

# 高速高温条件下刷式封严环涂层 与刷丝摩擦副磨损行为

郭会明<sup>1</sup>, 杨丽琪<sup>2,3</sup>, 张航<sup>1</sup>, 王恩庆<sup>1</sup>,  
刘砚飞<sup>1</sup>, 田伟<sup>1</sup>, 钟燕<sup>1</sup>, 薛伟海<sup>2,3</sup>

(1.中国航发四川燃气涡轮研究院, 成都 610500; 2.中国科学院金属研究所, 沈阳 110016;  
3.中国科学技术大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110016)

**摘要:** **目的** 研究高速高温刮削条件下 NiCr-Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub> 涂层和 SG37 合金刷丝组成的摩擦副的磨损行为。**方法** 利用自制的高速高温刮擦试验机, 在不同进给速度和过盈量条件下进行封严环涂层与刷丝摩擦副的高速高温刮削试验。用轮廓测量仪测量刷式封严环表面涂层的磨痕深度。用超景深显微镜 (OM) 和扫描电镜 (SEM) 观察涂层及刷丝样品的原始形貌和磨痕形貌, 并利用配备的 EDS 能谱仪分析磨痕表面元素成分, 同时分析了摩擦过程中的磨损机理。**结果** NiCr-Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub> 涂层与 SG37A 合金刷丝在高速高温刮擦过程中发生了磨粒磨损、黏着磨损和刷丝材料向涂层的转移。刷丝之间也存在摩擦变形和磨损, 这主要是由于刷丝与刷丝在磨损过程中发生了高温变形和挤压, 由于“拖尾”现象的存在, 使刷丝尖端的变形和挤压更加明显, 高温下金属流动性的增加进一步促进了菱形的形成。通过分析不同过盈量和进给速度对磨痕深度的影响, 发现过盈量和进给速度均对涂层磨痕深度存在影响, 随过盈量和进给速度的增加, 涂层磨痕深度增大。**结论** 高速高温的苛刻工况下, 刷丝在磨损过程中具有显著的变形, 并且过盈量对封严环涂层和刷丝样品磨损的影响更大。

**关键词:** 封严涂层; 刷丝; 刷式封严; 高速刮削; 磨损机制

中图分类号: TH117 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2023)03-0207-10

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.03.018

## Wear Behavior of Brush Seal Ring Coating and Bristles Friction Pair under High Speed and High Temperature

GUO Hui-ming<sup>1</sup>, YANG Li-qi<sup>2,3</sup>, ZHANG Hang<sup>1</sup>, WANG En-qing<sup>1</sup>,  
LIU Yan-fei<sup>1</sup>, TIAN Wei<sup>1</sup>, ZHONG Yan<sup>1</sup>, XUE Wei-hai<sup>2,3</sup>

(1. AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Chengdu 610500, China; 2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 3. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology of China, Shenyang 110016, China)

**ABSTRACT:** Aiming at the wear problem of brush seal ring coating and bristles in aeroengine during service, the tribological behaviors of seal friction pairs composed of commonly used NiCr-Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub> seal coatings and SG37A bristles were studied under

收稿日期: 2021-11-29; 修订日期: 2022-06-19

Received: 2021-11-29; Revised: 2022-06-19

作者简介: 郭会明 (1988—), 男, 硕士。

**Biography:** GUO Hui-ming (1988-), Male, Master.

引文格式: 郭会明, 杨丽琪, 张航, 等. 高速高温条件下刷式封严环涂层与刷丝摩擦副磨损行为[J]. 表面技术, 2023, 52(3): 207-216.

GUO Hui-ming, YANG Li-qi, ZHANG Hang, et al. Wear behavior of Brush Seal Ring Coating and Bristles Friction Pair under High Speed and High Temperature[J]. Surface Technology, 2023, 52(3): 207-216.

high-speed rubbing condition. The high speed and high temperature rubbing test of seal ring coating and bristles friction pair was carried out under different feed rates and interference conditions by using a self-developed high-speed rubbing tester. SG37A bristles with a diameter of 0.08 mm was used for brush seal. 2 hundred bristles was placed in a 1.2 mm×1.2 mm groove, with an angle of 45° with the horizontal, and the exposed height of bristles was 2 mm. The base material of the brush seal ring simulating samples is GH4169 alloy, and the sealing coating on the surface is a double-layer structure. The bottom layer is made of CoNiCrAlY, with a thickness of 0.1 mm, which is prepared by explosive spraying; the surface layer is NiCr-Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub> containing BaF<sub>2</sub> and CaF<sub>2</sub>, with a thickness of 0.25 mm, which is prepared by plasma spraying. The tests were conducted on the self-developed high-speed friction and wear tester. The bristles and coating samples were respectively installed on the high-speed rotary table and the fixture of the feeding system. The feed speed (the radial feed rate of the coating moving to bristles) was set to be 0.01 mm/s, 0.05 mm/s, and 0.1 mm/s, the interference is 0.3 mm, 0.5 mm and 1.0 mm. The linear speed of the bristles tip is 220 m/s, and the test heating temperature is 600 °C. The depth of abrasion marks on the surface coating of brush seal ring was measured by contour measuring instrument. The original morphology and wear morphology of the coating and bristles friction pair were observed by Ultra depth of field optical microscope (OM) and scanning electron microscope (SEM), and the element composition on the wear surface was analyzed by EDS spectrometer, and the wear mechanism during the friction process was also analyzed. The results showed that abrasive wear, adhesive wear and transfer of bristles material to the seal coatings occur during high-speed and high-temperature rubbing between the NiCr-Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub> coating and SG37A bristles. The bristles not only rub with the coating, but also have friction deformation and wear between the bristles. This is mainly due to the high-temperature deformation and extrusion of bristles during the wear process. Due to the existence of "tailing" phenomenon, the deformation and extrusion of bristle tips is more obvious. The increase of metal fluidity at high temperature further promotes the formation of diamond. By analyzing the influence of different interference amount and feed rate on the wear mark depth, it is found that both of them have an influence on the wear mark depth. With the increase of interference amount and feed rate, the coating wear mark depth increases. Under the severe working condition of high speed and high temperature, the bristles have significant deformation in the process of wear, and the interference amount has a greater influence on the wear of the seal ring coating and bristles sample.

**KEY WORDS:** seal coating; bristles; brush seal; high speed rubbing; wear mechanism

随着先进航空发动机推重比的不断提高,对气路封严的要求越来越高。由于转子旋转过程的振动和变形,传统的篦齿封严结构存在较多的二次流路空气损失,使发动机的效率难以进一步提升,而刷式封严则具有优异的封严性能<sup>[1]</sup>。研究表明,相同条件下刷式封严结构比传统篦齿封严结构减少 50%~90%的气体泄漏<sup>[2]</sup>。刷式封严同时还具有磨损小、结构小、质量轻的特点和良好的使用安全性,因此刷式封严结构被越来越多的航空发动机和燃气轮机所采用。

典型的刷式封严由固定的刷丝环和封严环组成。刷丝环由密排的刷丝、前挡环和后挡环构成,封严环表面喷涂有耐磨减摩涂层。刷丝的长度短(约 1.5 cm)、直径小(约 0.1 mm),与刷封环表面存在倾斜夹角和过盈量,如图 1 所示<sup>[1-3]</sup>。

目前刷式封严的研究主要集中在泄漏特性方面<sup>[4-6]</sup>,而刷式封严配副的摩擦和磨损是制约其寿命的关键因素。例如,当刷丝长期磨损后,刷式封严的封严效率降低,泄漏量增加<sup>[4-5]</sup>;影响刷式密封性能的“滞后效应”和“刚化效应”就是由于刷丝与背板间的摩擦过大而导致的;而常说的“吹伏”效应则会导致刷丝与跑道涂层的接触力过大,引起磨损加剧,进而使

泄漏增加<sup>[7]</sup>。因此,研究刷式密封中的摩擦磨损问题,特别是刷丝和封严环涂层间的高速高温摩擦磨损行为,具有重要意义。

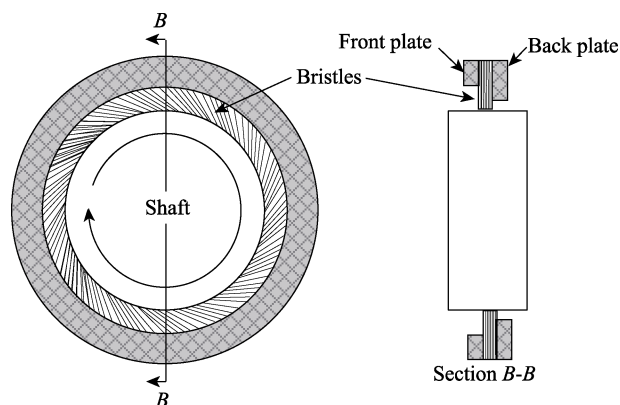


图 1 典型刷式封严结构示意图  
Fig.1 Illustration of a standard brush seal structure

Hawthorne 等<sup>[8]</sup>通过试验研究了刷式封严结构的磨损现象,结果表明,镍基高温合金刷丝与镍铬合金基体+Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub>涂层组成的刷式封严摩擦副在高温条件下具有良好的耐磨性。孙晓萍等<sup>[6]</sup>设计部件试验模拟

发动机工作条件, 获取了刷式封严在各个工作阶段的性能并验证了其耐久性和结构完整性。James 等<sup>[9]</sup>采用刷丝模拟试样进行了磨损特性研究并测量了不同环境温度和摩擦线速度下的摩擦因数, 结果表明, 刷丝与封严环发生了磨料磨损, 摩擦副中存在封严环材料向刷丝的转移, 而提高环境温度和摩擦线速度均会降低摩擦因数。Fan 等<sup>[10]</sup>的研究表明, 刷式封严中的刷丝磨损与多种因素存在关系, 包括封严环内径、刷丝角度、刷丝直径等, 并且各项因素之间相互影响。

刷式封严结构中, 刷丝材料主要为钴基或镍基高温合金, 封严环基体为高温合金, 表面涂覆耐磨的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层或  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  涂层等。在发动机工作过程中, 刷丝与封严环发生接触和磨损, 而在发动机的过渡工况下, 刷丝与封严环由低温升到较高的工作温度, 两者之间的接触角度和过盈量随工作状态的变化而改变, 这些变化对刷丝与封严环的磨损可能会产生不利的影响。在前期的文献调研中, 对发动机过渡工况下刷丝与封严环接触的动态因素影响研究较少。

本文采用高速刮擦试验, 研究了不同进给速度、过盈量和对摩时间下 SG37A 刷丝与含氟化钡氟化钙的碳化铬粉末涂层的摩擦磨损行为, 得到了对摩擦副在不同进给速度、过盈量和对摩时间下磨损行为规律, 探讨了刷式封严刷丝与封严环涂层的磨损机制, 重点关注了刷丝的磨损率变化。

## 1 试验

### 1.1 样品制备

本试验中所用的刷式封严刷丝样品采用应用于发动机的高温合金材料制造, 合金牌号为 SG37A, 丝材直径为 0.08 mm。采用专门设计的转接夹具进行模拟刷丝样品的制备, 模拟航空发动机中实际的绕丝过程, 在截面积  $1.2\text{ mm} \times 1.2\text{ mm}$  的方形槽内放置 200 根刷丝。通过方形槽的走向设计, 刷丝与夹具水平边

成  $45^\circ$  夹角露出。绕丝完成后, 采用线切割慢走丝的方式加工到所需的露头高度 2 mm。加工完成后, 酒精清洗吹干备用。刷丝模拟件工装结构及刷丝露头顶端放大照片如图 2 所示。

刷式封严环模拟试样 (涂层试样) 基体材料为 GH4169 合金, 表面涂覆的封严涂层为双层结构, 底层采用  $\text{CoNiCrAlY}$ , 厚度约为 0.1 mm, 采用爆炸喷涂工艺制备。面层采用含氟化钡和氟化钙的  $\text{NiCr-Cr}_2\text{C}_3$ , 厚度为 0.25 mm 左右, 采用等离子喷涂工艺制备。试验前刷式封严环模拟试样用电火花线切割技术加工成长方体样品, 测试面尺寸为  $36\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ , 厚度为 5 mm。刷式封严环模拟试样宏观形貌如图 3 所示。对涂层样品截面进行观察, 如图 4 所示。涂层样品制备完成后放入干燥器中备用。

### 1.2 方法

试验在自主研制的高速刮擦摩擦磨损试验机上进行。试验机控制参数: 转子转速 300~22 000 r/min, 平动样品进给速度 (入侵速率) 0.002~5 mm/s, 样品相对摩擦线速度 6~450 m/s, 法向力和切向力测量范围 10~1 000 N。

试验时, 刷丝 (转动) 和涂层试样 (平动) 分别安装到高速转盘和进给系统的夹具上, 然后设定涂层样品径向进给位置的原点、加热点和试验点, 如图 5 所示。其中, 原点为涂层样品离刷丝最远的位置, 加热点为涂层样品在感应加热线圈处的位置, 试验点是刷丝与涂层刚好接触的位置, 是涂层进给深度的基准点, 试验点与加热点的距离在 5 mm 左右。刷丝尖端转动的切线速度定义为刮擦速度 ( $V_t$ ), 涂层向转盘径向的移动速度和位移分别定义为刷丝对涂层的进给速度 ( $V_f$ ) 和过盈量 ( $D$ )。

通过感应加热的方式, 将涂层表面温度加热到试验温度后, 保温 5 min。在保温时间还剩 2 min 左右时, 带有刷丝样品的转盘开始旋转。当  $V_t$  被加速到

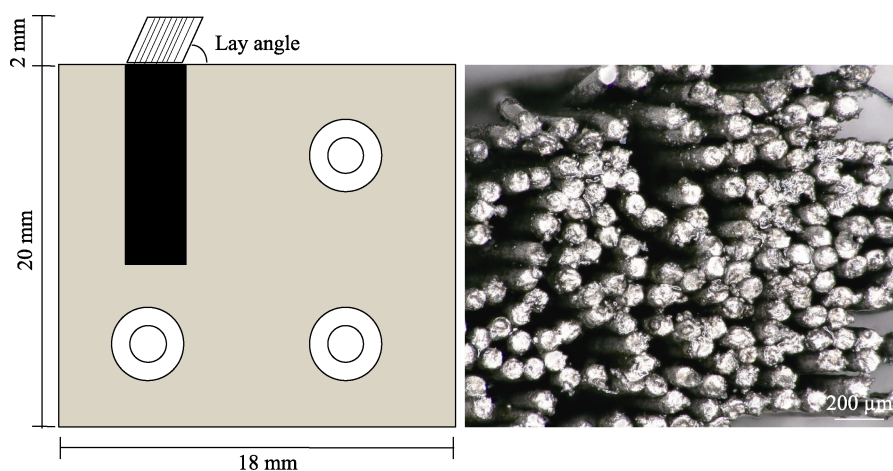


图 2 刷丝模拟件工装及刷丝形貌  
Fig.2 bristles simulator tooling and bristles Morphology

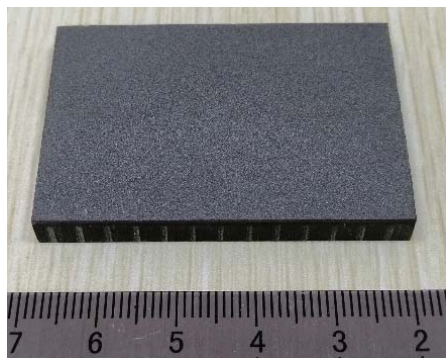


图3 刷式封严环模拟试样形貌  
Fig.3 Morphology of brush seal ring simulator

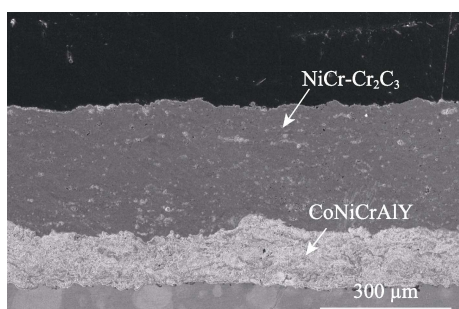


图4 刷式封严环模拟试样涂层截面形貌  
Fig.4 Cross section morphology of brush seal ring simulator' coating

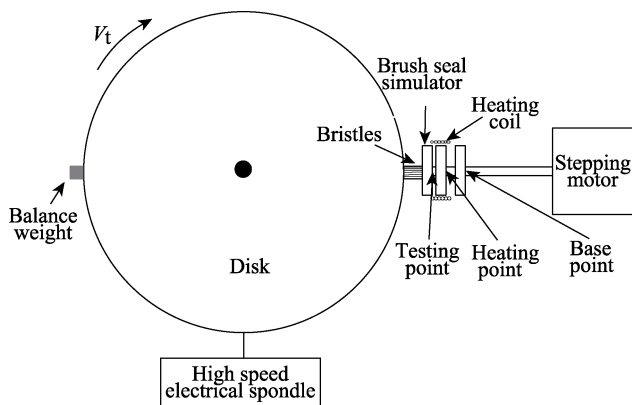


图5 高速刮削试验示意图  
Fig.5 High speed tribology test schematic

预定值时,启动步进电机,使涂层样品按照预设的速度  $V_t$  向转盘径向移动,刷丝转动与涂层平动的耦合模拟实际工况中刷丝与涂层的摩擦磨损行为。当涂层样品按照预定速度  $V_t$  移动到预定位置,即达到预设的过盈量  $D_i$  后,停止径向移动,在该位置保持一定时间后,涂层样品沿原路返回,并停止刷丝的转动,完成一次高温高速刮削试验。本次试验的方案如下:设定进给速度(涂层向刷丝样品运动的径向进给速率)分别为 10、50、100  $\mu\text{m/s}$ ,过盈量分别为 0.3、0.5、1.0 mm,刷丝尖端线速度为 220 m/s,试验加热温度为 600  $^{\circ}\text{C}$ ,试验状态及编号如表 1 所示。

表 1 高速高温摩擦试验条件  
Tab.1 Test parameters of high temperature and high speed

Serial number	Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Linear velocity/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Feed rate/ ( $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Interference/ mm	Testing time/h
1	600	220	10	0.3	0.5
2	600	220	50	0.3	0.5
3	600	220	100	0.3	0.5
4	600	220	10	0.5	0.5
5	600	220	50	0.5	0.5
6	600	220	100	0.5	0.5
7	600	220	10	1.0	0.5
8	600	220	50	1.0	0.5
9	600	220	100	1.0	0.5

### 1.3 分析表征

涂层的金相(OM)观察采用的是 KEY-ENCE VHX-1000C 超景深显微镜,刷式封严环表面涂层的磨痕深度采用基恩士轮廓测量仪(KEYENCE VR-3000)测量。观察刷丝样品端面和涂层样品的磨痕形貌采用的是 FEI INSPECT F50 型扫描电镜,并用配备的 EDS 能谱仪分析磨痕表面元素成分。

## 2 结果与讨论

### 2.1 高速高温摩擦试验结果

#### 2.1.1 涂层磨痕深度和刷丝倾角

对高速刮削试验后的涂层磨痕深度和刷丝倾角进行统计,如表 2 所示,相应的柱状图为图 6 和图 7。从表中数据可以看出,试验后的涂层磨痕深度均未超过 100  $\mu\text{m}$ ,远小于面层的厚度(250~300  $\mu\text{m}$ )。

当过盈量为 1.0 mm 时,涂层磨痕深度随进给速度的增大而增大,当进给速度由 10  $\mu\text{m/s}$  提高到 100  $\mu\text{m/s}$ ,涂层的磨痕深度也由 25~35  $\mu\text{m}$  提升到 36~53  $\mu\text{m}$ 。而当过盈量为 0.3 mm 和 0.5 mm 时,涂层磨痕深度随进给速度的变化无明显规律,这可能与过盈量较小的条件下进给速度对涂层与刷丝的摩擦影响较小有关。

过盈量对磨痕深度的影响规律较复杂,在进给速度相同的条件下,磨痕深度随过盈量的增加,先降低后增加。这可能是由于随着过盈量的增加,刷丝变形导致刷丝倾角发生了变化,随着刷丝倾角的减小,刷丝与涂层的接触部位由刷丝头部逐渐过渡到刷丝侧圆柱面,导致摩擦磨损减少,磨损深度减小;另一方面当过盈量进一步增加到 1.0 mm 时,刷丝与涂层试样摩擦过程中,部分刷丝断裂,刷丝与涂层的接触部位由刷丝侧圆柱面转变为刷丝头部,同时在接触应力增大的条件下,磨损深度进一步提升。由于刷丝断裂受到进给速度和过盈量的双重影响,刷丝断裂的数量



表 2 高速刮削试验后涂层磨痕深度和刷丝倾角 Tab.2 Coating wear scar depth and bristles inclination angle after the rubbing test				
Interference/ mm	Feed rate/ ( $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Coating no.	Wear scar depth/ $\mu\text{m}$	Lay angle/ ( $^{\circ}$ )
0.3	10	1-1	37	34
		1-2	24	28
	50	1-3	39	33
		1-4	24	30
	100	1-5	38	20
		1-6	28	23
0.5	10	2-1	10	19
		2-2	12	28
	50	2-3	40	29
		2-4	21	28
	100	2-5	13	33
		2-6	32	32
1.0	10	3-1	25	18
		3-2	35	23
	50	3-3	32	15
		3-4	34	16
	100	3-5	36	16
		3-6	53	23

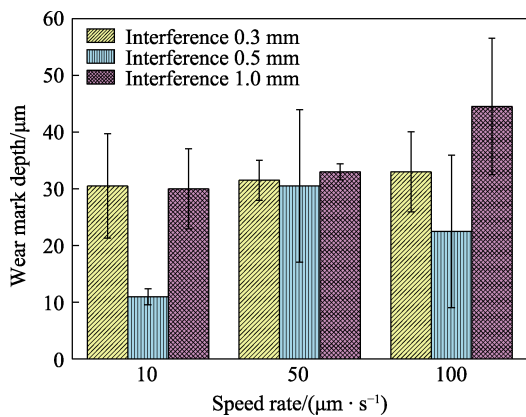


图 6 不同试验条件测试后涂层磨损深度  
Fig.6 Wear scar depth of coatings after rubbing  
at different test conditions

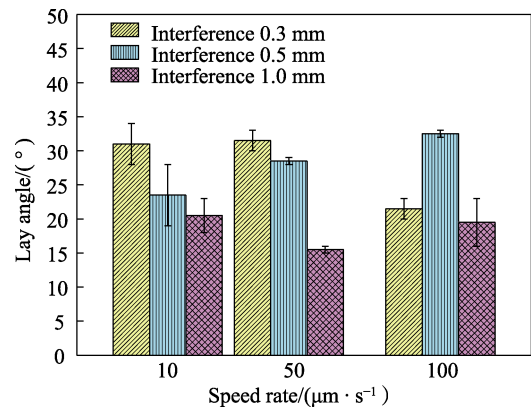


图 7 不同试验条件测试后刷丝倾角  
Fig.7 Inclination angle of bristles after rubbing  
at different test conditions

存在一定波动,导致不同进给速度下过盈量的影响不同。

刷丝倾角的变化主要与过盈量相关,试验后刷丝的倾角均小于初始值 ( $45^{\circ}$ )。从图 7 中可以看出,在进给速度为  $10\text{ }\mu\text{m/s}$  和  $50\text{ }\mu\text{m/s}$  的条件下,在本文的 3 种过盈量下,刷丝的倾角随过盈量的增加而降低;当进给速度为  $100\text{ }\mu\text{m/s}$  时,刷丝的倾角随过盈量的增加先增加后降低。另外在刷丝与涂层刮削过程中部分刷丝发生了断裂,对刷丝倾角的测量结果产生了一定的影响。

2.1.2 涂层磨痕形貌

对过盈量为  $0.3\text{ mm}$ 、不同进给速度下涂层的磨痕进行观察,结果如图 8 所示。可以看出,在进给速度为  $10\text{ }\mu\text{m/s}$ 、 $50\text{ }\mu\text{m/s}$ 、 $100\text{ }\mu\text{m/s}$  的条件下,涂层表面存在明显的磨损区域,磨痕呈现涂抹痕迹,在磨痕表面可见刷丝在刮削后形成的“犁沟”。在部分磨损区域还可以观察到涂层发生了掉块,从而形成了凹坑和空洞。对比不同进给速度的形貌,涂层磨损形貌相近。

对不同过盈量的试验条件下涂层的磨痕进行分析,结果如图 9 所示。可以看出,在进给速度为  $50\text{ }\mu\text{m/s}$ 、过盈量分别为  $0.3\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.0\text{ }\mu\text{m}$  的条件下,涂层的磨痕呈现涂抹痕迹,磨痕表面的“犁沟”随着过盈量的增加,深度逐渐增加。在进给速度为  $50\text{ }\mu\text{m/s}$ 、过盈量为  $0.5\text{ mm}$  的条件下,涂层磨损后表面存在较多的

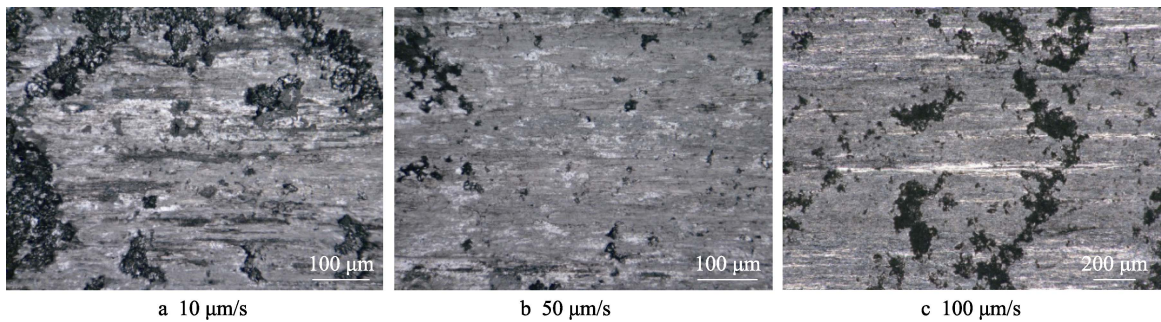


图 8 过盈量  $0.3\text{ mm}$ 、不同进给速度条件下涂层刮磨形貌  
Fig.8 Interference  $0.3\text{ mm}$ , morphology of coating wear under different speed rate conditions

涂层掉块。这主要是由于 NiCr-Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub> 涂层中的 CrC、CrO 等硬质陶瓷相在摩擦过程中发生剥落, 形成磨料, 在涂层表面出现深犁沟, 此外由于缺乏润滑效果, 被磨表面容易形成较大的剪切力, 使表面成片剥落。同时由于 NiCr-Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub> 涂层为层状结构, CrC、CrO 等硬质陶瓷相和 NiCr 金属相层状分布, 使涂层刮磨形貌呈现表面较光滑和表面存在较多剥落的 2 种形貌。

### 2.1.3 刷丝磨损形貌

对不同进给速度和过盈量条件下试验后刷丝形貌进行观察, 如图 10 所示。刷丝的尖端在高速摩擦

磨损试验后由圆形变为椭圆形, 椭圆的长轴方向与摩擦方向一致, 说明在高速摩擦热作用下发生了沿摩擦方向的塑性变形。

在相同进给速度条件下, 当过盈量增大时, 刷丝尖端的变形也较大, 更为接近于椭圆。在相同过盈量的条件下, 入侵速度较高时, 刷丝的变形也有变大的趋势。过盈量为 1.0 mm、入侵速度为 100  $\mu\text{m/s}$  时, 刷丝尖端已经不是椭圆形, 而是接近于菱形, 说明刷丝除了与涂层对摩发生塑性变形外, 刷丝与刷丝之间也发生了摩擦磨损。

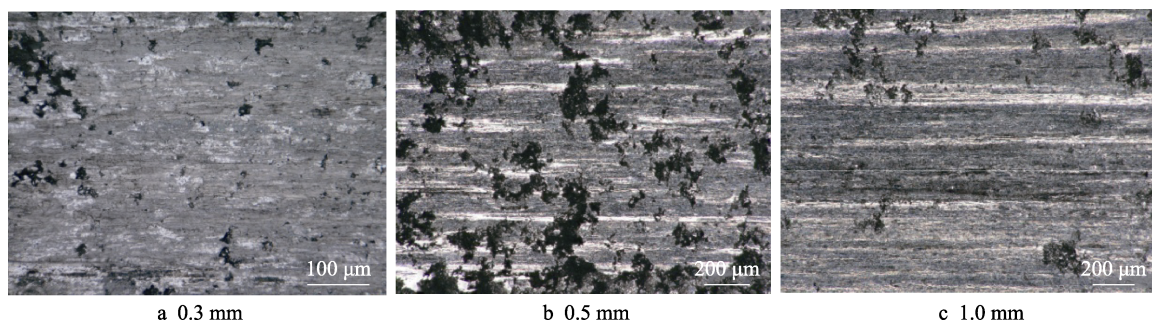


图 9 进给速度 50  $\mu\text{m/s}$ 、不同过盈量条件下涂层刮磨形貌

Fig.9 Speed rate 50  $\mu\text{m/s}$ , morphology of coating wear under different interference conditions

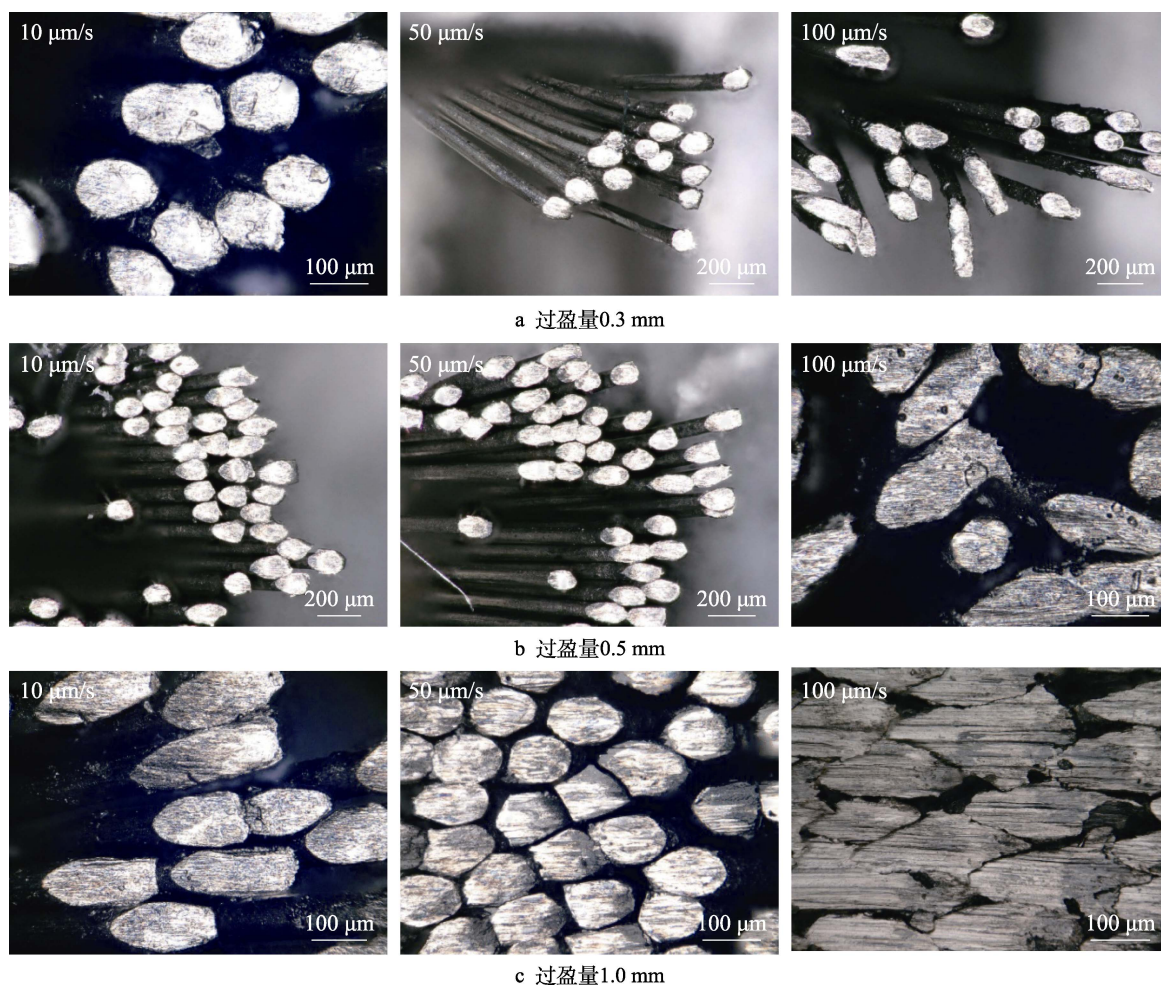


图 10 不同过盈量和进给速度条件下刷丝形貌

Fig.10 Morphology of bristles under different interference and speed rate conditions:  
a) interference 0.3 mm; b) interference 0.5 mm; c) interference 1.0 mm



2.2 磨损机理分析

对过盈量 0.3 mm、进给速度 50 μm/s、磨损时间 0.5 h (试样编号为 1-4) 的涂层和刷丝的磨损形貌进行观察, 结果如图 11 所示。从图 11a 中可以看出, 涂层磨痕中出现涂抹痕迹, 说明发生了黏着磨损。刷丝尖端试验后变为椭圆形, 长轴与刮擦方向一致, 应该是在高速摩擦热作用下发生了沿刮擦方向的塑性变形。另外刷丝表面可见明显的划痕, 结合相关文献<sup>[2]</sup>

报道, 可能由磨粒磨损导致, 刷丝与涂层磨损产生的磨屑被困在刷丝之间, 导致发生磨粒磨损。

对磨损的涂层表面和刷丝表面的化学成分进行能谱分析, 结果如表 3 所示。对比原始涂层和涂层磨痕的能谱结果, 发现涂层磨痕中出现了刷丝材料中才有的 Al、Fe 元素, 表明刷丝材料向涂层发生了转移。由于高速摩擦中, 刷丝材料软化更为严重, 刷丝向涂层的黏着转移也更为严重。而且涂层中存在减摩的 BaF<sub>2</sub>、CaF<sub>2</sub> 成分, 利于减轻黏着, 未发现涂层向刷丝的转移。

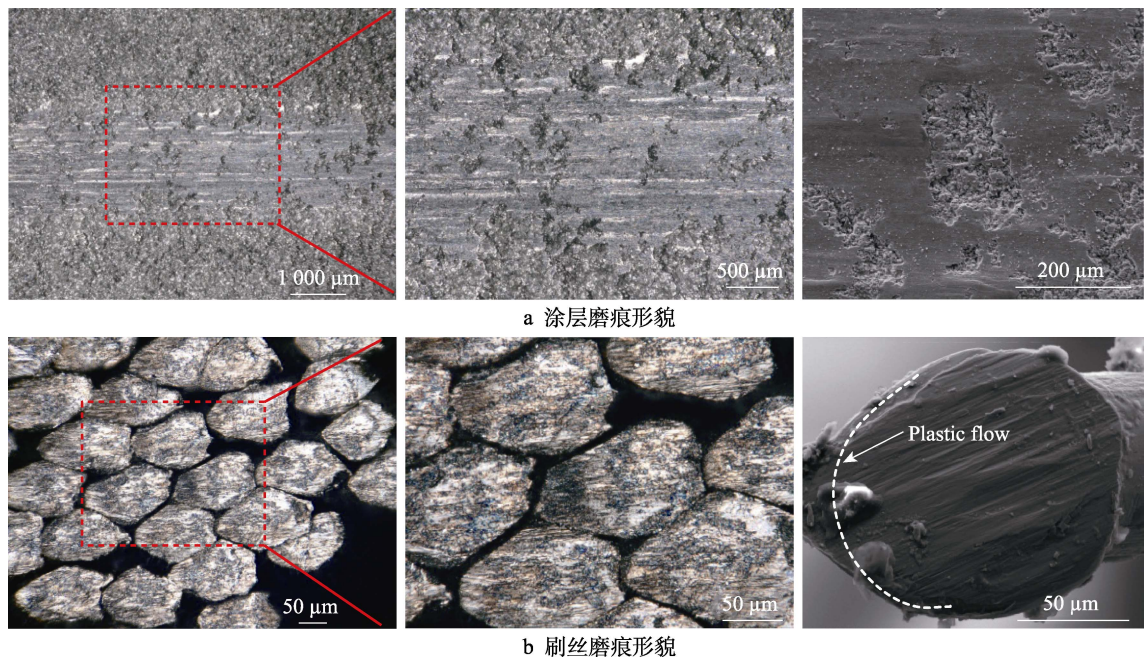


图 11 1-4 号样摩擦副磨损形貌分析  
Fig.11 The wear morphology of No.1-4 friction pair sample: a) coating wear scar; b) bristles wear scar

表 3 涂层、对磨刷丝原始成分和磨痕成分对比 (1-4 号样)  
Tab.3 Comparison of original composition and wear mark composition of coating and bristles(No.1-4)

Samples	C	O	F	Al	Ca	Cr	Fe	Ni	Ba
Original coating	8.4	5.3	6.0	—	0.8	57	—	24	2.1
Coating wear scar	9.8	8.5	—	0.8	0.7	47	1.4	30	1.5
Original bristles	—	—	—	4.2	—	18	3.2	Bal.	—
Bristle wear scar	—	—	—	5.7	—	16	3.1	75	—

对过盈量 1.0 mm、进给速度 100 μm/s、磨损时间 0.5 h (试样编号为 3-5) 的涂层和刷丝的磨损形貌进行观察, 结果如图 12 所示。与 1-4 号试样形貌对比发现, 涂层的磨痕均为涂抹, 但刷丝的磨痕形貌有较大不同。与 1-4 号试样相比, 刷丝的塑性变形更大, 刷丝尖端椭圆形的长轴更长。说明过盈量和进给速率的增大, 会导致刷丝发生更大的塑性变形。这与过盈量增大、载荷增加、摩擦力增大有关, 同时摩擦力增

大也导致摩擦热效应更显著, 接触区域温度更高, 刷丝更易变形。

对磨损的涂层表面和刷丝表面的化学成分进行能谱分析 (表 4), 并对比原始涂层和涂层磨痕的能谱结果, 同样发现刷丝材料向涂层转移, 涂层磨痕中检测到刷丝材料中才有的 Al、Fe, 同时 Ni 的含量大量增加。在刷丝尖端发现了较多的氧元素, 说明在高速摩擦磨损过程中发生了氧化磨损。

国外已开展了航空发动机中刷式密封的刷丝与涂层间的高速摩擦磨损问题的研究。Derby 等<sup>[13]</sup>采用多种材料的刷丝与多种涂层组成的摩擦副开展摩擦磨损研究, 结果表明, 不同刷丝材料与不同涂层材料磨损过程均发生了由刷丝到涂层的材料转移, 刷丝的磨损程度显著大于涂层。刷丝磨损程度的大小主要取决于刷丝材料的抗氧化能力以及刷丝表面形成的致密氧化膜。Thakare 等<sup>[11]</sup>采用刷式封严模拟设备开展试验研究, 刷丝采用 Haynes25 高温合金丝, 封严环表面涂覆氧化铬涂层, 结果表明, 刷丝主要发生塑性流动、两体磨粒磨损、摩擦氧化和再结晶, 近表层发



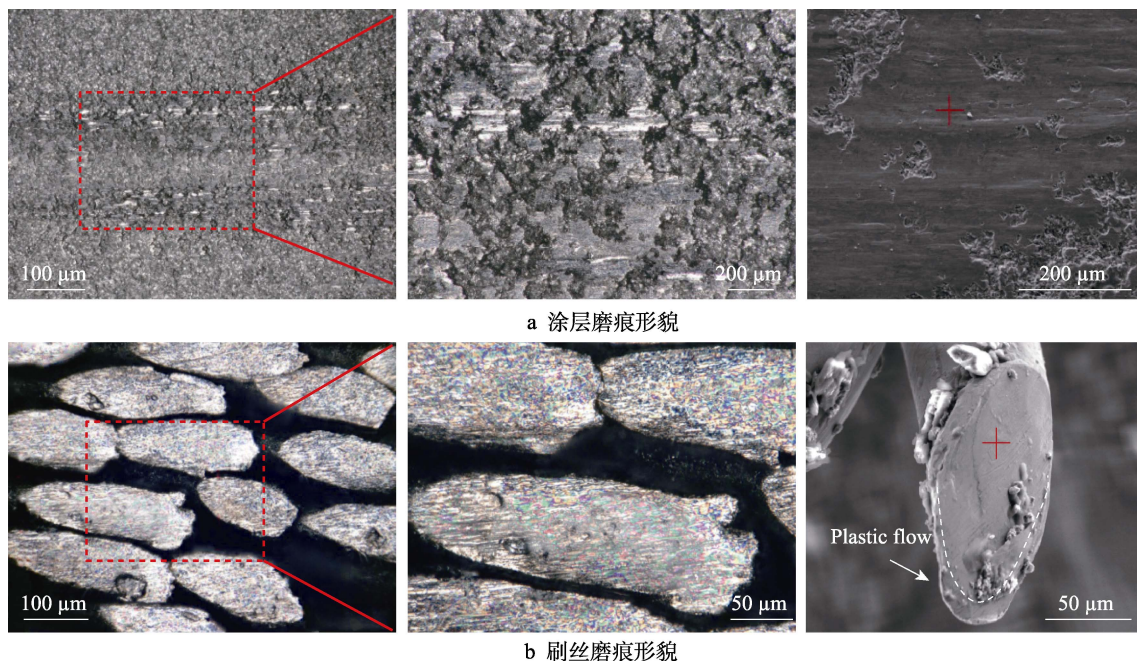


图 12 3-5 号样摩擦副磨损形貌分析

Fig.12 The wear morphology of No.3-5 friction pair sample: a) coating wear scar; b) bristles wear scar

表 4 涂层、对摩擦刷丝原始成分和磨痕成分对比(3-5 号样)  
Tab.4 Comparison of original composition and wear mark composition of coating and bristles(No.3-5)

Element	C	O	F	Al	Ca	Cr	Fe	Ni	Ba
Original coating	8.4	5.3	6.0	—	0.8	57	—	24	2.1
Coating wear scar	8.7	9.1	—	0.7	0.4	45	0.9	34	1.4
Original bristles	—	—	—	4.2	—	18	3.2	Bal.	—
Bristle wear scar	—	13	—	5.3	—	18	3.0	61	—

生沿刮擦方向的塑性变形。美国 NASA 和英国 EG&G 公司的研究<sup>[12-15]</sup>表明,磨屑在刷丝“拖尾”处的堆积主要是由于刷丝在磨损过程中的塑性变形。本研究中刷丝同样出现了“拖尾”现象(图 11 和图 12),

对 1-4 号样和 3-5 号样中的刷丝侧面进行观察,如图 13 所示,可以看出刷丝的尾部存在材料堆积,堆积的材料延伸到刷丝的外沿,并发生卷曲变形;从刷丝头部到刷丝的根部,由变形区逐渐过渡到非变形区。典型刷丝磨损机制如图 14 所示。

本研究中刷丝与涂层的磨损并没有导致涂层面层的剥落,一方面是由于刷式封严环涂层采用 NiCr-Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub> 涂层,该涂层中含有氟化钡和氟化钙,这 2 种材料在摩擦过程中会形成一层光滑的薄层,进一步减少了涂层的磨损<sup>[12]</sup>;另一方面刷丝这种柔性接触的形式决定了当试验条件发生变化时,反映在刷丝上的变形和磨损情况变化较大,涂层的磨损机制和磨痕大小没有显著变化。因此在刷丝与涂层组成的摩擦副中,影响刷丝封严环寿命的主要因素为刷丝的磨损<sup>[16-18]</sup>。

刷丝在试验过程中,除与涂层发生磨损外,刷丝之间由于非紧密结合同样存在磨损。图 10c 和图 11b

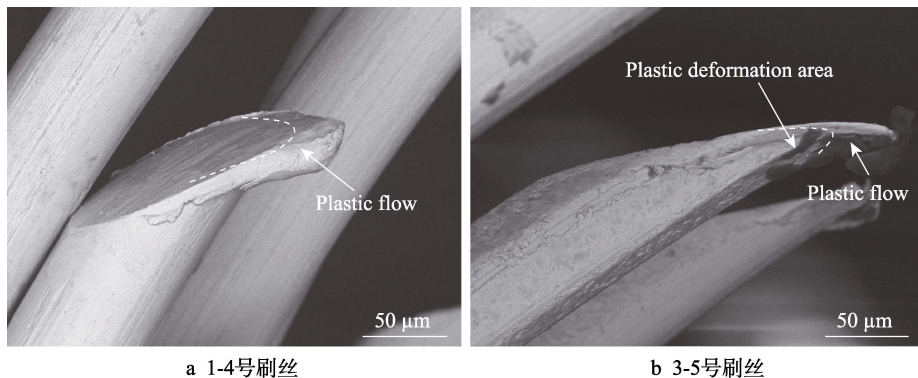


图 13 刷丝侧面磨损形貌

Fig.13 Morphology of worn bristles' side: a) No.1-4 bristles; b) No.3-5 bristles



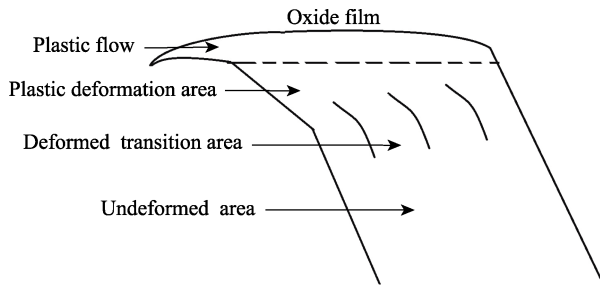


图 14 刷丝磨损机制示意图  
Fig.14 Bristles wear mechanism schematic

中可以观察到刷丝尖端已发生变形,由初始的圆形或椭圆变为菱形,这主要是由于刷丝与刷丝在磨损过程中发生了高温变形和挤压<sup>[15]</sup>,由于“拖尾”现象的存在,使刷丝尖端的变形和挤压更加明显,高温下金属流动性的增加进一步促进了菱形的形成<sup>[11]</sup>。在图 12b 中可以观察到刷丝尖端的椭圆长轴更长,这是由于刷丝与涂层间为柔性接触,当过盈量和进给速度增大时,刷丝与涂层接触角增大,从而导致刷丝尖端变得更加“椭圆”。

随着过盈量和进给速度的增加,涂层磨痕深度增大和刷丝尖端的变形程度增加,且过盈量对摩擦磨损的影响相对更大。过盈量参数主要影响刷丝与涂层的接触角度,过盈量越大,刷丝与涂层的接触角度越小。本研究中当过盈量为 1.0 mm 时,刷丝的磨损显著增大,且在进给速度的影响下,刷丝尖端变为菱形。为了获得更好的封严效果和更长的构件寿命,在刷丝封严环设计过程中需要考虑刷丝与封严环的配合间隙,应避免过盈量过大,从而增加刷丝的磨损,降低刷式封严构件的使用寿命。

### 3 结论

1) 当 NiCr-Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub> 涂层与 SG37 刷丝摩擦副的磨损形式为磨粒磨损、黏着磨损并伴随材料转移,刷丝的材料转移到了涂层表面,同时刷丝发生了塑性变形。

2) 过盈量和进给速度均对磨痕深度存在影响,随过盈量和进给速度的增加,涂层磨痕深度增大,但过盈量的影响相对更大。

3) 在刷丝封严摩擦副中刷丝不仅与涂层进行摩擦,刷丝之间也存在摩擦变形和磨损,这主要是由于刷丝与刷丝在磨损过程中发生了高温变形和挤压,由于“拖尾”现象的存在,使刷丝尖端的变形和挤压更加明显,高温下金属流动性的增加进一步促进了菱形的形成。

### 参考文献:

[1] CHUPP R E, DOWLER C A. Performance Characteristics of Brush Seals for Limited-Life Engines[C]//Proceedings of ASME 1991 International Gas Turbine and Aeroengine

Congress and Exposition. Florida: [s. n.], 2015.

[2] CHUPP R E, NELSON P. Evaluation of Brush Seals for Limited-Life Engines[J]. Journal of Propulsion and Power, 1993, 9(1): 113-118.

[3] HA Y, HA T, BYUN J, et al. Leakage Effects Due to Bristle Deflection and Wear in Hybrid Brush Seal of High-Pressure Steam Turbine[J]. Tribology International, 2020, 150: 106325.

[4] 杜春华, 吉洪湖, 胡娅萍, 等. 刷式封严磨损特性及其对泄漏影响的试验研究[J]. 推进技术, 2017, 38(11): 2597-2605.

DU Chun-hua, JI Hong-hu, HU Ya-ping, et al. Experimental Investigation on Wearing Characteristics and Effects on Leakage of Brush Seal[J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(11): 2597-2605.

[5] 孙晓萍, 李卫东, 刘晓远. 刷式密封设计与试验研究[J]. 航空发动机, 2005, 31(2): 17-19.

SUN Xiao-ping, LI Wei-dong, LIU Xiao-yuan. Design and Test of Brush Seal[J]. Aeroengine, 2005, 31(2): 17-19.

[6] 孙晓萍. 刷式密封性能和耐久性试验研究[J]. 航空发动机, 2002, 28(3): 37-41.

SUN Xiao-ping. Experimental Investigation of Performance and Durability of Brush Seal[J]. Aeroengine, 2002, 28(3): 37-41.

[7] 刘凤伟, 李曙, 刘阳. 封严涂层材料及其可刮削性的评价[J]. 中国表面工程, 2009, 22(1): 12-18, 24.

LIU Su-wei, LI Shu, LIU Yang. Seal Coating and Evaluation of Its Abradability[J]. China Surface Engineering, 2009, 22(1): 12-18, 24.

[8] HAWTHORNE H M. Brush-on-Disc Simulation Tribotesting of Materials for Gas Turbine-Compliant Seal Components[J]. Tribology International, 1994, 27(2): 87-95.

[9] FELLESTEIN J A, DELLACORTE C. A New Tribological Test for Candidate Brush Seal Materials Evaluation[J]. Tribology Transactions, 1996, 39(1): 173-179.

[10] FAN Jin-jin, JI Hong-hu, WANG Qiang, et al. A Combined Theoretical and Experimental Study of Wear Model of Brush Seal[J]. Tribology International, 2021, 154: 106696.

[11] 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.

[12] RABEN M, FRIEDRICH S, FLEGLER J. Brush Seal Frictional Heat Generation: Test Rig Design and Validation under Steam Environment[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Seoul: [s. n.], 2016.

[13] DERBY J, ENGLAND R. Tribopair Evaluation of Brush Seal Applications[C]//28th Joint Propulsion Conference and Exhibit. Virginia: AIAA, 1992: 3715.

[14] FELLESTEIN J, DELLACORTE C, MOORE K, et al. High Temperature Brush Seal Tuft Testing of Metallic

- Bristles Versus Chrome Carbide[C]//32nd Joint Propulsion Conference and Exhibit. Virigina: AIAA, 1996: 2908.
- [15] FELLESTEIN J, DELLACORTE C, MOORE K, et al. High Temperature Brush Seal Tuft Gesting of Selected Nickel-Chrome and Cobalt-Chrome Superalloys[C]//33rd Joint Propulsion Conference and Exhibit. Virigina: AIAA, 1997: 2634.
- [16] 郑海亮, 高祺洋, 薛伟海, 等. 高速刮擦条件下封严涂层热物性对叶片损伤行为的影响[J]. 中国表面工程, 2017, 30(6): 149-157.  
ZHENG Hai-liang, GAO Si-yang, XUE Wei-hai, et al. Effects of Thermal-Physical Property of Seal Coatings on Blade Wear Behaviors under High-Speed Rubbing Condition[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(6): 149-157.
- [17] 何亚楠, 宋强, 孙康, 等. 等离子熔覆 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合涂层摩擦磨损性能的研究[J]. 表面技术, 2019, 48(3): 126-133.  
HE Ya-nan, SONG Qiang, SUN Kang, et al. Wear Resistance of Plasma Cladding Deposited Ni-Based Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> Composite Coating[J]. Surface Technology, 2019, 48(3): 126-133.
- [18] RABEN M, SCHWARZ H, FRIEDRICH J. Operating Performance and Wear Investigations of Brush Seals for Steam Turbine Applications[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition. Texas: [s. n.], 2013.

责任编辑: 万长清

(上接第 142 页)

- [31] FU Jia-cheng, HE Hong-tu, YUAN Wei-feng, et al. Towards a Deeper Understanding of Nanoscratch-Induced Deformation in an Optical Glass[J]. Applied Physics Letters, 2018, 113(3): 031606.
- [32] YOSHIDA S, SANGLEBEUF J C, ROUXEL T. Indentation-Induced Densification of Soda-Lime Silicate Glass[J]. International Journal of Materials Research, 2007, 98(5): 360-364.
- [33] 张娜, 杨发展, 姜芙林. 刀具表面不同角度正弦型沟槽织构的数值模拟与实验研究[J]. 表面技术, 2019, 48(8): 83-89.  
ZHANG Na, YANG Fa-zhan, JIANG Fu-lin. Numerical Simulation and Experiment on Sinusoidal Grooved Texture with Different Angles on Tool Surface[J]. Surface Technology, 2019, 48(8): 83-89.
- [34] MA Wen-lin, LU Jin-jun. Effect of Surface Texture on Transfer Layer Formation and Tribological Behaviour of Copper-Graphite Composite[J]. Wear, 2011, 270(3-4): 218-229.
- [35] MENEZES P L, Kishore, KAILAS S V, et al. Role of Surface Texture, Roughness, and Hardness on Friction during Unidirectional Sliding[J]. Tribology Letters, 2011, 41(1): 1-15.

责任编辑: 万长清

(上接第 180 页)

- [23] 李晓瑜, 陈昭, 刘志林, 等. 含银 H70 铸态黄铜合金组织及性能[J]. 有色金属科学与工程, 2019, 10(6): 55-60.  
LI Xiao-yu, CHEN Zhao, LIU Zhi-lin, et al. Structure and Properties of H70 Silver-Containing Cast Brass Alloy[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2019, 10(6): 55-60.
- [24] 李学兵, 邱长军, 王少力, 等. WC-Co 硬质合金热喷涂层中温处理后的摩擦磨损特性研究[J]. 热加工工艺, 2006, 35(3): 6-7.  
LI Xue-bing, QIU Chang-jun, WANG Shao-li, et al. Friction and Wear Characteristic of Thermal-Sprayed WC-Co Mid-Temperature Sintered Coating[J]. Hot Working Technology, 2006, 35(3): 6-7.
- [25] SZALA M, ŁATKA L, WALCZAK M, et al. Comparative Study on the Cavitation Erosion and Sliding Wear of Cold-Sprayed Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Coatings, and Stainless Steel, Aluminium Alloy, Copper and Brass[J]. Metals, 2020, 10(7): 856.
- [26] 段海峰, 罗开玉, 鲁金忠. 激光冲击强化 H62 黄铜摩擦磨损性能研究[J]. 光学学报, 2018, 38(10): 205-214.  
DUAN Hai-feng, LUO Kai-yu, LU Jin-zhong. Friction and Wear Properties of H62 Brass Subjected to Laser Shock Peening[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(10): 205-214.

责任编辑: 彭颖