

织构化表面处理抑制界面摩擦尖叫噪声 *

盖小红, 莫继良, 刘铭倩, 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: 为寻求抑制摩擦尖叫噪声的新途径, 对表面加工有不同尺寸及分布沟槽型织构的列车制动盘蠕墨铸铁试样进行摩擦噪声试验, 探讨织构化表面处理对界面摩擦尖叫噪声特性的影响。结果表明: 沟槽织构表面具有明显降低摩擦尖叫噪声的效果, 系统在摩擦副接触界面为织构表面的半周期内无明显尖叫噪声产生, 但在接触界面为光滑表面的半周期内会产生高强度尖叫噪声。说明沟槽织构表面降低尖叫噪声的主要机理为: 沟槽棱边在摩擦过程中与对摩副撞击, 抑制了系统自激振动及摩擦尖叫噪声的产生。

关键词: 表面织构; 沟槽; 摩擦噪声; 尖叫噪声; 摩擦磨损

中图分类号: TG54; TH117

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2015)03-0102-06

Suppressing Friction-induced Squeal Noise at Interface by Surface Texturing

GE Xiao-hong, MO Ji-liang, LIU Ming-qian, YANG Jiang-zhou, CHEN Guang-xiong, ZHU Min-hao

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

Abstract: To seek new ways to suppress friction squeal noise, the influence of groove-textured surfaces on friction-induced squeal noise was studied by performing friction noise experiments on train brake disc materials (compacted graphite iron) on which groove-textured surfaces with different dimensions and distributions were processed. The results show that the groove-textured surfaces can significantly reduce the friction-induced squeal. No significant squeal is generated within the half cycle when there is groove-textured surface at the interface, while strong squeal is generated when the counterpart enters the contact interface without groove-textured surface. The main mechanism of the effect of groove-textured surfaces on reducing squeal noise is that the collision between the edges of the grooves and the counterpart can suppress the self-excited vibrations of the system and consequently the generation of squeal noise.

Keywords: surface texturing; groove; friction-induced noise; squeal noise; friction and wear

0 引 言

摩擦噪声通常分为低频颤振噪声($f=100\sim 1\,000\text{ Hz}$)和高频尖叫噪声($f=1\,000\sim 18\,000\text{ Hz}$)^[1]。其中, 高频尖叫具有发生频率高、响度大、机理复杂和难控制等特点, 一直是国内外研究的热点及难点。大多数研究者认为, 摩擦尖叫噪声是由界面摩擦导致的自激振动引起的^[2-4]。因此, 防止摩擦噪声最根本的途径就是从摩擦界

面入手。然而目前从主动改变界面的角度来抑制摩擦尖叫噪声的研究较少。

近年来研究表明, 在摩擦副表面加工出一定形状、排列和尺寸的沟槽、凹坑或凸包等微小结构阵列, 即织构化表面处理, 可以有效地改善界面的摩擦学性能。目前国内外关于表面织构的摩擦学性能研究则主要集中在研究其摩擦磨损特性^[5-8], 但对于织构化表面处理如何影响界面摩

收稿日期: 2015-01-20; **修回日期:** 2015-04-13; **基金项目:** * 国家自然科学基金(51375408); 教育部新世纪优秀人才支持计划基金(NCET-13-0974); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2682014CX129)

通讯作者: 莫继良(1982—), 男(汉), 副研究员, 博士; **研究方向:** 摩擦学及表面工程; **Tel:** (028) 8760 0601; **E-mail:** jlmo@swjtu.cn

网络出版日期: 2015-05-07 16:02; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20150507.1602.004.html>

引文格式: 盖小红, 莫继良, 刘铭倩, 等. 织构化表面处理抑制界面摩擦尖叫噪声 [J]. 中国表面工程, 2015, 28(3): 102-107. Ge X H, Mo J L, Liu M Q, et al. Suppressing friction-induced squeal noise at interface by surface texturing [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(3): 102-107.

擦噪声的研究鲜见报道。目前,国内外关于表面处理改变界面摩擦噪声的研究主要集中在改变制动盘/片表面形貌特征来抑制制动尖叫噪声,如瑞典学者尝试在汽车制动盘表面加工出螺旋形喷砂图案,得出喷砂处理能降低摩擦制动尖叫噪声,但其降噪效果随喷砂表面的磨损逐渐降低直至消失^[9];Lin等^[10]利用有限元方法分析了在制动盘表面进行多种表面结构处理(如开孔或开槽等)对制动尖叫噪声的影响,但仅停留在理论研究层面,未进行试验研究。又如Oberst等^[11-12]研究了4种不同摩擦衬片开槽方式对制动尖叫的影响,但并未详细分析其影响机制;Lin^[13]及张立军^[14]等利用数值分析结合试验的方法研究得出某些特定参数的表面处理能有效降低制动尖叫噪声的结论,但其并未针对改变制动盘表面如何影响制动尖叫进行研究。

目前,表面处理技术已被广泛用于各个领域以满足社会高速发展对材料表面性能不断提出的新需求^[15]。摩擦振动噪声严重影响了电机和机床等装备以及各类交通工具的正常安全服役,对人们的生产生活带来较大危害且难以消除。因此,系统开展织构化表面处理影响界面摩擦尖叫噪声的研究对探索采用表面处理方法抑制摩擦尖叫噪声具有重要意义。文中通过在列车制动盘蠕墨铸铁材料表面进行开沟处理,变化沟槽分布及尺寸参数,系统研究了沟槽织构化表面处理对摩擦尖叫噪声的影响及其作用机理,为通过表面设计及处理的途径来抑制界面摩擦尖叫噪声提供试验和理论依据。

1 试验部分

1.1 测量装置

采用自行搭建的摩擦噪声试验平台,其主要包括摩擦学试验系统、夹具系统和信号采集分析系统,其原理如图1所示。试验采用销—盘(面—面接触)模式,同步动态采集摩擦过程中摩擦力、振动加速度和摩擦噪声信号。

摩擦力信号由美国 CETR DFH-50 型二维应变式力学传感器(测量精度 0.025 N,测量范围 5~500 N)采集;采用德国 MTG MK250 型传声器(灵敏度 50 mV/g,频响 3.5 Hz~20 kHz,动态范围 15~146 dB)进行噪声信号采集;振动加速度信号由瑞士 KISTLER 8688A50 型三维加速

度传感器(灵敏度 100 mV/g,量程 ± 50 g,频响 0.5 Hz~5 kHz)采集。摩擦振动和噪声信号采用德国 MUELLER-BBM 32 通道振动噪声测量分析系统进行采集及分析。

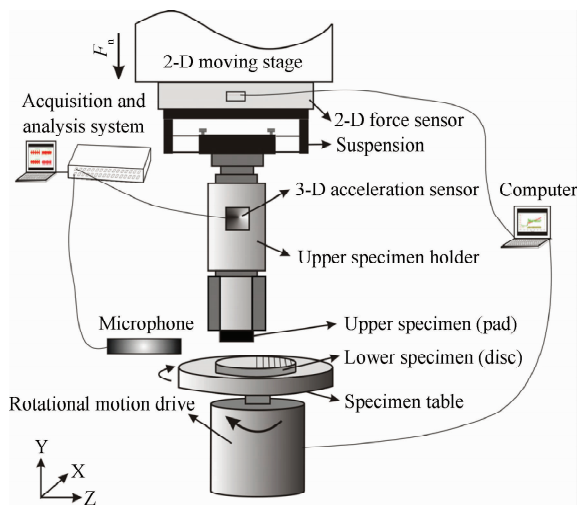


图1 摩擦噪声试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the friction noise test apparatus

1.2 材料及参数

所用试样均为列车盘形制动摩擦副材料。其中,上试样(块试样)取自制动片(复合材料,硬度为 50~90 HR,密度为 (1 ± 0.5) g/cm³,弹性模量 $E \leq 1.0 \times 10^3$ MPa),尺寸为 10 mm×10 mm×15 mm,表面不做处理。下试样(盘试样)取自制动盘(蠕墨铸铁,硬度为 240 HV_{0.03},弹性模量 $E = 158$ GPa),尺寸为 $\Phi 25$ mm×3 mm,表面经研磨、抛光至表面粗糙度 $Ra \approx 0.04$ μ m。

采用铣削方式在盘试样表面加工出 6 种不同尺寸及分布的沟槽型表面织构,如图 2 及表 1 所示。其中沟槽宽度为 w ,沟槽间距为 d ,沟槽深度 h 控制 0.1 mm 左右,沟槽为平行等间距均匀分布。后文中将用 S 表示光滑表面, T-a-d-w 表示全开沟织构表面(样品表面全部加工有沟宽为 w ,沟间距为 d 的沟槽),而 T-h-d-w 则表示半开沟织构表面(样品表面仅一半面积内加工有沟槽)。

试验前依次用酒精、丙酮对盘试样进行超声清洗并干燥。摩擦试验前进行跑合,以尽量保证摩擦副间有良好的面接触。试验参数如下:法向载荷 $F_n = 100$ N,盘试样转速为 60 r/min,磨痕中心处直径约为 20 mm,试验时间为 1 800 s。

试验环境为大气下干态(温度 24~27 ℃,相对湿度 RH(60±10)%)。在试验前进行本底噪声的测量分析,得出其强度约为 66.4 dB(A),主频约为 587.5 Hz。此频率与文中主要考察的尖叫噪声频率($f>1\,000\text{ Hz}$)相差较大,表明本底噪声将不影响摩擦噪声试验的结果及分析。此外,每种参数下试验均重复 3 次以上,以保证试验结果的准确性。试验后用光学显微镜观察磨痕表面磨损特征。

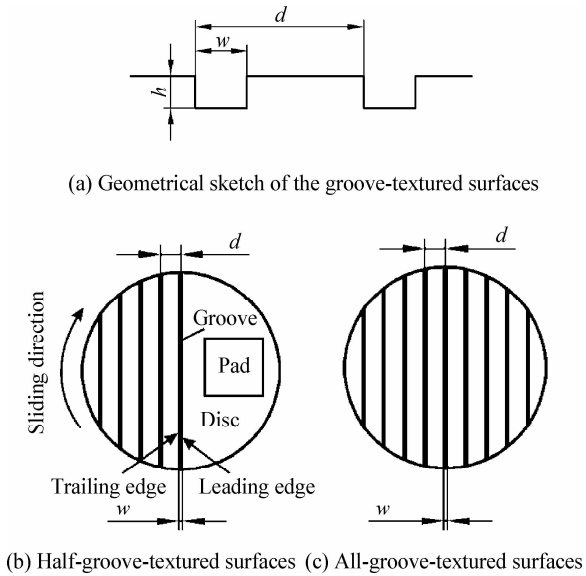


图 2 沟槽型结构表面示意图

Fig.2 Schematic diagrams of the groove-textured surfaces

表 1 沟槽型结构表面几何参数

Table 1 Geometrical parameters of the groove-textured surfaces

Samples	Pitch, d/mm	Width, w/mm
T-h-1-0.5	1 ± 0.02	0.5 ± 0.02
T-h-2-1	2 ± 0.02	1 ± 0.02
T-h-4-2	4 ± 0.02	2 ± 0.02
T-a-1-0.5	1 ± 0.02	0.5 ± 0.02
T-a-2-1	2 ± 0.02	1 ± 0.02
T-a-4-2	4 ± 0.02	2 ± 0.02

2 结果与讨论

2.1 结构化表面处理对摩擦尖叫噪声的影响

图 3 所示为光滑表面和全开沟结构表面的

摩擦噪声等效声压级随时间的变化(对每 100 s 内的噪声信号进行一次 A 计权等效声压级分析)。可以看出,全开沟结构表面的噪声强度均较光滑表面的低,且噪声强度随沟槽宽度的增大而降低,但值得注意的是,试验后期 3 种不同尺寸结构表面的声压级基本趋于一致。

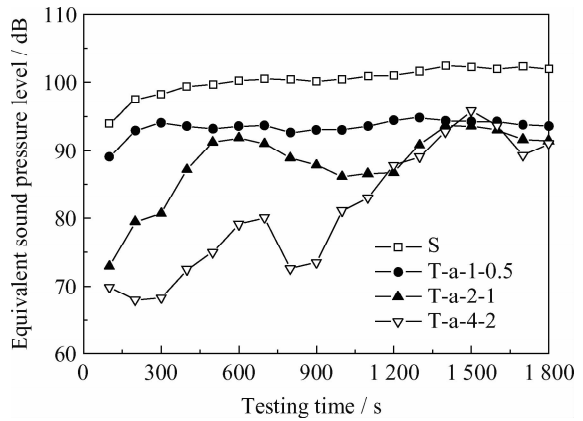


图 3 摩擦噪声等效声压级随时间的变化

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

为探究沟槽存在对界面摩擦尖叫噪声强度的影响,对比分析光滑表面、半开沟结构表面和全开沟结构表面对摩擦噪声强度的影响,在稳定阶段取一个周期(1 700.0~1 701.0 s),对每 0.1 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 4 所示(主频高于 1 000 Hz,强度高于 78 dB 的噪声为尖叫噪声)。可以看出,在整个周期内,光滑表面的噪声声压约为 100 dB(A),3 种全开沟结构表面的噪声声压均低于光滑表面。对于 3 种半开沟结构表面,其噪声声压在前半个周期内(1 700.0~1 700.5 s,接触界面为结构表面)明显低于光滑表面,而在后半周期内(1 700.5~1 701.0 s,接触界面为光滑表面)急剧升高,接近光滑表面的噪声声压水平。由此推测,沟槽的存在具有明显降低摩擦尖叫噪声强度的效果。

进一步考察摩擦尖叫噪声强度及频率随摩擦进程的演变过程,对光滑及 T-4-2 半/全开沟结构表面的噪声信号进行时频分析,结果见图 5。可以看出,3 种表面噪声信号均有 1 175、2 337 和 3 537 Hz 3 个明显的主频,盘试样开沟前后噪声信号的主频没有发生明显变化,加工沟槽对系统的固有频率几乎无影响。但是,3 种表面噪声信号的时频特征存在明显差别,光滑表面在试验开

始阶段就出现了 1 175、2 337 和 3 537 Hz 3 个明显的主频,且这些高频成分一直持续到试验结束。尽管半开沟表面 T-h-4-2 也相应的存在

3 个相同主频,但其强度明显减弱。而对于全开沟表面 T-a-4-2,3 个主频出现的时间明显延后且其强度极大减弱。

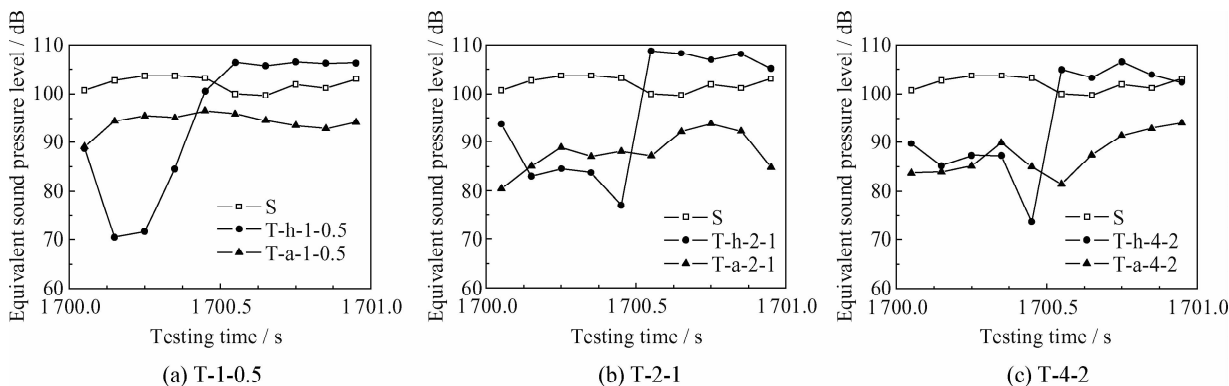


图4 一周期内摩擦噪声等效声压级随时间变化

Fig. 4 Equivalent sound pressures of the friction noise as a function of time in one cycle

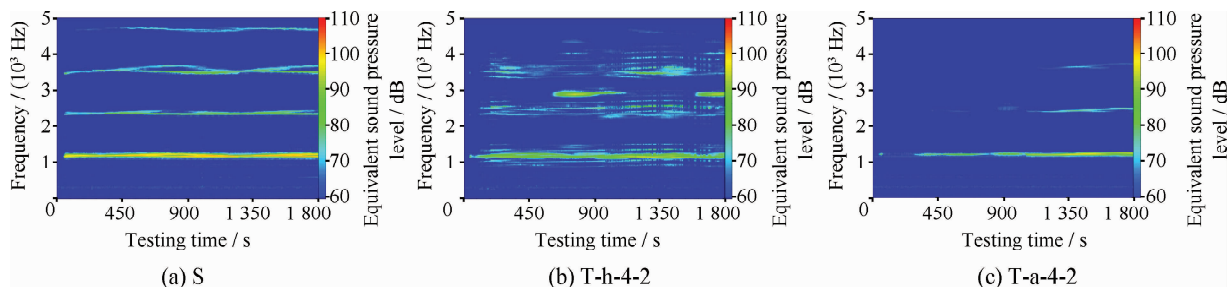


图5 摩擦噪声信号时频分析

Fig. 5 Time-frequency analysis of the friction noise

2.2 结构化表面处理对界面振动及力信号的影响

研究不同结构表面对界面振动的影响,对光滑和 T-4-2 半/全开沟结构表面在稳定阶段一个周期内(1 700.0~1 701.0 s)的切向和法向振动加速度以及噪声声压信号进行分析,结果如图 6 所示。可以看出,光滑表面两个方向振动加速度和声压信号在整个周期内均存在幅值较大的波动,即摩擦系统在整个周期内均发生强烈的界面自激振动并伴随有高强度的摩擦尖叫噪声,而半开沟结构表面 T-h-4-2 振动加速度和声压信号在接触界面为结构表面的前半周期(1 700.0~1 700.5 s)内没有出现明显的波动,但在接触界面转为光滑表面的后半周期(1 700.5~1 701.0 s)内出现较大幅值的波动。

这表明当上试样滑过半开沟结构表面的开沟区域时,摩擦系统无明显摩擦尖叫噪声产生,而滑过未开沟区域时,系统发生强烈的自激振动并产生尖叫噪声,沟槽的存在能很好的抑制摩擦尖叫噪声。通过全开沟结构表面 T-a-4-2 的振

动加速度和声压信号可以看出,其幅值明显低于光滑和半开沟结构表面,摩擦系统接触界面的自激振动和尖叫噪声都受到明显的抑制。

为进一步探讨结构化表面处理抑制界面摩擦尖叫噪声的机理,对光滑和 T-4-2 半/全开沟结构表面在稳定阶段一个周期内(1 700.0~1 701.0 s)的界面摩擦力信号进行分析,结果见图 7。可以看出,光滑表面的摩擦力信号波动较平缓,这种波动是由接触表面不平度引起的。相比之下,半开沟结构表面 T-h-4-2 的摩擦力信号在接触界面为结构表面的前半周期内出现 6 个明显的剧烈波动,但在接触界面转为光滑表面的后半周期内波动较平缓,而全开沟结构表面 T-a-4-2 的摩擦力信号在一个周期内出现 10 个剧烈波动,其波动数均对应于一周期内对摩擦副所滑过的沟槽数。由此推测,当上试样(制动片)滑过沟槽时会与下试样(制动盘)的沟槽棱角碰击并导致摩擦力的波动,从而打断了系统接触界面的自激振动,进而达到了抑制摩擦尖叫噪声的效果。

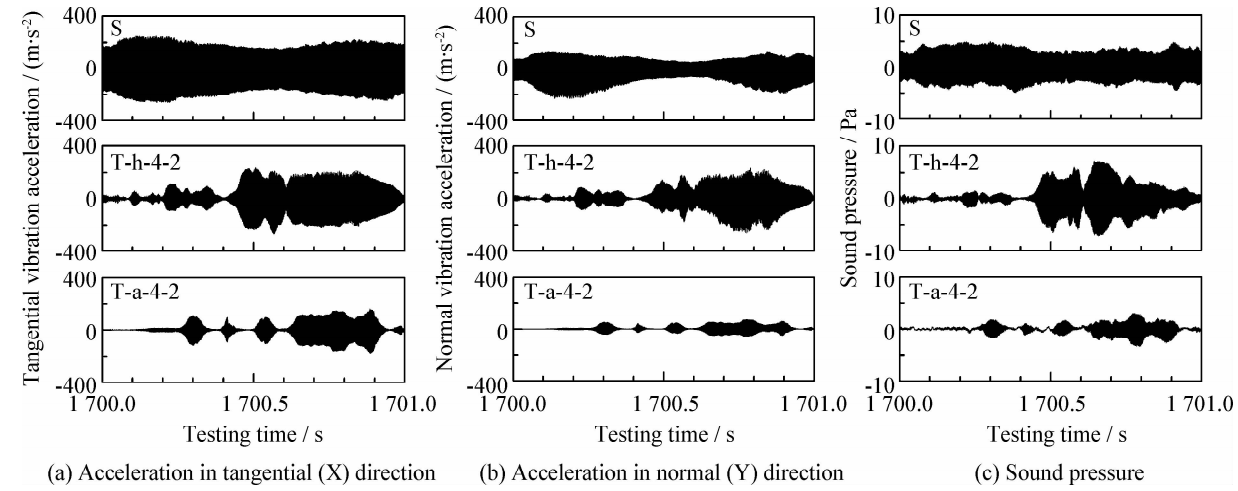


图 6 一个周期内摩擦力(X)方向振动加速度、法向力(Y)方向振动加速度和声压时间历程曲线

Fig. 6 Time history records of vibration acceleration in tangential (X) direction, vibration acceleration in normal (Y) direction and sound pressure in one cycle

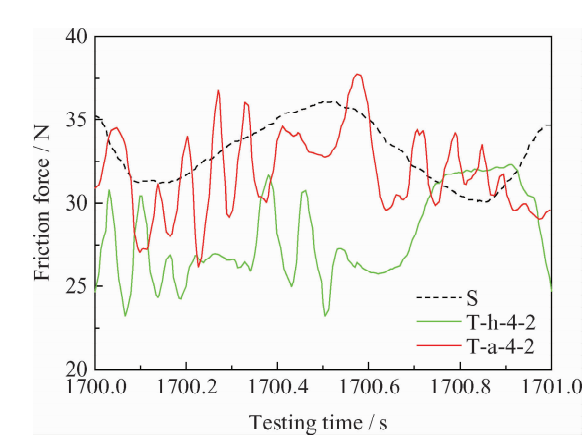


图 7 一个周期内的摩擦力曲线

Fig. 7 Friction force curves in one cycle

2.3 织构化表面处理对磨痕形貌的影响

对磨痕形貌进行分析,以验证沟槽的存在是如何影响界面摩擦特征并最终影响界面摩擦振动

噪声特性。图 8 为磨痕光学形貌,从图中可以看出,光滑表面磨痕内部的犁沟和剥落现象明显较织构表面的严重,表明沟槽的存在可以一定程度上改善界面的磨损特性。对比观察织构表面沟槽两侧棱边的损伤情况(为区分沟槽两棱边,对其进行定义见图 2(b)),可以看出与上试样初始接触的沟槽棱边(Leading edge)无明显的碰撞冲击痕迹(见图 8(b)),但与上试样后接触的沟槽棱边(Trailing edge)却存在明显的碰撞冲击痕迹(见图 8(c)),考虑到上试样(制动片)为复合材料,强度明显较下试样(制动盘)低,其对下试样的冲击磨损特性主要呈现为抛光效应。由此可见,沟槽的存在一方面可以改善界面的摩擦磨损特性,另一方面,沟槽的存在导致摩擦过程中上试样不断与其碰击,打断界面的连续接触,扰乱系统的自激振动,最终抑制摩擦尖叫噪声的产生。

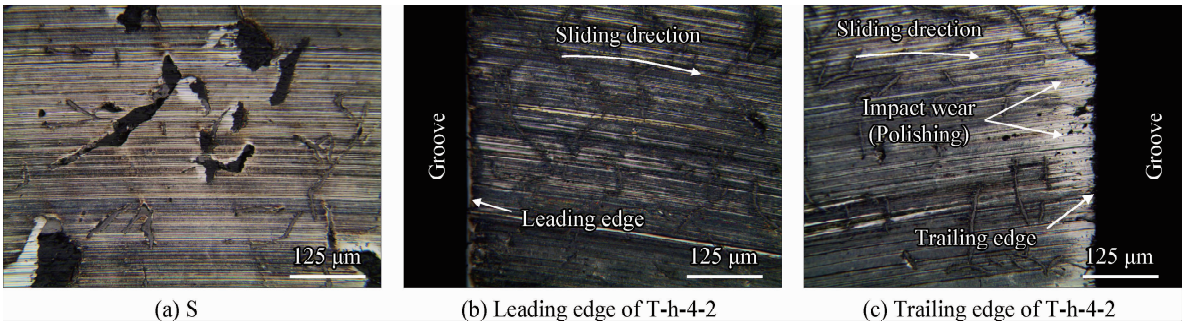


图 8 磨痕光学形貌

Fig. 8 Optical morphologies of the worn surfaces

3 结 论

(1) 光滑表面和沟槽型织构表面的对比试验结果表明,织构表面的噪声强度均较光滑表面的低,且噪声强度随沟槽宽度的增大而降低。

(2) 半开沟织构表面在摩擦副接触界面为织构表面的前半周期内系统无明显摩擦尖叫噪声产生,但在后半周期接触界面转为光滑表面之后,系统开始出现强烈的自激振动并伴随有高强度的摩擦尖叫噪声,沟槽的存在具有抑制摩擦尖叫噪声的效果。

(3) 沟槽的存在主要通过改善界面的摩擦磨损特性,并在摩擦过程中与上试样不断碰击,打断界面的连续接触,扰乱系统的自激振动,最终达到抑制摩擦尖叫噪声的效果。

参考文献

- [1] Rhee S K, Tsang P H S, Wang Y S. Friction-induced noise and vibration of disc brakes [J]. *Wear*, 1989, 133 (1): 39-45.
- [2] Hashemi-Dehkordi S M, Abu-Bakar A R, Mailah M. Stability analysis of a linear friction-induced vibration model and its prevention using active force control [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014, 6, 251594-606.
- [3] Chiello O, Sinou J-J, Vincent N, et al. Squeal noise generated by railway disc brakes: experiments and stability computations on large industrial models [C]. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, Canada: Acoustical Society of America, 2013; 065049.
- [4] Akay A, Giannini O, Massi F, et al. Disc brake squeal characterization through simplified test rigs [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, 23(8): 2590-607.
- [5] 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.
Tu M J, Ou Z W. Development and consideration of surface engineering [J]. *China Surface Engineering*, 2012, 25 (5): 1-5 (in Chinese).
- [6] Pettersson U, Jacobson S. Textured surfaces for improved lubrication at high pressure and low sliding speed of roller/piston in hydraulic motors [J]. *Tribology International*, 2007, 40(2): 355-359.
- [7] Bathe R, Krishna V S, Nikumb S, et al. Laser surface texturing of gray cast iron for improving tribological behavior [J]. *Applied Physics A*, 2014, 117(1): 117-123.
- [8] 万轶, 熊党生. 激光表面结构化改善摩擦学性能的研究进展 [J]. *摩擦学学报*, 2006, 26(6): 603-607.
Wan Y, Xiong D S. Study of laser surface texturing for improving tribological properties [J]. *Tribology*, 2006, 26 (6): 603-607 (in Chinese).
- [9] Hammerström L, Jacobson S. Surface modification of brake discs to reduce squeal problems [J]. *Wear*, 2006, 261(1): 53-57.
- [10] Lin S C, Abu-Bakar A R, Wan-Harujan W M M, et al. Suppressing disc brake squeal through structural modifications [J]. *Jurnal Mekanikal*, 2009, (29): 67-83.
- [11] Oberst S, Lai J C S. Numerical prediction of brake squeal propensity using acoustic power calculation [C]. *Proceedings of acoustics 2009*, Australia: Australian acoustical society, 2009.
- [12] Oberst S, Lai J C S. Statistical analysis of brake squeal noise [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2011, 330 (12): 2978-94.
- [13] Lin S C, Guan C C, Abu-Bakar A R, et al. Disc brake squeal suppression through chamfered and slotted pad [J]. *International Journal of Vehicle Structures and Systems*, 2011, 3(1): 28-35.
- [14] 张立军, 陈前银, 刁坤, 等. 摩擦衬片开槽方式对盘式制动器摩擦尖叫的影响 [C]. 2013 中国汽车工程学会年会论文集精选, 北京: 北京理工大学出版社, 2013, 304-312.
Zhang L J, Chen Q Y, Diao K, et al. Impact of various grooves in brake pads on disc brake squeal [C]. 2013 SAE-China Congress Selected Papers, Beijing: Beijing institute of technology press, 2013, 304-312 (in Chinese).
- [15] 徐滨士, 谭俊, 陈建敏. 表面工程领域科学技术发展 [J]. *中国表面工程*, 2011, 24(2): 1-12.
Xu B S, Tan J, Chen J M. Science and technology development of surface engineering [J]. *China Surface Engineering*, 2011, 24(2): 1-12 (in Chinese).

(责任编辑: 常青)