

## 腐蚀与防护

回收粉末再利用对等离子喷焊 Ni-WC 涂层  
冲刷腐蚀行为的影响机制柴慧<sup>1</sup>, 王勤英<sup>1\*</sup>, 西宇辰<sup>1</sup>, 马文祺<sup>1</sup>, 张兴寿<sup>1</sup>,  
肖檬<sup>1</sup>, 董立谨<sup>1</sup>, 白树林<sup>2</sup>(1.西南石油大学 新能源与材料学院, 成都 610500;  
2.北京大学 材料科学与工程学院, 北京 100871)

**摘要:** **目的** 探究粉末回收再利用对等离子喷焊 Ni-WC 涂层微观组织结构及静态腐蚀、冲刷腐蚀行为的影响规律, 揭示涂层腐蚀及冲刷腐蚀机理。**方法** 通过等离子喷焊技术在 AISI 4145H 钢表面制备了以新粉 (C-p<sub>1</sub>) 和回收粉 (C-p<sub>2</sub>) 为原料的 Ni-WC 涂层, 并通过冲刷腐蚀装置和电化学工作站等开展涂层的冲刷腐蚀行为研究。采用扫描电子显微镜对冲刷腐蚀前后涂层的微观组织结构和元素分布等进行表征分析。**结果** 在静态条件下, C-p<sub>1</sub> 的容抗弧半径大于 C-p<sub>2</sub>, 且 C-p<sub>1</sub> 的自腐蚀电流 ( $J_{\text{corr}}$ ) 为  $2.09 \times 10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>, 而 C-p<sub>2</sub> 的  $J_{\text{corr}}$  为  $1.03 \times 10^{-5}$  A/cm<sup>2</sup>, 表明 C-p<sub>1</sub> 的耐蚀性高于 C-p<sub>2</sub>。在冲刷腐蚀条件下, 随冲刷角的增加, 两涂层耐蚀性均先增大后减小, 且在 0° 时最差, 表明涂层受切削作用明显, 涂层表面氧化物膜被破坏, 使腐蚀加速。随流速增加, 两涂层耐蚀性均减小, 且在冲刷速度为 6 m/s、冲刷角为 0° 时腐蚀最严重, 此时 C-p<sub>1</sub> 的  $J_{\text{corr}}$  为  $1.98 \times 10^{-4}$  A/cm<sup>2</sup> 而 C-p<sub>2</sub> 的  $J_{\text{corr}}$  为  $1.04 \times 10^{-4}$  A/cm<sup>2</sup>, 表明两涂层的耐冲刷腐蚀性相似。**结论** 在静态腐蚀条件下, C-p<sub>2</sub> 的耐蚀性比 C-p<sub>1</sub> 差, 但在冲刷腐蚀条件下, 二者的抗冲刷腐蚀性相仿, 说明面向冲刷腐蚀工况的 Ni-WC 涂层, 使用回收粉进行制备具有可行性。

**关键词:** 粉末回收, 等离子喷焊, Ni-WC 涂层, 冲刷腐蚀, 电化学行为

**中图分类号:** TG174 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2025)06-0074-13

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2025.06.006

Influence Mechanism of Recovered Powder Reuse on Erosion-corrosion  
Behavior of Plasma Spray-welded Ni-WC CoatingCHAI Hui<sup>1</sup>, WANG Qinying<sup>1\*</sup>, XI Yuchen<sup>1</sup>, MA Wenqi<sup>1</sup>, ZHANG Xinshou<sup>1</sup>,  
XIAO Meng<sup>1</sup>, DONG Lijin<sup>1</sup>, BAI Shulin<sup>2</sup>

(1. School of New Energy and Materials, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

**ABSTRACT:** The effects of powder recycling on the microstructure, static corrosion and erosion-corrosion behavior of

收稿日期: 2024-04-29; 修订日期: 2024-05-08

Received: 2024-04-29; Revised: 2024-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(52174007); 中央引导地方科技发展专项资金项目(2023ZYD0043); 四川省省院省校科技合作项目(2025YFHZ0050)

Fund: National Natural Science Foundation of China (52174007); Central Government Guides Local Science and Technology Development Project of China (2023ZYD0043); Project of Sichuan Department of Science and Technology (2025YFHZ0050)

引文格式: 柴慧, 王勤英, 西宇辰, 等. 回收粉末再利用对等离子喷焊 Ni-WC 涂层冲刷腐蚀行为的影响机制[J]. 表面技术, 2025, 54(6): 74-86.

CHAI Hui, WANG Qinying, XI Yuchen, et al. Influence Mechanism of Recovered Powder Reuse on Erosion-corrosion Behavior of Plasma Spray-welded Ni-WC Coating[J]. Surface Technology, 2025, 54(6): 74-86.

\*通信作者 (Corresponding author)

plasma spray-welded Ni-WC coatings was investigated, and the corrosion and erosion-corrosion mechanisms of the coatings were revealed.

Ni-WC coatings were prepared on the surface of AISI 4145H steel by plasma spray-welded technology with received powder (C-p<sub>1</sub>) and recovered powder (C-p<sub>2</sub>) as raw materials. The erosion-corrosion behavior of the coatings was studied by erosion-corrosion device and electrochemical workstation. The microstructure and element distribution of the coatings before and after erosion-corrosion were characterized by scanning electron microscopy.

Under static conditions, the capacitive arc radius of C-p<sub>1</sub> was larger than that of C-p<sub>2</sub>, and the self-corrosion current ( $J_{\text{corr}}$ ) of C-p<sub>1</sub> was  $2.09 \times 10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>, while the  $J_{\text{corr}}$  of C-p<sub>2</sub> was  $1.03 \times 10^{-5}$  A/cm<sup>2</sup>, indicating that the corrosion resistance of C-p<sub>1</sub> was higher than that of C-p<sub>2</sub>. Under the condition of erosion-corrosion, with the increase of the erosion angle, the corrosion resistance of the two coatings first increased and then decreased. When the erosion angle was 0°, the surface of the coating was most affected by the shear stress, and the oxide film on the surface of the coating was destroyed, which accelerated the corrosion. With the increase of scouring velocity, the corrosion resistance of the C-p<sub>1</sub> and C-p<sub>2</sub> decreased. The corrosion was the most serious when the scouring velocity was 6 m/s and the erosion angle was 0°, the  $J_{\text{corr}}$  of C-p<sub>1</sub> was  $1.98 \times 10^{-4}$  A/cm<sup>2</sup> and the  $J_{\text{corr}}$  of C-p<sub>2</sub> was  $1.04 \times 10^{-4}$  A/cm<sup>2</sup>, respectively, indicating that the erosion-corrosion resistance of the two coatings was similar.

Under static corrosion conditions, the corrosion resistance of C-p<sub>2</sub> is worse than that of C-p<sub>1</sub>, but under erosion-corrosion conditions, the erosion-corrosion resistance of C-p<sub>1</sub> and C-p<sub>2</sub> is similar, indicating that it is feasible to prepare Ni-WC coatings for erosion-corrosion conditions using recovered powder.

**KEY WORDS:** powder recycling; plasma spray; Ni-WC coating; erosion-corrosion; electrochemical behavior

4145H 钢作为一种常用的石油钻具钢<sup>[1]</sup>, 在复杂油气田环境中长期服役, 钢材表面与钻采过程中产生的腐蚀性流体相互接触极易产生交互的流体冲刷和腐蚀, 导致钻具钢表面受到严重的冲刷腐蚀而失效, 不仅威胁钻井安全, 还将极大地提升油气开发成本<sup>[2-5]</sup>。利用等离子喷焊等高能热源在易损伤油气装备部件表面制备 Ni-WC 涂层能有效延缓冲刷腐蚀失效的发生, 在油气田行业已成功得到应用<sup>[6-8]</sup>。

目前石油钻具表面等离子喷焊涂层的成本较高, 其中金属粉末成本占总成本的 80%, 但粉末的有效利用率低于 70%, 大量粉末的浪费使涂层的制备成本增加。Massard 等<sup>[9]</sup>利用等离子体球化工艺回收氧化 100Cr6, 研究了粉末的物理和化学性质, 发现等离子体球化是一种很有前途的金属粉末回收方法。Gorji 等<sup>[10]</sup>发现 316L 粉末回收 10 次再利用后, 粉末的孔隙率增加, 表面粗糙度增大, 硬度降低。Strondl 等<sup>[11]</sup>发现经过电子束熔化回收的回收粉中的细粉更多, 导致其流动性变差, 回收粉成形件孔隙增大增多, 致密度降低。Ardila 等<sup>[12]</sup>指出 IN718 粉末回收多次后颗粒仍然完整, 存在假烧结现象, 但粉末及制备的涂层性能均无明显变化。Saboori 等<sup>[13]</sup>指出使用回收粉末制造的 316L 不锈钢零件与新鲜粉末制造的零件具有相似的拉伸强度水平。Bellini 等<sup>[14]</sup>对比了等离子体雾化工艺生产的原始粉末和回收超过 100 次的粉末, 发现粉末的微观结构无显著变化。Richter 等<sup>[15]</sup>使用新粉末和回收粉末的混合粉制造了 Ti6Al4V 零件, 指出回收粉末具备在基于电子束的粉末床增材制造中部分

替代新粉末的应用潜力。以上研究表明, 利用回收粉末进行涂层的制备具有可行性。

石油钻具表面等离子喷焊涂层在冲刷腐蚀的冲刷过程中, 腐蚀性流体将对其表面产生平行于钻具表面的切削和垂直于其表面的冲击<sup>[16-17]</sup>。刘晓斌等<sup>[18]</sup>发现在低冲蚀角度下 WC-CoCr 涂层的冲刷腐蚀主要表现为微切削和疲劳剥落, 而在高冲蚀角度下, WC-CoCr 涂层的冲刷腐蚀主要表现为疲劳应力产生裂纹纵向扩展并剥落, 而裂纹更易在层状结构处产生, 导致层状结构明显的涂层呈片状剥落。Chen 等<sup>[19]</sup>报道了 WC-Ni 和 WC-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-Ni 金属陶瓷涂层的冲刷腐蚀行为在低冲刷角时以切削侵蚀为主, 而在高冲刷角时则以冲蚀坑为主, 且在黏结相损耗和裂纹出现的地方存在塑性变形和侵蚀。侯素娟等<sup>[20]</sup>采用自制冲蚀磨损试验机研究了冲蚀角对等离子喷涂 WC-12Co 涂层腐蚀行为的影响机制, 发现在冲蚀角度为 30°时涂层表现为微裂纹扩展产生少量片状剥落, 同时存在冲蚀坑和梨形切屑。王东生等<sup>[21]</sup>发现随着冲蚀角的增大, 等离子喷涂 Ni-WC 涂层的重量损失先增大后减小, 同时表现出塑性-脆性复合冲蚀特征。然而, 粉末回收再利用对等离子喷涂 Ni-WC 涂层冲刷腐蚀行为的影响研究较少, 影响机制需要进一步探究。

本文通过等离子喷焊技术在 AISI 4145H 钢表面上制备了以新粉和回收粉为原料的 Ni-WC 涂层, 研究了粉末回收再利用对涂层冲刷腐蚀行为的影响机制, 为面向冲刷腐蚀工况的等离子喷焊 Ni-WC 涂层粉末回收利用的可行性提供了科学依据。

## 1 实验

### 1.1 材料

采用的基体材料为 AISI 4145H 钢, 其化学成分 (质量分数) 为 Cr 0.75%~1.2%、C 0.42%~0.49%、Mo 0.15%~0.25%、Si 0.15%~0.35%、Mn 0.65%~1.1%、P ≤ 0.035%、S ≤ 0.04%、Fe 余量。过渡层材料为 Inconel 625 粉末 (95.05 μm), 其化学成分 (质量分数) 为 Cr 21.8%、Fe 0.67%、Mo 9.2%、Nb 3.57%、Si 0.39%、Mn 0.38%、Ni 余量。涂层中 Inconel 625 粉末的质量分数为 40%, WC 粉末 (121.11 μm) 的质量分数为 60%。回收粉末指 Inconel 625 粉末和 WC 粉末混合粉的回收。以新粉和回收粉为原料的 Ni-WC 涂层分别命名为 C-p<sub>1</sub> 和 C-p<sub>2</sub>。

制备的等离子喷焊 Ni-WC 的涂层结构, 如图 1 所示。AISI 4145H 为基体, Inconel 625 过渡层的厚度为 2 mm, Ni-WC 复合涂层的厚度为 2.8 mm。过渡层等离子喷焊工艺参数为: 基体预热温度为 110 °C, 电流为 110 A, 送粉量为 30 g, 离子气为 1.25 m<sup>3</sup>/h, 送粉气为 3.0 m<sup>3</sup>/h, 保护气为 (Ar) 18 m<sup>3</sup>/h, 扫描速度为 115 mm/s。复合涂层等离子喷焊工艺参数为: 基体/过渡层预热温度为 250 °C, 电流为 95 A, 送粉量为 35 g, 离子气为 1.25 m<sup>3</sup>/h, 送粉气为 3.0 m<sup>3</sup>/h, 保护气 (Ar) 为 18 m<sup>3</sup>/h, 扫描速度为 115 mm/s。

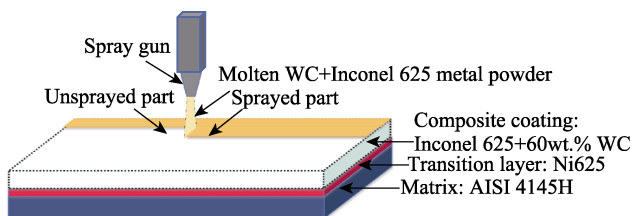


图 1 等离子喷焊 Ni-WC 涂层的涂层结构

Fig.1 Coating structure of plasma sprayed Ni-WC coating

### 1.2 微观组织结构表征

将试样去除表面 1 mm 喷涂层后加工成 5 mm×5 mm×11 mm (*L*×*W*×*H*) 的试样, 用 60#—2000# 的碳化硅砂纸打磨涂层表面, 再使用粒径为 2.5 μm 的金刚石抛光膏对试样进行抛光, 分别用去离子水和无水乙醇冲洗后用无水乙醇超声洗净。采用配备 SEM (EV0MA15 蔡司)、能量色散光谱 (EDS) 的扫描透射电子显微镜 (STEM, FEI Talos-F200s) 观察涂层冲刷腐蚀前后的微观组织结构。采用 EDS 分析涂层元素分布及含量变化。EDS 频谱的采集条件为探头电压为 20 kV, 电流为 500 pA, 采集时间为 200 s。

### 1.3 电化学测试

采用自主设计搭载电化学工作站 (CS310) 的原位电化学喷射式循环冲刷腐蚀试验机开展冲刷腐蚀

实验, 如图 2 所示。采用由饱和甘汞电极 (SCE) 作为参比电极 (RE), 铂片电极作为对电极 (CE), 待腐蚀面积为 0.25 cm<sup>2</sup> 的涂层表面作为工作电极 (WE) 的三电极体系, 腐蚀液为 3.5% (质量分数) NaCl 溶液, 冲刷角分别为 0°、45°和 90°, 冲刷速度为 2、4 和 6 m/s。对冲刷腐蚀试样进行交流阻抗谱 (EIS) 测试以及动电位极化测试。2 种测试均为原位测试, 交流阻抗谱测试皆在开路电位 (OCP) 稳定状态下进行, 其中 OCP 的电压采样频率为 0.5 s, 测试时间为 1 h。开路稳定后, 进行 EIS 测试, EIS 的测量频率范围为 100 kHz~0.01 Hz, 振幅为 5 mV。阻抗谱测试时间为 1、2、4、8、12 h, 进而开展动电位极化曲线测试。动电位极化曲线测量电压扫描范围为 -1~1 V, 扫描速率为 0.5 mV/s。

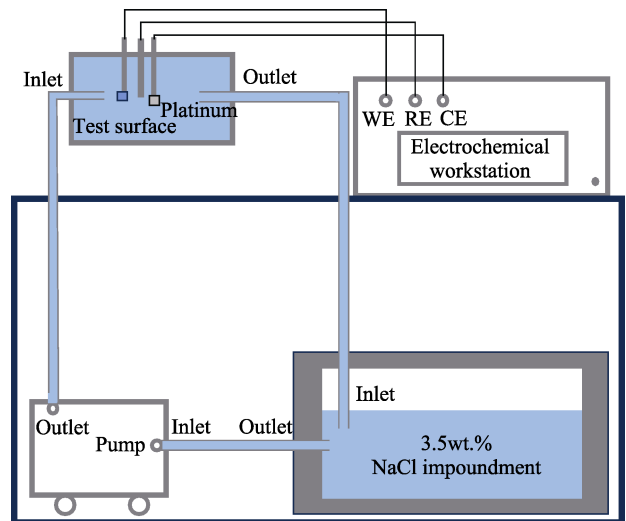


图 2 冲刷腐蚀试验机示意图

Fig.2 Schematic diagram of erosion-corrosion testing machine

## 2 实验结果及分析

### 2.1 微观组织结构

图 3 为新 Inconel 625 和 WC 混合粉末及回收混合粉末的微观形貌。由图 3 可见, 2 种粉末的尺寸不均匀, 均存在少量黏结情况, 其中颗粒尺寸较大且表面粗糙的粉末为 Inconel 625, 而颗粒尺寸相对较小且表面较光滑的粉末为 WC。对 Inconel 625 和 WC 混合粉末进行元素含量分析, 如表 1 所示。对比两者元素分析可知, C-p<sub>1</sub> 中的氧原子数分数为 3.51%, 而 C-p<sub>2</sub> 中的氧原子数分数为 3.99%, 结果表明, 回收粉末的氧原子数分数增加 13.68%, 但粉末仍符合成分规范。经粒径分析, 如图 4 所示。新粉的粉末尺寸大于回收粉, 新粉的平均粒径为 83.758 μm, 回收粉的平均粒径为 79.341 μm。除此之外, 回收粉末的形貌未发生明显的改变。

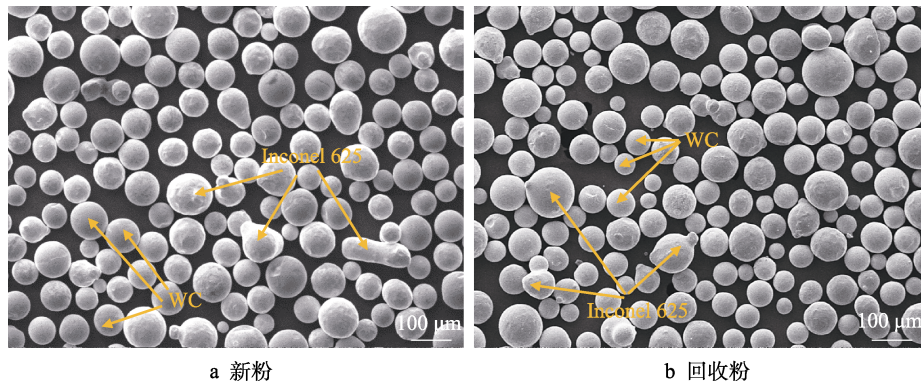


图 3 Inconel 625 和 WC 混合粉末的微观形貌  
Fig.3 Microstructure of Inconel 625 and WC mixed powder:  
a) received powder; b) recovered powder

表 1 Inconel 625 和 WC 混合粉末的元素含量  
Tab.1 Element content of Inconel 625 and WC mixed powders

Sample code	W	Ni	Fe	Cr	O	Total
C-p <sub>1</sub>	62.01	33.68	0.32	0.47	3.51	100
C-p <sub>2</sub>	59.11	35.14	0.87	0.9	3.99	100

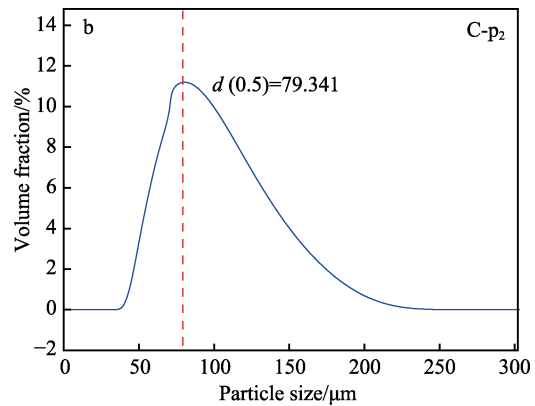
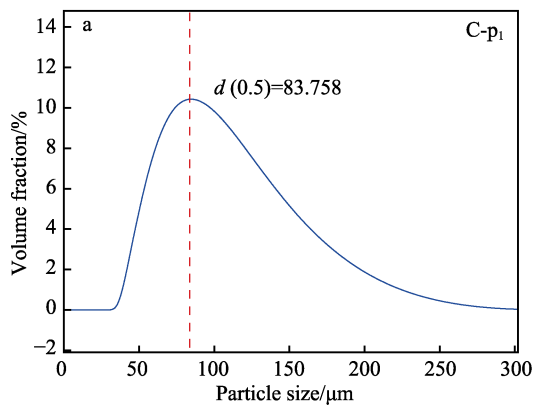


图 4 Inconel 625 和 WC 混合粉末的粒径分布曲线  
Fig.4 Particle size distribution curve of Inconel 625 and WC mixed powder

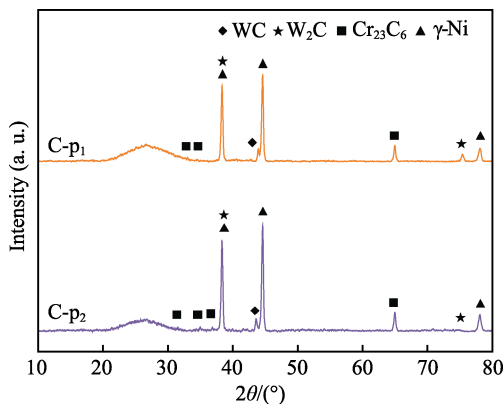


图 5 等离子喷焊 Ni-WC 涂层的 XRD 图谱  
Fig.5 XRD patterns of plasma sprayed Ni-WC coatings

图 6 为 C-p<sub>1</sub> 和 C-p<sub>2</sub> 体视显微镜下两涂层表面及截面的宏观形貌。图 6 中黑色圆形区域为 WC 颗粒,

图 5 为 C-p<sub>1</sub> 和 C-p<sub>2</sub> 涂层的 XRD 图谱。两涂层物相组成相同, 与标准卡片比对后可知, 两涂层均由  $\gamma$ -Ni (W, Cr, Fe)、 $W_2C$ 、WC 和  $M_{23}C_6$  组成。C-p<sub>2</sub> 的衍射峰相对 C-p<sub>1</sub> 向小角度方向偏移, 表明在制备过程中 C-p<sub>2</sub> 经过 2 次热喷涂, 在 Inconel 625 基体及 WC 颗粒边界生长大量的针状  $M_{23}C_6$ , 针状  $M_{23}C_6$  生长过程中在晶体结构中引入了应力和晶格畸变, 导致原晶格间距减小<sup>[22]</sup>。

C-p<sub>1</sub> 中 WC 颗粒尺寸明显大于 C-p<sub>2</sub>。从截面可观察到明显的三层结构, 且基体和 Ni625 过渡层及 Ni625 过渡层和涂层的结合程度良好。图 7 呈现的是 C-p<sub>1</sub> 和 C-p<sub>2</sub> 表面的微观组织结构特征。其中灰色球状区域为涂层中的 WC 颗粒, 且在涂层表面未观察到明显的裂纹、缺陷等, 说明涂层中的 Inconel 625 基体和 WC 颗粒的结合程度良好。从图 7a~b 中观察到, C-p<sub>1</sub> 中 WC 颗粒的尺寸不均匀而 C-p<sub>2</sub> 中 WC 颗粒尺寸较均匀, 且 C-p<sub>1</sub> 中 WC 颗粒尺寸大于 C-p<sub>2</sub> 中 WC 颗粒, 与图 6 结果一致。同时, 由图 7c~d 可知 C-p<sub>1</sub> 由 Inconel 625  $\gamma$ -Ni 基体和块状  $M_{23}C_6$  组成, 而 C-p<sub>2</sub> 则由 Inconel 625  $\gamma$ -Ni 基体和针状  $M_{23}C_6$  组成。根据菲克扩散定律和阿伦尼乌斯定律, 微观结构的演化特征受熔池中溶质原子的浓度梯度影响<sup>[23]</sup>。C-p<sub>1</sub> 中 Inconel 625 基体与 WC 颗粒在喷涂后的快速凝固过程中, WC 颗粒成

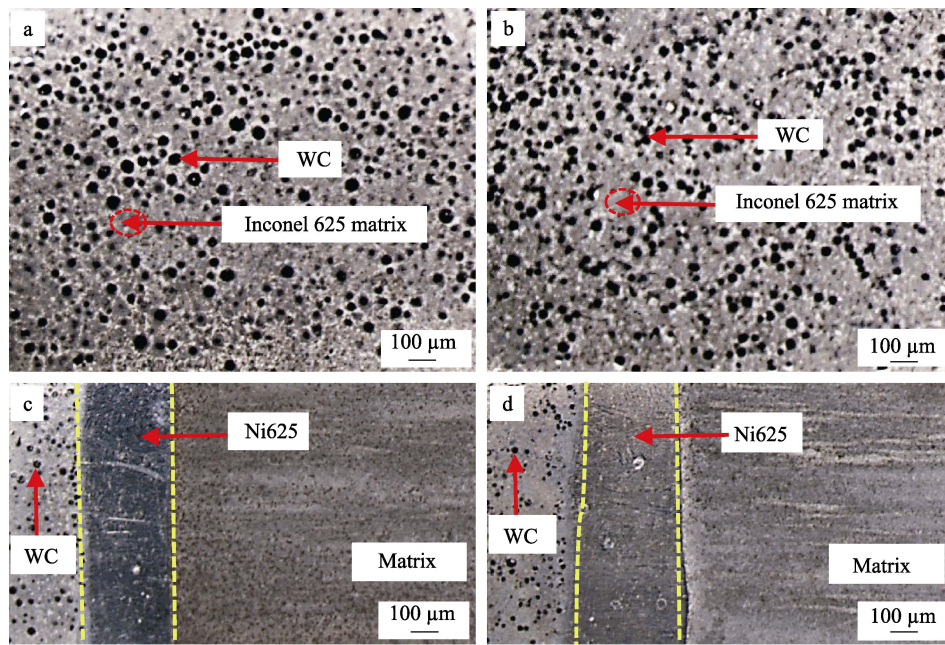


图6 C-p<sub>1</sub>表面(a)、截面(c)及C-p<sub>2</sub>表面(b)、截面(d)的宏观形貌图  
Fig.6 Macroscopic of surface (a), cross-section (c) of C-p<sub>1</sub> and surface (b), cross section (d) of C-p<sub>2</sub>

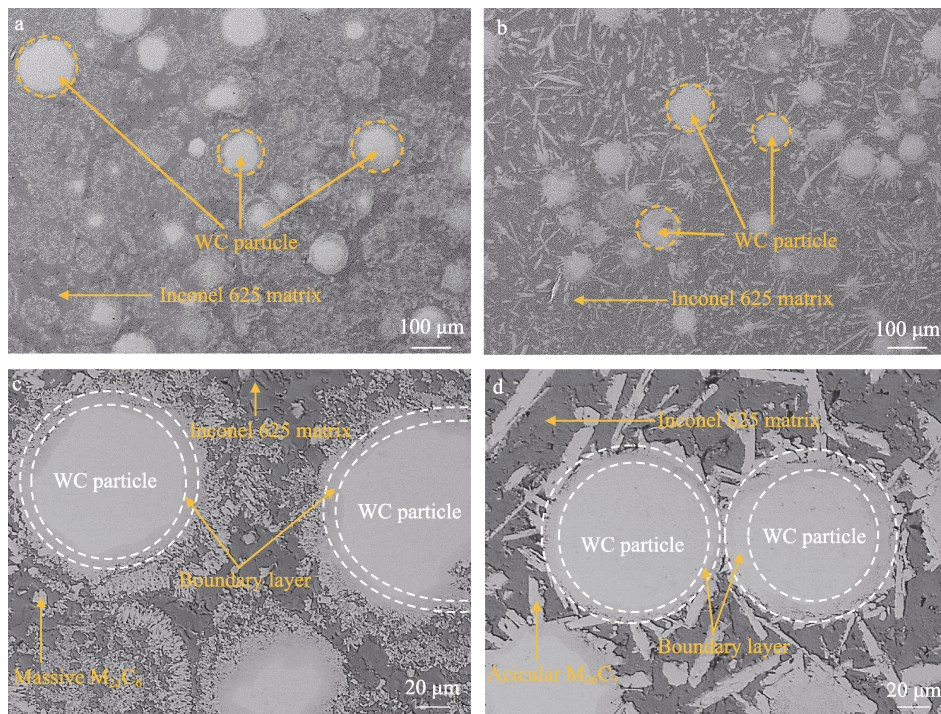


图7 C-p<sub>1</sub> (a, c)、C-p<sub>2</sub> (b, d)的微观组织结构  
Fig.7 Microstructure of C-p<sub>1</sub> (a, c), C-p<sub>2</sub> (b, d)

分向 Inconel 625 基体中扩散, 出现分散形核, 最终形成块状  $M_{23}C_6$ , 而 C-p<sub>2</sub> 经过 2 次热喷涂, 冷却时间延长, 成分扩散加强, Inconel 625 基体与 WC 颗粒中溶质原子浓度梯度增大, 组分过冷区加宽, 且第一次加热形成的块状  $M_{23}C_6$  与 Inconel 625 基体的接触面积较大, 产生择优取向, 更容易成核并生长为针状  $M_{23}C_6$ 。除此之外, 两涂层中的 WC 颗粒与 Inconel 625

基体相互作用, 使二者的界面处出现一层边界层。

为探究 Inconel 625/WC 边界层的特征, 对边界层进行元素扫描分析, 如图 8 所示。由元素分布可知, Inconel 625 基体中的 Ni、Cr、Fe 元素向 WC 颗粒内部扩散且 1# 的线扫描结果表明, Ni、Cr、Fe 元素主要集中在 Inconel 625 基体中, 而 W 元素主要集中在 WC 颗粒中, 从 WC 颗粒中心到 Inconel 625 基体, W

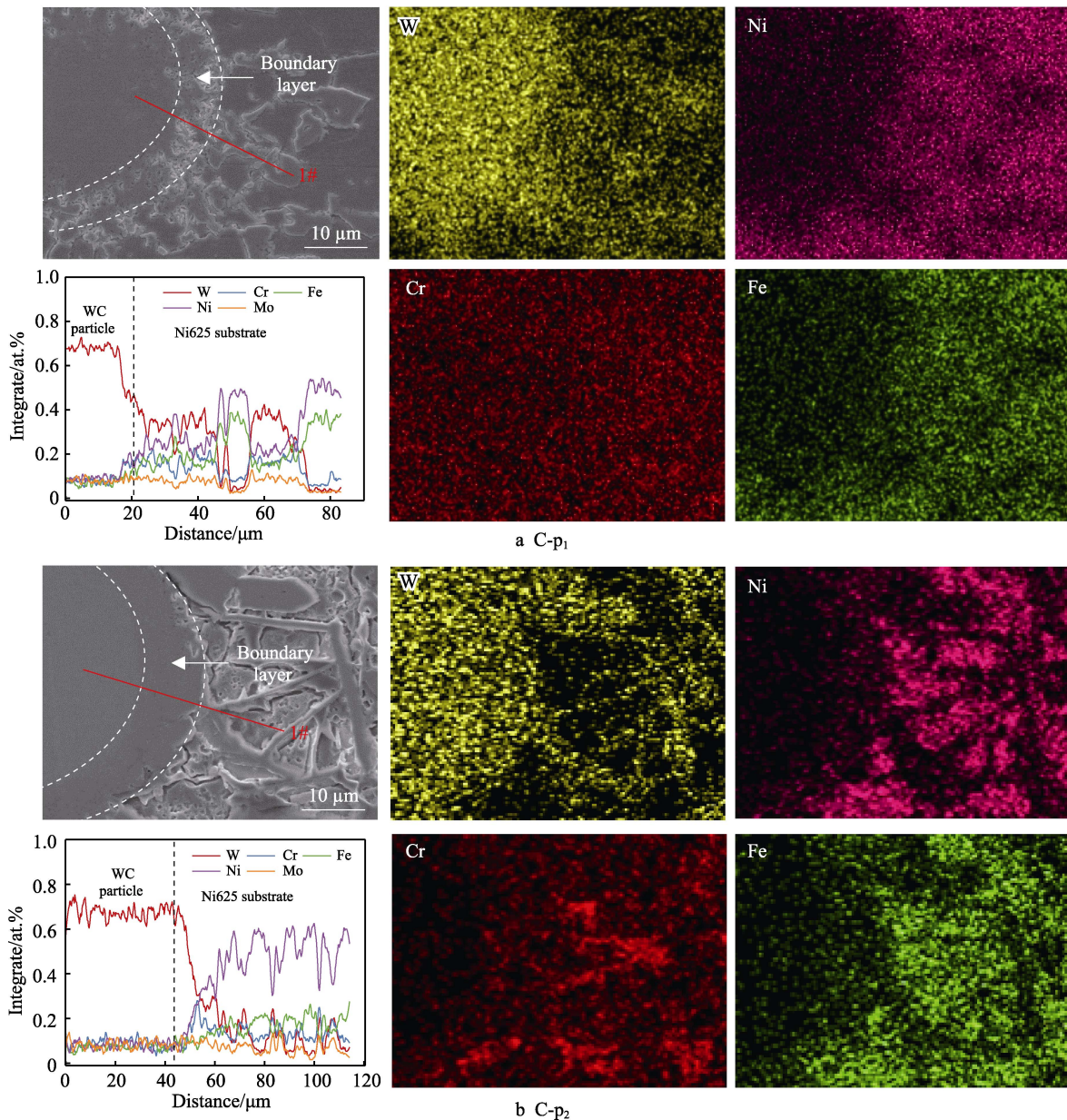


图 8 涂层微观组织结构及元素分布特征  
Fig.8 Element distribution and line scanning of coatings

元素的含量到边界层开始持续下降, 而 Ni、Cr、Fe 开始持续增加, Mo 的含量基本保持不变。表明 WC 和脱碳后的  $W_2C$  与 Inconel 625 中的 Ni、Cr、Fe、Mo 等元素在喷涂加热过程中相互扩散, 最终在 WC 颗粒和 Inconel 625 基体界面处形成一层元素扩散边界层。

## 2.2 静态电化学行为分析

图 9 为在 3.5% (质量分数) NaCl 溶液中静态浸泡下 C-p<sub>1</sub> 和 C-p<sub>2</sub> 在 1、2、4、8、12 h 的 Nyquist 图和 Bode 图。由图 9a 可见, C-p<sub>1</sub> 和 C-p<sub>2</sub> 的容抗弧半径随时间的延长不断增大, 并在 12 h 时达到最大, 且 C-p<sub>1</sub> 的容抗弧半径均大于 C-p<sub>2</sub>。图 9b 表明, 随浸

泡时间的延长试样表面产生氧化物膜而缓解了涂层的腐蚀。根据该电化学反应体系的特点, 选择拟合 Nyquist 曲线的等效电路, 如图 10 所示, 其中  $R_s$  为溶液电阻,  $Q_f$  和  $Q_{dl}$  为常相位角元件的电容, 用参数导纳 ( $Y_0$ ) 表示, 弥散系数 ( $n$ ) 可反映其契合程度, 其中  $n$  介于 0~1。 $Q_f$  是氧化物膜的电容,  $R_f$  为氧化物膜的电阻, 反映电极表面氧化物膜抵御腐蚀性离子侵入的能力<sup>[24]</sup>。 $R_{ct}$  为电荷转移电阻, 反映电荷通过电解质溶液和电极两相界面的转移步骤的难易程度大小。当  $Cl^-$  通过有破损的膜层时,  $R_{ct}$  和  $Q_{dl}$  的并联表示电荷转移电阻和熔覆层与 NaCl 溶液之间的双电层电容。 $R_f$ 、 $R_{ct}$  均以工作电极表面实际面积  $0.25 \text{ cm}^2$  进行换算, 拟合计算后得出的数据如表 2 所示。

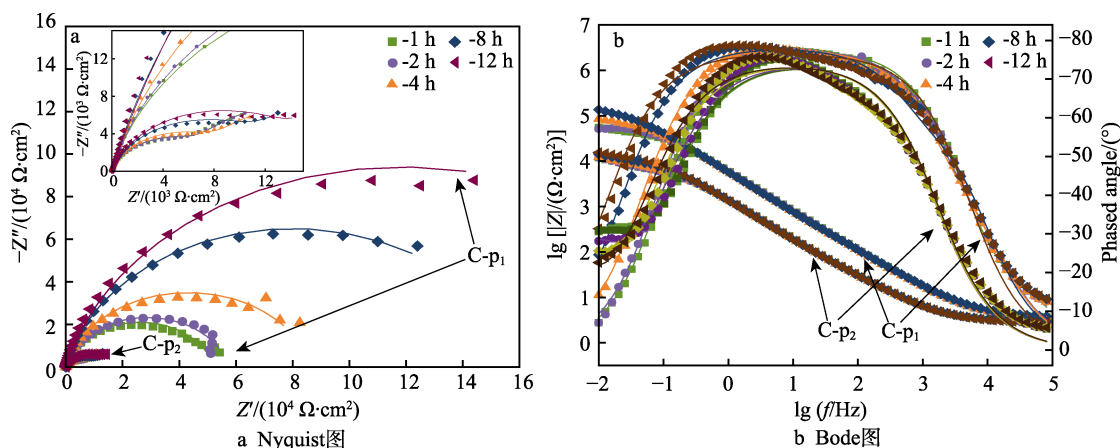


图9 等离子喷焊 Ni-WC 涂层  
Fig.9 Plasma sprayed Ni-WC coating: a) Nyquist diagram; b) Bode diagram

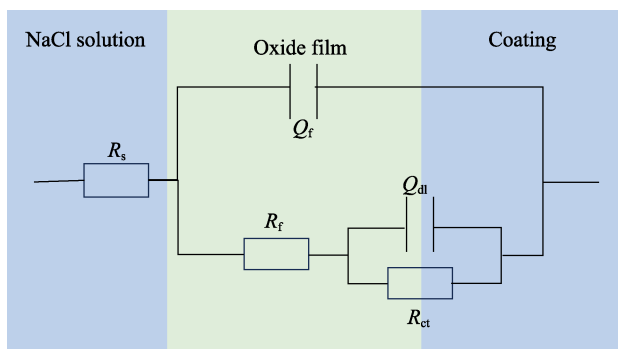


图10 Ni-WC 涂层电化学阻抗谱 (EIS) 的等效电路图  
Fig.10 Equivalent circuit diagram of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) of Ni-WC coating

$R_{sum}$  是反应过程的总阻抗, 通常用其表示材料的耐蚀性, 计算公式如下<sup>[25]</sup>:

$$R_{sum} = R_f + R_{ct} \quad (1)$$

式中:  $R_{sum}$  为极化电阻,  $\Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

随时间延长, C-p<sub>1</sub> 和 C-p<sub>2</sub> 的  $R_{sum}$  值均逐渐增大, 且 C-p<sub>1</sub> 的  $R_{sum}$  值大于 C-p<sub>2</sub>。在静态条件下, C-p<sub>1</sub> 和 C-p<sub>2</sub> 在 3.5% (质量分数) NaCl 溶液中测得的动电位

极化曲线, 如图 11 所示, 对应的拟合结果见表 3。 $J_{pass}$  为维钝电流密度,  $E_{corr}$  为自腐蚀电位, 根据腐蚀理论,  $E_{corr}$  值越正,  $J_{pass}$  值越小, 试样耐蚀性越强。表 3 表明, C-p<sub>1</sub> 的  $J_{pass}$  为  $1.29 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ , 而 C-p<sub>2</sub> 的  $J_{pass}$  为  $5.22 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 。C-p<sub>1</sub> 的  $J_{pass}$  比 C-p<sub>2</sub> 低 75.29%, 故在静态腐蚀条件下 C-p<sub>1</sub> 比 C-p<sub>2</sub> 具有更强的耐蚀性。由图 11 可知, C-p<sub>1</sub> 和 C-p<sub>2</sub> 的动电位极化曲线形状相似, 阳极发生钝化, 阴极由氧扩散控制。C-p<sub>2</sub> 中的 WC 颗粒尺寸更小, 边界层及针状  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  与 Inconel 625 基体形成电势差的区域增多, 在电势差存在区域发生电偶腐蚀, 加速腐蚀。

通过对比分析 2 种涂层静态电化学行为可知, C-p<sub>1</sub> 12 h 后的容抗弧半径比 C-p<sub>2</sub> 高 1 个数量级, C-p<sub>1</sub> 的  $R_{sum}$  为  $3.11 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , 而 C-p<sub>2</sub> 的  $R_{sum}$  为  $2.65 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , 比 C-p<sub>1</sub> 低 17.36%。除此之外, C-p<sub>2</sub> 的  $J_{pass}$  是 C-p<sub>1</sub> 的 4.05 倍。由此可见, 在静态腐蚀条件下, 粉末回收再利用制备的 Ni-WC 涂层耐蚀性较差, 不具有可行性。

### 2.3 Ni-WC 涂层冲刷腐蚀行为研究

C-p<sub>1</sub> 和 C-p<sub>2</sub> 冲刷腐蚀下的 Nyquist 图和 Bode 图,

表 2 等离子喷焊 Ni-WC 涂层静态 EIS 的等效电路元件拟合参数

Tab.2 Fitting parameters of equivalent circuit elements for static EIS of plasma sprayed Ni-WC coatings

Experimental condition	$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Q_f$		$R_f/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Q_{dl}$		$R_{ct}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$R_{sum}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	
		$Y_0/(\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^n)$	$n$		$Y_0/(\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^n)$	$n$			
C-p <sub>1</sub>	1 h	3.19	$1.183 \times 10^{-5}$	0.88	2.93	$2.07 \times 10^{-5}$	0.86	$5.21 \times 10^4$	$5.21 \times 10^4$
	2 h	3.51	$2.03 \times 10^{-5}$	0.87	12.4	$1.30 \times 10^{-6}$	0.86	$5.74 \times 10^4$	$5.74 \times 10^4$
	4 h	3.57	$2.12 \times 10^{-5}$	0.87	1.45	$1.37 \times 10^{-5}$	0.86	$8.64 \times 10^4$	$8.64 \times 10^4$
	8 h	3.74	$2.32 \times 10^{-5}$	0.87	41.58	$1.10 \times 10^{-4}$	0.87	$1.60 \times 10^5$	$1.60 \times 10^5$
	12 h	4.02	$3.51 \times 10^{-5}$	0.85	23.73	$4.72 \times 10^{-5}$	0.86	$3.11 \times 10^5$	$3.11 \times 10^5$
C-p <sub>2</sub>	1 h	3.02	$1.52 \times 10^{-4}$	0.83	9 080	$1.94 \times 10^{-3}$	0.99	$1.11 \times 10^4$	$2.02 \times 10^4$
	2 h	3.02	$1.56 \times 10^{-4}$	0.83	9 322	$2.03 \times 10^{-3}$	0.99	$1.10 \times 10^4$	$2.03 \times 10^4$
	4 h	3.03	$1.58 \times 10^{-4}$	0.83	10 660	$2.64 \times 10^{-3}$	0.99	$1.10 \times 10^4$	$2.17 \times 10^4$
	8 h	3.04	$1.59 \times 10^{-4}$	0.83	14 160	$3.68 \times 10^{-3}$	0.99	$1.20 \times 10^5$	$1.34 \times 10^5$
	12 h	2.93	$1.58 \times 10^{-4}$	0.83	16 860	$5.73 \times 10^{-3}$	0.99	$2.48 \times 10^5$	$2.65 \times 10^5$

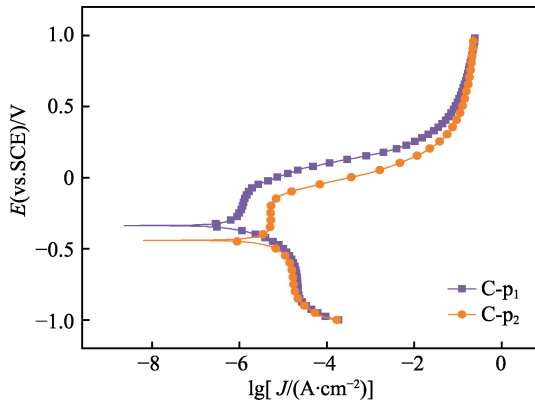


图 11 等离子喷焊 Ni-WC 涂层冲刷 12 h 后的动电位极化曲线

Fig.11 Potentiodynamic polarization curve of plasma sprayed Ni-WC coating after 12 h erosion

表 3 静态下涂层动电位极化曲线拟合获得的  $J_{pass}$  和  $E_{corr}$   
Tab.3  $J_{pass}$  and  $E_{corr}$  of coatings by fitting potentiodynamic polarization curve at static

Sample code	$J_{pass}/(A \cdot cm^{-2})$	$E_{corr}(vs. SCE)/V$
C-p <sub>1</sub>	$1.29 \times 10^{-6}$	-0.336
C-p <sub>2</sub>	$5.22 \times 10^{-6}$	-0.440

如图 12 所示。图中“1-0-2”指 C-p<sub>1</sub> 在冲刷角为 0°、冲刷速度为 2 m/s 条件下的曲线,其他标注以此类推。“2-0-2”指 C-p<sub>2</sub> 在冲刷角为 0°、冲刷速度为 2 m/s 条件下的曲线,其他标注以此类推。从图 12 可以发现,在各冲刷速度下,冲刷角从 0°~90°时,两涂层的容抗弧半径均先显著增大再缓慢减小。对比 C-p<sub>1</sub> 和 C-p<sub>2</sub> 可知,在 0°、45°和 90°时,C-p<sub>1</sub> 的容抗弧半径

均大于 C-p<sub>2</sub>,表明 C-p<sub>1</sub> 的耐蚀性高于 C-p<sub>2</sub>。随着冲刷速度的增加,两涂层的容抗弧半径逐渐减小。

根据涂层、溶液介质和 EIS 图谱的特征,选择与静态腐蚀条件下相同的等效电路,如图 10 所示。 $R_f$ 、 $R_{ct}$  均以工作电极表面实际面积  $0.25 \text{ cm}^2$  进行换算,C-p<sub>1</sub> 和 C-p<sub>2</sub> 在不同冲刷角和流速下电路元件的拟合参数,分别如表 4 和表 5 所示。各条件下, $R_f$  数值均较大,说明两涂层表面的氧化物膜对 Inconel 625 基体具有一定的保护性。在冲刷角为 0°、45°和 90°时,随冲刷速度的增大, $R_f$  和  $R_{ct}$  的主要变化趋势均为先增大后减小。当流体流经试样表面时,其过程可分解为 2 种:一种是平行于试样表面的切削过程,其中切削作用使涂层表面材料损失,另一种是垂直于涂层的冲击过程,导致涂层出现微裂纹,甚至材料脱落<sup>[26]</sup>。图 12 表明,涂层受切削影响更明显,切削通过削薄甚至移除涂层表面的 W、Ni、Cr、Fe、Mo 氧化物膜,使涂层表面裸露在 3.5%(质量分数)的 NaCl 溶液中,加速涂层的腐蚀,故冲刷角为 0°时耐蚀性最差。冲击力则是通过撞击或损伤涂层表面而产生冲蚀坑,但由于 Ni-WC 涂层自身具有耐腐蚀特性,不易产生点蚀。冲刷角为 45°时,虽然既受到切削也受到冲击的作用,但由于切削作用减弱,冲击占主导地位,同时涂层表面的氧化物膜对涂层产生了一定的保护作用,减缓了腐蚀。随冲刷角增大,C-p<sub>1</sub> 和 C-p<sub>2</sub> 的  $R_{sum}$  值均先增大后减小,且 C-p<sub>1</sub> 大于 C-p<sub>2</sub>。这是由于 C-p<sub>2</sub> 中 WC 颗粒尺寸较小,在腐蚀介质中边界层与 Inconel 625 基体接触面积增大,两者间的电势差导致电偶腐蚀,加剧了腐蚀。

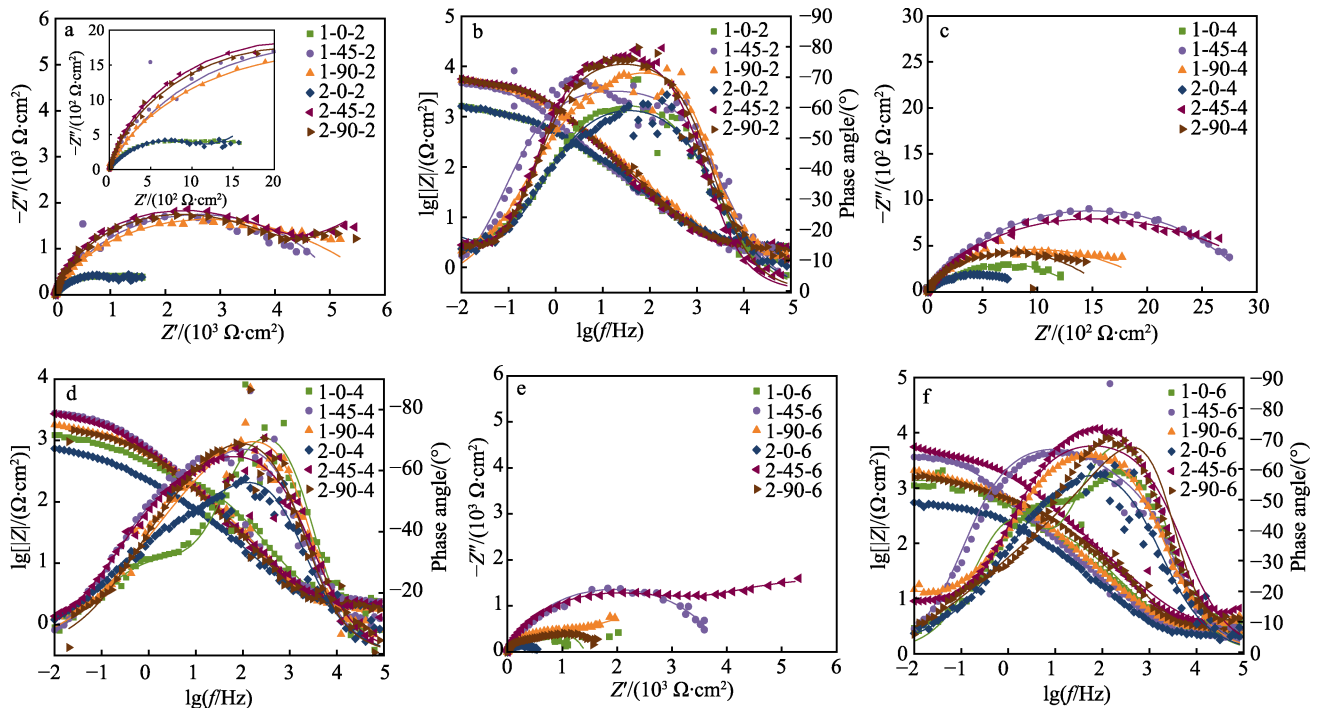


图 12 涂层在冲刷速度为 2 m/s (a~b)、4 m/s (c~d)、6 m/s (e~f),冲刷角为 0°、45°、90°条件下的 EIS 图  
Fig.12 EIS at 0°, 45° and 90° of coatings at the scouring velocity is 2 m/s (a-b), 4 m/s (c-d), 6 m/s (e-f)

图 13 为 3.5% (质量分数) NaCl 溶液中不同冲刷角下等离子喷焊 Ni-WC 涂层冲刷腐蚀动电位极化曲线。结果表明, 两涂层的动电位极化曲线表现出相似的特点, 涂层阳极曲线和阴极曲线表现为活性溶解状态。表 6 和表 7 分别为 C-p<sub>1</sub> 和 C-p<sub>2</sub> 的动电位极化曲线拟合数据。自腐蚀电流密度 ( $J_{corr}$ ) 增大, 涂层的耐蚀性降低。由表 6 和表 7 可知, 在 2、4 和 6 m/s 条件下, 随着冲刷角的增加, 二者的  $J_{corr}$  均先减小后

增大, 表明涂层的耐蚀性先增大后减小, 这与阻抗结果一致。而冲刷角为 0° 时, 由于切削作用涂层氧化物膜破坏, Inconel 625 基体与边界层接触形成微电偶, 加剧腐蚀的发生。对比可见, C-p<sub>2</sub> 的  $J_{corr}$  均大于 C-p<sub>1</sub>, C-p<sub>2</sub> 与 C-p<sub>1</sub> 的  $J_{corr}$  在同一个数量级, 耐蚀性未呈现降低趋势。这是由于 C-p<sub>2</sub> 中 WC 颗粒分布更均匀且 WC 颗粒更小, 边界层与腐蚀介质接触面积增大, 加剧了电偶腐蚀。

表 4 C-p<sub>1</sub>冲刷腐蚀条件下 EIS 的等效电路元件拟合参数

Tab.4 Fitting parameters of equivalent circuit elements of EIS of C-p<sub>1</sub> under erosion-corrosion conditions

C-p <sub>1</sub> Experimental condition	$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Q_f$			$R_f/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Q_{dl}$			$R_{ct}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$R_{sum}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$
		$Y_0/(\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^n)$	$n$			$Y_0/(\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^n)$	$n$			
2 m/s	0°	2.37	$3.94 \times 10^{-4}$	0.73	1 106	$4.17 \times 10^{-3}$	0.57	$1.20 \times 10^3$	$2.31 \times 10^2$	
	45°	1.74	$3.07 \times 10^{-4}$	0.75	5 244	$6.04 \times 10^{-4}$	0.89	$6.24 \times 10^3$	$1.15 \times 10^3$	
	90°	3.73	$1.37 \times 10^{-4}$	0.51	2.888	$7.01 \times 10^{-5}$	0.88	$6.11 \times 10^3$	$6.11 \times 10^3$	
4 m/s	0°	1.01	$2.44 \times 10^{-4}$	0.87	1.04	$7.71 \times 10^{-3}$	0.69	$0.82 \times 10^3$	$8.21 \times 10^2$	
	45°	2.48	$1.27 \times 10^{-4}$	0.84	3 057	$2.69 \times 10^{-4}$	0.61	$2.7 \times 10^3$	$5.76 \times 10^3$	
	90°	6.48	$4.39 \times 10^{-4}$	0.46	1.45	$5.94 \times 10^{-5}$	0.93	$2.15 \times 10^3$	$2.15 \times 10^3$	
6 m/s	0°	2.49	$6.24 \times 10^{-5}$	0.99	82.83	$5.35 \times 10^{-4}$	0.72	$1.39 \times 10^3$	$1.47 \times 10^3$	
	45°	1.98	$2.50 \times 10^{-4}$	0.78	49.79	$8.90 \times 10^{-4}$	0.76	$3.85 \times 10^3$	$3.90 \times 10^3$	
	90°	2.59	$2.26 \times 10^{-4}$	0.78	75.62	$1.56 \times 10^{-3}$	0.30	$3.41 \times 10^3$	$3.49 \times 10^3$	

表 5 C-p<sub>2</sub>冲刷腐蚀条件下 EIS 的等效电路元件拟合参数

Tab.5 Fitting parameters of equivalent circuit elements of EIS of C-p<sub>2</sub> under erosion-corrosion conditions

C-p <sub>2</sub> Experimental condition	$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Q_f$			$R_f/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Q_{dl}$			$R_{ct}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$R_{sum}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$
		$Y_0/(\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^n)$	$n$			$Y_0/(\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^n)$	$n$			
2 m/s	0°	2.46	$3.93 \times 10^{-4}$	0.71	1 213	$4.17 \times 10^{-3}$	0.57	$7.08 \times 10^2$	$1.92 \times 10^3$	
	45°	2.72	$1.15 \times 10^{-2}$	0.88	4 134	$6.04 \times 10^{-4}$	0.89	$2.27 \times 10^3$	$6.40 \times 10^3$	
	90°	2.44	$1.16 \times 10^{-4}$	0.85	4 118	$7.01 \times 10^{-5}$	0.88	$2.07 \times 10^3$	$6.19 \times 10^3$	
4 m/s	0°	6.21	$4.39 \times 10^{-4}$	0.46	1.455	$5.94 \times 10^{-5}$	0.93	$2.15 \times 10^3$	$2.15 \times 10^3$	
	45°	2.13	$2.08 \times 10^{-4}$	0.79	361.9	$2.23 \times 10^{-4}$	0.43	$3.04 \times 10^3$	$3.40 \times 10^3$	
	90°	2.01	$1.45 \times 10^{-4}$	0.86	268.0	$4.63 \times 10^{-3}$	0.52	$1.37 \times 10^3$	$1.64 \times 10^3$	
6 m/s	0°	1.99	$4.69 \times 10^{-4}$	0.76	113.9	$1.18 \times 10^{-3}$	0.38	$4.99 \times 10^2$	$6.13 \times 10^2$	
	45°	3.23	$8.55 \times 10^{-5}$	0.80	3 199	$1.88 \times 10^{-3}$	0.80	$6.02 \times 10^3$	$9.22 \times 10^3$	
	90°	2.59	$2.26 \times 10^{-4}$	0.78	75.62	$1.56 \times 10^{-3}$	0.50	$3.41 \times 10^3$	$3.49 \times 10^3$	

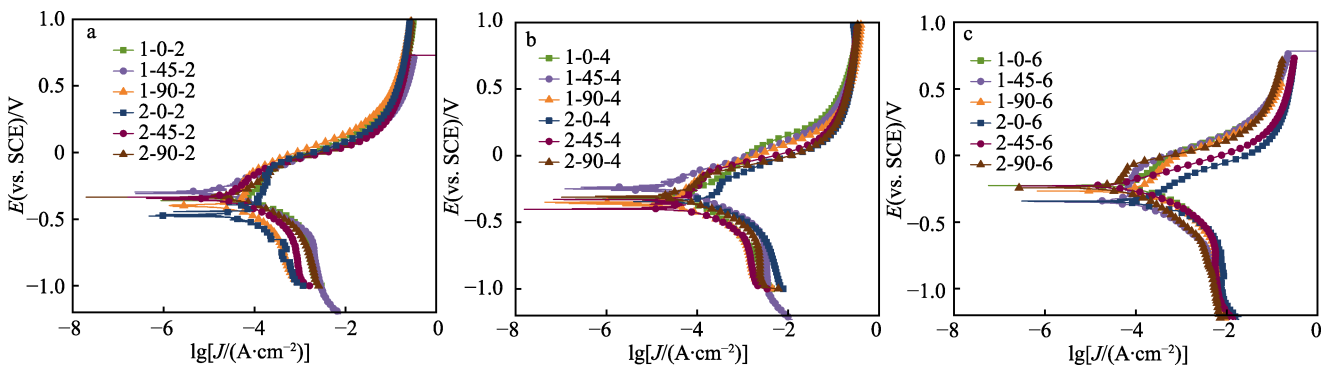


图 13 涂层在冲刷速度为 2 m/s (a)、4 m/s (b)、6 m/s (c), 冲刷角为 0°、45°、90° 条件下的动电位极化曲线  
Fig.13 Potentiodynamic polarization curves at 0°, 45° and 90° of coatings at the scouring velocity is 2 m/s (a), 4 m/s (b), 6 m/s (c)

表 6 C-p<sub>1</sub> 动电位极化曲线拟合获得的  $J_{corr}$  和  $E_{corr}$   
**Tab.6  $J_{corr}$  and  $E_{corr}$  of C-p<sub>1</sub> by fitting potentiodynamic polarization curve**

Experimental condition	C-p <sub>1</sub>	$J_{corr}/(A \cdot cm^{-2})$	$E_{corr}(vs. SCE)/V$
2 m/s	0°	$2.57 \times 10^{-4}$	-0.36
	45°	$5.07 \times 10^{-6}$	-0.30
	90°	$1.22 \times 10^{-6}$	-0.39
4 m/s	0°	$5.97 \times 10^{-5}$	-0.33
	45°	$2.37 \times 10^{-6}$	-0.25
	90°	$1.12 \times 10^{-6}$	-0.35
6 m/s	0°	$1.98 \times 10^{-4}$	-0.23
	45°	$4.72 \times 10^{-5}$	-0.34
	90°	$4.74 \times 10^{-4}$	-0.27

表 7 C-p<sub>2</sub> 中极化曲线拟合获得的  $J_{corr}$  和  $E_{corr}$   
**Tab.7  $J_{corr}$  and  $E_{corr}$  of C-p<sub>2</sub> by fitting polarization curve**

Experimental condition	C-p <sub>2</sub>	$J_{corr}/(A \cdot cm^{-2})$	$E_{corr}(vs. SCE)/V$
2 m/s	0°	$2.46 \times 10^{-5}$	-0.33
	45°	$7.63 \times 10^{-6}$	-0.34
	90°	$6.19 \times 10^{-6}$	-0.47
4 m/s	0°	$7.49 \times 10^{-4}$	-0.34
	45°	$6.59 \times 10^{-6}$	-0.38
	90°	$1.74 \times 10^{-5}$	-0.31
6 m/s	0°	$1.04 \times 10^{-4}$	-0.24
	45°	$4.72 \times 10^{-5}$	-0.23
	90°	$1.55 \times 10^{-4}$	-0.34

## 2.4 冲刷腐蚀机理研究

### 2.4.1 冲刷腐蚀形貌分析

图 14 为 C-p<sub>1</sub> 和 C-p<sub>2</sub> 在 3.5% (质量分数) NaCl 溶液中冲刷 12 h 后的腐蚀形貌图。涂层表面存在明显的冲刷痕迹和冲刷坑。随冲刷角从 90° 减小到 0°, 涂层表面的冲刷痕迹增多且异常明显, 氯化钠沉积现象减弱, 涂层表面氧化产物膜减薄而更易被破坏, 点蚀坑增多, 且主要出现在 WC 颗粒边界处, 这是由于涂层受切削作用影响更明显, 流速、切削及 Cl<sup>-</sup> 协同作用使涂层表面被严重破坏。而对比 C-p<sub>1</sub> 和 C-p<sub>2</sub> 的形貌发现 C-p<sub>2</sub> 的冲刷坑更多、尺寸更大, 原因在于 C-p<sub>2</sub> 中针状 M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 与基体接触面积更大, Inconel 625 基体与 M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 接触形成的电偶腐蚀更显著, 从而加速腐蚀。

### 2.4.2 冲刷腐蚀机理分析

图 15 为两涂层在冲刷角为 0° 和 90° 时的冲刷腐蚀机制图。在冲刷腐蚀时, 涂层中 Inconel 625 基体中 Ni 较耐腐蚀, 故在阳极区域主要由 Ni 控制, Ni 在腐蚀介质中失电子形成 Ni<sup>2+</sup>, Ni 失电子方程式如式 (2) 所示。OH<sup>-</sup> 在溶液中倾向于吸附在 WC 颗粒表面, 能够减缓 Cl<sup>-</sup> 的穿透<sup>[27]</sup>。Ni 失电子后与涂层中的 OH<sup>-</sup> 和溶液中存在的 H<sub>2</sub>O 发生反应生成 NiO 和 NiOOH 覆盖在涂层表面, 减缓了腐蚀的发生, 同时生成的 FeOOH 在涂层表面累积后, 减小了活性区域, 也减缓了腐蚀的发生。反应式如式 (3) ~ (7):

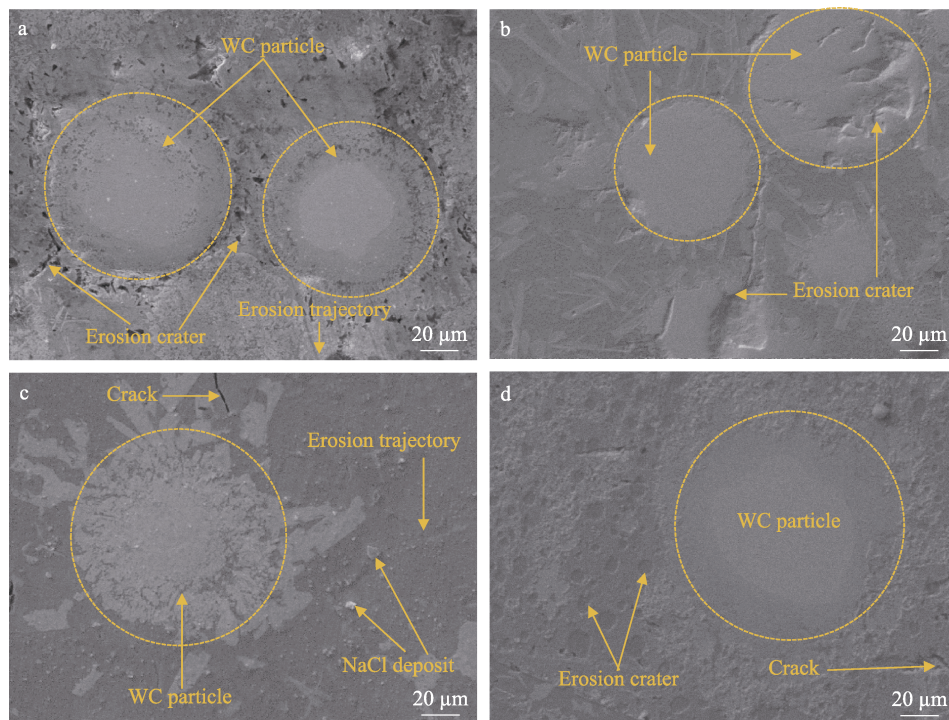
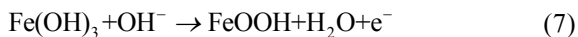
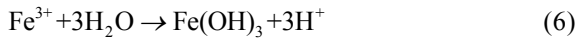
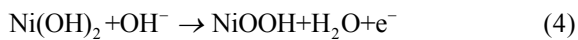
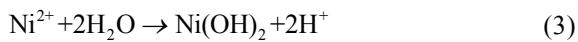


图 14 6 m/s 时 C-p<sub>1</sub> 在 0° (a)、90° (c) 及 C-p<sub>2</sub> 在 0° (b)、90° (d) 冲刷 12 h 后的腐蚀形貌特征  
 Fig.14 Corrosion morphology characteristics of C-p<sub>1</sub> at 0° (a), 90° (c) and C-p<sub>2</sub> at 0° (b), 90° (d) after 12 h erosion at 6 m/s



此外, Inconel 625 基体中的 Ni 在 3.5% (质量分数) NaCl 溶液中反应, 减小了对 WC 的黏附作用<sup>[28]</sup>, 同时 Inconel 625 基体和 WC 颗粒边界层之间存在电势差, 形成微电偶, 加速腐蚀的发生<sup>[29]</sup>。图 15 表明,

在冲刷角为 0° 时, 两涂层主要受切削作用影响, 涂层表面氧化物膜被破坏产生点蚀坑, 点蚀坑处涂层与腐蚀介质接触产生电偶腐蚀, 加速了腐蚀。在冲刷角为 90° 时, 两涂层主要受冲击作用影响, 涂层表面受到撞击, 损伤涂层表面氧化物膜, 产生点蚀, 点蚀坑处涂层与腐蚀介质接触产生电偶腐蚀, 加速了腐蚀。而 C-p<sub>2</sub> 中 WC 颗粒尺寸小且针状 M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 与涂层表面接触面积大, 点蚀坑增多, 边界层和 M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 与 Inconel 625 基体之间的电势差增大, 加速了腐蚀。

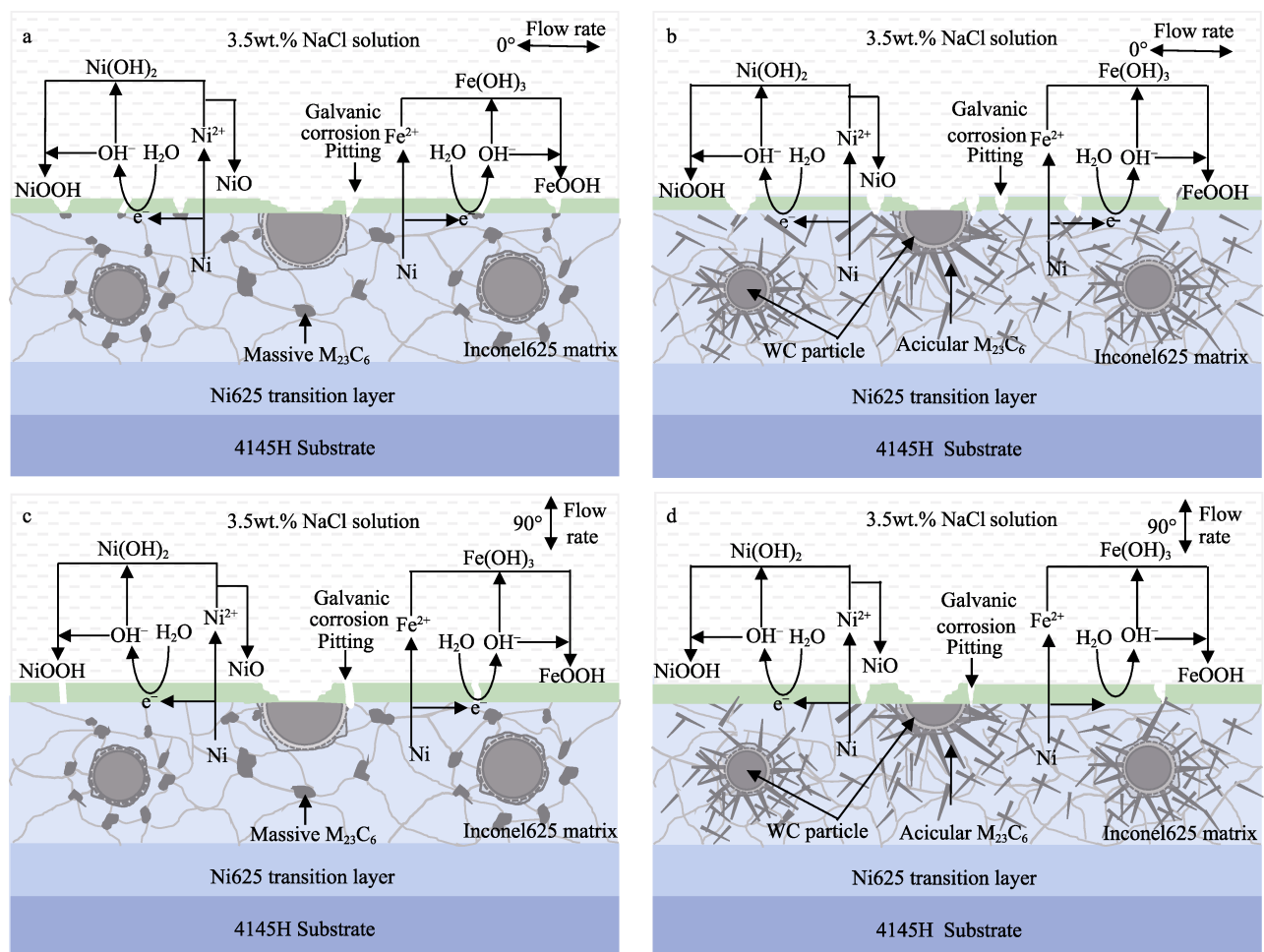


图 15 C-p<sub>1</sub> 在 0° (a)、90° (c) 和 C-p<sub>2</sub> 在 0° (b)、90° (d) 冲刷 12 h 后的腐蚀机制  
Fig.15 Corrosion mechanism of C-p<sub>1</sub> at 0° (a), 90° (c) and C-p<sub>2</sub> at 0°(b), 90° (d) after 12 h erosion

### 3 结论

本文研究了新粉和回收粉制备的等离子喷焊 Ni-WC 涂层在 3.5% (质量分数) NaCl 溶液中的静态及冲刷腐蚀行为和机制, 探究了粉末回收再利用对涂层微观组织结构及静态腐蚀、冲刷腐蚀行为的影响规律, 得出以下结论:

1) 两涂层中 WC 颗粒和 Inconel 625 基体结合良好, 除  $\gamma$ -Ni (W, Cr, Fe)、W<sub>2</sub>C、WC 之外, C-p<sub>1</sub> 另含块状 M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 而 C-p<sub>2</sub> 另含针状 M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, 并分别在两涂层中 WC 颗粒与 Inconel 625 基体界面发现一层边界层。

2) 在静态腐蚀下, 两涂层的耐蚀性均随时间增大而增大, 且在第 12 h 时最大, C-p<sub>1</sub> 的  $J_{\text{corr}}$  为  $2.09 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ , 而 C-p<sub>2</sub> 的  $J_{\text{corr}}$  为  $1.03 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ , 在静态腐蚀条件下 C-p<sub>1</sub> 比 C-p<sub>2</sub> 具有更强的耐蚀性。

3) 在冲刷腐蚀状态下, 随冲刷角从 0° 增加到 90°, 两涂层的耐蚀性均先增大后减小, 且在 0° 时耐蚀性最差。涂层受切削影响更明显, 通过削薄甚至移除涂层表面的氧化物膜, 使涂层表面裸露在 3.5% (质量分数) NaCl 溶液中, 会加速涂层的腐蚀。在冲刷腐蚀条件下, 两涂层的  $J_{\text{corr}}$  在同一个数量级上, 说明面向冲刷腐蚀工况的 Ni-WC 涂层, 使用回收粉进行制备具有可行性。

## 参考文献:

- [1] 梁晨帆, 王瑜, 李颖杰, 等. 激光淬火参数对钻具 4145H 钢磨损性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(6): 147-156.  
LIANG C F, WANG Y, LI Y J, et al. Effect of Laser Quenching Parameters on Wear Performance of 4145H Steel for Drilling Tools[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2021, 42(6): 147-156.
- [2] 傅登伟, 郑可新, 李博伦, 等. 35CrMo 钢在含砂胍胶溶液中的冲刷腐蚀行为和机理[J]. 腐蚀与防护, 2023, 44(5): 13-18.  
FU D W, ZHENG K X, LI B L, et al. Erosion Corrosion Behavior and Mechanism of 35CrMo Steel in Solution Containing Guargum and Sand[J]. Corrosion & Protection, 2023, 44(5): 13-18.
- [3] XU Y Z, ZHANG Q L, REN W B, et al. Interaction of Erosion and Corrosion on High-Strength Steels Used for Marine Dredging Engineering[J]. Wear, 2024, 544: 205309.
- [4] ZHAO Y L, YE F X, ZHANG G, et al. Investigation of Erosion-Corrosion Behavior of Q235B Steel in Liquid-Solid Flows[J]. Petroleum Science, 2022, 19(5): 2358-2373.
- [5] WANG H K, ZHAO X Y, YU Y, et al. Numerical Simulation Method of Erosion-Corrosion of High-Pressure X65 Pipe Bends in CO<sub>2</sub> Corrosion Environment[J]. Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design, 2024, 7(3): 2461-2487.
- [6] 王亚楠, 刘涛, 郭章伟, 等. Ni-WC 涂层在饱和 H<sub>2</sub>S 溶液中的磨损和腐蚀行为[J]. 中国表面工程, 2019, 32(4): 63-73.  
WANG Y N, LIU T, GUO Z W, et al. Wear and Corrosion Behaviour of Ni-WC Coatings in Sulfuretted Hydrogen Medium[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(4): 63-73.
- [7] 鲁宏, 戴魏魏, 蒋立鹤, 等. 超音速火焰喷涂 WC 基金属陶瓷涂层的长期腐蚀行为[J]. 热加工工艺, 2022, 51(24): 72-77.  
LU H, DAI W W, JIANG L H, et al. Long-Term Corrosion Behavior of WC-Based Cermet Coatings by HVOF Spraying[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(24): 72-77.
- [8] 宋长虹, 高峰, 白智辉. 等离子喷涂 WC-CrC-Ni 涂层与 WC-<sup>12</sup>Co 涂层的性能研究[J]. 热喷涂技术, 2017, 9(3): 26-30.  
SONG C H, GAO F, BAI Z H. Research on Performance of WC-CrC-Ni Coating and WC-<sup>12</sup>Co Coating Produced by APS[J]. Thermal Spray Technology, 2017, 9(3): 26-30.
- [9] MASSARD Q, SI-MOHAND H, CABROL E. Study on the Recycling of 100Cr6 Powder by Plasma Spheroidization for Laser Powder Bed Fusion[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27: 5889-5895.
- [10] GORJI N E, O'CONNOR R, BRABAZON D. X-Ray Tomography, AFM and Nanoindentation Measurements for Recyclability Analysis of 316L Powders in 3D Printing Process[J]. Procedia Manufacturing, 2020, 47: 1113-1116.
- [11] STRONDL A, LYCKFELDT O, BRODIN H, et al. Characterization and Control of Powder Properties for Additive Manufacturing[J]. JOM, 2015, 67(3): 549-554.
- [12] ARDILA L C, GARCIANDIA F, GONZÁLEZ-DÍAZ J B, et al. Effect of IN718 Recycled Powder Reuse on Properties of Parts Manufactured by Means of Selective Laser Melting[J]. Physics Procedia, 2014, 56: 99-107.
- [13] SABOORI A, AVERSA A, BOSIO F, et al. An Investigation on the Effect of Powder Recycling on the Microstructure and Mechanical Properties of AISI 316L Produced by Directed Energy Deposition[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 766: 138360.
- [14] BELLINI C, BERTO F, BORRELLI R, et al. Effects of Recycling on Defects and Microstructure in Ti-6Al-4V Powder Particles and Samples Fabricated by Electron Beam Melting Process[J]. Procedia Structural Integrity, 2023, 47: 359-369.
- [15] RICHTER J, WEGENER T, KRATZSCH R, et al. On the Structural Integrity and Fatigue Performance of Additively Manufactured Ti-6Al-4V Parts Processed Using Mechanically Recycled Powders[J]. International Journal of Fatigue, 2023, 176: 107903.
- [16] 邢志国, 吕振林, 谢辉. SiC/环氧树脂复合材料冲蚀磨损性能的研究[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(3): 291-295.  
XING Z G, LYU Z L, XIE H. Erosion Wear Behaviors of SiC/Epoxy Resin Composite[J]. Tribology, 2010, 30(3): 291-295.
- [17] 蒋业华, 周荣, 卢德宏. 冲击角度对 WC/铁基表面复合材料冲蚀磨损性能的影响[J]. 铸造, 2004, 53(7): 521-524.  
JIANG Y H, ZHOU R, LU D H. Effects of Impact Angle on Erosive Resistance of WC/Cast Iron Matrix Surface Composites[J]. Foundry, 2004, 53(7): 521-524.
- [18] 刘晓斌, 康嘉杰, 岳文, 等. HVOF 金属陶瓷涂层的冲蚀失效行为研究现状[J]. 材料导报, 2018, 32(S1): 312-316.
- [19] LIU X B, KANG J J, YUE W, et al. Research Status of Erosion Failure Behavior of HVOF Sprayed Cermet Coatings[J]. Materials Reports, 2018, 32(S1): 312-316.
- [20] CHEN Y R, WU Y P, HONG S, et al. The Effect of Impingement Angle on Erosion Wear Characteristics of HVOF Sprayed WC-Ni and WC-Cr-Ni Cermet Composite Coatings[J]. Materials Research Express, 2020, 7(2): 026503.
- [20] 侯素娟, 李新梅, 梁存光, 等. 冲蚀角对等离子喷涂 WC-12Co 涂层冲蚀磨损的影响[J]. 热加工工艺, 2020, 49(16): 109-113.  
HOU S J, LI X M, LIANG C G, et al. Effect of Erosion Angle on Erosion Wear of Plasma Sprayed WC-12Co Coatings[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(16):

- 109-113.
- [21] 王东生, 田宗军, 王松林, 等. 等离子喷涂 WC 颗粒增强 Ni 基涂层组织及抗冲蚀性能[J]. 热加工工艺, 2012, 41(4): 136-139.  
WANG D S, TIAN Z J, WANG S L, et al. Microstructure and Erosion Resistance of WC Particles Reinforced Ni-Based Plasma-Sprayed Coating[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(4): 136-139.
- [22] SHARMA S, SANGAL S, MONDAL K. On the Optical Microscopic Method for the Determination of Ball-on-Flat Surface Linearly Reciprocating Sliding Wear Volume[J]. Wear, 2013, 300(1/2): 82-89.
- [23] YAO J H, ZHANG J, WU G L, et al. Microstructure and Wear Resistance of Laser Cladded Composite Coatings Prepared from Pre-Alloyed WC-NiCrMo Powder with Different Laser Spots[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 101: 520-530.
- [24] LOPERENA A P, SAIDMAN S B, LEHR I L. Improvement in Corrosion Resistance of AZ91D Mg Alloy in Simulated Body Fluid by Cerium-Based/Stearic Acid Composite Coatings[J]. Corrosion Communications, 2024, 14: 11-22.
- [25] 赵朋飞, 文磊, 郭文营, 等. 高强铝合金循环盐雾加速腐蚀行为与机理研究[J]. 表面技术, 2022, 51(10): 260-268.  
ZHAO P F, WEN L, GUO W Y, et al. Accelerated Corrosion Behavior and Mechanism of High-Strength Aluminum Alloy by Cyclic Salt-Spray Test[J]. Surface Technology, 2022, 51(10): 260-268.
- [26] 王勤英, 裴芮, 西宇辰. 镍基激光熔覆层冲刷腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2019, 39(5): 458-462.  
WANG Q Y, PEI R, XI Y C. Erosion-Corrosion Behavior of Laser-Clad Ni-Based Alloy Coating on Q235 Carbon Steel[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2019, 39(5): 458-462.
- [27] JAYARAJ J, OLSSON M. Effect of Tribo-Layer on the Corrosion Behavior of WC-Co and WC-Ni Cemented Carbides in Synthetic Mine Water[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2021, 100: 105621.
- [28] LU K L, SHEN C J, HE Y Z, et al. Effect of Solute Elements (Cr, Mo, Fe, Co) on the Adhesion Properties of WC/Ni-Based Binder Interface: A First-Principles Study[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2021, 98: 105563.
- [29] 韩彬, 董威威, 骆祎岚, 等. 金属元素对 WC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合材料在 NaCl 溶液中腐蚀行为的影响研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2022, 50(6): 33-40.  
HAN B, DONG W W, LUO Y L, et al. Effect of Metal Elements on Corrosion Behavior of WC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite in NaCl Solution[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2022, 50(6): 33-40.
- 
- (上接第 73 页)
- [57] 史述宾, 戴雷, 周楠, 等. 硅溶胶改性磷酸盐无机涂料制备及其防腐性能研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2017, 29(1): 48-52.  
SHI S B, DAI L, ZHOU N, et al. Preparation and Anti-Corrosion Properties of Phosphate Inorganic Coating Modified by Silica Sol[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2017, 29(1): 48-52.
- [58] 刘继江. 磷酸盐胶黏剂的制备及性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.  
LIU J J. Preparation and Properties of Phosphate Adhesive[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007.
- [59] HONG L Y, HAN H J, HA H, et al. Development of Cr-Free Aluminum Phosphate Binders and Their Composite Applications[J]. Composites Science and Technology, 2007, 67(6): 1195-1201.
- [60] COLONETTI E, HOBOLD KAMMER E, DE NONI A Jr. Chemically-Bonded Phosphate Ceramics Obtained from Aluminum Anodizing Waste for Use as Coatings [J]. Ceramics International, 2014, 40(9): 14431-14438.
- [61] CHEN D C, HE L P, SHANG S P. Study on Aluminum Phosphate Binder and Related Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC Ceramic Coating[J]. Materials Science and Engineering: A, 2003, 348(1/2): 29-35.
- [62] 秦真波, 夏大海, 吴忠, 等. 磷酸盐无机涂料及其研究进展[J]. 表面技术, 2019, 48(12): 34-42.  
QIN Z B, XIA D H, WU Z, et al. Phosphate Inorganic Coating and Its Research Progress[J]. Surface Technology, 2019, 48(12): 34-42.
- [63] 王政阅. 磷酸盐耐热涂层的制备及固化机理的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2007.  
WANG Z Y. Study on Preparation and Curing Mechanism of Phosphate Heat-resistant Coating[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [64] 徐三强. 常温自固化无机磷酸盐防腐涂层的制备及性能研究[D]. 海口: 海南大学, 2015.  
XU S Q. Preparation and Properties of Self-curing Inorganic Phosphate Anticorrosion Coating at Room Temperature[D]. Haikou: Hainan University, 2015.
- [65] LIU F J, YANG M, HAN B, et al. Development of T-ZnOw@Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Incorporated Low-Temperature Curing Aluminium Phosphate Coating on Ti-6Al-4V Alloy[J]. Ceramics International, 2019, 45(15): 18406-18412.
- [66] LIU H L, SONG L. The Development of a New Compound Curing Agent for a Modified Self-Cured Phosphate Foundry Binder[J]. International Journal of Metalcasting, 2022, 16(1): 204-211.