

表面沟槽与润滑剂协同作用对摩擦振动和噪声特性的影响

王安宇, 王东伟, 范志勇, 吴元科, 项载毓, 莫继良

(西南交通大学 摩擦学研究所, 成都 610031)

摘要: **目的** 提升表面沟槽的减振降噪性能, 延长其寿命, 通过试验方法探索合适的优化方式。**方法** 借助数控加工方法在蠕墨铸铁材料表面加工出一定尺寸沟槽, 并在沟槽填充固体润滑剂 MoS_2 , 以获得具有不同变特性的表面。采用球-平面接触方式进行摩擦对比试验, 研究沟槽与固体润滑剂 MoS_2 协同作用对界面摩擦振动及噪声特性的影响。**结果** 沟槽与 MoS_2 固体润滑剂协同作用时, 不仅有效地缓解了过沟冲击振动, 还进一步抑制了摩擦振动及噪声的产生。与光滑表面相比, 填充 MoS_2 的表面噪声主频幅值降低约 13.4 dB。**结论** 该试验条件下, 接触表面粘着撕裂和犁削作用等产生的“不平顺”界面因素是激发摩擦振动及产生噪声的主要诱因。沟槽与 MoS_2 结合不仅维持了界面的完整性, 还能保持其时变特性, 能减缓并削弱“不平顺”界面因素的产生, 进一步优化表面沟槽减振降噪的功能, 并能减小磨损, 延长沟槽的使用寿命。

关键词: 表面沟槽; MoS_2 ; 摩擦振动; 噪声; 界面特征

中图分类号: TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)08-0016-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.08.003

Synergistic Effect of Surface Groove and Lubricant on Friction-induced Vibration and Noise Characteristics

WANG An-yu, WANG Dong-wei, FAN Zhi-yong, WU Yuan-ke, XIANG Zai-yu, MO Ji-liang

(Tribology Research Institute, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the vibration and noise reduction performance of the surface groove and prolong its service life and then explore an appropriate optimization method through test. NC machining method was used to fabricate a groove of certain size on the surface of compacted graphite iron. The groove was filled with solid lubricant MoS_2 to obtain the surface with different time-varying characteristics. The effect of cooperated groove and solid lubricant MoS_2 on interface friction-induced vibration and noise characteristics was investigated by adopting ball-on-flat configuration to conduct friction contrast test. When the groove and MoS_2 solid lubricant worked together, not only the impact vibration of the groove could be effectively alleviated, but also the friction-induced vibration and noise could be further suppressed. Compared with smooth surface, the main frequency amplitude of noise of the surface filled with MoS_2 was reduced by about 13.4 dB. Under the test

收稿日期: 2019-06-11; 修订日期: 2019-07-09

Received: 2019-06-11; Revised: 2019-07-09

基金项目: 国家自然科学基金 (51822508, 51675448)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51822508, 51675448)

作者简介: 王安宇 (1987—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为摩擦振动噪声。

Biography: WANG An-yu (1987—), Male, Doctor, Research focus: friction-induced vibration and noise.

通讯作者: 莫继良 (1982—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为摩擦学及表面工程、摩擦振动及噪声。邮箱: jlmo@swjtu.cn

Corresponding author: MO Ji-liang (1982—), Male, Doctor, Researcher, Research focus: tribology and surface engineering, friction-induced vibration and noise. E-mail: jlmo@swjtu.cn

conditions, the "irregularity" interface factors caused by adhesive tearing and ploughing are the main inducement of friction-induced vibration and noise. The cooperation of groove and MoS₂ can not only maintain the interface integrity but also keep the time-varying characteristic. It can slow down and weaken the "irregularity" interface factors, further optimize the function of reducing vibration and noise, and prolong the service life of groove as well.

KEY WORDS: surface groove; MoS₂; friction-induced vibration; noise; interface characteristics

摩擦振动及噪声广泛存在于机械系统中(如齿轮传动、导轨、柱销联接等),由此导致的系统振动和零部件疲劳将严重危害机械设备的服役寿命,也破坏了环境舒适性,有害于人的身心健康^[1-4]。同时,磨屑的产生极有可能会加剧界面磨损,并污染环境。摩擦振动及噪声的发生及演变受到诸多因素的影响,如载荷、速度、摩擦副材料以及磨损界面特征等^[5-6],众多学科领域的学者对摩擦振动及噪声给予了高度关注。

近年来,随着新材料、新工艺的不断应用,摩擦界面承担了有效改善摩擦磨损的重要角色。研究表明^[7-12]:具有一定非光滑形态的织构化表面在减摩、降噪等方面展示了突出的优越性。为了探索出符合实际工程应用的表面织构,研究者针对摩擦副表面织构化形貌的优化设计进行了大量研究。表面织构存在的类型主要是按一定规律分布微坑、微沟等^[7-10],其中一些已在滑动轴承、内燃机汽缸和机械密封中得到应用。也有学者将其与润滑剂^[13]、表面涂层^[14]相结合,进一步使这些特定的表面织构表现出更优良的减摩效果,并延长其使用寿命。

目前,利用沟槽型织构化表面改善界面摩擦振动噪声特性的相关报道较为普遍^[12,15]。其主要作用机理表现在:一是表面沟槽改变了界面接触状态,打断了摩擦过程摩擦力的连续变化;二是表面沟槽可以起到容纳磨屑的作用,通过改善磨损状态,进而降低振动噪声强度。但是,沟槽的存在不可避免地破坏了摩擦界面的完整性,降低了表面接触强度,同时导致接触过程中产生应力集中和过沟冲击等不利现象,因此有必要对沟槽型织构化表面进行进一步处理,使其在实现减振降噪作用的同时,尽可能地削弱开沟所带来的负面影响。如今,固体润滑剂 MoS₂ 凭借其优良的摩擦学性能、较强的承载能力、较高的耐磨性和良好的时效性,已在机械工程领域得以广泛应用^[16]。因此,本研究通过对铸铁材料表面进行开沟槽处理,并在沟槽中填充 MoS₂ 润滑剂,通过将两者相结合的方式实现对界面的改性,以期能进一步

提升沟槽织构表面减振降噪的效果,还能达到减缓磨损、延长沟槽使用寿命的目的。

1 试验

1.1 测量装置

本试验研究以 UMT-3 为基础,自行搭建了“球-平面”接触方式的摩擦噪声试验台,其原理如图 1 所示。球试样压紧在上夹具内,且上夹具用螺钉联接在二维移动台底部的应变式力传感器上;平面试样固定于下夹具中,下夹具安装在往复运动装置上。试验测试时,球试样随二维移动台缓慢下降,直至与平面试样建立良好接触,并施加预设的法向载荷。随后平面试样在往复运动装置带动下开始往复运动,使“球-平面”之间形成摩擦运动。二维移动台底部的应变式力传感器可以检测“球-平面”之间的法向力和动态摩擦力;上夹具贴有三维加速度传感器,其用于完成界面振动加速度信号的采集;在摩擦界面约 40 mm 处设置有传声器,用于完成摩擦噪声信号的监测。最后,三维加速度传感器和传声器所捕获的动态信号均传输至 16 通道振动噪声测量分析系统,实现同步采集和分析。

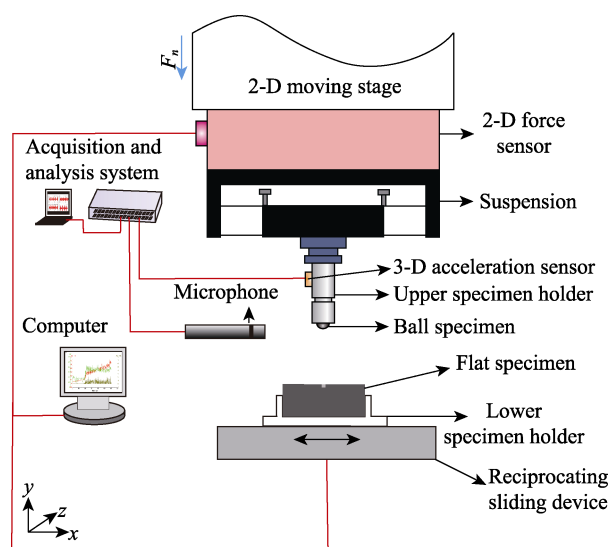


图 1 试验装置
Fig.1 Test apparatus

应变式力传感器的精度为 0.005 N, 测量范围为 1~100 N; 三维加速度传感器(瑞士 KISTLER 8688A50 型)的灵敏度为 100 mV/g, 频率响应范围为 0.5 Hz~5 kHz, 量程为 ± 50 g; 传声器(德国 MTG MK250 型)的灵敏度为 50 mV/Pa, 频率响应范围为 3.5 Hz~20 kHz, 动态范围为 15~146 dB。

1.2 试验样品制备

平面试样尺寸为 10 mm×10 mm×20 mm, 材料为未经热处理的蠕墨铸铁(硬度为 240 HV_{0.05}, 弹性模量 $E=158$ GPa), 研磨和抛光至表面粗糙度 $Ra \approx 0.04$ μm 。表面沟槽采用数控加工的方式获得, 其宽度和深度分别为 1 mm 和 0.5 mm。然

后对平面试样依次用酒精和丙酮进行超声清洗并干燥, 再在样品的沟槽内填充混有酚醛树脂的固体润滑剂 (MoS_2)。待填充物完全凝固后, 再次对样品表面进行抛光, 最终获得填充后的平面试样, 如图 2 所示。后文用 SS 代表光滑表面, GS 和 GMPS 分别代表沟槽表面和沟槽填入固体润滑剂 (MoS_2) 处理后的表面。固体润滑剂 (MoS_2) 采用直接填充可以避免涂层喷涂等工艺的复杂以及涂层与基材结合强度低等问题。对磨球选用 $\phi=10$ mm 的 Si_3N_4 陶瓷球, 硬度为 1800HV_{0.05}, 表面粗糙度 $Ra=0.02$ μm , 弹性模量 $E=310$ GPa。试验时, 用丙酮对平面试样的金属表面和球试样进行清洁处理。

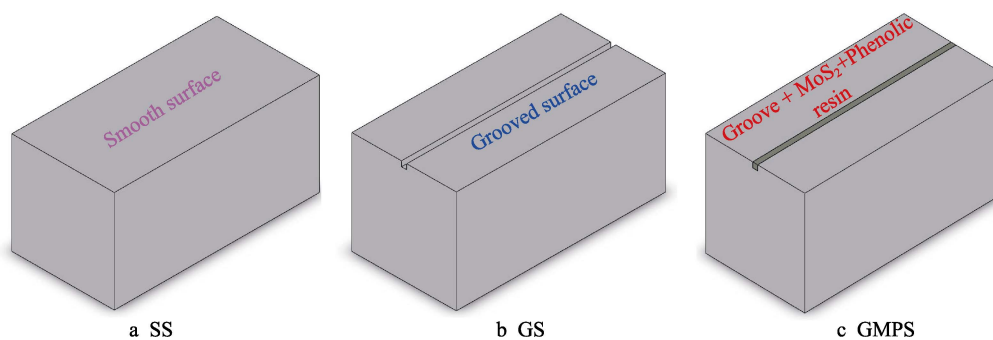


图2 试验样品
Fig.2 Test samples

1.3 试验参数设置及测试分析

摩擦学试验在干态下进行, 试验参数设置如下: 法向加载力 $F_n=15$ N, 往复位移 $D=4$ mm, 往复频率 $f=1$ Hz, 测试时间 $t=1800$ s, 试验环境条件为自然大气状态(温度 24~27 $^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 RH 为 60% \pm 10%)。为排除背景噪声对考察分析试验摩擦噪声的影响, 试验前测量背景噪声, 其声压约 64 dB(A), 主频约为 331 Hz。另外, 为保证获得可靠的试验结果, 对每种参数下的试验均重复 3 次以上。试验后, 利用扫描电子显微镜 (SEM, JEOL JSM-6610LV 型) 和白光干涉仪 (Bruker Contour GT) 对样品表面形貌进行观察和测量。

2 结果与讨论

2.1 声压信号 RMS 对比分析

对 1800 s 试验过程中每 100 s 内的噪声信号 RMS 值 (Root-mean-square values) 进行分析, 以便对不同表面在摩擦过程中的噪声差异作出

评价, 结果如图 3 所示。在摩擦初始阶段, 3 种表面几乎均无明显噪声产生。随着摩擦进程的推移, 光滑表面 SS 的噪声强度在约 450 s 后逐渐增大, 而沟槽表面 GS、沟槽填充表面 GMPS 的噪声强度分别在 450、750 s 后开始逐渐增大。在与光滑表面 SS 的噪声强度比较时发现, 沟槽表面 GS 的噪声强度明显得到降低; 而沟槽填充表面 GMPS 在整个过程中的噪声强度仅有略微的

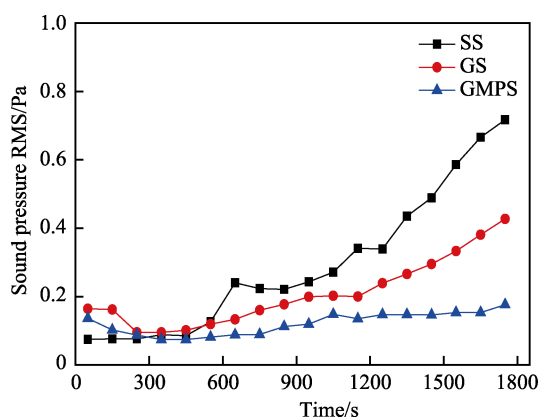


图3 摩擦噪声 RMS 随时间的变化
Fig.3 RMS of friction noise as a function of time

增大, 但远小于光滑表面。由此可见, 沟槽填充表面 GMPS 不仅可以进一步延缓摩擦振动噪声的产生, 并能极大地削弱噪声强度。

2.2 时域信号分析

对不同时间段的摩擦力、振动加速度和噪声声压信号进行分析, 用以观察 3 种表面摩擦振动噪声演变过程的差异。首先, 对 3 种表面 50~55 s 内 (初始阶段) 5 个周期的摩擦力、振动加速度和声压的时域信号进行分析, 结果如图 4 所示。从图 4 中可见, 光滑表面 SS 的摩擦力、振动加速信号曲线没有明显的变化, 对应的声压信号也没有出现明显的幅值增加; 沟槽表面 GS、沟槽填充表面 GMPS 的声压信号虽然都没有明显的变化, 但摩擦力信号均出现了明显的瞬时突变, 并且在摩擦力信号发生突变的对应时刻, 沟槽表

面 GS 的加速度信号也出现了轻微的幅值波动, 而沟槽填充表面 GMPS 的振动信号并未出现波动。据此可以推断, 存在于摩擦路径中的沟槽打断了界面的连续接触, 从而导致了摩擦力信号发生突变, 当球试样通过沟槽后, 摩擦力信号突变终止。这说明球试样与沟槽表面 GS 摩擦的过程中, 球试样与沟槽棱边发生撞击作用, 从而导致了振动加速度信号幅值增大。球试样在滑过沟槽填充表面 GMPS 的沟槽时, 虽然沟槽填充物 MoS_2 仍改变了接触状态而引起摩擦力突变, 但其有效缓解了球试样与沟槽边缘的撞击作用, 最终沟槽填充表面 GMPS 的振动信号未出现明显的幅值变化。

进一步考察 3 种表面在 1700~1705 s 内 (试验结束阶段) 5 个周期的时域信号。由图 5 可知,

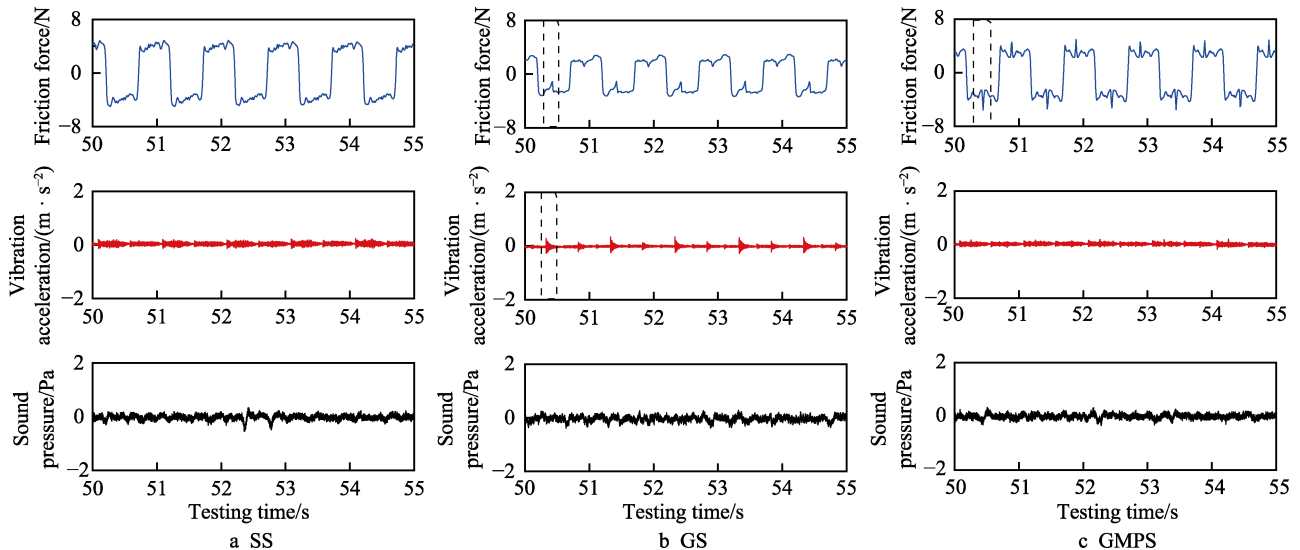


图 4 50~55 s 内 3 种表面的摩擦力、加速度和声压时域信号

Fig.4 Friction force, acceleration and sound signals of three kinds of surfaces within 50~55 s

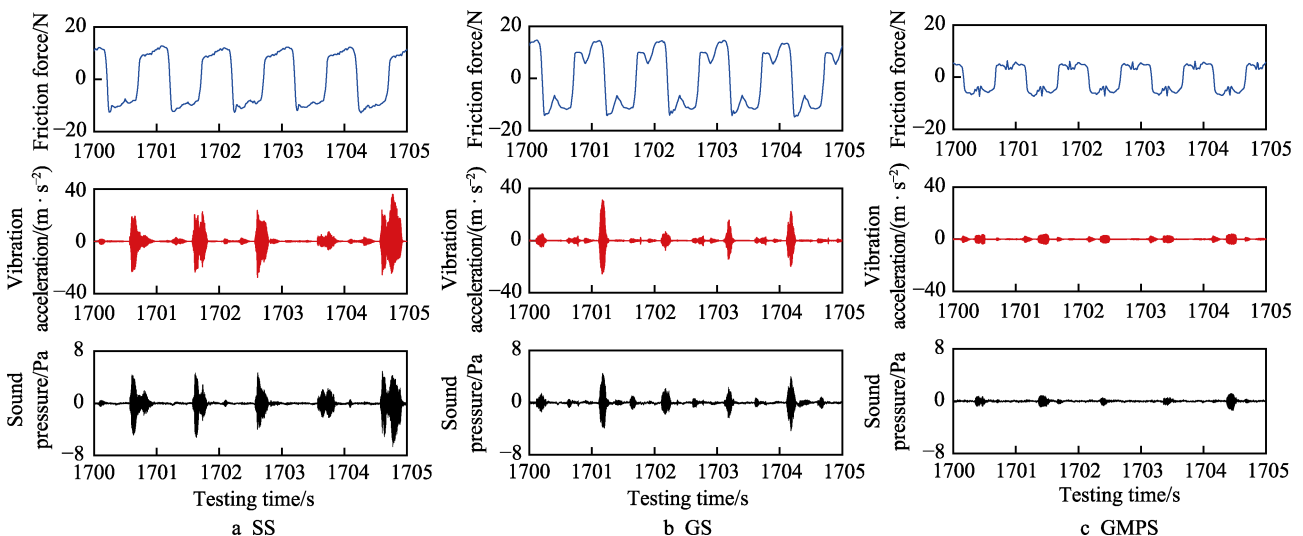


图 5 1700~1705 s 内 3 种表面的摩擦力、加速度和声压时域信号

Fig.5 Friction force, acceleration and sound signals of three kinds of surfaces within 1700~1705 s

相较于初始阶段,试验结束阶段各表面的时域信号都存在明显的幅值变化。光滑表面 SS 的摩擦力存在明显的幅值增大,振动加速度和声压信号幅值波动也出现了大幅度增加。由此可推断,系统在此时有强烈的摩擦振动产生,并辐射出高强度的摩擦噪声。与光滑表面相比,沟槽表面 GS 虽然摩擦力幅值与之较为接近,但其振动加速和噪声声压信号幅值波动的程度均明显较弱。说明沟槽表面 GS 在摩擦过程中引起的系统振动及其辐射出的噪声在强度上均低于光滑表面。沟槽填充表面 GMPS 各信号幅值变化都十分微弱,表明系统仅存在微弱的摩擦振动,且摩擦噪声强度非常微弱。分析说明,沟槽填充表面 GMPS 具有显著削弱摩擦系统振动强度和抑制摩擦噪声产生的作用。

2.3 摩擦噪声自功率谱分析

借助自功率谱进一步对 1700~1705 s 内(试验结束阶段)的摩擦噪声进行分析,结果如图 6 所示。从图 6 可知,光滑表面 SS 的噪声信号主频约为 1938 Hz,对应主频处的幅值最高,约为 78.9 dB;沟槽表面 GS 的噪声信号主频约 1918 Hz,其主频处的幅值约为 70.5 dB;沟槽填充表面 GMPS 的噪声信号主频约 3022 Hz,对应主频处的幅值接近于背景噪声,约为 65.5 dB。声压信号在主频处的幅值大小很好地反映了不同表面摩擦噪声强度的大小。与光滑表面 SS 相比,沟槽表面 GS 具有一定程度的摩擦噪声抑制功能。当沟槽与 MoS_2 协同作用后,沟槽填充表面 GMPS 能进一步地降低界面摩擦噪声,强度降低约 13.4 dB。

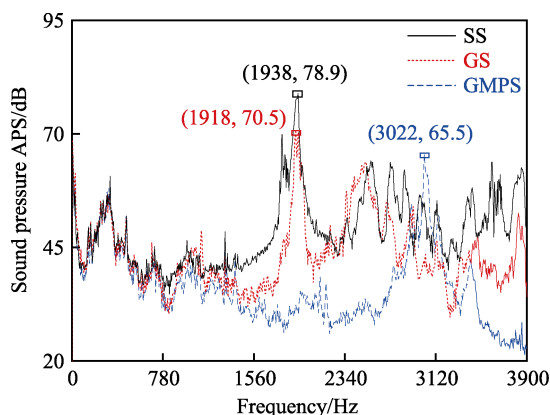


图 6 噪声信号自功率谱分析
Fig.6 Auto power spectrum analysis of noise signal

2.4 磨损分析

为建立界面磨损特征与摩擦振动及噪声特

性的关系,探讨沟槽与 MoS_2 协同作用对摩擦振动及噪声产生机理的影响,将结合摩擦振动及噪声特性分析结果进一步考察 3 种表面的磨损特征,将摩擦磨损特征和摩擦振动及噪声信号进行对比分析。

摩擦学试验后 3 种表面磨痕端部 SEM 照片、三维形貌及磨痕轮廓如图 7a—c 所示,可见这些表面在磨损程度及磨损特征等方面存在明显差异。磨损最严重的是光滑表面 SS,其磨痕宽度(约 0.71 mm)和深度(约 3.83 μm)均较大,犁沟、粘着剥落等磨损特征也很明显;沟槽表面 GS 磨痕宽度(约 0.73 mm)与光滑表面较为接近,深度(约 2.14 μm)减小,磨损区域存在明显犁沟现象,并散落有大量磨屑,粘着剥落现象较轻;沟槽填充表面 GMPS 磨痕宽度(约 0.46 mm)显著减小,深度(约 2.37 μm)与沟槽表面 GS 较为接近,磨痕上分布着大量润滑剂粘着层,未见明显粘着剥落,犁沟现象也极为轻微。结合图 4—6 的振动噪声信号分析可知,摩擦振动及噪声特性受到界面磨损特征的重要影响。由此可推测,光滑表面 SS 在磨损过程中产生的突出犁沟、粘着剥落等磨损特征更易激发摩擦系统振动,并最终辐射出高强度的噪声。因沟槽具有收集磨屑的作用,削弱了磨粒在摩擦过程的反复犁削和粘着,所以沟槽表面 GS 产生的犁沟、粘着剥落等磨损特征较轻,由此激发系统产生较弱强度的摩擦振动,噪声强度也相应得到降低。沟槽填充表面 GMPS 在固体润滑剂 MoS_2 被挤出后,不仅可以减少对磨球与“新鲜”表面的直接接触,减轻表面磨损,减少磨屑的产生,还能进一步削弱摩擦过程中的犁削和粘着,更好地抑制了犁沟、粘着剥落等磨损特征的形成,摩擦系统振动不易被激发,此时辐射的噪声强度就更低。因此,表面沟槽与 MoS_2 协同作用能更有效地抑制摩擦系统振动,降低摩擦噪声的强度。

图 8 分析了沟槽表面 GS 和填充表面 GMPS 的沟槽局部损伤形貌。沟槽表面 GS 在沟槽两侧边缘存在明显的由于撞击导致的棱边破损现象,并散落零散的磨屑和剥落层,且沟槽内积累有大量磨屑。沟槽填充表面 GMPS 的沟槽两侧则没有明显撞击痕迹,两侧表面较为光滑,但沟槽内的填充物已被碾碎,成碎片状分布于沟槽内。以上结果表明,沟槽的存在改变了摩擦表面的完整性,对磨球在滑过沟槽时,将与沟槽边缘发生撞击作用,从而使沟槽棱边受损。当在沟槽中填充

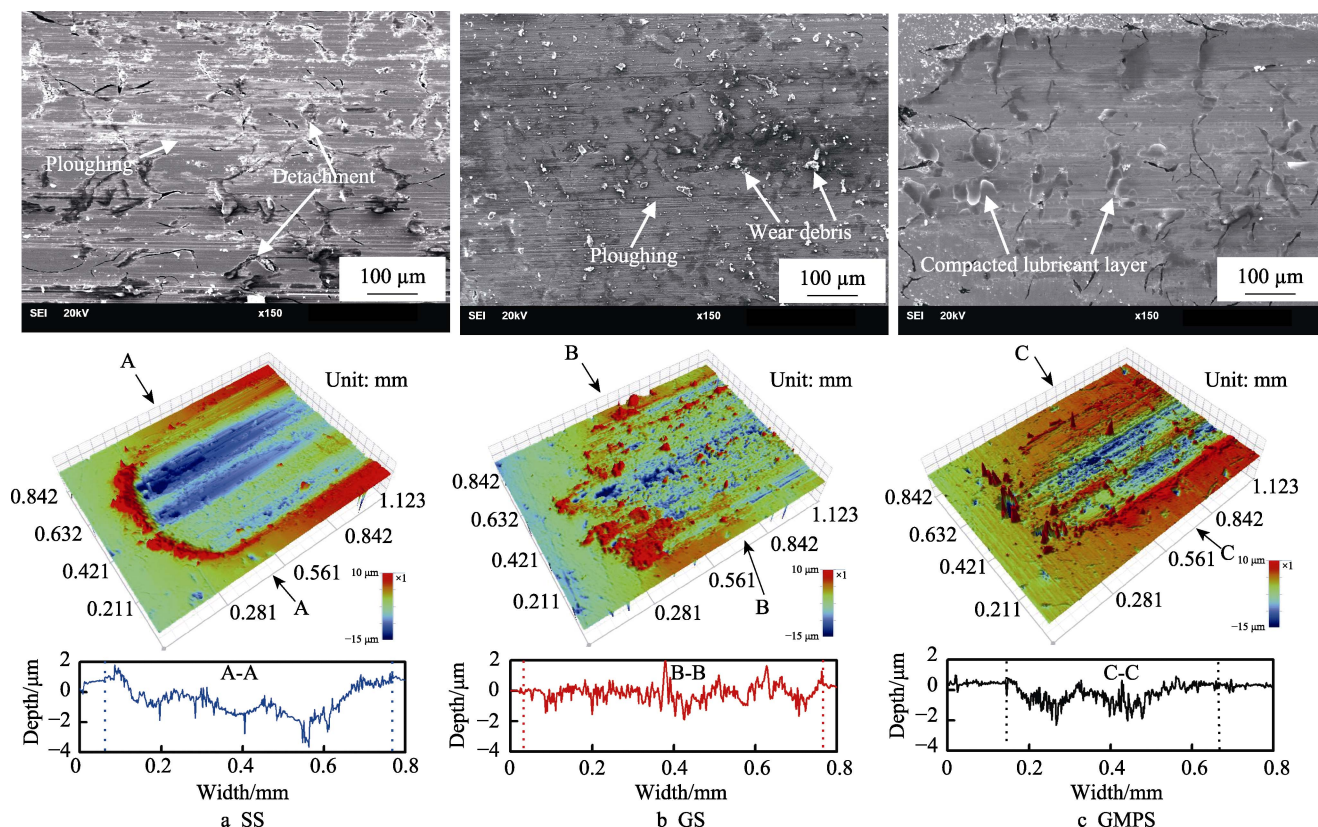


图 7 磨痕 SEM 照片和三维形貌及轮廓

Fig.7 SEM images and topographies and profiles of the worn surfaces

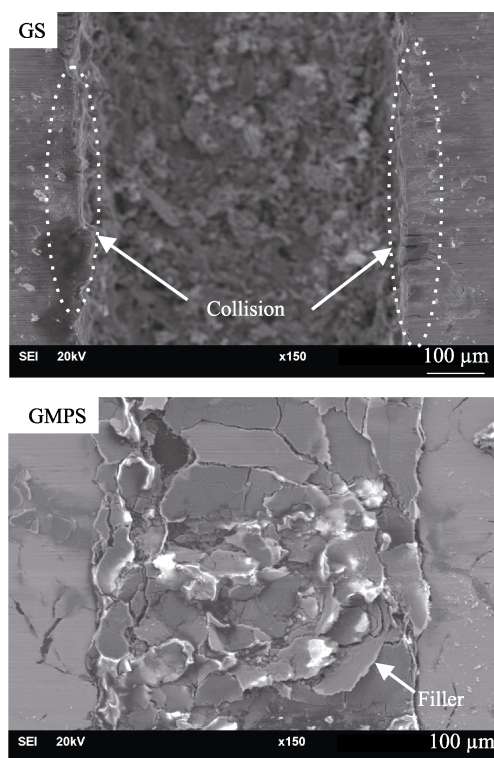


图 8 沟槽局部损伤形貌

Fig.8 Morphology of the local worn surfaces at groove

MoS₂ 后,可以有效避免过沟冲击,对沟槽棱边起到良好的保护作用。

基于上述分析,可以得出,摩擦过程中形成的复杂磨损界面特征激发了摩擦系统的振动,并辐射出噪声。光滑表面 SS 因其磨损产生的磨屑颗粒不能及时排除,导致产生了突出的磨屑碾压堆积、粘着剥落和犁沟等“不平顺”特征,摩擦系统在此状态下被激发产生较强的振动,最终辐射出较高强度的噪声。沟槽表面 GS 由于沟槽打断了摩擦过程的连续性,沟槽所具有的磨屑收集能力也削弱了磨粒在摩擦过程的反复犁削、粘着,缓解了界面磨损程度,有效避免了大范围的磨屑堆积碾压、粘着剥落和犁沟等“不平顺”特征的形成,所以在一定程度上达到了减振降噪的效果。沟槽填充表面 GMPS 因沟槽与 MoS₂ 协同作用,MoS₂ 伴随摩擦过程粘附在磨痕表面,减少了对磨球与“新鲜”表面的直接接触,使得表面磨损变得更加轻微,进一步避免了“不平顺”特征的形成,这就使得摩擦系统仅产生较为微弱的振动,因此几乎没有明显的摩擦噪声。同时,沟槽填充后可以有效避免过沟冲击,对沟槽棱边起到良好的保护作用。

3 结论

1) 表面沟槽在摩擦过程中具有收集磨屑的

作用,能一定程度上减轻表面磨损,从而抑制了粘着撕裂、犁削等作用,最终达到削弱摩擦振动强度和降低摩擦噪声的目的,但沟槽的存在也引入过沟冲击。当沟槽与 MoS_2 协同作用时,不仅可以有效地缓解过沟冲击,减缓磨损,还可以显著减轻粘着撕裂、犁削等作用,抑制系统振动和降低摩擦噪声强度的效果也更突出。

2) 摩擦振动及噪声受摩擦界面因素变化的影响。试验结果表明,摩擦振动及噪声主要受到磨损界面的粘着剥落、犁沟等磨损特征的影响。磨损过程中粘着撕裂、犁削等作用越显著,由此产生的粘着剥落、犁沟等磨损特征越明显,将激发更强烈的摩擦振动,并辐射出更高强度的摩擦噪声。

3) 表面织构与具有润滑作用的固体填充物协同作用能有效优化表面织构的减摩擦降噪效果,缓解表面织构在摩擦过程中引起的冲击振动,减轻磨损和延长表面织构的使用寿命,对实际工程应用具有指导意义。

参考文献:

- [1] 张立军,刁坤,孟德建,等. 摩擦引起的振动和噪声的研究现状与展望[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(5): 765-772.
ZHANG Li-jun, DIAO Kun, MENG De-jian, et al. Friction induced-vibration and noise research: the status que and its prospects[J]. Journal of Tongji University (natural science), 2013, 41(5): 765-772.
- [2] KANG J. Friction-induced noise of gear system with lead screw and nut: Mode-coupling instability[J]. Journal of sound and vibration, 2015, 356: 155-167.
- [3] KANG J, KIM K. Squeak noise in lead screw systems: Self-excited vibration of continuous model[J]. Journal of sound and vibration, 2010, 329(17): 3587-3595.
- [4] KANG J. Theoretical model of ball joint squeak[J]. Journal of sound and vibration, 2011, 330(22): 5490-5499.
- [5] AKAY A. Acoustics of friction[J]. The journal of the acoustical society of America, 2002, 111(4): 1525-1548.
- [6] 王安宇,莫继良,盖小红,等. 表面粗糙度对摩擦尖叫噪声特性的影响[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(4): 400-407.
WANG An-yu, MO Ji-liang, GE Xiao-hong, et al. The Influence of surface roughness on friction-induced squeal[J]. Tribology, 2014, 34(4): 400-407.
- [7] 许璐,郑锦华,吴双,等. 表面织构改善摩擦特性的研究进展[J]. 工具技术, 2018, 52(4): 7-12.
- [8] XU Lu, ZHENG Jin-hua, WU Shuang, et al. Recent development on surface texturing for improving tribological properties[J]. Tool Engineering, 2018, 52(4): 7-12.
王静秋,王晓雷. 表面织构创新设计的研究回顾及展望[J]. 机械工程学报, 2015, 51(23): 84-95.
WANG Jing-qiu, WANG Xiao-lei. State of the art in innovative design of surface texture[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(23): 84-95.
- [9] 秦立果,杨浩,刘斌,等. 织构化表面改性及其在生物材料上的应用[J]. 表面技术, 2018, 47(9): 1-11.
QIN Li-guo, YANG Hao, LIU Bin, et al. Surface texturing modification and its effect on biomaterials[J]. Surface technology, 2018, 47(9): 1-11.
- [10] 李俊玲,陈平,邵天敏,等. 葫芦形微凹坑对不锈钢表面摩擦学性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(2): 207-214.
LI Jun-ling, CHEN Ping, SHAO Tian-min, et al. The effect of gourd-shaped Surface texture on tribological performance of stainless steel[J]. Tribology, 2016, 36(2): 207-214.
- [11] TANG W, ZHOU Y, ZHU H, et al. The effect of surface texturing on reducing the friction and wear of steel under lubricated sliding contact[J]. Applied surface science, 2013, 273: 199-204.
- [12] WANG Dong-wei, MO Ji-liang, GE Xiao-hong, et al. Disc surface modifications for enhanced performance against friction noise[J]. Applied surface science, 2016, 382: 101-110.
- [13] 万轶,李建亮,熊党生. 活塞环表面织构化镀层的摩擦性能研究[J]. 表面技术, 2018, 47(6): 195-201.
WAN Yi, LI Jian-liang, XIONG Dang-sheng. Tribological property of textured-coating on piston ring surface[J]. Surface technology, 2018, 47(6): 195-201.
- [14] 鲍雨梅,王成武,金志伟,等. 激光表面织构化生物陶瓷涂层及其摩擦磨损性能[J]. 中国激光, 2019, 46(2): 77-85.
BAO Yu-mei, WANG Cheng-wu, JIN Zhi-wei, et al. Textured surface on a bioceramic coating via a femtosecond laser and its friction and wear properties[J]. Chinese journal of lasers, 2019, 46(2): 77-85.
- [15] WANG Dong-wei, MO Ji-liang, ZHU Zhang-yang, et al. Debris trapping and space-varying contact via surface texturing for enhanced noise performance[J]. Wear, 2018, 396: 86-97.
- [16] 赵洋,谭业发,周永权,等. 固体润滑技术及其工程应用[J]. 机械工程与自动化, 2011, 164(1): 207-209.
ZHAO Yang, TAN Ye-fa, ZHOU Yong-quan, et al. Solid lubricating technology and its engineering application[J]. Mechanical engineering & automation, 2011, 164(1): 207-209.