的 X65/DSS2205 双金属复合板分别采用正面和反面两个方向的穿透焊,证明了激光穿透焊熔池上下部液态金属涡流的相对独立性,且小直径光斑更有利于增强这种相对独立性。文献 [12] 研究结果表明,在保证实现穿透焊状态下,焊接速度的增加会促进激光熔池流动稳定性,使得焊缝上部和下部的合金元素发生了相对更少的对流交换。文献 [13] 系统地研究了采用单道激光穿透共熔池对接焊得到的 X65/DSS2205 双金属复合板接头综合性能,结果表明,接头的强度略高于其母材复合板,但力学不均性增加,对接头的电化学测试结果表明,复合板接头复层区表现出和其母材 2205 相当的抗均匀腐蚀性,但抗点蚀性能有所下降。

### 工艺过程优化试验

本文为进一步减小基层材料对复层材料的稀释,提高接头复层区

的抗点蚀性能,对基层厚度减小到 1mm 的 X65/DSS2205 双金属复合板继续进行单道激光穿透共熔池对接焊,表 1 显示了复合板两种材料化学成分。本文结合正交试验研究了焊接速度  $V$  (m/min)、激光功率  $P$  (W)、离焦量  $D$  (mm) 和背保护气体  $N_2$  体积分数  $V_N$  (%) 对焊缝上下部金属组织和成分相对独立性的影响规律,利用光学显微镜、扫描电镜对得到的复合板焊接接头组织、成分进行分析,来评价焊接工艺的合理性和可靠性。

表 2 显示了本研究中 X65/DSS2205 双金属复合板对接焊正交试验的工艺参数范围,该组参数的选择来自于前期试验结果的筛选,试验所用的焊接设备为 Ytterblum Laser System-4000 型光纤激光器。对复合板接头的金相组织浸蚀方法分两步进行:首先,用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液对整个接头进行浸蚀,时长为 5s,此时接头基层被浸蚀,复层不被浸蚀,对接头基层进行组织观察和拍摄;然后以 Kalling's 2 号腐

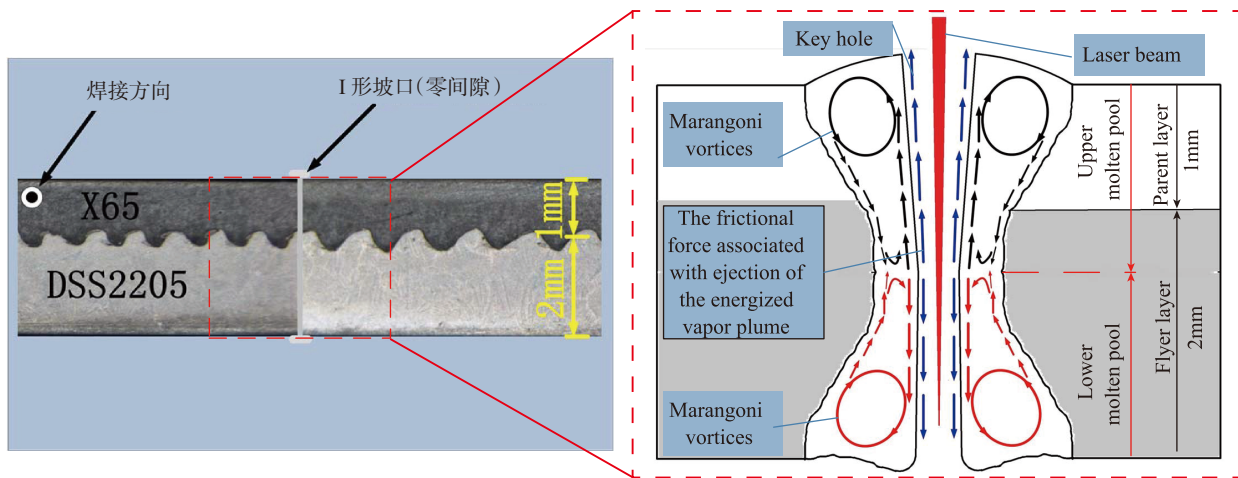


图1 X65/DSS2205层状复合板激光穿透焊接过程中熔池流动机制原理图  
Fig.1 X65/DSS2205 bimetallic sheets and molten pool flow mechanism in laser penetration welding

表1 DSS2205/X65双金属层状复合板化学成分

材料	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Fe
DSS2205	≤ 0.030	≤ 1.00	2.00	≤ 0.030	≤ 0.020	22.0~23.0	4.5~6.5	3.0~3.5	0.14~0.20	余量
X65	0.046	0.24	1.6	0.099	0.017	0.042	0.016	0.16	0.15	余量

表2 正交试验4因素-4水平表的工艺参数范围

因素	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4
激光功率 /W	4000	3500	3000	2500
焊接速度 $V/(m \cdot min^{-1})$	3.5	3	2.5	2
离焦量 $D/mm$	-1	0	1	2
$N_2$ 体积分数 /%	9	7	5	3

蚀剂(100mL 酒精 +100mL HCl+5g  $CuCl_2$ )对整个接头进行浸蚀,时长为30s,此时接头复层被浸蚀,基层被过浸蚀,对接头复层进行组织观察和拍摄。采用EDS面扫描技术和线扫描技术对焊接接头焊缝特征区域的合金元素含量进行统计分析。

### 结果与讨论

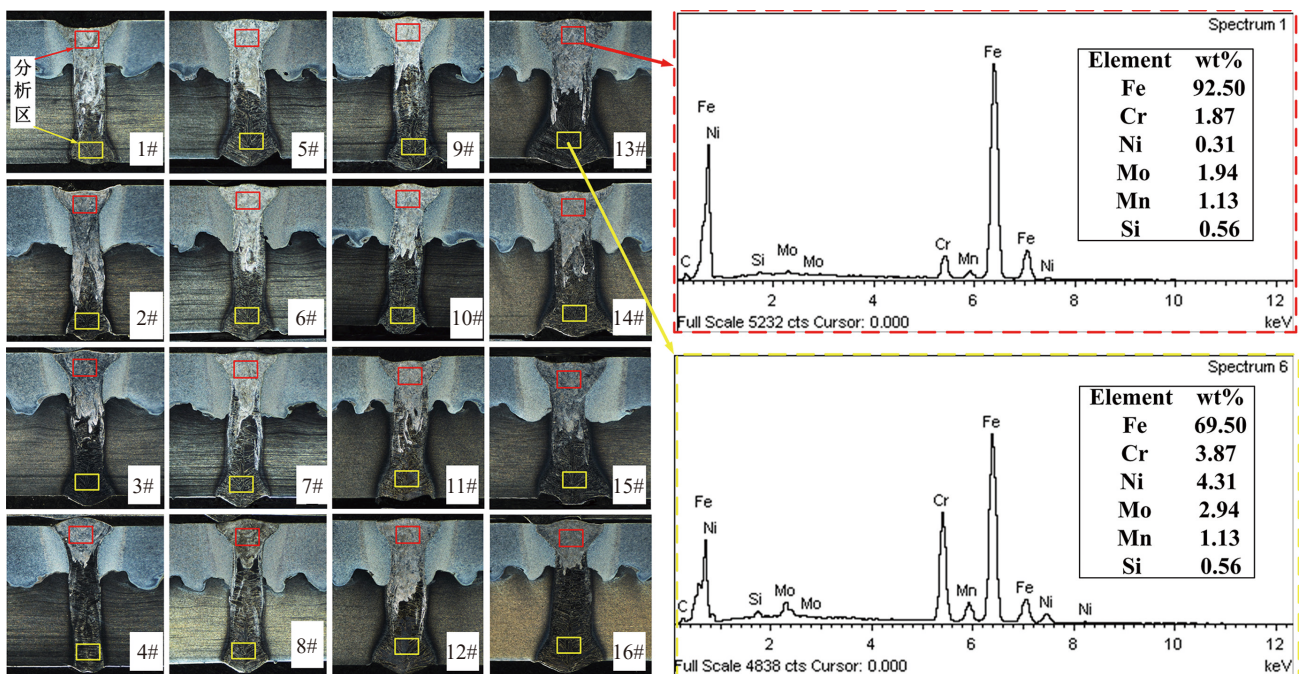
#### 1 接头宏观形貌分析

图2显示了正交试验表2所对应的工艺条件下DSS2205/X65复合板的对接接头横截面形貌,可以看出,正交试验所设计的16种工艺条件下,对应的16个复合板对接接头全都达到了全穿透焊接,并且所

有的接头焊缝形貌都具有上下部较宽,中间区域较窄的“X”型特征,这一特征主要来源于激光熔池上部和下部相对独立的Marangoni对流行为。从图2中亦可看出16个接头焊缝区上部和下部的宏观晶体形貌都展现为两种不同的形态,即焊缝金属组织在厚度方向上和复合板具有相同的层状分布特征,在焊缝上层和焊缝下层的交界处,两种组织形貌具有明显的界线,但整体呈现为无序的交错状态。采用EDS面扫描技术对焊缝基层区和复层区进行成分分析,以焊接速度为2.5m/min、激光功率为4000W、激光光斑离焦量为2mm、背保护气体 $N_2$ 体积分数为7%的13

号试样为例,其焊缝上部和下部的合金元素含量差异明显,结果如图2元素图谱所示,可以看出,焊缝基层区中元素Cr的质量分数只有1.87%,元素Ni的质量分数只有0.31%,都远小于焊缝复层区的含量。

图3显示了13号试样焊缝上下部分两种组织形态交接处的组织形貌,可明显看出在焊缝上下两种组织的交界处存在一个宽度为约 $10\mu m$ 的过渡界面,用EDS线扫描技术跨过界面对其进行成分分析,扫描位置和方向如图3(a)箭头线所示。EDS线扫描结果如图3(b)所示,跨过界面时Fe元素和Cr元素含量都具有非常陡峭的梯度特征,从焊缝上部向下部的方向上Fe元素含量急剧下降,而Cr元素含量急剧增加,这是因为在复合板基层材料X65中的Fe元素含量明显高于复层DSS2205,且几乎没有Cr元素,而在复层DSS2205中Cr元素质量分数高达22%左右。从图3中亦可看出,虽然在DSS2205中Ni和Mo两种



(a) 横截面形貌

(b) 元素图谱

图2 正交试验得到的复合板接头横截面形貌与13号试样元素分析

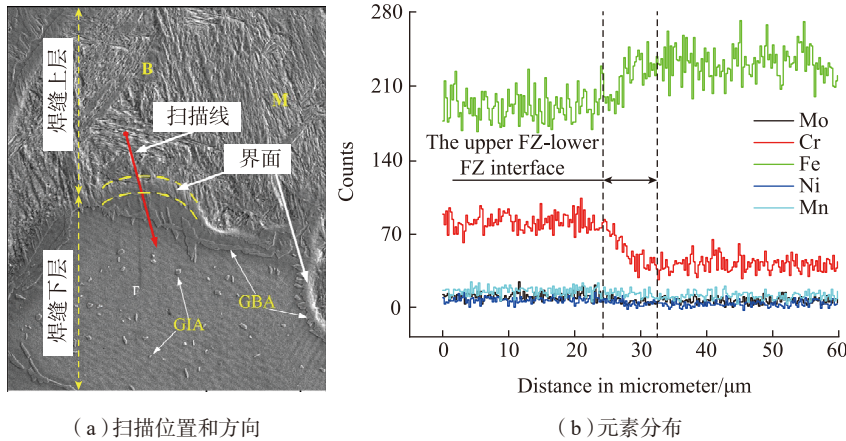
Fig.2 Macro photos of the cross sections of laser weld seams and EDS analysis of No.13

元素含量较少,但跨过界面时仍然存在肉眼可见的浓度梯度,且位于界面两侧的两种元素含量有可见的差距。已有研究表明,这一界面的存在

主要是因其两侧的合金元素浓度梯度较大所致<sup>[13]</sup>。以上两种现象的存在充分说明在激光穿透焊接时熔池内部上下层金属流动的相对独立性。

## 2 工艺参数对焊缝合金元素的分布影响

为了研究正交试验所设计的工艺条件对复合板对接接头焊缝中复层区合金元素含量的影响,采用EDS面扫描技术对图2中16个接头焊缝复层区进行成分分析,以复合板复层金属DSS2205中的Cr元素和Fe元素为标记元素,以它们的含量作为研究试验指标对得到的结果进行统计。依据统计结果绘制而成的效应曲线如图4所示,可以看出,相对于基层复层等厚度条件下的试验结果<sup>[11,13]</sup>,通过减小基层厚度使接头焊缝复层区的合金元素的保留含量明显增加,即复合板基层金属对复层金属的稀释率明显减小,约为10%。从图4中可以看到,若以Cr和Fe元素为标

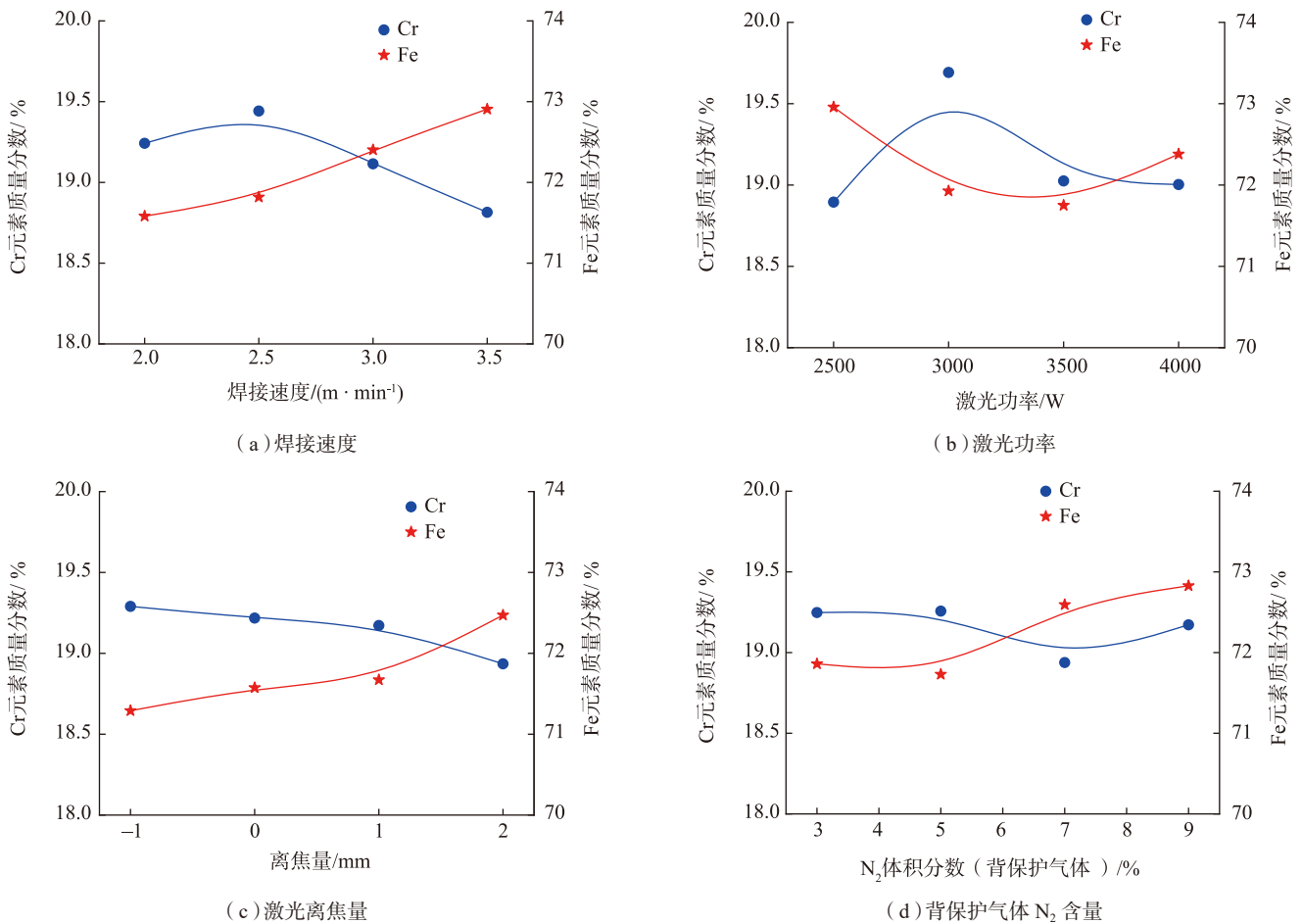


(a) 扫描位置和方向

(b) 元素分布

图3 接头13号试样焊缝基层区和复层区界面处合金元素分布

Fig.3 EDS line scan showing variation of alloying elements across the interface of upper FZ-lower FZ interface



(a) 焊接速度

(b) 激光功率

(c) 激光离焦量

(d) 背保护气体 N<sub>2</sub> 含量

图4 焊接试验因素对接头焊缝复层区的Cr和Ni元素的影响规律

Fig.4 Influence of welding parameters on Cr and Ni element in experimental index

记元素,则接头焊缝复层区中两元素随着正交试验所述的焊接速度  $V$  (m/min)、激光功率  $P$  (W)、离焦量  $D$  (mm)和背保护气体  $N_2$  体积分数  $V_N$  (%) 4种因素的变化成相反的波动规律,这一现象说明了试验结果的可靠性。从图4中亦可看出,就单因素的影响规律而言,当焊接速度  $V$  为 2.5m/min、激光功率  $P$  为 3000W、离焦量  $D$  为 -1mm、背保护气体的  $N_2$  体积分数  $V_N$  为 5% 时,接头焊缝复层区应能保留最高的合金元素含量。

### 3 最优工艺及其组织形态

图5(a)为正交试验得到的优化工艺条件下 DSS2205/X65 复合板对接接头横截面形貌,可以看出接头焊缝区具有明显“X”型形状特征,且整个接头熔合线和热影响区都整齐光滑,这说明在焊接过程中激光小孔和熔池流动行为特征持续稳定,从宏观的组织特征上来看,接头焊缝区上部和下部的晶体形貌亦展

现为两种不同形态的分层特征。采用 EDS 面扫描技术对焊缝复层区进行成分分析,其结果如图5(b)所示,可以看出,所测焊缝复层区域合金元素的含量都非常接近于其母材 DSS2205,其中元素 Cr、Ni 和 Mo 的平均质量分数分别约为 21.5%、4.5% 和 2.85%,也就是说在焊接过程中激光熔池上部和下部的液态金属流动,达到了最大的相对独立性,使得焊缝上下层金属的元素和成分相对于其母材而言得到了最大程度的保留。

对焊缝上层和下层的微观组织形态进行观察,图5(c)显示了图5(a)中  $c$  区组织在放大 2000 倍条件的形貌,可见,焊缝上部的组织主要表现为大量的针状铁素体及少量的粒状贝氏体和马氏体的混合形态,这是低合金高强钢的激光焊缝组织的典型特征,主要是由激光焊过程的急速冷却造成的。图5(d)显示了图5(a)中  $d$  区组织在放大 2000 倍条

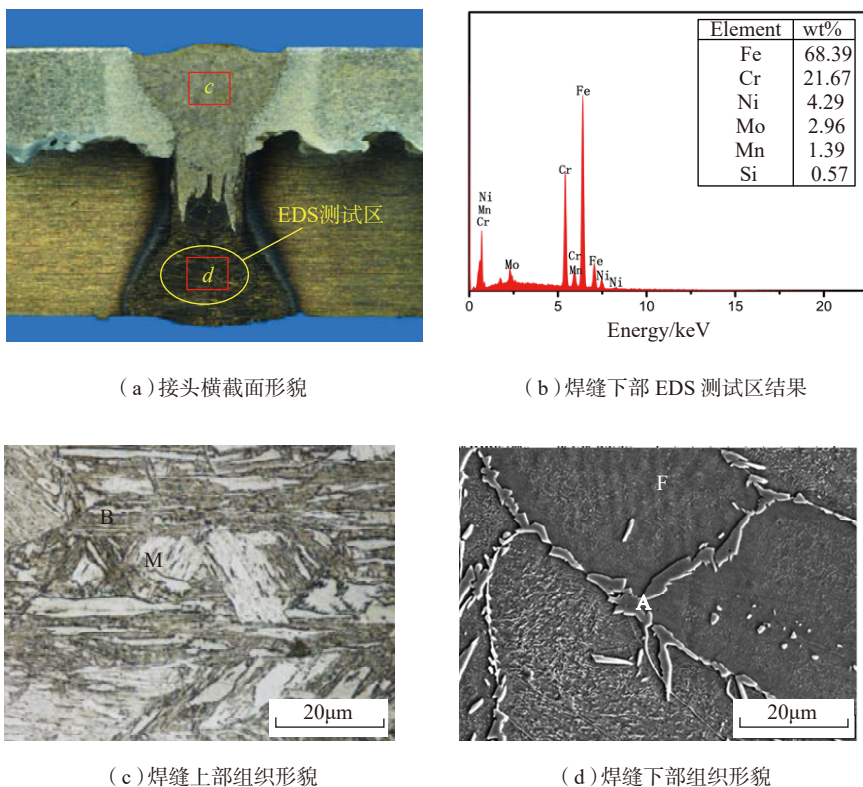
件下的形貌,可以看到,焊缝下部的组织主要表现铁素体和奥氏体双相状态,铁素体成基体状态,占了较大的体积分数,奥氏体主要存在于铁素体晶间,其数量较少,在部分铁素体晶粒内部也存在着极少点状和小岛状晶内奥氏体。研究表明,在双相不锈钢 2205 中,奥氏体和铁素体含量的比例深刻地影响着其力学性能和耐腐蚀性能。从图5(d)中可见,焊缝中奥氏体的含量仍远远小于铁素体含量,没有达到其母材 DSS2205 中两相等比例的理想形态,通过对焊缝复层区多个区域的统计分析,结果显示其奥氏体含量只有约 14%。分析认为,这一现象主要是由于激光焊接时焊缝极快的冷却速度造成的,由于冷速太快,使得焊缝金属处于铁素体向奥氏体转变的温度区间时间太短,导致铁素体向奥氏体转变不足,造成了铁素含量过高,奥氏体含量过低。

### 4 接头力学性能分析

图6为优化工艺条件下复合板焊接接头试样通过拉伸试验得到的工程应力-应变曲线。从图6中可以看出,对于母材复合板试样,在其拉伸的过程中存在完整的弹性变形、塑形变形和颈缩断裂阶段,其屈服强度为 780MPa,抗拉强度达到了 880MPa。而对于复合板的焊接接头而言,其屈服强度为 750MPa,相对于母材复合板变化不大,其抗拉强度达到了 1038MPa,相对于母材复合板提高了 17%,但其延伸率却明显降低,约为其母材复合板的一半,分析认为,这与接头中焊缝和热影响区的存在引起结构和性能的不连续性有关,这种不连续性引起的应力分布不均匀性导致了应力集中现象的产生,从而迫使接头试样快速颈缩、断裂,其断裂位置往往在焊缝和母材的过渡区。

### 5 接头腐蚀性能分析

图7为常温优化工艺条件下接



(a) 接头横截面形貌

(b) 焊缝下部 EDS 测试区结果

(c) 焊缝上部组织形貌

(d) 焊缝下部组织形貌

图5 优化工艺条件下接头焊缝区合金元素EDS分析结果及其组织特征  
Fig.5 EDS analysis result and microstructure of the optimizing welding joint

头的焊缝复层一侧及母材 2205 在 3.5% NaCl 溶液中的极化曲线。由图 7 可见,无论从自腐蚀电位  $E_{corr}$  还是抗点蚀电位  $E_{br}$  来看,接头复层的耐腐蚀性能都明显低于其母材 2205。图 7 中极化曲线显示,复合板接头的自腐蚀电位  $E_{corr}$  为  $-0.51V$ ,而母材 2205 的自腐蚀电位  $E_{corr}$  为  $-0.26V$ ,这说明接头复层一侧的抗均匀腐蚀性能明显下降,这一现象主要由焊缝区存在导致的。复合板接头复层的抗点蚀电位  $E_{br}$  为  $-0.35V$ ,而母材 2205 的抗点蚀电位高达  $1.10V$ ,这说明接头复层一侧的抗点蚀性能明显低于其母材,表

明接头在腐蚀体系中钝化膜的修复能力较弱,同时其钝化区 ( $E_{br}-E_{corr}$ ) 宽度也很窄,表明生成钝化膜的稳定性较差。通过分析认为,以上现象与焊缝复层中铁素体和奥氏体两相比比例有关,组织形态分析结果表明,接头焊缝复层区中奥氏体含量仅为 14%,远小于其母材 2205 中的含量约 50%,且这些奥氏体主要以晶间形式存在,有研究表明这种过低的奥氏体含量会导致材料中耐蚀性合金元素 Cr、Ni 和 Mo 的含量差异和分布不均匀,从而影响其在腐蚀体系中形成钝化膜的稳定性和均匀性。

## 结论

激光穿透共熔池焊是一种基于控制熔池特征流动行为的焊接技术,其将高能束激光恰当应用于结构具有复杂性、物性具有差异性的层状双金属复合材料连接,为巧妙地解决层状复合材料连接技术中存在的薄复层焊接、过渡层添加及焊接效率低下等问题提供了一种全新思路。

对 X65/DSS2205 双金属层状复合板进行单道激光穿透共熔池对接焊,焊缝上下部组织表现为相互独立的两种特征,在焊缝中部两种组织具有明显的界面,且成交错混合状态。焊缝上部的组织主要表现为大量的针状铁素体、少量的粒状贝氏体和马氏体的混合形态,焊缝下部组织主要由大量铁素体和少量的晶间奥氏体组成。EDS 分析结果表明,减小基层金属厚度能明显降低基层焊缝金属对复层焊缝中合金元素的稀释率,且在正交试验的最终优化工艺条件下,复层焊缝中合金元素的稀释率可降低至 3% 左右。拉伸试验结果表明,复合板接头相对于其母材成高强度匹配状态,但其延伸率只有母材复合板的 50% 左右。复合板接头复层区的极化曲线表明,由于焊缝区奥氏体含量只有 14% 左右,因此,导致其焊缝区的抗腐蚀性能低于其母材 2205。

层状双金属复合材料单道激光穿透共熔池对接技术的成熟将对双金属复合管等诸多复合材料结构的制造技术产生有益的补充,推动其制造技术的变革,产生显著的社会和经济效益。

## 参考文献

[1] KACZMAR J W, PIETRZAK K, WŁOSIŃSKI W. The production and application of metal matrix composite materials[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000,

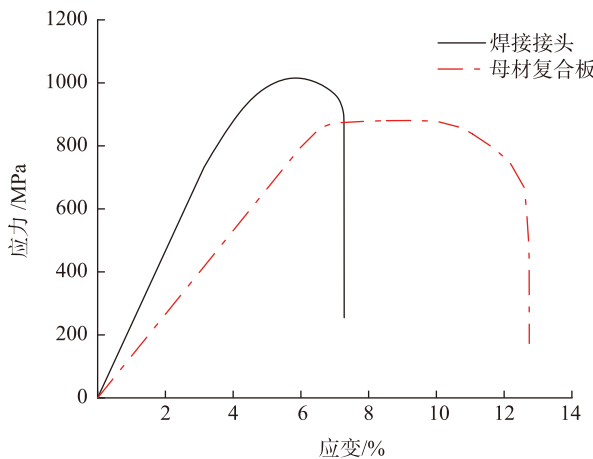


图6 优化工艺条件下接头及母材复合板拉伸应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves of tensile test for the optimizing welding joint and base metal

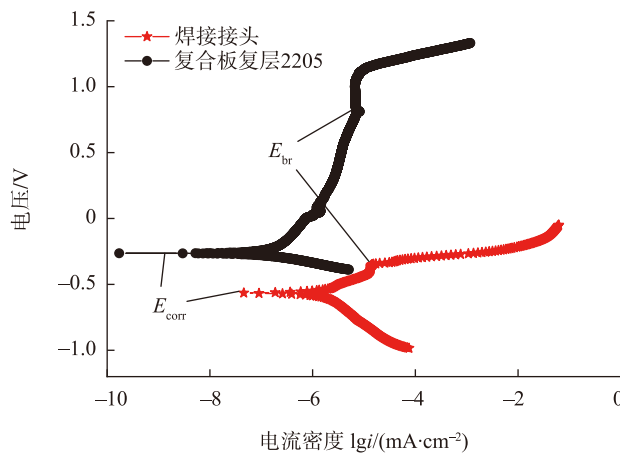


图7 优化工艺条件下接头复层及母材2205在3.5% NaCl溶液中的极化曲线

Fig.7 Polarization curves of optimizing welding joint and base metal 2205 in 3.5% NaCl solution

106(1-3): 58-67.

[2] TRYKOV Y P, STEPANISHCHEV I B, TRUDOV A F, et al. Structure and properties of explosive-welded composites from steels of different kinds[J]. *Metal Science and Heat Treatment*, 2004, 46(3/4): 167-169.

[3] KAYA Y, KAHRAMAN N. An investigation into the explosive welding/cladding of Grade A ship steel/AISI 316L austenitic stainless steel[J]. *Materials & Design*, 2013, 52: 367-372.

[4] 杨昕, 张友星, 肖景安, 等. 双金属复合板设备焊接技术[J]. *电焊机*, 2015, 45(5): 155-159.

YANG Xin, ZHANG Youxing, XIAO Jing'an, et al. Discussion of welding technology of bimetallic composite plate equipment[J]. *Electric Welding Machine*, 2015, 45(5): 155-159.

[5] CHU Q L, ZHANG M, LI J H, et al. Joining of CP-Ti/Q345 sheets by Cu-based filler metal and effect on interface[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 225: 67-76.

[6] 赵晨光, 彭清华, 马宏伟, 等. 双金属复合管焊接技术探讨[J]. *焊管*, 2013, 36(1): 60-63.

ZHAO Chenguang, PENG Qinghua, MA Hongwei, et al. Discussion on duplex metal composited tube welding technique[J]. *Welded Pipe and Tube*, 2013, 36(1): 60-63.

[7] ZHANG L J, ZHANG J X, GUMENYUK A, et al. Numerical simulation of full penetration laser welding of thick steel plate with high power high brightness laser[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(8): 1710-1720.

[8] 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.

[9] BACHMANN M, AVILOV V, GUMENYUK A, et al. Numerical simulation of full-penetration laser beam welding of thick aluminium plates with inductive support[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2012, 45(3): 035201.

[10] YE X H, CHEN X. Three-dimensional modelling of heat transfer and fluid flow in laser full-penetration welding[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2002, 35(10): 1049.

[11] 苟宁年, 张建勋, 李振岗. 双金

属复合板光纤激光焊接及其接头腐蚀性能分析[J]. *稀有金属材料与工程*, 2016, 45(7): 1760-1764.

GOU Ningnian, ZHANG Jianxun, LI Zhengang. Fiber laser welding of bimetallic plates and corrosion property of the joints[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, 45(7): 1760-1764.

[12] 苟宁年, 张建勋, 李振岗, 等. 焊接速度对复合板激光对接接头腐蚀性能的影响[J]. *焊接学报*, 2017, 38(7): 17-20.

GOU Ningnian, ZHANG Jianxun, LI Zhengang, et al. Effects of weld speed on the corrosion performance of bimetallic sheet butt joint welded by fiber laser[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2017, 38(7): 17-20.

[13] GOU N N, ZHANG J X, ZHANG L J, et al. Single pass fiber laser butt welding of explosively welded 2205/X65 bimetallic sheets and study on the properties of the welded joint[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86(9-12): 2539-2549.

通讯作者: 张建勋, E-mail: jxzhang@mail.xjtu.edu.cn.

## Dissimilar Metals Co-Pool Laser Penetration Butt Welding of Layered Bimetallic Sheet

ZHANG Jianxun, GOU Ningnian

(State Key Laboratory of Mechanical Behavior for Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**[ABSTRACT]** In order to develop high quality and efficient welding technology which is suitable for layered bimetallic sheets, based on the Marangoni convection behavior of molten pool in full penetration welding processes, the dissimilar metals co-pool single pass laser butt welding of bimetallic sheets was presented, and the welding of X65/DSS2205 bimetallic sheet was implemented. Metallographic observations indicated that upper and lower welding seam has obvious characteristics of independent metallographic formation, and there are no indecisive boundaries between the two metallographic formations. The EDS results show that under the optimum process conditions (by orthogonal test), the retention rate of alloying elements such as Cr, Ni and Mo were near 97%.

**Keywords:** Bimetallic sheet; Co-pool laser penetration welding; Microstructure; Element distribution; X65/DSS2205

(责编 李丹)