

不同背压下蜂窝密封泄漏性能实验研究

周庆辉¹, 张万福¹, 顾承璟¹, 潘 渤²

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

摘要: 蜂窝密封是减小透平机械工质泄漏的重要部件, 本文设计并搭建了蜂窝密封泄漏实验装置, 采用实验与理论相结合的方法, 研究了背压阀门开度 λ 、转速及进口压力对蜂窝密封泄漏量的影响。结果表明: 实验结果与理论计算吻合较好, 相对误差在6%以内; 在同一背压阀门开度下, 密封泄漏量随着进口压力增大而增加, 随着转速升高密封泄漏量几乎保持恒定; 在进口压力和转速不变情况下, 密封泄漏量随着背压阀门开度的增大而增加, 当背压阀门开度 $\lambda=1$ 时泄漏量达到峰值; 与背压阀门开度 $\lambda=1$ 相比较, 当背压阀门开度 $\lambda=0$ 时密封泄漏量最高可降低约15.9%。

关键词: 蜂窝密封; 泄漏量; 背压; 进口压力

中图分类号: TK730.2

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.01.007

[引用本文格式] 周庆辉, 张万福, 顾承璟, 等. 不同背压下蜂窝密封泄漏性能实验研究[J]. 热能动力工程, 2023, 38(1): 57-62. ZHOU Qing-hui, ZHANG Wan-fu, GU Cheng-jing, et al. Experimental study on leakage performance of honeycomb seals with considering different back pressures[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(1): 57-62.

Experimental Study on Leakage Performance of Honeycomb Seals with Considering Different Back Pressures

ZHOU Qing-hui¹, ZHANG Wan-fu¹, GU Cheng-jing¹, PAN Bo²

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093; 2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an, China, Post Code: 710054)

Abstract: Honeycomb seal is an important component to reduce the leakage of working fluid of turbine machinery. This paper designs and builds a honeycomb seal leakage experimental device, and uses a combination of experimental and theoretical methods to study the effects of back pressure valve opening λ , rotational speed and inlet pressure on the honeycomb seals leakage. The results show that the experimental results are in desirable agreement with the theoretical calculated values, and the relative error of both is within 6%. At the same back pressure valve opening, the seal leakage increases with the increase of inlet pressure, while with the increase of speed, the seal leakage remains almost constant. Under the condition of invariable inlet pressure and rotational speed, the seal leakage increases with the increase of back pressure valve opening, and the leakage reaches the peak value when the back pressure valve opening is 1. Compared to the back pressure valve opening of 1, when it is 0, the seal leakage can be reduced by up to approximately 15.9%.

Key words: honeycomb seal, leakage, back pressure, inlet pressure

收稿日期: 2021-04-23; 修订日期: 2022-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(51875361); 上海市自然科学基金(20ZR1439200)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(51875361); Natural Science Foundation of Shanghai(20ZR1439200)

作者简介: 周庆辉(1998-), 男, 上海理工大学硕士研究生.

通讯作者: 张万福(1986-), 男, 上海理工大学副教授.

引 言

蜂窝密封是汽轮机、燃气轮机及压缩机等透平机械减小工质泄漏的关键部件,对提高机组运行效率起着重要作用^[1-2]。随着透平机械向高参数、大容量及高性能方向发展,对蜂窝密封泄漏性能的要求越来越高^[3-5]。

Soto 和 Childs^[6]实验测试了蜂窝密封、无反旋流迷宫密封和反旋流迷宫密封泄漏量,发现蜂窝密封泄漏量最低。Fu 等人^[7-8]对不同叶顶密封结构的泄漏量开展的数值分析表明,动静部件布置蜂窝结构可以减少密封泄漏损失。王强^[9]分析了密封间隙和孔结构参数对蜂窝密封泄漏量影响,得出径向间隙为 0.5 mm、芯格直径为 2.75 mm 情况下泄漏量最低。杨兴辰等人^[10]研究了迷宫密封腔室内添加蜂窝结构对密封泄漏量的影响,指出当其处于非阻塞工况时,密封泄漏量随偏心率增大而减小,在高偏心率下泄漏量降低约 4.37%。Chougule 等人^[11]研究了一种交错布置的倾斜凹槽直齿蜂窝面,发现当径向间隙为 0.122 mm 时,由于壁面摩擦和湍流流动,密封泄漏量减少约 17%。叶小强等人^[12]通过数值方法计算得出,在不同进口压力下,蜂窝孔的深宽比为 0.52 时泄漏量最低。Chougule 和 Mirzamoghadam^[13]研究了蜂窝密封和迷宫密封两种形式下密封齿形状(梯形单/双槽直齿和斜齿)对泄漏量的影响,当梯形槽斜齿与交错蜂窝面相结合时,密封泄漏量最高可降低约 9%。

工况条件(如,压比、转速、进口预旋等)同样对蜂窝密封泄漏量有重要影响。张毅等人^[14-16]通过计算流体力学方法研究了密封间隙、压比和孔深等参数对蜂窝密封泄漏量的影响,蜂窝密封泄漏量随密封间隙、压比增大而增加,蜂窝孔深大于 4 mm 时泄漏量减少渐缓。孙丹等人^[17]采用理论与实验结合的方法研究蜂窝密封泄漏性能,结果表明:涡系发展越充分,蜂窝孔密度越大,密封泄漏量越小;转速对蜂窝密封性能影响较小;密封泄漏量随进出口压比增大而显著增加,且近似呈现线性关系。Yan 等人^[18-19]采用计算流体力学方法研究了进口预旋和孔序对蜂窝密封泄漏量的影响,指出进口预旋对密封泄漏量影响甚微,然而交错孔蜂窝密封泄漏量下降约 2.5%。目前,国内外学者研究压力对蜂窝密封泄漏量影响,仍然局限于进出口压力条件,有关背

压对蜂窝密封泄漏性能的研究比较鲜见。

本文针对不同背压下蜂窝密封泄漏性能开展了试验测试研究,并与理论计算进行对比分析,得到不同背压阀门开度下蜂窝密封泄漏特性。

1 实验装置

为探究背压对蜂窝密封泄漏量的影响,设计并搭建了蜂窝密封泄漏实验测试装置,如图 1 所示。



图 1 蜂窝密封泄漏试验测试装置

Fig. 1 Experimental test device of leakage flow rate of honeycomb seal

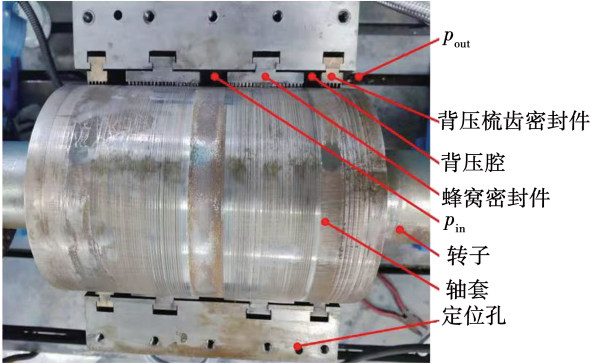
转子实验台主要由直驱电机(最高转速 6 000 r/min)、轴系(3 跨)、平衡盘、支撑底座、支撑平台、信号采集与控制系统(润滑油流量、油压、油温、转速、密封供气压力及流量)等组成;蜂窝密封装置主要由蜂窝密封、背压梳齿密封、供气管路、涡街流量计、压力变送器、进气稳压罐、排气管路及背压阀门组成。

2 蜂窝密封几何结构与试验方法

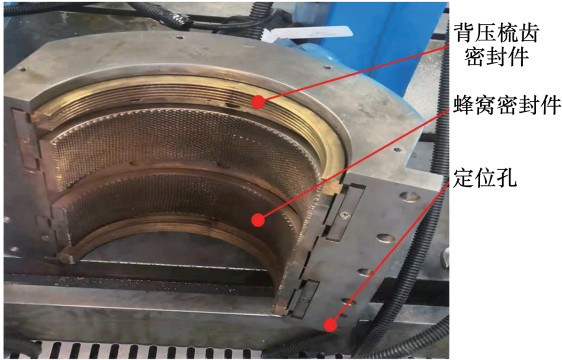
2.1 蜂窝密封几何结构

图 2 为蜂窝密封实物图,主要由轴套、蜂窝密封件、背压梳齿密封件组成。高压空气由气缸中间进

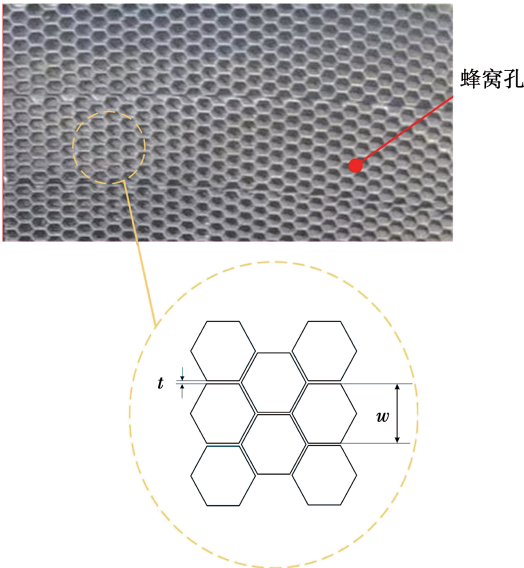
气,向两端排出,依次通过蜂窝密封、背压腔、背压阀门和背压梳齿密封,表 1 给出了蜂窝密封的主要参数。



(a) 蜂窝密封与气缸系统



(b) 蜂窝密封与背压梳齿密封件



(c) 蜂窝孔

图 2 蜂窝密封几何结构

Fig. 2 Geometric structure of honeycomb seal

2.2 实验方法

蜂窝密封泄漏量实验,主要分为实验准备、泄漏测量及数据处理 3 部分,如图 3 所示。测量蜂窝密

封在不同背压阀门开度 λ 、转速及压力下的泄漏量,背压阀门开度 $\lambda = 0$ 代表全关、 $\lambda = 1$ 代表全开。

表 1 蜂窝密封几何参数

Tab. 1 Geometric parameters of honeycomb seal

参数	数值
密封件长度 L/mm	70.5
孔深 H/mm	3.0
对边距 w/mm	2.5
壁厚 t/mm	0.4
轴套直径 D/mm	180
密封间隙 C_r/mm	0.3
轴向孔数 N	26

表 2 为实验工况参数。工质为空气,通过蜂窝密封进气阀门调节进气压力 p_{in} ,其范围为 $0.2 \sim 0.5$ MPa。由于蜂窝密封出口为背压腔室,通过背压阀门开度控制背压腔室压力,泄漏流体一部分通过背压阀门排入大气,另一部分通过背压梳齿密封排入大气($p_{\text{out}} = 0.1$ MPa)。电机转速 ω 通过变频器进行调节,转速 ω 范围为 $1\,000 \sim 3\,000$ r/min。

表 2 实验工况参数

Tab. 2 Experimental parameters

背压阀门开度 λ	进口压力 p_{in}/MPa	背压 p/MPa
0	0.2	0.17
0	0.3	0.26
0	0.4	0.35
0	0.5	0.44
0.25	0.2	0.14
0.25	0.3	0.23
0.25	0.4	0.3
0.25	0.5	0.37
0.5	0.2	0.13
0.5	0.3	0.19
0.5	0.4	0.24
0.5	0.5	0.29
0.75	0.2	0.12
0.75	0.3	0.16
0.75	0.4	0.21
0.75	0.5	0.23
1.00	0.2	0.11
1.00	0.3	0.12
1.00	0.4	0.14
1.00	0.5	0.16

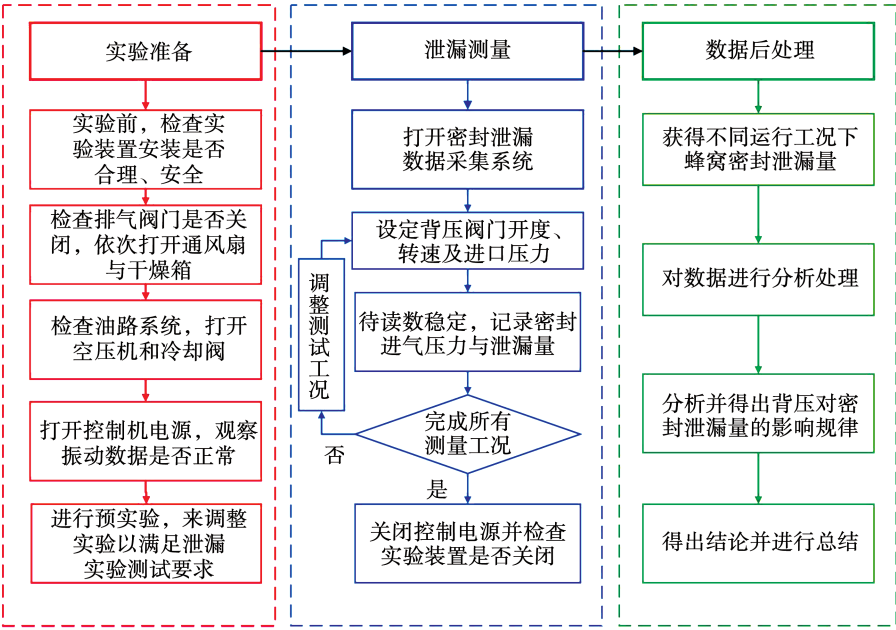


图 3 蜂窝密封泄漏量实验测试流程

Fig.3 Experimental test flowchart of leakage flow rate of honeycomb seal

3 结果与分析

3.1 实验与理论计算对比分析

为验证蜂窝密封实验值的准确性,将背压阀门开度 $\lambda = 0$ 时实验值与理论计算值进行对比。蜂窝密封泄漏量理论计算式^[17]为:

$$Q = \mu S \varepsilon p_{in} \sqrt{\frac{1}{RT_{in}}} \quad (1)$$

式中: q —密封理论泄漏量, kg/h; μ —修正系数; S —蜂窝密封间隙处迎气面积, m^2 , $S = \pi d_{ave} C_r$; d_{ave} —蜂窝密封间隙处平均直径; C_r —密封间隙; ε —泄漏系数; R —理想气体常数; T_{in} —密封入口总温, K。

对于修正系数 μ , 其计算式为:

$$\begin{cases} \mu = f(\alpha) t(\beta) \\ \alpha = \frac{t}{w} \\ \beta = \frac{H}{w} \end{cases} \quad (2)$$

式中: α —蜂窝壁厚 t 与对边距 w 之比; β —蜂窝孔深 H 与对边距 w 之比。

$f(\alpha)$ 与 $f(\beta)$ 计算表达式为:

$$\begin{cases} f(\alpha) = -13.9175\alpha^3 + 2.3019\alpha^2 + 0.048\alpha + 0.012 \\ t(\beta) = 0.352\beta^3 - 4.284\beta^2 + 11.9786\beta + 4.4376 \end{cases} \quad (3)$$

对于泄漏系数 ε , 其计算式为:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1 - \pi^2}{N + \ln(\frac{1}{\pi})}} \quad (4)$$

式中: N —轴向蜂窝孔个数; π —背压 p 与进口压力 p_{in} 之比。

图 4 为蜂窝密封在背压阀门开度 $\lambda = 0$ 时, 蜂窝密封泄漏量 Q_{pin} 实验测试值与理论计算值随进口压力变化情况 (Q_{pin} 代表不同进口压力下密封泄漏量, $\omega = 2\,000\text{ r/min}$)。可以看出: 泄漏量实验值与理论值均随进口压力增大而增加; 密封泄漏量随进口压力增加近似呈正比例关系。此外, 除进口压力为 0.2 MPa 工况下实验值与理论计算值相差较大外; 其余工况实验测量值与理论计算值具有较好的吻合度, 在 4 种进口压力下两者的相对误差都在 6% 以内。

3.2 背压阀门开度对密封泄漏影响

图 5 为不同背压阀门开度 λ 下蜂窝密封泄漏量 Q_{pin} 与 Q_{ω} , Q_{ω} 代表在 $p_{in} = 0.4\text{ MPa}$ 时不同转速下密封泄漏量。可以看出: 在同一背压阀门开度 λ 下蜂窝密封泄漏量 Q_{pin} 近似与进口压力 p_{in} 呈线性关系, 随进口压力增大蜂窝密封泄漏量 Q_{pin} 也随之升

高,其泄漏量 $Q_{p_{in}}$ 增加幅值随进口压力 p_{in} 升高而明显增大。同一开度下,转速 ω 升高对蜂窝密封泄漏量 Q_{ω} 影响较小,随转速 ω 由 1 000 r/min 升至 3 000 r/min 时,蜂窝密封泄漏量 Q_{ω} 几乎保持在一恒定值。

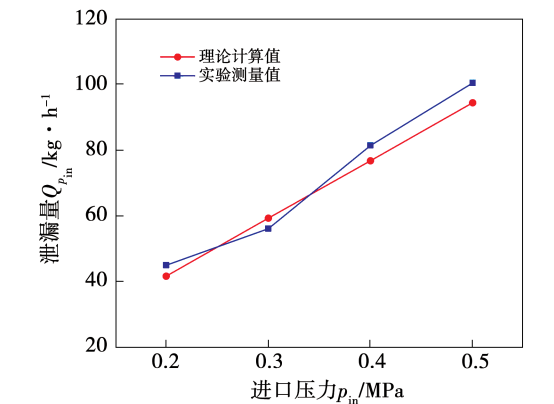


图 4 进口压力对蜂窝泄漏量 $Q_{p_{in}}$ 的影响

Fig.4 Influence of inlet pressure on leakage flow rate $Q_{p_{in}}$ of honeycomb seal

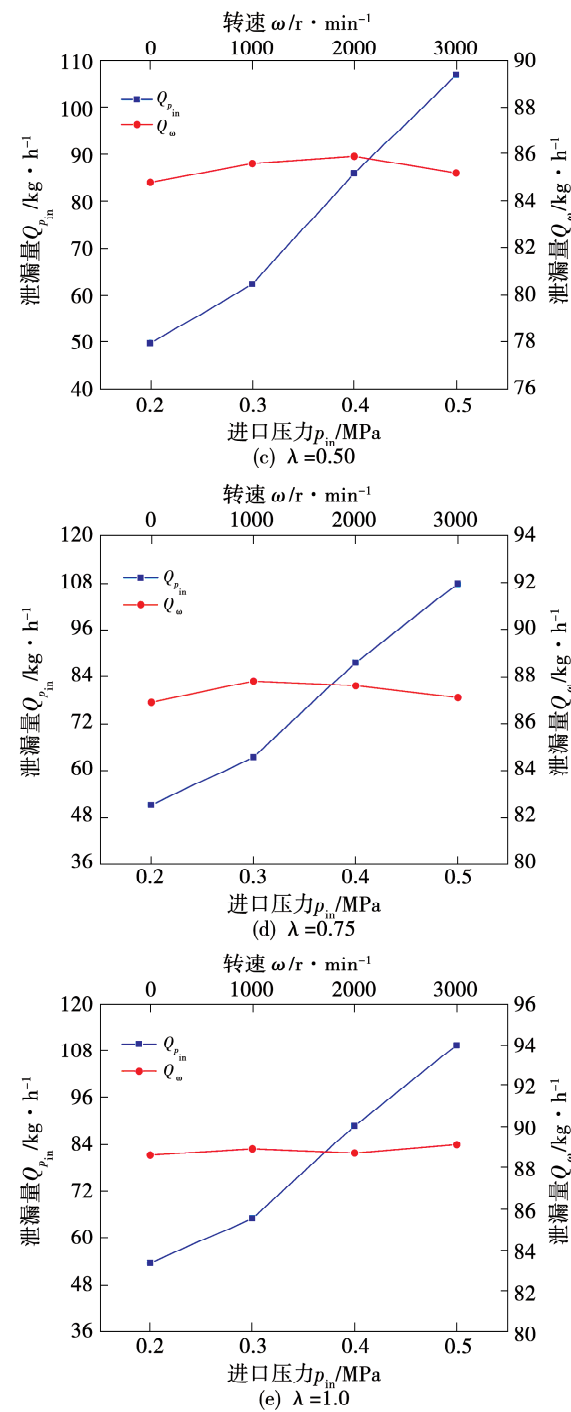
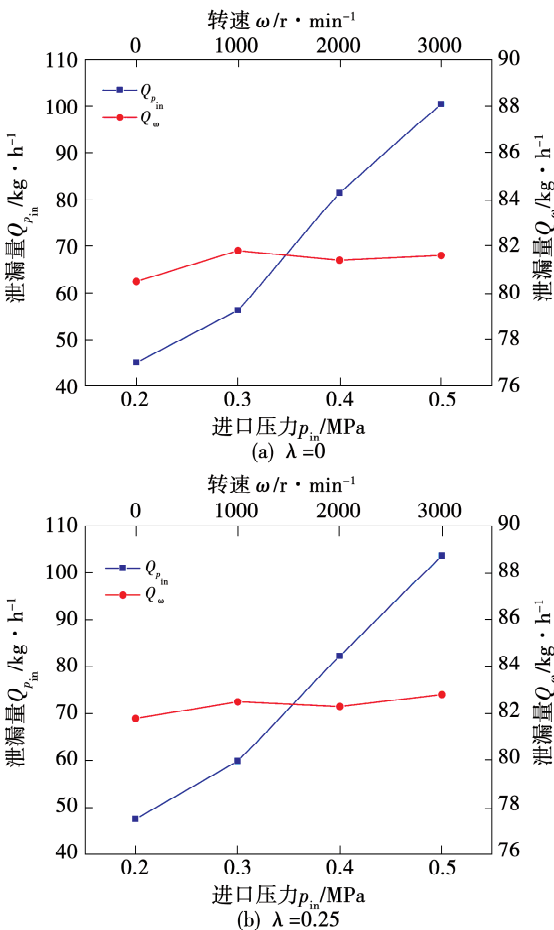


图 5 背压阀门开度对蜂窝密封泄漏量 $Q_{p_{in}}$ 和 Q_{ω} 的影响

Fig.5 Influence of back pressure valve opening on leakage flow rate $Q_{p_{in}}$ and Q_{ω} of honeycomb seal

图 6 为转速 $\omega = 2\,000$ r/min, 不同背压阀门开度下蜂窝密封泄漏量。可以看出, 背压阀门开度 λ 对蜂窝密封泄漏量有显著影响: 进口压力一定情况下, 蜂窝密封泄漏量随背压阀门开度增大而增加, 并且在背压阀门开度 $\lambda = 1$ 时达到最大泄漏量; 在背

压阀门开度 $\lambda = 0 \sim 0.5$ 时,密封泄漏量随背压阀门开度增大而显著增大;在背压阀门开度 $\lambda = 0.5 \sim 1$ 时,密封泄漏量随背压阀门开度增大而缓慢增加;当背压阀门全关($\lambda = 0$)时,相较于背压阀门开度 $\lambda = 1$ 时密封泄漏量最高可降低 15.9%。

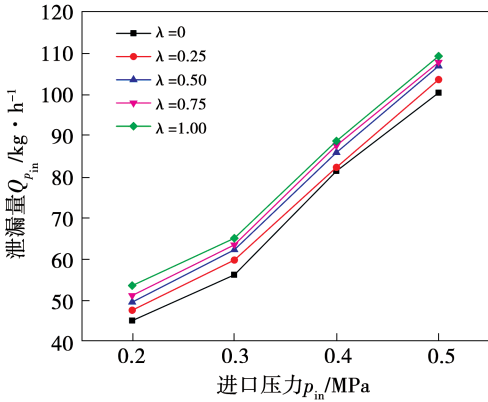


图 6 不同背压阀门开度下蜂窝密封泄漏量 $Q_{p_{in}}$

Fig. 6 Leakage flow rate $Q_{p_{in}}$ of honeycomb seal at different back pressure valve openings

4 结 论

采用实验测量了不同背压阀门开度、转子转速、进口压力对蜂窝密封泄漏量的影响,主要结论为:

- (1) 蜂窝密封泄漏量的实验测量与理论计算吻合度较高,相对误差较小。
- (2) 同一背压阀门开度下,蜂窝密封泄漏量 $Q_{p_{in}}$ 随着进口压力增大而增加,而随着转速升高,蜂窝密封泄漏量 Q_{ω} 几乎保持一恒定值。
- (3) 在进口压力和转速不变的情况下,密封泄漏量随着背压阀门开度的增大而增大,且在背压阀门开度为 $\lambda = 1.0$ 时,泄漏量达到峰值。当背压阀门开度 $\lambda = 0$ 时,密封泄漏量最高可降低约 15.9%。

参考文献:

[1] WEINBERGER T, DULLENKOPF K, BAUER H J. Influence of honeycomb facings on the temperature distribution of labyrinth seals[C]//UK:Proceedings of ASME Turbo Expo 2010;Power for Land,Sea, and Air,2010.

[2] HIRANO T, GUO Z, KIRK R G. Application of computational fluid dynamics analysis for rotating machinery—part II:labyrinth seal a-

nalys[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2005,127(4):820-826.

[3] USHININ S V. Experience with the introduction of honeycomb seals in steam turbines[J]. Power Technology and Engineering, 2009,43(6):382-388.

[4] 唐景涛.新型汽机蜂窝密封的应用[J]. 中国设备工程, 2015(7):72-73.

TANG Jing-tao. Application of a new type of honeycomb seal for steam turbines[J]. China Plant Engineering,2015(7):72-73.

[5] 李 军,晏 鑫,宋 立,等.透平机械密封技术研究进展[J]. 热力透平,2008,37(3):141-148.

LI Jun,YAN Xin,SONG Li,et al. A review of sealing technologies in turbomachinery[J]. Thermal Turbine,2008,37(3):141-148.

[6] SOTO E A, CHILDS D W. Experimental rotordynamic 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(1):153-159.

[7] FU Y, CHEN F, CHEN C, et al. Numerical study of the effect of honeycomb tip on tip leakage flow in turbine cascade[C]//South Korea:Proceedings of ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition,2016.

[8] FU Y, CHEN F, LIU H, et al. Experimental and numerical study of honeycomb tip on suppressing tip leakage flow in turbine cascade [J]. Journal of Turbomachinery,2018,140(6):061006.

[9] 王 强. 蜂窝轴封泄漏特性研究[J]. 机械工程师,2010(2): 110-112.

WANG Qiang. Study on the leakage characteristics of honeycomb shaft seals[J]. Mechanical Engineer,2010(2):110-112.

[10] 杨兴辰,张万福,顾承璟,等. 迷宫-蜂窝混合型密封静态稳定性与泄漏特性研究[J]. 摩擦学学报,2021,41(5): 738-748.

YANG Xing-chen,ZHANG Wan-fu, GU Cheng-jing, et al. Leakage performance and static stability of hybrid labyrinth-honeycomb seals[J]. Tribology,2021,41(5):738-748.

[11] CHOUGULE H H, RAMERTH D, RAMACHANDRAN D. Low leakage designs for rotor teeth and honeycomb lands in labyrinth seals [C]//Germany: Proceedings of the ASME Turbo Expo 2008;Power for Land,Sea, and Air,2008.

[12] 叶小强,何立东,霍耿磊. 蜂窝密封流场和泄漏特性的实验研究[J]. 润滑与密封,2006(4):95-97.

YE Xiao-qiang, HE Li-dong, HUO Geng-lei. Experimental investigation of the flow field and leakage characteristics of the honeycomb seal[J]. Lubrication Engineering,2006(4):95-97.