

引文格式: 朱明, 祁先刚, 张宗智, 等. 采用蓝光激光同轴熔覆铜过渡层的钛/钢复合层成形与组织分析[J]. 焊接学报, 2025, 46(9): 46 – 54. ZHU Ming, QI Xiangang, ZHANG Zongzhi, *et al.* Formation and microstructure analysis of titanium/steel composite layer with copper transition layer by blue laser coaxial cladding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2025, 46(9): 46 – 54.



采用蓝光激光同轴熔覆铜过渡层的钛/钢复合层 成形与组织分析

朱明^{1,2}, 祁先刚¹, 张宗智¹, 王金成¹, 石珏^{1,2}

(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, 兰州, 730050; 2. 兰州理工大学, 有色金属合金及加工教育部重点实验室, 兰州, 730050)

摘要: 钛钢复合板焊接修复时铜过渡层难以有效成形, 提出采用蓝光激光提高铜金属的吸收率, 并针对激光功率、送粉速率、扫描速度对铜粉熔化及铜层成形参数的作用规律展开研究, 通过能谱仪 (energy dispersive spectrometer, EDS) 面扫分析了不同工艺参数组合对 Fe-Cu 界面中铁元素扩散行为的影响, 在铜层表面继续同轴熔覆钛层时, 分析了蓝光激光对铜层的熔化行为并研究了 Fe-Cu-Ti 接头的微观组织与性能, 结果表明, 采用蓝光激光可以实现铜粉末的高效熔化, 随着激光功率的增加, 铜层的熔宽、余高、熔深与稀释率均有所增加; 随着送粉量的增加, 铜层的熔宽和余高增加, 熔深和稀释率明显减小; 随着扫描速度的增加, 铜层的成形参数和稀释率都呈减小趋势, 通过 Fe-Cu 接头的 EDS 面扫发现, 控制铜层的厚度, 可使铁元素在上表面区域的含量显著减小, 避免脆性 Fe-Ti 金属间化合物的形成, 形成的接头以 TiCu 和 Ti_3Cu_4 金属间化合物为主, 未形成脆性的 Fe-Ti 金属间化合物, 铜钛混合区平均硬度为 326 HV0.2.

创新点: (1) 通过蓝光激光在钢基材表面实现铜熔覆层成形的精确控制。
(2) 蓝光激光熔覆后形成的接头以 TiCu、 Ti_3Cu_4 金属间化合物为主。

关键词: 蓝光激光; 同轴熔覆; 钛钢复合板; 成形工艺; 微观组织

中图分类号: TG 174.44; TG 444.74 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20240622001

Formation and microstructure analysis of titanium/steel composite layer with copper transition layer by blue laser coaxial cladding

ZHU Ming^{1,2}, QI Xiangang¹, ZHANG Zongzhi¹, WANG Jincheng¹, SHI Yu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, 730050, China; 2. Non-Ferrous Metal Alloys and Processing Key Laboratory of The Ministry of Education, Lanzhou, 730050, China)

Abstract: During the welding repair of titanium-steel composite plates, it is difficult to effectively form the copper transition layer. To address this issue, the use of a blue laser to increase copper's absorptivity was proposed. The effects of laser power, powder feeding rate, and scanning speed on copper powder melting and copper layer formation parameters were investigated. The influence of different process parameter combinations on the diffusion behavior of iron elements at the Fe-Cu interface was analyzed using an energy dispersive spectrometer (EDS) area scanning. During coaxial cladding of a titanium layer onto the copper surface, the melting behavior of the copper layer under blue laser irradiation was analyzed. Subsequently, the microstructure and mechanical properties of the Fe-Cu-Ti joint were investigated. The results show that blue laser irradiation enables efficient melting of copper powder. As laser power increases, the melting width, weld reinforcement, melting depth, and dilution rate of the copper layer all

收稿日期: 2024-06-22; 录用日期: 2024-08-26

基金项目: 国家自然科学基金 (52065041); 中国-乌克兰政府间科技交流项目; 甘肃省教育厅“双一流”科研重点项目 (GSSYLXM-03); 甘肃省兰州理工大学红柳优青项目

increase. As the powder feeding rate increases, the melting width and weld reinforcement of the copper layer increase, while the melting depth and dilution rate significantly decrease. As scanning speed increases, both the formation parameters and dilution rate of the copper layer exhibit decreasing trends. EDS area scanning of Fe-Cu joints demonstrates that controlling copper layer thickness significantly reduces iron element content in the upper surface region, avoiding the formation of brittle Fe-Ti intermetallic compounds. The formed joint is mainly composed of TiCu and Ti_3Cu_4 intermetallic compounds. Fe-Ti intermetallic compounds that have not formed brittleness. The average hardness of the copper titanium mixed zone is 326HV0.2.

Highlights: (1) The precise control of the copper cladding layer formed on the surface of the steel substrate was realized by a blue laser. (2) The formed Fe-Cu joint by blue laser was mainly composed of TiCu and Ti_3Cu_4 intermetallic compounds.

Key words: blue laser; coaxial cladding; titanium-steel composite plate; formation process; microstructure

0 序言

钛钢复合板作为一种结合钛材的轻质、耐腐蚀与钢材的强度高、成本适中的新型材料,广泛应用于航空航天、石油化工等领域^[1-2].现阶段钛钢复合板的制造方法主要以爆炸复合法、厚板轧制法等为主^[3-4],鉴于钛和钢之间存在显著的物化性能差异及复杂的冶金行为,两者的结合界面易出现空洞、微裂纹等不良结合缺陷,为修复这些缺陷,通常需要依赖手工电弧焊技术堆焊钛层来实施修补^[5],然而,这种手工电弧修复方法不利于钛钢板的生产效率和整体性能,因此,迫切需要研发一种自动化水平高、性能稳定的钛钢板修复技术体系.

激光同轴熔覆技术的工艺易于自动化、适用性广、热量集中等优点,被广泛应用于增材制造和再制造技术中^[6-9].但铜金属对常规红光波段激光的吸收率较低,为此采用蓝光激光进行钛钢复合板修复中铜过渡层的成形研究.针对异种金属的激光再制造,国内外众多学者也进行了相关研究,王培等人^[10]利用激光熔覆技术进行了 Q235 钢表面熔覆钛涂层的研究;ZHANG 等人^[11]采用脉冲激光对 TC4 钛合金与 SUS301L 不锈钢焊接,选择 Nb 为过渡层金属;程建等人^[12]选择镍作为中间层,采用激光熔丝增材制造技术实现了 TC4/309L 复合材料的制备,主要研究了 Ni 中间层的添加对于界面组织

与性能的影响;张敏等人^[13]为了提高不锈钢工件的综合性能,采用激光熔覆技术在不锈钢表面制备 Inconel 625 熔覆层作为过渡层和 TC4 熔覆层,分析了复合层的微观组织和力学性能.相比 Ni、Nb 等过渡层金属,铜的成本低,且铜优良的塑性和延展性利于其发挥调节焊缝变形的作用,减少接头变形引起的焊接应力,补偿焊缝脆性相对于韧性的减弱,从而高接头的力学性能.上述研究主要集中在钛钢接头过渡层的选择、冶金结合机理等方面,但在蓝光激光作用下的成形控制及对组织、性能影响方面的研究相对较少.

文中提出采用蓝光激光控制铜过渡层熔覆,研究激光功率、送粉速率、扫描速度对铜粉熔化及铜层成形参数的影响规律,通过微观组织测试研究过渡层内 Fe、Cu 元素的分布特征,在铜层表面继续熔覆钛后得到 Fe-Cu-Ti 接头,并对其微观组织及性能进行分析.

1 试验方法

基体材料为尺寸 100 mm × 80 mm × 10 mm 的 45 号碳素结构钢,熔覆材料为纯铜粉和纯钛粉,粉末粒径为 30 ~ 200 μm 和 30 ~ 180 μm.化学成分见表 1 和表 2,SEM 形貌,如图 1 所示,粉末球形度较好,流动性好,存在少量的畸形颗粒.试验前对粉末

表 1 铜粉的化学成分 (质量分数, %)
Table 1 Chemical compositions of copper powder

Fe	Pb	Zn	O	Ni	Sn	Bi	Cu
0.01	0.05	0.03	0.02	0.05	0.001	0.03	余量

表 2 钛粉的化学成分 (质量分数, %)
Table 2 Chemical compositions of titanium powder

C	Fe	H	Si	Sn	Ti
0.08	0.20	0.015	—	—	余量

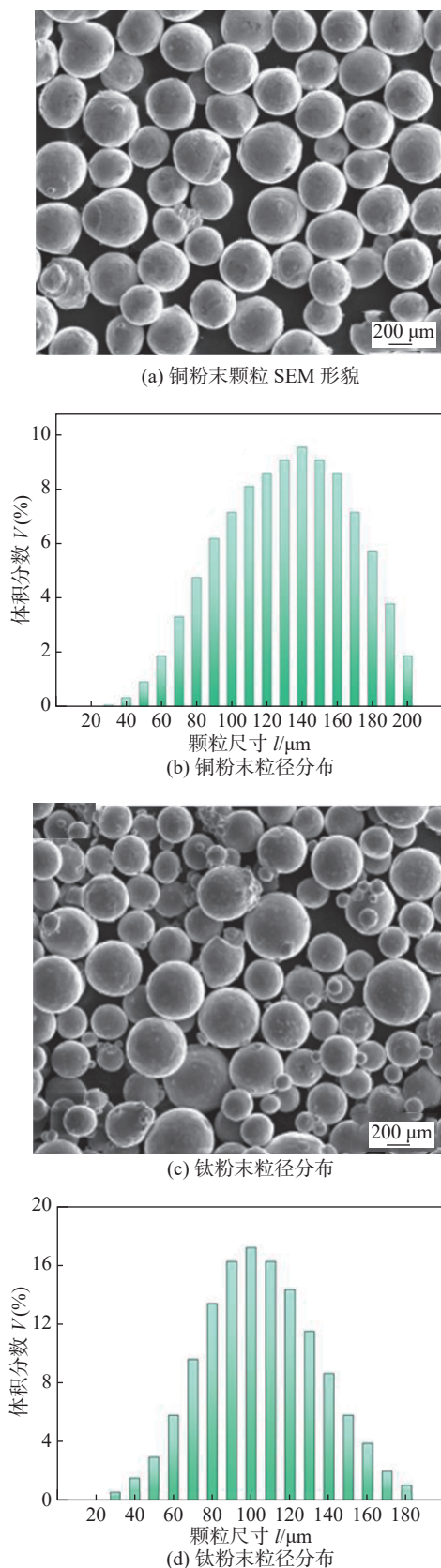


图 1 纯铜粉末和钛粉的颗粒的 SEM 形貌及粒径分布
Fig. 1 Particle morphology of pure copper powder and titanium powder and particle size distribution. (a) SEM morphology of copper powder particles; (b) particle size distribution of copper powder; (c) SEM morphology of titanium powder particles; (d) particle size distribution of titanium powder

进行干燥处理以去除粉末中的水分, 同时将 45 号钢用砂纸打磨去除表面铁锈和氧化膜, 用纯氩气 (99.99%) 作为载粉气, 送粉气体流量为 6 L/min.

采用线切割制备接头组织观察试样, 采用碳化硅砂纸和金刚石抛光液进行研磨、机械抛光处理. Q345 钢采用 FeCl_3 (10 g) + HCl (30 mL) + H_2O (120 mL) 溶液进行腐蚀, 纯钛采用 HF (10 mL) + HNO_3 (5 mL) + H_2O (85 mL) 进行腐蚀, 纯铜采用 FeCl_3 (5 g) + HCl (25 mL) + H_2O (50 mL) 进行腐蚀. 试验采用的激光热源为广东霍耳激光科技有限公司研制的 FL-Dlight-1500 聚焦输出光斑的蓝光半导体激光器, 其最小光斑直径为 2 mm, 工作波长为 455 ± 10 nm, 最大输出功率为 1 000 W. 送粉设备为 ECPF 2-2 LC 等离子送粉器, 试验过程, 如图 2 所示. 使用 LSM800 激光共聚焦显微镜进行熔覆层的微观组织分析. 利用 Quanta-450FEG 扫描电子显微设备研究试样的表面形貌和物相的化学成分分析. 采用 EDS 对试样微区进行成分分析, 使用 D8-ADVANCE 型 X 射线衍射仪进行复合层的物相分析, 采用 Wilson-VH1102 维氏硬度计进行熔覆层的显微硬度检测, 加载载荷为 2 N, 时间为 10 s.

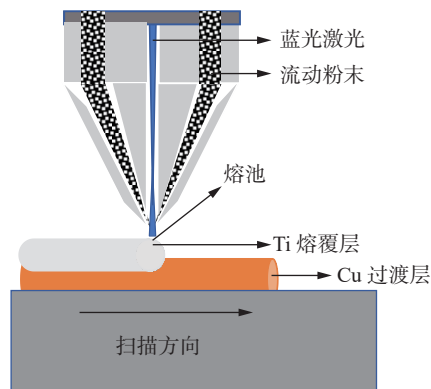


图 2 试验过程示意图
Fig. 2 Experimental system experimental diagram

2 试验结果与分析

2.1 工艺参数对铜熔覆层宏观形貌的影响

根据铜粉材料的物理特性和蓝光激光器的特点, 选择蓝光激光功率在 400 ~ 900 W, 扫描速度在 2 ~ 8 mm/s, 送粉速率在 0.25 ~ 1.00 r/min. 通过单一变量进行熔覆试验, 工艺参数见表 3.

铜熔覆层的宏观成形, 如图 3 所示, 从宏观成形发现, 当激光功率过小 (试样 a)、扫描速度过快 (试样 g) 或送粉速率过大 (试样 j) 均会导致粉末熔

表 3 不同工艺下的形貌参数
Table 3 Morphological parameters under different processes

组 号	试样编号	激光功率 P/W	扫描速度 $v_s/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	送粉速率 $v_f/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	熔宽 W/mm	余高 H/mm	熔深 h/mm	稀释率 $\eta(\%)$
第一组 (不同功率)	a	400	4	0.50	1.38	0.22	0.014	6.25
	b	600	4	0.50	2.15	0.51	0.083	14.00
	c	800	4	0.50	2.42	0.56	0.108	16.16
	d	900	4	0.50	2.54	0.61	0.182	22.98
第二组 (不同扫描速度)	e	600	2	0.50	2.42	0.62	0.172	21.71
	b	600	4	0.50	2.15	0.51	0.083	14.00
	f	600	6	0.50	1.74	0.35	0.021	5.66
	g	600	8	0.50	1.43	0.24	0.009	3.61
第三组 (不同送粉速率)	h	600	4	0.25	1.51	0.23	0.152	39.79
	b	600	4	0.50	2.15	0.51	0.083	14.00
	i	600	4	0.75	2.35	0.66	0.025	3.65
	j	600	4	1.00	2.53	0.81	0.012	1.36

化不充分, 成形较差. 当激光功率过大 (试样 d)、扫描速度过慢 (试样 e) 或送粉速率过小 (试样 h) 时熔

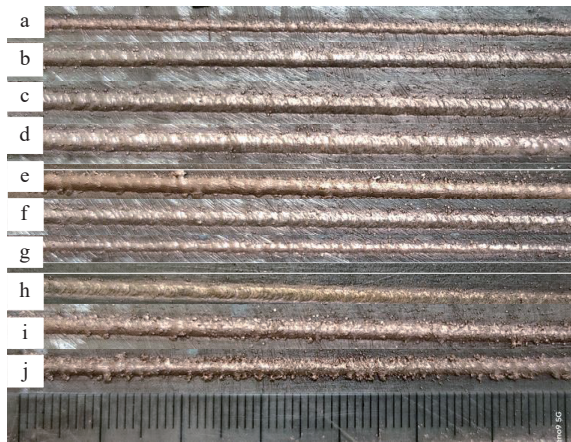


图 3 不同工艺参数下的熔覆层的宏观形貌
Fig. 3 Macroscopic morphology of the cladding layer under different process parameters

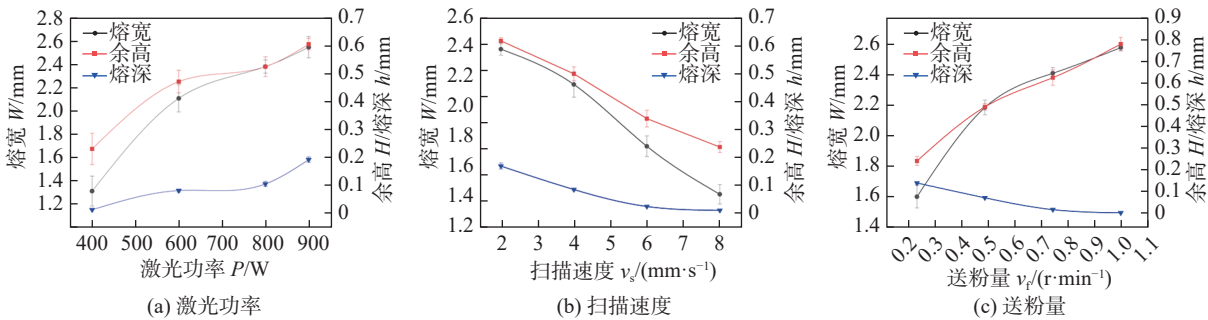


图 5 不同工艺参数对熔覆层成形参数的影响
Fig. 5 Effects of different process parameters on the forming parameters of the cladding layer. (a) laser power; (b) scanning speed; (c) Powder delivery quantity

覆层表面比较平整整洁, 但是试件表面开始出现了轻微过烧现象, 铜表面金属光泽变暗.

熔覆层成形的横截面结构示意图, 如图 4 所示, 其中 W 为熔宽, H 为余高, θ 为接触角, h 为熔深.

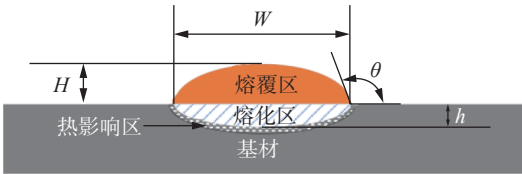


图 4 激光熔覆层横截面结构示意图
Fig. 4 Schematic diagram of the cross-sectional micro-structure of laser cladding layer

表 3 中工艺参数对铜熔覆层熔宽、余高和熔深的影响, 如图 5 所示. 从第一组试验结果发现, 激光功率与铜熔覆层的成形参数和稀释率成正比关系,

激光功率的提高会增加粉末材料和基体表面受到的能量密度,使得粉末和基体在单位时间内吸收的热量增加,一方面,光粉作用空间内熔化成液态的粉粒数量增多,不断向熔池传递热量和质量;另一方面,激光穿过粉末颗粒到达基底的能量增加,形成更大的熔池,更多的粉末颗粒进入熔池.这两方面的综合作用,不仅增加了熔化的粉末颗粒数量,而且使形成的熔融金属更容易在基体表面扩散,从而形成熔化宽度大、余高大、熔化深度大的熔覆层宏观形貌.

从第二组试验结果发现,扫描速度与成形参数和稀释率成反比关系,扫描速度增大成形参数和稀释率降低,主要是因为扫描速度增大导致热输入不足,粉末和基材吸收的热量下降,导致熔池中的金属粉末熔化和流动不充分,最终获得熔覆层的成形参数和稀释率均下降.最后,在第三组试验结果发现,送粉速率与熔宽和余高成正比,与熔深和稀释率成反比关系,因为送粉速率增加使得单位时间进入熔池的粉末数量增加,从而熔覆层的成形变大.送粉速率的增大使得单位空间内有更多的粉末颗粒吸收的能量,而作用在熔池上的能量减少,最终导致熔深和稀释率下降.

2.2 铜熔覆层的微观组织及 Fe 元素分布

为后续能继续熔覆 Ti 层,首先要选取铜层厚度能满足熔覆 Ti 层对熔深的要求,其次选择的过渡层能有效降低 Fe 元素的扩散,避免熔覆 Ti 层时产生大量的金属间脆性化合物,所以需要对比熔覆层进行元素分布分析.通过比较试样的宏观形貌选择对试样 b,试样 c 和试样 i 进行组织及元素分布分析,如图 6 所示.只有少量的 Fe 元素扩散到铜熔覆层中,且在整个熔覆层中 Fe 元素和铜元素的分布都比较均匀,且铜钢界面处没有明显 Fe 元素的偏析过渡发生.这有利于减少熔覆层中气孔、裂纹等缺陷的产生,提高了熔覆层与基体的结合强度,保证了熔覆层的稳定性和耐久性.在熔覆层与基体交界处均有 Fe 和 Cu 元素,在激光熔覆的过程中铜粉和基体材料之间发生了元素扩散,二者之间形成了良好的冶金结合.

图 6(a) 是在激光功率 600 W 时,扫描速度为 4 mm/s,送粉速率 0.5 r/min 下获得的试样微观组织,可以观察到铜钢界面和铜层组织晶界均清晰可见,铜层组织为多边形晶粒且形状相对规整,晶粒在各方向上尺寸相近,为等轴晶.图 6(b)激光功率为 800

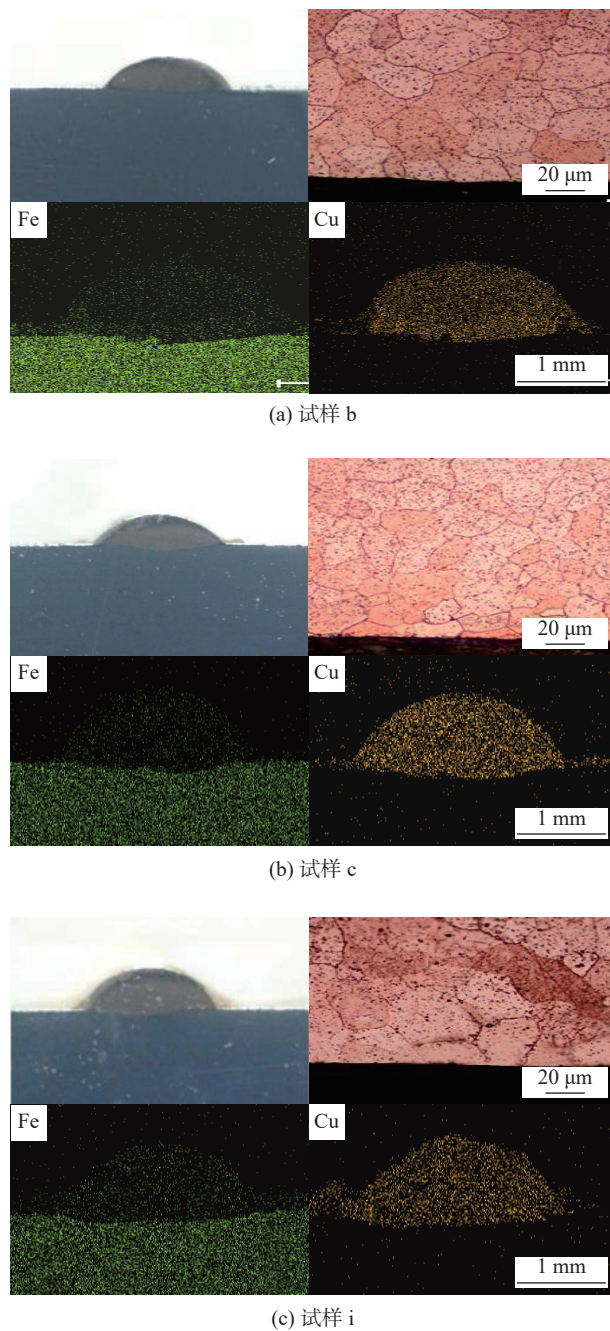


图 6 试样 b、试样 c 和试样 i 熔覆层的截面图、微观组织形貌及 EDS 面扫结果

Fig. 6 Cross section, EDS surface scanning results and microstructure morphology of b, c and f cladding layers of samples. (a) samples b; (b) samples c; (c) samples j

W, 由于激光热输入的增加晶粒尺寸变得粗大,较大的热量促进了晶核的生长,增加了晶粒生长和扩大的时间.图 6(c)送粉速率提高到 0.75 r/min 发现,在熔覆的过程中随着送粉速率的增加,铜过渡层的晶粒尺寸显著减小.由于送粉速率增加后,单位时间内进入熔池的粉末量相应增加.在固定的激光能量密度下,随着粉末颗粒的增加,激光与粉末颗粒之间的相互作用变得更为频繁和强烈,导致单

位体积的粉末颗粒所能接收到的激光能量减少,更多的能量在激光与粉末的交互过程中被吸收或散失,导致输入到基材的能量逐渐减少,在单位面积的粉末上,获得的激光辐照能量达到最低水平.这种能量分布的变化限制了晶粒的生长和粗化过程,使得晶粒在形成过程中无法充分长大,因此观察到的晶粒尺寸更为细小.激光功率为 800 W,由于激光热输入的增加晶粒尺寸变得粗大,因为较大的热量促进了晶核的生长,增加了晶粒生长和扩大的时间.从图 6(c) 送粉速率提高到 0.75 r/min 发现,在熔覆的过程中随着送粉速率的增加,铜过渡层的晶粒尺寸显著减小.由于送粉速率增加后,单位时间内进入熔池的粉末量相应增加.在固定激光能量密度下,随着粉末颗粒的增加,激光与粉末颗粒之间的相互作用变得更为频繁和强烈,导致单位体积的粉末颗粒所能接收到的激光能量减少,更多的能量

在激光与粉末的交互过程中被吸收或散失,导致输入到基材的能量逐渐减少,在单位面积的粉末上,获得的激光辐照能量达到最低水平.这种能量分布的变化限制了晶粒的生长和粗化过程,使得晶粒在形成过程中无法充分长大,因此观察到的晶粒尺寸更为细小.

通过综合对铜过渡层的宏观成形、余高、稀释率以及 Fe 元素的分布等比较发现,试样 i 的工艺相对最佳,其工艺参数为蓝光激光功率 600 W,扫描速度为 4 mm/s,送粉量 0.75 r/min.

2.3 钛熔覆层的成形特征及微观组织分析

基于熔覆铜层试验,选择工艺参数在蓝光激光功率 600 W,扫描速度为 4 mm/s,送粉速率 0.75 r/min 下获得的熔覆层作为钛钢连接时的过渡层,钛层熔覆试验参数见表 4,其宏观形貌和截面,如图 7 所示.

表 4 不同工艺参数下钛熔覆层的形貌参数
Table 4 Morphology parameters of titanium

试样编号	激光功率 P/W	扫描速度 $v_s/(mm \cdot s^{-1})$	送粉速率 $v_f/(r \cdot min^{-1})$	熔宽 W/mm	余高 H/mm
A	600	2	0.3	2.55	0.75
B	800	2	0.3	3.12	1.07
C	900	2	0.3	3.24	1.23
D	800	3	0.3	2.86	0.96
E	800	3	0.4	2.97	1.04
F	900	3	0.3	2.96	1.08

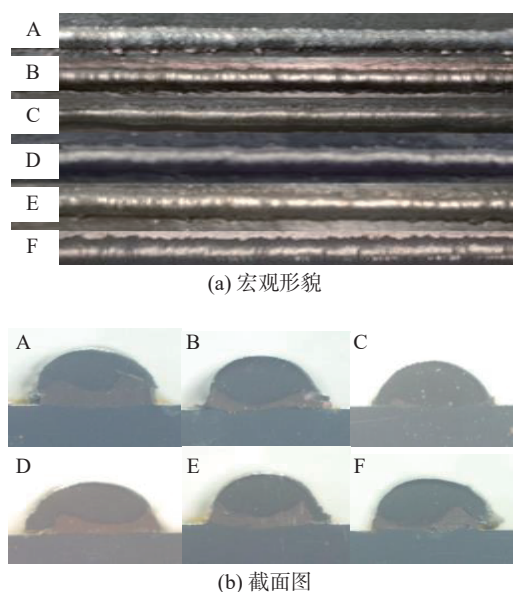


图 7 熔覆层的宏观形貌和截面图

Fig. 7 Cross-section of cladding layer. (a) macroscopic morphology; (b) cross section

从图 7 中复合层的宏观形貌和截面图发现,试样 A 熔覆层表面粗糙成形较差,表面黏着许多未熔颗粒,因为蓝光激光功率不足,激光热源的能量密度过小,导致移动的粉末颗粒达到熔池时无法熔化.这些颗粒必须从熔池中吸取热量才能熔化,导致熔池能量不足不能完成熔池的湿润铺展.当能量密度多大时铜过渡层几乎全被熔化,容易导致大量的 Fe 元素扩散到复合层中,不利于减少 Fe-Ti 脆性金属间化合物的生成.试样 B、试样 C 和试样 D 宏观成形良好,表面成形良好无黏着颗粒,复合层的截面无明显气孔、裂纹等缺陷.

对试样 B、试样 C 和试样 D 的复合层界面的微观形貌进行分析,如图 8 所示.图 8(a) 为复合层熔合界面的形貌,钢/铜界面平整连续,而铜/钛界面呈现凹状,结合紧密,无裂缝气孔缺陷,界面之间存在一层宽度不同的分层带.图 8(b) 为铜/钛界面铜

侧区域,铜侧区域组织呈柱状晶状生长,说明铜过渡层仍有纯铜晶体,在激光热输入的作用下,未熔部分的铜过渡层上表面的晶粒在激光热作用下明显长大,越靠近熔合区晶粒受激光热作用的影响越大,导致组织越粗大.根据霍尔佩奇关系可知,晶粒尺寸的大小直接影响材料的性能,尺寸越大材料强度越低,塑性越差,更容易致使裂纹的产生.由此可知,在二次激光热作用下铜过渡层的晶粒尺寸变大不利于提高熔覆层的性能.对铜侧区域进行 SEM 分析,如图 9 所示,对图 9(a) 中对于铜过渡中铜晶界面生成的灰白色颗粒进行 EDS 点分析,结果见表 5,并结合铜—铁二元相图判断是铜钢互溶时析出的 α -Fe 相.

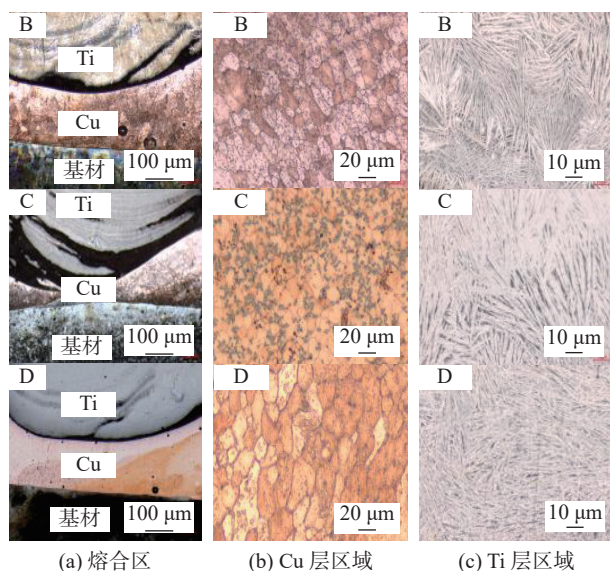


图 8 钛/铜/钢界面区域微观组织形貌

Fig. 8 Microstructure morphology of Ti/Cu/steel interface region. (a) fusion zone; (b) Cu layer region; (c) Ti layer region

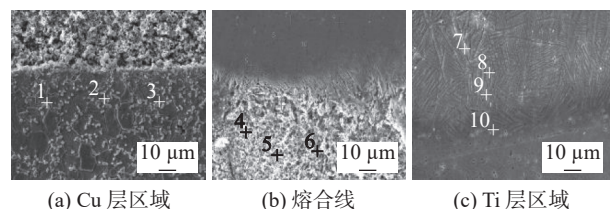


图 9 铜钛界面区域 SEM 下的形貌

Fig. 9 Morphology of copper-titanium interface region under SEM. (a) Cu layer region; (b) fusion line; (c) Ti layer region

图 8(c) 为铜/钛界面钛侧区域,钛侧呈现枝晶组织,大量的枝晶沿着多个方向生长.由枝晶生长理论可知,大量自由枝晶的存在是因为液相温度梯度小,凝固速度大,达到了熔体中自由枝晶的形成条件.由于激光热源的特性,熔池底部金属熔体

表 5 图 9 中各点 EDS 结果 (原子分数, %)
Table 5 EDS results of each point in Fig.9

测点	Ti	Cu	Fe	可能物相
1	0	0.8	99.2	Fe
2	0	0.2	99.8	Fe
3	0	0.5	99.5	Fe
4	15.7	83.2	1.1	TiCu ₄
5	17.9	75.6	6.4	TiCu ₄
6	48.6	40.4	11.0	Cu _{1-x} Fe _x Ti
7	52.8	46.5	0.7	TiCu
8	51.9	46.9	1.2	TiCu
9	40.7	49.8	2.4	Ti ₃ Cu ₄
10	37.9	51.6	10.5	Cu _{1-x} Fe _x Ti

与固相基体始终接触,基体界面为形核提供了良好的基底,所以首先在熔池与基体界面处生成晶核,致使熔池中凝固的组织具有外延生长的特性.根据铜钛二元相图,枝晶组织的描述如下,该组织的初生相是在最初的凝固过程中形成的 TiCu,可能是由于其高熔点 (982 °C),次生相是 Ti₃Cu₄(熔点约为 925 °C).因此,该区域的相变由 L 的一致凝固组成 TiCu→与 L + TiCu 的包晶反应→Ti₃Cu₄.再结合图 10 中 XRD 物相分析结果,判断图中的枝晶组织为 TiCu 和 Ti₃Cu₄.同时对枝晶间生长的白色点状相进行 EDS 点扫分析判断为 α -Ti 中析出的微量铜元素.

从图 8(a) 中发现在铜钛熔合区有较为明显的分层现象,并存在一个分层带,该区域中有钛元素扩散进入,可知该区域铜和钛发生了反应,判断该区域为金属化合物层.金属间化合物层的生成主要因为是在激光熔覆过程中大量的铜原子进入熔池,并有部分钛原子也进入熔池,在激光高热输入冷却后反应生成铜钛金属间化合物,由于钛侧冷却速度较慢,形成的金属间化合物生长较慢,因此形成了分层的金属间化合物层.结合表 5 EDS 点扫结果和图 10 中的 XRD 分析结果可知,该金属间化合物层以 TiCu₄ 为主.

对试样 D 复合层界面进行了扫描电镜测试,如图 11 所示.发现 Fe、Ti、Cu 元素分布均匀,没有产生明显的元素偏析现象,且整个熔覆层中 Fe 元素的含量较低,熔覆层中 Fe 元素的含量没有超出 Fe 在 Ti 中的固溶极限,减少了 Fe-Ti 硬脆性金属间化合物的生成,以及元素的均匀分布可有效降低

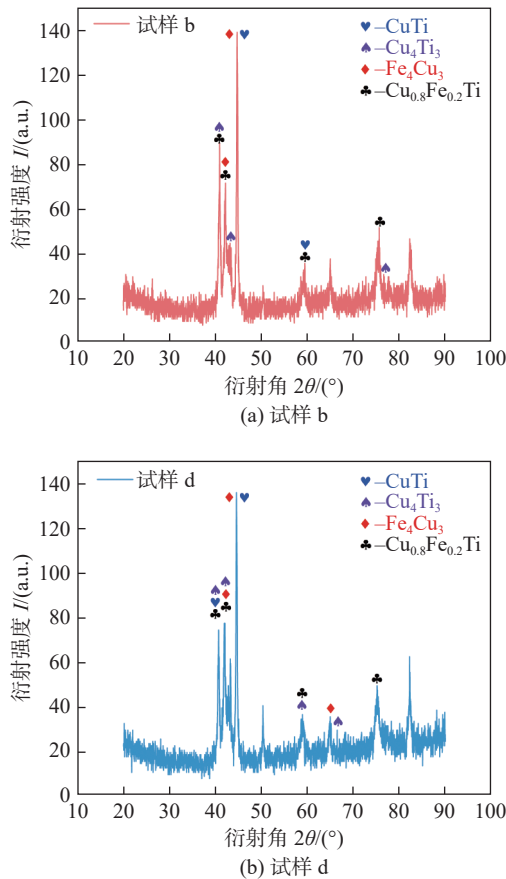


图 10 复合层 XRD

Fig. 10 XRD of composite layer. (a) sample b; (b) sample d

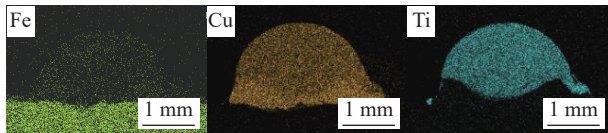


图 11 钢/铜/钛界面 EDS 结果

Fig. 11 EDS results of steel/copper/titanium interface

裂纹产生的倾向,有利于提高整个熔覆层的性能。

对试样 D 的复合层界面区域进行显微硬度分析,此次测试针对试样不同部位的表面进行硬度测试,测试点之间相隔 100 μm ,在每个区域测试 3 次,取多次测试的平均值作为当前位置区域的显微硬度值,如图 12 所示。复合层界面的硬度分布在不同位置展现出一致的趋势,显示出了较高的稳定性。然而,在铜钢界面处,由于激光熔覆产生的热影响区相对较小,并未使元素在此处形成显著的扩散区域,该区域的显微硬度值主要反映了基材的原始硬度,没有受到激光熔覆过程中元素扩散的显著影响。铜过渡层部分硬度最低在 78 HV0.2 左右,铜钛过渡区间硬度有所增加,钛/铜混合区域硬度值最高,因为此区域存在大量脆性较小的 TiCu 和

Ti_3Cu_4 金属化合物,平均在 326 HV0.2 左右,熔覆层上部区域的硬度明显高于底部。

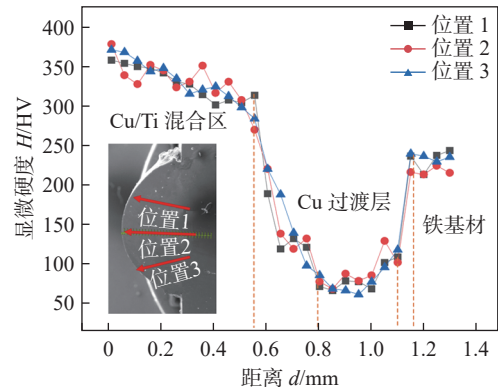


图 12 钢/铜/钛不同位置界面的硬度分布

Fig. 12 Hardness distribution of steel/copper/titanium interface at different positions

3 结论

(1) 采用蓝光激光可以实现铜粉材料的高效熔化,分析了不同工艺参数对铜过渡层的成形的规律,随着激光功率的增加,铜层的熔宽、余高、熔深与稀释率均有所增加;随着送粉量的增加,铜层的熔宽和余高增加,熔深和稀释率明显减小;随着扫描速度的增加,铜层的余高、熔深、熔宽和稀释率都呈减小趋势。

(2) 蓝光激光功率为 600 W,送粉速率为 0.75 r/min,扫描速度为 0.4 mm/s 时铜层厚度为 0.66 mm,且只有少量 Fe 元素扩散至铜层,有效避免了后续熔覆 Ti 时复合层中 Ti-Fe 金属间化合物的产生。

(3) 制备的铜过渡层厚度可以达到熔覆钛层对熔深的要求。Cu-Ti 接头主要以 TiCu 和 Ti_3Cu_4 金属间化合物为主,没有生成明显的 Ti-Fe 金属间化合物的脆硬相,铜钛混合区平均硬度为 326 HV0.2。

参考文献

- [1] 黎旭,冯中学,史庆南. 钛-钢复合材料制备技术及性能研究进展[J]. 稀有金属, 2018, 42(10): 1103 - 1113.
- LI Xu, FENG Zhongxue, SHI Qingnan. Research progress on preparation technology and properties of titanium-steel composites[J]. Rare metals, 2018, 42(10): 1103 - 1113.
- [2] HANG S, XIAO B L, FENG C, et al. Manufacturing technology and application trends of titanium clad steel plates[J]. Journal of Iron & Steel Research International, 2015, 22(10): 977 - 982.

- [3] 李俊翰, 孙宁, 马兰, 等. 钛钢复合板的制备技术进展及应用 [J]. 世界有色金属, 2020(14): 34 – 36.
LI Junhan, SUN Ning, MA Lan, *et al.* Progress and application of preparation technology of titanium steel composite plate[J]. World Nonferrous Metals, 2020(14): 34 – 36.
- [4] QIANG Z, RUI L, QIANG Z, *et al.* Tensile behavior of the titanium-steel explosive welded interface under quasi-static and high-strain rate loading[J]. International Journal of Solids and Structures, 2022, 254–255: 111870.
- [5] 史长根, 尤峻, 冯建. 压力容器用钛钢复合板缺陷的爆炸堆焊修复技术 [J]. 压力容器, 2008(7): 29 – 31.
SHI Changgeng, YOU Jun, FENG Jian. Explosive welding repair technology for defects in titanium steel composite plates for pressure vessels[J]. Pressure Vessels, 2008(7): 29 – 31.
- [6] 朱明, 王博, 石玓, 等. 激光熔覆过程预置粉末熔化行为的动态检测与分析 [J]. 中国激光, 2021, 48(14): 135 – 144.
ZHU Ming, WANG Bo, SHI Yu, *et al.* Dynamic detection and analysis of powder melting behavior in laser cladding process[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(14): 135 – 144.
- [7] 朱明, 祁先刚, 张宗智, 等. 采用激光预置铜层钛钢接头成形与组织 [J]. 焊接学报, 2025, 46(3): 18 – 26.
ZHU Ming, QI Xiangang, ZHANG Zongzhi, *et al.* Formation and microstructure of laser pre-placed copper layer titanium-steel joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2025, 46(3): 18 – 26.
- [8] 张津超, 石世宏, 龚燕琪, 等. 激光熔覆技术研究进展 [J]. 表面技术, 2020, 49(10): 1 – 11.
ZHANG Jinchao, SHI Shihong, GONG Yanqi, *et al.* Research progress of laser cladding technology[J]. Surface Technology, 2020, 49(10): 1 – 11.
- [9] 王凯弘, 刘晓英. 激光再制造技术及其应用发展研究 [J]. 中国设备工程, 2021(1): 195 – 196.
WANG Kaihong, Liu Xiaoying. Research on laser remanufacturing technology and its application development[J]. China Equipment Engineering, 2021(1): 195 – 196.
- [10] 王培, 叶源盛. Q235 钢表面激光熔覆钛涂层 [J]. 应用激光, 2018, 38(3): 377 – 381.
WANG Pei, YE Yuansheng. Laser cladding titanium coating on Q235 steel surface[J]. Application Laser, 2018, 38(3): 377 – 381.
- [11] ZHANG Y, SUN D Q, GU X Y, *et al.* A hybrid joint based on two kinds of bonding mechanisms for Titanium alloy and stainless steel by pulsed laser welding[J]. Materials Letters, 2016, 185: 152 – 155.
- [12] 程建, 徐荣正, 丁冬, 等. 镍夹层添加对激光熔丝增材制造钛/钢金属复合材料界面组织与性能影响研究 [J]. 有色金属工程, 2024, 14(6): 37 – 42.
CHENG Jian, XU Rongzheng, DING Dong, *et al.* Study on the effect of nickel interlayer addition on the interface microstructure and properties of titanium/steel metal composites fabricated by laser fuse additive manufacturing[J]. Nonferrous Metal Engineering, 2024, 14(6): 37 – 42.
- [13] 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 Min, WANG Xinbao, WANG Haojun, *et al.* Microstructure and properties of laser cladding TC4/Inconel 625/316L stainless steel gradient materials[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(7): 16 – 23.

作者简介: 朱明, 博士, 副研究员, 中国焊接学会理事, 甘肃省焊接学会秘书长; 主要研究方向先进自动化焊接, 激光增材再制造; Email: zhumin@syeah.net.

(编辑: 刘启明)