

航空发动机封严技术的研究和应用进展

Development of Study and Application of Aeroengine Sealing Technology

中国人民解放军 5713 工厂
北京航空航天大学

陈礼顺 王彦岭 卢建红
张辉

[摘要] 叙述了封严技术的基本原理、发展历程、在航空发动机上的应用情况,介绍了新型封严技术的研究进展、推广应用以及发展趋势。

关键词: 封严技术 篦齿封严 航空发动机耗油率

[ABSTRACT] The basic principle and development course of sealing technology, and its application on aeroengine are described. The research progress, application and development trend of the new sealing technology in the future are introduced.

Keywords: Sealing technology Labyrinth sealing Aeroengine Fuel consumption

航空发动机的研制技术已经达到极高的水平,虽然在气动、性能和传热学等方面仍有潜力有待发掘,但也很难取得较大的突破;但如果在某些结构上做些改进,就能使部件和发动机的效率得到较大提高。特别是随着对发动机内流损失研究的不断深入,对封严技术研究也越来越重视。试验研究表明:当压气机工作叶片顶端与机匣的相对间隙值(即该处径向间隙与叶片长度的比值)增加 1%时,压气机效率下降 1%~3%;直径大约 1m 的涡轮,当叶尖间隙由 1mm 增至 5mm 时,将使发动机耗油率增大 10%^[1]。因此,通过采用新型封严技术来减少发动机漏气损失、增大发动机推力、减少发动机耗油率、提高发动机效率是十分必要的。

1 篦齿封严装置

篦齿封严技术广泛用于各种蒸汽机、燃气轮机的封严装置中,在 20 世纪 30 年代首先用于蒸汽机上,有效地控制了蒸汽的泄漏损失。在航空发动机中,广泛用于阻隔高低压腔之间的流体泄漏。篦齿封严装置主要由轮盘、鼓、轴、叶冠等转动机件上的周向篦齿及静子部件上的环形圆柱面组成,通过减小压力差来减少漏气损失,封严的效率取决于转子部件和静子部件之间的径向间隙和篦齿数目。

1.1 篦齿封严装置的工作原理

如图 1 所示,篦齿封严装置属于非接触式的封严结构,由高压区来的空气或燃气辗转经过几道狭窄的缝隙和几个稍大的空腔,当气流经过第一道缝隙时,压力减小,而流速增加,在缝隙后的空腔中,气体由于突然膨胀,产生紊流而使其气流能量损失,气流的压力和速度下降,经过几道篦齿后,篦齿前后的压差减小,通过篦齿的气流量就减少了。在封气装置两侧压差不变的情况下,各篦齿相邻两空腔的压差小,因而漏气量也减小了。

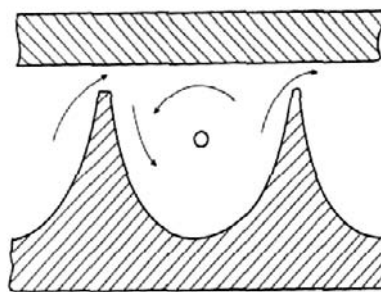


图 1 篦齿封严结构

Fig.1 Labyrinth sealing structure

1.2 篦齿封严装置的缺点

由于篦齿封严装置具有简单的结构和较好的使用性,因此,在涡桨发动机、涡喷发动机、涡扇发动机的转子和静子部件得到了广泛应用。具体用于压气机级间篦齿封严,发动机热端篦齿封严,发动机内部各腔、室之间的封严以及轴承腔的封严。主要缺点有:篦齿封严装置属于非接触式密封装置,泄漏量比接触式的大,且在工作中会磨损,造成泄漏量加大,从而加快发动机性能衰退;篦齿在工作中会磨损,磨粒会打坏涡轮叶片;常用的篦齿封严环在压差稍大时,气流逸漏过程中易激发封严环振动。

1.3 篦齿封严装置结构设计的改进

篦齿封严装置结构简单,但封气效果较差。主要由于在设计发动机转子和静子之间的间隙值时,必须考虑长期工作时轮盘与叶片的蠕变伸长、机匣的收缩

变形、转子的振动和偏摆等因素,使间隙的设计值偏大。为了减小发动机漏气损失,提高发动机效率,保证篦齿封气效果,又不使转子和静子相碰,可采取如下措施:

(1)涂覆可磨损封严涂层。为减少封严篦齿的齿顶与外环间的间隙,有效降低燃气泄漏量,提高发动机效率,在与篦齿相应的外环表面,覆盖一层质地较软的氧化物涂层或镀层,以承受篦齿与外环的少许接触。

(2)改进气流通道结构,提高封气效果。封严篦齿整体结构形式最常见的为直通齿和台阶齿,见图2,而单个齿的形状也有不同形式。篦齿朝气流倾斜一定角度、在轴上车制环形槽、采用阶梯形的封气装置和将篦齿做在锥面上均能提高封气效果^[2]。图2(a)代表直通齿的篦齿封气装置,图2(b)代表篦齿朝气流倾斜一定角度的篦齿封气装置,这种结构在-31发动机上比较常见。图2(c)、2(d)代表在轴上车制环形槽的篦齿封气装置,图2(e)代表阶梯形的封气装置,图2(f)代表篦齿做在锥面上的封气装置。

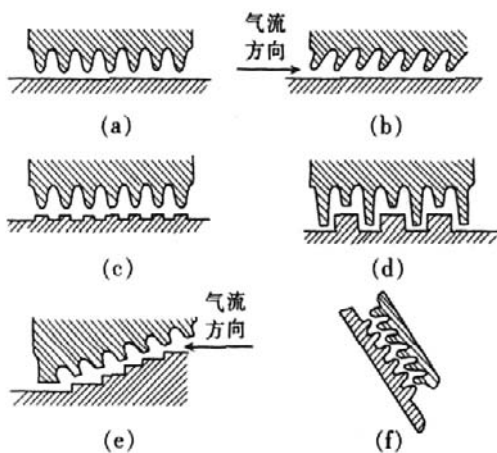


图2 几种不同形式的篦齿封严装置

Fig.2 Several different forms of labyrinth sealing devices

(3)采用蜂窝封严装置。蜂窝密封装置是在机匣封严环表面钎焊有蜂窝封严环,与转子或叶片叶冠上的篦齿构成封严结构,控制盘间腔空气的外漏。1994年,美制F-16战斗机在2个月内损失了4架,造成飞机坠毁的原因是发动机高压涡轮轴的封严篦齿环断裂。经大量试验研究,设计人员决定将与篦齿对应的外环表面设计成蜂窝结构,以便承受篦齿与外环的少许接触,既可尽量减少封严篦齿的齿顶与外环间的间隙,有效降低泄漏量,又保证发动机的可靠性和安全性^[2]。在压气机和涡轮部分采用蜂窝封严装置,能极大

地提高发动机效率,且蜂窝结构的厚度可灵活掌握,故可以很好地改善转子叶尖的周向漏气性能,从而提高发动机的效率和推力。国内某型发动机采用了蜂窝结构的封严装置后,发动机推力提高了10%以上^[3]。

2 浮动环式封严装置

浮动环式封严装置是介于涨圈式和篦齿式封严装置间的一种封严性能较好的装置,封严环装于前后侧板间,端面留有轴向间隙,封严环与轴间留有径向间隙,封严环在腔内外压差的作用下紧压在端壁上。封严环与轴间径向间隙很小,如果轴和封严环相碰时,封严环可上下浮动而不会磨损,因而封严效果较好,由于封严环能上下浮动,故称浮动环,这种有浮动环的封严装置也就称为浮动环式封严装置,斯贝发动机有3处采用浮动环式封严装置,其中高压涡轮前轴承腔的后封严处是比较典型的浮动环式封严装置。

3 石墨密封装置

石墨封严装置是密封用的石墨环装在石墨座内,靠弹簧力和封严座轴向连在一起,封严座靠铆钉和静子件连接,这种密封装置具有长时间的密封效果,能装在转速较高的传动轴上。米格-29飞机用的RD-33发动机在3个油腔处的5个油封处均采用了石墨封严装置,其中4个为径向接触式石墨封严装置,1个为径向加双向端面接触式石墨封严装置。JT8D发动机4、5号轴承腔的封严、-25发动机前支承滑油腔的封严均是由石墨环完成的。

为了提高发动机附件(如发电机与燃油泵等)传动轴端头的密封性,满足发动机的维修性要求,在CFM56、CF6-80C2、V2500、PW2037和PW4000等发动机上采用端面石墨封严装置以取代早期发动机附件上的皮碗密封,封严效果好、寿命长。但它只能在压差为 $2 \times 10^6 \text{ Pa}$ 、温度为430、摩擦速度为112m/s的环境下工作。因此,在高压、高温工作环境下不能使用端面石墨密封装置。GE公司最近发展了一种可用于此处的高压差端面石墨密封装置,它利用流体动力来减少在高压差下石墨磨损问题,能在压差为 $10 \times 10^6 \text{ Pa}$ 、温度为510、摩擦速度为134m/s的环境下正常工作,直径为228mm封严件的泄漏量相当于新篦齿环的3%,且在整个寿命期内泄漏率基本恒定,寿命比现有端面石墨密封装置高一倍^[4]。CF6-80C2发动机4、5号轴承腔改用这种装置后,与原设计相比,不仅发动机重量减轻了45kg,而且漏气量少、效率高。

4 刷式封严装置

篦齿封严装置目前在发动机上得到广泛采用,但它属于非接触式密封装置,泄漏量比接触式的大,且在工作中会磨损,造成泄漏量加大,使发动机性能衰退快。浮动环式封严装置和石墨封严装置由于种种原因在发动机上未广泛采用。目前发展的先进封严装置主要为刷式封严装置(简称刷封)。先进的封严装置不仅可降低耗油率,而且可以降低性能衰退率;降低涡轮前温度 T_3 ,提高热端部件效率;提高止推轴承寿命;降低发动机重量。

4.1 刷式封严技术在研究中取得较大的进展

刷式封严技术的首次试验是在1955年,由美国通用电气公司在J47发动机上进行了试验,但未取得成功。1981年,英国罗·罗公司在RB199上再次进行刷式封严技术的试验,取得了成功,并且获得刷封的英国专利权。目前,已有许多发动机公司将刷封应用到发动机上。罗·罗公司于1988年已在发动机上进行了4000h的试车,取得了较大的突破,其研究表明,在压差为 $2 \times 10^5 \text{Pa}$ 时,单个刷封的漏气量

仅是间隙为0.75mm、0.5mm的5道篦齿封严环的漏气量的4%、6%;在发动机试车中,用刷封取代篦齿后推力提高3%。GE公司的研究表明,CT7发动机的压气机后封气处采用刷封后使漏气量减少70%;CF6-80C2中,4号轴承通气处采用刷封后,耗油率可减少0.1%,直径为130mm的刷封的泄漏量为篦齿封严的40%。Allison公司于1984年开展了刷封的试验研究工作,曾在T800上进行24h以上的刷封试验,在T406热端部件中采用刷封后,使耗油率降低1%~1.5%;T406的13级压气机各级间封严处改用刷封后,通过75h试验,刷丝的初步磨损率低于0.0127mm/h;在T406 PLUS发动机发展试验中得出“刷封在温度高达776,摩擦速度为250m/s时有良好性能”的结论。美国在执行IHPTET计划时,已在NASA的试验器上进行了595下50h的刷封试验,结果良好;在IHPTET中,还将刷封应用到压气机叶尖间隙处,即在与工作叶片对应的机匣内安装刷封以与工作叶片叶尖接触,形成接触式封严,不仅减少了漏气损失,而且能

保持性能。据称在叶尖间隙处采用刷封后,可使压气机效率提高2%,喘振裕度提高5%^[4]。

4.2 刷式封严装置结构原理

图3所示为典型刷封装置及其左视图,在静子结构内,由前后侧板夹着很细金属丝或非金属纤维组成的环形刷,纤维丝通常直径为0.076mm的金属合金制成。刷内端紧压在转动的轴上,轴在与刷接触的环带上喷涂耐磨陶瓷。如果封严处的压差较大时,可用2~3组刷封串装起来,这时还可起到篦齿封严作用。刷丝做得较长,使它始终紧压在转子上,为了不使刷丝在压差作用下向后弯曲,在设计后侧板的内径时,使它与轴间仅留有较小的缝隙。环境工作温度低于650,刷丝摩擦速度低于300m/s时,刷丝的材料可选用钴基合金。用金属刷接触式封严能使涡轮发动

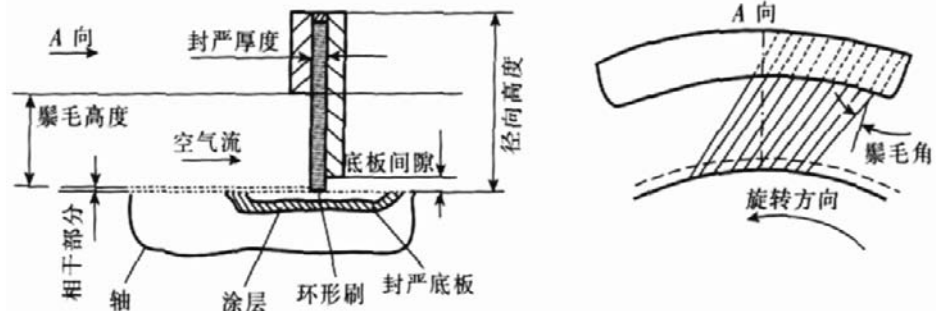


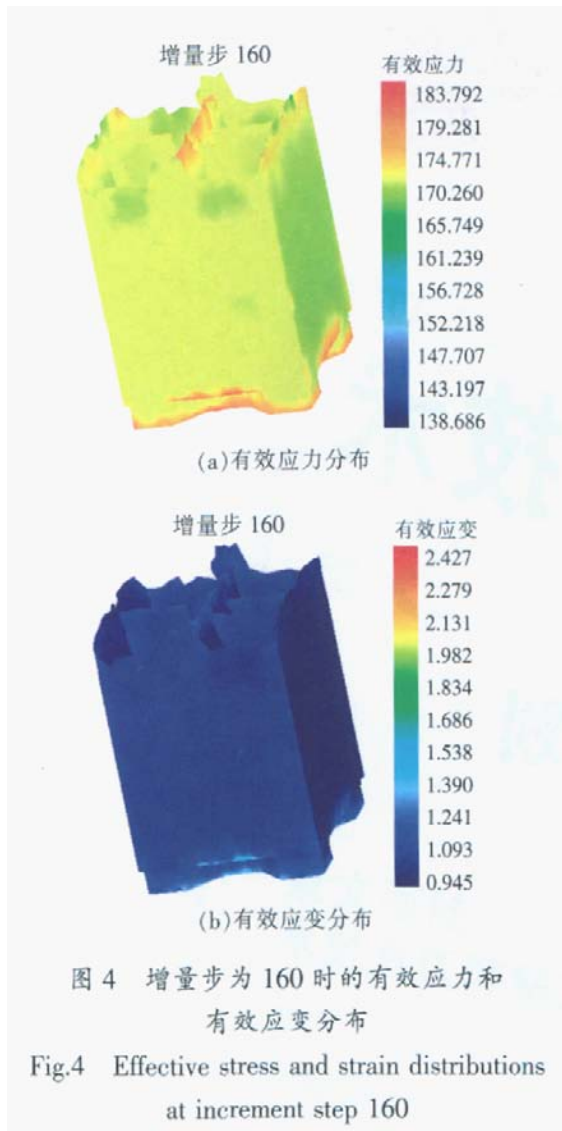
图3 刷式封严装置的工作原理^[3]
Fig.3 Work principle of brush sealing device^[3]

机漏气量减少一个数量级,使发动机效率提高4%~6%。

4.3 刷式封严技术的应用

由于开展了大量的刷封试验工作,因而刷封已逐渐取代了传统的篦齿封严装置在发动机上得到应用。罗·罗公司在V2500发动机上有2处采用刷封技术(气封);RB199曾换装了两处(气、油封各一处)进行试飞;EJ200所有油、气封严处均采用这种结构。刷封在V2500发动机上投入使用后,由于将非接触式封严方式改为接触式封严方式,封严效果明显,但由于当时未解决在高温、高相对接触速度环境条件下工作的可靠性,而未得到推广。普惠公司于1992年开始在PW4084发动机高压压气机与高压涡轮间采用刷式封严装置代替篦齿封严装置;1995年6月,在该区域共采用了四套刷式封严件,包括高压压气机出口与卸荷腔间、高压涡轮第一级工作叶片榫根与第一级导向器之间各一套,大大减少了漏气损失,使发动机推力提

(下转第95页)



的规律,揭示了复杂多腔变断面薄壁件挤压成形过程中造成的开裂、表面划伤等缺陷及产生的原因,并提出了相应的解决方法。复杂零件成形问题主要是控制金属的流动,模具的结构是影响金属流动形成的主要因素。应用有限元模拟技术全面、动态分析金属塑性变形过程流动规律,可及时发现塑性变形过程可能出现的缺陷,从而为缺陷的预防和工艺方案的修改提供科学依据。

参 考 文 献

- [1] 闫洪,夏巨谌,胡国安. 双孔模型材挤压过程的有限元分析. 塑性工程学报, 2003(2): 28~32.
- [2] 余斌. 薄壁方锥件冷挤压变形过程的分析及数值模拟[D]. 北京:北京科技大学, 2005.
- [3] 李旻明,彭颖红. 刚塑性含空穴材料的有限元方程的研究. 锻压技术, 2002(3): 43~46.

(责编 咏智 晓霏)

(上接第 84 页)

高了2%左右,相应的耗油率降低了约2%^[4]。上述应用说明刷式封严已能在较高的工作温度与高的切线速度下长期工作,这也是刷封技术在高温、高切向速度下的第一次应用,扩大了刷封的使用范围。由于刷式封严有较好的封严效果,能较显著地提高发动机性能,普惠公司在1996年,对用于波音747、波音767等客机上的PW4000系列发动机进行了同样的改装,作为PW4000系列发动机提高性能计划的主要措施之一。同时,GE公司也在其用于B777客机的GE90发动机低压涡轮中,采用了4套刷式封严装置。GE90发动机采用刷封后,封严效果好,在高压压气机后采用可使推力增加2%。IHPTET计划,已将刷封作为在第二阶段(到2000年)中达到实用的项目。由于材料等的改进,目前刷封也用于油腔的封严处^[4]。

5 结束语

传统的篦齿封严装置虽然存在着效率低、容易碰磨等很多缺点,但经过不断采用新工艺、新技术、新结构,仍具有广阔的应用空间,如蜂窝技术在一些新研制的航空燃气涡轮发动机上还在应用;刷式封严技术由于其具有结构简单、安装方便、重量轻、稳定性和密封性好等优点,在一些新研制的发动机上得到了广泛应用;在某些发动机上同时采用篦齿封严装置、浮动环式封严装置、石墨封严装置和刷式封严装置。

欧洲的EJ200发动机和美国F119发动机都将采用刷式封严装置;目前,还在发展一种用于高压压气机后的气-气非接触式气膜封严装置,它也将获得较高的封严效果,能使发动机推力提高约2%~2.5%^[4]。随着人们不断追求高性能、高可靠性和高经济性的航空发动机,更新更好的封严技术如指状封严技术、环形浮动薄膜封严技术也纳入人们的研究范围,预计将在未来高性能航空燃气涡轮发动机上得到应用。

参 考 文 献

- [1] 费多洛夫,聂加耶夫. 航空燃气涡轮发动机原理. 北京:国防工业出版社,1984.
- [2] 曹玉璋. 航空发动机传热学. 北京:北京航空航天大学出版社,2005.
- [3] 王如根,高坤华. 航空发动机新技术. 北京:航空工业出版社,2003.
- [4] 陈光. 航空发动机结构设计分析. 北京:北京航空航天大学出版社,2006.

(责编 钟元)