

文章编号: 1000-8055(2006)05-0814-06

双排簸箕形孔气膜冷却效率及其 叠加算法

朱惠人, 郭 涛, 许都纯
(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 对双排错排簸箕形孔气膜冷却效率进行了实验研究, 测出了孔排下游的局部冷却效率的分布。对比研究了单排孔与双排孔气膜冷却效率分布的特点及双排孔气膜冷却效率的叠加算法。结果表明, 在单排孔条件下所确定的最佳吹风比, 在多排孔喷射时是不适用的。在较高吹风比下, 如采用传统的气膜冷却效率的叠加算法, 根据单排孔冷却效率计算双排孔冷却效率会产生很大的偏差, 其计算结果远低于试验值。给出了双排错排的簸箕形孔的喷射时, 冷却效率的叠加计算关系式。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 簸箕形孔; 气膜冷却; 叠加算法

中图分类号: V 231.1

文献标识码: A

Film cooling and superposition method for double row dust pan shaped holes

ZHU Huiren, GUO Tao, XU Duchen

(School of Power and Energy,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Film cooling effectiveness for injection from single row and double row dust pan shaped holes has been studied experimentally. The differences of cooling performance between single row and double row holes were described. Results show that the optimal blowing ratio of injection from double row holes is higher than that of injection from single row holes. In the case of higher blowing ratio, the traditional superposition calculation method under-predicts the film cooling effectiveness of double row injection based on that of single row hole injection. The modified superposition calculation method is given in the present paper.

Key words: aerospace propulsion system; dust pan shaped hole; film cooling; superposition method

在现代高性能航空发动机中, 由于燃气的出口温度很高, 往往会对发动机中的高温部件产生不良影响, 气膜冷却技术是对高温部件表面加以保护的有效方式。采用单排气膜孔已不能满足冷

却需要, 因此目前设计中大都采用多排孔冷却方式, 因此多排孔气膜冷却效率的叠加, 就成为设计中必须关注的问题。但由于其问题的复杂性, 实际设计中所采用的是大都是针对具体情况的试验

收稿日期: 2005-10-17; 修订日期: 2006-03-22

作者简介: 朱惠人(1958), 男, 陕西西安人, 西北工业大学动力与能源学院教授, 博士, 主要从事航空发动机高温部件强化传热及冷却技术的研究。

数据, 没有普适性, 为了提高叶片热分析及设计效率, 寻找多排孔气膜冷却的叠加规律, 就显得特别重要了。较早研究单排孔冷却效率与多排孔冷却效率之间关系的是 Sellers^[1] 等, 他们在忽略气膜孔排间相互干扰的条件下提出了一种多排气膜孔冷却效率的叠加算法, 对两维缝隙气膜冷却较为适用。Sasaki 等^[2] 则采用实验对该算法进行了验证, 表明多数情况下其计算值偏低, 但认为其偏差是可以接受的。Takeishi^[3] 试验研究了涡轮叶片上多排气膜孔冷却效率的叠加效果, 发现 Sellers 的叠加算法在导向叶片吸力面较为适用, 对旋转条件下工作叶片的吸力面, 仅在气膜孔下游较远处才较为适用, 在叶片压力面, 其计算值与试验结果相差较大。有关扩张形气膜孔冷却效率的叠加算法的研究很少见到。本文对单、双排簸箕形孔排下游的冷却效率进行了测量, 对比研究了主流流动参数及吹风比的影响规律, 在对其冷却效率叠加特性的研究中发现若采用^[1] 中所提出的叠加法计算双排气膜孔的冷却效率, 在高吹风比时会产生很大的偏差, 并根据试验数据提出了具有扩张形出口的双排簸箕形孔排下游的冷却效率的叠加算法关联式。

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 $2.2\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.27\text{ m}$, 实验段进口前收缩比为 7.69:1, 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。经发泡处理后的多孔硬泡沫塑料层厚 100 mm, 导热系数约为 $0.03 \sim 0.04 (\text{W/m} \cdot \text{K})$, 在硬泡沫塑料上部是 3 mm 厚的硬塑料板, 上面贴有厚度为 0.04 mm, 宽 200 mm 的不锈钢加热带, 相邻加热带彼此间相互绝缘并采用串联方式连接, 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 0.1 mm 的镍铬-镍硅热电偶 90 个。风洞内气流速度采用变频器在 $3 \sim 25\text{ m/s}$ 范围内进行无级调速。

簸箕形孔排及孔形示意图如图 1 所示, 做单排试验时, 只打开其中的第一排孔, 做双排孔气膜冷却效率实验时, 同时打开第 1 排孔和第 2 排, 两种试验的测量区域相同, 均为第一排孔的中心孔下游的区域, 考虑到对称性, 只测量了中心孔中心对称线左侧区域冷却效率的局部分布。簸箕孔的圆柱部分直径 $D = 15\text{ mm}$, 该圆柱轴线与壁面夹角为 30° , 簸箕形底平面与圆柱轴线夹角为 15° 。

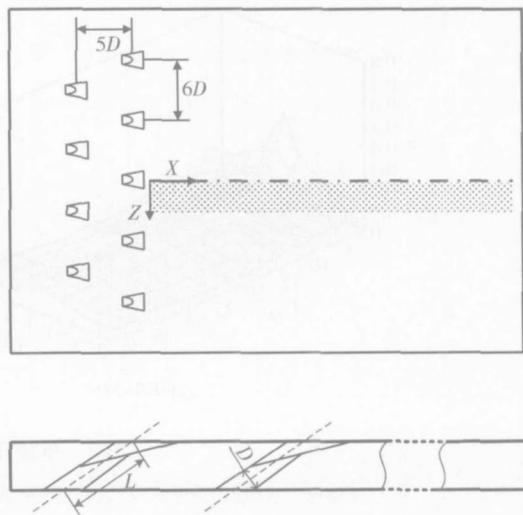


图 1 簸箕形孔排及孔形示意图

Fig. 1 Sketch of dust pan shaped hole rows and holes

孔与孔之间的距离为 $6D$, 双排孔的排距分别是 $5D, 10D, 15D$ 。

实验时对二次流进行加热, 在测出试件表面的温度 $t_{i,j}$, 二次流温度 t_2 及主流温度 t_0 后, 按下式来计算冷却效率:

$$\eta_{i,j} = \frac{t_{aw,i,j} - t_0}{t_2 - t_0} = \frac{t_{i,j} - t_0}{t_2 - t_0} + \frac{q_{rad} + q_{cond}}{h_{i,j}(t_2 - t_0)} \quad (1)$$

其中 $t_{aw,i,j}$ 为绝热壁温, 是无法直接测量的。 q_{rad} 为试件表面向周围环境的辐射热量, q_{cond} 为由试件表面通过底部硬塑料板和硬泡沫塑料层以导热形式散失的热量, $h_{i,j}$ 为试验件表面的局部的换热系数。

实验中主流速度可在 $3 \sim 25\text{ m/s}$ 范围内进行调节, 主流温度 t_0 约为 $5 \sim 15^\circ\text{C}$, 二次流加热后的温度比 t_0 高出 20°C 左右。二次流供气系统中设计有硅碳棒加热器对其加热, 流量用浮子流量计监控。

2 实验结果与分析

本实验的参数范围为主流速度 $U = 5 \sim 15\text{ m/s}$, 二次流吹风比 $BR = 0.3 \sim 2.0$, 对每种孔排距, 在上述范围选取了 21 个工况进行试验, 总试验工况 63 个。从本试验所获得的三个孔排距的试验结果看, 孔排距对气膜冷却效率的叠加效果影响较小, 因此以下只讨论孔排距为 $5D$ 的情况。

2.1 单排孔冷却效率的实验结果

(1) 单排孔下游冷却效率的分布

图 2(a), (b) 给出了主流速度为 15 m/s , 吹风比为 0.5 及 2.0 时, 单排孔下游冷却效率的局部

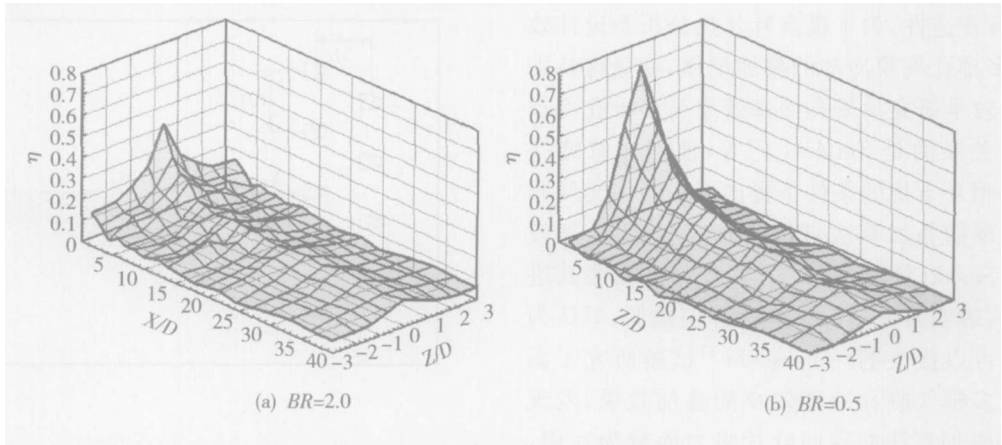


图 2 单排孔下游冷却效率的分布

Fig. 2 Film cooling effectiveness distribution on single row downstream surface

分布,可以看出,无论吹风比大于 1,还是小于 1,冷却效率分布很相似,有一些共同的特点:即在整个测量域中,中心线 $Z/D = 0.0$ 上,冷却效率最高,随着 Z/D 的增大,各条线上的冷却效率逐次降低,在 $Z/D \geq 2.0$ 区域的冷却效率下降趋缓,并达到了很低的值。同时沿流动方向,冷却效率随 X/D 的增大而减小,例如中心线上在 $BR = 2.0$ 的工况中, $X/D > 7$ 时,冷却效率下降到了低于 20% 的数值,在 $BR = 0.5$ 的工况中, $X/D > 20$ 时,冷却效率下降到了低于 20% 的数值,说明吹风比小于 1 时,冷气的冷却作用要比吹风比大于 1 时好。主要原因是吹风比大时,二次流喷出后,大部分脱离了壁面,起不到保护壁面的作用。

(2) 主流速度不变时,吹风比的影响

图 3 给出了主流速度为 15 m/s,不同吹风比对冷却效率平均值的影响情况,可以看出,随着吹风比由小到大的变化,冷却效率有一个逐步上升然后又下降的趋势,在吹风比为 1.0 时达到一个最大值,该值称为最佳吹风比,前人的研究表明圆柱形孔的最佳吹风比在 0.5 左右。本文所研究的簸箕形孔最佳吹风比为 1.0,大于圆柱形孔,主要原因是簸箕形孔出口的扩张作用降低了二次流喷出时的动量,使其在主流的作用下更容易贴附在壁面上。文献[4]中所提供的单排簸箕孔最佳吹风比约为 0.7,其中孔间距为 $4.5D$,小于本文的 $6D$,说明孔间距增加时,最佳吹风比会提高。图 3 中,在 $X/D = 1, 5$ 及 22 时,最佳吹风比所对应的冷却效率分别为 0.30, 0.22 及 0.11,文献[4]中对应的结果为 0.26, 0.18 及 0.11,对应位置本文结果高于文献[4],这主要得益于最佳吹风比较高。

(3) 吹风比不变时,主流速度的影响

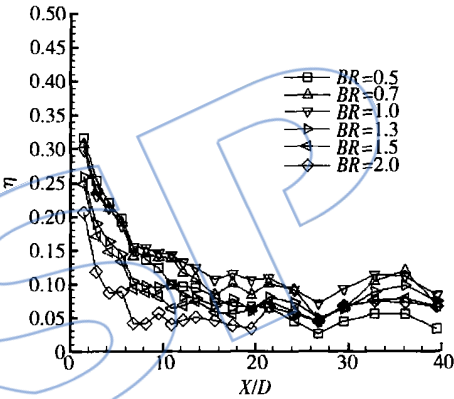


图 3 不同吹风比对冷却效率平均值的影响

Fig. 3 Effect of blowing ratio on average film cooling effectiveness

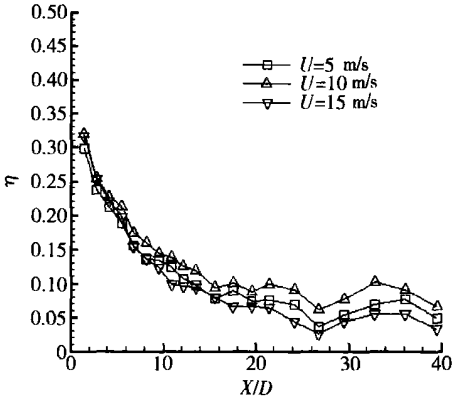


图 4 不同主流速度对冷却效率平均值的影响

Fig. 4 Effect of main flow velocity on average film cooling effectiveness

图 4 给出了吹风比为 0.5 时,主流速度对冷却效率平均值的影响情况。可以看出,主流速度的变化对冷却效率的影响较小,特别是在 $X/D < 20$ 的区域,在较远区域三个主流速度下的冷却效

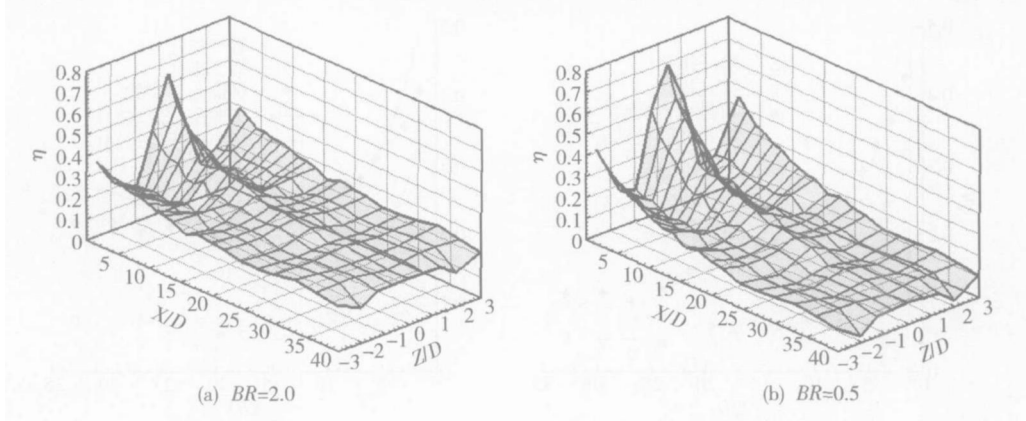


图5 双排孔下游冷却效率的分布

Fig.5 Film cooling effectiveness distribution on double row downstream surface

率分布有所分散,可能与该区域冷却效率较小,测量相对误差较大有关。在吹风比不变时,随着主流速度的增加,二次流的速度也要增加,换句话说,随着主流速度的增加,会有更多的二次流气体从气膜孔喷出,但这并没有明显的改善气膜冷却效率,原因是随着主流及二次流速度的同步增大,两者之间的掺混强度也增大了,使得在壁面附近二次流相对主流浓度并没有产生较大的变化。

比较图3及图4,可以看出,吹风比对冷却效率影响较大,主流速度对冷却效率的影响较小,主要原因是吹风比能更好的反映二次流与主流的相互作用规律。

2.2 双排孔冷却效率的实验结果

(1) 双排孔下游冷却效率的分布

图5(a),(b)给出了主流速度为15 m/s,吹风比为0.5及2.0时,双排孔下游冷却效率的局部分布。与图2所给出的单排孔结果相比,可以看出以下几个不同特点:第一,在两个孔的中间位置,即 $Z/D=3.0$ 处,冷却效率较高,呈“山”字形,很明显这是上游孔排喷出二次流的影响所造成的结果,由于两排孔为错排,上游孔排喷出的二次流正好位于下游孔排两孔的中间位置,使该部位的冷却效率有所升高;第二,当吹风比为2.0时,在 $Z/D=0$ 的中线附近的冷却效率相对图2所示单排情况有较大幅度提高,但这种现象在吹风比为0.5的情况下并不明显。其原因可能是,在上游孔排喷射的影响下,主流的湍流度有大幅增加,对下游孔排喷射有很大的扰动,具有加快其向周围扩散的作用,使下游喷出的二次流很快向壁面扩散,而不是像单排孔那样喷射到主流区域。在吹风比为0.5时,上游喷射大部分贴附在壁面上,对主流影响较小,再者,吹风比为0.5时冷却

效率本身就较高,因此下游孔排冷却效率的升幅自然会较小。这些现象说明在高吹风比和低吹风比下,上下游孔排喷射的相互干涉机理有所不同,预示着气膜冷却效率叠加效果的计算方法在高吹风比和低吹风比下可能有所不同。

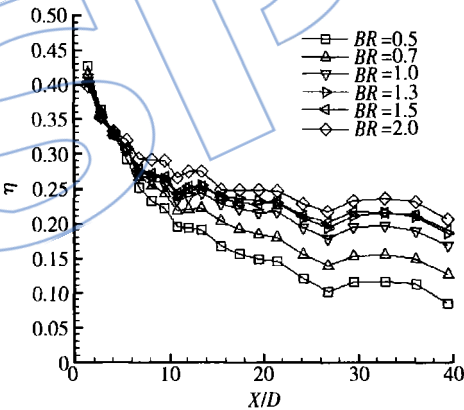


图6 不同吹风比对冷却效率平均值的影响

Fig.6 Effect of blowing ratio on average film cooling effectiveness

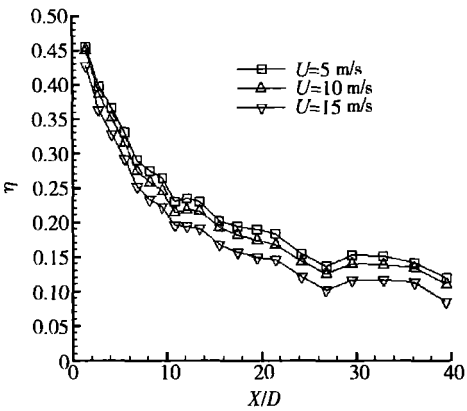


图7 不同主流速度对冷却效率平均值的影响

Fig.7 Effect of main flow velocity on average film cooling effectiveness

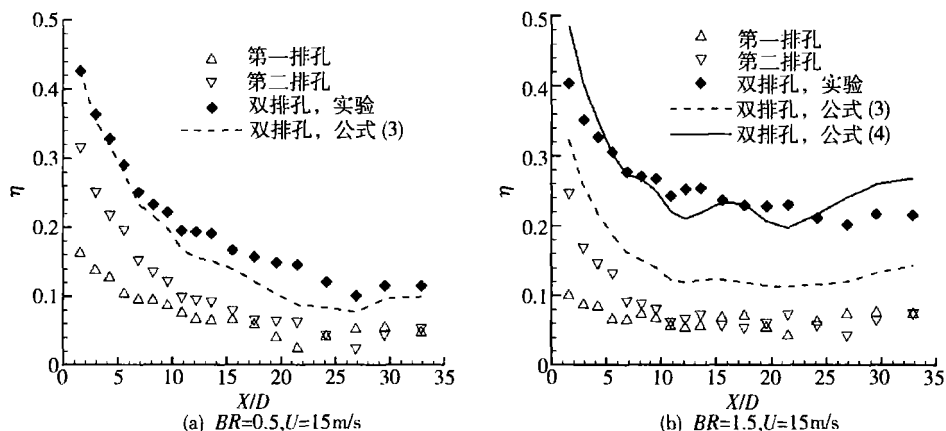


图8 双排气膜孔冷却效率叠加效果的计算

Fig. 8 Computed result of superposition effect of double row film cooling effectiveness

(2) 主流速度不变时, 吹风比的影响

图6给出了主流速度为15 m/s, 不同吹风比对冷却效率平均值的影响情况。与图3所示单排孔情况不同, 双排孔下游的平均冷却效率随吹风比变化呈单调增加趋势, 但当吹风比大于1.0以后, 增加的幅度有所减小。在 $X/D < 6$ 的区域, 冷却效率几乎不受吹风比的影响, 在 $X/D > 6$ 以后, 在二次流与主流掺混的影响下, 吹风比小的工况中冷却效率下降较快, 这是由于二次流绝对量较小, 在壁面附近二次流相对主流的浓度下降较快所致。这个结果表明, 在单排孔条件下确定的最佳吹风比, 在多排孔喷射时是不适用的。

(3) 吹风比不变时, 主流速度的影响

图7给出了吹风比为0.5时, 主流速度对冷却效率平均值的影响情况。与图4所示的单排孔情况基本相同, 在双排孔情况下, 主流速度对冷却效率平均值的影响也较小。

2.3 双排孔冷却效率的叠加计算

一般来讲, 多排孔气膜冷却效率要高于单排孔, 并与单排气膜孔的冷却效率密切相关, 但其具体的关系却很难确定。Sellars 早在上世纪60年代就根据两维缝隙气膜冷却的特征提出了气膜冷却效率的叠加计算方法:

$$\eta = \eta_1 + \eta_2(1 - \eta_1) + \dots + \eta_n(1 - \eta_1)(1 - \eta_2) \dots (1 - \eta_{n-1}) \quad (2)$$

其中, η_i 为第*i*排气膜孔单独喷射时, 在计算点处产生的冷却效率, 对两排气膜孔的情况, 上式具有如下形式:

$$\eta = \eta_1 + \eta_2(1 - \eta_1) \quad (3)$$

上式的推导是基于两维气膜缝喷射的, 并忽略了上下游气膜喷射的相互干扰, 因而在应用时

受到了很大的限制, 本文针对离散簇形气膜孔喷射, 测量了单排及双排气膜孔冷却效率分布, 经对比研究发现, 在吹风比小于1时, 式(3)具有较好的适用性, 其中在孔下游附近 $X/D < 10$ 的区域, 该式与试验数据符合的相当好, $X/D > 10$ 的区域, 其计算值略低于试验数据, 如图8(a)所示; 但在吹风比大于1时, 如图8(b)所示, 采用式(3)计算的结果远低于实测值。本文引入两个参数, 用下式描述两排簇形气膜孔冷却效率的叠加计算:

$$\eta = a\eta_1 + b\eta_2(1 - \eta_1) \quad (4)$$

整理该式所示用数据的吹风比范围是1.0~2.0, 其中 a, b 两个参数与吹风比相关, 并随吹风比增大而增大, 如图9所示, 可以看出系数明显大于系数, 第一排孔的冷却效率在叠加中占有较为重要地位, 这也可以说明本实验中三个孔排间距对叠加效果影响不大的现象。可以看出本文所获得的关系式(4)能较好的模拟大吹风比时, 两排相距较近的簇形气膜孔喷射时冷却效率的叠加关系。

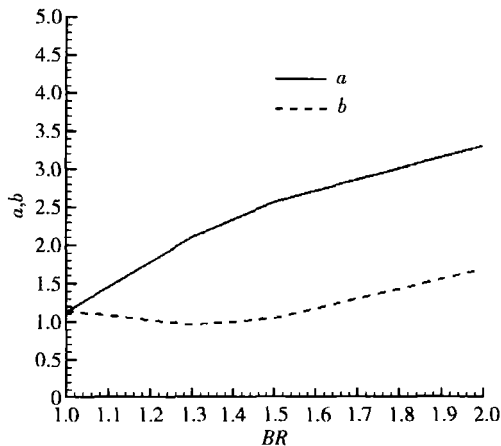


图9 叠加算法中的参数

Fig. 9 Parameters of superposition method

3 结 论

(1) 孔间距为 $6D$ 时单排簸箕孔最佳吹风比为 1.0, 与文献[4] 的结果对比表明, 单排簸箕孔最佳吹风比随孔间距增大而增大, 所对应的冷却效率也有小幅提高;

(2) 双排错排的簸箕形气膜孔下游的冷却效率分布呈“山”字形, 并且当吹风比较高时, 冷却效率相对单排孔有大幅度提高;

(3) 在本文试验的吹风比范围内(0. 5~ 2. 0), 双排错排的簸箕形气膜孔喷射时, 冷却效率随吹风比增加而增大, 当吹风比大于 1 时, 增加的幅度趋缓。表明在单排孔条件下所确定的最佳吹风比, 在多排孔喷射时是不适用的;

(4) 基于两维缝隙喷射分析所获得的冷却效率叠加计算式(3), 在吹风比较低时(本文中小于 1), 可适用于双排错排的簸箕形孔的喷射, 当吹风

比较高时, 其计算结果远低于试验值, 本文给出了较高吹风比条件下, 双排错排的簸箕形孔的喷射时, 冷却效率的叠加计算关系式。

参考文献:

[1] Sellers J P Jr. Gaseous Film Cooling with Multiple Injection Stations, [J]. AIAA Journal, 1965, 1: 2154 2156.

[2] Sasaki M, Takahara K, Kumagai T, et al. Film cooling effectiveness for injection from multirow holes[J]. Journal Engineering for Power, Tans. ASME, 1979, 101: 101-107.

[3] Takeishi K Aoki S, Sato T, Tsukagoshi K. Film cooling on a gas turbine rotor blade [J]. Journal of Turbomachinery, 1992, 114: 828- 834.

[4] 朱惠人, 许都纯, 刘松龄. 气膜孔形状对排孔下游冷却效率的影响. [J]. 航空学报, 2002, 23(1): 75-78.

Zhu Huiren, Xu Duchun, Liu Songling. Effects of hole shape on film cooling effectiveness[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2002, 23(1): 75-78.