DOI: 10.3901/JME.2019.10.151

不同工况下轮轨黏着-蠕滑曲线特性^{*}

师陆冰 李群 郭俊 王文健 刘启跃

(西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031)

摘要: 在轮轨滚动接触模拟试验机上采用均匀连续变化差的试验方法,进行不同工况和不同法向力条件下的轮轨黏着-蠕滑曲线试验,并利用两种数值拟合方法研究不同试验条件下的黏着-蠕滑曲线峰值点位置和初始斜率。结果表明:不同工况下的轮轨黏着-蠕滑曲线有较大差异,与干态相比,水、油工况下不仅导致黏着系数明显降低,还会导致峰值点发生明显左移;水、油工况下撒砂可有效提高黏着系数并使峰值点位置右移;干态下法向力增加对黏着系数和峰值点位置影响较小,但会导致曲线初始阶段斜率的下降;水、油工况下法向力的增加均会使黏着峰值点位置左移,并在水态下导致黏着系数的明显下降;撒砂后法向力对黏着系数及峰值点位置的影响较小,但曲线初始阶段斜率随法向力的增加呈下降趋势。通过试验和数值拟合获得轮轨黏着-蠕滑曲线特征参数的方法可为后续轮轨黏着研究提供参考。

关键词: 轮轨黏着; 黏着-蠕滑曲线; 表面工况; 法向力

中图分类号: TH117

Adhesion-creep Curve Characteristics of Wheel/Rail under Various Conditions

SHI Lubing LI Qun GUO Jun WANG Wenjian LIU Qiyue

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Abstract: The wheel/rail adhesion-creep curves under different surface conditions and normal forces are measured on a wheel/rail rolling contact apparatus through a continuous varying creep ratio test method. The peak positions and initial slopes of the measured adhesion-creep curves in different tests are investigated through two numerical fitting strategies. The results indicate that there are big differences of the adhesion-creep curves under different conditions. Compared to the dry condition, water and oil conditions not only drop the adhesion coefficient obviously but also move the peak points to the left of the curves. Sanding under water or oil condition could efficiently improve the degraded adhesion coefficient and lead the right movement of the peaks in the curves. Under dry condition, the increase of normal force affects little on the adhesion coefficient and peak position, but could descend the initial slopes of the adhesion-creep curves. Under water and oil conditions, the increase of normal force leads the left movement of the peaks in the curves. In addition, significant decrease of adhesion coefficient could also be observed with the increased normal forces under water condition. After sanding, both the adhesion coefficient and the peak position are less affect by the increased normal force, while the initial slopes of the adhesion-creep curves are reduced obviously. The combination of this experiment and numerical strategies to achieve the character parameters of the adhesion-creep curves could make good references for future studies.

Key words: wheel/rail adhesion; adhesion-creep curve; surface conditions; normal force

0 前言

轮轨黏着-蠕滑曲线是描述轮轨滚动接触过程中黏着力或黏着系数与蠕滑率之间的关系曲线,是

机车动力学、轮轨关系等研究中最为基础的问题,也是机车动力设计和黏着控制的理论基础。从最早的 Cater 二维滚动接触理论^[1],到后来的 Vermeulen-Johnson 理论^[2]、沈氏理论^[3]、Kalker 简化理论^[4]及完全理论^[5],轮轨黏着-蠕滑特性在理论研究方面取得了长足的进步。目前基于 Kalker 简化理论的快速数值算法 Fastsim^[6]和 Polach 数值模型^[7]在机车动力学研究中也已经得到了广泛的应用。在试验研究方

^{*} 国家自然科学基金(51775455)、四川省重点研发计划(2018GZ0368)和西南交通大学优秀博士论文培育资助项目。20180602 收到初稿,20181214 收到修改稿

面,日本 NAGASE^[8]利用专门设计的转向架在线路上研究了晴天与雨天的轮轨黏着-蠕滑曲线。FLETCHER 等^[9]利用小比例双轮对滚试验机得到了干态、水态、油态、树叶、润滑脂等多种工况下的轮轨黏着-蠕滑曲线。张卫华等^[10-11]在 1:1 的实物轮对模型上研究了水、油工况下的轮轨黏着-蠕滑特性的影响。王文健等^[12-14]利用 JD-1 轮轨模拟试验机系统开展了干态、水态、油态、水油混合等工况下不同速度、轴重等参数对轮轨黏着-蠕滑特性的影响研究。

轮轨黏着-蠕滑曲线上峰值点位置及曲线初始阶段斜率作为描述轮轨黏着-蠕滑特性的特征参数,是机车轮轨黏着-蠕滑数值模型^[15-16]的主要输入量,代表轮轨界面上的最大可利用黏着系数水平和接触斑内的切向力分布,具有十分重要的研究意义。以往试验研究中获得的轮轨黏着-蠕滑曲线大多是通过多次试验测得若干个蠕滑率下的黏着系数的方式获得,由于所选取的蠕滑率间隔较大,因此难以对峰值点位置和初始阶段斜率进行精确的对比研究。

为更深入研究不同工况下轮轨黏着-蠕滑特性,本文利用一种新的轮轨黏着试验方法,测定了几种常见表面工况及轴重下的轮轨黏着-蠕滑特性曲线,并利用数值拟合的方法对比研究了表面工况及轴重对黏着蠕滑曲线峰值点位置和初始阶段斜率的影响。研究结果可为轮轨黏着-蠕滑理论研究和机车黏着控制设计提供必要的的数据支撑和理论验证,分析方法也可为后续研究提供参考。

1 材料和方法

试验在轮轨滚动接触疲劳试验机上进行,如图 1 所示。轮轨试样分别由两个独立的伺服电动机驱动,转速范围:100~2 000 r/min,精度 0.1 r/min。试样法向载荷通过液压加载获得,加载范围:0~30 kN,精度 0.1 N。试验过程中,法向力和摩擦力矩分别通过液压缸上的薄膜式压力传感器和下试样主轴连接的扭矩传感器测得,并通过测控系统获得实时的黏着系数。

图 1 试验机结构简图

试验中上试样为车轮试样,取自 AAR-D 级车轮踏面;下试样为钢轨试样,取自 PD3 热轧钢轨轨头。试样直径 52 mm,取样位置和试样结构如图 2 所示。试验前试样表面粗糙度 R_a 约 0.3 μm ,车轮和钢轨试样表面硬度分别为 345、310 HV_{0.5}。每组试验前均使用无水乙醇在超声波清洗仪中清洗试样 20 分钟,确保试样表面无油污、氧化物等污染。

图 2 轮轨试样取样位置及结构

不同于以往通过多个不同滑差下轮轨黏着试验来获得某一工况下轮轨黏着-蠕滑曲线的方法,试验采用一种单组变滑差方法。通过预先设定的控制程序,当上、下试样间的转速及法向力加载至目标值后,程序控制模拟轮试样的驱动电机按照预设的时间步和增量对转速进行微调,实现试样间蠕滑率的均匀递增。蠕滑率变化过程中,垂向载荷保持不变,轮轨间切向力随蠕滑率的增加而迅速增加并最终趋于稳定,如图 3 所示。试验过程中,钢轨试样转速保持在 500 r/min,通过改变车轮试样的转速来控制轮轨蠕滑率,蠕滑率变化范围为 0~5%,步长为 0.1%。蠕滑率均匀、缓慢地变化可以保证每个蠕滑率下试样都处于稳态滚动状态,避免动力学因素的干扰。整个试验过程持续 20 min,可获得一条完整

图 3 一次试验中的参数变化过程

的黏着-蠕滑曲线。试验分别在干态、水态、油态和撒砂工况下进行,具体试验参数如表1所示。试验中选择2.3、3.6和5.1 kN分别模拟800、1 000和1 200 MPa接触应力下的轮轨接触。

表1 试验参数

编号	工况	法向力/kN	其他
1	干态	2.3, 3.6, 5.1	湿度: 55% RH、95% RH
2	水态	2.3, 3.6, 5.1	水量: 20 mL/min
3	水态撒砂	2.3, 3.6, 5.1	油量: 5 mL/min
4	油态	2.3, 3.6, 5.1	砂子粒径: 0.6~1 mm
5	油态撒砂	2.3, 3.6, 5.1	撒砂量: 10 g/min

2 结果与讨论

2.1 干态下轮轨黏着-蠕滑曲线

图4为干态不同法向力下轮轨黏着-蠕滑曲线。干态下轮轨黏着系数随法向力的增加有轻微的下降趋势。三个不同法向力下的轮轨黏着-蠕滑曲线峰值点位置均在1%~2%范围内,但过了峰值点之后三条曲线的变化趋势不同:2.3 kN法向力下的黏着-蠕滑曲线仍有轻微的上升趋势;3.6 kN法向力下的曲线逐渐趋于平稳;5.1 kN的曲线则在峰值点之后出现了较为明显的下降趋势。这是因为干态下随着法向力的增加,轮轨界面在大蠕滑率阶段的温升效应更为明显,而温升导致的材料特性改变和摩擦界面氧化加剧均会导致轮轨间黏着系数的降低^[15]。

图4 干态不同法向力下轮轨黏着-蠕滑曲线

环境湿度的增加会加剧轮轨滚动接触过程中摩擦界面间的氧化作用,且空气中的水分子极易吸附在试样表面,并与表面氧化物形成第三体介质层^[16],导致黏着系数的明显降低,如图5所示。随着试样间蠕滑率的增加,接触界面间的剪切作用逐渐增强,试样表面的第三体介质层逐渐被去除,95%RH条件下的轮轨黏着-蠕滑曲线在大蠕滑率下

(超过2%)仍具有明显的上升趋势。

图5 不同湿度下轮轨黏着-蠕滑曲线(干态, 2.3 kN)

2.2 水、油工况下轮轨黏着-蠕滑曲线

水和油是铁路上最为常见的污染物,当出现在轮轨接触界面中时极易导致低黏着事故的发生。图6为水介质和油介质工况下的轮轨黏着-蠕滑曲线,可以看出,水、油工况可分别使黏着系数降至0.25和0.05以下。水介质工况下,轮轨接触界面处于边

(a) 水态

(b) 油态

图6 水、油工况下轮轨黏着-蠕滑曲线

界润滑状态,法向载荷由水膜和金属微凸体共同承载。由于水膜的抗剪切系数远小于金属微凸体间的摩擦因数,因此轮轨黏着主要由承载载荷的金属微凸体提供。法向力的增加会使金属微凸体承载载荷的占比减小,使黏着工况进一步恶化^[17]。

油介质工况下轮轨界面处于弹流润滑状态,其润滑膜厚度要比介质工况下大一个数量级,油膜承载了更多的法向载荷,因此油介质工况下轮轨黏着系数远低于水介质工况。此外,由于黏着系数受油膜厚度的影响较大,法向力的增加会使油膜厚度减小,轮轨界面间有更多的微凸体发生接触,因此使黏着系数出现轻微的增加趋势。

水、油工况下黏着-蠕滑曲线的峰值点位置与干态下相比均明显左移。干态下正常峰值点位置在 1%~2% 范围内(图 4),而水态和油态下峰值点位置明显左移至 0~1% 以内(图 6)。低黏着工况下,当机车黏着控制系统检测到轮对发生空转或打滑时(蠕滑率过大)会通过迅速遏制牵引电动机输出功率来调整轮对蠕滑率重新回到峰值点附近,因此水、油工况下黏着峰值点的左移会严重削弱机车牵引效率的发挥。

2.3 撒砂工况下轮轨黏着蠕滑曲线

铁路上常利用撒砂来克服轮轨界面低黏着问题。以往研究中已证明了在特定蠕滑率范围内撒砂可有效提高轮轨间黏着系数^[18-20],但关于撒砂工况下的黏着-蠕滑特性曲线的研究目前还没有。研究蠕滑率和法向力等参数对撒砂增黏效果的影响,以及撒砂工况下的轮轨黏着蠕滑曲线峰值点位置有利于铁路上撒砂的合理运用。

水、油工况下撒砂轮轨黏着-蠕滑特性曲线如图 7 所示。水态下撒砂,黏着-蠕滑曲线与水态下相比有明显提升,且法向力越大,提升效果越为明显。5.1 kN 法向力下最大黏着系数可由水态下 0.15 提高至接近 0.25 以上,2.3 kN 法向力下黏着系数最大可提升至接近 0.3(图 6a、7a);油介质工况下撒砂,不同法向力条件下黏着-蠕滑曲线几乎无差异,但与油态下相比均有明显提升,最大黏着系数可由 0.06 以下提升至 0.1 左右(图 6b、7b)。此外,与图 6 结果对比还可以看出水、油工况下撒砂,峰值点位置有所右移,且法向力对黏着-蠕滑曲线影响减弱。

2.4 黏着-蠕滑曲线特征参数分析

由于试验获得的轮轨黏着-蠕滑曲线不能直接判断其峰值点位置及曲线初始阶段斜率,因此尝试借助 Cater 二维滚动接触模型和 Gelinck 线接触弹-塑性转变牵引曲线模型对试验所得到的黏着-

蠕滑曲线进行数值拟合,然后反求曲线上的特征参数。

图 7 撒砂工况下轮轨黏着-蠕滑曲线

Cater 二维滚动接触模型为^[1]

$$\frac{\mu}{\mu_c} = \begin{cases} \frac{2R}{\mu_c a} s - \frac{1}{4} \left(\frac{2R}{\mu_c a} \right) s^2 & \frac{2R}{\mu_c a} \leq 2 \\ 1 & \frac{2R}{\mu_c a} > 2 \end{cases} \quad (1)$$

式中, μ 为黏着系数, μ_c 为最大可利用黏着系数, s 为纵向蠕滑率, R 为当量曲率半径, a 为接触半宽。按照上述模型对试验数据进行量纲一化后,如图 8a 所示,可以看出试验得到的黏着蠕滑曲线与 Cater 二维滚动接触理论存在较大偏差。对偏差范围(图 8a 中灰色区域)内数据按照该二次多项式重新拟合可得到与实验数据拟合度较高的初始阶段黏着-蠕滑曲线,然后通过计算该曲线在所拟合范围内的曲线顶点并重新常量化,可近似获得该工况下的黏着-蠕滑曲线峰值点位置 s_0 。

Gelinck 模型为^[21]

$$\mu = \mu_c \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{\pi s}{2 s_c}\right) \quad (2)$$

式中, s_c 为弹性向塑性转变的临界蠕滑率。将式中 μ_c 和 s_c 分别当作待定系数对试验测得的黏着-蠕滑曲线进行拟合, 可得到各试验条件下的 μ_c 和 s_c 。需要注意的是利用该方法得到的临界蠕滑率 s_c 并非真正意义上的峰值点位置, 但通过对式(2)求导可知, μ_c 与 s_c 之间的比值为该曲线在蠕滑率 s 趋紧于 0 时的导数(图 8b), 因此可直接用拟合所得到的待定系数来求黏着-蠕滑曲线初始阶段的曲线斜率。

(a) Cater 二维滚动接触理论拟合

(b) Gelink 线接触模型拟合

图 8 两种寻找黏着-蠕滑曲线峰值点方法

利用以上两种方法得到对实验测得的不同工况下的黏着-蠕滑曲线拟合获得的曲线峰值点和初始斜率等特征参数如图 9 所示, 不同表面工况对黏着-蠕滑曲线的峰值点位置和初始阶段斜率影响较大。与干态相比, 水、油工况下峰值点位置左移, 且黏着系数较低, 尤其是油态下, 黏着系数降至 0.05 以下, 远低于机车正常运行所需的黏着系数范围, 且其峰值点位置左移至 0.35%~0.65% 范围内。撒砂可有效提高轮轨黏着系数, 且使峰值点位置右移, 有助于避免低黏着工况下轮对空转/滑行的发生, 提高机车牵引效率。

(a) Cater 二维滚动接触理论拟合结果

(b) Gelink 线接触模型拟合结果

图 9 利用两种方法获得的轮轨黏着-蠕滑曲线特征参数

法向力的影响在不同工况下不同, 干态下, 法向力的增加对峰值点位置基本无影响, 但在水、油介质下法向力的增加会使峰值点左移, 撒砂后法向力对峰值点位置的影响减小, 随法向力的增加轻微右移。对比图 9b 中不同工况下黏着-蠕滑曲线初始阶段斜率, 则可以看出, 水态下的初始斜率最大, 干态下次之, 油态下的最小, 而水、油工况下撒砂的初始斜率较为接近, 处于干态和油态之间。

需要说明的是, 尽管利用以上两种方法可以合理地研究轮轨黏着-蠕滑曲线峰值点位置, 尽可能地避免了人为判断的主观性及繁琐工作, 但使用 Cater 二维滚动接触理论进行拟合求解时, 在选择求解域时仍会带有一定的主观判断, 只能通过多次调整求解域寻求最优解的方式降低干扰; 而在使用 Gelink 线接触模型拟合求解时, 针对图 6a 中曲线过峰值点后急剧下降的情况, 拟合精度往往较差, R^2 降至 0.9 以下。因此, 后续研究中仍需要寻找更为合理的方法, 并通过轮轨界面接触理论的研究来解释峰值点位置偏移及初始阶段斜率改变的产生机制。

3 结论

进行了干态、水、油和撒砂工况下的轮轨黏着-蠕滑曲线研究, 主要得到以下几点结论。

(1) 利用单组变滑差的黏着可得到连续、均匀的轮轨黏着-蠕滑曲线, 进行黏着系数和曲线特征参数的对比研究。

(2) 利用 Cater 二维滚动接触模型和 Gelinck 线接触模型对试验获得的黏着蠕滑曲线进行数值拟合可分别获得黏着蠕滑曲线的峰值点位置和初始曲线斜率。

(3) 轮轨接触表面工况及法向力不仅直接影响黏着系数大小, 而且会导致峰值点位置及初始曲线斜率发生改变。其中表面工况对黏着-蠕滑曲线特征影响较大, 法向力的影响在干态和水态下较为明显。

参 考 文 献

- [1] CARTER F W. On the action of a locomotive driving wheel[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1926, 112(760): 151-157.
- [2] VERMEULEN P J, JOHNSON K L. Contact of nonspherical elastic bodies transmitting tangential forces[J]. Journal of Applied Mechanics, 1964, 31(2): 338-340.
- [3] SHEN Z, LI Z. A fast non-steady state creep force model based on the simplified theory[J]. Wear, 1996, 191(1-2): 242-244.
- [4] KALKER J J. The simplified theory of contact[M]. Dordrecht: Springer, 1990.
- [5] KALKER J J, JOHNSON K. Three-dimensional elastic bodies in rolling contact[M]. Dordrecht: Springer, 1990.
- [6] KALKER J J. A fast algorithm for the simplified theory of rolling contact[J]. Vehicle System Dynamics, 1982, 11(1): 1-13.
- [7] POLACH O. Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit[J]. Wear, 2005, 258(7-8): 992-1000.
- [8] NAGASE K. A study of adhesion between the rails and running wheels on main lines; Results of investigations by slipping adhesion test bogie[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 1989, 203(16): 33-43.
- [9] FLETCHER D I, LEWIS S. Creep curve measurement to support wear and adhesion modelling, using a continuously variable creep twin disc machine[J]. Wear, 2013, 298-299(1): 57-65.
- [10] ZHANG W H, CHEN J Z, WU X J, et al. Wheel/rail adhesion and analysis by using full scale roller rig[J]. Wear, 2002, 253(1-2): 82-88.
- [11] JIN X S, ZHANG W H, ZENG J, et al. Adhesion experiment on a wheel/rail system and its numerical analysis[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2004, 218(4): 293-304.
- [12] WANG W J, WANG H, WANG H Y, et al. Sub-scale simulation and measurement of railroad wheel/rail adhesion under dry and wet conditions[J]. Wear, 2013, 302(1-2): 1461-1467.
- [13] 王文健, 郭火明, 刘启跃, 等. 水油介质下研磨子对轮轨增黏与损伤影响[J]. 机械工程学报, 2015, 51(5): 71-75.
WANG Wenjian, GUO Huoming, LIU Qiyue, et al. Effect of abrasive block on improving adhesion and damage of wheel/rail under the water and oil conditions[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(5): 71-75.
- [14] 王文健, 郭俊, 刘启跃. 不同介质作用下轮轨粘着特性研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(7): 100-104
WANG Wenjian, GUO Jun, LIU Qiyue. Study on adhesion characteristic of wheel/rail under different medium conditions[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(7): 100-104.
- [15] VOLLEBREGT E A H. Numerical modeling of measured railway creep versus creep-force curves with CONTACT[J]. Wear, 2013, 314(1-2): 87-95.
- [16] FLETCHER D I. A new two-dimensional model of rolling-sliding contact creep curves for a range of lubrication types[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering tribology, 2012, 227(6): 529-537.
- [17] ZHU Y, LYU Y, OLOFSSON U. Mapping the friction between railway wheels and rails focusing on environmental conditions[J]. Wear, 2015, 324-325: 122-128.
- [18] CHEN H, ISHIDA M, NAMURA A, et al. Estimation of wheel/rail adhesion coefficient under wet condition with measured boundary friction coefficient and real contact area[J]. Wear, 2011, 271(1-2): 32-39.
- [19] WANG W J, LIU T F, WANG H Y, et al. Influence of friction modifiers on improving adhesion and surface damage of wheel/rail under low adhesion conditions[J]. Tribology International, 2014, 75: 16-23.
- [20] 申鹏, 王文健, 张鸿斐, 等. 撒砂对轮轨粘着特性的影响[J]. 机械工程学报, 2010, 46(16): 74-78
SHEN Peng, WANG Wenjian, ZHANG Hongfei, et al.

Effect of spraying sand on adhesion characteristic of wheel/rail[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(16): 74-78.

- [21] GELINCK ERM. Mixed lubrication of line contacts[D]. Enschede: University of Twente, 1999.

作者简介：师陆冰，男，1991 年出生，博士研究生。主要研究方向为轮轨黏着与增黏。

E-mail: shilubing91@163.com

王文健(通信作者)，男，1980 年出生，博士，研究员，博士研究生导师。主要研究方向为轨道交通轮轨关系与服役行为。

E-mail: wwj527@163.com