

文章编号: 1000-8055(2024)10-20220770-10

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220770

# 抑扰型刷式密封刷丝浮升效应流固耦合数值分析

孙基生<sup>1</sup>, 孙 丹<sup>1</sup>, 赵 欢<sup>1</sup>, 慕 伟<sup>2,3</sup>, 任国哲<sup>1</sup>, 徐文峰<sup>1</sup>

(1. 沈阳航空航天大学 航空发动机学院

辽宁省航空宇航推进系统先进测试技术重点实验室, 沈阳 110136;

2. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015;

3. 中国航空发动机集团有限公司 航空发动机动力传输重点实验室, 沈阳 110015)

**摘 要:** 提出抑扰型刷式密封结构, 基于 arbitrary Lagrange-Eulerian (ALE) 流固耦合方法建立抑扰型刷式密封刷丝浮升效应三维瞬态求解模型, 研究不同抑扰孔结构刷式密封泄漏特性和速度特性, 以及抑扰孔结构参数对刷式密封刷丝浮升效应的影响规律。研究结果表明: 在传统刷式密封前挡板设置抑扰孔可改变前排刷丝受力状态, 前排刷丝受到与扰动方向相反的力矩, 有效抑制刷丝浮升效应产生, 显著提升传统刷式密封密封性能。相较于易产生刷丝浮升效应的传统刷式密封, 降低抑扰孔高度、增加抑扰孔直径和排数, 均可有效降低刷式密封泄漏量, 其中增加抑扰孔排数至 3 排可降低 30.2% 泄漏量。设置抑扰孔结构可抑制刷丝浮升效应引起的前排刷丝形变, 相比于传统刷式密封, 抑扰孔高度设置为 3.75 mm、抑扰孔直径设置为 1.5 mm 与抑扰孔排数设置为 3 排, 分别使刷丝自由端平均变形量减少 53.2%、34.8% 和 54.0%。

**关 键 词:** 抑扰型刷式密封; 刷丝浮升效应; arbitrary Lagrange-Eulerian 方法; 流固耦合; 数值分析

中图分类号: V233.5

文献标志码: A

## Numerical investigation on bristles buoyancy effect of suppressed-disturbance brush seals with fluid-structure interaction

SUN Jisheng<sup>1</sup>, SUN Dan<sup>1</sup>, ZHAO Huan<sup>1</sup>, MU Wei<sup>2,3</sup>, REN Guozhe<sup>1</sup>, XU Wenfeng<sup>1</sup>

(1. Liaoning Key Laboratory of Advanced Measurement and Test Technology for Aviation Propulsion System, School of Aero-engine, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. Shenyang Engine Research Institute,

Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110015, China;

3. Key Laboratory of Power Transmission Technology on Aero-engine, Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110115, China)

**Abstract:** Suppressed-disturbance (SD) brush seal structure was presented. A three-dimensional transient solution model for bristles buoyancy effect of the brush seal with disturbance suppression was established based on arbitrary Lagrange-Eulerian (ALE) fluid-structure coupling method. The leakage characteristics and velocity characteristics of the brush seal with different SD hole structures were studied, and the influence of the structural parameters of SD holes on bristles buoyancy effect of brush seal was studied. The results showed that the SD hole in the front plate of the traditional brush seal can change the

收稿日期: 2022-10-07

基金项目: 国家自然科学基金(52075346); 先进航空动力创新工作站(依托中国航空发动机研究院设立)项目(HKC2020-02-030);

辽宁省教育厅基础科研项目(JYT2020047)

作者简介: 孙基生(1999—), 男, 硕士生, 主要从事刷式密封多物理场耦合性能分析技术方面的研究。

通信作者: 孙丹(1981—), 男, 教授, 博士, 主要从事透平机械先进密封技术研究。E-mail: phd\_sundan@163.com

引用格式: 孙基生, 孙丹, 赵欢, 等. 抑扰型刷式密封刷丝浮升效应流固耦合数值分析[J]. 航空动力学报, 2024, 39(10): 20220770. SUN Jisheng, SUN Dan, ZHAO Huan, et al. Numerical investigation on bristles buoyancy effect of suppressed-disturbance brush seals with fluid-structure interaction[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(10): 20220770.

stress state of the front bristles, and the front bristles were subjected to a torque opposite to the direction of disturbance, effectively inhibiting the bristles buoyancy effect, and significantly improving the sealing performance of the traditional brush seal. Compared with the traditional brush seal prone to produce the bristles buoyancy effect, reducing the height of the SD hole and increasing the diameter and number of the SD hole can effectively reduce the leakage of the brush seal. Increasing the number of rows of SD hole to 3 rows can reduce the leakage of brush seal by 30.2%. The setting of the SD hole structure can inhibit the deformation of the front bristles caused by the bristles buoyancy effect. Compared with the traditional brush seal, the height of the SD hole was set to 3.75 mm, the diameter of the SD hole was set to 1.5 mm, and the number of rows of the SD hole was set to 3 rows, which reduced the average deformation of the free end of the brush by 53.2 %, 34.8 % and 54.0 %.

**Keywords:** suppressed-disturbance brush seal; bristles buoyancy effect;  
arbitrary Lagrange-Eulerian method; fluid-structure interaction;  
numerical investigation

刷式密封是一种具有优良密封性能的接触式动密封, 相比于传统非接触式迷宫密封, 相同部位应用刷式密封可降低泄漏量 50%~90%, 已被广泛应用于航空发动机等透平机械<sup>[1-3]</sup>。研究表明, 传统型刷式密封在工作时前排刷丝在气流力的作用下会产生浮升效应, 刷丝浮升效应会使前排刷丝的扰动剧烈进而使得泄漏量增加, 刷丝寿命降低<sup>[4-5]</sup>。因此开展抑扰型(suppressed-disturbance, SD)刷式密封刷丝浮升效应研究具有重要意义。

国内外研究人员对刷式密封力学特性已开展了大量的研究, 刷式密封工作时刷丝受气流力与摩擦力共同作用下会产生刚化效应、滞后效应、吹下效应以及刷丝浮升效应等复杂的力学行为<sup>[6]</sup>。国外 Modi<sup>[7]</sup> 提出悬臂梁理论模型, 计算了单根刷丝端面与转子面的接触力。Basu 等<sup>[8]</sup> 实验得出在轴向压差作用下刷丝束被压紧, 使得刷丝束整体刚度增加, 即产生刚化效应, 对刷式密封使用寿命产生不利影响。Berard 等<sup>[9]</sup> 测试了前后挡板均设有减压腔的刷式密封在工作时的刷丝刚度, 发现前挡板与刷丝束间隙超过 0.508 mm 后再改变前挡板与刷丝束间隙对整体刷丝刚度影响可忽略不计。Short 等<sup>[10]</sup> 通过实验测试发现后挡板与刷丝束存在一定间隙能够降低刚化效应, 同时在刷丝束前防止导流板可有效防止压力闭合效应。Crudginton 等<sup>[11]</sup> 通过实验与数值研究了刷丝安装角对刷式密封刚化效应和吹下效应的影响, 得出刷丝倾角越大, 刷式密封的刚化效应与吹下效应越明显。Basu 等<sup>[8]</sup> 通过实验发现轴向压差使刷丝束与后挡板间摩擦力增加, 当转子存在涡动

时刷丝对转子的跟随性降低会产生滞后效应。Aksoy 和 Aksit<sup>[12]</sup> 通过静态实验与动态实验对比, 得到当转子发生转动时刚化效应与滞后效应会有所减弱。Zhao 和 Stango<sup>[13]</sup> 通过建立刷丝与后挡板之间接触的力学模型, 研究了刷丝束与后挡板之间的摩擦因数对滞后效应的影响, 得出滞后量随摩擦因数增加而增加, 存在临界摩擦因数使滞后量最大。Morrison 等<sup>[14]</sup> 提出对后挡板腔内加压来平衡刷丝轴向压力, 降低滞后效应, 保证刷丝对转子的随动性。Reggentin 等<sup>[15]</sup> 通过观测到刷丝在非定常气流作用下产生不稳定的扰动现象, 得出刷丝不稳定性与刷式密封泄漏量和有效密封间隙有关。O'Neill 等<sup>[16]</sup> 在两级刷式密封的前挡板应用多孔结构来抑制刷丝在气流力作用下产生的颤振现象。国内邱波等<sup>[17]</sup> 采用非线性接触模型, 分析了刷丝直径、刷丝长度和刷丝角度对滞后效应的影响规律。李朋飞等<sup>[18]</sup> 采用多孔介质模型, 研究了压差与减压腔轴向宽度对低滞后型刷式密封滞后特性的影响, 发现减压腔轴向宽度为 0.4 mm 时低滞后型刷式密封的滞后效应最弱。孙丹等<sup>[19-21]</sup> 基于刷式密封三维实体建模, 发现干涉量对刷丝最高温度的影响最大, 此外采用三维实体瞬态求解模型, 揭示了刷式密封吹下效应的诱发机理。Millener 等<sup>[4]</sup> 提出多孔结构的前挡板减少径向气流对刷丝的升力, 进而抑制刷丝浮升效应。综上所述, 国内外对刷式密封力学特性研究大多为滞后效应、刚化效应以及吹下效应等, 关于刷式密封刷丝浮升效应相关研究较少, 且现有研究大多采用稳态方法研究刷式密封结构对其密封性能的影响, 鲜有采用双向流固耦合瞬态方

法对刷式密封刷丝力学特性的相关研究。

本文针对传统刷式密封前排刷丝易发生的刷丝浮升效应提出抑扰型刷式密封结构, 基于 arbitrary Lagrange-Eulerian(ALE)流固耦合方法建立抑扰型刷式密封三维瞬态数值计算模型, 分析抑扰型刷式密封泄漏流动特性, 研究不同抑扰孔结构对抑扰型刷式密封刷丝浮升效应的影响规律, 为抑制刷式密封前排刷丝扰动, 防止刷丝断裂失效提供研究依据。

## 1 刷式密封 ALE 流固耦合理论

### 1.1 ALE 算法运动学描述

ALE 算法引入拉格朗日坐标系和欧拉坐标系之外的第三个参考坐标系, 其参考构型在空间中的运动形式任意。当网格跟随物体同步运动时即为拉格朗日描述, 当网格固定物体在网格内运动时即为欧拉描述。采用 ALE 描述可使刷丝运动中适当调整刷丝网格位置, 且有效跟踪刷丝在气流作用下位移变形的空间坐标。

流体质点  $\mathbf{X}$  在 ALE 描述下的空间坐标  $\mathbf{x}$  在  $t$  时刻的函数表述为

$$\mathbf{x} = \phi(\mathbf{X}, t) \quad (1)$$

式中  $\mathbf{X}$  表示初始构型的流体质点坐标,  $t$  表示时刻。流体网格运动可描述为

$$\mathbf{x} = \hat{\phi}(\chi, t) \quad (2)$$

式中  $\chi$  为参考构型坐标。

联立式(1)和式(2)可得, 流体质点  $\mathbf{X}$  在  $t$  时刻的参考构型坐标  $\chi$  为

$$\chi = \hat{\phi}^{-1}(\mathbf{x}, t) = \hat{\phi}^{-1}(\phi(\mathbf{X}, t), t) = \psi(\mathbf{X}, t) \quad (3)$$

流体质点  $\mathbf{X}$  在参考坐标系中的运动速度(即质点参考速度)为

$$\omega_i = \frac{\partial \chi_i(\mathbf{X}, t)}{\partial t} \quad (4)$$

流体网格点  $\chi$  的位移、速度和加速度为

$$\hat{\mathbf{u}}(\chi, t) = \mathbf{x}(\chi, t) - \chi \quad (5)$$

$$\hat{\mathbf{v}}(\chi, t) = \frac{\partial \mathbf{x}(\chi, t)}{\partial t} \equiv \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} \Big|_{\chi} \quad (6)$$

$$\hat{\mathbf{a}}(\chi, t) = \frac{\partial \hat{\mathbf{v}}(\chi, t)}{\partial t} \equiv \frac{\partial \hat{\mathbf{v}}}{\partial t} \Big|_{\chi} \quad (7)$$

利用链锁法则, 可将流体速度表示为

$$\mathbf{v}_i = \frac{Dx_i}{Dt} = \frac{\partial x_i(\chi, t)}{\partial t} \Big|_{\chi} + \frac{\partial x_i(\chi, t)}{\partial \chi_j} \omega_j \quad (8)$$

式(8)中将流体物质相对于参考构型的速度  $\omega$  变化到空间坐标系中, 可进一步简化为

$$\mathbf{v}_i = x_{i,j}[\chi] + \frac{\partial x_i(\chi, t)}{\partial \chi_j} \omega_j \quad (9)$$

式中  $[\chi]$  表示求导时  $\chi$  不变。

根据式(8)将流体质点  $\mathbf{X}$  与网格间的相对速度  $\mathbf{c}$  表示为

$$\mathbf{c}_i = \mathbf{v}_i - \hat{\mathbf{v}}_i = \frac{\partial x_i(\chi, t)}{\partial \chi_j} \omega_j \quad (10)$$

### 1.2 刷式密封流体动力学方程

ALE 描述下的质量守恒方程为

$$\rho_{,j}[\chi] + \mathbf{c} \cdot \nabla \rho + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (11)$$

式中  $\rho$  为密度。动量守恒方程为

$$\rho(\mathbf{v}_{,j}[\chi] + \mathbf{c} \cdot \nabla \mathbf{v}) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{b} \quad (12)$$

式中  $\boldsymbol{\sigma}$  流体为柯西应力张量,  $\mathbf{b}$  为体力密度。能量守恒方程为

$$\rho(e_{,j}[\chi] + \mathbf{c} \cdot \nabla e) = \mathbf{D} : \boldsymbol{\sigma} \quad (13)$$

式中  $e$  为单位质量内能,  $\mathbf{D}$  为变形率。

初始条件满足

$$\begin{cases} \mathbf{v}(\mathbf{X}, 0) = \mathbf{v}_0(\mathbf{X}) \\ \mathbf{u}(\mathbf{X}, 0) = \mathbf{u}_0(\mathbf{X}) \end{cases} \quad (14)$$

式中  $\mathbf{v}_0$  为初始速度,  $\mathbf{u}_0$  为初始坐标。

### 1.3 刷式密封结构动力学方程

刷式密封在工作过程中受气压力作用产生非线性运动, 无量纲运动方程描述为

$$\ddot{\mathbf{d}} - \frac{1}{m^*} \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}^s - \mathbf{f}^s = \mathbf{0} \quad (15)$$

式中  $\mathbf{d}$  为位移矩阵,  $m^*$  为质量比,  $\boldsymbol{\sigma}^s$  为 Cauchy 应力,  $\mathbf{f}^s$  为结构体力项。

St. Venant - Kirchhoff 材料本构关系为

$$\begin{cases} \mathbf{S} = \mathbf{C} : \mathbf{E} \\ \mathbf{E} = \mathbf{F}^T \mathbf{F} - \mathbf{I} \end{cases} \quad (16)$$

式中  $\mathbf{S}$  是第二 Piola - Kirchhoff 应力,  $\mathbf{C}$  为弹性本构张量,  $\mathbf{E}$  表示 Green - Lagrangian 应变,  $\mathbf{F}$  为变形梯度, 第二 Piola - Kirchhoff 应力经构形转换可表示为 Cauchy 应力

$$\mathbf{S} = \mathbf{J} \mathbf{F}^{-1} \boldsymbol{\sigma}^s \mathbf{F}^{-T} \quad (17)$$

式中 $J = \det(\boldsymbol{F})$ 。

初始条件和边界条件满足

$$\begin{cases} \boldsymbol{d} = \boldsymbol{d}^0 \\ \dot{\boldsymbol{d}} = \dot{\boldsymbol{d}}^0 \\ \boldsymbol{\sigma}^s \cdot \boldsymbol{n} = \boldsymbol{h}^s \end{cases} \quad (18)$$

式中 $\boldsymbol{d}^0$ 为初始位移坐标,  $\boldsymbol{n}$ 为单位矢量,  $\boldsymbol{h}^s$ 为固体柯西应力张量。刷丝受气流力作用产生的瞬态位移坐标可通过求解结构动力学方程, 结构动力学方程为

$$\boldsymbol{M}_s \ddot{\boldsymbol{d}} + \boldsymbol{C} \dot{\boldsymbol{d}} + \boldsymbol{K} \boldsymbol{d} = \boldsymbol{F} \quad (19)$$

式中 $\boldsymbol{M}_s$ 为结构质量矩阵;  $\boldsymbol{C}$ 为阻尼矩阵;  $\boldsymbol{K}$ 为结构刚度矩阵;  $\boldsymbol{F}$ 为外力矢量。

1.4 刷式密封 ALE 流固耦合方法

ALE 流固耦合方法在迭代计算过程中, 流体单元流经刷丝结构单元, 此时两者产生相对位移, 根据相对位移尺寸确定流体与刷丝网格单元对应的节点力, 刷丝受流体作用产生形变, 同时变形后的刷丝反作用于流体, 两者相互耦合作用, 确定 $T_n$ 时刻流体与刷丝网格单元位置, 最终循环结束。刷式密封 ALE 流固耦合流程, 如图 1 所示。

ALE 流固耦合方法会将变形网格中的单元

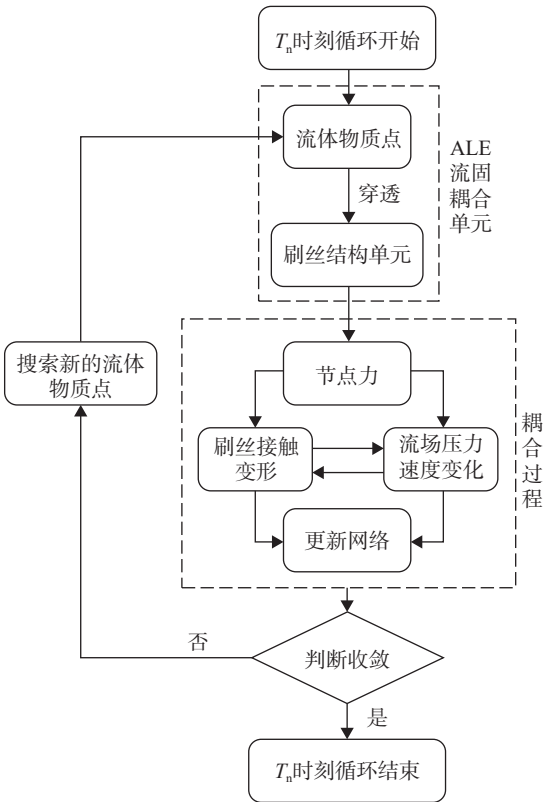


图 1 刷式密封 ALE 流固耦合方法

Fig. 1 ALE fluid-structure interaction of brush seal

变量与节点速度输运至新生成的网格中, 并根据收敛条件判断是否存在结束循环迭代过程。为保证网格变形后的单元变量输运, 需要根据拉格朗日和欧拉单元的尺寸合理选择耦合点个数。

2 抑扰型刷式密封结构设计

2.1 抑扰型刷式密封结构

图 2 为抑扰型刷式密封二维剖面图, 从图中可以看出, 抑扰型刷式密封结构主要由带有抑扰孔的前挡板、刷丝束以及后挡板组成。抑扰型刷式密封扇形段三维结构如图 3 所示。抑扰孔沿刷式密封前挡板周向排列布置, 抑扰孔直径为 $D_s$ , 抑扰孔距前挡板近转子端距离(即抑扰孔高度)为 $h_s$ , 抑扰孔周向间距为 $\delta$ , 前挡板保护高度为 $h_f$ , 后挡板保护高度为 $h_b$ , 刷丝直径为 $D$ , 刷丝排列间距为 $d$ , 前挡板宽度为 $w_f$ , 后挡板宽度为 $w_b$ , 刷丝

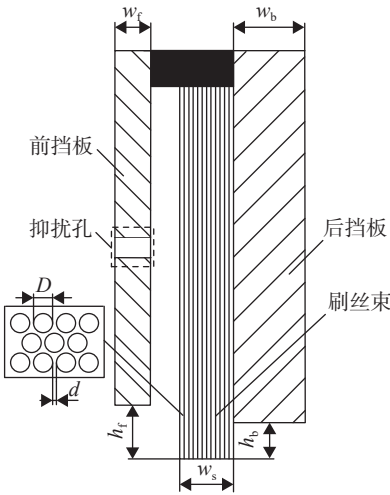


图 2 抑扰型刷式密封剖面图

Fig. 2 Profile of SD brush seals

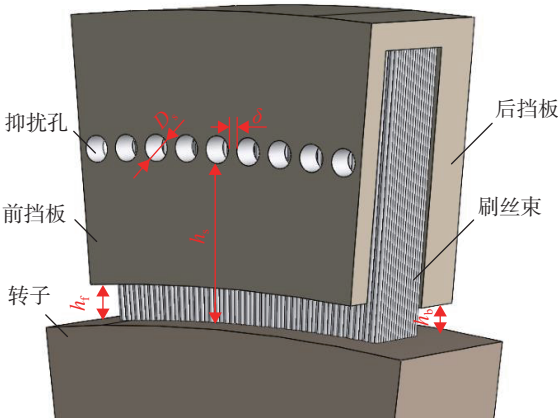


图 3 抑扰型刷式密封扇形段三维结构图

Fig. 3 Three dimensional structure diagram of sector of SD brush seals

束轴向厚度为  $w_s$ 。

2.2 抑扰型刷式密封设计原理

刷式密封在工作时前排刷丝受径向气流影响会产生刷丝浮升效应等非定常扰动现象。传统刷式密封未设置抑扰孔, 前方来流均需穿过前挡板与转子的间隙, 部分气流再通过前挡板与刷丝束间隙隙流向刷丝根部, 进而诱发刷式密封刷丝浮升效应。因此, 本文在前挡板设置抑扰孔来减弱前排刷丝的非定常扰动, 使部分来流通过抑扰孔流向前挡板与刷丝束间隙, 从而减少由刷丝自由端部流向刷丝根部的径向气流, 进而减弱刷丝浮升效应; 同时, 利用通过抑扰孔产生的高速轴向射流进入前挡板与刷丝束间隙隙流向前排刷丝, 对前排刷丝施加反力矩, 能够有效抑制前排刷丝向前挡板方向的位移, 即可有效抑制浮升效应。

3 抑扰型刷式密封刷丝浮升效应 ALE 流固耦合数值模型

3.1 数值模型

本文建立的计算模型中, 刷丝材料为 Haynes25, 弹性模量为 213.7 GPa, 泊松比为 0.29, 抑扰型刷式密封结构参数如表 1 所示。

| 表 1 抑扰型刷式密封结构参数  |                  |
|------------------|------------------|
| 参数               | 数值               |
| 前挡板宽度 $w_f$      | 1.0              |
| 后挡板宽度 $w_b$      | 2.0              |
| 刷丝束轴向厚度 $w_s$    | 1.5              |
| 前挡板保护高度 $h_f$    | 1.5              |
| 后挡板保护高度 $h_b$    | 1.0              |
| 刷丝束与转子面间隙 $h_g$  | 0                |
| 刷丝束与前挡板间隙 $w_g$  | 0.8              |
| 刷丝直径 $D$         | 0.07             |
| 刷丝排列间距 $d$       | 0.007            |
| 刷丝径向长度 $L$       | 10.4             |
| 抑扰孔直径 $D_s$      | 0.5, 1.0, 1.5    |
| 抑扰孔高度 $h_s$      | 3.75, 5.95, 8.15 |
| 抑扰孔周向间距 $\delta$ | $D_s/2$          |

计算时选取刷丝固定端以下部分作为建模区域, 本文将刷丝束简化为刷丝间距相等的三维叉排管束模型, 如图 4 所示, 求解模型的刷丝排列间距取实际刷丝排列间距的平均值, 故求解模型的刷丝束初始厚度  $W_0$ 、刷丝直径  $D$ 、刷丝排列间隙  $d$  和刷丝轴向排数  $n$  的关系可表示为式(20)。

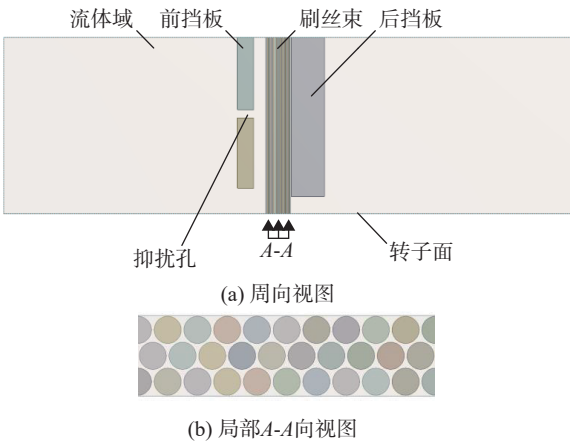


图 4 数值计算模型

Fig. 4 Numerical calculation model

据式(20)可求解得出刷丝排列间距。A-A 向视图为刷丝自由端法向视图。

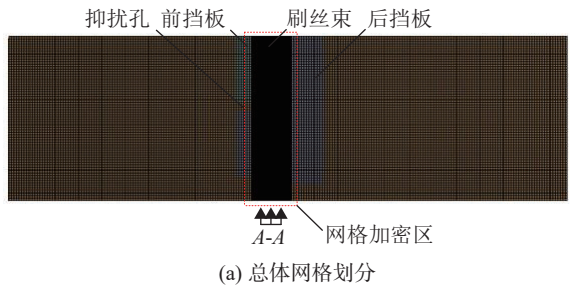
$$W_0 = \frac{(2n+1)D + (2n-1)d}{2} \quad (20)$$

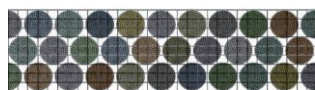
3.2 网格划分

网格划分时, 抑扰型刷式密封固体域部分, 即刷丝与前后挡板网格采用 Lagrange 单元, 流体域部分采用 Euler 单元, 且固体域嵌于流体域内部, 故流体域与固体域接触表面采用 ALE 流固耦合方法。计算求解过程需要根据计算资源与计算精度适度选取网格数量进行计算, 本文通过逐步网格加密, 最终加密至 243 万网格时, 相邻网格数量的抑扰型刷式密封泄漏量相对误差控制在 0.5% 以内, 以保证网格无关性, 如表 2 所示, 故采用网格数为 243 万时的网格划分方法进行数值计算, 如图 5 所示。

表 2 网格无关性验证

| Table 2 Grid independence verification |           |
|----------------------------------------|-----------|
| 网格数量/万                                 | 泄漏量相对误差/% |
| 82                                     | 16.43     |
| 134                                    | 9.26      |
| 193                                    | 4.14      |
| 243                                    | 0.42      |





(b) 局部A-A向网格划分

图 5 网格划分图

Fig. 5 Mesh diagram

### 3.3 边界条件及数值算法

本文采用 ALE 算法对刷丝浮升效应流固耦合模型进行求解, 刷式密封流固耦合模型边界条件如图 6 所示。进口面边界条件总压设置为 0.15~0.6 MPa, 出口面边界条件设置为静压 0.1 MPa, 周期面设置为滑移面, 其他流体域外边界均采用固定壁面。刷丝焊接端与挡板壁面均采用固定约束, 固体域结构间摩擦因数均取 0.3<sup>[21]</sup>。

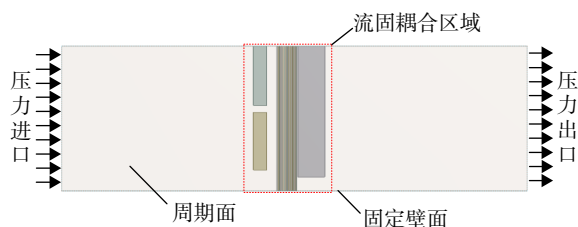


图 6 边界条件

Fig. 6 Boundary conditions

抑扰型刷式密封固体与流体间的流固耦合设置, 通过关键字定义将流体域部分算法设置为 ALE 算法, 固体域部分算法设置为 Lagrange 算法, 求解设置中计算步长为  $1 \times 10^{-8}$  s。此外, 本文所采用的 ALE 流固耦合数值计算方法准确性在文献 [21] 中已进行验证。

## 4 数值结果分析

### 4.1 抑扰型刷式密封泄漏流动特性分析

#### 4.1.1 抑扰型刷式密封泄漏特性分析

图 7 为不同抑扰孔结构的刷式密封在压比为 1.5~6 工况下泄漏量变化曲线, 未设置抑扰孔的刷式密封泄漏量高于其他具有抑扰孔结构的刷

式密封, 增加抑扰孔排数、降低抑扰孔设置高度与增加抑扰孔直径均可有效降低刷式密封泄漏量。在压比为 3 的工况下, 前挡板设置 3 排抑扰孔时, 相对于未设置抑扰孔的刷式密封泄漏量可降低 30.2%; 抑扰孔设置高度为 3.75 mm 时, 可降低泄漏量 24.9%; 将开孔直径增大至 1.5 mm 时, 泄漏量可降低 14.4%。

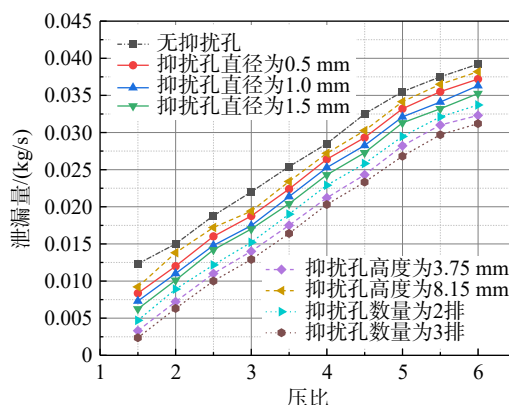
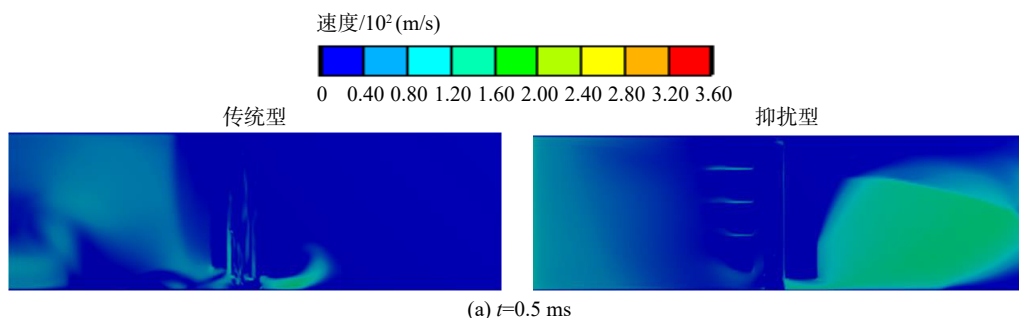


图 7 不同抑扰孔结构刷式密封泄漏量随压比变化曲线

Fig. 7 Leakage curve of brush seals with different SD holes structures varies with pressure ratio

#### 4.1.2 抑扰型刷式密封流场速度特性分析

图 8 中对比了传统型与抑扰型刷式密封在压比为 3、 $t=0.5 \sim 3.5$  ms 不同时刻的流场速度云图, 其中抑扰型刷式密封的抑扰孔直径为 0.5 mm, 抑扰孔排数为 3 排。 $t=0.5$  ms 时, 流场压力初始施加, 传统刷式密封与抑扰型刷式密封, 均在进口处气流速度较高, 气流经过刷丝束间隙在间隙内产生高速气流, 并通过后挡板与转子间隙向刷式密封的下游高速射出。 $t=1.5$  ms 时, 抑扰型刷式密封在抑扰孔内产生高速轴向气流, 并且下游气流速度明显高于传统型刷式密封。 $t=2.5$  ms 时, 传统型与抑扰型刷式密封流场均趋于稳定, 抑扰型刷式密封下游高速气流区域明显小于传统型刷式密封, 进而使得泄漏量降低。

(a)  $t=0.5$  ms

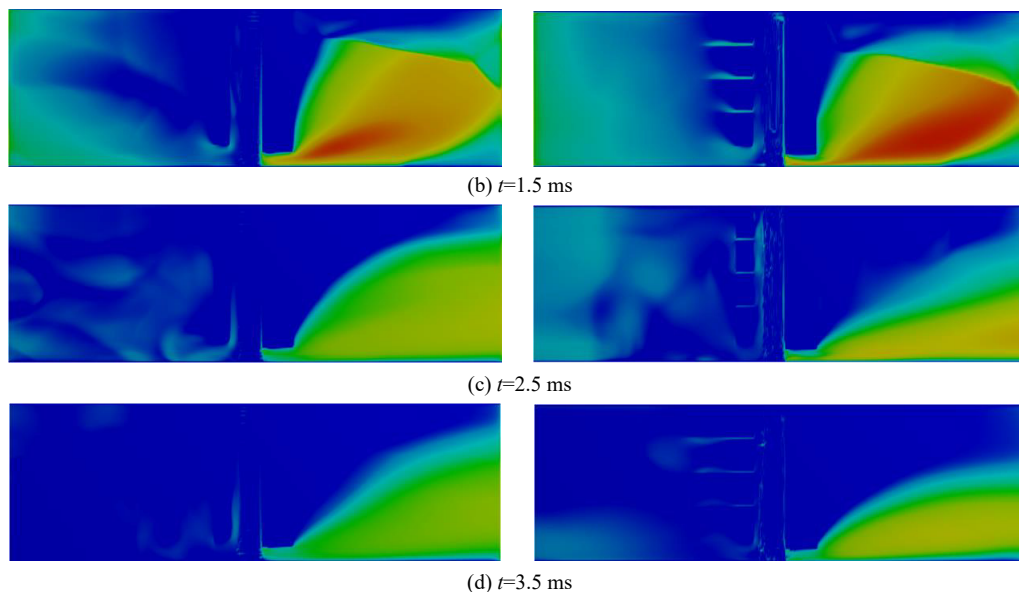


图 8 传统型与抑扰型刷式密封流场速度云图

Fig. 8 Velocity contours of flow field of traditional and SD brush seals

## 4.2 抑扰型刷式密封刷丝浮升效应影响因素分析

### 4.2.1 抑扰孔高度对浮升效应影响分析

传统型刷式密封与不同抑扰孔高度的抑扰型刷式密封, 当压比为 3 时, 中间排第 1~19 根刷丝自由端总体变形量随时间变化情况, 如图 9~图 10 所示。由图可知, 传统无抑扰孔刷式密封, 前 7 排刷丝在受到径向气流力作用后产生浮升效应, 总体变形量先增大后减小, 在  $t=1.5$  ms 时趋于稳定。

抑扰型刷式密封在  $t=0\sim 1.5$  ms 时, 在径向气流扰动下前 11 根刷丝产生刷丝浮升效应, 变形量显著增加, 变化趋势与无抑扰孔刷式密封类似,

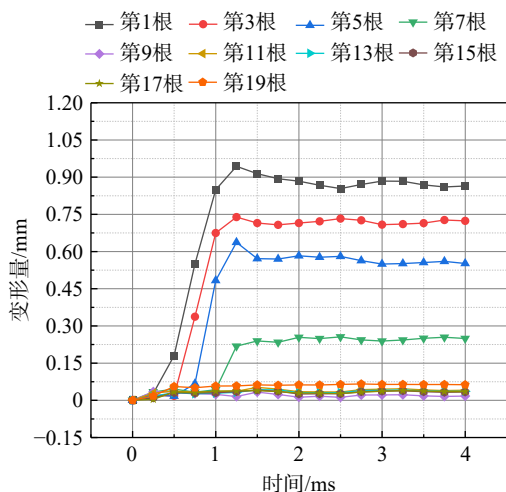
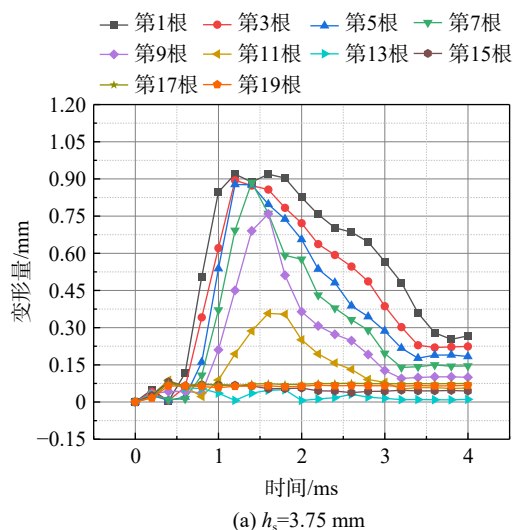


图 9 传统型刷式密封刷丝自由端不同时刻总体变形量

Fig. 9 Total deformation of bristle tips of traditional brush seals at different times

不同之处在于, 前排刷丝产生浮升效应后, 在  $t=3.5$  ms 后才趋于稳定, 且稳定后变形量较无抑扰孔刷式密封显著减小, 另外随着抑扰孔高度逐渐降低, 刷丝自由端最大变形量与每根刷丝稳定后变形量逐渐减小, 这是由于经过抑扰孔的轴向气流作用于前排刷丝产生与刷丝扰动方向相反的力矩, 抵消了部分由径向气流作用于前排刷丝产生的力矩, 有效抑制刷丝产生浮升效应。

为进一步定量研究抑扰孔高度对刷丝浮升效应的影响, 比较了不同抑扰孔高度下所研究对象在  $t=4$  ms 时, 第 1~19 根刷丝自由端的总体与径向变形量平均值, 如图 11 所示。对比发现, 设置抑扰孔可显著抑制前排刷丝的变形, 且随着抑扰孔高度的降低, 刷丝自由端的变形量逐渐降低,

(a)  $h_s=3.75$  mm

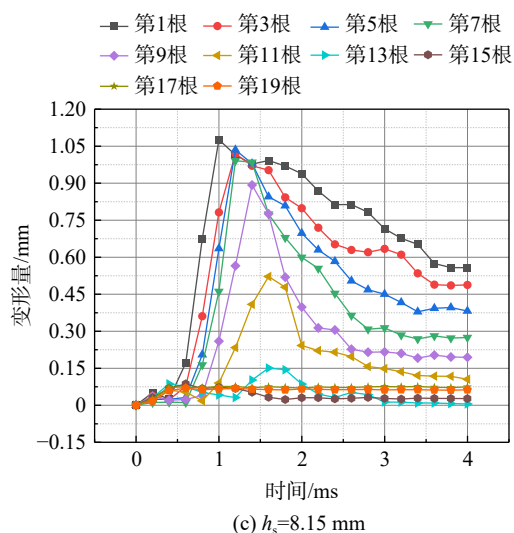
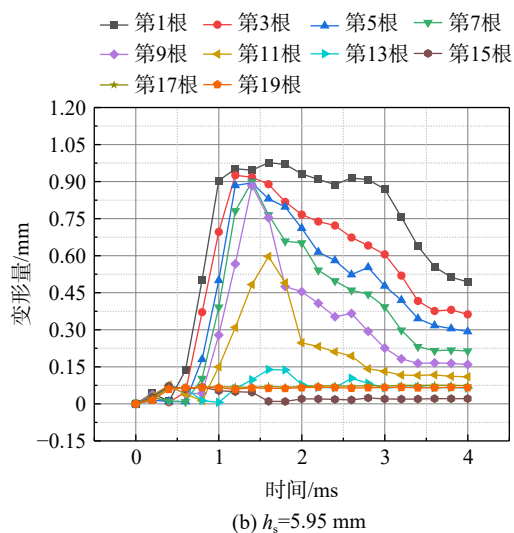


图 10 不同抑扰孔高度下刷丝自由端不同时刻总体变形量

Fig. 10 Total deformation of bristle tips at different times with different SD holes heights

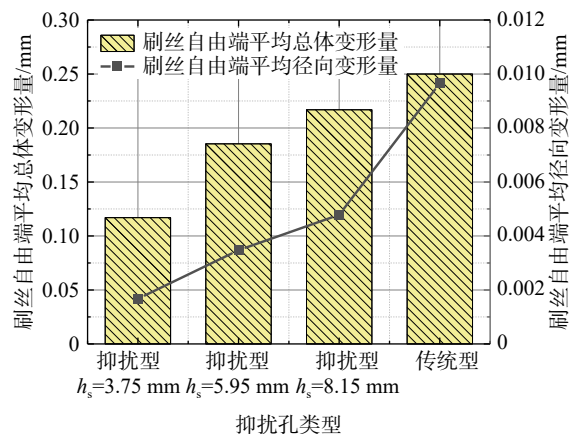


图 11 不同抑扰孔高度下刷丝自由端平均变形量

Fig. 11 Average deformation of bristle tips with different SD holes heights

其中抑扰孔高度为 3.75 mm 时对刷丝浮升效应的抑制效果最好, 相较于未设置抑扰孔的刷式密封, 可降低刷丝自由端平均变形量 53.2%。这是由于抑扰孔高度为 3.75 mm 时, 通过抑扰孔的气流作用于前排刷丝的力臂最大, 进而使得抑制前排刷丝产生刷丝浮升效应的力矩最大。

#### 4.2.2 抑扰孔直径对刷丝浮升效应影响分析

图 12 为抑扰孔高度为 5.95 mm, 直径分别为 1.0 mm 与 1.5 mm, 当压比为 3 时, 刷丝自由端总体变形量随时间变化情况, 其中抑扰孔直径为 0.5 mm 时, 如图 10(b) 所示。随抑扰孔直径增大, 当刷丝运动状态稳定后, 刷丝自由端最大变形量与每根刷丝变形量均降低, 且刷丝运动状态稳定所需时间逐渐降低。

图 13 所示为  $t=4$  ms 时, 不同抑扰孔直径下刷

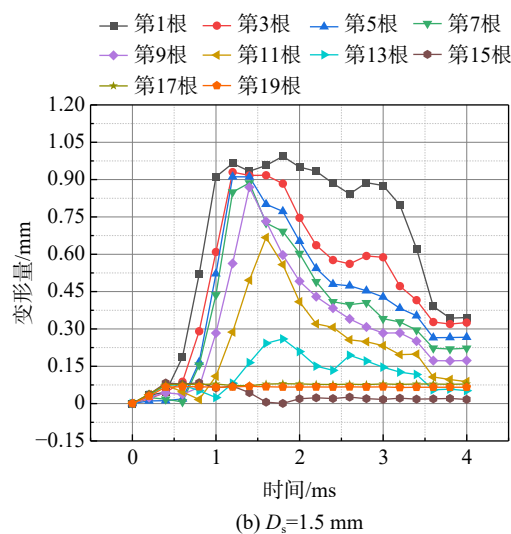
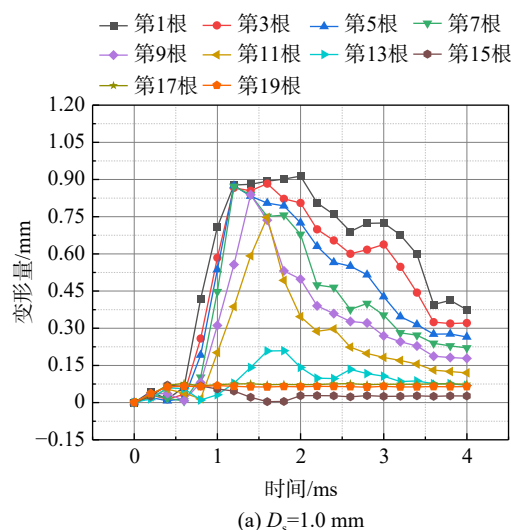


图 12 不同抑扰孔直径下刷丝自由端不同时刻总体变形量

Fig. 12 Total deformation of bristle tips at different times with different SD hole diameters

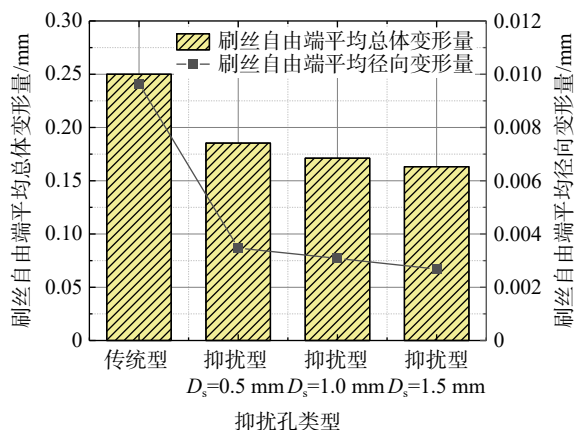


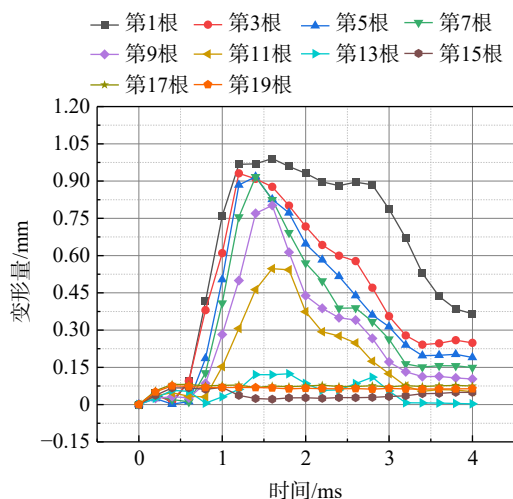
图 13 不同抑扰孔直径下刷丝自由端平均变形量

Fig. 13 Average deformation of bristle tips with different SD hole diameters

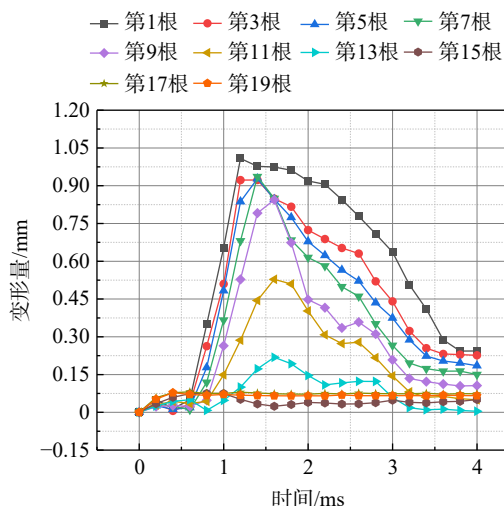
丝自由端总体与径向平均变形量。对比发现,随着抑扰孔直径增大,刷丝自由端平均总体变形量降低,其中抑扰孔直径为 1.5 mm 时对刷丝浮升效应的抑制效果最好,相较于未设置抑扰孔的刷式密封,可降低刷丝自由端平均变形量 34.8%。这是由于当抑扰孔直径增大后,前方来流通过抑扰孔进入前挡板与刷丝束间隙的气流质量流量在总质量流量中占比增加,使得抑制前排刷丝产生刷丝浮升效应的力矩增加,同时,前方来流经过前挡板与转子间隙的气流质量流量在总质量流量中占比减少,导致由刷丝自由端流向刷丝根部的径向气流对前排刷丝的作用力减小,两者共同作用使得刷丝浮升效应得到有效抑制。

#### 4.2.3 抑扰孔排数对刷丝浮升效应影响分析

图 14 所示为抑扰孔直径为 0.5 mm,排数分别为 2 排与 3 排,压比为 3 时,刷丝自由端总体变形量随时间变化情况,其中抑扰孔排数为 1 排时,如



(a) 抑扰孔排数为 2 排



(b) 抑扰孔排数为 3 排

图 14 不同抑扰孔排数下刷丝自由端不同时刻总体变形量

Fig. 14 Total deformation of bristle tips at different times with different SD holes rows

图 10(b) 所示。随抑扰孔排数增加,当刷丝运动状态稳定后,刷丝自由端最大变形量与每根刷丝变形量均降低。

图 15 所示为  $t=4\text{ms}$  时,不同抑扰孔排数下刷丝自由端总体与径向平均变形量。对比发现,随着抑扰孔排数增加,刷丝自由端平均总体变形量降低,其中抑扰孔排数为 3 排时对刷丝浮升效应的抑制效果最好,相较于未设置抑扰孔的刷式密封,可降低刷丝自由端平均变形量 54.0%。这是由于当抑扰孔排数增加,通过抑扰孔的轴向气流会形成多股射流作用于前排刷丝,有效抵消刷丝受径向气流影响产生的弯矩,同时通过前挡板与转子间隙的产生由刷丝自由端流向刷丝根部的径向气流质量流量降低也有效减弱作用于刷丝的力

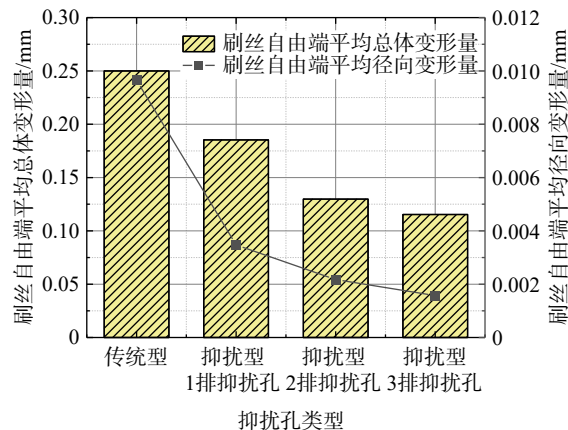


图 15 不同抑扰孔排数下刷丝自由端平均变形量

Fig. 15 Average deformation of bristle tips with different SD holes rows

矩,最终导致刷丝浮升效应得到显著减弱。

## 5 结 论

本文建立了抑扰型刷式密封 ALE 流固耦合数值模型,对比分析了不同抑扰型刷式密封的泄漏流动特性,以及刷丝变形特性,研究了抑扰孔结构对抑扰型刷式密封刷丝浮升效应的影响,得出结论如下:

1) 在传统刷式密封前挡板设置抑扰孔可改变前排刷丝受力状态,前排刷丝被施加与变形方向相反的力矩,有效抑制刷丝浮升效应,提升传统刷式密封密封性能。

2) 相较于易产生刷丝浮升效应的传统刷式密封,增加抑扰孔排数、降低抑扰孔高度与增加抑扰孔直径均可有效降低抑扰型刷式密封泄漏量,其中增加抑扰孔排数至 3 排可降低 30.2% 泄漏量。

3) 抑扰孔能够抑制刷式密封刷丝浮升效应导致的前排刷丝形变,不同抑扰孔结构其抑扰程度不同。增加抑扰孔排数、降低抑扰孔高度与增加抑扰孔直径均可减少刷丝自由端变形量,相比于传统刷式密封,抑扰孔高度设置为 3.75 mm、抑扰孔直径设置为 1.5 mm 与抑扰孔排数设置为 3 排,分别使刷丝自由端平均变形量减少 53.2%、34.8% 和 54.0%。

## 参考文献:

- [1] 李军, 李志刚, 张元桥, 等. 刷式密封技术的研究进展[J]. 航空发动机, 2019, 45(2): 74-84.  
LI Jun, LI Zhigang, ZHANG Yuanqiao, et al. Research progress of brush seal technology[J]. Aeroengine, 2019, 45(2): 74-84. (in Chinese)
- [2] BAYLEY F J, LONG C A. A combined experimental and theoretical study of flow and pressure distributions in a brush seal[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1993, 115(2): 404-410.
- [3] DINC S, DEMIROGLU M, TURNQUIST N, et al. Fundamental design issues of brush seals for industrial applications[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2002, 124(2): 293-300.
- [4] MILLENER P J, EDMUNDS T M. Brush seal with porous upstream side-plate: US5496045[P]. 1996-05-05.
- [5] 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.
- [6] 邱波, 李军. 刷式密封流动与换热及力学特性的研究进展[J]. 热力透平, 2013, 42(3): 141-149.  
QIU Bo, LI Jun. A review of flow and heat transfer, mechanical characteristics of brush seals[J]. Thermal Turbine, 2013, 42(3): 141-149. (in Chinese)
- [7] MODI V. Modeling bristle lift-off in idealized brush seal configurations[R]. AMSE 1994-GT-71, 1994.
- [8] BASU P, DATTA A, LOEWENTHAL R, et al. Hysteresis and bristle stiffening effects in brush seals[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1994, 10(4): 569-575.
- [9] BERARD G, SHORT J. Influence of design features on brush seal performance[R]. AIAA1999-2685, 1999.
- [10] SHORT J, BASU P, DATTA A, et al. Advanced brush seal development[R]. AIAA1996-2907, 1996.
- [11] CRUDGINGTON P, BOWSER A, WALIA J, et al. Bristle angle effects on brush seal contact pressures[R]. AIAA2009-5168, 2009.
- [12] AKSOY S, AKSIT M. Evaluation of pressure-stiffness coupling in brush seals[R]. AIAA2010-6831, 2010.
- [13] ZHAO Haifang, STANGO R J. Analytical approach for investigating bristle/backplate hysteresis phenomenon in brush seals[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2007, 23(2): 273-282.
- [14] MORRISON M K, WITHERS P A, JONES T V, et al. Brush seal: US5799952[P]. 1998-09-01.
- [15] REGGENTIN P, FRIEDRICH S J. Investigation of brush seal instabilities[R]. AIAA2020-3514, 2020.
- [16] O'NEILL A T, HOGG S I, WITHERS P A, et al. Multiple brush seals in series[R]. ASME 97-GT-194, 1997.
- [17] 邱波, 李军, 丰镇平. 考虑刷丝变形的刷式密封摩擦热效应研究[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(11): 2030-2034.  
QIU Bo, LI Jun, FENG Zhenping. Investigations on frictional heat generation of brush seals with consideration of bristle deflections[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, 34(11): 2030-2034. (in Chinese)
- [18] 李朋飞, 胡娅萍, 吉洪湖. 低滞后刷式密封泄漏特性与滞后效应研究[J]. 润滑与密封, 2020, 45(10): 52-58.  
LI Pengfei, HU Yaping, JI Honghu. Investigation on leakage characteristics and hysteresis effect of low hysteresis brush seals[J]. *Lubrication Engineering*, 2020, 45(10): 52-58. (in Chinese)
- [19] 孙丹, 李国勤, 艾延廷, 等. 基于三维实体建模的刷式密封传热机理数值研究[J]. 航空动力学报, 2019, 34(8): 1633-1643.  
SUN Dan, LI Guoqin, AI Yanting, et al. Numerical study on heat transfer mechanism of brush seal based on three-dimensional solid modeling[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2019, 34(8): 1633-1643. (in Chinese)
- [20] 杜宸宇, 孙丹, 刘永泉, 等. 刷式密封吹下效应诱发机理流固耦合数值研究[J]. 航空动力学报, 2021, 36(2): 310-319.  
DU Chenyu, SUN Dan, LIU Yongquan, et al. Numerical investigation on induced mechanism of blow-down effect of brush seals with fluid-structure interaction[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2021, 36(2): 310-319. (in Chinese)
- [21] 孙丹, 杜宸宇, 刘永泉, 等. 基于 ALE 流固耦合方法的刷式密封刷丝接触变形特性理论与试验研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(9): 170-180.  
SUN Dan, DU Chenyu, LIU Yongquan, et al. Theoretical and experimental investigation on the bristle contact deflections characteristics of brush seals based on ALE fluid-structure interaction method [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(9): 170-180. (in Chinese)

(编辑: 秦理曼)