

文章编号: 1000-8055(2003)02-0235-04

带肋壁与出流孔内流通道中肋角度 对流量系数的影响

裘云, 朱惠人, 倪萌, 刘松龄

(西北工业大学 航空动力与热力工程系, 陕西 西安 710072)

摘要: 在根据相似理论放大的模型上, 测量了带肋壁与出流孔内流通道中沿主流流向分布的各出流孔的流量系数 C_d 。实验在内流通道进口雷诺数为 40000~80000, 通道总出流比为 0.30~0.60 的范围内进行, 重点分析了肋角度、内流通道进口雷诺数 Re 和通道总出流比 SR 对 C_d 的影响规律。结果显示: 在本实验的工况范围内, 沿内流通道布置的各出流孔 C_d 的变化幅度不大, 在中后部略有上升; 在相同流动状况下, C_d 随肋角度的增大而增大, 在 120° 时达到最大值; 通道进口雷诺数和通道总出流比对 C_d 的影响都不显著。

关键词: 航空、航天推进系统; 内流通道; 肋; 出流孔; 流量系数

中图分类号: V 231.1

文献标识码: A

Effect of Rib Turbulator Orientation on the Discharge Coefficient of Suction Hole in the Internal Passage

QIU Yun, ZHU Hui-ren, NI Meng, LIU Song-ling

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Measurement of suction holes' discharge coefficients (C_d) in an internal passage with rib turbulators and suction holes are presented. The internal passage is a rectangular channel with two opposite ribbed walls, the aspect ratio is 0.5, and the rib turbulators are arranged in a staggered way on the two wider walls. The cylindrical suction holes are 45° inclined and perpendicularly oriented, they are placed on one ribbed wall. Tests were run by varying rib turbulators' angles as 45°, 60°, 90° and 120°, with Reynolds numbers (Re) changing from 40000 to 80000 and suction ratios (SR) changing from 0.30 to 0.60. Influences of rib turbulators angles, Reynolds number and suction ratio on C_d are studied. Results indicate: (1) C_d increases a little along the internal passage; (2) increasing rib turbulator's angle leads to higher C_d , and the maximum C_d is obtained when the rib angle is 120°; (3) varying suction ratio contributes no remarkable effect on changing discharge coefficients; (4) Reynolds number also has no obvious influence on discharge coefficients.

Key words: aerospace propulsion; internal passage; rib turbulator; suction hole; discharge coefficient

收稿日期: 2002-08-13; 修订日期: 2002-10-10

基金项目: 西北工业大学博士论文创新基金资助项目(200114)

作者简介: 裘云(1974-), 男, 浙江嵊县人, 西北工业大学航空动力与热力工程系博士生, 主要从事航空发动机高温部件的传热与冷却技术研究

1 引言

在气膜冷却技术中,冷气通常先流过供气通道,然后由出流孔喷出形成气膜。为了进一步发挥冷气的潜力,提高冷却效果,设计者开始在供气通道内布置粗糙肋,用以强化内部换热。涡轮动叶中的带肋壁与出流孔的径向内流通道就是这种设计思路的一种典型体现。采用这样的结构必须详细了解通道内的肋对出流孔出流量或流量系数的影响规律,这样才能合理的配置肋,在强化内部换热的同时满足外部气膜冷却对冷气量的要求。目前,国内外在出流孔的几何结构对流量系数影响方面所做研究工作较多:朱惠人等研究了出流孔的形状对流量系数的影响^[1];Gritsch 等研究了圆柱形出流孔的倾角对流量系数的影响^[2],并对 30° 倾角的圆柱形出流孔在不同流动情况下的流量系数总结出计算公式^[3]。而对于通道内的肋对出流孔流量系数的影响只有 Bunker 做过研究^[4],他研究的主要内容是肋与出流孔的相对位置对流量系数的影响规律。针对这种现状,本文以涡轮叶片内带肋壁与出流孔的径向内流通道为研究对象,在根据相似理论放大的模型上进行以下方面的实验研究:(1)通道内不同角度的肋对出流孔流量系数的影响;(2)通道进口雷诺数和通道总出流比对出流孔流量系数的影响;(3)通道中不同位置处的出流孔的流量系数分布情况。

2 实验装置

实验装置系统如图 1 所示,主要包括:风机、稳定室、收缩段、进口段、实验段、出口段和测量系统。有机玻璃制成的实验段由内流通道和出流孔收集腔组成。内流通道尺寸为 2490 mm × 280 mm × 140 mm,上下表面分别布置 15 根肋,它们之间的相对位置为错排。在下表面每两根肋间的正中心布置一出流孔,共有 14 个,出流孔出口通向收集腔。收集腔共有 7 个,每个收集腔对两个出流孔出流进行收集。通道的高宽比 H/W 为 0.5,肋的横截面为正方形,其高度与通道高度比为 0.1,肋与主流方向夹角为 90°;肋间距与通道的高度比 e/h 为 1.0。出流孔为圆柱形,其轴线与主流方向垂直,与壁面的夹角 45°;出流孔的直径与肋高的比 e/h 为 1.0,孔长度与直径的比 4.0。出流孔的间距与通道高度的比为 1.0。肋与出流孔的详细结构如图 2 所示。

实验时采用内流通道进口雷诺数 Re 和通道

总出流比 SR 确定工况,以保证实验模型中通道和出流孔内的流动与真实情况相似。内流通道进口雷诺数定义为 $Re = U_{\infty} D / \nu$;其中 U_{∞} 为内流通道进口处的平均速度, ν 为空气的运动粘度, D 为内流通道的水力直径。通道总出流比定义为所有出流孔流出的总质量流量与内流通道进口质量流量的比, $SR = \left(\sum_{i=1}^{14} m_{h,i}^{\circ} \right) / m_{inlet}^{\circ}$, 其中 $m_{h,i}^{\circ}$ 为通过第 i 个出流孔流出的质量流量, m_{inlet}° 为内流通道进口质量流量。实验分别在 3 个内流通道进口雷诺数 (40000, 60000, 80000), 3 种通道总出流比 (0.30, 0.45, 0.60) 下进行。实验时,通过调整出流收集腔出口处的阀门使各出流孔出口处的静压相同,以模拟涡轮叶片工作时单排出流孔出口侧静压相等的情况。

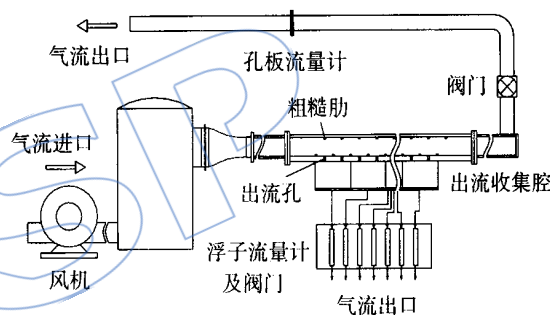


图 1 实验装置示意图

Fig 1 Test facility

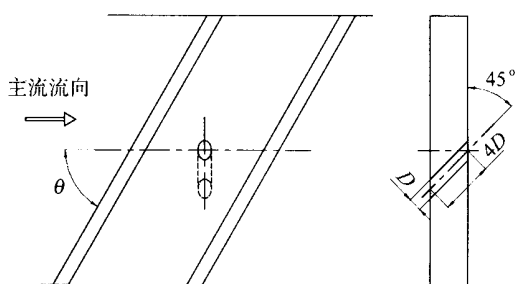


图 2 肋与出流孔的几何结构

($\theta = 45^{\circ}; 60^{\circ}; 90^{\circ}; 120^{\circ}$)

Fig 2 Geometries of rib turbulator and suction hole

($\theta = 45^{\circ}; 60^{\circ}; 90^{\circ}; 120^{\circ}$)

流量系数是通过出流孔的实际流量与理论流量之比, 定义为:

$$C_d = \frac{m}{\sqrt{\frac{2K}{(\kappa-1)RT_{tL}} \left[\left(\frac{p_s}{p_t} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] A}}$$

式中: m 为通过出流孔的实际质量流量; 分母为考虑到流体的可压缩性时的理论流量, 其中 p_s 为出流孔出口处的静压, p_t 为内流通道内进入出流孔前的总压, T_t 为内流通道内相应于总压位置的总温, A 为出流孔的截面面积。本文实验对每两个出流孔的出流量进行测量, 所以上式中的出流孔前的总压、总温相应采用两个孔前所测的数据, 出流孔出口处的静压采用收集两孔出流所用的腔内的静压, 式中的面积也相应为两孔的总截面面积。

3 实验结果及分析

目前在公开发表的文献中只有Bunker 对有关肋对流量系数影响进行了实验研究^[4], 他的实验模型中包括与本文中带 90° 肋的内流通道相似的模型, 不同之处是其模型尺寸较小, 壁面上仅布置了一个出流孔, 出流孔与壁面成 30° 夹角。图 3 为本文模型的实验结果同Bunker 的对比, 图中横坐标为出流孔进口处的总压与其出口处的静压之比 p_t/p_s , Ma 为通道内出流孔前的马赫数。本文实验中每对出流孔在不同工况下, 孔进出口压比 p_t/p_s 的范围为 1.01~1.05, 孔前马赫数 Ma 的范围为 0.085~0.0175。图中可以看出: 本文实验得到的流量系数随孔进出口压比 p_t/p_s 变化的规律与Bunker 的基本一致: 在 Ma 较低时, 流量系数随 p_t/p_s 变化不明显, 在 Ma 较高时, 流量系数随 p_t/p_s 升高而升高; 另一方面, 当 p_t/p_s 一定时, Ma 的升高会使流量系数减小, 这也与Bunker 的实验结果一致。

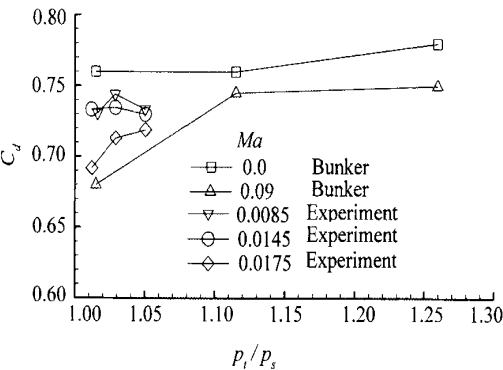


图 3 带 90° 肋内流通道的流量系数与 Bunker 的对比
Fig. 3 Discharge coefficients in internal passage with 90° rib turbulators: Comparison with Bunker's

通道内无肋时的实验结果。图中横坐标表示沿流向 7 对出流孔, 纵坐标表示每对出流孔的流量系数。可以看出在本文实验工况范围内: (1) 通道在布置不同角度肋和无肋时的实验结果都显示出通道中后部出流孔的流量系数较高, 进口处出流孔的流量系数最低。其主要原因是出流导致通道内的流速逐渐减小, 气流在低流速下进入通道中后部的出流孔时产生的分离区较小, 相应的损失小。

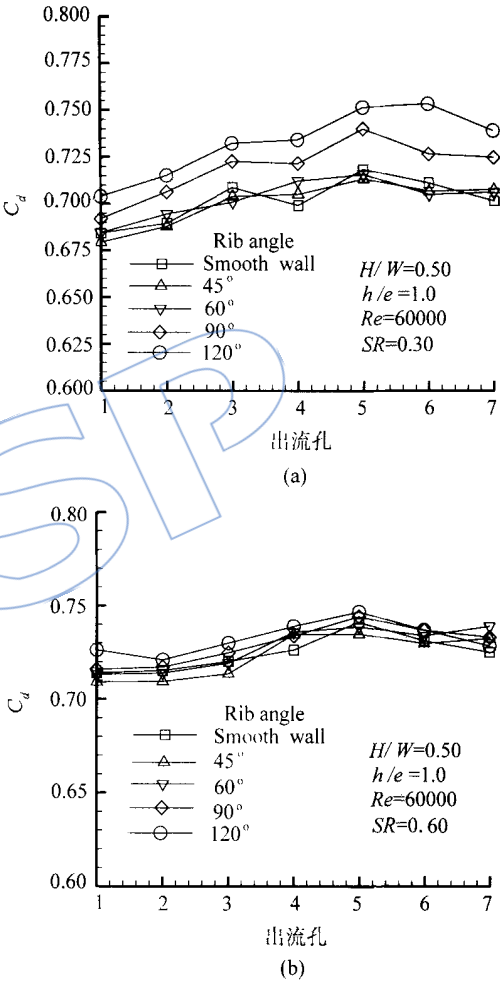


图 4 肋角度对流量系数的影响
Fig. 4 Effect of rib angle on discharge coefficients

(2) 在本实验所研究的通道结构中, 肋只在有限范围内影响出流孔的流量系数, 相对于不布置肋的通道并未大幅度改变流量系数的数值。这是由于, 出流孔的流量系数反应了孔进口处、孔内和孔出口处的三部分流动损失之和, 而肋只影响到其中进口处的这部分流动损失。另外, 本实验中肋与出流孔之间的距离相对较大, 这也削弱了肋对孔进口处流动损失的影响。(3) 在肋对出流孔流量系数有限的影响下, 还是可以观察到出流孔的流量系数随着肋角度的增大而增大, 在肋角度为 120° 时

图 4 为肋角度对流量系数的影响, 其中包括

达到最大值。这是因为,内流通道内布置了肋后会产类似螺旋管中的旋转流动,也就是有二次流出现。在布置有 120 肋时,出流孔进口附近的二次流流向与出流孔的轴线夹角较小,气流流入孔内所需偏转的角度小,流动损失小,流量系数大;而在布置有 45 肋时,进入孔的气流需要有很大转折才进入孔内,所以会有较大损失,流量系数偏小。(4)在通道总出流比较小时,肋角度对流量系数的影响较大,说明这时贴近壁面流入出流孔流量在总出流量中所占份额较大,壁面上布置的肋

对流出气流的影响也就相对显著。(5)壁面不布置肋时的流量系数小于布置 120 肋的情况,而略大于布置 45 肋时的情况。由此可以看出,不同角度的肋通过影响通道内的二次流,不仅可以增加损失,也可以减小损失。

实验结果显示,在不同结构的通道中流动因素对流量系数影响的趋势一致,本文选取布置了 90 肋的通道的实验结果说明通道进口雷诺数和通道总出流比对各出流孔的流量系数的影响。图 5 显示:本文实验的工况范围内,通道进口雷诺数和通道总出流比对流量系数的影响很小,说明这两个因素在这样的范围内变化对孔附近和孔内流场的影响不大。

4 结 论

本文对带肋壁和出流孔内流通道的出流特性进行了实验研究,在本文实验的参数范围内可以得出以下几点结论:(1)在相同通道进口雷诺数和相同通道总出流比的情况下,流量系数随着肋角度的增大而增大,在肋角度为 120 时达到最大值;(2)在相同通道进口雷诺数下,通道总出流比较小时,肋角度对流量系数的影响更显著;(3)通道进口雷诺数与通道总出流比对流量系数影响不十分明显;(4)沿通道流向布置的各个出流孔的流量系数基本一致,只是在通道中后部略有上升趋势。

参考文献

- [1] 朱惠人, 许都纯, 刘松龄, 等. 气膜孔形状对流量系数影响的实验研究[J]. 推进技术, 1998, 19(1): 42- 45
- [2] Gritsh M, Schulz A, Wittig S. Effect of Crossflows on the Discharge Coefficient of Film Cooling Holes With Varying Angles of Inclination and Orientation [J]. Journal of Turbomachinery, 2001, 123(10): 781- 787.
- [3] Gritsh M, Schulz A, Wittig S. Method for Correlating Discharge Coefficients of Film-Cooling Holes [J]. AIAA Journal, 1998, 36(6): 976- 980
- [4] Bunker R S, Bailey J C. Film Cooling Discharge Coefficient Measurements in a Turbulated Passage with Internal Crossflow [J]. Journal of Turbomachinery, 2001, 123 (10): 774- 780

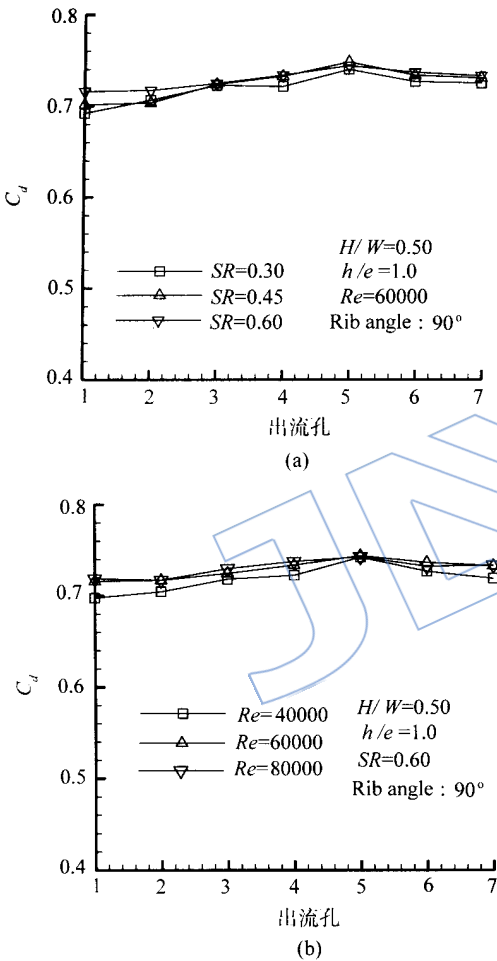


图 5 通道进口雷诺数和通道总出流比对流量系数的影响

Fig 5 Effect of Reynolds number and suction ratio on discharge coefficients