

文章编号: 1000-8055(2023)09-2107-09

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20210730

航空发动机篦齿流动熵产分析及系统 低熵产篦齿构造

刘晓静^{1,3}, 丁水汀², 邱 天³, 刘传凯³, 李 果¹, 赵志高⁴

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 中国民航大学, 天津 300300;

3. 北京航空航天大学 航空发动机研究院, 北京 100191;

4. 中国航空研究院 技术研究四部, 北京 100012)

摘 要: 建立篦齿熵产分析的数值模拟方法并经试验验证方法的准确性,进而揭示了台阶式篦齿的倾角、齿顶宽度、齿高、台阶高度变化下的流动熵产机理及导致熵产的主要流动特征。在此基础上最终从系统熵产视角对篦齿进行优化和特性分析。结果表明:篦齿齿顶区域相对耗散强度较大,导致该区域存在的齿顶涡具有较强增阻作用,对于提升篦齿局部熵产,降低系统熵产有重要作用。通过主动构造齿顶涡(增阻涡)可以实现增强篦齿局部熵产、减小泄漏量的设计目标。优化后的台阶式篦齿结构较初始台阶齿的封严性能提升 24%。

关 键 词: 篦齿; 熵产; 增阻涡; 构型; 封严性能

中图分类号: V232.3

文献标志码: A

Analysis of flow entropy generation in aero-engine grate and construction of low entropy generation grate

LIU Xiaojing^{1,3}, DING Shuiting², QIU Tian³, LIU Chuankai³, LI Guo¹, ZHAO Zhigao⁴

(1. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

3. Research Institute of Aero-Engine, Beihang University, Beijing 100191, China;

4. The Fourth Departments of Technical Research,
Chinese Aeronautical Establishment, Beijing 100012, China)

Abstract: The numerical simulation method of grate entropy generation analysis was established, and the accuracy of the method was verified by tests. Then, the flow entropy generation mechanism and the main flow characteristics leading to entropy generation under the changes of inclination angle, tooth top width, tooth height and step height of stepped grate were revealed. On this basis, the grate was optimized and analyzed from the perspective of system entropy generation. The results showed that the relative dissipation intensity in the top region of the grate was large, resulting in strong drag increasing effect of the top vortex in this region, and contributing a lot to improving the local entropy generation of the grate and reducing the system entropy generation. The design goal of enhancing the local entropy generation of the grate and reducing the leakage can be achieved by actively constructing the tooth top

收稿日期: 2021-12-27

作者简介: 刘晓静(1984—),女,助理研究员,博士生,主要从事航空发动机安全性与适航研究。

通信作者: 李果(1983—),男,副教授、博士生导师,博士,主要从事航空发动机安全性与适航研究。E-mail: 09869@buaa.edu.cn

引用格式: 刘晓静, 丁水汀, 邱天, 等. 航空发动机篦齿流动熵产分析及系统低熵产篦齿构造[J]. 航空动力学报, 2023, 38(9): 2107-2115. LIU Xiaojing, DING Shuiting, QIU Tian, et al. Analysis of flow entropy generation in aero-engine grate and construction of low entropy generation grate[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(9): 2107-2115.

vortex (drag increasing vortex); the sealing performance of the optimized stepped grate structure was 24% higher than that of the initial stepped teeth.

Keywords: grate; entropy generation; drag increasing vortex; configuration; sealing performance

篦齿是航空发动机空气系统中非常典型的流体封严结构,通常用于由于旋转轴有较大的位移、严酷的工作条件或密封材料的限制而不能使用接触式密封结构的地方,如:高低压转静件间隙之间,用以降低流体从高压区向低压区的泄漏量,利用其特殊的几何结构,形成了一个曲折的通道,通过流体流动时的齿尖节流效应和齿腔涡流等增大了流体流通的阻力,以达到降低泄漏量的目的,因而篦齿封严也被称为迷宫密封。图 1 给出 CFM56-7 型号发动机涡轮盘腔的空气系统封严结构局部示意图,从图中可以看出篦齿结构广泛应用于发动机的空气系统之中。美国联邦航空局和航空学会指出未来航空发动机性能的提高有一半将归功于发动机内部封严技术的提高和泄漏量的降低^[1-3]。而在商用飞机中,更先进的密封技术可以降低发动机 3% 到 5% 的成本,同时还能降低 10% 左右的航空煤油消耗量,相应的排放量也会相应降低 50% 左右,发动机的噪声也能得到大幅的减少,因此针对篦齿结构的相关研究工作对于提升发动机整体性能具有极为重要的意义。

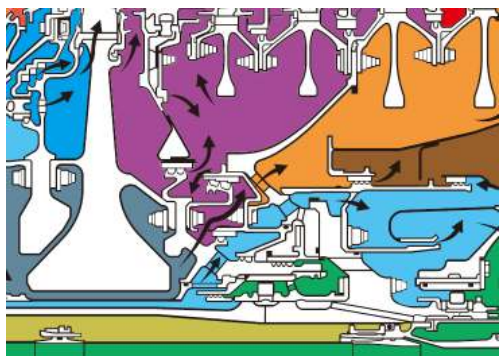


图 1 CFM56-7 发动机涡轮盘腔空气系统封严结构局部示意图

Fig. 1 Partial schematic diagram of sealing structure of CFM56-7 engine turbine disk cavity air system

国内外有诸多学者针对篦齿结构进行了深入的研究和探讨。从研究方法上来讲,在早期的研究当中,主要以热力学的理论分析为主要方法。随着科学技术的进步以及计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)的发展,渐渐发展为

以数值模拟和试验分析为主要研究手段。从研究内容上来看,主要分为针对某种特定篦齿结构的封严特性相关影响因素的探究,以及不同类型的篦齿结构封严特性的横向比较。Rhode 与 Demko 等^[4-6]运用有限差分法对直通型的篦齿封严结构进行了数值研究。Rhode 等^[7]引入有效黏度,对 standard $k-\varepsilon$ 的湍流模型进行了一些修正,研究了直通型篦齿封严结构内的可压流动。Rhode 和 Hibbs^[8-10]研究了尺寸结构变化对篦齿结构封严性能的影响。这些研究工作主要集中在对篦齿封严结构的泄漏特性^[11-13]和风阻特性^[14-24],并以此为基础开展结构的优化设计。但是值得注意的是,从机理上而言,篦齿流道的突扩和突缩消耗流体的动能带来熵增,从而增加流阻以限制或阻止流体泄漏;同时当气流与旋转部件接触时,由于旋转对流体做功,导致转子高品质动能耗散,带来熵增。即篦齿的熵产主要来自两方面,分别是总压损失和风阻温升^[25]。总压损失换取封严的效果,风阻温升降低了冷却的效果,需要抑制。上述特征带来了全新的视角去分析篦齿的作用效果及其设计优化。

因此本文由此出发,以航空发动机台阶式篦齿为研究对象,采用 CFD 数值模拟与试验验证相结合的方式,从熵产角度对篦齿流动开展机理分析及流动特征分析,在此基础上进一步从系统低熵产视角对篦齿进行优化和特性分析,实现系统低熵产目标下的篦齿流动熵产分析和流动重构。

1 数值模拟方法及准确性校验

1.1 数值模拟方法、模型及边界条件

本文以常用的下台阶式 5 齿篦齿封严结构作为研究的基础结构(图 2),采用 UG 参数化建模,其相关的篦齿几何参数符号及初始值见表 1 中所示。由于台阶式篦齿和衬套均为轴对称结构,建模过程中为了减小计算量,采用二维轴对称(旋转)模型,使用 ANSYS ICEM 进行非结构化网格划分,由于篦齿齿尖附近的区域是整个篦齿结构中极为关键的流动区域,篦齿的径向间隙对于篦齿的泄漏量有着决定性的影响,因此该区域的计算精度

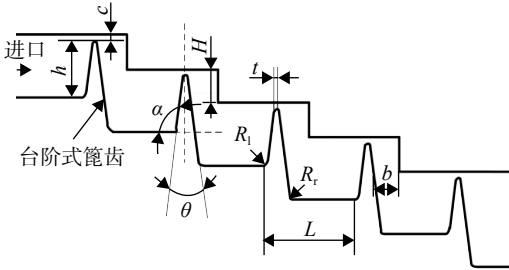


图 2 台阶式篦齿几何结构
Fig. 2 Stepped grate geometry

表 1 篦齿几何参数符号及初始值
Table 1 Symbols and initial values of geometric parameters of grate

几何参数	初始值
台阶高度 H/mm	3
齿间距 L/mm	8
齿高 h/mm	5
齿顶宽度 t/mm	0.3
篦齿倾角 $\alpha/(\text{°})$	90
篦齿前后侧夹角 $\theta/(\text{°})$	15
径向间隙 c/mm	0.36
轴向间隙 b/mm	3
迎风侧齿根倒圆半径 R_r/mm	0.5
背风侧齿根倒圆半径 R_l/mm	0.5

对于整个篦齿封严性能的计算结果准确性有着极为关键的影响。在建模过程中,针对齿尖敏感区域进行了局部网格加密,以保证计算精度,对影响网格数量以及计算结果的参数的全局最小网格尺寸和齿尖区域局部加密的最小网格尺寸进行网格无关性的计算,计算结果如图 3、图 4 所示。最终选定 CFD 模型中齿尖区域局部加密网格的最小尺寸为 0.03 mm,网格数量在 20 万左右。通过

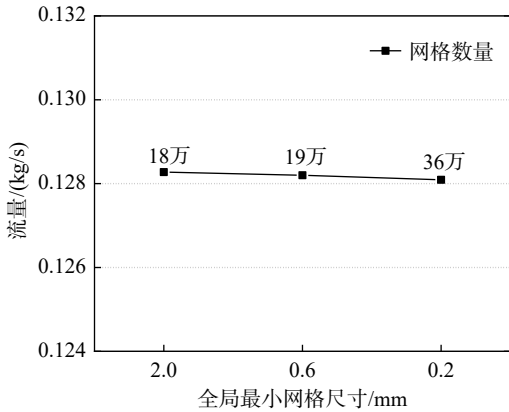


图 3 全局最小网格尺寸无关性计算
Fig. 3 Calculation of global minimum mesh size independence

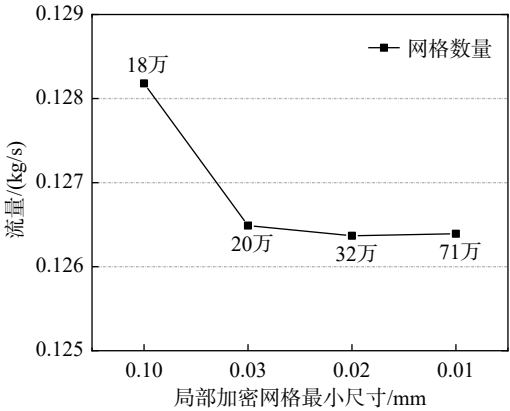


图 4 局加密网格最小尺寸无关性计算
Fig. 4 Calculation of minimum size independence of local refined mesh

设置附面层网格的方式来模拟篦齿结构中壁面边界层的流动,附面层网格层数设置为 5 层,第 1 层网格厚度为 0.006 mm,增长率为 1.2。网格划分及附面层网格、齿尖网格局部加密如图 5 所示。分析中,基于 ANSYS Fluent 工具的有限体积法求解三维非定常可压 Navier-Stokes(N-S)方程,完成篦齿的流动数值模拟分析。其中,时间离散为隐式 2 阶格式,空间离散为 2 阶迎风格式,湍流模型选用 shear-stress-transport(SST) 湍流模型;进口处设置压力进口条件,出口设置为压力出口条件,壁面设置为无滑移绝热壁面,计算工况中的出口压力为 101 325 Pa,进出口压比为 1.5,进出口温度均为 300 K。

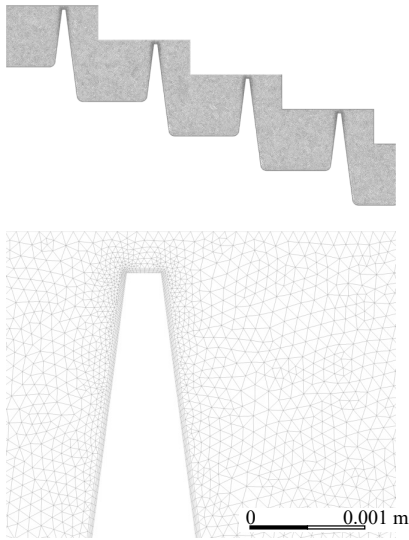


图 5 网格划分及附面层网格、齿尖网格局部加密
Fig. 5 Mesh generation and local densification of boundary layer mesh and tooth tip mesh

1.2 数值模拟工作的准确性校验

为验证数值模拟模型的准确性,本研究与相关试验结果进行对比验证。图 6 给出了试验系统的原理示意图,其中 m 为质量流量, T 为进口温度, p_{in} 为进口压力, p_{out} 为出口压力。由外部空压站提供的气流依次经过进气闸阀、限压阀、过滤器、稳压箱、冷干机、精密 3 级过滤器,再通过电动调节阀调节流量后进入到篦齿试验系统^[26]。其主要通过向篦齿试验段的前腔充气来创造篦齿结构不同的进出口压比条件,获取不同进出口压比下的流量数据,篦齿的出口直接向大气排气。图 7 给出了试验中所采用的台阶式篦齿试验件结构图,其篦齿几何参数见表 2,数值模拟模型采用相同的几何参数。

根据试验与数值模拟结果对比,换算流量系数的误差小于 5%,可以验证本文所建立的篦齿结构的数值仿真模型具有较高的准确性,如图 8 所示。

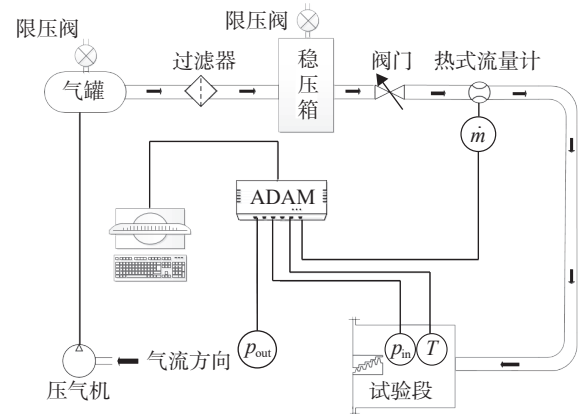


图 6 台阶式篦齿二维静止试验系统
Fig. 6 Two-dimensional static test system for stepped grate

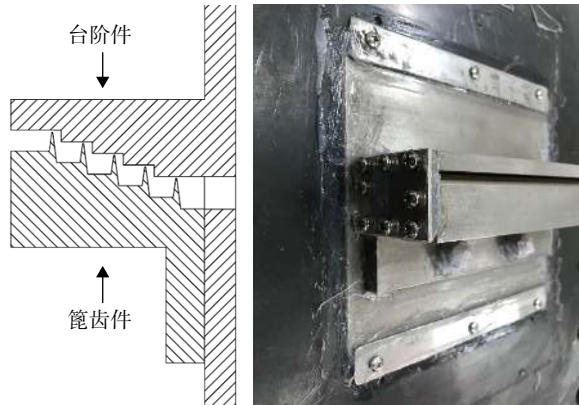


图 7 台阶式篦齿试验件模型
Fig. 7 Test piece model of stepped grate

表 2 试验中台阶式篦齿结构几何参数
Table 2 Geometric parameters of stepped grate structure in test bench

几何参数	取值
台阶高度 H/mm	3
齿间距 L/mm	6
齿高 h/mm	6
齿顶宽度 t/mm	0.8
篦齿倾角 $\alpha/(\text{°})$	90
篦齿前后侧夹角 $\theta/(\text{°})$	16
径向间隙 c/mm	0.6
轴向间隙 b/mm	2.4
迎风侧齿根倒圆 R_f/mm	0.5
背风侧齿根倒圆 R_b/mm	0.5

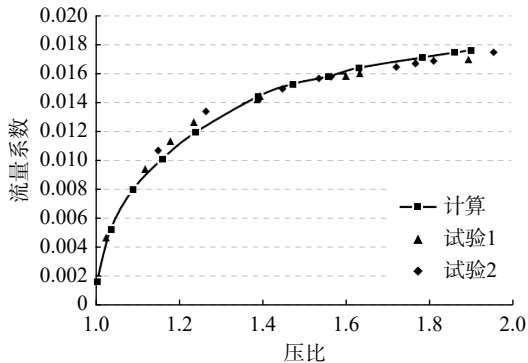


图 8 验证性试验结果与数值计算结果比对
Fig. 8 Comparison between confirmatory test results and numerical calculation results

2 篦齿流动熵产分析

根据经验证的篦齿数值模拟方法开展的仿真分析结果可以揭示篦齿流动熵产的产生机理:当篦齿结构内流体流经篦齿时(图 9),齿尖处来流有较强节流效应,形成速度较高的气流,当气流

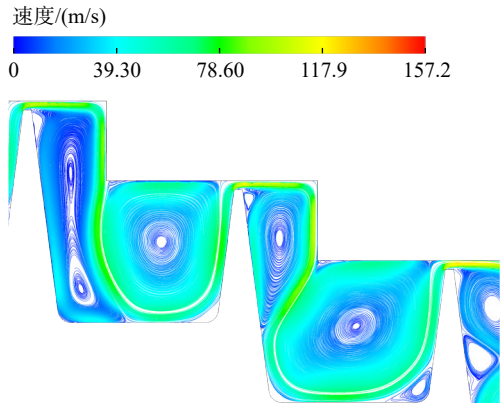


图 9 篦齿内流线分布
Fig. 9 Streamline distribution in grate

流过篦齿后,突然发生膨胀并以一定的角度扩散,在齿腔内流体流动阻力和壁面摩擦阻力的作用下,在篦齿腔内形成涡流,而后流体则以一定初速流到下游篦齿。在此过程中,流动中的耗散熵产来源于流体黏性产生的耗散,导致机械能向内能不可逆转化。图10给出了篦齿结构局部熵产分布,其中齿顶区域存在相对耗散强度较大的区域,即该区域存在较强涡流,该涡流可阻碍齿尖气流流通,具有较强增阻作用。

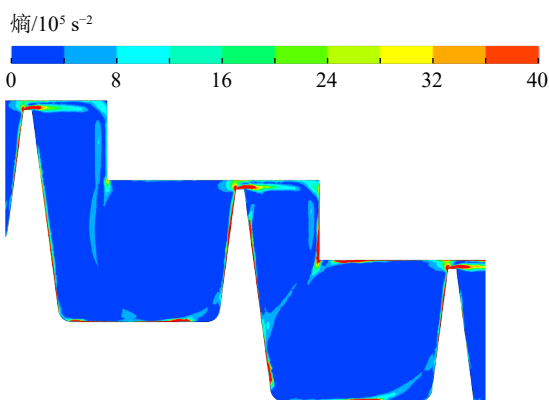


图10 篦齿内局部熵产分布

Fig. 10 Distribution of local entropy generation in grate

3 篦齿几何参数对流动熵产的影响规律分析

为分析篦齿几何参数的影响,对篦齿倾角、齿顶宽度、齿高、台阶高度(见图2及表1表示)变化下流动熵产机理及导致熵产的主要流动特征开展研究,为后续结构优化研究奠定基础。

3.1 篦齿倾角变化对流动熵产的影响规律

图11、图12分别显示出了在不同的倾角篦

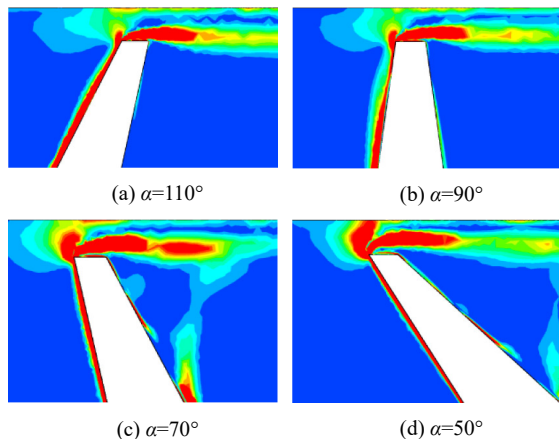


图11 篦齿倾角变化齿顶局部熵产分布图

Fig. 11 Distribution diagram of local entropy generation at the tooth top with grate inclination angle change

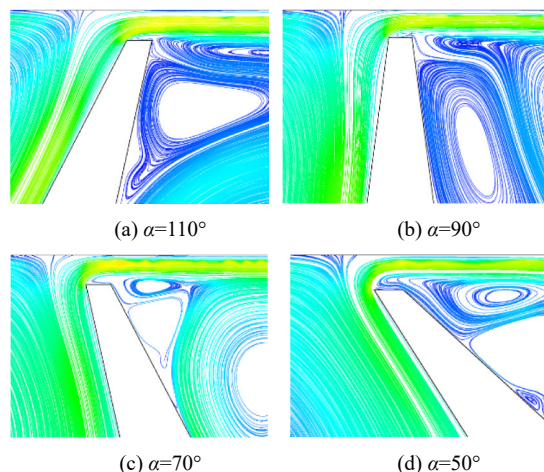


图12 篦齿倾角变化的流线图

Fig. 12 Streamline diagram of grate inclination angle change

齿的齿顶局部相对耗散强度分布图和流线图。可以看出,当篦齿前倾($\alpha < 90^\circ$)时,相对于篦齿竖直($\alpha = 90^\circ$)的情况,齿顶增阻涡结构明显增大,几乎占据整个齿顶通道,齿顶区域耗散熵产增强,这对于篦齿封严是有利的;当篦齿后倾($\alpha > 90^\circ$)时,齿顶增阻涡结构逐步减弱,并脱落转移到了齿背低半径处,在齿间腔内形成了两个涡系结构,齿顶区域耗散熵产减弱,封严效果降低。

3.2 齿顶宽度变化对流动熵产的影响规律

图13、图14分别显示出了在不同齿顶宽度篦齿的齿顶局部熵产分布图和流线图。可以看出,齿顶宽度影响篦齿射流角度,从而影响齿尖区域的间隙压缩效应。齿宽较小时,齿腔内气体流入齿尖后流动方向迅速改变,出口处流通面积迅速增大,流体速度方向与大小急剧变化,流体之间相互摩擦耗散熵产增大,篦齿局部比熵产增大。

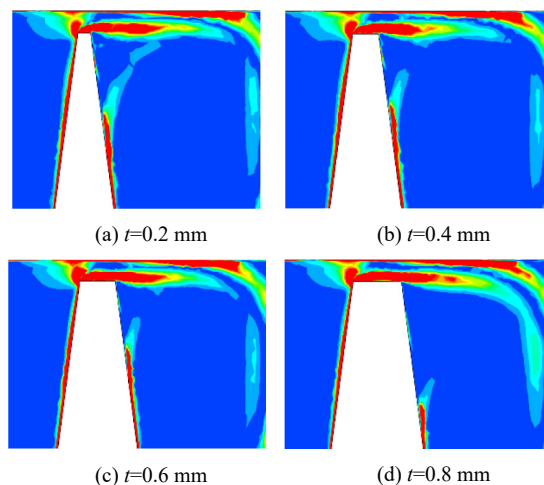


图13 齿顶宽度变化齿顶局部熵产分布图

Fig. 13 Distribution diagram of local entropy generation at tooth top with tooth top width change

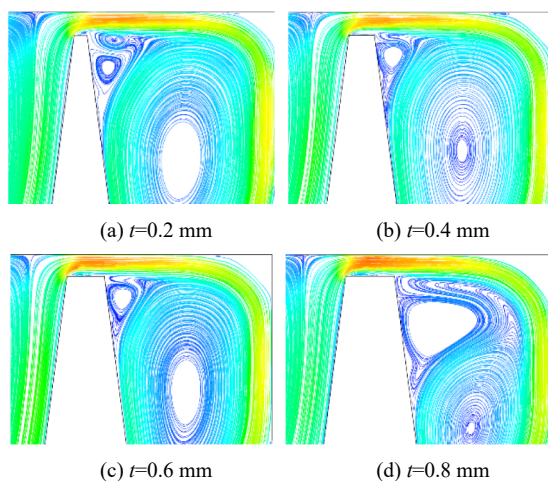


图 14 齿顶宽度变化的流线图

Fig. 14 Streamline diagram of tooth top width change

随着齿宽的增大, 流体流经齿尖时间延长, 有利于调节流体速度方向, 流体耗散熵产减小, 篦齿局部比熵产减小。

3.3 齿高变化对流动熵产的影响规律

图 15 和图 16 分别显示出了不同齿高的篦齿局部熵产分布图和流线图, 从图中可以看出, 齿高对于齿顶涡流的形成影响明显。当齿高为 4 mm 时, 在齿后形成多个涡, 有效的阻挡了气流的流通, 局部耗散熵产增大; 但当齿高继续增高时, 齿顶涡脱落并在齿后重新汇聚形成一个大涡, 局部耗散熵产减小, 阻碍能力减弱。

3.4 台阶高度变化对流动熵产的影响规律

图 17 和图 18 分别显示出了不同的台阶高度篦齿的局部熵产分布图和流线图。可以看出台阶处阻断流体的流动, 并在齿腔中形成新的涡旋,

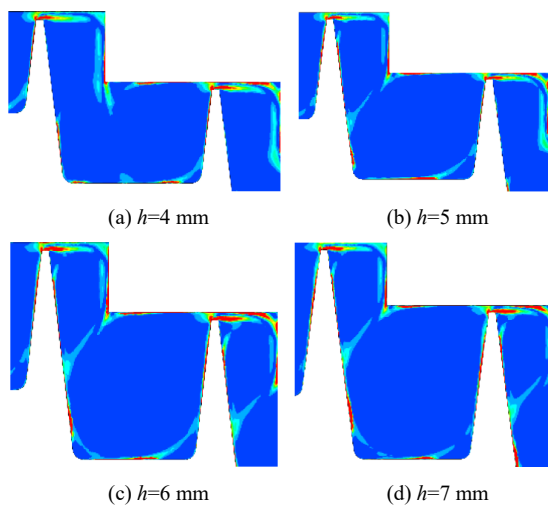


图 15 齿高变化局部熵产分布图

Fig. 15 Distribution diagram of local entropy generation with tooth height change

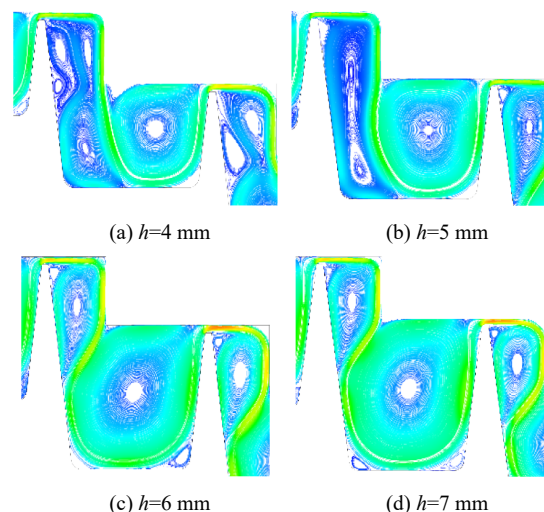


图 16 齿高变化的流线图

Fig. 16 Streamline diagram of tooth height change

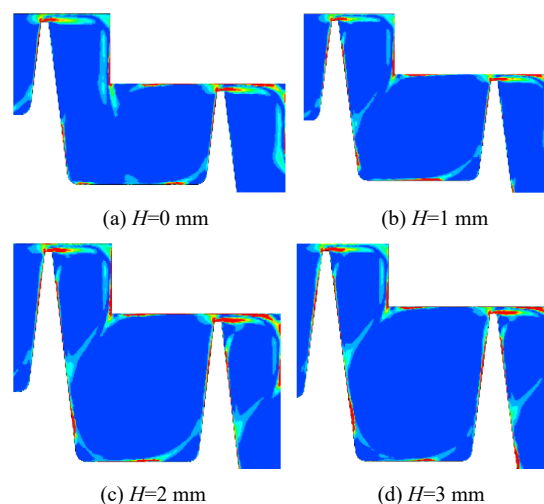


图 17 台阶高度变化局部熵产分布图

Fig. 17 Distribution diagram of local entropy generation with step height change

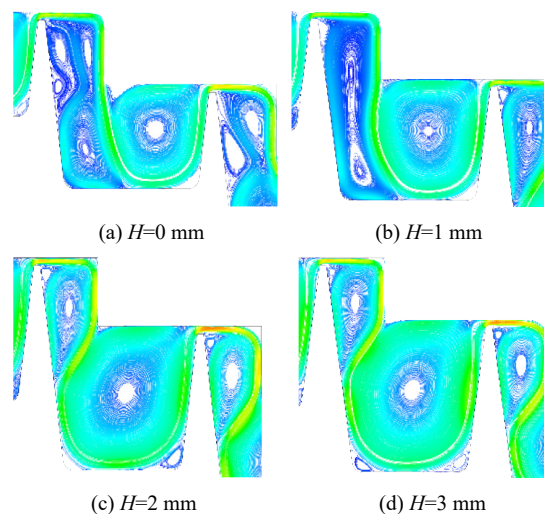


图 18 台阶高度变化的流线图

Fig. 18 Streamline diagram of step height change

增强耗散熵产：当台阶高度为 0 mm 时，齿尖由于没有涡的阻挡，气流通畅地通过齿顶通道并流向下一个齿；当台阶高度为 1 mm 时，由于台阶的阻挡，气流直接冲击篦齿台阶改变流动方向，并分流形成靠近齿后的多个小涡和一个方向相反的大涡，耗散熵产增强，篦齿局部比熵产增大；台阶高度继续增高时，齿后形成一个大涡，耗散熵产减弱，篦齿局部比熵产减小。

4 系统低熵产篦齿优化分析

4.1 优化目标的确定

在获得篦齿几何参数对流动熵产的影响机理和规律的基础上，本研究以某型航空发动机整机空气系统的高压压气机引气流路(图 19)为对象，在系统环境下开展低熵产篦齿优化析研究。其中，前期研究已经表明，由于该型航空发动机的卸荷腔排气篦齿(02_11)是局部熵产最高的元件，也是影响整机系统总熵产的关键敏感元件：当单独将该篦齿泄漏量增大 1% 时，元件局部比熵产减小 0.17 kJ/K，系统熵产增大 2.33 kJ/K。因此，本研究针对该篦齿开展优化工作，而优化目标为：在保证篦齿间隙、进出口压力、进口温度、转速不变的条件，在可接受的三维尺寸下，通过优化篦齿结构，增大篦齿局部比熵产，使篦齿泄漏量最小，得到更低的系统熵产。

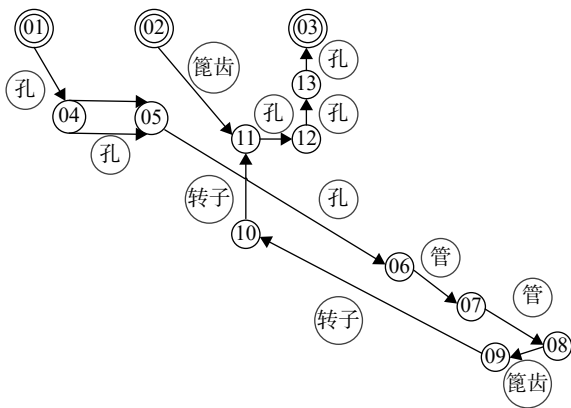


图 19 高压卸荷腔流路

Fig. 19 Flow path of high pressure unloading chamber

4.2 系统低熵产篦齿构型

图 20 给出了根据篦齿几何参数对流动熵产影响规律，通过篦齿倾角、齿顶宽度、齿高、台阶高度等几何参数变化及对应的齿顶涡(增阻涡)构造，增大篦齿局部比熵产，获得具有最小泄漏量

的优化篦齿构型，其参数如表 3 所示。

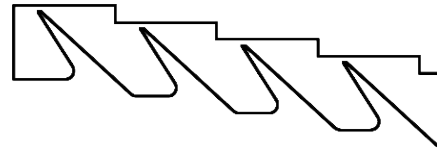


图 20 优化台阶式篦齿几何模型

Fig. 20 Optimizing the geometric model of stepped grate

表 3 优化后台阶式篦齿结构的几何参数取值表

Table 3 Table of geometric parameters for optimized stepped grate structure

几何参数	取值
台阶高度 H/mm	1
齿间距 L/mm	6
齿高 h/mm	4
齿顶宽度 t/mm	0.2
篦齿倾角 $\alpha/(\circ)$	50
篦齿前后侧夹角 $\theta/(\circ)$	15
径向间隙 c/mm	0.36
轴向间隙 b/mm	3
迎风侧齿根倒圆 R_f/mm	0.5
背风侧齿根倒圆 R_b/mm	0.5

在出口压力为 101 325 Pa，进出口压比为 1.5，进出口温度为 300 K 的工况下，将平齿、初始台阶齿、优化台阶齿的计算结果进行对比(表 4)，使用经验证的 CFD 数值模拟方法分析表明：初始台阶齿相比平齿封严性能提升 30%，优化后的台阶式篦齿结构较初始台阶齿的封严性能提升 24%。这一结果的机理在于优化后的结构是气流在齿尖后侧形成了较强的增阻涡结构，篦齿局部比熵产增大，阻碍了气流的流动，达到了封严的效果。图 21 和图 22 所示为优化后的台阶式篦齿流线和熵产分布图。

表 4 设计工况下不同篦齿结构封严性能对比

Table 4 Comparison of sealing performance of different grate structures under designed conditions

篦齿结构	换算流量	性能提升百分比/%
文献 [13] 平齿	0.019 944	
图 2 初始台阶齿	0.014 002 4	30
图 18 优化台阶齿	0.009 695 753	24

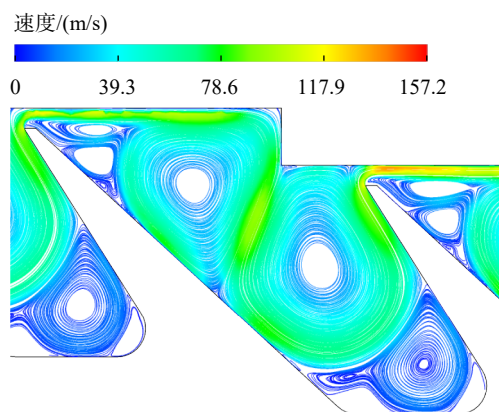


图 21 优化台阶式篦齿流线图

Fig. 21 Streamline diagram of optimized stepped grate

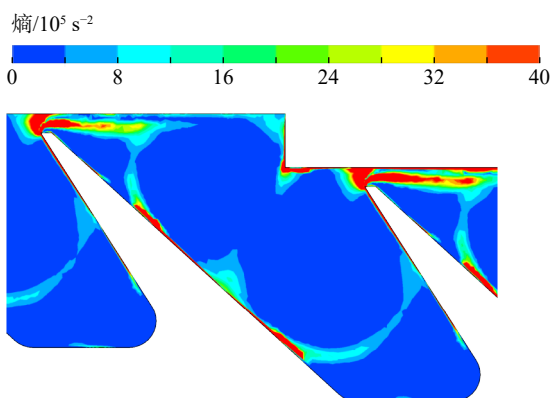


图 22 优化台阶式篦齿熵产分布图

Fig. 22 Distribution diagram of entropy generation of optimized stepped grate

5 结 论

本文主要通过数值模拟的方式, 针对篦齿流动熵产机理进行了研究, 分析了篦齿倾角、齿顶宽度、齿高、台阶高度等几何参数变化对流动熵产的影响规律, 在此基础上进一步从系统低熵产视角对篦齿进行优化和特性分析。

1) 建立篦齿结构的数值仿真模型以及台阶式篦齿结构的试验验证系统, 数值计算结果与试验获得的结果吻合较好, 误差小于 5%。

2) 通过数值模拟的方式结合流场分析了台阶式篦齿的流动熵产机理, 结果表明篦齿齿顶区域存在相对耗散强度较大的区域, 该齿顶涡具有较强的涡流并可阻碍齿尖气流流通, 具有较强增阻作用。

3) 通过构造增阻涡实现减小泄漏量的优化目标, 计算表明优化后的台阶式篦齿结构较初始台阶齿泄漏量减小 24%。

参考文献:

- [1] Federal Aviation Administration, Department of Transportation. Airworthiness standards, aircraft engines: CFR 14 Part 33[S]. Washington DC: Federal Aviation Administration, 2012: 33.1-33.201.
- [2] BUNKER R S. Gas turbine heat transfer: ten remaining hot gas path challenges[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2007, 129(2): 193-201.
- [3] 倪萌, 朱惠人, 裴云, 等. 航空发动机涡轮叶片冷却技术综述[J]. *燃气轮机技术*, 2005, 18(4): 25-33.
NI Meng, ZHU Hui ren, QIU Yun, et al. Overview of the cooling technology of aero-engine turbine blade[J]. *Gas Turbine Technology*, 2005, 18(4): 25-33. (in Chinese)
- [4] RHODE D L, DEMKO J A, TRAEGER U K, et al. Prediction of incompressible flow in labyrinth seals[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1986, 108(1): 19-25.
- [5] DEMKO J A, MORRISON G L, RHODE D L. Effect of shaft rotation on the incompressible flow in a labyrinth seal[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1990, 6(2): 171-176.
- [6] DEMKO J A, MORRISON G L, RHODE D L. The prediction and measurement of incompressible flow in a labyrinth seal[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1989, 111(4): 697-702.
- [7] RHODE D L, SOBOLIK S R. Simulation of subsonic flow through a generic labyrinth seal[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1986, 108(4): 674-680.
- [8] RHODE D L, HIBBS R I. New model for flow over open cavities: Part I model development[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1992, 8(2): 392-297.
- [9] RHODE D L, HIBBS R I. New model for flow over open cavities: Part II assessment for seal leakage[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1992, 8(2): 398-402.
- [10] RHODE D L, HIBBS R I. Clearance effects on corresponding annular and labyrinth seal flow leakage characteristics[J]. *Journal of Tribology*, 1993, 115(4): 699-704.
- [11] PRASAD B, SETHU MANAVAN V, NANJUNDA R N. Computational and experimental investigations of straight-through labyrinth seals[R]. ASME Paper 97-GT-326, 1997.
- [12] DENECKE J, DULLENKOF K, WITTING S. Experimental investigation of the total temperature increase and swirl development in rotating labyrinth seals[R]. ASME Paper GT-2005-68677, 2005.
- [13] STOFF H. Incompressible flow in a labyrinth seal[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1980, 100(4): 817-829.
- [14] WILLENBORG K, KIM S, WITTIG S. Effects of Reynolds number and pressure ratio on leakage loss and heat transfer in a stepped labyrinth seal[R]. ASME Paper 2001-GT-0123, 2001.
- [15] MILLWARD J A, EDWARDS M F. Windage heating of air passing through labyrinth seals[J]. *Journal of Turbomachinery*, 1996, 118(2): 414-419.
- [16] STOCKER H L, COX D M. Aerodynamic performance of conventional and advanced design labyrinth seals with solid-smooth, abradable, and honeycomb lands[R]. NASA CR-135307, 1977.
- [17] RHODE D L. Rub-groove width and depth effects on flow predictions for straight-through labyrinth seals[J]. *Journal of Tribology*, 2004, 126(4): 781-787.
- [18] KALI C N, MUSTHAFA T. The effects of tooth tip wear and its axial displacement in rub-grooves on leakage and windage heating of labyrinth seals with honeycomb lands[R]. AIAA-2007-5736, 2007.

- [19] KUTZ K J, SPEER T M. Simulation of the secondary air system of aero engines[R]. ASME Paper 92-GT-068, 1992.
- [20] ZHANG M, YANG J, XU Wanjun, et al. Leakage and rotordynamic performance of a mixed labyrinth seal compared with that of a staggered labyrinth seal[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, 31(5): 2261-2277.
- [21] JIA X, ZHENG Q, JIANG Y, et al. Leakage and rotordynamic performance of T type labyrinth seal[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 88(5): 22-31.
- [22] NAYAK K C. Effect of rotation on leakage and windage heating in labyrinth seals with honeycomb lands[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2020, 142(8): 081001.1-081001.11.
- [23] SUN D, ZHOU M, ZHAO H, et al. Numerical and experimental investigations on windage heating effect of labyrinth seals[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2020, 33(5): 4020057.1-4020057.9.
- [24] CHARAN N K, DUTTA P. Effect of rub-grooves on leakage and windage heating in straight-through labyrinth seals[J]. *Journal of Tribology*, 2016, 138(2): 022201.1-022201.11.
- [25] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [26] DAI Lu. Study on the improvement of resistance characteristics in stepped labyrinth seals[D]. Beijing: Beihang University, 2019.

(编辑: 陈 越)