

不同几何尺寸 SiC 微粒对机床导轨材料 GCr15 的磨损机制

王奔, 史忠澳, 祝天龙, 张棋

(沈阳航空航天大学 机电工程学院, 沈阳 110000)

摘要: **目的** 探究不同几何尺寸 SiC_p/SiC 陶瓷基复合材料切屑对机床精密部件磨损性能的影响机制及磨损机理, 为机床防护提供理论参考。**方法** 以机床精密部件——导轨运动副为例, 利用 SiC 磨粒代替 SiC_p/SiC 陶瓷基复合材料切屑, 采用机床导轨运动副材料 GCr15 轴承钢, 在不同几何尺寸磨粒条件下进行销盘摩擦磨损试验, 采用宏观摩擦因数和微观磨损形貌对磨损表面进行表征, 探究磨损机制。**结果** 相较于无磨粒条件下, 在加入磨粒后其摩擦因数更高、更不稳定。在磨粒条件下, GCr15 轴承钢的磨损表面存在大量的平行凹槽和不规则压痕, 并伴随着少量的剥落坑。随着磨粒尺寸的增加, 损伤加重, 平行凹槽磨损更深、更宽, 表面材料的剥落坑更密集, 同时, 磨粒几何尺寸的增加导致更深的磨痕深度及更高的磨损量。**结论** 磨粒在摩擦界面存在游离和结合等 2 种运动形式, 磨损机制为滚动挤压磨损与滑动开槽磨损的结合, 且随着磨粒几何尺寸的增大, 磨损机制由磨粒滚动挤压过渡为滑动开槽主导; 1 μm 和 5 μm 磨粒对摩擦进程的影响主要体现在剧烈磨损阶段, 而 10 μm 和 20 μm 磨粒对整个进程都有明显影响, 且大尺寸磨粒的加入会使摩擦副提前进入剧烈阶段; 对比不同条件下的磨损形貌、摩擦因数及磨损量可知, 1 μm 和 5 μm 的磨粒对摩擦的影响较小。

关键词: 机床导轨; 销盘试验; 三体磨粒磨损; 摩擦磨损性能; 磨损机制

中图分类号: TH117 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2025)01-0140-10

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2025.01.013

Wear Mechanism of SiC Particles of Different Sizes on Machine Tool Guide Material GCr15

WANG Ben, SHI Zhong'ao, ZHU Tianlong, ZHANG Qi

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 11000, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the effect mechanism and wear mechanism of SiC_p/SiC ceramic matrix composite chips with different geometric dimensions on the wear performance of machine tool precision parts and provide theoretical reference for machine tool protection. With the guide rail moving part of machine tool precision parts as an example, SiC

收稿日期: 2023-12-29; 修订日期: 2024-03-14

Received: 2023-12-29; **Revised:** 2024-03-14

基金项目: 国家自然科学基金 (51875367); 辽宁省振兴人才计划 (XLYC2007011); 辽宁省自然科学基金 (2020-MS-234); 中国博士后科学基金 (2020M670790)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51875367); Liaoning Revitalization Talents Program (XLYC2007011); Natural Science Foundation of Liaoning Province of China (2020-MS-234); China Postdoctoral Science Foundation (2020M670790)

引文格式: 王奔, 史忠澳, 祝天龙, 等. 不同几何尺寸 SiC 微粒对机床导轨材料 GCr15 的磨损机制[J]. 表面技术, 2025, 54(1): 140-149.
WANG Ben, SHI Zhong'ao, ZHU Tianlong, et al. Wear Mechanism of SiC Particles of Different Sizes on Machine Tool Guide Material GCr15[J]. Surface Technology, 2025, 54(1): 140-149.

abrasive particles were adopted instead of SiC_f/SiC ceramic matrix composite chips, and the GCr15 bearing steel commonly used as the material of the guide rail moving part of the machine tool was used to conduct the friction and wear experiments on the pin and disc under the condition of abrasive particles of different geometric dimensions, and the macroscopic coefficient of friction and microscopic wear morphology was used to characterize the worn surface and investigate the wear mechanism. The coefficient of friction was stable in the absence of abrasive particles, showing a tendency to increase, decrease, stabilize and then increase again. Compared to the condition without abrasive particles, the addition of abrasive particles produced higher and more unstable coefficients of friction. The overall trend of the friction coefficients remained unchanged, although unstable fluctuations occurred between the 1 μm and 5 μm abrasive particle conditions, while the friction coefficients under the 10 μm and 20 μm grain conditions continued to increase instead of decreasing after the first increase, and under the 20 μm condition, the second increase in the friction coefficient occurred in advance. There were obvious parallel grooves accompanied by a small number of spalling pits on the wear surface of GCr15 bearing steel under both non-abrasive and abrasive grit conditions. However, there were a large number of irregular indentations on the wear surface under the abrasive grit condition. In addition, with the increase of abrasive grain size, the wear of grooves and indentations on the test surfaces was more severe, and the spalling pits of the surface material were more intensive, while the deeper depth of wear marks as well as the higher amount of wear was produced under the high geometric abrasive grain condition. There were two forms of motion of abrasive grains at the friction interface, free and bonded, and the wear mechanism was characterized by large abrasive grains bonded to the friction interface, resulting in sliding grooves, and small abrasive grains free in the grooves, where rolling and extrusion occurred. As a result, the wear mechanism is a combination of rolling extrusion wear and sliding groove wear, and as the grain geometry increases, the wear mechanism changes from rolling extrusion to sliding groove dominance. The addition of abrasive particles causes unstable wear, and the wear process can be divided into three stages: running-in wear, stable wear and heavy wear. 1 μm and 5 μm abrasive particles mainly affect the running-in process in the severe wear stage, while 10 μm and 20 μm abrasive particles have an obvious effect on the whole process, and the addition of large-sized abrasive particles accelerates the friction process. Through the comparison on the wear morphology, coefficient of friction and amount of wear under different conditions, the effect of 1 μm and 5 μm abrasive particles on friction is relatively small.

KEY WORDS: machine guideway; pin-disc test; three body abrasive wear; friction and wear properties; wear mechanism

SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料具有密度低、耐高温、抗氧化等优点,被广泛应用于航空发动机的热端部件,例如涡轮叶片、燃烧室内壁^[1-3]。在 SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料机械加工过程中,会产生大量的微米级切屑,这不可避免地会对机床造成污染。当磨粒侵入精密运动部件的运动界面时,会导致运动副发生不稳定磨损,影响其使用寿命。其中,机床精密运动部件——导轨运动副作为机床进给系统的核心部件,自身的精度对机床的加工精度和加工质量具有决定性作用,115 μm 以下的颗粒就能透过导轨副密封结构,侵入导轨副摩擦界面^[4]。当切屑侵入导轨副摩擦界面时,会造成不稳定的磨粒磨损,导致导轨面磨损不均匀,从而影响导轨的使用寿命^[5]。

磨粒磨损分为 2 种损伤模式:二体磨粒磨损和三体磨粒磨损,前者主要表现为磨粒的微切削和犁耕,后者表现为磨粒的滚动接触挤压^[6]。众多学者针对磨粒开展了大量研究。黄琳等^[7]研究发现,虽然磨粒的加入会造成更为严重的磨损,但在磨损初期存在减磨效应,磨粒的加入有利于摩擦。田崇浩等^[8]研究发现,外部磨粒的加入会破坏摩擦过程中形成的主要发挥承载作用的氧化膜,这不利于氧化膜的形成,从而加

剧磨损。相关学者也研究了两者的过渡规律,Trezona 等^[9]通过改变载荷、磨粒尺寸及磨粒浓度等,探究了二体磨粒磨损和三体磨粒磨损的转变关系,结果表明,在高载荷和低磨粒浓度条件下,磨损机制主要表现为二体磨损;随着载荷的降低和浓度的提高,其磨损机制从二体磨粒磨损逐渐转变为三体磨粒磨损;在低载荷、高磨粒浓度条件下主要表现为三体磨损。磨粒的尺寸是影响磨损机理的重要因素之一,在很多研究中,由磨粒几何尺寸造成的磨损机理的变化,即磨粒的粒径效应已被证实会影响大多数条件下的磨损机理。在磨损过程中,磨粒的尺寸效应存在临界尺寸,当磨粒尺寸达到临界尺寸时,损伤机制会发生变化,由微切削转变为微犁耕^[10]。同时,磨粒存在临界最大尺寸,即当磨粒达到一定尺寸后,磨粒尺寸的增大不再对磨损产生影响,与粒径效应无关^[11]。Yuan 等^[12]研究发现,由于几何尺寸大的磨粒更难进入摩擦界面,因此中尺寸磨粒相较于大尺寸磨粒,会造成更为严重的磨损。研究表明,磨粒尺寸对磨损的影响与摩擦界面的粗糙程度有关,较高的粗糙度表示摩擦界面存在较大的凹凸峰接触,使得磨粒更易进入摩擦界面,导致更严重的磨损^[13]。然而,由磨粒尺寸造成磨

损机制的改变, 归咎于单个磨粒在摩擦界面载荷的增加, 因此造成了更为严重的挤压作用^[14]。

针对磨粒对摩擦副磨损特性的影响研究已取得了较大进展, 但陶瓷基复合材料切屑对机床导轨运动副的磨损机制未知, 机床导轨在第三体切屑磨粒条件下的磨损特性仍不清楚。本文以机床导轨材料 GCr15 为例, 研究外加磨粒对机床导轨材料 GCr15 摩擦学行为的影响, 重点探讨磨粒的几何尺寸对摩擦因数的时变特性, 分析其磨损形貌和磨损机制, 拟为机床的防护设计提供理论参考。

1 实验

1.1 磨粒特性

为了研究 SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料切屑对机床导轨材料摩擦损伤的影响, 首先使用 BT-9300ST 激光粒度仪分析了 SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料切屑的粒度分布, 使用扫描电子显微镜观测了颗粒的形貌。磨粒的粒径分布和颗粒形貌如图 1 所示, 主要集中在 20 μm 左右。为了探寻机床对磨粒的最大容限尺寸, 为机床防护提供理论指导, 选择粒径较小的颗粒进行试验。粒径在 22~125 μm 之间的 SiC 磨粒对摩擦磨损机制的影响无明显变化^[14]。由此, 本研究以 20 μm 为界限, 选取 1、5、10、20 μm 等 4 组粒径参数进行试验, 以无磨粒为对照。

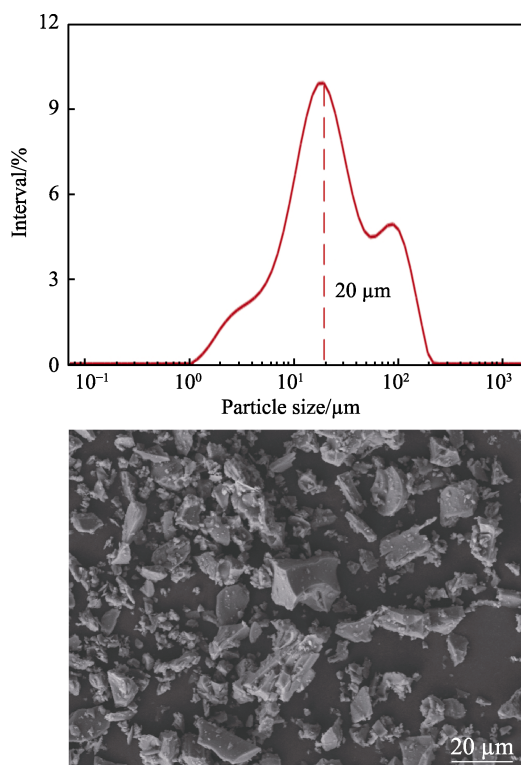


图1 SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料切屑粒度分布及颗粒形貌
Fig.1 Particle size distribution and morphology of SiC_f/SiC ceramic matrix composites chips

选择 SiC 磨粒代替 SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料切屑, 并在试验前对比了二者的颗粒特性。不同 SiC 磨粒粒径分布如图 2 所示, 颗粒形貌如图 3 所示。

莫氏硬度笔如图 4 所示。采用莫氏硬度笔测量 SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料切屑的硬度为莫氏硬度 9, 所用 SiC 磨粒由上海肴戈合金材料有限公司提供, 其莫氏硬度为 9.2。

通过分析颗粒特性可知, SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料切屑磨粒的形貌与 SiC 磨粒相差不大, 均呈不规则多边形形状, 且二者具有相似的硬度, 因此可以使用 SiC 代替 SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料切屑磨粒。

1.2 材料

在本试验中, 采用销盘试验方法研究了不同几何尺寸的切屑对机床导轨材料 GCr15 轴承钢摩擦损伤性能的影响。采用导轨油作为基础润滑油, 采用 SiC 磨粒代替 SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料切屑。

试样的导轨副材料为 GCr15 淬火轴承钢, 其硬度为 58~62HRC, 表面粗糙度 R_a 为 0.8 μm。销盘磨损示意图如图 5 所示。为了保证在试验过程中试件与 SiC 磨粒充分接触, 在销盘底座外侧设有 2 mm 的高环状凸台, 防止摩擦过程中磨粒脱离试验区域, 试样销柱的尺寸为 $\phi 5 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$, 底座的直径为 54 mm, 销柱与底座的接触面积为 19.635 mm², 运动轨迹的直径为 40.5 mm。

1.3 试验设置

所有试验均在常温、常压下进行, 在不同几何尺寸磨粒条件下进行销盘摩擦磨损试验, 并实时检测负载和转速, 摩擦因数的变化曲线随着时间的推移在计算中生成。

在试验前, 使用丙酮清洗试样表面, 在室温下使用超声清洗机清洗 15 min, 经烘干后, 使用电子天平称取样品的质量, 测得的质量为初始质量。通过查阅手册, 确定导轨的工况载荷, 选取载荷为 5 MPa, 线速度为 0.25 m/s^[15-16]。根据式 (1), 将载荷按销柱面积转换成法向压力。

$$w = \pi \cdot r^2 \cdot p \quad (1)$$

式中: r 为摩擦半径, mm; p 为接触载荷, MPa; w 为法向压力, N。

根据式 (2), 将线速度按试件旋转半径转换为转速。

$$n = v / 120\pi R \quad (2)$$

式中: n 为转速, r/min; v 为线速度, mm/s; R 为旋转半径, mm。

由式 (1)、(2), 转换得到法向压力为 98 N, 转速为 116 r/min。在试验前, 根据现场实际情况及试件面积, 向试件表面适量添加 0.05 g 的磨粒。润滑方式采用边界润滑, 润滑油量根据试件面积计算得到, 添

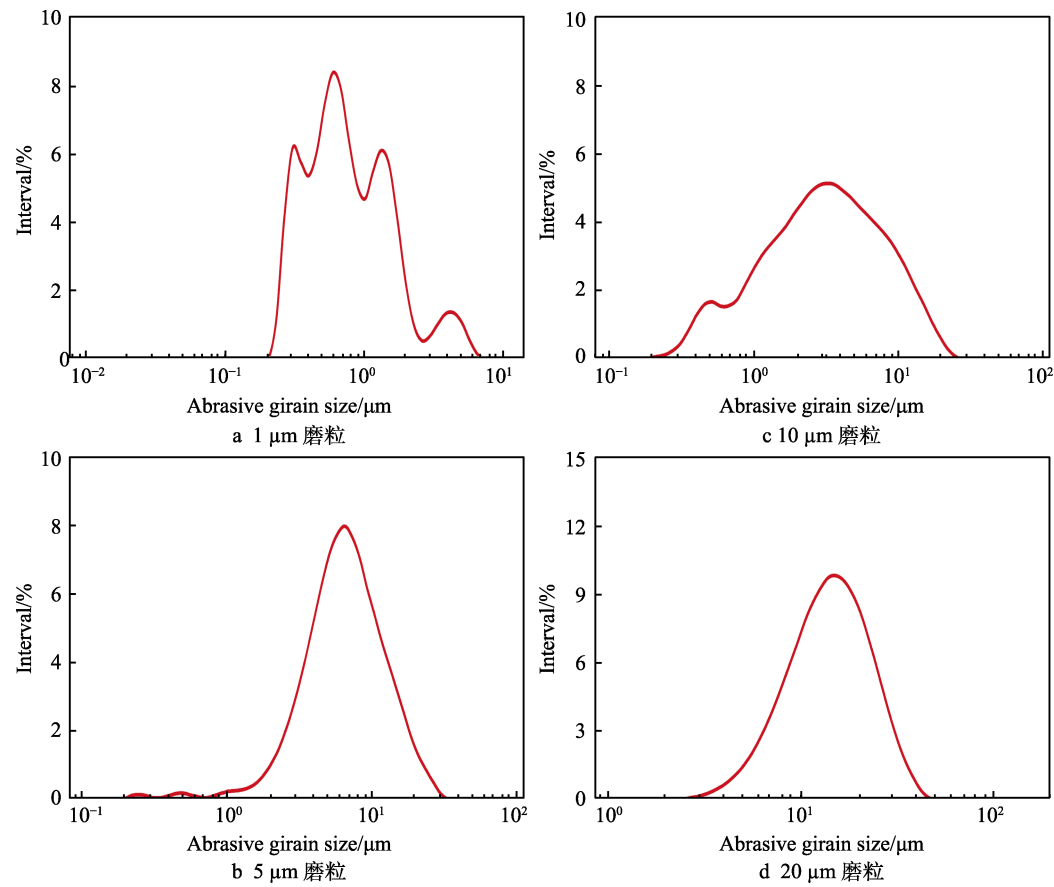


图 2 SiC 磨粒粒径分布

Fig.2 SiC abrasive particle size distribution: a) 1 μm abrasive particles; b) 5 μm abrasive particles; c) 10 μm abrasive particles; d) 20 μm abrasive particles

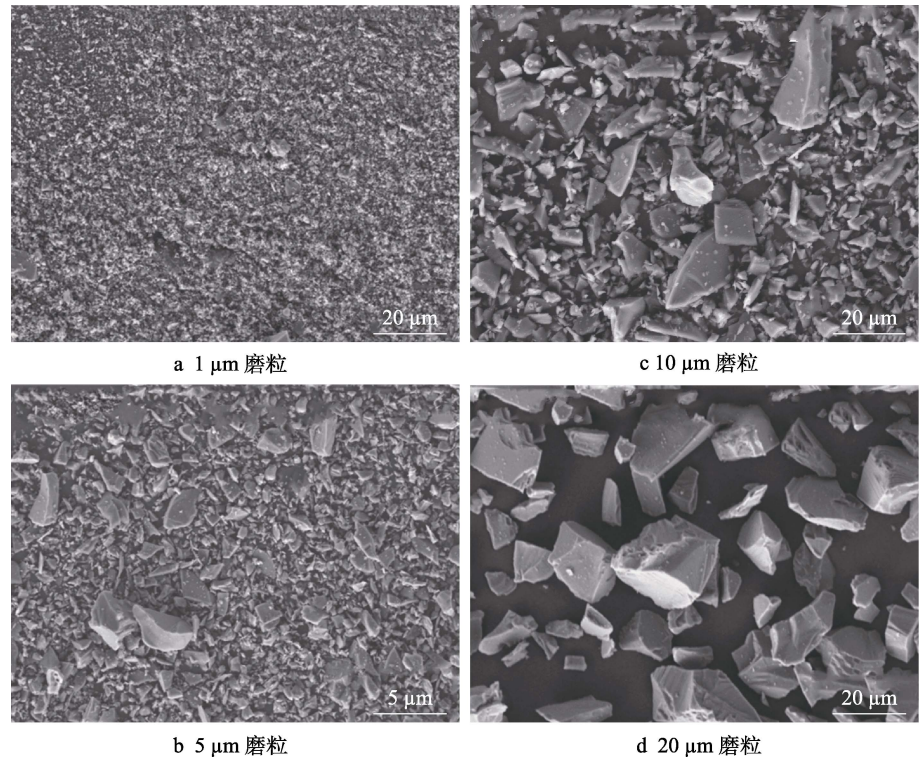


图 3 SiC 磨粒形貌

Fig.3 Morphology of SiC abrasive particles: a) 1 μm abrasive particles; b) 5 μm abrasive particles; c) 10 μm abrasive particles; d) 20 μm abrasive particles



图 4 莫氏硬度笔
Fig.4 Mohs hardness pen

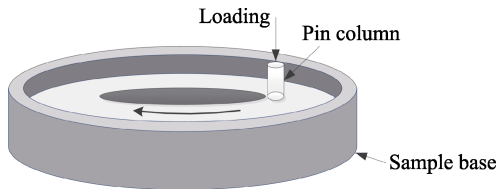


图 5 销盘示意图
Fig.5 Schematic diagram of pin disc

加的油量 Q 可以由式 (3) 计算^[17]。

$$Q = \alpha \cdot Ra \cdot S_1 \cdot n' \cdot t \quad (3)$$

式中: α 为边界膜厚度与表面粗糙度的比值系数, 在边界润滑条件下, 边界膜的厚度为表面粗糙度的 $1/10 \sim 1/100$ ^[17], 滑动导轨在稳定工作状态下表面润滑良好, 故取 α 为 $1/10$; Ra 为接触面粗糙度; S_1 为 1

次行程的油膜面积; n' 为每秒往复滑动次数; t 为每组试验时间, $t=3\ 600\text{ s}$ 。

在本实验中, $Ra=0.8\ \mu\text{m}$, $S_1=202.5\text{ mm}^2$, $n'=1.93\text{ 次/s}$ 。将上述参数代入公式, 边界润滑条件下的油量按 $Q=0.37\text{ mL/h}$ 计算, 膜厚为 $0.08\ \mu\text{m}$ 。

在试验开始时, 以 50% 的载荷和 50% 的转速磨合 5 min, 使润滑油与磨粒均匀覆盖, 正常磨合 60 min。在试验后, 清洗表面, 重新添加润滑油和磨粒, 重复 5 次。在试验完成后, 取下试件, 清洗并干燥, 称取试样的质量, 用于计算磨损质量。试验机的示意图和原理如图 6 所示。

1.4 设备

使用 MMU-10G 端面摩擦磨损试验机, 采用 ZEISS sigma 300 扫描电子显微镜 (SEM) 观察和分析试件表面的微观形貌, 分析不同几何尺寸磨粒条件下的摩擦学损伤性能。通过 SEM 微观形貌进一步解释宏观摩擦因数, 通过 SEM 微观形貌观测与宏观摩擦因数耦合表征摩擦学性能。利用 VHX-2000C 超景深显微镜观察和分析磨损轮廓, 采用电子天平测量不同条件下的磨损质量。

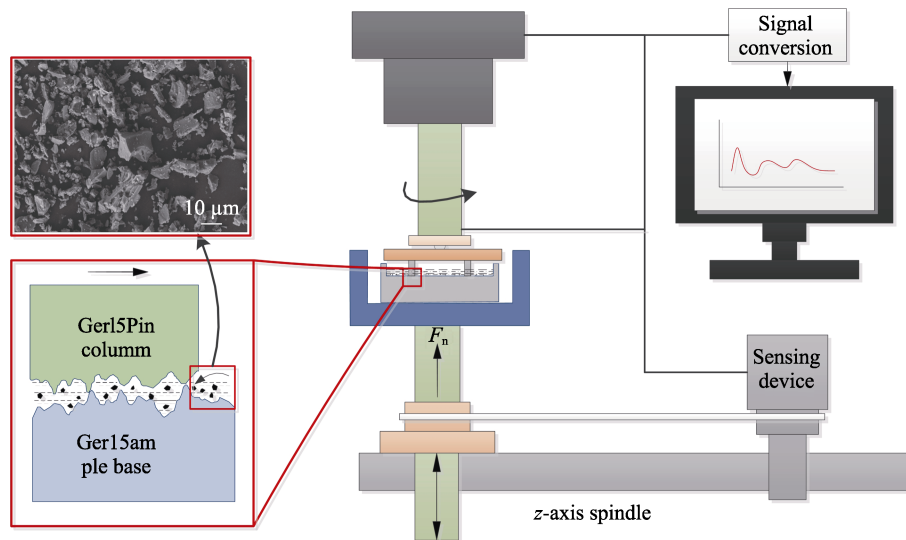


图 6 摩擦磨损试验机示意
Fig.6 Schematic diagram of friction and wear testing machine

2 结果与分析

2.1 不同粒径对摩擦因数的影响

不同粒径磨粒下摩擦因数时变曲线如图 7 所示。从图 7 可以看出, 未添加 SiC 磨粒的摩擦因数较小, 且相对稳定, 其磨损主要分为 3 个阶段: 磨合磨损阶段、稳定磨损阶段、剧烈磨损阶段。由于摩擦副表面具有微观和宏观的几何缺陷, 因此配合体之间实际是凸峰接触。在磨合初期, 实际接触点的接触压力较大,

摩擦剧烈, 使得摩擦因数迅速升高。随着磨合的进行, 试样表面的凸峰不断被磨平或脱落, 摩擦相容性不断提高, 使得摩擦因数降低并趋于稳定, 即进入稳定阶段。随着摩擦的进行, 试样表面磨损不断加剧, 表面损伤累积, 导致摩擦界面恶化, 摩擦因数开始发生剧烈波动, 进入剧烈磨损阶段。

添加磨粒后, 纵向分析不同磨粒对摩擦因数的影响, 磨粒的加入对摩擦进程的影响比较明显, 其几何尺寸越大, 影响越大。横向分析摩擦因数随时间的变化趋势, 摩擦进程因磨粒的加入而改变。在磨合-稳

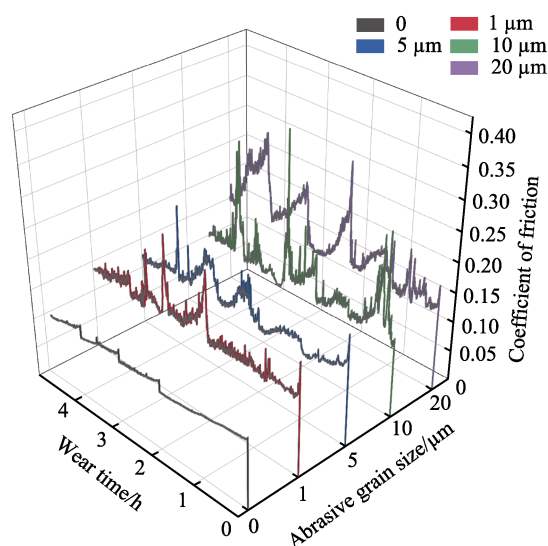


图 7 不同磨粒条件下摩擦因数时变曲线
Fig.7 Time varying curves of friction coefficient under different abrasive particle conditions

定磨损阶段,小磨粒的加入对摩擦进程无显著影响,虽然不够平滑,但整体上摩擦因数曲线相对稳定。当接触表面存在 $1\ \mu\text{m}$ 或 $5\ \mu\text{m}$ 的磨粒时,在磨合磨损阶段摩擦因数上升到较高的位置,但仍可以从磨合阶段平稳过渡到稳定阶段。这是由于磨粒的加入,在摩擦初期,使得摩擦界面的微凸峰表面更为粗糙,导致更大的摩擦因数,随着摩擦的进行,摩擦副接触表面逐渐被压实,磨粒被压入并存储在微凸峰之间,摩擦因数降低。

在接触表面存在 $5\ \mu\text{m}$ 的磨粒时,在稳定阶段后期摩擦因数发生跳动,摩擦恶化。当接触表面存在 $10\ \mu\text{m}$ 的磨粒时,摩擦因数在磨合磨损阶段后并未下降,反而进一步升高,在达到稳定磨损阶段前剧烈跳动,延长了磨合磨损阶段。在稳定磨损阶段时,摩擦因数相对不稳,且后期同样存在摩擦因数跳动的情况,且跳动得更剧烈,整体稳定性较差。当接触表面存在 $20\ \mu\text{m}$ 的磨粒时,不仅出现磨合磨损阶段延长的现象,而且在进入稳定磨损阶段后迅速进入剧烈磨损阶段,从而加快了磨损进程。

总体来看, $1\ \mu\text{m}$ 和 $5\ \mu\text{m}$ 的磨粒对摩擦进程的影响主要体现在剧烈磨损阶段,而 $10\ \mu\text{m}$ 和 $20\ \mu\text{m}$ 的磨粒对摩擦进程具有全面的影响,且随着磨粒几何尺寸的增加,呈现提前进入剧烈磨损阶段的趋势^[7]。

2.2 不同粒径对磨损量及磨损轮廓的影响

在不同磨粒条件下,磨损量随磨粒几何尺寸的变化情况如图 8 所示。由图 8 可见,添加磨粒后的磨损量高于无磨粒条件下的磨损量,且随着磨粒几何尺寸的增大,呈先减小再增大的趋势。在 $5\ \mu\text{m}$ 磨粒条件下的磨损量低于 $1\ \mu\text{m}$ 磨粒条件的磨损量,这可能是因随着磨粒几何尺寸的增大,磨粒承载更大,更加容易嵌入试样表面。Krelling 等^[18]的研究结果表明,在

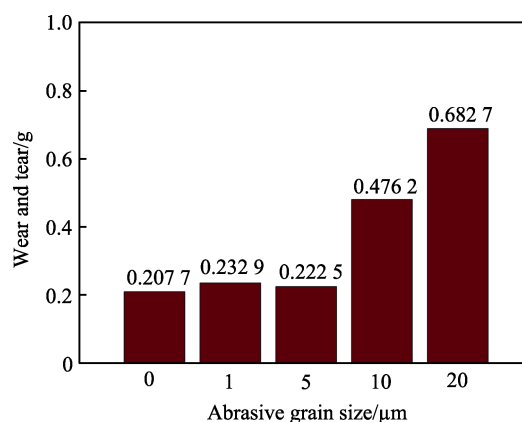


图 8 不同几何尺寸磨粒条件下的磨损量
Fig.8 Wear amount under different geometric size abrasive particle conditions

韧性材料中,磨粒颗粒的镶嵌附着会导致更低的磨损率。Bello 等^[19]的研究结果表明,磨损坑表面存在嵌入的磨粒可以很好地解释磨损系数的降低。

磨损表面二维轮廓示意图如图 9 所示,可以看到在无磨粒时,二维轮廓呈现较宽、较浅的 U 型。原因是在无磨粒情况下,硬度相差不多的摩擦件在载荷作用下易发生微凸峰黏附^[20],接触区在剪切作用下发生了双向磨损,形成了宽度较大、深度较小的磨损轮廓。在存在磨粒时,二维轮廓呈现较为明显的沟壑状,犁沟的波峰更加清晰。这是由于磨粒的硬度更高、粒度更小,在载荷作用下更易嵌入试样表面,压入基体的深度较深,在滑移过程中犁耕下层基体,形成了宽度较小、深度较深的磨损轮廓。

2.3 不同粒径对磨损的影响

添加不同几何尺寸磨粒磨损的表面形貌如图 10 所示。可以看到,无论是否添加磨粒,样品的磨损表面都存在明显的平行凹槽,这表示都受到了犁耕作用,发生了塑形变形^[21],且存在材料剥落现象,具有明显的磨粒磨损特征^[22],但是在有无磨粒之间可以看出明显差别。

无磨粒的样品表面剥落坑较浅,且发现有磨屑被压实在表面。这是由于接触表面在黏着效应下形成了黏着点。在长期磨损中,黏着点不断受到剪切作用,变形不断累积,最终导致黏着点发生剪切断裂,使得试样表面形成较浅的凹坑^[23]。随着摩擦的进行,剥落的磨屑被碾碎,进而表面出现犁沟状磨粒磨损形貌,因而无磨粒样本表面凹槽更宽、更浅,磨损的主要机制为磨粒磨损和黏着磨损。

当接触表面存在磨粒时,试样表面的凹槽磨损更窄,剥落坑更深,存在点蚀现象,且随着磨粒尺寸的增大,剥落坑逐渐密集。这是由于在两接触表面之间的挤压作用下,磨粒嵌入试样表面,使材料发生塑性变形,并产生表层裂纹,进而导致表层材料剥落,形

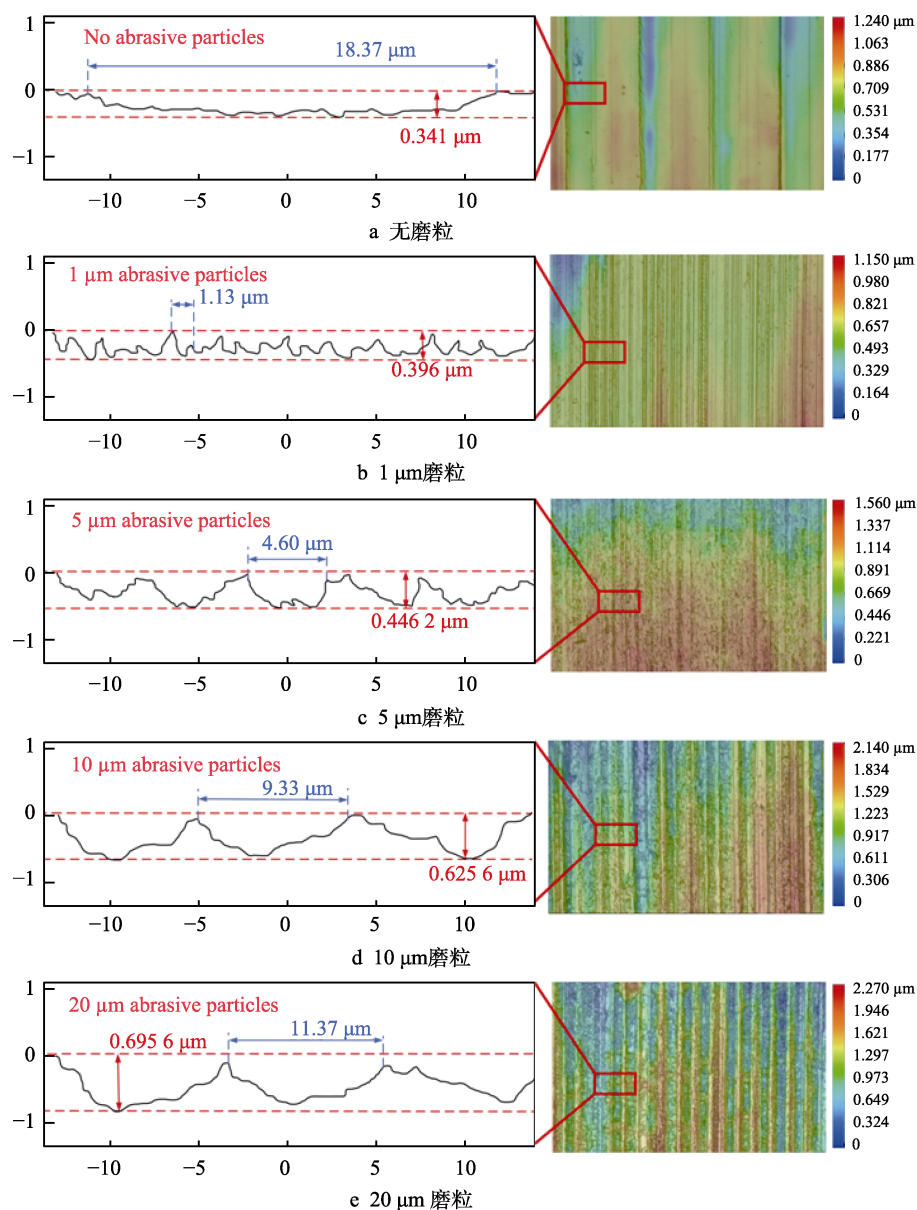


图9 磨损表面二维轮廓

Fig.9 2D profile of worn surface: a) no abrasive particles; b) 1 μm abrasive particles; c) 5 μm abrasive particles; d) 10 μm abrasive particles; e) 20 μm abrasive particles

成小凿坑。磨粒尺寸越大,则单颗磨粒承受的载荷越大,在摩擦界面会产生更为严重的接触作用^[14],造成了更为密集的剥落坑。在1 μm 磨粒试样表面,凹槽磨损较浅,无规则犁沟较为明显,磨损形式集中以滚动磨损为主。随着磨粒几何尺寸的增加,凹槽犁耕痕迹逐渐加深,磨损形式以滑动磨损为主。值得注意的是,1 μm 表面剥落坑明显比无磨粒时更小。这可能是因磨粒在摩擦界面滚动挤压,导致表面出现大量的微裂纹,这些裂纹反而阻止了材料大范围剥落。

2.4 表面损伤及磨损机理

添加磨粒后,GCr15轴承钢底座的磨损形态如图11所示。从图11a可以看出,样品表面出现沿摩擦方向的凹槽、少量剥落坑,发生了磨粒嵌入现象。这表

明试样在磨合过程中受到了磨粒的犁耕作用,发生了强烈的塑性变形,将材料推至边缘。从图11b、c可以看出,样品表面在沟槽之间存在大量的不规则压痕,这意味着在发生沟槽磨损的同时,还受到了磨粒滚压的作用,发生了滚动磨损。Cozza等^[24]在旋转球微磨粒磨损试验中也发现了类似的磨损,并称这种在沟槽表面发生的滚动磨损为微滚动磨损,且这种机制与磨粒的条件相关。

嵌入的磨料在磨合过程中挤压基体,在循环接触应力的作用下,使基体不断发生塑性变形,形成疲劳磨损区域,反复摩擦促进了微裂纹的萌生、扩展和向磨损表面裂纹的汇聚^[25](图11c),最终导致分层和脆性断裂脱落,从而形成剥落坑。

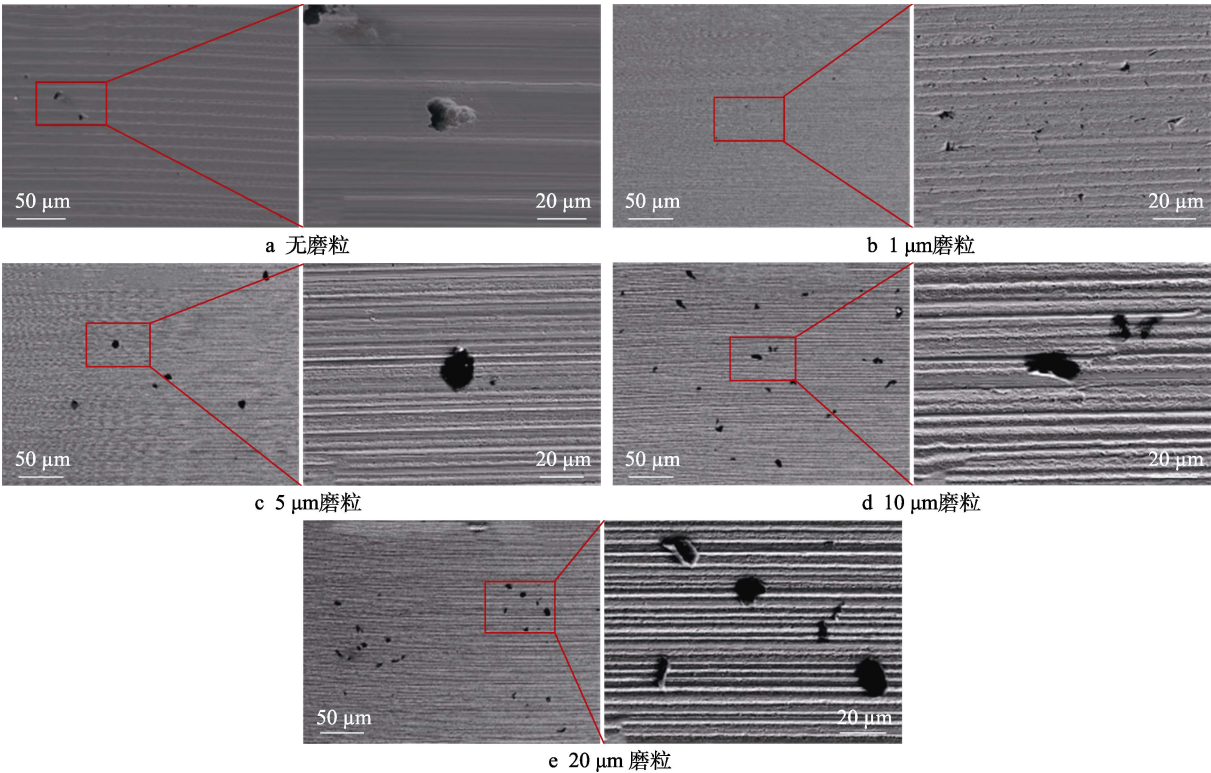


图 10 不同磨粒条件下的磨损形貌

Fig.10 Wear morphology under different abrasive conditions: a) no abrasive particles; b) 1 μm abrasive particles; c) 5 μm abrasive particles; d) 10 μm abrasive particles; e) 20 μm abrasive particles

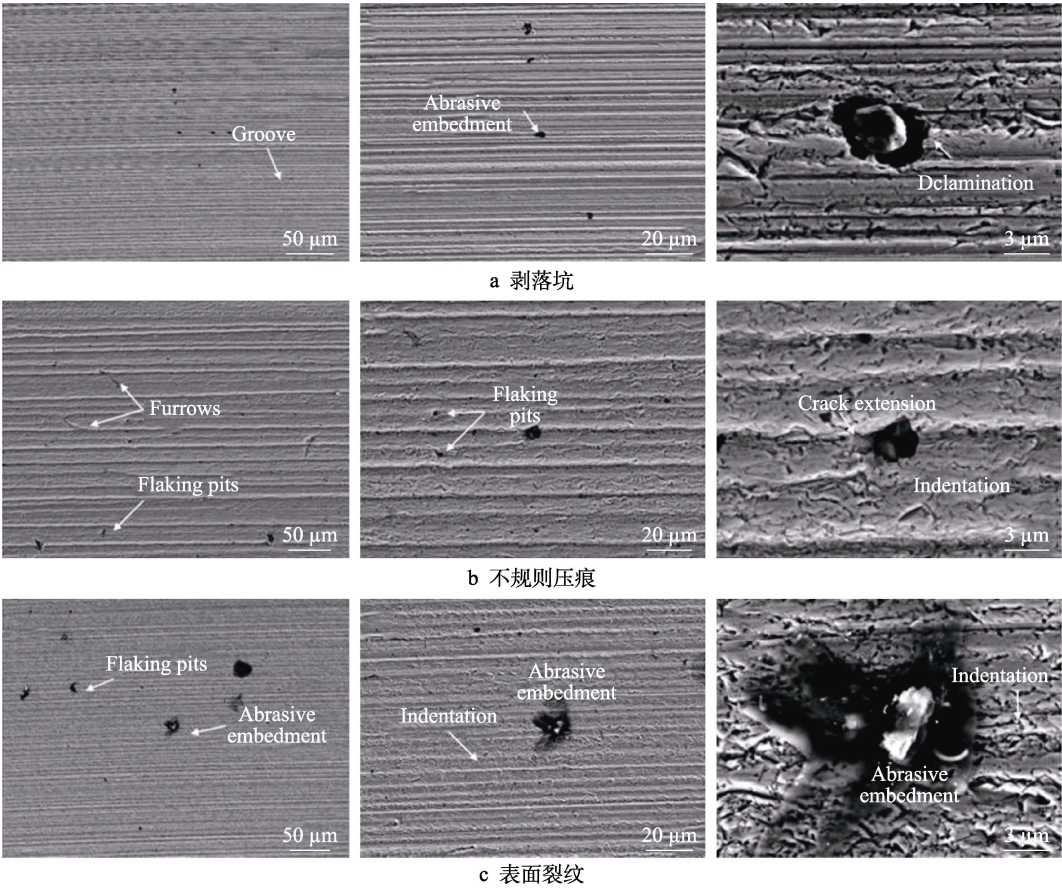


图 11 添加磨粒后试样磨损表面形貌 SEM 图

Fig.11 SEM image of the worn surface morphology of the sample after addition of abrasive particles: a) spalling pit; b) irregular indentation; c) surface cracks

GCr15 轴承钢磨损后的 EDS 成分分析结果如图 12 所示。表面形貌如图 12a 所示,扫描分析结果如图 12b 所示。表面嵌入颗粒如图 12a1 所示,表面黏着颗粒如图 12a2 所示,表面剥落坑如图 12a3 所示。根据图 12b1 的分析结果,元素主要为 Si、C,证明嵌入试样表面的颗粒为 SiC 磨粒,而由图 12b2 分析

结果可知,主要为少量的 Fe 元素、大量的 C 元素和极少量的 Si 元素,Gcr15 是含碳钢。表明颗粒为基体材料,在磨损过程中因疲劳而剥落下的基体材料成为磨屑,并参与到磨损进程中。如图 12b3 所示,凹坑内含有大量的 O 元素,表明在剥落坑中存在铁的氧化物,在磨损过程中发生了氧化反应。

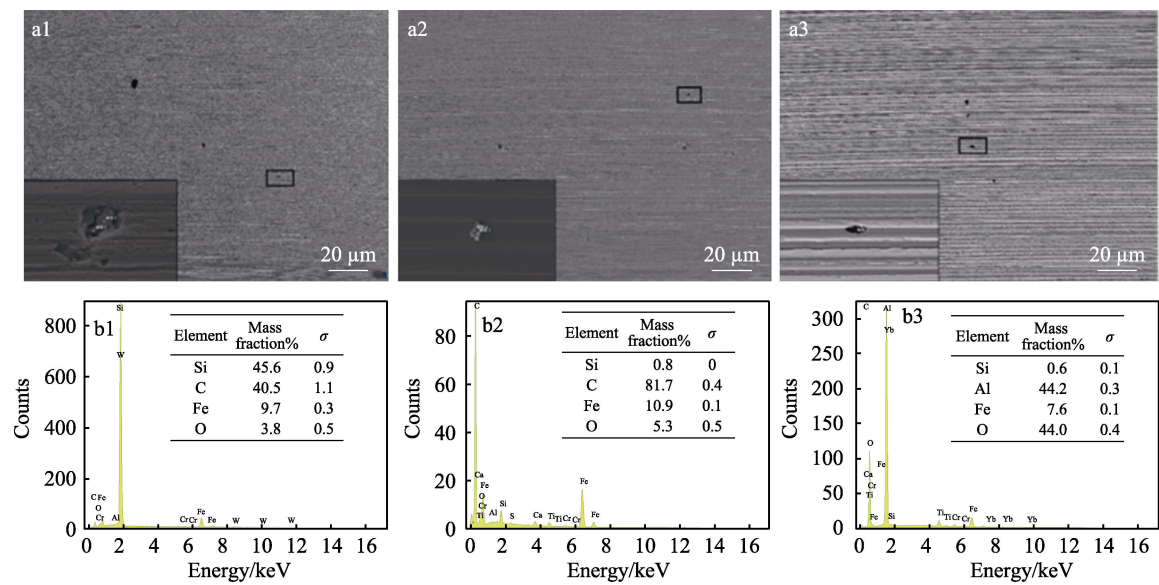


图 12 磨损形貌 (a) 及 EDS 成分分析结果 (b)
Fig.12 Wear morphology and EDS composition analysis results

磨粒的损伤机理如图 13 所示。基于磨粒的不均匀性,磨粒在摩擦表面同时发生了结合和游离 2 种现象^[26]。其中,粒径较大的磨粒会受到更大的法向载荷,在载荷作用下磨粒被压入摩擦表面,导致这些磨粒仅平移运动,通过犁耕作用使表面剪切、犁皱和切削,产生槽状磨痕,而较小的磨粒受到的法向载荷较小,部分磨粒会沿着大磨粒产生的大凹槽滚动,表现出平移加滚动的运动形式。通过挤压作用,在凹槽表面挤压出大量无方向性的切削犁沟、片状剥落坑和浅圆形剥落坑。

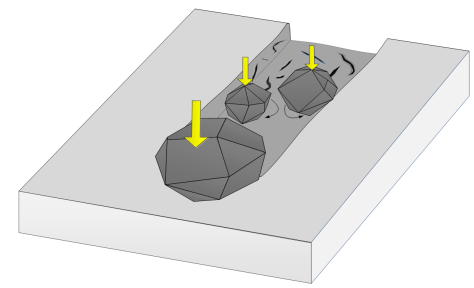


图 13 损伤机理示意图
Fig.13 Schematic diagram of damage mechanism

3 结论

采用 SiC 磨粒代替 SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料切屑,在模拟机床导轨跑合条件下进行了销盘摩擦试验,分析了不同几何尺寸磨粒对机床导轨材料 GCr15

轴承钢的摩擦性能,具体结论如下。

1) 磨粒在摩擦界面同时存在游离和结合两种现象,大磨粒结合嵌入摩擦界面,只能进行平移运动,从而发生开槽犁耕。小磨粒游离在大磨粒形成的凹槽中,表现为平移加滚动的运动形式,从而在犁耕凹槽内挤压,形成了大量的不规则压痕。

2) 在所有磨损后的试样表面均发现平行凹槽及剥落坑,而加入磨粒后磨损表面平行凹槽更窄、剥落坑更深,且随着磨粒几何尺寸的增大,磨损加重,产生了更加密集的剥落坑。同时,磨损机制由滚动挤压磨损转变为滑动开槽磨损,这归因于单颗磨粒承载的增加,造成了更为严重的接触。

3) 磨损可分为磨合磨损、稳定磨损、剧烈磨损等 3 个阶段。1 μm 和 5 μm 小磨粒主要影响剧烈磨损阶段,10 μm 和 20 μm 的大磨粒对整个进程都有显著影响,且随着磨粒几何尺寸的增大,影响越明显。同时,随着几何尺寸的增大,呈现加速磨损进程的趋势。

4) 磨粒的加入导致更高的磨损量及更差的磨损轮廓,综合对比摩擦因数、磨损轮廓、磨损量及磨损形貌发现,1 μm 和 5 μm 磨粒对磨损的影响较小。

参考文献:

[1] 刘巧沐,黄顺洲,何爱杰. 碳化硅陶瓷基复合材料在航空发动机上的应用需求及挑战[J]. 材料工程, 2019, 47(2): 1-10.

- LIU Q M, HUANG S Z, HE A J. Application Requirements and Challenges of CMC-SiC Composites on Aero-Engine[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2019, 47(2): 1-10.
- [2] 邱海鹏, 陈明伟, 谢巍杰. SiC/SiC 陶瓷基复合材料研究及应用[J]. *航空制造技术*, 2015, 58(14): 94-97.
- QIU H P, CHEN M W, XIE W J. Research and Application of SiC/SiC Ceramic Matrix Composites[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015, 58(14): 94-97.
- [3] 邹豪, 王宇, 刘刚, 等. 碳化硅纤维增韧碳化硅陶瓷基复合材料的发展现状及其在航空发动机上的应用[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(15): 76-84.
- ZOU H, WANG Y, LIU G, et al. Development Situation and Application of SiC/SiC Ceramic Matrix Composites in Aeroengine[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(15): 76-84.
- [4] 赵美玲, 冯健文. 滚动直线导轨副密封件及其应用研究[J]. *机电工程技术*, 2020, 49(8): 228-230.
- ZHAO M L, FENG J W. Research on the Seal of Rolling Linear Guide and Its Application[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2020, 49(8): 228-230.
- [5] 王超. 机床滑动导轨常见磨损问题及修复浅析[J]. *现代制造技术与装备*, 2019, 55(4): 177.
- WANG C. Common Wear Problems and Repair Analysis of Machine Tool Sliding Guide[J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2019, 55(4): 177.
- [6] ADACHI K, HUTCHINGS I M. Wear-Mode Mapping for the Micro-Scale Abrasion Test[J]. *Wear*, 2003, 255(1/2/3/4/5/6): 23-29.
- [7] 黄琳, 崔昊, 尹剑, 等. 基于制动器摩擦副销-盘试验的第三体摩擦磨损特性研究[J]. *润滑与密封*, 2022, 47(6): 59-64.
- HUANG L, CUI H, YIN J, et al. Study on the Friction and Wear Characteristics of the Third Body Based on Pin-Disc Test of Brake Friction Pairs[J]. *Lubrication Engineering*, 2022, 47(6): 59-64.
- [8] 田崇浩, 魏道高, 王伟. 基于“磨粒磨损”原理颗粒几何参数对制动块摩擦和磨损实验研究[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2022, 45(9): 1171-1176.
- TIAN C H, WEI D G, WANG W. Experimental Study on Friction and Wear of Brake Block by Particle Geometric Parameters Based on Abrasive Wear Principle[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2022, 45(9): 1171-1176.
- [9] TREZONA R I, ALLSOPP D N, HUTCHINGS I M. Transitions between Two-Body and Three-Body Abrasive Wear: Influence of Test Conditions in the Microscale Abrasive Wear Test[J]. *Wear*, 1999, 225: 205-214.
- [10] CORONADO J J, SINATORA A. Effect of Abrasive Size on Wear of Metallic Materials and Its Relationship with Microchips Morphology and Wear Micromechanisms: Part 2[J]. *Wear*, 2011, 271(9/10): 1804-1812.
- [11] MISRA A, FINNIE I. On the Size Effect in Abrasive and Erosive Wear[J]. *Wear*, 1981, 65(3): 359-373.
- [12] YUAN C Q, GUO Z W, TAO W, et al. Effects of Different Grain Sized Sands on Wear Behaviours of NBR/Casting Copper Alloys[J]. *Wear*, 2017, 384: 185-191.
- [13] GHEISARI R, BASHANDEH K, POLYCARPOU A A. Effect of Surface Polishing on the Tribological Performance of Hard Coatings under Lubricated Three-Body Abrasive Conditions[J]. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2019, 7(4): 045001.
- [14] RAJENDHRAN N, PONDICHERRY K, HUANG S G, et al. Influence of Grit Particles Characteristics on the Abrasive Wear Micro-Mechanisms of NBC-Ni and WC-Co Hard Materials[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2024, 118: 106422.
- [15] 王超, 胡亚辉, 谭雁清, 等. 基于 Archard 磨损理论的滑动导轨磨损率预测模型研究[J]. *润滑与密封*, 2014, 39(8): 73-76.
- WANG C, HU Y H, TAN Y Q, et al. Study on Wear Rate Prediction Model of Slide Guides Based on Archard Wear Model[J]. *Lubrication Engineering*, 2014, 39(8): 73-76.
- [16] 王超, 胡亚辉, 谭雁清, 等. 边界润滑状态下机床滑动导轨磨损特性及磨损率研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2019(10): 24-27.
- WANG C, HU Y H, TAN Y Q, et al. Research on Wear Characteristics and Wear Rate of Slide Guide of Machine Tool under Boundary Lubrication Condition[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2019(10): 24-27.
- [17] 王超, 胡亚辉, 谭雁清, 等. 边界润滑条件下机床滑动导轨精度保持性研究[J]. *机床与液压*, 2020, 48(21): 93-96.
- WANG C, HU Y H, TAN Y Q, et al. Research on Accuracy Retention of Machine Tool Sliding Guideway under Boundary Lubrication Condition[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2020, 48(21): 93-96.
- [18] KRELLING A P, DA COSTA C E, MILAN J C G, et al. Micro-Abrasive Wear Mechanisms of Borided AISI 1020 Steel[J]. *Tribology International*, 2017, 111: 234-242.
- [19] BELLO J O, WOOD R J K. Grooving Micro-Abrasion of Polyamide 11 Coated Carbon Steel Tubulars for Downhole Application[J]. *Wear*, 2003, 255(7/8/9/10/11/12): 1157-1167.
- [20] 郭华锋, 孙涛, 李菊丽. 不同摩擦条件下 TC4 钛合金摩擦学性能研究[J]. *热加工工艺*, 2014, 43(10): 40-43.
- GUO H F, SUN T, LI J L. Tribological Properties of TC4 Alloy under Different Friction Conditions[J]. *Hot Working Technology*, 2014, 43(10): 40-43.
- [21] FERNANDES F, RAMALHO A, LOUREIRO A, et al. Mapping the Micro-Abrasion Resistance of a Ni-Based Coating Deposited by PTA on Gray Cast Iron[J]. *Wear*, 2012, 292: 151-158.
- [22] 李波, 黄杰, 杨韬, 等. 20Cr13 不锈钢高温微动摩擦磨损特性研究[J]. *摩擦学学报*, 2024(4): 494-508.
- LI B, HUANG J, YANG T, et al. Analysis on High Temperature Fretting Wear Behaviour of 20Cr13 Stainless Steel[J]. *Tribology*, 2024(4): 494-508.
- [23] 米振莉, 张小垒, 李志超, 等. 热处理工艺对高碳铬轴承钢组织和性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2015, 36(7): 119-124.
- MI Z L, ZHANG X L, LI Z C, et al. Effect of Heat Treatment Process on Microstructure and Properties of a High Carbon Chromium Bearing Steel[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2015, 36(7): 119-124.
- [24] COZZA R C, TANAKA D K, SOUZA R M. Friction Coefficient and Abrasive Wear Modes in Ball-Cratering Tests Conducted at Constant Normal Force and Constant Pressure—Preliminary Results[J]. *Wear*, 2009, 267(1/2/3/4): 61-70.
- [25] 袁新璐, 张晓宇, 李根, 等. CuMg_{0.4} 合金切向微动磨损行为[J]. *中国有色金属学报*, 2022, 32(4): 962-974.
- YUAN X L, ZHANG X Y, LI G, et al. Tangential Fretting Wear Behavior of CuMg_{0.4} Alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2022, 32(4): 962-974.
- [26] COZZA R C. Third Abrasive Wear Mode: Is It Possible? [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2014, 3(2): 191-193.