

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.07.042

潮湿条件下滑板磨耗特性研究

王 蒙¹, 郭凤仪¹, 王智勇², 陈忠华², 薛一鸣²

(1. 辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105; 2. 国网冀北电力有限公司, 北京 100054)

摘要: 为了研究潮湿对受电弓滑板磨耗造成的影响,利用弓网电弧电磁噪声实验平台,开展了4种潮湿条件下的载流磨耗实验,分析了不同潮湿条件下浸铜碳滑板的载流磨耗特性和滑板表面微观形貌。弓网系统间存在一个最佳潮湿度,有利于减少滑板磨耗和电弧的产生。4种潮湿条件下磨耗机理的变化过程为:电弧侵蚀磨损伴随轻微机械磨损、机械磨损、电弧侵蚀磨损,与正常条件下由轻微机械磨损到重机械磨损伴随轻微电弧侵蚀,到机械磨损和电弧侵蚀共存状态的磨耗机理变化过程不同。为特殊条件下弓网磨耗的研究提供一定基础。

关键词: 潮湿度; 滑动电接触; 磨耗机理

Study on the Wear Characteristics of Slide Plate Under Wet Conditions

WANG Meng¹, GUO Fengyi¹, WANG Zhiyong², CHEN Zhonghua², XUE Yiming²

(1. Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Liaoning Huludao 125105, China;

2. State Grid Jibei Electric Power Company, Beijing 100054, China)

Abstract: In order to study the influence of wet electric pantograph slide abrasion, using catenary electromagnetic noise experiment platform, the current-carrying wear experiments of 4 kinds of wet conditions are carried out, the current-carrying wear characteristics and surface morphology of slide plate of Cu impregnation carbon under different wet conditions are analyzed. There is an optimum humidity between the pantograph and catenary system, which is helpful to reduce the arc and the slide plate wear. At the same time, the changing process of wear mechanism under four kind of damp conditions is, arc erosion wear is accompanied by slight mechanical wear, mechanical wear and arc erosion wear, under normal conditions, slight mechanical wear to heavy mechanical wear accompanied minor arc erosion, and finally changed to coexistence of mechanical wear and arc erosion. It provides a basis for the study of pantograph mesh wear under special conditions.

Key words: humidity; sliding electrical contact; wear mechanism

0 引言

在电力机车运行过程中,受电弓/接触线构成一对机械与电气耦合的摩擦副,其载流磨耗特性受机械、摩擦、化学、传热和电气等因素综合作用的影响。随着机车速度的增加,受电弓磨耗特性影响列车的安全性和滑板使用寿命。因此,对滑板磨耗特性的研究越来越重要^[1]。胡道春^[2]等研究了电弧能量对浸金属碳滑板载流磨损性能的影响。电弧侵

蚀坑四周残留的坚固区域起支持载荷的作用,电弧侵蚀区域磨损率不增加^[3]。

T. Ding^[4-6]等发现,磨损体积的增加由温度和电弧放电共同作用,电弧放电对摩擦系数和磨损表面有重要影响。卜俊^[7]探索了温度对电力机车正常运行的影响,分析了温度对摩擦系数、滑板磨耗、滑板表面形貌与成分变化的影响。王智勇^[8]等对不同压力、速度、电流条件下的摩擦副载流磨损特性进行研究,应用F检验法比较了3个因素对磨损率的影

收稿日期:2017-12-06; 修回日期:2018-02-18

基金项目:辽宁省教育厅基金项目(LJYL015)。

Project Supported by Liaoning Province Department of Education Fund(LJYL015).

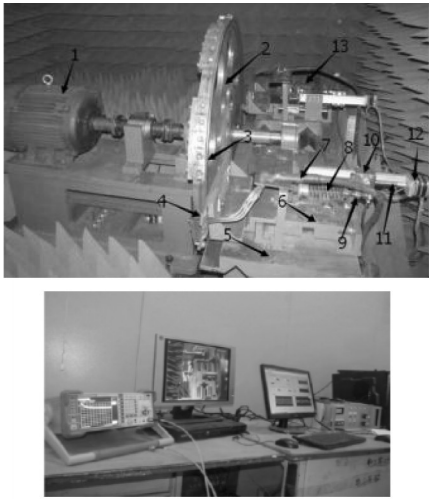
响程度。陈伟^[9]指出,适当增加离线距离,滑板的电弧侵蚀更加严重,但过大的离线距离反而会减弱电弧侵蚀。

目前,无论是实验和仿真,都是在正常的工况环境条件下进行,缺乏潮湿条件下弓网磨耗特性的研究。利用弓网电弧电磁噪声实验平台,研究不同潮湿条件下滑板的磨耗特性及机理,为研究特殊环境下弓网磨耗特性提供理论指导,具有一定的实际意义。

1 实验装置和条件

1.1 实验装置

利用弓网电弧电磁噪声实验平台开展实验,该平台由电波暗室,弓网电弧发生器和测量与分析系统组成^[10],见图1。



1—电机; 2—转盘; 3—接触线; 4—滑板; 5—水平移动台;
6—垂直移动台; 7—电缆; 8—弹簧; 9—拉压力传感器;
10—滑块; 11—滚珠丝杆; 12—步进电机; 13—电机。

图1 实验平台

Fig.1 Experimental platform

电波暗室提供一种电磁兼容性测试环境,弓网电弧发生器用于模拟弓网系统滑板与接触线之间的之字型运动轨迹;测量分析系统用于实现接触电压、接触电流、接触压力等试验数据的在线检测。

1.2 实验材料与方案

实验中滑板材料为浸铜碳,接触线材料为纯铜,截面积为120 mm²。滑板和接触线材料性能见表1。

采用单因素实验法设计了弓网载流磨耗实验,实验过程中,设置滑板静态接触压力为70 N,滑动速度为70 km/h,接触电流为220 A,滑板往复速度为0.25 m/s,单组试验时间为10 min,实验中只改变潮湿湿度,不改变其他条件。潮湿湿度设置见表2。

表1 滑板和导线性能

Table 1 Performance of slider and line

参数	浸铜碳滑板	纯铜接触导线
布氏硬度/HBS	56.7	96.2
密度/(10 ³ kg·m ⁻³)	3.4	8.9
电阻率/(μΩ·m)	12.320 0	0.017 5
比热/[J·(kg·K) ⁻¹]	660.2	380.0
热导率/[W·(m·K) ⁻¹]	15	380

表2 实验条件

Table 2 Experimental condition

潮湿湿度	说明
正常	正常滑板
垂上方喷水	实验进行时,用喷雾器垂直滑板表面均匀对滑板喷水
浸泡 20 min	将滑板在水中浸泡 20 min,然后进行实验
浸泡 60 min	将滑板在水中浸泡 60 min,然后进行实验

1.3 参数测量

采用 OPTPro2012 型金相显微镜在放大倍数为100 倍的条件下,测量实验前后滑板表面微观形貌。采用 BSM120.4 型电子天平测量实验前后滑板的质量,并计算磨耗量,该天平的精度为万分之一克。采用同步触发电路识别电弧,同步触发电路由 UVR2868 型紫外光传感器及其配套电路组成,当有电弧产生时,传感器接收光信号,输出高电平,当无电弧产生时,输出低电平,统计结果见表3。采用 FLIR T400 型红外热成像仪录制滑板表面温度,见图2。根据图2界面温度,实时的记录温度值,对录制的温度每10 s取一个平均值,绘制温度曲线见图3。

表3 不同潮湿条件下燃弧情况统计结果

Table 3 Statistical results of arc combustion under different humid conditions

实验条件	正常	垂上方 喷水	浸泡 20 min	浸泡 60 min
总燃弧时间/s	11.62	5.56	0.61	2.86
平均燃弧时间/ms	28.55	26.61	13.55	21.98
燃弧次数	407	209	45	130
燃弧率/%	1.94	0.93	0.10	0.48

1.4 数据统计结果

由图3和表3可知,正常、喷水、浸泡60 min 3种条件下平均燃弧时间较长,燃弧率和燃弧次数较大,并且温度较高。浸泡20 min 条件下的温度最低,燃弧时间最短,燃弧率和燃弧次数最低。每组实验过程中所记录温度数据的平均值见图4。

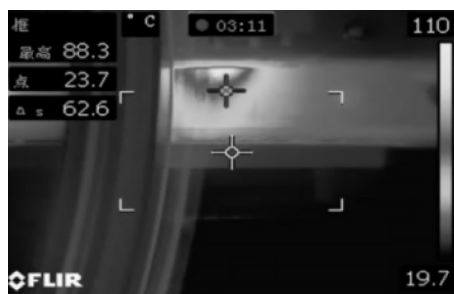


图2 正常条件下红外热成像仪测量界面

Fig. 2 Measurement interface of infrared thermal imager under normal conditions

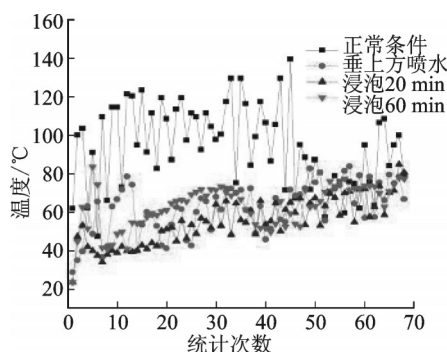


图3 温度变化曲线

Fig. 3 Temperature change curve

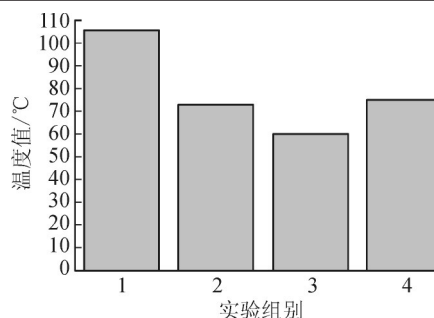


图4 平均温度

Fig. 4 Average temperature

2 实验结果与分析

实验期间应用同一块滑板。不同潮湿条件下,实验前后滑板表面形貌见图5。图5中,椭圆区域代表由电弧侵蚀的电弧坑和犁沟,矩形区域代表机械摩擦。

2.1 实验结果讨论

由图5(a)可知,实验前滑板表面组织结构较均匀,没有机械摩擦和电弧侵蚀的痕迹,滑板表面为近似光滑的平面。

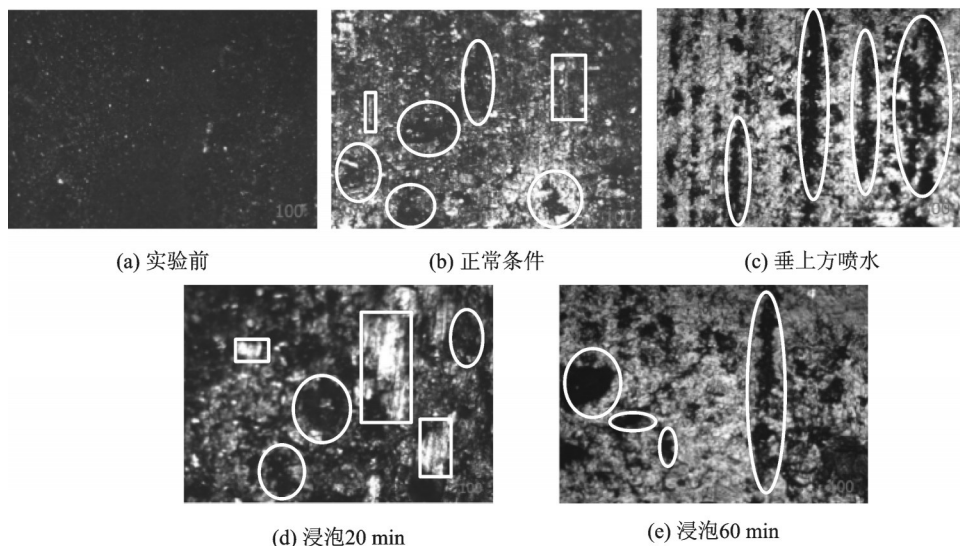


图5 滑板表面形貌

Fig. 5 Surface morphology of slider

2.1.1 正常条件

由图5(b)可知,滑板表面存在电弧侵蚀坑、明显的剥落坑,电弧烧蚀坑附近或者两个小的烧蚀坑间的材料发生挤压和撕裂,同时由于温度波动产生的热应力^[2],形成撕裂裂纹。在碳材料基体析出的铜清晰可见。由表3和图3可知,正常条件下,燃弧率最高和燃弧时间最长,滑板表面温度最高且波动较大。此时滑板磨损机理主要表现为电弧侵蚀和轻微机械磨损。

2.1.2 垂上方喷水

由图5(c)可知,滑板表面存在大量电弧侵蚀坑、侵蚀麻点和沿运动方向的犁沟痕迹,且犁沟磨损现象较严重。滑动电接触过程中,电弧会随运动方向而迁移,由此加剧滑板表面沿运动方向的烧蚀,形成犁沟^[11],侵蚀麻点由飞溅出的弧点造成,并且电弧形状是造成滑板表面侵蚀微观形貌的主要原因,电弧变化形态见图6。由图6可知,电弧形状与滑板表面电弧侵蚀形状和运动方向大致相同,并且喷水条

件下的长弧现象比正常条件下多,导致犁沟增多,正常情况下电弧形态多为椭圆形。此时,滑板磨损机理主要表现为电弧侵蚀。

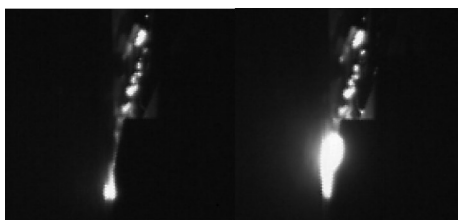


图6 电弧变化形态

Fig. 6 Change form of arc

2.1.3 滑板浸泡 20 min

由图 5(d)可知,滑板表面产生大量的沿滑动方向的磨痕和光滑平面,且机械磨损较其他 3 种条件严重。由表 3 可知,此时燃弧率、燃弧时间均最小,只产生微弱电弧,机械磨损占主要作用。滑动接触时,法向载荷将表面压平,滑动摩擦过程中的剪切应力使压紧平面形成了片状。并且,在剪切力的作用下,磨耗面上的粘着结合点被剪切断裂形成细小的磨屑,这种磨屑在剪切应力和载荷的作用下对滑板表面产生较为严重的切削,造成滑板表面磨痕。同时,浸铜碳滑板中碳分子机构较松散,易在压力作用下产生脱离原组织的颗粒,颗粒发生断裂,在浸铜碳滑板中脱离,形成磨屑并依附在滑板和接触线之间,导致磨粒磨损。由图 5 可以看出,由于反复摩擦作用产生光滑表面。此时,滑板磨损机理主要表现为磨粒磨损和粘着磨损。

2.1.4 滑板浸泡 60 min

由图 5(e)可知,滑板表面产生大量电弧侵蚀坑、犁沟和侵蚀麻点,并且电弧侵蚀坑较其他 3 种条件严重。这是由于长时间的滑动磨损,使滑板表面组织结构与硬度发现变化,产生疲劳磨损。此时滑板磨损机理主要表现为电弧侵蚀和疲劳磨损。

2.2 磨损机理分析

滑动电接触过程中,接触面实际是由少数微小的点或面发生真正的接触,电流流过接触面附近时收缩,实际接触面积减小,接触电阻增加。电弧放电时,由热成像仪录制的时频可知,弧光更为集中地发生在接触副附近或接触副间,电弧侵蚀导致接触材料脆断脱落和掉块现象变得更严重,磨屑的产生也导致磨粒磨损。同时,电弧发生时产生剧烈能量,在电弧能量作用下,滑板表面材料发生融化、气化、流动、凝固等一系列物理冶金过程,导致摩擦副材料以微小液滴形式喷溅出去,造成电弧侵蚀。

当两微凸体相对接触时,由于接点的粘着和随

后的滑动,不可避免地引起温度波动,弧柱区温度可达 $3\,000 \sim 50\,000\text{ K}$ ^[12],这些温度的闪现是瞬时的,其延续时间约为 10^{-4} s ^[12]。由于电弧热、摩擦热、焦耳热共同作用,使微凸体的顶端达到高温,高温会使次表面的铜析出。同时,高温会导致部分接触峰点产生粘着,随后在滑动中粘着结点被破坏,形成粘着磨损。

潮湿条件下,受电弓/接触线之间的接触表面会形成一层 nm 级的水膜,水膜中的双电层效应起着重要的润滑作用^[12]。在接触表面上,水膜存在的双电层引起的电粘度,将明显改变原来的粘度。根据考虑双电层效应的雷诺方程可知,实际粘度与薄膜厚度的三次方成反比,表面双电层对膜厚很薄的流体动压润滑过程有显著影响^[12]。微动磨损时,由于磨损随大气湿度的变化很敏感,当大气湿度增加时,接触表面上吸附的湿气起到了润滑剂的作用而减少磨损^[13]。这与图 7 所示的磨损测量结果一致,所以潮湿湿度在一定区间时,水膜能减磨损。

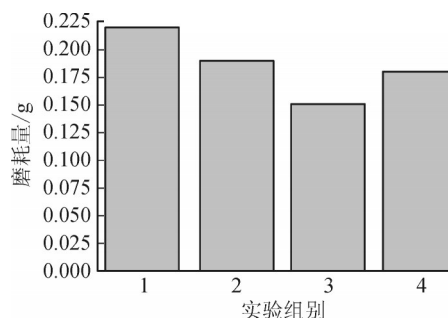


图7 磨损量

Fig. 7 Wear amount

当滑板表面相对湿度大于 65% 时,表面会覆以一层约 $0.001 \sim 0.01\text{ }\mu\text{m}$ 的水膜,当相对湿度接近 100% 时,水膜可达到几十微米。表面湿度在一定区间时,水膜增大了弓网间实际接触面积^[12],水膜的润滑作用能减少磨损。当湿度超过一定区间、温度升高导致气隙击穿电压降低,弓网摩擦副间的气隙更容易被击穿,电弧的产生又增多,增大滑板磨损。同时,随着湿度的增加,水膜在滑板表面的覆盖率增大且厚度增加,导致接触副间的电流传导性能变差,影响滑板磨损。通过数据统计分析和磨损测量可知,随湿度的增加,弓网间产生的电弧先减少后增大,并存在一个合理的潮湿湿度,有利于减少电弧的产生和滑板磨损,这与数据统计和磨损表面形貌分析结果相一致。

弓网滑动电接触过程中,弓网间接触压力呈动态周期性波动,作用在接触点上的力分为垂直分力和水平分力。前者使硬质点压入滑板表面,造成冲

蚀磨损,后者使硬质点在滑板表面产生相对位移,使滑板磨损表面产生犁沟或切屑^[13],造成机械磨损。垂直分力产生的磨损量比水平分力产生的磨损量低一些,并且电弧侵蚀磨损与振幅无关,而机械磨损与振幅成线性关系^[13],这是由于冲蚀磨损会随着振幅的增大而增加。垂直分力会改变弓网间实际接触面积,并且可能会导致滑板断裂和离线距离增大,增加磨耗同时可能增加电弧的产生。因此,研究振动对弓网的影响具有一定意义。

3 结论

通过以上分析可以得出以下结论:

1)在不同潮湿条件下,随着潮湿度的增加,弓网间产生的电弧先减少后增大,且滑板的磨耗量也呈现出先减小后增大的趋势。通过上述结果可知,弓网摩擦副存在一个合理的潮湿湿度有利于减少电弧的产生和滑板磨耗。

2)正常条件下,浸铜碳滑板整个磨耗过程中的磨耗机理变化为:由轻微机械磨损到重机械磨损伴随轻微电弧侵蚀,再到机械磨损和严重电弧侵蚀共存,最后趋于稳定的磨损状态。通过对4种条件下磨耗过程的机理研究发现,潮湿条件下磨耗机理的变化过程与正常条件下不同,改变潮湿湿度磨耗机理会发生相应的变化。潮湿条件下磨耗机理的变化过程为:电弧侵蚀磨损伴随轻微机械磨损、机械磨损、电弧侵蚀磨损,为特殊条件下弓网系统的研究提供一定基础。

参考文献:

- [1] 杨红娟,胡艳,陈光雄.受电弓滑板载流磨损机理演变过程试验研究[J].西南交通大学学报,2015,50(1):77-83.
YANG Hongjuan, HU Yan, CHEN Guangxiong. Experimental study on evolution of wear mechanism of contact strip with electric current[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(1): 77-83.
- [2] 胡道春,孙乐民,上官宝,等.电弧能量对浸金属碳滑板材料载流摩擦磨损性能的影响[J].摩擦学报,2009,29(1):36-41.
HU Daochun, SUN Lemin, SHANGGUAN Bao, et al. Influence of arc energy on friction and wear properties of metal soaked carbon slider material[J]. Tribology Journal, 2009, 29(1): 36-41.
- [3] KUBOTA Y, HAYASAKA T, IYAUCHI T, et al. Effect of arc discharge on the wear profile of Cu impregnated carbon based pantograph contact strip[J]. The International Conference on Electrical Contacts, 2014, 22(26): 248-254.
- [4] DING T, CHEN G X, WANG X, et al. Friction and wear behavior of pure carbon strip sliding against copper contact wire under AC passage at high speeds[J]. Tribology International, 2011(44): 437-444.
- [5] 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): 1629-1636.
- [6] DING T, CHEN G X, LI Y M, et al. Arc erosive characteristics of a carbon strip sliding against a copper contact wire in a high-speed electrified railway[J]. Tribology International, 2014(79): 8-15.
- [7] 卜俊.温度对弓网系统载流磨损的影响[D].成都:西南交通大学,2010.
BU Jun. Influence of temperature on current carrying wear of pantograph system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [8] WANG Z Y, GUO F Y, CHEN Z H, et al. Research on current-carrying wear characteristics of friction pair in pantograph catenary system[C]//Proc. of 59th IEEE Holm Conf. on Electrical Contact, Newport(RI). USA: IEEE, 2013: 92-96.
- [9] 陈伟.离线距离对弓网电弧特性及滑板载流摩擦磨损性能的影响[D].成都:西南交通大学,2015.
CHEN Wei. The effect of the off-line distance on the characteristics of arc distance between the pantograph and catenary and the friction and wear performance with electric current[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [10] 郭凤仪,王喜利,王智勇,等.弓网电弧辐射电场噪声实验研究[J].电工技术学报,2015,30(14):220-225.
GUO Fengyi, WANG Xili, WANG Zhiyong, et al. Research on radiated electric field noise of pantograph arc[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 220-225.
- [11] 吴广宁,周悦,雷栋,等.弓网电接触研究进展[J].高电压技术,2016,42(11):3495-3506.
WU Guangning, ZHOU Yue, LEI Dong, et al. Research progress on electrical contact of pantograph[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(11): 3495-3506.
- [12] 温诗铸,黄平.摩擦学原理[M].第3版.北京:清华大学出版社,2008.
WEN Shizhu, HUANG Ping. Tribology principle[M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [13] 何奖爱,王玉玮.材料磨损与耐磨材料[M].沈阳:东北大学出版社,2001.
HE Jiangai, WANG Yuwei. Material wear and wear resistant materials[M]. Northeastern University Press, 2001.

王蒙(1992—),男,硕士研究生,研究方向为电器基础理论及其应用。