

地铁刚性接触网滑板磨损优化的试验研究

徐鸿燕¹ 王刘辉¹ 梅桂明² 陈光雄²

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉; 2. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 610031, 成都//第一作者, 高级工程师)

摘要 为研究地铁刚性接触网滑板和接触线异常磨损问题,使用环-块式载流摩擦试验机。基于正交试验法,对4种浸金属碳滑板和铜银合金接触线的电滑动磨损问题进行了多参数影响试验。研究了电流强度、滑动速度、法向力和滑板材料等参数对滑板的磨损量和温度的影响。正交试验结果表明,直流电流是影响滑板磨损量和温度的最重要因素,法向力的影响次之,滑动速度的影响最弱。可以通过不同的浸金属碳滑板与铜银接触线的匹配来获得优化的地铁刚性接触网的耐磨性能。

关键词 地铁; 刚性接触网; 受电弓; 滑板; 磨损

中图分类号 U225.6

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.04.038

Experimental Study on Wear Optimization of Metro Rigid Pantograph-catenary System Contact Strips

XU Hongyan, WANG Liuhui, MEI Guiming, CHEN Guangxiong

Abstract In order to study the abnormal wear of contact strips and contact wires of metro rigid pantograph-catenary systems, a block-on-ring type current-carrying friction tester is used. Based on orthogonal test method, multi-parameter influence tests are conducted on four types of electric sliding wear of metal-impregnated carbon materials and copper-silver alloy contact wire. Effects of parameters including electric current strength, sliding speed, normal force, and materials of contact strips on the wear and temperature of the contact strips are investigated. The orthogonal test results show that direct current is the most important factor affecting the wear and temperature of contact strips, normal force the second, and sliding speed the weakest. The optimized wear resistance of metro rigid pantograph-catenary system can be obtained by matching different metal-impregnated carbon strips with the copper-silver contact wire.

Key words metro; rigid pantograph-catenary; pantograph; contact strip; wear

First-author's address China Railway Siyuan Survey and

Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China

自2003年我国建设第一条刚性接触网地铁线路以来,刚性接触网因其具有载流量大、结构简单、接触线无张力、安装方便、占用空间小、无断线隐患、维修方便、综合建设费用和运营维护费用都较低等诸多优点,在我国地铁线路中得到了越来越广泛的应用。但多年来的应用实践也发现,采用刚性接触网线路受电弓滑板和接触线的材料磨损都比较严重^[1-3]。研究人员对地铁刚性接触网的弓网异常磨损原因进行了理论研究^[4-6],但对地铁刚性接触网的弓网材料磨损试验研究则比较少见,较多见的是干线高速铁路接触网弓网材料磨损的试验研究^[7-8]。

本研究的目的是通过正交试验方法,认识地铁刚性接触网弓网材料严重磨损的机理,为优化弓网材料匹配和提高弓网材料使用寿命提供有益参考。

1 试验简介

1.1 试验设备

试验在西南交通大学牵引动力实验室载流摩擦磨损试验机上进行。试验机如图1所示,它是一种块-环(转动盘)式试验机,滑板安装在滑板座上,接触线安装在直径1100 mm转动盘的外圆周柱面上。采用变频电机驱动转动盘转动,从而实现弓网摩擦副之间的水平相对滑动;采用曲柄连杆机构驱动滑板座做垂直方向的往复运动,从而实现弓网摩擦副之间的“之”字形相对运动。摩擦副之间的法向力采用砝码加载,法向力为0~300 N,试验速度为0~200 km/h,试验电流为DC 0~600 A,受电弓和接触线之间“之”字形相对运动幅值和频率分别为55 mm和0~3 Hz。

1.2 试件制备

目前,在地铁刚性接触网中:接触线材料普遍

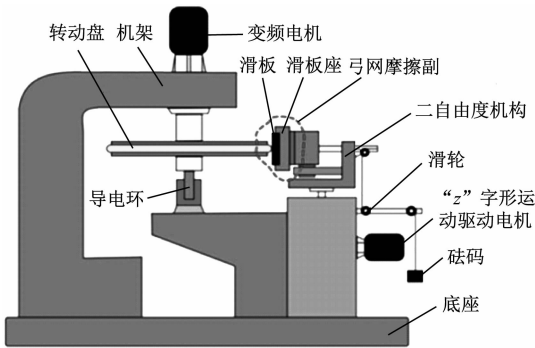


图 1 载流摩擦试验机简图

Fig. 1 Schematic diagram of the current-carrying friction tester

为国产的铜银合金接触线;滑板材料大多数都是浸金属碳,且国内外厂家的产品都有应用。本研究选取 2 种国产滑板(分别记为 A、B 滑板)和 2 种进口滑板(分别记为 C、D 滑板)进行对比试验,滑板材料的物理参数见表 1。铜银合金接触线试样的横截面与地铁接触线的横截面相同,该试样固定在试验机转动盘外圆柱面的整个圆周上。滑板试样使用地铁在用的材料,试样的宽度与实际滑板的宽度一致。滑板 A、B、C、D 的宽度尺寸分别为 35 mm、34 mm、33 mm、34 mm。将滑板加工成长度 120 mm 的试样块,安装在试验机的滑板座上。

表 1 滑板材料的物理参数

| Tab.1 Physical parameters of contact strips | | | | |
|---|------|------|------|------|
| 物理参数 | 滑板 A | 滑板 B | 滑板 C | 滑板 D |
| 体积质量/(g/cm ³) | 2.3 | 2.06 | 2.9 | 2.34 |
| 肖氏硬度 | 102 | 85 | 96 | 108 |

1.3 试验数据测量设备

试验时,使用精度为 0.1 mg 的电子天平来测量滑板的磨损量,使用热成像仪测量滑板的温度。由于接触线的磨损低微,况且接触线是固定在试验机转动盘外圆柱面上,拆装困难,因此本研究不测量接触线的磨损。

1.4 试验参数和试验方案

本研究试验电流为 DC 200 ~ 400 A,滑动速度为 60 ~ 120 km/h,法向力为 15 ~ 40 N,弓网“之”字形相对运动的幅值和频率分别为 55 mm 和 0.15 Hz,弓网切向相对滑动距离为 100 km。

由于试验工作十分耗时,故选定三因素(法向力、电流、滑动速度)四水平设计正交试验方案,试验工况见表 2。为了分析各个因素对试验结果的影响,需对正交试验结果进行极差分析。

响,需对正交试验结果进行极差分析。

$$M_{ij} = \frac{p}{n} \left(\sum_{k=1}^{n/p} y_{ij,k} \right) \tag{1}$$

$$R_j = \max(M_{ij}) - \min(M_{ij}) \tag{2}$$

式中:

p ——水平个数;

n ——试验次数;

$y_{ij,k}$ ——因素 j 第 i 水平的试验结果, $k = 1, 2, \dots, n/p$; 本试验中 n/p 为整数;

M_{ij} ——因素 j 中所有第 i 水平的试验结果平均值;

R_j ——因素 j 的极差。

极差分析可以分析出因素 j 对试验结果的影响程度。在正交试验中, R_j 值的大小和因素 j 对试验结果的影响程度呈正相关关系。

表 2 正交试验方案

Tab.2 Orthogonal test plan

| 工况 | 法向力/N | 电流/A | 速度/(km/h) |
|----|-------|------|-----------|
| 1 | 15 | 200 | 60 |
| 2 | 15 | 300 | 80 |
| 3 | 15 | 350 | 100 |
| 4 | 15 | 400 | 120 |
| 5 | 20 | 200 | 80 |
| 6 | 20 | 300 | 60 |
| 7 | 20 | 350 | 120 |
| 8 | 20 | 400 | 100 |
| 9 | 30 | 200 | 100 |
| 10 | 30 | 300 | 120 |
| 11 | 30 | 350 | 60 |
| 12 | 30 | 400 | 80 |
| 13 | 40 | 200 | 120 |
| 14 | 40 | 300 | 100 |
| 15 | 40 | 350 | 80 |
| 16 | 40 | 400 | 60 |

2 试验结果及分析

2.1 4 种滑板磨耗的正交试验结果

在载流滑动过程中 4 种滑板磨耗的正交试验结果见表 3 所示。正交试验的工况具有代表性,可以反映各因素各水平对滑板磨损量的影响。图 2 显示了 4 种滑板磨损量的比较,可以看出滑板 D 的耐磨性最好,滑板 A 的耐磨性次之,滑板 C 的耐磨性再

次之,滑板 B 的耐磨性最差。图 2 中,工况 4、8、12、16 对应的电流均为 DC 400 A,相应的磨损量都比较高,说明电流对滑板磨损量影响比较大。图 3 为工况 1 下 1 组滑板的磨痕形貌,可以看出滑板 D 的磨损最小。

表 3 滑板磨损的正交试验结果

| Tab.3 Result of contact strip wear orthogonal test | | | | |
|--|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 工况 | 滑板 A 磨损量/mm ³ | 滑板 B 磨损量/mm ³ | 滑板 C 磨损量/mm ³ | 滑板 D 磨损量/mm ³ |
| 1 | 112 | 120 | 390 | 56 |
| 2 | 365 | 81 | 540 | 95 |
| 3 | 216 | 487 | 317 | 143 |
| 4 | 317 | 1 733 | 841 | 562 |
| 5 | 275 | 35 | 125 | 53 |
| 6 | 231 | 77 | 266 | 39 |
| 7 | 212 | 166 | 226 | 8 |
| 8 | 403 | 1 401 | 532 | 140 |
| 9 | 196 | 16 | 69 | 17 |
| 10 | 108 | 32 | 198 | 107 |
| 11 | 607 | 83 | 379 | 109 |
| 12 | 742 | 2 314 | 911 | 360 |
| 13 | 41 | 25 | 52 | 18 |
| 14 | 75 | 94 | 66 | 24 |
| 15 | 206 | 205 | 109 | 52 |
| 16 | 503 | 1 818 | 123 | 275 |

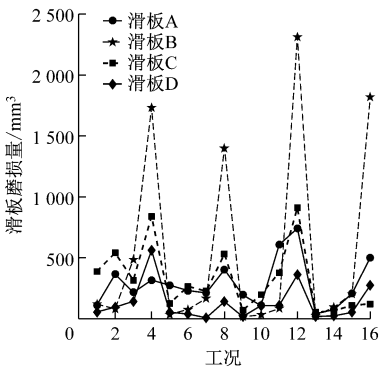


图 2 4 种滑板磨损量的比较

Fig.2 Comparison of the wear volumes of four types of contact strips

4 种滑板载流滑动摩擦正交试验磨损量的极差分析结果见表 4 所示。由表 4 可见,不同滑板材料磨损量试验 R_j 最大值对应的都是电流因素,也就是说直流电流是影响刚性接触网滑板材料磨损最重要的因素。此外,滑动速度是影响滑板 A 磨损量的次要因素,法向力是影响滑板 B、C、D 磨损量的次要因素。由表 3 还可看出,滑动速度对滑板 B、C、D

的磨损量的影响最弱。实际的地铁线路中,列车运行速度(即滑板的滑动速度)和弓网电流是不能随意变化的,因此可以通过控制弓网之间的法向力来尽量降低滑板的磨耗。滑板磨损量最优化参数一般通过极差分析确定,限于篇幅,这里不作详细讨论。从表 4 可粗略看出,滑板 A 耐磨性最优的工况是法向力 30 N、电流 200 A 和滑动速度 120 km/h;滑板 B 耐磨性最优的工况是法向力 25 N、电流 200 A 和滑动速度 100 km/h;滑板 C 耐磨性最优的工况是法向力 30 N、电流 200 A 和滑动速度 120 km/h;滑板 D 耐磨性最优的工况是法向力 20 N、电流 350 A 和滑动速度 120 km/h。

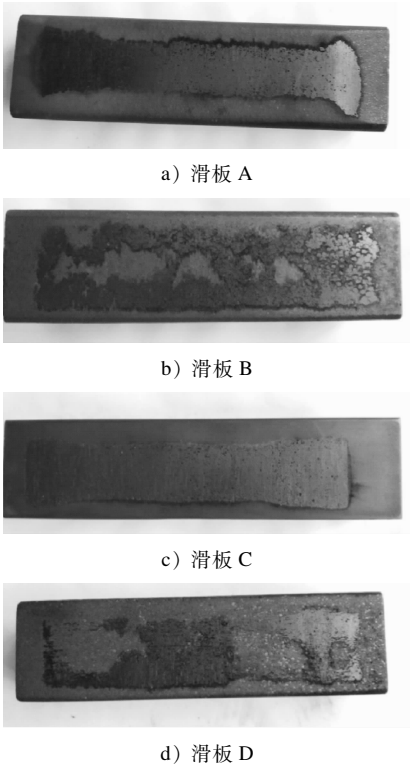


图 3 工况 1 下 4 种滑板的磨痕形貌
Fig.3 Scar topography of four types of contact strips under working condition 1

表 4 滑板磨损的极差分析结果

| Tab.4 Result of contact strip wear range analysis | | | |
|---|--------------------------|------------|--------------|
| 滑板种类 | 磨损量试验的 R_j/mm^2 | | |
| | $j=1$ (法向力) | $j=2$ (电流) | $j=3$ (滑动速度) |
| 滑板 A | 207.0 | 335.3 | 227.5 |
| 滑板 B | 191.5 | 1 767.5 | 169.8 |
| 滑板 C | 434.5 | 442.8 | 175.3 |
| 滑板 D | 154.0 | 298.3 | 92.8 |

2.2 4 种滑板温度的正交试验结果

在载流滑动过程中,4 种滑板温度的正交试验结果见表 5。由图 4 可见,在相同工况下滑板 C 的温度最低,滑板 D 的温度次之,滑板 A 和滑板 B 的温度最高。比较图 3 和图 4 可以看出:滑板 D 的磨损量最低,其温度也比较低,因而这种滑板材料的使用性能是比较好的;滑板 A 的耐磨性仅次于滑板 D,但其温度却是最高之一,显然其综合性能比滑板 D 差些;滑板 B 的耐磨性和温度性能都最差。

表 5 滑板温度正交试验的结果

Tab.5 Result of contact strip temperature orthogonal test

| 工况 | 滑板 A 温度/℃ | 滑板 B 温度/℃ | 滑板 C 温度/℃ | 滑板 D 温度/℃ |
|----|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1 | 175 | 184 | 163 | 125 |
| 2 | 328 | 222 | 145 | 200 |
| 3 | 425 | 286 | 269 | 246 |
| 4 | 270 | 423 | 199 | 249 |
| 5 | 266 | 166 | 91 | 93 |
| 6 | 328 | 222 | 198 | 198 |
| 7 | 448 | 274 | 209 | 278 |
| 8 | 431 | 383 | 270 | 243 |
| 9 | 236 | 160 | 90 | 221 |
| 10 | 250 | 265 | 145 | 125 |
| 11 | 436 | 397 | 197 | 295 |
| 12 | 466 | 489 | 211 | 231 |
| 13 | 122 | 216 | 105 | 266 |
| 14 | 258 | 226 | 166 | 285 |
| 15 | 300 | 297 | 236 | 289 |
| 16 | 285 | 412 | 314 | 334 |

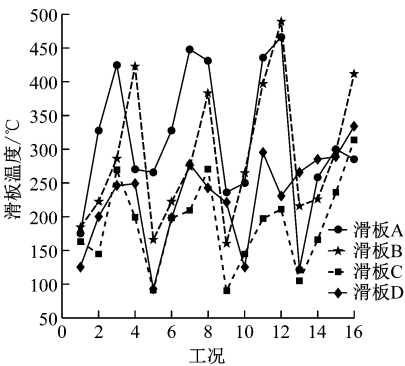


图 4 4 种滑板温度的比较

Fig.4 Comparison of the temperatures of four types of contact strips

4 种滑板温度试验的极差分析结果见表 6,可以看出 4 种滑板温度试验的 R_j 最大值均对应电流因素,即弓网通过电流对滑板温度的影响最大。

表 6 滑板温度的极差分析结果

Tab.6 Result of contact strip temperature range analysis

| 滑板种类 | 温度试验的 $R_j/^\circ\text{C}$ | | |
|------|----------------------------|------------|--------------|
| | $j=1$ (法向力) | $j=2$ (电流) | $j=3$ (滑动速度) |
| 滑板 A | 127.0 | 202.5 | 67.5 |
| 滑板 B | 66.5 | 245.3 | 40.0 |
| 滑板 C | 44.5 | 136.3 | 53.5 |
| 滑板 D | 120.7 | 134.3 | 60.7 |

3 结语

本文基于正交试验法试验研究了 4 种浸金属碳滑板材料与铜银合金接触线在直流电流下的滑板磨损性能和温度变化,得到如下结论:

1) 直流电流是影响滑板耐磨性和温度的最重要因素,弓网之间的法向力对滑板耐磨性的影响次之,滑动速度对滑板耐磨性的影响最弱。

2) 不同的浸金属碳滑板与铜银合金接触线配对时,其电滑动摩擦引起的滑板磨损量差别比较大,可以通过正交试验方法进行多方案比较以获得优化的滑板耐磨性能。

3) 弓网之间的法向力对滑板耐磨性的影响仅次于电流的影响,但并非法向力越大就越好。

参考文献

[1] 艾东兵.城市轨道交通刚性接触网拉出值优化[J].城市轨道交通研究,2018(7):50.
AI Dongbing. Optimization of the rigid overhead contact system stagger in urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2018 (7):50.

[2] 白凯元.刚性接触网拉出值布置与磨耗分析[J].城市轨道交通研究,2017(6):149.
BAI Kaiyuan. Analysis of rigid catenary stagger layout and wear[J]. Urban Mass Transit, 2017 (6):149.

[3] 蒋灵君.刚性接触网线路车辆碳滑板异常磨耗分析[J].现代城市轨道交通,2011(3):43.
JIANG Lingjun. Analysis of the abnormal wear of rigid catenary system vehicle pantograph strips[J]. Modern Urban Rail Transit, 2011 (3):43.

[4] 王剑.地铁刚性接触悬挂弓网磨耗问题研究[J].都市快轨交通,2012(4):59.
WANG Jian. Discussion on pantograph-catenary abrasion of metro rigid overhead catenary system[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2012 (4):59.

[5] 陈显志,陈建君,杨波.减小架空刚性悬挂接触网弓网磨耗的措施[J].现代城市轨道交通,2013(1):21.
CHEN Xianzhi, CHEN Jianjun, YANG Bo. Measures on reducing wear of pantograph and contact wire of overhead rigid suspension catenary[J]. Modern Urban Rail Transit, 2013(1):21.

(下转第 185 页)