

## 激光与光电子学进展

激光熔覆 Fe-Cr-Mo-Si 合金涂层的组织与  
摩擦磨损性能董月<sup>1</sup>, 舒林森<sup>1,2\*</sup>, 林冉<sup>1</sup><sup>1</sup>陕西理工大学机械工程学院, 陕西 汉中 723001;<sup>2</sup>陕西省工业自动化重点实验室, 陕西 汉中 723001

**摘要** 利用 3 kW 光纤同轴激光熔覆设备将 Fe-Cr-Mo-Si 合金粉末熔覆到 Q235 钢表面, 制备出了耐磨的铁基合金熔覆层, 通过金相显微镜、维氏硬度计和摩擦磨损试验机等设备研究了 Fe-Cr-Mo-Si 熔覆层的显微组织、硬度及摩擦磨损行为。结果发现: Fe-Cr-Mo-Si 熔覆层的显微组织均匀致密, 且无气孔、裂纹等缺陷; 熔覆层主要由树枝晶组成, 熔覆层/Q235 钢结合面处形成了细小的平面晶组织, 熔覆层与基体实现了良好的冶金结合; 熔覆层的平均硬度为 642.2 HV, 约为基体硬度的 4 倍; 当载荷为 50 N 时, 熔覆层和基体试样的平均摩擦因数分别是 0.621 和 0.512, 熔覆层的磨损量仅为基体的 14.6%; 摩擦因数随载荷的增加而减小, 磨损轮廓尺寸随载荷的增加而增大; 熔覆层的磨损机制为磨粒磨损和黏着磨损, 而基体的磨损机制以黏着磨损和疲劳剥落磨损为主。试验结果表明, 在 Q235 钢表面激光熔覆 Fe-Cr-Mo-Si 合金粉末能够显著提高材料的耐磨性能。

**关键词** 激光技术; 激光熔覆; Fe-Cr-Mo-Si 合金; 显微组织; 显微硬度; 摩擦磨损性能

中图分类号 TN249; TH117.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1914007

Microstructure and Friction and Wear Properties of Laser Cladded  
Fe-Cr-Mo-Si Alloy CoatingDong Yue<sup>1</sup>, Shu Linsen<sup>1,2\*</sup>, Lin Ran<sup>1</sup><sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723001 China;<sup>2</sup>Shaanxi Key Laboratory of Industrial Automation, Hanzhong, Shaanxi 723001 China

**Abstract** Fe-Cr-Mo-Si alloy powder was added to the surface of Q235 steel to prepare a wear-resistant iron-based cladding layer by using 3 kW fiber-coaxial laser cladding equipment. The Fe-Cr-Mo-Si cladding layer's microstructure, hardness, and friction-wear behavior were studied using a metallographic microscope, Vickers hardness tester, and friction and wear testing machine. The results show that the microstructure of the Fe-Cr-Mo-Si cladding layer is uniform and dense without pores, cracks, and other defects. The cladding layer is composed of dendritic crystals. A fine planar crystal structure is formed at the bonding surface of the cladding layer and Q235 steel, and the cladding layer and the substrate exhibit good metallurgical bonding. The average hardness of the cladding layer reaches 642.2 HV, which is four times the substrate's hardness. When the load is 50 N, the average friction coefficients of the cladding layer and the substrate are 0.621 and 0.512, respectively, and the wear mass loss of the cladding layer is 14.6% of the substrate. The friction coefficient decreases as load increases, whereas the size of the wear outline increases as load increases. The results show that the wear mechanism of the cladding layer is abrasive wear and adhesive wear, while that of the substrate is mainly adhesive wear and fatigue spalling wear. The

收稿日期: 2021-01-06; 修回日期: 2021-01-25; 录用日期: 2021-03-02

通信作者: \*shulinsen19@163.com

laser cladding of Fe-Cr-Mo-Si alloy powder on Q235 steel can improve wear resistance significantly.

**Key words** laser technique; laser cladding; Fe-Cr-Mo-Si alloy; microstructure; micro-hardness; friction and wear property

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 160.3380

## 1 引言

Q235 钢因含碳量适中、切削加工性能和综合力学性能良好以及成本优势明显,常被用于制造量大面广的常规机械零件<sup>[1-3]</sup>。但这种材料的屈服点低、耐磨性能差,在非均匀承载、润滑不周或干摩擦等工况下易发生表面磨损失效,因此,对其表面进行强化处理尤为重要<sup>[4]</sup>。采用激光熔覆技术在廉价基体表面制备高性能合金涂层,使基体表面的硬度和耐磨性得以提升,已逐渐成为材料表面强化与废旧零件再制造的重要手段<sup>[5-7]</sup>。

目前,激光熔覆常用的合金粉末有铁基合金<sup>[8]</sup>、钴基合金<sup>[9]</sup>和镍基合金<sup>[10]</sup>等,其中铁基合金粉末的工业应用范围最广、需求量最大。国内外很多学者对激光熔覆铁基涂层的耐磨性能进行了研究,如:王泽旺等<sup>[11]</sup>在 Q235 钢表面制备了 TiC 颗粒增强铁基合金熔覆层,该熔覆层的耐磨性约为基体的 11 倍;陈菊芳等<sup>[12]</sup>研究了 45 钢表面激光熔覆 Fe901 合金涂层的摩擦磨损性能,结果发现,铁基熔覆层使 45 钢的耐磨性显著提高;祁琦等<sup>[13]</sup>利用销盘摩擦磨损试验研究了转速对激光熔覆铁基合金耐磨性的影响,结果发现,摩擦因数随着转速的提高而降低,磨损程度随着转速的提高而增大。此外,研究人员还发现加载力的大小对熔覆层摩擦磨损性能以及磨损机制产生的影响不可忽视<sup>[14-15]</sup>。Fe-Cr-Mo-Si 合金粉末具有自熔性良好、硬度高、耐磨性好等优点,而且其成分与 Q235 钢接近,可与其实现冶金结合。为了促进 Fe-Cr-Mo-Si 合金粉末在工业激光熔覆中的应用,深入研究 Fe-Cr-Mo-Si 合金熔覆层的显微组织和摩擦磨损性能就显得尤为必要。

鉴于此,本文采用同步同轴光纤激光熔覆技术在 Q235 钢表面熔覆 Fe-Cr-Mo-Si 粉末,制备出了

Fe-Cr-Mo-Si 熔覆层,分析了熔覆层的显微组织和显微硬度,讨论了不同载荷条件下熔覆层的摩擦磨损性能,并将其与基体的摩擦磨损性能进行了对比分析,以期为工业生产中制备耐磨性能优良的 Fe-Cr-Mo-Si 熔覆层提供参考。

## 2 试验材料及方法

### 2.1 试样制备

激光熔覆试验以 Q235 钢作为基体材料,其尺寸为 200 mm×50 mm×10 mm,对基体材料进行铣削加工,使待熔覆表面的粗糙度达到 3.2 μm。试验前,用无水乙醇和丙酮对待熔覆表面进行清洁。粉末材料选用球形度较好的 Fe-Cr-Mo-Si 合金粉末,粉末颗粒的直径为 56~128 μm,显微形貌如图 1 所示。基体和熔覆粉末的化学成分如表 1 所示。

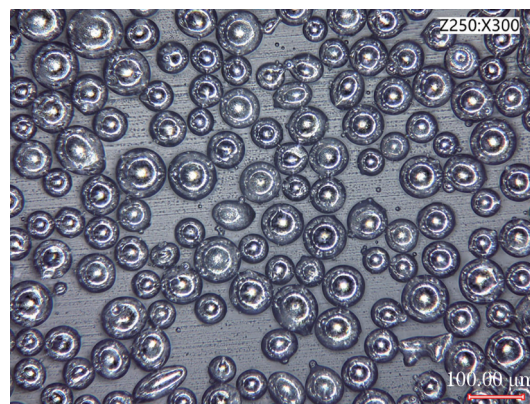


图 1 Fe-Cr-Mo-Si 合金粉末的显微形貌

Fig. 1 Micro-morphology of Fe-Cr-Mo-Si alloy powder

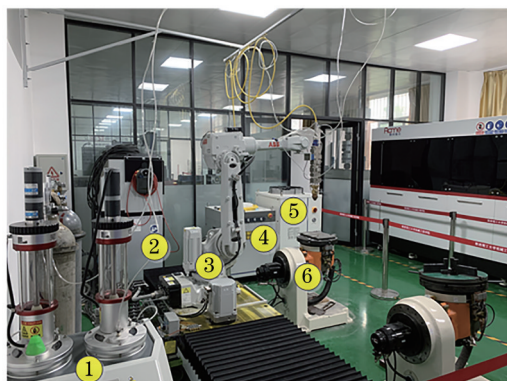
采用四路同步同轴送粉模式进行激光熔覆试验,光纤激光熔覆设备由 YLS-3000 型半导体激光器、ABB 机器人手臂、ZF-KDPZ 熔覆头、CWFL 水冷装置和 RH-DFOM 双筒送粉器组成。载粉气和保护气均采用纯度为 99.99% 的氩气。激光熔覆系

表 1 Fe-Cr-Mo-Si 合金粉末与 Q235 基体的化学成分

Table 1 Chemical composition of Fe-Cr-Mo-Si alloy powder and Q235 substrate

Material	Mass fraction / %							
	C	Si	Cr	Mn	Mo	Fe	S	P
Fe-Cr-Mo-Si	0.4	2.5	5.6	1.3	2.86	Bal.	—	—
Q235	0.12-0.20	0.30	—	0.30-0.70	—	Bal.	0.045	0.045

统如图 2 所示。激光熔覆工艺选用优化后的参数, 即: 激光功率 2400 W, 扫描速度 5 mm/s, 离焦量 +2 mm, 送粉量 20 g/min。



1 powder feeder 2 control system 3 ABB robot  
4 solid state laser 5 cooling device 6 working table

图 2 激光熔覆系统

Fig. 2 Laser cladding system

## 2.2 试验方法

单道熔覆试验完成后, 按切割、研磨、抛光、腐蚀等步骤制备金相试样。使用 VHX-7000 型显微镜对熔覆试样进行组织观察; 利用 HV-1000 型显微硬度计测定试样的硬度, 设置载荷为 4.9 N, 加载时间为 10 s。

以 50% 的搭接率进行多道熔覆试验, 然后制备摩擦磨损试样, 摩擦磨损试样的尺寸均为 38 mm × 38 mm × 6 mm, 表面粗糙度为 1.6 μm, 其中 1#、2# 和 3# 试样为熔覆层样块, 4# 试样为基体样块。采用 MMW-2 型销-盘摩擦磨损试验机进行单向干式摩擦磨损试验<sup>[16-17]</sup>, 试样安装在自制的专用辅具工装中, 与 40Cr 球头柱销形成配磨副, 详见图 3。

摩擦磨损试验前后, 用酒精对试样进行清洁并

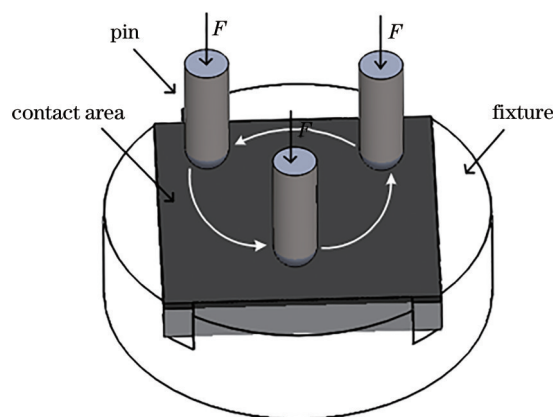


图 3 销-盘摩擦磨损试验方案

Fig. 3 Test scheme of pin-disc friction-wear

在室温下干燥, 然后使用精度为 0.001 g 的天平称量试样的质量, 并计算磨损量。在室温 (25 °C) 下进行摩擦磨损试验, 1#、2# 和 3# 熔覆层样块的加载载荷分别为 50, 100, 150 N, 4# 基体样块的加载载荷为 50 N, 转速均为 100 r/min, 磨损时间均为 20 min。摩擦因数曲线由磨损试验机的主机自动记录, 试样磨损后的表面形貌采用超景深显微镜进行观察。

## 3 熔覆层的组织与硬度

### 3.1 显微组织

图 4 所示为 Fe-Cr-Mo-Si 单道熔覆层的宏观和微观形貌。由图 4(a) 可见: 熔覆层表面光滑, 未熔化粉末颗粒较少, 基体与熔覆层的结合质量较好。由图 4(b) 可见: 整个熔覆层横截面由上到下呈现出明显的分层状态, 依次为熔覆层 (CZ)、熔化区 (MZ)、热影响区 (HAZ) 及基体 (Sub)。熔覆层与基体之间的结合界面平整, 内部无气孔和裂纹, 说明熔覆层与基体形成了良好的冶金结合。

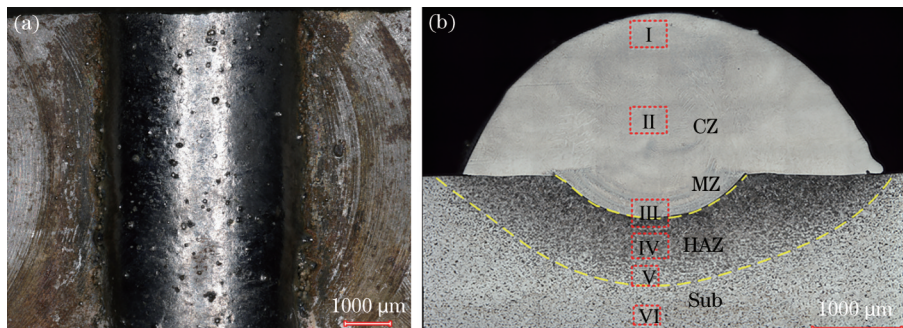


图 4 单道熔覆层形貌图。(a) 纵截面的宏观形貌; (b) 横截面的微观形貌

Fig. 4 Morphologies of single cladding layer. (a) Macro-morphology of longitudinal section; (b) micro-morphology of cross-section



图 5 所示为熔覆层横截面不同区域的显微组织特征。由凝固理论可知, 结晶参数  $G/R$  ( $G$  为温度梯度,  $R$  为凝固速率) 决定着凝固组织的形貌<sup>[18]</sup>。图 5(a) 为熔覆层顶部 (I 区) 的显微组织, 可见, 熔覆层顶部组织中既有细小的胞状晶, 也有粗大的树枝晶, 晶体沿温度梯度方向快速生长。其原因是熔覆层表面散热通道多, 结晶参数  $G/R$  小, 晶体生长无序。图 5(b) 为熔覆层中部 (II 区) 的显微组织, 可见, 粗大的树枝晶向着熔覆层中间或顶部生长。图 5(c) 为熔覆层底部 (III 区) 的显微组织, 可见, 熔覆层与基体结合部分主要是沿基体表面生长的平面晶, 形成了白亮的熔合线, 熔合线上部由平面晶向胞状晶和

长条树枝晶转变。其原因是结合界面处的结晶参数  $G/R$  最大。图 5(d) 为热影响区中部 (IV 区) 的显微组织, 可见, 热影响区中部主要由板条状马氏体组成。其原因在于该区域与熔池相邻, 材料吸收激光能量后转变为奥氏体, 然后在急冷作用下转变为硬度较高的马氏体组织。图 5(e) 为热影响区底部 (V 区) 的显微组织, 可见, 该区域为未发生相变的铁素体和珠光体。这是因为传递至该区域的热量少, 因此温度低, 同时该区域的保温时间短。图 5(f) 为 Q235 钢基体 (VI 区) 的显微组织, 主要为铁素体及块状分布的粒状珠光体, 珠光体的体积分数约为 13%, 由此可推算出钢中碳的质量分数约为 0.10%。

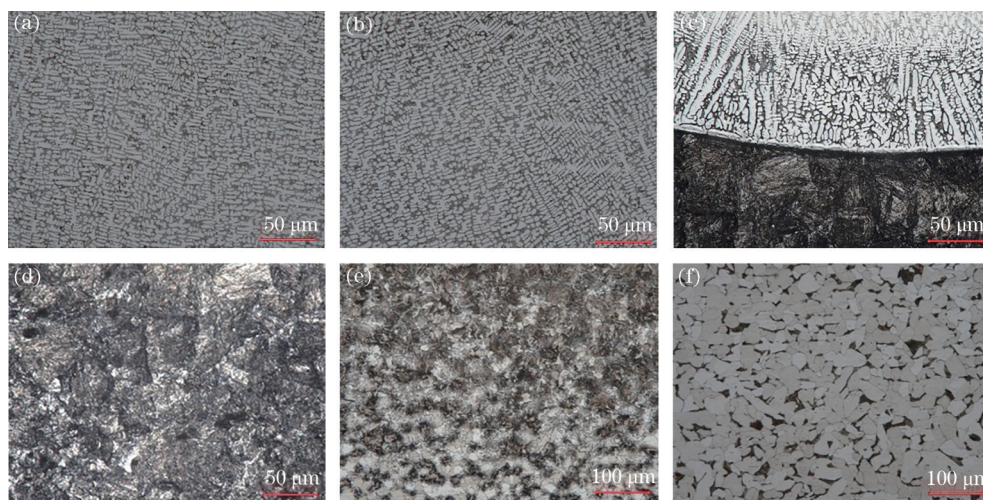


图 5 激光熔覆层横截面各区域的显微组织。(a) 熔覆层顶部; (b) 熔覆层中部; (c) 熔覆层底部; (d) 热影响区中部; (e) 热影响区底部; (f) Q235 钢基体

Fig. 5 Microstructures in various regions of the cross-section of laser cladding layer. (a) Top region of the cladding layer; (b) middle region of the cladding layer; (c) bottom region of the cladding layer; (d) middle region of the heat affected zone; (e) bottom region of the heat affected zone; (f) Q235 steel substrate

### 3.2 显微硬度

图 6 所示为熔覆层横截面上的显微硬度测试点

布置方案及显微硬度分布曲线。熔覆层的平均硬度为 642.2 HV, 约为基体平均硬度 (155.5 HV) 的

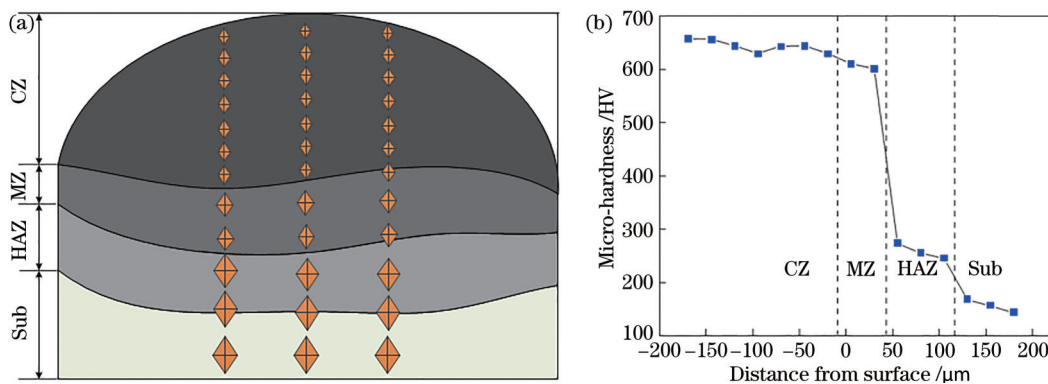


图 6 熔覆层横截面上的显微硬度测量。(a) 测试点布置方案; (b) 显微硬度分布曲线

Fig. 6 Micro-hardness measurement on cross-section of the cladding layer. (a) Test points arrangement; (b) micro-hardness distribution curve

4 倍,最高硬度出现在熔覆层中上部(细晶区),其值可达 654.8 HV;熔覆层中下部(粗晶区)的硬度有所降低,其平均值为 630.6 HV;熔化区(MZ)的平均硬度为 606.5 HV,热影响区(HAZ)的平均硬度为 257.9 HV。在激光熔覆过程中,熔覆层内固溶了较多的合金元素,加之熔覆层的晶粒细小、晶界较多,因此形成了细晶强化效应,熔覆层的硬度显著提高。熔化区的硬度比熔覆层低,其主要原因有两方面:一是基体对熔覆层组织产生了局部稀释作用,导致该区域的硬度降低;二是熔池底部的晶粒相对较粗。位于熔化区以下的热影响区的硬度明显高于基体,这主要是因为热影响区的部分组织转变成了马氏体。

## 4 熔覆层的摩擦磨损性能

### 4.1 摩擦因数及磨损轮廓

图 7 所示为四组试样的摩擦因数曲线。可见,四种配磨副均经历了初始磨合阶段和稳定磨损阶段。在初始磨合阶段,配磨副之间的接触实际上是微凸体接触<sup>[19]</sup>,接触面积小、应力大,微凸体被挤压、剪切,产生大量磨粒,对接触面产生“犁削”作用,因此摩擦因数迅速增大且波动明显。当微凸体被磨平后,配磨副进入稳定磨损阶段。当载荷  $F$  分别为 50, 100, 150 N 时,熔覆层的平均摩擦因数分别为 0.621、0.596 和 0.411。由图 7 可见,熔覆层的摩擦因数随着载荷增加而降低。其原因在于:1) 熔覆层表面微凸体的变形程度随载荷的增加而增大,导致实际接触面积增大;2) 配磨副表面发生加工硬化的程度随着载荷的增加而增大,配磨副间的黏合作用减小。与之相比, Q235 钢基体(载荷  $F$  为 50 N)的平均摩擦因数为

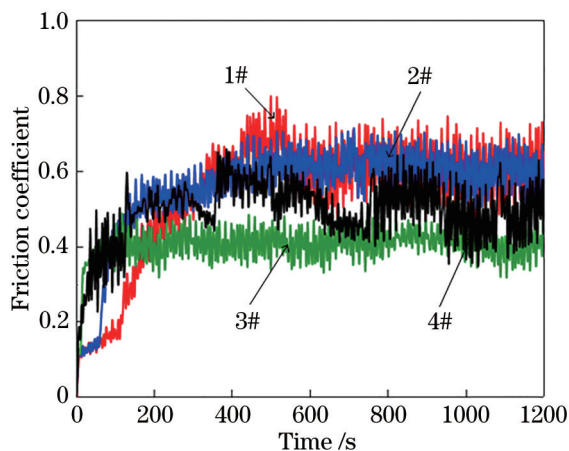


图 7 试样的摩擦因数

Fig. 7 Friction coefficient of specimens

0.512,摩擦因数曲线波动明显,说明摩擦磨损过程不稳定,这与基体硬度低、磨损失重快有关。

图 8 为四组试样的磨损轮廓截面形状。当载荷  $F$  为 50 N 时, Q235 钢基体试样的磨损深度为 186.43  $\mu\text{m}$ ,磨损宽度为 2.43 mm,而熔覆试样的磨损深度和宽度分别为 27.79  $\mu\text{m}$  和 1.69 mm;当载荷  $F$  增加到 100 N 时,熔覆试样的磨损深度和宽度分别为 48.39  $\mu\text{m}$  和 1.93 mm;当载荷  $F$  继续增至 150 N 时,熔覆试样的磨损深度和宽度分别为 52.32  $\mu\text{m}$  和 2.11 mm。以上说明熔覆层磨损轮廓随载荷的增加而增大。从磨损截面轮廓曲线来看, Q235 钢基体的磨损面上有较深的犁沟,说明基体表面磨损严重;而熔覆层磨损截面轮廓线的连续性较好,说明熔覆层表面的磨损比较均匀。

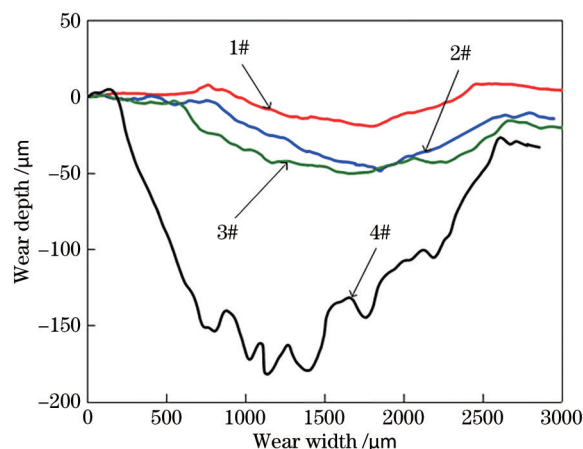


图 8 试样的磨损截面轮廓

Fig. 8 Wear outline of specimens

### 4.2 磨损量

四组试样的磨损量如图 9 所示。当载荷  $F$  分别

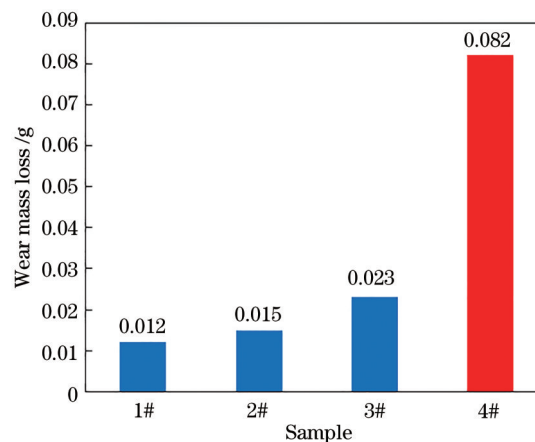


图 9 试样的磨损量

Fig. 9 Wear mass loss of different samples



为 50, 100, 150 N 时, 熔覆试样的磨损量分别为 0.012, 0.015, 0.023 g; 当载荷  $F$  为 50 N 时, Q235 钢的磨损量为 0.082 g。由此可见: 熔覆层的磨损量会随着载荷的增加而增大; 在同等载荷作用下, 熔覆试样的磨损量仅为基体的 14.6%, 即使给熔覆试样施加更大的载荷, 其磨损量也远低于基体。上述结果表明, Q235 钢表面熔覆 Fe-Cr-Mo-Si 涂层后可使材料的耐磨性能得到大幅提升。

### 4.3 磨损表面形貌

图 10 所示为四组试样磨损后的表面形貌。

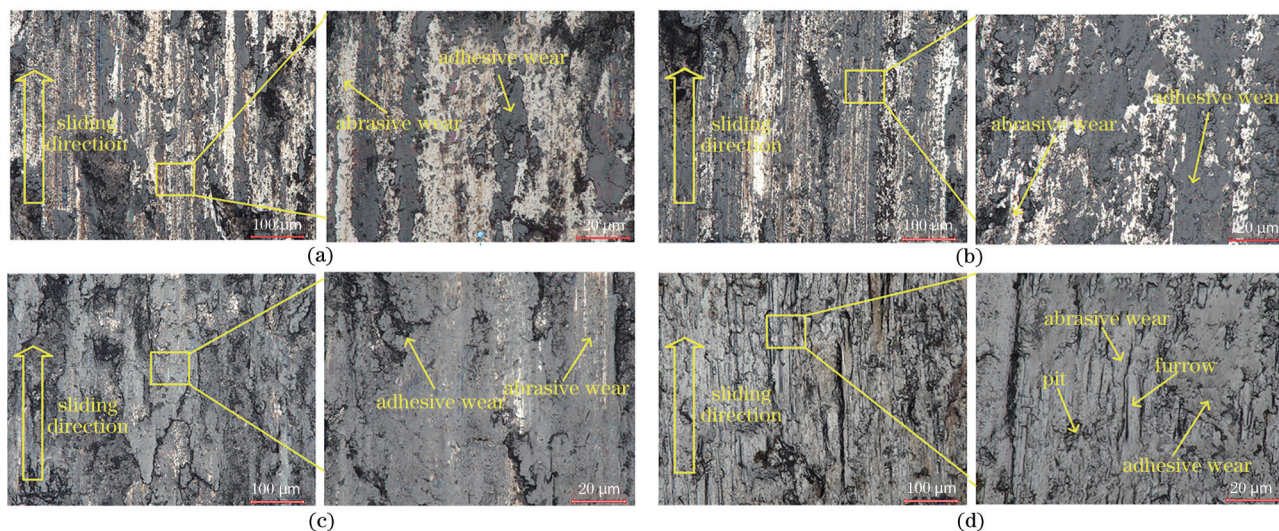


图 10 不同试样的磨损表面。(a) 熔覆试样(1#,  $F=50$  N); (b) 熔覆试样(2#,  $F=100$  N); (c) 熔覆试样(3#,  $F=150$  N); (d) 基体试样(4#,  $F=50$  N)

Fig. 10 Wear surfaces of different samples. (a) Cladded sample (1#,  $F=50$  N); (b) cladded sample (2#,  $F=100$  N); (c) cladded sample (3#,  $F=150$  N); (d) substrate sample (4#,  $F=50$  N)

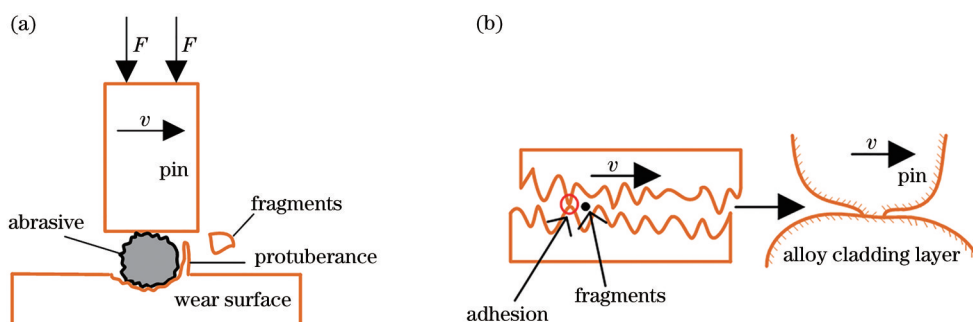


图 11 磨损机制示意图。(a) 磨粒磨损; (b) 黏着磨损

Fig. 11 Schematics of wear mechanism. (a) Abrasive wear; (b) adhesive wear

对于熔覆层而言, 在 50 N 载荷下, Fe-Cr-Mo-Si 熔覆层微凸起处发生局部塑性变形, 部分材料在黏着点处发生剪切断裂, 形成轻微的黏着磨损, 如图 10(a) 所示; 随着载荷增加到 100 N, 熔覆层表面的黏着物增多且尺寸增大, 部分金属附着物在滑动过程中脱落成为磨屑, 此时表面的黏着更加明显,

由图 10(a)~(c) 可见, 熔覆试样磨损表面均形成了较细浅且与滑动方向平行的犁沟, 犁沟深度和黏着量随着载荷增加而逐渐增大。由图 10(d) 可见, 基体试样的磨损表面也产生了与滑动方向平行的犁沟, 但是犁沟比熔覆层试样的更深。熔覆层试样与 Q235 钢基体试样表面均出现了犁沟, 说明均存在磨粒磨损。磨粒被压入摩擦表面, 并被切向力推动前进, 对试样表面进行剪切、犁皱和切削, 最终剥落成为磨屑。磨粒磨损机制如图 11(a) 所示。

如图 10(b) 所示; 当载荷增加到 150 N 时, 配磨件在反复摩擦过程中的黏着越来越严重, 此时的磨损机制表现为严重的黏着磨损, 如图 10(c) 所示。黏着磨损机制如图 11(b) 所示。对于 Q235 钢基体而言, 其磨损表面非常粗糙, 产生了较多的粗大凹坑和较深的犁削痕迹, 这表明其表面应力已超过了材料本

身的疲劳强度。脱落的磨屑在摩擦过程中充当硬质磨粒,引发表面裂纹,最终使表层材料断裂剥落产生局部疲劳,从而形成如图 10(d)中所示的凹坑,这表明 Q235 钢基体存在疲劳剥落磨损机制。

## 5 结 论

采用同步同轴光纤激光熔覆技术在 Q235 钢表面激光熔覆 Fe-Cr-Mo-Si 粉末制备合金熔覆层,研究了熔覆层的显微组织和摩擦磨损性能,得到如下结论:

1) 熔覆层组织均匀致密,内部无裂纹、气孔等缺陷,与基体形成了良好的冶金结合,熔覆层的平均硬度达到了 642.2 HV,约为基体的 4 倍。

2) 在同等载荷作用下,熔覆试样的磨损量仅为基体磨损量的 14.6%。在不同的载荷作用下,熔覆层的摩擦因数在 0.411~0.621 之间,摩擦因数随着载荷的增加而降低,磨损轮廓尺寸随着载荷的增加而增大。

3) 熔覆层的磨损机制为磨粒磨损和黏着磨损,黏着程度随着载荷的增加而增大;基体表面产生了塑性变形和磨粒脱落留下的凹坑,主要以黏着磨损和疲劳剥落磨损机制为主。

## 参 考 文 献

- [1] Min H. The study on the weldability of 1MnCrMoNi alloy steel and Q235 carbon steel[J]. Key Engineering Materials, 2020, 861: 71-76.
- [2] Li Y, Li Y L, Li X W. Microstructure and properties of Fe-based amorphous coating on Q235 steel substrate by TIG welding[J]. Materials Reports, 2020, 34(18): 18135-18138.  
李越, 李玉龙, 李学文. Q235 钢表面 TIG 焊堆焊铁基非晶涂层的组织与性能[J]. 材料导报, 2020, 34(18): 18135-18138.
- [3] Cao F J, Zhang Y, Shen Y F, et al. Effects of beam offset on the macro defects, microstructure and mechanical behaviors in dissimilar laser beam welds of SDSS2507 and Q235[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 55: 335-347.
- [4] Qin Z B, Wu Z, Hu W B. Application and progress of surface engineering technology[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 2192-2216.  
秦真波, 吴忠, 胡文彬. 表面工程技术的应用及其研究现状[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 2192-2216.

- [5] Wang J S, Shu L S. Laser cladding remanufacturing and repair of agricultural tractor spindle[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(7): 071404.  
王家胜, 舒林森. 农业拖拉机主轴激光熔覆再制造修复研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(7): 071404.
- [6] Xu B S, Xia D, Tan J Y, et al. Status and development of intelligent remanufacturing in China [J]. China Surface Engineering, 2018, 31(5): 1-13.  
徐滨士, 夏丹, 谭君洋, 等. 中国智能再制造的现状与发展[J]. 中国表面工程, 2018, 31(5): 1-13.
- [7] Zhang K Z, He C W, Lin Y Y, et al. Microstructures and mechanical properties of laser cladding repaired 5A06 alloys[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(23): 011408.  
张可召, 何超威, 林雨杨, 等. 激光熔覆修复 5A06 铝合金组织及力学性能[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(23): 011408.
- [8] Zhu H M, Hu J P, Li B C, et al. Research progress of laser cladding stainless steel coating on Fe-based substrate[J]. Surface Technology, 2020, 49(3): 74-84.  
朱红梅, 胡际鹏, 李柏春, 等. 铁基体料表面激光熔覆不锈钢涂层的研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 74-84.
- [9] Tong W H, Zhang X Y, Li W X, et al. Effect of laser process parameters on the microstructure and properties of TiC reinforced Co-based alloy laser cladding layer[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(9): 1265-1274.  
童文辉, 张新元, 李为轩, 等. 激光工艺参数对 TiC 增强钴基金属激光熔覆层组织及性能的影响[J]. 金属学报, 2020, 56(9): 1265-1274.
- [10] Xu Z F, Jiao J K, Zhang Z, et al. Research on laser repair process of Ni-based superalloy[J]. Materials Reports, 2019, 33(19): 3196-3202.  
徐子法, 焦俊科, 张正, 等. 镍基高温合金激光修复工艺研究[J]. 材料导报, 2019, 33(19): 3196-3202.
- [11] Wang Z W, Zhang H, Zhao C. Study on microstructure and properties of TiC-Fe45-based composite coating by argon tungsten-arc cladding[J]. Surface Technology, 2014, 43(5): 51-54, 75.  
王泽旺, 张寰, 赵程. 氩弧熔覆 TiC 颗粒增强 Fe 基涂层组织性能研究[J]. 表面技术, 2014, 43(5): 51-54, 75.
- [12] Chen J F, Li X P, Xue Y P. Friction and wear properties of laser cladding Fe901 alloy coating on 45 steel surface[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46

- (5): 0502001.  
陈菊芳, 李小平, 薛亚平. 45 钢表面激光熔覆 Fe901 合金的摩擦磨损性能[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0502001.
- [13] Qi Q, Chai R X, Zhang H J, et al. Effect of rotating speed on wear resistance of laser cladding iron base alloy[J]. Applied Laser, 2020, 40(1): 50-55.  
祁琦, 柴蓉霞, 张汉杰, 等. 转速对激光熔覆铁基金耐磨性的影响[J]. 应用激光, 2020, 40(1): 50-55.
- [14] Fu H, Zhu W, Zheng S W, et al. Effects of load on friction and wear properties of C<sub>t</sub>/SiC composites prepared by SLS[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(21): 2604-2610.  
傅华, 朱伟, 郑沈威, 等. 载荷对激光选区烧结 C<sub>t</sub>/SiC 复合材料摩擦磨损性能的影响[J]. 中国机械工程, 2019, 30(21): 2604-2610.
- [15] Wang W, Cui H Z, Wang Z N, et al. Microstructure and wear mechanism of induction quenching 50CrMo4 steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(7): 62-68.  
王伟, 崔洪芝, 王泽宁, 等. 50CrMo4 钢感应淬火微观组织和磨损机制[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(7): 62-68.
- [16] Liu S, Jiang X, Zhao H C, et al. Corrosion resistance and wear property of graphene-epoxy coatings[J]. Tribology, 2015, 35(5): 598-605.  
刘栓, 姜欣, 赵海超, 等. 石墨烯环氧涂层的耐磨耐腐蚀性能研究[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(5): 598-605.
- [17] 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: 203471.
- [18] Xu D H, Li F X, Li X N, et al. Mesoscale modeling of the crystallization parameters identification during the iron-based catalyst preparation process: the dilute concentration case[J]. Applicable Analysis, 2020, 99(13): 2191-2209.
- [19] 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.  
赵东平, 郭金强, 李轩. TC4 合金表面 Cu/石墨复合镀层的组织结构和摩擦磨损行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(8): 2861-2868.