摩擦自激振动引起摩擦面波状磨耗的试验研究

胡文萍[1*]，王 平[2]，陈光雄[1]，朱旻昊[1]
（1. 西南交通大学 牵引动力实验室摩擦学研究所，四川 成都 610031；
2. 荆楚理工学院 机械工程学院，湖北 荆门 448000）

摘 要：在销－盘摩擦磨损试验机上进行金属干摩擦试验，研究摩擦自激振动对盘试件磨痕表面轮廓的影响，采用激光位移传感器测量盘试件摩擦表面轮廓尺寸，用加速度传感器测量销试件的摩擦自激振动. 试验结果表明：在干摩擦状态下，销－盘系统容易发生持续的摩擦自激振动，当摩擦时间达到一定数值后，盘试件的磨痕表面轮廓会出现明显的波浪形磨耗，波浪形磨损机理主要是疲劳磨损. 分析表明波浪形磨耗的波长近似等于摩擦自激振动的周期与滑动速度的乘积，由此推断摩擦自激振动引起了摩擦表面的波浪形磨耗.

关键词：波磨；表面轮廓；摩擦自激振动；磨损
中图分类号：TH117.1 **文献标志码**：A **文章编号**：1004－0595(2013)06－0571－07

Experimental Study on Corrugated Wear of a Sliding Surface Caused by Frictional Self－excited Vibration

HU Wen－ping[1*], WANG Ping[2], CHEN Guang－xiong[1], ZHU Min－hao[1]
(*1. State Key Laboratory of Traction Power, Tribology Research Institute, Southwesst Jiaotong University, Chengdu 610031, China*
2. School of Mechanical Engineering, Jingchu University of Technology, Jingmen 448000, China)

Abstract: A series of experimental tests were conducted on a pin－on－disc tester to study the effect of frictional self－excited vibration on evolution of the scar profile. A laser displacement sensor was used to measure the profile size of the scars. An accelerometer was used to measure vibration of the pin specimen. The test results show that a sustained frictional self－excited vibration easily occurred when a metal specimen rub against another metal specimen under dry friction. When the sliding lasted for a certain time, corrugated wear was generated on the sliding surface of the disc specimen. Fatigue wear was a main wear mechanism of corrugation. The wavelength of corrugated wear was approximately equal to the sliding speed multiplied by the period time of the friction－induced vibration. Therefore, it is concluded that the corrugated wear of disc specimens was attributed to the frictional self－excited vibration occurring in the sliding process.

Key words: corrugation, scar profile, frictional self－excited vibration, wear

随着运营时间的增加，铁路钢轨会在其轨顶面的某些部位沿纵向出现具有一定规律性和周期性的类似波浪形状的磨耗，这种现象称为钢轨波浪形磨耗，简称波磨[1－3]. 钢轨波磨是导致钢轨损坏、轮轨

Received 3 June 2013, revised 1 July 2013, accepted 16 July 2013, available online 28 November 2013.
* Corresponding author. E－mail: hu947058421@163.com, Tel: +86－28－87634122.
The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (51275429) and Sichuan Province Science and Technology Support Program, China (2010GZ0227) and Program for Innovative Research Team in University of the Ministry of Education of China (IRT1178) and Fundamental Research Funds for the Central Universities(SWJTU12ZT01).
国家自然科学基金(51275429)、四川省科技支撑计划项目(2010GZ0227)、教育部创新团队发展计划项目(IRT1178)和中央高校基本科研业务费专项资金 (SWJTU12ZT01)资助.

振动和噪声的主要原因之一[4-7].

波磨通常可分为短波长波磨和长波长波磨[8-9],前者波长为20~80 mm,波深约为0.1~0.5 mm;后者波长大于80 mm,波深小于2 mm. 波磨的成因大致可分为动力类和非动力类两种[10-12]. 其中动力类成因认为波磨的波长取决于系统的振动特性,如系统的自激振动[13]、接触共振[14]和反馈振动[15-16]等. 非动力类成因则认为波磨是由于接触表面的不均匀塑性流动、摩擦磨损和应力变形等原因引起[17-19]. 现时多认为动力类成因是引起波磨的主要原因.

本文作者在前期研究工作中提出轮轨系统的摩擦耦合自激振动引起钢轨波磨的观点[20],其后,德国学者 Kurzeck[21] 也提出了类似的观点. 本文中基于这个新观点开展原理性试验研究工作. 在销-盘摩擦磨损试验装置上进行滑动摩擦试验,通过调节销试件的法向预紧弹簧的刚度获得需要的销-盘摩擦系统的摩擦自激振动频率,在此自激振动持续发生的条件下进行较长时间的滑动试验,同时记录摩擦振动信号和盘试件的磨痕轮廓. 试验结果表明销-盘系统的摩擦自激振动很容易引起盘试件摩擦面的波状磨耗. 本文的工作为钢轨波磨理论的深入研究提供了有意义的参考.

1 实验部分

1.1 设备及材料

采用销-盘摩擦磨损试验机上进行摩擦学试验,试验装置简图如图1所示. 盘试件采用容易磨损的1Cr18Ni9不锈钢材料,其化学成分为0.1% C、0.9% Si、1.8% Mn、0.02% S、0.03% P、18% Cr、9% Ni(以质量百分数计),抗拉强度 σ_b 不小于520 MPa、条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 不小于205 MPa,组织特征为奥氏体型,直径尺寸为 ϕ270 mm,厚度为10 mm. 销试件采用U71Mn型钢轨钢,其化学成分为0.76% C、0.23% Si、1.2% Mn、0.017% P、0.017% S、0.005% V,抗拉强度 σ_b 不小于880 MPa、伸长率 δ 不小于8%,其名义接触尺寸为 ϕ15mm 的圆平面,销试件的预紧弹簧刚度为16 kN/m.

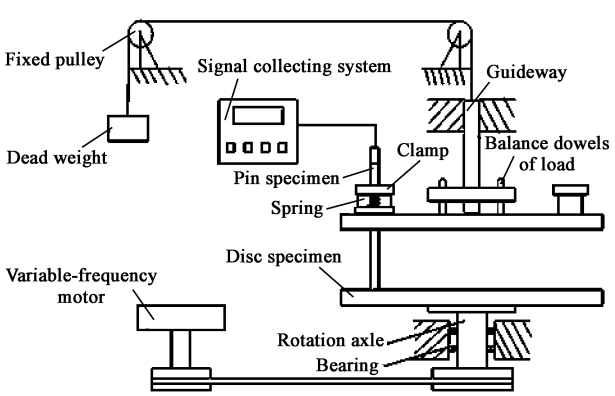


Fig. 1 Schematic illustration of the pin-on-disc tester

图1 销-盘摩擦试验装置简图

1.2 试验方法和数据测量方法

试验前,先将盘试件和销试件用600#和1 200#砂纸打磨光滑,并用酒精和丙酮清洗摩擦表面. 试验时,销试件固定不动,盘试件以一定的转速旋转. 试验开始时,盘试件低速与销试件跑合摩擦60 min,同时采集销试件的振动信号. 然后,每隔30 min观察一次盘试件的磨痕,直至产生初始波磨. 此后每隔10 min观察一次盘试件磨痕,直至产生明显的波磨,之后停止摩擦试验.

试验中采用国产CA-YD-181型压电式加速度传感器测量销试件的振动加速度,采用测量精度为0.1 ℃的红外测温仪测量盘试件摩擦面的平均温度,采用HB966转速表采集试验机转数信号,采用德国 Müller-BBM 公司出品的PAK振动测试分析系统进行信号采集与处理,采用日本 KEYENCE 公司出品的测量精度为0.1 μm 的 LK-Navigator 激光位移传感器测量盘试件的磨痕轮廓尺寸. 测量盘试件磨痕轮廓尺寸时,将其安放在可360°旋转的测量平台上,用激光位移传感器沿着磨痕的周向逐点测量盘试件的磨痕轮廓尺寸. 测量平台为一个带刻度的回转工作台,分度精度为1′(1°=60′),沿盘试件的磨痕圆周测量,读数点间距为10′,共测量2 160个数据点.

试验设置3组工况,其中法向载荷 F_n=50 N,固定不变. 工况一:盘试件的转速 n=60 r/min,工况二:n=90 r/min,工况三:n=120 r/min.

2 结果与讨论

2.1 波磨形成过程及轮廓曲线

在第一组盘试件转速 n 为60 r/min 工况下,当盘试件转过 R 为21 600 r时,其表面出现不明显的波状磨痕. 此后,每间隔600 r观察一次磨痕,发现盘试件上的波状磨痕均较上一次明显. 当盘试件转过 R 为28 800 r时,盘试件摩擦面出现很明显的波磨. 观察还发现,这些波磨并非均匀分布在盘试件磨痕的整个圆周上,只是在磨痕的局部位置出现,并且在波磨出现的地方有明显的塑性变形和塑性流动,如图2所示. 盘试件磨痕轮廓如图3(a)所示,波磨

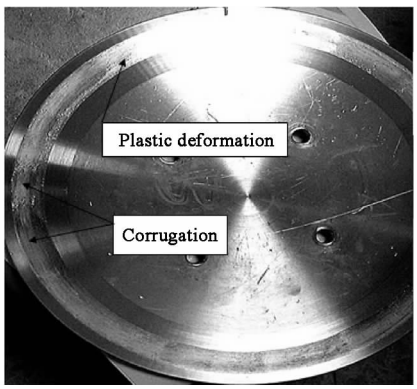


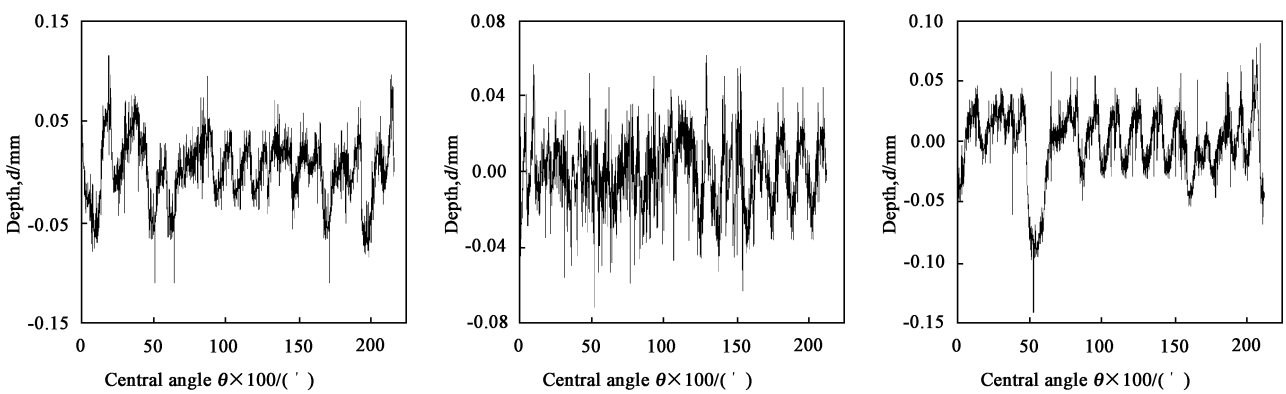
Fig. 2　Wear scar of the disc specimen
图 2　盘试件磨痕形貌图

的波长 λ 约为 46.77 mm,波深 d 约为 0.07 mm.

在第二组盘试件转速 n 为 90 r/min 工况条件下,当盘试件转过 R 为 27 000 r 时,盘试件摩擦表面开始出现不明显的波状磨痕. 此后,随着试验进行,盘试件磨痕的波状磨耗越来越明显. 当盘试件转过 R 为37 800 r时,盘试件摩擦表面出现很明显的波磨. 盘试件磨痕的轮廓尺寸如图 3(b)所示,波磨波长 λ 约为 50.37 mm,波深 d 约为 0.08 mm.

在第三组盘试件转速 n 为 120 r/min 的工况条件下,当盘试件转过 R 为 21 600 r 时,盘试件摩擦表面就开始出现不明显的波状磨痕. 当盘试件转过 R 为 28 800 r 时,盘试件磨痕出现很明显的波磨. 盘试件磨痕的轮廓尺寸如图 3(c)所示,可以看出盘试件摩擦面存在两段波长不同的波磨,测得的波长 λ 约为 53.97 mm、波深 d 约为 0.09 mm 和波长 λ 约为 30.22 mm、波深 d 约为 0.03 mm.

观察发现,在上述 3 种试验工况下,在销、盘摩擦面之间均出现了大量的磨屑,并伴随着摩擦表面材料的循环凸起和剥落以及摩擦面温度的升高. 试验中测量了盘试件摩擦面的温升,结果见图 4. 由图 4 可以看出,盘试件摩擦接触面的平均温度随摩擦滑动时间的增大而升高. 根据摩擦磨损基础知识[22]



(a) n = 60 r/min, R = 28 800 r　　(b) n = 90 r/min, R = 37 800 r　　(c) n = 120 r/min, R = 28 800 r

Fig. 3　Profile curves of the worn scars of the disc specimens under different test conditions
图 3　不同试验条件下的磨痕轮廓曲线

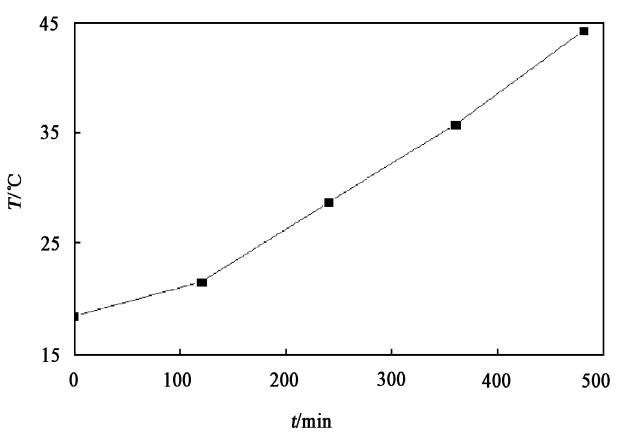


Fig. 4　Variation of the temperature of the sliding surface of a disc specimen with time
图 4　盘试件摩擦表面的温度变化

可知,此时摩擦接触表面发生了磨粒磨损.

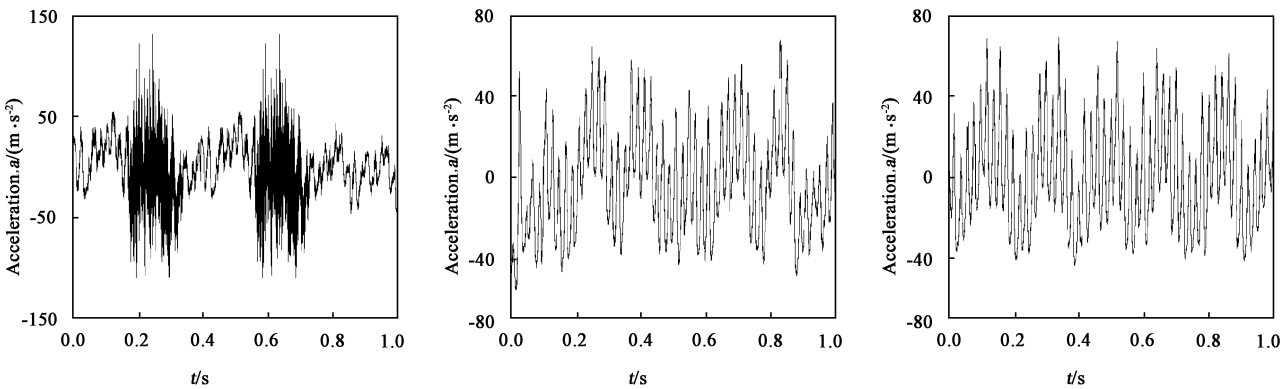
2.2　摩擦振动信号分析

为了更深入地研究摩擦自激振动对波状磨耗的形成与发展的影响,我们对摩擦振动信号的时域特性和频域特性进行了分析,试图从磨损机制的角度解释摩擦自激振动与波磨的关系.

图 5 示出了在盘试件转速 n = 60 r/min 工况下,盘试件摩擦表面没有发生波状磨耗之前记录的销试件摩擦振动信号的时域波形. 随着盘试件转数的增加,在盘试件摩擦表面没有出现波磨的时候,销试件就逐渐发生明显的周期性摩擦自激振动,如图 5(b)所示,并且随着摩擦滑动时间的增加,这个周期性的摩擦自激振动始终存在,如图 5(c)所示. 由此说明,

销－盘系统的摩擦自激振动是由滑动表面之间的摩擦引起,不是摩擦表面的波状磨痕引起. 当然,当摩擦表面的波状磨痕形成以后,这个波状磨痕也会助长摩擦自激振动的幅度.

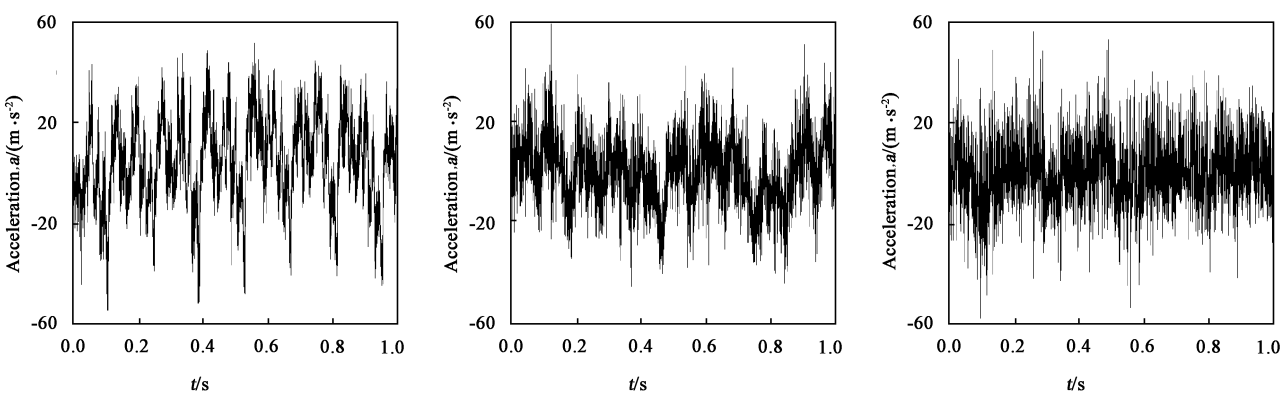
图6示出了不同试验条件下盘试件发生明显波状磨痕时销试件摩擦自激振动信号的时域波形,由图6可看出,3种不同工况下试件的法向振动加速度均呈现不同程度的周期性变化,并随着转速的增大周期变短. 由此可看出,当盘试件以一定转速转动时,销－盘系统会发生不稳定的摩擦自激振动[23].



(a) R=5 400 r (b) R=10 800 r (c) R=21 600 r

Fig. 5 Evolution of friction－induced vibration of the pin specimen with time

图5 在滑动摩擦不同时刻振动信号波形的演变



(a) n=60 r/min (b) n=90 r/min (c) n=120 r/min

Fig. 6 Vibration waveforms of the pin specimen under different test conditions

图6 不同试验条件下振动信号的时域波形

为了进一步了解振动信号的频率结构,对以上3组工况下测量的振动信号进行Zoom－FFT(细化快速傅里叶变换)变换,得到振动信号的幅频特性曲线如图7所示. 由频谱曲线可看出,3组工况下的摩擦振动在低频范围内均呈现复杂多变的特性,都有较高的振动能量,并有明显的固有频率和较少的边频. 根据文献[24]中对摩擦振动信号幅频特性与磨损机制的关系研究可推知,此时的主要磨损机制应为磨粒和疲劳磨损,这个推论与实际试验结果相符.

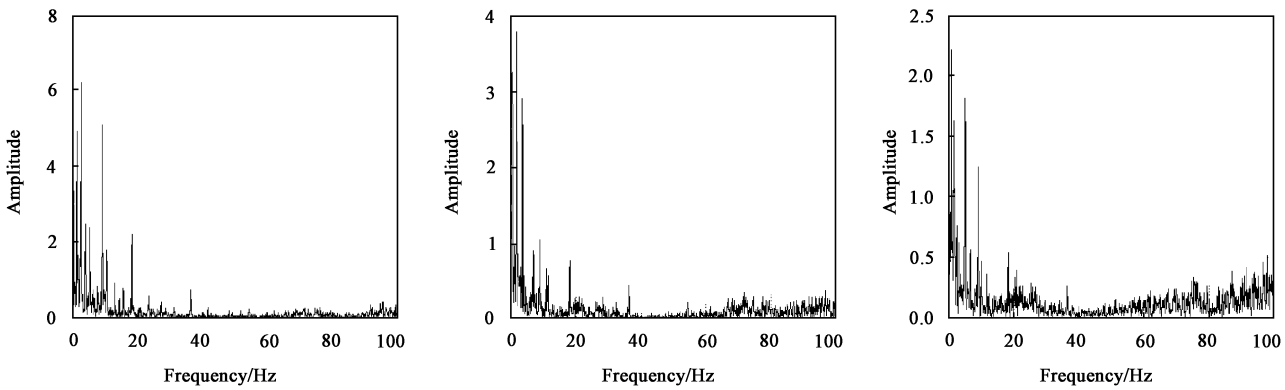
为了求出系统的振动频率,对3组工况出现的摩擦振动进行了功率谱分析,结果如图8所示. 前面两组工况下对应的系统振动频率分别为15.6和21.5 Hz,而第三组工况下振动系统出现了两个幅值近似相等的峰值,其频率分别为31.3和43.1 Hz,故可近似认为此工况下系统有两个摩擦自激振动频率,这与实际摩擦面出现两段波长不等的波磨现象相对应.

2.3 波磨形成机理分析

由上述试验结果可知,销－盘系统在摩擦滑动过程中产生不稳定的摩擦耦合自激振动,根据摩擦自激振动的知识可知销、盘试件之间摩擦接触区域上的法向接触力也是按摩擦振动的频率发生变

化[23],使摩擦接触面发生不均匀的磨损. 随着试验时间的增加,摩擦面温度升高,接触面表层材料在一定程度上被软化,导致磨损加剧,造成接触表面累积损伤并形成大量磨屑. 根据摩擦磨损基本原理[22],两表面相互接触时,由于表面粗糙度不同,使得局部接触区压力变大,并且由于磨损过程中摩擦温升的作用,使该接触区接触面积增大,从而在磨损过程中,该区域内的摩擦力和摩擦系数较低,在较大法向压力作用下,该区域的摩擦表面更易发生塑性变形,严重者还可能发生表面材料的点蚀、剥落现象. 反之,局部接触区压力小,接触面积小,在磨损过程中,该区域内的摩擦力和摩擦系数较大,摩擦表面不易发生塑性变形,磨损程度较轻.

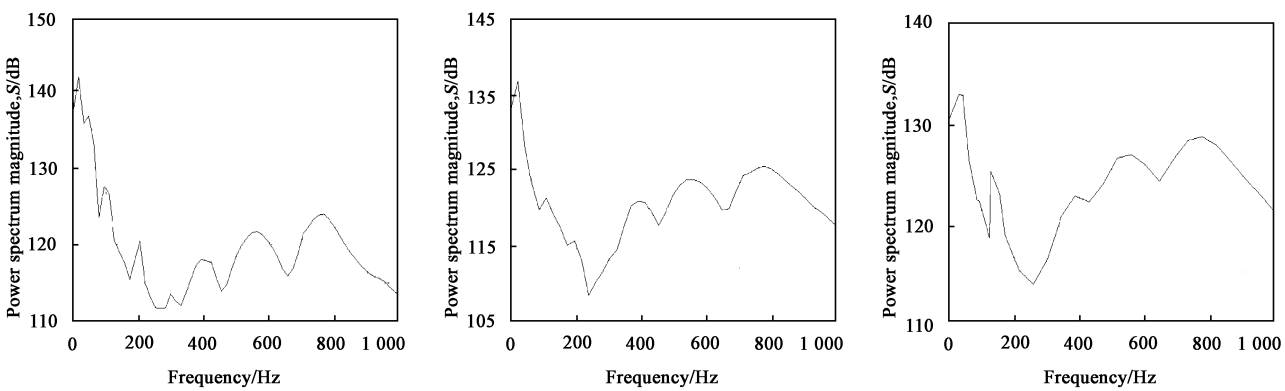
因此,可推知由于销 – 盘系统摩擦自激振动的



(a) n = 60 r/min　　(b) n = 90 r/min　　(c) n = 120 r/min

Fig. 7　Zoom – FFT analysis of frictional vibrations under different test conditions

图 7　不同试验条件下的摩擦振动信号频谱分析



(a) n = 60 r/min　　(b) n = 90 r/min　　(c) n = 120 r/min

Fig. 8　Power spectrum analysis of friction – induced vibrations under different test conditions

图 8　不同试验条件下的摩擦振动信号功率谱分析

周期作用,导致接触区压力的周期变化,从而使压力大的区域发生严重的塑性变形(如点蚀或剥落)和磨损,使压力小的区域发生较为轻微的磨损. 这也就解释了为什么盘试件摩擦接触区域会发生不均匀的磨损和塑性变形,同时解释了盘试件上波状磨耗的波峰和波谷的形成原因,即在压力大的区域,磨损和塑性变形严重形成波谷;反之在压力小的区域形成波峰. 然而,由于摩擦自激振动存在不稳定性,导致盘试件实际接触区域压力波动不稳定,这正好解释了为什么盘试件磨痕上的波磨并非完全均匀地分布在整个磨痕圆周上的原因.

由摩擦自激振动原理[23]可知,当系统发生摩擦自激振动时,法向接触力 F_n 会按摩擦自激振动的频率变化. 根据 Brockley[25]的观点,材料的磨损量:

$$\omega = k(H - C) \tag{1}$$

其中:ω 为单位时间内的磨损量;H 为磨损功率,$H = F\nu = \mu F_n \nu$,式中,F 为摩擦力,ν 为相对滑动速度,μ 为摩擦系数,F_n 为法向接触力;C 为长久摩擦功率;

k 为磨损常数.

根据公式(1)可知,当 F_n 按摩擦自激振动频率变化时,摩擦力 F 也会按摩擦自激振动的频率变化,磨损功率 H 也按摩擦自激振动的频率变化,此时磨损量会按摩擦自激振动的频率作波状变化,从而在盘试件上引起了波状磨耗. 为了验证上述结论,将3种工况下的振动频率代入(2)式.

$$\lambda = \nu T = \frac{v}{f} = \frac{nD\pi}{60f} \tag{2}$$

其中:n 为盘试件转速,D 为盘试件磨痕直径,实测 $D=247.5$ mm,f 为销-盘系统摩擦自激振动频率,v 为盘试件转动的线速度,T 为摩擦自激振动周期,λ 为波磨波长. 计算结果如下:当 $n=60$ r/min 时,$\lambda=51.37$ mm,与实测波长的误差为8.9%;当 $n=90$ r/min 时,$\lambda=55.34$ mm,与实测波长的误差为9%;当 $n=120$ r/min 时,$\lambda_1=50.57$ mm,与实测波长的误差为6.7%,$\lambda_2=36.69$ mm,与实测波长的误差为17.6%. 第三种试验工况的计算结果说明,此工况下系统主要发生两种频率的振动,因而其波状磨痕的波长亦不同. 分析表明:盘试件磨痕的波状磨耗频率与摩擦自激振动频率近似相等.

3 结论

a. 摩擦系统自激振动引起摩擦副接触法向力的周期性波动,在法向力大的区域盘试件磨损和塑性变形严重,形成波谷;而在法向力小的区域盘试件的磨损和塑性变形较轻形成波峰,从而在盘试件的摩擦接触面上形成了波状磨耗.

b. 摩擦自激振动引起摩擦功的波动是盘试件产生波状磨耗的主要原因.

c. 盘试件摩擦接触面上波磨的波长近似等于摩擦自激振动的周期与滑动速度的乘积.

参考文献:

[1] Yoshihiko Satol. Review on rail corrugation studies [J]. Translated by Wang Wenbin. Urban Rapid Rail Transit, 2010, 23(3):2-8.

[2] Yan Z Q, Gu A J, Hei Y J, *et al*. Influences of wheel set vibration on rail abnormal corrugation [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2011, 24(3):22-24(in Chinese)[闫子权,谷爱军,黑勇进,等. 轮对振动对产生钢轨异常波磨的影响[J]. 都市快轨交通, 2011, 24(3):22-24].

[3] Sun G Y, Liu X Y, Wang F G. Rail wear in small radius curves [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1994, 29(1): 65-70(in Chinese)[孙国瑛, 刘学毅, 万复光. 小半径曲线上的钢轨磨耗[J]. 西南交通大学学报, 1994, 29(1):65-70].

[4] Hempelmann K. Short-pitch corrugation on railway rails: a linear model for prediction [J]. VDI Fortschritt-Berichte, 1994.

[5] Tassilly E, Vincent N. A linear model for the corrugation of rails [J]. Journal of Sound and Vibration, 1991:163-178.

[6] Wang G X, Chen G X, Wu P B. Influence of sleeper support stiffness and damping on wear-type rail corrugation on a tight curve[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(2): 99-103(in Chinese)[王国新, 陈光雄, 邬平波. 轨枕支撑刚度和阻尼对小半径曲线钢轨磨耗型波磨影响的有限元研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(2):99-103].

[7] Wang B K, Dong G N, Liu Y H, *et al*. Shakedown analysis of rolling contact surface with short-wavelength corrugation[J]. Tribology, 2004, 24(1):70-73(in Chinese)[王步康, 董光能, 刘永红, 谢友柏. 钢轨短波长波浪形磨损的安定性分析[J]. 摩擦学学报, 2004, 24(1):70-73].

[8] Zhang B, Liu Q Y. Research review on rail corrugation[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2001, 36(5):500-504 (in Chinese)[张波, 刘启跃. 钢轨波浪形磨损的研究分析[J]. 西南交通大学学报, 2001, 36(5):500-504].

[9] Zarembski A M. Types of rail corrugations [J]. Railway Track&Structures, 1989, 85(8):13.

[10] Grassie S L, Kalousek J. Rail corrugation: characteristics, cause and treatments[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1993, 207:57-68.

[11] Liu X Y, Wang P, Wang F G. Formation mechanism of rail corrugation in heavy-haul rail line[J]. Journal of the China Railway Society, 2000, 22(1):98-103(in Chinese)[刘学毅, 王平, 万复光. 重载线路钢轨波形磨耗成因研究[J]. 铁道学报, 2000, 22(1):98-103].

[12] Zhang B, Liu Q Y. Experimental study on rail corrugation[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2003, 25(1):104-108(in Chinese)[张波, 刘启跃. 钢轨波磨的试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2003, 25(1):104-108].

[13] Johnson K L. Development of corrugation on surface in rolling contact[J]. Process Mechanics Engineers, 1975, 189:45-48.

[14] Suda Y. Effects of vibration system and rolling conditions on the development of corrugation[J]. Wear, 1991, 144(4):227-242.

[15] Sato Y, Matsumoto A, Knothe K. Review on rail corrugation studies[J]. Wear, 2002(253):130.

[16] Grassie S L. Rail corrugation: characteristics, causes and treatments[J]. Proc IMechE Part F:J Rail and Rapid Transit, 2009(223):581.

[17] Jin X S, Wen Z F, Wang K Y, *et al* Effect of high-frequency vertical vibration of track on formation and evolution of corrugations[J]. Tsinghua Science and Technology, 2004, 9(3): 274-280.

[18] Grassie S L. Short wavelength rail corrugation: field trials and measuring technology[J]. Wear, 1996, 191: 149-160.

[19] Grassie S L, Elkins J A. Tractive effort, curving and surface

damage of rails, part1: forces exerted on the rails[J]. Wear, 2005, 258(7-8):1 235-1 244.

[20] Chen G X, Zhou Z R, Ouyang H, *et al*. A finite element study on rail corrugation based on saturated creep force-induced self-excited vibration of a wheelset-track system[J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329: 4 643-4 655.

[21] Kurzeck B. Combined friction induced oscillations of wheelset and track during the curving of metros and their influence on corrugation[J]. Wear,2011, 271(1-2): 299-310.

[22] Wen S Z, Huang p. Principles of tribology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008(in Chinese)[温诗铸,黄平. 摩擦学原理[M]. 北京:清华大学出版社,2008].

[23] Ouyang H, Cao Q, Mottershead J E, *et al*. Vibration and squeal of a disc brake: modeling and experimental results[J]. Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2003, 217(10): 867-875.

[24] Li G B, Ren Z Y, Wang H ZH, *et al*. Characteristics extraction of friction vibration signal using harmonic wavelet packet transform[J]. Tribology, 2011, 31(5):452-455(in Chinese)[李国宾, 任宗英, 王宏志, 等. 摩擦振动信号谐波小波包特征提取[J]. 摩擦学学报, 2011, 31(5):452-455].

[25] Brockley A. An investigation of rail corrugation using friction induced vibration theory[J]. Wear, 1988, 128: 99-106.