

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2026.03.014

# Cr12MoV 模具钢表面 Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub> 复合镀层 在宽温域下的抗磨损性能

孙艳<sup>1</sup>, 任伟和<sup>2</sup>

(1. 忻州职业技术学院 机电系, 山西 忻州 034000; 2. 河北工程技术学院 土木与建筑学院, 河北 石家庄 050091)

**摘要:** 采用恒流电沉积法在 Cr12MoV 模具钢表面制备 Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub> 复合镀层, 并结合模具的使用环境温度, 研究该复合镀层在宽温域下的抗磨损性能。结果表明: 复合镀层无明显缺陷, 晶粒团聚体呈瘤状紧密排列, 结构较为致密。在室温、100 和 250 °C 条件下, 复合镀层的平均摩擦系数、磨痕宽度、最大磨痕深度和体积磨损率均低于模具钢, 且在相同实验温度下, 复合镀层的磨损程度明显较轻。复合镀层凭借致密结构与较高硬度(540~550 HV)展现出较强的承载能力和抵抗局部塑性变形能力, 复合镀层中掺杂硬质 ZrO<sub>2</sub> 颗粒和具有自润滑特性的 MoS<sub>2</sub> 颗粒在宽温域下能协同发挥抗磨减摩作用, 因而复合镀层对模具钢起到表面强化效果, 能有效提升其在宽温域下的抗磨损性能。

**关键词:** Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub>; Cr12MoV; 宽温域; 摩擦系数; 磨痕形貌

中图分类号: TQ153 文献标志码: A

## Wear resistance of Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub> composite coating electrodeposited on Cr12MoV die steel surface in wide temperature range

SUN Yan<sup>1</sup>, REN Weihe<sup>2</sup>

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xinzhou Vocational and Technical College, Xinzhou 034000, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Hebei Polytechnic Institute, Shijiazhuang 050091, China)

**Abstract:** Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub> composite coating was prepared on Cr12MoV die steel surface via constant-current electrodeposition method. Combined with the service environment temperature of the die, the wear resistance of this composite coating in wide temperature range were studied. The results show that the composite coating exhibits no obvious defects, with grain aggregates closely arranged in a nodular shape and a relatively dense structure. At room temperature, 100 and 250 °C, the average friction coefficient, wear scar width, maximum wear scar depth and volume wear rate of the composite coating are lower than those of the die steel. Under the same experimental temperature, the wear degree of the composite coating is significantly lighter. The composite coating exhibits excellent load-bearing capacity and resistance to local plastic deformation due to its dense structure and relatively high hardness (540~550 HV). The coupled action of hard ZrO<sub>2</sub> particles doped in the composite coating and the MoS<sub>2</sub> particles with self-lubricating properties promote wear resistance and reduce friction in wide temperature range. This ensures a surface strengthening effect of the composite coating on the die steel.

**Keywords:** Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub>; Cr12MoV; wide temperature range; friction coefficient; wear morphology

收稿日期: 2025-09-25 修回日期: 2025-11-25

通信作者: 孙艳(1981—), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为机械设计制造及自动化、表面工程等, e-mail: wen\_cici20@126.com

基金项目: 河北省科技攻关项目(202102210073)

引用信息: 孙艳, 任伟和. Cr12MoV 模具钢表面 Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub> 复合镀层在宽温域下的抗磨损性能[J]. 电镀与精饰, 2026, 48(3): 107-114.

SUN Yan, REN Weihe. Wear resistance of Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub> composite coating electrodeposited on Cr12MoV die steel surface in wide temperature range[J]. Plating and Finishing, 2026, 48(3): 107-114.

Cr12MoV模具钢因具有良好的物理化学性能和力学性能,常用于制造冷冲压模具的关键部件<sup>[1-2]</sup>。然而,模具在使用过程中,关键部件容易因划伤、微动磨损和高温氧化磨损等形式提前失效,不仅缩短模具的使用寿命,还会降低冲压件精度。为解决这一问题,需通过表面强化提高模具钢的抗磨损性能。目前,适用于模具钢的表面强化工艺主要有等离子喷涂、超声喷丸、电沉积及化学镀<sup>[3-8]</sup>,但等离子喷涂、超声喷丸和化学镀工艺均存在明显局限性。具体来说:等离子喷涂虽然能在模具钢表面形成高硬度、抗磨损性能优异的涂层,但存在成本高、原始涂层表面粗糙的问题,需后续加工才能满足使用要求。此外,涂层厚度通常不均匀,加工过程中易出现局部剥落,影响涂层抗磨损性能的稳定性。超声喷丸仅能改善模具钢表层的物理化学性能和力学性能,无法形成厚度可控的表面强化层,对模具钢抗磨损性能的提高效果有限。化学镀虽然易于实施且镀层厚度可控,但镀层硬度普遍较低,难以满足宽温域下的抗磨损要求。

相比之下,电沉积工艺具有成本低、镀层与基体结合牢固、镀层厚度和抗磨损性能可调控等优势,在模具钢表面强化方面展现出应用潜力。目前,已有学者在45钢、Cr12MoV钢等不同类型模具钢表面成功电沉积Ni-W合金镀层、Ni-Co合金镀层及Ni-W/MoS<sub>2</sub>复合镀层<sup>[9-11]</sup>。但这些镀层普遍存在硬度较高、断裂韧性不足的问题,在高温下易开裂,导致抗磨损性能不理想。相比之下,Co-W合金镀层及Co-W基复合镀层的断裂韧性较好,能抑制高温下裂纹的萌生与扩展,有望在高温环境中展现出较好的抗磨损性能。课题组前期研究已证实,通过电沉积制备的Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub>复合镀层能明显提高Cr12MoV模具钢的抗磨损性能<sup>[12]</sup>。但前期研究局限于常温环境,而模具在使用中易产生局部高温(100~250℃),此时Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub>复合镀层能否发挥较理想的抗磨和减摩作用尚未明确,且目前无相关研究报道。因此,有必要参考模具的使用环境温度,进一步研究Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub>复合镀层在宽温域下的抗磨损性能。

## 1 实验

### 1.1 Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub>复合镀层制备

实验基体为50 mm×24 mm×2 mm的Cr12MoV模具钢,预处理流程参照文献<sup>[12]</sup>。基础镀液选用硫酸钴、钨酸钠、柠檬酸氢二铵、硼酸和硫酸钠等分

析纯试剂配制,主要成分如表1所示。将基础镀液搅拌均匀,随后分别加入1.5 g/L、平均粒径为500 nm的MoS<sub>2</sub>颗粒和ZrO<sub>2</sub>颗粒。添加过程中持续进行超声波振荡,时长4 h。采用恒流电沉积法在Cr12MoV模具钢表面制备Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub>复合镀层,实验过程中调控镀液温度为(60±0.5)℃,并以300 r/min的速率持续搅拌镀液。设定阴极电流密度为2 A/dm<sup>2</sup>,并通过调节电沉积时间使复合镀层厚度达到40 μm。

表1 镀液主要成分

Tab.1 Main components of the bath

试剂	浓度/(g·L <sup>-1</sup> )
硫酸钴	35
钨酸钠	15
柠檬酸氢二铵	90
硼酸	40
硫酸钠	25
十二烷基苯磺酸钠	0.08

### 1.2 表征与性能测试

采用SUPRA55型扫描电镜(SEM)和Xplore型能量色散光谱仪(EDS)对Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub>复合镀层的微观形貌和成分进行表征分析,设置SEM的加速电压为10 kV,EDS的扫描模式为面扫描。

采用D8 DISCOVER型X射线衍射仪测试Co-W合金镀层和Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub>复合镀层的XRD图谱,进一步分析物相组成及晶体结构,测试条件为:Cu靶Kα射线(40 kV、40 mA)、扫描角度35°~80°、扫描速度5°/min。

采用HVS-1000T型硬度计测试Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub>复合镀层的硬度,在复合镀层表面随机选5个位置,测试结果取平均值。

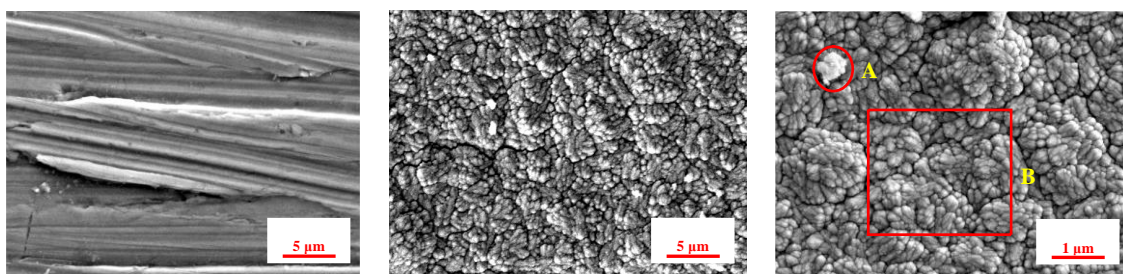
采用UMT系列高温摩擦磨损试验机分别在室温、100、250℃条件下进行摩擦实验,以Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub>复合镀层作为待磨件,对磨件选用GCr15钢球(直径4 mm)。实验载荷、摩擦时间、对磨件转速及旋转半径分别为3 N、8 min、200 r/min、3 mm。采用VHX-600型超景深三维显微镜观测复合镀层表面磨痕,并获取磨痕轮廓数据(包括磨痕宽度和最大磨痕深度)。另外,采用HORIBA HR Evolution型高分辨拉曼光谱仪测试复合镀层磨痕区域的拉曼光谱,波长为638 nm。结合摩擦系数、磨痕轮廓数据、体积磨损率、磨痕形貌及磨痕区域的拉曼光

谱,分析Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub>复合镀层在宽温域下的抗磨损性能及磨损机制。

## 2 结果与讨论

### 2.1 Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub> 复合镀层的微观形貌和成分

图1为Cr12MoV模具钢和Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub>复合镀层的SEM照片。可以看出,模具钢基体(图1(a))被复合镀层(图1(b))完全覆盖,且复合镀层无明显孔洞、裂纹等缺陷,结构较为致密。从图1(b)还看出,复合镀层表面附着一些颗粒。进一步观察发现,复合镀层的晶粒团聚体呈瘤状紧密排列,且表面附着的颗粒未出现团聚现象,如图1(c)所示。



(a) Cr12MoV 模具钢

(b) Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub> 复合镀层

(c) 复合镀层(局部放大)

图1 Cr12MoV 模具钢和 Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub> 复合镀层的 SEM 照片

Fig.1 SEM photograph of Cr12MoV die steel and Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub> composite coating

表2 复合镀层的面扫描结果

Tab.2 Surface scanning results of the composite coating

区域	质量分数/%					
	Co	W	Zr	O	Mo	S
A	2.04	1.26	65.76	30.94	—	—
B	59.34	36.12	—	—	2.83	1.71
整体	56.91	33.74	3.58	1.76	2.54	1.47

### 2.2 Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub> 复合镀层的物相组成及晶体结构

图2为Co-W合金镀层和Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub>复合镀层的XRD图谱。可以看出,两种镀层的XRD图谱均出现3个尖锐的衍射峰,且物相组成一致。强度最高的衍射峰对应Co相的(200)晶面,次强峰对应Co<sub>3</sub>W相的(220)晶面,强度最低的衍射峰则对应Co相的(111)晶面。由此推断,两种镀层都具有有序排列的晶体结构,即晶态结构。

从图2还看出,Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub>复合镀层的3个衍射峰相较于Co-W合金镀层均发生一定程度偏

移,可能是由于电沉积过程中MoS<sub>2</sub>颗粒掺入Co晶格引发晶格畸变所致。这种晶格畸变会影响镀层的晶体结构,可能使原本有序的晶体结构向“细晶粒、亚稳态”方向转变,有助于提高复合镀层的硬度和抗磨损性能。

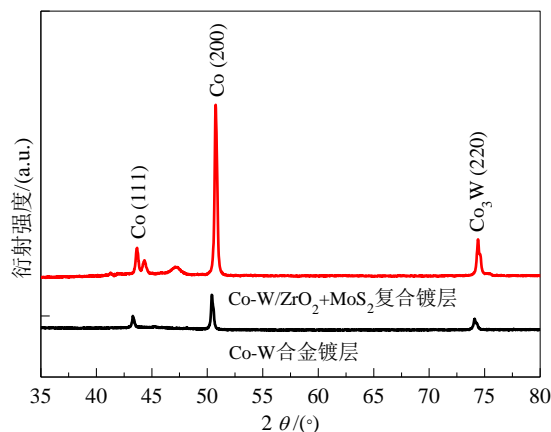


图2 Co-W合金镀层和Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub>复合镀层的XRD图谱

Fig.2 XRD patterns of Co-W alloy coating and Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub> composite coating

移,可能是由于电沉积过程中MoS<sub>2</sub>颗粒掺入Co晶格引发晶格畸变所致。这种晶格畸变会影响镀层的晶体结构,可能使原本有序的晶体结构向“细晶粒、亚稳态”方向转变,有助于提高复合镀层的硬度和抗磨损性能。

### 2.3 Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub> 复合镀层在宽温域下的抗磨损性能

#### 2.3.1 摩擦系数

图3(a)、图3(b)和图3(c)分别为Cr12MoV模具钢和Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub>复合镀层在宽温域下的摩擦系数变化曲线。观察发现,在室温、100、250 °C条件下,模具钢和复合镀层的摩擦系数变化均呈现两阶段特征:磨合阶段,模具钢和复合镀层的摩擦系数都出现较大幅度波动;进入稳定磨损阶段后,两者的摩擦系数波动幅度变小。对比可知,复合镀层在稳定磨损阶段的摩擦系数明显低于模具钢。以100和250 °C条件为例,复合镀层在稳定磨损阶段的平均摩擦系数分别为0.43和0.48,而模具钢在稳定磨损阶段的平均摩擦系数达0.74和0.80。

图4为Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub>复合镀层的硬度测试

结果。由图4可知,复合镀层的硬度均匀性良好,不同位置的硬度均处于540~550 HV范围,相比于退火状态的Cr12MoV模具钢(约265~275 HV)提高约一倍。

在摩擦实验过程中,复合镀层凭借致密结构与较高硬度展现出较强的承载能力和抵抗局部变形能力。此外,复合镀层中掺杂的硬质ZrO<sub>2</sub>颗粒及具有自润滑特性的MoS<sub>2</sub>颗粒,可协同发挥作用:随着摩擦实验进行,复合镀层逐渐损耗,硬质ZrO<sub>2</sub>颗粒裸露,能在一定程度上承受法向载荷和剪切作用,从而减轻磨损。而MoS<sub>2</sub>颗粒因具有层状结构易发生层间滑移<sup>[13-15]</sup>,其产物转移到与对磨件的接触面会发生吸附并铺展,形成润滑膜起到减摩作用,有效降低摩擦系数。因此,复合镀层在宽温域下的平均摩擦系数明显低于模具钢,表现出较好的抗磨损性能。

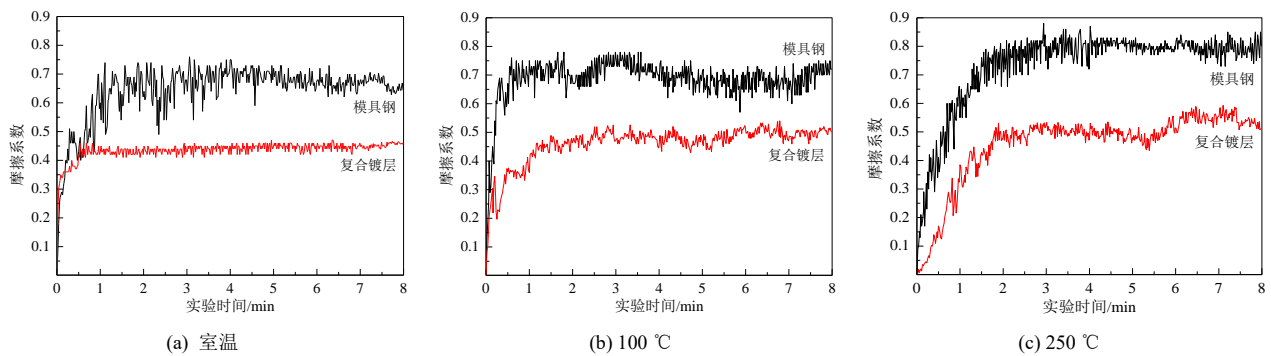


图3 Cr12MoV 模具钢和 Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub> 复合镀层在宽温域下的摩擦系数变化曲线

Fig.3 Friction coefficient curves of Cr12MoV die steel and Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub> composite coating in a wide temperature range

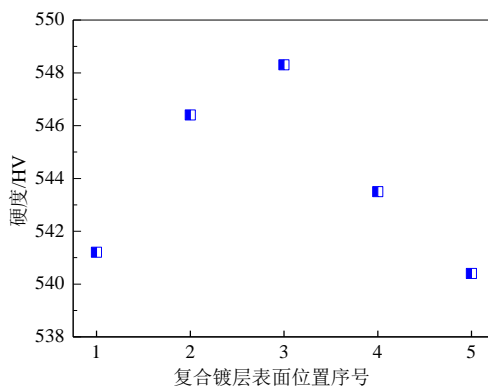


图4 Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub> 复合镀层的硬度测试结果

Fig.4 Hardness test results of Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub> composite coating

#### 2.3.2 磨痕特征参数和体积磨损率

图5为Cr12MoV模具钢和Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub>复合镀层在宽温域下形成的磨痕截面轮廓,对应的磨痕宽度和最大磨痕深度见表3。在室温、100和250 °C

条件下,复合镀层的磨痕宽度和最大磨痕深度均小于模具钢。但随着实验温度从室温升至250 °C,模具钢和复合镀层的磨痕宽度和最大磨痕深度均呈增大趋势。具体来说,模具钢的磨痕宽度从室温时530 μm增至250 °C时840 μm,最大磨痕深度从室温时10.0 μm增至250 °C时12.8 μm。复合镀层的磨痕宽度从室温时360 μm增至250 °C时540 μm,最大磨痕深度从室温时4.3 μm增至250 °C时6.0 μm。

出现该现象是由于实验温度升高导致摩擦过程中产生的热量无法及时散失<sup>[16-17]</sup>,使模具钢和复合镀层表层软化,抵抗局部塑性变形及抵抗犁削能力下降,进而导致对磨件嵌入模具钢和复合镀层中的体积增大、摩擦接触面积增加,最终加重磨损程度。值得注意的是,在相同实验温度下,复合镀层的磨痕宽度和最大磨痕深度始终小于模具钢。这一结果进一步表明,复合镀层能有效提高模具钢在宽温域下的抗磨损性能,与上述分析结论一致。

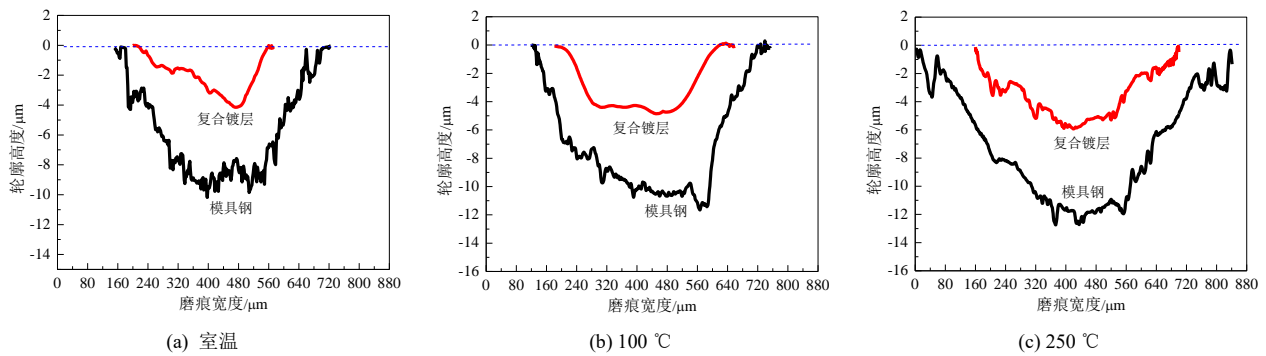


图5 Cr12MoV 模具钢和 Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub> 复合镀层在宽温域下形成的磨痕截面轮廓

Fig.5 Cross-sectional profiles of wear scars formed by Cr12MoV die steel and Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub> composite coating in a wide temperature range

表3 Cr12MoV 模具钢和 Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub> 复合镀层在宽温域下的磨痕特征参数

Tab.3 Characteristic parameters of wear scars for Cr12MoV die steel and Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub> composite coating in a wide temperature range

温度	磨痕宽度/μm		最大磨痕深度/μm	
	模具钢	复合镀层	模具钢	复合镀层
室温	530	360	10.0	4.3
100 °C	620	420	11.9	4.9
250 °C	840	540	12.8	6.0

图6为Cr12MoV模具钢和Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub>复合镀层在宽温域下的体积磨损率。从图6看出，室温下模具钢和复合镀层的体积磨损率相对较低，分别为 $3.45 \times 10^{-4}$ 和 $1.84 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。随着实验温度升至250 °C，模具钢和复合镀层的体积磨损率均呈升高趋势，前者在250 °C的体积磨损率约为室温的2.3倍，而后者在250 °C的体积磨损率仅为室温的1.7倍。由于实验温度升高造成模具钢和复合镀层表层软化、承载能力下降<sup>[18]</sup>，可能改变对磨件与模具钢或复合镀层接触面的应力分布，加剧表层塑性变形，进而加重磨损。同时，实验温度升高会加速摩擦面氧化反应<sup>[19-20]</sup>，生成的氧化产物脆性高且易脱落，这些产物在持续摩擦过程中转变成磨粒，形成“摩擦面氧化—磨粒磨损”的叠加效应，最终表现为体积磨损率随实验温度升高而升高。

但在相同实验温度下，复合镀层的体积磨损率始终低于模具钢，主要归因于：一方面，复合镀层中掺杂的硬质ZrO<sub>2</sub>颗粒可阻碍复合镀层发生局部

塑性变形，在一定程度上提高复合镀层的承载能力<sup>[21]</sup>，并降低摩擦过程中的局部压应力，从而减轻应力集中引发的磨损。另一方面，复合镀层中还掺杂具有自润滑特性的MoS<sub>2</sub>颗粒，凭借层状结构易发生层间滑移和剥落，产物转移到摩擦面会形成润滑膜，使硬接触摩擦转变为润滑膜隔离下的软接触摩擦。上述两方面协同作用，使复合镀层在宽温域下的体积磨损率低于模具钢。

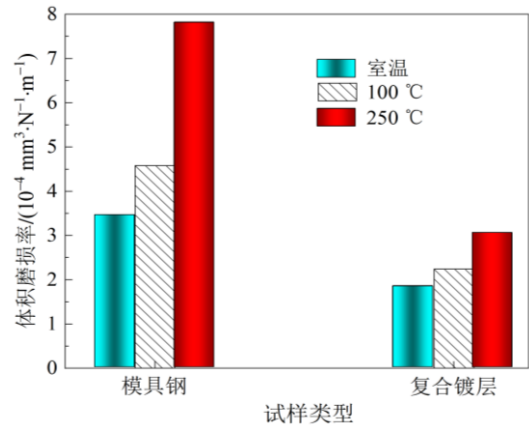


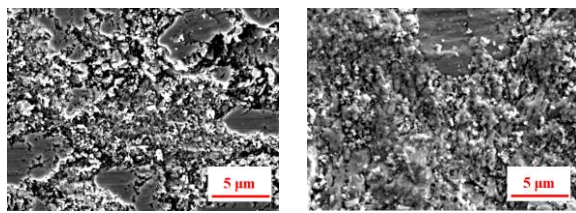
图6 Cr12MoV 模具钢和 Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub> 复合镀层在宽温域下的体积磨损率

Fig.6 Volume wear rate of Cr12MoV die steel and Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub> composite coating in a wide temperature range

2.3.3 磨痕形貌和磨损机制

图7、图8和图9分别为Cr12MoV模具钢和Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub>复合镀层在宽温域下形成的磨痕形貌。从图7(a)看出，室温下模具钢表面呈现非均匀磨损特征：局部发生严重剥落，形成许多尺寸不一的坑洞和延伸状微裂纹，并且坑洞周围附着的颗粒状磨屑尺寸差异较大。从图7(b)看出，室温下复合镀层

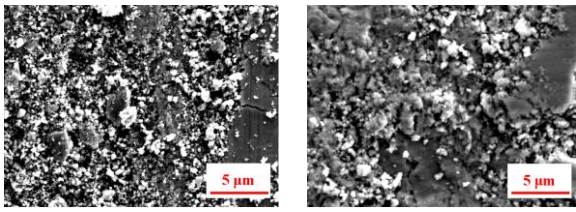
表面呈现均匀磨损特征：表层发生轻度且较均匀剥落，形成的坑洞和磨屑尺寸均一，未出现明显裂纹。随着实验温度升至250 °C，模具钢和复合镀层表面磨损程度均加重。但两者的磨损特征仍存在差异，前者呈现更突出的非均匀磨损特征：局部剥落更严重，形成的坑洞和磨屑尺寸明显增大且差异显著，如图9(a)所示。后者则逐渐呈现非均匀磨损特征，局部发生较严重剥落，伴随着尺寸不一的坑洞和磨屑形成，同时形成少量微裂纹，如图9(b)所示。



(a) 模具钢 (b) 复合镀层

图7 Cr12MoV 模具钢和 Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub> 复合镀层在室温下形成的磨痕形貌

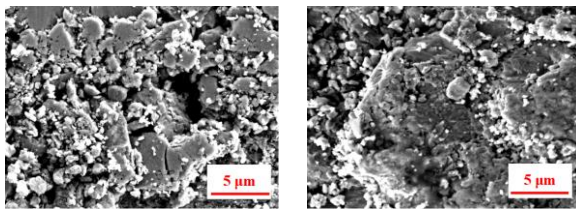
Fig.7 Morphology of wear scars on the surface of Cr12MoV die steel and Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub> composite coating formed at room temperature



(a) 模具钢 (b) 复合镀层

图8 Cr12MoV 模具钢和 Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub> 复合镀层在100 °C下形成的磨痕形貌

Fig.8 Morphology of wear scars on the surface of Cr12MoV die steel and Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub> composite coating formed at 100 °C



(a) 模具钢 (b) 复合镀层

图9 Cr12MoV 模具钢和 Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub> 复合镀层在250 °C条件下形成的磨痕形貌

Fig.9 Morphology of wear scars on the surface of Cr12MoV die steel and Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub> composite coating formed at 250 °C

由于模具钢本身成分不均匀且硬度较低，在持续摩擦过程中易发生局部塑性变形<sup>[22]</sup>，进而诱发严重剥落。随着实验温度升高，模具钢表层逐渐软化，由于成分不均导致表层不同区域的氧化速度存在差异，形成的氧化膜结合力较弱且在持续摩擦过程中易碎裂、剥落，剥落产物转变为磨粒，进一步加剧模具钢表面非均匀磨损。复合镀层无明显缺陷，结构较为致密且硬度较模具钢基体显著提高，凭借致密结构与较高硬度展现出较强的承载能力和抵抗局部变形能力，可有效避免局部严重剥落，使表层发生较均匀磨损。同时，复合镀层以Co和W元素为主要成分且成分相对均匀，能减轻因成分不均引发的局部严重磨损。此外，复合镀层中掺杂硬质ZrO<sub>2</sub>颗粒和具有自润滑特性的MoS<sub>2</sub>颗粒，在250 °C下仍然能协同发挥作用：ZrO<sub>2</sub>颗粒可增强复合镀层的承载能力、缓解局部压应力，MoS<sub>2</sub>颗粒则转移到摩擦面起到自润滑减摩作用，两者协同作用减轻了复合镀层在高温下的磨损程度。虽然实验温度升高同样会造成复合镀层的磨损程度加重，并逐渐呈现非均匀磨损特征，但与模具钢相比，复合镀层的磨损程度较轻。综上所述，在模具钢表面电沉积Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub>复合镀层可起到表面强化效果，进而提高模具钢在宽温域下的抗磨损性能。

为辅助分析Cr12MoV 模具钢和 Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub>复合镀层在宽温域下的磨损机制，对模具钢和复合镀层的磨痕区域进行面扫描。结合图10、图11所示的磨痕区域面扫描结果及图7~9所示的磨痕形貌分析可知，室温下模具钢和复合镀层主要发生磨粒磨损，此时两者的摩擦界面氧化程度很轻，磨痕区域O元素的质量分数很低，氧化磨损可忽略。当实验温度升至100 °C时，模具钢的摩擦界面会发生一定程度氧化，但生成的氧化膜较薄，因此其磨损机制仍以磨粒磨损为主，伴随着轻度氧化磨损。复合镀层以Co和W元素为主要成分且成分相对均匀，在室温及100 °C条件下不会发生遍及整个表面的氧化，仅摩擦界面的坑洞处可能发生局部氧化，磨痕区域O元素的质量分数较低，因此其磨损机制同样以磨粒磨损为主，伴随着轻度氧化磨损。

随着实验温度升至250 °C，模具钢的磨痕区域O元素的质量分数明显升高，表明摩擦界面氧化程度加剧并且生成较厚的氧化膜。该氧化膜脆性大，在对磨件挤压与磨粒刮擦的共同作用下易开裂、剥落，导致氧化磨损程度加重。同时，250 °C条件下模具钢表层软化，原本能抵抗磨粒犁削的表面易被

犁削,最终表现为严重磨粒磨损与氧化磨损并存的磨损机制。对于复合镀层而言,在250 °C条件下,其内部结构可能发生变化(例如晶界软化),导致韧性下降,承受对磨件挤压和磨粒犁削能力减弱,进而加剧磨粒磨损,使磨痕区域形成较多坑洞和微裂纹。这些坑洞和微裂纹的存在,会导致高温下复合镀层的摩擦面难以形成连续状氧化膜,使氧气加速渗入复合镀层内部<sup>[23]</sup>。在摩擦应力持续作用下,复合镀层易发生局部碎裂、剥落,最终呈现非均匀磨损特征。

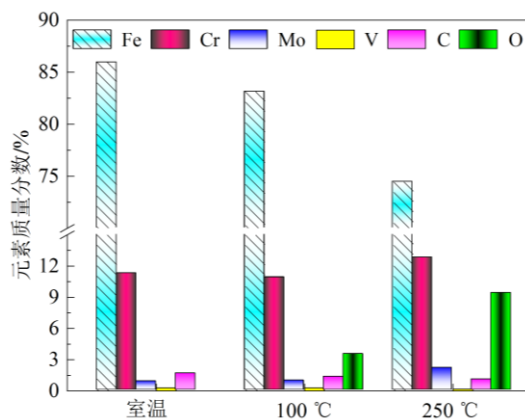


图10 Cr12MoV模具钢在宽温域下形成的磨痕区域面扫描结果

Fig.10 Surface scanning results of wear scar areas formed on Cr12MoV die steel in a wide temperature range

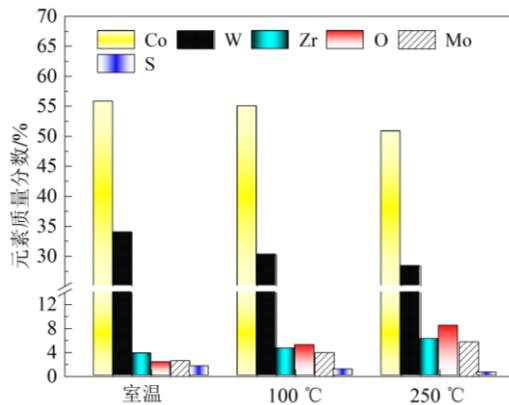


图11 Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub>复合镀层在宽温域下形成的磨痕区域面扫描结果

Fig.11 Surface scanning results of wear scar areas formed on Co-W/ZrO<sub>2</sub>+ MoS<sub>2</sub> composite coating in a wide temperature range

图12所示的拉曼光谱显示:367和404 cm<sup>-1</sup>处的峰分别对应MoS<sub>2</sub>的E<sub>1</sub> 2 g和A<sub>1</sub> g振动模式;623 cm<sup>-1</sup>处的峰归属于立方相ZrO<sub>2</sub>;521 cm<sup>-1</sup>处的峰对应

Co-O键,952 cm<sup>-1</sup>处的峰则对应W-O键。这一结果证实,ZrO<sub>2</sub>与MoS<sub>2</sub>颗粒均随着复合镀层本体磨损转移至摩擦面,且在250 °C条件下复合镀层的摩擦面发生了氧化。结合图11所示的复合镀层宽温域下磨痕区域的面扫描结果可知,250 °C条件下复合镀层磨痕区域的O元素质量分数较室温升高约6.1%,表明随着实验温度升高,复合镀层的氧化磨损程度同样加剧。同时,250 °C条件下复合镀层的磨痕区域Zr和Mo元素的质量分数均高于未磨痕区域(分别为3.58%和2.54%),表明即使在高温条件下,ZrO<sub>2</sub>与MoS<sub>2</sub>颗粒仍能协同发挥抗磨减摩作用。

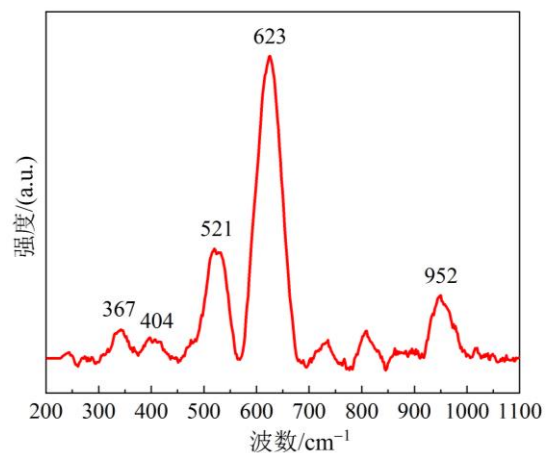


图12 250 °C条件下Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub>复合镀层磨痕区域的拉曼光谱

Fig.12 Raman spectroscopy of the wear scar area of Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub> composite coating at 250 °C

### 3 结论

(1) 采用恒流电沉积法在Cr12MoV模具钢表面制备出无明显缺陷、结构较致密且呈晶态结构的Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub>复合镀层,其中掺杂有ZrO<sub>2</sub>和MoS<sub>2</sub>颗粒。在室温、100和250 °C条件下,该复合镀层的平均摩擦系数、磨痕宽度、最大磨痕深度和体积磨损率均低于模具钢,在宽温域下展现出较好的抗磨损性能。

(2) Co-W/ZrO<sub>2</sub>+MoS<sub>2</sub>复合镀层凭借较致密结构与较高硬度(540~550 HV),具备较强的承载能力和抵抗局部塑性变形能力,可有效避免局部严重剥落。硬质ZrO<sub>2</sub>颗粒的掺杂能进一步增强复合镀层的承载能力,并缓解局部压应力,而MoS<sub>2</sub>颗粒则起到自润滑减摩作用,两者协同减轻了复合镀层在宽温域下的磨损程度。将该复合镀层作为表面强化层,能有效提高模具钢在宽温域下的抗磨损性能。

## 参考文献

- [1] 黄皓天, 田富强, 仝永刚, 等. Cr12MoV 模具钢表面 TiC-Ni60 熔覆层的显微组织与耐磨性能研究[J]. 材料保护, 2025, 58(5): 91-99.
- [2] 何霞, 庞国英, 钟林, 等. Cr12MoV 表面 DLC 涂层和渗氮/QPQ 表面改性工艺耐磨性能的实验研究[J]. 机械科学与技术, 2024, 43(12): 2168-2175.
- [3] 朱东林, 孙登月, 杨家辉, 等. 等离子喷涂 WC-20Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-7Ni/8YSZ 复合涂层的组织及摩擦学性能[J]. 金属热处理, 2023, 48(2): 256-262.
- [4] 王超, 陈小明, 宋仁国. 纳米 TiO<sub>2</sub> 含量对等离子喷涂 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 涂层耐磨性的影响[J]. 金属热处理, 2018, 43(10): 192-196.
- [5] 刘文波. 喷丸强化盾构滚刀刀圈耐磨耐蚀性能分析与研究[D]. 济南: 济南大学, 2021.
- [6] 孙安荣, 顾兰智. 电流方式对 Cr12MoV 模具钢基体上 Ni-Co 合金镀层性能的影响[J]. 电镀与环保, 2019, 39(2): 8-11.
- [7] ZOU X F, HU Y J, LONG X B, et al. Prediction and optimization of phosphorus content in electroless plating of Cr12MoV die steel based on PSO-BP model[J]. Surfaces and Interfaces, 2020, 18: 0-100443.
- [8] 崔凯, 任伟和. Cr12MoV 模具钢化学镀 Ni-W-P/PTFE 复合镀层及耐磨性能研究[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(10): 32-39.
- [9] 李东山, 徐立新, 王龙支. 电沉积裂纹 Ni-W 合金镀层的摩擦磨损性能[J]. 电镀与精饰, 2014, 36(3): 29-33.
- [10] 孙安荣, 顾兰智. 电流方式对 Cr12MoV 模具钢基体上 Ni-Co 合金镀层性能的影响[J]. 电镀与环保, 2019, 39(2): 8-11.
- [11] 陈元迪. 基于纳米 MoS<sub>2</sub> 的复合电刷镀层的抗黏着磨损性能[J]. 材料保护, 2016, 49(4): 26-29.
- [12] 孙艳, 任伟和. Cr12MoV 模具钢电沉积不同 Co 基镀层的抗磨损性能研究[J]. 电镀与精饰, 2024, 46(12): 70-78.
- [13] 黄俊奇. 钢铁材料表面有序微孔固载 MoS<sub>2</sub> 的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2022.
- [14] YANG B P, XUE Y, ZHANG B, et al. Investigation on the friction-wear properties and tribological microscopic mechanism of MoS<sub>2</sub> films[J]. Material Sciences, 2017, 7(3): 403-412.
- [15] 孙磊. 含氢碳/二硫化钼薄膜界面调控与超滑行为研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2021.
- [16] 罗天洪, 吴小川, 罗文军, 等. 湿式制动轴对称摩擦生热与摩擦因数/热磨损特性分析[J]. 机械传动, 2014, 38(3): 114-119.
- [17] 段海涛, 杜三明, 张永振, 等. 高速干滑动条件下钢/铜摩擦副摩擦磨损表面摩擦热规律研究[J]. 润滑与密封, 2007, 32(10): 40-43.
- [18] 周俊豪, 褚兆龙, 李波, 等. 2A70 铝合金高温切向微动摩擦磨损特性研究[J]. 摩擦学学报(中英文), 2026, 46(1): 1-13.
- [19] LIU D T, ZHU A T, KONG D J. Effects of load and speed on high-temperature tribological performance of electrodeposited hard Cr coating in trivalent-Cr bath[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2024, 63(2): 488-497.
- [20] ZHANG S M, ZHANG X P, CAI H C, et al. Effect of B element doping on high-temperature tribological properties of WS<sub>2</sub>-based composite coatings[J]. Lubricants, 2025, 13(8): 332.
- [21] 谭明锋. 含 ZrO<sub>2</sub> 功能复合镀层的制备及其性能研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2011.
- [22] 张俊喜, 陈百明, 易湘斌, 等. Vanadis 4 Extra 模具钢的干滑动摩擦性能[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(4): 185-192.
- [23] 揭晓华, 陈元迪, 谢光荣, 等. Ni-W 合金电刷镀层的高温氧化与高温磨损特性[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(4): 979-983.