

文章编号: 1000-6893(2002) 01-0075-04

气膜孔形状对排孔下游冷却效率的影响

朱惠人, 许都纯, 刘松龄

(西北工业大学 706 教研室, 陕西 西安 710072)

EFFECTS OF HOLE SHAPE ON FILM COOLING EFFECTIVENESS

ZHU Hui-ren, XU Du-chun, LIU Song-ling

(Faculty 706, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

摘要: 实验研究了气膜孔几何形状及吹风比对孔排下游的局部冷却效率的影响。所用孔形是簸箕形孔、圆锥形孔及圆柱形孔, 实验的参数范围为二次流孔径雷诺数 $Re = 10\,000 \sim 25\,000$, 二次流吹风比 $M = 0.3 \sim 2.0$, 在上述范围选取了 26 个工况分别对 3 种孔形进行了实验。结果表明: 圆锥形孔、簸箕形孔及圆柱形孔的最佳吹风比分别为 1.0, 0.7 及 0.5。当吹风比大于 0.7 时, 带有扩张型出口的气膜孔的冷却效率和冷却区域均优于圆柱形孔。

关键词: 簸箕形孔; 圆锥形孔; 气膜冷却效率; 最佳吹风比

中图分类号: V233.5 文献标识码: A

Abstract: Effects of hole shapes on film cooling effectiveness downstream of film cooling holes were investigated. Experiments on dust-pan shaped holes, cone-shaped holes and round holes have been conducted with secondary flow Reynolds number ranging from 10,000 to 25,000 and blowing ratio ranging from 0.3 to 2.0. Measurements are taken for 26 conditions. Results show that the optimal blowing ratio is 1.0 for the cone-shaped holes, 0.7 for the dust-pan shaped holes and 0.5 for the round holes. The film cooling effectiveness and cooled area of dust-pan shaped holes and cone-shaped holes are evidently superior to those of round holes in cases of blowing ratios greater than 0.7.

Key words: dust-pan shaped hole; cone-shaped hole, film cooling effectiveness; optimal blowing ratio

在现代高性能航空发动机中, 由于燃气的出口温度很高, 往往会对发动机的高温部件产生不良影响, 所以, 需要采用气膜冷却技术对高温部件表面加以保护。目前有关气膜冷却方面的研究已有很多, 但多数是针对圆柱形孔进行的。中科院工程热物理所曾对槽缝气膜冷却进行过研究^[1], Goldstein 等人^[2]曾对几种不同几何形状喷孔的气膜冷却效率进行了测量, 徐红洲等人^[3]对单个圆锥形孔气膜冷却作了详细研究。本文的主要内容是对比研究不同的气膜孔形状对孔排下游冷却效率的影响。所选孔形除了传统的圆柱形孔外, 还有簸箕形及圆锥形孔。后两种孔形在新型航空发动机高温部件的气膜冷却设计中较大的应用潜力。这 3 种孔形对流量系数影响的研究见文献[4]。

1 实验装置

实验在西北工业大学回流式传热风洞中进行, 矩形实验段尺寸 $2.2\text{m} \times 0.5\text{m} \times 0.27\text{m}$, 顶板和两侧壁板由有机玻璃构成, 底板由不锈钢加热

带, 硬塑料板和硬泡沫塑料构成。不锈钢加热带厚度为 0.04mm , 宽 200mm , 贴在 3mm 厚的硬塑料板上, 硬塑料板下方是厚为 100mm 的多孔泡沫塑料层。考虑到对称性, 在中间孔下游半侧区域的加热带背面焊有直径 0.1mm 的镍铬-镍硅热电偶 90 个。风洞内气流速度可在 $3 \sim 40\text{m/s}$ 范围内进行无级调节。

为了对测量结果进行比较, 本实验选用的 3 种孔形均开在相同的壁厚上, 如图 1 所示, 孔轴线与平面的夹角均为 30° ; 圆锥形孔及簸箕形孔均是在圆柱形孔的基础上加工而成的。圆锥形孔孔口是一个张角为 30° 的圆锥形开口, 簸箕形孔孔口是由 4 个平面组成, 形同簸箕, 其底面与孔轴线的夹角为圆锥形孔张角的 $1/2$, 即 15° ; 两个侧面

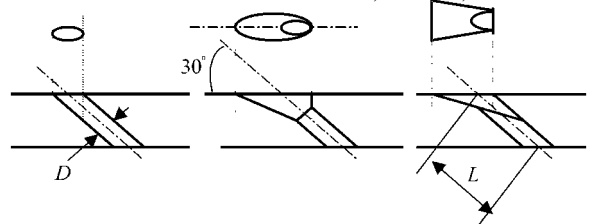


图 1 3 种孔形示意图

的夹角为 15° 。孔排由 5 个孔组成, 孔与孔之间的距离为 $4.5D$, 孔长 - 孔径比 $L/D = 4$ 。

每个孔都有独立的二次流系统供气, 其中设计有硅碳棒加热系统可对二次流加热, 流量用浮子流量计监控, 可调节使每个孔喷出的二次流都有相同的吹风比, 这样两边的 4 个喷孔就为中间的喷孔提供了对称的边界条件, 因此, 可以认为中间孔下游区域的情况可以代表每个孔下游的实际情况, 该区域又可分为两个对称的半侧区域, 故本实验在中间孔下游的右侧区域布置了约 90 个热电偶, 测量壁温。

冷却效率的定义式为

$$\eta_{i,j} = (t_{aw,i,j} - t) / (t_2 - t)$$

其中: $t_{aw,i,j}$ 为绝热壁温; t_2 为二次流温度。实验时采用二次流加热, 一般高于主流(环境)温度 $15 \sim 20K$, 而底板不加热。在此情况下, 由于壁面黑度很低及底板下敷设有很厚的低导热系数泡沫塑料绝热材料, 因此底板表面的辐射热损失及通过底板下的导热损失均很小, 完全可认为底板表面处于绝热状态, 所测的壁温即为绝热壁温。

2 实验结果与分析

本实验所选孔形为圆柱形孔, 簸箕形及圆锥

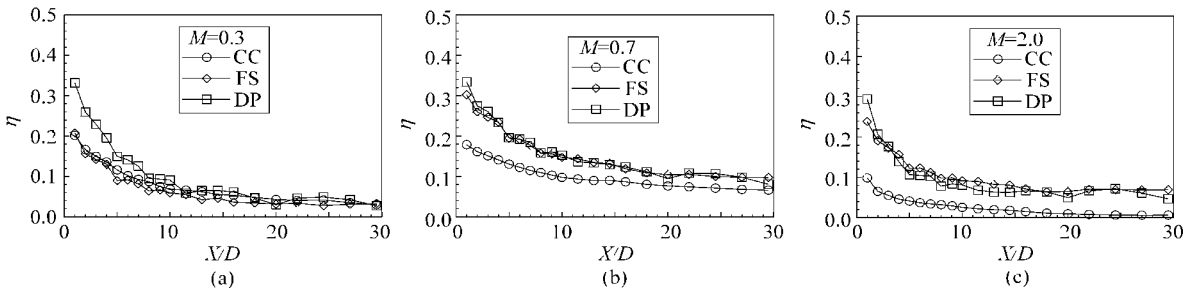


图 2 二次流雷诺数为 10 000 时 3 种孔形排平均冷却效率的对比

CC: 圆形孔(Round hole); FS: 圆锥形孔(Cone-shaped hole); DP: 簸箕形孔(Dust-pan shaped hole)

Fig. 2 Average film cooling effectiveness of holes for $Re = 10000$

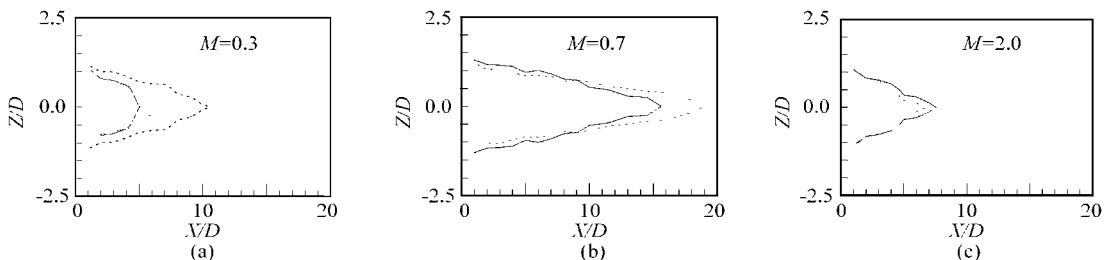


图 3 二次流雷诺数为 10 000 时 3 种孔形冷却效率大于 0.2 的区域比较

(虚线为圆形孔; 点划线为簸箕形孔; 细实线为圆锥形孔)

Fig. 3 Regions of film cooling effectiveness greater than 0.2 of holes for $Re = 10000$

形孔, 实验的参数范围为二次流(冷气)孔径雷诺数 $Re = 10\,000 \sim 25\,000$, 吹风比 $M = 0.3 \sim 2.0$ 。

(1) 气膜孔形状对平均冷却效率的影响 图 2 给出了在二次流雷诺数为 10 000 时, 3 种孔形孔排在 3 种吹风比 $M = 2.0, 0.7$ 及 0.3 条件下, 平均冷却效率(冷却效率沿横向平均值)的对比情况。可以看出当吹风比 $M = 0.3$ 时, 除了在孔口下缘附近簸箕形孔的平均冷却效率稍高以外, 3 种孔形孔排下游区域的冷却效率相差不大, 而在其余较高的吹风比下, 圆锥形孔排和簸箕形孔排的平均冷却效率明显高于圆柱形孔排, 特别是在孔口附近其高出的幅度更大。说明从具有扩张形出口的喷孔出流的气流对壁面的贴附性很好, 尤其是在孔口附近。当吹风比较低时, 喷出气流量较少, 会很快掺混到主流中去, 因而 3 种孔形的冷却效果差别不大。

(2) 气膜孔形状对二次流(冷气)覆盖区域的影响 图 3 给出了二次流雷诺数为 10 000 时, 吹风比分别为 0.3, 0.7 及 2.0 的情况下, 3 种孔形下游冷却效率大于 0.2 的区域比较。可以看出, 当吹风比 $M = 0.3$ 时, 簸箕形孔的覆盖区域最大, 延伸到 $X/D = 10$, 圆锥形孔和圆柱形孔的覆盖区域基本一样, 均只延伸到 $X/D = 5$ 处。垂直于流向,

簸箕形孔出流的扩展性也优于其他 2 个孔。当吹风比 $M = 0.7$ 时,圆柱形孔出流的覆盖区域明显小于簸箕形孔和圆锥形孔,从图 3(b) 可以看出,圆柱形孔的覆盖区域沿流向延伸到 $X/D = 9$,簸箕形孔和圆锥形孔分别延伸到 $X/D = 15$ 及 $X/D = 19$,垂直于流向圆柱形孔的覆盖区域扩展到 Z/D 约为 0.8 处,簸箕形孔和圆锥形孔均扩展到 Z/D 约为 1.3 处。当吹风比 $M = 2.0$ 时,圆柱形孔整个下游的冷却效率均低于 0.2,而簸箕形孔和圆锥形孔下游仍有较大的区域其冷却效率大于 0.2。综上所述,吹风比较小时,簸箕形孔的冷却性能要优于圆锥形孔和圆柱形孔。当吹风比大于 0.7 时,带有扩张型出口的气膜孔其冷却特性要明显优于圆柱形孔。分析其原因,从结构上讲,圆形孔有其明显的不足,即气流喷出后比较集中,特别是在较大吹风比时,喷出气流量大,使其具有较强的穿透能力,出流后直接穿过边界层进入主流区,对壁面的贴附性较差,降低了冷却效果。

表 1 给出了 3 种孔形孔排下游中心线上在各自吹风比下冷却效率的最大值,可以看出,除了在吹

表 1 3 种孔形下游中心线上冷却效率的最大值 (二次流雷诺数为 10 000)

Table 1 Maximum film cooling effectiveness of holes on $Z/D = 0$ line for $Re = 10\ 000$

吹风比 M	2.0	1.5	1.3	1.0	0.7	0.5	0.3
最大冷却效率							
圆柱形孔	0.12	0.13	0.16	0.26	0.35	0.42	0.45
圆锥形孔	0.42	0.48	0.50	0.55	0.56	0.56	0.42
簸箕形孔	0.56	0.60	0.59	0.66	0.69	0.72	0.72

风比为 0.3 以外,在其他吹风比下,圆锥形孔排及簸箕形孔排的冷却效率最大值均大于圆柱形孔,说明有更多的冷气从具有扩张形出口的气膜孔出流后贴附在了表面附近。

(3) 气膜孔形状对最佳吹风比的影响 图 4

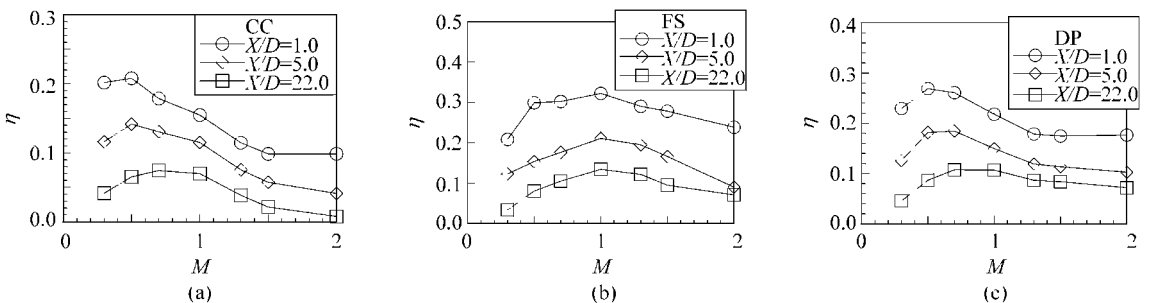


图 4 3 种孔形平均冷却效率随吹风比 M 的变化趋势

CC: 圆形孔; FS: 圆锥形孔; DP: 簸箕形孔

Fig. 4 Changes of average film cooling effectiveness with blowing ratio

(a)、(b) 及 (c) 分别给出了所研究的 3 种孔形孔排下游,在 $Re = 10\ 000$ 时,平均冷却效率在 $X/D = 1.0, 5.0$ 及 22.0 三个不同位置处,随吹风比 M 的变化趋势。可以看出在孔排下游的整个测量区内,冷却效率平均值随吹风比 M 的增大都有一个先上升后又下降的过程。圆柱形孔排,在上述 3 个位置上,对应于最高平均冷却效率的吹风比分别为 0.5, 0.5 及 0.7,所对应的冷却效率为 0.2, 0.14 及 0.07,簸箕形孔排分别为 0.5, 0.7 及 1.0,所对应的冷却效率为 0.25, 0.18 及 0.11,圆锥形孔排这 3 个吹风比则均为 1.0,所对应的冷却效率为 0.32, 0.21 及 0.13。可见圆锥形孔排最佳吹风比最高,簸箕形孔排次之,圆柱形孔排最低。这一实验结果提示,具有扩张形出口的孔形,在相同吹风比下,其冷却效果优于圆柱形孔,且更适合于在高吹风比下使用,以获得最好的冷却效果。

从上述图形还可以看出,圆柱形孔排及簸箕形孔排的最佳吹风比随着 X/D 的增加而向高吹风比移动,说明采用这两种孔形对远离孔排的下游区域进行冷却时,适当提高吹风比能获得更好的冷却效果,圆锥形孔排没有这种选择性,在冷却系统设计时更具有优越性。

3 结 论

本文的实验表明,具有扩张形出口的气膜孔更适合于在高吹风比下使用。

(1) 当吹风比大于 0.7 时,带有扩张形出口的气膜孔型,会使更多的气流出流后贴附在表面上,并在流向及横向的覆盖区域明显大于圆柱形孔,因而具有更高的冷却效率。

(2) 带有扩张形出口的孔型使最佳吹风比提高,在本实验中圆锥形孔的最佳吹风比为 1.0 左右,簸箕形孔为 0.7 左右,圆柱形孔为 0.5 左右。

参 考 文 献

- [1] 葛绍岩, 刘登瀛, 徐靖中, 等. 气膜冷却[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
(Ge S Y, Liu D Y, Xu J Z, *et al.* Film cooling[M]. Beijing: Science Press, 1985.)
- [2] Goldstein R J, Eckert F R, Burggraf F. Effects of hole geometry and density on three-dimensional film cooling[J]. Int J Heat Mass Transfer, 1974, 17: 595- 607.
- [3] 徐红洲. 气膜冷却的实验研究[D]. 西安: 西北工业大学, 1996.
(Xu H Z. Experimental investigation of film cooling[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 1996.)
- [4] 朱惠人, 许都纯, 刘松龄, 等. 气膜孔形状对流量系数影响的实验研究[J]. 推进技术, 1998, 19(1):42- 45.
(Zhu H R, XU D C, Liu S L, *et al.* Effects of hole geometric model on discharge coefficients of film cooling holes [J]. J of Propulsion Technology, 1988, 19(1): 42- 45)

作者简介:



朱惠人(1958-) 男, 陕西人, 西北工业大学教授, 博士。1982年毕业于西安交通大学, 1988年获硕士学位, 2000年3月获西北工业大学博士学位。研究方向包括传热与传质, 数值传热学, 高温部件冷却技术, 气膜冷却技术各种传热强化技术等。



许都纯(1960-) 男, 陕西人, 高级工程师。研究方向为高温部件传热及冷却技术, 测试技术。

刘松龄(1933-) 男, 江苏人, 西北工业大学教授, 研究方向为传热学, 粘性流体力学、航空发动机冷却技术等。

(责任编辑: 吴小勇)