

航空发动机可磨耗涂层在不同碰磨场景下的有毒物质产生机理

孙杨慧¹, 陈勇², 王少辉¹, 侯乃先¹, 孙建刚³

(1. 中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 201108; 2. 中国船舶集团有限公司第七一一研究所, 上海 201108; 3. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160)

摘要: **目的** 获得铝硅聚苯酯涂层在发动机不同碰磨条件下磨削物的尺寸、内部结构与其热分解特性的关系, 进而揭示有毒气体产生的机理。**方法** 应用 LS-DYNA 软件计算压气机在不同运行工况下叶片的伸长量与伸长率, 定义碰磨场景。应用等离子喷涂技术 (APS) 制备铝硅聚苯酯涂层, 利用高温超高速可磨耗试验机模拟碰磨场景并开展碰磨试验。利用扫描电镜 (SEM)、能谱仪 (EDS) 表征不同碰磨场景下磨削物颗粒的尺寸、形貌与成分。利用气相色谱-质谱连用仪对不同尺寸、形貌及内部结构的磨削物颗粒开展热分解试验, 获得热分解规律及导致客舱引气污染的有害物质。**结果** 高转速 (183 m/s)、低进给率 (28 $\mu\text{m/s}$) 条件下, 磨削物颗粒的平均尺寸约为 30.8 μm ; 高转速 (183 m/s)、高进给率 (257 $\mu\text{m/s}$) 条件下, 磨削物颗粒的平均尺寸约为 74 μm ; 低转速 (52 m/s)、低进给率 (28 $\mu\text{m/s}$) 条件下, 磨削物颗粒的平均尺寸约为 101.8 μm ; 低转速 (52 m/s)、高进给率 (257 $\mu\text{m/s}$) 条件下, 磨削物颗粒的平均尺寸约为 119.4 μm 。当涂层磨削物颗粒尺寸大于 100 μm 时, 在 210 $^{\circ}\text{C}$ 附近未发生热解, 仅在 550 $^{\circ}\text{C}$ 附近有明显的热解反应; 当涂层磨削物颗粒尺寸小于 75 μm 时, 在 210、550 $^{\circ}\text{C}$ 附近都有明显的热解现象, 且都会产生苯、甲苯等有害物质。**结论** 线速度基本一致的情况下, 磨削物颗粒尺寸与进给率成正相关; 进给率基本一致的情况下, 磨削物颗粒尺寸与进给率成负相关。磨削物颗粒的热稳定性与颗粒的尺寸、内部结构相关。涂层在高转速下热效应明显, 涂层骨架中的聚苯酯发生部分坍塌, 内部结构遭到破坏, 导致磨削物在低温下发生热解反应, 且产生的有害物质会污染客舱引气。

关键词: 铝硅聚苯酯; 碰磨机理; 热裂解; 有毒物质

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)06-0248-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.06.022

Toxic Generation Mechanism of Aero-engine Wearable Coatings under Different Abrasion Scenarios

SUN Yang-hui¹, CHEN Yong², WANG Shao-hui¹, HOU Nai-xian¹, SUN Jian-gang³

(1. AVIC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 201108, China; 2. No.711 Research Institute of China State Shipbuilding Co., Ltd., Shanghai 201108, China; 3. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China)

收稿日期: 2021-04-21; 修订日期: 2021-09-03

Received: 2021-04-21; Revised: 2021-09-03

作者简介: 孙杨慧 (1985—), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为航空发动机可靠性、安全性。

Biography: SUN Yang-hui (1985-), Female, Doctor, Senior engineer, Research focus: aeroengine reliability and safety.

引文格式: 孙杨慧, 陈勇, 王少辉, 等. 航空发动机可磨耗涂层在不同碰磨场景下的有毒物质产生机理[J]. 表面技术, 2022, 51(6): 248-254.

SUN Yang-hui, CHEN Yong, WANG Shao-hui, et al. Toxic Generation Mechanism of Aero-engine Wearable Coatings under Different Abrasion Scenarios[J]. Surface Technology, 2022, 51(6): 248-254.

ABSTRACT: To obtain the relationship between the grinding particles size, internal structure and thermal decomposition characteristics of aluminum-silicon polyester coating under different rubbing conditions, and study the mechanism of toxic gas generation. LS-DYNA software was applied to calculate the blade elongation and elongation rate under different operating conditions of the compressor, and define the rubbing scenarios. In addition, APS was also applied to prepare the Al-Si polyester coating, and the rubbing tests were carried out by high-temperature ultra-high-speed abrasion test machine. Furthermore, SEM and EDS were used to characterize the size, morphology and composition of the grinding particles under different rubbing scenarios. Thermal decomposition tests were conducted on rubbing particles using GC-MS to obtain the thermal decomposition patterns and harmful substances that cause cabin air pollution. The results showed that the average size of the grinding particles was 30.8 μm at low feed rate (28 $\mu\text{m/s}$) and high speed (183 m/s); the average size of the rubbing particles was 74 μm at high speed (183 m/s) and high feed rate (257 $\mu\text{m/s}$); the average size of the grinding particles was 101.8 μm at low speed (52 m/s) and low feed rate (28 $\mu\text{m/s}$) and the average size of the rubbing particles was 119.4 μm at low speed (52 m/s) and high feed rate (257 $\mu\text{m/s}$). When the size of grinding particle was larger than 100 μm , a significant pyrolysis reaction occurred only near 550 $^{\circ}\text{C}$. When rubbing particle size of the coating was smaller than 75 μm , there were significant pyrolysis reactions near 210 $^{\circ}\text{C}$ and 550 $^{\circ}\text{C}$, and harmful substances such as benzene and toluene were produced. In conclusion, the size of the rubbing particles is positively correlated with the feed rate when the linear speed remains the same, and the size of grinding particles is negatively correlated with the feed rate when the feed rate is basically the same. The thermal stability of the rubbing particles is related to the size and internal structure of the particles. Due to the obvious thermal effect of coating at the high speed, the internal structure will be damaged, which results in the pyrolysis reaction of the rubbing particles at low temperature. Furthermore, the produced harmful substances will contaminate the cabin air induction.

KEY WORDS: Al-Si polyester; rubbing mechanism; pyrolysis; toxic substance

民用航空发动机是高度集成的复杂系统,是一个国家综合国力的体现。它不仅要满足高推力、低油耗要求,还要满足高安全性、长寿命、低噪声、低排放等要求。对于涡扇发动机,航空发动机气路密封间隙设计对提升推进效率、降低油耗有着重要的影响^[1-2]。研究表明^[3-5],封严泄露量减少 1%,可使发动机推力增加 1%,耗油率降低 0.1%。间隙设计过程是一个权衡过程,一方面间隙过大势必会增加气体的泄漏量,降低发动机效率;另一方面间隙过小则容易受到变形、振动的影响而发生碰磨,从而引发安全事故。为了解决这个矛盾,在发动机设计过程中普遍采用可磨耗涂层设计^[6-9]。以压气机的叶片与机匣的间隙设计为例,通过引入可磨耗涂层,由于材料的硬度不同,在碰磨发生时优先磨损涂层材料,从而保护转子叶片,这样不仅可以延长转子叶片的使用寿命,还可以保证整体的叶尖间隙能够维持原有的状态。

目前,在压气机和各级涡轮之间的气路密封部位多达 40~60 处,在每一级气路密封处均设置了封严材料。从发动机的低温段到高温段,由于各区域的温度、载荷、相对速度、环境氛围等均会发生很大变化,因此适用的封严材料也不同。一般高温部件多采用超合金、高温合金材料等,低温部件多采用硅橡胶、硅铝聚苯酯等材料^[9]。

可磨耗涂层材料的使用解决了间隙设计的难点,但是同时也带来了新问题,即可磨耗涂层在刮磨过程中对客舱引气的污染问题。中国民航局发布的《航空发动机适航规章》(CCAR-33R2)第 33.75 条规定了

发动机的最低安全要求,其中将“客舱用发动机引气中有毒物质浓度足以使机组人员或乘客失去能力”这一事件定义为危害性发动机后果,要求申请人提供座舱用发动机引气中有毒物质排出率的相关资料,来表明引气中的有毒物质的成本与浓度满足最低安全要求,并将其作为发动机安装说明书中的一部分^[10]。

由美国汽车工程师协会发布的 SAE APR 4418“发动机及 APU 引气中有毒物质的取样与测量程序”^[11]为航空发动机以及辅助动力装置(APU)制造商提供了引气质量符合性验证试验的实施过程及气体检测方法,在该标准中列出了在引气试验中需要检测的有害物质及限制要求,如表 1 所示。

当前,由于可磨耗涂层材料在发动机中大量使用,必须考虑涂层在刮磨过程中受热分解对引气质量

表 1 发动机引气试验中需要检测的物质

Tab.1 Substances to be tested in engine bleed test

CAS no.	Compound	Limits/(mg·m ⁻³)
75-07-0	Acetaldehyde	18
107-02-8	Acrolein	0.5
71-43-2	Benzene	3.2
124-38-9	Carbon dioxide	3 650
630-08-0	Carbon monoxide	17.8
50-00-0	Formaldehyde	1.0
78-93-3	Methyl ethyl Ketone (2-butanone)	598.5
108-88-3	toluene	153

的污染。铝硅聚苯酯涂层材料广泛应用于发动机增压级的间隙设计中,然而当前针对铝硅聚苯酯涂层材料的研究主要集中在涂层材料的性能、摩擦磨损机理等方面^[12-17]。乔家科等^[18]通过开展刮磨试验研究了不同转速下的刮磨机理。丁坤英等^[19]对不同温度下铝硅聚苯酯涂层的热稳定性开展了研究,建立了不同温度下涂层硬度的变化情况。程旭莹等^[20]在不同温度下对铝硅聚苯酯涂层开展恒温氧化试验,获得了不同温度和保温时间对涂层可磨耗性能的影响。陈亚军等^[21]通过对试验结果的归纳、分析,探讨了涂层结合强度、硬度与热处理温度、时间之间的关系。金辰日等^[22]在准静态与动态压缩条件下对铝硅聚苯酯涂层的力学行为开展了研究,结合微观组织结构解释了在不同加载条件下涂层的断裂机理。刘正发等^[23]通过刮磨试验研究叶片转速对铝硅聚苯酯涂层刮磨性能的影响,揭示了不同转速下的磨损机理。然而针对铝硅聚苯酯可磨耗涂层在碰磨中如何污染客舱引气的相关研究还非常少。

本文围绕增压级可磨耗涂层材料硅铝聚苯酯,通过建立低压转子系统有限元分析模型,分析增压级在典型的运行工况(不同转速与加速度)下可能发生的碰磨场景。利用高温超高速可磨耗试验机开展碰磨试验并收集磨削物,进一步利用扫描电子显微镜(SEM)对磨削物的形态特征及成分进行表征与分析,归纳不同碰磨场景下磨削物的形态规律。最后,利用热裂解气相色谱-质谱联用仪对不同碰磨条件下的磨削物开展热分解试验,揭示有毒物质产生机理与碰磨行为的内在联系,并获得磨削物的热分解温度及气体成分。

1 碰磨试验及磨削物热分解试验

1.1 建立低压转子系统有限元模型

采用八节点六面体实体单元建立典型的低压转子整机有限元模型,见图1。模型共包含42.5万个节点,28.5万个单元。

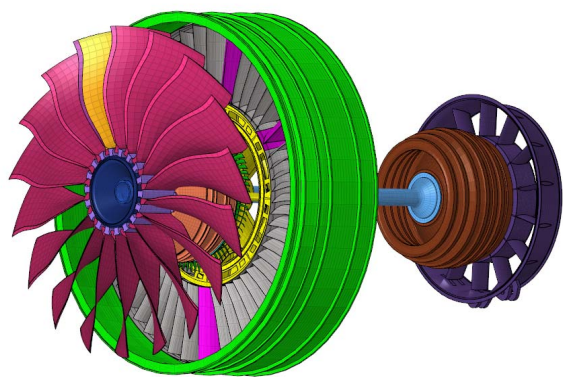


图1 低压转子整机有限元分析模型

Fig.1 Finite element model of low pressure rotor system

1.2 计算叶片径向伸长量

由于发动机的运行环境复杂,碰磨行为可能发生在任何一个飞行阶段中,而决定碰磨行为的关键物理参数包括初始的间隙、转速、叶片伸长率以及叶片的伸长量。不考虑随机故障条件,影响间隙变化的原因主要包括2个方面,一是转子叶片在离心力作用下的径向伸长,二是低压轴在加速过程中发生的径向位移。本文考虑最严苛的高温高原起飞条件,根据增压级可能达到的最大转速以及发动机在该起飞条件下的加速过程,定义4个典型的运行工况,见表2。通过计算在不同转速与不同加速度条件下叶片的伸长量与伸长率,来定义典型的碰磨试验工况。

表2 典型运行工况下的增压级转速与加速度
Tab.2 Speed and acceleration of booster stage under typical working conditions

Working conditions	Initial speed/(r·min ⁻¹)	Acceleration/(rad·s ⁻²)
1	2 496	262
2	3 660	21
3	1 152	16.2
4	3 297.417	135

1.3 计算叶片伸长量与伸长率

应用LS-DYNA软件计算不同转速及加速度下的叶片伸长量,分为2个步骤,首先计算不同转速下叶片的伸长量,即叶片在离心载荷下的伸长量,接着在该转速下加载加速度,计算叶片的伸长量,即叶片在加速载荷下的伸长量。两者相加得到转子叶片的径向总伸长量。进一步地,根据加速度及叶片伸长量计算叶片的伸长率。按照上述方法,计算得到了以上4个工况下的叶片总伸长量、伸长率,见表3。

表3 不同工况下叶片的伸长量与伸长率
Tab.3 Elongations and elongation rates of blade under different working conditions

Working conditions	Elongation under centrifugal load/mm	Elongation under accelerating load/mm	Total elongation/mm	Rate of elongation/(mm·s ⁻¹)
1	0.196	0.122	0.318	0.122
2	0.421	0.257	0.678	0.257
3	0.041 8	0.027 3	0.069 1	0.027 3
4	0.342	0.204	0.546	0.204

1.4 确定碰磨试验条件

根据1.3节中的计算结果,策划了6组碰磨试验,试验参数见表4。其中线速度涵盖了从地面慢车到最大起飞状态,叶片伸长率涵盖了表3中最大伸长率到最小伸长率区间。

表 4 碰磨试验条件
Tab.4 The conditions of rubbing test

Test grouping	Tangent velocity/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Feed rate/ ($\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Cutting depth/mm	Ambient temperature/K
Group 1	183	257	0.678	382
Group 2	52	257	0.069 1	299
Group 3	183	28	0.678	382
Group 4	52	28	0.069 1	299
Group 5	166	250	0.546	318
Group 6	166	200	0.546	318

1.5 试验设备与材料

为了能够较全面地研究硅铝聚苯酯涂层材料在不同碰磨工况下的碰磨行为与机理,应用高温超高速可磨耗试验机研究增压级转子叶片与机匣可磨耗涂层的碰磨过程。该试验机由转子动力系统、动平衡系统、进给系统、火焰加热系统、控制系统、安全防护等 8 个系统构成,可以真实地模拟涂层的服役环境,在底部设置了磨削物收集器,可收集约 70% 的磨削物。试验机的工作原理见图 2。

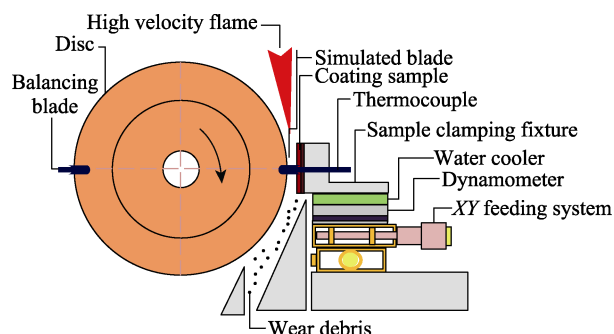


图 2 高温超高速可磨耗试验机结构
Fig.2 Structure of abrasion testing machine with high-temperature and high-velocity

碰磨试验分为 2 个步骤: 第 1 步, 通过电机带动转子系统高速旋转, 让转速稳定在给定的试验参数下; 第 2 步, 启动微进给系统, 按照设定的进给率向叶片靠近, 实时监测进给深度, 当进给深度达到预设值时, 进给系统退回到原位, 碰磨试验结束。碰磨试验中硅铝聚苯酯涂层材料采用大气等离子喷涂工艺^[24], 基底为镍铝合金粉末, 面层为铝硅/聚酯复合粉末。增压级转子叶片使用钛合金 TC4 材料。

针对在不同碰磨试验条件下获得的磨削物, 一方面利用 Quanta FEG250 型场发射扫描电子显微镜(配能谱仪)对磨削物的形貌、尺寸、成分进行表征, 结合试验数据分析碰磨机理; 另一方面, 利用气相色谱-质谱联用仪(Py-GC-MS)对磨削物开展热分解试验, 探索尺寸效应对铝硅聚苯酯颗粒热分解温度的影响, 并获得不同碰磨条件下磨削物的热分解温度及热分解气体。

2 结果与讨论

2.1 磨削物形貌表征

6 组碰磨试验下磨削物形貌及尺寸规律分别见图 3、图 4。从图 3 和图 4 中可以看出, 不同的碰磨条件下, 磨削物的尺寸有较大差异。在线速度基本一致的条件下, 进给率越高, 颗粒尺寸越大; 在进给率基本一致的条件下, 线速度越高, 颗粒尺寸越小。其中, 高转速(183 m/s)、低进给率(28 $\mu\text{m}/\text{s}$)条件下, 磨削物颗粒的平均尺寸约为 30.8 μm ; 高转速(183 m/s)、高进给率(257 $\mu\text{m}/\text{s}$)条件下, 磨削物颗粒的平均尺寸约为 74 μm ; 低转速(52 m/s)、低进给率(28 $\mu\text{m}/\text{s}$)条件下, 磨削物颗粒的平均尺寸约为 101.8 μm ; 低转速(52 m/s)、高进给率(257 $\mu\text{m}/\text{s}$)条件下, 磨削物颗粒的平均尺寸约为 119.4 μm 。

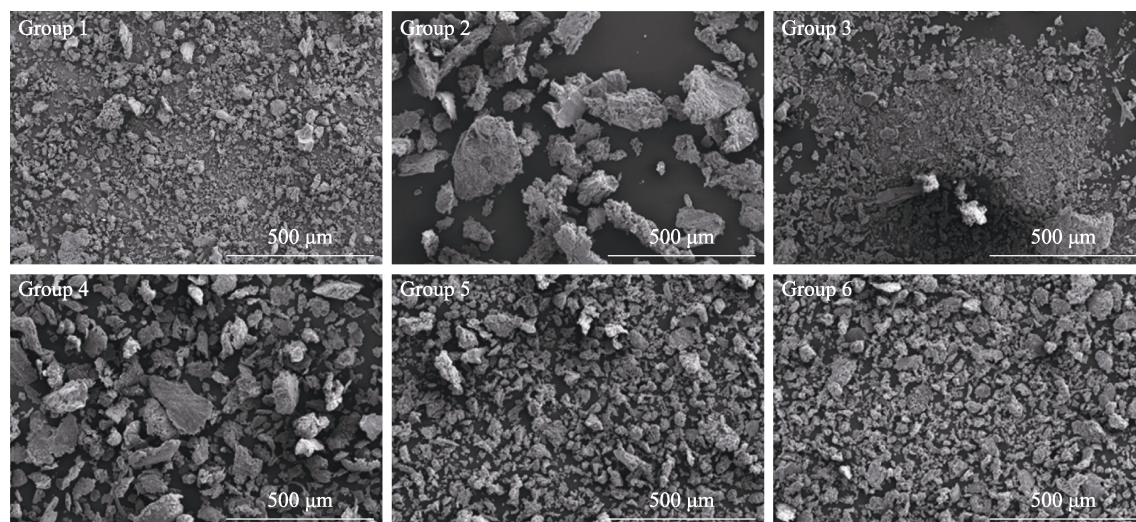


图 3 不同碰磨条件下获得的磨削物 SEM 形貌
Fig.3 The SEM micrographs of rubbing powder obtained under different rubbing conditions

在试验中还发现在高转速、低进给率下,磨削物颗粒中存在较多质地疏松、黏连状结构。以第3组碰磨条件(线速度 183 m/s, 进给率 28 $\mu\text{m/s}$)为例,磨

削物的形貌及能谱图见图5,其中氧元素的质量分数为 21.91%,远高于其他5组磨削物的氧含量。试验中测得的摩擦表面温度最高可以达到 202 $^{\circ}\text{C}$ 。

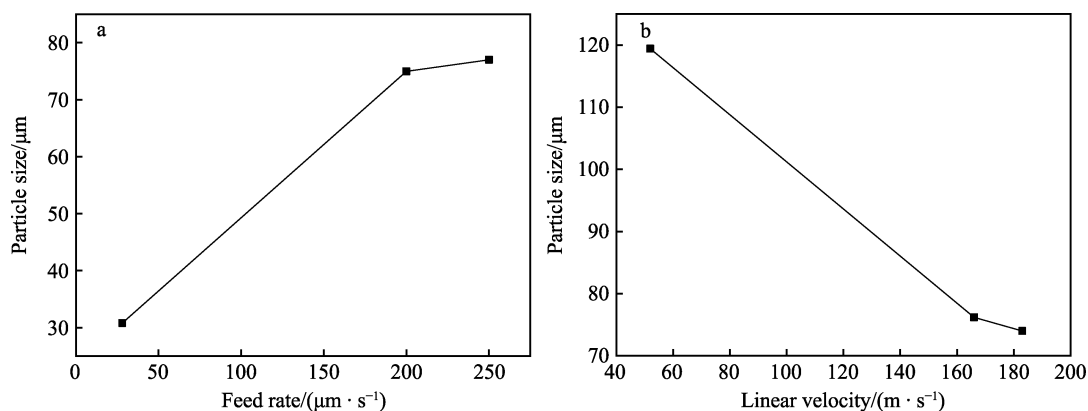


图4 不同进给率(a)和线速度(b)下磨削物的颗粒大小

Fig.4 Particle sizes of rubbings under different feed rate (a) and linear speed (b)

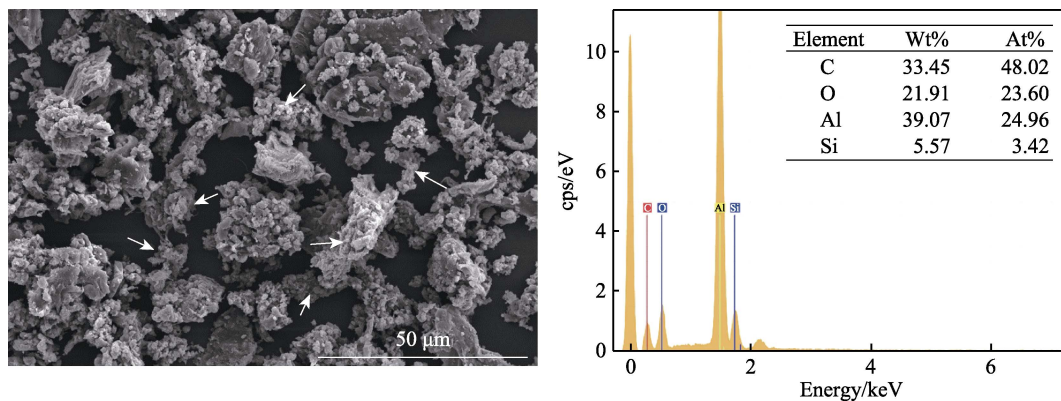


图5 高线速度、低进给率下磨削物的典型特征

Fig.5 Typical characteristics of rubbing powder at high speed and low feed rate

2.2 涂层 IDR 值表征

IDR 值是目前评价涂层可磨耗性能的主要量化指标之一^[20,25],当以磨损为主时, IDR 为正值;当涂层材料与叶片有黏附时, IDR 为负值。IDR 的绝对值越小说明涂层的可磨耗性能越好。IDR 值的计算公式如下:

$$IDR = \frac{\Delta h}{D} \quad (1)$$

式中: Δh 为试验前叶片高度与试验后叶片高度之差; D 为涂层刮痕的深度。表5计算了6组碰磨条件下涂层的 IDR 值,可以看出第3组涂层的 IDR 值最大,其次是第6组。显示出在高转速、低进给率下涂层更容易向叶尖转移,涂层的可磨耗性最差。

2.3 磨削物热分解特征

为了能进一步探究磨削物的尺寸、内部结构对其热分解特性的影响,基于在6组不同碰磨试验条件下收集到的磨削物,应用气相色谱-质谱连用仪开展热分解试验,结果见图6。

表5 不同碰磨工况下涂层的 IDR 值

Tab.5 IDR values of coatings under different rubbing conditions

Test grouping	Blade height variation/mm	Cutting depth/mm	IDR value
Group 1	0	3.78	0
Group 2	-0.06	2.78	0.021 6
Group 3	-0.11	2.87	0.038
Group 4	0	2.75	0
Group 5	0.01	2.79	0.003 5
Group 6	0.07	2.37	0.029 5

从图6中可以看到2个明显的离子峰,分别在 210 $^{\circ}\text{C}$ 以及 560 $^{\circ}\text{C}$ 附近,说明在这2个温度点铝硅聚苯酯会发生热分解。另外,从图6中可以看到在第2组与第4组碰磨条件下收集到的磨削物,仅在 560 $^{\circ}\text{C}$ 附近发生了热裂解,而第1组、第3组、第5组不仅在 560 $^{\circ}\text{C}$ 附近有明显的离子峰,在 210 $^{\circ}\text{C}$ 附近也有明显的热解现象。

表6直观地呈现了涂层在不同碰磨条件下磨削

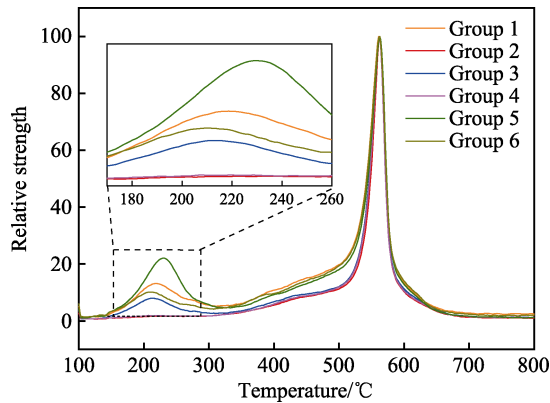


图 6 不同试验条件下获得的磨削物温谱图
Fig.6 Temperature spectrums of rubbing powder obtained under different test conditions

表 6 磨削物颗粒的尺寸与热裂解温度
Tab.6 Sizes and pyrolysis temperatures of rubbing powder

Test grouping	Rubbing particle size/ μm	IDR value	Pyrolysis temperature/ $^{\circ}\text{C}$
Group 1	74	0	218.6
Group 2	119.4	0.021 6	
Group 3	30.8	0.038	210
Group 4	101.8	0	
Group 5	76.17	0.003 5	230.4
Group 6	75	0.029 5	211

物的平均尺寸、IDR 值以及磨削物在 210 ℃ 附近的热分解温度。从表 6 中可以看出,碰磨行为会显著影响磨削物的热分解温度,当磨削物颗粒尺寸大于 100 μm 时,在该温度下不会发生热解反应;当磨削物颗粒尺寸小于 75 μm 时,在该温度下会发生热解反应。

磨削物受热分解后,产生的气体成分如表 7 所示。对照表 1 中给出的有害物质可以看出,铝硅聚苯

表 7 磨削物热分解气体成分
Tab.7 Pyrolytic compositions of rubbing powder

Compound	Molecular formula	CAS no.
Carbon dioxide	CO ₂	124-38-9
Benzene	C ₆ H ₆	71-43-2
Phenol	C ₆ H ₆ O	108-95-2
M-hydroxybenzaldehyde	C ₇ H ₆ O ₂	100-83-4
Toluene	C ₇ H ₈	108-88-3
P-hydroxytoluene	C ₇ H ₈ O	106-44-5
2-vinylnaphthalene	C ₁₂ H ₁₀	827-54-3
Dibenzofuran	C ₁₂ H ₈ O	132-64-9
Diphenyl ethers	C ₁₂ H ₁₀ O	101-84-8
2,2'-biphenyl	C ₁₂ H ₁₀ O ₂	1806-29-7
Xanthone	C ₁₃ H ₈ O ₂	90-47-1
Fluorene	C ₁₃ H ₁₀	86-73-7
4,4'-dihydroxybenzophenone	C ₁₃ H ₁₀ O ₃	611-99-4
2,2'-dihydroxybenzophenone	C ₁₃ H ₁₀ O ₃	835-11-0

酯在热解过程中释放出的苯、甲苯、二氧化碳等物质会污染发动机向客舱的引气。

2.4 机理分析

通常涂层的非金属相、金属相和空隙与叶尖之间的相互作用都会影响碰磨行为^[18,20,23],在线速度基本一定的情况下,由于低进给率下的碰磨主要是叶片的微峰对涂层进行切割,随着进给率的增大,碰磨会进一步加剧,部分硅铝相会脱落,造成涂层、叶片以及硅铝相三体磨粒磨损,因此磨削物的颗粒也会变大,这与试验中观察到的现象一致。在进给率基本一定的情况下,提高线速度会加快切削的频率,磨削物颗粒的尺寸就会越小,该规律与试验中观察到的规律也是一致的。

针对高转速、低进给率下磨削物的典型形貌,考虑到铝硅聚苯酯涂层的组织结构为铝硅颗粒和聚苯酯颗粒机械搭接而成,界面的结合性能较弱,在该碰磨条件下,受到热效应和冲击载荷的双重影响,铝硅相与聚苯酯相更容易分离。蜂窝状的聚苯酯组织结构会被破坏^[20]并发生部分氧化,导致磨屑物的质地从微观形貌上看较为松散,也更易黏着在叶尖上。这与试验中观察到的典型形貌(见图 5)以及计算的涂层 IDR 值(见表 5)相一致。

针对图 6,由于第 2 组、第 4 组的磨削物是在低转速的碰磨条件下产生的,一方面颗粒物的平均尺寸较大,约 100 μm ;另一方面由于该条件下的碰磨主要是叶片的微峰对涂层进行切割,涂层的结构未受到破坏,硬度较强,因此在 210 ℃ 附近未发生热解反应。第 3 组、第 6 组磨削物是在高转速、低进给率碰磨条件下产生的,该条件下颗粒的平均尺寸较小,且该碰磨条件下的热效应较为明显(试验测得的碰磨表面最高温度为 202 ℃),铝硅合金骨架中夹杂的聚苯酯团的蜂窝状结构受到破坏,导致磨削物在 210 ℃ 附近就有明显的热解反应。第 1 组、第 5 组磨削物颗粒的平均尺寸在 75 μm 附近,相比于高转速、低进给率的碰磨条件,该条件下涂层结构的破坏不严重(见表 5 中的 IDR 值),因此热裂解温度较高,在 224 ℃ 附近。

3 结论

1) 碰磨行为与磨削物尺寸特征的内在关系:线速度基本一致条件下,磨削物颗粒尺寸与进给率成正相关,即进给率越高,颗粒尺寸越大;涂层进给率基本一致条件下,磨削物颗粒尺寸与线速度成负相关,即线速度越高,颗粒尺寸越小。

2) 碰磨行为对磨削物结构的影响:在高线速度、低进给率的碰磨条件下,热效应明显(接触面最高温度可达 202 ℃),铝硅合金骨架中夹杂的聚苯酯团的蜂窝状组织结构有一定的塌陷并发生氧化,涂层的

IDR 值高,可磨耗性能差;在低线速度、低进给率的碰磨条件下,碰磨主要是叶片的微峰对涂层进行切割,涂层结构较为完整,涂层的 IDR 值低,可磨耗性能好。

3) 磨削物尺寸、内部结构对磨削物热分解温度的影响:铝硅聚苯酯磨削物在 210、560 °C 附近有明显的离子峰,其中 210 °C 附近的离子峰与磨削物的尺寸、结构密切相关。当磨削物颗粒尺寸大于 100 μm 时,由于铝硅聚苯酯结构未发生较大的变化,因此在该温度下不会发生热解反应;当磨削物颗粒尺寸小于 75 μm 时,由于碰磨行为破坏了涂层的内部结构,磨削物在该温度下会发生热裂解反应。

4) 磨削物热分解的气体成分:不同尺寸、不同内部结构的磨削物在 560 °C 附近均会发生热分解,产生苯、甲苯、二氧化碳等有害物质。由于发动机向客舱的引气口通常在高压压气机的后几级,壁面温度高达 600 °C 以上,磨削物在流道中流动极有可能落在热表面而发生热分解。因此,在发动机设计中要考虑铝硅聚苯酯涂层的使用对发动机引气造成的污染。

参考文献:

- [1] 胡延青,申秀丽.航空发动机叶尖径向间隙研究进展综述[J].航空发动机,2014,40(1):60-67.
HU Yan-qing, SHEN Xiu-li. Overview on Aeroengine Radial Tip Clearance[J]. Aeroengine, 2014, 40(1): 60-67.
- [2] 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):25-27,31.
ZHANG Shao-ping, SU Ting-ming, LUO Qiu-sheng, et al. Design Method for Compressor Radial Clearance of an Aero-Engine[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2011, 24(4): 25-27, 31.
- [3] 马文生,顾春伟.叶顶间隙对压气机性能的影响[J].动力工程,2007,27(6):863-867.
MA Wen-sheng, GU Chun-wei. Effect of Tip Clearance on Compressor Performance[J]. Journal of Power Engineering, 2007, 27(6): 863-867.
- [4] 张俊红,袁一,刘志远,等.封严涂层脱落对高压压气机性能影响的数值模拟[J].表面技术,2020,49(7):207-214,221.
ZHANG Jun-hong, YUAN Yi, LIU Zhi-yuan, et al. Numerical Simulation on High-Pressure Compressor Performance Affected by Fall-off of Seal Coating[J]. Surface Technology, 2020, 49(7): 207-214, 221.
- [5] LATTIME S, STEINETZ B. Turbine engine clearance control systems: Current practices and future directions[C]//38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Virginia: AIAA, 2002: 3790.
- [6] 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):21-22.
CHENG Xu-dong, GAO Zhong-bao, LI Qi-lian, et al. The Study on the Abradable Seal Coating Material Used in High Temperature[J]. Surface Technology, 2008, 37(4): 21-22.
- [7] 朱立群,刘孟兰,王建华,等.飞机发动机封严涂层的研究[J].航空学报,2000,21(S1):135-139.
ZHU Li-qun, LIU Meng-lan, WANG Jian-hua, et al. Study of the Abradable Seal Coating Used in Aircraft Engine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2000, 21(S1): 135-139.
- [8] DORFMAN M, ERNING U, MALLON J. Gas Turbines Use 'Abradable' Coatings for Clearance-Control Seals[J]. Sealing Technology, 2002, 2002(1): 7-8.
- [9] CHUPP R E, GHASRIPOOR F, TURNQUIST N A, et al. Advanced Seals for Industrial Turbine Applications: Dynamic Seal Development[J]. Journal of Propulsion and Power, 2002, 18(6): 1260-1266.
- [10] CCAR 33 R2, 航空发动机适航规定[S].
CCAR 33 R2, Aeroengine Airworthiness Regulations[S].
- [11] SAE ARP 4418, Procedure for Sampling and Measurement of Engine and APU Generated Contaminants in Bleed Air Supplies from Aircraft Engines[S].
- [12] ÖKSÜZ M, YLDRM H. Structure and Properties of AlSi/Polyester Coating[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2004, 93(5): 2437-2444.
- [13] ZHANG Na, SHEN Jie, XUAN Hai-jun, 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.
- [14] 赵丹,赵忠兴,杨景伟,等.封严涂层的性能评价及研究进展[J].航空科学技术,2011,22(4):17-20.
ZHAO Dan, ZHAO Zhong-xing, YANG Jing-wei, et al. Performance Evaluation and Research Progress of Seal Coatings[J]. Aeronautical Science & Technology, 2011, 22(4): 17-20.
- [15] 王月.铝硅封严涂层热稳失效机理分析[D].天津:天津大学,2009:31-40.
WANG Yue. Thermal Stability Failure Mechanism for Aluminum Silicon Sealing Coating[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009: 31-40.
- [16] 程涛涛,孙波,江云飞,等.不同造孔剂含量的铝硅聚苯酯粉末制备涂层性能研究[J].焊接技术,2014,43(6):23-26.
CHENG Tao-tao, SUN Bo, JIANG Yun-fei, et al. Study on the Properties of Coating Prepared by Al-Si-P Powder with Different Pore-Forming Agent Content[J]. Welding Technology, 2014, 43(6): 23-26.
- [17] 张俊红,鲁鑫,何振鹏,等.航空发动机可磨耗封严涂层技术研究及性能评价[J].材料工程,2016,44(4):94-109.
ZHANG Jun-hong, LU Xin, HE Zhen-peng, et al. Technique Application and Performance Evaluation for Abradable Coating in Aeroengine[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(4): 94-109.

(下转第 290 页)