

刷式密封技术研究进展与发展趋势

Research Progress and Development of Brush Seal Technology

■ 孙丹 赵欢 / 沈阳航空航天大学 于霄 / 中国航发沈阳发动机研究所

刷式密封作为一种先进的柔性接触式动密封结构，是传统篦齿密封最简单有效的替代产品，在航空发动机型号研制中具有重要的应用前景。

密封作为航空发动机重要的基础零部件，其性能直接影响着航空发动机的燃油经济性和工作效率，先进的密封技术可有效减少泄漏量，降低航空发动机的级间能量损耗，进而提升航空发动机的总体性能。刷式密封作为一种先进的柔性接触式动密封结构，起着防止工作介质泄漏和节能降耗的关键作用，在航空发动机及燃气轮机等涡轮机械上应用效果显著，航空发动机中密封装置应用位置如图1所示。

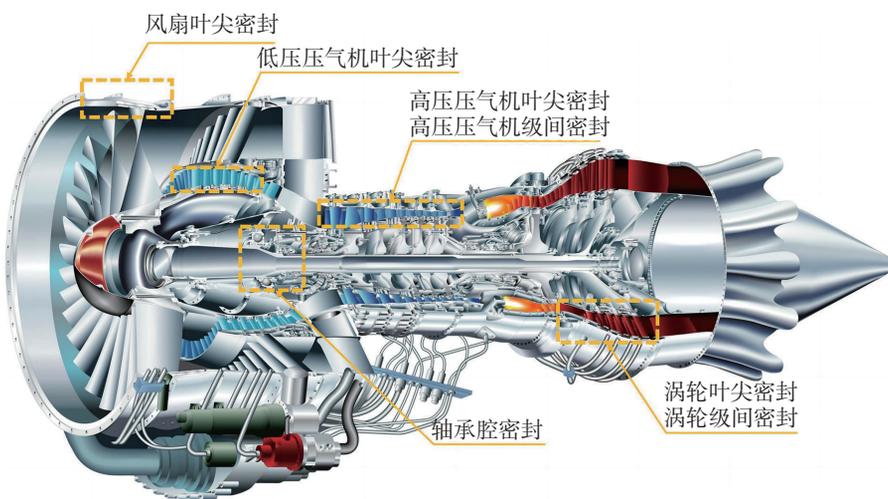


图1 航空发动机中密封装置应用位置

结构形式与工作原理

刷式密封主要由前挡板、后挡板以及两者之间的刷丝束3部分组成，刷丝束是捆扎在一起的高集中度、具有一定周向倾角的弹性圆截面金属丝束，刷丝自由端与转子表面相互接触摩擦，固定端位于前后挡板之间，前挡板处于气流高压区，后挡板处于气流低压区。

由于刷丝束中刷丝间空隙的不均匀性作用，均匀的来流进入刷丝束中就变得不均匀，从紧密的刷丝束区域向疏松的刷丝束区域偏流，这些偏流在刷丝之间逐渐形成同向流和射流，并产生随机的二次流和旋涡流，刷丝束区域流体流动情况

如图2所示。而当射流遇到前面紧密的刷丝束，就会改变运动方向而变成和主流方向垂直的横向流动，即横向流。正是由于刷丝束破坏流动而确保流动的不均匀性，使流体产生了自密封效应，横向流动代替向前流动能使流过刷丝的总压降增大，从而减少泄漏。

刷丝束与前后挡板的固定方式

有焊接型和箍制型两种。焊接型刷式密封存在焊接热对刷丝可靠性的影响，并且不适用于非金属刷丝材料。德国MTU公司提出了一种箍制型刷式密封结构，与焊接型刷式密封相比，箍制型刷式密封刷丝材料可选择金属或非金属轻质材料，为航空发动机密封装置提供了新的选择。然而，实际工作中发现，传统

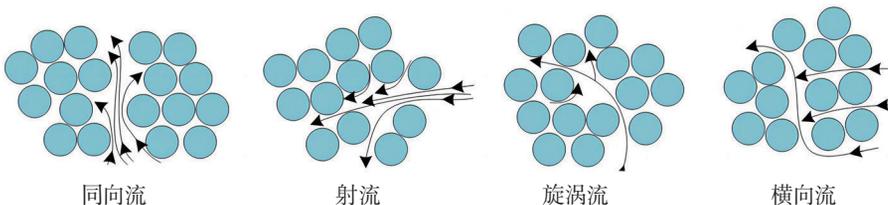


图2 刷丝束区域流体流动情况

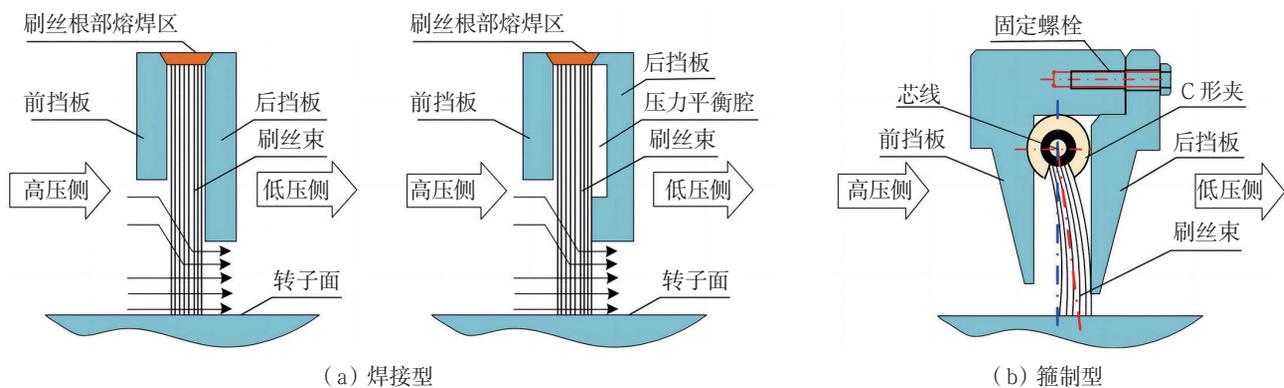


图3 单级刷式密封结构

刷式密封工作时刷丝在气流力和摩擦力的共同作用下会发生滞后效应和刚化效应，直接影响刷式密封的封严性能和使用寿命。研究人员在传统刷式密封结构基础上，提出了具有压力平衡腔的低滞后型刷式密封结构。低滞后型刷式密封在后挡板与刷丝束接触部位设有环形压力平衡腔，使得刷丝束与后挡板不贴合，减小了刷丝与刷丝之间以及刷丝束与后挡板之间的摩擦力，降低了刷式密封的滞后效应和刚化效应，提高了密封性能。图3给出了单级刷式密封的结构。

发展现状

一般情况下，单级刷式密封能承受的最大上下游压差为0.3~0.35MPa，近年来，随着涡轮机械向高性能方向发展，密封结构上下游压差不断增加，如一般涡扇发动机高压压气机出口与高压涡轮进口等共10余处密封部位压差达0.4~1.8MPa。单级刷式密封因承压能力有限而无法满足不同涡轮机械的工作需求，高压差工况下需要采用多级刷式密封。相对于单级刷式密封而言，多级刷式密封具有承受的压差更大，密封性能更好等优点。

研究人员先后提出了多种多级刷式密封结构，如图4所示。传统型和低滞后型单级刷式密封的串联组合是常用的多级刷式密封结构，如图4(a)和图4(b)所示。为进一步提高多级刷式密封的封严特性，研究人员提出了一种刷丝具有轴向倾角的多级刷式密封结构，如图4(c)所示，该结构刷丝束向高压侧倾斜，在气流力的作用下，刷丝束产生吹下效应和轴向变形，刷丝束贴近转子表面，减小径向间隙，达到提高封严的效果。图4(d)给出了一种首级具有抑振弹片的多级刷式密封结构，针对于前排刷丝在工作中易受到不稳定的气流扰动而产生疲劳断裂问题，该抑振弹片可对前排刷

丝进行保护，延长刷式密封使用寿命。针对多级刷式密封末级刷丝束承担压降大和刷丝温度高的问题，研究人员提出了一种具有级间排热通道多级刷式密封结构，如图4(e)所示，该结构在相邻末两级之间设置气流泄漏通道，用于带走高温气流，降低末级刷式密封的温度，缓解由于温度过高导致刷丝熔断，延长了使用寿命。针对转子径向跳动引起的刷丝摩擦磨损问题，研究人员提出了一种刷丝径向设置的多级刷式密封结构，如图4(f)所示，该结构可以缓解由转子跳动引起的刷丝摩擦磨损，此外，该结构紧凑，具有占用空间小和质量轻的优点。

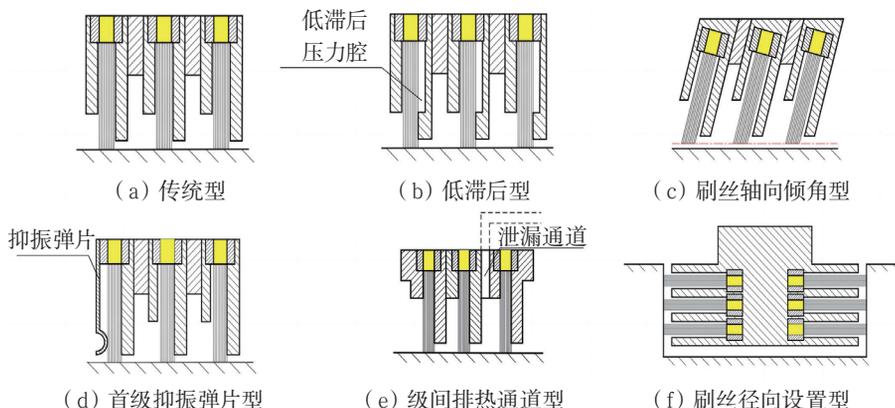


图4 多级刷式密封结构

改型设计

随着多级刷式密封的广泛应用,研究人员在实际应用中发现多级刷式密封存在提前失效、寿命过短的问题,靠近下游级的刷丝会发生快速失效,快速失效又会转移到上一级刷丝,最终导致多级刷式密封整体失效。这是由于各级结构相同的多级刷式密封下游级刷丝束承担压降大于上游级刷丝束承担压降,这种非均衡级间压降引起各级刷丝承受气流力、接触力、摩擦热效应等负荷的不同,由此导致下游级刷丝束出现摩擦磨损、高温粘连熔断、疲劳断裂等提前失效的故障。下游级刷丝束失效后,逐一传递至上游级,加速各级失效,最终导致多级刷式密封整体失效。研究表明,影响多级刷式密封级间压降均衡性的主要原因是逐级增大的体积流量增量,各级压降随体积流量增量的增加而增大,增大下游各级流道间隙面积可有效降低各级体积流量增量,改善多级刷式密封各级压降分配不均衡性。因此,针对各级相同的多级刷式密封提前失效、寿命过短的问题,笔者团队提出了一种新型各级差异化刷式密封结构^[1-2],如图5所

示。各级差异化刷式密封通过提高下游级后挡板保护高度、减少下游级刷丝厚度从而增大下游级的流通面积,进而改善了多级刷式密封级间压降不均衡的问题,避免某级刷丝承担压降过大而提前失效,延长整体多级刷式密封的使用寿命。

发展趋势

刷式密封作为一种接触式动密封,具有良好的密封效果。随着航空发动机性能提高,航空发动机温度、压力、转速等状态参数向升高方向发展,刷式密封摩擦磨损问题日益突出,且刷式密封目前多应用于转、静子之间的单转子系统。刷式密封未来应向采用新型减磨材料刷丝与对转轴间刷式密封两个方面发展。

双转子轴间旋转刷式密封

除了常规的单转子系统部位可以应用刷式密封,在高低压转子轴间部位同样存在封严需求^[3-5]。根据美国国家航空航天局(NASA)的研究报告显示,双转子轴间部位工况环境更为复杂。首选,需要考虑旋转轴的径向跳动与轴向窜动,这对于密封形式的柔性与耐摩擦磨损性能提出高要求;同时,双转子反向

旋转导致密封部位相对转速叠加,对密封形式提出高线速度性能要求。

NASA的研究报告中分别对比了3种主流的密封形式:石墨密封、迷宫密封和刷式密封。其中,石墨密封的泄漏间隙最小,封严性能最佳,但石墨材料自身脆性导致其不能很好地适应双转子轴间随时可能发生的径向跳动与轴向窜动,可能会因为石墨材料破碎进而导致密封形式失效;迷宫密封作为应用最广泛的一种传统密封形式,具有成本低、结构可靠、封严性能稳定等优点,但迷宫密封的封严间隙相比其他两种密封形式大,使得其封严性能较弱,而选取密封形式的关键指标之一便是封严性能;刷式密封由于刷丝自身具有一定的柔性,使得刷式密封可以完美地贴合双转子轴间封严部位的工况需求,当内外转子分别发生径向跳动与轴向窜动时,柔性刷丝都可以及时地退让以减少磨损,或及时地填补泄漏间隙。因而,在石墨密封,迷宫密封与刷式密封3种密封形式中,刷式密封更能满足双转子轴间封严部位需求。

在双转子轴间部位应用刷式密封也为刷式密封带来了挑战:柔性刷丝无论安装于内转子或外转子,均会在高转速下受离心效应的影响,这对于刷丝尖端力学变形与摩擦磨损行为产生影响;同时,双转子轴间部位的相对转速叠加导致线速度过高,常规的金属材料刷丝难以满足耐摩擦磨损性能需求。因此,亟待开展新型减磨材料的刷式密封。

新型减磨材料刷式密封

目前,刷式密封常用的金属材料为Haynes25,是一种钴基高温合金,其高温性能与抗氧化性能在金

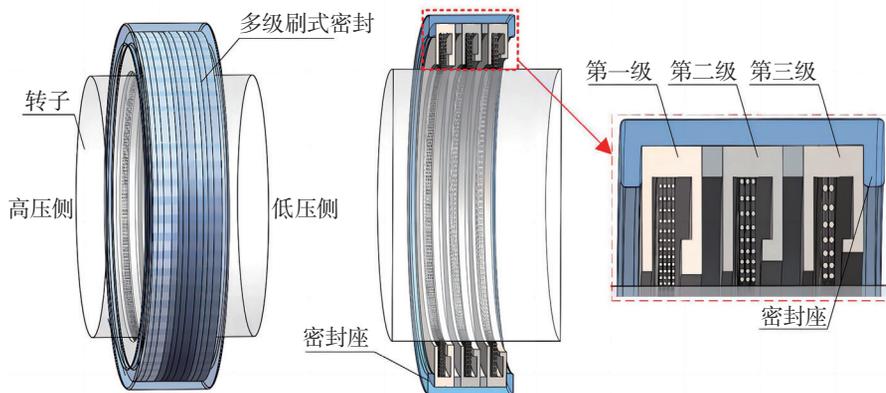


图5 新型各级差异化多级刷式密封结构

属材料中表现优异。采用非金属刷丝的刷式密封技术目前也在航空发动机轴承箱的封严设计中得到应用，可以有效避免传统接触式碳密封的油结焦与高温。已经有学者对非金属的芳纶纤维刷式密封开展研究，试验结果表明，非金属材料的芳纶纤维刷丝封严性能要优于金属材料的刷式密封，且摩擦系数更低，可以避免摩擦热引起高温导致油结焦的风险。同时，先进的刷式密封制造公司如技术集团(Technetics Groups)等已将碳纤维刷丝投入刷式密封产品的使用，作为非金属材料，刷丝与转子之间的摩擦系数更低，同时导热性能更佳，刷丝尖端产生的热量更少。因此，将来开展基于新型减摩材料的刷式密封将成为研究的热点方向。

未来研究热点

刷式密封未来研究热点将围绕新型低滞后效应单级刷式密封、适应离心效应的旋转轴间刷式密封、大冲击载荷作用下单级刷式密封、缓解摩擦热效应积累的多级刷式密封4个方面开展。

在航空发动机压差升降循环过程中，刷丝在轴向压差作用下紧贴后挡板会导致刷丝滞后于转子运动。刷式密封的整体封严性能会受到滞后效应的影响，而摩擦磨损性能会受到刚化效应的影响。因此，以改善滞后效应为主的新型低滞后刷式密封结构将成为未来单级刷式密封研究的热点之一。

针对更复杂工况对刷式密封设计改型，例如，双转子轴间刷式密封需要综合考虑：高转速离心效应对刷丝力学变形及摩擦磨损特性的影响、高线速度下新型减摩对偶材

料在刷丝材料方面的创新，开发适用于双转子轴间缓解离心效应的刷式密封。

针对航空发动机特定运行工况也可开展相关研究，例如，对大冲击载荷作用下刷式密封封严性能及摩擦磨损特性机理进行分析，开发新型适应转子大冲击载荷作用的刷式密封。

未来航空发动机朝着高性能方向发展，多级刷式密封的应用会更加广泛。针对多级刷式密封摩擦热效应逐级积累，下游级摩擦热效应严重的问题，亟待针对多级刷式密封的摩擦热效应开展理论与试验研究，开发缓解下游级摩擦热效应的多级刷式密封结构。

结束语

先进的密封技术可有效减少泄漏量，降低航空发动机的级间能量损耗，刷式密封技术作为先进的动密封技术是当下密封领域研究的热点。为了进一步提高刷式密封技术在航空发动机上应用时的封严性能与使用寿命，在试验研究方面需要针对刷式密封所处真实工况开展高温、高速环境下刷式密封刷丝动力学特性以及摩擦磨损特性试验研究；在理论方面需要深入探究刷式密封刷丝在气流力与各力学效应作用下刷丝变形的流固耦合作用机理，同时需要开展结构设计优化的研究，进而提高刷式密封的设计水平，拓宽其应用范围。未来，研究人员将设计出低泄漏、长寿命、耐磨损的刷式密封，应用到航空发动机与燃气轮机等涡轮机械中，进而提升航空发动机的总体性能。

航空动力

(孙丹，沈阳航空航天大学，教

授，主要从事航空发动机先进密封技术研究)

参考文献

- [1] 赵欢, 李业隆, 孙丹, 等. 各级差异化多级刷式密封级间压降均衡性数值与实验研究[J]. 航空动力学报, 2022, 37(5): 934-945.
- [2] ZHAO H, LI Y, SUN D, et al. Inter-stage pressure drop of multi-stage brush seal with differentiated Structure[J]. Journal of engineering for gas turbines and power: Transactions of the ASME, 2023.
- [3] HOLLOWAY G, MEHTA J, ROSADO L, et al. Innovative rotating inter-shaft brush seal for sealing between rotating shafts part I - mechanical design of the rotating brush seal[C]. 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Sacramento, California, 2006.
- [4] HOLLOWAY G, MEHTA J, ROSADO L, et al. Innovative rotating inter-shaft brush seal for sealing between rotating shafts part II: modeling of the brush seal leakage flows[C]. 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Sacramento, California, 2006.
- [5] SARAWATE N, TRIVEDI D. Rotating brush seal design and performance testing. proceedings of the ASME Turbo Expo 2021: turbomachinery technical conference and exposition[C]. Volume 5B: Heat Transfer general Interest; Internal Air Systems; Internal Cooling. Virtual, 2021.