DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.3181

稀土 Y₂O₃ 对激光熔覆 Fe60-Y₂O₃ 涂层显微组织 和摩擦学性能的影响

王 鑫¹,赵恩兰¹,王义赛¹,贺亦柏²,史俊勤²,杨海峰^{1,2}

(1.中国矿业大学 机电工程学院,江苏 徐州 221116; 2. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室,陕西 西安 710072)

摘 要:稀土在激光熔覆中可改善激光熔覆层的组织和性能,研究了添加质量分数为1.0%的稀土氧化物Y₂O₃ 对激光熔覆Fe60涂层显微组织和摩擦学性能的影响。使用激光熔覆技术在16Mn基板表面制备了Fe60涂层和 Fe60-Y₂O₃涂层;采用XRD、OM、SEM、EDS对比分析了Fe60涂层和Fe60-Y₂O₃涂层的显微组织;通过维氏硬度计、摩 擦磨损试验机、3D形貌仪和SEM研究了两种涂层的显微硬度、摩擦学性能和磨损机理。结果表明,与Fe60涂层相比, Fe60-Y₂O₃涂层的二次枝晶臂间距为2.925 μm,减小了17.4%;截面显微硬度为701 HV_{0.3},提高了9.5%;摩擦系数为 0.312,降低了40.3%;体积磨损率为2.36×10⁻⁵ mm³/(N·m),降低了30.8%。可见,Fe60-Y₂O₃涂层具有细化的显微组织、更 高的显微硬度、更低的摩擦系数和更好的抗磨损性能。

关键词:激光熔覆;Fe60-Y2O3涂层;细化晶粒;磨损

中图分类号: TH142.1; TG301 文献标识

文献标识码:A

文章编号:1000-8365(2023)07-0657-08

Microstructure and Tribological Properties of Laser Cladding Fe60-Y₂O₃ Coating

WANG Xin¹, ZHAO Enlan¹, WANG Yisai¹, HE Yibo², SHI Junqin², YANG Haifeng^{1,2}

(1. School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi' an 710072, China)

Abstract: Rare earth can improve the microstructure and properties of the laser cladding layer in laser cladding. In this paper, the effects of rare earth Y_2O_3 with a mass fraction of 1.0% on the microstructure and tribological properties of a laser cladding Fe60 coating were studied. First, an Fe60 coating and Fe60- Y_2O_3 coating were prepared on the surface of a 16Mn substrate by laser cladding. Then, the microstructure of both the Fe60 coating and Fe60- Y_2O_3 coating was analysed by XRD, OM, SEM and EDS. Finally, the microhardness, tribological properties and wear mechanism of the two coatings were studied by a Vickers hardness tester, friction and wear tester, 3D profilometer and SEM. The results show that compared with the Fe60 coating, the secondary dendrite arm spacing of the Fe60- Y_2O_3 coating is 2.925 µm, which is reduced by 17.4%; the cross-section microhardness is 701 HV₀₃, which is increased by 9.5%; the friction coefficient is 0.312, which is decreased by 40.3%; and the volume wear rate is 2.36×10^{-5} mm³/ (N·m), which is decreased by 30.8%. Therefore, the Fe60- Y_2O_3 coating with finer grains has a higher microhardness, lower friction coefficient and better wear resistance.

Key words: laser cladding; Fe60-Y2O3 coating; grain refinement; wear

激光熔覆技术作为一种先进的表面改性技术, 是指利用一定功率密度和扫描速度的激光束作用 在同步送入的或预制于基体表面的功能性材料上, 功能性材料与基体共同熔化、快速冷却、凝固形成 具有良好冶金结合的熔覆层^[1-2]。激光熔覆技术能够 使零部件表面获得优异的耐高温、防腐蚀、耐磨损、 抗蠕变等性能。因此被广泛应用于航空航天、轨道交 通、汽车工业、石油化工、工程机械等领域¹³⁻⁴。激光熔 覆技术在矿山机械行业中也获得了普遍应用,如对 采煤机及掘进机截齿¹⁵、液压油缸活柱¹⁶的制造,以

收稿日期: 2023-07-04

- 基金项目:国家自然科学基金(52275224);凝固技术国家重点实验室开放课题(SKLSP202324)
- 作者简介: 王 鑫, 1998 年生, 硕士生. 研究方向为激光熔覆技术. Email: 1020684184@qq.com
- 通讯作者:杨海峰,1981年生,博士,副教授.研究方向为激光熔覆技术.Email:4841@cumt.edu.cn
- **引用格式:**王鑫,赵恩兰,王义赛,等.稀土Y₂O₃对激光熔覆Fe60-Y₂O₃涂层显微组织和摩擦学性能的影响[J].铸造技术,2023,44(7): 657-664.

WANG X, ZHAO E L, WANG Y S, et al. Microstructure and tribological properties of laser cladding Fe60-Y₂O₃ coating[J]. Foundry Technology, 2023, 44(7): 657-664.

及对刮板机^[7]、齿轮传动箱中的失效零部件^[8]的再制造,特别是在截齿端部锥面、刮板机等易磨损部位制备冶金结合良好、高硬度和高韧性的耐磨涂层。然 而,激光熔覆后涂层内往往会存在微观成分偏析、 粗大树枝晶等问题,诱发涂层开裂,降低工件品质。

稀土及其氧化物粉末目前在激光熔覆中主要 作为改性材料使用,添加少量稀土就可以明显改 善激光熔覆层的组织和性能^[9-10]。目前研究较多的是 Ce、La、Y等稀土元素及其氧化物 CeO2、La2O3、Y2O3 等[11-13]。近年来,国内外学者主要从组织和性能两方 面研究了添加稀土对激光熔覆层的影响。Zhang 等^[14] 在激光熔覆镍基粉末中添加 CeO2 粉末,实验结果 表明,CeO,的加入显著提高了涂层的显微硬度和耐 磨性,添加1.5% CeO₂(质量分数)涂层的显微硬度和 耐磨性最好。Wang等[15]采用激光熔覆技术在45钢 表面制备不同含量 La₂O₃ 的铁基合金复合涂层,研 究La2O3对激光熔覆铁基合金涂层组织和性能的影 响,结果表明,La₂O₃的加入起到了细化晶粒的作 用,由于La₂O₃的细晶强化和弥散强化,提高了铁基 合金涂层的硬度和耐磨性。当La2O3质量分数为1% 时,与基体材料相比,硬度增加了3.1倍,磨损率降低 了 27.7%。Zhang 等^[16]采用激光熔覆工艺在5CrNiMo 模具钢上制备 Y₂O₃ 陶瓷增强铁基复合涂层,研究了 Y₂O₃对熔覆层微观结构和高温氧化性能的影响。结 果表明,稀土氧化物 Y₂O₃ 可以细化陶瓷颗粒和涂层 组织,提高涂层的高温抗氧化性。魏铭^四研究了CeO₂ 对 H13 钢表面激光熔覆钴基涂层组织和性能的影 响,结果表明,适量的 Ce 元素对涂层的细晶强化和 固溶强化作用使涂层的硬度和耐磨性提高。张光耀 等[18]研究稀土 La₂O₃ 对激光熔覆镍基熔覆层的微观 结构影响,结果表明,适量 La₂O₃ 的加入,不仅可以 减少熔覆层的裂纹而且使涂层组织得到细化。刘佳 等[19]研究稀土 Y2O3 对激光熔覆 Ni 基 WC 熔覆层的 组织和性能影响,结果表明,Y₂O₃可增强熔池的流动性,细化熔覆层组织,提升熔覆层的硬度和耐磨性。 总的来说,在激光熔覆粉末中添加稀土可起到净化 晶界、抑制柱状晶生长的作用,从而有效细化涂层组 织,增加涂层韧性,缓解涂层开裂倾向,减少裂纹的 产生^[11,20]。

16Mn 材料在刮板输送机、液压支架等矿山机 械中具有广泛的应用。为了提高 16Mn 材料的表面 耐磨性能,本文通过激光熔覆技术在 16Mn 表面进 行激光熔覆 Fe60-Y₂O₃ 涂层的研究,探索稀土氧化 物 Y₂O₃ 对涂层显微组织和摩擦学性能的影响,以改 善 16Mn 钢表面的耐磨性。

1 实验方法

1.1 实验材料

实验采用的基体材料为16Mn钢板,尺寸为100mm×100mm×100mm,实验前将基体材料表面用砂纸打磨以去除表面氧化层,随后将其浸泡在无水乙醇中超声波清洗5min,风干待用。16Mn钢的化学成分如表1所示。

实验选用的熔覆材料为铁基合金粉末(Fe60), Fe60 合金粉末采用气雾法制备,粉末平均粒径约为 100 μm,Fe60 合金粉末的化学成分如表 2 所示。在 前期对 Y₂O₃ 含量进行研究的基础上,本文在 Fe60 合金粉末中添加 1.0%(质量分数)的 Y₂O₃,粉末平均 粒径约为 10 μm,Fe60 合金粉末和 Y₂O₃ 粉末微观 形貌如图 1 所示。

1.2 样品制备

采用激光加工实验平台(HWL-R1500W,华威激 光公司)制备熔覆层,该平台主要包括:激光器、三维 移动平台、同轴激光熔覆头、水冷机、送粉器和送气 系统等。采用同步送粉式进行激光熔覆试验,送气系 统一方面将送粉器中粉末输送到同轴激光熔覆头的

表1 16Mn钢的化学成分 w/%						
Tab.1	Chemical composition of 16Mn steel					



图 1 Fe60 合金粉末、Y₂O₃ 粉末和 Fe60-Y₂O₃ 粉末微观形貌图 Fig.1 Morphology of Fe60, Y₂O₃ and Fe60-Y₂O₃ powders

	表 2 Fe6)合金粉末的	化学成分	w/%)
Tab.2	Chemical	composition	of Fe60	allov	powder

元素	Ni	Cr	С	Si	В	Fe
含量	0.1~1.0	13~17	0.5~1.0	0.3~1.0	0.2~1.5	Bal.
喷嘴处	,另一方	「面防」	上粉末发	定生氧化	匕,避免	熔覆层
产生气	孔等缺网	备。表:	3 为激为	七加工实	验平台	的主要
技术参	数					

表 3 激光加工实验平台主要技术参数	
Tab.3 Main technical parameters of the CW las	se

-	
技术参数	数值
额定输出功率	1 500 W
激光波长	910~1 050 nm
光束质量	0.1 mm · rad
光纤直径	0.4 mm
功率稳定性	±2%
最小光斑直径	0.7 mm

1.3 材料处理和表征

《铸诰技术》07/2023

试验用 Fe 基合金粉末和 Y₂O₃ 粉末需要在行星 式球磨机 (YXQM-2L,3SP2 南大仪器厂)中充分混 合,再放到真空干燥箱(DZF-2020AB,上海一恒)中 进行干燥处理,混合后的 Fe60-Y₂O₃ 粉末如图 1 所 示。研磨球采用 ZrO₂ 陶瓷球,球料比为 2:1,转速为 400 r/min,球磨时间为 2 h,干燥温度为 80 ℃,干燥 时间为 2 h。激光熔覆后的材料用电火花线切割机 进行切割,然后在磨抛机(MTP-200,兆方智能科技 有限公司)上采用 SiC 砂纸按照 200#、400#、800#、 1200#、1500# 和 2000# 的顺序进行依次研磨、抛光。 研磨抛光后的试样浸泡在无水乙醇里超声清洗 5 min。最后,对熔覆涂层截面进行显微组织观察 前,采用 HNO₃:HCl=1:3 的王水溶液对样品表面进行 腐蚀。

采用光学显微镜(OM, Leica DM4)和配备有能 谱分析仪(EDS,牛津仪器)的场发射扫描电子显微 镜(FSEM, MAIA3,国仪量子)对试样的表面成分和 微观形貌进行观察。采用X射线衍射仪(XRD,D8 advanced,德国Bruker公司)对涂层的物相组成进行 分析。X射线衍射仪分析所用靶材为Cu靶,电流为 30 mA,电压为40 kV,扫描速度为4(°)/min,扫描角 度为20°~90°,利用Jade 6.0软件进行物相比对,并 确定涂层相组成。涂层的显微硬度采用维氏硬度计(华 银HVSA-1000A型)进行测试,载荷为0.3 kg,保荷 时间为15 s,硬度值为3次测量的平均值。采用销盘 回转摩擦磨损试验机(MPX-3X,恒旭试验机制造有 限公司)进行摩擦磨损测试,对磨球为直径 6.35 mm 的Al₂O₃陶瓷球,载荷为50 N,转速为300 r/min,磨 损时间为30 min,摩擦半径为4 mm。摩擦磨损试验 后,采用 3D 形貌仪(DSX1000,奥林巴斯)测量磨损 表面的磨痕形貌。

2 实验结果与讨论

2.1 显微组织

在前期激光熔覆工艺优化的基础上,该实验激光 熔覆的激光功率为1200W,扫描速度为400mm/min, 送粉速度为6g/min,搭接率为50%,光斑直径为 3mm,气流量为10L/min。

图 2 所示为有/无添加 Y_2O_3 的 Fe 基合金涂层 的 XRD 图谱。由图可知,多种物相的衍射峰发生重 合,这是因为涂层在凝固过程中会形成固溶体,引起 晶格畸变,衍射峰发生偏移,造成许多物相衍射峰的 重叠。Fe60-Y₂O₃ 涂层的衍射峰相较于 Fe60 涂层的 衍射峰向右偏移,由布拉格衍射原理可知,衍射角向 右偏移,晶面间距变小,晶格常数减小。另外,两涂层 的衍射峰分布类似,表明两种涂层的相组成相似,主 要由 α -Fe 基相、 α -(Fe,Cr)固溶体相、(Cr,Fe)₇C₃、Cr-FeB 硬质相和 γ -(Fe,Ni) 共晶相组成。此外,在 Fe60-Y₂O₃ 涂层中还发现了 Y₂O₃ 的衍射峰,说明涂 层中存在少量未熔 Y₂O₃。



图 2 有/无添加 Y₂O₃的 Fe 基合金涂层的 XRD 图谱 Fig.2 XRD patterns of Fe-based alloy coatings with/without Y₂O₃ addition

图 3 为有/无添加 Y₂O₃ 的 Fe 基合金涂层的 OM 图。从图中可以看出,Fe60-Y₂O₃ 涂层显微组织相较 于 Fe60 涂层发生了明显变化。由图 3(a3,b3)可知, 有/无添加 Y₂O₃ 的 Fe 基合金涂层的底部均由平面 晶、胞状晶和柱状晶组成;相较于 Fe60 涂层, Fe60-Y₂O₃ 涂层平面晶更厚一些,也没有出现微裂 纹,垂直于结合界面外延生长的柱状晶尺寸明显减 小。由图 3(a2,b2)可知,Fe60 涂层中部存在大量粗大 树枝晶,树枝晶交织成网状结构;Fe60-Y₂O₃ 涂层中 部树枝晶数量明显减少,粗大树枝晶转变为细小树 枝晶和等轴枝晶。由图 3(a1,b1)可知,Fe60 涂层顶部 出现等轴晶,但是等轴晶数量不多;Fe60-Y₂O₃ 涂层 顶部出现大面积的细小等轴晶。Fe60 涂层出现上述



现象的原因是:由金属凝固学理论可知,微观组织的形成主要由温度梯度(G)和凝固速度(R)所决定, G×R 决定了凝固组织的尺寸,G/R 决定了凝固组织的形态。结合成分过冷理论,熔覆层从底部到顶部逐步生成平面晶、胞状晶、柱状晶、树枝晶和等轴晶。Fe60-Y₂O₃涂层产生上述现象原因是:①在激光熔覆过程中,Y₂O₃中的Y元素容易在固-液界面前沿偏聚,一方面阻碍了结合界面处微裂纹的萌生和扩展,另一方面阻碍了柱状晶的生长;②适量的稀土促进了熔池内部的流动,破碎枝晶广泛分布在熔池中,提高了熔池的形核率,促进树枝晶转变为等轴枝晶;③稀土元素容易在晶界上富集,在晶粒生长过程中会产生拖拽作用,阻碍晶粒继续长大,促 进晶粒细化;④稀土本身就是良好的形核剂,促进了 熔池非均质形核,为等轴晶生长提供了条件。

图 4 为有/无添加 Y₂O₃ 的 Fe 基合金涂层的 SEM 图。由图可知,两种涂层均由枝晶和枝晶间组 织组成,测试点 A 和 B 分别在 Fe60 涂层的枝晶和 枝晶间处,测试点 C 和 D 分别在 Fe60-Y₂O₃ 涂层的 枝晶和枝晶间处。从图中可以看出,相较于 Fe60 涂 层,Fe60-Y₂O₃ 涂层枝晶间网状和层状共晶组织更加 紧密,充分发挥了骨架强化作用,对涂层性能起到积 极效果。由表 4 EDS 元素含量可以看出,Fe60- 涂层 的枝晶和枝晶间均由 B、C、Cr、Fe、Si 和 Ni 元素组 成,枝晶的 Fe 元素含量高于枝晶间,枝晶间的 C、Cr 和 Ni 等元素含量高于枝晶。Fe60-Y₂O₃ 涂层枝晶和



图 4 有/无添加 Y_2O_3 的 Fe 基合金涂层 SEM 图 :(a) 无 Y_2O_3 , (b) $1\%Y_2O_3$ (质量分数) Fig.4 SEM images of Fe-based alloy coatings with/without Y_2O_3 addition: (a) without Y_2O_3 , (b) with $1\%Y_2O_3$ (mass fraction)

表4 有/无添加Y₂O₃的Fe基合金涂层EDS分析 Tab.4 EDS analysis of Fe-based alloy coatings with/without Y₂O₃ addition

《铸诰技术》07/2023

测试点	В	С	Cr	Fe	Si	Ni	Y
点 A	1.15	3.97	12.30	80.81	0.76	1.01	-
点 B	1.96	4.38	17.38	72.87	0.46	2.95	-
点 C	1.03	3.65	13.76	79.88	0.72	0.96	-
点 D	1.63	6.48	18.28	71.53	0.39	1.52	0.17

枝晶间组织元素含量分布规律与 Fe60 涂层相似,但 是 Fe60-Y₂O₃ 涂层枝晶间的 C 和 Cr 元素含量高于 Fe60 涂层枝晶间组织,Fe60-Y₂O₃ 涂层枝晶间还检 测到少量 Y 元素。

为了评价稀土对 Fe 基合金涂层组织的影响,对 有/无添加 Y₂O₃ 的 Fe 基合金涂层枝晶组织进行二 次枝晶臂间距测量,两种涂层分别选取 4 个区域, 并对 4 组测量结果取平均值。图 5 所示为有/无添加 Y₂O₃ 的 Fe 基合金涂层的 SEM 图,图中 A1~A4、 B1~B4 所在的区域用于二次枝晶臂间距统计。表 5 为有/无添加 Y₂O₃ 的 Fe 基合金涂层二次枝晶臂间 距统计结果。由表 5 可知,Fe60 涂层二次枝晶臂间 距平均值为 3.543 μ m,Fe60-Y₂O₃ 涂层二次枝晶臂 间距平均值为 2.925 μ m,Fe60-Y₂O₃ 涂层二次枝晶 臂间距相较于 Fe60 涂层减少了 17.4%。表明 Y₂O₃ 的加入,可以显著细化涂层组织。

2.2 涂层显微硬度及磨损性能

(a)

图 6 所示为有/无添加 Y₂O₃ 的 Fe 基合金涂层

表 5 有/无添加 Y₂O₃ 的 Fe 基合金涂层二次枝晶臂间距 Tab.5 Secondary dendrite arm spacing in Fe-based alloy coatings with/without Y₂O₃ addition

-					
区域编号	A1	A2	A3	A4	Average value
二次枝晶臂间距 /µm	4.16	3.72	3.36	2.93	3.543
区域编号	B1	B2	B3	B4	Average value
二次枝晶臂间距 /um	3.14	3.05	2.85	2.66	2,925

沿深度方向的显微硬度。从图 6(a)可以看出,有/无 添加 Y₂O₃ 的 Fe 基合金涂层从涂层顶部到基体表面 均有下降趋势,两种涂层的显微硬度明显高于基体, Fe60-Y₂O₃ 涂层显微硬度高于 Fe60 涂层。由图 6(b) 可知,Fe60 涂层的平均显微硬度为 640 HV_{0.3},Fe60-Y₂O₃ 涂层的平均显微硬度为 701 HV_{0.3},Fe60-Y₂O₃ 涂层的显微硬度相较于 Fe60 涂层提高了 9.5%。这 是因为,稀土元素自身的表面活性和流动性改善了 熔池的润湿性,降低临界形核功,促进形核,有效地 细化了显微组织。由 Hall-Petch 公式可知,显微组织 的尺寸越小,涂层强度越高,进而提高了涂层的显微 硬度。

图 7 为有/无添加 Y₂O₃ 的 Fe 基合金涂层摩擦 系数曲线。由图 7(a)可知,基体、Fe60 涂层和Fe60-Y₂O₃ 涂层的摩擦系数曲线均呈现先急速上升后趋于平稳 的变化趋势。两种涂层的摩擦系数均低于基体,Fe60 涂层的摩擦系数高于 Fe60-Y₂O₃ 涂层。从图 7(b)可以 看出,基体、Fe60 涂层和 Fe60-Y₂O₃ 涂层的平均摩擦 系数分别为 0.644、0.523 和 0.312,Fe60-Y₂O₃ 涂层的







图 6 有/无添加 Y₂O₃ 的 Fe 基合金涂层的显微硬度分布和平均显微硬度:(a) 基体和涂层的显微硬度曲线,(b) 基体和涂层的平均显微硬度

Fig.6 Microhardness distribution and average microhardness of Fe-based alloy coatings with/without Y₂O₃ addition: (a) microhardness distribution curve of the substrate and coatings, (b) average microhardness of substrate and coatings



图 7 基体和涂层的摩擦系数曲线和平均摩擦系数:(a) 摩擦系数曲线,(b) 平均摩擦系数

Fig.7 Friction coefficient curve and average friction coefficient of the substrate and coatings: (a) friction coefficient curve, (b) average friction coefficient

摩擦系数相较于 Fe60 涂层降低了 40.3%,说明 Y₂O₃的加入有效地提高了涂层的耐磨性能。

图 8 为有/无添加 Y₂O₃ 的 Fe 基合金涂层 3D 磨 痕形貌和体积磨损率。由图 8(a~c)可知,基体、Fe60 涂层和 Fe60-Y₂O₃ 涂层的 3D 磨痕形貌均呈现两端 水平、中间凹陷的 U 字型,基体的磨痕深度最大, Fe60-Y₂O₃ 涂层磨痕深度最浅。由图 8(d)可知,基体、 Fe60 涂层和 Fe60-Y₂O₃ 涂层的体积磨损率分别为 4.26×10⁻⁵ mm³/(N·m)、3.41×10⁻⁵ mm³/(N·m)和 2.36× 10⁻⁵ mm³/(N·m)。与 Fe60 涂层相比,Fe60-Y₂O₃ 涂层 的体积磨损率降低了 30.8%。

2.3 磨损机理讨论

图 9 为有/无添加 Y₂O₃ 的 Fe 基合金涂层的磨损形貌。从图 9(a~b)可以看出,基体的磨损表面粗糙不平,存在很多深沟槽,深沟槽周围有严重的塑性变形,磨损表面出现大量的磨屑堆积,并且伴有层状剥落和凹坑,基体的磨损机制主要表现为严重的磨粒磨损和粘着磨损。从图 9(c~d)可以看出,Fe60 涂层 磨损表面存在犁沟,表面存在着颗粒状磨屑,磨屑尺寸较小,局部伴有轻微的塑性变形,Fe60 涂层的磨

损机制主要表现为磨粒磨损和轻微的粘着磨损。从 图 9(e~f)可以看出,Fe60-Y₂O₃涂层磨损表面出现细 且浅的犁沟,局部伴有微小凹坑,整体磨损表面光滑 且平整,Fe60-Y₂O₃涂层的磨损机制主要表现为轻微 的磨粒磨损。产生上述现象的原因是,Fe60涂层的 固溶体和硬质相广泛分布在枝晶间,网状枝晶间组 织一方面对涂层起到骨架支撑作用,提高了涂层硬 度,进而提高了涂层的耐磨性;另一方面,硬质相在 涂层基体组织中产生钉扎效应,阻碍了晶体内部的 位错运动,从而提高了涂层的耐磨性。Fe60-Y₂O,涂 层组织明显细化,出现大面积的等轴枝晶,一方面晶 粒细化有助于提高涂层的硬度,进而改善涂层的耐 磨性;另一方面,细化晶粒产生更多的晶界,使得硬 质相弥散分布在涂层中,降低了涂层的残余应力,涂 层的塑性变形和裂纹敏感性得到抑制,最终改善了 涂层的耐磨性。

3 结论

(1)稀土 Y₂O₃ 的加入改变了激光熔覆 Fe60 涂 层的显微组织,使 Fe60-Y₂O₃ 涂层的中部和顶部形







图 9 磨损形貌图:(a~b) 基体,(c~d) 无 Y_2O_3 ,(e~f) 1% Y_2O_3 (质量分数) Fig.9 Wear topography: (a~b) substrate, (c~d) without Y_2O_3 , (e~f) with 1% Y_2O_3 (mass fraction)

成了细小等轴晶,枝晶间网状和层状共晶组织更加 致密。与 Fe60 涂层 3.543 μm 的二次枝晶臂间距 相比,Fe60-Y₂O₃ 涂层显微组织的二次枝晶臂间距 为 2.925 μm,减小了 17.4%。

(2)与 Fe60 涂层 640 HV₀₃ 的截面显微硬度相比, Fe60-Y₂O₃ 涂层的截面显微硬度增加到 701 HV₀₃, 提高了 95%;Fe60 涂层的摩擦系数为 0.523,Fe60-Y₂O₃ 涂层摩擦系数降低了 40.3%,减小为 0.312;Fe60 涂 层的体积磨损率为 3.41×10⁻⁵ mm³/(N·m),Fe60-Y₂O₃ 涂层的体积磨损率为 2.36×10⁻⁵ mm³/(N·m),降低了 30.8%;Fe60 涂层的磨损机制为磨粒磨损和轻微的 粘着磨损,而 Fe60-Y₂O₃ 涂层的磨损机制为轻微的 磨粒磨损。

参考文献:

- POLONSKY A T, POLLOCK T M. Closing the science gap in 3D metal printing[J]. Science, 2020, 368(6491): 583-584.
- [2] ZHAO C, PARAB N D, LI X, et al. Critical instability at moving keyhole tip generates porosity in laser melting[J]. Science, 2020, 370(6520): 1080-1086.
- [3] 董世运.激光增材再制造技术[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2019.

DONG S Y. Laser additive remanufacturing technology[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2019. [4] 曹青,蔡志海,秦航,等. WC 增强镍基合金激光熔覆层性能及其 在刮板输送机中部槽上的应用[J]. 应用激光,2018,38(4):522-526.

CAO Q, CAI Z H, QIN H, et al. The performance of WC reinforced nickel-based alloy laser cladding layer and its application in the middle trough of scraper conveyor[J]. Applied Laser, 2018, 38 (4): 522-526.

[5] 孙方红,马壮,董世知.矿用截齿表面强化技术[J].金属热处理, 2011, 36(11): 99-102.

SUN F H, MA Z, DONG S Z. Mining pick surface strengthening technology[J]. Heat Treatment of Metals, 2011, 36(11): 99-102.

[6] 王义猛. 液压油缸活柱表面激光熔覆技术研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(18): 137-140.

WANG Y M. Study on laser cladding technology of hydraulic cylinder column surface [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (18): 137-140.

- [7] 朱真才,李剑锋,彭玉兴,等. 刮板输送机中部槽的研究现状及 展望[J]. 机械制造与自动化,2020(1): 1-3, 15.
 ZHU Z C, LI J F, PENG Y X, et al. Research status and prospect of scraper conveyor middle trough[J]. Machine Building & Automation, 2020(1): 1-3, 15.
- [8] 许波. 面向绿色再制造的单道激光熔覆几何特征的研究 [D]. 南京:南京航空航天大学,2011.

XU B. Geometric characteristics of single-pass laser cladding for green remanufacturing [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.

[9] ZHANG H, ZOU Y, ZOU Z D, et al. Microstructure and properties

of Fe-based composite coating by laser cladding Fe-Ti-V-Cr-C-CeO₂ powder[J]. Optics and Laser Technology, 2015, 65: 119-125.

- [10] LI J, LUO X, LI G J. Effect of Y₂O₃ on the sliding wear resistance of TiB/TiC-reinforced composite coatings fabricated by laser cladding[J]. Wear, 2014, 310(1-2): 72-82.
- [11] QUAZI M M, FAZAL M A, HASEEB A S M A, et al. Effect of rare earth elements and their oxides on tribo-mechanical performance of laser claddings: A review[J]. Journal of Rare Earths, 2016, 34(6): 549-564.
- [12] WANG C L, GAO Y, WANG R, et al. Microstructure of laser-clad Ni60 cladding layers added with different amounts of rare-earth oxides on 6063 Al alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 740: 1099-1107.
- [13] WANG C L, GAO Y, ZENG Z C, et al. Effect of rare-earth on friction and wear properties of laser cladding Ni-based coatings on 6063Al[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 727: 278-285.
- [14] ZHANG S H, LI M X, CHO T Y, et al. Laser clad Ni-base alloy added nano- and micron-size CeO₂ composites [J]. Optics and Laser Technology, 2008, 40(5): 716-722.
- [15] WANG Q, YANG J, NIU W, et al. Effect of La₂O₃ on microstructure and properties of Fe-based alloy coatings by laser cladding[J]. Optik, 2021, 245: 167653.
- [16] ZHANG M, WANG X H, QU K L, et al. Effect of rare earth oxide

on microstructure and high temperature oxidation properties of laser cladding coatings on 5CrNiMo die steel substrate[J]. Optics and Laser Technology, 2019, 119(7): 105597.

- [17] 魏铭. 稀土氧化物 CeO2 对 H13 钢激光熔覆钴基合金组织和性能的影响[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
 WEI M. The effect of rare earth oxide CeO2 on the microstructure and properties of laser cladding cobalt-based alloy on H13 steel
 [D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2018.
- [18] 张光耀,王成磊,高原,等. 稀土 La₂O₃ 对 6063Al 激光熔覆 Ni 基 熔覆层微观结构的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 53-58. ZHANG G Y, WANG C L, GAO Y, et al. Effect of rare earth La₂O₃ on microstructure of 6063Al laser cladding Ni-based cladding layer [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(11): 53-58.
- [19] 刘佳,林晨, 徐欢欢, 等. 稀土 Y₂O₃ 对激光熔覆 Ni 基 WC 熔覆 层的组织与性能影响[J]. 应用激光, 2021, 41(5): 948-954
 LIU J, LIN C, XU H H, et al. Effect of rare earth Y₂O₃ on microstructure and properties of laser cladding Ni-based WC coating
 [J]. Applied Laser, 2021, 41(5): 948-954
- [20] ZHANG T G, ZHUANG H F, ZHANG Q, et al. Influence of Y₂O₃ on the microstructure and tribological properties of Ti-based wear-resistant laser-clad layers on TC4 alloy[J]. Ceramics International, 2020, 46(9): 13711-13723.