

316L 不锈钢掺杂 SiC 环状同轴送粉 TIG 熔覆层组织结构与性能

高辉, 周灿丰, 胡晓慧, 李文龙

(北京石油化工学院, 北京市高等学校能源工程先进连接技术研究中心, 北京, 100926)

摘要: TIG 熔覆是经济高效的表面修复方法, 与传统的预置粉末法相比, 同轴送粉法具有优良的适应性, 但是试验研究相对较少。自主设计制造了环状同轴送粉 TIG 熔覆焊枪, 与管状同轴送粉 TIG 熔覆焊枪相比, 制造的熔覆层不存在熄弧位置凹坑、焊缝不够平直以及焊缝熔宽不一致等问题, 而且具有更高的熔覆效率。结果表明, 采用优化的焊接热输入、送粉量和 SiC 含量参数匹配, 在 316L 不锈钢表面进行环状同轴送粉 TIG 熔覆, 获得了外观优良的单层单道熔覆层、单层多道熔覆层。对熔覆层进行显微硬度测量、微观组织及元素成分分析、宏观电化学腐蚀试验、微区电化学腐蚀试验以及耐磨性能测试, 并与母材进行了比对, 环状同轴送粉 TIG 熔覆导入的 SiC 粉末有效地提升了熔覆层的耐蚀性与耐磨性。

创新点: (1) 采用自主研发的同轴送粉氩弧熔覆系统制备了成形良好无缺陷的熔覆层。
(2) 采用优化的工艺参数获得外观优良的单层单道熔覆层。
(3) 分析了优化工艺参数条件下的熔覆层耐蚀性与耐磨性。

关键词: 环状同轴送粉 TIG 熔覆; 316L 不锈钢; 掺杂 SiC; 耐蚀性; 耐磨性

中图分类号: TG 444.74 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20230424001

0 序言

《“十四五”循环经济发展规划》强调遵循“减量化、再利用、资源化”原则, 建立健全绿色低碳循环发展经济体系, 为经济社会可持续发展提供资源保障。表面修复技术概念于 20 世纪 80 年代提出以后, 对工业生产和日常生活产生了巨大的影响。目前常见的表面修复技术有激光熔覆、等离子熔覆与 TIG 熔覆^[1-3], 激光熔覆设备昂贵且熔深较深, 等离子熔覆熔宽较大、操作环境要求较高, TIG 熔覆具备的熔宽大、熔深浅、电弧燃烧稳定的优点非常适用于表面修复。激光熔覆、等离子熔覆、焊条熔覆与 TIG 熔覆的对比研究表明, TIG 熔覆仍然是具有发展前景的经济高效熔覆修复术^[4-7]。

目前 TIG 熔覆常见的填料方式主要为送粉与送丝, 而送粉又分为传统的预置粉末法、旁轴送粉

法以及同轴送粉法。Prasad 等人^[8] 通过在预先放置的 NiTi 粉末层上使用 TIG 电弧在 Ti-6Al-4V 合金上制备了大面积的 NiTi 涂层。

同轴送粉方法克服了载粉气对电弧保护气的影响, 广泛应用于激光熔覆和等离子熔覆。然而从目前的相关研究资料来看, 针对同轴送粉 TIG 熔覆焊接工艺的研究相对较少。徐国健等人^[9] 研究了将送丝与送粉技术相结合的 TIG 焊接装置, 焊丝从焊枪顶部通过半裂式空心钨极送至电弧-熔池区域, 粉末从四路送粉喷嘴同轴送往待焊接区域; Huang 等人^[10] 提出了一种使用双层保护气的新型粉末熔池耦合活性 TIG 焊方法, 内层气体为保护气, 外层气体为载粉气, 其方法结构类似于同轴送粉 TIG 焊; Alcindo 等人^[11] 将粉末熔融与 TIG 结合, 采用两种粉末粒度、三种焊接速度和三种焊接电流, 在 AISI 1020 板的母材基底上制造了 AISI H13 熔覆层, 并且将层数由 1 层扩展到了 10 层, 因而有望发展成为新的增材制造方法。

在表面改性中, 导入 SiC 粉末等材料的主要目的是提高母材的耐蚀性与耐磨性。Jyotsna 等人^[12]

采用激光熔覆在 AISI 316L 不锈钢基材中掺杂 5% SiC 和 20% SiC, 熔覆层显微硬度由基材的 150 VHN 增加到 5% SiC 的 340VHN 和 20% SiC 的 800VHN. Ding 等人^[13]在 U71 Mn 钢轨上进行了不同激光功率、扫描速度、扫描方式和层数的 316L 不锈钢粉末单道次和多道次激光熔覆试验, 以此优化工艺参数, 提高熔覆层的耐磨性; Ji 等人^[14]采用激光熔覆技术, 在 316L 不锈钢基体上用非晶粉末制备了多层铁基合金涂层, 与 316L 不锈钢相比, 多层铁基涂层具有良好的抗腐蚀磨损性能; Riquelme 等人^[15-18]使用具有不同百分比的 316 L 不锈钢粉末和 SiC 颗粒的混合物, 通过直接激光沉积增材制造了耐磨性高度增强的 316 L/SiC 金属基复合材料, 并且确定了激光功率、扫描速度和层高度的最佳值.

文中设计制造环状同轴送粉 TIG 熔覆焊枪, 搭建了 TIG 熔覆试验装置, 以熔覆层硬度作为响应值, 采用优化的工艺参数在 316L 不锈钢表面进行环状同轴送粉 TIG 熔覆, 获得了单层单道熔覆层、单层多道熔覆层. 对熔覆层进行了显微硬度测量、微观组织及元素成分分析、宏观电化学腐蚀试验、微区电化学腐蚀试验以及耐磨性能测试, 并与母材进行了比对, 分析了环状同轴送粉 TIG 导入的 SiC 粉末对熔覆层耐蚀性与耐磨性的作用.

1 试验方法

将自主设计制造的环状同轴送粉 TIG 熔覆焊枪安装在焊接机床上, 进行 316L 不锈钢掺杂 SiC 环状同轴送粉 TIG 表面熔覆. 对熔覆层进行显微硬度测量、微观组织及元素成分分析、宏观电化学腐蚀试验、微区电化学腐蚀试验以及耐磨性能测试, 并与母材进行比对.

管状同轴送粉 TIG 熔覆层存在熄弧位置凹坑, 焊缝不够平直, 以及焊缝熔宽不一致等问题, 而环状同轴送粉 TIG 熔覆层不存在这些问题, 此外环状同轴送粉 TIG 熔覆效率更高. 环状同轴送粉 TIG 熔覆焊枪关键结构如图 1 所示, 送粉结构示意图如图 1(a) 所示, 其中送粉内环上部螺柱用于与 TIG 焊枪本体连接、下部螺纹与外环(图 1(b))的内螺纹连接, 形成送粉结构(图 1(c)), 内环、外环直径不同, 二者之间形成一条环形窄缝(图 1(d)), 构成粉末输送通道. 送粉内环设置多个对称小孔, 氩气均匀喷出, 为熔覆过程提供稳定的粉末供应与熔池保护气

体供应. 装配之后的环状同轴送粉 TIG 焊枪实物如图 2 所示, 为保证良好的送粉效果, 钨极伸出长度设置为 7 mm, 焊枪在焊接机床上安装之后, 钨极尖端距母材 316L 不锈钢板表面距离为 8 mm, 对应的电弧电压约为 15 V.



图 1 环状同轴送粉结构

Fig. 1 Powder feeding structure. (a) structure diagram; (b) outer structure; (c) powder delivery structure; (d) annular gap



图 2 TIG 熔覆焊枪

Fig. 2 The cladding gun

2 试验设计

环状同轴送粉 TIG 熔覆试验装置示意图如图 3 所示, 主要由焊接电源、送粉器、焊接保护气瓶、送粉气瓶、母材、焊接机床, 以及安装在焊接机床上的同轴送粉 TIG 熔覆焊枪组成. 用于 TIG 熔覆的时代逆变 WSM-400 焊接电源采用直流正接方式, 正极与母材 316L 钢板连接, 负极与焊枪导电铜块连接. 保护气体、送粉气体均使用纯度 99.99% 的高纯氩气, 其中粉末速度通过送粉气体流量以及送粉器转盘旋转速度进行控制. 焊接机床采用可编

程 PLC 控制, 对母材 316L 钢板进行熔覆, 形成平直熔覆层。

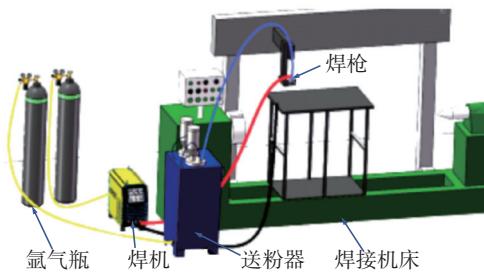


图 3 TIG 熔覆装置示意图

Fig. 3 TIG cladding device schematic diagram

母材 316L 不锈钢板厚度为 10 mm, 长度和宽度分别为 250 mm 和 150 mm, 可以在宽度方向进行多次熔敷。采用以 316L 粉末为主体、掺杂少量 SiC 粉末的复合粉末作为熔覆材料, 316L 粉末微观结构如图 4 所示, 粉末为球形, 粒径为 5~10 μm , 输运流动性好。SiC 粉末微观结构如图 5 所示, 粉末为不规则形状, 粒径为 13~25 μm , 流动性差。使用前先将 SiC 粉末烘干, 然后按照 98% 的 316L 粉末与 2% 的 SiC 粉末均匀混合。

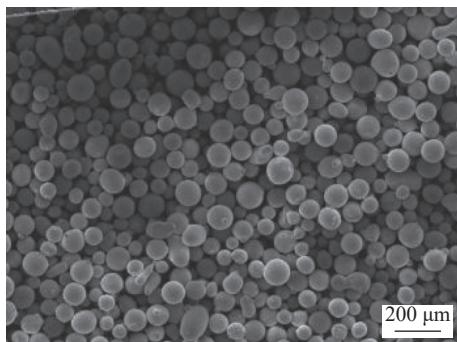


图 4 316L 粉末微观结构

Fig. 4 Microscopic morphology of 316L powder

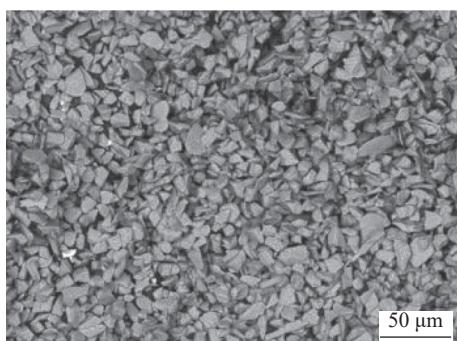


图 5 SiC 粉末微观结构

Fig. 5 Microscopic morphology of SiC powder

TIG 熔覆的主要工艺参数是焊接热输入、送粉量和 SiC 含量。焊接热输入是单位长度熔覆层接受

的电弧能量, 单位是 kJ/cm , 在数值上等于电弧电压与焊接电流的乘积与焊接速度的比值; 送粉量是单位长度熔覆层接受的粉末质量, 单位是 g/cm , 在数值上等于单位时间送粉量与焊接速度的比值; SiC 含量是复合粉末中 SiC 的质量百分比。环状同轴送粉 TIG 表面熔覆工艺试验表明, 当焊接保护气体流量为 15 L/min、送粉气体流量为 2 L/min 时, 采用的优化熔覆参数为焊接热输入 10.8 kJ/cm 、送粉量 8 g/mm 和 SiC 含量 2%, 该 TIG 熔覆过程稳定, 获得的熔覆层外观优良, 而且微观硬度较高。采用优化熔覆参数, 在 316L 不锈钢表面进行熔覆, 获得的单层单道熔覆层、单层多道熔覆层分别如图 6 和图 7 所示。



图 6 单层单道熔覆层

Fig. 6 Single-layer single-pass cladding layer



图 7 单层多道熔覆层

Fig. 7 Single-layer multi-passes cladding layer

试样从 TIG 焊缝的中心沿着表面向两侧各延伸 10 mm, 试样的宽度在焊缝的顶部为 15 mm, 在底部也为 15 mm, 共选取了焊接区域 8 个不同深度的位置作为取样点, 按照图 8 所示的测试区域进行熔覆层、母材的显微硬度测量、微观组织及元素成分分析、宏观电化学腐蚀试验、微区电化学腐蚀试验以及耐磨性能测试。

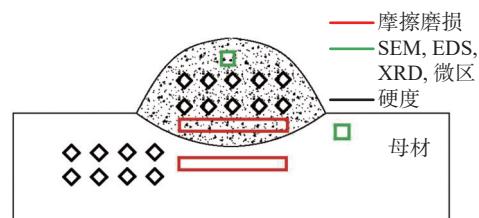


图 8 测试区域示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the testing area

试验使用标准三电极体系, 其中饱和甘汞电极作为参比电极, 铂丝作为辅助电极, 试验样品为工作电极。在试验前, 为了减小非工作面对试验结果的影响, 样品的非工作面采用环氧树脂进行封装处理, 对于样品的工作面, 采用逐级打磨抛光的方法, 分别使用 400 号、800 号、1000 号、1500 号和 2000

号金相砂纸进行处理, 细磨至无划痕后, 再在细磨表面涂敷 $2.5 \mu\text{m}$ 金刚砂, 并对其进行抛光, 抛光采用型号为 DINCER MoPao2S 的自动磨抛机。显微硬度测量采用 HVS-10 数显维氏硬度计, 按照图 8 所示的测试区域测量 10 个点的硬度值, 然后求取平均值。

抛光之后的试样截面, 采用硫酸铜盐酸腐蚀液进行腐蚀, 当截面出现氧化膜时使用无水乙醇进行清洗, 然后用于微观组织观察。采用型号为 SSX-550 型扫描电子显微镜对熔覆层截面进行 SEM 检测分析, 并对母材、熔覆层进行 Si 元素含量 EDS 能谱分析比对测试。采用型号为 D8 FOCUS 的 X 射线衍射仪对母材、熔覆层进行 XRD 比对测试。

采用普林斯顿电化学工作站对母材、熔覆层进行耐蚀性能比对测试, 测试项目包括 3 项宏观电化学腐蚀试验即开路电位测试 (OCP)、阻抗谱测试 (EIS)、动电位极化曲线测试 (PDP), 以及微区电化学腐蚀试验即局部阻抗谱测试 (LEIS)。

在母材、熔覆层中截取试样, 尺寸为 $20 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$, 使用 240 号、400 号、800 号、1200 号、2000 号砂纸按顺序对表面进行打磨后, 在打磨表面涂敷 $2.5 \mu\text{m}$ 金刚砂磨砂膏并进行抛光, 采用型号为 SRV-IV 的摩擦磨损试验机对母材、熔覆层进行往复摩擦磨损比对试验, 试验之前的原始试样如图 9 所示, 其中左侧为母材试样, 右侧为熔覆层试样。

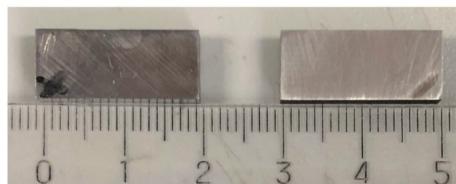


图 9 摩擦磨损试验原始样件

Fig. 9 Original samples of friction and wear test

3 试验结果及分析

3.1 熔覆层硬度分析

采用 RSM 响应曲面法进行试验设计, 以熔覆层硬度作为响应值, 研究焊接热输入 q 、送粉量 V 和 SiC 含量 w_p (质量分数) 对熔覆层硬度的影响。三者的取值范围分别设置为 $9 \sim 12.6 \text{ kJ/cm}$, $4 \sim 8 \text{ g/mm}$ 和 $1\% \sim 2\%$, 每个因素设置 3 个水平, 进行熔覆试验, 获得与 16 组工艺参数组合对应的 16 道熔

覆层, 进行硬度测试, 获得相应的 16 个 10 点平均硬度值。三因素的取值分别为 10.8 kJ/cm , 8 g/mm 和 2% 时, 熔覆层硬度值最高, 为 276 HV 。采用 Design Expert 软件进行数据拟合, 得到工艺参数对熔覆层硬度的影响经验公式, 即

$$H_{\text{HV}} = -53.825 + 25.8V + 22.775q + 25.45w_p - 0.58333w_p + 10.5Vw_p - 2.8333qw_p - 2.18125V^2 - 0.49722q^2 - 5.9w_p^2 \quad (1)$$

式 (1) 表明, 熔覆层硬度是由 q 、 V 和 w_p 共同决定的, 而且因素之间存在交互影响, 其中 V 与 w_p 之间为协同作用, 而 V 与 q 之间、以及 q 与 w_p 之间均是拮抗作用。

3.2 熔覆层与母材微观组织及元素成分分析

环状同轴送粉 TIG 熔覆层截面 SEM 测试结果如图 10 所示。SiC 粉末为不规则形状、粒径为 $13 \sim 25 \mu\text{m}$, 其熔点为 $2700 \text{ }^\circ\text{C}$, 远远高于母材 316L 不锈钢焊接熔池温度, 因此基本可以确定图 10 中的粒子为 SiC 粒子。

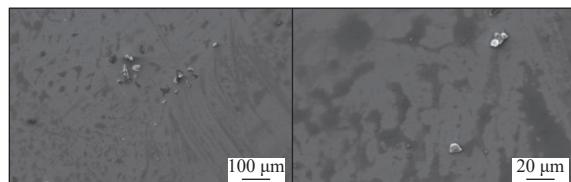


图 10 熔覆层 SEM 测试结果

Fig. 10 SEM test results of cladding layer

对母材、TIG 熔覆层进行 Si 元素含量 EDS 能谱分析比对测试, EDS 结果分别如图 11 和图 12 所示, 母材的 Si 元素含量为 0.685% , 熔覆层的 Si 元素含量为 1.274% 。316L 不锈钢中 Si 元素的含量不会超过 1% , 因此熔覆层中的 SiC 强化颗粒是同轴送粉 TIG 熔覆导人的。

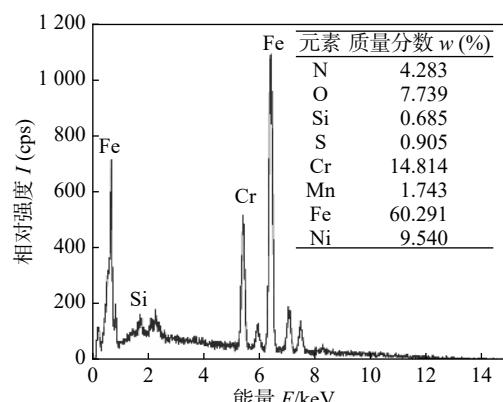


图 11 母材 EDS 测试结果

Fig. 11 EDS result of base metal

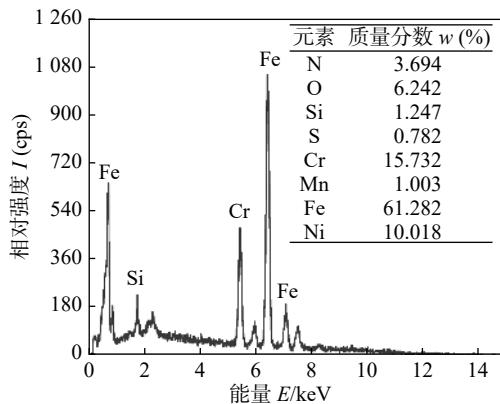


图 12 熔覆层 EDS 测试结果

Fig. 12 EDS result of cladding layer

对母材、TIG 熔覆层进行 XRD 比对测试, 其结果如图 13 所示。XRD 测试管压 40 kV, 管流 200 μ A, 铜靶, 衍射宽度 $DS=SS=1^\circ$, $RS=0.3$ mm, 扫描速度 2.000 d/min, 扫描范围 $10^\circ \sim 90^\circ$ 。XRD 测试结果表明, 在 SiC 相应的衍射角下, 母材并未出现 SiC 的衍射峰, 而熔覆层的 SiC 衍射峰强度要远高于母材, 这从另一方面证明同轴送粉 TIG 熔覆将 SiC 强化颗粒导入了熔覆层。

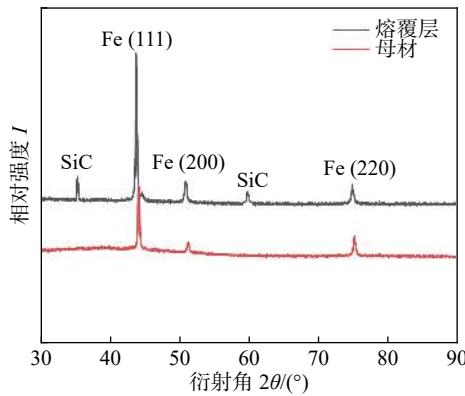


图 13 XRD 测试结果

Fig. 13 XRD test results

3.3 熔覆层与母材宏观电化学腐蚀性能比对

熔覆层与 316L 不锈钢母材在 3.5% 的 NaCl 溶液中浸泡 0.5 h 后, 进行开路电位测试 (OCP), 测试结果如图 14 所示。熔覆层的 OCP 值为 -197.986 mV, 而 316L 不锈钢母材的 OCP 值为 -209.112 mV, 说明同轴送粉 TIG 熔覆导入的 SiC 粉末改善了熔覆层的耐蚀性能。

对熔覆层与 316L 不锈钢母材进行电化学阻抗谱测试 (EIS), 测试结果如图 15 所示, 测试频率为 $1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^5$ Hz。Nyquist 图中熔覆层的容抗弧半径明显大于 316L 不锈钢母材的容抗弧半径, 说

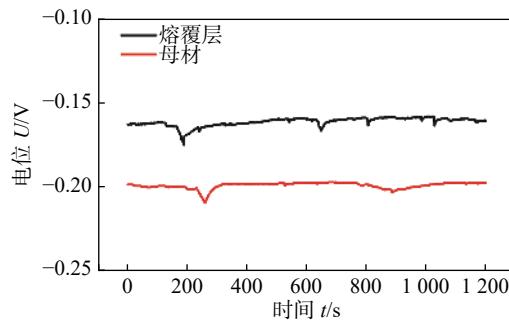
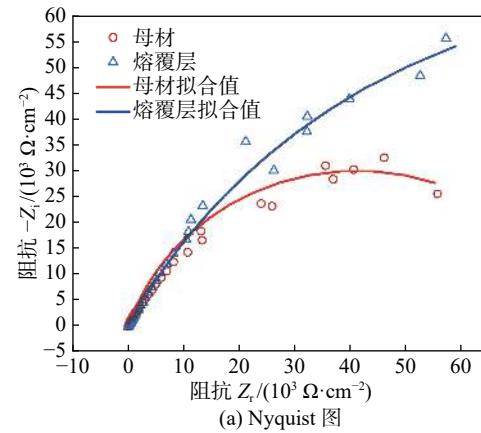
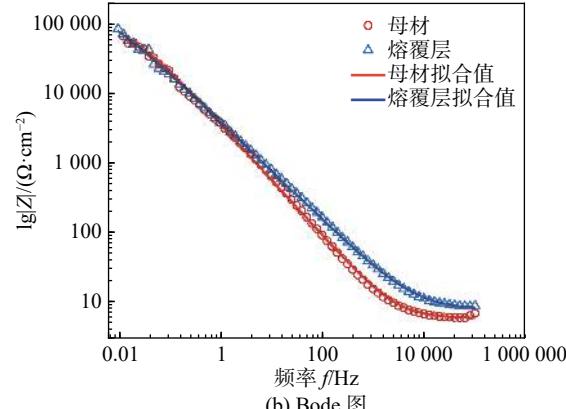


图 14 OCP 测试结果

Fig. 14 OCP test results



(a) Nyquist 图



(b) Bode 图

图 15 电化学阻抗图谱

Fig. 15 Electrochemical impedance spectrum. (a) Nyquist; (b) Bode

明同轴送粉 TIG 熔覆导入的 SiC 粉末改善了熔覆层的耐蚀性能。通过 Bode 图能够看出, 母材在低频区的阻抗略小于熔覆层, 证明了熔覆层防腐性能略优于母材, 在频率超过 0.1 MHz 后, 母材与熔覆层的阻抗均逐渐趋于平稳。

将电化学腐蚀测试的三电极系统近似地看作由溶液电阻 R_s 、电荷转移电阻 R_{ct} 和双电层常相位角元件 Q_{dl} 组成的等效电路, 其中 R_{ct} 是电化学过程中的关键指标, 该参数数值越大表明测试样品的耐蚀性能越优良。利用 ZSimpWin 拟合软件对电化

学阻抗谱中的试验数据进行等效电路拟合分析, 熔覆层的 R_{ct} 值为 $8.204 \times 104 \Omega/\text{cm}^2$, 而 316L 不锈钢母材 R_{ct} 值为 $2.015 \times 104 \Omega/\text{cm}^2$, 表明熔覆层的耐蚀性能优于 316L 不锈钢母材。

对熔覆层与 316L 不锈钢母材进行动电位极化曲线测试 (PDP), 测试结果如图 16 所示, 对其进行曲线拟合, 得到熔覆层的腐蚀电位 E_{corr} 为 -248.513 mV 、腐蚀电流密度 I_{corr} 为 $-88.223 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 而 316L 不锈钢母材的腐蚀电位 E_{corr} 为 -272.021 mV 、腐蚀电流密度 I_{corr} 为 $-106.459 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 表明熔覆层的耐蚀性能优于 316L 不锈钢母材。

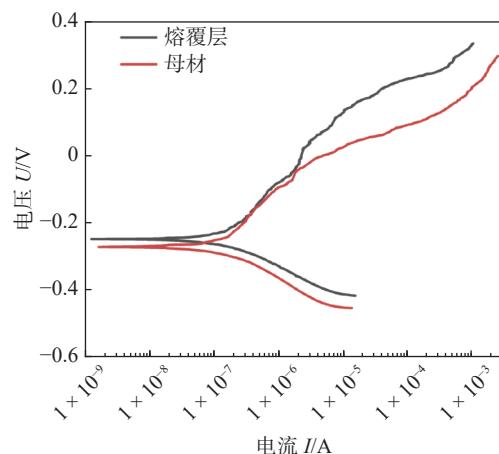


图 16 PDP 测试结果

Fig. 16 PDP test results

3.4 熔覆层与母材微区电化学腐蚀性能比对

熔覆层与 316L 不锈钢母材在 3.5% 的 NaCl 溶液中浸泡 0.5 h 后, 将 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 局部区域作为扫描区域, 进行局部阻抗谱测试 (LEIS), 测试结果如图 17 与图 18 所示。熔覆层的局部阻抗最大值为 $1.72 \times 10^7 \Omega$, 而母材的局部阻抗最大值为 $2.25 \times 10^6 \Omega$, 表明熔覆层的局部耐蚀性能也优于 316L 不锈钢母材。

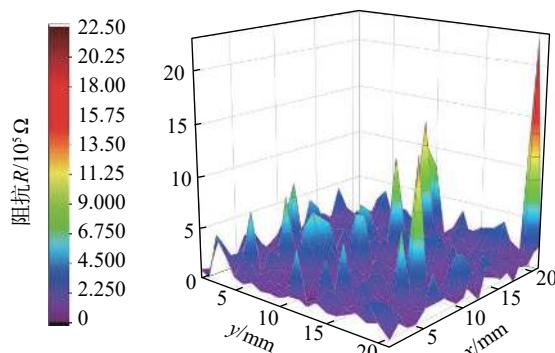


图 17 母材 LEIS 图谱

Fig. 17 LEIS map of base metal

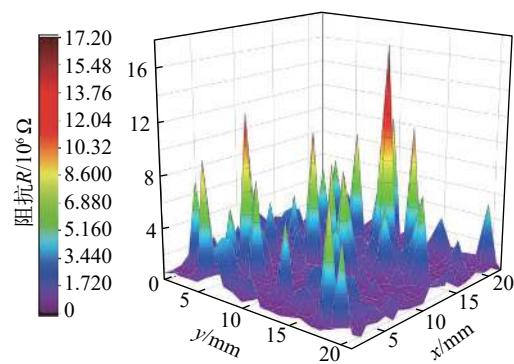


图 18 熔覆层 LEIS 图谱

Fig. 18 LEIS map of cladding layer

3.5 熔覆层与母材耐磨性能比对

采用直径 5 mm 的球型氮化硅作为摩擦副材料, 载荷为 20 N, 摩擦磨损幅值为 10 mm, 测试模式为往复摩擦磨损, 对同轴送粉 TIG 熔覆层与 316L 不锈钢母材进行摩擦磨损比对试验。在进行 30 min 的往复摩擦之后, 得到的试验结果如图 19 所示, 称量得知熔覆层的质量损失为 1.63 mg, 316L 不锈钢母材的质量损失为 2.06 mg, 表明熔覆层的耐磨性能优于 316L 不锈钢母材。

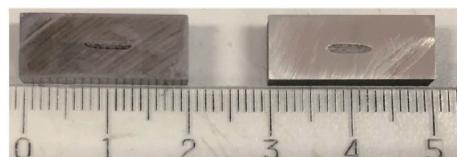


图 19 试样摩擦磨损形貌

Fig. 19 Samples after friction and wear testing

316L 不锈钢母材与同轴送粉 TIG 熔覆层摩擦磨损试验完成之后, 摩擦磨损试验机自动测量获得的磨痕深度如图 20 所示, 母材的最大磨痕深度是

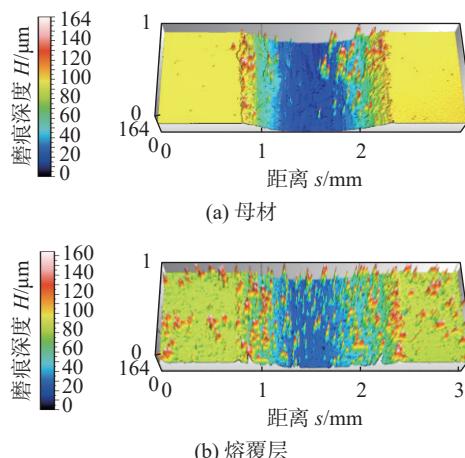


图 20 磨痕深度

Fig. 20 Abrasion depths. (a) base material; (b) cladding layer material

164 μm , 熔覆层的最大磨痕深度是 160 μm . 采用金相显微镜对熔覆层磨损部位进行显微组织观察, 显微组织如图 21 所示, 其中 SiC 粒子采用红色圆圈标识. 熔覆层的划痕之处存在 SiC 粒子, 而 316L 不锈钢母材划痕之处不存在 SiC 粒子.

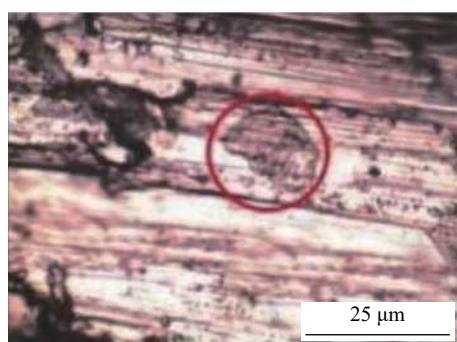


图 21 熔覆层磨损表面微观结构图

Fig. 21 Wear surface microstructure of cladding layer

4 问题与讨论

环状同轴送粉 TIG 熔覆解决了管状同轴送粉 TIG 熔覆存在的熔覆层熄弧位置凹坑, 焊缝不够平直, 以及焊缝熔宽不一致等问题, 而且具有更高的熔覆效率. 以熔覆层硬度作为响应值, 确定了优化的工艺参数为焊接热输入 10.8 kJ/cm 、送粉量 8 g/mm 和 SiC 含量 2%. 采用优化参数, 在 316L 不锈钢表面进行环状同轴送粉 TIG 熔覆, 获得了外观优良的单层单道熔覆层、单层多道熔覆层. 环状同轴送粉 TIG 熔覆工艺可以将 SiC 粒子作为基体强化材料, 提高 316L 不锈钢的耐蚀性与耐磨性. 根据 LEIS 阻抗谱可以看出, SiC 在熔覆层中的弥散较为均匀, 熔覆层局部阻抗最大值为 $1.72 \times 10^7 \Omega$, 而母材的局部阻抗最大值为 $2.25 \times 10^6 \Omega$. 熔覆层与母材摩擦磨损后损失质量分别为 1.63 mg 与 2.06 mg, 使用金相显微镜对摩痕进行 SiC 粒子检测, 验证了 SiC 粒子的强化作用. 采用环状同轴送粉 TIG 方法, 导入 SiC 粉末的目的是提高母材的耐蚀性与耐磨性, 对应其他表面改性需求, 也可以考虑借鉴环状同轴送粉 TIG 方法, 从而拓展其应用领域.

5 结论

- (1) 环状同轴送粉 TIG 熔覆能够获得外观优良的熔覆层.
- (2) 环状同轴送粉 TIG 熔覆层硬度是由焊接热

输入 q 、送粉量 V 和 SiC 含量 w_p 共同决定的, 而且因素之间存在交互影响, 其中 V 与 w_p 之间为协同作用, 而 V 与 q 之间、以及 q 与 w_p 之间均是拮抗作用.

(3) 母材与熔覆层 SEM, EDS 和 XRD 比对测试表明, 环状同轴送粉 TIG 熔覆将 SiC 强化颗粒有效地导入了熔覆层.

(4) 母材与熔覆层宏观、微区电化学腐蚀性能比对测试表明, 环状同轴送粉 TIG 熔覆导入的 SiC 粒子提高了 316L 不锈钢的耐蚀性.

(5) 母材与熔覆层摩擦磨损试验表明, 环状同轴送粉 TIG 熔覆导入的 SiC 粒子提高了 316L 不锈钢的耐磨性.

参考文献

- [1] Meng J S, Jin G, Shi X P. Structure and tribological properties of argon arc cladding Ni-based nanocrystalline coatings [J]. Applied Surface Science, 2018, 431(feb.15): 135 – 142.
- [2] Lu J, Wang B, Qiu X, et al. Microstructure evolution and properties of CrCuFeNiTi high-entropy alloy coating by plasma cladding on Q235[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 328: 313 – 318.
- [3] Gong F B, Shen J, Gao R H, et al. Influence of heat treatment on microstructure and mechanical properties of FeCrNi coating produced by laser cladding[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(8): 2117 – 2125.
- [4] 黎红. 钛的氩弧焊, 激光焊和等离子弧焊的实验研究 [J]. 华西口腔医学杂志, 1998, 16(3): 219 – 221.
Li Hong. Study on titanium joined with tungsten inert gas welding, laser welding and plasma welding[J]. West China Journal of Stomatology, 1998, 16(3): 219 – 221.
- [5] 李胜, 韩立发, 张小萍, 等. 激光熔覆与氩弧焊熔覆、焊条电弧焊熔覆的比较 [J]. 热加工工艺, 2011, 40(15): 125 – 126, 129.
Li Sheng, Han Lifan, Zhang Xiaoping, et al. Compare on laser cladding and argon arc cladding, covered electrode arc cladding[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(15): 125 – 126, 129.
- [6] 王金凤, 井子润, 杨伟, 等. 激光熔覆与等离子熔覆的镍基合金熔覆层组织和性能对比 [J]. 材料保护, 2020, 53(1): 80 – 83.
Wang Jinfeng, Jing Zirun, Yang Wei, et al. Effect of laser cladding and plasma cladding on microstructure and properties of nickel-based alloy cladding layer[J]. Materials Protection, 2020, 53(1): 80 – 83.
- [7] 王子龙, 秦建, 路全彬, 等. 焊接方法对 S22053 双相钢焊接接头组织和性能的影响 [J]. 焊接, 2018(8): 21 – 27.
Wang Zilong, Qin Jian, Lu Quanbin, et al. Effect of welding methods on microstructure and properties of S22053 welding

- joints[J]. *Welding & Joining*, 2018(8): 21 – 27.
- [8] Prasad R, Waghmare D T, Kumar K, *et al.* Effect of overlapping condition on large area NiTi layer deposited on Ti-6Al-4V alloy by TIG cladding technique – *Science direct*[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 385: 125417.
- [9] 徐国建, 柳晋, 刘占起, 等. 一种同轴弧内送丝与弧外送粉 TIG 电弧增材制造装置: CN111266702A[P]. 2020-06-12. Xu Guojian, Liu Jin, Liu Zhanqi, *et al.* A coaxial in-arc wire feeding and out-arc powder feeding TIG arc additive manufacturing device: CN111266702A[P]. 2020-06-12.
- [10] Huang Y, Liu R L, Hao Y Z. Gas pool coupled activating TIG welding method with coupling arc electrode[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 31(6): 169 – 176.
- [11] Alcindo F Moreira, Kandice S B Ribeiro, Fábio E Mariani, *et al.* An initial investigation of tungsten inert gas (TIG) torch as heat source for additive manufacturing (AM) process[J]. *Procedia Manufacturing*, 2020, 48: 671 – 677.
- [12] Jyotsna Dutta Majumdar, Ajeet Kumar, Lin Li. Direct laser cladding of SiC dispersed AISI 316L stainless steel[J]. *Tribology International*, 2009, 42(5): 750 – 753.
- [13] Ding Haohao, Yang Tao, Wang Wenjian, *et al.* Optimization and wear behaviors of 316L stainless steel laser cladding on rail material[J]. *Wear*, 2023, 523(7): 204830.
- [14] Ji Xiulin, Luo Chanyuan, Sun Yong, *et al.* Corrosive wear of multi-layer Fe-based coatings laser cladded from amorphous powders[J]. *Wear*, 2019, 438–439(11): 203113.
- [15] Riquelme C, Sánchez de Rojas Candela, Rodrigo P, *et al.* Influence of process parameters in additive manufacturing of highly reinforced 316L/SiCp composites[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, 299(1): 117325.
- [16] 叶超, 侯亮, 陈云, 等. 316L 不锈钢激光熔覆宏观特征优化[J]. *焊接学报*, 2023, 44(3): 8 – 16. Ye Chao, Hou Liang, Chen Yun, *et al.* Research on optimization of macroscopic and microscopic characteristics of 316L stainless steel by laser cladding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2023, 44(3): 8 – 16.
- [17] 张敏, 王新宝, 王浩军, 等. 激光熔覆 TC4/Inconel 625/316L 不锈钢梯度材料组织与性能 [J]. *焊接学报*, 2023, 44(7): 16 – 23. Zhang Ming, Wang Xinbao, Wang Haojun, *et al.* Microstructure and mechanical properties of laser clad-ding TC4/Inconel 625/316L stainless steel gradient material[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2023, 44(7): 16 – 23.
- [18] Li Xiaoping, Liu Xiao, Li Runzhou, *et al.* Microstructure and property research on welded joints of 7xxx aluminum alloy welding wire TIG for 7075 aluminum alloy[J]. *China Welding*, 2021, 30(4): 58 – 64.

第一作者:高辉, 博士, 副教授; 主要研究方向为焊接装备开发与焊接工艺; Email: gaohui@bupt.edu.cn.

通信作者:周灿丰, 博士, 教授; Email: canfeng@bupt.edu.cn.

(编辑: 郑红)

[上接第 48 页]

- [14] Kisielewicz A, Pandian K T, Sthen D, *et al.* Hot-wire laser-directed energy deposition: process characteristics and benefits of resistive pre-heating of the feedstock wire[J]. *Metals*, 2021, 11(4): 1 – 22.
- [15] Sang Y, Xiao M, Zhang Z, *et al.* Effect of auxiliary heating process on low power pulsed laser wire feeding deposition[J]. *Materials & Design*, 2022, 218: 110666.
- [16] Naksuk N, Poolperm P, Nakngonthong J, *et al.* Experimental investigation of hot-wire laser deposition for the additive manufacturing of titanium parts[J]. *Materials Research Express*, 2022, 9(5): 056515.
- [17] 彭进, 王星星, 倪增磊, 等. 焊丝熔化方式对激光焊接过程的影响 [J]. *焊接学报*, 2020, 41(2): 64 – 67. Peng Jin, Wang Xingxing, Ni Zenglei, *et al.* Effect of filler wire melting mode on laser welding process[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2020, 41(2): 64 – 67.
- [18] 韩善果, 杨永强, 蔡得涛, 等. 光丝位置对铝合金激光填丝焊接过程的影响 [J]. *激光技术*, 2022, 46(4): 481 – 485. Han Sanguo, Yang Yongqiang, Cai Detao, *et al.* Influence of the distance between laser and wire on the process of aluminum alloy welding with filler wire[J]. *Laser Technology*, 2022, 46(4): 481 – 485.
- [19] Guo Q, Zhao C, Qu M, *et al.* In-situ full-field mapping of melt flow dynamics in laser metal additive manufacturing[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 31: 100939.

第一作者:杨鑫, 硕士; 主要从事激光熔丝增材制造的研究工作; Email: 2426078149@qq.com.

通信作者:韩红彪, 博士, 教授, 博士研究生导师; Email: lyhhb7157@163.com.

(编辑: 王盈盈)