

汽轮机叶片钢超音速火焰喷涂层和 等离子喷焊层性能研究

章友谊

(四川工程职业技术学院, 四川 德阳 618000)

摘 要: **目的** 提高汽轮机叶片钢 1Cr12Ni2W1Mo1V 的抗微粒冲蚀性能和抗水蚀性能。**方法** 利用超音速火焰喷涂技术和等离子喷焊技术在其表面分别制备了 $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr75-25}$ 涂层、WC-10Co-4Cr 涂层和 Stellite 6 合金喷焊层。借助扫描电镜 (SEM) 观察 3 种涂层水蚀凹坑的微观组织形貌, 并对 3 种涂层的显微硬度、抗摩擦磨损性能、抗微粒冲蚀性能和抗水蚀性能进行分析。**结果** 3 种涂层的平均显微硬度较基体均有显著提升, 其中 WC-10Co-4Cr 涂层的平均显微硬度最高, 其值为 $1314.6\text{HV}_{0.05}$ 。以 Stellite 6 合金涂层为摩擦副, $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr75-25}$ 涂层的摩擦系数为 0.5~0.7, 失重 0.0131 g, 而 WC-10Co-4Cr 涂层的摩擦系数为 0.5~0.6, 失重 0.0007 g, 显然 WC-10Co-4Cr 涂层的抗摩擦性能更好。抗微粒冲蚀性能试验中, 最大磨痕深度由深到浅依次为: 基体材料 ($94.658\text{ }\mu\text{m}$)、Stellite 6 合金层 ($85.932\text{ }\mu\text{m}$)、 $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr75-25}$ 涂层 ($81.163\text{ }\mu\text{m}$)、WC-10Co-4Cr 涂层 ($11.864\text{ }\mu\text{m}$)。其对应的磨损率也逐渐减小。表面水蚀沟槽最大深度依次为: 基体材料 ($445\text{ }\mu\text{m}$)、Stellite 6 合金层 ($70\text{ }\mu\text{m}$)、 $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr75-25}$ 涂层 ($80\text{ }\mu\text{m}$)、WC-10Co-4Cr 涂层 ($41\text{ }\mu\text{m}$)。其对应造成的质量损失由 30 mg/cm^2 逐渐变为 3.3 mg/cm^2 。**结论** 3 种涂层均具有一定的抗摩擦磨损性能、抗微粒冲蚀性能和抗水蚀性能, 其中 WC-10Co-4Cr 涂层的各项性能均最佳, 主要是该涂层中弥散分布了大量 WC 硬质相, 使其显微硬度最高, 加之其他相关性能共同作用的结果。

关键词: 超音速火焰喷涂; 等离子喷焊; 涂层; 显微硬度; 抗微粒冲蚀性能; 抗水蚀性能

中图分类号: TG174.453 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)10-0099-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.10.011

Performance of Supersonic Flame Spray Coating and Plasma Spray Welding Layer for Turbine Blade Steel

ZHANG You-yi

(Sichuan Engineering Technical College, Deyang 618000, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the particle erosion resistance and water erosion resistance of turbine blade steel 1Cr12Ni2W1Mo1V. $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr75-25}$ coating, WC-10Co-4Cr coating and Stellite 6 alloy spray welding coating were respectively prepared on the base metal by supersonic flame spraying and plasma spray welding. The microstructures of the three coatings were observed by SEM and the micro-hardness, friction and wear resistance, particle erosion resistance and water

收稿日期: 2020-04-09; 修订日期: 2020-06-11

Received: 2020-04-09; Revised: 2020-06-11

作者简介: 章友谊 (1979—), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为金属材料焊接与表面工程。邮箱: zyy906@qq.com

Biography: ZHANG You-yi (1979—), Male, Master, Associate professor, Research focus: metal material welding and surface engineering. E-mail: zyy906@qq.com

引文格式: 章友谊. 汽轮机叶片钢超音速火焰喷涂层和等离子喷焊层性能研究[J]. 表面技术, 2020, 49(10): 99-105.

ZHANG You-yi. Performance of supersonic flame spray coating and plasma spray welding layer for turbine blade steel[J]. Surface technology, 2020, 49(10): 99-105.

erosion resistance of the three coatings were tested and analyzed. The average micro-hardness of the three coatings was significantly higher than that of the base metal, especially the average micro-hardness of WC-10Co-4Cr coating was the highest, with a value of 1314.6 HV_{0.05}. Stellite 6 alloy coating was used as friction pair, the friction coefficient of Cr₃C₂-NiCr75-25 coating was between 0.5 and 0.7, with a weight loss of 0.0131 g, while that of WC-10Co-4Cr coating was between 0.5 and 0.6 with a weight loss of 0.0007 g. Obviously, WC-10Co-4Cr coating had better friction performance. In the test of particle erosion resistance, the maximum wear mark depth of the coating from deep to shallow was: base metal (94.658 μm), Stellite 6 alloy coating (85.932 μm), Cr₃C₂-NiCr75-25 coating (81.163 μm), and WC-10Co-4Cr coating (11.864 μm). The corresponding wear rates of the coatings were also gradually reduced. The maximum depth of water erosion groove on the surface from deep to shallow was: base metal (445 μm), Stellite 6 alloy coating (70 μm), Cr₃C₂-NiCr75-25 coating (80 μm), and WC-10Co-4Cr coating (41 μm) and the corresponding mass loss gradually changed from 30 mg/cm² to 3.3 mg/cm². The three kinds of coatings have certain friction and wear resistance, particle erosion resistance and water erosion resistance, among which WC-10Co-4Cr coating has the best performance due to the highest micro-hardness caused by the dispersion of a large number of WC hard phase in the coating and the synergistic effect of other related properties.

KEY WORDS: supersonic flame spraying; plasma spray welding; coating; micro-hardness; particle erosion resistance; water erosion resistance

为了适应节约能源和保护环境的新要求,超超临界火电机技术逐渐成为火力发电机组技术的发展方向。但随着汽轮机的参数越来越高,固体颗粒对汽轮机流通部件的侵蚀破坏也更加突出^[1],同时汽轮机叶片长期在极为恶劣的环境下工作,由于蒸汽湿度大,极易遭到水蚀。这些不仅降低了汽轮机的效率,还给汽轮机的正常运行带来了极大的安全隐患^[2-4]。为了有效解决这些问题,国内外学者做了大量的研究工作^[5-9],如用钎焊司太立合金片的方法来提高耐水蚀性能,用激光熔覆的方法制备 Stellite 6 耐水蚀涂层,以及采用超音速火焰喷涂(HVOF)和电弧喷涂来制备抗水蚀涂层等,均获得了较好的抗水蚀效果,但也存在一些不足。例如高频钎焊司太立合金片的一次合格率偏低(30%左右),且司太立合金片与叶片基体贴合不均匀,容易造成钎焊层未熔合和空洞等缺陷较多,进而可能形成疲劳裂纹源;激光熔覆技术设备较贵,不易推广;电弧喷涂层的结合力较低、孔隙率较高等。

HVAF 技术(High Velocity Air-fuel Spraying)粒子速度高(>600 m/s),焰流温度低(<1600 ℃),利用该技术获得的涂层具有结合强度高、孔隙率低、综合性能好等诸多优点,因而备受关注^[10-15]。同时,等离子喷焊技术具有能量集中、热输入低、稀释率低、喷焊层与基体结合良好以及工艺简单等优点,在提高材料表面耐磨、耐热和耐蚀等方面应用广泛^[16-21]。针对汽轮机低压末级叶片的常用材料(1Cr12Ni2W1Mo1V 不锈钢),采用不同方法制备不同涂层,并对涂层的综合性能进行对比研究的报道较少。为此,本工作分别采用 HVAF 技术和等离子喷焊方法在 1Cr12Ni2W1Mo1V 不锈钢表面制备了 Cr₃C₂-NiCr75-25 涂层、WC-10Co-4Cr 涂层和 Stellite 6 喷焊合金层,研究了涂层的显微硬度、摩擦磨损性能、抗微粒冲蚀性能和抗水蚀性能,

以期为提高汽轮机末级叶片的服役寿命和叶片修复提供依据。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

基体材料 1Cr12Ni2W1Mo1V 不锈钢为汽轮机末级叶片常用材料,其化学成分(质量分数)为: C 0.11%~0.16%, Mn 0.4%~0.8%, Si 0.10%~0.35%, Ni 2.2%~2.6%, Cr 10.5%~12.5%, W 1.0%~1.4%, Mo 0.15%~0.35%, 余量为 Fe。喷涂材料分别为粒径 5~30 μm、松装密度 2.8 g/cm³ 的 Cr₃C₂-NiCr75-25 碳化铬粉末和粒径 5~30 μm、松装密度 4.9 g/cm³ 的 WC-10Co-4Cr 碳化钨粉末。喷焊材料为粒径 80~120 μm 的 stellite6 合金粉末。

1.2 涂层制备

为了保证涂层与基体的结合强度,首先对基体材料表面进行了除油和喷砂处理。喷砂参数:砂砾采用 24~36 目的白刚玉,喷砂压力 0.4~0.5 MPa,喷砂角度 45°~75°,喷砂距离 100~150 mm。然后采用超音速火焰喷涂技术(HVAF)制备 Cr₃C₂-NiCr75-25 涂层和 WC-10Co-4Cr 涂层,喷涂工艺参数见表 1。采用等离子喷焊工艺制备 Stellite 6 喷焊合金层,喷焊两层,使喷焊合金层的厚度达到 3~4 mm,喷焊工艺参数如表 2 所示。

1.3 实验方法

采用 HVS-1000 型精密数显显微硬度计测试基体和各涂层的显微硬度,载荷 4.9 N,保持时间 10 s。将超音速火焰喷涂碳化铬、碳化钨涂层与等离子喷焊 Stellite 6 合金涂层在 MG-2000 型高速高温摩擦磨损

表 1 HVOF 喷涂工艺参数
Tab.1 Process parameters of HVOF spraying

Process parameters	Pressure of compressed air/MPa	Pressure of primary propane/MPa	Pressure of secondary propane/MPa	Feeding rate/(g·min ⁻¹)	Speed of the spray gun/(mm·s ⁻¹)	Spray distance/mm
Cr ₃ C ₂ -NiCr75-25 coating	0.59	0.54	0.45	70~80	500~800	165
WC-10Co-4Cr coating	0.70	0.64	0.54	70~80	500~800	325

表 2 等离子喷焊工艺参数
Tab.2 Process parameters of plasma spray welding

Welding current/A	Welding voltage/V	Welding speed/(cm·min ⁻¹)	Preheat temperature before welding/°C	Interpass temperature/°C	Ar flow/(L·min ⁻¹)	Send powder amount/(kg·h ⁻¹)
160~180	26~30	15	450~500	450~500	7~8	3~3.6

试验机上进行对磨试验, 转速 105 r/min, 载荷 200 N, 对磨时间 15 min, 不加润滑介质, 测试其相对摩擦系数和试样摩擦磨损前后质量变化。

在室温下利用 MSE-S 表面涂层综合性能评价试验机 (MSE 微粒喷浆冲蚀法) 测试基体材料、碳化铬涂层、碳化钨涂层和 Stellite 6 合金层的抗微粒冲蚀性能, 喷射角度 90°, 有效磨损面积 1 mm², 浆体质量分数 3%, 粒径 1.875 μm, 并用 Mini Profiler 轮廓仪测量磨痕深度, 评估长度为 4 mm。

利用汽轮机湿蒸汽叶片耐水蚀性试验装置分别对基体、碳化铬涂层、碳化钨涂层和 Stellite 6 合金层进行耐水蚀试验, 射流流速 680 m/s, 射流压力 240 MPa, 喷头直径 0.1 mm, 主轴转速 1500 r/min, 冲蚀角 90°。利用 VK-X1003D 激光扫描显微镜, 观察水蚀凹坑的微观形貌并测量水蚀槽凹坑开口宽度 W , 同时在水蚀区域划线求出水蚀凹坑的平均深度值 D 。利用 S-3400N 扫描电子显微镜观察试样水蚀形貌。试验前用精度为 0.000 1 g 的 CP114 分析天平称取试样的质

量 m_0 , 水蚀试验 3、10、37、28、42 h 后, 将试样取出吹干, 称出试样质量 m_1 , 利用公式 $\Delta m=m_0-m_1$ 计算出各个试样经不同水蚀时间后的质量损失。

2 实验结果与分析

2.1 涂层微观形貌与显微硬度

图 1 为各涂层微观形貌。从图 1a 和 1b 可以观察到, 采用 HVOF 工艺制备的碳化铬和碳化钨喷涂层与基体结合良好, 涂层厚度较为均匀, 分别约为 274 μm 和 217 μm。两种涂层中均存在较多点状细小的孔隙, 采用面积比例法测得两种涂层的孔隙率分别为 0.5% 和 0.07%, 显然碳化钨涂层的孔隙率更低, 组织更加致密, 有利于涂层综合性能的提升。从图 1c 可以发现, 喷焊 Stellite 6 合金层与基体材料冶金结合良好, 界面清晰可辨。喷焊层主要为白色枝晶状 Co-Cr 固溶体, 枝晶间有较多黑色的 M₇C₃ 和 WC 碳化物, 组织细小、分布均匀, 未见气孔和裂纹等缺陷。

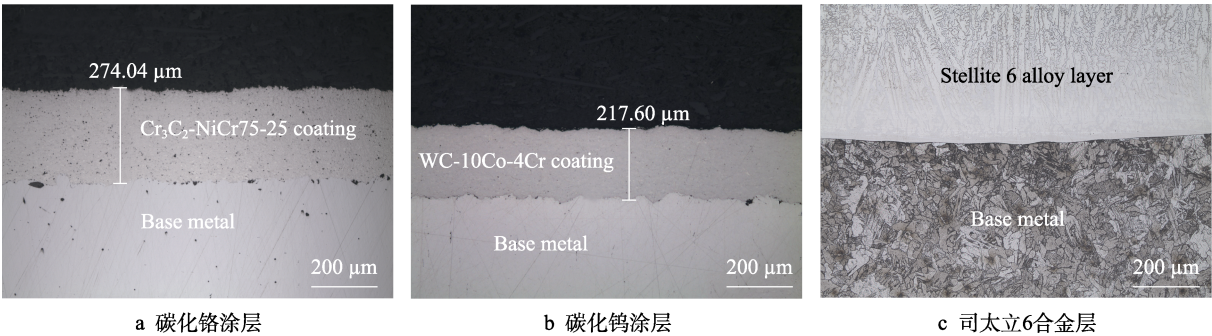


图 1 涂层横截面显微组织形貌

Fig.1 Microstructure and morphology of coatings: a) Cr₃C₂-NiCr75-25 coating; b) WC-10Co-4Cr coating; c) Stellite 6 alloy coating

图 2 为基体材料、碳化铬涂层、碳化钨涂层和 Stellite 6 合金涂层的平均显微硬度。可以看出, 基体材料的平均显微硬度为 203.4HV_{0.05}, 喷焊 Stellite 6 合金涂层的平均显微硬度为 382.38HV_{0.05}; 约为基体材料的 1.88 倍; 碳化铬涂层的平均显微硬度为

960.6HV_{0.05}, 是基体材料的 4.72 倍; 碳化钨涂层的平均显微硬度为 1314.6HV_{0.05}, 是基体材料的 6.46 倍。以上数据表明, 通过在基体材料 1Cr12Ni2W1Mo1V 不锈钢表面制备 Stellite 6 合金涂层、碳化铬涂层和碳化钨涂层, 均可以显著提高其硬度, 主要是由于各涂

层中均有大量的碳化物硬质相弥散分布,尤其是碳化钨涂层孔隙率低,同时又有大量硬质相 WC 颗粒弥散分布,使其硬度最高。硬度的提升也利于涂层的摩擦磨损、抗微粒冲蚀和抗水蚀能力的提升。

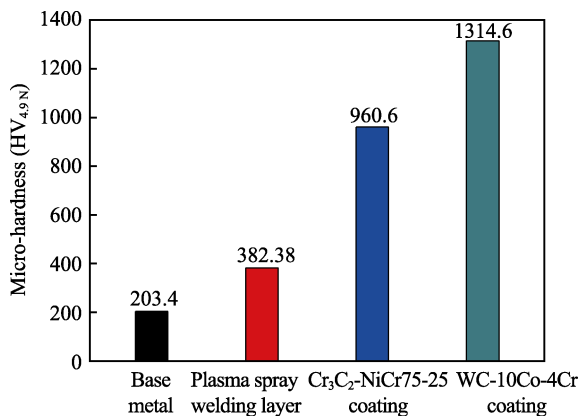


图2 基体和各种涂层的平均显微硬度

Fig.2 Average micro-hardness of substrate and various coatings

2.2 摩擦磨损性能分析

图3是碳化铬涂层和碳化钨涂层分别与等离子喷焊 Stellite 6 合金涂层对磨过程中,摩擦系数随时间的变化曲线。可以看出,碳化铬涂层的摩擦系数随着摩擦时间增加而急剧增大,150 s 后开始稳定在 0.5~0.7。碳化钨涂层的摩擦系数先急剧增大后缓慢降低,然后逐渐在 0.5~0.6 上下波动。这是因为对磨试样表面不是完全平整的状态,表面凹陷部分阻碍试样的相对滑动。在实验初期,突然施加的载荷会使试样表面状态发生巨大变化,试样凹陷和凸出部分受到破坏,即存在一定时间的磨合期^[22]。磨合期结束后,整个摩擦过程进入稳定期,摩擦系数稳定在一定范围内上下波动。相对而言,碳化钨涂层摩擦系数更小,具有更好的耐摩擦磨损性能。

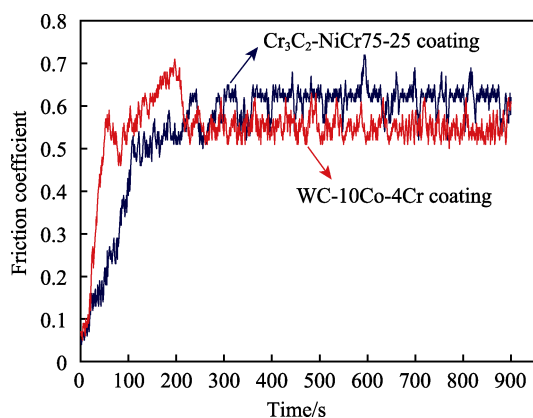


图3 各涂层的摩擦系数

Fig.3 Friction coefficient of each coating

采用精度 0.1 mg 的分析天平称取试样件摩擦磨损试验前后的质量,每个试样称量 3 次,取平均值作

为测试结果,见表3。从表中可以看出,碳化铬涂层在磨损试验过程中质量减少 0.0131 g,碳化钨涂层质量减少 0.0007 g,而喷焊 Stellite 6 合金层的质量不仅没有减少,反而存在不同程度的增加。这是因为在摩擦磨损过程中,由于超音速火焰喷涂碳化铬、碳化钨涂层的显微硬度要远高于喷焊 Stellite 6 合金层,分别是 Stellite 6 合金层的 2.5 倍和 3.4 倍,这使得 Stellite 6 合金涂层在磨损过程中粘附于碳化铬、碳化钨涂层表面,形成粘着磨损。同时可以发现,碳化钨涂层的质量损失最小,主要是因为该涂层的孔隙率低,微观组织更致密,且粉末本身含有的 WC 硬质相使得涂层的显微硬度高^[23]。

表3 摩擦磨损质量变化
Tab.3 Friction and wear mass change

Group	Coating	Pre-test mass/g	Post-test mass/g	Mass change/g
The first group	Cr ₃ C ₂ -NiCr75-25 coating	74.2934	74.3065	-0.0131
	Stellite 6 alloy layer	66.1744	66.1529	+0.0215
The second group	WC-10Co-4Cr coating	77.6056	77.6063	-0.0007
	Stellite 6 alloy layer	69.1657	69.1421	+0.0236

2.3 抗微粒冲蚀性能

图4为基体和各涂层微粒冲蚀量为 80 g 时的磨痕深度。可以看出,基体材料的磨痕最深,为 94.658 μm,碳化钨涂层的磨痕最浅,仅为 11.864 μm,而等离子喷焊 Stellite 6 合金层和碳化铬涂层的磨痕深度介于两者之间,分别为 85.932 μm 和 81.163 μm。

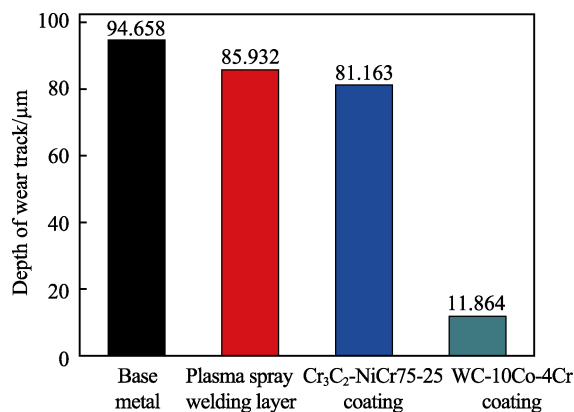


图4 基体和涂层磨痕深度

Fig.4 Wear mark depth of substrate and coatings

为了准确表征基体和各涂层的抗微粒冲蚀性能,将微粒冲蚀量分别增加到 100、120、140、160、180 g,并测试对应试样磨痕的最大深度值,计算其磨损率(磨损最大深度值与微粒冲蚀量的比值),得到的试

验结果如图 5 所示。可以看出, 基材的磨损率约为 0.83, 等离子喷焊 Stellite 6 合金层的值约为 0.43, 为基体材料的 1/2; 碳化铬涂层的值约为 0.5, 是基体材料的 3/5; 而碳化钨涂层的值仅为 0.03, 为基体材料的 1/25。可以看出, 基体材料的磨损率最大, 碳化钨涂层最小, 等离子喷焊 Stellite 6 合金层和碳化铬涂层介于两者之间。这与冲蚀量为 80 g 时测得的各试样的磨痕深度规律完全吻合, 表明基体材料的抗微粒冲蚀性能最差, 而碳化钨涂层最好。这主要是因为基体材料为 1Cr12Ni2W1Mo1V 不锈钢, 硬度低、韧性好, 当遭遇高硬度粒子的碰撞时容易产生“韧性侵蚀”,

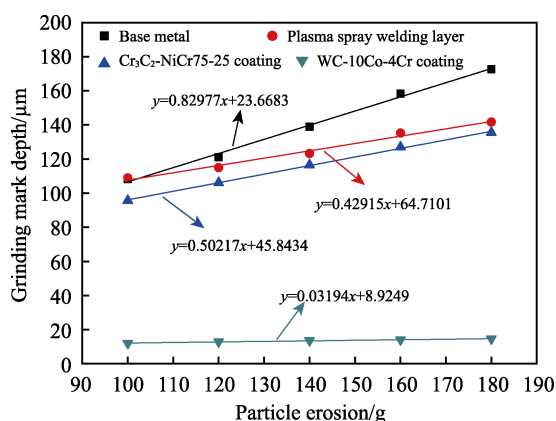


图 5 抗微粒冲蚀试验结果

Fig.5 Experimental results of particle erosion resistance test

导致其抗微粒冲蚀性能较差。固体颗粒的高速撞击、刮削以及氧化物等硬脆材料对硬质材料表面的冲击磨损属于脆性磨损, 而碳化钨涂层硬度最高, 涂层组织更加致密, 工作层中弥散分布了大量 WC 等硬质相, 使其抗微粒冲蚀性能较好^[24-25]。

2.4 耐水蚀性能

2.4.1 水蚀形貌分析

图 6 是经过 42 h 水蚀实验后各试样表面的 SEM 照片。同时为了定量表征水蚀痕迹, 将三维形貌图在凹坑区域进行纵向切割, 获得水蚀槽的截面高度曲线, 从而得出水蚀槽凹坑开口宽度 W , 同时计算出水蚀凹坑深度 D 等数据 (图 7 所示)。从图 6 可以看出, 4 种试样的水蚀情况存在明显差异, 基体材料表面均形成了连续的水蚀损伤, 存在大面积的金属脱落, 形成了明显的水蚀沟槽, 水蚀痕迹清晰可辨。等离子喷焊层表面水蚀损伤也较为严重, 有较多大小不同、分布不均匀的水蚀凹坑, 局部位置有金属脱落现象。碳化铬涂层也比较明显, 形成了一道较浅的水蚀槽, 未见大面积金属脱落。碳化钨涂层的水蚀痕迹不太明显, 但也能观察到较为均匀、深浅相近的水蚀斑点。

从图 7 可以发现, 宽度方向上, 基体材料的水蚀槽宽度最宽, 约 410 μm , 等离子喷焊 Stellite 6 合金涂层为 300 μm , 碳化铬涂层为 390 μm , 碳化钨涂层约 420 μm 。深度方向上差异更明显, 基体材料最深 (约

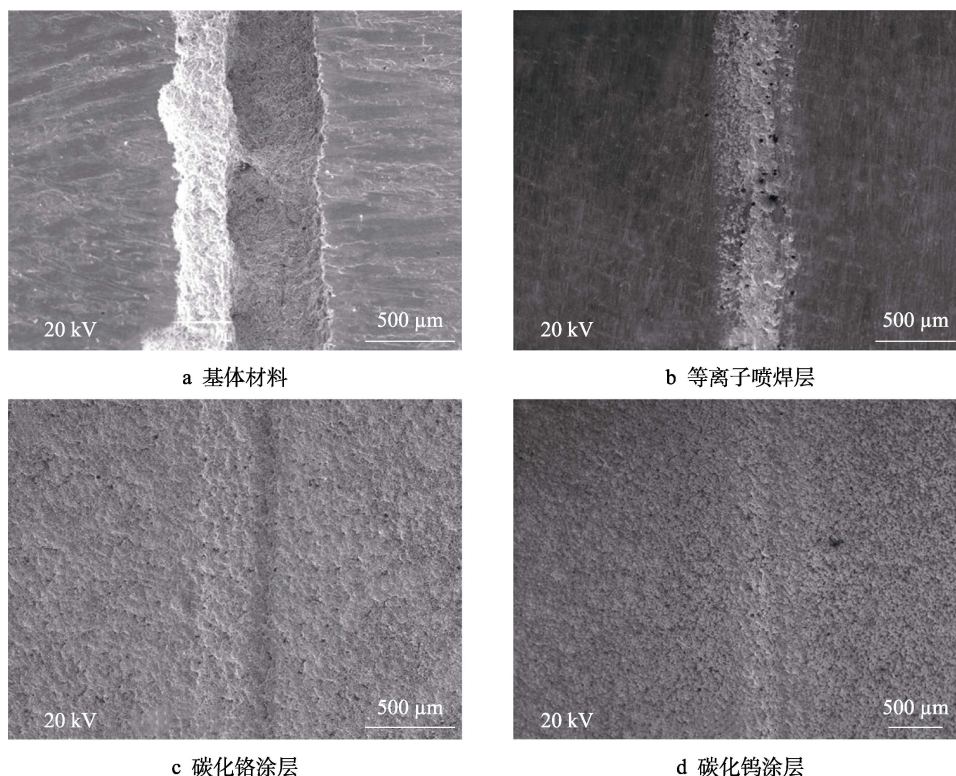


图 6 基体和涂层水蚀 SEM 照片

Fig.6 SEM photographs of water erosion of base metals and coatings: a) base metal; b) Stellite 6 alloy layer; c) $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr75-25}$ coating; d) WC-10Co-4Cr coating

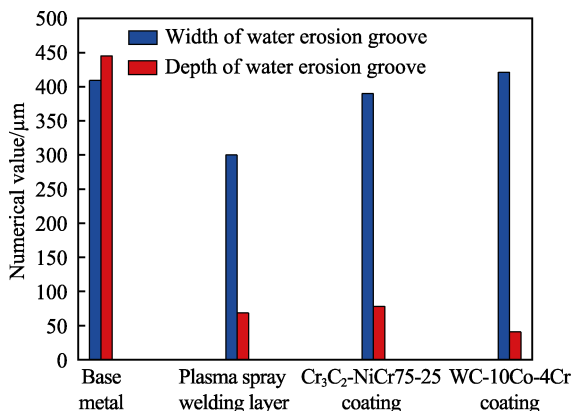


图7 水蚀槽数据

Fig.7 Data of water erosion groove

445 μm), 碳化钨涂层最浅(约 41 μm), 而等离子喷焊 Stellite 6 合金涂层和碳化铬涂层介于两者之间, 分别约为 70 μm 和 80 μm。由于水蚀槽越深, 湿蒸汽对叶片冲刷越严重, 叶片越容易产生裂纹而失效, 所以水蚀凹坑越浅, 说明其抗水蚀性能越好。可以看出, 在基体材料 1Cr12Ni2W1Mo1V 不锈钢表面制备各种涂层后, 其表面工作层均弥散分布了大量的硬质相, 使其显微硬度得到显著提高, 有利于防水蚀能力提升, 尤其是碳化钨涂层的抗水蚀性能更优。这是因为高速射流撞击过程中, 碳化钨涂层内部具有更强的粘附力和更致密的材料颗粒排列结构, 能够很好地抵抗射流的挤压作用和扩散剪切作用。

2.4.2 涂层水蚀质量损失分析

水蚀实验过程中, 采用精度 0.1 mg 的分析天平分别对基体和各涂层试样进行 6 次称量, 绘制了基体材料和各涂层的水蚀质量损失曲线, 如图 8 所示。可以看出, 随着水蚀时间的增加, 各试样单位面积的质量损失均增加。其中基体材料最为严重, 42 h 实验后, 试样的质量损失近 30 mg/cm²; 而等离子喷焊 Stellite 6 合金层、碳化铬涂层和碳化钨涂层的质量损失增加缓慢, 经过 42 h 实验后, 各试样的水蚀质量损失均小于 5 mg/cm², 分别约为 4.3、3.6、3.3 mg/cm², 显

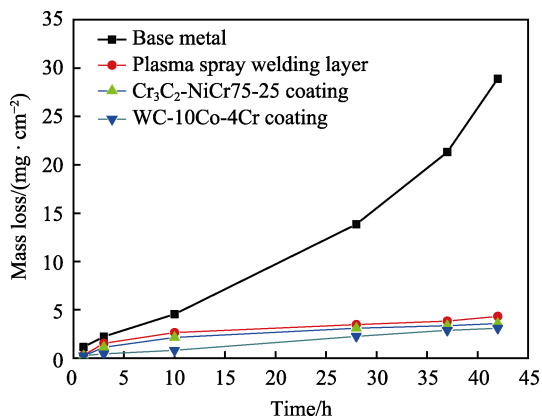


图8 水蚀质量损失曲线

Fig.8 Water erosion mass loss curve

然碳化钨涂层的水蚀质量损失最小, 仅为基体材料损失量的 1/9。说明通过在基体材料表面制备 Stellite 6 合金层、碳化铬和碳化钨涂层均能有效提高材料的抗水蚀性能, 尤其是碳化钨涂层抗水蚀性能最好。这主要是由于该涂层的显微硬度最高, 组织更加致密, 从而有效提高了其抗水蚀性能。

3 结论

1) 采用等离子喷焊技术和超音速火焰喷涂技术在基体材料 (1Cr12Ni2W1Mo1V 不锈钢) 表面分别制备的 Stellite 6 喷焊层和碳化铬涂层、碳化钨涂层, 界面结合良好, 均可以使材料的表面硬度显著提高。其中, 碳化钨涂层最为突出, 平均显微硬度为 1314.6HV_{0.05}, 是基体材料的 6.46 倍。

2) 相对基体材料而言, 等离子喷焊 Stellite 6 合金层、碳化铬涂层和碳化钨涂层的抗摩擦磨损性能、抗微粒冲蚀性能和抗水蚀性能均得到了大幅提升, 尤其是碳化钨涂层的各项性能均最好。

参考文献:

- [1] MURTHY J K N, PRASAD K S, GOPINATH K, et al. Characterisation of HVOF sprayed Cr₃C₂-50(Ni20Cr) coating and the influence of binder properties on solid particle erosion behaviour[J]. Surface and coatings technology, 2010, 204(24): 3975-3985.
- [2] 李太江, 刘庆伏, 李巍, 等. 汽轮机动叶片水蚀防护技术研究及应用[J]. 热加工工艺, 2011, 40(16): 109-113.
LI Tai-jiang, LIU Qing-fu, LI wei, et al. Study on protection techniques for last stage blades in steam turbine from water erosion and its application[J]. Hot working technology, 2011, 40(16): 109-113.
- [3] MANN B S, ARYA V. HVOF coating and surface treatment for enhancing droplet erosion resistance of steam turbine blades[J]. Wear, 2003, 254(7): 652-667.
- [4] 管继伟, 李宇峰, 王梅英, 等. 某型核电汽轮机末级叶片失效原因分析及优化改型设计[J]. 汽轮机技术, 2015, 57(6): 409-410.
GUAN Ji-wei, LI Yu-feng, WANG Mei-ying, et al. Root cause analysis of failure and optimization design of L-1 blade for nuclear power plant steam turbine[J]. Turbine technology, 2015, 57(6): 409-410.
- [5] 王烜烽, 张铁磊, 胡仁杰, 等. 汽轮机末级叶片进汽边表面防水蚀工艺研究[J]. 热力透平, 2015, 44(3): 220-224.
WANG Xuan-feng, ZHANG Tie-lei, HU Ren-jie, et al. Surface corrosion resistance process of blade leading edge of last stage for steam turbines[J]. Thermal turbine, 2015, 44(3): 220-224.
- [6] 熊云, 王勇, 张开峰, 等. 激光熔覆 Stellite6/WC 的组

- 织与性能研究[J]. 中国表面工程, 2008, 21(1): 37-40.
- XIONG Yun, WANG Yong, ZHANG Kai-feng, et al. Microstructures and properties of laser cladding stellite6/WC[J]. China surface engineering, 2008, 21(1): 37-40.
- [7] 任超, 李铸国, 疏达, 等. 17-4PH 不锈钢表面激光熔覆 Stellite6 涂层组织及耐水蚀性能[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 107-114.
- REN Chao, LI Zhu-guo, SHU Da, et al. Microstructure and water erosion resistance property of stellite6 coating by laser cladding on 17-4PH stainless steel surface[J]. Chinese journal of lasers, 2017, 44(4): 107-114.
- [8] 赵文雨. 2Cr12MoV 表面激光熔覆 Stellite 6 涂层的组织及性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- ZHAO Wen-yu. Research on microstructure and properties of stellite 6 coatings by laser cladding on 2Cr12MoV[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [9] 叶林, 陈国星, 胡金力, 等. DS 和 HVOF 法制备防水蚀功能涂层的对比研究[J]. 热喷涂技术, 2013, 5(1): 38-41.
- YE Lin, CHEN Guo-xing, HU Jin-li, et al. Comparative study of the functional coating of water erosion prepared by DS and HVOF[J]. Thermal spray technology, 2013, 5(1): 38-41.
- [10] 李学伟, 孟银, 王鹏, 等. 热喷涂 WC-10Co4Cr 涂层的研究现状[J]. 中国钨业, 2014, 29(2): 28-31.
- LI Xue-wei, MENG Yin, WANG Peng, et al. Research status of WC-10Co4Cr coatings prepared by thermal spraying[J]. China tungsten industry, 2014, 29(2): 28-31.
- [11] SADEGHIMERESHT E, MARKOCSAN N, et al. A comparative study of corrosion resistance for HVAF-sprayed Fe-and Co-based coatings[J]. Journal of coatings technology and research, 2016, 6(16): 3390-3404.
- [12] ZHANG P, SADEGHIMERESHT E, PENG R L, et al. Isothermal oxidation behavior of HVAF-sprayed NiCoCrAlY coatings: effect of surface treatment[J]. Journal of infectious diseases, 2017, 197(5): 775-786.
- [13] ESMAEIL S, NICOLAIE M, PER N. Microstructure effect of intermediate coat layer on corrosion behavior of HVAF-sprayed Bi-layer coatings[J]. Journal of thermal spray technology, 2016, 26(1-2): 1-11.
- [14] GAO Han, WEI Xian-shun, LIANG Dan-dan, et al. Friction and wear properties of HVAF sprayed Fe-based amorphous alloy coatings[J]. Surface technology, 47(2): 55-63.
- [15] MARJAANA K, JUHA L, KIMMO K, et al. Nanocrystalline WC-Co HVAF coatings by utilizing novel powder manufacturing route using water-soluble raw materials[J]. Journal of thermal spray technology, 2017, 27(5): 196-206.
- [16] 熊中, 王艳, 徐强, 等. TiC 对铁基合金喷焊层组织与性能影响[J]. 表面技术, 2017, 46(8): 79-84.
- XIONG Zhong, WANG Yan, XU Qiang, et al. Effects of TiC on microstructure and properties of Fe-based alloy spray-welding layer[J]. Surface technology, 2017, 46(8): 79-84.
- [17] WANG Jun-yuan. Preparation of Ni60-WC coating by plasma spraying, plasma re-melting and plasma spray welding on surface of hot forging die[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 27(4): 640-643.
- [18] 曾志强, 张博, 王俊元, 等. Ni 基 + WC 等离子喷焊涂层性能研究[J]. 粉末冶金工业, 2017, 27(1): 37-41.
- ZENG Zhi-qiang, ZHANG Bo, WANG Jun-yuan, et al. Study on properties of Ni base +WC coating by plasma spray welding[J]. Powder metallurgy industry, 2017, 27(1): 37-41.
- [19] 刘政. 等离子喷焊 IN625 合金显微组织和力学性能分析[J]. 电焊机, 2018, 48(12): 55-60.
- LIU Zheng. Microstructure and mechanical properties of plasma spray surface IN625 alloy[J]. Electric welding machine, 2018, 48(12): 55-60.
- [20] 王瑞权, 邱葭菲, 姚荣庆, 等. 等离子喷焊 CuAlFe 涂层组织及性能研究[J]. 热加工工艺, 2014(18): 118-120.
- WANG Rui-quan, QIU Jia-fei, YAO Rong-qing, et al. Study on microstructure and properties of CuAlFe coating deposited by plasma spraying[J]. Hot working technology, 2014(18): 118-120.
- [21] HUANG Shi-ming, SUN Da-qian, XU De-sheng, et al. Microstructures and properties of NiCrBSi/WC biomimetic coatings prepared by plasma spray welding[J]. Journal of bionic engineering, 2015, 12(4): 592-603.
- [22] BONNY K, BAETS P D, VLEUGELS J, et al. Dry reciprocating sliding friction and wear response of WC-Ni cemented carbides[J]. Tribology letters, 2008, 31(3): 199-209.
- [23] 陈焕涛, 谭禧, 朱晖朝, 等. HVAF 和 HVOF 制备的 WC-10Co-4Cr 涂层性能研究[J]. 材料研究与应用, 2019, 13(3): 211-215.
- CHEN Huan-tao, TAN Xi, ZHU Hui-chao, et al. Research on the properties of WC-10Co-4Cr coatings by HVOF and HVAF[J]. Materials research and application, 2019, 13(3): 211-215.
- [24] 曹晓英, 李定骏, 范华. 汽轮机通流部件防固体颗粒侵蚀碳化铬涂层的研制及应用[J]. 材料保护, 2018, 51(2): 105-108.
- CAO Xiao-ying, LI Ding-jun, FAN Hua. Preparation and application of solid particle erosion prevention Cr₃C₂-NiCr coating on steam turbine flowing parts[J]. Materials protection, 2018, 51(2): 105-108.
- [25] 廉影, 李阳, 王建民, 等. HVOF/AC-HVAF 热喷 WC-10Co-4Cr 涂层的耐冲蚀性能[J]. 焊接学报, 2019, 40(4): 95-100.
- KANG Ying, LI Yang, WANG Jian-min, et al. Erosion resistance of HVOF/AC-HVAF sprayed WC-10Co-4Cr coatings[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(4): 95-100.