

不同横向距离下双射流孔流动与冷却特性实验研究

姚家旭, 雷 蒋

(西安交通大学 机械结构强度与振动国家重点实验室 力学实验教学国家示范中心
航天航空学院, 陕西 西安 710049)

摘 要:通过实验方式,在平板上对不同孔间横向距离($p/d=0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$)下的双射流气膜冷却结构进行了研究。使用七孔探针测量了孔下游不同截面处的时均流场,使用压力敏感漆(PSP)测量了平板表面的气膜冷却效率。孔间流向距离(s/d)为3.0。吹风比(M)为0.5, 1.0, 1.5, 2.0,射流-主流密度比为1.0。研究了孔间横向距离对双射流间相互作用,及其流动和冷却特性的影响。结果表明, $p/d=0$ 时,孔间相互作用体现为压附效应,下游射流被上游射流压向壁面并保持贴附,气膜冷却效率对吹风比不敏感。 $p/d=0.5$ 与1.0时,反肾形涡效应主导,两股射流均被压向壁面,气膜覆盖较好,冷却效率较高。 $p/d\geq 1.5$ 时,压附效应基本消失,反肾形涡效应减弱,射流间距增加,气膜覆盖变差。

关键词:气膜冷却;双射流;压力敏感漆

中图分类号:V434-34 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2018)01-0036-08

Experimental study on flow and cooling characteristics of double-jet film-cooling holes at different spanwise distances

YAO Jiaxu, LEI Jiang

(State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, National Demonstration Center for Experimental Mechanics Education, School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Double-jet film-cooling structures on a flat plate at different spanwise distances ($p/d=0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$) are investigated experimentally. The time-averaged flow field at several cross-sections in downstream of the holes is measured by a seven-hole probe, and the film-cooling effectiveness on surface of the flat plate is measured with pressure sensitive paint (PSP). The measured results indicate that the streamwise distance (s/d) is 3.0, and the blowing ratio (M) is 0.5, 1.0, 1.5, and 2.0 while the density ratio (DR) is 1.0. The interaction between the two jets, its influence on the flow and cooling characters are investigated. The results show that, as $p/d=0$, the interaction between the holes is presented as pressing effect, that is, the downstream jet is pressed on the wall surface by the upstream one and keeps attached to the surface, and the film-cooling effectiveness is not sensitive to blowing ratios; as $p/d=0.5$ and 1.0, the anti-kidney vortex effect dominates, both of the jets are pressed down on the surface, and the film coverage is good and the effectiveness is relatively high; as $p/d\geq 1.5$, the pressing effect al-

收稿日期:2017-07-09;修回日期:2017-08-30

基金项目:国家自然科学基金(51776153)

作者简介:姚家旭(1993—),男,硕士研究生,研究领域为燃气轮机热端部件传热与冷却

most disappears, the anti-kidney vortex effect weakens, the distance between the jets increases, and the film coverage degrades.

Keywords: film-cooling; double-jet; pressure sensitive paint

0 引言

气膜冷却被广泛运用于航天航空推进领域,是冷却发动机燃烧室、以及航空发动机涡轮叶片的重要方式之一。冷却气体通过布置于待冷却表面的小孔喷出,在表面形成保护层,以阻隔由高温燃气传来的热量,确保发动机安全正常地运行。

在用于气膜冷却的孔型之中,流向圆孔是最为常见的一种,其加工维护较为简单。在平板上对流向圆孔(倾斜角 $\theta \approx 30^\circ$)的研究发现,在吹风比(射流-主流质量通量比, M)小于0.5时,这一结构的气膜冷却效率随吹风比增加而提高;但是在 $M > 0.5$ 时,由于射流发生吹离,不能有效覆盖壁面,气膜冷却效率迅速降低^[1]。除圆孔外,扇形孔也是常见于气膜冷却的一种结构,这一孔型在出口处具有一定的横向扩张,因此降低了冷却射流在孔出口处的动量,以抑制射流吹离;与圆孔相比,其能够提供更好的冷却效果,这一优势在大吹风比下尤为明显^[2-3]。但扇形孔的加工维护较为困难。2007年,Kusterer等提出了双射流气膜冷却(Double-Jet Film-Cooling, DJFC)结构^[4],采用一对交错布置、轴线方向与主流不平行的复合角圆孔,利用射流间的相互作用,在其下游产生一对反肾形涡,将冷却射流压向壁面抑制其吹离。一些研究者在不同的实验工况或布置参数下对这一结构进行了研究^[5-9],结果表明,与流向扇形孔相比,双射流孔具有较高的气膜冷却效率,尤其在大吹风比工况下;同时由于其轮廓为圆柱形,因此加工维护较为简单。但截止目前,针对双射流结构流场的实验研究相对较少,且横向距离对其相互作用,以及流场和气膜冷却效率的影响尚未得到较多的研究。

本文在不同的吹风比下,对不同孔间横向距离的双射流结构进行了研究,测量了其时均流场与气膜冷却效率,讨论了横向距离对其射流间相互作用的影响,以期对这一冷却结构提供更为细致的了解。

1 实验设备与方法

1.1 实验设备

实验在一低速直流风洞内进行,实验系统如图1所示。风洞实验段横截面尺寸为500 mm × 202 mm,采用皮托管测得主流流速为20 m/s,采用热线风速仪测得湍流度为0.6%。实验中,冷却射流分别由空气压缩机和高压N₂两路气源进行供气,并分别使用冷干机与加热器保证其与主流间的温度差不超过1℃。冷却射流的流量由转子流量计控制。供气腔尺寸为402 mm × 270 mm × 105 mm,可保证供气均匀。图2给出了本文所研究的双射流孔结构与坐标系,表1中给出了其几何参数。

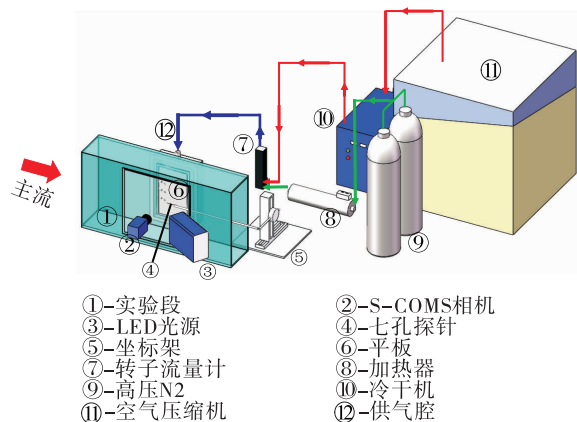


图1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic of experimental system

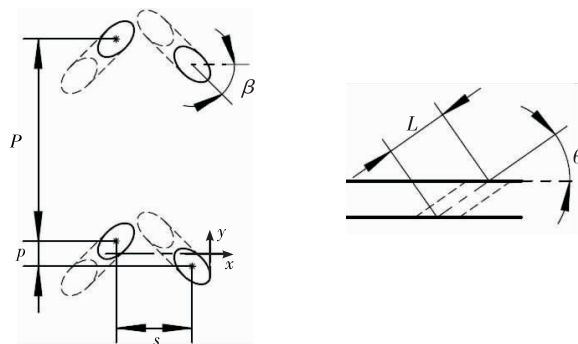


图2 双射流孔结构与坐标系

Fig. 2 Structure and coordinates of double-jet film-cooling holes

表 1 双射流孔结构参数

Tab. 1 Structural parameters of double-jet film-cooling holes

d/mm	L/d	P/d	p/d	s/d	$\theta/(\circ)$	$\beta/(\circ)$
7	2.5	8	0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0	3	35	± 45

本文分别在 4 个吹风比 ($M = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$) 下进行实验,其定义如下:

$$M = \frac{\rho_c U_c}{\rho_\infty U_\infty} \quad (1)$$

式中: ρ_∞ 与 U_∞ 分别为主流的密度与速度; ρ_c 与 U_c 分别为射流的密度与其在孔入口处的速度。

1.2 实验方法

1.2.1 流场测量

采用七孔探针,在 3 个不同流向截面处 ($X/d = -2.0, 1.0, 5.0$), 测量双射流孔下游时均流场, 测量点间距为 0.5 mm, 实验时冷却射流为空气。七孔探针固定于坐标架上, 由风洞出口处伸入实验段, 以尽可能减小对流场的干扰。由测得的压力值算得三个方向上的速度分量, 所有结果(主流方向速度 u , 二次流截面速度 $v-w$) 和流量 (Ω) 均作无量纲化处理。

1.2.2 气膜冷却效率测量

使用压力敏感漆 (PSP) 技术测量平板上的气膜冷却效率, 其定义为:

$$\eta = \frac{T_f - T_\infty}{T_c - T_\infty} \quad (2)$$

在湍流路易斯数 $Le_T \approx 1$ 时, PSP 技术可通过传热传质类比测量气膜冷却效率^[10], 与传统的热方法相比, 这一测量技术可排除由平板导热引起的误差。实验时, 空气与氮气分别作为冷却射流。

PSP 基于氧猝灭 (oxygen quenching) 效应测量氧气的分压 (或浓度): 受特定波长的激发光源照射时, PSP 会发出红色荧光, 荧光光强与氧气分压 (或浓度) 相关, 氧气分压 (或浓度) 越高, 光强越低。本实验采用波长约为 420 nm 的 LED 作为激发光源, PSP 发出的荧光经波长为 610 nm 的带通滤光片后, 由一台 S-CMOS 相机接收。为避免实验环境温度变化的影响, PSP 在每次测量前均需要进行标定。将不同压力下测得的荧光光强进行拟合, 曲线如图 3 所示, 图中 P_R 与 I_R 分别为参考压力 (即常压) 与参考压力下的光强。在实验中, 通过测得的光强计算氧

气浓度, 最终由传热传质类比, 算得气膜冷却效率:

$$\eta = \frac{T_f - T_\infty}{T_c - T_\infty} \frac{\text{传热传质类比}}{C_f - C_\infty} \quad (3)$$

式中: T_∞ , T_c 和 T_f 分别为主流、射流与壁面气膜的温度; C_∞ , C_c 和 C_f 分别为主流、射流与壁面气膜的氧气浓度。

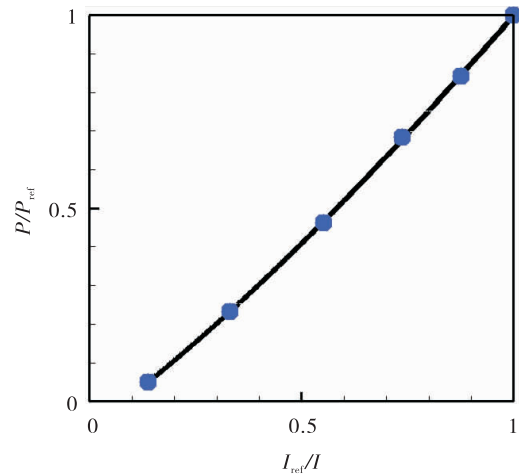


图 3 PSP 标定曲线

Fig. 3 Calibration curve of PSP

2 误差分析

采用文献[11]的方法, 使用热线风速仪测量了气膜孔前缘处的主流边界层分布, 并与典型的湍流边界层分布 (Spalding Profile) 进行对比, 取得了良好的吻合, 如图 4 所示。由此确保实验在湍流条件下进行。边界层位移厚度与气膜孔直径之比 (δ_1/d) 为 0.2。探针中心与平板壁面距离为 2.75 mm。

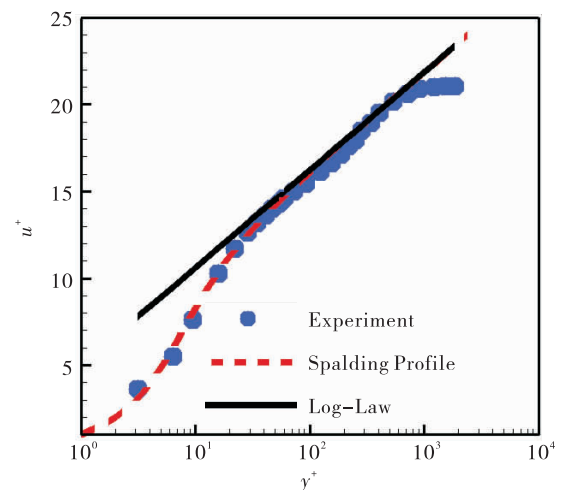


图 4 主流边界层速度分布

Fig. 4 Velocity profile of main stream boundary layer

为验证实验结果的准确性,首先对流向圆孔(直径 $d=7\text{ mm}$,孔间距 $P/d=4$,长径比 $L/d=2.5$,倾斜角 $\theta=35^\circ$)的气膜冷却效率进行了测量,并与文献[3]、[12]、[13]进行对比,如图5所示。由于本研究的主流湍流度较低($Tu=0.6\%$),因此在 $DR=1.0$, $M=0.5$ 时,中心线上的气膜冷却效率略高于

文献[3]和[13]中的数值($Tu=8\%$ 与 6.8%),除此之外,气膜冷却效率的趋势和数值均非常接近。此外,还将横向距离 $p/d=1.0$ 的双射流孔气膜冷却效率与文献[7]进行了对比;值得注意的是,文献[7]中的射流-主流密度比(DR)为 1.4 ,因此其在靠近孔出口区域的冷却效率较高。

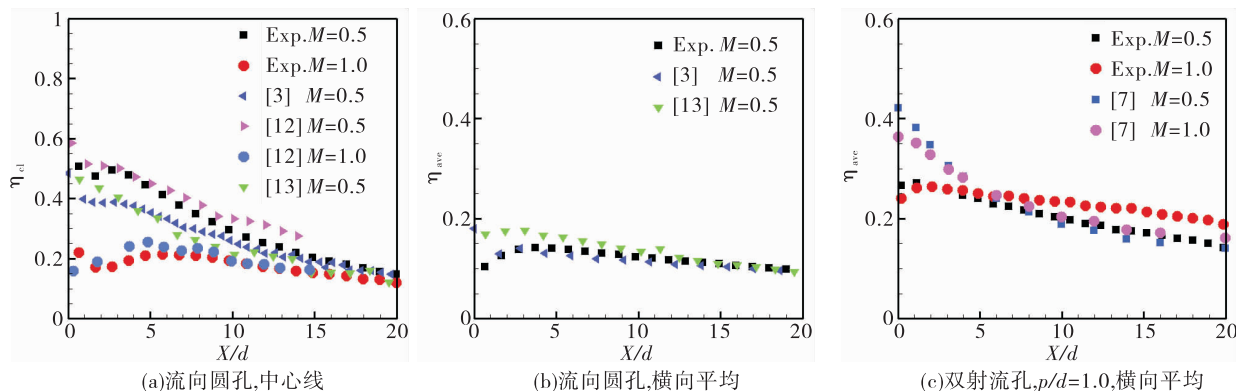


图5 气膜冷却效率与公开文献对比

Fig. 5 Film-cooling effectiveness comparing with that of the reference literatures

本文的实验误差由文献[14]中的方法进行计算,由于气膜冷却效率是通过相机所测光强算得的,因此其误差与光强相关。在置信度为95%的情况下,气膜冷却效率为 0.8 时,测量误差约为 3% ;但在气膜冷却效率较低时,由于相机测得光强减弱,因此测量误差增大,气膜冷却效率为 0.2 时,测量误差约为 15% 。

3 结果与讨论

3.1 不同孔间横向距离下的流场

图6和图7为双射流孔下游不同截面($X/d=-2.0, 1.0, 5.0$)处的时均流场,包括速度场与涡量场。为简洁期间,此处仅展示了吹风比为 $M=0.5$ 与 1.5 的结果,以分别说明双射流结构在小吹风比与大吹风比下的流动特征。下文讨论了孔间横向距离对气膜孔下游流场的影响。

$M=0.5$ 时,冷却射流与平板壁面保持贴附,尚未发生吹离,此时 $X/d=-2.0$ 处的二次流与涡量相对较弱,肾形涡只有被增强的一支能被明显观测

到。 $p/d=0$ 时,上游射流与下游射流重叠,并将其压向壁面,此时气膜横向覆盖受限。同时,上游射流被抬升,并与壁面分离。 $X/d=1.0$ 处的涡量方向与肾形涡相同,但结构不对称,这一现象说明,上游射流可能受到了下游射流的挤压,并被迫移向 $Y/d \leq 0$ 一侧。 $p/d=0.5$ 时,两股射流在下游合并,且其高度较 $p/d=0$ 时更低。 $X/d=1.0$ 处的涡量呈现两层结构,反肾形涡并未生成。随着射流向下游移动,二次流与涡量迅速耗散。 $p/d=1.0$ 时,两股射流在其边缘处交汇,其间的相互作用将两者压向壁面。在这一横向距离下,下游出现明显的反肾形涡结构,这一结构来源于两股射流被增强的肾形涡分支。此时射流核心较低,且孔间区域被冷却射流覆盖,表明可能会获得较高的气膜冷却效率。随横向距离增大, $p/d=1.5$ 与 2.0 时,射流间相互作用减弱。此时仍能明显观测到反肾形涡结构,但射流核心相对较高,且两者间距较大,气膜覆盖可能较差。

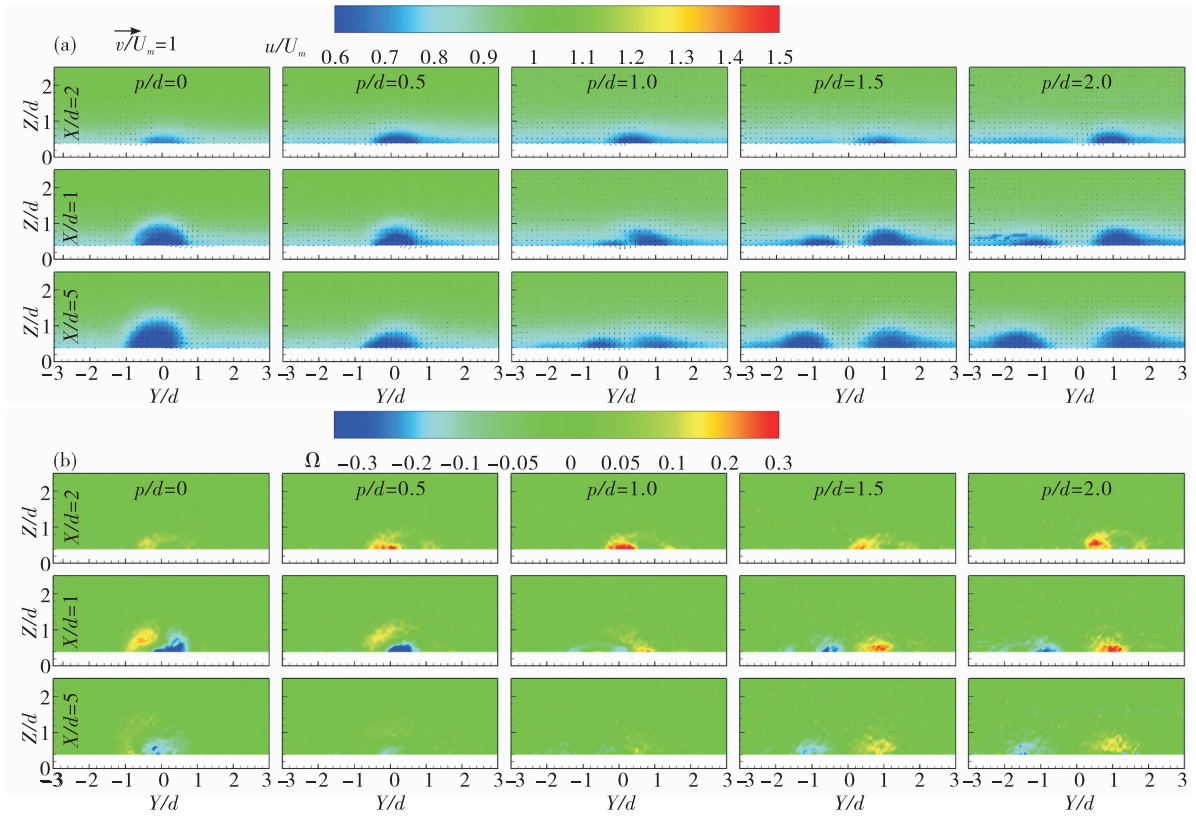


图 6 $M=0.5$ 时流场结果 (图 (a) 为速度场, 图 (b) 为涡量场)

Fig. 6 Flow field results at $M=0.5$ (velocity field (a), vorticity field (b))

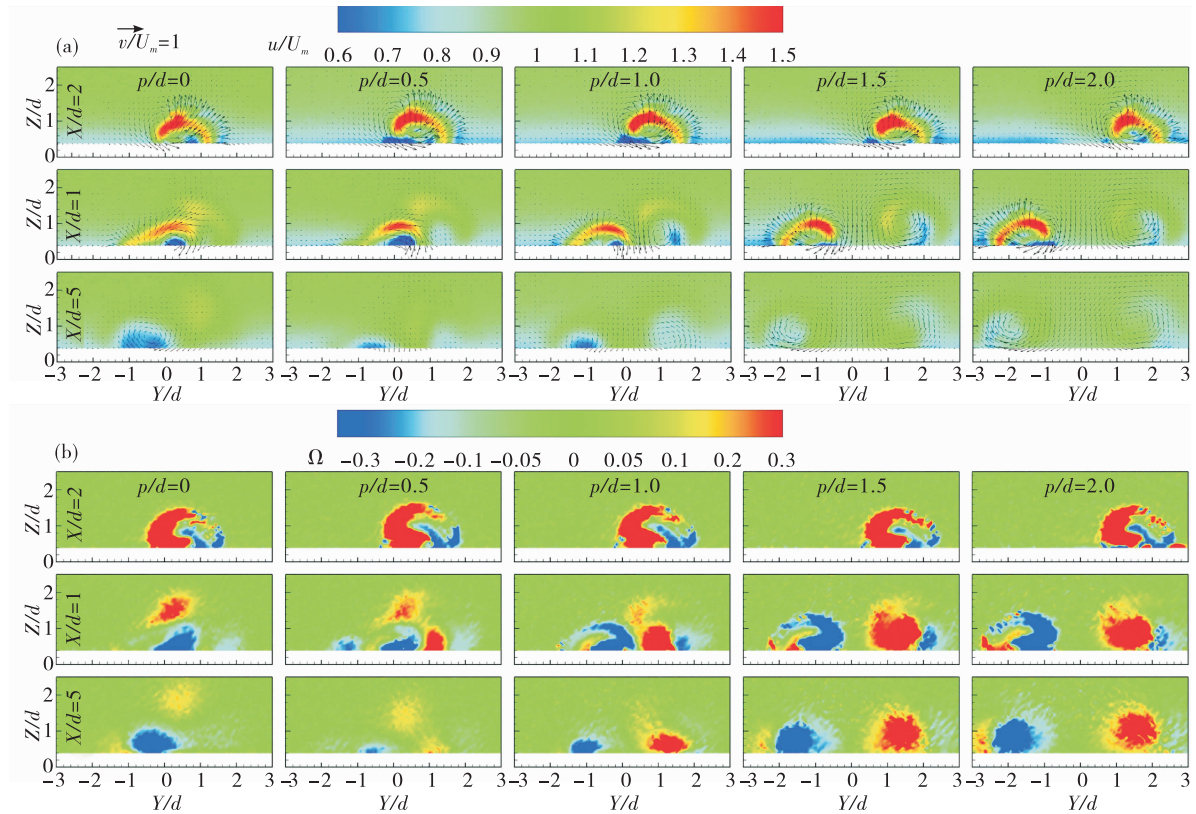


图 7 $M=1.5$ 时流场结果 (图 (a) 为速度场, 图 (b) 为涡量场)

Fig. 7 Flow field results at $M=1.5$ (velocity field (a), vorticity field (b))

$M = 1.5$ 时,由于动量增加,上游射流在离开孔出口后发生吹离, $X/d = -2.0$ 处的二次流与涡量也相对较强,被削弱的肾形涡分支也能明显观测到。 $p/d = 0$ 时,上游射流与下游射流重叠,并被抬升、远离壁面;但同时下游射流则被压向壁面,并保持贴附。下游处($X/d = 1.0, 5.0$)的涡量呈现两层结构。 $p/d = 0.5$ 时,上游射流被下游射流挤压,其涡量在 $X/d = 1.0$ 处被分为两支,如图 7 所示。此时,涡量场仍呈现两层结构:上游射流涡量较低的一支,与来自于下游射流的涡量,构成了涡量场的下层;而上游涡量较高的一支则停留在涡量场的上半部分。随射流向下游移动,二次流与涡量迅速耗散, $X/d = 5.0$ 处的涡量明显弱于其他情况。在这一横向距离下,射流间发生了较为有利的相互作用,处于上层的冷却射流,与下层的肾形涡共同将冷却气体压向壁面,并抑制其吹离。因此,可能会获得较好的气膜覆盖与较高的气膜冷却效率。 $p/d = 1.0$ 时,下游所生成的反肾形涡结构十分明显。但射流核心开始升高,因此气膜覆盖可能开始变差。被削弱的肾形涡分支沿流向迅速耗散。 $p/d = 1.5$ 与 2.0 时,射

流间距增加,相互作用减弱。两支射流间出现间隙,可能将主流气体卷入其中,导致气膜覆盖变差。

3.2 不同孔间横向距离下的气膜冷却效率

图 8 为不同吹风比 ($M = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$) 下平板表面的气膜冷却效率分布;与之对应的横向平均 ($-4 \leq Y/d \leq 4$) 气膜冷却效率在图 9 中给出。同时,还将双射流冷却结构的气膜冷却效率与常见的流向扇形孔进行了比较。下文在不同的吹风比下,讨论了横向距离对气膜冷却效率的影响。

在 $M = 0.5, p/d = 0$ 时,射流相互重叠,气膜横向覆盖受限,且由于部分上游射流无法有效覆盖壁面,故冷却效率较低。 $p/d = 0.5$ 时,气膜横向覆盖范围扩大,靠近孔出口处的区域具有较高的气膜冷却效率,横向平均冷效与 $p/d = 0$ 时相比有所升高。 $p/d = 1.0$ 时,受射流间相互作用生成的反肾形涡影响,冷却射流被压向壁面,导致较好的气膜覆盖。横向平均冷效高于其他 p/d 情况,且在靠近下游孔出口处的区域出现一定的上升趋势。 $p/d = 1.5$ 与 2.0 时,射流间距增大,相互作用减弱,气膜覆盖变差,横向平均冷效降低。

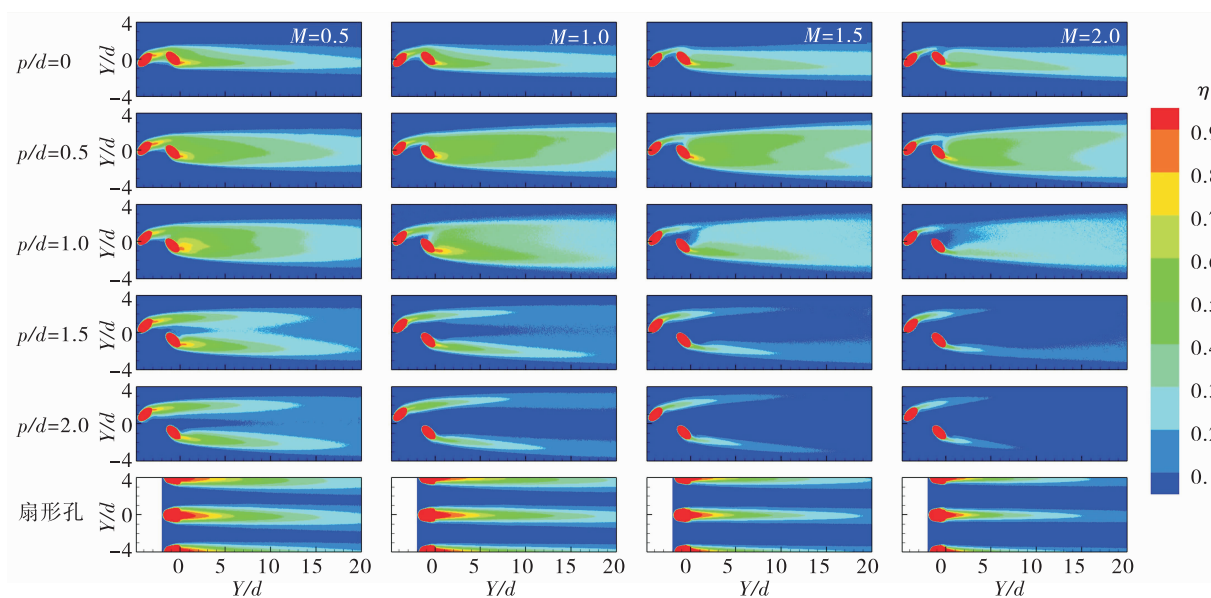


图 8 不同吹风比下的气膜冷却效率分布

Fig. 8 Film-cooling effectiveness distribution at different blowing ratios

$M = 1.0, p/d = 0.5$ 时,射流间相互作用与 $M = 0.5$ 时相似。而对于 $p/d = 0.5$ 的情况,气膜横向覆盖沿流向逐渐增加,横向平均冷效上升,且由于反

肾形涡将冷却射流压向壁面,气膜覆盖较好。 $p/d = 1.0$ 时,靠近下游孔出口处,冷却效率较高的区域有所减小,但横向平均冷效与 $p/d = 0.5$ 时差别不大。

$p/d = 1.5$ 与 2.0 时,射流相互作用减弱,气膜覆盖变差,横向平均冷效降低。

$M = 1.5$ 时,上游射流发生吹离。 $p/d = 0$ 时,由于下游射流被上游射流压向壁面,并保持贴附,横向平均冷效沿流向几乎不发生改变,但气膜横向覆盖仍然受限。 $p/d = 0.5$ 时,虽然并未产生较为规则的反肾形涡结构(图 7),但射流间的相互作用使得射流核心较低,导致了较好的气膜覆盖,且横向平均冷效高于其他情况。 $p/d = 1.0$ 时,可较为明显地观测到上游射流的吹离;且位于两孔之间, $0 \leq X/d \leq 1$ 的区域无法得到较好的气膜覆盖。横向平均冷效与 $p/d = 0.5$ 时相比有所降低。但由于反肾形涡将冷却射流压向壁面,并使其重新附着,横向平均冷效在 $0 \leq X/d \leq 2$ 呈上升趋势。 $p/d = 1.5$ 时,反肾形涡作用减弱,横向平均冷效沿流向缓慢上升。 $p/d = 2.0$ 时,射流间相互作用进一步减弱。

$M = 2.0$ 时,由于射流动量增加,其吹离更为明显。 $p/d = 0$ 时,射流间相互作用与 $M = 1.5$ 时相似。

$p/d = 0.5$ 时,射流间的相互作用导致了较好的气膜覆盖与较高的横向平均冷效。 $p/d = 1.0$ 时,受反肾形涡影响,横向平均冷效在 $0 \leq X/d \leq 15$ 范围内逐渐上升。 $p/d = 1.5$ 时,反肾形涡作用减弱。而在 $p/d = 2.0$ 时,两者近似为独立射流。

双射流孔间相互作用可总结如下。 $p/d = 0$ 时,反肾形涡未生成,射流间的相互作用主要体现为“压附效应”:下游射流被上游射流压向壁面,并保持贴附。因此,在这一情况下气膜冷却效率对吹风比不敏感,且气膜横向覆盖受限;由于上游射流被抬升,冷却效率主要来源于下游射流。 $p/d = 0.5$ 与 1.0 时,压附效应减弱,气膜横向覆盖增加;此时反肾形涡生成,两股射流均被压向壁面。压附效应与反肾形涡效应共同作用,导致较好的气膜覆盖与较高的横向平均冷效。 $p/d = 1.5$ 与 2.0 时,难以观察到压附效应,且反肾形涡效应减弱,气膜覆盖变差,横向平均冷效降低。

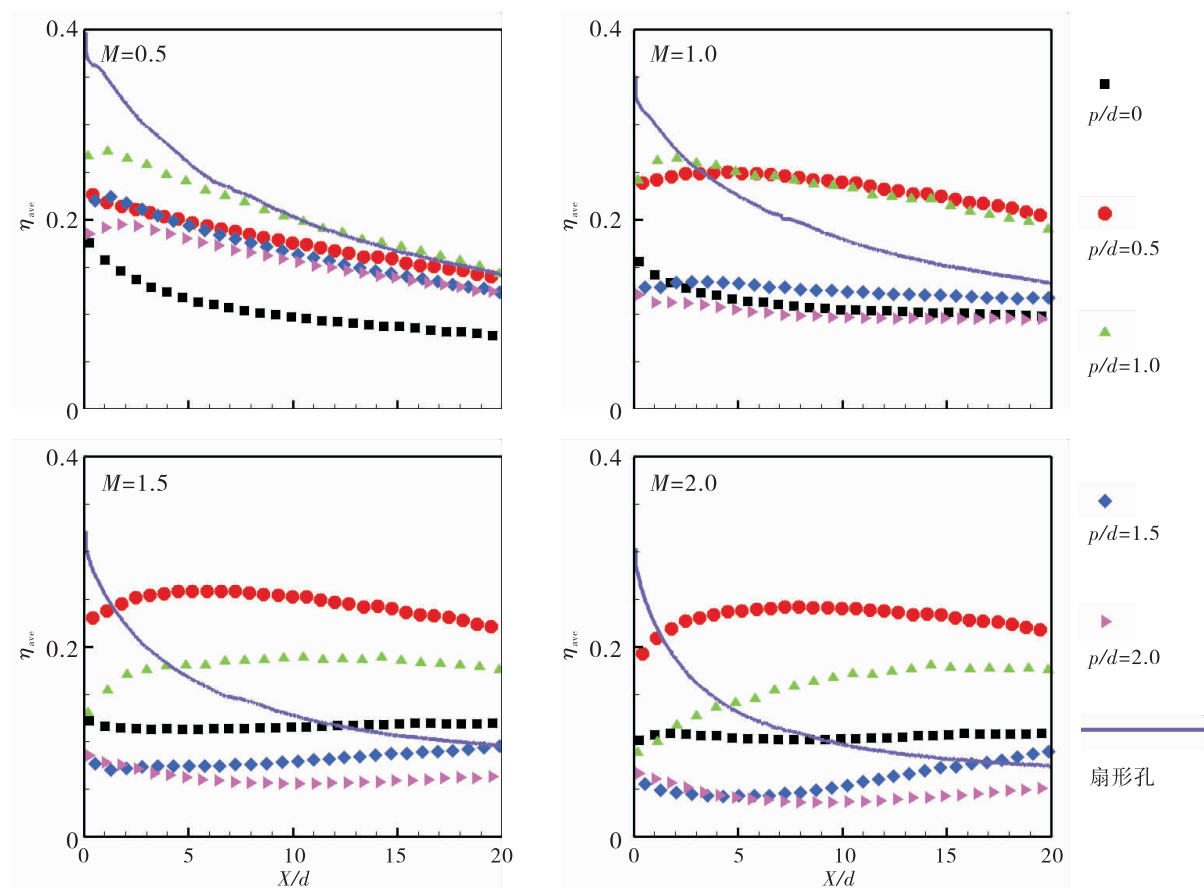


图 9 不同吹风比下的横向平均气膜冷却效率

Fig. 9 Laterally-averaged film-cooling effectiveness at different blowing ratios

图8与图9还将双射流冷却结构与流向扇形孔(直径 $d=7\text{mm}$,孔间距 $P/d=4$,长径比 $L/d=2.5$,倾斜角 $\theta=35^\circ$,横向扩张角 $\alpha=10^\circ$,扩张段占孔长度的一半)进行了对比。需要说明的是,同一吹风比下,两种结构在单位横向距离内的冷却气体流量相等。结果表明,与流向扇形孔相比, $p/d=0.5$ 与 1.0 的双射流孔具有更大的气膜覆盖范围;在大吹风比下,由于扇形孔射流轨迹变窄,这一优势尤为明显。由于扇形孔减小了射流在孔出口处的动量,因此在靠近孔出口处具有更高的横向平均冷效,如图9所示。 $M=0.5$ 时,扇形孔的横向平均冷效较高;但在 $M\geq 1.0$ 时,双射流孔(除 $p/d=2.0$ 以外)具有更高的横向平均冷效。此外, $M\geq 1.0$ 时,扇形孔的横向平均冷效沿流向下更快。

4 结论

通过实验方式,研究了孔间横向距离对双射流孔间相互作用,及其流场与气膜冷却效率的影响,主要结论如下:

1)不同横向距离下,射流间相互作用体现为不同的效应。 $p/d=0$ 时,体现为压附效应,下游射流被压向壁面并保持贴附,上游射流被抬升。 $p/d=0.5$ 与 1.0 时,压附效应减弱,反肾形涡生成,两股射流均被压向壁面。 $p/d=1.5$ 与 2.0 时,压附效应基本消失,反肾形涡效应减弱。

2)在某一孔间横向距离下,双射流间发生有利的相互作用,此时压附效应与反肾形涡效应共存。此时反肾形涡结构可能不规则,但射流核心较低,故气膜覆盖较好,横向平均冷效较高。 $M=0.5$ 时, $p/d=1.0$ 下的横向平均冷效较高,而在 $M\geq 1.0$ 时, $p/d=0.5$ 占优。

3)随吹风比增加,射流间距离增大,发生相互作用的位置逐渐向下游移动。

参考文献:

- [1] SINHA A K, BOGARD D G, CRAWFORD M E. Film-cooling effectiveness downstream of a single row of holes with variable density ratio [J]. ASME journal of turbomachinery, 1991, 113(3): 442-449.
- [2] HYAMS D G, LEYLEK J H. A detailed analysis of film cooling physics: Part III -streamwise injection with shaped holes [J]. ASME journal of turbomachinery, 2000, 122(1): 122-132.
- [3] WRIGHT L M, MCCLAIN S T, BROWN C P, et al. Assessment of a couple hole film cooling geometry using S-PIV and PSP: GT2013-94614 [R]. USA: ASME, 2013.
- [4] KUSTERER K, BOHN D, SUGIMOTO T, et al. Double-jet ejection of cooling air for improved film cooling [J]. ASME journal of turbomachinery, 2007, 129(4): 809-815.
- [5] KUSTERER K, ELYAS A, BOHN D, et al. Film cooling effectiveness comparison between shaped- and double jet film cooling holes in a row arrangement [C]// Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air. [S. l.]: ASME, 2010: 1503-1515.
- [6] WANG Z, LIU J J, AN B T, et al. Effects of axial row-spacing for double-jet film-cooling on the cooling effectiveness [C]// Proceedings of ASME 2011 Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition. [S. l.]: ASME, 2011: 483-492.
- [7] WANG Z, LIU J J, ZHANG C. Impacts of geometric parameters of double-jet film cooling on anti-kidney vortex structure and cooling effectiveness: GT2013-94038 [R]. [S. l.]: ASME 2013.
- [8] HAN C, REN J. Multi-parameter influence on combined-hole film cooling system [J]. International journal of heat and mass transfer, 2012, 55(15): 4232-4240.
- [9] HAN C, CHI Z R, REN J, et al. Optimal arrangement of combined-hole for improving film cooling effectiveness: GT2013-94561 [R]. [S. l.]: ASME, 2013.
- [10] HAN J C, RALLABANDI A. Turbine blade film cooling using PSP technique [J]. Frontiers in heat and mass transfer (FHMT), 2010, 1(1): 101-109.
- [11] KENDALL A, KOOCHESFAHANI M. A method for estimating wall friction in turbulent wall-bounded flows [J]. Experiments in fluids, 2008, 44(5): 773-780.
- [12] WRIGHT L M, MCCLAIN S T, CLEMENSON M D. Effect of freestream turbulence intensity on film cooling jet structure and surface effectiveness using PIV and PSP [J]. ASME journal of turbomachinery, 2011, 133(4): 041023.
- [13] WRIGHT L M, MCCLAIN S T, CLEMENSON M D. Effect of density ratio on flat plate film cooling with shaped holes using PSP [J]. ASME journal of turbomachinery, 2011, 133(4): 041011.
- [14] KLINE S J, MCCLINTOCK F. Describing uncertainties in single-sample experiments [J]. Mechanical engineering, 1953, 75(1): 3-8.

(编辑:陈红霞)