

# 激光与光电子学进展

## 不同载荷下激光熔覆钴基合金涂层的摩擦学性能研究

徐家乐<sup>1\*</sup>, 谭文胜<sup>1</sup>, 胡增荣<sup>2</sup>, 王松涛<sup>3</sup>, 周建忠<sup>3</sup>

<sup>1</sup>常州信息职业技术学院智能装备学院, 江苏 常州 213164;

<sup>2</sup>苏州大学轨道交通学院, 江苏 苏州 215131;

<sup>3</sup>江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

**摘要** 采用激光熔覆技术在 GCr15 轴承钢基体上制备了钴基合金涂层, 对涂层进行了微观组织、显微硬度以及不同载荷下的干摩擦磨损试验研究。结果表明: 从熔覆层底部至顶部显微组织分别以平面晶、柱状晶、树枝晶和等轴晶形态分布; 由于合金元素的固溶强化、碳化物硬质相的弥散强化与显微组织的细晶强化, 涂层的平均显微硬度较 GCr15 轴承钢提高约 1.36 倍; 随外加载荷的增加, 激光熔覆层的平均摩擦系数呈下降趋势, 从 0.342 降至 0.261, 且波动幅度逐步减小, 而磨损率逐渐增大至  $27.93 \times 10^{-2} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ , 不同载荷下的涂层呈现不同磨损机制, 在 150 N 的载荷下, 涂层以磨粒磨损和轻微氧化磨损为主, 随着载荷增加到 300 N 时, 涂层以氧化磨损和粘着磨损为主, 当载荷达到 450 N 时, 由于形成了稳定氧化釉质层与加工硬化层, 涂层的磨损形式以微切削和强塑性变形为主, 磨损表面光滑平整。

**关键词** 激光技术; 激光熔覆; 钴基合金涂层; 载荷; 摩擦磨损; 磨损机制

中图分类号 TG146

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0714008

## Tribological Properties of Laser Cladding Co-Based Alloy Coating Under Different Loads

Xu Jiale<sup>1\*</sup>, Tan Wensheng<sup>1</sup>, Hu Zengrong<sup>2</sup>, Wang Songtao<sup>3</sup>, Zhou Jianzhong<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Intelligent Equipment, Changzhou College of Information Technology, Changzhou, Jiangsu 213164, China;

<sup>2</sup>School of Rail Transportation, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215131, China;

<sup>3</sup>School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

**Abstract** Laser cladding technology was used to prepare a Co-based alloy coating on a GCr15 bearing steel substrate. The microstructure, microhardness, and dry friction of the coating, and wear experiments were performed using various loads. The results show that the microstructure is in the form of plane, columnar, dendrite, and equiaxed crystals from the bottom to the top of the cladding layer. This is due to the solid solution strengthening of alloy elements, dispersion strengthening of carbide hard phase, and fine grain strengthening of microstructure, and the average microhardness of the coating is approximately 1.36 times higher than that of GCr15 bearing steel.

收稿日期: 2021-05-12; 修回日期: 2021-06-25; 录用日期: 2021-06-30

基金项目: 常州市科技计划项目(CJ20210034); 江苏省高校自然科学研究面上项目(20KJB460016)、江苏省高职院校青年教师企业实践培训资助项目(2020QYSJ129)、常州信息职业技术学院校级科研课题资助项目(CXKZ201906Y)、常州信息职业技术学院 2020 年度校级科研平台项目(KYPT202003Z)

通信作者: \*xujiale1989@sina.com

With the increase of external load, the average friction coefficient of the laser cladding layer is increased, the friction coefficient decreases from 0.342 to 0.261, and the fluctuation amplitude decreases gradually, while the wear rate increases to  $27.93 \times 10^{-2} \text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ . The wear mechanism of the coating varies with the load. The coating wears primarily due to abrasive wear and minor oxidation wear under a 150 N load. When the load increases to 300 N, the coating primarily wears due to oxidation and adhesive wear. For a 450 N load, the worn form of the coating is primarily due to microcutting and strong plastic deformation, with a smooth and flattening wear surface due to the formation of stable oxide enamel and work hardening layers.

**Key words** laser technique; laser cladding; Co-based alloy coating; loads; friction and wear; wear mechanism

## 1 引言

磨损是机械装备中的零部件在服役过程中的主要失效形式之一,随着服役工况的苛刻化,零部件材料的磨损日益严重,相较于整体抗磨材料的制备,对零部件表面进行改性是提高耐磨性能的有效途径<sup>[1]</sup>。激光熔覆技术<sup>[2-4]</sup>是一种先进材料表面改性工艺,其通过高能激光束使输送的合金粉末与基材表面急速熔化并快速冷却,从而使低性能材料表面获得组织细化、稀释率低且与基材间呈良好冶金结合的高性能涂层。通过激光熔覆技术可显著提高金属基材表面的耐磨抗蚀等性能,因此激光熔覆技术已成为材料表面强化的一种有效方法,在航空航天、冶金化工、船舶制造等领域得到了广泛应用<sup>[5-6]</sup>。

相较于 Fe 基和 Ni 基合金粉末,Co 基合金呈现出更加优异的综合力学性能<sup>[7]</sup>。近年来随着材料和涂层制备技术的不断发展,Co 基涂层已在服役于高温腐蚀或与磨损并存环境的零部件表面强化中得到广泛应用。孟庆武等<sup>[8]</sup>在镍基合金表面激光熔覆了钴基合金涂层,并研究了其耐磨性能,证明了钴基合金涂层相较于基体具有更小的摩擦系数、更低的磨损量,表现出更好的耐磨性能。王涛等<sup>[9]</sup>在蠕墨铸铁表面利用激光熔覆技术制备了没有夹渣与孔隙且与基体呈良好冶金结合的钴基熔覆涂层,研究发现钴基合金涂层可以大幅度提高基体的硬度和耐磨性能。余廷等<sup>[10]</sup>研究了激光熔覆 Stellite 6 钴基合金涂层的高温摩擦磨损行为,发现由于摩擦表面能形成氧化层,涂层的高温磨损量低于常温磨损量,且由于致密的釉质层在 700 °C 以上会迅速形成,因此 Stellite 6 钴基合金涂层的最高工作温度在 700~800 °C 之间。邵延凡等<sup>[11]</sup>在双相不锈钢表面激光熔覆了钴基合金涂层,研究发现熔覆层的抗磨粒磨损性能较双相不锈钢基体提高 3 倍左右。Liu 等<sup>[12]</sup>探究了高速列车制动盘激光熔覆 Co06 涂层的高温磨

损性能,发现相较于基体,Co06 熔覆层表现出更加优异的耐磨性能,并且随着温度的升高磨损量逐渐降低。综上所述,钴基合金涂层在常温与高温下均呈现较好的耐磨性能,然而,材料的摩擦磨损是一个系统行为,影响磨损行为的因素众多,如材料的组织、硬度以及环境温度、外加载荷等,其中外加载荷对干摩擦副的表现行为影响更加显著<sup>[13]</sup>。因此,本研究采用激光熔覆工艺制备了钴基合金涂层,重点探讨了涂层在不同载荷条件下的干摩擦磨损行为。

## 2 试验材料及方法

基体材料为尺寸 40 mm×40 mm×5 mm 的 GCr15 轴承钢块体,化学成分(质量分数):C(1.02%),Si(0.25%),Mn(0.35%),Cr(1.47%),Mo(0.02%),S(0.006%),P(0.013%),Fe(余量)。熔覆前用 600# 金相砂纸打磨,并在丙酮中进行超声波清洗,吹干待用。激光熔覆采用的钴基合金粉末扫描电镜(SEM)形貌如图 1 所示,球形颗粒直径为 40~100 μm,粉末的化学成分(质量分数):C(1.58%),Cr(30.35%),B(0.1%),Si(1.1%),Ni(3%),Mo(2.0%),W(6.0%),Fe(2.1%),Co(余量)。

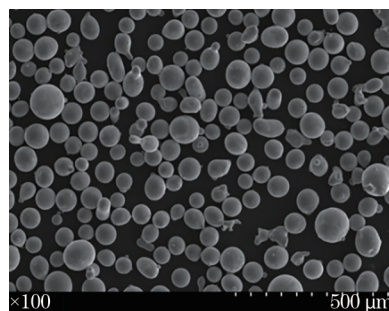


图 1 钴基合金粉末 SEM 图片

Fig. 1 SEM image of Co-based alloy powder

激光熔覆试验采用 IPG YLS-2000 光纤激光器,激光波长为 1070 nm,采用较优的工艺参数:激光功率为 1900 W,扫描速率为 500 mm/min,送粉率为 15 g/min,光斑直径为 3 mm,搭接率为 30%,保



护气体(氩气)流量为 15 L/min,熔覆涂层的宏观形貌如图 2 所示。



图 2 钴基熔覆涂层的宏观表面形貌  
Fig. 2 Macroscopic surface morphology of Co-based cladding layer

单道激光熔覆试验后,沿横截面将试样切开,将截面打磨抛光并用王水腐蚀 60 s 后,采用光学显微镜对熔覆层组织进行观察与分析。采用 HV-1000 型显微硬度计沿熔覆层的最大熔池深度方向由熔覆层至基体每隔 100  $\mu\text{m}$  打一个测量点,加载载荷为 200 g,保载时间为 15 s。为减小测量误差,每个压痕在同一水平线上打 3 次,取其算术平均值作为最终的硬度值。将多道搭接制备好涂层的试样通过线切割加工成尺寸为 15 mm $\times$ 15 mm $\times$

5 mm 的块体进行摩擦磨损试验,在试验之前使用 200#~2000# 金相砂纸和金刚石研磨膏依次对其表面进行打磨,最终使磨件表面平均粗糙度为 0.5  $\mu\text{m}$  左右,然后用丙酮超声清洗,吹干待用。采用美国 MFT-5000 型摩擦磨损试验机在室温环境下进行摩擦试验,使用的磨球材质为氮化硅陶瓷球( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ),其直径为 6.35 mm。试验时,先将试样固定在试验机工作台上,并将氮化硅对磨球固定在销中,保证始终以同一接触点进行往复运动形式的摩擦磨损试验,法向加载载荷分别为 150 N、300 N 和 450 N,往复行程为 5 mm,速度设定为 10 mm/s,试验时间为 30 min。摩擦系数由系统直接给出。磨损试验前后,将每个样块经超声清洗并吹干后,用精度为 0.001 mg 的电子天平称重,从而计算磨损量,并由公式  $W_s = \Delta m / \rho L$  (其中  $\Delta m$  为磨损失重量, $\rho$  为涂层的密度, $L$  为滑动距离<sup>[14]</sup>) 计算不同载荷下的涂层磨损率。磨损试验完成后,使用扫描电子显微镜观察样品磨损表面用于探究磨损机制。

### 3 结果与分析

#### 3.1 显微组织

图 3 为激光熔覆钴基涂层的横截面形貌与金相

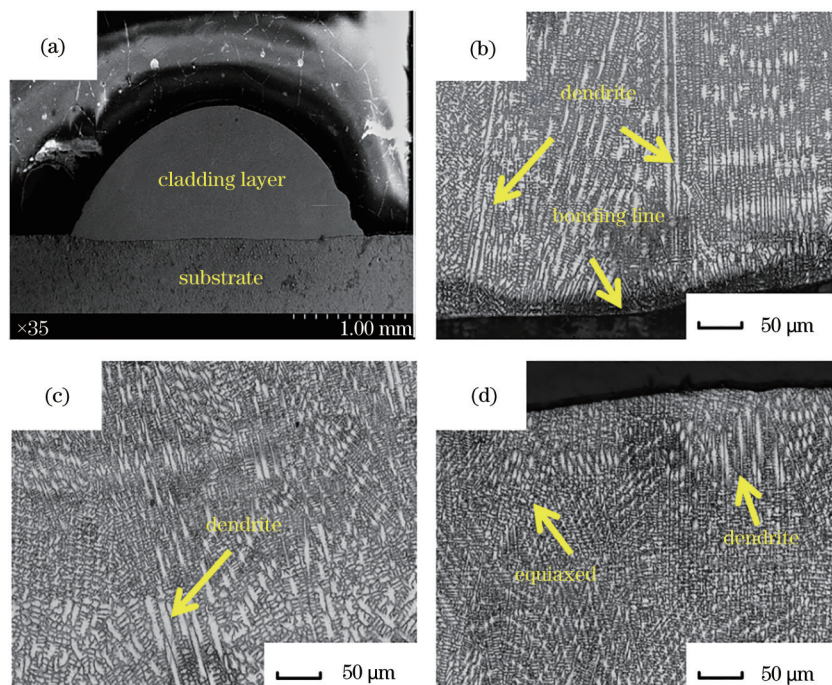


图 3 激光熔覆层横截面的微观组织。(a)熔覆层截面宏观形貌;(b)底部;(c)中部;(d)顶部  
Fig. 3 Cross-section microstructure of laser cladding layer. (a) Cross-section macro morphology of cladding layer; (b) bottom region; (c) middle region; (d) top region

组织,由图 3(a)可以看出涂层没有产生裂纹、气孔等缺陷。由图 3(b)~(d)可见,熔覆层不同区域的显微组织存在差异。由凝固组织结晶参数  $G/R$  (温度梯度 / 凝固速率)<sup>[15]</sup>可知,在涂层与基体结合界面处温度梯度  $G$  最大,凝固速率  $R$  最小,则  $G/R$  最大,因此在紧靠基体结合区凝固组织形态以低速平面生长,由图 3(b)可见,熔池底部形成约  $10\ \mu\text{m}$  厚的熔合线,表明涂层与基体之间已经形成了良好的冶金结合。随着熔池凝固的不断推进,凝固速率  $R$  增大,温度梯度  $G$  逐渐减小,则  $G/R$  值变小,熔池内部区域传热速度变慢,成分过冷度增大,较大的成分过冷使柱状晶凝固前沿失稳,并在晶粒之间的相互制约作用下形成具有不同方向性的树枝晶,如图 3(c)所示。当凝固至顶部时,熔池由于自身的热辐射及空气的流动,散热作用增强,过冷度进一步增大,且在熔池内会形成大量的晶核,因而会在熔覆层顶部形成大量细小的等轴晶组织,如图 3(d)所示。

### 3.2 显微硬度

图 4 为激光熔覆层沿截面方向的硬度分布图。由图 4(a)可见,熔覆层从表面向基材方向上的硬度

呈阶梯状分布,涂层区域的显微硬度为  $401\sim 442\ \text{HV}$ ,呈现一定的波动,这主要与熔覆层由顶部至底部存在的梯度变化显微组织有关,在晶粒细小和硬质相偏聚处硬度值较高,而在组织粗大及硬质相贫化处硬度值较低,表明涂层组织与成分具有一定的分散性,涂层的平均显微硬度值为  $423\ \text{HV}$ ,约为 GCr15 轴承钢试样 ( $311\ \text{HV}$ ) 的 1.36 倍,在与基材结合处硬度发生陡降,然后逐渐降至基材硬度值,说明基材对熔覆层具有一定的稀释作用,呈现较好的冶金结合。由图 4(b)的 X 射线能谱分析 (EDS) 可知,枝晶与枝晶间均含有 Co、Cr、W、Fe、C、Si 等元素。钴基涂层呈现的高硬度主要由于在熔覆过程中合金元素 Cr、W 和 Fe 等会溶于 Co 与 Cr 所形成的固溶体中,从而起到固溶强化作用;同时涂层中的一部分 Cr 会与 C、W 等元素反应形成高硬度的碳化物,另外这些碳化物会与 Co 基体形成共晶体,呈骨架状或网状分布于 Co 基体中,起到骨架强化作用;并且激光熔覆即热骤冷的凝固特点可获得晶粒细小的显微组织,起到细晶强化作用<sup>[16]</sup>。因此,上述多种强化共同作用使得钴基涂层呈现较高的显微硬度。

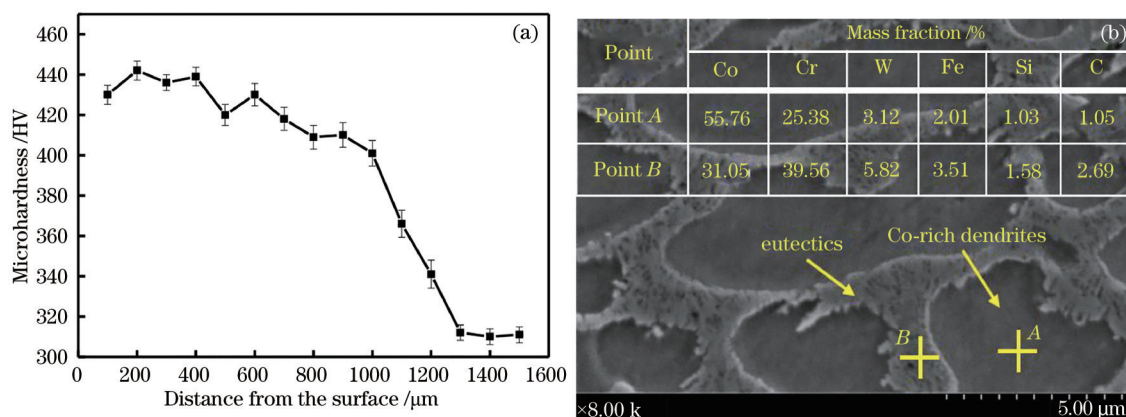


图 4 激光熔覆层沿截面方向的硬度分布

Fig. 4 Microhardness distribution of cladding layer along the section direction

### 3.3 耐磨性能

图 5 为激光熔覆钴基涂层在  $150\ \text{N}$ 、 $300\ \text{N}$  和  $450\ \text{N}$  不同载荷下进行往复运动得到的摩擦系数和滑动时间的关系曲线。由图 5 可知,在不同载荷下摩擦系数曲线均经历了初始磨合和稳定磨损两个阶段。在前  $200\ \text{s}$  内,试样与对磨球表面硬的微凸体相互接触,实际接触面积小,接触应力大,微凸体碰撞断裂后将产生大量的磨粒,硬的磨粒会对摩擦表面进行犁削,增加表面的粗糙度,进而使摩擦系数

增大,因此所有试样都呈现出较短且不稳定的磨合阶段<sup>[17]</sup>;经过一段时间的磨合后,试样表面的微凸体被逐渐磨平,摩擦副间的接触状态得以改善而进入稳定磨损阶段,经观察发现,不同载荷作用下的摩擦系数在稳定阶段的曲线波动幅度不同,在较低载荷下随着时间的延长摩擦系数曲线波动最大 ( $150\ \text{N}$ ),而随着载荷增加到  $450\ \text{N}$ ,此时的摩擦系数曲线波动幅度最小,不同载荷下稳定阶段的平均摩擦系数分别为  $0.342$  ( $150\ \text{N}$ )、 $0.287$  ( $300\ \text{N}$ ) 和



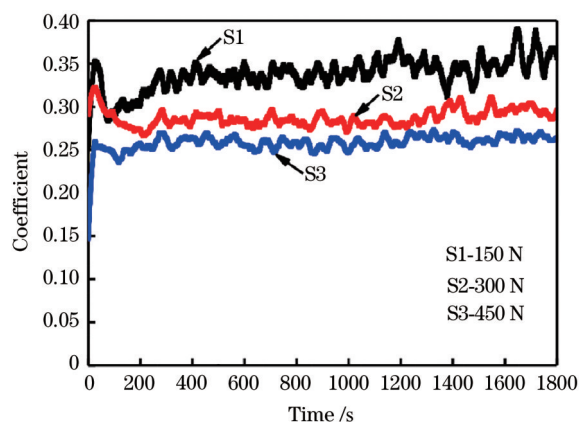


图 5 不同载荷下钴基涂层的摩擦系数  
Fig. 5 Friction coefficient of Co-based coating under different loads

0.261 (450 N), 450 N 载荷下的摩擦系数分别较 300 N 和 150 N 减小了约 23.7% 和 9.1%, 表明摩擦系数随着载荷的增加逐渐降低。

图 6 为在相同时间内不同载荷下的钴基涂层磨损率变化, 可以看出随着载荷的增大磨损率也相应增加, 载荷在 450 N 时达到最大, 为  $27.93 \times 10^{-2} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。相较于 300 N 和 150 N 载荷下分别增加了 9.2% 和 42.1%。可见涂层的磨损率随着载荷的增加而增大, 说明随着接触载荷的增大, 涂层所承受压应力增加, 实际接触面积提高, 磨损加剧, 磨损量增大, 但进一步分析磨损率的变化可以发现, 钴基涂层的磨损率随载荷的增加, 其增加的幅度有所减小, 磨损率的变化并非与载荷呈线性增长的趋势。

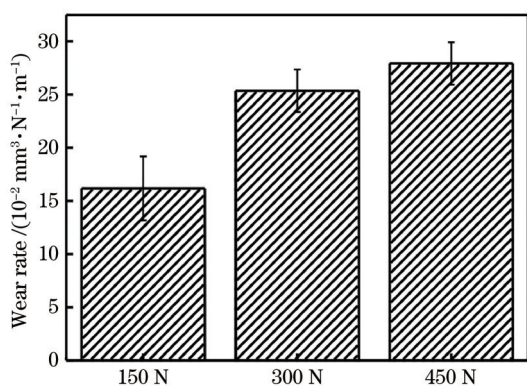


图 6 不同载荷下的钴基涂层磨损率  
Fig. 6 Wear rate of Co-based coating under different loads

图 7 所示为不同载荷下的钴基涂层磨损表面形貌。当载荷为 150 N 时, 可以观察到, 在磨痕表面上有许多平行于滑动方向的沟槽和严重的剥层与大量磨屑 [图 7(a)], 此时摩擦主要表现为摩擦副表面

微凸体之间持续碰撞造成的脱落微颗粒对摩擦表面的三体磨粒磨损, 以及高硬度磨球上的凸峰在法向载荷的作用下碾压摩擦表面, 在往复滑动过程中, 对试样表面进行切削 [18], 产生大量的犁沟磨痕; 同时由于循环应力的作用, 易在涂层表面产生疲劳磨损, 促使表面的萌生裂纹扩展引起块状材料剥落, 产生大量未能及时排出的磨屑; 并且在磨损过程中易产生大量摩擦热, 瞬时温度较高, 如 EDS 所示, 在磨损区 O 元素含量较高, 易在磨损表面形成氧化膜, 但形成的氧化膜易被磨屑破坏, 形成大量的氧化磨屑, 磨损机制主要以磨粒磨损和轻微的氧化磨损为主, 由于磨损机制主要是由大量的凹凸磨痕与残留氧化磨屑造成的, 表面比较粗糙, 因此摩擦系数较高且波动较大。

随着载荷增加到 300 N, 如图 7(b) 所示, 表面硬的微凸体在相对滑动过程中所受压力增加, 极易产生塑性变形被剪切掉, 此时, 摩擦副的接触面积增大, 在钴基涂层磨损表面出现非常明显的塑性变形, 表面较为光滑, 易产生自润滑作用; 同时由于摩擦热的产生会使涂层发生不同程度的氧化, 如 EDS 所示, 在磨损表面依然存在含量较高的 O 元素, 在较大载荷作用下摩擦表面形成一层氧化薄膜 [19], 耐磨性能也会得到相应的提高, 因此呈现出较低的摩擦系数, 但随着磨损的不断进行, 氧化膜产生疲劳脱落, 形成氧化物堆积屑, 在摩擦副的反复碾压之下, 最终形成大量的片状磨屑, 使得摩擦表面出现严重氧化磨损。

在 450 N 载荷下, 如图 7(c) 所示, 由于载荷进一步提高, 摩擦副的接触面积进一步增大, 磨损表面因塑性变形会产生明显的加工硬化层 [20], 硬化层改变了摩擦副的相互作用, 使摩擦表面呈现更高的承载能力以及耐磨性能, 减少了与对磨件接触时相对较软一方钴基涂层的变形。同时, 随着载荷的增大, 摩擦热与新鲜表面接触的面积增加, 增大了摩擦表面与氧结合的概率, 导致氧化堆积物增加, 但是较大的载荷会使原本附着在磨痕表面的片状磨屑挤压进入沟槽内, 让压扁的犁皱沿着摩擦力方向扩展, 形成一层新的表面光滑薄层, 由 EDS 分析可知, 摩擦面主要为 O 与 Co 和 Cr 的氧化产物, 由文献 [10] 可知, Cr 和 Co 相结合的氧化产物易在高温下烧结形成釉质层, 釉质层的形成可使磨损率大幅度降低。因而, 在磨损表面并未出现大量的氧化磨屑, 磨损表面反而更加的光滑。

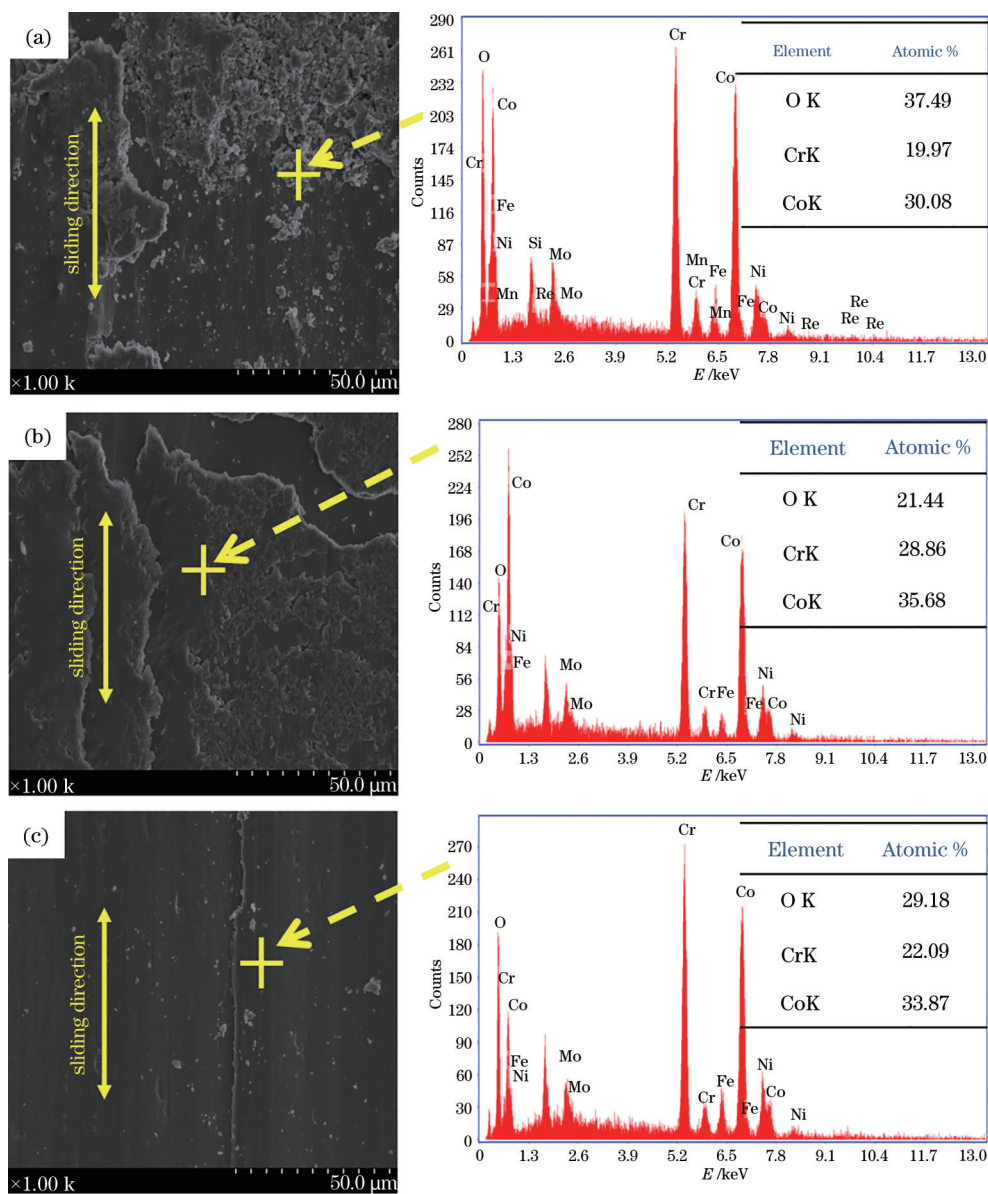


图7 不同载荷下钴基合金涂层磨损表面形貌及能谱分析。(a) 150 N; (b) 300 N; (c) 450 N

Fig.7 Morphologies and EDS element analysis of worn surfaces of Co-based alloy coating under different loads.

(a) 150 N; (b) 300 N; (c) 450 N

## 4 讨 论

从熔覆层的显微组织以及显微硬度试验结果可以看出,近表层的细小等轴晶组织可以有效提高涂层的显微硬度,由Hall-Petch公式可知,显微硬度与晶粒尺寸成反比,晶粒尺寸越小,材料的显微硬度越高,高硬度的涂层可以有效提高材料表面抗犁削的性能和抗磨粒磨损的能力<sup>[21]</sup>。在较低载荷下,涂层本身具有的较高硬度使得摩擦表面发生塑性变形的趋势较小,因此不易形成较厚的加工硬化层,且产生的摩擦热虽能使O与Co、Cr等元素形成氧化产物,但是氧化物不稳定且和涂层表面的结合

强度不高,极易剥落形成氧化磨屑;随着载荷提高至300 N,较大的压应力会进一步促使较深加工硬化层的形成,进而提高涂层表面的承载能力,载荷的增加进一步提高摩擦热的温度,使得氧化物增多,且在较大压应力的作用下会粘着在磨损表面,在往复的滑动过程中易发生粘着磨损;当载荷达到450 N时,涂层表面的加工硬化层厚度增加且稳定,摩擦热温度更高,在高载荷的作用下,硬化层近表面也会产生局部的塑性变形,Cr和Co相结合的氧化产物会在磨损表面烧结形成釉质层。

综上所述,钴基涂层在干摩擦过程中,随着载荷的增大,磨损面间硬的微凸体发生弹塑性变形程

度增加,增大了实际的接触面积,相应减小了接触应力,并且由于摩擦热产生的瞬时高温易使氧化磨屑能够更快地在涂层表面形成一定区域的釉质层,从而导致摩擦系数下降且波动减小;与此同时由于在磨损过程中,对磨球对涂层表面的往复挤压易于在近表层形成加工硬化层,载荷越大,材料发生加工硬化的程度越高,涂层的承载能力增强,使得摩擦系数有效降低,磨损表面越加光滑。

## 5 结 论

钴基熔覆层不同区域的显微组织存在差异,在熔覆层底部显微组织以平面晶和柱状晶为主,随着熔池凝固的不断推进,显微组织由柱状晶转为细小树枝晶,直至熔覆层顶部以等轴晶组织形态为主。

钴基熔覆层的平均显微硬度值为 423 HV,较 GCr15 轴承钢提高约 1.36 倍,钴基熔覆层呈现的高硬度主要源于合金元素的固溶强化、碳化物硬质相的弥散强化与显微组织的细晶强化。

钴基熔覆层的摩擦系数随着载荷的增大而逐渐减小,磨损率随着载荷的增加而逐步增大。不同载荷下的涂层表现出不同的磨损形式,在 150 N 载荷下,涂层主要以磨粒磨损和轻微的氧化磨损为主,随着载荷提高至 300 N,涂层的磨损形式转变为以氧化磨损和粘着磨损为主,当载荷继续增加到 450 N 时,磨损表面因塑性变形产生的加工硬化层与稳定氧化釉质层的相互作用,使摩擦表面呈现更高的承载能力以及耐磨性能,因此磨损表面越加光滑,未见明显的磨屑和犁沟。

## 参 考 文 献

- [1] Ananth M P, Ramesh R. Tribological improvement of titanium alloy surfaces through texturing and TiAlN coating[J]. *Surface Engineering*, 2014, 30(10): 758-762.
- [2] Wang Y F, Zhao X Y, Lu W J, et al. Microstructure and properties of high speed laser cladding stainless steel coating on sucker rod coupling surfaces[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(6): 0602114.  
王彦芳, 赵晓宇, 陆文俊, 等. 抽油杆接箍表面高速激光熔覆不锈钢涂层的组织与性能[J]. *中国激光*, 2021, 48(6): 0602114.
- [3] Bai Y, Wang Z H, Zuo J J, et al. Fe-based composite coating prepared by laser cladding and its heat and corrosion resistance[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(10): 1002001.  
白杨, 王振华, 左娟娟, 等. 激光熔覆制备铁基复合涂层及其耐热耐蚀性能[J]. *中国激光*, 2020, 47(10): 1002001.
- [4] Wang H, Wu M P, Lu P P, et al. Effect of laser power on the mechanical properties of the cobalt-based/GO composite coatings[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(9): 091405.  
王航, 武美萍, 陆佩佩, 等. 激光功率对钴基/GO 复合熔覆层力学性能的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(9): 091405.
- [5] Birger E M, Moskvitin G V, Polyakov A N, et al. Industrial laser cladding: current state and future[J]. *Welding International*, 2011, 25(3): 234-243.
- [6] Brandt M, Sun S, Alam N, et al. Laser cladding repair of turbine blades in power plants: from research to commercialisation[J]. *International Heat Treatment and Surface Engineering*, 2009, 3(3): 105-114.
- [7] Zhao J, Gao Q W, Wang H Q, et al. Microstructure and mechanical properties of Co-based alloy coatings fabricated by laser cladding and plasma arc spray welding[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 785: 846-854.
- [8] Meng Q W, Geng L, Zhu L Q, et al. Wear resistance of laser clad Co-based alloy coating on Ni-based alloy[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2009, 34(8): 22-24.  
孟庆武, 耿林, 祝立群, 等. 镍基合金表面激光熔覆钴基合金涂层的耐磨性能[J]. *金属热处理*, 2009, 34(8): 22-24.
- [9] Wang T, Yao Y C, Wang N, et al. Microstructure and wear resistance of Co-based alloy coating fabricated by laser cladding[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2017, 42(5): 84-89.  
王涛, 姚有才, 王宁, 等. 激光熔覆钴基合金涂层的组织与耐磨性[J]. *金属热处理*, 2017, 42(5): 84-89.
- [10] Yu T, Zhang Z X, Rao X X, et al. High-temperature wear behavior of laser-cladding stellite 6 coating[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(14): 141403.  
余廷, 张子翔, 饶锡新, 等. 激光熔覆 Stellite 6 涂层的高温摩擦行为[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(14): 141403.
- [11] Shao Y F, Wang Z H, Li X, et al. Microstructure and properties of laser cladding Co-based alloys on duplex stainless steel[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(4): 299-305.  
邵延凡, 王泽华, 李潇, 等. 双相不锈钢表面激光熔



- 覆钴基合金组织和性能研究[J]. 表面技术, 2020, 49(4): 299-305.
- [12] Liu Y, Wu Y, Ma Y M, et al. High temperature wear performance of laser cladding Co06 coating on high-speed train brake disc[J]. Applied Surface Science, 2019, 481: 761-766.
- [13] Wang Z X, He Z Y, Wang Y Q, et al. Study on sliding dry friction properties of TiNi/Ti<sub>2</sub>Ni modified layer on TC4 alloy under different loads[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(7): 1186-1190.
- 王振霞, 贺志勇, 王英芹, 等. TC4 合金表面 TiNi/Ti<sub>2</sub>Ni 改性层不同载荷滑动干摩擦性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(7): 1186-1190.
- [14] Wang L, Ding H Y, Liu A H, et al. Wear performance of TC4 alloys in different tribo-systems [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(9): 2449-2454.
- 王兰, 丁红燕, 刘爱辉, 等. TC4 合金在不同摩擦体系中磨损性能的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(9): 2449-2454.
- [15] Tian J Y, Xu P, Chen J H, et al. Microstructure and phase transformation behaviour of a Fe/Mn/Si/Cr/Ni alloy coating by laser cladding[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 122: 97-104.
- [16] Frenk A, Kurz W. Microstructural effects on the sliding wear resistance of a cobalt-based alloy[J]. Wear, 1994, 174(1/2): 81-91.
- [17] Fu H, Zhu W, Zheng S W, et al. Effects of load on friction and wear properties of C<sub>f</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>f</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.
- [18] 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.
- [19] Ma H R, Li J W, Jiao J, et al. Wear resistance of Fe-based amorphous coatings prepared by AC-HVAF and HVOF[J]. Materials Science and Technology, 2017, 33(1): 65-71.
- [20] Zhang J, Zhang X B, Liu Q H, et al. Effects of load on dry sliding wear behavior of Mg-Gd-Zn-Zr alloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2017, 33(7): 645-651.
- [21] Duan H F, Luo K Y, Lu J Z. Friction and wear properties of H62 brass subjected to laser shock peening [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(10): 1014002.
- 段海峰, 罗开玉, 鲁金忠. 激光冲击强化 H62 黄铜摩擦磨损性能研究 [J]. 光学学报, 2018, 38(10): 1014002.