

喷砂表面处理控制滑动摩擦尖叫噪声^{*}

王安宇, 莫继良, 王正国, 阳江舟, 陈光雄, 朱旻昊

(西南交通大学 摩擦学研究所, 成都 610031)

摘要: 采用球—平面接触方式, 对喷砂处理的制动盘蠕墨铸铁试样进行了滑动摩擦噪声试验, 并与光滑表面样品试验对比。在对摩擦噪声特性和摩擦磨损特性进行综合分析的基础上, 探讨控制滑动摩擦尖叫噪声触发和演变规律的关键界面因素, 研究了喷砂表面对滑动摩擦尖叫噪声的影响及其机理。结果表明: 喷砂处理表面能明显的抑制界面摩擦尖叫噪声的产生, 且表面粗糙度越大, 抑制尖叫噪声效果越明显, 界面微凸体的分布和磨损情况对摩擦尖叫噪声的产生及演变具有关键的影响。该试验条件下摩擦尖叫噪声的产生主要归因于磨屑堆积、粘着剥落和犁沟等界面因素引起界面摩擦力剧烈波动, 诱发了摩擦系统的自激振动。相比光滑表面, 喷砂处理表面的微凸体接触磨损“平台”表面的磨屑堆积、粘着剥落和犁沟等现象较轻, 引起摩擦力波动的能量较弱, 产生的尖叫噪声强度较低。

关键词: 摩擦噪声; 自激振动; 尖叫噪声; 喷砂处理; 表面微凸体

中图分类号: TG174.442; TG115.58 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2013)04-0044-06

Controlling Friction-induced Squeal by Surface Sandblasting Treatment

WANG An-yu, MO Ji-liang, WANG Zheng-guo, YANG Jiang-zhou, CHEN Guang-xiong, ZHU Min-hao
(Tribology Research Institute, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Abstract: Experimental study of sliding friction noise of compacted graphite iron brake disc samples with/without sandblasting surface treatment was performed in a ball-on-flat configuration. The key interface factors that control the triggering and evolution of squeal were analyzed by combining friction and wear and friction noise properties, and the effect of sandblasting surface on squeal was investigated. The test results show that the sandblasting surface can significantly suppress the generation of squeal, which increases with the increase of surface roughness. The distribution and wear status of surface asperities play a key role in the triggering and evolution of squeal. The generation of squeal was mainly attributed to the severe fluctuation of friction force caused by some interface factors, such as the accumulation of wear debris, detachment and ploughing. Compared with smooth surface, the worn surface of the plateau generated by the wear of asperities show slighter accumulation of wear debris, adhesion, detachment and ploughing, which result in relatively weaker fluctuation of friction force and consequently lower squeal level.

Key words: friction noise; self-excited vibration; squeal; sandblasting; surface asperities

0 引言

摩擦噪声是由于接触界面摩擦激发物体发生振动, 能量通过周围介质向外传播而产生。国际上通常将 $f \leq 1\,000$ Hz 的噪声称为颤振(Chatter、Flutter 等), 将频率 $f = 1\,000 \sim 20\,000$ Hz 的噪声称为尖叫(Squeal)^[1]。其中低频颤振噪声的声压级一般较低且易于控制, 而高频尖叫噪声危害极大且难以消除。摩擦噪声的根源是界面的摩

擦噪声的根源是界面的摩

收稿日期: 2013-04-02; 修回日期: 2013-05-22; 基金项目: * 国家自然科学基金(51005191); 高等学校博士学科点专项科研基金(20100184120003); 教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT1178)

作者简介: 王安宇(1987-), 男(汉), 四川巴中人, 硕士生; 研究方向: 摩擦学及表面工程

网络出版日期: 2013-07-01 13:21; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20130701.1321.003.html>

引文格式: 王安宇, 莫继良, 王正国, 等. 喷砂表面处理控制滑动摩擦尖叫噪声 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(4): 44-49.

擦,但总的来说目前从摩擦学角度研究摩擦噪声的工作不多,相比摩擦学研究通常所关注的材料摩擦磨损特性,摩擦噪声特性得到的研究明显偏少,而从摩擦界面角度对摩擦噪声进行深入研究的报道则更少见^[2-3]。

摩擦界面特性是影响摩擦噪声的关键因素,目前界面特性与摩擦噪声关系的研究主要集中在考察摩擦界面形貌因素(粗糙度、微凸体、磨屑等)对摩擦噪声的影响^[4-7]。国外学者通过不同的摩擦接触方式进行研究,得出摩擦噪声声压级 L_p 与 R_a 表面粗糙度的关系式为: $L_p(\text{dB}) \sim 20\lg Ra^n$ ($n:0.25 \sim 1.2$)^[4],但这些研究对摩擦噪声产生的机理探讨尚且不足。针对难以消除的高频尖叫噪声,目前研究主要是从系统动力学角度通过改变系统结构和刚度以及增加阻尼等被动手段来抑制尖叫噪声^[8-9],从改变摩擦界面角度来主动控制尖叫噪声的研究鲜见报道。Hammerström 等^[10]研究了汽车制动盘表面图案喷砂处理对制动尖叫噪声的影响,结果表明螺旋形的喷砂处理表面具有降低制动尖叫噪声的效果,其推测螺旋形喷砂表面能够扰乱系统的自激振动并抑制尖叫噪声的产生,但由于摩擦界面形貌特征的影响因素较为复杂,没有得出充分的证据对其降噪机理进行验证。此外,其研究也没有对界面摩擦因素与摩擦噪声的关联性进行统计分析,并找出控制摩擦尖叫噪声触发和演变规律的关键界面因素。

当前,表面处理技术已经被广泛用于各种领域以实现这些领域中对材料和表面性能不断提出的新需求^[11]。摩擦振动噪声严重影响电机驱动、机床驱动、制动系统和轨道运输等各种摩擦系统的精度、可靠性以及正常使用,并导致严重的噪声污染,亟待解决。因此,系统开展喷砂表面摩擦尖叫噪声特性影响的研究并揭示其作用机理,将对如何利用表面处理方法来抑制摩擦尖叫噪声具有重要的指导意义。文中通过在列车制动盘蠕墨铸铁材料表面进行各种参数的喷砂处理并进行摩擦噪声试验,研究喷砂表面如何影响界面摩擦尖叫噪声特性,并探讨其作用机理,为控制摩擦尖叫噪声的表面设计及处理提供理论依据。

1 试验部分

1.1 试验及测量装置

研究在自行搭建的摩擦噪声试验分析系统上

进行,采用“球-平面”接触方式,其原理如图1所示。测量法向力和摩擦力的应变式力传感器测量范围为 $1 \sim 100 \text{ N}$,精度为 0.005 N 。振动加速度和噪声信号采集及分析采用 32 通道振动噪声测量分析系统(德国 MUELLER-BBM 公司)。加速度测量采用瑞士 KISTLER 8688A50 型三维加速度传感器(灵敏度 100 mV/g ,量程 $\pm 50 \text{ g}$,频响 $0.5 \sim 5000 \text{ Hz}$);噪声测量采用德国 MTG MK250 型传声器(灵敏度 50 mV/Pa ,频响 $3.5 \sim 20000 \text{ Hz}$,动态范围 $15 \sim 146 \text{ dB}$)。

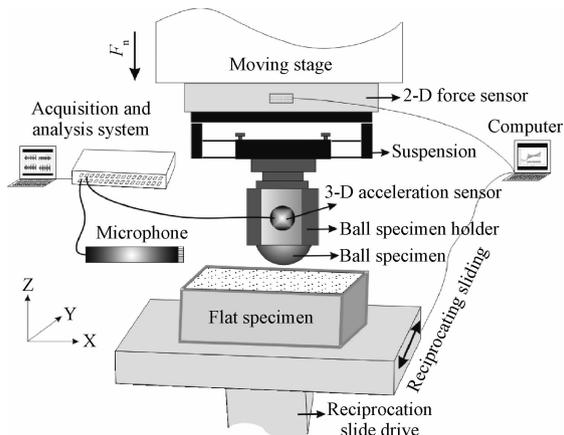


图1 摩擦噪声试验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the test apparatus

1.2 试验材料及参数条件

试验材料为列车制动盘蠕墨铸铁(无热处理,硬度为 $240 \text{ HV}_{0.05}$,弹性模量 $E=158 \text{ GPa}$),尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,研磨和抛光后进行喷砂表面处理,采用 2 种规格的玻璃微珠:220 目(砂粒 $\Phi \approx 65 \mu\text{m}$),30 目(砂粒 $\Phi \approx 550 \mu\text{m}$)。后文将用 S 代表光滑表面,PG-1 和 PG-2 分别代表 220 目和 30 目砂粒喷砂处理后的表面。

图 2 为光滑表面和两种喷砂处理表面的三维形貌及面平均粗糙度值(R_a),测量的面区域为 $2.5 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。对磨球选用 $\Phi 10 \text{ mm}$ 的 Si_3N_4 陶瓷球(硬度为 $1800 \text{ HV}_{0.05}$,表面粗糙度 $R_a 0.02 \mu\text{m}$,弹性模量 E 为 310 GPa)。试验前对平面试样和球试样依次用酒精和丙酮进行超声清洗并干燥。

摩擦学试验参数如下:法向载荷 $F_n=5 \text{ N}$,往复位移幅值 $D=4 \text{ mm}$,往复频率 $f=0.5 \text{ Hz}$,试验时间分为:初始阶段($T=200 \text{ s}$)、刚出现摩擦尖叫噪声阶段、 $T=1500 \text{ s}$ 阶段、 $T=3000 \text{ s}$ 阶段和

$T=5\ 000\text{ s}$ 阶段, 试验环境条件为大气下干态(温度 $24\sim 27\text{ }^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 $\text{RH}(60\pm 10)\%$)。

振动噪声测量分析系统的采样频率设为 12.8 kHz 。传声器固定在滑动摩擦部件附近 40 mm 处, 试验前进行本底噪声的测量并分析其频率成分, 得出其主频约为 331 Hz , 而文中主要考察频

率在 $1\ 000\text{ Hz}$ 以上的尖叫噪声, 两者频率相差很大, 不影响摩擦噪声试验结果的分析。由于摩擦噪声具有一定的随机性, 对每种参数下的试验均重复 3 次以上, 以保证试验结果的重复性。试验后, 利用激光共聚焦扫描显微镜和 ContourGT In-Motion™ 三维光学形貌仪观察磨损特征。

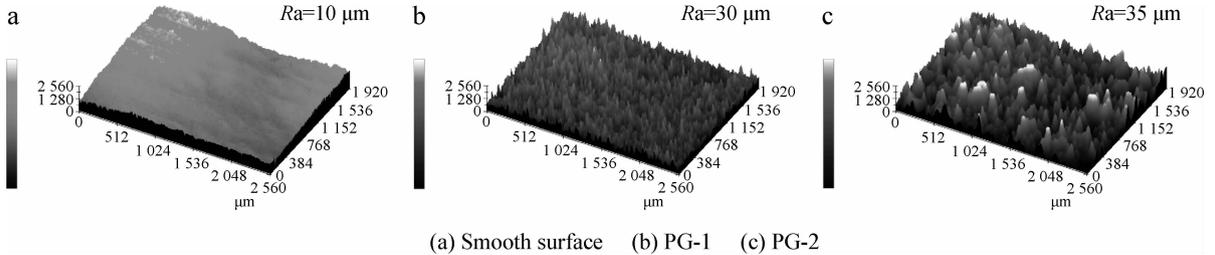


图 2 表面三维形貌及面平均粗糙度值

Fig. 2 Surface topographies and arithmetic average roughness

2 结果与讨论

2.1 喷砂处理表面对摩擦尖叫噪声的影响

为分析光滑表面和喷砂处理表面在摩擦过程中的噪声水平及规律, 对 $T=1\ 500\text{ s}$ 阶段每 100 s 内的噪声信号进行一次 A 计权等效声压级分析, 结果如图 3 所示。从图中可以看出, 3 种表面在摩擦初始阶段的声压均约为 70 dB(A) (本底噪声声压约 65 dB(A))。随着摩擦时间的增加, 光滑表面的噪声声压在约 400 s 后明显增大, 而 PG-1 和 PG-2 的噪声声压分别在 500 s 和 600 s 后开始明显增大。在噪声趋于稳定阶段, 光滑表面的噪声声压明显较喷砂表面的高, 而较粗糙的 PG-2 表面的噪声声压明显低于 PG-1 表面, 摩擦噪声声压级随表面粗糙度的增大而明显降低。

较长时间的试验结果表明, 光滑表面的噪声强度在 $1\ 500\text{ s}$ 时已经趋于稳定值约 89 dB(A) , 其后随时间增加不再产生明显变化。而 PG-1 和 PG-2 喷砂表面分别在 $1\ 500\sim 3\ 000\text{ s}$ 间逐渐趋于稳定值约 87 dB(A) 和 84 dB(A) 。当 $T=5\ 000\text{ s}$ 时, 光滑表面的噪声强度仍较 2 种喷砂表面的高, PG-2 喷砂表面的噪声强度仍然最低, 3 种表面噪声强度的相对大小关系一直没有发生明显变化。

进一步考察摩擦尖叫噪声的频率随摩擦进程的变化, 对 3 种表面的摩擦噪声信号进行了时频分析(见图 4)。3 种表面产生噪声的主频均约为 $2\ 150\text{ Hz}$, 与通过锤击法测量的摩擦系统的某阶

自然频率 $2\ 100\text{ Hz}$ 很接近, 表明摩擦尖叫噪声是由摩擦系统的自激振动引起的。但 3 种表面产生的摩擦尖叫噪声在时域上存在明显不同, 光滑表面在 200 s 左右就出现明显的高频尖叫成分, 并在 400 s 后明显增强, 而 PG-1 和 PG-2 表面分别在 500 s 和 600 s 后才出现高频成分, 且能量较弱, 尤其是 PG-2 表面的高频成分能量最弱。

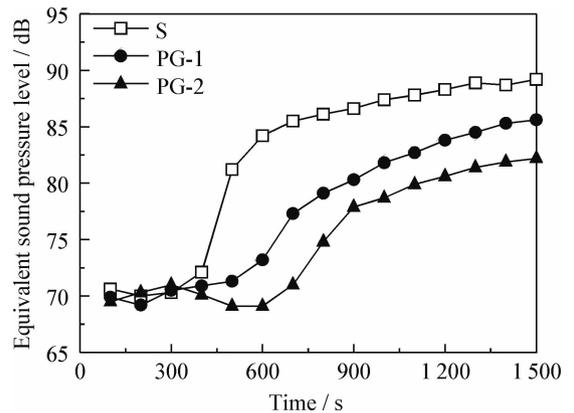


图 3 摩擦噪声等效声压级随时间的变化

Fig. 3 Equivalent sound pressure level of friction noise as a function of time

2.2 喷砂处理表面影响摩擦尖叫噪声的机理

基于以上摩擦尖叫噪声特性的分析, 进一步考察 3 种表面的摩擦因数和磨损特征, 将摩擦磨损特性演变和振动噪声信号在时域内进行对比分析, 尝试建立界面特性与尖叫噪声的关系, 探讨喷砂处理表面影响摩擦尖叫噪声的机理。

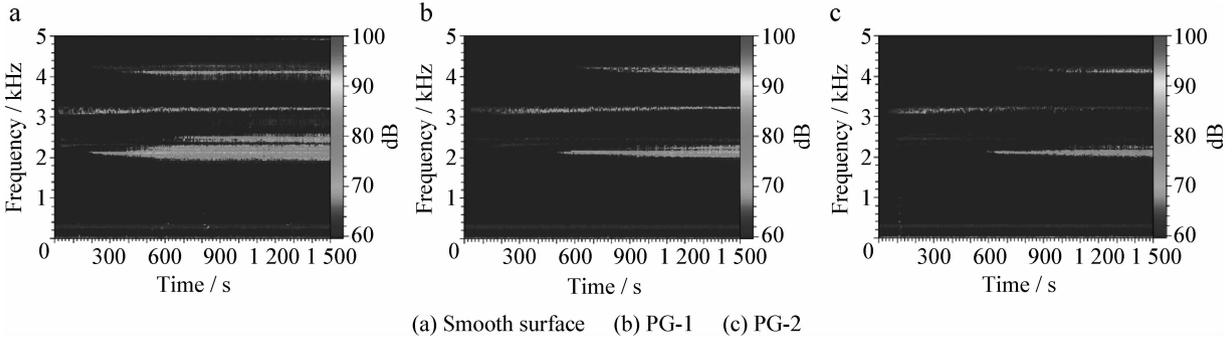


图 4 摩擦噪声信号时频分析

Fig. 4 Time-frequency analysis of friction noise

图 5 为 3 种表面的摩擦因数曲线, 可见光滑表面在摩擦前期阶段(700 s 内)的摩擦因数明显高于 2 种喷砂处理表面, 在此之后 3 者摩擦因数逐渐趋于一致。3 种表面的尖叫噪声均产生在摩擦因数爬升阶段, 对应的摩擦因数在 0.45 左右。在摩擦因数爬升阶段, 界面摩擦力主要来源于去除微凸体所需剪应力^[12]。但摩擦噪声的产生以及噪声强度大小与摩擦力(摩擦因数)数值的大小并无直接对应关系, 而是与摩擦力波动的剧烈程度有关。摩擦力的波动则是由摩擦界面因素决定的, 如摩擦副真实接触面积、磨屑形成、犁削和粘着作用等。摩擦因数作为一个系统值, 其大小及走势同样受各种界面因素的影响, 无法与噪声的强度建立起直接的对应关系。

因此, 进一步对比考察不同时段(摩擦初始阶段、刚出现摩擦尖叫噪声阶段和 $T=1\ 500\ s$ 阶段)的磨损表面形貌, 找出控制滑动摩擦尖叫噪声触发和演变规律的关键界面因素。图 6 所示为 PG-1 表面在不同时段的磨损形貌, 可见磨损表面在不同阶段的最典型差异为被磨损的微凸体数

量和面积的变化, 随着摩擦进程的推移, 真实接触的微凸体数量增多, 微凸体被磨损后产生的“平台”面积逐渐增大。对 2 种喷砂处理表面在 3 个阶段的观测区域内的接触面积比(真实接触面积/磨痕面积)进行计算, 结果如表 1 所示。可以看出随着磨损的进行, 真实接触面积逐渐增大, 2 种表面均在面积比约 50%~60% 时出现尖叫噪声并逐

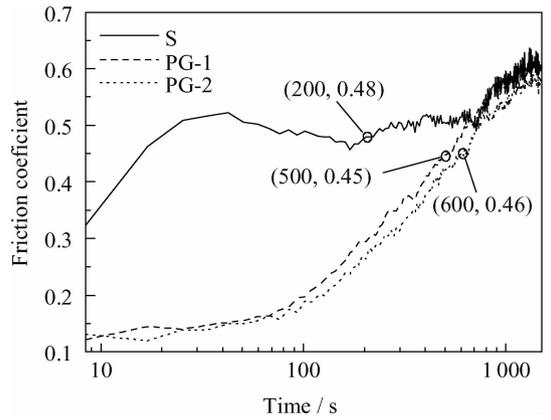
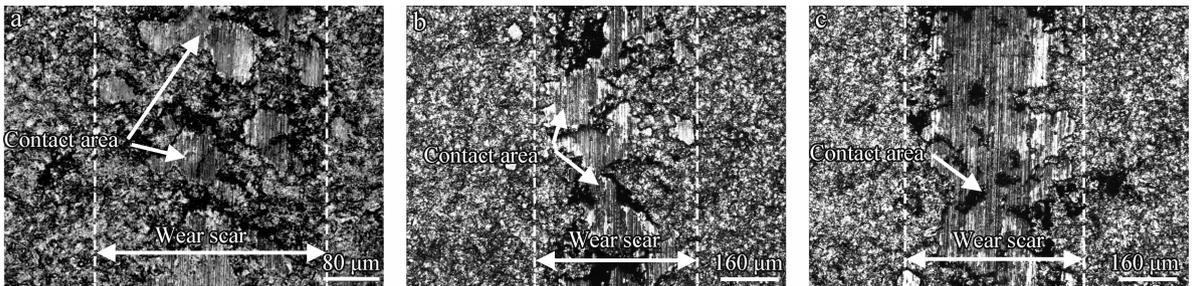


图 5 摩擦因数曲线

Fig. 5 Curve of the friction coefficient



(a) Initial stage (b) Squeal generation stage (c) $T=1\ 500\ s$

图 6 PG-1 表面不同阶段的磨损形貌

Fig. 6 Wear scar morphologies of the PG-1 surface in different stages

渐增强。此外,结合图 2 所示的 3 种表面的三维形貌及面平均粗糙度,可以得出,表面越粗糙,微凸体分散性越大,产生的尖叫噪声强度越小。因此,可以认为文中条件下界面微凸体的分布和磨损情况对摩擦尖叫噪声的产生及演变具有重要的影响,喷砂处理表面能明显的抑制界面摩擦尖叫噪声的产生。

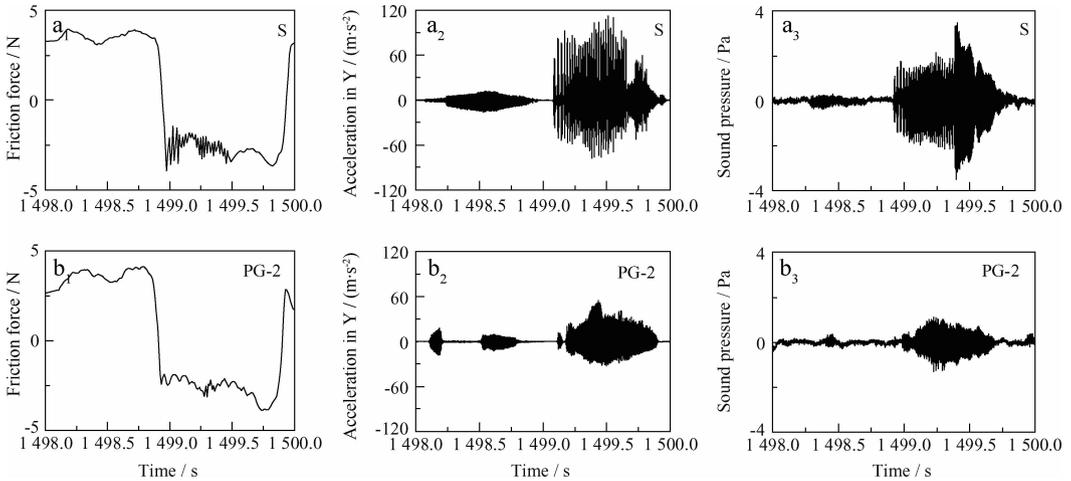
表 1 不同时段喷砂表面接触面积比

Table 1 Contact area ratio of the sandblasting surfaces in different period

Samples	Initial stage	Squeal generation stage	T=1 500 s
PG-1	42.5%±1%	58.0%±1%	83.4%±0.5%
PG-2	28.3%±1%	54.2%±1%	76.4%±0.5%

对光滑和 PG-2 喷砂表面在 $T=1\ 500\ s$ 阶段一个周期内摩擦力和振动加速度和噪声声压信号进行分析,结果如图 7 所示。可以看出光滑表面的摩擦力信号波形在周期内(1 499.0~1 499.5 s)明显存在剧烈波动,对应地,其加速度和声压信号也在同样位置出现较大的幅值,表明摩擦系统在此处发生强烈的自激振动并产生较高强度的摩擦尖叫噪声。相比之下,PG-2 喷砂表面在整个周期内的摩擦力波动很弱,其加速度和声压信号幅值较小,系统产生的摩擦尖叫噪声强度也较弱。

观察 $T=1\ 500\ s$ 阶段的光滑和 PG-2 喷砂表面真实接触区域内的局部三维形貌,如图 8 所示。可见光滑表面的磨损表面存在明显的磨屑“第三体”层、粘着撕裂等特征,而 PG-2 喷砂表面的微凸体磨损后产生的“平台”表面相对比较光滑,

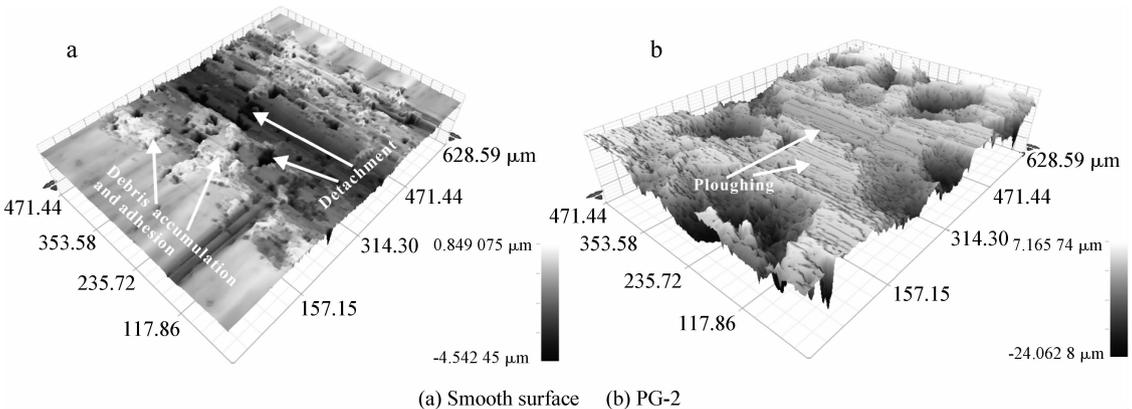


(a) Smooth surface (a₁) Friction force (a₂) Acceleration in Y-direction (a₃) Sound pressure

(b) PG-2 (b₁) Friction force (b₂) Acceleration in Y-direction (b₃) Sound pressure

图 7 一个周期内摩擦力、Y(摩擦力)方向振动加速度和声压时间历程曲线

Fig. 7 Time history records of friction force, vibration acceleration in friction (Y) direction and sound pressure in one cycle



(a) Smooth surface (b) PG-2

图 8 磨损表面局部三维形貌

Fig. 8 Local topographies of the worn surface

仅存在一定的犁沟效应。因此,光滑表面在真实接触区域内的磨屑堆积、粘着剥落等“不平顺”因素更易导致界面摩擦力剧烈波动,并最终产生尖叫噪声。而喷砂处理表面在真实接触区域内磨损表面较为光滑平顺,存在一定的犁沟效应但无明显的粘着剥落特征,其摩擦力波动较弱,不易产生尖叫噪声。

结合以上界面力、振动噪声特性和界面摩擦磨损特性的综合分析,可以得出在摩擦初始阶段,材料表面微凸体塑性接触较强,微凸体基本以脆性断裂为主,所以并没有产生高频的摩擦尖叫噪声。随着磨损过程的进行,微凸体平均半径急剧增大,界面真实接触面积增加,弹性接触增强,接触刚度增大,微凸体在反复冲击中被疲劳撕裂,界面出现明显的磨屑堆积、粘着剥落和犁沟等现象,这将引起摩擦力波动加剧,界面振动加强,当其振动频率与系统某一自然频率耦合,将产生明显的尖叫噪声。

相比之下,光滑表面在磨损过程中形成的磨屑堆积、粘着剥落等现象较明显,界面粘着、撕裂等作用引起摩擦力的剧烈波动,进而诱发摩擦系统产生强烈的自激振动,并辐射出较高强度的摩擦尖叫噪声。而喷砂处理表面主要由微凸体磨损表面的犁削效应引起摩擦力波动,其能量较弱,形成的尖叫噪声声压级也相应较低。对于喷砂处理表面,表面越粗糙,微凸体的分布越分散,磨损过程中真实接触面积越小,界面磨屑堆积和粘着剥落现象越轻,摩擦力波动越弱,产生的尖叫噪声强度也越低。

3 结论

(1) 选取光滑表面和2种喷砂处理表面在相同条件下进行试验,得出不同表面的摩擦噪声特性存在明显差异,粗糙度(微凸体的分布和磨损情况)对摩擦尖叫噪声的产生及演变具有关键的影响:表面粗糙度越大,微凸体分散性越大,产生摩擦尖叫噪声的时间越晚,且声压级越低,喷砂处理表面能明显的抑制界面摩擦尖叫噪声的产生。

(2) 磨屑堆积、粘着剥落和犁沟等摩擦界面特征是引起摩擦力波动,诱发摩擦系统自激振动,并最终产生高频摩擦尖叫噪声的主要因素。相比光滑表面的磨损表面存在明显磨屑堆积和粘着剥

落,由粘着撕裂作用引起较强摩擦力波动并产生较高强度尖叫噪声的情况,喷砂处理表面真实接触磨损表面(微凸体磨损后产生的“平台”)主要特征为较浅的犁沟,犁削效应引起摩擦力波动的能量较弱,产生的尖叫噪声强度较低。

参考文献

- [1] Kinkaid N M, O'Reilly O M, Papadopoulos P. Automotive disc brake squeals [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 267(1): 105-166.
- [2] Rusli M, Okuma M. Effect of surface topography on mode-coupling model of dry contact sliding systems [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, 308(3): 721-734.
- [3] Chen G X, Zhou Z R, Kapsa P, et al. Effect of surface topography on formation of squeal under reciprocating sliding [J]. *Wear*, 2002, 253(3): 411-423.
- [4] Abdelounis H B, Bot A L, Perret Liaudet J, et al. An experimental study on roughness noise of dry rough flat surfaces [J]. *Wear*, 2010, 268(1): 335-345.
- [5] Massi F, Berthier Y, Baillet L. Contact surface topography and system dynamics of brake squeal [J]. *Wear*, 2008, 265(11): 1784-92.
- [6] Sherif H A. Investigation on effect of surface topography of pad/disc assembly on squeal generation [J]. *Wear*, 2004, 257(7): 687-695.
- [7] 陈光雄,石心余.在有或无摩擦噪声状态下磨痕形貌的观察[J].*中国表面工程*,2002,15(2):21-23.
- [8] Guan D H, Su X D, Zhang F. Sensitivity analysis of brake squeal tendency to substructures modal parameters [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 291(1/2): 72-80.
- [9] Cantone F, Massi F. A numerical investigation into the squeal instability: Effect of damping [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, 25(5): 1727-37.
- [10] Hammerström L, Jacobson S. Surface modification of brake discs to reduce squeal problems [J]. *Wear*, 2006, 261(1): 53-57.
- [11] 涂铭旌,欧忠文.表面工程的发展及思考[J].*中国表面工程*,2012,25(5):1-5.
- [12] Ibrahim R A. Friction-induced vibration, chatter, squeal, and chaos-Part I: Mechanics of contact and friction [J]. *American Society of Mechanical Engineers Applied Mechanics Reviews*, 1994, 47(7): 209-226.

作者地址:四川省成都市二环路北一段111号 610031
西南交通大学摩擦学研究所
Tel: (028) 8760 0601
E-mail: jlmo@swjtu.cn