

高温涡轮叶片液冷机理研究

南京航空学院 刘德彰 袁保宁

【摘要】 本文是高温涡轮叶片液冷机理研究的第一部分。以水为冷却介质,在均匀受热的铅直圆管内流动产生汽液两相沸腾,测量其沿程流型、换热系数及其相互关系。在一定的加热条件下,改变进口流量,研究流动参数对流型变化的影响,得到环状流区最长又不出现“烧毁”的最佳流型分布和换热系数,并提出可供选用的经验公式。本文还进行了数值计算,所得结果与实验吻合较好。

一、引言

提高涡轮前的温度 T_3^* 仍然是当前改善发动机性能的重要途径之一。但是,随着 T_3^* 的不断提高,用空气作为冷却介质将产生一系列问题:①冷却气量的增加,导致发动机总体性能下降;②气膜冷却流量的增加不仅会使涡轮气动性能下降,而且气膜流量也要受流动结构的限制^[1];③叶片冷却通道结构更复杂,制造工艺更困难,成本更高。因此,必须寻求新的解决方法。已有的研究工作表明在汽液两相流动中,当流型为环状流时,液膜厚度很薄并沿流向不断减薄,在恒热流下,可使壁面过热度 $(T_w - T_s)$ 很小,即换热系数很大。本文提出用液体作为冷却介质,当冷液进入冷却通道受热后,将经历从单相液体到汽液两相沸腾的强化换热过程,使换热系数大大提高,改善发动机的总体性能和结构。为了详细研究环状流型的变化及控制规律,本文采用小流量 $(1.5 \sim 4.6 \text{ g/s})$ 和相对大的热流 $(25 \sim 90 \text{ kW/m}^2)$ 的工况,实测了各工况下,流型、壁温和换热系数的变化关系,并与数值计算相比较后,得出了可供设计选用的环状流起始点 Z_N 与始沸点 Z_V 的控制公式。

二、实验研究

实验装置如图1所示,水从高15.7m的溢流水箱恒压地供入实验段。实验段是一内径为10mm,外径为10.3mm厚度均匀的耐热不锈钢管。将实验段直接作为可控硅稳压电源的加热电阻,当接通电源后,调节可控硅,便可使实验段迅速受热。

1. 用移动式电导探针测量全流程的流型

(1) 测量系统 准确地测定流型是研究汽液两相流动和换热特性的重要问题。但是,迄今国内外介绍的关于汽液两相流型的测量方法都只适用于某一截面的流型测定,不适于测定全流程各截面的流型。本实验采用自制的移动式电导探针,进行全流程的流型测定,其测量原理与等效电路如图2所示(a:实验原理 b:测量等效电路)。在实验段内置一直径为0.12mm的漆包线,在其适当位置上裸露长度为1~1.5mm的一段铜丝作为测点A极,该线上端经通道出口与滑尺悬臂相系,下端经管道进口处联接到测量回路上。经测量表明不锈钢管

的电阻值与水的电阻值相比可忽略不计, 因此, 钢管与测量回路可作为等电位。

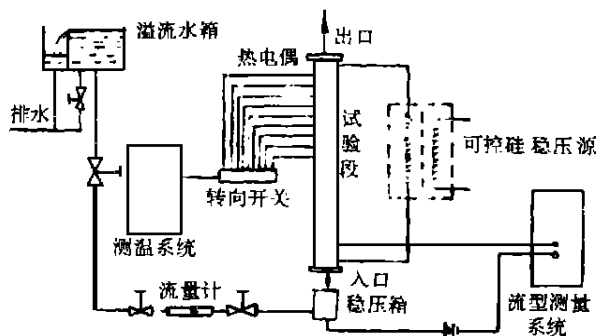


图1 实验装置图

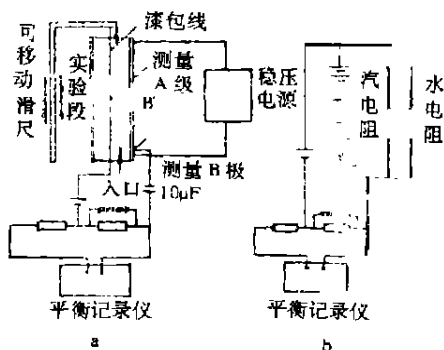


图2 移动式电导探针测量流型示意图

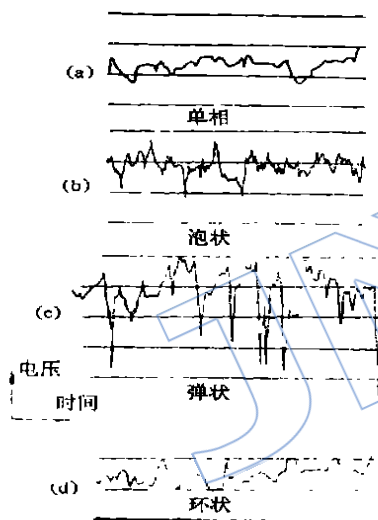


图3 流型图

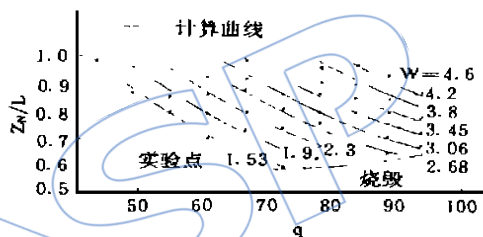


图4 压力面和吸力面上相对速度的物理逆变分量 W 的分布

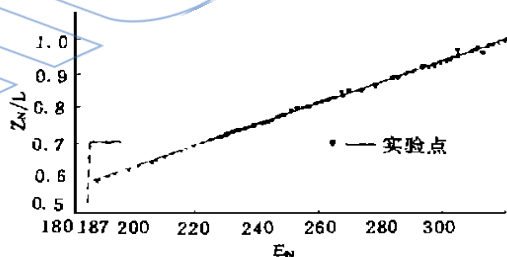


图5 $Z_N/L \sim E_N$ 的关系曲线

用电导探针测量流型, 是基于汽液两相导电率的明显差异, 液相的导电率明显地大于汽相。当可控硅电源供电后, 随着滑尺的移动, A 极将随之移动, 不同处的流型便可由 A 极与 B 极的电位差反映出来。但因 B 与 B' 点相互错开, 使得 BB' 段上的可控硅电源所加的一部分电压, $V_{BB'} = IR_{BB'}$ 串入测量回路, 并使响应曲线的基线上移。为消除这一影响, 在电路中串入一电容及对应的电感。这样, 便可测出电压随时间的响应曲线, 判定该处的流型。

(2) 测量结果 实验时用表 1 所列的水流量 W 与电流 I , 组成一系列工况进行实验。本实验共做了 65 个工况, 图 3 为 $W = 2.30 \text{ g/s}$, $q = 53809 \text{ W/m}^2$ 工况下所测得的流型图, (a: $Z = 5 \text{ cm}$, 单相; b: $Z = 11 \text{ cm}$, 泡状; c: $Z = 97 \text{ cm}$, 弹状; d: $Z = 113 \text{ cm}$, 环状)。

由于环状流区的换热系数最大, 本实验着重研究环状流区的起始点及其与流动参数等的关系。以环状流区起始点 Z_N 与管长 L 的比值 Z_N/L 为函数, 加热量 q 为变量, 流量 W 为参变量, 可将实验结果表示为如图 4 所示的实验点, 可见, 它们是一组规则的曲线族。

表 1 实验时所用的 W 和 I 的数值

流量 W (g/s)	4.60	4.20	3.80	3.45	3.06	2.68	2.30	1.90
电流 I (A)	220	210	200	190	180	170	160	150

(3) 实验数据处理 现有的环状流起始点的经验公式, 都只将 Z_N 作为流动参数与物性参数的函数, 未计入换热的影响, 为使经验公式能适于有换热的工况, 本文用无因次参数对实验数据进行整理。根据理论分析, Z_N 有如下函数关系

$$Z_N = f(W, q, c_p, d, \sigma, p_{in}, \gamma) \tag{1}$$

选用无因次量 E_N 为横坐标, E_N 取为

$$E_N = (W c_{pL}) / (q d^2) \cdot (\Delta T_{s,in} + \xi_1) \tag{2}$$

式中, $\xi_1 = 0.022 + 0.0163 (R^2 \rho_L) / w \cdot (\rho_L / \sigma g)^{-0.25} \cdot \gamma / c_{pL}$; $\Delta T_{s,in} = T_{s,in} - T_{in}$ 。选用 Z_N / L 为纵坐标, 绘制成 $Z_N / L \sim E_N$ 的关系曲线如图 5 所示。从图中可得出 Z_N / L 的经验公式为

$$Z_N / L = 0.572 + 0.396 E_N \tag{3}$$

上式说明改变 E_N 可得到相应的 Z_N 。说明在一定的工质条件下, 改变工况就可改变 E_N 值, 并得到相应的 Z_N 值。从图 5 中还可看出, 只要 $E_N > 187$, 便可按图中的曲线或式 (3) 求出 Z_N / L 值。但必须注意, 若 $E_N < 187$, 则管道后部将出现雾状流动, 甚至导致烧毁。

2. 始沸点 Z_V 的确定 始沸点的确定也是汽液两相流动换热的重要问题。虽 Z_V 不能直接用电导探针测定, 但因始沸点所对应的壁温有明显的突降, 可从壁温分布曲线得出。若以热流 q 为变量, 流量 W 为参变量, 可由实验数据整理出 $Z_V / L \sim q$ 的变化关系如图 6 所示。

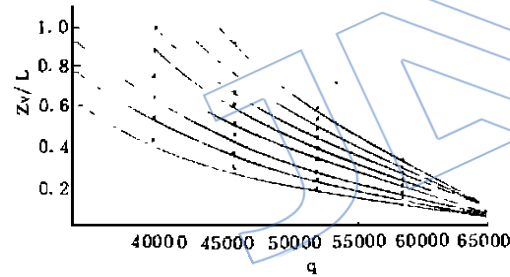


图 6 $Z_V / L \sim q$ 的关系曲线

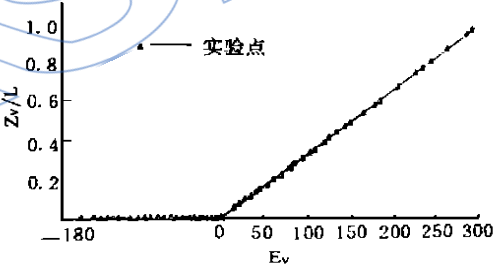


图 7 $Z_V / L \sim E_V$ 的关系曲线

根据分析, Z_V 有以下函数关系

$$Z_V = f(W, q, c_{pL}, d, \alpha, p_{in}) \tag{4}$$

以 E_V 为横坐标, E_V 取为

$$E_V = (W c_{pL}) / (q d^2) \cdot (\Delta T_{s,in} - \xi_2) \tag{5}$$

式中, $\xi_2 = (1.008 q / \alpha) - 30.68 (q / \alpha)^{0.25}$ 。以 Z_V / L 为纵坐标, 便可绘制成 $Z_V / L \sim E_V$ 的关系曲线如图 7 所示。可见, 所有的实验点几乎都在同一直线上。从图 7 中可得出

$$Z_V / L = 0.803 E_V = 0.803 (W c_{pL}) / (q d^2) \cdot (\Delta T_{s,in} - \xi_2) \tag{6}$$

3. 换热系数的确定 汽液两相流动换热系数的确定, 是通过对壁温 T_w 的测定和计算出管内流动时的压降及对应的饱和温度 T_s , 再由已知的热流量 q 求得, 即

$$\alpha = q / (T_w - T_s) \tag{7}$$

本实验用镍铬—康铜热电偶焊在管外壁上, 全长共置 42 对。因壁厚很薄可用外壁温 T_w' 作为内壁温 T_w 。本实验得到 65 组 $T_w \sim Z$ 和 $\alpha \sim Z$ 的关系曲线, 图 8 为其中 4 个工况。

从图 8 中可见: ①当加热量相对于流量很大时, 沿程有两个壁温突降, 如图中的 a 和 b 。

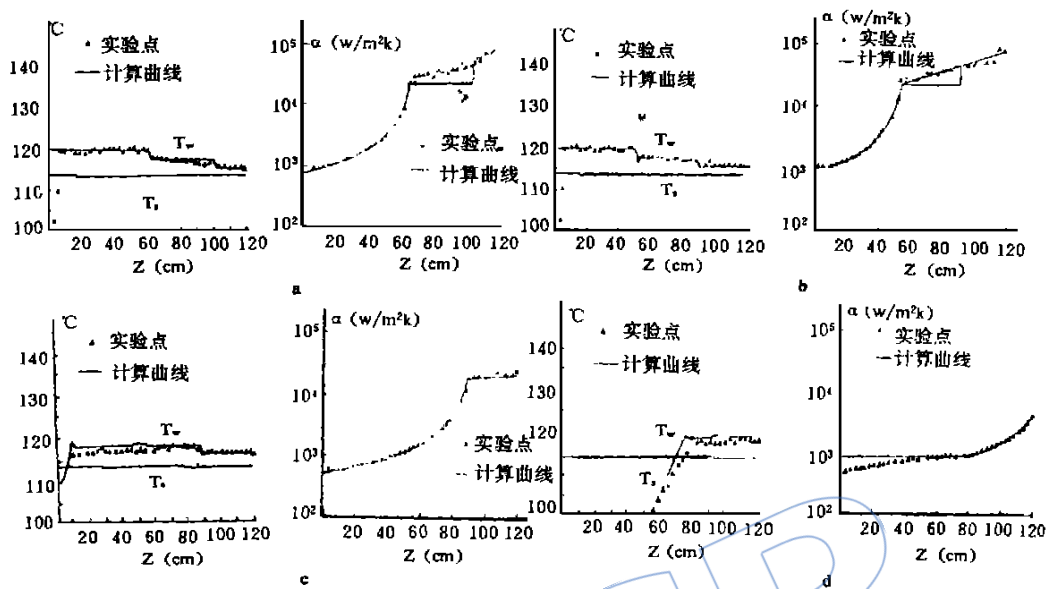


图 8 几种工况下的 T_w-Z 和 $\alpha-Z$ 关系曲线 (a. $W=4.60\text{g/s}$, $q=90350\text{W/m}^2$;

b. $W=3.80\text{g/s}$, $q=90350\text{W/m}^2$; c. $W=3.80\text{g/s}$, $q=53809\text{W/m}^2$; d. $W=3.80\text{g/s}$, $q=37677\text{W/m}^2$)

说明此时始沸点是几乎在进口处, 从进口处到第一个温降是过冷核沸腾; 从第一个到第二个温降是饱和核沸腾; 第二个温降是环状流开始。②当加热量相对于流量不太大时, 如图中的 c , 沿程虽也有两个壁温突降, 但第一个温降是始沸点, 第二个温降是过冷核沸腾进入饱和沸腾而引起的温降, 在此工况与管长下未出现环状流区。③当加热量相对于流量较小时, 如图中的 d , 始沸点在离进口较远处出现, 此时沿程壁温只有一个突降点—始沸点。

三、数值计算

为了校核实验结果, 本文利用现有的一些公式, 并根据小流量工况的特点作了一些补充和修正, 进行数值计算, 结果与实验符合较。

1. 泡状流区及换热计算 流区计算是确定始沸点 Z_V 、流动压降 (dp/dz) 和壁温 T_w 。

(1) 始沸点 Z_V 的确定是直接计算液体过冷度的方法。过冷沸腾开始的条件应是加热量 q 大于单相液体对流换热量, 即

$$q - \alpha(T_w - T_b) \geq 0 \quad (8)$$

式中, α 为单相液体对流换热系数。因此, 始沸点 Z_V 处的过冷度 ΔT_V 应为

$$\Delta T_V = T_{s,v} - T_{b,v} = (T_{w,v} - T_{b,v}) - (T_{w,v} - T_{s,v}) = (q/\alpha) - \Delta T_{s,v} \quad (9)$$

式中 $\Delta T_{s,v} = (T_{w,v} - T_{s,v})$ 可用詹斯—洛蒂斯 (Jens-Lottes) 方程^[2]计算

$$\Delta T_{s,v} = c \cdot q^{0.25} \quad (10)$$

式中, $c = 7.8 \exp \{-0.0163(p_v - 1)\}$, p_v 为始沸点处的压强

$$p_v = p_{in} - \lambda(Z_V/d)(\rho_L/2)u_L^2 \quad (11)$$

$T_{b,v}$ 为液体的整体温度, 可由热平衡式计算

$$T_{b,v} = T_{in} + (q 2\pi R Z_v) / (c_p L W) \quad (12)$$

对 (9) ~ (12) 四式反复迭代, 便可求得 Z_v 。计算结果如图 6 上的实线, 与实验较吻合。

(2) 泡状流区的压降计算分过冷沸腾区和饱和沸腾区两部分。过冷沸腾区的压降可由欧文斯 (Owens) 和施洛克 (Schrock)^[3] 提出的公式计算

$$(dp/dz)/(dp_o/dz) = 0.97 + 0.028 \exp(6.13 Z^*) \quad (13)$$

式中, (dp_o/dz) 是单相等温且同一主干温度和质量流速时的摩阻梯度; $Z^* = (Z - Z_v) / (Z_B - Z_v)$, 是无因距离; Z_B 为饱和沸腾的起始点, 可由热平衡确定。因饱和沸腾区流动情况较复杂, 根据文献 [4] 提出当管径 $d \leq 80 \text{ mm}$, 便可均相流动模型计算。本工况 $d = 10 \text{ mm}$, 故可采用均相模型, 将汽液两相作为物性参数为相应平均值的“单相流体”处理。即

$$-(dp/dz) = (dp_f/dz) + (dp_g/dz) + (dp_a/dz) \quad (14)$$

式中, 摩阻压降梯度 (dp_f/dz) 可由液相析算系数 $\Phi_{f,o}$ 求得, 即

$$\Phi_{f,o}^2 = (dp_f/dz) / (dp_f/dz)_{L,o} = N_{L,o} [1 + x(\rho_L/\rho_g - 1)] \quad (15)$$

$$\text{或} \quad \Phi_{f,o}^2 = (\mu_L/\mu_o)^{-0.25} [1 + x(\rho_L/\rho_g - 1)] \quad (16)$$

式中, $\mu_o = x(\rho_o/\rho_g)\mu_g + (1-x)(\rho_o/\rho_L)\mu_L$; $\rho_o = \rho_g \Phi_{g,o}^2 + \rho_L(1-\Phi_{g,o}^2)$;
 $\Phi_{g,o}^2 = \rho_L / [(\rho_g/x) + (\rho_L - \rho_g)]$

重位压降梯度 (dp_g/dz) 可由下式计算

$$(dp_g/dz) = \rho_g \sin \theta = \rho_g \Phi_{g,o}^2 + \rho_L(1-\Phi_{g,o}^2) g \quad (17)$$

加速压降梯度 (dp_a/dz) 可由下式计算

$$\frac{dp_a}{dz} = \left[\frac{W}{A} \right]^2 \frac{d}{dz} \left[\frac{(1-x)^2}{\rho_L(1-\Phi_{g,o}^2)} + \frac{x^2}{\rho_g \Phi_{g,o}^2} \right] \quad (18)$$

(3) 壁温计算

① 单相液体流动区换热, 虽由 Re 数可得流态为层流, 但因下游沸腾的汽泡生成与破灭都会影响上游单相流, 使其换系数提高。本文经对大量实验数据的统计处理, 得出换热数为

$$\alpha = (392.6 - 7.76I + 0.0529I^2 + 1.2 \times 10^{-4}I^3)(Nd) \quad (19)$$

② 泡状沸腾区的壁温 T_w , 汤姆 (Thom) 等人^[5] 提出对充分发展核沸腾可由下式计算

$$T_w = [q - \alpha_o(T_s - T_b)]^{0.5} \times 22.65e^{-p/87} + T_s \quad (20)$$

但是, 在充分发展过冷沸腾区, 单相对流换热分量 $q_c = 0$, 即壁温为

$$T_w = 22.65q^{0.5}e^{-p/87} + T_s \quad (21)$$

显然, 用式 (20) 和 (21) 进行壁温计算, 必将出现充分发展过冷沸腾区的壁温高于部分过冷沸腾区的矛盾, 因此必须对式 (20) 进行修正, 本文经大量试算, 表明式 (20) 应修正为

$$T_w = [q - \alpha_{s,D}(T_s - T_b)]^{0.5} \times 26.75e^{-p/125} + T_s \quad (22)$$

用式 (22) 计算部分过冷沸腾区的壁温与实验吻合。

③ 从饱和沸腾起始点 Z_b 至环状流起始点 Z_N , 该区的换热可采用 Chen 提出的关系式^[6]

$$q = \alpha_{mac}(T_w - T_b) + \alpha_{mic}(T_w - T_s) \quad (23)$$

式中, α_{mac} 为计入雷诺因子 F_c 的单相对流换热系数; α_{mic} 为计入抑制因子 S_c 的大容器沸腾换热系数。由式 (23) 可求得该区的壁温。

2. 环状流动及换热计算 因环状流区在换热中的重要地位, 本文从理论分析入手, 结合经验与半经验公式, 对该区的流动与换热进行数值计算。

为便于分析, 假设在环状流区流体温度基本不变, 物性为常数; 液膜很薄, 切应力沿液

膜厚度为常数; 液膜内湍流普朗特数 Pr_t 为常数; 沿轴向液膜内的温度分布相似。

①环状流区的压降梯度, 仍可由动量方程写为

$$-(dp/dz) = (dp_f/dz) + (dp_g/dz) + (dp_a/dz) \quad (24)$$

式中, 摩阻压降梯度 dp_f/dz , 可按分相模型并计入夹带液滴的影响进行计算。即

$$(dp_f/dz) = (\lambda_{L,E}/2)(\rho_L W_{LO,E}^2/d) \quad (25)$$

式中, $W_{LO,E}$ 是计入夹带后的液相折算速度, $W_{LO,E} = W_L(1-E)/(\rho_L A)$; $E = W_E/W_L$, 称为窜流比, W_E 为夹带液滴量; $\lambda_{L,E} = 0.3164 Re_{L,E}^{-0.25}$; $Re_{L,E} = Re_L(1-E)$ 。重位压降梯度 dp_g/dz 和加速压降梯度 dp_a/dz 仍可由式 (17) 和式 (18) 计算。

②液膜内的速度分布, 因液膜很薄, 可用斯堡汀 (Spalding) 的壁面定律公式^[7]计算

$$y^+ = u^+ + e^{kB} [\xi^{ku^+} - 1 - ku^+ - (ku^+)^2/2 - (ku^+)^3/6] \quad (26)$$

式中, $y^+ = yv^*/\nu$, $u^+ = u/v^*$; v^* 是壁面摩擦速度, $v^* = (\tau_w/\rho_L)^{1/2}$; $k = 0.4$, $B = 5.5$ 。

③壁面温度计算, 因设 $Pr_t = \text{常数}$, 可由雷诺相似得

$$q/\tau_w = (\lambda + \lambda)/(u + u_t)(dT/du) \approx q_w/\tau_w \quad (27)$$

所以 $dT = q_w/(c_p \tau_w) = (1 + \mu_t/\mu)/\Phi [P_r + (\mu_t/\mu)(1/P_{r,t})]$ (28)

由斯堡汀关系式^[7], 可得

$$\mu/\mu = ke^{-kB} [\xi^{ku^+} - 1 - ku^+ - (ku^+)^2/2] \quad (29)$$

由式 (29) 和 (28) 用数值积分可得液膜内的温度分布和壁温。因温度分布沿轴向各截面相似, 在求得第一点的壁温后, 下游各点的壁温就只与液膜厚度有关。

④环状流起始点 Z_N 的计算, 采用文献 [6] 推荐的关系式

$$3.18W_{s,g}(\rho_L/\sigma) = 50 + 11.5W_{s,L}(\rho/\sigma) \quad (30)$$

式中, $W_{s,g} = wx/(\rho_g A)$; $W_{s,L} = w(1-x)/(\rho_L A)$ 。再由热平衡式

$$2\pi R Z q = xWY + Wc_{p,L}(T_{s,N} - T_{in}) \quad (31)$$

由式 (30) 求得 x 后, 代入式 (31) 便可求得 Z_N 。

四、结 论

1. 用移动式电导探针测量全流程各段流型变化的方法是可行的。

2. 由实验结果整理成的始沸点 Z_V 与环状流起始点 Z_N 两个经验公式 (3) 与 (6), 都综合考虑了流动、传热和物性参数等的影响, 且都是无因次形式, 便于使用。说明在一定的热量和介质条件下, 可采用改变流动参数来得到相应的 Z_V 和 Z_N , 并对其数值进行控制。

3. 在数值计算中, 泡状流区的部分过冷沸腾区的壁温计算, 因汤姆公式 (20) 不适用, 应修正为式 (22)。环状流区计算中所作的假设和数理模型, 经计算结果表明是合理的。两区壁温的数值计算结果都与实验数据相吻合, 说明计算所用的方法是可行的。

参 考 文 献

- [1] 刘德彰、郑际睿、吉洪湖, “涡轮叶片气膜冷却流场的实验研究”, 中国航空科技文献, HJZ860037, 1986 年。
- [2] Zuber, N. et al, Proc., 3rd Int. Heat Transfer Conf., 1966.
- [3] Owens, W. L. et al, ASME Rep., No. 60-WA-249, 1960.
- [4] Engineering Science Data Item, “The Gravitational Component of Pressure Gradient for Two-Phase Gas or Vapor/Liquid Flow Through Straight Pipes”, Engineering Science Data Item, No. 77016, 1977.
- [5] Thom, J. R. S., “Boiling in Subcooled Water During Flow up Heated Tubes or Annuli”, Paper 6, Presented at the Symposium on Boiling Heat Transfer in Steam Generating Units and Exchange Held by Inst. Mech Engrs, 15016, Sept, 1965.
- [6] Collier, J. G., “Convective Boiling and Condensation”, McGraw-Hill, London, 1972.
- [7] 吴国钊, “粘性流体力学”, 航空工业出版社, 1988 年。

STUDY ON ATOMIZATION MODEL AND COMPUTATION OF PREFILMING AIRBLAST ATOMIZER

Gan Xiachua and Zhao Qishou

(*Beijing University of Aeronautics and Astronautics*)

ABSTRACT

An atomization model for prefilming airblast atomizer is formulated on the basis of analysis and experiments, and put in to numerical computation. A breakup criterion of liquid film is provided to judge the film disintegration extent. Quantitative relations between the wavelength-frequency spectrum of the film wave and its correspondingly formed droplet size-number are considered. A Trace-Statistical method is presented to perform the model computation. A numerical example of atomization of a three-dimensional axisymmetric atomizer has been completed. The consistence of the computational results with the experimental data demonstrates that this model is feasible.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF DENSE SPRAY ON DROP SIZE MEASUREMENT BY LIGHT SCATTERING TECHNOLOGY

Li Weiming, Zhang Yan, Chin Jushan

(*Beijing University of Aeronautics and Astronautics*)

ABSTRACT

The effect of dense spray on drop size measurement by light scattering technology was studied by using Malvern instrument with five duplicated internal mixing airblast atomizers aligned with laser beam. The correction factor data for multiple scattering were obtained. By regression analysis, an empirical equation was obtained which correlated the correction factor as a function of obscuration (OBS), Sauter Mean Diameter under dilute spray condition SMD_0 and drop size distribution parameter for Rosin-Rammler distribution under dilute spray condition N_0 .

The experimental data showed definitely that the correction factor is not only a function of OBS, SMD_0 , as proposed by Lee Dodge, but also is a function of N_0 . The correlation fits the experimental data very well, and can be used for practical purposes to correct the data from Malvern drop sizer at high obscuration conditions.

THE MECHANISM OF LIQUID-COOLED VANE FOR HIGH-TEMPERATURE TURBINE

Liu Dezhang and Yuan Baoning

(*Nanjing Aeronautical Institute*)

ABSTRACT

In this study the flow pattern and heat exchange coefficient have been obtained, and relation between them have been determined in the circumstance of vapour-liquid two-phase boiling of water coolant through a even heated straight tube. The influences of the coolant flow parameters on the flow pattern and heat exchange have been studied by changing the coolant flow speed, or the flowrate at the entrance under certain

heating conditions. As a result, the best flow pattern for the heat exchange coefficient in which the annular flow zone is the longest without "burn down". Then the empirical formulas have been found for designing. The results of numerical calculation are in good agreement with the data of tests.

MEASURING TECHNIQUE FOR INFRARED RADIATION OF METALLIC SURFACES

Ren Linghua, Zhen Jirui, Lei Ying

(*Nanjing Aeronautical Institute*)

ABSTRACT

A testing principle, method and apparatus for measuring infrared radiative energy of metallic surfaces are presented. The infrared radiation characteristics of irons and stainless steels have been investigated experimentally. The effects of the temperature on the infrared radiative energy of metal materials are considered. The experimental results illustrate that this testing technique is applicable and the measuring apparatus is reliable.

EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT TRANSFER IN TURBULENT SEPARATED FLOW OVER A FORWARD-FACING STEP

Duan Xinran

(*Lanzhou Railway Institute*)

A. Baron and F. K. Tsou

(*Drexel University, Philadelphia, U. S. A.*)

W. Aung

(*National Science Foundation, Washington, DC, U. S. A.*)

ABSTRACT

An experimental study of heat transfer in turbulent separated flow over a forward-facing step is reported in this paper. The present work deals with a quite small forward-facing step model (step height $H = 4.0\text{mm}$), therefore a special technique that can change the relative locations of heat flux gauge from the step is applied successfully.

The investigation is focused on two recirculation zones. Measurements of heat transfer are performed in Ludwig Wind Tunnel by the transient technique, which demonstrates a new method of experimental research in this field. Within the range of Reynolds number 11800 to 32200, the distribution of wall heat flux and the distribution of Nusselt number are obtained. Those distributions show that the heat transfer coefficient increases to the first maximum value near the step in the front recirculation zone and the second maximum occurs at the reattachment point in the downstream recirculation zone where this point is fixed roughly at $X/H = 2.5$ for the five different Reynolds numbers. The second maximum is larger than the first for same Reynolds number. At last a correlative equation between Reynolds and Nusselt numbers is presented.