

# 一种高速列车制动盘高熵合金耐磨层 组织和性能的研究

曹振飞<sup>1</sup>, 齐海波<sup>1,2</sup>, 林齐<sup>1</sup>, 包大志<sup>1</sup>, 门晓玲<sup>1</sup>, 王健宇<sup>1</sup>

(1. 石家庄铁道大学, 石家庄 050043; 2. 河北省交通工程材料重点实验室, 石家庄 050043)

**摘要:** **目的** 对磨损后的高速列车制动盘进行修复, 以降低列车运营成本。**方法** 采用机械自混粉末, 利用激光熔覆工艺制备 CrMnFeCoNi 高熵合金熔覆层对制动盘进行修复, 对熔覆层组织、组成相、耐磨性和耐腐蚀性进行研究。**结果** 最佳实验工艺为: 激光功率 1000 W, 扫描速度 5 mm/s, 送粉电压 7.5 V, 对应单道宽度 2.42 mm, 高度 0.44 mm, 搭接率 50%。激光熔覆过程中存在烧损, 造成粉末成分不是等摩尔原子比, 最终熔覆层组成相为 BCC 和 FCC 两相。熔覆层铸造组织较均匀, 生长方向趋于一致, 存在一定数量的非晶和纳米级组织。CrMnFeCoNi 高熵合金熔覆层可降低材料磨损量, 摩擦系数为 0.3655, 更耐磨; 腐蚀电流密度为  $1.24 \times 10^{-5}$  A/cm<sup>2</sup>, 腐蚀速率为 0.146 475 mm/a。**结论** 通过激光熔覆工艺制备的高速列车制动盘高熵合金修复层, 其耐磨性、耐腐蚀性均优于基体, 延长了磨损后制动盘的使用寿命, 满足制动盘使用要求。

**关键词:** 高熵合金; 制动盘; 激光熔覆; 修复; 耐磨性; 耐腐蚀性

**中图分类号:** TG115.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)08-0030-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.08.005

## Microstructure and Properties of High Entropy Alloy Wear-resistant Layer for High-speed Train Brake Disc

CAO Zhen-fei<sup>1</sup>, QI Hai-bo<sup>1,2</sup>, LIN Qi<sup>1</sup>, BAO Da-zhi<sup>1</sup>, MEN Xiao-ling<sup>1</sup>, WANG Jian-yu<sup>1</sup>

(1. Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Key Laboratory of Hebei Province Traffic Engineering Material, Shijiazhuang 050043, China)

**ABSTRACT:** The work aims to repair the worn high-speed train brake disc to reduce train operating cost. The CrMnFeCoNi high entropy alloy prepared with mechanical self-mixing powder by laser cladding was used to repair the brake disc and study the microstructure, composition phase, wear resistance and corrosion resistance. The best experimental technology was laser power of 1000 W, scanning speed of 5 mm/s, feeding voltage of 7.5 V, single channel width of 2.42 mm, single channel height of 0.44 mm and single overlap rate of 50%. There was burning loss in the process of laser cladding, so the powders composition was not equal to molar atom ratio and finally BCC and FCC phases were formed in CrMnFeCoNi high entropy alloy cladding

收稿日期: 2018-03-11; 修订日期: 2018-06-22

**Received:** 2018-03-11; **Revised:** 2018-06-22

**基金项目:** 国家自然科学基金资助 (51705345); 河北省重点研发计划 (18211813D); 河北省自然科学基金资助 (E2017210054)

**Fund:** Natural Science Foundation of China (51705345), Key Research and Development Plan of Hebei Province of China (18211813D), Natural Science Foundation of Hebei Province (E2017210054)

**作者简介:** 曹振飞 (1993—), 男, 硕士, 主要研究方向增材制造。

**Biography:** CAO Zhen-fei (1993—), Male, Master, Research focus: increasing material manufacturing.

**通讯作者:** 齐海波 (1972—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为增材制造、数值模拟。

**Corresponding author:** QI Hai-bo (1972—), Male, Doctor, Professor, Research focus: increasing material manufacturing, composite materials and numerical simulation.

layer. The casting microstructure of the cladding layer was uniform with the same growth tendency and certain amorphous and nanometer microstructures. The CrMnFeCoNi high entropy alloy reduced the wear by the friction factor of 0.3655, so the high entropy alloy cladding layer was more wear-resisting. The high entropy alloy cladding layer current density was  $1.24\times 10^{-5}$  A/cm<sup>2</sup> and the annual corrosion rate thickness was 0.146 475 mm/a. The high entropy alloy repair layer of high-speed train brake disc prepared by laser cladding has better wear resistance and corrosion than the matrix and the service life of worn brake disc is extended to meet the demand of brake disc.

**KEY WORDS:** high entropy alloy; brake disc; laser cladding; repairing; abrasive resistance; corrosion resistance

高速列车制动盘作为高速列车制动环节的关键部件,需要较好的耐磨性,同时制动过程中酸性油污、粉尘较多,工作环境恶劣,对耐蚀性也有要求<sup>[1-3]</sup>。我国高质量盘体依赖进口,成本较高,难以满足大规模装配需求,很有必要对磨损后的制动盘进行修复,以降低使用成本<sup>[4-6]</sup>。

高熵合金具有高强度、高硬度、高热阻、高电阻等一些传统合金无法比拟的优异性能,尤其是耐磨和耐腐蚀性强的特点,可对磨损后的制动盘进行修复<sup>[7]</sup>。Wang 等<sup>[8]</sup>研究了等离子渗氮法制备的 AlCoCrFeNi 高熵合金的组织 and 耐磨性,在固溶强化和硬质相综合作用下,高熵合金的耐磨性明显高于铸态基体。Gheorge BULUC 等<sup>[9]</sup>研究了 FeNiCrMnAl 合金耐磨性,结果显示该类合金摩擦系数处于变化状态,在 1667 s 内,前 16 s 摩擦系数为 1.18,之后一直下降,直至稳定在 0.87,摩擦系数较大。上述研究的高熵合

金涂层较薄,不适合大面积、磨损严重制动盘的修复。

激光熔覆技术加热速度和冷却速度都很快,制备合金时减少了组织粗大的现象,能够快速制备出高熵合金块体<sup>[10]</sup>。本文利用激光熔覆技术在高速列车制动盘铸造基体上制作厚度较大的高熵合金熔覆层,对磨损后高速列车制动盘进行修复,研究熔覆层组织和性能是否满足高速列车制动盘使用要求。

1 实验

1.1 材料成分及制备

激光熔覆基体材料选用经过正火和调质处理后的 24CrNiMo 制动盘同材质钢板,用砂轮打磨干净,并用丙酮和酒精擦拭清洗,待用,其主要化学成分见表 1。

表 1 制动盘基体化学成分  
Tab.1 Chemical composition of brake disc matrix

| wt%  |      |      |     |      |      |      |      |       |       |      |
|------|------|------|-----|------|------|------|------|-------|-------|------|
| C    | Cr   | Ni   | Mo  | Si   | Mn   | Al   | Nb   | P     | S     | Fe   |
| 0.23 | 0.86 | 1.11 | 0.5 | 0.55 | 1.12 | 0.04 | 0.04 | 0.015 | 0.008 | Bal. |

用单质 Cr、Mn、Fe、Co、Ni 混合自制高熵合金粉末,单质粉末粒度范围为-150~+300 目,纯度为 99.99%,实验材料 CrMnFeCoNi 按等摩尔比进行配比,合金元素参数如表 2 所示。实验粉末中 Cr、Mn、Ni 可以细化晶粒,得到细小组织,从而提高熔覆层使用性能。

表 2 合金元素参数  
Tab.2 Parameters of alloy elements

| Elements         | Mn     | Fe     | Ni     | Cr     | Co     |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Melting points/℃ | 1246   | 1535   | 1453   | 1857   | 1495   |
| Latticetype      | BCC    | BCC    | FCC    | BCC    | FCC    |
| Atomic radius/nm | 0.1249 | 0.1241 | 0.1219 | 0.1326 | 0.1230 |

实验前首先将粉末置于 DH50 混合机中混合 8 h,再用行星球磨机研磨 4 h,充分混合均匀,研磨后粒径相差不大,然后烘干待用。实验采用同轴送粉的方法在基板表面进行激光熔覆。实验成形系统主要由

YLS-4000W 光纤激光器、KUKA 六轴联动机器人手臂、DPSF-2 型送粉器和四路同轴送粉熔覆头组成。

针对激光功率、扫描速度和送粉电压三个参数进行单道正交实验,对 9 条单道进行评判打分,最终确定最优实验参数为:激光功率 1000 W,扫描速度 5 mm/s,送粉电压 7.5 V。实验时使用纯度为 99.999% 的氩气作保护气体和粉末载气,保护气体流量为 15 L/min,载气流量为 8 L/min,得到单道宽度为 2.42 mm,高度为 0.44 mm。

将单道搭接率作为单因素实验变量,最终确定最佳搭接率为 50%。

1.2 组织和相组成分析

将试样切割成 10 mm×10 mm×10 mm 大小,利用 GX51 型奥林巴斯光学显微镜(OM)和 GeminiSEM300 型场发射扫描电子显微镜(SEM)对熔覆层微观结构和形貌进行分析。采用 D8-ADVANCE 型 X 射线衍射仪对试样进行 XRD 分析,确定熔覆层组成相,扫描

角度范围为  $20^{\circ}\sim 100^{\circ}$ ，扫描速率为  $5 (^{\circ})/\text{min}$ 。

### 1.3 摩擦磨损试验

分别对高熵合金熔覆层及基体试样进行摩擦磨损试验。为模拟真实制动过程，本实验采用盘销式 MG-2000 型摩擦磨损试验机，主轴转速为  $300 \text{ r/min}$ ，载荷为  $50 \text{ N}$ ，摩擦时间为  $300 \text{ s}$ ，试样销尺寸为  $\phi 6 \times 10 \text{ mm}$ ，对偶盘为高速列车用粉末冶金铜基闸片，硬度为  $6\sim 8\text{HRC}$ 。实验前后，将试样销放入丙酮并用超声波清洗仪进行清洗，然后烘干称量，并用分析天平称量试样销磨损前后的质量变化，计算磨损量。

### 1.4 电化学测量

分别对 CrMnFeCoNi 高熵合金熔覆层及基体试样进行电化学测量。首先制作腐蚀标本切片，用砂纸从 800 目到 2000 目打磨，安装在大小为  $4 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的镶嵌件上。电化学测量在  $0.5 \text{ mol/L}$  盐酸溶液中进行，溶液配制环境为  $25^{\circ}\text{C}$ 、标准大气压力，甘汞电极作参比电极，铂片作辅助电极，两个试验试样依次在该盐酸溶液中进行电化学腐蚀实验。

## 2 结果与分析

### 2.1 XRD 分析

图 1 为高熵合金熔覆层 X 射线衍射图谱。从图 1 可以看到，高熵合金熔覆层在  $43.4^{\circ}$ 、 $51.2^{\circ}$ 、 $74.9^{\circ}$ 、 $91.8^{\circ}$  处出现 FCC 相衍射峰，在  $44.3^{\circ}$ 、 $65.3^{\circ}$ 、 $82.7^{\circ}$  处出现 BCC 相衍射峰，说明在该高熵合金熔覆层中同时存在 FCC 相和 BCC 相。

根据吉布斯自由能理论和传统凝固理论，本实验合金应形成多元合金<sup>[10]</sup>，结果显示相数远远少于传统理论值。由表 3 二元合金混合焓值可知，金属元素混合焓值较小，导致元素之间亲和力较小，因此该类型高熵合金没有产生大量金属间化合物；同时，高熵合金具有强烈的抑制作用，能够抑制复杂相产生，两者共同作用从而促进稳定固溶体形成<sup>[11-12]</sup>。

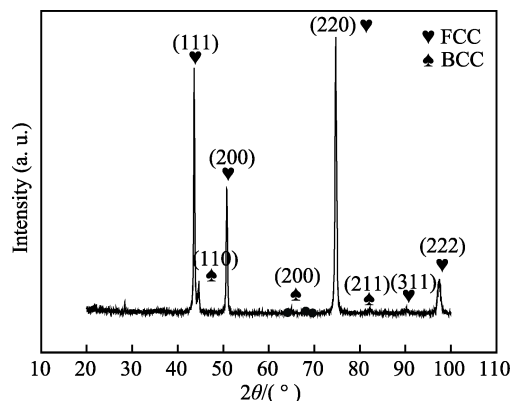


图 1 CrMnFeCoNi 高熵合金熔覆层 X 射线衍射图谱  
Fig.1 XRD image of CrMnFeCoNi high entropy alloy cladding layer

表 3 二元合金元素混合焓  
Tab.3 Mixing entropy of binary alloy element

| Element | Cr | Mn | Fe | Co | Ni |
|---------|----|----|----|----|----|
| Cr      | 0  |    |    |    |    |
| Mn      | 2  | 0  |    |    |    |
| Fe      | -1 | 0  | 0  |    |    |
| Co      | -4 | -5 | -1 | 0  |    |
| Ni      | -7 | -8 | 13 | 0  | 0  |

kJ/mol

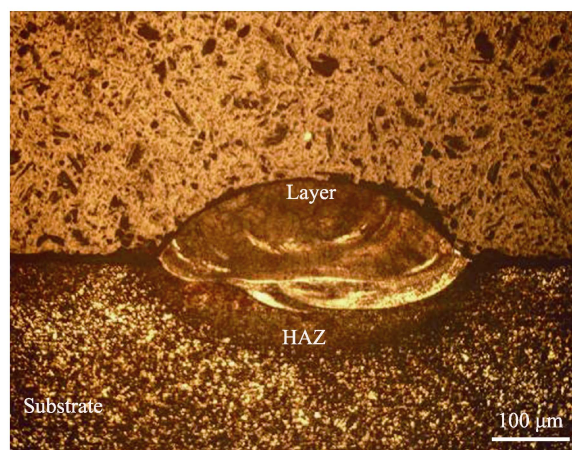
文献[13]显示激光熔覆 CrMnFeCoNi 高熵合金只出现 FCC 组成相。本实验在激光熔覆过程中，部分粉末烧损，造成合金元素不是严格的等摩尔原子比，因而形成了 BCC 组成相。

### 2.2 显微组织分析

图 2 为 CrMnFeCoNi 高熵合金熔覆单道形貌。由图 2 可知，单道表面光滑平整连续，没有出现粘粉和断点现象，也没有形成波浪形表面形貌。熔池横截面形貌良好，热影响区范围适宜，熔覆层和基体达到冶金结合，实验参数适合多层多道成形实验。



a 宏观形貌



b 截面形貌

图 2 高熵合金熔覆层单道形貌  
Fig.2 Single layer morphology of high entropy alloy:  
(a) macroscopic feature of single layer,  
(b) cross section of single layer

图 3 为 CrMnFeCoNi 高熵合金熔覆层的显微组织。熔覆层组织为细小铸造枝晶，生长方向与激光熔覆方向趋于一致，晶粒大小均匀，形状保存完整，铸造缺陷较少，晶外和晶内有明显晶界区分。从图 3 还可以看出，晶体内部还存在部分细小的非晶、纳米级组织。

在本研究工艺参数下，能量密度小，造成温度梯

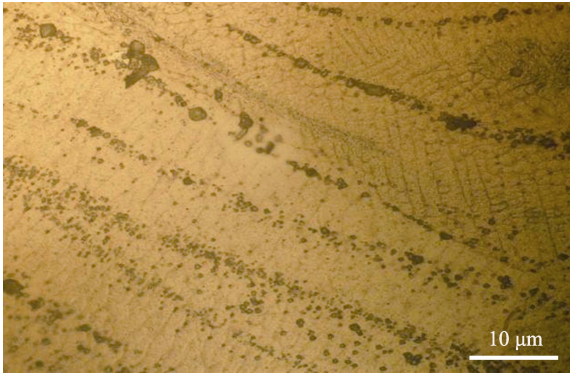


图 3 CrMnFeCoNi 高熵合金熔覆层组织  
Fig.3 OM images of CrMnFeCoNi high entropy cladding layer

度相对较小，晶粒有足够的时间进行形核，液态熔滴以平面形式进行生长，形成大小均匀、方向一致的铸造枝晶。一方面，固液界面处，合金元素进行再分配，产生成分过冷，但是温度梯度较小，胞晶不会在液相中生长成较大枝晶，而是又重新熔化在液相区，造成长度方向和宽度方向生长速度相近；另一方面，冷却时间相对较长，初生晶体有足够的时间进行生长，并且残余能量能够通过热传导方式由基板扩散出去，不会造成过热，工艺本身也能够起到细化晶粒的作用，这样就形成了图 3 所示的铸造枝晶。

2.3 摩擦磨损实验分析

图 4 为激光熔覆 CrMnFeCoNi 高熵合金块体及基体摩擦系数随时间的变化曲线，经测算，该高熵合金摩擦系数为 0.3655，基体摩擦系数为 0.4801，摩擦系数小幅度降低。同时称量每个试样销的磨损量，结果如表 4 所示，高熵合金平均磨损量为 17.2 mg，基体平均磨损量为 22.9 mg，磨损量减少 24.7%。高熵合金修复层既能满足磨损使用要求，同时降低了磨损量，增加了服役寿命。

基体摩擦系数随时间的增加在 0.500 左右浮动，

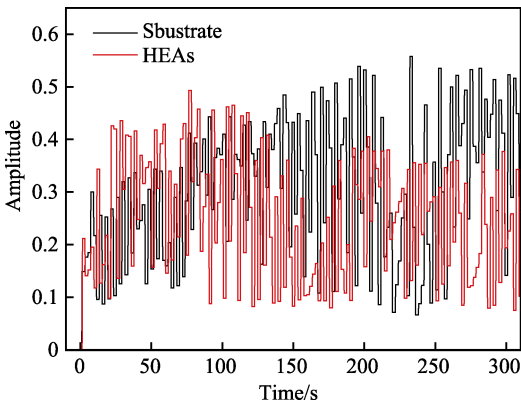


图 4 高熵合金与基体摩擦系数变化趋势比较  
Fig.4 Friction coefficient change trend comparison of high entropy alloy and substrate

高熵合金熔覆层摩擦系数一直在小范围波动。在 0~100 s 内，高熵合金摩擦系数在 0.382 左右并逐渐下降，在 150 s 时下降到 0.365；在 150~300 s 内，高熵合金摩擦系数在 0.350 左右并逐渐稳定。两种合金摩擦系数变化处于饱和磨损阶段<sup>[14]</sup>，摩擦系数在一定范围内波动，磨损较剧烈，满足在规定距离内进行制动的要求。

表 4 试样磨损量  
Tab.4 Abrasionloss of samples

| 材料       | 编号 | 磨损前<br>质量/g | 磨损后<br>质量/g | 磨损量<br>/g | 平均磨<br>损量/g |
|----------|----|-------------|-------------|-----------|-------------|
| 母材       | 1  | 2.119       | 2.101       | 0.018     | 0.0229      |
|          | 2  | 1.975       | 1.960       | 0.015     |             |
|          | 3  | 2.076       | 2.040       | 0.036     |             |
| 高熵<br>合金 | 4  | 2.099       | 2.085       | 0.014     | 0.0172      |
|          | 5  | 2.472       | 2.460       | 0.012     |             |
|          | 6  | 1.826       | 1.801       | 0.025     |             |

图 5 为该高熵合金摩擦磨损后的 SEM 电镜图，可知磨损表面平行分布着大量犁沟形划痕，相对于基体的犁沟较浅，且高熵合金表面同样存在破损和氧化现象。

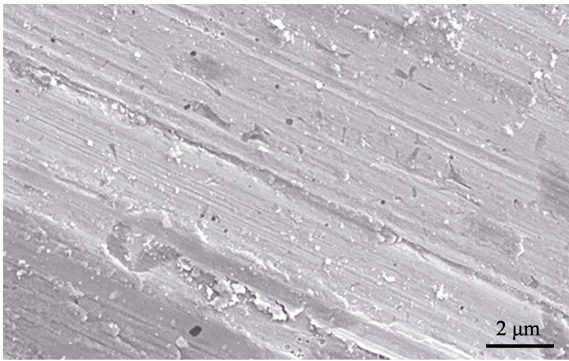


图 5 高熵合金摩擦磨损后的 SEM 电镜图  
Fig.5 SEM image of the CrMnFeCoNi high entropy alloy after frictional wear test

由于本实验采用销盘式摩擦磨损试验机，试样销在摩擦副表面相对滑动时，结合点处发生剪切断裂，试样销上合金材料脱落成磨屑，从试样销表面转移到闸片上。同时，由于实验过程为模拟真实制动过程，实验时间较长，试样销和闸片之间会形成循环变化的接触应力，在此应力作用下，试样销表面会产生疲劳、剥落而形成图 5 所示的凹坑和犁沟<sup>[15-16]</sup>。制动过程中，试样销和闸片之间相对滑动，磨屑发生迁移，同时试样表面形成凹坑，因此该系列高熵合金磨损属于粘着磨损和疲劳磨损共同作用的结果。

相对于制动盘基体材料，高熵合金在稳定固溶



体、增强相(BCC)等综合影响下,摩擦过程中表面摩擦能力上升,抗变形能力得到提高,使此类高熵合金摩擦磨损性能略高于制动盘基体材料的使用标准。

## 2.4 电化学测量分析

图6为CrMnFeCoNi高熵合金熔覆层的塔菲尔曲线。动力学参数可以通过Butler-Volmer分析,使用线性相符的方法来计算,表5为塔菲尔曲线的电化学参数。

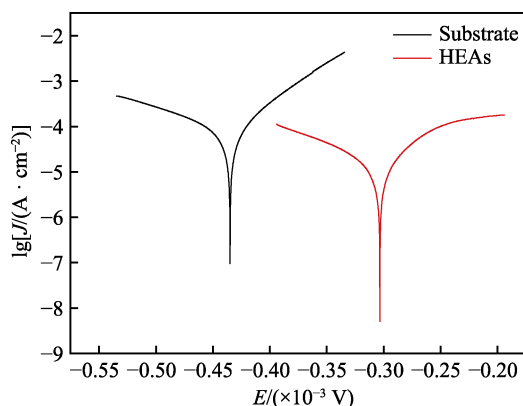


图6 高熵合金熔覆层及基体的塔菲尔曲线  
Fig.6 Dynamic potential Tafel curve for CrMnFeCoNi high entropy alloy

表5 CrMnFeCoNi高熵合金电化学参数  
Tab.5 Electrochemical parameters of Tafel curve for CrMnFeCoNi high entropy alloy

| 材料   | 自腐蚀电位<br>( $\times 10^{-3}$ V) | 自腐蚀电流密度<br>( $\times 10^{-5}$ A·cm $^{-2}$ ) |
|------|--------------------------------|--|
| 高熵合金 | -0.315                         | 1.244  |
| 基体   | -0.435                         | 6.023  |

在腐蚀面积、腐蚀时间、腐蚀电流、腐蚀温度相同的情况下,高熵合金输入电流密度 $J_c$ 为 $1.086\ 793 \times 10^{-5}$  A/cm $^2$ ,低于基体电流密度 $6.118\ 788 \times 10^{-5}$  A/cm $^2$ ;高熵合金平均腐蚀速率为 $0.129\ 9251$  g/(m $^2$ ·h),低于制动盘基体平均腐蚀速率 $0.639\ 046\ 3$  g/(m $^2$ ·h);高熵合金平均腐蚀厚度为 $0.146\ 475$  mm/a,低于制动盘基体平均腐蚀厚度 $0.720\ 448$  mm/a。结合表5腐蚀电位和腐蚀电流密度,高熵合金耐腐蚀性强于制动盘基体。

金属元素Cr、Ni、Mn在激光熔覆过程中会形成钝化膜,在酸性溶液中对内部合金起保护作用,因此高熵合金熔覆层具有比基底材料更强的抗腐蚀性能。该曲线说明修复后的耐磨层为“被动”腐蚀,在腐蚀电位持续增加的过程中,高熵合金熔覆层比制动盘基体展现了更窄的腐蚀区间;在相同腐蚀电流密度下,高熵合金熔覆层自腐蚀电位比基体低,宏观表现为高熵合金熔覆层有更好的耐腐蚀性。

## 3 结论

1) 采用机械自混粉末,利用激光熔覆技术在基体上成功制备出CrMnFeCoNi高熵合金耐磨层。

2) CrMnFeCoNi高熵合金熔覆层为具有FCC相和BCC相的固溶体,熔覆层显微组织为细小铸造枝晶,生长方向较一致,晶粒大小均匀,存在一定数量的非晶和纳米级组织。

3) CrMnFeCoNi高熵合金熔覆层摩擦系数为0.3655,平均磨损量为 $17.2$  mg,较基体磨损量减少24.7%,耐磨性更好。

4) CrMnFeCoNi高熵合金熔覆层在 $0.5$  mol/L盐酸中的腐蚀电流密度为 $1.244 \times 10^{-5}$  A/cm $^2$ ,较基体腐蚀电流密度降低79.3%,输入电流为 $1.086\ 793 \times 10^{-5}$  A/cm $^2$ ,平均腐蚀速率为 $0.129\ 925\ 1$  g/(m $^2$ ·h),高熵合金平均腐蚀厚度为 $0.146\ 475$  mm/a,低于制动盘基体平均腐蚀厚度 $0.720\ 448$  mm/a,说明高熵合金修复层耐腐蚀能力强。

## 参考文献:

- [1] 王红英,李志军,莫守形,等. 高速列车制动盘失效分析及材料研究的进展[J]. 焊接, 2007(3): 14-17.  
WANG Hong-ying, LI Zhi-jun, MO Shou-xing, et al. Failure analysis of high speed train brake discs and progress in materials research[J]. Welding, 2007(3): 14-17.
- [2] MACKIN T J, NOE S C, BALL K J, et al. Thermal cracking in disc brakes[J]. Engineering failure analysis, 2002, 9(1): 63-76.
- [3] 王晔. 高铁制动用粉末冶金摩擦材料的制备及性能研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2015.  
WANG Hua. Preparation and properties of high speed railway brake powder metallurgy friction materials[D]. Beijing: University of Science & Technology Beijing, 2015.
- [4] 岑升波. 高速列车铸钢制动盘热疲劳性能研究及寿命预测[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.  
CEN Sheng-bo. Study on thermal fatigue properties and life prediction of cast brake discs for high speed trains[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [5] 徐汇音. 高速列车刹车片检修工艺的分析[J]. 实验室研究与探索, 2012, 31(5): 58-60.  
XU Hui-yin. Repair Process of high-speed train brake pads[J]. Research and exploration in laboratory, 2012, 31(5): 58-60.
- [6] 吴丹,王福明,王程明,等. Cr-Mo-V系高铁制动盘用钢的热力学研究[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(8): 228-233.  
WU Dan, WANG Fu-ming, WANG Cheng-ming, et al. Thermodynamic of Cr-Mo-V steel for high-speed railway

- brake discs[J]. Transactions of materials and treatment, 2016, 37(8): 228-233.
- [7] 张晖, 周潘冶, 何宜柱. 激光熔覆 FeCoNiCrAlSi 高熵合金涂层[J]. 金属学报, 2011, 47(8): 1075-1079.  
ZHANG Hui, ZHOU Pan-ye, HE Yi-zhu. Laser cladding FeCoNiCrAlSi high-entropy alloy coating[J]. Acta metalurgica sinica, 2011, 47(8): 1075-1079.
- [8] WANG Y, YANG Y, YANG H, et al. Microstructure and wear properties of nitride AlCoCrFeNi high-entropy alloy[J]. Materials chemistry & physics, 2017, 532: 480.
- [9] BULUC G, CHELARIU R, POPESCU G, et al. Study on wear resistance FeNiCrMnAl high entropy alloy-mechanical properties[J]. Key engineering materials, 2017, 750: 34-38.
- [10] 袁庆龙, 冯旭东, 曹晶晶, 等. 激光熔覆技术研究进展[J]. 材料导报, 2010, 24(3): 112-116.  
YUAN Qing-long, FENG Xu-dong, CAO Jing-jing, et al. Research progress in laser cladding technology[J]. Materials review, 2010, 24(3): 112-116.
- [11] ZHANG Y. Metallic glasses and high entropy alloys[M]. Beijing: Science press, 2010: 69.
- [12] WEN Z, ZHAO Y, HOU H, et al. First-principles studied Ni-Al intermetallic compounds under various temperature and pressure[J]. Super lattices & microstructures, 2017 (103): 9-18.
- [13] YE Q, FENG K, LI Z, et al. Microstructure and corrosion properties of CrMnFeCoNi high entropy alloy coating[J]. Applied surface science, 2016, 396: 652.
- [14] 邱明, 钱亚明. 摩擦学原理与设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 57-63.  
QIU Ming, QIAN Ya-ming. Principle and design of tribology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 57-63.
- [15] ZADDACH A J, NIU C, ONI A A, et al. Structure and magnetic properties of a multi-principal element Ni-Fe-Cr-Co-Zn-Mn alloy[J]. Intermetallics, 2016(68): 107-112.
- [16] 刘武. 制动盘用激光熔覆 CNTs/SiC/Ni60A 高温合金混杂复合涂层制备研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2016.  
LIU Wu. Preparation of laser cladding CNTs/SiC/Ni60A superalloy hybrid coatings on brake discs[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2016.