DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.02.102　　文章编号：1000-128X(2023)04-0131-06

电力机车受电弓碳滑板在线适应性试用研究

田合强

（中国铁道科学研究院集团有限公司 标准计量研究所，北京 100081）

摘　要：由于电力机车受电弓碳滑板易损易耗的特点，使得用户对碳滑板的使用需求量较大，更多的生产企业参与到电力机车受电弓碳滑板的试制。为做好机车受电弓碳滑板试制阶段的在线试用工作，有必要对试制的机车受电弓碳滑板进行科学的在线适应性试用研究。文章汇总并分析了既有服役碳滑板可能出现的失效形式及其形成原因，阐述了机车受电弓碳滑板在线适应性试用的必要性，同时归纳了机车受电弓碳滑板在线试用的前提条件；并且从试用装车数量与周期、试用期间的跟踪和监测、试用结束后的拆检、试用结果评价、安全应急预案等5个方面设计制定机车受电弓碳滑板在线适应性试用方案。将该试用方案应用于国内某型机车受电弓碳滑板，线路试用过程和试验数据综合验证了该试用方案的可行性，未影响既有电力机车的正常运营服役。经验证的试用方案能够全面反映和评价新试制机车受电弓碳滑板在线运用的适应性与质量可靠性，并能够有效指导相关方在机车受电弓碳滑板试用现场的实际操作，降低了机车受电弓碳滑板在线试用的安全风险，同时为机车受电弓碳滑板的批量装车提供重要技术支撑。

关键词：电力机车；碳滑板；适应性；试用方案

中图分类号：U264.3+4　　**文献标识码：**A

Research on on-track adaptability trial of pantograph carbon contact strips for electric locomotives

TIAN Heqiang

(Standards & Metrology Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: As one of consumable parts for railway electric locomotives, pantograph carbon contact strips are largely demanded, and more manufacturers engage in the trial production of pantograph carbon contact strips for electric locomotives. The current study is necessary in order to improve on-track trial operation of pantograph carbon contact strips for locomotives in the trial production stage. This paper summarized and analyzed the potential failure modes and corresponding causes of the carbon contact strips in service, expounded the necessity of the on-track adaptability trial for them, and summarized the preconditions of the on-track trial operation. In addition, an on-track adaptability trial scheme of pantograph carbon contact strips for locomotives was designed, covering five aspects of loading quantity and cycle of trial operation, tracking and monitoring during trial operation, disassembly and inspection after trial operation, evaluation of trial results and safety emergency plan. This scheme was applied to a new type of pantograph carbon contact strips for locomotives produced by a domestic manufacturer. The on-track trial process and test data comprehensively proved the feasibility of this trial scheme, not involving any effect to the normal operational service of the locomotive. The trial scheme can fully reflect and evaluate the adaptability and quality reliability in the on-track application of new locomotive pantograph carbon contact strips in trial production, and effectively guide the relevant parties in the actual operation of the pantograph carbon contact strips for locomotives on the trial site, thus reducing the safety risk of the on-track trial, and provide important technical support for the mass loading of pantograph carbon contact strips on locomotives.

基金项目：中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题（J2022J008）

通信作者：田合强（1983—），男，高级工程师，主要从事铁道机车部件新产品的试用、认证等相关技术工作；E-mail: thqzjz@163.com

引用格式：田合强.电力机车受电弓碳滑板在线适应性试用研究[J].机车电传动,2023(4):131-136.

Citation: TIAN Heqiang.Research on on-track adaptability trial of pantograph carbon contact strips for electric locomotives[J].Electric drive for locomotives,2023(4):131-136.

Keywords: electric locomotive; carbon contact strip; adaptability; trial scheme

0 引言

电力机车通过受电弓碳滑板从接触网获取电能，受电弓碳滑板与接触网的可靠接触是保证电力机车正常受流的重要条件，任何一方出现故障或失效，都会破坏正常的受流，因此质量稳定的受电弓碳滑板是确保电力机车正常运营的前提之一。影响新造受电弓碳滑板服役可靠性和在线适应性的因素较多且复杂，仅通过仿真计算和台架试验尚不能对其准确模拟和预测，还需要通过一定周期的在线试用进行验证。

受电弓碳滑板为易损易耗件，其市场需求量相对较大。为应对国内相关生产企业对受电弓碳滑板的试制需求，有必要对试制的受电弓碳滑板进行科学的在线适应性研究。目前，关于受电弓碳滑板在线适应性试用的既有规定主要是从管理角度对试用提出较为宏观的要求，但在试用期间的具体监测、试用评价等技术规定方面仍显不足[1]，不能完全指导机车受电弓碳滑板试用工作的具体实施。因此，在既有规定基础上，本文结合机车受电弓碳滑板的技术特征，增加专业技术方面的试用内容与评价要素，设计制定出较为具体的、适用于指导现场实际使用的机车受电弓碳滑板在线适应性试用方案，同时将其应用于国内某相关生产企业的机车受电弓碳滑板试制工作，为国内相关企业的受电弓碳滑板研制工作提供参考。

1 机车受电弓碳滑板在线适应性试用的必要性

在机车受电弓碳滑板服役过程中，其碳滑条、金属托架、粘接层、气道组件、螺栓组件等各部位均有可能出现损伤或故障，典型的损伤或故障包括碳滑条掉块损伤、碳滑条表面裂纹损伤、接头漏气、碳滑条贯穿裂纹损伤、碳滑条前后偏磨、粘接失效（如图1所示）。当机车车辆运行时，碳滑板应与接触线始终保持滑动接触受流。由于接触网呈“Z”字形布置，同时接触线导高在一定范围内波动，不可避免地会存在弹性不均匀，即存在俗称的“硬点”；接触网硬点或挂附异物会对碳滑板产生一定的冲击。碳滑板损伤以磨损、裂纹为主，不同程度、不同形式的损伤或相互叠加，均会引起碳滑板失效。在调研相关文献[2-14]的基础上，本文汇总出机车车辆用碳滑板主要出现的损伤或故障表现形式及其形成原因，具体如表1所示。



(a) 碳滑条掉块　(b) 碳滑条表面裂纹　(c) 接头漏气

(d) 碳滑条贯穿裂纹　(e) 碳滑条前后偏磨　(f) 粘接失效

图1 典型的碳滑板损伤或故障现象

Fig. 1 Typical damage or failure symptoms of carbon contact strips

由表1可知，碳滑板损伤与碳滑板的运用工况条件、加工质量等众多因素有关，这些因素都可能造成碳滑板服役失效。相对较短的里程周期在线试用并不能完全暴露某些碳滑板的伤损类型，如异常磨耗、腐蚀等，仍需要在碳滑板试用结束后通过日常运行监测和检修等手段对其进行不间断的质量管控。部分伤损出现的时机往往具有随机性，在线试用会提早暴露导致碳滑板随机失效或异常的潜在可能问题，如碳滑板自身的材质及工艺质量问题、碳滑板与服役线路接触线的适应性问题等，从而降低机车车辆的运营风险。

为提前暴露碳滑板服役时可能出现的失效，验证碳滑板的在线运用适应性、稳定性、可靠性以及制造

表 1　碳滑板主要损伤或故障表现形式及其形成原因

Table 1　Main damage or failure symptoms and corresponding causes of carbon contact strips

损伤或故障部位	表现形式		形成原因
碳滑条	异常磨耗	边缘掉块	接触线硬点冲击、外来异物撞击
		表面裂纹	碳滑条本身细裂纹拓展、浸金属碳滑条浸铜纹路、电弧热影响
		贯穿裂纹	接触线硬点冲击、外来异物撞击、安装支架变形应力作用
		前后偏磨	存在弓头转动自由度
		局部偏磨（沟槽或波浪状）	接触线布置、拉出值不符合要求
		整体磨耗加剧	①电磨耗加剧：高燃弧率，与弓网受流质量有关，动态接触力、接触电阻、短时大电流、材料载流性能、运行环境工况（有雨、雪）影响受流质量； ②机械磨耗加剧：与摩擦副表面品质有关，受硬度、粗糙度、外来异物（粉尘、风沙等）影响
金属托架		变形，断裂	过载、疲劳
		烧蚀	弓网离线，电弧灼烧
		腐蚀	运行环境工况所致（如存在盐、碱、高温高湿等）
粘接层		过热失效	胶体耐温、耐候性能不足，粘接电阻过高、发热温升大
气道组件		撞击漏气自动降弓	外力作用变形漏气
		撞击未漏气降弓	与撞击作用点位置、冲击功大小以及气道组件设计有关
		接头漏气	①安装力矩过大，接头跟转或过载断裂； ②冰雪天气工况，接触线挂冰掉落，击打
螺栓组件		安装卡滞、脱出	安装操作不规范
其他		附具掉落	未规范安装、异物击打掉落损伤

质量，避免后续出现批量质量问题及服役安全问题，同时考虑到碳滑板产品质量安全不能完全通过实验室的测试结果得到验证和确认[1]，因此有必要对试制碳滑板进行科学的在线适应性试用。

2　机车受电弓碳滑板在线试用前提条件

为确保碳滑板在试用过程中的安全性，根据中国国家铁路集团有限公司（以下简称“国铁集团”）对机车供货方（以下简称“主机厂”）的整车及零部件供货技术管理要求、主机厂对零部件产品的技术管理程序、认证机构对生产企业申请碳滑板产品认证时的相关规定，机车受电弓碳滑板在被装车试用前，生产企业需完成以下技术准备：①主机厂或铁路局机务主管部门等用户按照机车零部件供应商评价办法等文件的相关要求，对计划新增的碳滑板生产企业进行资质审核。资质批准后，用户与碳滑板生产企业签订相关技术协议，同时规定所需求碳滑板的技术要求，随后用户对碳滑板生产企业拟试制的碳滑板进行设计评审。②设计评审通过后，碳滑板生产企业开始进行碳滑板试制，包括确定工艺参数、过程试验、出厂质量检验等。试制完毕后，向用户申请首件检验审核；首件检验审核执行机车零部件首件检验办法等相关文件要求。③首件检验审核通过后，生产企业可向认证机构申报碳滑板产品认证，办理碳滑板试用证书相关事宜。碳滑板的生产现场需通过铁路产品工厂质量保证能力检查，试制出的碳滑板需通过认证抽样型式检验，检验结果需符合 TJ/JW 029—2014《交流传动机车受电弓碳滑板暂行技术条件》[15]等标准的技术要求。

生产企业在获得碳滑板的铁路产品试用证书后，即完成了碳滑板装车试用的主要技术准备。

3　机车受电弓碳滑板试用方案设计

考虑到运用线路工况条件对碳滑板的影响，同时限于可搭载试用的现状，对机车受电弓碳滑板的在线试用宜结合既有机车的在线服役运用同期进行。基于此方式，依据碳滑板的技术特征和其他相关技术规定，主要从以下 5 个方面设计制定机车受电弓碳滑板的试用方案。

3.1　试用装车数量与周期

标准 TJ/JW 029—2014 规定新产品的装车试验产品数量一般不少于装备 2 台机车的用量，TG/JW 102—2014《机车技术管理规则》[16]规定新产品小批量装车时装车数量应少于 5 台，因此将试用碳滑板数量设计为 2 台份样车对应的数量。

既有机车整车设计定型时的试用走行里程为 30 万 km（客运）或 20 万 km（货运），机车受电弓碳滑板产品认证方案中同样规定试制机车受电弓碳滑板在铁路行业有 30 万 km（客运）或 20 万 km（货运）的试用走行经历。基于此，机车受电弓碳滑板的适应性试用走行里程设计为不少于 30 万 km（客运）或 20 万 km（货运）；其里程为碳滑板正常磨耗（含更换）下的机车里程累计，至少应覆盖每个受电弓碳滑板的全寿命周期。

3.2 试用期间的跟踪和监测

试制的机车受电弓碳滑板属于未定型产品，其质量存在不确定性。考虑新产品在试用期间的安全性，需要详尽跟踪、监测试制碳滑板在试用期间的质量状态及其变化。跟踪和监测信息总体划分为3种（如图2所示）：①运用跟踪信息；②日常质量监测信息；③定期监测信息。基于跟踪和监测信息，设计供现场使用的相应检查记录表格。试验结果如图2所示。

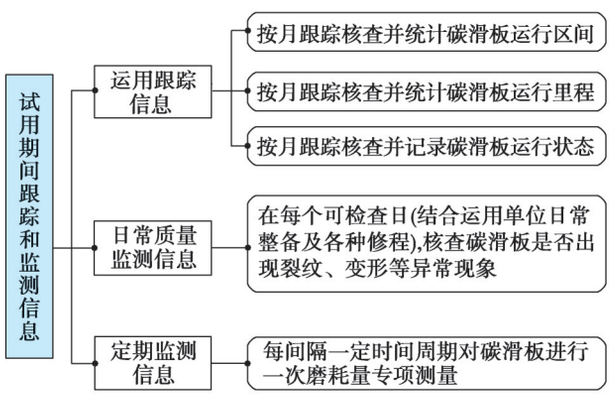


图2 碳滑板试用期间的跟踪和监测信息

Fig. 2 Tracking and monitoring information during the trial operation of carbon contact strips

为了掌握碳滑板的在线磨耗情况，在碳滑板1个寿命周期内，每月对碳滑板进行1次磨耗量专项测量。测量时在使用范围内取碳滑板3个点进行测量，并做好标记，然后用游标卡尺记录3个标记点处的碳滑条的厚度数据，具体如图3所示。

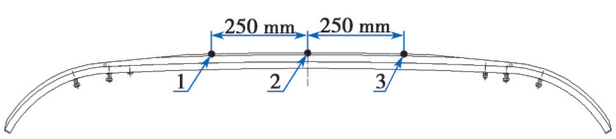


图3 磨耗量测量位置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of wear measurement position

3.3 试用结束后的拆检

根据试制碳滑板的试用状况，同时为更加全面验证碳滑板的质量，在机车达到试用周期后，至少随机抽取2条碳滑板，将其从受电弓上拆解下来，按照标准TJ/JW 029—2014对碳滑板进行室温下密封性测试，合格标准为充气气压达到1 MPa，并保压10 min，压力下降不应超过初始压力的2%。

3.4 试用结果评价

基于试用的目的和既有相关运用、检修等对碳滑板的要求，规定碳滑板在试用期间不应出现以下情况：①由于碳滑板本身质量原因而引起的更换。②碳滑板粘接不牢固，有离壳现象；金属托架变形；安装螺栓，自动降弓装置用进、出气孔不固定。③由于碳滑板质量的原因，出现以下情况视为不合格：存在贯穿至铝托架的侧面裂纹、上表面纵向贯穿性裂纹、裂到碳滑板边缘且宽度大于0.3 mm的横向裂纹、摩擦区超过3条以上裂纹、缺陷样块所占宽度方向超过40%，铝托架表面孔洞直径超过2 mm、接头或接缝处漏气、滑板扭曲变形。其中，上表面纵向贯穿性裂纹是垂直于滑板长度方向的裂纹，而横向裂纹是指平行于滑板长度方向的裂纹。对碳滑板可能出现此类缺陷的技术要求具体如图4所示。

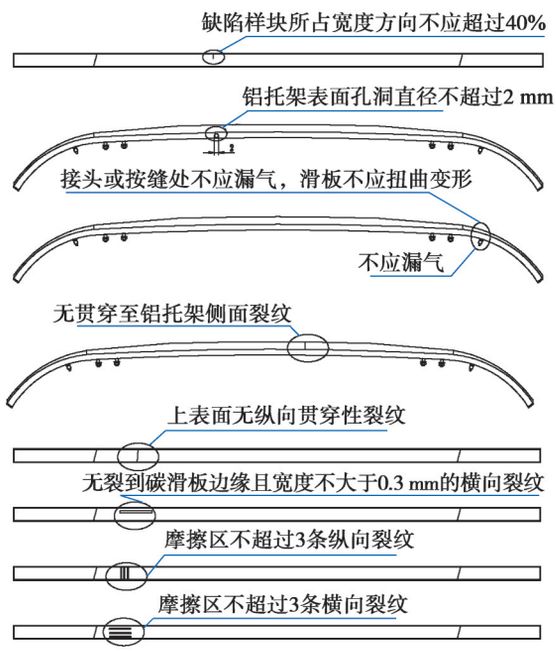


图4 对碳滑板可能出现缺陷的技术要求

Fig. 4 Technical requirements for potentical defects of carbon contact strips

试用周期结束后，碳滑板应符合如下要求：①单条碳滑板寿命不低于10万机车公里；②拆解后室温下的密封性测试结果符合要求。

3.5 安全应急预案

相关生产企业和配属运用单位需充分了解试用的安全风险问题与应对措施，尤其要关注试用过程中可能出现的质量风险。为应对试用过程中可能出现的安全风险问题，需要相关生产企业协同配属运用单位专门制定应急预案。试用过程中一旦出现碳滑板本身的安全质量问题，由相关生产企业承担相应责任；如出现异常质量情况，需尽快组织相关专家和涉及单位进行分析确认，必要时将试用碳滑板换回原车碳滑板，停止试用工作，以确保铁路交通运营安全。

4 试用方案的应用

将设计试用方案应用于国内某生产企业新试制的某型机车受电弓碳滑板，该型号碳滑板在1台份机车上的安装位置如图5所示，每台机车装有4条碳滑板。将试用碳滑板数量设计为2台份样车对应数量，共计8

条；为降低线路试用潜在风险、避免影响正常铁路运输，先只在2台机车中的2#受电弓上安装试用碳滑板（共4条），预试用1个月。经跟踪验证质量良好后，再在1#受电弓和2#受电弓上全部换装试用碳滑板。其配属的机车属于客运机车，因此将装有该碳滑板的机车适应性试用走行里程设计为不少于30万km。

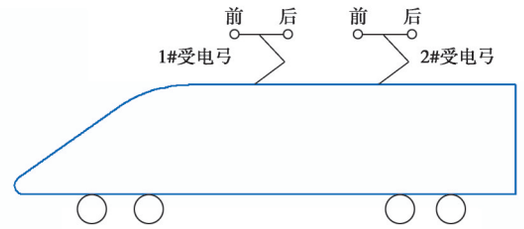


图5　1台份机车用碳滑板的安装位置

Fig. 5　Installation position of carbon contact strips on single locomotive

该型碳滑板于2020年9月10日获得铁路产品试用证书，被安排在配属于中国铁路乌鲁木齐局集团有限公司乌鲁木齐车辆段的2台机车（0037号和0053号）上试用。安装在0037号机车2#受电弓的试制碳滑板如图6所示。

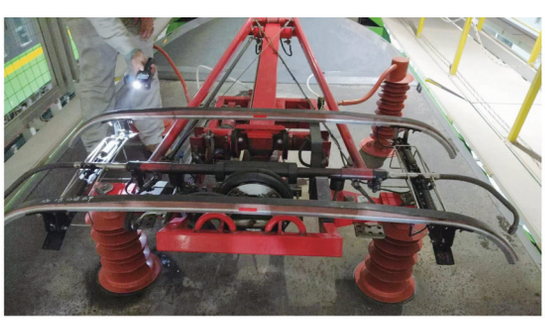
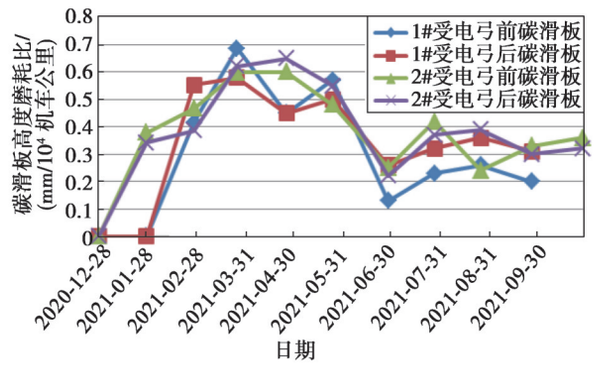


图6　安装在0037号机车2#受电弓的试制碳滑板

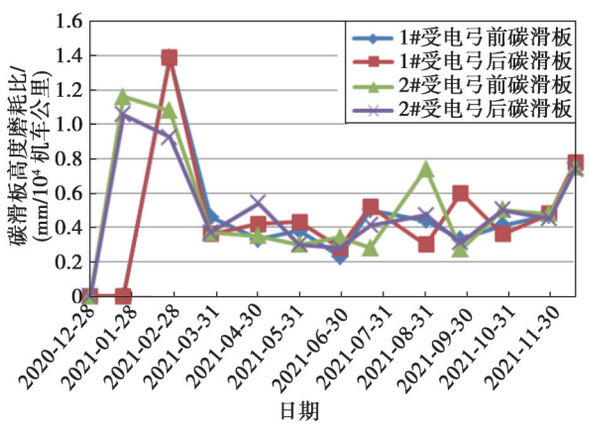
Fig. 6　Carbon contact strip installed on the pantograph 2 of No. 0037 locomotive in trial production stage

2020年12月28日，8条试制碳滑板在乌鲁木齐车辆段正式开始试用，主要被配属在“乌鲁木齐—伊宁”“乌鲁木齐—库尔勒”区间，试用线路具有冬季严寒多冰雪、昼夜温差偏大、风沙大的特点，试用环境和工况较为恶劣，有利于实现考核目的。

在试用期间，试制碳滑板试用状态良好，日常各项监测及时，碳滑板表面质量、磨耗情况等均符合相关评价要求，未发生影响铁路交通正常运营的事故。0037号机车1#受电弓的2条碳滑板于2021年10月12日磨耗到限，并正常更换，单根碳滑板寿命为21.26万机车公里；0037号机车2#受电弓的2条碳滑板于2021年11月10日磨耗到限，并正常更换，单根碳滑板寿命为24.08万km的机车走行里程；0053号机车1#受电弓和2#受电弓的4条碳滑板于2021年12月18日磨耗到限，并正常更换，单条碳滑板寿命为26.74万机车公里。试制碳滑板在1个寿命周期内的高度磨耗比曲线如图7所示。由图7可知，碳滑板在磨耗前期，磨耗速率较快，随后趋于平稳，冬春季磨耗加剧、夏季磨耗较稳定，在一定程度上符合同类碳滑板的一般磨耗规律。



(a) 0037号机车受电弓碳滑板



(b) 0053号机车受电弓碳滑板

图7　试用受电弓碳滑板在1个寿命周期内的高度磨耗比曲线

Fig. 7　Height wear ratio curve in a life cycle of pantograph carbon contact strip in trial operation

2022年2月，2台份机车的试用里程满足要求，其中0037号机车累计走行里程为332 358 km，0053号机车累计走行里程为336 409 km。在核实试用碳滑板的状态后，从0053号机车上抽取2条碳滑板进行拆解。对拆解后的碳滑板进行室温下密封性测试，其结果符合标准TJ/JW 029—2014的技术要求。

试用期间的跟踪和监测结果、试用后的拆检结果反映了试制碳滑板质量稳定，能够满足机车的运用要求。依据制定的试用方案，综合评价试用过程有效，试用结论为通过。

5　结束语

基于科学合理组织实施在线试用的目的，制定了机车受电弓碳滑板在线适应性试用方案。在不影响既有机车正常运营服役的前提下，该方案有效地支撑了碳滑板试用工作的顺利进行，为真实地暴露试用碳滑板可能存在的潜在缺陷和制造质量问题、验证试制碳滑板的应用可行性发挥了积极作用。

在机车碳滑板试用工作顺利完成的同时，也为其

他相关单位在今后进行同类产品的试用工作积累了经验。在后续设计类似试用方案时，在满足机车数量、条件成熟的情况下，建议在相同机车上同时安排试制、原装碳滑板产品进行试用和运用，试用的碳滑板覆盖不同碳滑条供方，增加试用对比评价方案设计。

参考文献：

[1] 韩富强, 黄银霞, 曲云腾 . 铁路专用产品运用试用考核适用性研究[J]. 中国铁路, 2015(11): 5-8.
HAN Fuqiang, HUANG Yinxia, QU Yunteng. Study on the applicability of trial assessment of railway special products [J]. China railway, 2015(11): 5-8.

[2] 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.
SONG Dongli, JIANG Yanan, ZHANG Weihua. Effects of contact strips wear on service performance of pantograph system[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2017, 52 (3): 450-457.

[3] 黄超, 王安斌, 何宇, 等 . 受电弓碳滑板异常磨损与高频振动机理分析[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(3): 149-156.
HUANG Chao, WANG Anbin, HE Yu, et al. Mechanism analysis of abnormal wear and high frequency vibration of pantograph carbon strip[J]. Railway standard design, 2021, 65(3): 149-156.

[4] 黎智豪 . 高寒及交变环境下弓网接触摩擦磨损性能研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2022.
LI Zhihao. Research on the wear properties of carbon strips and contact wires at frigid and alternative temperatures[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2022.

[5] 沈明学, 李含欣, 季德惠, 等 . 弓网系统载流摩擦磨损研究现状[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(4): 113-125.
SHEN Mingxue, LI Hanxin, JI Dehui, et al. Research status of current-carrying friction and wear in pantograph-catenary system[J]. Journal of east China jiaotong university, 2021, 38(4): 113-125.

[6] 赵磊, 张彬, 杜建波 . 电力机车碳滑板磨耗规律的研究[J]. 铁道机车车辆, 2018, 38(6): 80-82.
ZHAO Lei, ZHANG Bin, DU Jianbo. Study on grinding rule of carbon strip for electric locomotive[J]. Railway locomotive & car, 2018, 38(6): 80-82.

[7] 王亚春, 陈立明, 杨才智 . 高速铁路弓网关系模拟试验研究[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(3): 79-85.
WANG Yachun, CHEN Liming, YANG Caizhi. Simulation test study on pantograph-catenary relation of high speed railway[J]. China railway science, 2018, 39(3): 79-85.

[8] 吕海军 . DSA 型受电弓风路系统实时监测系统的研究[J]. 铁道技术监督, 2020, 48(11): 33-36.
LYU Haijun. Research on real-time monitoring system of DSA pantograph air circuit system[J]. Railway quality control, 2020, 48(11): 33-36.

[9] 李永光, 李晨亮, 李立照, 等 . 受电弓碳滑板病害边缘检测技术研究[J]. 中国铁路, 2018(6): 76-81.
LI Yongguang, LI Chenliang, LI Lizhao, et al. The study on the disease edge detection technology of pantograph carbon contact strip[J]. China railway, 2018(6): 76-81.

[10] 孙建设, 陈章 . 电力机车弓网电接触研究现状分析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2021, 44(2): 76-79.
SUN Jianshe, CHEN Zhang. Research advances of electric contact of pantograph-contact line for electric locomotive [J]. Electric locomotives & mass transit vehicles, 2021, 44 (2): 76-79.

[11] 金荦 . 电力机车受电弓滑板破损调查分析及对策措施[J]. 上海铁道科技, 2017(3): 35-36.
JIN Luo. Investigation analysis and countermeasures on damage of pantograph skateboard of electric locomotive[J]. Shanghai railway science & technology, 2017(3): 35-36.

[12] 周成尧, 刘畅 . 北京地铁 6 号线受电弓滑板异常磨耗研究[J]. 铁道机车车辆, 2019, 39(增刊 1): 51-54.
ZHOU Chengyao, LIU Chang. Research for abnormal wear of pantograph in Beijing subway line 6[J]. Railway locomotive & car, 2019, 39(Suppl 1): 51-54.

[13] 黄树智, 肖敬义, 贺祖团 . 城市轨道交通运营后期弓网异常磨耗整改及预防措施[J]. 现代城市轨道交通, 2022(5): 68-72.
HUANG Shuzhi, XIAO Jingyi, HE Zutuan. Improvement and prevention measures for abnormal wear of pantograph and contact line in the later period of urban rail transit operation[J]. Modern urban transit, 2022(5): 68-72.

[14] 傅骏 . 广州地铁 1 号线 A2、A3 型车受电弓碳滑板裂纹分析[J]. 现代城市轨道交通, 2016(6): 32-34.
FU Jun. Analysis on cracks of pantograph carbon skateboard of A2/A3 type vehicles on Guangzhou metro line 1 [J]. Modern urban transit, 2016(6): 32-34.

[15] 中国铁路总公司 . 交流传动机车受电弓碳滑板暂行技术条件: TJ/JW 029—2014[S]. 北京: 中国铁路总公司, 2014.
China Railway Corporation. Interim technical conditions for pantograph carbon slide plate of AC drive locomotive: TJ/JW 029—2014[S]. Beijing: China Railway Corporation, 2014.

[16] 中国铁路总公司 . 机车技术管理规则: TG/JW 102—2014[S]. 北京: 中国铁路总公司, 2014.
China Railway Corporation. Locomotive technology management rules: TG/JW 102—2014[S]. Beijing: China Railway Corporation, 2014.

收稿日期：2022-11-27
修回日期：2023-01-05