

堆焊工艺参数与碳化钨含量对镍基碳化钨涂层性能的影响研究^①

王俊杰¹, 杨军^{1,2}, 邹德宁^{1,2}, 李新涛¹, 米小雨¹

(1.西安建筑科技大学冶金工程学院,陕西西安710055; 2.陕西省冶金工程技术研发中心,陕西西安710055)

摘要:以Ni35复合WC粉末为原料,采用等离子堆焊工艺在Q235A低碳钢表面制备了镍基复合碳化钨涂层,研究了焊接电流、WC含量对复合涂层性能的影响。结果表明,降低堆焊电流,减少热量输入,可以有效防止WC沉积。在研究范围内,WC含量低的样品WC沉积明显,而WC含量高的样品中WC分布较均匀。Ni35复合WC涂层相组成主要为 γ -Ni(Cr,Fe)相、 γ -(Ni,Fe)基体相,第二相WC,弥散相 Cr_3C_2 、 Cr_7C_3 、 FeNi_3 和 W_2C 。在焊接电流一定时,随着WC含量增加,堆焊涂层硬度增大;涂层中WC含量相同时,随着堆焊电流降低,涂层硬度上升。在大焊接电流(210 A)下,随着镍基涂层中WC含量增加,样品磨损量逐渐增大;在小焊接电流(195 A)下,随着WC含量增加,样品磨损量降低;当涂层中WC含量相同时,随着堆焊电流降低,样品磨损量降低。

关键词:等离子堆焊;碳化钨;涂层;相结构;摩擦磨损;焊接电流;固溶强化;弥散强化

中图分类号: TG455

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2020.04.033

文章编号: 0253-6099(2020)04-0130-05

Influence of Surfacing Process Parameters and Tungsten Carbide Content on Properties of Nickel-Based Tungsten Carbide Coatings

WANG Jun-jie¹, YANG Jun^{1,2}, ZOU De-ning^{1,2}, LI Xin-tao¹, MI Xiao-yu¹

(1.School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China; 2.Shaanxi Research Center of Metallurgical Engineering and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

Abstract: With Ni35 composite WC powder as the raw material, a nickel-based composite tungsten carbide coating was prepared on the surface of Q235A low-carbon steel by plasma transferred arc (PTA) process, and the effects of welding current and WC content on the performance of the composite coating were studied. The results show that WC deposition can be effectively prevented by reducing the surfacing current and decrease the heat input. The samples with low WC content has an obvious WC deposition, while the samples with high WC content has more uniform WC distribution. The phase composition of Ni35 composite WC coating mainly consists of γ -Ni(Cr,Fe) phase, γ -(Ni,Fe) matrix phase, the second phase (WC) and dispersed phases (Cr_3C_2 , Cr_7C_3 , FeNi_3 and W_2C). When the welding current is constant, the hardness of the surfacing coating increases with the increasing of the WC content. When the WC content in the coating is constant, the hardness of the coating increases with the decreasing of the surfacing current. With the high welding current (210 A), the wear loss of the sample gradually increases with an increase in the content of WC in the nickel-based coating, while with lower welding current (195 A), the wear loss of the sample decreases with an increase in the WC content. When the WC content in the coating is constant, the wear loss of the sample decreases with the decreasing of the surfacing current.

Key words: plasma surfacing; tungsten carbide; coating; phase structure; frictional wear; welding current; solid solution strengthening; dispersion strengthening

等离子堆焊工艺可将高性能涂层制备于成本低的基材表面,实现表面强化,所得涂层具有与母材结合力

强、稀释率低、厚度可调、成分可控等优点^[1-3],被广泛应用于材料的维修和防护。制备具有优异耐磨性能的

① 收稿日期: 2020-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(51774226, U1460104)

作者简介: 王俊杰(1993-),男,陕西宝鸡人,硕士研究生,主要研究方向为材料表面耐磨性能提升及表面强化。

通讯作者: 杨军(1962-),男,陕西西安人,博士,教授,主要从事连铸新技术及先进材料等领域的教学与科研工作。

陶瓷颗粒增强金属基复合涂层,近几年受到广泛关注。陶瓷颗粒增强相主要有 WC^[4-5]、TiC^[6]、Cr₃C₂^[7-8]、SiC^[9]等。其中 WC 颗粒因具有硬度大、熔点高,对金属基体有很好的润湿性而被广泛使用^[10],但 WC 由于密度大而带来的沉积问题至今未很好解决。本文以 Ni35 复合 WC 粉末为原料,采用等离子堆焊法在 Q235A 低碳钢表面制备镍基复合碳化钨涂层,研究了焊接电流、WC 含量对涂层性能的影响。

1 试验

1.1 试验材料及工艺参数

本次试验选用的基体材料为 Q235A 低碳钢,尺寸为 $\Phi 90 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 。镍基堆焊层采用的镍基合金粉末为 Ni35+WC。3 种粉末的粒度均为 50~150 μm ,其化学成分等相关参数列于表 1。等离子堆焊前,对 Q235A 基底材料的堆焊面进行砂纸打磨,去除表面氧化皮等杂质,然后用丙酮清洗表面残留油污。焊接前,采用球磨机将 Ni35 和 WC 粉末机械混合,合金粉末在堆焊前置于 150 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中干燥 2 h。采用上海多木实业有限公司生产的 DML-V03CD 等离子转移弧堆焊机进行堆焊,堆焊工艺参数见表 2。

表 1 材料化学成分、密度及硬度

材料类别	化学成分(质量分数)/%	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	硬度
Q235A	C 0.14~0.22; Mn 0.30~0.65; Si \leq 0.30; P \leq 0.045; Fe 余量	7.85	\leq 10HRC
Ni35	C 0.3; Cr 8.0~15.0; Si 2.8~3.8; B 1.5~2.5; Fe 1.5~2.5; Ni 余量	7.5	35HRC
WC	WC \geq 99.3; W、C 等余量	15.63	1 620HV

表 2 等离子堆焊工艺参数

工作电流/A	送粉速率/($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	工装转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	送粉气/($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	离子气/($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	保护气/($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)
195	40	4 000	5.5	3.5	10
210	40	4 000	5.5	3.5	10

1.2 试验方法

采用 Ni35 复合 WC 粉末作为原材料,按表 3 配比及电流参数进行等离子堆焊涂层的制备。电流参数及 WC 含量的选取依据堆焊操作人员经验。

采用线切割获取涂层截面部分试样,尺寸为 15 mm \times 4.5 mm,并依次采用 80[#]~2000[#] SiC 磨盘逐级打磨,然后用 Al₂O₃ 抛光剂进行抛光,最后用王水腐蚀 15 s。采用 SEM 观察试样涂层组织结构及 WC 分布,并借助 SEM 自带的 EDS 系统判断微观结构的元素配比。对

表 3 试验材料类型

编号	配比(质量分数)	电流/A
1	Ni35+10%WC	210
2	Ni35+20%WC	210
3	Ni35+30%WC	210
4	Ni35+10%WC	195
5	Ni35+20%WC	195
6	Ni35+30%WC	195

SEM 样品表面重新打磨、抛光,再进行 XRD 分析。

采用显微硬度计测量试样截面硬度,载荷为 200g,保载时间为 10 s,沿截面高度方向每隔 0.25 mm 打 1 个点,打 3 组数据求平均值。

6 组摩擦磨损试样尺寸为 20 mm \times 15 mm \times 4.5 mm,其中 20 mm \times 15 mm 的涂层上表面作为摩擦磨损试验面。试验前先将 6 组试验面采用 800[#]磨盘打磨成统一粗糙度,用酒精清洗,用吹风机吹干,避免外界因素影响。摩擦磨损试验在德国布鲁克 UMT-3MT-2 摩擦磨损试验机上进行,涂层摩擦学性能的测试采用直线往复式干滑动摩擦磨损,往复试验摩擦副为硬度 57~59HRC、直径 8 mm 的 440-C 不锈钢球,试验载荷 40 N,往复距离 5 mm,往复速度 50 mm/s,测试时间 30 min。动态摩擦系数通过 UMT 试验机直接获取,并采用 Origin 软件绘图。每组样品的磨损量采用精度为 0.000 01 的天平测量。

2 结果与讨论

2.1 显微物相及组织

Ni35 复合 WC 制备的等离子堆焊涂层,由于增强相 WC 密度(15.63 g/cm^3)远大于黏接相 Ni35 的密度(7.5 g/cm^3),堆焊层会出现严重的碳化钨沉积现象,涂层中颗粒分布和组织不均匀将影响涂层的耐磨性能。

图 1 为各等离子堆焊涂层横截面 SEM 形貌图。从图 1 看出,大电流(210 A)条件下焊接涂层中,WC 含量较少的样品 1 和样品 2 出现了明显的 WC 沉积,含量较大的样品 3 中 WC 分布较为均匀。小电流(195 A)条件下焊接涂层中,WC 含量较小的样品 4 中 WC 沉积现象比较严重,含量较大的样品 5 和 6 中 WC 分布较为均匀。WC 含量越大沉积现象越弱,这是由于 WC 具有较好的热导率,可以加速凝固过程中的热量扩散,凝固加快,阻碍 WC 颗粒下沉。从实际应用角度考虑,样品 3、样品 5 和样品 6 涂层可以在不进行表面切割的情况下直接使用,较为理想。

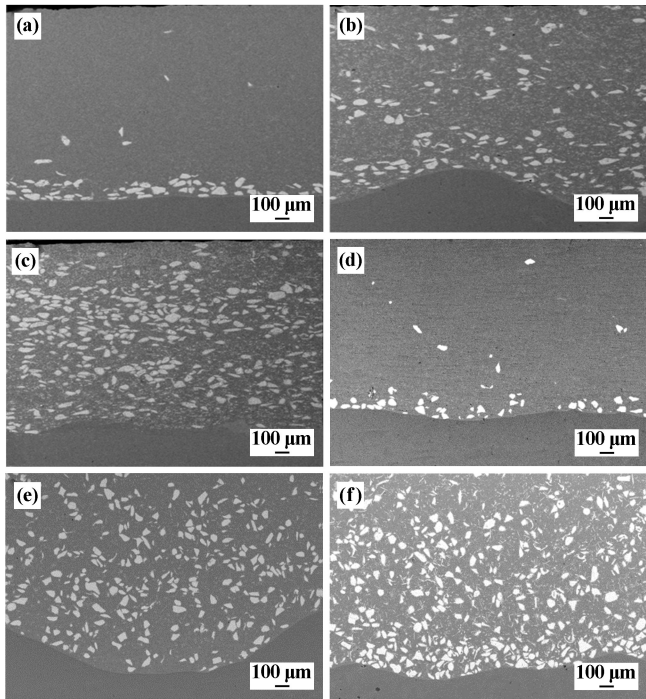


图1 等离子堆焊涂层横截面形貌

(a) 样品1; (b) 样品2; (c) 样品3; (d) 样品4; (e) 样品5; (f) 样品6

图2为各样品涂层的XRD图谱。大电流下,随着WC含量增加,注入涂层的W、C元素量增加,更易于碳化物的生成,主要基体相由固溶了Cr、Fe的 γ -Ni固溶体相逐渐转变为固溶了Fe的 γ -Ni固溶体相,Cr的碳化物、W的碳化物增多,这些碳化物具有较高的硬度,有效提升涂层硬度。比较图2中样品2、样品5的图谱可知,随焊接电流降低,溶入 γ -Ni固溶体中的Cr量减少,主要的基体相为 γ -(Ni,Fe)。

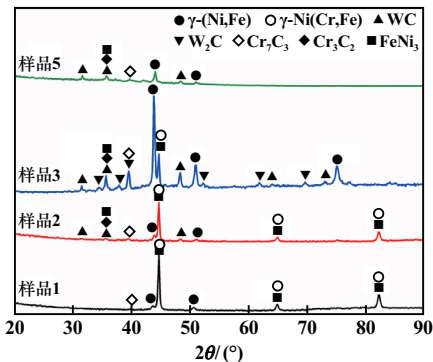


图2 样品XRD图谱

图3为样品2、样品5熔合区到涂层上表面的显微组织图。由图3可见,从熔合区到涂层上表面析出弥散相含量逐渐增加、组织粗大化,在相同位置样品2较样品5的析出相量小、基体相组织粗大。凝固过程

是沿熔合区到表面区方向,熔合区温度梯度大、冷却速度慢,处于高温时间长,大量合金元素溶入 γ -Ni相,固溶强化起主要作用;析出的弥散相极少,弥散强化起次要作用。

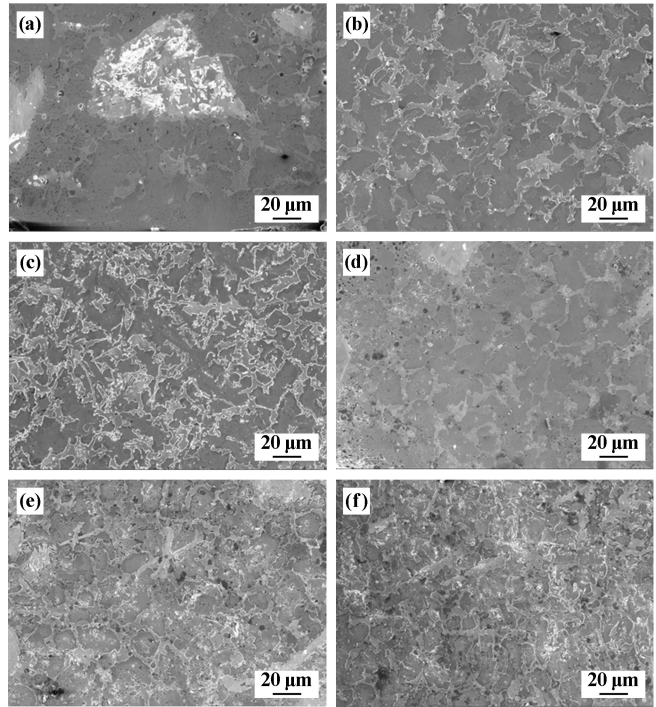


图3 等离子堆焊涂层的横截面组织

(a) 样品2熔合区; (b) 样品2中间区; (c) 样品2表面区; (d) 样品5熔合区; (e) 样品5中间区; (f) 样品5表面区

图4为样品2、样品5堆焊中间层区域特定区域EDS图。结合XRD谱图,可以确定样品2中1、2和3点分别为 W_2C 、 γ -Ni(Cr,Fe)和WC;样品5中的4、5和6点分别为 γ -(Ni,Fe)、Cr的碳化物和WC。证实了样品2中的基体相为 γ -Ni(Cr,Fe)且析出了 W_2C 硬脆

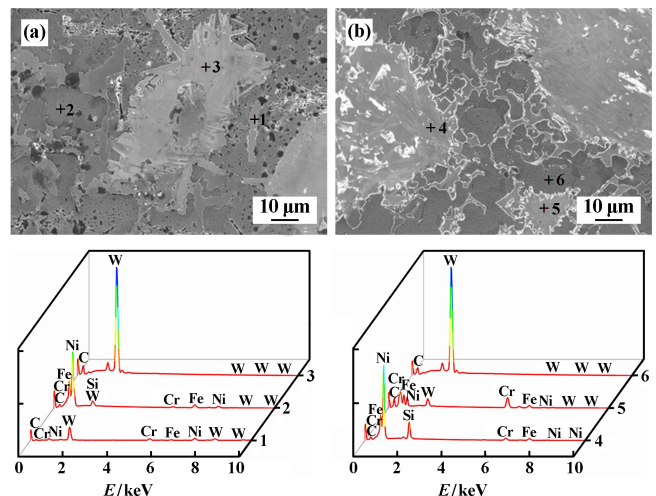


图4 WC增强Ni基涂层试样截面的显微组织及相应点的EDS谱

(a) 样品2; (b) 样品5

相;样品5中的基体相为 γ -(Ni, Fe),主要以Cr的碳化物为弥散相。

2.2 动态摩擦系数

图5为各样品涂层上表面摩擦系数随时间变化的曲线。由图5可见,每组样品的动态摩擦系数都经历初期急速增加、中期缓慢增加、最终趋于稳定的过程。摩擦副表面的状态直接影响摩擦系数的值,摩擦磨损初期,摩擦副接触方式接近于点接触,突然施加的载荷会产生应力集中,使得摩擦方向的阻力增大,同时摩擦磨损面产生塑性变形从而发生涂层表面与磨球齿合、撞击。此阶段的磨损量较大,摩擦系数较小。磨损量的急剧增加使得摩擦副接触面积快速增大,应力集中减弱,摩擦方向的阻力急剧下降,这个过程即为摩擦磨损的磨合期;磨合期产生大量碎屑堆积在涂层上表面,起到了一定的自润滑作用^[11-12],随磨损时间增长,摩擦副接触表面温度上升,涂层上表面软化^[13],两者共同作用,减缓摩擦系数的增长速度。随着摩擦副接触表面状态趋于稳定,摩擦系数在某一数值附近波动。

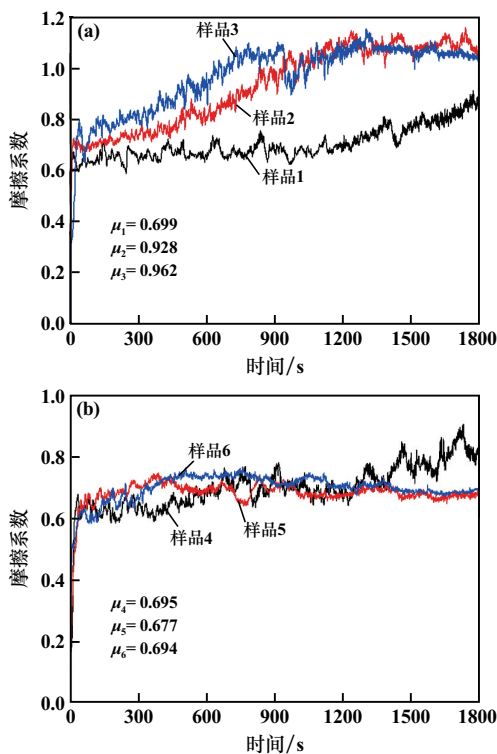


图5 试样摩擦系数与时间的关系曲线

定义 μ 为稳定期平均摩擦系数,由图5(a)可以看出,在大焊接电流下,随着WC含量增加,摩擦系数呈现增加趋势。此焊接电流条件下,作为黏结相的镍基组织较为粗大,力学性能较差,不能在摩擦磨损过程中很好固定住作为增强相的WC颗粒,使得WC颗粒脱落严重,WC含量越多脱落越严重,摩擦副接触表面粗

糙度越大,因而摩擦系数增加。由图5(b)可知,在小焊接电流下,随着WC含量增加,摩擦系数呈现先减小后增大趋势。此电流条件下,黏结相镍基基体组织较为细小,力学性能较好,可以在摩擦磨损过程中较好地固定WC,并且当WC含量为20%时,堆焊上表面WC达到最佳分布,因而样品5的平均摩擦系数最小($\mu_s = 0.677$)。分别比较样品1与4、样品2与5、样品3与6,在相同WC含量下,堆焊电流降低,摩擦系数呈现降低趋势。堆焊电流降低,堆焊层形成的镍基基体组织更加细小,弥散强化相更加丰富,磨损表面镍基基体强度增加,因而摩擦系数减小。

2.3 涂层硬度及磨损量

材料的硬度是研究材料耐磨性能的一个重要指标。图6各样品堆焊层显微硬度分布曲线。由图6可见,堆焊层的显微硬度(均大于300HV)较基材Q235A(约190HV)有明显提高。堆焊层中高硬度的碳化物和硼化物等硬质相及固溶了Cr、Fe等元素的固溶强化奥氏体的存在,使得镍基涂层的硬度明显提升。此外,镍基堆焊层的硬度呈现出波动范围较小的梯度分布。堆焊层上表面的硬度值较熔合线附近处略高,由金属凝固原理知堆焊层凝固是沿熔合区到堆焊层上表面的方向,熔合区附近在凝固过程中散热较慢,长时间处于高温,从而使得合金中原有的元素(Fe、Cr等)很容易固溶于 γ -Ni中形成固溶体,起到固溶强化的作用。而远离熔合区的位置则由于接近涂层上表面,温度梯度

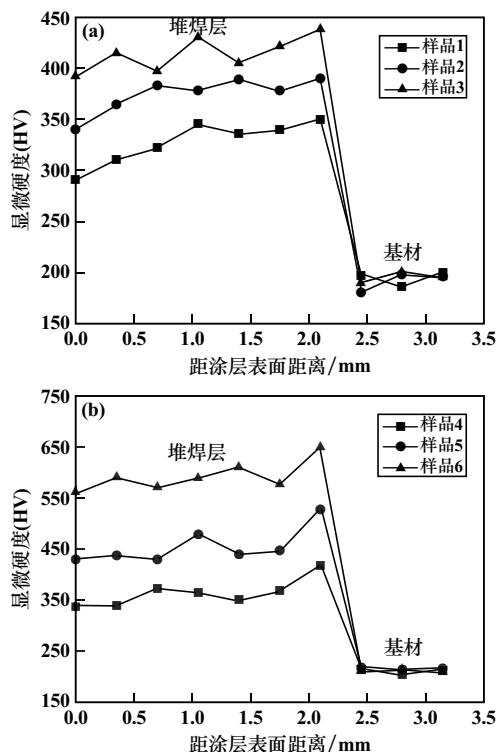


图6 试样横截面的显微硬度曲线

小,散热较快,从而不利于合金原有元素的固溶,形成较多的弥散相,起到弥散强化的作用,较熔合区附近强化效果弱。

在焊接电流一定时,随着 WC 含量增加,堆焊涂层的硬度普遍增大。WC 含量增加使得未溶解的分布于涂层中的高硬度 WC 量增加,同时 WC 受热分解的量增加,从而固溶于 γ -Ni 的 W 量也增加,使得堆焊层硬度提升。对比图 6 中样品 1 与 4、样品 2 与 5、样品 3 与 6,发现堆焊层显微硬度随堆焊温度降低而升高。相同 WC 含量条件下,随着堆焊电流降低,输入涂层热量降低,涂层中基体相 γ -Ni 固溶体晶粒尺寸减小,涂层硬度提升。

试样磨损量是直接表征材料耐磨性能的参数。图 7 为各样品磨损量柱状图。在大焊接电流(210 A)下,随着镍基涂层中 WC 含量增加,试样磨损量逐渐增大。在小焊接电流(195 A)下,WC 含量较大的样品 5、6 较含量较少的样品 4 磨损量明显降低。分别对比样品 1 与 4、样品 2 与 5、样品 3 与 6,在相同 WC 含量条件下,随着堆焊电流降低,样品磨损量降低。其中,样品 5 和样品 6 的磨损量最低(14×10^{-2} mg)。由 Archard 磨损理论可知,堆焊涂层的耐磨性能与其摩擦系数成反比,与其显微硬度成正比。

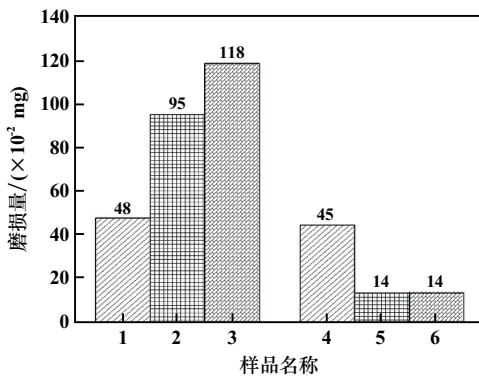


图 7 试样磨损量

3 结 论

1) 通过降低堆焊电流,减少热量输入,可以有效防止 WC 沉积。在研究范围内,WC 含量低的样品 WC 沉积明显,而 WC 含量高的样品中 WC 分布较均匀。

2) Ni35 复合 WC 涂层相组成主要为 γ -Ni (Cr, Fe) 相、 γ -(Ni, Fe) 基体相,第二相 WC,弥散相 Cr_3C_2 、 Cr_7C_3 、 FeNi_3 和 W_2C 。WC 含量增加,WC、 W_2C 、 Cr_3C_2 和 Cr_7C_3 相明显增加。电流降低, γ -(Ni, Fe) 相减少,

基体相组织更加细小,弥散相增加。

3) 在焊接电流一定时,随着 WC 含量增加,堆焊涂层硬度增大;涂层中 WC 含量相同时,随着堆焊电流降低,涂层硬度上升。

4) 在大焊接电流(210 A)下,随着镍基涂层中 WC 含量增加,样品磨损量逐渐增大;在小焊接电流(195 A)下,随着 WC 含量增加,样品磨损量降低。涂层中 WC 含量相同时,随着堆焊电流降低,样品磨损量降低。

参考文献:

- [1] 邓德伟,陈蕊,张洪潮,等. 离子堆焊技术的现状及发展趋势[J]. 机械工程学报, 2013,49(7):106-112.
- [2] 崔华威,崔秀芳,王海斗,等. 反应等离子熔覆原位合成 TiN 复合涂层微观组织及显微硬度研究[J]. 稀有金属, 2014,38(6):999-1004.
- [3] R Venkata Rao. Development of Mathematical Models for Prediction of Weld Bead Geometry for AISI 430 Grade of steel for GMAW welding process[J]. International Journal of Manufacturing Technology and Industrial Engineering, 2011(2):1-6.
- [4] 范丽,陈海萸,刘珊珊,等. 球形 WC 增强铁基复合等离子堆焊层的组织与摩擦学性能[J]. 摩擦学学报, 2018,38(1):17-27.
- [5] Wei Y, Wei X, 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, 2018,28:2511-2519.
- [6] Feng Z, Tang M, Liu Y, et al. In situ synthesis of TiC-TiN-reinforced Fe-base plasma cladding coatings[J]. Surface Engineering, 2017,34:1-7.
- [7] 高胡鹤,丁婷婷,马淑谨,等. 等离子堆焊 Cr_3C_2 /钴基合金涂层的组织结构与耐磨性能研究[J]. 稀有金属, 2016,40(11):1119-1125.
- [8] 斯松华,姜闪闪,王妍妍. Ti 对等离子堆焊 Ni 基 Cr_3C_2 涂层组织与性能的影响[J]. 材料科学与工艺, 2019,27(3):66-70.
- [9] 潘成刚,肖琴,杨虎群,等. 等离子堆焊镍包 SiC_p 增强钴基覆层的组织分析[J]. 特种铸造及有色合金, 2016,36(8):788-791.
- [10] 乔虹,李庆棠,符寒光,等. 激光熔覆原位合成陶瓷相增强铁基熔覆层的组织和性能[J]. 焊接学报, 2015,36(1):67-69.
- [11] 彭思源. WC 颗粒增强铁基复合堆焊层性能研究[D]. 合肥:安徽建筑大学材料与化学工程学院, 2015.
- [12] Liu H Q. Development and characterization of laser clad high temperature self-lubricating wear resistant composite coatings on Ti-6Al-4V alloy[J]. Materials and Design, 2014,55:404.
- [13] 袁建辉,祝迎春,雷强,等. 等离子喷涂制备 WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 自润滑耐磨涂层及其高温摩擦性能[J]. 中国表面工程, 2012,25(2):31-36.

引用本文: 王俊杰,杨军,邹德宁,等. 堆焊工艺参数与碳化钨含量对镍基碳化钨涂层性能的影响研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(4):130-134.