

文章编号:1000-8055(2012)08-1902-05

前板结构对低滞后刷式密封性能影响分析

迟佳栋, 王之栋

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 针对不同前板结构的低滞后刷式密封, 采用多孔介质模型, 进行流场计算, 对计算得到的上游刷丝压力、速度分布、刷丝上游靠近跑道区域的湍流动能以及刷式密封泄漏量进行分析, 讨论对于低滞后刷式密封的性能的影响。分析表明: 前板结构对上游刷丝压力、轴向速度分布以及刷式密封泄漏量无明显影响, 对上游刷丝径向速度分布影响较大; 无前板及过长前板结构, 刷封上游靠近跑道区域湍流动能较大, 前板开孔可降低刷丝上游靠近跑道区域的湍流动能, 减弱刷丝扰动的趋势。

关 键 词: 刷式密封; 前板; 低滞后; 多孔介质; 刷丝扰动

中图分类号: V233

文献标志码: A

Analysis of front plate's effect on low hysteresis brush seal

CHI Jia-dong, WANG Zhi-li

(School of Mechanical Engineering and Automation,
Beijing University Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Aimed at different kinds of low hysteresis brush seals, computed them with porous medium model, and analyzed the pressure and velocity on upstream side of bristles, turbulence kinetic energy at the front and low part of bristles, discussed the effect of front plate on low hysteresis brush seals. The result indicates that front plate does not have obvious effect on upstream bristles' pressure, axial velocity and leakage of brush seals, but varies radial velocity on upstream bristles behind different kinds of front plate; the turbulence kinetic energy at the upstream and low part of bristles of the brush seal without front plant or with front plate too long is very big, the brush seal has front plate with holes got smaller turbulence kinetic energy at the upstream and low part of bristles than the other kinds of brush seal, and gets smaller bristle disturbance effect.

Key words: brush seal; front plate; low hysteresis; porous medium;
bristle disturbance

刷式密封应用在航空发动机等具有高速转动轴的密封领域, 作为传统迷宫密封替代者的一种, 其泄漏率可下降至后者的 0.2~0.5 倍^[1], 表现了良好的密封性能。Prior^[2]等建立刷式密封的磨损模型并进行实验研究发现刷丝与跑道接触面以及刷丝尖端升高的温度是影响刷式密封磨损的重要因素。Chew^[3-4]等建立了三维 CFD(computation-

al fluid dynamics)和力学模型, 并在此基础上对刷丝变形进行了研究, 得到了刷式密封的泄露曲线并与实验数据进行了比较。同时有学者刘占生^[5]等针对刷式密封接触动力学特性进行了研究, 并有学者^[6-7]基于多孔介质模型对刷丝变形、热量分布、摩擦扭矩和泄漏量等进行了计算分析。已经使用的刷式密封结构有多种设计形式,

收稿日期: 2011-08-22

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20120830.1200.201208.1902_032.html

作者简介: 迟佳栋(1985—), 男, 河北承德人, 硕士生, 主要从事机械设计及理论研究。

其中带有低滞后槽的背板设计可有效降低刷密封的“滞后”效应^[8],有益于获得稳定的密封性能,因而得到广泛应用. 本文将对低滞后刷式密封结构前板的影响作用进行研究.

1 刷丝柔性的作用及刷丝扰动

刷式密封的刷丝具有很高的柔性,这对于其密封性能有着重要的作用. 由于刷丝沿跑道转动方向有一定倾斜,在气流的作用下,柔性刷丝被压在跑道上,并跟随跑道的径向相对运动,即形成“压力闭合”,以此达到良好的密封效果. 但当刷丝被过度压紧时,刷丝间摩擦力增大,刷丝束刚度提高即发生“刚化”,在跑道径向相对位置变化时则产生间隙或刷丝与跑道摩擦过大^[9-10]. 这被称为“滞后”现象^[11]. 为了减弱“滞后”影响,研究人员设计了背板带有低滞后槽的低滞后刷式密封.

柔性的刷丝,尤其是受约束较小的前排刷丝,在工作中一旦受到不稳定气流的扰动,易产生刷丝弯折翘起等不规则变形^[12]. 这种变形会影响密封效能. 由于刷丝扰动是因流场不稳定造成的,因此可以采用衡量刷丝附近区域流场的不稳定程度的湍流动能评价刷丝扰动的程度^[13].

本文针对3类前板结构的低滞后刷式密封进行分析. 图1为3类结构的结构图,其中(a)为无前板刷式密封,(b)为普通前板刷式密封,(c)为前板开孔刷式密封.

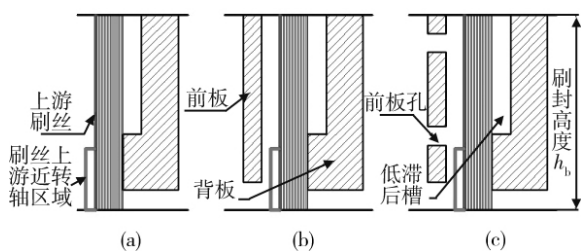


图1 3类不同前板结构刷式密封

Fig. 1 Three different kinds of brush seals in front plate

在对刷式密封的分析中,将刷封区域考虑为各项异性的多孔介质是一种常用的手段. 因为刷封具有轴向对称性,可取无前板、普通前板和前板开孔3类低滞后刷式密封结构的径向与轴向形成的剖面进行二维计算,以此分析前板结构对刷式密封的性能的影响.

前板的作用主要在于改变刷丝前区的流场,主要影响前排刷丝. 为了分析这种影响,本文主要

针对上游刷丝(见图1)进行分析. 同时,为了分析刷丝受到的扰动,主要比对易受到气流扰动的刷丝上游近跑道区(见图1).

2 理论模型

2.1 多孔介质模型

本文采用二维多孔介质模型,即将刷丝区域整体考虑为各向异性的多孔介质,根据刷式密封的轴对称性,分析其径向-轴向剖面的流场. 刷封区域通过引入阻抗力 F 来表示刷丝区域对于气流的阻碍^[7]

$$F = -A\mu u - B\rho |u|u \quad (1)$$

其中 μ, ρ 分别为动力黏度和流体密度, u 为速度向量, A 和 B 分别为惯性阻力张量和黏性阻力张量

$$A = \begin{pmatrix} a_x & 0 \\ 0 & a_n \cos \varphi + a_s \sin \varphi \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$B = \begin{pmatrix} b_x & 0 \\ 0 & b_n \cos \varphi + b_s \sin \varphi \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中 a_x, a_n, a_s 分别代表沿转子轴向方向(x 方向)、沿垂直刷丝方向(n 方向)和与刷丝平行方向(s 方向)的黏性阻抗系数, b_x, b_n, b_s 为对应的惯性阻抗系数, φ 为刷丝倾角. 阻抗力在 x, y 方向上的分量分别为

$$F_x = -\mu a_x u - \rho \sqrt{u^2 + v^2} b_x u \quad (4)$$

$$F_y = -\mu (a_n \cos \varphi + a_s \sin \varphi) v - \rho \sqrt{u^2 + v^2} (b_n \cos \varphi + b_s \sin \varphi) v \quad (5)$$

2.2 刷丝扰动分析

刷式密封在实际工作中存在着刷丝的扰动,由于前排和后排刷丝的约束更小,这种扰动明显出现在柔性更高的边缘刷丝上,产生变形翘起,降低密封效果.

由于是气体的不规则流动产生了刷丝扰动,所以流场的混乱程度就成为了衡量这种扰动趋势的重要指标.

流场的混乱主要来源于湍流,湍流速度 u_i 可分为时均速度 $\bar{u}_i$ 和脉动速度 u_i' ^[14-15]

$$u_i = \bar{u}_i + u_i' \quad (6)$$

湍流动能 k 即是单位质量脉动速度 u_i' 动能的平均量

$$K = \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i'} \quad (7)$$

在 $k-\epsilon$ 模型中对 k 的控制方程的耗散率 Γ 和源项 S 分别为^[15]

$$\Gamma = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (8)$$

$$S = G_k + \epsilon \rho \quad (9)$$

其中 $\mu_t, \sigma_k, G_k, \epsilon$ 分别为湍动黏度、湍流动能对应的 Prandtl 数、平均速度梯度引起的湍流动能产生项和湍流动能耗散率。

本文用湍流动能衡量气流的不规则程度,进而分析对刷丝扰动的影响。

3 计算结果与分析

计算采用商用 CFD 软件 FLUENT, 使用 RNG(renormalization group) $k-\epsilon$ 模型。

以刷封高度为 h_b , 前板高度为 h_p , 则相对前板高度 $h = h_b/h_p$ 。以下为 $h = 0.86, h = 0.67, h = 0.38, h = 0$ 及 $h = 0.86$ 开孔结构进行流场计算。

3.1 不同结构的上游刷丝压场及流场

上游刷丝是最易受到前板结构影响的, 图 2、图 3、图 4 分别为不同结构上游刷丝沿径向相对位置 H 的压力 p 分布、轴向速度 u_a 分布和径向速度 u_r 分布。

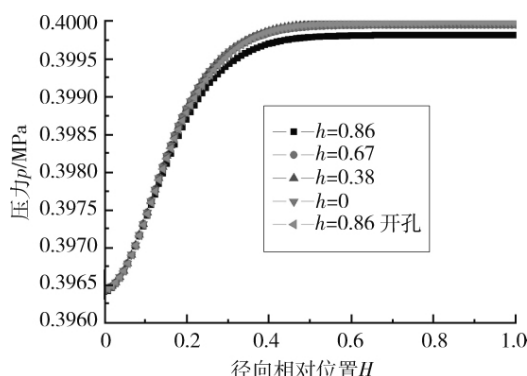


图 2 上游刷丝压力分布

Fig. 2 Pressure on upstream side of bristles

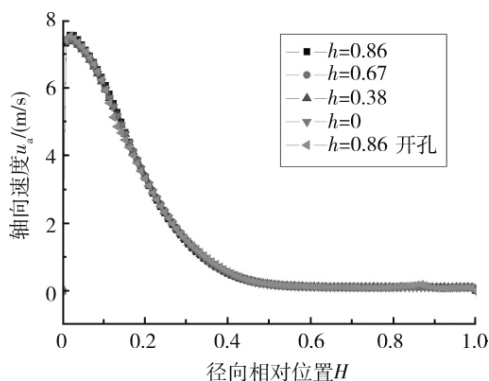


图 3 上游刷丝轴向速度分布

Fig. 3 Axial velocity on upstream side of bristles

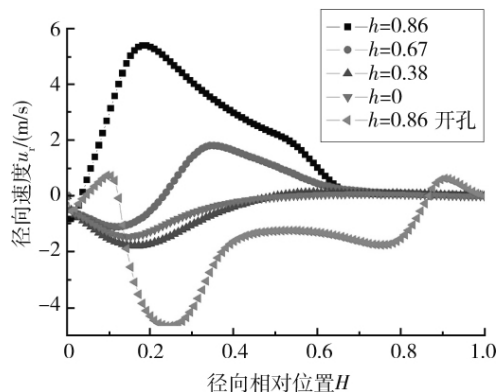


图 4 上游刷丝径向速度分布

Fig. 4 Radial velocity on upstream side of bristles

图 2 和图 3 表明: 前板结构的有无以及形式对于上游刷丝旁的气流的压力和轴向速度分布无显著影响。这是因为刷丝束是对压力主要的阻碍作用, 而背板的位置决定了轴向气流的流向。压力场之间较小的差异说明前板结构对低滞后刷式密封刷丝压紧的程度作用不大, 因而对“滞后”程度影响不大。

图 4 则表明前板结果对上游刷丝旁的气流径向速度有明显改变。随着前板长度的增加, 上游径向速度由向下转为向上。向上的径向气流对刷丝压在跑道上的趋势有负面影响, 易导致前排刷丝翘起等不规则变形, 不利于密封; 同时可以产生更小的摩擦扭矩, 但由于压力场的改变不大, 这种减小的程度很小; 向下的径向气流作用相反。前板开孔后上游刷丝具有较大的向下的径向速度, 这可以降低刷丝不规则变形的可能性。

3.2 不同结构的刷丝扰动

计算得到的上游刷丝的湍流动能分布如图 5。由图可见, 随着前板长度的增加, 上游刷丝的湍流

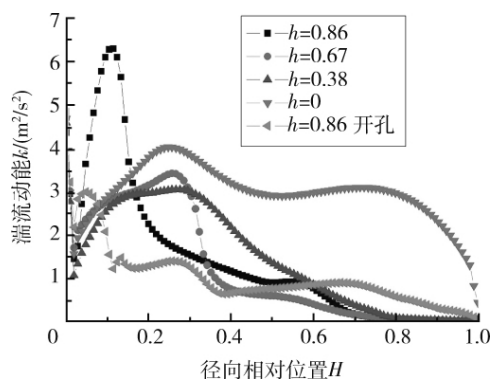


图 5 上游刷丝湍流动能分布

Fig. 5 Turbulence kinetic energy on upstream side of bristles

动能的分布逐渐集中在易受气流扰动影响的刷丝下部。这说明:即使易受到气流扰动的刷丝下部区域的湍流动能相近,无前板结构和短和普通前板结构产生刷丝扰动的可能性也更大。

截取最易受到扰动的刷丝上游靠近跑道区域做典型分析,计算3类不同前板结构的区域平均湍流动能,以此分析前板结构对于刷丝扰动的影响。

图6表明:普通前板结构较无前板结构刷丝上游近跑道区湍流动能小,随着前板长度变短,这种优势先加大后减小。结合图5可知:普通前板结构较无前板结构可减弱对刷丝扰动的影响。前板开孔结构则较其他两种对前扰动区湍流动能有显著下降。这种下降将使前板开孔结构的前排刷丝受到的扰动程度减小。产生这种现象的原因是:前板开孔结构可以使刷丝前区的气流更稳定。

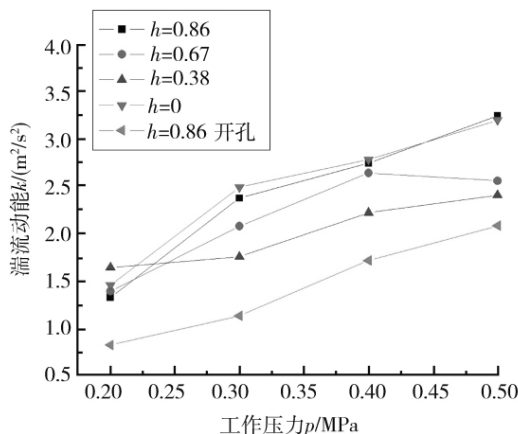


图6 刷丝上游近跑道区平均湍流动能

Fig. 6 Turbulence kinetic energy at the front and low part of bristles

3.3 不同结构的刷式密封泄漏量

图7表明3类结构泄露量基本相当,说明普通前板结构及前板开孔结构对于泄漏量无明显影响。

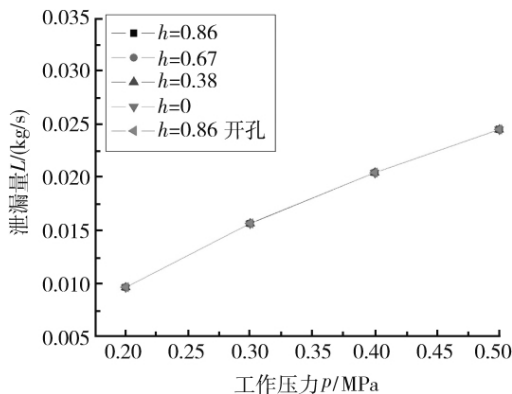


图7 不同结构刷式密封的泄漏量

Fig. 7 Leakage of different kinds of brush seals

4 结 论

1) 前板长度的增加,使上游刷丝旁的气流径向速度由向下转为向上,易引起刷丝不规则变形;前板开孔结构上游刷丝具有较大的向下的径向速度,可减弱刷丝不规则变形的趋势。

2) 无前板结构和过长的前板结构的刷丝上游近跑道区湍流动能较大,前板开孔结构显著降低了刷式密封刷丝上游近跑道区湍流动能,进而降低刷丝扰动。

3) 在不同工作压力下,前板结构对泄漏量、上游刷丝压力分布及轴向速度分布无明显影响。

参考文献:

- [1] Lelli D, Chew J W, Cooper P. Combined three-dimensional fluid dynamic and mechanical modeling of brush seals[J]. Journal of Turbomachinery, 2006, 128(1): 188-195.
- [2] Prior R, Short J, Basu P. Brush seal wear model[R]. AIAA 1998-3170, 1998.
- [3] Chew J W, Lapworth B L, Millener P J. Mathematical modeling of brush seals[J]. Int. J. Heat Fluid Flow, 1995, 16(6): 493-500.
- [4] Guardino C, Chew J W. Numerical simulation of three-dimensional bristle bending in brush seals[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2005, 127(7): 583-591.
- [5] 刘占生, 叶建槐. 刷式密封接触动力学特性研究[J]. 航空动力学报, 2002, 17(5): 635-640.
LIU Zhansheng, YE Jianhui. Research on structural dynamic characteristics of brush seals[J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(5): 635-640. (in Chinese)
- [6] 王之栋, 梁小峰, 宋飞, 等. 低滞后刷式密封数值分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(9): 1080-1083.
WANG Zhili, LIANG Xiaofeng, SONG Fei, et al. Low hysteresis brush seal numerical simulations[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(9): 1080-1083. (in Chinese)
- [7] 李理科, 王之栋, 宋飞, 等. 刷式密封温度场数值研究[J]. 航空动力学报, 2010, 25(5): 1018-1024.
LI Like, WANG Zhili, SONG Fei, et al. Numerical investigation of temperature field in brush seals[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(5): 1018-1024. (in Chinese)
- [8] Tseng T W, Short J F, Steinetz B M. Development of a low hysteresis brush seal for modern engine application[R]. AIAA 1999-2683, 1999.
- [9] Aksit M F, Tichy J A. Wear of brush seals: background and new modeling approach[J]. Tribol Trans, 1998, 41(3): 368-374.
- [10] Wood P E, Jones T V. A test facility for the measurement of torques at the shaft to seal interface in brush seals[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1999,

- 121(1):160-166.
- [11] Zhao H, Stango R J. Role of distributed interbristle friction force on brush seal hysteresis[J]. ASME Journal of Tribology, 2007, 129(1): 199-204.
- [12] CHI Jiadong, WANG Zhili, LI Like. Numerical simulation and analysis of low hysteresis brush seals[J]. Advanced Materials Research, 2012, 452/453: 1455-1459.
- [13] Dogu Y, Aksit M F. Effects of geometry on brush seal pressure and flow fields Part I: front plate configurations[J]. Journal of Turbomachinery, 2006, 128(2): 367-378.
- [14] 张兆顺, 崔桂香, 许春晓. 湍流的理论与模拟[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [15] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件的原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.