

文章编号: 1000-8055(2008)03-0443-05

模拟刷式封严泄漏流动的多孔介质模型

曹广州, 吉洪湖, 袁艳平

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 将刷束处理为多孔介质, 在动量方程中引入由于多孔介质对流体流动的阻碍作用而引起的动量源项, 之后详细分析了刷束孔隙率的确定方法并根据实验结果确定了该孔隙率, 从而建立了模拟刷式封严泄漏流动的多孔介质模型. 对该模型的计算结果做进一步的修正后, 可以与实验结果很好地吻合, 证明了利用该模型预测刷式封严的泄漏量是可行的.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 刷式封严; 泄漏流动; 多孔介质; 数值模型

中图分类号: TK124

文献标识码: A

A porous medium model for simulating leakage flows through brush seals

CAO Guang-zhou, JI Hong-hu, YUAN Yan-ping

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The bristle pack was treated as porous medium. A momentum source term which was caused by the porous medium was added into the momentum equation. The method to determine porosity of the pack was examined in detail and the porosity was obtained based on the experimental results. So a porous medium model for simulating the leakage through brush seals was built up. The computational results, after correction, show a good agreement with the experimental results. The model was proved to be practicable for predicting the leakage of brush seals.

Key words: aerospace propulsion system; brush seal; leakage; porous medium; numerical model

刷式封严是 20 世纪 80 年代初发展起来的一种性能优异的新式密封结构, 在航空发动机和工业涡轮中得到了十分广泛的应用, 英、美、德等国家都对其进行了大量的研究. 对刷式封严泄漏特性的研究一般以实验为主, 同时也发展了两类数值模型, 一类模型直接利用计算流体动力学模拟刷丝间的流动, 如有效厚度模型等^[1], 另一类模型不关心刷丝间的流动情况, 而将整个刷束处理为多孔介质, 即多孔介质模型^[2], 该模型便于预测刷式封严的泄漏量, 因此工程应用较多.

国内从上世纪 90 年代开始对刷式封严的泄漏特性开展研究工作. 在数值研究方面, 丁水汀和

陶智等^[3]将刷束处理为多孔介质, 用 Darcy 定律取代动量方程, 对刷式封严的流动和换热进行了数值模拟; 黄学民和史伟等^[4]也将刷束处理为多孔介质, 利用实验的方法确定水力传导系数, 从而建立了一个预测刷式封严泄漏量的多孔介质模型; 王之栋和王宗根等^[5]直接利用计算流体动力学对刷束中的泄漏流动进行了数值模拟; 谢晓俊和康宁^[6]对刷片式密封进行了数值研究. 对工程应用中出现的刷丝硬化 (Bristle stiffening)、迟滞 (Hysteresis) 以及吹下 (Blow down)^[7]等重要现象以及性能更加优越的低迟滞型刷式封严^[7]泄漏特性的研究, 目前国内还未见报道, 因此本文拟建

收稿日期: 2007-03-06; 修订日期: 2007-05-16

作者简介: 曹广州 (1981-), 男, 江苏赣榆人, 博士生, 主要从事传热传质与流体机械方面的研究.

立模拟刷式封严泄漏流动的多孔介质模型,为以后的数值研究工作奠定基础.

1 多孔介质模型的建立

刷式封严的泄漏流场可以分为两个区域,即刷束区域和刷束以外的区域.刷束以外的区域可以采用传统的 CFD 技术进行处理,由于刷束区域中的流体流动很复杂,因此对该区域的分析处理是建立模型的关键.刷束是由大量的细刷丝紧密排列组成的,刷丝之间的空隙类似于多孔介质中的空隙,其中的流体流动形式也与多孔介质中的流动相似,因此本文将刷束区域处理为多孔介质.

1.1 刷束的多孔介质处理

由于刷环上下游的压差较大,流体通过刷束时密度将发生很大的变化,因此把泄漏气体处理为理想可压缩气体

$$p = \rho R T \quad (1)$$

流体只能通过刷束中的空隙部分进行泄漏,因此刷束区的连续方程为

$$\nabla \cdot (\rho \epsilon_a V) \quad (2)$$

流体通过刷束时,固体刷丝将会对其产生很大的阻力作用,这种阻力作用可以体现为动量源项 S_i ^[8],于是刷束区的动量方程可以写为

$$\rho V \cdot \frac{V}{\nabla} = - \frac{p}{\nabla} + \mu \frac{\nabla^2 V}{\nabla} + S_i + S_v \quad (3)$$

上述式中 ϵ_a 是多孔介质的面孔隙率, S_v 是其它没有包括的粘性项之和,温度 T 根据实验测量值给定(一般在 300 K 左右).

多孔介质的孔隙率是指多孔介质中空隙容积与总容积之比.面孔隙率是指在垂直某方向的截面上,空隙截面积与总截面积之比,故一般又称定向面孔隙率^[9].结合刷束的结构特点,可以推导出刷束在轴向、径向和周向的面孔隙率分别为

$$\epsilon_{ax} = 1 - \frac{d^2 n}{4(r_{ob} + r_{ib}) B \cos \beta} \quad (4)$$

$$\epsilon_{ar} = 1 - \frac{d^2 n}{8 r B \cos \beta} \quad (5)$$

$$\epsilon_{a\theta} = 1 - \frac{d^2 n}{4(r_{ob} + r_{ib}) B \cos \beta} \quad (6)$$

式中 d 为刷丝直径(m), n 为刷丝总根数, r_{ob} 为刷束自由段的外径(m),即前挡板内径, r_{ib} 为刷束自由段的内径(m),在非间隙配合时即为转子的外径, B 为刷束的厚度(m), β 为刷丝排列角度($^\circ$), r 为径向位置(m).

由刷束引起的动量源项 S_i 包括粘性损失和

内部损失两项^[8],即

$$S_i = - \left(\frac{\mu}{a} V + \frac{1}{2} C_2 \rho |V| V \right) \quad (7)$$

式中,等号右边的第一项为粘性损失,第二项为内部损失, $1/a$ 为多孔介质的粘性损失系数, C_2 为多孔介质的内部损失系数,它们可以由以下经验公式^[8]求得

$$\frac{1}{a} = \frac{150}{d^2} \frac{(1 - \epsilon_a)^2}{\epsilon_a^3} \quad (8)$$

$$C_2 = \frac{3.5}{d} \frac{1 - \epsilon_a}{\epsilon_a^3} \quad (9)$$

将式(8)和式(9)带入式(7)可得

$$S_i = - \left(\frac{150 \mu}{d^2} \frac{(1 - \epsilon_a)^2}{\epsilon_a^3} V + \frac{1.75 \rho (1 - \epsilon_a)}{d \epsilon_a^3} |V| V \right) \quad (10)$$

1.2 计算域的选取

为了将计算结果与实验结果进行对比,本文的数值模型是根据真实的实验结构和状态建立的.图 1 是实验装置结构剖面图,图中给出了部分结构尺寸(单位:m).选取图中的流体通道作为二维数值模拟的计算域,该计算域包括两个部分,一是夹具、前后挡板、轴向调节环以内和转子以外的部分,二是刷束的自由段部分.对于需要建立三维模型的低迟滞型刷环^[7],其三维模型的计算域在轴向和径向上与二维相同,周向上取一块遮流板及两侧各半个缝隙宽度的范围(比如具有 60 块遮流板结构的刷环,其计算域在周向上取 6° 的范围).图 2 和图 3 分别是二维和三维模型的计算域,可将其分为 4 个区域,即刷束上游高压区、刷束区、后挡板保护高度区和刷环下游低压区.

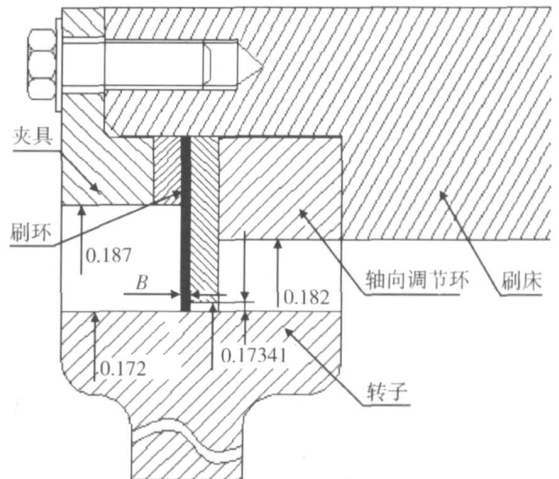


图 1 实验装置结构剖面图 (单位:m)

Fig.1 Sketch of brush seal test rig

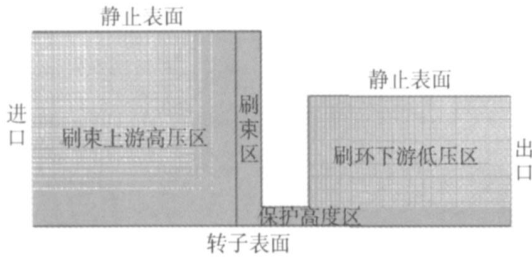


图 2 二维模型的计算域

Fig. 2 Computational domain of 2D model

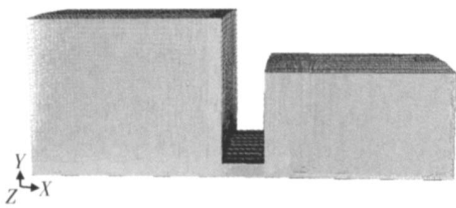


图 3 三维模型的计算域

Fig. 3 Computational domain of 3D model

1.3 网格划分

确定了计算域以后,先进行初步的网格划分,然后对其进行改进和加密,并进行网格独立性验证,最终确定了所用网格,该网格具有以下特点:

- 1) 网格数量因结构不同而不同,二维模型的网格总量一般在 5 万左右,三维模型的网格总量一般在 50 万左右.
- 2) 网格密度因位置不同而不同,刷束区和后挡板保护高度区的密度最大,刷环下游低压区比刷束上游高压区的密度稍大一些;三维模型的网格,其周向只在遮流板之间的缝隙区密度较大.
- 3) 壁面附近的网格进行了加密,速度梯度大的区域也进行了网格自适应加密.

1.4 边界条件处理

泄漏流体为空气,视为理想可压气体;转子表面和静止表面上均采用壁面无滑移边界条件,其中转子转速在 $0 \sim 3\,000 \text{ r/min}$ 之间;进口和出口分别设为压力进口和压力出口,具体压力值采用实验数据,一般进口压力在 $0.1 \sim 0.7 \text{ MPa}$ 之间,出口压力在 $0.1 \sim 0.2 \text{ MPa}$ 之间;刷束区域为多孔介质区域;对于三维模型,周向设为周期性边界.

2 刷束孔隙率的确定

2.1 对刷束孔隙率 ε_b 的分析

由式(4)~(6)可知,刷束的孔隙率主要由 d , n , r_{ob} , r_{ib} , r , B 和 β 等参数决定.在刷环结构设计确定后, d , r_{ob} , r_{ib} , r , n 和 β 等结构参数就确定了,

刷束厚度 B 成为唯一的一个决定孔隙率大小的参数. B 的大小不仅受刷丝直径 d 和刷丝层数 i 等可确定参数的影响,同时也受刷丝排列状态的影响.刷丝的排列状态又受多方面因素的影响,比如刷束的制作工艺、刷丝刚度(又由刷丝材料、直径 d 和长度等因素决定)以及刷环工作时所承受的压差 Δp 等,良好的制作工艺可以使刷丝排列比较紧密,在上下游压差的作用下,刷丝刚度较小的刷束更容易被进一步压紧.

事实上,在刷环制作完成时,刷丝的排列是杂乱的,如图 4(作者实验研究所用的刷环实验件)所示,某些局部排列疏松以允许流体泄漏,某些局部排列紧密而使流体难以通过.

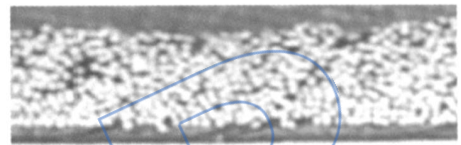


图 4 刷丝排列图

Fig. 4 Picture of bristle arrangement

为了便于确定刷束的孔隙率,我们将刷束的厚度与刷丝的理想排列方式联系起来,图 5 是刷丝的几种理想排列方式对刷束厚度的影响(以 3 层刷丝为例).在刷环制作完成未使用之前时,刷丝一般以疏松方式排列,刷束厚度较大;开始使用之后,在上下游压差的作用下,刷丝之间不断调整,排列逐渐趋于规则紧密,刷丝排列可以达到的极限是紧密叉排方式,此时的刷束厚度最小,将此厚度作为一个标准厚度,记为 B_1 ;在此过程中存在另一个理想排列方式即紧密顺排方式,此时刷束厚度也容易确定,可将其作为另一个标准厚度,记为 B_2 ;而实际情况下的刷丝排列大多处于紧密叉排和紧密顺排之间的过渡排列方式,此时的刷束厚度也介于两个标准厚度之间.标准厚度 B_1 和 B_2 可以由以下公式确定

$$B_1 = d + \frac{\sqrt{3}}{2} (i - 1) d \quad (11)$$

$$B_2 = d \times i \quad (12)$$

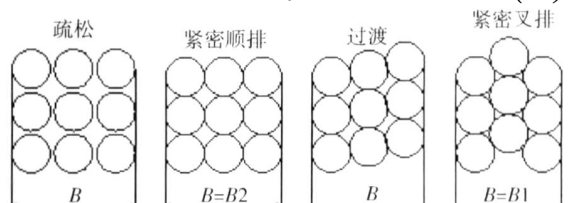


图 5 刷丝排列对刷束厚度的影响

Fig. 5 Pack thickness versus bristle arrangement

2.2 刷束孔隙率的确定

此处引入初期使用时间的概念,它是指刷式封严从开始使用到性能稳定的这段时间.图6是实验结果与计算结果的对比,其中的实验结果是刷式封严在不同时期的泄漏量,实验所用刷环的刷丝材料为1Cr18Ni9,直径为0.15 mm,计算结果是将刷束厚度分别处理为标准厚度B1和B2时的泄漏量.从图中可以看出,在刷环刚开始使用时,实验结果与刷丝紧密顺排时的计算结果相当,随着使用时间的增加,刷式封严的泄漏量不断降低,逐渐接近刷丝紧密叉排时的计算结果,在实验进行45 h之后,刷式封严的泄漏水平趋于稳定.这说明在初期使用时间内,刷丝逐渐由最初的疏松排列方式调整到接近紧密叉排的过渡排列方式并趋于稳定.

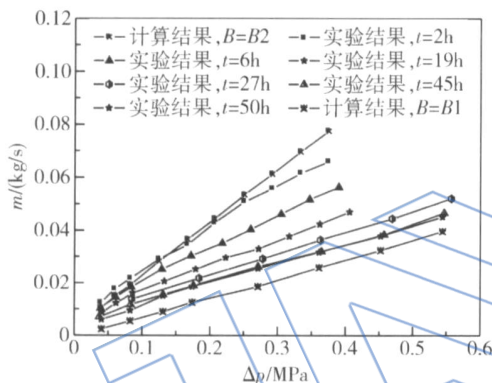


图6 标准厚度下计算结果与实验结果的对比

Fig. 6 Computational results with standard pack thickness compare with experimental results

为了使数值模拟更接近实际情况,将刷式封严性能稳定之后的刷束厚度处理为

$$B = B1 + a(B2 - B1) \quad (13)$$

取不同的 a 值确定刷束的厚度,求得其孔隙率并计算出刷式封严的泄漏量,将计算结果与性能稳定时的实验结果再进行对比,发现 $a = 0.3$ 时的计算结果不仅接近实验结果,而且更容易修正,如图7所示.从图中可以看出,在刷环上下游的压差小于0.15 MPa时,计算结果与实验结果吻合的较好,之后计算结果与实验结果的偏差基本上与刷环上下游的压差成线性关系.这说明经过初期使用时间的调整后,刷束厚度约为利用 $a = 0.3$ 计算所得出的厚度,在刷环上下游的压差小于0.15 MPa时,由于刷丝自身的刚性,刷束不会被明显压紧,当压差大于该值时,刷束将逐渐被压紧,对应的刷束厚度进一步减小,孔隙率不断降

低,造成实验结果逐渐低于计算结果.

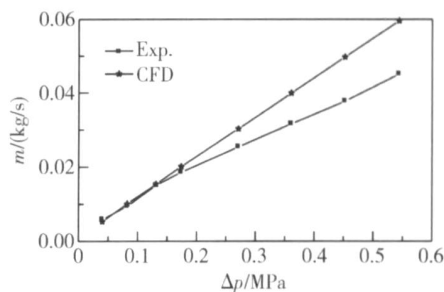


图7 计算结果与实验结果的对比

Fig. 7 Computational results compare with experimental results

3 对计算结果的修正

确定了 a 值后,刷束的孔隙率随之确定,本文的多孔介质模型也最终确定.由于在刷环上下游的压差大于0.15 MPa时,计算结果与实验结果的偏差与该压差成线性关系,因此对二者的偏差做如下拟合:

$$m_{\text{exp}} - m_{\text{CFD}} = A + k\Delta p \quad (14)$$

式中 m_{exp} 和 m_{CFD} 分别是实验结果和计算结果,通过拟合可以得到 $A = 0.00461$ 和 $k = -0.03561$.因此对计算结果进行如下修正

$$m_{\text{corrected}} = m_{\text{CFD}} + (A + k\Delta p) \quad (15)$$

式中 $m_{\text{corrected}}$ 是修正后的计算结果.图8是经过修正后的计算结果与实验结果的对比.从图中可以看出,修正后的计算结果可以很好的与实验结果相吻合.经计算,在大部分压差范围内,二者偏差都小于3%.

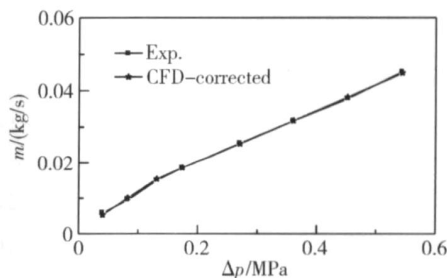


图8 修正后计算结果与实验结果的对比

Fig. 8 Computational results with correction compare with experimental results

从以上的分析可以看出,对于本文模型中采用的刷式封严结构,按 $a = 0.3$ 处理刷束厚度来计算泄漏量,然后对计算结果进行修正,所得结果可以较好地与实验结果相吻合.对于结构相似材料相近的刷式封严,利用本文建立的模型及修正方

法来预测其泄漏量应该还是比较准确的.该方法比较简单易于操作,但是没有考虑刷丝的刚度以及刷束所承受的压差等因素所引起的刷束厚度的变化,因此下一步工作将综合考虑这些因素的影响,获得刷束厚度在不同条件下的经验公式并将其放入模型中,使模型具有更好的通用性.

4 总 结

本文将刷束处理为多孔介质,引入由于多孔介质对流体流动阻碍作用而引起的动量源项,之后介绍了刷束孔隙率的确定方法并重点分析了刷丝排列对刷束孔隙率的影响,根据实验结果确定了该孔隙率,从而建立了模拟刷式封严泄漏流动的多孔介质模型.对模型的计算结果做进一步的修正后,可以很好的与实验结果相吻合,从而为工程应用中准确预测刷式封严的泄漏量提供了参考.

参考文献:

- [1] Chupp R E, Holle G F. Generalizing circular brush seal leakage through a randomly distributed bristle bed[J]. Journal of Turbomachinery, 1996, 118: 153-161.
- [2] Chew J W, Hogg S I. Porosity modeling of brush seals[J]. ASME Journal of Tribology, 1997, 119: 769-775.
- [3] 丁水汀,陶智,徐国强.刷式封严流动和换热的数值模拟[J].推进技术,1999,20(1):65-67.
DING Shuiting, TAO Zhi, XU Guoqiang. Numerical simulation on fluid flow and heat transfer of a brush seal configuration[J]. Journal of Propulsion Technology, 1999, 20(1): 65-67.
- [4] 黄学民,史伟,王洪铭.刷式密封中泄漏流动的多孔介质数值模型[J].航空动力学报,2000,15(1):55-58.
HUANG Xuemin, SHI Wei, WANG Hongming. Porous medium leakage flow model of brush seal[J]. Journal of Aerospace Power, 2000, 15(1): 55-58.
- [5] 王之栋,王宗根,孙丽霞.刷密封内流动与密封特性的研究[J].润滑与密封,2005(6):114-116.
WANG Zhili, WANG Zonggen, SUN Lixia. Research on flow and seal character in brush seal[J]. Lubrication Engineering, 2005(6): 114-116.
- [6] 谢晓俊,康宁.低泄漏高寿命刷式封严的数值计算[J].航空动力学报,2003,18(6):824-826.
XIE Xiaojun, KANG Ning. Numerical computation of low leakage and high endurance brush seal[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(6): 824-826.
- [7] Short J F, Basu P, Data A, et al. Advanced brush seal development[R]. AIAA Paper 96-2907.
- [8] FLUENT User's Guide[Z]. Fluent Inc., 2003.
- [9] 林瑞泰.多孔介质传热传质引论[M].北京:科学出版社,1995.