

车用不锈钢表面激光定向能量沉积WC/Co基复合强化涂层研究

李政昂, 胡洪铭

辽宁工程技术大学机械工程学院 辽宁阜新 123000

摘要: 为提高车用304不锈钢表面的耐磨性和使用寿命, 采用激光定向能量沉积技术在其表面制备了WC/Co基复合强化涂层, 系统研究了不同WC颗粒含量对涂层组织结构及性能的影响。通过光学显微镜观察、X射线衍射分析、硬度检测及摩擦磨损试验等手段, 分析了涂层的微观组织演变、物相组成、硬度变化及耐磨性能。结果表明: 涂层主要由fcc-Co、Co₆W₆C、Fe₆W₆C及W₂C组成, 随着WC颗粒含量的增加, 涂层中硬质相含量提升, 晶粒细化现象明显。涂层的宏观与微观硬度随WC含量升高而显著增强, 当WC颗粒含量为40%时, 洛氏和维氏硬度分别达到86.4HRA和1123.7HV0.5。同时, 涂层的磨损速率随WC颗粒含量增加而大幅降低, 耐磨性明显改善, WC颗粒通过第二相强化、细晶强化和弥散强化机制, 有效提升了涂层的综合力学性能。本研究为车用不锈钢零部件表面改性强化提供了理论依据和技术参考。

关键词: 激光定向能量沉积; 车用不锈钢; WC/Co复合涂层; 微观组织; 耐磨性

Research on laser directed energy deposition of WC/Co-based strengthened coating on the surface of automotive stainless steel

LI Zhengang, HU Hongming

School of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China

Abstract: To enhance the wear resistance and service life of automotive 304 stainless steel surfaces, WC/Co-based composite reinforced coatings were fabricated via laser directed energy deposition. The effects of different WC particle contents on the microstructure and properties of the coatings were systematically investigated. Through optical microscopy observation, X-ray diffraction analysis, hardness testing, and friction and wear experiments, the evolution of the microstructure, phase composition, hardness variations, and wear resistance of the coatings were comprehensively analyzed. The results show that the coatings mainly consist of fcc-Co, Co₆W₆C, Fe₆W₆C, and W₂C phases. With the increase of WC particle content, the proportion of hard phases rises and significant grain refinement occurs. Both macro- and micro-hardness of the coatings increase markedly with higher WC content, reaching 86.4HRA and 1123.7HV0.5 when the WC content is 40%. Meanwhile, the wear rate of the coatings decreases significantly with the addition of WC particles, and the wear resistance is substantially improved. The enhancement

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (2023M731481)。

第一作者: 李政昂, 主要从事先进制造系统与技术研究, E-mail: 905034306@qq.com。

in mechanical properties is attributed to second-phase strengthening, grain refinement strengthening, and dispersion strengthening mechanisms induced by WC particles. This study provides theoretical guidance and technical support for the surface modification and strengthening of automotive stainless steel components.

Keywords: laser directed energy deposition; automotive stainless steel; WC/Co composite coating; microstructure; wear resistance

1 序言

随着汽车工业的不断发展,车辆对零部件性能的要求日益提高,尤其是在高强度、高耐磨和耐腐蚀性能方面提出了更为严苛的标准。车用不锈钢因其优良的耐蚀性和较高的强度,被广泛应用于汽车排气系统、燃油系统及结构部件等多个关键部位。然而,传统不锈钢材料在摩擦和强应力等复杂工况下仍存在耐磨性不足的问题,严重影响了其服役寿命和整体性能表现。因此,提升不锈钢表面性能,尤其是耐磨和抗疲劳能力,成为当前材料工程领域的重要研究方向之一^[1, 2]。

激光定向能量沉积技术作为一种高效、绿色、精密的表面改性方法,近年来在材料表面工程中得到了广泛应用^[3, 4]。该技术通过高能激光束瞬时熔化预置在基体表面的合金粉末材料,并与基体表面形成冶金结合,从而获得一层成分设计合理、组织致密及性能优异的熔覆层。相比传统涂覆或热喷涂工艺,激光定向能量沉积具有稀释率低、涂层结合强度高、热影响区小等显著优势^[5],特别适用于要求高耐磨性和耐蚀性的车用材料表面强化处理。张连松等^[6]和杨金玉等^[7]利用激光定向能量沉积工艺在车用304不锈钢表面制备了CoCrFeNi高熵合金涂层,并研究了NbC颗粒对涂层组织及力学性能的影响,发现NbC的引入可以提升涂层的耐磨性。

在众多熔覆材料中,WC/Co基复合材料因其高硬度、高耐磨性以及良好的热稳定性而备受关注。WC硬质相能够显著提高涂层的抗磨粒磨损能力,而Co基结合相则提供良好的韧性与抗裂性能,从而实现耐磨与韧性的兼顾^[8, 9]。WANG等^[10]通过激光定向能量沉积技术在AISI H13热作模具钢上制备了WC/Co复合材料涂层,研究发现WC-12Co可以降低磨损痕迹宽度和深度,减少疲劳裂纹。肖居鹏等^[11]研究了不同WC添加量对WC/Co06复合涂层耐磨性、耐蚀性的影响,发现20%WC含量(质量分数,下同)

的涂层具有最优异的耐磨性、耐蚀性,可显著提升液压阻尼器活塞杆的耐用性。WANG等^[12]采用激光定向能量沉积制备了316L/WC-12Co复合涂层,发现涂层与基体结合牢固,WC-12Co含量增加,会致使底部胞状结构减少,当WC含量为50%时,WC-12Co涂层的耐磨性最佳。因此,将WC/Co基材料应用于不锈钢表面激光定向能量沉积,不仅可以有效改善基材的表面力学性能,还可显著延长装备关键零部件的使用寿命,提高其在不同服役环境下的可靠性和安全性。

本文围绕车用304不锈钢表面激光定向能量沉积WC/Co基强化涂层开展系统性研究,旨在深入研究WC陶瓷颗粒添加含量对WC/Co复合涂层组织结构与性能的影响规律,通过显微组织观察、物相成分分析、硬度检测及摩擦磨损试验手段,从微观结构与宏观性能两方面进行综合分析,为激光定向能量沉积技术在汽车制造领域的推广应用提供理论依据和工艺参考。

2 试验材料及方法

2.1 试验材料

本研究选用尺寸为150mm×150mm×10mm的304不锈钢板作为基体材料,基材表面经0[#]~2000[#]砂纸逐级打磨并用丙酮清洗后待用。选用粉末粒径为45~150μm的Co基耐磨合金粉末和100~320目的WC硬质陶瓷颗粒。基于前期试验研究基础,为保证涂层的可加工性和稳定性,避免WC陶瓷颗粒含量过高而导致异质材料热物性差异加剧,从而引起涂层缺陷特征劣化,选取添加含量为0~40%的WC颗粒。将质量分数分别为10%、20%、30%及40%的WC陶瓷颗粒与Co基合金粉末置于球磨机中进行混合粉体制备,球磨机转速为60r/min,时间为4h,研磨球为φ2~φ8mm的Al₂O₃陶瓷磨球,球粉比为3:1。充分混合后,将混合粉体在100℃的烘箱中干燥2h备用。Co基合金和304不锈钢化学成分见表1,

Co基合金粉末和WC陶瓷颗粒特征及混合过程如图1所示。

表1 Co基合金和304不锈钢基体化学成分组成（质量分数）（%）

元素	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Fe	P	W	Co
Co基合金	2.50	1.20	1.00	29.50	1.00	3.00	3.00	—	12.50	余量
304不锈钢	0.03	0.75	2.00	16.55	—	9.23	余量	0.045	—	—

试验用激光定向能量沉积系统由Laserline LDM-3000激光器、KUKA KR30HA六自由度工业

机械手、南京中科煜宸RC-PGF-D2同轴送粉器和四路同轴送粉喷嘴组成。试验过程中载粉气和保护气均采用高纯氩气，气体流速分别为5L/min和10L/min。激光光斑呈圆形，直径为4mm，激光头端面至基体表面距离为40mm。根据课题组前期研究基础^[13, 14]，采用具有良好成形质量的多熔覆道变工艺间断搭接策略，选择最佳工艺参数组合为：激光功率为2100W，扫描速度为6mm/s，送粉速率为17.90g/min。激光定向能量沉积WC/Co基复合涂层制备加工过程如图2所示。

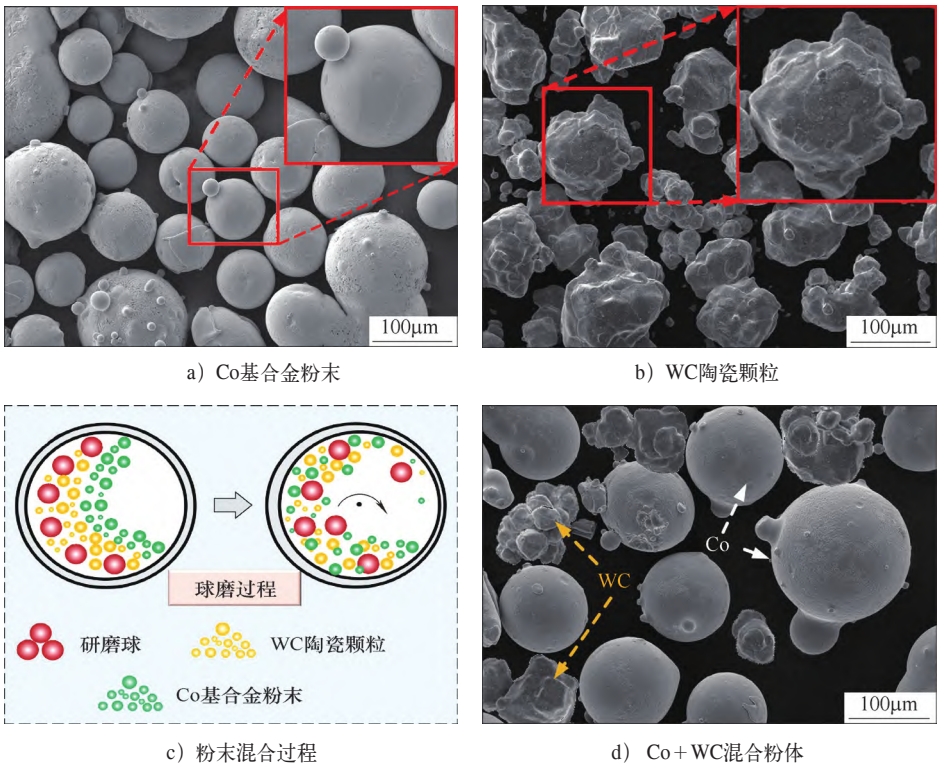


图1 Co基合金粉末和WC陶瓷颗粒SEM图及混合粉体制备过程

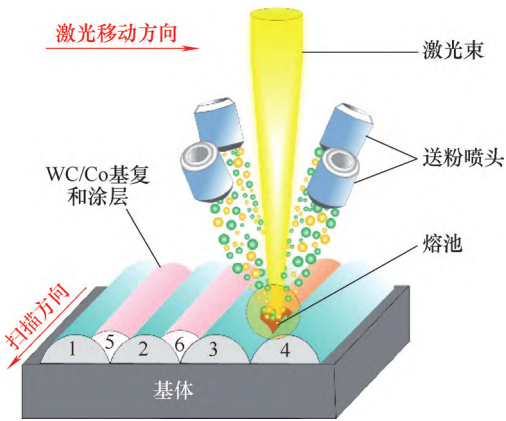


图2 激光定向能量沉积WC/Co基复合涂层制备过程

2.2 组织表征及性能检测

试件经切割、逐级研磨、抛光及腐蚀后制成检测试样，腐蚀液选用4%KMnO₄+4%KOH+100mLH₂O，清洗烘干后置于VHX-5000型光学超景深显微镜下观测WC/Co基复合涂层表面形貌特征、气孔和裂纹等。采用Bruker D8 Advance X射线衍射仪对不同WC颗粒含量的WC/Co基复合涂层的物相组成进行测定，衍射角为0°~90°，电压为30kV，电流为10mA，扫描速度为5°/min。采用HR150洛氏硬度计和MVK-H11维氏硬度计分别对WC/Co基复合涂层的宏观与微观硬度进行检测，施

加载荷分别为600N和5N,保荷时间均为10s。利用维氏硬度计分析基体到涂层的硬度变化情况,压痕间距为0.15mm,为保证检测准确性,每组维氏硬度检测的水平间隔为0.1mm,重复进行3次试验并记录平均值。采用RTEC-2816摩擦磨损试验机对WC/Co基复合涂层的耐磨性进行评估。选用Si₃N₄陶瓷球作为对磨副,施加载荷为10N,转速为120r/min,摩擦半径为3mm,摩擦试验时间为30min。根据式(1)计算涂层磨损速率为

$$W_v = \frac{V_w}{2\pi r_c \omega_r t F} \quad (1)$$

式中 W_v ——磨损速率 [$\mu\text{m}^3/(\text{N}\cdot\text{mm})$];

V_w ——涂层磨损体积 (μm^3);

r_c ——对磨副半径 (mm);

t ——试验时间 (min);

ω_r ——转盘转速 (r/min);

F ——磨损施加载荷 (N)。

3 结果与讨论

3.1 微观结构特征

图3所示为Co基涂层截面基体至涂层顶部的显微组织特征。研究表明,温度梯度(G)与凝固速率(R)之比对不同区域晶粒结构的转变起到了关

键作用。在涂层凝固初期,基体与涂层交界处存在较高的温度梯度,且凝固速率接近于零,因此 G/R 值较大,使涂层底部首先形成平面晶,并沿界面方向扩展生长。从图3a可看出,基体与涂层交界处存在一条明亮的白色熔合线,反映涂层与基体之间实现了冶金结合。从图3b、c可看出,随着凝固向熔覆层内部推进,热量逐渐积累,温度梯度逐步降低,凝固速率有所增加,导致 G/R 比值减小,晶粒形态也从平面晶过渡为胞状晶与柱状晶结构。从图3d可看出,随着 G/R 的持续下降,熔覆层中心区域形成了具有一定取向性的树枝晶。从图3e可看出,当固液界面继续上移时,由于顶部区域散热增强(如对流和辐射作用),使得 G/R 比值进一步降低,晶粒形核速率显著提高,从而在熔覆层表面形成了各向异性的细小等轴枝晶。

由于WC颗粒熔点较高且激光成形过程中冷却速率快,颗粒未能完全熔化,因此在涂层中仍保留了其原有形貌,如图4a所示。WC颗粒在涂层中以分散状态存在,呈现出不规则分布,HU等^[15]研究发现,弥散分布的大粒径陶瓷增强颗粒可以显著提高涂层的耐磨性。在快速凝固过程中,受WC颗粒钉扎效应的影响,树枝晶呈现出复杂的生长方向。同时,由于涂层顶部热量通过对流和辐射向周

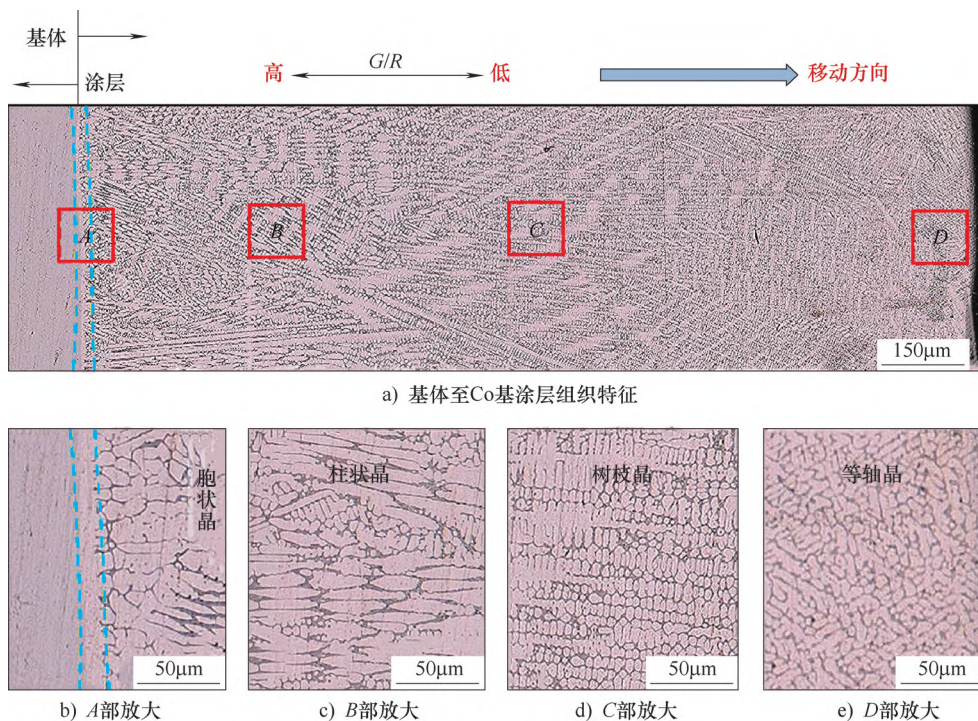


图3 Co基涂层截面显微组织特征

围环境散失,导致温度梯度达到临界水平,进一步促进了树枝晶向等轴树枝晶的转变。此外,W₂C颗粒倾向于向涂层底部聚集,主要原因在于其密度较大(15.77g/cm³),在熔池中受到重力作用及马兰戈尼对流驱动,从而发生沉降。图4b~e所示为不同WC含量的复合涂层底部(对应Co基金属涂层柱状晶区域)的显微结构特征。从图4b~e可看出,

10%WC/Co涂层底部附近的显微组织主要由胞状晶与柱状晶构成,晶体沿界面垂直生长,并逐渐向定向树枝晶过渡,这一变化归因于合金中溶质元素凝固温度的差异。随着WC颗粒含量增加,W₂C/Co涂层中的柱状晶逐渐转变为杂乱生长的树枝晶,后进一步转换为更为细小的枝晶结构,因此,添加WC颗粒具有细化晶粒的作用。

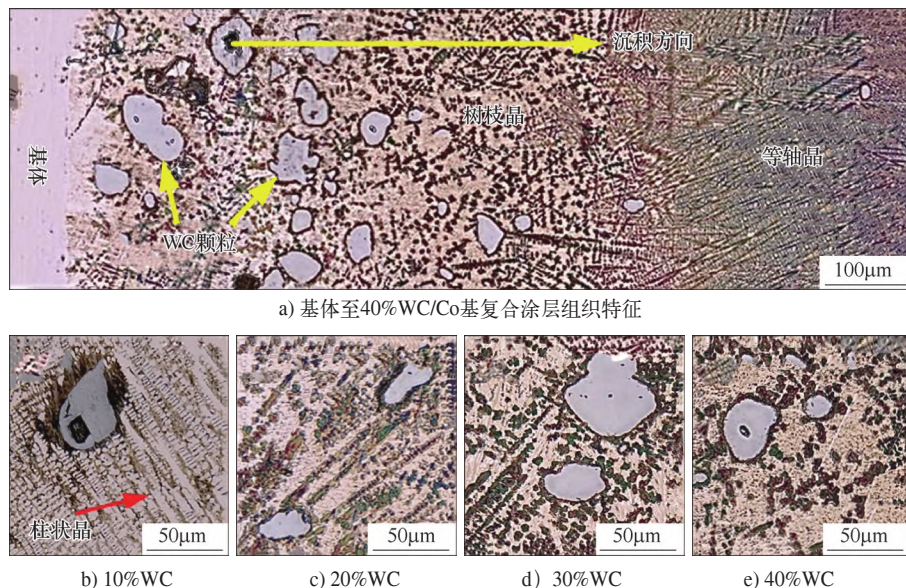


图4 WC/Co基复合涂层显微组织特征

3.2 物相组成

图5所示为不同WC含量的WC/Co基复合涂层的XRD图谱。从图5可看出,Co基金属涂层主要由面心立方结构Co(fcc-Co)及少量碳化物和氧化物相构成。本研究所用Co基金属粉末中含有能够稳定fcc-Co结构的Ni元素,加之激光定向能量沉积过程中快速加热与冷却的特性,共同抑制了fcc-Co向其他相的转变。与单一Co基金属涂层相比,W₂C陶瓷颗粒的引入促使WC/Co复合涂层中形成了新的金属碳化物相及W₂C陶瓷增强相,表明WC颗粒在熔覆过程中与Co、Fe元素发生了熔合反应,同时W和C元素在枝晶间形成了间隙固溶体,从而实现了固溶强化和弥散强化作用。不同WC含量的涂层中物相种类基本相同,但各衍射峰的强度存在差异,且随着WC颗粒含量的增加,W₂C及Fe₆W₆C的衍射峰强度逐渐增强,表明硬质相数量的增加有效提升了涂层的耐磨性能,这主要是由于WC颗粒在熔覆过程中发生部分熔解,释放出的W和C元素向熔池中扩散,导致晶格结构发生畸变,从而降低了固溶体的

稳定性,并促使形成一定量的金属间化合物^[16]。

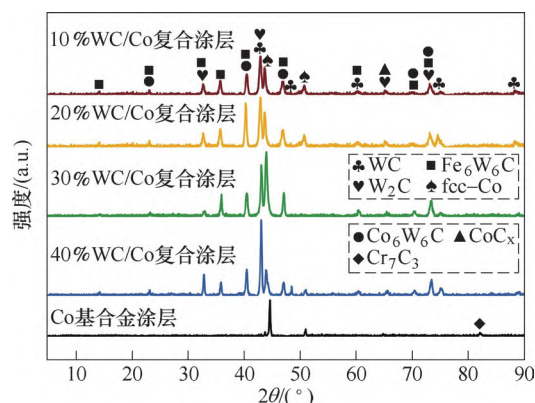


图5 各WC/Co基复合涂层XRD图谱

3.3 硬度特性

考虑到WC颗粒的尺寸特征以及陶瓷增强相的弥散强化效果,本研究采用洛氏硬度和维氏硬度检测方法分别对WC/Co复合涂层整体硬度性能和局部显微硬度变化情况进行评估。图6所示为不同WC颗粒含量WC/Co涂层的硬度特征变化情况。从图6可看出,随着WC颗粒含量由0增加至40%,涂层硬度

显著提升, 其中洛氏硬度和维氏硬度的平均峰值分别达到86.4HRA和1123.7HV0.5。从涂层截面的维氏硬度分布(见图6b)可看出, 基体到涂层硬度呈现明显的梯度变化, 二者之间形成了约150 μ m宽的熔合过渡区。WC/Co基复合涂层硬度随WC颗粒含量增加而提高的主要原因包括以下几点。

1) 随着高硬度未熔化及部分熔化WC颗粒数量的增加, 第二相强化作用增强, 有效抑制了涂层的位错运动与塑性变形。

2) WC颗粒的存在抑制了枝晶生长, 显著地细化了涂层晶粒, 细晶强化效应随颗粒含量提升而更加明显。根据霍尔-佩奇关系式可知^[17], 晶粒尺寸减小可有效提升材料的硬度与强度, 因此WC陶瓷颗粒的添加加速了涂层组织细化。

3) 析出的WC增强相在涂层中起到了弥散强化作用, 同时能够牢固地钉扎晶界, 限制了晶界滑移, 进一步改善了涂层的整体力学性能。

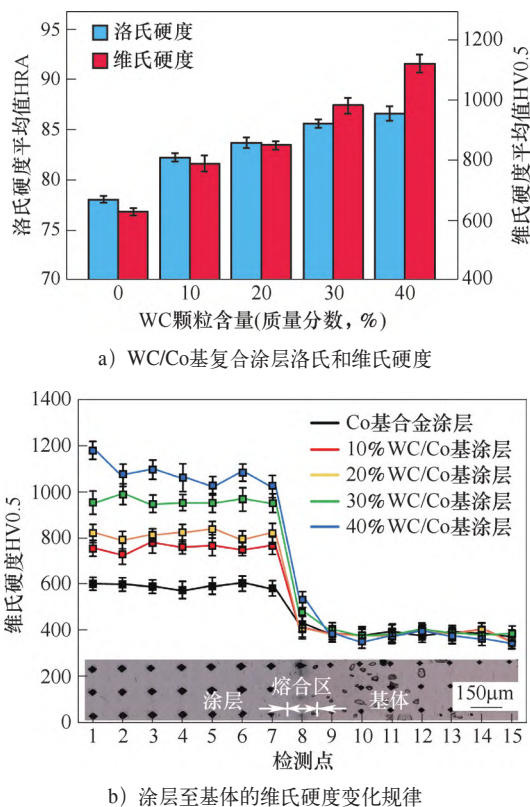


图6 不同WC颗粒含量WC/Co涂层的硬度特性

3.4 耐磨性能

图7所示为不同WC颗粒含量WC/Co涂层摩擦系数和磨损速率的变化情况。各WC/Co涂层试件的摩擦系数在初期磨合阶段迅速上升, 表现出典型的

磨合特征。在600s后, 对磨副与涂层试件的接触方式由最初的点接触逐渐转变为面接触, 导致接触应力降低。此后, 摩擦系数趋于稳定, 波动较小, 表明摩擦系统进入了相对平稳的磨损阶段, 如图7a所示。从图7b可清晰地看出, 随着WC含量的不断增加, 涂层的磨损速率呈现显著的降低趋势。当WC含量增加至40%时, 磨损速率从162.7 μ m³/(N·m)大幅降低至50.3 μ m³/(N·m), 相较于未添加WC的Co基合金涂层降低了69.1%。由上述分析可知, 一方面, WC颗粒能够阻碍晶粒的长大, 甚至打断已经形成的晶粒, 从而使涂层内部的晶粒得到细化, 进而对涂层产生细晶强化效果, 提升涂层的硬度, 增强其耐磨性; 另一方面, WC颗粒在涂层内部还发挥着重要的钉扎作用。在摩擦过程中发现, WC颗粒能够牢固地嵌入涂层基体中, 改变对磨材料对涂层表面的切削路径, 阻碍了磨损的连续性。随着WC含量的增加, WC颗粒对涂层的细晶强化和钉扎作用显著增强, 进一步细化了涂层晶粒, 同时显著提升了涂层的整体稳定性。

不同WC含量对应各涂层的磨损形貌及磨损机

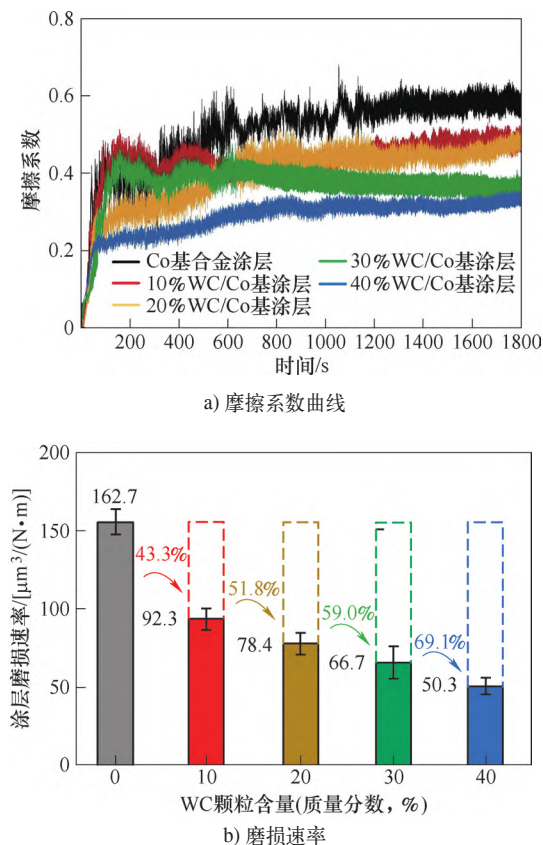


图7 不同WC含量WC/Co复合涂层摩擦系数和磨损速率

理如图8所示。从图8a可观察到,未添加WC颗粒的Co基合金涂层在摩擦过程中,由于对磨副反复作用,表面形成了宽而深的犁沟,表明Co基合金材料在摩擦载荷下发生了塑性变形与磨粒磨损。随着WC颗粒含量的逐步增加(见图8b~e),涂层表面的犁沟逐渐变得窄而浅,磨痕宽度明显减小,且磨损形貌趋于平整,表明WC颗粒的引入有效提升了涂层的耐磨性能。

对于未添加硬质相的Co基合金涂层,摩擦过程中对磨副直接作用于涂层表面,导致产生较大的接触应力集中,从而形成明显的犁沟及磨损。而在WC/Co复合涂层中,分散分布的WC颗粒在摩擦

过程中作为硬质支撑点,承担了部分外加载荷,有效减缓了涂层表面的局部应力集中。同时,Wc颗粒能够抵抗对磨副的切削作用,减少了基体材料的剥离与移除,形成了稳定的硬质阻磨屏障。此外,Wc颗粒的存在破坏了连续磨损带的形成,抑制了磨损过程中的热积累,进一步减缓了材料的磨耗。分析可知,Wc颗粒通过颗粒强化、弥散强化和承载效应,在涂层中发挥了多重增强作用,显著提高了涂层的抗磨损能力和服役稳定性。随着WC含量的提升,涂层表面硬质相比比例增加,耐磨性进一步改善,表现出更优异的抗犁沟磨损和抗塑性变形能力。

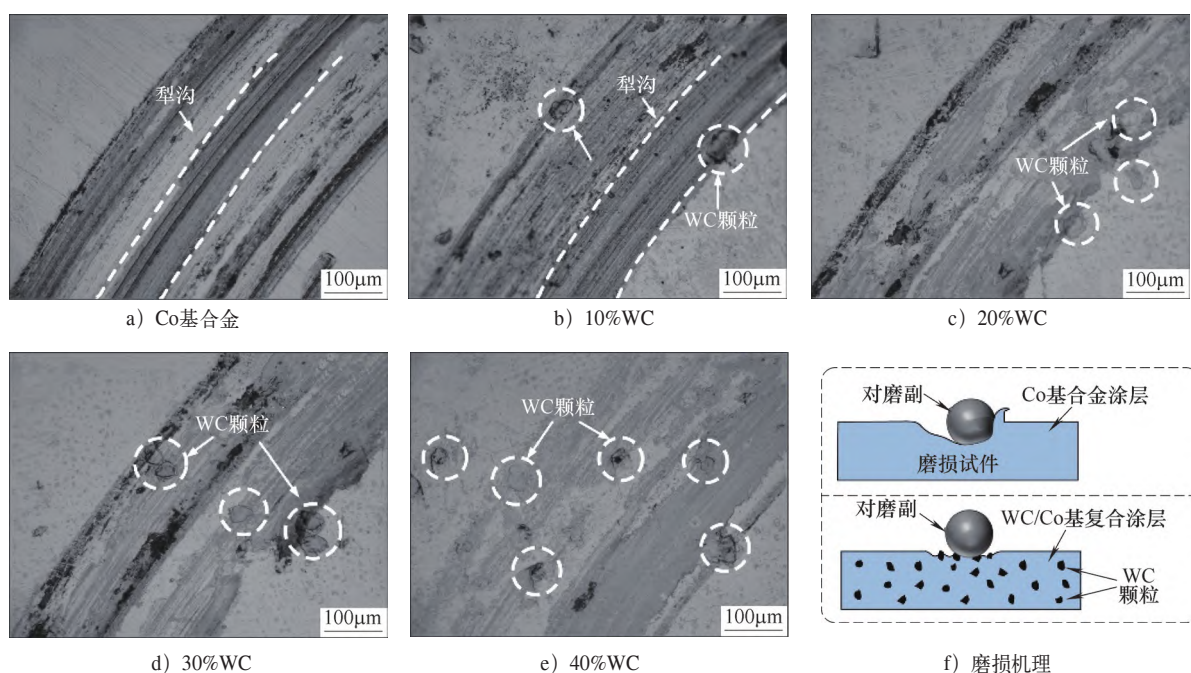


图8 不同WC含量WC/Co基复合涂层磨损形貌特征

4 结束语

本文采用激光定向能量沉积工艺在车用304不锈钢表面制备了WC/Co基复合涂层,对WC/Co基复合涂层的微观组织特征、物相组成、硬度特性及耐磨性进行了系统性评价,得出以下主要结论。

1) WC/Co基复合涂层中WC颗粒受重力和马兰戈尼对流影响沉积在涂层底部,涂层主要由fcc-Co、Co₆W₆C、Fe₆W₆C及W₂C相组成,随着WC颗粒含量增加,造成硬质相衍射峰强度逐渐增强。

2) WC颗粒的引入细化了涂层晶粒,并起到了弥散强化和位错强化的作用。随着WC颗粒含量的

增加,涂层的洛氏硬度和维氏硬度均显著提升,最高分别达到86.4HRA和1123.7HV0.5,表明WC/Co基复合涂层具有优异的硬度特性。

3) WC陶瓷颗粒通过承载与阻碍磨损机制显著改善了涂层的抗磨性能。当WC含量为40%时,涂层磨损速率降低69.1%,WC/Co基复合涂层表现出了优异的减摩、抗磨效果。

参考文献:

- [1] 古青,包海斌,王永强,等. Si含量对316L不锈钢激光定向能量沉积层凝固行为和显微组织的影响[J]. 表面技术, 2025, 54 (5): 167-175.

- [2] MO K, CAO L, ZHAO D, et al. Study on the microstructure and wear resistance of laser clad martensitic stainless steel 420 with different content of TiC[J]. Materials Today Communications, 2025, 46: 112615.
- [3] 姚猛, 孙强, 张占东, 等. EA1N车轴激光定向能量沉积工艺研究与应用[J]. 金属加工 (热加工), 2025 (3): 161-165.
- [4] ABHINAV M, PIYUSH C, SURESH K, et al. High-temperature tribological evaluation of cobalt-based laser clad disc for automotive brake systems[J]. Ceramics International, 2024, 50 (24): 54458-54472.
- [5] 王升正, 魏子海, 邢炜. 主轴激光定向能量沉积修复再制造技术研究[J]. 金属加工 (热加工), 2025 (4): 151-155.
- [6] 张连松, 苏涛, 沈思明. 车用不锈钢表面激光原位合成FeCrCoNi涂层组织及耐磨性[J]. 粉末冶金工业, 2024, 34 (1): 111-116.
- [7] 杨金玉, 刘军, 徐晓冰. 车用不锈钢表面激光定向能量沉积CoCrFeNi-NbC复合涂层的组织及耐磨性[J]. 粉末冶金工业, 2024, 34 (6): 70-75.
- [8] 陈国栋, 刘秀波, 刘庆帅, 等. IN718激光定向能量沉积Co-WC/Cu复合涂层组织与摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报 (中英文), 2024, 44 (6): 741-751.
- [9] ZHANG H, WANG Q, JING P, et al. Manufacture of gradient WC-Co composite and its mechanical property evaluation[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2025, 131: 107180.
- [10] WANG G, ZHANG J, SHU R, et al. High temperature wear resistance and thermal fatigue behavior of Stellite-6/WC coatings produced by laser directed energy deposition with Co-coated WC powder[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2019, 81: 63-70.
- [11] 肖居鹏, 杨学锋, 李万洋, 等. 液压阻尼器活塞杆激光定向能量沉积WC/Co06涂层耐磨耐腐蚀性能[J]. 表面技术, 2023, 52 (3): 217-227.
- [12] WANG Y, CHEN X, YANG D, et al. Effect of WC-12Co content on the microstructure and wear properties of 316L/WC-12Co composite coating by laser directed energy deposition[J]. Surface and Coatings Technology, 2025, 508: 132146.
- [13] YUE H, LV N, GUO C, et al. Multi-objective process optimization of laser directed energy deposition Co-based alloy by process window and grey relational analysis[J]. Coatings, 2023, 13: 1090.
- [14] YUE H, LV N, GUO C, et al. Forming characteristics analysis of variable-process alternated overlapping strategy based on contour description for laser melting deposition[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27: 5424-5435.
- [15] HU D, LIU Y, CHEN H, et al. Microstructure and wear resistance of Ni-based tungsten carbide coating by laser cladding on tunnel boring machine cutter ring[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 404: 126432.
- [16] 龙海洋, 董真, 卢冰文, 等. WC含量对激光熔覆FeCoNiCr高熵合金涂层组织结构及性能的影响规律研究[J]. 中国激光, 2023, 50 (24): 115-124.
- [17] ZHU H, OUYANG M, HU J, et al. Design and development of TiC-reinforced 410 martensitic stainless steel coatings fabricated by laser cladding[J]. Ceramics International, 2021, 47 (9): 12505-12513.

(收稿日期: 20250521)