

文章编号: 1000-8055(2009)09-1989-05

微小通道在叶片冷却结构中的应用研究

马世岩, 徐国强, 邓宏武, 陶 智, 丁水汀
(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重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 采用数值计算的方法, 针对涡轮叶片中部的微小通道冷却结构进行了换热以及流阻特性的分析, 得到了微小通道宽高比和肋厚高比对其特性的影响。在进口雷诺数 $Re = 11\,000$ 时, 若肋厚高比一定, 则该冷却结构的综合换热效果随微小通道宽高比的增加先增加后减小; 若微小通道宽高比一定, 则该冷却结构的综合换热效果随肋厚高比的增加呈现先增加后减小的趋势。

关 键 词: 微小通道; 涡轮叶片; 换热; 流阻

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Research on application of micro channel in the blade cooling structure

MA Shi-yan, XU Guo-qiang, DENG Hong-wu, TAO Zhi, DING Shui-ting

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

Abstract: Numerical method was used to analyze the characteristics of heat transfer and flow resistance in micro channels in the middle of turbine blades; and the effect of aspect ratio and the rib aspect ratio in the micro channels was also studied. The result shows: in the case of the inlet $Re = 11\,000$, if the rib aspect ratio is invariable, and the aspect ratio of micro channel increases, the integrated effect of heat transfer will increase firstly and then decrease; if the aspect ratio is invariable, and the rib aspect ratio increases, the integrated effect of heat transfer also will increase firstly and then decrease.

Key words: micro channel; turbine blade; heat transfer; flow resistance

叶片冷却技术是提高航空发动机涡轮前温度, 从而提高发动机性能的重要手段之一。探索有效的冷却方式, 已成为现代高性能涡轮叶片设计技术的一个重要研究领域。微小通道内的流动换热在生物技术和生物医学工程、微机电技术和微电子工程等领域有着广泛的应用背景, 是当前传热学研究的前沿热点之一^[1-3]。通常认为 $1\,\mu\text{m} \sim 1\,\text{mm}$ 范围内为微小尺度, 由于微小通道的当量直径小, 在换热上具有优越性, 故可考虑将其应用于航空发动机涡轮叶片的冷却结构中。国内外对微

小通道的研究从上个世纪 50 年代就开始了, 但是由于该结构研究的影响因素和难点众多, 直到目前研究还不成熟^[4]。刘庆东等人对微小通道冷却结构进行了一系列实验^[5], 得出了该换热方式的优缺点。

本文在文献[5]研究的基础上, 针对微小通道在涡轮叶片中的应用情况进行了换热和流阻特性的数值研究, 以得到微小通道宽高比和肋厚高比对其特性的影响。

收稿日期: 2008-09-10; 修订日期: 2008-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(50606002)

作者简介: 马世岩(1985 -), 男, 山东单县人, 硕士生, 主要从事微小通道的换热研究。

1 研究对象及数值计算方法

1.1 研究对象

根据微小通道的换热特点,北航旋转换热组提出将该冷却结构应用于涡轮叶片的中部和尾缘部分,即图1中的1和2区域.

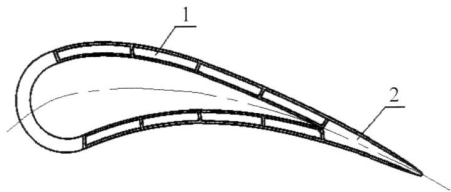


图1 微小通道在涡轮叶片中的应用示意图

Fig.1 Picture of micro channel in turbine blade

在此冷却结构中,把冷气布置在最需要冷却的地方——与主燃气接触的叶片外表面,从而更好的实现冷却.另外,微小通道内表面上具有的流向微槽一方面起到强化传热的作用,使叶片的冷却效果更好,另一方面通过对通道内冷却气体流动特性的影响,进而影响冷却通道的传热特性,达到冷却叶片、提高效率的作用.因此,对微小通道冷却结构的换热研究就显得尤为重要.

微小通道在涡轮叶片中部的应用可简化为图2所示的模型:

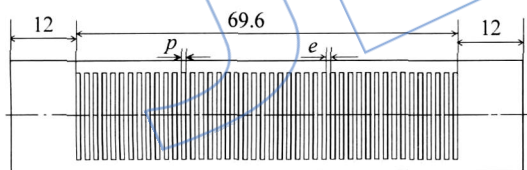


图2 微小通道冷却结构横截面

Fig.2 Cross section of micro channel

文献[5]就是根据该简化模型设计的实验.图中数值为文献[5]中的实验件横截面^[5]的参数:肋厚 e 为 0.8 mm,微小通道宽 p 分别取 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 mm,通道长为 150 mm,高 h 为 15 mm.

对于图2所示的实验模型,在计算时考虑到模型的特点,即每个小通道都是上下左右对称的,故计算时可只取一个小通道的四分之一,如图3中实线部分所示.

计算中采用软件 STAR-CD,划分网格并进行计算.在划分网格时,对于图3中的流固耦合面1和2附近的流体区域进行网格加密.

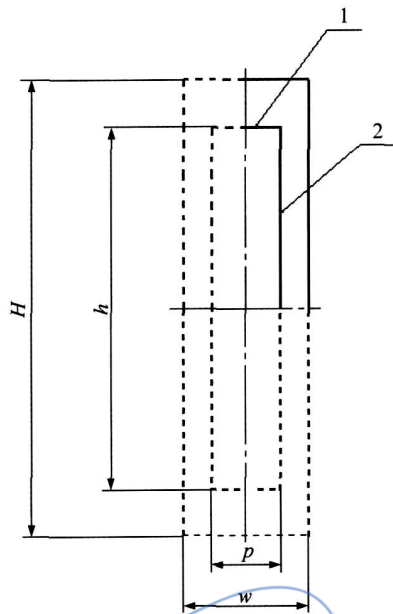


图3 简化的计算模型

Fig.3 Simulation model

为了和实验作对比,计算时选取了和实验相同的模型尺寸和边界条件,并分别选取层流模型和 $k-\epsilon$ 湍流模型,以得到和实验吻合较好的计算模型.

1.2 数据处理

克努森数的定义: $Kn = \frac{\lambda}{D}$,其中 λ 为空气分子的平均自由程, D 为通道的当量直径.所研究

所有通道 $Kn < 2 \times 10^{-4}$,一般认为 $Kn < 0.001$ 为连续介质区,故所研究对象均符合连续介质假说.

雷诺数^[6]的定义:取光通道时的当量直径作为特征尺度,进口温度作为特征温度,定义进口雷诺数 $Re = \frac{\dot{m} d_e}{\mu A_{in}}$,由进口质量流量可知实验中通道进口 Re 在 10500~61000 之间变化若定义 $Re_s = \frac{\dot{m}_s d_{es}}{\mu A_s}$,即以小通道中的参数定义 Re 值,则实验中 Re_s 在 1000~9000 之间变化.

再定义如下参数:微小通道宽高比 $P = \frac{p}{h}$;肋

的厚高比 $E = \frac{e}{h}$;对流传热系数 $\alpha = \frac{Q}{A(t_{w2} - t_f)}$;

努塞尔数 $Nu = \frac{\alpha d_e}{\lambda_{\text{空气}}}$;阻力系数 $\xi = \frac{p_{in}^* - p_{out}^*}{\frac{1}{2} \rho_{in} u_{in}^2}$;综合

换热效果^[7] $\eta = (Nu / Nu_s) / (\xi / \xi_s)^{1/3}$.式中 A 为不带肋时光通道的面积,下标 in 代表进口,out 代表出口,s 代表光通道的值.

2 计算结果及分析

2.1 计算和实验结果的对比分析

对计算结果进行处理,引用文献[5]实验结果,并将两者进行对比,如下图所示.实验中所有实验件的肋厚均为 0.8 mm.

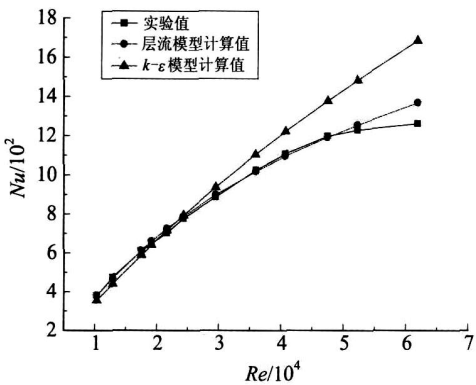


图 4 努塞尔数 Nu 随雷诺数 Re 的变化 ($p=0.4\text{ mm}$)
Fig. 4 Nusselt number versus Reynolds number
($p=0.4\text{ mm}$)

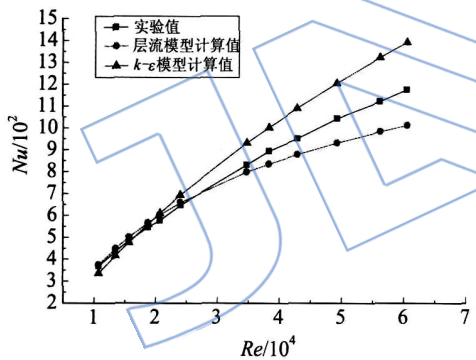


图 5 努塞尔数 Nu 随雷诺数 Re 的变化 ($p=0.6\text{ mm}$)
Fig. 5 Nusselt number versus Reynolds number
($p=0.6\text{ mm}$)

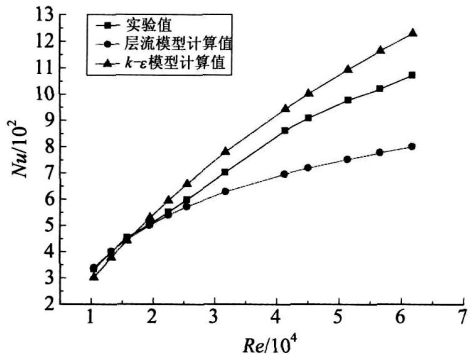


图 6 努塞尔数 Nu 随雷诺数 Re 的变化 ($p=0.8\text{ mm}$)
Fig. 6 Nusselt number versus Reynolds number
($p=0.8\text{ mm}$)

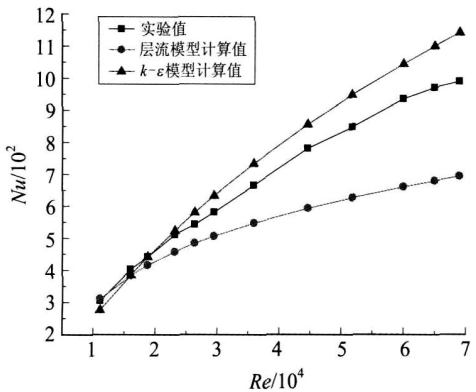


图 7 努塞尔数 Nu 随雷诺数 Re 的变化 ($p=1.0\text{ mm}$)
Fig. 7 Nusselt number versus Reynolds number
($p=1.0\text{ mm}$)

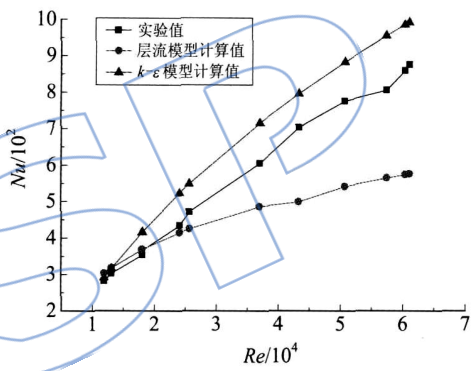


图 8 努塞尔数 Nu 随雷诺数 Re 的变化 ($p=1.2\text{ mm}$)
Fig. 8 Nusselt number versus Reynolds number
($p=1.2\text{ mm}$)

由上述各图可以看出:

在通道进口 Re 较小时,层流模型的计算结果和实验吻合的比较,但是随着 Re 的增加,该偏差会越来越大.在微小通道宽即当量直径越小时,层流模型的计算结果与实验吻合较好的 Re 范围越大.由此也可以看出,在微小通道的尺度下,当进口 Re 不太大时是可以利用层流模型来进行计算的.

在航空发动机上,由于涡轮叶片的尺寸较小,因此在考虑微小通道宽高比和肋厚高比对其性能的影响时,在实验基础上进一步对尺寸更小的结构进行了研究.对于北航旋转换热组提出的涡轮叶片冷却结构,满足实际应用的进口 Re 在 11 000 左右,此时对于不同通道 Re ,在 400~1 800 不等.从计算和文献[5]的对比中发现,对该结构用层流模型计算结果较好.因此,后续计算时取进口 $Re=11\,000$,所有模型的高度 h 为 15 mm,通道长为 150 mm,采用层流模型,以研究微小通

道宽高比和肋厚高比对微小通道冷却结构性能的影响.

2.2 微小通道宽高比对微小通道结构性能的影响

在 $Re = 11\,000$ 时,对于不同肋厚高比的微小通道结构,微小通道宽高比对其性能的影响如下图所示:

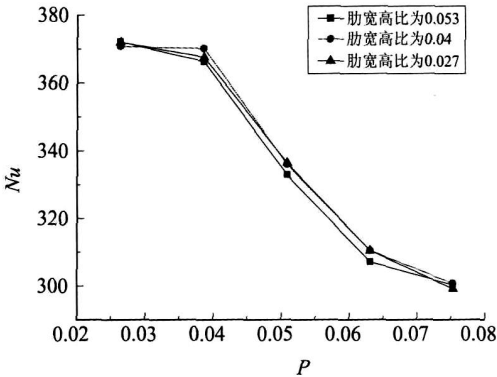


图 9 微小通道宽高比对努塞尔数的影响
Fig. 9 Nusselt number versus aspect ratio P

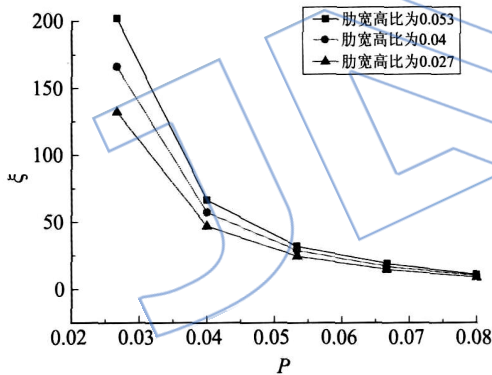


图 10 微小通道宽高比对阻力系数的影响
Fig. 10 Resistance coefficient versus aspect ratio P

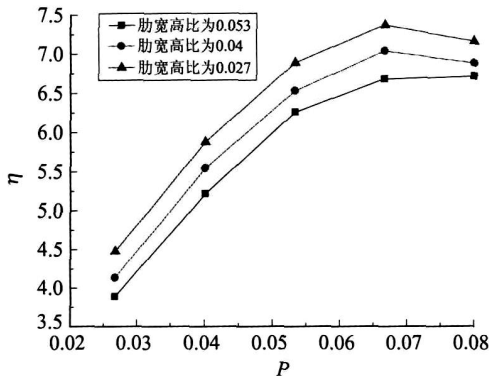


图 11 微小通道宽高比对综合换热效果的影响
Fig. 11 Integrated effect of heat transfer versus aspect ratio P

由上述各图可以看出:

在进口 Re 和肋厚高比一定的情况下,微小通道冷却结构的换热平均 Nu 随微小通道宽高比的增大而减小,阻力系数也随之减小,而综合换热效果则随之先增加后减小.这是因为在肋厚高比一定的情况下,微小通道宽高比的增加导致了微小通道数目的减少,这样通道换热的扩展面积也随之减小,从而使得换热平均 Nu 减小;同时,微小通道宽高比的增加导致了进口流通面积增加,引起进口速度和进出口压降减小,使得阻力系数减小; Nu 和阻力系数的减小导致了综合换热效果的出现先增加后减小的趋势,即存在一最佳的微小通道宽高比,使得该肋厚高比下通道的综合换热效果最好.

2.3 肋厚高比对微小通道结构性能的影响

在 $Re = 11\,000$ 时,对于不同微小通道宽高比的微小通道冷却结构,肋厚高比对其性能的影响如下图所示:

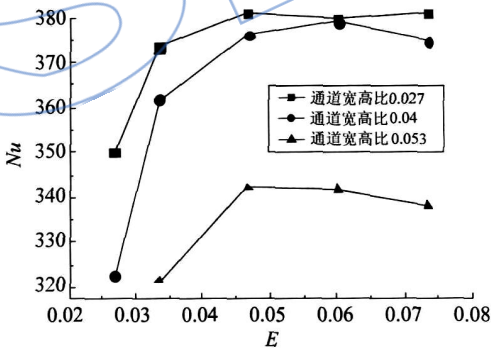


图 12 肋厚高比对努塞尔数的影响
Fig. 12 Nusselt number versus aspect ratio E

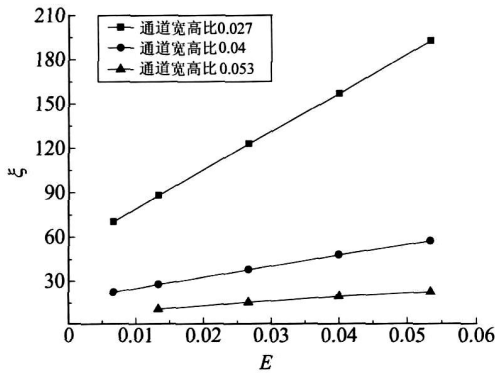


图 13 肋厚高比对阻力系数的影响
Fig. 13 Resistance coefficient versus aspect ratio E

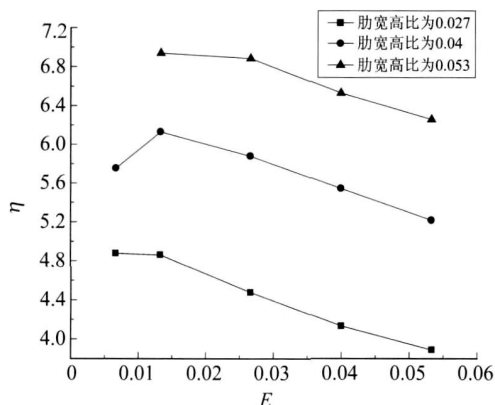


图14 肋厚高比对综合换热效果的影响

Fig. 14 Integrated effect of heat transfer versus aspect ratio E

由上述各图可以看出:

在进口 Re 和微小通道宽高比一定的情况下,微小通道冷却结构的平均 Nu 随肋厚高比的增加呈现先增加后减小的趋势,阻力系数随其增加而增加,综合换热效果随其增加也呈现先增加后减小的趋势。在微小通道宽高比一定的情况下,肋厚高比的增加导致了微小通道数目的减少,换热的扩展面积也随之减小,这使得换热有所减弱,但是肋厚高比的增加使得通过肋的导热得到了加强,从而使得 Nu 增加;当肋厚高比到了一定值,肋厚高比对换热的影响小于了扩展面积对换热的影响,此时 Nu 又随着肋厚高比的增加而减小。微小通道数目的减少使得进口流通面积减小,引起进口速度和进出口压降的升高,阻力系数随之增加。 Nu 和阻力系数的影响导致了综合换热效果也出现先增加后减小的趋势,即存在一最佳肋厚高比,使得该微小通道宽高比下通道的综合换热效果最好。

由上可知,存在一最优的微小通道宽高比和肋厚高比组合,使得微小通道的综合换热效果最好。

3 结 论

本文结合实验对微小通道冷却结构的换热以

及流阻特性进行了研究:

1) 在进口 Re 和肋厚高比一定的情况下,微小通道冷却结构的换热平均 Nu 随微小通道宽高比的增大而减小,阻力系数也随之减小,而综合换热效果则随之先增加后减小;

2) 在进口 Re 和微小通道宽高比一定的情况下,微小通道冷却结构的平均 Nu 随肋厚高比的增加呈现先增加后减小的趋势,阻力系数随其增加而增加,综合换热效果随其增加也呈现先增加后减小的趋势;

3) 上述分析可知,存在一最优的微小通道宽高比和肋厚高比组合,使得微小通道的综合换热效果最好。

参考文献:

- [1] Epstein A H, Senturia S D. Macro power from micro machinery [J]. Science, 1997, 276(5316):1211.
- [2] Brenchiey D L, Wegeng R S, Drost M K. Development of micro chemical and thermal systems [J]. Proceeding of Combustion Institute, 2002, 29(1):909-916.
- [3] 吕春红,任泰安.微尺度流动研究的历史与现状[J].重庆电力高等专科学校学报,2007,12(1):11-13.
L Ü Chunhong, REN Taian. The history and actuality of micro-scale research [J]. Journal of Chongqing Electric Power College, 2007, 12(1):11-13. (in Chinese)
- [4] 凌智勇,丁建宁,杨继昌,等.微流动的研究现状及影响因素[J].江苏大学学报,2002,23(6):1-4.
LING Zhiyong, DING Jianning, YANG Jichang, et al. Research advance in micro fluid and its influencing factors [J]. Journal of Jiangsu University, 2002, 23(6):1-4. (in Chinese)
- [5] 刘庆东.涡轮叶片新内冷结构的实验研究[D].北京:北京航空航天大学,2006.
LIU Qingdong. Experimental research of turbine blades' new internal cooling structure[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)
- [6] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].3版.北京:高等教育出版社,2002.
- [7] 马重芳,顾维藻,张玉明,等.强化传热[M].北京:科学出版社,1990.