DOI:10.20038/j.cnki.mra.2023.000616

WC-10Co4Cr/WC-10Ni耐磨耐腐蚀涂层制备与研究

熊学威^{1,2},康忠明^{1,2}

(1. 广东省科学院新材料研究所, 广东 广州 510650; 2. 广东粤科新材料科技有限公司, 广东 佛山 528225)

摘要:以WC-10Co4Cr和WC-10Ni粉末为原料,利用超音速火焰喷涂在304不锈钢基体上制备WC-10Co4Cr和WC-10Ni涂层。同时,利用显微硬度计、扫描电镜、万能力学试验机、磨耗试验机和盐雾试验机等手段,分析涂层的力学性能和耐磨耐腐蚀性能。结果表明:WC-10Co4Cr涂层和WC-10Ni涂层与基体结合牢固,组织致密;WC-10Co4Cr涂层的硬度更高,结合强度和耐磨性更强于WC-10Ni涂层;WC-10Ni涂层的耐盐雾腐蚀性能,更优于WC-10Co4Cr涂层。

关键词:超音速火焰喷涂;摩擦磨损;力学性能;金相组织 中图分类号:TF123 **文献标志码:** A

文章编号:1673-9981(2023)06-1146-04

引文格式:熊学威,康忠明.WC-10Co4Cr/WC-10Ni耐磨耐腐蚀涂层制备与研究[J].材料研究与应用,2023,17(6):1146-1149.

XIONG Xuewei, KANG Zhongming. Preparation and Study of Wear-Resistant and Corrosion-Resistant WC-10Co4Cr/WC-10Ni Coating[J]. Materials Research and Application, 2023, 17(6):1146-1149.

0 引言

超音速火焰喷涂(HVOF),是将燃料(煤油)和 助燃剂(氧气)按照一定的比例输入燃烧室而产生高 速热气流,同时由载气(N₂)将喷涂粉末送入高温射 流中使粉末加热熔化和加速的方法[1]。由于射流通 过喷管时受到水冷壁的压缩,离开喷嘴后燃烧气体 迅速膨胀,产生2倍以上音速的超音速火焰,并将熔 融微粒喷射到基材表面形成涂层,以此改善材料表 面的物理化学性能。超音速火焰喷涂制备出的涂层 具有结合强度好、耐磨性高的优点,广泛应用在石油 化工、海洋工程、航空航天等诸多领域中^[2-5]。WC 是常用的超音速火焰喷涂材料,其具有较好的弹性 模量和较高的硬度,但韧性较差。将WC与钴、镍等 金属相相结合[6-9],可以提高涂层的韧性,同时具有 高的硬度和高的韧性。以Co为粘结相的WC-Co系 合金,凭借其优异的性能成为应用最广泛的陶瓷涂 层,该系列涂层硬度高、耐磨性好,但脆性较大,可以 通过增加Co含量来提高涂层的韧性。但是,由于钴 元素存量较少,WC-Co系合金粉末价格昂贵、抗氧 化抗腐蚀性能差,限制了其进一步的发展。Ni与Co 同属铁族,其具有与Co相似的性质,并且具有优良 润湿WC的功能,同时耐腐蚀性能和抗氧化性能较

好。蒋永兵等^[10]采用超音速火焰喷涂技术,在304 不锈钢基体上制备了WC-10Co4Cr涂层并进行了真 空重熔,重熔可提高涂层的硬度和耐磨性。Shi 等^[11]采用激光熔覆,在Cr12MoV模具钢上制备了 Al₂O₃增强WC-10Co4Cr涂层,随着Al₂O₃质量分数 的增加,涂层的硬度明显提高、摩擦系数降低、磨损 率下降。Singh等^[12]在SS-316基体上微波熔覆了 WC-10Co4Cr涂层,其硬度明显提高,但在3.5%的 NaCl溶液中的耐腐蚀性低于基体。李博^[13]采用超 音速火焰喷涂,在Ti55531钛合金基体上制备了 WC-10Co4Cr和WC-17Co涂层,对比了涂层的显微 硬度和耐蚀性等并发现,两种涂层硬度和耐蚀性均 高于基体,其中WC-10Co4Cr的硬度更高、耐腐蚀性 更好。Tian等^[14]在316L上制备了超音速火焰喷涂 WC-10Co4Cr涂层和环氧树脂封孔后处理的WC-10Co4Cr涂层,封控涂层比喷涂涂层具有更高的抗 腐蚀和抗气蚀性能。Zhou等^[15]采用超音速火焰喷 涂技术,在35CrMo钢基体上制备了常规和双峰结 构的WC-10Co4Cr复合涂层并发现,双峰涂层具有 更致密的微观结构、更低的孔隙率和更好的耐腐蚀 性能。Ding等^[16]在304不锈钢基体上通过不同燃料 类型的超音速火焰喷涂系统,制备了多尺度WC颗

收稿日期:2023-07-26

作者简介:熊学威,本科,助理工程师,研究方向为现代材料表面技术成果转化推广, E-mail: xuewei12012126@hotmail.com。

粒的WC-10Co4Cr涂层并发现,高速氧液体燃料喷涂的涂层孔隙率更低、机械性能更优。

本文采用超音速火焰喷涂制了WC-10Co4Cr涂 层和WC-10Ni涂层,研究分析两种涂层的硬度、结 合强度、摩擦磨损性能和耐盐雾腐蚀性能,为实际生 产提供理论依据。

1 试验材料及方法

1.1 原材料

基体材料为304不锈钢板,喷涂前用白刚玉进 行喷砂处理,喷砂后采用丙酮洗去油污和残余颗粒。 试验选用WC-10Co4Cr和WC-10Ni粉末,粉体粒径 均在5-35μm,合金粉末的化学成分列于表1。

	12 1	顺床仍不时化	子成刀	组成	
Table1	Chemical	compositions	of the	spraying	powders

吨冷松士的化 学 击 乙 细 击

粉末	含量 w/%						
	Со	Cr	С	Fe	О	Ni	W
WC-10Co4Cr	10.33	3.61	5.41	0.25	< 0.1		余量
WC-10Ni	—		5.41	0.23	< 0.1	9.55	余量

1.2 试验方法

试验采用超音速火焰喷涂技术,其工艺参数列 于表2。

表 2 超音速火焰喷涂工艺参数 Table2 Process parameters of supersonic flame spraying

煤油流量/ (L·h ⁻¹)	氧气流量/ (L•min ⁻¹)	冷却气流量/ MPa	喷距/ mm
25	900	0.2-0.6	380
走枪速度/	转台转速/	氮气流量/	送粉量/
$(mm \cdot s^{-1})$	$(r \cdot min^{-1})$	$(L \cdot min^{-1})$	$(g \cdot min^{-1})$
500	500	11	95

1.3 测试方法

喷涂后采用线切割设备对试样进行切割,切割 的尺寸按照不同试验所需的规格进行。切割完成的 样品采用200、400、800、1000和1200+砂纸依次进 行打磨,以去除线切割的痕迹和热影响区,再进行镜 面抛光。

采用 H-500D 型显微硬度仪对涂层的硬度进行 测试,加载力为 0.2 kg、保荷时间 15 s,测量 5 个点的 硬度取平均值。采用 GP-TS2000M 型万能力学试验 机对涂层进行杯突和结合强度的测试,样品杯突规 格为 76 mm×44 mm×1.4 mm,杯突样品的涂层厚度 为 0.1 mm,采用直径 20 mm 的钢球,以 6 mm·min⁻¹的 速度向杯突板无涂层面压入,压入深度为 10 mm,观 察杯突实验后涂层表面的裂纹情况。结合强度样品 的涂层厚度为 0.2 mm,粘结剂采用 E7 胶,固化温度 100 ℃、固化时间 180 min。采用 NUS-ISO3 型磨耗 机进行摩擦性能测试,使用180[#]的SiC砂纸,压力 设置为30N、往复速率40次·min⁻¹、砂纸轮转动一 次的角度为0.9°,转动一周样品即往复磨损400 回,磨损完成一次后用压缩空气吹干样品表面,用精 度为0.1 mg的分析天平测量其磨损失重。采用 LEICA DM4M型金相显微镜观测涂层的表面形 貌,并采用图像分析软件ImageJ通过灰度法计算涂 层的孔隙率。采用KD-120盐雾喷雾试验机进行 500 h盐雾试验,根据腐蚀状况分析涂层的耐腐蚀 性能。

2 试验结果与分析

2.1 组织形貌

图 1 为 WC-10Co4Cr涂层和 WC-10Ni涂层的金 相照片。从图 1 中可以看出, WC-10Co4Cr 和 WC-10Ni涂层的组织细密均匀, 无明显的裂纹和夹杂等 组织缺陷。



(a)-WC-10Co4Cr;(b)-WC-10Ni_o

图1 涂层金相图

Figure 1 Optical microstructure of the coating

对涂层的显微硬度、孔隙率进行测试,结果列于表3。由表3可知,WC-10Co4Cr涂层的显微硬度及 孔隙率均优于WC-10Ni涂层。

	表 3	WC-10Co4Cr和WC-10Ni涂层硬度的测试结果
Table 3	Test	results of WC-10Co4Cr and WC-10Ni coating hardness

		J	
涂层	测试硬度 HV _{0.2}	平均硬度HV _{0.2}	孔隙率/%
WC-0Co4Cr涂层	1423,1383,1410,1344,1451	1402.2	0.1
WC-10Ni涂层	1115,1271,1216,1243,1229	1214.8	0.2

2.2 力学性能分析

图 2 为 WC-10Co4Cr 涂层和 WC-10Ni 涂层的 杯突形貌图。从图 2 中可以看出:WC-10Co4Cr 和 WC-10Ni 涂层的杯突表面整体连续均匀,有肉眼可 见的龟裂,无涂层剥落现象,表明 2 种涂层的韧性均 较好;其中,WC-10Co4Cr 涂层与 WC-10Ni 涂层相 比,WC-10Co4Cr 涂层杯突裂纹更多、更短, 而 WC-10Ni 涂层裂纹较少、较长。





图 3为WC-10Co4Cr涂层和WC-10Ni涂层的结 合强度测试结果。从图 3可以看出,WC-10Co4Cr 涂层的结合强度明显高于WC-10Ni的结合强度, WC-10Co4Cr涂层的平均结合强度为88 MPa,而 WC-10Ni涂层的平均结合强度为72 MPa,WC-10Co4Cr涂层的结合强度比WC-10Ni涂层提高了 22%。这可以解释为钴与WC的润湿性优于镍与 WC的润湿性,因此WC-10Co4Cr涂层的结合强度 优于WC-10Ni涂层。



Figure 3 Histogram of bond strength of the coating

2.3 耐磨性分析

图 4 为 WC-10Co4Cr涂层和 WC-10Ni 涂层的磨 损数据图。从图 4 中可以看出: WC-10Co4Cr 和 WC-10Ni涂层的磨损失重随着时间的增加而直线 增加,2种涂层的失重速度在前1200次明显高于后 面800次,这是由于摩擦度过了磨合期后进入平稳 磨损阶段,因而磨损速率减慢;WC-10Ni涂层的失 重明显高于WC-10Co4Cr涂层,二者的失重差距随 着往复次数的增加而明显拉大,在2000次时达到 最大,此时WC-10Ni涂层的失重质量约为WC-10Co4Cr涂层的1.4倍。一般情况下,涂层的致密 度、耐磨损性能和硬度与黏结相紧密相关,黏结相与 WC 颗粒结合力越好涂层的力学性能越好,钴与 WC 的润湿性优于镍的,因此含镍的WC涂层耐磨 性能更差。



2.4 耐腐蚀分析

图 5为WC-10Co4Cr涂层和WC-10Ni涂层经过 500 h盐雾腐蚀后的腐蚀形貌。从图 5中可以明显 看出,WC-10Co4Cr涂层经过 500 h盐雾腐蚀后有明 显的凹坑,而WC-10Ni涂层则并没有明显的凹坑。 由此可以看出,WC-10Ni涂层的耐腐蚀性能优于 WC-10Co4Cr涂层。



(a)—WC-10Co4Cr;(b)—WC-10Ni₀
 图 5 涂层盐雾腐蚀形貌
 Figure 5 Salt spray corrosion morphology of the coatings

3 结论

(1) WC-10Co4Cr 涂层和 WC-10Ni 涂层,组织 致密均匀、结构紧凑,与基体结合效果好。 (2)WC-10Co4Cr涂层的硬度和耐磨性明显优于WC-10Ni涂层,而耐腐蚀性能弱于WC-10Ni涂层。

参考文献:

- [1] 张勇. 超音速火焰喷涂 WC-10Co-4Cr 涂层的耐磨性研 究[J]. 世界有色金属, 2023(1): 175-177.
- [2] 丁伟,曹圣兵.超音速火焰喷涂WC10Co4Cr涂层适海 性工艺研究[J].科学技术创新,2022,33:180-183.
- [3]方凯,王晓霞,王欣,等.热处理对超音速火焰喷涂增 材制造9Cr18Ni12/WC10Co4Cr流道微观结构和空蚀 性能的影响[J].稀有金属,2023,47(5):778-786.
- [4] 高晓颖,郑超,孟保利,等.喷涂工艺参数对Ti-6Al-4V合金表面WC-17%Co涂层孔隙率和显微硬度的影响[J].硬质合金,2022,39(6):468-474.
- [5]关远涛,肖细军,翟甲友,等.A-100 钢超音速火焰喷 涂 WC-10Co4Cr 涂层性能研究[J].焊接技术,2021,50(6):10-13.
- [6] 万伟伟,高峰,王旭,等.超音速火焰喷涂WC-10Co4Cr粒子沉积状态对涂层滑动磨损的影响[J].矿 冶,2021,30(5):91-96.
- [7] 王超,牛少鹏,黄益聪,等.超音速火焰喷涂WC-17Co
 涂层氧化行为研究[J].材料研究与应用,2022,16
 (3):418-424.
- [8] 杨柯楠,李海新,魏敏,等.超音速火焰喷涂制备WC-Co系涂层缺陷形成机理与组织结构调控研究概述[J]. 材料导报,2022,36(S2):332-337.
- [9] 祝子伟,陈清宇,杨超,等.超音速火焰喷涂微纳WC-Cr_3C_2-CoNi涂层的结构与性能[J]. 材料保护, 2023,56(4):22-28.

- [10] 蒋永兵,颜炳良,尚洪宝,等.超音速火焰喷涂WC-10Co4Cr涂层的制备及真空重熔对涂层性能的影响 [J].自动化与仪器仪表,2021(7):203-206.
- [11] SHI J, GE Y, KONG D. Microstructure, dry sliding friction performances and wear mechanism of laser cladded WC-10Co4Cr coating with different Al₂O₃ mass fractions [J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 406: 126749.
- [12] SINGH P, KUMAR GOYAL D, BANSAL A.
 Electrochemical corrosion and erosive wear behaviour of microwave processed WC-10Co4Cr clad on SS-316
 [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 50: 1900-1905.
- [13] 李博. Ti55531 钛合金超音速火焰喷涂 WC-10Co4Cr 和 WC-17Co 工艺对比研究[J]. 焊接技术, 2023, 52 (1): 53-56.
- [14] TIAN Y, ZHANG H, CHEN X, et al. Effect of cavitation on corrosion behavior of HVOF-sprayed WC-10Co4Cr coating with post-sealing in artificial seawater [J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 397: 126012.
- [15] ZHOU Y K, LIU X B, KANG J J, et al. Corrosion behavior of HVOF sprayed WC-10Co4Cr coatings in the simulated seawater drilling fluid under the high pressure [J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 109: 104338.
- [16] DING X, HUANG Y, YUAN C, et al. Deposition and cavitation erosion behavior of multimodal WC-10Co4Cr coatings sprayed by HVOF [J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 392: 125757.

Preparation and Study of Wear-Resistant and Corrosion-Resistant WC-10Co4Cr/WC-10Ni Coating

XIONG Xuewei^{1,2}, KANG Zhongming^{1,2}

(1. Institute of New Materials, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2. Guangdong Yueke New Material Technology Co., Ltd., Foshan 528225, China)

Abstract: This article uses WC-10Co4Cr and WC-10Ni powders as raw materials and adopts supersonic flame spraying to prepare WC-10Co4Cr and WC-10Ni coatings on 304 stainless steel substrates. The mechanical properties and wear and corrosion resistances of the coating are analyzed by using microhardness tester, scanning electron microscopy, universal mechanical testing machine, wear testing machine, and salt spray testing machine. The results show that the WC-10Co4Cr coating and WC-10Ni coating are firmly bonded to the substrate and have dense microstructures. The WC-10Co4Cr coating has a higher hardness, stronger bonding strength, and wear resistance than the WC-10Ni coating, and the salt spray corrosion resistance of the WC-10Ni coating is better than that of the WC-10Co4Cr coating.

Keywords: high-velocity oxygen-fuel spraying(HVOF); friction and wear; mechanical properties; microstructure