**Modeling and Simulation** 建模与仿真, 2024, 13(4), 4381-4394
Published Online July 2024 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/mos
https://doi.org/10.12677/mos.2024.134396

# 磁控溅射沉积Ni-DLC涂层摩擦磨损性能研究及预测

**石青松，徐红玉，王晓强**

河南科技大学机电工程学院，河南 洛阳

收稿日期：2024年6月15日；录用日期：2024年7月8日；发布日期：2024年7月15日

## 摘　要

**为提高风电轴承的摩擦磨损性能、延长使用寿命，从而降低运维成本，以硬度、摩擦系数和磨损率为摩擦磨损性能的评价指标。在42GrMo钢基体使用非平衡磁控溅射沉积技术沉积Ni-DLC复合涂层，对复合涂层进行摩擦磨损实验和划痕实验，测试涂层的硬度、摩擦系数和磨损率，控制磁控溅射工艺参数研究其对评价指标的影响规律。基于正交实验，建立指数回归预测模型和BP神经网络预测模型，通过实验验证了指数回归预测模型具有较好的精度，可指导实际生产，具有一定的理论意义。**

## 关键词

**磁控溅射，指数回归，摩擦磨损性能，Ni-DLC涂层，风电轴承**

# Research and Prediction of Friction and Wear Properties of Magnetron Sputtering Deposition Ni-DLC Coatings

**Qingsong Shi, Hongyu Xu, Xiaoqiang Wang**

School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan

Received: Jun. 15th, 2024; accepted: Jul. 8th, 2024; published: Jul. 15th, 2024

## Abstract

**In order to improve the friction and wear performance of wind power bearings, prolong the service life, and reduce the operation and maintenance costs, the hardness, friction coefficient and wear rate are the evaluation indicators of friction and wear performance. The non-equilibrium**

文章引用: 石青松, 徐红玉, 王晓强. 磁控溅射沉积 Ni-DLC 涂层摩擦磨损性能研究及预测[J]. 建模与仿真, 2024, 13(4): 4381-4394. DOI: 10.12677/mos.2024.134396

**magnetron sputtering deposition technology was used to deposit the Ni-DLC composite coating on the 42GrMo steel matrix, and the friction and scratch tests were carried out on the composite coating to test the hardness, friction coefficient and wear rate of the coating, and the magnetron sputtering process parameters were controlled to study its influence on the evaluation index. Based on orthogonal experiments, the exponential regression prediction model and the BP neural network prediction model are established, and the exponential regression prediction model is verified by experiments to have good accuracy, which can guide the actual production, which has certain theoretical significance.**

## Keywords

**Magnetron Sputtering, Exponential Regression, Friction and Wear Properties, Ni-DLC Coating, Wind Power Bearings**



## 1. 引言

随着我国“双碳”战略计划的出台与应用，低碳绿色循环发展步履坚实，积极推进碳达峰碳中和[1]。作为效率高且资源丰富的绿色低碳的风能得到研究人员的关注，已成为新能源发展战略的重要力量。风电轴承是风电机利用风能系统平稳运行的核心零部件，其滚动体的摩擦磨损性能和服役寿命是风电轴承平稳运行、降低运维成本的重要因素。镍掺杂类金刚石复合涂层(Ni-DLC)具有低摩擦系数、优异的减磨耐磨性和力学性能等优点，在滚动体表面沉积涂层可提高风电轴承减磨耐磨性能和服役寿命，从而降低风电机的运维成本。

近年来，国内外学者对复合 DLC 涂层摩擦磨损性能进行研究。Chen Y 等[2]使用直流磁控溅射技术沉积 $MoS_2$-DLC 涂层，研究 $MoS_2$ 含量对于涂层结构及力学性能的影响，还研究复合涂层与 $Al_2O_3$ 球体的摩擦磨损行为及机理。结果表明，$MoS_2$ 的掺杂提高了涂层的粘结强度，摩擦中发生磨料磨损和疲劳磨损。Pillaca E 等 Ling J 等[3]使用外加阴极的增强型技术制备硼掺杂类金刚石涂层，对涂层微观结构、硬度、摩擦系数和硬度进行测试。结果表明，摩擦系数、磨损和硬度均有提高。Ya P J 等[4]采用脉冲电沉积和液相电沉积方法在在(TC4)合金衬底表面沉积了一种耐磨润滑的 Ni/N/rGO-DLC 薄膜，研究 rGO 含量对共掺杂类金刚石碳薄膜微观结构和摩擦行为的影响。结果表明，在 0.07 g/LrGO，在改善薄膜力学性能方面的协同作用。Yuting L 等[5]在铝合金表面原位构建了具有多孔结构的 DLC/MAO 多层膜，对其形貌、组成和摩擦学性能进行了研究。在干态和油润滑条件下，研究涂层的磨损机理以及载荷对磨损的影响。结果表明，DLC/MAO 涂层具有优异的承载能力和耐磨性能。Zhang S 等[6]采用磁控溅射在 316L 不锈钢基体上沉积了 Ti、Ni 元素掺杂的类金刚石(DLC)涂层。分析了元素掺杂对 DLC 涂层微观结构和摩擦磨损性能的影响。结果表明，Ni 掺杂 DLC 涂层具有更光滑的表面、更致密的织构、更高的结合强度、更高的硬度、提高了耐磨性。Alireza V 等[7]使用高功率脉冲磁控溅射(HiPIMS)将 Ne 含量提高到 50%的退火 DLC 薄膜，评估其摩擦力学性能。结果表明，高温和退火膜摩擦学测试中涉及的磨损机制是磨损和附着力的结合。

胡杨等[8]使用直流磁控溅射技术在 304 不锈钢上沉积 $MoS_2$ 的 DLC 薄膜，研究其摩擦学性能的影响。结果表明，薄膜致密性好，薄膜硬度达到 10 GPa，降低摩擦系数及磨损率，$MoS_2$ 掺杂类金刚石薄膜可有

效改善 304 不锈钢基体的摩擦磨损性能。冯兴国等[9]使用磁控溅射与等离子体增强化学沉积在 9Cr18 钢表面沉积了 $MoS_2$-Ti 薄膜、W-DLC 和 DLC 薄膜。结果表明，$MoS_2$-Ti 薄膜与 DLC 薄膜的摩擦系数和磨损率最小。$MoS_2$-Ti 薄膜、W-DLC 与 DLC 薄膜摩擦副的磨损机制为磨粒磨损、黏着磨损。魏晨阳等[10]改变高功率脉冲磁控溅射技术(HiPIMS)的电源占空比，制备结构不同的 Ti 过渡层。结果表明，HiPIMS 技术可提高 Ti 层致密性与承载能力，摩擦寿命提高 4.5 倍，为研究涂层易脱落提供新思路。孔维程[11]在钛合金表面进行渗氮处理后磁控溅射沉积 Cr-DLC 薄膜，对于钛合金的摩擦学以及服役寿命有着重要意义。结果表明，复合工艺提高了显微硬度，降低平均摩擦系数和磨损率，表现良好的减磨耐磨性能与抗腐蚀性能。杜广煜等[12]在绝缘涂层 $Al_2O_3$ 表面沉积类金刚石碳(DLC)薄膜，研究其微动摩擦特性。结果表明，在适当高温下，DLC 涂层具有良好的摩擦学性能，湿度在 0.8RH 时平均摩擦系数较小。聂朝胤等[13]在渗碳淬火钢表面利用非平衡磁控溅射技术沉积不同含量 Ti 掺杂类金刚石涂层，对硬度、摩擦系数、膜基结合力进行测试。结果表明，复合涂层 Ti 掺杂量越大，摩擦系数越小。

综上所述，国内外学者对于复合类金刚石涂层的摩擦磨损性能进行了研究，复合涂层的摩擦磨损性能、抗腐蚀性能、摩擦磨损性能、服役寿命、表面质量都有良好的表现，被广泛应用于各个行业，但是对于镍掺杂类金刚石复合涂层(Ni-DLC)的摩擦磨损性能的研究还较少，故本文使用非平衡磁控溅射技术在 42GrMo 钢基体表面沉积 Ni-DLC 涂层，对复合涂层的摩擦磨损性能进行研究，旨在提高风电轴承的摩擦磨损性能、延长使用寿命、降低运维成本。

## 2. 磁控溅射沉积 Ni-DLC 涂层原理及制备过程

### 2.1. 磁控溅射原理

溅射镀膜是通过惰性气体通过辉光放电产生带电离子，经电场加速后轰击靶材表面，产生靶材原子与二次电子，进而轰击气体原子，产生更多的带电离子，靶材原子后沉积在基体表面的过程。缺点是沉积速率低、基底温升高等缺点。磁控溅射是引入正交电磁场，是电子在磁场内做摆线运动，提高其沉积速率。

磁控溅射是一种利用辉光放电产生离子轰击靶材表面，通过磁场延长电子的运动线路，通过磁场控制电子的运动方向，在阴极基体上进行沉积涂层的技术，其工作原理如图 1 所示。电子在正交电电场中作用下，加速移动基体的过程中与 Ar 原子相撞，电离出 Ar+并产生电子。电子向基体移动，在电场作用下，Ar+高速轰击靶材表面，使其溅射。在溅射原子中，中性的靶材原子沉积在基体表面形成薄膜。e1. e3 为二次电子受洛伦磁力的作用，被束缚在靶材表面等离子区域，在其电离出大量的 Ar+轰击靶材。随着碰撞次数增多，二次电子能量损耗尽，最后沉积在基体。因为电子能量非常低，所以基体温升慢。在磁极轴线处与磁场平行，电子 e2 直接飞到基体。所以，磁控溅射具有高速和低温的特点。

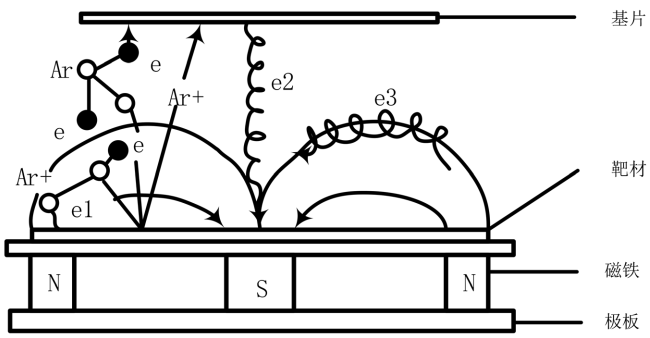



**Figure 1.** Schematic diagram of magnetron sputtering
**图 1.** 磁控溅射原理图

## 2.2. 实验材料及制备过程

### 2.2.1. 实验材料

本文选用淬火处理及磨削加工后的 42CrMo 钢作为轴承滚动体的等效加工对象。将直径 30 mm 的 42CrMo 钢棒料通过线切割技术进行切割，获得直径 30 mm、厚度 5 mm 的基体样片。42CrMo 钢的力学性能如表 1 所示，其化学成分如表 2 所示。

**Table 1.** Mechanical properties of 42CrMo steel
**表 1.** 42CrMo 钢的力学性能

| 参数 | 密度/(kg·m$^{-3}$) | 泊松比 | 屈服强度/MPa | 弹性模量/GPa | 抗拉强度/MPa | 硬度/HV |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 数值 | 7850 | 0.28 | 930 | 212 | 1080 | 600 |

**Table 2.** Elements and contents of 42CrMo steel (wt%)
**表 2.** 42CrMo 钢的元素及含量(wt%)

| P | Cu | C | Mn | Cr | Mo | Si | Ni | Fe |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.03 | 0.03 | 0.37 | 0.77 | 0.98 | 0.21 | 0.15 | 0.04 | 97.4 |

### 2.2.2. 涂层制备过程

设备选用 UDP-700 型闭合非平衡磁控溅射离子镀膜机来制备 Ni-DLC 涂层。在开始制备涂层前，需将石墨靶材和 Ni 靶材安装到镀膜实验机相应位置。安装万用表防止出现短路，关闭舱门，进行沉积涂层。该设备有 4 个溅射靶位置，可以制备单层、多层及复合涂层。

Ni-DLC 涂层沉积过程分为实验前期准备、镀膜机真空实现、离子轰击等，操作如下：

1) 前期实验准备：将 42CrMo 钢基体样片，使用 200#、800#、2000#砂纸对打磨样片，后用抛光布和研磨膏抛光到镜面效果，将基体样片放入到无水乙醇和丙酮中超声波清洗 10~15 分钟。将其放到样品台上面，用吹风机清洁样片和样品台，防止靶中毒。擦拭真空室封口，盖上真空室盖子并检查栓口，防止密封效果差。

2) 镀膜机真空实现：打开机器电源与前级阀和高阀，抽真空到 $5 \times 10^{-5}$ Pa。加热基体到预定值。

3) 离子轰击：打开离子轰击电源，预热 10 分钟，通入适量的氩气，选择合适的溅射功率、电压、电流等参数，记录镀膜时间。

4) 沉积 Ni-DLC 涂层：打开 Ni 靶材电源，沉积 20 min，将 Ni 作为过渡层，后关闭 Ni 靶材电源，打开石墨靶材电源，沉积设定时间。

5) 取出样片：关闭其他电源，最后关闭总电源。等样片冷却 30 分钟，打开放气阀和真空室，取出基体样片。

## 2.3. 复合涂层性能测试方法

本文使用 LSXPT 型纳米压痕仪，通过载荷与位移量的关系，实现涂层的单个硬度的测量。每个实验样片测试 9 个点，计算每个测试点的硬度，计算平均硬度作为该样片的最终硬度，完成涂层硬度测试。

选用 MFT-5000 超滑摩擦磨损试验机，测量 Ni-DLC 涂层的摩擦系数，对每个实验样片进行 3 次测试，取平均值作为测量最终数据。

选用白光干涉 3D 划痕仪测量涂层的磨痕轮廓，计算得出涂层的磨损率。

## 2.4. 实验设计及结果

设计正交实验，可有效减少磁控溅射沉积实验次数，还可以研究各个溅射因子的交互作用。优点是高效、简单、科学等，广泛应用在科研研究、工业生产等。

选用溅射功率 $Q$、沉积温度 $C$、沉积气压 $P$ 作为磁控溅射工艺参数[14]-[16]，以涂层硬度 $H$、摩擦系数 $\mu$、磨损率 $M$ 为摩擦磨损评价指标进行正交实验。取每个因子 4 个水平，设计 16 组正交实验，磁控溅射参数水平如表 3 所示，正交实验结果如表 4 所示。

**Table 3.** Sputtering factor level
**表 3.** 工艺参数水平表

| 水平 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| 溅射功率/W | 50 | 110 | 170 | 230 |
| 沉积温度/℃ | 75 | 100 | 125 | 150 |
| 沉积气压/Pa | 0.3 | 0.8 | 1.3 | 1.8 |

**Table 4.** Orthogonal experiment results of magnetron sputtering
**表 4.** 磁控溅射正交实验结果表

| 序号 | 溅射功率 $Q$/W | 沉积温度 $C$/℃ | 沉积气压 $P$/Pa | 硬度 $H$/GPa | 摩擦系数 $\mu$ | 磨损率 $M$/ $10^{-8}$ mm$^3$/Nm |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 50 | 75 | 0.3 | 7.165 | 0.141 | 50.622 |
| 2 | 50 | 100 | 0.8 | 7.386 | 0.121 | 40.336 |
| 3 | 50 | 125 | 1.3 | 7.55 | 0.125 | 43.845 |
| 4 | 50 | 150 | 1.8 | 7.92 | 0.152 | 55.581 |
| 5 | 110 | 75 | 0.8 | 7.638 | 0.105 | 24.392 |
| 6 | 110 | 100 | 0.3 | 7.783 | 0.130 | 47.957 |
| 7 | 110 | 125 | 1.8 | 8.057 | 0.117 | 29.663 |
| 8 | 110 | 150 | 1.3 | 7.101 | 0.121 | 35.812 |
| 9 | 170 | 75 | 1.3 | 7.802 | 0.105 | 21.613 |
| 10 | 170 | 100 | 1.8 | 8.02 | 0.112 | 29.326 |
| 11 | 170 | 125 | 0.3 | 8.136 | 0.118 | 32.534 |
| 12 | 170 | 150 | 0.8 | 7.079 | 0.105 | 21.655 |
| 13 | 230 | 75 | 1.8 | 7.665 | 0.138 | 48.43 |
| 14 | 230 | 100 | 1.3 | 8.389 | 0.112 | 27.971 |
| 15 | 230 | 125 | 0.8 | 8.565 | 0.099 | 15.034 |
| 16 | 230 | 150 | 0.3 | 7.761 | 0.102 | 26.768 |

# 3. 磁控溅射的工艺参数对涂层摩擦磨损性能指标的影响规律

为了研究磁控溅射沉积的工艺参数对于涂层摩擦磨损指标的影响规律，通过控制变量的实验分析，得到涂层的硬度、摩擦系数和磨损率的影响规律。

### 3.1. 溅射参数对 Ni-DLC 涂层硬度的影响规律

在磁控溅射镀膜实验中，保持沉积气压为 1.1 Pa，研究不同溅射功率和沉积温度对于涂层硬度的影响规律。由图 2 可知，当沉积温度不变，涂层硬度随着溅射功率的升高先升高后降低。在溅射功率 200 W 时，硬度达到最大值；当功率在 200~230 W 时，硬度逐渐减小。在溅射功率 50 W~200 W 时，一方面是 $sp^3$ 含量逐渐增大，在 200 W 时，含量最多；另一方面是随着溅射功率的增大，原子的动能会变大，使 DLC 机构更加致密，减少了涂层的缺陷与空隙，有助于 Ni 含量的增大，从而致使涂层逐渐变大。200 W 以上功率涂层出现石墨化进而导致涂层硬度减少，过高的功率则会使涂层出现热效应，破坏 Ni-DLC 涂层的结构或相变，从而导致涂层硬度逐渐变小。

由图 2 可知，当溅射功率不变，涂层硬度随着沉积温度的升高而升高，呈正比例关系。沉积温度的升高，有助于涂层硬度的增加。在 75~150℃沉积温度条件下，温度有助于 DLC 结构的形成，同时升温有助于靶材原子的扩散，DLC 的 $sp^3$ 杂化碳的比例达到最优，使得涂层具有最高的硬度。当沉积温度超过 150℃时，硬度会减少，因为过高的温度使 DLC 结构发生破坏或相变，使得涂层中的碳原子从 $sp^3$ 杂化转变为 $sp^2$ 杂化，降低了涂层的硬度。

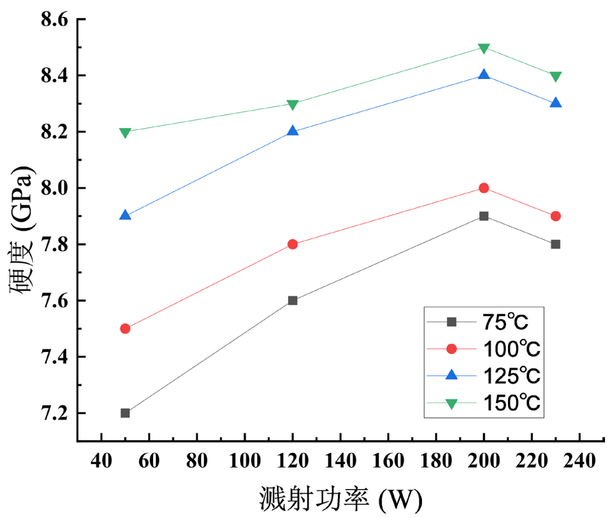



**Figure 2.** Hardness curves of different sediment pressures
**图 2.** 不同溅射功率的硬度变化曲线

保持溅射功率为 140 W，研究不同沉积气压和沉积温度对于涂层硬度的影响规律。由图 3 可知，当沉积温度不变，涂层硬度随着沉积气压的升高，呈现先升后降的趋势。过高的或过低的沉积气压都会使涂层的硬度变小。当沉积气压在 0.3 Pa~1.5 Pa 时，硬度与沉积气压呈正比例，因为随着沉积气压的增大，有助于增加气体分子的碰撞频率，促进 Ni 靶材原子的溅射和扩散，使得涂层沉积更均匀，从而提高涂层硬度。当沉积气压大于 1.5 Pa 时，硬度随着沉积气压的增大而减小，因为过高的气压导致气体分子对涂层表面的轰击作用增强，破坏 DLC 的结构，造成能量的损失，从而降低涂层的硬度。

### 3.2. 溅射参数对 Ni-DLC 涂层摩擦系数的影响规律

在磁控溅射镀膜实验中，保持沉积气压为 1.1 Pa，研究不同溅射功率和沉积温度对于摩擦系数的影响规律。由图 4 可知，当沉积温度不变，涂层摩擦系数随着溅射功率的增大先减小后增大，在溅射功率 200 W 时，摩擦系数达到最小值；当功率在 200~230 W 时，摩擦系数逐渐增大。在 50 W~200 W 时，溅

射功率的增大，有助于提高增加原子的动能，使得 DLC 结构更加致密和均匀，减少了涂层中的缺陷和孔隙。这种致密的 DLC 结构有助于降低涂层与对磨材料之间的直接接触面积，从而减小摩擦系数。当溅射功率 200 W 以上时，过高的溅射功率导致涂层中出现过度的热效应，使得 DLC 结构发生破坏，提高气体的离化率，原子碰撞过多，能量减小，进而影响涂层的摩擦性能。

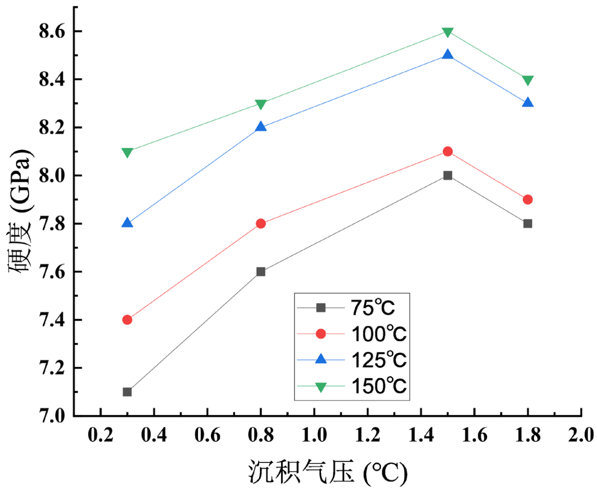



**Figure 3.** Hardness curves of different sputtering powers
**图 3.** 不同沉积气压的硬度变化曲线

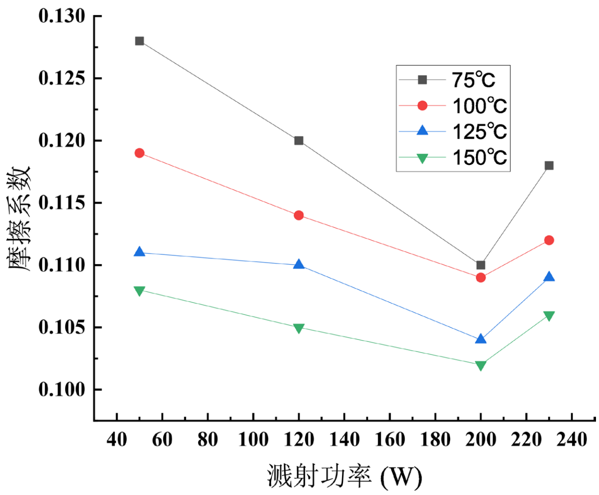



**Figure 4.** Friction coefficient curves of different sputtering powers
**图 4.** 不同溅射功率的摩擦系数变化曲线

由图 4 可知，当溅射功率不变，涂层摩擦系数随着沉积温度的升高，逐渐减小，在 150℃时，涂层达到最小的摩擦系数。原因是：当沉积温度逐渐升高，基体残留的气体减少，表面质量更好，从而使涂层的膜基结合力变大，涂层有较好的致密性。温度越高，原子会更加活跃，涂层的迁移率变高，降低涂层成核密度，有益于形成均匀致密的涂层，从而使涂层的摩擦系数减小。

保持溅射功率为 140 W，研究不同沉积气压和沉积温度对于涂层摩擦系数的影响规律。由图 5 可知，当沉积温度不变，涂层摩擦系数随着沉积气压的增大先减小后增大，过高的或过低的沉积气压都会使涂

层的摩擦系数变大。当沉积气压在 0.3 Pa~1.1 Pa 时，摩擦系数与沉积气压呈反比例，因为在较低的沉积气压相下，气体分子的平均自由程较长，气体分子与涂层表面之间的碰撞频率降低，这导致涂层表面的原子或分子未能充分扩散和重排，形成较为疏松的结构，从而有较高的摩擦系数。当沉积气压大于 1.1 Pa 时，摩擦系数随着沉积气压的增大而增大，因为过高的气压，导致涂层中的气体含量增加，形成气孔或缺陷，从而降低涂层的硬度和耐磨性，使涂层摩擦系数增大。

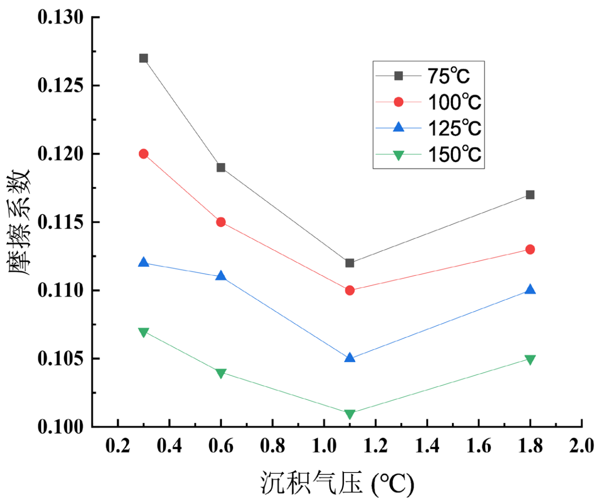



**Figure 5.** Friction coefficient curves of different sedimentary pressures
**图 5.** 不同沉积气压的摩擦系数变化曲线

### 3.3. 溅射参数对 Ni-DLC 涂层磨损率的影响规律

在磁控溅射镀膜实验中，保持沉积气压为 1.1 Pa，研究不同溅射功率和沉积温度对于磨损率的影响规律。由图 6 可知，当沉积温度不变，涂层磨损率随着溅射功率的增大先减小后增大，在溅射功率 200 W 时，磨损率达到最小值；当功率在 200~230 W 时，磨损率逐渐增大。在 50 W~200 W 时，溅射功率的增大，有助于提高溅射原子的能量，与基材表面结合更好。有助于涂层内部原子或分子的扩散和重排，形成更为致密和均匀的结构，降低涂层的磨损率。当溅射功率 200W 以上时，过高的溅射功率导致溅射原子在撞击基材表面时产生过多的热量，使得涂层内部产生热应力或热损伤，导致涂层发生熔化或氧化，增大涂层的磨损率。

由图 6 可知，当溅射功率不变，涂层磨损率随着沉积温度的升高，逐渐减小，在 150℃时，涂层达到最小的磨损率。原因是，当沉积温度逐渐升高，原子或分子的活动能力升高，减小涂层内部存在缺陷和空隙，形成均匀致密的涂层，同时会使涂层与基材间形成良好的化学键合，提高涂层的附着力和耐磨性，从而减小了涂层的磨损率。

保持溅射功率为 140 W，研究不同沉积气压和沉积温度对于涂层磨损率的影响规律。由图 7 可知，当沉积温度不变，涂层磨损率随着沉积气压的升高先减小后增大，过高的或过低的沉积气压都会使涂层的磨损率变大。当沉积气压在 0.3 Pa~1.4 Pa 时，磨损率与沉积气压呈反比例，因为随着沉积气压的升高，增大二次电子的数量，增强辉光效应，提高原子数与溅射效率，形成致密的 Ni-DLC 涂层，磨损率降低。当沉积气压大于 1.4 Pa 时，磨损率随着沉积气压的增大而增大，因为过高的气压，离子流变大，增大原子碰撞几率，平均动能降低，硬度、残余应力、膜基结合力降低，易磨损，从而导致磨损率变大。

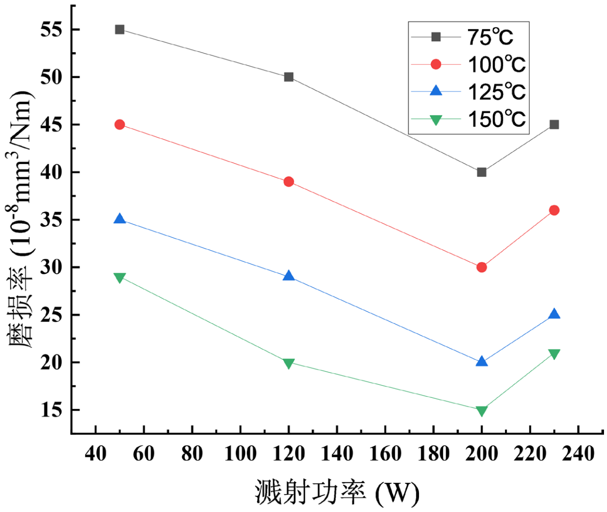



**Figure 6.** Curves of wear rate for different sputtering powers

**图 6.** 不同溅射功率的磨损率变化曲线

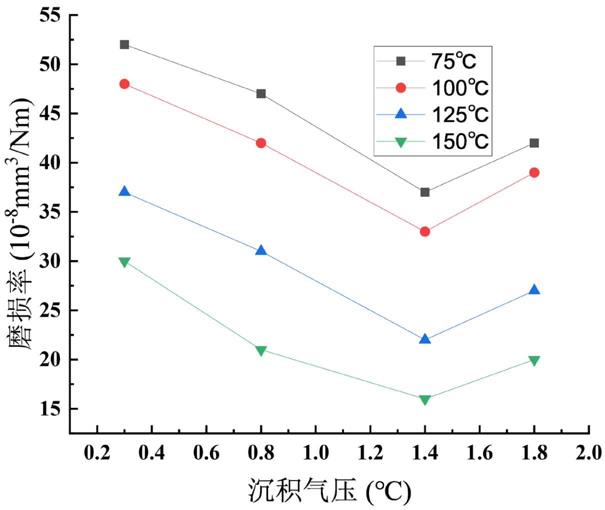



**Figure 7.** Variation curves of wear rate under different sediment pressures

**图 7.** 不同沉积气压的磨损率变化曲线

## 4. 预测模型的建立

### 4.1. 指数回归预测模型

指数回归预测模型具有稳定性强、拟合度高等特点，以指数形式建立磁控溅射指标预测模型，公式如下：

$$\begin{aligned} H &= U_1 \times Q^{j_1} \times C^{j_2} \times P^{j_3} \\ \mu &= U_2 \times Q^{j_4} \times C^{j_5} \times P^{j_6} \\ M &= U_3 \times Q^{j_7} \times C^{j_8} \times P^{j_9} \end{aligned} \tag{1-1}$$

式中，$U_1$，$U_2$，$U_3$为常数，$j_1$ - $j_9$为溅射因子的指数。

对式(1-1)进行对数变形，如下式：

$$\log H = \log U_1 + j_1 \log Q + j_2 \log C + j_3 \log P$$
$$\log \mu = \log U_2 + j_4 \log Q + j_5 \log C + j_6 \log P \tag{1-2}$$
$$\log M = \log U_3 + j_7 \log Q + j_8 \log C + j_9 \log P$$

令 $y = \log H$、$\log \mu$、$\log M$，$k_0 = \log U_1$、$\log U_2$、$\log U_3$，$x_1$、$x_2$、$x_3 = \log Q$、$\log C$、$\log P$。如下式所示：

$$y = k_0 + k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_3 x_3 \tag{1-3}$$

得到下式：

$$\begin{cases} y_1 = \alpha_0 + \alpha_1 x_{11} + \alpha_2 x_{12} + \alpha_3 x_{13} + \varepsilon_1 \\ y_2 = \alpha_0 + \alpha_1 x_{21} + \alpha_2 x_{22} + \alpha_3 x_{23} + \varepsilon_2 \\ \vdots \\ y_{16} = \alpha_0 + \alpha_1 x_{161} + \alpha_2 x_{162} + \alpha_3 x_{163} + \varepsilon_{16} \end{cases} \tag{1-4}$$

设：

$$\boldsymbol{Y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & x_{13} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & x_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{161} & x_{161} & x_{163} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\alpha} = \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_3 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_{16} \end{bmatrix} \tag{1-5}$$

由上式可得：

$$\boldsymbol{Y} = \boldsymbol{\alpha X} + \boldsymbol{\varepsilon} \tag{1-6}$$

可得 $k_0$、$k_1$、$k_2$、$k_3$ 为 $a_0$、$a_1$、$a_2$、$a_3$ 的最小二乘估计，则 $k$ 如下式：

$$k = \left(\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{X}\right)^{-1} \boldsymbol{X}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{Y} \tag{1-7}$$

根据表 4 正交实验数据，最终计算可得硬度 $H$、摩擦系数 $\mu$ 和磨损率 $M$ 与磁控溅射溅射参数之间的指数回归预测模型，如式(1-8)所示。

$$H = 10^{0.8604} \times Q^{0.000174} \times C^{-0.000035} \times P^{0.0076}$$
$$\mu = 10^{-0.8575} \times Q^{-0.000448} \times C^{-0.000174} \times P^{0.0208} \tag{1-8}$$
$$M = 10^{1.735} \times Q^{-0.001386} \times C^{-0.00054} \times P^{0.0302}$$

## 4.2. BP 神经网络

BP 神经网络是一种具有从输入到输出的前向传播过程和误差反向传播过程的人工神经网络模型，网络拓扑结构如图 8 所示，图中三个加工参数为输入层，表层性能指标为输出层，依据经验公式确定隐含层个数，如式(1-9)所示，对数据计算误差，当 10 个隐含层时，预测平均误差最小且拓扑结构最优。

$$y = \sqrt{o + p} + b, \quad 1 < b < 10 \tag{1-9}$$

式中，$y$ 是节点数，$o$、$p$ 分别为输入层和输出层节点数。

在建立表层性能指标 BP 神经网络模型前以及为了训练准确，需对目标函数使用归一化函数和反归一化函数，归一化函数如式(1-10)所示，采用 Trainlm 函数训练目标函数，purelin 作为传递函数，设置训练次数为 1000，学习速率为 0.01，训练目标最小误差为 0.00001。

$$x_i' = \frac{x_i - \overline{x}}{\sigma} \tag{1-10}$$

式中，$x_i$ 为原始数据，$\bar{x}$ 为加工参数平均值，$\sigma$ 为标准差。

预测值与实验值如图 9 所示：

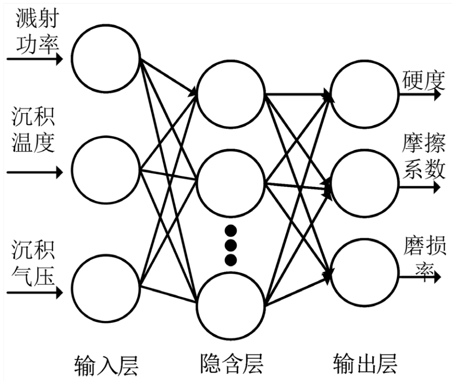
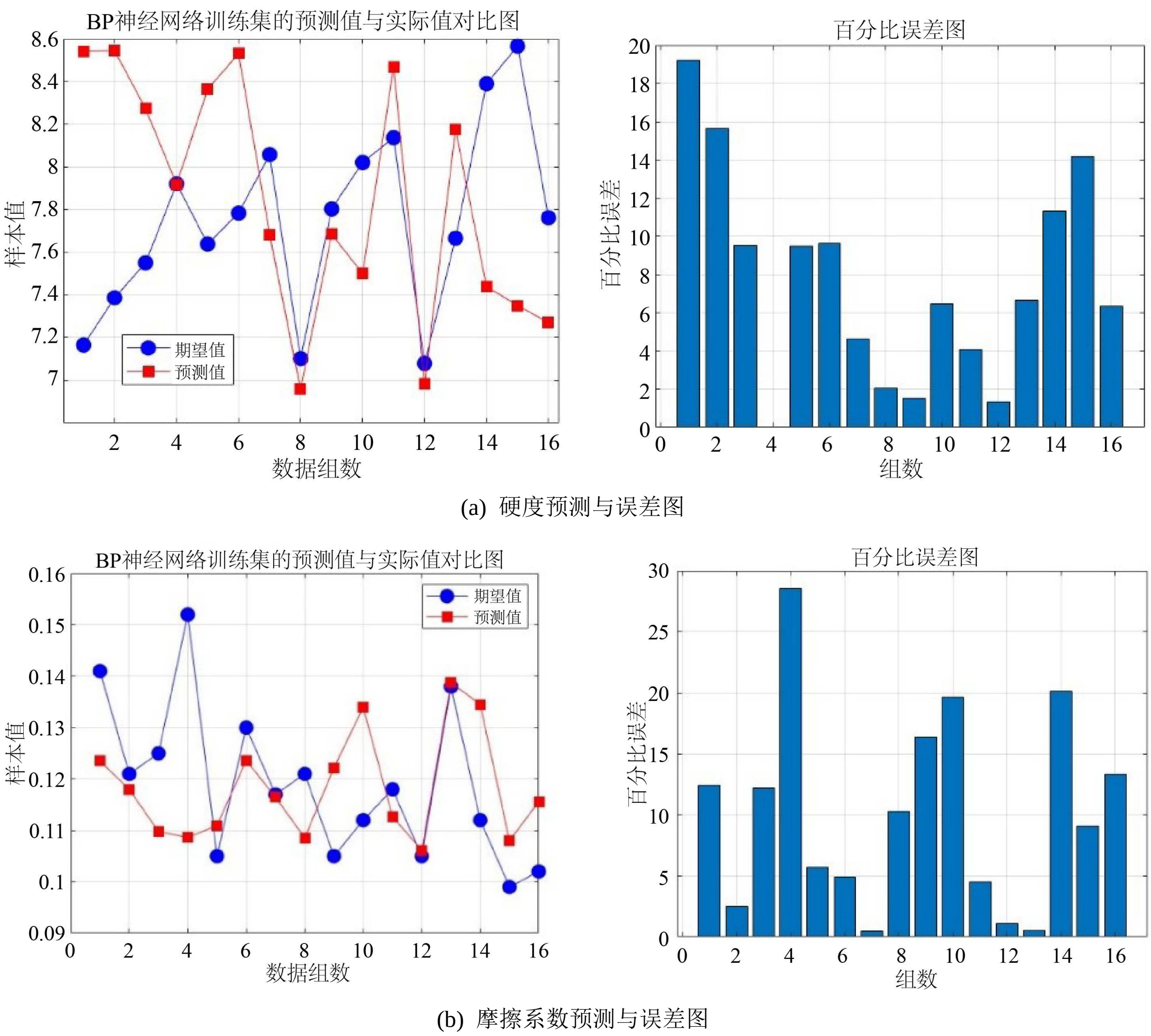
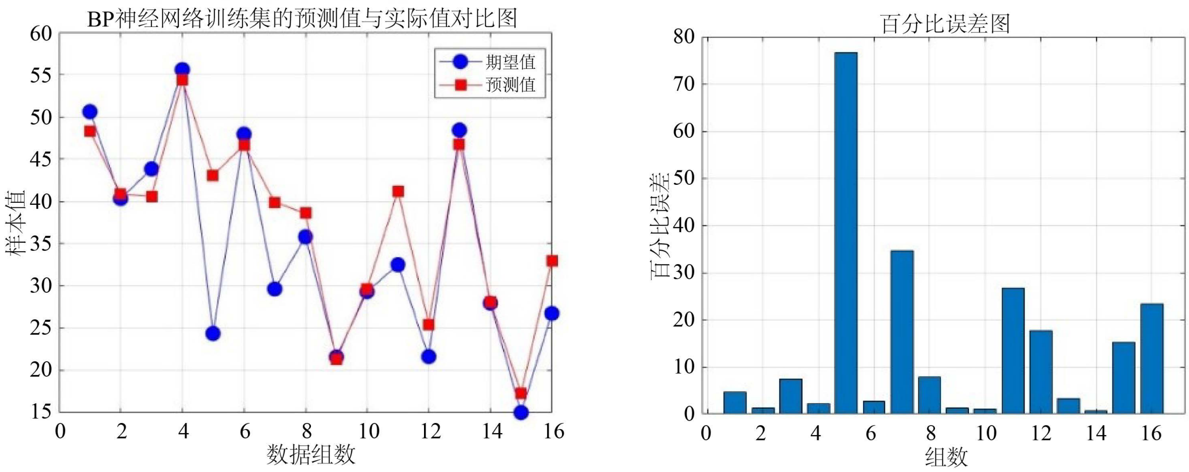


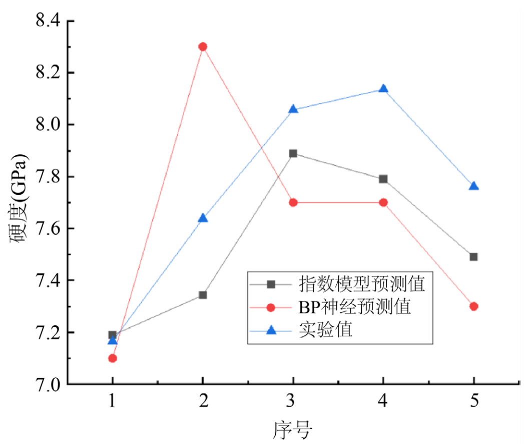

**Figure 8.** BP neural network topology
**图 8.** BP 神经网络拓扑结构



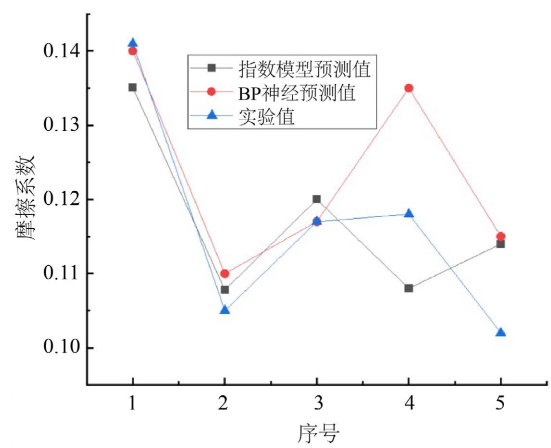



(c) 磨损率预测与误差图

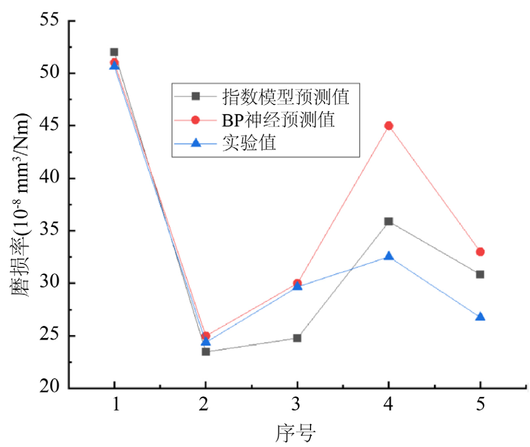
**Figure 9.** Prediction and error
**图 9.** 预测与误差图




(a) 硬度预测对比




(b) 摩擦系数预测对比




(c) 磨损率预测对比

**Figure 10.** Predicts the predicted value and the experimental value of the prediction model
**图 10.** 预测模型预测值与实验值

### 4.3. 预测模型对比

为验证预测模型的精准性，对比分析指数模型和 BP 神经网络并计算误差，随机取正交试验第 1、5、7、13、16 组，通过实验验证，评价指标预测图与实验值如图 10 所示。计算误差可得，指数回归预测模型硬度、摩擦系数和磨损率平均误差分别为 2.9%、2.1%和 7.4%，BP 神经网络预测模型硬度、摩擦系数和磨损率平均误差分别为 4.1%、6%和 9.6%。所以，指数回归预测模型精度高。

## 5. 结论

1) 使用非平衡磁控溅射技术在在 42GrMo 钢基体沉积 Ni-DLC 复合涂层，设计三因素四水平的正交实验和控制变量实验，对磁控溅射工艺参数对硬度、摩擦系数和磨损率的影响规律进行研究，可得：度随着溅射功率的增大，呈现先升后降的趋势；硬度与沉积温度是正比例关系；硬度与沉积气压是正比例关系。摩擦系数和磨损率随着溅射功率的增大，呈现先降后升的趋势；摩擦系数和磨损率与沉积温度是反比例关系；摩擦系数和磨损率随着沉积气压的增大，呈现先降后升的趋势。

2) 对磁控溅射正交实验数据进行涂层硬度、摩擦系数和磨损率进行预测，指数回归预测模型平均误差分别为 2.9%、2.1%和 7.4%，BP 神经网络平均误差分别为 4.1%、6%和 9.6%。所以，指数回归预测模型具有较好的精确度。

## 基金项目

国家自然科学基金项目[U1804145]；国家重点研发计划[2018YFB2000405]；国家重点研发计划[2022YFC2805702]。

## 参考文献

[1] 张永辉, 杨欣可, 吴雪龙, 等. 屋顶光伏发电效率提升技术研究及应用[J]. 电工电气, 2023(10): 72-73.

[2] Chen, Y., Li, H., Su, F., Ma, G., Li, Q., Sun, J., *et al*. (2024) Friction and Wear Behavior of Molybdenum-Disulfide Doped Hydrogen-Free Diamond-Like Carbon Films Sliding against $Al_2O_3$ Balls at Elevated Temperature. *Wear*, **544**, Article ID: 205296. https://doi.org/10.1016/j.wear.2024.205296

[3] Pillaca, E.J.D.M., Correia, R.F.B.d.O., Martins, G.V., Ferreira, S.R., da Silva, T.F., Rodrigues, C.L., *et al*. (2024) Preparation of Boron-Doped Diamond-Like Carbon Films via Enhanced-PECVD Using an Additional Cathode. *Surface and Coatings Technology*, **478**, Article ID: 130432. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130432

[4] Jia, Y., Sun, W., Zhang, Y., Xiao, Y., Zhang, C. and Liu, J. (2023) Effect of rGO Concentration on the Microstructure and Friction Behavior of Co-Doped Diamond-Like Carbon (NI/N/rGO-DLC) Films. *Diamond and Related Materials*, **137**, Article ID: 110112. https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.110112

[5] Jin, L., Li, Y., Liu, C., Fan, X. and Zhu, M. (2023) Friction Mechanism of DLC/MAO Wear-Resistant Coatings with Porous Surface Texture Constructed *in-Situ* by Micro-Arc Oxidation. *Surface and Coatings Technology*, **473**, Article ID: 130010. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.130010

[6] Zhang, S., Wu, S., Huang, T., Yang, X., Guo, F., Zhang, B., *et al*. (2023) The Effects of Ti/Ni Doping on the Friction and Wear Properties of DLC Coatings. *Coatings*, **13**, Article 1743. https://doi.org/10.3390/coatings13101743

[7] Vahidi, A., Serra, R., Ferreira, F., Cavaleiro, A. and Oliveira, J. (2023) Assessment of Thermomechanical Stability of DLC Films Deposited by Ne-HiPIMS Technology for High-Temperature Applications. *Wear*, **532**, Article ID: 205126. https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.205126

[8] 胡杨, 何沐阳. $MoS_2$ 掺杂 DLC 薄膜对力学性能及摩擦学行为的影响[J]. 陶瓷学报, 2023, 44(5): 947-953.

[9] 冯兴国, 郑玉刚, 汪科良, 等. 二硫化钼薄膜在不同摩擦副条件下的摩擦学性能研究[J]. 真空与低温, 2024, 30(1): 31-38.

[10] 魏晨阳, 白琴, 郭鹏, 等. HiPIMS 占空比对 Al 合金表面 Ti/DLC 涂层力学和摩擦性能的影响[J]. 中国表面工程, 2023, 36(4): 77-88.

[11] 孔维程. 渗氮钛合金表面沉积 Cr-DLC 涂层微观组织和性能研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 东华大学, 2023.

[12] 杜广煜，梁笑瑜，万亿，等. 不同温湿度下风电轴承表面防护 DLC 薄膜微动摩擦特性[J]. 轴承, 2023(6): 89-95.

[13] 聂朝胤，谢红梅，杨娟，等. 非平衡磁控溅射 Ti 掺杂类金刚石薄膜的基本特性[J]. 材料热处理学报, 2008, 29(3): 147-151.

[14] 李昌恒，刘奎仁，魏世丞，等. 磁控溅射技术制备氮化钛薄膜的研究进展[J]. 材料保护, 2023, 56(2): 111-119.

[15] 常德龙，谢青，胡伟华，等. 磁控溅射法薄木镀膜金属工艺参数的遴选[J]. 东北林业大学学报，2016, 44(6): 75-78.

[16] 王会强. 铝合金表面磁控溅射 ZrN、TiN、TiCN 彩色纳米薄膜工艺的研究[D]: [博士学位论文]. 保定: 河北农业大学, 2014.