

DOI: 10.19666/j.rlfed.202503033

一种增强气膜冷却的瓦片涡流 发生器性能研究

马朋辉, 寇志海, 尹训彦, 李广超, 卫海桥
(沈阳航空航天大学航空发动机学院, 辽宁 沈阳 110136)

[摘要] 为了解决圆柱孔在低吹风比下冷却裕度不足、高吹风比下冷流脱离壁面的技术难题, 基于圆柱形孔的尖端覆盖涡流发生器 (TCVG), 提出了一种新型涡流发生器 (VG) 设计, 即瓦片形涡流发生器 (TVG)。对传统圆柱孔与带有 TVG 的圆柱形孔进行数值模拟, 模拟结果表明: 采用 TVG 时, 气膜冷却效率比传统圆柱孔提高 200% 左右, 并且解决了传统圆柱气膜孔在高吹风比下冷流从壁面脱离的情况; 随着 TVG 宽度的增加, 气膜冷却效率增加, 当宽度达到 2 倍气膜孔直径时气膜冷却效率趋于稳定; 随着 TVG 高度的增加, TVG 对冷流的压制作用减弱, 且在高吹风比下近场区出现未冷却的间隙, 气膜冷却效率呈现下降趋势。TVG 扩张角对气膜冷却效果的影响较小, 最优扩张角为 7.5° 。

[关键词] 气膜冷却; 瓦片形涡流发生器; 吹风比; 冷却效率; 数值模拟

[引用本文格式] 马朋辉, 寇志海, 尹训彦, 等. 一种增强气膜冷却的瓦片涡流发生器性能研究[J]. 热力发电, 2025, 54(12): 27-38. MA Penghui, KOU Zhihai, YIN Xunyan, et al. Research on performance of a tile vortex generator with enhanced film cooling[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(12): 27-38.

Research on performance of a tile vortex generator with enhanced film cooling

MA Penghui, KOU Zhihai, YIN Xunyan, LI Guangchao, WEI Haiqiao
(School of Aero Engine, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: In order to solve the technical problem that the cooling margin of the cylindrical hole is insufficient at low blowing ratios and the cold flow is separated from the wall at high blowing ratios, based on the tip-covered vortex generator (TCVG), a new type of vortex generator (VG) is proposed, which is called tile-shaped vortex generator (TVG). The conventional cylindrical hole and the cylindrical hole with TVG are numerically simulated. The results show that the film cooling efficiency of the cylindrical hole with TVG is 200% higher than that of the conventional cylindrical hole. Moreover, it solves the problem that the cold flow of the conventional cylindrical film hole will separate from the wall at high blowing ratios. With the increase of TVG width, the film cooling efficiency increases, and tends to be stable when the width reaches twice the film hole diameter. With the increase of TVG height, the suppression effect of TVG on cold flow is weakened, and there is an uncooled gap in the near-field area at high blowing ratios, and the film cooling efficiency shows a downward trend. The expansion angle of TVG has little effect on the film cooling effect, and the optimal expansion angle is 7.5° .

Key words: film cooling; tile-shaped vortex generator; blowing ratio; cooling efficiency; numerical simulation

为了提升燃气轮机的效率并增大输出功率, 采用增加涡轮前燃气进口温度, 持续的增加至今仍使其显著高于涡轮材料的熔点, 因此需要采用复杂的

气膜冷却技术来降低高温部件的热负荷。在高压燃气轮机中, 常用的气膜孔类型为圆形孔, 其结构简单且易于加工, 可在一定程度上实现对热端部件表

收稿日期: 2025-03-20 网络首发日期: 2025-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52376028)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (52376028)

第一作者简介: 马朋辉 (2000), 硕士研究生, 主要研究方向为涡轮叶片气膜冷却, penghui0711@qq.com。

通信作者简介: 寇志海 (1981), 博士, 教授, 主要研究方向为燃气轮机热端部件冷却, zhihaikou@163.com。

面的冷却。然而,在大吹风比下,圆形孔容易出现冷流脱壁现象,导致下游气膜无法起到冷却效果。这表明高效的气膜冷却设计仍然是燃气涡轮发动机工业设计中面临的一个重大技术难题。

随着叶片制作工艺的提高,一些新的孔型被提出,如百叶窗孔、叶子形孔、扁豆形孔、三叶草形孔、五角星形孔、双射流孔、箭头形孔、交叉扭转椭圆孔、椭圆孔、扇形孔、收敛缝形孔,这些形状气膜孔得到广泛研究^[1-8]。其中椭圆孔、扇形孔、收敛缝形孔已经在一些燃气涡轮机中得到应用。在气膜孔出口处开设浅槽也可提高气膜冷却性能。文献^[9-12]研究了槽结构对气膜冷却特性的影响。

近年来,在气膜孔附近安装涡流发生器(vortex generator, VG)来增强气膜冷却效果的方法得到各学者们的广泛关注。当流体跨越障碍时,由于边界层的存在,在其表面会形成回流区, VG 就是利用了这一流动机理。Zhang 等人^[13-14]研究了 VG 倾角、高度和位置对气膜冷却效率的影响。Sarkar 等人^[15]通过模拟研究了 DWVG 与 UWVG 对气膜冷却效率的影响。此外, Krss 等人^[16]研究了开槽与斜坡相结合的结构对冷却效果的影响。Song 等人^[17]实验研究了倾斜角和吹风比以及在圆柱孔出口下游安装微斜坡来提高平板的薄膜冷却性能。Deng 等人^[18]对上游具有 4 种类型小翼涡流发生器的平板气膜冷却性能进行了数值研究。Halder 等人^[19]使用数值模拟研究了涡流发生器位于圆形气膜孔上游,对平板薄膜冷却效果的影响。Straub 等人^[20]数值模拟了在圆柱形气膜孔出口下游安装 V 形排列的矩形板对平板气膜冷却效果的影响。He 等人^[21]在气膜孔出口上游设计了 4 种 V 形涡流发生器,研究了其对气膜冷却的影响。Yu 等人^[22]发现 DBD-VGs 可以提高气膜冷却性能。Tepe 等人^[23]发现三角形凹边形(TCES)在射流区域产生一对强大的反向旋转涡旋,可以改善冷却剂在表面上向横向的分散。Lee 等人^[24]研究了在圆形气膜孔出口下游安装 V 形排列的矩形板对平板气膜冷却效果的影响。

尽管现有的 VG 配置(三角斜坡型、小翼型等)可以增强圆柱形平板气膜冷却效果,但在平板气膜冷却方面仍有望改进,对于增强气膜冷却的设计理念仍需要进一步发展,以满足未来燃气轮机热端部件的冷却要求。因此,本文基于尖端覆盖涡流发生器(TCVG),提出了一种新型的结构,旨在进一步

提高气膜冷却效果并解决冷流在高吹风比下脱离壁面的问题。对带有瓦片形涡流发生器(TVG)的圆柱气膜孔进行数值模拟,分析不同结构参数对平板气膜冷却效果的影响。

1 计算模型和数值方法

1.1 计算模型

本文的研究均基于平板气膜,利用 UG 软件建立三维模型。图 1 为平板气膜计算模型,图 1 中气膜孔直径 $D=5\text{ mm}$,长径比 $L/D=4$,喷射角度 45° 。主流通道的长、宽、高分别为 $55D$ 、 $6D$ 和 $10D$ 。冷气腔的长、宽、高分别为 $5D$ 、 $6D$ 和 $10D$ 。在气膜孔出口布置 TVG,其几何尺寸与位置如图 2 所示。由图 2 可见,TVG 与 TCVG 相似,在顶部都是封闭的。而与 TCVG 不同的是,为了防止冷流在高吹风比下脱离壁面,TVG 安装在气膜孔出口位置,TVG 前端与气膜孔出口前端对齐。由于考虑到冷流冲击到 TVG 顶部横向扩散,整个 TVG 设计成瓦片形且流向扩张。TVG 的厚度为 $e=0.1D$,中心线高度为 h ,前端宽度为 d_1 ,后端宽度为 d_2 ,长度固定为 $2D$,流向扩张角为 α 。为了研究其几何参数对平板气膜冷却效果的影响,保持 e 与 s 固定,改变其他参数,算例几何参数设置见表 1。

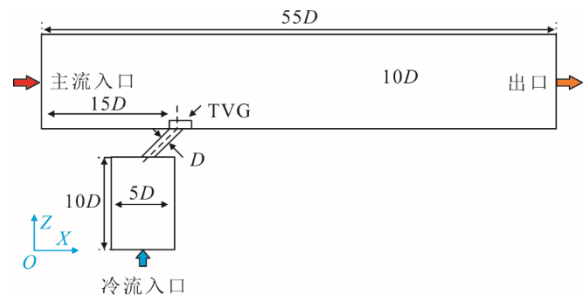


图 1 平板气膜计算模型

Fig.1 Calculation model of the flat-plate gas film

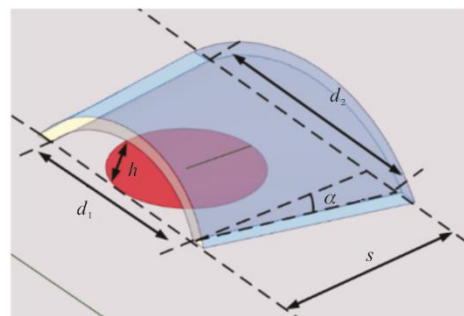


图 2 TVG 几何尺寸

Fig.2 Geometric size of the TVG

表 1 算例几何参数设置
Tab.1 Geometric parameter settings for calculation examples

算例	$\alpha/(\circ)$	h	d_2	类型
Case1				无 TVG
Case2	0	$0.4D$	D	TVG
Case3	0	$0.4D$	$2D$	TVG
Case4	0	$0.4D$	$3D$	TVG
Case5	0	$0.6D$	$2D$	TVG
Case6	0	$0.8D$	$2D$	TVG
Case7	7.5	$0.4D$	$2D$	TVG
Case8	15.0	$0.4D$	$2D$	TVG

本文模型所有网格均采用软件 Fluent Meshing 自动生成, 为四面体和六面体组成的混合网格。平板气膜计算域网格划分如图 3 所示。对平板表面以及气膜孔划分边界层网格, 使第 1 层网格的无量纲距离 y^+ 小于 1, 从而满足湍流模型的要求。

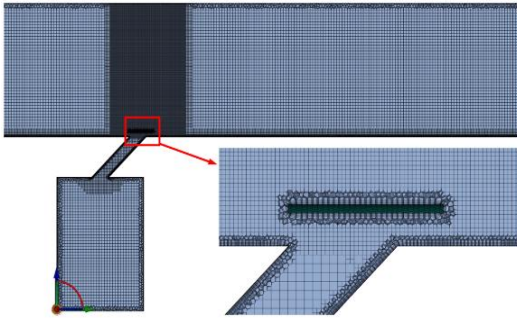


图 3 平板气膜计算域网格

Fig.3 Computational domain grid for the flat-plate gas film

1.2 边界条件与数值模拟方法

设定主流入口为速度入口, 入口流速为 20 m/s, 温度为 350 K, 湍流强度为 1%。冷流入口也设为速度入口, 入口流速依据吹风比 M 而定 ($M=0.5$ 、1.0、1.5), 温度为 300 K, 湍流强度为 5%。冷流与主流都采用空气。出口设为压力出口。计算域两侧壁面设为周期性边界条件, 其余壁面设为绝热无滑移。

采用 Fluent 软件求解雷诺时均形式的 $N-S$ 方程和能量方程。采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型模拟湍流流动, 壁面函数采用增强壁面函数, 采用二阶迎风差分格式离散各方程, 采用 Fluent 分离隐式求解器亚松驰求解, 收敛残差设置为 10^{-5} 。

1.3 参数定义

吹风比 M 定义为:

$$M = \frac{\rho_c v_c}{\rho_g v_g} \quad (1)$$

式中: ρ_c 为冷流密度, kg/m^3 ; ρ_g 为主流密度, kg/m^3 ;

v_c 为冷流在气膜孔出口的平均速度, m/s; v_g 为主流进口的平均速度, m/s。

气膜冷却效率 η 定义为:

$$\eta = \frac{T_g - T_{aw}}{T_g - T_c} \quad (2)$$

式中: T_g 为初始主流温度, K; T_{aw} 为绝热壁面温度, K; T_c 为初始冷流温度, K。

气膜有效覆盖比 A_f 为:

$$A_f = \frac{a_f}{a_w} \quad (3)$$

式中: a_f 为气膜有效覆盖 ($\eta \geq 0.2$ 等值线所围成的图形面积), m^2 ; a_w 为平板面积, m^2 。

1.4 数值模拟方法验证

选取 308 万、344 万、412 万和 453 万网格进行网格无关性验证, 结果如图 4 所示。当网格数为 412 万时, 模拟结果基本不变。网格数量的增加对模拟结果的影响很小, 故选取 412 万网格进行计算。

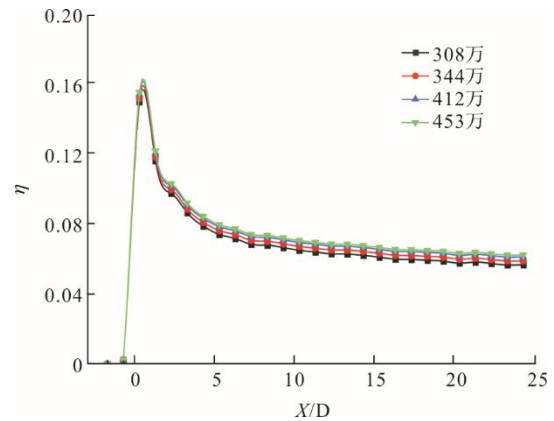


图 4 网格无关性验证

Fig.4 Grid independence verification

为了验证湍流模型的准确性, 依据 Liu 等人^[25]设计的实验建立模型, 利用本文计算方法对 $M=0.5$ 的圆柱气膜孔进行数值模拟, 将所得的结果与实验结果进行比较。图 5 为平板气膜冷却效率分布验证。图 6 为湍流模型展向平均冷却效率验证。由图 5 和图 6 可见, 气膜冷却效率的预测趋势与实验数据一致。但在气膜孔出口下游附近, 该湍流模型低估了展向冷却效率, 原因可能有 3 点: 1) 建模的缺点以及实验的不确定性; 2) 近场冷流和主流之间的混合相对较弱, 导致湍流较弱; 3) 气膜孔出口位置湍流结构复杂, $N-S$ 方程难以准确预测气膜冷却性能。此外 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型已在平板气膜冷却性能影响研究中得到了大量的实验验证^[10,18,21]。

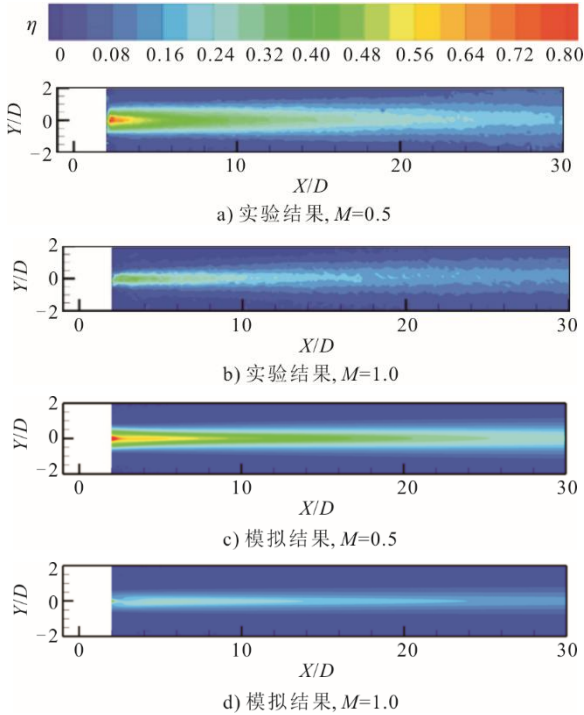


图 5 平板气膜冷却效率分布验证
Fig.5 Verification of film cooling efficiency distribution

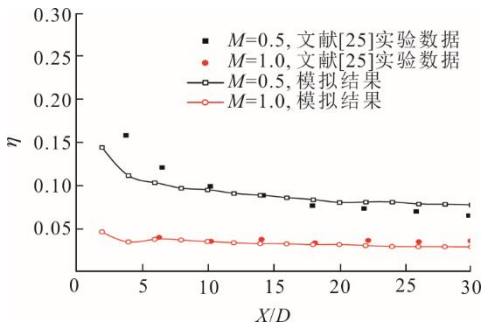


图 6 湍流模型展向平均冷却效率验证
Fig.6 Verification of span-wise averaged cooling efficiency for turbulence model

2 计算结果及分析

2.1 TVG 的影响

图 7 显示了 Case1 与 Case3 在不同吹风比下气膜孔中心截面温度与流线分布。从图 7 可以看出，圆柱形气膜孔在低吹风比下冷却射流动量较小，穿透性较弱，冷流受主流压迫紧贴壁面。但随着吹风比的增大，冷流穿透性增强，从而更容易穿透主流，导致冷流流线逐渐上移，冷流的贴壁性逐渐减弱。然而装有 TVG 结构的圆柱形气膜孔不仅在低吹风比下冷流的贴壁性良好，而且在高吹风比下由于 TVG 对冷流的阻挡作用，导致冷流无法穿透主流，从而形成良好的贴壁效果。由于 TVG 的存在，使得气膜孔出口附近流动复杂，形成了多个涡系结构。TVG 下方的涡系由于主流遭到冷流的阻碍而形成，TVG 上方

的涡流则由于冷流从 TVG 后方流出，导致主流抬升而形成，涡流大小随着吹风比的增大而增大。

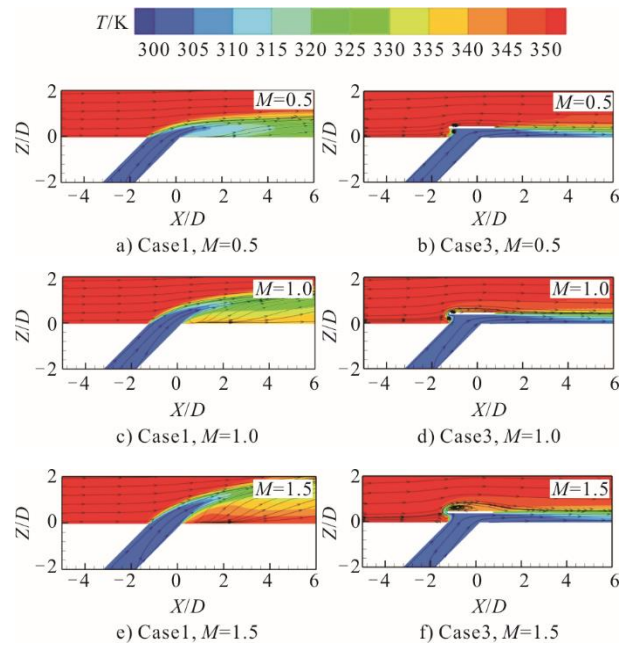
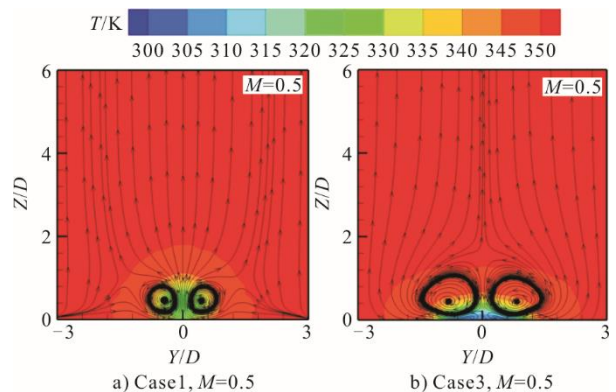


图 7 气膜孔中心截面温度与流线分布
Fig.7 Temperature and streamline distributions in central cross-section of the film-cooling hole

图 8 显示了 Case1 与 Case3 在不同吹风比下气膜孔出口下游 $X/D=5$ 处横截面温度流线分布。从图 8 可以看出，当 $M=0.5$ 时，圆柱形气膜孔引发了一对较小的肾形涡。这些肾形涡通过与主流相互作用，将主流卷入冷流下方区域，对整体的气膜冷却效能产生了不利影响。随着吹风比的增大，肾形涡也随之发展壮大，卷吸以及抬升作用也越来越明显，使得冷流离平板壁面越来越远，冷流无法很好地保护平板，造成冷却液的严重浪费。当 $M=0.5$ 时，装有 TVG 的圆柱形气膜孔在此处会产生一对与肾形涡相反的涡系，此外没有其他涡系结构。该涡系有压迫冷流抬升防止其脱离壁面的作用。随着吹风比的增大，该涡系也随之增大，导致冷流横向扩张越来越大，这意味着动量和标量传输之间存在良好的相关性。



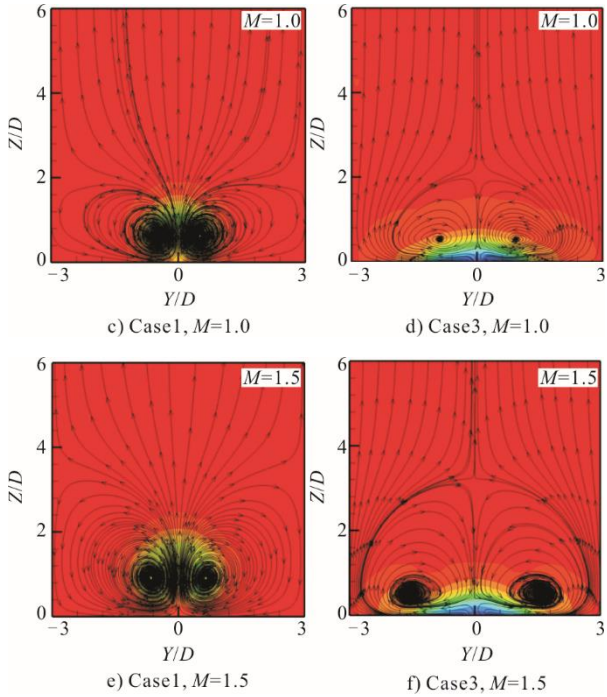


图 8 气膜孔出口 $X/D=5$ 处截面温度与流线分布
Fig.8 Temperature and streamline distributions in cross-section at $X/D=5$ at the outlet of the film-cooling hole

图 9 显示了 Case1 与 Case3 在不同吹风比下气膜冷却效率云图。从图 9 可以看出，Case1 随着吹风比的增大，气膜冷却效果越来越差，在 $M=1.5$ 时气膜冷却效果近乎没有。这是因为在高吹风比下，冷流动量增大，使得肾形涡增强，冷流的抬升作用增强导致气膜近乎无冷却效果。而装有 TVG 的圆柱形气膜孔相比于传统圆柱形气膜孔来说，因为反向涡系的产生，抑制了冷流的抬升作用，使得气膜有着更高效、更广、更均匀的气膜覆盖，冷却裕度也更大，而且也解决了圆柱形气膜孔在高吹风比下冷流脱壁现象，使得在高吹风比下仍然具有非常好的气膜覆盖。随着吹风比的增大，气膜的冷却效果越来越好。

图 10 显示了 Case1 与 Case3 在不同吹风比下孔下游 $X/D=5$ 处气膜冷却效率横向分布。由图 10 可以发现，当 $M=0.5$ 时，圆柱形气膜孔在中心线附近冷却效率 η 最高，达到 50% 左右。 η 向两侧逐渐降低。随着吹风比的增大，在该处的气膜横向覆盖越小， η 越低。相较于标准圆柱气膜孔，装有 TVG 的圆柱形气膜孔在该处的 η 分布规律类似，但随着吹风比的增大，气膜的横向覆盖更广，冷却效率更高，最高处 ($M=1.5$) 可达到 98% 左右。

图 11 显示了 Case1 与 Case3 在不同吹风比下展向平均气膜冷却效率分布。从图 11 可以看出，装有 TVG 的圆柱形气膜孔展向平均气膜冷却效率分

布规律与圆柱形气膜孔类似，沿流动方向，展向平均气膜冷却效率逐渐降低。与圆柱形气膜孔展向平均气膜冷却效率随吹风比升高而降低不同的是，装有 TVG 的圆柱形气膜孔展向平均气膜冷却效率随着吹风比升高而升高。在 $M=0.5$ 时，展向平均气膜冷却效率沿着流动方向降低趋势幅度较大。随着吹风比的升高，展向平均气膜冷却效率沿着流动方向降低趋势逐渐放缓。这与图 9 所得的结果一致。

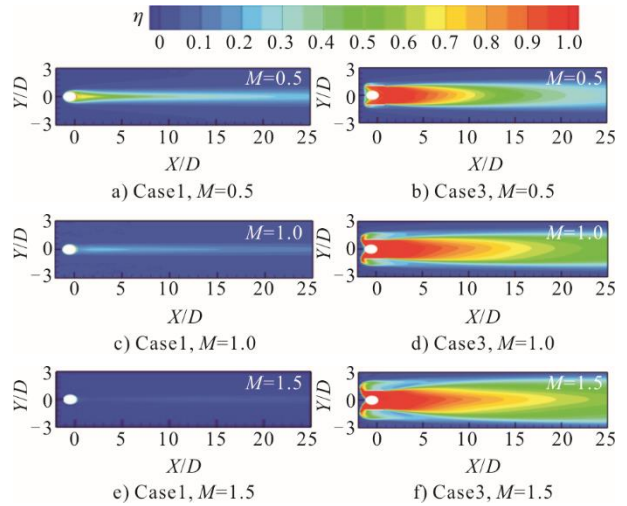


图 9 平板气膜孔冷却效率云图
Fig.9 Contour map of film cooling efficiency for flat-plate film holes

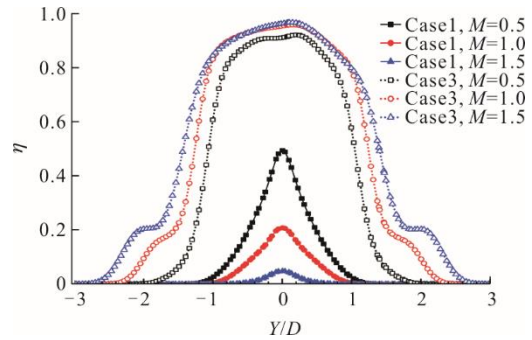


图 10 $X/D=5$ 截面气膜冷却效率横向分布
Fig.10 Transverse distribution of film cooling efficiency at the cross-section with $X/D=5$

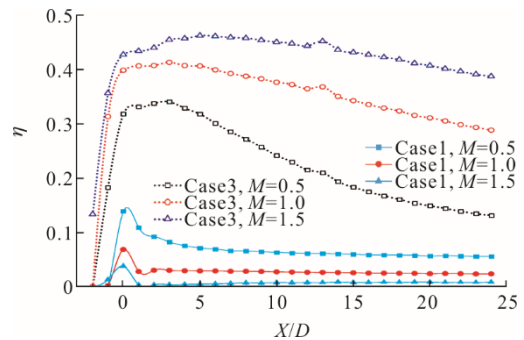


图 11 展向平均气膜冷却效率分布
Fig.11 Span-wise averaged distribution of film cooling efficiency

图 12 展示 Case1 与 Case3 在不同吹风比下平均气膜冷却效率。从图 12 可以看出,圆柱形孔的面平均气膜冷却效率 η 随吹风比的增大而降低,原因是圆柱形气膜孔的最佳吹风比通常在 0.5 左右。一旦吹风比超过此值, η 就会随着吹风比的增加而降低。这是圆柱形气膜孔的固有缺点。而装有 TVG 的圆柱形气膜孔的面平均 η 随吹风比的增大而增大,这是因为 TVG 阻碍了冷流的抬升,使得冷流在高吹风下也不会脱离壁面而降低气膜冷却效果。与圆形孔相比,装有 TVG 的圆柱形气膜孔在 $M=0.5$ 时面平均 η 提升了 200%左右,在 $M=1.0$ 与 $M=1.5$ 时,面平均 η 则远远高于了圆柱孔。

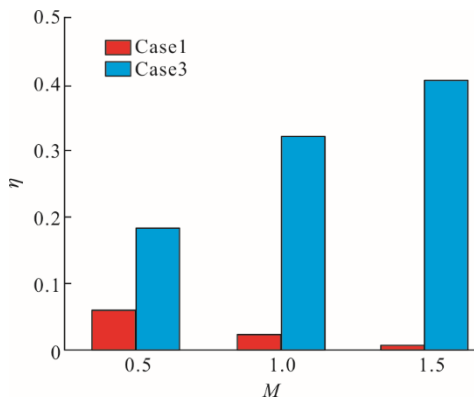


图 12 面平均 η 比较

Fig.12 Comparison of surface-average cooling efficiency

2.2 TVG 宽度的影响

图 13 显示了 $M=0.5$ 、1.0 时不同 TVG 宽度气膜孔中心截面温度与流线分布。由图 13 可以看出,随着 TVG 宽度的增加,产生的涡系越来越小,冷流在 TVG 上的抬升效果也越来越小,气膜厚度变的越来越薄,使冷流的利用率有了一定的提升。

图 14 展示了 $M=0.5$ 、1.0 时不同 TVG 宽度气膜孔出口下游 $X/D=5$ 处横截面温度与流线分布。由图 14 可见,在 $M=0.5$ 时,在 $X/D=5$ 处产生的反向涡系随着 TVG 宽度的增大而增大。宽度为 $3D$ 时,在近壁面处产生了一对非常小的肾形涡,该肾形涡由于反向涡系的存在,以及自身发展程度较小的原因,使得其对冷流的影响微乎其微。因为有 TVG 的阻挡作用,所以随着吹风比的增大,由 TVG 下方进入的主流越来越少,导致主流对冷流的影响越来越小,以至于使肾形涡随着吹风比的增大而减小,在 $M=1.0$ 时已无影响。在 $M=0.5$ 、1.0 时,随着 TVG 宽度的增加,冷流的横向覆盖变得更宽,气膜厚度变得越来越薄,导致冷流的利用率越来越高。

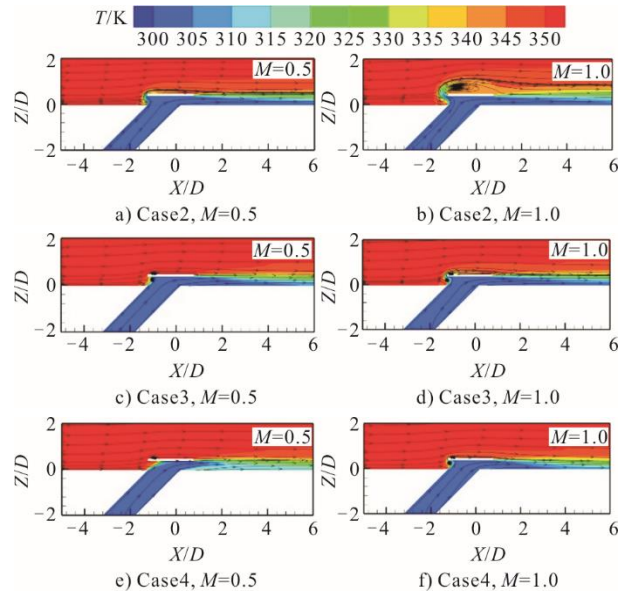


图 13 TVG 不同宽度下气膜孔中心截面温度与流线分布
Fig.13 Temperature and streamline distributions in central cross-section of the film hole under different widths of TVG

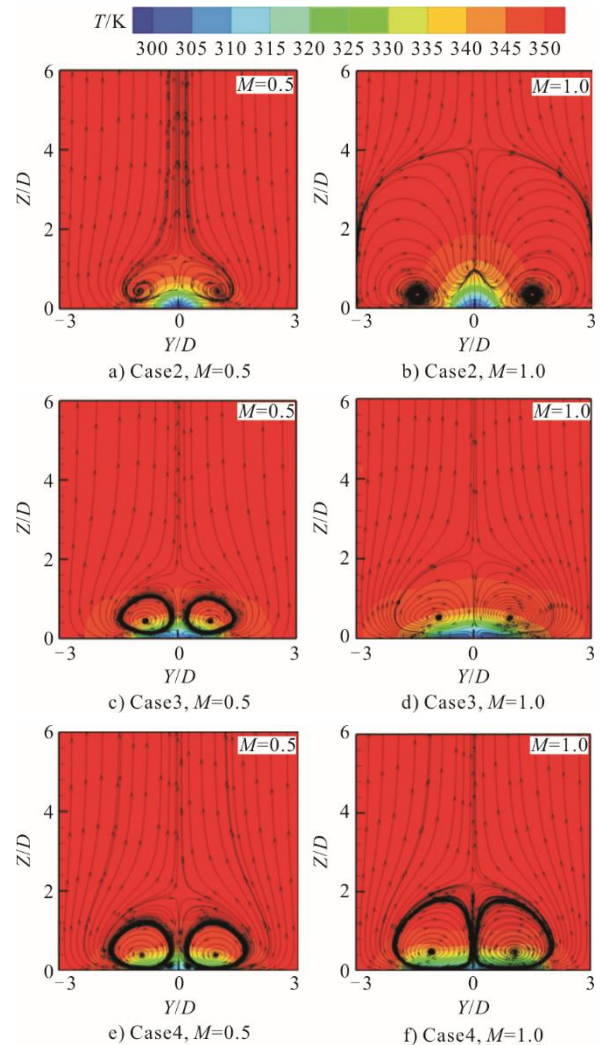


图 14 TVG 不同宽度下 $X/D=5$ 截面温度与流线分布
Fig.14 Temperature and streamline distributions in cross-section at $X/D=5$ under different widths of TVG

图 15 展示了 $M=0.5$ 、 1.0 时不同 TVG 宽度气膜冷却效率。由图 15 可以发现，当 TVG 宽度为 D 时，TVG 两侧限制了气膜向两侧的扩张，使气膜的横向覆盖面积较小。在 $M=1.0$ 时，此处冷流产生了一个较大的回流，这是由于射流动量大而外通道小所致。当 TVG 宽度增大时，气膜的横向覆盖范围有了较大的增长。当 TVG 宽度为 $3D$ 、 $M=0.5$ 时，在孔出口下游附近产生了小段冷却效率较低的区域，并且此时气膜冷却效率 η 分布与 $M=1.0$ 有着较大的差异。因为在 $M=0.5$ 时，在气膜孔下游除了具有一对反向涡系外，还有一对肾形涡，肾形涡的出现使得下游冷流抬升，降低了 η 。

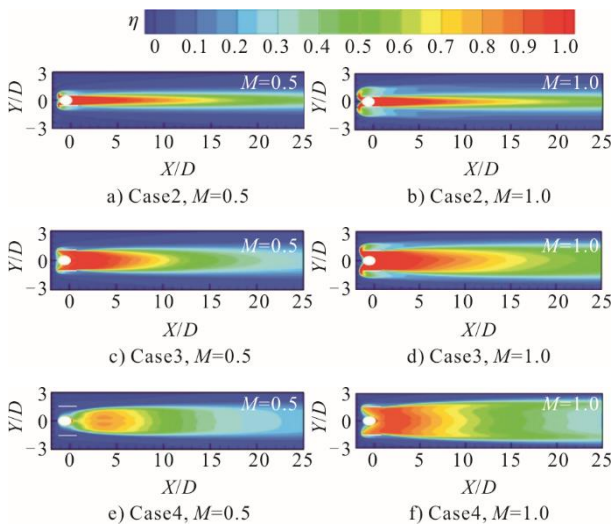


图 15 TVG 不同宽度下 η 分布
Fig.15 Distributions of cooling efficiency under different widths of TVG

图 16 展示了 $M=0.5$ 、 1.0 时不同 TVG 宽度下游 $X/D=5$ 处气膜冷却效率横向分布。从图 16 可以看出，随着 TVG 宽度的增加，气膜在该处的横向覆盖面积也随之增加，但该处 η 的最大值却随之下降。 $M=1.0$ 时，Case2 和 Case3 的冷却效率在两侧出现了拐点，这是由于从 TVG 前方流出的冷流所导致的，其他几个算例未出现此种现象主要原因在于吹风比较小和 TVG 宽度较大。

图 17 显示了 $M=0.5$ 、 1.0 时不同 TVG 宽度展向平均气膜冷却效率。由图 17 可以看出，当 $M=0.5$ 时，TVG 宽度由 D 增加到 $2D$ 时，展向平均 η 有一个较大的增长。而当 TVG 宽度由 $2D$ 增加到 $3D$ 时，展向平均 η 在 $X/D=3$ 之前减小，之后有一小幅度的增长，在 $X/D=13$ 下游几乎不变。展向平均 η 在 $X/D=3$ 之前减小的原因为肾形涡在此处对冷却效果的抑制作用。当 $M=1$ 时，展向平均 η 随着 TVG 宽度由

D 增长到 $2D$ 有一个大幅度的增加。宽度由 $2D$ 增长到 $3D$ 时，展向平均 η 在 $X/D=17$ 之前增长，在此之后则出现了下降趋势。

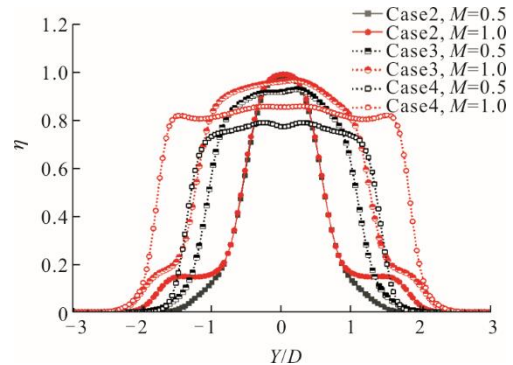


图 16 TVG 不同宽度下 $X/D=5$ 截面 η 横向分布
Fig.16 Distribution of cooling efficiency at $X/D=5$ under different widths of TVG

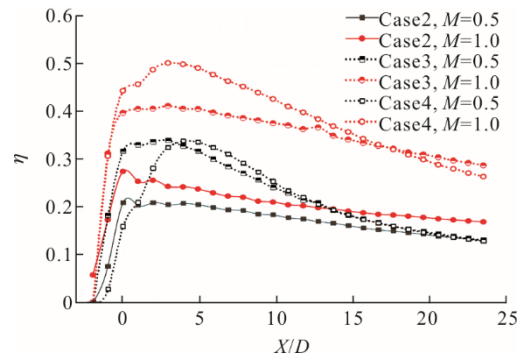


图 17 TVG 不同宽度下展向平均 η 分布
Fig.17 Distribution of span-wise average cooling efficiency under different widths of TVG

图 18 展示了 $M=0.5$ 、 1.0 、 1.5 时不同 TVG 宽度面平均气膜冷却效率。从图 18 可以看出，当 TVG 宽度由 D 增加到 $2D$ ， $M=0.5$ 、 1.0 、 1.5 时，面平均 η 依次提高了约 23.0%、66.7% 和 80.0%。随着吹风比的增加，面平均 η 时均值的增大幅度越来越大。当 TVG 宽度由 $2D$ 增加到 $3D$ 时，在各吹风比下的面平均 η 变化非常小。

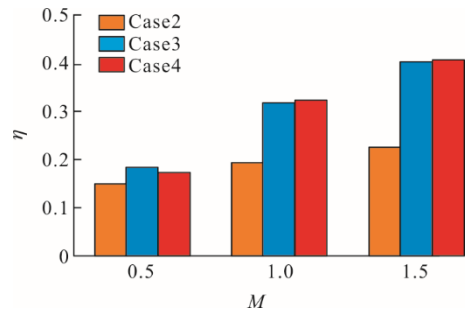


图 18 TVG 不同宽度下面平均 η 比较
Fig.18 Comparison of surface-average cooling efficiency under different widths of TVG

2.3 TVG 高度的影响

图 19 展示了 $M=0.5$ 、 1.0 时不同 TVG 高度气膜孔中心截面温度与流线分布。由图 19 可以发现，气膜的厚度随着 TVG 高度的增大而增大。TVG 高度决定了冷流喷出高度的上限，而当吹风比较小时，从气膜孔中喷出的冷流动量低，导致在壁面所产生的气膜厚度较薄，受到 TVG 影响小。当 TVG 高度为 $0.8D$ 、 $M=1.0$ 时，在气膜孔出口下游附近产生了一小段未被气膜覆盖到的区域。

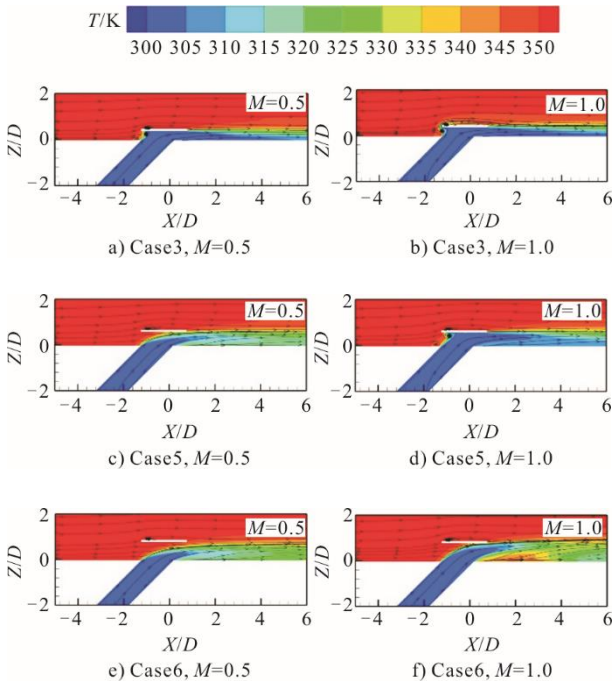


图 19 TVG 不同高度下气膜孔中心截面温度与流线分布
Fig.19 Temperature and streamline distributions in central cross-section of the film hole under different heights of TVG

图 20 展示了 $M=0.5$ 、 1.0 下不同 TVG 高度气膜孔下游 $X/D=5$ 处横截面温度流线分布。从图 20 可以看出，与 TVG 高度为 $0.4D$ 只产生反向涡不同的是，当高度为 $0.6D$ 时，在此基础上产生了一对肾形涡，肾形涡对 η 有着负面影响。肾形涡的大小随着 TVG 高度的增大而变大。因为当 TVG 的高度变大时，TVG 顶部对冷流的压制作用降低，主流与冷流更容易发生掺混产生肾形涡。

图 21 展示了 $M=0.5$ 、 1.0 时不同 TVG 高度气膜冷却效率云图。由图 21 可以发现，随着 TVG 高度的增加， η 呈现不同的分布。当 $M=0.5$ 时，气膜的横向覆盖随着 TVG 高度的增加而逐渐变窄。当 $M=1.0$ 时，气膜的横向覆盖随着 TVG 高度由 $0.4D$

增加到 $0.6D$ 的变化较小，而增加到 $0.8D$ 时下降显著。当 TVG 高度为 $0.8D$ 、 $M=1.0$ 时，在气膜孔后缘到 $X/D=2$ 的流向位置，由于肾形涡造成的冷流抬升，可看到未冷却的间隙。

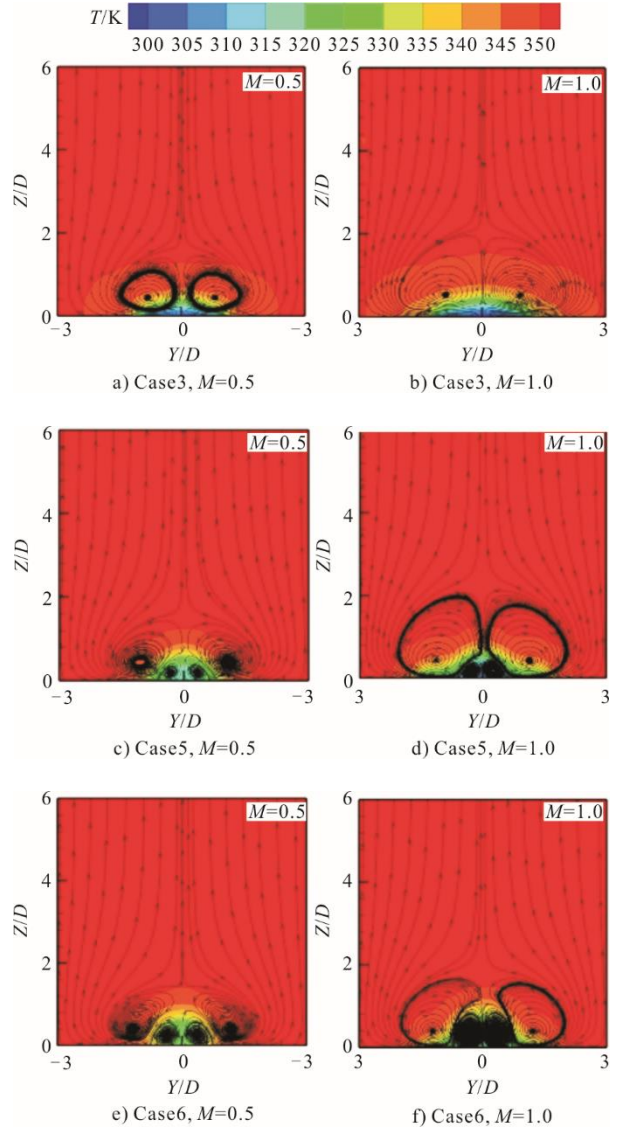
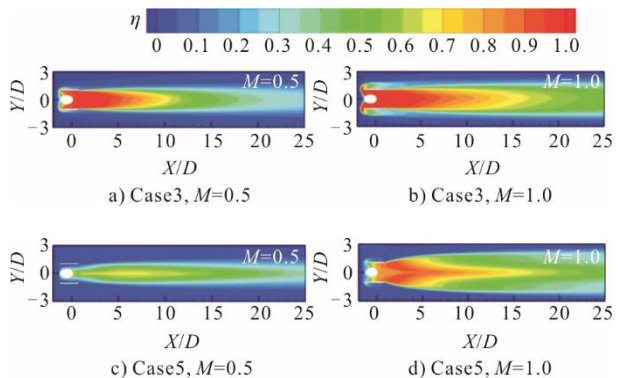


图 20 TVG 不同高度下 $X/D=5$ 截面温度与流线分布
Fig.20 Temperature and streamline distributions in cross-section at $X/D=5$ under different heights of TVG



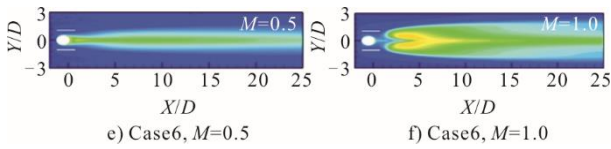


图 21 TVG 不同高度下 η 分布
Fig.21 Distributions of cooling efficiency under different heights of TVG

图 22 展示了 $M=0.5$ 、 1.0 时不同 TVG 高度下游 $X/D=5$ 处气膜冷却效率横向分布。由图 22 可见，当 $M=0.5$ 时， $X/D=5$ 处 η 最大值和横向有效覆盖面积随着 TVG 高度的增大而变小。当 $M=1.0$ 时， η 最大值随着 TVG 高度的增大而变小，气膜的横向有效覆盖面积随着 TVG 高度的增大先增大后减小，在 $0.4D$ 时最大。

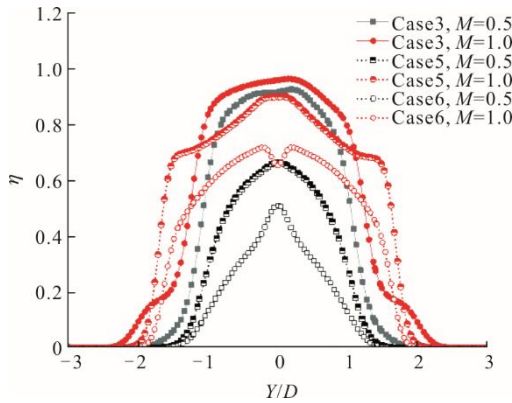


图 22 TVG 不同高度下 $X/D=5$ 截面 η 横向分布
Fig.22 Distribution of cooling efficiency at $X/D=5$ under different heights of TVG

图 23 为 $M=0.5$ 、 1.0 时不同 TVG 高度展向平均气膜冷却效率分布。从图 23 可以看出，当 $M=0.5$ 时，展向平均 η 在 $X/D=15$ 之前随着 TVG 高度的增加而降低。在 $X/D=15$ 之后，TVG 高度由 $0.2D$ 增加到 $0.4D$ 时，展向平均 η 几乎不变。当 $M=1.0$ 时，TVG 高度为 $0.2D$ 与 $0.4D$ 时气膜的展向平均 η 相差不多。当 TVG 高度由 $0.4D$ 增加到 $0.6D$ 时，展向平均 η 下降明显。主要是因为 TVG 高度为 $0.4D$ 时产生的肾形涡较小，对气膜覆盖影响较小。而当 TVG 高度为 $0.6D$ 时，肾形涡进一步变大，导致展向平均 η 明显降低，这与图 19 结果一致。

图 24 为 $M=0.5$ 、 1.0 和 1.5 时不同 TVG 高度面平均气膜冷却效率分布。由图 24 可见， $M=0.5$ 、 1.0 、 1.5 时，随着 TVG 高度的增加，平板的面平均 η 随之降低。 $M=0.5$ ，面平均 η 依次降低了约 23%、40.8%。 $M=1.0$ ，面平均 η 依次降低了约 3.2%、31.4%。 $M=1.5$ ，面平均 η 依次降低了约 2.1%、23.9%。面平均 η 的下降幅度随着 TVG 高度的增大而加剧。

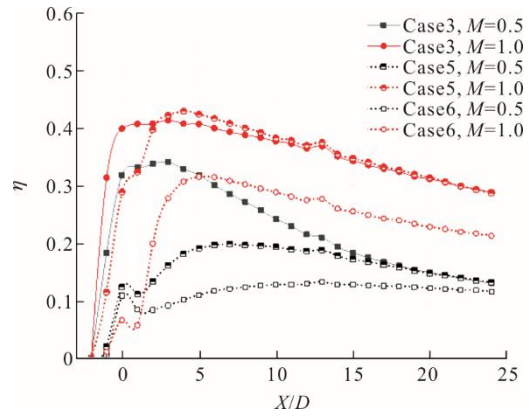


图 23 TVG 不同高度下展向平均 η 分布
Fig.23 Distribution of span-wise average cooling efficiency under different heights of TVG

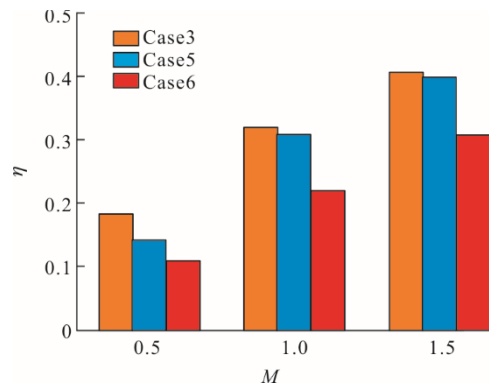
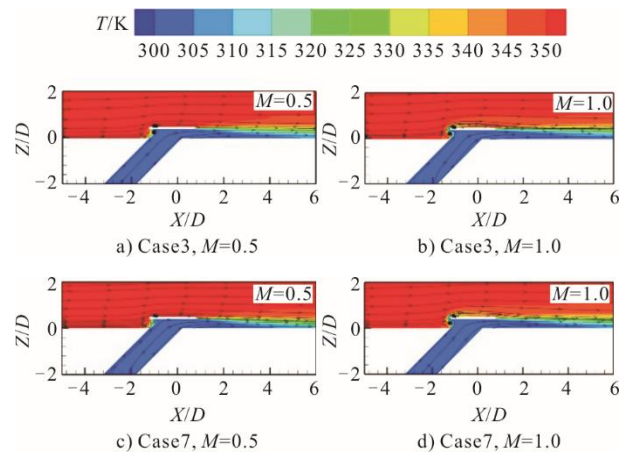


图 24 TVG 不同高度下面平均 η 比较
Fig.24 Comparison of surface-average cooling efficiency under different heights of TVG

2.4 TVG 扩张角的影响

图 25 为 $M=0.5$ 、 1.0 时不同 TVG 扩张角气膜孔中心截面温度与流线分布。由图 25 可见，气膜厚度随着 TVG 扩张角的增大而减小。此外无其他影响。图 26 为 $M=0.5$ 、 1.0 时不同 TVG 扩张角气膜孔出口下游 $X/D=5$ 处横截面温度流线分布。由图 26 可见，TVG 扩张角的变化对 $X/D=5$ 处横截面温度与流线分布无明显影响。



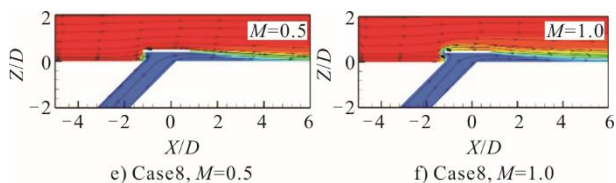


图 25 TVG 不同扩张角下气膜孔中心截面温度与流线分布
Fig.25 Temperature and streamline distributions in central cross-section of the film hole with different expansion angles of TVG

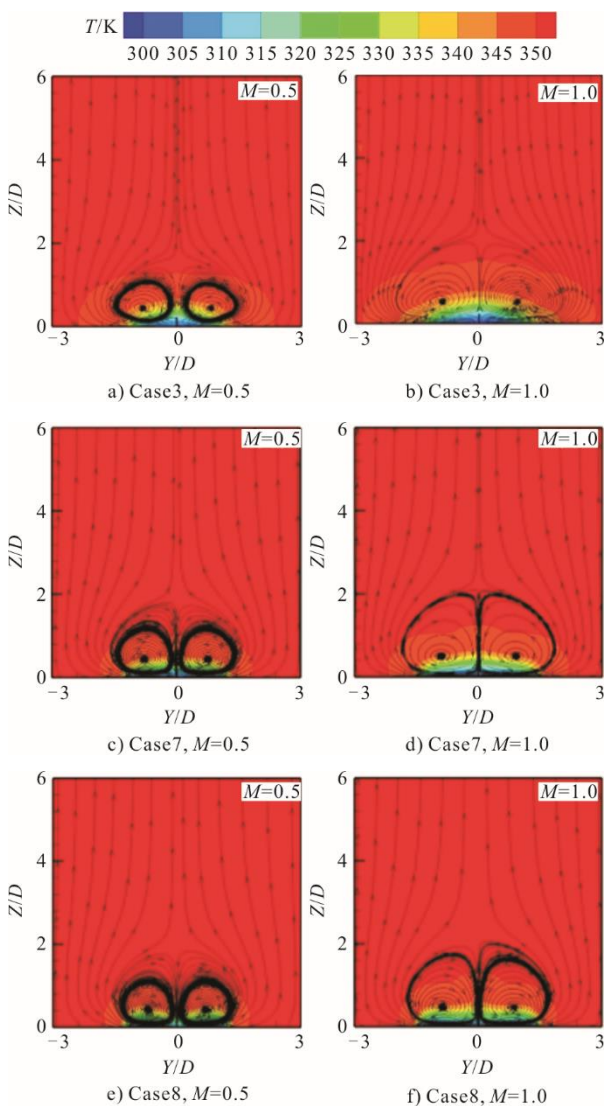


图 26 TVG 不同扩张角下 $X/D=5$ 截面温度与流线分布
Fig.26 Temperature and streamline distributions in cross-section at $X/D=5$ with different expansion angles of TVG

图 27 为 $M=0.5$ 、 1.0 时不同 TVG 扩张角气膜冷却效率云图。由图 27 可加见，当 $M=0.5$ ，TVG 扩张角由 0° 增到 7.5° 时，在孔下游的远场出现只覆盖到两侧的情况。随着扩张角进一步增大至 15° ，分离点（在中心线上沿着流动方向出现的 $\eta=0.2$ 的点）前移，气膜在远场处表现出一定范围的无效覆盖区域，这种现象主要原因是：当气膜孔出口下

游蔓延的气流动量不足以抵消或超过气膜孔射流带来的动量时，冷流在此处发生分离。在吹风比增大时，冷流的动量随之增加，导致分离点向后方区域延移。

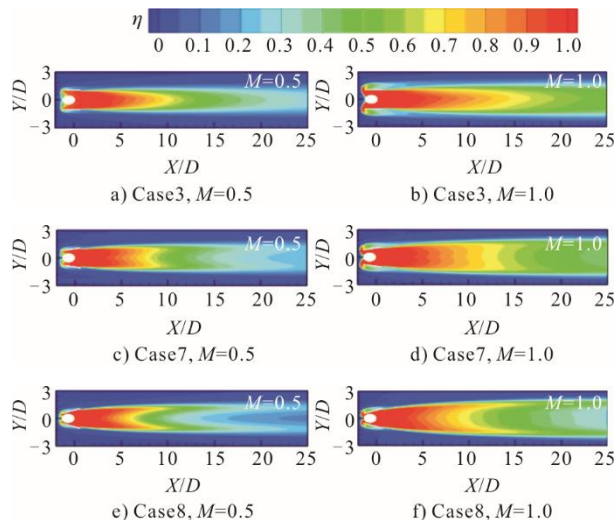


图 27 TVG 不同扩张角下 η 分布
Fig.27 Distributions of cooling efficiency η with different expansion angles of TVG

图 28 为 $M=0.5$ 、 1.0 时，TVG 不同扩张角孔下游 $X/D=5$ 处气膜冷却效率横向分布。由图 28 可见， $M=0.5$ 时，TVG 扩张角的增大对气膜的横向覆盖范围几乎无影响，但气膜有效覆盖宽度 ($\eta \geq 0.2$) 有着微小的增长。此外，在中心线处 ($Y/D=0$) 的 η 随着 TVG 扩张角的增加而降低。 $M=1.0$ 时，TVG 扩张角的增大对气膜有效覆盖宽度 ($\eta \geq 0.2$) 没有产生变化，但气膜的横向覆盖宽度随之变小。这是因为从孔前方泄露的冷流也会影响气膜的横向覆盖宽度，吹风比增大时，泄露流增大，对气膜的横向覆盖宽度的影响增大。

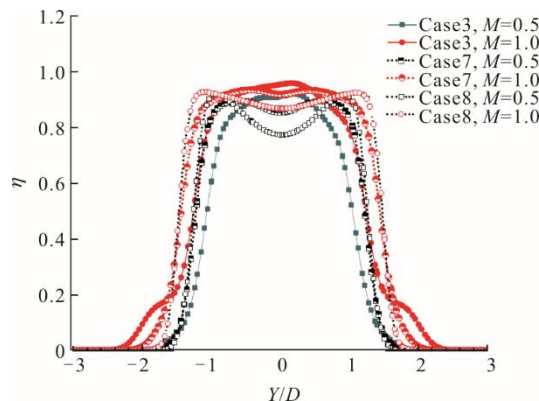


图 28 TVG 不同扩张角下 $X/D=5$ 截面 η 横向分布
Fig.28 Transverse distribution of cooling efficiency in cross-section at $X/D=5$ with different expansion angles of TVG

图 29 展示了 $M=0.5$ 、 1.0 时, TVG 不同扩张角展向平均气膜冷却效率分布。从图 29 可以看出, 在气膜孔出口附近, 由于倾斜角的存在, 导致 TVG 在平板上所围成的面积减小, 气膜覆盖面积随之减小, 所以此处的展向平均 η 随着 TVG 倾斜角的增大而减小。沿着流向往后, 首先 Case7 和 Case8 的展向平均 η 接近且超过了 Case3, 紧接着 Case3 和 Case7 的展向平均 η 逐渐接近, 最后超过了 Case8。主要原因是 Case7 和 Case8 在近场区气膜的横向有效覆盖范围较宽, 使得展向平均 η 超过了 Case3, 而在远场区由于 Case8 在中心线附近出现了无气膜覆盖的区域, 使得 Case8 在远场区展向平均 η 较低。 $M=0.5$ 时, Case8 的展向平均 η 在 $X/D=11$ 后低于了 Case3, $M=1.0$ 时, Case8 的展向平均 η 在 $X/D=17$ 后低于了 Case3。

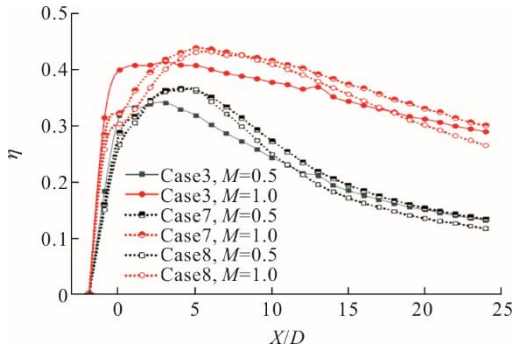


图 29 TVG 不同扩张角下展向平均 η 分布

Fig.29 Distribution of span-wise average efficiency with different expansion angles of TVG

图 30 为 $M=0.5$ 、 1.0 、 1.5 时 TVG 不同扩张角面平均气膜冷却效率分布。由图 30 可以看出, 当 TVG 扩张角由 0° 增加到 7.5° 时, 在吹风比为 0.5 、 1.0 和 1.5 时, 面平均 η 分别升高了约 3.2% 、 2.4% 和 0.6% 。当 TVG 扩张角由 0° 增加到 15° 时, 面平均 η 分别降低了约 4.6% 、 6.0% 和 6.7% 。总的来说, TVG 扩张角对气膜冷却效果的影响较小。随着 TVG 扩张角的增加, 面平均 η 先增加后减小, 在扩张角为 7.5° 时达到最大。

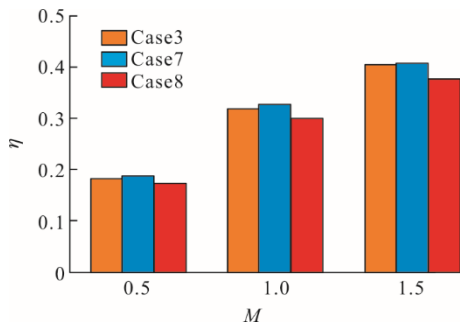


图 30 TVG 不同扩张角下面平均 η 比较

Fig.30 Comparison of surface-average cooling efficiency with different expansion angles of TVG

3 结 论

1) 圆柱气膜孔在高吹风比下冷流穿透性增强, 贴壁性逐渐减弱, η 降低。而装有 TVG 结构的圆柱形气膜孔不仅在低吹风比有着更高的 η , 而且在高吹风比下由于 TVG 对冷流的阻挡作用, 导致冷流无法抬升, 从而形成良好的贴壁效果。在 $M=0.5$ 时, 面平均 η 效果提升了 200% 左右。在 $M=1.0$ 与 $M=1.5$ 时, 面平均 η 则远远高于了圆柱孔。

2) 圆柱形气膜孔在下游产生一对肾形涡。它将主流卷入冷流下方, 导致冷流抬升, 对气膜冷却效果有着一定的负面影响。而装有 TVG 的圆柱气膜孔在下游会产生一对与肾形涡相反的涡系, 该涡系有着压迫冷流抬升防止其脱离壁面的作用。

3) TVG 的宽度由 D 增加到 $2D$, $M=0.5$ 、 1.0 和 1.5 时, 气膜的横向覆盖宽度显著增加, 面平均 η 依次提高了约 23.0% 、 66.7% 和 80.0% 。由 $2D$ 增加到 $3D$ 时, 面平均 η 几乎不变。随着 TVG 高度的增加, 在孔下游逐渐出现一对肾形涡, 其大小随着 TVG 高度的增大而增大, 所以面平均 η 随 TVG 高度的增加而降低。TVG 扩张角对气膜冷却效果的影响较小, 随着 TVG 扩张角的增加, 面平均 η 先增加后减小, 在扩张角为 7.5° 时达到最大。

4) TVG 体积小且易于集成, 可应用于大弯曲涡轮叶片、涡轮外环等部件。未来的 VG 设计将更加精细化, 从而进一步拓展其在燃气轮机热端部件中的应用潜力。

[参 考 文 献]

- [1] IMMARIGEON A, HASSAN I. An advanced impingement/film cooling scheme for gas turbines numerical study[J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2006, 16(4): 470-493.
- [2] LEE K D, KIM K Y. Performance evaluation of a novel film-cooling hole[J]. Journal of Heat Transfer, 2012, 134(10): 101702.
- [3] YANG X, LIU Z, FENG Z. Numerical evaluation of novel shaped holes for enhancing film cooling performance[J]. Journal of Heat Transfer, 2015, 137(7): 071701.
- [4] 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.
- [5] OKITA Y, NISHIURAM. Film effectiveness performance of an arrowhead-shaped film-cooling hole geometry[J]. Journal of Turbomachinery, 2007, 129(2): 331-339.
- [6] 李广超, 付建, 刘永泉, 等. 温比对双向扩张孔射流气膜冷却效率的影响[J]. 热力发电, 2015, 44(4): 50-55. LI Guangchao, FU Jian, LIU Yongquan, et al. Influence of temperature ratio on cooling efficiency of 3-in-1 hole injection film[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(4): 50-55.

- [7] 肖坤, 何娟, 刘钊, 等. 交叉扭转椭圆气膜孔冷却机理研究[J]. 工程热物理学报, 2020, 41(11): 2719-2725.
XIAO Kun, HE Juan, LIU Zhao, et al. Study on the cooling mechanism of cross-torsion elliptical film hole[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(11): 2719-2725.
- [8] SCHROEDER R P, THOLE K A. Adiabatic effectiveness measurements for a baseline shaped film cooling hole[J]. Journal of Turbomachinery, 2022, 144(12): 121003.
- [9] 张博伦, 张丽, 朱惠人, 等. 利用双波纹凹槽改善气膜冷却效率的数值研究[J]. 工程热物理学报, 2019, 40(8): 1894-1903.
ZHANG Bolun, ZHANG Li, ZHU Huiren, et al. Numerical study on improving film cooling effectiveness with double-wave trench[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40(8): 1894-1903.
- [10] 林一帆. 开槽气膜孔结构对气膜冷却性能的影响研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2022: 1.
LIN Yifan. Effect of slotted gas film pore structure on film cooling performance[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2022: 1.
- [11] ZHANG B L, ZHU H R, LIU C L, et al. Experimental study on the film-cooling characteristics of the cylindrical holes embedded in sine-wave shaped trench[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2020, 142(10): 101003.
- [12] BOUALEM K, BORDJANE M, BOURDIM M, et al. Numerical investigation of V-shaped trench on film cooling performance[J]. Thermophysics and Aero-mechanics, 2023, 30(2): 305-315.
- [13] SONG L, ZHANG C, SONG Y, et al. Experimental investigations on the effects of inclination angle and blowing ratio on the flat-plate film cooling enhancement using the vortex generator downstream[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 119: 573-584.
- [14] ZHANG C, WANG J, LUO X, et al. Experimentally measured effects of height and location of the vortex generator on flow and heat transfer characteristics of the flat-plate film cooling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 141: 995-1008.
- [15] SARKAR S, RANAKOTI G. Effect of vortex generators on film cooling effectiveness[J]. Journal of Turbomachinery, 2017, 139(6): 061009.
- [16] KRSS B, PFITZNER M. Numerical and experimental investigation of the film cooling effectiveness and temperature fields behind a novel trench configuration at high blowing ratio[C]. Turbine Technical Conference and Exposition, 2012.
- [17] SONG L M, ZHANG C, SONG Y J, et al. Experimental investigations on the effects of inclination angle and blowing ratio on the flat-plate film cooling enhancement using the vortex generator downstream[J]. Applied Thermal Engineering: Design, Processes, Equipment, Economics, 2017, 119: 573-584.
- [18] DENG H F, TENG J F, ZHU M M, et al. Overall cooling performance evaluation for film cooling with different winglet pairs vortex generators[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 201: 117731.
- [19] HALDER N. Numerical inspection of location, density ratio, and turbulent kinetic energy of vortex generator in gas turbine blade film cooling application[J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2024, 16(5): 051002.
- [20] STRAUB D, WEBER J, ROY A, et al. Effects of downstream vortex generators on film cooling a flat plate fed by crossflow[J]. Journal of Turbomachinery, 2024, 146(5): 051011.
- [21] HE J, DENG Q H, FENG Z P. Film cooling performance enhancement by upstream V-shaped protrusion/dimple vortex generator[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 180: 121784.
- [22] YU J, WANG Z, CHEN F, et al. Large eddy simulation of the elliptic jets in film cooling controlled by dielectric barrier discharge plasma actuators with an improved model[J]. Journal of Heat Transfer, 2018, 140(12): 122001.
- [23] TEPE A Ü. Enhancement of film cooling effectiveness using upstream vortex generator[J]. Heat and Mass Transfer, 2021, 57(11): 1815-1828.
- [24] LEE C, SHIH T I, STRAUB D, et al. Computational and experimental study of film-cooling effectiveness with and without downstream vortex generators[J]. Journal of Turbomachinery, 2023, 145(2): 021007.
- [25] LIU C L, YE L, ZHU H R, et al. Investigation on the effects of rib orientation angle on the film cooling with ribbed cross-flow coolant channel[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 115: 379-394.

(责任编辑 杜亚勤)