

考虑泄漏间隙有压流体作用的指尖密封瞬态性能分析

王莉娜, 陈国定, 苏 华, 路 菲
(西北工业大学 机电学院, 西安 710072)

摘 要: 针对已有指尖密封性能分析工作中未考虑泄漏间隙有压流体作用使得指尖密封的理论分析与工程实际有较明显差距的问题,建立了考虑泄漏间隙中有压流体作用的指尖密封性能分析模型,对是否考虑泄漏间隙中有压流体作用的指尖密封性能差异进行了比较分析. 研究表明:指尖密封性能分析工作需要考虑泄漏间隙有压流体的作用. 考虑泄漏间隙有压流体作用指尖密封的泄漏率较不考虑有压流体作用的泄漏率最大增加了234.7%,且有压流体作用使指尖密封泄漏率随转速增加的趋势更加显著.

关 键 词: 指尖密封; 流体作用; 瞬态分析; 泄漏间隙; 压力分布; 泄漏率

中图分类号: V232; TH122

文献标志码: A

Transient performance analysis of finger seal considering compressed fluid in the leakage gap effect

WANG Li-na, CHEN Guo-ding, SU Hua, LU Fei

(School of Mechanical Engineering,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to solve the problem that the influence of compressed fluid in the leakage gap was neglected in previous work and the results compared with the practical test had poor consistency, the transient performance analysis model of finger seal (FS) considering compressed fluid in the leakage gap effect was proposed; and then the calculated results of FS performance were compared with those without having considered the effect of compressed fluid. The results indicate that it's necessary to consider the compressed fluid effect about the performance analysis of FS. The FS leakage rate with consideration of compressed fluid has a maximal increase of 234.7% compared with that neglecting the effect of compressed fluid. The compressed fluid makes the trend of FS leakage rate rise remarkably with the increasing rotor speed. In addition, the FS average contact pressure is decreased by compressed fluid, so the wear extent is lower.

Key words: finger seal; fluid; transient analysis; leakage gap; pressure distribution; leakage rate

指尖密封作为一种柔性密封,具有低泄漏率和长寿命的优点,其在航空发动机内流密封和轴承腔密封等领域中可能具有的潜在应用前景^[1-5],使得指尖密封近年来得到了广泛的重视和研究.

指尖密封的性能分析一直是指尖密封研究的重要方面,指尖密封性能的提高与指尖密封所具有的迟滞特性相关. 转子旋转时因其不平衡质量作用而径向跳动时,推动指尖密封梁产生径向位

收稿日期: 2014-03-03

基金项目: 陕西省自然科学基金(2014JM7266); 国家自然科学基金(51305343)

作者简介: 王莉娜(1985—),女,陕西渭南人,博士生,主要从事机械系统密封与润滑的相关研究.

移,当转子结束径向跳动恢复原位时,则因叠置的指尖密封片之间摩擦阻滞作用,指尖密封梁的弹性变形恢复并非与转子恢复运动一致,故而因所谓的“迟滞作用”在密封靴与转子之间出现间隙,导致有压流体向低压侧泄漏的现象产生.近年来有关指尖密封的研究多集中在降低指尖密封迟滞作用、提高指尖密封性能的领域,比如,Arora等通过试验发现了指尖密封确因“迟滞作用”而造成流体泄漏的现象,为避免通过提高指尖密封刚度来改善指尖密封的密封性能,提出了“压力平衡低迟滞指尖密封”结构,以减小“迟滞效应”^[6];其后,Margaret等对压力平衡指尖密封进行了高温高压试验和功耗试验,分析了工况条件对指尖密封泄漏性能的影响^[7-9];Nathan等提出了“改进型指尖密封结构”,一定程度上减小了指尖密封泄漏量,并通过试验对理论分析进行了验证^[10];陈国定等分析了几种不同指尖密封型线对指尖密封迟滞性能的影响,提出了合理的指尖密封结构选择的理论依据^[11-12],并采用分布质量等效动力学的方法验证了将C/C复合材料应用于指尖密封的可行性^[13-14];苏华等对指尖密封迟滞机理进行了理论研究,从迟滞能的角度阐释了指尖密封产生迟滞现象的原因^[15-16];张延超、路菲等分别探讨了转子一个运动周期中指尖梁位移和密封靴接触压力的状态变化,并进行了试验验证^[17-18].

由于泄漏间隙的存在,工作过程中有一半以上的时间密封靴底与转子之间不接触,此时密封靴与转子间仍然存在着有压流体对转子和密封靴的作用,进而影响到指尖密封性能.迄今为止在指尖密封性能研究中,都没有考虑泄漏间隙中有压流体的影响,使得指尖密封的理论分析与工程实际有了差距.基于此本文建立了考虑泄漏间隙中有压流体作用的指尖密封性能分析模型,对是否

考虑泄漏间隙中有压流体作用的指尖密封性能差异进行了比较分析.本文的研究进一步完善了指尖密封理论研究方法,对于提高指尖密封分析和设计水平有着较高的学术意义和应用价值.

1 考虑泄漏间隙有压流体作用的指尖密封性能分析模型

指尖密封系统由前后挡板、若干相互交错叠置的指尖密封片和转子构成.由于指尖密封结构复杂,如果将几十片密封片构成的指尖密封整体作为分析对象,计算工作量之大可能难以使理论分析为继,因此多以指尖密封具有的周向及轴向循环结构特征为考虑,进行有限个密封片和指尖梁组合下的研究.国内外许多研究都表明这样处理能够正确反映指尖密封的实际性能,且使得计算工作量可以接受.出于这样的考虑,本文基于的指尖密封性能分析结构模型由3片密封片(高压、中间和低压密封片)、每片密封片上有2个完整指尖梁,并包括了前后挡板所构成,3个密封片上指尖梁亦是相互交错叠置,如图1所示.

从指尖密封结构模型出发,采用有限元方法进行指尖密封性能分析.密封片、前后挡板和转子都使用六面体单元进行离散处理.数值分析的边界条件是:指尖密封片外圆周面和后挡板处1进行3个坐标方向上的位移约束;转子轴向端面2处位移为0;转子圆周截断部位3、指尖梁根部圆周截断部位4和后挡板的圆周截断部位5处均施加循环对称约束;在高压密封片表面施加压力边界条件.另外,密封靴与转子之间,密封片之间以及密封片与后挡板之间,建立相应的接触对和设置相应的摩擦因数.图2所示为指尖密封性能分析的有限元模型.

转子自身具有的不平衡质量使转子在转动过

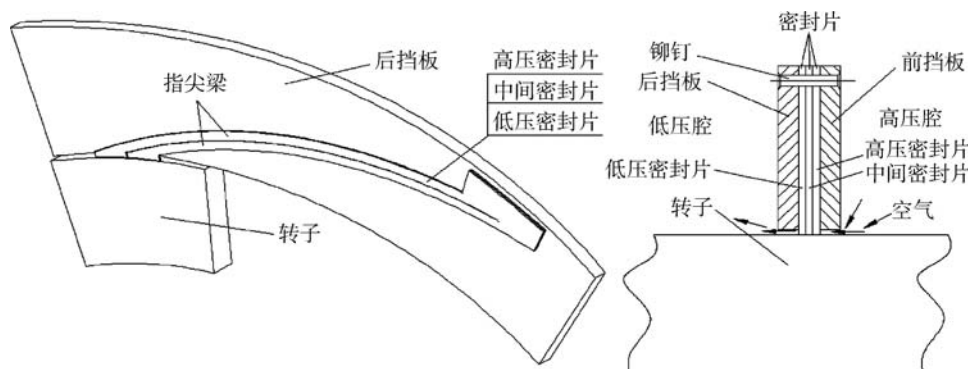


图1 指尖密封结构示意图

Fig. 1 Structure schematic of FS

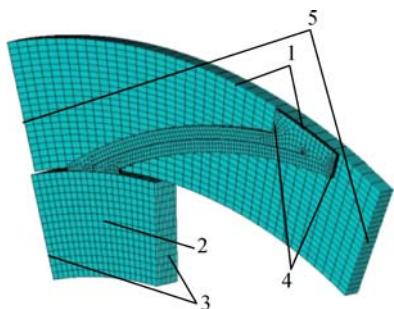


图2 指尖密封性能分析有限元模型

Fig. 2 Finite element model of FS performance analysis

程中产生离心力,该作用力以转子径向位移激励形式表征.转子径向位移幅值随转子转速增大而增大,但受支承轴承径向游隙的限制,当转速增至某一转速后,转子径向位移幅值恒定为轴承径向游隙之半,这个转速称为“特定转速”,其计算公式为

$$n^* = 29894 \sqrt{\frac{M}{m_e}} \quad (1)$$

式中 m_e 为转子不平衡量; M 为转子质量.

根据文献[17]的研究,转子位移激励采用分段正弦函数形式表达为

$$y(t) = \frac{\alpha n}{2n^*} \sin\left[\frac{n\pi}{30}t\right] \quad n \leq n^* \quad (2)$$

$$y(t) = \frac{\alpha}{2} \sin\left[\frac{n\pi}{30}t\right] \quad n > n^*$$

式中 n 为转子转速; α 为支承轴承的径向游隙.

当指尖密封因“迟滞作用”在密封靴与转子之间出现泄漏间隙时,泄漏间隙中存在有有压流体并作用于密封靴上.由于泄漏流体的流动是在指尖密封上下游压力差作用下形成的,因此作用于第 i 层密封靴上的流体压力可以表示为

$$G_i = p_l + \frac{i-1}{N} \Delta p \quad (3)$$

式中 p_l 为密封系统低压侧压力; Δp 为密封上下游压力差; N 为密封片层数.

转子转动一个周期中的指尖密封性能分析,需要判断各密封片与转子的接触和分离状态,以确定何时对各密封片施加间隙流体的作用.可以以各密封片位移响应与转子位移激励之差作为判断参数.当该差值为 0 时,表明密封靴与转子相互接触,无流体作用的影响;而当该差值大于 0 时,表明密封靴与转子进入脱离状态,此刻开始需要考虑流体作用的影响.

通过有限元瞬态分析计算出一个运动周期中对应转子位移激励的各层密封片的位移响应,指

尖密封的泄漏间隙可以用密封片的位移响应与转子的位移激励之差表征,即就是一个运动周期中 t 时刻第 i 层密封片的泄漏间隙 $h_i(t)$ 可以表示为

$$h_i(t) = x_i(t) - y_i(t) \quad (4)$$

式中 $x_i(t)$ 为一个运动周期中 t 时刻第 i 层密封片的指尖梁位移响应; $y_i(t)$ 为对应的 t 时刻转子的位移激励.

指尖密封第 j 个时刻点各密封片与转子之间泄漏间隙的平均值 $\bar{h}_j$,其表达式为

$$\bar{h}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i(t_0 + j\Delta t) \quad (5)$$

式中 t_0 为初始时刻点; Δt 为计算时间步长, $\Delta t = T/f$, f 为转子一个运动周期的计算时间步数, T 为转子运动周期.

利用文献[19]给出的环形柱面轴向流动泄漏率计算公式,指尖密封泄漏率 Q 可以表示为

$$Q = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^f \frac{\rho_a \pi D_r \bar{h}_j^3 \Delta p \Delta t}{12 \eta L} \quad (6)$$

式中 ρ_a 为流体密度; η 为流体动力黏度; L 为指尖密封泄漏间隙长度; D_r 为转子直径.

2 计算结果及分析

计算分析中涉及的结构参数如表 1 所示.指尖密封片、后挡板和转子所用材料分别为 1Cr13 不锈钢、2Cr13 不锈钢和 40CrNiMo,其弹性模量分别为 206, 200 GPa 和 210 GPa,泊松比均为 0.3.空气密度为 1.2 kg/m^3 ,空气动力黏度为 $17.9 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$.

表 1 指尖密封结构参数
Table 1 FS structural parameters

参数	数值
转子直径 D_r/mm	240
密封片外圆直径 D_w/mm	290
密封片根圆直径 D_c/mm	280
密封片厚度 δ/mm	0.25
靴高 x_g/mm	1
指尖梁缝隙宽度 c/mm	0.3
指身宽度 b/mm	1.5
指尖梁个数 n_b	100

图 3 所示为上下游压力差为 0.3 MPa、转子转速为 5000 r/min 条件下,转子转动一个周期的转子位移激励和 3 个密封片的位移响应.可以看

出,时刻点 t 在 0.005 s 之前,密封片位移响应与转子位移激励同步;当时刻 t 大于 0.005 s 后,各层密封片与转子之间相继脱离接触,并因有压流体对密封片的作用,各层密封片的位移响应发生“阶跃变化”.在迟滞作用和有压流体“支撑”作用下,密封片位移响应恒定在某一数值上.图中表明高压密封片的位移响应最大,低压密封片的位移响应最小,其原因与沿轴向分布的流体压力对高压密封片作用最强烈有关.

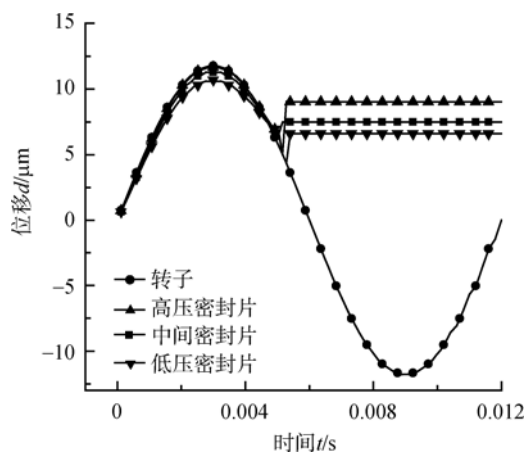


图 3 3 个密封片的位移响应

Fig. 3 Displacement response of three laminates

图 4 所示为同样工况条件下转子转动一个周期 3 个密封片的泄漏间隙.时刻点 t 在 0.005 s 之前,由于转子与指尖密封接触,故 3 个密封片的泄漏间隙均为 0;当时刻点 t 大于 0.005 s 后,由于指尖密封的位移响应与转子的激励响应存在的幅值差异,形成了转子与指尖密封之间的泄漏间隙,对应着各层密封片的不同位移响应,承受更高有压流体作用的高压密封片的泄漏间隙最大.

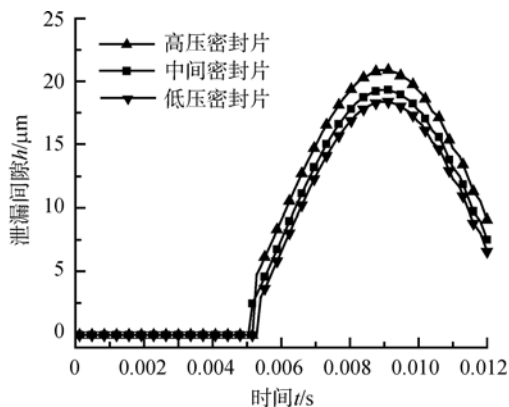


图 4 3 个密封片的泄漏间隙

Fig. 4 Leakage gap of three laminates

图 5 是同样工况条件下转子转动一个周期 3 个密封片上密封靴承受的压力情况.在时刻点 t 小于 0.005 s 时,密封靴上的压力是密封靴与转子相互接触的接触压力;当时刻点 t 大于 0.005 s 后,密封靴上的压力来自于泄漏间隙中有压流体的作用.表 2 给出了转子一个激励周期中密封靴部若干时间点承受的压力数值,包括了前半周期的接触压力和后半周期的流体压力.从表 2 中可以看到,有压流体对密封靴的作用压力同转子与密封靴间的接触压力处于同一个数量级,因此有压流体的影响在指尖密封的特性分析中是应当加以考虑的.还应该指出,低压密封片与转子之间的接触压力较高,这是因为低压密封片的迟滞作用较弱、其弹性恢复程度较大;二是因为压流体对低压密封片的影响较小,其弹性恢复程度所受影响较小.此外,由表 2 可以计算得到转子一个激励周期指尖密封高压、中间和低压密封片的平均压力分别为 $0.163, 0.110\text{ MPa}$ 和 0.0807 MPa .

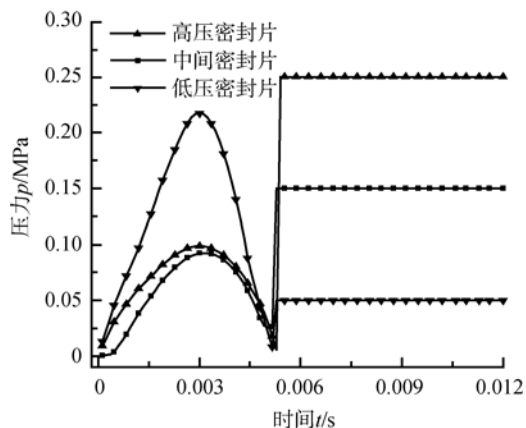


图 5 3 个密封片密封靴的压力分布

Fig. 5 Finger pad pressure distribution of three laminates

表 2 3 个密封片密封靴的压力分布

Table 2 Finger pad pressure distribution of three laminates

时刻点 t/s	压力 p/Pa		
	高压密封片	中间密封片	低压密封片
0.00012	9174.97	581.77	13139.14
0.00060	36266.97	8757.99	54559.36
0.00108	55978.69	32440.26	88407.32
0.00156	71815.43	54030.33	127639
0.00204	85082.48	72101.99	166728.2
0.00252	94890.18	85554.92	201666.4

续表

时刻点 t/s	压力 p/Pa		
	高压密封片	中间密封片	低压密封片
0.00300	98576	92338.48	217689.9
0.00348	95058.76	90405.61	201405.3
0.00396	83955.54	79628.93	155171.2
0.00444	65568.96	58515.14	88332.53
0.00492	38818.25	27405.7	32697.26
0.00540	6007.94	150000	50000
0.00588	250000	150000	50000
0.00636	250000	150000	50000
0.00684	250000	150000	50000
0.00732	250000	150000	50000
0.00780	250000	150000	50000
0.00828	250000	150000	50000
0.00876	250000	150000	50000
0.00924	250000	150000	50000
0.00972	250000	150000	50000
0.01020	250000	150000	50000
0.01070	250000	150000	50000
0.01120	250000	150000	50000
0.01160	250000	150000	50000
0.01200	250000	150000	50000

在上下游压力差是 0.3 MPa、转子转速是 5000 r/min 条件下,分析了考虑有压流体作用与否则对密封片位移响应的影响如图 6 所示.可以看出,当指尖密封与转子脱离接触后,是否考虑有压流体作用对各层密封片在这一时间段的位移响应影响较大,考虑有压流体作用的指尖密封位移响应显著大于不考虑有压流体作用的指尖密封位移响应,故也具有较大的泄漏间隙如图 7 所示,当然肯定会影响到指尖密封的泄漏性能.

图 8 为同样工况条件下考虑有压流体作用与否则对密封靴压力分布的影响.显然,当指尖密封与转子相互接触时,有压流体作用对密封靴上的压力大小没有影响;但当指尖密封与转子脱离接触,考虑有压流体作用的密封靴上有较大的压力,如果不考虑有压流体作用,如所预料的,密封靴上的压力为 0.

图 9 所示为密封片与转子之间接触压力分布情况.从图中可以看出,相较于不考虑流体作用,考虑有压流体作用的密封片与转子接触时间缩

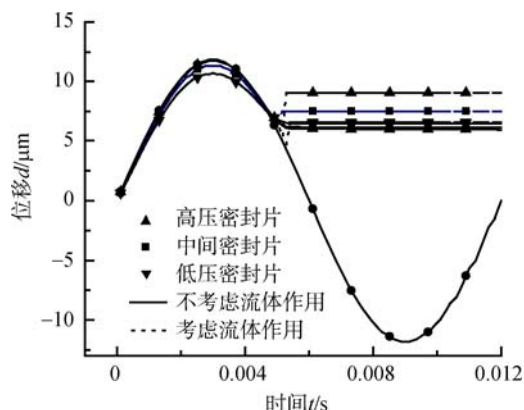


图 6 有压流体作用对指尖密封位移响应的影响
Fig. 6 Effect of compressed fluid on FS displacement response

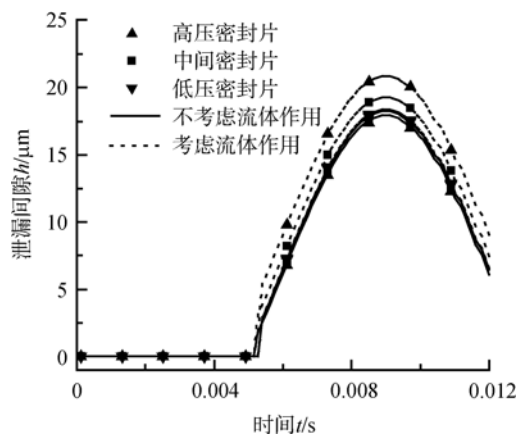


图 7 有压流体作用对指尖密封泄漏间隙的影响
Fig. 7 Effect of compressed fluid on FS leakage gap

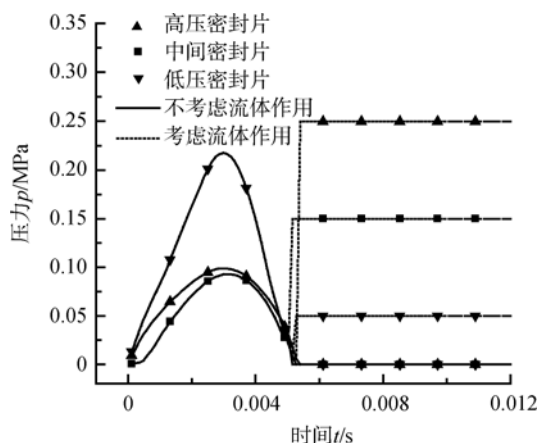


图 8 有压流体作用对密封靴压力分布的影响
Fig. 8 Effect of compressed fluid on finger pad pressure distribution

短,这是因为有压流体“支撑”作用使得泄漏间隙增大,造成密封片与转子进入接触的时间推后、脱

离接触的时间提前. 密封片与转子接触压力因有压流体作用出现的这一变化, 将降低指尖密封与转子之间的平均压力, 对于减小指尖密封的磨损是有利的.

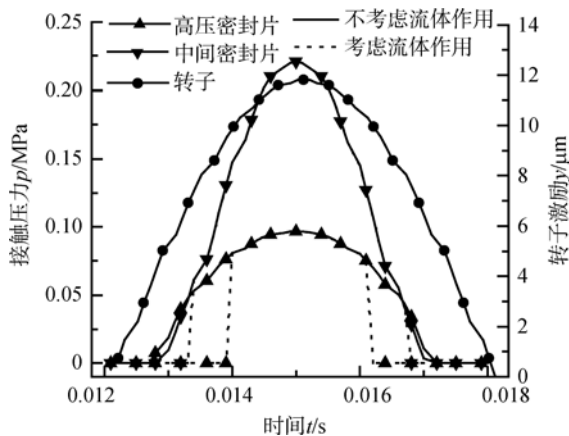


图 9 有压流体作用对指尖密封接触压力的影响

Fig. 9 Effect of compressed fluid on FS contact pressure

图 10 给出了若干上下游压力差和转子转速条件下, 考虑有压流体作用与否的指尖密封泄漏率比较, 和所预料到的一样, 考虑有压流体作用的指尖密封泄漏率要更大些. 转子转速的增加使得指尖密封泄漏率增大, 这与转子不平衡效应增强造成转子跳动量增大、对应转子跳动量增大导致迟滞效应增强的原因有关, 故而表现出指尖密封泄漏率增大. 特别是有压流体作用存在时, 其对指尖密封迟滞效应具有进一步增强的作用, 使得这种情况下指尖密封泄漏率随着转子转速增加和上下游压力差增大表现得更为突出, 如表 3 所示. 上下游压力差增大使得指尖密封泄漏率增加的原因很容易理解, 因为无论是上下游压力差增大促使有压流体作用增加、还是促使泄漏流体速度的加

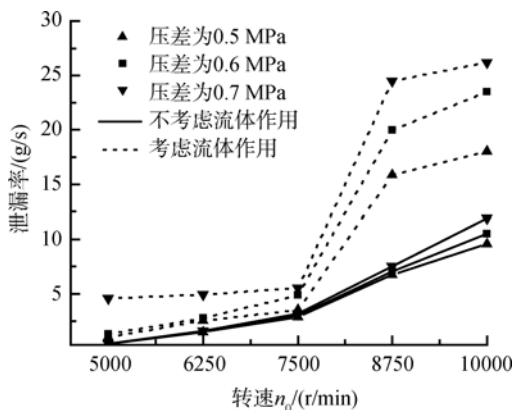


图 10 有压流体作用对指尖密封泄漏率的影响

Fig. 10 Effect of compressed fluid on FS leakage rate

快, 都有助于指尖密封泄漏率的增大, 不同之处在于有压流体作用的影响更为明显.

表 3 有压流体作用对指尖密封泄漏率及其增长率的影响
Table 3 Effect of compressed fluid on FS leakage rate and its growth rate

压差/ MPa	转速/ (r/min)	不考虑流体 作用泄漏 率/(g/s)	考虑流体 作用泄漏 率/(g/s)	泄漏率 增长率/%
0.5	5000	0.40	1.00	150
	6250	1.49	2.51	68.4
	7500	2.90	4.55	56.9
	8750	6.75	15.83	134
	10000	9.60	18.00	87.5
0.6	5000	0.42	1.30	209
	6250	1.51	2.78	84.1
	7500	3.00	4.90	63.3
	8750	7.06	19.97	182.8
0.7	10000	10.51	23.50	123.6
	5000	0.98	3.28	234.7
	6250	1.57	4.94	214.6
	7500	3.20	5.50	71.9
	8750	7.49	24.47	226.7
	10000	11.7	26.40	125.6

3 结 论

根据本文的研究可以获得以下结论:

1) 考虑有压流体作用对指尖密封与转子脱离接触状态下的密封性能影响较大, 较之不考虑有压流体作用的情况表现出更大的泄漏间隙和泄漏率, 从这点来讲不应忽略有压流体作用对指尖密封性能的影响.

2) 有压流体作用使得指尖密封与转子接触时间缩短, 造成指尖密封与转子之间的平均接触压力降低, 因此有可能减小指尖密封的磨损.

3) 考虑有压流体作用时转子转速增加使得指尖密封泄漏率增大, 并且较之不考虑有压流体作用这一增大程度更烈. 无论是否考虑有压流体作用, 指尖密封泄漏率都随着上下游压力差增大而增加. 因为上下游压力差对有压流体作用增强和促进泄漏流体流速加快的双重作用, 同样使得考虑有压流体作用时指尖密封泄漏率随着上下游压力差变化更为剧烈.

参考文献:

- [1] Proctor M P, Delgado I R. Preliminary test results of a non-contacting finger seal on a herringbone-grooved rotor[R]. AIAA-2008-4506, 2008.
- [2] Marie H. Dynamic simulation of finger seal-rotor interaction using variable dynamic coefficients[R]. AIAA-2006-4931, 2006.
- [3] Braun M J, Pierso H M, Kudriavtsev V V. Finger seal solid modeling design and some solid/fluid interaction considerations[J]. Tribology Transactions, 2003, 46(4): 566-575.
- [4] Braun M J, Pierson H M, Deng D F, et al. Structure and dynamic consideration towards the design of padded finger seal[R]. AIAA-2003-4698, 2003.
- [5] Arora G K. Dual pressure balanced non-contacting finger seal; US, 6364316[P]. 2002-04-02.
- [6] Arora G K, Proctor M P, Steinetz B M, et al. Pressure balanced, low hysteresis, finger seal test results[R]. AIAA 99-2686, 1999.
- [7] Proctor M P, Arun K, Delgado I R. High-speed, high-temperature finger seal test result[J]. Journal of Propulsion and Power, 2004, 20(2): 312-318.
- [8] Proctor M P, Delgado I R. Leakage and power loss test results for competing turbine engine seals[R]. NASA TM-2004-213049, 2004.
- [9] Delgado I R, Proctor M P. Continued investigation of leakage and power loss test results for competing turbine engine seals[R]. AIAA-2006-4754, 2006.
- [10] Gibson N E, Takeuchi D, Hynes T, et al. Second generation air-to-air mechanical seal design and performance[R]. AIAA-2011-5636, 2011.
- [11] 陈国定, 徐华, 虞烈, 等. 指尖密封型线力学性能的有限元分析[J]. 西北工业大学学报, 2002, 20(2): 219-221.
- CHEN Guoding, XU Hua, YU Lie, et al. On selecting proper shape of finger seal[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2002, 20(2): 218-221. (in Chinese)
- [12] 陈国定, 徐华, 虞烈, 等. 指尖密封的迟滞特性分析[J]. 机械工程学报, 2003, 39(5): 121-124.
- CHEN Guoding, XU Hua, YU Lie, et al. Analysis to the hysteresis of finger seal[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(5): 121-124. (in Chinese)
- [13] CHEN Guoding, LU Fei, YU Qiangpeng, et al. Dynamic analysis of finger seal using equivalent model based on distributed mass method[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2014, 228(16): 2992-3005.
- [14] CHEN Guoding, WANG Lina, YU Qiangpeng, et al. Dynamic analysis of C/C composite finger seal[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2014, 27(3): 745-758.
- [15] SU Hua, CHEN Guoding. Dynamic behavior analysis of finger seal based on equivalent dynamic model[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 23(5): 590-599.
- [16] 苏华, 陈国定. 指尖密封迟滞特性的机理分析[J]. 机械工程学报, 2009, 45(5): 57-61.
- SU Hua, CHEN Guoding. Analysis on hysteresis characteristics of finger seal[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(5): 57-61. (in Chinese)
- [17] 张延超. 指尖密封的性能分析和优化研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2009.
- ZHANG Yanchao. Performance analysis and optimization research of finger seal[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2009. (in Chinese)
- [18] 路菲, 陈国定, 苏华, 等. 2. 5D 碳/碳复合材料指尖密封动态性能分析[J]. 航空学报, 2013, 34(11): 2616-2625.
- LU Fei, CHEN Guoding, SU Hua, et al. Analysis of dynamic performance for 2. 5D carbon-carbon composite finger seals[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(11): 2616-2625. (in Chinese)
- [19] 林基恕. 航空发动机设计手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.

(编辑: 秦理曼)