

主流逆压力梯度下气膜孔流量系数的实验^{*}

樊慧明, 朱惠人, 李广超

(西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 为研究主流逆压力梯度下气膜孔的几何结构和气动参数对流量系数的影响规律, 采用放大模型在低速回流式风洞中进行了实验。在对比研究圆柱孔和双向扩张孔流量系数基础上, 重点研究了双向扩张孔的流量系数。结果表明, 双向扩张孔的流量系数比圆柱孔的流量系数高。前倾角越大, 流量系数越高; 径向角越大, 流量系数越高。流量系数随动量比的增加而增高, 在动量比小于 4 时增幅尤其明显。主流湍流度增大使流量系数增大, 动量比越小, 增幅越大。除了在孔轴线与平板的夹角较大情况外, 密度比对流量系数的影响较小。

关键词: 航空发动机; 燃气涡轮; 二次流; 流量系数; 试验

中图分类号: V 235. 113 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2009) 04-0405-06

Experiments of discharge coefficient of film cooling holes under adverse pressure gradient

FAN Huiming, ZHU Huiran, LI Guangchao

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

Abstract To study the influence of geometries and aerodynamic parameters on discharge coefficient in the presence of the mainstream adverse pressure gradient, experiments were carried out in a scaled up low speed wind tunnel. The discharge coefficient of the expanded holes is compared with that of the cylindrical holes firstly and then the investigation is focused on the discharge coefficient of the expanded holes. The results show that the discharge coefficient of the expanded holes is larger than those of the cylindrical holes. Both the large plane angles and the small radial angles provide the greater discharge coefficient. Discharge coefficient increases when the momentum flux ratios increase, especially at the momentum flux ratios lower than 4. The high turbulence intensity produces the large discharge coefficient, especially at the low momentum flux ratios. Density ratios have weak influence on the discharge coefficient, except at the large inclination angles of the film cooling holes.

Key words Aircraft engine; Gas turbine; Secondary flow; Discharge coefficient; Experiment

1 引 言

在现代高性能发动机中一般采用气膜冷却对涡轮叶片进行冷却, 即从压气机末级抽取高压冷却气体进行冷却。由于涡轮前温度的不断提高, 冷却叶片所用的空气量必须不断提高, 有时高达 15% ~ 20% 左右, 大量压缩空气的消耗影响了发动机的效率和推力。因此准确掌握流量系数与气动参数和气膜孔的几何结构的关系是合理设计冷却结构的基础。

到目前为止, 国外对气膜冷却的流量系数进行了

广泛而深入的研究^[1~4]。国内朱惠人、杨卫华研究了气膜孔形状对流量系数的影响。邓明春研究了密度比对涡轮叶片气膜孔流量系数的影响, 廖乃冰等研究了顺压力梯度下双向扩张形孔的气膜冷却特性^[5~9], 但是国内对流量系数的研究还不够完善, 主流逆压力梯度的状况研究的还比较少。而在实际发动机涡轮叶片的吸力面和压力面的局部区域均有可能出现逆压力梯度的流动状态。主流的压力梯度必然影响二次流喷出气膜孔以后的流动状态, 因此有必要对逆压力梯度下气膜孔的流动特性进行研究。考虑到在实际发动机中冷却气体和主流高温燃气之间较大的温

^{*} 收稿日期: 2008-04-30 修订日期: 2008-09-24

作者简介: 樊慧明 (1983—), 男, 硕士生, 研究领域为航空发动机热端部件传热与冷却技术。

E-mail fanhuiming21@163.com

差造成的密度不同, 试验中分别用二氧化碳和空气作为二次流来研究密度比对流量系数的影响。到目前为止, 有关湍流度对流量系数影响的研究很少, 实际上, 湍流度不同, 会影响主流与喷出气膜的掺混状态, 从而影响气膜孔流量系数, 因此, 本文也将湍流度的影响纳入研究内容。另外还系统研究了前倾角、径向角、动量比对双向扩张形孔流量系数的影响。

2 实验装置与测量方法

2.1 实验装置与试验件

本实验在回流式风洞中进行, 基于气膜孔圆柱部分直径的主流雷诺数为 6 100 左右。整个系统分为主流系统和二次流系统两部分, 回流风洞的结构示意图如图 1 所示。

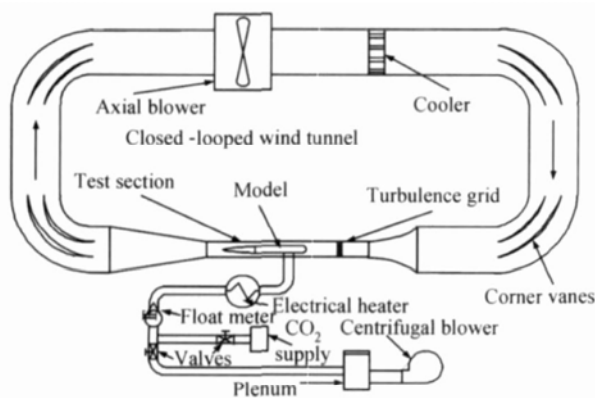


Fig. 1 Sketch of closed-looped wind tunnel

鼓风机用来提供主流气流, 实验段设计成扩张的形状以产生逆压力梯度气流 (如图 2 所示), 气膜孔出口位置主流气体的压力梯度为 $k = v \times (\frac{du}{dx}) / u^2 = -4.3 \times 10^{-6}$, 其中 v 表示空气的运动粘性系数。实验件上游安装了湍流发生器来产生较高的湍流度 (与部分航空发动机一级高压导向叶片前缘主湍流度相当), 在进行低湍流度试验时不安装湍流发生器。对流量系数的研究, 主流和二次流一般都是用空气作为工质的, 考虑到实际发动机中冷却气体与高温燃气的密度相差较大, 因此本实验分别用空气和二氧化碳作为二次流, 以对比研究密度比对流量系数的影响, 他们与主流的密度比分别为 1.0 和 1.5。二次流气体由压气机或是九个二氧化碳气罐并联提供, 二次流的流量由浮子流量计测定, 流量的大小由与浮子流量计相连接的阀门控制。

加工了 28 个平板试验件研究气膜孔几何参数的影响, 每个平板上都开有一排 7 个气膜孔。孔的结构

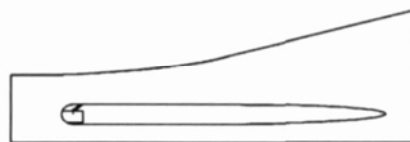


Fig. 2 Sketch of experimentation section

如图 3 所示, 气膜孔厚径比为 3 气膜孔长径比随角度变化而变化。双向扩张孔是在圆柱形孔的基础上进口和出口侧向都进行 15° 扩张形成的, 同时保证进口和出口侧向宽度是孔径的 1.5 倍。本文中双向扩张孔用 3-in-1 holes 表示。试验件的气膜孔圆柱部分的直径为 7.5 mm, 相对于实际发动机涡轮叶片的气膜孔大约放大了 15~20 倍。主流的流动方向与 x 轴的正方向相同。前倾角是气膜孔的轴线在 xy 平面上的投影与 x 轴的夹角, 表示为 α 。径向角是孔轴线在 yz 平面的投影与 y 轴的夹角, 表示为 β 。孔轴线与平板的夹角为 γ , 孔间距用相邻两个孔的中心线距离与孔的直径的比值 P/d 表示。

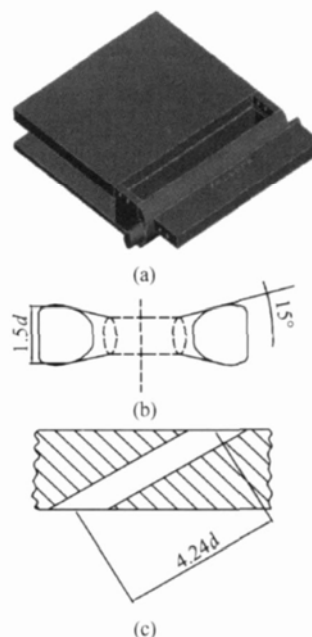


Fig. 3 Sketch of text model

动量比

$$I = \rho_c u_c^2 / \rho_m u_m^2$$

密度比

$$Dr = \rho_c / \rho_m$$

湍流度

$$Tu = \sqrt{\frac{1}{3} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})} / \overline{U}$$

孔雷诺数

$$Re = \rho_c u_c d / \mu$$

式中 ρ_m 和 ρ_c 分别为主流和二次流的密度, u_m 和 u_c 分别为主流和二次流的速度, u' , v' 和 w' 分别是三个坐标方向的脉动速度, $\bar{U}$ 是流体的特征时间平均速度。 d 表示气膜孔圆柱部分的直径, μ 为二次流的动力粘性系数, 实验时三个坐标方向的速度是用热线风速仪测得, 频率为 2 kHz 每次测得的速度可求得一个湍流度, 然后 2 000 个湍流度相加再平均求得平均湍流度。 本文根据实际设计时的数据需求, 调整实验件前缘主流湍流度为 8% 进行实验。

表 1 给出了双向扩张形孔和圆柱形孔的角度和孔间距参数, 这两个参数的定义如图 4 所示。 试验时通过更换试验件来研究孔的几何结构对流量系数的影响。 试验通过对比圆柱形孔的流量系数, 主要研究了双向扩张形孔的结构和气动参数 (由表 2 给出) 对流量系数的影响。

2.2 流量系数的确定

流量系数是流过气膜孔的实际流体质量流量与

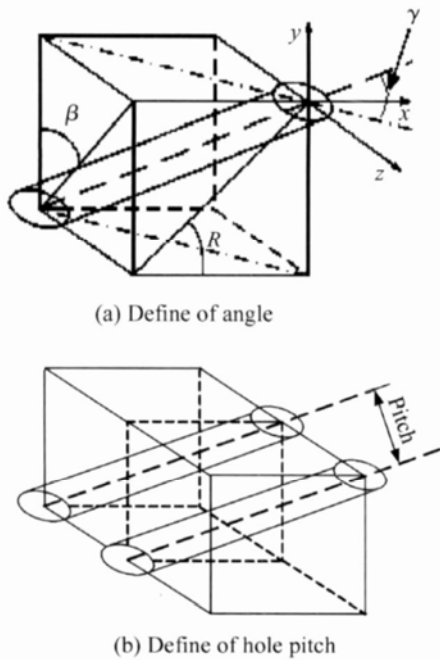


Fig. 4 Definition of angle and hole pitch

Table 1 Geometry of the holes

	3-in-1 holes			Cylindrical
P/d	2	3	4	3
$\alpha/(^\circ)$	20	45	90	45
$\beta/(^\circ)$	0	30	65	0

Table 2 Aerodynamic parameters

I	1	2	4
Dr	1	1.5	
$Tu/\%$	0.4	8.0	

理想流体质量流量之比, 理想流体质量流量是假设从二次流总压到主流静压做等熵膨胀的条件下计算出来的。 理想流体流量系数的计算公式为^[6]

$$C_D = \frac{m_c}{p_{tc} \left| \frac{p_m}{p_{tc}} \right|^{(k+1)/2k} \sqrt{\frac{2k}{(k-1)RT_{tc}}} \left| \frac{p_{tc}}{p_m} \right|^{(k-1)k} - \left| \frac{\pi}{4} d^2 \right.}$$

式中的 C_D 表示流量系数, p_{tc} 为二次流总压, p_m 为主流静压, m_c 为二次流质量流量, k 是气体的多变指数, 本试验中 k 取 1.4 T_{tc} 为二次流热力学温度, d 为气膜孔圆柱部分的直径, R 为摩尔气体常数, 取值 8.314 5。

由流量系数的定义式可知, 在实验中知道了二次流的质量流量、二次流的总压和主流的静压就可以算得流量系数。

二次流的体积流量用浮子流量计来测定, 测得了二次流的体积流量根据 $m_c = \rho_c q_c$ 可以得到二次流的质量流量, 其中 ρ_c 为二次流的密度, q_c 为二次流的体积流量。

二次流的总压由布置在气膜孔进口位置处的压力腔里面的测点测得。 主流的静压由布置在主流通道的侧壁上的测点测得, 由于存在主流逆压力梯度, 沿主流方向的压力不同, 计算时主流静压取气膜孔出口位置测的压力值。

本试验计算流量系数的理论流量时, 有效面积不是以孔的出口面积计算, 而是以孔的圆柱部分的横截面积来计算, 圆柱横截面的面积比孔的出口面积小, 所以双向扩张形孔的流量系数可能大于 1。

3 实验结果与分析

首先对比了圆柱形孔和双向扩张形孔的流量系数, 发现在动量比、入射角度、主流湍流度和密度比都相同的情况下双向扩张形孔的流量系数明显比圆柱形孔的流量系数大。 在此基础上重点研究了前倾角、径向角、动量比、密度比和主流湍流度对双向扩张形孔的流量系数的影响规律。

3.1 孔形对流量系数的影响

图 5 给出了双向扩张形孔和圆柱形孔的流量系数对比情况, 实验条件是 $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 0^\circ$, $P/d = 3$ 由图看出, 在相同的动量比下, 双向扩张形孔的流量系数明显比圆柱形孔的流量系数大, 双向扩张形孔的流量系数比圆柱形孔的流量系数大 33% ~ 42%。 主要原因是双向扩张形孔的进口和出口都经过了双向扩张, 进口段经过双向扩张后气流的分离作用减弱, 局

部流动损失减小。出口双向扩张后使得出流的有效面积增大,削弱了主流对二次流的阻塞作用,减少了流动损失。所以双向扩张形孔的流量系数比圆柱形孔的流量系数大。

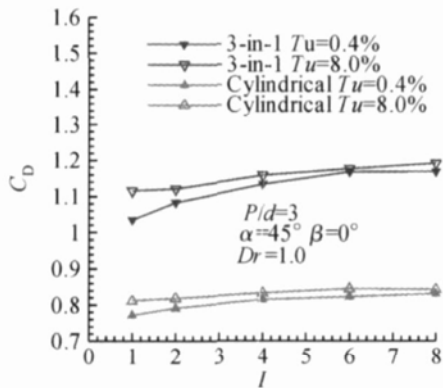


Fig. 5 Effect of the hole shape on discharge coefficient

3.2 前倾角对流量系数的影响

图 6给出了前倾角 α (包括 20° , 45° 和 90°) 对流量系数的影响, 其它实验条件都是径向角 $\beta = 0^\circ$, 孔间距 $P/d = 3$ 密度比 $Dr = 1.0$ 主流湍流度 $Tu = 8.0\%$ 。可以看出前倾角越大流量系数越大, $\alpha = 90^\circ$ 的流量系数比 $\alpha = 20^\circ$ 的流量系数大 $16\% \sim 30\%$ 。这是因为在相同的动量比下, 较大前倾角的孔形在出口位置二次流沿着垂直于主流方向的分速度较大, 二次流容易射入主流与主流掺混, 二次流气体能更顺畅的流出气膜孔, 出口的流动阻力比较小。另外前倾角较大时气流在气膜孔的进口段的速度分布比较均匀, 进口段局部流动损失较小。所以前倾角增大时流量系数将增大。

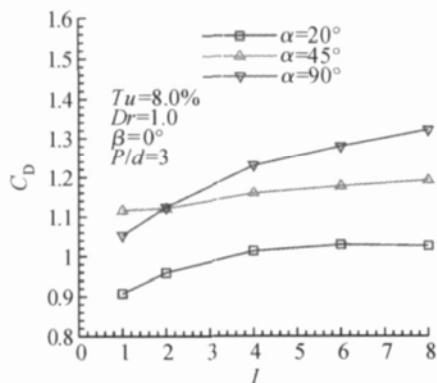


Fig. 6 Effect of the plane angle on discharge coefficient

3.3 径向角对流量系数的影响

图 7给出了径向角 β (包括 0° , 30° 和 65°) 对流量系数的影响。其它实验条件都是前倾角 $\alpha = 20^\circ$,

孔间距 $P/d = 2$ 密度比 $Dr = 1.0$ 主流湍流度 $Tu = 8.0\%$ 。可以看出, 径向角越大流量系数越小, 以 $I = 8.0$ 时为例, $\beta = 0^\circ$ 和 $\beta = 30^\circ$ 的流量系数比 $\beta = 65^\circ$ 的流量系数分别大 24% 和 18% 。这是因为: (1) 径向角较大时二次流在气膜孔的进口段存在较大的分离漩涡, 导致进口段局部损失较大。(2) 当径向角较大时气膜孔出口面的展向宽度较大, 受到主流的压迫作用较强烈, 导致出口位置的损失比较大。

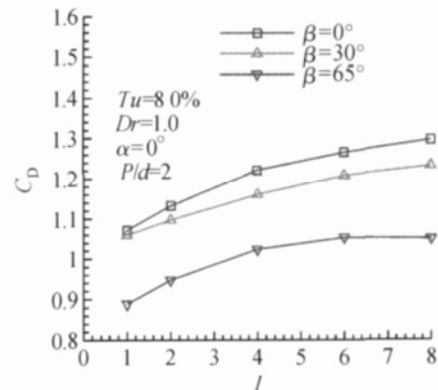


Fig. 7 Effect of the radial angle on discharge coefficient

3.4 动量比对流量系数的影响

图 8给出了在主流湍流度为 8.0% , 以空气为二次流, $\alpha = 20^\circ$, $\beta = 0^\circ$; $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 0^\circ$ 和 $\alpha = 90^\circ$, $\beta = 0^\circ$ 的双向扩张形孔流量系数随动量比的变化。总的来说, 流量系数随着动量比的增大而增大, 当 $I < 4$ 时, 流量系数随动量比增加的较快, 当 $I > 4$ 以后, 流量系数随动量比的变化较慢。动量比由 1 增加到 8 $\alpha = 20^\circ$ 时流量系数增加了 7% , $\alpha = 45^\circ$ 时流量系数增加了 19% , $\alpha = 90^\circ$ 时流量系数增加了 26% 。在低动量比下主流对二次流的堵塞作用明显, 二次流的出流面积较小。随着动量比的增大, 二次流具有较大的动量可以克服主流的挤压作用, 使有效出流面积增大, 减小了流动阻力, 流量系数增大。另外动量比增大也可使孔内的边界层变薄, 相对减小了粘性耗散损失。动量比增大使出流面积的增大和边界层厚度的减小都是在一定范围之内比较明显, 在本次试验中发现在动量比小于 4 的范围内这种作用较明显, 流量系数的增加较快。

3.5 密度比对流量系数的影响

图 9给出了密度比对流量系数的影响。孔间距 $P/d = 4$ 湍流度 $Tu = 8.0\%$, 四个图的入射角度: 图 9 (a) $\alpha = 20^\circ$; $\beta = 0^\circ$, 图 9 (b) $\alpha = 20^\circ$; $\beta = 65^\circ$, 图 9 (c) $\alpha = 90^\circ$; $\beta = 0^\circ$, 图 9 (d) $\alpha = 90^\circ$; $\beta = 65^\circ$ 。在 α 较小

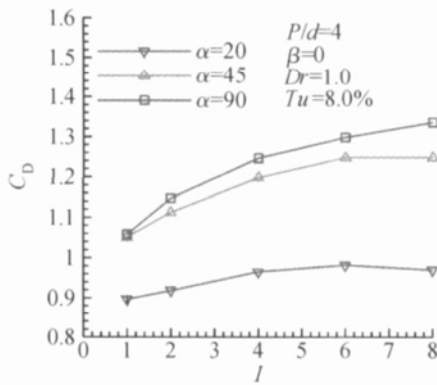


Fig. 8 Effect of the momentum flux ratios on discharge coefficient

(如图 9(a)(b)所示)和 β 角较大(如图 9(d)所示)时,密度比为 1.5 和密度比为 1 两种情况的流量系数基本相同。当 α 较大和 β 较小时,孔轴线与平板的夹角 γ 较大。从图 9(c)可以看出,当倾角 γ 较大时,密度比 $Dr=1.5$

的流量系数略大于 $Dr=1.0$ 的流量系数。

文献[8]发现在孔雷诺数小于 15 000 时,气膜孔的流量系数随孔雷诺数提高而迅速提高;在孔雷诺数大于 15 000 时,流量系数不再有明显变化。根据动量比、密度比和孔雷诺数的定义,在相同的动量比下, $Dr=$

1.5 和 $Dr=1.0$ 的二次流的孔雷诺数比值约为 1.55 (以常温下计算 $T=290\text{ K}$)。动量比 $I=1.0$ 时, $Dr=1.0$ 的孔雷诺数为 7 000, $Dr=1.5$ 的孔雷诺数为 11 000; 动量比 $I=2.0$ 时, $Dr=1.0$ 的孔雷诺数为 10 000, $Dr=1.5$ 的孔雷诺数为 15 600; 动量比 $I=4.0$ 时, $Dr=1.0$ 的孔雷诺数为 14 200, $Dr=1.5$ 的孔雷诺数为 22 000。在相同的动量比下密度比较大的工况的孔雷诺数较大,所以密度比 $Dr=1.5$ 的流量系数略大于 $Dr=1.0$ 的流量系数。

本实验进一步证明除了在 γ 较大时高密度比使流量系数增加外,密度比对流量系数的影响较弱,主要原因是本文采用了动量比代替目前工程上采用的吹风比作为变量,能在一定程度上反映密度比的影响。这与主流顺压力梯度下密度比对流量系数的影响很小^[8]略有差别。

3.6 主流湍流度对流量系数的影响

图 10 给出了孔间距 $P/d=2$ 密度比 $Dr=1.0$ 径向角 $\beta=0^\circ$,不同前倾角下主流湍流度对流量系数的影响。从图中看到 $\alpha=20^\circ$ 和 $\alpha=45^\circ$ 时, $Tu=8.0\%$ 的流量系数略高于 $Tu=0.4\%$ 的流量系数。 $\alpha=90^\circ$ 时,在小动量比下主流湍流度对流量系数的影响比较大,

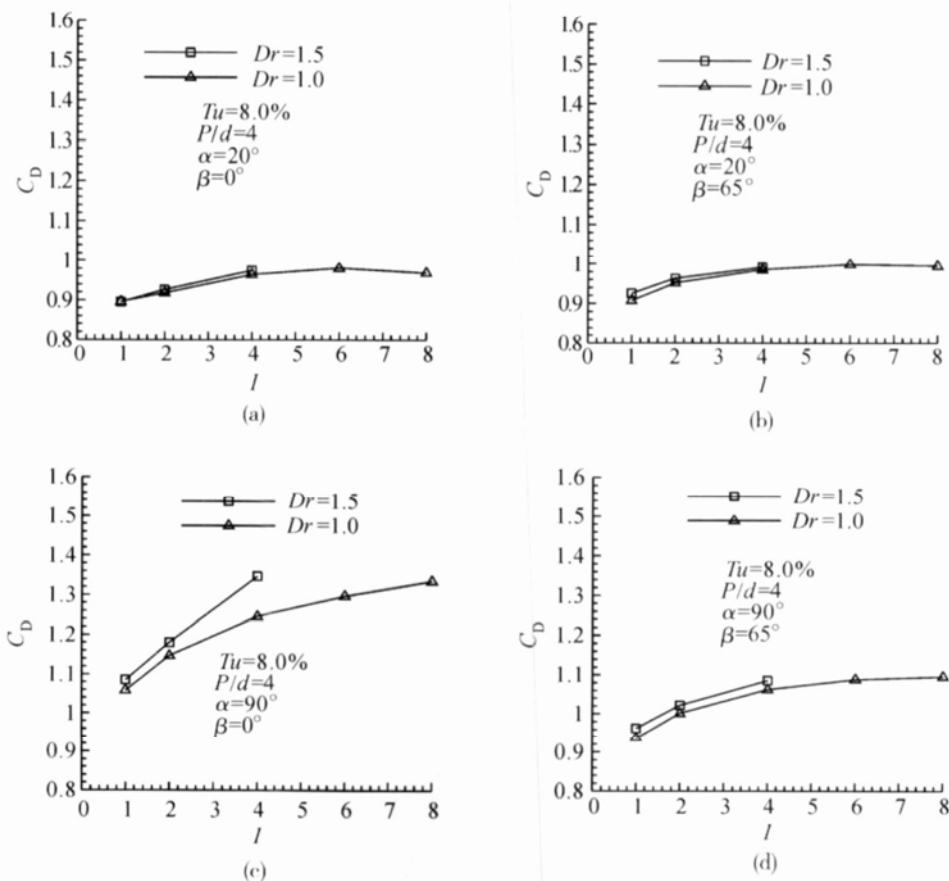


Fig. 9 Effect of the density ratio on discharge coefficient

$I=1.0$ 时,主流湍流度为 8.0% 的流量系数比 0.4% 的流量系数高出 17%。主流湍流度能为主流和二次流的掺混提供能量,有利于二次流流出气膜孔后与主流的掺混。主流湍流度较高就容易带走气膜孔出口的二次流气体,从而射流气体能够更顺畅地流出气膜孔,减少气膜孔的流动阻力,流量系数就相应增大。

由图 10 还可以发现主流湍流度对流量系数的影响在小动量比时比较大动量比时明显。这是因为当动量比较大时,射流与主流的掺混产生强烈的湍流效应使得主流本身所携带的湍流能量所能作出的贡献有所降低,从而大动量比下主流湍流度对流量系数的影响较小。与顺压梯度下湍流度对流量系数的影响规律相同^[8]。

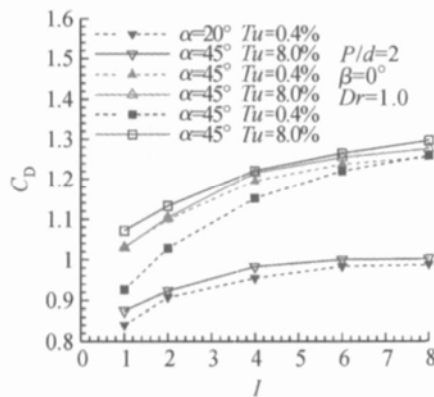


Fig. 10 Effect of the turbulence ratios on discharge coefficient

4 结 论

(1)双向扩张形孔作为一种新型的孔形结构具有较大的流量系数,它比圆柱形孔的流量系数大 33% ~ 42%。

(2)前倾角越大流量系数越大,径向角越大流量系数越小。

(3)随着动量比的增加,流量系数增大,在 $I < 4$ 时尤其明显。

(4)除了在 γ 较大时高密度比使流量系数增加外,密度比对流量系数的影响较弱。

(5)高的主流湍流度使流量系数增加。动量比越小,增幅越大。

致 谢: 本项研究在英国 Rolls-Royce 公司资助下完成,在此表示感谢,同时感谢 Rolls-Royce 公司的气动热

力及冷却组专家 Robert Kingston 及牛津大学 Osney 实验室专家 David Gillespie 曾专程赴本实验室商讨实验方案。

参考文献:

- [1] Hay N, Lampard D, Bermansour S. Effects of crossflows on the discharge coefficient of film cooling holes [J]. *ASME Journal of Engineering for Power*, 1983, 105: 243~374.
- [2] Hay N, Henshall S E, Manning A. Discharge coefficient of holes angled to the flow direction [J]. *ASME Journal of Turbomachinery*, 1994, 116: 358~368.
- [3] Hay N, Spencer A. Discharge coefficient of film cooling holes with radiused and chamfered inlets [R]. *ASME 91-GT-269*.
- [4] Petersen D R, Eckert E R G, Goldstein R J. Film cooling with large density differences between the mainstream and secondary fluid measured by heat mass transfer analogy [J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1997, 99: 620~627.
- [5] 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 (ZHU Huiren, XU Du-chun, LIU Song-ling et al. The experimental investigation in the effects of film cooling holes shape on discharge coefficient [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1998, 19(1).)
- [6] 杨卫华, 马国锋, 张靖周, 等. 气膜孔几何结构对流量系数的影响 [J]. *推进技术*, 2005, 26(5): 413~416 (YANG Weihua, MA Guo-feng, ZHANG Jing-zhou et al. Influence of geometrical construction of film cooling hole on discharge coefficient [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2005, 26(5).)
- [7] 邓明春, 朱惠人, 王学文, 等. 密度比对涡轮叶片气膜孔流量系数的影响 [J]. *航空动力学报*, 2006, 21(5): 796~799.
- [8] 廖乃冰. 一种新型孔的气膜冷却特性研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2008.
- [9] 向安定, 朱惠人, 刘松龄, 等. 涡轮导向叶片表面气膜孔流量系数的实验研究 [J]. *推进技术*, 2003, 24(3): (XIANG An-ding, ZHU Huiren, LIU Song-ling et al. Discharge coefficient measurements for film cooling holes on blade surface in a turbine cascade [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2003, 24(3).)

(编辑: 梅 瑛)