

基于磨屑分析的城市轨道交通弓网系统磨损机制研究

支兴帅¹,周宁¹,张欣¹,魏海飞¹,郑伟²,罗朝基²,何平双³

(1. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031;
2. 成自铁路有限责任公司,四川 成都 610299; 3. 四川旷谷信息工程有限公司,四川 成都 610083)

摘要:城市轨道交通中弓网系统的异常磨耗问题日益增多,围绕弓网系统摩擦磨损性能的影响因素,磨耗演变规律及磨损机制的研究已成为当下弓网关系研究的一个重要方向。通过对某城轨列车实际运行工况进行跟踪并收集其车顶磨屑,进行宏、微观形貌分析、化学元素分析、主要化学元素分布分析以探讨城市轨道交通中弓网系统磨屑主要来源以及磨损机制。结果表明:城市轨道交通弓网系统中磨屑的主要来源为滑板、接触线及弓网接触副因高温生成的氧化物;弓网系统的主要磨损机制为磨粒磨损、黏着磨损和电弧烧蚀,氧化层的脱落导致更严重的磨粒磨损,电弧的烧蚀增加了滑板的磨损。

关键词:轨道交通;弓网系统;磨屑;成分分析;磨损机制

中图分类号:U264 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)05-0046-05

Study on Wear Mechanism of Pantograph-catenary System in Urban Rail Transit Based on Wear Debris Analysis

ZHI Xingshuai¹, ZHOU Ning¹, ZHANG Xin¹, WEI Haifei¹, ZHENG Wei², LUO Chaoji², HE Pingshuang³

(1. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Chengzi Railway Limited Liability Company, Chengdu 610299, China;

3. SiChuan Crungoo Information Engineering Co., Ltd., Chengdu 610083, China)

Abstract: As the abnormal wear of pantograph-catenary system in metro-rail transit is worsening, the research on pantograph-catenary relationship related to influencing factors, wear evolution law and wear mechanism has become an important reserch field. This study explores the main sources of wear debris and wear mechanism of pantograph-catenary system in metro-rail transit by tracking the actual operating conditions of a metro train and collecting the wear debris on its roof for macro-micro morphology analysis, chemical composition and distribution analysis of elements. The results indicate that the main sources of wear debris in the pantograph-catenary system of metro-rail transit come from strip, catenary line and the oxides generated by high temperature in the pantograph-catenary contact pair. The main wear mechanisms of pantograph-catenary system are abrasive wear, adhesive wear and arc ablation. The peeling off of oxide layer leads to more serious abrasive wear, and the erosion of electric arc increases the wear of strip.

Keywords: rail transit; pantograph-catenary system; wear debris; component analysis; wear mechanism

0 引言

随着城市轨道交通的发展,刚性接触网因其所占空间小、结构简单、维护成本低等一系列优点^[1-3],应用逐渐广泛。但由于刚性接触网的弹性不均匀、接触副形貌差异、线路不平顺等因素而导致燃弧率过高,不仅使得受电弓滑板极易发生异常磨耗,同时也使得接触线易产生烧蚀、拉丝等异常现象,进而影响受电弓的使用寿命^[4]。近年来全国各地弓网系统异常磨耗问题尤为严重,极大地增加了城轨列车的运维成本,其具体表现为受电弓滑板的偏磨、接触线的烧蚀及拉丝等,如图1所示。针对近年来多地出现的弓网系统异常磨耗问题,探究磨损机制,寻找异常磨

耗产生的原因已成为亟待解决的问题。

滑板磨耗影响因素众多,国内外学者针对弓网结构参数及配副材料、弓网接触力、列车运行速度、温度等因素均进行过研究^[5-14],所得结论不尽相同。通过宏观、微观形貌及元素组成分析接触副失效形式、磨损机制是一种较为有效的方法,国内外学者通过此方法对轮对表面损伤、制动闸片的失效形式及弓网系统接触副磨损机制已进行过相应的研究^[15-17]。但弓网系统的磨损是一个在多影响因素下发生并伴有电弧干扰、隧道环境多变等诸多特殊而复杂现象的微观破坏过程;且在弓网系统受流的复杂条件下,某些影响因素伴随始终,也有诸多影响因素随机出现,不同影响因素之间极易相互作用而诱发难以估算的磨损,

基金项目:国家自然科学基金项目(52072319);四川省科技计划重点研发项目(2021YFG0066);中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目(P2020J025)

第一作者简介:支兴帅(1996—),男,辽宁鞍山人,硕士研究生,研究方向为受电弓-接触网摩擦磨损,zxs010@my.swjtu.edu.cn。

故通过对台架试验所得滑板形貌的分析并不能完全真实地反映列车线路运行情况;而形貌分析所需样品对尺寸要求较为严格,从线路运行滑板进行取样所需时间、经济成本较大。本文通过对某城轨列车运行状态进行实时监测,并对车顶收集的磨屑进行宏、微观分析,以探究城市轨道交通弓网系统的磨损机制,为降低其异常磨耗提供研究基础。

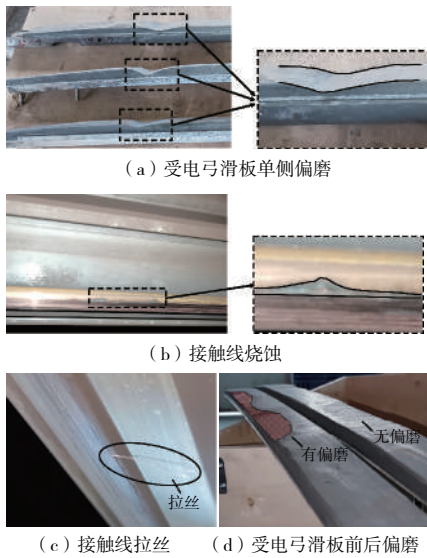


图1 弓网系统异常磨耗

1 试验简介

1.1 列车运行工况

本次试验对某城轨列车运行速度、电流、电压及受电弓弓头振动状态进行监测,图2为列车在某站段运行时的运行速度、电压及电流情况,可以看出该城轨列车的运行速度为0 km/h~70 km/h,运行时的电压在1.6 kV左右,单弓电流在-500 A~+500 A之间。由于列车制动时存在回馈,电流存在负值,且电流大小与加速度变化正相关,同时可以发现列车在加速阶段时单弓电流较大。

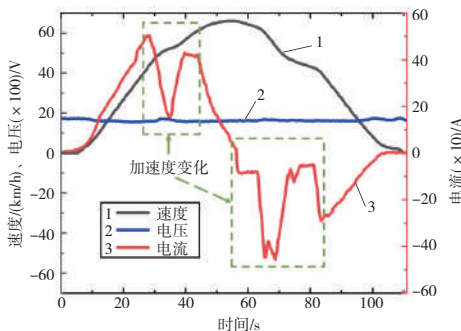


图2 某城轨列车运行工况

图3所示为所监测受电弓在某站段内弓头振动情况,其中加速度的最大值为49.53g,标准差为4.72g,且随着列车运行速度的提升,弓头振动加速度的波动有所提升。

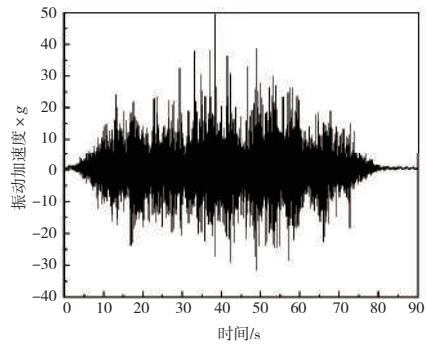


图3 某站段内加速度曲线

为使受电弓滑板磨耗均匀,地铁运营系统常将刚性接触网进行正弦或“之”字形布置,本次监测将所得拉出值数据按5 mm的长度进行区间划分,图4所示为该线路中20个锚段的拉出值和导高值分布情况及全线拉出值在各区间分布情况,可见该线路拉出值布置方式为正弦波布置,且在拉出值±100 mm~±250 mm区间内分布较多,导高值大多在4 030 mm~4 040 mm之间。

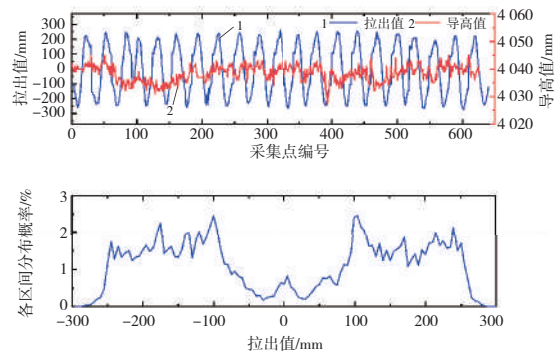


图4 拉出值及导高值分布情况

图5所示为该站段内加速度在各拉出值区间内的分布情况及标准差。由图可知,加速度较大值均发生在拉出值较大处,且在拉出值为0附近的加速度标准差最小。

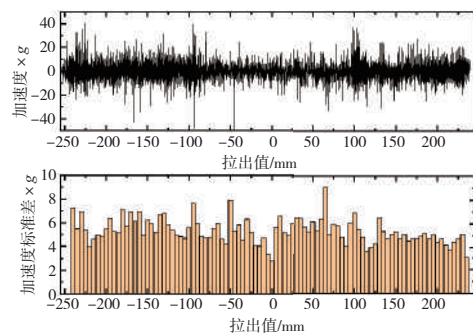


图5 加速度随拉出值变化情况

1.2 试样材料

由于拉出值的存在,列车在运行中,受电弓与接触网纵向及横向均存在相对滑动,这种受电弓滑板沿接触线的相对运动必然会发生机械磨损,并伴有磨屑产生。同时考虑到受电弓滑板在列车运行过程中会发生前后偏磨现象,

如图 1(d)所示,且线路导高值并无异常,推断为双滑板弓头与接触线接触异常而使滑板前后偏磨,如图 6 所示。此种不良的接触必然会加剧刮伤接触线,而导致受电弓滑板和接触线磨屑掉落于车顶,因此本文试样取自某地铁列车运行过程中残留于车顶的磨屑,并对磨屑来源进行分析验证,如图 7 所示。表 1 及表 2 分别为接触线及滑板的质量分数组成。

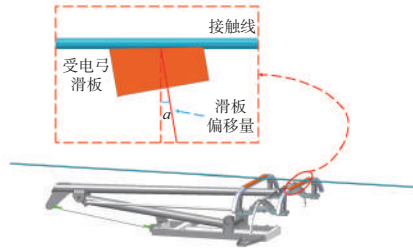


图 6 弓网匹配异常推断



图 7 磨屑试样

表 1 接触线质量分数

成分	质量分数/%
Cu	残余
Ag	0.08~0.12
Bi	≤0.000 5
O	≤0.003
其他	≤0.03

表 2 滑板质量分数

成分	质量分数/%
C	残余
Cu	42~54
Sn	≤0.5
其他	≤1.0

1.3 滑板偏磨分析及试样检测方法

本次研究首先采用体式显微镜(SM)对磨屑样品进行宏观分析,观察样品表面形貌特征。然后采用扫描电子显微镜(SEM)对磨屑样品进行微观形貌分析,观察样品微观形貌特征。最后运用电子探针(EPMA)对磨屑特征位置进行化学元素定性分析和定量分析,以确定磨屑主要质量分数及其来源,并进一步判断弓网系统发生异常磨损的主要作用机理。

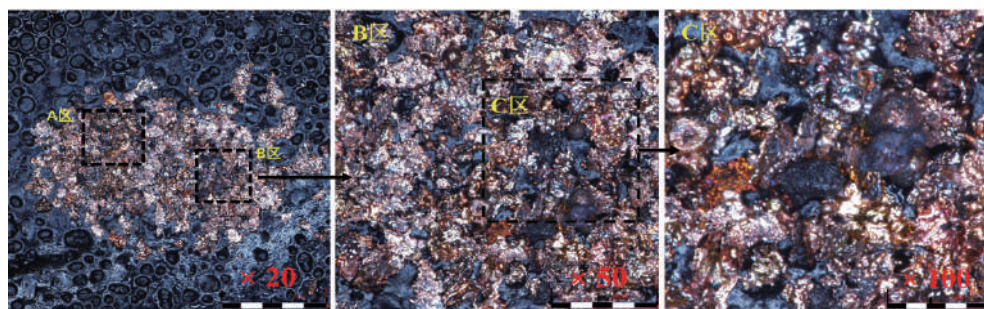
2 磨屑形貌分析

2.1 宏观形貌分析

图 8(a)所示为体式显微镜对磨屑样品进行宏观分析的全貌特征,样品粉末表面整体有紫红色金属光泽,但颜色深浅分布不均匀。图中 A 区域处,颜色较深,且呈现出块状黏结。分析其原因可能是由于高温导致接触副融化黏结。在地铁运营过程中,弓网系统往往采用大电流供电方式,单个滑板最高通过电流可达 500 A 以上,如图 2 所示;且由于线路不平顺及弓网系统耦合振动等原因,接触副在接触过程中会出现短时离线,而此时由于大电流的存在,容易在弓网之间形成电火花及电弧,由于摩擦热、电弧热及焦耳热的共同作用^[18],接触副产生局部高温,导致接触副材料融化,且在接触过程中,两者间存在垂向作用力,容易发生材料之间的黏结。图 8(b)所示 B 区域整体颜色较暗,颗粒物固体分布集中,且颜色暗淡,无金属光泽。将 B 区域放大为 C 区域,如图 8(c)所示。C 区域固体表面存在融滴状固体,熔融状固体表面几乎没有金属光泽;C 区域存在少量砖红褐色特征物质,疑似 Cu 的氧化产物,需对其进行质量分数分析以确定其成分及来源。

2.2 微观形貌分析

图 9(b)所示为扫描电子显微镜观测磨屑样品的整体 SEM 形貌。从图中可以看到,磨屑大多以一种黏结块状的形态存在,分布不均匀;在部分黏结块表面存在不规则颗粒状物体,大小不一,分布比较分散。选取试样左上部区域进行放大数倍观察,如图 9(a)所示。发现在 A 区域存在大小不一的类似基体物,在 B 区域的黏结块表面存在不明颗粒状物,C 区域的少量黏结块之间存在薄片状物。选取试样中心部位放大数倍观察,如图 9(c)所示,发现图中 E 区域黏结块表面存在熔融状物,D 区域存在断断续续相连的黏结块。这些特征位置的形成疑似是由磨粒磨损、电弧烧蚀所致,需进行质量分数分析对其进行验证。



(a) SM观测全貌

(b) B区放大图

(c) C区放大图

图 8 磨屑宏观形貌

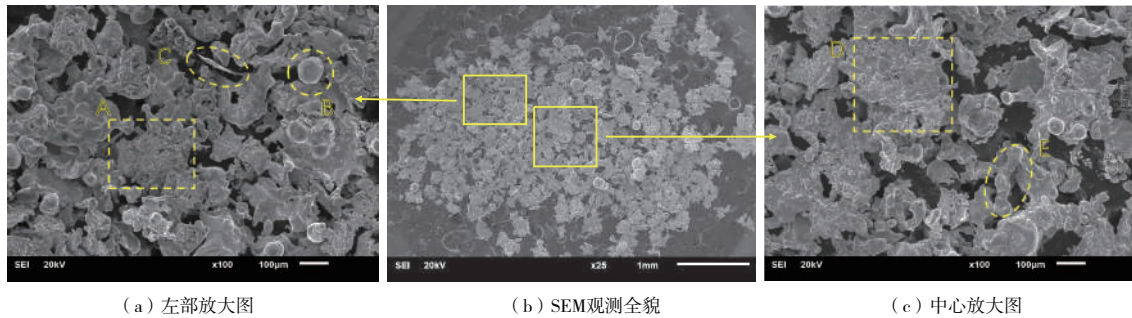


图9 磨屑微观形貌

3 磨屑质量分数分析

3.1 电子探针(EPMA)元素定性分析和定量分析

为了确定磨屑的质量分数,以验证磨损机理并确定磨屑来源,运用电子探针(EPMA)对粉末特征位置(下文所述A、B、C、D、E点均与图9所示特征点相对应)进行化学元素定性分析和定量分析。

图10所示为A、B、C点各元素质量占比,A、B、C主要元素为C和Cu元素,均含有一定量的Ag元素,并含有O、P、Bi、Sn、Pb和Si等微量杂质元素。由于磨屑中含有一定量不存在于滑板中的Ag元素,故可推断磨屑中存在部分接触线磨屑。此外,A点含有少量N单质,来源不明。B点含有一定量的O元素,说明部分磨屑发生了氧化现象;由于磨屑中氧化物的存在,说明弓网接触副间的氧化层出现脱落,由于氧化物的硬度较大,会导致弓网接触副间发生严重的磨粒磨损,同时氧化物的存在证实了SM宏观形貌分析中砖红褐色物质是Cu的氧化物;此外B点还含有一定量的Fe元素,推测为受电弓弓角与汇流排或滑板刚蹭所产生。

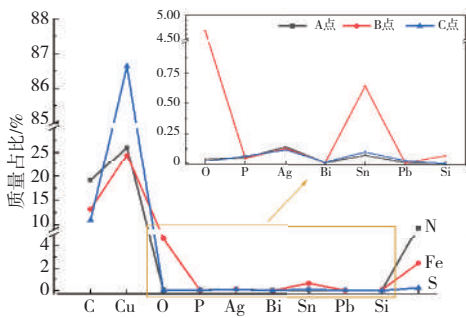


图10 A、B、C点各元素质量占比

对磨屑中黏接块(D点)及熔融状物(E点)依次进行定性分析和定量分析,如图11及图12所示。发现此两处位置主要包含C元素和Cu元素,含有O、P、Ag、Sn等微量杂质元素,同时E点含有一定量的Ag、Bi、Mg、W元素。D区域黏接块的产生可能是接触副间发生高温,使得接触副间发生了黏着磨损。E点推测为弓网接触副在高速运作时电弧产生的电弧热及大电流产生的焦耳热共同作用产生了一定的高温,使得部分滑板磨屑熔化,从而产生的熔融状物。

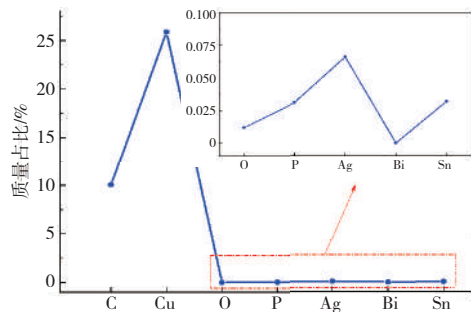


图11 D点元素质量占比

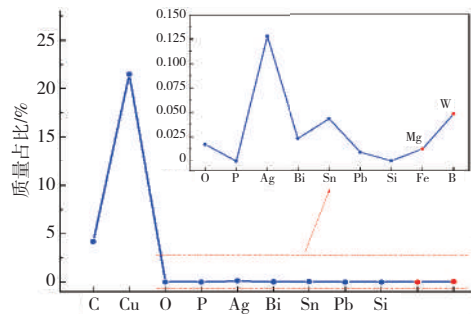


图12 E点元素质量占比

3.2 电子探针(EPMA)元素面扫描分析

为了确认磨屑的质量分数的分布情况,选取含有典型特征位置的区域,根据上文中的EPMA定性定量分析,对磨屑中的主要元素Cu和C以及杂质中含量相对较多的元素N和Fe,运用电子探针(EPMA)对磨屑进行面扫分析。图13中黑色方框区域为磨屑面扫测试位置,其中包含了磨屑中的主要特征位置(图10中的浅色方框区域:A区、B区、C区、D区和E区),和上文所述特征位置相对应(因本刊为黑白印刷,有疑问之处可向作者咨询)。

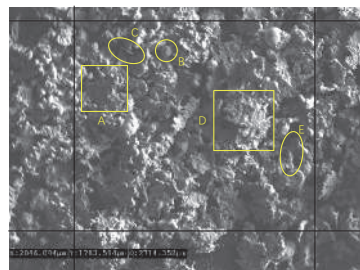


图13 磨屑面扫描分析位置

图 14 所示为磨屑中 C、Cu、Fe 和 N 元素面扫描结果,可以看到:C 元素多在薄片状物(类似 B 区)中以较高含量分布,其他区域均存在 C,但是含量相对较低;而 Cu 元素以较高的含量分布在磨屑中的整个区域。而杂质元素 Fe 多在黏结块区域分布,但是含量轻微。杂质元素 N 分布比较均匀,均含量极微,多处不存在 N 元素。这与前文所述分析结果相一致。

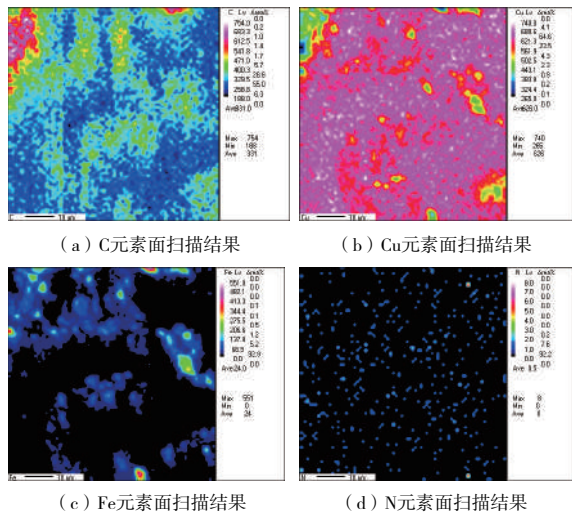


图 14 磨屑 C、Cu、Fe、N 元素面扫描结果

4 结语

1) 磨屑中主要质量分数为 C 和 Cu 元素,并含有接触线中的 Ag、Bi 等元素及 O 元素,同时普遍含有 N、S、W、Sn、Rb 等微量杂质元素,因此磨屑主要为 Cu 和 C 的混合物。磨屑来源主要是滑板、接触线及弓网接触副间由于高温所产生的氧化物(EPMA 分析中的 Fe 元素为接触线与弓角或滑板与汇流排等接触产生)。

2) 通过对磨屑宏观、微观分析显示,弓网系统磨损机制主要有磨粒磨损、黏着磨损及电弧烧蚀等。

3) 根据 EPMA 质量分数分析结果,发现颗粒状磨屑中存在一定量的 O 元素。这是由于线路不平顺及弓网间耦合振动等因素引发的离线,导致电弧烧蚀,同时高温作用下 Cu 与空气中的 O 发生氧化反应生成氧化物,脱层后的氧化物由于硬度较高所导致严重的磨粒磨损。

参考文献:

[1] 李会杰,田志军. 接触网刚性悬挂平面布置研究[J]. 铁道学报,2003,25(2):103-106.
 [2] 王田,高金山,王宏,等. 有砟轨道线路 200 km/h 刚性接触网系统仿真研究[J]. 电气化铁道,2021,32(4):70-74.
 [3] 皋金龙. 刚性接触网跨距对弓网动态性能的影响分析[J]. 电气化铁道,2021,32(3):12-15.

[4] 宋冬利,江亚男,张卫华. 滑板磨耗对受电弓系统服役性能的影响研究[J]. 西南交通大学学报,2017,52(3):450-457.
 [5] HU Y, CHEN G X, ZHANG S D, et al. Comparative investigation into the friction and wear behaviours of a Cu-Ag contact wire/carbon strip and a pure copper contact wire/carbon strip at high speeds[J]. Wear, 2017, 376/377:1552-1557.
 [6] BOUCHOUCHA A, CHEKROUD S, PAULMIER D. Influence of the electrical sliding speed on friction and wear processes in an electrical contact copper-stainless steel[J]. Applied Surface Science, 2004, 223(4):330-342.
 [7] LIN X Z, ZHU M H, MO J L, et al. Tribological and electric-arc behaviors of carbon/copper pair during sliding friction process with electric current applied[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(2):292-299.
 [8] DING T, CHEN G X, BU J, et al. Effect of temperature and arc discharge on friction and wear behaviours of carbon strip/copper contact wire in pantograph-catenary systems[J]. Wear, 2011, 271(9/10):1629-1636.
 [9] YASAR I, CANAKCI A, ARSLAN F. The effect of brush spring pressure on the wear behaviour of copper-graphite brushes with electrical current[J]. Tribology International, 2007, 40(9):1381-1386.
 [10] CHEN G X, YANG H J, ZHANG W H, et al. Experimental study on arc ablation occurring in a contact strip rubbing against a contact wire with electrical current[J]. Tribology International, 2013, 61:88-94.
 [11] 卜俊,丁涛,陈光雄. 温度对受电弓滑板材料磨损的影响[J]. 润滑与密封,2010,35(5):22-25,105.
 [12] 刘新. Ti₃SiC₂、Ti₃AlC₂ 陶瓷的非载流和载流摩擦学行为研究[D]. 北京:北京交通大学,2007.
 [13] 丁涛,何宏高,陈光雄,等. 弹性条件下浸金属碳/不锈钢载流摩擦磨损性能[J]. 西南交通大学学报,2009,44(4):558-563.
 [14] 丁涛,王鑫,陈光雄,等. 120~170 km/h 条件下碳滑板/铜接触线摩擦磨损性能试验研究[J]. 机械工程学报,2010,46(16):36-40.
 [15] 沈明学,秦涛,李圣鑫,等. 宽温域下高速轮轨界面粘着与车轮表面损伤行为[J]. 交通运输工程学报,2021,21(3):269-278.
 [16] 曹超,杜慧杰,王赫,等. 某型磁浮列车制动闸片的磨损失效分析[J]. 润滑与密封,2021,46(8):76-82.
 [17] YANG H J, HU B, LIU Y H, et al. Influence of reciprocating distance on the delamination wear of the carbon strip in pantograph-catenary system at high sliding-speed with strong electrical current[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 104:887-897.
 [18] 王英. 弓网电接触热流和电流传导及影响规律研究[D]. 成都:西南交通大学,2016.

收稿日期:2022-04-01