

运行工况对碳刷/集电环摩擦副表面膜形成的影响

秦红玲^{1,2}, 王锦涛¹, 李洪波¹, 赵新泽¹, 易静雯³, 赵益俊⁴, 任志英^{2*}

(1.三峡大学 机械与动力学院, 湖北 宜昌 443002; 2.福州大学 机械工程及自动化学院, 福州 350116; 3.长江电力检修厂, 湖北 宜昌 443002; 4.重庆华能水电设备制造有限公司, 重庆 404100)

摘要: 目的 解决水轮发电机组碳刷/集电环组件接触界面表面膜形成困难和容易破损的问题。方法 在分析载流摩擦表面膜层成因的基础上, 采用某水轮发电机组所用的碳刷及集电环配副, 在同尺寸水轮发电机组碳刷/集电环模拟试验台进行相似性试验, 用四探针方阻仪表表征表面膜层的氧化情况, 研究电流密度、速度、温度、载荷对集电环表面膜生成的影响。结果 碳刷与集电环形貌磨合大约需要 200 min, 随后表面膜逐渐形成。在 4、8 m/s 转速下, 正极集电环表面方阻的最大值可达到 0.6 m Ω , 在 12 m/s 转速下正极集电环表面方阻的最大值可达到 25 m Ω 。电流提高了摩擦副的温度, 有利于氧化反应的进行, 但过高的温度会导致摩擦表面水分子脱附, 从而严重磨损表面膜。负极碳刷的温度普遍高于正极碳刷。弹簧压力分布不均会导致碳刷载流分配不均, 更易引发负极碳刷出现高温, 损坏表面膜。在 12 m/s 转速、800 A 电流工况下, 表面膜的生成速度相对最快。结论 表面膜主要由石墨层和氧化物层组成, 在表面膜的形成过程中, 碳刷与集电环间的接触电阻在前期以收缩电阻为主, 在后期以膜层电阻为主。膜层电阻主要受到膜层厚度的影响。转速是影响表面膜生成速率的主要因素。高温是造成表面膜破坏的直接原因。

关键词: 载流摩擦磨损; 水轮发电机组; 碳刷/集电环; 表面膜; 形成机理

中图分类号: TM312 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2023)09-0178-11

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.09.014

Effect of Operating Conditions on Friction Surface Film Formation of Carbon Brush/Slip Ring Assemblies

QIN Hong-ling^{1,2}, WANG Jin-tao¹, LI Hong-bo¹, ZHAO Xin-ze¹,
YI Jing-wen³, ZHAO Yi-jun⁴, REN Zhi-ying^{2*}

(1. College of Mechanical & Power Engineering, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China;
2. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;
3. China Yangtze Power Maintenance Plant, Hubei Yichang 443002, China; 4. Chongqing Huaneng Hydro Equipment Manufacturing Co., Ltd., Chongqing 404100, China)

ABSTRACT: In order to solve the problem that the film on the contact interface surface of the carbon brush/slip ring assembly of the hydro-generator set is difficult to form and easy to be damaged. Similar tests are carried out on a current-carrying friction

收稿日期: 2022-09-14; 修订日期: 2023-02-24

Received: 2022-09-14; Revised: 2023-02-24

基金项目: 摩擦学国家重点实验室开放基金项目 (SKLTKF19B09); 固体润滑国家重点实验室开放基金项目 (LSL-1909)

Fund: Tribology Science Fund of State Key Laboratory of Tribology (SKLTKF19B09); State Key Laboratory of Solid Lubrication (LSL-1909)

引文格式: 秦红玲, 王锦涛, 李洪波, 等. 运行工况对碳刷/集电环摩擦副表面膜形成的影响[J]. 表面技术, 2023, 52(9): 178-188.

QIN Hong-ling, WANG Jin-tao, LI Hong-bo, et al. Effect of Operating Conditions on Friction Surface Film Formation of Carbon Brush/Slip Ring Assemblies[J]. Surface Technology, 2023, 52(9): 178-188.

and wear test machine with the same size and structure as the one in service, to explore the mechanism and key factors working on the formation and destroy of film on the surface of carbon brush and slip ring. Based on the analysis of the causes of the film on the surface of the current-carrying friction pairs, the effects of current density, velocity, temperature, and load on the surface film formation of the collecting ring were studied. The surface square resistance of the slip ring was detected with a four-probe square resistance tester to understand the formation of the surface film layer without damaging the collecting ring. The maximum square resistance of the positive electrode surface could reach $0.6\text{ m}\Omega$ at 4 m/s and 8 m/s , and the maximum square resistance of the positive electrode surface can reach $25\text{ m}\Omega$ at 12 m/s , and the high rotational speed tearing the surface carbon film promoted contact of the base metal with oxygen. The current increased the temperature of the friction pair, which was conducive to the oxidation reaction, but too high temperature would lead to the desorption of water molecules on the friction surface, resulting in serious wear and damage to the surface film. The temperature of the negative carbon brush was generally higher than that of the positive carbon brush. Uneven spring pressure would lead to an uneven current carrying the carbon brush, which was more likely to cause high-temperature damage to the surface film of the negative carbon brush. Film generation was the fastest at 12 m/s and 800 A current. It took about 200 minutes for the topography of the carbon brush and the collector ring to be run in, after which the surface film began to form gradually. The surface film was mainly composed of a graphite layer and an oxide layer. The size of the film resistance was mainly affected by the film thickness. During the formation of the surface film, the contact resistance between the carbon brush and the collector ring is mainly based on shrinkage resistance in the early stage, and film resistance in the later stage. The rotational speed is the main factor affecting the rate of surface film formation. High temperature is the direct cause of damage to the surface film. In this paper, the current-carrying operation of the carbon brush/slip ring under actual working conditions is restored to the greatest extent, and the formation mechanism of the surface film is analyzed, which has a certain guiding significance for the formation and maintenance of the surface film of the collector ring.

KEY WORDS: current-carrying friction; hydro-generator; carbon brush/slip ring; surface film; formation mechanism

碳刷与集电环的滑动接触属于电接触与机械接触构成的具有强性能耦合和损伤耦合的载流摩擦系统^[1-3]。近年来,随着水力发电功率需求的增大,滑环装置出现碳刷过热、打火频率逐渐升高等现象,故障机组的集电环表面受到严重损伤。经调查发现,这是目前大中小型水电站面临的共性问题,且在一般情况下,负极集电环会出现严重蚀坑,而正极集电环则附着一层金黄色表面膜,表面电蚀程度较轻(如图 1 所示),这也是负极集电环常需回厂修外圆的原因。据统计,在水轮发电机组常见事故中,励磁系统故障约占发电机组故障的 $1/3$,而碳刷/集电环打火烧损等事

故约占励磁系统故障的 70%。表面膜状态不佳是导致碳刷过热、打火、环火的主要原因之一。

碳刷与集电环之间的表面膜具有良好的润滑和减磨性能,在降低刷、环间磨损的同时,还能降低碳刷的抖动和噪音,是装置运行良好的主要标志之一^[4]。良好的表面膜具有适度、均匀、稳定等特点,主要由不导电的油污、粉尘和氧化物组成,在低压时基本不导电,一旦被击穿,其电阻率会大幅下降,过流电流急剧增加。在刷环磨合过程中或工况条件变化时,表面膜的形貌和厚度会发生变化,导致接触电阻发生变化,进而使电流在各碳刷之间的分配随之动态调整。这是导致碳刷过热、打火的主要原因之一^[5]。在实际运行时,表面膜由碳粉、氧化物及其他杂质在集电环表面逐渐沉积而成。根据运行工况的不同,形成周期长达 1 个月~1 年不等。在这个过程中,系统处于磨合期,且处于机械接触和载流的不稳定状态。寻找适宜的 surface 膜生成工况,缩短碳刷与集电环的磨合时间,促使其快速形成完整均匀的表面膜,使系统尽快进入稳定运行阶段,减小故障的发生率,成为当务之急^[4,6]。

由于表面膜的存在对载流摩擦性能的影响巨大,近年来学者们对摩擦过程中表面膜的演化规律^[7-8]及影响因素进行了大量研究。Liu 等^[9]研究动车接地装置的碳刷磨损性能时发现,温度升高会增大金属扩散系数,高温会破坏表面膜的完整性,从而造成严重的

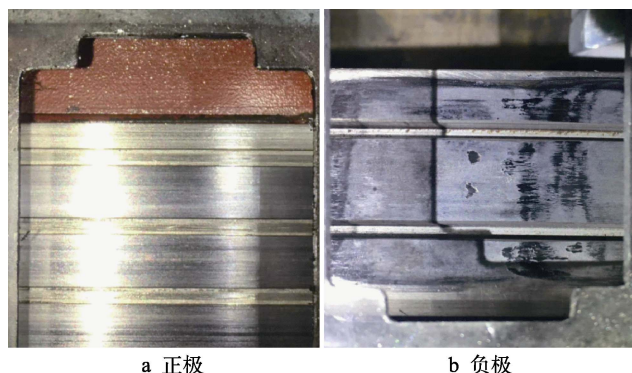


图 1 某水轮发电机组集电环表面状态
Fig.1 Surface status of slip ring for a hydro-generator:
a) positive; b) negative

氧化磨损。贾淑果等^[10]对铁路铜合金滑板的研究结果表明,表面膜的力学性能对温度较敏感,在大电流下的反复滑动摩擦过程中,表面膜易破裂,形成碎屑,造成磨粒磨损。Poljanec 等^[11]对电机刷环系统的研究结果表明,表面膜的性能由接触条件决定。Hamilton^[12]研究电机电刷磨损时发现,在换向器表面形成良好的表面膜所需的条件众多,电流密度、温度、压力等都会对表面膜状态及碳刷寿命造成影响。Xu 等^[13]研究复合材料的摩擦性能时发现,滑动速度的提高会导致氧化磨损的加剧。Liu 等^[14]在对铜石墨电刷和换向器的研究中发现,温度的升高会软化基底,增大表面膜的覆盖面积,但高温会导致表面膜性能恶化,从而发生严重磨损。大量研究表明,载流摩擦界面表面膜的形成受到诸多因素的影响,合适的工况条件有助于尽快在集电环表面形成表面膜。目前的大部分研究工作都集中在高铁受电弓、电机换向器等方面,针对水轮发电机组碳刷/集电环摩擦界面表面膜的研究较少。以上研究对分析碳刷/集电环表面膜形成的工况条件具有很好的借鉴意义,基于摩擦学系统的工况、环境依赖性,它与水轮发电机组表面膜形成的工况存在显著差别。为了弄清水轮发电机组碳刷/集电环接触界面表面膜的生成条件,有必要根据碳刷/集电环摩擦副的实际工况,通过合理的试验设计探索不同工况条件下碳刷/集电环接触界面表面膜的成膜状态,最终确定适合表面膜快速生成的工况条件。这里根据相似性原理设计相关试验,重点研究电流密度、滑动速度和温度对表面膜的影响,并对表面膜的形成和破坏的机理进行解释。

1 试验

1.1 方案及参数

这里所使用的水轮发电机组碳刷/集电环装置模拟试验台是根据某电厂所用机组的配置按 1:1 尺寸

开发的,如图 2 所示。其中,集电环的材质为 Q235B,直径为 1 380 mm,螺旋槽为右旋,螺距为 12 mm,由额定功率 30 kW、额定输出转矩 382 N·m、转速 0~740 r/min 的电机驱动。碳刷型号为 HNMT634,规格为 34 mm×38 mm×64 mm,配合可带电拆卸的刷握使用。电流由输出直流电流 0~2 000 A 的整流装置提供。正负两极碳刷及刷握一共 24 套,每极 12 套,试验时碳刷的名义电流密度在 5.16~10.32 A/cm² 间变化。这里采用的恒压弹簧中,20 个弹簧的额定压力为 (25±2) N,4 个弹簧的额定压力为 22 N。测得弹簧的整体压力均值为 22.38 N。在每组试验前,用 800 目砂纸打磨碳刷表面,去除表面污染层。用 800 目砂纸打磨集电环表面,直至其表面方阻小于 0.01 mΩ。在通电前以 4 m/s 的速度磨合 30 min,直至碳刷与集电环的接触面积大于 70%。

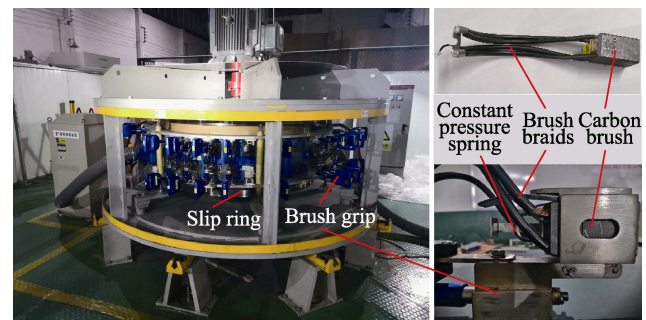


图 2 试验用集电环与碳刷
Fig.2 Slip ring and carbon brushes for tests

由前面的分析可知,影响表面膜生成的关键因素有温度、电流密度和滑动速度等,由此根据相似性原理设计试验方案,如表 1—2 所示。

1.2 检测设备及方法

在设备运行过程中,碳刷过流电流和温度通过埋在碳刷内部的传感器测量,并通过刷握的无线装置传

表 1 实际工况与试验工况参数对照
Tab.1 Comparison of actual and experimental condition parameters

Condition parameter	Number of carbon brush per electrode	Carbon brush size/mm	Rated current/A	Nominal current density/(A·mm ⁻²)	Relative speed/(m·s ⁻¹)	Rated pressure of spring/N	Relative humidity/%
Actual conditions	32	34×38	1 720	5.5	5	22	50
Test conditions	12	34×38	600-1 200	5.16-10.32	4-12	25	40-80

表 2 试验参数
Tab.2 Test parameters

Carbon brush/Slip ring material	Rated current/A (Nominal current density/(A·cm ⁻²))	Rated pressure of spring/N	Rotating speed/(m·s ⁻¹)
HNMT634/Q235B	600 (5.16)	25/22	4
	800 (6.88)		8
	1 000 (8.60)		
	1 200 (10.32)		12

输到电脑。通过弹簧压力测试仪获取弹簧力, 测量压缩行程为 30 mm 时的回弹力。表面方阻采用精密四探针电阻率测试仪测量, 测量集电环表面等距分布的 8 个位置, 取平均值。

如图 3 所示, 四探针方阻仪的探头由间距相同的 4 根探针组成, 通过两端的探针通入电流, 形成回路, 采用中间的 2 根探针测量电压, 并换算成电阻。当电阻率极低的金属基底表面覆盖一层极薄的不良导体表面膜后, 电流击穿表面膜, 形成回路, 此时回路中的电阻主要为膜层电阻, 膜层越厚, 电阻越大。在试

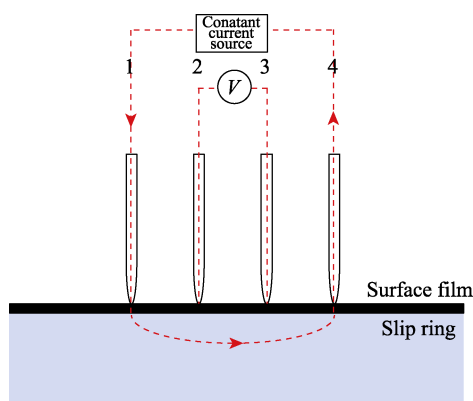


图 3 四探针方阻仪测量原理
Fig.3 Measurement principle of square resistance tester with four-point probe

验前, 将集电环表面用砂纸打磨, 以去除其表面膜, 通过测量发现其电阻极小, 低于 $0.01 \text{ m}\Omega$, 以此为基准判定每次试验前表面膜是否被去除彻底。

2 结果与分析

2.1 试验时长的确定

在水轮发电机组实际运行过程中, 状态良好的机组服役工作时间长达 10 余年, 集电环表面膜的形成时间为 1 个月~1 年。如果严格以机组实际运行形成表面膜的时间为周期, 则试验总时间太长。为此, 需根据试验效果, 确定合适的试验时长, 以尽快得到优化的工况参数。

连续运行 24 h 的试验结果如图 4 所示。在运行 200 min 前, 碳刷/集电环间的过流电流波动剧烈, 因相对运动的摩擦副表面在剪切力的作用下, 其凸峰被剪断, 或发生了塑性变形^[15], 导致摩擦因数和表面形貌急剧变化, 导电斑点的面积和数量大幅变动。由于此时的接触电阻主要受到收缩电阻的影响, 导致在试验起始阶段电流的波动幅度较大。同时, 刷体温度处于急剧上升阶段, 可见在 200 min 前, 碳刷的表面形貌与集电环尚未完全吻合, 两者处于“形”的磨合阶段, 故此阶段碳刷机械磨损严重。在 200 min 后, 正

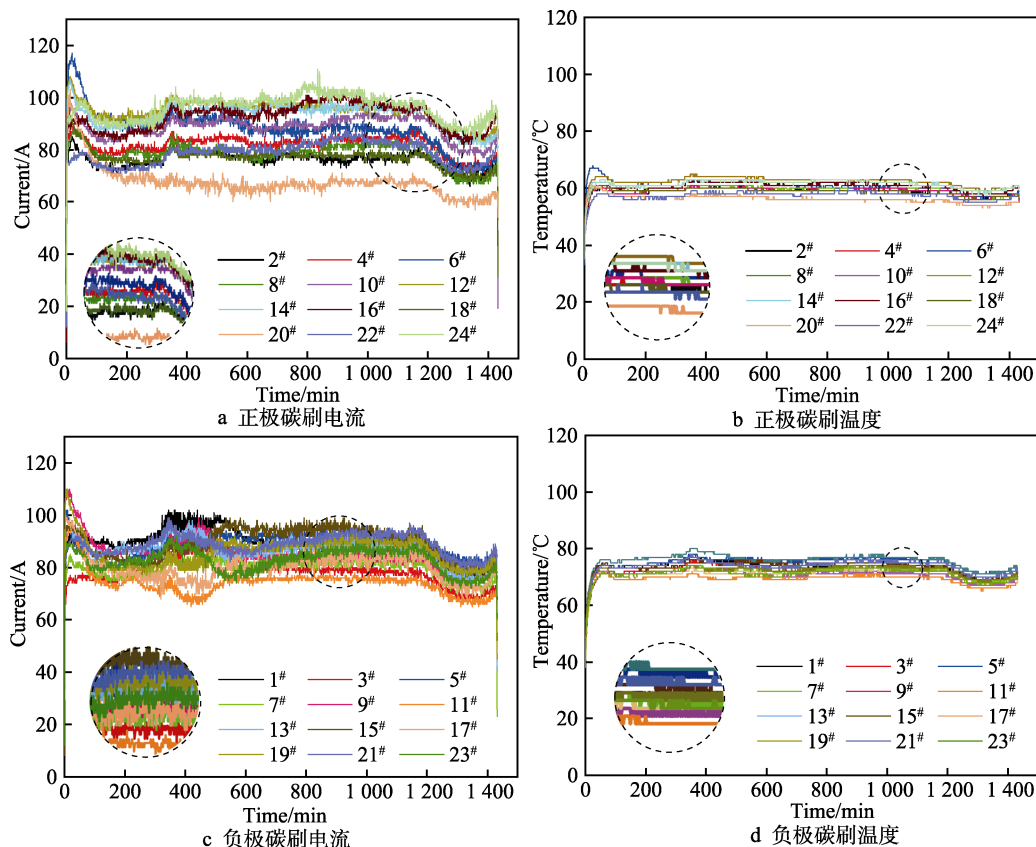


图 4 在 24 h 试验中碳刷电流和温度随时间的变化

Fig.4 Variation trend of brush temperature and current over time in 24 h test: a) current of positive carbon brushes; b) temperature of positive carbon brushes; c) current of negative carbon brushes; d) temperature of negative carbon brushes

极碳刷整体电流波动趋于平缓,说明此时表面“形”的磨合基本完成。

24 h 的试验数据仅能说明碳刷与集电环表面形貌磨合基本完成,不能说明生成了表面膜,因此延长试验时间至 72 h,测量集电环表面温度、方阻及相关参数,结果如图 5 所示。由图 5 可见,在连续运行 72 h 的试验中,随着时间的延长,两极的电流整体上呈现规律性波动,但正极碳刷的载流更加均匀、稳定。两极碳刷的温度走势明显,正极碳刷温度持续走低,负极碳刷温度基本保持恒定,正负极集电环温度规律与碳刷相似,两极温差逐渐拉大。在试验结束后,表

面方阻也出现显著差异,其中负极环的表面方阻基本不变,正极环的表面方阻明显增大,由此判断正极环表面在试验后其表面膜增厚明显。故以 72 h 为试验时长,既能代表建立完整表面膜的过程,又能最大程度地缩短整个试验的总时长。

2.2 表面膜快速生成工况的确定

为了判断表面膜在各个工况下生成的速率,在试验过程中每 12 h 测量 1 次表面方阻,根据方阻的增大情况判断其是否达到稳定。各组试验中集电环表面方阻随时间的变化如图 6 所示。

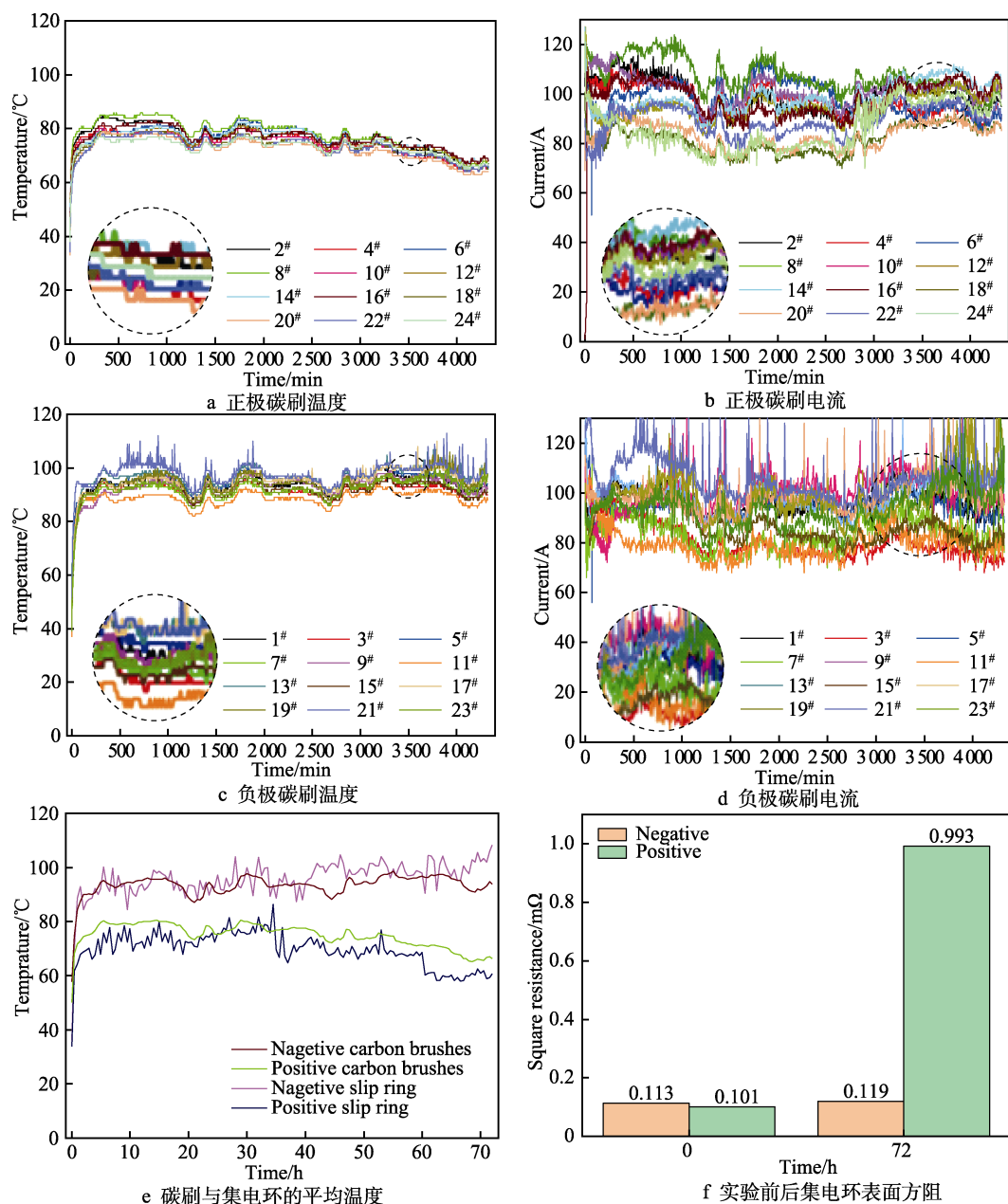


图 5 在 72 h 试验中各参数的变化

Fig.5 Variation trend of parameters in 72 h test: a) temperature of positive carbon brushes; b) current of positive carbon brushes; c) temperature of negative carbon brushes; d) current of negative carbon brushes; e) average temperature of carbon brushes and slip ring; f) square resistance of slip ring before and after tests

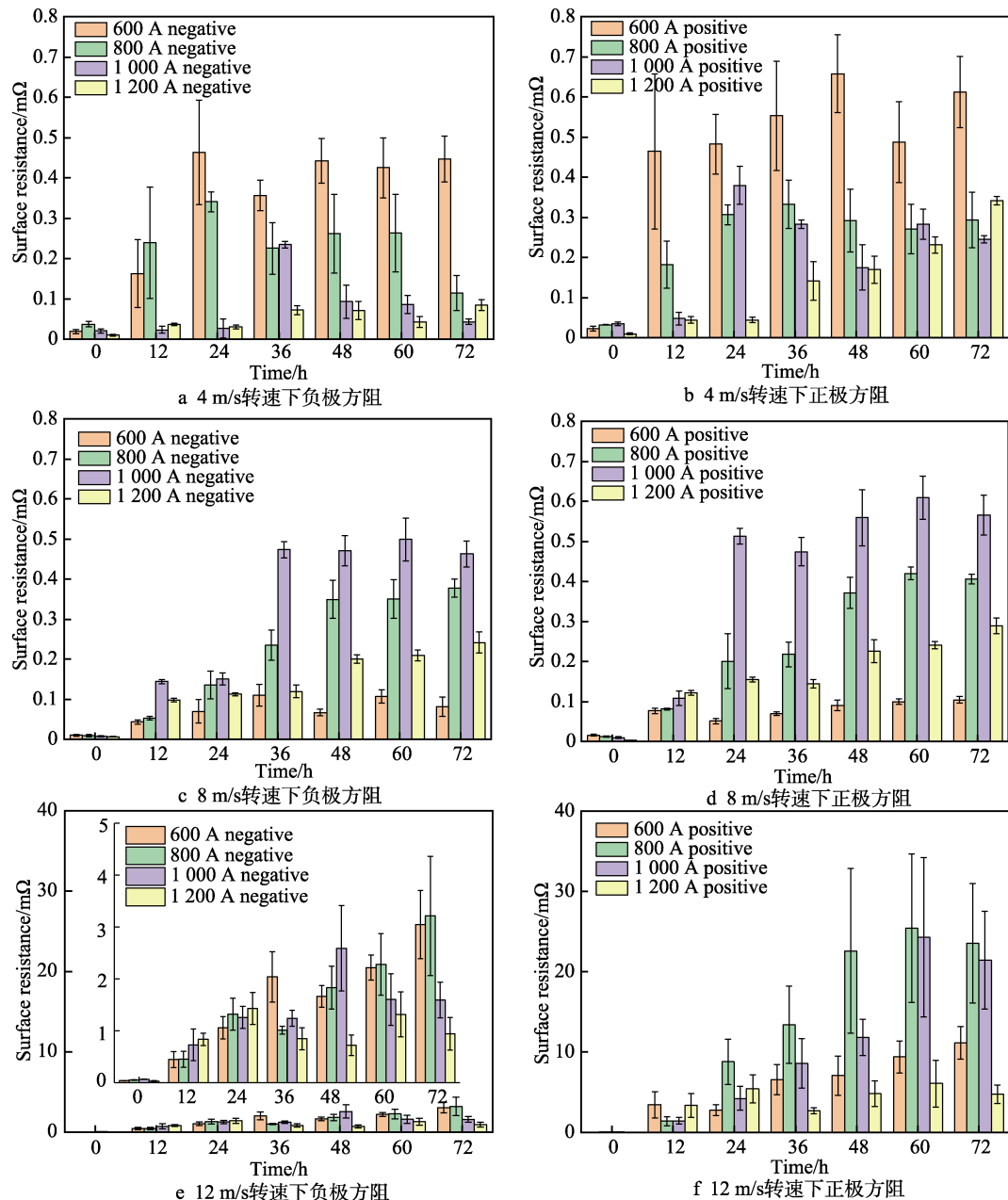


图 6 不同转速下表面方阻随时间的变化

Fig.6 Variation trend of surface square resistance over time at different relative speeds: a) 4 m/s, negative; b) 4 m/s, positive; c) 8 m/s, negative; d) 8 m/s, positive; e) 12 m/s, negative; f) 12 m/s, positive

由图 6 可知, 表面方阻随着试验时间的延长, 先快速增长, 随后在最大值附近波动。其中, 正极集电环表面方阻的增长比负极更为明显, 在 4、8 m/s 转速下正极表面方阻的最大值可达到 0.6 mΩ, 并且在 48 h 后保持稳定状态。在 12 m/s 转速下, 正极表面方阻的最大值可达到 25 mΩ, 可见在高转速下更易形成表面膜层。在相同转速下, 不同电流导致表面膜的生成速度也不相同, 在 12 m/s 转速, 以及 800、1000 A 电流下方阻增长得更快。

各工况下的碳刷平均温度和温升如图 7 所示。在转速相同的情况下, 额定电流增大, 则碳刷的平均温升更高。在相同额定电流下, 转速越高则温升越低,

可见转速的升高使得散热加快, 散发的热量超过了转速升高所增加的摩擦热。

由于额定电流和滑动速度对碳刷温升的影响较大, 在不同工况下温升为 30~90 °C, 因此应选择合适的额定电流和滑动速度, 才能使温度处于氧化膜形成的合适范围内。在 12 m/s 转速, 以及 800、1000 A 电流工况下, 正极集电环的表面方阻达到较大值, 此时对应的碳刷平均温度为 70~75 °C。同时, 通过红外测温仪测得集电环表面温度区间为 70.2~74.6 °C, 两者的温度范围与大多数文献提到的表面膜生成适宜温度相近。可见, 温度过高和过低都不利于表面膜的稳定生成。

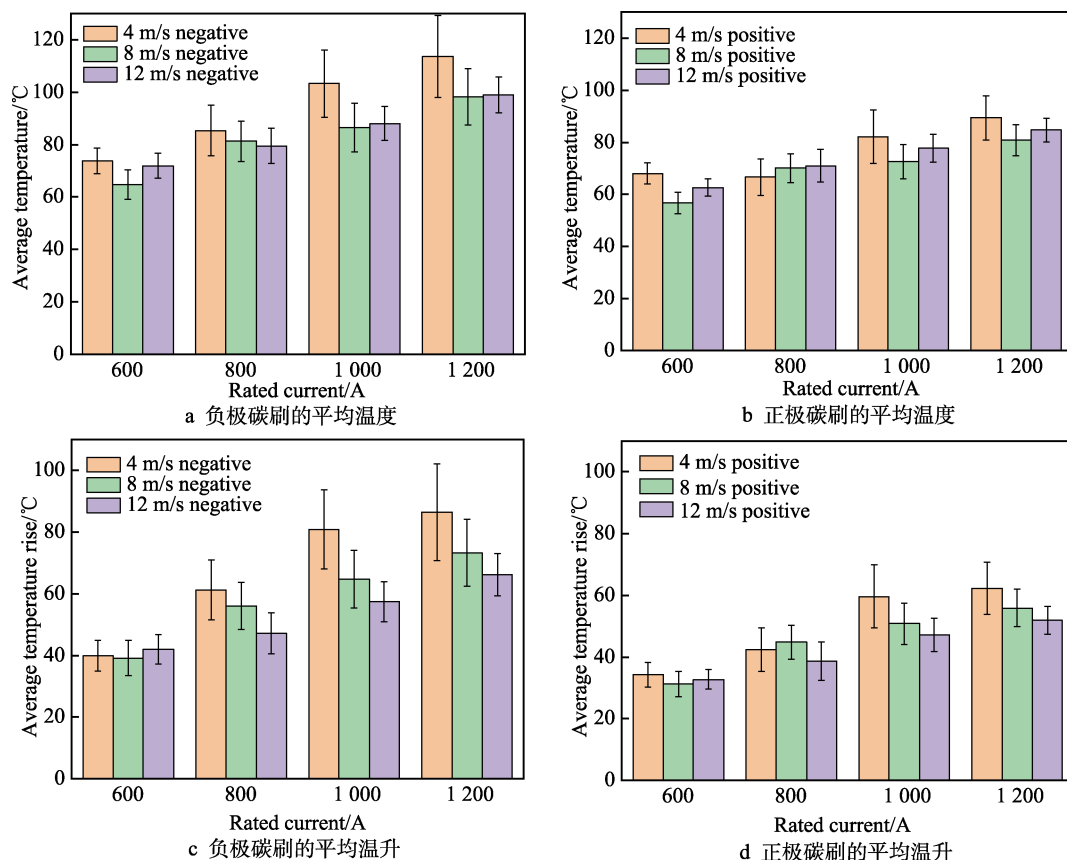


图7 不同额定电流下碳刷的平均温度和平均温升

Fig.7 Average temperature and average temperature rise under different rated currents: a) average temperature of negative carbon brushes; b) average temperature of positive carbon brushes; c) average temperature rise of negative carbon brushes; d) average temperature rise of positive carbon brushes

电流和转速会对组件整体温度造成影响,而弹簧压力的影响体现在碳刷个体上。此次试验转速由低到高依次进行,在8、12 m/s条件下试验结束时,都测量了弹簧压力,并根据8 m/s后的测量结果和弹簧规格,将弹簧压力分为A、B、C 3类,恒压弹簧额定弹力为25 N且弹力大于23 N为A类,恒压弹簧额定弹力为25 N但弹力小于23 N为B类,恒压弹簧额定弹力为22 N为C类。

根据图8可知,不同压力的碳刷间的平均温度存在差异,弹簧压力越大,其碳刷温度越高,不同类别碳刷的温差可超过10℃。出现温差的主要原因是碳刷压力直接影响碳刷与集电环间接触斑点的数量和斑点面积,导致碳刷的载流能力出现差异。如图8所示,弹簧压力大的碳刷则载流更大,产生的摩擦热和焦耳热更多,并且负极的碳刷因整体温度更高,其个体间的温差也更明显,这也是负极更易出现过热打火现象的原因。

每个因素都直接关系到表面膜的生成,但影响程度不尽相同。由表3可知,对比同一转速下的表面方阻,其极值相差不超过6倍,当转速达到12 m/s后,各电流下的方阻相较于低转速下提升了数十倍。在同转速条件下,处于适宜表面膜生成温度范围工况下方阻的最大值更大,但在不同转速下,温度并非是决定

因素。由文中的试验结果可知,转速是影响方阻变化的第一因素。

2.3 表面膜形成机理分析

表面膜在碳刷与集电环的磨合中逐渐形成,磨合过程主要分为“形”“性”2个吻合阶段。首先是碳刷的表面形状与集电环表面形状吻合,在此磨合过程中,2个表面之间的接触实际上是2个表面上无数个凸峰的接触^[16],将这些凸峰接触形成的导电斑点称为a斑点,它们分散承受着接触面上的压力和电流,电流在导电斑点处汇集,使得电流流过的路径变长,且有效导电面积变小,产生了局部的附加电阻,称为收缩电阻。

随着磨合时间的延长,摩擦热和焦耳热在接触点积聚,导致局部温度上升,如图7所示。在不同工况下,从磨合开始到稳定运行阶段,碳刷的温升为30~90℃。随着温度的升高,接触材料软化^[17],在法向载荷和平行滑动方向的剪切力作用下,表面的凸峰被剪切成颗粒,导致接触面积持续增加,且发生了磨粒磨损。石墨颗粒和金属氧化物颗粒进入接触界面,并在机械作用下,接触表面之间形成了机械混合层薄膜^[18]。这种膜具有润滑作用,可将界面从直接接触变为间接接触^[19],使得摩擦因数降低,最终过渡到稳定磨损阶段。

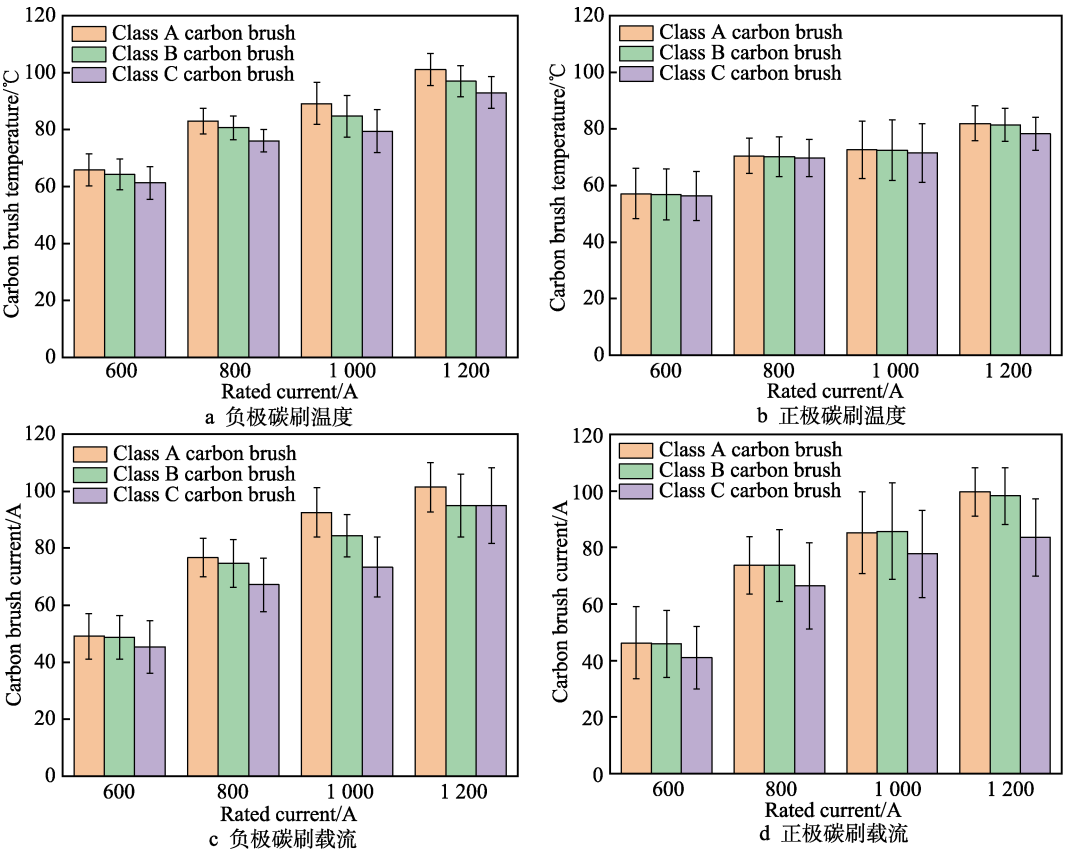


图 8 在 8 m/s 转速下碳刷温度、载流和额定电流的关系
Fig.8 Relationship between carbon brush temperature, current carrying and rated current at 8 m/s:
a) temperature of negative carbon brushes, b) temperature of positive carbon brushes, c) current carrying of negative carbon brushes, d) current carrying of positive carbon brushes

表 3 各运行工况下的方阻最大值
Tab.3 Maximum square resistance under various working conditions

Current/A	Speed/(m·s ⁻¹)			mΩ
	4	8	12	
600	0.658	0.105	11.132	
800	0.332	0.420	25.414	
1 000	0.379	0.609	24.295	
1 200	0.341	0.289	6.064	

进入稳定磨损阶段后,摩擦副表面“形”的吻合基本达成,磨损速率大幅下降,摩擦面上的表面膜厚度增加,且逐渐完整均匀。随着此过程的进行,石墨膜和氧化膜开始交替分布在整个磨损表面上,摩擦副表面进入“性”的吻合阶段。此时,接触斑点的数量基本稳定,收缩电阻的波动幅度减小,接触电阻的主导因素从收缩电阻变为膜层电阻(如图 9 所示),主要受到石墨膜和氧化膜厚度的影响。基于石墨的层状结构,使得膜在平行层方向具有良好的成形能力,使得石墨膜的反复剥离和再生过程不会使接触面之间出现严重磨损,故稳定磨损阶段的电流较稳定^[9]。随着运转时间的延长,表面膜厚度增加,金属离子的扩散受到膜厚的抑制,金属基底的氧化速率逐渐减慢,直

到氧化速率与机械磨损趋于动态平衡,摩擦副表面才完全达到“性”的吻合阶段,表面膜的厚度也将保持稳定。集电环表面膜层生成的全过程示意图如图 10 所示。

表面方阻的增大,可能主要是因金属氧化物的生成或者碳膜的增厚。对比 3 个转速下的试验结果发现,在 12 m/s 转速下,方阻显著增大的原因更可能是集电环表面氧化的加快,金属氧化物增多。集电环表面的碳膜具有润滑和抗氧化作用,当碳膜均匀覆盖后,阻碍了金属基底与空气中的氧气接触,导致氧化反应缓慢,而滑动速度的增加,使得系统的稳定性降低,振动加剧,接触表面的冲击频率变高,碳膜更易

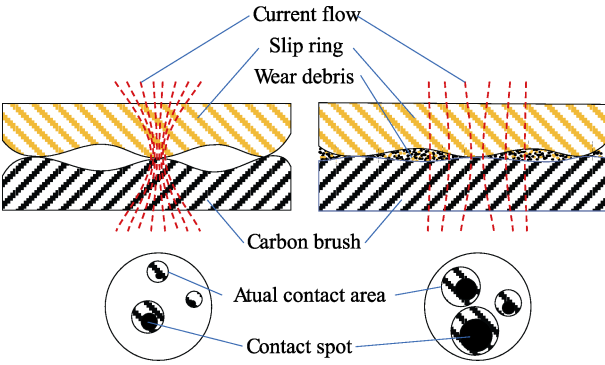


图 9 接触电阻示意图
Fig.9 Schematic diagram of contact resistance

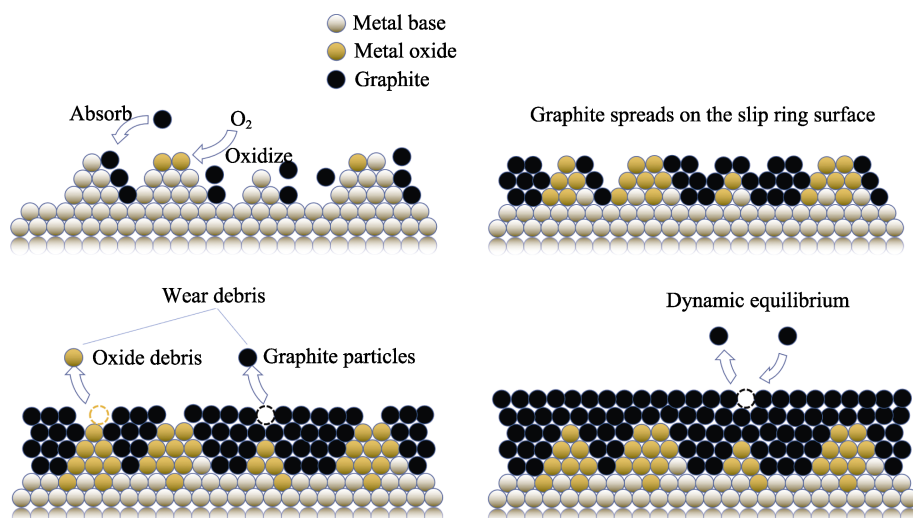


图 10 集电环表面膜生成过程示意图

Fig.10 Schematic diagram for production process of slip ring's surface film

破碎。碳膜的破碎和撕裂有助于金属基底与氧气接触，增加了金属氧化物的产生^[13]。

温度的升高可以增强接触表面^[20]之间的相互作用，增大金属基底的氧化速度。这主要是因为温度的升高可以提高金属的自扩散系数^[21]，这意味着金属可以更快地扩散到表面层^[22]，并与氧反应，从而提高氧化速率^[23]。当电流密度增大时，在滑动界面处高电阻膜的形成被加热效应加速，加热效应随着电流密度和滑动速度的增加而增强^[24]，所以在转速相同的情况下，在 800、1 000 A 工况下方阻上升的速度比在 600 A 工况下快。

虽然温度的升高有助于表面膜的形成，但温度升高到一定程度后，会使表面膜的破坏速率超过生成速率^[9]。如图 11 所示，在转速 12 m/s、额定电流 1 000 A 时，正极碳刷的温度不超过 85 ℃，而在额定电流为 1 200 A 时碳刷温度达到 90 ℃。结合图 6 中对方阻的变化分析结果可知，表面膜的连续性可能被超过 90 ℃ 的高温破坏，导致表面膜强度降低，同时高温会导致表面膜与基体结合不牢固，使得表面膜的力学

性能变差。此时表面膜很容易破裂，并作为磨损碎片剥离到摩擦界面，出现严重磨粒磨损^[9]，所以超过 90 ℃ 的温度会破坏表面膜的完整性，表面膜碎屑导致磨粒磨损。表面膜的破裂和磨损使得金属基底再次裸露，而新裸露金属基底的方阻远低于正常表面膜的方阻，这是在 1 200 A 额定电流下集电环表面方阻较低的原因之一。只有完整、厚度均匀的氧化膜才能起到润滑作用，防止摩擦表面发生更严重的磨损^[25]。

另外，根据吸附润滑理论^[26]，在正常情况下，石墨表面会吸附一层水膜，水膜的存在会降低摩擦面间的结合力和分子黏附力，降低摩擦因数，减少磨损。当温度升至一定程度时，会使水分子解吸，导致石墨表面无法被水膜覆盖，碳刷表面的石墨与集电环表面发生咬合，从而加剧碳刷和集电环的磨损^[14, 27]。由此可见，在 1 200 A 电流下出现方阻降低现象的另一个原因是：电流过大引起碳刷温度升高，导致接触表面水膜脱附，摩擦力增大，碳刷与集电环的咬合导致表面膜被破坏、碳刷表面膜被剥离。

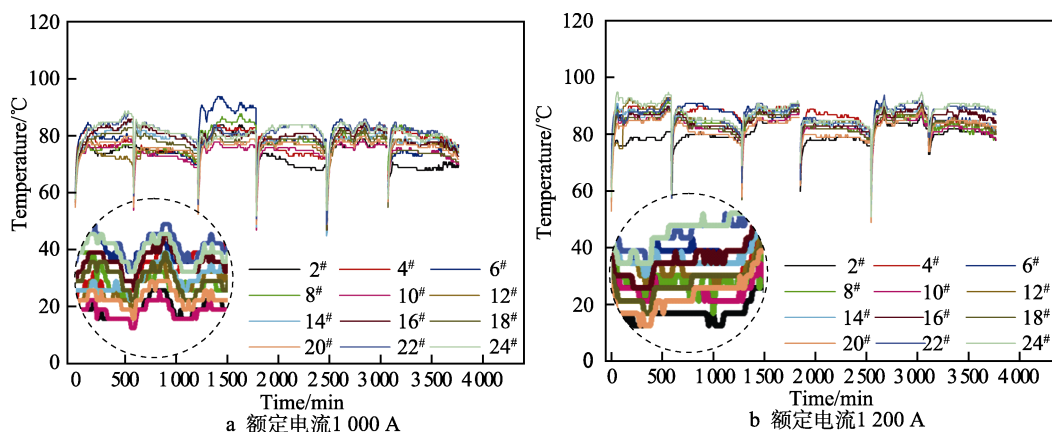


图 11 在转速 12 m/s、额定电流 1 000、1 200 A 时正极碳刷温度的变化

Fig.11 Variation trend of positive carbon brush temperature at 12 m/s:

a) 1 000 A rated current; b) 1 200 A rated current

3 结论

采用与实际水轮发电机组的比例为 1 : 1 的试验台进行相似性试验, 得到适合集电环表面膜快速生成的工况条件, 以减少碳刷/集电环系统的磨合时间。研究了不同水平电流密度、压力和速度下表面方阻、温度的变化情况, 以及对表面膜生成的影响。主要结论如下。

1) 碳刷与集电环间的接触电阻从磨损初期以收缩电阻为主, 转变为稳定磨损阶段以膜层电阻为主。集电环表面膜层的主要成分为金属氧化物和石墨, 电阻主要受到氧化层厚度的影响。

2) 在转速 12 m/s、电流 800 A 的工况下, 正极集电环的表面方阻达到最大值。在此工况下, 对应的碳刷平均温度为 70~75 °C, 集电环表面温度为 70.2~74.6 °C。

3) 影响表面膜氧化速度的最主要因素是滑动速度。在转速达到 12 m/s 时, 大大提高了表面膜的电阻。原因是转速的提高撕裂了过厚的表面碳层, 为基底的氧化提供了氧气。

4) 电流密度显著影响摩擦副的温度, 电流密度增大则温度升高, 加快了氧化反应的进行, 但过高的温度会使摩擦表面水分子难以附着, 表面缺少润滑, 从而造成严重磨损。

5) 弹簧压力的差异导致负极碳刷间出现温差, 在试验条件下不足 5 N 的弹力差异足以导致超过 10 °C 的温差, 因此实际运行中必须避免不同规格的弹簧混用, 定期检查弹力的衰减程度, 使得各碳刷弹簧的压力保持在同一水平, 这样可以有效降低碳刷个体的最高温度, 减少打火现象。

参考文献:

- [1] 冯鹏洋, 涂川俊, 陈查坤, 等. 磺化石墨烯对树脂基炭刷载流磨损性能的影响[J]. 新型炭材料, 2017, 32(4): 352-357.
FENG Peng-yang, TU Chuan-jun, CHEN Zha-kun, et al. The Effect of Sulfonated Graphene Oxide on the Current-Carrying Wear Characteristics of a Resin Matrix Carbon Brush[J]. New Carbon Materials, 2017, 32(4): 352-357.
- [2] 张永振, 杨正海, 上官宝. 载流摩擦的研究现状与挑战[J]. 自然杂志, 2014, 36(4): 256-263.
ZHANG Yong-zhen, YANG Zheng-hai, SHANGGUAN Bao. Research Progress and Challenges in Tribo-Electric Systems[J]. Chinese Journal of Nature, 2014, 36(4): 256-263.
- [3] 惠阳, 刘贵民, 闫涛, 等. 载流摩擦磨损研究现状及展望[J]. 材料导报, 2019, 33(13): 2272-2280.
HUI Yang, LIU Gui-min, YAN Tao, et al. Research Status and Prospect of Current-Carrying Friction and Wear[J]. Materials Reports, 2019, 33(13): 2272-2280.
- [4] 孙戈. 浅谈氧化膜[J]. 碳素, 1982(2): 45-49.
SUN Ge. Discussion on Oxide Film[J]. Carbon, 1982(2): 45-49.
- [5] 宋曼. 碳刷磨损试验及机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015: 55-62.
SONG Man. Research on the Wearing Test and Wearing-mechanism of Carbon Brush[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015: 55-62.
- [6] 颜承东, 李继春. 浅议电刷在集电环上运行中形成氧化膜的作用[J]. 煤矿现代化, 2008(5): 37-38.
YAN Cheng-dong, LI Ji-chun. Discussion on the Function of Forming Oxide Film when Brush Runs on Collector Ring[J]. Coal Mine Modernization, 2008(5): 37-38.
- [7] 轩福贞, 朱明亮, 王国彪. 结构疲劳百年研究的回顾与展望[J]. 机械工程学报, 2021, 57(6): 26-51.
XUAN Fu-zhen, ZHU Ming-liang, WANG Guo-biao. Retrospect and Prospect on Century-Long Research of Structural Fatigue[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(6): 26-51.
- [8] ZHU Ming-liang, JIN Long, XUAN Fu-zhen. Fatigue Life and Mechanistic Modeling of Interior Micro-Defect Induced Cracking in High Cycle and very High Cycle Regimes[J]. Acta Materialia, 2018, 157: 259-275.
- [9] LIU Xin-long, HU Ming-jie, LI Zhi-hao, et al. Effect of Copper Contents on the Current-Carrying Wear Properties of Carbon Brush under Different Temperatures Conditions[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15: 3110-3121.
- [10] 贾淑果, 宋克兴, 张应周, 等. Cu-Ag-Cr-Ce 合金材料载流磨损行为的研究[J]. 热加工工艺, 2011, 40(20): 4-6.
JIA Shu-guo, SONG Ke-xing, ZHANG Ying-Zhou, et al. Wear Behavior of Cu-Ag-Cr-Ce Alloy Contact Wire with Electrical Current[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(20): 4-6.
- [11] POLJANEC D, KALIN M, KUMAR L. Influence of Contact Parameters on the Tribological Behaviour of Various Graphite/Graphite Sliding Electrical Contacts[J]. Wear, 2018, 406/407: 75-83.
- [12] HAMILTON R J. DC Motor Brush Life[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, 36(6): 1682-1687.
- [13] XU Jin-cheng, YU Hui, XIA Long, et al. Effects of some Factors on the Tribological Properties of the Short Carbon Fiber-Reinforced Copper Composite[J]. Materials & Design, 2004, 25(6): 489-493.
- [14] LIU Ru-tie, CHENG Kai, CHEN Jie, et al. Friction and Wear Properties of High Temperature and Low Temperature Sintered Copper-Graphite Brushes at Different Ambient Temperatures[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(4): 7288-7296.
- [15] PAN Wu-jiu, LI Xiao-peng, WANG Xue. Contact mechanics of elastic-plastic fractal surfaces and static friction analysis of asperity scale[J]. Engineering Computations,

- 2021, 38(1): 131-150.
- [16] ZUGELJ B B, KALIN M. Submicron-Scale Experimental Analyses of Multi-Asperity Contacts with Different Roughnesses[J]. Tribology International, 2018, 119: 667-671.
- [17] 岳洋, 孙逸翔, 孙毓明, 等. 载荷和电压对纯铜滚动载流摩擦学性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(1): 67-74.
- YUE Yang, SUN Yi-xiang, SUN Yu-ming, et al. Effect of Load and Voltage on the Tribo-Electric Behaviour of Rolling Cu Pairs[J]. Tribology, 2018, 38(1): 67-74.
- [18] GRANDIN M, WIKLUND U. Influence of Mechanical and Electrical Load on a Copper/Copper-Graphite Sliding Electrical Contact[J]. Tribology International, 2018, 121: 1-9.
- [19] FUKUDA T. Analysis of Tribofilm Formed by Electric Brush Sliding for Long Life Starter Motor[R]. SAE Technical Paper, 2019.
- [20] CHENG Kai, LIU Ru-tie, XIONG Xiang, et al. The Effect of Sintering Temperature on the Microstructures and Properties of Resin-Bonded Copper-Graphite Brush Materials[J]. Tribology Letters, 2019, 67(3): 1-10.
- [21] PARK J H, NATESAN K. Oxidation of Copper and Electronic Transport in Copper Oxides[J]. Oxidation of Metals, 1993, 39(5): 411-435.
- [22] ZAIDI H, CHIN K J, FRENE J. Analysis of Surface and Subsurface of Sliding Electrical Contact Steel/Steel in Magnetic Field[J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 148(2/3): 241-250.
- [23] MAACK B, NILIUS N. Oxidation of Polycrystalline Copper Films - Pressure and Temperature Dependence[J]. Thin Solid Films, 2018, 651: 24-30.
- [24] DILLICH S, KUHLMANN-WILSDORF D. Effects of Surface Films on the Performance of Silver-Graphite (75wt.% Ag, 25 wt.% C) Electric Brushes[J]. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 1980, 3(1): 37-41.
- [25] QI Shao-jun, LI Xiao-ying, DONG Han-shan. Reduced Friction and Wear of Electro-Brush Plated Nickel Composite Coatings Reinforced by Graphene Oxide[J]. Wear, 2019, 426/427: 228-238.
- [26] LANCASTER J K, PRITCHARD J R. The Influence of Environment and Pressure on the Transition to Dusting Wear of Graphite[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1981, 14(4): 747-762.
- [27] 李含欣, 季德惠, 沈明学, 等. 环境湿度对碳/铜滑动接触副载流摩擦学行为的影响[J]. 摩擦学学报, 2022, 42(4): 709-718.
- LI Han-xin, JI De-hui, SHEN Ming-xue, et al. Effect of Environmental Humidity on Tribological Behavior of Carbon/Copper Current-Carrying Sliding Contact Pairs[J]. Tribology, 2022, 42(4): 709-718.

责任编辑：彭颀

(上接第 169 页)

- [53] SKORDARIS G, BOUZAKIS K D, KOTSANIS T, et al. Effect of PVD Film's Residual Stresses on Their Mechanical Properties, Brittleness, Adhesion and Cutting Performance of Coated Tools[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2017, 18: 145-151.
- [54] FAOU J Y. Mechanics of Functionnal Thin Films: Instabilities and Adhesion[D]. Paris: Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, 2013: 10-14.
- [55] ABADIAS G, CHASON E, KECKES J, et al. Stress in Thin Films and Coatings: Current Status, Challenges, and Prospects[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 2018, 36(2): 020801.
- [56] LI Guo-dong, LI Liu-he, HAN Ming-yue, et al. The Performance of TiAlSiN Coated Cemented Carbide Tools Enhanced by Inserting Ti Interlayers[J]. Metals, 2019, 9(9): 918.
- [57] HOLMBERG K, MATHEWS A. Coatings Tribology: A Concept, Critical Aspects and Future Directions[J]. Thin Solid Films, 1994, 253(1/2): 173-178.
- [58] POLCAR T, KUBART T, NOVÁK R, et al. Comparison of Tribological Behaviour of TiN, TiCN and CrN at Elevated Temperatures[J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 193(1/2/3): 192-199.
- [59] BADISCH E, FONTALVO G A, STOIBER M, et al. Tribological Behavior of PACVD TiN Coatings in the Temperature Range up to 500 °C[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 163/164: 585-590.
- [60] KÖSTENBAUER H, FONTALVO G A, MITTERER C, et al. Tribological Properties of TiN/Ag Nanocomposite Coatings[J]. Tribology Letters, 2008, 30(1): 53-60.
- [61] JINDAL P C, SANTHANAM A T, SCHLEINKOFER U, et al. Performance of PVD TiN, TiCN, and TiAlN Coated Cemented Carbide Tools in Turning[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 1999, 17(1/2/3): 163-170.
- [62] KNIGHT J C. The Effect of Annealing on the Hardness, Interfacial Adhesion and Wear Behaviour of Plasma-Vapour-Deposited TiN Coatings on Steels[J]. Wear, 1990, 138(1/2): 239-257.
- [63] MO J L, ZHU M H. Tribological Oxidation Behaviour of PVD Hard Coatings[J]. Tribology International, 2009, 42(11/12): 1758-1764.
- [64] DENG Jian-xin, LIU Ai-hua. Dry Sliding Wear Behavior of PVD TiN, Ti₅₅Al₄₅N, and Ti₃₅Al₆₅N Coatings at Temperatures up to 600 °C[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2013, 41: 241-249.

责任编辑：彭颀