



水轮发电机碳刷/集电环无载流与载流干滑动摩擦磨损性能研究

秦红玲 付阳 喻叶 刘云帆 杨昌 赵新泽 张小龙

Tribological Performance of Carbon Brush/Collector Ring for Hydroelectric Generator under Dry Sliding Condition with Current-Carrying and without Current-Carrying

QIN Hongling FU Yang YU Ye LIU Yunfan YANG Chang ZHAO Xinze ZHANG Xiaolong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2019114>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

PF/CNTs-Cu复合材料的制备及其载流摩擦磨损机理研究

Preparation and Current Carrying Wear Properties of PF/CNTs-Cu Composites

摩擦学学报. 2018, 38(3): 334 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018.03.011>

45钢/PA66配副干滑动摩擦磨损性能研究

Friction and Wear Behavior of 45 steel/PA66 Pairs under Dry Sliding Condition

摩擦学学报. 2019, 39(1): 26 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018138>

载荷和电压对纯铜滚动载流摩擦学性能的影响

Effect of Load and Voltage on the Tribo-electric Behaviour of Rolling Cu Pairs

摩擦学学报. 2018, 38(1): 67 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018.01.009>

AISI 4340钢干滑动摩擦磨损特性研究

Investigation on Friction and Wear behavior of AISI 4340 Steel in Dry Sliding Condition

摩擦学学报. 2018, 38(1): 59 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018.01.008>

18Ni(300)钢高速干滑动摩擦磨损特性研究

Friction and Wear Characteristics of 18Ni(300) Steel at High Speed Dry Sliding Condition

摩擦学学报. 2017, 37(2): 218 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.02.011>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16078/j.tribology.2019114

水轮发电机碳刷/集电环无载流与载流干滑动摩擦磨损性能研究

秦红玲^{1,3}, 付阳¹, 喻叶², 刘云帆¹, 杨昌¹, 赵新泽¹, 张小龙^{1*}

(1. 三峡大学水电机械设备设计与维护湖北省重点实验室, 湖北宜昌 443002;

2. 中国长江电力股份有限公司葛洲坝电厂, 湖北宜昌 443000;

3. 国家水运安全工程技术研究中心福建分中心, 福建福州 350108)

摘要: 针对水轮发电机碳刷/集电环摩擦副磨损严重、打火和励磁电流不稳等现象, 在对常用碳刷(D172、E468e)磨损原因及影响因素分析的基础上, 采用碳刷/GCr15钢球配副在Anton Paar Tribometer多功能摩擦磨损试验机上, 研究干滑动条件下载荷、速度及电流密度对碳刷/GCr15钢球配副摩擦学性能的影响。结果表明: 碳刷/集电环摩擦副在载流与无载流时的摩擦磨损性能相差较大。无载流时, D172和E468e两碳刷的磨损率均随载荷的增大呈现先减小后增大的趋势, 在达到最小值时出现大转折, 两碳刷磨损率变化趋势呈“U”字型。无载流时D172碳刷磨损率远低于E468e, 载流时则情况相反。D172碳刷无载流时磨损机理以磨粒磨损为主并伴有轻微黏着磨损, 载流时碳刷除发生磨粒磨损、黏着磨损外还伴有氧化磨损。E468e碳刷在载流前后均为磨粒磨损。D172碳刷摩擦系数整体呈增大趋势, 而E468e碳刷摩擦系数先缓慢增大随后逐渐减小, 电流对D172碳刷摩擦系数的影响比E468e碳刷更明显。

关键词: 碳刷/集电环; 载流摩擦; 磨损率; 电流密度; 水轮发电机

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2019)06-0713-10

Tribological Performance of Carbon Brush/Collector Ring for Hydroelectric Generator under Dry Sliding Condition with Current-Carrying and without Current-Carrying

QIN Hongling^{1,3}, FU Yang¹, YU Ye², LIU Yunfan¹, YANG Chang¹, ZHAO Xinze¹, ZHANG Xiaolong^{1*}

(1. Hubei Key Laboratory of Hydroelectric Machinery Design & Maintenance, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China

2. Gezhouba Hydropower Plant, China Yangtze Power Co, Ltd, Hubei Yichang 443000, China

3. Fujian sub-center of National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Fujian Fuzhou 350108, China)

Abstract: In order to reveal the cause of the severe wear, sparking and unstable excitation current of the carbon brush/collector ring on hydroelectric generator, the carbon brush/GCr15 ball pair was used to simulate its contact and friction condition on the Anton Paar Tribometer multi-functional friction and wear tester. Then the effects of load, speed and current density on the tribological properties of the carbon brushes (D172, E468e) under the dry sliding condition with current-carrying and without current-carrying were analyzed. The results show that the tribological performance of the carbon brushes with current-carrying was quite different from that without current-carrying. Without current-carrying, the wear rates of D172 and E468e carbon brushes decreased first and then increased with the increase of load.

Received 26 June 2019, revised 13 August 2019, accepted 17 September 2019, available online 28 November 2019.

*Corresponding author. E-mail: xlzhang12@sina.com, Tel: +86-18371798561.

The project was supported by the Tribology Science Fund of State Key Laboratory of Tribology (SKLTKF19B09).

清华大学摩擦学国家重点实验室开放基金项目(SKLTKF19B09)资助。

When the minimum value was reached, a large turning point occurred, so that the change trend of the wear rate of the two carbon brushes was “U” shape. Without current-carrying, the wear rate of the D172 carbon brush was much lower than that of the E468e, while opposite result was obtained for current-carrying condition. Without current-carrying, the wear mechanism of D172 carbon brush was mainly abrasive wear accompanied by mild adhesive wear. With current-carrying, in addition to abrasive wear and adhesive wear, the carbon brush was accompanied by oxidative wear. The wear mechanism of E468e carbon brushes was abrasive wear with and without current-carrying. The friction coefficient of D172 carbon brush increased, while the friction coefficient of E468e carbon brush increased slowly and then gradually decreased. The effect of current on the friction coefficient was obvious for D172 carbon brush but not obvious for E468e carbon brush.

Key words: carbon brush/collector ring; current-carrying friction; wear rate; current density; hydroelectric generator

水电作为环保、经济的可再生清洁能源，在我国现有能源中占有重要地位^[1]。水力发电的核心设备是水轮发电机，水轮发电机中碳刷/集电环装置是将励磁电流引入励磁绕组的重要部件，其通过碳刷与集电环滑动接触来实现水轮发电机励磁电流的输送^[2]。碳刷与集电环的滑动接触属于电接触学和摩擦学构成的具有强烈性能耦合和损伤耦合的载流摩擦系统^[3]。据统计，在水轮发电机常见事故中励磁系统故障约占发电机故障的1/3，而碳刷/集电环打火烧损等事故约占励磁系统故障的26%。碳刷/集电环摩擦副的过度磨损^[4]以及接触不匀所造成的碳刷过热、跳火和环火问题是所有大小型水轮发电站目前所面临的急需解决的问题之一，也一直是工程界和学术界所关注的焦点。

碳刷/集电环是各种电机和发电机用于高导电率和导热率的主要电接触摩擦副，碳被广泛应用于电流收集系统(例如用于水轮发电机励磁系统的碳刷/集电环摩擦副)。在这些系统中碳与集电环的载流摩擦和磨损行为对于电流稳定传输具有相当重要的实用意义。Vera Deevaa等^[5]研究表明电流增加摩擦接触界面氧分子的压力使氧化层生成速率加快导致摩擦系数减小。在高速电接触滑动下，实际接触面积仅为名义接触面积的百分之几^[6]，所以电流在碳刷/集电环间传输是在局部接触峰点传导且在热堆积部位承载，由于强烈的电阻热和摩擦热的联合作用会导致电接触界面附近出现高温区域，这可能会降低材料的性能并导致严重磨损^[7-9]。Mitjan Kalin等^[10]指出，聚合物粘结的石墨/Cu形成光滑的摩擦薄膜降低了局部接触压力和温度，并且较大表面覆盖率降低了磨损和接触电阻，从而降低了接触不稳定性。Kong等^[11]指出氧化层可以起到保护界面作用也可以被电弧和磨料磨损所破坏。林修洲等^[12-14]发现碳刷的磨损机制受电弧的影响，低载荷下主要磨损机制为黏着磨损和材料转移，高载荷下主要磨损机制是机械磨损。这些文献显示载流滑动接

触材料在不同条件下存在不同的磨损机理。

基于此，本文作者采用多功能摩擦磨损试验机通过控制变量法研究载荷、速度和电流密度等因素对碳刷/集电环摩擦磨损性能的影响，通过对试验后摩擦系数、磨损率及磨损表面形貌、微观结构特征的分析，研究接触界面损伤演变行为及关键影响因素，揭示碳刷/集电环摩擦副在载流与无载流时性能差异及磨损机理，为长寿命、高可靠度的水轮发电机励磁系统设计提供理论依据。

1 试验部分

1.1 试验设备和材料参数

基于等效原理在Anton Paar Tribometer多功能摩擦磨损试验机上采用球-盘接触方式进行碳刷/集电环往复滑动摩擦试验，接触方式如图1所示。

试验用球为 $\Phi 10$ mm的GCr15钢球(Mo质量分数不大于1%)，硬度为HRC59~61。盘试样选用摩根新材料(上海)有限公司生产的摩根D172型号碳刷和德国产E468e型号碳刷，两者尺寸分别为32 mm×25 mm×8 mm、38 mm×34 mm×8 mm。用切割机将碳刷切割成厚度为9 mm的长方块，截面尺寸与原碳刷保持一致，然后依次用100[#]、400[#]、800[#]、2 000[#]金刚石砂纸研磨至厚度为

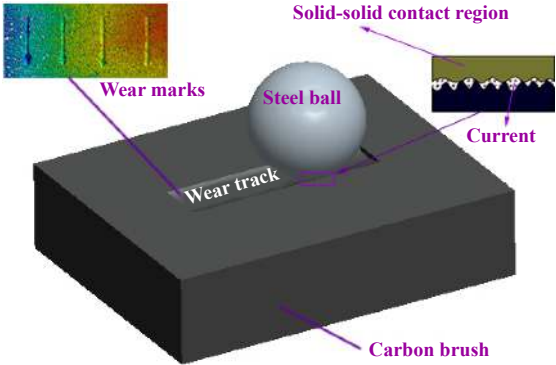


Fig. 1 Carbon brush-steel ball contact
图 1 碳刷-钢球磨损接触示意图

8 mm, 表面粗糙度达 $R_a0.8\text{ }\mu\text{m}$ 的试样. 试验条件为室温, 工况为干摩擦. 载流试验中电流大小通过改变电源电压来控制, 电源采用KEITHLEY公司的2635A SYSTEM Source Meter. 考虑到目前在役水电站碳刷电流密度额定值范围为 $5\sim11\text{ A/cm}^2$. 基于相似性原理, 本文中主要研究名义电流密度 α 分别为 $5、7、9$ 和 11 A/cm^2 时对两碳刷摩擦学性能的影响. 由电流密度公式 $\alpha = \frac{I}{A}$, 可得到电流计算式 $I=\alpha A$ (其中 A 为接触面积, mm^2). 使用万用表测得D172、E468e两碳刷试样接触电阻平均值分别为 1.22 和 $0.88\text{ }\Omega$ (当然此接触电阻包括碳刷与GCr15钢球的体电阻), 由此可根据欧姆定律算出两种碳刷名义电流密度分别为 $5、7、9$ 和 11 A/cm^2 时的名义等效电压. 两碳刷物理性能列于表1中.

表 1 碳刷物理性能

Table 1 Physical properties of carbon brush

Sample	Hardness (HV)	Current density/ (A/cm^2)	Unit pressure/ (N/cm^2)
D172	5.73	12	14.7~19.6
E468e	5.04	10	-

1.2 试样形貌表征

基于NANOVER三维表面形貌测试仪观察碳刷磨损后表面形貌, 结合碳刷磨痕深度和宽度计算出各种试验条件下的磨损率, 比较不同工况下的磨损状况. 磨损率通过 $W=V/(SF)$ 计算, 其中 W 为磨损率, 单位 $\text{m}^3/(\text{N}\cdot\text{m}^2)$; V 为磨损体积, 单位 m^3 ; S 为滑动总行程, 单位 m ; F 为试验载荷大小, 单位 N , 为了减小误差, 所得结果为3次试验的平均值. 利用计算机软件实时采集摩擦系数, 分析摩擦系数随载荷、速度和电流密度的变化趋势. 采用扫描电镜(SEM)观察碳刷表面微观结构特征, 分析其磨损机理及其关键影响因素, 使用EDS能谱仪观察磨损前后碳刷表面元素分布.

1.3 试验设计

实际工况中影响碳刷/集电环摩擦磨损主要因素有法向载荷、相对线速度和励磁电流大小, 因此本文中采用控制变量法, 在载流与无载流工况下基于单因素试验研究碳刷磨损机理, 选取两种碳刷的试验因素和水平列于表2中, 试验过程如下: ① 无载流、线速度为 10 mm/s 时, 分别在载荷 $0.2、0.4、0.5$ 和 0.6 N (最大赫兹接触应力为 $0.5\sim4.87\text{ MPa}$), 直线往复摩擦900次, 单次行程 10 mm ; ② 无载流、载荷为 0.4 N 时, 分别在速度 $5、10、15$ 和 20 mm/s 下, 直线往复摩擦900次, 单次行程 10 mm ; ③ 保持载荷 0.4 N 与速度 10 mm/s 不变进行载流试验, 分别在名义电流密度为 $5、7、9$ 和 11 A/cm^2 , 直线往复摩擦900次, 单次行程 10 mm .

表 2 试验因素与水平表

Table 2 Test factors and level

Sample	Factor	Level			
D172/ E468e	Velocity/(mm/s)	5	10	15	20
	Load/ N	0.2	0.4	0.5	0.6
	Current density/(A/cm^2)	5	7	9	11

2 结果与讨论

2.1 载荷对碳刷干摩擦磨损性能的影响

速度 10 mm/s 、无载流和干摩擦条件下, 研究载荷($0.2、0.4、0.5$ 和 0.6 N)对碳刷/GCr15钢配副摩擦磨损性能的影响规律及机理. 图2(a-b)为摩擦系数随循环次数的变化曲线图. 由图可知, D172碳刷摩擦系数的中值随载荷增加先减小后增大, 载荷为 0.4 N 时摩擦系数中值出现最小值(约为 0.29); E468e碳刷摩擦系数的中值随载荷增加先增大后减小, 其载荷在 0.6 N 时波动程度最小, 载荷在 0.4 N 时E468e碳刷摩擦系数最大(中值 μ 约为 0.34).

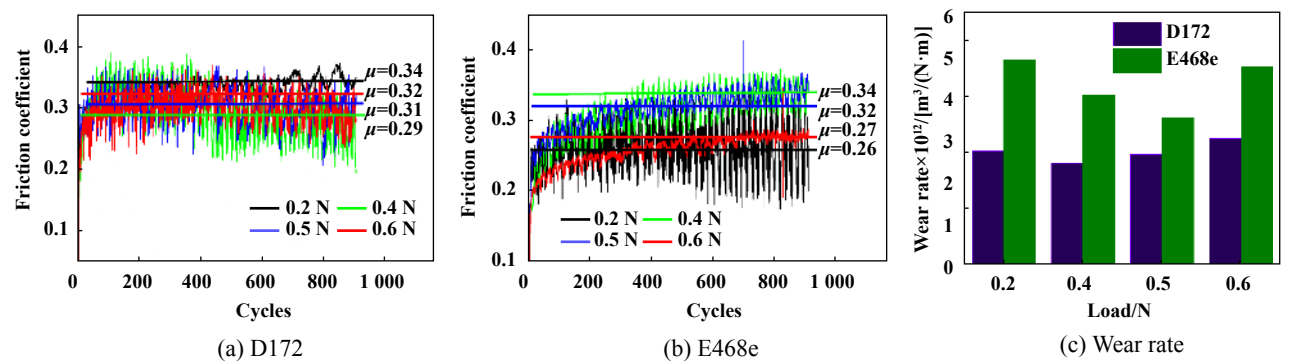


Fig. 2 Friction and wear rate under different loads

图 2 摩擦系数与磨损率随载荷变化趋势图

图2(c)为两碳刷磨损率随载荷的变化直方图. 由图可知, 在每一对应载荷下D172碳刷磨损率约为E468e磨损率的1/4~1/2. D172碳刷磨损率在载荷0.4 N时达到最小, 在载荷0.6 N时达到最大, 增幅达87%. E468e碳刷磨损率在载荷0.5 N达到最小, 在载荷0.2 N时达到最大, 增幅达39%. 两类碳刷的磨损率总体上随着载荷的增大先减小后增大, 在达到最小值时出现转折, 两种碳刷磨损率出现最小值的载荷在0.4~0.5 N

之间. 这将意味着它们均对碳刷/集电环系统在服役过程中的振动和主轴摆动所引起的载荷变化非常敏感. 为了解释磨损机理, 对两碳刷磨损表面进行三维形貌扫描以及扫描电镜检测(见图3). 选取在相同条件下效果最明显、载荷最大的0.6 N试样形貌的SEM照片[见图3(e)、(f)]作为D172碳刷与E468e碳刷磨粒磨损的图证. 由于石墨在摩擦磨损过程中会从碳刷表面剥离, 进而填入碳刷与集电环摩擦界面的微凹坑, 而不

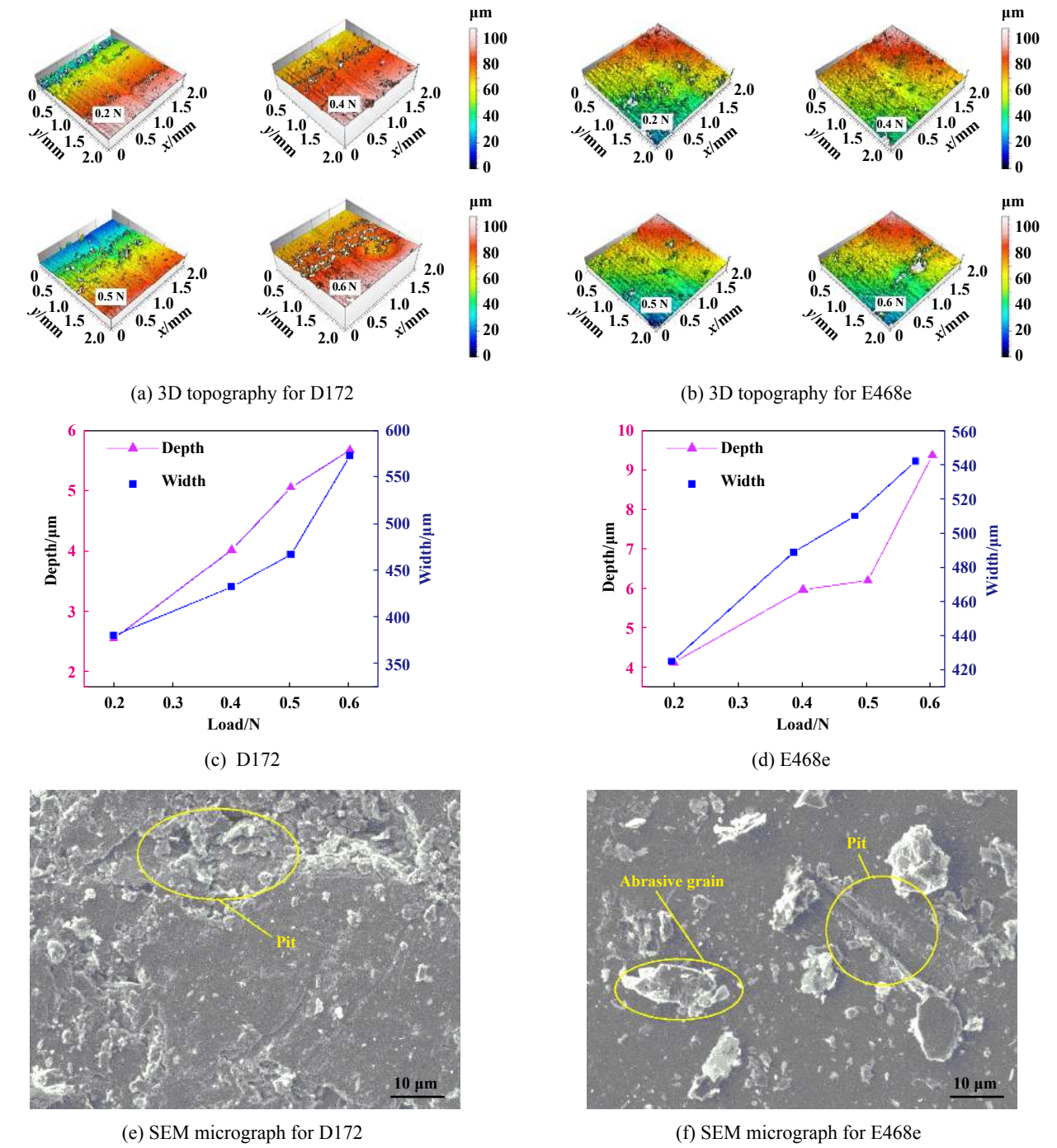


Fig. 3 Characterization of two types of carbon brushes interfaces under different loads

图 3 不同载荷下两种型号碳刷界面表征图

同型号碳刷分子结构及化学成分不同导致摩擦界面粗糙度不同. D172碳刷由于含有少量S和Ca元素[见图8(a)], 表面微观孔隙较大, 磨损剥落的碳粉在低载和摩擦力作用下容易转移到微孔隙形成1层光而明亮的摩擦薄膜, 摩擦薄膜有助于提高摩擦界面的润滑性能, 最终提高摩擦副的整体抗磨性能, 所以低载荷时D172碳刷磨损率较小; 当载荷继续增大时, 磨损颗粒增多, 在接触界面集聚形成磨粒团, 导致碳刷摩擦界面出现犁沟, 摩擦膜被破坏, 此时磨损率会急剧增加. 而E468e碳刷纯度高[见图9(a)], 摩擦表面致密, 孔隙较小, 且其硬度较D172碳刷低(表1), 材质更疏松, 磨损表面有似雨滴长期溅射岩石表面出现的凹坑[见图3(e)], 在低载荷时脱落的石墨粉难以滞留在大面积凹坑从而形成光亮摩擦膜, 所以此时E468e碳刷磨损率较大. 同时该碳刷磨损界面裸露的炭相中存在一定数量垂直于或不完全平行于接触面的炭纤维, 随载荷增大炭纤维在摩擦剪切力作用下从碳刷表面脱落形成颗粒, 故磨损以磨粒磨损[见图3(f)]为主. 为避免载荷过大产生严重的机械磨损同时防止载荷过小产生微跳动撞击碳刷表面形成塑性变形, 在实际运行工况中恒压弹簧的法向压力在碳刷/集电环系统服役过程中应该保持在最优值附近, 且其波动幅度要尽可能小, 以便使碳刷/集电环系统既能保持稳定的运行, 又能使碳刷磨损量最小来延长碳刷更换周期.

2.2 速度对碳刷干摩擦磨损性能的影响

载荷0.4 N、无载流和干摩擦条件下, 研究速度(5、10、15和20 mm/s)对GCr15钢/碳刷配副摩擦磨损性能的影响规律及机理. 图4(a~b)为两碳刷摩擦系数随循环次数的变化曲线图. 由图可知, 两碳刷摩擦系数在速度的变化时基本维持在0.23~0.36之间波动. 图4(c)为两碳刷磨损率随速度变化柱形图. 由图可见, 每一对应速度下D172碳刷磨损率约为E468e磨损率的1/2~2/3. 当速度从5 mm/s增至20 mm/s时, D172、E468e

碳刷的磨损率整体上呈现增加趋势, 增幅分别为126%和132%.

图5为不同速度下D172、E468e碳刷三维磨损表面形貌图、磨痕的宽深度图以及速度20 mm/s时的两碳刷形貌的SEM照片. 两种碳刷在速度20 mm/s时磨损最严重, 现象最为明显, 故选择速度20 mm/s条件下试样进行SEM观测(放大倍数均为1 500倍). 由图可见, E468e碳刷磨痕深度明显大于D172碳刷. 如前所述, E468e碳刷材质为天然石墨纯度高, 材质更松软(见表1), 在钢球表面微凸体的犁切作用下更易磨损, 故其磨损率高于D172碳刷. 由图4(c)可知, 速度增大时, 两碳刷磨损率逐渐增大. 这主要是因为, 在干滑动摩擦过程中, 滑动速度较小时, 球-盘之间接触相对平稳, 产生的热量较小, 摩擦表面因为微凸峰被剪断而形成黏着磨损以及少量的磨粒磨损[见图5(e)、(f)]. 而随着速度增大, 钢球和碳刷盘之间的振动和冲击作用增大, 造成摩擦副的接触状态变差, 摩擦界面产生的热量增加. 高温使得碳刷表面软化, 黏着加剧, 摩擦表面变得不平整. 同时摩擦膜的完整性遭到破坏, 表面膜与基体炭结合能以及抗剪切能力降低^[15], 形成大量磨料. 因此随着滑动速度的增加, 两碳刷的磨损率均增大.

2.3 电流密度对碳刷干摩擦磨损性能的影响

载荷0.4 N、速度15 mm/s、干摩擦条件下, 研究名义电流密度(5、7、9和11 A/cm²)对GCr15钢/碳刷配副摩擦磨损性能的影响规律及机理. 图6(a)、(b)为两碳刷摩擦系数随电流密度的变化曲线. 如图所示, 随着电流密度的增大, D172碳刷摩擦系数整体呈增大趋势, 而E468e碳刷摩擦系数先缓慢增大随后逐渐减小到0.29左右. D172碳刷载流时的摩擦系数在0.31~0.37之间波动, 无载流时D172碳刷摩擦系数在0.3左右波动, 相对于无载流D172碳刷摩擦系数在载流时的最大增幅为23%. E468e碳刷载流时摩擦系数在0.29~0.36之间波动, 无载流时E468e碳刷摩擦系数在0.33左右, 相

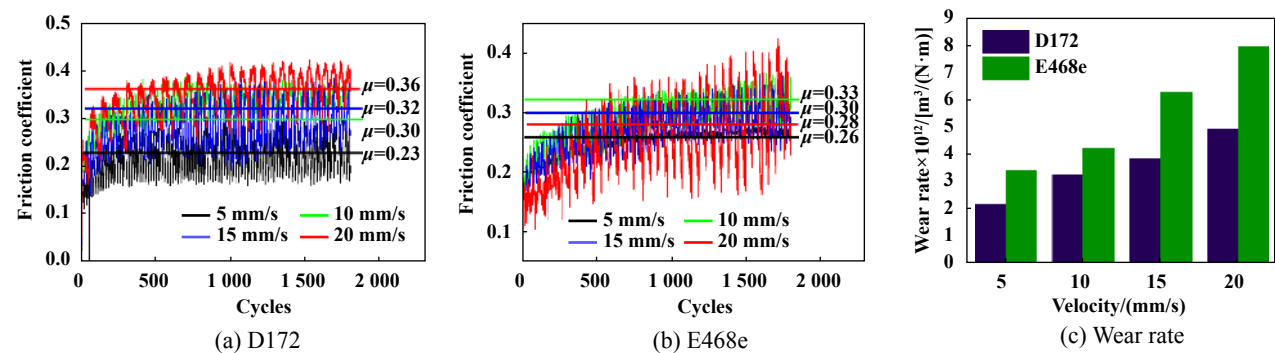


Fig. 4 Friction coefficient and wear rate with speeds

图 4 摩擦系数与磨损率随速度变化趋势图

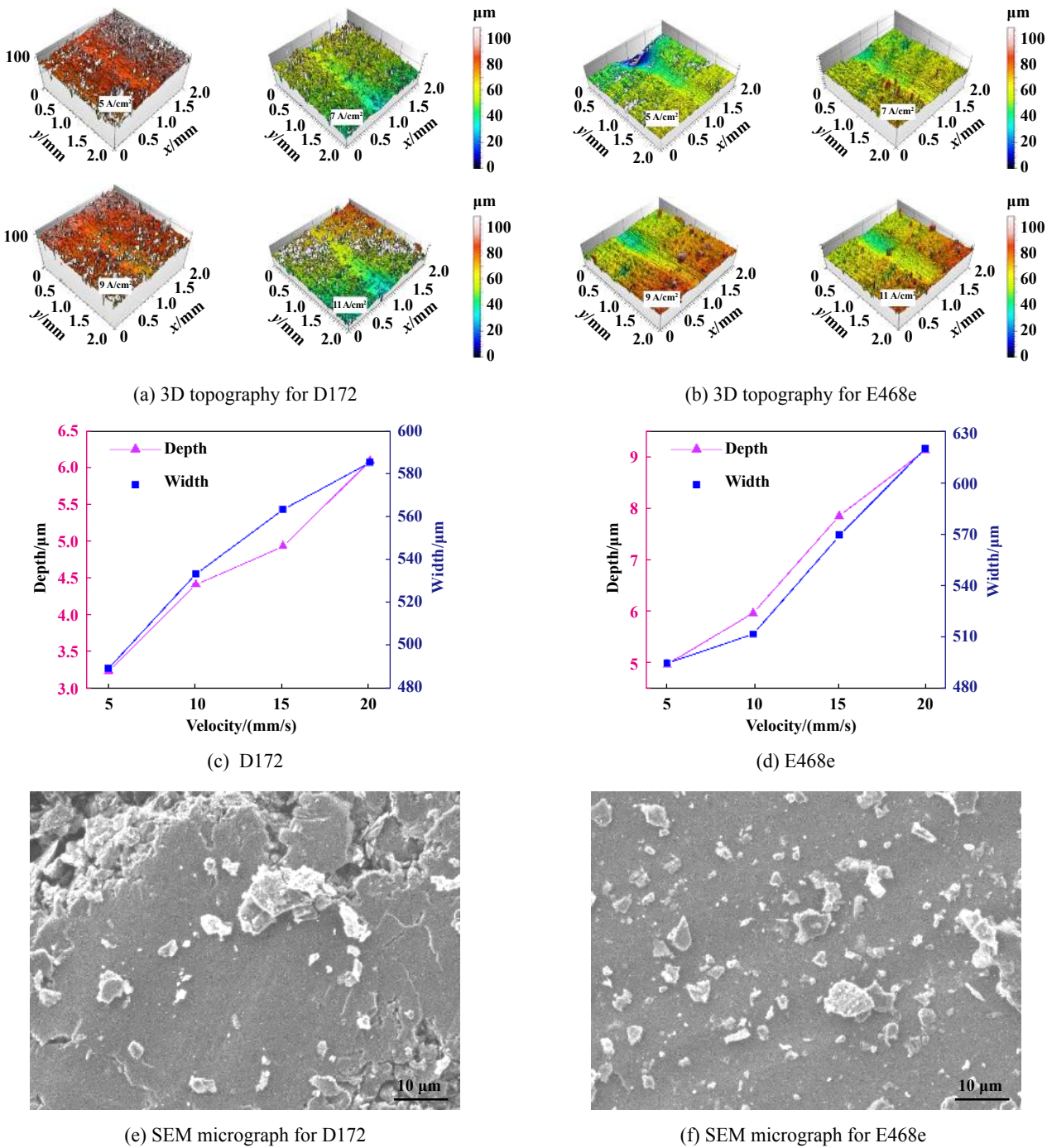


Fig. 5 Characterization diagram of two types of carbon brushes at different speeds [(a) (c) (e) for D172, (b) (d) (f) for E468e]
图 5 不同速度下两种型号碳刷界面表征图[(a) (b) (c)为D172, (d) (e) (f)为E468e]

对于无载流E468e碳刷摩擦系数在载流时的最大增幅为9%。说明电流对D172碳刷摩擦系数的影响比E468e碳刷更明显。在整个试验历程中摩擦系数的大小和波动程度均相对无载流时较稳定。电流密度在5~11 A/cm²间变化时,摩擦系数中值维持在0.29~0.37之间,变化增幅仅28%左右。图6(c)为两碳刷磨损率随电流密度的变化柱形图。可见随着电流密度的增大,两碳刷的磨损率总体呈现增大的趋势,且E468e的磨

损率受电流密度影响更大,最大增幅达273%。更有趣的现象是,载流时E468e碳刷的磨损率总体上均低于D172,在电流密度为5和9 A/cm²时,其磨损率只有D172碳刷磨损率的1/2,这与无载流时情况恰好相反。可见,碳刷/集电环摩擦副在载流与无载流时的摩擦磨损性能相差较大。

图7为不同电流密度下D172、E468e碳刷三维磨损表面形貌图、磨痕的宽深度图及电流密度为11 A/cm²

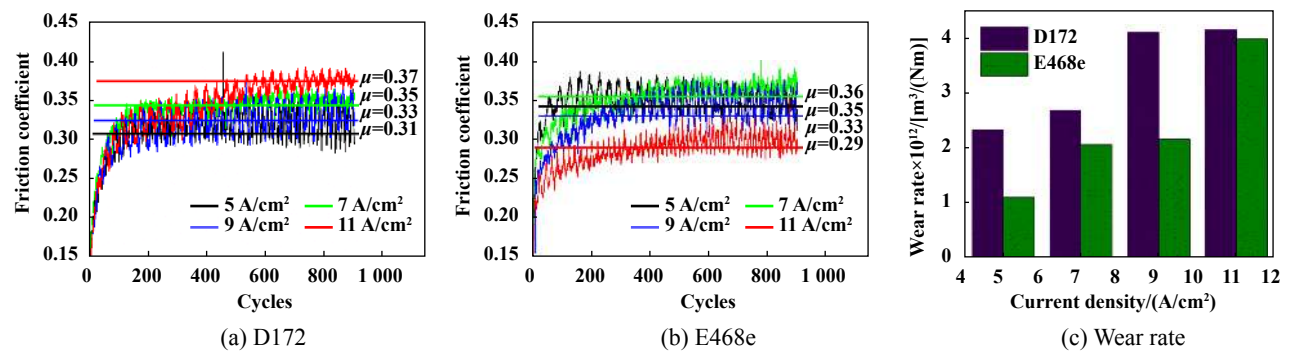
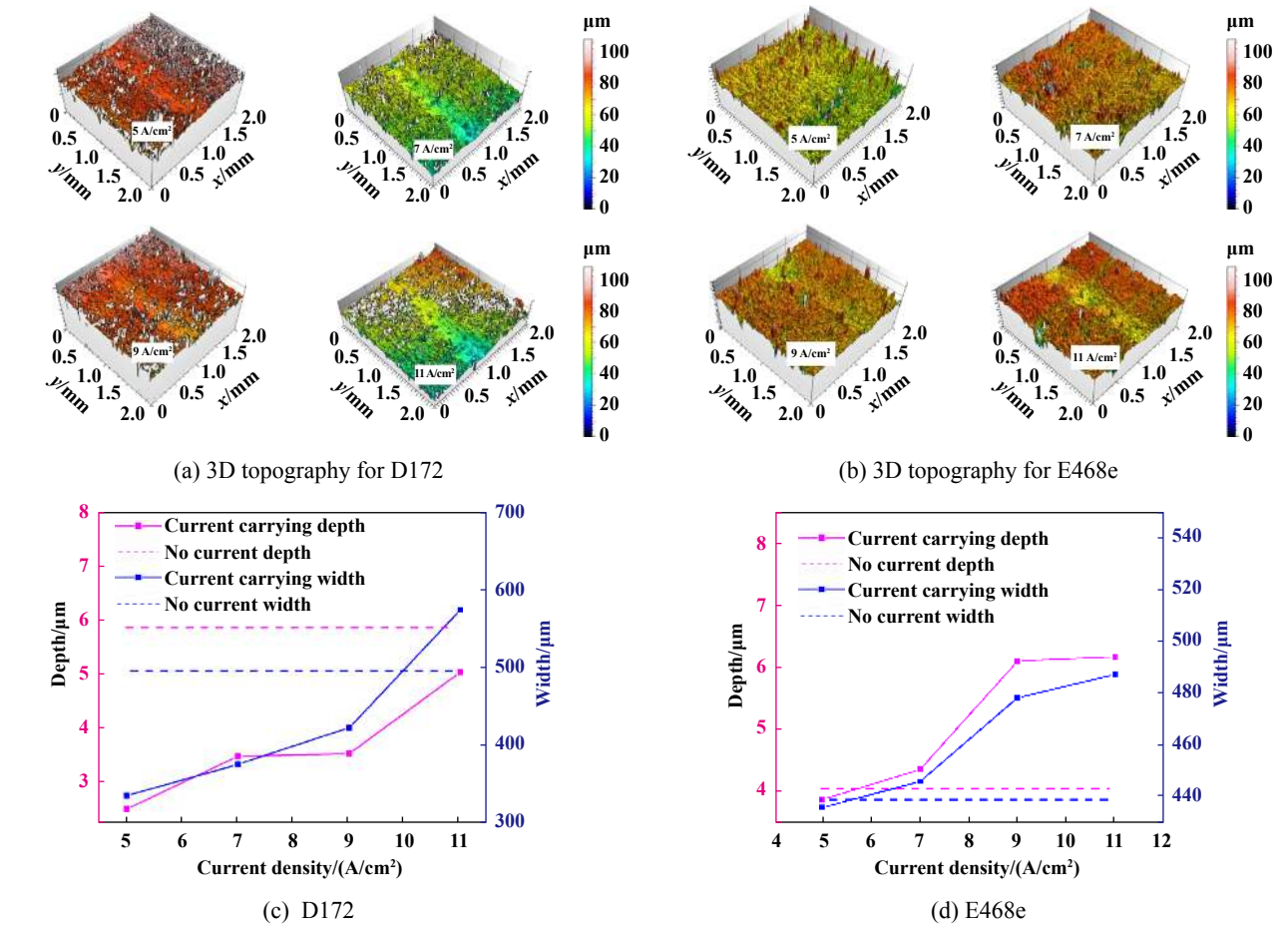


Fig. 6 Friction coefficient and wear rate with current density

图 6 摩擦系数与磨损率随电流密度变化趋势图



(e) SEM micrograph for D172

(f) SEM micrograph for E468e

Fig. 7 Characterization of two types of carbon brushes at different current densities

图 7 不同载流密度下两型号碳刷界面表征图

时的两碳刷形貌的SEM照片. 两种碳刷在电流密度为 11 A/cm^2 条件的磨损表面更具有代表性, 故选择电流密度 11 A/cm^2 条件下SEM照片(放大倍数均为800倍). 比较两碳刷在无载流[图5(a)、(b)]和载流[图7(a)、(b)]情况下的三维表面形貌图可知, 载流时两碳刷的摩擦表面变得更为平滑, 犁沟数量减少, 磨痕深度降低, 摩擦表面粘附颗粒减少, 这可能是由于碳刷表面因为电流产生了电流润滑效应. 分析试验结果可知, 在无载流条件下, 磨损界面材料发生了塑性变形、脱落和黏着等微观力学行为, 导致出现大面积凹坑[见图7(e)]; 在载流条件下, 摩擦副在电场力作用下吸附了大量的碳粉磨屑, 随着摩擦副的不断滑动, 钢球将碳粉磨片反复地挤压并填充到划痕中, 界面磨痕将得到磨屑的不断修复, 故而较致密平整. 因此电场吸附部分磨屑是载流条件与无载流条件摩擦表面磨痕差异的主要原因^[16]. 当两个导体相互接触时, 电流通过的摩擦表面之间的单独接触点称为导电点. 在电流作用下摩擦

热、电弧热和焦耳热^[17]增加了导电点的温度, 温度升高致使导电点附近材料软化甚至熔化, 产生更多的导电点, 并使基材发生断裂和脱落导致碳刷磨损量随电流增大而增大; 外加电场还会加速碳刷表面氧化, 在摩擦表面形成黑色的氧化膜, 使严重的黏着磨损转变为氧化磨损, 改变了磨损机制^[18]. 因此, 碳刷/集电环摩擦副在载流与无载流时的摩擦磨损性能相差较大.

图8~9分别为D172、E468e碳刷在载流摩擦试验前后的EDS能谱图. 由图可知, D172碳刷试验前含有大量C元素及少量O、S和Ca元素, 试验后除O元素含量升高之外还发现了Si、Al和Fe元素, 说明D172碳刷在载流条件下发生了氧化磨损和碳刷与钢球之间的材料转移与反转移, 即黏着磨损. 磨损后, 碳刷试验接触面成分明显改变, 碳材料表层出现了从球试样表层转移来的铁元素, 且在碳刷试验的接触表层, 不同区域铁元素的含量也不同. 由图8(a)可知, 碳元素含量降低, 氧元素含量明显增加, 表明碳刷表面氧化严重, 且存

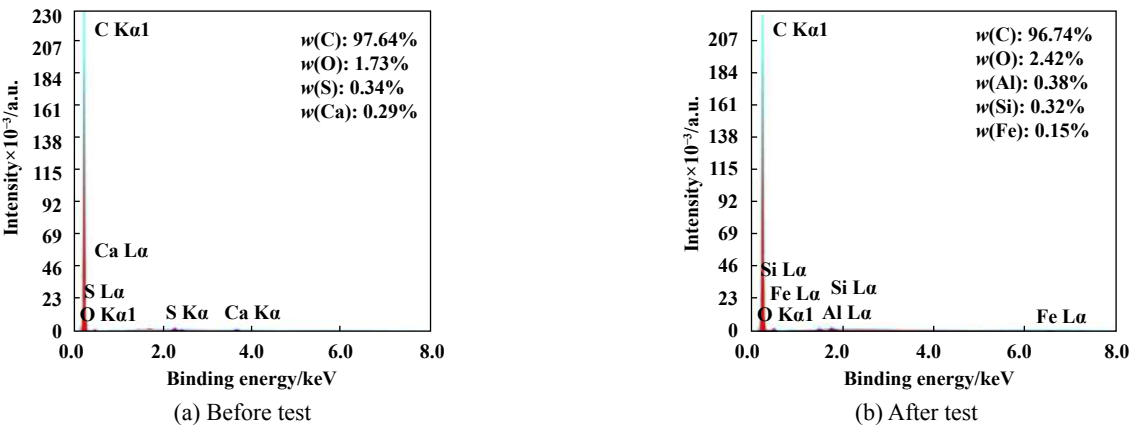


Fig. 8 EDS spectra of D172 carbon brush (Current density 11 A/cm^2 , load 0.4 N , speed 10 mm/s)
图 8 D172碳刷EDS谱图(电流密度 11 A/cm^2 , 载荷 0.4 N , 速度 10 mm/s)

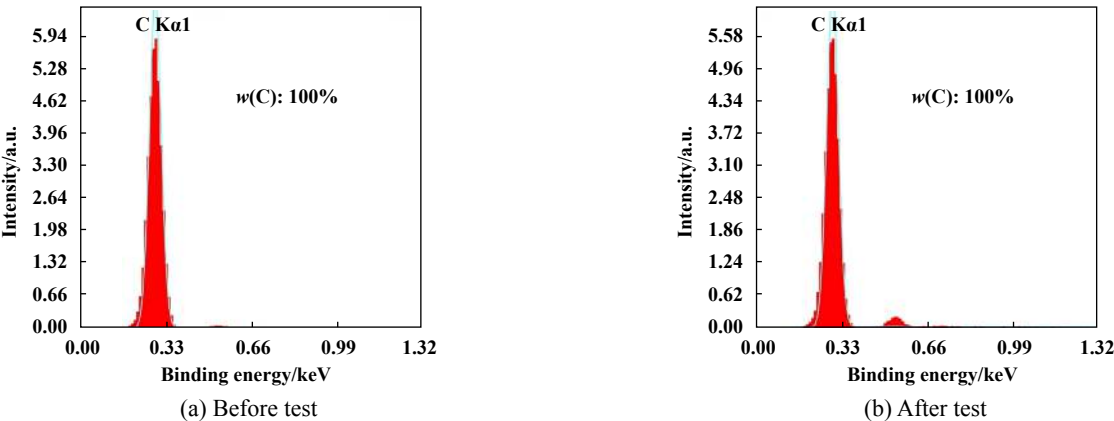


Fig. 9 EDS spectra of E468e carbon brush (Current density 11 A/cm^2 , load 0.4 N , speed 10 mm/s)
图 9 E468e碳刷EDS图(电流密度 11 A/cm^2 , 载荷 0.4 N , 速度 10 mm/s)

在氧化物形成和沉积;碳元素明显减少,这是由于摩擦磨损过程中的高温使得部分被碳氧化,熔融的金属氧化物在表层的覆盖也造成了碳元素含量的降低。同时正是因为出现了Si、Al和Fe元素,使得碳刷与钢球接触界面出现了硬质相,在摩擦过程中这些硬质相会划伤碳刷表面形成犁沟效应,在摩擦力和剪切力作用下发生了轻微的塑性变形,出现了少量在摩擦过程中未及时排出而粘附在磨损表面的大小不一的片状磨屑。而E468e碳刷试验前后主要成分均为C和少量杂质,说明其磨损形式主要为磨粒磨损,这也是载流情况下D172碳刷磨损率大于E468e碳刷的原因。

3 结论

a. 无载流时,D172和E468e两碳刷的磨损率均随载荷的增大呈现先减小后增大的趋势,达到最小值时出现大转折,这意味着两碳刷均对碳刷/集电环系统在服役过程中的振动和主轴摆动所引起的载荷变化非常敏感。

b. 碳刷/集电环摩擦副在载流与无载流时的摩擦磨损性能相差较大。无载流时D172碳刷的磨损率远低于E468e,载流时则情况相反。D172碳刷无载流时的磨损机理以磨粒磨损为主并伴有轻微黏着磨损,载流时碳刷除发生磨粒磨损和黏着磨损外,还伴有氧化磨损。E468e碳刷在载流前后均为磨粒磨损。

c. 名义电流密度对两种碳刷的摩擦系数影响不大,在整个试验历程中摩擦系数的大小和波动程度均较稳定,摩擦系数中值基本维持在0.3上下,变化增幅仅21%左右。

参考文献

- [1] Gu Guobiao, Ruan Lin. Application and development of evaporative cooling technology in the field of hydroelectric generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5112–5119 (in Chinese) [顾国彪, 阮琳. 蒸发冷却技术在水轮发电机领域的应用和发展[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5112–5119].
- [2] Dejan Poljanec, Mitjan Kalin, Ludvik Kumar. Influence of contact parameters on the tribological behaviour of various graphite/graphite sliding electrical contacts[J]. Wear, 2018, 406–407: 75–83. doi: 10.1016/j.wear.2018.03.022.
- [3] Feng P, Tu C, Chen Z, et al. The effect of sulfonated graphene oxide on the current-carrying wear characteristics of a resin matrix carbon brush[J]. Carbon, 2017, 124: 729.
- [4] Trinh K E, Tsipenyuk A, Varenbrerg M, et al. Wear debris and electrical resistance in textured Sn-coated Cu contacts subjected to fretting[J]. Wear, 2015, 344–345(4): 86–98.
- [5] Deeva V, Slobodyan S. Influence of gravity and thermodynamics on the sliding electrical contact[J]. Tribology International, 2017, 105: 299–303. doi: 10.1016/j.triboint.2016.10.004.
- [6] Vera Deeva, Stepan Slobodyanb, Martik Martikyana. Physical model of the sliding contact of conductors of the alloy Cu-Zr and Cu-Re under high current density[J]. Materials Oday-Proceedings, 2016, 3(9): 3114–3120. doi: 10.1016/j.matpr.2016.09.027.
- [7] Wen X, Yuwen F, Ding Z, et al. Electric arc-induced damage on electroless Ag film using ionic liquid as a lubricant under sliding electrical contact[J]. Tribology International, 2019, 135: 269–276. doi: 10.1016/j.triboint.2019.03.019.
- [8] Kubota Y, Nagasaka S, Miyauchi T, et al. Sliding wear behavior of copper alloy impregnated C/C composites under an electrical current[J]. Wear, 2013, 302(Special SI): 1492–1498.
- [9] Yang Z, Zhang Y, Zhao F, et al. Dynamic variation of arc discharge during current-carrying sliding and its effect on directional erosion[J]. Tribology International, 2016, 94: 71–76. doi: 10.1016/j.triboint.2015.03.012.
- [10] Kalin M, Poljanec D. Influence of the contact parameters and several graphite materials on the tribological behaviour of graphite/copper two-disc electrical contacts[J]. Tribology International, 2018, 126: 192–205. doi: 10.1016/j.triboint.2018.05.024.
- [11] Kong D J, Guo H Y, Wang W C. Effects of loadings on friction and wear behaviors of cathodic arc ion plating Al TiN coating at high temperature[J]. Tribology Transactions, 2016, 59(4): 604–612. doi: 10.1080/10402004.2015.1094842.
- [12] Wu Xiaoguang, Zhang Hongbo, Yin Jian, et al. Preparation of PF/CNTs-Cu composite and its current carrying friction and wear mechanism[J]. Journal of Tribology, 2018, 38(3): 334–341 (in Chinese) [吴晓光, 张红波, 尹健, 等. PF/CNTs-Cu复合材料的制备及其载流摩擦磨损机理研究[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(3): 334–341]. doi: 10.16078/j.tribology.2018.03.011.
- [13] Lin Xiuzhou, Zhu Minghao, Mo Jiliang, 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 (in Chinese) [林修洲, 朱旻昊, 莫继良, 等. 碳/铜载流滑动摩擦过程中摩擦学与电弧行为[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(2): 292–299].
- [14] Yang H J, Chen G X, Zhang S D, et al. Effect of the vibration on friction and wear behavior between the carbon strip and copper contact wire pair. Proceedings of the institution of mechanical engineers[J]. Journal of Engineering Tribology, 2012, 226(J8): 722–728.
- [15] Mao Peilin, Yue Yulin, Guo Rui, et al. Friction and wear properties of carbon/carbon composites under nitrogen and a air conditions[J]. Powder Metallurgy Materials Science and Engineering, 2012, 17(2): 166–171 (in Chinese) [毛佩林, 岳葆林, 郭瑞, 等. 氮气、空气条件下炭/炭复合材料的摩擦磨损性能[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2012, 17(2): 166–171]. doi: 10.3969/j.issn.1673-0224.2012.02.005.

[16] Zhou Wenyan, Peng Ke, Yan Liping, et al. Effect of current on the current-carrying friction and wear properties of Mo₂C modified C/C-Cu composites[J]. Tribology, 2016, 36(4): 503–509 (in Chinese) [周文艳, 彭可, 冉丽萍, 等. 电流对Mo₂C改性C/C-Cu复合材料载流摩擦磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(4): 503–509]. doi: [10.16078/j.tribology.2016.04.015](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2016.04.015).

[17] Zhang Y, Sun S, Guo Q, et al. Investigation of transient temperature's influence on damage of high-speed sliding electrical contact rail surface[C]//Infrared, Millimeter-Wave, and Terahertz Technologies IV. International Society for Optics and Photonics, 2016, 10030: 100302G.

[18] Han H, Du S, Zhang Y, et al. Effect of DC magnetic field on friction and wear properties of 45 steel at different velocities[J]. Tribology Letters, 2016, 64(3): 38. doi: [10.1007/s11249-016-0754-z](https://doi.org/10.1007/s11249-016-0754-z).