带肋变截面回转通道内流动与换热的数值模拟

朱剑琴 徐国强 陶 智 丁水汀

(北京航空航天大学 航空发动机气动热力重点实验室，北京 100191)

摘 要：开发了三维流动换热的通用计算程序，数值研究了带肋变截面回转通道内流动与换热的特性. 湍流模型采用低雷诺数 k-ε 模型. 通道肋间距为 25 mm，肋高分别为 1 mm，1.5 mm，2 mm，冷气进口雷诺数 Re 分别为 7 500，12 500，18 500，25 000. 计算结果表明：①通道的平均努赛尔数均随进口雷诺数的增大而增大；②对于 Re=7 500 和 12 500，肋高越高，换热越强；对于 Re=18 500 和 25 000，肋高为 1.5 mm 的通道换热最强；③局部雷诺数的不同和离心力的影响导致通道内各区域的局部换热随肋高的变化趋势并不一致；在进口段，肋高越高，换热越强；在出口段，当 Re=7 500 和 12 500 时，肋高越高，换热越强，而当 Re=18 500 和 25 000 时，存在最佳肋高 1.5 mm.

关 键 词：通道流动；换热；数值模拟

中图分类号：V 231.1

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)01-0018-05

Numerical investigation of heat transfer and flow resistance in U-shaped variable cross-section channels with different rib heights

Zhu Jianqin Xu Guoqiang Tao Zhi Ding Shuiting

(National Key Laboratory on Aero-Engines, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The flow and temperature distribution in U-shaped variable cross-section channels with different rib heights was investigated numerically by a new developed three-dimensional Navier-Stokes code with low Reynolds number k-ε turbulence model. The rib pitch is 25 mm and the rib heights are 1 mm, 1.5 mm, 2 mm respectively. The Reynolds number Re based on the inlet velocity of the cooling air and hydraulic diameter are 7 500, 12 500, 18 500, 25 000. Numerical results reveal that the average Nusselt number of the channel increases with the increase of Reynolds number. The enhanced heat transfer was achieved with the higher rib height e when Re is equal to 7 500 and 12 500. The higher heat transfer characteristics can be reached for the case of e=1.5 mm when Re is equal to 18 500 and 25 000. The effects of rib heights on local heat transfer show different behavior due to the different local Reynolds numbers and centrifugal force. The higher rib height e enhanced the heat transfer of inflow passage. In outflow passage, the higher the rib height, the better heat transfer behavior is produced for Re=7 500 and 12 500, while for Re=18 500 and 25 000 the optimum rib height is 1.5 mm.

Key words: channel flow; heat transfer; simulation

随着高性能航空发动机的发展及涡轮前燃气温度的不断提高，涡轮叶片的工作环境越来越恶劣，其冷却技术日益成为航空领域的研究热点. 当前涡轮叶片内部冷却结构仍以叶片中部的带肋回转通道和叶片尾缘的扰流柱排为主. 对于带肋回转通道，肋的扰流和转弯段附近由离心力引起的二次流使得通道内的流动和换热特性变得非常复杂，因此研究各因素对其流动换热的影响机理就显得特别重要.

从 20 世纪 80 年代起至今，关于带肋等截面

收稿日期：2008-01-04

作者简介：朱剑琴(1983—)，女，湖南衡阳人，博士生，zhujianqinbuaa@sina.com.

回转通道的换热规律国外已经进行了较多的研究[1-3]. 文献[2－3]对不同几何参数下带肋等截面回转通道进行了静态实验研究,研究表明不同几何参数下通道的换热效果存在较大的差别,肋与流向夹角为 60°时换热效果最好.

然而真实涡轮叶片的内冷通道都是变截面的,因此近年来国内外对变截面带肋通道换热规律也进行了研究. 文献[4]实验研究了梯形变截面通道并与等截面通道换热进行了比较. 结果表明,变截面回转通道使得转弯段二次流的作用更加明显,其换热效果要优于等截面通道. 文献[5]通过实验研究了变截面光滑回转通道的换热及其流阻规律. 在没有肋片因素影响的条件下,变截面对于回转通道的流动换热的影响得到了充分的体现. 文献[6－7]实验研究了肋间距、肋高、肋角度等因素对该通道换热和流阻的影响规律. 但由于实验采用的是热电偶测温,因此无法给出详尽的局部换热信息.

综上所述,目前对这方面的研究多采用实验方法,然而肋的扰流、转弯段的存在以及变截面等多种因素使得通道内流动特性非常复杂,实验研究很难全面地展现其流动结构,并探索各因素对换热的影响机理. 因此本文采用自行开发的"HITRANS"三维流动换热计算程序,对带肋变截面回转通道的流动与换热进行了数值模拟. 研究了肋间距一定,不同肋高条件下通道换热的变化规律,并基于数值模拟结果对变截面回转通道内流动与换热机理进行了系统的分析.

1　数学物理模型

1.1　几何模型

图 1 为以某涡轮叶片中部的内冷通道为原型简化而得到的几何模型. 通道由进口段通道、转弯段和出口段通道三段组成,其中带肋表面在进口段和出口段保持沿流向均匀缩小,而通道侧面在进口段沿流向均匀扩大,沿出口段均匀缩小. 进口段的上下表面共布置了 10 对肋,出口段的上下表面共布置了 11 对肋,转弯段和通道侧面不带肋. 进口水力直径 $D_{in}=16.3$ mm,肋与流动方向的夹角为 90°,肋宽为 2 mm,肋间距 P 为 25 mm. 计算中选取肋高 e 分别为 1,1.5 和 2 mm. 故肋高与水力直径比 e/D_{in}(以下简称高径比)分别为0.061,0.092 和 0.123.

图 2 为通道截面面积沿流向的变化规律. 从图中可以看出,进口段截面积逐渐增大,接近转弯段时略微减小;在转弯段截面积迅速增大后又迅速减小;在出口段截面积递减很快.

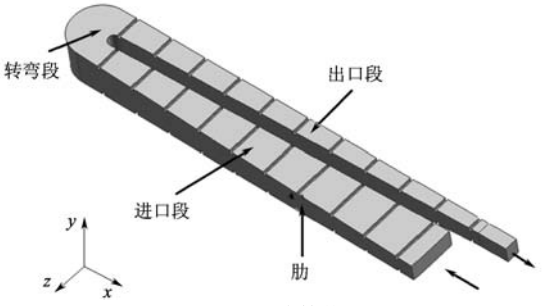


图 1　计算模型

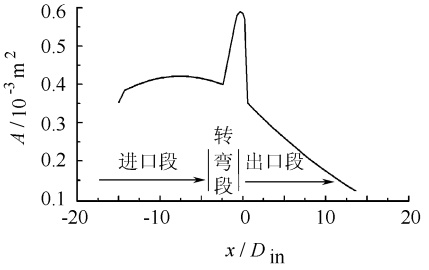


图 2　通道截面面积沿流向的变化曲线

1.2　计算模型及边界条件

"HITRANS"是一个可以计算三维粘性可压/不可压、瞬态/稳态流动换热的通用程序. 根据圆管层流的理论解和圆管湍流的经典实验数据[8],已经对程序的计算准确性进行了验证. 所求解的方程组为 ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian)描述下的粘性三维 Navier-Stokes 湍流时均运动方程. 时间的离散采用的是向前差分法,空间的离散采用的是有限体积法. 网格划分采用任意六面体网格单元,并采用交错网格体系,定义除速度外的热力学参数位于单元的中心,定义速度矢量位于单元的角点上. 对流项的计算采用准二阶迎风格式. 计算模型壁面附近的网格进行了加密,网格数约为 14 万,整体网格如图 3 所示. 湍流模型采用的是低 Re 数 k-ε 模型,计算中保证靠近壁面第一层网格的 $y^+<2$.

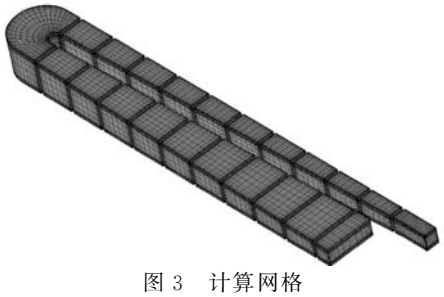


图 3　计算网格

进口给定冷气的速度和温度,出口为充分发展边界条件并给定静压 1×10^5 Pa. 通道的带肋内

表面为等热流边界条件,通道侧面为绝热边界条件.进口湍动能为进口平均动能的5%.

1.3 参数定义及计算工况

将计算域沿流向划分为若干个块,进口段和出口段每一个块都包含一个肋,因此进口段共为10个块,出口段为11个块,转弯段独自为1个块,编号如图4所示.定义块换热系数为 $h_b=q_w/(T_{wb}-T_{inb})$,平均换热系数定义为 $h_{ave}=\sum h_b \cdot A_b/\sum A_b$,通道的平均努赛尔数定义为 $Nu_{ave}=h_{ave} \cdot D_{in}/\lambda_{in}$,块努赛尔数定义为 $Nu_b=h_b \cdot D_b/\lambda_{inb}$,通道的进口雷诺数定义为 $Re=\rho_{in} \cdot u_{in} \cdot D_{in}/\mu_{in}$.其中 q_w 为壁面热流,λ_{in},ρ_{in},u_{in},μ_{in},D_{in} 分别为冷气进口导热系数、密度、速度、动力粘性系数和通道的进口水力直径,A_b,T_{wb},T_{inb},D_b,λ_{inb} 分别为块的表面积、平均壁面温度、进口温度、水力直径和进口导热系数.

本文对于光滑通道,高径比为0.061,0.092,0.123这4种模型进行了计算,进口雷诺数分别为7 500,12 500,18 500,25 000.

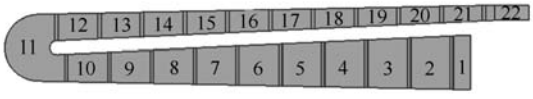


图4 通道块编号示意图

2 结果分析

2.1 变截面对光滑通道局部换热的影响

图5为不同进口雷诺数下光滑通道的块努赛尔数的沿程分布图.从图中可以看出,随着进口雷诺数的增大,整个通道的块努赛尔数亦增大;在靠近进口区域,由于进口效应,努赛尔数降低较快,随着流动的充分发展,努赛尔数的变化趋于平缓;在转弯段区域,由于流体的冲击和离心力所引起的二次流,使得换热大大增强;从图中可以看到,块努赛尔数的最大值出现在转弯段下游的第1个块,因为在该区域由离心力引起的二次流起到了强化换热的作用.而在出口段由于离心力的影响逐渐降低,块努赛尔数也迅速下降后趋于平滑.

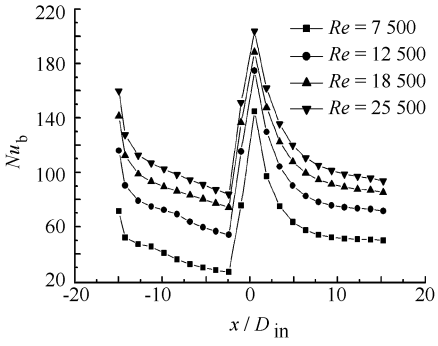


图5 光滑通道块努赛尔数的沿程分布

从图中还可以看到,出口段充分发展时的块努赛尔数明显大于进口段充分发展时的块努赛尔数,且在进口雷诺数较低时这种差别非常明显.这是由于出口段为渐缩通道,通道的截面积沿流向下降的非常迅速,在各工况下出口段的局部雷诺数明显大于进口段的局部雷诺数,从而决定了充分发展时出口段的换热比进口段的换热要强.

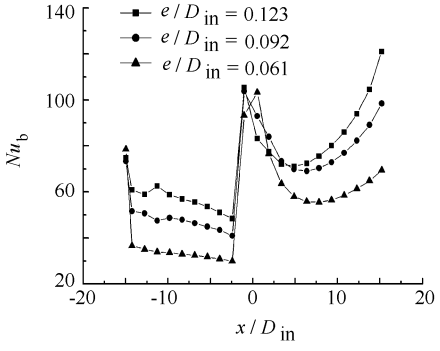
2.2 肋高对变截面带肋通道局部换热的影响

图6为各进口雷诺数下不同肋高的块努赛尔数沿程分布图.由图知,对于所有的进口雷诺数,在进口区域,均是高径比越大换热越差,并且这种现象在高进口雷诺数时尤为明显.这是因为在进口区域通道高度较小,当肋越高时,对进口区域壁面附近处流动的阻碍效应越大,使得壁面附近的流速显著降低,边界层增厚,从而弱化了换热.

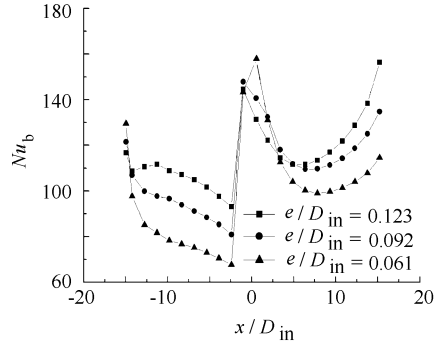
在进口段的充分发展区域,对于所有的进口雷诺数,均呈现出高径比越大则换热越好的规律.这是因为进口段的通道高度沿流向不断的增大,两肋之间的流体得到充分的发展,且由于局部雷诺数不高,流体与肋的上端面贴附得较好,不存在与肋的前缘分离的问题.图7为块5在 $Re=25\,000$时,不同高径比下的局部努赛尔数分布图.从图中可以看出,不管是在肋后涡区、再覆区还是肋表面,高径比为0.123的局部努赛尔数都始终大于高径比为0.092及0.061的局部努赛尔数.对于高径比为0.123和0.092的两个通道,二者的换热强度在肋后涡区以及肋表面都非常接近,但在再覆区则前者比后者要强.这是因为主流从肋表面冲到再覆点时,肋越高,垂直于壁面的速度矢量越大,类似冲击射流,再覆点下游的边界层越薄,换热越强.因此,在主流与肋表面贴附较好的前提下,高径比越大,换热越强.

在转弯区域及其下游附近,从图6可以看出,换热的规律为高径比越小换热越强.之前已经提到,对于光滑通道,由于离心力引起的二次流,使得转弯段下游附近区域的换热得到了强化.但当这个区域布置了肋以后,肋的存在不仅消弱了离心力的影响,降低了二次流的强度,且肋越高时,这种消极的作用就越强.因此在这个区域出现了高径比越小换热越好的趋势,且进口雷诺数越大,趋势越明显.

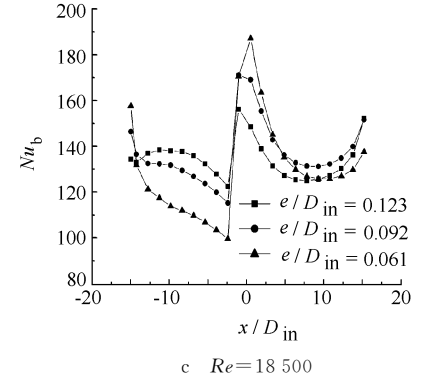
在出口段的充分发展区域,高径比对换热的影响变得复杂.当进口雷诺数较低时($Re=7\,500$和$Re=12\,500$),影响规律为高径比越大换热越强,其产生机理与进口段的充分发展区域类似.且



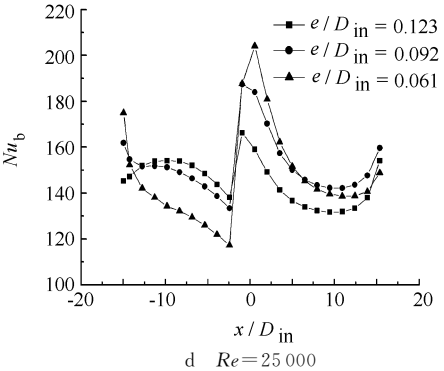
a　$Re=7\,500$



b　$Re=12\,500$



c　$Re=18\,500$



d　$Re=25\,000$

图 6　各进口雷诺数下不同肋高的块努赛尔数沿程分布

由于肋的强化和通道截面积渐缩的双重积极作用,使得该区域的换热大大强于进口段的充分发展区.但当进口雷诺数较高时($Re=18\,500$ 和 $Re=25\,000$),高径比对该区域换热影响不再单调,高径比为 0.092 时,换热最强.这是因为在出口段的充分发展区域,影响换热的因素较多:转弯段残留的二次流、横截面迅速下降造成的流体加速、肋的存在等.这个区域里横截面积较进口有了大幅的下降,它的局部雷诺数近乎进口雷诺数的 2 倍.在局部雷诺数过高的情况下,会出现部分流体与肋前缘分离的现象,如图 8 所示.图 8 为 $Re=25\,000$、高径比为 0.123 时,块 21 的流场矢量图.从该图可以看出,在局部雷诺数较高和肋高较大的双重因素作用下,部分流体在肋的前缘处具有垂直于肋表面向中心处流动的速度分量,当肋越高时,该分量会越大.这部分速度分量,不仅会造成肋后涡的结构松散,弱化肋后涡与主流之间的质量和能量交换,从而降低肋后涡区的换热,并且会导致两肋之间近壁区流体质量流量的减少,从而减弱再覆区的壁面换热.

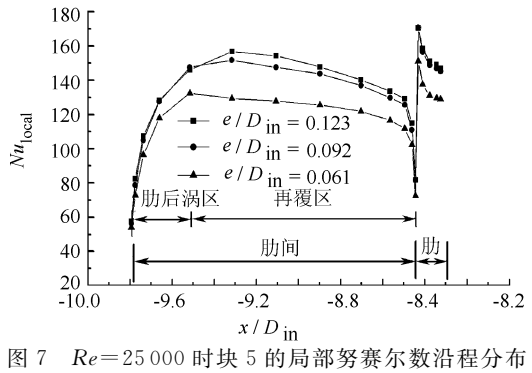


图 7　$Re=25\,000$ 时块 5 的局部努赛尔数沿程分布

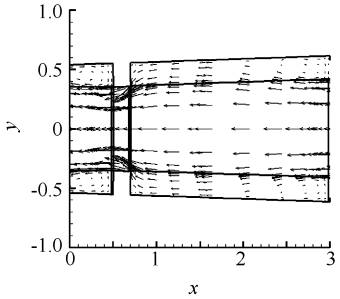


图 8　$Re=25\,000$,$e/D_{in}=0.123$ 时块 21 的流场矢量图

2.3　通道平均换热的变化规律

图 9 为不同雷诺数下光滑通道的平均努塞尔数 Nu_{ave} 计算值和实验值的比较图.从图中可以看出,对于 4 个工况,计算值与实验值都很接近.最大差别发生在 $Re=25\,000$ 时,计算值和实验值相

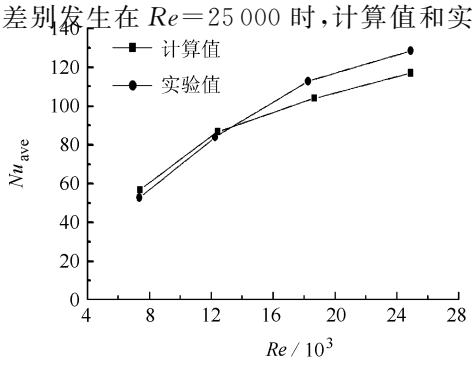


图 9　光滑通道平均努赛尔数计算与实验比较图

差9%.由此可见,程序的计算准确度是可靠的.

图10为光滑通道和不同高径比下通道的平均努赛尔数 Nu_{ave} 随进口雷诺数的变化图.从图中可以看出,对于各种模型,通道的平均努赛尔数 Nu_{ave} 均随着进口雷诺数的增大而增大.在进口雷诺数较低时,高径比为0.123时的通道平均换热最强,并且高径比越小换热越差,呈单调趋势.然而随着进口雷诺数的增高,不同肋高下的平均努赛尔数差别减小,高径比为0.092时的通道平均换热最强,高径比对换热的影响不再呈单调趋势.

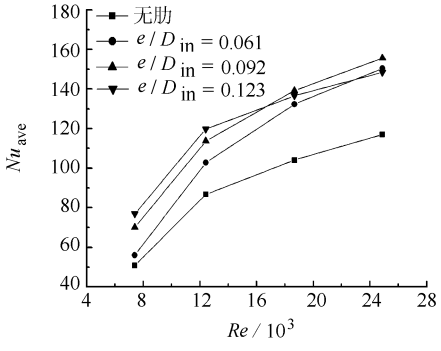


图10 不同肋高下平均努赛尔数随 Re 变化图

3 结 论

本文利用自行开发的计算三维流动换热的通用程序,研究了肋间距一定,不同肋高下的变截面回转通道内的流动和换热特性.系统分析了进口雷诺数、肋高、回转段、变截面等多种因素对通道内局部换热的耦合影响机理.得到了以下主要结论:

1) 对于无肋和各种肋高模型,变截面回转通道的平均努赛尔数 Nu_{ave} 均随进口雷诺数的增大而增大.

2) 当进口雷诺数较低时(Re = 7 500 和12 500),通道的平均换热强度随着肋高的增大而增大,呈单调趋势,肋高为2 mm时通道的平均换热最强;当进口雷诺数较高时(Re = 18 500 和25 000),肋高为1.5 mm时通道的平均换热最强,肋高对平均换热的影响不再单调.

3) 对于变截面通道,局部雷诺数的不同以及离心力影响,导致通道内各区域的换热随肋高的变化趋势并不一致.在进口段,肋高越大,换热越强.在出口段,进口雷诺数较低时(Re = 7 500 和12 500),肋高越大,换热越强;而当进口雷诺数较高时(Re = 18 500 和 25 000),存在最佳肋高1.5 mm.

参考文献(References)

[1] Chyu M K. Regional heat transfer in two-pass and three-pass passages with 180° turns [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1991,113:63-70

[2] Ekkad S V, Han J C. Detailed heat transfer distributions in two-pass square channels with rib turbulators [J]. Int J Heat Mass Transfer, 1997,40(11):2525-2537

[3] Ekkad S V, Huang Y Z, Han J C. Detailed heat transfer distributions in two-pass square channels with rib turbulators and bleed holes[J]. Int J Heat Mass Transfer, 1987, 41(23): 3781-3791

[4] Ekkad S V, Pamula G, Shantiniketanam M. Detailed heat transfer measurements inside straight and tapered two-pass channels with turbulators [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2000,22:155-163

[5] Hirota M, Fujita H, Cai H, et al. Heat (mass) transfer in rectangular cross-sectioned two-pass channels with an inclined divider wall[J]. Int J Heat Mass Transfer, 2002,45: 1093-1107

[6] Liu X Y, Ding S T, Tao Z, et al. Heat transfer characteristic inside two-pass variable cross-section channels with ribs and bleed holes[R]. ASME GT2004-53529,2004

[7] 刘湘云,丁水汀,陶智,等.变截面U型通道内肋高对换热特性影响的实验[J].航空动力学报,2007,22(7):1138-1141
Liu Xiangyun, Ding Shuiting, Tao Zhi, et al. Experimental study of heat transfer in snake-shaped variable cross-section channels with different rib heights[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(7): 1138-1141(in Chinese)

[8] 吴望一.流体力学[M].北京:北京大学出版社,1983
Wu Wangyi. Fluid dynamics[M]. Beijing: Peking University Press, 1983(in Chinese)

(责任编辑:张 嵘)