

文章编号: 1000 8055(2008)10 1759-06

缩扩孔对孔板气膜冷却效果的数值研究

李志强, 田 涛

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 从加强气膜孔内的换热量和孔板热侧的气膜覆盖两个角度来提高气膜孔壁的冷却效果, 通过对气膜孔孔型的改进, 提出了缩扩型气膜孔型结构, 数值计算结果表明收缩进气可以强化孔内的对流换热; 而扩张出气则可以使冷气出口的速度降低, 气膜覆盖面更广, 提高气膜的覆盖效果. 与扩张孔相比, 所提出的缩扩型孔在较低的吹风比下有利于改善冷却效果, 而在大吹风比下则对冷却不利; 然而与普通圆柱型孔相比, 缩扩型孔在任何吹风比下均能改善冷却效果.

关 键 词: 气膜冷却; 缩扩孔; 冷却效率; 数值研究

中图分类号: V235.1

文献标识码: A

Numerical studies of the effects of shaped holes on cooling effectiveness of flat plate film with conical shrink entrance and conical diffuser exit

LI Zhi qiang, TIAN Tao

(National Key Laboratory on Aircraft Engines, School of Jet Propulsion,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The numerical simulation was used to study the film cooling effectiveness of plate with jet holes by increasing the heat transfer of wall of hole and enlarging the cooled area of plate in the side of hot gas stream. By studying different shape of jet holes, a new shaped hole (conical shrink entrance and conical diffuser exit shaped hole) was proposed. The computational results show that, the conical shrink entrance of the new shaped hole can efficiently enhance the convection heat transfer of wall of hole, and the conical diffuser exit of the new shaped hole can efficiently enlarge the cooled area of plate in the side of hot gas stream. If comparing with the conical diffuser shaped hole, it is found that, when the shrinkage hole is used, the film cooling effectiveness of plate is enhanced with low blowing ratio, and the film cooling effectiveness is inferior with high blowing ratio. However, when compared with the cylindrical hole, when the new shaped hole is used, the film cooling effectiveness of plate can be improved in any case.

Key words: film cooling; shaped hole; cooling effectiveness; numerical studies

现代航空燃气涡轮发动机燃烧室火焰筒壁的冷却结构多采用复合冷却结构, 多斜孔壁复合冷却结构就是其中的一种, 它是一种介于传统气膜冷却和发散冷却之间的准发散冷却结构, 其主要

特点是在需要冷却的壁面上开大量密集、离散、小直径的气膜孔阵, 该结构的冷却方式包含了冷侧对流换热、气膜小孔内对流换热和热侧气膜冷却这三种冷却方式, 其中冷侧对流换热量、孔内对流

收稿日期: 2007 09 19; 修订日期: 2008 03 10

作者简介: 李志强(1970-), 男, 山西长治人, 副教授, 博士, 主要从事湍流、燃烧与传热领域的实验与数值模拟研究.

E-mail: lizhiqiang@buaa.edu.cn.

换热量和热侧气膜覆盖分别占冷却效果的 30%、40% 和 30%^[1-2].

目前该冷却结构已经成功地应用到了美国 General electric (GE) 公司为民用客机研制的 GE90 涡扇发动机, 并且取得很好的冷却效果. 近年来国内外一些学者如 Leylek J H 等人通过改变气膜孔的形状发现可以更好的提高冷却效果^[3-6], 所研究的孔型多为圆柱型孔、向前扩散孔、横向扩散孔、进口异型孔、尖角型等, 但在扩张孔和缩扩孔方面的研究还未见报导. 为此本文通过数值计算方法研究包括缩扩孔在内的不同孔形状对气膜冷却效果的影响, 其目的是通过采用异型孔来提高孔内的雷诺数和改变气膜孔的出口速度, 从而强化孔内的对流换热和热侧的气膜覆盖.

1 数值模拟

1.1 几何模型

本文以一排孔为研究对象(孔间距为 4.5 倍孔径), 通过改变不同的孔型和吹风比来得到不同的冷却效果. 研究内容包括 3 种不同孔型和 1, 0.5 及 0.2 三种吹风比对冷却效果的影响. 3 种孔型的模型如图 1 所示.

模型 1 直径为 0.676 mm 的圆孔;

模型 2 带有 10° 出气扩张角的扩张孔;

模型 3 带有 10° 收缩进口和 10° 扩张出口的缩扩孔.

3 个模型的孔在进口处的截面积相同, 并且模型 2 和模型 3 的出口截面相同.

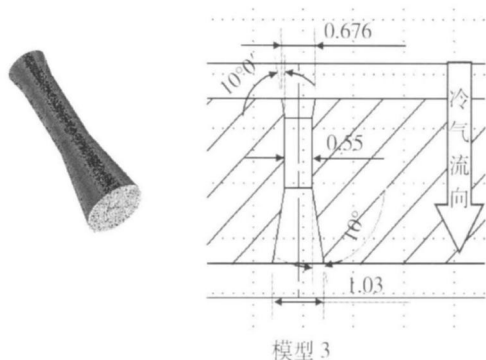
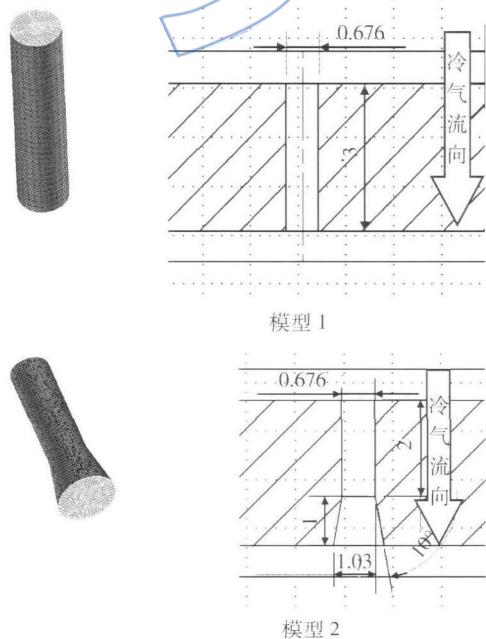


图 1 3 种孔的结构和尺寸

Fig. 1 Configurations and sizes of holes

计算模型的流体域为 20 mm × 3 mm × 18 mm, 固体域为 15 mm × 3 mm × 3 mm, 在距板前端 3 mm 的地方开设有与燃气主流入口方向垂直的一排气膜孔. 采用 ICEM CFD 进行六面体网格划分, 总体网格如图 2 所示分布, 气膜孔处采用 O 型网格, 以提高网格质量, 在流体与固体接近的地方采用网格局部加密, 满足边界层要求.

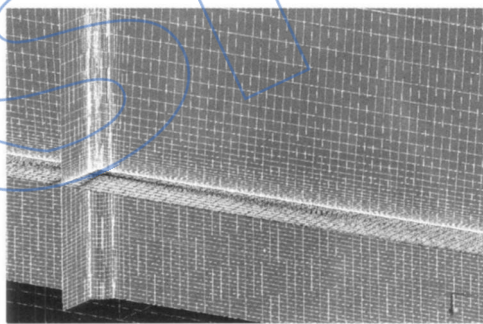


图 2 计算网格示意图

Fig. 2 Grid for calculation

1.2 边界条件和数值计算方法

参照一些文献和国内外典型航空发动机燃烧室中的参数, 冷气和燃气定义为可压缩理想空气, 其中燃气主流的进口温度 $T_{\infty} = 1595$ K, 进口速度 $U_{\infty} = 80$ m/s; 冷却气体进口温度 $T_2 = 800$ K, 在计算时通过调整冷气的进口速度 U_2 来调整吹风比, 由于 $\rho \approx 2\rho_{\infty}$, 即当吹风比 M 分别为 1, 0.5 和 0.2 时, 所对应的冷却气进口速度 分别为 40 m/s, 20 m/s 和 8 m/s; 混合气体的出口采用压力边界条件, 平均静压为 2.33 MPa.

计算域的前后表面采用对称边界条件, 孔壁和气膜孔热侧采用流固耦合条件, 其余各表面(除气体进出口面外)由于不考虑换热的影响, 均采用绝热边界条件.

求解三维雷诺平均 Navier-Stokes 方程时, 在

流体域和固体域均采用统一的控制方程, 不同区域的区别仅在于广义扩散系数和广义源项的不同, 流固耦合界面位于计算域的内部, 计算软件采用 CFX 商业软件, 基于文献[7] 分别采用 $k-\epsilon$ 模型、Realizable $k-\epsilon$ 模型和 RNG $k-\epsilon$ 模型等湍流模型对单圆孔气膜冷却的流动和传热特性的计算能力分析, 结果表明 RNG $k-\epsilon$ 模型的预测值与实验值偏差最小. 为此, 本文采用湍流模型采用 RNG $k-\epsilon$ 模型, 计算程序会根据 y^+ 自动选择壁面函数或者低雷诺数模型来提高计算精度, 通过在特征部位生成监视面, 对温度与压力进行监视, 确保计算残差收敛到 10^{-6} 的量阶, 来保证计算收敛.

2 计算结果和分析

定义两个无量纲参数冷却效率 η 和 x/d , 其中 $\eta = (T - T_{\infty}) / (T_2 - T_{\infty})$, 式中 T 为固体平壁热侧面上给定 x 处沿 y 方向的平均温度(每个 x 对应一个 T), T_{∞} 为主流燃气入口的平均温度, T_2 为冷气射流入口的平均温度; x/d 中 x 为距板前端的距离, d 为气膜孔的直径.

2.1 计算结果

2.1.1 吹风比为 0.2 时的冷却效果

当吹风比等于 0.2 时, 3 种孔型的冷却效果如图 3 所示. 可以看出, 缩扩孔(模型 3)和扩张孔(模型 2)的冷却效率明显要高于圆孔(模型 1)的冷却效率, 同时缩扩孔(模型 3)的冷却效率要高于扩张孔(模型 2)的冷却效率. 3 种孔型冷却效率的最高点均出现在气膜孔的下游.

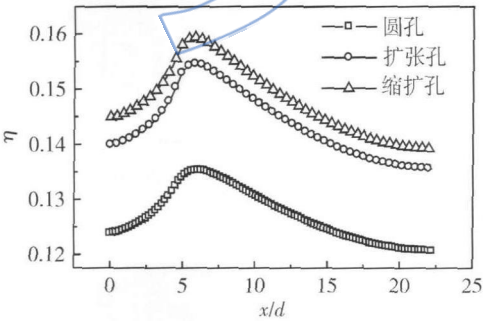


图 3 吹风比 0.2 时的冷却效率

Fig. 3 Cooling effectiveness at blowing ratio 0.2

2.1.2 吹风比为 0.5 时各条流线上的冷却效果

当吹风比等于 0.5 时, 表现出与吹风比 0.2 时基本相同的情况, 仍然是缩扩孔(模型 3)的冷却效率最优, 但与扩张孔(模型 2)间的差距在缩小, 尤其是在气膜孔下游的地方, 缩扩孔(模型 3)的冷却优势已经不很明显. 圆孔(模型 1)的效果

在该吹风比下仍然最差, 并且与另外两种孔型的冷却效率的差距在进一步加大(如图 4 所示). 同时与吹风比为 0.2 时相比, 3 个模型的冷却效率均有所上涨, 这与参与热防护的冷气流量增加有关, 符合对流换热的机理.

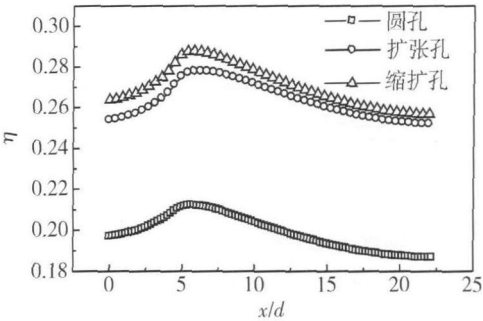


图 4 吹风比 0.5 时的冷却效率

Fig. 4 Cooling effectiveness at blowing ratio 0.5

2.1.3 吹风比为 1 时各条流线上的冷却效果

当吹风比等于 1 的时候, 与前面两种吹风比出现较大的不同, 此时扩张孔(模型 2)的冷却效率最高, 明显超过了其它两种孔型的冷却效率, 但圆孔(模型 1)冷却效率仍然最低.

同时还可以发现, 在吹风比为 0.5 的时候, 扩张孔(模型 2)和缩扩孔(模型 3)的冷却效率已经高于圆孔(模型 1)在吹风比为 1 时的冷却效率, 这说明在低吹风比下采用扩张孔或缩扩孔能够取得传统圆柱孔在高吹风比下的冷却效率.

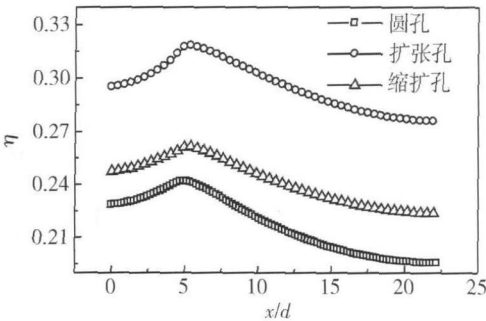


图 5 吹风比 1 时 3 条流线上的冷却效率

Fig. 5 Cooling effectiveness at blowing ratio 1

2.2 结果分析

对比上述 3 个模型在 3 种不同的吹风比下的 9 个算例, 可以发现, 在计算模型中, 冷气直接从气膜孔入口射入, 因此可以忽略冷侧的对流换热, 冷却效率的高低只取决于气膜孔内的对流换热和热侧的气膜覆盖.

2.2.1 孔内的对流换热

图 6 所示为不同吹风比下孔内的总换热量和平均换热量分布. 可以看出, 对于不同的吹风比,

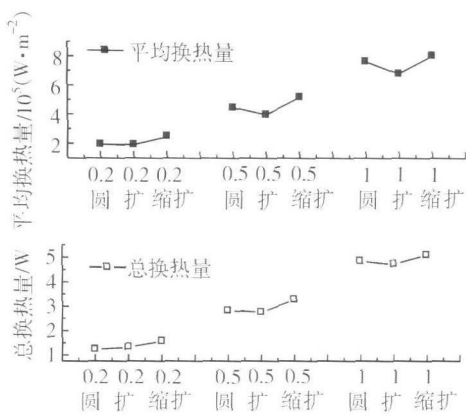


图 6 不同吹风比下孔内总换热热量和平均换热热量
Fig. 6 Amount of total and average heat transfer in the hole with different blowing ratios

缩扩孔内的平均换热热量最大, 其次是圆孔, 扩张孔最小; 而对于孔内的总的换热热量, 也是缩扩孔最大, 但扩张孔和圆孔相差不大. 同时也可以看出,

随着吹风比的增大, 孔内 Re 数在增大, 从而 3 种孔型的换热热量均得到提高.

对同一种吹风比, 不同孔型的孔内换热量的不同可用如下分析来解释. 缩扩孔的收缩进气导致入口冷气速度的不断加快, 强化了孔内的对流换热; 然而对于扩张孔, 其扩张出气显然降低了流体的速度, 导致平均换热热量低于圆孔, 但由于换热面积比圆孔有所增大, 使得总的换热热量跟圆孔相比相差不是很多.

对于不同孔型, 其换热热量大小的不同, 可用孔内不同涡量的变化来解释. 随着孔型的变化, 可以使孔内的流体速度方向发生变化, 从而产生有利于强化换热的纵向涡. 图 7 所示为不同吹风比下, 圆孔、扩张孔、缩扩孔在直管段的涡量分布图, 通过调整圆孔、扩张孔的最大和最小值与缩扩孔的范围一致, 可以看出圆孔和扩张孔几乎没有涡量, 而缩扩孔内却存在大量纵向涡, 从而强化了孔内的换热.

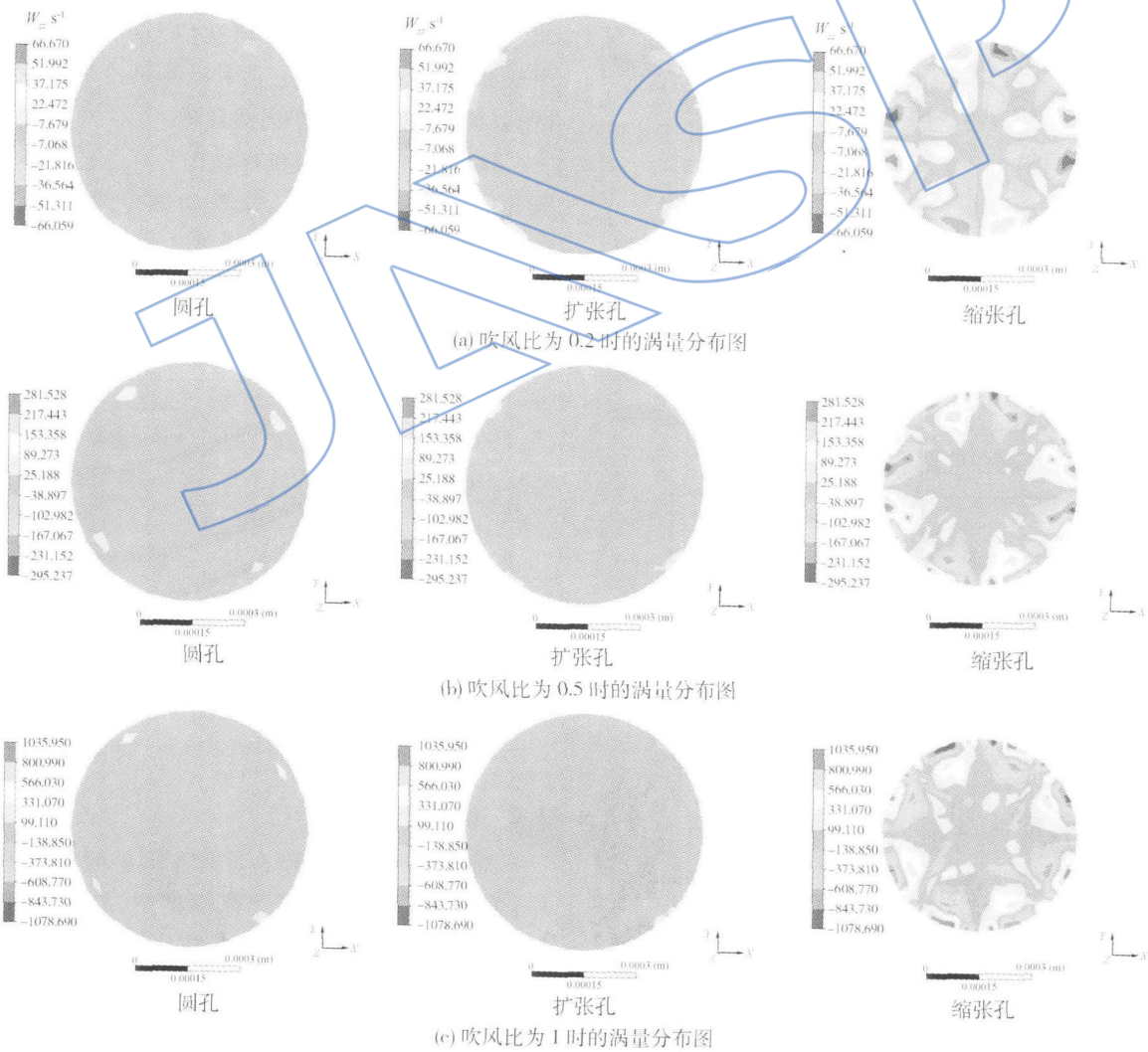


图 7 不同吹风比下不同孔型涡量分布图

Fig. 7 Vorticity distributions of different shaped jet holes with different blowing ratios

综上所述,缩扩孔可以使冷气速度进一步提高,并且有大量高强度的纵向涡存在,使得缩扩孔的孔内换热能力明显强于其它两种孔型.

2.2.2 热侧气膜覆盖

气膜孔出来的冷气 and 高温的横向主流相互作用,在冷却孔附近产生局部非常复杂的流动现象和旋涡结构,如图 8 所示. 其中反向涡旋对 (Counter-rotating vortex pair, CVP) 在下游占主导地位,影响气膜冷却的效率. 由于 CVP 旋向的原因和两个涡相互作用,使得涡内侧的粘性摩擦力(向下)小于外侧的粘性摩擦力(向上),会使得冷气远离壁面,降低覆盖效果,同时 CVP 的存在加快了冷气和燃气的掺混,对冷却效果产生不好的影响. 由此可见减弱反向涡旋对 (CVP) 可以提高气膜覆盖效果.

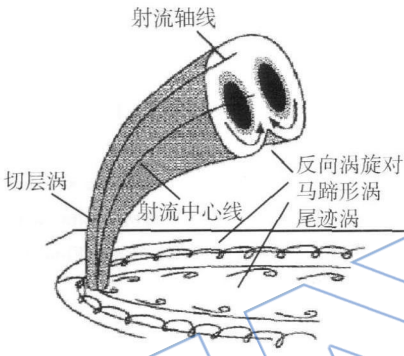


图 8 冷却孔附近旋涡结构
Fig. 8 Eddy distributions near film hole

对于本文所研究的 3 种孔型,取其出口附近的 CVP 衰减到同一个相对很小值时的涡量分布图来研究,可以发现其衰减过程是不一样的. 图 9~ 图 11 为吹风比 0.2 时 3 种孔型的 CVP 涡量沿气膜孔衰减到 $20\,000(\text{s}^{-1})$ 时的涡量分布. 可以看出,3 种孔型的 CVP 涡量衰减距离是不一样的,圆孔最长,其次是缩扩孔,最后是扩张孔,并且后两种孔型的衰减距离相差不大. 同时还可看到,扩张孔和缩扩孔在核心涡的两侧有两个长长的尾巴,证明这两种孔型的 CVP 比较扁平,更加贴近壁面. 可见由于孔型的不同,所产生的 CVP 的涡量强度也不一样,表 1 为 3 种孔型在不同的吹风比下,CVP 衰减的 $20\,000(\text{s}^{-1})$ 时到气膜孔中心的距离 (mm).

对比表 1 中的数据,可以发现 3 种孔型在不同的吹风比下,均是圆孔的 CVP 的强度最大,影响最远,其次是缩扩孔,最后是扩张孔,并且缩扩孔和扩张孔之间的差距不大. 在同一种孔型的不

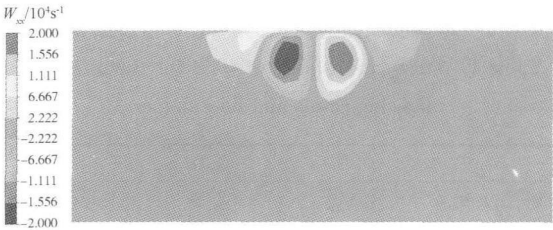


图 9 距气膜孔中心 4.69 mm 时圆孔涡量分布图
Fig. 9 Vorticity distribution of round hole at 4.69 mm

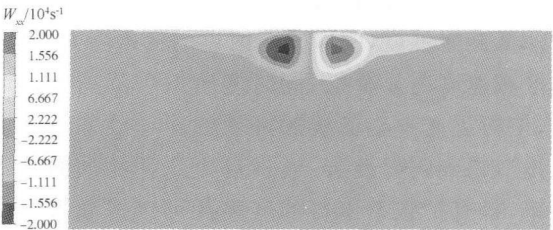


图 10 距气膜孔中心 2.86 mm 时扩张孔涡量分布图
Fig. 10 Vorticity distribution of hole with cone outspread exit at 2.86 mm

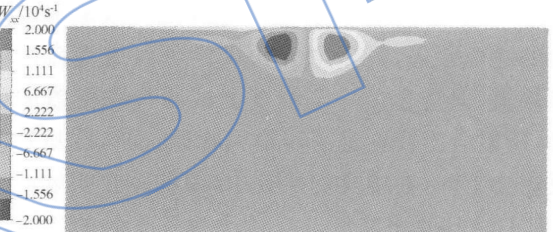


图 11 距气膜孔中心 3.01 mm 时缩扩孔涡量分布图
Fig. 11 Vorticity distribution of hole with cone contractive entrance and the cone outspread exit at 3.01 mm

同的吹风比下,随着吹风比的增大,所产生的 CVP 的涡量强度越大. 另外,在数值研究中还发现,当吹风比为 0.5 和 1 时,CVP 并不是单调变化,而是先减小再增大最后再减小,这种现象在相关的研究文献中也被提到过^[8]. 其原因可能是由于马蹄涡和尾迹涡在向下游发展过程中逐渐抬升,在到达一定高度后卷入 CVP,使其强化,所以产生了 CVP 二次增大的现象;而在吹风比为 0.2 的时候,由于冷气射流的速度小,CVP 的二次增大不明显.

扩张孔和缩扩孔由于存在扩张出口,使得出口的冷气速度的大小和方向得到改善,从而使得产生 CVP 的强度远小于圆孔,提高了气膜的覆盖效果;同时也由于缩扩孔的收缩进气使得孔内的冷气得到了加速,其出口的速度要比扩张孔的大些,所以产生 CVP 的强度相对要比扩张孔稍大一些.

表 1 不同吹风比与孔型的 CVP 涡量衰减距离
Table 1 Decaying distance of CVP for the different blowing ratios and hole shapes

	0.2	0.5	1
圆孔/mm	4.69	8.2	13.4
扩张孔/mm	2.86	6.17	10.7
缩扩孔/mm	3.01	6.46	11.3

通过上述分析,可以认为扩张型出口可以有效降低旋涡强度,明显减弱射流的穿透能力,使核心区速度明显降低;同时侧向扩展范围明显增加,使得远离中心流线的区域的冷却效率也比圆孔出口得到明显改善.通过对比 3 种孔型的冷却效率,带有扩张型出口的气膜孔可以提高气膜的覆盖宽度,增加气膜的附壁性,具有更高的冷却效率.

2.2.3 分析展望

从本文的研究结果看,气膜孔的冷却效率主要来源于孔内的对流冷却和热侧的气膜覆盖两方面的综合效果,虽然增大吹风比可以增大孔内的换热量,但是会在一定程度上减弱气膜覆盖的效果,所以会出现在进一步增大吹风比时,冷却效率反而会下降,在本文的研究中,缩扩孔在吹风比为 1 时的冷却效率就低于吹风比为 0.5 时的冷却效率,这主要在于吹风比为 1 时的气膜覆盖比吹风比为 0.5 时要差很多,抵消了孔内换热带来的好处,从而使得冷却效率变差.本文计算结果表明,在吹风比为 0.2 和 0.5 的时候缩扩孔在孔内换热和热侧气膜覆盖两方面的综合效果要好于其它两种孔型,而在吹风比 1 的时候,扩张孔的综合效果要好于缩扩孔.

上述分析只是对于单排孔的计算结果,如果考虑到孔的倾斜和孔的纵向排列,这些都会对孔内的对流换热和 CVP 产生影响,相信这些因素的加入会使缩扩孔相对于其它两种孔型表现出更好的冷却效果.

4 结 论

1) 对于气膜孔来说,收缩进气可以提高冷气的速度,并且产生大量的纵向涡,强化了孔内的对流换热.

2) 带有扩张型出口的气膜孔可以提高气膜

的覆盖宽度,增加气膜的附壁性,具有更高的冷却效率.

3) 多斜孔属于复合冷却,要综合考虑各个因素,不能过分强调其中的某种冷却方式.

4) 基于缩扩孔在低吹风比时良好的冷却效果,将为用更少的冷气冷却燃烧室火焰筒提供了一种参考方式.

参考文献:

[1] 陈焱. 致密微孔壁复合冷却数值模拟和实验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
CHEN Yan. Numerical and experimental study of effusion cooling of a plate with compact tiny holes [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005. (in Chinese)

[2] 林宇震, 宋波, 李彬, 等. 多斜孔壁冷却方式小孔内对流换热研究[J]. 航空动力学报, 1999, 14(1): 87-90.
LIN Yunzhen, SONG Bo, LI Bin, et al. A study on convective heat transfer in holes of inclined multihole wall film cooling [J]. Journal of Aerospace Power, 1999, 14(1): 87-90. (in Chinese)

[3] Colban W, Thole K. Influence of hole shape on the performance of a turbine vane endwall film cooling scheme [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2007, 28: 341-356.

[4] Miao J M, Wu C Y. Numerical approach to hole shape effect on film cooling effectiveness over flat plate including internal impingement cooling chamber[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49: 919-938.

[5] Hyams D G, Leylek J H. A detailed analysis of film cooling physics: Part III Streamwise injection with shaped holes [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2000, 122: 122-132.

[6] Brittingham R A, Leylek J H. A detailed analysis of film cooling physics: Part IV Compound angle injection with shaped holes [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2000, 122: 133-145.

[7] 刘建红. 气膜冷却流动与传热特性的数值模拟[D]. 吉林: 东北电力大学, 2007.
LIU Jianhong. Numerical simulation of characteristics of flow and heat transfer of film cooling[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2007. (in Chinese)

[8] 康顺. 冷却孔附近三维流动结构[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(5): 87-90.
KANG Shun. Three dimensional flow structure nearby cooling holes[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(5): 87-90. (in Chinese)