

# 不同孔型平板气膜冷却特性的数值模拟

王春娟<sup>1</sup>, 董若凌<sup>1</sup>, 施红辉<sup>1</sup>, 陈伟<sup>1,2</sup>, 张晓东<sup>1</sup>

(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, 杭州 310018)

**摘要:** 为研究不同射流孔型对气膜冷却效率的影响,基于 SIMPLEC 算法,采用 RNG  $k-\epsilon$  湍流模型,对射流倾角为  $35^\circ$  的圆柱孔、扩散孔和横向扩散孔的平板气膜冷却模型进行了数值模拟。得到了不同吹风比  $M$  下的 3 种孔型的绝热气膜冷却效率曲线、速度矢量图和壁面温度分布。结果表明:横向扩散孔的气膜冷却效果优于圆柱孔和扩散孔,其产生的反向涡旋对的尺度最小,孔间的气膜冷却效果也较好。

**关键词:** 气膜冷却; 孔型; 平板; 数值模拟

**中图分类号:** TK472 **文献标识码:** A

## 0 引言

航空燃气涡轮发动机的推力和热效率随涡轮前温度的提高而提高。为保证涡轮叶片在高温燃气环境下安全可靠地工作,必须对叶片采取冷却和热防护措施。气膜冷却是一种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着至关重要的作用<sup>[1]</sup>。气膜冷却效果受多种流场几何结构和流动因素的影响。

国内外许多研究者对气膜冷却做了大量研究。戴萍等<sup>[2]</sup>数值研究了圆柱孔、前向扩张孔和缩放槽缝孔在不同吹风比下对孔下游气膜冷却效率的影响,结果表明前向扩张孔和缩放槽缝孔不同程度地抑制了反向涡旋对的形成,增强了对壁面的冷却效果。Gritsch M 等<sup>[3]</sup>对圆孔、扇形孔和后倾扇形孔进行了研究,比较了它们的气膜有效度。李少华等<sup>[4]</sup>分析对比了圆孔、圆锥孔和簸箕孔 3 种孔型的流动、传热特性和壁面冷却效率。刘存良等<sup>[5]</sup>对收缩—扩张型气膜孔提高气膜冷却效率的机理进行了数值研究。陆犇等<sup>[6]</sup>对无肋和带  $45^\circ$  肋的气膜冷却平板通道的三维对流换热和传热问题进行了数值模

拟,结果表明带肋冷却平板较无肋时的表面平均温度低,且肋的存在对增大冷空气出流比有利。

本文选取了工程实际中常见的两种吹风比  $M=0.5$  和  $M=1.5$ ,对圆柱孔、扩散孔和横向扩散孔的气膜冷却特性进行了数值研究,对比分析了 3 种孔型的绝热气膜冷却效率和速度矢量分布。

## 1 研究模型与数值计算方法

采用的 3 种孔型的孔型结构如图 1,坐标原点取在冷却平板表面中间射流孔的中心上, $X$  轴沿主流方向, $Y$  轴垂直向上, $Z$  轴为展向方向。其中图 1(a)为简单圆柱孔;图 1(b)为扩散孔,在距离出口中心处  $2.0D$  的位置,孔型以  $10^\circ$  角度向四周扩展;图 1(c)为横向扩散孔,只在展向  $Z$  方向尺寸扩大,在平板冷表面上的横截面积是圆柱孔径面积的 3.18 倍,冷却孔倾斜角为  $35^\circ$ 。几何模型采用平板气膜冷却模型,主流通道为(长宽高)  $1\,400\text{ mm} \times 759\text{ mm} \times 500\text{ mm}$  的长方体;射流通道为 5 个孔,孔径均为  $D(D=10\text{ mm})$ ,长度均为  $4.36D$ ,射流平板如图 2。

计算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。边界条件包

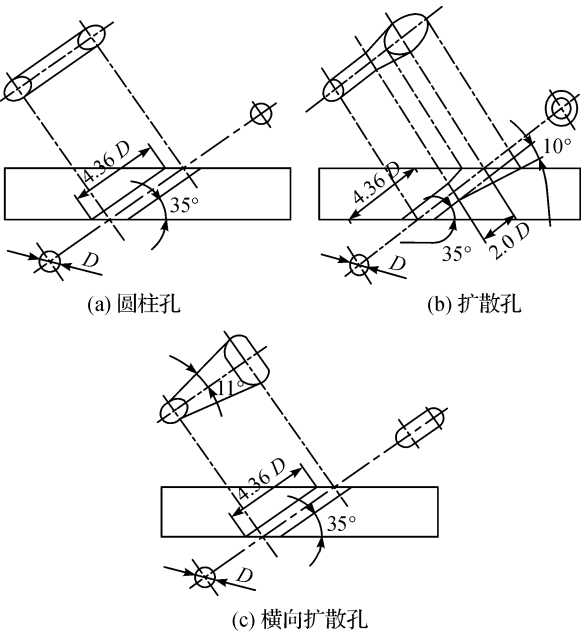


图1 3种孔型示意

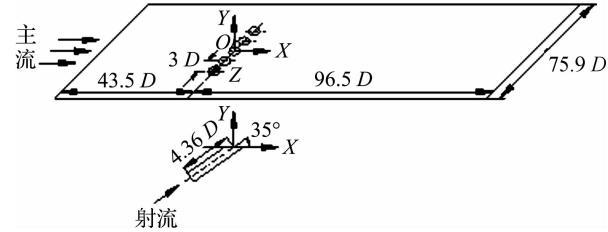


图2 射流平板示意

括入口速度边界、压力出口边界和壁面边界等。主流和射流入口均为通道内充分发展的湍流速度分布,所有物理量的法向梯度为0。

定义吹风比为射流与主流的质量流量比

$$M=\rho_j U_j/\rho_\infty U_\infty \tag{1}$$

式中: $\rho_j$ 、 $\rho_\infty$ 分别为射流工质、主流工质的密度; $U_j$ 、 $U_\infty$ 分别为射流、主流的入口速度。

射流和主流为相同密度的空气,设为不可压缩气体。主流速度保持在17 m/s不变,射流速度随吹风比 $M$ 的不同而相应改变。主流和射流入口温度分别设置为473 K和295 K。根据文献[7],设置主流湍流强度为3.4%,射流处湍流强度为4.7%。定义主流通道出口压力为101 325 Pa,其余面为无滑移绝热壁面。边界采用标准壁面函数处理。

基于Fluent软件平台,湍流模型采用RNG  $\kappa-\epsilon$ 模型,分离隐式求解三维稳态Navier-Stokes方程,压力—速度耦合采用SIMPLEC算法,控制方程的离散采用有限体积法,控制容积界面的各物理量应用二阶迎风差分格式获得,计算过程中,根据实际需要调整松弛因子等参数以加快收敛速度,解收敛的

判断标准为:能量的残差小于 $10^{-6}$ ,其余各量的残差小于 $10^{-3}$ 。

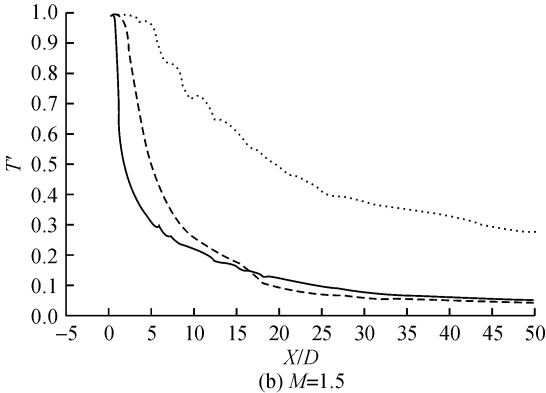
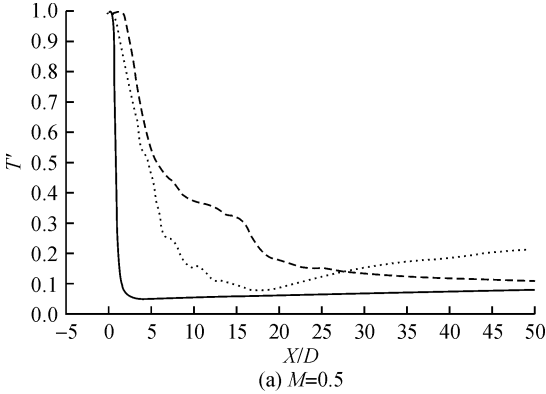
## 2 计算结果及分析

### 2.1 绝热气膜冷却效率的分析

绝热气膜冷却效率是衡量气膜冷却效果的重要参数之一[8],该量为一个无量纲温度。定义绝热气膜冷却效率为

$$T'=(T_m-T_{aw})/(T_m-T_j) \tag{2}$$

式中: $T_{aw}$ 为冷却壁面上的绝热壁温; $T_m$ 为主流入口平均温度; $T_j$ 为射流入口平均温度。图3为3种孔型在吹风比为 $M=0.5$ 和 $M=1.5$ 时的冷却效率曲线。



—— 圆柱孔, - - - - 扩散孔, ..... 横向扩散孔

图3 不同吹风比下3种孔型底面中心线的绝热气膜冷却效率曲线

从图3可以看出, $M=0.5$ 时,孔口到下游 $X/D=27$ 处,扩散孔的冷却效率优于圆柱孔和横向扩散孔,在远下游区域,其冷却效率又低于横向扩散孔,之后冷却曲线趋于平缓;而圆柱孔在孔口附近区域,冷却效率迅速降至6%,在 $X/D>5$ 的下游区域逐渐趋于稳定;横向扩散孔的冷却效率在 $X/D=17$ 处达到最小值8%,之后又有所增加,在到达下游 $X/D=50$ 处冷却效率趋于20%; $M=1.5$ 时,横向扩散孔的冷却效率明显高于圆柱孔和扩散孔。随着

$X/D$  增大,3 种孔型的冷却效率均减小,但横向扩散孔冷却效率曲线变化比较平缓。圆柱孔和扩散孔的冷却效率曲线走势基本相同,在  $X/D<15$  的上游区域,扩散孔的冷却效率高于圆柱孔,而在  $X/D>15$  远下游区域,其冷却效率略小于圆柱孔。总体来说,两种吹风比条件下,扩散孔和横向扩散孔的气

膜冷却效率都优于圆柱孔。向下游发展,气膜冷却效率迅速减小,最后趋于平稳,这种变化趋势反映了射流与主流的不断掺混作用。

2.2 速度矢量分析

两种吹风比条件下 3 种孔型在展向平面  $X/D=2.0$  处的速度矢量分布见图 4~图 6。

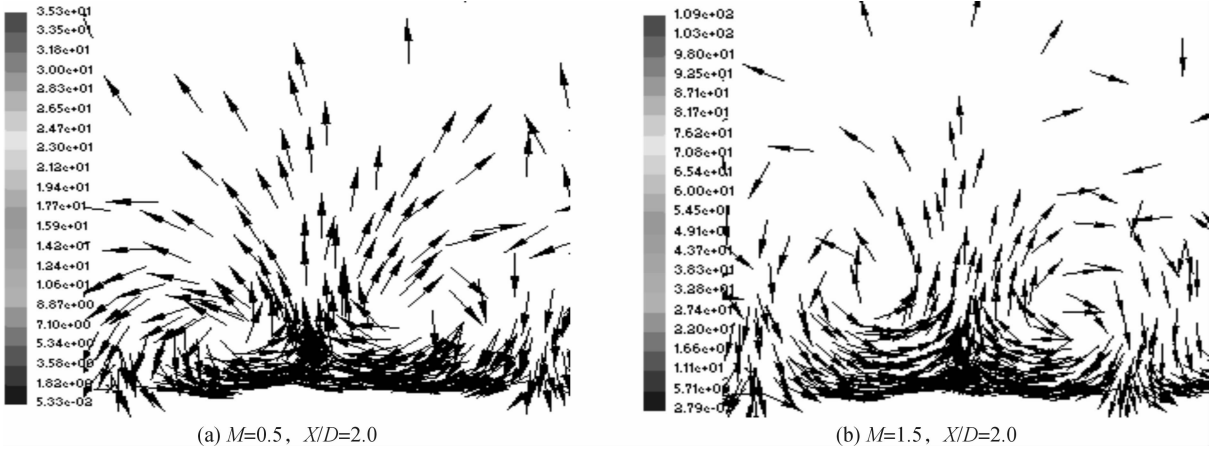


图 4 圆柱孔展向平面上速度矢量分布

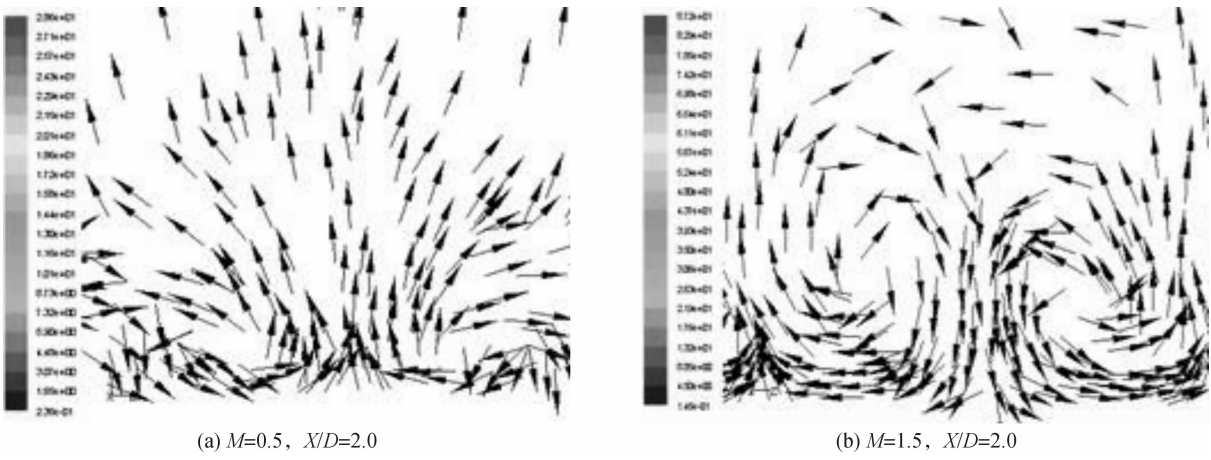


图 5 扩散孔展向平面上速度矢量分布

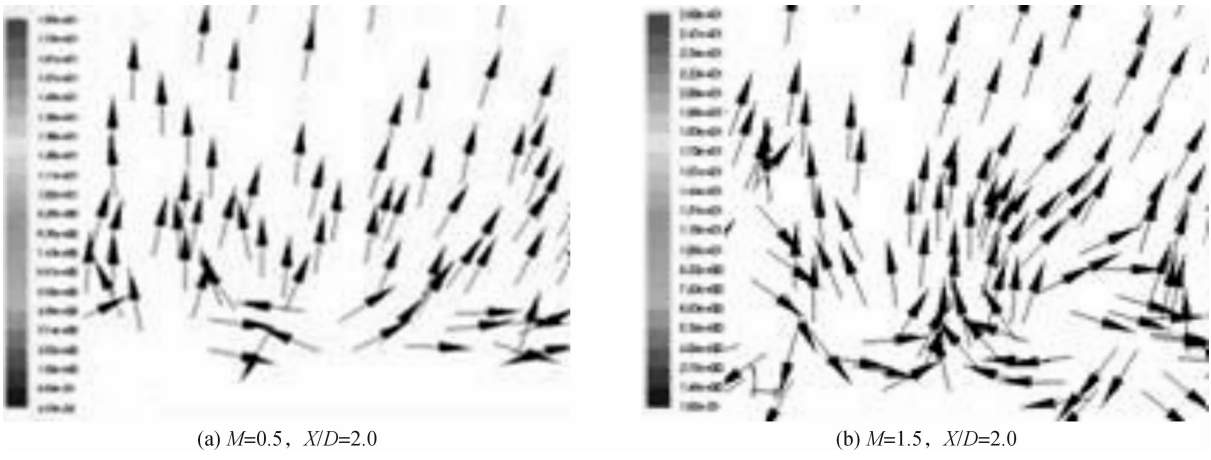


图 6 横向扩散孔展向平面上速度矢量分布

主流与射流的速度差产生切向应力,形成较强的反向涡旋对。3 种孔型在  $M=1.5$  时反向涡旋对的强度和尺度较大,反向涡旋对上升,射流被抬升;在相同吹风比下,圆柱孔的反向漩涡对中心距离壁面较近,强度较强,扩散孔次之,横向扩散孔的涡强度最弱,尺度最小。

2.3 壁面温度分布

3 种孔型平板在吹风比  $M=0.5$  和  $M=1.5$  时冷却壁面温度分布见图 7。

由图 7(a)~图 7(f)可知,当  $M=0.5$  时,由于吹风比较小,射流动量小于主流动量,受主流影响,射流很容易贴附于壁面,3 种孔型均形成良好的冷却保护作用。横向扩散孔的孔出口由于展向扩展幅度最大,孔间冷却效果明显优于圆柱孔和扩散孔,但在较远的下游处,冷却气膜沿主流方向的尺寸减小;圆柱孔在孔口附近冷却效率较高,但在更远的下游区,由于主流支配了整个流场的流动,射流的作用逐渐减弱至消失,因此基本没有什么冷却效果。

相对于圆柱孔和横向扩散孔,扩散孔出口由于增大了横向尺寸,使得冷却气膜伸向较远的下游区域,冷却效果较好。

当  $M=1.5$  时,圆柱孔在孔口附近基本无冷却气膜形成,而在孔下游处,由于射流的再附壁,形成微弱的冷却气膜覆盖在壁面,在此工况条件下,射流的动量大于主流的动量,射流与主流的相互作用加强,产生较强烈的反向涡旋对,射流被抬离壁面,使得周围的主流热气不断被卷吸到壁面上,导致壁面在主流热气的影响下温度升高。随着  $X/D$  的增大,射流的动量逐渐减小,对流场的作用开始减弱,主流将逐渐支配整个流场的流动,在主流的压力和摩擦力作用下,射流再次贴附于壁面,这使得下游处的冷却效率曲线有所上升;扩散孔在孔口附近形成较好的冷却保护作用,但孔间几乎无冷却效果;横向扩散孔由于存在扩散角,孔出口的面积增大,孔间区域均形成良好的冷却气膜,且延伸至孔下游  $X/D=25$  处,冷却效果明显优于圆柱孔和扩散孔。

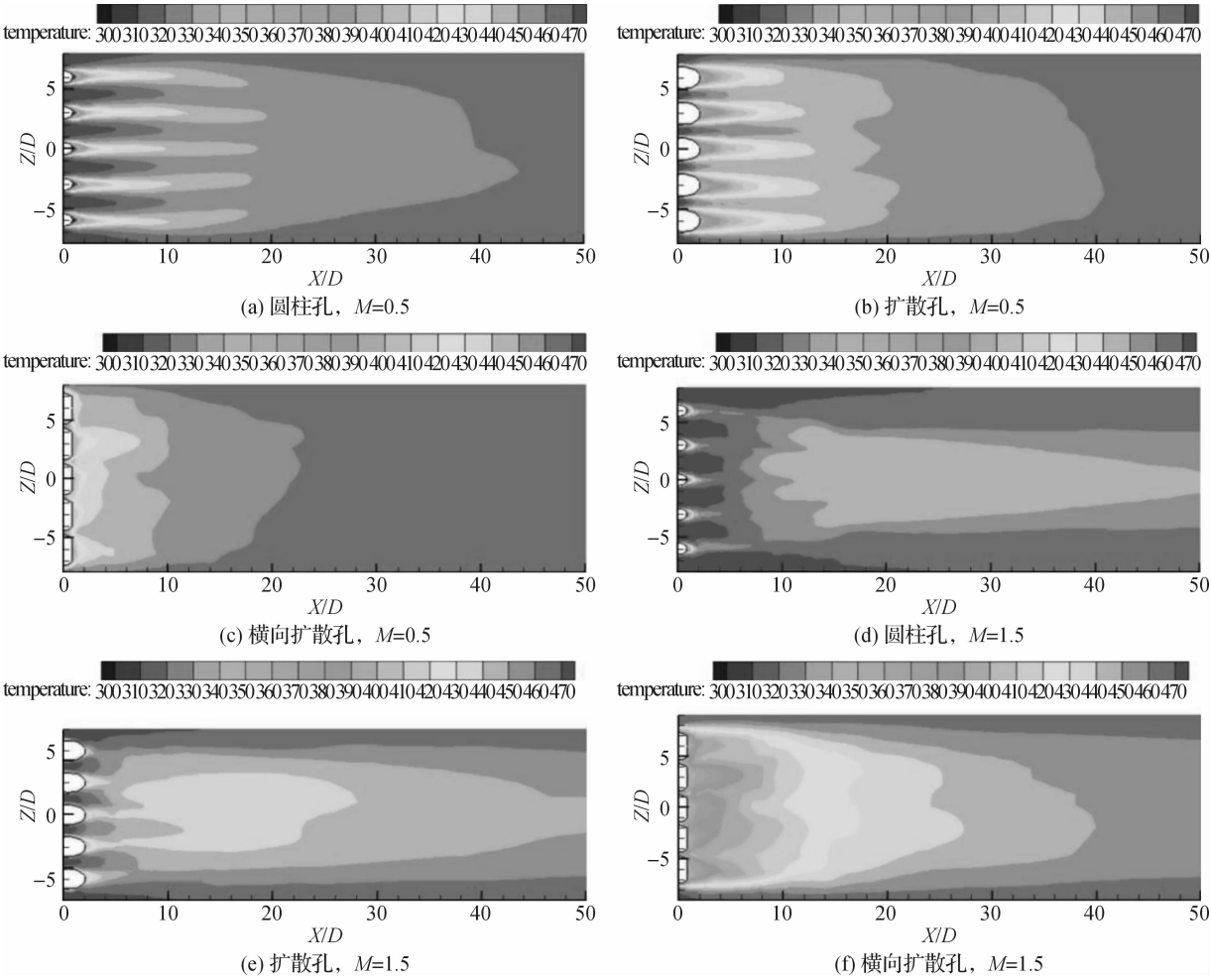


图 7 两种吹风比下 3 种孔型的壁面温度分布

3 结 论

- a)在相同吹风比下,横向扩散孔的冷却气膜纵向覆盖区域最宽,孔间冷却效果最好;扩散孔的横向覆盖长度最长,整体冷却效果优于圆柱孔。
- b)横向扩散孔和扩散孔不同程度地抑制了反向涡旋对的形成,使得冷却气膜能更好地贴附于壁面,减弱了射流对主流的卷吸作用,因而冷却效果均较圆柱孔好。
- c)在吹风比  $M$  为 1.5 时,由于射流的卷吸和再附,在孔口下游附近出现了零冷却效率区域。

参考文献:

[1] 韩介勤, 杜 达, 艾卡德. 燃气轮机传热和冷却技术 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2005.

[2] 戴 萍, 林 枫. 气膜孔形状对冷却效率影响的数值研究[J]. 动力工程, 2009, 29(2): 117-122.

[3] Gritsch M, Schulz A, Wittig S. Adiabatic wall effectiveness measurements of film cooling holes with expanded exits[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1998, 120(3): 549-556.

[4] 李少华, 宋东辉, 刘建红, 等. 不同孔型平板气膜冷却的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(17): 112-116.

[5] 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): 994-406.

[6] 陆 彝, 李凌波, 姜培学, 等. 气膜冷却平板通道的数值模拟[J]. 热能动力工程, 2005, 20(4): 411-413.

[7] 王福军. 计算流体力学分析:CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 214-216.

[8] 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: 自然科学版, 2008, 48(8): 1331-1334.

Numerical Simulation of Flat Plate Film Cooling Field  
Using Different Shape Holes

WANG Chun-juan<sup>1</sup>, DONG Ruo-ling<sup>1</sup>, SHI Hong-hui<sup>1</sup>, CHEN Wei<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiao-dong<sup>1</sup>

(1. School of Machinery and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;  
2. Hangzhou Vocational Technical College, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** To investigate the effects of jet hole shape on film cooling effectiveness, the film cooling characteristics on flat plate with cylindrical injection holes, diffusion holes and lateral expanded holes of 35° inclined angle are numerically simulated, using RNG  $k-\epsilon$  turbulence mode and based on the method of SIMPLEC. The adiabatic film cooling effectiveness, the velocity vector and the temperature of cooled wall are studied in different blowing ratios. The results show that the film cooling effectiveness of lateral expanded hole is better than that of cylindrical hole and diffusion hole and its CVP scale is smallest and the area between holes is cooled well.

**Key words:** film cooling; hole shape; flat plate; numerical simulation

(责任编辑: 杨元兆)