文章编号:1005-0523(2013)05-0024-06

高速列车轮轨材料滑动摩擦实验研究

肖 乾[1],穆 明[2],周新建[1],梁 军[3]

(1. 华东交通大学载运工具与装备教育部重点实验室,江西 南昌 330013;2. 东南大学机械工程学院,江苏 南京 211189;3. 中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑国家重点实验室,甘肃 兰州 730000)

摘要:在高速列车实际运行中,轮轨之间会发生剧烈摩擦。轮轨之间的摩擦不仅存在滚动摩擦运动,也存在相对横向和径向滑动摩擦运动,特别在小曲线弯道时不能忽视滑动摩擦产生的破坏作用。文章以动车轮轨材料LM1奥贝体钢为摩擦试验样块做研究对象,使用往复式球-盘试验机通过考察不同条件下的滑动摩擦实验研究,进行了不同载荷,不同温度,不同滑动速度下的轮轨材料摩擦实验,然后使用扫描电子显微镜(SEM),非接触三维表面轮廓仪(3D-MAP),X射线衍射(XRD),X射线光电子能谱(XPS)等实验表征设备来解释摩擦机理。

关键词:滑动摩擦;摩擦系数;高速列车;轮轨材料

中图分类号:U211.5 **文献标志码**:A

上世纪80年代,前苏联著名摩擦学专家科拉格利斯基就通过大量的试验发现滑动速度会使表面产生温升、变形、化学变化和磨损,因而明显地影响摩擦系数[1]。摩擦系数是轮轨滚动接触理论中非常重要的组成部分,研究摩擦系数的最终目的还是为了更加精确的分析轮轨滚动接触所产生的列车运行品质和安全性问题,主要内容主要包括轮轨间不同载荷,不同温度,相对速度,第三介质对摩擦系数的影响等问题。因此国内外学者对轮轨摩擦系数进行了多项研究,西南交通大学张卫华教授系统介绍了在滚动振动试验台上所进行的1∶1实物模型高速轮轨黏着机理试验情况,最后通过拟合得到轮轨接触函数型摩擦系数并进行计算[2]。刘启跃教授通过试验方法研究了两个圆盘试样的滚动-滑动状态下的摩擦系数,得到了两个重要结论:① 滚动体摩擦系数分为静摩擦系数、动摩擦系数和过渡摩擦系数[3];② 滚动体磨耗与切向摩擦力以及滚动循环数密切相关。李正军[4]在UTM摩擦试验机上,采用销-盘滑动磨损的实验方法分别对马钢生产的重载车轮钢,日本标准车轮钢和欧洲标准车轮钢,在不同湿度环境条件下,以1 $m\cdot s^{-1}$的滑动速度进行了摩擦实验。高速列车轮轨滚动接触的摩擦系数研究得到了国内外许多学者的关注[5-8],但并没有完全从本质上揭示摩擦系数与列车法向载荷,轮轨温升,相对行驶速度之间的关系。虽然不少学者认识到了轮轨间摩擦系数的复杂性[9-11],但为了简化计算,现有的轮轨滚动接触理论模型均以库伦摩擦定律为假设条件,难以满足列车轮轨滚动接触分析的需要。本文针对以上不足,从法向载荷、环境温度、滑动速度三个条件对滑动摩擦系数的影响出发研究轮轨材料的摩擦磨损性能。

1 实验部分

摩擦试验样块和摩擦对偶均采用动车轮轨材料LM1奥贝体钢。表1和表2分别给出了LM1奥贝体钢的化学成分和机械性能参数。采用线切割的方法,将初始LM1奥贝体钢切成试验块,将试验面经过金相砂纸打磨抛光后,蒸馏水冲洗后再用丙酮进行超声清洗,清洗时间为20 min,烘干备用。

收稿日期:2013-05-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51005075);江西省教育厅科研项目(GJJ12292);中国科学院"百人计划"项目

作者简介:肖乾(1977-),男,副教授,博士,主要研究方向为高速列车轮轨关系。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表1 LM1奥贝体钢的化学成分

Tab.1　Chemical composition of LM1 austenitic-bainitic steel

钢种	化学成分/wt.%								
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	Re	V	Ti
LM1	0.35	2.8	2.3	1.1	0.35	0.3	0.03	0.08	0.05

表2 LM1奥贝体钢机械性能

Tab.2　Mechanical properties of LM1 austenitic-bainitic steel

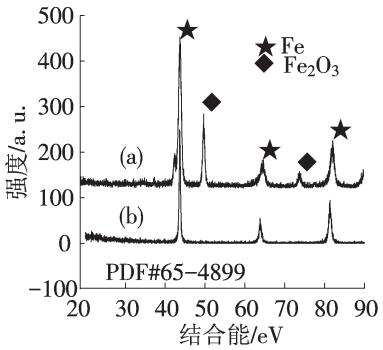
机械性能	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ /%	硬度HRC	屈服强度 σ_s /(kg·mm^{-2})
数值	1 400 ~ 1 560	12 ~ 14.5	37 ~ 42	1 100 ~ 1 300

利用X射线衍射(XRD，飞利浦X'Pert Pro MPD X射线衍射仪)研究实验试样的相组成，Cu-Kα辐射作为发射源，采用掠角入射，掠射角为2°。采用Thermon Scientific型X射线光电子能谱仪(XPS)(Al靶Ka单色辐射1 486.6 eV)对摩擦试验后磨痕表面进行相关元素的测定。使用JEOL JSM-5600LV型扫描电子显微镜观察观察轮轨材料表面形貌和Fe_2O_3形貌。利用UMT-3MT摩擦试验机对轮轨材料试样在不同条件下的摩擦学性能进行评价。摩擦副对偶为AISI52100钢球，直径为3 mm，硬度HRC为62~63，表面粗糙度约为0.01 μm。

2　结果与讨论

2.1　XRD相组成分析

图1给出了LM1奥贝体钢抛光处理前后的XRD谱图。可以看出，对于未经抛光处理的LM1奥贝体钢，其XRD谱图中(a)中除了Fe的衍射峰以外，还出现两个新的衍射峰。这两个衍射峰对应的是Fe_2O_3。因此，未抛光的钢片上面有一层主要成分为Fe_2O_3的氧化膜Fe_2O_3是铁锈的主要成分。这是由于LM1奥贝体钢含有杂质碳等物质，暴露在空气中的Fe元素在杂质碳的存在下，会与空气中的水份和氧气发生反应，使表面发生锈蚀。对于经过抛光处理的LM1奥贝体钢，其XRD谱图中(b)中不含有除铁外其它杂质衍射峰，为了减少表面氧化膜层以及污染物对实验结果产生影响，在下面的试验中，我们均采用表面通过抛光处理的试样来进行测试。



(a)为没有任何抛光处理的铁块，(b)为表面通过抛光处理，且用丙酮浸泡，超声清洗20 min的光滑表面

图1　LM1奥贝体钢抛光处理前后的XRD图

Fig. 1　XRD patterns of the steels

3　摩擦学性能

3.1　不同法向载荷条件下的摩擦磨损性能

在车辆运行的过程中，较大的载荷使轨道发生变形或高频振动，所以研究法向载荷对轮轨材料摩擦磨损性能的影响十分必要。利用UMT-3摩擦试验机对样品的摩擦学性能进行评价，所有样品的测试环境条件为：温度控制在25 ℃，湿度为(40±5%)RH%，滑动时间为30 min。

如表3图2所示，随着法向载荷的不断增加，轮轨材料的摩擦系数越低。如图3，随法向载荷的变化磨损情况也随之变化，载荷越大，磨痕越深越宽。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表3 平均摩擦因数

Tab.3 Average friction factor

参数	载荷/N			
	100	200	300	400
摩擦系数(25 ℃,0.05 m·s^{-1})	0.70	0.65	0.60	0.50

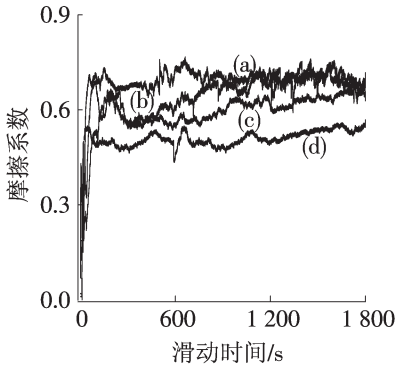


图2 不同载荷摩擦系数随滑动时间的变化曲线

Fig. 2 Friction coefficients curve of different loads with the sliding time

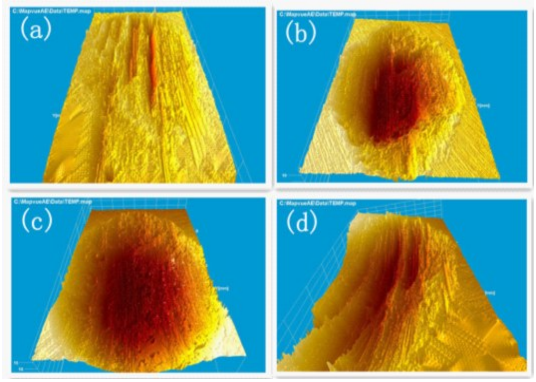


图3 不同载荷下的3D磨痕形貌图

Fig. 3 3D morphologies of the wear tracks of different loads

3.2 光洁钢轨表面不同滑动速度试验

利用UMT-3MT摩擦试验机对样品的摩擦学性能进行评价,所有样品的测试环境条件为:温度控制在25 ℃,湿度为40RH±5%,滑动时间为30 min。

表4 平均摩擦因数

Tab.4 Average friction factor

参数	相对滑动速度/(m·s^{-1})			
	0.05	0.1	1	5
摩擦系数(25 ℃,100 N)	0.75	0.67	0.55	0.52

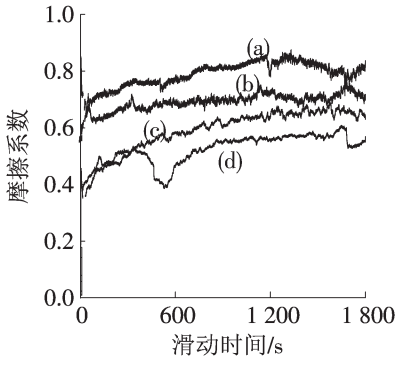


图4 不同速度下摩擦系数随滑动时间的变化曲线

Fig. 4 Friction coefficients curve of different speeds with the sliding time

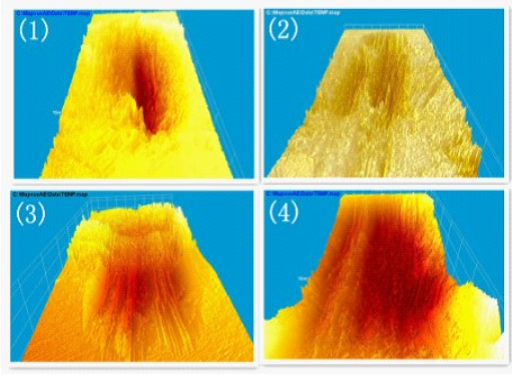


图5 不同速度下的3D磨痕形貌图

Fig. 5 3D morphologies of the wear tracks at different speeds

如表4,图4,图5所示,滑动速度的增加会使摩擦接触表面产生温升、变形、化学变化和磨损,因而明显地影响摩擦因数。轮轨摩擦因数在不同状态下随滑动速度的增加而下降。随着滑动速度的增加,磨痕截面越大,随之的磨痕深度和宽度也逐渐增加。由以上研究数据可知,在干摩擦条件下,随着滑动速度的进

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

行，磨损过程表现得相对平稳，磨损率增加而耐磨性下降。

3.3　光洁钢轨在不同温度条件下的试验

在摩擦过程中，温度的变化会使摩擦副表面材料的性质发生了改变，从而影响摩擦数。摩擦系数随摩擦副工作温度条件的不同而变化。具体情况需要通过试验的方法来测定。

表5　平均摩擦因数

Tab.5　Average friction factor

参数	温度/℃			
	25	50	100	200
摩擦系数(400 N，0.05 m·s^{-1})	0.50	0.58	0.67	0.71

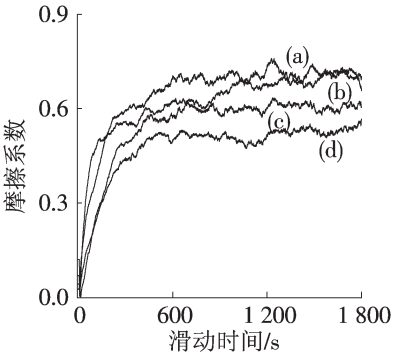


图6　不同温度下摩擦系数随滑动时间的变化曲线

Fig. 6　Friction coefficients curve of different temperatures with the sliding time

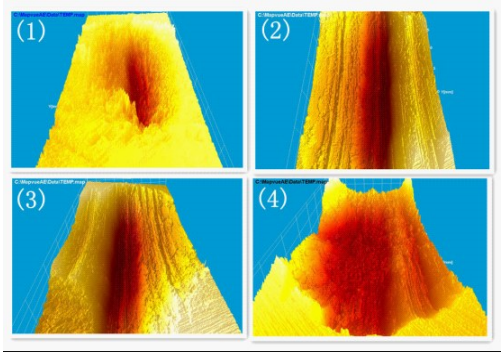


图7　不同温度下的3D磨痕形貌图

Fig. 7　3D morphologies of the wear tracks at different temperatures

如表5，图6，图7所示，在100~200 ℃时，摩擦磨损比较剧烈，实验噪声比较大，且平均摩擦因数上升的幅度比大。钢轨的平均摩擦因数在温度的升高都有了不同程度的增加。随着温度的逐渐升高，磨痕截面越大，随之的磨痕深度和宽度也逐渐增加。

由以上研究数据可知，在干摩擦条件下，随着滑动时间的进行，磨损过程逐渐变的平缓，同时平均摩擦系数保持平稳，磨损率增加而耐磨性下降，这是由于温度高时，铁会与水发生复杂的化学物理反应，生成一层氧化膜的速度会加快，对钢轨的对磨起保护作用，到达一种接触稳态。

3.4　磨痕化学成本XPS分析

我们随机选择了摩擦实验参数为“25 ℃，100 N，1 m·s^{-1}”（如图8）的实验样块分析磨痕元素成分。

采用Thermon Scientific型X射线光电子能谱仪（XPS）（Al靶Ka单色辐射1 486.6 eV）测定磨痕元素的光电子能谱。通过光电子发射时所处的芯态能级的结合能，X射线光电子能谱（XPS）可以用于辨识样品表面的元素构成和化学状态。通过X射线光电子能谱（XPS），可对磨痕进行分析。

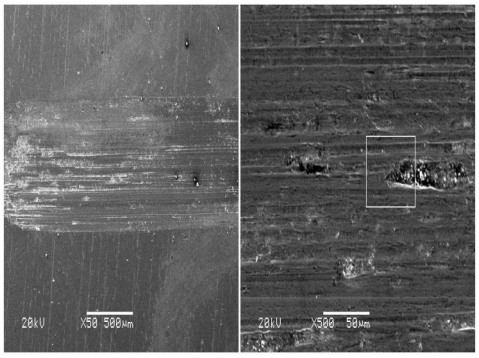


图8 钢块磨痕SEM

Fig. 8 SEM micrograph of the steels of the wear tracks

由表6，图9可知，电子结合能为711.29，724.82 eV的铁元素，化学态呈现的是Fe_3O_4，电子结合能为710.35，724 eV的铁元素，化学态呈现的是Fe_2O_3；如图10可知，电子结合能为531.8，529.8，530.2 eV的氧元素，化学态呈现的是Fe_3O_4；电子结合能为529.5，529.9，530 eV的铁元

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

素，化学态呈现的是Fe_2O_3。

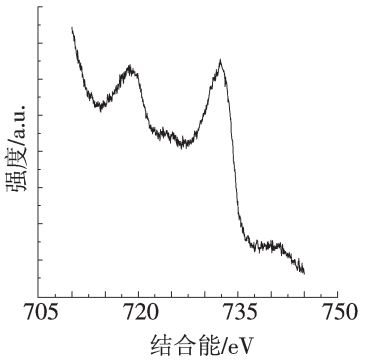


图9 磨痕XPS的铁元素分析

Fig.9 XPS spectra of Fe2P for the steel

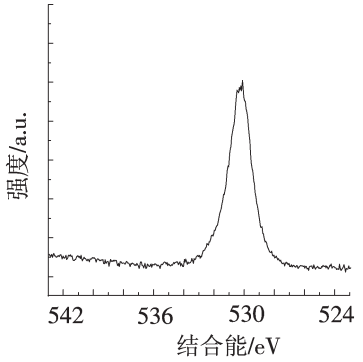


图10 磨痕XPS的氧元素分析

Fig.10 XPS spectra of O1s for the steel

3.5 轮轨材料摩擦机理分析

在往复滑动摩擦的过程中，材料表面经受一系列复杂的物理化学变化。虽然光滑试验块经过多次前处理操作，但钢表面总是存在一定厚度的氧化铁薄膜。随着实验的进行，氧化膜的生成速度加快，由于氧化铁薄膜容易粘附在钢块表面，在摩擦力的作用下，随对偶钢块滑动，但由于氧化铁与钢块之间结合的不够好，在摩擦过程中会剥落，离开钢块表面，从而起到润滑作用，所以，在摩擦实验的过程中，快速生成的氧化铁薄膜成为粘性体起到稳定和降低钢轨之间对磨摩擦系数的作用。

表6 磨痕化学成分分析

Tab.6 Chemical composition analysis of wear track

元素	电子结合能/eV	化学态
O_{1s}	531.8,529.8,530.2	Fe_3O_4
	529.5,529.9,530	Fe_2O_3
Fe_{2p}	711.29,724.82	Fe_3O_4
	710.35,724	Fe_2O_3

摩擦过程中发生了复杂的物理化学反应，铁金属摩擦副和周围介质发生了物理化学或者电化学的反应。空间和水的作用，使得铁金属副发生了一般的氧化磨损。氧化磨损主要取决于氧化膜层和基底的连接强度，以及氧化膜层的生长速度。摩擦机制主要与金属摩擦副的温升，接触表面的洁净程度，机械应力[14]，氧化速度等作用有密切相关。

各种氧化物如碳的氧化物，钼的氧化物，锰的氧化物，钛的氧化物，在摩擦过程中起到减磨得作用；铁金属在摩擦产生的高温下生成铁的氧化物如二氧化三铁，三氧化四铁也是一种减磨剂，它们各自起着减磨作用；同时，各种氧化物的协同作用，会进一步降低摩擦系数。

滑动速度的增加，滑动温度的升高，载荷的变化，都会影响氧化物的生成，以及氧化膜的生长速度（氧化率），这就进一步影响轮轨间摩擦系数。这主要是由于滑动速度的增加，轮轨摩擦产生温升、机械活化等原因使得轮轨表面更容易与空气中的氧和水分子结合发生氧化，从而使得氧化膜增厚[12]。

4 结论

通过对轮轨材料进行滑动摩擦实验，结果可知：随着法向载荷的增加，平均摩擦系数是呈下降的趋势；轮轨平均摩擦因数在不同状态下随滑动速度的增加而下降；摩擦系数随摩擦副工作温度条件的升高而逐渐升高。摩擦过程中发生了复杂的物理化学反应，轮轨材料铁金属摩擦副与周围介质发生了物理化学或者电化学的反应，生成多种氧化物膜层，且这种含水的氧化膜层在摩擦实验中会起到降低摩擦系数的作用。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参考文献:

[1] 克拉盖尔斯基 N B,等. 摩擦磨损原理[M]. 汪一麟,等译. 北京:机械工业出版社,1982:68-106.

[2] 张卫华,周文祥. 高速轮轨黏着机理试验研究 [J]. 铁道学报,2000,22(4):20-25.

[3] LIU Q Y,JIN X S,ZHOU Z R. An investigation of friction characteristic of steels under rolling-sliding condion[J]. Wear,2005,259:439-444.

[4] 李正军. 轮轨摩擦磨损试验及模拟研究[D]. 北京:北京科技大学,2009.

[5] XIAO QIAN,MU MING,ZHOU XINJIAN,et al. Study friction between wheel and rail by using molecular dynamics method [J]. Applied Mechanics and Materials,2012,2011(130-134):2746-2749.

[6] BOWER A F,JOHNSON K L. Shakedown,residual stress and plastic flow in repeated wheel-rail contact[J]. Rail Quality and Maintenance for Modern Railway Operation,Kluwer,1993,239-249.

[7] POPOV V L,PSAKHIE S G,SHILKO E V,et al. Friction coefficient in "rail-wheel"-contacts as a function of material and loading parameters[C]. Physical Mesomechanics,2002,53:17-24.

[8] AKIRA MATSUMOTO,YASUHIRO SATO,MACHI NAKATA,et al,Wheel-rail contact mechanics at full scale on the test stand[J]. Wear 1996,191:101-106.

[9] KNOTHE K,STICHEL S. Direct covariance analysis for the calculation of creepages and creep-forces for various bogies on straight track with random irregularities[J]. Vehicle System Dynamics,1993,22:237-251.

[10] KNOTHE K,LIEBEL S. Determination of temperatures for sliding contact with applications for wheel-rail systems[J]. Wear 1995,189:91-99.

[11] LINCK V,SAULOTA A,BAILLET L. Consequence of contact local kinematics of sliding bodies on the surface temperatures generated[J]. Tribology International 2006,39:1664-1673.

[12] 李祥明,戴振东,刘德浚,等. 摩擦作用下金属氧化反应的机理[J]. 南京航空航天大学学报,1999,31(2):89-93.

[13] 裴有福. 高速铁路轮轨黏着机理的研究[D]. 北京:清华大学,1996.

[14] 罗文俊,雷晓燕,练松良,等. 车辆-高架桥耦合系统竖向振动分析车辆轨道新模型[J]. 华东交通大学学报,2013,30(2):1-8.

Study on Sliding Friction Coefficient of High-speed Wheel-rail Materials

Xiao Qian[1],Mu Ming[2],Zhou Xinjian[1],Liang Jun[3]

(1. The Key Laboratory of Conveyance Tools and Equipment of the Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013,China; 2. School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 3. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Friction exists between wheel and rail in high-speed train operation, including not only the rolling friction, but also relative lateral and radial sliding friction. Thus effects produced by sliding friction in big curve corners can not be ignored. In order to study sliding friction coefficient of high-speed train of wheel and rail materials under different conditions, this paper uses UMT-3 friction testing machine to explore the friction behavior of wheel LM1 steel material samples under different conditions, such as different loads, different temperatures, different relative speeds. The friction mechanism is analyzed by scanning electronic microscope (SEM), X-ray diffractometer (XRD), X-ray photoelectron spectroscope (XPS) experiments characterization equipment.

Key words: Sliding friction; friction coefficient; high-speed trains; wheel-rail material

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net