

叶尖间隙智能气动密封技术研究*

北京航空航天大学 张学仁** 聂景旭 张驰明

【摘要】 利用形状记忆合金的特性发展了一种新型压气机叶尖间隙智能密封技术, 可以根据发动机工作状态的变化, 自适应地控制压气机叶尖间隙。本文介绍了控制叶尖间隙的原理和方案, 进行了智能气动密封环的结构设计, 并对密封环进行了变形计算与分析。

主题词: 叶轮机械 形状记忆合金 间隙型密封

分类号: V232.4

1 引言

燃气涡轮发动机的叶尖径向间隙对其工作性能有十分显著的影响, 间隙增大会使压气机和涡轮的效率下降, 从而导致发动机推力减小, 单位耗油率增大。目前, 压气机和涡轮的气动设计技术已相当成熟, 进一步改进设计提高效率的难度较大, 相对来说改进密封技术仍有相当大的潜力。有研究表明, 为了得到相同的性能改善, 改进压气机和涡轮级气动设计的成本将至少是改进密封技术的 4~5 倍^[1]。因此研究叶尖间隙控制技术有十分重要的意义。

目前最成熟的间隙控制技术是利用冷却空气控制机匣的热膨胀。这种方案利用环绕在压气机和涡轮机匣外面的冷却气管向机匣喷气进行冷却, 从风扇和压气机处抽气, 由全权限数字式电子控制器按确定的调节规律通过开环控制一些阀门来调节冷却空气的温度和流量, 从而控制机匣的热膨胀, 维持所需的合适间隙。此方案的主要不足之处在于要从风扇和压气机抽气, 从而抵消了部分由间隙减小带来的性能收益。

本文利用形状记忆合金的特性发展了一种新型压气机叶尖间隙智能密封技术, 可以根据发动机工作状态的变化, 自适应地控制压气机叶尖间隙, 从而提高发动机的效率。

2 利用形状记忆合金控制叶尖间隙的原理和方案

2.1 叶尖间隙的变化特点及控制要求

燃气涡轮发动机的结构十分复杂, 影响叶尖间隙的因素也就十分繁杂, 主要有以下几个方面: (1) 加工和装配误差; (2) 转、静子的热膨胀不匹配; (3) 工作载荷的变化。如图 1 所示是一个典型工作循环中的叶尖间隙变化情况。由图 1 可见, 最小间隙出现在过渡状态。在设计压气机的冷态装配间隙时, 要保证在过渡工况下的最小间隙大于某一安全值以避免发生转、静子间的碰摩, 这一安全值的确定主要考虑的是重力载荷、陀螺载荷、安装节载荷、椭圆度、外罩载荷等引起间隙减小。这样, 在最大状态或巡航状态时的叶尖间隙就比所需要的安全值大得多。发

动机长时间工作于最大或巡航状态,因此对此时的间隙进行控制,即消除间隙中大于所需安全值的多余部分,无疑具有重要意义。

2.2 形状记忆合金的主要特性

形状记忆合金(SMA)是指某温度以下发生形变后,通过加热到一定温度以上能够恢复到原有形状的合金。SMA的这种称形状记忆效应(SME),也称回复效应。而具有双程记忆效应的形状记忆合金既可以记忆其母相(高温相)的形状,又可以部分或全部记忆其马氏体相(低温相)的形状。在恢复到“被记忆”形状的过程中,合金若被约束,将产生强大的回复力,这一特点可被用来实现驱动功能。

2.3 采用形状记忆合金补偿环的原理

采用形状记忆合金制成的封严环(或称SMA间隙补偿环)可以达到控制叶尖间隙的目的,这种封严环应具有双程记忆效应。当发动机起动工作时,压气机的气流温度逐渐升高,封严环受热升温至其材料的马氏体逆相变温度 A_s 后,开始发生马氏体逆相变,试图恢复较小的直径,于是封严环的收缩抵消了机匣的部分径向热膨胀,这样可以通过设计使发动机在巡航状态或最大状态的叶尖间隙减小为最小所需间隙(见图2)。而当温度降低至该材料的马氏体相变温度 M_s 后,封严环又试图恢复较大的直径,从而避免了发动机在其他工况时叶尖间隙小于安全值。通过合理选择材料的相变温度,过渡状态下所需的最小间隙是完全可以保证的。

3 补偿环的结构设计

3.1 形状记忆合金类型的选择

现有SMA的基本类型有: NiTi SMA、铁基SMA、铜基SMA等。其中NiTi类的性能最好,但其相变温度一般在 100°C 以内,且加工较难;而铜基SMA价格便宜、加工容易,其相变温度可通过改变合金成分来调节,相变终了温度可达 350°C ,因此其适用温度范围大。压气机各级的温度不同,应采用不同相变温度的SMA,因此采用铜基SMA是适宜的。另外补偿环的载荷并不大,铜基SMA完全可以满足要求。因此,研究中选用了铜基SMA。

3.2 SMA补偿环的主体结构及安装形式

SMA间隙补偿环的结构和在机匣上的安装形式需要根据具体发动机的机匣结构来确定。目前的设计是整个补偿环用SMA制作,根据控制的要求,SMA应具有双程记忆效应。铜基SMA通过训练可以获得双程记忆效应,但稳定循环的次数有限,不能满足应用要求。因此,设计了SMA加偏置弹簧的结构来实现SMA的双程作用。如图3所示即为弹性环加SMA环的补偿环复合型主体结构方案,其主体由两个过盈配合的同心环组成,外环与内环的材料完全相

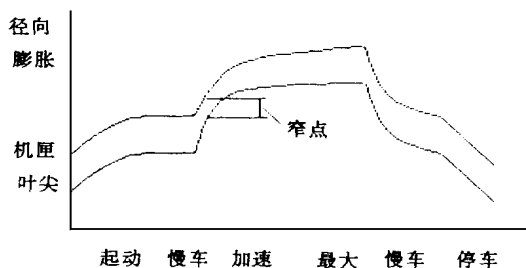


图1 典型工作循环中的叶尖间隙变化

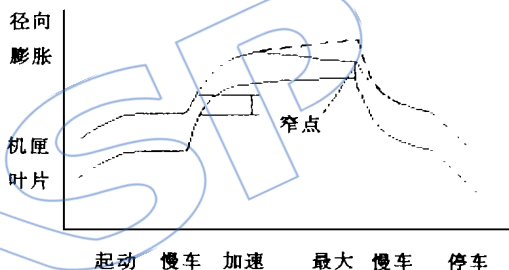


图2 采用SMA间隙补偿环的间隙变化

同,均为铜基合金;但热处理工艺的不同使前者具备形状记忆效应,而后者不具备。通过调整弹性环的尺寸即可精确地控制封严环组件的收缩与膨胀量值。弹性环的存在解决了铜基形状记忆合金双程记忆效应的循环寿命问题,提高了相变温度,减小了相变滞后。

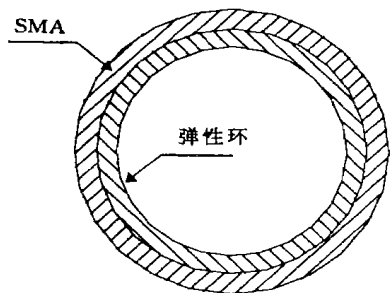


图3 SMA 间隙补偿环的结构

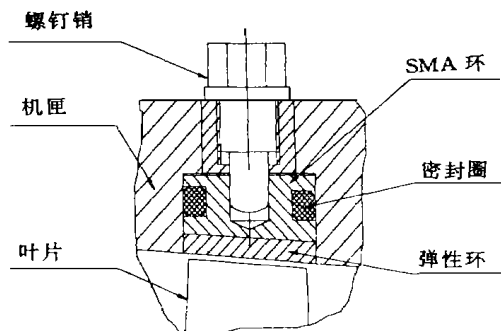


图4 SMA 控制转子间隙的结构方案

图4示出了补偿环的一种安装形式。每个环由6个均布径向螺钉销固定,限制了轴向位置,加热冷却时沿径向可以有位移。6个径向销起定心作用。

3.3 补偿环的变形计算与分析

利用形状记忆合金材料的本构关系模型^[2],对图3所示的补偿环进行了变形计算与分析。补偿环的结构和材料特性参数可参见文献[3]。SMA环的预应变为0.6%时,计算出的SMA间隙补偿环内径变化与温度的关系如图5所示,其周向应力与温度的关系如图6所示。由图中

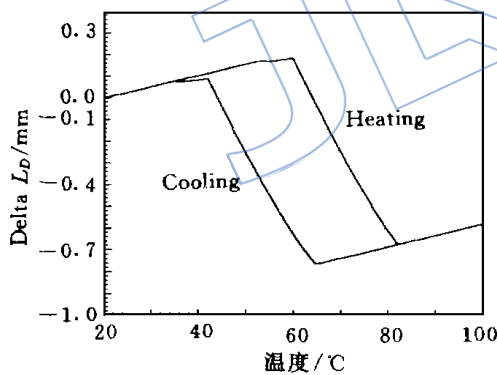


图5 补偿环内径变化与温度的关系

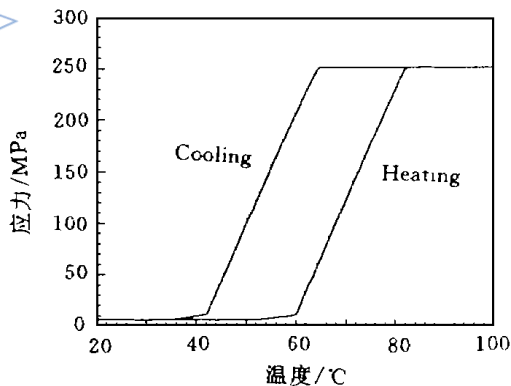


图6 补偿环周向应力与温度的关系

可以看出,在加热过程中,当温度小于SMA环材料马氏体逆相变起始温度 A_s 时,由于SMA环与弹性环的线膨胀系数相同,若假设二者温度均匀,则无热应力产生,应力保持为装配应力不变,间隙控制环内径因热膨胀而随温度提高缓慢增大;当温度高于 A_s 时,应力随温度提高迅速增大,SMA环开始收缩压迫弹性环,内径随温度提高迅速减小,这正是由于SMA环的形状记忆效应所引起的;直至温度升到SMA环马氏体逆相变终结温度 A_f 时,应力和收缩量均达到各自的最大值;当温度高于 A_f 时,由于马氏体逆相变已经完成,SMA环材料完全回到母相状态,应力不再随温度增长,间隙控制环内径又由于热膨胀继续随温度提高而缓慢增大,直

至加热过程结束。在冷却过程中,当温度高于马氏体相变起始温度 M_s 时,应力保持不变,间隙控制环内径随温度降低缓慢减小;当温度降到 M_s 时, SMA 环开始膨胀,内径随温度降低迅速增大,直至温度降到马氏体相变终结温度 M_f 时,应力重新回到装配应力的水平,间隙控制环内径也达到最大值;当温度继续降到 M_f 以下时,应力维持在装配应力的水平不再变化,内径随温度降低缓慢减小直至冷却过程结束。

4 结论与展望

由上述计算分析可见,在一定的范围内,随着温度的升高 SMA 补偿环能够收缩从而抵消了机匣的径向热膨胀,这样可以通过合理设计使发动机在巡航状态或最大状态的叶尖间隙减小为最小所需的间隙。而温度降低时封严环又恢复较大直径,这样封严环的膨胀避免了发动机在其他工况时叶尖间隙小于最小安全值。通过合理选择材料的相变温度及预变形量,过渡状态下所需的最小间隙是完全可以保证的。因此,利用形状记忆合金的特性发展的 SMA 智能气动密封环可以控制压气机叶尖间隙。有关实验验证将在下一步进行。

据文献[4],美国 NASA 刘易斯研究中心与 Memory 公司合作也在进行类似的研究,其方案与本文类似,并按该方案正在 T55 涡轴发动机的压气机上进行试验,具体试验结果尚未见到。但据设计者称,经过计算分析,若 T55 压气机的轴流式压气机全部 7 级均应用此技术,压气机整体(7 级轴流+ 1 级离心)效率将提高约 0.8%,单位耗油率将降低 0.2%~0.4%。他们认为这是控制压气机叶尖间隙的最理想的一种新技术,决心大力加速研究。可以预计,此项技术的成功应用将是叶尖间隙控制技术的一大突破。

参 考 文 献

- 1 Steinetz B M, Hendricks R C. Engine Seal Technology Requirements to Meet NASA's Advanced Subsonic Technology Program Goals. AIAA 94- 2698
- 2 Liang. The Constitutive Modeling of Shape Memory Alloys. Ph. D. Dissertation, VPI&SU, 1990
- 3 张弛明. 利用形状记忆合金控制压气机叶尖间隙的技术研究: [硕士学位论文]. 北京航空航天大学, 1997
- 4 Potlock L E, Schetky L M, Steinetz B M. Shape Memory Alloy Adaptive Control of Gas Turbine Engine Blade Clearance. AIAA 95- 2762

(责任编辑 王震华)

CONTROL OF BLADE TIP CLEARANCE WITH SHAPE MEMORY ALLOYS

Zhang Xueren, Nie Jingxu, Zhang Chiming

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT

An adaptive sealing ring is developed to control the blade tip clearance of compressors with the help of shape memory alloys. Such a ring can change the blade tip clearance in adaption to the working conditions of engine. Its control mechanism is described. The structural design of the adaptive sealing ring is completed. The deformation of the adaptive ring is calculated and analyzed according to the constitutive relation of shape memory alloys.

Key Words Shape memory alloys Tip clearance Sealing rings

NUCLEATE BOILING OF BINARY MIXTURE AT HIGH HEAT FLUX UNDER MICROGRAVITY

Chai Lihe and Peng Xiaofeng

(Thermal Engineering Department, Tsinghua University, Beijing 100084)

ABSTRACT

An analytical model for nucleate pool boiling heat transfer of binary mixtures in high-flux regime is formulated according to Helmholtz instability theory of vapor-liquid interface. The nucleate pool boiling for binary mixtures at high heat flux under microgravity is also characterized by the existence of a liquid layer known as macrolayer between the heater surface and the vapor mass. The dual-bubble layer structure can maintain up to CHF condition due to less buoyancy. The expressions for fraction of bubble contact area on the heater surface and initial macrolayer thickness are derived in term of the thermophysical properties or/and the heat flux. A CHF model based on hydrodynamics is provided. The predicted results are compared with experimental data and theoretical analysis. Some important conclusions are drawn as follows: The fraction of bubble contact area on the heater surface is independent of the input heat flux, but much greater than that at terrestrial conditions; Initial macrolayer thickness is much greater than that at terrestrial conditions due to less velocities of vapor phase and liquid phase; The CHF values for binary mixtures under microgravity are about 60~80% of those at terrestrial conditions, but are much greater than those of single components under microgravity.

Key Words Heat transfer Boiling Bubble dynamics of boiling

CALCULATION OF HEAT CONVECTION IN COMPLEX 3D GEOMETRIES

Zhu Songlin (Huazhong University of Science and Technology)

Zhu Fangyuan (7th Dept. Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072)

ABSTRACT

A simulation method is presented for heat convection in 3D complex geometries. For a non-orthogonal coordinate formulation of the governing equations with cartesian velocity components, pressure and temperature, a finite volume method is uti-