

文章编号: 1000-8055(2003) 06-0824-03

低泄漏高寿命刷式封严的数值计算

谢晓俊, 康 宁

(北京航空航天大学 汽车系, 北京 100083)

摘要: 通过空气动力学计算方法探索新型低泄漏高寿命三层片式刷式封严结构。利用商用计算流体力学软件 STAR-CD, 用定常可压缩 N-S 方程对刷封进行三维流动模拟, 计算不同压差下的泄漏情况。以泄漏量作为评价指标, 确定新型刷式封严结构的密封特性并对其进行改进。计算结果表明: 随着进出口压差的增大, 泄漏量增大; 改进的封严刷环结构泄漏性能优于简单的片式刷封结构; “70度模型”的泄漏性能略好于“75度模型”, 说明增加层与层间的夹角可以达到减少泄漏量的效果。

关键词: 航空、航天推进系统; 片式刷式封严; 空气动力学计算; 有限体积法

中图分类号: TB42

文献标识码: A

Numerical Computation of Low Leakage and High Endurance Brush Seal

XIE Xiao-jun, KANG Ning

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: A new style of brush seal with low leakage and high endurance was studied in this paper by the method of the aerodynamic computation. The steady compressible N-S equations were solved numerically to simulate the three dimensional flow in the brush seal structure with the aid of the commerical software STAR-CD. The leakages of the brush seal were calculated for serveral pressure differences. The brush seal structure was evaluated according to the computed leakages. The above results showed that: the leakages become larger with the increase of the pressure difference; the leakages of the new brush seal were smaller than that of the old brush seal; the leakages of the seventy-model were slightly smaller than that of the seventy-five-model. This study indicates that the increase of the angle between the brush seal layers can reduce the leakages.

Key words: aerospace propulsion system; slice brush seal; the aerodynamic computation; the finite volume method

封严的密封特性对发动机的性能具有极为重要的影响, 在大型民航发动机中通过提高封严的密封特性, 可使发动机的推力提高4%~6%, 并能使耗油率下降约2.5%。在过去的几十年中, 发动机中的密封主要是篦齿封严, 但篦齿封严性能的

恶化和结构故障在现代发动机中屡屡发生, 因此, 人们又提出一种刷式封严。刷式封严比篦齿封严的密封性能更为优良, 泄漏量为篦齿封严的20%~40%, 因此得到了国内外的高度重视和发展。但由于刷式封严的密封材料采用合金材料制成的耐

收稿日期: 2003- 01- 17; 修订日期: 2003- 04- 09

基金项目: 航空基础科学基金资助项目(00C51084)

作者简介: 谢晓俊(1980-), 男, 江西泰和人, 北京航空航天大学汽车系硕士生。

磨刷丝,在前后压差超过一定值时,由于刷丝受压差而变形,导致密封性能明显恶化。为了克服丝式刷封这一缺点, FLOWER^[1]等提出用薄金属片代替刷丝,整个刷封由很多金属片沿周向压紧组成。这样做成的片状刷封首先在制作上比丝式刷封简单,而且重要的是它在整个压力差范围内的密封泄漏-压差特性基本是线性的,避免了丝式封严由于刷丝变形而造成的泄漏量急剧恶化的现象^[2](见图1)。最近的研究^[2]还表明片式刷封的寿命远好于丝式刷封,但它与丝式刷封相比较的一个显著缺点是其泄漏量偏大。造成这个现象的原因是流体通过丝式刷封是要通过一系列的收缩扩张通道,而片式刷封的流体是直接通过的,因而流阻远低于丝式刷封。

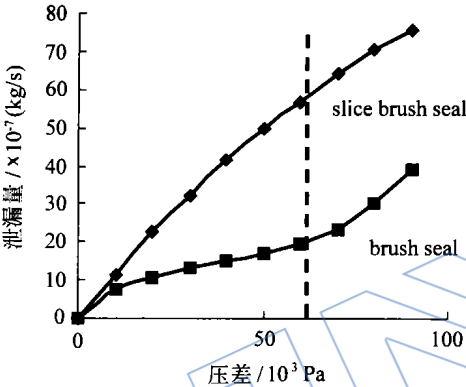


图1 片式与丝式刷封典型压差与泄漏量的定性比较
Fig. 1 Qualitative comparison of pressure difference via leakage between slice brush seal and brush seal

本文将对片式刷封结构进行改进,将简单的

直通道片式刷封结构(图2(a))改为三层片式结构(图2(b)),前后两层保持原样,而中间层发生一定的偏转,使中间层与前后两层形成一定的角度,以此增加流体流过刷封的阻力,这样既利用了片式刷封的长寿命特点,又保证了低泄漏量。本文利用计算机数值模拟对新型片式刷封进行空气动力学计算,得出在不同夹角情况下泄漏量随前后压差的变化情况,并与原片式刷封的泄漏量进行比较。

1 物理模型及数值计算方法

本文研究的片式刷式封严结构转子轴的直径为300 mm,分布在转子外径上的封严金属片的厚度为0.1 mm,金属片间的周向间距为0.05 mm,金属片的径向高度为2 mm。当着眼于局部通道时,由于金属片的厚度和高度比轴的半径小很多,金属片厚度以及高度与轴的半径之比分别为 1.6×10^{-4} 和 6.67×10^{-3} ,所以可以采取简化的处理方法,即不考虑金属片沿转轴周向的曲率变化,近似地把金属片看成排列在一平面上。因此,在柱坐标下研究的整圈刷封模型,可简化在直角坐标下研究任两个刷片间隙中通过的泄漏量,这样可以极大地减少网格数,因而减少计算量,见图2。

采用商用计算流体力学软件 STAR-CD, 用定常可压缩 N-S 方程对刷封进行三维流动计算,控制方程组采用有限体积方法进行离散,速度和压力的耦合处理采用“SIMPLE”方法。湍流模型采用常用的 $k-\epsilon$ 高雷诺数模型。

如图2(b)为新式片式刷封模型,该模型由三

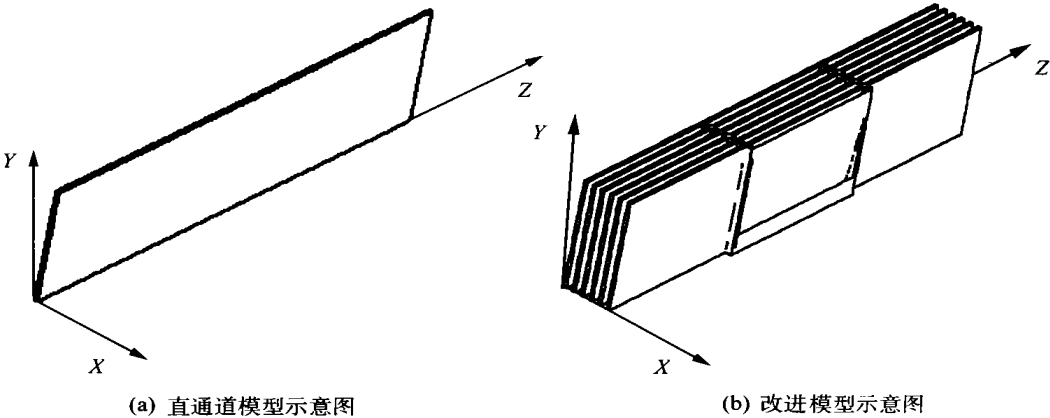


图2 刷封模型示意图
Fig. 2 Brush seal structure

层金属片组成,每层金属片沿 z 向长度为2 mm,每两层金属片之间的缝隙为0.05 mm。该模型的计算域为一平行六面体, $z=0$ 平面为进口边界, $p=p_{in}$; $z=6.1$ mm 平面为出口边界, $p=p_{out}$; $y=2$ mm 的平面为静止物面边界条件。由实验结果^[2]可知,转轴速度对泄漏量几乎没有影响,因此 $y=0$ 的平面也可看作静止物面边界条件。此计算域在 x 轴方向的两边界面,与第一和第三层金属片相平行,与第二层金属片相交,该边界条件可用周期性边界条件,因为这些刷封片是沿着转轴的周向布置的。为了周期性边界能够相互拼接上,必须采用图3所示的计算域进行计算。图2(a)为简单片式刷封模型,由于不存在计算域与刷片相交的问题,取任两个刷片之间的间隙作为计算域即可。

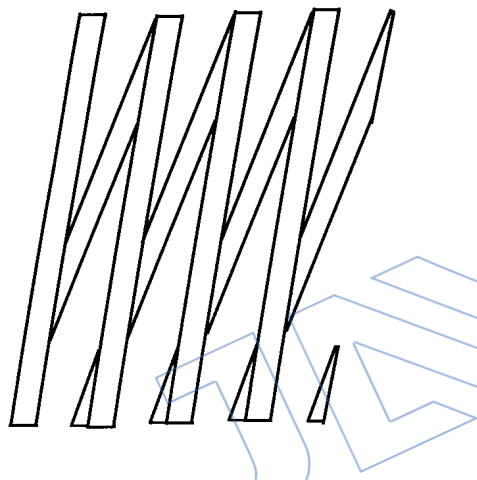


图3 改进模型计算域的主视图

Fig. 3 The front view of computational domain of new model

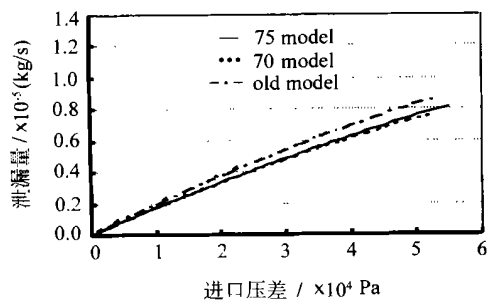


图4 新型刷封泄漏量与直通刷封泄漏量的比较

Fig. 4 The leakage of two new brush seal and old brush seal

该计算域也为一平行六面体,边界条件同上,只是在 x 轴方向的两边界面都与金属片相切,所以该

边界条件可用静止物面边界条件。

网格的数目以及划分的技巧将影响到计算的精度,在流场变化较剧烈的区域和靠近边界的区域,网格应划得密一些,其他区域应划得疏一些。就所研究的模型而言,沿 z 方向,在刷片层与层之间的缝隙应布置较多的网格。为研究网格疏密对计算结果的影响,采用 $(30 \times 30 \times 96)$ 和 $(40 \times 40 \times 130)$ 两种网格对压差为 2×10^4 Pa,层间夹角为 75° 的情况进行了计算,对比结果显示两种网格给出相同的结果。因而对其它情况皆采用 $(30 \times 30 \times 96)$ 个网格。计算大概需要1000步可以收敛。

2 计算结果及分析

片式刷封最原始的模型是直通道,即一通到底,如图2(a)所示。为了增大流阻,引进了新的模型,这一模型的特点在于,把原先的片式刷封分成三层,第一层和第三层与 x 轴夹角 80° ;第二层与 x 轴夹角 75° ,称‘75度模型’;而‘70度模型’的第二层与 x 轴夹角为 70° ;原先的直通道变成了如图2(b)所示的情况。下面将研究层间夹角对泄漏量的影响。

泄漏量的减少是通过改变第二层各封严片与第一层和第三层的夹角来实现的。图4给出第二层与第一层和第三层之间夹角对泄漏量的影响,同时与直通道的计算结果相比较,由此可看出新型封严模型对减低泄漏量的作用。由计算结果可知,两个改进的模型的泄漏量比直通道的都有所减少,减少了大约10%左右。而‘70度模型’和‘75度模型’相比,泄漏量的减小不是很可观,大约减少了2%左右。这是因为,随着层间夹角的增大,层与层刷片之间相互交错的程度越大,对流动的阻碍作用越大,因而泄漏量减小。

3 结 论

通过对新型片式刷封结构的计算结果表明,“直通道模型”的泄漏量最大,其余两个模型的泄漏量相当,“75度模型”的泄漏量稍大于“70度模型”;说明改进的模型可以减少泄漏量,并且随着层间夹角增大,泄漏量减少。

参考文献:

- [1] Flower R. Brush Seal Development System[R]. AIAA 90-2143.
- [2] 刘江虹. 刷式封严流动与换热的实验研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1999.