

## 激光熔覆Fe06+(TiC/Mo)复合涂层硬度及耐磨性能研究

杨凯欣, 孙文磊, 肖奇, 陈子豪

### Study on hardness and wear resistance of laser cladding Fe06+(TiC/Mo) composite coatings

引用本文:

杨凯欣,孙文磊,肖奇,陈子豪. 激光熔覆Fe06+(TiC/Mo)复合涂层硬度及耐磨性能研究[J]. *激光技术*, 2023, 47(3): 393-399.

YANG Kaixin,SUN Wenlei,XIAO Qi,CHEN Zihao. Study on hardness and wear resistance of laser cladding Fe06+(TiC/Mo) composite coatings[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 47(3): 393-399.

### 您可能感兴趣的其他文章

#### 1. CeO<sub>2</sub>对激光熔覆Ni60合金涂层组织及性能的影响

引用本文: 陈顺高, 张晓明, 郑启池, 等. CeO<sub>2</sub>对激光熔覆Ni60合金涂层组织及性能的影响[J]. *激光技术*, 2017, 41(6): 904-908.

#### 2. TC4表面激光熔覆TiAl合金涂层的工艺和组织性能

引用本文: 赵欣鑫, 肖华强, 游川川, 等. TC4表面激光熔覆TiAl合金涂层的工艺和组织性能[J]. *激光技术*, 2021, 45(6): 697-702.

#### 3. Ni60激光熔覆工艺参量对涂层裂纹及厚度的影响

引用本文: 黄海博, 孙文磊. Ni60激光熔覆工艺参量对涂层裂纹及厚度的影响[J]. *激光技术*, 2021, 45(6): 788-793.

#### 4. 激光粉末沉积中碳高强贝氏体钢组织与性能研究

引用本文: 江易林, 方金祥, 杨武红, 等. 激光粉末沉积中碳高强贝氏体钢组织与性能研究[J]. *激光技术*, 2021, 45(6): 709-714.

#### 5. 激光熔覆复合涂层WC对裂纹产生机理影响研究

引用本文: 李镭昌, 魏昕. 激光熔覆复合涂层WC对裂纹产生机理影响研究[J]. *激光技术*, 2023, 47(1): 52-58.

文章编号: 1001-3806(2023)03-0393-07

## 激光熔覆 Fe06+(TiC/Mo) 复合涂层硬度及耐磨性能研究

杨凯欣, 孙文磊\*, 肖奇, 陈子豪  
(新疆大学 机械工程学院, 乌鲁木齐 830047)

**摘要:** 为了提高石油钻杆材料 42CrMo 的硬度及耐磨性能, 通过激光熔覆技术制备不同质量分数(0, 0.10, 0.15, 0.20) Fe06+TiC/Mo 复合涂层。采用显微硬度仪器、扫描电镜、摩擦磨损试验机进行了显微硬度、耐磨性能、物相组成、磨损行为分析和实验验证, 得到的熔覆层主要由  $\alpha$ -Fe、Cr-Fe 以及 (Fe, Ni) 固溶体等相组成。结果表明, Fe06+TiC 复合涂层硬度平均约 1180 HV<sub>0.2</sub>, Fe06+Mo 复合涂层硬度平均约 893 HV<sub>0.2</sub>; Fe06+TiC 复合涂层的磨损量平均约 2.97 mg, Fe06 熔覆层磨损量为 7.8 mg, Fe06+Mo 复合涂层的磨损量平均约 2.67 mg; Fe06+TiC/Mo 复合涂层磨损机理以粘着磨损、磨粒磨损为主, Fe06+0.2TiC 熔覆层硬度最高, Fe06+0.2Mo 熔覆层耐磨性能最好。该研究为提高 42CrMo 材料硬度及耐磨性能提供了实践参考。

**关键词:** 激光技术; 耐磨性能; 显微硬度; 磨损行为; 磨损量

**中图分类号:** TN249; TG178 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.03.017

## Study on hardness and wear resistance of laser cladding Fe06+(TiC/Mo) composite coatings

YANG Kaixin, SUN Wenlei, XIAO Qi, CHEN Zihao  
(School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

**Abstract:** In order to improve the hardness and wear resistance of oil drilling pipe material 42CrMo, Fe06+TiC/Mo composite coatings with different mass fractions (0, 0.10, 0.15, 0.20) were prepared by laser cladding technique. The microhardness, wear resistance, phase composition, wear behavior, and experimental verification were carried out by microhardness instrument, scanning electron microscope, and friction and wear testing machine. It was found that the cladding layer was mainly composed of  $\alpha$ -Fe, Cr-Fe and (Fe, Ni) solid solution phases. The results show that the average microhardness of Fe06+TiC composite coating about 1180 HV<sub>0.2</sub>, and that of Fe06+Mo composite coating is about 893 HV<sub>0.2</sub>. The average mass loss of Fe06+TiC composite coating is about 2.97 mg, the average mass loss of Fe06 cladding layer is 7.8 mg, and the average mass loss of Fe06+Mo composite coating is about 2.67 mg, respectively. The wear mechanism of Fe06+TiC/Mo composite coating is mainly adhesion wear and abrasive wear. The hardness of Fe06+0.20TiC cladding is the highest, and the wear resistance of Fe06+0.20Mo cladding is the best. This study provides practical reference for improving the hardness and wear resistance of 42CrMo materials.

**Key words:** laser technique; wear resistance; microhardness; wear behavior; mass loss

### 引言

石油开采过程中,石油钻杆长期工作于地下复杂环境,受到严重的磨损致使其失效,使开采进度停滞,带来无法估量的损失。所以需要提高钻杆材料的耐磨损性

能从而增强其应对恶劣环境的能力,延长使用寿命。

激光熔覆技术作为一种新型表面改性技术广泛应用于航空航天、汽车工业、石油化工等领域<sup>[1-3]</sup>,其原理是将配置好的粉末在保护气下通过激光迅速加热融到基体表面迅速凝固形成熔覆层。通过同轴送粉的方式在基材表面熔凝新的高耐磨耐蚀涂层,并达到较好的结合强度,可在钻杆表面形成一道完美的防线,保证其可以在地下环境中顺利开展。LI 等人<sup>[4]</sup>采用激光熔覆技术制备高耐磨表面涂层具,研究发现: Ni 复合涂层磨损量与摩擦系数明显较低表现出良好的耐磨损性能。QI 等人<sup>[5]</sup>在磁场辅助下用激光器制备出

基金项目:新疆维吾尔自治区克拉玛依市科技重大专项资助项目(2018ZD002B)

作者简介:杨凯欣(1996-),男,硕士研究生,主要从事石油钻具材料激光表面工艺及改性研究。

\* 通讯联系人。E-mail:sunwenxj@163.com

收稿日期:2022-04-18;收到修改稿日期:2022-05-17

高耐磨合金涂层,证明激光熔覆层可显著提高基体的性能。目前,激光熔覆常用合金粉末有铁基合金<sup>[6-8]</sup>、镍基合金<sup>[9]</sup>和钴基合金<sup>[10-11]</sup>等,其中铁基合金粉末的应用最为广泛、需求量最大。DING 等人<sup>[12]</sup>研究了 WS<sub>2</sub> 不同质量分数粉末配比(0, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08)的铁基合金激光熔覆层硬度及磨损性能,结果表明:硬度提高了 730 HV<sub>0.5</sub>~820 HV<sub>0.5</sub>,残余应力变为压缩状态,WS<sub>2</sub> 含量为 0.06 时熔覆层磨损率最小。FENG 等人<sup>[13]</sup>用激光熔覆制备 M<sub>3</sub>(C, B) 增强铁基复合涂层,结果表明:增强后涂层平均硬度超过 850 HV,约为基材(42CrMo)2.5 倍(335 HV),并表现出远高于基体的耐磨性能。YU 等人<sup>[14]</sup>铁基添加质量分数为 0.01~0.05 的 Ni 并研究其熔覆层物相组成,硬度和耐磨损能力,研究表明:熔覆层均由 α-Fe、γ-Fe、(Fe, Ni) 固溶体等组成,添加质量分数为 0.30 的 Ni 时熔覆层性能最好,硬度达到 920 HV,磨损量最小。

TiC 和 Mo 粉的加入可有效提高铁基熔覆层的性能<sup>[15]</sup>。YE 等人<sup>[16]</sup>制备不同质量分数(0, 0.05, 0.10, 0.15) TiC 的铁基合金涂层,研究发现,当 TiC 质量分数为 0.15 时,硬度和耐磨性能最好,磨损机理为粘着磨损、磨粒磨损和氧化磨损。CHEN 等人<sup>[17]</sup>研究了

表 1 基体与 Fe06 粉末化学成分表

Table 1 Substrate and Fe06 powder chemical composition list

compositions (mass fraction <i>w</i> )	C	Si	Cr	Ni	B	Mo	Fe
Fe06	0.008	0.02	0.0075	0.32	0.04	—	balance
42CrMo	0.004~0.005	0.002~0.004	0.009~0.012	≤0.003	—	0.002~0.003	—

表 2 TiC 粉末化学成分表

Table 2 TiC powder chemical composition list

compositions(mass fraction <i>w</i> )	Ti	C	Fe	free carbon	other impurity allowance
TiC	0.802	0.195	0.001	0.001	0.003

## 1.2 混粉实验方法

准备阶段:首先将粉末放入干燥箱中,将干燥箱温度调为 120 ℃ 烘干 1 h,再将 TiC/Mo 粉以 0, 0.10, 0.15, 0.20 的质量分数分别与 Fe06 粉末进行配比。用超声振动清洗研磨球和罐体内部,清洗完成后进行烘干,保证研磨球以及罐体无水分即可,研磨球倒入罐体后再将称好的粉末倒入其中。

实验阶段:将研磨罐盖好放入球磨机中固定,连接电源,每 30 min 正反转颠倒,球磨机转速 300 r/min,混粉 30 min,切断电源后方可打开球磨机,再将混好的粉末与研磨球分离并将混合均匀的粉末再次放入干燥箱烘干。

## 1.3 激光熔覆实验方法

图 1 为激光熔覆实验设备。由激光发生器、激光

TiC 陶瓷颗粒增强 Ti6Al4 合金耐磨性能,发现 TiC 陶瓷颗粒涂层耐磨性是 Ti6Al4 合金基体的 3 倍。DENG 等人<sup>[18]</sup>在 AISI 1045 钢上制备 Fe-Mo 合金耐磨涂层,并检测其硬度和耐磨性能,得到结论为 Fe-Mo 涂层的显微硬度和耐磨性远高于 AISI 1045 钢基体,磨损表面生成具有良好减摩性能的 MoO<sub>3</sub> 氧化物,增强了耐磨性能。JIN 等人<sup>[19]</sup>在 Q235 钢制备含 Mo<sub>2</sub>FeB<sub>2</sub> 熔覆层,结果表明:含 Mo 熔覆层硬度约为 1052 HV<sub>0.5</sub>, Mo 粉质量分数在 0.25 左右具有较好的耐磨性能。

综上所述,本文中设计不同质量分数(0.10, 0.15, 0.20) TiC/Mo 与 Fe06 粉末配比在 42CrMo 基材上制备激光熔覆层进行实验研究。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

选择 42CrMo 为基体材料。粉末为 Fe06+TiC 与 Fe06+Mo 粉末,基体与 Fe06 粉末的化学成分见表 1,表 2 为 TiC 粉末化学成分表。由于基体板材是光板,需要用砂纸在板材上面进行打磨,然后用无水乙醇清洗。因粉末是两种,所以需要对两种粉末进行混粉,混粉装置采用的是行星式球磨机。

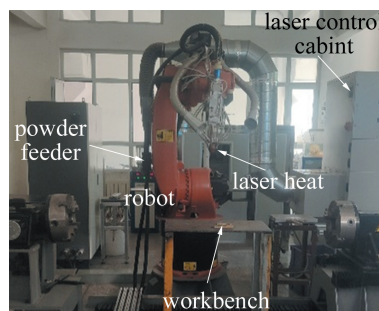


图 1 激光熔覆设备

Fig. 1 Laser cladding equipment

头、DPSF-2 送粉器、六轴机器人、KR30HA 机械臂、激光控制箱、工作台等组成。在扫描速率为 3 mm/s、激光功率为 1000 W、送粉率为 1.4 r/min 时,将不同比例的 Fe06-TiC 粉末(Fe06+0.10TiC, Fe06+0.15TiC, Fe06+

0.20TiC) 与 Fe06-Mo 粉末 (Fe06 + 0.10Mo, Fe06 + 0.15Mo, Fe06+0.20Mo) 混合均匀熔覆到 42CrMo 基体上。分析熔覆完成后的复合材料涂层的物相组成、显微组织和显微硬度,接着进行摩擦磨损测试并分析其磨损形貌及磨损机理。

## 2 熔覆层测试

### 2.1 XRD 物相测试

通过 Rigaku Ultima IV 型 X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD) 试验机进行扫描,将试件涂层截面用砂纸由粗到细打磨光滑,呈镜面反光状态,扫描角度  $30^\circ \sim 90^\circ$ ,每个试件扫描时长 20 min,得到 XRD 衍射图谱,并利用 Jade 软件进行数据分析得到复合涂层中分布的相组成。

### 2.2 显微组织测试

将抛光后的试样以 HCl 和  $\text{HNO}_3$  比例为 3:1 的王水溶液腐蚀约 15 s,在扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 下观察拍照。

### 2.3 硬度测试

将不同质量分数 (0, 0.10, 0.15, 0.20) TiC/Mo 与 Fe06 粉末混合进行激光熔覆实验,从熔覆层顶端向底部,每隔 0.2 mm 打点,载荷为 200 g,加载时间为 15 s 进行实验。最后与未熔覆的基材进行对比,得到涂层表面与基体的显微硬度。

### 2.4 磨损性能测试

准备阶段:将 45# 钢对磨副在  $800^\circ\text{C}$  高温中淬火 15 min~30 min,待高温淬火后冷却从而改善对磨副硬度。通过 N-2000 型磨损试验机进行本次实验<sup>[20]</sup>,将熔覆层利用线切割机,切成  $31\text{ mm} \times 7\text{ mm} \times 8\text{ mm}$  的长方体,实验前将其称重 3 次取平均值。然后将试件牢固固定在卡槽,将对磨副固定拧紧。接着观察摩擦角度,看熔覆层能否和对磨副接触良好,调节角度至接触良好再进行实验。

实验阶段:设定 200 N 加载力,转速为 160 r/min,磨损时长 1 h,实验完成后将试件称重 3 次取平均值,即可得到磨损量。试验机每 120 s 取值一次绘制摩擦因数曲线图。将摩擦因数磨损量以及磨损率进行对比分析涂层的耐磨损能力。

## 3 结果和讨论

### 3.1 XRD 物相分析

通过 XRD 实验检测出的相组成如图 2 所示。图

2a 中硬质相 TiC 主要有:  $\alpha\text{-Fe}$ 、 $\text{Fe-Cr}$ 、 $\text{Fe}_{0.975}\text{Ti}_{0.025}$  以及  $\text{Fe}_{0.905}\text{Si}_{0.095}$ 。铁基合金中的 Fe、Cr、Ni 元素发生反应生成  $\text{CrFe}_4$ 、 $\text{Fe-Si}$  和  $\text{Fe-Ni}$  相,当 TiC 添加后,生成新相  $\text{Fe}_{0.975}\text{Ti}_{0.025}$ ,这是由于 TiC 熔融时将 C 元素分解, Ti 与铁基合金中的 Fe 元素发生反应生成的。TiC 质量分数的增加导致第 1 个衍射峰的强度逐渐降低,结晶性能下降。TiC 陶瓷颗粒具有较高熔点,在激光功率、送粉率和扫描速率一致的情况下,随着 TiC 含量增多,熔化所需的能量越多,所以有更多未熔的 TiC 硬质颗粒会滞留在涂层内增强涂层的耐磨损性能。

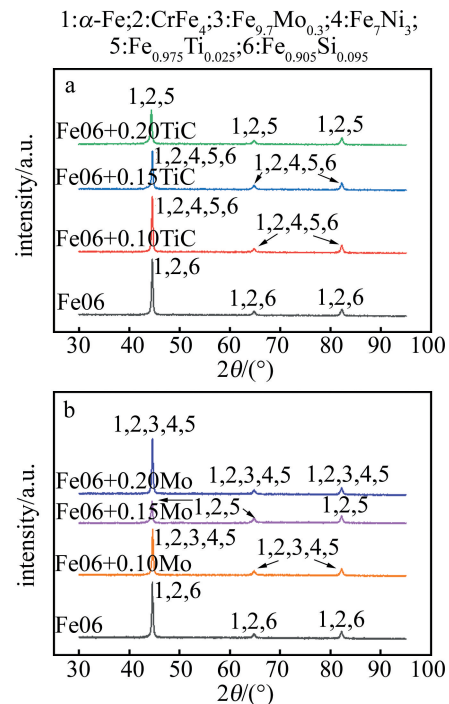


图 2 Fe06+(TiC/Mo) 复合材料涂层 XRD 物相图谱  
a—Fe06 与不同含量 TiC 的 XRD 图谱 b—Fe06 与不同含量 Mo 的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD phase diagram of Fe06+(TiC/Mo) composite coating  
a—XRD patterns of Fe06 with different TiC contents b—XRD patterns of Fe06 and different Mo contents

图 2b 中 (Fe、Mo) 复合涂层的 XRD 物相主要有:  $\alpha\text{-Fe}$ 、 $\text{Cr-Fe}$ 、 $\text{Fe-(Ni/Si)}$  和  $\text{Fe-Mo}$ 。铁基合金与 Mo 元素反应生成  $\text{Fe}_{9.7}\text{Mo}_{0.3}$  相,极大增强了涂层的耐磨损性能。Mo 元素与基体可以很好地融合,随着 Mo 粉质量分数增高,衍射峰的强度呈现出先降低后增高的趋势。为抑制结晶生长最高添加量,当 Mo 粉的质量分数超过 0.15 时,未熔的 Mo 粉与铁基合金生成  $\text{Fe}_{9.7}\text{Mo}_{0.3}$  相含量增多,此时衍射峰强度呈上升趋势。未熔的 Mo 粉弥散在熔覆层也会改善其机械性能,增强硬度及耐磨性能。

熔覆层中无论 TiC 硬质颗粒或者 Mo 粉均与铁基

合金反应生成新的增强相,具体的性能优良还需进一步讨论。

### 3.2 显微组织分析

熔覆层从下到上的晶粒凝固过程主要由形状控制因子  $G/R$  决定,  $G$  为温度梯度,  $R$  为凝固速率。在熔池底部  $G$  较大,  $R$  较小,  $G/R$  值很大, 熔覆层底部的结构呈亮白色带状<sup>[21]</sup>。图 3 为 Fe06 熔覆层的微观组织。Fe06 熔覆层底部组织如图 3a 所示, 随着熔覆进行,  $G/R$  值减小, 底部结合区向散热方向生成了粗大的柱状晶。中部组织见图 3b, 表现为分布广泛的胞状晶, 这是因为随着  $G/R$  值减小, 晶体生长方式由平面晶逐渐过渡为胞状晶, 熔覆层上部组织也会更加致密和细化。

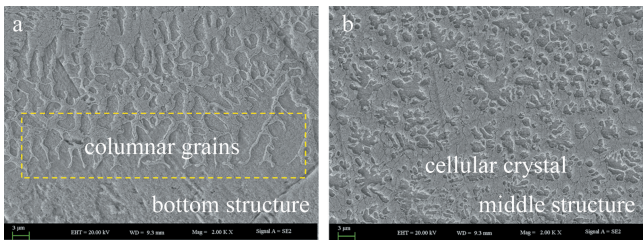


图 3 Fe06 熔覆层的显微组织图

Fig. 3 Microstructure of Fe06 cladding layer

Fe06+TiC 复合熔覆层显微组织图如图 4 所示。图 4a、图 4b 分别为 Fe06+0.10TiC 复合涂层的底部组织和中部组织, 图 4c、图 4d 分别为 Fe06+0.15TiC 复合涂层的底部组织和中部组织, 图 4e、图 4f 分别为 Fe06+0.20TiC 复合涂层的底部组织和中部组织。由图 4 可知, 在底部结合区部分生成了柱状晶并朝着熔覆层中部延伸生长, 熔覆层中部由分布均匀的等轴晶组成。可以看出, 当 TiC 质量分数增加, 熔覆层底部熔合线逐渐变宽; 结合区上部的柱状晶由细长转变为粗短, 中部鱼骨状树枝晶逐渐由胞状晶形态取代。熔覆层底部集合区域冷却速度慢, 大量 TiC 在此区域发生分解反应, 使得熔覆层底部强化效果不明显, 随着熔覆进行, 冷却速度逐渐加快, 熔池中未熔的 TiC 颗粒嵌入

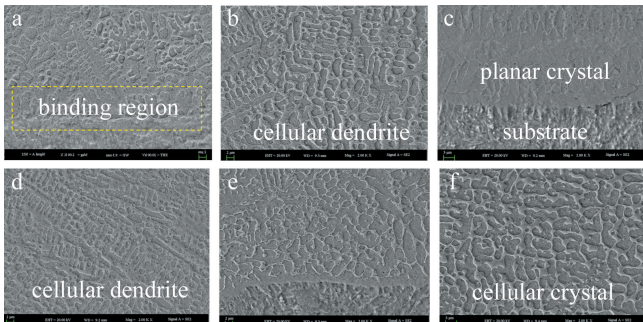


图 4 Fe06+TiC 复合熔覆层显微组织图

Fig. 4 Microstructure of Fe06+TiC composite cladding layer

到熔覆层中, 使得硬度大幅提高<sup>[22]</sup>。

Fe06+Mo 复合熔覆层显微组织图如图 5 所示。图 5a、图 5b 分别为 Fe06+0.10Mo 复合涂层的底部组织和中部组织; 图 5c、图 5d 分别为 Fe06+0.15Mo 复合涂层的底部组织和中部组织; 图 5e、图 5f 分别为 Fe06+0.20Mo 复合涂层的底部组织和中部组织。如图 5 所示, 熔覆层底部主要以平面晶的形式展现并逐渐演化为柱状晶和部分枝晶(鱼骨状), 随着 Mo 粉添加量增大, 平面晶生长区域变大, 柱状晶由细长变得粗短, 逐渐向胞状晶(花瓣状)变化, 熔覆层中部组织随着 Mo 粉添加量增加变得更为致密和均匀, 可有效提高熔覆层的性能。当 Mo 粉质量分数达到 0.20 时, 熔覆层成形最好。

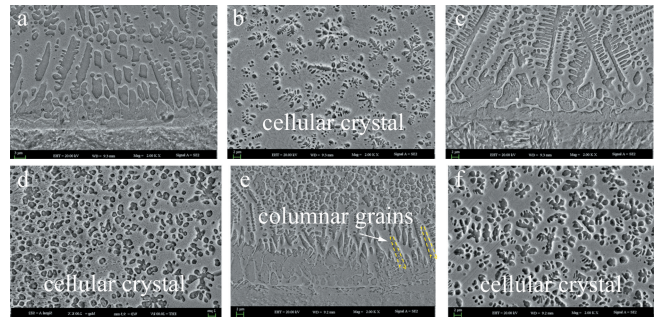


图 5 Fe06+Mo 复合熔覆层显微组织图

Fig. 5 Microstructure of Fe06-Mo composite cladding layer

### 3.3 磨损性能分析

磨损量和磨损率是评价材料耐磨性的指标, 具体的磨损率  $W$  计算公式如下式所示<sup>[23]</sup>:

$$W = \frac{m}{\pi dn} \quad (1)$$

式中,  $m$  为磨损量,  $d$  为对磨副直径(40 mm),  $n$  为对磨副总转动圈数。

图 6 为 8 组试样的摩擦因数曲线图。可见, 不同试样在 9 min 内的初始磨合阶段摩擦因数急剧增加, 因为此时对磨副与涂层的接触属于微凸体接触<sup>[24]</sup>, 涂

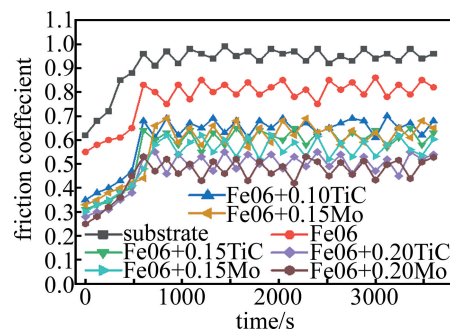


图 6 摩擦因数曲线图

Fig. 6 Friction factor curves

层表面微凸体被挤压、剪切,产生磨粒充当硬质物对涂层表面进行磨粒磨损,9 min 后微凸体被磨平进入稳定磨损阶段,磨损率在一定范围内上下波动,此时为该材料正常磨损状态。

各试样磨损率计算结果如表 3 所示,磨损量如图 7 所示。结合磨损量和磨损率来看,随着涂层中 TiC 陶瓷颗粒和 Mo 粉质量分数的增多,涂层的磨损量和

磨损率呈下降趋势。Fe06+0.20Mo 的磨损量(2.1 mg)和磨损率( $1.7408 \times 10^{-6} \text{ mg} \cdot \text{m}^{-1}$ )最低,耐磨性能最好,纯 Fe 基的磨损量为 7.8 mg,约为基体磨损量的 2/5,磨损也相对剧烈未能表现出较好的耐磨性能,而添加硬质颗粒和 Mo 粉后,耐磨性能大大提升,磨损量平均约为基体磨损量 7/50,耐磨性能得到很大程度的提升。

表 3 磨损率

Table 3 Wear rate

samples	substrate	Fe06	0.10TiC	0.15TiC	0.20TiC	0.10Mo	0.15Mo	0.20Mo
wear rate/ $(10^{-6} \text{ mg} \cdot \text{m}^{-1})$	16.2471	6.4656	3.0670	2.4039	1.9065	2.6526	2.2381	1.7408

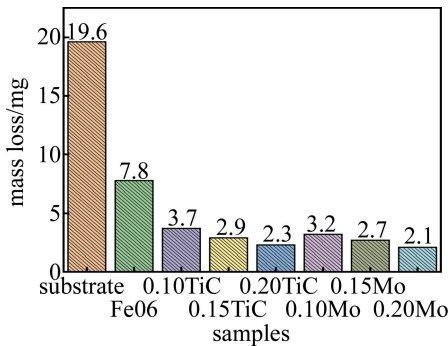


图 7 磨损量  
Fig. 7 Mass loss

### 3.4 显微硬度分析

图 8 为各试样涂层显微硬度。由图 8 可见,TiC/Mo 的添加可有效改善纯铁基的显微硬度,纯 Fe 基涂层平均硬度约为 772.71  $\text{HV}_{0.2}$ ,随着陶瓷颗粒和 Mo 粉质量分数增加,硬度呈上升趋势,在 Fe06+0.20TiC 时,硬度达到最高,平均约为 1272.22  $\text{HV}_{0.2}$ ; Fe06 + 0.20Mo 复合涂层平均硬度达到 1040.49  $\text{HV}_{0.2}$ ; Fe06 涂层硬度较基体硬度(319.17  $\text{HV}_{0.2}$ )提高了 2.42 倍。图 9 为不同涂层熔覆层与基体硬度对比图,复合涂层热影响区的硬度较基体也提高了 2 倍左右。TiC/Mo-Fe06 涂层硬度的提高一方面得益于 Cr-Fe 超硬相广泛分布,Mo 粉可以起到细化微观组织的作用,阻碍位错

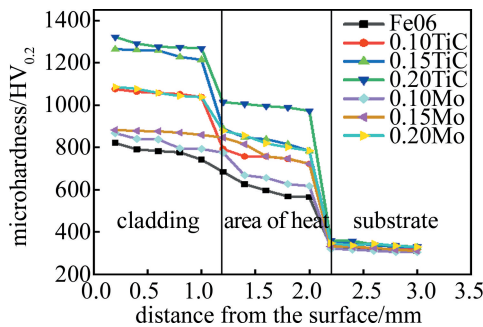


图 8 各试样显微硬度

Fig. 8 Microhardness of each sample

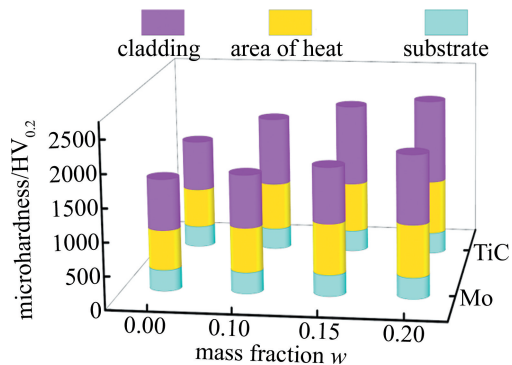


图 9 涂层与基体硬度对比图

和晶界迁移很大程度强化晶体从而提高硬度;另一方面,TiC/Mo 熔点较高,部分固溶于熔覆层,弥散在熔覆层中增强涂层机械性能,改善硬度和磨损性能。

### 3.5 磨损行为

基体与 Fe06 涂层的磨损形貌如图 10 所示。熔覆层表面有明显的呈条状的划痕和犁沟,涂层表面有细条痕表、片状脱落现象。图 10a 为基体磨损形貌图,基体试样表面发生了剧烈的磨粒磨损以及粘着磨损现象,因此基体表面呈现出密集深长的犁沟并伴有片状的涂层剥落。同样的 Fe06 涂层的磨损机理与基体一致,磨损现象如图 10b 所示,但是基体试样的犁沟比 Fe06 涂层宽而深,磨损更为剧烈,磨损量更大,所以 Fe06 涂层耐磨性能优于基体试样<sup>[25]</sup>。

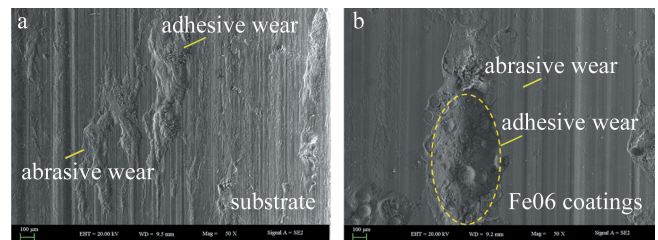


图 10 基体与 Fe06 磨损形貌

Fig. 10 Wear morphology of the substrate and Fe06 coatings

Fe06+TiC 复合涂层磨损形貌图如图 11 所示。Fe06+0.10TiC 复合涂层微凸处发生局部塑性变形,部分材料在粘着点发生剪切断裂,形成粘着磨损,如图 11a 所示,熔覆层表面有部分金属附着物在滑动过程中脱落成为磨屑,有较为强烈的磨粒磨损并引发表面裂纹最终使表层材料断裂剥落产生疲劳磨损形成小坑<sup>[26]</sup>。从图中可以看到,随着 TiC 陶瓷颗粒质量分数增多,涂层同样表现出粘着磨损和磨粒磨损,但涂层的片状脱落变小,细条痕变得短而浅,如图 11b、图 11c 所示。说明随着 TiC 含量的增高,涂层的耐磨损性能较之基体和 Fe06 涂层显著升高<sup>[27]</sup>。



图 11 Fe06+TiC 复合涂层磨损形貌

a—Fe06+0.10TiC 涂层 b—Fe06+0.15TiC 涂层 c—Fe06+0.20TiC 涂层

Fig. 11 Wear morphology of Fe06+TiC composite coatings

a—Fe06+0.10TiC coating b—Fe06+0.15TiC coating c—Fe06+0.20TiC coating

图 12 为 Fe06+Mo 复合涂层的磨损形貌图。Fe06+0.10Mo 复合涂层部分涂层脱落表现出明显的粘着磨损现象,且表面伴有深长的犁沟,意味着发生了剧烈的磨粒磨损,如图 12a 所示。从图中可以看到,随着 Mo 粉质量分数增多,涂层表现出轻微的粘着磨损和磨粒磨损,涂层的片状脱落变小,细条痕变得短而浅。图 12b、图 12c 所示分别为 Fe06+0.15Mo 和 Fe06+0.20Mo 复合涂层的磨损形貌,表现出良好的耐磨性能。说明随着 Mo 粉含量的增多,涂层的耐磨损性能显著提升,Mo 粉增强了涂层的耐磨性。相比 Fe06+TiC 复合涂层,Fe06+Mo 复合涂层以粘着磨损为主,耐磨损性能优于 Fe06+TiC 复合涂层。



图 12 Fe06+Mo 复合涂层磨损形貌

a—Fe06+0.10Mo 涂层 b—Fe06+0.15Mo 涂层 c—Fe06+0.20Mo 涂层

Fig. 12 Wear morphology of the Fe06+Mo composite cladding

a—Fe06+0.10Mo coating b—Fe06+0.15Mo coating c—Fe06+0.20Mo coating

## 4 结论

在 42CrMo 基材上制备激光熔覆 Fe06+TiC/Mo 复

合涂层,并研究其涂层硬度、耐磨性、磨损机理。

(1) Fe06+TiC/Mo 复合涂层主要的相组成为:  $\alpha$ -Fe、Cr-Fe 以及 (Fe、Ni) 固溶体等,未熔的 TiC 陶瓷颗粒和 Mo 粉分布在熔覆层中增强熔覆层的硬度及耐磨损能力。

(2) 当 TiC/Mo 粉末质量分数达到 0.20 时,熔覆层的显微组织最佳。Fe06+TiC/Mo 复合涂层底部组织由平面晶向胞状晶转变;Fe06-TiC 复合涂层的中上部由鱼骨状的胞状枝晶向胞状晶体过渡;Fe06+Mo 复合涂层中部组织主要由花瓣状胞状晶组成。

(3) Fe06+TiC/Mo 复合涂层硬度及耐磨性能与 TiC/Mo 的质量分数呈正比。Fe06+0.20TiC 硬度最高约为  $1040 \text{ HV}_{0.2}$ ,是基体材料硬度 ( $320 \text{ HV}_{0.2}$ ) 的 3.25 倍,Fe06 熔覆层硬度 ( $772 \text{ HV}_{0.2}$ ) 的 1.35 倍;Fe06+0.20Mo 复合涂层的耐磨性能最好,磨损率为  $1.7408 \times 10^{-6} \text{ mg/m}$ ,磨损量为基体磨损量的 12.4%、Fe06 熔覆层磨损量的 27%,表现出远高于基体的耐磨能力。

(4) Fe06+TiC/Mo 复合涂层主要表现为粘着磨损和磨粒磨损。且随着 TiC/Mo 粉质量分数增加,熔覆层表面犁沟变得浅而窄,涂层脱落面积迅速减小,在质量分数达到 0.20 时,表现出最优异的耐磨性能。

## 参考文献

- [1] CHEN X M, WANG H J, ZHOU X L, *et al.* Laser surface modification technology and research progress[J]. Materials Review, 2018, 32(s1):341-344 (in Chinese). 陈小明,王海金,周夏凉,等.激光表面改性技术及其研究进展[J].材料导报,2018,32(s1):341-344.
- [2] TAN J H, SUN R L, NIU W, *et al.* Research status of TC4 alloy laser cladding materials[J]. Materials Review, 2020, 34(15):15132-15137 (in Chinese). 谭金花,孙荣禄,牛伟,等. TC4 合金激光熔覆材料的研究现状[J].材料导报,2020,34(15):15132-15137.
- [3] ZHANG J C, SHI Sh H, GONG Y Q, *et al.* Research progress of laser cladding technology[J]. Surface Technology, 2020, 49(10):1-11 (in Chinese). 张津超,石世宏,龚燕琪,等.激光熔覆技术研究进展[J].表面技术,2020,49(10):1-11.
- [4] LI M Y, HAN B, SONG L X, *et al.* Enhanced surface layers by laser cladding and ion sulfurization processing towards improved wear-resistance and self-lubrication performances[J]. Applied Surface Science, 2020, 503(C):144226.
- [5] QI K, YANG Y, LIANG W X, *et al.* Effect of magnetic field on the microstructure and wear properties of  $\text{TiB}_2$ /metal composite layers synthesized in situ by laser cladding on Ti-6Al-4V alloy[J]. Ceramics International, 2021, 47(20):29463-29474.
- [6] SUN B, CHENG J B, CAI Zh H, *et al.* Formation and wear property of broad-beam laser clad Fe-based coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 4(5):126598.
- [7] WANG Sh, SHAO S Ch, BI Sh P, *et al.* Study on microstructure and

- properties of laser cladding Fe-based alloy layer on TC4 surface[J]. *Laser Technology*, 2022,46(5):653-656(in Chinese).  
王胜,邵思程,毕少平,等. TC4 表层激光熔覆 Fe 基合金层组织及性能研究[J]. *激光技术*,2022,46(5):653-656.
- [8] GONG M M, XIE L Y, WU T, *et al.* Study on the properties of laser cladding Fe60-TiO<sub>2</sub> coating on TC4 surface[J]. *Laser Technology*, 2022,46(4):551-555(in Chinese).  
龚美美,谢林圻,吴腾,等. TC4 表面激光熔覆 Fe60-TiO<sub>2</sub> 涂层性能研究[J]. *激光技术*,2022,46(4):551-555.
- [9] XU Z F, JIAO J K, ZHANG Zh, *et al.* Research on laser repair process of Ni-based superalloy [J]. *MaterialsReports*, 2019, 33(19):3196-3202.
- [10] LI Zh Y, YAN H, ZHANG P L, *et al.* Improving surface resistance to wear and corrosion of nickelaluminum bronze by laser-clad TaC/Co-based alloy composite coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021,4(5):126592.
- [11] ZHOU J L, KONG D J. Friction-wear performances and oxidation behaviors of Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> reinforced Co-based alloy coatings by laser cladding[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021,408:126816.
- [12] DING H H, MU X P, ZHU Y, *et al.* Effect of laser claddings of Fe-based alloy powder with different concentrations of WS<sub>2</sub> on the mechanical and tribological properties of railway wheel [J]. *Wear*, 2022, 488/489:204174.
- [13] FENG Y L, PANG X T, FENG K, *et al.* Residual stress distribution and wear behavior in multi-pass laser clad Fe-based coating reinforced by M<sub>3</sub>(C, B) [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021,11(15):5597-5607.
- [14] YU H, LUO Z A, WANG Y H, *et al.* Influence of Ni content on the microstructure and reciprocating wear of Fe-based/B<sub>4</sub>C composite coating by vacuum cladding[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2021,423:127604.
- [15] YAN G H, ZHENG M Y, YE Zh H, *et al.* In-situ Ti(C, N) reinforced AlCoCrFeNiSi-based high entropy alloy coating with functional gradient double-layer structure fabricated by laser cladding [J]. *Journal of Alloys and Compounds*,2021,886:161252.
- [16] YE F X, YANG Y, LOU Zh, *et al.* Microstructure and wear resistance of TiC reinforced AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub> eutectic high entropy alloy layer fabricated by micro-plasma cladding [J]. *Materials Letters*, 2021,284(P1):128859.
- [17] CHEN T, DENG Z X, LIU D F, *et al.* Bioinert TiC ceramic coating prepared by laser cladding; Microstructures, wear resistance, and cytocompatibility of the coating[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2021,423(7):127635.
- [18] DENG X K, ZHANG G J, WANG T, *et al.* Investigations on microstructure and wear resistance of Fe-Mo alloy coating fabricated by plasma transferred arc cladding[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2018,350:480-487.
- [19] JIN J, SUN J Sh, WANG G L. Effect of Mo content on microstructure and wear resistance of Mo-Fe-B claddings [J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*,2019,8(1):233-241.
- [20] RAHIMAN A H S, SMART D S R, WILSON B, *et al.* Dry sliding wear analysis of Al5083/CNT/Ni/MoB hybrid composite using DOE Taguchi method[J]. *Wear*, 2020, 460/461(2):203471.
- [21] ZHAO W X, ZHOU Zh, HUANG J, *et al.* Microstructure and frictional wear behavior of FeCrNiMo alloy layer fabricated by laser cladding[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2021,57(10):1291-1298(in Chinese).  
赵万新,周正,黄杰,等. FeCrNiMo 激光熔覆层组织与摩擦磨损行为[J]. *金属学报*,2021,57(10):1291-1298.
- [22] WU J, JIN J, ZHU D D, *et al.* Effect of TiC content on microstructure, friction and wear properties of Inconel718 based ceramic coatings prepared by high energy laser cladding[J]. *Surface Technology*, 2021,50(9):225-235(in Chinese).  
吴军,金杰,朱冬冬,等. TiC 添加量对高能激光熔覆 Inconel718 基陶瓷涂层显微组织和摩擦磨损性能的影响[J]. *表面技术*, 2021,50(9):225-235.
- [23] SUN N, FANG Y, ZHANG J Q, *et al.* Effect of WC-12Co addition on microstructure and wear resistance of Inconel625 matrix composites prepared by laser cladding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021,48(6):0602106(in Chinese).  
孙宁,方艳,张家奇,等. WC-12Co 添加量对激光熔覆 Inconel625 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):0602106.
- [24] ZHAO D P, GUO J Q, LI X. Structure and wear behavior of Cu/graphite composite coating electroplated on TC4 alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*,2020, 49(8):2861-2868.
- [25] ZHANG M, WANG G, ZHANG L Sh, *et al.* Microstructure and properties of laser cladding Fe, Ni-based coatings on 40Cr surface [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2021, 45(8):928-935(in Chinese).  
张敏,王刚,张立胜,等. 40Cr 钢表面激光熔覆 Fe, Ni 基涂层组织性能研究[J]. *稀有金属*, 2021, 45(8):928-935.
- [26] DONG Y, SHU L S, LIN R. Microstructure and friction and wear properties of laser clad Fe-Cr-Mo-Si alloy coating[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021,58(19):1914007(in Chinese).  
董月,舒林森,林冉. 激光熔覆 Fe-Cr-Mo-Si 合金涂层的组织与摩擦磨损性能[J]. *激光与光电子学进展*,2021,58(19):1914007.
- [27] JIAO X J, WANG Ch M, GONG Z Q, *et al.* Effect of Ti on T15M composite coating fabricated by laser cladding technology [J]. *Surface & Coatings Technology*,2017,325:643-649.