

文章编号:1000-8055(2009)03-0537-05

肋角度和出流孔位置对流动特性的影响

郭 涛, 朱惠人, 李广超, 许都纯
(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 针对带肋和双排出流孔通道,研究了肋角度和出流孔位置对流量系数分布和总压系数分布的影响.研究的肋角度为 60° , 90° 和 120° .出流孔分别位于相邻两肋之间距前肋 $1/4$ 肋距、两肋中间、距后肋 $1/4$ 肋距.研究表明:不同的肋角度和出流孔位置不改变流量系数和总压系数沿流向的分布规律;流量系数随肋角度增大而增大; 60° 和 120° 肋通道中总压系数绝对值接近且小于 90° 肋通道中的绝对值;两肋之间,出流孔位置靠近下游,将使流量系数增大,总压系数绝对值增大.

关 键 词: 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

Effect of rib turbulator orientation and bleed hole location on flow character

GUO Tao, ZHU Hui-ren, LI Guang-chao, XU Du-chun

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

Abstract: According to the flow in the channel with rib turbulators and double-row bleed holes, the effects of the rib turbulator orientation and the bleed hole location on the discharge coefficient and the total pressure coefficient distribution had been investigated. The rib turbulator orientation angles were 60° , 90° and 120° . The bleed holes were located at $1/4$ rib distance downstream from the front rib, the middle of rib distance, $1/4$ rib distance upstream from the behind rib. The results indicate that the rib turbulator orientation and the bleed hole location do not change the distribution of discharge coefficient and the total pressure coefficient along the channel; the discharge coefficient increases with the increase of the rib turbulator orientation angle; the absolute value of the total pressure coefficient in the channel with 60° and 120° ribs is approximately same and less than that in the channel with 90° ribs; the discharge coefficient and the absolute value of the total pressure coefficient decrease while the bleed holes are close to down stream between two adjacent ribs.

Key words: rib turbulators; bleed holes; discharge coefficient; pressure distribution

为获得更高的推重比和循环效率,燃气涡轮发动机的涡轮入口温度越来越高,必须对涡轮进行有效的冷却保护防止其损坏,以实现合理的长寿命.带肋和出流孔通道是涡轮叶片前缘通常采

用的内部冷却形式之一,为合理设计通道的几何结构,必须准确掌握几何特征对流动特性的影响.

相关研究中,文献[1-2]对无出流孔带肋通道的流动阻力进行了研究,分析了肋高、肋距、肋角

收稿日期: 2008-02-21; **修订日期:** 2008-07-04

基金项目: 国家“973”计划(2007CB0707701)

作者简介: 郭涛(1976-),男,吉林四平人,工程师,硕士,主要从事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. E-mail: guotao@nwpu.edu.cn

度等几何因素对流动特性的影响. 文献[3]测量了有出流情况下,不同肋角度时通道内的流动结构,研究发现:出流作用使通道内的流动情况发生较大改变. 文献[4]在有出流的带肋通道中对肋与主流的角度、肋的形式等因素的影响进行了实验研究. 文献[5]在通道总出流比为 0.3~0.6 的情况下,对肋角度的影响进行了研究,认为流量系数随肋角度的增大而增大. 文献[6]的数值模拟表明,不同角度肋所诱发的二次流动是造成这一规律的原因. 文献[7]的研究分析了带肋和出流孔通道流动阻力的构成,对流动阻力的计算方法进行了研究. 以上研究针对的是无出流孔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. 文献[8]针对带肋和双排出流孔通道,研究了通道入口雷诺数和通道总出流比对流动特性的影响;本文将针对该类通道,对肋角度、出流孔与肋的相对位置对流量系数和总压系数的影响作具体研究.

1 实验装置及实验件

实验系统如图 1 所示. 由风机流出的气流经入口稳定腔消除脉动后进入实验通道,在实验通道入口处装有细金属网,保证均匀的入口速度和紊流度分布. 进入实验通道的气流沿通道向后流动进入出口稳定腔,经主流流量调节阀和孔板流量计排出;在气流沿通道向后流动过程中,其中一部分气流经壁面出流孔流出通道,进入出流收集腔,出流流量经调节阀调节,并由浮子流量计测量后排出.

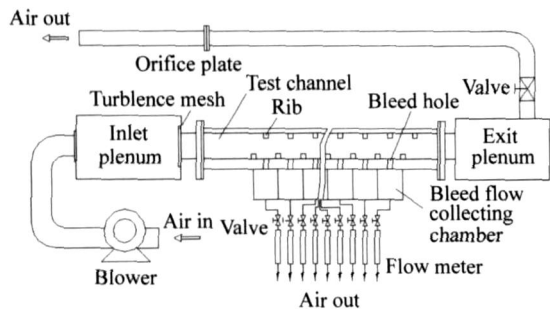


图 1 实验装置

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), 在下壁面分布有 18 个出流孔,

孔径 $d = 9$ mm, 分为两排, 孔排距为 $10d$. 每相邻两肋之间有两个出流孔, 如图 2 所示, 两出流孔中心连线与肋平行, 肋与主流方向的夹角 α 可分别为 60° , 90° 和 120° , 以研究肋角度对流动特性的影响. 肋角度为 90° 时, 出流孔可分别位于相邻两肋之间区域的上游(距前肋 $1/4$ 肋距)、中间、下游(距后肋 $1/4$ 肋距), 以研究出流孔位置对流动特性的影响. 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共用一个出流收集腔.

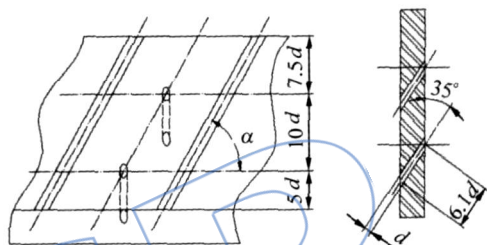


图 2 肋和出流孔的结构

Fig. 2 Configuration of rib turbulators and bleed holes

出流收集腔下壁面, 在避开出流冲击, 流动较平缓的位置开有壁面静压孔, 出流收集腔内速度较低, 压力分布均匀, 可认为此位置所测静压代表了出流孔出口处的静压. 通道静压测点全部位于距出流孔 $5d$ 的侧壁上, 该侧壁出流孔上方 $1/2$ 通道高度位置开有壁面静压孔, 用于测量沿流向的静压分布. 根据数值模拟结果, 肋和出流造成的通道内气流的三维流动不会对静压测量产生明显影响. 侧壁中心, 在第一根肋前 1 倍肋距处开有壁面静压孔测量入口静压. 通道中心, 距入口 100 mm 处用水银温度计测量气流温度.

通道进口雷诺数 Re 定义为

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

其中 U_∞ 为通道进口处的平均速度, D 为通道的当量直径, 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_c 为通道截面积.

出流孔雷诺数 Re_h 定义为

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

其中 ρ_i 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

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

其中 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

$$C_d = \frac{m}{p_t \left(\frac{p_s}{p_t} \right)^{\frac{\kappa-1}{2\kappa}} \sqrt{\frac{2\kappa}{(\kappa-1)RT_t} \left[\left(\frac{p_t}{p_s} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right]} A} \quad (4)$$

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想流量,其中 κ 为绝热指数, p_s 为出流孔出口处的静压, p_t 为出流孔入口上游通道中的平均总压,具体为出流孔上游 $1/2$ 肋距处静压(由测量结果线性差值得到)与当地动压头(根据通道入口流量和各收集腔流量计算)之和, T_t 为与总压对应处的总温, A 为出流孔的截面积。

总压系数为

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

式中 $p_{t,\infty}$ 为通道进口处的总压, $p_{t,i}$ 为第 i 对出流孔上游通道中的平均总压,该点沿通道主流方向的距离与肋间距或孔间距的比为 $i(X/P = i)$ 。以上总压亦由该处静压与当地动压头相加求得。通道内总压有损失时,总压系数为负值。总压系数绝对值越大,损失越大。

实验时打开主流调节阀,调整出流调节阀使各收集腔静压相等,由浮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(1),(3)两式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。

出流流量和主流流量直接测量结果均为体积流量,测量不确定度均为 2.5%;静压和温度的测量不确定度均为 0.5%;根据误差传递理论,流量系数的不确定度不大于 3%;总压系数的不确定度不大于 5%。

2 实验结果及分析

2.1 肋角度对流量系数的影响

研究发现,不同肋角度时,通道内各对出流孔的流量系数沿流向分布规律类似;肋角度对流量系数的影响规律在所研究的通道入口雷诺数和总出流比范围内一致,以下以 $Re = 90\,000$, $Sr = 0.22$

的工况为例进行说明,如图 3 所示:随肋角度的增大,每对出流孔的流量系数均增大,但增大的幅度有限。这与文献[5-6]的结论相同,即随着肋角度的增大,由肋所诱导的二次流使气流进入出流孔时更加顺畅,损失减小,提高了流量系数。但出流孔入口处的损失在总的出流损失中所占比例有限,这部分损失的变化造成的流量系数变化也较小。本次研究中并未发现文献[5-6]研究中发现的流量系数沿流向逐渐增大的现象,相反在主流雷诺数较小或出流比较小的情况下出现了文献[8]提到的,沿流向流量系数减小的情况。主要原因在于:本次研究的出流比较小,通道内流速下降较小,由于流速降低造成通道后部出流损失减小的现象并不明显。而主流雷诺数较小或出流比较小工况中,出流雷诺数 Re_h 处于较小水平,在这一水平下,出流孔内的流动损失对出流雷诺数较为敏感,随着出流使通道后部出流雷诺数减小,出流孔内流动损失增大,使流量系数减小。实际内流冷却通道的设计通常是多排出流孔设计,总出流比较大而出流雷诺数在一些工况下可能较小,在这种情况下,上述两种因素可能同时作用于流量系数的变化。

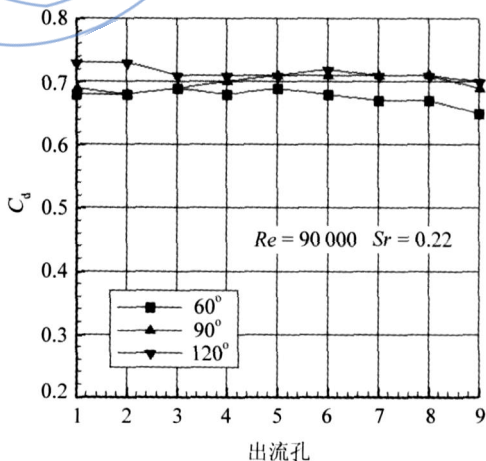


图3 肋角度对流量系数 C_d 的影响

Fig. 3 Effect of rib turbulator orientation on discharge coefficient C_d

2.2 肋角度对总压系数的影响

肋角度对总压系数的影响规律在各工况下是一致的,仍以 $Re = 90\,000$, $Sr = 0.22$ 的工况为例,如图 4 所示:无论直肋还是斜肋,沿流动方向在通道入口处,受入口效应的影响,总压系数下降速度高于通道后部,在整个通道中,带 90 肋通道总压系数绝对值最大,带 60 和 120 肋通道中的总压

系数接近,其绝对值均小于带 90 肋通道. 意味着带 90 直肋的通道流动损失要高于带斜肋的通道. 斜肋所诱发的纵向涡旋有利于减小肋所带来的流动损失. 在出流比相同的情况下,出流所导致的通道内流动结构的变化对流动损失的影响不明显.

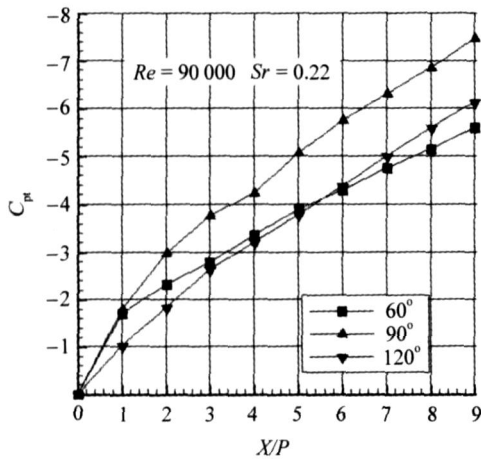


图 4 肋角度对总压系数 C_{pt} 的影响
Fig. 4 Effect of rib turbulator orientation on total pressure coefficient C_{pt}

2.3 孔位置对流量系数的影响

各工况下,出流孔位于相邻两肋间上游和下游时,流量系数沿通道的分布规律与出流孔位于两肋中间时相同. 图 5 是 $Re = 90\,000, Sr = 0.22$ 时,出流孔分别位于两肋间上游、中心和下游时,沿流向的流量系数分布. 出流孔位置在下游时,流量系数最高,在上游时,流量系数最低. 说明肋后跨流的再附着点在两肋之间的靠后位置,出流孔

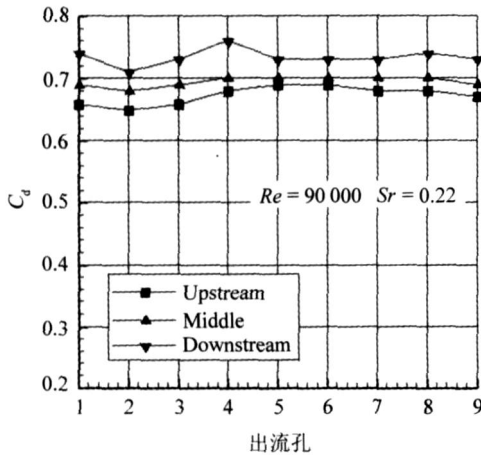


图 5 孔位置对流量系数 C_d 的影响
Fig. 5 Effect of bleed hole location on discharge coefficient C_d

位置越向下游,越有利于跨流后的气流进入,流量系数相对较高. 出流孔位于上游时,由于存在肋后回流区,气流不易进入,相对其它两种出流孔位置,流量系数较低.

2.4 孔位置对总压系数的影响

不同出流孔位置工况下,通道内总压系数的分布规律是类似,但具体数值有差别,以 $Re = 150\,000, Sr = 0.22$ 的工况为例,如图 6 所示:出流孔位于相邻两肋间下游位置时,总压系数绝对值最大,流动阻力最大;位于上游时,总压系数绝对值最小,其流动阻力也最小. 原因在于不同位置出流使通道内流动结构不同. 出流作用会造成下壁面附近的气流有向下的分速度,出流孔位置越靠近下游肋,由于向下流动分速度的存在,使肋对流动的扰动越强烈,通道内流动损失越大.

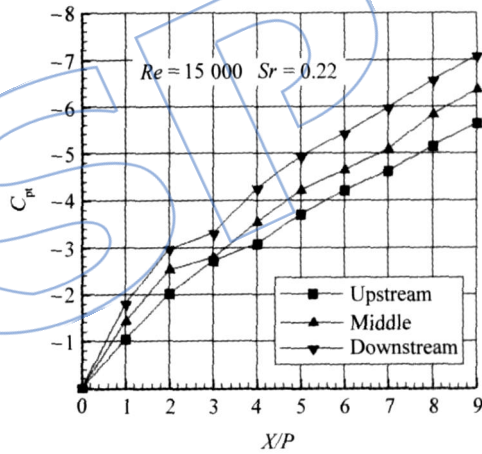


图 6 孔位置对总压系数 C_{pt} 的影响
Fig. 6 Effect of bleed hole location on total pressure coefficient C_{pt}

3 结 论

根据本文研究条件下的实验结果,可得出如下结论:

- 1) 肋角度和出流孔与肋的相对位置不改变流量系数和总压系数在通道内沿流向的分布规律,但不同几何结构会造成相同流动工况下流量系数和总压系数数值的不同;
- 2) 通道中两肋间每对出流孔的流量系数随肋角度的增大而增大,但增大的幅度不大;
- 3) 通道中沿流向各位置的总压系数绝对值在肋角度为 90° 时最大,在 60° 和 120° 时数值接近,均小于肋角度为 90° 的通道;
- 4) 在两肋之间,出流孔位置靠近下游时的流

量系数要高于靠近上游时的情况;

5) 两肋之间,出流孔位置偏向下游时会使总压系数绝对值增大,流动损失增加.

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] Chanteloup D, Bolcs A. Flow characteristics in two-leg internal coolant passages of gas turbine airfoils with film-cooling hole ejection [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2002, 124(3): 499-507.
- [4] Ekkad S V, Huang Y Z, Han J C. 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.
- [5] 裘云, 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.
- QIU Yun, ZHU Huiren, NI Meng, et al. Effect of rib turbulator orientation on the discharge coefficient of suction hole in the internal passage[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(2): 235-238. (in Chinese)
- [6] 倪萌, 朱惠人, 裘云, 等. 肋角度对流量系数影响的数值模拟研究[J]. 航空动力学报, 2004, 19(2): 196-200.
- NI Meng, ZHU Huiren, QIU Yun, et al. Numerical investigation of influence of rib orientation on discharge coefficients[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(2): 196-200. (in Chinese)
- [7] 裘云, 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): 341-343.
- QIU Yun, ZHU Huiren, XU Duchun, et al. Pressure loss of the internal passage with rib turbulators and suction holes[J]. Journal of Propulsion Technology, 2003, 24(4): 341-343. (in Chinese)
- [8] 郭涛, 朱惠人, 李广超, 等. 带肋和双排出流孔通道的流动特性[J]. 推进技术, 2007, 28(4): 399-402.
- GUO Tao, ZHU Huiren, LI Guangchao, et al. Flow in channel with rib turbulators and double-row bleed holes [J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28(4): 399-402. (in Chinese)