

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20161127001

封严涂层可磨耗性测试用高温超高速可磨耗试验装置

张娜^{1,2}, 宣海军^{1,2}, 卢斌^{1,2}, 沈婕³, 洪伟荣¹

(1. 浙江大学 能源工程学院, 杭州 310027; 2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100083; 3. 北京矿冶研究总院 金属材料研究所, 北京 100160)

摘要: 为评价航空发动机气路密封中封严涂层材料在极端工况下的可磨耗性能, 自主研制了一套模拟涂层与转子部件之间摩擦磨损行为的高温超高速可磨耗试验装置。采用大功率交流电机经由增速设备驱动主轴和试验轮盘-叶片结构高速稳定运转; 采用高精度XY双向进给平台带动涂层试样进行径向和轴向进给, 实现与高速旋转叶片的碰磨; 通过超音速火焰加热涂层试样模拟其高温工况; 高速碰磨产生的碰磨力、冲击加速度、摩擦热分别通过三向测力仪、加速度传感器、红外测温仪进行测量, 并由高速数据采集系统进行高频采集、存储和分析。试验装置可实现叶尖线速度20~450 m/s、径向和轴向进给速率2~2 000 $\mu\text{m/s}$ 、最高加热温度1 200 $^{\circ}\text{C}$ 的磨耗试验, 试验过程稳定、结果可靠。

关键词: 可磨耗试验; 试验装置; 封严涂层; 可磨耗性; 航空发动机

中图分类号: V263.14; TG115.58

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2017)03-0139-09

High-temperature and High-speed Abadable Tester for Abradability Test of Seal Coatings

ZHANG Na^{1,2}, XUAN Hai-jun^{1,2}, LU Bin^{1,2}, SHEN Jie³, HONG Wei-rong¹

(1. College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027; 2. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-engine, Beijing 100083; 3. Institute of Metallic Materials, Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, Beijing 100160)

Abstract: To evaluate the abradability of gas seal coating materials under extreme conditions, a high-temperature and high-speed abradable tester was developed, which can be used to simulate the high-speed rubbing behavior between seal coatings and rotating components in aero-engines. The simulated disk and blade were able to run stably at high speed connected with a shaft driven by an AC motor with high power and a gear increaser. The feeding movement of the coating sample in radial and axial directions was completed by a XY feeding platform with high precision to simulate the rubbing interaction with the high-speed rotating blade. The coating sample was heated by a supersonic flame to simulate the high temperature environment. Rubbing forces, impact acceleration and friction heat were measured using the multicomponent dynamometer, acceleration sensor and infrared thermometer and the data was collected and analyzed through a high-speed data acquisition system. Test results show that abrasion tests can be conducted stably using this tester with reliable results when the blade tip velocity varied from 20 to 450 m/s, incursion rate from 2 to 2 000 $\mu\text{m/s}$, and heating temperature from RT to 1 200 $^{\circ}\text{C}$.

Keywords: abrasion test; test equipment; seal coating; abradability; aero-engine

收稿日期: 2016-11-27; 修回日期: 2017-04-27

网络出版日期: 2017-05-05 18:10; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20170505.1810.016.html>

通讯作者: 宣海军(1977—), 男(汉), 副教授, 博士; 研究方向: 航空发动机封严材料的可磨耗性能; E-mail: marine@zju.edu.cn

基金项目: 中央高校基本科研业务费(2013XZZX005); 国家高技术研究发展计划(863项目)(2012AA03A512)

Fund: Supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities (2013XZZX005) and National High Technology Research and Development Program of China (863 Project) (2012AA03A512)

引文格式: 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(3): 139-147.

ZHANG N, XUAN H J, LU B, et al. High-temperature and high-speed abradable tester for abradability test of seal coatings[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(3): 139-147.

0 引言

提高发动机效率、降低油耗已成为现代航空涡轮发动机技术发展的重要目标^[1-2]，转-静部件之间的径向间隙对发动机效率具有至关重要的影响。较小的气路密封间隙能有效降低高压气体的泄漏量、增大压比^[3-4]，但是转、静子的加工和安装误差、部件振动、热膨胀以及离心力导致的伸长变形等均可导致发动机转子与静子部件之间发生高速碰磨^[5]。应用可磨耗封严材料可以将转、静子之间的径向间隙降低到最小，同时在发生碰磨时保护转子叶片免受损伤和破坏^[6]。

可磨耗涂层是一种典型的封严材料，一般涂覆于机匣内壁，服役于高温高速工况环境^[7]，因此要求其具有良好的综合性能^[8]：既足够“硬”，保证其在高温高速气流冲蚀下正常工作；又足够“软”，在与转子部件发生碰磨时优先发生磨损^[9]。严酷的服役工况给封严涂层高速摩擦磨损行为的研究带来巨大的困难，目前主要以模拟试验为主，近几十年来逐渐发展起来的可磨耗试验机成为一种非常有效的试验手段^[10]。瑞士Sulzer Metco^[11]、英国Sheffield大学^[12]、加拿大国家研究院^[13]、德国MTU和KIT^[14]等研究单位均已成功研制了模拟工况的可磨耗试验机，并对高速摩擦磨损的特征和机理进行了研究^[15-17]。国内对封严涂层的试验研究早期主要以硬度测试、单摆冲击划痕法^[18]以及冲击刮削法^[19]等简单考核手段为主。近十年来国内中科院金属所^[20]、浙江大学和北京矿冶研究总院^[21]等单位逐渐开始研制小型可磨耗试验机，并应用试验设备进行了封严材料高速碰磨行为以及磨耗性能的试验研究^[22-27]。但是国内设备的试验参数与真实工况仍存在差异，尤其是叶尖线速度，试验能力有限。因此，研制一台能真正模拟封严涂层高温超高速工况的大型可磨耗试验机对我国封严涂层服役性能的评定以及高速摩擦磨损行为和机理的研究具有非常重要的意义。

在充分调研国外可磨耗测试设备的技术参数以及航空发动机典型封严材料工况后，浙江大学联合北京矿冶研究总院自主完成大型高温超高速可磨耗试验装置的研制。文中将详细介绍试验装置的技术指标、设计原理、关键技术及功能验证。

1 试验装置功能要求和技术指标

封严材料高温高速可磨耗性能试验装置的核

心功能是模拟航空涡轮发动机封严材料在高温高速极端工况下与转子部件之间的碰磨作用，通过分析磨损形貌、磨损质量、碰摩力、摩擦热等数据对封严材料/结构的可磨耗性能进行评价。真实发动机中发生的高速摩擦磨损作用通常是转子部件主动碰磨，而磨耗试验装置的设计采用相反思想，通过涂覆封严涂层的静止部件的主动进给实现与转子部件的高速碰磨。

封严涂层可磨耗试验装置的功能决定了其需要具备高温高速的技术指标，如表1所示，该指标与在型涡扇发动机的技术参数一致，满足我国封严涂层研制的实际需要。

表 1 可磨耗试验装置主要技术指标	
Table 1 Technical parameters of abradable tester	
Parameters	Values
The highest blade tip speed / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	450
The highest rotating speed / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	15 500
Max.output torque of spindle / ($\text{N} \cdot \text{m}$)	≥ 600
Incursion rate / ($\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	2-2 000
Heating temperature / $^{\circ}\text{C}$	RT-1 200

2 试验装置的结构和组成

2.1 设计原理

可磨耗试验装置的设计原理如图1，试验轮盘在动力系统驱动下实现高速旋转，模拟叶片安装在轮盘外缘，并在与其相对的180°位置安装配重叶片用于平衡模拟叶片的离心力。封严涂层试样安装在高精度双向进给平台上，可同时实现径向和轴向的精密进给。为模拟涂层的高温工况，采用超音速火焰加热涂层试样，并使用热电偶实时监测试样温度。使用三向测力仪实时测量高速碰摩力；使用非接触式红外测温仪测量试样表面温

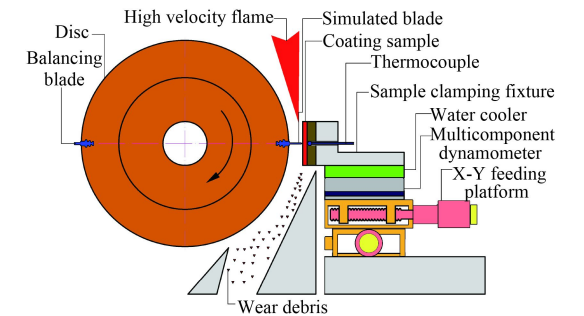


图 1 可磨耗试验装置设计原理图
Fig.1 Design diagram of abradable tester

度变化,定量考核高速碰磨时的摩擦热效应;试样背面安装加速度传感器测量碰磨瞬时的加速度响应。试验过程由计算机自动控制系统进行远程控制,在线监控和记录转速、叶尖线速度、主轴振动、试样进给速率、进给深度、加热温度等参数。

2.2 组成和结构

试验装置由动力、转子、进给、火焰加热、控制、高速数采、辅机、安全防护等8大系统组成,实物照片如图2所示。

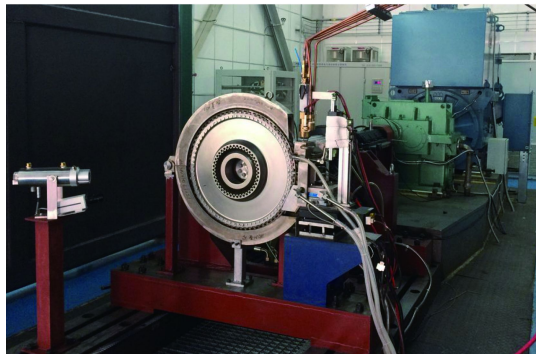


图2 高温超高速可磨耗试验装置实物图

Fig.2 Image of the high-temperature and high-speed abrasible tester

(1) 动力系统:包括1 250 kW交流变频电机及变频控制器、增速齿轮箱等,为转子系统提供目标转速、目标扭矩的动力输出。

(2) 转子系统:包括中间轴、主轴、试验轮盘-叶片结构、限扭保护联轴器、轴承支撑座等。为试验机核心组件,将动力稳定传递到轮盘-叶片部件,实现模拟叶片高速旋转。

(3) 控制系统:包括工控机、PLC、传感器、采集卡、自动控制和状态监测软件等。实现对试验过程的自动控制以及设备运行状态的监测。

(4) 进给系统:包括双向精密进给平台及控制器、试样夹持工装等。按照设定进给速率和过程完成涂层试样的进给运动。

(5) 火焰加热系统:包括超音速喷枪及控制器、热电偶、冷却保护装置。用于加热试样表面涂层,模拟高温服役工况。

(6) 高速数采系统:包括高速数据记录仪、三向测力仪、红外测温仪、加速度传感器等,完成对关键试验数据的高速采集、存储和分析。

(7) 辅机系统:包括润滑油站、冷水机、燃气系统等。为试验设备提供必要的润滑油、冷却水以及燃气介质等。

(8) 安全防护系统:包括安全防护罩、监控摄像系统、气体浓度检测装置等。为试验设备和操作人员提供安全防护,保证试验过程的安全性。

3 关键技术及实现方法

3.1 超高叶尖线速度

典型可磨耗试验设备采用的动力驱动方式主要有3种:空气涡轮^[28-29]、高速电主轴^[30-31]、电机+增速器^[32-33]。为克服轮盘-叶片结构超高速旋转时的强大风阻作用,达到450 m/s叶尖线速度设计要求,确定采用“大功率交流变频电机+增速齿轮箱”实现对转子系统的高速驱动,结构如图3所示。选用1 250 kW、额定转速2 980 r/min的交流变频电机作为动力源,经齿轮箱增速后可实现最高转速16 000 r/min、扭矩734 Nm的输出。试验轮盘采用悬臂方式安装在转子主轴上,通过增大主轴直径提高主轴刚度,减小轴系挠曲变形量,降低试验机运行的振动。主轴位置安装了电涡流位移传感器,用于对试验机运行过程中的振动进行实时测量。主轴支承采用滑动轴承和挤压油膜阻尼器,以紧凑的结构实现高速转子的稳定运行。采用中间轴和限扭联轴器,实现转子系统与动力系统之间的隔断和保护。

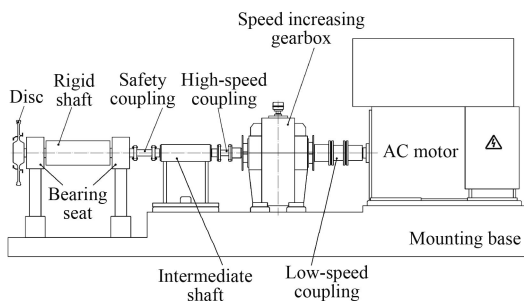


图3 高速转子系统结构

Fig.3 Structure of the high-speed rotor system

3.2 双向精密进给

转动叶片与涂层试样的碰磨作用强烈程度由进给速率反映。低进给速率用于模拟发动机中转子部件由于惯性和热载荷作用导致的碰磨,高进给速率模拟发动机在动态和突加载荷状态下的碰磨。结合目前国外已有设备的技术参数,确定试验装置的进给速率范围2~2 000 $\mu\text{m/s}$,控制精度为 $\pm 2 \mu\text{m/s}$ 。

选用“步进电机+双向精密进给平台+线性光栅尺”方式实现涂层试样在径向和轴向的精密进给

以及闭环反馈控制，其控制原理如图4所示。步进电机按照控制系统给定的脉冲频率转动，经联轴器将扭矩传递到高精度滚珠螺杆，从而拖动进给平台沿导轨进行前后滑动。进给平台前后位置安装的极限位置传感器可保证其在规定的行程范围内运动。平台运动的位移信号通过分辨率0.01 μm的线性光栅尺进行实时测量，并实时反馈给控制系统，从而实现闭环反馈控制。步进电机配置有细分驱动器，控制精度最高可达8 nm。

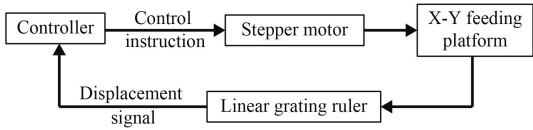


图 4 进给系统控制原理

Fig.4 Control principle of the feeding system

3.3 超音速火焰加热

封严涂层位于发动机风扇、压气机、涡轮机匣内壁面，使用温度可以高达1 350 ℃^[34]。考虑到典型封严涂层的工况温度范围和加热方案的可行性，确定试验设备的最高加热温度为1 200 ℃。

国内外可磨损试验机模拟高温工况条件，一般使用火焰加热和电加热两种方式。图5为文中研究用火焰加热的示意图。采用氧气和丙烷燃烧产生的高温火焰对涂层试样表面进行加热，燃烧过程中通入高速高压空气并利用拉瓦尔喷管原理对燃烧火焰进行加速，其焰流速度最高可达2 150 m/s。该方式具有加热温度高、升温快、功率可调的优点，同时降低了轮盘-叶片结构高速旋转对火焰形状和加热效果的影响。通过调节氧气和丙烷的气体流量控制火焰燃烧的温度，加热过程中可根据需求喷入适量冷却气体进行试样加热温度均匀性和稳定性的调节。

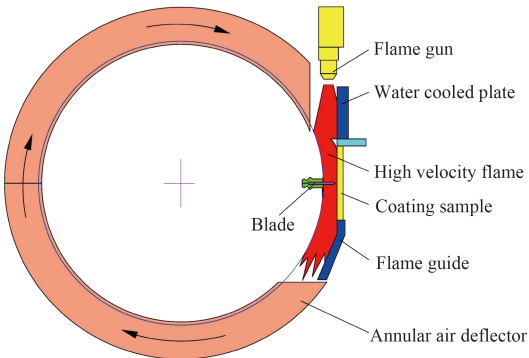


图 5 火焰加热示意图

Fig.5 Schematic diagram of flame heating

3.4 高速碰摩关键数据测试

高速碰摩力是反映叶片与涂层试样摩擦磨损作用大小的关键参数。叶片与平板涂层试样断续碰摩的作用时间极其短暂，因此要求测力系统具有动态测量、高灵敏度、高刚度、高固有频率的特点。试验机选用量程±5 kN、固有频率3.5 kHz的压电式三向测力计。压电式测力计受到叶片高速碰摩涂层试样产生的瞬时脉冲力作用后产生电荷信号，电荷放大器对其进行放大并转换成电压信号，最后通过高速数据采集系统进行高频采集，输出力值信号。数据采集系统结构如图6所示。

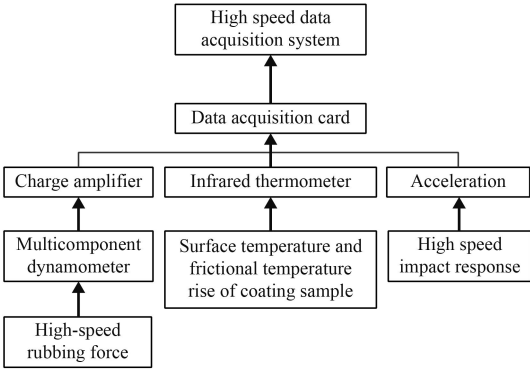


图 6 数据采集系统结构

Fig.6 Structure of the data acquisition system

3.5 模拟叶片及其装卡

航空发动机中常见的叶片与轮盘的连接方式主要有燕尾榫连接、圆柱销连接以及枞树形榫连接3种。试验机采用某型发动机高压涡轮盘，其叶片与轮盘通过枞树形榫头结构连接。加工安装尺寸相同的模拟榫头作为模拟叶片的装卡工具，其结构如图7所示。为降低试验复杂度以及叶片结构对试验结果的影响，采用简化的平直叶片设

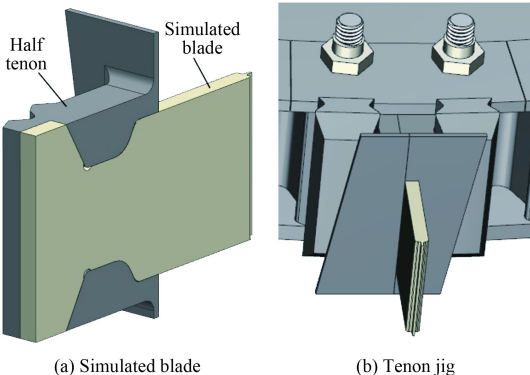


图 7 模拟叶片及其夹具

Fig.7 Simulated blade and its jig

计,结构简单且加工方便。根据试验需要,可以安装多个模拟叶片,但是应保证转子系统的动平衡精度。

3.6 加热温度测试

试验装置火焰加热系统通过设置不同的“氧气-丙烷”流量配方实现不同加热温度的试验要求,磨耗试验时采用非接触式红外测温仪对涂层试样表面温度进行测量,同时采用高温热电偶在涂层试样背面测试中心点温度,如图8所示。红外测温仪与涂层试样安装于同一水平高度,夹角为15°,从而保证其测量准确性。

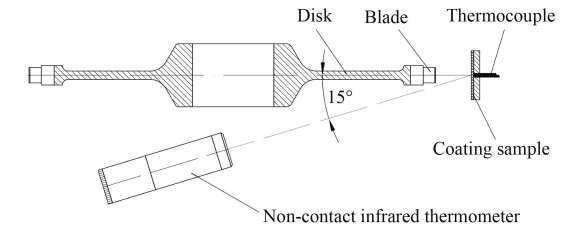


图 8 涂层试样测温系统示意图

Fig.8 Schematic diagram of the temperature measurement system for coating samples

正式试验前,为保证加热温度的准确和稳定性,需进行相同试验条件下的温度场标定,通过多个高温热电偶测试试样不同位置的加热温度,获得合适的燃气配方并掌握涂层试样的表面温度场分布。正式试验时只需采用相同的燃气配方即可保证涂层试样温度达到目标值。

4 性能测试和功能验证

4.1 试验过程和方法

试验前设定试验参数,包括叶尖线速度、进给速率、进给深度、加热温度等。开启辅机系统进行系统自检,然后启动动力系统,驱动转子逐渐升速,升速同时开启火焰加热系统。待叶尖线速度达到目标值后,喷入适量冷却空气微调加热温度,使涂层试样温度达到于目标温控范围并稳定。开启进给系统,到达进给零位后触发高速数据采集系统开始保存温度、碰摩力、加速度等数据,然后按设定剧本完成叶片与试样的高速碰磨,直至过程结束并快速退出。随后转子降速并停止火焰加热,降速为零后关闭辅机系统,结束试验。试验全程对振动、油温、油压等信号进行实时监测,出现异常显示报警信号或自动停机。

4.2 试验机运行功能测试

安装调试结束后,测试整机性能,试验曲线如图9所示。试验用轮盘-叶片的叶尖直径为682 mm,转速12 611 r/min时叶尖线速度达到450 m/s,此时的转速最大偏离量为±6 r/min;目标加热温度800 ℃时,温控精度±20 ℃;试验全过程主轴振动不超过15 μm;在2~2 000 μm/s范围内进给速率波动小于2 μm/s。

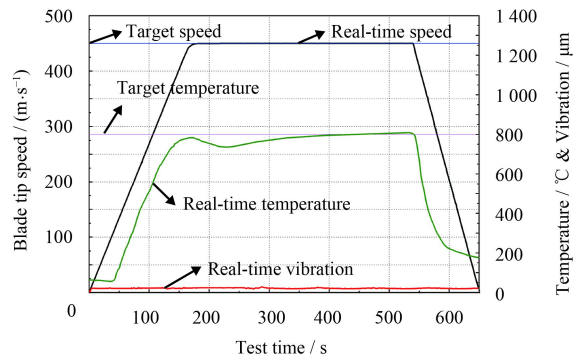


图 9 线速度和温度控制曲线

Fig.9 Test curves of blade tip speed and temperature

图10所示为加热试验时分别通过红外测温仪和热电偶测试到的涂层试样温度变化曲线,可见两曲线温度变化趋势相似,红外测温仪测得的数据明显高于热电偶,主要是因为两者测温位置不同。前者测试的是涂层试样表面温度,后者则是试样基板的温度,涂层的隔热作用、热量的衰减以及热电偶的响应时间导致了两者之间的温差。随着加热时间的延长,温差会逐渐减小,最终稳定在60 ℃左右。红外测温仪的测温范围300~1 400 ℃,因此在低于300 ℃时示数无变化。

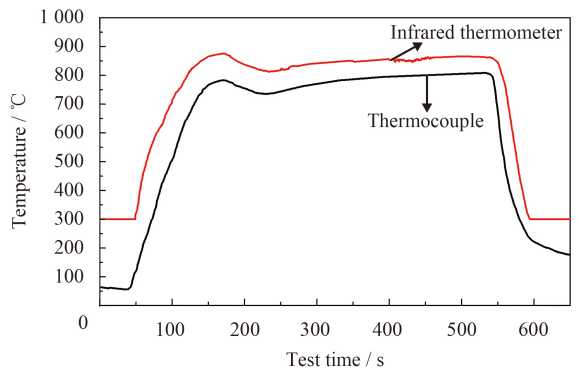


图 10 红外测温仪和热电偶测温曲线

Fig.10 Temperature curves of infrared thermometer and thermocouple

线速度350 m/s条件下进行涂层试样1 200 ℃的温度场标定, 试样不同位置的温度曲线如图11所示, 从左向右、从上至下依次将测点编号为1~9。试样中心点温度最高且稳定在1 200 ℃, 其次是上、下部中心点, 稳定后测温点温度波动小于30 ℃。

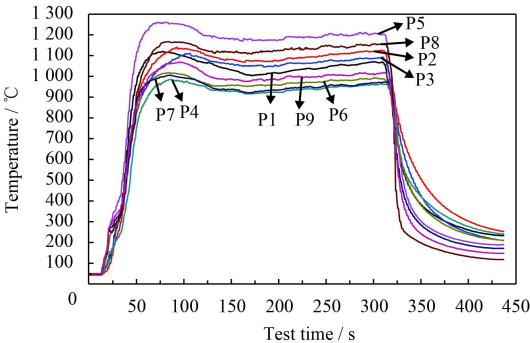


图 11 加热温度标定曲线

Fig.11 Calibration curves of heating temperature

4.3 磨耗试验验证

为检验试验机性能, 进行两种涂层材料的磨耗试验, 参数如表2所示, 结果如图12和图13所示。AlSi-BN表现出典型的犁沟形貌; ZrO₂的磨损深度明显小于目标深度, 主要原因是其硬度太高, 导致GH4169材料的模拟叶片叶尖发生了非常严重的磨损。

表 2 磨耗试验参数

Table 2 Test parameters of abrasion tests

Parameters	AlSi-BN	ZrO ₂
Blade tip speed /(m·s ⁻¹)	250	450
Incursion rate /(μm·s ⁻¹)	100	20
Incursion depth / μm	1 000	600
Heating temperature / ℃	RT	800

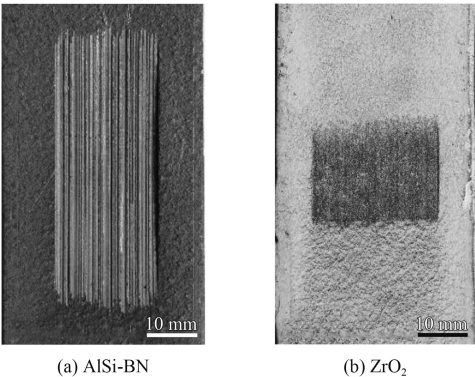


图 12 不同封严涂层磨耗形貌

Fig.12 Wear morphologies of different seal coatings

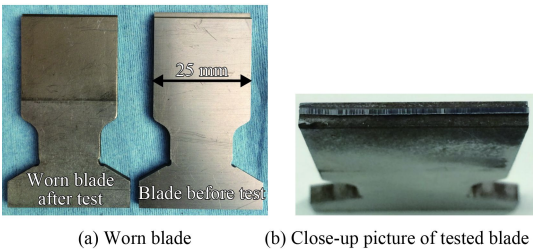


图 13 与ZrO₂涂层对磨后的叶片

Fig.13 Images of the blade after abrasion with ZrO₂

4.4 碰磨力和冲击加速度分析

进行了某涂层试样的磨耗试验, 叶尖线速度450 m/s, 进给速率50 μm/s, 进给深度1 000 μm, 历时20 s, 测得完整的碰磨力如图14所示。结果显示, 触发前1.5 s开始记录数据, 1.5 s时碰磨力明显增大, 此时叶尖与涂层试样接触并开始碰磨, 21.5 s时作用力逐渐开始衰减, 碰磨结束。冲击加速度曲线如图15所示, 开始碰磨后冲击强度逐渐增大, 随后冲击作用基本稳定, 碰磨结束后冲击作用逐渐减弱直至初始状态。碰磨过程及其前后的碰磨力和冲击加速度均被完整采集, 数据可靠。

图16为数个周期的碰磨力曲线, 可见碰磨力呈现典型的周期性变化规律, 变化周期与叶片旋

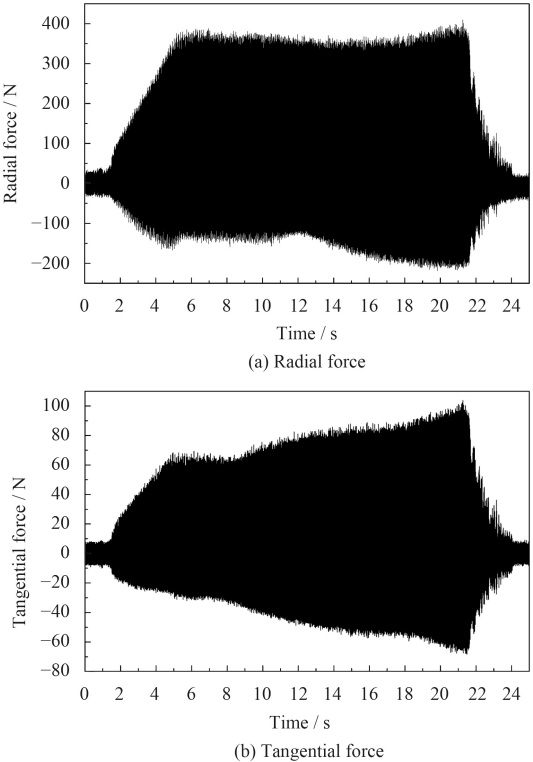


图 14 涂层试样的碰磨力曲线

Fig.14 Rubbing force curves of the coating samples

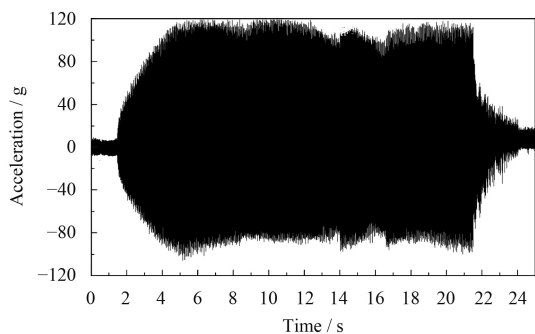


图 15 加速度变化曲线

Fig.15 Variation curve of acceleration

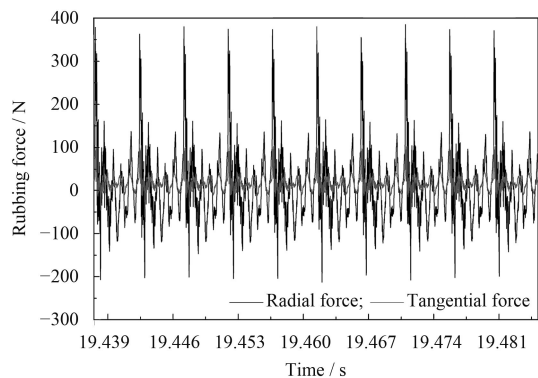


图 16 典型的数次磨擦周期力值曲线

Fig.16 Typical rubbing forces for several rubbing cycles

转一周的时间相同, 约为4.78 ms。碰磨瞬时作用力突增, 随后逐渐衰减, 突增瞬时峰值力可以反映本次碰磨的冲击作用大小。

通过整机性能测试, 验证了研制的可磨耗试验装置能够精确控制叶片线速度、进给速率、进给深度以及加热温度等试验参数, 实现了设定的技术指标和功能。经磨耗试验测试, 试验装置能够模拟极端工况下涂层和对偶件的摩擦磨损行为, 对高速碰磨过程中的径向和切向碰磨力、冲击加速度、表面温度等关键参数进行高频且实时的测量, 试验结果可用于封严涂层的可磨耗性能评定。

5 结 论

(1) 自主研制了能够模拟高速高温工况下封严涂层与转子部件之间摩擦磨损行为的试验装置, 并通过了整机性能测试。高温超高速可磨耗试验机能够完成叶尖线速度20~450 m/s、涂层试样进给速率2~2 000 $\mu\text{m/s}$ 、试样加热温度RT~1 200 $^{\circ}\text{C}$ 模拟工况条件下的封严涂层磨耗试验。

(2) 试验机成功解决了试验叶片超高线速度运

转、试样双向精密进给、高速旋转状态下的高温加热、模拟叶片装卡等关键技术问题, 提出了涂层加热温度标定的方法。

(3) 试验机能够对涂层试样关键数据进行高速采集, 包括碰摩力、冲击加速度、涂层表面温升, 并结合磨耗形貌分析对封严涂层的可磨耗性能进行评价。

(4) 试验装置的研制为极端工况下摩擦磨损行为的研究, 封严材料可磨耗性能的评定, 以及航空发动机气路封严材料的设计、选材、工艺优化、应用等提供了重要的试验手段和设备基础。

参考文献

- [1] DEMASI-MARCIN J T, GUPTA D K. Protective coatings in the gas turbine engine[J]. Surface & Coatings Technology, 1994, 68-69(12): 1-9.
- [2] GHASRIPOOR F, DORFMAN M, SCHMID R. Abradables improve gas turbine efficiency[J]. Materials World, 1997, 5(6): 328-330.
- [3] DALZELL W J, SANDERS S A, CRAWFORD G L, et al. Abradable seal with improved properties[J]. Sealing Technology, 2002, 2002(8): 14-15.
- [4] DORFMAN M, ERNING U, MALLON J. Gas turbines use 'abradable' coatings for clearance-control seal[J]. Sealing Technology, 2002, 2002(1): 7-8.
- [5] RATHMANN U, OLMES S, SIMEON A. Sealing technology: Rub test rig for abrasive/abradable systems[C]. Proceedings of ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea, and Air, Montreal, Canada, 2007, 5: 223-228.
- [6] DRASKOVICH B S, FRANI N E, JOSEPH S S, et al. Abrasive Tip/abradable shroud system and method for gas turbine compressor clearance control[P]. United States: 5704759. 1998-06-01.
- [7] 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): 92-95.
YIN C L, CHEN M Y, ZHAN J, et al. Development progress of abradable seal coatings[J]. Aeronautical manufacturing Technology, 2008(20): 92-95 (in Chinese).
- [8] 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.
CHEN X D, GAO Z B, LI Q L, et al. The study on the abradable seal coating material used in high temperature[J]. Surface Technology, 2008, 37(4): 21-24 (in Chinese).
- [9] 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.
WANG G, TENG B Q, WANG Z H, et al. The development of abradable coatings for aeroengine[J]. Thermal Spray

- Technology, 2012, 4(1): 20-23 (in Chinese).
- [10] 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 abrasability[J]. China Surface Engineering, 2009, 22(1): 12-18 (in Chinese).
- [11] BARDI U, GIOILLI C, SCRIVANI A, et al. Development and investigation on new composite and ceramic coatings as possible abrasable seals[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2008, 17(5/6): 805-811.
- [12] STRINGER J, MARSHALL M B. High speed wear testing of an abrasable coating[J]. Wear, 2012, 294-295(31): 257-263.
- [13] DADOUCHE A, CONLON M J, DMOCHOWSKI W, et al. Experimental evaluation of abrasable seal performance at high temperature[C]. Proceedings of ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea, and Air, 2008, 5: 143-150.
- [14] PYCHYNSKI T, HÖEFLER C, BAUER H J. Experimental study on the friction contact between a labyrinth seal fin and a honeycomb stator[C]. Proceedings of ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition, 2015, 5C: V05CT15A008.
- [15] FOIS N, WATSON M, STRINGER J, et al. An investigation of the relationship between wear and contact force for abrasable materials[J]. Proceedings of the Institution Mechanical Engineering, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2015, 229(2): 136-150.
- [16] BOUNAZEF M, GUESSASMA S, SAADI B A. The wear, deterioration and transformation phenomena of abrasable coating BN-SiAl-bonding organic element, caused by the friction between the blades and the turbine casing[J]. Material Letters, 2004, 58(27/28): 3375-3380.
- [17] CHUPP R E, LAU Y C, GHASPRIPOR F, et al. Development of higher temperature abrasable seals for gas turbine applications[C]. ASME Turbo Expo 2004: Power for Land, Sea, and Air, 2004, 4: 221-229.
- [18] 高祺洋, 刘凤伟, 李曙, 等. 单摆冲击划痕法对封严涂层耐磨性的评价[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(4): 385-391.
- GAO S Y, LIU S W, LI S, et al. Evaluation of wear resistance of abrasable coatings by a single-pass pendulum scratch method[J]. Tribology, 2010, 30(4): 385-391 (in Chinese).
- [19] 易茂中, 张先龙, 胡奈赛, 等. 冲击刮削法评价封严涂层的可磨耗性[J]. 航空学报, 1999, 20(3): 249-253.
- YI M Z, ZHANG X L, HU N S, et al. Abradability evaluation of seal coating by impact-scraping test machine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1999, 20(3): 249-253 (in Chinese).
- [20] 高祺洋, 刘阳, 段德莉, 等. 模拟封严涂层工况的刮擦式摩擦磨损试验机[J]. 中国表面工程, 2012, 25(4): 100-106.
- GAO S Y, LIU Y, DUAN D L, et al. A rubbing type of friction and wear tester simulating working condition of seal coatings[J]. China Surface Engineering, 2012, 25(4): 100-106 (in Chinese).
- [21] 刘振波, 宣海军, 沈婕, 等. 新型封严涂层高温高速磨损试验机的研制[J]. 航空发动机, 2014, 40(6): 58-62.
- LIU Z B, XUAN H J, SHEN J, et al. Research on new seal coating high temperature high speed abrasion test technology[J]. Aeroengine, 2014, 40(6): 58-62 (in Chinese).
- [22] XUE W H, GAO S Y, DUAN D L, et al. Material transfer behaviour between a Ti6Al4V blade and an aluminium hexagonal boron nitride abrasable coating during high-speed rubbing [J]. Wear, 2015, 322: 76-90.
- [23] 刘通, 于月光, 沈婕. 进给速率对AlSi/hBN封严涂层可磨耗性的影响[J]. 热喷涂技术, 2014, 6(3): 43-49.
- LIU T, YU Y G, SHEN J. The influence of incursion rate on abrasability of AlSi-hBN abrasable seal coating[J]. Thermal Spray Technology, 2014, 6(3): 43-49 (in Chinese).
- [24] 薛伟海, 高祺洋, 段德莉, 等. 刮擦线速度对TC4叶片与Ni-G封严涂层磨损行为的影响[J]. 摩擦学学报, 2013, 33(6): 614-621.
- XUE W H, GAO S Y, DUAN D L, et al. The effect of linear speed on the wear behavior of TC4 Blade and Ni-G seal coating[J]. Tribology, 2013, 33(6): 614-621 (in Chinese).
- [25] ZHANG N, SHEN J, XUAN H J, et al. Evaluation of an AlSi-polyester abrasable seal coating performance using high-temperature and high-velocity abrasion tests[J]. Proceedings of the Institution Mechanical Engineering, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2015, 230(7): 842-851.
- [26] 程旭莹, 刘建明, 章德铭, 等. 铝硅聚苯酯涂层热稳定性及与钛合金叶片对磨刮削可磨耗性研究[J]. 热喷涂技术, 2016, 8(1): 63-71.
- CHENG X Y, LIU J M, ZHANG D M, et al. Thermal stability of AlSi-Polyester coating and its abrasability rubbed to titanium alloy blade[J]. Thermal Spray Technology, 2014, 6(3): 43-49 (in Chinese).
- [27] 刘凤伟. 涡扇压气机封严涂层高速刮擦可刮削性判据的探讨[D]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 2010, 6.
- LIU S W. Exploration on criterion of abrasable of seal coating for turbofan engine compressor by high-speed rubbing test[D]. Shenyang: Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, 2010, 6 (in Chinese).
- [28] LAVERTY W F. Compressor seal rub energetics study[R]. United States: Pratt and Whitney Aircraft Group, 1978.
- [29] PADOVA C, BARTON J, DUNN M G, et al. Development of an experimental capability to produce controlled blade tip/shroud rubs at engine speed[J]. Journal of Turbomachinery, 2005, 127(4): 726-735.

[30] FOIS N, STRINGER J, MARSHALL M B. Adhesive transfer in aero-engine abradable linings contact[J]. Wear, 2013, 304(1/2): 202-210.

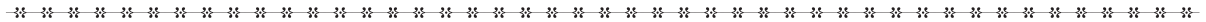
[31] 刘阳. 评价封严材料可刮削性能的试验设备与方法[D]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 2007, 4.
LIU Y. A study on testing rig and methodology for estimating the abradability of seal materials[D]. Shenyang: Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, 2007, 4 (in Chinese).

[32] FONG J, PEASE A, PLAINE T. Abradable seal test rig development and material analysis[R]. United States: California Polytechnic State University, 2010.

[33] SPORER D, WILSON S, GIOVANNETTI I, et al. On the potential of metal and ceramic based abradables in turbine seal applications[C]. Proceedings of the Thirty-sixth Turbomachinery Symposium, 2007: 79-86.

[34] 田晔, 张淑婷, 马江虹, 等. 可磨耗封严涂层发展及应用[J]. 有色金属: 冶炼部分, 2006(S1): 96-99.
TIAN Y, ZHANG S T, MA J H, et al. Development and application of abradable sealing coating[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2006(S1): 96-99 (in Chinese).

(责任编辑: 王文宇)



• 本刊讯 •

2017年全国堆焊再制造技术学术会议将在沈阳召开

中国焊接学会堆焊及表面工程专业委员会拟于2017年8月初在辽宁省沈阳市召开以“面向‘十三五’的先进堆焊技术与智能再制造技术”为主题的学术研讨会。会议针对经济新常态下堆焊领域面临的巨大挑战, 邀请钢铁、矿山、冶金、建材、水泥、电力、轧辊等行业中的知名专家, 就各行业的“十三五”发展规划以及堆焊技术在各行业中的应用进行专题报告, 以便于全国堆焊工作者能够深入把握各行业的发展动态, 引领堆焊技术在复合制造及再制造领域的发展趋势, 推动我国堆焊事业的繁荣发展。会议由中国机械工程学会焊接分会堆焊及表面工程专业委员会主办, 沈阳工业大学、机械产品再制造国家工程研究中心承办。

征文范围如下: 国内外堆焊技术的应用现状与发展趋势; 堆焊设备、材料与工艺; 复合堆焊再制造; 堆焊及表面工程技术对环境的影响和意义; 节能型堆焊技术、高能束堆焊技术、复合堆焊技术; 钢铁、矿山、建材、电力、阀门等行业中的堆焊技术与设备; 其它表面工程与再制造技术。

征文截止时间为2017年6月30日。投稿邮箱为: caizhihai2052@163.com或dhjbmngch@sina.com。

(本刊编辑部 供稿)