

# 旋转双流程叶根弯道流动传热特性数值模拟

尚梦雨<sup>1</sup>, 范青<sup>2</sup>, 张科<sup>1</sup>, 雷蒋<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学 航天航空学院 机械结构强度与振动国家重点实验室, 陕西 西安 710049;  
2. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘要** 旋转带来的叶片内部动-热负荷不均衡性会严重影响透平机械的安全与稳定。为研究旋转数和浮力系数对涡轮动叶片内部通道流动传热特性的影响,应用 CFD 仿真计算方法,分别以光滑和带肋的叶根弯道为对象,在旋转数分别为 0、0.15、0.2、0.25、0.3 和浮力系数分别为 0、0.3、0.4、0.5、0.6 的条件下进行模拟。结果表明:随着旋转数增加,科氏力作用增强,在科氏力指向侧的流动传热得以强化;浮力系数增大,旋转浮升力作用增强,会导致内流通道前后缘面出现双峰流,外流通道前缘面出现流动分离甚至产生回流;综合对比光滑通道和带肋通道,带肋通道的换热强度更大,且受到旋转效应的影响比光滑通道小。

**关键词** 旋转;叶根弯道;流动传热;旋转数;浮力系数;斜肋;数值模拟

**中图分类号** V231.1 **文献标识码** A **文章编号** 1672-9374(2023)02-0042-09

## Numerical simulation of flow and heat transfer characteristics in rotating double process of blade root passage

SHANG Mengyu<sup>1</sup>, FAN Qing<sup>2</sup>, ZHANG Ke<sup>1</sup>, LEI Jiang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;  
2. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract** The imbalance of dynamic and thermal load inside the blade caused by rotation affects the safety and stability of turbomachinery seriously. In order to study the influence of rotation number and buoyancy coefficient on the flow and heat transfer characteristics in the internal passage of rotor blade, smooth and ribbed passages were simulated with CFD simulation under the conditions of rotation number 0, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3 and buoyancy parameter 0, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, respectively. The results show that with the increase of rotation number, Coriolis force is enhanced and the heat transfer in the edge of same direction of Coriolis force is strengthened. With the increase of buoyancy coefficient, the effect of rotary buoyancy force will be enhanced, which will lead to the double peak flow state appeared at the leading and trailing edges of the inflow passage, and the flow separation or the even backflow occurred at the

收稿日期:2022-01-31;修回日期:2022-03-09

基金项目:国家自然科学基金(5177615、52076107);国家科技重大专项(2017-III-0009-0035)

作者简介:尚梦雨(1998—),男,硕士,研究领域为推进系统热端部件传热与冷却。

通信作者:雷蒋(1980—),男,博士,研究领域为推进系统热端部件传热与冷却。

leading edges of the outflow passage. By the comprehensive comparison between the smooth passage and the ribbed passage, the heat transfer intensity in the ribbed passage is higher, and the effect of rotation is less than that of the smooth passage.

**Key words** rotation; blade root passage; flow and heat transfer; rotation number; buoyancy parameter; angled rib; numerical simulation

## 0 引言

高效冷却技术是保证航空发动机、火箭发动机、地面燃气轮机安全与稳定运行的必要手段。内部冷却是涡轮叶片最常用的冷却方式之一,冷却介质流经叶片内部的蛇形弯道,以对流传热的方式吸收叶片热量,降低其温度<sup>[1]</sup>。常见的内部冷却往往通过人工粗糙度的方法,如布置扰流肋片等,以增强湍流掺混,提高换热强度<sup>[2-9]</sup>。

涡轮动叶工作在高转速的条件下,叶片内冷却介质受到科氏力和旋转浮升力的影响,其流动与换热特性与静止状态相比呈现出很大差异<sup>[10]</sup>。Wagner等利用实验的方法,对旋转状态下的径向外流光滑通道和蛇形弯道的传热现象进行了研究,获得了大量的实验数据,发现旋转浮升力对径向外流通道的影响强于内流通道<sup>[11-12]</sup>; Dutta在Wagner等的研究基础上,利用含旋转浮升力和科氏力的湍流模型,对Wagner的实验数据进行大胆的拓展,预测了在更大范围内旋转对流动传热特性的影响规律,并发现了叶片前缘流动分离可以强化传热的现象<sup>[13]</sup>。

邓宏武等对旋转状态下带肋U形通道内的传热现象进行了实验研究,发现通道内各表面的传热特性与流动特性密切相关,其中科氏力在垂直于旋转半径的截面上的不均匀分布是产生传热差异的主要原因<sup>[14]</sup>。邓宏武、程俊华等分别使用实验和数值模拟的方法,研究了高旋转数下内冷通道的传热现象<sup>[15-16]</sup>。郑杰等利用数值模拟的方法,研究了湍流模型对旋转状态下带肋回转通道内部传热特性的影响<sup>[17]</sup>。崔欣超等研究了温度比对旋转直肋双通道传热特性的影响,发现温度比通过改变浮力系数影响流动传热特性,并且在一定程度上抑制传热,不过这种抑制作用在U型通道的两段通道内表现并不一致<sup>[18]</sup>。

然而,前人的研究都主要针对叶顶弯道展开,

对旋转状态下叶根弯道的研究还较为罕见,本文以光滑和带肋的叶根弯道为研究对象,分别在旋转数为0、0.15、0.2、0.25、0.3时,以及固定旋转数为0.25,使浮力系数达到0、0.3、0.4、0.5、0.6的条件下展开数值模拟,分别研究不同旋转数和浮力系数下的流动传热特性,同时,两种通道的对比也可以揭示肋片效应对旋转效应的影响。

## 1 模型与数值方法

本文中主要的无量纲参数如下。

雷诺数为

$$Re = uD_h/(\mu/\rho) \quad (1)$$

式中:  $u$  为冷却气体进口速度, m/s;  $D_h$  为通道水力直径, m;  $\mu$  为冷却气体的动力黏度, Pa·s;  $\rho$  为冷却气体的密度, kg/m<sup>3</sup>。

旋转数为

$$Ro = \omega D_h/u \quad (2)$$

式中  $\omega$  为旋转的角速度, rad/s。

浮力系数

$$Bo = Ro^2(\Delta\rho/\rho)(R/D_h) \quad (3)$$

其中

$$\Delta\rho/\rho = (T_w - T_b)/T_w \quad (4)$$

式中:  $\Delta\rho$  为通道靠近壁面处与通道中部冷却气体的密度差;  $T_w$  与  $T_b$  分别代表这两处的温度, K;  $R$  为叶片的旋转半径, m。

### 1.1 计算模型与边界条件

图1展示了涡轮叶片内部冷却系统的结构,其中叶根弯道的主体部分呈U型,通道宽高比为2:1,在通道入口前增加长为10倍通道水力直径的发展段,以降低入口效应对流动与传热特征的影响。在带肋叶根弯道中,通道上下两侧各对称布置10处矩形肋片,肋片倾斜方向与主流呈45°夹角,如图2所示。

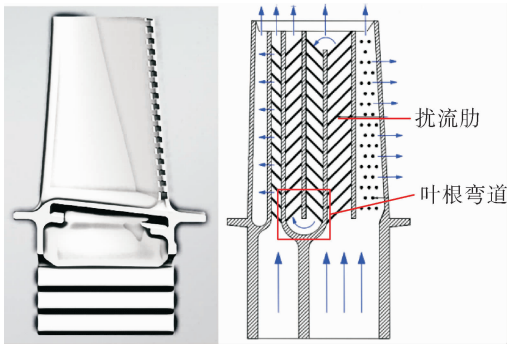


图 1 叶片内部冷却示意图

Fig.1 Schematic diagram of cooling structure inside blade

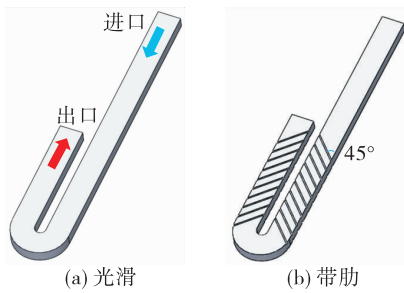


图 2 叶根弯道几何示意图

Fig.2 Geometric diagram of blade root passages

在旋转状态下,通道壁面处和肋片表面处流动较为复杂,需对该处的网格进行加密处理。如图 3 所示,全局采用结构化网格的方式,总体网格质量较高。由于旋转下存在大量的剪切流动,因此采用剪切应力传输 (SST  $k-\omega$ ) 模型,保证近壁面第一层网格的  $y^+$  在 1 以内,判敛标准是动量和能量方程的残差均方根达到  $10^{-5}$ 。

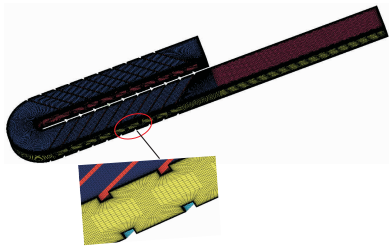


图 3 全局与局部网格示意图

Fig.3 Diagram of global and local mesh

本文采用理想气体作为冷却介质,理想气体的部分性质见表 1。入口边界:速度入口边界条件,模拟在雷诺数为 20 000 条件下进行,入口速度为

18 m/s;入口温度为 20 ℃。出口边界:出口类型为自由流出口,有效避免了出口回流带来的计算错误,相对压力 0 Pa,参考温度 20 ℃。壁面边界:壁面光滑,无滑移,壁温恒定为 60 ℃。计算工况分别如表 2、表 3 所示。旋转状态如图 4 所示。

表 1 理想气体热物性参数

Tab.1 Properties of ideal air

热物性参数	数值
进气密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.204
导热系数 $k / [\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$	0.026 1
定容热容 $C_V / [\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$	1 004. 4
动力黏度 $\mu / (10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s})$	1.831
普朗特数 $Pr$	0.704 62

表 2 工况 1:改变旋转数

Tab.2 Operating condition 1: different rotation numbers

旋转数	转速/ $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$
0.00	0
0.15	1 526
0.20	2 034
0.25	2 542
0.30	3 051

表 3 工况 2:改变浮力系数

Tab.3 Operating condition 2: different buoyancy parameters

浮力系数	旋转半径/m
0.0	0.00
0.3	0.68
0.4	0.90
0.5	1.13
0.6	1.35

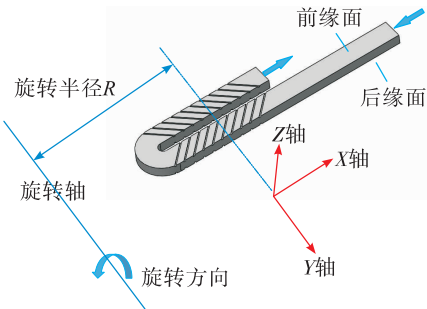


图 4 旋转状态示意图

Fig.4 Diagram of rotating state

## 1.2 无关性验证与数据对比

无关性验证分别在壁面第一层网格高度为0.050、0.010、0.005、0.002 mm的条件下进行,对光滑通道,所对应的网格数分别为 $1.01 \times 10^6$ 、 $2.12 \times 10^6$ 、 $2.70 \times 10^6$ 、 $3.65 \times 10^6$ ,带肋通道对应网格数达到 $2.09 \times 10^6$ 、 $3.86 \times 10^6$ 、 $4.97 \times 10^6$ 、 $6.56 \times 10^6$ 。在后处理时,按照图5所示的方式将通道划分为18个区域分别求取平均值,在静止状态下,得到不同网格密度时光滑通道和带肋通道近壁面的沿程 $Nu/Nu_0$ 分布如图6与图7所示。



图5 通道近壁面沿程区域分布

Fig.5 Area distribution near the wall along the passage

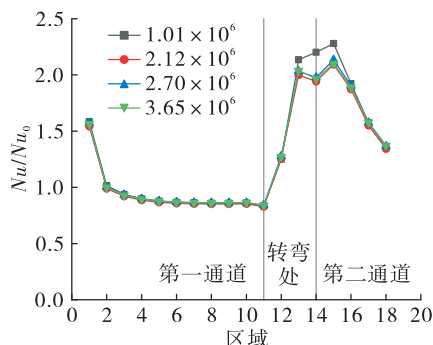


图6 光滑通道网格无关性验证

Fig.6 Verification of grid independence in smooth passage

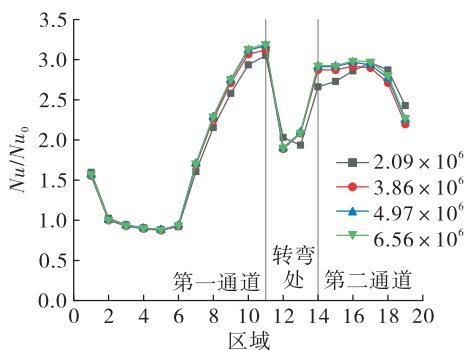


图7 带肋通道网格无关性验证

Fig.7 Verification of grid independence in ribbed passage

当网格数量分别达到 $2.70 \times 10^6$ 和 $4.97 \times 10^6$ 时,继续加密网格,对结果的影响不大,因此最终确定光滑通道和带肋通道的网格数量分别为 $2.70 \times 10^6$ 和 $4.97 \times 10^6$ 。

为验证模拟的可行性,故建立了与Wagner在1991年建立的叶顶弯道实验<sup>[12]</sup>相一致的物理模型,在雷诺数为25 000、进气温度为25℃、恒定壁温为70℃、旋转半径为0.828 m、旋转数为0.24的条件下进行数值模拟,并将实验结果和数值模拟的沿程 $Nu/Nu_0$ 的分布结果进行对比,如图8所示。由图8可知,只有在转弯处模拟结果与实验存在较大差别,这是由于转弯处流动过于复杂,难以得到准确结果而导致的,在弯道的其他地方,数值模拟的结果与实验误差在10%以内,可认为模拟结果与实验吻合较好。

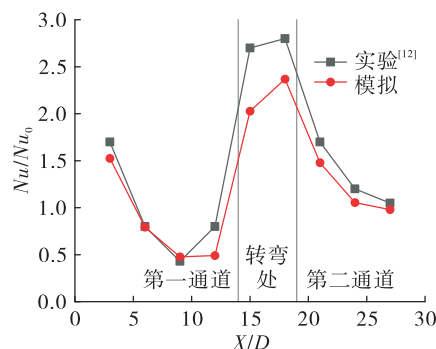


图8 模拟与实验对比

Fig.8 Comparison between simulation results and experimental data

## 2 结果与讨论

由于在径向入流和外流段,科氏力分别指向通道的前缘面和后缘面,因此前后缘面的流动与传热差异是最明显的,后文将重点研究旋转对于前后缘面在流动特性和传热特性方面的差异。

### 2.1 光滑叶根弯道

#### 2.1.1 $Ro$ 的影响

静止时,入口效应和弯道效应是引起通道内部流动与换热特性发生变化的主要因素,通道入口处边界层较薄,换热强度较高;转弯处较高的湍流度也使得换热强度有一定程度提高。

在旋转状态下,径向内流通道的后缘面高速流动区有增大的趋势,如图9所示,这是由于受到指向

前缘面的科氏力作用,使得流体向前缘面汇聚导致的,而这也使得前缘面的换热得以强化,不过由图 10 也可以看出,这种强化作用在高旋转数下更加明显。而随着旋转数的进一步增大,湍流强化作用增强,也会使得内通道后缘面的换热有所增强(见图 11)。

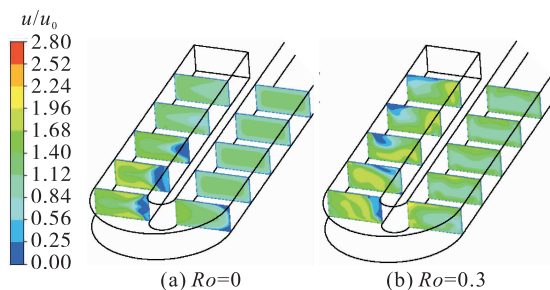


图 9 光滑通道 Y-Z 截面速度分布

Fig. 9 Velocity distribution of Y-Z section in smooth passage

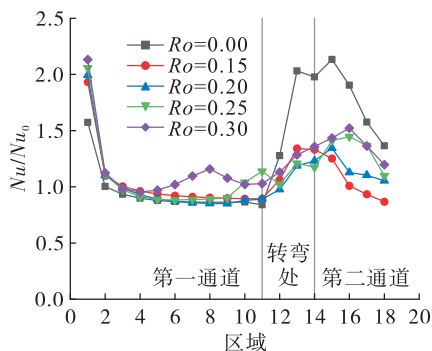


图 10 不同旋转数下,光滑通道前缘面  $Nu/Nu_0$  分布

Fig. 10  $Nu/Nu_0$  of the leading surface in smooth passage with different rotation numbers

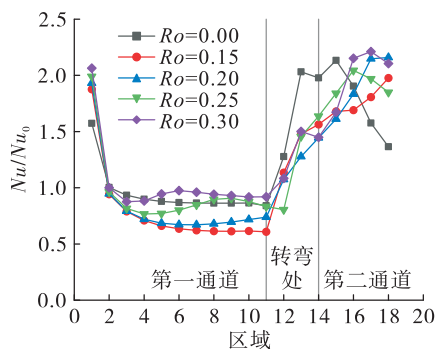


图 11 不同旋转数下,光滑通道后缘面  $Nu/Nu_0$  分布

Fig. 11  $Nu/Nu_0$  of the trailing surface in smooth passage with different rotation numbers

在静止状态下,径向外流通道的流动特性在前后缘面呈现出很好的对称性,同时由于弯道效应,使得弯道出口段内侧形成低速回流区,外侧形成高速流动区。但在旋转状态下,受到弯道效应和科氏力的共同作用,弯道出口段内侧的回流区逐渐向弯道外侧和前缘面发展。这是由于在转弯后冲击外侧壁面的冷却流体在惯性作用下向外流通道的内侧聚集,而科氏力会促使冷却流体向后缘面汇聚,两者共同作用下,就会在通道的内侧和后缘面形成高速流动区,相对应地,在通道的外侧和前缘面产生低速流动区,甚至引发回流现象,这无疑将促进通道内侧流动传热的增强而减弱外侧和前缘面的流动传热强度。

在转弯段,当旋转数为 0 时,流体流经转弯段会受到弯道效应的影响,形成二次流涡,通道中间部分的冷却流体被二次流涡裹挟,分别对前缘面和后缘面产生冲击,使得前后缘面流体流速加快,传热增强(图 12);而在旋转状态下,弯道二次流涡被破坏,绝大部分流体通过弯道内侧流出,进入径向外流通道;少部分流体受到旋转科氏力的影响,形成指向前缘面的二次流涡。但此时涡流对通道前后缘面的冲击已经很弱。

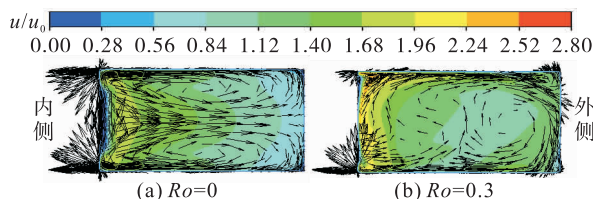


图 12 光滑通道转弯处速度分布

Fig. 12 Velocity distribution at the bend in smooth passage

### 2.1.2 $Bo$ 的影响

图 13 分别展示了径向内流和外流通道内 X-Z 截面的速度分布。在径向内流通道内,随着浮力系数的增大,通道前后缘面的流体流速都在增大。在径向内流通道内,科氏力指向通道前缘面,由科氏力引起的二次流涡会促进通道前缘面高速流动区的发展,相对应地,通道后缘面将形成较大的低速流动区。然而通过观察图 13(a)却发现通道后缘面,随着浮力系数的增大,也形成了较为明显的高速流动区,这就是浮力系数产生的影响。图 14(a)解释了产生这种现象的原因:在靠近通道前后缘面



处,流体受到比通道中部更大的浮升力,在指向旋转轴方向的浮升力作用下,靠近前后缘面处流体的流动加速,从而形成双峰状的流动分布。通过图 15 和图 16 也可知,随着浮力系数的增大,通道内流段的前后缘面换热强度也将有所提高,这与文献[19-20]的研究结论是相一致的。

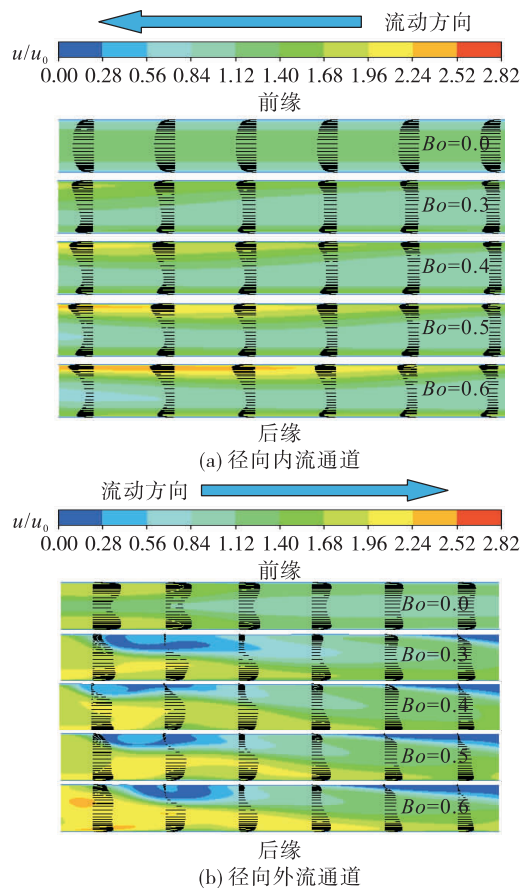


图 13 光滑通道 X-Z 截面速度分布  
Fig. 13 Velocity distribution of X-Z section in smooth passage

在图 13(b)中,外流通道的前缘面出现了 2 个明显的低速流动区:在刚流过弯道后产生了第 1 个低速流动区,此处流体受到弯道效应和指向后缘科氏力的共同影响,后缘面流动加速,故在前缘面形成较大的低速流动区;第 2 个低速流动区发生在外流通道的后半段,此时弯道效应很弱,在靠近前后缘面处,浮升力和科氏力对流动的影响很大,在指向旋转中心的浮升力的作用下,前缘面流体流动速度下降,随着浮力系数的增大,低速流动区也在扩展。通过图 14(b)可以看出,当前缘面流体产生回流后,会重新诱导出指向前缘面的科氏力,进而使

得前缘面的换热强度随着浮力系数的提高有细微的增强(见图 15),而后缘面的换热则随着浮力系数的提高一直在增强(见图 16)。

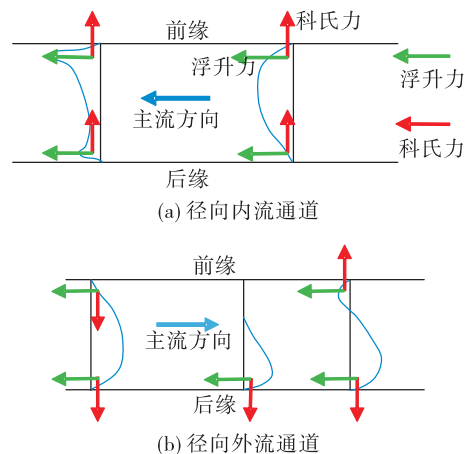


图 14 流体受力分布示意图  
Fig. 14 Diagram of fluid force distribution

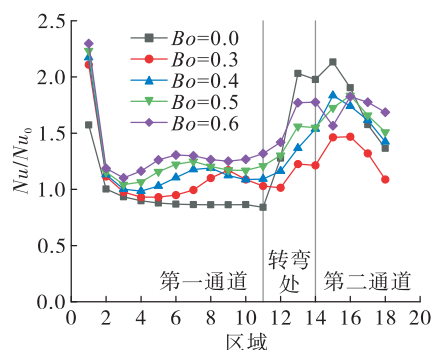


图 15 不同浮力系数下,光滑通道前缘面  $Nu/Nu_0$  分布  
Fig. 15  $Nu/Nu_0$  of the leading surface in smooth passage with different buoyancy parameters

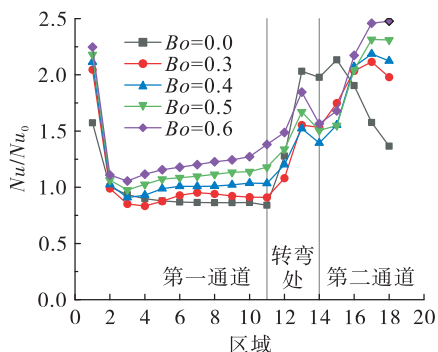


图 16 不同浮力系数下,光滑通道后缘面  $Nu/Nu_0$  分布  
Fig. 16  $Nu/Nu_0$  of the trailing surface in smooth passage with different buoyancy parameters

## 2.2 带肋叶根弯道

### 2.2.1 $Ro$ 的影响

与光滑通道相类似,带肋通道也存在入口效应和弯道效应。不过在带肋的条件下,肋片的周围存在剧烈的流动分离-再附着现象,在很大程度上抑制边界层的生长,降低对流传热热阻,同时增强湍流度,从而使传热程度得到大幅度提高,但在转弯处,由于没有肋片的存在,换热强度较内外流通道有所降低。

由图 17 可以看出,在内流通道的前后缘面,旋转并没有使得前后缘面的流动状态产生较大的差异,这是因为在径向内流通道内,尽管由于科氏力的影响形成指向前缘面的二次流涡,但与肋片引起的二次流涡相比,科氏力引起的二次流涡的作用很小<sup>[21]</sup>。如图 18 和图 19 所示,弯道处换热强度不升反降,这也是和光滑通道的主要区别之一。

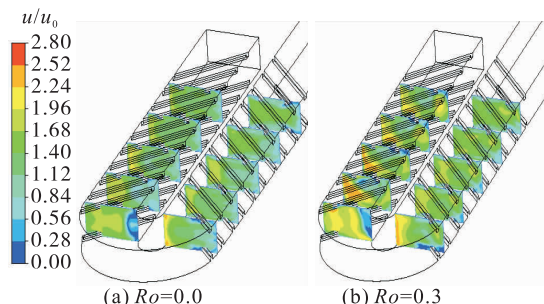


图 17 带肋通道 Y-Z 截面速度分布

Fig. 17 Velocity distribution of Y-Z section in ribbed passage

在转弯段,虽然没有肋片,但前后通道内由于肋片引起的二次流涡也会对弯道中心截面处的流动特性产生影响(见图 20),静止状态下,通道中间的部分冷却流体在二次流涡的作用下冲击弯道内侧,在弯道内侧由于离心力和冲击的作用而形成高速流动区,外侧则由于逆压形成低速回流区;在旋转状态下,受到指向前缘面科氏力的影响,在通道中部,有较多的冷却流体受到科氏力引二次流涡的作用,被涡流裹挟产生对前缘面的冲击,因此相对于静止状态,前缘面的传热将得到增强,而后缘面的传热将被削弱。

通过图 17 看出,在径向外流通道中,受到指向后缘的科氏力影响,靠近后缘面的流体流速加快,这也将使得后缘面的换热强度随着旋转数的提高

而有所增强(见图 19)。同时,由于肋片引起的二次流指向弯道的内侧,因而在外流通道的后半段,弯道内侧逐步形成一个高速流动区,这也将提高内侧与壁面之间的换热强度。

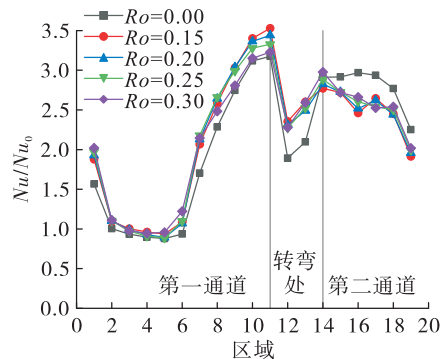


图 18 不同旋转数下,带肋通道前缘面  $Nu/Nu_0$  分布

Fig. 18  $Nu/Nu_0$  of the leading surface in ribbed passage with different rotation numbers

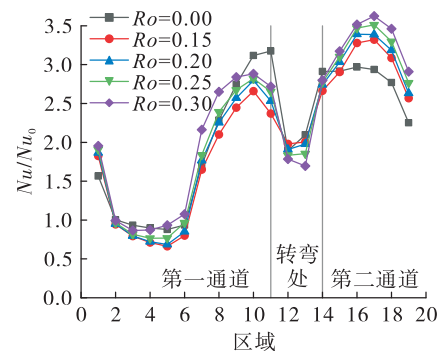


图 19 不同旋转数下,带肋通道后缘面  $Nu/Nu_0$  分布

Fig. 19  $Nu/Nu_0$  of the trailing surface in ribbed passage with different rotation numbers

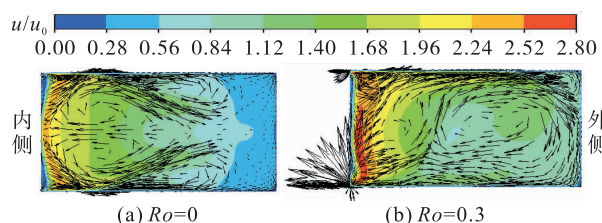


图 20 带肋通道转弯处速度分布

Fig. 20 Velocity distribution at the bend in ribbed passage

### 2.2.2 $Bo$ 的影响

通过图 21(a)可以看出,在径向内流通道中,随着浮力系数的提高,靠近前后缘面处的流体流动都在加快,但与图 13(a)相比,高速流动区的发展明显

受到了抑制,这是因为在内流通道中,流体的流动分布状态主要受到肋片扰流的影响,在流动的过程中,肋片的扰动作用不断加强,在前后缘面形成类似浮力系数作用的双峰状流动分布,但是这种双峰状的流动分布并不是由于浮力系数引起的,因此随着浮力系数的增大,这种双峰状的流动分布并没有发生大的变化。同时观察图 22 和图 23 可以看出,内流通道的换热强度随着浮力系数的提高而变化得并不明显。

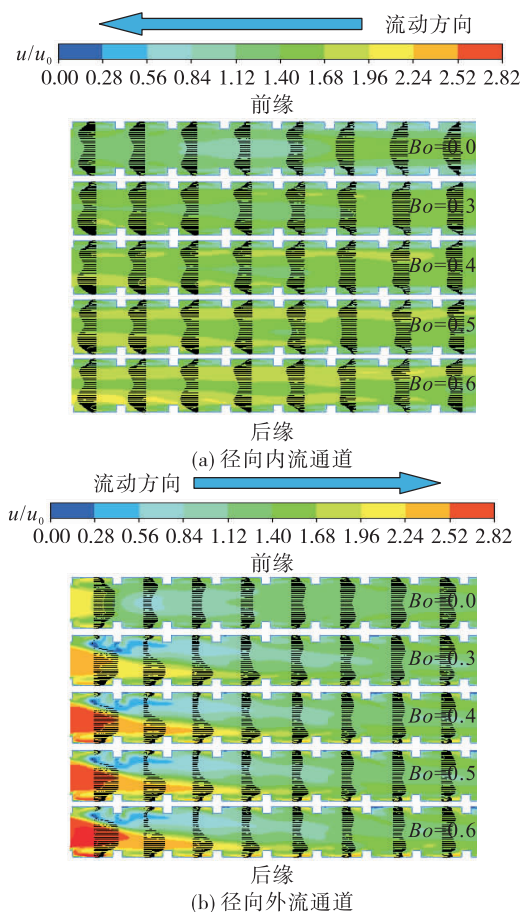


图 21 带肋通道 X-Z 截面速度分布

Fig. 21 Velocity distribution of X-Z section in ribbed passage

在径向外流通道后缘面,由于旋转科氏力的指向性,促进通道中间冷却流体向后缘面汇聚,是造成旋转状态下传热强度比静止状态高以及传热强度随着浮力系数提高而增强的主要原因,这与图 21 后缘面流动特性的影响是一致的。在前缘面,浮力系数的提高带来更强的湍流扰动,也使得前缘面传热强度有了一定的提高。

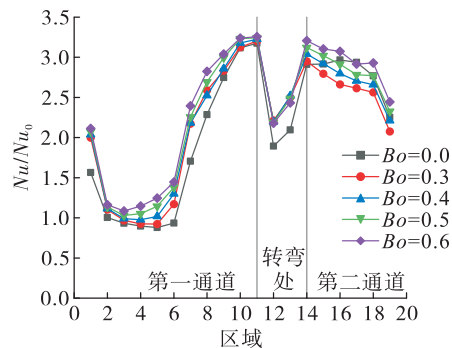


图 22 不同浮力系数下,带肋通道前缘面  $Nu/Nu_0$  分布

Fig. 22  $Nu/Nu_0$  of the leading surface in ribbed passage with different buoyancy coefficients

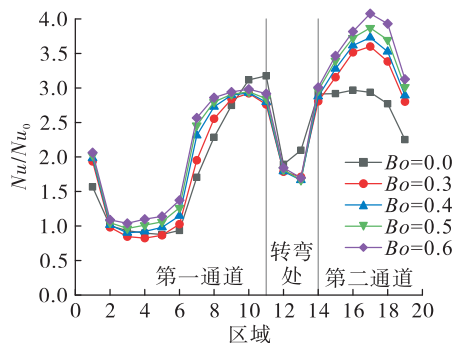


图 23 不同浮力系数下,带肋通道后缘面  $Nu/Nu_0$  分布

Fig. 23  $Nu/Nu_0$  of the trailing surface in ribbed passage with different buoyancy parameters

### 3 结论

本文对旋转涡轮叶片叶根弯道处的流动和传热特性进行了数值模拟,研究了旋转状态下叶根弯道内由于科氏力、旋转浮升力及弯道效应、肋片效应引发的流动传热不均衡性强、局部热应力高的原因,对于航空发动机及各种组合式发动机在提高叶片使用寿命、降低航行事故率方面具有一定的指导价值,具体结论如下。

1) 由于入口效应的存在,入口段冷却流体流速较高,传热较强;离开入口段后,通道内的传热会显著降低。并且在旋转状态下,入口效应会比静止状态时更加明显。

2) 旋转数对流动传热的影响通过旋转科氏力体现。在科氏力的指向侧,冷却流体的流速加快,传热得到强化;科氏力背离侧,传热被削弱,但随着旋转数进一步增大,湍流混合加剧,也会使得科氏力背离侧的流动传热得到加强。



3)在转弯段,对于光滑通道,弯道形成的二次流涡会促进通道前后缘面的传热,但在旋转状态下,旋转会破坏由于弯道引起的二次流涡,因而在一定程度上削弱了弯道处的传热;对于带肋通道,由于转弯处没有肋片,使得弯道处的换热强度比内外流通道低。

4)浮力系数作为综合性的影响因素,对通道前后缘面流动传热的影响通过科氏力和旋转浮升力共同体现。在径向入流通道内,由于浮力系数增大带来明显的双峰流现象,在外流通道中,又会在前缘产生流动分离甚至回流的现象。

5)肋片对叶根弯道流动传热的影响是最显著的。由于肋片的存在,内外流通道内产生明显的边界层分离-再附着的现象,在增大湍流度的同时,使得传热强度得到大幅提升。由于肋片本身带来较强的增强传热能力,因此改变旋转数和浮力系数对带肋通道的影响没有对光滑通道明显。

#### 参考文献

- [1] HAN J C. Advanced cooling in gas turbines 2016 max Jakob memorial award paper[J]. Journal of Heat Transfer, 2018, 140(11): 113001.
- [2] 张萌,孙冰. 人工粗糙度对矩形弯曲管道流动与传热数值模拟[J]. 火箭推进, 2020, 46(1): 20-27.  
ZHANG M, SUN B. Numerical simulation of flow and heat transfer in a curved rectangular channel with artificial roughness[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2020, 46(1): 20-27.
- [3] WRIGHT L M, HAN J C. Heat transfer enhancement for turbine blade internal cooling [J]. Journal of Enhanced Heat Transfer, 2014, 21(2/3): 111-140.
- [4] HAN J C, GLICKSMAN L R, ROHSENOW W M. An investigation of heat transfer and friction for rib-roughened surfaces[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1978, 21(8): 1143-1156.
- [5] HAN J C. Heat transfer and friction in channels with two opposite rib-roughened walls[J]. Journal of Heat Transfer, 1984, 106(4): 774-781.
- [6] HAN J C. Heat transfer and friction characteristics in rectangular channels with rib turbulators[J]. Journal of Heat Transfer, 1988, 110(2): 321-328.
- [7] HAN J C, OU S, PARK J S, et al. Augmented heat transfer in rectangular channels of narrow aspect ratios with rib turbulators[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1989, 32(9): 1619-1630.
- [8] HAN J C, ZHANG Y M, LEE C P. Augmented heat transfer in square channels with parallel, crossed, and V-shaped angled ribs[J]. Journal of Heat Transfer, 1991, 113(3): 590-596.
- [9] HAN J C, ZHANG Y M. High performance heat transfer ducts with parallel broken and V-shaped broken ribs[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1992, 35(2): 513-523.
- [10] YERANEE K, RAO Y. A review of recent studies on rotating internal cooling for gas turbine blades [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(7): 85-113.
- [11] WAGNER J H, JOHNSON B V, HAJEK T J. Heat transfer in rotating passages with smooth walls and radial outward flow [J]. Journal of Turbomachinery, 1991, 113(1): 42-51.
- [12] WAGNER J H, JOHNSON B V, KOPPER F C. Heat transfer in rotating serpentine passages with smooth walls[J]. Journal of Turbomachinery, 1991, 113(3): 321-330.
- [13] DUTTA S, ANDREWS M J, HAN J C. Prediction of turbulent heat transfer in rotating smooth square ducts [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1996, 39(12): 2505-2514.
- [14] 邓宏武, 张伟, 陶智. 旋转状态下带肋 U 形通道内换热的实验研究[J]. 推进技术, 2000, 21(1): 26-29.
- [15] 邓宏武, 程俊华, 陈豪, 等. 高旋转数下光滑回流通道的换热特性[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(5): 701-706.
- [16] 程俊华, 倪彬, 邓宏武, 等. 高旋转数内冷通道换热实验技术及验证[J]. 航空动力学报, 2014, 29(8): 1817-1823.
- [17] 郑杰, 朱惠人, 赵曙, 等. 湍流模型对旋转状态下 S 型带肋回流通道的内部换热特性的影响[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(9): 2090-2095.
- [18] 崔欣超, 邓宏武, 李洋, 等. 温度比对旋转直肋双通道换热特性的影响研究[J]. 推进技术, 2016, 37(11): 2009-2016.
- [19] FU W L, WRIGHT L M, HAN J C. Heat transfer in two-pass rotating rectangular channels (AR = 1:2 and AR = 1:4) with 45 deg angled rib turbulators [J]. Journal of Turbomachinery, 2005, 127(1): 164-174.
- [20] LIOU T M, CHEN M Y, TSAI M H. Fluid flow and heat transfer in a rotating two-pass square duct with In-line 90-deg ribs [J]. Journal of Turbomachinery, 2002, 124(2): 260-268.
- [21] SHRESTHA S, PRASAD A, RICKLICK M A. Internal cooling of rotating and non-rotating channels with rib turbulators [C]//2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting. Reston, Virginia: AIAA, 2018.