

# 高压液氧涡轮泵孔型/蜂窝阻尼密封的设计

毛 凯, 李昌奂, 张 聃, 安 康

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:**针对某型火箭发动机高压液氧涡轮泵离心轮的前、后凸肩动密封,采用孔型/蜂窝阻尼密封代替原始迷宫密封方案,并对密封结构参数进行优化设计,旨在减小泵内动静间隙泄漏,提高泵容积效率。采用经水工质孔型密封泄漏量实验数据验证的,基于  $k-\varepsilon$  湍流模型和三维定常 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) 方程的液体孔型密封泄漏量数值计算方法,研究了孔深、孔径对液氧孔型阻尼密封、蜂窝阻尼密封泄漏特性的影响规律,并与迷宫密封的封严性能进行了比较。计算分析了孔径在 0.3 ~ 2.0 mm 范围内、孔深在 0.1 ~ 2.0 mm 范围内连续变化时孔型阻尼密封的泄漏量。结果表明:相同孔径和孔深下,孔型阻尼密封和蜂窝阻尼密封具有相近的封严性能,均优于迷宫密封;有限的密封轴向长度下,液氧孔型/蜂窝阻尼密封泄漏量随孔径的增大(轴向孔数目减小)先减小后增大,孔型/蜂窝阻尼密封最佳孔径为 1.4 mm;不同孔径下,液氧孔型/蜂窝密封均存在最佳深径比 0.5,泄漏量达到最小值;相比于原始迷宫密封方案,优化设计的孔型/蜂窝阻尼密封使液氧涡轮泵离心轮前、后凸肩动密封泄漏量分别减小了约 19% 和 21%。

**关键词:**液氧涡轮泵;孔型/蜂窝密封;优化设计;封严性能

**中图分类号:**V434.21 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2021)02-0047-07

## Design of the hole-pattern/honeycomb seals in the high-pressure liquid oxygen turbopump

MAO Kai, LI Changhuan, ZHANG Dan, AN Kang

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** To reduce the leakage flow rates and improve the operation efficiency of the turbopump, as the replacement sealing scheme of the conventional labyrinth seal, the hole-pattern seal and honeycomb seal were designed and optimized for the front and rear shoulder rotating seals of the high-pressure liquid oxygen turbopump in a liquid rocket engine. The present numerical method based on the RNG  $k-\varepsilon$  turbulence model and steady RANS solutions were validated by comparisons to experiment data of leakage flow rates of a water-fed hole-pattern seal at different rotational speeds. The influences of the hole depth and hole diameter on the leakage performance of the hole-pattern and honeycomb seals were numerically investigated, and comparisons to the conventional labyrinth seal were also presented. The leakage flow rates were computed for the hole-pattern seal with continuously variable hole depth (0.1 ~ 2.0 mm) at

收稿日期:2019-06-20;修回日期:2019-08-17

基金项目:国家重大基础研究项目(613321)

作者简介:毛凯(1987—),男,硕士,研究领域为液体火箭发动机涡轮泵。

different hole diameters (0.3 ~ 2.0 mm). The results show that with the same hole geometry parameters (depth and diameter), the hole-pattern seal and the honeycomb seal possess the similar sealing performance which are both better than the conventional labyrinth seal. With the constant seal axial length, the leakage flow rates of the hole-pattern/honeycomb seals firstly decrease and then increase with the increasing hole diameter whose optimum value is 1.4 mm in this paper. For all the hole diameter cases, the hole-pattern/honeycomb seal possess the optimum ratio of the hole depth to diameter 0.5, where the best sealing performance were obtained. Compared to the conventional labyrinth seal, the leakage flow rates through the front and rear rotating seals of the high-pressure liquid oxygen turbopump were reduced by about 19% and 21% respectively, when the optimized hole-pattern/honeycomb seal were introduced.

**Keywords:** liquid oxygen turbopump; hole-pattern/honeycomb seal; optimization design; sealing performance

## 0 引言

离心轮前、后凸肩泄漏量占泵内泄漏量的主要部分,目前国内外常用的密封方法有两种<sup>[14]</sup>,一种是采用浮动环密封方案,此种方案可通过设置较小的密封间隙来获取较低的泄漏量,但研究中发现此种结构对泵运转稳定性要求较高;另外一种为固定的密封方案,在密封环或者叶轮凸肩表面设置多个迷宫型密封齿来降低泄漏量,但此种结构间隙较大,泵容积效率一般较低。因此,为了提高封严性能,必须采用更先进的密封形式。

孔型/蜂窝阻尼密封由于具有优良的封严性能和阻尼性能,已广泛应用于压气机、燃气涡轮、汽轮机等气体工质旋转机械中<sup>[5-11]</sup>。国内外学者对其进行了大量的试验和数值研究,研究了不同结构参数、转速、进出口压力和进口预旋等不同因素对密封泄漏特性的影响规律<sup>[12-16]</sup>。结果表明气体工质孔型阻尼密封和蜂窝阻尼密封具有相近的、优于传统迷宫密封的封严性能和阻尼稳定性能。但通过查阅文献发现,对于液体介质,尤其是高压力差结构中,蜂窝密封的应用非常少,也无成熟的研究结论可以直接采用。可查到的昆明理工大学王文全等以两平行平板间的蜂窝密封结构为研究对象,采用数值方法得到了不同蜂窝半径和深度下蜂窝结构与之相对应的梳齿密封结构的泄漏量,结果表明:蜂窝结构比传统的梳齿结构具有更好的密封性能;流体从间隙进入蜂窝内腔后产生了很强的漩涡而耗散部分动能,这种作用对降压节流起到主要作用<sup>[17]</sup>。在液体泵的领域,仅有上海凯士比泵有限公

司付子龙等将蜂窝式密封环应用于大功率、高转速锅炉给水泵上,并对其加工制造方法进行了研究探索,采用特殊的电火花腐蚀工艺实现<sup>[18]</sup>。最终相比于光滑式表面,蜂窝式密封结构将其泄漏量从2.5%降低至1%,试验测得泵效率能够提高1.1%。Jolly等实验测量了不同转速下,水工质孔型阻尼密封的泄漏特性和转子动力特性,并与光滑密封进行了比较<sup>[19]</sup>。研究表明相比于光滑面密封,孔型阻尼密封具有优良的封严性能和转子稳定性。

本文针对某火箭发动机中高压液氧涡轮泵离心轮的前、后凸肩动密封,采用孔型/蜂窝阻尼密封代替原始迷宫密封方案,并开展密封结构参数优化设计和封严性能分析研究。研究了孔深、孔径对液氧孔型/蜂窝阻尼密封泄漏特性的影响规律,并与迷宫密封的封严性能进行了比较。

## 1 孔型/蜂窝阻尼密封设计方案

图1给出了某型火箭发动机高压液氧涡轮泵局部结构示意图。其为典型带诱导轮的单级、高压离心泵结构。工作过程中为了减小离心轮前、后凸肩处液氧泄漏量,以获取较高的泵容积效率,在离心轮前、后密封环上设计了传统的固定式迷宫密封结构。表1给出了离心轮前、后凸肩动密封的主要尺寸。原始迷宫密封结构是在离心轮前、后密封环内孔表面设置了6排迷宫密封齿结构。涡轮泵全三维流场分析表明该迷宫密封存在泄漏量偏大、气流激振显著的问题。

本文针对图1的涡轮泵离心轮前、后凸肩原始迷宫密封结构进行优化改进,采用先进的孔型/蜂

窝阻尼密封代替原始迷宫密封,达到减小离心轮前、后凸肩处动静间隙泄漏量和抑制液流激振的目的。

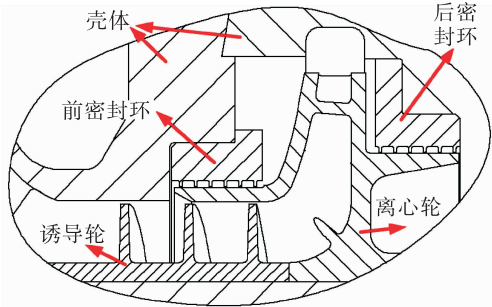


图 1 液氧涡轮泵局部结构图

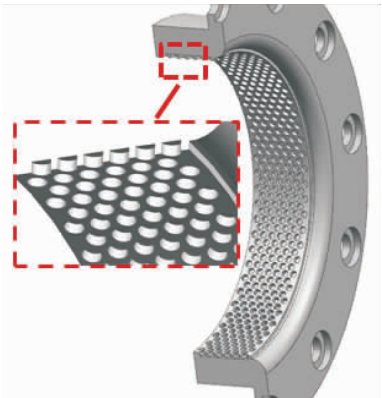
Fig. 1 Schematic of the liquid oxygen turbine pump

表 1 前、后凸肩动密封装配尺寸	
Tab. 1 Assembly dimensions of the front and rear shoulder seals	
单位:mm	
参数名称	数值
前密封间隙	0.12
前密封轴向长度	11.00
后密封间隙	0.12
后密封轴向长度	11.00

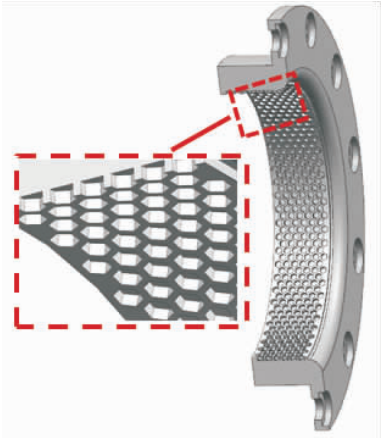
为了保证与原迷宫密封方案的可比性,以及符合动密封装配尺寸要求,孔型/蜂窝阻尼方案设计保证表 1 所示的密封装配尺寸不变。为了保证密封环的加工工艺性及其在液氧环境中的安全性,结构尺寸进行了一定的约束限制。孔型密封尺寸满足:孔径  $D_1 \geq 0.3\text{ mm}$ 、深径比  $H_1/D_1 \leq 5$ 、最小壁厚  $B_1 \geq 0.5\text{ mm}$ ;蜂窝密封尺寸应满足内切圆直径  $D_2 \geq 0.4\text{ mm}$ 、深径比  $H_2/D_2 \leq 4$ 、最小壁厚  $B_2 \geq 0.5\text{ mm}$ 。

图 2 给出了孔型阻尼密封和蜂窝阻尼密封三维结构图。受前、后凸肩动密封轴向和周向装配尺寸的限制,随孔型/蜂窝阻尼密封孔径的增大,轴向和周向能够布置的孔排数目减小。孔径决定孔型/蜂窝阻尼密封的耗散空腔数目,而孔径和孔深共同决定了耗散空腔的形状,进而影响密封的封严性能。已有研究结果表明孔径和孔深是孔型/蜂窝阻尼密封泄漏特性的关键影响因素。因此,本文选取孔径和孔深作为密封设计的关键参数。表 2 给出了不同

孔型/蜂窝密封方案的孔径、孔深和孔数目等结构参数。前、后凸肩密封具有相同的轴向长度和不同的周向长度(半径不同),因此相同孔径下,二者具有相同的轴向孔排数和不同的周向孔排数。



(a) 孔型阻尼密封



(b) 蜂窝阻尼密封

图 2 孔型/蜂窝阻尼密封

Fig. 2 Hole-pattern/honeycomb seal

表 2 孔型密封孔腔结构参数			
Tab. 2 Geometry parameters of the holes in the hole-pattern seal			
孔径/mm	轴向孔排数	总孔数(前/后)	孔深变化/mm
0.3	13	3 900/3 750	0.1 ~ 1.0
0.5	11	2 520/2 280	0.1 ~ 1.0
0.8	9	1 350/1 350	0.1 ~ 1.6
1.0	8	975/975	0.1 ~ 1.6
1.2	7	936/900	0.3 ~ 2.0
1.4	6	768/792	0.3 ~ 2.0
1.6	5	600/540	0.8
1.8	5	450/400	0.9

2 计算模型和数值方法

2.1 计算模型

图 3 给出了迷宫密封、孔型阻尼密封和蜂窝阻尼密封 3 种密封方案的网格模型。采用三维造型软件 UG 生成 3 种密封流体域的三维计算模型,然后采用 ICEM 软件生成密封流体域的多块结构化网格。考虑到密封结构的旋转周期性,为减小计算量,迷宫密封计算域选取 5°的弧段,孔型密封和蜂窝密封选取两排孔腔弧段,周向 2 个侧面采用周期性边界条件。为保证进出口均匀边界条件,密封计算域增加了进出口延伸段。采用 O 型网格对每个密封环形腔(迷宫密封)、圆柱孔腔(孔型密封)和六面体孔腔(蜂窝密封)进行结构化网格剖分,并对近壁面边界层加密,满足  $y^+$  的要求,密封间隙沿径向布置了 20~25 个节点。不同孔径、孔深下的孔型/蜂窝密封采用了 72 万~175 万的网格节点数。

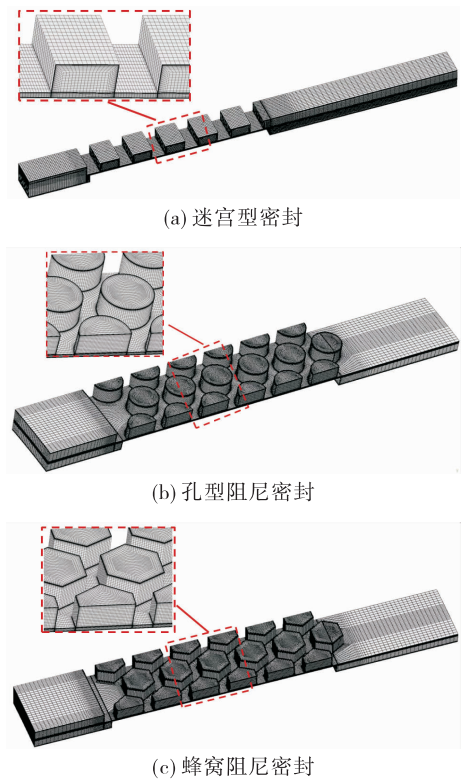


图 3 迷宫、孔型和蜂窝密封三维计算网格  
Fig. 3 Computational meshes of labyrinth seal, hole-pattern seal and honeycomb seal

2.2 数值计算方法

基于商用软件 ANSYS CFX,采用定常求解

RANS 方程的数值方法,计算分析了孔径、孔深对孔型/蜂窝密封的泄漏特性的影响规律,并与迷宫密封进行了比较。表 3 给出了具体的数值计算方法和边界条件。工质采用低温液态氧;进口给定总压,流动方向垂直进口边界,湍流度取 5%;出口给定平均静压。湍流模型选用  $k-\epsilon$  两方程模型,近壁面采用壁面函数法求解。连续方程、动量方程的均方根残差小于  $10^{-4}$  数量级,进出口流量不平衡度小于 0.1% 时,认为计算收敛。进出口压力边界条件通过液氧涡轮泵额定工况下全三维流场数值计算获得。

表 3 数值方法和边界条件

Tab. 3 Numerical methods and boundary conditions	
数值方法	属性
求解器	ANSYS CFX 16.0
进口总压/MPa	11.660(前)/13.296(后)
出口静压/MPa	2.969(前)/6.352(后)
转速/( $r \cdot \min^{-1}$ )	45 400.8
工质	等温液氧
工质温度/K	91.4
离散格式	高精度格式
数值求解方法	时间推进法
湍流模型	$k-\epsilon$
壁面属性	绝热、光滑壁面、无滑移

3 结果与讨论

3.1 数值方法验证

目前文献中缺少针对液氧工质孔型/蜂窝阻尼密封泄漏量的实验数据,本文选用 Jolly 等的不同转速下,水工质(水和液氧均为不可压缩流体,具有相近的流动特性)孔型阻尼密封泄漏量的实验数据<sup>[19]</sup>对数值方法进行校核。图 4 给出了不同转速下,水工质孔型阻尼密封泄漏量的实验值和数值预测结果。各转速下,密封泄漏量数值预测误差小于 5%,与实验结果吻合良好。因此本文数值方法能够可靠预测液相孔型/蜂窝阻尼密封的泄漏特性。



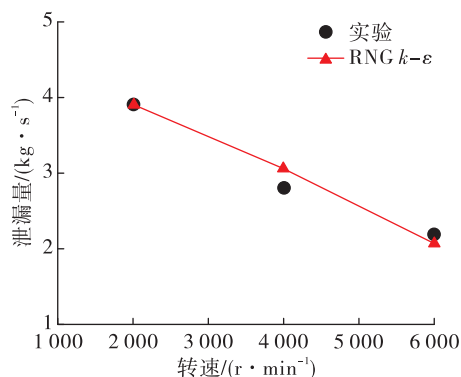


图 4 不同转速下,水工质孔型阻尼密封泄漏量

Fig. 4 Leakage flow rates of water-fed hole-pattern seal at different rotational speeds

### 3.2 孔深对孔型密封泄漏特性的影响

图 5 给出了不同孔径下,前凸肩孔型阻尼密封的泄漏量随孔深的变化曲线。

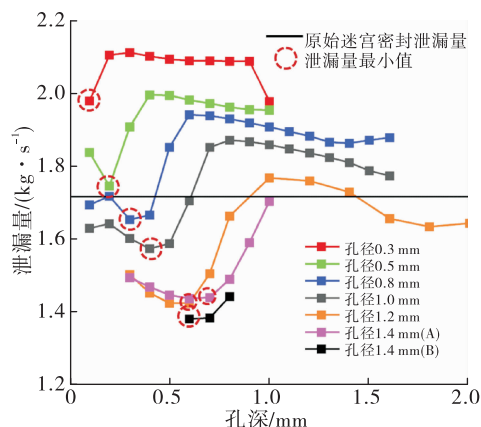


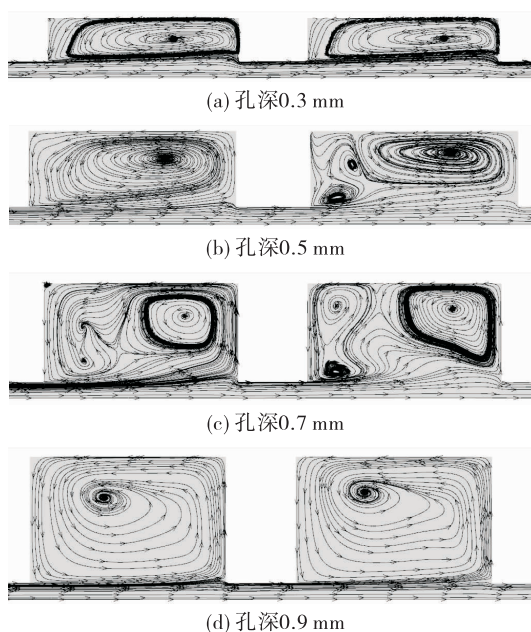
图 5 不同孔径下前凸肩孔型阻尼密封泄漏量随孔深变化曲线

Fig. 5 Leakage flow rate versus hole depth for the front shoulder seal at different hole diameter

如图 5 所示,在孔径  $D_1 = 0.3 \sim 1.4$  mm 范围内,孔径越大,孔型密封的泄漏量越小。不同孔径下,孔型密封泄漏量随孔深变化呈现相同趋势:随孔深增加,孔型密封泄漏量先逐渐减小,并在深径比  $H_1/D_1 = 0.5$  附近达到泄漏量最小值,然后再增加最后逐渐下降并趋于恒定值。图 5 中,孔径 1.4 mm 的 A 和 B 孔型密封周向孔数分别为 120 个和 128 个,其中 B 孔型密封泄漏量更小。可见,增加周向孔排数能够提高孔型密封密封性能。因此,可以得出结论:不同孔径下,液氧孔型阻尼密封均具有最优的深径比  $H_1/D_1 = 0.5$  使泄漏量最小;相同孔径下,周向孔排数越多,孔型密封密封性能越好。后凸肩计

算结果与前凸肩结果基本一致,文中不再赘述。

图 6 给出了孔径  $D_1 = 1.4$  mm 时,不同孔深下,孔型密封孔腔子午面速度流线分布。如图 6 所示,随孔深增加,腔室内的涡流结构从单涡核结构逐渐转变为耗散作用更强的多涡核结构,随着孔深进一步增加,又重新变为单涡核结构,导致孔型密封泄漏量随孔深增加呈现先降低后增加的趋势。

图 6 不同孔深下,孔型阻尼密封孔腔子午面流线分布  
Fig. 6 Streamline distributions on the meridian plane of the hole cavity at different hole depths

### 3.3 孔径对孔型密封泄漏特性的影响

图 7 给出了最佳径深比  $H_1/D_1 = 0.5$  下,前凸肩孔型密封的泄漏量随孔径的变化曲线。如图 7 所示,随孔径增大,孔型密封泄漏量先减小,并在孔径  $D_1 = 1.4$  mm 附近达到泄漏量最小值,然后再增大。需要说明的是:随孔径  $D_1$  的增大,轴向和周向孔排数均减小,即孔型密封的耗散腔数目减小,总体密封腔耗散作用减弱;同时,随孔径  $D_1$  的增大,孔腔上下游间隙距离增大,流体动能输运系数减小,单个密封腔耗散作用增强。增大孔径  $D_1$  使单个密封腔的耗散作用增强,但减少了密封腔数目,进而导致泄漏量先减小后增大。因此,可以得出结论:有限的动密封轴向尺寸下,液氧孔型阻尼密封存在最佳孔径  $D_1$  (本文中最佳孔径  $D_1 = 1.4$  mm) 使泄漏量最小。后凸肩计算结果与前凸肩结果基本一致,文中不再赘述。

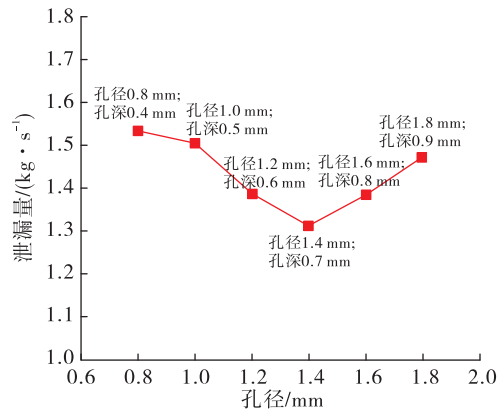


图 7 最佳深径比  $H_1/D_1 = 0.5$  下,前凸肩孔型阻尼密封泄漏量随孔径的变化曲线

Fig. 7 Leakage flow rate versus hole diameter of the font shoulder hole-pattern seal with the optimum ratio of hole-depth to diameter

3. 4 迷宫、孔型和蜂窝密封性能比较

根据孔型密封的孔径、孔深对泄漏量的影响规律,可知孔型密封最佳孔腔尺寸为  $D_1 = 1.4\text{ mm}$ ,  $H_1/D_1 = 0.5$ 。据此,本文设计了六面体芯格内切圆直径  $D_2 = 1.2\text{ mm}$ 、芯格深度  $H_2 = 0.6\text{ mm}$  和  $D_2 = 1.4\text{ mm}$ ,  $H_2 = 0.7\text{ mm}$  的两种蜂窝密封方案,并与迷宫密封、孔型密封进行了封严性能对比。表 4 给出了最佳孔型密封方案和蜂窝密封方案的孔腔尺寸。

表 4 孔型和蜂窝密封方案孔腔尺寸  
Tab. 4 Geometry parameters of hole-pattern seal and honeycomb seal

密封方案	密封 间隙/mm	孔深/mm	孔径/mm	孔数
孔型阻尼密封	0.12	0.7	1.4	768/792
蜂窝阻尼密封 1	0.12	0.6	1.2	936/900
蜂窝阻尼密封 2	0.12	0.7	1.4	768/792

图 8 和图 9 分别给出了前、后凸肩动密封的 3 种密封方案泄漏量计算结果。所设计的孔型密封和蜂窝密封方案具有相近的封严性能,均能显著减小原始迷宫密封的泄漏量;相比于原始迷宫密封,所设计的孔型/蜂窝阻尼密封使前、后凸肩动密封泄漏量分别减小了约 19% 和 21%。

图 10 给出了不同密封方案孔腔子午面的速度流线分布。由图可以看出,相对于迷宫密封的单涡核结构,孔型阻尼密封、蜂窝阻尼密封均是双涡核涡流结构,涡流耗散作用更强,因此泄漏量更低。

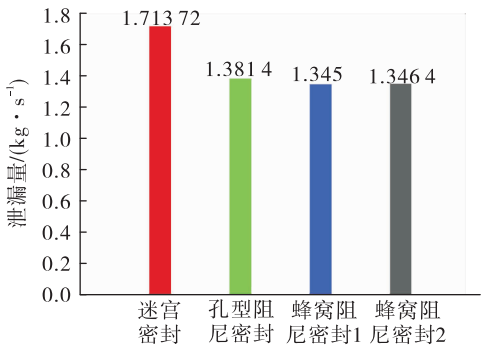


图 8 前凸肩动密封的迷宫、孔型和蜂窝密封方案泄漏量比较

Fig. 8 Leakage flow rates of labyrinth seal, hole-pattern seal and honeycomb seal for the front shoulder seal

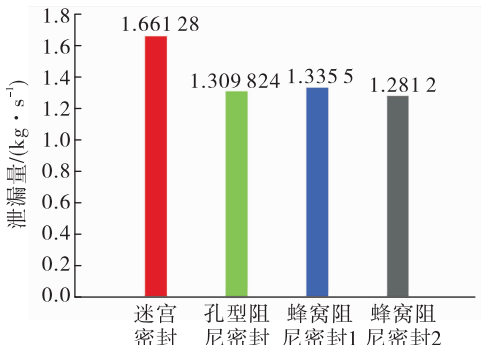


图 9 后凸肩动密封的迷宫、孔型和蜂窝密封方案泄漏量比较

Fig. 9 Leakage flow rates of labyrinth seal, hole-pattern seal and honeycomb seal for the rear shoulder seal

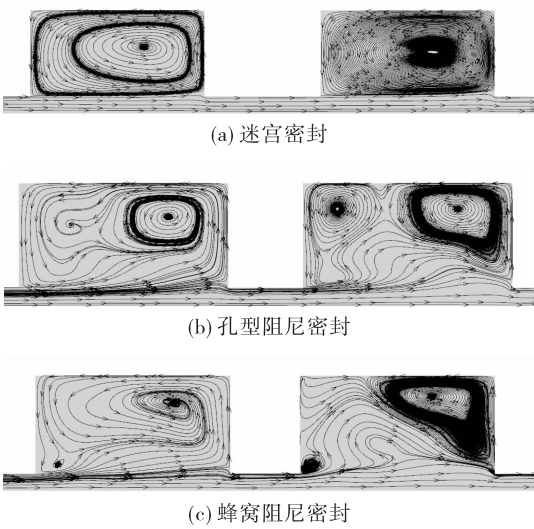


图 10 迷宫、孔型和蜂窝密封孔腔子午面流线分布  
Fig. 10 Streamline distributions on the meridian plane of the labyrinth seal, hole-pattern seal and honeycomb seal

## 4 结论

针对某型火箭发动机高压液氧涡轮泵离心轮的前、后凸肩动密封,设计了孔型/蜂窝阻尼密封代替原始迷宫密封方案,并对孔径、孔深等密封结构参数进行优化设计,数值分析了孔深、孔径对液氧孔型阻尼密封、蜂窝阻尼密封泄漏特性的影响规律,并与迷宫密封的封严性能进行了比较。综合以上数值计算结果可以得到以下结论:

1)不同孔径下,液氧孔型/蜂窝阻尼密封均具有最优的深径比  $H_1/D_1 = 0.5$ 、 $H_2/D_2 = 0.5$  使泄漏量最小;相同孔径下,周向孔排数越多,孔型/蜂窝密封封严性能越好。

2)有限的动密封轴向尺寸下,液氧孔型/蜂窝阻尼密封泄漏量随孔径的增大先减小后增大,存在最佳孔径  $D_1$  (本文中最佳孔径  $D_1 = 1.4 \text{ mm}$ ) 使泄漏量最小。

3)相比于原始迷宫密封,优化设计的孔型/蜂窝阻尼密封使涡轮泵离心轮前、后凸肩密封泄漏量分别减小了约19%和21%。

### 参考文献:

- [1] 奥夫相尼科夫. 液体火箭发动机涡轮泵装置原理与计算[M]. 北京:北京航天动力研究所,2006.
- [2] 张远君. 液体火箭发动机涡轮泵设计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1995.
- [3] 黄智勇,李惠敏,胡钟兵. 液体火箭发动机超高速泵浮动密封环研究[J]. 火箭推进,2004,30(4):10-14.  
HUANG Z Y, LI H M, HU Z B. Study on floating seal ring of hyper-rotate-speed pump in liquid rocket engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2004, 30(4):10-14.
- [4] 马杰伟,李斌. 涡轮泵内流路静态分析[J]. 火箭推进,2004,30(6):26-31.  
MA J W, LI B. Static and dynamic state characteristic analysis for the secondary flow of the turbopump[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2004, 30(6):26-31.
- [5] 孙丹,王猛飞,艾延廷,等. 蜂窝密封泄漏特性理论与实验[J]. 航空学报,2017,38(4):282-291.
- [6] 李志刚,宁霄,晏鑫,等. 蜂窝面迷宫密封泄漏特性和鼓风加热特性研究[J]. 工程热物理学报,2015,36(6):1196-1200.
- [7] 宋文希,朱蓬勃,高庆,等. 汽轮机低压通流区鼓风态流场数值分析[J]. 热力透平,2019,48(1):20-25.
- [8] 姜铁骝,曹丽华,付亚辉,等. 蜂窝芯格尺寸对蜂窝密封流动特性的影响[J]. 润滑与密封,2016,41(6):29-34.
- [9] 李承曦,何立东. 蜂窝密封动力特性参数的CFD数值分析方法[J]. 北京化工大学学报(自然科学版),2010,37(1):117-121.
- [10] 吴培锋,杨锐,杨建道. 汽轮机蜂窝汽封泄漏量及气动特性的数值模拟[J]. 热力透平,2010,39(2):121-125.
- [11] 张毅,曹丽华,索付军,等. 蜂窝密封泄漏流动特性影响因素的数值研究[J]. 动力工程学报,2013,33(10):775-781.
- [12] KLEYNHANS G F, CHILDS D W. The acoustic influence of cell depth on the rotordynamic characteristics of smooth-rotor/honeycomb-stator annular gas seals[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1997, 119(4):949-956.
- [13] 李军,邓清华,丰镇平. 蜂窝汽封和迷宫式汽封流动性能比较的数值研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(16):108-111.
- [14] 李志刚,李军,丰镇平. 蜂窝密封流动特性的数值研究和泄漏量计算公式的构造[J]. 机械工程学报,2011,47(2):142-148.
- [15] 方志,李志刚,李军. 孔型几何参数对孔型密封泄漏和鼓风加热特性影响研究[J]. 西安交通大学学报,2019,53(1):135-141.
- [16] 李志刚,李军,丰镇平. 进口防旋板对孔型密封非定常气流激振特性的影响[J]. 西安交通大学学报,2016,50(1):16-21.
- [17] 王文全,张立翔,闫妍. 蜂窝密封的水封特性[J]. 排灌机械工程学报,2013,31(3):248-252.
- [18] 付子龙,陈琦,彭俊华. 蜂窝式密封环的优点及加工制造概述[J]. 装备机械,2016(4):21-25.
- [19] JOLLY P, HASSINI A, ARGHIR M, et al. Experimental and theoretical rotordynamic coefficients of smooth and round-hole pattern water fed annular seals[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition. Düsseldorf, Germany: [s. n.], 2014.