

# 超音速火焰喷涂 WC-12Co、WC-10Co4Cr 和 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 涂层在不同介质中摩擦行为研究

罗鑫<sup>1</sup>, 王韶毅<sup>1,2</sup>, 洪源昆<sup>1</sup>, 吴佳逸<sup>1</sup>, 骆宛卿<sup>1</sup>, 钟志强<sup>2</sup>, 羊求民<sup>1,2</sup>

(1. 江西理工大学 材料冶金化学学部, 江西 赣州 341000)

(2. 崇义章源钨业股份有限公司, 江西 赣州 341000)

**摘要:** 为了研究硬面涂层在不同介质中的摩擦行为, 以 WC-12Co、WC-10Co4Cr 和 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 硬面材料为原料, 采用超音速火焰喷涂 (HVOF) 技术制备得到了 3 种不同成分的硬面涂层。通过显微硬度计、摩擦磨损仪和扫描电镜等对涂层的硬度及摩擦磨损形貌进行分析。结果表明, 涂层中的孔隙率和粘结相的含量密切相关, 当粘结相质量分数为 12%(Co)时, 其孔隙率为 1.11%; 粘结相质量分数为 14%(CoCr)时, 其孔隙率为 0.98%; 粘结相质量分数为 25%(NiCr)时, 其孔隙率降低为 0.92%。空气中, WC-10Co4Cr 的硬度最高, 其摩擦系数最小; Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 的硬度最小, 其摩擦系数最大。1 mol/L HCl 的环境中, NiCr 的耐腐蚀性能最好, 使 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 涂层的摩擦系数稳定; 而纯 Co 和 CoCr 的耐腐蚀性能较差, 使 WC-10Co4Cr 和 WC-12Co 涂层的摩擦系数呈现出波浪状的变化规律。1 mol/L NaOH 的环境的摩擦过程中, 硬质相的腐蚀会使涂层表面的硬度下降, 使摩擦系数增加。

**关键词:** 超音速火焰喷涂; 硬面涂层; 介质; 摩擦性能

中图分类号: TG174.442<sup>+</sup>.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)12-4682-07

磨损和腐蚀是现代工业设备运行过程中失效的主要形式。通过在表面涂覆一层耐磨耐蚀的硬面涂层是有效提高材料性能, 延长部件使用寿命的方法。硬面涂层的制备方法主要有电镀硬铬、等离子堆焊和热喷涂等<sup>[1-3]</sup>。热喷涂是通过加热使材料呈熔融或半熔融状态并以一定速度喷射到基体表面, 获得耐磨损、耐腐蚀的涂层, 其相比于电镀和堆焊等工艺具有性能优异、环保和低成本等优势<sup>[4,5]</sup>。

目前, 金属-陶瓷复合粉末的喷涂工艺主要采用超音速火焰喷涂技术 (HVOF), 其较高的喷涂速度和较低的火焰温度使涂层孔隙率低、化学成分变化小, 制备得到的涂层具有良好的微观结构和力学性能, 可承受湿气、磨料和腐蚀性颗粒的侵蚀, 广泛应用于飞机起落架、钢铁行业炉辊、结晶器铜板、沉没辊、造纸行业瓦楞辊等表面处理<sup>[6-9]</sup>。超音速火焰喷涂常用的金属-陶瓷复合粉末主要有 WC-12Co 和 WC-10Co4Cr 和 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 等。Baumann 等<sup>[10]</sup>通过超音速火焰喷涂制备得到了 WC-12Co 硬面涂层, 并详细研究了不同粒径硬面材料对涂层性能的影响。结果表明, WC 晶粒尺寸减小有利于提高材料的比表面积和受热效率, 有效改善颗粒的熔融

行为, 与传统涂层相比, 纳米结构 WC-12Co 硬面涂层的沉积效率和显微硬度更高。Liu 等<sup>[11]</sup>采用乙醇燃料超音速火焰喷涂制备 WC-10Co4Cr 硬面涂层, 并详细分析了硬面材料喷涂过程中颗粒特性与涂层性能的关系。研究表明, 燃料类型影响火焰特性, 且火焰温度升高有利于增强颗粒温度, 使颗粒熔融或半熔融状态增多, 脱碳现象增加, 孔隙度和断裂韧性值降低、显微硬度增加。Vashishtha 等<sup>[12]</sup>采用超音速火焰喷涂制备 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 涂层, 喷涂过程中脱碳少, 具有较好的力学性能。

由于 WC-12Co、WC-10Co4Cr 和 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 硬面材料在喷涂过程中硬质相及其粘结相的不同而导致性能各异。因此, 近年来对 WC-12Co、WC-10Co4Cr 和 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 硬面涂层的比较进行了广泛的研究。Vashishtha 等<sup>[13]</sup>研究了热处理对 WC-12Co 和 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 硬面涂层的摩擦性能。结果表明, 热处理对涂层相变、力学性能、残余应力和摩擦磨损行为产生较为明显影响; 低温热处理可提高 WC-12Co 和 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 涂层在磨粒磨损条件下的耐磨性, 而高温热处理对耐磨性有害。Zhang 等<sup>[14]</sup>对比了超音速火焰喷

收稿日期: 2021-12-23

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划项目 (202010407014); 江西省教育厅面上项目 (GJJ200807); 江西省主要学术和技术带头人培育计划青年人才项目 (20212BCJ23005); 赣州市重点研发计划重点项目 (202101074491); 江西省重点研发计划一般项目 (20203BBE53052)

作者简介: 罗鑫, 男, 1999 年生, 江西理工大学材料冶金化学学部, 江西 赣州 341000, E-mail: 2233875868@qq.com

涂 WC-10Co4Cr 和 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 涂层的性能, 2 种涂层结合力相当 (60~65 MPa), WC-10Co4Cr 涂层的致密度更好。Matikainen 等<sup>[15]</sup>对比了 WC-10Co4Cr 和 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 硬面涂层的冲蚀磨损行为。结果表明, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 材料中较小的碳化物尺寸显著减少了碳化物反弹, 导致喷涂涂层中碳化物含量增加, 提高了抗冲蚀磨损性。Vashishtha 等<sup>[16]</sup>研究了 WC-12Co、WC-10Co4Cr 和 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 涂层的摩擦行为。结果表明, 磨损机制受到涂层微观结构和试验条件的影响, 相同的摩擦磨损条件下, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 的磨损量最大。Mishra 等<sup>[17]</sup>对 WC-12Co、WC-10Co4Cr 和 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 涂层滑动磨损性能进行了比较。结果表明, WC-12Co 涂层的显微硬度最高, 滑动磨损性能最好。但是, 在现有的研究中, 并未发现 WC-12Co、WC-10Co4Cr 和 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 涂层在不同介质中摩擦性能的研究。为此, 本研究将通过超音速火焰喷涂制备 WC-12Co、WC-10Co4Cr 和 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 3 种涂层, 详细分析涂层微观组织结构及其在空气、1 mol/L HCl 和 1 mol/L NaOH 介质条件下的摩擦行为, 为腐蚀和磨损同时存在工况下硬面涂层材料的选择提供依据。

## 1 实验

喷涂原料采用崇义章源钨业股份有限公司团聚烧结法制备的 WC-12Co、WC-10Co4Cr 和 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 硬面材料, 粒度范围为 15~45 μm, 其形貌如图 1 所示。从图 1 中可以看出, 3 种团聚烧结粉末的表面粗糙多孔、形状规则、分布均匀且球形度高, 有利于热喷涂过程中热转换, 使粉末在焰流吸收更多的热量, 促进粉末内未熔颗粒减少, 获得高质量的硬面涂层。

采用尺寸为 55 mm×46 mm×5 mm 的 45#钢为基体材料。首先对基体材料表面进行除油和喷砂粗化处理, 随后将其固定在夹具上, 夹具中间盘绕紫铜管, 并通入压缩空气。将高性能团聚颗粒装入送粉器中, 采用 JP8000 超音速火焰喷涂设备进行涂层制备, 其喷涂参数见表 1, 并在喷涂过程中使用 SHUJI OT-833 红外测温仪对涂层表面温度进行监控。

采用 DHV-1000 型显微维氏硬度计测量涂层的硬度, 采用扫描电镜观测涂层的微观组织结构, 采用 HSR-2M 型往复式摩擦磨损仪分别在空气, 1 mol/L 的 HCl 溶液以及 1 mol/L NaOH 溶液下进行摩擦试验, 并采

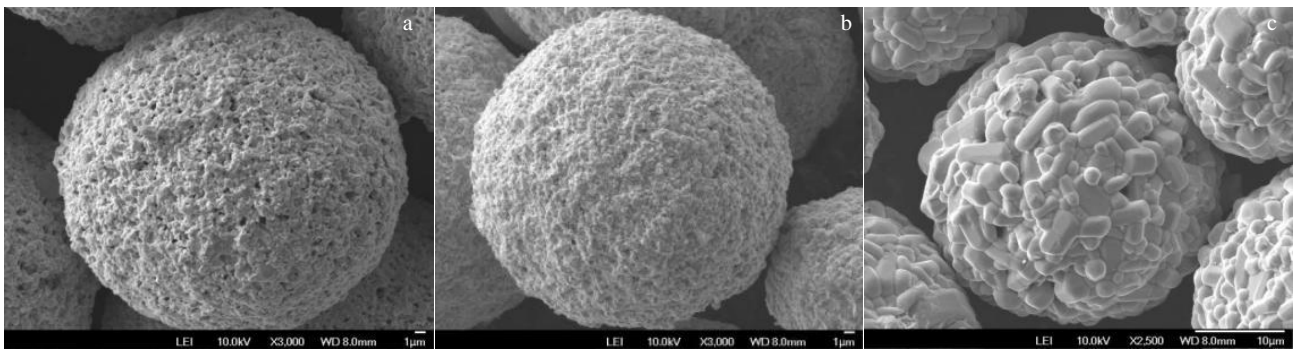


图 1 硬面材料 SEM 形貌

Fig.1 SEM morphologies of raw materials: (a) WC-12Co, (b) WC-10Co4Cr, and (c) Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr

表 1 超音速火焰喷涂工艺参数

Table 1 Process parameters of HVOF

| Parameter                                     | Value |
|---|-------|
| Oxygen pressure/×0.1 MPa                      | 10    |
| Oxygen flow/L min <sup>-1</sup>               | 270   |
| LPG pressure/×0.1 MPa                         | 7     |
| LPG flow/L min <sup>-1</sup>                  | 65    |
| Air pressure/×0.1 MPa                         | 6     |
| Air flow/L min <sup>-1</sup>                  | 600   |
| Powder feed rate/g min <sup>-1</sup>          | 45    |
| Nitrogen carrier gas flow/L min <sup>-1</sup> | 9.4   |
| Carrier gas pressure/×0.1 MPa                 | 6     |
| Working distance/mm                           | 180   |

用扫描电镜观察磨损后表面形貌, 对磨球为氮化硅陶瓷球, 加载载荷为 100 N, 往复时间为 30 min, 往复长度为 5 mm, 转速为 300 r/min。

## 2 结果与分析

图 2 为 WC-12Co、WC-10Co4Cr 和 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 硬面涂层的微观组织结构。从图中可以看出, WC-12Co 涂层由硬质 WC 和粘结相 Co 2 相组成, WC-10Co4Cr 中可观察到硬质相 WC 和粘结相 Co、Cr 3 相; Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 由硬质相 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 和粘结相 NiCr 2 相组成。同时, 从 Cr EDS 元素面扫描分析结果中可以明显看到 WC-10Co4Cr 硬面涂层中存在粘结相 Cr, 如图 3 所示。

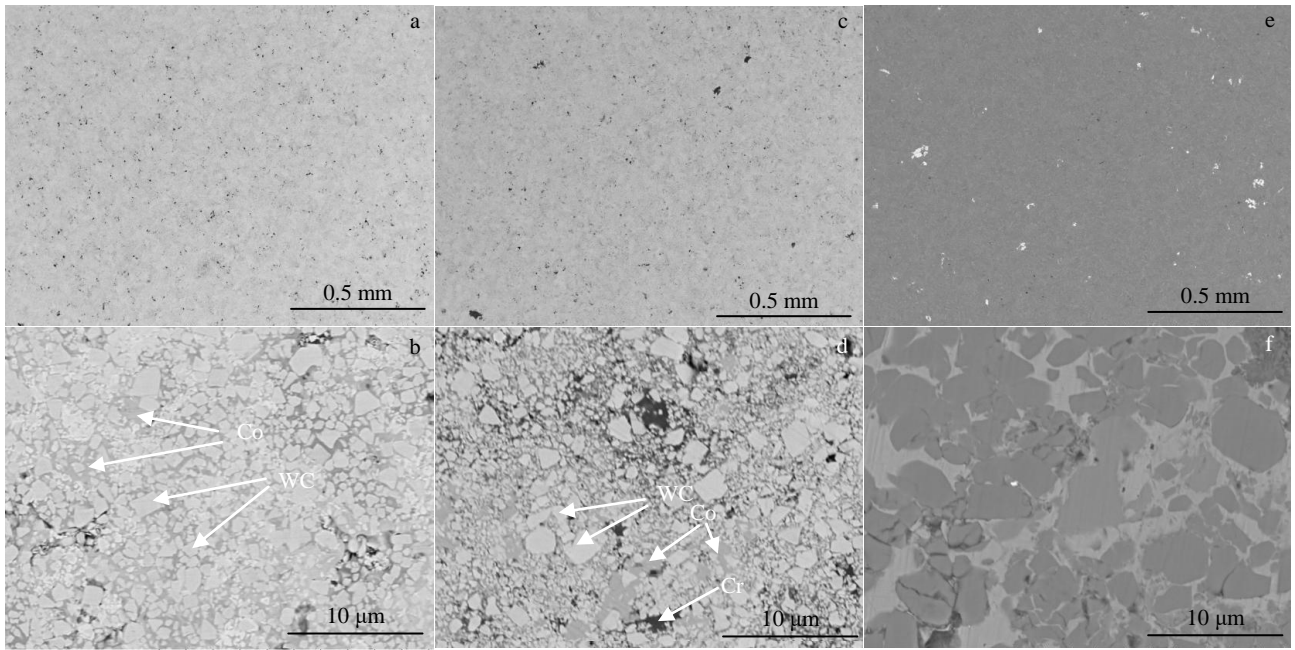


图 2 超音速火焰喷涂硬面涂层的微观组织

Fig.2 Microstructures of HVOF hard surface coatings: (a, b) WC-12Co; (c, d) WC-10Co4Cr; (e, f) Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr

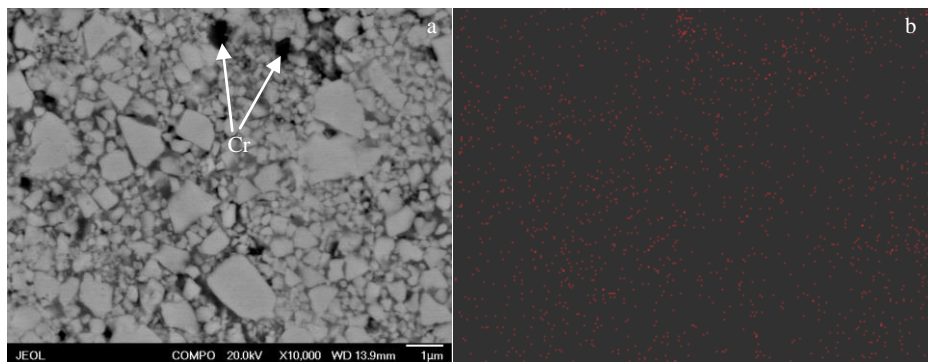


图 3 WC-10Co4Cr 硬面涂层微观组织和 Cr EDS 元素面扫描

Fig.3 SEM microstructures (a) and EDS element mapping (b) of WC-10Co4Cr hard surface coating

3 种涂层结构均为粘结相包裹硬质碳化物。此外，WC-10Co4Cr 硬面涂层中存在明显的纳米/超细 WC 晶粒区域，如图 4 所示。喷涂过程中，粘结相的熔化温度低，而硬质碳化物的熔点高，使硬面材料在喷涂过程中形成粘结相金属熔融包覆硬质碳化物颗粒，并以高速的能量撞击基体表面形成粘结相包裹硬质碳化物的涂层结构。根据灰度法对低倍扫描电镜照片进行孔隙度测量，其结果如表 2 所示。涂层中的孔隙率和粘结相的含量密切相关，当粘结相质量分数为 12% (Co) 时，其孔隙度为 1.11%；粘结相质量分数为 14% (CoCr) 时，其孔隙度为 0.98%；粘结相质量分数为 25% (NiCr) 时，其孔隙度降低为 0.92%。粘结相含量的增加使喷涂过程中颗粒的熔融状态增加，撞击基体时硬面材料能够更好地铺展，从而

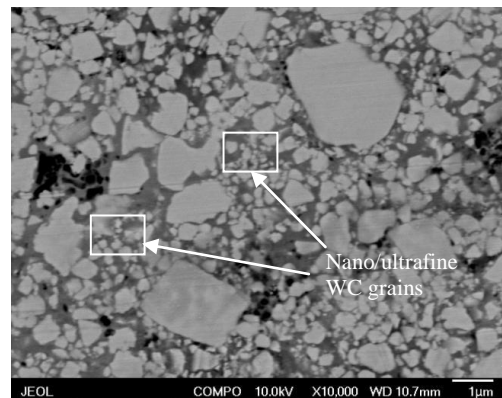


图 4 WC-10Co4Cr 硬面涂层的高倍 SEM 形貌

Fig.4 SEM morphology of WC-10Co4Cr hard surface coating

表 2 3 种硬面涂层孔隙率测试结果

Table 2 Porosity of the three kinds of hard surface coatings

| Coating    | WC-12Co | WC-10Co4Cr | Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> -25NiCr |
|------------|---------|------------|--|
| Porosity/% | 1.11    | 0.98       | 0.92                                   |

使涂层孔隙率随着粘结相的增加而降低。但是, 25%NiCr 的硬面涂层孔隙率与 14%CoCr 硬面涂层相比仅有较小幅度的提高, 其主要原因可能是与粘结相/硬质相间的润湿性有关。Co 对硬质相碳化钨的润湿性比 Ni 和 Cr 对 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 的润湿性能好, 导致 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 硬面涂层孔隙率降低不明显。

表 3 是 WC-12Co、WC-10Co4Cr 和 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 涂层的显微硬度值。WC-12Co 硬面涂层的硬度为 9711.8 MPa, WC-10Co4Cr 硬面涂层的硬度为 10005.8 MPa, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 涂层的硬度为 6928.6 MPa。硬面涂层的显微硬度主要与硬质相的含量及其晶粒大小相关。Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 涂层的粘结相含量最高, 其硬度值最低。WC-10Co4Cr 涂层中存在明显的纳米/超细 WC 晶粒区域, 使其显微硬度值最高。

图 5 为 WC-12Co、WC-10Co4Cr 和 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 涂层在空气中的摩擦系数随时间变化曲线。3 种涂层的摩擦系数变化趋势符合典型滑动摩擦特征。刚开始发生摩擦时, 3 种涂层的摩擦系数均出现了陡然升高的现象, 此阶段内硬面涂层与对磨球 (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) 刚接触并进入滑动摩擦状态, 接触黏着面积逐渐增大, 摩擦挤压产生的磨屑磨损涂层表面, 造成接触面粗糙度增加, 摩擦系数迅速增大; 随着摩擦的进行, 接触表面出现不断地黏着, 表面

粗糙度逐渐降低, 摩擦系数降低; 而后在切应力作用下发生剪断, 最终达到动态平衡, 摩擦系数维持在一个相对平稳的范围内。但是, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 的硬度显著低于 WC 基硬面涂层, 其在较快的时间内达到摩擦系数最大值, 随后趋于动态平衡, 如图 5 所示。此外, 空气中, 涂层的摩擦系数与硬度呈正相关。WC-10Co4Cr 的硬度最高, 其摩擦系数最小; Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 的硬度最小, 其摩擦系数最大。

图 6 为涂层在空气条件的磨痕横截面深度剖面图。Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 的磨痕宽度和深度最大, 分别为 1.73 mm 和 68.74 μm。随着涂层硬度的增加, 磨痕的宽度和深度逐渐降低, 在 WC-10Co4Cr 涂层中, 磨痕宽度和深度最小, 分别为 1.36 mm 和 44.18 μm。上述结果有效地证明了在空气条件下, 涂层的硬度显著影响摩擦系数和磨痕深度, 且呈正相关的关系。

图 7 为 WC-12Co、WC-10Co4Cr 和 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 涂层在 1 mol/L 的 HCl 介质中的摩擦系数随时间变化曲线。从图中可以看出, 由于溶液的润湿作用, 涂层的摩擦系数与空气介质相比均显著降低。在 HCl 溶液中, WC-12Co 和 WC-10Co4Cr 的摩擦系数发生剧烈的波动, WC-12Co 的波动范围显著大于 WC-10Co4Cr。Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 的摩擦系数稳定性好。由于 WC 在酸性条件下几乎不会发生

表 3 3 种硬面涂层的显微硬度测试结果

Table 3 Hardness of the three kinds of hard surface coatings

| Coating                               | WC-10Co4Cr | WC-12Co | Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> -25NiCr |
|---------------------------------------|------------|---------|--|
| Microhardness, HV <sub>0.3</sub> /MPa | 10005.8    | 9711.8  | 6928.6                                 |

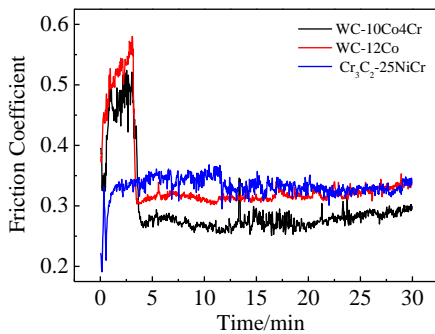


图 5 不同硬面涂层在空气条件的摩擦系数随时间的变化曲线  
Fig.5 Variation of friction coefficient with time for different hard surface coatings in air

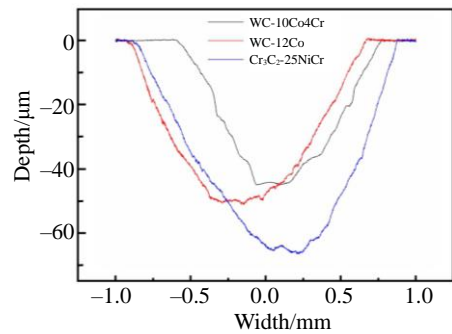


图 6 不同硬面涂层在空气条件的磨痕横截面深度剖面图  
Fig.6 Cross-sectional depth profile of different hard surface coatings in air

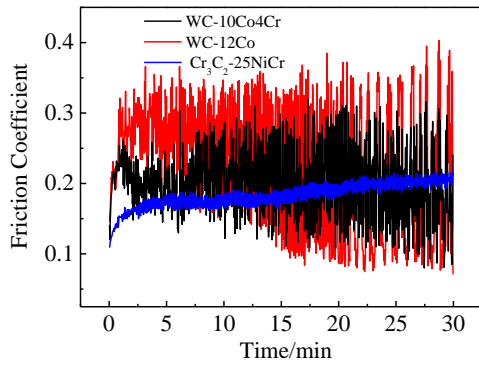


图 7 硬面涂层在 1 mol/L HCl 条件的摩擦系数随时间的变化曲线  
Fig.7 Variations of friction coefficient with time of different hard surface coatings in 1 mol/L HCl

腐蚀,而金属粘结相在酸性条件下将产生腐蚀现象。因此,酸性条件下的摩擦腐蚀主要和金属粘结相有关。纯 Co、CoCr 和 NiCr 3 种金属粘结剂中,纯钴的耐腐蚀性最差,CoCr 次之,而 NiCr 的耐腐蚀性能最好。因此,酸性

溶液摩擦过程中,  $Cr_3C_2-25NiCr$  的摩擦系数较稳定,而 WC-12Co 和 WC-10Co4Cr 由于金属粘结相的腐蚀而使摩擦系数的稳定性变差。摩擦过程中,粘结剂被腐蚀,导致涂层表面的硬质相 WC 占主要组成,表观硬度显著提高,使合金的摩擦系数迅速降低;但由于粘结相的腐蚀使涂层中 WC 晶粒的结合力显著减弱,在往复摩擦作用力下极易产生脱落,涂层表面粗糙度迅速增加,摩擦系数升高,从而使 WC-12Co 和 WC-10Co4Cr 呈现出波浪状的变化规律。

为了更进一步分析酸性条件下涂层的摩擦行为,对 WC-12Co 和 WC-10Co4Cr 涂层在酸性条件下磨损后的表面进行 SEM 分析,其结果如图 8 所示。从图中可以看出,WC-12Co 中由于粘结相的耐 HCl 腐蚀的性能较弱,在其表面出现了大块因 WC 脱落而产生的孔隙;而 WC-10Co4Cr 中因粘结相腐蚀性能更好而使 WC 脱落的更少,表现出更好的耐摩擦性能。

图 9 为 WC-12Co、WC-10Co4Cr 和  $Cr_3C_2-25NiCr$  涂层在 1 mol/L 的 NaOH 介质中的摩擦系数随时间的变

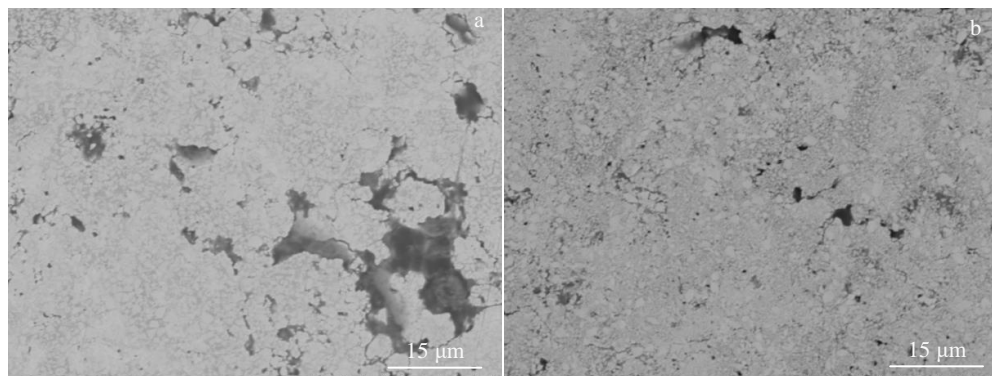


图 8 WC-12Co 和 WC-10Co4Cr 不同硬面涂层在 1 mol/L HCl 条件的磨损表面形貌  
Fig.8 SEM morphologies of the wear track of WC-12Co (a) and WC-10Co4Cr (b) hard surface coatings in 1 mol/L HCl

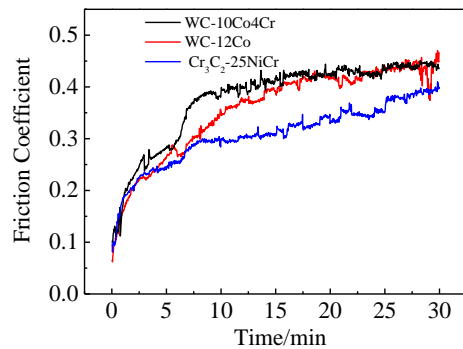


图 9 不同硬面涂层在 1 mol/L NaOH 条件的摩擦系数随时间的变化曲线  
Fig.9 Variations of friction coefficient with time of different hard surface coatings in 1 mol/L NaOH

化曲线。碱性条件下的摩擦系数显著高于酸性条件下的摩擦系数值,且随着摩擦的进行,硬面涂层的摩擦系数呈逐渐上升的趋势。碱性条件下,金属粘结剂的耐腐蚀性能更好,此时主要是由于硬质相的轻微腐蚀而造成的。在摩擦过程中硬质相的腐蚀会使涂层表面的硬度下降,从而使摩擦系数增加。此外,碱性条件下,硬面涂层的耐腐蚀性和硬质相的含量及粘结相和硬质相的润湿性有关。金属粘结剂的增加能有效地提高涂层的结合力,使轻微腐蚀的硬质相不脱落,从而降低涂层的摩擦系数,使  $Cr_3C_2-25NiCr$  的摩擦系数最小。同时,WC 与 Co 的润湿性明显优于 WC 和 CoCr 的润湿性,使 WC-12Co 的摩擦系数优于 WC-10Co4Cr 的摩擦系数。

为了更进一步分析碱性条件下涂层的摩擦行为,对

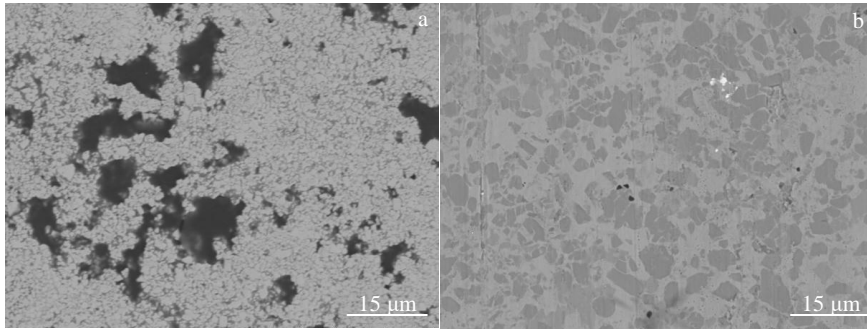


图 10 WC-12Co 和 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 不同硬面涂层在 1 mol/L NaOH 条件的磨损表面形貌

Fig.10 SEM morphologies of the wear track of WC-12Co (a) and Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr (b) hard coatings in 1 mol/L NaOH

WC-12Co 和 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 涂层碱性条件下磨损后的表面进行 SEM 分析, 其结果如图 10 所示。从图中可以看出, WC-12Co 中由于 NaOH 对 WC 的腐蚀使其耐磨性降低, 且粘结相含量低而使硬质相间的厚度小, 摩擦过程中不能有效地支撑表面腐蚀后的 WC, 产生大片脱落的现象; Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 涂层中粘结相含量高而使其能有效避免硬质相的脱落, 产生均匀磨损的现象, 表现出更好的耐摩擦性能。

### 3 结 论

1) 涂层中的孔隙率和粘结相的含量密切相关, 当粘结相质量分数为 12%(Co)时, 其孔隙度为 1.11%; 粘结相质量分数为 14%(CoCr)时, 其孔隙度为 0.98%; 粘结相质量分数为 25%(NiCr)时, 其孔隙度降低为 0.92%。

2) Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 涂层的粘结相含量最高, 其硬度值最低。WC-10Co4Cr 涂层中存在明显的纳米/超细 WC 晶粒区域, 使其显微硬度值最高。

3) 空气中, WC-10Co4Cr 的硬度最高, 其摩擦系数最小; Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr 的硬度最小, 其摩擦系数最大。

4) 1 mol/L HCl 的环境中, NiCr 的耐腐蚀性能最好, 摩擦系数稳定; 而纯 Co 和 CoCr 的耐腐蚀性能较差, 摩擦系数呈现出波浪状的变化规律。

5) 1 mol/L NaOH 的环境的摩擦过程中, 硬质相的腐蚀会使涂层表面的硬度下降, 从而使摩擦系数增加。

#### 参考文献 References

[1] Trejo J, Tolosa R, Ruiz N *et al. Mechanics of Materials*[J], 2021, 152: 103 637  
 [2] Chen Qingyu(陈清宇), Fu Wei(富 伟), Du Daming(杜大明) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(11): 3680  
 [3] Liu Hailang(刘海浪), Wang Bo(王 波), Qi Zhengwei(祁正伟) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工

程)[J], 2018, 47(11): 3338

- [4] Richard M C, Elvys I M C, Luiz F F I *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2021, 427: 127 841  
 [5] Xu Jimin(许吉敏), Zhen Wenying(郑文颖), Zhang Juchen(张聚臣) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(11): 3417  
 [6] Yu Fangli(于方丽), Bai Yu(白 宇), Xie Hui(谢 辉) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(6): 1884  
 [7] Lin J R, Hong S, Zheng Y *et al. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2021, 94: 105 407  
 [8] Hong S, Wei Z Y, Wang K L *et al. Ultrasonics Sonochemistry*[J], 2021, 72: 105 438  
 [9] Yuan Xiaojing(袁晓静), Cha Bailin(查柏林), Chen Xiaohu(陈小虎) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(2):473  
 [10] Baumann I, Hagen L, Tillmann W *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2021, 405: 126 716  
 [11] Liu S W, Wu H J, Xie S M *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2021, 408: 126 805  
 [12] Vashishtha N, Sapate S G, Sahariah B J *et al. Materials Today: Proceedings*[J], 2018, 5: 7686  
 [13] Vashishtha N, Sapate S G, Bagde P *et al. Tribology International*[J], 2018, 118: 381  
 [14] Zhang W C, Liu L B, Zhang M T *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2015, 25(11): 3700  
 [15] Matikainen V, Peregrina S R, Ojala N *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2019, 370: 196  
 [16] Vashishtha N, Khatirkar R K, Sapate S G. *Tribology International*[J], 2017, 105: 55  
 [17] Mishra T K, Kumar A, Sinha S K, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2021, 94: 105 404

## Friction Behavior of WC-12Co, WC-10Co4Cr and Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr Coatings Prepared by HVOF in Different Media

Luo Xin<sup>1</sup>, Wang Shaoyi<sup>1,2</sup>, Hong Yuankun<sup>1</sup>, Wu Jiayi<sup>1</sup>, Luo Wanqing<sup>1</sup>, Zhong Zhiqiang<sup>2</sup>, Yang Qiumin<sup>1,2</sup>

(1. Department of Materials Metallurgical Chemistry, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

(2. Chongyi Zhangyuan Tungsten Industry Co., Ltd, Ganzhou 341000, China)

**Abstract:** In order to study the friction behavior of hard surface coatings in different media, the coatings were prepared by high-velocity oxygen-fuel (HVOF) with WC-12Co, WC-10Co4Cr and Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr materials as raw materials. The hardness, morphologies of the wear track of the coatings were analyzed by micro-hardness tester, wear tester and SEM. The results show that the porosity of the coating is closely related to the content of the binder phase. When the binder phase (Co) content is 12wt%, the porosity of the coating is 1.11%. When the binder phase (CoCr) content is 14wt%, the porosity of the coating is 0.98%. When the binder phase (NiCr) content is 25wt%, the porosity is reduced to 0.92%. In air, WC-10Co4Cr has the highest hardness and the lowest friction coefficient, while Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr has the lowest hardness and the highest friction coefficient. In the environment of 1 mol/L HCl, the best corrosion resistance of NiCr binder makes the friction coefficient of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr coating stable, and the poor corrosion resistance of pure Co and CoCr makes the friction coefficient of WC-10Co4Cr and WC-12Co coatings with high and low fluctuations. In the friction process in 1 mol/L NaOH environment, the corrosion of hard phase can reduce the hardness and increase the friction coefficient.

**Key words:** HVOF; hard surface coating; medium; friction performance

---

Corresponding author: Yang Qiumin, Ph. D., Associate Professor, Department of Materials Metallurgical Chemistry, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, P. R. China, E-mail: yqm@jxust.edu.cn