

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2025.02.001

微织构对挖掘机铲斗关节摩擦副表面耐磨性能研究

张 雷^{1,2}, 陈雪辉^{1,2}, 李 昊^{1,2}, 高 婷^{1,2}, 刘 伟^{1,2}

(1. 安徽建筑大学 机械与电气工程学院, 安徽 合肥 230601;
2. 高端装备关键摩擦副安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230601)

摘 要: 为了改善挖掘机铲斗关节摩擦副的磨损问题, 以特定的挖掘机模型为例, 通过模拟挖掘机铲斗关节摩擦副的典型工况确定其相应的载荷, 采用有限元法对此加载条件下各种形貌微织构表面的应力分布进行了研究。采用 GY-LC-01 型飞秒激光打标机对 1Cr13 基体表面加工一定尺寸的微织构, 在有油润滑条件下, 使用端面摩擦磨损试验机进行摩擦磨损试验, 利用三维扫描深度显微镜观察磨损表面, 研究了不同微织构的摩擦机理以及润滑条件下摩擦副的减摩效果。研究结果表明, 织构表面的摩擦性能优于非织构表面, 应力集中在织构边缘, 圆形织构表面应力最小、减摩耐磨特性最好, 具有最低的平均摩擦因数。

关键词: 挖掘机; 铲斗关节; 摩擦副; 微织构; 摩擦机理; 减摩耐磨特性

中图分类号: TH117

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2025)02-0001-07

引文格式: 张 雷, 陈雪辉, 李 昊, 等. 微织构对挖掘机铲斗关节摩擦副表面耐磨性能研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2025, 39(2): 1-7.

Study on the Wear Resistance of Micro-Texture on the Surface of Bucket Joint Friction Sub-Surface of Excavators

ZHANG Lei^{1,2}, CHEN Xuehui^{1,2}, LI Hao^{1,2}, GAO Ting^{1,2}, LIU Wei^{1,2}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;
2. Anhui Province Key Laboratory of Critical Friction Pair for Advanced Equipment, Hefei 230601, China)

Abstract: In order to solve the wear problem of the bucket joint friction vice of the excavator, a specific excavator model is taken as an example to determine the corresponding load by simulating the typical working conditions of the excavator bucket joint friction pair, with the finite element method adopted to study the stress distribution of various micro textured surfaces under this loading condition. The GY-LC-01 femtosecond laser marking machine is used to process certain size of microstructures on the surface of 1Cr13 substrate, with the friction and wear tests conducted by using end face friction and wear testing machine under oil lubrication condition. The worn surfaces is observed by using a three-dimensional scanning depth microscope to study the friction mechanism of different microstructures and the anti-friction effect of friction pairs under lubrication condition. The results show that the textured surface is characterized with a better friction performance, with stress concentrated at the edges of the texture. Circular textured surfaces are characterized with the lowest stress and the best anti-friction and wear-resistant properties, with the lowest average friction coefficient.

Keywords: excavator; bucket joint; friction pair; micro-texture; friction mechanism; friction reduction and wear resistance property

收稿日期: 2024-04-02

基金项目: 安徽省高校自然科学基金资助项目 (2022AH020025); 安徽省重点研究与开发计划基金资助项目 (202004a05020066); 安徽省住房和城乡建设科学技术计划基金资助项目 (2022-YF056)

作者简介: 张 雷, 女, 安徽建筑大学硕士生, 主要研究方向为关节摩擦副摩擦磨损, E-mail: 1773680362@qq.com

1 研究背景

挖掘机大多长期处在恶劣环境下作业,由于挖掘机工作装置受力情况复杂多变,工作装置关节处易发生疲劳断裂、表面材料脱落、端面摩擦副处磨损严重等不良现象,对机器机械系统的正常运转及使用造成重要影响^[1]。工作装置中关节摩擦副是挖掘机的重要组成部分,因此对于关节摩擦副在作业过程中导致的疲劳破坏,特别是端面摩擦副处磨损严重等问题,是急需解决的工程技术难题。

一般的摩擦学理论中,认为摩擦副加工质量愈高,其表面平滑程度愈高,摩擦特性愈佳。韩静^[2]研究了表面织构对摩擦副摩擦性能的影响,其以雷诺方程为基础,建立了相应的动力学模型,并进行了实验验证。在此基础上,利用所建立的数学模型,计算出最优的表面纹理及厚度。孙建国^[3]对 GCr15 环形接触轴承钢的摩擦特性进行了研究,考察了不同润滑条件、组织密度的差异以及不同微观组织对其摩擦性能的影响。赵章行等^[4]研究了以内燃机活塞与缸套接触面为焦点,利用时均雷诺方程和周期性边界条件,构建了带有微织构的平面摩擦副油膜流动数学模型。结合实验测试和流场分析,其揭示了表面均匀分布的凹坑型和斜槽型微织构在润滑减摩方面的作用机理,发现斜槽型织构能提供更显著的减摩性能。D. B. Hamilton 等^[5]开展了两类并联摩擦副的微织构试验,试验结果表明,微织构排列对提高承载能力有重要影响。殷唯等^[6]以 TC4 钛合金为研究对象,以提高其耐磨特性为目标,利用皮秒脉冲激光对其进行 3 种形状的织构化制备。通过对织构化后的 TC4 进行摩擦磨损试验,发现经织构化后的 TC4 材料的表面硬度提高了 60% 左右,并且三角形微织构的硬度最大,而圆形和长方形织构可以明显地减小摩擦因数。Wang B. F. 等^[7]构建了有机玻璃 (polymethyl methacrylate, PMMA) 的飞秒激光去除模型,并且制备了 PMMA 的表面初级和次级微观结构,采用超深度三维显微镜和接触角测量仪对微观结构的表面形貌和润湿性进行了测量和分析,发现飞秒激光在 PMMA 材料上的直接刻蚀可以改变 PMMA 的亲水性,从而实现对 PMMA 材料浸润性的改变。M. Rezayat 等^[8]研究了激光处理对亚稳态奥氏体不锈钢 (MASS) 的热影响区微观组织和化学成分的影响,并且详细研究了表面改性对材料硬度、拉伸强度和疲劳寿命等力学性能的影响。

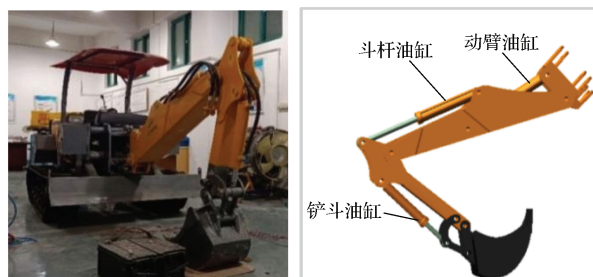
当前,表面微织构的加工技术有激光雕刻微制造技术^[9]、超声波冲击处理技术^[10]、表面喷丸技

术、电化学蚀刻技术、反应离子蚀刻技术等,其中激光雕刻微制造技术应用最为广泛。1Cr13 被广泛用于挖掘机工作装置铲斗关节处的耐磨垫圈。本研究通过对 1Cr13 的表面进行激光加工,获得了圆形、三角形和正方形 3 种不同的微织构。在此基础上,研究微织构对材料的摩擦学行为的作用机制。利用 ANSYS 建立 1Cr13 材料的三维仿真模型,研究 1Cr13 在旋转状态下的应力场变化规律,并结合摩擦磨损试验对其进行研究。

2 虚拟样机模型建立及动力学分析

2.1 挖掘机工作装置虚拟样机的模型建立

为使仿真结果更为精确,通过模拟实际工况得到相关动态载荷,为磨损仿真作基础。建立挖掘机工作装置三维实体模型,并且导入 ADAMS 中,根据实际工况设置作业过程,对模型进行运动副施加和驱动加载^[11-12]的动力学仿真,挖掘机研究模型如图 1 所示,其具体的运动副如表 1 所示。



a) 挖掘机实体样机 b) 工作装置虚拟样机模型

图 1 挖掘机研究模型

Fig. 1 Excavator research model

表 1 挖掘机运动副

Table 1 Movement subs of the excavator

连接部位	运动副
底座 + 旋转平台	转动副
旋转平台 + 动臂	
动臂 + 斗杆	
斗杆 + 铲斗	
动臂油缸 + 平台、动臂	转动副
斗杆油缸 + 动臂、斗杆	
铲斗油缸 + 斗杆、铲斗	
油缸活塞 + 对应油缸	

在挖掘作业中,将铲斗齿尖遭遇的挖掘阻力按照切向和法向方向进行分解。铲斗齿尖所承受的挖掘阻力、挖掘物料在满载状态下的重力,以及控制三组液压油缸的驱动函数等关键参数见表 2。

表2 铲斗齿尖的主要驱动函数、力函数
Table 2 Main drive functions and force functions of bucket tooth tips

参数名称	驱动函数、力函数
动臂油缸	$\text{step}(\text{time}, 0, 0, 3, -40) + \text{step}(\text{time}, 8, 0, 10, 40) + \text{step}(\text{time}, 10, 0, 12, -40)$
斗杆油缸	$\text{step}(\text{time}, 0, 0, 2, 200) + \text{step}(\text{time}, 8, 0, 10, -200) + \text{step}(\text{time}, 10, 0, 12, 10)$
铲斗油缸	$\text{step}(\text{time}, 0, 0, 2, -150) + \text{step}(\text{time}, 3, 0, 8, 250) + \text{step}(\text{time}, 12, 0, 14, -250)$
物料重力	$\text{if}(\text{time} \geq 8, 0, 14, -1\ 326)$
切向阻力	$\text{step}(\text{time} \geq 3, 0, 8, 2\ 542)$
法向阻力	$\text{step}(\text{time} \geq 3, 0, 8, 12\ 710)$

2.2 工作装置虚拟样机的动力学仿真分析

仿真模拟完成后,从ADAMS后处理模块中提取铲斗关节端面摩擦副间隙处的历史动态载荷-时间数据,绘制成如图2所示曲线。

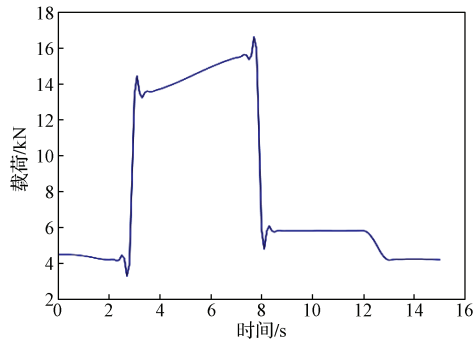


图2 铲斗-斗杆关节载荷曲线

Fig. 2 Bucket-bar joint loading curve diagram

根据图2所示铲斗-斗杆关节载荷曲线,可以观察到工作装置在不同阶段的受力情况。初始的0~3 s内,为准备挖掘阶段,挖掘机的机械臂尚未遭遇外部或动态载荷,因此铲斗-斗杆的连接点仅有微小的载荷变化。3~8 s内,为铲斗挖掘阶段,铲斗齿

尖遇到的挖掘阻力使得关节受力和力矩急剧上升,达最大值 16.5 kN,此时关节端面的摩擦副因为碰撞作用而表现出明显的接触应力。启动后,会出现明显的负载波动;工程机械中遇到的巨大冲击力通常是在工况转换期间引起的。在8~10 s内,随着铲斗挖掘动作的完成和工作装置的提升,载荷出现了另一次的显著变化。与挖掘阶段不同的是,提升物料时不再有挖掘阻力,动载荷也因此降低,降至 6 kN 左右;12~13 s 内为卸料阶段,13~15 s 内为转台转回阶段,负载均相对较低,外部负载被释放,每个关节只受工作装置本身重力的影响,载荷与0~3 s的移动阶段相同,持续0~3 s,约为 4.5 kN,故此3个阶段的载荷相差不大。当载荷发生变化时,由于工作装置本身的弹性变形,会产生规则的振动载荷。为了研究工作设备的结构疲劳,这些振动载荷是不可忽视的^[13]。

在与挖掘机相关的研究中,关节载荷通常被视为外力,研究关节载荷对于理解和预测关节摩擦副的磨损行为和疲劳寿命具有基础性意义。关节载荷是造成接触应力变化的直接原因,可能导致关节摩擦副损伤。因此,获取精确的关节荷载数据对于确保后续分析的可靠性和有效性至关重要^[14]。

3 不同形状微织构的有限元分析

3.1 建立几何模型

针对材料的加工效率、质量和表面摩擦等问题,学者们拟将天然生物的微观结构如仿生学纹理等引入机械工程领域中。仿生学纹理是指模仿生物体的外形,使之具备一定的抗摩擦性能的微纳尺度阵列结构^[15]。如图3所示是本研究利用Solidworks建立的无微织构、圆形微织构、正方形微织构、三角形微织构4种基本模型。

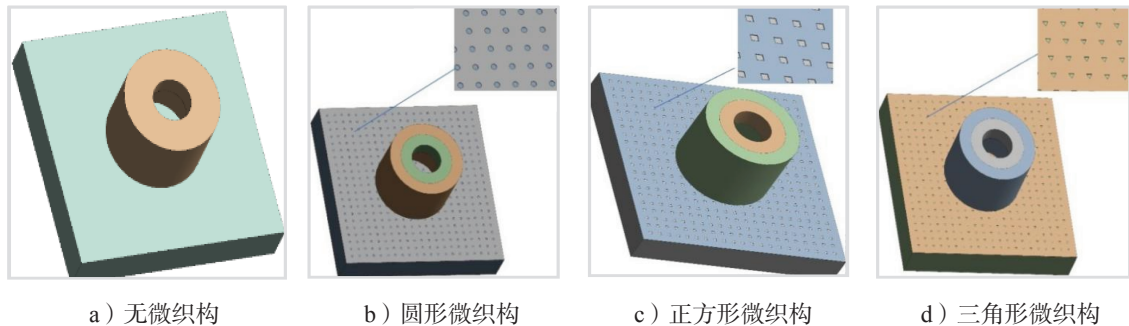


图3 不同形状微织构模型

Fig. 3 Microstructure models with different shapes

图3中,圆柱销由45#钢制成, $\Phi 10\text{ mm} \times 20\text{ mm}$,泊松系数为0.31,弹性模量为210 GPa;方块盘材料为1Cr13,尺寸为 $38\text{ mm} \times 38\text{ mm} \times 4\text{ mm}$,

泊松系数为0.3,弹性模量为206 GPa,圆形微织构直径为 $300\text{ }\mu\text{m}$,正方形微织构边长为 $300\text{ }\mu\text{m}$,三角形微织构边长为 $300\text{ }\mu\text{m}$,间距为 $500\text{ }\mu\text{m}$,深度为20

μm 。取等面积的 3 种不同微织构形状进行数值模拟,通过对 3 种不同形状与无织构的表层进行对比,分析织构化表层的各种受力状态,归纳出黏结区与滑移区分布的变化规律,确定适宜的应力尺寸组织。

3.2 划分模型网格

网格划分主要有四面体和六面体两种方式,由于六面体网格的计算精度更高,且更加接近模拟数值,因此整个模型采用六面体网格,如图 4 所示。

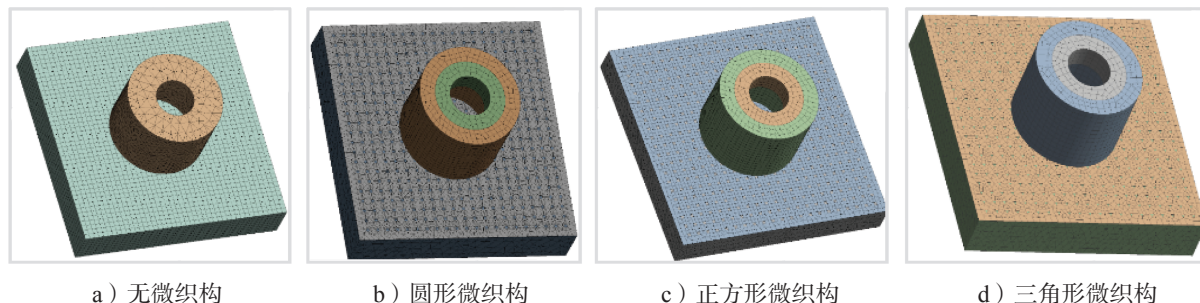


图 4 不同形状微织构网格图

Fig. 4 Mesh patterns of microstructures with different shapes

图 4 所示模型中,圆柱销的环形面为主要受力面,方块盘织构区域为次要受力面。由于圆柱销和方块盘之间存在明显的旋转,接触定义为有限滑动。在应力场中,应力集中发生在接触区域。为了提升计算精度,对接触区域网格进行了局部细化,最小网格尺寸设定为 0.5 mm ,圆柱销和方块盘都使用 C3D8RT 单元进行模拟。无微织构模型网格数量为 48 403,节点数量为 83 311;圆形微织构模型网格数量为 156 233,节点数量为 256 706;正方形微织构模型网格数量为 182 384,节点数量为 279 865;三角形微织构模型网格数量为 149 186,节点数量为 230 712。在销和方块盘之间的接触状态为润滑油下的摩擦,切向行为遵守库仑摩擦定律,法向行为则是硬性接触。

3.3 不同微织构对应力的影响

将 ADAMS 动力学仿真得到的动态载荷数据导出,选取最大载荷,根据挖掘机实际模型铲斗关节端面的面积大小,通过建立的模型进行面积等效转换,

得到的载荷施加在建立的数学模型上,作为边界条件,施加 1.5 kN 的载荷,圆柱销顺时针自转。

当销轴旋转时,应力分布在接触表面上的方块盘上,其应力没有显著变化。当销轴在具有微织构的方块盘中旋转时,应力先由小到大,再由大到小。事实上,织构的存在减少了销与方块盘之间的表面接触,这意味着销与方块盘上表面之间的接触成为销与方块盘上微织构之间的接触。当销轴转动时,由于对微织构有挤压作用,微织构产生应力集中和应力增大,且其受到的应力呈环形,由中心向四周扩散。含微织构的关节摩擦副端面动态接触应力和磨损量也随之增大,应力最大主要集中在间隙处环形区域端面。由于反向扭矩的影响,在模拟工作过程中,关节摩擦副的摩擦接触表面上的接触力会产生不均匀的接触。关节摩擦副端面接触应力云图表明,一侧应力较高,另一侧应力较低^[13]。在转速为 120 r/min 时,不同形状微织构的应力云图见图 5。

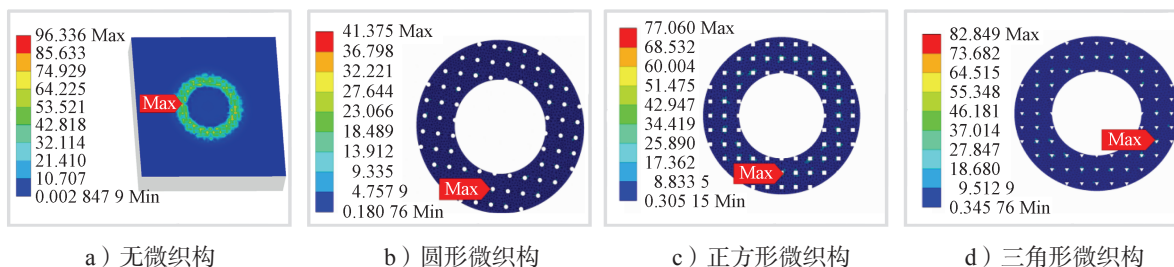


图 5 不同形状微织构应力云图

Fig. 5 Stress cloud map of microtextures with different shapes

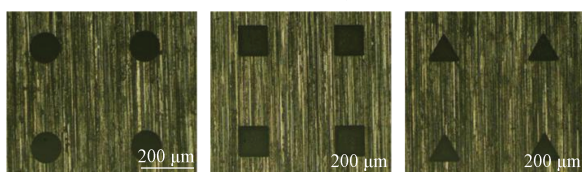
由图 5 所示微织构应力云图可知,无微织构端面最大应力为 96.336 MPa ,圆形微织构的端面最大应力为 41.375 MPa ,正方形微织构的端面最大应力为 77.060 MPa ,三角形微织构的端面最大应力为 82.849 MPa ,它们的最大应力点分别出现在图中标

有 Max 的地方,因为在旋转过程中无微织构表面平整,有微织构表面有凹槽存在,容易产生应力集中,因此会出现在相应位置处。由仿真模拟得出,圆形微织构在接触区域受到的应力最小,这可能是由微织构形状几何因素造成的。

4 不同形状微织构摩擦磨损试验

4.1 表面微织构制备

1Cr13 是用线切割技术进行研磨和抛光的,该技术将其切割成 $38\text{ mm} \times 38\text{ mm}$ 的样品。利用 GY-LC-01 型飞秒激光打标机制备不同形状的织构,制备好圆形、正方形、三角形微织构。圆形微织构直径为 $300\text{ }\mu\text{m}$,正方形微织构边长为 $300\text{ }\mu\text{m}$,三角形微织构边长为 $300\text{ }\mu\text{m}$,间距为 $500\text{ }\mu\text{m}$,深 $20\text{ }\mu\text{m}$ 。制备后用 1 000# 砂纸磨平样品表面,消除因金属融化重新凝结而产生的坑边毛刺,并将其与基面对准,用丙酮和超声波对其表面进行清理,烘干后备用,各样品在金相显微镜下显示的三维形貌如图 6 所示。



a) 圆形 b) 正方形 c) 三角形

图 6 3 种不同形状微织构在显微镜下的形貌

Fig. 6 Morphology of three different shapes under the microscope

4.2 摩擦性能试验装备

在端面磨损试验机上,使用制备好的不同形状微织构正方形块状试样进行测试。本次研究中选用的摩擦磨损试验设备为如图 7 所示的 HDM-20 型端面摩擦磨损试验机。



a) 试验机

b) 上试样

图 7 HDM-20 端面摩擦磨损试验机及上试样

Fig. 7 HDM-20 end face friction and wear testing machine and upper specimen

试验过程中,上试样(圆柱销)是由 45# 钢制成的,并且是旋转的,如图 7b 所示,而静止的下试样(环、板)则由 1Cr13 材料制成,两者之间发生端面接触顺时针旋转。在润滑油条件下,对该材料的摩擦磨损性能进行试验检测。

4.3 摩擦磨损试验结果分析

不同形状织构表面在室温条件下的摩擦因数变化规律如图 8 所示,设置 1.5 kN 外载荷作用下进行试验,磨损试验时间为 60 min 。试样在磨合阶段,随着时间不断增加,载荷从 0 开始不断增加,摩擦因数也随之增加,试验到 30 min 左右时,摩擦因数趋

于稳定。在稳定摩擦阶段,无微织构方块盘的摩擦因数波动较大,而含有织构方块盘的摩擦因素相对稳定。

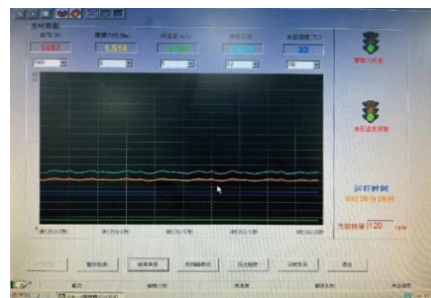


图 8 试验机下摩擦因数的变化规律图

Fig. 8 Change rule diagram of friction coefficient under the test machine

无织构和 3 种不同形状微织构的摩擦因数变化曲线如图 9 所示。

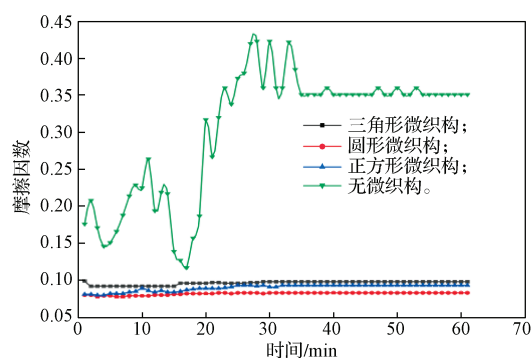


图 9 无织构和 3 种不同形状微织构的摩擦因数变化曲线

Fig. 9 Variation curves of the friction coefficients without texture and three different shapes of microtextures

从图 9 中可以看出,随着旋转时间增加,无微织构试样的平均摩擦因数最大,约为 0.350 ,圆形微织构试样的平均摩擦因数最低,约为 0.068 。正方形微织构试样的平均摩擦因数约为 0.096 ,三角形微织构试样的平均摩擦因数约为 0.117 ,与其他两种织构相比,圆形微织构在较短运动时间内可获得较低的摩擦因数,且摩擦因数曲线是稳定的。因此,可得出如下结论:表面微织构的存在可降低摩擦副表面的摩擦因数,从而提高其表面摩擦性能。圆形微织构是降低摩擦因数的最佳形状,这与有限元模型建模结果一致。

磨痕能反映物体在相同条件下磨损后的三维形貌以及磨损痕迹截面尺寸,通过观察试样的表面磨痕形貌可以研究微织构表面材料的抗磨性能。不同微织构的磨痕三维形貌如图 10 所示。由图 10 可以看到,无微织构化表面上磨损痕迹的平均深度远大于织构化表面上的平均磨损深度,表明织构化样品比无织构化样品的磨损小得多。图 10 中各磨痕截面呈现“U”形状,随着载荷的增大带来的摩擦因数变大,磨痕的

深度和宽度大致是越来越大,无微织构、圆形微织构、正方形微织构、三角形微织构的表面磨痕深度依次为 206.23, 50.00, 55.53, 64.35 μm , 根据磨痕深度大小可以得出,无微织构的磨痕深度最深,对于 3 种不同形状的微织构来说,圆形微织构的磨痕深度值最小,磨

损效果最好,以这种方式可以实现减摩耐磨的目的,其次是正方形微织构,而三角形微织构的磨痕最深,耐磨效果最差。

4 种不同微织构形状表面磨痕的 SEM 照片如图 11 所示。

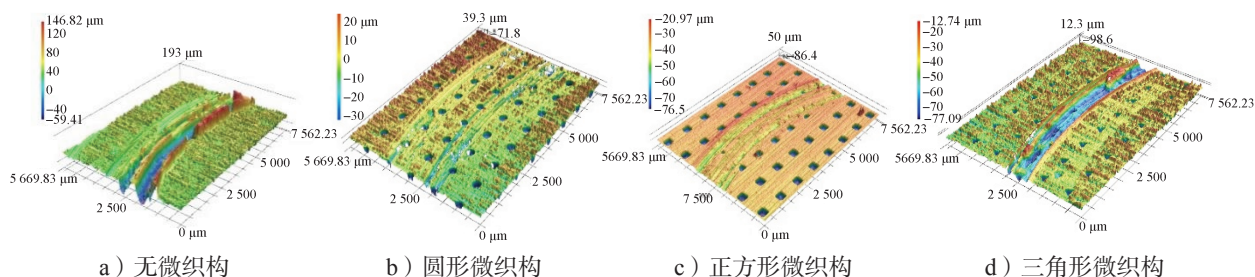


图 10 无织构和 3 种不同微织构的磨痕三维形貌

Fig. 10 Three-dimensional morphology of wear marks without texture and three different microtextures

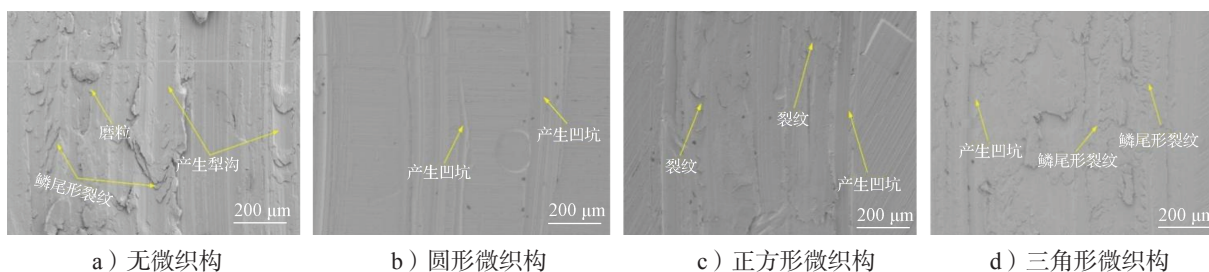


图 11 不同微织构形状表面磨痕的 SEM 照片

Fig. 11 SEM images of worn surface marks of different microtexture shapes

观察图 11 可知,无微织构表面磨损最为严重,区域表面金属材料严重脱落,产生犁沟、磨粒和鳞尾形裂纹,磨损机制为磨粒磨损;圆形微织构表面在摩擦过程中形成了犁沟,产生凹坑且磨痕处的磨屑数量不多。这表明在该条件下,动态负荷循环引起的疲劳是磨损机制的主要表现形式;随着磨损过程持续,正方形微织构表面的划痕变得更加显著,并且由于裂纹和凹坑的大量产生,磨损机制在这个阶段经历了从疲劳磨损向磨粒磨损的连续转变。磨损表面形成了与转动方向平行的犁沟,而塑性变形所引起的裂纹逐渐成为主导的磨损方式;三角形微织构在摩擦过程中产生了较大的凹坑,这一情况揭示了磨损机制:应力循环导致摩擦界面上形成深而长的鳞尾形裂纹和凹坑,这些裂纹和凹坑在每个循环中不断深化,直至材料发生疲劳破坏。随着磨损继续,材料表面出现了较为明显的划痕和犁沟现象,说明磨损正在从疲劳磨损转变为以磨粒磨损为主的磨损机制。上试样滑过微织构表面时,随着滑动时间增加,形成了大量磨屑,但在压缩下,大多数磨屑积聚在织构化的凹坑中,从而使磨损痕迹上的磨屑数目变少,造成了微织构面上的浅犁沟。表面微织构可以储存产生的三体碎屑,减少犁槽的产生,从而达到减少摩擦和磨损的目的^[16]。

5 结论

通过有限元方法对挖掘机铲斗关节端面摩擦副有无微织构表面应力分布情况变化进行了分析,并且进行了摩擦磨损试验,得到以下结论:

1) 在含有微织构的方块盘上旋转时,圆形微织构表面应力最少,具良好的摩擦性能,减摩特性较好;

2) 无微织构试样的摩擦因数最大,为 0.350,圆形微织构试样的平均摩擦因数最低,仅约为 0.068,正方形微织构试样的平均摩擦因数为 0.096,三角形微织构试样的平均摩擦因数为 0.117,可见圆形微织构是降低摩擦因数的最佳形状,其摩擦性能最好,而三角形微织构的摩擦性能最差;

3) 无微织构、圆形微织构、正方形微织构和三角形微织构的磨痕深度依次为 206.23, 50.00, 55.53, 64.35 μm ,因此圆形微织构磨损深度值最小,磨损效果最好,以这种方式可以实现减摩耐磨的目的,其次是正方形微织构,三角形微织构的磨痕最深,效果最差。

4) 与具有高摩擦因数的无微织构表面相比,表面微织构可以存储生成的碎片,降低了犁沟的产生,减少了摩擦,降低了磨耗。在 3 种不同的结构形式下,以圆形微织构为最优。

参考文献:

- [1] 蒙秋红. 挖掘机典型摩擦副磨损控制技术研究与应用 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
MENG Qiuhong. Research and Application of Wear Control Technology for Typical Friction Pairs of Excavators[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.
- [2] 韩静. 宏微观表面纹理的润滑及摩擦性能研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
HAN Jing. Study on the Lubrication and Friction Properties of Macroscale and Microscale Surface Texture[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013.
- [3] 孙建国. 滑动轴承摩擦副微织构表面自润滑技术及性能研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
SUN Jianguo. Study on Self-lubricating Technology and Property on Micro-Textured Surface of Sliding Bearing Couple[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.
- [4] 赵章行, 龙威, 任璞, 等. 表面织构类型对摩擦副减摩性能的影响分析 [J]. 中国表面工程, 2022, 35(1): 173-182.
ZHAO Zhangxing, LONG Wei, REN Pu, et al. Analysis of Influence of Surface Texture Type on Lubrication and Friction Reduction Performance of Friction Pair[J]. China Surface Engineering, 2022, 35(1): 173-182.
- [5] HAMILTON D B, WALOWIT J A, ALLEN C M. A Theory of Lubrication by Microirregularities[J]. Journal of Basic Engineering, 1966, 88(1): 177-185.
- [6] 殷唯, 张杰, 位博宇, 等. TC4 钛合金表面微织构干摩擦特性 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(4): 130-137.
YIN Wei, ZHANG Jie, WEI Boyu, et al. Surface Dry Tribological Properties of TC4 Titanium Alloy with Micro Texture[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55(4): 130-137.
- [7] WANG B F, SONG J. Hydrophobic Prediction Model and Experimental Study of PMMA Surface Microstructure Prepared by Femtosecond Laser Direct Writing[J]. Coatings, 2022, 12(12): 1856.
- [8] REZAYAT M, KARAMIMOUGHADAM M, MORADI M, et al. Overview of Surface Modification Strategies for Improving the Properties of Metastable Austenitic Stainless Steels[J]. Metals, 2023, 13(7): 1268.
- [9] 房善想, 赵慧玲, 张勤俭. 超声加工技术的应用现状及其发展趋势 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 22-32.
FANG Shanxiang, ZHAO Huiling, ZHANG Qinjian. The Application Status and Development Trends of Ultrasonic Machining Technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 22-32.
- [10] 赵镇, 马廉洁, 韩智斌, 等. 微织构几何参数对硬质合金干摩擦性能的影响 [J/OL]. 机械科学与技术, 2024: 1-7. [2024-03-20]. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20230280>.
ZHAO Zhen, MA Lianjie, HAN Zhibin, et al. Influence of Microweave Geometry Parameters on Dry Friction Performance of Cemented Carbide[J/OL]. Mechanical Science and Technology, 2024: 1-7. [2024-03-20]. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20230280>.
- [11] SHI H S, WANG L H, YANG Z, et al. Dynamics Simulation Analysis on Hydraulic Excavator Working Mechanism Based on Rigid-Flexible Coupled Modeling[J]. Advanced Materials Research, 2014, 889/890: 459-462.
- [12] 肖才远, 张桂菊, 邓瑞麟. 基于 ADAMS 液压挖掘机工作装置动力学仿真分析 [J]. 邵阳学院学报 (自然科学版), 2016, 13(2): 89-94.
XIAO Caiyuan, ZHANG Guiju, DENG Ruilin. Dynamic Simulation Analysis of Working Device for Hydraulic Excavator Based on ADAMS[J]. Journal of Shaoyang University (Natural Science Edition), 2016, 13(2): 89-94.
- [13] 王子健. 基于刚柔耦合动力学分析的挖掘机工作装置关节摩擦副端面接触性能分析 [D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2022.
WANG Zijian. Based on Rigid-Flexible Coupling Dynamics Analysis of Excavator Joint Friction Pair Face Contact Performance Analysis[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2022.
- [14] 刘思思, 刘强, 刘金刚, 等. 表面微织构化石墨涂层对铝合金表面的协同减摩机理研究 [J]. 表面技术, 2019, 48(8): 29-38.
LIU Sisi, LIU Qiang, LIU Jingang, et al. Synergistic Antifriction Mechanism of Surface Micro-Textured Graphite Coating on Aluminum Alloy Surface[J]. Surface Technology, 2019, 48(8): 29-38.
- [15] 马文林, 赵健, 王府伯. 织构化表面对 45 号钢摩擦磨损性能的影响 [J]. 摩擦学报, 2023, 43(3): 314-324.
MA Wenlin, ZHAO Jian, WANG Fubo. Effect of Textured Surface on Friction and Wear Properties of 45 Steel[J]. Tribology, 2023, 43(3): 314-324.
- [16] 王丽丽, 郭少辉, 魏聿梁, 等. 表面微织构对 45# 钢摩擦副表面摩擦学性能影响的实验研究 [J]. 表面技术, 2018, 47(12): 149-154.
WANG Lili, GUO Shaohui, WEI Yuliang, et al. Experimental Study on the Influence of Surface Microtexture on the Tribological Properties of 45# Steel Friction Pairs[J]. Surface Technology, 2018, 47(12): 149-154.

(责任编辑: 廖友媛)