

# 车轮型面对轮轨黏滑特性影响

王文健, 郭俊, 刘启跃

(西南交通大学 摩擦学研究所, 四川 成都 610031)

**摘要:** 利用非 Hertz 滚动接触理论和数值程序 CONTACT 分析了 LM, LMA, S1002 和 XP55 四种车轮型面与我国 CHN60 钢轨匹配时的轮轨黏滑特性. 数值结果表明: 四种车轮型面与 CHN60 钢轨匹配时的轮轨接触斑黏滑特性明显不同, 车轮型面对轮轨接触斑面积、黏滑区分布、轮轨摩擦功等有较大影响; LM 型面与 CHN60 匹配时的蠕滑区面积和轮轨摩擦功较大, 且接触斑更容易达到饱和状态; LMA 型面与 CHN60 匹配时的黏滑特性较佳, 其接触斑面积、黏着区面积较大; S1002 型面与 CHN60 匹配时的黏滑特性较 XP55 型面要好.

**关键词:** 车轮型面; 轮轨; 黏滑; 滑动量

**中图分类号:** U211.5

**文献标志码:** A

## Effect of Wheel Profile on Wheel-rail Stick-slip Characteristic

WANG Wenjian, GUO Jun, LIU Qiyue

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

**Abstract:** The stick-slip behaviors of wheel-rail between LM, LMA, S1002, XP55 wheel profiles and CHN60 rail in static rolling contact were analyzed according to the rolling contact theory of three-dimensional elastic bodies with non-Hertz form and numerical program of CONTACT. The numerical results indicate that the stick-slip characteristics of wheel-rail between LM, LMA, S1002, XP55 wheel profiles and CHN60 rail are different. The wheel profile has an obvious effect on the area of the contact zone, the stick-slip distributing and the friction work of wheel-rail. The stick-slip characteristic between the LMA wheel profile and the CHN60 rail is better and the areas of the contact zone and stick zone are larger. The stick-slip behaviors between S1002 wheel profile and CHN60 rail are better than those of the XP55 wheel profile.

**Key words:** wheel profile; wheel-rail; stick-slip; slippage

车轮与钢轨是铁路运输工具的关键零部件, 列车的启动、运行和制动都要靠轮轨之间滚动接触摩擦来实现, 因此, 轮轨之间的相互作用行为直接关系到列车的运行品质、安全和经济效益<sup>[1]</sup>. 影响轮轨之间相互作用行为的因素很多, 其中一个比较重要的因素是轮轨踏面的形状. 如果轮轨型面匹配性能差, 则可能导致车辆振动加剧, 引起轮轨损伤. 轮轨型面匹配关系对于机车车辆的蛇行稳定性、曲线通过性能、轮轨表面损伤以及脱轨安全性有着重要的影响, 国内外学者在轮轨型面设计方面做了许多研究<sup>[2-8]</sup>, 设计出了适合于各国国情的不同车轮踏面.

轮轨黏着将直接影响到机车牵引功率的发挥、轮轨表面损伤、列车运行稳定性、列车制动等诸多方面. 轮轨黏着影响因素有: 轮轨型面、接触表面的粗糙度和“第三介质”、材料强度、环境温度、轮轨之间的相对滚动滑动速度<sup>[9-13]</sup>. 轮轨黏着和轮轨接触状态是密切相关的, 如果要使铁路进一步高速化以及实现高加速和高减速化, 就必须充分了解车轮与钢轨间的黏滑特性. 目前, 我国高速铁路铺设钢轨为国产 60 kg · m<sup>-1</sup> 钢轨, 使用的车轮型面有 LM 和 LMA 型国产车轮踏面、欧洲 S1002 型高速车轮踏面, 以及法国国家铁路 SNCF 提出的 XP55 型高速车轮踏面<sup>[14]</sup>. 上述车轮型面与钢轨的匹配性能将影响我国高速列车的运行品质, 其中不同车轮型面的轮轨黏滑特性对高速轮轨关系的运行是至关重要的.

经过多年的发展, 轮轨滚动接触计算已形成了较为完善的三维弹性体非 Hertz 滚动接触理论. 本文利用三维弹性体非 Hertz 滚动接触理论及数值程序 CONTACT 并借助于弹性力学中的 Bossinesq-Cerruti 力一位移公式和 Gauss-9 数值积分方法, 分析了 LM, LMA, S1002 和 XP55 四种车轮踏面与我国 CHN60 钢轨匹配时的轮轨黏滑特性. 数值结果为我国高速铁路车轮型面的优化匹配与选用提供有力

收稿日期: 2012-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(50905148); 四川省应用基础项目(2011JY0129); 牵引动力国家重点实验室开放课题(TPL1204); 中央高校基本科研业务费专项资金(SWJTU12CX037)

第一作者: 王文健(1980—), 男, 副研究员, 工学博士, 主要研究方向为轮轨关系与设计. E-mail: wwj527@163.com

的参考依据。

### 1 轮轨滚动接触计算<sup>[1,15]</sup>

轮对在不同横向位移量和摇头角情况下,左右轮轨之间的接触点位置不同,因此轮轨之间的接触几何参数也发生相应变化.轮对在运动过程中,轮轨接触几何参数的变化不是独立的,它们可以根据轮对中心横向位移量  $y$  和摇头角  $\varphi$  确定.根据文献[1]中轮轨几何参数计算原理,通过 CONTACT 数值程序计算四种车轮踏面与我国  $60\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$  钢轨滚动接触时的轮轨接触几何参数及轮轨法向间隙,以此作为轮轨刚性蠕滑率计算的输入参量,然后把轮轨法向间隙和轮轨刚性蠕滑率结果作为轮轨滚动接触模型的输入参量进行数值计算<sup>[1]</sup>.

目前为止,Kalker 基于弹性力学余能变分原理和数学规划法完成的三维弹性体非 Hertz 滚动接触理论及 CONTACT 数值程序是目前滚动接触理论方面最完善的理论之一.由于轮轨接触斑几何尺寸远小于轮轨的特征尺寸,则距离接触斑较远的轮轨边界条件对接触斑力学行为的影响可以忽略不计.用  $M$  个均匀的矩形网格覆盖轮轨的可能接触斑  $A_c$  (见图 1),并借助于 Bossinesq-Cerruti 力一位移公式,就可得到弹性轮轨三维非 Hertz 滚动接触理论离散模型<sup>[1,16]</sup>.式(1)表示弹性滚动接触轮轨系统余能原理离散数学表达式,属数学规划问题的解.

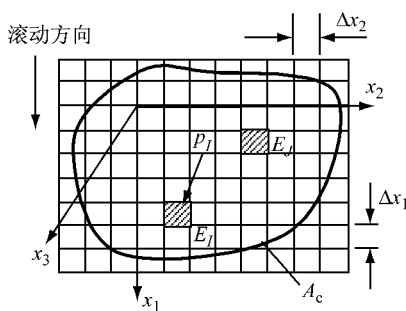


图 1 轮轨可能存在的接触斑

Fig.1 Possible wheel/rail contact patches

$$\begin{cases} \min C^* = \frac{1}{2} p_E A_{EJ} p_{Jj} - [(h_{0j} - \delta) p_{j3} + \\ (t_{j\tau} - u'_{j\tau}) p_{j\tau}] \Delta A \\ p_{j3} \geq 0, |p_{j\tau}| \leq b_j, \forall x \in A_c \\ \Delta A \sum_j^M p_{j3} = t \cos \delta_{L,R} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $p_E$  是  $I$  单元作用力密度,  $p_{Jj}$  是  $J$  单元作用力密度,  $i, j=1, 2, 3$  分别表示接触斑坐标轴  $x_1, x_2$  和

$x_3$  方向上的分量;  $A_{EJ}$  是在矩形单元  $I$  上沿  $x_i$  轴方向上的单位密度分布力引起的单元  $J$  中心处沿  $x_j$  方向上的弹性位移差;  $h_{0j}$  是矩形单元  $J$  中心处轮轨初始接触面之间的法向间隙;  $\delta$  是轮轨沿接触斑法向 ( $x_3$  轴方向) 上弹性挤压量,  $L, R$  表示左右轮轨接触;  $p_{j\tau}$  是  $J$  单元沿  $x_1, x_2$  轴两方向上的分量,  $\tau=1, 2$ ;  $t_{j\tau}$  是  $J$  单元中心处从前时刻到当前时刻的总刚性滑动量;  $u'_{j\tau}$  是轮轨滚动接触过程中前时刻  $J$  单元中心处弹性位移差;  $\Delta A = \Delta x_1 \Delta x_2$  是矩形单元面积,  $\Delta x_1$  和  $\Delta x_2$  分别是矩形单元沿  $x_1$  和  $x_2$  轴方向的长度;  $b_j$  是  $J$  单元上的极限摩擦力;  $M$  为覆盖接触区离散单元总数;  $W$  为轮重, 等于轴重之半.

利用数学规划法求解式(1)中的  $p_{j3}$ , 然后以轮轨接触表面作用力  $p_{j3} (j=1, 2, 3)$  分布作为轮轨的已知边界条件, 利用 Bossinesq-Cerruti 力一位移公式和 Gauss-9 点数值积分法进行关系参数求解<sup>[1,16-17]</sup>.

数值计算中参数取值: 轮重  $W=19 \times 9.8/2=93.1\text{ kN}$ ; 车轮半径  $r_0=420\text{ mm}$ ; 摩擦因数  $f=0.3$ ; 轮轨材料泊松比  $\nu=0.28$ , 切变模量  $G_0=82\text{ GPa}$ ;  $M=441, \Delta x_1=2.0\text{ mm}, \Delta x_2=1.2\text{ mm}$ ; 钢轨为国产  $60\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$  轨; 车轮踏面为 LM, LMA, S1002, XP55 车轮踏面 (见图 2); 横向位移量  $y=0\sim 12\text{ mm}$ , 摇头角  $\varphi=0^\circ$ , 标准轨距  $d=1\,435\text{ mm}$ , 轨底坡  $1:40$ . 数值计算过程中不考虑车轮材料因素的影响.

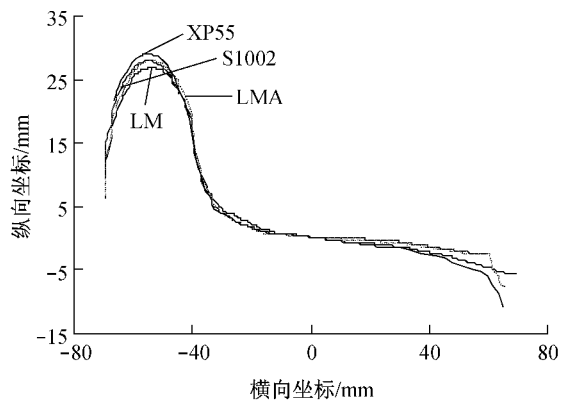


图 2 四种车轮型面对比图

Fig.2 Four kinds of wheel profiles

### 2 结果与分析

图 3 给出了不同车轮型面的接触斑总面积. 从图中可知, 车轮型面对轮轨接触斑面积具有较大影响. 对左接触斑, 随横向位移量的增加, 四种车轮踏面的接触斑面积先缓慢增加然后减小; LMA 型面的

左接触斑面积较大且变化较为平稳, LM 型面的左接触斑面积最小, 虽然 S1002 型面在横向位移量小于 4 mm 时最大, 但横向位移量大于 4 mm 时左接触斑面积急剧减小. 对右接触斑, 随横向位移量变化接触斑面积变化平稳, 但 LM 型面右接触斑面积先增加随后又减小, 这主要是由于 LM 型面的曲率变化较大. 轮轨接触斑面积与接触应力是相关的, 接触斑面积越大, 轮轨应力越小, 因此大的接触斑面积将有利于降低轮轨磨损与疲劳损伤.

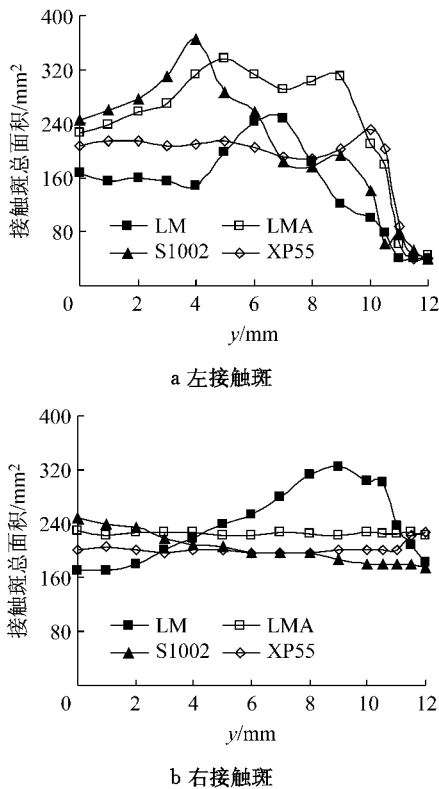


图 3 不同车轮型面的接触斑总面积

Fig. 3 Total area of wheel/rail contact patches of different wheel profiles

轮轨相互作用区分为黏着区和蠕滑区, 铁路运输中机车牵引力是通过轮轨承载的滚动接触界面上的黏着与滑动来传递的, 因此轮轨接触斑的黏滑区分布特性将影响机车的牵引和制动性能. 图 4 和 5 分别给出了不同车轮型面的接触斑黏着区和蠕滑区面积. 从图中可看出, 对左接触斑, 随横向位移量增加, LMA 和 S1002 型面的黏着区面积先增加然后减小, 相比 S1002 型面随横向位移量的变化 LMA 的变化较为缓慢, 且黏着区面积较大; XP55 型面黏着区面积随横向位移量增加而减小, LM 型面黏着区面积当横向位移量大于 2 mm 时为零, 即此时接触斑外为完全蠕滑区. 对右接触斑, 随横向位移量增加, 四种型面的黏着区面积均减小, S1002 型面的黏

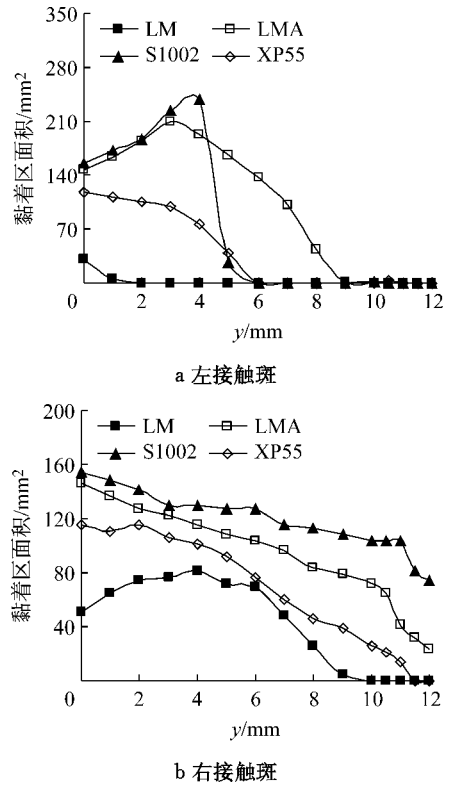


图 4 不同车轮型面的接触斑黏着区面积

Fig. 4 Stick-slip area of wheel/rail contact patches of different wheel profiles

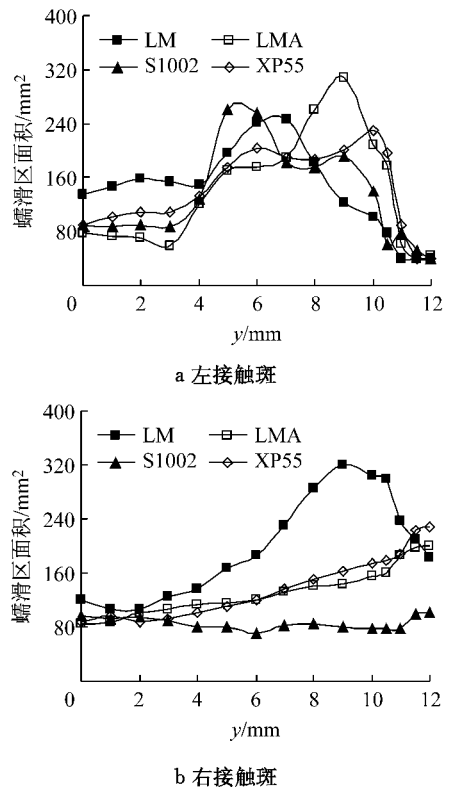


图 5 不同车轮型面的接触斑蠕滑区面积

Fig. 5 Creep area of wheel/rail contact patches of different wheel profiles

着区面积最大,LM型面的最小,LMA和XP55型面的居中。

图5的结果也表明:随横向位移量增加,四种型面的左接触斑蠕滑区面积变化波动较大,在横向位移量小于7 mm时,LM型面的值最大,LMA型面对应的蠕滑区面积最小,横向位移量超过8 mm时,LMA型面的蠕滑区面积最大且随横向位移量增加急剧减小。对右接触斑,随横向位移量增加,四种型面的蠕滑区面积均呈现增大趋势,其中LM型面最大,S1002型面最小,LMA和XP55型面居中且相差不大。

图6计算了不同车轮型面的接触斑蠕滑区与总面积比值。对左接触斑,随横向位移量增加,LM型面的变化为先增加然后不变,此时接触斑为完全蠕滑区,无黏着区存在,即接触斑达到饱和,其他三种型面也表现为先增加然后达到接触斑的饱和其比值保持不变,四种型面之间的差别在于达到饱和时对应的横向位移量不同。对右接触斑,随横向位移量增加,蠕滑区与总面积比值呈现增大趋势,LM型面在横向位移量超过10 mm时达到饱和状态,其他型面此时均没有达到饱和状态,四种型面中S1002变化平稳,这说明此种型面右接触斑的蠕滑区随横向位移量增加变化不明显。由于轮轨接触斑黏滑区的分布对轮轨牵引和制动过程中黏着的有效发挥具有重要的影响作用,因此车轮与钢轨合理匹配对获得合理的黏滑分布具有重要的影响,大的蠕滑区存在较大滑动量,从而运行过程中造成较大的轮轨表面磨损和损伤。

图7给出了 $y=0$ 时不同车轮型面左接触斑黏滑区分布图(箭头代表滑动方向)。从图中可知,横向位移量为零时,四种型面的接触斑形状不尽相同,且接触斑面积也不相同(见图3)。XP55型面的接触斑形状呈扁长型,其他三种型面形状相似。四种接触斑中黏着区(空白代表黏着区)大小也不相同,其中LM型面的最小。同时也可发现,蠕滑区的滑动方向分布也不相同,LMA和S1002型面的方向与运行方向基本相一致,这将有利于轮轨滚动运行,其他两种型面不尽相同。对于四种车轮型面的右接触斑具有相似的变化结果。

接触斑所消耗的摩擦功是衡量接触表面磨损的重要指标之一<sup>[15]</sup>。图8给出了不同车轮型面的接触斑摩擦功。结果表明:对左接触斑,随横向位移量增

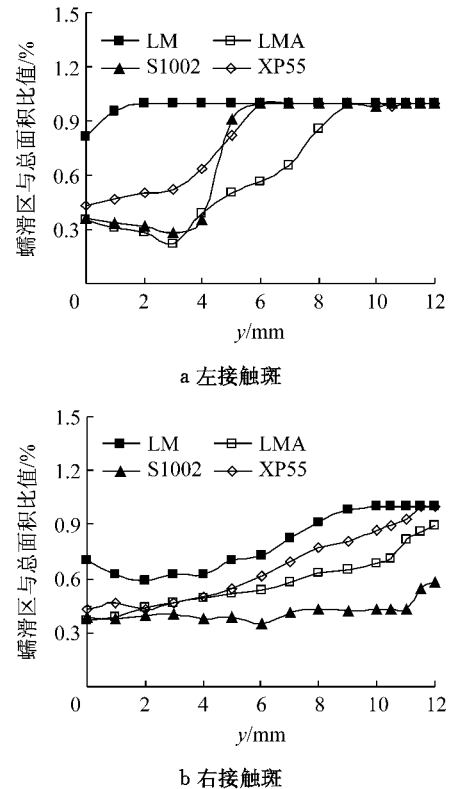


图6 不同车轮型面的接触斑蠕滑区与总面积比值

Fig.6 The ratio of creep area to total area of wheel/rail contact patches of different wheel profiles

加,轮轨摩擦功呈现增大趋势,且LM型面的值最大,LMA型面的值较小。对右接触斑而言,也表现出随横向位移量增加摩擦功增大的变化趋势,四种型面中S1002摩擦功最小,当横向位移量大于7 mm时LM型面的值最大,大的轮轨摩擦功将加剧轮轨表面之间的磨损与损伤,因此应该降低轮轨接触斑的摩擦功,以达到延长轮轨使用寿命的目的。

数值分析结果表明:四种车轮型面与我国CHN60钢轨匹配时的黏滑特性存在明显不同,不同的黏滑区分布对轮轨良好黏着特性的发挥具有重要影响,特别在高速运行情况下具有更为重要的影响。由于S1002,XP55型面为国外引进的高速车轮型面,LM,LMA为国产车轮型面,因此它们与我国CHN60钢轨匹配时会产生一定的差异,为了适应我国高速列车运行,需要设计更为合理的轮轨型面匹配以获得更佳的轮轨黏着特性。上述对静态下四种型面与CHN60钢轨匹配时的黏滑特性进行了研究,由于轮轨运行过程中动态匹配效果更能反映轮轨关系性能,因此四种车轮型面与CHN60钢轨匹配时的动态黏滑特性需通过试验手段进一步深入研究。

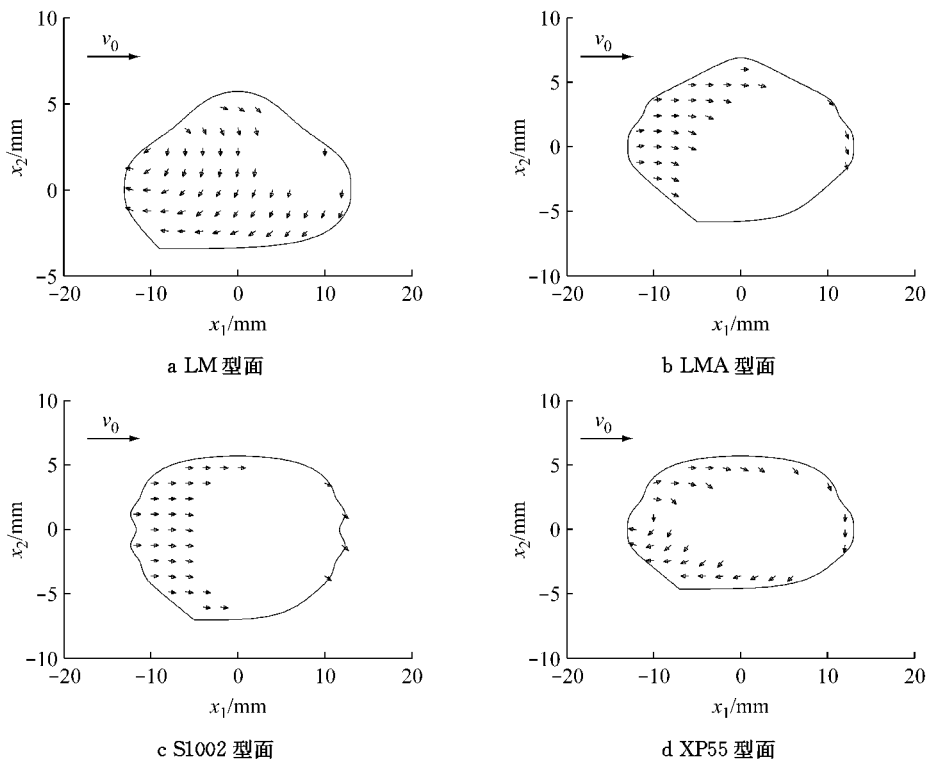


图 7 不同车轮型面左接触斑黏滑区分布 ( $y=0$ )

Fig. 7 The stick-slip distribution of the left wheel/rail of different wheel profiles ( $y=0$ )

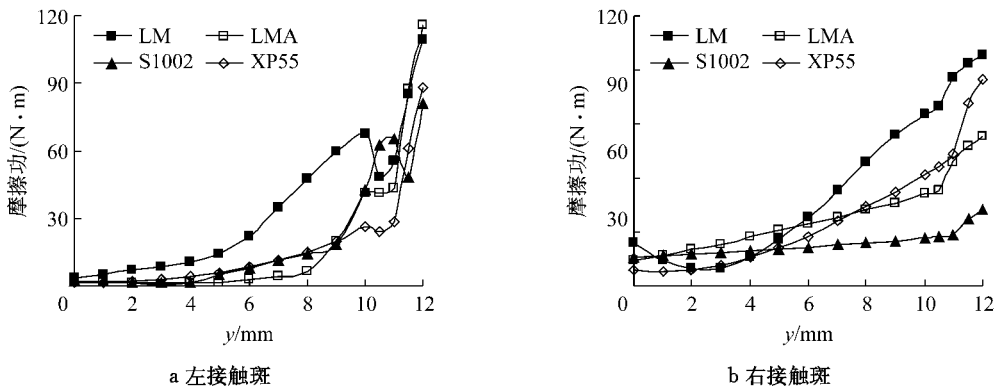


图 8 不同车轮型面的接触斑摩擦功

Fig. 8 Friction work of wheel-rail contact patches of different wheel profiles

### 3 结论

(1) 四种车轮型面与我国 CHN60 钢轨匹配时的轮轨接触斑黏滑特性明显不同, 车轮型面对接触斑面积、黏滑区的分布、轮轨摩擦功等均有较大影响。

(2) 从轮轨接触斑黏滑区分布可知, LM 型面的蠕滑区面积和摩擦功较大, 且容易达到饱和状态; LMA 型面与 CHN60 钢轨匹配性能较好, S1002 型面匹配性能较 XP55 要好。

#### 参考文献:

[1] 金学松, 刘启跃. 轮轨摩擦学[M]. 北京: 中国铁道出版社,

2004: 1-90.

JIN Xuesong, LIU Qiyue. The tribology of wheel/rail [M]. Beijing: China Railway Press, 2004: 1-90.

[2] E. E. Magel, J. Kalousek. The application of contact mechanics to rail profile design and rail grinding [J]. *Wear*, 2002, 253: 308.

[3] I. Y. Shevtsov, V. L. Markine, C. Esveld. Optimal design of wheel profile for railway vehicles [J]. *Wear*, 2005, 258: 1022.

[4] I. Haque, D. A. Latimer, E. H. Law. Computer-aided wheel profile design for railway vehicles [J]. *ASME Journal of Engineering for Industry*, 1989, 111: 288.

[5] R. E. Smith, J. Kalousek. A design methodology for wheel and rail profiles for use on steered railway vehicles [J]. *Wear*, 1991, 144: 329.

[6] Jahed H, Farshi B, Eshraghi M A, et al. A numerical optimization technique for design of wheel profiles [J]. *Wear*,

- 2008, 264: 1.
- [7] 柳拥军. 高速轮轨接触几何及高速轮轨几何型面优化的研究[D]. 北京:铁道科学研究院,1999.  
LIU Yongjun. Study on contact geometry and geometric profile optimization of high-speed wheel-rail [D]. Beijing, China Academy of Railway Sciences, 1999.
- [8] 张剑,温泽峰,孙丽萍,等. 基于钢轨型面扩展法的车轮型面设计[J]. 机械工程学报, 2008, 44(3): 44.  
ZHANG Jian, WEN Zefeng, SUN Liping, et al. Wheel profile design based on rail profile expansion method [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(3): 44.
- [9] 沈志云,张卫华,金学松,等. 轮轨接触力学研究的最新进展[J]. 中国铁道科学, 2001, 22(2): 1.  
SHEN Zhiyun, ZHANG Weihua, JIN Xuesong, et al. Advances in wheel-rail contact mechanics [J]. China Railway Science, 2001, 22(2): 1.
- [10] Olofsson U, Sundvall K. Influence of leaf, humidity and applied lubrication on friction in the wheel-rail contact; pin-on-disc experiments [J]. Journal of Rail and Rapid Transit, 2004, 218: 1309.
- [11] Wang W J, Shen P, Song J H, et al. Experimental study on adhesion behavior of wheel/rail under dry and water conditions [J]. Wear, 2011, 271: 2699.
- [12] Lewis R, Gallardo-Hernandez E A, Hilton T, et al. Effect of oil and water mixtures on adhesion in the wheel-rail contact [J]. Journal of Rail and Rapid Transit, Proceedings of the IMechE Part F, 2009, 223(1): 275.
- [13] 覃为刚,唐怀平. 轮轨水介质黏着分析[J]. 西南交通大学学报, 2000, 35(5): 509.  
QIN Weigang, TANG Huaiping. Adhesion analysis of wheel and rail with water medium [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2000, 35(5): 509.
- [14] 肖广文,肖新标,温泽峰,等. 高速客车轮对动力学性能的比较[J]. 铁道学报, 2008, 30(6): 29.  
XIAO Guangwen, XIAO Xinbiao, WEN Zefeng, et al. Comparison of dynamic behaviors of wheelsets of high-speed passenger car [J]. Journal of the China Railway Society, 2008, 30(6): 29.
- [15] 温泽峰,金学松,刘兴奇. 两种型面轮轨滚动接触蠕滑率和摩擦功[J]. 摩擦学学报, 2001, 21(4): 288.  
WEN Zefeng, JIN Xuesong, LIU Xingqi. Creepages and friction work of wheelset and track with two type profiles in rolling contact [J]. Tribology, 2001, 21(4): 288.
- [16] 金学松,温泽峰,张卫华. 轮对运动状态对轮轨滚动接触应力的影响[J]. 工程力学, 2004, 21(2): 165.  
JIN Xuesong, WEN Zefeng, ZHANG Weihua. Effect of wheelset motions on the rolling contact stresses of wheel and rail [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(2): 165.
- [17] 徐芝纶. 弹性力学简明教程[M]. 北京:人民教育出版社, 1979: 1-150.  
XU Zhilun. A concise course of elastic mechanics [M]. Beijing: People's Education Press, 1979: 1-150.
- ~~~~~
- (上接第 839 页)
- [5] 伍建国,王峰. 城市道路交通数据采集系统检测器优化布点研究[J]. 公路交通科技, 2004, 21(2): 88.  
WU Jianguo, WANG Feng. Study on optimal layout of traffic detector for traffic data collection system in urban area [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development. 2004, 21(2): 88.
- [6] 暨育雄. 城市路网交通评价分析方法研究[D]. 上海:同济大学, 2003.  
JI Yuxiong. Evaluation Method of the Urban Road Network [D]. Shanghai: Tongji University, 2003.
- [7] 邵敏华,邵显智,孙立军. 城市道路交通流量检测线圈的布置方案探讨[J]. 长沙交通学院学报, 2006, 22(3): 49.  
SHAO Minhua, SHAO Xianzhi, SUN Lijun. Research on the arrangement method of the traffic volume detectors on urban streets [J]. Journal of Changsha Communication University. 2006, 22(3): 49.
- [8] SHAO Minhua, SUN Lijun. Arrangement method of volume detectors over urban streets network [C/CD]// Proceedings of the 10th International Conference on the Application of Advanced Technologies in Transportation, Athens: AATT, 2008.
- [9] 邵敏华,孙立军. 地面道路交通评价“封闭环”分析模型研究[R]. 上海:同济大学, 2007.  
SHAO Minhua, SUN Lijun. Closing-ring model for sensor arrangement over urban street network [R]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [10] 耿媛婧. 城市局域路网交通分配方法研究[D]. 上海:同济大学, 2007.  
GENG Yuanjing. Traffic assignment over urban local road network [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [11] Taussky O. Bounds for characteristic roots of matrices [J]. Duke Math, 1948(15): 1043.
- [12] 石钟慈,王伯英. 某些类矩阵的行列式、特征值以及条件数界限的若干估计[J]. 数学学报, 1965, 15(3): 326.  
SHI Zhongci, WANG Boying. Several estimations of the conditional limitations for the characteristics and determinants of some kinds of matrices [J]. Acta Mathematica Sinica, 1965, 15(3): 326.