

吹风比对平板气膜冷却效率影响的数值模拟

陈伟^{1,2}, 董若凌¹, 施红辉¹, 王春娟¹, 张晓东¹

1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018
2. 杭州职业技术学院金都管理学院, 杭州 310018

摘要 为了揭示吹风比 M 对气膜冷却效果的影响规律, 在 $M=0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ 工况下对平板气膜冷却圆柱孔模型和扩散孔模型进行了流动和传热的数值模拟对比研究。计算时基于控制容积法对三维定常不可压缩 N-S 方程进行离散, 采用 SIMPLEC 算法, 湍流模型选取可实现 $k-\varepsilon$ 模型, 壁面函数采用增强壁面函数, 分析比较了壁面温度分布、速度矢量和气膜冷却效率。结果表明, 随吹风比增大, 射流容易脱离壁面。在孔口附近区域, 对圆孔而言吹风比对冷却效率的影响不明显, 而对扩散孔冷却效率随吹风比增加而提高。在射流向下游发展过程中, 就扩散孔而言较大的吹风比使得射流沿流向的覆盖区域增大; 就圆孔而言较大的吹风比射流出现了回流, 近下游位置处的冷却效率提高而远下游处的冷却效率降低。由此可见, 针对不同的孔型, 冷却效率随吹风比的变化规律不尽相同, 圆孔的冷却效率不随吹风比单调变化, 扩散孔的冷却效率随吹风比的增加而提高。

关键词 吹风比; 平板; 气膜冷却; 数值模拟

中图分类号 V233.5

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.34.007

Numerical Simulation of Film Cooling Efficiency at Different Blow Ratios

CHEN Wei^{1,2}, DONG Ruoling¹, SHI Honghui¹, WANG Chunjuan¹, ZHANG Xiaodong¹

1. College of Machinery and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China
2. Jindu Management Institute, Hangzhou Vocational Technical College, Hangzhou 310018, China

Abstract Numerical simulations were carried out to verify the influence of blow ratios on the film cooling effectiveness. With the blow ratio M taking values of 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, numerical simulations were carried out on the fluid flows and heat transfers in a cylindrical hole and a fan-shaped hole. By using the realizable $k-\varepsilon$ turbulence model with an enhanced wall function, based on the bulk flow control, the three-dimensional steady incompressible N-S equations and the method of SIMPLEC, the mean flow velocity at the exit of the hole and the temperature of the cooled wall were calculated to analyze the film cooling effectiveness. Different blowing ratios were compared on the influence of the film cooling effectiveness. The results indicate that when the blow ratio increases, the jet tends to lift off the wall. Within the scope of this study, in the near field of the hole, for the cylindrical hole, the blow ratio has no obvious effect on the film cooling effectiveness, however, for the fan-shaped hole, the film cooling effectiveness increases with the blow ratio. As the jet goes downstream of the flow direction, for the fan-shaped hole, the jet coverage area increases while for the cylindrical hole, a back-flow is found and the film cooling effectiveness is enhanced around the near downstream field but decreased in the far downstream field. Thus the cooling effectiveness does not change monotonously with the blowing ratio for the cylindrical hole, but for the fan-shaped hole, the film cooling effectiveness increases with the blow ratio.

Keywords blowing ratios; flat plate; film cooling; numerical simulation

收稿日期: 2011-11-15; 修回日期: 2011-11-30

基金项目: 浙江省自然科学基金项目 (Y1090869)

作者简介: 陈伟, 讲师, 研究方向为燃气轮机气膜冷却技术, 电子信箱: chenweihz@yeah.net; 董若凌 (通信作者), 副教授, 研究方向为燃气轮机气膜冷却技术, 电子信箱: dongruoling@zstu.edu.cn

0 引言

气膜冷却是燃气轮机高温部件上广泛采用的有效冷却保护技术,准确预估气膜冷却效果对涡轮叶片的设计起至关重要的作用^[1]。气膜冷却效果受多种流场几何结构和流动因素的影响,其中吹风比是一个重要因素。刘江涛等^[2]对圆柱和圆锥扩散形孔在多种吹风比下的斜孔气膜冷却进行了数值模拟分析,研究了复合角、孔型和吹风比对流场及气膜冷却效果的影响。雷云涛等^[3]采用 FNM 形式的蝶形结构化网格对不同吹风比 ($M=0.75, 1.0, 1.5$) 条件下的流场进行了数值模拟。结果表明,随着吹风比的不断增大,由于卷吸作用的增强,射流大部分脱离壁面与主流进行掺混,使得气膜冷却效率不断降低。马丽等^[4]研究了不同吹风比条件下,不同长宽比的矩形垂直射流孔附近区域的流场特性。结果表明,随着吹风比的增大,流场中肾型涡和马蹄涡的强度和尺度都增大。何建伟^[5]研究了气膜冷却的冷却效果随吹风比的变化规律,指出每种孔型都有其最优吹风比。本文以圆柱孔和扩散孔两种孔型进行流动和传热的数值模拟,分析壁面温度、速度矢量和气膜冷却效率等。

1 物理模型与数值计算方法

1.1 几何模型

模型以 Pietrzyk 等^[6]和 Sinha 等^[7]的实验为参考,系统如图 1 所示,其圆孔孔径 $D=10\text{mm}$,测试平板长 $50D$,前缘距孔口前缘 $19D$,各孔间距 $3D$,长径比为 3.5。Walters^[8]利用该系统对若干孔型在不同复合角和流向角条件下的气膜冷却特性进行了研究。本文相同的实验条件下对圆孔和扩散孔受吹风比影响的冷却流场、效果特性进行分析,具体结构如图 2 所示。为简化计算,仅考虑单一角度射流,流向角控制为 35° ,扩散孔扩散角取 15° ,吹风比选取 $M=0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ 4 种工况。基

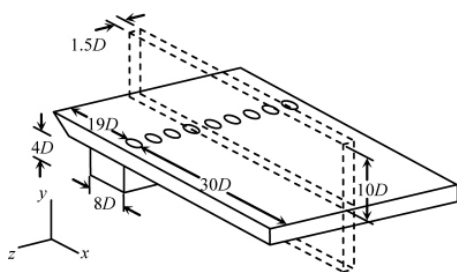


图 1 计算域模型尺寸示意图
Fig. 1 Geometry of the computation model

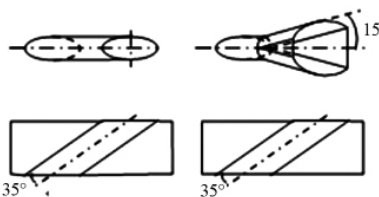


图 2 不同孔型示意图
Fig. 2 Configurations of two test film-cooling holes used in this study

于各射流孔流场和温度场的相似性和对称性,模拟区域宽度限为 $1.5D$ 。为避免进口效应,对射流的模拟扩展至其上游集气室入口,该部件长 $8D$,高 $4D$,铅垂向 (y 方向) 进气。

1.2 湍流模型

分别利用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型 (std),重整化群 $k-\epsilon$ 湍流模型 (mg) 和可实现 $k-\epsilon$ 湍流模型 (real) 对 $M=0.5$ 条件下的实验平板进行气膜有效度的数值模型,结果如图 3 所示。可见,可实现 $k-\epsilon$ 湍流模型的模拟结果更接近实验值 (exp)。考虑到 Walters^[8]和刘存良等^[9]的数值计算也证实了可实现 $k-\epsilon$ 湍流模型对冷却度和气动损失的模拟均较精准,本文的湍流模拟也选择该模型。计算域网格采用非结构网格,以有效预测射流孔中心线气膜有效度衰减状况。气、固边界用标准壁面函数处理,壁面起第 1 层网格的 y^* (黏性底层与对数律层的分界点) 控制为 11.225。计算利用分离隐式求解器,二阶上风差格式离散方程,压力速度耦合采用 SIMPLE 算法。

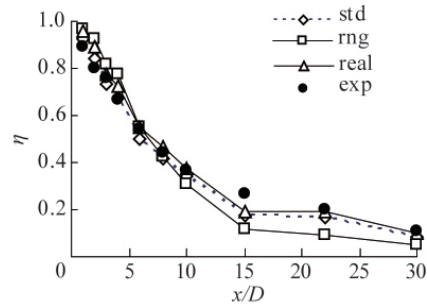


图 3 3 种湍流模型气膜有效度计算与实验结果的比较
Fig. 3 Comparison between numerical results and experiment data

1.3 网格划分和边界条件

计算域采用非结构化混合网格,其中主流通道为六面体网格,射流通道为四面体网格。在主流与射流的混合区进行了网格加密,近壁面第 1 个网格单元中心的近壁面距离满足壁面函数律的条件。

冷却气流和主流为相同密度的空气,设为不可压缩气体。定义吹风比 M 为射流与主流的质量流量比

$$M = \rho_j U_j / (\rho_\infty U_\infty)$$

其中, ρ_j, ρ_∞ 和 U_j, U_∞ 分别为主流与射流工质的密度和速度。主流速度保持在 17m/s 不变,射流速度随吹风比 M 的不同而相应改变。计算时主流和射流入口温度分别设置为 583K 和 295K ,主流湍流强度为 4.1% ,湍流长度尺寸为 46mm ;射流处湍流强度为 4.6% ,湍流长度尺寸为 37.5mm 。定义主流出口为压力出口边界条件,基于对称性主流和射流相应位置边界为对称边界条件,其余面为无滑移绝热壁面边界条件。

2 结果与讨论

2.1 壁面温度分布

图 4 给出了圆孔在 4 种吹风比下壁面上的温度分布。当 $M=0.5$ 时,孔口附近到下游 $x/D > 10$ 范围内的冷却效果比较

好,射流的附壁性很好,但是冷却气膜的覆盖范围比较小。当 $M=1.0$ 时,与 $M=0.5$ 的情况对比可知,冷却气膜的覆盖面积更广,但是在计算域内温度分布有所升高;与 $M=1.5$ 的情况对比可知,射流抬升的高度较小,附壁效果较好。当 $M=1.5$ 时,壁面的冷却效果差,孔口下游附近无冷却气膜,由于射流在孔口附近的抬升和下游的再附着,在远离孔口下游 $x/D=20$ 处开始形成微弱的冷却气膜。当 $M=2.0$ 时,在射流远下游区域 $20 < x/D < 30$ 范围内冷却效率有上升的趋势。这是由于射流在

向下游运动的过程中动量逐渐减小,在主流的作用下重新贴近壁面。在4种吹风比工况下,圆孔射流的脱附和再附着也有显示,低吹风比的冷却效果好于高吹风比工况。

图5显示了扩散孔在4种吹风比下壁面上的温度分布。由于扩散孔出口面积大、速度低,有利于气膜展开,得到了优于圆孔的冷却效果。从图5可看出,扩散孔的冷却范围随吹风比的增加有所增加,在计算域内较大的吹风比有较好的冷却表现。

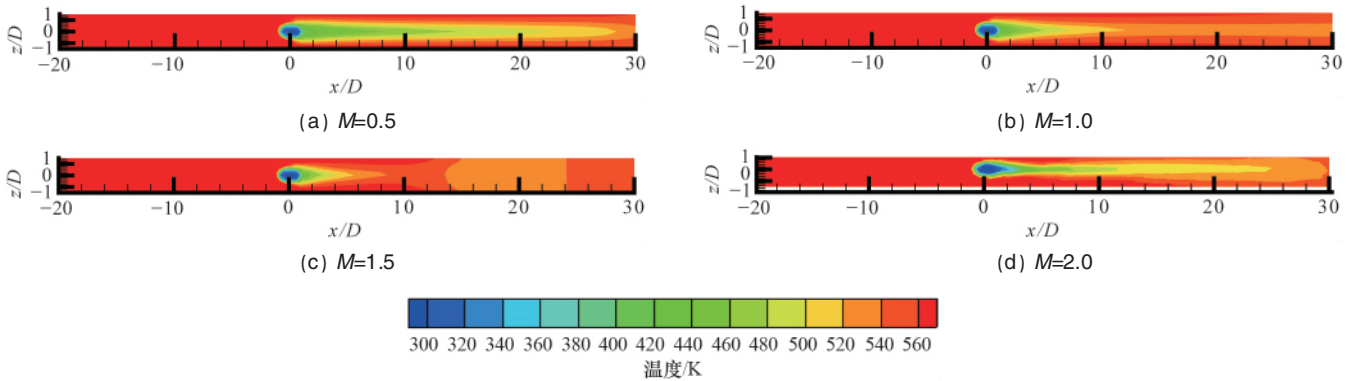


图4 气膜冷却壁面温度随吹风比变化云图(圆孔)

Fig. 4 Temperature magnitude contours versus blow ratio along the adiabatic wall for cylindrical hole

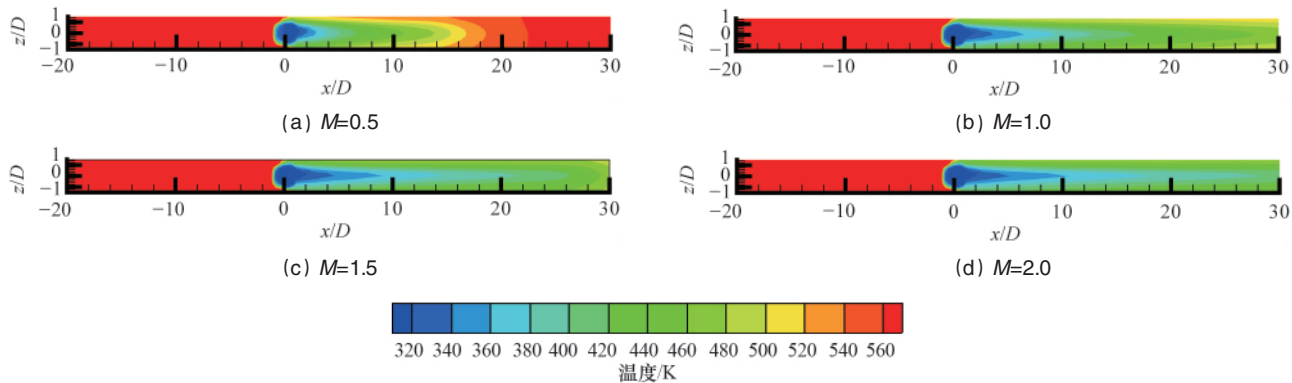


图5 气膜冷却壁面温度随吹风比变化云图(扩散孔)

Fig. 5 Temperature magnitude contours versus blow ratio along the adiabatic wall for fan-shaped hole

2.2 速度矢量分析

以扩散孔和圆孔为例,比较了吹风比 $M=0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ 的工况下,吹风比对冷却效果的影响。图6、图7给出了圆孔、扩散孔在平面 $x/D=5.0$ 处的速度矢量分布。

如图6所示,圆孔 $M=0.5$ 时,涡位于紧贴壁面位置处;随着吹风比增加,当 $M=1.0$ 和 $M=1.5$ 时,涡逐渐成长,在相同的截面位置处涡对在 z 方向和 y 方向的尺寸都增大,涡结构越来越明显,涡对的强度逐渐增大; $M=2$ 时,形成了较为明显的方向肾型涡对。随着吹风比增大,冷却气流射出射流孔之后不能很好地附壁,而是迅速脱离壁面与主流混合,其相应的冷却效果就会变差。

如图7所示,相同工况下扩散孔涡的形状不如圆孔下明显,在相同吹风比下,扩散孔涡结构的尺寸较大。扩散孔与圆孔的冷却效果随吹风比的变化趋势相同:随吹风比增大,涡

的尺寸逐渐增大,但扩散孔的涡尺寸增加较不明显。

由此可见,在相同孔型时随着吹风比的不断增大,射流对对流的卷吸作用逐渐增强,肾型涡对不断增大,使得射流流体多数脱离壁面而与主流进行掺混,气膜冷却效果减弱。对比扩散孔和圆孔两种孔型,扩散孔有减弱肾型涡的作用,使射流更贴近于壁面,有利于气膜冷却效果的提高。

2.3 气膜冷却效率分析

定义气膜效率 $\eta = \frac{T_g - T_{aw}}{T_g - T_c}$, 其中, η 为气膜有效度; T_g 为主流温度; T_{aw} 为绝热壁面温度; T_c 为冷却射流温度。实际上 η 反映了气膜冷却保护的有效性,其值的大小和分布是衡量气膜冷却方案优劣的重要尺度。壁面各点的冷却效率如图8、图9所示。计算是针对冷却孔中心线进行的。

在射流孔孔口周围区域,吹风比对冷却效率的影响不明

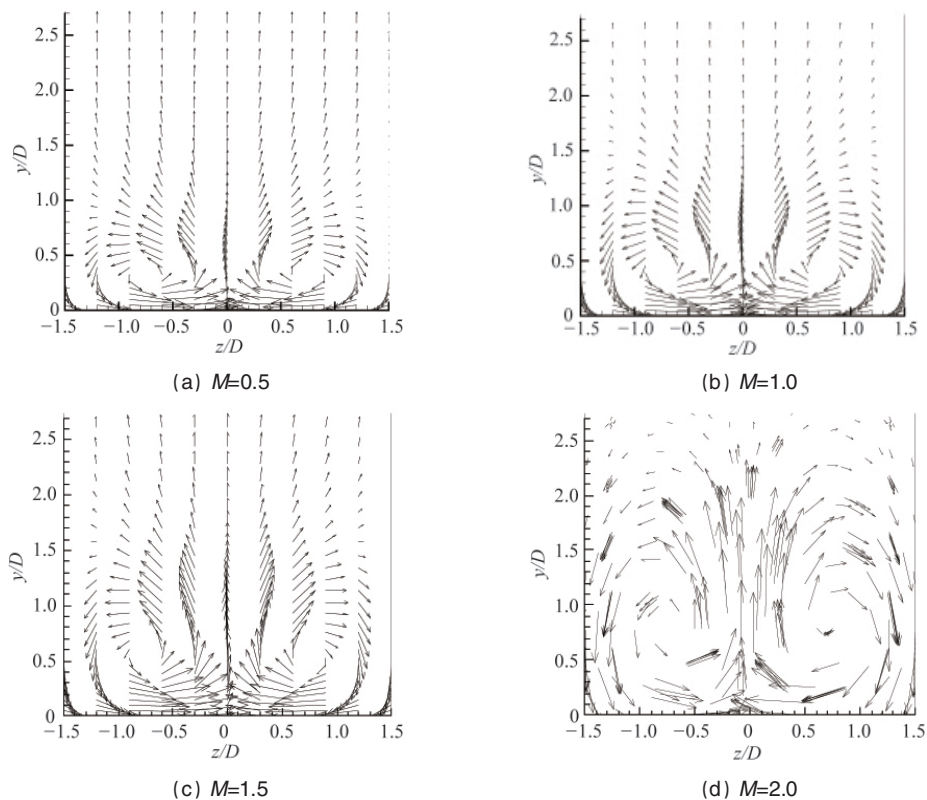


图 6 圆孔展向平面 $x/D=5$ 上速度矢量分布

Fig. 6 Velocity vectors versus blow ratio along the cross-sections ($x/D=5$) in the downstream direction for cylindrical hole

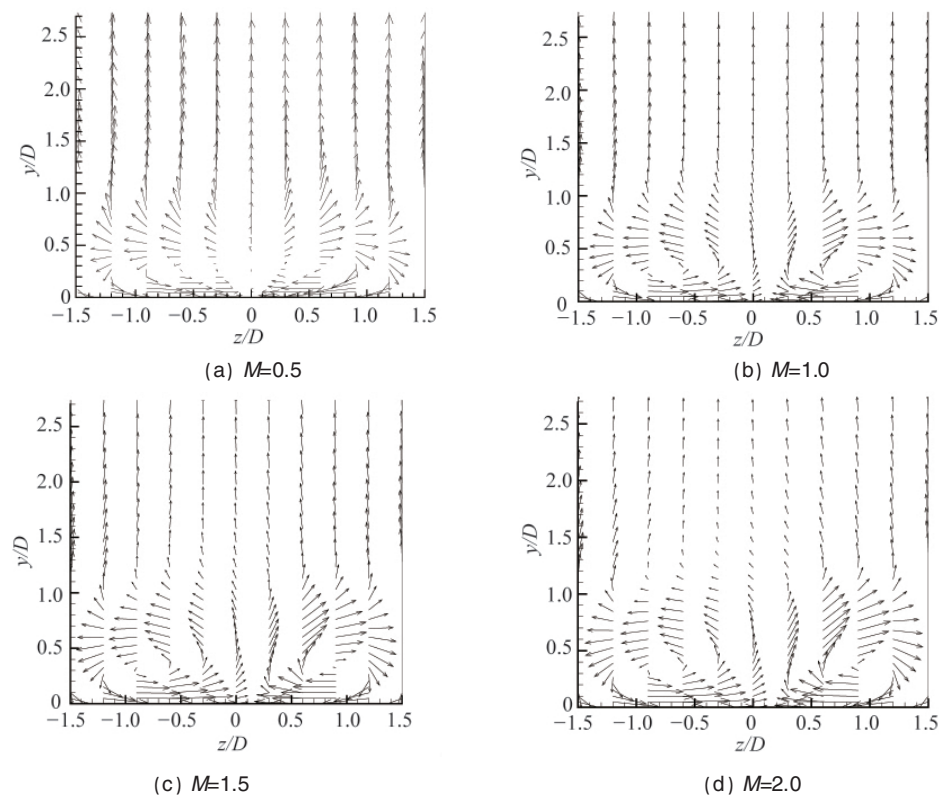


图 7 扩散孔展向平面 $x/D=5$ 上速度矢量分布

Fig. 7 Velocity vectors versus blow ratio along the cross-sections ($x/D=5$) in the downstream direction for fan-shaped hole

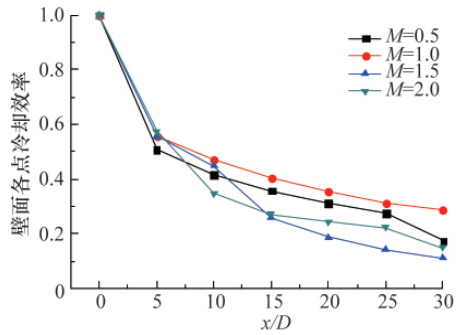


图 8 圆孔壁面各点在不同吹风比下的气膜冷却效率曲线

Fig. 8 Cooling effectiveness versus blow ratio along the adiabatic wall for cylindrical hole

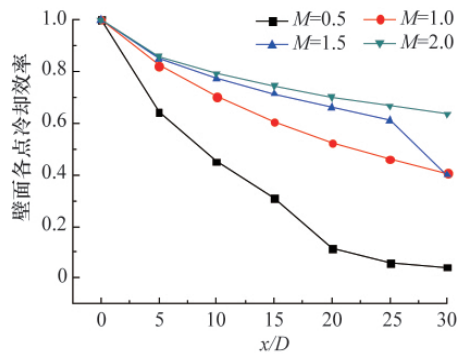


图 9 扩散孔壁面各点在不同吹风比下的气膜冷却效率曲线

Fig. 9 Cooling effectiveness versus blow ratio along the adiabatic wall for fan-shaped hole

显;随着射流向下游发展到下游附近的区域,大吹风比的冷气射流脱离壁面,冷却效率低于小吹风比。这主要是由于随着吹风比的增大,射流的初始动量增加,射流垂直方向的动量分量使得冷却射流穿透主流,对主流影响区域增加,增加了能量损失;另外,射流内部的反向涡旋和射流孔下游背风侧的尾迹涡对主流形成较强的卷吸作用,使得射流脱离壁面流动,主流进入射流下部空间,贴附于壁面的冷却气流减少,导致冷却效果减弱。

由于平板布置有数量较多的气膜冷却孔,在进行气膜冷却效率比较的时候尤其要关注气膜冷却孔口周围和近下游区域(x/D 为0—30附近区域)。从图8可以看出,对于圆柱孔,在喷孔下游 $x/D=5$ 的区域内,即使吹风比不同,冷却效率也差别不大;而在 $x/D>5$ 的孔下游附近区域吹风比为0.5和1.0工况下的冷却效率高于吹风比为1.5和2.0工况的。从图9可知,对于扩散孔,吹风比在计算域内表现出了对冷却效率比较一致的影响规律,即吹风比增大,冷却效率提高。但在吹风比由0.5增加到1.0时,冷却效率提高明显,继续增加吹风比到1.5和2.0时,冷却效率之间的差别减小。这也是由于射流在向下发展的过程中,大吹风比下射流容易脱离壁面。从第2.1节壁面温度分布图分析得知,扩散孔冷却范围随吹风比的增加有所增加,在到达影响范围尽头之后,有可能出现与圆孔相同的变化趋势:即大吹风比所引起的射流抬升于

壁面,冷却效率低于小吹风比。因此可得出结论:冷却效率不随吹风比的变化而单调变化;在射流孔口周围区域吹风比对冷却效率的影响不明显;较大吹风比使得冷却气膜纵向覆盖区域增大,但孔口附近射流抬升。

3 结论

本文采用非结构化计算网格,基于控制容积法对三维定常不可压缩N-S方程进行离散,湍流模型采用可实现 $k-\varepsilon$ 湍流模型,壁面函数采用增强型壁面函数SIMPLEC算法,对4种工况下平板气膜冷却进行了数值模拟分析。结果表明,冷却射流形成的反向肾型涡对气膜冷却效果影响明显,随着吹风比的不断增大,由于卷吸作用的增强,肾型涡对不断增大,使得射流大部分脱离壁面与主流进行掺混。而冷却效率不随吹风比的变化而单调变化;较小吹风比使得孔口附近的冷却效果比较好;较大吹风比使得冷却气膜纵向覆盖区域增大,但孔口附近射流抬升。

参考文献 (References)

- [1] 韩介勤, 杜达, 艾卡德. 燃气轮机传热和冷却技术[M]. 程代京, 谢永慧, 译. 西安: 西安交通大学出版社, 2005.
Han J C, Sandip D, Srinath V E. Gas turbine heat transfer and cooling technology [M]. Cheng Daijing, Xie Yonghui, tran. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2005.
- [2] 刘江涛, 吴海玲, 陶涛, 等. 斜孔气膜冷却数值模拟分析 [J]. 工程热物理学报, 2004, 25(6): 1034-1036.
Liu Jiangtao, Wu Hailing, Tao Tao, et al. Journal of Engineering Thermo Physics, 2004, 25(6): 1034-1036.
- [3] 雷云涛, 林智荣, 袁新. 不同吹风比下平板气膜冷却数值模拟[J]. 清华大学学报, 2008, 48(8): 1331-1334.
Lei Yuntao, Lin Zhirong, Yuan Xin. Journal of Tsinghua University, 2008, 48(8): 1331-1334.
- [4] 马丽. 不同形状气膜冷却孔附近定常和非定常流动的数值模拟[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
Ma Li. Numerical simulation of steady and unsteady flows near film cooling holes with different shapes [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2008.
- [5] 何建伟. 燃气轮机叶片气膜冷却流场的数值模拟 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2009.
He Jianwei. Numerical simulation of the filming cooling fluid field of gas turbine blades[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2009.
- [6] Pietrzyk J R, Bogard D G, Crawford M E. Effects of density ration on the hydrodynamics of film cooling [J]. Journal of Turbomachinery, 1990, 112(3): 437-443.
- [7] 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.
- [8] Walters D K. Impact of film-cooling jets on turbine aerodynamic losses [J]. Journal of Turbomachinery, 2000, 122(3): 537-545.
- [9] 刘存良, 朱惠人, 白江涛. 收缩-扩张形气膜孔提高气膜冷却效率的机理研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(4): 598-604.
Liu Cunliang, Zhu Huiren, Bai Jiangtao. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(4): 598-604.

(责任编辑 安莹, 刘志远)