

MIG 与 CMT 熔覆工艺对 Cu 基涂层与母材组织性能的影响

刘晟¹, 常云峰^{2*}, 刘永华¹, 王增伟³, 秦建²,
张冠星², 刘晓芳², 王东亮²

(1. 郑州煤矿机械集团有限责任公司, 郑州 450016; 2. 中国机械总院集团
郑州机械研究所有限公司 高性能新型焊接材料全国重点实验室, 郑州 450001;
3. 中创智领(郑州)工业技术集团股份有限公司, 郑州 450016)

摘要: **目的** 探究电弧熔覆工艺方法对涂层和母材组织性能的影响, 优选涂层质量好、对母材性能影响小的熔覆工艺, 保障产品服役安全。**方法** 分别采用 MIG 与 CMT 熔覆技术在液压油缸内壁表面熔覆铜合金涂层, 对比研究 2 种工艺方法对涂层成形质量、涂层微观组织形貌、涂层耐腐蚀性能、母材界面形貌特征、母材热影响区形貌、母材微观组织形貌与母材屈服强度、低温冲击韧性、显微硬度的影响规律。**结果** MIG 和 CMT 熔覆涂层组织致密、结合良好, 均无明显气孔和裂纹等缺陷。2 种熔覆涂层均以 α 相、 β 相和 κ 相为主, 但 MIG 熔覆层中含有大量球状和块状的母材组织。CMT 熔覆层的稳态开路电位为 -0.44 V、腐蚀电位为 -0.67 V、腐蚀电流密度为 $4.46 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 优于 MIG 熔覆层的 -0.47 V、 -0.72 V、 $4.81 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。CMT 熔覆试样的热影响区宽度为 $890 \mu\text{m}$, 低于 MIG 的 $1\,025 \mu\text{m}$; CMT 熔覆试样近热影响区母材的显微硬度、屈服强度、低温冲击韧性 (-20°C) 分别为 257HV 、 707MPa 、 135J , 与未熔覆母材相比分别下降 10.5% 、 7.0% 、 17.7% , 而 MIG 试样的分别为 249HV 、 701MPa 、 125J , 与未熔覆母材相比分别下降 13.5% 、 7.7% 、 23.3% 。**结论** MIG 和 CMT 熔覆工艺均对母材的组织 and 性能造成一定程度的影响, 与 MIG 相比, CMT 熔覆涂层的元素分布更加均匀、稀释率更低、耐腐蚀性能更好, 对母材组织和性能的影响程度更小。

关键词: MIG; CMT; 熔覆; 铜合金; 力学性能

中图分类号: TG174.4 文献标志码: A 文章编号: 1001-3660(2026)07-0143-14

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2026.07.012

Effects of MIG and CMT Cladding Processes on the Microstructures and Properties of Cu-based Coatings and Base Metals

LIU Sheng¹, CHANG Yunfeng^{2*}, LIU Yonghua¹, WANG Zengwei³, QIN Jian²,
ZHANG Guanxing², LIU Xiaofang², WANG Dongliang²

(1. Zhengzhou Coal Mine Machinery Group Co., Ltd., Zhengzhou 450016, China; 2. State Key Laboratory of High Performance & Advanced Welding Materials, China Academy of Machinery Zhengzhou Research Institute of Machinery Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China; 3. ZCZL Industrial Technology Group Company Limited, Zhengzhou 450016, China)

收稿日期: 2025-09-19; 修订日期: 2025-12-01

Received: 2025-09-19; Revised: 2025-12-01

基金项目: 河南省重点研发专项 (251111222600)

Fund: The Key Research and Development Project of Henan Province, China (251111222600)

引文格式: 刘晟, 常云峰, 刘永华, 等. MIG 与 CMT 熔覆工艺对 Cu 基涂层与母材组织性能的影响[J]. 表面技术, 2026, 55(7): 143-156.

LIU Sheng, CHANG Yunfeng, LIU Yonghua, et al. Effects of MIG and CMT Cladding Processes on the Microstructures and Properties of Cu-based Coatings and Base Metals[J]. Surface Technology, 2026, 55(7): 143-156.

*通信作者 (Corresponding author)

ABSTRACT: Arc cladding corrosion-resistant coatings are one of the primary methods to enhance the surface performance of workpieces and extend their service life. To thoroughly investigate the effects of arc cladding process methods on the microstructures and mechanical properties of coatings and base metals, optimize the cladding process with good coating quality and minimal impact on base metal properties, and ensure product service safety, MIG and CMT cladding technologies were respectively used to clad copper alloy coatings on the inner surface of hydraulic cylinders. A comparative study was conducted on the effect laws of the two process methods on coating forming quality, coating microstructure morphology, coating corrosion resistance, base metal interface morphology characteristics, base metal heat-affected zone (HAZ) morphology, base metal microstructure morphology, as well as base metal yield strength, low-temperature impact toughness, and microhardness. Both MIG and CMT cladding coatings had dense structures and good bonding, with no obvious defects such as pores and cracks. Both cladding coatings were mainly composed of α -phase, β -phase, and κ -phase. However, the MIG cladding coating contained a large number of spherical and blocky base metal structures. The interface between the MIG cladding coating and the base metal was uneven. During the cladding process, part of the base metal melted and was involved in the molten pool, and existed in the coating as spherical and columnar structures after solidification, forming base metal "inclusions". This not only increased the coating dilution rate but also affected the mechanical properties of the coating. The CMT cladding coating had uniform element distribution and low coating dilution rate, and the interface between the cladding coating and the base metal was serrated. Its steady-state open-circuit potential was -0.44 V, self-corrosion potential was -0.67 V, and corrosion current density was $4.46 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, which were better than those of the MIG cladding sample (0.47 V, -0.72 V and $4.81 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). Therefore, the CMT cladding sample had better corrosion resistance.

Both MIG and CMT cladding processes have a certain degree of effect on the microstructure and properties of the base metal. The HAZ width of the CMT cladding sample is $890 \mu\text{m}$, which is lower than that of the MIG sample ($1\ 025 \mu\text{m}$). The microstructure of the HAZ in both CMT and MIG samples is primarily composed of coarse ferrite and cementite. Notably, a small amount of Widmannstatten structure is observed in the HAZ of the MIG sample. Compared with the cladding samples, in addition to the obvious change in the HAZ microstructure of both CMT and MIG samples, the microstructure in the near-HAZ of the base metal has undergone an obvious coarsening phenomenon. The microhardness, yield strength, and low-temperature impact toughness of the base metal in the near-HAZ of the CMT cladding sample are 257HV , 707 MPa , and 135 J respectively. Compared with the uncladded base metal, these values decrease by approximately 10.5% , 7.0% , and 17.7% respectively. For the MIG sample, the corresponding values are 249HV , 701 MPa , and 125 J , with decreases of 13.5% , 7.7% , and 23.3% compared with those of the uncladded base metal. The degree of decrease is higher than that of the CMT process. Compared with MIG, the CMT cladding process has lesser impact on the microstructure and properties of the base metal.

KEY WORDS: MIG; CMT; cladding; copper alloy; mechanical properties

液压油缸是液压支架的主要承载部件之一,其稳定性和可靠性是保证煤矿生产安全的关键,不仅直接决定了液压支架的支护效果和承载稳定性,还决定了煤炭开采的效率与成本^[1]。液压油缸服役环境恶劣,煤矿综采工作面中充满水雾、腐蚀性气体和大量细小固体颗粒,使其常暴露于潮湿和腐蚀性环境中,工作过程中,液压油缸还需要时常伸出和回缩。在动载荷冲击、盐雾腐蚀、摩擦磨损等作用下,缸体内外表面极易发生磨损、腐蚀、裂纹等而导致失效^[2]。

液压油缸内壁服役时处于乳化液、液压油等液体介质内,主要的失效方式是腐蚀失效,因此对于液压油缸内壁通常采用电镀、电弧熔覆、激光熔覆、钎涂等方式在其表面制备耐腐蚀涂层^[3-9],以延长其使用寿命。传统电镀方法具有工艺方法简单、成本低、易于批量化生产等优势,但电镀过程易产生大量重金属污染、生产耗能高、涂层结合性差易剥落、易产生电

化学腐蚀等,目前已逐步被先进的电弧、激光等熔覆技术所代替。激光熔覆具有热输入小、稀释率小、成形精度高等优势,但制造成本高、设备复杂、空间可达性不好、效率较低,在批量化生产制造中,应用受限^[10-11]。电弧熔覆具有工艺简单、生产成本低、设备灵活、熔覆效率高等优势,应用十分广泛^[12-15]。

随着冷金属过渡技术(Cold Metal Transfer, CMT)的快速发展与应用,CMT技术在熔覆和增材制造中也体现出其独特的优势,与传统的MIG(Melt Inert-gas Arc Welding)/MAG(Metal Active-gas Welding)熔覆相比,具有热输入小、飞溅小、熔覆层成形美观等特点,应用越来越广泛^[16-20]。通过CMT或MIG方式在液压油缸内壁熔覆铜合金涂层,可以有效提升液压油缸的耐腐蚀性能,延长其使用寿命,保障煤矿生产安全。但在零件表面熔覆功能涂层过程中,熔覆层长时间对零件进行加热,在零件表面形成

一定宽度的热影响区,而热影响区附近的母材组织恶化、性能下降,严重影响产品服役安全与寿命^[21-22]。

近年来,国内外学者利用 CMT 工艺开展了相关熔覆制造研究。Rajesh 等^[23]使用 CMT 工艺将具有出色导电性的纯铜沉积在 AISI347 基材上,获得了无缺陷的优质熔覆层,结果表明,铜层熔覆的后热处理显著提高了导电性。Wu 等^[24]采用等离子熔覆和 CMT 电弧熔覆 2 种方法在钢上沉积了青铜涂层,并进行了对比研究,结果表明,与等离子弧沉积相比,CMT 熔覆层表现出更小的穿透裂纹倾向和更低的稀释度,综合性能更优。目前,主要集中于对涂层组织与性能的影响研究,而对于熔覆工艺对母材性能的影响研究鲜有报道。

本文以液压油缸为对象,分别采用传统的 MIG 技术和新型的 CMT 技术在液压油缸内壁熔覆了铜合金涂层,对比研究了 MIG 熔覆和 CMT 熔覆对铜合金涂层、液压油缸基体组织与性能的影响,探究了熔覆工艺对母材服役性能的影响,为实际工程应用中优选熔覆工艺、提升产品性能提供了技术支撑。

1 试验

1.1 材料

试验母材选用液压油缸常用的 30CrMo 合金结构钢,其具体化学成分见表 1,试验工件规格尺寸为:外径 480 mm、壁厚 57 mm、长度 700 mm。涂层材料选用锰铜焊丝,直径 $\phi 1.2$ mm,其具体化学成分见表 2。

1.2 方法与设备

MIG 与 CMT 熔覆试验在自动化电弧熔覆工作站进行,熔覆设备为 Fronius 电弧焊机,焊接枪装在内部伸缩杆上,通过内部伸缩杆在液压油缸轴向上的移动和变位机的转动,来实现对液压油缸内壁的熔覆制造。为对比研究实际生产过程中不同熔覆工艺对涂层和缸体性能的影响,焊接工艺参数从经焊接工艺评定确定的实际焊接生产工艺参数范围内进行选取,选择理论焊接热输入基本相同的两组工艺参数分别进行

试验。

焊接热输入是指焊接时由焊接能源输入给单位长度焊缝上的热能,等于焊接电流、电弧电压、热效率的乘积和焊接速度的比值,计算公式如式(1)所示。

$$E = UI\eta/v \tag{1}$$

式中: E 为焊接热输入, J/mm; U 为电弧电压, V; I 为焊接电流, A; v 为焊接速度, mm/s; η 为热效率系数。

对于常规 MIG 和 CMT 工艺的热效率系数分别进行考虑,根据 Pepe 等^[25]对不同熔滴过渡形式 GMAW (Gas Metal Arc Welding) 焊接工艺效率的测量,脉冲 MIG 和 CMT 的工艺效率系数分别为 0.81 和 0.85,因此,常规 MIG 熔覆工艺的热效率系数 η 取 0.81。但对于 CMT 工艺,由于焊接过程中存在燃弧阶段和短路阶段,在确定热效率系数 η 时应充分考虑短路阶段热输入基本为 0 的情况。如图 1 所示,为 CMT 工艺的电流和电压变化曲线。由图 1 可知,CMT 短路阶段时电流电压值很小,可以认为短路阶段电弧能量输入为 0,并且燃弧阶段的持续时间是短路阶段的 4 倍^[19,26],因此 CMT 熔覆工艺的热效率系数 η 应取 0.68。根据公式(1)分别计算 MIG 和 CMT 两种工艺模式下工艺参数的热输入,分别选择热输入为 267.3 J/mm 和 260.1 J/mm 对应的工艺参数,具体焊接工艺参数见表 3,熔覆保护气采用纯 Ar。熔覆前,对油缸内部进行粗镗、精镗处理,并使用酒精清理内壁表面油污,然后进行熔覆试验。

为充分研究熔覆工艺对液压油缸基体组织与性能的影响,在涂层与基体界面处的基体处进行取样,如图 2 所示,试样经粗磨、细磨、抛光、腐蚀后进行组织与性能分析,腐蚀液选用氯化铁盐酸乙醇溶液,腐蚀时间约 10 s。利用蔡司 Axio Scope.A1 金相显微镜和 Keyence VHX-X1 超景深显微镜进行涂层和母材微观组织分析,以及母材的热影响区形貌特征分析,观察倍数选用 100、500、1 000 倍等不同倍数。采用 Phenom XL 电子扫描显微镜进行界面元素分布特征分析和 EDS 分析,采用 Smart Lab X 射线衍射仪进行 XRD 物相分析,物相测试扫描角度为 10°~90°,扫描

表 1 油缸化学成分
Tab.1 Chemical composition of the oil cylinder

wt. %														
C	Ca	K	Mg	Na	Si	Al	Ti	V	Cr	Mn	Ni	Cu	Mo	Fe
0.30	0.09	0.03	0.01	0.01	0.29	0.05	0.01	0.01	1.1	0.55	0.03	0.04	0.23	Bal.

表 2 锰铜焊丝化学成分
Tab.2 Chemical composition of the manganese copper welding wire

wt. %												
Ca	Mg	Na	S	Si	Al	P	Cr	Mn	Fe	Ni	Zn	Cu
0.07	0.01	0.01	0.02	0.07	7.52	0.01	0.01	9.73	1.59	2.43	0.04	Bal.

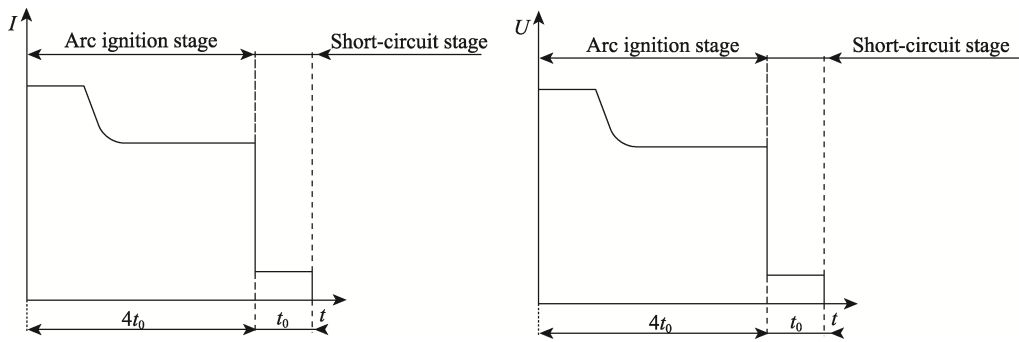


图 1 CMT 伏安特性曲线^[26-27]

Fig.1 CMT variation of positive volt-ampere characteristics^[26-27]

表 3 电弧熔覆工艺参数

Tab.3 Parameters of the arc cladding process

Method	Welding current I/A	Welding voltage U/V	Welding speed $v/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	Shield gas flow rate $Q/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	Overlap ratio $q/\%$	Heat input $E/(\text{J}\cdot\text{mm}^{-1})$
MIG	225	22	0.9	20	40	267.3
CMT	170	15	0.4	20	40	260.1

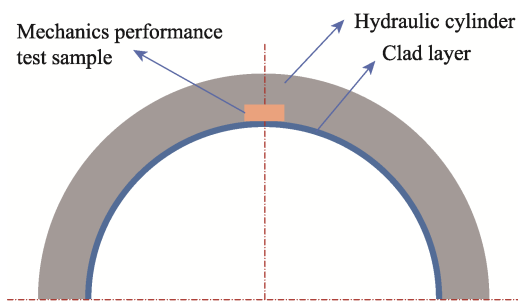


图 2 取样位置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the sampling location

速度为 $10\text{ }(^{\circ})/\text{min}$ ，电流 40 mA ，电压 40 kV 。采用华银 HV-1000Z 显微硬度计进行涂层及母材的维氏显微硬度分析，显微硬度测试沿界面垂直方向由涂层向母材内部进行测试，在涂层与界面附近每间隔 0.2 mm 测量 1 次，远离热影响区的母材位置每间隔 0.5 mm 测量 1 次，加载力为 100 g ，加载时间为 10 s 。采用中机 DF13.305M 万能拉伸试验机进行母材抗拉强度测试试验，试样制备方法及试验方法参照《GB/T

228.1—2021》执行。采用 Zwick HIT 5.5P 冲击试验机进行冲击性能测试试验，根据实际工程应用需求，煤矿用液压油缸冲击试验在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下进行，采用夏比摆锤冲击试验方法，试样缺口采用 V 型缺口。电化学腐蚀试验在 RST5200F 电化学工作站进行，腐蚀液为 $3.5\%\text{NaCl}$ 溶液，采用标准三电极体系，饱和甘汞电极作为参比电极，铂电极作为负电极，测量时间 $4\text{ }000\text{ s}$ ，振幅 5 mV ，分别进行开路电位和极化曲线的测试，分析不同工艺下涂层的耐腐蚀性能。

2 结果与分析

2.1 涂层组织与性能研究

2.1.1 涂层成形质量

如图 3 所示，为根据表 3 的工艺参数，使用 CMT 和 MIG 方法制备的铜合金涂层宏观形貌。由图 3 可知，2 种工艺方法的熔覆层均成形美观、表面平整、道次之间搭接良好，无明显的外观缺陷。

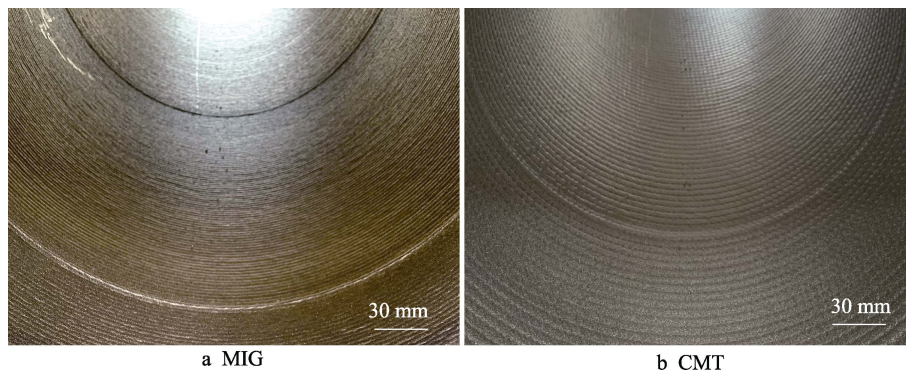


图 3 油缸内壁铜合金涂层宏观形貌

Fig.3 Macroscopic morphology of the copper alloy coating on the inner wall of the oil cylinder

实际工程应用中,需要对铜合金涂层表面进行机加工,一方面要保证涂层表面的粗糙度,另一方面要保证涂层厚度在 0.3~1 mm 之间,涂层过厚或过薄,都不利于提升油缸的使用性能。分别对 2 种油缸的内壁进行加工处理,加工到满足设计要求的尺寸后,对 2 种工艺的铜合金涂层进行 X 射线探伤检测,检测其内部缺陷。由于液压油缸为筒状,进行 X 射线探伤时圆周方向不同位置距成像板的距离不同,导致只有很窄的区域可以在正常成像。因此,在液压油缸上随机截取一段进行 X 射线探伤,主要观察涂层与界面是否存在明显的裂纹、夹杂等缺陷,如图 4 所示,分别为 2 种工艺铜合金涂层的 X 射线探伤照片。由图 4 可知,经 X 射线探伤检测,机加工后 2 种工艺的铜合金涂层结合良好,均未见裂纹、气孔、搭接不良等缺陷。

2.1.2 涂层微观组织形貌

如图 5 所示,为常规 MIG 熔覆试样的铜合金涂层微观组织形貌。由图 5 可知,常规 MIG 熔覆铜合金涂层组织主要由富 Cu 固溶体 α 相、富 Cu 的 β 相、富 Fe 的 κ 相组成^[27],同时涂层中非均匀分布着灰色球状组织,灰色球状组织主要分布于界面附近。利用扫描电镜对 MIG 熔覆试样的涂层进行 EDS 分析,测

量灰色球状组织的化学成分,结果如图 6 所示。由图 6 可知,灰色球状组织的主要成分与母材基体成分相似,说明灰色球状组织主要是由母材形成。MIG 熔覆过程中,熔滴主要以自由过渡为主,液滴需要长大到一定的尺寸才能形成过渡,与 CMT 等熔滴过渡形式相比,断弧时间短、加热时间长,电弧温度高达 2 000 °C 以上。因此, MIG 熔覆过程中,在电弧和高温熔池的作用下,近表面的部分母材发生了熔化,而由于 Fe 在 Cu 中的固溶度较低,因此熔化的母材并未完全被溶解,而是以“夹杂物”的形式存在于铜合金涂层中。这种母材的“夹杂物”不仅造成铜合金涂层稀释率增加,影响涂层的耐腐蚀性能,也势必对涂层的力学性能造成影响。

CMT 熔覆试样的涂层微观组织形貌如图 7 所示,其中,图 7a~b 为相邻位置处的涂层微观组织形貌,图 7c 为区域 1 的微观组织形貌,图 7d 为区域 4 的微观组织形貌。由图 7a~b 可知,对于 CMT 熔覆试样,不同熔覆道次之间存在明显的熔合线,熔合线两侧的涂层微观组织形貌明显不同,主要有细小颗粒状组织和大块状组织。这与 MIG 熔覆试样的微观组织形貌差异显著,说明 CMT 熔覆试样的温度场分布与 MIG 明显不同。CMT 的熔滴过渡方式与传统的 MIG 明显

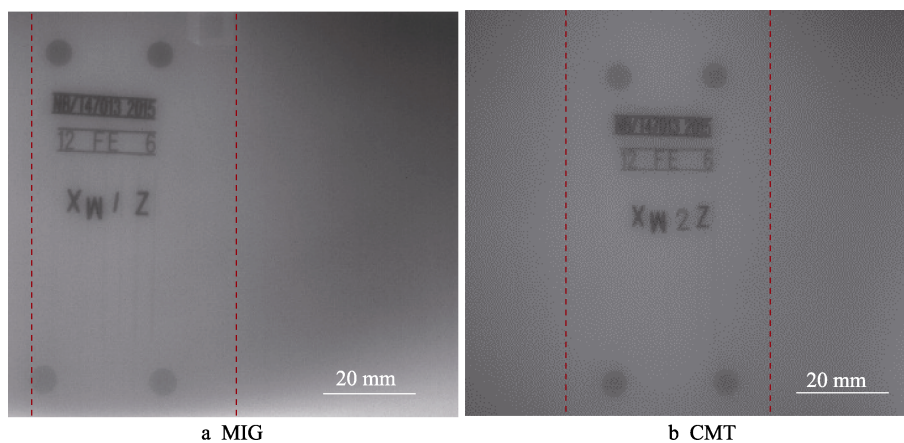


图 4 油缸内壁铜合金涂层 X 射线探伤照片

Fig.4 X-ray inspection photo of the copper alloy coating on the inner wall of the oil cylinder

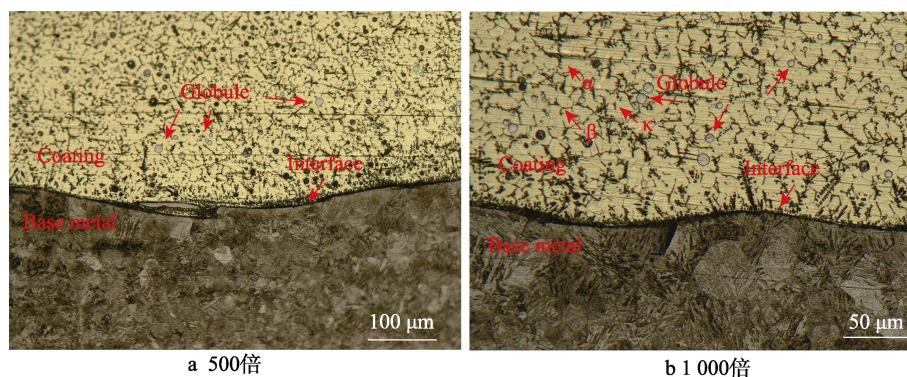


图 5 MIG 熔覆层微观组织形貌

Fig.5 Microstructure morphology of the MIG cladding coating: a) 500×; b) 1 000×

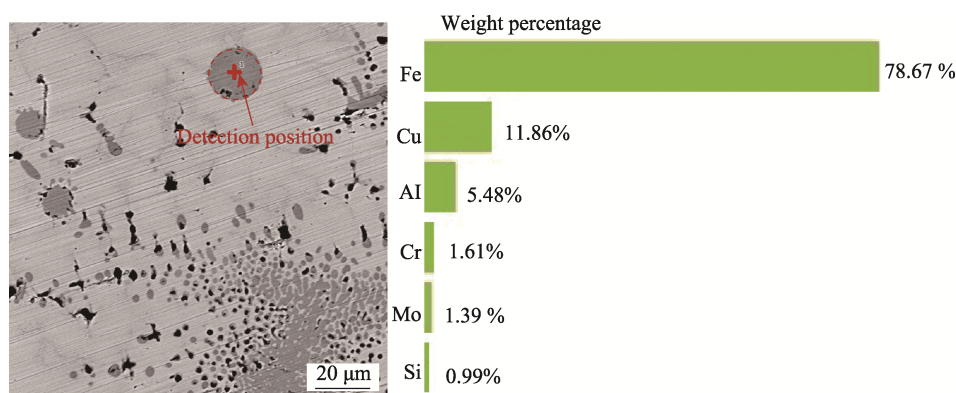


图 6 灰色球状组织 EDS 分析

Fig.6 EDS analysis of the gray spherical structure

不同, CMT 熔滴过渡过程中, 有相对较长的时间电流几乎为零, 其熔池温度要远低于 MIG 工艺。因此在熔覆过程中, 熔池只能熔化前一熔覆道的少部分涂层, 导致熔覆层出现明显的熔合线。由图 7a~d 可知, 区域 1 主要为块状的 α 相、 β 相和细小颗粒状的 κ 相组织, 区域 4 主要为条状 α 相、 β 相和针状 κ 相组织, 区域 2 的组织介于区域 1 和区域 4 之间, 由与区域 1 中组织形貌类似的等轴晶和与区域 4 中组织形貌类似的柱状晶组成; 区域 3 与区域 1 的微观组织形貌类似。这主要是由于不同区域经历的热循环不同而造成的。当熔池凝固时, 由于冷却速度较快, 形成了细小颗粒状的等轴晶组织; 同时, 高温熔池对上一道熔覆层进行了加热, 从而导致旁边熔覆层的组织发生长大, 形成粗大的块状组织^[28-29]。

2.1.3 涂层耐腐蚀性能

为进一步对比分析 2 种工艺方法对涂层的影响, 分别选取 MIG 和 CMT 熔覆试样进行电化学试验, 测试涂层的耐腐蚀性能, 试验结果如图 8~9 所示, 图 8 为 MIG 和 CMT 试样熔覆层的开路电位变化曲线。图 9 为试样的极化曲线。开路电位的大小可反映材料的腐蚀倾向, 通常, 开路电位越低, 材料的腐蚀倾向性越高, 耐腐蚀性能越差。由图 8 可知, 随试验时间的增加, MIG 和 CMT 试样的开路电位都呈现先下降后趋于平稳的规律, 这说明铜合金涂层在刚开始测试时, 涂层表面受到腐蚀生产腐蚀产物导致电位下降, 当腐蚀反应与钝化膜的生成达到动平衡状态时, 开路电位趋于稳定。其中, MIG 熔覆层的稳态开路电位约为 -0.47 V, CMT 为 -0.44 V, 且 CMT 的开路电位均

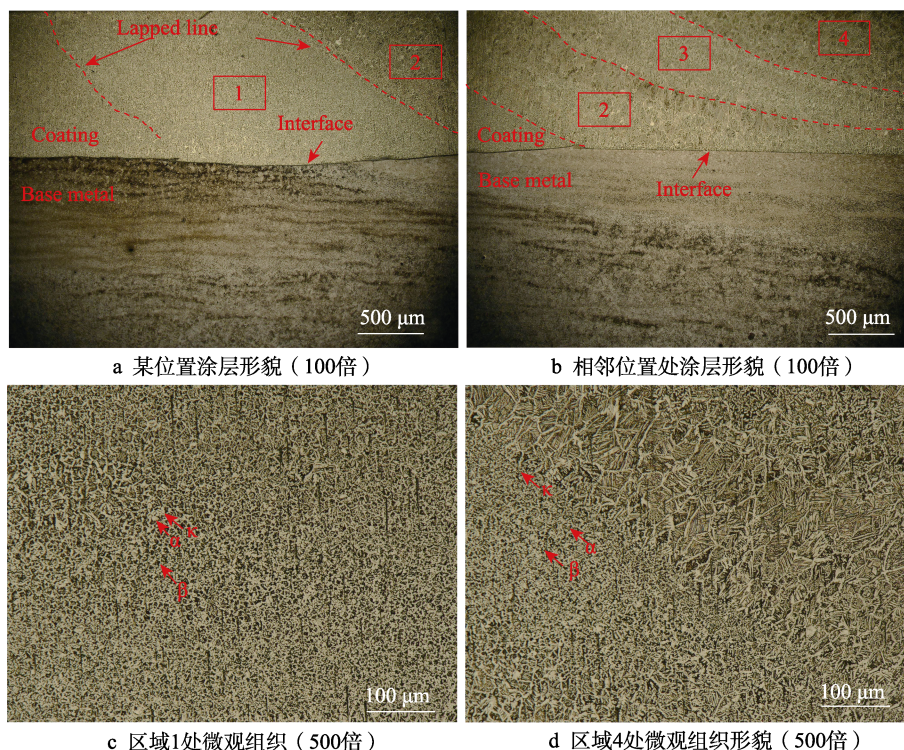


图 7 CMT 熔覆层微观组织形貌

Fig.7 Microstructure morphology of the CMT cladding coating: a) coating morphology at a certain location (100×); b) coating morphology at adjacent locations (100×); c) microstructure at region 1 (500×); d) microstructure at region 4 (500×)

高于 MIG, 说明 CMT 熔覆层在 3.5%NaCl 溶液中的耐腐蚀性能要优于 MIG。这可能是由于 MIG 熔覆层的稀释率较高, 涂层中的 Fe 含量较高, 且元素和组织分布相对不均匀, 导致涂层在 3.5%NaCl 溶液中的腐蚀行为更活跃。

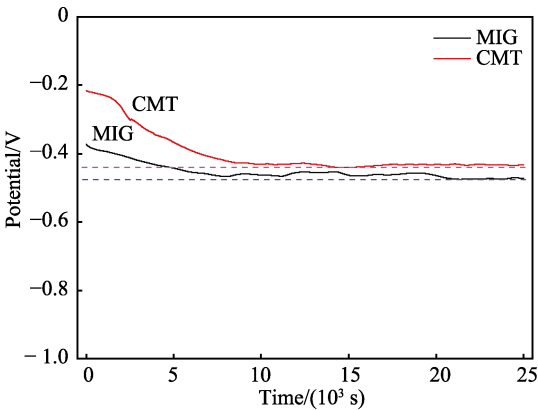


图 8 开路电位变化曲线
Fig.8 Open circuit potential variation curve

极化曲线的形态反映了电极极化的程度, 极化曲线中钝化区斜率表示极化率和反应阻力的大小, 钝化区斜率越大, 材料的耐腐蚀性越好, 同时, 也可以通过腐蚀电位和腐蚀电流密度来反映材料的耐腐蚀性能, 腐蚀电位越趋近于正值, 腐蚀电流密度越小, 材料的耐腐蚀性能越好^[16]。由图 9 可知, MIG 熔覆层与 CMT 的动电位极化曲线均具有相似的特征: (1) 在点蚀发生之前, 即阳极极化区可以观察到短暂的钝化区; (2) 在溶液中均发生明显的点蚀现象。通过对动电位极化曲线的分析, 分别将腐蚀电位 (E_{corr})、腐蚀电流 (I_{corr})、点蚀电位 (E_{pit}) 以及钝化区宽度 ($E_{\text{pit}}-E_{\text{corr}}$) 总结在表 4 中, E_{pit} 表示点蚀成核的临界状态, 被广泛用作评估耐蚀性的电化学参数。图 9 所示, 2 种工艺腐蚀电位和腐蚀电流密度数值基本相当。其中, MIG 试样的腐蚀电位为 -0.72 V , 腐蚀电流密度为 $4.81\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$, CMT 的分别为 -0.67 V 、 $4.46\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

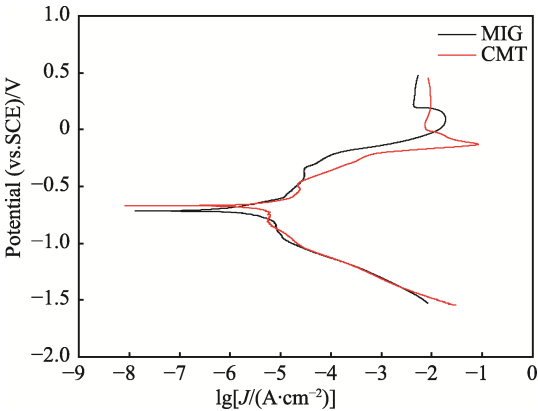


图 9 极化曲线
Fig.9 Polarization curve

表 4 动电位极化腐蚀参数

Tab.4 Transpassive polarization corrosion parameters

Method	E_{corr}/V	$J_{\text{corr}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	E_{pit}/V	$E_{\text{pit}}-E_{\text{corr}}/\text{V}$
MIG	-0.72 ± 0.02	4.81 ± 0.10	-0.38 ± 0.01	0.34
CMT	-0.67 ± 0.03	4.46 ± 0.05	-0.45 ± 0.02	0.22

由此可以得出, CMT 具有较高的腐蚀电位, 较低的腐蚀电流密度, 说明 CMT 熔覆层的耐腐蚀性能要略优于 MIG。

2.2 界面元素分布

如图 10 所示, 为 MIG 熔覆试样界面附近的元素分布图。由图 10 可知, MIG 熔覆过程中, 界面形成了良好的冶金结合, 涂层内部出现大量垂直于界面向涂层内生长的树枝状 Fe-Cr 化合物和球状 Fe-Cr 化合物, 其中树枝状组织主要存在于界面附近, 而球状组织分布于涂层内部距离界面较远的位置。这主要是由于 MIG 熔覆过程中, 部分钢基体发生了熔化, 一部分液态母材未被卷入熔池, 留在了熔池底部, 凝固过程中沿界面法线方向形成柱状晶或树枝晶; 而另一部分液态母材被卷入到了熔池中, 但 Fe 在 Cu 中的溶解度较低, 因此进入熔池的母材凝固后以球状组织存在于涂层中。另外, 熔池与钢基体的界面处温度较高, 铜合金涂层与界面发生了冶金化学反应, 钢中的 Fe、Cr 等元素向涂层内部扩散, 并在涂层中再结晶, 形成了柱状晶或树枝晶组织。如图 11 所示, 为界面处元素含量分布曲线图。由图 11 可知, 界面处存在明显的元素过渡区, 元素过渡区宽度约为 $20.5\text{ }\mu\text{m}$, 说明界面处发生了明显的冶金反应, 结合良好。

如图 12 所示, 为 CMT 熔覆试样界面附近的元素分布图。由图 12 可知, 界面处 Fe、Cu、Al、Cr 等元素含量发生显著变化, 存在明显的元素过渡区; CMT 熔覆层界面处 Fe 基相垂直于界面处向涂层内生长, 呈锯齿状。这主要是由于熔池底部温度较高, 少量母材发生熔化或母材元素在高温下快速向涂层内扩散, 在熔池凝固过程中, 受温度梯度和成分梯度影响, 沿界面形成柱状晶。但由于熔池温度相对较低、冷却速度较快, Fe 相来不及长大, 从而形成小尺寸的柱状晶。与 MIG 熔覆试样相比, CMT 熔覆层中 Cu、Al 等元素分布更加均匀, 无明显的 Fe 基相存在, 熔覆层界面处的 Fe 基组织尺寸更加细小、向内生长距离更短, 说明母材熔化较少、涂层稀释率较低, 且温度较低, 不能满足向内生长的热力学和动力学条件。因此, CMT 熔覆层的性能一致性相对更好, CMT 熔覆工艺对母材的热影响相对更小。

如图 13 所示, 为 CMT 熔覆试样界面处的元素分布曲线。由图 13 可知, 界面处元素过渡区比较明显, 过渡区宽度约为 $15.6\text{ }\mu\text{m}$, 与 MIG 相比, 约下降 23.9%。过渡区宽度变窄, 一方面说明在熔覆过程中,

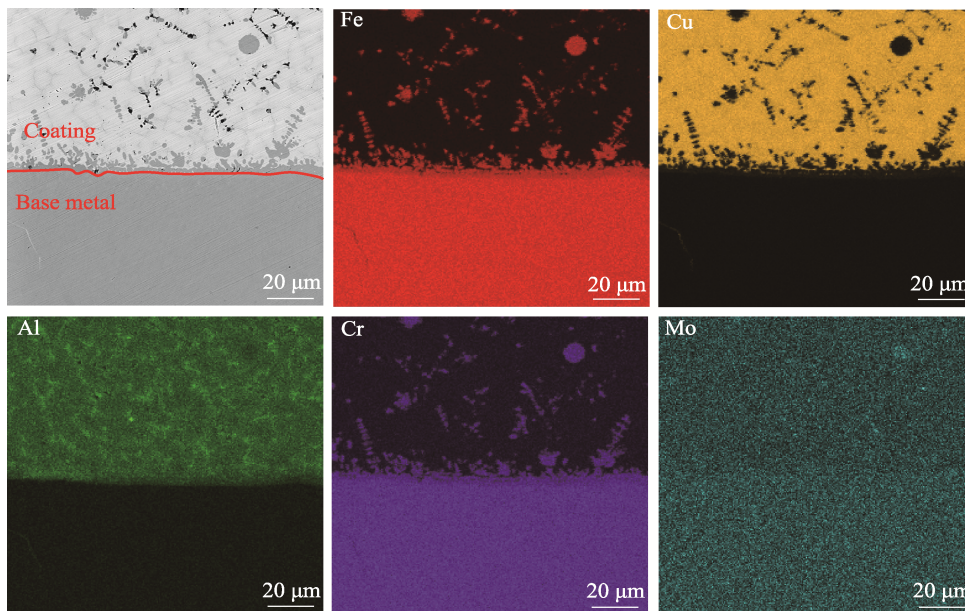


图 10 MIG 熔覆试样界面处元素分布图
Fig.10 Distribution map of elements at the interface of the MIG cladding sample

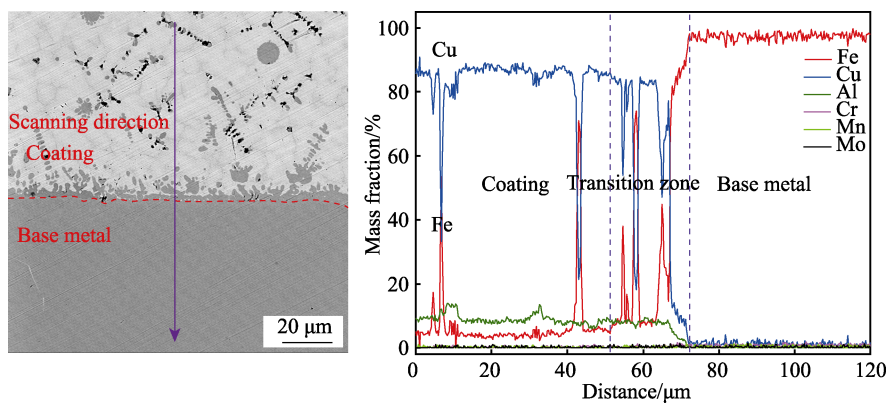


图 11 MIG 熔覆试样界面处元素分布曲线
Fig.11 Distribution curve of elements at the interface of the MIG cladding sample

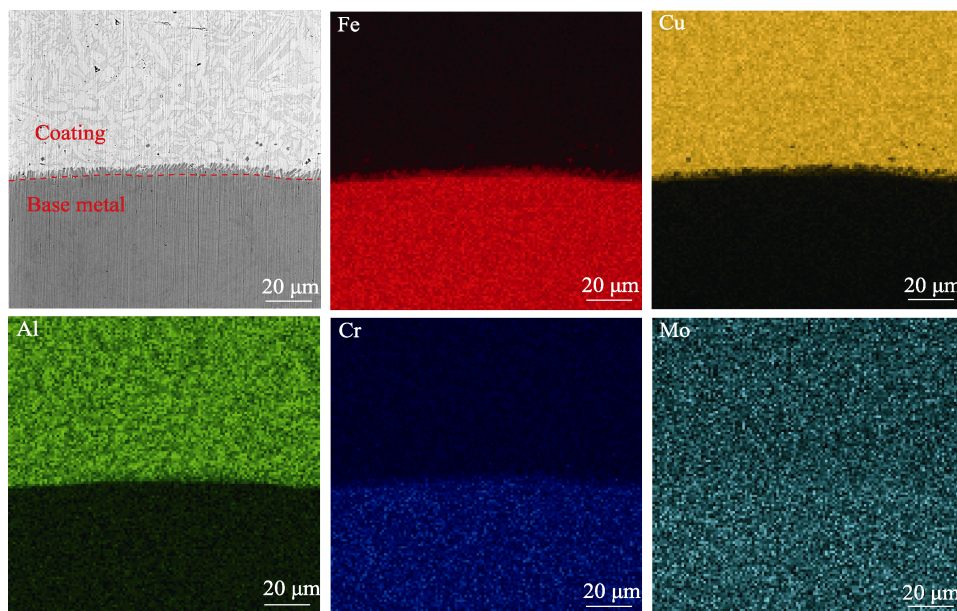


图 12 CMT 熔覆试样界面处元素分布图
Fig.12 Distribution map of elements at the interface of the CMT cladding sample

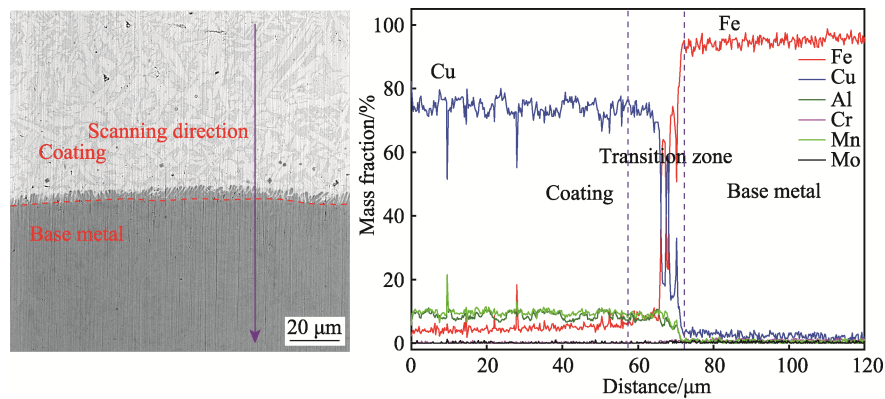


图 13 CMT 熔覆试样界面处元素分布曲线

Fig.13 Distribution curve of elements at the interface of the CMT cladding sample

CMT 熔池的温度要低于 MIG, 即 CMT 工艺的实际热输入更小、对母材的热影响更小; 另一方面说明 CMT 工艺的涂层稀释率更低, 涂层的性能完整性保持的更好。

2.3 母材组织与性能研究

2.3.1 母材热影响区

焊接热输入直接决定了母材经历的热循环情况, 也决定了热影响区的宽度。同等材料下, 实际热输入越大, 热影响区宽度越大, 热影响区母材性能恶化越严重。因此通过热影响区宽度的对比, 也可以反映出不同工艺对母材组织与性能的影响程度。

如图 14 所示, 为常规 MIG 熔覆试样相邻位置处的热影响区形貌。由图 5 可知, 常规 MIG 熔覆条件下, 母材中形成了明显的热影响区, 且热影响区与涂

层的界面处呈凹凸状, 而与母材基体的交界处相对较为笔直。这主要是由于熔池中心位置温度高, 母材发生了熔化, 而熔池两侧的温度较低, 两侧的母材并未发生明显熔化, 从而造成界面呈凹凸状。由于 MIG 熔覆试样中不同位置的热影响区宽度差异较大, 因此采用热影响区宽度的平均值来代表 MIG 熔覆试样的热影响区宽度, 其值约为 $1\,025\,\mu\text{m}$ 。

如图 15 所示, 为 CMT 熔覆试样的热影响区形貌。由图 15 可知, CMT 熔覆后, 油缸基体也形成了明显的热影响区, 但界面呈笔直状, 热影响区宽度约为 $890\,\mu\text{m}$ 。与常规 MIG 熔覆相比, CMT 熔覆试样的热影响区宽度明显下降, 约下降 13.2%。说明在试验条件下, CMT 熔覆工艺对母材的热影响要小于常规的 MIG 工艺。

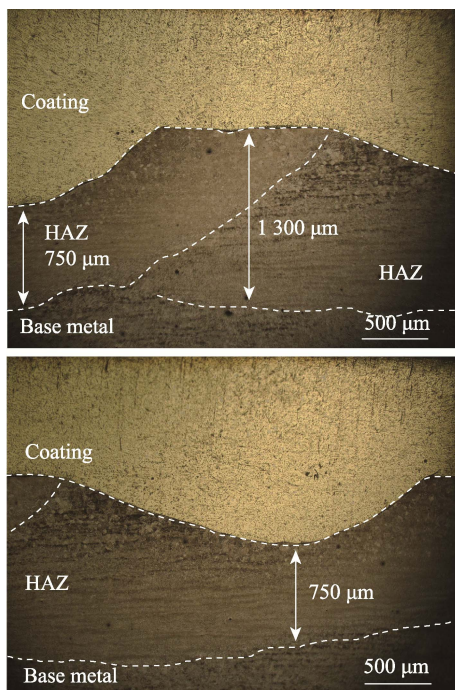


图 14 MIG 熔覆试样相邻位置处的热影响区形貌

Fig.14 Morphology of the HAZ adjacent to the MIG sample

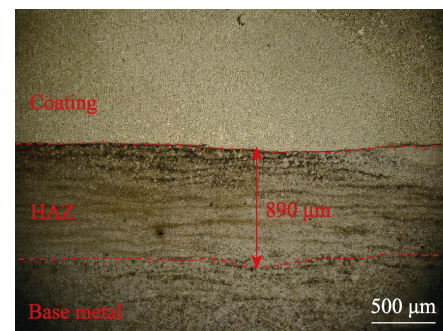


图 15 CMT 熔覆试样的热影响区形貌

Fig.15 Morphology of the HAZ adjacent to the CMT sample

由 1.2 小节可知, 2 种工艺参数的理论热输入基本相同, 但根据 2 种工艺的热影响区宽度分析可知, 试验条件下 CMT 的实际热输入应低于 MIG 工艺。这一方面是由于 CMT 工艺在熔覆过程中采用“回抽丝”模式, 在熔滴还未正常过渡之前, 通过控制系统将焊丝迅速抽回, 进而使焊丝与熔滴分离, 实现熔滴的强制过渡, 熔滴过渡瞬间电流几乎为零^[30], 并且熔滴未完成“长大”便向熔池中进行过渡, 电弧处于高温燃烧的时间也相对较短。另一方面对于常规的 MIG 焊接过程, 当焊接过程不稳定时, 常常存在多种熔滴过

渡方式,当出现短路过渡时,由于电流仍然较大,熔池会产生较大的焦耳热^[25]。因此 CMT 熔覆工艺的电弧和熔池温度较低,实际焊接热输入相对较小,对母材的热影响也相对较小。

2.3.2 母材微观组织形貌

如图 16 所示,为未熔覆前母材的微观组织形貌,其中图 16a 为油缸内壁位置处的微观组织形貌,图 16b 为距离油缸内壁 5 mm 位置处的微观组织形貌。由图 16 可知,母材内壁和芯部位置组织是铁素体内分布着碳化物球粒的复合组织,这是母材经调质(淬火+高温回火)处理后的典型微观组织特征,为回火索氏体。其中,内壁位置处的组织呈现一定的方向性,这可能是由于油缸经轧制而成,导致外侧组织呈现一

定的轧制组织特征。

如图 17 所示,为 MIG 熔覆试样的母材微观组织形貌,其中图 17b 为图 17a 中位置 A 处的微观组织形貌,图 17c 为图 17a 中位置 B 处的微观组织形貌,图 17d 为图 17a 中位置 C 处的微观组织形貌。由图 17b~d 可知,界面附近的热影响区(位置 A)组织主要为粗大的铁素体+渗碳体,并存在部分魏氏组织;远离界面处的热影响区(位置 B)组织主要为铁素体+粗大的粒状渗碳体,近热影响区的母材(位置 C)组织仍以索氏体+回火索氏体为主,但与未熔覆的母材组织相比,发生了明显的长大现象,二次渗碳体明显增多。说明 MIG 熔覆后,母材受到的热影响较大,热影响区组织性能较差,可能会导致母材的力学性能下降。

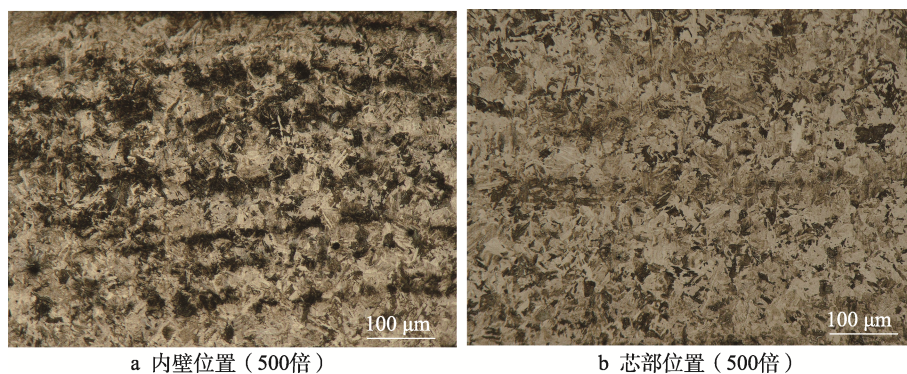


图 16 未熔覆母材微观组织形貌

Fig.16 Microstructure morphology of uncladded base metal: a) inner wall (500×); b) core (500×)

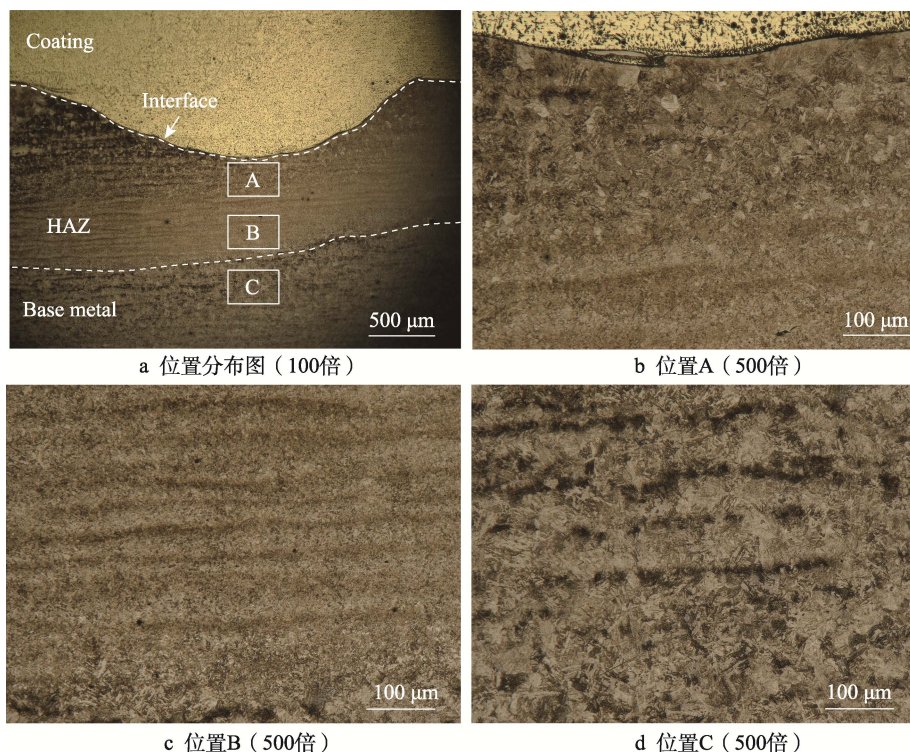


图 17 MIG 熔铜试样金相组织照片

Fig.17 Metallographic microstructure photograph of the MIG melted copper sample: a) location distribution map (100×); b) location A (500×); c) location B (500×); d) location C (500×)

如图 18 所示, 为 CMT 熔覆试样的母材微观组织形貌, 其中图 18b~d 分别为图 18a 中位置 A、B、C 处的微观组织形貌。由图 18b~d 可知, 界面附近的热影响区(位置 A)组织主要为粗大的铁素体+渗碳体, 但与 MIG 熔覆试样相比, 晶粒尺寸明显变小, 且该粗大组织的分布宽度明显变窄; 远离界面处的热影响区(位置 B)

组织主要为铁素体+粗大的粒状渗碳体; 近热影响区的母材(位置 C)组织仍以索氏体+回火索氏体为主, 与未熔覆的母材相比有一定的组织长大现象。说明 CMT 熔覆后, 母材受到的热影响较大, 热影响区组织性能较差, 但与 MIG 熔覆试样相比, CMT 熔覆试样热影响区组织尺寸相对较小, 对母材的热影响相对较小。

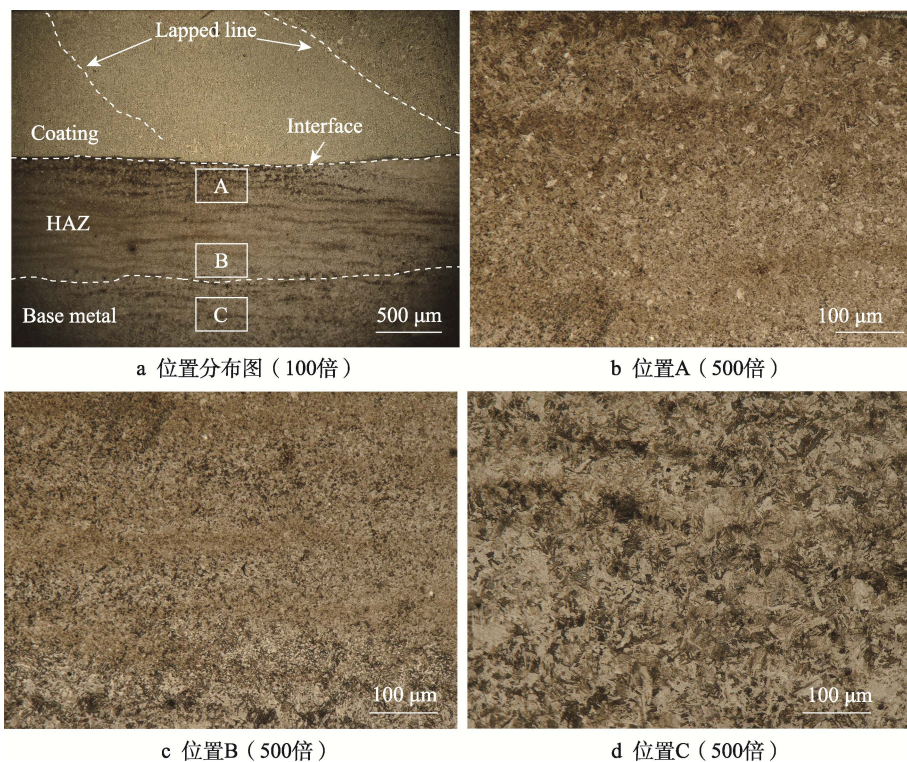


图 18 CMT 熔铜试样金相组织照片

Fig.18 Metallographic microstructure photograph of the CMT melted copper sample: a) location distribution map (100×); b) location A (500×); c) location B (500×); d) location C (500×)

2.3.3 显微硬度

如图 19 所示, 为 MIG 和 CMT 熔覆试样界面处显微硬度分布曲线。由图 19 可知, MIG 和 CMT 熔覆试样的显微硬度变化规律相同, 涂层处的显微硬度远低于母材, 热影响区处的显微硬度远高于母材, 热影响区外的母材显微硬度趋于一致, 显微硬度值在界面处出现突变, 形成较强的应力集中。对于铜合金熔覆层, MIG 熔覆试样的平均显微硬度约为 167HV, CMT 熔覆试样的平均显微硬度约为 201HV, 与 MIG 相比约升高 20.2%。与 CMT 相比, MIG 熔覆试样涂层的成分分布相对不均匀, 组织以富 Cu 固溶体 α 相为主, 强化相 κ 相较少且分布不均匀, 因此导致其涂层显微硬度有所降低。对于母材热影响区, MIG 熔覆试样的平均显微硬度约为 418HV, CMT 熔覆试样的约为 419HV, 两者相当。对于近热影响区的母材位置, MIG 熔覆试样的平均显微硬度约为 249HV, CMT 熔覆试样的平均显微硬度约为 258HV, 略高于 MIG 熔覆试样。与未熔覆试样相比, MIG 和 CMT 熔覆试样

近热影响区位置母材的显微硬度均有一定程度的下降, MIG 约降低 13.5%, CMT 约降低 10.5%, 这可能是由于在熔覆过程中, 母材经历了长时间的热循环, 组织内晶格畸变减弱、内应力降低, 导致显微硬度下降。

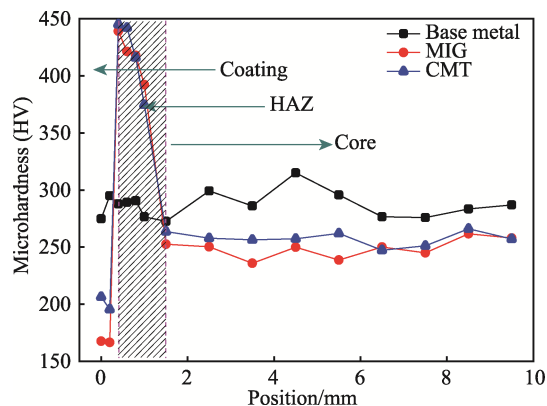


图 19 界面处显微硬度变化曲线

Fig.19 Variation curve of Vickers microhardness at the interface

2.3.4 屈服强度

分别针对未熔覆油缸和 MIG、CMT 熔覆的油缸, 在靠近内壁位置取拉伸试验试样进行试验, 试验在室温下进行, 拉伸试验结果如图 20 所示。由图 20 可知, 未熔覆油缸内壁位置母材的屈服强度为 760 MPa, MIG 和 CMT 熔覆试样的屈服强度相对于未熔覆试样均有所降低。这可能是由于热影响区的微观组织发生恶化, 以及近热影响区母材组织发生一定程度的长大和晶格畸变减弱, 导致此区域母材的强度有所下降。MIG 熔覆试样内壁位置母材的屈服强度为 701 MPa, 与未熔覆试样比约下降 7.7%; CMT 熔覆试样内壁位置母材的屈服强度为 707 MPa, 与未熔覆试样比约下降 7.0%, 与 MIG 熔覆试样相当。

如图 21 所示, 为未熔覆试样与 MIG、CMT 熔覆试样拉伸试验的断口形貌。由图 21a 可知, 未熔覆试样的断口形貌具有明显的韧性断裂特征, 断口处韧窝

数量多、形貌显著。由图 21b~c 可知, MIG 和 CMT 熔覆试样的拉伸断口也呈明显的韧性断裂特征, 断口处韧窝特征明显。但与未熔覆试样相比, MIG 和 CMT 试样的断口有较为明显的撕裂棱和河流花样。

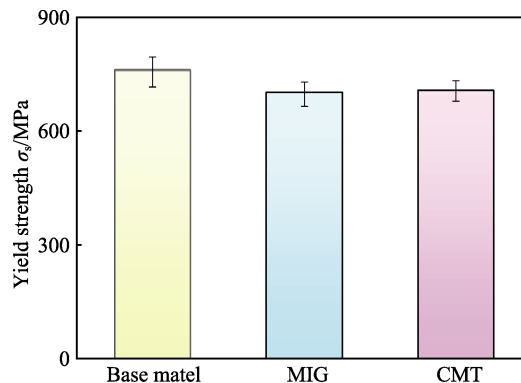


图 20 不同试样屈服强度对比

Fig.20 Comparison of yield strength of different samples

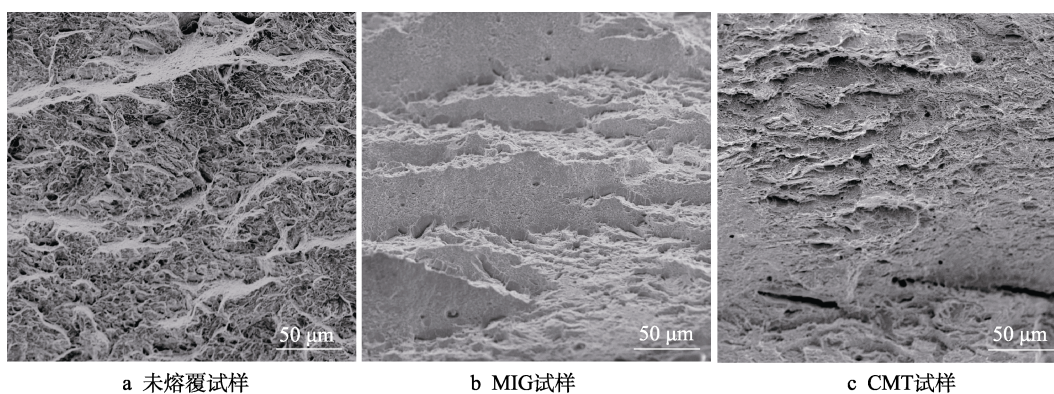


图 21 不同试样的拉伸断口形貌

Fig.21 Tensile fracture morphologies of different samples: a) uncladded sample; b) MIG sample; c) CMT sample

2.3.5 低温冲击韧性

分别针对未熔覆油缸和 MIG、CMT 熔覆的油缸, 在靠近内壁位置取冲击试样进行低温冲击试验 ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$), 试验结果如图 22 所示。由图 22 可知, 未熔覆试样的低温冲击功为 164 J, MIG 熔覆试样的低温冲击功为 125 J, 与未熔覆母材相比约下降 23.3%; CMT 熔覆试样的低温冲击功为 135 J, 与未熔覆母材相比约下降 17.7%。油缸经历熔覆铜合金涂层后, 近内壁位置母材的低温冲击韧性有所下降, 说明熔覆工艺对母材的性能造成了一定的影响。另外, 与 MIG 相比, CMT 熔覆试样低温冲击功的下降幅度约减少 24.0%, 说明 CMT 工艺对母材性能的影响相对更小。

2.3.6 物相分析

如图 23 所示, 为不同工艺下界面处母材的 XRD 衍射图谱。由图 23 可知, MIG 和 CMT 熔覆试样界

面处的相组成没有明显差异, 均以铁素体和碳化物为主。但与未熔覆的母材相比, MIG 和 CMT 熔覆试样界面处的碳化物含量增加, 说明熔覆后界面处淬硬相增加, 对母材韧性造成影响。

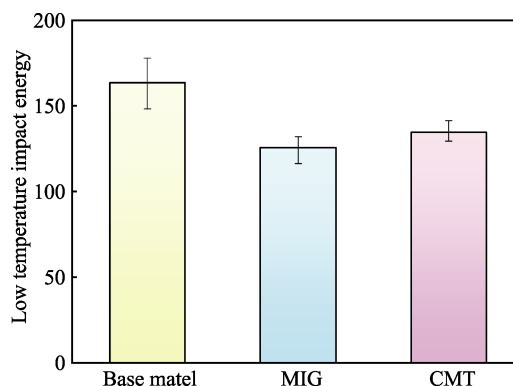


图 22 不同试样低温冲击性能对比

Fig.22 Comparison of low-temperature impact resistance of different samples

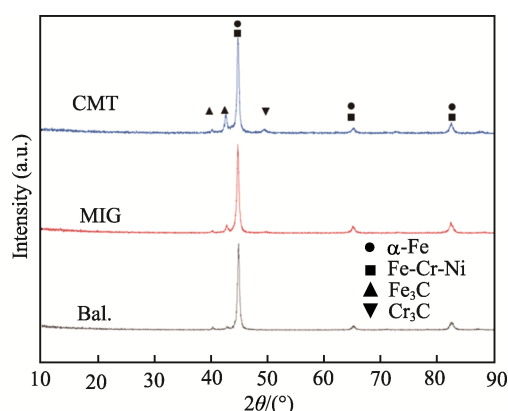


图 23 物相分析
Fig.23 Phase analysis

3 结论

1) MIG 和 CMT 工艺均可在液压油缸表面制备出成形美观、表面平整、组织致密、结合良好、无裂纹和气孔等缺陷的铜合金涂层, 涂层与基体均形成冶金结合, 分别形成约 20.5 μm 和 15.6 μm 的元素过渡区。

2) MIG 和 CMT 工艺均对母材热影响区及附近的组织和性能造成了一定的影响, 与未熔覆母材相比, 近涂层位置母材组织均发生明显的长大现象, 屈服强度、低温冲击韧性均有所下降, 热影响区的显微硬度显著增加、近热影响区母材的显微硬度发生下降。

3) 与未熔覆母材相比, MIG 熔覆试样近热影响区位置的显微硬度、屈服强度、低温冲击韧性分别为 249HV、701 MPa、125 J, 分别约降低 13.5%、7.7%、23.3%; CMT 熔覆试样的分别为 257HV、707 MPa、135 J, 分别约降低 10.5%、7.0%、17.7%。

4) 与 MIG 熔覆试样比, CMT 熔覆层的元素分布更加均匀、稀释率更低, 元素过渡区宽度约降低 23.9%; CMT 熔覆层的耐腐蚀性能更好, 稳态开路电位、腐蚀电位、腐蚀电流密度分别为 -0.44 V、-0.67 V、4.46 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, 分别提升 6.4%、6.6%、7.3%; CMT 熔覆工艺对母材组织和性能的影响程度明显降低, 母材的热影响区宽度为 890 μm , 约降低 13.2%, 近涂层位置母材屈服强度、低温冲击韧性的下降幅度分别降低 9.1%、24.0%。

参考文献:

[1] 曹春玲, 刘佳, 张周周, 等. 矿用液压支架 30CrMnSi 立柱中缸开裂失效分析[J]. 热加工工艺, 2025, 54(3): 143-146.
CAO C L, LIU J, ZHANG Z Z, et al. Cracking Failure Analysis of 30CrMnSi Column Cylinder for Mining Hydraulic Support[J]. Hot Working Technology, 2025,

54(3): 143-146.
[2] 崔蕾蕾, 马珂, 兰志宇, 等. 液压支架立柱中缸裂纹原因分析及改进[J]. 金属热处理, 2024, 49(8): 289-294.
CUI L L, MA K, LAN Z Y, et al. Cause Analysis and Solution of Crack of Hydraulic Support Column Cylinder[J]. Heat Treatment of Metals, 2024, 49(8): 289-294.
[3] WU Q L, LONG W M, ZHANG L, et al. A Review on Ceramic Coatings Prepared by Laser Cladding Technology[J]. Optics & Laser Technology, 2024, 176: 110993.
[4] 樊世冲, 殷凤仕, 任智强, 等. 基于电弧的多能场复合增材制造技术研究现状[J]. 表面技术, 2023(8): 49-70.
FAN S C, YIN F S, REN Z Q, et al. Research Status of Multi-Energy Field Composite Additive Manufacturing Technology Based on Arc[J]. Surface Technology, 2023(8): 49-70.
[5] 张泽, 张远涛, 张林, 等. 电弧离子镀涂层大颗粒缺陷控制与抑制技术研究进展[J]. 表面技术, 2025, 54(1): 1-16.
ZHANG Z, ZHANG Y T, ZHANG L, et al. Research Progress of Large Particle Defect Removal in Arc Ion Plating Coatings[J]. Surface Technology, 2025, 54(1): 1-16.
[6] 龙伟民, 刘大双, 吴爱萍, 等. 金刚石粒度及添加量对大气环境感应钎涂层耐磨性的影响[J]. 机械工程学报, 2023, 59(12): 225-235.
LONG W M, LIU D S, WU A P, et al. Influence of Size and Content on the Wear Resistance of Induction Brazing Diamond Coating in Air[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(12): 225-235.
[7] 龙伟民, 刘大双, 王博, 等. 铝微粉对大气环境感应钎涂金刚石涂层性能影响[J]. 焊接学报, 2021, 42(12): 67-71.
LONG W M, LIU D S, WANG B, et al. Effect of Aluminum Powder on Properties of Induction Braze Coated Diamond Layers in Atmospheric Environment[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(12): 67-71.
[8] 浦娟, 石苏桐, 魏宏兵, 等. 油管内壁双钨极热丝 TIG 堆焊 625 镍基合金层组织及耐腐蚀性能[J]. 焊接学报, 2025, 46(5): 94-104.
PU J, SHI S T, WEI H B, et al. Microstructure and Corrosion Properties of 625 Ni-Based Alloy Surfacing Layer on the Inner-Wall of Oil Pipe Prepared by Twin Tungsten Electrode TIG Welding with Heat Wire[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2025, 46(5): 94-104.
[9] 龙伟民, 刘大双, 张冠星, 等. 感应钎涂粉末熔融及传热机制[J]. 焊接学报, 2021, 42(11): 29-34.
LONG W M, LIU D S, ZHANG G X, et al. Melting and Heat Transfer Mechanism of Powder by Induction Brazing Coating[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(11): 29-34.
[10] AHMAD SIDDIQUI A, DUBEY A K. Recent Trends in Laser Cladding and Surface Alloying[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 134: 106619.

- [11] ZHU L D, XUE P S, LAN Q, et al. Recent Research and Development Status of Laser Cladding: A Review[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 138: 106915.
- [12] SRINIVASAN D, SEVVEL P, JOHN SOLOMON I, et al. A Review on Cold Metal Transfer (CMT) Technology of Welding[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 64: 108-115.
- [13] SELVI S, VISHVAKSENAN A, RAJASEKAR E. Cold Metal Transfer (CMT) Technology - An Overview[J]. Defence Technology, 2018, 14(1): 28-44.
- [14] ENGSTLER R, REIPERT J, KARIMI S, et al. A Reverse Osmosis Process to Recover and Recycle Trivalent Chromium from Electroplating Wastewater[J]. Membranes, 2022, 12(9): 853.
- [15] ILANLOU M, SHOJA RAZAVI R, PIRALI P, et al. Additive Manufacturing of Functionally Graded Stellite6/17-4 pH Fabricated via Direct Laser Deposition[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 32: 985-999.
- [16] 温涛涛, 陈玉华, 陈伟, 等. CMT 电弧增材制造铝青铜的微观组织及耐腐蚀性能研究[J]. 精密成形工程, 2019, 11(5): 149-154.
WEN T T, CHEN Y H, CHEN W, et al. Microstructure and Corrosion Resistance of Aluminum Bronze Made by CMT Arc Additive Manufacturing Technology[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(5): 149-154.
- [17] 陈伟, 黄龙彪, 陈玉华, 等. CMT 电弧增材制造 Cu-Ni-Al-Mn-Fe 铝青铜合金微观组织性能研究[J]. 精密成形工程, 2018, 10(5): 81-87.
CHEN W, HUANG L B, CHEN Y H, et al. Microstructure of Cu-Ni-Al-Mn-Fe Copper Alloy Made by of CMT Arc Additive Manufacturing Technology[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2018, 10(5): 81-87.
- [18] 邵光辉, 杨克, 邹晓东, 等. 汽轮机转轴表面 CMT 修复层微观组织及力学性能对比研究[J]. 精密成形工程, 2023, 15(9): 99-107.
SHAO G H, YANG K, ZOU X D, et al. Comparative Study of Microstructure and Mechanical Properties in CMT Repair Layers on Surface of Steam Turbine Rotor[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(9): 99-107.
- [19] 赵文勇, 曹熙勇, 杜心伟, 等. CMT 电弧增材制造过程传热传质数值模拟[J]. 机械工程学报, 2022, 58(1): 267-276.
ZHAO W Y, CAO X Y, DU X W, et al. Numerical Simulation of Heat and Mass Transfer in CMT-Based Additive Manufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(1): 267-276.
- [20] LIU Y, LI B, ZHANG W G, et al. Interfacial Behavior of Copper/Steel Bimetallic Composites Fabricated by CMT-WAMM[J]. Coatings, 2024, 14(7): 756.
- [21] 薛冰, 雷卫宁, 刘骁, 等. 低碳钢电弧熔覆增材层摩擦磨损及抗腐蚀性能[J]. 表面技术, 2020, 49(9): 225-232.
XUE B, LEI W N, LIU X, et al. Friction and Wear Resistance and Corrosion Resistance of Low Carbon Steel Arc Welding Additive Layer[J]. Surface Technology, 2020, 49(9): 225-232.
- [22] LI K, LI B X, ZHU L, et al. Optimizing Microstructure and Strength of CMT-Wire Arc Additive Manufactured WE43 Mg Alloy through a Novel Active Cooling Technique[J]. Thin-Walled Structures, 2024, 205: 112453.
- [23] RAJESH KANNAN A, MOHAN KUMAR S, PRAMOD R, et al. Metallurgical Aspects and Electrical Resistivity of Hardfaced Pure Copper Layers over AISI 347 with Cold Metal Transfer Process[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2023, 237(1): 95-102.
- [24] WU Y M, WANG X H, ZHANG J T, et al. A Comparative Study of Interface Characteristics and Properties of Bronze Coatings on Steel by Plasma Arc and Cold Metal Transition Deposition[J]. Applied Physics A, 2024, 130(2): 134.
- [25] PÉPE N, EGERLAND S, COLEGROVE P A, et al. Measuring the Process Efficiency of Controlled Gas Metal Arc Welding Processes[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2011, 16(5): 412-417.
- [26] 高如超. 脉冲 GTAW 和 CMT 焊接过程传热、传质现象的数值模拟[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
GAO R C. Numerical Simulation of Heat and Mass Transfer[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [27] 刘缙, 王克鸿, 徐程, 等. 电弧增材镍铝青铜的组织与性能[J]. 焊接学报, 2024, 45(8): 103-109.
LIU J, WANG K H, XU C, et al. Microstructure and Mechanical Properties of NAB by Wire and Arc Additive Manufacturing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024, 45(8): 103-109.
- [28] 杨威, 高站起, 张海燕, 等. 电弧增材制造 0Cr₁₃Ni₅Mo 不锈钢的组织与性能[J]. 中国表面工程, 2025, 38(3): 297-305.
YANG W, GAO Z Q, ZHANG H Y, et al. Microstructure and Properties of 0Cr₁₃Ni₅Mo Stainless Steel Prepared by Wire Arc Additive Manufacturing[J]. China Surface Engineering, 2025, 38(3): 297-305.
- [29] 周祥曼, 谭晨宇, 赵美云, 等. 电弧增材制造铜铁合金材料组织与性能的研究[J]. 航空制造技术, 2025, 68(15): 121-129.
ZHOU X M, TAN C Y, ZHAO M Y, et al. Study on Microstructure and Properties of Cu-Fe Alloy Fabricated by Wire Arc Additive Manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(15): 121-129.
- [30] 张钢, 李敬勇, 刘健, 等. 热处理对 CMT 电弧增材制造铝青铜组织及力学性能的影响[J]. 塑性工程学报, 2025, 32(2): 213-221.
ZHANG G, LI J Y, LIU J, et al. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum Bronze Manufactured by CMT Arc Additive[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2025, 32(2): 213-221.