刷式密封技术的研究进展

李 军^{1,2},李志刚¹,张元桥¹,王凌峰¹,刘璐园¹ (1.西安交通大学 叶轮机械研究所,西安 710049;2.先进航空发动机协同创新中心,北京 100191)

摘要:刷式密封技术凭借其优良的封严性能而在航空发动机、燃气轮机和汽轮机中应用。简要回顾了典型刷式密封技术及其 发展历程,综述了刷式密封的泄漏特性、摩擦传热特性、力学行为、闭合和迟滞效应以及转子动力特性的研究进展,介绍了 MTU 箍制 刷式密封技术及其在湿蒸汽环境下的试验研究结果,以及目前非金属丝刷式密封技术的研究和应用情况,总结了刷式密封技术流 热固耦合特性的研究成果,探讨了刷式密封技术在航空发动机真实运行工况下运行寿命和性能可靠性方面需要深入研究的内容, 为刷式密封技术在透平行业中的高效应用提供了技术支撑。

关键词:刷式密封;泄漏特性;摩擦传热;闭合和迟滞效应;试验测量;数值模拟;航空发动机
 中图分类号: V229
 文献标识码:A
 doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2019.02.015

Research Progress of Brush Seal Technology

LI Jun^{1,2}, LI Zhi-gang¹, ZHANG Yuan-qiao¹, WANG Ling-feng¹, LIU Lu-yuan¹

(1.Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Collaborative Innovation Center of Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China)

Abstract: Brush seal was widely used in aeroengine, gas turbine and steam turbine due to its excellent seal performance. The typical brush seal technology and its development course were briefly retrospected. The research progress on leakage characteristics, friction and heat transfer characteristics, mechanical behavior, blow down and hysteresis effects and rotor dynamic characteristics of brush seal were summarized. The brush seal technology made by MTU hoop and its test results in wet steam environment were introduced. The research and application of non-metallic wire brush seal technology were briefly introduced. The research results of fluid -thermal -solid coupling characteristics of brush seal technology were summarized. The contents of brush seal technology which needed to be deeply studied in terms of service life and performance reliability of aeroengine were discussed under real operating conditions. It provides technical support for the efficient application of brush seal technology in turbine industry.

Key words: brush seal; leakage characteristics; friction heat transfer; blow down and hysteresis effect; test measurement; numerical simulation; aeroengine

0 引言

密封技术是保证透平机械高效稳定运行的关键 技术之一^[1-2]。传统的迷宫密封由于固有间隙的存在, 封严性能有限,在控制泄漏时会产生气流激振力,易 诱发转子涡动失稳。刷式密封是1种具有优良封严性 能的接触式动密封技术,其泄漏量只有传统迷宫密封 的 1/5~1/10^[3]。同时,刷式密封由于刷丝束良好的韧 性,对转子的瞬时偏心涡动具有很强的适应性。目前, 刷式密封技术作为迷宫密封的替代品已经被广泛应 用于航空发动机、燃气轮机和汽轮机中^[4-5]。

刷式密封主要由前夹板、刷丝束和后夹板3部分 组成。前夹板用来固定和保护刷丝束。后夹板用来支 撑刷丝束,避免刷丝束在较大压差的作用下产生大的 轴向变形,保持稳定的封严性能。刷丝束是由紧密排 列的刷丝一层层重叠构成的。刷丝束的一端与前后圆 环形夹板连接固定,另一端自由伸出,工作时与转轴 接触。刷丝束排列方向与转轴半径方向成1个角度,

收稿日期:2018-01-21 基金项目:国家自然基金(50976083)资助 作者简介:李军(1971),男,博士,教授,主要研究方向为透平机械气动热力学与优化设计和密封技术;E-mail;junli@mail.xjtu.edu.cn。

引用格式: 李军,李志刚,张元桥,等. 刷式密封技术的研究进展[J].航空发动机,2019,45(2):74-84. LI Jun, LI Zhigang, ZHANG Yuanqiao, et al. Research progress of brush seal technology[J]. Aeroengine, 2019, 45(2):74-84.

其方向顺着转轴的转动方向。这是为了更好的容纳转 轴的瞬间径向变形以及偏心运行。

刷丝束是决定刷式密封性能的关键⁴⁴。最常用的 刷丝材料是钴基合金(Haynes 25),这种合金在高温 下具有很好的耐磨和耐腐蚀特性。刷式密封在工作 时,转子面一般需要光滑硬质涂层,这样可以降低刷 式密封对转子的磨损,避免产生裂纹。航空发动机中 常用陶瓷涂层,包含碳化铬和氧化铝。对于陆用燃气 轮机和汽轮机,转子直径大,对涂层没有统一要求。近 年来,出现了非金属纤维(Kevlar、Carbon)制造的刷 丝,用于一些特殊的场合⁶⁶。例如,金属材料的刷式密 封不适用于轴承油封,因为刷丝磨损产生的金属颗粒 会对精密轴承造成损害,同时存在潜在的火花。而纤 维材料的刷式密封能克服这些缺点,替代迷宫密封, 几乎不产生泄漏。

设计刷式密封时需要选取合适的刷丝直径 d、刷 丝密度 N、刷丝束厚度 w、刷丝与转子径向干涉量 Δr^{4} 。 对于金属刷丝常见的刷丝直径为 0.05~0.20 mm。对于 非金属刷丝常见的刷丝直径为 0.01~0.15 mm。选取 较大的刷丝直径有利于提高刷式密封的承压能力和 增强其耐磨性。刷丝束的密度决定刷式密封的封严性 能,沿圆周方向刷丝密度一般为90~180根/mm。刷 丝束厚度的选取需要确保刷丝束具有足够高的轴向 刚度以承受轴向压差,一般为 0.6~2.0 mm。刷丝与转 子应具有微小的径向干涉量,确保刷丝束与转子完全 接触,一般在 0.2 mm 以下。过大的干涉量容易造成严 重的摩擦热效应,不利于转动部件的安全和密封寿 命。刷丝束角度为 30°~60°,常取 45°。后夹板的刷丝 束围栏长度即刷丝束自由端离后夹板的距离是1.1~ 2.0 mm, 刷式密封前夹板的刷丝束自由长度比后夹板 刷丝束围栏长度大。

目前,在世界各大透平公司的技术创新和发展 中,都将刷式密封技术的研究作为其重要内容之一。 20世纪90年代,高温、高相对接触速度刷式密封的 研究取得了很大进展,可以承受的转子线速度已经超 过305 m/s,运行温度达690℃。PW公司将刷式密封 成功用于 F-119发动机中,该发动机装备 F-15和 F-16战机[□]。波音777客机的 PW4084发动机在多处 位置使用了刷式密封,发动机推力提高了近2%,相 应耗油率降低了约2%[□]。1996年,用于波音747、767 以及 MD11、A300等客机上的 PW4000 系列发动机进 行了同样的改装。同时 GE 公司也在其用于 B777 客 机的 GE90 发动机低压涡轮中应用了 3 套刷式密封。

在燃气轮机方面,传统迷宫密封的间隙一般高达 2 mm。采用刷式密封,可显著降低泄漏损失,提高效 率,而费用比改造其它硬件要少得多。1992 年 Siemens Westinghouse 将刷式密封作为 1 项先进技 术,应用于 160 MW 的 501F 燃气轮机中,并在 501D 的改造和 501G 生产中也采用了刷式密封^[5]。在汽轮 机方面,已经在汽轮机轴封和动叶顶部采用了刷式密 封,取得了很好的经济效益^[5]。

刷式密封是1种看似简单实际上却非常复杂的 密封装置。气流是从刷丝束内部随机分布的孔隙泄漏 的,具有复杂的泄漏流动形态。为了确保刷式密封的 优良封严性能,刷丝束以一定的倾斜角与转子相接 触。刷丝在运行时,在泄漏气流、转子、前夹板以及后 夹板的共同作用下会产生变形和磨损,同时,刷式密 封会产生闭合效应(Blow Down Effect)、摩擦热效应 (Frictional Heat Effect)、刚化效应(Stiffness Effect)及 迟滞效应(Hysteresis Effect)等。刷式密封的这些效应 都会对其封严性能和使用寿命产生重要影响,同时也 会限制刷式密封的应用范围。

本文综述了刷式密封技术的泄漏特性、摩擦热效 应、闭合和迟滞效应以及转子动力特性方面的研究进 展。

1 泄漏特性

刷式密封作为接触式密封可以消除密封件和转 子面的动、静间隙,具有很好的封严性能。但由于刷式 密封的刷丝束是由排列紧密的纤细刷丝层叠构成,刷 丝间随机分布着许多微小的孔隙,气流仍然会在压差 的作用下通过这些微小间隙而泄漏。泄漏气流渗透进 入刷丝束,形成多股射流进入封闭孔隙形成多个漩 涡。同向流、横向流、射流、漩涡流在刷丝束内周而复 始的相互作用,形成混沌无序的流场,破坏了泄漏流 的连续性和均匀性,从而产生很好的封严效果¹⁸。

在试验研究方面,研究人员已经通过试验证明了 刷式密封作为接触式动密封的封严性能远优于传统 迷宫密封的。Chupp和 Dowler¹⁰试验对比了刷式密封 和迷宫密封在亚声速条件下的泄漏特性,研究结果表 明刷式密封的封严性能明显优于迷宫密封的。刷式密 封的泄漏量只有迷宫密封的 1/7~1/4。在升压和降压 过程中发现了刷式密封的迟滞特性,即在相同压比下,升压过程的泄漏量不同于降压过程的。多级刷式 密封不仅能够保证刷式密封承受更高的压差,而且能够提高封严性能和减小对转速变化的敏感性。

Bayley 和 Long¹⁰⁰在非旋转试验台上测量了干涉 量为 0.25 mm 的单级刷式密封泄漏特性及刷丝束轴 向和径向压力分布,并发展了可压缩层流等熵流动的 多孔介质模型预测刷式密封的泄漏特性。数值结果与 试验数据吻合,验证了所发展的模型可以预测刷式密 封的泄漏量。Turner 等¹¹¹试验测量了径向间隙分别为 0.27 mm 和 0.75 mm,最大压比为 4 的单级刷式密封 的泄漏量、后夹板径向压力分布和转轴的轴向压力分 布。结果表明,刷丝束在气流力作用下向转轴延伸,产 生闭合效应,减小了设计时的径向间隙,提高了封严 性能。孙晓萍等¹¹²开展的刷式密封静态和发动机运行 工况下的试验结果表明,设计时刷丝束与转轴间应采 用小的间隙或小的过盈配合。

在数值研究方面,研究人员发展了许多近似的数 值模型来模拟刷式密封内部的泄漏流动。主要分为整 体流动泄漏模型、理想泄漏模型和多孔介质模型3种。

整体流动泄漏模型主要基于刷式密封几何结构 参数和运行参数发展的预测刷式密封泄漏量的半经 验公式。采用此模型预测的刷式密封泄漏量具有一定 的可靠性,有助于刷式密封初始设计。

理想泄漏模型是将刷丝束简化为顺列或者交错 排列的圆柱体,用气流通过理想化的刷丝束来模拟刷 式密封内部的泄漏流动^[13]。该模型主要分析泄漏气流 在刷丝束内部孔隙中的泄漏流动形态。但将刷丝束简 化为多排交错排列的圆柱体是1种理想化的模型。而 刷丝束在实际运行中会受到转子、前后夹板以及流体 的共同作用。刷丝在相互间摩擦力和流体力的作用下 相互挤压而变形,最后形成复杂不规则的结构。刷丝 束内部的孔隙是随机分布的,因此,刷丝束内部的泄 漏流动并不是排列有序的圆柱体绕流。刷式密封的流 场可视化试验^[14]验证了刷丝束内部流动的复杂性和 非均匀性。

多孔介质模型根据刷式密封的刷丝束内部孔隙 随机分布的特性,将刷丝束处理为各向异性的多孔介 质,具体是在动量方程中增加阻力源项表示刷丝束对 流体的阻力。Bayley和Long¹⁰首次引入线性Darcian 多孔介质模型,数值预测了试验研究的刷式密封泄 漏量。线性 Darcian 多孔介质模型仅仅考虑了刷丝 束对流体的黏性阻力。而 Chew 和 Hogg^[15]则引入 Non-Darcian 多孔介质模型预测刷式密封的泄漏量, 采用的 Non-Darcian 多孔介质模型考虑了刷丝束对流 体的惯性阻力和黏性阻力。

Dogu¹⁶⁹和 Dogu 等¹⁷⁷提出基于整体多孔介质的刷 式密封泄漏量预测模型,计算了零间隙和有间隙的刷 式密封泄漏量。将刷丝束处理成多孔介质,根据试验 数据确定多孔介质的渗透率系数,进而开展刷式密封 泄漏流动和封严性能数值预测。研究结果表明,将刷 丝束处理成多孔介质可以更好地掌握刷式密封内泄 漏流动特征和刷丝束的力学行为,根据间隙和压差具 体数值,通过刷式密封径向间隙的泄漏量占总泄漏量 的 65% ~ 94%。李军等¹¹⁸⁻¹⁹采用基于 Non-Darcian 多 孔介质模型的刷式密封泄漏流动模型,结合刷式密封 径向间隙、刷丝束厚度几何结构参数、压比及转速等 运行参数对刷式密封泄漏量的影响规律进行详细的 数值研究。

根据目前研究结果,多孔介质模型的方法是最为 有效并且应用最为广泛的刷式密封泄漏量数值预测 方法。

刷丝束在泄漏气流力和压差的作用下会发生力 学变形,影响刷式密封封严性能。经典多孔介质方法 没有考虑刷丝束变形影响其孔隙率,其预测精度有待 提高。Chen 等^[20]发展了耦合 CFD 和刷丝束力学模型, 预测了刷式密封泄漏量、刷丝束位移、应力及与转轴 的接触负荷。刷丝束受力考虑了刷丝束间和刷丝束与 后夹板间隙的摩擦效应。刷式密封泄漏特性将刷丝束 看成是基于 Non-Darcian 多孔介质模型进行处理。研 究表明,刷式密封泄漏特性的预测需要考虑实际运行 的刷丝束力学变形特性效应。Lelli 等凹发展了基于 CFD 和线性弯曲梁理论的流固耦合刷式密封泄漏和 扭矩特性数值计算方法。数值计算获得的刷式密封扭 矩与试验数据吻合,但是泄漏量低于试验测量数据。 泄漏量的预测依赖模型中刷丝束参数和刷丝束间的 间隙数值。Li 等[22-23]发展了采用 CFD 和 FEA 方法的 流固耦合模型数值预测迷宫刷式密封的泄漏特性。数 值计算迷宫刷式密封的泄漏量考虑了转轴的伸长和 刷丝束的闭合效应。试验测量数据验证了所发展方法 的有效性。刷式密封泄漏特性的数值预测模型需要考 虑刷丝束变形的力学行为、转轴由于径向位移和离心 力与热应力作用的伸长效应而改变刷丝束多孔介质属性和间隙的变化影响。

2 刷式密封摩擦传热

刷式密封作为接触式动密封,刷丝束通常在安装 时与转子具有一定的干涉量,在工作时,刷丝与转子 高速摩擦,产生大量的热,会使刷丝自由端的温度升 高,影响刷丝的机械性能,加快刷丝的磨损。摩擦热效 应是关系到刷式密封封严性能、使用寿命以及应用范 围的关键因素。刷式密封的摩擦热效应是1个非常复 杂的流 - 热 - 固耦合问题,涉及固体的摩擦、变形、 导热,流体的泄漏流动与传热,固体与流体间耦合传 热等问题。

Hendricks 等^[24]首先对刷式密封摩擦热效应进行 研究,提出了摩擦热流流量可由接触力、相对接触速 度和摩擦系数计算得出。Chew 和 Guardino^[25]数值模拟 了刷丝顶部区域的流动与传热过程。计算模型包括刷 丝束与转子的摩擦产热以及导热。Dogu 和 Aksit¹²⁶分 别采用针肋模型的理论分析方法和计算流体动力学 方法预测了刷式密封的温度分布。其中刷式密封的传 热 CFD 模型采用多孔介质方法, 刷丝与转子相接触 的区域给定摩擦热流量,摩擦热流量根据刷式密封典 型工况估算出。Qiu 和 Li 等[27-28]发展了耦合 CFD 和 FEM 方法的刷式密封传热性能研究方法,开发了刷 式密封摩擦热和热传递途径模型。指出刷式密封的摩 擦热和泄漏量随着压比的增大而增加,而泄漏流体具 有冷却摩擦热的作用。刷丝束最高温度随着压比的增 大先升高再降低。在一定转速下,刷式密封最高温度 存在1个压力临界点。Huang 等¹²⁹数值模拟和试验测 量了单级刷式密封的刷丝束顶端力和温度场。刷丝束 最高温度出现在与转轴接触的刷丝束顶端。数值预测 与试验的误差主要由摩擦系数和刷丝束几何结构参 数等数值预测模型不够完善导致。

邱波等^{[90}提出了适用于刷式密封流动传热与接 触变形的多物理场耦合数学模型,如图1所示。推导 了描述刷式密封在局部热平衡和局部非热平衡条件 下传热过程的能量方程,发展了以刷丝所受气动力、 刷丝与转子间的摩擦热量和刷丝变形量的作为求解 变量的刷式密封的流热固耦合模型,建立了刷式密封 流动传热的数值计算方法,如图2所示。研究结果表 明,刷丝最高温度随压比增大的变化趋势主要取决于 刷式密封的结构参数;刷丝最高温度和围栏高度以下 区域的刷丝平均温度均随转速升高而显著升高。



①摩擦热通过导热进入转子内部;②摩擦热通过导热进入刷丝束;③气流与转子表面对流换热;④刷丝之间相互导热;⑤气流与刷丝进行对流换热;⑥刷丝与前后夹板直接导热;⑦刷丝与前后夹板间接换热;⑧气流与前后夹板进行对流换热

图 1 刷式密封传热模型^[30]



图 2 刷式密封基本传热规律[30]

目前,刷式密封摩擦热效应的试验测量技术需要 强化,为刷式密封摩擦热效应数学模型的完善提供可 靠的试验数据。

3 刷式密封闭合和迟滞效应与转子动力特性

刷式密封的应用受到刷丝束磨损的影响。刷丝束 与转轴的接触压力直接影响刷丝束磨损,该接触压力 受到气流力、刷丝束间和与后夹板间的摩擦力以及转 轴受到离心力和热应力与偏心导致的作用力的共同 作用。刷式密封内部主要存在刷丝与转子表面、末排 刷丝与后夹板及刷丝之间的3种接触。刷式密封运行 时在气动力和摩擦力的共同作用下会发生刚化效应、 迟滞效应、闭合效应、压力硬化及刷丝悬挂等复杂的 力学行为,都会对刷式密封的封严性能和使用寿命产 生重要影响。本章介绍刷式密封由于力学行为导致的 闭合和迟滞效应。

刷式密封的典型结构和受力分析³¹¹如图 3 所示。 从图中可见,刷丝以倾斜角 ϕ 与半径为 R 的转子以 干涉量 Δr 过盈装配。干涉量是指刷丝束自由端的内 径与转子半径的差值。刷丝与转子间的接触力 F 可 以分解为沿转子径向的法向接触力 F_a 和沿转子周向 的摩擦力 F_c 气流是从后夹板与转子表面之间的围栏 高度 H 区域泄漏的。气流在围栏高度以下区域具有 强烈的轴向流动,对刷丝形成1 个从刷丝束上游指向 下游的轴向力。



图 3 刷式密封结构和受力分析模型[31]

从图中还可见,在 a-a 的刷丝束进口截面上,径 向向心流动的闭合效应增大了具有干涉量的刷丝束 与转轴的接触力。在刷丝束中间位置如 b-b 截面,刷 丝束受到泄漏气流力的作用而结合得更加紧密。在刷 丝束出口截面 c-c 处,刷丝束受到后夹板的支撑和约 束,有抵抗刷丝束变形的作用。泄漏气流迅速通过转 轴与刷丝束干涉量的空间 G*。在刷丝束顶端位置 d-d 截面,刷丝束受到由于干涉量、转轴偏心、机械热应力 和转轴偏心力的作用,同时刷丝束受到进气气流预旋 的作用。

Wood 和 Jones^[32]发展了利用刷式密封作用与转 轴上的扭矩对刷丝束的接触压力进行间接测量的方 法。测量结果验证了刷式密封的接触压力受到刷丝束 变形和压差的作用。Stango等^[33]建立了刷丝束干涉量 造成的转轴与刷丝束间接触力的线性悬臂梁力学模 型,考虑了刷丝束与转轴间的 Coulombic 摩擦效应。 研究表明,在刷丝束结构、摩擦和抗挠刚度共同作用 下产生了接触力。轻微和中等摩擦力可以减轻刷丝束 与转轴的接触力。

刷式密封的闭合效应^[34]是由径向压力梯度导致 的。流体最初沿轴向流动,由于后夹板下方流动面积 的减小,流体开始转向转子面。靠近刷丝顶部的流体 进入刷丝顶部下端的间隙,导致在该区域产生漩涡, 在刷丝顶部附近产生径向顺压力梯度,从而产生了闭 合力。闭合效应减小了具有间隙的刷式密封实际运行 时的间隙,准确预测刷式密封泄漏特性必须考虑刷丝 束的闭合效应。

Crudgington 等¹⁴¹采用试验测量和有限元方法分 析了具有间隙的刷式密封闭合效应,给出了根据试验 数据计算闭合效应强度的半经验方法。Franceschini 等¹⁵¹通过试验和数值方法研究了刷式密封闭合效应 的气动原因。张元桥等¹⁵³提出了考虑闭合效应的刷式 密封运行时的间隙修正公式,结合试验测量的有无间 隙的刷式密封在不同压比和转速下的泄漏量的数值 计算结果表明:由于闭合效应,刷式密封有效间隙会 随着压差增大而减小;考虑闭合效应对刷式密封泄漏量。

刷式密封在转轴偏心或升负荷时,在泄漏流体压 力作用下,刷丝束与后夹板间的摩擦力使刷丝束不能 及时跟随,出现刷丝束刚化效应。在刷丝束被转轴径 向推移后,当转轴脱离偏移或者降负荷时,由于刷丝 束与后夹板间的摩擦力作用,刷丝束不能立即复原, 刷丝束出现迟滞特性¹³⁷,会加大刷式密封的泄漏量, 降低密封性能。

Chupp 和 Dowler¹⁷在进行刷式密封泄漏试验时注 意到刷式密封的迟滞效应,刷式密封的泄漏量与进、 出口压比的加载过程有关,即当增大或减小到给定压 比时,刷式密封的泄漏量不同。Basu 等^[38]通过刷式密 封试验发现轴向压差增强了刷丝束与后夹板间的摩 擦,在转子径向偏移时刷丝束会发生刚化效应,当转 子从偏心位置恢复时刷丝束会发生迟滞效应。

为了减小刷式密封的刚化和迟滞效应并延长刷 式密封的使用寿命,研究人员设计了压力平衡型低迟 滞刷式密封结构^[88]。Basu 等^[38]试验测量了2种传统刷 式密封和2种低迟滞刷式密封结构的刚度和泄漏迟 滞特性,其中泄漏迟滞特性在刷丝束与转轴同心、偏 心和转轴径向偏移3种动态试验中完成。试验结果表 明低迟滞刷式密封在封严性能和迟滞效应方面均明 显优于传统刷式密封结构。Tseng 等^[39]发展了低迟滞 刷式密封结构(如图 4 所示),并进行了 5 种几何参数 的低迟滞刷式密封的模型性能试验,在此基础上,确 定了最优结构并在 GE90 发动机上完成了试验验证。 试验结果表明:低迟滞刷式密封在封严性能上优于 2 级刷式密封。



Zheng 等⁴⁰试验测量了 GE 公司的专利设计变直 径刷丝束的刷式密封的封严性能、刚度和磨损特性。 GE 公司的变直径刷丝束的刷式密封结构设计是采 用不同直径刷丝束组成的多层刷丝束结构,即直径 大的刷丝束安装于前、后夹板位置,确保刷丝束的刚 度,而直径小的刷丝束安装在刷丝束中间区域。结果 表明,GE 公司的变直径刷丝束的刷式密封结构的封 严性能比传统刷式密封结构的更好,刷丝束的刚度 可以承受更高的压差和流体扰动,但是在迟滞特性 方面没有改善。

Pekris 等^[41]对比分析了传统和压力平衡型刷式密 封(图 4)的封严性能、力学和热特性。研究表明:传统 刷式密封设计由于综合封严和寿命而具有迟滞效应。 主动压力平衡型刷式密封能够减轻刷丝束与后夹板 间的摩擦,但是增加了闭合效应进而引起密封寿命的 缩短问题。这需要综合优化封严和扭矩性能。具有主 动压力平衡腔的刷式密封结构相比于传统结构具有 更好的传热性能。

张艾萍等^[42]、杜春华等^[43]和周坤等^[44]开展了低滞后 刷式密封设计和性能试验。周坤等^[44]在 30000 r/min 试 验中进行了低滞后刷式密封的持久试验。50 h 的试验 结果表明,低滞后刷式密封具有持久性能,刷丝束与 转轴具有较好的跟随性,有效缓解了刷丝束的滞后效 应。Duran 等^[45]采用试验测量和有限元计算的方法研 究了刷式密封的刷丝束顶端力和应力水平。旋转试验 影响刷丝束的振动并减弱刷丝束摩擦,进而导致在升 负荷的过程中具有较低的刷丝束顶端力。动态刚度试 验也表明刷式密封具有较低的刷丝束顶端力和迟滞 效应。

刷式密封的力学行为和转子动力特性的研究是 1个流热固耦合的研究课题,对于确保刷式密封在高 温高转速运行环境下可靠运行具有重要意义。

Conner 和 Childs^[46]试验测量了 4 级刷式密封的直接刚度、交叉刚度和直接阻尼系数。试验结果表明:随着转速的增加直接阻尼系数略微增大。相比于迷宫密封,交叉刚度系数随着进口切向速度增加而保持不变。Gaszner 等^[47]试验测量和数值模拟对比了不同刷式迷宫密封的泄漏特性和转子动力特性系数。结果表明:刷式迷宫密封的转子动力特性取决于密封几何结构和刷丝束参数。相比于迷宫密封,刷式迷宫密封具有更低的泄漏量和更高的阻尼。Gaszner 等^[48]试验测量和数值对比了不同刷式迷宫密封的带子动力特性和转子动力特性系数。刷式迷宫密封的带子动力特性和转子动力特性系数。刷式迷宫密封则和影响无法。称用等^[49] 基于流固耦合模型研究了刷丝束变形特性和力学行为。

为了提高刷式密封的性能,科研人员发明了靴式 刷式密封和混合刷式密封结构。San Andres 等^[50]试验 研究不同转速时基于靴式刷式密封发展的混合刷式 密封(如图 5 所示)功损失和泄漏量。试验结果表明, 相比于靴式刷式密封结构,混合刷式密封的泄漏量降 低了约 36%。混合刷式密封结构有助于提高发动机 的稳定性和降低振动。San Andres 等^[51]试验和数值研

究了混合刷式密封的转前来板 子动力系数。混合刷式密局 封相比于迷宫密封具有 興加优良的封严性能和 动力特性,并能提高传统 -刷式密封抗磨损性能。 **图**



图 5 混合刷式密封结构^[50]

4 MTU 公司的箍制刷式密封

德国 MTU (Motoren-und Turbinen-Union Friedrichshafen GmbH)公司发展了有别于焊接加工的箍制 刷式密封技术,如图 6 所示。MTU 箍制刷式密封技术 的应用领域和目的见表 1。

针对 MTU 公司箍制刷式密封技术,科研人员开展了针对汽轮机通流中湿蒸汽环境下的泄漏特性、摩



图 6 MTU 公司箍制与典型焊接刷式密封结构^[22]

表 1 MTU 公司箍制刷式密封应用

	航空发动机和 地面燃气轮机	汽轮机 /ORC	压气机	机械工程应用
应用位	·轴承箱	·平衡活塞	・轴	·机床
	・轴	・轴端	·级间	·泵
	·级间	·级间	·叶轮	・船舶
置	·静态			·特种机器
				・碎煤机
	·减少燃油消	·提高效率	·减少泄漏	·提高效率
Ħ	耗	·提高转子动力	·提高转子	·保证机器运行
的	·减少尺寸和	性能	动力性能	·封严气体泄漏
	质量	·通过缩短轴长	·提高效率	·提高转子动力
		度减少成本		性能

擦热效应、刚化与闭合效应的试验研究。旨在拓展刷 式密封技术在汽轮机通流中的应用和提高汽轮机热 功转换效率。Schwarz 等^[52]针对西门子汽轮机应用 MTU 公司刷式密封技术,试验研究了 MTU 公司刷式 密封结构参数对其封严

性能的影响。试验测量如 图 7 所示。测量了 MTU 公司刷式密封的闭合效 应、轴向厚度变化特性和 刷丝束刚度性能,为刷式 密封技术在蒸汽环境中 的应用提供了基础数据。

轴向厚度试验

刷式密封

丙烯酸玻璃段

转子轮盘

镜

(b)轴向厚度试验

t

流动

大气环境



Schwarz 等⁵³试验研究了 3 种轴向倾斜角 θ =0.1°、 3.1°、6.0°的 MTU 公司刷式密封结构的闭合和刚化效应。 刷丝束受力后的分布和试验图片分别如图 8.9 所示。



箍制刷式密封轴向倾斜角对其性能影响的对比 如图 10 所示。研究表明:低轴向倾斜角可以增加适应 转子偏心的能力。在以空气为工质,压差达到 0.4 MPa时,低轴向倾斜角刷式密封具有强闭合效应和低 刚化效应。高轴向倾斜角刷式密封适用于低压差环 境。考虑压差和密封性能,中等轴向倾斜角的刷式密 封结构具有综合优良的封严性能。



Schwarz 等¹⁵⁴试验研究了低轴向倾斜角的压力平 衡后夹板刷式密封的刷丝束波动特性。结果表明,轴 向倾斜角为 2°~3°的刷式密封具有良好的封严性能 和刷丝束具有优良刚度特性。Raben 等[55-56]在蒸汽环 境下开展了刷式密封磨损和摩擦热效应试验研究,对 比分析了串列布置的刷式密封和2级刷式密封的封 严性能和磨损特性(如图 11 所示)。试验结果表明:静态试验验证了 2 种布置方式的刷式密封均具有优良的封严性能,没有发现明显磨损。动态变负荷的试验 表明串列刷式密封具有良好的径向适应性。



5 非金属刷丝密封技术

非金属刷丝束的刷式密封技术应用在航空发动 机的轴承箱封严设计中,可以有效提高封严性能,减 少封严气体量并防止产生传统接触式碳密封的结焦 和高温^[6]。Bhate等^[6]提出将非金属的芳纶纤维刷丝密 封应用于发动机轴承箱油密封的结构设计中。Bhate 等^[6]试验测试了芳纶纤维刷丝束的磨损率、封严性能 和应力。研究表明,在油气封严中,芳纶刷式密封的封 严性能优于金属刷式密封和迷宫密封的。非金属芳纶 刷丝束的摩擦系数优于金属刷丝束的。但是由于密封 与转轴间存在油,希望进一步降低摩擦系数,减小壁 面产生摩擦热引起温度升高而导致油结焦的风险。

芳纶和 Haynes 25 刷丝束结构参数主要区别是: Haynes 25 刷丝束直径为 0.07 mm,周向布置刷丝 100~200 根 /mm,刷丝束倾斜角为 45°;芳纶刷丝束 直径为 0.012 mm,周向纤维刷丝布置最多可达 7000 根 /mm,刷丝束倾斜角为 15°。相比于 Haynes 25 金属 丝刷式密封,芳纶刷式密封在温度高于 250 ℃时性 能恶化而导致应用非常困难。

Ruggiero 等^[57]研究了芳纶刷式密封的热生成特性。芳纶刷丝束与转轴间的摩擦热由转子的转速、刷 丝束与转轴的接触水平和刷丝束与转轴间的摩擦动 力系数决定。Ruggiero 等^[58]采用试验测量和数值模拟 方法研究了碳纤维刷丝密封的摩擦热效应。采用红外 热像仪测量了具有间隙、线线接触和 0.1、0.2、0.3 mm 干涉量下刷式密封的温度分布。结果表明,碳纤维的 摩擦热相比于芳纶纤维的最大可以减少 66%。主要 原因是碳纤维具有比芳纶更小的摩擦系数,同时,试 验中碳纤维具有更小的弯曲阻力。Ruggiero 等^[59]试验 测量了芳纶纤维刷丝密封的刚度,采用净能量方法测 试了迟滞效应;采用红外热像仪测量了具有间隙、线 线接触和具有干涉量3种情况下芳纶刷式密封的摩 擦热。Ruggiero等^[59]发展的芳纶刷式密封直接刚度测 量和摩擦热生成测量技术获得的试验数据和方法为 芳纶刷式密封设计和应用提供了技术支撑和设计依 据。Ruggiero等^[60]试验对比了有无前夹板的芳纶刷式 密封的封严性能。研究表明,没有前夹板的芳纶刷式 密封的封严性能。研究表明,没有前夹板的芳纶刷丝 束由于闭合效应明显而使得刷式密封的封严性能优 于具有前夹板结构的。同时 Ruggiero等提出了2种在 前夹板开设槽的结构来增强闭合效应而提高刷式密 封的封严性能的设计方法。

Flouros 等^[61,62]针对发动机轴承箱的密封结构,采 用高温测针技术试验测量了金属和芳纶刷式密封的 瞬态温度场,如图 12 所示。同时发展基于 CFD 和 FEA 方法的刷式密封流场和温度场预测模型和数值 计算方法。研究结果表明:金属刷丝密封相比于芳纶 刷式密封对转速具有更高的敏感度,摩擦导致温升更 高。金属丝和芳纶刷式密封对转动部件都没有观察到 损伤。相比于迷宫密封均能够明显减少封严气体量。



Outirba 等⁶⁰在静态和低速条件下试验测量了 10 种结构的碳纤维刷式密封的封严性能和扭矩摩擦损 失。试验航空发动机轴承箱封严位置和试验结构如图 13 所示。研究了转轴的偏心对刷式密封性能的影响。



刷式密封技术作为先进的接触式动密封技术,可 显著减少泄漏量,提高透平的热功转换效率和运行稳 定性,是现代高性能透平领域发展的关键技术之一。 科研人员在刷式密封的泄漏流动、摩擦热效应和转子 动力特性方面开展了试验测量、数值模拟和理论分析 的研究工作,阐明了刷式密封的封严机理、摩擦热效 应的传热途径和作用机制以及转子动力特性的力学 行为和影响规律。

(1)设计搭建了常温常压环境下金属丝和非金属 丝刷式密封泄漏特性试验研究平台。提出了流热固耦 合的刷式密封摩擦热效应和传热特性数学模型和计 算方法,实现了刷式密封泄漏和摩擦传热特性及其影 响因素的数值预测。

(2)开发了刷丝束顶端力模型并给出泄漏量曲线,分析刷式密封闭合和迟滞效应试验测量方法,揭示了刷式密封闭合和迟滞效应的刷丝束力学作用机理和影响机制,建立了提高刷式密封技术综合性能的新结构和工艺技术的设计方法。

(3)开展了非金属芳纶纤维、碳纤维等非金属刷 式密封摩擦传热和封严性能的试验测量和数值研究, 实现了非金属刷式密封在航空发动机轴承箱油气封 严中的设计和应用。

7 展望

刷式密封技术作为先进的动密封技术已成为密 封领域的研究热点。刷式密封内部的泄漏流动与传 热、接触与摩擦、刷丝变形闭合和迟滞效应以及转子 动力特性等都是非常复杂的流固耦合问题,特别是在 真实航空发动机和燃气轮机的高温、高压和高转速的 运行环境下。为了进一步提高刷式密封技术在航空发 动机和燃气轮机中应用的综合性能、运行寿命和可靠 性,除了改善刷丝束的材料和加工制造工艺以外,还 需要在以下3个方面开展更加深入系统的科研工作。

(1)开展高温、高转速运行环境下刷式密封摩擦 热效应和传热特性的试验研究。先进航空发动机和燃 气轮机封严技术应用环境的日益苛刻对刷式密封摩 擦热效应、温度分布及热应力研究愈发迫切。设计搭 建模拟真实运行环境中的刷式密封泄漏特性、摩擦传 热性能的高精度试验研究平台,掌握刷式密封在实际 运行工况下的刷丝束温度、热应力特性和影响机制, 是推动刷式密封技术在航空发动机和燃气轮机中应 用和性能保证必须深化和加强的研究内容。

(2)开展高温、高转速运行环境下刷式密封接触 力和转子动力特性的试验测量技术研究。刷式密封作 为1种高效的接触式密封,对转子的偏心涡动具有很 强的适应性。目前关于航空发动机和燃气轮机真实运 行环境下刷式密封由于接触力引起的迟滞、闭合效应 以及转子动力特性的研究还非常少。因此,设计搭建 高温、高转速刷式密封力学性能试验研究平台,开展 实际运行环境下刷式密封的力学特性及其影响因素 的研究,提出刷式密封流热固耦合模型的力学特性分 析数学模型和数值方法,探究刷式密封力学特性和磨 损机制,拓宽刷式密封应用范围和提高其综合性能具 有现实的工程应用价值。

(3)开展刷式密封设计方法和体系的建立。基于 高温、高转速运行环境下刷式密封泄漏、摩擦传热和 力学性能的试验测量和数值模拟结果,掌握刷式密封 实际运行环境下流热固耦合性能的作用机制和影响 规律,提出航空发动机和燃气轮机用刷式密封设计方 法,发展新型低迟滞刷式密封、可径向移动的刷式密 封、非金属刷丝的刷式密封等结构和工艺技术,建立 具有低泄漏、高耐磨、高阻尼刷式密封结构设计准则 和体系,实现刷式密封技术的自主研发设计,提高航 空发动机和燃气轮机的热功转换效率和运行安全性。

参考文献:

- Chupp R E, Hendricks R C, Lattime S B, et al. Sealing in turbomachinery[J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22(2): 313–349.
- [2] 李军,晏鑫,李志刚. 热力透平密封技术[M]. 西安:西安交通大学出版社,2015:1-15.

LI Jun, YAN Xin, LI Zhigang. Thermal turbine sealing technology[M]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University Press, 2015:1-15.(in Chinese)

- [3] Ferguson J G. Brushes as high performance gas turbine seals[R].ASME 1988–GT–182.
- [4] Din S, Demiroglu M, Yurnquist N, et al. Fundamental design issues of brush seals for industrial applications [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2002, 124(2): 293-300.
- [5] Chupp R E, Ghasripoor F, Turnquist N, et al. Advanced seals for industrial turbine applications: dynamics seal development [J]. Journal of Propulsion and Power, 2002, 18(2):1260–1266.
- [6] Bhate N, Thermos A C, Aksit M F, et al. Non-metallic brush seals for gas turbine bearings[R]. ASME 2004–GT–54296.
- [7] Chupp R E, Dowler C A. Performance characteristics of brush seals for limited–life engines[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines

and Power, 1993, 115(2): 390-396.

- [8] Hendricks R C, Flower R, Howe H W. A brush seals program modeling and developments[J]. Journal of Rotating Machine, 1998, 4:91–96.
- [9] Chupp R E, Dowler C A. Performance characteristics of brush seals for limited–life engines[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1993, 115(2): 390–396.
- [10] Bayley F J, Long C A. A combined experimental and theoretical study of flow and pressure distributions in a brush seal[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1993, 115(2):404–410.
- [11] Turner M T, Chew J W, Long C A. Experimental investigation and mathematical modeling of clearance brush seals [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1998, 120(3):573–579.
- [12] 孙晓萍,李卫东,刘晓远. 刷式密封设计与试验研究[J]. 航空发动机,2005,31(2):17-19.
 SUN Xiaoping,LI Weidong,LIU Xiaoyuan. Design and test of brush seal[J]. Aeroengine,2005,31(2): 17-19. (in Chinese).
- [13] Sharatchandra M C, Rhode D L. Computed effects of rotor-induced swirl on brush seal performance Part 1: leakage analysis [J]. ASME Journal of Tribology, 1996, 118(4):912–919.
- [14] Chen L H, Wood P E, Jones T V, et al. Detailed experimental studies of flow in large scale brush seal model and a comparison with CFD predictions [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2000,122(10):672–679.
- [15] Chew J W, Hogg S I. Porosity modeling of brush seals[J]. ASME Journal of Tribology, 1997, 119(10):769–775.
- [16] Dogu Y. Investigation of brush seal flow characteristics using bulk porous medium approach [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2005, 127(1): 136–144.
- [17] Dogu Y, Aksit M F, Demiroglu M, et al. Evaluation of flow behavior clearance brush seals [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, 130(1): 012507.
- [18] 李军,晏鑫,丰镇平,等. 基于多孔介质模型的刷式密封泄漏流动 特性研究[J]. 西安交通大学学报,2007,41(7):768-771,779.
 LI Jun,YAN Xin,FENG Zhenping, et al. Study on the leakage flow characteristics of brush seal based on porous medium model[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2007,41 (7):768-771,779. (in Chinese).
- [19] Li J,Obi S,Feng Z. The effects of clearance sizes on labyrinth brush seal leakage performance using a reynolds-averaged Navier-Stokes solver and non-darcian porous medium model [J]. Proc. IMechE Part A: J. Power and Energy, 2009, 223:953–964.
- [20] Chen L H, Wood P E, Jones T V, et al. An iterative CFD and mechanical brush seal model and comparison with experimental results
 [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1999, 121(4):656–662.
- [21] Lelli D, Chew J W, Cooper P. Combined three-dimensional fluid dynamics and mechanical modeling of brush seals [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2006, 128(1): 188–195.
- [22] Li J, Qiu B, Feng Z. Experimental and numerical investigations on the leakage flow characteristics of the labyrinth brush seal [J]. ASME

Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2012, 134(10): 102509.

- [23] Qiu B, Li J, Yan X. Investigation into the flow behavior of multi-stage brush seals [J]. Proc. IMechE Part A: J. Power and Energy, 2014, 228 (4):416-428.
- [24] Hendricks R C, Schlumberger S, Braun M J, et al. A bulk flow model of a brush seal system[R]. ASME 1991–GT–325.
- [25] Chew J W, Guardino C. Simulation of flow and heat transfer in the tip region of a brush seal [J].Int. J. Heat Fluid Flow, 2004, 25(4): 649–658.
- [26] Dogu Y, Aksit M F. Brush seal temperature distribution analysis [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2006, 128 (3):599–609.
- [27] Qiu B, Li J. Numerical investigations on the heat transfer behavior of brush seals using combined computational fluid dynamics and finite element method [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2013, 135(12): 122601.
- [28] 邱波,李军,丰镇平.考虑刷丝束变形的刷式密封摩擦热效应研究
 [J]. 工程热物理学报,2013,34(11): 2030-2034.
 QIU Bo,LI Jun,FENG Zhenping. Investigations on frictional heat transfer of brush seals with consideration of bristle deflections [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013,34 (11):2030-2034.
 (in Chinese).
- [29] Huang S, Suo S, Li Y, et al. Theoretical and experimental investigation on tip forces and temperature distribution of the brush seal coupled aerodynamic force [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2014, 136(5):052502.
- [30] 邱波,李军.基于多孔介质局部非热平衡方法的刷式密封耦合传 热特性[J]. 航空动力学报,2015,30(5):1067-1075.
 QIU Bo,LI Jun. Conjugate heat transfer characteristics of brush seal based on local thermal non-equilibrium porous medium approach[J]. Journal of Aerospace Power,2015,30(5):1067-1075. (in Chinese).
- [31] Zhao H, Stango R J. Analytical approach for investigation bristle/backplate hysteresis phenomenon in brush seals [J]. Journal of Propulsion and Power, 2007, 23(2):273–282.
- [32] Wodd P E, Jones T V. A test facility for the measurement of torques at the shaft to seal interface in brush seals[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1999, 121(1):160–166.
- [33] Stango R J,Zhao H,Shia C Y. Analysis of contact mechanics for rotor-bristle interface of brush seal [J]. ASME Journal of Tribology, 2003,125(2):414–421.
- [34] Crudgington P F, Bowsher A. Brush seal blow down [R]. AIAA– 2003–4697.
- [35] Franceschini G, Jones T V, Gillespie D R H. Improved understanding of blow-down in filament seals[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2010,132 (4):041004.
- [36] 张元桥, 闫嘉超, 李军. 考虑闭合效应的刷式密封泄漏特性研究[J]. 润滑与密封, 2017, 42(4): 36-42.

ZHANG Yuanqiao, YAN Jiachao, LI Jun. Investigations on leakage flow characteristics of brush seal with consideration of blow down effect[J]. Lubrication Engineering, 2017, 42(4): 36–42. (in Chinese).

- [37] Crudgington P F, Bowsher A. Brush seal pack hysteresis [R].AIAA-2002-3794.
- [38] Basu P, Datta A, Loewenthal R, et al. Hysteresis and bristle stiffness effects in brush seals [J]. Journal of Propulsion and Power, 1994, 10 (4):569-573.
- [39] Tseng T W, Short J F, Steinetz B M. Development of a low hysteresis brush seal for modern engine applications[R]. AIAA-99-2683.
- [40] Zheng X, Mack M, Demiroglu M, et al. Design, manufacture and testing of variable bristle diameter brush seal[R]. AIAA-2013-3859.
- [41] Pekris M J, Franceschini G, Gillespie D R H. An investigation of flow, mechanical, and thermal performance of conventional and pressure-balanced brush seals [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2014, 136(6):062502.
- [42] 张艾萍,张帅,李相通,等. 低滞后刷式密封泄漏流动数值模拟及结构优化[J]. 润滑与密封,2015,40(2): 67-72.
 ZHANG Aiping,ZHANG Shuai,LI Xiangtong, et al. Numerical simulation on leakage flow characteristics and optimization on structure of low hysteresis brush seal [J]. Lubrication Engineering, 2015,40(2): 67-72. (in Chinese).
- [43] 杜春华,吉洪湖,胡娅萍,等.低前挡板型小尺寸刷式封严泄漏特性的试验[J]. 航空动力学报,2017,32(2): 298-305.
 DU Chunhua, JI Honghu, HU Yaping, et al. Experimental investigation on leakage characteristics of small size brush seal with low front plate [J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32 (2): 298-305. (in Chinese).
- [44] 周坤,力宁,郭徽,等. 低滞后刷式密封泄漏特性试验研究[J]. 润滑 与密封,2017,42(4):132-136.
 ZHOU Kun, LI Ning, GUO Hui, et al. Experimental investigation on leakage characteristics of low hysteresis brush seals [J]. Lubrication Engineering,2017,42(4): 132-136. (in Chinese).
- [45] Duran E T, Aksit M F, Ozmusul M. Brush seal structural analysis and correlation with tests for turbine conditions [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2016, 138(5):052502.
- [46] Conner K J, Childs D W. Rotordynamic coefficient test results for a four-stage brush seal [J]. Journal of Propulsion and Power, 1993, 9 (3):462-465.
- [47] Gaszner M, Pugachev A O, Georgakis C, et al. Leakage and rotordynamic coefficients of brush seals with zero cold clearance used in an arrangement with labyrinth fins [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2013, 135(12):122506.
- [48] Pugachev A O, Gaszner M, Georgakis C, et al. Segmentation effects on brush seal leakage and rotordynamic coefficients [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2016, 138(3): 032501.
- [49] 孙丹,刘宁宁,胡广阳,等.考虑刷丝变形的刷式密封流场特性与 力学特性流固耦合研究 [J]. 航空动力学报,2016,31(10): 2544-2553.

SUN Dan, LIU Ningning, HU Guangyang, et al. Fluid-structure interaction investigation on the flow field and mechanical characteristics in brush seal with bristle deflections [J]. Journal of Aerospace Power, 2016,31(10):2544-2553. (in Chinese).

- [50] San Andres L, Baker J, Delgado A. Measurements of leakage and power loss in a hybrid brush seal [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2009,131(1):012505.
- [51] San A L, Baker J, Delgado A. Rotordynamic force coefficients of a hybrid brush seal: Measurements and predictions [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010, 132(4):042503.
- [52] Schwarz H, Friedcrichs J, Flegler J. Design parameters of brush seals and their impact on seal performance[R]. ASME 2012–GT–68956.
- [53] Schwarz H, Friedrichs J, Flegler J. Axial inclination of the bristle pack, a new design parameter of brush seal for improved operational behavior in steam turbines[R]. ASME 2014–GT–26330.
- [54] Schwarz H, Friedrichs J. Preliminary investigations for a pressure balanced back plate at low inclined brush seals [R]. ASME 2015–GT– 42580.
- [55] Raben M, Friedrichs J, Helmis T, et al. Brush seals used in steam environments-chronological wear development and the impact of different seal designs [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2016, 139(5):051901.
- [56] Raben M, Friedrichs J, Flegler J. Brush seal frictional heat generationtest rig design and validation under steam environment [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2016, 139 (3): 032502.
- [57] Ruggiero E J, Allen J, Demiroglu M, et al. Heat generation characteristics of a Kevlar fiber brush seal[R]. AIAA-2007–5738.
- [58] Ruggiero E J, Allen J, Lusted R M. Heat generation characteristics of a carbon fiber brush seal[R]. AIAA-2008-4508.
- [59] Ruggiero E J, Allen J, Lusted B M. Experimental testing techniques for kevlar fiber brush seals[R]. ASME 2009–GT–60172.
- [60] Ruggiero E J. Influence of friction on the blow-down behavior of an aramid fiber brush seal[R]. ASME 2012–GT–69329.
- [61] Flouros M, Hendrick P, Outirba B, et al. Thermal and flow phenomena associate with the behavior of brush seals in aero engine bearing chambers [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2015, 137(9): 092503.
- [62] Flouros M, Stadlbauer M, Cottier F, et al. Transient temperature measurements in the contact zone between brush seals of Kevlar and metallic type for bearing chamber sealing using a pyrometric technique [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2013, 135(8):081603.
- [63] Outirba B, Hendrick P. Experimental testing of carbon brush seals for aero engines bearing chambers[R]. ASME 2014–GT–25684.

(编辑:刘 亮)