

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2026.04.011

## 交变载荷下缸套表面复合电镀层疲劳磨损性能

裴羊羊<sup>1</sup>, 李媛媛<sup>2</sup>

(1. 鹤壁汽车工程职业学院 智能制造学院, 河南 鹤壁 458030; 2. 河南理工大学 鹤壁工程技术学院, 河南 鹤壁 458030)

**摘要:** 汽车发动机缸套在服役过程中承受高频交变接触应力, 导致镀层疲劳失效加速, 且其动态切向力响应难以直接测量。为此, 研究交变载荷下汽车发动机缸套材料表面复合电镀层疲劳磨损性能。镀液以烧杯作为电镀槽, 通过依次倒入硫酸镍、硫酸钴、钨酸钠、柠檬酸钠、糖精钠和十二烷基硫酸钠等材料, 经磁力搅拌、定容、调整 pH 值等步骤制备而成。随后通过电镀法制备出汽车发动机缸套材料表面复合电镀层, 测试交变载荷不同等级以及不同循环次数下该镀层的最大切向力变化以及磨损形貌变化, 计算镀层磨损率。试验结果表明: 在交变载荷作用下, 随着循环次数增加, 镀层最大切向力波动较大, 但循环初期该波动较为接近, 疲劳交变载荷循环次数和位移幅值的增加都会加剧镀层磨损; 高交变载荷下, 镀层磨损程度随循环次数增加而加重, 损失量和磨损率均显著上升。

**关键词:** 交变载荷; 复合电镀; 发动机缸套; 疲劳磨损

**中图分类号:** TQ050; TH114 **文献标志码:** A

## Fatigue wear performance of composite electroplating layer on cylinder liner surface under alternating load

PEI Yangyang<sup>1</sup>, LI Yuanyuan<sup>2</sup>

(1. College of Intelligent Manufacturing, Hebi Vocational College of Automobile Engineering, Hebi 458030, China; 2. Hebi Institute of Engineering and Technology, Henan Polytechnic University, Hebi 458030, China)

**Abstract:** The cylinder liner of an automobile engine is subjected to high-frequency alternating contact stress during service, which accelerates the fatigue failure of the coating, and its dynamic tangential force response is difficult to directly measure. Therefore, the fatigue wear performance of composite electroplating layer on the surface of automobile engine cylinder liner under alternating load is studied. The plating solution was prepared by using a beaker as the plating tank. Materials such as nickel sulfate, cobalt sulfate, sodium tungstate, sodium citrate, sodium saccharin, and sodium dodecyl sulfate were sequentially added. The solution was then prepared by magnetic stirring, constant volume, and pH optimization. Subsequently, a composite electroplating layer was prepared on the surface of automotive engine cylinder liners using electroplating method. The maximum tangential force and wear morphology changes of the coating were tested under different levels and cycles of alternating loads, and the wear rate of the coating was calculated. The experimental results show that under the alternating loads, the maximum tangential force of the coating greatly fluctuates as the number of cycles increases. Though the fluctuation is relatively similar during the initial stages of cycling. The increasing number of fatigue alternating load cycles and

收稿日期: 2025-05-28 修回日期: 2025-08-23

通信作者: 裴羊羊(1991—), 女, 本科, 讲师, 研究方向为力学、机电一体化, e-mail: fanmengmeng45@yeah.net

基金项目: 国家自然科学基金项目(6220562877); 2025年度河南省高校人文社会科学研究一般项目(2025-ZDJH-305)

引用信息: 裴羊羊, 李媛媛. 交变载荷下缸套表面复合电镀层疲劳磨损性能[J]. 电镀与精饰, 2026, 48(4): 70-75.

PEI Yangyang, LI Yuanyuan. Fatigue wear performance of composite electroplating layer on cylinder liner surface under alternating load[J]. Plating and Finishing, 2026, 48(4): 70-75.

displacement amplitude will exacerbate the wear of the coating. Under high alternating loads, the wear degree of coating intensifies with increasing number of cycles, with both the loss and wear rate rising significantly.

**Keywords:** alternating load; composite electroplating; engine cylinder liner; fatigue wear

发动机是整个汽车结构中的主要构件,其各项性能参数直接影响整个车辆的行驶与性能,对于车辆使用寿命也具有直接影响<sup>[1]</sup>。汽车发动机缸套作为关键摩擦副部件,长期承受机械载荷和热-机械耦合作用,其表面复合电镀层的疲劳磨损性能直接影响发动机的可靠性、燃油经济性和服役寿命<sup>[2]</sup>。常见的铸铁或钢制缸套多采用激光淬火镀层或镀铬涂层,这类镀层虽具有较好的耐磨性,但难以适应车辆复杂工况,长期使用后会出现裂缝、破损等多种情况<sup>[3]</sup>。交变载荷指大小、方向或作用点随时间周期性变化的荷载,受到交变载荷影响时,缸套上的电镀层出现疲劳损伤包含多种物理场和尺度的耦合,车辆在行驶时,镀层和周边其他构件都会产生接触,此时界面结合强度、残余应力等参数的分布会对镀层的裂纹萌生位置及扩展路径都会产生影响<sup>[4]</sup>。涂层中的硬质颗粒和缸套自身之间的界面相容性都对涂层在使用时受交变载荷影响时出现变形和剥离情况产生影响<sup>[5]</sup>。因此,深入研究交变载荷下复合电镀层的疲劳磨损行为,对提升发动机耐久性具有重要意义。

针对复合电镀层疲劳磨损的研究多集中于单一载荷条件下的性能评估,而对交变载荷下涂层协同效应的研究仍显不足。郜家伟等<sup>[6]</sup>分析受多种因素影响后,以镍铜为原料的双层膜发生的摩擦行为,该研究尽管部分探讨了纹理密度和方向对摩擦系数的影响,但缺乏系统性的实验设计和理论分析,难以全面揭示其对摩擦行为的调控机制,同时该研究将基底材料简化为完美平面,未充分考虑实际材料表面存在的粗糙度或纹理对摩擦行为的影响。宫璇等<sup>[7]</sup>以铝合金作为基底材料,结合镍磷材料制备出复合镀层,并且分析该镀层的耐磨损性能,由于该镀层添加金刚石颗粒,所以显著提升该镀层的硬度,耐磨损性能较强,但是该研究并没有构建用于深入分析的摩擦学模型,不能分析多种工况下该镀层的摩擦损失量。庞皓升等<sup>[8]</sup>分析应用在硅聚合物基接触面上的纳米复合涂层的摩擦行为,经过试验分析后,长期疲劳摩擦后,镀层出现磨粒磨损和黏着磨损,摩擦系数还能保持在较为稳定范围内,但是该研究并未对MXenes涂层在纳米尺度下的摩擦力、粘附能等微观摩擦学参数的测量与分

析,同时也没有实现该镀层大面积制备,对于均匀性以及多种缺陷并未作出研究,研究尚不全面。陈国栋等<sup>[9]</sup>使用激光熔覆技术制备出合金镀层,并且分析该镀层的摩擦学性能,按照合理配比制备出的镀层能够在高温环境下仍旧具备较高耐磨性,但是该镀层制备时使用的WC颗粒和基体混合时存在一定难度,容易出现材料分布不均的情况,导致制备后的镀层易于出现强度较低的情况,导致镀层应用效果不佳的情况出现。

本文研究交变载荷下汽车发动机缸套材料表面复合电镀层疲劳磨损性能。使用镍、钴等原料通过沉积法制备出镀液,再使用电镀法将该镀液电镀在处理后的铸铁材料上,获得与汽车发动机缸套电镀层较为接近的试验样品。测试该试样在不同交变载荷以及不同疲劳循环次数下,该试验样品的磨损性能变化。

## 1 实验

### 1.1 材料与设备

汽车发动机缸套材料表面复合电镀层制备所用材料如表1所示,设备情况如表2所示。

### 1.2 复合电镀层制备

#### 1.2.1 铸铁基底材料预处理

本文所制备的镀层需要应用在发动机缸套上,但是缸套实际体积较大,所以选择与缸套材质较为接近的铸铁材料,作为阴极材料<sup>[10-12]</sup>。按照试验分析需求将铸铁材料切割成10 mm×10 mm,厚度为2 mm的试件,使用目数为800的砂纸整体打磨铸铁材料上的氧化层,再分别使用1 200和2 000目砂纸打磨,使得铸铁材料转变为没有划痕、没有污渍材料,使用去离子水冲洗材料表面,使得打磨后的残渣能够被充分清理干净,使用抛光机处理铸铁材料,完成抛光以后,再次使用无水乙醇和去离子水冲洗清理铸铁材料。对于抛光后铸铁材料表面残留的油脂,使用丙酮溶液及强碱溶液浸泡并冲洗铸铁材料表面,冲洗后再将材料转移至超声清洗机中,完成清洗后置于烘干箱中,充分烘干水分。在实施电镀操作前,为防止铸铁材料再次发生氧化,需先用酸性溶液冲洗去除其表面残留的碱性溶液。随后,使用硫酸对铸铁表面进行30 s的活化处理,以此

表 1 复合电镀层制备所用材料

Tab.1 Materials used in the preparation of composite electroplating layers

材料名称	厂家	详情
铸铁	宁波市鄞州下应求恒浸塑材料经营部	载荷等级 d400, 球化率 85%, 压缩强度 150 MPa
硫酸镍	保定福赛钴镍新材料有限公司	主盐材料, 浓度 0.3 mol/L, 工业级, 镍含量 22%, pH>3
硫酸钴	保定福赛钴镍新材料有限公司	主盐材料, 浓度 0.04 mol/L, 分析纯, 熔点 96~98 °C
钨酸钠	吴江市南风精细化工有限公司	主盐材料, 浓度 0.03 mol/L, pH=6, 工业级, 熔点 698 °C
柠檬酸钠	天津金汇太亚化学试剂有限公司	有机络合剂, 浓度 0.5 mol/L, 化学纯, 粒度 200, pH=8, 熔点 300 °C
糖精钠	金华市千寻生物科技有限公司	消除剂, 浓度 1 g/L, 工业电镀颗粒
十二烷基硫酸钠	南京百聚科技有限公司	湿润剂, 浓度 0.016 g/L, 闪点 270 °C, 水分<1 %

表 2 复合电镀层制备所用设备

Tab.2 Equipment used for the preparation of composite electroplating layers

设备名称	厂家	型号	详情
抛光机	安徽中德机床股份有限公司	ZD-600	回转数 20 r/min, 空载转速 2 800 r/min, 电流 200 A
超声清洗机	中山市梵英科技有限公司	FY5J40 K	超声频率 40 kHz, 超声温度 55 °C
烘干箱	常州市贝奇干燥设备有限公司	CT-C	控温精度 0.1 °C, 温度波动度小于±1 °C
恒温水浴锅	郑州赫名仪器设备有限公司	HH-WO	最高温度 200 °C, 功率 600 W, 恒温分辨率 0.1 °C
多功能微动磨损试验机	献县路格仪器销售中心	KPM-12A	分辨率 0.001, 摩擦频率 3, 最大负载 200 N

增强镀层与基体的附着力。完成冲洗与烘干工序后迅速实施电镀<sup>[13]</sup>。

### 1.2.2 镀液制备

使用电沉积法制备复合镀层。以烧杯作为电镀槽, 在该电镀槽中倒入适量去离子水, 取硫酸镍和硫酸钴同时倒入电镀槽中, 使用磁力搅拌机搅拌 2 min, 再次倒入钨酸钠和柠檬酸钠, 再次磁力搅拌 2 min, 将糖精钠和十二烷基硫酸钠最后倒入并磁力搅拌 2 min, 使得各个材料充分混合。引入去离子水对混合溶液定容, 定容量控制在 250 mL, 定容后再磁力搅拌至全部材料都充分溶解后, 使用强碱和硫酸分别调整该混合溶液的 pH 值<sup>[14]</sup>。

### 1.2.3 基于电沉积方法的镀液施镀

通过电沉积法将上文配制的镀液电镀至预处理后的铸铁基底材料上。将盛有镀液的容器置于恒温水浴锅中, 温度设定为 50 °C, 完成镀液升温以后, 将预处理后的铸铁基底置于镀液之中, 电镀需要连接电源, 电源导线的阴极与铸铁材料相连, 取全新石墨棒作为阳极材料与电源的阳极相连, 通电电镀以后关闭电源并使用去离子水充分冲洗电镀后的材料, 确定材料表面没有杂质后置于烘干箱中干燥处, 取出后即为本研究所研究的汽车发动机缸套表面复合电镀层试件<sup>[15-16]</sup>。

## 1.3 疲劳磨损性能测试

### 1.3.1 交变载荷施加设计

使用多功能微动磨损试验机能够实现交变载荷的施加和磨损性能分析, 该设备中使用连杆连接驱动器, 通过连杆运动施加交变载荷, 交变载荷的幅值范围与频率范围分别为 0~50 N 和 1~50 Hz。该试验机通过偏心轮、凸轮或电磁激振器等装置产生周期性激振力, 作用于试验样品表面, 形成交变载荷。

将各试验样品安装在试验机上的振动台上, 控制连接位置没有出现缝隙, 调整对中位置, 避免由于试验中由于偏心应力导致的附加力矩出现。设定振动频率范围为 1~50 Hz, 调整激振力大小, 使试验样品表面振幅达到预设值±1 mm, 启动试验机使试验样品在设定频率和振幅下振动, 记录各个试验样品在交变载荷下的加速度、应力以及位移变化, 根据该变化分析试验样品的疲劳性能、动态刚度等指标<sup>[17-19]</sup>。

### 1.3.2 不同疲劳循环次数下疲劳磨损特性

发生摩擦时镀层分为少量滑移区、整体滑移区

与混合滑移区,其中少量滑移区表示镀层表面只出现局部微小滑移,试验样品主要表现为弹塑性变形;混合滑移区是不均匀磨损区域,滑动和黏着并存;整体滑移区以滑动摩擦为主,试验样品与镀层出现严重磨损存在明显相对位移。调整试验机的疲劳循环次数分别为400、800、1 200、1 600、2 000和2 400,分析在少量滑移区(位移幅值分别为1.5和2.5  $\mu\text{m}$ )、混合滑移区(位移幅值分别为6和9  $\mu\text{m}$ )以及整体滑移区(位移幅值分别为25和55  $\mu\text{m}$ )施加循环交变载荷,载荷数值为70 N,记录最大切向力变化,通过切向力变化评估镀层的疲劳磨损性能<sup>[20]</sup>。

### 1.3.3 不同疲劳循环次数下疲劳磨损形貌

将试验机调整成两种不同交变载荷等级:50和100 N,在这两种交变载荷下,分别循环疲劳500、5000、50 000和100 000次,观察并拍摄不同试验条件下,镀层的磨损形貌变化。

### 1.3.4 不同疲劳循环次数下质量疲劳磨损

将试验机调整成两种不同交变载荷等级:50和100 N,在这两种交变载荷下,分别循环疲劳500、5000、50 000和100 000次,分别称量前后试验样品的质量值,通过计算确定不同疲劳循环次数和不同交变载荷下,电镀层的质量磨损率,使用式(1)计算磨损率:

$$\sigma = V / (W \times d_i) \quad (1)$$

式中, $V$ 表示磨损后试验样品的体积, $W$ 表示试验机

施加的交变载荷, $d_i$ 代表滑移距离。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同循环疲劳次数对疲劳磨损特性的影响

调整试验机的作用区域,分析不同循环疲劳次数下,镀层的最大切向力变化,试验结果如图1所示。

分析图1可知,受到交变载荷影响,试验样品镀层出现明显的变化波动。图1(a)中,随着疲劳循环次数的增加,两种位移幅值下的镀层最大切向力波动较大,但初期波动较为接近,上升趋势基本一致。这表明在少量滑移区,镀层初期对交变载荷的响应较为一致,但随着循环次数的增加,不同位移幅值下的镀层磨损程度开始出现差异。图1(b)中,虽然两种位移幅值下镀层的最大切向力相差较大,这表明在混合滑移区,镀层磨损程度受到位移幅值和循环次数的共同影响,但总体变化趋势保持一致。图1(c)中,尽管两种位移幅值差距较大,但最大切向力变化较为接近。这表明在整体滑移区,镀层磨损程度已经非常严重,位移幅值对最大切向力的影响相对减弱,而循环次数成为主导因素。

通过图1中的试验可以确定,交变载荷循环次数和位移幅值的增加都会加剧镀层磨损,导致最大切向力上升。在不同滑移区下,镀层对交变载荷的响应存在差异,但总体变化趋势表明随着循环次数的增加,镀层磨损程度逐渐加重。

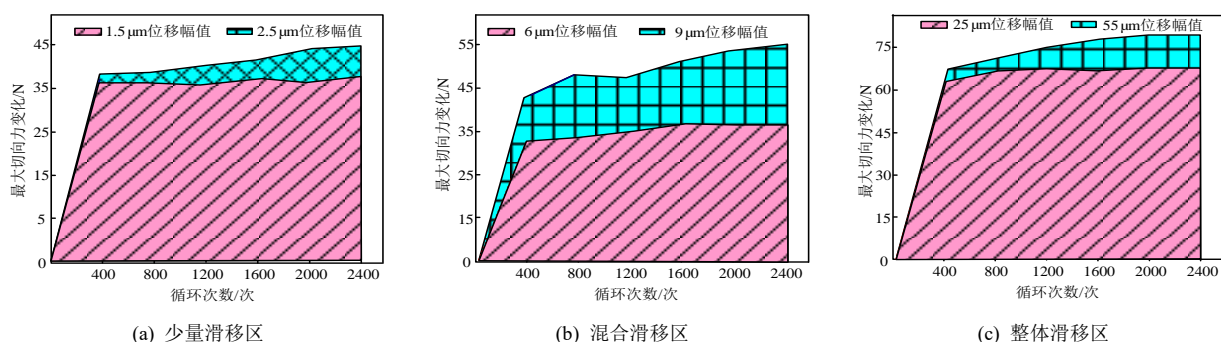


图1 不同疲劳循环次数对切向力变化

Fig.1 Change of tangential force with different fatigue cycles

### 2.2 疲劳循环变化对疲劳磨损形貌的影响

不同交变载荷和不同循环次数下,镀层的磨损形貌变化,试验结果如图2所示。

分析图2能够看出,交变载荷循环次数增加会导致镀层的磨损破坏越来越严重,且与低等级交变载荷相比,高等级交变载荷也会导致镀层的磨损更

严重。纵向对比来看,交变载荷循环疲劳次数增加,各个镀层的磨损磨坏程度逐渐增加,从最初镀层出现划痕破坏(循环500次),到镀层出现完全破坏,甚至出现凹陷、完全剥离的情况(循环100 000次)。对比不同交变载荷等级下镀层磨损情况,较低交变载荷(50 N)等级下,镀层磨损程度较低,循环100 000次

仍旧没有出现严重剥离破坏。较高交变载荷(100 N)等级下, 镀层磨损程度较为严重, 循环100 000次出现严重磨损破坏, 镀层内部的铸铁基体已裸露, 镀层完全失效, 丧失对缸套的保护功能。由此可以看出, 高交变载荷长期循环疲劳影响下, 汽车发动机缸套表面电镀层的磨损较为严重。

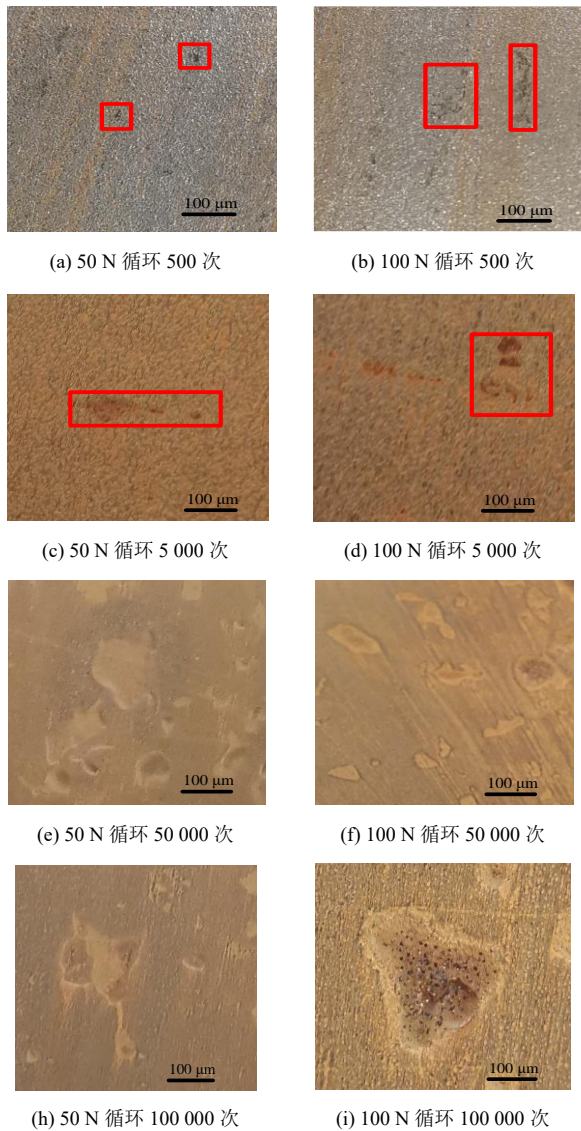


图2 交变载荷对磨损形貌影响

Fig.2 Effects of alternating load on worn morphology

### 2.3 疲劳循环变化对疲劳损失量的影响

不同交变载荷下以及不同疲劳循环次数下, 镀层的磨损量与磨损率试验结果如图3所示。分析图3可知, 在低交变载荷下, 镀层的磨损量和磨损率相对较低。图中显示, 随着循环次数的增加, 磨损量和磨损率均呈现出缓慢上升的趋势。这表明在低交变载荷下, 镀层能够保持较好的耐磨性能。在高交

变载荷下, 镀层的磨损量和磨损率显著上升。图中显示, 随着循环次数的增加, 磨损量和磨损率均呈现出急剧上升的趋势。这表明在高交变载荷下, 镀层的耐磨性能显著下降, 磨损速度加快。由此可以看出, 在长期循环交变载荷作用下, 汽车发动机缸套电镀层会出现显著损失, 这一变化也印证图2中镀层的损失变化。

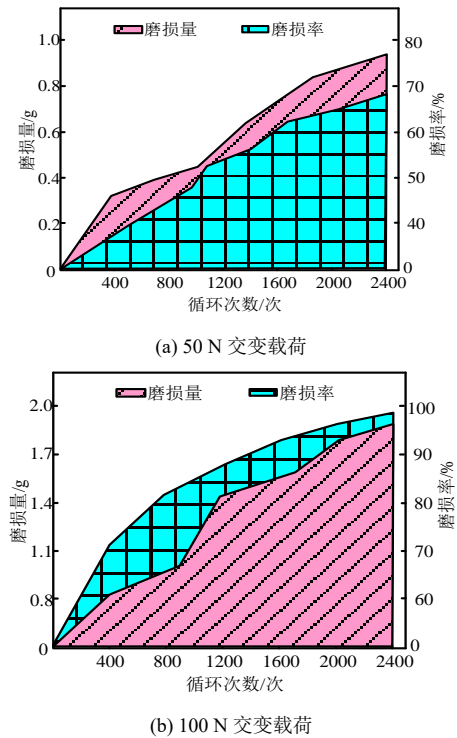


图3 不同交变载荷下疲劳损失

Fig.3 Fatigue loss under different alternating loads

### 3 结论

本研究分析了交变载荷作用下汽车发动机缸套表面复合电镀层的疲劳磨损性能, 通过多种盐复合沉积法制备镀液并采用电镀法制备与实际缸套表面相近的复合电镀层样品, 在不同交变载荷等级和循环次数下对镀层的最大切向力变化、磨损形貌变化及磨损率进行测试分析得出以下结论:

- (1) 最大切向力方面, 随循环次数增加, 镀层最大切向力呈现显著波动。少量滑移区初期不同位移幅值下的响应趋势一致, 但随循环次数增加, 位移幅值差异导致磨损程度分化; 混合滑移区虽切向力绝对值差异显著, 但演化趋势保持一致; 整体滑移区则表现为循环次数主导磨损进程, 位移幅值影响减弱。
- (2) 磨损形貌演化显示: 循环次数增加导致镀

层从表面划痕发展为完全剥离。高载荷(100 N)工况下, 100 000次循环即出现基体裸露失效, 而低载荷(50 N)工况仍保持镀层完整性, 呈现典型的加速磨损特征。

综合而言, 交变载荷循环次数和位移幅值增加会加剧镀层磨损, 导致最大切向力上升、磨损程度增加; 长期循环交变载荷下汽车发动机缸套电镀层会出现显著损失, 与磨损形貌变化一致; 高交变载荷长期循环疲劳对镀层磨损影响显著, 镀层损失量与磨损率随循环次数增加显著上升, 严重影响发动机可靠性、燃油经济性和服役寿命。

## 参考文献

- [1] 刘军, 王宗境, 杜瑞, 等. 铝合金发动机后体座压铸工艺数值模拟与优化[J]. 模具技术, 2024(5): 37-49.
- [2] 张镇华, 曹子文, 魏大盛, 等. 激光冲击表面微坑结构化对类金刚石碳涂层微动磨损行为的影响[J]. 中国激光, 2025, 52(4): 159-169.
- [3] 卞达, 钱善华, 何颖诗, 等. 面向水润滑条件磷酸盐黏结复合涂层的摩擦学性能研究[J]. 表面技术, 2023, 52(11): 216-224, 247.
- [4] 王梅桂, 王湘玲, 叶相元. 氨基化氟化石墨烯增强热塑性聚氨酯的制备与性能研究[J]. 表面技术, 2022, 51(9): 141-150.
- [5] 新巴雅尔, 辛英臣, 孙思意, 等. 基于 ANSYS 的耐热钢高温磨损性能研究[J]. 计算机仿真, 2023, 40(9): 318-323, 501.
- [6] 郜家伟, 姚廷强, 谢家琛, 等. 不同因素下镍铜双层膜表面摩擦行为的研究[J]. 材料科学与工艺, 2023, 31(2): 50-59.
- [7] 宫璇, 刘家辰, 崔彦, 等. 2014 铝合金表面 Ni-P/金刚石复合镀层的制备和性能[J]. 材料保护, 2024, 57(9): 148-153, 160.
- [8] 庞皓升, 刘大猛, 柴春鹏, 等. MXenes 及其纳米复合涂层在硅/聚合物基接触面上的摩擦学行为[J]. 北京化工大学学报, 2023, 50(6): 74-84.
- [9] 陈国栋, 刘秀波, 刘庆帅, 等. IN718 激光熔覆 Co-WC/Cu 复合涂层组织与摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2024, 44(6): 741-751.
- [10] 邱敬文, 许惠明, 刘涣平, 等. 矿用钛合金钻杆表面复合强化与摩擦性能研究[J]. 润滑与密封, 2022, 47(11): 124-134.
- [11] 王奕迪, 李晓倩, 陈端杰, 等. 近单一 FCC 相 AlCoCrFeNi 高熵合金的常温摩擦学行为及典型磨损机制[J]. 摩擦学学报, 2023, 43(2): 197-208.
- [12] 蔡铭泽, 喻世臣, 朱平, 等. 镍-钴-氧化铝复合电刷镀工艺及其性能[J]. 电镀与涂饰, 2024, 43(6): 1-12.
- [13] 张强, 李春燕, 李春玲, 等. 法向载荷对 Fe 基块体非晶复合材料摩擦磨损性能的影响[J]. 功能材料, 2023, 54(1): 1133-1137, 1170.
- [14] 刘贵民, 惠阳, 杜建华, 等. 连续高温制动条件下颗粒增强铁基复合材料的摩擦磨损性能[J]. 粉末冶金技术, 2023, 41(1): 63-70.
- [15] 惠阳, 刘贵民, 兰海, 等. 连续制动条件下泡沫陶瓷/金属双连续相复合材料的摩擦磨损性能[J]. 材料工程, 2022, 50(4): 112-122.
- [16] 韩基泰, 段为朋. VE 扩散对加速老化辐照 GO/UHMWPE 复合材料生物摩擦学性能的影响[J]. 塑料, 2023, 52(5): 22-26.
- [17] 原征宇, 范亚洲. Ni/P 金刚石复合镀层的抗接触疲劳性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2025, 48(1): 33-38.
- [18] 逢显娟, 岳世伟, 黄素玲, 等. 不同摩擦条件对 PEEK、CF/PEEK 复合材料摩擦学性能及其抗静电性能的影响[J]. 化工新型材料, 2022, 50(11): 109-115, 120.
- [19] 梁敖, 卞永明, 邵杰, 等. 重载顶推装备滑动副的摩擦磨损机理[J]. 同济大学学报, 2022, 50(6): 906-914.
- [20] 杨文选, 吕燕, 郭雅琪, 等. 熔覆速度对激光-电复合丝材熔覆 630 不锈钢熔覆层组织及性能的影响[J]. 应用激光, 2024, 44(2): 27-33.