航空发动机密封技术应用研究

胡广阳
（中航工业沈阳发动机设计研究所，沈阳 110015）

摘要：介绍了石墨圆周密封、刷式密封、指状密封、气膜密封和其他几种新型密封技术研究的新进展和在航空发动机上的应用，对密封技术的机理、特点和在研究中遇到的问题进行了分析和讨论。阐明了为适应航空发动机的发展要求，密封技术应进行材料、工艺、结构、机理等多方面的开创性设计，并提出在密封技术设计中应引入控制概念的观点。

关键词：密封技术；航空发动机；材料；工艺

胡广阳(1970)，男，高级工程师，从事航空发动机机械系统设计研究工作。

收稿日期：2012-02-09

Application Research of Seal Technology for Aeroengine

HU Guang-yang
（**AVIC Shenyang Engine Design and Research Institute, Shenyang 110015, China**）

Abstract: The development and application of aeroengine seal technology were introduced, which include high misalignment carbon seals, brush seal, finger seal, films seal and other new kinds of seal technology. The principles, characteristics, problems were analyzed and discussed. The innovative design on materials, techniques, structures and principles of seal technology were conducted to meet aeroengine development requirements and the views of control concept were introduced in seal technology design.

Key words: seal technology; aeroengine; materials; technics

0 引言

随着航空发动机技术的发展，密封技术已成为影响发动机性能和寿命的重要因素。自 20 世纪 80 年代中期以来，世界上航空发动机技术领先国家均将发展新型密封技术作为尚未开掘，但具有巨大潜力的领域，投入大量的人力、物力，进行了深入研究，相继开发出了刷式密封、指状密封、气膜密封等多种不同结构的新型密封技术。发动机密封的工作条件除具有流体机械转子系统的典型特征外，还要承受高密封表面相对速度、高环境温度、高密封压差以及剧烈振动等各种因素引起的变形和位移。基于此，近年来密封技术在发动机上的应用从传统的石墨圆周密封到各种新型的密封都有不同程度的发展。

本文主要介绍了近年来几种新型密封技术在航空发动机上的应用。

1 石墨圆周密封技术

经过几十年的发展，石墨圆周密封技术已经在航空发动机轴承腔密封中成功应用。但随着先进发动机中弹性支撑和齿轮驱动涡轮风扇（GTF）发动机等新技术的广泛应用，对石墨圆周密封结构除了要求具有更高的抗氧化温度和高摩擦线速度外，又增加了对大径向跳动和一定角向偏差的承受力要求。而现有石墨圆周密封结构只能承受综合考虑不大于 1 mm 的径向跳动，很难满足新的设计要求。

STEIN 密封公司曾为 PW 公司提供了 2 种用于 GTF 发动机风扇轴的石墨圆周密封方案，如图 1 所示[1]。这种密封结构可承受 2.5 mm 的径向跳动，同时还可承受 0.5°的角向偏差，并且具有 30000 h 的平均拆换间隔时间。2 种方案均基于浮动背环设计，能将石墨环作为 1 个整体部件随轴一起做径向运动。第 1 种方案放弃了传统设计中的接头和定位槽，改动了石墨环的内径，增加了轴向垫板；第 2 种方案通过“摇臂环”减少石墨轴向垫板与石墨环密封面间的相对运动，径向相对运动被转移到摇臂环与密封座之间。2 种方案均能在不对石墨装置进行大改动的情况下，显

著提高密封适应转子大径向跳动的能力;但存在浮动背板与固定背板间的磨损、浮动背板和浮动衬套的防转等难点尚未解决。尽管如此,2 种方案对较传统的石墨圆周密封结构提供了 1 种改进的新思路和新方向。

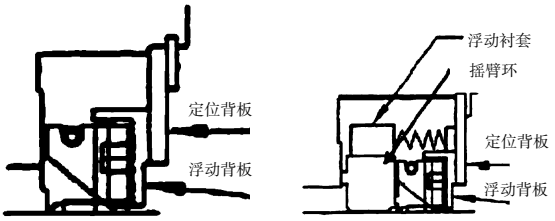


图 1 可承受大径向跳动的石墨圆周密封方案

石墨圆周密封装置除了在结构上的创新外,在材料选择上,要以高弯曲强度和低弹性模量为基准,而密封跑道材料则选用高热传导率的低合金钢,以便于快速散发摩擦密封表面产生的热量。同时为适应更高的密封温度和其它应用环境(例如盐雾环境),采用新工艺取代高温抗氧化石墨的浸渍无机盐的处理工艺。美国在 IHPTET 计划中,已开发验证了用 BN 作为高温抗氧化石墨添加剂的材料制造工艺技术,该材料具有优良的高温耐磨损性能,不但可以延长热端密封结构的使用寿命,而且能够提高发动机密封技术在海洋等潮湿环境下的工作可靠性,并大大减少因浸渍物析出所带来的维护成本。

2 刷式密封和指状密封技术

目前,篦齿密封技术在航空发动机中有着最广泛的应用。面对其较高的泄漏和性能损失,更需要积极地发展新的密封技术。而刷式密封[2]和指状密封技术在许多方面均具有优势,但也由于存在一些相似的问题,至今仍没有在先进航空发动机(特别是军用发动机)上得到广泛应用。

近年来,刷式密封技术研究主要集中在解决密封的“滞后效应”、刷丝束的“刚化效应”和“压力闭合效应”等方面。密封的“滞后”使其在转子发生摆动时的泄漏大大增加,而刷丝的“刚化”与“压力闭合”或称“吹伏”则会造成磨损增加,同时产生更多的功率损耗。

“吹伏”是气流流过刷丝时产生的 1 种现象。气流顺着刷丝流动会对刷丝产生 1 个指向轴心的径向力,因此,增加了刷丝朝向密封跑道的运动趋势。这种趋势可以减小刷丝端部与密封跑道之间的缝隙,从而减少泄漏;但是在密封作用于大压差的情况下,这种趋势也会造成刷丝与跑道的接触力过大,引起过度磨损,进而使泄漏增加。试验显示[3],在刷丝前增加遮流板能有效减少气流对刷丝的“吹伏”(特别是在采用低刚度刷丝的情况下),同时遮流板还能减缓密封结构上游高速气流吹向刷丝时对刷丝造成的“扰乱”。

密封的“滞后”与刷丝的“刚化”都是由密封结构所承受的高压差造成的,气体不平衡力将刷丝压在背板上,并使之与背板间产生较大摩擦力。当转子发生径向偏移时,刷丝被转子压向外侧,而当转子转离刷丝时,由于刷丝与背板间的摩擦力使刷丝难以复位,产生较大密封间隙,使泄漏增加,直到压力减小使摩擦力减小后,刷丝才能跟随转子保持贴合减少泄漏,这样就造成了“滞后”。刷丝与背板间的摩擦力还使刷丝随转子浮动时需要承受更大的接触力,使刷丝“相对刚度”大大增加造成“刚化”,进而增加了密封结构的磨损。研究表明,密封元件所承受的气体不平衡力造成刷丝与背板间的摩擦力过大,是密封“滞后”与“刚化”的根本原因[4]。

指状密封结构也存在“滞后”和“刚化”的问题[5]。为有效改善普通指状密封结构的“滞后”,开发了 1 种压力平衡型指状密封结构[6],如图 2 所示。其结构与普通指状密封的相似,只是除了有前隔环外,又在指状元件与背板之间增加了 1 个后隔环,使指状元件与背板之间形成 1 个缝隙,同时又在靠近密封结构内径的位置布置了 1 个窄密封坝,而形成了 1 个平衡腔。平衡腔通过一些小孔与密封结构上游高压侧相通,使其压力始终与上游压力保持一致。这种结构使作用在指状元件上的气体不平衡力大为减小,从而减小指状元件与背板间的摩擦力,使指状密封垫在全部工作条件下都能保持在合适位置,有效地防止“滞后”的发生。因此,指状密封结构的泄漏无论在稳态或是过渡态均能保持在较低水平。

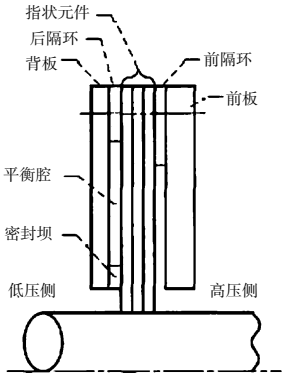


图 2 压力平衡型指状密封结构

采用类似低滞后结构并另外带有遮流板以防止“吹伏”和“扰乱”的低滞后刷式密封结构(如图 3 所示)已经进行了全尺寸(915 mm)的试验器试验[7],并在

GE90 发动机发展型上进行了试验，对单级低滞后刷式密封结构进行了 385 h 共 1300 个低周疲劳循环试验，试验后的刷式密封结构磨痕平滑，没有出现刷丝的扰乱。尽管由于密封跑道的径向偏移,使刷式密封内径有偏摩的痕迹，但其内径仍然保持光顺。单级低滞后型刷式密封结构的性能比 1 个传统型双级刷式密封结构的优势明显。二者试验前的泄漏率相当,但试验后单级低滞后型刷式密封结构的泄漏率只增大了 16%，而传统型双级刷密封结构的泄漏率增大了 110%。

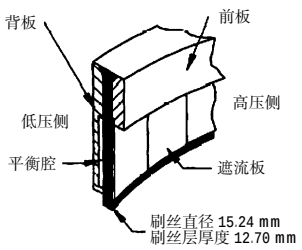


图 3　带遮流板的低滞后刷密封结构

功率损失也是刷式密封结构和指状密封结构等接触式密封结构遇到的共同问题,并随着密封线速度以及密封压差的增加而增加。试验表明[8],对于 1 个初始过盈量为 165 μm 的指状密封结构和初始过盈量为 96.5 μm 的刷式密封结构而言,当密封线速度达到 366 m/s,密封压差分别为 70、275 和 517 kPa 时的功率损失分别为 1.5、6 和 10 kW。刷式密封结构的功率损失略大于指状密封结构的,而二者功率损失的水平基本相当。

3　气膜密封技术

凭借在高摩擦线速度、高工作温度和高密封压差等工况下所具有的出色工作能力,端面气膜密封技术在转子运转较平稳的地面旋转机械中得到广泛成功应用。但发动机转子系统剧烈振动和变形使密封面在工作时的位移和跳动可达到气膜厚度的几十倍,因此,尽管对端面气膜密封技术的研究与开发已进行了几十年,发展了流体静压、流体动压和动静压混合等多种形式,以及包括吸气式端面密封结构在内的多种创新结构,但由于密封结构端面的磨损过度或是泄漏过大等原因,迄今为止仍很少见到端面气膜密封技术在航空发动机上实际应用。

同端面气膜密封结构相比,柱面气膜密封结构可以有较高的径向柔性,并可以避免端面跳动对密封效果的影响,因此,更适于在航空发动机上应用。近年来,越来越多的研究集中于柱面气膜密封技术。

经过改进的柔顺片密封结构[9]如图 4 所示。其薄片状的密封元件在流体动压气膜的作用下与转子外边面保持非接触状态,背面的波形凸起起到柔顺弹性支撑的作用,使密封片随转子上下浮动,保持密封性能。试验表明,在直径为 72 mm、转速为 40000 r/s、环境温度为 20 ℃、压比为 6 的情况下,气膜的泄漏仅为刷式密封结构的 30%，且没有发现磨损。在此基础上,正计划进行直径为 152 mm 的密封试验,试验转速可达到 20000 r/s,温度达 1200 ℃。

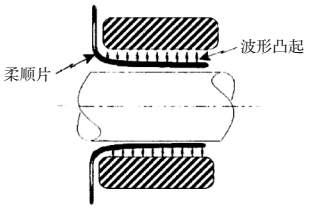


图 4　柔顺片柱面气膜密封结构

4　几种新型密封技术

(1)“靴衬”刷式密封结构[10]如图 5 所示。该密封结构在刷丝尖部增加了靴形的衬垫与转子接触。当转子转动时,“靴衬”会在流体动力产生的压力作用下与转子脱离接触。产生的气膜使密封转、静子不再接触,能够减轻磨损，并减少热量的产生,降低工作温度,同时还具有反转能力。这种密封结构具有接触式密封的高性能，同时还有非接触式密封的长寿命。

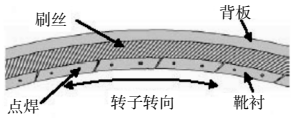
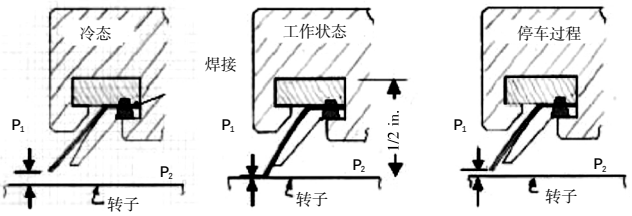


图 5　“靴衬”刷式密封结构

(2)压力驱动薄片密封结构[11]如图 6 所示。该密封结构在启动(冷态)和停车等过程压力较小的状态时是非接触的,由此可以避免磨损;而在工作状态时是接触式的,其密封性能可以达到刷式密封性能衰减以前的水平。这种结构的主要密封元件由多层薄片高温合金(如 Haynes25)叠加而成,在薄带的边缘切出一些缝隙,并向轴的内侧弯曲一定角度,形成类似圆台状的结构。由密封结构所承受的压力决定薄片的层数,每 1 层薄片上的缝隙像瓦片一样相互错开来阻挡气流。密封的支撑元件面向密封的高压侧,支撑着密



(a) $P_1=P_2$,转静子非接触间隙大　(b) $P_1>>P_2$,转静子非接触　(c) $P_1>P_2$,转静子非接触间隙小

图 6　压力驱动薄片密封结构

封薄片，承受密封压差。密封结构扇形段通过背环插入静子部件中。背环、支撑元件和密封元件采用焊接连接。通过初步的试验和理论分析认为，该型密封可以适应不同的工作状态，在避免磨损、提高磨损承受力、延长密封寿命、降低泄漏、提高耐压能力、适应反转工况、缩小密封的轴向尺寸以及降低制造成本等多方面，比篦齿密封结构和刷式密封结构都具有一定优势。

（3）非金属刷式密封结构是 1 种用于轴承腔的新型滑油密封结构，试验[12]结果表明，该密封结构（特别是在滑油的作用下）在泄漏特性和磨损等方面均优于金属刷式密封结构，但要满足在发动机轴承腔中的应用，密封摩擦热产生的温升能否满足滑油结焦温度的限制仍是主要制约因素。

5 结束语

综上所述，密封技术研究对密封材料和特种加工工艺的大力推动和牵引非常重要，同时要对密封机理进行创新性发展，需对密封结构内部在建立大量翔实准确的试验数据的基础上进行详细分析。

另外，密封技术还应该引入控制的概念。所谓的涡轮间隙控制，实际上就是通过对叶尖密封间隙的控制提高密封性能，从而提高涡轮性能。在发动机密封引气流路上增加控制活门，则可以为不同工况提供不同的封严气，以降低密封结构的使用要求，提高可靠性。压力驱动薄片密封结构就是 1 种控制密封状态的密封结构，可以在不同工况下提供大间隙、小间隙和接触等不同密封形式，以适应工况的复杂多变。

先进航空发动机密封技术对材料性能和加工精度具有特殊的依赖性，现阶段单一的密封形式很难满足发动机越来越复杂的工作环境和增大的工况范围以及苛刻的性能 / 寿命要求。相反，一些复合型结构密封显现出旺盛的生命力。1 套密封结构在不同工作条件下表现出不同的工作状态，为复杂的发动机工况提供最合适的密封形式。先进国家的密封技术进展表明，密封技术必须进行材料、工艺、结构、机理等多方面的开创性设计变革，才能适应航空发动机的发展需要。

参考文献：

[1] Pescosolido A, Dobek L. Development of high misalignment carbon seals[R]. AIAA-2001-3625.

[2] 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.

[3] Short J F, Basu P, Datta A, et al. Advanced brush seal development[R]. AIAA-96-2907.

[4] Basu P, Datta A, Johnson R, et al. Hysteresis and bristle stiffening effects of conventional brush seals [R]. AIAA-93-1996.

[5] 曹静，吉洪湖，金峰，等. 指式封严结构中气流流动与传热特性分析[J]. 航空发动机，2011,37(4):33-36.

[6] Arora G K, Proctor M P, Steinetz B M, et al. Pressure balanced, low hysteresis, finger seal test results [R]. AIAA-99-2686.

[7] Tseng T W, Short J F, Steinetz B M. Development of a low hysteresis brush seal for modern engine applications [R]. AIAA-99-2683.

[8] Proctor M P, Delgado I R.Leakage and power loss test results for competing turbine engine seals [R]. ASME 2004-GT-53935.

[9] Salehi M , Heshmat H .Evaluation of large compliant foil seals under engine simulated conditions[R]. AIAA-2002-3792.

[10] Grondahl C.Pressure Actuated leaf seals for improved turbine shaft sealing[R]. AIAA-2005-3985.

[11] Delgado A, Andres L S, Justak J F. Analysis of performance and rotordynamic force coefficients of brushseals with reverse rotation ability[R]. ASME 2004-GT-53614.

[12] Bhate N, Thermos A C, Aksit M F.Non-metallic brush seals for gas turbine bearings[R]. ASME 2004-GT-54296.