

基于刮磨温度的封严涂层刮磨形貌和黏附形态分析*

邹 慧¹ 孙铭阳¹ 王璐璐² 董仲伸² 丁坤英¹

(1. 中国民航大学天津市民用航空器适航与维修重点实验室 天津 300300;

2. 中国南方航空股份有限公司工程技术分公司 沈阳 110170)

摘要: 为了探究航空发动机可磨耗封严涂层与叶片在高速刮磨过程中磨损和黏附情况,使用大气等离子喷涂方法制备AlSi-PHB中低温封严涂层,对其进行高速刮磨试验,并对涂层和叶尖形貌和黏附形态进行研究。通过高速转子试验台测得刮磨过程中径向力和切向力并拟合刮磨温度曲线。采用共聚焦显微镜和扫描电镜设备获取涂层和叶尖表截面形貌、EDS面扫描能谱以及涂层表面粗糙度,采用高精度电子秤测得涂层和叶尖失重量并计算失重速率,进一步佐证刮磨温度变化趋势。结果表明:高速刮磨时的单次切削量影响涂层失重速率,且产生不同的刮磨温度,刮磨温度影响叶尖黏附物状态;叶尖黏附物形态进一步影响刮磨后的涂层表面形貌,最终影响涂层封严性能。对高速刮磨过程中涂层刮磨形貌和叶尖黏附形态进行定性和定量分析,可为判断不同刮磨形态对涂层使用性能影响提供参考。

关键词: 封严涂层; 高速刮磨; 黏附转移; 刮磨温度

中图分类号: TG174

Scraping Morphology and Adhesion Morphology Analysis of Sealing Coating Based on Scraping Temperature

ZOU Hui¹ SUN Mingyang¹ WANG Lulu² DONG Zhongshen² DING Kunying¹

(1. Tianjin Key Laboratory for Civil Aircraft Airworthiness and Maintenance,

Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. Shenyang Base of China Southern Airlines Corporation Engineering & Technology Branch,

Shenyang 110170, China)

Abstract: In order to investigate the wear and adhesion of the abrasion-sealing coating and blade blade in the process of high-speed scraping, the atmospheric plasma spraying method is used to prepare AlSi-PHB sealing coating, and the high-speed scraping test is carried out. The radial force and tangential force in the process of scraping are measured by high-speed rotor test bench and the temperature curve of scraping is fitted. The scraping and adhesion morphology of the coating and blade tip are studied. The curves of radial and tangential force are measured, and the temperature curve of scraping is calculated. The surface of the coating and blade tip, EDS surface scanning and surface roughness are obtained. The weight loss of the coating and blade tip is measured and the rate is calculated to further support the trend of scraping temperature. The results show that the occurrence of adhesion transfer affects the surface morphology of the coating after scraping, and then affects the application efficiency of the coating. The scraping temperature indirectly affects the blade tip adhesion state by affecting the weight loss rate of the coating, and affects the safety of the coating, which is an important factor affecting the adhesion transfer. The weight loss rate of blade tip adhesion was low, but the weight loss rate of flake was high. This paper presents a qualitative and quantitative analysis of the coating scraping morphology and tip adhesion patterns during high-speed scraping, which provides a data reference for determining the effect of different scraping patterns on the coating performance.

Keywords: sealing coating; high speed scraping; scraping mechanism; scraping temperature

* 中央高校基本科研业务费重点资助项目(3122019189)。

Fund: Supported by Key Project for Basic Business Funds of Central Universities (3122019189).

20210824 收到初稿, 20211027 收到修改稿

0 前言

可磨耗封严涂层作为航空发动机转动部件与机匣之间的保护性涂层,在工作过程中通过磨耗自身保护叶片和发动机,控制压气机转子与配合机匣之间的间隙,减少发动机加速过程中的喘振概率,降低油耗,提高发动机工作效率和使用寿命^[1-4]。封严涂层在叶片高速进给过程中,首先是叶尖的微观凸起^[5-6]对涂层凸起处进行微观切削,随着进给进行,刮磨力和刮磨温度逐渐升高,涂层上因刮磨产生的碎屑黏附至叶尖,部分转移成分会在高温状态下逐渐累积最终凝固成各种形态^[7-10]。GHASRIPOOR 等^[11]研究了不同工况下刮磨温度对封严涂层塑性变形的影响,认为高进给速率导致的冲击作用和温度升高是导致涂层塑性变形的重要因素,并根据不同刮磨工况绘制出基于叶尖转速和侵入率的封严涂层磨损图。FOIS^[12-13]和 STRINGER^[14]利用频闪成像技术观察到叶尖碰磨涂层过程中的高温火花,认为较高的刮磨温度出现在侵入率较低时,而侵入率较高时观察到明显的低温状态切削现象。BÉRENGER^[15]基于可磨耗封严涂层的刮磨机制建立了以刮磨温度和角速度为参数基础的封严涂层磨损轮廓图。这些研究包括对高速刮磨过程中产生的现象和涂层刮磨形貌进行定性分析,但缺少刮磨过程中的定量分析和对叶尖黏附形态的分析。

基于上述研究,本文探究 AlSi-PHB 封严涂层

和 TC4 叶片在不同单次切削量工况下刮磨温度对二者刮磨形貌的影响,使用高速转子试验台模拟发动机的不同刮磨工况并计算对应刮磨温度曲线,结合 AlSi-PHB 封严涂层和叶尖刮磨失重速率、金相形貌和涂层表面粗糙度等参数对黏附形态进行分析,为判断不同刮磨形态对涂层使用性能影响提供参考。

1 试验

1.1 试验材料

试验选用等离子喷涂方法制备 AlSi-40%PHB 中低温封严涂层,原料成分如表 1 所示。基体材料选用低碳钢($\phi 25.4 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$),底层沉积厚度约 0.1 mm,总沉积厚度约 2 mm。喷涂工艺如表 2 所示。涂层制备后,采用 KGS-618M 磨床搭配 180 目和 400 目金刚石砂轮将涂层表面粗糙度打磨至 $Ra < 2 \mu\text{m}$,打磨厚度不小于 $0.5 \mu\text{m}$ 。进行金相试样制备时必须采用真空冷镶嵌法,并使用规格 $3 \mu\text{m}$ 及以下的低回复性抛光布配合对应规格的抛光液进行抛光。AlSi-PHB 截面金相形貌如图 1 所示。

表 1 AlSi-40%PHB 封严涂层原料成分

Table 1 Material composition of AlSi-40%PHB sealing coatings

Layer	Manufacturer	Brand	Composition
Bottom	Sulzer Metco	450NS	Ni_5Al
Top	Sulzer Metco	601NS	$\text{Al}_7\text{Si-40\%PHB}$

表 2 AlSi-40%PHB 封严涂层喷涂参数

Table 2 Spraying parameters of AlSi-40%PHB sealing coatings

Layer	Spraying equipment	Voltage / V	Current / A	Feed rate / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	Gun speed / ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Distance / mm
Bottom	PRAXAIR M3710	750	40	2	300	120
Top	PRAXAIR M3710	790	41	13	300	120

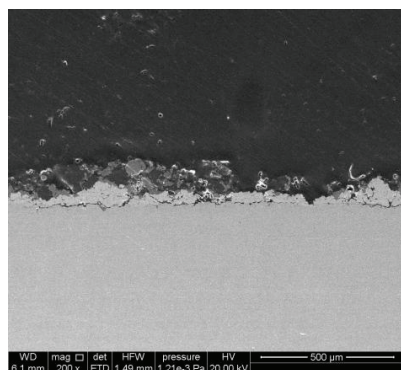


图 1 AlSi-40%PHB 封严涂层金相形貌

Fig. 1 Metallographic morphology of AlSi-40%PHB sealing coatings

1.2 试验条件

高速刮磨试验设备采用自制的高速转子试验台,图 2 显示了高速转子试验台的工作原理图。为确保不同叶尖转速下叶片与涂层对磨的行程相同,刮磨次数一致,试验以单次切削量为变量标准,控制刮磨深度不变,进而改变刮磨工况,刮磨参数如表 3 所示。对磨副材料为 Ti6Al4V,叶尖尺寸为 $3 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$,试验前叶片尖端需用 800 #、1200 # 金刚石砂纸进行预打磨以保证叶尖平整。为避免叶片因高转速产生的离心力伸长触碰涂

层, 需控制叶尖与涂层的初始距离大于 0.2 mm。设定参数后开机, 待叶片转速达到设定值后开始进给。数据采集频率为 1 kHz。试验前后叶片和涂层质量用高精度电子天平称量, 称量至少 3 次, 并取平均数计算质量变化。将试验后的叶尖用刀片刮去黑色黏附物质, 并用高精度电子天平称量黏附物质和叶片以减小误差。

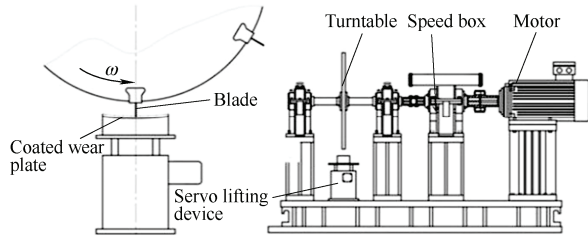


图 2 高速转子试验台工作原理

Fig. 2 Working principle of high speed rotor test bench

表 3 高速刮磨试验参数

Table 3 High speed scraping grinding test parameters

Rotation speed / ($r \cdot \min^{-1}$)	Feed rate / ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Depth of the feed / mm	Bite per strike / μm
1 000	0.01	0.6	0.6
2 000	0.02		
3 000	0.03		
1 000	0.1	6	6
2 000	0.2		
3 000	0.3		

1.3 刮磨温度的计算

当两粗糙表面之间发生相对滑动时, 物体产生的热量首先通过接触的微凸体向内扩散^[5]。扩散过程中热量集中在接触面上, 接触点处的温度远高于对磨副表面平均温升, 接触点温度被称为“闪点温度”。为了方便计算分析, 通常假设结合面上温度分布连续^[16]。ARCHARD^[17]在对闪点温度的计算过程中, 认为高速接触过程中, 接触期间热量穿透的深度与接触的尺寸较小, 因此可以忽略侧向热流, 将其视为半无限固体平面的导热问题。对于表面温度计算公式如下:

$$\theta = 2qt^{0.5} / (\pi K \rho c)^{0.5} \quad (1)$$

式中, q 为单位面积的传热速率, t 为接触时间, K 为导热系数, ρ 为密度, c 为比热容。

对于高速刮磨过程中的导热问题, 假设摩擦产生的热量全部流入涂层表面和叶尖, 且以恒定的速率

传导至接触平面, 这样刮磨产生热量的传导问题可认为是恒定表面热流密度下的半无限大媒介间的瞬态导热问题^[5,18]。刮磨产生的热量 Q 将以固定比例系数 C 分配到两接触面上。比例系数 C 的计算公式为:

$$C = K_c k_b^{0.5} / K_b k_c^{0.5} \quad (2)$$

式中, k_b 为叶尖热扩散率, k_c 为涂层热扩散率。根据能量守恒定律, 在刮磨面上存在公式^[18]:

$$F_x \cdot L = Q + W_f \quad (3)$$

式中, F_x 为刮磨力, L 为刮磨总长度, Q 为刮磨产生的能量, W_f 为切削能。

2 结果与讨论

2.1 涂层刮磨力与温度分析

2.1.1 涂层刮磨力分析

图 3 显示封严涂层高速刮磨过程中刮磨力最大值。由于径向力 F_z 最大值代表刮磨过程中对磨副之间的作用程度^[19], 随着转速增加, F_z 作用的占比减小, 对磨副之间相互作用减少, 最终导致黏附行为减少, 磨损行为增加^[19]。在低单次切削量工况下, 较小的刮磨力对叶尖黏附物的挤压效果越弱, 而高单次切削量工况下刮磨力较大, 对叶尖上黏附物的挤压效果明显。

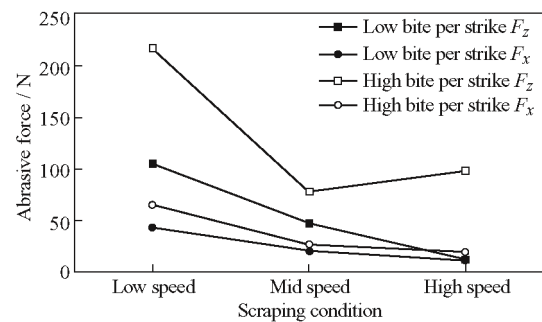


图 3 涂层刮磨力最大值

Fig. 3 Maximum abrasive force of coating

2.1.2 涂层刮磨温度分析

通过式(1)得出的刮磨温度曲线如图 4 所示。随着转速增加, 刮磨温度上升速率和最高温度呈现上升趋势。结合图 3 可见, 刮磨深度不变时低单次切削量工况下刮磨力较小, 但刮磨时间较长, 叶尖能够保持稳定的刮磨行程, 转速增加使得稳定刮磨时间变短, 径向力峰值降低, 磨损行

为增加,即摩擦做功增加。在不考虑磨屑带走热量的前提下,刮磨做功累积使得温度上升。同时刮磨结束前温度均大于 300 ℃,远高于环境温度。这说明涂层在高速刮磨过程中因热失效导致自身磨损加剧^[20]。在高单次切削量工况下,由于单次进给的深度增加,每一次切削所做的功更大,使得刮磨做功的速率高于低单次切削量工况,因此该工况下刮磨温度上升速率高于低单次切削量工况。

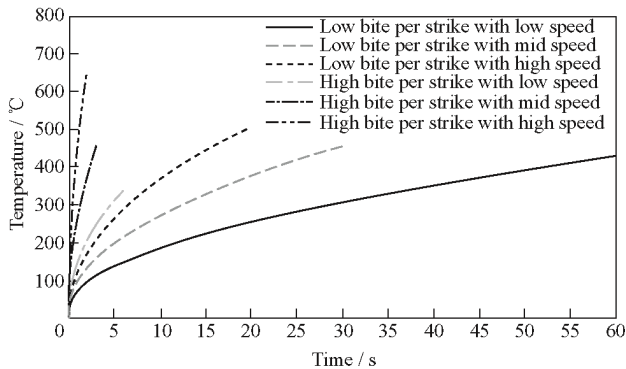


图 4 封严涂层高速刮磨温度变化曲线

Fig. 4 Temperature variation curve of high speed scraping of sealing coating

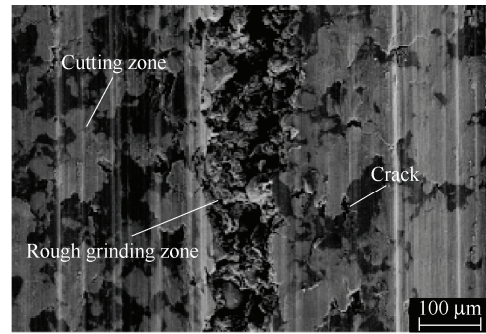
2.2 涂层和叶尖刮磨形貌和失重分析

2.2.1 刮磨形貌分析

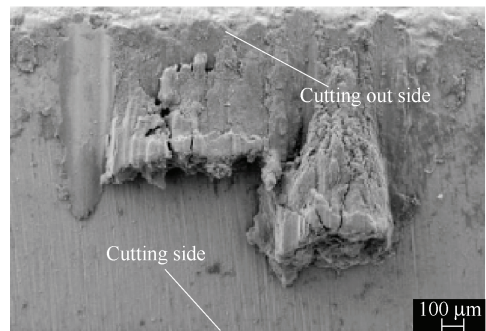
图 5 为低单次切削量工况下刮磨后涂层和叶尖表面形貌。涂层表面出现较平整的切削区和较粗糙的刮磨区,粗糙区域沿刮磨方向扩展明显,说明此处对应叶尖区域磨损严重,出现明显的局部开裂和塑性变形。从叶尖形貌图中发现明显的块状凸起,经图 6 叶尖 EDS 能谱分析显示,该凸起物质主要元素为 Al、Si 和 Ti 元素,其中 Al、Si 元素为涂层组分元素。该块状凸起成分集中在叶片切出侧,而叶片切入侧较平整,说明在刮磨进程中,叶片切入侧主要受到切削作用,而叶片切出侧主要受黏附转移作用。该结论同样适用于高单次切削量工况(如图 7 所示)。

高单次切削量工况下刮磨表面形貌如图 7 所示,刮磨区域粗糙区面积明显减少,涂层表面以较平整的切削区为主。叶尖处黏附成分呈层状铺展在叶尖表面,反映出高单次切削量工况下由于进给速率较高,黏附至叶尖的物质受到更强的挤压作用。结合图 8 叶尖和涂层 EDS 能谱可见黏

附转移出现在全工况下,转移物主要聚集在叶片切出侧。



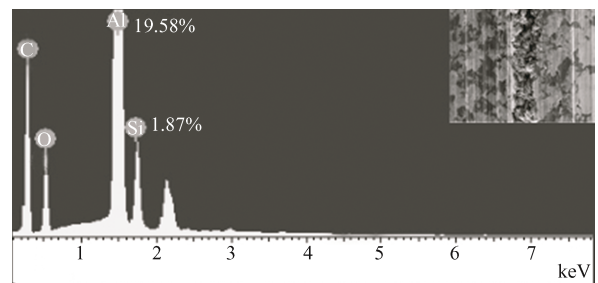
(a) AlSi-PHB coating



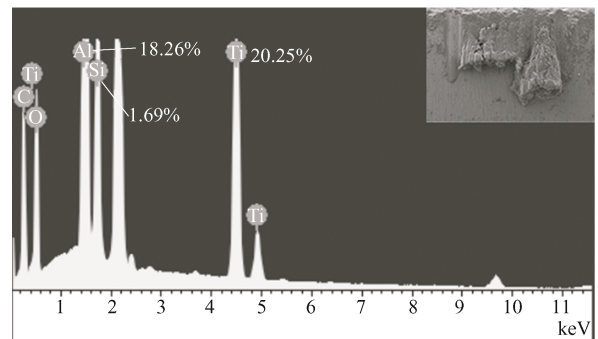
(b) TC4 blade

图 5 低单次切削量工况对磨副表面刮磨形貌

Fig. 5 Effects of low bite per strike condition on the surface scraping morphology



(a) AlSi-PHB coating



(b) TC4 blade

图 6 低单次切削量工况对磨副 EDS 面扫描能谱

Fig. 6 EDS surface scanning energy spectrum of grinding pair under low bite per strike condition

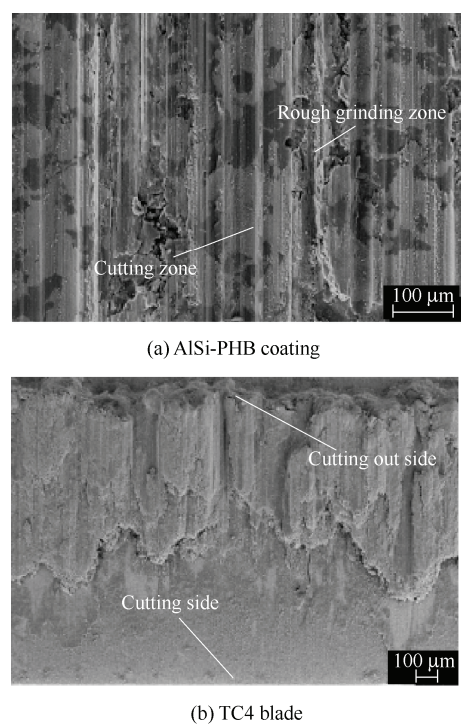


图 7 高单次切削量工况对磨副表面刮磨形貌
Fig.7 Effects of high bite per strike on the surface
scraping morphology

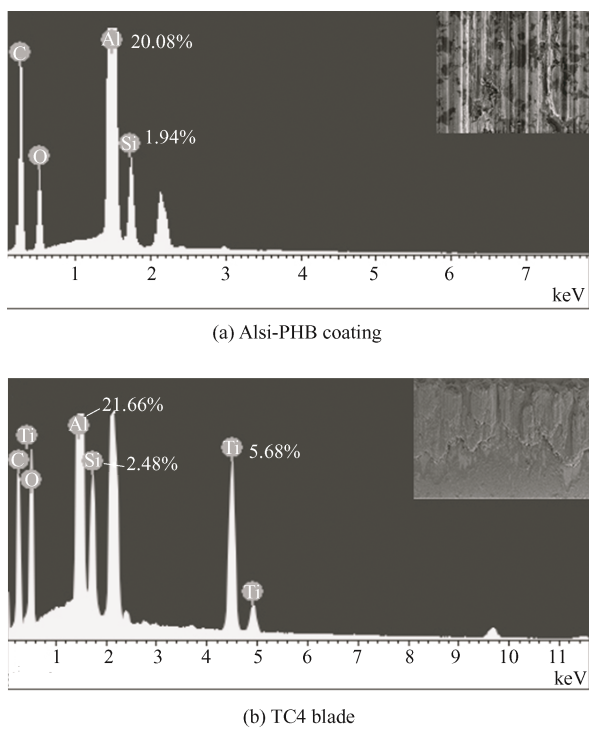


图 8 高单次切削量工况对磨副 EDS 面扫描能谱
Fig. 8 EDS surface scanning energy spectrum of
grinding pair under high bite per strike condition

2.2.2 刮磨失重分析

表 4 为刮磨后涂层及叶片失重速率, 可以看出在相同工况下, 高转速会增加叶片和涂层磨损^[14]; 而在相同转速下, 提高进给速率会增加对磨副的磨损。但根据表 5 涂层和叶尖失重率比值可以看出, 转速增加对叶片磨损更严重, 而在低转速时对磨次数提高会降低叶片磨损速率。

表 4 高速刮磨后涂层和叶尖失重速率

Table 4 High speed scraping coating and tip weight loss rate			
Scraping condition	Rotation speed / (r · min ⁻¹)	Coating loss rate / (g · s ⁻¹)	Blade loss rate / (g · s ⁻¹)
Low bite per strike	1 000	0.013 57	0.001 83
	2 000	0.031 23	0.005 67
	3 000	0.047 05	0.011 00
High bite per strike	1 000	0.124 5	0.015 83
	2 000	0.189 3	0.030 00
	3 000	0.208 5	0.050 00

表 5 高速刮磨涂层失重率/叶尖失重率

Table 5 High speed scraping coating weight loss divided by tip weight loss(weightlessness rate)			
Scraping condition	Low speed	Mid speed	High speed
Low bite per strike	7.415 3	5.507 9	4.277 3
High bite per strike	7.864 8	6.310 0	4.170 0

2.3 涂层表面粗糙度分析

图 9 为刮磨后涂层的表面粗糙度, 可以看出低单次切削量工况的表面粗糙度高于 25 μm, 高单次切削量工况的粗糙度低于 20 μm。结合涂层和叶尖表面形貌可以说明, 叶尖黏附物质形状是影响表面粗糙度的重要因素。黏附物质为块状表明该工况下刮磨机制是叶尖、转移物颗粒与涂层之间的三体磨粒磨损, 最终形成图 5 中粗糙刮磨区形貌, 因此涂层表面粗糙度较大。黏附物质为层状表明该工况下刮磨机制是叶尖与涂层之间二体磨损, 粗糙刮磨区面积较小导致表面粗糙度较小。另外, 随着转速的增加, 叶尖对涂层的刮磨程度加剧, 涂层刮磨面起伏增加, 即叶片与涂层的间隙扩大, 发动机更容易因此导致其内部气体流动不连续而导致喘振, 进而对航空器的使用造成更大威胁。而高单次切削量工况由于进给速率较高, 对涂层的挤压作用较低单次切削量工况更明显。因此, 高单次切削量工况的使用对航空发动机的威胁最小。

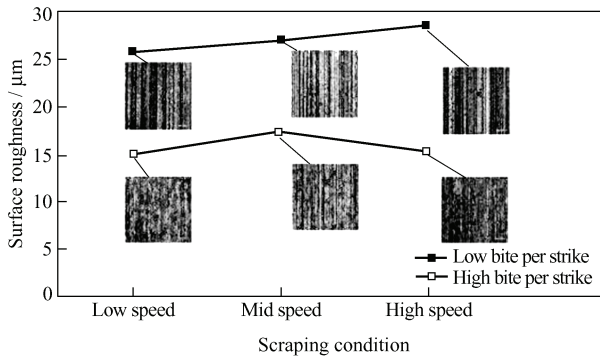


图9 涂层刮磨表面粗糙度

Fig.9 Coating scraping surface roughness

2.4 基于刮磨温度的黏附转移分析

图10为涂层失重速率与温度、刮磨力比的关系图。可以看出,刮磨温度与涂层失重速率变化趋势相同,在低单次切削工况下,叶尖黏附物质以块状为主,高单次切削工况下以层片状为主。在相同工况下,涂层失重速率小于 0.2 g/s 时,刮磨温度升高导致失重速率和 F_x/F_z 上升,说明涂层失重主要来源于高温状态下的摩擦磨损作用。同时,单次进给深度较小导致黏附范围变大,最终黏附状态为块状。当涂层失重速率大于 0.2 g/s ,刮磨温度上升,但 F_x/F_z 下降,说明此时涂层刮磨面受挤压作用大于磨损和切削作用。而且,刮磨时间缩短导致黏附发生时间缩短,单次进给深度较大使得单次的黏附量减少,黏附状态为层片状。

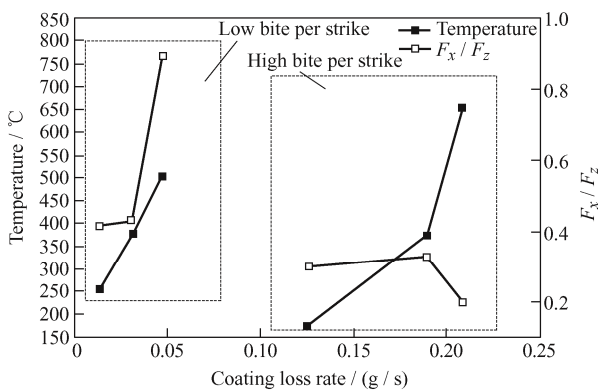


图10 涂层失重速率-温度-刮磨力比关系图

Fig.10 Coating weight loss rate-temperature-abrasive force ratio diagram

3 结论

对 AlSi-PHB 封严涂层在不同工况下高速刮磨后涂层和叶片的刮磨温度、金相组织和表面粗糙度进行测试和分析,探究该封严涂层与 TC4 叶片对磨

在不同工况下的刮磨行为,得出结论如下:

(1) AlSi-40%PHB 封严涂层刮磨形貌中,低单次切削量工况下涂层表面出现明显的局部开裂和塑性变形,高单次切削量工况下涂层表面刮磨粗糙区面积减小。

(2) 刮磨温度是影响黏附转移的重要因素,当刮磨温度远高于环境温度时会加剧涂层和叶尖的磨损和黏附。

(3) 高速刮磨过程中存在涂层向叶尖的黏附转移,单次切削量较小时表面粗糙度大于 $25\text{ }\mu\text{m}$,单次切削量较大时表面粗糙度低于 $20\text{ }\mu\text{m}$ 。

(4) 涂层失重速率小于 0.2 g/s 时 F_x/F_z 与涂层失重速率呈正相关,叶尖呈块状黏附,当涂层失重速率大于 0.2 g/s 时 F_x/F_z 与涂层失重速率呈负相关,叶尖呈层片状黏附。

参 考 文 献

- [1] 孙建刚, 马春春, 王会. 高温超高速试验系统及封严涂层评价体系的研究进展[J]. 热喷涂技术, 2019, 11(2): 5-11.
SUN Jiangang, MA Chunhui, WANG hui. Research progress of high temperature and high speed test system and seal coating evaluation system[J]. Thermal Spraying Technology, 2019, 11(2): 5-11. (in Chinese)
- [2] DADOUCHE A, CONLON M, DMOCHOWSKI W, et al. Experimental evaluation of abradable seal performance at high temperature[J]. Proceedings of ASME Turbo Expo, 2008(6): 9-13.
- [3] CHUPP R E, HENDRICKS R C, LATTIME S B, et al. Sealing in Turbomachine[J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22(2): 313-349.
- [4] LUDWIG L P, BILL R C. Gas path sealing in turbine engines[J]. Asle Transactions, 1980, 23(1): 1-22.
- [5] 刘雨薇. 影响摩擦磨损的接触热动力学特性研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
LIU Yuwei. Research on contact thermal dynamics of friction and wear [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [6] 张利华. 考虑微凸体相互作用的各向异性粗糙表面接触特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
ZHANG Lihua. Study on contact characteristics of anisotropic rough surfaces considering the interaction of microconvexes[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [7] 鲍羽. 涡轮叶片刮磨传热特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
BAO Yu. Research on heat transfer characteristics of

- turbine blade scraping[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [8] 张佳平, 高祺洋, 李浩宇, 等. 高速刮擦条件下两种铝基封严涂层的可刮削性[J]. 中国表面工程, 2018, 31(6): 90-97.
ZHANG Jiaping, GAO Siyang, LI Haoyu, et al. High-speed scratch under the condition of two kinds of aluminum seal coating can be scraping resistance [J]. China Surface Engineering, 2018, 31(6): 90-97. (in Chinese)
- [9] 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 Hailiang, GAO Siyang, XUE Weihai, et al. Effect of thermal properties of sealing coating on blade damage behavior under high speed scraping[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(6): 149-157. (in Chinese)
- [10] 张佳平, 芦国强, 李浩宇, 等. Al/BN 涂层性能及高速刮削下与 TA11 合金叶片的磨损行为[C]//中国航空学会. 探索 创新 交流(第7集)——第七届中国航空学会青年科技论坛文集(上册). 中国航空学会: 中国航空学会, 2016: 7.
ZHANG Jiaping, LU Guoqiang, LI haoyu, et al. Al/BN coating properties and wear behavior of TA11 alloy blade under high speed scraping[C]//Chinese Aeronautical Society. Exploration and Innovation Exchange (Vol. 7) — The 7th Youth Science and Technology Forum of Chinese Aeronautical Society (Vol. 1). Chinese Society of Aeronautics: Chinese Society of Aeronautics, 2016: 7. (in Chinese)
- [11] GHASRIPOOR F, SCHMID R, DORFMAN M. A review of clearance control wear mechanism for low temperature aluminium silicon alloys[C]//Proceedings of the 15th International Thermal Spray Conference, 1998: 139-144.
- [12] FOIS N, WATSON M, STRINGER J, et al. An investigation of the relationship between wear and contact force for abradable materials[J]. Proc. Inst. Mech. Engineers Part J. Eng. Tribol. Online Publ, 2014: 1-15.
- [13] FOIS N, STRINGER J, MARSHALL M. Adhesive transfer in aero-engine abradable linings contact[J]. Wear 2013, 304 (1-2): 202-210.
- [14] STRINGER J, MARSHALL M, High speed wear testing of an abradable coating[J]. Wear, 2012, 294-295: 257-263.
- [15] BÉRENGER B, BATAILLY A, STAINIER L, et al. Phenomenological modeling of abradable wear in turbomachines[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 98: 770-785.
- [16] KALIN M. Influence of flash temperatures on the tribological behaviour in low-speed sliding: A review[J]. Materials Science and Engineering, 2004, A374: 390-397.
- [17] ARCHARD J. The temperature of rubbing surfaces[J]. Wear, 1958, 2: 438-455.
- [18] CARSLAW H, JAEGER J. The conduction of heat in solids[M]. London: Oxford University Press, 1947: 56.
- [19] DELEBARRE C, WAGNER V, PARIS J, et al. An experimental study of the high speed interaction between a labyrinth seal and an abradable coating in a turbo-engine application[J]. Wear, 2014, 316: 109-118.
- [20] Metco® 601NS Aluminum-polyester powder[M]. SulzerMetco: Technical Bulletin #10-141, 2000.

作者简介: 邹慧, 女, 1976 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为材料表面工程。

E-mail: hzou@cauc.edu.cn

孙铭阳, 男, 1997 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为材料表面工程。

E-mail: 2270649962@qq.com

丁坤英 (通信作者), 男, 1981 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为表面工程技术。

E-mail: dingkunyong@126.com