

高温涡轮叶片液冷机理的试验研究

南京航空学院 刘德彰 欧阳宁

【摘要】 本文在文献[1]的基础上,用水为冷却介质,用均匀受热的倾斜与水平管模拟涡轮叶片冷却通道,研究其沿程流型和换热系数的变化及其相互关系,得出在各种倾斜角度、热流密度和进口冷液参数下,对饱和沸腾起始点 Z_B 与环状流起始点 Z_N 的影响及对 Z_B 与 Z_N 控制的经验公式。研究结果表明,汽液两相沸腾环状流区的换热系数比单相液流区提高近两个数量级,而且倾斜与水平管轴的上半部分各流型区的转换点均比下半部分提前,因此在实际应用时应以上半部分的“蒸干点”作为“烧毁”的控制点。

一、实验设备与测试系统

(1) 涡轮叶片冷却通道实际工作时的位置不都是铅直的,多数情况下冷却通道所处的位置与水平面成一倾角,因此必须研究通道处于倾斜与水平位置时的流型与换热系数的变化规律。为模拟冷却通道的各种位置,在原实验系统中^[1],实验段为可变角度,并由设备上的角度仪读出实验段所处的倾斜角。(2) 当管道处于倾斜或水平时,汽液两相在同一截面上不再是对称分布,因此同一截面上各处的流型就不同,相应的壁温与换热系数也将不同。为准确测定沿程各截面流型及其变化,采取在管内绕水平轴的同一旋转平面上配置三根平行并可同步移动的化。电导探针,对沿程各截面的流型进行测定。实验结果表明这种方法既可测出沿程截面的流型变化;又可测出同一截面与转动平面垂直的上下两部分的不同流型;还可测出流型的瞬态变为了准确地测定壁温,并相应得到换热系数,实验采用如图1所示的测温系统。在管壁上每隔30mm安排一组(3对)镍铬—铐铜热电偶,共40组(120对)均布于实验段。因管壁厚度均匀且很薄($\delta=0.15\text{mm}$),可忽略内外壁温差。热电偶的引线及其他外设的联接线均采用屏蔽线并将整个实验段包在长方形的金属盒中,以屏蔽电磁干扰。采用低通滤波器,以滤去高

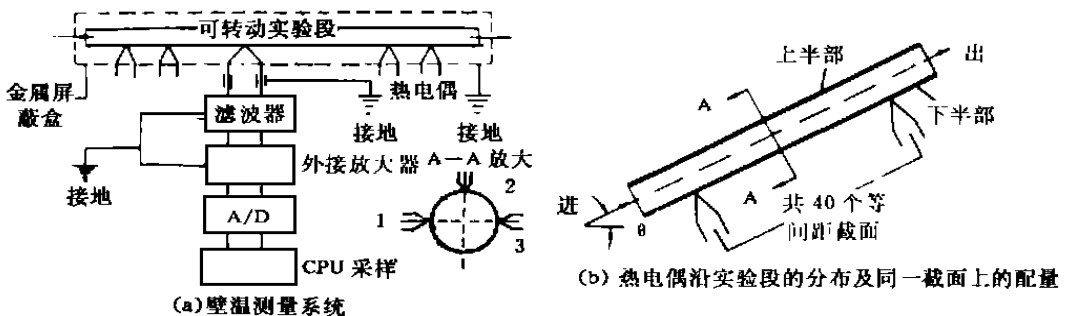


图1 壁温 T_w 的测量系统

频干扰信号。所用的热电偶测量端不大于 $\Phi 0.6\text{mm}$ ，其响应在几十 ms 内不大于 100Hz 。用六通道滤波型放大器对信号进行初级稳定放大后，送入 A/D 内的放大器进行二级放大，再转换为 CPU 可接受的数字量，经采样软件的控制获得准确的热电势输出值。实验时还采用五位半数字电压表和自动采集系统同步测量，以便相互校核。

二、流型的测量^[2,3]

1 实验工况 本实验采用如表 1 所示的 10 个加热工况。工质由溢流水箱恒压供入实验段，用浮子流量计测量流量并用阀门调节。可控硅电源的输出线经六个自制的“铜爪”与实验段两端联接，保证大电流平稳地流过而不会烧毁连接处。

表 1 实验所用的 I 、 U 和 q 数值

电流 I (A)	100.	120.	140.	160.	180.	200.	220.	240.	260.	280.
电压 U (v)	10.8	12.8	14.9	17.2	19.3	21.5	22.7	23.8	26.4	32.3
热流 q (J/m^2)	26.50	37.67	51.17	67.50	85.21	105.5	122.5	140.1	168.4	221.8

2 电导探针的配置 如图 2 所示，用三根 $\Phi 0.21\text{mm}$ 的耐高温漆包线制成的电导探针，一根置于管轴心，另两根置于距管壁约 1mm 处。其上的“裸点”是在放大镜下制作的，长度 1.5mm 。三根电导探针配置在同一转动平面内，上端经一耐高温软橡皮固定于滑尺悬臂，下端经另一高温软橡皮联接于测量回路。当滑尺移动时，三根探针及其“裸点”也随之平行同步移动。这样便可通过中心与另外两个“裸点”向的 $U-t$ 响应曲线测定其流型。

3 自制的高、低通滤波器 为消除实验时的干扰信号，在测量系统中采用了自制的滤波器。滤波频带是根据对所测信号的估算和对各种干扰信号的测量来确定的。可按不同的需要，对电路作适应的调速，以获得不同的滤波频带。

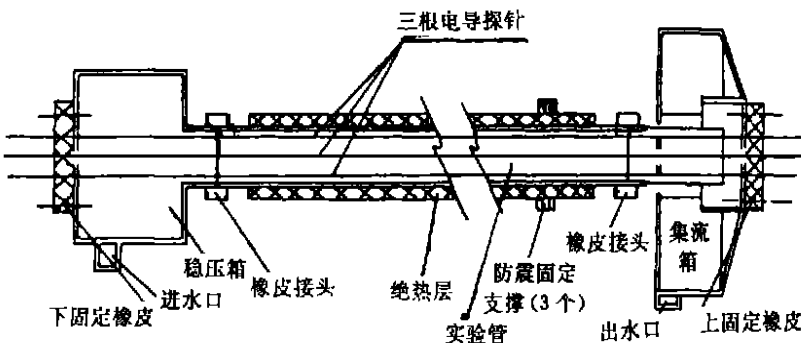


图 2 实验段密封、固定支撑和电导探针的分布

4 测量结果 通过对

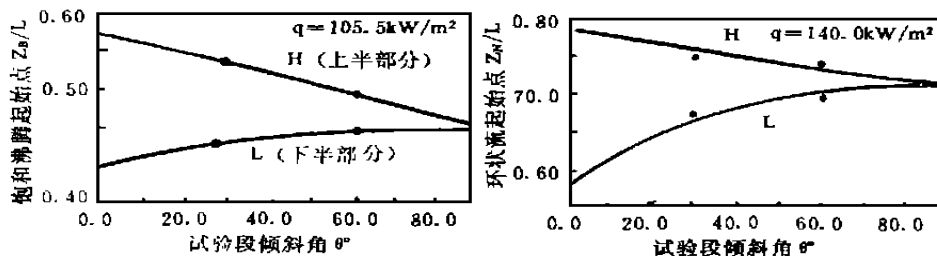


图 3 Z_B 、 Z_N 曲线

10 个加热工况、4 个角度 (0° 、 30° 、 60° 、 90°) 沿程各截面流型的测量，获得相应的流型图 80

张(每一工况各截面有上下两部分的流型图两张),从所得的流型图可明显看出:(1)当实验段倾角一定时,同一截面上的上下两部分的流型不一定相同;(2)在热流密度与其他工作参数一定时,当倾角由小到大与管道转动平面相垂直的下半部分的饱和沸腾起始点 Z_B 和环状流起始点 Z_N ,将逐渐向进口端移动;而上半部的 Z_B 与 Z_N 将逐渐向出口端移动。当管道成铅直(90°)时,上下两部分的 Z_B 与 Z_N 将各自重合,如图3所示。

5 “流型”控制的经验公式 将实验结果用计算机绘图并整理,可得饱和沸腾起始点 Z_B 与环状流起始点 Z_N 的经验公式:

(1) 环状流起始点 Z_N 的经验公式

$$Z_N/L = 0.572 + 0.398E_N \quad (1)$$

式中,无因次量 $E_N = (\bar{W} c_{p,L}/qd^2)(\Delta T_{s,in} + \xi_N)$;进口处液体过冷度 $\Delta T_{s,in} = T_{s,in} - T_{b,in}$, $T_{s,in}$ 与 $T_{b,in}$ 分别为进口处饱和温度与液流温度(K), $\bar{W}$ 为质量流率(kg/s), $c_{p,L}$ 为定压比热(J/kg·K), q 为热流密度(W/m^2), d 为试验管管径(m)。

对于管截面的上半部分, $\xi_N = \xi_{N,u}$, $\xi_{N,u} = \{0.022 \sin \theta^{0.20} + 0.0288(R^2 \rho_L / \bar{W})(\rho_L / \sigma g)^{-0.25}\} \gamma / c_{p,L}$ 式中, R 为试验管半径(m), ρ_L 为液流密度(kg/m^3), σ 为表面张力(N/m), γ 为汽化潜热(J/kg)。

对于管截面的下半部分, $\xi_N = \xi_{N,d}$

$$\xi_{N,d} = \{0.022(\sin \theta)^{0.25} + 0.44[\sin(\pi/2 - \theta)]^{0.25} + 0.0288(R^2 \rho_L / \bar{W})(\rho_L / \sigma g)^{-0.25}\} \gamma$$

(2) 饱和沸腾起始点 Z_B 的经验公式

$$Z_B/L = 0.803E_B \quad (2)$$

式中,无因次量 $E_B = (\bar{W} c_{p,L}/qd^2)(\Delta T_{s,in} + \xi_B)$

对于管截面的上半部分, $\xi_B = \xi_{B,u}$, $\xi_{B,u} = 17.54 \sin \theta^{0.125} + 56.65 (q/\alpha)^{0.25}$

对管截面下半部分, $\xi_B = \xi_{B,d}$, $\xi_{B,d} = 17.54 \sin \theta^{0.125} + 40.5 [\sin(\pi/2 - \theta)]^{0.125} + 56.65 (q/\alpha)^{0.25}$

可见,当管道铅直($\theta = 90^\circ$)时,上述经验公式与文献[1]的结果相同。

6 饱和沸腾起始点 Z_B 的测定 文献[1]是用测量壁温的变化来判定始沸点 Z_v 。本文采用直接从探针输出电压的响应信号来判定饱和沸腾起始点 Z_B 。因汽液两相流体的电导率与空腔率、电离度以及温度等有关。若 V_o 为不加热时单相液体的电压值(基值), V_b 为加热后汽液两相动态电压平均值(平衡值)。当 $V_b \leq V_o$ 时,为饱和泡状(饱和沸腾),当 $V_b > V_o$ 时,为未饱和泡状(过冷沸腾)。这样便可从 $U-t$ 响应曲线中测定 Z_B 。

三、壁温的测量^[3]与换热系数的确定

1 测量程序 图1为壁温测量系统。A/D模数转换器采用A113^[4]与Apple II A^[5]微机相配合,完成对热电偶输出值的多次采样,数字滤波,并用最小二乘法程序,转换为相应的壁温值。其工作由采样主程序、采样子程序和热电偶冷端补偿程序等三个程序软件^[6]来完成。

采样主程序的作用是输入必要的参数,调用采样子程序和对采样所得的数据进行处理并按给定型式存入单元,还可按要求显示、存盘并形成文本文件以备调用。

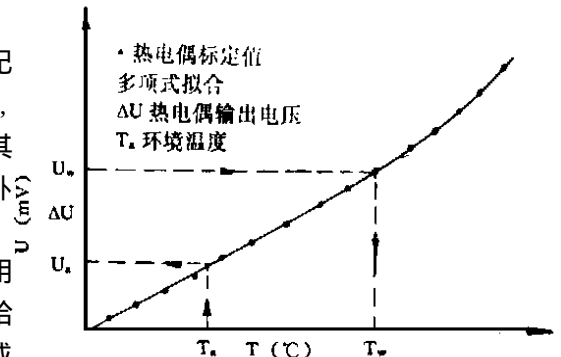


图4 用计算机实现冷端补偿的原理测量结果

采样子程序的作用是数据采集与数字滤波。因为 A/D 模数转换器为 12 位, Apple—IIA 是 8 位机, 所以一个数据的获得必须分两次进行, 先取高 4 位, 再取低 8 位, 然后拼接起来, 以获得一个数字量, 即

$$\text{RESULT} = 256 \times \text{PEEK}(\text{ADDRESS1}) + \text{PEEK}(\text{ADDRESS2})$$

其中, ADDRESS1 和 ADDRESS2 分别为高 4 位与低 8 位的十进制存储单元地址。这个小汇编子程序一经被主程序调用, 即可在 10^{-2} 秒内对给定通道号的点采样 64 次, 并进行大小排队, 取中间 32 点的平均值存入指定内存, 再返回主程序经数值处理, 作为该通道的一个瞬态值显示。

热电偶冷端补偿程序是将所有有效热电偶电压值经冷端补偿后转化为壁温 T_w 的输出值。其工作原理如图 4 所示, 是基于热电偶的特点, 借助最小二乘法反复迭代实现的。

2 测量结果 实际测量结果证明用 A/D 采样系统测得的平均值与用数字电压表测得的平均值吻合较好, 这表明采样系统具有良好的工作稳定性与抗干扰能力。图 5 是用 A/D 系统对实验段处于水平位置时, 如图 1 的第 2 组热电偶在不同热流 q 作用下所测得的沿程壁温变化。与其相类似的在不同的 q 、 $\bar{W}$ 、 θ 时的 T_w — Z 图共有 20 张。

3 换热系数的确定 通过对壁面的准确测定和流场计算后, 可得到局部换热系数 α 沿流程的变化曲线。这些曲线共有 60 组, 现选其中部分示于图 6。

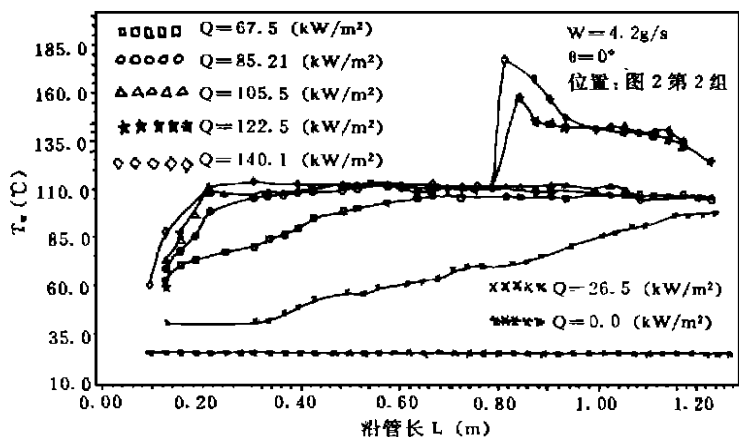


图 5 不同加热量时的沿程壁温变化

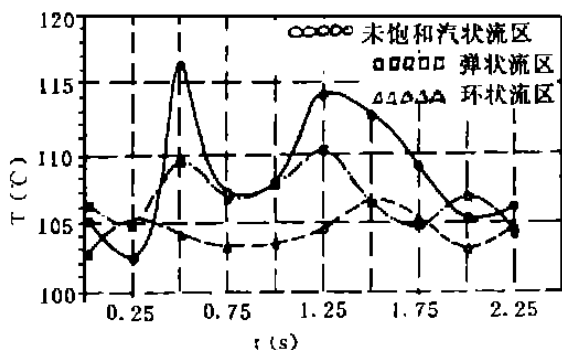


图 6 有倾斜角时局部换热系数的变化

四、实验结果及分析

实验结果表明: (1) 从单相液流到沸腾汽液两相流的沿程中, 共有三个转捩点—始沸点 Z_V 、饱和沸点 Z_B 和环状流起始点 Z_N 。从 Z_V 到 Z_B , 换热系数约增大 1 个数量级; 从 Z_B 到 Z_N , 换热系数又明显增加, 也约为一个数量级。说明环状流型区的换热系数比单相液流区可提高约两个数量级。(2) 从 Z_B 到环状流区结束, 有较长的距离。若按式 (1) 和式 (2) 控制有关参数, 使冷却介质进入通道后很快达到饱和沸腾状态, 并在环状流结束前一点距离流出加热段, 便可使沿程平均换热效果最佳。(3) 当实验段倾斜角度不同时, 虽然沿管轴的上下两部分沿程流型的

变化规律仍相同,但通常都是上半部分流型的转捩点比下半部分提前,壁温也相应提前达到最大值(提前出现“蒸干点”)。因此在工程应用时,确定“烧毁点”应以上半部的“蒸干点”出现为依据,以确定不发生烧毁,并可由此得出对应的极限热流密度。(4)在汽液两相流动区,由于气泡的生成、破灭与聚合,可引起流动不稳定和流体振动,导致对管壁的不均匀冲刷。实验表明,从始沸点到饱和沸腾起始点,不稳定性逐渐增大;从饱和沸腾起始点到环状流开始,不稳定性逐渐减小;环状流区稳定性最好。图 7 为同一工况下,三个不同流型区所测得的壁温

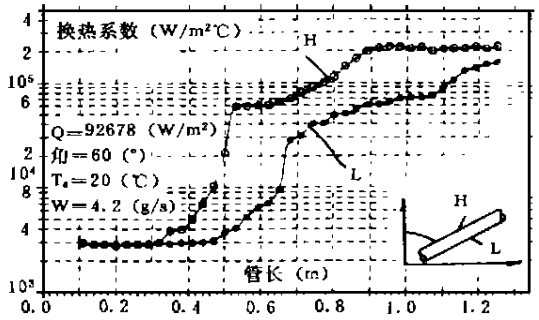


图 7 不同流型区壁温的不稳定情况

随时间变化情况。可见,未饱和泡状流时,壁温的脉动量最大,脉动最大误差为 13.6%;弹状流时,壁温最大脉动误差为 5.6%;环状流时,壁温最大脉动误差只有 3.8%。因此在实际应用中,也应按式(1)和(2)调整工况参数,使冷却介质在通道内尽快达到饱和沸腾区和环状流区。

五、结 论

1 用三根平行可同步移动的电导探针,对倾斜与水平管内沸腾汽液两相沿程流型进行测定,有良好的分辨率与可靠性。在壁温测量中所用的 A/D 采样系统,具有快速、准确和适于大量采集与实时处理的特点。

2 实验结果表明环状流区的换热系数比单相液流区高近两个数量级,与文献[1]的结论一致。

3 在同一流动工况下,同一截面上各点达到 Z_V 、 Z_B 、 Z_N 所需的加热量不同。在实际应用时,可由式(1)和(2)的经验公式调整工况参数,使通道尽快达到饱和沸腾与环状流区段,使其换热系数最大且管道上部又不会“烧毁”。为保证工作的安全可靠,冷却通道的“烧毁点”应以管道最上部的蒸干点为依据。

4 在沸腾汽液两相流中有流动不稳定性,但环状流区的稳定性较好。因此,实际应用时,应使介质在通道内尽快达到饱和沸腾与环状流区。

5 对大量的实验数据借助于先进的软件系统进行归纳、传输、绘图、最佳拟合并综合出经验公式,取得良好的效果。

6 本阶段的研究结果,可为第三阶段以煤油为冷却介质的研究工作提供良好的基础。

参 考 文 献

- [1] 刘德彰、袁保宁,“高温涡轮叶片液冷机理研究”,航空动力学报,Vol.5, No.2, 1990.
- [2] Hewitt G. F., “Measurement of Two Phase Flow Parameters”, Copyright 1978, Great Britain
- [3] Delhage J. M. and Cognet G., (Edi) “Measuring Techniques in Gas-Liquid Two-Phase Flow”, IUTAM Symposium, Nancy, France, 1983

laminar flow to fully turbulent flow over a flat plate is given

NUMERICAL SIMULATION OF 3-D VISCOUS FLOW IN NON-AXISYMMETRIC NOZZLE

Ji Yongchun (Tsinghua University)

Ma Tieyou and Cui Jiya (Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

ABSTRACT The three-dimensional viscous flow in non-axisymmetric nozzle are simulated numerically. MacCormack finite difference scheme is extended to solving three-dimensional Navier-Stokes equations. Local time step technique is adopted in numerical iteration for rapid convergence. The computer memory and CPU time are saved by proper programming. Two examples of simulation are presented. Favorable agreement is shown between computed and measured surface static pressure distributions.

EFFECT OF HEAT-TRANSFER LAW ON FINITE-TIME EXERGoeCONOMIC OPTIMAL PERFORMANCE OF A CARNOT ENGINE

Chen Lingen, Sun Fengrui, Chen Wenzhen

(Naval Academy of Engineering)

ABSTRACT The relationship between optimal efficiency and profit of an endoreversible carnot engine is derived. According to this relationship the finite-time exergoeconomic optimal performance of the engine has been considered for three common heat-transfer laws. A number of new universal conclusions have been drawn therefrom.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON LIQUID-COOLING MECHANISM FOR TURBINE VANE

Liu Dezhang and Ouyang Ning (Nanjing Aeronautical Institute)

ABSTRACT The experimental investigation on liquid cooling mechanism was carried out with water through an even-heated adiabatic straight pipe. The flow pattern, the heat transfer coefficient along full-flow-path, and the correlation between them, have been studied. In order to imitate the actual working conditions of the cooling passage of turbine vane, the heat transfer flux, the coolant inlet parameters, and the pipe angle are changeable. Some empirical formulas for come-to-saturated point Z_B and come-annular point Z_N have been derived and several useful conclusions have been drawn for engineering application.