

引用格式:张国松,王文超,刘涛,等.激光熔覆 $\text{FeCo}_{0.5}\text{CrNi}_{1.5}\text{B}_{0.5}\text{Nb}_{0.1}$ 高熵合金涂层组织调控及耐磨耐蚀性能研究[J].热加工工艺,2025,54(17):184-188.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20223539

<http://www.rjggy.net> rjggy@vip.163.com

激光熔覆 $\text{FeCo}_{0.5}\text{CrNi}_{1.5}\text{B}_{0.5}\text{Nb}_{0.1}$ 高熵合金 涂层组织调控及耐磨耐蚀性能研究

张国松^{1,2}, 王文超¹, 刘涛¹, 陈兵¹, 张宗佳¹

(1. 山东科技大学机械电子工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 山东能源重型装备制造集团有限责任公司, 山东 泰安 271000)

摘 要:针对真空泵转子轴在实际工况中的表面磨损、腐蚀问题,采用激光熔覆技术在球墨铸铁(QT500-7)表面制备了 $\text{FeCo}_{0.5}\text{CrNi}_{1.5}\text{B}_{0.5}\text{Nb}_{0.1}$ 高熵合金涂层,并研究不同激光扫描速度(300、400、500、600 mm/min)对该涂层物相组成、显微组织、显微硬度、耐磨及耐蚀性能的影响。结果表明,随着激光扫描速度的增加,涂层发生了局部相变,晶粒细化,晶间逐渐出现硼化物、碳化物沉淀,起到了析出强化作用。涂层显微硬度及耐磨耐蚀性能随扫描速度的增加先增加后降低。当扫描速度为 500 mm/min 时,涂层物相由 FCC、Laves 相和少量硼化物、碳化物组成,强韧兼具,涂层显微硬度最高,为 632.3 HV0.2,大约为基体的 2.75 倍,且其具有最优的耐磨性和耐蚀性。

关键词:激光熔覆;扫描速度; $\text{FeCo}_{0.5}\text{CrNi}_{1.5}\text{B}_{0.5}\text{Nb}_{0.1}$ 合金;磨损;腐蚀

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2025)17-0184-06

Microstructure Control and Wear, Corrosion Resistance of Laser Cladding $\text{FeCo}_{0.5}\text{CrNi}_{1.5}\text{B}_{0.5}\text{Nb}_{0.1}$ High Entropy Alloy Coating

ZHANG Guosong^{1,2}, WANG Wenchao¹, LIU Tao¹, CHEN Bing¹, ZHANG Zongjia¹

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Shandong Energy Heavy Equipment Manufacturing Group Co., Ltd., Taian 271000, China)

Abstract: In view of the surface wear and corrosion problems of the vacuum pump rotor shaft in the actual working conditions, $\text{FeCo}_{0.5}\text{CrNi}_{1.5}\text{B}_{0.5}\text{Nb}_{0.1}$ high entropy alloy coating was prepared on the surface of nodular cast iron (QT500-7) by laser cladding technology. The effects of different laser scanning speeds (300 mm/min, 400 mm/min, 500 mm/min, 600 mm/min) on the phase composition, microstructure, microhardness, wear resistance and corrosion resistance of the coating were studied. The results show that with the increase of laser scanning speed, the coating undergoes local phase transformation, the grains are refined, and boride and carbide precipitate gradually between grains, which plays a role in precipitation strengthening. The microhardness, wear resistance and corrosion resistance of the coating first increase and then decrease with the increase of scanning speed. When the scanning speed is 500 mm/min, the coating phase is composed of FCC, Laves phase and a small amount of borides and carbides, with both strength and toughness. The microhardness of the coating is highest, which is 632.3 HV0.2, about 2.75 times than that of the substrate, and it has the best wear resistance and corrosion resistance.

Key words: laser cladding; scanning speed; $\text{FeCo}_{0.5}\text{CrNi}_{1.5}\text{B}_{0.5}\text{Nb}_{0.1}$ alloy; wear; corrosion

螺杆真空泵转子轴是真空泵的重要组成部分,转子轴常用材料为球墨铸铁,它耐磨性好,便于切削加工,但是耐蚀性差,必须在表面施加一定的防护涂层,否则无法长期应用于含水蒸气或其他腐蚀介质的工

作环境^[1]。激光熔覆是一种在基体上制备表面性能改善的涂层或修复表面缺陷的表面改性技术^[2],它具备极高的能量密度和冷却速率,这使得其适用于加工大部分的金属材料。通过激光熔覆技术在基材表面制备不同的合金材料,可以减少熔覆层的变形,提高工件的耐磨性^[3]和耐蚀性^[4]。高熵合金^[5]是近些年来材料学新兴起的一种合金概念,以多种合金元素($5 \leq n \leq 13$)为主要组成基元,且每种主元的原子分数为 5at%~35at%。高熵合金具有独特的 4 大核心

收稿日期:2022-12-19 修回日期:2024-12-12

基金项目:山东省博士后创新项目(202103054);青岛西海岸新区科技计划专项项目(202090)

作者简介:张国松,男,副教授,博士,主要研究方向为失效分析与防护;

E-mail:zhguosong@sdu.edu.cn

效应^[6];即高熵效应、晶格畸变、缓慢扩散效应、鸡尾酒效应,这使得高熵合金在凝固过程中抑制了金属间化合物的产生,促进了简单固溶体相的形成。研究人员使用激光熔覆技术制备了高硬度^[7]和耐磨损^[8]、耐腐蚀^[9]的高熵合金涂层,在海洋工程、航天、工业制造等领域表现出巨大的发展潜力。

高熵合金的性能与组织结构密切相关,调控高熵合金组织可以使其表现出不同的性能,这逐渐成为研究人员们的研究重点。研究发现,高熵合金中不同的固溶体组织结构具有不同的力学性能,FCC固溶体的屈服强度低但塑性较高,BCC固溶体的屈服强度高但塑性较差^[10]。除此之外,某些高熵合金体系,如CrFeCoNiNb^[11]、CrFeCoNiB_{0.05}Ti_x^[12]、FeNiCoCr-Ti_{0.5}Nb_x^[13]等中含有Laves相,分布在晶间的Laves相具有第二相强化作用,大大提高了涂层的硬度和耐磨性。一些含有B、Si等非金属元素的高熵合金体系,如FeCoCrNiB_x^[14]体系,可以生成金属间强化相,并且随着B含量的增加,涂层中M₃B强化相含量也随之增加,极大的提高了涂层硬度。针对高熵合金的组织物相进行合理调控,可以获得更均衡的力学性能,拓宽高熵合金的应用范围。随着FeCoCrNi系高熵合金的研究趋于成熟,以FeCoCrNiNb(x)为代表的纳米共晶高熵合金材料体系得到了众多研究人员的关注。基于高熵效应、迟滞扩散效应以及纳米尺度钝化效应,FeCoCrNiNb系高熵合金涂层有望同时具备优良的力学性能与耐腐蚀性能,成为新型高强韧耐腐蚀涂层材料^[11]。同时有研究表明:B元素的适量加入可以有效提高FeCoNiCr系高熵合金的耐蚀性^[15]。本研究以FeCoCrNi系高熵合金为基础,添加B、Nb元素,制备FeCo_{0.5}CrNi_{1.5}B_{0.5}Nb_{0.1}高熵合金,使用激光熔覆技术在球墨铸铁基体上制备涂层,并通过改变激光扫描速度来调整能量输入,以便调控涂层组织,探索磨损腐蚀机理,期望通过本研究实现球墨铸铁表面的强化与改性,延长转子轴的使用寿命。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

基体材料选用QT500-7,尺寸为150mm×45mm×10mm。使用角磨机去除基体待熔覆表面的氧化皮后,再依次使用200、500、1000目的砂纸将其打磨光滑,最后使用无水乙醇清洗表面。金属粉末采用纯度高于99.9%的Co、Cr、Fe、Ni、Nb和硼铁合金粉,粉

末粒度为50~120μm,其中硼铁粉各元素的质量分数(wt%)为:20B,4.0Si,0.5C,0.2P,0.5Al,余量Fe。使用硼铁粉的原因是硼的密度与其他金属粉末具有较大差异,使用硼铁粉可以减少熔覆过程中硼元素的偏析^[15]。采用BSA224S精密电子天平称量按摩尔比配置的高熵合金粉末。FeCo_{0.5}CrNi_{1.5}B_{0.5}Nb_{0.1}高熵合金粉末的化学成分见表1。

表1 FeCo_{0.5}CrNi_{1.5}B_{0.5}Nb_{0.1}高熵合金粉末的化学成分(原子分数,%)

Tab.1 Chemical composition of FeCo_{0.5}CrNi_{1.5}B_{0.5}Nb_{0.1} high entropy alloy powders (at%)

Fe	Co	Cr	Ni	Nb	B
21.74	10.87	21.74	32.61	2.17	10.87

利用立式行星式球磨机(DECO-PBM-V-2L)将原材料粉末混合均匀,研磨球材质为氧化锆,球料质量比为10:1,转速为300r/min,球磨时间为6h。将球磨后的粉末放置在恒温60℃的保温箱中干燥24h。

1.2 实验方法及性能测试

采用不同的激光扫描速率(300、400、500、600mm/min)在QT500-7上熔覆完成后,使用线切割制备8mm×8mm×10mm试样。试样使用金相试样镶嵌机(XQ-1)进行固定,样品表面用60~2000目的砂纸打磨,并在金相试样磨抛机(YMP-2B)进行抛光处理。采用D/Max-2500PC型(Rigaku, Japan)X射线衍射仪进行涂层相结构分析,该仪器以Cu-Kα(A=1.5418nm)靶为辐射源,工作电压为40kV,工作电流为100mA,扫描速度为4(°)/min,衍射角扫描范围为20°~100°。采用显微维氏硬度计(TMVS-1)对涂层表面与截面进行维氏硬度测试,间距为0.1mm,施加载荷为1.96N,加载时间为15s,选取不同区域,进行多次测量并计算平均值。用王水(HCl:HNO₃=1:3,体积比)蚀刻样品,通过电子探针(EPMA, JEOL JXA-8230)对涂层微观形貌进行观察并通过能谱仪(EDS)进行成分分析。使用多功能摩擦磨损试验机(MFT-5000, RTEC)在室温下进行不同载荷下的往复滑动磨损试验,摩擦副为Si₃N₄陶瓷球,频率和行程长度分别为1Hz和5mm,载荷为30N,摩擦时间为1200s。通过电子探针(EPMA)和三维形貌仪(Contour GT-K)表征磨痕的表面形貌和磨损体积。在室温下,以3.5wt%NaCl溶液为电解液,采用三电极体系模式对涂层进行动电位极化曲线测试,实验设备为Gamry Reference 3000电化学工作

站。动电位极化曲线测试的电压范围为 $-1.2 \sim +0.2$ V, 扫描速度为 $1 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$ 、采样间隔为 1 s。每组样品以相同实验条件重复测试 3 次, 消除实验数据的偶然性, 确保结果的可重复性。实验数据使用 Gamry 分析软件进行数据处理与拟合。

2 结果与讨论

2.1 物相分析

图 1 为不同扫描速度下激光熔覆 $\text{FeCo}_{0.5}\text{CrNi}_{1.5}\text{B}_{0.5}\text{Nb}_{0.1}$ 高熵合金的 X 射线衍射图谱。从图中可以看出, 不同扫描速度下的高熵合金涂层物相组成相似, 均为面心立方 (FCC) 相和硼化物或碳化物中间

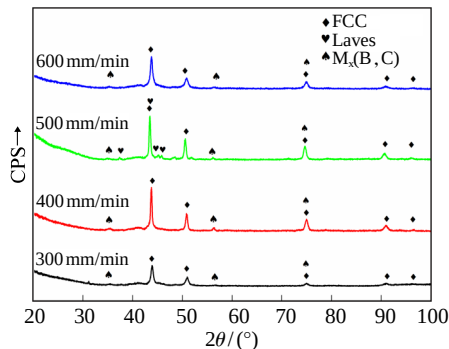


图 1 $\text{FeCo}_{0.5}\text{CrNi}_{1.5}\text{B}_{0.5}\text{Nb}_{0.1}$ 高熵合金涂层的 XRD 图
Fig.1 XRD patterns of $\text{FeCo}_{0.5}\text{CrNi}_{1.5}\text{B}_{0.5}\text{Nb}_{0.1}$ high entropy alloy coatings

相组成, 其中扫描速度为 500 mm/min 时出现了代表 Laves 相的衍射峰。 Fe 、 Co 、 Cr 、 Ni 元素间具有近似的原子半径且相互之间混合焓接近零, 倾向于形成 FCC 相^[16]。因为 B 和 C 与体系中其他元素之间具有较负的混合焓, 所以容易生成金属间中间相并在晶间析出。Nb 原子半径比其他元素大得多, 且 Nb 的熔点较高, 所以会率先凝固析出生成 Laves 相。虽然硬质相的产生可能导致裂纹等削弱涂层稳定性的后果, 但同时它的产生可以有效提高涂层硬度, 而且 FCC 相的存在可以增韧硬质相, 进而改善耐磨性。总之, 激光扫描速度的改变影响了激光能量输入, 引起了局部相变, 从而影响熔覆层耐磨性和耐蚀性。

2.2 熔覆层显微形貌分析

$\text{FeCo}_{0.5}\text{CrNi}_{1.5}\text{B}_{0.5}\text{Nb}_{0.1}$ 高熵合金涂层的显微形貌及 EDS 面扫描图如图 2 所示。可看出, 随着扫描速度的增加, 涂层吸收的激光能量减少, 晶粒不断细化, 但是当扫描速度为 600 mm/min 时, 激光能量密度过低, 粉末吸收能量不足, 不利于形核, 晶粒尺寸变大^[17]。为了进一步分析涂层中的元素分布及相组成, 对涂层进行了 EDS 面扫描及线扫描, 图 3 为 $\text{FeCo}_{0.5}\text{CrNi}_{1.5}\text{B}_{0.5}\text{Nb}_{0.1}$ 高熵合金涂层的 EDS 线扫描图。可以观察到不同扫描速度下涂层的显微组织有所差异, 根据 EDS 和 XRD 结果分析, 涂层中大部分元素发生了

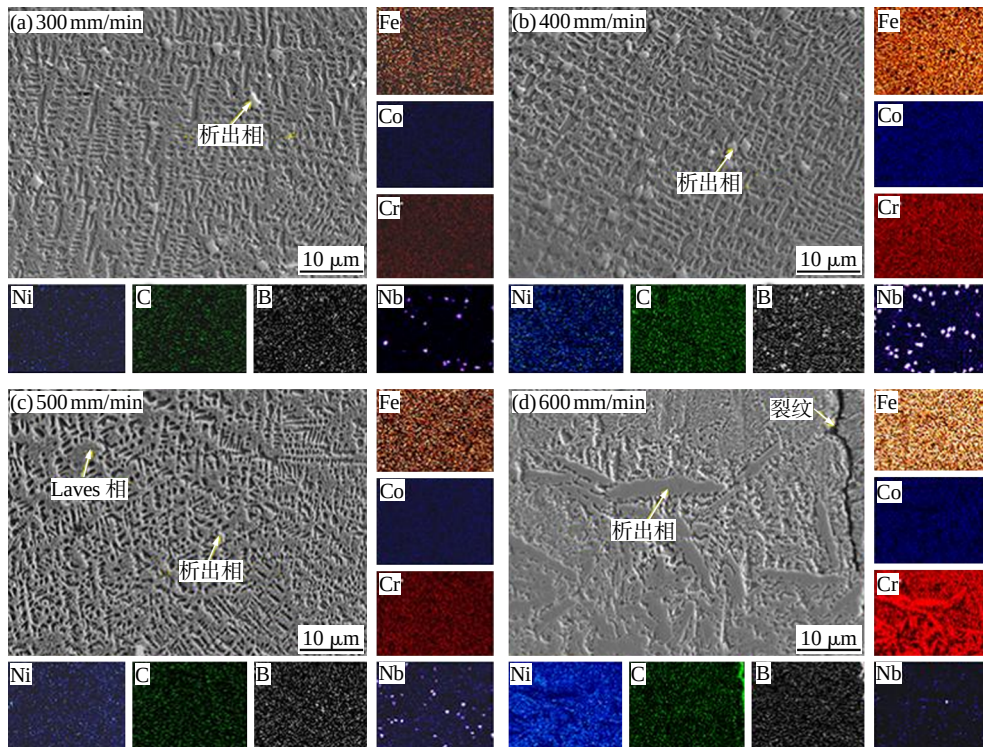


图 2 $\text{FeCo}_{0.5}\text{CrNi}_{1.5}\text{B}_{0.5}\text{Nb}_{0.1}$ 高熵合金涂层的显微形貌及 EDS 面扫描图
Fig.2 Microstructure and EDS scanning of $\text{FeCo}_{0.5}\text{CrNi}_{1.5}\text{B}_{0.5}\text{Nb}_{0.1}$ high entropy alloy coatings

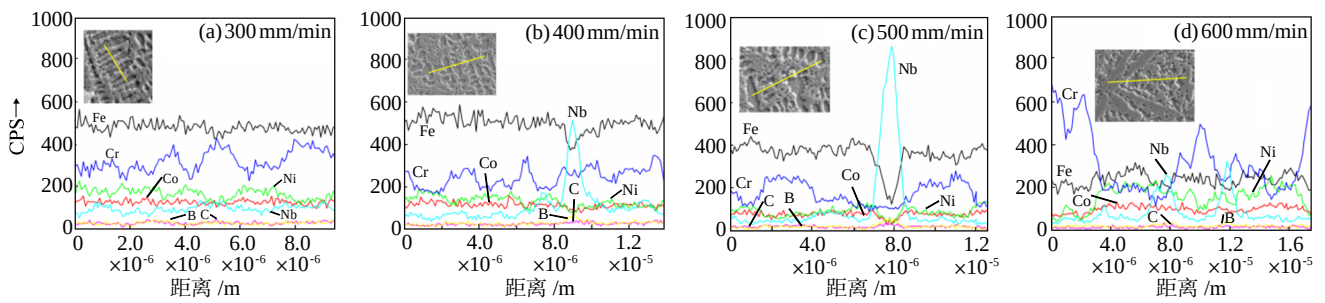


图 3 $\text{FeCo}_{0.5}\text{CrNi}_{1.5}\text{B}_{0.5}\text{Nb}_{0.1}$ 高熵合金涂层的 EDS 线扫描图
Fig.3 EDS line scan of $\text{FeCo}_{0.5}\text{CrNi}_{1.5}\text{B}_{0.5}\text{Nb}_{0.1}$ high entropy alloy coatings

一定的偏析现象,其中 Fe、Ni 元素在晶粒内聚集, Cr、Nb 元素在晶间聚集, Co 元素均匀的分布在涂层中,可以判断 FCC 相为 Fe_3Ni_2 相,分布在晶粒内部, Laves 相为 CrCoNi 相,分布在晶间。其中 Laves 相在扫描速度为 500 mm/min 的涂层中数量最多,但其他涂层中也可以观察到 Laves 相产生,可能由于 Laves 相尺寸过小,其他扫描速度涂层的 XRD 图谱中未表现出明显的 Laves 相衍射峰。同时从图 2 还观察到有颗粒状沉淀相在晶间析出,且随着扫描速度的增加,颗粒状沉淀相先增加后减少。如图 2(d)所示,在扫描速度为 600 mm/min 时,有棒状沉淀相析出。根据涂层 EDS 面扫描及线扫描可以判断颗粒状析出物为 NbC 和 NbB_2 等金属间强化相,棒状沉淀相为 Cr_2B 相,硼化物和碳化物等中间相的出现可以有效提高涂层的显微硬度。但是由于大块的棒状硼化物产生,使得扫描速度为 600 mm/min 的涂层脆性变大,内部产生裂纹。

2.3 显微硬度分析

图 4 为不同扫描速度下 $\text{FeCo}_{0.5}\text{CrNi}_{1.5}\text{B}_{0.5}\text{Nb}_{0.1}$ 高熵合金涂层的截面硬度曲线。可以明显观察到截面分成涂层、热影响区、基体 3 个区域,其中涂层区域具有最高最稳定的硬度。从图 4 还可以看出,随着

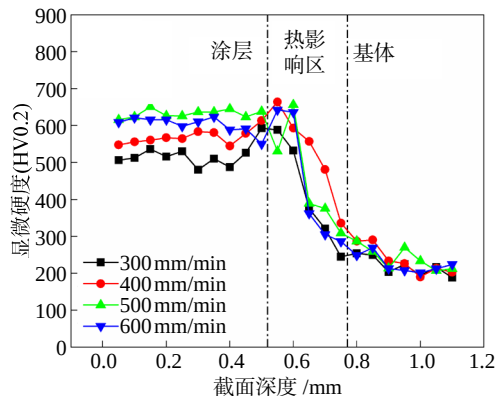


图 4 不同扫描速度下 $\text{FeCo}_{0.5}\text{CrNi}_{1.5}\text{B}_{0.5}\text{Nb}_{0.1}$ 高熵合金涂层的截面硬度曲线

Fig.4 Cross section hardness curves of $\text{FeCo}_{0.5}\text{CrNi}_{1.5}\text{B}_{0.5}\text{Nb}_{0.1}$ high entropy alloy coatings at different scanning speeds

激光扫描速度的增加,涂层平均显微硬度先增加后降低,在 500 mm/min 时平均显微硬度最高,达到 632.3 HV0.2,是基体显微硬度 (229.8 HV0.2) 的 2.75 倍。涂层的强化机制主要是由于碳化物、硼化物和 Laves 相等硬质相引起的析出强化,高熵效应导致的固溶强化作用和激光扫描速度变化引起的细晶强化,其中析出强化占据主要地位。根据 XRD 和涂层显微形貌分析,500 mm/min 的涂层除具有碳化物、硼化物沉淀外,还生成较多的 Laves 相,这是其具有最高显微硬度的主要原因。

2.4 摩擦磨损性能

图 5 为不同扫描速度下 $\text{FeCo}_{0.5}\text{CrNi}_{1.5}\text{B}_{0.5}\text{Nb}_{0.1}$ 高熵合金涂层的摩擦实验结果。从图 5(a)可以发现,摩擦系数曲线可大致分为初始磨合阶段和稳定磨损阶段。在初始磨合阶段,磨球与试样实际接触面积较小,因为载荷恒定,所以实验初期接触应力大,磨损速度较快,摩擦系数迅速上升^[18]。随着磨损的不断进行,磨球与试样接触面积不断扩大,磨损速度也逐渐变慢,摩擦系数趋于稳定,进入稳定磨损阶段。由图 5(a)还可见,随着激光扫描速度的增加,涂层摩擦系数先减小后增大,这一变化规律与涂层物相组织结构及硬度变化规律相符,扫描速度为 500 mm/min 时,涂层中的 Laves 相和硼化物、碳化物强化相含量较多,所以其硬度最高,平均摩擦系数最低。由图 5 可以明显看出,涂层摩擦系数与磨痕深度、磨损体积呈对应关系,摩擦系数越大,磨痕深度越深,磨损体积越大。在扫描速度为 300 mm/min 时涂层硬度最低,平均摩擦系数最高,磨痕最深摩擦体积损失最大;500 mm/min 时涂层平均摩擦系数最低,磨痕最浅,摩擦体积损失最小。为了更好分析涂层的磨损机理,使用带有能谱的电子探针对涂层磨损形貌进行观测,不同扫描速度下 $\text{FeCo}_{0.5}\text{CrNi}_{1.5}\text{B}_{0.5}\text{Nb}_{0.1}$ 高熵合金涂层磨损形貌如图 6 所示。可以观察到不同扫描速度下的涂层表现出相似的磨损特征。从图 6

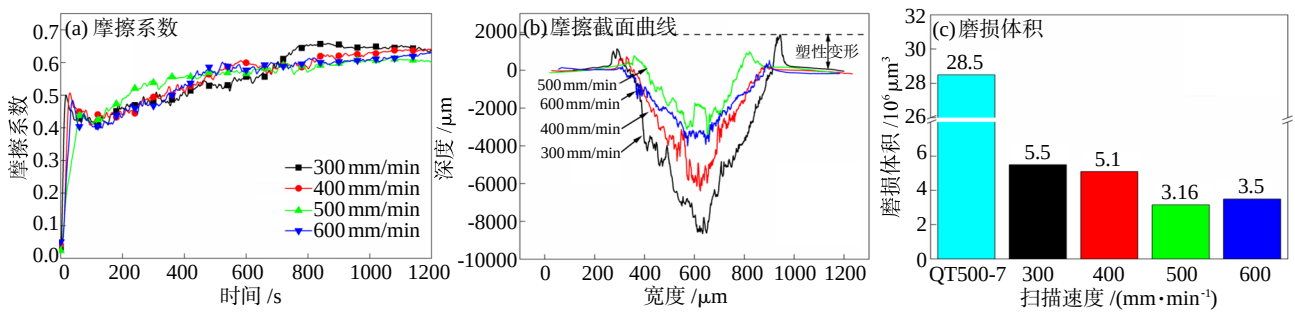


图5 不同扫描速度下 FeCo_{0.5}CrNi_{1.5}B_{0.5}Nb_{0.1} 高熵合金涂层的摩擦实验结果
Fig.5 Friction test results of FeCo_{0.5}CrNi_{1.5}B_{0.5}Nb_{0.1} high entropy alloy coatings at different scanning speeds

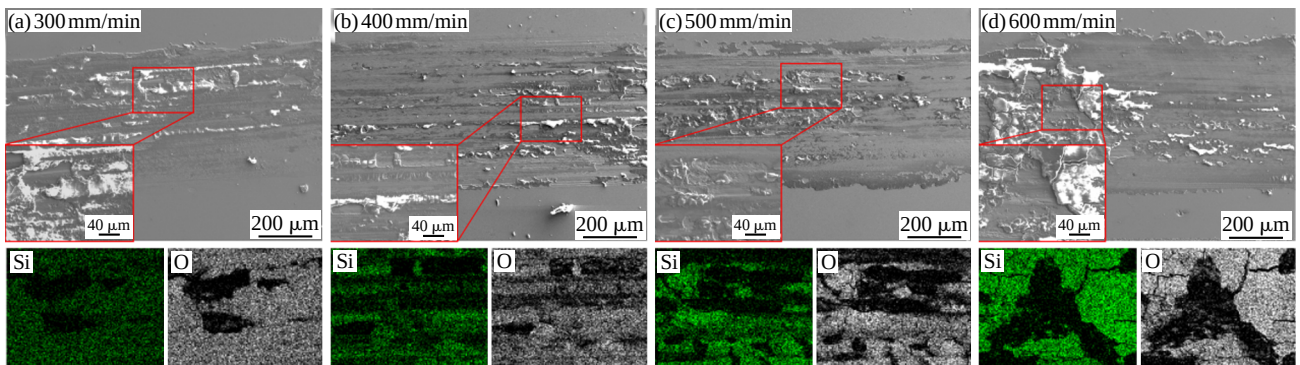


图6 不同扫描速度下 FeCo_{0.5}CrNi_{1.5}B_{0.5}Nb_{0.1} 高熵合金涂层磨损形貌
Fig.6 Wear morphologies of FeCo_{0.5}CrNi_{1.5}B_{0.5}Nb_{0.1} high entropy alloy coatings under different scanning speeds

可以看出,磨损表面具有连续的氧化层,氧化层的面积随扫描速度的增加而变大,氧化层在周期性载荷的作用下产生微小裂纹,但是在扫描速度为 600 mm/min 的涂层中出现了贯穿整个磨痕的大裂纹。除此之外,磨损表面出现少量磨屑堆积、犁沟和剥落。根据图 6 的能谱分析,发现磨损表面出现了较多的 Si 元素和 O 元素,说明磨损界面发生了物质转移。涂层磨损机理以粘着磨损和氧化磨损为主,伴有少量的磨粒磨损。综合来说,扫描速度为 500 mm/min 的涂层具有较多的氧化层,可以有效减少摩擦体积损失,并且未出现贯穿型裂纹,具有最好的耐磨性能。

2.5 腐蚀性能

基体与不同扫描速度下 FeCo_{0.5}CrNi_{1.5}B_{0.5}Nb_{0.1} 涂层的动电位极化曲线如图 7 所示,拟合得到相应的腐蚀电位和腐蚀电流密度见表 2。自腐蚀电位(E_{corr})和腐蚀电流密度(I_{corr})是评价材料耐蚀性的两个因素,其中腐蚀电流密度是公认的评价耐蚀性的重要指标。自腐蚀电位即材料自身发生腐蚀反应的电位,其数值越低代表其越不容易发生腐蚀。腐蚀电流密度可以在腐蚀动力学上表征腐蚀速率,即腐蚀电流密度越小,腐蚀速率越低,耐蚀性越好。根据表 2 可知,所有高熵合金涂层的腐蚀电流密度都比基体的

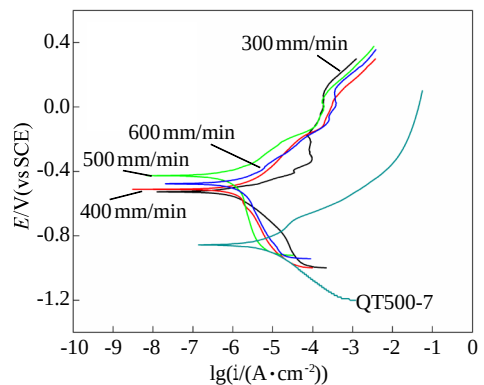


图7 基体与不同扫描速度下 FeCo_{0.5}CrNi_{1.5}B_{0.5}Nb_{0.1} 涂层的动电位极化曲线

Fig.7 Dynamic potential polarisation curves of the substrate and the FeCo_{0.5}CrNi_{1.5}B_{0.5}Nb_{0.1} coatings at different scanning speeds

表 2 不同扫描速度下 FeCo_{0.5}CrNi_{1.5}B_{0.5}Nb_{0.1} 涂层的腐蚀参数
Tab.2 Corrosion parameters of FeCo_{0.5}CrNi_{1.5}B_{0.5}Nb_{0.1} coatings at different scanning speeds

腐蚀参数	300	400	500	600	QT500-7
$E_{\text{corr}}/\text{mV}$	-466.2	-474.8	-388.4	-476.0	-856.0
$I_{\text{corr}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	4.972	3.400	2.100	2.470	8.190

小;并且随着扫描速度的增加,涂层腐蚀电流密度先减小后增大,在扫描速度为 500 mm/min 时,涂层腐蚀电流密度最小达到 2.470 $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$,即腐蚀速率最低。高致密度的钝化膜形成是涂层耐蚀性提高的主要原因,晶粒细化可以提高钝化膜的致密度。随着扫

速度的增加,涂层晶粒不断细化,耐蚀性逐渐提高。同时,析出物和腐蚀产物会形成阻挡层,阻碍腐蚀的进一步进行^[11]。直到速度提高到 600 mm/min 时,扫描速度过快,熔池内对流增加,导致涂层出现裂纹等缺陷,表面更加粗糙,涂层耐蚀性下降。

3 结论

(1) 涂层主要由 FCC 相、Laves 相和部分硼化物、碳化物组成,扫描速度的改变使涂层发生局部相变,沉淀相数量、形态发生改变,导致涂层显微硬度及耐磨耐蚀性有所不同。

(2) Laves 相及沉淀相引起的析出强化是涂层具有较高硬度的主要原因,当激光扫描速度为 500 mm/min 时,涂层具有最高的硬度,为 632.3 HV0.2,是基体显微硬度(229.8 HV0.2)的 2.75 倍。

(3) 不同扫描速度下涂层的磨损机理相似,以粘着磨损和氧化磨损为主,伴有少量的磨粒磨损,且涂层耐磨性与硬度成正比。扫描速度为 500 mm/min 的涂层具有最高的硬度,最低的摩擦系数,最少的摩擦体积损失。

(4) 不同扫描速度下的涂层耐蚀性均优于基体,其中扫描速度为 500 mm/min 的涂层具有最优的耐蚀性。涂层的耐蚀性主要与钝化膜的致密性和稳定性有关,硼化物和碳化物也起到了一定的屏障作用,有利于涂层耐蚀性的提高。但是过高的扫描速度会导致涂层出现裂纹,使得涂层的耐蚀性下降。

参考文献:

- [1] 张远深,卢玉星,范超超,等. 干式螺杆真空泵转子热力耦合分析与冷却系统优化[J]. 液压气动与密封,2019,39(2):49-53.
- [2] Siddiqui A A, Dubey A K. Recent trends in laser cladding and surface alloying [J]. Optics & Laser Technology,2021,134: 106619.
- [3] 鲁青龙,王彦芳,栗荔,等. 扫描速度对激光熔覆铁基非晶复合涂层组织与性能的影响[J]. 中国激光,2013,40(2):116-121.
- [4] Jiang G Y, Liu Y P, Xie J L, et al. Mechanical and corrosion resistance of laser cladding Ni-based alloy of steel plate under variable defocusing[J]. Optik,2020,224:165464.
- [5] Yeh J W, Chen S K, Lin S J, et al. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements[J]. Advanced Engineering Materials,2004,6(5):299-303.
- [6] 董天顺,刘琦,李艳姣,等. 高熵合金涂层的研究现状及展望[J]. 材料保护,2020,53(7):137-141.
- [7] 王志英,徐泽洲,黄月明. 激光熔覆 TiNbZrMo 高熵合金涂层的显微组织与摩擦磨损性能 [J]. 热加工工艺,2021,50(22): 92-95.
- [8] 李大艳,姜慧,邹龙江,等. WC 含量对激光熔覆 AlCoCrFeNi-Nb_{0.75} 高熵合金涂层的组织与性能的影响[J]. 热加工工艺,2019, 48(10):117-121.
- [9] Tian L C, Shen Y. Microstructure and corrosion property of CrMnFeCoNi high entropy alloy coating on Q235 substrate via mechanical alloying method [J]. Surfaces and Interfaces,2019, 15:135-140.
- [10] Sun Y, Chen P, Liu L, et al. Local mechanical properties of Al_xCoCrCuFeNi high entropy alloy characterized using nanoindentation[J]. Intermetallics,2018,93:85-88.
- [11] 宋鹏芳,姜芙林,王玉玲,等. 激光能量密度对 CrFeCoNiNb 熔覆层组织演变和性能影响的试验研究 [J]. 机械工程学报, 2023,59(2):127-137.
- [12] 姜越,朱柏祥,李秀明,等. CrFeCoNiB_{0.05}Ti_x 高熵合金的显微组织和力学性能[J]. 金属热处理,2022,47(8):58-63.
- [13] Zhang H T, Xiao M. Effect of Nb content on microstructure and properties of laser cladding FeNiCoCrTi_{0.5}Nb_x high-entropy alloy coating[J]. Optik,2019,198:163316.
- [14] 陈国进,张冲,唐群华,等. 含 B 量对激光熔覆 FeCoCrNiB_x(x=0.5,0.75,1.0,1.25) 高熵合金涂层组织结构与耐磨性的影响 [J]. 稀有金属材料与工程,2015,44(6):1418-1422.
- [15] Zhang C, Chen G J, Dai P Q. Evolution of the microstructure and properties of laser-clad FeCrNiCoB_x high-entropy alloy coatings [J]. Materials Science and Technology,2016,32(16): 1666-1672.
- [16] 姜慧. CoFeNi(Cr)-M 共晶高熵合金成分设计与力学性能研究 [D]. 大连:大连理工大学,2018.
- [17] Qiu X W, Zhang Y P, He L, et al. Microstructure and corrosion resistance of AlCrFeCuCo high entropy alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds,2013,549:195-199.
- [18] 孙宁,方艳,张家奇,等. WC-12Co 添加量对激光熔覆 Inconel 625 基复合材料微观组织和耐磨性能的影响 [J]. 中国激光, 2021,48(6):93-102. 