

某涡喷发动机密封环研制^{*}

刘艳梅 孙 扬 宋鸿达

(航天工业总公司31所, 北京, 100074)

摘 要: 简要论述了某涡喷发动机密封环在发动机中的工作原理, 结合发动机的研制, 阐明了密封环结构设计、机械性能计算、材料选择、制造加工方法。研制的密封环, 经发动机各项试验考核, 寿命和密封可靠性均符合涡喷发动机总体设计要求。

主题词: 涡轮喷气发动机, 密封环, 结构设计, 机械性能

分类号: V 235. 11

STUDY OF SEAL RING OF TURBOJET ENGINE

Liu Yanmei Sun Yang Song Hongda

(The 31st Research Inst., Beijing, 100074)

Abstract: The mechanism of the seal ring of a turbojet engine was discussed. The structure design, mechanical performance, material and manufacture choosing for the seal ring were studied particularly. The results of engine tests show that the seal ring is conformed to the requirement of the engine design.

Subject terms: Turbojet engine, Seal ring, Structure design, Mechanical performance

1 引 言

某涡轮喷气发动机使用的密封环, 以动密封和静密封来实现对气态和液体介质的密封, 它是涡喷发动机中重要零件之一。目前国内尚未见象某涡喷发动机中那样的密封环在“无润滑”条件下工作的应用实例。由于发动机性能的不断提高, 要求密封环寿命长、工作可靠、油耗量低、摩擦损失少以及成本低等。为使这种外形简单而又小的金属密封零件达到上述要求, 在研制中采取了独特的设计, 沿用了内燃机活塞环行业的有关技术, 试制出满足某涡喷发动机使用的密封环。

2 结构设计^[1, 2]

密封环大小由转子轴颈和中心孔的大小决定。图1为密封环装入发动机内的简图。图2为发动机工作时环受力图, 图中 p_2 为压气机压力, p_z 为轴承腔压力, h 为密封环高度。为防止润滑油非正常泄漏, 靠环端面 and 环外圆密封, 受压差的作用, 环总是贴向转子轴颈槽内一侧, 该侧面即环端面和轴颈端面形成封严面, 属动密封, 转子高速旋转, 环基本不动。当环侧面贴边后稳态时就不会产生漏气、漏油现象。当 p_2 与 p_z 有波动时, 原环外圆(桶面)与固定面形成条线密封, 可随时调节, 保持线密封, 同时侧面贴边也可保持有角度的密封或线密封。

* 收稿日期: 1998-12-28, 修回日期: 1999-05-25

结构设计时考虑下列几个因素: (1) 密封工作时处于压缩状态, 环外圆构成完整的圆为自由状态, 缺口张开则不是一个整圆。(2) 径向弹力与自由开口大小和所选用材料的弹性模量有关。(3) 为保证密封环在涡喷柔性转子偏摆状态中仍能保持可靠密封和安装方便, 密封环外圆加工成桶形, 桶面度为 $0.003\text{ mm}\sim 0.012\text{ mm}$ (类似球面)。(4) 端面密封对接触面的表面粗糙度有一定的要求, 它直接影响密封效果、耐磨性和摩擦力大小。(5) 保证工作可靠, 还要满足热稳定性、漏光度和翘曲度等技术要求。(6) 结构上要突出抗粘着磨损设计。

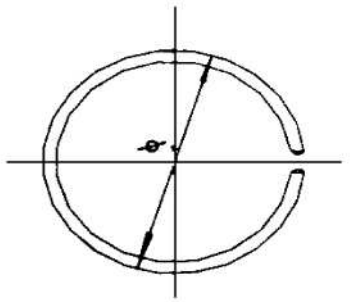


Fig. 1 Structure of seal ring

密封环是自张性开口环形密封元件。理论上的主要泄漏通道是闭口间隙。由于密封环与转子轴颈环槽这一对摩擦副在“无润滑”且 p, u 值很高的条件下工作, 摩擦功大, 温升快, 易于出现材料的局部融溶而产生粘着磨损, 所以这一对摩擦副, 必须具有突出的抗粘着性, 以保障转子安全运行。在此应当指出, 文中所述“无润滑”是与激溅润滑相对而言, 从滑油对摩擦副的冷却与减磨效果比较, 前者极差。抗粘着磨损设计的主要内容

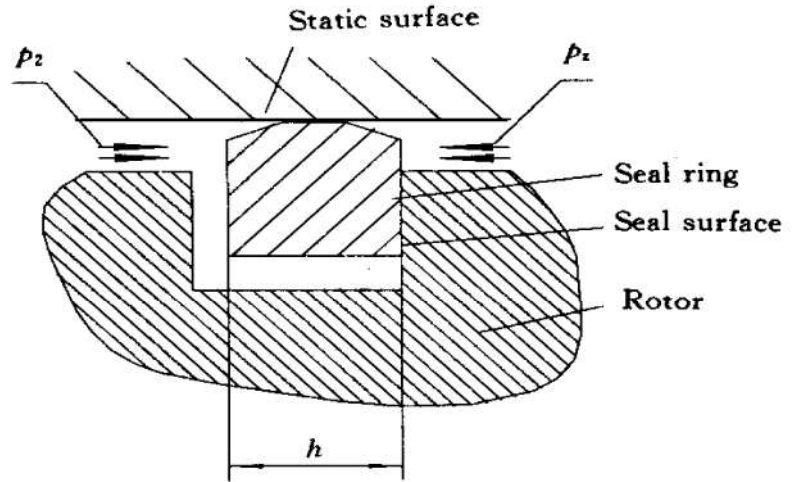


Fig. 2 Loads of seal ring

包括: (1) 控制D, B型石墨和基体组织中铁素体含量, 用以消除产生粘着的根源; (2) 安装状态下确保闭口间隙的存在, 以防偏置导致局部过热而引发粘着; (3) 摩擦面粗糙度适当, 用以降低摩擦功率; (4) 环外圆桶面曲率半径不宜过小, 用以保障传热冷却。

3 机械性能计算

根据涡喷发动机使用性能要求, 对材料的弹性模量进行计算, 公式见文献[3]。从结果看出, 若计入残余变形系数, 对于相同的结构尺寸, 则材料需有较高的弹性模量, 其增长率为5.97%, 略大于残余变形系数。密封环外圆静摩擦力矩 M_{s1} 大于其端面动摩擦力矩 M_{s1} , 其力矩裕度约为100%。在发动机运行状态下, 密封环不会出现转动。如果因残余变形过大, 使得密封环径向弹力过低, 则有可能呈现带转跑合, 这是应予避免的。为了验证密封环结构设计的合理性, 在结构尺寸和材料机械性能初步确定的基础上, 对环径向弹力和断裂瞬时开口尺寸进行分析计算。计算采用有限元法, 用SAP6/AT软件在SUN586机上完成。计算结果密封环的材料弹性模量为91 GPa, 抗弯强度为518 MPa, 径向弹力为21.5 N。断裂开口尺寸和加载部位有关, 在环中施力时为12.5 mm~13.0 mm, 在环开口处施力时为14.8 mm~15.3 mm。此数据已在研制产品中证明结构设计合理, 材料力学性能参数适用。涨圈式旋转密封, 在航空发动机中通常用于有润滑、接触压力0.1 MPa、滑动线速度10 m/s范围的工况, 与新研制的密封环使用工况相比, 主要差距在于“无润滑”工作条件恶劣, 有无润滑时摩擦功的差别可达100.6, 应属超常规使用。如果密封环与环境无热交换, 摩擦功率就会全部转换为自身的温升, 由于存

在热交换, 摩擦功不可能全部转变为自身的温升^[4]。同时, 在发动机工作过程中, 由于气流冷却作用, 温度与周围环境温度基本一致, 不会出现温度过高的现象。但是计算结果应使设计者注意到, 由于密封环与轴颈这一对摩擦副的超常规运行, 在相关结构设计中, 必须慎重考虑零件的减磨和冷却。

4 材料选择及加工工艺

密封环零件为磨耗件; 摩擦副在“无润滑”和较高 p , u 值的条件下运行, 局部易于粘着, 呈现“咬合”或“拉丝”, 致使结构骤然损坏。因此要求密封环的材料既有较高的机械性能又有较低的耐磨性能和可靠的抗粘着性能, 这显然对金相组织提出了苛刻的要求。选择灰铸铁为基体, 并作适当调整, 找出了满足密封环使用要求的金相组织, 主要由球状石墨和铁基体组成^[5]。铁素体含量高, 硬度低耐磨性能差, 易于粘着“咬合”, 细小而分布均匀的磷共晶和磷化物可提高耐磨和抗“咬合”的能力, 但不能呈连续网状分布, 否则机械强度降低。高磷铸铁把含磷量提高到0.3%~0.65%, 且绝大部分以磷共晶形式析出。在基体组织中具有高硬度的磷共晶, 能提高摩擦面上的承压能力和抗磨粒磨损性能。热处理能改变基体组织, 灰铸铁材料可通过石墨化退火, 在保证综合性能的前提下, 降低硬度, 变耐磨为磨耗。经过电炉冶炼、浇铸、石墨化和热处理等多环节实验研究, 才能取得所需金相组织。涡喷发动机使用的密封环材料是一种新研制的铸铁材料。

在小型密封环生产中采用单体砂型铸造毛坯, 即单片铸造。这是密封环研制的又一大特色。每箱12片, 叠箱浇铸, 电炉冶炼。过程中严格控制炉前化验, 用质谱仪分析化学成份, 适当调整多元素用量, 以保证其材料机械性能达到规定的要求, 确保金相组织的一致性。

机械加工引用内燃机活塞环专用设备及行业技术。全部机械加工安排17道工序, 专用工装10多道, 而且工装系数高, 每道工序都有专用测量设备检测。例如, 为保证密封环工作时有一定的弹力, 又要保证在压缩状态的外形尺寸, 密封环外表面粗加工时采用靠模车成椭圆形, 确保开口端的相对接触压力大于1, 再开缺口, 后车内外圆, 精加工均是在压缩状态下进行, 加工成正圆, 以确保工作状态的弹力。环外圆的桶面度采用Taylor轮廓仪珩磨, 开口尺寸是由加工外圆时的工装控制的, 所以外圆工装的设计精度的合理性非常重要。

5 结 论

研制的密封环经过发动机整机试验, 压气机部件试验、可靠性增长试验和飞行试验考核, 在正常情况下使用, 密封环寿命超过10 h。其密封可靠性符合涡喷发动机总体设计要求, 在国内是首次研制生产这种小型金属密封件, 为航天密封件产品开创了新路。

参 考 文 献

- 1 电机工程手册编辑委员会编. 机械工程手册. 北京: 机械工业出版社, 1978.
- 2 西安交通大学动力机械系内燃机教研组编. 内燃机设计. 北京: 中国工业出版社, 1961.
- 3 国家标准局. GB1149-82内燃机活塞环. 北京: 中国标准出版社, 1982, 12
- 4 谢仲群, 胡继绳译. 活塞环理论. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- 5 国家标准局. GB2805-81内燃机单体铸造活塞环金相检验. 北京: 中国标准出版社, 1981.