

## 基于Archard磨损模型研究SiC/AZ91D复合材料干摩擦磨损特性

付豪 尧军平 梁超群 李步炜 陈国鑫

### Research on dry friction and wear characteristics of SiC/AZ91D composites based on Archard wear mode

FU Hao, YAO Junping, LIANG Chaoqun, LI Buwei, CHEN Guoxin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240318.005>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### MoO<sub>3</sub>-氧化碳纳米管改性玻璃纤维/环氧树脂复合材料的摩擦磨损性能

Friction and wear properties of MoO<sub>3</sub>-oxide carbon nanotubes modified glass fiber/epoxy composites

复合材料学报. 2021, 38(1): 102–110 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200610.003>

#### 新型填料对高摩复合材料摩擦磨损性能影响及机制

Effect and mechanism of new filler on friction and wear properties of high friction composites

复合材料学报. 2017, 34(10): 2171–2181 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170105.004>

#### Mg<sub>2</sub>Si/AZ91D复合材料阻尼性能

Damping capacity of Mg<sub>2</sub>Si/AZ91D composites

复合材料学报. 2017, 34(9): 1997–2004 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20161129.001>

#### 纤维对短切碳纤维/AZ91D复合材料热变形行为和加工性能的影响纤维对短切碳纤维/AZ91D复合材料热变形行为和加工性能的影响

Influence of fiber on the hot deformation behavior and workability of chopped carbon fiber/AZ91D composites

复合材料学报. 2019, 36(6): 1480–1490 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180913.001>

#### 基于犰狳外壳仿生的SiC-超高分子量聚乙烯柔性防护板的试验测试和有限元模拟

Experimental testing and finite element simulation of SiC-ultrahigh molecular weight polyethylene flexible protective plate inspired by armadillo shell

复合材料学报. 2020, 37(10): 2561–2571 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200121.001>

#### 碳纤维束间的摩擦磨损特性

Frictional and worn behavior of inter-carbon fiber tows

复合材料学报. 2019, 36(8): 1838–1846 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181009.005>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

# 基于 Archard 磨损模型研究 SiC/AZ91D 复合材料干摩擦磨损特性



分享本文

付豪, 尧军平\*, 梁超群, 李步伟, 陈国鑫

(南昌航空大学 航空制造工程学院, 南昌 330063)

**摘要:** 颗粒增强镁基复合材料在活塞制造中具有重要意义, 活塞使用寿命与其材料的摩擦磨损性能关系密切, 为预测镁基复合材料活塞耐磨性。基于 Archard 磨损模型结合自适应网格技术, 建立 SiC/AZ91D 镁基复合材料及其基体有限元模型, 探究其在不同载荷下的磨损行为, 考察其应力场分布、磨损深度, 进行了试验验证, 揭示磨损机制。结果表明: 在不同载荷下, 盘销的接触面均表现出距盘轴心最近与最远处应力值较大, 其他径向区域较小。随着载荷增加, 盘销接触区域各处均表现出应力值增大。在不同载荷下, 盘销接触面均表现出距盘轴心最近处磨损深度较小, 离盘轴心径向距离增加, 磨损深度越来越大。随着载荷增加, 盘销接触区域各处均表现出磨损深度数值增大。但复合材料的磨损深度小于基体, 表现出较好的耐磨性能。磨粒磨损和剥层磨损为复合材料主要磨损机制, 粘着磨损为基体合金的主要磨损机制, 模拟结果与试验结果吻合较好。

**关键词:** 镁基复合材料; 有限元模拟; 摩擦磨损; Archard 磨损模型; 磨损机制

**中图分类号:** TB333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2024)11-6206-09

## Research on dry friction and wear characteristics of SiC/AZ91D composites based on Archard wear mode

FU Hao, YAO Junping\*, LIANG Chaoqun, LI Buwei, CHEN Guoxin

(School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**Abstract:** The particle reinforced magnesium matrix composite is of great significance in the manufacture of piston. The service life of piston is closely related to the friction and wear properties of the material, so it can predict the wear resistance of magnesium matrix composite piston. Based on Archard wear model and adaptive mesh technology, a finite element model of SiC/AZ91D magnesium matrix composite and its matrix was established to explore its wear behavior under different loads, investigate its stress field distribution and wear depth, and conduct experimental verification to reveal the wear mechanism. The results show that, under different loads, the stress values of the nearest and furthest distance from the disc axis are larger on the contact surface of the disc pin, while other radial regions are smaller. With the increase of load, the stress values in all parts of the disc and pin contact area increase. Under different loads, the wear depth of the contact surface of the disc pin is smaller at the closest point to the disc axis, and the wear depth is larger and larger with the increase of the radial distance from the disc axis. With the increase of load, the wear depth increases in all parts of the disc and pin contact area. However, the wear depth of the composite is less than that of the matrix, which shows better wear resistance. Abrasive wear and peeling wear are the main wear mechanisms of the composite, adhesive wear is the main wear mechanism of the

收稿日期: 2023-12-27; 修回日期: 2024-02-26; 录用日期: 2024-03-07; 网络首发时间: 2024-03-19 12:34:56

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240318.005>

**基金项目:** 国家自然科学基金 (52065046; 51661024); 江西省科技重点研发计划 (20202BBEL53024); 研究生创新专项资金项目 (2030009101050)  
National Natural Science Foundation of China (52065046; 51661024); Jiangxi Key Research and Development Plan (20202BBEL53024); Graduate Student Innovation Special Fund Project (2030009101050)

**通信作者:** 尧军平, 博士, 教授, 研究方向为金属基复合材料 E-mail: [yyyjps@126.com](mailto:yyyjps@126.com)

**引用格式:** 付豪, 尧军平, 梁超群, 等. 基于 Archard 磨损模型研究 SiC/AZ91D 复合材料干摩擦磨损特性 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(11): 6206-6214.  
FU Hao, YAO Junping, LIANG Chaoqun, et al. Research on dry friction and wear characteristics of SiC/AZ91D composites based on Archard wear mode[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(11): 6206-6214(in Chinese).

matrix alloy, and the simulation results are in good agreement with the experimental results.

**Keywords:** magnesium matrix composite material; finite element simulation; friction and wear; Archard's law of wear; wear mechanism

镁合金材料具有韧性好、减震性强、强度高及刚性好等特点被广泛应用于众多领域,但因其耐磨性能、耐腐蚀性能不佳,在需频繁参与摩擦的工业产品零部件(如低负荷轴承齿轮、离合器活塞等)方面很少被采用。为了改善其耐磨性能,在镁合金中添加高硬质 SiC 颗粒,能有效提升 SiC 颗粒增强镁基复合材料的摩擦磨损性能。因此,研究 SiC/AZ91D 复合材料干摩擦磨损特性具有重要的科学意义和工程价值<sup>[1-4]</sup>。

刘世英等<sup>[5]</sup>研究了纳米 SiC 颗粒增强的镁基复合材料及其基体的干滑动摩擦磨损行为,结果表明随着载荷的增加,基体和复合材料的磨损率线性增加,复合材料的耐磨性能要明显强于基体。Arjmandi 等<sup>[6]</sup>则运用 Archard 磨损模型对涤纶树脂(PET)材料进行了滑动磨损预测,通过提取接触面节点的轮廓变化来分析磨损深度。Ajit 等<sup>[7]</sup>运用 Archard 磨损模型建立球盘模型研究 GH605 合金钢在滑动摩擦过程中磨损深度,并对仿真与实验的磨损深度进行误差分析。Ashish 等<sup>[8]</sup>研究塑料材料低密度聚乙烯(LDPE)在销盘模型中滑动摩擦过程的磨损性能,并根据 Archard 磨损模型模拟该材料在摩擦过程中的应力分布与形变。Suresh 等<sup>[9]</sup>研究 6061 铝复合材料在不同载荷条件下磨损特性,在销盘模型下,运用 Archard 磨损模型结合 Ansys 中的 Euler 积分公式计算表面的磨损深度和接触压力。

综上所述,目前大多数学者采用 Archard 模型研究摩擦磨损行为大多集中在合金与高分子材料,而对金属基复合材料研究较少,尤其是对 SiC/AZ91D 镁基复合材料摩擦磨损性能研究未见报道。因此,本文以 SiC/AZ91D 镁基复合材料为研究对象,建立其 Archard 磨损模型,研究 SiC/AZ91D 复合材料及其基体的干摩擦磨损行为。

1 材料与工况

磨损实验在图 1(a)所示的 WTM-2E 型摩擦试验机中进行,由兰州中科凯华科技开发有限公司生产。图 1(b)为对磨试样。盘采用镁基复合材料及其基体合金,尺寸为  $\Phi 20\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ ,复合材料由 AZ91D 镁基体合金与  $25\text{ }\mu\text{m}$  SiC 颗粒(颗粒体积分数为 15vol%)挤压铸造而成,如图 2 所示;

销为 GCr15 轴承钢,尺寸为  $\Phi 4\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ ,盘中心轴与销中心轴之间的距离为 4 mm,其材料基本参数见表 1。

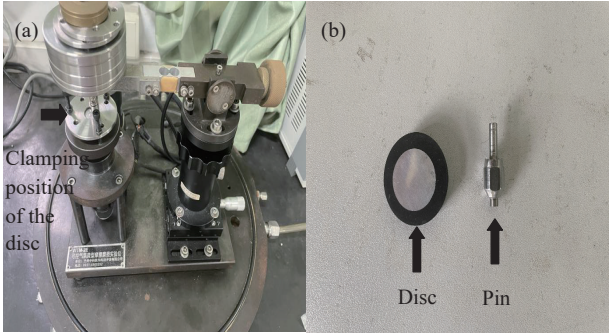


图 1 摩擦实验机 (a) 与试样图 (b)  
Fig. 1 Friction testing machine (a) and samples drawing (b)

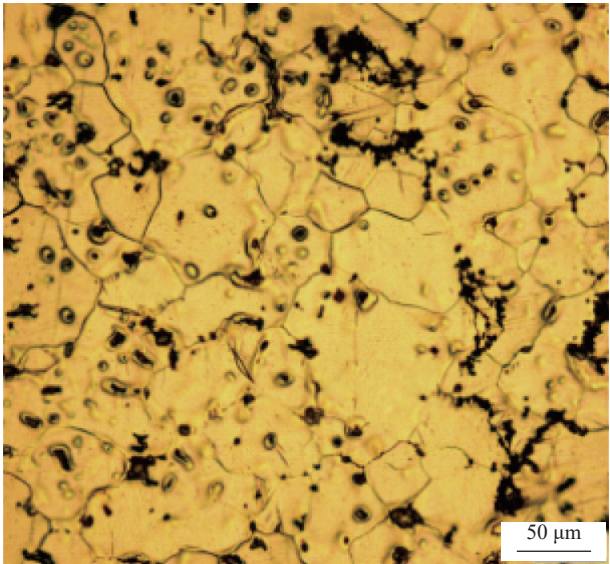


图 2 SiC/AZ91D 光学显微组织图  
Fig. 2 Optical microstructure of SiC/AZ91D

表 1 材料的基本参数

| Table 1 Basic parameters of the materials |                                      |                       |       |                |       |
|-------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|-------|----------------|-------|
| Material                                  | $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | $\sigma_s/\text{MPa}$ | $\mu$ | $E/\text{MPa}$ | $H_B$ |
| GCr15                                     | 7.18                                 | 518.5                 | 0.3   | 20 800         | 248   |
| SiC/AZ91D                                 | 1.84                                 | 204                   | 0.35  | 62 000         | 65    |
| AZ91D                                     | 1.82                                 | 160                   | 0.3   | 44 800         | 58    |

Notes:  $\rho$ —Material density;  $E$ —Modulus of elasticity;  $\mu$ —Poisson's ratio;  $\sigma_s$ —Yield strength;  $H_B$ —Brinell hardness number.

盘表面用不同目数的砂纸依次进行打磨,并

抛光处理。进行了 6 组实验，实验条件如表 2 所示。每组实验至少重复 3 次以确保结果的可靠性。通过 SEM 观察磨损表面的形貌。

表 2 实验条件  
Table 2 Experiment condition

| No. | Load/N | Rotation speed/<br>(rad·min <sup>-1</sup> ) | Time/min | Material  |
|-----|--------|---------------------------------------------|----------|-----------|
| 1   | 3      | 200                                         | 20       | SiC/AZ91D |
| 2   | 6      | 200                                         | 20       | SiC/AZ91D |
| 3   | 10     | 200                                         | 20       | SiC/AZ91D |
| 4   | 3      | 200                                         | 20       | AZ91D     |
| 5   | 6      | 200                                         | 20       | AZ91D     |
| 6   | 10     | 200                                         | 20       | AZ91D     |

采用奥林巴斯公司生产的 OLS4100 光学轮廓仪测试销盘接触面磨损区域的轮廓尺寸、粗糙度、磨损体积及磨损深度等参数。

使用下式计算磨损系数  $k$ <sup>[10]</sup>:

$$k = \frac{VH}{sW} \tag{1}$$

式中： $V$  为磨损体积 (mm<sup>3</sup>)； $s$  为滑动距离 (mm)； $H$  为布氏硬度 (N/mm<sup>2</sup>)； $W$  为法向载荷 (N)。

滑动距离  $s$ ，由下式得出：

$$s = 2\pi rn \tag{2}$$

式中： $r$  为圆盘轴心与销轴心的距离； $n$  为圆盘转速 (rad/s)。

2 模型建立

Archard 理论是磨损理论中比较经典的一种理论模型，适用范围比较广泛，包括不同类型的复合材料与摩擦条件，通过磨损体积的计算，实现摩擦磨损过程的定量分析，故采用 Archard 磨损理论进行求解。使用 Abaqus 软件建立磨损模型作出如下假设<sup>[11]</sup>：(1) 摩擦副表面的接触发生在锥底直径为  $2r$ 、高度  $h$  不同、具有相同锥底角  $\theta$  的圆锥形微凸体上；(2) 接触表面间的接触点数目为  $n$ 。

由假设 (1) 与 (2) 可知，滑动距离为  $2r$  时，剪断的圆锥形微凸体的体积  $\Delta v$  与此  $2r$  距离时的单位长度体积磨损率  $q$  分别为

$$\Delta v = \frac{1}{3}\pi r^2 h \tag{3}$$

$$q = \frac{\Delta v}{2r} = \frac{\pi r h}{6} \tag{4}$$

根据几何关系可知  $h = \tan\theta r$ ，表面越光滑  $\theta$  角度越小，每个点接触的载荷为  $w = \pi r^2 \sigma_s$ ，则滑动

距离为  $L$  时，体积磨损总量为  $V$ ，总载荷为  $W$  分别为

$$V = Lq = \sum \frac{1}{6}\pi r h L = \frac{1}{6}\pi n L r^2 \tan\theta \tag{5}$$

$$W = \sum w = n\pi r^2 \sigma_s \tag{6}$$

式 (4) 代入式 (3) 可得：

$$V = L \sum_0^n q = \frac{1}{6}\pi n L r^2 \tan\theta = \frac{WL}{6\sigma_s} \tan\theta \tag{7}$$

根据材料硬度  $H$  与屈服强度  $\sigma_s$  的经验公式，假设  $H = k_0 \sigma_s$ ，式 (7) 可以改写为

$$V = L \sum_0^n q = \frac{1}{6}\pi n L r^2 \tan\theta = \frac{WLk_0}{6H} \tan\theta \tag{8}$$

磨损过程中，不是每个凸起表面都会产生磨削，此时可以加入一个影响因子  $k_1$ ，则式 (8) 改写为

$$V = k_1 L \sum_0^n q = \frac{1}{6}k_1 \pi n L r^2 \tan\theta = \frac{k_1 WLk_0}{6H} \tan\theta \tag{9}$$

为简化数据处理与数值模拟计算，将所有系数  $k_1$ 、 $k_0$  和常数项，简化为磨损系数  $K$ ，可得：

$$V = \frac{k_1 WLk_0}{6H} \tan\theta = K \frac{WL}{H} \tag{10}$$

本次模拟需要得出材料磨损深度变化，把式 (11) 代入式 (10) 做出改写：

$$\begin{aligned} dV &= dhA \\ L &= vt = 2\pi Rnt \end{aligned} \tag{11}$$

得出模拟过程中每个节点磨损深度与时间的变化关系：

$$dh = \frac{KWR\omega}{AH} \tag{12}$$

式中： $dh$  为  $dt$  时刻内的磨损深度； $A$  为销的横截面积 (mm<sup>2</sup>)； $\omega$  是转速 (rad/min)； $R$  是销-盘摩擦副的摩擦半径 (mm)； $W$  为法向载荷 (N)； $H$  为材料硬度。

模型的网格划分与边界条件如图 3 所示，盘可绕  $Z$  轴进行旋转，销的顶端受到均布载荷作用，只能沿  $Z$  轴方向上下移动。模型采用 C3D8R 类型网格，网格尺寸为 50 μm×50 μm×50 μm，全局网格尺寸设定为 0.01。总计有 120 960 个单元和 138 972 个节点。分析步时长为 0.01 s，模拟总时长为 100 s。

在有限元分析中，计算磨损深度使用 UMESH-MOTION 子程序，基于 FORTRAN 语言进行实现。其核心思想为在应力分析的相邻增量步中利用 UMESHMOTION 子程序来计算每个网格单元的磨损

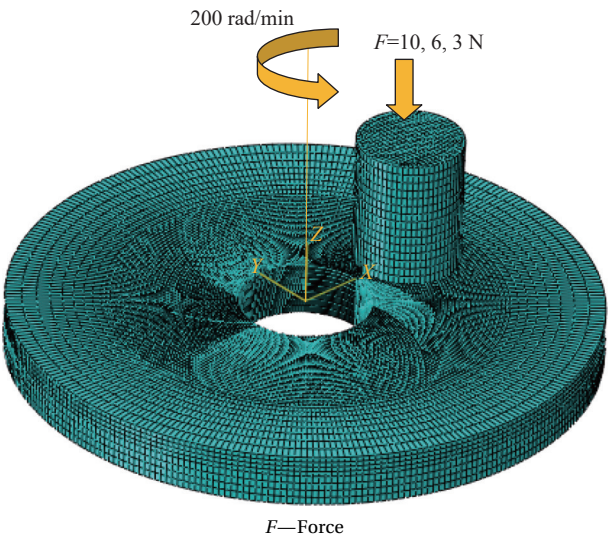


图3 模型边界条件及其网格划分

量。同时，通过 ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 自适应网格技术实现模型网格的更新。在一个载荷增量步中，首先更新应力，然后再更新磨损量<sup>[12-13]</sup>。

在模型中，定义了自适应网格约束，用于调整自适应网格区域内节点的位移。此约束允许自适应网格区域内的网格在不改变原有网格拓扑结构的情况下独立流动，逐步改善网格的质量。ALE 技术作用于接触磨损表面<sup>[14-15]</sup>。

在每个增量步的应力更新结束后，为避免网格畸变，ALE 作用域内的单元调用 ALE 算法。该算法根据边界节点的磨损状况调整节点的位移，然后重新划分 ALE 作用域内的网格，以确保在磨损过程中不会引起过度的网格畸变<sup>[16-18]</sup>。

3 模拟及实验结果

3.1 AZ91D 镁合金与 SiC/AZ91D 复合材料磨损过程中的应力场分布

图 4 是 SiC/AZ91D 复合材料在不同载荷条件下的 Von Mises 应力分布云图。可以看出，在不同载荷下，盘销接触面应力值在径向区域分布不均匀，接触面均表现出距盘轴心最近与最远处应力值较大，其他径向区域较小。随着载荷增加，盘销接触面应力场差异明显。当载荷为 10 N 时，距盘轴心最近与最远处应力值分别为 1.136 MPa 与 1.142 MPa，中心区域应力平均值为 0.67 MPa；载荷为 6 N 时，最近与最远处最大应力值分别为 0.689 与 0.688 MPa，中心区域应力平均值为 0.48 MPa；当载荷为 3 N 时，最近与最远处最大应

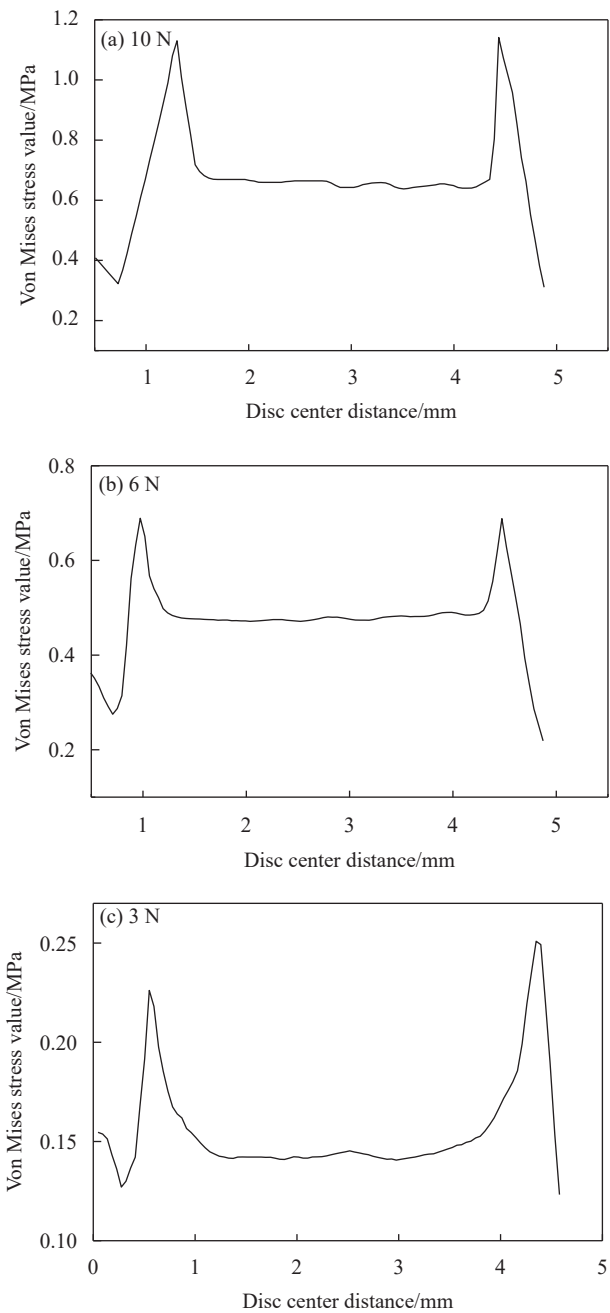


图 4 不同载荷下 SiC/AZ91D 试样 Von Mises 应力分布：  
(a) 10 N；(b) 6 N；(c) 3 N

Fig. 4 Von Mises stress distribution of SiC/AZ91D samples under different loads: (a) 10 N; (b) 6 N; (c) 3 N

力值分别为 0.255 MPa 与 0.338 MPa，中心区域应力平均值为 0.14 MPa。

图 5 是 AZ91D 基体在不同载荷条件下的 Von Mises 应力分布云图。基体与复合材料的应力场分布规律一致。在载荷为 10 N 时，距盘轴心最近与最远处应力值分别为 1.034 MPa 与 1.037 MPa，中心区域应力平均值为 0.48 MPa；在 6 N 条件下，距盘轴心最近与最远处应力值分别为 0.627 MPa

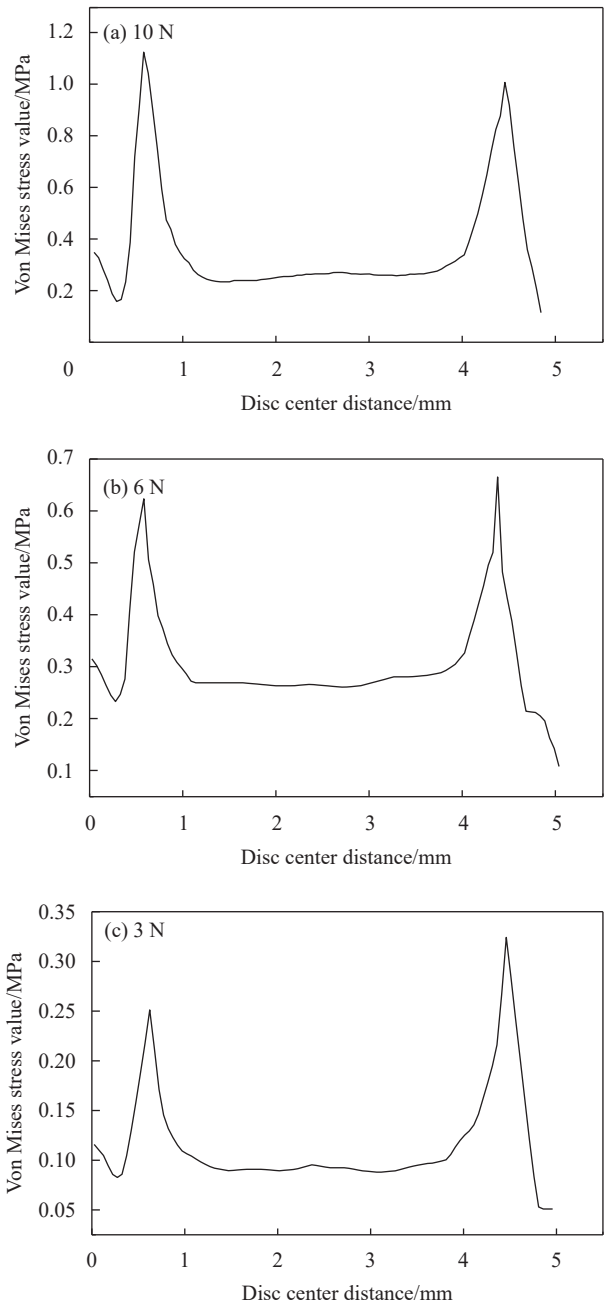


图5 不同载荷下 AZ91D 试样 Von Mises 应力分布：  
(a) 10 N; (b) 6 N; (c) 3 N

Fig. 5 Von Mises stress distribution of AZ91D samples under different loads: (a) 10 N; (b) 6 N; (c) 3 N

与 0.663 MPa，中心区域应力平均值为 0.39 MPa；而在 3 N 条件下，距盘轴心最近与最远处应力值分别为 0.246 MPa 与 0.325 MPa，中心区域应力平均值为 0.12 MPa。

上述结果表明，当载荷为 10 N 时，复合材料距盘轴心最近与最远处应力值比基体金属分别高 9.86% 与 10.1%；复合材料中心区域应力平均值比基体金属高 39.5%。当载荷为 6 N 时，复合材料距

盘轴心最近与最远处应力值比基体金属分别高 9.8% 与 3.7%；复合材料中心区域应力平均值比基体金属高 23.1%；当载荷为 3 N 时，复合材料距盘轴心最近与最远处应力值比基体金属分别高 3.65% 与 1.18%；复合材料中心区域应力平均值比基体金属高 16.7%。

由图 4 与图 5 应力场分布可知，在相同载荷条件下，SiC/AZ91D 复合材料和基体均表现出接触面距盘轴心最近与最远处应力值较大，而其他区域应力值较小的特性。这种现象主要由于接触面在边缘处突变，导致接触面两侧应力集中<sup>[19]</sup>。对 SiC/AZ91D 复合材料而言，接触面应力值均大于 AZ91D 基体。由于高模量和高硬度 SiC 颗粒存在使复合材料具有比基体更高的硬度和弹性模量<sup>[20-21]</sup>。因此在相同载荷作用下，复合材料比基体变形更小，应力值更大。

3.2 AZ91D 镁合金与 SiC/AZ91D 复合材料的磨损深度

图 6(a) 为 SiC/AZ91D 复合材料在不同载荷条件下的磨损深度与径向距离关系。由图可知，在不同载荷下，盘销接触面均表现出距盘轴心最近处磨损深度较小，随盘轴心径向距离增加，磨损深度越来越大。随着载荷增加，盘销磨损深度差异明显。当载荷为 10 N 时，距盘轴心最远处的磨损深度为 -0.0421 mm，距盘轴心最近处磨损深度为 -0.0187 mm；载荷为 6 N 时，距盘轴心最远处的最大磨损深度为 -0.0228 mm，距盘轴心最近处磨损深度为 -0.0105 mm；当载荷为 3 N 时，距盘轴心最远处的最大磨损深度为 -0.0202 mm，距盘轴心最近处磨损深度为 -0.087 mm。

图 6(b) 为 AZ91D 基体在不同载荷条件下的磨损深度与径向距离关系。基体磨损深度与径向距离关系表现出与复合材料一致。当载荷为 10 N 时，距盘轴心最远处的磨损深度为 -0.0542 mm，距盘轴心最近处磨损深度为 -0.0373 mm；载荷为 6 N 时，距盘轴心最远处的最大磨损深度为 -0.0399 mm，距盘轴心最近处磨损深度为 -0.0265 mm；当载荷为 3 N 时，距盘轴心最远处的最大磨损深度为 -0.0315 mm，距盘轴心最近处磨损深度为 -0.0213 mm。

上述结果表明，当载荷为 10 N 时，复合材料距盘轴心最近与最远处磨损深度值比基体金属分别低 51.7% 与 32.5%；复合材料中心区域磨损深度

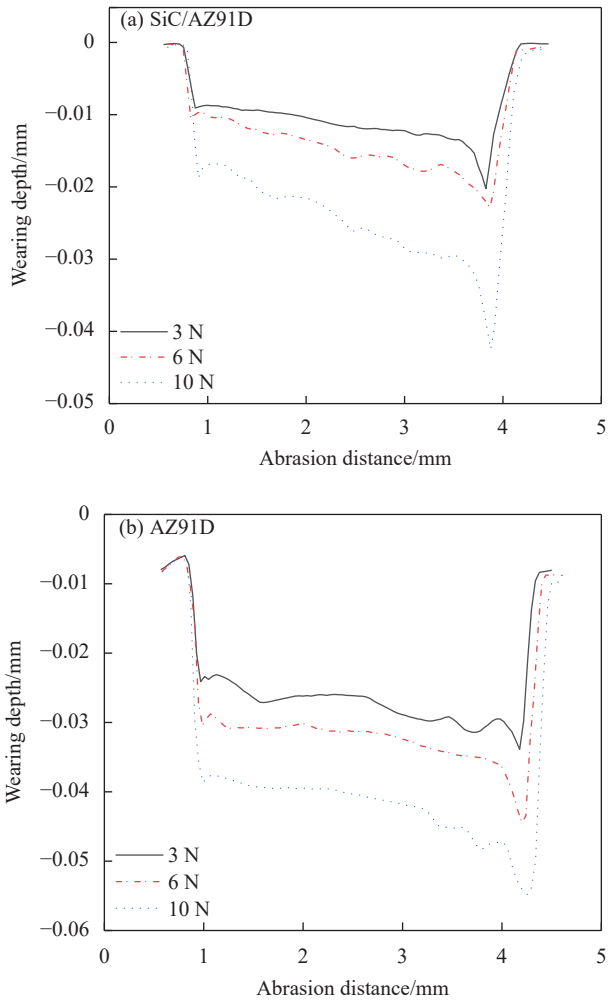


图6 不同载荷下 SiC/AZ91D (a) 与 AZ91D (b) 试样的磨损深度与径向距离关系

Fig. 6 Relationship between wear depth and radial distance of SiC/AZ91D (a) and AZ91D (b) samples under different loads

值比基体金属低 41.5%。当载荷为 6 N 时,复合材料距盘轴心最近与最远处磨损深度值比基体金属分别低 65.2% 与 48.5%;复合材料中心区域磨损深度值比基体金属低 54.7%;当载荷为 3 N 时,复合材料距盘轴心最近与最远处磨损深度值比基体金属分别低 62.9% 与 40.3%;复合材料中心区域磨损深度值比基体金属低 59.1%。

由图 6 可见,在各种载荷下,复合材料和基体的磨损深度与径向距离关系均表现出,随盘轴心径向距离增加,磨损深度增大。由于接触面距盘轴心最远处应力与相对运动速度的乘积大于最近处,通过 UMESHMOTION 子程序提取节点应力值,输入 Archard 磨损模型得出随盘轴心径向距离增加,磨损深度增大<sup>[22-23]</sup>。但是复合材料的磨损深度均小于基体磨损深度,表现出更好的耐磨

性能。

### 3.3 AZ91D 镁合金与 SiC/AZ91D 复合材料磨损实验结果

图 7 为复合材料与基体在不同载荷下摩擦系数与磨损时间关系图。由图可知,摩擦系数均呈现出先快速上升,随后平稳波动,将其分为跑合阶段和稳定磨损阶段。在跑合阶段,由于接触面较光滑,摩擦总是发生在接触峰上,接触点数目和接触点尺寸随载荷增加,致使摩擦系数快速增大;稳定磨损阶段,接触表面出现磨痕、沟槽,较光滑表面形貌被破坏,且磨屑粘着和磨损表面由于摩擦热作用致使的氧化膜存在等综合作用使摩擦系数在这一阶段较平稳,波动稳定<sup>[24]</sup>。

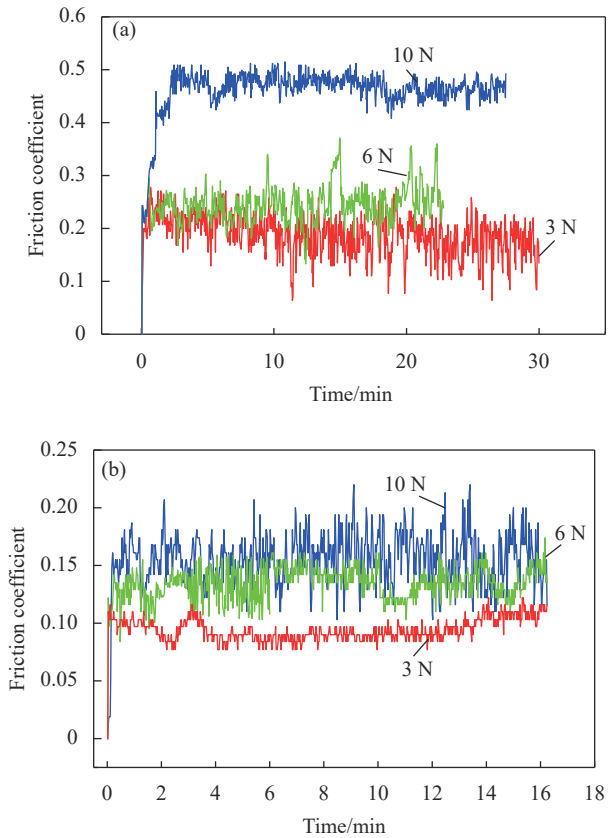


图7 不同载荷下 SiC/AZ91D (a) 与 AZ91D (b) 试样的摩擦系数与磨损时间关系

Fig. 7 Relationship between friction coefficient and wear time of SiC/AZ91D (a) and AZ91D (b) samples under different loads

图 8 为复合材料与基体平均摩擦系数与载荷关系图,由图可知,复合材料与基体的摩擦系数均表现出随着载荷的增加而增大。原因是载荷增加使盘与销之间接触状态由点接触变为微观面接触,摩擦系数随之增加<sup>[25]</sup>。

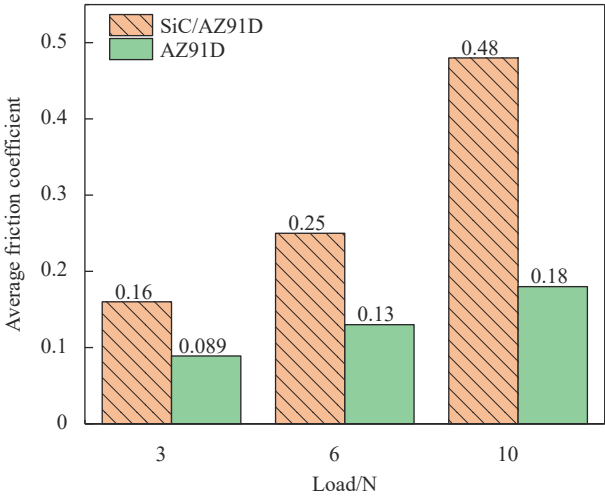


图8 SiC/AZ91D 复合材料与 AZ91D 基体平均摩擦系数与载荷关系  
Fig. 8 Average friction coefficient and load relationship between SiC/AZ91D composite material and AZ91D matrix

图 9 为相同载荷下复合材料与基体摩擦磨损面 SEM 图像。由图 9(a) 可见，复合材料的磨损表面以磨粒磨损为主并有少量剥层磨损，由于 SiC 增强颗粒凸起于基体表面，起到支撑载荷的作用，减少了基体合金与对磨副间的直接接触，使基体合金上的粘着点减少并被隔开成不连续点，从而磨损表面得到改善；由图 9(b) 可见，基体合金磨损表面上出现很深的凹凸不平的条纹，这是由于 AZ91D 合金硬度较低，在载荷压力和磨擦热作用下磨擦表面产生变形，接着在磨擦表面形成凸起的具有犁削作用的粘着点，随着磨擦磨损过程的不断进行，粘着点逐渐增大，在剪切力的作用下，致使基体的剥落加剧。张永振等[26] 研究指出，干滑动摩擦条件下，摩擦副的摩擦磨损特性受控于所产生的摩擦热、材料的导热能力及材料保持一定塑性变形抗力的温度条件三者之间的耦合作用。AZ91D 合金导热能力较高，但熔点较低、强度较差，基体材料失去塑性变形抗力，因此较容易发生粘着磨损。

3.4 实验与模拟对比

磨损深度的实验值由奥林巴斯 OLS4100 光学轮廓仪测得，其三维效果图如图 10 所示。为了验证模型的准确性，比较了相同载荷下 SiC/AZ91D 复合材料与基体合金磨损深度的模拟结果与实验结果。模拟曲线值{y}愈接近实验曲线值{y}，则曲线拟合度愈好。引入拟合优度指标  $R_{NL}$  [27]：

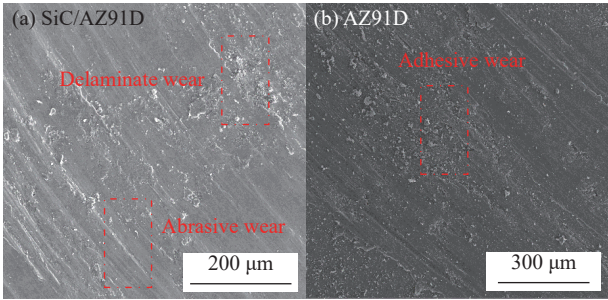


图 9 10 N 载荷下 SiC/AZ91D 复合材料 (a) 与 AZ91D 基体 (b) 摩擦磨损面的 SEM 图像  
Fig. 9 SEM images of friction and wear surface between SiC/AZ91D composite (a) and AZ91D matrix (b) under 10 N load

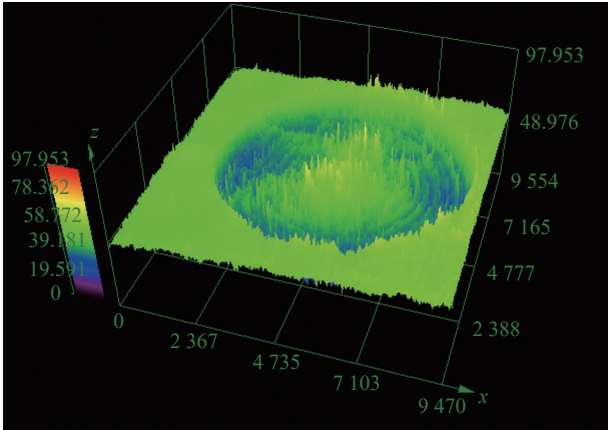


图 10 SiC/AZ91D 复合材料与 AZ91D 基体磨损轮廓三维效果图  
Fig. 10 3D rendering of wear profile between SiC/AZ91D composite and AZ91D matrix

$$R_{NL} = 1 - \sqrt{\frac{\sum (y_i - \widehat{y}_i)^2}{\sum y_i^2}} \tag{13}$$

式中： $\sum (y_i - \widehat{y}_i)^2$ 为残差平方和； $\sum y_i^2$ 为相对误差。对于实验所得数据与模拟曲线提供的数据来说，显然有  $R_{NL} \leq 1$ 。 $R_{NL}$  愈接近于 1，表示曲线的拟合优度愈好，说明模拟与实验吻合度高。

图 11 和式 (3) 计算可知，复合材料的  $R_{NL}$  为 0.926；AZ91D 合金的  $R_{NL}$  为 0.967，模拟结果和实验结果相近，复合材料与基体金属这种偏差可能是由于模型中两种材料的硬度差异，添加 SiC 颗粒在磨损表面的分布不均匀，那么不同磨损区域磨损行为会有偏差，随着磨损的进行，从而增加其误差。综上所述，模拟结果与实验结果吻合度高，本文的模拟模型及其分析结果是可信可靠的。

4 结论

(1) 盘销接触面应力值在径向区域分布不均匀，接触面均表现出距盘轴心最近与最远处应力值较

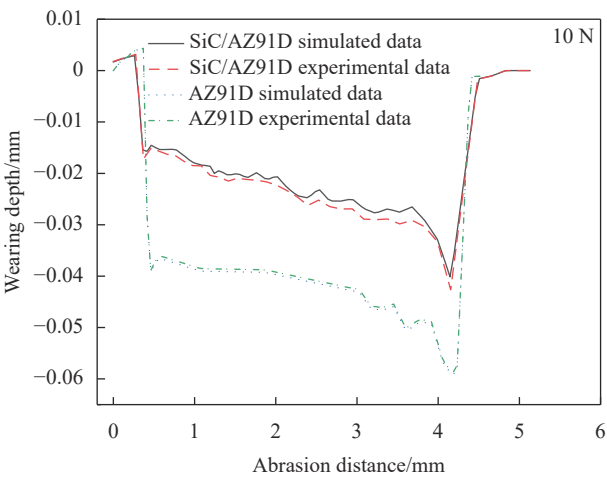


图 11 相同载荷下 SiC/AZ91D 复合材料与 AZ91D 基体磨损深度模拟与实验对比

Fig. 11 Comparison of simulated and experimental wear depth between SiC/AZ91D composite and AZ91D matrix under the same load

大, 其他径向区域较小。当载荷为 10 N 时, 复合材料距盘轴心最近与最远处应力值比基体金属分别高 9.86% 与 10.1%; 复合材料中心区域应力平均值比基体金属高 39.5%。当载荷为 6 N 时, 复合材料距盘轴心最近与最远处应力值比基体金属分别高 9.8% 与 3.7%; 复合材料中心区域应力平均值比基体金属高 23.1%; 当载荷为 3 N 时, 复合材料距盘轴心最近与最远处应力值比基体金属分别高 3.65% 与 1.18%; 复合材料中心区域应力平均值比基体金属高 16.7%。

(2) 在不同载荷下, 盘销接触面均表现出距盘轴心最近处磨损深度较小, 离盘轴心径向距离增加, 磨损深度越来越大。基体合金的磨损深度明显大于复合材料。当载荷为 10 N 时, 复合材料距盘轴心最近与最远处磨损深度值比基体金属分别低 51.7% 与 32.5%; 复合材料中心区域磨损深度值比基体金属低 41.5%。当载荷为 6 N 时, 复合材料距盘轴心最近与最远处磨损深度值比基体金属分别低 65.2% 与 48.5%; 复合材料中心区域磨损深度值比基体金属低 54.7%; 当载荷为 3 N 时, 复合材料距盘轴心最近与最远处磨损深度值比基体金属分别低 62.9% 与 40.3%; 复合材料中心区域磨损深度值比基体金属低 59.1%。

(3) 磨粒磨损和剥层磨损为复合材料主要磨损机制, 粘着磨损为基体合金的主要磨损机制。

参考文献:

[1] 李紫阳, 薄文杰, 张清林, 等. 外场对 SiCp/AZ91D 镁基复合材

料组织和性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(1): 275-284.

LI Ziyang, BO Wenjie, ZHANG Qinglin, et al. Effect of compound field on microstructure and properties of SiCp/AZ91D magnesium matrix composites[J]. Acta Materialae Compositae Sinica, 2022, 39(1): 275-284(in Chinese).

[2] 李怡然, 尧军平, 黄浩, 等. SiC/AZ91D 镁基复合材料单轴拉伸过程中裂纹萌生扩展机制 [J]. 塑性工程学报, 2023, 30(2): 185-196.

LI Yiran, YAO Junping, HUANG Hao, et al. Crack initiation and propagation mechanism of SiC/AZ91D magnesium matrix composites during uniaxial tension[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30(2): 185-196(in Chinese).

[3] YU X W, JIANG B, HE J J, et al. Oxidation resistance of Mg-Y alloys at elevated temperatures and the protection performance of the oxide films[J]. Journal of Alloys and Compound, 2018, 749: 1054-1062.

[4] 吕鑫, 邓坤坤, 王翠菊, 等. SiCp/尺寸对铸态 AZ91 镁合金显微组织与腐蚀性能的影响 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43(1): 136-142.

LYU Xin, DENG Kunkun, WANG Cuiju, et al. Effect of SiCp size on microstructure and corrosion properties of as-cast AZ91 magnesium alloy[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2023, 43(1): 136-142(in Chinese).

[5] 刘世英, 李文珍, 张琼元, 等. SiCp/AZ91D 纳米复合材料的摩擦磨损行为研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(1): 110-114.

LI Shiying, LI Wenzhen, ZHANG Qiongyuan, et al. Study on friction and wear behavior of SiCp/AZ91D nanocomposites[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(1): 110-114(in Chinese).

[6] ARJMANDI M, RAMEZANI M, GIORDANO M, et al. Finite element modelling of sliding wear in three-dimensional woven textiles[J]. Tribology Internationa, 2017, 115: 452-460.

[7] AJIT B A, DAVID S B, DANIELE D. Three-dimensional finite element simulation and experimental validation of sliding wear[J]. Wear, 2022, 204402: 504-505.

[8] ASHISH S A, PANKAJ K D. Tribological characterizations and numerical simulations of thermoplastic composites in pin-on-disc configuration[J]. Materials Today, 2023, 79: 92-99.

[9] SURESH R, PRASANNA K M, BASAVARAJAPPA S, et al. Numerical simulation & experimental study of wear depth and contact pressure distribution of aluminum MMC pin on disc tribometer[J]. Materials Today, 2017, 4: 11218-11228.

[10] FALCONNET E, MAKICH H, MONTEIL J C. Numerical and

- experimental analyses of punch wear in the blanking of copper alloy thin sheet[J]. *Wear*, 2012, 296: 598-606.
- [11] 吕景儒, 殷玉枫, 张锦, 等. 基于 C17200 与 34CrNiMo6 材料的摩擦磨损特性与数值模拟研究 [J]. 表面技术, 2023, 52(4): 176-177.
- LYU Jingru, YIN Yufeng, ZHANG Jin, et al. Frictional wear properties and numerical simulation of C17200 and 34CrNiMo<sub>6</sub> materials[J]. *Surface Technology*, 2023, 52(4): 172-183(in Chinese).
- [12] KUNAL K B, RAMKUMAR P. 3D FEM wear prediction of brass sliding against bearing steel using constant contact pressure approximation technique[J]. *Tribology Online*, 2019, 14: 194-207.
- [13] HEGADEKATTEA V, HUBERB N. Modeling and simulation of wear in a pin on disc tribometer[J]. *Tribology Letters*, 2006, 10(24): 1-10.
- [14] WANG Y Q, PASILIAO C L. Modeling ablation of laminated composites: A novel manual mesh moving finite element analysis procedure with ABAQUS[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 116: 306-313.
- [15] CAI M X, ZHANG P, XIONG Q W. Finite element analysis of fretting wear under variable coefficient of friction and different contact regimes[J]. *Tribology International*, 2023, 177: 107930.
- [16] MILOŠTANKOVIĆ C, ALEKSANDAR M C, ALEKSANDAR G C. Determination of Archard's wear coefficient and wear simulation of sliding bearings[J]. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2018, 71: 119-125.
- [17] ARVIN T T A, HOSSEIN A B, HASAN S C. Correction of Archard equation for wear behavior of modified pure titanium[J]. *Tribology International*, 2021, 115: 106772.
- [18] BORTOLETO E M, ROVANI A C, SERIACOPI V. Experimental and numerical analysis of dry contact in the pinon disc test[J]. *Wear*, 2013, 301: 19-26
- [19] ZHANG W C, ZHANG Y, GUO H L. An investigation on the tribological properties of nano-tungsten carbide coating by ESD[J]. *Journal of Engineering Research*, 2024, 12(3): 551-561.
- [20] 李宏伟, 李增权. SiC 颗粒增强镁基复合材料的制备与组织性能研究 [J]. 精密成形工程, 2023, 15(5): 36-43.
- LI Hongwei, LI Zengquan. Preparation and microstructure properties of SiC particle reinforced magnesium matrix composites[J]. *Precision Forming Engineering*, 2023, 15(5): 36-43(in Chinese).
- [21] PRIIT POÕDRA A, SÖREN ANDERSSON B. Simulating sliding wear with finite element method[J]. *Tribology International*, 1999, 8: 71-81.
- [22] ASHISH S, PANKAJ K D. Tribological characterizations and numerical simulations of thermoplastic composites in pin-on-disc configuration[J]. *Materials Today*, 2023, 79: 92-99.
- [23] 肖博升, 王新宇. 基于修正 Archard 模型的聚醚醚酮磨损数值模拟 [J]. 工程塑料应用, 2017, 45(9): 88-92, 104.
- XIAO Bosheng, WANG Xinyu. Numerical simulation of polyether ether ketone wear based on modified Archard model[J]. *Engineering Plastics Application*, 2017, 45(9): 88-92, 104(in Chinese).
- [24] STRAFFELINI G, PELLIZZARI M, MOLINARI A. Influence of load and temperature on the dry sliding behaviour of Al-based metal-matrix-composites against friction material[J]. *Wear*, 2004, 256: 7-8.
- [25] 卢楠楠. SiCp\_AZ91D 镁基复合材料的摩擦磨损行为研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- LU Nannan. Study on friction and wear behavior of SiCp\_AZ91D magnesium matrix composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [26] 张永振, 邱明, 上官宝, 等. 高速干摩擦条件下铝基复合材料的摩擦磨损行为研究 [J]. 摩擦学学报, 2005, 25(4): 343-347.
- ZHANG Yongzhen, QIU Ming, SHANGGUAN Bao, et al. Study on friction and wear behavior of aluminum matrix composites under high speed dry friction[J]. *Tribology*, 2005, 25(4): 343-347(in Chinese).
- [27] 梁超群, 尧军平, 李怡然, 等. SiC/AZ91D 镁基复合材料单轴压缩过程中裂纹萌生扩展机制 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(7): 4282-4293.
- LIANG Chaoqun, YAO Junping, LI Yiran, et al. Crack initiation and propagation mechanism during uniaxial compression of SiC/AZ91D magnesium matrix composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(7): 4282-4293(in Chinese).