

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.11.011

宽载荷范围下复合 MoS₂ 的 GCr15 钢材料表面磨损性能研究

吴昱桦^{1*}, 刘生寿¹, 刘锡尧², 方舟³

(1. 白银矿冶职业技术学院 机电工程学院, 甘肃 白银 730900; 2. 西安工业大学 机电工程学院, 陕西 西安 710000; 3. 甘肃省计量研究院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 针对被广泛应用于制造仪器仪表、轴承套圈、柱塞的 GCr15 钢材料, 目前存在宽载荷范围下易摩擦磨损问题。本文创新性的制备了一种新型富含固体润滑剂 MoS₂ 的 GCr15 球形粉末, 再通过放电等离子烧结技术将球形粉末烧制成 GCr15 基自润滑复合材料, 对其摩擦学特性进行研究。研究结果表明: MoS₂ 稳定存在于 GCr15 粉末中, 且与 GCr15 基体结合状态良好; MoS₂ 的添加对降低 GCr15 钢的摩擦系数及磨损率具有显著效果(降低 30% 以上), 这主要归功于在摩擦过程中固体润滑剂 MoS₂ 富集于摩擦表面形成的减摩耐磨层。研究结果可为新型复合润滑剂设计及金属基滑动部件摩擦性能提升研究提供指导。

关键词: GCr15; 固体润滑剂 MoS₂; 球形粉末; 摩擦磨损

中图分类号: TH14 **文献标识码:** A

Study on the friction and wear properties of GCr15 matrix materials with composite MoS₂ under wide load range

Wu Yuhua^{1*}, Liu Shengshou¹, Liu Xiyao², Fang Zhou³

(1. School of Electrical Engineering of Baiyin Mining and Metallurgy Vocational College, Baiyin 730900, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering Xi'an Technological University, Xi'an 710000, China; 3. Gansu Provincial Institute of Metrology, Lanzhou 730000, China)

Abstract: GCr15 steel material, which is widely used in the manufacturing of instruments, bearing rings, and plungers, currently has the problem of easy friction and wear under a wide load range. This article innovatively prepares a new type of GCr15 spherical powder rich in solid lubricant MoS₂, and then uses discharge plasma sintering technology to sinter the spherical powder into GCr15 based self-lubricating composite material, and studies its frictional properties. The research results indicate that MoS₂ is stably present in GCr15 powder and has a good bonding state with the GCr15 matrix; The addition of MoS₂ has a significant effect on reducing the friction coefficient and wear rate of GCr15 steel (by more than 30%), mainly due to the accumulation of solid lubricant MoS₂ on the friction surface during the friction process,

收稿日期: 2025-03-31 修回日期: 2025-05-28

通信作者: 吴昱桦(1989—), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为材料摩擦润滑, email: 617983394@qq.com

基金项目: 甘肃省科技计划资助项目(24CXGD002); 陕西省科技厅重点研发项目(2024GX-YBXM-212); 2024 年度白银市科技局科技计划资金项目(24-1-32G)

引用信息: 吴昱桦, 刘生寿, 刘锡尧, 等. 宽载荷范围下复合 MoS₂ 的 GCr15 钢材料表面磨损性能研究[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(11): 79-84.

Wu Yuhua, Liu Shengshou, Liu Xiyao, et al. Study on the friction and wear properties of GCr15 matrix materials with composite MoS₂ under wide load range[J]. Plating and Finishing, 2025, 47(11): 79-84.

forming a friction reducing and wear-resistant layer. The research results can provide guidance for the design of new composite lubricants and the study of improving the friction performance of metal based sliding components.

Keywords: GCr15; solid lubricant MoS₂; spherical powder; friction and wear

GCr15钢是一种合金含量较少,且具有较高硬度、组织均匀、接触疲劳性能优良的高碳铬轴承钢^[1-2],被广泛应用于制造仪器仪表器件,还用于机床滚珠丝杆、轴承套圈、柱塞等机械部件及其表面的增强制造,GCr15钢摩擦磨损性能直接影响相关零部件的工作稳定性、服役寿命等,因此提高GCr15钢的减摩耐磨特性具有十分重要的价值^[3-4]。

现如今固体自润滑技术被广泛应用于提高金属基摩擦磨损性能方面,已取得进展^[5-7]。尹延国等^[8]采用石墨来提高金属基材料的摩擦学性能,结果表明金属基材料取得了较低的摩擦系数及磨损率;张洪龙等^[9]Ni20Cr合金为基体,加入镍包石墨、BN及共晶BaF₂/CaF₂混合物为润滑相,采用粉末冶金的方法制备了镍基高温多相复合自润滑材料,研究发现当石墨、BN及共晶BaF₂/CaF₂比例分别为2 wt.%、10 wt.%和8 wt.%时,材料获得了最低的摩擦系数0.27及较低的磨损量0.114 mg/m,其磨损机理为磨粒磨损、表面疲劳磨损及轻微的氧化磨损。MoS₂作为层状固体润滑剂的典型代表也被应用于金属基材料中以提高其摩擦磨损性能,张俊喜等^[10]探究了MoS₂对铝基材料摩擦磨损性能的影响,结果表明铝基材料的摩擦磨损性能有了显著提高。

虽然关于固体自润滑材料有研究取得了很大进展,但是普遍是通过将固体润滑剂直接添加到金属基粉末材料中,这会使因固体润滑剂分布不均匀而导致摩擦行为随机难控,难以有效稳定提升金属部件的摩擦磨损性能^[11-13]。且目前关于固体润滑剂MoS₂增强GCr15钢的减摩抗磨性能研究也鲜见报道,其作用机制也不清楚。基于此,本文创新性的提出通过高温熔炼技术制备富含MoS₂的GCr15球形粉末,并采用放电等离子烧结技术将富含MoS₂的GCr15球形粉末烧结成GCr15基自润滑复合材料,重点研究GCr15基自润滑复合材料的摩擦磨损性能,研究结果可为金属基自润滑材料设计和制

备,以及零件自润滑表面制备提供参考。

1 实验

1.1 试样制备

本实验以纯GCr15样品(定义为样品GC)与包含MoS₂粉末的GCr15样品(定义为样品GC-M)为研究对象,实验样品通过放电等离子烧结技术(SPS)制备。基体材料GCr15由C粉、Mn粉、Si粉、Ni粉、Cr粉、Cu粉、Mo粉、S粉、P粉和Fe粉按一定质量分数比配制而成,比值分别为0.99:0.35:0.20:0.20:1.50:0.20:0.10:0.025:0.025:96.41(见表1),各粉末粒径为30~50 μm,纯度99.9 wt.%。固体润滑剂MoS₂粉末粒径为20~50 μm,纯度为99.99 wt.%,图1为MoS₂粉末的微观形貌,可见MoS₂呈现典型的层状结构,形态良好。

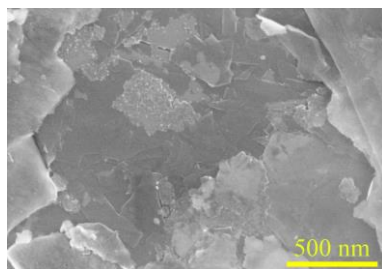
首先制备GCr15-MoS₂混合型球形粉末。将基体材料GCr15粉末按照一定比例与固体润滑剂MoS₂震荡混合得到初始配料,将初始配料通过高温熔炼炉在惰性气氛下进行熔化(温度为1 200 °C~1 250 °C,保护气体为Ar气体),得到液化的混合熔液,再将熔液通过雾化处理得到冷却凝固后形成的GCr15-MoS₂混合型球形粉末。

其次,制备固体自润滑材料试样。称取一定量GCr15-MoS₂混合型球形粉末置于圆筒状石墨模具中,并利用铅纸、石墨压头等将圆筒状石墨模具端部压紧。最后将装有GCr15-MoS₂混合型球形粉末的圆饼状石墨模具放置于等离子烧结炉中,设置烧结参数:烧结温度为1 000 °C、升温速率为90~110 °C/min、烧结压力为25 MPa、真空度为0.1 Pa、保温时间为10 min。烧结结束后对样品进行打磨抛光即得到含固体润滑剂MoS₂的GCr15样品(即样品GC-M)。同样方法制备可获得纯GCr15样品(即样品GC)。

表1 GCr15的元素组分

Tab.1 Element composition of GCr15

元素	C	Mn	Si	Ni	Cr	Cu	Mo	S	P	Fe
质量百分数/%	0.99	0.35	0.20	0.20	1.50	0.20	0.10	0.025	0.025	Bal.

图1 层状 MoS₂ 的微观形貌Fig.1 Microscopic morphology of layered MoS₂

1.2 摩擦磨损测试

摩擦实验为滑动摩擦形式,采用摩擦试验机的型号为HT-1000(兰州中科凯华科技开发有限公司,砝码加载方式),摩擦测试的实际实施流程如图2所示。摩擦测试为球盘接触(如图3所示),根据赫兹接触原理^[15],获得摩擦实验载荷设定为4、8、12和16 N,温度为室温,速度为0.3 m/s,摩擦磨损测试时间为30 min。鉴于对对磨副高强度要求,对磨副选为Si₃N₄陶瓷球。摩擦测试每种工况下测试三次,摩擦系数及磨损率为三次测试结果的平均值。摩擦测试的摩擦系数由摩擦试验机的传感系统直接实时记录并输出在所连接计算机上,磨损率则是根据摩擦实验前后质量损失(通过超精密电子天平测得质量损失)计算而得,计算公式为:

$$W=V/(S \times F)=(V \times \rho)=M_{\text{loss}}/(S \times F \times \rho) \quad (1)$$

式中: V 为磨损体积; S 为滑动距离; F 为施加载荷; ρ 为样品密度; M_{loss} 为摩擦前后样品质量损失。

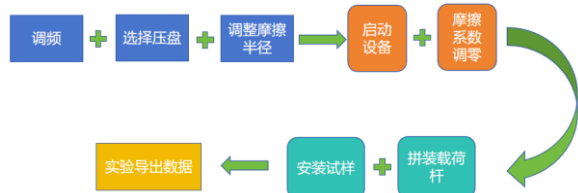


图2 摩擦实验实施流程图

Fig.2 Flow chart for friction experiment implementation



图3 摩擦磨损实验方式

Fig.3 Friction and wear test method

2 结果分析

2.1 GCr15-MoS₂ 混合型球形粉末性能分析

通过以上真空雾化方法制备得到了GCr15-MoS₂混合型球形粉末,其微观形貌结构如图4所示(MoS₂添加量为2 wt.%)。可以观察出,所制备GCr15-MoS₂粉末具有良好的球形度及尺度一致性,有利于后续样品制备过程中颗粒的流动,促进粉末冶金均质成型,EDS测试得到球形粉末中含有一定量的Mo和S元素,证实了润滑剂MoS₂的存在。

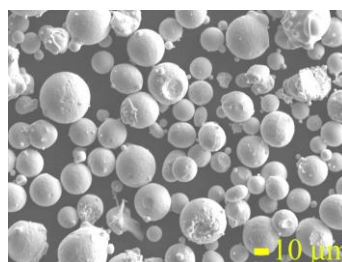
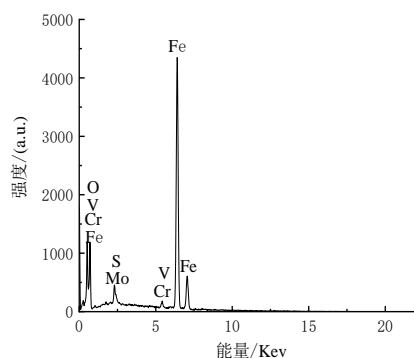
(a) GCr15-MoS₂ 混合型球形粉末微观形貌(b) GCr15-MoS₂ 混合型球形粉末元素含量

图4 GCr15-MoS₂ 混合型球形粉末微观形貌图及元素含量
Fig.4 Microstructure and element content of GCr15-MoS₂ mixed spherical powder

为探究不同含量固体润滑剂MoS₂对GCr15的摩擦磨损特性影响,制备了不同MoS₂含量的GC-M样品,见表2所示,MoS₂的添加量分别为0 wt.%(样品GC)、2 wt.%(样品GC-M2)、5 wt.%(样品GC-M5)和8 wt.%(样品GC-M8)。为获得放电等离子烧结所制备的GC及GC-M样品的机械性能,对样品的密度及硬度进行了测试,测试结果见表2。利用HV-1000维氏硬度计进行硬度测试时,在每个样品的表面取五个点,将五个点处硬度的平均值作为此样品的最终硬度值。密度测量是采用基于阿基米德原理浮力法的BGD-300密度计测量而得^[14],取三次测量的平均值作为每个样品的密度最终值。从平均密度和硬度结果看,随着MoS₂含量的增加,样品的平均密度

有些许降低,这是由于MoS₂为层状结构,密度及强度较低,这有利于润滑剂MoS₂的扩散。

表 2 GC 与 GC-M 样品的密度及硬度值

Tab.2 Density and hardness values of GC and GC-M samples

样品	主要成分	平均密度 /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	平均硬度 /GPa
GC	GCr15	7.81	5.14
GC-M2	GCr15+2 wt.% MoS ₂	7.56	4.84
GC-M5	GCr15+5 wt.% MoS ₂	7.37	4.47
GC-M8	GCr15+8 wt.% MoS ₂	7.16	4.05

2.2 摩擦系数及磨损率

通过以上球盘接触摩擦磨损实验,获得了不同样品的摩擦系数及磨损率。图5是样品GC、GC-M2、

GC-M5、GC-M8的平均摩擦系数及平均磨损率变化趋势图。从图5明显看出以MoS₂作为固体润滑剂的样品GC-M2、GC-M5、GC-M8与纯样品GC相比,表现出了较优异的摩擦磨损行为。图5(a)显示,样品GC的摩擦系数范围为0.49~0.65,而GC-M摩擦系数范围为0.26~0.52,较于样品GC降低了30%左右;图5(b)显示了样品GC、GC-M2、GC-M5和GC-M8的磨损率变化图,GC-M的磨损率比样品GC有不同程度的降低,总体降低在30%以上。当摩擦施加载荷为12 N时,样品GC-M达到摩擦系数及磨损率的最低值,说明12 N为样品载荷工况的较佳条件。此外,GC-M5为GC-M样品中减摩耐磨行为表现最为优异的样品,这说明固体润滑剂MoS₂的最佳添加含量为5 wt.%,且在12 N载荷条件下,其摩擦系数及磨损率分别低至0.26和 $4.40\times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$,这必然与球形粉末中掺杂的固体润滑剂MoS₂密切相关。

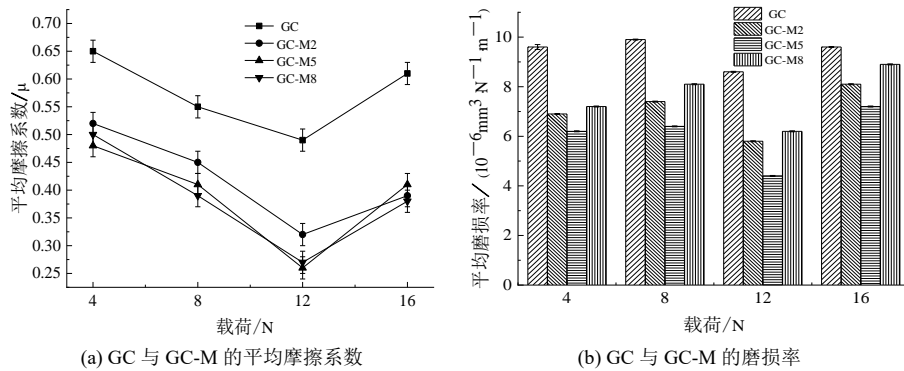


图 5 GC 与 GC-M 的平均摩擦系数及磨损率变化趋势图

Fig.5 Average friction coefficient and the variation trend of the wear rate of GC and GC-M

2.3 磨痕三维轮廓

为了更进一步研究磨损表面特征变化,采用白光干涉仪器对样品GC与GC-M5的磨痕进行了测试,结果如图6所示。从图可以看出,样品GC-M5磨

痕宽度及深度较样品GC均有较大幅度减小,且样品GC-M5的磨痕表面粗糙度与样品GC对比也较小,也这证实了样品GC-M5具有优异的摩擦系数及磨损率。

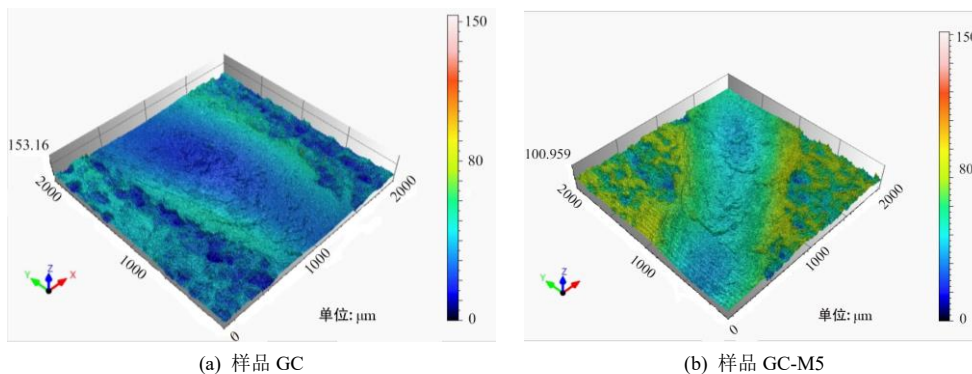


图 6 GC 与 GC-M5 的磨痕三维轮廓

Fig.6 Three-dimensional profile of abrasion traces of GC and GC-M5

2.4 磨损表面微观形貌分析

为了深入分析GC-M5优异的减摩耐磨机制,利用电子探针显微镜对其摩擦磨损形貌进行分析,并对磨痕表面元素进行检测,结果如图7及表3所示。图7(a)显示,当载荷为8 N时,磨痕表面布满大小犁沟,并且还分布大量磨屑,其主要磨损机制为犁削。当所施加载荷增至12 N时,GC-M5磨痕表面较于载荷为8 N时呈现了较光滑状态,仅有少许细小的犁

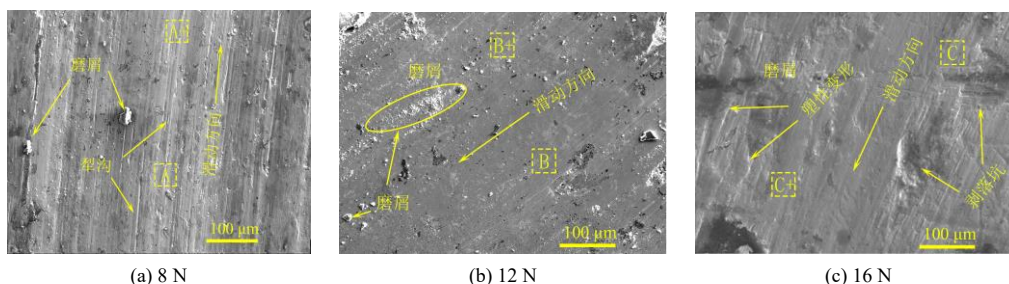


图7 GC-M5 分别在不同载荷条件下的磨痕形貌图

Fig.7 Morphology of wear marks on GC-M5 under different loading conditions

表3展示了不同载荷条件下GC-M5磨痕表面各元素含量。不同载荷条件下,各个元素含量数值分别取A与A+、B与B+、C与C+点EDS分析结果的平均值。可以看出在不同载荷作用下,元素Mo及S的含量均高于所添加固体润滑剂元素含量,这说明在磨损表面发生了层状固体润滑剂的富集行为。尤其当载荷为12 N时,Mo与S元素含量分别高达9.30 wt.%和2.90 wt.%,这是由于在此载荷作用下,MoS₂可以更好的被挤出至磨损表面,并在磨损表面形成了润滑层,以起到减摩耐磨作用。

表3 在不同载荷条件下 GC-M5 磨痕表面各元素含量

Tab.3 Content of various elements on the worn surface of GC-M5 under different load conditions

检测点	元素含量/(wt.%)					
	Cr	C	Mo	Fe	S	O
8 N(A, A+)	1.46	0.98	7.5	85.19	1.68	3.22
12 N(B, B+)	1.51	1.02	9.3	78.95	2.90	5.34
16 N(C, C+)	1.49	1.05	8.2	80.84	2.10	5.32

2.5 磨痕断面微观形貌分析

为了更进一步探究层状固体润滑剂MoS₂在磨损表面的富集成膜行为,利用场发射电子显微镜对GC-M5样品磨痕断面进行了分析,其断面结构如图8所示。可以明显看出在磨痕断面结构可以分为两个部分:富含固体润滑剂MoS₂的润滑层与GC-M5基

沟,磨屑也很好的布展在磨损表面(图7(b)所示),其磨损机制为轻微犁削,这很有可能是固体润滑剂MoS₂在摩擦表面的富集行为所导致的。载荷条件为16 N时,如图7(c)所示,材料发生了大量的塑性变形,同时,大的剥落坑也在磨损表面呈现,这表明材料在较大载荷条件下已经丧失了其抵抗能力,以严重塑性变形与剥落为主要磨损机制。

体。通过EDS数据分析(表4)也可以确认在断面上部Mo及S元素含量远高于基体材料,进一步证明MoS₂摩擦磨损过程中在磨损表面的富集行为。

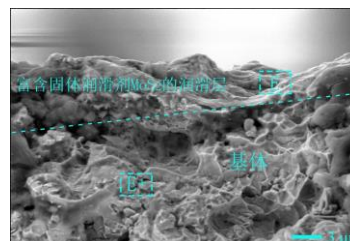


图8 GC-M5 在12 N 载荷条件下的磨痕断面形貌

Fig.8 Morphology of the wear scar section of GC-M5 under a load of 12 N

表4 在12 N 载荷条件下 GC-M5 磨痕断面不同位置处各元素含量

Tab.4 Content of each element at different positions of the GC-M5 scratch section under 12 N load

检测点	元素含量/(wt.%)					
	Cr	C	Mo	Fe	S	O
E+	1.39	0.99	6.5	84.12	1.45	4.34
E	1.40	1.10	9.6	79.28	2.69	5.00

根据以上分析,载荷过低,不利于固体润滑剂MoS₂在摩擦表面铺展及富集,而载荷过高时,材料则会发生较严重的塑性变形,导致磨损率急剧增大。当载荷条件为12 N时,GC-M5达到最优的摩擦

磨损性能, 这主要归功于所添加的固体润滑剂 MoS_2 。GC-M5减摩耐磨机理如图9所示, 在循环摩擦力作用下, 层状固体润滑剂 MoS_2 可以很好地在磨损表面铺展开来, 并在循环摩擦力作用下逐渐富集成膜, 形成减摩耐磨润滑层, 使得材料获得较低摩擦系数及磨损率, 大大提高了GCr15钢的摩擦磨损性能。

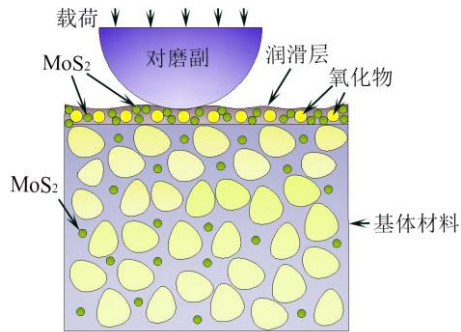


图9 复合材料GC-M减摩耐磨机理

Fig.9 Friction and wear reduction mechanism of GC-M

3 结论

本文制备了一种新型富含固体润滑剂 MoS_2 的GCr15球形粉末, 再通过放电等离子烧结技术将球形粉末烧制成GCr15基自润滑复合材料, 探究了GCr15- MoS_2 自润滑材料在不同载荷下的摩擦磨损性能, 得到主要结论如下:

(1) 创新性的采用真空熔炼技术成功获得了新型富含固体润滑剂 MoS_2 的GCr15球形粉末, 球形粉末成形质量良好, 解决了固体润滑剂与金属基体结合不良的问题。

(2) 与纯GCr15材料相比, GCr15- MoS_2 自润滑材料具有良好的摩擦学性能, 在宽载荷范围内, GCr15- MoS_2 自润滑材料摩擦系数及磨损率均降低30%以上。

(3) 当固体润滑剂 MoS_2 含量为5 wt.%时, GCr15- MoS_2 自润滑材料的摩擦磨损性能表现更为优异。

(4) GCr15- MoS_2 自润滑材料具有优异减摩耐磨性能的主要原因是, 在磨损表面形成了富含固体润滑剂 MoS_2 的润滑层, 且润滑层形成均质, 当载荷条件为12 N时, 更有利于 MoS_2 的铺展及富集。

参考文献

[1] 宋宝玉, 古乐, 邢恩辉. 真空条件下 GCr15 钢摩擦磨损

性能研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004(2): 238-241.

[2] 马廉洁, 韩智斌. 机械零件织构化表面减摩性能研究进展[J]. 润滑与密封, 2023, 48(12): 163-177.

[3] 吴彼, 张振波, 李曙. 航空发动机材料摩擦学研究进展[J]. 摩擦学学报, 2023, 43(10): 1099-1117.

[4] 王常川, 王日初, 彭超群, 等. 金属基固体自润滑复合材料的进展[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(7): 1945-1955.

[5] Ren X Y, Hong B Z, Diao Q W, et al. Surface modification technologies for enhancing the tribological properties of cemented carbides: a review[J]. Tribology International, 2023, 191:108257.

[6] 纪铭亮, 马生辉, 黄浩洋, 等. 风电机组制动片材料摩擦学性能的研究进展[J]. 机械工程材料, 2025, 49(1): 8-15.

[7] 左维琦, 孙睿泽. 纳米添加剂润滑条件下 GCr15/45#钢摩擦磨损性能影响[J]. 机械制造与自动化, 2016, 45(4): 40-43, 58.

[8] 朱龙辉, 焦智超, 石焯然, 等. 常用金属材料的低温摩擦学研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2025, 54(1): 254-262.

[9] 尹延国. 铜基石墨自润滑材料及其摩擦学研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.

[10] 张洪龙. 镍基高温复合自润滑材料的制备与性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.

[11] 张俊喜, 陈百明, 龚成功, 等. MoS_2 对铝基材料摩擦磨损性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2016, 21(5): 746-753.

[12] 李艳敏, 柳学全, 李金普, 等. 高温固体自润滑复合材料研究进展[J]. 粉末冶金工业, 2023, 33(1): 99-106.

[13] Hu H R, Guo Y J, Yan J H. Dry sliding wear behavior of $\text{MoSi}_2\text{-Mo}_5\text{Si}_3\text{-Mo}_5\text{SiB}_2$ composite at different temperatures and loads[J]. Wear, 2019, 428/429: 237-245.

[14] Lu G C, Shi X L, Liu X Y, et al. Effects of functionally gradient structure of Ni3Al metal matrix self-lubrication composites on friction-induced vibration and noise and wear behaviors [J]. Tribology International, 2019, 135: 75-88.

[15] Liu X Y, Wang Y J, Qin L J, et al. Friction and wear properties of a novel interface of ordered microporous Ni-based coating combined with MoS_2 under complex working conditions[J]. Tribology International, 2023, 189: 108970.