

文章编号: 1000-8055(2008)07-1189-05

涡轮叶片尾缘通道中纵向肋对换热特性的影响

陶 智, 袁 星, 冼汀, 徐国强, 邓宏武

(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 100083)

摘 要: 采用冷凝水蒸汽的实验方法, 测量三种不同类型纵向肋对叶片尾缘通道的换热影响. 系统的研究了孔径为 2.6 mm 的带孔平肋, 波峰孔径为 3 mm、波谷孔径为 2.2 mm 的波浪肋, 和不带孔平肋之间的换热和流阻比较, 实验结果表明: 当 $Re < 20\,000$ 时, 波浪肋的换热优于带孔平肋, 当 $Re > 50\,000$ 时, 波浪肋换热不及不带孔平肋. 且波浪肋流阻远低于不带孔平肋和带孔平肋.

关 键 词: 换热特性; 涡轮叶片尾缘通道; 隔板; 流阻

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Effect of different clapboards structure in turbine blade trailing edge complex passages on heat transfer characteristics

TAO Zhi, YUAN Xing, DING Shu-ting, XU Guo-qiang, DENG Hong-wu

(National Key Laboratory on Aeroengines, School of Jet Propulsion,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The effect of three different dividers on the heat transfer of turbine blade trailing passage was investigated experimentally. The condensation vapor method was used in the experiment. Heat transfer and hydrodynamic drag were compared among the straight divider with hole of 2.6 mm in diameter, waved divider with hole of 3 mm in diameter on wave crest and hole of 2.2 mm in diameter on trough, and straight divider without hole. The waved divider gave better heat transfer than the straight divider with hole when the $Re < 20\,000$. For the case of $Re > 50\,000$, the waved divider showed worse heat transfer than the straight divider without hole. The drag of the waved divider was far less than that of the straight divider with or without hole.

Key words: heat transfer characteristics; turbine blade trailing edge; dividers; flowing resistance

现代航空发动机的性能随着发动机压缩比及涡轮前温度的提高而不断提高. 涡轮前温度的提高使得发动机热端部件叶片的冷却结构设计也日益复杂, 一般采用的方法是采用多腔冷却, 各腔依据不同的需求采用不同的冷却结构形式. 这使得叶片冷却更加合理, 减小热载荷变化过大而引起的热应力. 但复杂的冷却结构形式也使得冷气流

量的控制变得复杂. 叶片尾缘是涡轮叶片最重要的冷却区域. 一个典型的尾缘冷却结构形式是基于两通道设计, 一个通道为横肋强化换热腔, 另一个是多排交错扰流柱腔. 冷气分别从两通道根部进入, 扰流柱通道的冷气从根部进入后绕过尾缘下半部区域后从出流孔排出, 横肋腔的冷气从顶部进入扰流柱区对叶顶区域冷气进行补充.

收稿日期: 2007-06-21; 修订日期: 2008-04-08

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(50606002)

作者简介: 陶智(1963-), 男, 辽宁瓦房店人, 教授, 博士生导师, 主要从事传热与传质研究.

对于涡轮叶片的内冷通道的流动及换热,国际上从 20 世纪 80 年代初就围绕强化换热问题进行了研究.较早的研究是 Brown, Metzger^[1]等人对叉排短扰流柱的流动及换热情况进行的实验研究.其研究发现:局部的努塞尔数 Nu ,随着扰流柱排的增加有一个先增后减的过程,最大值一般出现在第 3 或第 4 排;Hwang^[2],对带扰流柱排的直通和 90° 折转通道的流动与换热特性作了详细的研究和比较,指出在直通情况下,换热系数沿渐缩通道方向递减,且在叉排分布扰流柱阵列中换热系数的值相对较高且均匀;在 90° 折转通道中,换热系数在出流孔处得到提高,而在边角处的换热系数较低.国内丁水汀、李莉、刘丽艳等人研究了涡轮叶片尾缘复合通道的换热,得出开孔均匀的隔板换热效果较好的结论^[3].波形肋的换热高于矩形肋换热,且流阻低^[4].

在文献[3-4]中,实验均采用了热色液晶法进行实验,但热色液晶本身存在一定的显色范围,且实验中仅能单面加热,与航空发动机真实环境还存在一定的差异.本文正是针对上述存在的问题,在文献[3-4]的基础上采用了新的冷凝水蒸汽实验法,有效地保证恒温环境下进行双面加热,从而更好的研究叶片尾缘通道中不同纵向肋(即隔板)对换热特性的影响.

1 实验装置

1.1 实验模型

本实验共设计了三种不同类型的纵向肋结构(又称隔板),分别是不带孔平肋、带孔平肋、波浪肋.不带孔平肋为叶片模型的原型,带孔平肋与波浪肋分别为叶片原始模型的改进型.三种肋的出流面积近似相等,相对误差< 3%.图 1 为波浪肋上下两排布置 30 个出流孔,波谷处孔径为 2.2 mm,波峰处孔径为 3 mm.

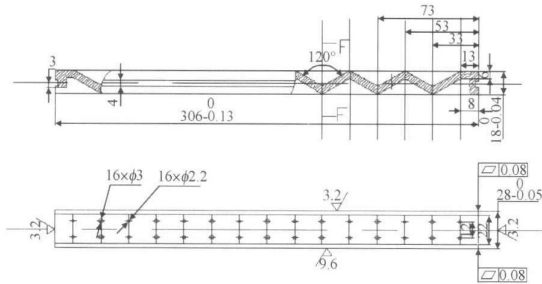


图 1 波浪肋实验结构图

Fig. 1 Schematic view of the wave divider

与波形肋相似,带孔平肋上下均匀布置两排孔径为 2.6 mm 的出流孔 30 个.不带孔平肋不设置出流孔,而在肋端附近开一个 6.6 mm × 24 mm 的缝隙.具体可见图 2.

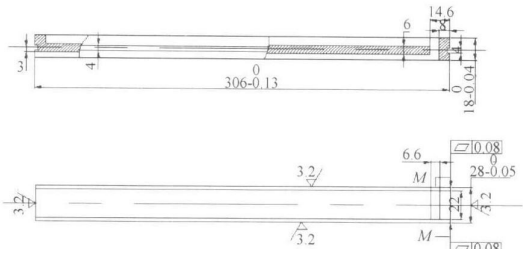


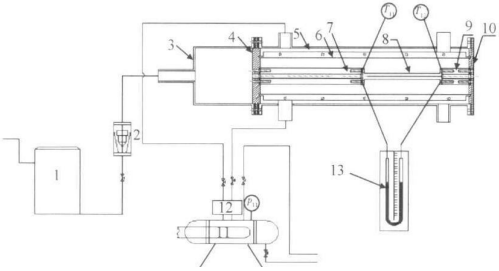
图 2 不带孔平肋实验件结构图

Fig. 2 Schematic view of the straight divider

1.2 实验台

全部的实验都在静止的状态下完成,其中换热实验采用了水蒸气凝换热方案.利用相变(沸腾或凝结)进行加热或冷却,是传热实验常用的加热或冷却方式.因为在相变过程中,介质温度可以保持不变,所以相变加热或冷却的方式可以创造出类似第一类的边界条件,即等壁温的边界条件.

流阻实验与换热实验同步进行,测量实验段中进口段与出口段的压力.整个实验的实验装置与文献[5]中完全相同,如图 3 所示.



1 稳压箱;2 浮子流量计;3 进气转接段;4 前隔板;5 蒸汽外腔;6 蒸汽内腔;7 进口段;8 实验件;9 出口段;10 后隔板;11 电热锅炉;12 稳压分流器;13 水银压差计;
 p_{11} 蒸气压力; T_{11} 冷却空气进口温度; T_{12} 冷却空气出口温度

图 3 实验台结构示意图

Fig. 3 Schematic view of the experimental set up

2 实验数据处理

2.1 评价指标

本实验中对于各种不同的隔板结构的强化换热效果进行比较,是通过以下几个指标来衡量:

1) 努塞尔数 $Nu = hD/\lambda$ 其中 $h = \dot{q}/(T_{\text{wavy}} - T_0)$; D 为入口的水力直径,其中 λ 为气体的导热

系数, 考虑到由于气流温度的变化, 气体导热系数会发生相应的变化, 所以对气体导热系数作如下的修正: $\lambda = \lambda_0 (T_0/273)^n$. λ_0 为标准状态下气体的导热系数, 其值为 $0.0259 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, n 取 0.82 , q 为经热损失实验修正得到的壁面加热热流; T_0 为进口温度; 平均壁温 $T_{w, \text{avr}}$ 由壁面温度按照面积加权得到.

2) 阻力系数 $\zeta = \Delta p / (\rho u^2 / 2)$, 其中压差 $\Delta p = p^* - p_0$, 即进口总压和出口压力的差值. 本实验中进口压力 p^* 为进口段总压, 出口压力 p_0 为劈缝后压力; ρ 为来流密度; u 为来流速度.

3) 换热效果与压力损失的比较 $Nu / \zeta^{1/3}$, 主要表征结构的换热性能, 在本实验的条件下, 称为综合换热效果.

2.2 换热效果比较

发动机叶片的原型即为不带孔平肋, 由于其换热效果不佳, 且换热不均匀. 目前我们提出了两种改进方式: 一种为带孔平肋, 另一种为波浪肋. 无论是带孔平肋还是波浪肋, 当气流沿纵向肋, 通过肋上的小孔流出, 进入到绕流柱区, 这样会形成射流, 冷却气可以不必折返直接冷却壁面, 从而使换热加强. 从下图 4 可以看出无论是带孔平肋还是波形肋, 在 $Re < 50\,000$ 内, 其换热相对于原始的不带孔平肋要好.

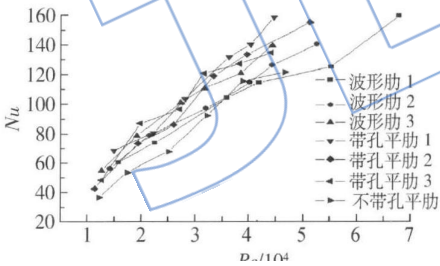


图 4 实验换热比较图

Fig. 4 Comparison of Nusselt numbers of tests

图 4 中波浪肋 1, 2, 3 分别代表不同时间的波浪肋实验, 带孔平肋与此相同. 由图 5 可见在雷诺数较低的情况下, 波浪肋的换热特性要好于带孔直肋和不带孔直肋的, 随着 Re 的增加, 波浪肋换热逐渐低于带孔平肋, 当 Re 数在 $20\,000$ 左右, 带孔平肋换热明显优于波浪肋. 当 Re 增至 $50\,000$ 左右, 波浪肋的换热不及不带孔平肋.

从波形肋和带孔平肋优化换热机理比较来看, 一方面当气流沿纵向肋通过肋上小孔进入扰流柱区时会形成射流, 由于射流的卷吸作用, 气体随着射流向下游流动, 射流的宽度将逐渐增加从

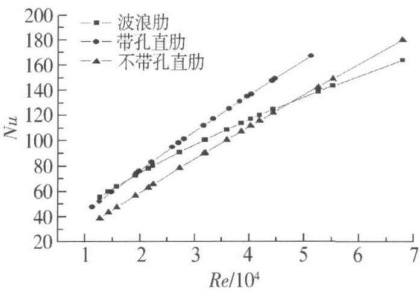


图 5 实验换热拟合曲线比

Fig. 5 Fit graph of Nusselt numbers of tests

而形成一个角度, 这种现象称为射流的扩散现象. 这样, 在隔板上的两孔之间就会形成换热死区, 严重影响扰流柱区的换热效果. 而如果沿着射流的这个扩散角度构建隔板就可以消除这些换热死区. 另一方面可从肋片强化换热方面考虑. 隔板做成波浪形, 与气流的接触面积增大, 相当于依附于直肋基础表面上的扩展表面, 即起到肋片强化换热的作用. 另外, 当气流在横肋通道内流动时, 由于波形隔板的存在, 使得气流呈现交替收缩、扩张的状态, 增加了通道内气流的湍流度, 破坏了附面层, 提高了换热效果. 但实验结果并非完全与理论设想一致. 这说明波浪肋与带孔直肋之间的优劣不仅仅与肋型有关, 还与肋上的开孔大小, 来流的大小存在一定的关系是一个综合作用的结果.

2.3 流阻比较

由图 6, 图 7 可见不带孔直肋流阻、波浪肋和带孔直肋的流阻系数随着 Re 的增大而减小. 从量值而言不带孔直肋的流阻系数要高于带孔直肋, 也高于波浪肋. $11\,000 < Re < 51\,200$ 时, 波浪肋阻力系数为 $55.9 \sim 47.9$; 带孔平肋阻力系数为 $60.8 \sim 56.3$; 不带孔平肋阻力系数为 $88.3 \sim 78.1$; 带孔直肋的流阻系数与不带孔直肋相比下降了 27.7% 到 31.2% , 波浪肋的流阻系数与不带孔直肋相比, 下降了 36.7% 到 38.5% . 波浪肋的流阻系数相对于带孔直肋下降 9% 到 17.3% .

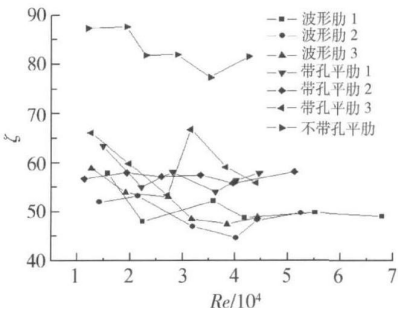


图 6 实验流阻比较图

Fig. 6 Comparison of pressure drop ratios of tests

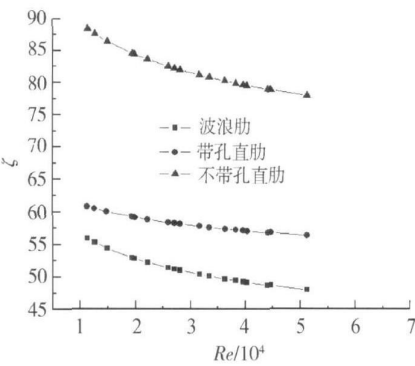


图 7 实验流阻拟合曲线比

Fig. 7 Fit graph of pressure drop ratios of tests

2.4 综合换热效果比较

为了评价综合换热效果,我们引入一个评价指标: $Nu/\zeta^{1/3}$. 基于实验数据,得到相关经验关系式如下:

波形肋: $Nu/\zeta^{1/3} = 0.024\ 03\ Re^{0.678\ 33}$
带孔平肋: $Nu/\zeta^{1/3} = 0.003\ 128\ Re^{0.881\ 08}$
不带孔平肋: $Nu/\zeta^{1/3} = 0.002\ 631\ Re^{0.868\ 98}$

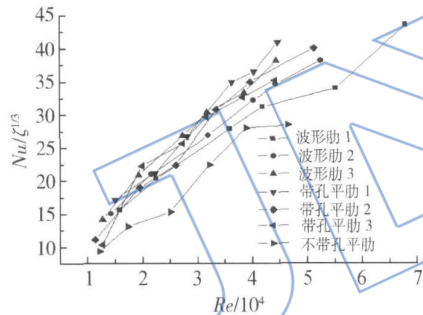


图 8 实验综合换热效果比较图

Fig. 8 Comparison of general heat transfer of tests

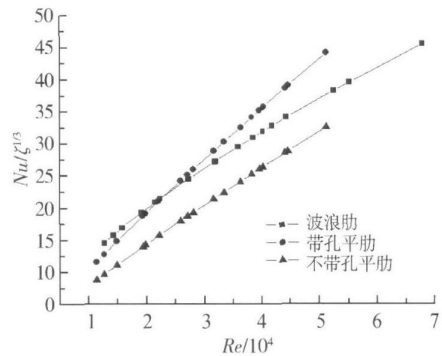


图 9 实验综合换热效果拟合曲线比较图

Fig. 9 Fit graph of general heat transfer of tests

从换热与流阻比较可知,波形肋和带孔平肋

在换热上都优于不带孔平肋,而流阻却远小于不带孔平肋,因此其综合换热效果 $Nu/\zeta^{1/3}$ 也必将优于不带孔平肋. 从图 8、图 9 可知,实验结果显示无论是带孔平肋还是波浪肋在综合换热效果比较上,都优于叶片原型的不带孔直肋,在 Re 较低时($Re < 27\ 500$),波浪肋要优于带孔平肋,而随着 Re 的增加,带孔平肋综合换热效果将逐渐大于波浪肋.

由不带孔叶片原型的改进成波浪肋和带孔平肋后,破坏了流体的附面层,缩短了流体冷却进程,因而换热加强,流阻降低,综合换热效果好,这已由实验结果得以证明.但是要进一步探讨研究波浪肋与带孔平肋之间的优劣,就需要更系统的了解实验件的换热细节.这有待下一阶段的实验加以研究.

3 结 论

- 1) 在 $Re < 2\ 000$ 时,波浪肋换热优于带孔平肋,当 $Re > 5\ 000$ 时,波浪肋换热不及不带孔平肋
- 2) 波浪肋和带孔平肋流阻远小于不带孔平肋,波浪肋流阻相对于带孔平肋下降 9% 到 17.3%.
- 3) 在综合换热效果比较中,波浪肋和带孔平肋均优于不带孔平肋,在 $Re < 27\ 500$ 时,波浪肋优于带孔平肋.

参考文献:

[1] Metzger D E, Berry R A. Developing heat transfer in rectangular ducts with staggered pin fins[J]. Trans ASME J Heat Transfer, 1982, 104: 700-706.
[2] Hwang J J, Lui C C. Detailed heat transfer characteristic comparison in rectangular and 90 deg turned trapezoidal ducts with pin fin arrays[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999, 42: 4005-4016.
[3] 李莉,丁水汀,陶智,等. 涡轮叶片尾缘复合通道的换热[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(2): 302-305.
LI Li, DING Shuiting, TAO Zhi, et al. Heat transfer in complex passages of turbine blade trailing edge[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(2): 202-205. (in Chinese)
[4] 丁水汀,刘丽艳,李莉,等. 涡轮叶片尾缘复合通道中隔板结构对换热特性的影响[J]. 航空动力学报, 2006, 21(3): 523-527.
DING Shuiting, LIU Liyan, LI Li, et al. The effect of different structure clappboards in complex passages on heat transfer characteristics of turbine blade trailing edge[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(3): 523-527. (in Chinese)
[5] 邓宏武,潘文艳,陶智,等. 开槽交错肋通道换热和流阻特

性 [J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(10): 1158-1161.

DENG Hongwu, PAN Wenyang, TAO Zhi, et al. Heat transfer and flow resistance in a notched crossed rib channel [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(10): 1158-1161. (in Chinese)

汤姆森·路透(Thomson Reuters)科技信息集团期刊在线出版研讨会

2008 年 6 月 26 日, 汤姆森·路透(Thomson Reuters)科技信息集团在北京中国科学院国家科学图书馆报告厅举行了 Thomson Reuters 2008 期刊在线出版研讨会。出席会议的有 Thomson Reuters 中国区董事刘煜博士, Thomson Reuters 首席科学家与解决方案顾问岳卫平博士, Manuscript Central 欧洲区销售总监 Mr. David Thomas, 中国科学院国家图书馆资源发展部周静怡女士等,《航空动力学报》和北京地区相关科技学术期刊杂志社的代表参加了此次研讨会。

Thomson Reuters 科技信息集团是全球学术研究和科技创新领域信息解决方案的领先供应商。长期以来一直致力于全球学术界与企业界的研发与创新。为科技创新的每一步——发现、分析、管理、出版到产品与知识产权的开发与应用, 提供强大的科技与知识产权信息解决方案。

面向科技期刊出版领域, Thomson Reuters 科技信息集团的相关产品有: Web of Science(WOS)数据库, Journal Citation Report, ISI Web of Knowledge 平台, EndNote 写作工具, ScholarOne Manuscript Central 期刊在线同行评议平台等。

研讨会上刘煜博士以“激励发现 推动创新”为题, 发表了精彩演讲, 周静怡女士论证了中国科学引文数据库(CSCD)和 WOS 对科技期刊的学术影响力, 岳卫平博士以专业视角向与会者展示了一个整合的学术研究平台——ISI Web of Knowledge, Mr. David Thomas 详细介绍了学术期刊在线出版工具 Manuscript Central。

会议讨论的内容有: CSCD 最新进展; CSCD 与 ISI Web of Knowledge 合作项目进展; WOS 加强对区域性期刊的收录的相关情况; ScholarOne Manuscript Central 期刊出版 workflow 平台汉化进展, 及其与 ISI Web of Knowledge, EndNote Web 的整合应用; 如何利用 ISI Web of Knowledge 分析工具了解学科和期刊发展态势, 优化期刊编辑策略等。

随着科技期刊网络化、全球化进程的推进, 国际流行、功能完善的在线投稿、审稿平台和出版也将成为众多科技期刊发展的一个重要方面。《航空动力学报》在已经实现网上投稿、审稿、编辑一系列工作流程之后, 也将紧密跟随国际期刊网络的最新发展, 把在线出版纳入新的发展目标, 在扩大期刊影响力的同时, 希望能为广大作者和读者提供更加便利快捷的服务。(文 冯菲菲/ 图 王娟)



Thomson Reuters 集团期刊在线出版研讨会会场



David Thomas Manuscript Central 欧洲区销售总监



刘煜博士 Thomson Reuters 中国区首席代表



岳卫平博士 Thomson Reuters 公司首席顾问