

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20180704002

高速刮擦条件下两种铝基封严涂层的可刮削性

张佳平^{1,2}, 高祺洋¹, 李浩宇², 段德莉¹, 李 曙¹, 王 璐²

(1. 中国科学院金属研究所, 沈阳 110043; 2. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司技术中心, 沈阳 110043)

摘 要: 目前少有从涂层机械性能角度(如硬度、结合强度等)研究大量应用于我国航空发动机上的 Al-BN 涂层的材料性能及其在高滑动速度条件下的摩擦学行为。为此, 以 AlSi-PHb 涂层为参比对象, 对比了两者的材料性能, 并通过自制的高速刮擦试验机对两者与对偶钛合金叶片在高速工况下的摩擦磨损行为进行了研究。结果表明: AlSi-PHb 涂层的组织均匀性更好、机械性能更高; Al-BN 涂层粘着叶片, AlSi-PHb 涂层粘着叶片的同时还强烈地磨损叶片, 两种铝基涂层的可刮削性均存在不足; 涂层的机械性能对于叶片的损伤形式具有直接影响, 机械性能高, 则刮擦时摩擦热效应显著, 涂层易损伤叶片; 反之, 则易于粘着叶片。适度的机械性能, 是封严涂层获得良好可刮削性的关键所在。

关键词: 封严涂层; 摩擦学行为; 磨损机制; 机械性能

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2018)06-0090-08

Investigation on Abradability of Two Aluminum-based Seal Coatings Under High-speed Rubbing Condition

ZHANG Jiaping^{1,2}, GAO Siyang¹, LI Haoyu², DUAN Deli¹, LI Shu¹, WANG Lu²

(1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110043, China; 2. AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, China)

Abstract: Though Al-BN seal coating was widely used in the aeroengine of our country, little research work was reported on its tribological behaviors under high-speed sliding from the point of coating mechanical properties such as harness and cohesion strength. Therefore, taking AlSi-PHb coating as the reference object, the material properties of the two Al-based seal coatings were compared, and meanwhile, the tribological behaviors of the two coatings coupled with titanium blades were studied by a self-developed high-speed rubbing tester. The results show that the microstructure homogeneity and mechanical properties of the AlSi-PHb coating are better and higher than that of the Al-BN coating. Coating adhesion is the main wear mechanism of the Al-BN coating, while both blade wear and coating adhesion are for AlSi-PHb coating. The two coatings show deficiencies in the respect of abradability. Mechanical properties have direct effect on the blade wear status. Coating with higher mechanical properties tends to damage the blade, and otherwise coating adhesion mechanism tends to occur. The moderate mechanical properties regulation is beneficial for the better abradability of the seal coating.

Keywords: seal coating; tribological behavior; wear mechanism; mechanical property

0 引 言

可磨耗封严涂层是航空涡轮发动机中兼顾小气路间隙和叶片安全的关键技术。封严涂层的使

用能够有效减小发动机中转子与静子部件的气路间隙, 降低泄露, 进而提高航空发动机的推重比和效率, 是战斗机高航速、高灵活性和机动性的

收稿日期: 2018-07-04; 修回日期: 2018-11-26

网络出版日期: 2018-12-04 14:42; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20181204.1442.008.html>

通信作者: 高祺洋(1982—), 男(汉), 助理研究员, 博士; 研究方向: 特殊工况下的材料摩擦学; E-mail: sygao@imr.ac.cn

基金项目: 清华大学摩擦学国家重点实验室开放基金(SKLTkf12B15)

Fund: Supported by State Key Laboratory Open Fund of Tribology Tsinghua University (SKLTkf12B15)

引用格式: 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 J P, GAO S Y, LI H Y, et al. Investigation on abradability of two aluminum-based seal coatings under high-speed rubbing condition[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(6): 90-97.

关键技术保障, 被广泛应用于航空发动机风扇、压气机以及涡轮机匣表面^[1-3]。对于发动机压气机部件的气路密封, 早期使用镍石墨涂层。但由于涂层金属相镍的熔点较高, 配副使用时摩擦热效应强烈, 常造成叶片的过度损伤。为了降低叶片的损伤, 采用铝或铝硅合金代替镍, 开发出了一系列的铝及铝硅基封严涂层, 其中包括铝/氮化硼 (Al-BN)、铝硅/聚苯酯 (AlSi-PHb)、铝硅/石墨 (AlSi-Cg)、铝硅/氮化硼 (AlSi-BN) 等^[4-6]。目前, 铝及铝硅基封严涂层已部分或完全取代了镍石墨涂层, 成为航空发动机低压气机中主要使用的封严涂层。AlSi-PHb 涂层是欧美市场上使用较为广泛的一类铝基封严涂层, Al-BN 涂层是我国航空发动机低压压气机中大量使用的封严涂层。

对封严涂层综合性能评价的进一步研究发现, 作为材料的服役性能, 模拟工况下进行磨损试验得到的数据, 在用于表征和评价封严涂层上更为有效。有大量的文献对铝及铝硅基涂层与钛合金叶片配副时的摩擦学行为进行了研究, 特别是在模拟服役工况的试验器研制和封严涂层可磨耗性表征评价等方面开展了大量工作^[7-10]。Borel 对含有高熔点塑料的 AlSi-plastic 封严涂层的试验研究表明, 同一涂层和叶片摩擦副在不同试验条件下磨损形式不同, 在高进给率时叶片向涂层转移, 而低进给率时涂层向叶片转移^[11]。在对 Ti6Al4V 叶片与等离子喷涂 Al 涂层的高速刮擦研究中, Bill 发现涂层向叶片的严重转移, 一些叶尖几乎被涂层完全覆盖^[12]。从 Ghasripoor 所做的 AlSi-polyester 的磨损机制图中可见, 在较低线速度和进给率条件下, 发生涂层向叶片转移^[13]。Bounazef 模拟了发动机不同运行阶段 AlSi-hBN 涂层与钛合金叶片间的摩擦学行为, 发现在高线速度和高进给率组合下, 涂层向叶片的转移才有所减少, 而且在整个实验范围内叶片不发生磨损^[14]。薛伟海等人发现高线速度带来的高摩擦热是涂层转移的必要条件, 而低的单次进给速率是涂层向叶片转移积累的主要因素^[15]。

综上所述, AlSi-BN、AlSi-PHb 等涂层与钛合金叶片配副使用时, 涂层有向叶片转移现象, 叶片磨损轻微。但对目前国内外航空发动机压气机中大量使用的 Al-BN 涂层与钛合金叶片的摩擦学行为研究, 特别是 300 m/s 以上线速度的高速刮擦

试验研究相关文献较少。此外, 上述研究多集中于涂层和/或叶片的磨损程度、磨损规律等宏观信息, 对于磨痕表面的形貌、成分等微观磨损信息, 缺乏深入表征; 硬度、相含量、层间结合强度也缺乏统一的性能表征数据。为此, 文中以 Al-BN 和 AlSi-PHb 涂层为研究对象, 利用自制的高速刮擦试验机模拟航空发动机压气机转子叶片与对偶封严涂层的摩擦学工况, 并结合两种涂层的材料性能, 比较两种铝基可磨耗封严涂层与钛合金叶片在高滑动速度下的磨损/粘着机理。

1 试 验

1.1 试验方法

由于封严涂层与叶片特殊的服役条件, 模拟其应用工况的摩擦磨损实验中摩擦副相对运动的线速度达到了百米每秒量级。因此, 常规的摩擦磨损试验机无法满足模拟工况的需要。目前, 国内外很多研究机构均通过开发模拟工况的高速高温刮擦试验机, 来研究封严涂层与叶片的摩擦磨损行为^[11]。自制的高速刮擦试验机由机械主机和电控系统组成^[16], 如图 1 所示。

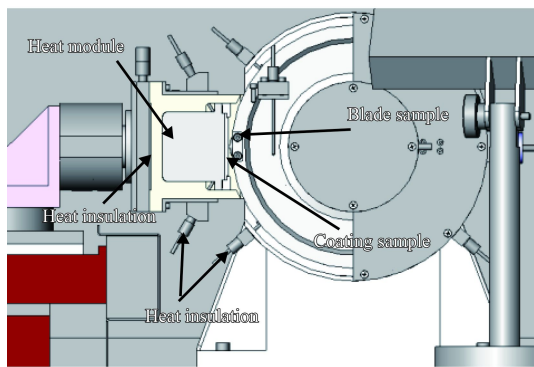


图1 高速刮擦试验机示意图

Fig.1 Schematic diagram of the high-speed rubbing tester

该试验机最大刮擦速度: 450 m/s、进给速率 (入侵速率): 1~2 000 $\mu\text{m/s}$, 具备测力、测温等功能。高速主轴固定在底座上, 提供试验台的回转运动。模拟叶片试件插入圆盘, 用圆盘的旋转模拟实际转子叶片的高速运转, 并用另一高度稍短的叶片试件进行配重, 以保证试验装置的动平衡。涂层试样固定在位移台上的卡具装置上, 实现涂层试片的进给。工作时可以采用辐射加热装置, 来模拟高温工作环境, 并利用传感器进行工

作温度的测量；位移台上的加工装置上装有力传感器，进行动态力的测量；在电主轴外壳上装有测振传感器，对电主轴的工作时的振动情况进行监测。

1.2 样品规格

模拟叶片 (转动样品) 和涂层 (平动样品) 分别安装到高速转盘和进给系统的夹具上，设定入侵率、入侵深度和线速度，开机后待线速度达到设定值后进行叶片端面入侵涂层的刮擦。试验条件为：涂层向高速转盘的径向速度 (V_r) 为 $10\text{ }\mu\text{m/s}$ ，刮擦深度 (H) 为 0.4 mm ，叶片转动速度 (V_t) 为 300 m/s ，室温条件。摩擦副分别为 Al-BN 涂层 VS. TA11 钛合金试片及 AlSi/PHb 涂层 VS. TA11 钛合金试片，每种摩擦副进行 3 次试验。采用精度 0.1 mg 电子天平，分别测量试验前后的质量差值，作为涂层和叶片样品质量失重程度的表征；试验前与试验后叶片长度的差值作为叶片长度的变化量，叶片和磨痕长度由卡尺测量得到。

涂层基材为 0Cr17Ni4Cu4Nb 合金，尺寸为 $70\text{ mm}\times40\text{ mm}\times5\text{ mm}$ ；模拟叶片采用 TA11 钛合金，其名义成分为 Ti-8Al-1Mo-1V。模拟叶片的几何尺寸如图 2 所示，其中叶尖端面尺寸 20 mm 一侧与滑动方向垂直。

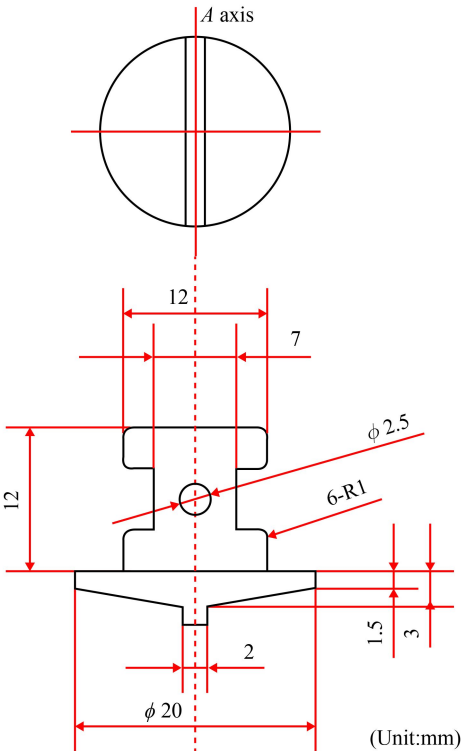


图 2 模拟叶片样品的几何尺寸

Fig.2 Geometric dimensions of the simulated blade samples

文中选择的两种涂层材料分别为进口 AlSi/PHb(牌号 Metco601NS) 和国产 Al-BN 粉末。AlSi/PHb 粉末材料成分质量分数为：12% Al，40% Si，余量为 PHb，Al-BN 粉末材料成分为 20% BN，6% SiO₂，余量为 Al。两种涂层均采用等离子喷涂工艺制备，涂层厚度为 2.5 mm 。

2 结果与讨论

2.1 涂层的相含量、硬度及结合强度

采用金相法测量涂层中金属相与非金属相含量^[7]，采用表洛 HR15Y 标尺测量涂层的硬度，每个样品至少测试 5 个数据点计算平均值，采用粘胶拉伸法测量涂层的层间结合强度，每个样品至少测试 3 个数据计算平均值。表 1 为 2 种涂层的硬度、结合强度和相含量测试结果。由表 1 可见，AlSi-PHb 涂层的硬度和结合强度均高于 Al-BN 涂层，但 Al-BN 涂层的金属相含量更高。

表 1 Al-BN 和 AlSi-PHB 涂层的硬度、结合强度和相含量
Table 1 Hardness, bonding strength and phase content of Al-BN and AlSi-PHB coatings

Coating	Al-BN	AlSi-PHB
Hardness / HR15Y	55–65	60–70
Bonding strength / MPa	8.9	11
Metallic phase content / %	63	52
Nonmetallic phase content / %	37	48

值得注意的是，作为封严涂层的基体相和强度相，通常金属相的含量越高，涂层的结合强度越高。但文中具有更低金属相含量的 AlSi/PHb 涂层的结合强度却大于 Al-BN 涂层，其原因可能和涂层中非金属相的均匀性有关。作为典型多相复合材料，其层间结合强度显然受到非金属相尺寸和分布等因素的影响。非金属相的尺寸和分布越均匀，有利于层间结合强度。

由两种涂层的截面金相组织 (图 3) 可见，Al-BN 涂层中非金属相 (孔隙和 BN) 为不规则的多边形，尺寸和分布上存在较大的不均匀性；AlSi/PHb 涂层中非金属相为近似球形，且非金属相的尺寸和分布明显较 Al-BN 涂层更为均匀。因此，尽管 AlSi/PHb 涂层金属相含量明显低于 Al-BN 涂层，但由于非金属相的均匀性，该涂层的层间结合强度更高。

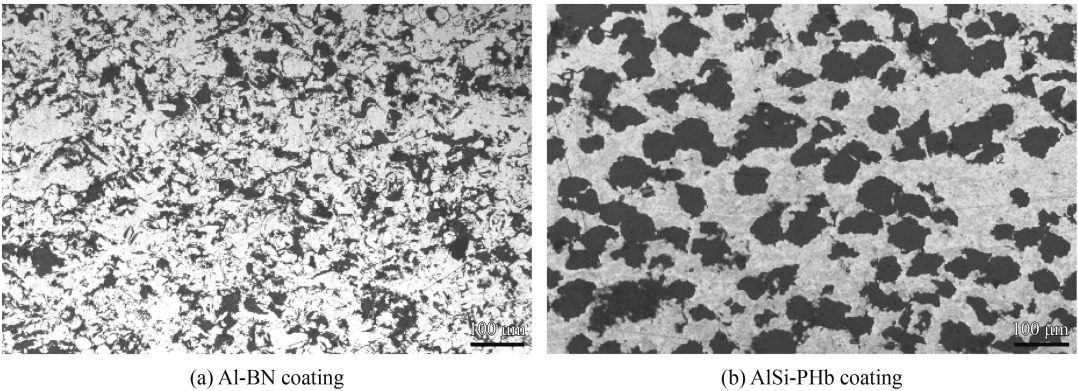


图 3 等离子喷涂 Al-BN 和 AlSi-PHb 涂层的金相组织

Fig.3 Metallographic structures of APS-sprayed Al-BN and AlSi-PHb coatings

2.2 涂层与叶片的磨损

2.2.1 涂层与叶片的磨损程度

通过分别采用磨痕长度、叶片质量和长度的变化量来表征涂层与叶片的磨损程度。叶片样品的质量变化量和长度变化量由试验前与试验后的

差值计算得到, 若差值小于 0, 说明叶片增重、增长; 反之则意味叶片磨损。

表 2 为两种摩擦副的磨损情况。可见, 高速刮擦时, Al-BN 涂层与 AlSi-PHb 涂层对钛合金叶片的磨损情况出现明显的不同。

表 2 两种 Al 基封严涂层与配副叶片的的磨损状态

Table 2 Wear status of the two aluminium-based seal coatings and the titanium blades coupled with them					
Friction pair	Coating wear scar length / mm	Coating weigh change / mg	Blade tip length change / μm	Blade weigh change / mg	Friction process
Al-BN and TA11	AVE: 43.8	AVE: 1360	AVE: -1304	AVE: -540	No firelight
	47.2 / 39.4 / 44.8	1451 / 1285 / 1344	-1194 / -1396 / -1322	-534 / -465 / -621	
AlSi-PHb and TA11	AVE: 34.7	AVE: 721	AVE: 30	AVE: 20	firelight
	32.3 / 35.7 / 36.1	716 / 719 / 728	26 / 31 / 33	16 / 21 / 23	

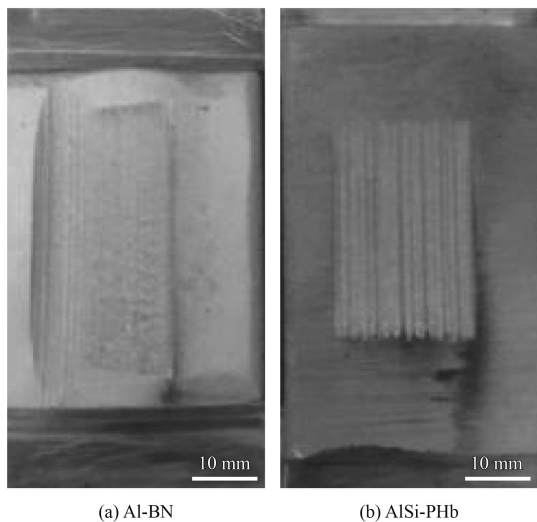
对于 Al-BN 涂层与 TA11 摩擦副, 叶片的质量变化量和长度变化量均为负值; 且在入侵深度仅为 400 μm 的情况下, 叶片增长量达到 1304 μm , 表明高速刮擦过程中, 存在着严重的 Al-BN 向 TA11 粘着的现象。

对于 AlSi-PHb 涂层与 TA11 摩擦副, 叶片的质量变化量和长度变化量均为正值, 且相同实验条件下, AlSi-PHb 涂层的磨痕长度明显小于 Al-BN 涂层。

这表明高速刮擦过程中, AlSi-PHb 涂层磨损叶片。在试验中观察到了强烈的火花现象, 可以推定在高速刮擦条件下, AlSi-PHb 涂层与 Ti 合金试片在高速刮擦试验条件下发生了强烈的摩擦热效应, 造成叶片一定程度的损伤。但损伤的同时, 仍会存在一定程度的涂层粘附叶片, 因此试验后试片高度既有降低也有增加, 且试片出现了轻微的失重。

2.2.2 涂层宏观形貌

对比试验后, Al-BN 涂层与 AlSi-PHb 涂层的磨痕宏观形貌如图 4 示, 两种铝基封严涂层与钛合金叶片的多次摩擦后, 表面均出现了大量犁沟磨痕。根据文献, 在高速对摩过程中, 法向载荷将磨屑压入摩擦表面, 滑动时的摩擦力通过磨削的犁沟作用使表面剪切、犁皱和切削产生磨痕。软金属粘附物形成磨粒磨损产物, 在封严涂层表面均形成犁沟。由图 4 可见 Al-BN 涂层(左侧)的磨痕长度明显长于 AlSi-PHb 涂层。另外, Al-BN 涂层的磨痕长度并不均匀, 这是由于 Al-BN 涂层在对摩试片尖端形成的粘附层高度并不均匀所致, 磨痕左侧部分的长度明显长于其他部分, 即左侧粘附层高度最高, 造成试片尖端增高最大。相比于 Al-BN 涂层, AlSi-PHb 涂层的磨痕表面有明显的犁沟, 其原因是与之对摩的钛合金试片尖端表面同时发生叶尖磨损和涂层粘附, 对



(a) Al-BN

(b) AlSi-PHb

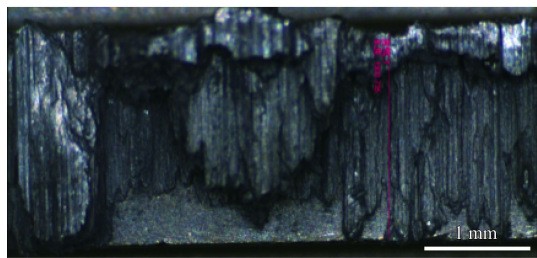
图4 Al-BN涂层与AlSi-PHb涂层的磨痕宏观形貌

Fig.4 Macro graphs of wear scar on Al-BN and AlSi-PHb coatings

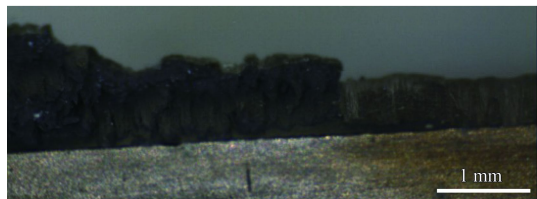
摩叶片尖端出现了明显的高低起伏。

2.2.3 叶尖截面宏观形貌

图5为与Al-BN涂层对摩的试片尖端端面及侧面宏观形貌。可见, Al-BN涂层在对摩试片上形成了明显的粘附层, 且粘附层的覆盖并不均匀, 仍有未被覆盖的试片表面。高度也存在明显变化($-1304\sim-525\text{ }\mu\text{m}$), 这也是造成涂层磨痕长度不一致的原因。



(a) End face of the blade tip



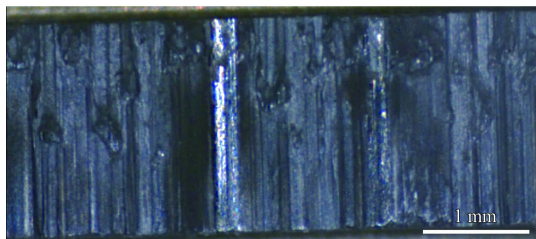
(b) Profile of the blade tip

图5 与Al-BN涂层对摩的叶尖端面及侧面宏观形貌

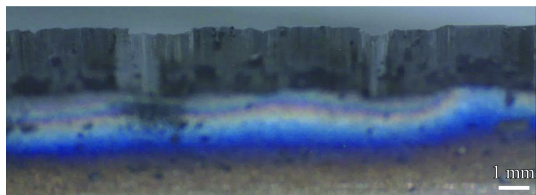
Fig.5 End face and profile macro morphologies of the blade coupled with Al-BN coating

图6为与AlSi-PHb涂层对摩的Ti合金试片的端面及侧面形貌。由图可见, 不同于Al-BN涂

层的对摩试片尖端, AlSi-PHb涂层的对摩试片端面出现了明显的犁沟状的磨痕, 试片侧面出现了明显的氧化变化现象(蓝、黄色), 表明试验过程中出现了强烈的摩擦热效应, 造成了试片氧化。犁沟及蓝色斑痕的存在, 意味着刮擦过程中对摩试片存在着损伤。



(a) End face of the blade tip



(b) Profile of the blade tip

图6 与AlSi-PHb涂层对摩的叶尖端面及侧面宏观形貌

Fig.6 End face and profile macro morphologies of the blade coupled with AlSi-PHb coating

2.2.4 微观形貌及能谱分析

对Al-BN、AlSi-PHb涂层以及各对摩试片进行磨痕形貌及能谱分析, 图7为Al-BN涂层微观形貌及能谱分析, 图8为Al-BN涂层对摩试片磨痕形貌。图9为AlSi-PHb涂层微观形貌及能谱分析, 图10为与AlSi-PHb涂层对摩试片磨痕形貌及能谱分析。

由图7可见, Al-BN涂层兼有被涂抹碾压和犁沟磨损形貌, 同时涂层磨痕表面出现了与刮擦方向垂直的裂纹, 表明涂层组织中, 粘结在一起的粉末粒子在刮擦力的作用下出现分离, 有出现裂纹后逐步脱落的趋势。对A区的能谱分析结果表明, 磨痕表面主要为涂层自身成分(Al、Si、N、O), 没有对摩试片Ti合金的成分。

由图8可见, 对摩试片表面有明显的Al-BN涂层形成的粘附层, 粘附层存在明显的层状结构, 表明粘附层的形成是一个累积过程; 粘附层的表面有明显的裂纹, 表明粘附层结合不牢, 可能在刮擦过程中发生剥落; 粘附层的主要成分为涂层成分, 基本没有钛合金试片成分。

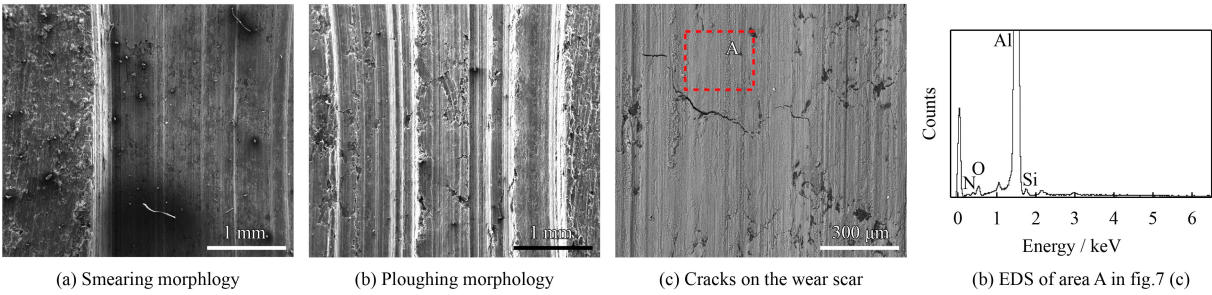


图 7 Al-BN 涂层磨痕的 SEM 形貌及其能谱分析

Fig.7 SEM images and EDS of wear scar on Al-BN coating

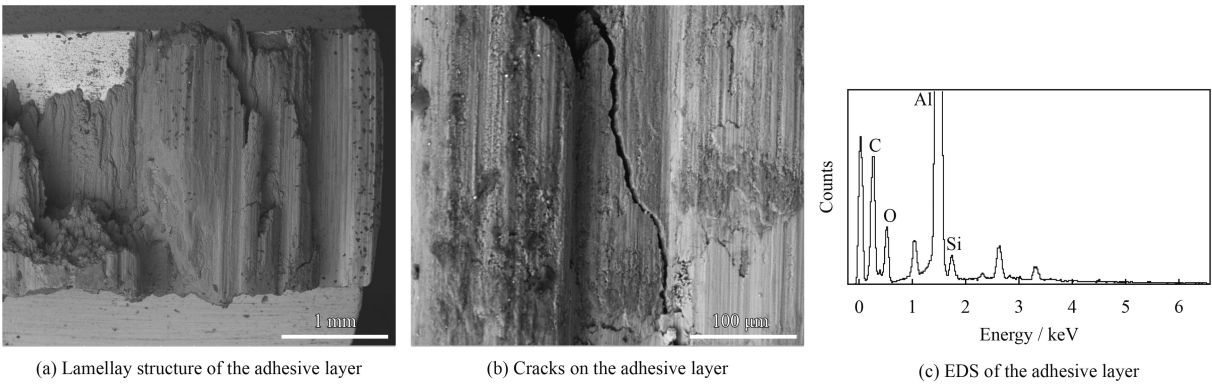


图 8 Al-BN 涂层对摩叶片的 SEM 形貌及其能谱分析

Fig.8 SEM images and EDS of counterpart blade coupled with Al-BN coating

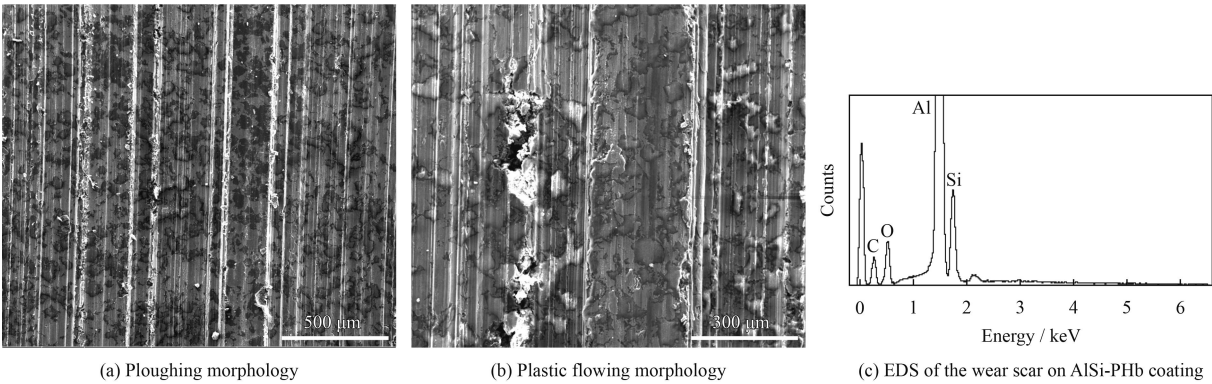


图 9 AlSi-PHb 涂层的磨痕形貌及能谱分析

Fig.9 SEM images and EDS of wear scar on AlSi-PHb coating

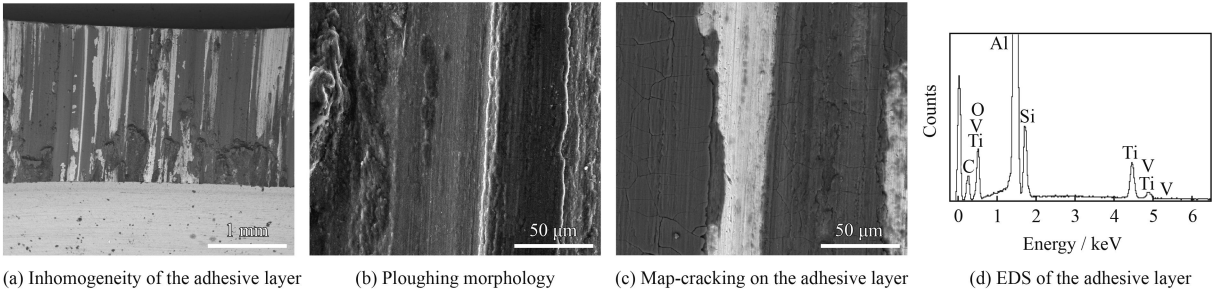


图 10 AlSi-PHb 涂层对摩叶片的 SEM 形貌及其能谱分析

Fig.10 SEM images and EDS of counterpart blade coupled with AlSi-PHb coating

由 AlSi-PHb 涂层的磨痕微观形貌可见, AlSi-PHb 主要为犁沟磨损机制, 基本没有涂层碾压; AlSi-PHb 有明显的塑性流动痕迹, 表明刮擦过程中有强烈的擦热效应致使涂层软化; 能谱分析结果表明, 磨痕表明主要为涂层自身成分 (Al、Si、C 和 O), 表明尽管刮擦过程中有强烈的摩擦热效应, 但叶片并未向涂层发生粘附转移。

由对摩叶片的微观形貌可见, 尽管叶尖表面存有 AlSi-PHB 涂层的粘附层, 但相比于与 Al-BN 涂层对摩的叶尖, 粘附的覆盖程明显降低, 高度也明显降低, 这也是因为 AlSi-PHB 涂层硬度较高; 由于粘附层的覆盖不均, 造成叶尖表面出现了明显犁沟形貌, 其中被粘附层覆盖的区域表现为凸起, 未被覆盖区域表现为凹陷; 粘附层上出现了纵横交错的网状裂纹, 表明刮擦过程中粘附层会发生严重的剥落, 因此相对比 Al-BN 涂层, 与 AlSi-PHB 涂层对摩的叶片, 高速刮擦后, 并未出现明显的增高; 粘附层的成分同时含有涂层及叶片成分, 为两者的混合层。

2.3 讨论

AlSi-PHb 与 Al-BN 涂层均属于铝基封严涂层, 两者的微观组织结构相同 (金属基体+固体润滑相+孔隙), 组织均匀性相近, 但 AlSi/PHb 涂层的机械性能 (结合强度和硬度) 更高。

高速刮擦过程中, AlSi-PHb 涂层与钛合金叶片摩擦副 (简称 AlSi-PHb 摩擦副) 有强烈的火花现象, 且叶尖出现明显的氧化变色; 而 Al-BN 涂层与钛合金叶片摩擦副则无火花现象, 叶尖也未氧化变色; 说明前者的摩擦热效应更强烈、接触面温度更高。

导致 AlSi-PHb 摩擦副摩擦热效应更强烈、接触面温度更高的原因可能包括如下几方面: ①相对于 Al-BN 涂层, AlSi-PHb 涂层的孔隙率更高, 不利于摩擦热从接触面的导出, 进而导致热量聚集、温度升高; ②摩擦热来源于摩擦力做功, 而 AlSi-PHb 涂层的硬度、结合强度更高, 很可能造成更大的摩擦力, 进而产生更多的摩擦功; ③AlSi-PHb 涂层中, PHb 通常作为造孔剂, 且在高速刮擦过程中, 常表现出一定的“粘滞”特性; 而 Al-BN 涂层中, BN(六方) 是常用的固体润滑剂, 因此相对于 AlSi-PHb 涂层, Al-BN 涂层的减摩效果更好。

结合叶片损伤形式与涂层性能可见, 如果涂层的机械性能较高 (如 AlSi-PHb 涂层), 则可能导致叶片损伤; 如果涂层的机械强度较低 (如 Al-BN 涂层), 则易于粘着叶片。因此, 适当的机械强度, 使得叶片既不磨损也不被涂层粘着, 是封严涂层获得良好可刮削性的关键所在。

对比其它学者的研究工作可见, 对于 Al-BN 涂层, 文献[15]、[18]的结果均显示, 与钛合金叶片配副时, 主要的磨损机制为涂层粘着叶片; 对于 AlSi-PHb 涂层, 文献[19]的结果显示, 与之配副的钛合金叶片, 在个别条件下存在轻微的损伤, 文献[13]的结果显示, 同时存在 AlSi-PHb 涂层粘着和磨损叶尖的磨损机制。

考虑到实验设备、条件不同等因素, 尽管上述工作对于叶片损伤或被粘着的定量程度上与文中的结果存在一定出入, 但叶片的磨损形式与文中研究一致。

需要指出的是, 涂层的成分、组织均值均一性等材料结构参数, 同样对涂层及叶片的磨损程度、机制具有直接, 但文中研究重点是涂层的机械性能与磨损行为间的关系, 因此并未对涂层的材料结构等其它参数进行深入讨论。

3 结 论

(1) 根据两种涂层性能对比分析, 等离子喷涂 AlSi-PHb 涂层的结合强度、硬度都高于等离子喷涂 Al-BN; Al-BN 涂层的金属相含量比 AlSi-PHb 涂层的金属相含量高, 但涂层组织均匀性稍差。

(2) 对于 Al-BN 涂层, 以 Al-BN 涂层向对摩的钛合金叶尖粘附转移为主要的磨损机制, 造成叶片出现了增高、增重, 叶片最大增高量达到了 $-1304\ \mu\text{m}$ 。因此从涂层粘附叶片的角度考虑, 高速刮擦下 Al-BN 涂层粘附叶片, 造成叶片伸长, 将改变叶片原有振动频率, 增加了叶片出现裂纹的可能性, 可刮削性不佳。

(3) 对于 AlSi-PHb 涂层, 试验过程中出现了明显的火花现象, 表明试验过程中有强烈的摩擦热效应, 也使得该涂层的磨损机制不同于 Al-BN 涂层。主要表现为: 高速刮擦过程中, 兼有叶片的磨损和 AlSi-PHb 涂层的粘附转移。叶片磨损和涂层粘附的综合结果, 使得试验后钛合金叶片出现了轻微的质量失重 ($0.02\ \text{mg}$) 和轻微的增高 ($-30\ \mu\text{m}$)。叶尖表面上粘附层上出现了网络状的裂纹, 这是

非常不利的磨损机制,因此从叶片磨损角度考虑,高速下 AISi-PHb 涂层的可刮削性不佳。

(4) 涂层的结合强度和硬度等机械性能,对于叶片的损伤形式影响显著。机械强度过高 (AISi-PHb), 涂层易于损伤叶片; 机械强度过低 (Al-BN), 则易于粘着叶片。因此, 适当的机械强度, 是获得良好可刮削性的关键。

参考文献

- [1] RHYS-JONES T. Thermally sprayed coating systems for surface protection and clearance control applications in aero engines[J]. *Surface & Coatings Technology*, 1990, 43/44: 402-415.
- [2] GHASRIPOOR F, SCHMID R, DORFMAN M. Abradables improve gas turbine efficiency[J]. *Materials world*, 1997, 5(6): 328-330.
- [3] CHUPP R, HENDRICKS R, LATTIME S. Sealing in turbomachinery[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2006, 22(2): 313-349.
- [4] WANG G, TENG B Q, WANG Z H, et al. The application and requirement of abradable seal coating on aero-engine[J]. *Thermal Spray Technology*, 2012, 4(1): 20-24.
- [5] SCHMID R, GHASNIPOOR F, DORFMAN M. An overview of compressor abradable thermal spray[C]. *The 1st International Thermal Spray Conference*, 2000, 1087-1093.
- [6] SPORER D, WILSON S. Current and next-generation titaniumblade compatible compressor abradable coatings[J]. *Thermal Spray technology*, 2012, 211(5): 143-148.
- [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.
LIU S W, LI S, LIU Y. Seal coating and evaluation of its abradability coating on aero-engine[J]. *Thermal Spray Technology*, 2009, 22(1): 12-18 (in Chinese).
- [8] TAYLOR T, THOMPSON B, ATON W. High-speed rub wear mechanism in IN-718 VS NiCrAl-Bentonite[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2007, 202: 698-703.
- [9] XIE X X, ZHANG X, JI X J. Research of Room-temperature and high-temperature friction and wear properties of NiCrAl/B.e seal coating[J]. *Thermal Spray Technology*, 2011, 3(1): 23-28.
- [10] STRINGER J, MARSHALL M. High speed wear testing of an abradable coating[J]. *Wear*, 2012, 295(7): 257-263.
- [11] BOREL M, NICOLL A. The wear mechanisms occurring in abradable seals of gas turbines[J]. *Surface & Coatings Technology*, 1989, 39-40, Part 1: 117-126.
- [12] BILL R, SHIEMBOB L. Friction and wear of sintered fiber-metal abradable seal materials[J]. *Journal of Lubrication Technology-Transactions of the ASME*, 1977, 99(4): 421-427.
- [13] GHASRIPOOR F, SCHMID R, DORFMAN M, et al. A review of clearance control wear mechanisms for low temperature aluminium silicon alloys[C]. *Proceedings of the 15th International Thermal Spray Conference*, 1998, 139-144.
- [14] BOUNAZEF M, GUESSASMA S, AIT SAADI B. The wear, deterioration and transformation phenomena of abradable coating BN-SiAl-bonding organic element, caused by the friction between the blades and the turbine casing[J]. *Materials Letters*, 2004, 58(27-28): 3375-3380.
- [15] XUE W H, GAO S Y, DUAN D L, et al. Material transfer behaviour between a Ti6Al4V blade and an aluminium hexagonal boron nitride abradable coating during high-speed rubbing[J]. *Wear*, 2015, 322-323: 76-90.
- [16] 张彬, 杨辉, 王璐, 等. 基于 ANSYS 的封严涂层试验台高速主轴动力学分析[J]. *机械设计与研究*, 2015, 31(2): 20-24.
ZHANG B, YANG H, WANG L, et al. Seal coating test rig of high-speed spindle based on ANSYS dynamic analysis[J]. *Machine design and research*, 2015, 31(2): 20-24.
- [17] 张佳平, 袁福河, 王璐, 等. 航空发动机封严涂层金相制备及显微组织检测技术[J]. *材料保护*, 2017, 5(1): 68-71.
ZHANG J P, YUAN F H, WANG L, et al. Metallographic preparation and micro-structure testing techniques of abradable sealing coatings for aeroengines[J]. *Materials Protection*, 2017, 5(1): 68-71 (in Chinese).
- [18] 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 H L, GAO S Y, XUE W H, 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.
- [19] XUAN H J, ZHANG N. Evaluation of an AISi-polyester abradable seal coating performance using high-temperature and high-velocity abrasion tests[J]. *Journal of Engineering Tribology*, 2015: 1-10.