

非金属封严材料在民用发动机上的应用

姜永强, 沈尔明, 王志宏
(沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)



姜永强(1976), 男, 高级工程师, 从事压气机结构设计。

收稿日期: 2010-05-06

摘要: 介绍了国外民用发动机非金属封严材料的特点、发展和应用, 通过与金属材料对比, 阐明了非金属材料所具有的优势。

关键词: 非金属封严材料; 民用发动机; 可磨损材料

Application of Non-metal Seal Materials on Civil Engine

JIANG Yong-qiang SHEN Er-ming WANG Zhi-hong
(Shenyang Aeroengine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: The characteristics, development and application of nonmetal sealing material on foreign civil aeroengine were introduced. The advantages of the nonmetal materials were clarified by comparing with the metal materials.

Key words: non-metal seal material; civil engine; non-abradable material

1 引言

封严结构在航空发动机结构设计中起着越来越重要的作用。是否使用封严、所用封严材料的性能水平高低和效果好坏, 已成为现代航空发动机设计水平高低的重要标志。目前国内军用发动机的封严材料体系已初步形成, 主要以封严涂层为主, 封严材料的使用使发动机工作温度大大提高了, 油耗降低, 推力增大, 航程增加, 并满足了飞机对发动机的使用寿命要求^[1]。

但是国内有关封严涂层的种类主要是金属封严涂层, 但金属封

严涂层的组织结构、孔隙率均匀性及结合力等方面在喷涂中很难控制, 在涂层使用中, 经常出现涂层剥落等问题, 特别是随着大涵道比发动机的研制, 在风扇/增压级部分的封严涂层由于尺寸较大, 对喷涂工艺提出更高的要求, 因此金属封严涂层不能完全满足大涵道比发动机长寿命和高可靠性的要求。

非金属封严材料的应用在国外已经有成熟的经验, 但是在国内才刚刚起步, 其应用前景广阔。

美国、欧洲一些国家目前研制的CFM56、V2500、PW4000、PW-6000、GE90等系列发动机大量采用橡胶封严材料来减小风扇或增

压级转子叶片的磨损, 同时还采用填充空心玻璃珠的液体橡胶材料来固定风扇增压级静子叶片, 并用级间封严。这说明非金属封严材料有很好的性能指标和可靠性要求。

本文重点介绍了用在民用发动机低压静子部件上的非金属软质封严材料(可磨损材料)的特点、发展和应用。

2 封严涂层种类及作用

目前国内采用的封严材料主要包括金属-有机涂层和金属-无机涂层。金属-有机涂层如Al-Si-聚苯酯涂层用于300℃以下的发动机压气机及滑油系统; 金属-

无机涂层如 NiCrAl- 硅藻土涂层,用于 800 °C 以下发动机涡轮部位封严。国外还有橡胶封严材料。

涡轮喷气发动机是由进气、压缩、燃烧和排气等组成的多级装置,其效率直接与每级同它上级封严的效率有关,保持通过每级气流压力差是获得高效率的必要条件。研究发现,涡轮发动机的气路密封性,即转动部件与静子部件的径向间隙大小对压气机、涡轮的效率、功率和耗油率(SFC)影响(如图 1(a)、(b)所示)极大。从图 1 中可见,如果叶尖间隙与叶高比值(Δ/L)每增加 1%,大直径风扇压气机的效率损失则增大 2%,而低压或高压涡轮的效率损失则增大 1%~3%。1 台典型发动机高压涡轮叶尖气路间隙减少 0.254 mm,效率可提高约 1%;压气机径向间隙增大 0.076 mm,耗油率可增加约 1%^[2,3]。因此减少发动机气流通道的泄漏损失是提高发动机效率、降

低耗油率的重要途径。

在设计封严结构时,设计人员为提高发动机运转效率、使用寿命和降低油耗,尽量减少转子和静子之间的运转间隙。但是由于制造困难和在工作状态下的部件结构变形,间隙过小,导致旋转中的动、静件之间存在相互摩擦的危险,因此希望有 1 个既能减小间隙又能缓冲摩擦的封严圈。

封严装置一般用在风扇、压气机和涡轮部位(如图 2 所示)。基材料应具有磨损性、耐冲蚀性、热稳定性和较小的摩擦系数等特点。对工作温度在 600 °C 以上的封严装置,多采用具有抗氧化性的涂层材料。控制动、静件之间间隙的封严材料分为 2 大类。1 类是用在静子部件上的软质涂层(可摩耗涂层)。当转子上的叶片或篦齿与静子上的软质涂层相摩擦时,允许叶片或齿尖切入时的摩擦压力和摩擦热都较少,不至使旋转部件受到扭曲或损伤。另 1 类是喷涂在转子部件上的硬质涂层(主动磨削层)。转子应有很好的转动平衡性,不允许涂层的不均匀磨损或掉块现象发生。故只能喷涂硬度高而且工作时基本不磨损的涂层。这类涂层主要是等离子喷涂的陶瓷涂层,硬度高、高温性能好,且导热系数低,不会使薄壁转子因摩擦生热而产生变形。

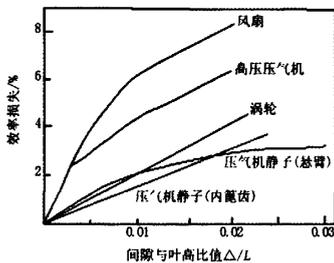
虽然减小气路密封性可以提高发动机性能,但是转动件与非转动件之间的间隙不可能为零。因为这将使制造和装配发动机的费用极其昂贵,并有可能发生不可预见的灾难性后果,实际上在制造中也不可能使间隙控制为零,这是因为:

- (1) 发动机转子及机匣组合件材料的热膨胀不一致;
- (2) 转子高速旋转离心力引起的叶片伸长;
- (3) 零件加工的同心度、圆度和公差的影响;
- (4) 发动机装配中的偏差;
- (5) 零部件因振动引起的位移;
- (6) 发动机转子的热弯曲变形;
- (7) 发动机转子的自身变形;
- (8) 发动机轴向力的变化;
- (9) 因飞机起飞、加速、减速等飞行负载变化及其它外界干扰引起的零件材料机械蠕变。

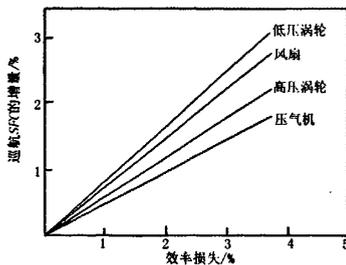
以上因素有些可以通过设计来克服,有些则无法估计,因此在设计中还必须留有足够的间隙。保持间隙的目的是为了满足高速旋转的需要,但间隙过大则会降低发动机性能,封严涂层有助于将间隙减小到最低限度^[1]。

3 非金属封严材料在国外民用发动机上应用

目前在外国民用涡扇发动机使用的非金属封严材料,根据成型工艺不同,可分为固体橡胶和液体橡胶涂层材料 2 大类。由于受到耐热能力的限制,一般非金属封严材料主要应用在低压低温部件上,在风扇转子叶片上的应用



(a) 径向间隙对部件效率的影响



(b) 部件效率损失对耗油率的影响

图 1 径向间隙与叶片高度比值对部件效率及耗油率的影响^[2]

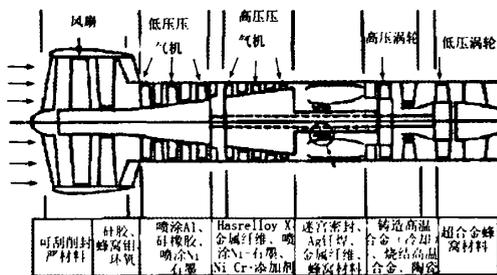


图 2 涡轮发动机可刮削封严材料的选用^[2]

较硬会对其后的零件造成损伤;而非金属封严材料较软,硬度较小,有很好的可磨削性,当与转子叶片磨损脱落后由于材质较软不易打伤后面的零件。

4.3 成型工艺性比较好

金属封严涂层需要专用喷涂设备对零件进行喷涂,工艺参数要求比较高,而且不容易控制,有些喷涂后甚至要进行热处理,会影响原零件的力学性能;非金属封严材料成型工艺比较简单,可以加工成成品存放,在使用时用粘结剂粘接到发动机上,也可以将各成分按一定比例在一定条件下化合后涂敷到发动机上。

4.4 零件变形较小

金属封严涂层由于需要热喷涂,温度较高,喷涂后易造成零件变形;非金属封严涂层是粘接到零件上,能够在 150℃以下进行,此温度不会造成零件变形很大,从而

保持了零件尺寸和位置度。

4.5 维修性好

如果在使用中因封严涂层局部脱落需要修理,对金属封严涂层,需要将整圈涂层清除后进行重新喷涂,对零件维修性、经济性、完整性的影响都是不利的;而非金属封严涂层可以将损坏的局部去除、更换,既方便快捷,又经济实用,在机场即可更换,可以为发动机维修节省大量的时间。

4.6 降低发动机质量

非金属封严涂层的密度小($\rho < 1 \text{ g/cm}^3$),相应体积下比金属封严涂层的质量轻得多,可以降低发动机质量,提高其推重比。

5 结束语

目前非金属封严材料在国内航空发动机上还是首次应用,其材料的选择、摩擦特性、失效模式、非金属构件的制备工艺、可磨耗性指

标的制定,抗冲蚀性的好坏、材料的抗氧化性的好坏、使用寿命的确定、检测手段等情况还缺乏成熟经验,今后还需要做大量的分析、研究、验证工作。但由于非金属封严材料具有可靠性高、工装简单且易于维护等技术和经济优势,随着国家大飞机项目的快速发展,一定会在民用飞机发动机上大量使用,也将会给中国封严涂层领域带来一次技术性革新。

参考文献

- [1]郑宏济.航空发动机热喷涂封严涂层应用[J].红旗技术,1997(3):26-29.
- [2]刘凤伟,李曙,刘阳.封严涂层材料及其可刮削性的评价[J].中国表面工程,2009,22(1):12-24.
- [3]田晔,张淑婷,马江虹,等.可磨耗封严涂层发展及应用[J].有色金属(冶炼部分),2006(增刊1):96-99.

(上接第5页)活门上的多种液压力,剪切好、抗污染能力强。

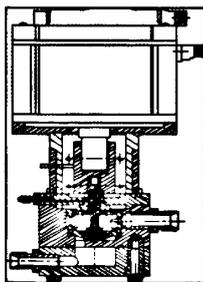


图2 伺服电机驱动旋转计量装置

7 结束语

燃油中必然存在污染物,且较难被控制,故燃油控制系统设计要

考虑可能长期连续使用带污染物的燃油,或短期使用高度污染物的燃油,要采用高效的燃油与控制系统抗污染技术。从方案确立、选型到零、部件设计过程中,都要把抗污染指标放到主要位置,以期提高可靠性和使用寿命。目前,发动机燃油系统元件的污染度标准已相继制订。如何对航空发动机燃油系统元件污染物进行有效控制,已经成为制订航空发动机燃油系统元件污染度标准的关键。

参考文献

- [1]张世桢.航空发动机设计手册(第15

册);控制及燃油系统[M].北京:航空工业出版社,2000.

- [2]张绍基.俄罗斯航空发动机燃油与控制系统研究与展望[J].国际航空,1995(12).
- [3]张怀安,张冬梅,薛艳等.喷气燃料氧化安定性对航空发动机燃油系统沉积物生成的影响研究[J].航空发动机,2008,2:36-38.
- [4]祝世兴.飞机液压与燃油系[M].北京:兵器工业出版社,2004.
- [5]夏志新.液压系统污染控制[M].北京:机械工业出版社,1992.
- [6]于静.燃油污染及其维护[J].航空科学技术,2007(6).
- [7]祝刚,谢平.航空发动机燃油泵自动测试系统的设计[J].微计算机信息,2007(23):10.