

转子蜂窝密封封严特性的试验研究

王 旭¹, 张文平¹, 马胜远², 诸振友²

(1. 哈尔滨工程大学 动力与核能学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036)

摘 要: 为研究转子蜂窝密封的封严特性, 设计制作了 5 种规格的蜂窝密封静子试验件和转子试验件, 并在转子密封试验台上进行了蜂窝芯格尺寸、密封间隙、转子转速、蜂窝深度和密封压比对封严特性的影响试验以及蜂窝静子与篦齿轮盘和光滑轮盘组成密封结构时的封严特性对比试验, 最后给出了试验研究结论。

关 键 词: 转子; 蜂窝密封; 篦齿密封; 封严特性

中图分类号: TQ051.1 文献标识码: A

1 引 言

在高速旋转的流体机械中, 为了提高效率, 减少泄漏, 维持各个腔室的工作压力, 通常需要采用各种封严措施, 篦齿密封和蜂窝密封是非接触式动态密封中应用最广泛的两种。随着流体机械向着高参数大容量方向的发展, 为了提高效率, 要求密封间隙越来越小, 而篦齿密封转子的流体激振问题也越来越突出。比如, 美国航天飞机上的高压涡轮泵在研制过程中, 就曾发生过严重的由级间篦齿密封引起的流体激振事故^[1], 国外某排气压力为 28.5 MPa 的背对背式离心压缩机, 在投产后曾发生了严重的亚异步振动^[2], 我国某化肥厂的一台离心式压缩机, 也曾发生过严重的气封流体激振事故^[3]。此外, 在排气压力高达 40~50 MPa 的离心压缩机上, 篦齿式密封的强度也存在安全隐患。蜂窝密封不仅封严特性好, 还有很好的动力学特性, 随着蜂窝芯格的加工和焊接工艺的不断改进, 采用蜂窝密封技术的成本正不断降低, 蜂窝密封正在高效大功率流体机械中取得越来越广泛的应用。关于蜂窝密封技术的研究, 总的来说理论研究落后于实验研究。美国的 Childs, Kleyhans 和 Ha 等人作了大量的实验研究工作^[4~8], 其实验内容主要是关于蜂窝密封对转子动态特性影响方面的。其实要做到合理有效地使用蜂

窝密封, 研究在各种流动状态下蜂窝密封的封严特性和结构参数的变化规律同样是非常重要的。我们曾对 3 种规格的蜂窝密封作过一些初步的试验研究^[9~10], 本次试验研究是在已有试验研究的基础上, 考虑多种蜂窝规格和多种动静组合, 研究封严特性随密封间隙、压比及转速等参数的变化情况, 并从中总结出一些规律性的东西。

2 试验台装置及封严特性测量方法

2.1 试验台装置

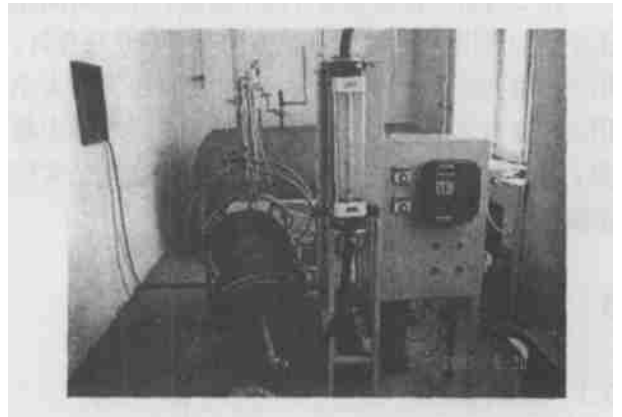


图 1 密封试验台装置

图 1 为本文密封试验台装置图。试验台设有工作腔和平衡腔。试验时, 将相同压力的气体同时引入工作腔和平衡腔, 这样可以最大程度地减小作用于滚动轴承上的轴向力。该试验台可以进行多种工况的密封试验, 如不同的进气压力、不同转速、不同转子偏心及反旋流试验等。不同的进气压力是通过调压阀来调节的, 调压范围为 0~0.6 MPa。气源由容积为 1.6 m³ 高压贮气罐提供, 通过高压气泵可将 1.0 MPa 的高压气体打入罐内。转速是通过变频调

收稿日期: 2003-09-22; 修订日期: 2003-12-18

基金项目: 国防“十五”预研基金资助项目(40101030104)

作者简介: 王 旭(1963-)男, 辽宁法库人, 现哈尔滨第七〇三研究所工作, 研究员。

速器控制电机来调节的,并用一个皮带轮增速机构来实现,变频调速器的调节范围为 0~3 000 r/min,皮带轮传递的增速比为 4:1,因此,可实现的调速范围为 0~12 000 r/min。转子偏心由专门设计的调节机构来完成,用来模拟实际转子的挠曲、安装偏心或旋转时的涡动等情况。

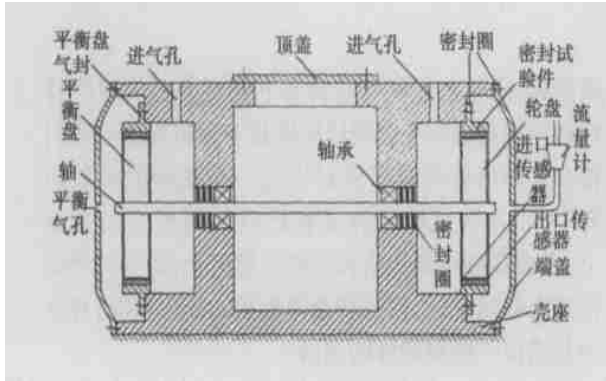


图 2 封严特性测量方法示意图

2.2 封严特性测量方法

图 2 为封严特性测量方法示意图。在密封间隙正中间的进出口处,迎着气流方向布置有总压探针,用来测量密封腔的进出口总压,进出口压力的大小用水柱高度表示。从密封间隙泄漏出来的气体由端盖上的出气管引入流量计,流量计的读数就是实际泄漏量。

3 试验方案

3.1 密封试验件

共有 5 种规格的蜂窝静子试验件,其结构尺寸见表 1 和图 3。篦齿静子为直通式直齿密封环,齿高 5.0 mm,齿距 5.0 mm,齿尖厚 0.3

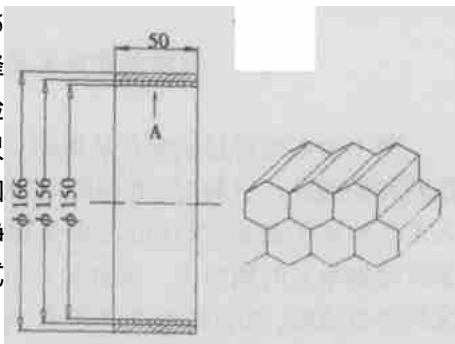


图 3 蜂窝静子环试验件结构图

mm,扩张角 15°。篦齿静子环的内径为 Φ150 mm,宽度为 50 mm。试验用的轮盘为光滑轮盘或篦齿轮盘,篦齿轮盘的齿高、齿距、齿尖厚等参数与篦齿静子环的参数相同。两种轮盘的宽度均为 26 mm,即

密封间隙的轴向宽度为 26 mm。

表 1 蜂窝静子环试验件规格 (mm)

	芯格尺寸	蜂窝深度	蜂窝壁厚
小蜂窝静子	0.8	3.0	0.1
中蜂窝静子 1	1.6	3.0	0.1
大蜂窝静子	3.2	3.0	0.1
特大蜂窝静子	4.0	3.0	0.1
中蜂窝静子 2	1.6	5.5	0.1

3.2 试验方案

试验转速为 0~6 000 r/min,每 1 200 r/min 为一个级差。调压阀的输出压力为 0.2~0.4 MPa,每 0.05 MPa 为一个级差。密封半径间隙为 0.06、0.12 和 0.30 mm。通过试验主要研究以下几个问题:

- (1) 蜂窝芯格尺寸对封严特性的影响;
- (2) 转速对转子封严特性的影响;
- (3) 蜂窝深度对转子封严特性的影响;
- (4) 蜂窝静子与篦齿轮盘或光滑轮盘组合时的封严特性对比;
- (5) 不同芯格尺寸的蜂窝静子与篦齿轮盘组合时的封严特性对比;
- (6) 密封间隙对转子封严特性的影响。

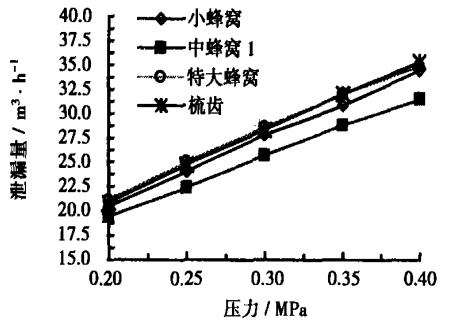
4 试验结果

4.1 蜂窝芯格尺寸对封严特性的影响

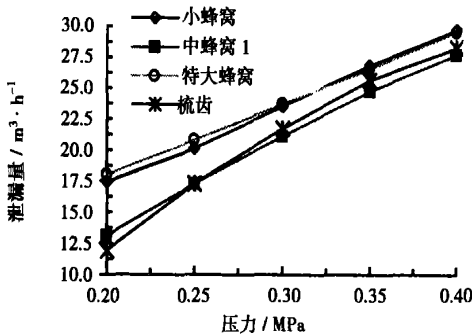
图 4(a)为 3 种规格的蜂窝静子/光滑轮盘密封,在半径密封间隙为 0.3 mm,转子转速为 6 000 r/min 时,泄漏量随进气压力变化的试验曲线;图 4(b)为这 3 种密封形式,在半径密封间隙为 0.12 mm,转子转速为 4 800 r/min 时,泄漏量随进气压力变化的试验曲线,并与篦齿静子/光滑轮盘密封进行了对比。

从图 4 可以看出,随着进气压力的增大,密封的泄漏量增大。当密封间隙较大时,比如 $G=0.30$ mm,在 4 种规格的密封形式中,中蜂窝密封的封严效果最好,其次为小蜂窝密封,特大蜂窝密封与篦齿密封的封严效果接近;当密封间隙较小时,比如 $G=0.12$ mm,在 4 种规格的密封形式中,中蜂窝和篦齿密封的封严效果最好,而小蜂窝和特大蜂窝密封的效果较差。此试验结果表明,当密封间隙很小时,蜂窝密封的封严效果并不具有优势,但正如在本文引言中提到的那样,当密封间隙很小时,如果压力很高,很容易引起气封流体激振,并且篦齿气封的强度问题也存在隐患^[1],其实如此小的篦齿密封间隙一

一般在工程上也是不允许的。



(a) $Cr=0.30\text{ mm}$, $n=6000\text{ r/min}$



(b) $Cr=0.12\text{ mm}$, $n=4800\text{ r/min}$

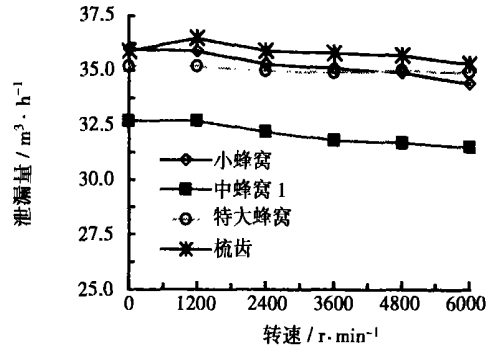
图 4 不同芯格尺寸的蜂窝密封泄漏量与压力的关系

4.2 转速对封严特性的影响

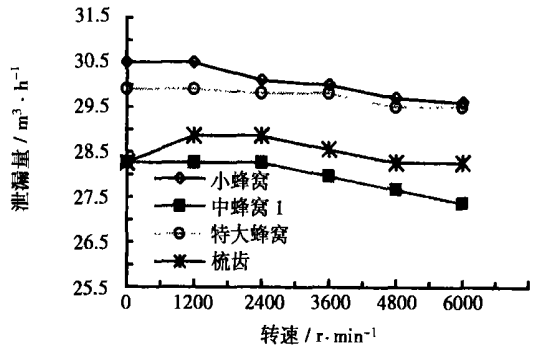
图 5(a) 为 3 种规格的蜂窝静子/光滑轮盘密封, 当半径密封间隙为 0.30 mm, 进气压力为 0.4 MPa 时, 在不同转速下的泄漏量试验结果, 图 5(b) 为这 3 种密封形式, 当半径密封间隙为 0.12 mm, 进气压力为 0.4 MPa 时, 在不同转速下的试验结果, 并与篦齿密封进行了对比。

试验结果表明, 随着转速的升高, 4 种密封形式的泄漏量都在减少, 在高转速时的减少量更明显些。相对于转子静止状态而言, 当 $Cr=0.30\text{ mm}$, 转速升高到 6000 r/min 时, 密封泄漏量的绝对值分别减少了 1.6 m³/h (小蜂窝/光滑轮盘)、0.3 m³/h (特大蜂窝/光滑轮盘)、1.2 m³/h (中蜂窝 1/光滑轮盘) 和 0.6 m³/h (篦齿/光滑轮盘)。按百分比计算分别减少了 4.44%、0.85%、3.67% 和 1.67%; 当 $Cr=0.12\text{ mm}$, 转速升高到 6000 r/min 时, 密封泄漏量的绝对值分别减少了 0.9 m³/h (小蜂窝/光滑轮盘)、0.4 m³/h (特大蜂窝/光滑轮盘)、0.89 m³/h (中蜂窝 1/光滑轮盘) 和 0 m³/h (篦齿/光滑轮盘)。按百分比计算分别减少了 2.95%、1.34%、3.15% 和 0%。可以看出,

密封间隙减小时, 随转速的升高, 密封泄漏量减小, 但总的来说, 转速对封严特性的影响不大。



(a) $Cr=0.30\text{ mm}$, $p=0.4\text{ MPa}$



(b) $Cr=0.12\text{ mm}$, $p=0.4\text{ MPa}$

图 5 转速对封严特性的影响

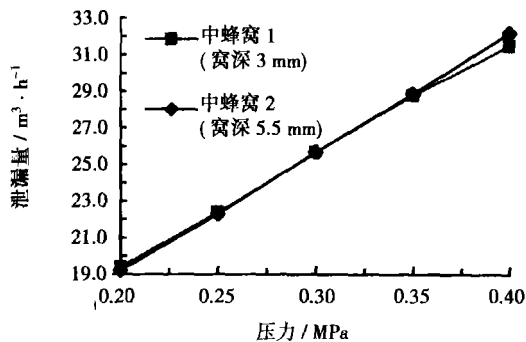
4.3 蜂窝深度对封严特性的影响

选用蜂窝深度分别为 3.0 mm 和 5.5 mm, 芯格尺寸均为 1.6 mm 的两个蜂窝静子, 与光滑轮盘组成密封形式。图 6(a) 为中蜂窝 1/光滑轮盘、中蜂窝 2/光滑轮盘密封, 当转速为 6000 r/min, 半径密封间隙为 0.30 mm 时, 密封泄漏量随进气压力变化的试验曲线, 图 6(b) 为这两种密封形式, 当转速为 6000 r/min, 半径密封间隙为 0.12 mm 时, 密封的泄漏量随进气压力变化的试验曲线。

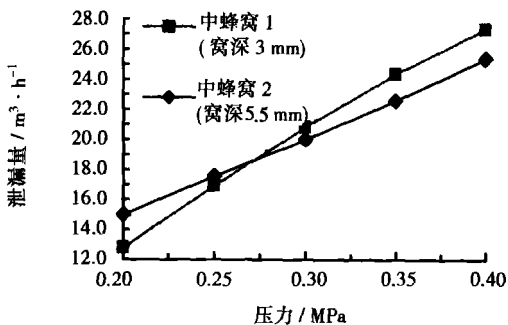
从图 6 可以看出, 随着进气压力的增大, 密封的泄漏量增大, 当密封间隙较大时, 如 $Cr=0.30\text{ mm}$, 两种密封的封严效果几乎完全一致; 当密封间隙较小时, 如 $Cr=0.12\text{ mm}$, 两种密封的封严效果也比较接近, 当压力较高时, 深蜂窝的封严效果要好些, 当压力较低时, 浅蜂窝的封严效果要好些。总的来说, 蜂窝深度对封严特性的影响很小。

4.4 篦齿轮盘与光滑轮盘的封严特性对比

图 7(a) 为中蜂窝 1/光滑轮盘与中蜂窝 1/篦齿轮盘密封, 当转速为 6000 r/min, 半径密封间隙为 0.30 mm 时, 两种密封形式的封严效果对比。图 7



(a) $Cr=0.30$ mm, $n=6000$ r/min



(b) $Cr=0.12$ mm, $n=6000$ r/min

图 6 蜂窝深度对封严特性的影响

(b)这两种密封形式,当转速为 6 000 r/min,半径密封间隙为 0.12 mm 时的封严效果对比。

从图 7 中可以看出,相对于同一蜂窝静子,采用光滑轮盘或篦齿轮盘,其封严效果是有区别的,当密封间隙较大时,如 $Cr=0.30$ mm,采用光滑轮盘的封严效果要好于采用篦齿轮盘的封严效果;当密封间隙较小时,如 $Cr=0.12$ mm,当压力小于 0.3 MPa 时,光滑轮盘的封严效果好于篦齿轮盘的封严效果,当压力大于 0.3 MPa 时,篦齿轮盘的封严效果好于光滑轮盘的封严效果,约提高 7.3%。

4.5 不同芯格蜂窝静子与篦齿轮盘密封的封严特性对比

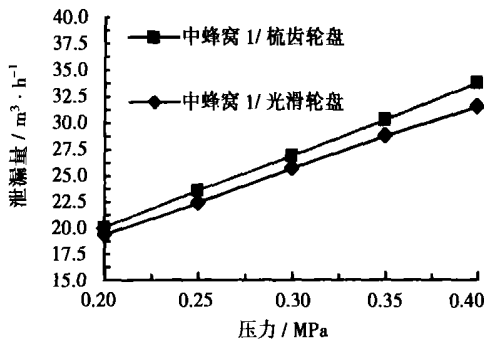
本文试验研究了特大、中、小 3 种蜂窝静子与篦齿轮盘组合时的封严特性对比。试验转速为 6 000 r/min,半径密封间隙为 0.12 mm。图 8 为 3 种蜂窝静子与篦齿轮盘密封的封严特性对比。

从图 8 中可以看出,大蜂窝密封的泄漏量明显大于中蜂窝 1 和小蜂窝密封的泄漏量,中蜂窝 1 和小蜂窝密封的泄漏量几乎相同。

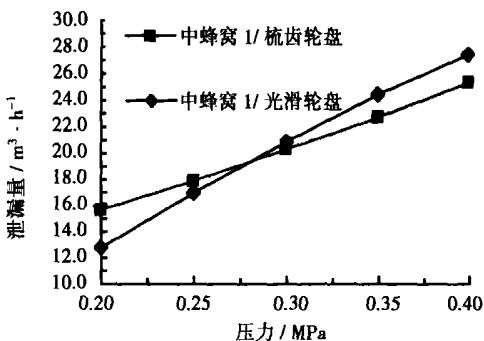
4.6 密封间隙对封严特性的影响

图 9 为中蜂窝 1/光滑轮盘密封,当密封间隙为

0.30, 0.12, 0.06 mm, 转速为 6 000 r/min 时,其封严特性随进气压力变化情况的对比,图 10 为 3 种密封间隙下的压比随进口压力变化的情况。



(a) $Cr=0.30$ mm, $n=6000$ r/min



(b) $Cr=0.12$ mm, $n=6000$ r/min

图 7 篦齿轮盘与光滑轮盘的封严特性对比

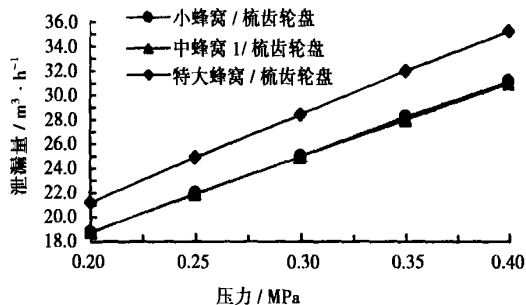


图 8 3 种蜂窝静子/篦齿轮盘密封的封严特性对比 ($Cr=0.12$ mm, $n=6000$ r/min)

从图 9 可以看出,密封间隙减小,漏气量明显减小,当密封间隙由 0.3 mm 减小到 0.12 mm 时,在 5 个设定的压力下,漏气量绝对值平均减少了 $4.1 m^3/h$,按百分比计算平均减少了 15.1%。密封间隙由 0.3 mm 进一步减小到 0.06 mm 时,在 5 个设定的压力下,漏气量绝对值平均减少了 $6.64 m^3/h$,按百分比计算平均减少了 24.6%。从图 10 可以看出,气封

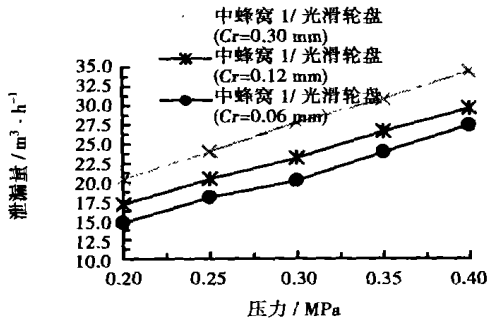


图9 密封间隙对封严特性的影响

(n=6 000 r/min)

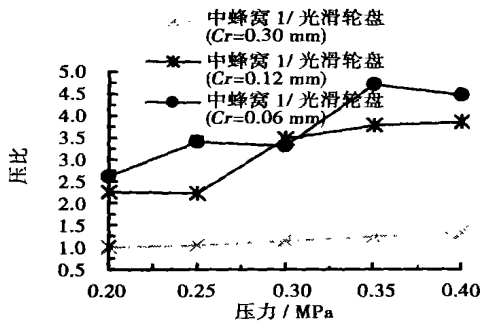


图10 压比随进气压力变化的曲线

(n=6 000 r/min)

前后的压比随密封间隙的减小而明显增大,并随进气压力的增大而缓慢增大,气封前后的压比是衡量转子动态特性和考虑气封强度的重要指标。

5 结论

(1)密封间隙对蜂窝密封的封严特性和气封前后的压比有着重要的影响。密封间隙越大,封严效果越差,但密封间隙的大小与泄漏量并不成比例关系,当密封间隙很小时,与篦齿密封相比,蜂窝密封的封严效果并不具有优势;气封前后的压比随密封间隙的减小而明显增大。

(2)进气压力对蜂窝密封的封严特性有重要影响。在某一固定间隙下,漏气量随进气压力的增大而明显增大,气封前后的压比随进气压力的增大而缓慢增大。

(3)转子转速对蜂窝密封的封严特性有影响,漏

气量随转速的升高而减小,特别是在高转速时减小量更明显,但总的来说这种影响很小。

(4)蜂窝的芯格尺寸对封严特性有一定的影响,并随不同的密封间隙和与光滑轮盘或梳轮盘配合而不同。总的来说,当压力不高时,中蜂窝/光滑轮盘密封的封严效果较好;当压力较高、密封间隙较小时,中蜂窝/篦齿轮盘密封的封严效果较好。

(5)对同一芯格的蜂窝静子/光滑轮盘密封形式来说,增加蜂窝的深度对封严性几乎没有影响。当密封间隙较小,压力较大时,增加蜂窝深度可使封严效果略有提高。

参考文献:

- [1] SCHARRER J. Annular honeycomb seals; test results for leakage and rotor dynamic coefficients; comparisons to labyrinth and smooth configurations[J]. *ASME Journal of Tribology*, 1989, 111: 300-301.
- [2] SOTO E, CHILDS D. Experimental rotor dynamic coefficient results for (a) a labyrinth seal with and without shunt injection and (b) a honeycomb seal[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1999, 121: 153-159.
- [3] 沈庆根. 化工机器故障诊断技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1994.
- [4] CHILDS D, ELROD D, HALE K. Annular honeycomb seals; test results for leakage and rotor dynamic coefficients; comparisons to labyrinth and smooth configurations[J]. *Journal of Tribology*, 1989, 111: 293-300.
- [5] KLEYHANS G. A comparison of experimental results and theoretical predictions for the rotor dynamic and leakage characteristics of short (L/D=1/6) honeycomb and smooth annular pressure seal[R]. Texas: Texas A & M University, 1991.
- [6] HA T, CHILDS D W. Annular honeycomb-stator turbulent gas seal analysis using new friction-factor model based on flat plate tests[J]. *ASME Journal of Tribology*, 1994, 116: 352-360.
- [7] HA T W, CHILDS D W. Friction-factor data for flat plate tests of smooth and honeycomb surfaces (Including Extended Test Data)[R]. Texas: Texas A & M University, 1991.
- [8] HA T W. Rotor dynamic analysis of annular honeycomb-stator turbulent gas seal using a new friction-factor model based on flat plate tests[R]. Texas: Texas A & M University, 1992.
- [9] HE LIDONG, YUN XIN. Experimental investigation of the sealing performance of honeycomb seals[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2001, 14: 13-17.
- [10] 何立东, 诸振友, 夏松波. 密封间隙气流振荡流场的动态压力测试[J]. *热能动力工程*, 1999, 14(1): 40-42.
- [11] CARTER J, SPROWL B, WEATHERWAX M, et al. High pressure experimental rotor dynamic results for honeycomb seals[R]. Texas: Texas A & M University, 2001.

Key words: boiling tube, CFX, throttling element

转子蜂窝密封封严特性的试验研究 = **Experimental Investigation of the Sealing Characteristics of a Rotor Honeycomb Seal** [刊, 汉] / WANG Xu, ZHANG Wen-ping (Nuclear and Power Engineering Institute under the Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), MA Sheng-yuan (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(5). — 521 ~ 525

To study the sealing characteristics of a rotor honeycomb seal, five kinds of stator test piece for honeycomb seals and five kinds of rotor test piece were designed and fabricated. Tests were carried out on a rotor seal test rig to identify the impact on sealing characteristics of such factors as honeycomb core lattice size, seal clearance, rotor speed, honeycomb depth, and seal pressure ratio. Contrast tests were also conducted of the sealing characteristics of a seal structure composed of a honeycomb stator, labyrinth disc and smooth disc. Finally, the conclusions of the experimental study were presented.

Key words: rotor, honeycomb seal, labyrinth seal, sealing characteristics

五孔探针实验数据处理的线性插值法 = **Linear Interpolation Method for Processing the Test Data of Five-hole Probes** [刊, 汉] / YUE Guo-qiang, Han Wan-jin, Lu Wen-cai, et al (Institute of Energy Science & Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(5). — 526 ~ 529

During the calibration of data by using five-hole probes a spline interpolation and least square fit are generally employed. For the calibration of curves by the use of identical probes the results of interpolation obtained by employing respectively the above-mentioned two methods may be quite different. Through a theoretical analysis of these two methods the authors have come up with a linear interpolation method, which is more practical for general use. For probes with good characteristics the recommended method can attain a precision close to that of the spline interpolation. As for probes with relatively poor characteristics the above method is capable of ensuring interpolation precision without the change of the probe characteristics, and relative to the spline interpolation and least square fit it enjoys a higher degree of adaptability. **Key words:** five-hole probe, linear interpolation, spline interpolation, least square method

循环流化床的物料平衡和运行中的物理现象 = **Mass Balance of a Circulating Fluidized Bed and Physical Phenomena Encountered in the Latter's Operation** [刊, 汉] / MA Su-xia, WANG Ming-min, YUE Guang-xi (Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(5). — 530 ~ 533

Mass balance in a fluidized bed constitutes the core and basis of the combustion process in a circulating fluidized bed and is of utmost importance to the operation of the fluidized bed. A mass balance model is presented for a circulating fluidized bed in its steady state along with a discussion of various factors liable to influence the mass balance. The mass balance model was used to calculate the circulating mass flow rate, residue mass flow rate and fly ash flow rate (including its particle distribution) of a 75t/h circulating fluidized bed boiler. An analysis was conducted of the intrinsic causes of the physical phenomena and problems encountered in the operation of the fluidized bed boiler under the influence of the mass balance. Such phenomena include “bed quality” and the characteristics of the separator used for the circulating bed, etc. Some existing problems currently attracting the attention of a circle of theoretical and industrial workers are quantitatively explained. **Key words:** circulating fluidized bed, mass balance, model, physical phenomena

余热锅炉补燃装置的研究 = **A Study of the Supplementary-firing Burner Unit for a Heat Recovery Steam Generator** [刊, 汉] / YU Zhao-yang (Harbin Boiler Co. Ltd., Harbin, China, Post Code: 150046), WANG Jian-zhi (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036), HE Nian (Equipment Engineering Depart-