

DOI:10.11973/jxgcl240190

工艺参数对氩弧熔覆 TiC+Al₂O₃/Ni 复合涂层稀释率及显微硬度的影响

李思捷,孟君晟,陈志辉,郝晨帆,李钦东

(山东交通学院船舶与港口工程学院,威海 264200)

摘要:采用氩弧熔覆工艺制备了 TiC+Al₂O₃/Ni 复合涂层,通过四因素四水平正交试验,研究了熔覆电流(100, 110, 120, 130 A)、熔覆速度(1, 2, 3, 4 mm·s⁻¹)、电弧长度(1, 2, 3, 4 mm)和氩气流量(8, 10, 12, 14 L·min⁻¹)对涂层稀释率和显微硬度的影响,获取最佳工艺参数,并对比分析了不同工艺参数下涂层的物相组成和显微组织。结果表明:稀释率和显微硬度的主要影响因素分别为熔覆速度和熔覆电流;随着熔覆速度增大,稀释率减小,显微硬度先增大后减小;随着熔覆电流增加,稀释率增大,显微硬度先增大后减小;随着电弧长度增加,稀释率减小,显微硬度先减小后增大;氩气流量对稀释率和显微硬度的影响较小;最佳熔覆工艺参数为熔覆电流 120 A,熔覆速度 2 mm·s⁻¹,电弧长度 2 mm,氩气流量 12 L·min⁻¹,此条件下制备的涂层组织细小且均匀,显微硬度最大,为 680.9 HV。

关键词: 氩弧熔覆; 工艺参数; 复合涂层; 稀释率; 显微硬度

中图分类号: TG174.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2024)10-0035-06

0 引言

作为一种碳素结构钢,Q235钢的碳含量适中、综合性能好、成本低,被广泛用于化工、船舶、车辆等领域^[1-2]。然而,Q235钢硬度较低、耐磨性差,易发生磨损失效^[3-4]。通过表面熔覆技术在其表面制备与基体呈冶金结合的复合涂层,可以改善Q235钢的耐磨性能^[5-6]。目前常用的表面熔覆技术包括激光熔覆、等离子熔覆、氩弧熔覆等,其中氩弧熔覆技术具有优异的熔池保护性能和简便的操作流程^[7-9]。

在氩弧熔覆复合涂层过程中,基体材料、熔覆粉末和工艺参数等因素会对涂层形貌和性能产生一定影响^[10-11],其中工艺参数的影响较大,因此工艺参数的选取至关重要^[12-13]。时海芳等^[14]通过调控氩弧熔覆电流、熔覆速度、氩气流量和电弧长度等参数在Q235钢上制备镍基复合涂层,发现熔覆电流对焊缝

尺寸及组织影响最大,焊接速度和氩气流量影响较小。MENG 等^[15]采用不同氩弧熔覆工艺参数制备 TiN-TiB₂纳米晶涂层,发现当熔覆电流为 120 A 时纳米晶涂层的平均显微硬度为 1 420 HV,耐磨性较基体显著提高。诸葛翔飞^[16]分析了熔覆电流和熔覆速度对氩弧熔覆涂层力学性能和物相组成的影响,发现涂层硬度随熔覆电流减小或熔覆速度增大而升高。由上可知,优化工艺参数对提高涂层性能有着重要意义。目前,氩弧熔覆工艺参数对涂层稀释率和显微硬度等性能影响的研究还不够深入,需要进一步研究。

TiC+Al₂O₃/Ni 复合涂层是一种通过氩弧熔覆技术制备的高性能涂层,具有优异的耐磨性能。作者在 Q235 钢基体表面制备了 TiC+Al₂O₃/Ni 氩弧熔覆复合涂层,通过设计四因素四水平正交试验,以稀释率和显微硬度作为响应,对熔覆电流、熔覆速度、电弧长度和氩气流量 4 个工艺参数进行优化,得到最佳工艺参数,并对比分析了不同工艺参数下涂层的物相组成和显微组织。

1 试样制备与试验方法

基体材料为 Q235 钢,尺寸为 80 mm×15 mm×10 mm,化学成分见表 1。基体经砂纸打磨后用无水

收稿日期: 2024-04-11; 修訂日期: 2024-09-12

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2020KF024); 浙江省水利水电装备表面工程技术研究重点实验室开放课题资助(20240302); 山东省大学生创新创业训练计划项目(S202311510154, S202311510210, S202311510274); 山东交通学院研究生科技创新项目(2024YK103)

作者简介: 李思捷(2000—),女,山东济宁人,硕士研究生

通信作者(导师): 孟君晟副教授

乙醇清洗。按照质量比为 4:1:20 称取钛粉、Ni60A 合金粉、石墨烯粉, 混合后, 与 Al₂O₃ 粉按照质量比 95:5 进行配料, 置于 XQM-4 型行星式球磨机中混合均匀, 球料质量比为 15:1, 转速为 300 r·min⁻¹, 在混合粉中加入黏结剂(胶水)调和, 涂覆于基体表面, 涂覆厚度约为 1 mm, 自然干燥 24 h 后置于烘干炉内 110 °C 下干燥 150 min, 采用 ITG500AP 型氩弧焊机进行熔覆制备 TiC+Al₂O₃/Ni 复合涂层, 熔覆电极为直径 2 mm 的铈钨电极, 钨极角度为 60°, 保护气体为氩气, 纯度为 99.9%, 熔覆过程如图 1 所示。设计了四因素四水平(见表 2)的正交试验对工艺参数进行优化。

表 1 Q235 钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of Q235 steel

元素	C	Mn	Si	S	P	Fe
质量分数/%	≤0.22	≤0.7	≤0.3	≤0.05	≤0.045	余

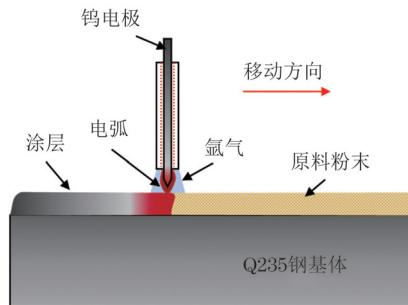


图 1 氩弧熔覆过程示意

Fig. 1 Diagram of argon arc cladding process

表 2 正交试验因素和水平

Table 2 Orthogonal test factors and levels

水平	熔覆电流 / A	熔覆速度 / (mm·s ⁻¹)	电弧长度 / mm	氩气流量 / (L·min ⁻¹)
1	100	1	1	8
2	110	2	2	10
3	120	3	3	12
4	130	4	4	14

稀释率是影响熔覆涂层显微硬度等性能的重要因素, 因此以这两者作为响应。熔覆涂层横截面结构示意如图 2 所示, 稀释率的计算公式为

$$\eta = \frac{S_2}{S_z} = \frac{S_2}{S_t + S_2 - S_1} \quad (1)$$

$$S_1 = l_1 R_1 / 2 - L_1 (R_1 - h_1) / 2 \quad (2)$$

$$S_2 = l_2 R_2 / 2 - L_2 (R_2 - h_2) / 2 \quad (3)$$

式中: η 为稀释率; S_2 为熔合区面积; l_1, l_2 分别为涂层区弧长和熔合区弧长; L_1, L_2 分别为涂层区弦长和

熔合区弦长; S_z 为两弧 l_1, l_2 与两斜边所围成的涂层面积; S_t 为两弦 L_1, L_2 与两斜边所围面积; S_1 为弧 l_1 和弦 L_1 所围面积; R_1, R_2 分别为涂层区弧和熔合区弧的半径; h_2 为熔深; h_1 为弦高。

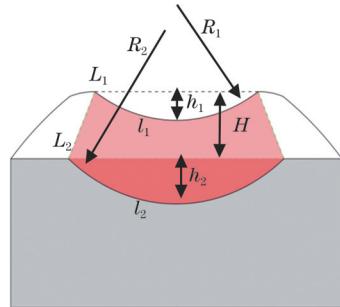


图 2 涂层横截面结构示意

Fig. 2 Coating cross-section structure diagram

采用 DX-2700BH 型 X 射线衍射仪(XRD)对涂层进行物相分析, 铜靶, K_a 射线, 波长为 0.154 nm, 管电压为 40 kV, 工作电流为 40 mA, 扫描速率为 6 (°)/min, 衍射角范围为 20°~90°。在熔覆涂层上沿横向采用线切割制取尺寸为 15 mm×15 mm×10 mm 的金相试样, 经研磨、抛光, 用体积比为 30:3:1 的 C₂H₅OH+HNO₃+HF 混合溶液腐蚀 30 s 后, 采用 EVO MA10 型扫描电子显微镜(SEM)观察显微组织。采用 HV-1000A 型显微硬度测试仪测试显微硬度, 载荷为 1.96 N, 保载时间为 10 s, 从距熔覆层上表面 0.2 mm 处开始取点测试, 沿涂层的最大熔深方向由熔覆层至基体每隔 0.3 mm 取点, 相同深度处测试 3 点取平均值。

2 试验结果与讨论

2.1 正交试验结果

不同熔覆工艺条件下复合涂层的稀释率以及距表面 0.2 mm 处的显微硬度如表 3 所示, 极差分析结果如表 4 所示。由表 4 可知: 对稀释率的影响程度由大到小依次为熔覆速度、熔覆电流、电弧长度、氩气流量; 随着熔覆速度增加, 涂层稀释率减小, 这是由于熔覆速度增加会减少热源停留时间, 导致基体吸收的热量减少, 稀释率减小; 随着熔覆电流增加, 稀释率增大, 这是由于熔覆电流增加会使输入的热量增加, 基体熔化区域增加; 随着电弧长度增加, 稀释率减小, 这是由于电弧长度增加意味着钨极到试样的工作距离增大, 热量损失增加, 基体吸收热量减少; 氩气流量对稀释率影响较小。根据稀释率指标, 最优工艺参数组合为熔覆电流 100 A, 熔覆速度 4 mm·s⁻¹, 电弧长度 4 mm, 氩气流量 12 L·min⁻¹。

表3 正交试验结果

Table 3 Orthogonal test result

编号	熔覆电流/A	熔覆速度/(mm·s ⁻¹)	电弧长度/mm	氩气流量/(L·min ⁻¹)	误差列	稀释率/%	显微硬度/HV
1	100	1.0	1.0	8	1	71.1	556.9
2	100	2.0	2.0	10	2	17.5	531.0
3	100	3.0	3.0	12	3	26.2	534.8
4	100	4.0	4.0	14	4	20.7	466.2
5	110	1.0	2.0	12	4	52.0	572.0
6	110	2.0	1.0	14	3	24.2	639.9
7	110	3.0	4.0	8	2	24.1	551.2
8	110	4.0	3.0	10	1	41.7	395.2
9	120	1.0	3.0	14	2	47.9	563.8
10	120	2.0	4.0	12	1	60.8	608.4
11	120	3.0	1.0	10	4	37.7	671.7
12	120	4.0	2.0	8	3	16.1	619.3
13	130	1.0	4.0	10	3	70.5	569.2
14	130	2.0	3.0	8	4	50.4	593.9
15	130	3.0	2.0	14	1	47.6	589.7
16	130	4.0	1.0	12	2	52.8	576.6

表4 TiC+Al₂O₃/Ni 复合涂层稀释率和距表面 0.2 mm 处显微硬度的极差分析结果

Table 4 Range analysis results of dilution rate and microhardness at position 0.2 mm away from

surface of TiC+Al₂O₃/Ni composite coating

响应	水平	熔覆电流	熔覆速度	电弧长度	氩气流量
稀释率/%	1	33.9	60.4	55.3	46.4
	2	35.5	38.2	40.2	44.0
	3	40.6	33.9	35.6	33.3
	4	55.3	32.8	34.2	41.6
极差		21.4	27.5	21.1	13.1
显微硬度/HV	1	522.2	565.5	611.3	580.3
	2	539.6	593.6	578.0	541.8
	3	615.8	586.9	521.9	573.0
	4	582.4	514.3	548.8	564.9
极差		93.6	79.0	89.4	38.5

对显微硬度的影响程度由小到大为熔覆电流、电弧长度、熔覆速度、氩气流量;随着熔覆电流增加,显微硬度先增大后减小,这是由于熔覆电流的增加释放出更多热量,促使熔池内反应更完全,提高了显微硬度,但熔覆电流过大时,合金元素在涂层的占比减小,导致涂层显微硬度减小;随着电弧长度增加,显微硬度先减小后增大,这是由于电弧长度的增加会使熔池内热量不足导致反应不完全,但当电弧长度增加到一定值后,由于熔池温度的进一步降低,冷却速率变慢,这可能导致局部区域的再结晶或相变,

从而增大显微硬度,但电弧长度过大不能确保熔覆质量;随着熔覆速度增加,显微硬度先增大后减小,这是由于随着熔覆速度增加,熔覆层冷却速率加快,有助于细化晶粒从而提高显微硬度,但熔覆速度过快会使输入的热量减少,导致熔池内反应不完全,从而降低显微硬度;氩气流量对显微硬度影响较小。根据显微硬度指标,最优工艺参数组合为熔覆电流 120 A, 熔覆速度 2 mm·s⁻¹, 电弧长度 1 mm, 氩气流量 12 L·min⁻¹。

稀释率过小,会导致涂层与基体之间的结合

强度较差, 稀释率过大则会有过多的基体元素进入涂层, 使熔覆合金元素在涂层的占比减小, 导致显微硬度降低。为保证适中的稀释率和较高的显微硬度, 最佳工艺参数组合为熔覆电流 120 A, 熔覆速度 2 mm·s⁻¹, 电弧长度 2 mm, 氩气流量 12 L·min⁻¹。

2.2 复合涂层物相组成及显微组织

由图 3 可见: 最佳工艺参数下制备的 TiC+Al₂O₃/Ni 复合涂层的物相主要包括 Al₂O₃、M₂₃C₆、TiC 以及 NiAl 相; NiAl 相衍射峰强度较小, 这是由于 Al₂O₃受热后仅部分分解, 导致进入熔池的铝元素较少, 另一部分仍以半熔状态分布在涂层内。

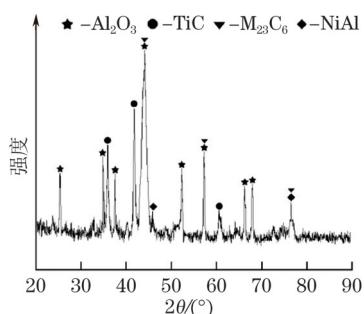


图 3 最佳工艺参数下 TiC+Al₂O₃/Ni 复合涂层的 XRD 谱

Fig. 3 XRD pattern of TiC+Al₂O₃/Ni composite coating under optimal process parameters

选取稀释率最小的工艺参数组合(熔覆电流 100 A, 熔覆速度 4 mm·s⁻¹, 电弧长度 4 mm, 氩气流量 12 L·min⁻¹)为较优工艺参数。由图 4 结合 XRD 谱可知: 较优工艺参数下制备的涂层中生成了一定数量的白色 TiC 颗粒相且分布较均匀; 相比较优工艺参数下, 最佳工艺参数下制备的涂层中 TiC 颗粒相的尺寸更细小且分布更均匀, 多呈块状, 少量类花瓣状。最佳工艺参数下单位时间内释放热量可使反应更完全, 部分 Al₂O₃受热分解, 释放铝元素进

入熔池, 改善熔池流动性, 使涂层组织得到细化^[17]。

2.3 复合涂层显微硬度

由图 5 可见: 较优工艺参数和最佳工艺参数下复合涂层的截面显微硬度分布趋势相似, 均呈随距表面距离增加先升高后降低的趋势。热影响区显微硬度迅速下降的原因是熔覆粉末与基体之间发生渗透作用, 使基体中的一些元素被稀释, 受热后, 部分组织转化为马氏体。较优工艺参数下涂层厚度为 1 mm, 硬度平均值为 613.5 HV; 最佳工艺参数下涂层厚度增加至 1.2 mm, 硬度平均值增大到 680.9 HV。这是因为在最佳工艺条件下, 涂层内部反应更充分, 均匀分布的增强相使得硬度分布均衡, 产生的弥散强化提高了硬度水平。

3 结 论

(1) 对 TiC+Al₂O₃/Ni 复合涂层稀释率的影响程度按从大到小排序为熔覆速度、熔覆电流、电弧长度、氩气流量, 对显微硬度的影响程度按从大到小排序为熔覆电流、电弧长度、熔覆速度、氩气流量。随着熔覆速度增大, 稀释率减小, 显微硬度先增大后减小; 随着熔覆电流增加, 稀释率增大, 显微硬度先增大后减小; 随着电弧长度增加, 稀释率减小, 显微硬度先减小后增大; 氩气流量对两者影响较小。

(2) 综合考虑稀释率和硬度指标, 确定最佳工艺参数为熔覆电流 120 A, 熔覆速度 2 mm·s⁻¹, 电弧长度 2 mm, 氩气流量 12 L·min⁻¹。

(3) 相比以稀释率最小为指标获得的较优工艺参数(熔覆电流 100 A, 熔覆速度 4 mm·s⁻¹, 电弧长度 4 mm, 氩气流量 12 L·min⁻¹), 最佳工艺参数下制备的涂层中 TiC 颗粒的尺寸更细小且分布更均匀, 涂层厚度更大, 为 1.2 mm, 显微硬度更大, 为 680.9 HV。

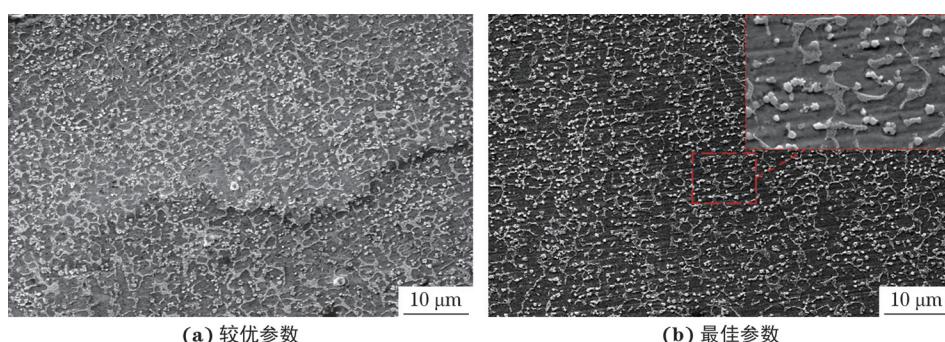
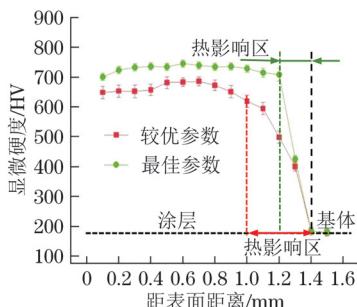


图 4 不同工艺参数下 TiC+Al₂O₃/Ni 复合涂层的显微组织

Fig. 4 Microstructures of TiC+Al₂O₃/Ni composite coating under different process parameters:
(a) relatively good parameters and (b) optimal parameters

图 5 不同工艺参数下 TiC+Al₂O₃/Ni 复合涂层纵截面显微硬度分布Fig. 5 Microhardness distribution on longitudinal section of
TiC+Al₂O₃/Ni composite coating under different
process parameters

参考文献:

- [1] WANG S S, SHI W Q, CHENG C, et al. Effect of process parameters on microstructure and properties of laser cladding Ni60+30%WC coating on Q235 steel[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2023, 16(22): 7070.
- [2] XIE R Z, GENG R C, ZHANG Q, et al. Investigation of Q235 steel electrochemical corrosion behavior in naturally dried sandy soil[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2023, 18(12): 100376.
- [3] LU P Z, JIA L, ZHANG C, et al. Optimization on laser cladding parameters for preparing Ni60 coating along with its friction and wear properties[J]. Materials Today Communications, 2023, 37: 107162.
- [4] GAO K, ZHANG Y, YI J H, et al. Overview of surface modification techniques for titanium alloys in modern material science: A comprehensive analysis[J]. Coatings, 2024, 14(1): 148.
- [5] 丁涛, 张云华, 李俊杰, 等. 不锈钢表面激光熔覆技术研究现状与展望[J]. 金属热处理, 2022, 47(2): 205-212.
- [6] AHMAD SIDDIQUI A, DUBEY A K. Recent trends in laser cladding and surface alloying[J]. Optics and Laser Technology, 2021, 134: 106619.
- [7] ZHAO P F, SHI Z M, WANG X F, et al. A review of the laser cladding of metal-based alloys, ceramic-reinforced composites, amorphous alloys, and high-entropy alloys on aluminum alloys[J]. Lubricants, 2023, 11(11): 482.
- [8] 孟君晟. 氩弧熔覆 TiB₂+TiN/Ni 涂层的微观结构与摩擦学行为[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.
- MENG J S. Microstructure and tribological behavior of TiB₂+TiN/Ni coatings by argon arc cladding[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2016.
- [9] 王磊. 石墨烯对氩弧熔覆镍基涂层组织与性能的影响[J]. 黑龙江科技大学学报, 2022, 32(6): 759-764.
- WANG L. Effect on microstructure and properties of Ni based coating by argon arc cladding with graphene[J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2022, 32(6): 759-764.
- [10] 时海芳, 李强, 刘忆. Si 含量对氩弧熔覆 AlCuFeNiCoSi_x 高熵合金涂层组织及性能的影响[J]. 材料保护, 2022, 55(5): 18-22.
- SHI H F, LI Q, LIU Y. Effect of Si Content on Structure and Properties of AlCuFeNiCoSi_x High-Entropy Alloy Coating[J]. Journal of Materials Protection, 2022, 55(5): 18-22.
- [11] 陈鑫辉, 董定乾, 顾金宝, 等. TiC 钢结硬质合金的研究现状及展望[J]. 稀有金属与硬质合金, 2023, 51(6): 96-101.
- CHEN X H, DONG D Q, GU J B, et al. Research status and prospect of TiC steel-bonded cemented carbides[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2023, 51(6): 96-101.
- [12] GHOSH G, AGRAWAL S, SAIGAL A, et al. Effect of process parameters on the porosity in laser-directed energy deposition of Al₂O₃ reinforced Inconel-based composite coating[J]. Manufacturing Letters, 2023, 35: 683-688.
- [13] HUANG J, ZHU Z K, SHI W Q, et al. Microstructure and properties analysis of Ni60-based/WC composite coatings prepared by laser cladding[J]. Heliyon, 2024, 10(2): e24494.
- [14] 时海芳, 柳凤恩, 柳鑫恩, 等. 工艺参数对氩弧熔覆焊缝尺寸及组织影响的研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2014, 37(6): 55-58.
- SHI H F, LIU F E, LIU X E, et al. Effect of process parameters on size and microstructure of argon arc cladded weld[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2014, 37(6): 55-58.
- [15] 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: 135-142.
- [16] 诸葛翔飞. FeCoNiCrTiV_x 系高熵合金双钨极氩弧熔覆涂层的组织与性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.
- ZHUGE X F. Microstructure and properties of FeCoNiCrTiV_x high entropy alloy prepared by twin-electrode TIG cladding[D]. Jinan: Shandong

University, 2022.

- [17] 焦玉凤, 金大明, 宁国辉, 等. 铸造/SHS 法制备 TiC-Al₂O₃ 钢基表面复合层的研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2012, 30(3): 387-389.

JIAO Y F, JIN D M, NING G H, et al. The study of TiC-Al₂O₃/Fe surface composite with SHS casting process[J]. Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition), 2012, 30(03): 387-389.

Effect of Process Parameters on Dilution Rate and Microhardness of Argon Arc Cladding TiC+Al₂O₃/Ni Composite Coating

LI Sijie, MENG Junsheng, CHEN Zhihui, HAO Chenfan, LI Qindong

(School of Naval Architecture and Port Engineering, Shandong Jiaotong University, Weihai 264200, China)

Abstract: TiC+Al₂O₃/Ni composite coating was prepared by argon arc cladding. Four factors and four levels orthogonal test were designed. The effect of cladding current (100, 110, 120, 130 A), cladding velocity (1, 2, 3, 4 mm·s⁻¹), arc length (1, 2, 3, 4 mm) and argon flow rate (8, 10, 12, 14 L·min⁻¹) on coating dilution rate and microhardness was studied, and the optimal process parameters were obtained. The phase composition and microstructure of the coating under different process parameters were compared and analyzed. The results show that the main influencing factors of dilution rate and microhardness were cladding velocity and cladding current, respectively. With the increase of the cladding velocity, the dilution rate decreased, and the microhardness increased first and then decreased. With the increase of cladding current, the dilution rate increased, and the microhardness increased first and then decreased. With the increase of arc length, the dilution rate decreased and the microhardness first decreased and then increased. Argon flow rate had little effect on the dilution rate and microhardness. The optimal cladding parameters were as follows: cladding current of 120 A, cladding speed of 2 mm·s⁻¹, arc length of 2 mm, argon flow of 12 L·min⁻¹. The microstructure of the coating prepared under optimal parameters was fine and uniform, and the microhardness reached the maximum of 680.9 HV.

Key words: argon arc cladding; process parameters; composite coating; dilution rate; microhardness