

弯曲壁面上离散孔气膜冷却均匀性的实验研究

中国科学院工程热物理研究所 姚永庆 夏彬 葛绍岩

美国德克赛尔大学

邹福康

摘 要

本文利用传质比拟传热的方法,研究离散孔气膜冷却在整个弯曲壁面上沿与主流垂直方向的冷却均匀性。比较了单、双排孔和前、后排孔流量不等时,在不同吹风比的条件下,在凸、凹表面上冷却均匀性的特征。

离散孔是现代气膜冷却广为采用的结构形式,其主要缺点是冷却均匀性不好。本文是以有效温比在整个弯曲壁面上的分布为基础,对射流孔下游,沿着与主流垂直方向(E方向)的冷却均匀性进行了较全面的实验研究,取得了较为满意的结果。

实验是采用传质模拟传热的方法进行的。其实验原理、装置、测试仪表以及试验件尺寸等,见文献[1]。图1为试验件的平面示意图,图中 x 与 θ 的关系为: $x = \pi R \theta / 180 + 10$,式中 R 为曲面的曲率半径。

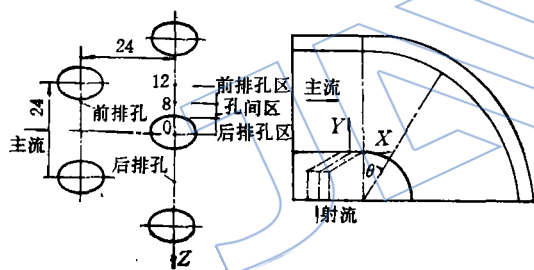


图1 试验件的平面示意图

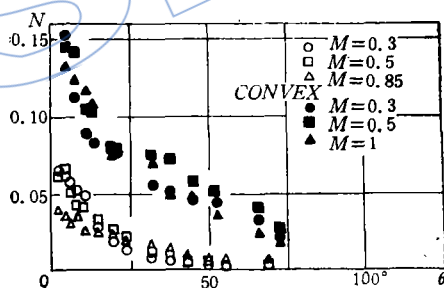


图2 单排离散孔在弯曲壁面上沿z方向的不均匀度

1. 实验结果与分析 为了评比在E方向上的冷却均匀性,引入冷却均匀系数 $N = (\eta_{\max} - \eta_{\min}) / E_{a1}$ 。式中 $\eta_{\max}$ 和 $\eta_{\min}$ 分别为在同一 θ 位置上,沿z向的有效温比最大值和最小值, E_{a1} 是这两个值之间的间距。 N 值的大小,仅反映出冷却的均匀程度,而不表示冷却效果的优劣。 N 值愈大,冷却均匀性就愈差, $N = 0$ 时,具有最佳的冷却均匀性。

(1) 单排离散孔

图2示出了单排离散孔的实验结果,它有以下特点:(a)在远孔区的冷却均匀性能比近孔区的好。这是因为气膜从射流孔喷射出来,以一定角度扩散开,离孔愈远其复盖面愈大,同时近孔区的有效温比要比远孔区高得多,见图3、图4。(b)在近孔区 M 值大反而冷却均匀性好、这是由于 M 值愈大,射流脱离壁面的趋向性就愈大,这对凹表面更为显著,此时有效温

比很小, 而达不到应有的冷却效果, 这种冷却均匀性是没有意义的。在小 M 值的, 由于射流动量小, 在主流的作用下, 在近孔区有较高的有效温比, 且射流的扩散角大, 因此也有较好的冷却均匀性。(c)凹表面上沿 E 方向的冷却均匀性, 明显的比凸表面上的要好, 而与 M 和 θ 值的大小无关, 一般相差 1 倍以上。这一特性主要是由于在不同弯曲表面上主流与射流具有不同的特性所决定的。文献〔2〕中指出, 在气膜冷却的射流中, 存在着与主流运动方向相垂直的二次流, 而在凹、凸表面上, 二次流的旋向是相反的。在凸表面上, 射流外缘的二次流是向内翻卷的, 而在凹表面上, 则是向外翻卷的, 这样就形成一个阻止射流扩散, 而另一个是促使射流扩散的运动。另一方面, 在弯曲壁面流动特性的试验中, 发现在凹表面上, 产生着一系列与主流相垂直的旋涡〔3〕, 而在凸表面上无此特性。正是上述原因, 就造成在凸表面上在孔区范围内有较高的有效温比值, 而沿 z 方向扩散性差, 而在凹表面上孔区内有效温比值较低, 沿 z 方向扩散性好的特征。

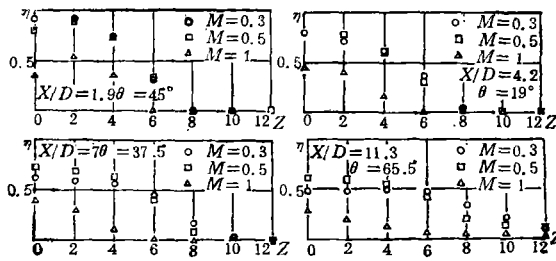


图 3 单排离散孔在凸表面上有效温比的分布

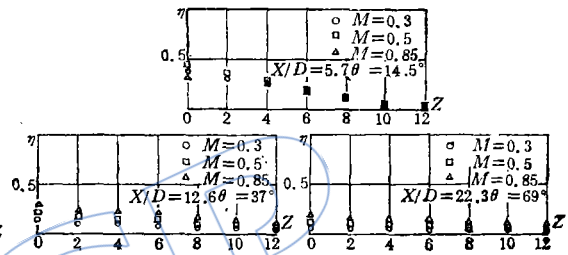
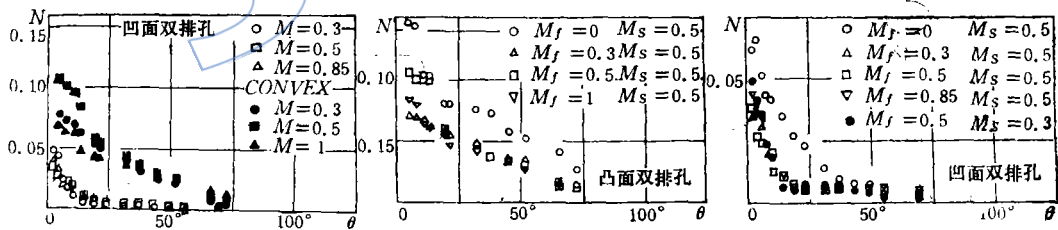


图 4 单排离散孔在凹表面上有效温比的分布

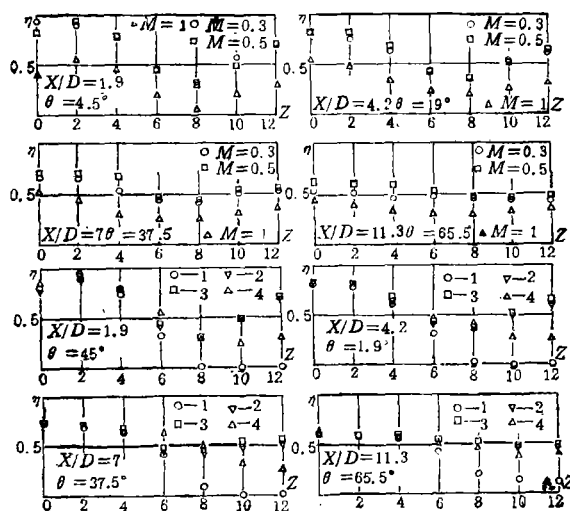
(2) 双排离散孔

在离散孔结构中, 采用双排孔形式, 是改善冷却不均匀性的有效措施。我们除了对前后排孔流量相等时做了大量的实验, 并采取了固定后排孔的流量, 使其保持在 $M = 0.5$, 而改变前排孔流量的方法, 来研究前后排孔流量变化对冷却均匀性的影响。

图 5 双排离散孔在弯曲壁上沿 z 方向的冷却不均匀度。

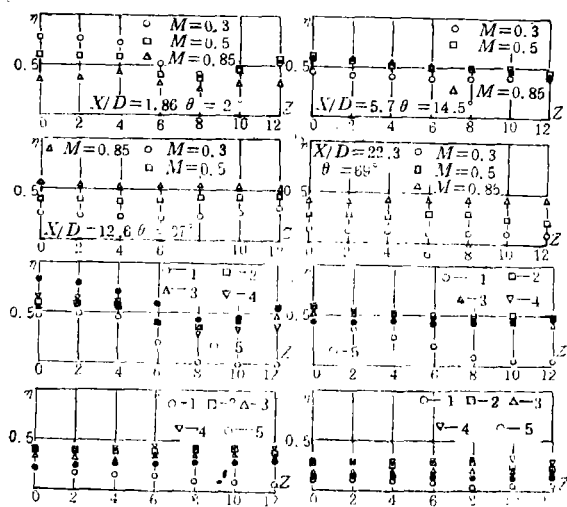
从图 5 中可以看出, 当离散孔气膜冷却采用双排孔结构以后, 与单排孔相比较, 无论 M 值大小, 无论是在凹表面还是在凸表面上, 无论是在近孔区还是在远孔区, 无论前排孔流量是大是小, 其沿 z 方向的冷却不均匀性都有显著的改善。相比之下, 凸面上改善的程度更大一些。它们依然具有单排孔的一些特征: 凹表面上比凸表面上的冷却均匀性好, 远孔区比近孔区冷却均匀性好, M 值小时冷却均匀性好。

如图 6 所示, 对于凸表面, 不论 M 值大小, 也不论前排孔的流量如何变化, 在后排孔区内, 与单排孔时相比较, 同一 M 值情况下的有效温比值, 基本上没有变化, 充分地显示出



$M_s = 0.5$ 时: 1- $M_f = 0.0$ 2- $M_f = 0.3$
3- $M_f = 0.5$ 4- $M_f = 1.0$

图 6 在凸表面上双排离散孔有效温比的分布



$M_s = 0.5$ 时: 1- $M_f = 0.00$ 2- $M_f = 0.50$
3- $M_f = 0.30$ 4- $M_f = 0.85$

图 7 在凹表面上双排离散孔时有效温比的分布

在凸表面上气膜扩散性差的特点。另一特点是,有效温比最小值的位置在 $Z = 8$ 附近,也和 M 值及前排孔的流量变化无关,它取决于射流孔的间距及射流与主流的夹角。从图 7 上可以看出,对于凹表面,加大前排孔的流量,同时也提高了后排孔孔区的有效温比值,反映出凹表面上气膜扩散性好的特点。第三个特点是,无论 M 值大小,无论前排孔流量如何变化,在 $\theta = 14.5^\circ$ 附近,它的有效温比值为 0.5 左右,在 $\theta < 14.5^\circ$ 时, M 值大,有效温比值就低,在 $\theta > 14.5^\circ$ 时, M 值大,有效温比值就高。这取决于曲面的曲率半径和射流的喷射角。

综合上述可以看出,采用双排孔结构,对于凸表面,可以显著地改善冷却不均匀性。而对凹表面,不仅可以改善冷却均匀性,同时也提高了后排孔孔区的有效温比。

2. 结论

- (1) 凹表面上的冷却均匀度优于凸表面上的,远孔区优于近孔区,双排孔优于单排孔。
- (2) 增大凸表面的射流流量是有害无益的,前后排孔的吹风比,一般应控制在 0.3 与 0.5 之间 ($0.3 \leq M < 0.5$)。适量提高凹表面前排孔的流量,虽不能改善冷却均匀性,但可改善后排孔孔区下游的冷却效果。
- (3) 在采用双排孔结构时,在凸表面上, $E = 8$ 附近是冷却的薄弱点。在凹表面上,在 $\theta = 14.5^\circ$ 附近,不管 M 值大小,其有效温比是一常数。且在 $\theta > 14.5^\circ$ M 值大的有效温比值高, $\theta < 14.5^\circ$ 时,则相反。

总之,从冷却均匀度来看,在凸表面上不宜采用单排孔结构。

参 考 文 献

- [1] 姚永庆、夏彬、葛绍岩、邹福康:“双排离散孔在凸表面上气膜冷却有效温比的传质实验研究”《航空动力学报》Vol. 1, No. 1 1986.7.
- [2] 姚永庆、夏彬、葛绍岩、邹福康:“弯曲壁上双排离散孔的流量不等时气膜特性的实验研究”,《工程热物理学报》, Vol. 7, No. 4, 1986.11.
- [3] Ramaprian, B.R., Shivaprasad, B.G., “Mean Flow Measurements in Turbulent Boundary Layers Along Mildly Curved Surfaces” AIAA Vol. 15, 1977.

(责任编辑 杨帆)

TECHNICAL NOTES

A DATA ACQUISITION SYSTEM FOR BLADE VIBRATION TEST

Zhang Chengsheng and Song Zhaohong

(Beijing Institute of Aeronautics and Astronautics)

Abstract

A real-time data acquisition system based on IBM-PC for vibration test is provided. The highest sampling frequency of each channel is 100kc/s. There are 16 A/D channels and 2 D/A channels in this system. The tests of frequency spectrum analysis and vibration stress distribution of blade have been completed with this system.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON FILM-COOLING UNIFORMITY OF DISCRETE HOLES OVER A CURVED SURFACE

Yao Yongqing, Xia Bin, Ge Shaoyen

(Institute of Engineering Thermophysics)

Abstract

The film-cooling uniformity of discrete holes in the direction normal to main stream is investigated by means of heat and mass analogy. At different blowing ratios, the features of the film-cooling uniformity for one row and two rows of discrete holes are compared. It is found that the film-cooling uniformity on the concave surface is better than that on the convex one.

A DESIGN METHOD OF "WIGGLESTRAP" FILM-COOLING CONSTRUCTION OF FLAME TUBE

Li Changlin

(Northwestern Polytechnical University)

Abstracts

This paper presents a calculation method for the design of three types of "wigglesrap" film-cooling construction, i. e. the square, the trapeze and the double circle arc constructions, which are applied to the flame tube of aero-engine. When the airflow distribution and the cooresponding airflow passage section areas are given, all parameters of the construction can be determined.