

刷式密封吹下效应诱发机理 流固耦合数值研究

杜宸宇¹, 孙丹¹, 刘永泉^{2,3}, 战鹏^{2,3}, 信琦^{2,3}

(1. 沈阳航空航天大学 航空发动机学院

辽宁省航空推进系统先进测试技术重点实验室, 沈阳 110136;

2. 中国航空发动机集团有限公司 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航空科技重点实验室, 沈阳 110015)

摘 要: 分析了刷式密封吹下效应理论模型, 建立基于 arbitrary Lagrange-Euler(ALE)流固耦合方法的刷式密封吹下效应三维瞬态数值模型, 在验证数值模型准确性的基础上, 分别研究了刷丝轴向、径向和截面变形特性, 量化分析了刷丝径向吹下量, 揭示了刷式密封吹下效应诱发机理。研究表明: 刷式密封吹下效应会减小刷丝径向间隙, 考虑吹下效应可以更加准确地计算泄漏量。刷式密封吹下效应是伴随刷丝扰动的非定常变形形式, 刷丝自由端相比于后挡板径向中部和末端的刷丝截面, 其吹下效应和刷丝扰动均较强。随着进出口压比的增加, 刷式密封刷丝在具有更大径向吹下量的同时也伴随着更强的刷丝扰动, 在研究工况下, 2、3 和 4 进出口压比下的刷丝束中部刷丝最大径向吹下量分别为 0.004、0.010 mm 和 0.019 mm。刷丝具有一定的周向倾角和刷丝束区域的径向压力梯度是诱发刷式密封吹下效应的初始条件, 且刷丝间的法向正压力和切向摩擦力会进一步影响吹下效应。增大刷丝周向倾角可以减弱刷式密封吹下效应。

关 键 词: 刷式密封; 吹下效应; 诱发机理; arbitrary Lagrange-Euler(ALE)方法; 流固耦合

中图分类号: V233; TK263.2

文献标志码: A

Numerical investigation on induced mechanism of blow-down effect of brush seals with fluid-structure interaction

DU Chenyu¹, SUN Dan¹, LIU Yongquan^{2,3}, ZHAN Peng^{2,3}, XIN Qi^{2,3}

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

2. Shenyang Engine Research Institute,

Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110115, China;

3. Key Laboratory for Power Transmission of Aero Engine,

Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110115, China)

Abstract: The theoretical model of blow-down effect of brush seals was analyzed. The three-dimensional transient numerical model of blow-down effect of brush seals based on arbitrary Lagrange-Euler (ALE) fluid-structure interaction method was established. The axial, radial and sectional deflection characteristics of bristles were studied respectively. The

收稿日期: 2020-05-27

基金项目: 国家自然科学基金(52075346, 51675351); 中国博士后科学基金(2018M633572); 辽宁省自然科学基金(2019-ZD-023)

作者简介: 杜宸宇(1996—), 男, 硕士生, 主要从事刷式密封流场特性及力学特性研究。

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: 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.

radial blow-down displacements of bristles were analyzed quantitatively, and the induced mechanism of blow-down effect of brush seals was revealed. The results showed that the leakage can be calculated more accurately with consideration of blow-down effect, because the bristle radial clearance was reduced by blow-down effect. Blow-down effect of brush seals presented an unsteady deflection with bristle oscillation. Compared with bristle cross section in the radial middle and end position of backing plate, blow-down effect and bristle oscillation of bristle tip were stronger. Bristles had more radial blow-down displacements and stronger bristle oscillation with the increase of inlet-outlet pressure ratio. When the inlet-outlet pressure ratio was 2, 3 and 4, the maximum radial blow-down displacement of bristles in the middle of bristle pack was 0.004, 0.010 mm and 0.019 mm, respectively, under the studied condition. The initial condition for the bristles with a certain circumferential lay angle and the radial pressure gradient in bristle pack contributed to the induced blow-down effect, and blow-down effect was further influenced by the normal pressure and the tangential friction between bristles. Blow-down effect of brush seals can be weakened by increasing the circumferential lay angle.

Key words: brush seals; blow-down effect; induced mechanism; arbitrary Lagrange-Euler (ALE) method; fluid-structure interaction

刷式密封是一种具有优良密封性能的接触式动密封技术,被广泛应用于航空发动机等透平机械^[1-3]。刷式密封在工作中刷丝会产生吹下效应,吹下效应会增加刷丝与转子间的接触力进而加剧刷丝磨损^[4-5],刷式密封吹下效应对刷式密封的密封性能和使用寿命有着重要影响^[6-8],因此对刷式密封吹下效应的研究尤其重要。

国内外学者对刷式密封进行了大量的研究工作。在刷式密封数值方法研究方面,国外 Dogu 等^[9-10]采用多孔介质数值模型,研究了刷式密封流场特性,计算得到通过刷丝径向间隙的泄漏量占总泄漏量的 65%~94%。Lelli 等^[11]提出了基于线性弯曲梁理论和 CFD 耦合的刷式密封泄漏特性数值方法,发现当刷丝与转子表面接触时刷丝束结构参数与排列间隙是影响泄漏量的主要原因。孙丹等^[12]采用了流固耦合方法研究了刷丝的变形规律与力学特性,发现刷丝在气流力作用下会产生随时间变化的变形规律。马登骞等^[13]采用基于非线性 Darcian 多孔介质模型的三维 RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes)方程耦合有限元接触模型的数值方法,研究了后挡板结构对刷式密封性能的影响,发现后挡板压力腔结构可有效防止刷丝发生刚化效应并降低气流对刷丝的扰动。研究表明:现有文献大多基于简化模型或采用定常数值方法,考虑刷丝接触变形的三维瞬态流固耦合研究较少。

在刷式密封吹下效应研究方面,国外 France-

schini 等^[14]研究了吹下效应理论模型,并通过数值结合实验发现了刷式密封产生吹下效应的气动原因。Crudginton 和 Bowshe^[15]通过数值结合实验研究了具有一定径向间隙的吹下效应,给出了吹下效应强度的半经验计算方法。Ruggiero^[5]通过实验对比了有无前挡板的吹下效应,发现无前挡板相比于有前挡板,其吹下效应更强,并提出了前挡板开槽结构用于增强吹下效应的设计方法。Schwarz 等^[16]通过实验研究了 3 种轴向倾角的箍制型刷式密封,发现低轴向倾角结构具有较强的吹下效应和较弱的刚化效应。国内张元桥等^[17-18]通过多孔介质模型分析了刷式密封刷丝束内的压力分布,发现刷丝束内存在一定的径向压差,气流在此压差的作用下沿径向向转子表面流动,从而导致刷式密封产生吹下效应。进一步结合实验研究发现考虑吹下效应对刷丝径向间隙的影响可以更加准确地预测泄漏量,并提出了考虑吹下效应的刷丝径向间隙修正公式。研究表明:刷式密封刷丝与流体之间的相互作用是典型的瞬态双向流固耦合问题,考虑刷丝接触变形可以更加准确地计算实际工况的吹下效应,现有文献大多采用定常数值方法和实验方法研究刷式密封吹下效应,且现有刷式密封流固耦合方法容易因刷丝接触变形而导致网格畸变,难以解决刷丝接触变形问题^[19],使用考虑刷丝接触变形的三维瞬态双向流固耦合数值方法研究刷式密封吹下效应并揭示其诱发机理的相关文献鲜有发表。

本文建立了基于 ALE 流固耦合方法的刷式密封吹下效应三维瞬态数值模型,在验证数值模型准确性的基础上,分析了刷丝轴向、径向和周向变形特性,量化分析了刷丝径向吹下量,揭示了刷式密封吹下效应诱发机理,研究结果为刷式密封结构设计提供理论依据。

1 刷式密封吹下效应理论模型

图 1 给出了刷式密封吹下效应理论模型,前挡板径向末端以下区域流经首排刷丝的气流路径如图所示。图中坐标轴 x 轴、 y 轴和 z 轴分别表示刷式密封的周向切线方向、径向和轴向。从图中可以看出,1 和 2 分别为流入和流出首排刷丝的气流流线,本文刷式密封吹下效应理论模型中的气流流线方向均根据实际工况进行假设,由于气体具有黏性,故在流经刷式密封时气流会沿着刷丝表面和转子旋转方向产生流动方向的偏移。

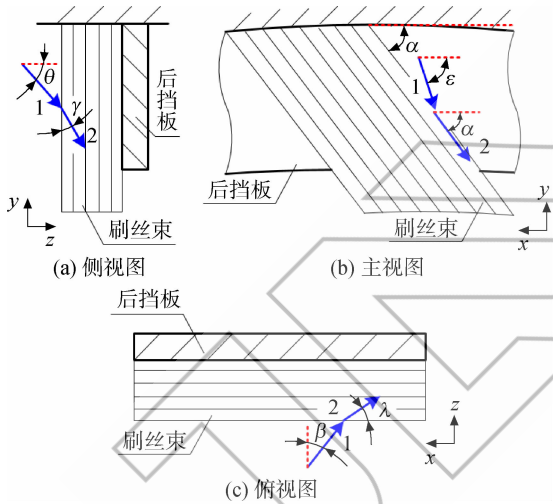


图 1 刷式密封吹下效应理论模型

Fig. 1 Theoretical model of blow-down effect of brush seals

首排刷丝受到的周向气流力 F_{tx} 和径向气流力 F_{ty} 可分别表示为^[14]

$$F_{tx} = (p_1 + \rho_1 v_1^2) \cos \epsilon \sin \beta S_1 - (p_2 + \rho_2 v_2^2) \cos \alpha \cos \lambda S_2 \quad (1)$$

$$F_{ty} = (p_1 + \rho_1 v_1^2) \sin \epsilon \sin \theta S_1 - (p_2 + \rho_2 v_2^2) \sin \alpha \cos \gamma S_2 \quad (2)$$

式中下标 1 和 2 分别为气流 1 和气流 2。 p 为压强, ρ 为密度, v 为速度, S 为流线横截面积, ϵ 为 xy 平面气流 1 与 x 轴的夹角, θ 为 yz 平面气流 1 与 z 轴的夹角, β 为 xz 平面气流 1 与 z 轴的夹角, α 为 xy 平面气流 2 与 x 轴的夹角也为刷丝的

周向倾角, γ 为 yz 平面气流 2 与 y 轴的夹角, λ 为 xz 平面气流 2 与 x 轴的夹角。由于气体具有黏性和可压缩性,故流经密封后气体的状态参数会产生变化,气流密度 ρ_1 和 ρ_2 的物理意义为同一气流流经刷丝后气体的密度发生了变化。

吹下效应是由 xy 平面内垂直于刷丝轴线的气流导致的,故导致首排刷丝产生吹下效应的气流力可表示为

$$F_t = F_{tx} \sin \alpha - F_{ty} \cos \alpha =$$

$$(p_1 + \rho_1 v_1^2) (\cos \epsilon \sin \beta \sin \alpha - \sin \epsilon \sin \theta \cos \alpha) S_1 + (p_2 + \rho_2 v_2^2) (\cos \lambda \sin \alpha \cos \alpha - \cos \gamma \cos^2 \alpha) S_2 \quad (3)$$

综上,导致刷丝产生吹下效应的气流力大小主要受到周向倾角、气流压强、气流速度和方向的影响,由于刷丝束内的气流流动状态随时间不断变化,导致刷丝同时产生吹下效应和扰动现象,故刷式密封吹下效应是伴随刷丝扰动的非定常变形形式。

2 刷式密封吹下效应 ALE 流固耦合数值模型

2.1 求解模型

刷式密封结构示意图如图 2 所示,主要结构参数如表 1 所示。本文通过测量刷式密封实验件尺寸得到本文求解模型的尺寸参数,通过直接测量可得到刷丝直径、刷丝轴向排数、刷丝束初始厚度、刷丝径向长度、前挡板保护高度和后挡板保护高度。由于刷丝排列存在较大的随机性,本文将实际刷丝束简化为刷丝均匀排列的三维叉排管束模型,并使用实际刷丝排列间隙的平均值作为求解模型的刷丝排列间隙,故求解模型的刷丝束初始厚度 T_0 、刷丝直径 d 、刷丝排列间隙 δ 和刷丝轴向排数 n 的关系可表示为

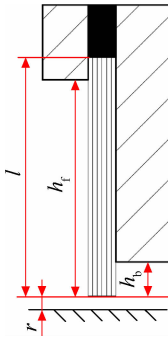


图 2 刷式密封结构示意图

Fig. 2 Structural schematic diagram of brush seals

表 1 刷式密封主要结构参数

Table 1 Main structural parameters of brush seals

结构参数	数值
刷丝直径 d/mm	0.1
刷丝排列间隙 δ/mm	0.01
刷丝径向长度 l/mm	10.5
前挡板保护高度 h_f/mm	9.5
后挡板保护高度 h_b/mm	1.5
刷丝径向间隙 r/mm	0.2

$$T_0 = \frac{(2n+1)d + (2n-1)\delta}{2} \tag{4}$$

由此可得到求解模型的刷丝排列间隙。求解模型刷丝材料的密度为 7850 kg/m^3 ,弹性模量为 213.7 GPa ,泊松比为 0.29 。选取刷丝固定端以下区域作为建模区域,建立了考虑周向倾角的三维刷式密封流固耦合求解模型,完整刷丝模型共 90 根,用于辅助计算的切半刷丝模型共 20 根。求解模型如图 3 所示。 D 向视图为刷丝束固定端法向视图。

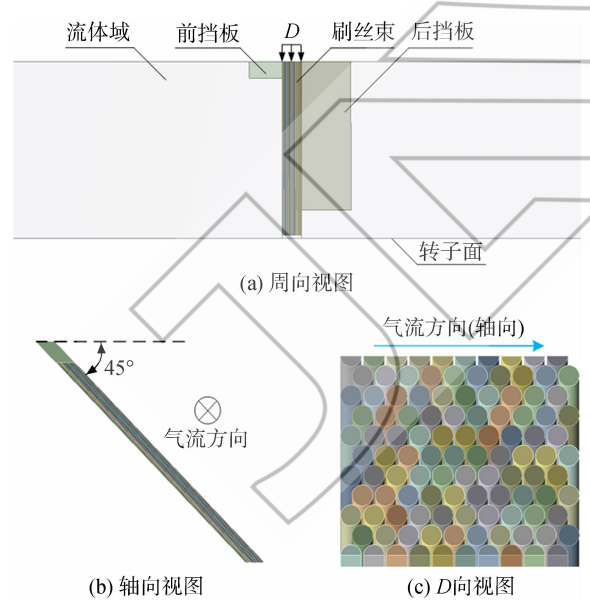


图 3 求解模型
Fig. 3 Solved model

2.2 网格划分

在进行网格划分时,刷式密封结构域网格采用 Lagrange 单元,刷式密封流体域网格采用采用 ALE 单元,使用该算法时结构网格与流体网格相互重叠。为提高计算精度并考虑计算成本,本文对刷丝束附近区域的网格进行局部加密处理,流体网

格向转子表面逐渐加密。当网格数量达到 345 万时,泄漏量变化范围不超过 0.5% ,故使用 345 万网格数量进行数值计算,网格划分如图 4 所示。

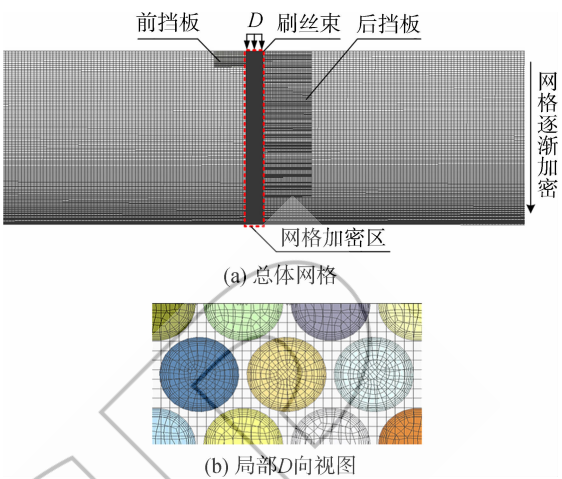


图 4 网格划分
Fig. 4 Grid division

2.3 边界条件及数值算法

在刷式密封流固耦合模型中,采用压力入口和压力出口(标准大气压)的边界条件,对称面采用滑移面边界条件,其他边界采用固定壁面边界条件。完整刷丝固定端和前后挡板固定端采用固定约束,切半刷丝所有面均采用固定约束,刷丝与刷丝之间、刷丝与前后挡板之间的摩擦因数均取 $0.3^{[20]}$,刷丝与流体之间以及前后挡板与流体之间均为流固耦合边界条件,刷式密封流固耦合模型边界条件如图 5 所示。

刷式密封流体采用 ALE 算法,刷丝和前后挡板采用 Lagrange 算法。刷丝与刷丝之间、刷丝与流体之间的耦合方式均采用罚函数耦合方式,该耦合方式保证了耦合接触过程中的能量守恒,能够准确的计算刷式密封流固耦合问题。为选取合理的时间步长进行计算,作者首先采用自动时间步长控制,但系统自动设置的时间步长过于保守,故作者在自动时间步长的基础上进行放大,当

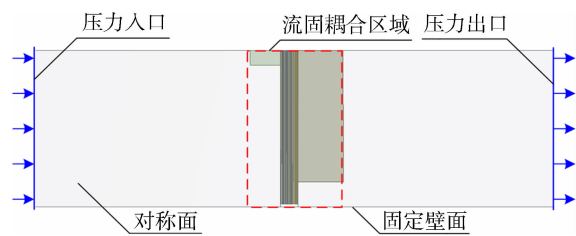


图 5 边界条件
Fig. 5 Boundary condition

时间步长调试至 9×10^{-9} s 时,计算过程中未出现负网格错误,且与使用自动步长计算的泄漏量误差不超过 0.5%,故选取该时间步长进行计算。当刷式密封的泄漏量变化范围不超过 0.5% 时,视为计算收敛,本文模型在计算时长为 3 ms 时达到收敛条件。

2.4 数值模型准确性验证

本文和文献[21]所使用的数值方法均为刷式密封 ALE 流固耦合方法,但文献[21]的在建模时未建立刷丝周向倾角,因此未考虑刷式密封吹下效应对泄漏特性的影响,故使用本文建模方法和文献[21]建模方法分别建立本文求解模型,并应用文献[21]所描述的实验装置进行实验测试。由于实验件为扇形段结构,故将数值模型的泄漏量换算为实验件尺寸的泄漏量,其可表示为

$$L_t = \frac{c}{5\sqrt{3}(d+\delta)}L_n \tag{5}$$

式中 L_t 为实验件尺寸的泄漏量, L_n 为数值模型的泄漏量, c 为实验件刷丝自由端周向长度。

图 6 给出了在本文研究工况下的泄漏量对比验证。

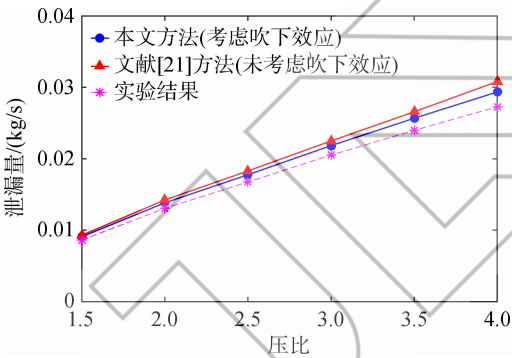


图 6 泄漏量对比验证

Fig. 6 Comparison and verification of leakage

从图 6 中可以看出,本文建模方法与实验结果的平均误差为 6.4%,文献[21]建模方法与实验结果的平均误差为 9.9%,本文建模方法所计算的泄漏量结果更接近实验结果,这主要是由于刷丝径向间隙处泄漏量占总泄漏量比重相对较大^[10],且本文数值模型考虑了刷式密封吹下效应对泄漏特性的影响,刷丝存在一定的吹下量,其减小了刷丝径向间隙进而阻碍了气流流动,故考虑吹下效应可以更加准确地计算实际工况的泄漏量。本文数值模型与实验结果存在一定误差,主要是由于数值模型与实验件存在一定的几何参数和材料参数的误差,最终导致误差的产生。

3 数值结果分析

3.1 刷丝轴向变形特性分析

图 7 给出了在进出口压比为 4 的工况下,不同时刻(t)的刷丝轴向总体变形。从图中可以看出,刷丝总体产生了向后挡板运动的轴向变形,后挡板保护高度区域的刷丝总体变形量相对较大,这主要是由于气流从后挡板保护高度区域流出刷式密封,该区域刷丝受到较大的气流力作用,同时未受到后挡板的约束,刷丝具有更大的运动空间,故该区域的刷丝总体变形量相对较大。从图中还可以看出,前排刷丝变形量相对较大,且变形量随时间不断变化,这主要是由于前排刷丝的运动空间相对较大,刷丝受到了更小的约束力作用,进而产生了更大的变形,由于本文数值计算方法为瞬态双向流固耦合方法,刷丝在气流力的作用下会产生刷丝与刷丝、刷丝与后挡板之间的接触变形,其变形也会进一步影响流场分布,这导致刷丝束内的气体流动状态随时间不断变化,具有非定常流动的特点,因此刷丝会受到非定常气流力和刷丝间接触力的共同作用,进而产生一定程度的扰

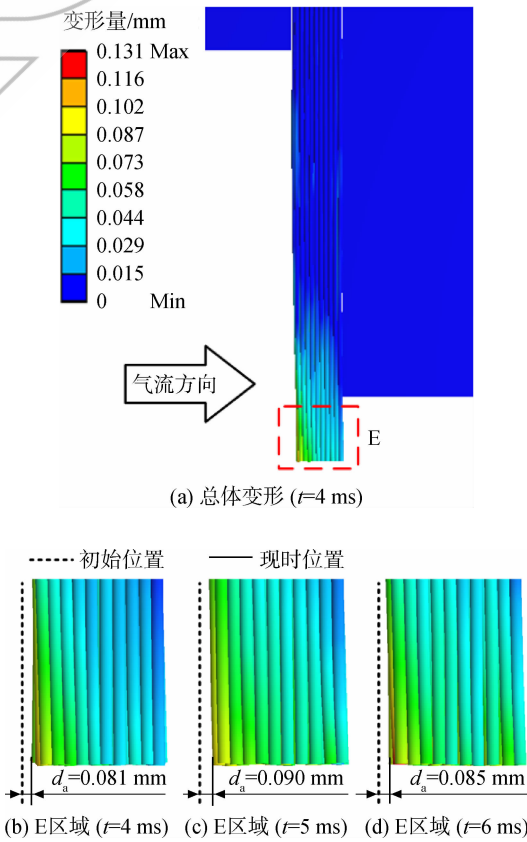


图 7 刷丝轴向总体变形

Fig. 7 Axial total deformation of bristles

动,故刷式密封刷丝轴向变形是伴随刷丝扰动的非正常变形形式。由于刷丝产生了轴向变形,故会导致刷丝径向间隙的增大。图中 d_a 为轴向变形量。

3.2 刷丝径向变形特性分析

图 8 给出了在进出口压比为 4 的工况下,不同时刻的刷丝径向总体变形。从图中可以看出,刷式密封刷丝总体产生明显的径向吹下变形,刷丝与刷丝间存在接触变形,每根刷丝的径向吹下量均不相同,并随着时间不断变化,这主要是由于刷丝在非定常气流力和刷丝间接触力的共同作用

下产生了吹下效应并伴随一定程度的刷丝扰动,导致刷丝自由端向转子面方向产生径向偏移,且位置不断变化,总体体现减小刷丝径向间隙的趋势,故刷式密封吹下效应是伴随刷丝扰动的非正常变形形式。又由于每根刷丝受到的气流力和刷丝间接触力均不相同,故每根刷丝所产生的吹下效应强度也均不相同。由于刷丝轴向变形会增大刷丝径向间隙,吹下效应会减小径向间隙,故刷式密封刷丝径向间隙的改变是刷丝轴向变形和吹下效应共同作用的结果。图中 d_r 为轴向变形量。

3.3 刷丝截面变形特性分析

参考图 9 可知 A 截面为后挡板径向中部刷丝截面,B 截面为后挡板径向末端刷丝截面,C 截面为刷丝自由端。

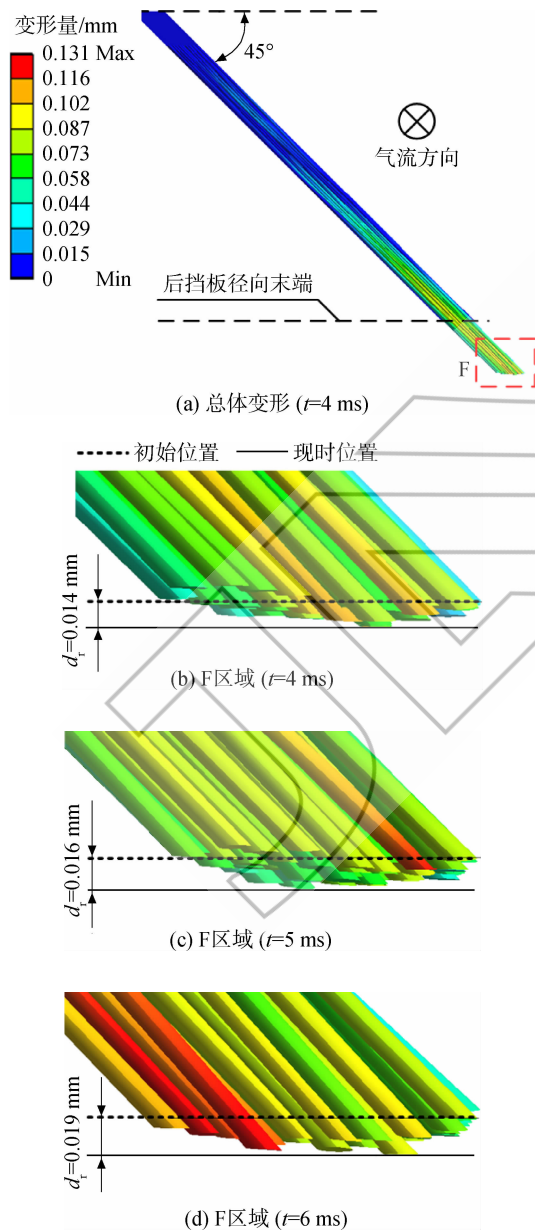


图 8 刷丝径向总体变形 (变形量放大 5 倍)
Fig. 8 Radial total deformation of bristles
(deformation is increased by 5 times)

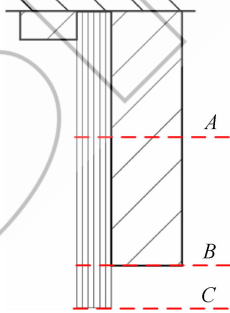


图 9 刷丝径向截面示意图
Fig. 9 Position schematic of bristle radial section

图 10 和图 11 分别给出了在进出口压比为 4 的工况下,刷丝径向截面的总体变形和总体速度。通过对比 4 ms 时刻的 A、B 和 C 截面的刷丝总体变形可以发现,A 截面的轴向厚度最大,刷丝排列相对整齐,刷丝平均速度(v_a)最小,刷丝周向变形较小;B 截面的轴向厚度最小,刷丝挤压程度较强,刷丝平均速度较小,刷丝周向变形较小;C 截面的轴向厚度介于两者之间,刷丝扰动较强,平均速度最大,刷丝沿周向的变形即产生吹下效应最为显著。上述现象的产生主要是由于后挡板径向中部位置轴向压力梯度较小,刷丝受到的气流力也较小,故导致该截面的刷丝变形和扰动较小;后挡板径向末端位置轴向压力梯度变化较大,刷丝受到的气流力也较大,但在后挡板的约束作用下,该截面后排刷丝变形受到限制,前排刷丝变形较大,导致刷丝束轴向厚度较小,刷丝扰动较小;刷丝自由端由于缺少后挡板的约束,在气流力的作用下刷丝会产生较大的轴向和周向变形,同时刷丝具有较大的动能,故该截面的刷式密封吹下效

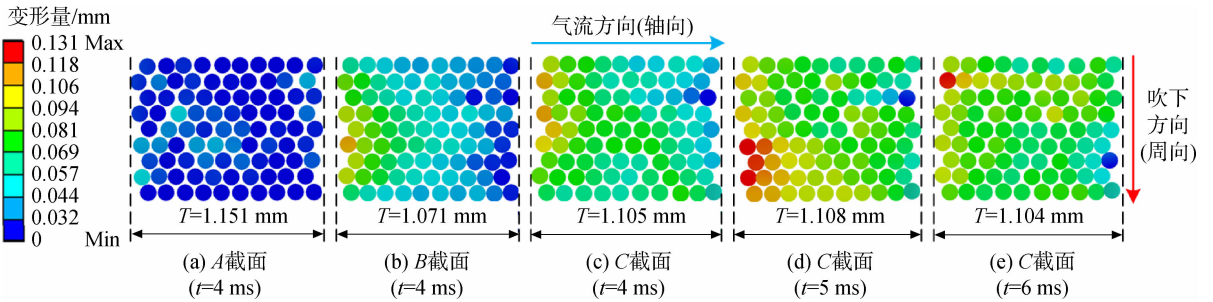


图 10 刷丝径向截面总体变形

Fig. 10 Total deformation of bristle radial section

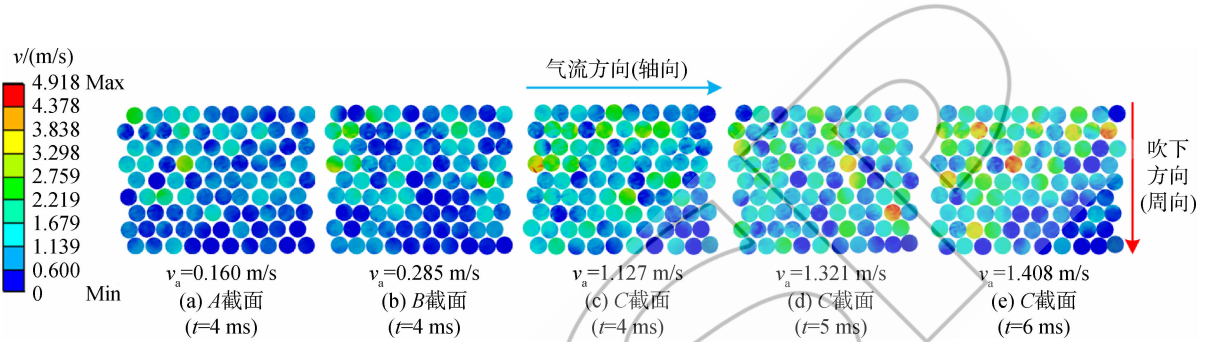


图 11 刷丝径向截面总体速度

Fig. 11 Total velocity of bristle radial section

应和刷丝扰动较强。

通过对比不同时刻的 C 截面刷丝总体变形可以发现,刷丝在气流力的作用下,刷丝的排列形式、轴向厚度和平均速度均随着时间不断变化,导致刷丝与刷丝间存在接触力的作用,其分为刷丝与刷丝法向相对运动产生的法向正压力和切向相对运动产生的切向摩擦力,因此两者会影响刷丝的周向变形,进而影响刷式密封吹下效应。

3.4 刷丝自由端变形量分析

图 12 和图 13 给出了进出口压比为 4 的工况下刷丝自由端轴向和周向变形量。图 14 给出了 3 种进出口压比工况下的刷丝径向吹下量(刷丝自由端沿径向变形量)随时间的变化规律。图中分析的对象均为沿气流方向中间排第 3 根~第 8 根刷丝。从图中可以看出,刷式密封刷丝自由端在轴向、径向和周向的变形量均随时间不断变化,刷丝自由端运动轨迹具有随机性的特点,这主要是由于刷式密封刷丝在气流力和刷丝间的接触力的共同作用下产生了扰动现象。其中刷丝自由端径向变形总体呈现向转子面偏移的趋势,这主要是由于刷式密封产生了吹下效应,且在此过程中伴随着一定的刷丝扰动,故刷式密封吹下效应是伴随刷丝扰动的非定常变形形式。

从图 14 中还可以看出,压比分别为 2、3、4 的

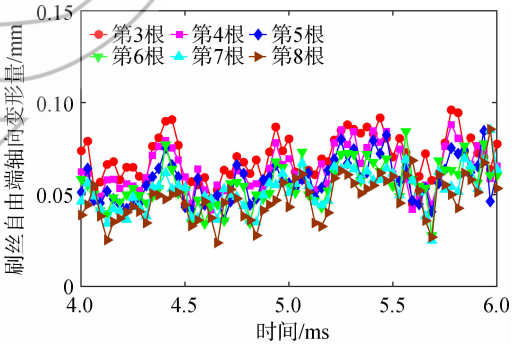


图 12 刷丝自由端轴向变形量随时间的变化规律

Fig. 12 Change of axial deflection of bristle tips with time

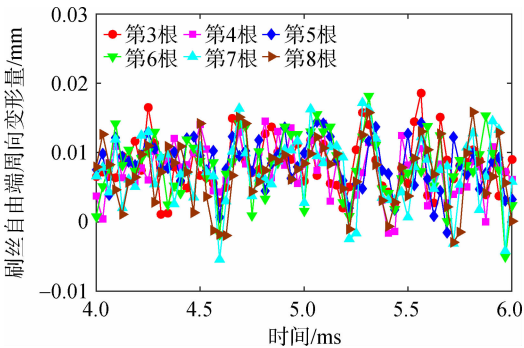


图 13 刷丝自由端周向变形量随时间的变化规律

Fig. 13 Change of circumferential deflection of bristle tips with time

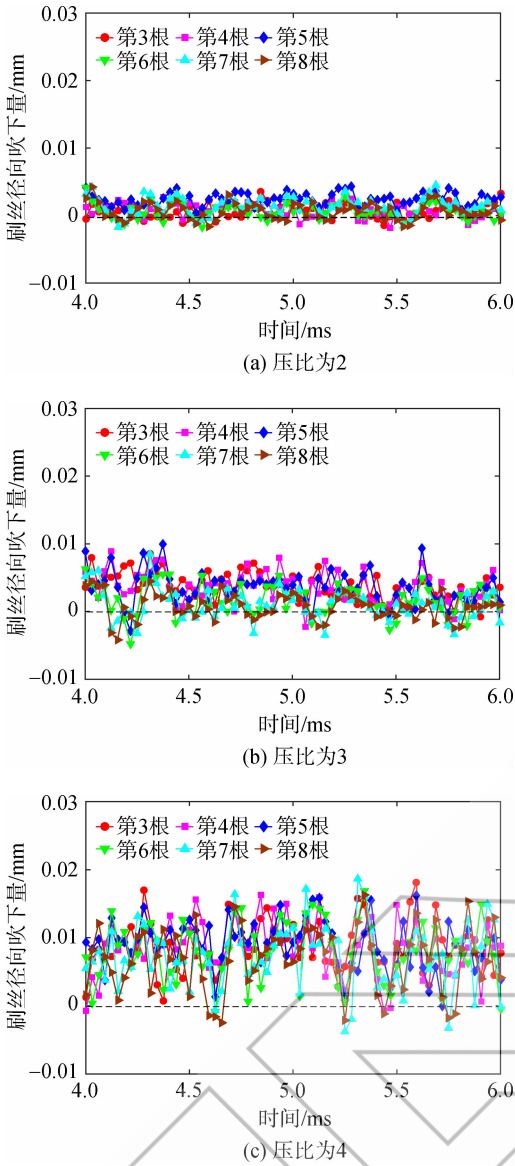


图 14 刷丝径向吹下量随时间的变化规律

Fig. 14 Change of radial blow-down displacements of bristles with time

刷丝束中部刷丝最大径向吹下量分别为 0.004、0.010 mm 和 0.019 mm。通过对比三种进出口压比下的刷丝径向吹下量变化规律可以发现,刷式密封吹下效应随着进出口压比的增加而增强,且刷丝径向吹下量的变化范围也随着进出口压比的增加而增大,这主要是由于随着进出口压比的增加,刷丝受到了更强的导致刷丝产生吹下效应的气流力和刷丝间接触力的作用,同时刷丝的扰动更为剧烈,因此随着进出口压比的增加,刷式密封刷丝在具有更大径向吹下量的同时也伴随着更强的刷丝扰动。

3.5 刷式密封吹下效应诱发机理分析

图 15 给出了刷式密封吹下效应诱发初始条

件,其中图 15(a)给出了在进出口压比为 4 的工况下,后挡板径向末端位置处的刷丝束区域压力分布(未考虑刷丝变形), G 为后挡板末端位置径向截面,图 15(b)给出了刷式密封吹下效应力学模型。

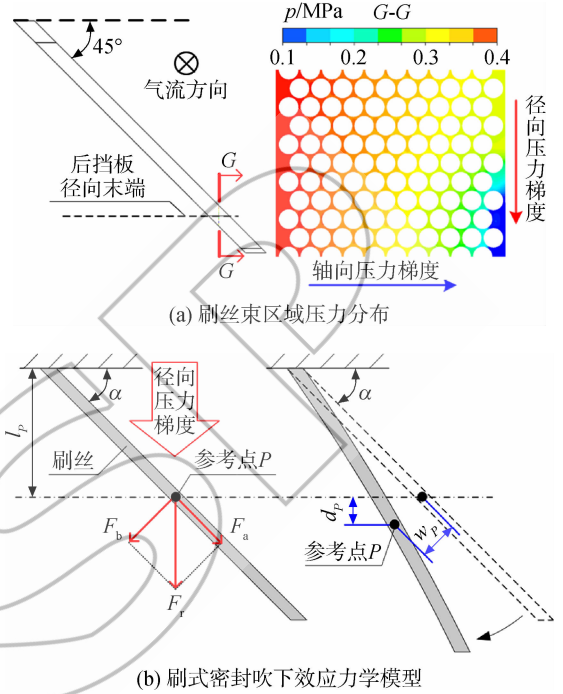


图 15 刷式密封吹下效应诱发初始条件

Fig. 15 Induced initial condition of blow-down effect of brush seals

从图 15 中可以看出,刷丝束区域存在明显的轴向压力梯度和径向压力梯度,正是由于径向压力梯度的存在,且刷丝具有一定的周向倾角 α ,故刷丝在径向气流力的作用下会产生吹下效应。

选取一参考点 P 进行受力分析可知,径向气流力 F_r 可分解为垂直刷丝轴线的气流力 F_b 和沿刷丝轴线的气流力 F_a ,其中气流力 F_b 可表示为

$$F_b = F_r \cos \alpha \quad (6)$$

刷丝会在气流力 F_b 的作用下以固定端为中心产生弯曲变形,则点 P 处的挠度 w_p 可表示为^[22]

$$w_p = \frac{F_b}{3EI} \left(\frac{l_p}{\sin \alpha} \right)^3 = \frac{F_r l_p^3}{3 \sin^2 \alpha \tan \alpha EI} \quad (7)$$

式中 l_p 为参考点 P 与刷丝固定端的径向距离, E 为刷丝材料的弹性模量, I 为刷丝截面惯性矩。

故点 P 处的刷丝径向变形量 d_p 可表示为

$$d_p = w_p \cos \alpha = \frac{F_r l_p^3}{3 \sin \alpha \tan^2 \alpha EI} \quad (8)$$

结合以上分析可知,刷丝具有一定的周向倾角和刷丝束区域的径向压力梯度为诱发刷式密封

吹下效应的初始条件。由于刷丝周向倾角的变化范围为 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$, 根据式(8)分析可知, 增大刷丝周向倾角可以减小刷丝径向吹下量即减弱刷式密封吹下效应。

综上对刷式密封吹下效应的研究分析, 本文总结了刷式密封吹下效应诱发机理。图 16 给出了刷式密封吹下效应诱发机理流程图。

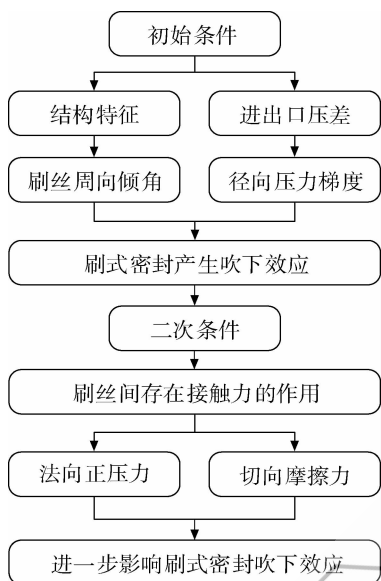


图 16 刷式密封吹下效应诱发机理分析技术路线图

Fig. 16 Technology roadmap of analysis on the induced mechanism of blow-down effect of brush seals

从图 16 中可以看出, 刷式密封吹下效应的诱发初始条件分为两方面, 一是刷式密封刷丝在结构上具有一定的周向倾角, 二是在进出口压差的作用下刷丝束区域存在的径向压力梯度, 在两者的共同作用下诱发刷式密封产生吹下效应。结合刷丝变形特性分析可知, 刷式密封刷丝在气流力的作用下会产生接触变形, 会对吹下效应造成影响, 故诱发刷式密封吹下效应的二次条件是刷丝间存在接触力的作用, 其分为法向正压力和切向摩擦力, 两者共同影响着刷丝的变形, 因此会进一步影响刷式密封吹下效应。

4 结 论

本文建立了基于 ALE 流固耦合方法的刷式密封吹下效应数值模型, 分析了刷丝变形特性, 量化分析了刷丝径向吹下量, 揭示了刷式密封吹下效应诱发机理, 得出以下结论:

1) 刷式密封刷丝径向间隙的改变是刷丝轴向变形和吹下效应共同作用的结果, 其中吹下效

应会减小刷丝径向间隙, 考虑吹下效应可以更加准确地计算泄漏量。

2) 刷式密封吹下效应是伴随刷丝扰动的非定常变形形式, 刷丝自由端相比于后挡板径向中部和末端的刷丝截面, 其吹下效应和刷丝扰动均较强。

3) 随着进出口压比的增加, 刷式密封刷丝在具有更大径向吹下量的同时也伴随着更强的刷丝扰动, 在本文研究工况下, 进出口压比为 2、3 和 4 下的刷丝束中部刷丝最大径向吹下量分别为 0.004、0.010 mm 和 0.019 mm。

4) 刷丝具有一定的周向倾角和刷丝束区域的径向压力梯度是诱发刷式密封吹下效应的初始条件, 且刷丝间的法向正压力和切向摩擦力会进一步影响吹下效应。增大刷丝周向倾角可以减弱刷式密封吹下效应。

参考文献:

- [1] HILDEBRANDT M, SCHWITZKE C, BAUER H J. Experimental investigation on the influence of geometrical parameters on the frictional heat input and leakage performance of brush seals[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2019, 141(4): 042504. 1-042504. 10.
- [2] DEVILLE L, ARGHIR M. Experimental analysis of small diameter brush seals and comparisons with theoretical predictions[J]. Journal of Tribology, 2019, 141(1): 012201. 1-012201. 10.
- [3] DEVILLE L, ARGHIR M. Theoretical analysis of brush seals leakage using local computational fluid dynamics estimated permeability laws[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2018, 140(6): 062803. 1-062803. 12.
- [4] RABEN M, FRIEDRICH S, HELMIS T, et al. Brush seals used in steam environments-chronological wear development and the impact of different seal designs[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2016, 138(5): 051901. 1-051901. 14.
- [5] RUGGIERO E J. Influence of friction on the blow-down behavior of an aramid fiber brush seal[R]. ASME Paper 2012-GT-69329, 2012.
- [6] 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)
- [7] 李军, 晏鑫, 李志刚. 热力透平密封技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2015.
- [8] 黄首清, 索双富, 李永健, 等. 几何参数对刷式密封泄漏和刷丝尖端力的影响[J]. 航空动力学学报, 2016, 31(1): 196-202.
HUANG Shouqing, SUO Shuangfu, LI Yongjian, et al. In-

- fluences of geometric parameters on leakages and bristle tip forces in brush seals[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2016, 31(1): 196-202. (in Chinese)
- [9] DOGU Y. Investigation of brush seal flow characteristics using bulk porous medium approach[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2005, 127(1): 136-144.
- [10] DOGU Y, AKSIT M F, DEMIROGLU M, et al. Evaluation of flow behavior clearance brush seal[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2008, 130(1): 012507. 1-012507. 9.
- [11] LELLI D, CHEW J W. Combined 3D fluid dynamics and mechanical of brush seal[J]. *Journal of Tubomachinery*, 2006, 128(1): 188-195.
- [12] 孙丹, 刘宁宁, 胡广阳, 等. 考虑刷丝变形的刷式密封流场特性与力学特性流固耦合研究[J]. *航空动力学报*, 2016, 31(10): 2544-2553.
- SUN Dan, LIU Ningning, HU Guangyang, et al. Fluid-structure interaction investigation on the flow field and mechanical characteristic in brush seals with bristle deflection[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2016, 31(10): 2544-2553. (in Chinese)
- [13] 马登骞, 张元桥, 李军, 等. 考虑刷丝变形的后夹板结构对刷式密封泄漏和传热特性影响的研究[J]. *西安交通大学学报*, 2019, 53(9): 15-25.
- MA Dengqian, ZHANG Yuanqiao, LI Jun, et al. Effects of backing plate structure on leakage and heat transfer characteristics of brush seals considering bristle pack deformation[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, 53(9): 15-25. (in Chinese)
- [14] FRANCESCHINI G, JONES T V, GILLESPIE D R H. Improved understanding of blow-down in filament seals[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2010, 132(4): 041004. 1-041004. 10.
- [15] CRUDGINGTON P F, BOWSHER A. Brush seal blow down[R]. AIAA 2003-4697, 2003.
- [16] SCHWARZ H, FRIEDRICHS J, FLEGLER J. Axial inclination of the bristle pack, a new design parameter of brush seal for improved operational behavior in steam turbines [R]. ASME Paper 2014-GT-26330, 2014.
- [17] 张元桥, 王妍, 晏鑫, 等. 刷式密封泄漏流动及传热特性的研究: 第一部分 泄漏特性[J]. *工程热物理学报*, 2017, 38(3): 482-489.
- ZHANG Yuanqiao, WANG Yan, YAN Xin, et al. Investigations on the leakage and heat transfer characteristics of brush seal: Part 1 leakage characteristics[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2017, 38(3): 482-489. (in Chinese)
- [18] 张元桥, 闫嘉超, 李军. 考虑闭合效应的刷式密封泄漏特性研究[J]. *润滑与密封*, 2017, 42(4): 36-42.
- ZHANG Yuanqiao, YAN Jiachao, LI Jun. Investigations on leakage flow characteristics of brush seal with consideration of blow down effect[J]. *Lubrication Engineering*, 2017, 42(4): 36-42. (in Chinese)
- [19] 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)
- [20] 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)
- [21] 李国勤, 孙丹, 刘永泉, 等. 基于 ALE 流固耦合方法的刷式密封泄漏特性理论与实验研究[J]. *推进技术*, 2020, 41(8): 1850-1860.
- LI Guoqin, SUN Dan, LIU Yongquan, et al. Theoretical and experimental study on leakage characteristics of brush seal based on ALE fluid-structure interaction[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(8): 1850-1860. (in Chinese)
- [22] 刘鸿文. 材料力学[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2011.

(编辑: 李岩梅、张雪)