

文章编号:1000-8055(2012)10-2188-06

直接供气预旋转静系流动和换热数值模拟

罗 翔, 冯 野, 徐国强, 赵 熙, 赵 南

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 采用 CFD 商业软件 FLUENT 分别从维度模型和湍流模型两个角度对接近真实的高压涡轮旋转盘腔进行数值模拟, 研究了一种直接供气预旋转静系旋转盘腔模型内的流动和换热特性. 通过计算研究发现: 低位腔内的流动仅由中心入流控制, 二维计算不能反映高位腔内中心入流与预旋入流的掺混; 二维和三维计算所得的腔内压力分布相似, 实验值介于两者之间; 主盘面的换热主要受中心入流控制, 二维和三维计算差别不大, Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型在定性和定量上均能更好地反映换热实验结果.

关 键 词: 旋转盘腔; 涡轮盘; 直接供气预旋系统; 流动和换热; 数值模拟

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Numerical simulation of flow and heat transfer performances in a direct transfer pre-swirl system

LUO Xiang, FENG Ye, XU Guo-qiang, ZHAO Xi, ZHAO Nan

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics,
School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100191, China)

Abstract: In order to investigate the flow and heat transfer performances in a direct transfer pre-swirl system, a numerical study was conducted by using CFD commercial software FLUENT with dimensional model and turbulence model respectively. Through the comparison, the following conclusions can be drawn: flow of the lower cavity is determined by the central inflow, and the two-dimensional computation does not reflect mixing of the central inflow and pre-swirl inflow in the higher cavity. Pressure distribution of the two- and three-dimensional computation is similar, and the measurements are within the two results; the heat transfer of the main disk is determined by the central inflow, the two- and three-dimensional computation is almost identical, and heat transfer results of Realizable $k-\epsilon$ turbulence model are mainly good with the measurements qualitatively and quantitatively.

Key words: rotating disk system; turbine disk; direct transfer pre-swirl system; flow and heat transfer; numerical simulation

为了有效地冷却高压涡轮盘和转子叶片, 现代航空燃气涡轮发动机二次空气系统往往采用中心进气和预旋进气共同提供冷却空气. 从预旋喷

嘴射入的冷却空气, 几乎相对静止地进入叶片冷却孔, 从而降低了接收孔入流冷气的相对总温. 冷却空气经由动盘上的冷气接收孔, 进入叶片内冷

收稿日期: 2012-01-16

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20121015.1020.201210.2188_016.html

作者简介: 罗翔(1973—), 男, 四川成都人, 副教授, 博士, 主要研究航空发动机旋转部件的流动换热.

通道以冷却叶片,中心进气进入转静腔室并径向流过涡轮盘,通过转静封严篦齿流出,不但减少了主流高温燃气入侵,而且降低了盘面温度。

对于预旋转静系旋转盘腔的流动和换热,国内外学者进行了大量研究. Karabay 等^[1-3], Yan 等^[4], Farzaneh-Gord 等^[5], Lewis 等^[6]对预旋孔相对接收孔位于低半径处的预旋系统进行了深入研究. Schneider 等^[7-8]研究了预旋孔位于高半径时的流动结构. Jarzombek 等^[9]研究了预旋孔几何参数对预旋系统性能的影响. 丁水汀, 陶智, 徐国强, 罗翔等^[10-14]对预旋进气角度及旋转盘腔内的流动和换热进行了实验研究.

本文对预旋孔与接收孔位于同半径位置的直接供气预旋转静系进行了数值研究,分别从维度模型和湍流模型两个角度将流动结构、压力分布以及盘面换热特性的数值模拟结果与实验数据进行了比较,验证了方法的计算精度。

1 数值计算简介

1.1 物理模型

预旋进气转静系旋转盘腔盘腔的实验结构如图 1 所示。

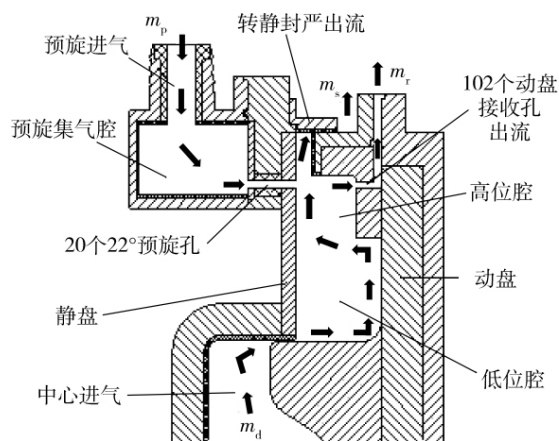


图 1 直接供气预旋转静系实验结构图

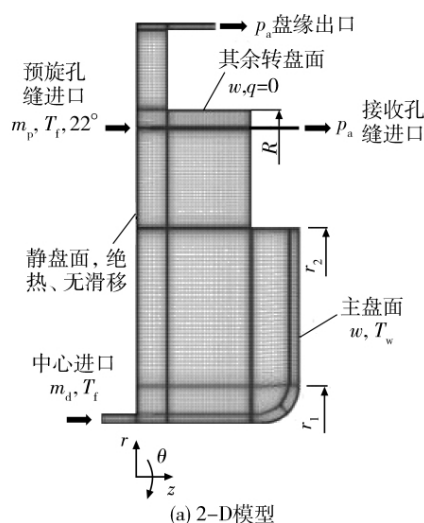
Fig. 1 Schematic diagram of a direct transfer pre-swirl system

预旋集气腔的进口为其外环面上焊接的 10 个内径为 20 mm 的进气嘴, 气流进入预旋集气腔后经过 20 个直径为 5.3 mm、与节圆切线夹角为 22° 的预旋孔 (预旋方向与转盘旋转方向一致) 流入转静腔, 其中进气嘴与预旋孔按周期性对称布置。中心入流在进入转静腔前变为环形入流。转静腔内的气流分别经过构型环上的 102 个直径为 4.6 mm 的动盘接收孔以及轮盘外缘的转静封严

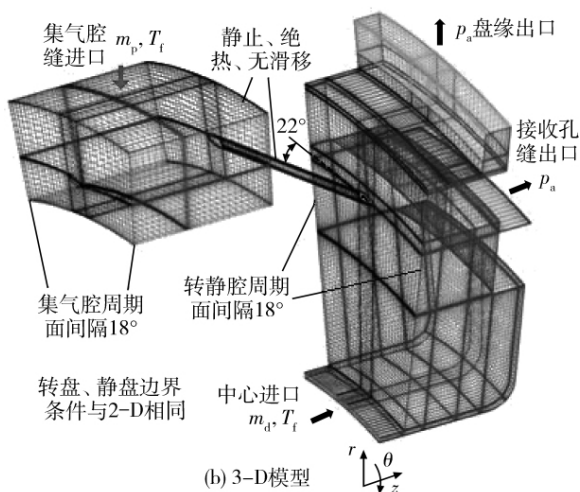
間隙流入大気.

1.2 几何模型

根据实验结构图得到用于数值模拟计算的二维(2-D)和三维(3-D)几何模型如图 2(a)和图 2(b)所示。模型的几何尺寸与实验结构一致,进口和出口采用等效面积法简化。二维模型中,省略集气腔,预旋孔和动盘接收孔折合为缝。三维模型中,为避免动静坐标系的转换,预旋集气腔进口和动盘接收孔出口折合为缝。由于旋转盘腔流动具有周向周期性特征,所以模型中预旋集气腔以及转静腔均为圆周的 $1/20$ 。



(a) 2-D模型



(b) 3-D模型

图 2 二维、三维计算网格及边界条件

Fig. 2 Mesh and boundary conditions of the two- and three-dimensional computation

1.3 计算方法

计算工质为空气理想气体,除密度外其余物性参数均为常数.对于可压流,动量方程与能量方程须联立求解,在静止或旋转坐标系下,定常、常

物性流体流动和换热的连续、动量、能量方程可参见文献[15];本文采用 FLUENT 软件进行计算,求解静止坐标系下的控制方程,能量方程中忽略了压力功及耗散项;方程的离散采用 2 阶迎风格式;压力与速度的耦合采用 SIMPLE(semi-implicit method for pressure linked equations)算法。

二维计算中,对转盘和静盘壁面附近的网格进行了加密,网格增长率分别为 1.1 和 1.2;对于不同计算工况,转盘边界附近的第 1 层网格小于 0.03 mm、静盘边界小于 0.08 mm 时,均满足各湍流模型对 y^+ 的要求。计算域内最大网格尺寸小于 1.8 mm,进行网格无关解验证后网格节点总数约为 3.5 万。

三维计算中,沿周向设置了 45 个节点并在预旋孔附近进行了局部加密;壁面附近以及转静腔 r - z 平面的网格设置与二维模型的近似。计算域内最大网格尺寸在转静腔内小于 2 mm、在集气腔内小于 2.5 mm,进行网格无关解验证后网格节点总数约为 150 万。

为比较不同湍流模型的差异,计算中除使用 Realizable k - ϵ 模型外,还考察了标准 k - ϵ 、 k - ω 、RNG(renormalization group)及 SST(shear stress transport)模型对计算结果的影响。

1.4 边界条件

中心流量 m_d 、预旋流量 m_p 以及盘转速 ω 均按实验值给定;2 个进口处进口温度 T_i 相同,取为换热实验测得的进口温度时间平均值,约为 320 K。

二维计算中规定了进口方向,预旋角为 22° ,预旋方向与转盘旋转方向相同。进口湍流度设为 5%,长度尺度为 1 mm。主盘($r_1=0.245\text{ mm}<r<r_2=0.305\text{ mm}$)给定由实验所得从开始加热至热色液晶显色的时间平均温度,约为 310 K(由进口温度插值并平均得到);其余转盘和静盘边界均给定绝热、无滑移条件。

为应对三维模型盘缘转静封严间隙出口以及迭代过程中动盘接收缝出口可能出现的回流,设置回流温度为 300 K、压力为 101325 Pa、湍流强度为 5%。集气腔和转静腔周期面给定周期性边界条件。

2 计算结果分析

2.1 腔内流动结构

图 3 为二维和三维计算得到的中心和预旋 2 股气流在转静腔内的流动结构。对于二维结果,如图 3(a)所示,中心进气主流 m_d (红色流线)进入腔内后沿动盘面流动,在高低位腔分界处($r=r_2$)折转后冲向静盘,在黏性力的作用下,低位腔中心主流与静盘之间形成了环状螺旋运动的旋转核区。此后中心主流在预旋进口附近分两路:一路与预旋主流(蓝色流线)相遇从盘缘出口流出;另一路则折向动盘并由动盘接收缝出口流出。预旋主流 m_p 进入腔内后则直接流向盘缘出口,高位腔及出口段内均观察不到两股主流之间的掺混,这体现了二维模拟的局限性。采用三维模型后,由图

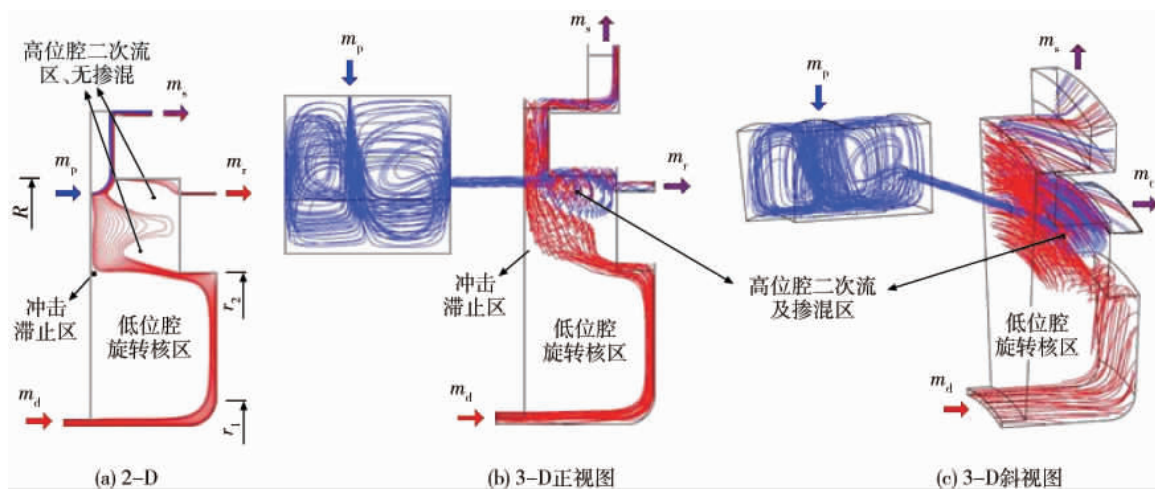


图 3 二维、三维主流流动结构($m_d=700\text{ kg/h}$, $\omega=3000\text{ r/min}$, realizable k - ϵ)

Fig. 3 Flow structure of the two-and three-dimensional computation ($m_d=700\text{ kg/h}$, $\omega=3000\text{ r/min}$, realizable k - ϵ)

3(b)、图 3(c)中可看到在高位腔和出口段内两股主流均发生了掺混,接收缝出流 m_r 和盘缘出流 m_s 均各自含有中心主流和预旋主流的组分.对比图 3(b)、图 3(c)两图还可看到,2 股主流的掺混出现在高位腔及出口段内,低位腔内则只存在中心主流,这说明低位腔内主盘面的换热只由中心主流控制.实验或者工程应用中,中心进气和预旋进气两股主流的温度难以保证相同,因此对高位腔的转盘高位面,由于主流间的掺混,使得传热系数的参考温度无法确定,因而也无法确定其换热规律.

2.2 不同平面压力分布

图 4 给出了计算结果的取值位置,图 5、图 6 给出了典型工况下图 4 所示的腔内不同平面的压力分布云图.图 5 中,由于预旋孔的存在,静盘压力分布在高位腔($r_2 < r < R$)和出口段($r > R$)内呈比较明显的二维特性.预旋孔附近由于射流速度较高,流体动压头较大,静压则相应较小.在低位腔内($r < r_2$),由于受轴对称的中心射流的控制,静盘压力在周向上的变化比较小,呈轴对称分布.图 6(a)、图 6(b)为三维计算模型所得结果,图 6(c)为二维模型计算结果.从图中可以看出,三维计算结果的 2 个 r - z 截面上压力的大小和分布均比较接近;而二维和三维结果相比则表明虽然压力分布形式相似,但在低位腔和高位腔内二维计算结果的压力值显著低于三维计算结果.

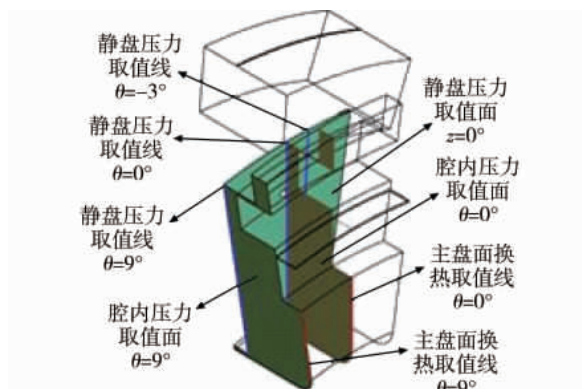


图 4 计算结果取值位置

Fig. 4 Locations of the analysis data

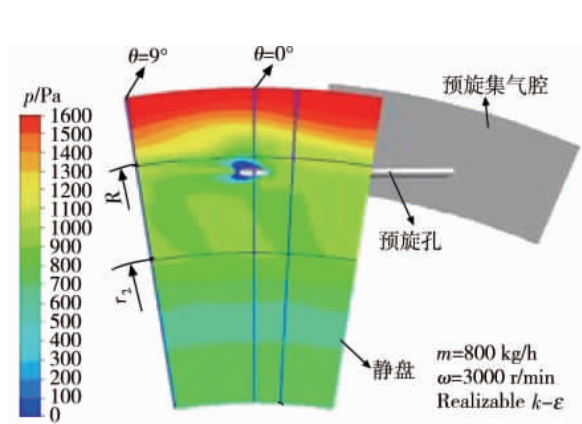


图 5 静盘压力分布云图

Fig. 5 Pressure contours of the stator disk

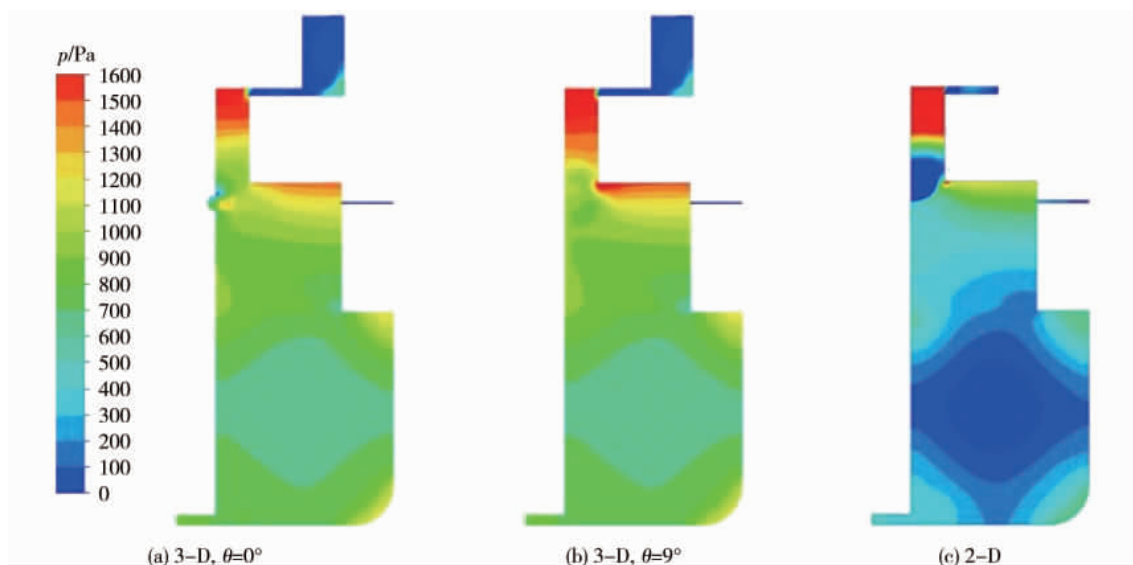


图 6 腔内 r - z 平面压力分布云图 ($m=800 \text{ kg/h}$, $\omega=3000 \text{ r/min}$, Realizable k - ϵ)

Fig. 6 Pressure contours of the r - z face ($m=800 \text{ kg/h}$, $\omega=3000 \text{ r/min}$, Realizable k - ϵ)

图 7 为图 5 所示的静盘压力在 3 个周向位置 ($\theta=0^\circ, -3^\circ, 9^\circ$) 随半径变化的关系,图中同时还

给出了同工况下的二维计算结果和测量结果(实验中测点周向位置 $\theta=-3^\circ$).由图可见,三维计算

结果中不同周向位置的压力分布在腔内预旋进口下方的区域($r < r_p$)变化较小, $\theta = 0^\circ$ 时在预旋进口附近静压出现极小值. 三维、二维计算以及实验所得的静盘压力在低位腔和高位腔内的分布形状较相似, 但三维结果比实验值偏高, 二维结果则偏低; 二维结果在预旋进口上方的区域与实验值偏离很大. 总体看来, 对于压力的计算三维模拟要优于二维.

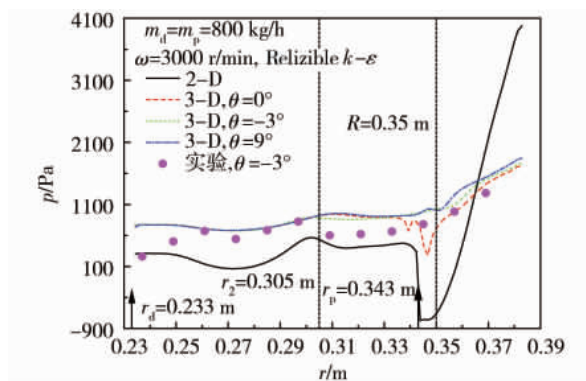


图 7 2-D 和 3-D 静盘压力计算结果比较

Fig. 7 Pressure comparison between the two- and three-dimensional computation

2.3 盘面局部努塞尔数

图 8 所示为主盘面局部努塞尔数的二维、三维计算以及选取低位腔进口气流温度为参考温度所得实验值的比较. 由于低位腔内受中心进气主流的控制, 预旋进气对主盘面换热的影响很小, 因此在三维计算结果中 $\theta = 0^\circ$ 和 $\theta = 9^\circ$ 处的努塞尔数差异也很小. 二维和三维计算所得的局部努塞尔数在除高低半径区域外的较大半径范围内相差不大, 且与实验结果符合较好. 这说明对于主盘面换

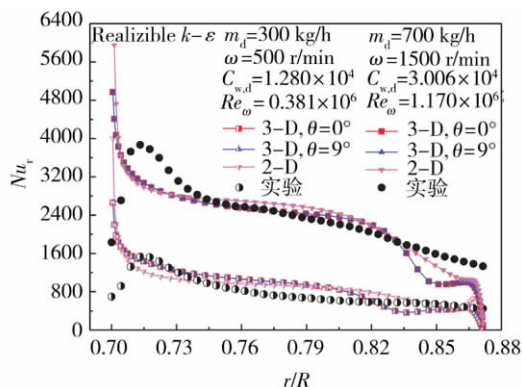


图 8 2-D 和 3-D 换热计算结果比较

Fig. 8 Heat transfer comparison between the two- and three-dimensional computation

热的数值计算采用二维模拟已能得到较可靠的结果.

图 9 给出了二维模拟中使用不同湍流模型时计算所得的主盘面局部努塞尔数与实验结果的对比情况. 由图可得使用 Realizable $k-\epsilon$ 和 $k-\epsilon$ 模型计算所得的局部努塞尔数与实验结果符合最好, RNG 模型计算值比实验值偏大, 而 $k-\omega$ 和 SST 模型计算值在低半径处偏大高半径处则偏小. 这进一步说明本文采用二维计算域配合 Realizable $k-\epsilon$ 模型对旋转盘腔内盘面换热进行数值计算是比较恰当的, 但由前面的讨论看到, 这一计算方法对实验结构内压力的模拟并不适宜. 基于此原因, 下面仅给出换热实验工况二维计算所得的主盘面平均努塞尔数 Nu_{av} 与实验结果的对比, 如图 10 所示. 由图中可见计算结果能很好的反映实验规律, 且定量上在大多数工况下与实验值一致性较好.

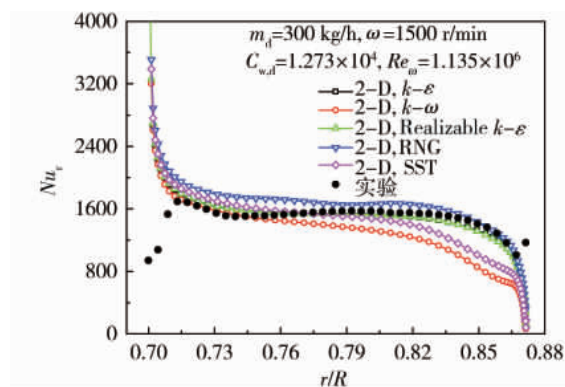


图 9 不同湍流模型换热计算结果比较

Fig. 9 Heat transfer comparison among the different turbulence models

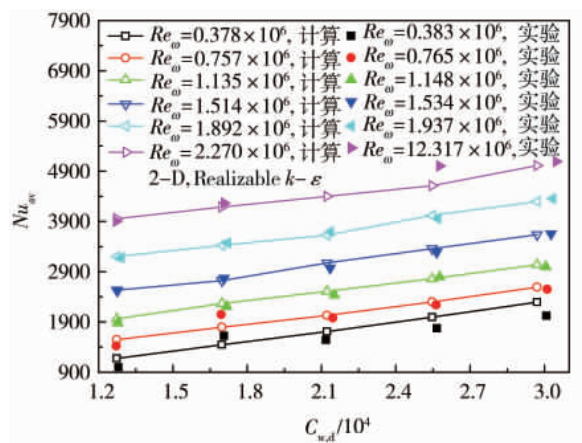


图 10 主盘面平均努塞尔数的 2-D 计算结果

Fig. 10 Nu_{av} of the main disk surface of the two-dimensional computation

3 结 论

1) 对腔内流动的数值计算表明:低位腔的流动只由中心主流控制;与三维计算相比,二维计算不能反应高位腔和出口段内中心主流与预旋主流的掺混。

2) 二维和三维计算所得的腔内压力在分布上相似,但定量上差异较大;就除出口段外的静盘压力而言,与实验值相比三维计算结果偏大,二维结果显著偏小。

3) 对主盘面换热的数值计算表明:二维和三维计算差别不大,主盘面的换热主要受中心进气主流的控制。与标准 $k-\epsilon$, $k-\omega$, RNG 及 SST 等湍流模型相比,采用 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型在定性和定量上均能更好地反应换热实验结果。

参考文献:

- [1] Karabay H, Chen J X, Pilbrow R. Flow in a cover-plate pre-swirl rotor-stator system[J]. Transactions of the ASME, 1999, 121(1): 160-166.
- [2] Karabay H, Pilbrow R, Wilson M. Performance of pre-swirl rotating-disc systems[J]. Transactions of the ASME, 2000, 122(3): 442-450.
- [3] Karabay H, Wilson M, Owen J M. Approximate solutions for flow and heat transfer in pre-swirl rotating-disc systems[R]. AMSE Paper 2001-GT-0200, 2001.
- [4] Yan Y, Farzaneh-Gord M, Lock G D, et al. Fluid dynamics of a pre-swirl rotor-stator system[J]. Journal of turbomachinery, 2003, 125(4): 641-647.
- [5] Farzaneh-Gord M, Wilson M, Owen J M. Numerical and theoretical study of flow and heat transfer in a pre-swirl rotor-stator system[R]. ASME Paper GT2005-6813, 2005.
- [6] Lewis P W, Wilson M, Lock G. Physical interpretation of flow and heat transfer in pre-swirl systems[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2007, 129(3): 769-778.
- [7] Schneider O, Dohmen H J, Benra F K. Analysis of dust separation inside a pre-swirl cooling air system[R]. ISRO-MAC10-2004-029, 2004.
- [8] Schneider O, Dohmen H J, Benra F K. Investigations of dust separation in the internal cooling air system of gas turbines[R]. ASME Paper GT2003-38293, 2003.
- [9] Jarzombek K, Dohmen H J, Benra F K. Flow analysis in gas turbine pre-swirl cooling air systems: variation of geometric parameters[R]. ASME Paper GT2006-90445, 2006.
- [10] 丁水汀, 陶智, 徐国强. 带进气预旋的旋转空腔平均换热特性研究[J]. 航空动力学报, 1998, 13(3): 277-280.
DING Shuiting, TAO Zhi, XU Guoqing. A study on averaged heat transfer characteristics of a rotating cavity with preswirling inflow[J]. Journal of Aerospace Power, 1998, 13(3): 277-280. (in Chinese)
- [11] 丁水汀, 徐国强, 陶智. 外缘预旋进气的旋转空腔主盘局部换热及流阻特性研究[J]. 推进技术, 1998, 19(6): 45-49.
DING Shuiting, XU Guoqing, TAO Zhi. Local heat transfer and flow characteristics of rotating cavity with tangential pre-swirling fringe guide van and radial outlet[J]. Journal of Propulsion Technology, 1998, 19(6): 45-49. (in Chinese)
- [12] 罗翔, 徐国强, 陶智. 30°预旋进气旋转盘流动与换热特性的实验[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(3): 290-293.
LUO Xiang, XU Guoqing, TAO Zhi. Flow and heat transfer in rotor-stator system with pre-swirl angle of 30°[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(3): 290-293. (in Chinese)
- [13] 罗翔, 徐国强, 陶智. 进气角度对旋转盘冷却效果的影响[J]. 推进技术, 2007, 28(3): 240-244.
LUO Xiang, XU Guoqing, TAO Zhi. Cooling effectiveness in a rotor-stator system with different pre-swirl angles[J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28(3): 240-244. (in Chinese)
- [14] 丁水汀, 李焱, 张弓. 旋转盘腔预旋角度的敏感性分析[J]. 航空动力学报, 2011, 26(10): 2251-2257.
DING Shuiting, LI Ye, ZHANG Gong. Sensibility analysis of inlet pre-swirl angle in the rotating cavity[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(10): 2251-2257. (in Chinese)
- [15] 陈懋章. 粘性流体动力学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.