

横向间距与密度比对双射流气膜冷却特性影响

姚家旭^{1,2}, 徐进^{1,2}, 张科^{1,2}, 武俊梅^{1,2}, 雷蒋^{1,2}

- (1. 西安交通大学 航天航空学院 机械结构强度与振动国家重点实验室, 西安 710049;
2. 西安交通大学 航天航空学院 陕西省先进飞行器服役环境与控制重点实验室, 西安 710049)

摘 要: 使用压力敏感漆(PSP)测量技术对平板上的双射流气膜冷却结构进行了研究。双射流孔间横向距离分别为0、0.5、1.0;孔间流向距离保持为3.0。密度比分别为1.0、1.5、2.5,吹风比分别为0.5、1.0、1.5、2.0。研究了孔间横向距离与密度比对双射流气膜冷却效率的影响。结果表明:双射流孔间横向距离为0时,气膜横向覆盖受限;随横向距离增大,气膜覆盖范围增加;但在横向距离过大时,气膜覆盖变差。随密度比增加,射流吹离减弱,气膜冷却效率提高。在高密度比下,横向距离较大的双射流孔气膜冷却效率较高。

关 键 词: 气膜冷却; 双射流; 压力敏感漆(PSP); 气膜冷却效率; 密度比

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Effects of spanwise distance and density ratio on the characteristic of double-jet film-cooling

YAO Jiaxu^{1,2}, XU Jin^{1,2}, ZHANG Ke^{1,2}, WU Junmei^{1,2}, LEI Jiang^{1,2}

- (1. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures,
School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Shaanxi Key Laboratory of Environment and Control for Flight Vehicle,
School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Double-jet film-cooling geometries on a flat plate were investigated using pressure sensitive paint (PSP) measurement technique. The spanwise distance between the double-jet film-cooling holes varied as 0, 0.5 and 1.0, while the streamwise distance was kept as 3.0. The density ratio was 1.0, 1.5 and 2.5, while the blowing ratio was 0.5, 1.0, 1.5 and 2.0. The effects of spanwise distance and density ratio on the effectiveness of double-jet film-cooling holes were studied. The results showed, at spanwise distance of 0, the lateral coverage of the film was suppressed. As the spanwise distance increased, the film covered more areas. However, while the spanwise distance was too large, the film coverage degraded. With the increase of density ratio, the lifting-off of the jets weakened, and the film-cooling effectiveness improved. At high density ratios, higher film-cooling effectiveness was achieved by the double-jet film-cooling holes with larger spanwise distance.

收稿日期: 2017-05-11

基金项目: 国家自然科学基金(11402191); 陕西省自然科学基金(2014JQ1029)

作者简介: 姚家旭(1993—),男,硕士生,主要从事燃气轮机热端部件传热与冷却研究。

通讯作者: 雷蒋(1980—),男,副教授,博士,主要从事燃气轮机热端部件传热与冷却研究。E-mail:leijiang@mail.xjtu.edu.cn

引用格式: 姚家旭,徐进,张科,等. 横向间距与密度比对双射流气膜冷却特性影响[J]. 航空动力学报,2018,33(6):1336-1344. YAO Jiaxu, XU Jin, ZHANG Ke, et al. Effects of spanwise distance and density ratio on characteristic of double-jet film-cooling [J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(6): 1336-1344.

Key words: film-cooling; double-jet; pressure sensitive paint (PSP); film-cooling effectiveness; density ratio

为达到更高的推力或效率,燃气轮机涡轮进口温度在过去几十年间不断升高。目前投入使用的燃气轮机,其涡轮进口温度已远超过高温合金的耐热极限^[1]。因此,必须对叶片进行冷却以保证燃气轮机的安全运行。

气膜冷却是用于涡轮叶片热防护的重要手段之一:冷却工质通过布置于叶片表面上的气膜孔喷出,贴附于叶片表面,形成温度较低的保护层,以隔绝叶片与高温燃气,减少传入叶片的热量。射流与高温燃气间的相互作用导致了气膜冷却的复杂特性,其冷却性能受到很多因素的影响,包括冷却结构(如孔型、倾角、长径比),射流-主流相对关系(如吹风比、密度比),以及叶片曲率、表面粗糙度等^[2]。

在用于涡轮叶片气膜冷却的众多孔型中,圆孔最早获得应用,其加工维护较为简单;但在吹风比(M)较大时,冷却射流发生吹离,气膜冷却效率迅速降低。Haven 等^[3]发现,射流与主流相互作用形成的肾形涡使得射流核心抬升,是导致其吹离的重要原因。在平板上对流向圆孔(复合角 $\beta=0^\circ$,倾角 $\theta\approx 30^\circ$)的研究表明,其射流发生吹离的临界吹风比约为 $M_{cr}=0.5$ ^[4-6]。采用出口处具有一定扩张的扇形孔能够降低冷却射流在孔出口处的速度,进而减弱其吹离,以获得更好的冷却效果^[7-9],这一孔型也在目前的涡轮叶片中得到了应用。但是与圆孔相比,扇形孔的加工与维护较为困难。

Kusterer 等^[10]于 2007 年提出双射流气膜冷却(double-jet film-cooling, DJFC)的概念:采用一对交错布置的复合角圆孔,利用其射流与主流间的相互作用,在气膜孔下游生成一对反肾形涡,以抑制射流吹离,进而提高气膜冷却效率。在此之后,有研究者在不同布置方式、工况参数下,对双射流冷却结构进行了研究^[11-15]。其结果表明,与流向扇形孔相比,双射流结构在大吹风比下具有更高的气膜冷却效率。

在真实燃机中,受冷却工质与主流间的温度差影响,冷却工质-主流密度比(R_d)通常在 2.0 左右,甚至更高^[1]。对于圆孔和扇形孔,研究表明,密度比对其气膜冷却效率具有明显影响^[4,7]。但上述有关双射流冷却结构的研究,实验所达到的密度比相对较低($R_d\leq 1.5$),未能模拟真实燃机密度比($R_d\geq 2.0$)的效应。

本文使用压力敏感漆(PSP),分别在 $R_d=1.0, 1.5, 2.5$ 下测量双射流孔下游的气膜冷却效率,讨论孔间横向距离对其气膜冷却效率的影响,并了解其在不同密度比下的冷却特性。

1 实验设备与方法

1.1 实验设备

本文的相关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 $500\text{ mm}\times 202\text{ mm}$,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% ,温度为室温(约 293 K)。实验中,冷却射流分别由空气压缩机和高压气瓶两路气源进行供气,并分别使用冷干机和加热器保证其与主流间的温度差不超过 1°C 。冷却射流的流量由转子流量计控制。供气腔尺寸为 $402\text{ mm}\times 270\text{ mm}\times 105\text{ mm}$,可保证供气均匀。气膜冷却平板固定于风洞壁面,并保证其与壁面接缝处光滑平整。相机正对气膜平板。

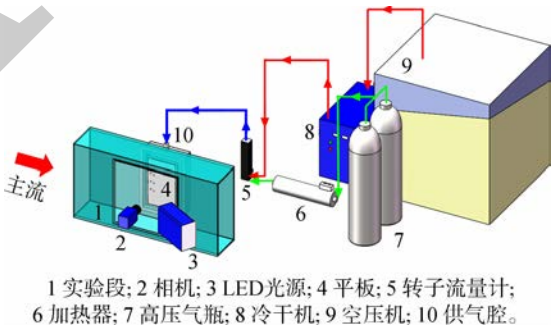


图 1 实验系统示意图
Fig. 1 Schematic of the experimental system

图 2 给出了实验使用的双射流孔结构示意图以及坐标原点。其几何参数在表 1 中给出,包括气膜孔孔径 d ,长径比 L/D ,倾斜角 θ ,双射流孔间横向距离 P/d 、流向距离 S/d ,复合角 β ,以及两组双射流孔间的距离 P_2/d 。表 2 给出了本研究的实验工况(共 36 个)。密度比与吹风比分别定义为

$$R_d = \frac{\rho_c}{\rho_\infty} \tag{1}$$

$$M = \frac{\rho_c U_c}{\rho_\infty U_\infty} \tag{2}$$

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

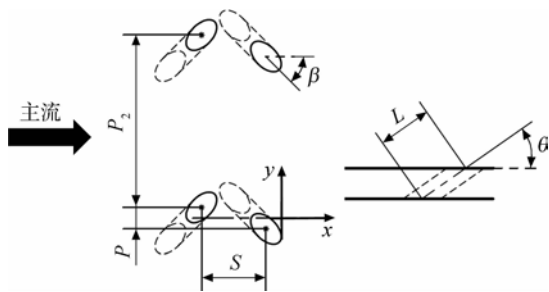


图 2 双射流孔结构与坐标系

Fig. 2 DJFC holes geometries and coordinates

表 1 双射流孔结构参数

Table 1 Geometry parameters of the DJFC holes

<i>d</i> /mm	<i>L</i> / <i>d</i>	<i>P</i> ₂ / <i>d</i>	<i>P</i> / <i>d</i>	<i>S</i> / <i>d</i>	$\theta/(^\circ)$	$\beta/(^\circ)$
7	2.5	8	0, 0.5, 1.0	3	35	± 45

表 2 实验工况

Table 2 Experimental conditions

<i>P</i> / <i>d</i>	<i>R</i> _d	<i>M</i>
0, 0.5, 1.0	1.5, 2.5	0.5, 1.0, 1.5, 2.0

1.2 实验方法

在湍流路易斯数 $Le_t \approx 1$ 时, 可通过传热传质类比, 由压力敏感漆 (PSP) 测量和计算气膜冷却效率^[16]。与传统的热方法相比, PSP 可排除由热传导引起的测量误差。PSP 基于氧猝灭效应测量氧气的分压 (或质量分数)。受特定波长的激发光源照射时, PSP 会发出红色荧光, 荧光的光强与氧气分压有关: 氧气分压越高, 光强越低。此外, 通过使用不同的气体作为射流, PSP 可实现不同密度比下的气膜冷却效率测量。本文采用 N_2 、 CO_2 、70% Ar + 30% SF_6 作为异种气体 (foreign gas^[16]) 射流, 分别实现了 1.0、1.5、2.5 共 3 个密度比下的测量。文献^[16]对使用 PSP 测量气膜冷却效率的方法进行了详细描述。

本实验采用波长约为 420 nm 的发光二极管 (LED) 作为光源, PSP 发出的荧光经波长为 610 nm 的带通滤光片后, 由一台相机接收。每次实验前, 均需对 PSP 进行标定, 以避免实验环境温度变化的影响。将不同压力下测量的荧光光强进行拟合, 曲线如图 3 所示。图中 p 、 I 为压力与光强, p_r 、 I_r 分别为参考压力 (即常压) 与参考压力下

的光强。实验中, 由所测光强计算氧气质量分数, 进而通过传热传质类比获得气膜冷却效率

$$\eta = \frac{T_f - T_\infty}{T_c - T_\infty} = \frac{C_f - C_\infty}{C_c - C_\infty} = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{p_{air}/p_r}{p_{fg}/p_r} - 1 \right) \frac{W_{fg}}{W_{air}}} \tag{3}$$

式中 T_∞ 、 T_c 、 T_f 分别为主流、射流与壁面气膜的温度; C_∞ 、 C_c 、 C_f 分别为主流、射流与壁面气膜的氧气质量分数; p_{air} 、 p_{fg} 分别为空气与异种气体作为冷却射流时的氧气分压; W_{air} 、 W_{fg} 分别为空气与异种气体的相对分子质量。

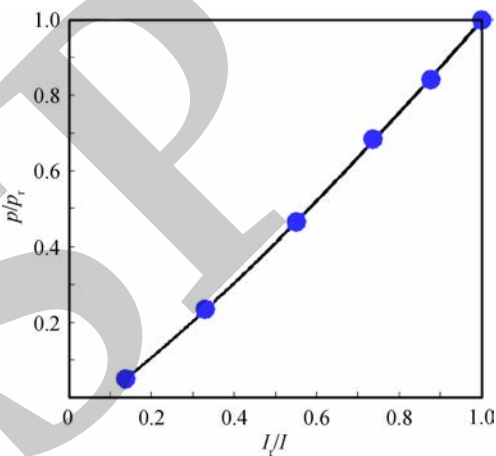


图 3 PSP 标定曲线

Fig. 3 PSP calibration curve

2 实验误差分析

采用文献^[17]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, 由此确认实验在湍

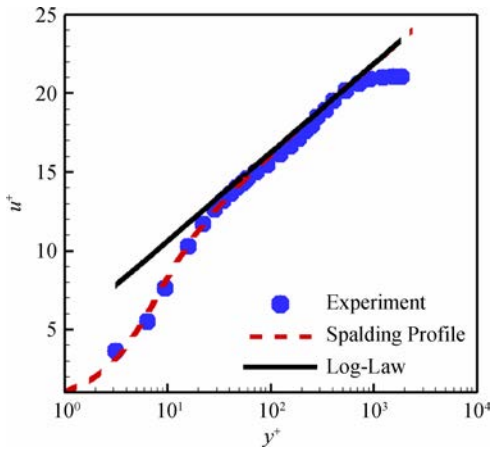


图 4 主流边界层速度分布

Fig. 4 Mainstream boundary velocity profile

流条件下进行。边界层位移厚度与孔径之比(δ_1/d)为 0.2。

为验证本文 PSP 所测结果的准确性,首先对流向圆孔(孔径 $d=7\text{ mm}$,长径比 $L/d=2.5$,孔间距 $P_2/d=4$,倾角 $\theta=35^\circ$)的气膜冷却效率进行了测量;并将 $R_d=1.0$ 时中心线上的冷却效率(η_{cl})和横向平均气膜冷却效率(η_{ave})与文献[8,18]进行对比,将 $R_d=1.5$ 时中心线上的冷却效率与文献[4,19]进行对比;如图 5 所示。由于本研究的主流湍流度较低($T_u=0.6\%$),因此在 $R_d=1.0$, $M=0.5$ 时,中心线上的气膜冷却效率略高于文献[8]($T_u=8\%$),除此之外,气膜冷却效率的趋势和数值均非常接近。 $R_d=1.5$ 时,结果的变化趋势与文献[4,19]较为接近,但气膜冷却效率数值存在一定差距,这一差距可能来源于实验方法的区别。

实验误差采用文献[20]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,因此其不确定度与光强相关。在置信度为 95%,气膜冷却效率为 0.8 的情况下,测量的不确定度

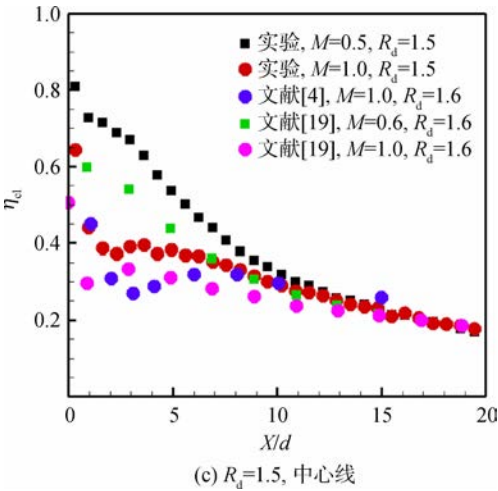


图 5 流向圆孔气膜冷却效率与公开文献对比
Fig. 5 Film-cooling effectiveness for streamwise cylindrical holes comparing with open literature

约为 3%。但随着气膜冷却效率降低,相机所测光强减弱,导致测量误差增大。气膜冷却效率为 0.2 时,不确定度约为 15%。

3 结果与讨论

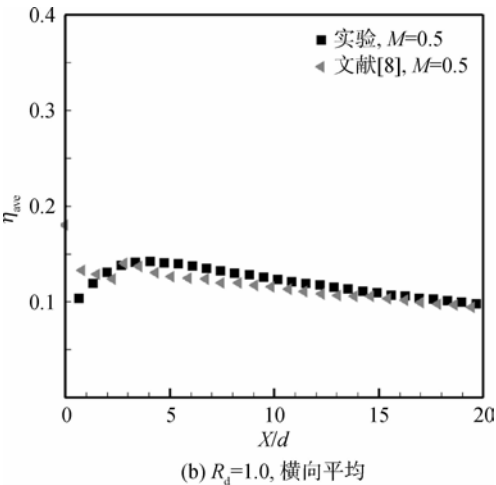
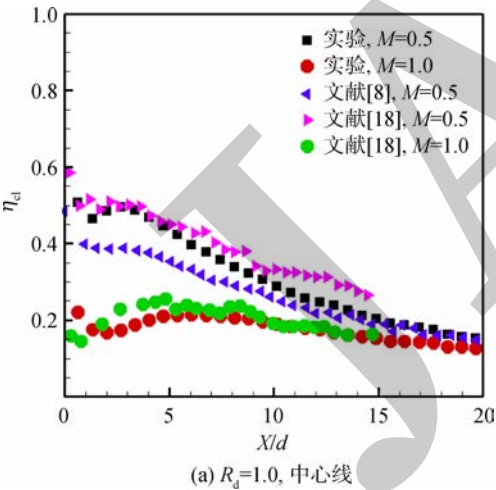
图 6~图 9 列出了本文的实验结果,包括不同吹风比下的气膜冷却效率分布云图以及对应的横向平均($-4\leq Y/d\leq 4$)气膜冷却效率。并以目前常见的流向扇形孔作为参考。需要说明的是,同一吹风比下,两种结构在单位横向距离内的冷却气体流量相等。扇形孔孔径为 $d=7\text{ mm}$,孔间距 $P_2/d=4$,长径比 $L/d=2.5$,倾角为 35° ,横向扩张角为 10° ,扩张段占孔长度的一半。

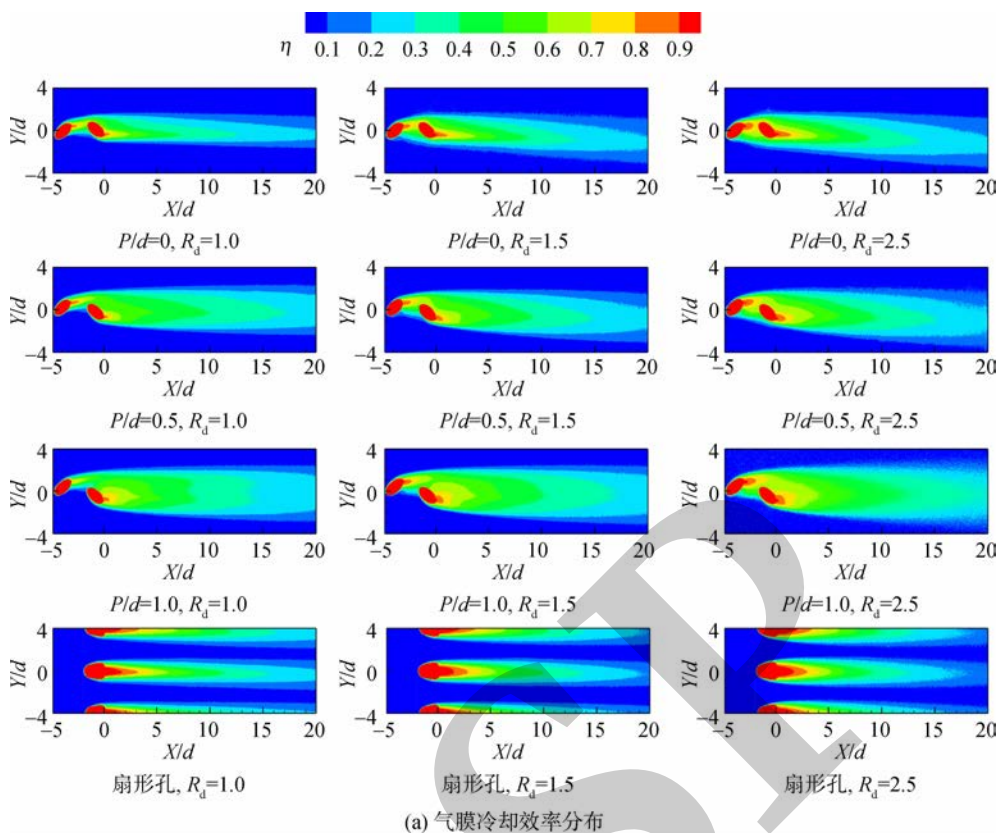
对于扇形孔,随吹风比增加,冷却射流轨迹变窄,气膜覆盖范围减小;而对于双射流冷却结构,随吹风比增加, $P/d=0.5, 1.0$ 时,气膜覆盖范围有所扩大, $P/d=0$ 时,气膜覆盖范围变化不大。在特定的孔间横向距离下,双射流冷却结构所生成的反肾形涡将射流压向壁面^[15,21];因此与扇形孔相比,双射流结构能够获得更好的气膜覆盖和更高的横向平均气膜冷却效率;其横向平均冷却效率沿流向降低更慢;在大吹风比、高密度比下,双射流冷却结构的优势尤为明显。

下文首先在密度比为 $R_d=1.0$ 时,讨论了双射流孔间横向距离(P/d)对气膜冷却效率的影响;并概括了密度比为 $R_d=1.5, 2.5$ 时,孔间横向距离的影响。最后,研究了密度比对双射流冷却结构气膜冷却效率的影响。

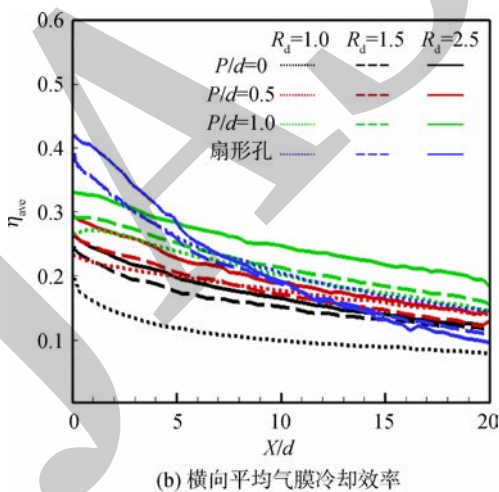
3.1 横向距离影响

本文在 $R_d=1.0$ 的情况下讨论横向距离对





(a) 气膜冷却效率分布



(b) 横向平均气膜冷却效率

图 6 $M=0.5$ 时的气膜冷却效率分布与横向平均气膜冷却效率

Fig. 6 Film-cooling effectiveness distribution and laterally averaged film-cooling effectiveness at $M=0.5$

双射流冷却结构气膜冷却效率的影响。

$M=0.5, P/d=0$ 时,上游射流将下游射流压向壁面,并抑制其横向移动;同时部分上游射流与下游射流重叠,无法有效覆盖壁面^[21];故此时气膜覆盖范围较小,且横向平均气膜冷却效率较低。 $P/d=0.5$ 时,冷却气体覆盖范围增加,横向平均冷却效率升高,气膜孔下游 $0 \leq X/d \leq 10$ 范围内的部分区域获得了较好的气膜覆盖 ($\eta \geq 0.4$)。 $P/d=1.0$ 时,反肾形涡作用较为明显,冷却气体被压向壁面,孔下游气膜覆盖较好,横向平均冷却

效率较高。

$M=1.0, P/d=0$ 时,双射流冷却结构的气膜冷却效率分布特征与 $M=0.5$ 时相似。 $P/d=0.5$ 时,孔下游的气膜覆盖沿流向逐渐增加,使得横向平均气膜冷却效率有所上升。由于反肾形涡将射流压向壁面,孔下游的区域具有较高的气膜冷却效率。 $P/d=1.0$ 时,孔下游高冷却效率 ($\eta \geq 0.4$) 的区域开始缩小,而横向平均气膜冷却效率与 $p/d=0.5$ 时相比,变化不大。

$M=1.5$ 时,冷却射流开始吹离。 $P/d=0$

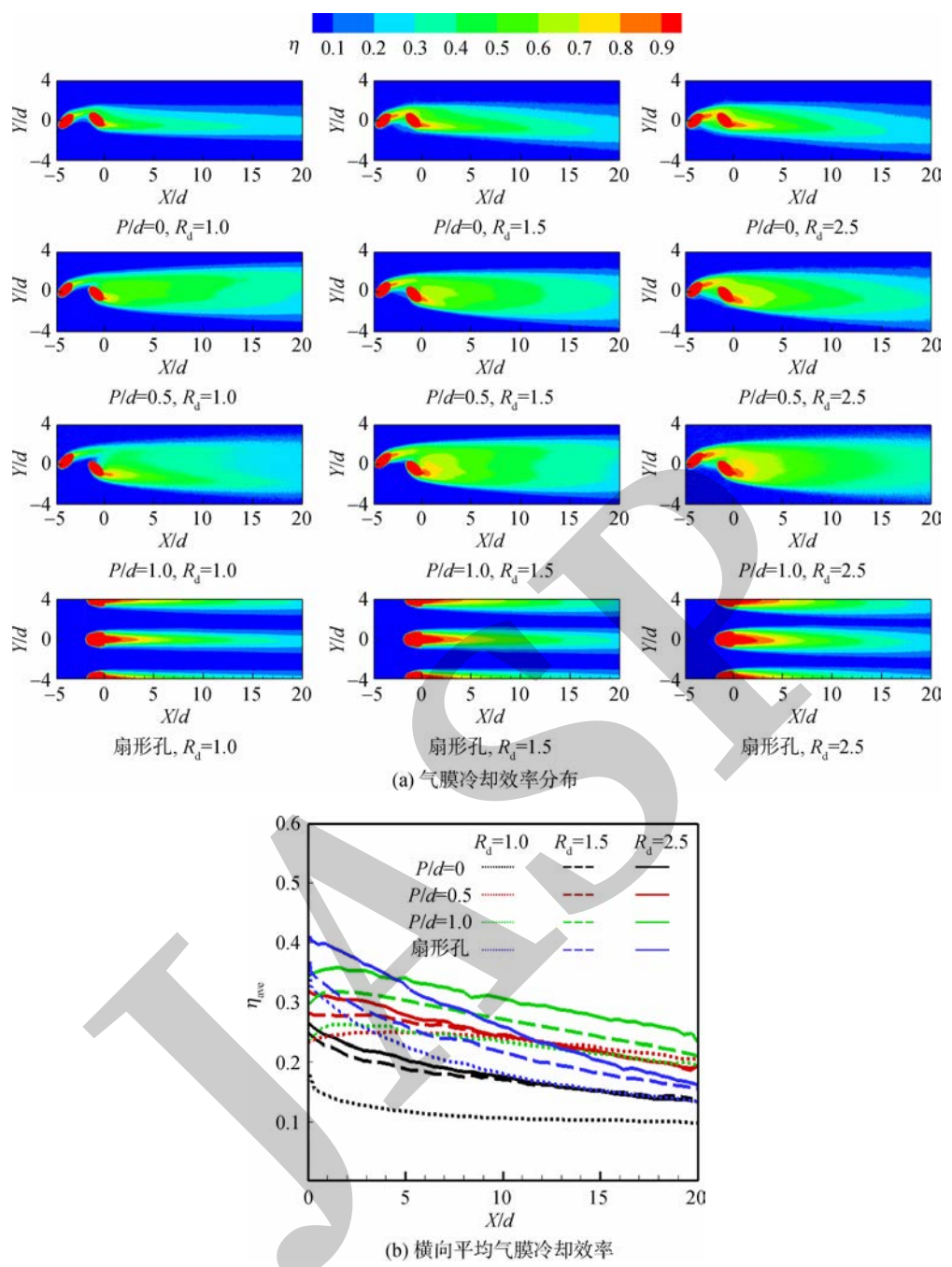


图 7 $M=1.0$ 时的气膜冷却效率分布与横向平均气膜冷却效率

Fig. 7 Film-cooling effectiveness distribution and laterally averaged film-cooling effectiveness at $M=1.0$

时,由于下游射流被上游射流压向壁面,横向平均气膜冷却效率沿流向几乎不发生改变。 $P/d=0.5$ 时,气膜覆盖范围增加;受反肾形涡影响,冷却气体被压向壁面,因此横向平均冷却效率较高。 $P/d=1.0$ 时,上游射流的吹离较为明显,孔下游 $0 \leq X/d \leq 1$ 处的区域未能获得有效的气膜覆盖。横向平均气膜冷却效率相比于 $P/d=0.5$ 时有所下降。但此时仍能观测到反肾形涡作用,其将上游射流带向壁面,并使其重新附着,横向平均气膜冷却效率在临近孔的下游处($0 \leq X/d \leq 2$)出现回升趋势。

随吹风比增大($M=2.0$),射流的吹离更为明显。此时,横向距离对双射流冷却结构气膜冷却效率的影响与 $M=1.5$ 时相似。 $P/d=0$ 时,射流横向覆盖受限。 $P/d=0.5$ 时,气膜覆盖较好,横向平均冷却效率较高。而 $P/d=1.0$ 时,横向距离过大,冷却气体覆盖变差,横向平均冷却效率降低;但受反肾形涡影响,横向平均气膜冷却效率在 $0 \leq X/d \leq 15$ 范围内逐渐回升。

$R_d=1.5, 2.5$ 时,横向距离对气膜冷却效率分布的影响趋势与 $R_d=1.0$ 时相似: $P/d=0$ 时,

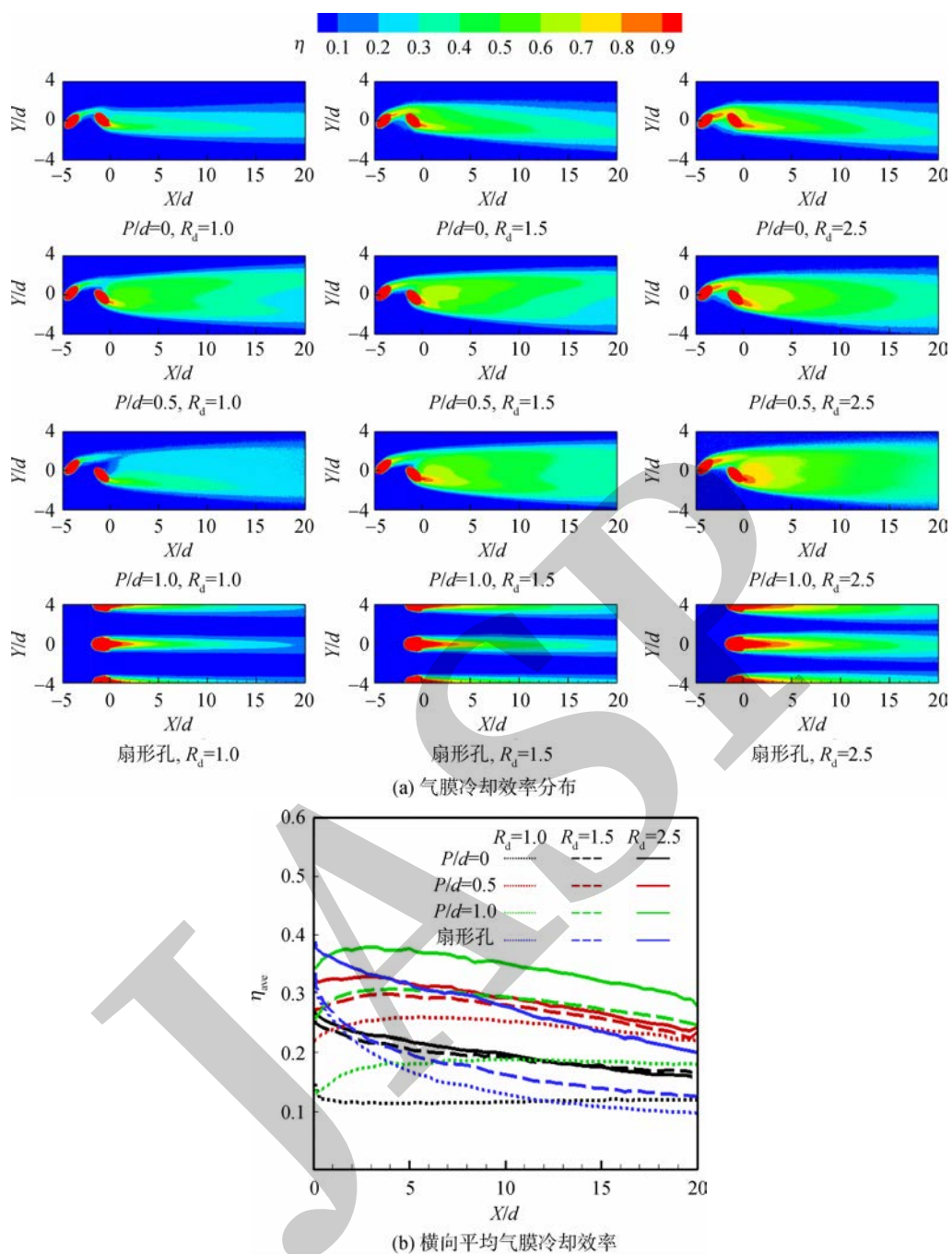


图 8 $M=1.5$ 时的气膜冷却效率分布与横向平均气膜冷却效率

Fig. 8 Film-cooling effectiveness distribution and laterally averaged film-cooling effectiveness at $M=1.5$

射流横向覆盖受限;随 P/d 增加,气膜覆盖范围增大。不同的是,对于所研究的所有工况,在 $R_d=1.5, 2.5$ 时,未观察到由于横向距离过大,而导致气膜覆盖变差、横向平均冷却效率降低的现象。

3.2 密度比影响

从总体趋势上看,随密度比增加,气膜横向覆盖范围扩大,横向平均冷却效率有所提高;同时在靠近下游气膜孔出口处,冷却效率较高的区域增大。下文针对不同孔间横向距离下的双射流冷却结构,具体讨论了密度比对其冷却效率的影响。

$P/d=0, R_d=1.0$ 时,射流横向覆盖受限,横向平均气膜冷却效率较低。随密度比增加,气膜横向覆盖范围扩大,横向平均冷却效率有所升高。高密度比下的横向平均冷却效率明显高于 $R_d=1.0$ 时,但 $R_d=1.5, 2.5$ 之间的横向平均冷却效率差别不大。

$P/d=0.5$ 时,气膜横向覆盖范围的扩大主要来源于孔间横向距离的增加,因此密度比对其影响不明显。由于在一定的吹风比下,增加密度比降低了射流动量;导致在 $M \leq 1.0, R_d=1.5,$

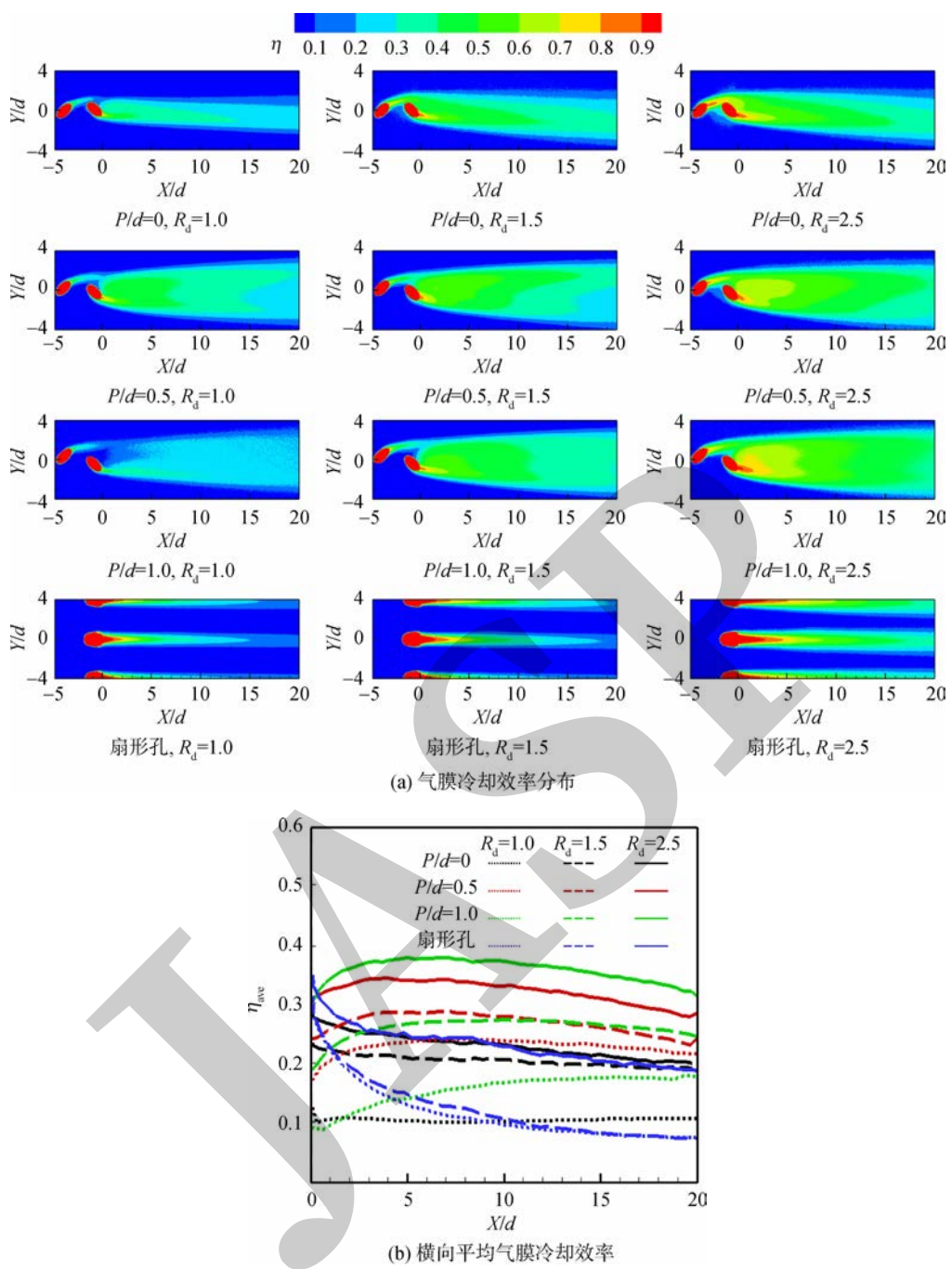


图 9 $M=2.0$ 时的气膜冷却效率分布与横向平均气膜冷却效率

Fig. 9 Film-cooling effectiveness distribution and laterally averaged film-cooling effectiveness at $M=2.0$

2.5 时,冷却气体相对较少;而此时 $R_d=1.0$ 的射流尚未发生吹离,仍能有较好的气膜覆盖。因此在 $M\leq 1.0$ 时,3 个密度比下的横向平均气膜冷却效率比较接近。 $M=1.5$ 时, $R_d=1.5, 2.5$ 的射流动量增加,提供了足够的冷却气体与良好的气膜覆盖,同时 $R_d=1.0$ 的射流开始发生吹离。因此,与 $R_d=1.0$ 时相比, $R_d=1.5, 2.5$ 时的横向平均气膜冷却效率更高,且孔下游冷却效率较高的区域面积更大。 $M=2.0$ 时,随着射流动量增加,3 个密度比下的气膜冷却效率差距更为明显。

$P/d=1.0$ 时,孔间距离较大,反肾形涡作用减弱。 $M\geq 1.5$ 时, $R_d=1.0$ 的射流出现明显吹离,而 $R_d=1.5, 2.5$ 的射流仍能较好地与壁面保持贴附,提供较好的气膜覆盖。在这一横向距离下,密度比对双射流冷却结构的影响非常明显:随密度比增加,冷却气体与壁面贴附更好,气膜覆盖范围增大,横向平均气膜冷却效率升高。此外,随吹风比增加,不同密度比下气膜冷却效率的差距变大,说明密度比的影响有所增强。

不同密度比下,双射流冷却结构获得较高气

膜冷却效率的孔间横向距离有所区别。 $R_d=1.0$ 时,在 $M=0.5$ 下, $P/d=1.0$ 的双射流冷却结构横向平均气膜冷却效率较高;除此之外, $P/d=0.5$ 的双射流结构表现更好。 $R_d=1.5, M \leq 1.0$ 时, $P/d=1.0$ 的横向平均气膜冷却效率较高;而 $M \geq 1.5$ 时, $P/d=0.5, 1.0$ 的横向平均气膜冷却效率相差不大,但均高于 $P/d=0$ 的情况。 $R_d=2.5$ 时,在所研究的吹风比范围内,较高的横向平均气膜冷却效率均在 $P/d=1.0$ 下获得。

4 结 论

本文采用实验手段,对双射流气膜冷却结构进行了研究。使用压力敏感漆(PSP)测量了双射流孔下游平板表面的气膜冷却效率,并讨论了孔间横向距离与密度比对双射流冷却结构气膜冷却效率的影响。主要结论如下:

1) $P/d=0$ 时,冷却气体横向覆盖受限,气膜冷却效率相对较低;随 P/d 增加,气膜覆盖范围增大;但在 P/d 过大时,反肾形涡作用减弱,气膜覆盖变差。

2) 随吹风比 M 增大,密度比对双射流冷却结构气膜冷却效率的影响增强,反肾形涡的作用逐渐后移。

3) 随密度比增加,射流吹离现象减弱,冷却气体横向覆盖范围增大,横向平均气膜冷却效率升高,靠近气膜孔出口处冷却效率较高的区域增大。

4) 双射流冷却结构在特定孔间横向距离下获得较好的气膜覆盖与较高的横向平均气膜冷却效率。密度比增加时,该横向距离随之增大。

参考文献:

[1] HAN J C, DUTTA S, EKKAD S. Gas turbine heat transfer and cooling technology [M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2012.

[2] BOGARD D G, THOLE K A. Gas turbine film cooling[J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22(2): 249-270.

[3] HAVEN B, YAMAGATA D, KUROSAKA M, et al. Anti-kidney pair of vortices in shaped holes and their influence on film cooling effectiveness [R]. ASME Paper 97-GT-045, 1997.

[4] SINHA A K, BOGARD D G, CRAWFORD M E. Film-cooling effectiveness downstream of a single row of holes with variable density ratio[J]. Journal of Turbomachinery, 1991, 113(3): 442-449.

[5] WALTERS D K, LEYLEK J H. A detailed analysis of film-cooling physics; Part I streamwise injection with cylindrical holes[J]. Journal of Turbomachinery, 2000, 122

(1): 102-112.

[6] BERNSDORF S, ROSE M G, ABHARI R S. Modeling of film cooling; Part I experimental study of flow structure [J]. Journal of Turbomachinery, 2006, 128(1): 141-149.

[7] WRIGHT L M, MCCLAIN S T, CLEMENSON M D. Effect of density ratio on flat plate film cooling with shaped holes using psp [J]. Journal of Turbomachinery, 2011, 133(4): 041011. 1-041011. 8.

[8] WRIGHT L M, MCCLAIN S T, BROWN C P, et al. Assessment of a double hole film cooling geometry using s-PIV and PSP [R]. ASME Paper GT2013-94614, 2013.

[9] CHEN A F, LI S J, HAN J C. Film cooling with forward and backward injection for cylindrical and fan-shaped holes using PSP measurement technique [R]. ASME Paper GT2014-26232, 2014.

[10] KUSTERER K, BOHN D, SUGIMOTO T, et al. Double-jet ejection of cooling air for improved film cooling [J]. Journal of Turbomachinery, 2007, 129(4): 809-815.

[11] KUSTERER K, ELYAS A, BOHN D, et al. Film cooling effectiveness comparison between shaped-and double jet film cooling holes in a row arrangement [R]. ASME Paper GT2010-22604, 2010.

[12] WANG Zhan, LIU Jianjun, AN Baitao, et al. Effects of axial row-spacing for double-jet film-cooling on the cooling effectiveness [R]. ASME Paper GT2011-46055, 2011.

[13] HAN Chang, REN Jing. Multi-parameter influence on combined-hole film cooling system [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(15): 4232-4240.

[14] HAN Chang, CHI Zhongran, REN Jing, et al. Optimal arrangement of combined-hole for improving film cooling effectiveness [R]. ASME Paper GT2013-94561, 2013.

[15] WANG Zhan, LIU Jianjun, ZHANG Chao. Impacts of geometric parameters of double-jet film cooling on anti-kidney vortex structure and cooling effectiveness [R]. ASME Paper GT2013-94038, 2013.

[16] HAN J C, RALLABANDI A. Turbine blade film cooling using PSP technique [J]. Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT), 2010, 1(1): 1-16.

[17] KENDALL A, KOCHESFAHANI M. A method for estimating wall friction in turbulent wall-bounded flows [J]. Experiments in Fluids, 2008, 44(5): 773-780.

[18] 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]. Journal of Turbomachinery, 2011, 133(4): 041023. 1-041023. 8.

[19] EBERLY M K, THOLE K A. Time-resolved film-cooling flows at high and low density ratios [J]. Journal of Turbomachinery, 2014, 136(6): 061003. 1-061003. 8.

[20] KLINE S J, MCCLINTOCK F. Describing uncertainties in single-sample experiments [J]. Mechanical Engineering, 1953, 75(1): 3-8.

[21] YAO Jiaxu, XU Jin, ZHANG Ke, et al. Interaction of flow and film-cooling effectiveness between double-jet film-cooling holes with various spanwise distances [R]. ASME Paper GT2017-63740, 2017.