

# 带偏转角气膜出流发散壁冷却特性的数值分析

谢 婕 张靖周

(南京航空航天大学能源与动力学院, 南京, 210016)

**摘要:**运用数值计算方法对带偏转角气膜出流发散孔壁的冷却特性进行了研究,分析了气膜孔偏转角对气膜冷却效率和流量系数的影响。研究表明,带偏转角气膜孔喷出的气膜出流具有侧向涡旋特征,增强了气膜射流的横向能力,对于改善发散壁前端的冷却效率具有一定的作用,在高吹风比下更为显著;随着偏转角度的增加,发散壁前端气膜孔的流量系数则呈降低趋势。

**关键词:**发散冷却;气膜孔偏转;气膜冷却效率;流量系数;数值计算

**中图分类号:** V233.1; V233.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2013)02-0157-05

## Numerical Simulation on Cooling Characteristics of Effusion Wall with Deflection Film Outflow

Xie Jie, Zhang Jingzhou

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** Numerical investigations are performed on the cooling characteristics of effusion wall with deflection film outflow. The effects of film deflection angle on the film cooling effectiveness and discharge coefficient are revealed. The results show that a swirling film outflow issued from deflection hole enhances the lateral flow capacity of film jet and the film cooling effectiveness in the front of effusion cooled wall, especially under higher blowing ratio cases. As the increase of film deflection angle, the discharge coefficient of film holes located at the front of effusion cooled wall is decreased.

**Key words:** effusion cooling; film jet deflection; film cooling effectiveness; discharge coefficient; numerical simulation

随着现代航空燃气涡轮发动机推重比的提高,高温升燃烧室设计中面临的火焰筒冷却问题日益苛刻。为了改善火焰筒的可靠性,不仅需要提高火焰筒材料的耐温性能,也需要不断发展高效的火焰筒冷却结构。就后者而言,多孔全覆盖气膜或发散冷却是目前引起广泛关注的、更易于得到实际应用的一种冷却模式<sup>[1-2]</sup>,其主要特征是被冷却壁上的离散冷却孔更为密集,可以在燃气侧壁面附近形成完整覆盖的冷却气膜,同时由于气膜孔的致密性,可以形成更有效的冷却壁孔内的对流换热。

国内外研究人员对发散冷却结构已开展了大

量的研究,较为系统地研究了气膜孔阵列的排布方式、孔倾角、孔间距等结构参数以及吹风比、流动雷诺数等气动参数对于多孔壁热侧、冷侧和孔内流动换热特性的影响<sup>[3-6]</sup>。尽管如此,如何尽可能地改善气膜冷却的效率、优化气膜冷却结构特征参数仍是需要不断发展的、富于创新性的研究内容,其核心问题在于降低气膜出流向主流穿透率、增强气膜出流在扩展区域扩散的覆盖面积。近十几年来,对单排气膜冷却孔结构优化方面的研究(诸如气膜孔的形状、气膜孔喷吹角)异常活跃<sup>[7-12]</sup>,但对于致密孔阵气膜冷却的喷吹角以及孔形的研究尚不充分。

**基金项目:**国家自然科学基金(51276090)资助项目。

**收稿日期:** 2012-07-09; **修订日期:** 2012-12-27

**通信作者:** 张靖周,男,教授,博士生导师, E-mail: zhangjz@nuaa.edu.cn。

本文通过数值计算,对带偏转角的发散孔壁气膜冷却结构的流动和传热特性进行研究,较为全面地分析气膜孔偏转角对发散孔壁气膜冷却效率和流量系数的影响规律。

## 1 物理模型和计算方法

### 1.1 物理模型

带气膜出流偏转角的多斜孔发散冷却结构和计算域如图1所示。计算域由主流通道、多孔壁和多斜孔二次流通道3个子域构成,主流通道高度( $y$ 方向)取为50 mm,宽度为两倍气膜孔展向间距,在流向上( $x$ 方向),共布置了20排、呈叉排排布的气膜孔,气膜孔直径 $d$ 为1 mm,倾角 $\alpha=30^\circ$ ,偏转角 $\beta$ 分别为 $0, 20, 30$ 和 $45^\circ$ ,气膜孔排的排布为超长菱形,其横向间距比 $P/d=4$ ,纵向间距比 $S/d=8$ ,第一排气膜孔距计算域进口截面为 $20d$ ,最后一排气膜孔距主流通道出口截面为 $50d$ 。多孔壁厚度为2 mm,冷却气流直接从多孔壁底部的气膜孔注入。 $x$ 方向坐标原点定义在第一排气膜孔中心截面处。

### 1.2 边界条件和参数定义

计算过程中,在发散孔壁横向上( $z$ 方向)选取两倍气膜孔横向间距作为计算域,边界条件如下:

主流入口为速度入口, $u_\infty=50$  m/s, $T_\infty=600$  K,湍流强度取为0.5%,并且湍流特征长度取

为进口当量直径的3%;冷却气流入口为速度入口, $T_c=300$  K,入口速度按照吹风比 $M=(\rho_c u_c)/(\rho_\infty u_\infty)$ 确定;混合流出口为压力出口,设为101 325 Pa;固体壁面为无滑移边界,流体域与固体域接触面设为流-固耦合面,两侧壁作为周期性边界。

鉴于本文仅限于研究气膜偏转出流对绝热气膜冷却效率的影响,因此发散孔壁导热系数取为 $0.001$  W/(m·K),以忽略发散孔壁内的导热和对流换热效应,底面(冷却气流进口面)设为绝热。本文研究的气膜冷却性能参数定义如下:

(1)气膜冷却效率

$$\eta = \frac{T_\infty - T_w}{T_\infty - T_c} \quad (1)$$

式中: $\eta$ 为气膜冷却效率; $T_w$ 为发散孔壁流-固耦合面的温度,按照本文的边界条件和发散孔壁导热系数的选取,式(1)中的流-固耦合面的温度可以认为是绝热壁面温度。

(2)流量系数

$$C_d = m_c / A_c \sqrt{2\rho_c(P_c^* - P_c)} \quad (2)$$

式中: $m_c$ 为单个气膜孔冷却气流质量流量; $P_c^*$ ,  $P_c$ ,  $A_c$ ,  $\rho_c$ 分别为气膜孔入口冷却气流的总压、气膜孔出口的静压、气膜孔的横截面积和冷却气流的密度。

### 1.3 计算方法和验证

在整个计算域内,布置了非均匀的结构化网格,其中在气膜孔内布置了比较密的网格,特别是在气膜孔口附近采用了逐渐加密方法,以适应该区域的大速度梯度的要求,在热侧通道内的近壁面区域,也布置比较密的网格。整个计算域约划分1 720 000个网格,其中每个气膜孔约划分5 000个网格。运用Fluent计算软件,湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 两方程模型,近壁流场采用标准壁面函数处理;采用分离隐式求解器进行离散方程组的求解;对流-扩散项的离散格式为二阶迎风格式;收敛判据采用的残差精度为 $10^{-5}$ 。

参照文献[7]中的多孔全覆盖气膜冷却结构进行了算例验证,在此冷却结构中, $P/d=4.9$ ,  $S/d=4.9$ ,  $\alpha=30^\circ$ 。图2为横向平均气膜冷却效率的本文计算结果和实验结果的对比,图中 $I=(\rho_c u_c^2)/(\rho_\infty u_\infty^2)$ 为动量比。对比表明,在多孔全覆盖气膜冷却结构的前排气膜起始段( $0 \leq x/d \leq 20$ ),本文的计算结果明显低于实验结果,这是由于实验过程中难以绝对保证壁面的绝热边界,同时由于在前排气膜起始段沿轴向的壁面温度梯度或差异较为显著,因此实验中的气膜壁容易受到轴向热传导的影响,而导致前排气膜起始段的壁面温度降低或绝热冷却效率的升高。作者认为,在前排气膜

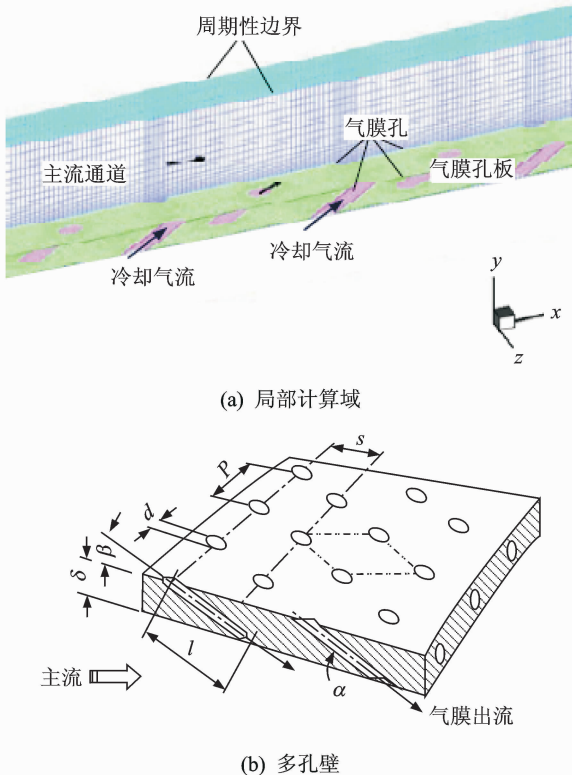
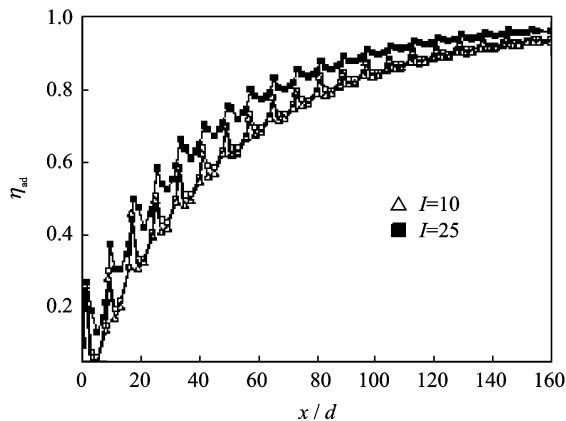
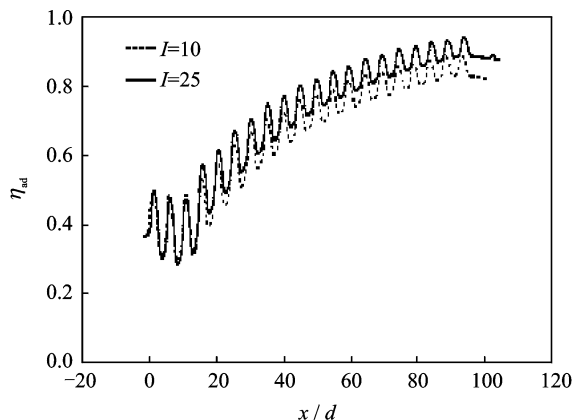


图1 发散冷却模型示意图

起始段本文的计算结果更符合物理特征;在多孔全覆盖气膜冷却结构的下游气膜发展段( $40 \leq x/d$ ),本文的计算结果与实验结果非常吻合;由于实验中的气膜孔排数要少于本文计算的排数,因此实验曲线在  $x/d$  约为 90 时呈现出一定的下降趋势。因此,可以认为本文的计算模型和计算方法是合理的。



(a) 本文计算结果



(b) 文献[7]实验结果

图 2 计算结果验证

## 2 计算结果及分析

### 2.1 温度和速度分布特征

图 3 给出了吹风比  $M=1.65$  时,第 2,3 和 4 排气膜孔附近热侧壁面温度随偏转角的变化。可以看出, $\beta=0^\circ$  时热侧壁温沿气膜孔中心线对称分布,第 2 排气膜孔后壁温较高,这是因为吹风比  $M=1.65$  时,冷气射流动量较高向主流的穿透较大,同时上游基本上没有气膜层的积累,因此主流很容易绕过气膜层对壁面进行加热;当出现偏转角后,壁面温度分布也明显出现了偏转,低温区往偏转方向倾斜且更加靠近气膜出口,这是因为当气膜孔引入偏转角后,气膜出流有了偏转方向的初始速度分量,相对于无偏转角的气膜射流而言(气膜射流在横向上仅仅依赖于射流的扩展作用),气膜射

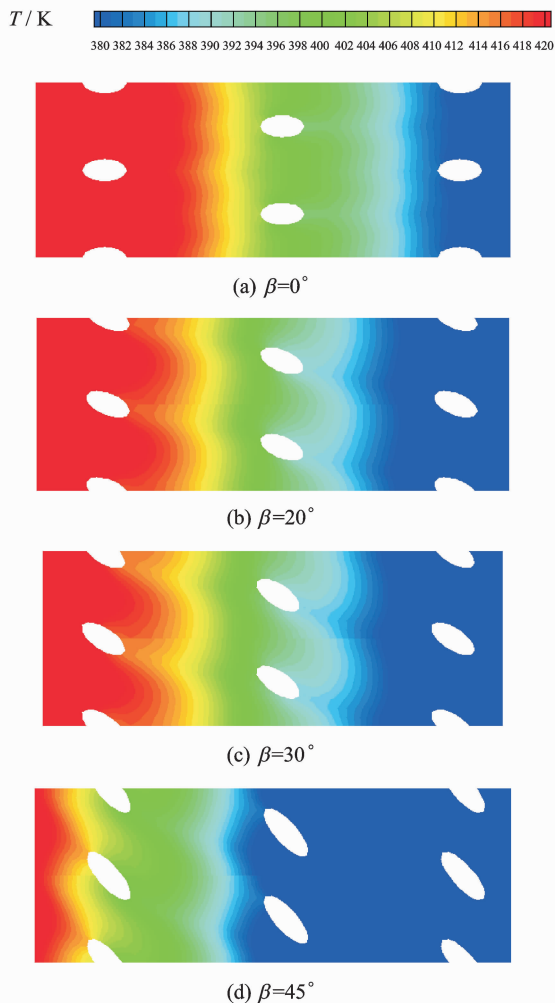


图 3 发散冷却壁面局部温度分布

流能够横向掠过气膜孔间的下游区域,使得气膜侧向分布更宽,从而在一定程度上改善了相邻孔下游的近孔区域气膜覆盖,使得气膜孔下游近孔区域获得较好的冷却。相对无偏转角的气膜射流,带偏转角的气膜出流使得壁面低温区整体向发散孔壁前端迁移,随着气膜出流偏转角度的增大,这种趋势更加明显。

图 4 给出了第 3 排气膜孔出口中心截面的速度矢量分布。可以看出, $\beta=0^\circ$  时,射流沿气膜孔中心线对称分布,在气膜出口处有一对旋转方向相反的涡旋,这是典型的无偏转角气膜出流的流动特征。一旦气膜出流孔带偏转角度,气膜出口处的涡对趋于消失,涡旋向气膜出流偏转方向倾斜。注意到在较低的吹风比下(譬如  $M=0.88$ ),气膜出流偏转角对气膜出口处涡对的影响要明显弱于大吹风比下的情形,这是由于在低吹风比下,气膜出流的初始动量较小,偏转角诱导的气膜出流横向流动的速度相对较低;同时随着偏转角度的增大,气膜出流的偏转程度越来越大,意味着冷却气流对壁面的冲

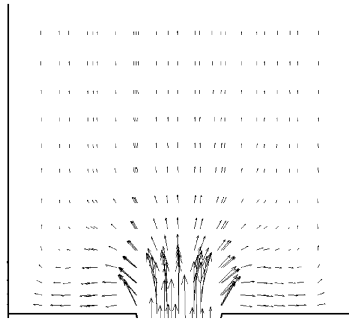
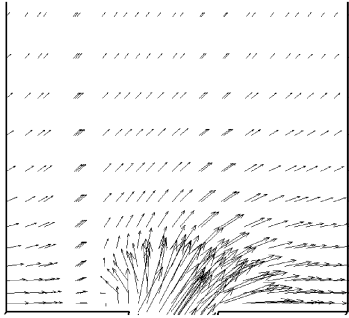
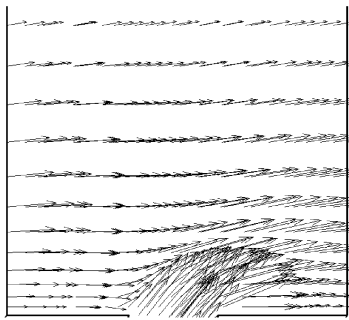
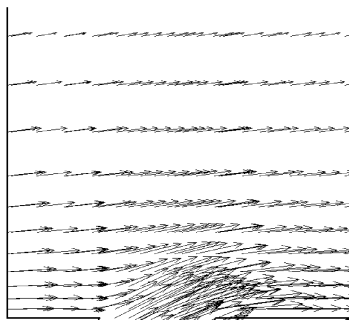
(a)  $M=0.88, \beta=0^\circ$ (b)  $M=0.88, \beta=20^\circ$ (c)  $M=2.11, \beta=20^\circ$ (d)  $M=2.11, \beta=30^\circ$ 

图4 偏转角对气膜出流的影响

刷也越来越强烈。因此,气膜出流偏转角对不同吹风比下的气膜冷却效果将形成不同程度的影响。

## 2.2 气膜冷却效率

图5示出了在吹风比  $M$  分别为 0.88 和 2.11 时,不同偏转角  $\beta$  对气膜冷却效率的影响。需要指出的是,最后一排气膜孔大约在  $x/d=140$ 。可以看出,在吹风比较小时,偏转角的大小对气膜冷却效率的影响似乎很微弱,这与低吹风比下气膜出流

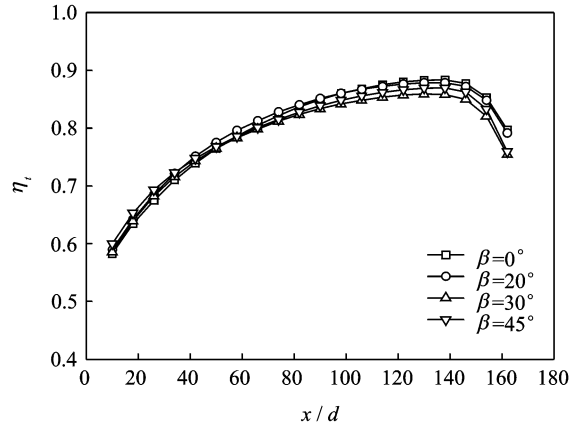
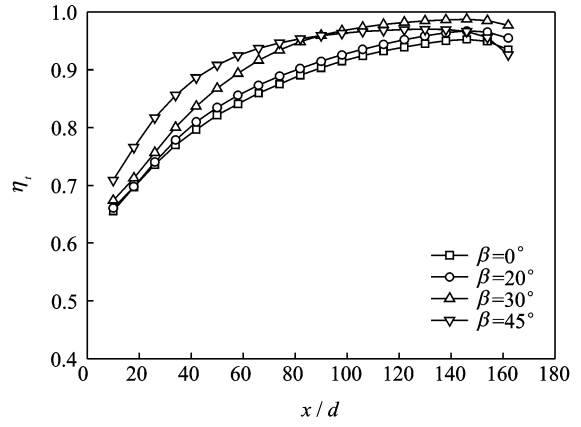
(a)  $M=0.88$ (b)  $M=2.11$ 

图5 横向平均气膜冷却效率

偏转角对气膜出口处涡对的影响相对较弱相关,在发散孔最后一排孔下游,冷却效率呈现快速的下降趋势;当吹风比较大时,偏转角对冷却效果影响较大,但这种影响在不同的区域表现不同。可以看出,在  $x/d < 120$  的区域,气膜出流偏转角对于气膜冷却效率的影响较为显著,随着气膜出流偏转角的增大,冷却效率有较大幅度的增加;当  $x/d > 120$  后,随着从发散孔前端气膜孔排出的气膜射流逐渐发展和融合,对发散壁面形成充分的覆盖,此时偏转角的影响逐渐趋于衰弱。在发散孔最后一排孔下游,由于高吹风比的气膜射流具有更高的动量,因此仍能在最后一排气膜孔下游一段距离内维持较高的冷却效率,然后再呈现出逐渐下降的趋势。

## 2.3 流量系数

图6给出了偏转角度对多孔壁流量系数的影响,图中  $n$  表示孔排序号。可以看出,随着偏转角度的增大,流量系数呈下降趋势。这是因为,偏转角度增大后,二次流流经气膜孔时的偏折更厉害,入口损失会增大;同时,偏转角度的增大会加长气膜孔的长度,那么气流在孔内流动时的摩擦损失也会加大。因此,偏转角度增大后,相同孔排处的流

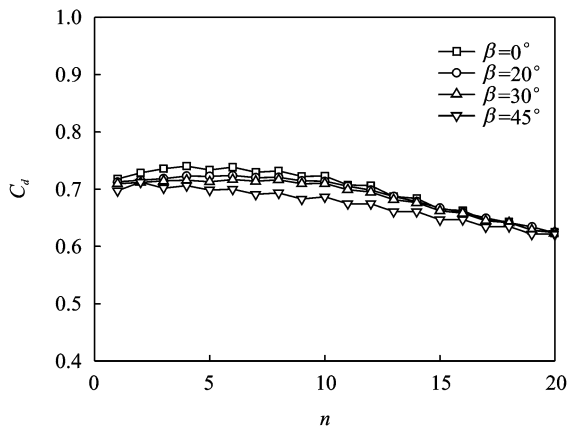
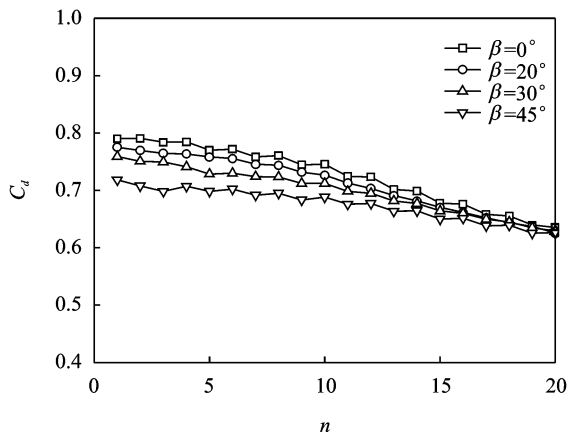
(a)  $M=0.88$ (b)  $M=2.11$ 

图 6 偏转角度对多孔壁流量系数的影响

量系数下降,这种影响在高吹风比下更为显著。当气膜出流逐渐融合形成较为连续的气膜层之后,偏转角对于气膜孔流量系数的影响趋于减弱。

### 3 结 论

(1)当气膜孔引入偏转角后,气膜出流有了偏转方向的分量,气膜孔下游近孔区域仍能获得较好的冷却;同时射流分量对相邻孔下游的近孔区域冷却也起到一定作用,使得气膜侧向分布更宽。

(2)在吹风比较小时,偏转角的大小对气膜绝热冷却效果的影响似乎很微弱;当吹风比较大时,偏转角对冷却效果影响较大,随着气膜出流的发展和融合,偏转角的影响逐渐趋于衰弱。

(3)随着偏转角度的增大,流量系数呈下降趋势,这种影响在高吹风比下更为显著。

### 参考文献:

[1] Leger B, Miron P, Emidio J M. Geometric and aerothermal influences on multi-holed plate temperature; application on combustor wall [J]. International

Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46(7): 1215-1222.

[2] Zhong F, Brown G L. Experimental and numerical studies of multi-hole cooled ceramic matrix composite liners[R]. AIAA Paper 2005-0184, 2005.

[3] 宋波,林宇震,刘高恩,等.不同排列方式多斜孔壁气膜冷却绝热温比研究[J].航空动力学报,1999,14(1):91-94.

Song Bo, Lin Yuzhen, Liu Gaoen, et al. An investigation on film cooling effectiveness of inclined-multi-hole walls with different patterns[J]. Journal of Aerospace Power, 1999,14(1):91-94.

[4] Gustafsson K M, Johansson T G. An experimental study of surface temperature distribution on effusion-cooled plates[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2001,123(2):308-316.

[5] 谢浩,张靖周.致密孔阵气膜冷却绝热温比和对流换热系数的数值研究[J].航空动力学报,2009,24(6):1229-1235.

Xie Hao, Zhang Jingzhou. Numerical study on adiabatic wall cooling effectiveness and convective heat transfer coefficient of effusion cooling[J]. Journal of Aerospace Power, 2009,24(6):1229-1235.

[6] 杨成凤,张靖周,杨卫华.全覆盖气膜孔阵列方式对冷却特性的影响[J].航空动力学报,2010,25(7):1524-1529.

Yang Chengfeng, Zhang Jingzhou, Yang Weihua. Effect of the holes array arrangement on the full coverage film cooling characteristics [J]. Journal of Aerospace Power, 2010,25(7):1524-1529.

[7] Bohn D, Moritz N. Influence of hole shaping of staggered multi-hole configurations on cooling film development[R]. AIAA Paper 2000-2579, 2000.

[8] Lee S W, Kim Y B, Lee J S. Flow characteristics and aerodynamic losses of film-cooling jets with compound angle orientations[J]. Journal of Turbomachinery, 1997,119(2):310-319.

[9] Zhang Chi, Song Bo, Lin Yuzhen, et al. Cooling effectiveness of effusion walls with deflection hole angles measured by infrared imaging[J]. Applied Thermal Engineering, 2009,29(5):966-972.

[10] Lee Kidon, Kim Kwangyong. Shape optimization of a fan-shaped hole to enhance film-cooling effectiveness[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010,53(15):2996-3005.

[11] Liu C L, Zhu H R, Bai J T, et al. Experimental research on the thermal performance of converging slot holes with different divergence angles[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2009,33(5):808-817.

[12] Yao Y, Zhang J Z. Investigation on film cooling characteristics from a row of converging slot holes on flat plate[J]. Science China: Technological Sciences, 2011,54(7):1793-1800.