

透平叶片冷却膜稳定性的实验研究

鄂学全 邓素卿* 郭绍岩* 李 堃

(中国科学院力学研究所)

*(中国科学院工程热物理研究所)

提 要

在水洞中,对透平叶片冷却膜附壁的稳定性的稳定性进行了显示观察和测量的实验研究。用圆柱和放大的叶片做模型,模拟叶片前缘和叶盆凹面的流动。在流体动力学相似条件下,用色液显示的方法,观察了圆柱上展向喷射角 β 为 30° 的冷膜的流动图案;测量了从圆周角 θ 为 10° 、 20° 、 25° 和 40° 处喷射的冷膜的临界速比 m_{cr} 与主流加速度参数 K 的关系,并得出经验公式: $m_{cr} = f(K, \beta)$ 。测量的叶片凹面上冷膜的 m_{cr} 与 K 的关系,有与圆柱凸面上的相近趋势,可作为工程设计的参考依据。

符 号

C 叶片弦长(毫米)	X 从前驻点量起的弧长(毫米)
d 喷射孔直径(毫米)	α 由图 2(c)定义的安装角
D 圆柱直径或对应的叶片前缘圆弧直径(毫米)	β 由图 2(a)定义的喷射角
$K = \frac{v}{V^2} \frac{dV}{dX}$ 加速度参数	θ 圆周角
$m = \frac{V_j}{V_m}$ 喷射速比	ν 运动粘度
$M = \frac{\rho_j V_j}{\rho_m V_m}$ 喷射流率比(吹风比)	μ 动力粘度
$R_{mC} = \frac{V_j C}{\nu}$ 弦长定义的雷诺数	ρ 密度
$R_{cd} = \frac{V_j d}{\nu}$ 射流雷诺数	下 标:
$R_{cD} = \frac{V_j D}{\nu}$ 圆柱直径定义的雷诺数	cr 临界值
V 来流速度(厘米/秒)	f 液 态
	g 气 态
	j 射 流
	m 主 流
	opt 最 佳
	∞ 来 流

原稿于1987年7月22日收到。

一、引 言

随着高性能涡轮发动机的发展,透平进口温度不断提高,透平叶片的工作温度相应提高,而新型高温材料的发展满足不了需要,主要靠改进叶片的冷却技术来实现。

采用气膜冷却是解决叶片前缘和尾缘局部高温区的有效冷却方法。气膜冷却是将冷气从叶片内部经壁面上的离散小孔喷射出来,附着在下游表面上形成一层冷却膜,将燃气与叶片表面隔开,降低燃气传给叶片的热量。合理的气膜冷却设计,必须保证冷气稳定地附着壁面,形成冷却膜。以前的研究^[1,2,3]结果表明:在冷却膜附壁条件下,冷气流量越大,冷却效果越好,在吹风比 M 为最佳值时,气膜既附壁又冷却,则效率最高。但最佳吹风比的值,受气膜喷射孔的形状、喷射角度和主流条件等等许多因素的影响,至今还待深入研究。

透平叶片表面是凸壁和凹壁,主流参数变化较大,其冷却膜附壁的稳定性问题,比平壁上的情况复杂得多。作者曾在水洞中用色液显示的方法,对主流加速条件下凸壁冷膜的附壁特性(即稳定性)进行了研究^[4]。实验结果证明:用流谱显示方法,可以直观地观察到冷膜流动的过程和不同条件下可能出现的流动现象。在动力学相似条件下,水流中可以得到模拟的空气动力学图案和数据。

本文在文[4]的基础上,对主流加速条件下凸壁和凹壁冷膜的附壁稳定性作进一步研究。研究冷膜的稳定性,就是研究在壁面上形成稳定的冷膜的条件,满足了这些条件,冷膜则稳定,否则被破坏。文[4]的结果已经表明:临界速比 $m_{cr}(=V_{j,cr}/V_m)$,冷膜仍能附壁的最大喷射速度与当地主流速度之比)是冷膜的稳定性参量。它是冷膜附壁与不附壁的分界线,当冷膜的喷射流率比 M (或喷射速比 m)大于临界值 M_{cr} (或 m_{cr})时,冷膜将离开壁面,破坏膜的作用,即为不稳定。

本文对横流圆柱展向喷射角 β 为 30° 的冷膜的临界速比进行了观测,与[4]中 β 为 45° 和 90° 的结果一起,归纳出主流加速和 β 角对冷膜附壁性能的定量影响。对圆周角 θ 为零度时的冷膜附着和扩展性能进行了观察。还对叶盆凹面上冷膜的附壁性能进行了观察和初步的测量。

二、实验设备和实验技术

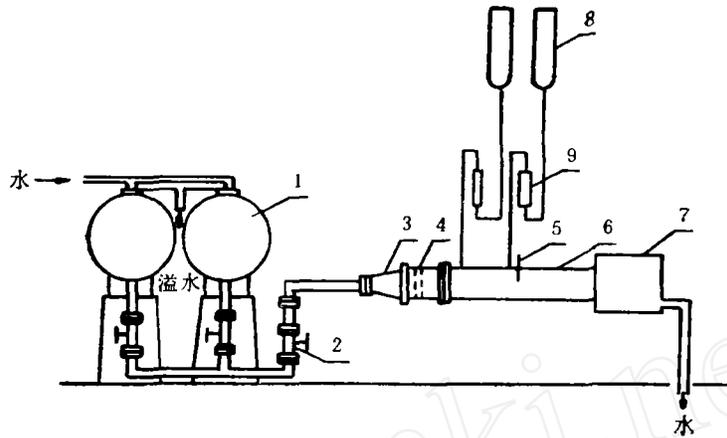
1. 设 备

本实验装置系开放式二维水洞。它由水罐、试验段、调节阀门以及进、排水管道等部份组成,靠水的重力作用运行(见图1)。试验段截面为40毫米 \times 450毫米,用有机玻璃制成。试验段内的水流速度,可在3至40厘米/秒范围内调节。试验段的二维速度分布经校验符合实验要求。色液瓶悬挂在铁架上。色液通过浮子流量计进入模型内腔。

2. 模 型

圆柱模型:用直径为30毫米的圆柱,模拟透平叶片的前缘,模型的结构尺寸和安装示意如图2(a)和2(b)。喷射色液的小孔中心线与圆柱表面母线成 30° 。模型安装在试验段的一个侧壁上,可绕轴旋转到所需要的喷射位置 θ 。为了消除尾涡的影响,扩大实验的雷诺数范围,在圆柱后加上一个固定的接尾段。

叶片模型:用放大五倍的二维叶片,模拟一典型的透平导向叶片。叶盆凹面的曲率半径与前



1. 储水罐 2. 调节阀 3. 扩散段 4. 收缩段
5. 流速仪 6. 试验段 7. 溢水箱 8. 色液瓶
9. 流量计

图 1 实验设备示意图

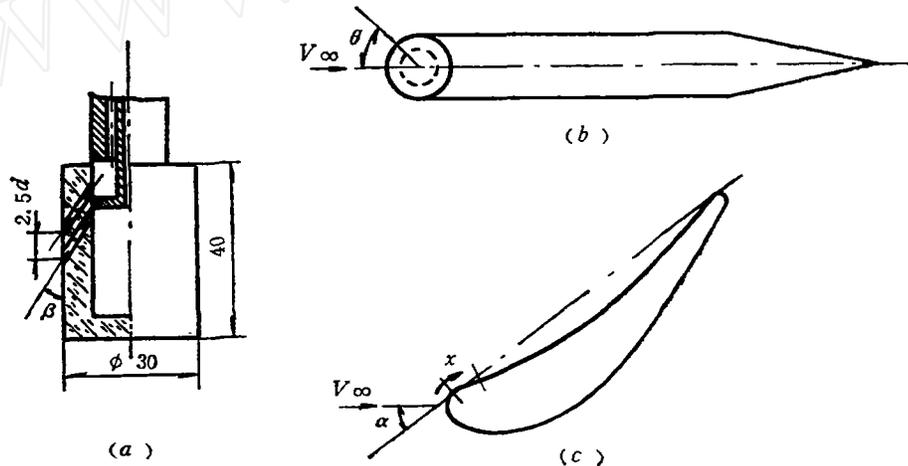


图 2 模型结构尺寸

缘圆弧半径之比为 29:1。第一排孔开在叶盆侧的前缘凸面上，圆周角 θ 约为 40° ，弧长与弦长之比 X/C 为 0.045，其后即过渡至凹面。第二排孔开在第一排孔下游 8 倍孔径的凹面， X/C 为 0.146。垂直于表面的喷射孔的孔径和圆柱模型的相同(2 毫米)。可以转动叶片改变安装角 α (弦长的延长线与来流的夹角)。其结构尺寸和安装示意如图 2(c)。

3. 方 法

流体动力学相似条件：用水流模拟气流的流动，流体动力学相似的条件是几何相似和雷诺数相等。用横流圆柱模拟叶片前缘流动，要满足的条件是：

$$Re_{D,f} = Re_{D,g} \quad (1)$$

对有喷射流的情况，还要满足射流的雷诺数相等：

$$Re_{d,f} = Re_{d,g} \quad (2)$$

几何相似要求喷射孔的形状相同，喷射角相同，喷射孔的直径与圆柱的直径之比相等：

$$d_f/D_f = d_g/D_g \quad (3)$$

由(1)式和(2)式相除得

$$Re_{d,t}/Re_{D,t} = Re_{d,g}/Re_{D,g} \quad (4)$$

将定义式代入(4)式并整理后得出:

$$M_t(\mu_{t,t}/\mu_{m,t}) = M_g(\mu_{t,g}/\mu_{m,g}) \quad (5)$$

在本实验条件下,

$$\rho_{j,t} = \rho_{m,t}, \quad \mu_{j,t} = \mu_{m,t} \quad (6)$$

则(5)式变为

$$m = M_g(\mu_{t,g}/\mu_{m,g}) \quad (7)$$

其中 $m = V_{j,t}/V_{m,t}$ 。

对叶片的流动, 同样有以上关系; 不同的是雷诺数中的定性尺寸改用叶片的弦长 C 。

测量和显示技术: 在横流圆柱模型实验中, 用 MZL-A 型转子流速仪测定来流速度 V_∞ , 用位流速度分布关系式

$$V_\theta = 2V_\infty \sin \theta \quad (8)$$

计算不同喷射位置 θ 处的当地主流速度 V_θ 。当地的主流加速度参数 K 以下式确定:

$$K = \frac{v}{V_\theta^2} \frac{dV_\theta}{dX} \quad (9)$$

在叶片模型实验中, 用 MZL-A 型转子流速仪监视主流速度, 用多普勒激光测速仪测来流速度、叶片表面的边界层厚度和当地主流速度^[7]。

喷射的色液由牛奶、染料和酒精配制而成, 其比重为 1 克/厘米³。冷膜的喷射流量用浮子流量计测量。喷射速度按喷射孔的面积平均计算。冷膜流动的调节及显示方法同文[4]一样, 仅改用了一种含有荧光物质的钙黄绿素作染料, 在不同的光线强度和方向的作用下, 可看到由绿到黄的色调, 清晰地显示出不同层次的流谱。

实验中还采用了一种新的显示方法即空气泡法^[5]。在水洞上游的贮水罐中加入十二烷基硫酸钠粉末, 使水流中产生大量小气泡, 用肉眼可清晰地观察到主流的流动状况。如观察前驻点位置、边界层厚度分布、壁面附近分离泡和主流中的涡旋等等。

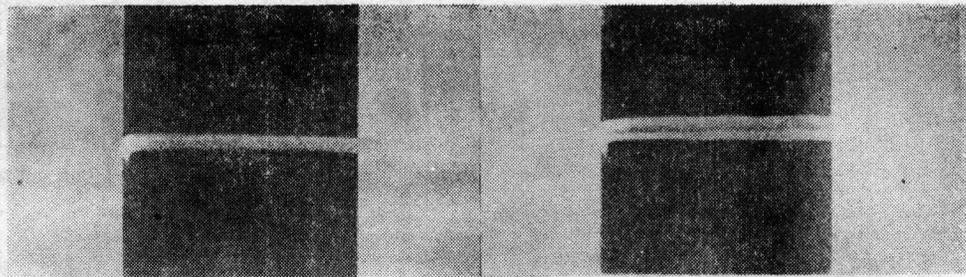
三、实验结果及讨论

1. 显示观察

圆柱模型上 β 为 30° 冷膜的流动图象: 在 θ 为 10° 、 20° 、 25° 和 40° 等位置, 改变喷射速比 m , 观察冷膜流动图象的变化。总的来说, 它与 β 为 45° 的相似, 即随着喷射速比逐渐增加, 射流同样有从附壁到分离的变化过程。起初, 附壁的冷膜由薄变厚, 然后出现局部的分离泡, 分离泡逐渐扩大, 最后完全离开壁面。但仔细比较, 它和 β 为 45° 的有明显的差别。

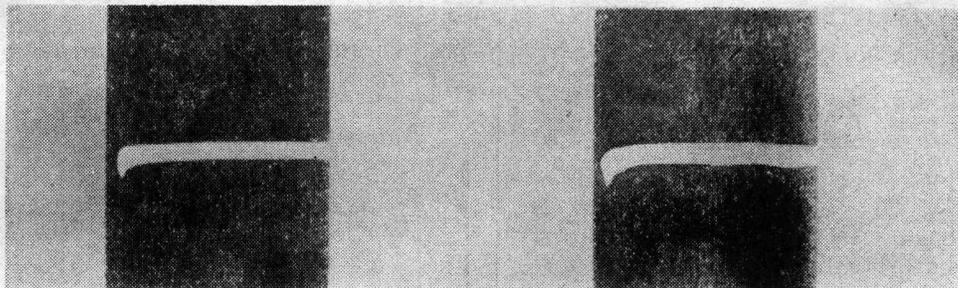
(1) 拐弯现象较明显。射流喷出后, 从展向偏斜的方向弯转至主流方向。这与射流的展向速度分量和当地的主流速度的比值有关。在相同喷射速比下, β 越小, 这个比值越大, 拐弯现象就越明显。从图 3 中可以看出, 这种现象随喷射速比的增加和 θ 角的减小而愈加明显。

(2) 流向分离泡增长过程较明显。从上游往下游看, 本实验的喷射角是向左偏斜的。冷膜拐弯后, 在出口附近的流向下流, 展向流动不均匀。随着喷射速比的增加, 首先从中右部出现分离泡, 图 3 中冷膜中右部颜色较深的区域即是这种局部分离泡。然后, 分离泡向流向延长, 向横向扩展, 而后达到完全与壁面分离。 β 较小时, 在改变较大的喷射速比后才完成这一过程。



(a) $\theta = 10^\circ, m < m_{cr}$
冷膜附壁

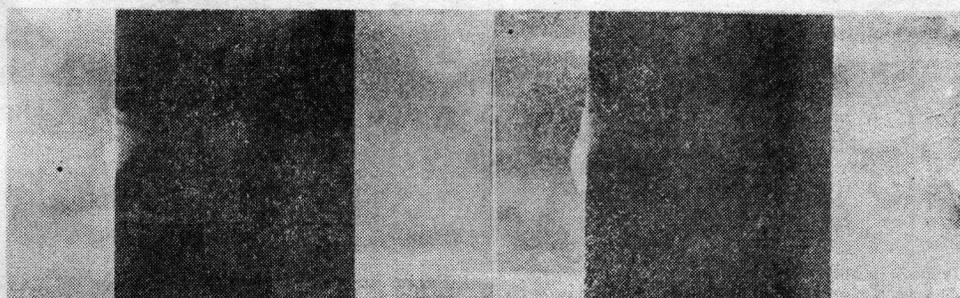
(b) $\theta = 10^\circ, m < m_{cr}$
冷膜分离



(c) $\theta = 40^\circ, m < m_{cr}$
冷膜附壁

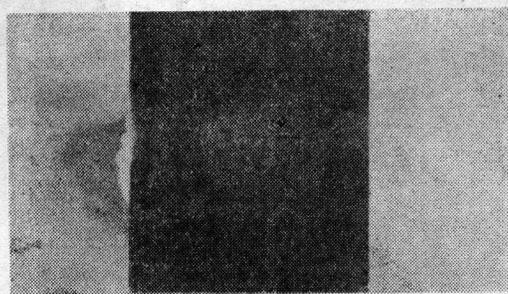
(d) $\theta = 40^\circ, m < m_{cr}$
冷膜分离

图 3 圆柱上 β 为 30° 的冷膜流动图象



(a)

(b)



(c)

图 4 圆柱 $\beta = 30^\circ, \theta = 0^\circ$, 喷射速度逐渐增加时, 冷膜流动图象的变化

(3) 展向出现明显的分离泡。在实验条件下, θ 为 10° 的冷膜, 其流向局部分离泡是一条狭长的带状, 其余部分保持附着壁面。在喷射速比较大时, 喷射孔出口附近出现了展向分离泡。它随喷射速比的增加而扩大。肉眼能看清楚这一过程, 但由于图 3 的照片是垂直于试验段壁面拍摄的, 分辨不出展向分离泡的形状。其图象和图 4(b) 中的大体相同。

(4) 横向扩展较好。相同喷射孔径时, β 较小的喷孔横向开孔面宽; 相同喷射速比时, β 较小的冷膜展向速度分量与主流速度的比值大。这些是有助于横向扩展的因素。在本实验条件下, θ 从 40° 至 10° 变化, 横向扩展宽度的变化并不显著。

θ 为 0° 是一种特殊情况, 在前驻点附近当地主流速度近于零, 射流喷出后, 沿展向伸展一定距离, 而后随主流向上下表面分流。在喷射流量较小时, 射流完全贴附壁面, 扩展宽度比其余 θ 位置时宽得多(见图 4(a))。随着喷射流量的增加, 出现展向分离泡, 冷膜拐弯后, 扩展宽度又有所增加, 流向附壁距离变短, 但不出现流向分离(见图 4(b))。展向分离泡增加到一定程度以后, 冷膜出现脉动, 即使流向不分离, 但很快就扩散而消失(见图 4(c))。图 4 的流动图象表明, 采用较小的 β 角, 前驻点处的气膜冷却是有效的。

叶片模型上的流动图象: 首先分别改变叶片的安装角 α 和来流速度, 用空气泡法观察了叶片周围流动的变化, 以便了解主流条件对冷膜流动的影响。

在 α 小于 15° 时, 叶盆前缘(凹面)有分离泡, α 为 15° 即消失。由于叶盆背两侧通道流阻不同, 在不同安装角和来流速度下, 前驻点位置是变化的。 α 一定, 增加来流速度, 前驻点位置向叶盆一侧稍有移动。增加 α , 前驻点位置也向叶盆一侧移动。 α 为 35° 时, 前驻点接近第一排孔的位置。除了主流有分离泡的情况外, 在本实验条件下, 无射流时的叶盆表面, 边界层厚度变化是平缓的。

在不同主流条件下, 叶片表面冷膜的流动有三种不同的情况:

(1) 主流有分离泡。在 α 小于 15° 时, 分离泡在第一排孔下游约二十倍孔径的区域。在此条件下, 第一排孔的射流完全不附壁; 第二排孔的射流喷出后先向上游流动, 在分离泡的前端向上弯转, 然后流向下流。图 5(a) 给出其侧视和顶向视流动图象。它说明从主流有分离泡的部位喷

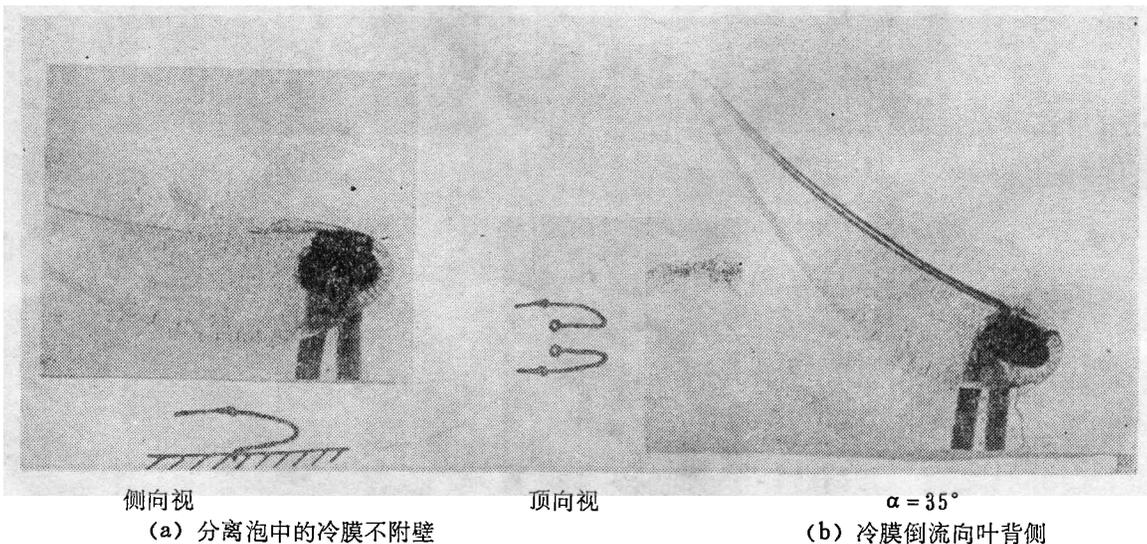


图 5 叶片上冷膜的流动图象

出的射流起不到冷却的作用。如果将第二排孔改为抽负的，将分离泡全部抽掉以后，第一排孔的射流才附壁。

(2) 前驻点在第一排孔附近(如 α 为 35°)的情况: 冷膜附着壁面, 但部分或全部倒流向叶背一侧, 其流动图案见图5(b)。当主流有波动时, 倒流的程度也跟随波动。

(3) α 为 25° 至 30° 的情况, 两排孔的冷膜都能稳定地附着壁面。如保持来流速度不变, 随着喷射速比的增加, 冷膜由附壁到分离, 同样可以找到对应的临界喷射速比。图6给出两排冷膜附壁和不附壁的形象。

由以上观察到的流动图象说明, 在主流容易出现分离泡的部位, 不宜开设气膜冷却孔。如叶盆前部, 从凸面过渡到凹面的部位, 由于主流分离, 射流不附壁, 不但起不到冷却作用, 反而由于射流对主流的扰动, 增大了主流对叶片的对流换热系数, 增加了换热量, 这是必须加以注意的。并且, 前驻点位置的变化(如攻角变化所引起的), 会引起冷膜流动的不稳定, 因而, 前缘附近的气膜冷却方案, 必须精心设计。

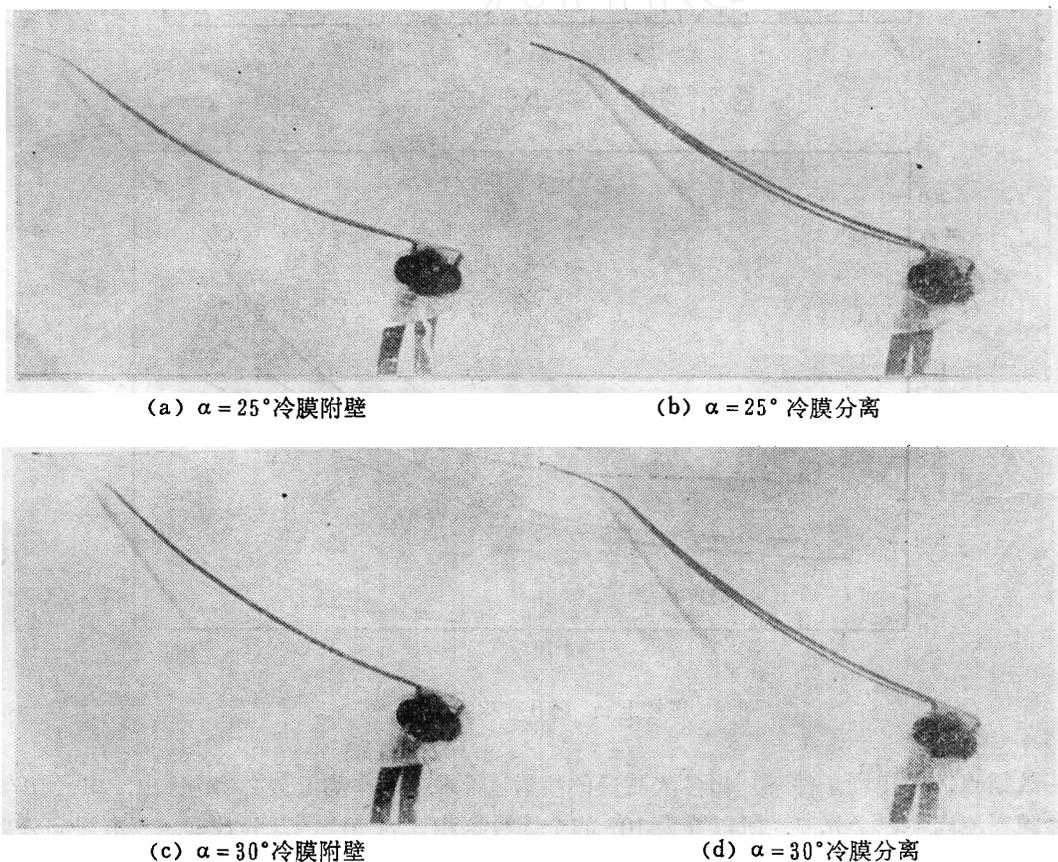


图6 叶片盆面冷膜流动图象

2. 测量结果

本实验在 $R_{o,D}$ 为 9×10^2 至 7×10^3 范围内, 在用或不用接尾段的情况下, 分别测量了喷射位置 θ 为 10° 、 20° 、 25° 和 40° 的临界速比值。图7给出临界速比 m_{cr} 随主流加速度参数 K 变化的关系。不同 θ 的结果, 可用一条经验曲线表示。 K 值越大, m_{cr} 也越大。在 K 值较大时, 曲线较陡; K 值较小时, 曲线较平坦而渐趋于常值。这些趋势与 β 为 45° 和 90° 的结果完全相同。图7

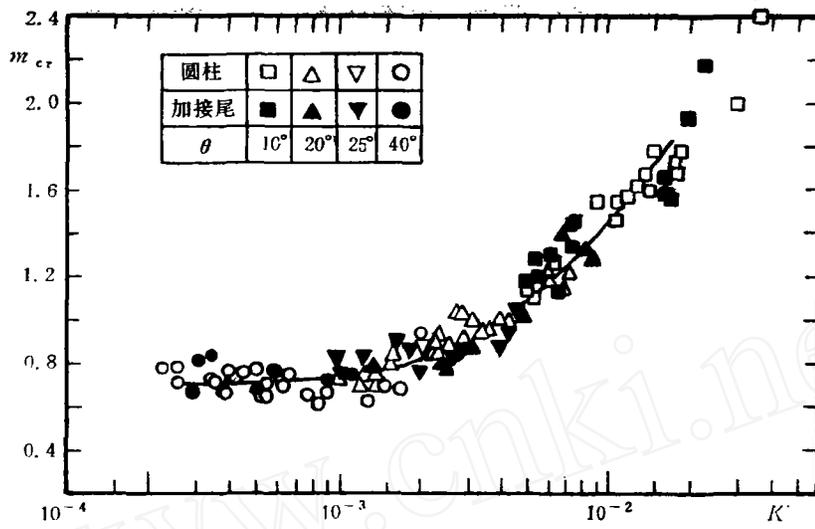


图 7 圆柱上 m_{cr} 随 K 变化的曲线

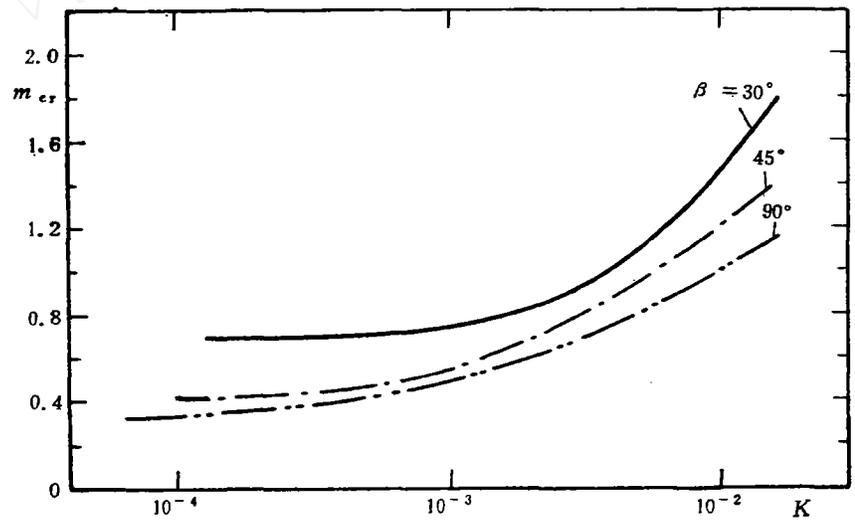


图 8 圆柱上 m_{cr} 随 β 变化的比较

中每一数据点，是相同条件下，由多次测量的喷射流量求出的平均值。必须指出，由于 θ 较小时，冷膜在流向不完全分离，所以 θ 为 10° 的全部数据和 θ 为 20° 的部分数据，是取展向分离泡小于孔径时的喷射速比值。又由于展向分离泡的大小不容易判断，在重复测量时有观察误差，这是 β 为 30° 的数据带比 β 为 45° 和 90° 的宽的主要原因。

图 8 给出 β 为 30° 、 45° 和 90° 的三条实验曲线的比较。首先可以看出的是，临界速比随 β 的减小而增加； β 角较小，冷膜较容易附壁。其次是，不同 β 的 $m_{cr}-K$ 曲线中， m_{cr} 渐趋于常值的 K 值范围不同。 β 为 90° 的结果， K 值小于 10^{-4} 趋于常值，而 β 为 30° 的， K 值小于 10^{-3} 就趋于常值。 β 为 45° 的，没有 K 值小于 2×10^{-4} 的数据，可以推断，其 m_{cr} 趋于常值所对应的 K 值是介于以上两者之间，大约小于 3×10^{-4} 。这意味着，主流加速有利于冷膜附壁的作用，在较

小 K 值时可以忽略。而 β 的影响，在实验参数范围内，始终是非常重要的。在实际应用中，应该尽量选用小的 β 角。

为便于工程设计计算，由测量数据(包括[4])归纳出 m_{cr} 与 K 值的经验关系式如下：

对于 β 为 90° 的：

$$m_{cr} = 3.5485 + 1.9414 \lg K + 0.3816 \lg^2 K + 0.0243 \lg^3 K \quad (10)$$

$$K \geq 4.0 \times 10^{-5}$$

对于 β 为 45° 的：

$$m_{cr} = 5.7109 + 3.7044 \lg K + 0.8628 \lg^2 K + 0.0670 \lg^3 K \quad (11)$$

$$K > 1.0 \times 10^{-4}$$

对于 β 为 30° 的：

$$m_{cr} = 10.3056 + 8.3408 \lg K + 2.4338 \lg^2 K + 0.2388 \lg^3 K \quad (12)$$

$$K \geq 5.0 \times 10^{-5}$$

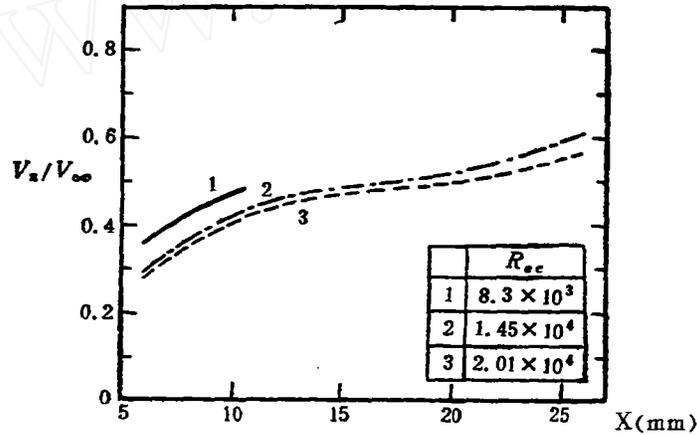


图 9 叶盆表面主流速度分布

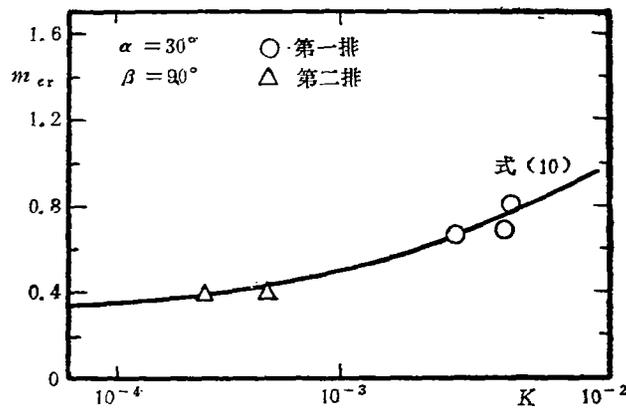


图 10 叶盆表面冷膜的临界速比

从图 8 和式(10)至(12)可以看出， m_{cr} 是 K 值的对数函数，而与 β 成反比例关系，为估算方便，将以上三式归纳为一个通用的近似关系式：

$$m_{cr} = \left(\frac{2\beta}{\pi} \right)^{-0.68} (3.5485 + 2.30171gK + 0.53611g^2K + 0.41631g^3K) \quad (13)$$

$$10^2 \leq R_{eD} \leq 4 \times 10^4, \quad 0 < \beta \leq \frac{\pi}{2}, \quad K > 1.0 \times 10^{-5}$$

在 R_{ec} 为 8×10^3 至 3×10^4 的范围内, 测量了叶片安装角为 30° 时每排孔的临界速比与加速度参数的关系。无射流时的主流速度分布见图 9; 用式(9)的差分形式计算 K 值; 第一排孔处的边界层厚度约为 0.9 毫米, 第二排孔处的约为 2.2 毫米。

图 10 给出叶片上的测量值与图 8 中 β 为 90° 的经验曲线的比较。测量点基本落在曲线附近。由此看来, 在本实验条件下, 凹面的冷膜的 m_{cr} 与 K 值的关系同凸面的相近, 凹面上主流加速, 同样对冷膜附壁有利。

由于实验条件的限制, 测量的数据有限, 因而, 关于凹面上的冷膜附壁性能的定量关系, 还待进一步研究。

前人的大量研究结果表明, 离散孔气膜冷却, 存在最佳冷却效果的工况, 在这一工况下, 冷却效果最高, 也就是对应有一个最佳吹风比, 在小于此值时, 增加吹风比能增加冷却效果, 超过此值以后, 再增加吹风比, 冷却效果反而减小。这由流动和换热机理可知, 在这一工况下, 冷膜必然是附壁的, 且冷膜的流量较大, 膜层较厚, 热汇作用较强。这也正是本工作所得到的结果。

值得指出的是, 目前大量的用气体为介质所做的气膜冷却实验中, 其最佳吹风比 M_{opt} 是指冷却效果 η (或展向平均的 $\bar{\eta}$) 与吹风比 M 的关系中, 最大效果值所对应的吹风比值。一般不同的 X/D 处, 有不同的 M_{opt} 。那么, 设计计算时, 就有究竟应该用那个 X/D 位置的 M_{opt} 值为依据的问题。

对于透平叶片的情况, 一是叶片尺寸小, 前缘表面曲率大, 冷却孔必须要小, 有效冷却的区域是 X/D 小于 10 的范围。二是气动效率要求冷气用量不能大, 实际关心的是气膜孔下游较近的区域和吹风比小于 1.5 的情况。目前文献中发表的数据, 多数是 X/D 较大处的, 有用的 X/D 较小处的数据极少。用文献中有限的的数据, 还不能解决冷膜附壁和有效冷却的定量判据。

本实验用显示观察的方法, 观察射流喷出后附壁的情况从整体上判断冷膜冷却作用的优劣。可以认为, 这种判断, 对实际工程设计更为方便。由显示观察的结果说明, 从气态的冷却效果测量中, 判断出孔中心线下游出现分离泡, 还不能说冷膜不附壁。因为在分离泡的宽度较小时, 分离泡以外的部分仍然是附壁的。如本实验中所观察到的, 分离泡狭长而冷膜并不分离。气态实验要借助于仪器观察, 才能判断冷膜的附壁情况, 就较难捕捉到临界速比的值, 用本实验所提供的临界速比作为冷膜附壁的判据时, 只要采用的速比值小于本文的临界速比值, 就可以判断, 其冷膜仍然是有效的。

由第二节关于流体动力学相似的关系得知, 在使用本实验结果时, 还要考虑冷膜与主流的温比和密度比的影响。从关系式(7)可推得吹风比 M_g , 其中包括了密度的影响。R. J. Goldstein 等^[7]研究了这些影响, 密度比越大, 冷膜的热汇作用越强, 其作用是单调的。在用吹风比或动量比作参数来描述冷膜附壁和与主流渗混的特性时, 速比或速度平方比的影响更为主要。因此, 本实验结果, 可用于工程设计计算, 以估计选择吹风比参数。

四、结 论

由上述实验结果和讨论, 可得出如下结论:

1. 离散孔冷膜附壁与不附壁的分界, 可用相应的临界速比来描述。为了保证冷膜的冷却效果, 实际应用的喷射速比, 不要超过临界速比。

2. 用圆柱模型模拟叶片前缘冷膜的流动特性, 得到有规律的结果:

(1) 临界速比值 m_{cr} 随主流速度增加而减小, 而随主流的加速度参数 K 增加而增加。喷射位置 θ 对 m_{cr} 的影响包含在加速度参数 K 中, 不同 θ 处测量值, 可用一条 $m_{cr}-K$ 曲线表示。当 K 值较大时, m_{cr} 变化较急剧; K 值较小时, 则变化平缓, 且逐渐趋于常值。

(2) 不同喷射角 β , 有不同的 $m_{cr}-K$ 曲线。相同 K 值下, β 越小, m_{cr} 越大。展向偏斜喷射, 对冷膜的附壁有利。 β 为 30° 的 m_{cr} 值, 在 $K < 10^{-3}$ 就趋于常值, 而 β 为 90° 的, 则在 $K < 10^{-4}$ 才渐趋近于常值。换句话说, 在 $K < 10^{-3}$ 时, 用小的 β 角喷射, 主流加速影响已很弱, 而 β 的影响相对较强。

由 β 为 30° 、 45° 和 90° 的测量结果, 得出通用近似关系式(13), 便于工程设计计算。

(3) β 为 30° 时, 从前驻点喷射的冷膜有较好的附壁和展向扩展特性, 但有效复盖的流向距离较短。

3. 用叶片模型测量的叶盆前缘凹面上的冷膜, 其临界速比也随加速度参数的增加而增加。

4. 在主流有分离泡的部位, 喷出的射流不附壁; 攻角 α 和来流条件的变化, 会改变冷膜的流动, 可能出现倒流或分离。这些造成冷膜不能稳定附壁的因素, 需要进一步研究。

参加本实验工作的还有: 杨大铮、杨家寿、李广达和黄福祥等同志。

参 考 文 献

- [1] R. J. Goldstein, E. R. G. Eckert, and J. W. Ramsey, "Film Cooling with Injection Through Holes: Adiabatic Wall Temperatures Downstream of A Circular Hole", ASME, A. p. 385 (1968).
- [2] C. Liess, "Experimental Investigation of Film Cooling with Ejection from A Row of Holes for The Application to Gas Turbine Blades", ASME, A. p. 21 (1975).
- [3] David W. Luckey and Mel. R. L' Ecuyer, "Stagnation Region Gas Film Cooling-Spanwise Angled Coolant Injection", J. Aircraft Vol. 14, No5, p. 494 (1977).
- [4] 鄂学全, 邓素卿, "透平叶片前缘冷却膜的流动显示研究", 力学与实践, 1984年第3期。
- [5] 鄂学全, 罗明晖, "乳化空气泡法显示流谱", 科学通报, 1983年, 第22期。
- [6] D. R. Pedersen, E. R. G. Eckert and R. J. Goldstein, "Film cooling with Large Density Differences between the Mainstream and the Secondary Fluid Measured by the Heat-Mass Transfer Analogy", ASME, C. p. 620 (1977).
- [7] 杨大铮等, "激光多普勒测速仪测定透平叶片表面边界层及绕流速度", 第二届全国实验流体力学会议论文摘要汇编(一), 1984年11月, 昆明。

Experimental Study on The Stability of Cooling Film on a Turbine Blade

E Xuequan Deng Suging Ko Shaoyen* Li Kun*

(Institute of Mechanics) * (Institute of Engineering
Academia Sinica) (Thermophysics, Academia Sinica)

Abstract

The stability of the cooling film to attach to a blade surface is investigated by flow visualization technique in a water tunnel under hydrodynamically analogous conditions. Cylinder and enlarged blades are used as test models for simulating the leading edge and concave surface of the blade. The flow patterns of cooling film on the cylinder and blade are observed, using colour liquid and air bubbles generated by emulsification. The critical velocity ratio m_{cr} of cooling film at injecting angle θ of 10° , 20° , 25° , and 40° are measured and related to the acceleration parameter K and spanwise angle β , $m_{cr} = f(K, \beta)$. The experimental results reveal the factors which affect the effectiveness of discrete holes cooling film and its regularity.