

## 旋转状态下 S 型带肋通道流动特性 数值研究

王顺斌<sup>1</sup>, 张 丽<sup>1</sup>, 赵 曙<sup>1</sup>, 朱惠人<sup>1</sup>, 孙瑞嘉<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072;

2. 中国航空工业集团公司 中国航空动力机械研究所 涡轮部, 湖南 株洲 412002)

**摘 要:** 为了更好地了解涡轮叶片内冷完整通道中流体的流动特性,数值研究了肋、转弯以及旋转对完整 S 型带肋通道流动特性的影响. 雷诺数为 17 000, 3 个出口的出流比分别为 27%, 49%, 24%, 旋转数取 0, 0.03, 0.06, 0.09. 结果表明:通道 1 靠近前缘侧阻塞比高,肋的扰流作用强,流体速度较低. 转弯引起流体流动分离,使转弯下游通道中的主流发生偏移,通道 3 靠近分隔板侧存在较大范围低速区. 旋转产生的切向哥氏力使流体向哥氏力指向面偏移,通道 2 与通道 3 主流分别偏向吸力面与压力面. 旋转影响通道中二次流的分布,增强转弯下游低速回流涡区域流体的流动.

**关 键 词:** 涡轮叶片; S 型通道; 90°肋; 旋转; 流动特性; 内冷

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

## Numerical study of flow characteristics in rotating S-shaped passage with ribs

WANG Shun-bin<sup>1</sup>, ZHANG Li<sup>1</sup>, ZHAO Shu<sup>1</sup>,

ZHU Hui-ren<sup>1</sup>, SUN Rui-jia<sup>2</sup>

(1. School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Turbine Department, China Aviation Powerplant Research Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China)

**Abstract:** For better understanding of the flow characteristics of turbine blade internal cooling passage, a numerical study was conducted to investigate the influences of rib, turn and rotation on the flow characteristics in full S-shaped passage with ribs. The Reynolds number was 17 000, three outlet discharge ratios were 27%, 49%, 24%, rotation numbers were 0, 0.03, 0.06, 0.09. The results reveal that the fluid has stronger turbulence and lower velocity with higher blockage ratio near the leading edge of passage 1. Turn causes the flow separation and shift of mainstream downstream the turn. There is a big range of low velocity area near the bulkhead in the passage 3. Coriolis force makes the fluid shift towards the wall to which the Coriolis force points, the mainstream shifts towards suction surface and pressure surface in passage 2 and passage 3 respectively. Rotation affects the distribution of the secondary flow in passage and promotes the flow of low velocity circumfluence area downstream the turn.

收稿日期:2014-01-21

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2013CB035702)

作者简介:王顺斌(1990—),男,浙江温州人,硕士生,主要从事航空发动机高温部件传热与冷却技术研究.

**Key words:** turbine blade; S-shaped passage; 90° rib; rotation; flow characteristic; internal cooling

在现代燃气轮机中,涡轮前入口温度已远高于涡轮叶片所能承受的温度,为了保证涡轮叶片正常工作,采用相应的冷却技术是非常有必要的.涡轮叶片内冷通道的设计通常会在通道壁面上布置扰流肋,通过增大换热面积以及对冷却流体的扰动来强化换热,目前,关于静止状态下带肋通道的研究比较广泛. Graham 等<sup>[1]</sup>对 U 型带肋通道中的流场进行了测量,得出肋前后存在明显的循环区域. Cho 等<sup>[2]</sup>研究发现直排肋与错排肋所产生的二次流涡的结构具有明显的不同. Bunker 等<sup>[3]</sup>研究了方形通道中肋倾斜角度对传热系数和摩擦因数的影响,得出 90° 肋的综合性能是最好的. Maurer 等<sup>[4-5]</sup>研究表明 W 形肋传热性能与压力损失都要高于 V 形肋. 涡轮叶片内冷通道大多数为多流程通道,通道之间通过转弯来连接. Elfert 等<sup>[6]</sup>利用 PIV (particle image velocimetry) 技术对 U 型带肋通道中流体的流动进行了测量,发现在转弯区域出现流动分离. 陈伟、阚瑞等<sup>[7-8]</sup>对圆形弯头 U 型通道进行了实验研究,得出最小换热与最大压降出现在弯头区域. 王晓增等<sup>[9]</sup>利用瞬态液晶测量方法对带肋回转通道全表面换热分布进行了实验研究,结果表明在弯道处布置肋能够很好地增强换热.

实际中,涡轮叶片处于高速旋转的工作状态,旋转状态下涡轮叶片内冷通道流动与换热的研究更接近于涡轮叶片冷却的真实情况. Liu 等<sup>[10-11]</sup>研究了高旋转数对三角形通道换热的影响,结果表明旋转状态下前缘带肋区域换热效果增强. ZHOU 等<sup>[12]</sup>研究了矩形双通道在旋转状态下的换热,得出旋转增强了通道内部的换热. 刘传凯等<sup>[13-14]</sup>研究了旋转以及旋转方位角对 U 型通道流动与换热特性的影响,得出哥氏力产生的二次流与肋片二次流共同影响通道内流体的流动与换热. 相比静止状态,旋转所产生的附加力会影响通道中流体的流动结构,从而影响换热. Coletti 等<sup>[15]</sup>研究表明,受浮升力的影响,肋之间会产生较大范围的回旋流动. 邓宏武等<sup>[16]</sup>通过数值模拟研究了旋转状态下蛇型通道流动和换热的机理,得出哥氏力引起主流的偏移以及二次流动旋涡的形成.

综上所述,目前带肋通道的研究集中于单通道或 U 型双通道等单元结构,而对于带肋内冷完

整通道的研究比较少. 涡轮叶片内冷通道的换热与通道内流体流动特性有着密切的关系,了解通道内流体的流动结构有助于换热的研究. 另外,受肋、转弯、出流、通道截面形状等多种因素综合影响,通道内的流体流动较为复杂. 在旋转情况下,还增加了离心力、哥氏力等旋转带来的附加力的作用,通道内的流动和换热与静止状况下会有一定的差异,实验研究很难全面地预测通道内的流动结构. 因此,本文采用数值模拟方法研究完整 S 型带肋通道的流动特性,为下一步实验研究以及涡轮叶片冷却结构设计和改进提供参考.

## 1 数值计算方法

### 1.1 计算模型及网格划分

图 1 为本文所研究的完整 S 型带肋通道(下文简称通道)示意图. 图 2 为内冷通道截面示意图. 计算模型含有 3 个通道、2 个 180° 转弯段、1 个入口以及 3 个出口. 通道 1 与通道 3 为梯形通道,通道 2 为矩形通道. 入口位于叶根,入口当量直径  $d=11.2\text{ mm}$ ,出口 1 与出口 2 位于叶尖,出口 3 (19 个尾缘孔)位于尾缘. 每个通道的上下表面都布置交错排列的肋,肋与流体流动方向的夹角为 90°,通道 1 和通道 2 上下表面各布置 7 根交错排列的方形直肋,肋高  $e/d=0.107$ ,肋宽  $w/d=0.107$ ,肋间距  $p/d=1.348$ ;通道 3 上下表面共有

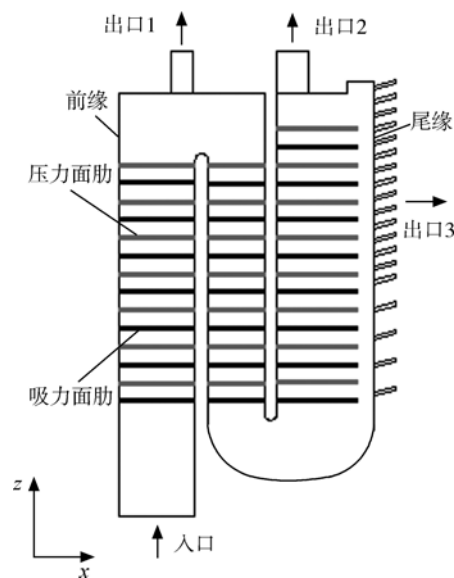


图1 完整 S 型带肋通道示意图

Fig. 1 Schematic of full S-shaped passage with ribs

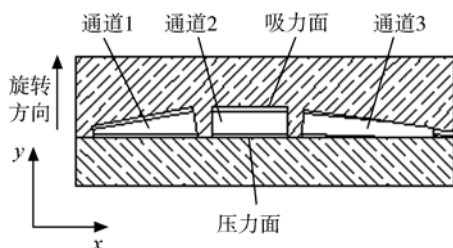


图2 内冷通道截面示意图

Fig.2 Schematic of internal cooling passage section

16根楔形直肋,交错排列。流体从入口流入,在通道1与通道3中为径向出流,在通道2中为径向入流,最后从出口1、出口2和出口3流出,3个出口的出流比分别为27%,49%,24%。坐标 $x, y, z$ 方向分别代表通道宽度(叶弦)、通道高度以及通道长度(叶高)方向,计算模型绕 $x$ 轴旋转,旋转半径 $r/d=46.43$ ,旋转方向由压力面指向吸力面。

由于计算模型较为复杂,采用非结构混合型网格对计算模型进行网格划分,对肋附近区域进行局部加密,压力面与吸力面附加10层边界层网格,并保证近壁面第1层网格 $y^+ < 1$ ,通过网格无关性分析,计算模型网格数目约为900万。图3为压力面肋附近区域局部网格示意图。

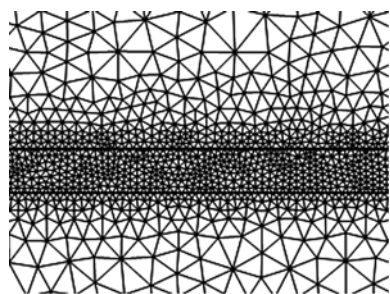


图3 压力面肋区域局部网格示意图

Fig.3 Schematic of local grid of rib of pressure surface

## 1.2 计算方法及边界条件

利用商业软件FLUENT分离隐式求解器进行求解,流体选用理想气体,采用realizable  $k-\epsilon$  湍流模型<sup>[17]</sup>和增强壁面函数对通道的流动特性进行数值模拟。利用压力分离隐式稳态求解器求解雷诺时均湍流微分控制方程,速度和压力的耦合采用SIMPLE(semi-implicit method for pressure-linked equations)算法。压力修正方程、连续方程、动量方程、 $k$ 和 $\epsilon$ 方程均采用亚松弛因子,各参数的离散格式均采用2阶精度的迎风格式,解收敛的判断标准为各方程相对残差小于 $10^{-5}$ 。边界条件设定为:计算域入口设为质量流量入口;

出口设为压力出口,在数值计算迭代的过程中,通过调节出口压力值来控制3个出口的出流流量分配比例;壁面设为第2类边界条件,给定壁面热流密度,选择无滑移条件并给定相应的湍流脉动能和耗散率。

## 1.3 计算工况及参数定义

文中用到的主要参数定义如下:

雷诺数

$$Re = \rho v_{in} d / \mu \quad (1)$$

式中 $\rho, \mu$ 分别为流体密度和动力黏度; $v_{in}$ 为入口流体的平均速度。

旋转数

$$R = r\omega / v_{in} \quad (2)$$

式中 $\omega$ 为旋转角速度。

出流比

$$S_i = \dot{m}_i / \dot{m}_{in} \quad (3)$$

式中 $\dot{m}_{in}$ 为入口流体质量流量; $\dot{m}_i$ 为第 $i$ 个出口的质量流量, $i$ 取1,2,3分别代表出口1、出口2和出口3。

压力系数

$$C_p = 2(p - p_m) / (\rho v_{in}^2) \quad (4)$$

式中 $p$ 为通道测点处流体的静压; $p_m$ 为入口流体静压。

本文对4组工况进行了数值模拟计算,3个出口的出流比 $S_1, S_2, S_3$ 分别为27%,49%,24%,雷诺数 $Re=17000$ ,旋转数 $R$ 取0,0.03,0.06,0.09。

## 2 实验系统及测试方法

图4为实验系统示意图,主要的实验装置有压气机、流量计(精度为2.5级)、加热器、实验件、摄像机、图像采集卡、温度/压力采集装置等。利用压气机将气体压入储气罐,稳定后打开阀门,气体流经加热器加热后进入实验件,最后从实验件3个出口流出,实验件入口质量流量以及出口1、出口2出流流量分配比例通过阀门和流量计控制。通道沿程布置15个静压测点,利用NetScanner Model 98RK型压力扫描阀(精度为0.1级)测量沿程静压分布。实验件表面传热系数采用热色液晶瞬态测量技术进行测量,具体原理参考文献[18]。通道沿程布置15个直径为0.2mm的热电偶(标定精度为0.2℃),记录实验过程中沿程主流温度的变化情况;通道内表面喷涂35℃窄带热色液晶(带宽为1℃),热色液晶标定精度为1℃,

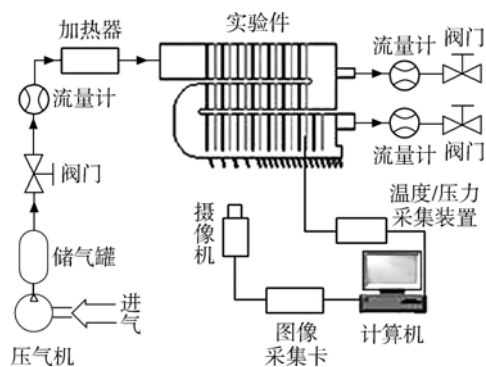


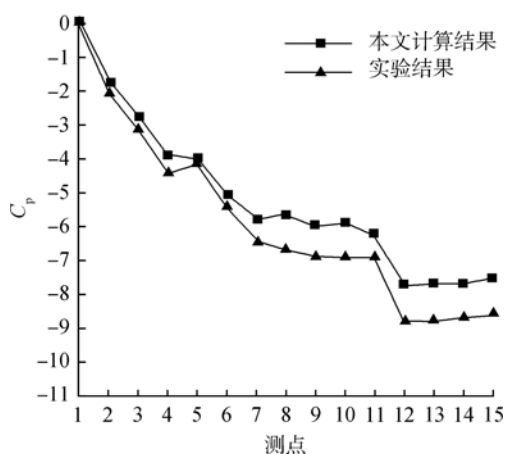
图4 实验系统示意图

Fig. 4 Schematic of experimental system

由摄像机记录实验件表面热色液晶颜色的变化。

### 3 数值计算结果验证

利用数值模拟方法对通道的流动特性进行研究,为了验证数值计算结果的准确性,将本文计算结果与实验结果进行对比。沿流程方向在吸力面与实验压力测点相对应的位置取15个点,测点1~测点5位于通道1,测点6~测点10位于通道2,测点11~测点15位于通道3。图5为本文计算所得压力系数与实验结果的对比,计算得到的压力系数相比实验结果略微偏高,最大误差约为14.8%,但两者变化趋势是一致的。

图5 本文计算结果与实验结果对比 ( $Re=17000, R=0$ )Fig. 5 Comparison between numerical result in this paper and experimental result ( $Re=17000, R=0$ )

## 4 结果与讨论

为了能够详细描述通道的流动特性,需要对计算模型多个截面上的速度分布进行分析,文中部分截面位置如图6所示。其中截面C、截面D、

截面E位于通道1,截面F位于通道2,截面G位于通道3,截面A、截面B分别位于第4排压力面肋上下游。

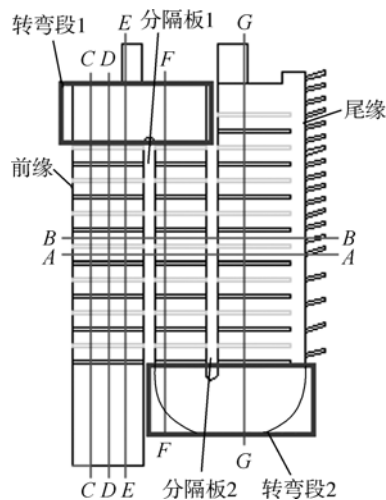


图6 截面位置示意图

Fig. 6 Schematic of sections' position

#### 4.1 肋对通道内流场的影响

图7为旋转状态下,通道1中不同位置截面上流体的速度云图与流线图。从图中可以看出,肋的前壁和后壁附近都存在涡,肋前有角涡,肋后存在较大的回流涡。当流体流经肋时,肋前的角涡对贴近壁面的流体有抬升作用,使得靠近壁面的低速流体与壁面发生分离。分离后的流体受到的黏性力减小,并与高速主流混合,速度会大幅度地增加,加速后的流体在肋下游又会冲击壁面,与壁面重新附着。肋正是通过使流体与壁面不断分离再附着,破坏了近壁边界层,强化了肋下游壁面的换热。

本文所研究模型的通道1为梯形通道,靠近前缘侧较窄,通道1中肋为方形直肋,沿通道宽度方向肋高不变,因此,通道1中窄侧阻塞比高。对比图7中3个沿通道宽度方向不同位置截面上的速度云图及流线图,可以看出阻塞比越大,流线弯曲越明显,表明肋对流体的扰动作用越强;另外,阻塞比越大也造成流体在流动过程中受到更大的阻力损失,截面C(靠近前缘)上的主流速度明显低于截面E。

#### 4.2 转弯对流体流动的影响

图8为通道中2个 $180^\circ$ 转弯段的流体速度云图与流线图,其中图8(a)为通道1与通道2之间的转弯段,转弯段两侧壁面与顶端壁面成 $90^\circ$ 夹角,顶端壁面上分布出口1;图8(b)为通道2与通道3之间的转弯段,转弯段两侧壁面与顶端壁面

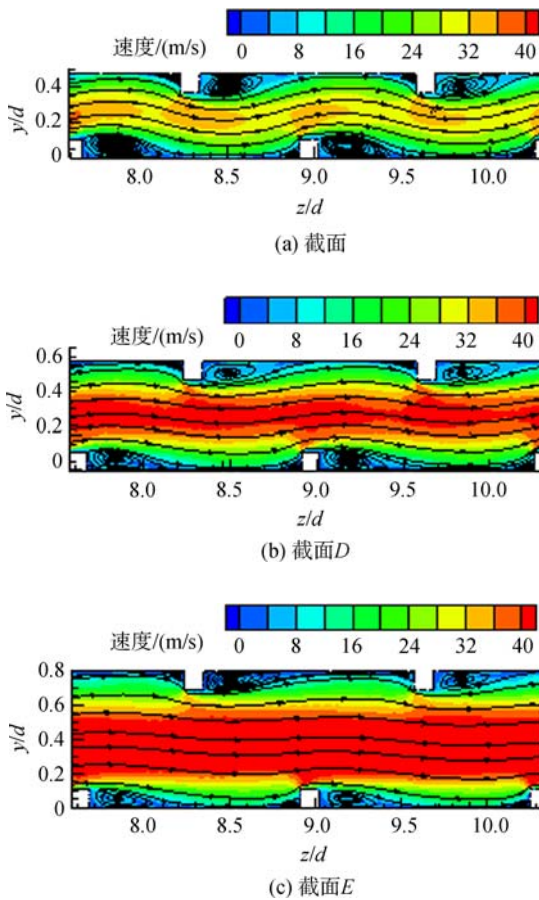
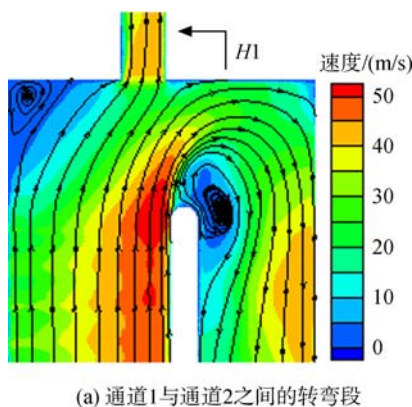


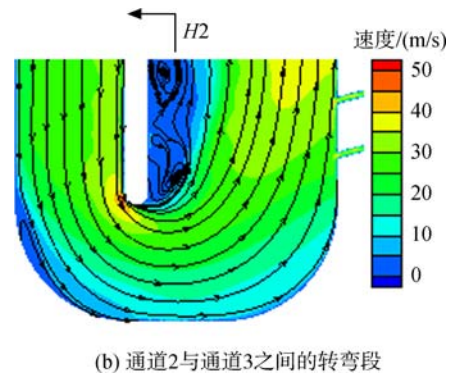
图7 截面C,D,E上速度云图与流线图( $R=0.09$ )  
Fig.7 Velocity contour and streamlines on sections C, D, E ( $R=0.09$ )

通过一段圆弧过渡,通道3尾缘壁面上分布出口3.从速度分布云图可以看出,流体流经转弯段,转弯段内侧主流速度要高于转弯段外侧主流的速度,在第1个转弯段靠近前缘壁面与顶端壁面的 $90^\circ$ 夹角区域存在涡.

受转弯的影响,流体流经转弯段后会在分隔板顶部发生流动分离,转弯段流动分离程度与流体的速度有关,从图中可以看出,相比第2转弯段(图8(b)),第1转弯段(图8(a))流体速度较大,



(a) 通道1与通道2之间的转弯段



(b) 通道2与通道3之间的转弯段

图8 转弯段截面速度云图与流线图

Fig.8 Velocity contour and streamlines on section in the turn

分隔板顶部具有更大范围的低速区域.转弯还影响转弯段下游通道的流动结构,由于主流在转弯段发生流动分离,使得转弯段下游通道中的流体流动发生偏移.在图8(a)中,通道2主流偏向第2分隔板,而在第1分隔板附近出现较大范围的低速区域,并在低速区域形成涡;在图8(b)中也得到类似结论,第3通道主流偏向尾缘侧,靠近第2分隔板附近的低速区域也存在涡.

图9为图8中截面H1,H2上流体的速度云图与流线图,流体流经转弯段会发生流动分离,使得主流偏离分隔板,分隔板顶部出现低速区域.从图9(a)可以看出,第1转弯段流体的流动分离程度从压力面、吸力面两侧往通道中间逐步递增,吸力面附近流体流动分离程度大于压力面,转弯段

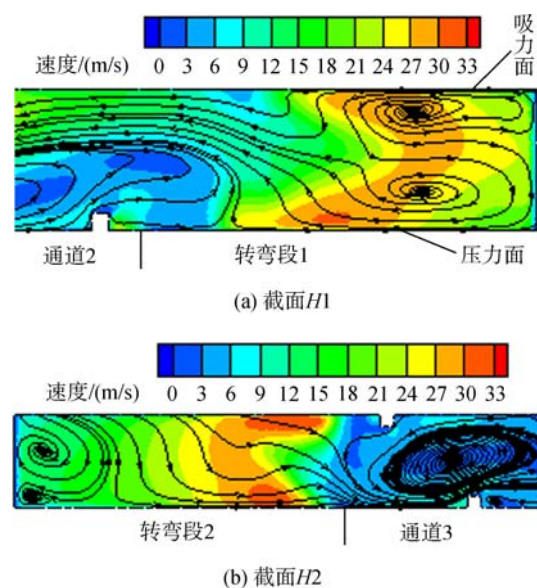


图9 截面H1,H2上的速度云图与流线图

Fig.9 Velocity contour and streamlines on sections H1 and H2

中间流体流动分离程度最大. 在第1转弯段, 高速主流区域存在涡, 分别位于第1转弯段的吸力面和压力面附近. 对于第2转弯段, 如图9(b)所示, 通道高度方向上的流动分离程度也从压力面、吸力面两侧往通道中间逐步递增, 不过与第1转弯段不同的是第2转弯段吸力面附近流体流动分离程度低于压力面, 在第2转弯段外侧顶端壁面存在涡. 另外可以看到, 在截面 H2 上, 通道3中流体速度较低, 并存在较大的回流涡, 一方面是由于转弯引起主流偏离; 另一方面由于尾缘壁面上分布出口3, 使得通道3中的流体进一步偏向通道3尾缘侧壁面.

#### 4.3 旋转对通道流动特性的影响

图10为静止状态( $R=0$ )与旋转状态( $R=0.09$ )下通道中截面速度云图与流线图, 从单张速度分布云图可以看出, 3个通道右侧速度都要比左侧高. 通道1靠近前缘侧由于阻塞比高, 流动阻力大, 流体流动速度低于第1分隔板附近的流体. 通道2受转弯的影响, 主流偏向于第2分隔板, 使得第1分隔板壁面附近流体速度较低, 随着二次流的作用, 沿流程方向通道2的第1分隔板侧流体速度逐渐增大. 通道3除了受转弯的影响外, 出口3的出流对通道3的流体流动影响较大, 一方面出流使得出口3附近流体流速增大, 尾缘壁面出口3附近出现较大面积的高速区域; 另一方面促进了通道3中流体偏向尾缘壁面, 使得通道3第2分隔板侧壁面附近出现较大范围的低速区域.

对比不同旋转数下的速度云图与流线图可以看出, 通道1中流体速度随旋转数的增加而增大. 旋转数对通道2中流体流动有一定的影响, 旋转数越高, 通道2中二次流作用越强, 第1分隔板侧流体加速越快, 可以看到图10中通道2第1分隔板附近低速区域面积随旋转数增大而变小. 通道3中的流体流动受旋转数的影响较大, 由于受转弯以及出口3出流的影响, 高速主流偏向通道3尾缘侧, 使得通道3第2分隔板侧壁面附近出现大片的低速区域, 随着旋转数的增大, 通道3中第2分隔板侧壁面附近流体速度增大, 低速区域面积也有了一定程度的减小, 可以明显看出, 回流涡范围随旋转数的增大而逐渐变小.

相比静止状态, 旋转对内冷通道流动的影响, 主要体现在旋转增加了离心力与哥氏力的作用. 离心力方向沿径向向外, 与通道中主流的方向相同或相反, 当离心力方向与流体流动方向相同(相反)时, 会促进(抑制)流体的流动; 切向哥氏力的方向与流体流动方向垂直, 它对流体流动的影响

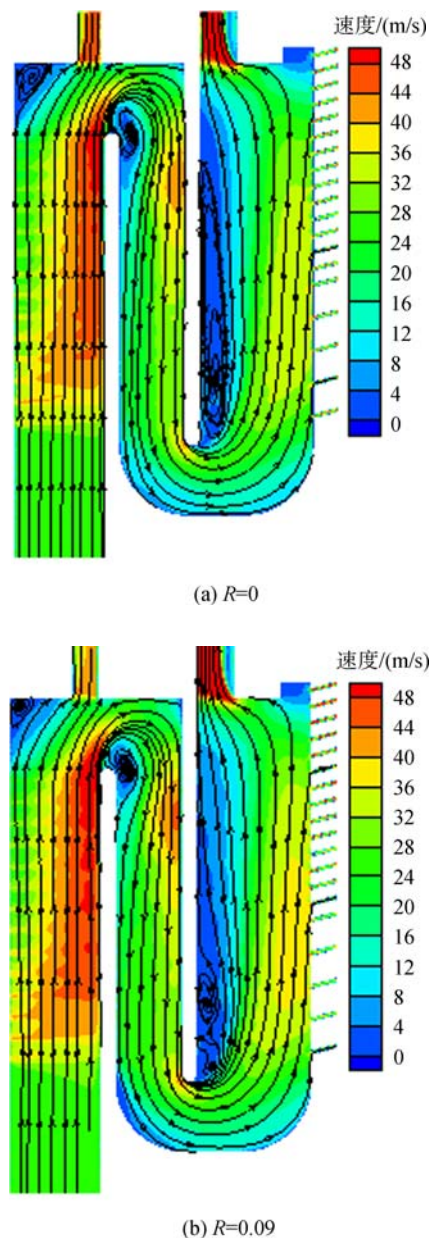


图10 静止与旋转状态下通道截面速度分布  
Fig. 10 Velocity contour and streamlines on section in stationary and rotating passages

主要表现为使流体沿切向哥氏力方向发生偏移.

在计算模型中取截面 A, B, 截面位置如图6所示, 图11为截面 A, B 在静止状态下( $R=0$ )和旋转状态( $R=0.09$ )下的速度云图与流线图. 由于截面 A, B 分别位于第4排压力面肋的上下游, 肋对截面 A, B 上流体的扰流作用不同, 从而造成了通道1, 2, 3 流体在截面 A, B 沿通道高度方向上的速度指向不同.

对于通道1, 对比截面 A, B 在不同旋转数下的速度分布, 在旋转情况下, 高速流体区域较静止状态略微往前缘侧发展. 通道1由于肋的扰流作用较强, 旋转产生的切向哥氏力没有使通道1中

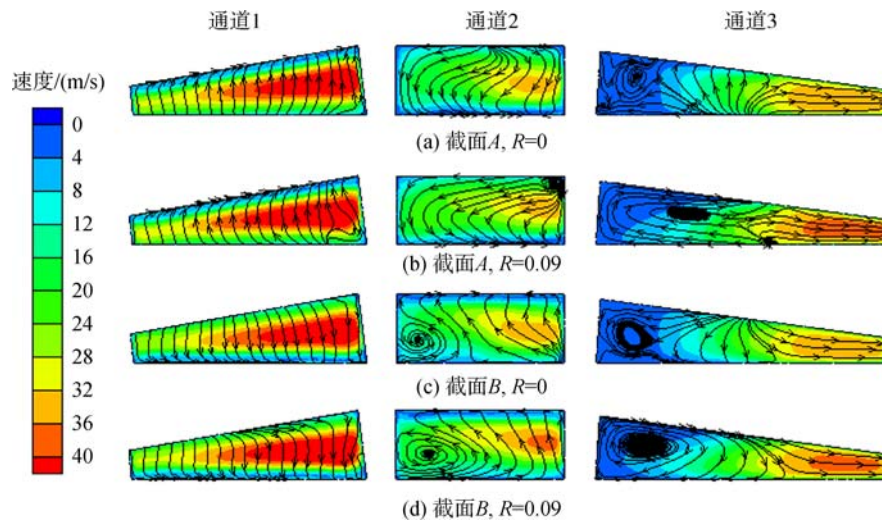


图11 静止与旋转状态下通道截面A,B速度云图和流线图

Fig. 11 Velocity contour and streamlines on sections A, B in stationary and rotating passages

的主流发生明显的偏移。

对于通道2,从速度流线图可以看出,在截面A上,静止状态下流体从吸力面沿通道两侧流向压力面;在 $R=0.09$ 时,更多流体沿着通道2左侧第1分隔板壁面流向压力面,并且在通道2吸力面与右侧第2分隔板 $90^\circ$ 夹角处产生涡。在截面B上,流体从压力面流向吸力面,并在通道2左侧第1分隔板附近产生涡,可以看出,在旋转状态下通道2中涡更扁。对比截面A,B在静止与旋转状态下的速度云图可以看出,旋转增大了通道2左侧第1分隔板壁面附近流体速度,另外旋转产生的切向哥氏力使通道2右侧第2分隔板附近的高

速主流略微向吸力面偏移。

对于通道3,在截面A,B上通道3左侧第2分隔板附近都存在涡,在旋转状态下,涡被压扁。从速度分布云图可以看出,在旋转状态下,通道3右侧尾缘附近高速主流的速度有所增大;旋转促进了主流向通道3左侧第2分隔板流动,使得低速区域面积明显减小;此外,旋转产生的切向哥氏力使通道3中的主流向压力面偏移。需要注意的是,由于通道3右侧尾缘壁面分布出口3,受出流的影响,切向哥氏力并没有使通道3尾缘附近的高速流体发生明显的偏移。

图12为截面D,F,G在静止状态( $R=0$ )和

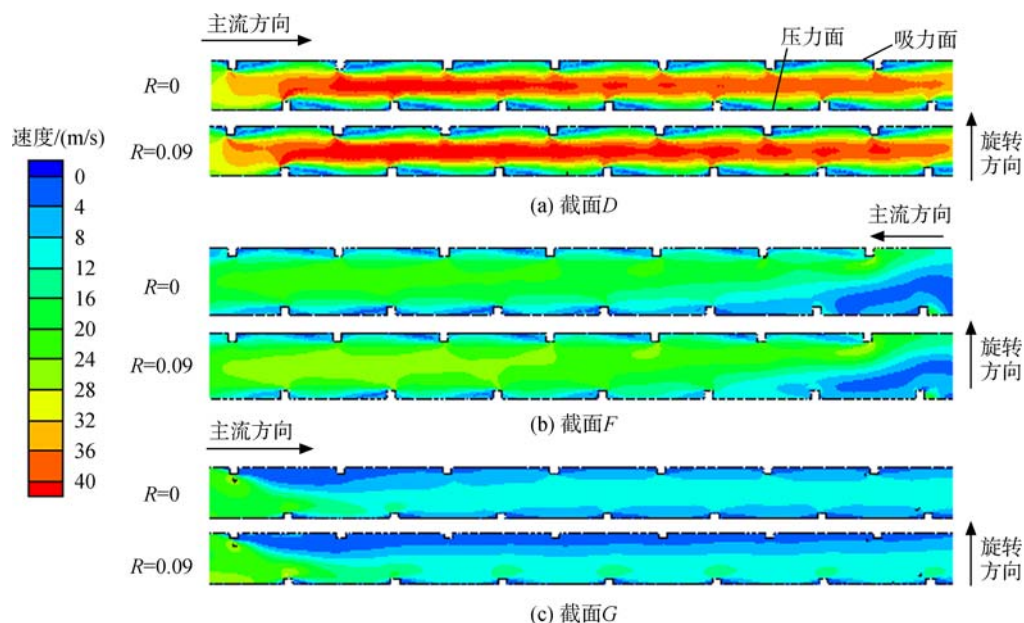


图12 静止与旋转状态下通道截面D,F,G的速度云图

Fig. 12 Velocity contour on sections D, F, G in stationary and rotating passage

旋转状态( $R=0.09$ )下的速度云图,其中截面 D 位于第 1 通道,截面 F 位于第 2 通道,截面 G 位于第 3 通道,截面位置如图 6 所示. 流体在通道 1 入口段流动比较平缓,流经肋后,由于肋的存在使有效流通面积变小,流体被压缩,通道中间主流流动速度增大,同时,肋的存在使流动阻力变大,使得第 1 通道后半段流体速度有了明显的下降. 从图 12(a)可以看出截面 D 主流在旋转状态下的速度要比静止状态下高,在旋转状态下,流体受到径向向外离心力的作用,在通道 1 中,离心力方向和主流流动方向一致,离心力在一定程度上促进了通道 1 中流体的流动. 截面 F 靠近通道 2 第 1 分隔板,从图 12(b)可以看出,截面 F 上主流速度沿流体流向逐渐增大,这是通道 2 中二次流作用的结果,二次流促进通道 2 中第 2 分隔板侧高速流体向第 1 分隔板侧低速区域流动;另外,相比静止状态下,旋转状态下截面 F 上流体速度沿主流方向增加得更快,表明旋转增加了通道 2 中二次流的流动. 在图 12(c)上,对比截面 G 在静止与旋转状态下的流体速度分布云图,可以看出在通道高度方向上速度差异较大. 通道 3 较宽,且通道中肋为楔形直肋,通道 3 中肋的扰流作用较弱,因此旋转所产生的切向哥氏力对第 3 通道的流动影响较大. 流体进入通道 3 时,主流向压力面偏移,靠近吸力面附近流体速度较低,由于肋的扰流作用,主流逐渐向通道中间过渡,吸力面附近流体速度有所增大. 在静止状态下,经过 2 排肋的作用,吸力面与压力面附近流体速度基本一致;在旋转状况下,虽然靠近吸力面附近的低速区域面积逐渐变小,但由于受到指向压力面的切向哥氏力作用,主流一直偏向于压力面,使得压力面附近流体速度高于吸力面.

## 5 结 论

为了能够详细地了解涡轮叶片内冷完整通道中流体的流动特性,对完整 S 型带肋通道进行了数值模拟,研究了肋、出流、转弯以及旋转对 S 型带肋通道流动特性的影响,得出以下结论:

1) 通道 1 靠近前缘侧较窄,阻塞比高,肋的扰流作用强,同时流体流动阻力损失也越大,流体速度较低;受转弯以及尾缘孔出流的影响,通道 3 靠近第 2 分隔板侧存在较大范围低速区.

2) 受转弯的影响,转弯段流体在分隔板顶部会出现流动分离,第 1 转弯段吸力面流动分离程度高于压力面,第 2 转弯段压力面流动分离程度高于吸力面;转弯使流体在转弯下游通道发生偏

移,通道 2 主流偏向第 2 分隔板侧,通道 3 主流偏向尾缘侧.

3) 旋转产生的切向哥氏力使流体向哥氏力指向面偏移,通道 2 与通道 3 主流分别偏向吸力面与压力面,通道 1 由于肋的扰流作用较强,主流偏移不明显.

4) 旋转影响通道中二次流的分布,推动高速主流流向低速区域,增强了通道 2 第 1 分隔板侧与通道 3 第 2 分隔板侧流体的流动.

## 参考文献:

- [1] Graham A, Sewall E, Thole K A. Flowfield measurements in a ribbed channel relevant to internal turbine blade cooling[R]. ASME Paper 2004-GT-53361, 2004.
- [2] Cho H H, Lee S Y, Wu S J. The combined effects of rib arrangements and discrete ribs on local heat/mass transfer in a square duct[R]. ASME Paper 2001-GT-0175, 2001.
- [3] Bunker R S, Osgood S J. The effect of turbulator lean on heat transfer and friction in a square channel[R]. ASME Paper 2003-GT-38137, 2003.
- [4] Maurer M, von Wolfersdorf J, Gritsch M. An experimental and numerical study of heat transfer and pressure loss in a rectangular channel with V-shaped ribs[J]. Journal of Turbomachinery, 2007, 129(4): 800-808.
- [5] Maurer M, von Wolfersdorf J, Gritsch M. An experimental and numerical study of heat transfer and pressure losses of V- and W-shaped ribs at high Reynolds numbers[R]. ASME Paper 2007-GT-27167, 2007.
- [6] Elfert M, Jarius M P, Weigand B. Detailed flow investigation using PIV in a typical turbine cooling geometry with ribbed walls[R]. ASME Paper 2004-GT-53566, 2004.
- [7] 陈伟, 阚瑞, 任静, 等. 涡轮叶片内部冷却通道传热和压力分布特性的实验[J]. 航空动力学报, 2010, 25(12): 2779-2786. CHEN Wei, KAN Rui, REN Jing, et al. Experimental investigation of heat transfer and pressure drop in a two-pass internal coolant passages of gas turbine airfoil[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(12): 2779-2786. (in Chinese)
- [8] 阚瑞, 陈伟, 任静, 等. 梯形带肋内部冷却通道的流动及传热特性[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(5): 753-756. KAN Rui, CHEN Wei, REN Jing, et al. Aero-thermodynamical characteristics in a ribbed trapezoidal internal cooling system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(5): 753-756. (in Chinese)
- [9] 王晓增, 张丽, 朱惠人, 等. 涡轮叶片内部回转通道的换热实验[J]. 航空动力学报, 2011, 26(7): 1495-1501. WANG Xiaozeng, ZHANG Li, ZHU Huiren, et al. Heat transfer measurements of turn-over channel in turbine blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(7): 1495-1501. (in Chinese)
- [10] Liu Y H, Huh M, Rhee D H, et al. Heat transfer in leading edge, triangular shaped cooling channels with angled ribs

- under high rotation numbers[J]. Journal of Turbomachinery, 2009, 131(4): 041017. 1-041017. 12.
- [11] Liu Y H, Huh M, Han J C, et al. High rotation number effect on heat transfer in a triangular channel with  $45^\circ$ , inverted  $45^\circ$ , and  $90^\circ$  ribs[J]. Journal of Heat Transfer, 2010, 132(7): 71702-71711.
- [12] ZHOU Fuguo, Acharya S. Heat transfer at high rotation numbers in a two-pass 4:1 aspect ratio rectangular channel with 45 deg skewed ribs[J]. Journal of Turbomachinery, 2008, 130(2): 21019-21030.
- [13] 刘传凯, 邓宏武, 陶智, 等. 旋转蛇形通道内冷气流动和换热的数值模拟[J]. 航空动力学报, 2005, 20(4): 662-667.  
LIU Chuankai, DENG Hongwu, TAO Zhi, et al. Prediction of turbulent flow and heat transfer with in rotating U-shaped passages[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(4): 662-667. (in Chinese)
- [14] 刘传凯, 丁水汀, 邱天, 等. 旋转方位角对斜肋通道内部流动与换热的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(10): 1188-1191.  
LIU Chuankai, DING Shuiting, QIU Tian, et al. Effects of channel orientation on fluid flow and heat transfer in a channel with angled ribs[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(10): 1188-1191. (in Chinese)
- [15] Coletti F, Cresci I, Arts T. Time-resolved PIV measurements of turbulent flow in rotating rib-roughened channel with Coriolis and buoyancy forces[R]. ASME Paper 2012-GT-69406, 2012.
- [16] 邓宏武, 魏喆, 陶智, 等. 旋转状态下蛇形通道内流动与换热的机理研究[J]. 航空学报, 2005, 26(4): 411-416.  
DENG Hongwu, WEI Zhe, TAO Zhi, et al. Study on mechanism of turbulent flow and heat transfer in rotating passages[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(4): 411-416. (in Chinese)
- [17] 郑杰, 朱惠人, 赵曙, 等. 湍流模型对旋转状态下S型带肋回转通道内部换热特性的影响[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(9): 2090-2095.  
ZHENG Jie, ZHU Hui ren, ZHAO Shu, et al. Influences of turbulence models on heat transfer of rotating ribber S-bend passage[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(9): 2090-2095. (in Chinese)
- [18] 苏福斌, 朱惠人, 郭涛, 等. 内冷通道带肋和出流孔壁面的换热研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(7): 1500-1506.  
SU Fubin, ZHU Hui ren, GUO Tao, et al. Heat transfer enhancement within an internal passage by combinations of ribs and suction holes[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(7): 1500-1506. (in Chinese)

(编辑: 陈 越)