

# Y对轴承钢上激光熔覆FeCoCrNi涂层结构和冲蚀磨损的影响

刘欣宁<sup>1\*</sup> 徐少华<sup>2</sup> 王璇<sup>1</sup>

(1.河南工业职业技术学院 机械工程学院 南阳 473000; 2.南京理工大学 机械工程学院 南京 210094)

## Effect of Y on the Structure and Erosion Wear of Laser-Cladding FeCoCrNi Coating on Bearing Steel

LIU Xinning<sup>1\*</sup>, XU Shaohua<sup>2</sup>, WANG Xuan<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Henan Institute of Industrial Technology, Nanyang 473000, China;

2. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract** The FeCoCrNi-xY high-entropy alloy coating was prepared on bearing steel by laser cladding method, and its high-temperature erosion resistance in a gas environment was tested. The effect of Y on coating structure and erosion wear was studied. The results show that with the increase of Y, the honeycomb structure begins to decrease until it disappears completely, and many small-size M particles are generated, forming a Y-compound structure with smaller particle size and more uniform distribution. After increasing the amount of Y, the hardness of the coating first decreases and then increases, and the hardness measured is in the range of 720–960 HV. When the erosion angle is gradually increased, the erosion wear rate of the FeCoCrNi-xY coating continues to increase. The FeCoCrNi-xY coating obtains a higher hardness than the bearing steel, showing obvious brittleness. The erosion of the FeCoCrNi-0.3Y coating forms deeper furrows and achieves a higher erosion wear rate. When the temperature increases, the wear rate also increases, but the change range is lower. The wear pattern of coating at various angles of attack was not affected by temperature.

**Keywords** FeCoCrNi-Y coating, Laser cladding, Microstructure, Erosion wear

**摘要** 以激光熔覆方法在轴承钢上制得FeCoCrNi-xY高熵合金涂层,并对其处于气体环境中的耐高温冲蚀性进行了测试。研究Y对涂层结构和冲蚀磨损的影响。研究表明:随着Y增大,蜂窝形组织开始减少直到全部消失,生成了许多尺寸较小的M颗粒,形成了粒径更小以及分布形态更均匀的Y化合物组织。提高Y的加入量后,涂层发生了硬度先减小再增大势,测试得到的硬度值介于720–960 HV范围内。当逐渐提高冲蚀角后,FeCoCrNi-xY涂层发生了冲蚀磨损率持续增大。FeCoCrNi-xY涂层获得了高于轴承钢的硬度,呈现明显的脆性特点。对FeCoCrNi-0.3Y涂层冲蚀形成了深度更大的犁沟,达到了更高的冲蚀磨损率。当温度提高后,磨损率同样呈现增大现象,不过变化幅度较低。各攻角下的涂层磨损形式并未受到温度的明显影响。

**关键词** FeCoCrNi-Y涂层 激光熔覆 微观组织 冲蚀磨损

中图分类号: TG174

文献标识码: A

doi:10.13922/j.cnki.cjvst.202006057

目前,高熵合金因其独特的性能获得了众多学者的研究,除了具备高力学强度,还可以实现优异耐蚀性并具备良好的抗高温能力,在许多工业领域都获得了广泛应用<sup>[1-3]</sup>。由于采用激光熔覆技术可

以对材料表面进行高效处理,因此已有许多学者对该技术进行了研究<sup>[4-5]</sup>。例如,初雅杰<sup>[6]</sup>通过激光熔覆的方式在轴承钢基体组织表面制得了具备优异性能的Al<sub>x</sub>CoCrNiMo高熵合金,同时还发现该合金

收稿日期:2020-06-29

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:31660298)

\*联系人:E-mail:zhanping38979mml@126.com

可以有效抵抗高温作用而不发生软化。李俊魁<sup>[7]</sup>则通过激光熔覆得到 FeCoCrNiAlB<sub>x</sub> 高熵涂层,同时发现添加 B 元素后涂层获得了更强耐磨能力。到目前为止,已有很多文献报道 FeCoCrNi 高熵合金的研究内容<sup>[8]</sup>,为获得性能更优的合金涂层,在该合金体系加入硅与 Y 元素,再对其进行激光熔覆处理制得 Fe-CoCrNi 系高熵合金涂层,通过测试发现含有 Y 与 B 的情况下可以获得更优的熔覆效果,并且还能够显著改善涂层力学特性<sup>[9-10]</sup>。

大部分学者对高熵合金开展的研究基本都从力学强度、耐蚀性与抗高温氧化的层面进行分析<sup>[11-13]</sup>。相关学者通过实验依次研究了 NiCoCrFe-Al<sub>3</sub> 与 Al<sub>x</sub>FeCrNiCoCu 两种合金抵抗泥浆腐蚀的能力,不过都只是针对涂层处于溶液环境中的耐蚀性与磨损特性,尚未研究气体环境中的涂层耐蚀能力。根据以上分析结果,本文以激光熔覆方法制得 FeCoCrNi-xY 高熵合金涂层,并对其处于气体环境中的耐高温冲蚀性进行了测试,并渗入探讨了发生冲蚀过程的具体作用机制。

## 1 实验

### 1.1 试样制备

本实验以 GCr15 轴承钢作为测试基体,通过激光熔覆方法制备得到 FeCoCrNi-xY 涂层,其中  $x$  依次为 0.1、0.2 与 0.3。需要使用的原料为高纯 Cr 粉、Ni 粉、Co 粉、Fe 粉, Y 元素是以 Y 铁粉的形式进行添加。将上述各粉末采用球磨机进行均匀混合后再将其涂覆到基体试样的表面,控制涂层的铺设厚度接近 1.6 mm。接着利用 TruDisk2002 碟片激光器对

粉末实施激光熔覆,要求熔覆期间一直通入氩气提供保护作。

### 1.2 高温冲蚀测试

在高温冲蚀磨损机上完成涂层的高温冲蚀测试。首先对试样进行线切割获得 10 mm×10 mm×10 mm 的方形结构,通过打磨获得具有金属光泽的试样表面,采用机械方法实施冲蚀面的抛光处理,再将其浸入丙酮试剂中超声清洗并充分干燥,采用 FA1024B 电子天平进行称量并计算磨损质量变化。按照如下条件进行高温冲蚀:控制气压为 0.5 MPa,气体流量为 7 m<sup>3</sup>/min,保持喷嘴与试样间距为 15 mm,以氧化物作为冲蚀颗粒,分别测试了 25-850℃ 不同温度下的冲蚀结果,控制冲蚀角介于 30°-90° 之间。

### 1.3 性能表征

在 S3400-II 扫描电镜(SEM)下观察了涂层的微观形貌以及经过冲蚀后形成的表面微观组织形态。通过 DHV-1000 硬度仪测试了涂层的表面硬度,以基体作为起始位置,对横截面区域上的熔覆层进行硬度测试,设定载荷为 200 g,持续保压 20 s。

## 2 结果分析

### 2.1 组织和硬度分析

图 1 显示了以激光熔覆方法制得的 FeCoCrNi-xY 涂层微观形貌。可以发现,当涂层内的 Y 比例较小的情况下( $x \leq 0.1$ ),主要形成了具有蜂窝形结构的 M 组织与 FCC 共晶结构;随着  $x$  增大到 0.2 时,蜂窝形组织开始减少,同时形成了粒径更小以及分布形态更均匀的 Y 化物组织。

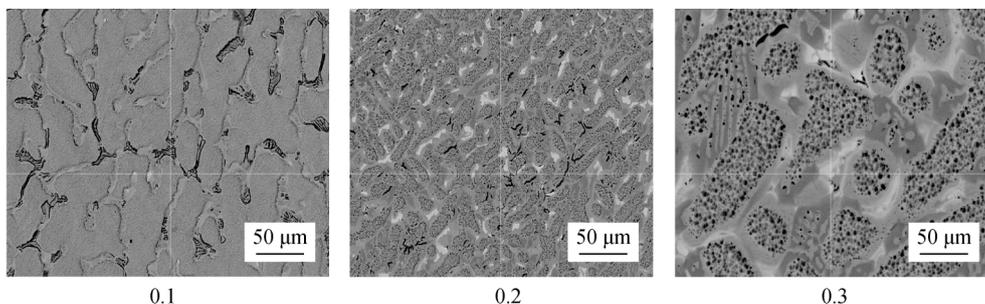


图 1 FeCoCrNi-xY 涂层的 SEM 形貌

Fig.1 SEM images of FeCoCrNi-xY coating.

表 1 是对 FeCoCrNi-xY 涂层进行 EDS 测试得到的各元素含量。结果显示,此时在 FeCoCrNi-xY 涂层内形成的 FCC 固溶体中存在大量 Co、Fe、Ni,但 Cr

的含量都较低;在 M 相内主要存在 Fe、Cr 与 Co,但 Y 与 Ni 含量很少。同时还可以发现,当 Y 比例提高后,在 FCC 固溶体内形成了更多的 Y,但 Cr 的含量

发生了减小,由此可以推断Y可以替换FCC固溶体内的Cr。

表1 FeCoCrNi-xY涂层的EDS结果  
Tab.1 EDS results of FeCoCrNi-xY coating

x	相	Co	Cr	Ni	Fe
0.1	FCC	26.8	5.8	31.6	Bal.
	M	12.6	16.3	6.2	Bal.
0.2	FCC	23.8	5.1	33.2	Bal.
	M	13.1	15.1	5.9	Bal.
0.3	FCC	24.9	3.8	31.8	Bal.
	M	14.2	16.0	5.2	Bal.

如图2所示,是通过激光熔覆方法制得的FeCoCrNi-xY涂层截面硬度测试结果。提高Y加入量后,涂层发生了硬度先减小再增大的变化趋势,测试得到的硬度值介于720-960 HV范围内。分析FeCoCrNi-xY涂层显微组织可以发现,Y化物比例依然保持较高的状态,此时主要通过第二相发挥硬度强化的作用。另一方面,因为Y具有较小的原子半径,可以在FCC固溶体内达到很高的固溶度,从而发挥优异的固溶强化效果。

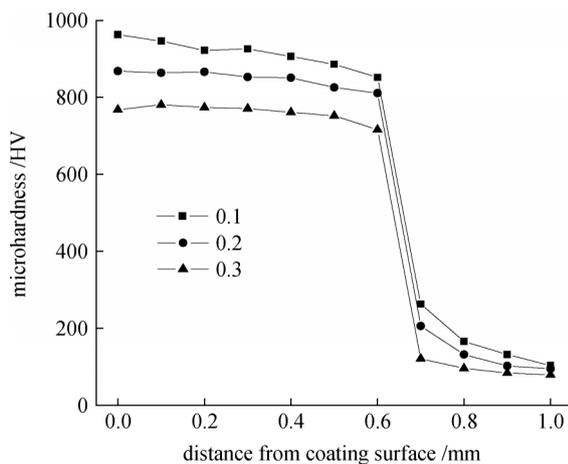


图2 FeCoCrNi-xY涂层截面的硬度分布

Fig.2 Hardness distribution of FeCoCrNi-xY coating cross-section

## 2.2 冲击角度对涂层冲蚀率的影响

为了增强冲蚀的效果,选用硬度较高的氧化铝作为冲蚀磨粒,从表2中可以看到在不同攻角条件下依次对FeCoCrNi-xY涂层以及轴承钢进行冲蚀磨损测试的情况。可以发现,当逐渐提高冲蚀角之后,FeCoCrNi-xY涂层发生了冲蚀磨损率持续增大现象,但轴承钢表现为相反的变化规律。对制得的涂层进行硬度测试得到,FeCoCrNi-xY涂层获得了

高于轴承钢的硬度,呈现明显的脆性特点,同时轴承钢呈现明显的韧性特征。上述两类材料受到不同撞击角颗粒作用后将会产生响应差异性,以25~30°进行冲蚀时,韧性材料达到了最高磨损率,之后逐渐降低,角度为90°的情况下达到最低磨损率;但对于脆性材料而言,随着冲蚀角的增加,逐渐获得更高的冲蚀磨损率,最大值出现于90°的情况下。比较x=0、0.2、0.3三种条件下制得的涂层经过各攻角冲蚀形成的磨损率可知,以低角度进行冲蚀时,FeCoCrNi-0.2Y达到了最低磨损程度;当冲蚀角度较大时,此时涂层达到了最低磨损量,表现出和硬度相近的变化趋势。

表2 不同攻角下轴承钢和FeCoCrNi-xY涂层的冲蚀磨损率分布

Tab.2 Erosion wear rate distribution of bearing steel and FeCoCrNi-xY coating at different impact angles

攻角	GCr15	x=0.1	x=0.2	x=0.3
30°	16.8	8.8	9.5	8.2
60°	13.1	13.9	13.2	15.0
90°	11.9	14.9	14.2	16.0

图3和图4分别是以650℃并采用不同攻角对轴承钢与FeCoCrNi-0.3Y涂层进行冲蚀测试得到的显微组织图片。当攻角为30°时,对FeCoCrNi-0.3Y涂层与轴承钢进行冲蚀测试时都形成了明显犁沟组织特征并形成部分切削痕。此时,在轴承钢内形成了许多磨损过程产生的氧化铝颗粒,磨粒对试样表面产生犁耕作用,并嵌入到了表层组织里,使轴承钢发生了明显变形,同时尾部发生堆积。通过观察发现,FeCoCrNi-xY涂层中形成了很短但深度较小的犁沟,获得了比轴承钢更强的抗冲蚀磨损能力。

当把攻角设置为60°时,所有试样表面经过冲蚀后都形成了犁沟并产生了切削结构,不过犁沟比例出现了降低,但形成了更多的切削痕迹。对于轴承钢来说,其表面主要形成了犁沟组织形态,但长度变短并且数量也明显降低,与30°攻角相比发生了磨损率的降低。对FeCoCrNi-0.3Y涂层进行冲蚀测试发现,形成了深度更大的犁沟,同时切削长度也发生了增加,达到了更高的冲蚀磨损率。

增大冲蚀攻角至90°时,在轴承钢与FeCoCrNi-0.3Y涂层上都已经观察不到犁耕与切削痕迹,此时主要表现为挤压破坏的形式。并且还可以发现有

很多氧化铝颗粒嵌入到了轴承钢基体内,这是由于氧化铝颗粒尖端高速撞击到轴承钢基体引起的,并

且轴承钢的硬度较小,容易引起磨粒嵌入现象。

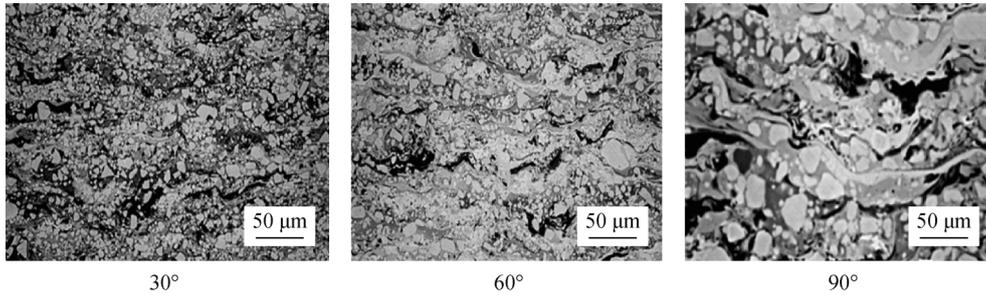


图3 不同攻角下轴承钢的冲蚀表面SEM形貌

Fig.3 SEM morphology of erosion surface of bearing steel at different impact angles

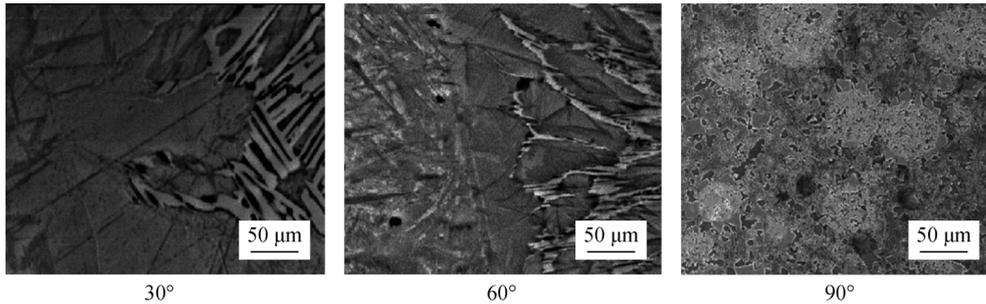


图4 不同攻角下 FeCoCrNi-0.3Y 涂层的冲蚀表面SEM形貌

Fig.4 SEM morphology of erosion surface of FeCoCrNi-0.3Y coating at different impact angles

### 2.3 温度对涂层冲蚀率的影响

表3显示了以不同温度对 FeCoCrNi-0.3Y 涂层进行冲蚀测试得到的磨损率。根据表3可知,当温度提高后,以30°角对 FeCoCrNi-0.3Y 涂层冲蚀时获得了更大的磨损率;处于高角度条件下,磨损率同样呈现增大现象,不过变化幅度较低。图5是以850℃对 FeCoCrNi-0.3Y 涂层分别进行30°与90°角度冲蚀形成的微观形貌。结果显示,各攻角下的涂层磨损形式并未受到温度的明显影响。其中,处于低角度状态下,形成了更深的犁沟,并且切削痕迹

宽度也增加;经过高角度挤压后形成了深度更大的凹坑。这是由于受到高温作用时,涂层的硬度发生了降低,同时获得了更大的塑性与韧性。

### 3 结论

(1)随着Y增大,蜂窝形组织开始减少直到全部消失,生成了许多尺寸较小的M颗粒,形成了粒径更小以及分布形态更均匀的Y化物组织。在 Fe-CoCrNi-xY 涂层内形成的 FCC 固溶体中存在大量 Co、Fe、Ni,但 Cr 与 B 的含量都较低。提高Y的加入量后,涂层发生了硬度先减小再增大势,测试得到

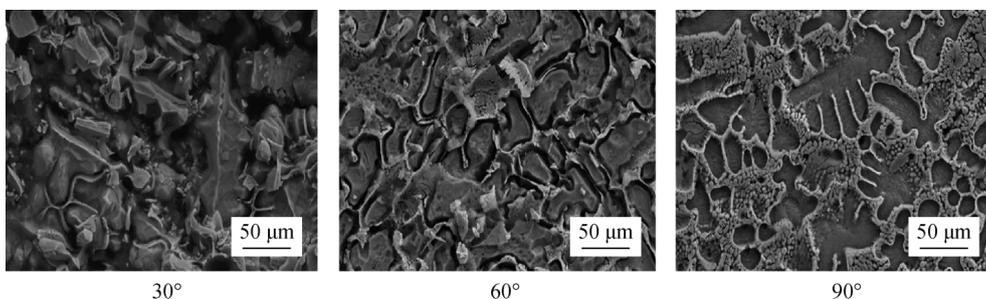


图5 不同攻角下 FeCoCrNi-0.3Y 涂层 850℃冲蚀表面SEM形貌

Fig.5 SEM morphology of FeCoCrNi-0.3Y coating at 850℃ at different impact angles

表3 不同攻角下 FeCoCrNi-0.3Y 涂层冲蚀磨损率  
随温度的变化

Tab.3 Variation of erosion wear rate of FeCoCrNi-0.3Y coating with temperature at different impact angles

攻角	25℃	600℃	750℃	850℃
30°	5.2	7.8	8.3	9.7
60°	8.2	10.2	11.1	12.6
90°	12.1	14.8	15.1	16.2

的硬度值介于 720-960HV 范围内。

(2) 当逐渐提高冲蚀角后, FeCoCrNi- $x$ Y 涂层发生了冲蚀磨损率持续增大, 但轴承钢表现为相反的变化规律。FeCoCrNi- $x$ Y 涂层获得了高于轴承钢的硬度, 呈现明显的脆性特点, 同时轴承钢呈现明显的韧性特征。对 FeCoCrNi-0.3Y 涂层进行冲蚀测试发现, 形成了深度更大的犁沟, 切削长度也增加了, 达到了更高的冲蚀磨损率。

(3) 当温度提高后, 磨损率同样呈现增大现象, 不过变化幅度较低。各攻角下的涂层磨损形式并未受到温度的明显影响。

#### 参 考 文 献

- [1] 黄顺友, 上官晓峰, 陈建, 等. Mo(0.2)FeCoCrNi 高熵合金定向凝固枝晶分裂与取向偏转[J]. 西安工业大学学报, 2019, 39(01): 65-71
- [2] SHAHMIR H, NILI-AHMADABADI M, SHAFIEE A, et al. Effect of a Minor Titanium Addition on the Superplastic Properties of a CoCrFeNiMn High-Entropy Alloy Processed by High-Pressure Torsion[J]. Materials science and engineering: A, 2018, 718: 468-476
- [3] NAIR R B, ARORA H S, MUKHERJEE S, et al. Exceptionally High Cavitation Erosion and Corrosion Resistance of a High Entropy Alloy[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 41: 252-260
- [4] 董世知, 孟旭, 马壮, 等. 粉煤灰活性氩弧熔覆 Fe<sub>x</sub>-AlCoCrCuTi(0.3) 高熵合金涂层的组织和冲蚀磨损性能[J]. 材料保护, 2018, 51(08): 90-94
- [5] LIN D Y, ZHANG N N, HE B, et al. Tribological Properties of FeCoCrNiAlB<sub>x</sub> High-Entropy Alloys Coating Prepared by Laser Cladding[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2017, 24(2): 184-189
- [6] 初雅杰, 李晓泉, 李建, 等. 退火温度对激光熔覆 Al-FeCrCoNiTi 高熵合金涂层组织与性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2018, 39(06): 91-95
- [7] 李俊魁, 彭竹琴, 马明星, 等. CeO<sub>2</sub> 对 AlCoCuFeMnNi 高熵合金涂层组织和硬度的影响[J]. 金属热处理, 2017, 42(11): 19-23
- [8] 屈乐, 王维刚, 李培友, 等. 过渡族 Fe-Cr-Co-Ni 系高熵合金的研究进展[J]. 热加工工艺, 2016, 45(16): 15-19
- [9] 卢金斌, 彭竹琴, 马明星, 等. Q235 钢等离子熔覆 CoCr-CuFeMnNi 高熵合金涂层[J]. 金属热处理, 2016, 41(04): 51-54
- [10] ZHOU R, LIU Y, ZHOU C S, et al. Microstructures and Mechanical Properties of C-Containing FeCoCrNi High-entropy Alloy Fabricated by Selective Laser Melting[J]. Intermetallics, 2018, 94: 165-171
- [11] 李栋梁, 周芳, 余师豪. 激光熔覆 FeCrNiMnMoxB(0.5) 高熵合金涂层组织与耐蚀性能[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(02): 196-201
- [12] 张丽, 沙明红, 张峻巍, 等. Al 含量对 Al<sub>x</sub>CoCrFeNiTi(0.5) 激光涂层组织和耐磨性的影响[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(12): 185-189
- [13] 李泰增, 张丽, 陈子尚, 等. 激光熔覆 AlCoCrFeNiTi(0.5) 合金涂层制备及其组织性能[J]. 辽宁科技大学学报, 2015, 38(03): 170-173