

高温超高速试验系统及封严涂层评价体系的研究进展

孙建刚, 马春春, 王会

- (1. 北京矿冶科技集团有限公司, 北京 100160;
2. 北矿新材科技有限公司, 北京 102206;
3. 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)

摘要: 封严涂层应用于飞机发动机转动部件与机匣之间, 能够有效提高发动机效率、降低油耗, 同时对叶片起到保护作用。可磨耗性为封严涂层的重要评价指标, 本文综述了国内外可用于封严涂层可磨耗性评价的相关设备及评价体系, 对比分析了转速、最高加热温度、试样进给速率等设备参数, 评述了涂层表面粗糙度、叶片磨损量、刮擦速度等检测评价方法, 并在此基础上对用于封严涂层可磨耗性的评价设备及体系的发展方向进行了展望。

关键词: 封严涂层; 可磨耗性; 评价体系

中图分类号: TG174.4 文献标识码: A 文章编号: 1674-7127 (2019) 06-0002-07

DOI 10.3969/j.issn.1674-7127.2019.02.002

Research Progress of High-Temperature and High-Speed Tester System and Seal Coating Evaluation System

Jiangang Sun, Chun Chun Ma, Hui Wang

- (1. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;
2. BGRIMM Advanced Materials Science & Technology Co., Ltd. Beijing 102206, China;
3. Beijing Engineering Technology Research Center of Surface Strengthening and Repairing of Industry Parts, Beijing 102206, China.)

Abstract: The seal coating is applied between the rotating parts of the aircraft engine and the casing, which can effectively improve engine efficiency, reduce fuel consumption, and protect the blades. Abrasiveness is an important evaluation index for sealing coatings. This paper reviews the related equipment and evaluation systems that can be used for the evaluation of the abrasion performance of seal coatings at home and abroad. The equipment parameters such as rotation speed, maximum heating temperature and sample feed rate were compared and analyzed. The surface roughness, blade wear amount and scratch speed were evaluated. Finally, the evaluation equipment and method development direction for the abrasion performance of the sealing coating is prospected.

Keywords: Sealing Coating; Abrasion performance; Evaluation system

0 引言

航空工业的迅速发展对航空发动机提出了越来越高的要求, 大推力、高效率、低油耗已成

为发动机设计和制造的总体标^[1]。研究发现, 涡轮发动机的转动部件与机匣的径向间隙大小对压气机、涡轮机的效率、功率和耗油率影响极大。可磨耗封严涂层作为牺牲型涂层应用于转动部件

与机匣之间,能够有效减小叶尖与机匣之间的间隙从而提高发动机效率、降低油耗,同时对叶片起到保护作用。美国航空航天局(NASA)研究表明,航空发动机各部位使用可磨耗封严涂层后效率可提高2%以上,油耗可降低2.5%以上^[2]。

表征航空发动机封严涂层的主要性能指标有:可磨耗性、抗冲蚀性、涂层与基体结合强度、抗热震性和化学稳定性等^[1]。其中,可磨耗性及抗冲蚀性是评价封严涂层的两个关键指标。同时,二者又相互矛盾、相互关联。国内外对封严涂层的可磨耗性进行了相关的研究。根据航空发动机实际工况,建立了各自的试验机及评价体系,但目前还未形成封严涂层可磨耗性统一的评价体系。

1 国外高速高温可磨耗试验机及封严涂层评价体系的研究进展

1.1 模拟台架试验机

德国MTU航空发动机公司^[3]是德国领先的公务飞机用高涵道比涡扇发动机部件和组件制造商,该公司研制的模拟工况涂层检测设备如图1所示。该设备近似于一个尺寸缩小的台架实验机。碰磨线速度最高可达500m/s,入侵速率1.5~3000 $\mu\text{m/s}$,试验机只能完成低温段的试验考核,机匣内壁涂层加热温度最高为600℃。

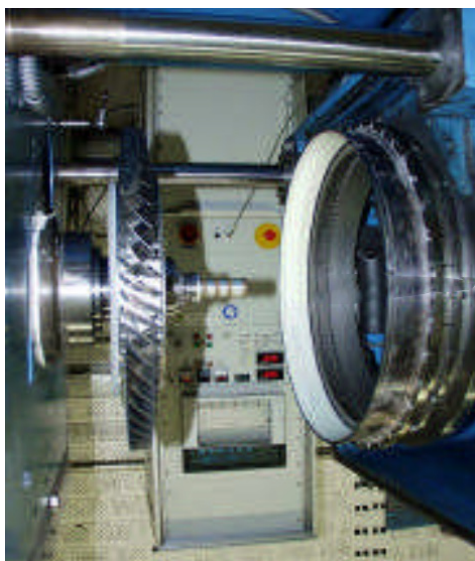


图1 MTU模拟工况涂层检测设备^[3]

Fig.1 MTU simulation condition coating detection equipment^[3]

美国NASA Lewis研究中心^[4]研制的模拟试验台架,如图2所示。可进行叶片和篦齿试验,其刮擦速度达320m/s,最小入侵速率25.4~254 $\mu\text{m/s}$,通过红外高温计实时检测刮擦温度,利用光学显微镜和电子显微镜进行磨屑的研究。通过该试验台架可检测如下参数:摩擦力、径向力、转子的温度、封严涂层的温度、转子部件及封严涂层的磨损体积、涂层式样表面的显微结构等。

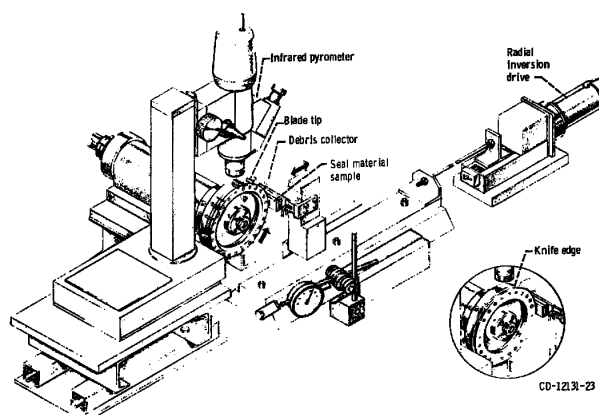


图2 美国NASA Lewis研究中心模拟实验台架^[4]

Fig.2 NASA Lewis research center simulation test bench^[4]

1.2 可模拟发动机工况的试验机

Sulzer Metco公司在表面涂层研究领域一直处于世界领先地位,1988年其研发中心研制了一套高温高速可磨耗性能评价试验系统^[5,6]。系统及原理图见图3所示。该系统采用高速摄像头监测刮擦过程及摩擦火花。该试验机可模拟的叶片叶尖最高线速度达410m/s,涂层试样进给速率可以在2~2000 $\mu\text{m/s}$ 之间调节,涂层加热温度最高至1200℃。该公司建立了封严涂层可磨耗性的评价体系,通过检测封严涂层表面粗糙度、叶片磨损量与刮擦速度及入侵速率,绘制三维磨损机制图对可磨耗性进行表征。

加拿大国家研究院自建了试验装置^[7]用于封严涂层以及蜂窝密封结构的磨耗性能测试,如图4所示。该试验装置采用空气涡轮作为动力,转子轮盘最高转速可达40000r/min,对应最高叶尖线速度425m/s,轮盘上最多可安装8个模拟叶片;试验机可实现径向和轴向的同时进给,进给速率

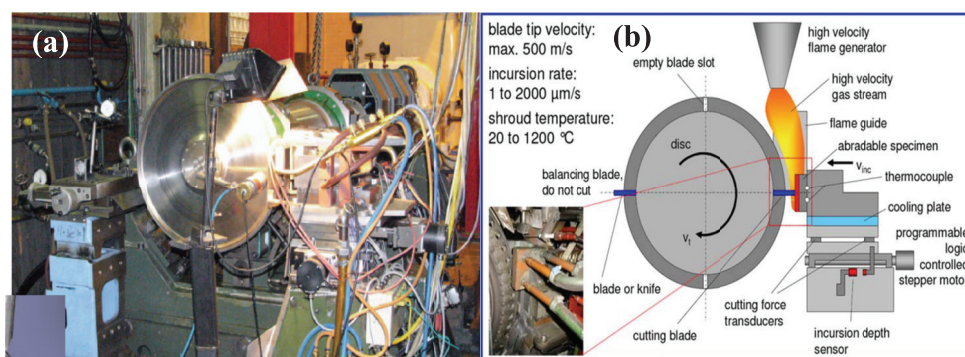


图 3 高温高速可磨图 3 耗性能评价试验系统^[5,6]: (a) 试验系统照片; (b) 试验系统原理图

Fig.3 High temperature and high speed abrasion performance evaluation test system^[5,6]:

(a) test system picture, (b) test system schematic diagram

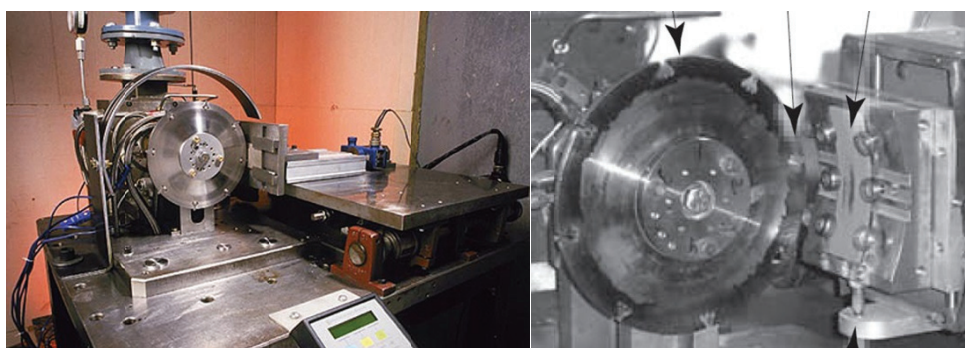


图 4 加拿大国家研究院的试验装置^[7]

Fig.4 Canadian national research institute test facility^[7]

可在 2.54~762 $\mu\text{m/s}$ 范围内调节;封严试样可为平板结构或圆弧型结构,试样背面安装电阻丝加热器可将其加热至最高 600 $^{\circ}\text{C}$ 工况下进行试验。试验机配置多种测试传感器对试验过程中的线速度、进给深度、碰磨力、刮擦温度等参数进行测量,结合试验前后试验叶片和封严试样的磨损质量变化对封严材料的磨耗性能进行综合评定。

1.3 其他模拟试验机

美国 PWA(Pratt&Whitney Aircraft) 公司^[8] 研制的高速刮削装置。为解决叶片与涂层刮削时间较短,测量叶尖温度较难等问题,以敷有涂层的圆盘为高速转动部件,以叶片为径向进给样品,如图 5 所示。通过测定可刮削封严材料与模拟叶片叶尖刮擦过程的能耗,利用测得的温度分布和一维运动鳍片模型,计算出传给叶片、可刮削涂层和磨屑的能量分数,并命名该研究内容为“刮擦能量学”(Rub Energetics)。

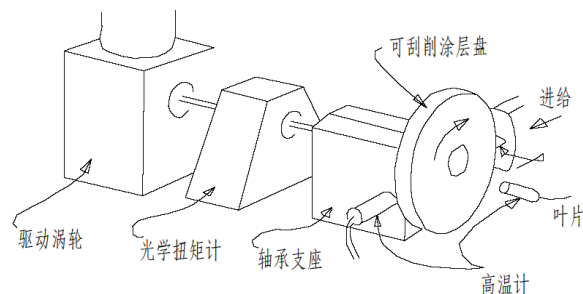


图 5 PWA 公司的高速可刮削试验台架^[8]

Fig.5 PWA high speed scratch test bench^[8]

美国 TABER 公司的 TABER 5135 泰伯磨擦试验系统(单研磨盘)如图 6 所示,该试验系统是现今较为方便的“加速耗损实验”设备,刮削速度能够达到 50m/s。美国 CETR 摩擦磨损试验系统技术有限公司生产的高温摩擦磨损测试仪器如图 7 所示,是一种用途广泛的摩擦、磨损实验机,最高温度达 1000 $^{\circ}\text{C}$,速度为 0.1mm/s 到 50m/s。



图 6 ABER 5135 泰伯磨擦试验系统
Fig.6 ABER 5135 taber friction test system

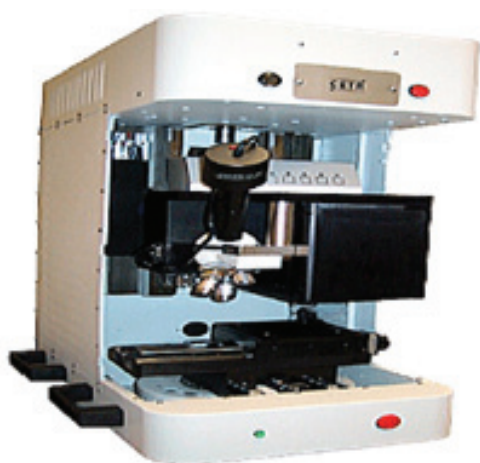


图 7 CETR 高温摩擦磨损测试仪
Fig.7 CETR high temperature friction and wear tester

英国谢菲尔德大学 J. Stringer 等人研制的一台模拟实际航空涡轮压气机的可磨耗试验系统, 如图 8 所示。它主要的参数指标: 线速度 $100 \sim 200\text{m/s}$, 进给速度最小能精确到 $0.1\mu\text{m/s}$, 最高达 $2000\mu\text{m/s}$ 。该试验系统从分析进给速度对可磨耗性能的影响得到的结论: 进给速率越大, 涂层刮削均匀表现良好的可磨耗性能; 而小的进给速率将造成涂层与叶片的磨损, 可磨耗性能差^[9]。其中可磨耗机制主要从电脑模拟、实际测量叶片的高度变化以及叶片表面粗糙度的角度来进行分析。



图 8 英国谢菲尔德大学试验系统^[9]
Fig.8 University of Sheffield test system^[9]

瑞士 ALSTOM 公司研制的试验机^[10]如图 9 所示, 该设备直接由高速电机驱动, 模拟轮盘的最高转速为 30000r/min , 对应叶尖线速度 400m/s , 试样可完成进给速率 $1\sim 2000\mu\text{m/s}$ 范围内的轴向和径向进给, 试验机具备加热功能, 配置测力传感器、高温计对试验数据进行测量。

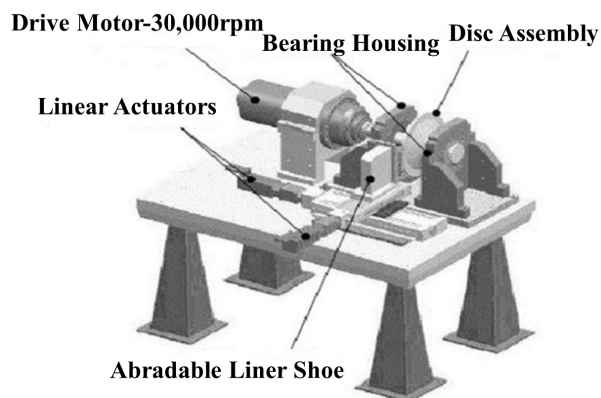


图 9 ALSTOM 的试验机结构^[10]
Fig. 9 ALSTOM test system construction^[10]

2 国内超高速高温试验系统及封严涂层评价体系的研究现状

可磨耗封严涂层试验机由于在国内的研究工作起步较晚, 对封严涂层可磨耗性的评价的设备和方法有限, 缺乏通过磨耗量、刮削力、涂层的微观形貌等来综合评价封严涂层可磨耗性的新型高温可磨耗试验机。

2.1 国内大学

西安交通大学与中南大学共同研制一次冲击实验装置^[11]。该试验系统以一次冲击刮削法模拟航空发动机叶片刮削封严涂层的工况，最大冲击刮削速度 5m/s；最大冲击能量 20J；实验滑座带动涂层进给机构的定位精度 10 μ m。可检测刮削力及涂层进给位移。西安交通大学的陆明珠及中南工业大学易茂中等学者利用该试验系统进行了封严涂层的实验研究^[12]，并建立针对该试验系统的评价体系。测试封严涂层的冲击载荷-位移曲线，曲线上的屈服点和最大载荷点综合表征了封严涂层可磨耗性和涂层与机体的结合强度，曲线包围的面积即冲击刮削性，表征了涂层的抗冲蚀性。

浙江大学高速旋转机械实验室研制了一台专用易磨耗性能测试装置^[13]，如图 10 所示。由于封严橡胶服役温度比较低，一般为 -60~120℃，因此试验机使用电加热和液氮冷却方式模拟环境温度，可实现的温度范围为 -120~200℃；为实现超高叶尖线速度，试验机设置了可抽真空的试验腔以降低升速阻力、提高运行稳定性，其主轴最高转速可到 16000r/min，可实现的叶尖线速度最高为 520 m/s；进给系统由伺服电机驱动滚珠丝杠实现，可在 5~1000 μ m/s 进给速率范围内调节。试验机配置了高清摄像机，可对高速碰磨过程进行记录。除封严橡胶外，还可进行各种封严材料的常温磨耗试验。

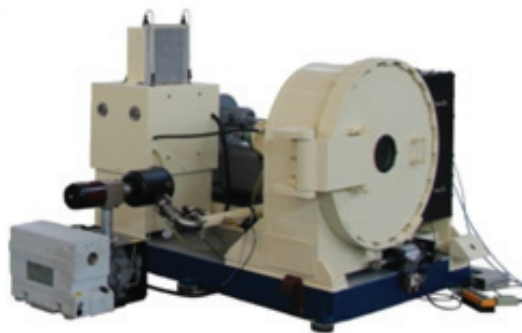


图 10 浙江大学封严橡胶测试用可磨耗试验机^[13]

Fig.10 Abrasion testing machine for sealing rubber of Zhejiang University^[13]

2.2 中国科学院

中科院金属研究所自行研制单摆冲击划痕试

验系统^[14]，该设备采用高速记录系统测量每次冲击过程的刮擦剪切力和正压力的变化，以精密控制试样的台升实现对入侵深度的模拟，通过改变摆的初始冲击角度调整冲击速度，改变摆锤重量调整冲击初始能量。

中科院金属所以航天飞机为背景研制的小型台架试验系统^[15]如图 11 所示，用以评价封严涂层材料性质，其转盘叶尖线速度达到 150m/s，以径向精密进给控制叶片刮擦的入侵深度和入侵速度，入侵速率可达 2~3000 μ m/s，试样加热温度可达 1200℃。试验过程中可实时测量高速高温条件下摩擦副的正压力、切向力（摩擦力）、功率损耗、试样温度等参数，用于试样摩擦磨损的研究，与国外先进的试验设备相比，可模拟的线速度参数仍存在较大差距。中国科学院金属研究所刘凤伟等人建立了封严涂层的评价体系模型，根据封严涂层可磨耗性的定义，在销-盘和高速刮擦试验中选用磨损质量的比值作为封严涂层可磨耗性能指数。

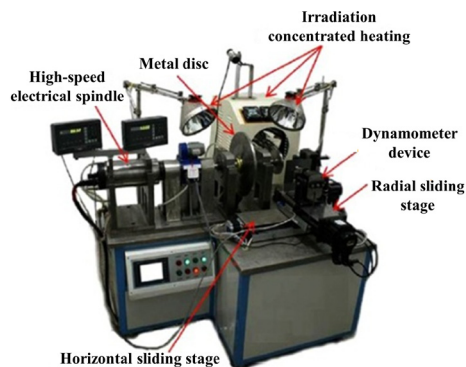


图 11 中科院金属研究所高温高速磨损试验系统^[15]

Fig.11 High temperature and high speed wear test system of the Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences^[15]

2.4 科研院所

中航工业北京航空精密机械研究所研制的封严涂层刮削式试验机^[16,17]，如图 12 所示，试验机以电主轴为动力，实际最高转速达 23500r/min；进给系统可实现径向 1~2000 μ m/s 的进给速率，采用陶瓷纤维加热器对涂层试样进行加热，其最高理论加热温度可达 1150℃，但实际测试时的最高温度只能达到 300℃。该试验机的运行稳定性以及可实现的技术参数还有待考察。

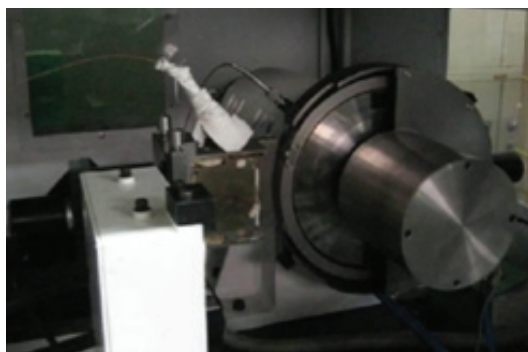


图 12 北京航空精密机械研究所的刮削式试验机^[16]
Fig.12 Scraping machine of Beijing Precision Engineering
Institute for Aircraft Industry^[16]

北京矿冶科技集团有限公司成功研制了两台高温超高速可磨耗试验机,用于磨耗性能测试。其中:AST500 型试验机^[18]如图 13 所示,主轴最高转速 13500r/min,最高线速度 300m/s,最高加热温度可达 800℃实现涂层试样在 1.5~2000 μ m/s 进给速率范围内的进给。



图 13 北京矿冶科技集团有限公司 AST500 试验机^[18]
Fig.13BGRIMM Technology Group AST500 tester^[18]

北京矿冶科技集团有限公司新研制的全尺寸 BGRIMM-ATR 型高温超高速磨耗试验平台,是在对美国 Metco 公司可磨耗试验机充分调研的基础上,经国内外专家多轮论证,集合国内外多个专业的技术研制而成,具备了 Metco 公司设备的多因素耦合模拟测试水平。轮盘最高转速 13000rpm,最高线速度 450m/s,最高测试温度 1200℃,微进给速率 2~2000 μ m/s,可通过转盘安装现役所有尺寸轮盘及叶片,设备的温度、线速度、进给速率控制精度及检测系统等达到

Metco 公司设备同等水平,处于国际先进水平,是目前国内唯一能实现模拟航空发动机工况条件的高温超高速实验平台,平台照片如图 14 所示。该研究机构利用该试验平台进行了大量的模拟试验,结合 Metco 公司及国内研究机构的评价方法,建立了相应的评价体系。

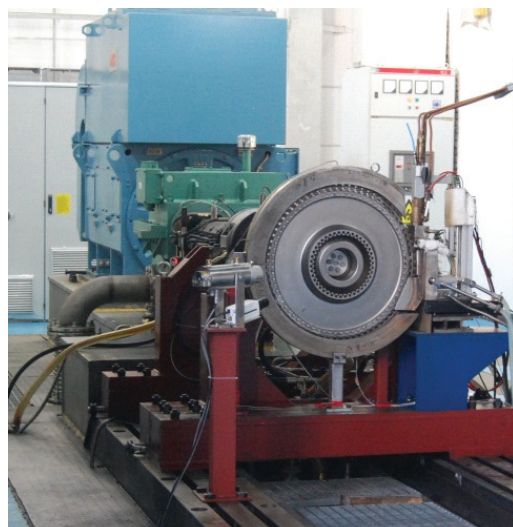


图 14 BGRIMM-ATR 高温超高速磨耗试验平台
Fig.14 BGRIMM-ATR high temperature and high speed
abrasion test platform

3 总结与展望

(1) 目前 Sulzer Metco、北京矿冶科技集团有限公司等研究机构的试验平台均能安装发动机真实轮盘、叶片,模拟发动机内部高温、高速的工况,对封严涂层进行评价。试验证明,模拟试验机即节约了试验成本,又可有效地对封严涂层的可磨耗性进行评价。为了使试验机更接近发动机实际工况,相关研究机构正在努力使得轮盘、

叶片、涂层的工况均接近实际工况,涂层基体更接近机匣的外形,刮削过程更接近发动机叶片与机匣实际碰磨轨迹。

(2) 封严涂层可磨耗性的评价尚未形成统一标准,随着国内相关设备的日趋成熟,应尽快形成国家标准,以指导封严涂层可磨耗性的评价及生产。

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] 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,2012,3: 20-23.
- [3] Smarsly W. Coatings for advanced aero engine materials: Coatings for Advanced Aero Engine Materials Dr. Wilfried Smarsly Materials Engineering 8 th HIPIMS Conference 1-2 July 2009[C]. Sheffield: University of Sheffield, 2009.
- [4] Robert C B, Lawrence P L. Wear of seal materials used in aircraft propulsion systems[J]. Wear, 1980, 59: 165-189.
- [5] Borel M O, Nicol A R, Schlapfer H W, et al. The wear mechanisms occurring in abradable seals of gas turbines[J]. Surface and Coatings Technology, 1989, 30/40: 117-126.
- [6] Bardi U, Giolli C, Scrivani A. Development and investigation on new composite and ceramic coatings as possible abradable seals[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 17(5): 805-811.
- [7] Dadouche A, Conlon M J, Dmochowski W, et al. Experimental evaluation of abradable seal performance at high temperature: ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea and Air, Berlin, Germany[C]. New York: ASME, 2008.
- [8] Laverty W F. Rub energetics of compressor blade tip seals[J]. Wear, 1982, 75: 1-20.
- [9] Stringer J, Marshall M B. High speed wear testing of an abradable coating[J]. Wear, 2012, 257: 294-295.
- [10] Rathmann U, Olmes S, Simeon A. Sealing technology: rub test rig for abrasive/abradable systems: ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea and Air, Montreal, Canada[C]. New York: ASME, 2007: 223-228.
- [11] 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.
- [12] 陆明珠,刘海军,苏启生.用冲击刮削法测量封严涂层的力学性能[J].材料研究学报,1997,11(4): 407-410.
- [13] 宣海军,张娜.一种高速旋转刮削试验机:中国,CN201320277611.1[P]. 2013-05-20[2013-10-30].
- [14] 刘凤伟,高撰洋,李曙,等.NiCrW-BN 气路封严涂层的可磨耗性评价[J].材料研究学报,2010,24(4): 406-410.
- [15] 刘阳.评价封严材料可磨耗性能的实验设备与方法[D].沈阳:中国科学院金属研究所硕士学位论文,2007.
- [16] 张彬.封严涂层刮削式试验机的研制[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [17] 张海存,张彬,李静,等.航空发动机封严涂层试验机控制测量研究[J].测控技术,2014,33(S): 98-101.
- [18] 于月光,宣海军.封严涂层高速高温可磨耗试验机:中国,CN201210496279.8[P]. 2012-11-28[2013-04-03].