

模拟封严涂层工况的刮擦式摩擦磨损试验机^{*}

高禔洋, 刘 阳, 段德莉, 易 凡, 王 鹏, 侯思焱, 李 曙

(中国科学院金属研究所 专用材料与器件研究部, 沈阳 110016)

摘 要:自主研发了模拟高速高温工况专用于评价封严涂层/对偶件服役性能的刮擦式摩擦磨损试验机。通过电主轴直接驱动负载主轴的方式保证高速刮擦过程中,转动样品能够平稳的运转;采用精密进给系统使得试验过程中平动样品能够精确的向转动样品移动;通过辐照聚光加热设备可将样品加热到需要的温度,进而完成所需的高温试验;采用高频响、石英压电三向传感器能够准确的采集到试验过程中的刮擦力信息;通过自行开发的快速数据采集系统现实了对海量试验数据的准确的采集、存储和输出功能。经实车测试,该试验机的刮擦速度最高可达 160 m/s,最高加热温度可达 1 200 ℃,刮擦力的测量范围为 10~1 000 N,可同时记录刮擦力、刮擦温度、扭矩和转速等所需信息。

关键词:摩擦磨损;试验机;封严涂层;性能评价

中图分类号: TG115.58

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2012)04-0100-07

A Rubbing Type of Friction and Wear Tester Simulating Working Condition of Seal Coatings

GAO Si-yang, LIU Yang, DUAN De-li, YI Fan, WANG Peng, HOU Si-han, LI Shu

(Specialized Materials and Devices Division, Institute of metal research, Chinese Academic Sciences, Shenyang 110016)

Abstract: A rubbing type of friction and wear tester was developed, which can simulate the high rubbing speed and temperature working conditions of seal coatings, especially to evaluate seal coatings/counterparts serve performance. The rotation sample can run stably through an electrical spindle directly driving the load spindle. The precision-feed system can make the translational sample move to the rotation sample accurately. The sample can be heated to the wanted temperature so that the high-temperature experiment can be carried out by using the irradiation condenser heat device. The rubbing force during the experiment can be precisely measured by a quartz piezoelectric three-sensor of high frequency response. The mass data can be fast and accurately collected, stored and outputted using a rapid data acquisition system. The practical test shows that the highest rubbing speed and heating temperature of the tester was 160 m/s and 1 200 ℃, and the arrangement of rubbing force was 10~1 000 N. The tester can also record the information of rubbing force, rubbing temperature, torque and rotation speed at the same time during the rubbing process.

Key words: friction and wear; tester; seal coatings; performance evaluation

0 引 言

现代航空燃气涡轮发动机效率的提升很大程度上依赖于气路密封配副(封严涂层/对偶件)的合理设计和应用,其中封严涂层的服役性能具

有重要影响。目前已有文献对封严涂层在涡轮机中的服役部位、加工方法、摩擦磨损性能和经济效益等进行论述^[1-5]。对于涡轮机中的压气机而言,机匣内壁封严涂层与对偶件(叶片、篦齿)

收稿日期: 2012-05-10; 修回日期: 2012-06-07; 基金项目: * 国家自然科学基金面上项目(50675215)

作者简介: 高禔洋(1982—),男(汉),辽宁沈阳人,博士生;研究方向:特殊工况下材料的摩擦磨损行为

网络出版日期: 2012-07-04 08:37; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20120704.0837.001.html>

引文格式: 高禔洋,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.

的间隙越小,效率越高;但是由于存在热膨胀、惯性力、机匣变形、部件振动、加工及安装误差等因素,发动机运行时封严涂层与对偶件尖端之间的刮擦在所难免。这种刮擦通常发生在极高的转速下,刮擦速度可达 300~400 m/s,会造成对偶件的严重损伤,导致破坏性的故障^[6]。

显然,模拟涡轮机工况研究气路密封配副的摩擦磨损行为十分必要。从提高涡轮机效率和安全性角度考虑,希望在刮擦时封严涂层发生磨损而对偶件尽可能少磨损,这要求封严涂层具有良好的可刮削性;同时,高速气流及粉尘颗粒的存在,对封严涂层会产生冲刷作用,因此还要求封严涂层具有一定的抗冲蚀性^[7-8]。由于可刮削性和抗冲蚀性的综合要求,封严涂层在高速刮擦条件下的摩擦磨损行为研究相当复杂。

国际上对封严涂层的服役性能和摩擦磨损行为的研究,通常采用模拟工况的高速高温刮擦试验机,可研究犁削、微切削和材料转移等磨损机制^[9]。国内对于封严涂层服役性能的研究,通常采用硬度测试配以常规的摩擦磨损试验,目前还没有专门的用于高速高温刮擦条件下的摩擦磨损试验机。在相关的工程项目中,封严涂层的设计和制备多以引进和参考国外的技术为主,对其性能评价则不得不借助代价昂贵的台架考核,既难以控制试验参数和测量有效数据,也不易研究运行过程中的涂层行为规律和磨损机制,无法获得评价封严涂层可刮削性的有效判据,更不能

指导涂层的设计和工艺改进。因此,研制高速高温刮擦摩擦磨损试验机,提高我国特殊工况摩擦学研究水平和增强自主创新能力,无疑具有重要意义和应用价值。

通过调研航空涡轮机中封严涂层的实际工况,参考国内外同类设备及相关文献,自行研发了可模拟气路密封配副高速高温工况的刮擦式摩擦磨损试验机。文中对该试验机的设计、研制和功能进行详细介绍。

1 试验机的结构

1.1 设计框图

图 1 为刮擦式摩擦磨损试验机的设计框图。由高速电机驱动可承受大载荷冲击的高速转动系统,由数控滑台驱动可控制正、负位移和进给速率的精密平动系统,实现转动样品与平动样品之间模拟断续刮擦的试验方式。正压力的控制与调节采用控制位移量的方式实现,测得的切向力作为试验中计算摩擦系数的依据。高速主轴的电流、转动速度、扭矩、平动样品的位移量、进给率、作用在摩擦副的正压力、切向力等信号均通过传感器由高速测量系统采集,送计算机进行判断,数据存储和处理,并控制试验进程。高温加热与测温控制系统使试样表面达到并保持所要求的温度,即时的温度数据由计算机进行检测。所得测试结果通过研制的程序进行分析和处理。

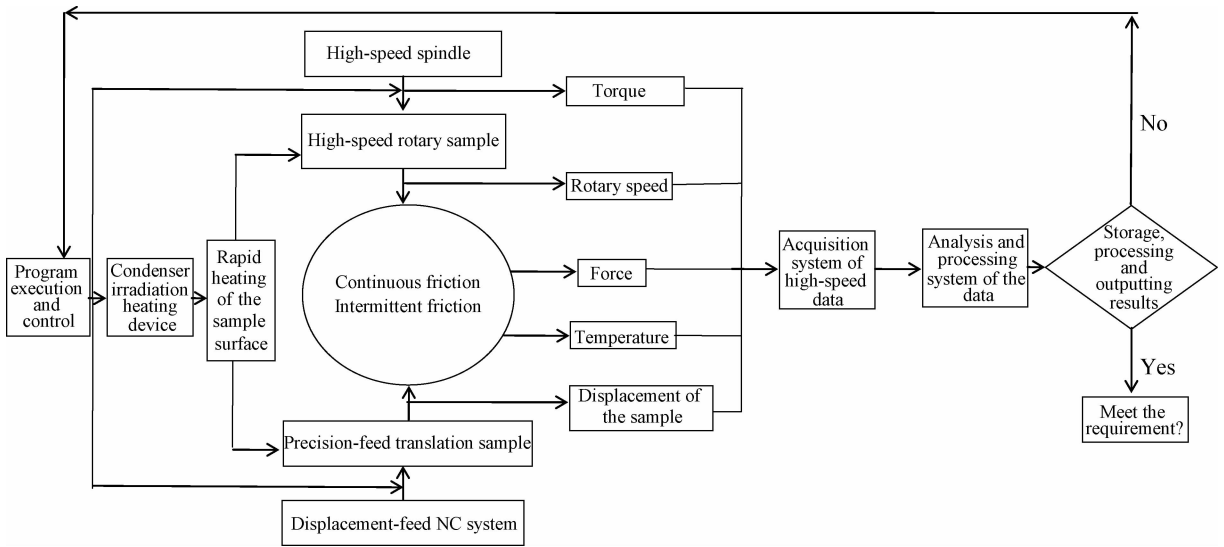
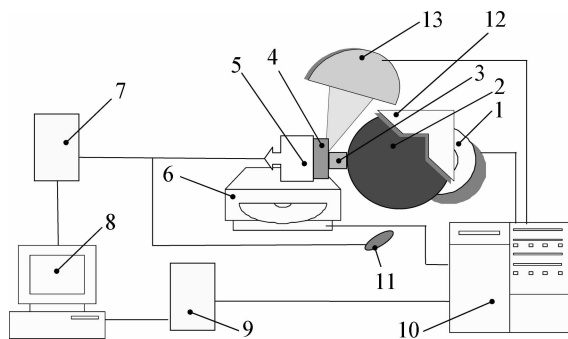


图 1 刮擦式摩擦磨损试验机的设计框图

Fig. 1 Design diagram of the rubbing type of friction and wear tester

1.2 组成及工作原理

图 2 是刮擦式摩擦磨损试验机的组成结构示意图,由 13 个部件组成的试验机可划分为 8 个系统。



1-Driving spindle, 2-High-speed rotary disk, 3-Rotary sample, 4-Radiation feed sample, 5-Insulation sample stage and force sensor, 6-Precision radial-feed numerical control units, 7-Data acquisition unit, 8-Computer, 9-Program execution and PLC controller, 10-Automatic control system, 11-Infrared rapid temperature measurement unit, 12-Wear debris and protective device, 13-Ir-radiation condenser heating system

图 2 刮擦式摩擦磨损试验机的结构示意图

Fig. 2 Structure schematic diagram of the rubbing type of friction and wear tester

(1) 高速转动及控制系统。包括:高速电主轴,主轴座,测速传感器和放大器,高速刀盘,变频控制器。

(2) 滑动台及精密进给数控系统。包括:步进电机,变速器,精密滚珠丝杠,滑台机座,精密滚动导轨,横向滑台,转向台,纵向滑台,锁紧螺栓,精密径向进给。

(3) 信号测试、采集系统。包括:高频测力单元——安装在样品台上的压电测力传感器,信号放大调理器,传感器的安装台座;位移测量单元——SGC-4 型光栅线位移传感器,数显表头及向计算机提供数字信号的 A/D 转换板;温度测量单元——红外高温仪,热电偶,温度变送器,信号采集放大单元, A/D 转换板;速度测量单元——测速传感器,放大器,脉冲信号采集板。

(4) 精密进给样品和高速转动样品系统。包括:精密进给样品——相对静止样品由背向、侧向挡块紧固后安装在精密进给样品台上;高速转动样品——转动样品由高速转动刀盘,刚性紧固

块及紧固螺栓组成。

(5) 工控机、数据采集与处理系统。试验的数据采集与处理均由工控计算机完成——硬件部分包括:工控机,主机板,多路信号采集板,脉冲信号采集板,开关量控制板,显示器,端子板和机柜等;软件部分包括:终端控制、数据采集专用软件 and 数据分析处理软件。

(6) 电气自动控制系统。包括:自动控制电器柜和控制操作面板。

(7) 加热装置和循环水冷系统。包括:辐照成像加热单元——氙弧灯,椭球全反射聚光镜,冷却风扇,供电与控制电源;循环水冷却单元——水冷零件,水箱,循环水泵,控制阀门与管路等。

(8) 试验机台、安全防护及其他装置。包括:台架,台面,防振可调底脚,高速转动主轴安全防护罩,电磁屏蔽与接地零线,磨屑收集等。

该试验机的工作原理为:将转动样品(模拟叶片)3、平动样品(封严涂层)4 分别装卡在配有惯性轮的高速转动圆盘 2 和精密进给样品台 6 上;由数控驱动主轴 1 实现所要求的高速转动,精密的数控径向进给样品台 6 以设定的速率和位移量运动,两者的相对运动组合成所要求模拟的刮擦运动;通过测力、测速、测位移以及测量驱动电流变化的传感器或元件,快速得到试验所需的测试信号,经过高频数据采集系统 7 进行实时测量,其数据送给计算机 8;计算机对工作变量进行分析判断,与设定参数比较以控制试验的进行、中断或结束,执行指令由程序执行和控制单元 9 下达给自动控制系统 10。所有测试数据通过程序设定的方式进行分类和存储,采集过程结束即可进行处理和分析。

通过数据采集及处理系统测量并记录的高速刮擦过程中的刮擦力(法向力、切向力)、刮擦温度等再结合试验前后试样的质量变化、体积磨损等,可对封严涂层的可刮削性进行定性或半定量的评价;通过试验后续工作如磨痕形貌分析、能谱分析等可对封严涂层高速刮擦条件下的摩擦磨损行为进行机理性研究。图 3 为研制的刮擦式摩擦磨损试验机的实物照片。

2 技术难点及解决方案

2.1 转动样品的高速平稳运转

电动机的转速通常小于 3 000 r/min,在负载

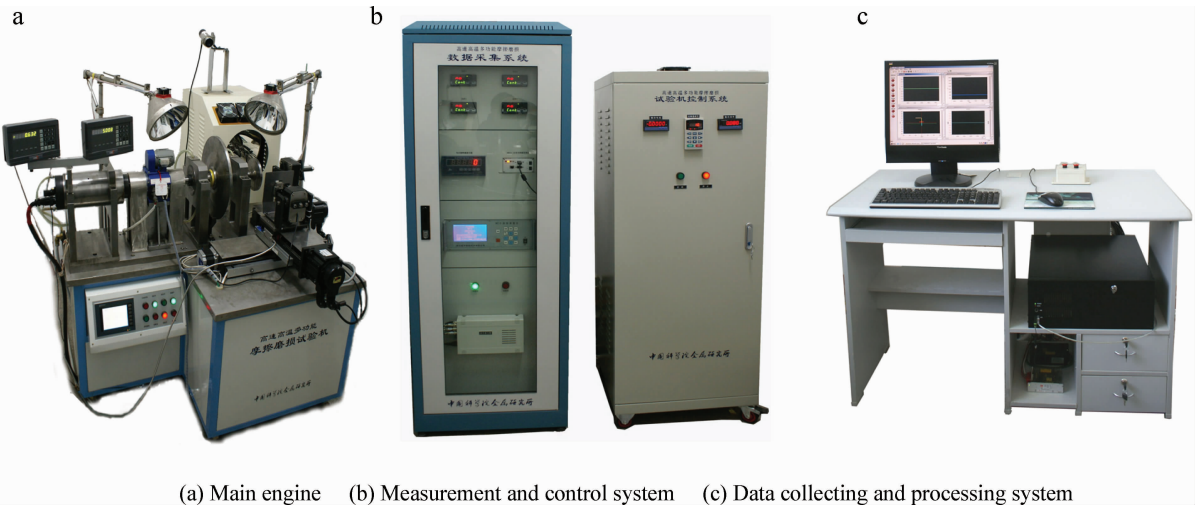


图 3 刮擦式摩擦磨损试验机实物照片

Fig. 3 Pictures of the rubbing type of friction and wear tester

较大转速超过 10 000 r/min 的高速情况下，一般采用传动装置、变速装置（如皮带、齿轮、联轴节等）的传统设计方式，存在结构复杂，体积庞大、制造维护困难以及转速失稳和能量损耗的缺陷。为克服缺陷，设计时选择了高频、高刚度的电主轴直接驱动负载主轴的方式，并配套变频控制调速系统。图 4 是电主轴直接驱动高速转动主轴的结构框图，电主轴是一种智能型功能部件，不但转速高、功率大，还有一系列调控主轴温升与振动等运行参数的功能，以确保其高速运转的可靠与安全性。它有如下特点：① 主轴由内装式电机直接驱动，省去了中间传动环节，具有结构紧凑、机械效率高、噪声低、振动小和精度高等特点；② 电主轴可在额定转速范围实现无级调速；③ 可实现精确的主轴定位；④ 由于不受中间传动环节的影响，主轴运行更平稳，使主轴轴承的寿命得到延长。通过扭矩传感器将采集到的转速、扭矩等信息传送给计算机进行存储、分析和处理。

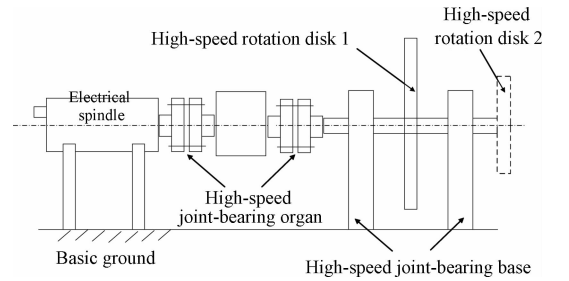


图 4 电主轴直接驱动高速转动主轴的结构图
Fig. 4 Structure schematic diagram of high-speed shaft driven by electric-shaft

图 5 是高速刮擦试验过程中实时监控的转速、扭矩信息，可以实时观察电机开启（阶段Ⅰ）、加速（阶段Ⅱ）、平稳运行（阶段Ⅲ，内含试验阶段）、电机关闭（阶段Ⅳ）过程中转速和扭矩的变化。由图 5 发现：① 采用电主轴驱动的转动主轴加速环节所需时间很短，从启动到 7 200 r/min 所需时间小于 15 s；② 转动主轴在高速下可以稳定运行，测得的转速比较稳定。

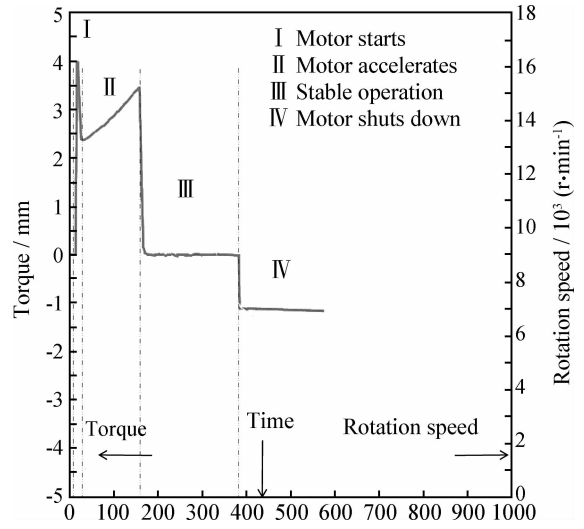


图 5 高速刮擦过程中实时监控的扭矩和转速
Fig. 5 Real-time information of rotary speed and torque during the rubbing test

2.2 样品进给的精密测控

区别于砝码、弹簧、液压加载和碰撞冲击加

载等传统摩擦磨损试验机,文中试验机的载荷是由转动部件与平动样品的径向进给共同决定的,平动样品的进给量和进给速率是需要严格控制的重要试验参数,其实际数值也是反映试验特征的重要数据,与摩擦副的摩擦磨损行为密切相关。根据调研,要求进给速率在 $2\sim3\,000\,\mu\text{m/s}$ 之间调控,承受冲击载荷的同时进给位移量的测试精度应达到 $2\,\mu\text{m}$ 。

试验机采用区别于加工机床的精密进给控制,避免试验过程中摩擦副因素对位移和速度的影响而改变进给参数,在精确控制这些参数的同时,要通过数据采集加以检测供试验分析。为此,设计了开环数控的精密进给系统,通过精密数控技术,由步进电动机驱动精密滚丝杠保证样品台的进给精度;用精细度达到 $1\,\mu\text{m}$ 的精密光栅尺测量试验过程中平动样品的实际位移,将测得的位移数据通过配套的光栅表传送给计算机,进行实时监控以保证平动样品进给量和进给速率的真实和准确。径向进给控制依据试验的要求,从启动到停止可以设定成正 / 反向,匀速 / 变速,连续 / 间断以及它们相互组合的多种形式,与转动样品的速度范围调整相配合,可以模拟各种接触形式和参数条件下的刮擦式试验。图 6 是刮擦试验过程中记录的位移曲线,可以看到:① 精密进给系统可以很好地实现匀加速、匀减速、保持、变速等运动;② 定位精确,以零位为例,误差小于 5% 。

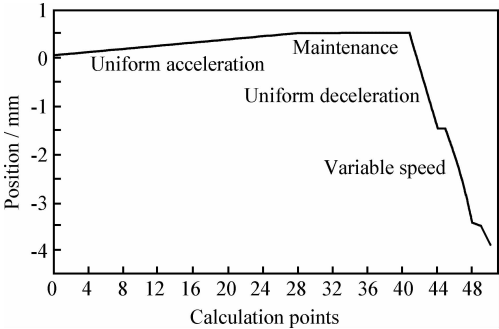


图 6 高速刮擦过程中的位移记录曲线
Fig. 6 Displacement curve recorded during the high-speed rubbing test

2.3 样品加热和测温

对于服役于燃气涡轮热段(hot section)部位的封严涂层,其工作温度通常为 $800\sim900\,^{\circ}\text{C}$,最高甚至超过了 $1\,200\,^{\circ}\text{C}$,因此要想研究高温封严

涂层的摩擦磨损性能并对其进行工程评价,必须对封严涂层加热升温。国际上常用的加温方式为火焰加热,此外还有激光加热、辐照聚光加热等方法。文中选定辐照聚光加热方式,其加热原理示意图见图 7。加热过程中采用数字红外测温仪进行样品表面测温并输入计算机,实现对样品表面温度的实时监控。

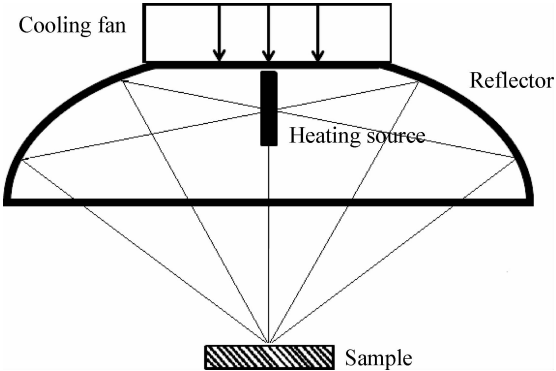


图 7 辐照聚光加热示意图
Fig. 7 Schematic diagram of radiation focusing lights heating

2.4 快速精密测量切向力和法向力

由于高速刮擦试验的特殊性,即极短的刮擦时间(每次刮擦时的接触时间约为 $10^{-4}\,\text{s}$ 量级),以及断续、多次刮擦(一次试验过程中刮擦次数通常为千次以上),试验过程中的刮擦力、摩擦系数等信息不易获取;而上述信息又是研究材料摩擦磨损行为时不可或缺的参数,因此获取高速刮擦过程中的力信息是刮擦式试验机的一个重要的性能指标。

采用高频响、石英压电晶体型三向测力传感器,配套适调器和高速数据采集系统进行测量。该系统测试的最大动态力分别为切向力 $4.45\,\text{kN}$,正压力 $5.87\,\text{kN}$,非线性误差的精度达到 $\leq 1\%$ 量程。

2.5 计算机海量数据快速采集

计算机快速数据采集系统的主要功能是实现对各种测试信号的同时采集、存储和处理,不会出现因通道采集的先后而出现“数据错配”的现象^[10],通过编制的程序进行数据分析和试验结果的输出。在测温 and 样品的径向精密测量方面,选定的红外测温仪和高精度光栅尺都设有独立的通信接口可供计算机进行数据采集,因此仅需要编制程序,建立通信协议以控制采集和数据处理的过程。

为实现海量数据的高速采集,采取一种基于 CPLD 和嵌入式系统的高速数据采集方法,其系统结构如图 8。该系统由高速 ADC、CPLD、FIFO 和嵌入式系统组成,输入信号经过增益满足 ADC 芯片的要求。第一级 FIFO 数据缓冲电路用于存储 A/D 转换后的数据。CPLD 电路用于已完成数据对应累加。第二级 FIFO 数据缓冲电路用于存放前一次数据的累加结果,并在进行后一次累加的时候由 CPLD 读取其中的数据与 AD 采样的数据累加。CPLD 完成累加后再把数据送给第二级数据缓冲电路保存。在嵌入式系统中选用了 TOP-5612H 海量测试系统和 UBOX-20016SE 扫描数据采集系统,结合本项目的特殊要求进行了二次开发。

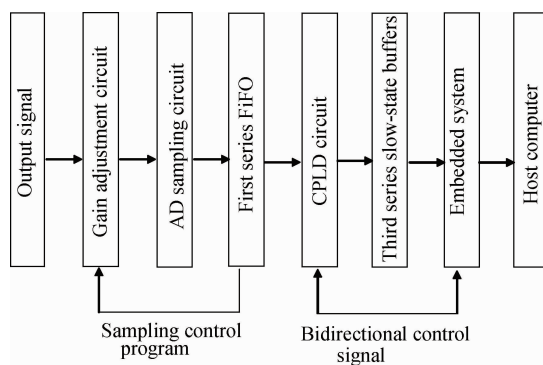


图 8 数据快速采集系统的结构

Fig. 8 Structure of data rapid collecting system

3 试验机的指标

经过整机测试与调整,研制的刮擦式摩擦磨损试验机可以实现的设备参数指标如下:① 采用断续刮擦的摩擦副接触与运动方式;② 高速转动样品的转数 300~15 000 r/min;③ 相对运动刮擦速度 3~160 m/s;④ 试样加热温度为室温至 1 200 ℃;⑤ 样品台的进给速度 0.002~5 mm/s;⑥ 法向和切向力测量范围 10~000 N;⑦ 试验参数的快速采集频响 500 kHz;⑧ 使用计算机进行数据采集、处理和分析。

运行中对摩擦副的正压力、切向力(刮擦力)、功率损耗、试样温度等参数进行实时测量,数据经计算机处理和分析,得到的结果可用于研究试验对象的摩擦磨损行为。

4 试验机的功能

刮擦式摩擦磨损试验机主要的功能就是模

拟封严涂层工况,研究在高速刮擦条件下涂层的摩擦磨损特性及其可刮削性进行工程评价。本试验机可以精确控制刮擦速度、入侵速率、刮擦深度以及加热温度等,通过改变实验参数以模拟不同工况。其具体功能简介如下:

- (1) 固定入侵速率,通过变化刮擦速度可以研究刮擦速度对封严涂层摩擦磨损行为的影响;
- (2) 固定刮擦速度,通过变化入侵速率可以研究入侵速率对封严涂层摩擦磨损行为的影响;
- (3) 由于高速刮擦造成的高温高热会对叶尖材料造成严重的损伤,而高速刮擦过程中的摩擦热是一个累积的过程,因此可以在固定刮擦速度和入侵速率的条件下,变化刮擦深度,以此来研究热效应对封严涂层摩擦磨损行为影响;

- (4) 涡轮机中封严涂层的服役温度范围从室温到 1 000 ℃,甚至更高,试验机可通过辐射加热系统将封严涂层升温进行高温高速刮擦实验,研究不同温度下封严涂层的摩擦磨损行为。

通过试验机参数的配合可以模拟不同的工况条件。例如:高刮擦速度和低入侵速率的组合可以模拟叶片或篦齿由于热膨胀造成的低速侵入封严涂层的过程,此时叶尖每刮擦一次入侵量很小;低刮擦速度和高入侵速率的组合则代表由于硬着陆或机械加载等原因造成的高能量刮擦,此时叶尖每刮擦一次入侵量极大;而适中的刮擦速度和入侵速率的组合则可模拟涡轮机常规运行条件下叶片对封严涂层的刮擦情况。

通过试验机程序设定进行分段式刮擦,可以模拟叶尖与封严涂层的实际配副情形。例如:首先让叶尖以高刮擦速度 V_{t1} 和低入侵速率 V_{inc1} 对封严涂层进行刮擦,侵入涂层 H_1 深,此时模拟叶尖由于热膨胀对封严涂层的慢速侵入;达到 H_1 深时暂停侵入,将叶尖从 V_{t1} 降低为中刮擦速度 V_{t2} ,再让叶尖以 V_{t2} 和中入侵速率 V_{inc2} 侵入涂层 H_2 深,此时模拟涡轮机正常运行状态;最后,叶尖以低刮擦速度 V_{t3} 和高入侵速率 V_{inc3} 侵入涂层 H_3 深,模拟由于硬着陆或机械加载时叶尖对涂层的刮擦。

5 结 语

气路密封配副的设计及其使用情况,很大程度上决定了航空燃气涡轮机的效率。目前我国正开展大飞机的研制,其中,封严材料的摩擦磨

损行为研究和服役性能评价必然成为一大难点及热点,但是至今尚无标准的试验方法和有效的评价判据,很有必要研发一种能够模拟封严涂层服役工况的试验机,开展封严涂层性能评价研究。自主研制的刮擦式摩擦磨损试验机,解决了转动样品的平稳运行以及平动样品的精确进给问题,可将样品最高加热至 1 200 ℃ 的高温,能够精确地对试验过程中的刮擦力、刮擦界面温度等重要信息进行测量,并解决了海量信息存储过程中的错配等问题,因此能够模拟封严涂层/对偶件的高速高温刮擦服役工况,对封严涂层的摩擦磨损行为进行研究。工作不仅对于发展特殊工况摩擦学和新型复合涂层的研究具有一定的理论意义,而且对于涡轮发动机气路密封配副的优选、封严涂层的设计、制备工艺改进和安全运行条件等具有一定的指导作用,对于促进航空工业发展具有现实工程意义。

参考文献

[1] Bill R C, Ludwig L P. Wear of seal materials used in aircraft propulsion systems [J]. Wear, 1980, 59(1): 165-89.

[2] Ludwig L P, Bill R C. Gas path sealing in turbine engines [J]. Tribology Transactions, 1980, 23(1): 1-22.

[3] Novinski E, Harrington J, Klein J. Modified zirconia abradable seal coating for high temperature gas turbine applications [J]. Thin Solid Films, 1982, 95(3): 255-263.

[4] Schmid R K, Ghasripoor F, Dorfman M, et al. An overview of compressor abradables [J]. ASM International, 2000(1): 1087-93.

[5] 刘凤伟,李曙,刘阳. 封严涂层及其可刮削性的评价 [J]. 中国表面工程, 2009, 22(1): 12-18.

[6] Bill R C, Ludwig L P. Friction and wear of several compressor gas path seal materials [R]. NASA - Technical, 1977: 1128.

[7] 戎磊,黄坚,李铸国. 激光熔覆 WC 颗粒增强 Ni 基合金涂层的组织与性能 [J]. 中国表面工程, 2010, 23(6): 40-44.

[8] 张光华,李曙,刘阳. HVOF 热喷 WC-10Co-4Cr 涂层的砂浆冲蚀行 [J]. 中国表面工程, 2007, 20(4): 16-22.

[9] Liang Y N, Li S Z, Li S. Evaluation of abrasability of porous seal materials in single-pendulum scratch device [J]. Wear, 1994, 177: 166-173.

[10] 刘军海,陆明珠,苏启生. 一种多通道数据采集卡 [J]. 电子与自动化, 1995(5): 33-35.

作者地址: 辽宁省沈阳市沈河区文化路 72 号 110016
中国科学院金属研究所
Tel: (024) 2397 1775
E-mail: sygao@imr. ac. cn

• 本刊理事单位介绍 •

上海出入境检验检疫局工业品与原材料检测技术中心

上海出入境检验检疫局工业品与原材料检测技术中心(简称“原材料中心”)由原上海进出口商品检验局化矿金、纺织和纸包等实验室组成,经事业单位法人登记,能独立承担第三方公正检验,对外开展业务活动。2002 年 8 月原材料中心获得认监委及中国合格评定国家认可委二合一认可,2009 年获中国质量认证中心质量管理体系认证证书。

原材料中心内设 2 个中心和 12 个科室,接受上海检验检疫局的委托,承担进出口石油及石化产品、有机化学品、无机化学品、矿产品、金属材料及其制品、工程材料、纺织材料、纺织品、轻工产品、食品接触材料、一次性卫生用品、纸张纸浆、包装等的实验室检测和检验工作,承担危险品分类鉴定与评估工作,以及与上述检测、检验、鉴定和评估相关的其他技术工作。与此同时,中心提供有关商品的检验服务及相关的技术咨询服务,并承担国家质量监督检验检疫总局指定的有关复验和仲裁检验任务。

2011 年度原材料中心积极开展科研工作,加强对涉及安全卫生环保和健康等商品和项目技术开发研究,完成各类科研项目 14 项,其中国家局项目 2 项,上海局课题 12 项。完成各类标准制订 28 项,其中国家标准 2 项,SN 标准 14 项,SHCIQ 标准 12 项;发表各类技术论文 79 篇,其中 SCI/EI 期刊论文 13 篇,中文核心期刊有 29 篇,ISTP 会议论文 1 篇,其他论文 36 篇。