

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20211102002

刷式密封高温摩擦磨损行为*

徐乙人¹ 祁志浩¹ 李永健¹ 赵炬颖¹ 马婷²

(1. 清华大学摩擦学国家重点实验室 北京 100084;
2. 中国航发沈阳发动机研究所航空发动机动力传输重点实验室 沈阳 110015)

摘要: 刷式密封能够提升各类透平机械的性能,近年来航空发动机对刷式密封提出了更高的工作温度要求。为研究高温条件下跑道对刷丝尖端的磨损作用,针对性地研制基于电磁加热原理的刷式密封高温磨损试验设备,并成功完成GH5605材料的刷封试样与转子跑道之间的高温高速磨损试验,试验温度达到700℃,试验线速度达到100m/s。为研究刷丝柱面的高温摩擦磨损行为,基于SRV摩擦磨损试验机开展刷丝柱面模拟磨损试验。研究表明:刷丝尖端与跑道耐磨涂层之间的磨损机理以磨粒磨损为主,随着跑道温度升高,刷丝尖端附着的氧化物增加,并可使刷丝柱面产生粗糙氧化层;温度对刷丝柱面的磨损行为有显著影响,常温条件下刷丝柱面呈现出显著的黏着磨损特征,在300℃和700℃的试验温度条件下,氧化现象削弱了刷丝柱面的黏着磨损作用,并使其摩擦因数和磨损速率降低。研究结果揭示了刷式密封的磨损机理及高温条件对其磨损行为的影响,可为提升刷式密封的磨损性能提供理论指导。

关键词: 航空发动机;刷式密封;高温;磨粒磨损;黏着磨损

中图分类号: TH117

Friction and Wear Behaviors of Brush Seal under High Temperature

XU Yiren¹ QI Zhihao¹ LI Yongjian¹ ZHAO Juying¹ MA Ting²

(1. State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Key Laboratory of Power Transmission Technology on Aero-engine,
AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: The performance of turbomachinery can be improved by using brush seals. In recent years, brush seals are required to work at higher temperature by advanced aero-engines. In order to study the wear behaviors between brush bristle tips and rotor, a high temperature wear test rig based on electromagnetic heating is developed, and a wear test for GH5605 superalloy brush bristles is completed with a temperature up to 700℃ and a line speed up to 100m/s. In order to study the friction and wear behaviors at brush bristle cylindrical surfaces, an other wear test is completed based on SRV friction and wear testing machine. The test results show that the wear mechanism between the bristle tips and the wear-resistant coating on rotor surface is mainly abrasive wear. As the temperature rising, the oxide at bristle tips increases and rough oxide layers may appear on the brush bristle cylindrical surfaces. The temperature has a significant effect on the wear behaviors of brush bristle cylindrical surfaces. The cylindrical surfaces show adhesive wear characteristics under room temperature. However, when the test temperature reaches to 300℃ and 700℃, the oxidation of brush bristle cylindrical surfaces weakens the adhesive wear effect, and reduces the friction factor and wear rate. The research reveals the wear mechanism of brush seal and the influence of high temperature conditions, which provides theoretical guidance for improving the wear performance of brush seal.

Keywords: aero-engine; brush seal; high temperature; abrasive wear; adhesive wear

* 国家科技重大专项(2017-VII-0013-0110)、中国航空发动机集团产学研合作(HFZL2018CXY003-2)和摩擦学国家重点实验室自主研究课题(SKLT2019B07)资助项目。

Fund: Supported by National Science and Technology Major Project of China (2017-VII-0013-0110), Industry-University-Research Cooperation Project of AECC (HFZL2018CXY003-2), and State Key Laboratory of Tribology (SKLT2019B07).

20211102收到初稿,20220421收到修改稿

0 前言

刷式密封 (Brush seal) 是一种高速动柔性密封件, 广泛应用于航空发动机、工业燃气轮机和汽轮机等大型叶轮机械, 是篦齿密封的最简单、最实用、最有效的替换产品^[1-3]。在刷式密封工作过程中, 刷丝尖端与喷涂耐磨涂层的跑道会产生高线速度的摩擦, 同时在气流的吹拂扰动作用下, 相邻刷丝之间亦发生接触和相对运动, 并使刷丝的柱面发生磨损^[4-6]。刷丝尖端的磨损情况直接影响刷式密封的泄漏量, 而刷丝柱面的磨损会影响刷式密封工作寿命。一些学者针对刷式密封磨损问题开展了研究, 如 THAKARE 等^[7]开展了常温条件下刷丝束与跑道材料的磨损试验, 观察了刷丝与渗氮钢、氧化铬涂层等对磨后的刷丝尖端磨损形貌; PROCTOR 等^[8]研究了刷式密封在低温液氮和液氧环境中的工作情况, 并观察到刷丝尖端的犁沟和涂抹形貌以及刷丝塑性变形; KIRK 等^[9]对比了两种刷丝材料的磨损速率, 指出 HaynesNS163 高温合金刷丝耐磨性能优于 Haynes25 高温合金。温度对摩擦副的摩擦磨损行为有显著影响^[10], 近年来航空发动机对刷式密封提出了更高的工作温度要求^[11], 但关于高温条件下的刷式密封磨损行为的研究工作仍然较少, 且高温条件下的刷丝外圆柱面的磨损和氧化现象尚未引起足够重视。本文针对刷式密封高温摩擦磨损行为, 分别进行高温条件下的刷丝尖端磨损试验及刷丝柱面摩擦磨损试验, 研究高温条件下刷丝尖端和刷丝柱面的磨损机理, 以及高温氧化对刷丝磨损的影响。

1 试验设计

刷式密封是由刷环和跑道组成的环形密封组件, 图 1 为常规刷式密封的结构示意图, 其中刷环由前板 (Front plate)、背板 (Back plate) 和夹于两者之间的刷丝束 (Bristle pack) 组成^[12]。刷环的前板位于气流的高压侧, 背板位于气流的低压侧。刷丝束由大量紧密有序排列的细刷丝 (Bristles) 组成, 刷丝与半径方向的夹角为 45° 左右, 刷丝直径一般在 $0.05 \sim 0.15 \text{ mm}$ 。跑道外圆柱面与刷环内孔相配合, 跑道表面的耐磨涂层可有效减轻刷丝束对跑道的磨损^[13-14]。透平机械工作转速一般为数千至数万转每分钟, 所以刷丝尖端与跑道表面的摩擦线速度较高。刷丝柱面的摩擦主要是由气流诱导的, 气流可导致刷丝持续摆动, 这一方面使相邻刷丝之间

发生摩擦, 另一方面也使刷丝与前板、背板摩擦。文献[4]通过原位视频观测的方法研究了刷丝尖端在气流作用下的摆动行为, 观测到刷丝摆动幅值约为 0.1 mm , 摆动频率在 $15 \sim 20 \text{ Hz}$, 可见刷丝柱面处摩擦线速度相对较低。综上所述, 刷丝尖端和刷丝柱面具有不同的摩擦运动形式, 刷丝尖端与跑道耐磨涂层之间为旋转式高线速度摩擦, 而刷丝柱面与相邻刷丝或前板、背板之间为往复式低线速度摩擦。

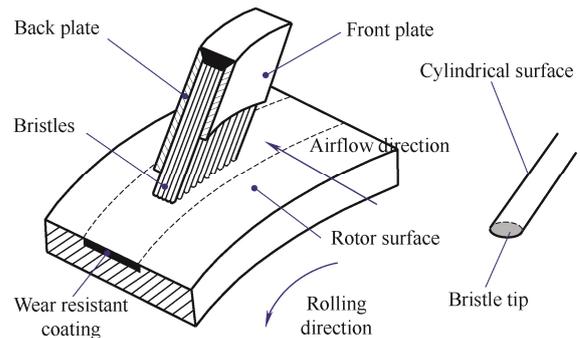


图 1 刷式密封结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of brush seal

1.1 刷丝与跑道对磨试验

为模拟高温工况条件下刷丝尖端与跑道表面的摩擦磨损行为, 研制了基于电磁加热原理的刷式密封高温磨损试验设备, 可将跑道表面加热至最高 $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 。设备结构原理如图 2 所示, 跑道试验件随转轴和电主轴旋转, 刷环试件安装在试验腔体上, 电磁感应加热线圈与跑道存在一定间隔, 当电磁加热线圈通入交流电时, 跑道试验件的外缘在电涡流作用下被加热。在该设备中, 利用红外测温传感器监测跑道表面温度, 并可自动调节感应加热功率, 能够准确设定并保持跑道表面温度。

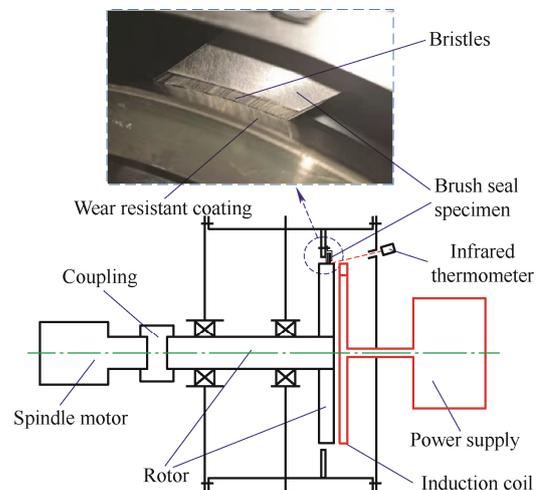


图 2 刷式密封高温磨损试验装置

Fig. 2 High temperature wear test rig for brush seals

为降低试验成本,采用刷环扇段试验件代替完整的刷环进行试验,图2展示了刷环扇段在试验器上的安装情况。刷环扇段试验件和跑道试验件的结构参数如表1所示,其中刷丝材料为刷式密封的常用材料GH5605^[15],涂层材料为爆炸喷涂的碳化铬涂层,该涂层以镍铬合金为黏结相,以碳化铬陶瓷颗粒为耐磨相^[16]。为研究高温条件下刷式密封的磨损行为,并与常温条件下的磨损行为进行比较分析,依次开展室温、300℃及700℃三种跑道温度条件下的磨损试验,线速度均为100m/s,试验时长均为10min。

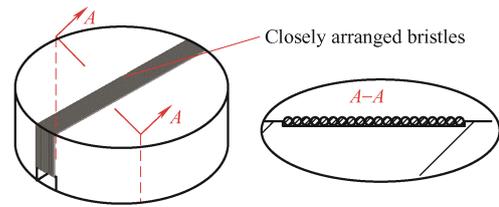
表1 跑道及刷环扇段试验件的参数

Table 1 Parameters of the tested rotor and brush seal specimens

Parameters	Values
Outer diameter of the rotor / mm	300
Radius interference / mm	0-0.1
Bristle lay angle / (°)	45
Angular width of brush seal specimens / (°)	10
Diameter of brush bristles / mm	0.1
Material of bristles	GH5605
Coating material	NiCr-Cr ₃ C ₂
Coating thickness / mm	0.3

1.2 刷丝柱面磨损试验

以图1和图2所示的刷丝束为试验对象开展刷丝柱面磨损试验存在一系列难题,例如试验载荷、运动频率及幅值均难以控制,因此设计了基于标准摩擦磨损试验机的刷丝柱面磨损模拟试验。试验在德国Optimol公司SRV摩擦磨损试验机上进行,SRV试验机的标准下试样为圆盘形状,在标准下试样结构的基础上加工一个凹槽,将刷丝按图3a所示紧密缠绕在下试样的凹槽位置,保持刷丝平铺排列。上试样的摩擦表面为球面,上试样的球面与下试样紧密排列的刷丝的柱面对磨,上试样材料与刷丝材料相同,试验时上试样沿垂直于刷丝长度方向往复运动。图3b展示了上、下试样的实物及其在试验机上的安装情况。在SRV试验机中,通过上位机对试验的载荷、振幅、频率及温度进行监控,在上试样上施加试验载荷并进行摩擦运动控制,在下试样上进行加温及温度监测,试验过程中试验机能够测量摩擦力并自动计算摩擦因数。刷丝柱面磨损试验条件见表2,下试样的温度值包括室温、300℃及700℃,其中试样往复运动的幅值和频率基于文献[4]中的观测结果给出。

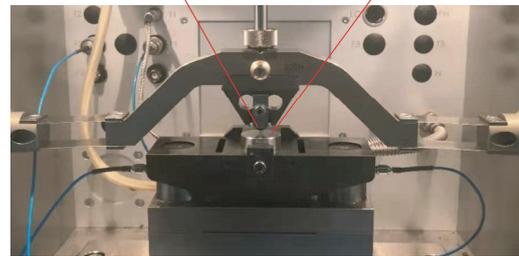


(a) Schematic diagram of the lower sample



Upper sample

Lower sample



(b) Specimen on SRV

图3 刷丝柱面磨损试验方案

Fig. 3 Wear test scheme of brush bristle cylindrical surfaces

表2 刷丝柱面磨损试验参数

Table 2 Wear test parameters of the bristle cylindrical surfaces

Test number	Temperature / °C	Load / N	Amplitude of motion / mm	Frequency / Hz	Time / min
a	Room temperature	5	±0.05	20	30
b	Room temperature	10	±0.05	20	30
c	300±10	5	±0.05	20	30
d	300±10	10	±0.05	20	30
e	700±10	5	±0.05	20	30
f	700±10	10	±0.05	20	30

2 结果与讨论

2.1 刷丝尖端磨损行为分析

图4a为刷丝尖端初始形貌扫描电镜显微图像,可见刷丝尖端在磨损前呈现出凹凸不平的形态,这是因为加工刷环内孔时采用了线切割工艺切断刷丝,刷丝断口处存在局部熔化断裂现象。刷丝材料为GH5605钴基高温合金,从图4b所示的能谱分析结果中可以看出,刷丝尖端的金属元素分布是不均匀的,其中Co、Ni、W三种金属元素的分布情况存在较高的一致性,而Cr和Mn两种元素的分布规

律与上述三种元素相反, 刷丝尖端氧元素的含量较高, 氧元素重量百分比达到 19.6%, 说明线切割使刷丝尖端出现较严重的氧化。

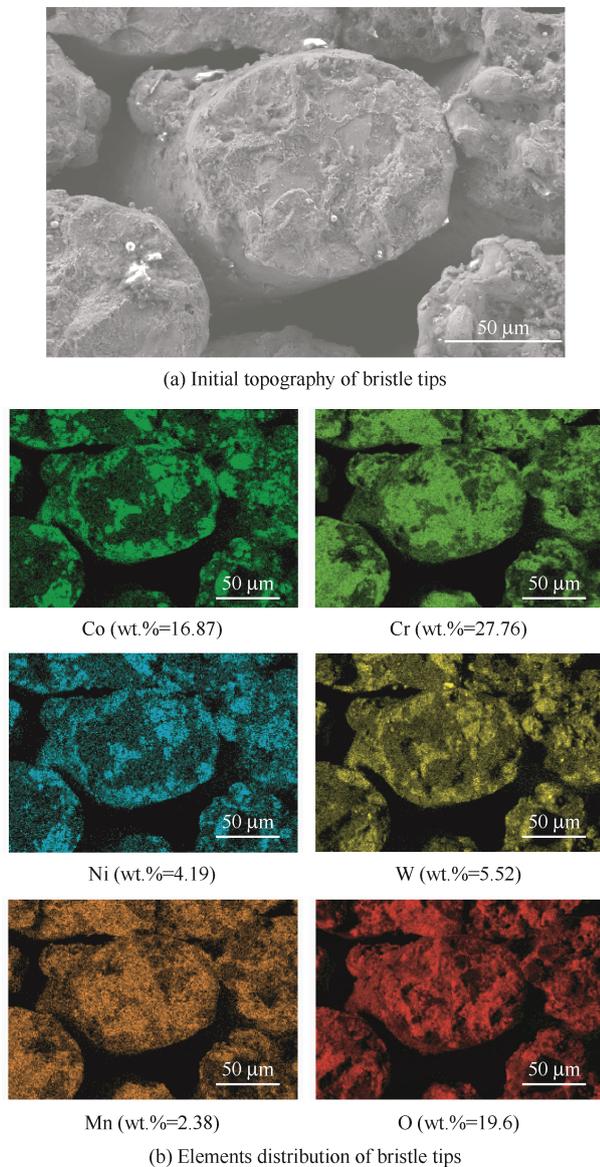


图 4 刷丝尖端初始形貌与元素分布

Fig. 4 Initial topography and elements distribution of bristle tips

图 5 为跑道温度为室温、300 °C 及 700 °C 时对应的刷丝尖端磨损形貌, 相对于图 4 所示的刷丝初始形貌, 可见试验后的刷丝尖端被磨平, 进一步观察可发现较多“犁沟”状磨损特征。此外刷丝表面有碎屑附着现象, 其中在 700 °C 跑道表面温度的磨损试验后, 刷丝尖端的碎屑最多 (图 5c)。从刷丝尖端的“磨平”现象及“犁沟”特征来看, 刷丝尖端与跑道的磨损机理主要为二体磨粒磨损, 硬度较大的碳化铬耐磨涂层对刷丝尖端产生了类似“磨削”的作用。刷丝尖端与跑道耐磨涂层之间为干摩擦, 在这种二体磨粒磨损机制作用下, 虽然摩擦副的磨

损是难以避免的, 但可通过提升刷丝的耐磨性及跑道耐磨涂层的光洁度减轻磨损。此外, 应针对刷丝尖端与跑道的初始过盈量进行精细化设计, 避免初始过盈量超出合理值, 以避免初始过盈量过大导致的涂层损伤及刷丝损坏。从图 5 中还可看出, 部分刷丝尖端因塑性变形向外铺展, 并与相邻刷丝的尖端相接。图 6 为图 5c 对应的主要元素的分布图像, 可见铬元素占比较高的位置氧元素含量亦高, 还可看出图 5c 中碎屑集中的位置氧元素含量亦较高, 这说明高温条件下刷丝尖端附着的碎屑中氧化物较多。

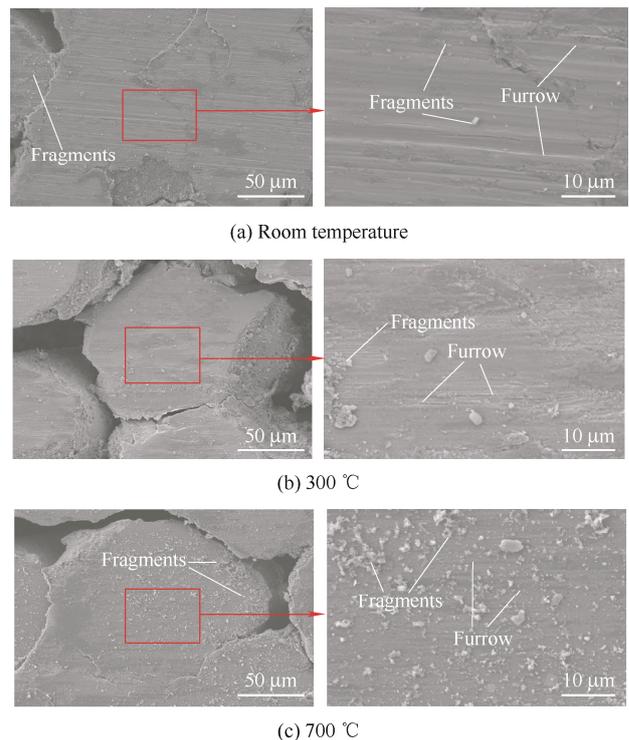


图 5 不同温度下刷丝尖端磨损形貌

Fig. 5 Wear topography of bristle tips at different temperatures

利用扫描电镜对 700 °C 磨损试验后刷丝柱面形貌进行观察, 图 7a 为刷丝尖端位置的刷丝柱面形貌, 可见刷丝尖端的柱面出现了粗糙的氧化层, 图 7b 为距刷丝尖端 1.2 mm 处的刷丝柱面的显微图像, 可见图 7b 与图 7a 相比相对光滑, 仅少部分表面略显粗糙。图 7a 所示的刷丝柱面贴近跑道, 受高温跑道的热影响最大, 且更直接地受到摩擦热的影响, 故其氧化表现最为显著。文献[15]研究了 GH5605 材料在 750 ~ 1150 °C 温度范围内的氧化行为, 结果表明 GH5605 材料高温氧化膜的致密度、厚度、形貌及成分均与温度条件关系密切。航空发动机中的刷式密封工作在高温气体环境中, 氧化导致的刷丝柱面形貌改变将不仅仅集中在刷丝尖端附近, 而是

会覆盖刷丝柱面所有位置^[17]。刷丝柱面的氧化现象可显著改变刷丝柱面的形态和性质,其对刷丝柱面磨损行为的影响是不可忽视的。

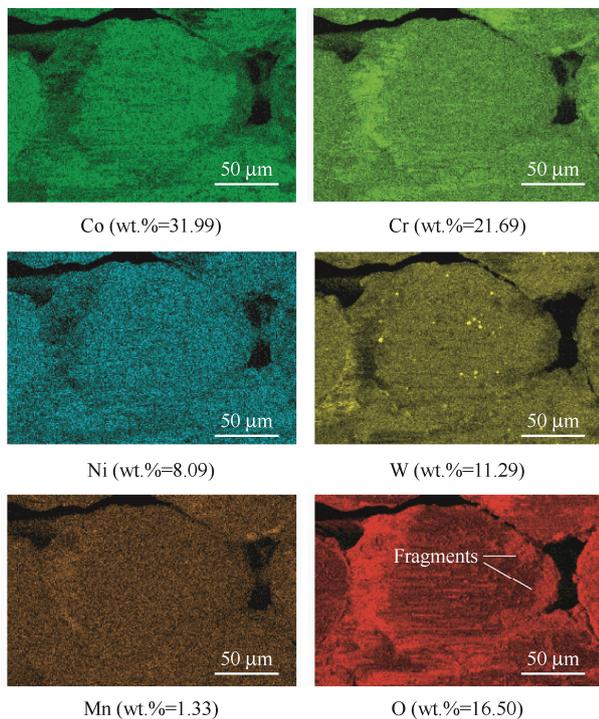
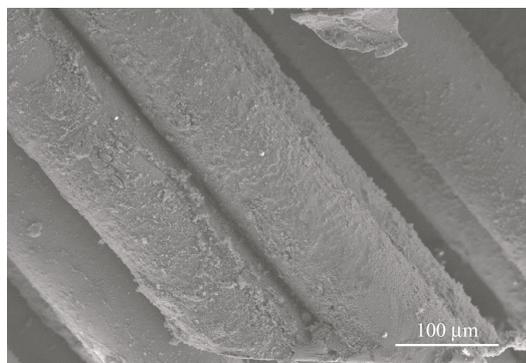
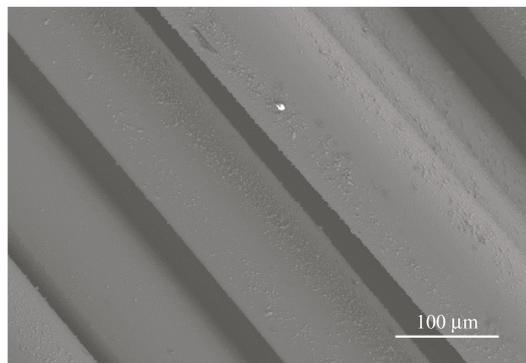


图6 试验后刷丝尖端元素分布

Fig. 6 Elements distribution at bristle tips after test



(a) At the bristle tips



(b) 1.2 mm from the bristle tips

图7 700 °C磨损试验后刷丝柱面的形貌

Fig. 7 Morphology of cylindrical surfaces after 700 °C wear test

2.2 刷丝柱面磨损分析

按表2所示的6组试验参数在SRV试验机上进行刷丝柱面磨损模拟试验,在室温、10 N载荷条件下(表2条件b)多根刷丝出现“磨断”现象,而其余5组试验中未发生刷丝断裂。图8所示为5 N载荷条件下不同试验温度时的摩擦因数随时间变化曲线。图9所示为刷丝柱面磨损形貌扫描电镜显微图像。

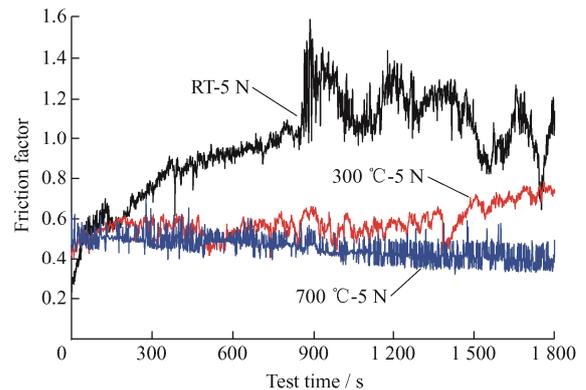


图8 摩擦因数随时间变化曲线

Fig. 8 Variation curve of friction factor

根据图8中的摩擦因数曲线可知,室温条件下摩擦因数的波动幅度较大,而高温时摩擦因数的波动量相对较小。室温时摩擦因数在0.6~1.4变化,且绝大部分时间的摩擦因数数值保持在0.8以上。300 °C条件下的摩擦因数在0.4~0.8,700 °C时的摩擦因数在0.4~0.6。显然,摩擦因数随温度升高呈现减小趋势,且室温条件下测得的摩擦因数显著高于300 °C及700 °C温度条件。

在图9a和图9b所示的室温条件刷丝柱面磨损形貌图中,可见明显的层片状材料黏附(在图9中的a3、b3中示出),同时未见显著的犁沟特征,根据磨损形貌可判断室温条件下刷丝柱面磨损机理主要为黏着磨损。图9c和图9d为下试样被加热至300 °C时的刷丝柱面磨损形貌,刷丝柱面的磨损区域呈现出粗糙形态,可分辨出刷丝柱面表层材料的塑性流动现象,但未见明显的层片状黏附特征。图9e和图9f为下试样被加热至700 °C时的刷丝柱面磨损形貌,亦未见与图9a、9b类似的层片状材料黏附,仍可在磨损表面分辨出材料塑性流动的特征。通过观察刷丝柱面上材料塑性变形及流动形态可知,图9e、9f中的材料塑性流动主要是在“原位”发生的,未见明显的材料脱落及黏附现象。

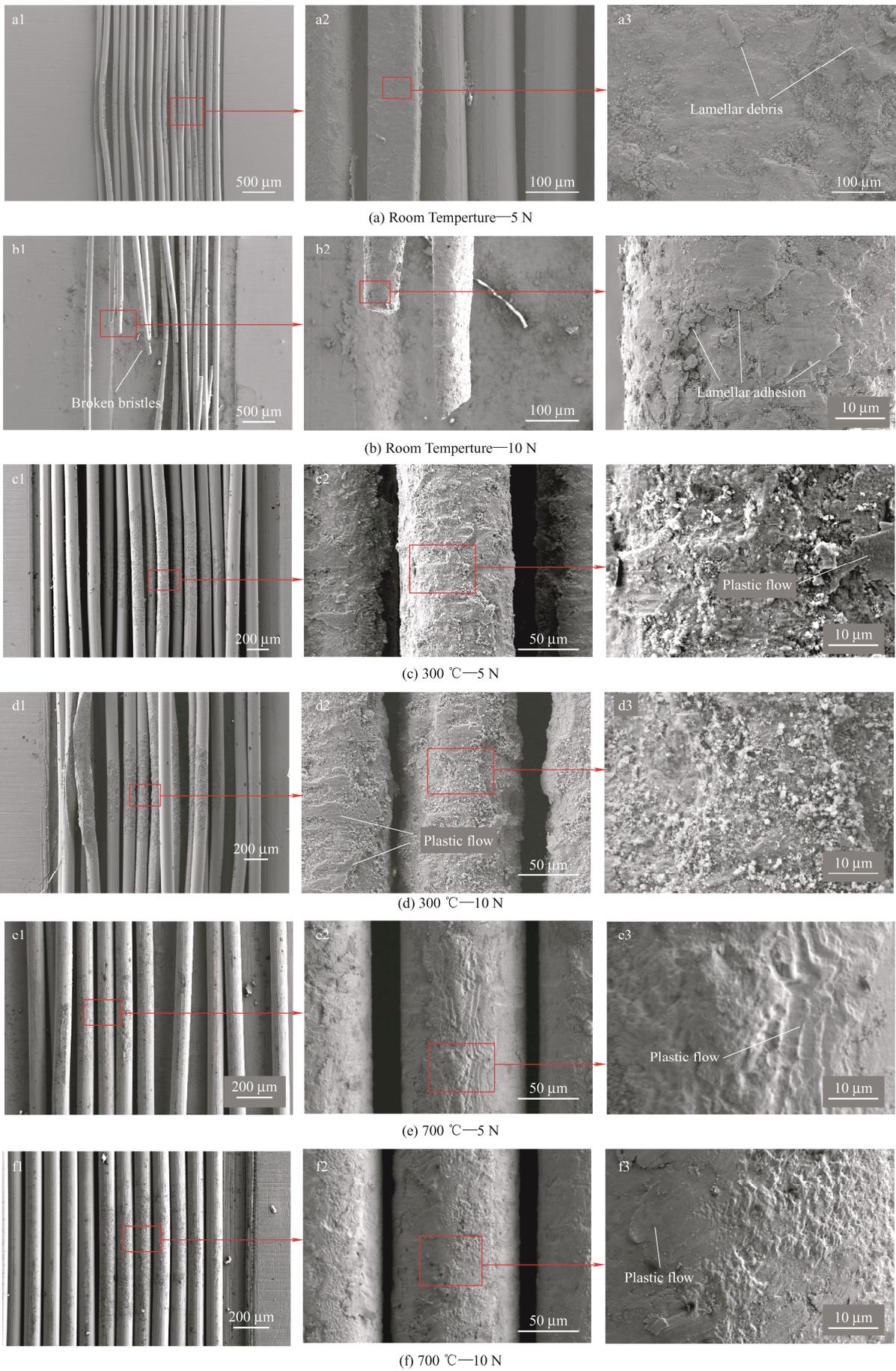


图 9 刷丝柱面磨损形貌

Fig. 9 Wear morphology of brush bristle cylindrical surfaces

通过图9所示磨损图像对比不同温度条件下刷丝柱面的磨损量,可发现磨损量随着试验温度的升高呈减小趋势。在常温条件下,刷丝磨损最为严重,甚至出现断裂情况(图9b)。在300℃的试验条件下,刷丝磨损位置的直径出现了一定程度减小,但被磨损位置仍基本保持圆柱形。而当试验温度达到700℃时,刷丝磨损程度进一步减轻,被磨损位置的刷丝直径未见明显减小。

在700℃高温磨损试验后,刷丝表面颜色从试验前的银白色变为试验后的蓝紫色,这是氧化导致的,但图9e和图9f中未磨损的刷丝柱面仍保持着较光滑的形态,并未出现与图7a类似的粗糙氧化层。可能是因为图7a中的刷丝柱面受到了700℃跑道表面和高线速度摩擦生热的双重影响,使其经受了更高的温度。300℃磨损试验后,刷丝表面颜色仍保持为银白色,但通过能谱分析发现刷丝柱面氧元素含量升高数倍,氧元素的质量分数从约1%升高至6%以上。虽然高温合金材料的氧化行为非常复杂,但可确定刷丝柱面在300℃以上存在不可忽视的氧化现象。

通过综合分析刷丝柱面磨损试验中的磨损形貌、摩擦因数、磨损量及氧化情况,针对试验结果给出以下解释:常温条件下刷丝柱面磨损机理主要为黏着磨损,随着温度升高,刷丝柱面的氧化程度增强,并削弱了刷丝柱面的粘着作用,进一步地导致摩擦因数降低、磨损量减少。因刷丝直径一般仅为0.05~0.15mm,建议探索研究刷丝柱面保护层,以避免刷丝柱面出现粘着磨损和严重氧化现象,从而保证刷式密封的长寿命工作。

3 结论

面向航空发动机刷式密封的高温工作需求,开展了不同温度条件下的刷丝与跑道对摩试验及刷丝柱面摩擦磨损试验,最高试验温度达到700℃。主要研究结论如下:

(1) 对刷丝材料为高温合金的刷式密封,跑道耐磨涂层对刷丝尖端的磨损主要为磨粒磨损,高温条件对刷丝尖端的磨损机理没有明显影响。

(2) 刷丝的高温氧化表现是复杂的,高温可导致刷丝氧化变色、氧元素含量升高、氧化碎屑附着及产生粗糙氧化层等,刷丝的高温氧化现象对刷丝柱面磨损行为有显著影响。

(3) 刷丝柱面在常温条件下呈现出粘着磨损特征,随着温度升高,刷丝柱面的氧化程度增强,并使刷丝柱面的黏着磨损作用减弱。

参 考 文 献

- [1] 李军, 李志刚, 张元桥, 等. 刷式密封技术的研究进展[J]. 航空发动机, 2019, 45(2): 74-84.
LI Jun, LI Zhigang, ZHANG Yuanqiao, et al. Research progress of brush seal technology[J]. Aeroengine, 2019, 45(2): 74-84. (in Chinese)
- [2] FAN J J, JI H H, WANG Q, et al. A combined theoretical and experimental study of wear model of brush seal[J]. Tribology International, 2021, 154: 106696.
- [3] DINC S, DEMIROGLU M, TURNQUIST N, et al. Fundamental design issues of brush seals for industrial applications[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2002, 124(2): 293-300.
- [4] 孙丹, 杜宸宇, 刘永泉, 等. 刷式密封刷丝变形与振动特性实验[J]. 航空学报, 2020, 41(10): 68-78.
SUN Dan, DU Chenyu, LIU Yongquan, et al. Experiment on bristle deflection and oscillation characteristics of brush seals[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(10): 68-78. (in Chinese)
- [5] REGGENTIN P, FRIEDRICH S J. Investigation of brush seal instabilities[C]// AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum, August 24-28, 2020. Virtual Event: AIAA 2020-3514.
- [6] O' NEILL A T, HOGG S L, WITHERS P A, et al. Multiple brush seals in series[C]// ASME 1997 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition, June 2-5, 1997. Orlando, Florida, USA: 97-GT-194.
- [7] THAKARE M R, MASON J F, OWEN A K, et al. Effect of sliding speed and counterface properties on the tribo-oxidation of brush seal material under dry sliding conditions[J]. Tribology International, 2016, 96: 373-381.
- [8] PROCTOR M P, WALKER J F, PERKINS H D, et al. Brush seals for cryogenic applications: performance, stage effects, and preliminary wear results in LN2 and LH2 [R]. NASA, 1996.
- [9] KIRK T, BOWSER A, CRUDGINGTON P. High temperature brush seal development[C]// Proceedings of ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, June 26-30, 2017. Charlotte, NC, USA: GT2017-63091.
- [10] 牛宇生, 郝秀清, 孙鹏程, 等. 温度对表面摩擦磨损性能影响的研究进展[J]. 中国表面工程, 2020, 33(6): 1-22.
NIU Yusheng, HAO Xiuqing, SUN Pengcheng, et al. Perspective of influence of temperature on friction and

- wear behavior[J]. *China Surface Engineering*, 2020, 33(6): 1-22.
- [11] 陈聪慧, 葛泉江, 李季, 等. 航空发动机机械系统技术研究[J]. *航空发动机*, 2015, 41(5): 86-91.
- CHEN Conghui, GE Quanjiang, LI Ji, et al. Study on aeroengine mechanical system technology[J]. *Aeroengine*, 2015, 41(5): 86-91. (in Chinese)
- [12] 黄首清. 刷式密封的介质流动及刷丝尖端接触传热特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- HUANG Shouqing. Research on the flow field and bristles tip contact heat transfer characteristics of brush seals[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015. (in Chinese)
- [13] DERBY J, ENGLAND R. Tribopair evaluation of brush seal applications[C]// 28th Joint Propulsion Conference and Exhibit, July 6-8, 1992. Nashville, TN, USA: AIAA 1992-3715.
- [14] HAWTHORNE H M. Brush-on-disc simulation tribotesting of materials for gas turbine-compliant seal components[J]. *Tribology International*, 1994, 27(2): 87-95.
- [15] 郭淑娟, 孙魁平. 钴基高温合金 GH5605 的恒温氧化行为研究[J]. *科学技术与工程*, 2011, 11(6): 1328-1331.
- GUO Shujuan, SUN Kuiping. Isothermal oxidation behavior study on Co-base super alloy GH5605[J]. *Science Technology and Engineering*, 2011, 11(6): 1328-1331. (in Chinese)
- [16] 王长亮, 崔永静, 汤智慧, 等. 超级爆炸喷涂镍基钴基涂层高温氧化及摩擦磨损性能[J]. *装备环境工程*, 2020, 17: 90-96.
- WANG Changliang, CUI Yongjing, TANG Zhihui, et al. High temperature oxidation and friction behavior of nickel based and cobalt based coating deposited by super detonation spray[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2020, 17: 90-96. (in Chinese)
- [17] HENDRICKS R C, GRIFFIN T A, BOBULA G A, et al. Metallographic analysis of brush bristle and integrity testing of brush seal in shroud ring of T-700 engine[R]. NASA, 1995.

作者简介: 徐乙人, 男, 1988 年出生, 博士研究生。主要研究方向为润滑及密封技术。

E-mail: xuyirenzone@126.com

李永健 (通信作者), 男, 1980 年出生, 副教授、博士研究生导师。主要研究方向为密封技术。

E-mail: liyongjian@mail.tsinghua.edu.cn