

DOI: 10.7652/xjtuxb201911009

槽缝射流对环形叶栅端壁气膜冷却性能影响的实验研究

祝培源^{1,2}, 陶志¹, 姚韵嘉¹, 宋立明¹, 李军¹

(1. 西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安;

2. 中国核动力研究设计院中核核反应堆热工水力技术重点实验室, 610213, 成都)

摘要: 为了研究槽缝射流对环形叶栅端壁气膜冷却性能的影响,建立了考虑槽缝射流的环形叶栅端壁气膜冷却实验平台。在不同质量流量比条件下,利用红外测温技术研究了槽缝结构形式(均匀槽缝、收缩槽缝)对不同射流角下端壁气膜冷却效果的影响。结果表明:提高槽缝射流的质量流量比,可增强对叶栅端壁的气膜冷却效果。与原始均匀槽缝相比,收缩槽缝由于提高了槽缝射流出口的动量,能够显著提高不同射流角下的端壁气膜冷却性能,且明显扩展了气膜覆盖范围。与45°射流角相比,90°射流角时由于前缘涡系增强,槽缝射流所产生的端壁气膜冷却效果有所减弱。90°射流角时,采用收缩槽缝所带来的气膜冷却性能提升比45°射流角时更显著。

关键词: 槽缝射流;红外测温;气膜冷却;环形叶栅

中图分类号: TK474.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)11-0063-08

Experimental Study on the Effect of Purge Flow on Film Cooling Performance of an Annular Cascade Endwall

ZHU Peiyuan^{1,2}, TAO Zhi¹, YAO Yunjia¹, SONG Liming¹, LI Jun¹

(1. Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. CNNC Key Laboratory on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics Technology, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

Abstract: To study the effects of purge flow on endwall film cooling performance, an endwall film cooling test rig was built for an annular cascade with upstream purge flow. The effects of slot profile (normal or convergent) on endwall film cooling performance were studied using infrared temperature measurement technology for different ejection orientations and mass flow ratios. Results indicate that increasing the mass flow ratio of purge flow can improve the film cooling effect on the endwall of annular cascade. Compared with normal slot, convergent slot can enhance the film cooling performance and enlarge the coolant coverage on the endwall in different injection orientations because convergent slot can increase the momentum of purge flow. When the ejection orientation increases from 45° to 90°, the secondary vortexes near the vane leading edge are strengthened, resulting in the reduction of the film cooling effectiveness. Besides, the enhancement in endwall film cooling effect of convergent slot is more significant when the ejection orientation is 90°.

Keywords: purge flow; infrared temperature measurement; film cooling; annular cascade

收稿日期: 2019-06-03。 作者简介: 祝培源(1990—),男,博士生;宋立明(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51676149)。

网络出版时间: 2019-08-12

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190812.0933.002.html>

提高燃气轮机透平进口温度是提升燃气轮机效率和输出功率的有效手段^[1]。针对低 NO_x 排放要求,燃烧室出口温度沿叶高方向的分布应更加均匀,这使得端壁附近流体温度升高^[2]。上述原因导致现代透平叶片端壁区域所承受的热负荷急剧增加,使高效的端壁传热冷却设计方法和技术成为迫切需求。

槽缝射流一方面能够避免高温主流入侵盘腔,另一方面能对端壁形成一定的气膜冷却保护^[3]。槽缝射流因其对端壁附近的流动、传热和冷却特性的重要影响而受到了国内外学者的重视。Blai 率先研究了上游槽缝结构对叶栅端壁气热性能的影响,研究表明,槽缝射流对下游端壁产生了一定的气膜冷却效果,且气膜分布在周向变化剧烈^[4]。Burd 等针对燃机高压透平进口导叶,利用实验手段研究了槽缝射流对端壁附近的流动、气膜冷却以及传热特性的影响,结果表明,增加槽缝射流的质量流量比能够有效削弱二次流对端壁气膜冷却的影响,从而对端壁产生更好的冷却保护效果^[5-6]。Thole 等采用实验手段研究了槽缝射流对叶片端壁气膜冷却性能的影响,结果表明,受到端壁横向二次流的影响,冷却气体主要集中在端壁前部且靠近叶片吸力面侧区域,而对压力面侧区域的冷却效果较差^[7]。Thrit 等实验研究了槽缝结构的几何参数(射流角、位置)对端壁传热冷却性能的影响,结果表明:当槽缝射流垂直射入主流时,槽缝出口附近边界层会发生较大的分离,形成较大的前缘涡系结构,不利于端壁前缘区域的冷却保护,而减小射流角度则有利于提升槽缝射流对端壁的冷却保护效果,从而降低端壁热负荷;减小槽缝与叶片前缘的距离,有利于提高端壁前部的气膜冷却效率^[8-9]。Cardwell 等以第一级静叶为对象,通过实验手段研究了槽缝宽度对端壁气膜冷却特性的影响,研究表明,提高槽缝射流的质量流量比或者减小槽缝宽度,能够显著提升端壁气膜有效度,而增加槽缝射流的动量比,则有利于扩大端壁上的气膜覆盖范围^[10]。Lynch 等通过实验手段综合研究了槽缝射流对端壁传热特性和气膜冷却性能的影响,结果表明,上游槽缝射流会对端壁前部靠近吸力面侧提供一定的气膜冷却效果,同时也增强整个端壁区域的传热系数^[11]。综合考虑冷却效率和传热系数,槽缝射流可以有效降低端壁前部的热负荷,但是增强了端壁后部区域的热负荷^[12]。国内一些学者也开展了针对槽缝射流的相关研究,例如:杜坤等开展了槽缝结构对静叶端壁气膜冷却特性的影响的数值研究,结果表明改变槽缝的入射段结构会显

著影响叶片前缘端壁区域的气膜冷却效果,相比直线形式,采用圆弧过渡的入射段结构能够弱化槽缝射流出口的流动分离,从而提升气膜冷却性能^[13-14];宋立明团队采用实验和数值模拟研究了槽缝的几何参数对端壁气膜冷却性能、传热特性以及气动性能的影响^[15-16]。

综上所述,目前关于槽缝射流对叶片端壁气膜冷却性能影响的研究,大多数是基于平面叶栅模型开展的。这些研究忽略了实际燃气透平中必然存在的叶栅环形效应,从而导致二者的流动传热特性存在一定的差异^[17]。针对以上研究的不足,本文对典型燃气轮机透平进口导叶,搭建了考虑上游槽缝结构的环形叶栅端壁气膜冷却实验平台,研究了射流角(45° 、 90°)和槽缝结构形式(均匀、收缩)对环形叶栅端壁气膜冷却性能的影响。

1 实验方法

1.1 端壁气膜冷却实验系统

端壁气膜冷却实验装置如图1所示,主要包括主流系统、冷气系统、实验段以及测量系统。其中,主流来自于通过多台压缩机驱动的低速风洞。低速风洞中安装了整流格栅和稳流装置,以保证气流均匀和稳定。经过收敛段后,主流进入实验测试段。在实验测试段入口处安装了总压探针,以测试主流的总压。

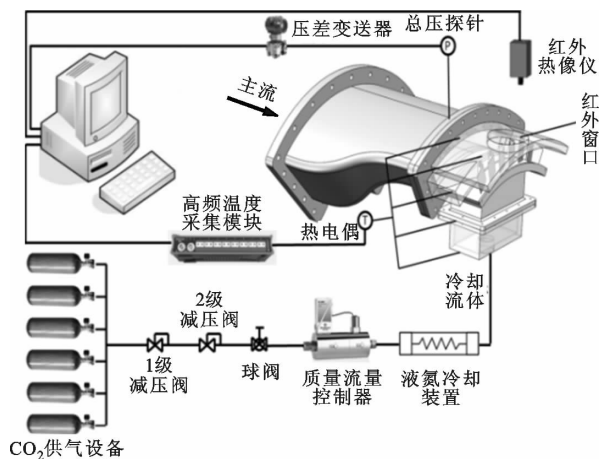


图1 实验装置示意图

为了能够匹配真实燃机条件的密度比,采用 CO_2 作为冷却气体。二次空气系统由多瓶压缩 CO_2 供气。通过调节各级减压阀和质量流量控制器来控制冷气的流量。质量流量比 r_{MFR} 的定义为

$$r_{\text{MFR}} = \frac{m_c}{m_\infty} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_{∞} 、 m_c 分别为主流、冷却射流的质量流量。

实验测量了 3 个工况,其质量流量比分别为 1.0%、1.5%、2.0%。利用液氮冷却装置对 CO₂ 气体进行冷却,冷气在气室中进行混合,最后通过槽缝结构流入叶栅通道中。在二次空气系统的管道外侧覆盖高效的保温材料,以减少实验中的热量损失。根据工质热物性,在实验压力(100 kPa)条件下,主流空气的温度为 15 ℃,密度为 1.236 kg/m³,当 CO₂ 温度为 -20 ℃时,密度为 2.11 kg/m³,故冷气和主流的密度比可保证为 1.7。

1.2 实验段

采用 3D 打印技术加工了环形叶栅实验段,如图 2 所示。为了保证流动周期性,环形叶栅有 6 个叶片和 5 个流道。实验中选取中间流道的端壁进行测量。为了降低端壁的热传导,采用低导热率的光敏树脂材料(导热率为 0.2 W·m⁻¹·K⁻¹)作为实验段的材料。实验中,主流进口边界条件保持不变,进口总压为 1 kPa(表压),进口总温为 15 ℃,叶栅出口马赫数为 0.1。

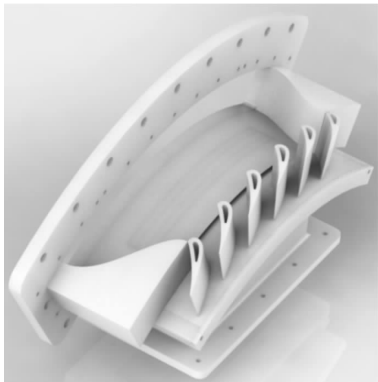


图 2 实验段三维模型

以 GE 公司 E3 高压透平第一级静叶的根部型线为基准叶型,通过拉伸得到实验叶型。叶片的根部截面型线及三维叶型实体如图 3 所示。表 1 给出了叶型主要几何参数。

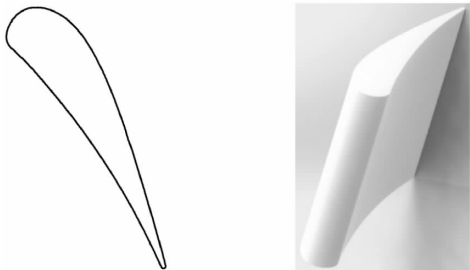


图 3 叶型及三维叶型实体

为了研究槽缝射流对端壁气膜冷却性能的影响,设计并加工了 4 种不同的槽缝结构,如图 4 所

示,用于研究均匀槽缝和收缩槽缝在不同射流角(45°、90°)下对端壁气膜冷却的影响。槽缝的详细几何参数如表 2 所示。

表 1 环形叶栅几何参数

参数	数值
叶片数	6
叶片弦长/mm	62.2
节弦比(中叶展)	0.76
环形叶栅内径/mm	350
环形叶栅外径/mm	400

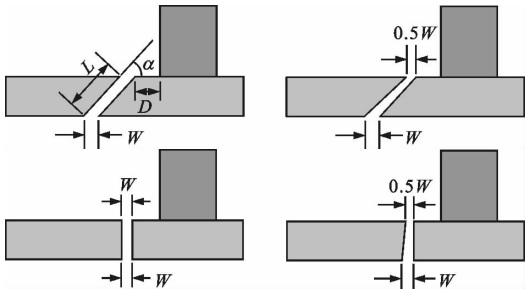


图 4 槽缝结构示意图

表 2 槽缝结构几何参数

参数	数值
槽缝位置 D /mm	9
槽缝长度 L /mm	28
槽缝宽度 W /mm	6
射流角 α /°	45,90

1.3 实验测量系统

在气膜冷却实验中,采用高精度热电偶对主流温度、冷气系统的温度进行监控和测量。主流温度测量采用具有 I 级精度的 K 型热电偶,测量范围为 -200~1 200 ℃,精度为 0.4%。冷却气体温度测量采用具有 I 级精度的 T 型热电偶,测量范围为 -200~350 ℃,精度为 0.4%。热电偶测量的温度通过 DEWESOFT 高频温度采集模块进行数据采集和监控,采集模块的测量精度为 0.05%,最高采样频率为 200 kHz。主流的进口总压通过位于收敛段出口的总压探针进行测量和监控,以保证实验中主流工况一致。利用高精度的 ALICAT 21 质量流量控制器对槽缝射流的质量流量进行调节和测量。

利用红外测温技术对端壁表面的温度分布进行测量,作为一种非接触式的测量方法,红外测温技术对流场的影响较小。采用美国 FLIR 公司生产的高精度红外热像仪 FLIR T650sc 对端壁温度分布进

行全场测量。该红外热像仪具有较高的空间分辨率和较宽的测量范围,实物图如图 5 所示,相关参数由表 3 给出。



图 5 红外热像仪实物图

表 3 红外热像仪相关参数

参数	数值
分辨率	640×480 像素
测量精度	±1%或±1℃
温度范围	-40~150℃
图像帧频	≤30 Hz
空间分辨率	0.68 mrad
工作波长	7.5~14 μm
视场角,最小焦距	(25×19)°,0.25 m

在不同温度下分别对利用热电偶和红外热像仪获得的标定点温度进行标定,标定曲线如图 6 所示。标定结果表明,在本实验的测量温度范围内,红外热像仪具有较高的精度和可靠性。

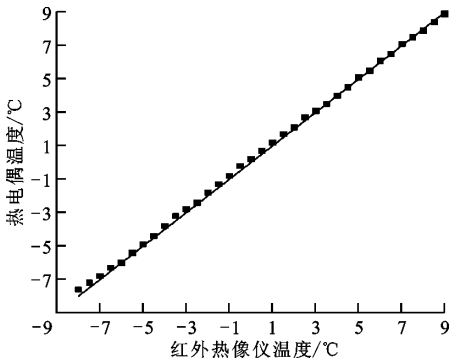


图 6 红外热像仪标定曲线

采用直径为 100 mm 的 BaF₂ 玻璃作为红外窗口。如图 7 所示,将扇形叶栅端壁测量区域向二维平面投影即可得到面积为 60 mm×80 mm 的矩形视场,该视场可以清晰地拍摄一个叶栅通道的端壁温度。

1.4 误差分析

在气膜冷却性能评估中,通常采用绝热气膜有效度来衡量气膜冷却的效果,其定义为

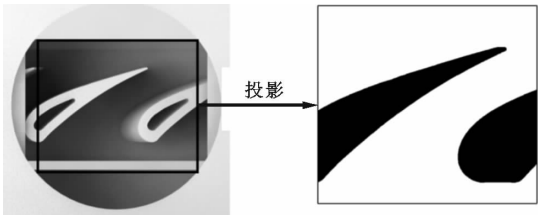


图 7 红外测量视场

$$\eta = \frac{T_{\infty} - T_{aw}}{T_{\infty} - T_c} \tag{2}$$

式中: T_{∞} 为主流温度; T_{aw} 为壁面绝热温度; T_c 为槽缝射流的温度。

主流温度测量所采用的 K 型热电偶的误差为 ±0.2℃;槽缝射流与壁面温度测量采用的 T 型热电偶的误差分别为 ±0.2℃与 ±0.4℃。对于实验最终关注的参数 η (绝热气膜有效度),采用下式进行相对误差估计

$$\frac{\Delta\eta}{\eta} = \left(\left(\frac{T_{\infty}}{\eta} \frac{\partial\eta}{\partial T_{\infty}} \right)^2 \frac{\Delta T_{\infty}^2}{T_{\infty}^2} + \left(\frac{T_{aw}}{\eta} \frac{\partial\eta}{\partial T_{aw}} \right)^2 \frac{\Delta T_{aw}^2}{T_{aw}^2} + \left(\frac{T_c}{\eta} \frac{\partial\eta}{\partial T_c} \right)^2 \frac{\Delta T_c^2}{T_c^2} \right)^{1/2} \tag{3}$$

通过计算可得:当 η 为 0.1、0.5 和 0.9 时,其测量不确定度 $\Delta\eta$ 分别为 0.017、0.016 和 0.017,而相对误差分别为 17%、3.2%和 1.9%。

2 结果与分析

首先分析槽缝射流质量流量比对端壁气膜冷却性能的影响,在此基础上对比分析所提出的收缩型槽缝和常规均匀槽缝在不同射流角($\alpha=45^\circ, 90^\circ$)下对端壁气膜冷却性能的影响。

2.1 质量流量比的影响

以射流角为 45°的均匀槽缝为例,研究不同质量流量比(1.0%、1.5%、2.0%)对端壁气膜有效度的影响。图 8 给出了端壁气膜有效度云图。由图可知,在端壁前部靠近吸力面侧的区域,冷却气膜的覆盖较好,而在端壁靠近压力面侧区域以及端壁后部几乎没有气膜覆盖。这是因为槽缝射流进入主流以后,受到端壁横向二次流的作用,从压力面侧向吸力面侧迁移,在往下游运动的过程中,被通道涡卷吸而逐渐吹离壁面。在叶片前缘附近,受到马蹄涡影响,冷却射流与主流的掺混加剧,导致叶片前缘区域的气膜冷却效果较差。整体而言,随着质量流量比的增大,不仅扩大了气膜在端壁的横向覆盖范围,也提升了端壁气膜的有效度。在叶片前缘区域,随着质量流量比的提高,该区域的冷却效果逐渐增强,尤其

是当 r_{MFR} 增加到2.0%时,槽缝射流对叶片前缘附近区域的气膜冷却保护效果大大增强。这是由于提高冷却射流的质量流量比,增加了冷却射流的动量,削弱了主流入侵现象,并削弱了前缘马蹄涡的不利影响。因此,在本文所研究的 r_{MFR} 范围内,随着质量流量比的增加,槽缝射流对叶片前缘附近的冷却保护作用增强。

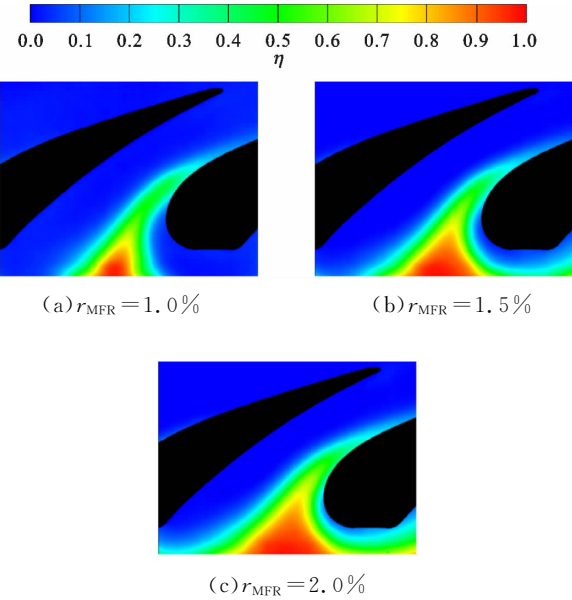


图 8 不同质量流量比下端壁气膜有效度分布

2.2 槽缝结构的影响($\alpha=45^\circ$ 时)

图 9 分别给出了 $\alpha=45^\circ$,质量流量比为1.0%、1.5%和2.0%时,均匀槽缝和收缩槽缝的叶片端壁气膜有效度分布。在本文所研究的质量流量比范围内,与均匀槽缝相比,收缩槽缝能够明显提升端壁的气膜冷却效果。在射流质量流量比较小(1.0%)时,由于冷却射流动量较小,原始槽缝受到马蹄涡以及主流入侵的影响,其叶片前缘附近的端壁区域几乎没有冷却气膜覆盖;采用收缩槽缝可以提高间隙出口冷却射流的动量,能够有效减小马蹄涡以及避免主流入侵的影响,因而收缩槽缝射流能够对叶片前缘附近的端壁区域提供一定的冷却保护。在射流质量流量比较大(1.5%和2.0%)时,由于冷却射流动量的提高,采用均匀槽缝时叶片前缘附近的端壁区域也有一定的冷却气膜覆盖,而收缩槽缝对槽缝出口冷却射流动量的进一步提高,可以进一步提高该区域的气膜有效度。

图 10 给出了在 $\alpha=45^\circ$ 、不同射流质量流量比条件下采用均匀槽缝和收缩槽缝时,前缘位置处端壁气膜有效度的周向分布。图中 Y 为周向位置坐标, P 为栅距, Y/P 为量纲一的周向位置。从图 10 中

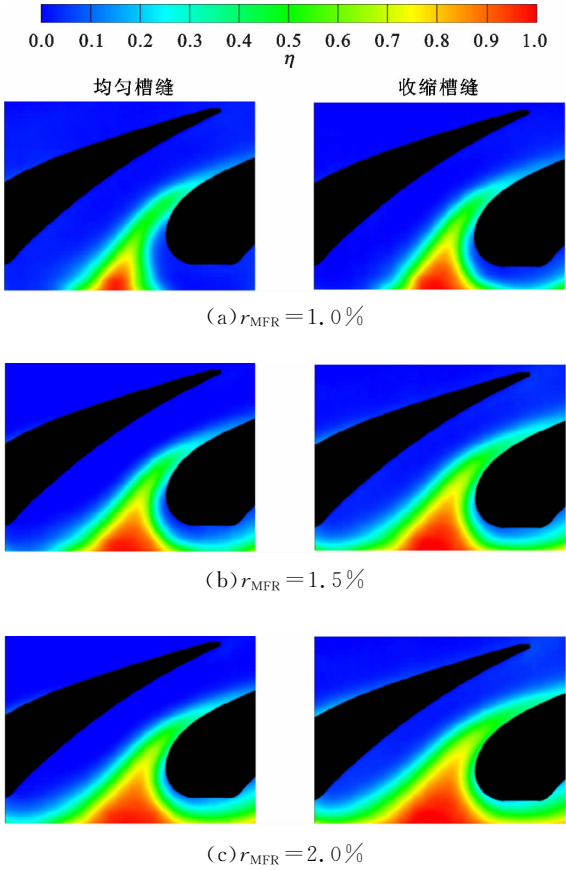
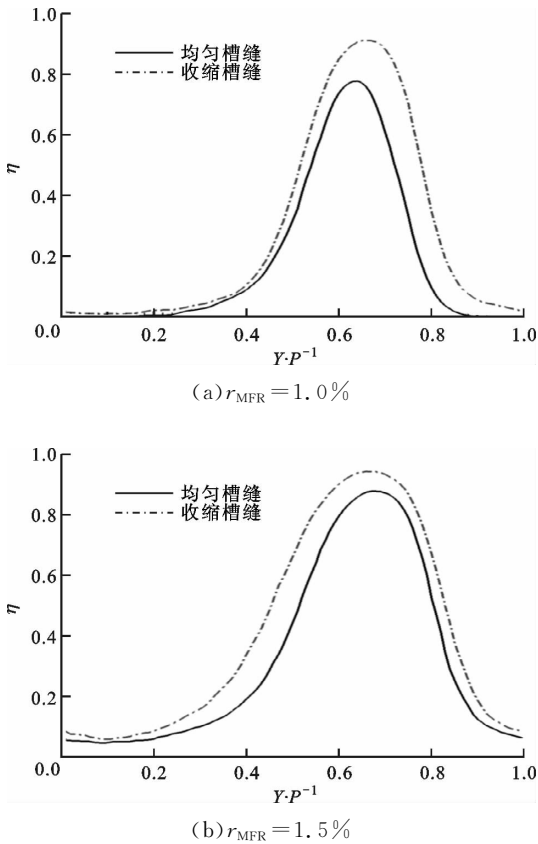


图 9 不同槽缝结构的气膜有效度分布($\alpha=45^\circ$)



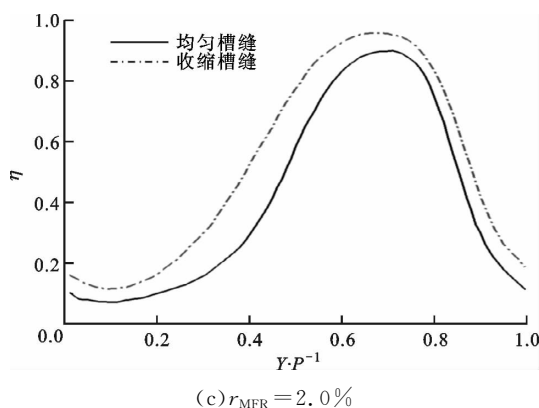


图10 前缘位置端壁气膜有效度的周向分布($\alpha=45^\circ$)

可以看出,相比于均匀槽缝,收缩槽缝能够显著提高前缘位置处的端壁气膜有效度,并扩展气膜在周向的分布范围。当 $r_{\text{MFR}}=1.0\%$ 时,收缩槽缝对端壁气膜有效度的提升效果最为显著,而随着 r_{MFR} 的增加,收缩槽缝对端壁气膜有效度的提升效果有所减弱。在 $Y/P=0.6$ 处, $r_{\text{MFR}}=1.0\%$, 1.5% , 2.0% 时,相比于均匀槽缝,收缩槽缝能够使该处的端壁气膜有效度分别提高16.5%、12.4%和12.1%。

2.3 槽缝结构的影响($\alpha=90^\circ$ 时)

在 $\alpha=90^\circ$,质量流量比分别为1.0%、1.5%和2.0%时,采用均匀槽缝和收缩槽缝的端壁气膜有效度分布云图如图11所示。

与 $\alpha=45^\circ$ 相比, $\alpha=90^\circ$ 时端壁气膜冷却性能显著降低。这是由于当 $\alpha=90^\circ$ 时,一方面增强了前缘附近马蹄涡和分离涡,使得主流和冷却气体的掺混加剧,弱化了气膜冷却效果;另一方面,更大的沿叶高方向的分动量使得冷却射流更不容易被主流压制,更易吹离壁面,减弱气膜冷却效果。此外, $\alpha=90^\circ$ 时,冷却射流沿流向的动量降低,故冷却气体所能覆盖的范围有所减小。与原始均匀槽缝相比,收缩槽缝一方面显著扩展了冷却气膜的覆盖范围,另一方面明显提高了高冷却效率区域的气膜有效度。当 $r_{\text{MFR}}<1.5\%$ 时,均匀槽缝受到马蹄涡以及主流入侵的影响,叶片前缘附近的端壁区域几乎没有冷却气膜覆盖,而采用收缩槽缝时,可以提高间隙出口冷却射流的动量,有效弱化主流入侵和前缘马蹄涡的影响,从而提升对叶片前缘附近区域的气膜冷却保护效果,扩大冷却气膜覆盖范围。此外,与原始均匀槽缝相比,收缩槽缝提高了槽缝射流出口处沿流向的动量分量,使得冷气能够渗透更远的距离,从而扩大了气膜覆盖范围。

图12给出了 $\alpha=90^\circ$ 、在不同射流质量流量比条

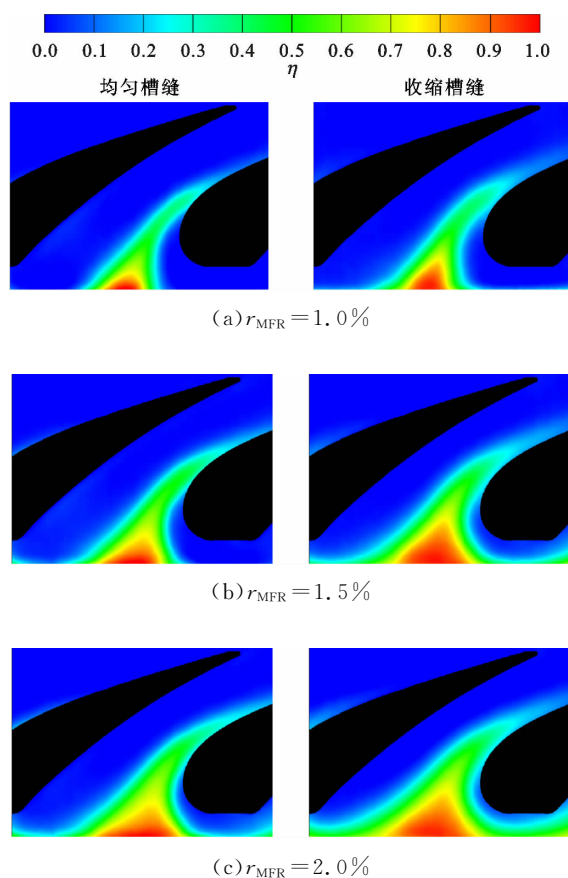
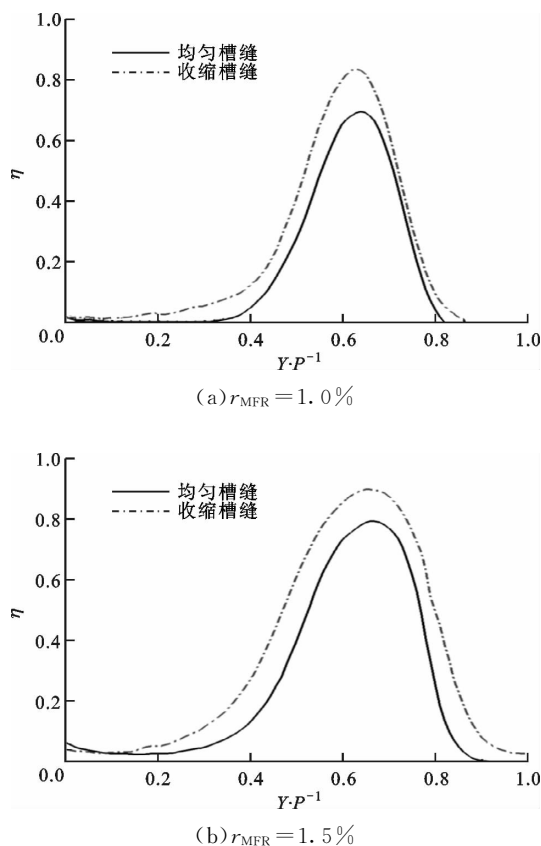


图11 不同槽缝结构的气膜有效度分布($\alpha=90^\circ$)



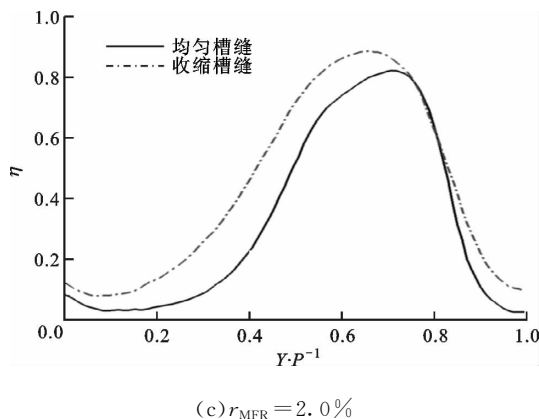


图 12 前缘位置端壁气膜有效度的周向分布($\alpha=90^\circ$)

件下采用均匀槽缝和收缩槽缝时,在前缘位置处端壁气膜有效度的周向分布。从图 12 中可以看出,相比于均匀槽缝,收缩槽缝能够显著提高前缘位置处的端壁气膜有效度,并扩展气膜在周向的分布范围。与 $\alpha=45^\circ$ 相比, $\alpha=90^\circ$ 时收缩槽缝对前缘处气膜冷却性能的提升效果更为显著。前缘 $Y/P=0.6$ 处,在射流质量流量比为 1.0%、1.5% 和 2.0% 时,相比于均匀槽缝,采用收缩槽缝能够提高端壁气膜有效度,其值分别为 21.0%、17.5% 和 16.2%。

3 结 论

基于所搭建的槽缝射流作用下扇形叶栅端壁气膜冷却性能实验平台,研究了在不同射流角(45° 、 90°)下槽缝结构形式(均匀、收缩)对端壁气膜冷却性能的影响,主要结论如下。

(1) 槽缝射流对端壁前部区域具有一定的气膜冷却保护效果,且随着质量流量比的增加,槽缝射流对端壁的气膜冷却效果增强。但是,受到端壁横向往二次流的影响,冷却气体主要分布在端壁前部靠近吸力面侧区域,而对压力面侧区域的冷却效果较差。

(2) $\alpha=45^\circ$ 时,与原始均匀槽缝相比,收缩槽缝可以提高槽缝射流出口的动量,从而显著提高叶片端壁的气膜有效度,且扩展了气膜覆盖范围。特别地,收缩槽缝增强了对叶片前缘区域的气膜冷却保护效果。

(3) 与 $\alpha=45^\circ$ 时相比, $\alpha=90^\circ$ 时由于槽缝出口流动分离加剧,导致了前缘涡系的增强,从而减弱了对端壁的气膜冷却保护效果。与 45° 射流角类似, 90° 射流角时采用收缩槽缝依然能够明显地提高叶片端壁的气膜冷却性能,且收缩槽缝所带来的气膜冷却性能提升效果比 45° 射流角时更为显著。

参考文献:

- [1] HAN J C, DUTTA S, EKKAD S. Gas turbine heat transfer and cooling technology [M]. Boca Raton, USA: CRC Press, 2012: 1-2.
- [2] 李雪英, 任静, 蒋洪德. 燃烧室温度剖面对静叶端壁冷却的影响 [J]. 工程热物理学报, 2015, 36(4): 752-755.
LI Xueying, REN Jing, JIANG Hongde. The influence of combustor outlet temperature profile on a vane endwall [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(4): 752-755.
- [3] 高庆, 李军. 涡轮蜂窝面径向轮缘密封封严性能的数值研究 [J]. 推进技术, 2016, 37(5): 937-944.
GAO Qing, LI Jun. Numerical investigations on sealing performance of turbine honeycomb radial rim seal [J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(5): 937-944.
- [4] BLAIR M F. An experimental study of heat transfer and film cooling on large-scale turbine endwalls [J]. Journal of Heat Transfer, 1974, 89: 524-529.
- [5] BURD S W, SIMON T W. Effects of slot bleed injection over a contoured endwall on nozzle guide vane performance: part I Flow field measurements [C]//Proceedings of ASME Turbo Expo. New York, USA: ASME, 2000: GT2000-199.
- [6] BURD S W, SATTERNESS C J, SIMON T W. Effects of slot bleed injection over a contoured endwall on nozzle guide vane performance: part II Thermal measurements [C]//Proceedings of ASME Turbo Expo. New York, USA: ASME, 2000: GT2000-200.
- [7] THOLE K A, KNOST D G. Heat transfer and film-cooling for the endwall of a first stage turbine vane [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(25/26): 5255-5269.
- [8] THRIFT A A, THOLE K A, HADA S. Effects of orientation and position of the combustor-turbine interface on the cooling of a vane endwall [J]. Journal of Turbomachinery, 2012, 134(6): 061019.
- [9] THRIFT A A, THOLE K A, HADA S. Impact of the combustor-turbine interface slot orientation on the durability of a nozzle guide vane endwall [J]. Journal of Turbomachinery, 2013, 135(4): 041019.
- [10] CARDWELL N D, SUNDARAM N, THOLE K A. The effects of varying the combustor-turbine gap [J]. Journal of Turbomachinery, 2006, 129(4): 91-102.
- [11] LYNCH S P, THOLE K A. The effect of combustor-turbine interface gap leakage on the endwall heat transfer for a nozzle guide vane [J]. Journal of Turbomach-

- inery, 2008, 130(4): 671-682.
- [12] LYNCH S P, THOLE K A. The effect of the combustor-turbine slot and midpassage gap on vane end-wall heat transfer [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2011, 133(4): 2167-2178.
- [13] 杜昆, 李军, 晏鑫. 槽缝射流对静叶端壁冷却性能的影响 [J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(1): 21-26.
DU Kun, LI Jun, YAN Xin. Effect of the slot jet impingement on the cooling performance of the vane end-wall [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(1): 21-26.
- [14] DU K, LI J. Numerical study on the effects of slot injection configuration and endwall alignment mode on the film cooling performance of vane endwall [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 98: 768-777.
- [15] 姚韵嘉, 祝培源, 陶志. 间隙射流对端壁气膜冷却性能影响的实验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2019, 53(3): 43-49.
YAO Yunjia, ZHU Peiyuan, TAO Zhi. Experimental study on the effect of gap jet on film cooling performance of endwall [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, 53(3): 43-49.
- [16] SONG L, ZHU P, LI J. Effect of purge flow on end-wall flow and heat transfer characteristics of a gas turbine blade [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 110: 504-520.
- [17] 孙皓. 非轴对称端壁造型的透平叶栅和透平级气动性能的试验和数值研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2013: 8-9.
(编辑 荆树蓉)
-
- (上接第 62 页)
- [11] COSTA M C, BOROS L A D, COUTINHO J P A, et al. Low-temperature behavior of biodiesel: solid-liquid phase diagrams of binary mixtures composed of fatty acid methyl esters [J]. *Energy & Fuels*, 2011, 25(7): 3244-3250.
- [12] 梅德清, 谭文兵, 张永涛, 等. 基于差示扫描量热法和热力学模型的生物柴油结晶行为分析 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30(7): 206-211.
MEI Deqing, TAN Wenbing, ZHANG Yongtao, et al. Crystallization behavior of biodiesel based on differential scanning calorimetry and thermodynamic model [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(7): 206-211.
- [13] 杨飞, 李传宪, 林名桢. 聚丙烯酸酯降凝剂对合成蜡油降凝规律的研究 [J]. *油田化学*, 2009, 26(1): 106-110.
YANG Fei, LI Chuanxian, LIN Mingzhen. Studies on pour point depression of synthetic waxy oils by poly(n-alkyl acrylates) [J]. *Oilfield Chemistry*, 2009, 26(1): 106-110.
- [14] COUTINHO J A P, ANDERSEN S I, STENBY E H. Evaluation of activity coefficient models in prediction of alkane solid-liquid equilibria [J]. *Fluid Phase Equilibria*, 1995, 103(1): 23-39.
- [15] 陈五花. 降凝剂对含蜡油石蜡析出过程影响的实验与模型化研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2009: 15-18.
- [16] 梅德清, 谭文兵, 袁银男. 利用热力学相平衡分析生物柴油晶体析出规律 [J]. *农业工程学报*, 2013, 29(15): 223-228.
MEI Deqing, TAN Wenbing, YUAN Yinnan. Crystal precipitation law of biodiesel based on thermodynamic phase equilibrium [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(15): 223-228.
- [17] LOPES J C A, BOROS L, KRAHENBUHL M A, et al. Prediction of cloud points of biodiesel [J]. *Energy & Fuels*, 2008, 22(2): 747-752.
- [18] ROUX M V, TEMPRADO M, CHICKOS J S. Vaporization, fusion and sublimation enthalpies of the dicarboxylic acids from C4 to C14 and C16 [J]. *Journal of Chemical Thermodynamics*, 2005, 37(9): 941-953.
- [19] TSUCHIYA Y, HASEGAWA H, IWATSUBO T. Prediction of the latent heat of n-alkanes using the molecular dynamics method [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2003, 42: 6508-6511.
- [20] 陈水根, 蒋剑春, 聂小安. 生物柴油低温流动性能研究进展 [J]. *生物质化学工程*, 2007, 41(6): 42-46.
CHEN Shuigen, JIANG Jianchun, NIE Xiao'an. Research progress on the low-temperature flow property of biodiesel [J]. *Biomass Chemical Engineering*, 2007, 41(6): 42-46.
- [21] 曹磊昌. 生物柴油低温流动性及其降凝机理研究 [D]. 上海: 上海应用技术大学, 2012: 21-26.
- [22] 应学海. 柴油降凝剂合成与性能研究 [D]. 青岛: 中国石油大学, 2013: 19-23.
(编辑 赵炜)