V型沟槽表面流动换热的比拟特性

刘 昆 陶 智 吴 宏 王 皎

(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: 利用实验的方法, 对静止状态下"V"型沟槽表面通道在不同雷诺数下的流动与换热特性进行了比拟研究. 研究结果表明: 相比平板通道流动, 宽与深均为 0.5mm (h = s = 0.5mm)的沟槽表面在实验范围内 (10000< Re< 80000)具有明显的减阻效果, 同时具有弱化换热特性, 证明了比拟理论的正确性, 且减阻效果和弱化换热效果随着雷诺数增加而减小. 此研究为涡轮叶片外换热提供了一种技术储备.

关 键 词: 减阻表面; 流动换热; 实验

中图分类号: V 231.1

文献标识码: A 文章编号: 1001-5965(2008)08-0961-03

Analogy performance of flow and heat transfer on the V groove surface

Liu Kun Tao Zhi Wu Hong Wang Jiao

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

Abstract The drag and heat transfer characteristics of small longitudinal V groove surfaces in the rectangular channel were investigated experimentally based on the Reynold analogy. Within the range of Reynolds number from 10 000 to 80 000, the experimental results indicated that the V groove surface of h= s= 0.5mm had drag-reduction characteristics, and the heat transfer of the V groove surface also be weakened, which demonstrates the correctness of the theory of Reynold analogy. The weakeness of heat transfer and drag-reduction decreased as Reynolds number increased. The decrease of heat transfer and drag-reduction contributed to the improvement of performance of aircraft engine, which will be beneficial to the flow and heat transfer when this type of surface applys to the surface of turbine vane.

Key words drag-reduction surface; flow and heat transfer; experiment

根据雷诺比拟理论[1], 流动的热量传递和动量传递是基于同一湍流交换机理, 即在常规的流动换热中, 流动的能量传递过程和动量传递过程是同步的. 如果能寻找到一种叶片表面结构, 使得在实现减少表面的流动阻力的同时, 也降低涡轮叶片表面的换热性能, 对于航空发动机的涡轮叶栅通道内的流动和换热都是非常有益的. 开展对涡轮叶片外表面的换热和流动阻力特性的比拟研究有着重要的意义. 国内外大量的相关研究工作都表明了非光滑表面减阻的可靠性和可应用性. 目前有关非光滑叶片减阻技术的研究大部分采用"V"型流向沟槽表面[2]. 本论文吸取了相关研究的经验, 设计了一种合适的具有"V"型表面结构的矩形通道, 通过实验研究的方法, 与光滑表面通道作比较, 研究其减阻效果和换热特性以及它们之间的比拟关系.

1 "V"型沟槽表面减阻机理

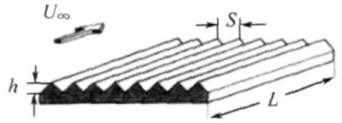
实验中采用的减阻表面流向微槽的形状结构如图 1a所示. 近几年来, 人们的注意力集中到沟槽面湍流减阻机理的研究. 许多学者从不同角度对减阻机理进行探讨, 文献[3]认为减阻是由于粘性底层厚度的增加造成的. 文献[4]将其归结为反向旋转的流向涡与沟槽尖顶形成的小的二次涡的相互作用, 二次涡减弱了与低速带条相联系的流向涡, 并在沟槽内保留低速流体 (见图 1b).

收稿日期: 2007-07-18

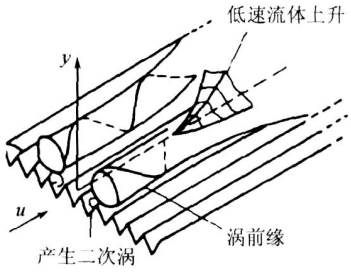
基金项目: 航空科学基金的资助项目 (04C51036)

作者简介: 刘 昆 (1984-), 男, 湖南岳阳人, 硕士生, liukun7926@gmail.com.

文献[5]认为狭窄的V型沟槽的沟谷具有保留低摩阻的低速安静流体的能力,且这些流体具有很小的湍流度.



a 沟槽表面结构



b 二次涡结构

图1 减阻表面示意图

2 实验装置和实验数据的处理方法

减阻结构的尺寸设计参照了国内外相关研究的一些经验,"V"型沟槽表面的减阻效能是由沟槽的高度 h 和间距 s(图1a)的无量纲尺寸 h^+ 和 s^+ 决定的[5]. 和光滑表面相比,当 $h^+ \leqslant 25$ 和 $s^+ \leqslant 30$ 时"V"型沟槽表面开始有减阻效果,并且在 $h^+ = 10$ 和 $s^+ = 15$ 时减阻可达8%.

结合本实验的工况条件以及以往研究的经验关系式,使得 $h^+ = 10$ 和 $s^+ = 15$ 的沟槽尺寸与来流雷诺数的关系曲线如图2所示. 可知,当雷诺数从5 000增大到20 000时, h 和 s 急剧下降,而在 $Re > 50\,000$ 情况下, h 和 s 的尺寸变化则很小,基本上维持在 $h = 0.07$ mm 和 $s = 0.1$ mm 左右. 按照计算结果,在实验工况范围内,为保证较好的减阻效果,沟槽实际尺寸会十分微小,这将导致加工难度增大,成本增加. 因此参照文献[5]将实际的沟槽尺寸定为 $h = s = 0.5$ mm(见图3).

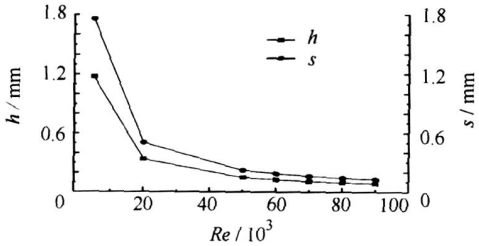


图2 h 和 s 与 Re 数的关系

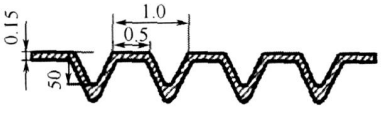


图3 沟槽表面结构尺寸

实验基体布局见图4 薄膜加热器位于"V"型沟槽表面和绝热层之间,形成单向等热流条件. K型热电偶焊于"V"型表面下,进行温度测量,并用数据采集系统实现实时温度采集. 采用水排进行进出口压力和流动沿程压力测量,为人工读数.

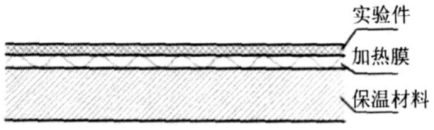


图4 实验基体

阻力特性用流阻系数 ξ 衡量:

$$\xi = (p_1^* - p_2^*)/(1/2\rho_1 v_1^2) \qquad (1)$$

式中, p_1^*, p_2^* 分别为进、出口总压; ρ_1 为进口处流体密度; v_1 为进口截面流体平均速度; $1/2\rho_1 v_1^2$ 为来流动压头.

换热特性则由平均努赛尔数 Nu 衡量:

$$Nu = hd/\lambda \qquad (2)$$

式中, h 为表面平均对流换热系数; d 为通道截面当量直径; λ 则表示由来流特征温度所决定的流体导热系数.

实验的雷诺数范围在10 000~80 000之间. 利用稳压电源计算加热功率,并通过热损失实验确定实际实验中的热损失量,并在实验结果中进行热损失修正.

3 实验结果分析

3.1 光滑表面换热特性分析

为检验实验系统的可靠性,首先对光滑表面的换热特性进行了实验,实验结果见图5,可知在 $10000 < Re < 50\,000$ 时,实验值和理论值吻合得比较好. $Re > 50\,000$ 之后误差逐渐变大,原因可能是气源的限制,实验过程中流量增大至500 kg/h后气压不稳定,从而产生较大的读数误差.

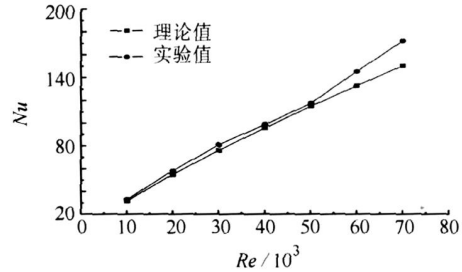


图5 光滑表面努赛尔数与经验值对比

3.2 "V"型沟槽表面的减阻效果分析

在实验工况范围内,沟槽表面的流阻系数都要小于光滑表面,证实沟槽表面是具有减阻效果的. ξ_0 和 ξ 分别表示光滑表面和沟槽表面的流阻

系数, 减阻效果用 $\eta = (\xi_0 - \xi)/\xi_0$ 来衡量, 图 6为减阻效果随雷诺数变化的关系. 可见, 沟槽表面的减阻效果随着雷诺数的增大而减小, 减阻效果较好, 由图 2可知, 此沟槽尺寸使得雷诺数在接近 20000时有最好的减阻效果; 而在 $Re > 50000$之后, 减阻效果变化相对平缓. 因此可以认为本实验的沟槽表面最大实际减阻效果为 5% ($Re = 10000$ 的数据有测量误差, 故舍去).

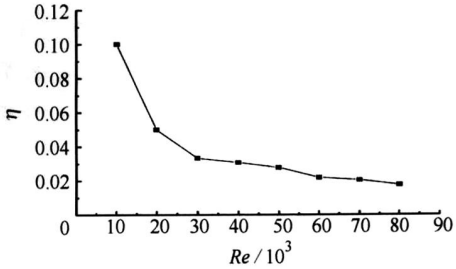


图 6　沟槽表面减阻效果

3 3　"V"型沟槽通道换热特性分析

如图 7所示, 光滑表面与沟槽表面的平均换热努赛尔数均随着雷诺数的增加而增加, 并且沟槽表面的努赛尔数始终低于光滑表面. 说明在实验工况范围 $10000 < Re < 80000$内, 沟槽表面具有弱化换热的效果.

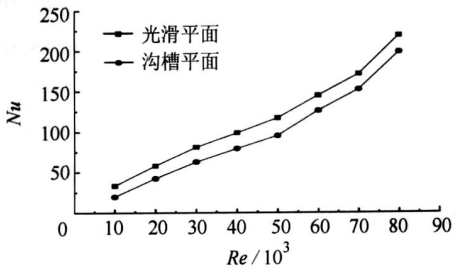


图 7　沟槽表面和光滑表面换热效果

图 8给出了沟槽表面的平均努赛尔数 Nu 与光滑表面的平均努赛尔数 Nu_0的比值, 即强化换热比的变化趋势图, 由该图可以看出, 在实验工况范围内, 强化换热比数值始终小于 1, 说明沟槽表面的换热效果要弱于光滑表面, 并且可以得出以下结论: 在 $Re = 20000$时, 强化换热比为 0 725, 即最大弱化换热效果为 27 5%, 并且随着雷诺数的增加, 弱化换热效果逐渐减弱.

将图 6与图 8作分析比较可以发现: 在雷诺数由 10000增至 80000的过程当中, 沟槽表面的减阻效果在逐渐减弱, 弱化换热效果也在逐渐减弱. 因此可以证明上述推论的正确性.

需要进一步进行讨论的是沟槽表面的实际换热量, 沟槽表面相比于同尺寸的光滑表面, 其换热表面积增加了 30%左右, 其换热系数在不同雷诺数下均有不同程度的减少. 按照对流换热的公式:

$$Q = hA\,\Delta T \qquad (3)$$

式中, A 为换热表面积; ΔT 为流体与壁面的温差; h为表面对流换热系数. 在温差 ΔT 不变的情况下, 实际换热量取决于换热系数 h的变化. 根据图 8的结果, 可以认为 $Re = 10000$和 $Re = 20000$时, 沟槽表面的实际换热量小于光滑表面; 其余工况范围内, 其实际换热量大于光滑表面.

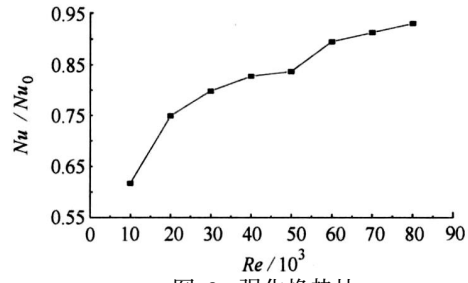


图 8　强化换热比

4 结　论

本文对矩形通道内具有"V"型沟槽的表面的换热特性和阻力特性进行了初步的研究, 在 $10000 < Re < 80000$的实验工况范围内, 主要得到以下结论: ①本文研究的沟槽表面具有比较明显的减阻特性, 最大减阻能达到 5%, 且减阻效果随雷诺数的增加而逐渐减小. ②在相同工况下, 与光滑表面相比, 沟槽表面具有较为明显的弱化换热特性, 即沟槽表面的换热努赛尔数明显小于光滑表面, 证明了比拟理论的正确性. 这种弱化换热效果随着雷诺数的增加而逐渐减小, 且努赛尔数最大能减小 27 5%. ③流动阻力和表面换热的降低对航空发动机性能的提高有直接影响, 因此这种沟槽表面对于应用到涡轮叶片表面意义重大.

参考文献 (References)

[1] Eckert E R G. 传热传质分析 [M]. 北京: 科学出版社, 1981
Eckert E R G. Heat and mass transfer[M]. Beijing Science Press, 1981(in Chinese)

[2] 葛少岩, 刘登瀛, 徐靖中. 气膜冷却 [M]. 北京: 科学出版社, 1985
Ge Shaoyan, Liu Dengying, Xu Jingzhong. Film cooling [M]. Beijing Science Press, 1985(in Chinese)

[3] Walsh M J, Weinstein L M. Drag-reduction characteristic of small longitudinal ribbed surfaces[J]. AIAA Journal, 1979, 17 (3): 770 – 771

[4] Choi K S. Near-wall structure of a turbulent boundary layer with riblets[J]. Fluid Mech, 1989, 2 (13): 417– 458

[5] Walsh M J, Weinstein L M. Drag and heat transfer characteristics of small longitudinal ribbed surfaces[J]. AIAA Journal, 1979, 7 (9): 70– 72

(责任编辑: 张　嵘)