

NiCrAl/NiCg 封严涂层高速可磨耗性能研究

方胜杰, 孙建刚, 王会, 赵心我

- (1. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160;
2. 北京市工业部件表面强化与修复工程技术研究中心, 北京 102206;
3. 特种涂层材料与北京市重点实验室, 北京 102206)

摘要: NiCrAl/NiCg 可磨耗封严涂层可以提高涡轮发动机效率, 已广泛应用于航空发动机中高压压气机部位。本文采用高温高速刮擦试验方法对 NiCrAl/NiCg 封严涂层进行模拟服役工况条件下的可磨耗试验, 试验后通过对磨损表面宏观形貌、微观组织形貌、磨损质量以及叶片高度磨损比等数据进行分析以评价涂层的可磨耗性能。结果表明, NiCrAl/NiCg 封严涂层在不同的试验条件下均表现出优异的可磨耗性能, 可以保护叶片免受损伤; 当进给速率由 5 $\mu\text{m/s}$ 提高到 500 $\mu\text{m/s}$ 时, 叶片涂层质量磨损比 (*IQR*) 值、叶片高度磨损比 (*IDR*) 均显著提高, NiCrAl/NiCg 封严涂层的可磨耗性有所下降; 单次刮削深度是影响 NiCrAl/NiCg 封严涂层可磨耗性能的重要影响因素, 单次刮削深度越小, NiCrAl/NiCg 封严涂层的可磨耗性能越优异。该研究为航空发动机应用中叶尖与可磨耗封严涂层相互作用的探索提供了新的基础数据, 也为今后封严涂层性能研究及选定提供参考依据。

关键词: 可磨耗性; 封严涂层; 高温高速; 磨损

中图分类号: TG174.4 文献标识码: A 文章编号: 1674-7127(2022)02-0006-10

DOI 10.3969/j.issn.1674-7127.2022.02-006

Research on High Speed Abrasion Performance of NiCrAl/NiCg Sealing Coating

Fang Shengjie, Sun Jiangan, Wang Hui, Zhao Xinwo

- (1. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160;
2. Beijing Engineering Technology Research Center of Surface Strengthening and Repairing of Industry Parts, Beijing 102206;
3. Beijing Key Laboratory of Special Coating Material and Technology, Beijing 102206)

Abstract: NiCrAl/NiCg abrasion resistant sealing coatings can improve the efficiency of turbine engines and have been widely used in high-pressure compressors in aero-engines. In this paper, the high-temperature and high-speed scratching test method were used to carry out the wearability test of the NiCrAl/NiCg sealing coating under simulated service conditions. The wear ratio and other data were analyzed to evaluate the abrasion resistance of the coatings. The results showed that the NiCrAl/NiCg sealing coating exhibits excellent abrasion resistance under different test conditions and can protect the blade from damage; when the feed rate was increased from 5 $\mu\text{m/s}$ to 500 $\mu\text{m/s}$, the *IQR* value and *IDR* of NiCrAl/NiCg sealing coating were significantly improved, and the abrasion resistance of NiCrAl/NiCg sealing coating decreased. The single scraping depth was an important factor affecting the wearability of NiCrAl/NiCg sealing coating. The smaller the depth of a single scrape, the more excellent

abradability of the γ -NiCrAl seal coating was. This research provides new basic data for the exploration of the interaction between the blade tip and the abradable seal coating in aero-engine applications, and also provides a reference for future seal coating performance research and selection.

Keywords: Abradability; Sealed coating; High temperature and high speed; Wear

0 引言

航空发动机转、静部件之间的气路密封间隙是影响发动机效率和油耗的重要因素^[1]。可磨耗封严涂层的使用能有效减小转静部件之间的设计间隙,达到降低泄露量、提高发动机效率的目的^[2-5]。此外,当转子部件因主轴振动、径向变形、安装错误、冲击载荷等原因与静子部件发生碰磨刮擦作用时,理想状态是可磨耗封严涂层几乎承受全部的磨损,而叶片叶尖不会发生磨损或产生尽可能小的磨损^[6,7]。因此,封严涂层材料的使用可有效减小径向气流间隙,提高航空发动机效率,同时减小发动机零部件的磨损,延长服役寿命并降低油耗。

可磨耗封严涂层服役的工况非常复杂、严苛,因此其具有优良的综合性能,如结构强度、结合强度、可磨耗性、稳定性、抗侵蚀性、抗热震性等^[8-11]。由于封严涂层的特殊工况和作用,可磨耗性是最重要的性能指标。可磨耗性是气路密封配副在极端工况下摩擦学综合特性的表达,既与动、静配副的材料有关,也与磨损过程中的刮擦速度、转动部件的入侵速率、封严材料的表面温度密切相关。

为了精确评价封严涂层材料的可磨耗性能,国外航空航天研究机构早在 20 世纪 70 年代时,就开始纷纷联合相关公司研制封严配副材料可磨耗性能测试的专用设备——高温高速可磨耗试验机^[12]。目前,美国 NASA 格林研究中心、瑞士 Sulzer Metco 公司、英国 Sheffield 大学、加拿大 NRC 航空航天研究所等国外研究单位均已成功研制出模拟发动机实际工况的可磨耗试验设备^[13-15]。为推动我国航空发动机封严涂层技术的发展,满足国内对封严涂层材料研发、生产的需求,近几年逐渐有研究机构开始独立自主进行可磨耗试验机的研制,矿冶科技集团有限公司已成功开发出

可磨耗试验机,并应用试验设备开展了涂层可磨耗性能测试研究,取得了一定的研究成果。

Bardi U 等人^[16]在瑞士 Sulzer 公司的可磨耗试验机上对新型复合陶瓷涂层的高速碰磨行为进行了研究,试验叶尖线速度分别为 250 m/s、350 m/s 和 410 m/s,涂层进给速率分别为 5 $\mu\text{m/s}$ 、50 $\mu\text{m/s}$ 和 500 $\mu\text{m/s}$,试验后通过叶尖质量、高度变化等数据对涂层的可磨耗性能开展了定量评价。浙江大学 Na Zhang 等人^[17]在高温超高速可磨耗试验装置上进行了 350 模拟服役工况条件下 TC4 模拟叶片和 AlSi/聚苯酯封严涂层材料的高速碰磨试验,通过试验分析研究涂层高速碰磨时的磨耗机理和碰磨力变化规律,通过磨损形貌、磨损质量和碰磨力分析对涂层材料的可磨耗性能进行了初步评价。唐公民等人^[18]利用高温高速刮擦试验方法对 NiCrFeAl/hBN 可磨耗封严涂层进行模拟服役工况的高速碰磨试验,通过对刮削痕迹、汽封齿高度变化等宏观分析,研究 NiCrFeAl/hBN 涂层在不同工况条件下的可磨耗性。

本文利用自主研发的一台能够模拟航空发动机服役工况的高温超高速可磨耗试验机,对 NiCrAl/NiCrAl 封严涂层材料进行了不同工况下的刮削磨损试验,通过对试验后的表面磨损形貌、磨损质量以及叶片高度磨损比等进行分析,以评价涂层试样的高温高速可磨耗性能。

1 材料和方法

1.1 试验设备

为了真实地模拟 NiCrAl/NiCrAl 封严涂层在航空涡轮发动机服役条件下与叶尖刮削磨损行为,研究其磨耗机理,并评价涂层的可磨耗性能,利用矿冶科技集团有限公司自行研发的 BGRIMM-ATR 高温超高速可磨耗试验机进行碰磨刮削试验。试验设备的核心指标如下:最高测试温度 1200 ,最高叶尖线速度 450 m/s,可实现速率为 2~2000

$\mu\text{m/s}$ 的双向进给运动。由于 NiCrAl/NiCg 封严涂层应用于航空发动机高压压气机部位, 因此该试验设备参数满足其服役工况的需求。

1.2 试验材料

试验用模拟叶片和平衡叶片采用发动机真实叶片常用材料 GH 150 加工制备而成, 模拟叶片宽度为 25 mm, 叶尖处的厚度为 2.5 mm, 有效长度为 15 mm, 在模拟轮盘上安装固定后的叶尖回转半径为 340.75 mm。

试验用涂层试样采用火焰喷涂的方法制备而成, 选用的粉末材料均为矿冶科技集团有限公司自主研制。其中, 涂层试样底层选用 NiAl 复合粉 (牌号: KF-6), 粉末粒度为 $-140\sim+325$ 目。涂

层试样面层使用 NiCrAl/NiCg 粉体材料 (牌号: KF-123), 粉末粒度为 $-100\sim+325$ 目。

涂层试样选用 GH4169 合金为基体材料, 尺寸为长 100 mm \times 宽 40 mm \times 厚 6 mm, 表面经丙酮清洗后, 进行喷砂粗化处理, 形成洁净的粗糙表面以提高基体与涂层的结合强度。涂层粉末烘干后采用火焰喷涂系统喷涂在 GH4169 金属基板上, 其中底层喷涂厚度约为 150 μm , 涂层的标准喷涂厚度为 2 mm, 喷涂工艺参数如表 1 所示。制备得到的 NiCrAl/NiCg 涂层试样的洛氏硬度的范围为 60~62HR15Y, 硬度测试标准参照 GB/T 230.1-2018。其中, 模拟叶片和涂层样品的几何形状如图 1 所示。

表 1 火焰喷涂 NiCrAl/NiCg 工艺参数
Table 1 Process parameters of flame spraying NiCrAl/NiCg

| 氧气流量 ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$) | 氧气压力 (MPa) | 乙炔流量 ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$) | 乙炔压力 (MPa) | 送粉速率 ($\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$) | 送粉气流量 (L/min) | 送粉气压力 (MPa) | 喷涂距离 (mm) |
|--|---------------|--|---------------|--|------------------------------------|----------------|--------------|
| 22 | 0.38 | 18 | 0.19 | 46.5 | 7.78 | 0.26 | 180 |

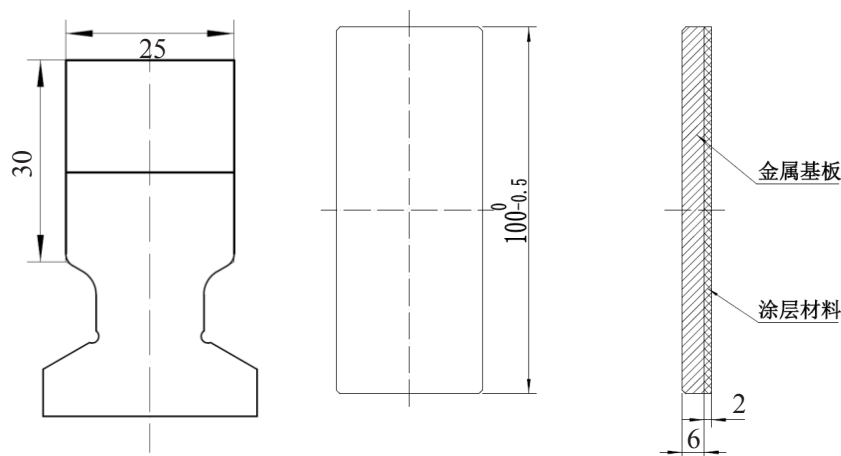


图 1 模拟叶片 (左) 和涂层试样 (右) 的几何形状

Fig. 1 Geometry of the simulated blade (left) and coating specimen (right)

1.3 试验方法

为了探究 NiCrAl/NiCg 涂层材料的可磨耗性能, 选取其与 GH150 模拟叶片组成摩擦副, 在不同试验参数条件下共进行了 6 组刮削磨损试验,

相关试验参数如表 2 所示。在这一系列试验中, 叶尖线速度分别取为 350 m/s 和 450 m/s, 进给速率分别为 5 μm 、500 $\mu\text{m/s}$ 。低进给速率 (5 $\mu\text{m/s}$) 用于模拟转子轮盘因离心力作用和热膨胀导致的

伸长变形，而高进给速率 (500 μm/s) 可用于模拟转子部件动态或突加载荷导致的碰磨情形。为了更好地模拟航空发动机服役工况，试验温度分为室温和 650 。由于受到涂层厚度的限制，设置试验总体进给深度均为 1 mm。

在高速碰磨试验前，采用高精度光栅尺采集静态时叶片叶尖与涂层试样表面刚好接触的进给平台位置，并记录在控制系统的程序中。首先控

制进给平台运行至逻辑零位，当主轴速度达到目标值并保持稳定时，涂层试样将由径向进给系统驱动以较低的进给速率开始进给，直到叶尖与涂层试样表面接触，即到达初始进给零位。然后进给平台以表 3 中给出的进给速率进行进给，直至到达目标进给深度 (1000 μm)。当平台达到目标深度时，平台迅速退回到初始位置，最后在主轴停止后卸下叶片和涂层试样，做进一步分析。

表 2 NiCrAl/NiCg 涂层刮削磨损试验参数
Table 2 Test parameters of scratching wear of NiCrAl/NiCg coating

| 试验编号 | 切线速度 (m/s) | 进给速率 (μm/s) | 进给深度 (μm) | 试验温度 () |
|------|------------|-------------|-----------|----------|
| 1# | 450 | 5 | 1000 | 室温 |
| 2# | 450 | 500 | 1000 | 室温 |
| 3# | 350 | 5 | 1000 | 室温 |
| 4# | 450 | 5 | 1000 | 650 |
| 5# | 450 | 500 | 1000 | 650 |
| 6# | 350 | 5 | 1000 | 650 |

在每次试验前后，测量并记录每个叶片和封严涂层试样的重量。记录磨损质量损失、涂层样品的刮削长度、磨损表面形态等数据，用于可磨损性分析。其中，测量设备为量程 600 g、测量精度 0.001 g 的电子天平，将磨损质量与初始质量的比值相除，得到磨损比例。此外，由于涂层试样刮痕表面形貌的不规则性，采用直接测量的方法很难获得准确的刮痕深度数据。本试验根据转子半径与刮痕长度的几何关系，计算得出理论涂层刮痕深度数据，其中，刮削深度与刮削长度的几何关系如图 2 所示，计算公式如下：

$$D = R_b - \sqrt{R_b^2 - \frac{L^2}{4}} \quad (1)$$

式中 D 为涂层刮削深度理论值； R_b 为叶尖回转半径； L 为涂层刮削长度。

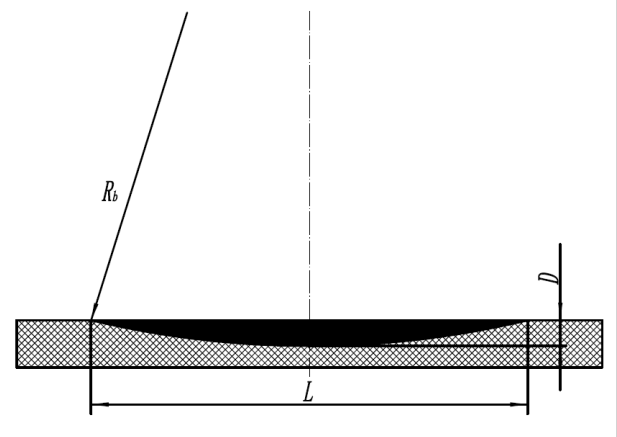


图 2 刮痕深度与刮痕长度的几何关系
Fig. 2 Geometric relationship between scratch depth and scratch length

1.4 单次刮削深度、IQR、IDR 定义

1.4.1 单次刮削深度

单次刮削深度 D_p (μm) 是指叶片与涂层试样单次碰磨的进给深度，如图 3 所示，假设叶片不发生任何磨损，其理论计算公式如下：

$$D_p = \frac{2\pi \cdot V_r \cdot R_b}{n_b \cdot V_b} \quad (2)$$

式中, V_r 为进给速率 ($\mu\text{m/s}$); R_b 为叶尖回转半径 (mm); V_b 为叶尖线速度 (m/s); n_b 为试验时模拟叶片的安装数量 (无量纲), 本次试验中只使用一个叶片, 因此取为 1。

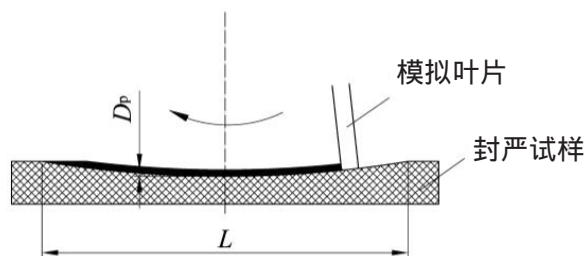


图3 单次碰磨深度示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the depth of single impact grinding

1.4.2 IQR

为了更具体地分析涂层的可磨耗性能, 将可磨耗试验前后的叶片质量变化与涂层试样质量变化的比值定义为叶片涂层质量磨损比 (IQR), 通过下式计算:

$$IQR = \frac{m_1 - m_2}{M_1 - M_2} \times 100\% \quad (3)$$

m_1 : 叶片刮削前质量 (g); m_2 : 叶片刮削后质量 (g); M_1 : 涂层试样刮削前质量 (g); M_2 : 涂层试样刮削后质量 (g)。

在不发生大规模涂层剥落、掉块等极端情况下, 当 IQR 为正值时, 表示以叶片磨损为主, 当 IQR 为负值时, 表示出现涂层材料黏附叶片的现象。一般情况下, IQR 值越小, 表明叶片与涂层试样对磨时叶片的损伤越小, 涂层承担更多的磨耗损失。

1.4.3 IDR

为了定量的评价 NiCrAl/NiCg 涂层的可磨耗性能, 以叶片高度变化这一影响气路封严效果的核心因素为基础, 提出了叶片高度磨损比 (IDR) 评价指标, 其可以真实的反映叶片叶尖磨损及涂层粘附程度, 计算公式如下所示:

$$IDR = \begin{cases} \frac{\Delta h}{D} (\Delta h < 0) \\ \frac{\Delta h}{D + \Delta h} (\Delta h > 0) \end{cases} \quad (4)$$

式中, Δh 为试验前后叶片高度变化值; D 为涂层磨痕深度。

当以叶片磨损为主时, IDR 为正值; 当出现涂层材料黏附叶片时, IDR 为负值。一般情况下, IDR 值越小, 涂层的可磨耗性能就越好, 以 IDR 为指标判定封严涂层可磨耗性能的评价标准如表 3 所示。

表 3 涂层可磨耗性能的评价标准

Table 3 Evaluation Criteria for Wearability of Coatings

| 序号 | IDR | 可磨耗性 |
|----|---------|------|
| 1 | <10% | 优异 |
| 2 | 10%~20% | 良好 |
| 3 | 20%~30% | 可接受 |
| 4 | >30% | 较差 |

2 结果和讨论

试验完成后, 通过对试样的磨损表面宏观形貌、微观组织形貌、磨损质量以及叶片高度磨损进行分析, 进而评价涂层试样的可磨耗性能, 同时也对涂层材料的高速磨耗机理进行了初步的研究。

2.1 磨损表面宏观形貌分析

磨损试验完成后, 通过磨损表面的宏观形貌可清楚地揭示 NiCrAl/NiCg 封严涂层的可磨耗性能, 这是封严涂层可磨耗性评价最直接的特征之一。图 4 所示为涂层与叶片磨损后的表面形貌, 从图中可以看出, 涂层试样在不同的刮削线速度、进给速率以及温度条件下呈现出的磨损形貌基本相似, 其表面均有明显的刮削弧形凹槽, 涂层表面粗糙度较小, 均匀程度较高, 质地比较有光泽, 且均未发生大面积剥落、掉块、断裂等现象, 切削磨损为主要的磨耗机理。仔细观察 1#~6# 试样, 发现磨痕表面出现与剥落机制类似的小型弧坑特征, 主要是由于叶片叶尖与涂层试样发生相对

滑动时，摩擦副接触面局部发生黏着，涂层发生剪切断裂，磨屑颗粒从涂层表面被拖曳和撕扯下来，此时涂层材料发生了轻微的磨损。与涂层表面相接触的叶尖部分磨损程度较轻，表面较为平

整且均匀，叶片上均无附着物。从涂层材料和叶片被刮削后的宏观图像分析可得与涂层磨损相比，叶片磨损相对较轻，说明 NiCrAl/NiCg 涂层材料具有较好的可磨耗性能。

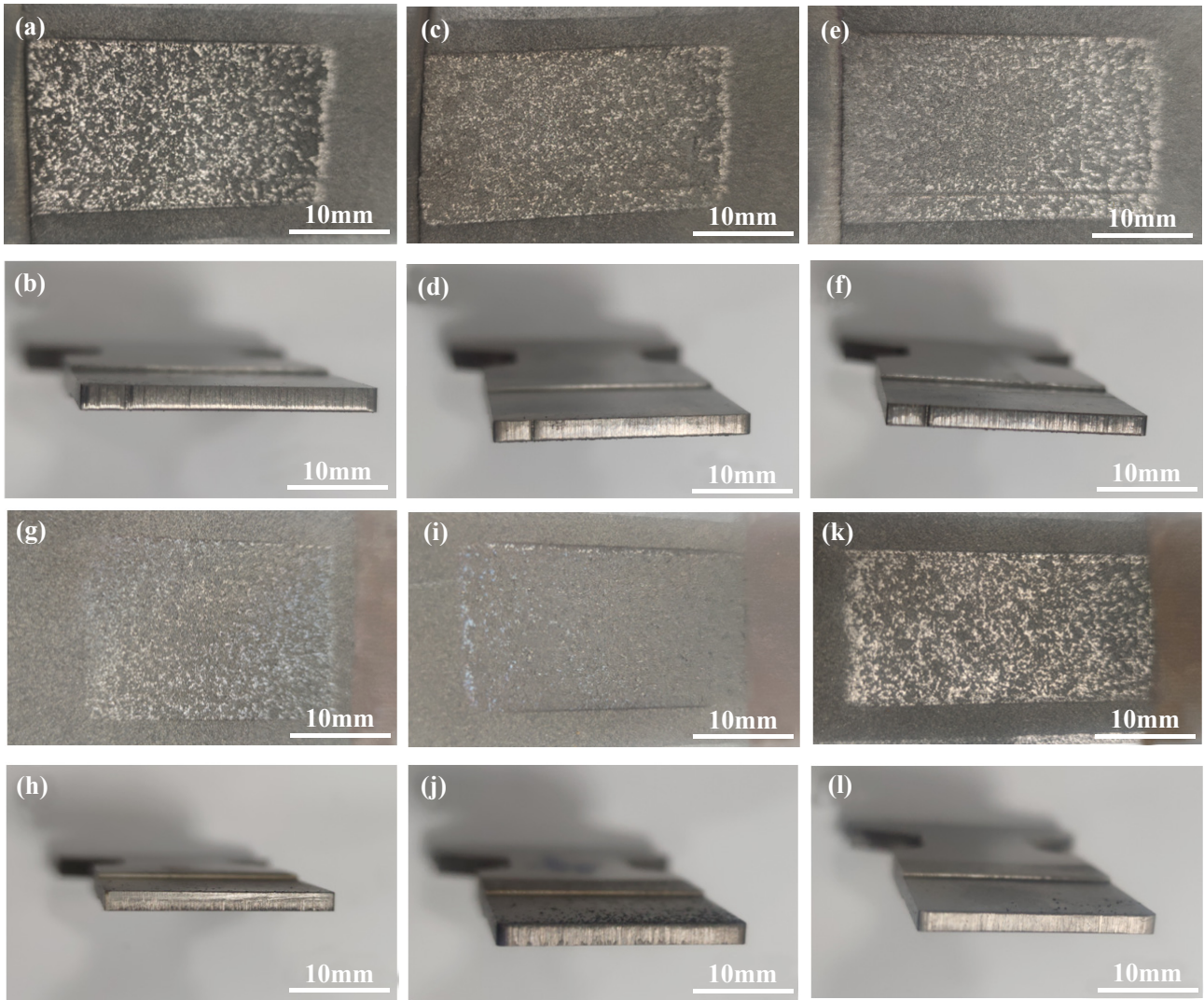


图 4 NiCrAl/NiCg 涂层试样与叶片叶尖端表面磨损形貌：

(a), (b) 1# ; (c), (d) 2# ; (e), (f) 3# ; (g), (h) 4# ; (i), (j) 5# ; (k), (l) 6# ;

Fig.4 Surface wear morphology of NiCrAl/NiCg coating sample and blade tip:

(a), (b) 1#; (c), (d) 2#; (e), (f) 3#; (g), (h) 4#; (i), (j) 5#; (k), (l) 6#;

2.2 涂层 SEM 形貌分析

采用扫描电子显微镜 (SEM) 对试验后的涂层刮削表面进行微观形貌分析，如图 5 所示。由图中可知，6 组涂层试样在不同试验条件下呈现出的 SEM 形貌基本相似，涂层刮削表面有比较明显的麻面状刮削痕迹，但刮痕表面质地较为均匀，损伤程度较小，同时周围伴有细小的裂纹与破碎，

由此说明切削磨损为主要磨耗机理。此外，在其他试验条件相同的情况下，高进给速率涂层试样 (2#，5#) 与低进给速率 (1#、4#) 相比，刮削表面有较为明显的犁沟状痕迹，同时在沿犁沟方向形成了部分鳞片状结构，表明进给速率的提高导致叶片与涂层试样碰磨作用的增加。

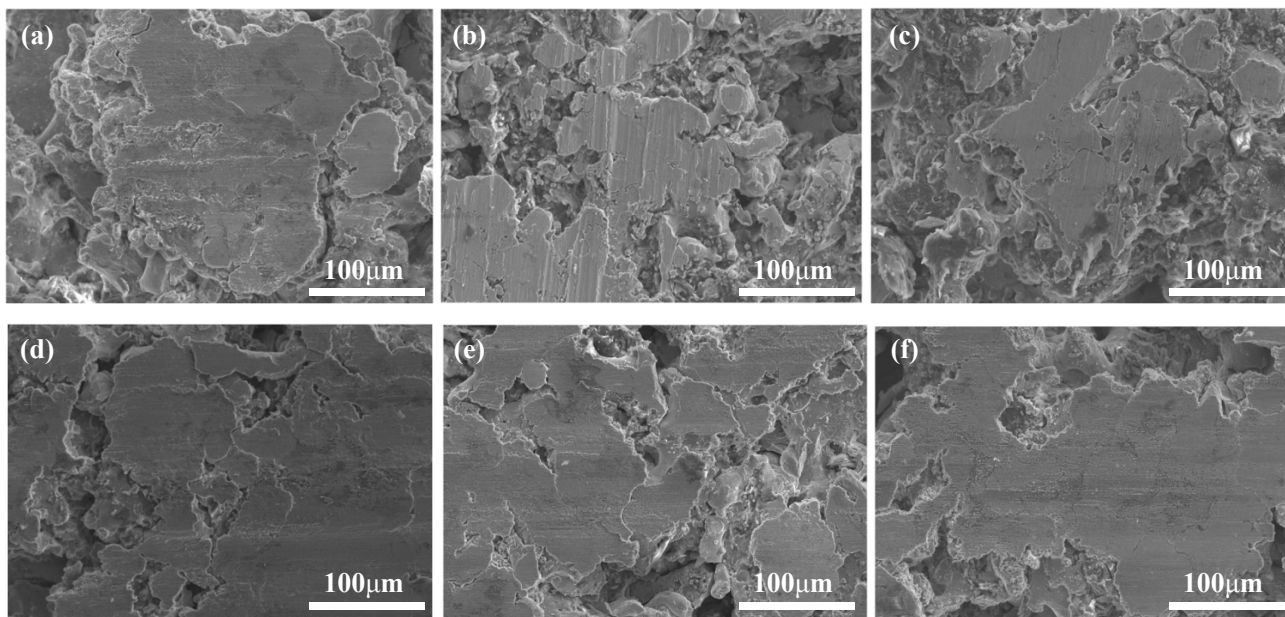


图 5 NiCrAl/NiCg 涂层试样 SEM 形貌 : (a) 1# ; (b) 2# ; (c) 3# ; (d) 4# ; (e) 5# ; (f) 6# ;
 Fig.5 SEM morphology of NiCrAl/NiCg coating sample:(a) 1# ; (b) 2# ; (c) 3# ; (d) 4# ; (e) 5# ; (f) 6# ;

2.3 涂层 EDS 元素分析

对 NiCrAl/NiCg 涂层试样在不同试验参数下碰磨刮削表面进行 EDS 元素分析，结果如图 6 所示。经分析可知，6 组涂层试样刮削部分的金属相元素主要为 Cr、Al、Ni 三种元素，均不存在叶

片 GH150 材料的区别元素 (Fe、Mo 等)，说明在不同参数条件下的可磨耗试验均未发生叶片向涂层的材料转移，NiCrAl/NiCg 涂层表现出良好的可磨耗性能，可以保护叶片免受损伤。

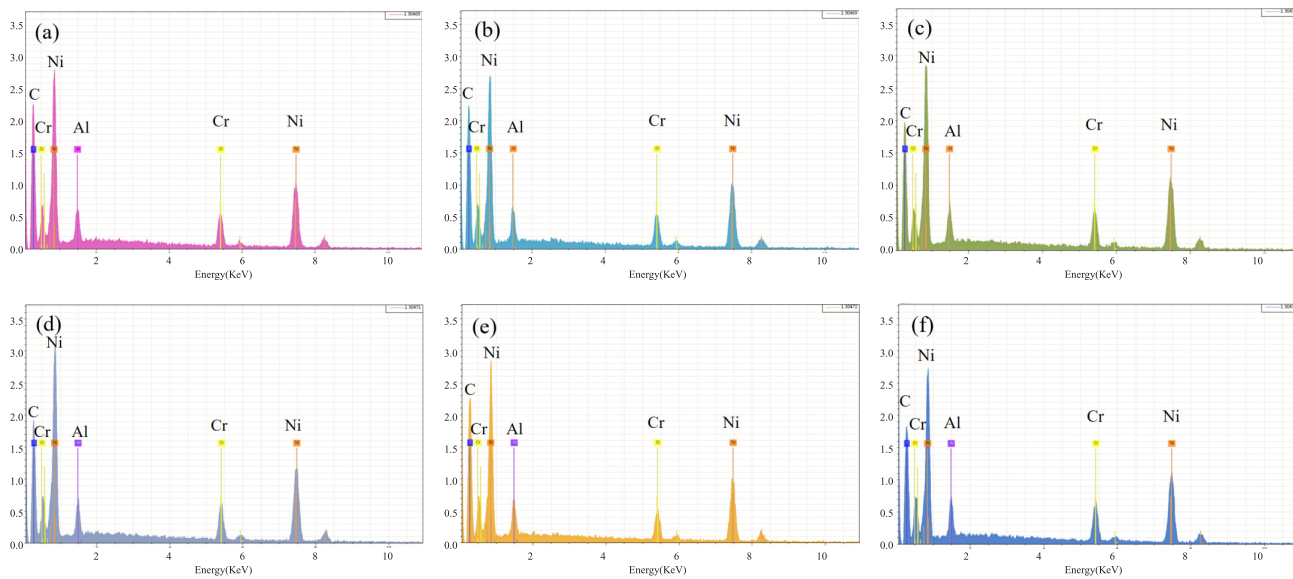


图 6 NiCrAl/NiCg 涂层在不同试验参数下的 EDS 分析 : (a) 1# ; (b) 2# ; (c) 3# ; (d) 4# ; (e) 5# ; (f) 6# ;
 Fig.6 EDS analysis of NiCrAl/NiCg coating under different test parameters : (a) 1# ; (b) 2# ; (c) 3# ; (d) 4# ; (e) 5# ; (f) 6# ;

2.4 叶片磨损质量分析

作为牺牲型材料，理想的封严涂层材料应当承受全部的磨损从而保护叶片免受损伤，因此磨损质量是一个有效的评定涂层材料可磨耗性能的指标。

碰磨试验后的叶片和涂层试样的磨损质量统计结果如表4所示。由表4可知，叶片被刮削前后的质量变化微乎其微，其质量磨损比例均低于0.1%，而涂层质量磨损比例在1%~2%范围之内。此外，各组试验完成后的*IQR*计算结果如图5所示。由图7可知，6组试验的*IQR*值均低于0.7%，可见NiCrAl/NiCg涂层在不同的试验条件下均具有良好的可磨耗性能，材料足够软，可以保护叶片免受损伤。当进给速率由5 μm/s提高到500 μm/s，涂层试样与叶片的磨损量均增加，*IQR*值显著提高，表明叶片与涂层的碰磨强度增大，叶片磨损程度增加。

2.5 叶片高度磨损分析

可磨耗封严涂层的主要功能是在与叶片叶尖

碰磨时能够发生主动磨耗从而保护叶片，并且不粘附在叶尖上避免影响其气动特性等。因此，叶片叶尖的磨损及其上涂层的粘附程度是评判涂层可磨耗性的核心关键。碰磨试验前后的叶片高度磨损统计结果如表5所示。

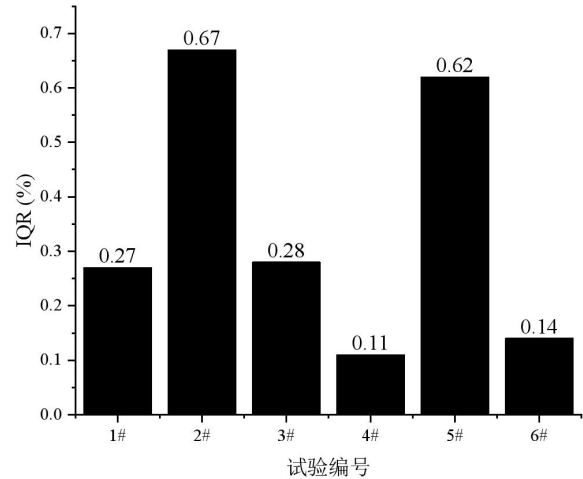


图7 各组试验*IQR*的计算结果

Fig. 7 Calculation results of *IQR* in each group of experiments

表4 叶片和涂层试样的磨损质量统计表

Table 4 Wear quality statistics of blade and coating samples

| 试验编号 | 叶片质量 (g) | | | 涂层质量 (g) | | | 叶片质量磨损比例 (%) | 涂层质量磨损比例 (%) |
|------|----------|--------|-------|----------|---------|-------|--------------|--------------|
| | 初始量 | 最终量 | 磨损量 | 初始量 | 最终量 | 磨损量 | | |
| 1# | 26.593 | 26.585 | 0.008 | 213.363 | 210.397 | 2.966 | 0.030 | 1.39 |
| 2# | 26.591 | 26.565 | 0.026 | 215.753 | 211.912 | 3.841 | 0.098 | 1.78 |
| 3# | 26.591 | 26.584 | 0.007 | 212.582 | 210.157 | 2.425 | 0.026 | 1.14 |
| 4# | 25.735 | 25.733 | 0.002 | 211.874 | 210.039 | 1.835 | 0.008 | 0.87 |
| 5# | 25.659 | 25.640 | 0.019 | 212.516 | 209.467 | 3.049 | 0.074 | 1.43 |
| 6# | 25.668 | 25.664 | 0.004 | 212.463 | 209.645 | 2.818 | 0.016 | 1.33 |

由表5可知，各组的*IDR*值都普遍较小，均低于6%，参照表3中涂层可磨耗性能的评价标准，可推断出各组NiCrAl/NiCg涂层试样在不同的试验条件下均表现出优异的可磨耗性能。碰磨试验结果显示，在其他试验条件相同的情况下，低进给速率时的*IDR*值(1#、4#)明显低于高进给速率时的*IDR*值(2#、5#)。单次刮削深度可以解释这一现象，表6给出了6组试验单次刮削深度计算

结果。在相同的试验温度和叶尖线速度条件下，进给速率越低，则相同时间内的碰磨次数越多，单次碰磨深度越小，涂层材料更容易实现磨损，叶片磨损程度越小；进给速度越大，单次碰磨深度增大，叶片旋转一周需要碰磨更多的涂层材料，碰磨作用比较激烈，叶片磨损程度也将变大，涂层可磨耗性能变差。此外，在其他试验条件相同的情况下，高叶尖线速度的*IDR*值也明显高于低

表 5 刮削磨损试验前后的叶片高度磨损统计表

Table 5 Statistical table of blade height wear before and after scraping wear test

| 试验 编号 | 叶片高度 (mm) | | | 涂层刮削深度 (mm) | | | 总磨耗深度 (mm) | IDR(%) |
|----------|-----------|-------|------|-------------|------------|----------|---------------|--------|
| | 初始高度 | 最终高度 | 磨损高度 | 刮削长度 L | 转子半径 R_b | 计算深度 D | | |
| 1# | 50.95 | 50.93 | 0.02 | 49.84 | 340.75 | 0.912 | 0.932 | 2.15 |
| 2# | 51.03 | 50.97 | 0.06 | 51.61 | 340.75 | 0.979 | 1.039 | 5.77 |
| 3# | 50.97 | 50.95 | 0.02 | 47.14 | 340.75 | 0.816 | 0.836 | 2.39 |
| 4# | 50.91 | 50.90 | 0.01 | 44.80 | 340.75 | 0.737 | 0.747 | 1.34 |
| 5# | 50.97 | 50.92 | 0.05 | 49.92 | 340.75 | 0.915 | 0.965 | 5.18 |
| 6# | 50.93 | 50.91 | 0.02 | 48.60 | 340.75 | 0.868 | 0.888 | 2.25 |

叶尖线速度的 IDR 值, 单次刮削深度理论同样可以解释这一现象。因此, 从现有的试验结果得出: 在相同的试验温度条件下, 低叶尖线速度和高进

给速率会导致叶片发生较大的磨损; 单次刮削深度越小, NiCrAl/NiCg 涂层的可磨耗性能越优异。

表 6 NiCrAl/NiCg 涂层单次刮削深度计算结果

Table 6 Calculation results of single scraping depth of NiCrAl/NiCg coating

| 试验编号 | 叶尖线速度 (m/s) | 进给速率 ($\mu\text{m/s}$) | 单次刮削深度 (μm) | 试验温度 () | IDR(%) |
|------|-------------|--------------------------|--------------------------|----------|--------|
| 1# | 450 | 5 | 0.0238 | 室温 | 2.15 |
| 2# | 450 | 500 | 2.38 | 室温 | 5.77 |
| 3# | 350 | 5 | 0.0898 | 室温 | 2.39 |
| 4# | 450 | 5 | 0.0238 | 650 | 1.34 |
| 5# | 450 | 500 | 2.38 | 650 | 5.18 |
| 6# | 350 | 5 | 0.0898 | 650 | 2.25 |

3 结论

本文在高温超高速可磨耗试验装置上进行了模拟服役工况条件下 GH150 模拟叶片和 NiCrAl/NiCg 封严涂层材料的高速碰磨试验, 通过磨损宏观形貌、微观组织形貌、磨损质量以及叶片高度磨损比分析, 对涂层材料的可磨耗性能进行了初步评价, 主要结论如下:

(1) 试验结果表明, 在不同的试验条件下 NiCrAl/NiCg 封严涂层的 IQR 、 IDR 值都普遍较小, 表现出优异的可磨耗性能, 在与叶片对磨过程中承受几乎全部磨耗, 能够保护叶片结构免受损伤;

切削磨损是其主要磨耗机理。

(2) 当其它试验参数不变的情况下, 进给速率由 $5 \mu\text{m/s}$ 提高到 $500 \mu\text{m/s}$, 涂层试样与叶片的磨损量均增加, IQR 、 IDR 值均显著提高, 表明叶片与涂层的碰磨强度增大, 叶片磨损程度增加, 可磨耗性能变差。

(3) 单次刮削深度是影响封严材料磨耗性能的重要影响因素, 可以通过叶尖线速度和进给速率计算得到。在相同的试验温度条件下, 低叶尖线速度和高进给速率会导致叶片发生较大的磨损; 单次刮削深度越小, IDR 值就越小, NiCrAl/NiCg 涂层的可磨耗性能越优异。

参考文献

- [1] 尹春雷, 陈美英, 占佳, 等. 可磨耗封严涂层研究进展 [J]. 航空制造技术, 2008, 20: 92-94.
- [2] 丁一, 章德铭, 刘建明, 等. 高温可磨耗封严涂层研究进展 [J]. 科技传播, 2012, 4(23): 95.
- [3] 顾伟, 乔剑, 陈潇, 等. 民用航空涡扇发动机涡轮叶尖间隙控制技术综述 [J]. 燃气轮机技术, 2013, 26(1): 1-4.
- [4] 高俊国, 陆峰, 郭孟秋, 等. 可磨耗封严涂层研究现状及发展趋势 [J]. 热喷涂技术, 2012, 4(2): 6-11.
- [5] 张少平, 苏廷铭, 罗秋生, 等. 航空发动机压气机径向间隙设计方法研究 [J]. 燃气涡轮试验与研究, 2011, 24(4): 25-26.
- [6] 朱佳, 冀晓鹃, 揭晓武, 等. 封严涂层材料及应用 [J]. 材料开发与应用, 2008, 23(4): 78-84.
- [7] 王刚, 滕佰秋, 王志宏, 等. 航空发动机上可磨耗封严涂层的应用及需求 [J]. 热喷涂技术, 2012, 4(1): 20-23.
- [8] Dalzell W J, Sanders S A, Crawford G L, et al. Abradable seal with improved properties[J]. Sealing Technology, 2002, 2002(8): 14-15.
- [9] Yi M Z, Huang B Y, He J W. Erosion wear behavior and model of abradable seal coating[J]. Wear, 2002, 252(1): 9-15.
- [10] Lei B, Li M, Zhao Z X, et al. Corrosion mechanism of an Al-BN abradable seal coating system in chloride solution[J]. Corrosion Science, 2014, 79(3): 198-205.
- [11] 程旭东, 高忠宝, 李其连, 等. 高温封严涂层材料的基本性能研究与评价 [J]. 表面技术, 2008, 37(4): 21-24.
- [12] 张娜, 宣海军, 卢斌, 等. 封严涂层可磨耗性测试用高温超高速可磨耗试验装置 [J]. 中国表面工程, 2017, 30(03): 139-147.
- [13] Stringer J, Marshall M B. High speed wear testing of an abradable coating[J]. Wear, 2012, 294-295(31): 257-263.
- [14] Dadouche A, Conlon M J, Dmochowski W, et al. Experimental evaluation of abradable seal performance at high temperature[C]. ASME Turbo Expo 2008, ASME, 2008, 5: 143-150.
- [15] Bill R C, Shiembob L T. Friction and wear of sintered fibermetal abradable seal materials[J]. Journal of Lubrication Technology, 1977, 99(4): 421-427.
- [16] Bardi U, Giolli C, Scrivani A, et al. Development and investigation on new composite and ceramic coatings as possible abradable seals[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2008, 17(5-6): 805-811.
- [17] Zhang N, Shen J, Xuan H J, et al. Evaluation of an AlSi-polyester abradable seal coating performance using high-temperature and high-velocity abrasion tests[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2016, 230(7): 842-851.
- [18] 唐公民, 郭洁, 刘建明, 等. 蒸汽轮机用 NiCrFeAl/hBN 可磨耗封严涂层可磨耗性研究 [J]. 东方汽轮机, 2018, 3: 58-61+80.