

带肋和双排出流孔通道的流动特性^{*}

郭 涛, 朱惠人, 李广超, 许都纯

(西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 研究了通道进口雷诺数和总出流比对带肋和双排出流孔通道流量系数和压力分布的影响。实验研究的通道进口雷诺数为 $3 \times 10^4 \sim 1.5 \times 10^5$, 通道总出流比为 0.09~0.22。结果表明: 通道总出流比较小时, 流量系数沿流向减小。通道进口雷诺数增加, 流量系数先增加, 之后基本不变; 通道总出流比较大时, 流量系数基本不变; 各工况下总压系数沿流向依次经历迅速减小、基本不变、继续减小的过程; 沿流向各位置上的总压系数在通道进口雷诺数为 $6 \times 10^4 \sim 9 \times 10^4$ 时最小; 出流比增大, 沿流向各位置上的总压系数随之增大。

关键词: 涡轮叶片; 肋⁺; 出流孔⁺; 流量系数; 压力分布

中图分类号: V231.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2007) 04-0399-04

Flow in channel with rib turbulators and double-row bleed holes

GUO Tao ZHU Hui-ren LI Guang-chaq XU Du-chun

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an 710072, China)

Abstract The effect of Reynolds number and mass flow ratio on the discharge coefficient and pressure distribution for the flow in channel with rib turbulators and double-row bleed holes are investigated. The Reynolds numbers range from 30 000 to 150 000 and mass flow ratios are between 0.09 and 0.22. The results indicate that when mass flow ratios are low, the discharge coefficients decrease along the flow direction. With the increase of Reynolds number, the discharge coefficients increase firstly and then do not vary significantly. Along the flow direction, the total pressure coefficients decrease firstly and then keep the level and decrease again in each case. In all the positions along the flow direction, the lowest total pressure coefficient is achieved in case of Reynolds numbers ranging from 60 000 to 90 000. The total pressure coefficients increase with the increase of mass flow ratio.

Key words Turbine blade; Rib turbulators; Bleed holes; Flow coefficient; Pressure distribution

1 引 言

提高涡轮入口温度是提高涡轮发动机推重比和循环效率的有效手段, 目前涡轮发动机涡轮前温度已超过材料的熔点并且仍然在不断提高。必须采用有效的冷却方式防止高温燃气对涡轮造成损害。将现有的基本冷却方式结合起来, 实现高效冷却是解决这一问题的有效方式。在叶片前缘, 热负荷大, 叶片外表面多采用多排孔气膜冷却, 在内部一种常见的设计方式则是采用有出流孔的带肋直内流冷却通道。带肋直通道实现叶片内部冷却的同时, 出流孔的出流实

现叶片外的气膜冷却。

文献[1, 2]研究了带肋通道的流阻特性; 在通道有出流孔的情况下, 其流动特性会更加复杂。文献[3]分析了肋与主流的角度、肋的形式、通道进口雷诺数对通道总的压力损失系数的影响; 文献[4]分析了压力损失的构成, 对带肋和单排出流孔通道压力损失的工程算法进行了研究。影响流量系数的因素更为复杂; 文献[5]研究了通道内马赫数、出流孔进出口压比、出流孔与主流的角度以及出流孔与肋的相对位置对流量系数的影响; 文献[6]在不同出流孔倾角和导向角下, 研究了通道内马赫数、出流孔出口横流

* 收稿日期: 2006-07-21; 修订日期: 2007-03-06。

基金项目: 国家“九七三”计划 (2007CB707701)。

作者简介: 郭 涛 (1976—), 男, 硕士, 工程师, 研究领域为航空宇航推进器高温部件传热及冷却技术和传热实验方法研究。Email: guotao@nwpu.edu.cn

马赫数、出流孔进出口压比以及孔内流动与通道内、外流动的动量比等因素对流量系数的影响;文献[7]分析了肋与主流的角度、通道进口雷诺数和通道总出流比对流量系数的影响规律。以上研究针对的是无气膜孔出流的带肋通道或在肋壁上有单排出流孔的通道,与实际叶片前缘内流冷却通道存在多排出流孔的实际设计有所区别。本文将研究通道入口雷诺数和总出流比对有双排出流孔的带肋通道的流量系数和压力分布的影响规律,分析双排出流孔出流对流动特性的影响。

2 实验装置和研究方法

图1为实验研究的风洞系统。气流从风机流出,经管路和入口稳定室消除压力波动后进入实验段。在入口稳定室和实验段之间装有金属网作为紊流发生器,使气流发展成为充分的紊流流动。在实验段上距入口100 mm处开有小孔,用于放置温度计测量风洞入口气流温度。实验段上部为主流通道,下部溢流孔出口处有出流收集腔,实验段采用有机玻璃制成。实验段出口与出口稳定室相连,以保证主流稳定的出口条件。在出口稳定室和出流收集腔后接有阀门和流量计,用于调节和测量主流和出流孔的出流流量。安装后使风洞有良好的气密性以保证测量数据的准确。

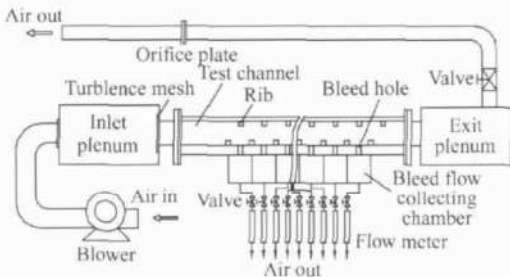


Fig 1 Schematic of test facility

实验通道截面高宽比为0.4(81 mm × 202.5 mm),两侧壁光滑,上下壁面各有10根肋,交错布置,肋间距与肋宽的比为10。肋截面高宽比为1(15 mm × 15 mm),在下壁面每两肋之间开有两个出流孔,共18个出流孔,出流孔直径 $d=9$ mm,孔中心在实验段宽度方向相距 $10d$,中心连线与肋平行。出流孔上方 $1/2$ 通道高度位置开有静压孔,用于测量沿流向的静压分布。图2为肋与出流孔几何结构示意图。出流孔中心距两侧壁的距离分别为 $5d$ 和 $7.5d$ 。出流孔与下壁面夹角为 35° ,与主流夹角为 90° ,长径比为6.1。每两肋之间的出流孔对共用一个出流收集腔。

通道进口雷诺数 Re 定义为

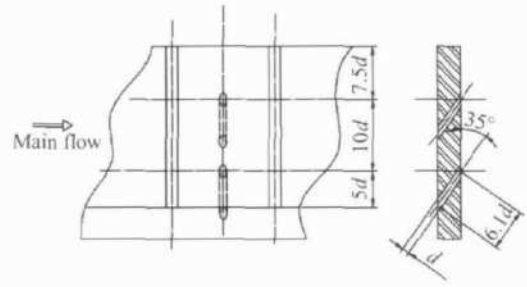


Fig 2 Configuration of rib turbulators and bleed holes

$$Re = \frac{\rho_\infty U_\infty D}{\mu} = \frac{(m_{\text{inlet}}/A_e)D}{\mu} \quad (1)$$

式中 U_∞ 为通道进口处的平均速度, D 为通道的水力直径, μ 为空气的动力粘度, ρ_∞ 为通道入口处的空气密度, m_{inlet} 为通道进口的质量流量, A_e 为通道截面积。

出流孔雷诺数 Re_h 定义为

$$Re_h = \rho U_i d / \mu \quad (2)$$

式中 ρ 为出流空气的密度, U_i 为第 i 个出流孔的出流速度, d 为出流孔直径。

通道总出流比 Sr 定义为所有出流孔出流的总质量流量与通道进口的质量流量之比,即

$$Sr = \left(\sum_i m_i \right) / m_{\text{inlet}} \quad (3)$$

式中 m_i 为通过第 i 个出流孔出流的质量流量。

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

$$C_d = \frac{m_i}{p_1 \left(\frac{p_s}{p_1} \right)^{(k+1)/2k} \sqrt{\frac{2k}{(k-1)RT_1} \left(\left(\frac{p_1}{p_s} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right) A}} \quad (4)$$

式中 m_i 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想流量,其中 k 为绝热指数, p_s 为出流孔出口处的静压, p_1 为出流孔入口上游通道中的平均总压, T_1 为与总压对应处的总温, A 为出流孔的截面面积。

总压系数为

$$C_{p_{1i}} = (p_{1i} - p_{1\infty}) / (\rho_\infty U_\infty^2 / 2) \quad (5)$$

式中 $p_{1\infty}$ 为通道进口处的总压, p_{1i} 为第 i 对出流孔上方的总压,该点沿通道主流方向的距离与肋间距或孔间距的比为 $i(X/\text{Pitch} = i)$ 。通道内总压有损失时,总压系数为负值。总压系数越小,损失越大。

实验时打开主流调节阀门,调整出流调节阀门使各收集腔静压相等,由转子流量计测量经过每个出流收集腔的流量。将各收集腔流量和孔板流量计测量的主流流量相加得到通道进口流量,由式(1)、(3)计

算通道进口雷诺数和通道总出流比。反复调节出流调节阀和主流调节阀,直到通道进口雷诺数和通道总出流比达到实验工况要求。需要指出的是,由于每两肋之间的两个出流孔共用一个出流收集腔,本文所涉及到的流量系数和出流孔雷诺数是指两个出流孔的平均值。

3 实验结果

3.1 通道进口雷诺数 Re 对流量系数 C_d 的影响

图 3 是通道总出流比 Sr 相同,不同通道进口雷诺数 Re 时的流量系数分布。在 Sr 较小时,如图 3(a)所示,流量系数呈现沿流向逐渐减小的趋势, $Re > 30\,000$ 时流量系数分布基本重合,即 Re 对流量系数的影响较小,而 $Re = 30\,000$ 时,流量系数小于其他高雷诺数工况; Sr 较大时,如图 3(b)所示,流量系数沿主流流向基本不变,保持在 0.68 左右,不同 Re 下流量系数的分布也基本重合。文献 [7] 对于带肋和单排出流孔通道的研究中也发现:在其研究的工况范围内 ($Re = 40\,000 \sim 80\,000$, $Sr = 0.3 \sim 0.6$), Re 对流量系数的影响很小。由此可看出 Re 只在 Sr 和 Re 都较小时对流量系数产生影响。

造成上述现象的原因是因为孔的雷诺数 Re_h 和出流孔附近的流动状态是影响流量系数的重要原因。图 4 是第一对出流孔的流量系数 C_d 随 Re_h 的变化关系,在 $Re_h < 6\,000$ 时,流量系数随 Re_h 的增大而增大, Re_h 继续增大,流量系数基本保持不变。 Sr 和 Re 较小的工况下 ($Re = 30\,000$, $Sr = 0.09$), Re_h 较小,流量系数小,当 Re 增大时, Re_h 随之增大,使流量系数增大。 $Re > 30\,000$ 时, Re_h 高于 $6\,000$, 第一对孔的流量系数不再随 Re 变化。沿流向,随着出流量减少,一方面 Re_h 降低造成沿流向流量系数降低,另一方面出流孔附近的局部损失对流量系数影响增大,出流比相同时,出流孔附近流动状态相似,使得各工况下流量系

数的变化相同。大出流比工况时, Re_h 较高,出流所涉及的流体区域向通道中心发展,不再局限在出流孔附近,出流孔附近的流动状态对出流损失影响份额减小,流量系数基本保持不变。

3.2 通道进口雷诺数 Re 对总压系数 C_p 的影响

通道进口雷诺数 Re 对总压系数 C_p 分布的影响在各出流比 Sr 下的规律基本一致,以 $Sr = 0.18$ 时的结果为例,如图 5 所示,在带肋通道入口附近,由于流通面积变化造成局部损失,总压系数沿流动方向迅速减小,在 $X/Pitch = 2$ 和 3 的位置基本不变,之后又逐渐减小,但减小的速度小于入口段。从数值上看,随 Re 增大,沿流向各位置的总压系数先减小,后增大,在 Re 为 $60\,000 \sim 90\,000$ 时达到最小。造成这种现象的原因可能是因为 Re 较低和较高时各部分损失所起作用不同。总压损失由带肋通道的沿程损失、出流作用造成的压力回升和出流作用改变通道内的流场结构而产生的局部流动损失三部分组成^[4], Re 较低时,由出流所引起的局部流动损失在总损失中所占比例较大,随 Re 升高,由出流所引起的局部阻力损失增大造成总损失增大; Re 较高时,随 Re 增加,出流导致的总压升高的趋势所起的作用在增大,使得总压损失减小,总压系数增大。

3.3 通道总出流比 Sr 对流量系数 C_d 的影响

如图 6 所示, Re 较小时,流量系数随 Sr 的提高而提高; Re 较大,当 $Sr > 0.09$ 时,流量系数不随 Sr 变化,其数值维持在 0.68 附近, $Sr = 0.09$ 时流量系数小于 $Sr > 0.09$ 的工况,且沿流动方向降低。该现象也主要是 Re_h 和出流孔附近流动状况的变化造成的。 Re 小, Re_h 处于较低水平, Re 提高使 Re_h 随之提高,流量系数增大。 Re 大, Re_h 已较大,流量系数不再随之变化。小 Sr 时流量系数沿流向降低则主要是出流孔附近的局部损失影响较大和 Re_h 减小造成的。

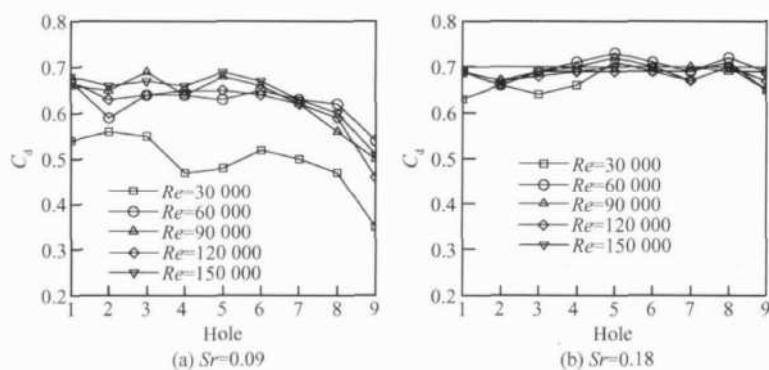


Fig. 3 Effect of Reynolds number on discharge coefficient

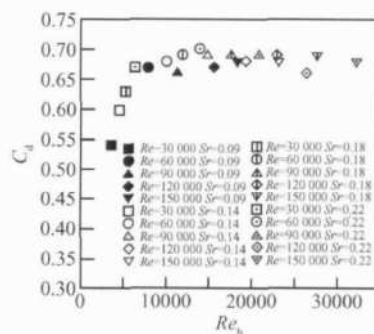


Fig. 4 Variation of discharge coefficient for the first pair of holes with bleed hole Reynolds number

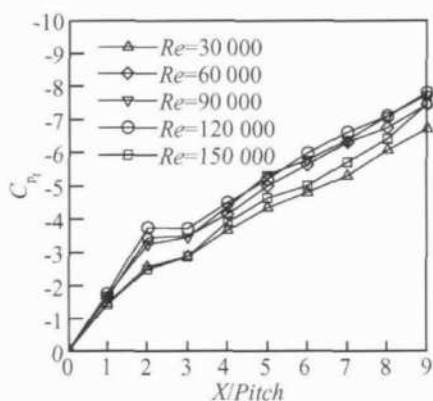


Fig. 5 Total pressure coefficient distribution along the channel at $Sr = 0.18$

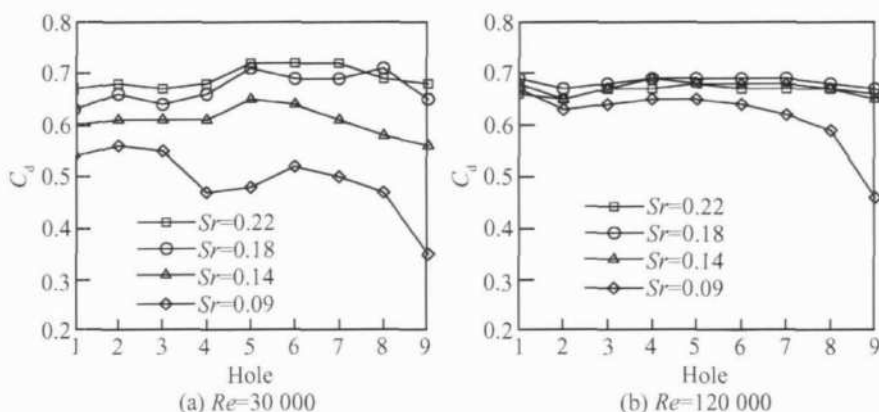


Fig. 6 Effect of exist mass flow ratio on discharge coefficient

3.4 通道总出流比 Sr 对总压系数 C_{pt} 的影响

各 Re 下总压系数的分布规律基本相同, 以 $Re = 150\,000$ 时的工况为例, 如图 7 所示, 随 Sr 增大, 总压系数逐渐增大, 与单排孔出流时的情况类似 [4]。 Sr 增大, 出流导致的总压升高的趋势所在总损失中占比例提高, 使总压损失减小, 总压系数增大。

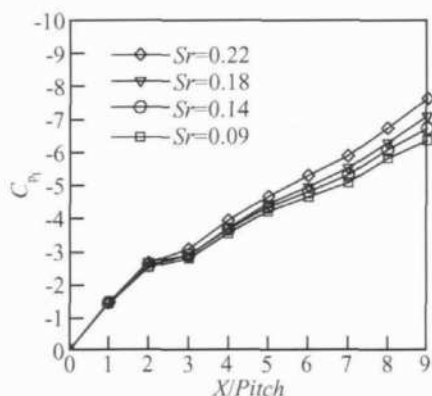


Fig. 7 Total pressure coefficient distribution along the channel at $Re = 150\,000$

4 结 论

根据在本文研究条件下的实验结果, 可得出如下结论: (1) 通道总出流比小时, 流量系数沿流向逐渐减小, 通道总出流比大时, 流量系数沿流向基本无变化, 保持在 0.68 左右。 (2) 通道进口雷诺数较高时, 流量系数基本不变。 (3) 各工况下总压系数沿流向先迅速减小, 保持不变一段距离后, 再继续减小。 (4) 通道入口雷诺数提高, 沿流向各位置的总压系数先降低后升高, 在雷诺数为 60 000~90 000 时总压系数最小。 (5) 通道总出流比提高, 沿流向各位置的总压系数升高。

参考文献:

- [1] Han J C. Heat transfer and friction in channels with two opposite rib-roughened walls [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1984, 106(4): 774~781.
- [2] Taslim M E, Li T, Spring S D. Measurements of heat transfer coefficients and friction factors in passages rib-roughened on all walls [J]. *ASME Journal of Turbomachinery*, 1998, 120(2): 564~570.
- [3] Srinath V, Ekkad, Yizhe Huang, Je-Chin Han. Detailed heat transfer distributions in two-pass square channels with rib turbulators and bleed holes [J]. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 1998, 41(23): 3781~3791.
- [4] 裴云, 朱惠人, 许都纯, 等. 带肋壁与出流孔内流通道的流阻特性 [J]. *推进技术*, 2003, 24(4). (QU Yun, ZHU Huiran, XU Du-chun, et al. Pressure loss of the internal passage with rib turbulators and suction holes [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2003, 24(4).)
- [5] Bunker R S, Bailey J C. Film cooling discharge coefficient measurements in a turbulated passage with internal crossflow [J]. *ASME Journal of Turbomachinery*, 2001, 123(4): 774~780.
- [6] Gritsch M, Schulz A, Wittig S. Effect of crossflows on the discharge coefficient of film cooling holes with varying angles of inclination and orientation [J]. *ASME Journal of Turbomachinery*, 2001, 123(4): 781~787.
- [7] 裴云, 朱惠人, 倪萌, 等. 带肋壁与出流孔内流通道中肋角度对流量系数的影响 [J]. *航空动力学报*, 2003, 18(2): 235~238.

(编辑: 梅 瑛)