

DOI: 10.11973/jxgccl202308007

WC 增强铁基合金粉芯热丝等离子弧熔覆层的制备及其组织和性能

凌壮壮, 冯曰海, 夏 杰

(南京理工大学材料科学与工程学院, 工业和信息化部受控电弧增材制造与焊接重点实验室, 南京 210094)

摘要: 采用电阻热与等离子弧双热源同步加热 WC 增强铁基合金粉芯丝材的方法制备 WC 增强铁基合金熔覆层, 研究了不同热丝电流(0, 40, 50, 60, 70 A)下熔覆层的宏观形貌、显微组织和性能, 获得了合适的热丝电流。结果表明: 当热丝电流为 50 A 时, 熔覆层的成形质量较好, 稀释率最低, 为 51.77%; 随着热丝电流的增大, 熔覆层的平均晶粒尺寸先减小后增大, 碳化物含量先增多后减少, 当热丝电流为 50 A 时, 组织以细小的奥氏体胞状晶为主, 晶粒平均尺寸较小, 为 9.45 μm , 并且碳化物含量最多; 随着热丝电流的增加, 熔覆层的平均硬度先升高后降低, 磨损率和摩擦因数均先减小后增大, 当热丝电流为 50 A 时, 平均硬度最高, 为 403.1 HV, 摩擦因数和磨损率均最小, 分别为 0.52 和 $4.53 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

关键词: 热丝等离子弧; 碳化钨增强铁基合金; 显微组织; 耐磨性能

中图分类号: TG456.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2023)08-0039-06

Preparation, Microstructure and Properties of Plasma Arc Cladding Layer with WC Reinforced Iron-Based Alloy Powder-Cored Hot Wire

LING Zhuangzhuang, FENG Yuehai, XIA Jie

(MIIT Key Laboratory of Intelligent Controlled-Arc Additive Manufacturing, School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: WC reinforced iron-based alloy cladding layer was prepared by heating WC reinforced iron-based alloy powder-cored wire with resistance heat and plasma arc dual heat source simultaneously. The macromorphology, microstructure and properties of cladding layers under different hot wire currents (0, 40, 50, 60, 70 A) were studied, and the appropriate hot wire current was obtained. The results show that when the hot wire current was 50 A, the forming quality of the cladding layers was good with the lowest dilution rate of 51.77%. With increasing hot wire current, the average grain size of the cladding layer first decreased and then increased, and the carbide content first increased and then decreased. When the hot wire current was 50 A, the microstructure mainly consisted of fine cellular austenite, the average grain size was small (9.45 μm), and the carbide content was the highest. With increasing hot wire current, the average hardness of the cladding layer first increased and then decreased, and the wear rate and friction coefficient first decreased and then increased. When the hot wire current was 50 A, the cladding layer had the highest average hardness of 403.1 HV, the smallest friction coefficient of 0.52 and the smallest wear rate of $4.53 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.

Key words: hot wire plasma arc; WC reinforced iron-based alloy; microstructure; wear resistance

0 引言

碳化钨(WC)增强金属基耐磨涂层具有良好的塑韧性和耐磨性能, 在机械、采矿等行业具有广阔的应用前景^[1]。目前, 等离子弧熔覆技术因具有电弧能量密度和热效率高的特点^[2]而广泛用于

收稿日期: 2022-05-09; 修订日期: 2023-05-27

基金项目: 国防创新特区项目(17-H863)

作者简介: 凌壮壮(1996—), 男, 江苏连云港人, 硕士研究生

导师: 冯曰海教授

金属基耐磨涂层及其复合耐磨涂层的制备。陈更新等^[3]和 WEI 等^[4]采用等离子弧熔覆技术分别制备了 WC 增强钴基合金耐磨涂层和 WC 增强镍基合金耐磨涂层,发现涂层的硬度高,耐磨性好,但是 WC 粉的熔覆效率低,且钴和镍的成本高^[5],不利于工业化应用。铁基合金的成本相对较低,被认为是潜在的替代材料之一。使用 WC 增强铁基合金粉芯丝材替代粉料熔覆制备 WC 增强铁基合金耐磨涂层可以显著提高熔覆效率,降低制备成本。但 WC 颗粒的熔点较高,会造成粉芯丝材的熔化特性差^[6];过高含量未熔 WC 颗粒的存在容易使熔覆层表面产生缺陷,内部组织分布不均匀。因此,迫切需要开发一种新的工艺以改善 WC 增强铁基合金粉芯丝材的熔化特性。

热丝技术是等离子弧熔覆技术中新的工艺方式之一^[7]。热丝是指利用电阻热在丝材进入熔池前对其进行快速加热,使其达到一定温度,从而在不改变等离子弧热输入的条件下,改善丝材的熔化特性,缩短丝材熔滴过渡时间,提高等离子弧的熔覆效率^[8]。CAO 等^[9]使用冷丝和热丝非熔化极惰性气体钨极保护(TIG)焊成功进行了不锈钢的焊接,发现相比于冷丝 TIG 焊,热丝 TIG 焊获得的焊缝成形更好,焊接缺陷更少。PAI 等^[10]研究发现,与传统冷丝手工非熔化极惰性气体钨极保护焊(GTAW)相比,通过电阻热将焊丝预热至 200 ℃左右的热丝 GTAW 的金属熔覆效率提升了 300%,并且焊缝内部的组织分布更加均匀。热丝技术可以改善粉芯丝材的熔化特性。目前,鲜见使用电阻热与等离子弧双热源同步加热难熔粉芯丝材来制备高硬度耐磨熔覆层的

报道。因此,作者以自制 WC 增强铁基合金粉芯丝材为原材料,采用电阻热与等离子弧双热源同步加热丝材的等离子弧技术制备熔覆层,研究了不同热丝电流(0~70 A)下熔覆层的宏观形貌、显微组织、物相组成、硬度和摩擦磨损性能,并获得合适的热丝电流,以期采用高熔点难熔丝材等离子弧制备耐磨涂层提供试验参考。

1 试样制备与试验方法

选用直径为 1.6 mm 的自制 WC 增强铁基合金粉芯丝材,丝材中 WC 的质量分数为 20%,基板选用尺寸为 400 mm×200 mm×10 mm 的 304L 不锈钢板。丝材与基板的化学成分如表 1 所示。采用机器人热丝等离子弧熔覆系统进行试验,此系统主要由 6 轴弧焊机器人、MagicWave 3000 型焊机、EWM Tetrix 300 型独立热丝电源以及独立送丝装置组成。试验前用角磨机打磨掉基板表面氧化物,热丝电流在丝材和熔池之间形成回路,利用热丝回路产生的电阻热对送入熔池的丝材进行快速加热,使其达到一定温度。经过大量试验,确定了合适的试验工艺参数:熔覆电流 180 A,电弧电压 27 V,电弧行进速度 20 cm·min⁻¹,送丝速度 1 m·min⁻¹,摆动幅度 3 mm,钨极直径 4.8 mm,喷嘴孔径 3.2 mm,离子气体和保护气体均为纯度 99.99% 的氩气,其中保护气体流量为 18 L·min⁻¹,离子气体流量为 1.2 L·min⁻¹,喷嘴到工件距离为 6.0 mm,熔覆长度为 80 mm。在熔覆过程中通过控制热丝电流来改变丝材的加热温度,设定的热丝电流分别为 0, 40, 50, 60, 70 A。

表 1 丝材与基板的化学成分

Table 1 Chemical composition of wire and substrate plate

材料	质量分数/%							
	C	Ni	Cr	Si	P	WC	Mn	S
丝材			18.0	1.5		20	1.5	余
基板	0.08	9.0	19.0	1.0	0.035		2.0	0.03

计算熔覆层稀释率 η , 计算公式为

$$\eta = S_2 / (S_1 + S_2) \quad (1)$$

式中: S_1 , S_2 分别为熔覆层的截面积和基板熔化区的截面积。

采用线切割的方式在熔覆焊道上沿纵向截取金相试样,用质量比 1:2:7 的氯化铁、盐酸和水组成的溶液腐蚀 10 s 后,用 OLYMPUS-GX41 型光学显微镜观察熔覆层的显微组织,在熔覆层上选取 5 个不

同区域的显微组织,随机选取 20 组晶粒测量直径,统计平均晶粒尺寸。采用 Bruker-AXS D8 Advance 型 X 射线衍射仪(XRD)对熔覆层的物相组成进行分析,工作电压为 20 kV,工作电流为 5 mA,扫描范围为 20°~100°,扫描步长为 0.02°。采用 FEI Quanta 250F 型场发射环境扫描电镜(SEM)观察熔覆层中部(距熔合线 2 mm 处)的微观形貌,并用其附带的能谱仪(EDS)进行微区成分分析。使用

HVS-1000Z 型维氏硬度计从熔合线下方 1 mm 处向熔覆层顶部每隔 0.2 mm 取点进行硬度测试,载荷为 5 N,保载时间为 10 s。使用 CETR UMT-3 型摩擦磨损试验机进行干摩擦磨损试验,试样尺寸为 10 mm×10 mm×5 mm,摩擦副直径为 6 mm,材料为 GCr15 钢,载荷为 2 N,滑动频率为 2 Hz,摩擦时间为 20 min,摩擦速度为 1 mm·s⁻¹,测试温度为室温,摩擦环境为大气环境;使用 SM-1000 型三维轮廓仪测定磨痕轮廓,计算磨损率,并用 FEI Quanta 250F 型扫描电镜观察磨损形貌。

2 试验结果与讨论

2.1 宏观形貌

由图 1 可见:传统冷丝(热丝电流为 0)条件下熔覆层表面存在少量裂纹,这是因为 WC 与铁基合金的物理特性差异,尤其是热膨胀系数的差异较大,会产生较大内应力,导致熔覆层开裂;当热丝电流为 40,50 A 时,熔覆层的成形质量较好,无裂纹等缺陷;当热丝电流为 60,70 A 时,熔覆层边缘处出现较多焊瘤,这主要是因为过大的热丝电流会使丝材温度快速升高,未进入等离子弧柱中心就已经熔化,其熔滴落在熔覆层边缘处形成焊瘤。

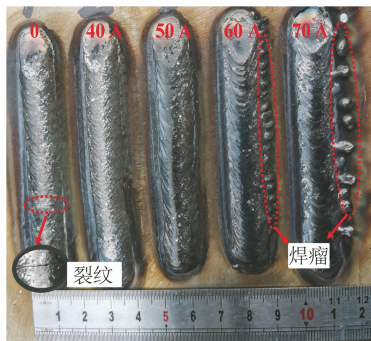


图 1 不同热丝电流下熔覆层的宏观形貌

Fig. 1 Macromorphology of cladding layers under different hot wire currents

当热丝电流为 0,40,50,60,70 A 时,熔覆层的稀释率分别为 57.09%,55.64%,51.77%,56.61%,66.75%。当热丝电流为 0 时,等离子弧的形态稳定、穿透力较强,对基板的热输入较大。采用热丝工艺后,等离子弧的形态发生变化,影响等离子弧对基板的热输入:一方面,热丝回路产生的磁场使等离子弧偏转^[11-12],降低了等离子体向熔池行进的速度以及电流密度,减弱了等离子弧挺度,从而减少了等离子弧对基板的热输入;另一方面,热丝电流加热丝材,减少了丝材熔化需要从等离子弧吸收的热量,又

增加了等离子弧对基板的热输入。因此,热丝工艺下等离子弧对基板的热输入是上述两因素综合作用的结果。熔覆层的稀释率主要受热输入影响。当热丝电流为 40,50 A 时,丝材加热温度较低,等离子弧偏转降低热输入这一因素占主要地位,因此相比热丝电流为 0 时,等离子弧对基板的热输入减小,熔覆层熔深较小,稀释率较低。但随着热丝电流增加到 60,70 A,丝材加热温度升高,不需要再从等离子弧吸收较多热量就已经可以熔化,这使得等离子弧对基板的热输入增加,并且这一因素随热丝电流的增大而逐渐占据支配地位,从而导致熔覆层的熔深增加,稀释率上升。综上可知,合适的热丝电流(40,50 A)可以显著改善熔覆层的成形性并降低熔覆层的稀释率。

2.2 显微组织和物相组成

由图 2 可知,不同热丝电流下熔覆层的物相均包含奥氏体相,铁素体相,Fe₃W₃C、Cr₇C₃ 碳化物,当热丝电流在 0~50 A 时,由于加热效果较差,还存在少量未熔 WC 相。热丝工艺下熔覆层的 WC 相衍射峰强度较低,这主要是因为热丝工艺使 WC 颗粒的溶解更为充分而造成的;奥氏体相的主峰(2θ 为 50.26°)向左偏移(标准峰的 2θ 为 51.59°),这是由于奥氏体相中固溶了钨、镍、铬等元素,导致晶格常数变大。

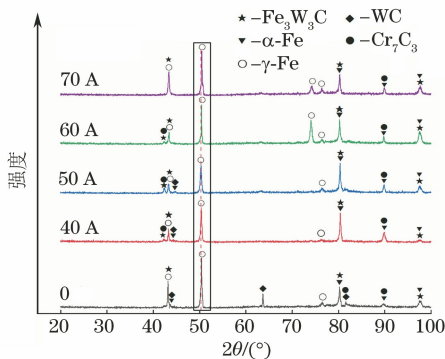


图 2 不同热丝电流下熔覆层的 XRD 谱

Fig. 2 XRD patterns of cladding layers under different hot wire currents

由图 3 可知:不同热丝电流下熔覆层组织都以大量细小的胞状晶形态和少量柱状树枝晶形态的奥氏体为主,晶间均匀分布着白色网状碳化物,仅在冷丝熔覆层内观察到了未熔 WC 颗粒。冷丝熔覆层晶粒较为粗大,白色晶间碳化物数量较少;当热丝电流为 40,50 A 时,熔覆层内晶间碳化物的数量增多,晶粒细化;但当热丝电流增加到 60,70 A 时,晶间碳化物数量开始减少,晶粒逐渐粗化。晶粒尺寸的变化

化与熔覆层内晶间碳化物的含量有关。熔覆层基体相为奥氏体的主要原因在于镍和锰元素的存在扩大了奥氏体相区,同时 WC 颗粒在熔池内溶解产生大量的碳原子,也有助于奥氏体的生成。此外,WC 颗粒溶解产生的钨元素以及基板和丝材中大量存在的铬元素是典型的碳化物形成元素,因此在熔池内有大量碳原子的情况下,冷却过程中 Fe-W-C 系和 Cr-C 系碳化物将优先通过非均质形核的方式从液相中析出,从而降低了液相中碳元素的含量;铬和钨同时

又是强烈的铁素体形成元素,因此在凝固末期熔覆层中会有少量铁素体生成。

由图 4 可知,热丝电流为 0,50 A 条件下,熔覆层位置 1 处的镍和铁元素含量较高,可以确定为基体相奥氏体,位置 2 和 3 中镍、铁元素含量减少,铬、钨和碳元素含量较多,可以判断为碳化物 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 和 Cr_7C_3 。这些碳化物作为熔覆层的强化相,不仅硬度高,而且呈网状均匀分布,对基体相奥氏体起到弥散强化作用^[13]。

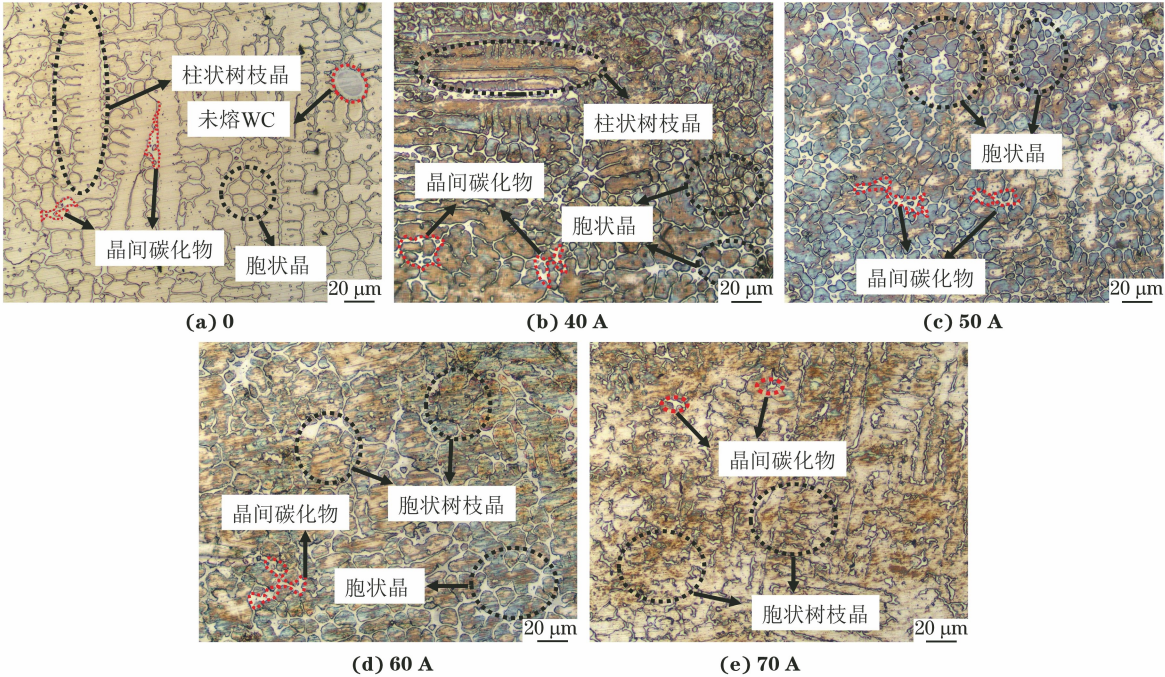


图 3 不同热丝电流下熔覆层的显微组织

Fig. 3 Microstructures of cladding layers under different hot wire currents

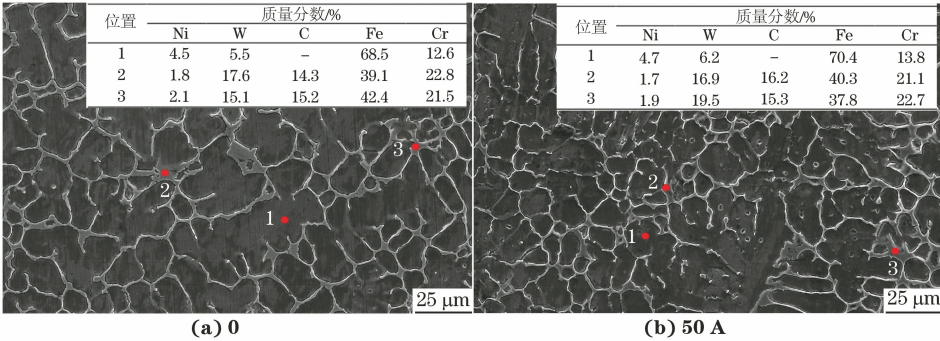


图 4 0,50 A 热丝电流下熔覆层中部的 SEM 形貌和 ESD 分析结果

Fig. 4 SEM images and EDS analysis results of middle part of cladding layers under hot wire current of 0, 50 A

0,40,50,60,70 A 热丝电流下,熔覆层的平均晶粒尺寸分别为 14.26,10.49,9.45,13.16,16.49 μm 。可以看出,随着热丝电流的增大,熔覆层的平均晶粒尺寸先减小后增大,当热丝电流为 40,50 A 时,平均晶粒尺寸较小,比热丝电流为 0 条件下的冷丝熔覆层分别降低了 26.4%,33.7%。由前述稀释率分析可

知,晶粒尺寸减小主要是因为热输入相比冷丝时降低,冷却时间缩短,晶粒没有足够的时间长大,并且热丝使得 WC 溶解充分,生成了更多 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 、 Cr_7C_3 强化相,这些强化相阻碍了晶界移动、抑制了晶粒长大。当热丝电流增大到 60,70 A 时,晶粒尺寸又逐渐增大,这主要是因为大热丝电流下的热输

入增加导致稀释率增大、合金元素烧损,熔覆层内的晶间碳化物 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 、 Cr_7C_3 数量减少,阻碍晶界移动的作用减弱,从而使晶粒进一步长大。

由表 2 可以看出:随着热丝电流的增大,钨、铬元素含量呈先增加后降低的趋势,且在热丝电流为 50 A 时达到最大,此时熔覆层内会生成更多 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 和 Cr_7C_3 。由前述可知,熔覆层的稀释率变化规律与热输入一致,均随着热丝电流的增加呈现先下降后升高的趋势,而稀释率过高会加剧基板对熔覆层内合金元素的稀释作用^[14],使得熔覆层内铁元素含量增加,钨、铬、镍等合金元素含量下降;同时热输入的增加也会造成熔覆层内的合金元素烧损^[15],进一步降低合金元素的含量,造成 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 和 Cr_7C_3 的含量减少。

表 2 不同热丝电流下熔覆层的元素线扫描结果

Table 2 Element line scanning results of cladding layers under different hot wire currents

热丝电流/ A	质量分数/%				
	Ni	Cr	W	Fe	其他元素
0	3.8	15.6	7.5	57.8	余
40	4.5	17.1	9.2	55.4	余
50	4.7	17.8	9.5	55.1	余
60	3.5	15.4	7.3	58.4	余
70	2.6	14.1	5.0	59.8	余

2.3 显微硬度与摩擦磨损性能

由图 5 可知,不同热丝电流下熔覆层的硬度在 300~450 HV,而基板的硬度在 180~220 HV。当热丝电流为 0,40,50,60,70 A 时,熔覆层的平均硬度分别为 343.8,386.2,403.1,357.9,302.5 HV,可知当热丝电流为 40,50 A 时,熔覆层的平均硬度较高。熔覆层的平均硬度变化与其内部 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 、 Cr_7C_3 强化相的含量和分布有关。当热丝电流为

40,50 A 时,强化相含量比热丝电流为 0 时的熔覆层多,这进一步增强了弥散强化和细晶强化的效果,因此熔覆层的平均硬度升高;而随着热丝电流继续增大至 60,70 A,基板对熔覆层内合金元素的稀释作用加大,合金元素的烧损加剧,这使得熔覆层内强化相含量降低,晶粒逐渐粗化,因此熔覆层平均硬度降低。

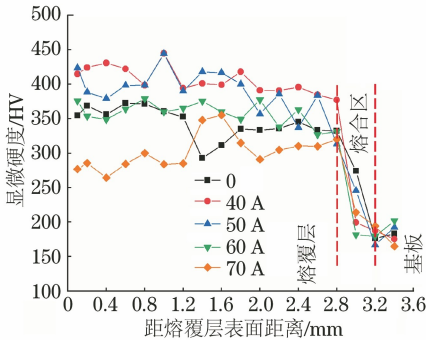
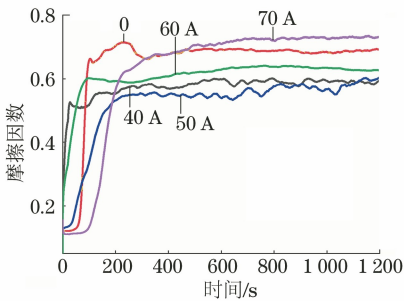


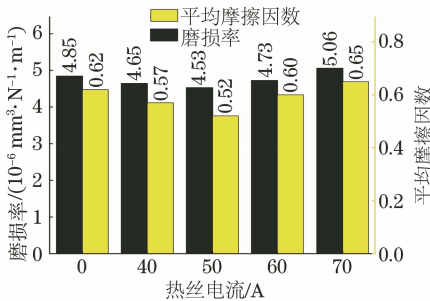
图 5 不同热丝电流下熔覆层的显微硬度分布曲线
Fig. 5 Microhardness distribution curves of cladding layers under different hot wire currents

由图 6 可以看出,熔覆层的磨损过程可分为初始磨损和稳定磨损两个阶段,并且在稳定磨损阶段,各熔覆层的摩擦因数差异明显。熔覆层的平均摩擦因数随着热丝电流的增加呈先减小后增大的趋势,并且在热丝电流为 50 A 时达到最小,说明此时熔覆层的耐磨性最好。熔覆层的磨损率随热丝电流的变化趋势与平均摩擦因数一致,热丝电流为 50 A 时的磨损率最小,为 $4.53 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。结合显微组织可以看出,熔覆层中 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 、 Cr_7C_3 碳化物的含量对熔覆层的耐磨性影响显著。网状碳化物的增多可以增强对基体相的支撑作用,提升熔覆层的耐磨性,因此当热丝电流为 50 A 时,熔覆层的摩擦磨损性能最好。

由图 7 可知:当热丝电流为 0 时,熔覆层表面存在大量磨屑、平行于摩擦方向的犁沟以及较大的塑



(a) 摩擦因数曲线



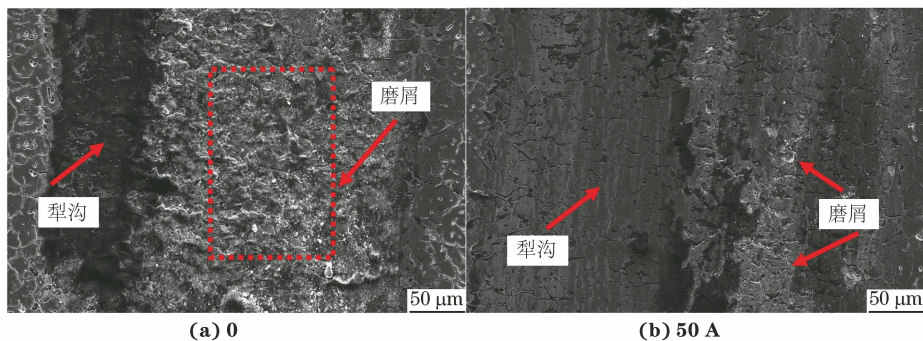
(b) 平均摩擦因数和磨损率与热丝电流的关系

图 6 不同热丝电流下熔覆层的摩擦因数曲线以及平均摩擦因数和磨损率与热丝电流的关系

Fig. 6 Friction coefficient curves of cladding layers under different hot wire currents (a) and relation between average friction coefficient and wear rate and hot wire current

性变形,磨损机理以黏着磨损为主、磨粒磨损为辅,这主要是由于熔覆层内强化相 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 、 Cr_7C_3 碳化物含量较少,对基体的支撑作用不足,基体在磨损过程中受到破坏后,碳化物易从表面剥落,在摩擦副的往复运动下形成大量层状磨屑,而磨屑的产生又会作为磨料的一部分加剧表面磨损;当热丝电流为 50 A 时,熔覆层表面存在大量犁沟以及少量磨屑,同

时塑性变形程度较轻,磨损较为均匀,其磨损机制为磨粒磨损和轻微的黏着磨损,耐磨性较热丝电流为 0 时显著提升,这主要与熔覆层中 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 、 Cr_7C_3 碳化物的增多密切相关。碳化物增多后会在熔覆层内形成更加致密的网状结构,加强对基体的支撑作用,并且强化晶界,阻碍晶粒和位错的滑移,使得熔覆层耐磨性得到提高。



(a) 0

(b) 50 A

图 7 不同热丝电流下熔覆层的磨损形貌

Fig. 7 Wear morphology of cladding layers under different hot wire currents

3 结 论

(1) 采用电阻热与等离子弧双热源同步加热 WC 增强铁基合金粉芯热丝成功制备了 WC 增强铁基合金熔覆层,当热丝电流为 40、50 A 时,熔覆层的成形质量较好,无裂纹等缺陷,当热丝电流为 50 A 时,熔覆层稀释率最低,为 51.77%。

(2) 不同热丝电流下熔覆层的物相均包含奥氏体相,铁素体相, $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 、 Cr_7C_3 碳化物,当热丝电流在 0~50 A 时还包含少量未熔 WC 相;随着热丝电流由 0 增加到 70 A,熔覆层的平均晶粒尺寸先减小后增大,碳化物含量先增多后减少,当热丝电流为 50 A 时,显微组织以细小的奥氏体胞状晶为主,晶粒平均尺寸较小,为 $9.45 \mu\text{m}$,并且碳化物含量最多。

(3) 随着热丝电流的增加,熔覆层的平均硬度先升高后降低,与 GCr15 钢对磨时的磨损率和摩擦因数均先减小后增大,当热丝电流为 50 A 时,熔覆层的平均硬度最高,为 403.1 HV,摩擦因数和磨损率均最小,分别为 0.52 和 $4.53 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$,耐磨性能最优,磨损机制为磨粒磨损和轻微的黏着磨损。

参考文献:

- [1] BEHERA M P, DOUGHERTY T, SINGAMNENI S. Conventional and additive manufacturing with metal matrix composites: A perspective[J]. Procedia Manufacturing, 2019, 30:159-166.
- [2] VAN NGUYEN A, TASHIRO S, NGO M H, et al. Effect of

the eddies formed inside a weld pool on welding defects during plasma keyhole arc welding [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 59:649-657.

- [3] 陈更新,洪峰,王华君,等. 钴基碳化钨增强等离子弧堆焊覆层的制备及其磨损行为[J]. 热加工工艺, 2019, 48(20):98-101.
CHEN G X, HONG F, WANG H J, et al. Preparation and wear behavior of WC-Co reinforced plasma arc surfacing coating[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(20):98-101.
- [4] WEI Y, WEI X S, CHEN B, et al. Parameter optimization for tungsten carbide/Ni-based composite coating deposited by plasma transferred arc hardfacing [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(12):2511-2519.
- [5] FERRO ROCHA A M, BASTOS A C, CARDOSO J P, et al. Corrosion behaviour of WC hardmetals with nickel-based binders[J]. Corrosion Science, 2019, 147:384-393.
- [6] HE M, WANG J Y, HE R G, et al. Effect of cobalt content on the microstructure and mechanical properties of coarse grained WC-Co cemented carbides fabricated from chemically coated composite powder [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 766:556-563.
- [7] 冯曰海,汤荣华,刘思余,等. 308L 不锈钢热丝等离子弧增材构件组织和性能[J]. 焊接学报, 2021, 42(5):77-83.
FENG Y H, TANG R H, LIU S Y, et al. Microstructures and mechanical properties of stainless steel component deposited with 308L wire by hot wire plasma arc additive manufacturing process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(5):77-83.
- [8] MIAO Y G, YIN C H, WEI C, et al. An investigation on droplet transfer for bypass-current wire-heating PAW [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 65:355-363.

- temperature on bainite transformation below martensite starting temperature[J]. Materials Science and Technology, 2019,35(13):1539-1550.
- [12] ZHAO L J, QIAN L H, ZHOU Q A, et al. The combining effects of ausforming and below- M_s or above- M_s austempering on the transformation kinetics, microstructure and mechanical properties of low-carbon bainitic steel[J]. Materials & Design, 2019,183:108123.
- [13] ZHAO L J, QIAN L H, LIU S A, et al. Producing superfine low-carbon bainitic structure through a new combined thermo-mechanical process [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016,685:300-303.
- [14] 田亚强,张明山,董福涛,等. 低碳钢淬火等温碳配分中粒状贝氏体组织演变及性能[J]. 钢铁研究学报, 2017, 29(5): 420-424.
- TIAN Y Q, ZHANG M S, DONG F T, et al. Granular bainite microstructure evolution and mechanical properties of low carbon steel in quenching isothermal carbon partition process [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2017, 29(5): 420-424.
- [15] 武会宾,巨彪,车英建. 等温温度对超细贝氏体钢组织演变规律的影响[J]. 工程科学学报, 2016, 38(12): 1741-1746.
- WU H B, JU B, CHE Y J. Effect of austempering temperature on the microstructure evolution of ultrafine bainite steel[J]. Chinese Journal of Engineering, 2016, 38(12):1741-1746.
- [16] LI Z Y, LI P F, LUO Y, et al. Effect of austenitizing temperature and prior martensite on ultra-fine bainite transformation kinetics[J]. Metals, 2019,9(12):1309.
- [17] ZHOU Y T, HOJO T, KOYAMA M, et al. Effect of austempering treatment on the microstructure and mechanical properties of 0.4C-1.5Si-1.5Mn TRIP-aided bainitic ferrite steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 819: 141479.
- [18] 姚春霞,蓝慧芳,杜林秀. 等温淬火工艺对超高强贝氏体钢组织性能影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(7): 948-951.
- YAO C X, LAN H F, DU L X. Effect of austempering process on microstructure and mechanical property of ultra-high strength bainitic steel[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2019, 40(7): 948-951.
- [19] LIU E Z, LI Q G, NASEEM S, et al. Effect of isothermal transformation times below M_s and tempering on strength and toughness of low-temperature bainite in 0.53 C bainitic steel[J]. Materials, 2020, 13(10): 2418.
- [9] CAO F J, CHEN S J, DU C C. Investigation of hot-wire TIG welding based on the heat-conduction[J]. Energy Procedia, 2018,144:9-15.
- [10] PAI A, SOGALAD I, BASAVARAJAPPA S, et al. Assessment of impact strength of welds produced by cold wire and hot wire gas tungsten arc welding (GTAW) processes[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 24: 983-994.
- [11] 李挺,黄健康,陈秀娟,等. 旁路耦合微束等离子弧焊熔滴过渡特性分析[J]. 热加工工艺, 2018, 47(5): 182-185.
- LI T, HUANG J K, CHEN X J, et al. Analysis of droplet transfer characteristics in bypass double-electrode micro-plasma arc welding[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(5): 182-185.
- [12] 刘海华,赵洵,张志臣,等. 横向稳态磁场作用下微束等离子电弧数值分析[J]. 材料科学与工艺, 2021, 29(1): 59-65.
- LIU H H, ZHAO T, ZHANG Z C, et al. Numerical analysis of micro-plasma arc under the action of transverse steady state magnetic field[J]. Materials Science and Technology, 2021, 29(1): 59-65.
- [13] 张孟良,汤文博,李百奇,等. 等离子熔覆添加和内生联合 WC 颗粒增强铁基涂层的组织和性能[J]. 金属热处理, 2022, 47(2): 200-205.
- ZHANG M L, TANG W B, LI B Q, et al. Microstructure and properties of additional and in situ synthesized WC particle reinforced iron-based coatings prepared by plasma cladding [J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(2): 200-205.
- [14] 张洋,宋博瀚,薛峰. 稀释率对镍基合金激光熔覆层组织和性能的影响[J]. 应用激光, 2016, 36(3): 259-264.
- ZHANG Y, SONG B H, XUE F. Influence of dilution on microstructure and properties in Ni based laser clad coating [J]. Applied Laser, 2016, 36(3): 259-264.
- [15] 王暑光,石拓,傅戈雁,等. 激光内送粉高速熔覆 Cr50Ni 合金稀释率及单道形貌分析[J]. 表面技术, 2020, 49(7): 311-318.
- WANG S G, SHI T, FU G Y, et al. Analysis of dilution rate and single channel morphology of high-speed cladding Cr50Ni alloy by laser inside-beam powder feeding process[J]. Surface Technology, 2020, 49(7): 311-318.