

双 TIG 电弧双丝增材制造低碳钢/不锈钢梯度材料的组织及性能

邓颖¹, 王新鑫^{1,2}, 贺虹云¹, 徐浩淳¹, 熊锋³

(1. 重庆理工大学材料科学与工程学院, 重庆 400054; 2. 重庆市特种焊接材料与技术高校工程研究中心, 重庆 400054; 3. 重庆理工大学车辆工程学院, 重庆 400054)

摘要: 采用双钨极惰性气体保护焊(TIG)电弧双丝增材制造方法,制备了低碳钢/不锈钢薄壁梯度材料,并分析其微观组织、力学性能和耐腐蚀性能。结果表明:随着不锈钢所占比例的增加,低碳钢/不锈钢梯度材料的元素成分呈现近似线性的变化规律,Fe元素含量逐渐减小,而Cr和Ni元素含量逐渐增加;梯度材料的微观组织在高度方向呈现梯度变化,由底部的马氏体、铁素体组织过渡到中部的马氏体组织再到中上部位的马氏体和奥氏体,最终过渡到顶部的 δ 铁素体和奥氏体组织;随着不锈钢比例的增加,梯度材料的显微硬度大体呈逐渐增加趋势,显微硬度为230~430HV0.3;梯度材料在水平方向和竖直方向的抗拉强度分别为1224和1106MPa,伸长率分别为11%和12.5%;梯度材料在水平方向和竖直方向的断口形貌均由韧窝构成,表现为延性断裂的特征;随着不锈钢比例的增加,梯度材料的耐腐蚀性增强,顶部的耐腐蚀性能高于底部。

关键词: 梯度材料; 电弧增材; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG401 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6264(2025)09-0191-11

Microstructure and properties of low carbon steel/stainless steel graded material fabricated by two-TIG dual-wire arc additive manufacturing

DENG Ying¹, WANG Xin-xin^{1,2}, HE Hong-yun¹, XU Hao-chun¹, XIONG Feng³

(1. School of Materials Science and Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 2. Chongqing University Engineering Research Center for Special Welding Materials and Technology, Chongqing 400054, China; 3. School of Vehicle Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: Low carbon steel/stainless steel thin-walled gradient material was prepared using two-TIG dual-wire arc additive manufacturing method, and its microstructure, mechanical properties, and corrosion resistance were analyzed. The results show that as the proportion of stainless steel increases, the elemental composition of the low-carbon steel/stainless steel gradient material exhibits an approximately linear change pattern, with the Fe element content gradually decreasing, while the Cr and Ni element contents gradually increasing. The microstructure of the gradient material exhibits gradient changes in the height direction, transitioning from the martensite and ferrite structure at the bottom to the martensite structure in the middle, then to the martensite and austenite structure in the upper middle, and finally to the δ ferrite and austenite structure at the top. As the proportion of stainless steel increases, the microhardness of the gradient material generally shows a gradually increasing trend, with a microhardness of 230-430 HV0.3. The tensile strength of the gradient material in the horizontal and vertical directions is 1224 and 1106 MPa, respectively, with elongation of 11% and 12.5%, respectively. The fracture surface morphology of the gradient material in both horizontal and vertical directions shows ductile dimples, characteristics of ductile fracture. With the increase of stainless steel proportion, the corrosion resistance of the gradient material is enhanced, and the corrosion resistance of the top is higher than that of the bottom.

Keywords: gradient material; arc additive; microstructure; mechanical property

收稿日期: 2024-10-28 **修订日期:** 2025-04-18

基金项目: 国家自然科学基金(51705054);重庆市科技局面上项目(CSTB2024NSCQ-MSX0127);重庆理工大学科研创新团队培养计划(2023TDZ013)

作者简介: 邓颖(1997—),女,硕士研究生,主要研究方向为电弧增材制造,E-mail: 1359062028@qq.com。

通信作者: 王新鑫(1985—),男,副教授,博士,主要研究方向为高效焊接方法、增材制造及数值模拟,E-mail: wang@cqut.edu.cn。

引用格式: 邓颖,王新鑫,贺虹云,等.双TIG电弧双丝增材制造低碳钢/不锈钢梯度材料的组织及性能[J].材料热处理学报,2025,46(9):191-201.

DENG Ying, WANG Xin-xin, HE Hong-yun, et al. Microstructure and properties of low carbon steel/stainless steel graded material fabricated by two-TIG dual-wire arc additive manufacturing[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2025, 46(9):191-201.

随着工业制造水平的不断提升,传统的单一均质材料已不能满足人们对材料性能的需求,而功能梯度材料(Functionally grade material, FGM)因其成分及性能局部可控的优点而受到广泛关注。FGM与传统单一材料不同,它基于两种及两种以上的不同性能的材料,通过逐层改变材料的成分和结构,使得材料的成分或结构沿着一个或多个维度变化,形成材料性能随着材料成分或结构变化的新材料,即具有不同特定功能的功能梯度材料^[1-3]。FGM的应用领域广泛,目前在航空航天^[4]、核能发电^[5]、生物医学^[6]、光电器件^[7]等对于服役条件和服役环境有较高要求的领域具有非常迫切的应用需求。用于制备功能梯度材料的方法很多,传统的多组分组合结构加工方法包括气相沉积,等离子喷涂、粉末冶金、自蔓延高温合成法、电沉积法、离心铸造法等^[8]。总体而言,这些方法存在着成本高、周期长、不适用大尺度试样及复杂试样制备的缺点^[9]。

增材制造技术为 FGM 的开发提供了一种新思路,增材制造采用自下而上、逐层堆积的成形方式,在不同部位熔覆不同成分的材料,从而实现多组分结构的制备。电弧增材制造(Wire and arc additive manufacture, WAAM)以电弧为热源,将金属丝材逐层熔化、堆积直接成形致密零件的技术,具有沉积效率高、生产周期短、成本低、可以成形复杂大型结构等优势^[10-11]。与其他电弧增材制造方法相比,TIG 电弧增材在实现逐层加工的同时,具备独立控制送丝速度、电弧移动速度以及熔覆电流的优势,整个增材过程可以通过控制送丝速度实现各成分含量的控制,调节更加灵活。Rodrigues 等^[12]利用电弧增材制造技术制造了钢/铜功能梯度材料,将铜合金沉积在高强度低合金钢顶部,充分证明 WAAM 电弧增材制造技术可行性。Wang 等^[13]采用双丝电弧增材制造技术研究了钛铝合金梯度材料,通过控制铝的含量从基板(0 at%)到顶部(50 at%)逐层增加,从而获得了不同层不同的合金含量比。此外,Wang 等^[14]通过电弧增材制造了 Ti-35Al、Ti-45Al、Ti-55Al 金属构件,并分别对增材金属的组织、力学性能及抗氧化性能进行了综合的研究。通过调节双丝的送丝速度,得到了不同成分组织和性能变化的材料。Zhang 等^[15]利用电弧增材制造了不锈钢-铝梯度材料,并对组织和性能进行了分析,结果表明,随着 Al 含量的增加,合金的显微组织演变为: $\gamma\text{-Fe} \rightarrow \gamma\text{-Fe}$ 和 $\alpha\text{-Fe} \rightarrow \alpha\text{-Fe} \rightarrow \text{Fe}_3\text{Al} \rightarrow \text{FeAl}$,裂纹发生在 FeAl 区,这是由高应力和低塑性引起的。Chen 等^[16]采用双丝电弧增材方法,制备了从

TC4 到 316L 不锈钢的功能梯度材料,研究发现,当 Fe 原子分数达到 50%时,合金出现裂纹;当 Fe 原子分数达到 60%时,硬度最大。以上研究对利用 WAAM 进行梯度材料的制备进行了诸多有益探索,然而由于异种材料之间相容性的问题,还有许多问题需要进一步研究。

为进一步提高电弧增材制造的效率,发挥其优势,可以在提高电流的同时增加扫描速度。然而,当电流过大,则会由于电弧力太大而导致熔覆金属溢出而难以成形,或者在速度超过临界值后出现咬边和驼峰等缺陷,形成熔覆层不连续^[17]。为此,采用耦合电弧是一个有效的解决方法。Han 等^[18]采用双钨极耦合电弧实现了高熔覆率的增材制造,韩庆麟等^[19]进一步进行了不锈钢/高强钢的梯度材料增材制造。邹鹏远等^[20]研究了双丝 MAG 电弧增材碳钢/耐磨钢梯度材料的性能。采用熔化极电弧需送丝速度与电流相匹配,对于增材制造梯度材料成分而言,调节自由度有一定的限制。王林等^[21]采用等离子弧双丝增材制造技术成功制备了 Ti-48Al 合金(at%),并对其沉积态和热处理后的组织特征进行了系统的研究。Huang 等^[22]系统研究了铝合金双丝电弧增材制造过程中光谱信号的变化机理,根据典型光谱特征与表面成形精度之间的关系,建立了光谱传感信号与沉积合金相组成的关系。Xu 等^[23]研究了 TIG 电弧增材制造奥氏体钢和铁素体钢双金属结构的界面特征,表明界面处形成大量板条马氏体和等轴马氏体是其硬度上升的主要原因。作为应用极其广泛的两种材料,低碳钢和不锈钢直降具有较好的材料相容性,其组合结构在工程领域有广泛的应用,然而,关于其 WAAM 的研究还相对较少^[24]。

本文提出双 TIG 电弧双丝增材制造梯度材料的方法,相对于双钨极 TIG 电弧而言,可不设计制作专用焊枪,直接利用双 TIG 电弧熔化双丝,从而更容易实现。另外,利用耦合电弧力明显减小的特点,可以在提高电流以增加送丝速度(熔覆率)的同时,提高电弧移动速度,进一步提高生产效率^[25]。本研究以低碳钢和不锈钢焊丝为填充材料,制备低碳钢/不锈钢梯度材料,并对其成分变化、微观组织、力学性能和耐腐蚀性进行分析,以期实现组织和力学性能的梯度过渡。以期推广双丝双 TIG 电弧增材制造低碳钢/不锈钢梯度材料的应用提供依据,也为利用不锈钢与低碳钢材料之间的优势互补,满足对服役环境和服役条件有相应需求的工程领域提供借鉴。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

采用的基板为尺寸 100 mm×50 mm×10 mm 的

Q235 低碳钢,丝材为直径 1.2 mm 的 ER70S-6 低碳钢焊丝和 CHM-304 奥氏体不锈钢焊丝,各自的化学成分见表 1。保护气体为 99.99% 的氩气,钨极为 3.2 mm 铈钨极。

表 1 ER70S-6、CHM-304 和 Q235 的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of ER70S-6, CHM-304 and Q235 (mass fraction, %)

Material	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Fe
ER70S-6	0.071	1.46	0.011	0.012	0.83	0.010	0.010	0.010	Bal.
CHM-304	0.051	1.73	0.013	0.012	0.51	18.29	8.13	0.024	Bal.
Q235	≤0.22	≤1.4	≤0.045	≤0.050	≤0.35	-	-	-	Bal.

1.2 试验方法

试验前,将基板用角磨机进行打磨,去除表面的氧化膜,用丙酮擦拭,去除表面油污杂质等。两只 TIG 焊枪在基板移动方向前后排布,焊枪在垂直于母材平面内呈 60° 夹角,采用两台相互独立的焊接电源对两焊枪供电,两根焊丝呈现一定的夹角送入电弧,采用两台独立的送丝机构送丝。试验过程中,主要工艺参数为电流 200 A + 200 A,送丝速度

450 cm/min,弧长 3 mm,钨极间距为 3 mm,气体流量为 15 L/min,试验的基本参数如表 2 所示。设计的低碳钢/不锈钢梯度薄壁墙体在高度方向以 10% 体积分数为步长,由 100% 的低碳钢过渡到 100% 的不锈钢。试验中,根据设计的成分方案改变每道熔覆层的送丝速度,电弧固定不动,基板随着平台一起移动,起弧后开始送丝。试验实物图如图 1 所示。

表 2 双 TIG 电弧双丝增材制造基本工艺参数

Table 2 Basic process parameters for two-TIG dual-wire arc additive manufacturing

Current ratio, I_1+I_2/A	Argon flow rate, $Q/(L/min)$	Arc length L/mm	Tungsten electrode distance, d/mm	Arc travel speed, $v_t/(cm/min)$	Wire feeding speed, $v_f/(cm/min)$	Tungsten electrode tip angle, $\theta/(^\circ)$	Interlayer temperature, $T/^\circ C$
200+200	15	3	3	8	450	60	200



图 1 双 TIG 电弧双丝增材试验装置实物图

Fig. 1 Physical picture of two-TIG dual-wire arc additive manufacturing testing device

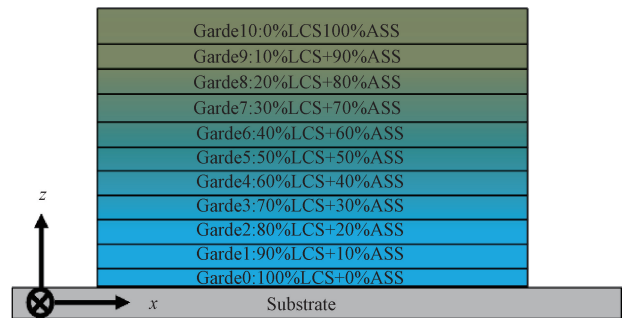


图 2 增材梯度材料墙体示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the additive gradient material wall

梯度材料墙体沉积试验的成分示意图如图 2 所示。基板为低碳钢,第一层沉积层为 100% 低碳钢(LCS)丝熔化形成,之后低碳钢送丝速度以 10% 递减,不锈钢(ASS)送丝速度以 10% 递增,使得沉积层成分按照设定的比例变化,且每层沉积层厚度相当。在试验中采用侧向独立送丝的方式,将两根异质焊丝送入电弧, X 方向为电弧移动方向, Z 向为墙体构建方向。

逐层沉积试验完成后,沿沉积的高度方向(Z 方向)切取金相试样,经打磨抛光后,使用 Marble 腐蚀液进行腐蚀。采用场发射扫描电镜(SEM)对试样进行微观组织观察,用能谱仪(EDS)进行成分测量;拉伸性能测试依据 GB/T 2653—2008《焊接接头弯曲试验方法》进行拉伸,水平方向和竖直方向各取 3 个拉伸样;显微硬度测试依据标准 GB/T 2654—2008《焊接接头硬度试验方法》,试验使用 HVS-1000Z 型显微硬度计,载荷为 300 g,保持时间为 15 s,从基板开始往上依次进行打点测试,每隔 0.5 mm 打一个点,直

到到达墙体顶部;利用电化学工作站,采用标准的三电极体系,使用3.5 mass%的NaCl溶液作为腐蚀溶剂,对沉积墙体金属构件进行耐腐蚀性能测试;采用X射线衍射仪(XRD)对试样的物相组成进行分析,绘图进行对比分析物相组成;对试样进行电子背散射衍射(Electron back-scattered diffraction, EBSD)分析,以获取梯度墙体不同成分的晶体取向、物相分布等信息。

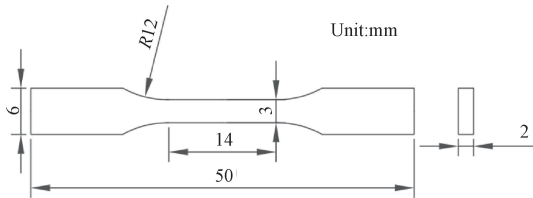


图3 拉伸试样的尺寸示意图

Fig. 3 Dimensional diagram of tensile specimen

2 结果与分析

2.1 梯度墙体的元素分布

图4为低碳钢/不锈钢梯度墙体中的Fe、Ni和Cr 3种元素的成分随墙体高度的变化,设计的成分采用实线表示,实际测量值用虚线表示。如图4所示,横坐标代表到基板的距离,可见距离越大,Cr和Ni的成分比例含量越高,且几乎以线性变化。Fe元素随着高度的增加含量逐渐减小,Cr和Ni元素随着高度的增加含量逐渐增加。成分变化的理论值与实际测量值基本吻合,表明了梯度墙体元素成分的梯度变化。值得注意的是,Fe的实测值与设计值偏离相对较大,而Cr和Ni则吻合较好。可能的原因是由于熔池的流动性,每层熔覆层的厚度和元素分布不能严格地按线性变化,会出现不同程度的波动,导致实际值出现浮动。总体而言,元素变化表现出梯度变化的特点。

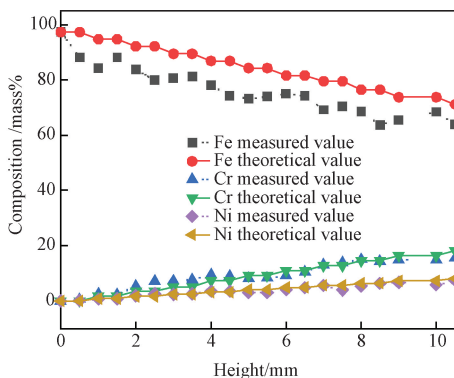


图4 梯度墙体不同高度的成分变化

Fig. 4 Composition changes of the gradient wall at different heights

2.2 XRD物相分析

Ni_{eq} 和 Cr_{eq} 的计算方法如式(1)和(2)所示^[23]:

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30 \times \%C + 0.5 \times \%Mn \quad (1)$$

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1.5 \times \%Si + 0.5 \times \%Nb \quad (2)$$

图5为根据Schaeffer相图^[16]得到的梯度墙体不同位置的相组成, Ni_{eq} 和 Cr_{eq} 根据式(1)和(2)计算,结果如图中实心圆点标记所示。

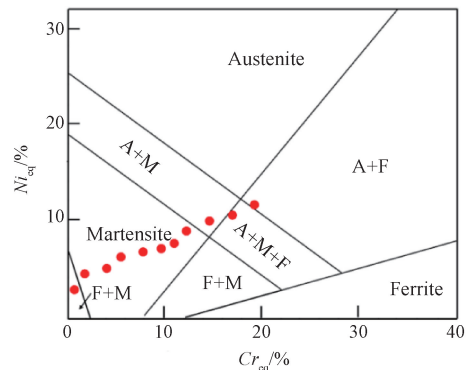


图5 根据Schaeffer相图得到的梯度材料的相组成^[16]

Fig. 5 Phases corresponding to the compositions in the graded wall obtained from the Schaeffer phase diagram^[16]

由图5可知当不锈钢焊丝熔覆成分为0%时,梯度材料由F+M构成。当不锈钢含量从10%增加到70%左右时,梯度材料的相为M。当不锈钢占比为75%~90%时,相为A+M。当不锈钢含量为90%~100%时,相组成为A+F+M。当304不锈钢含量为100%时,相为F+A。

图6所示为梯度材料不同区域(底部、中下、中部、中上)的XRD分析结果。由图6可知,在整个试件中主要存在体心立方(BCC)结构相和面心立方(FCC)结构相,整个梯度墙体中均出现了衍射峰指数为(110)、(200)、(211)、(220)、(310)的峰,结合Schaeffer相图,图6(a)为底部100%低碳钢,即第一道熔覆层的XRD结果,结合特征峰和图5的结果,表明该区域为F+M。图6(b)和图6(c)位置虽然出现了FCC衍射峰(111),但没有其他FCC的特征峰出现,且峰强较弱,所以可能的相是BCC,结合图5的结果,相为M。图6(d)为成分约为80%的不锈钢含量的结果,出现BCC的(111)和(200)和(220)3个特征峰,结合图5的结果,认为在这一区域为A+M。另外也可以看到,随着不锈钢含量的增加,BCC的衍射峰强度逐渐减小,FCC的衍射峰强在靠近顶部的位置更加明显。

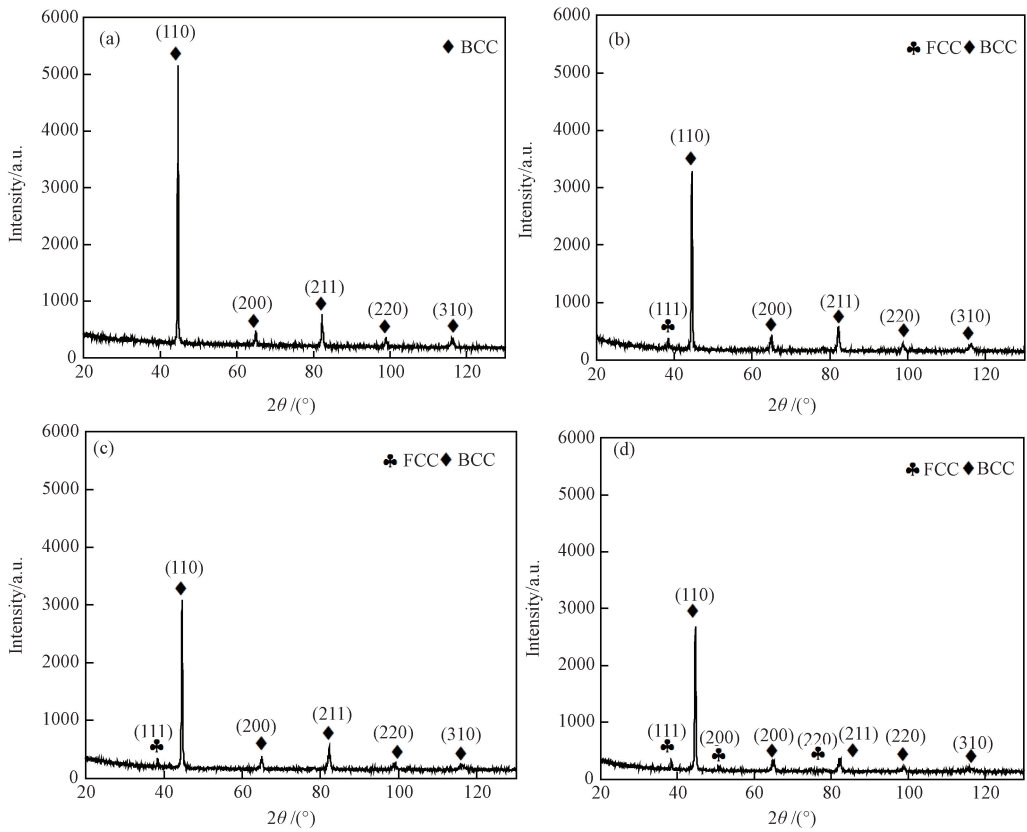


图 6 梯度墙体不同位置的 XRD 图谱 (a) 底部; (b) 中部偏下; (c) 中部; (d) 中部偏上

Fig. 6 XRD patterns of the graded wall at different positions (a) bottom; (b) lower middle; (c) middle; (d) upper middle

采用 EBSD 对梯度墙体中部以及中部偏上两个位置进行相分布测试,结果如图 7 所示。图 7(a)为中部位置的相分布,可见,只存在 BCC 相;图 7(b)为

中部偏上位置的相分布,可见,在中上部出现少量的 FCC,含量为 4.2%,其余为 BCC。这一结果与前述的结果一致。

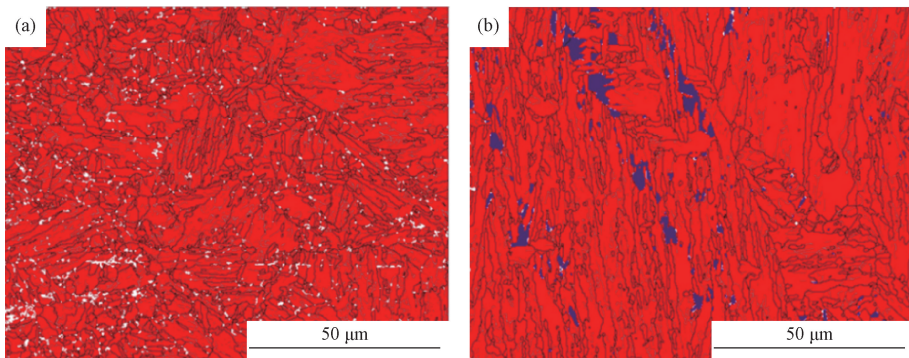


图 7 梯度墙体不同高度的 EBSD 相分布图 (a) 中部; (b) 中部偏上

Fig. 7 EBSD phase distribution maps of the graded wall at different positions (a) middle; (b) upper middle

2.3 显微组织

图 8 为梯度材料不同区域微观组织的 SEM 形貌。图 8(a)所示为第一层熔覆金属的微观组织,由于是 100%低碳钢熔覆层,在较大的热输入和较快的冷却速度下形成铁素体和马氏体组织^[18-19],且在后

续熔覆层多次的加热冷却作用下,形成回火马氏体组织,且晶粒变得较为细小。图 8(b)所示为底部偏上部位的熔覆层,不锈钢含量为 20%左右,Cr、Ni 和 Mn 等合金元素含量明显升高,且冷却速度较大,更加有利于形成马氏体。如图 8(c)所示为中间熔覆层的组

织,此时不锈钢与低碳钢含量大约各为 50%,虽然冷却速度较底部有所减小,但是由于合金元素含量明显升高,仍然形成马氏体组织。如图 8(d)所示为中上熔覆层的组织,不锈钢的含量接近 90%,由于 Ni 和 Cr 都达到比较高的比例,同时冷却速度继续降低,组织粗化,结合 Schaeffer 相图,此时形成奥氏体、马氏

体和少量铁素体。同时,由于沉积在先前的沉积层上,热量比基板热量更高,随着沉积层的增加,热量进一步积累,冷却速率和温度梯度降低,冷却速率减慢,相较于底部区域,出现残留奥氏体。如图 8(e)所示顶部熔覆层的组织,304 不锈钢含量占比为 100%,形成奥氏体和其晶界残留的少量 δ 铁素体。

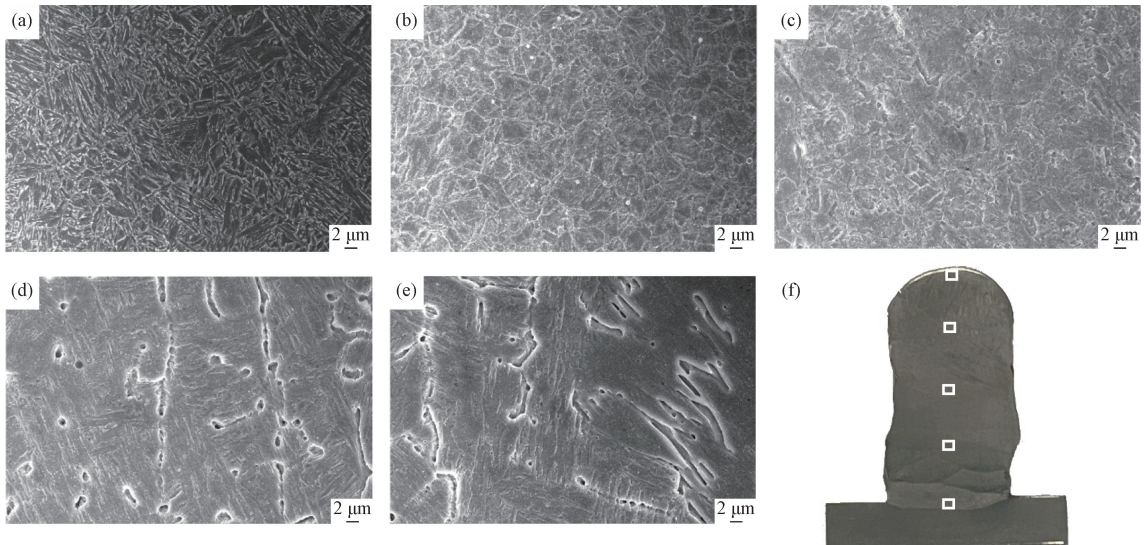


图 8 梯度材料不同位置微观组织的 SEM 形貌

(a) 底部; (b) 中部偏下; (c) 中部; (d) 中部偏上; (e) 顶部; (f) 取样位置示意图

Fig. 8 SEM images showing microstructure of the graded wall at different positions

(a) bottom; (b) lower middle; (c) middle; (d) upper middle; (e) top; (f) schematic diagram of sampling location

2.4 显微硬度

图 9 为低碳钢/不锈钢梯度墙体不同高度的硬度分布,随着不锈钢焊丝填充量增加,显微硬度呈现增加的趋势,整个低碳钢/不锈钢梯度墙体在高度上的显微硬度的范围为 230~430 HV0.3,在基板热影响区硬度明显增加。随着不锈钢熔覆比例的增加,墙体中出现较多马氏体,明显地增加了显微

硬度,硬度的变化与上述微观组织的变化规律一致。

2.5 拉伸试验

梯度墙体在水平方向和竖直方向的应力-应变曲线如图 10 所示。取样为墙体中部,由图 10 可知,水平方向的抗拉强度为 1224 MPa,竖直方向上的抗拉强度为 1106 MPa,低碳钢/不锈钢梯度墙体在水平方

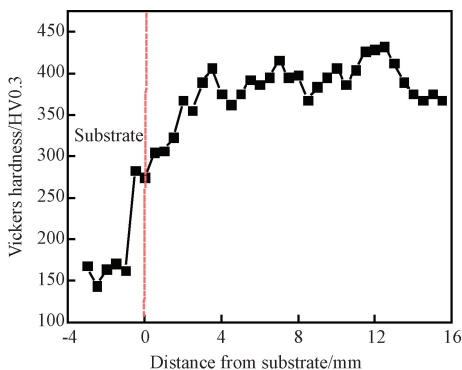


图 9 低碳钢/不锈钢梯度墙体的硬度

Fig. 9 Hardness of the low carbon steel/stainless steel gradient wall

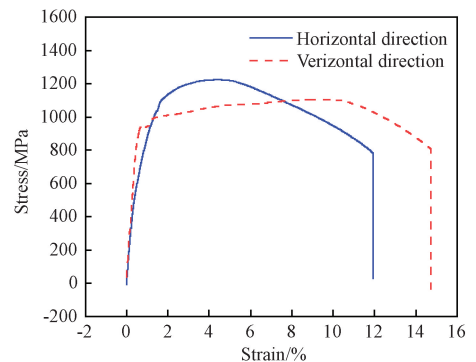


图 10 梯度墙体在水平方向和竖直方向的应力-应变曲线

Fig. 10 Stress-strain curves of the gradient wall in both horizontal and vertical directions

向的抗拉强度大于竖直方向。另外,梯度墙体的抗拉强度都明显高于丝材,而伸长率明显降低,这是由于生成较多的马氏体所致,且部分形成回火马氏体,由于固溶强化的作用和内应力的释放,保持了较高的强度和一定的塑性。

图 11 为水平方向和竖直方向的拉伸试验结果。由图 10 和图 11 可知,梯度材料的拉伸性能在水平方向和竖直方向不同,水平方向的抗拉强度大于竖直方向,水平方向的伸长率为 11%,竖直方向的伸长率为 12.5%。在增材制造过程中,有研究表明抗拉强度与沿着沉积方向生长的晶粒的取向有关。在不同的方向上,拉伸试样的取向不同,水平方向的晶粒生长方向较为复杂,晶粒数量较多,因此,水平方向的拉伸试样包含更多的晶粒边界^[23],从而阻碍位错的运动,导致强度上升,伸长率较低。

2.6 拉伸断口分析

图 12 为梯度墙体在水平方向和竖直方向上的拉伸断口形貌。由图 12 可知,水平方向和竖直方向

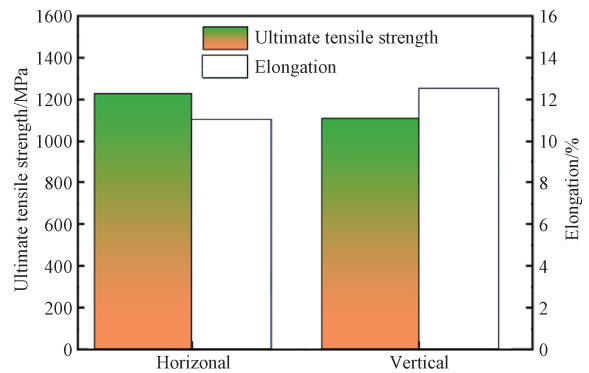


图 11 梯度墙体在水平方向和竖直方向的拉伸试验结果
Fig. 11 Tensile test results of the gradient wall in both horizontal and vertical directions

上的断口处存在大量韧窝,表现为典型的延性断裂特征。韧性与韧窝尺寸成正比,水平方向上的韧窝尺寸稍大于竖直方向上的韧窝,因此水平方向上的韧性略大于竖直方向,拉伸断口形貌所表现的特征与抗拉强度结果相对应。

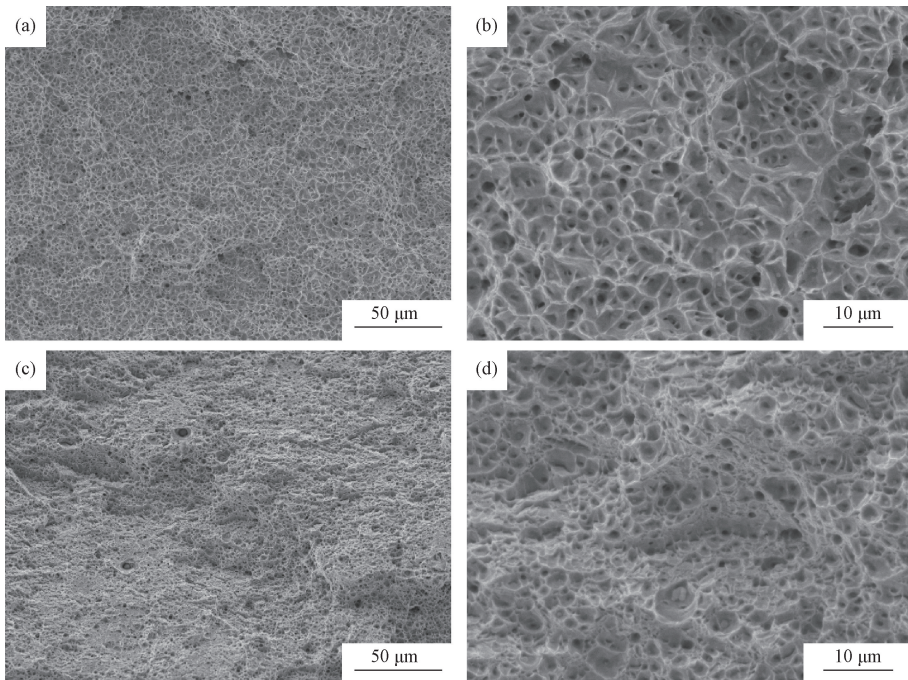


图 12 拉伸试样的断口微观形貌 (a,b) 水平方向; (c,d) 竖直方向

Fig. 12 Fracture surface morphology of tensile test specimens (a,b) horizontal direction; (c,d) vertical direction

图 13 为韧窝处的第二相粒子的 EDS 结果,如表 3 所示,可见第二相粒子是合金元素 Si、Mn 和 Fe 的氧化物,这些氧化物是在金属熔覆过程中有少量空气进入熔池而形成^[26]。氧化物杂质通常为脆硬相,会使材料强度上升,而伸长率降低。

2.7 耐腐蚀性能分析

图 14 为梯度材料试样不同部位在 3.5% NaCl 溶液中的极化曲线,自腐蚀电流密度的大小代表金属在溶液中的腐蚀速率,自腐蚀电流密度越小,电荷在腐蚀过程中转移越困难,材料腐蚀速率越低。材料的

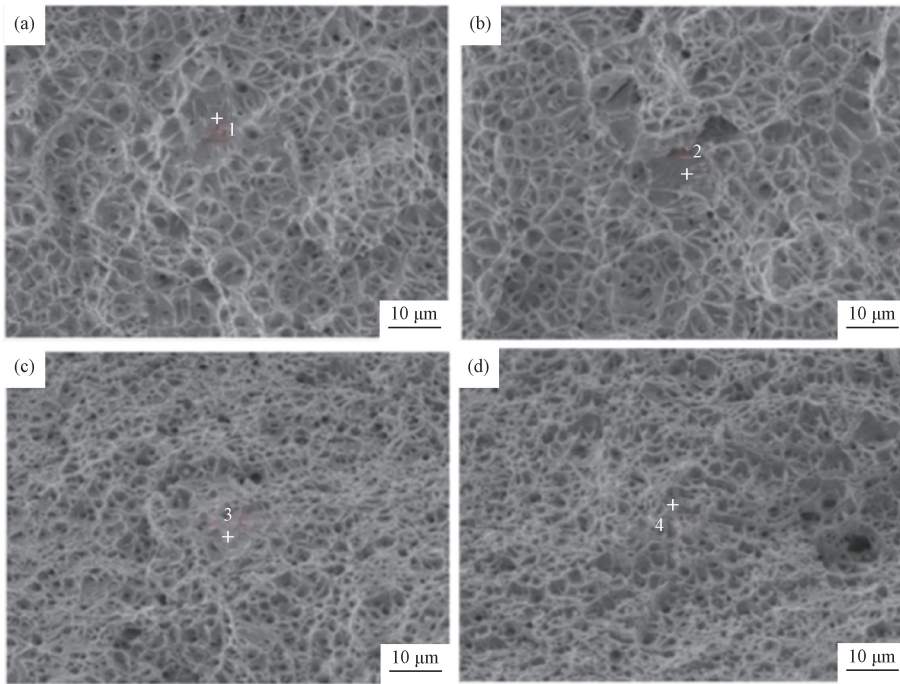


图 13 水平方向和竖直方向试样拉伸断口第二相粒子的分析位置 (a,b) 水平方向; (c,d) 竖直方向
Fig. 13 Analysis position of second phase particles on tensile fracture surface of horizontal and vertical specimens
(a, b) horizontal direction; (c, d) vertical direction

表 3 图 13 中标识位置的 EDS 分析结果 (质量分数, %)

Table 3 EDS analysis results of the locations marked in Fig. 13 (mass fraction, %)

Position	O	Si	Fe	Cr	Ni
1	53.64	29.69	9.74	6.52	0.41
2	51.97	31.01	8.23	8.23	0.14
3	45.53	22.98	11.04	4.56	1.37
4	27.23	11.11	37.97	8.64	3.26

自腐蚀电流和自腐蚀电位通过 Tafel 曲线外推法获得,表 4 为其拟合结果。由表 4 可知,整个墙体的自腐蚀电位最低,底部次之,顶部最大。顶部的自腐蚀电流密度最小,为 $3.286 \times 10^{-7} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$, 腐蚀速率最慢,整个墙体的自腐蚀电流密度为 $5.794 \times 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$, 腐蚀速率最快;且顶部的自腐蚀电位大于底部区域的自腐蚀电位,表明了顶部区域更不容易发生腐蚀,顶部区域的耐腐蚀性大于底部区域。

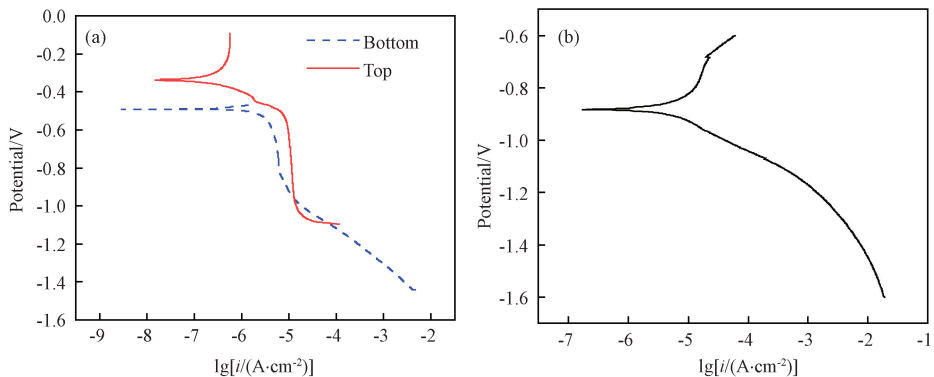


图 14 梯度材料不同部位在 3.5% NaCl 溶液的极化曲线 (a) 局部; (b) 整体
Fig. 14 Polarization curves of different parts of the graded wall in 3.5% NaCl solution (a) part; (b) whole

对梯度墙体不同部位进行电化学试验,测定其在 3.5% NaCl 电解质溶液中的动电位极化曲线以及阻

抗曲线,本试验的等效电路图如图 15 所示。

图 16 为以奈奎斯特图展示的梯度墙体不同部

表 4 墙体不同位置的腐蚀电流密度和自腐蚀电位

Table 4 Corrosion current density and self-corrosion potential at different positions of the graded wall

Position	Self-corrosion potential, E_{corr}/mV	Self-corrosion current density, $I_{corr}/(\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$
Bottom	-0.520	2.607×10^{-6}
Top	-0.305	3.286×10^{-7}
Whole	-0.903	5.794×10^{-6}

位的电化学阻抗谱(EIS)。图 16 中分别表示底部、顶部和整体 3 个试样的奈奎斯特图,奈奎斯特图揭示了材料的电容性特性^[27]。由图 16 可知,顶部和底部的电化学阻抗图谱类似,均表现出单容抗特征,表明

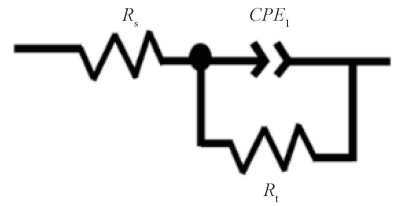


图 15 等效电路图

Fig. 15 Equivalent circuit diagram

高频域主要是电容响应。材料的耐腐蚀性能好坏与半径圆弧的直径有关,直径越大,耐腐蚀性越好,可见,梯度墙体顶部区域的腐蚀性高于底部区域。

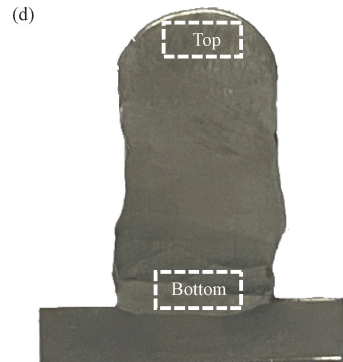
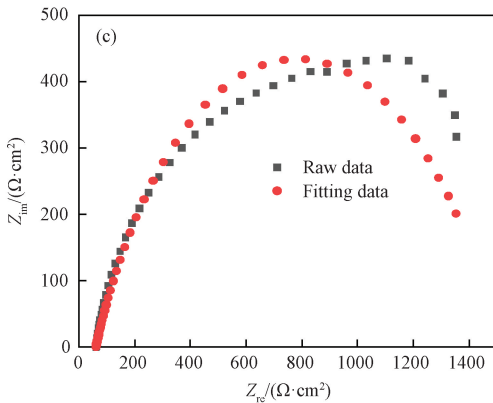
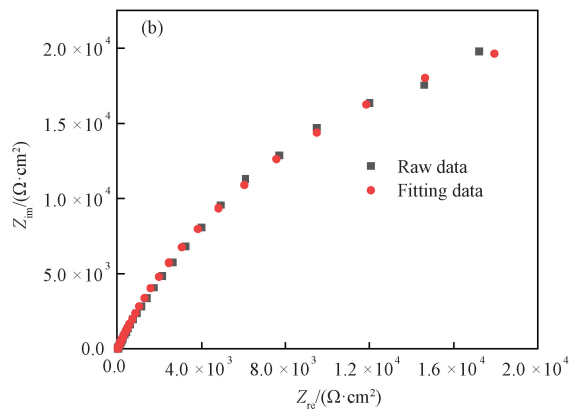
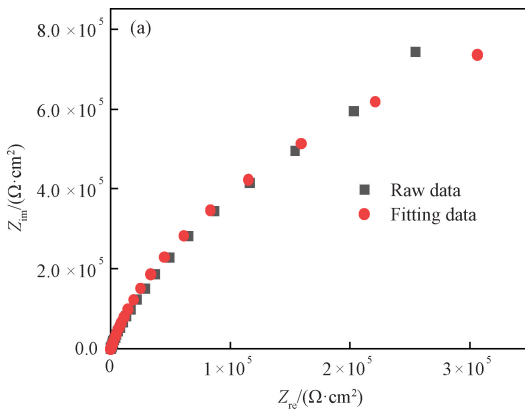


图 16 梯度材料在 3.5%NaCl 溶液中的 Nyquist 图 (a) 顶部; (b) 底部; (c) 整体; (d) 取样位置示意图

Fig. 16 Nyquist plots of the graded material in 3.5% NaCl solution

(a) top; (b) bottom; (c) whole; (d) schematic diagram of sampling location

3 结论

1) 通过双 TIG 电弧双丝电弧增材方法可以制造低碳钢/不锈钢梯度材料,实现元素成分的近线性变化;

2) 梯度墙体的微观组织从底部到顶部组织发生梯度变化,从底部的马氏体和铁素体组织过渡到中部

的马氏体组织,中上部形成马氏体和少量奥氏体组织,最终过渡到顶部的铁素体和奥氏体组织;

3) 随着不锈钢焊丝熔覆比例增加,导致硬度增加,水平方向和竖直方向的拉伸性能不同,水平方向的抗拉强度为 1224 MPa,竖直方向的抗拉强度为 1106 MPa,伸长率分别为 11%和 12.5%;

4) 梯度材料水平和竖直方向的拉伸为延性断

裂,断口处均存在少量第二相粒子;顶部含有不锈钢 较多的金属熔覆层耐腐蚀性大于底部。

参 考 文 献

- [1] Saleh B, Jiang J, Ma A, et al. Effect of main parameters on the mechanical and wear behaviour of functionally graded materials by centrifugal casting: a review[J]. *Metals and Materials International*, 2019, 25: 1395–1409.
- [2] Fathi R, Ma A, Saleh B, et al. Investigation on mechanical properties and wear performance of functionally graded AZ91-SiCp composites via centrifugal casting[J]. *Materials Today: Communications*, 2020, 24: 101169.
- [3] Reichardt A, Shapiro A A, Otis R, et al. Advances in additive manufacturing of metal-based functionally graded materials[J]. *International Materials Reviews*, 2021, 66(1): 1–29.
- [4] Kumar S, Reddy K M, Kumar A, et al. Development and characterization of polymer-ceramic continuous fiber reinforced functionally graded composites for aerospace application[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2013, 26(1): 185–191.
- [5] Hu S, Gagnoud A, Fautrelle Y, et al. Fabrication of aluminum alloy functionally graded material using directional solidification under an axial static magnetic field[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 7945.
- [6] Song J, Chew Y, Jiao L, et al. Numerical study of temperature and cooling rate in selective laser melting with functionally graded support structures[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 24: 543–551.
- [7] Gupta A, Talha M. Recent development in modeling and analysis of functionally graded materials and structures[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2015, 79: 1–14.
- [8] 崔雪, 张松, 张春华, 等. 高性能梯度功能材料激光增材制造研究现状及展望[J]. *材料工程*, 2020, 48(9): 13–23.
CUI Xue, ZANG Song, ZHANG Chun-hua, et al. Research status and prospect of laser additive manufacturing technology for high performance gradient functional materials[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2020, 48(9): 13–23.
- [9] 夏晓光, 段国林. 功能梯度材料增材制造技术的研究进展及展望[J]. *材料导报*, 2022, 36(10): 134–140.
XIA Xiao-guang, DUAN Guo-lin. Advances and prospects of additive manufacturing technology of functionally graded material[J]. *Materials Reports*, 2022, 36(10): 134–140.
- [10] 姚祥宏, 周琦, 王克鸿, 等. 基于焊道尺寸控制的电弧增材成形高氮奥氏体不锈钢与 316L 不锈钢交织结构[J]. *材料工程*, 2020, 48(1): 54–60.
YAO Xiang-hong, ZHOU Qi, WANG Ke-hong, et al. Mix structure of high nitrogen austenitic stainless steel and 316L stainless formed by wire and arc additive manufacturing based on size controlling of beads[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2020, 48(1): 54–60.
- [11] Liu Z Y, He B, Lyu T, et al. A review on additive manufacturing of titanium alloys for aerospace applications: Directed energy deposition and beyond Ti-6Al-4V[J]. *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 2021, 73(6): 1804–1818.
- [12] Rodrigues T A, Bairrão N, Farias F W C, et al. Steel-copper functionally graded material produced by twin-wire and arc additive manufacturing (T-WAAM)[J]. *Materials & Design*, 2022, 213: 110270.
- [13] Wang J, Pan Z X, Ma Y, et al. Characterization of wire arc additively manufactured titanium aluminide functionally graded material: microstructure, mechanical properties and oxidation behavior[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2018, 734: 110–119.
- [14] Wang J, Pan Z X, Cuiuri D, et al. Phase constituent control and correlated properties of titanium aluminide intermetallic alloys through dual-wire arc additive manufacturing[J]. *Materials Letters*, 2019, 242: 111–114.
- [15] Zhang W, Wang J, Zhu X, et al. A functionally graded material from stainless steel 304 to Fe-40Al fabricated by dual wire arc additive manufacturing[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 28: 3566–3572.
- [16] Chen X, Han J, Wang J, et al. A functionally graded material from TC4 to 316L stainless steel fabricated by double-wire + arc additive manufacturing[J]. *Materials Letters*, 2021, 300: 130141.
- [17] DebRoy T, Wei H L, Zuback J S, et al. Additive manufacturing of metallic components-Process, structure and properties[J]. *Progress in Materials Science*, 2018, 92: 112–224.
- [18] Han Q, Li D, Sun H, et al. Forming characteristics of additive manufacturing process by twin electrode gas tungsten arc[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 104: 4517–4526.
- [19] 韩庆璘, 李鑫磊, 张广军. 低碳钢/高强钢组合结构双丝双钨极氩弧增材制造[J]. *焊接学报*, 2022, 43(2): 88–93.

- HAN Qing-lin, LI Xin-lei, ZHANG Guang-jun. Fabrication of mild steel/high-strength steel composite structure by double wire twin electrode gas tungsten arc additive manufacturing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(2): 88-93.
- [20] 邹鹏远, 程东海, 刘小萍, 等. 双丝电弧增材梯度材料的工艺性能[J]. 焊接, 2019(10): 12-16.
- ZOU Peng-yuan, CHENG Dong-hai, LIU Xiao-ping, et al. Process performance of dual-wire arc additive manufacturing of gradient materials[J]. Welding, 2019(10): 12-16.
- [21] 王林, 华学明, 沈忱, 等. 等离子电弧双丝增材制造 Ti-48Al 合金组织特征[J]. 焊接学报, 2024, 45(2): 1-6.
- WANG Lin, HUA Xue-ming, SHEN Chen, et al. Microstructural characteristics of plasma arc dual-wire additive manufacturing of Ti-48Al alloy[J]. Journal of Welding, 2024, 45(2): 1-6.
- [22] Huang Y M, Zhang F K, Yuan J, et al. Investigation on surface morphology and microstructure of double-wire + arc additive manufactured aluminum alloys based on spectral analysis[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 84: 639-651.
- [23] Xu Y, Wang R, Sato Y, et al. Interfacial characteristics and microstructural evolution of austenitic to ferritic stainless steels bimetallic structure fabricated by wire-arc directed energy deposition[J]. Additive Manufacturing, 2025, 98: 104629.
- [24] Zuback J, Palmer T A, DebRoy T. Additive manufacturing of functionally graded transition joints between ferritic and austenitic alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 770: 995-1003.
- [25] 张佳, 邵沛泽, 王新鑫, 等. 双TIG活性电弧增材制造方法与工艺[J]. 焊接学报, 2024, 45(8): 62-69.
- ZHANG Jia, SHAO Pei-ze, WANG Xin-xin, et al. Method and technology of two TIG activating arc additive manufacturing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024, 45(8): 62-69.
- [26] Wang X, Zhang J, Deng Y, et al. Numerical investigation of the arc properties in gas tungsten arc-based additive manufacturing [J]. Welding in the World, 2023, 67: 945-954.
- [27] Li K, Li D, Liu D, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of multiple-layer laser cladding coating of 308L stainless steel[J]. Applied Surface Science, 2015, 340: 143-150.