

高温涡轮叶片用航空煤油冷却的机理研究

南京航空学院 刘德彰* 刘明候 武卫东

【摘要】 本文用航空煤油为冷却介质,在均匀受热的铅直圆管内沸腾形成气液两相流动,研究其沿程换热系数的变化规律,并与用水为冷却介质相比较;研究在不同工况下,煤油沸腾气液两相流动时的不稳定性 and 结焦的情况。

关键词: 航空煤油 叶片冷却 结焦

1 前言

已有的研究工作^[1,2]表明,用水为冷却介质,在管内沸腾产生汽液两相流动,当流型为环状流时,液膜厚度很小,并沿流向不断减薄,在恒热流下,使壁温的过热度变小,因此,换热系数可比单相液流区提高约两个数量级。当用煤油为冷却介质时,其在受热通道中,仍然要经历从单相液流到沸腾气液两相流动的过程,换热效果也将增强。但是,因煤油的物性不同于水,其换热效果的增强比水差一些,当流型为环状流时,换热系数比单相液流区高一个数量级;尤其是在一定的工况下,煤油会出现“结焦”(析炭),其部分析炭将贴附于壁面,使热阻增加,换热效果降低。因此,不仅要研究煤油在未结焦情况下的换热系数,而且要研究其在某些工况下的结焦速率和阻止或减少结焦的途径。

2 实验设备与测试系统

实验装置如图1所示,试验段是用内径为10mm、外径为10.3mm 厚度均匀的耐热不锈钢

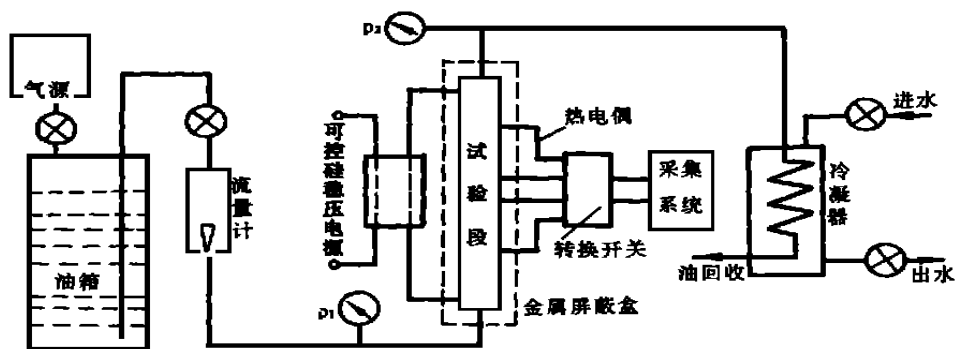


图1 实验装置

管 (1Cr18Ni9Ti) 做成的, 并直接作为可控硅稳压电源的加热电阻。试验段外包绝热材料并置于金属屏蔽盒中。为模拟涡轮叶片冷却时的工况, 本文采用小流量 ($1.2 \sim 4 \text{ g/s}$) 和相对大的热流 ($25 \sim 85 \text{ kW/m}^2$) 的工作参数。因为是用煤油为冷却介质, 实验时要改变不同的工作压力, 并回收出口的油气混合流, 所以采用挤压式系统, 并在出口处加装冷凝器。

2. 1 壁温测量系统

在试验段的管壁上, 每间隔 40 mm 配置一对热电偶, 全长共 16 对。各热电偶间沿周向错开 90° ; 以减少对加热均匀度的影响。热电偶测量端直径小于 0.6 mm , 其响应在几十 ms 内不大于 100 Hz ^[3]。用六通道滤波型放大器, 对所采集的信号进行初级稳定滤波放大, 将高于 100 Hz 的信号滤掉后送入 A/D 进行二级放大, 再转换为 CPU 可接受的数字量。经采样软件控制, 可获得准确的热电势输出值。同时, 用五位半数字电压表直接测出热电势, 与采样系统结果相互校核。测温系统如图 2 所示。

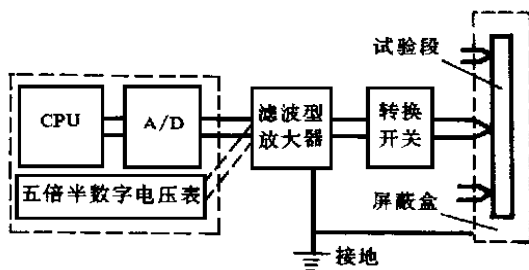


图 2 壁温测试系统

2. 2 平均主体温度 T_b 的确定

通过测定管壁温度 T_w , 即 $T_w = f_1(z)$; 和数值计算, 求得沿程压力变化, 即 $p_b = f_2(z)$ 及相应

的 T_b ; 便可由已知的热流 q , 按 $\alpha = q/(T_w - T_b)$, 求得 $\alpha = f_4(z)$ 。因此, 除精确地测得 T_w 外, 还应准确地确定 T_b 。进口段未饱和时仍按单相流计算。

T_b 的确定方法同文献 [1、2]。此时虽有析炭, 但其量极少, 可先忽略固相的影响, 仍用汽液两相流动进行计算。在求得沿程压降后, 便可得到沿程压力变化值及相应的 T_b 。

为了较准确地求得沿程的压力变化, 并计及固相的影响, 本文在文献 [1、2] 的基础上, 采用如图 3 所示的修正方法, 即将实测的进出口压力与计算值之间的差值, 用 $\Delta p_z = \Delta p_2 (Z/L)^2$ 进行修正, 得到修正后的沿程压力分布, 再按其确定相应的 T_b 。

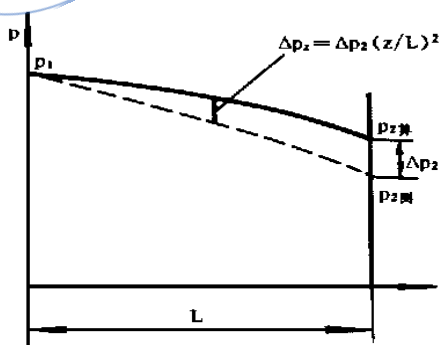


图 3 压力修正曲线

2. 3 内壁温 T_w' 的换算

为了准确地求得换热系数, 需将实测的外壁温 T_w 换算为内壁温 T_w' 。由导热关系式, 可得

$$T_w' = T_w - [q d_i / 4\lambda (d_o^2 - d_i^2)] \ln d_o / d_i - (d_o^2 - d_i^2)$$

式中, d_i 、 d_o 分别为试验段的内、外径。

2. 4 热电偶的冷端补偿

热电偶的冷端补偿由 IBMPC-XT 微机完成, 采用 FORTRAN 语言编程, 其作用是将热电

偶所有输出的电势值, 经冷端补偿后以壁温值输出。其过程是对热电偶的标定值进行最佳拟合, 再用拟合方程进行冷端补偿。其拟合方程为 $u = f(T)$, 反函数为 $T = f'(u)$, 而环境温度对应的电压值为 $u_a = f''(T_a)$, 则壁温 T_w 对应的电压值为 $u_w = u_a + \Delta u$, 即壁温 $T_w = f'''(u_w)$ 。

3 实验结果

实验是在不同的热流密度 q 、不同的流量 W 和压力的条件下进行的, 所得结果如下。

3. 1 分别用水与用煤油为冷却介质的比较

图 4 为在相同工况下, 用水与用煤油为冷却介质时, 沿程壁温与换热系数的变化曲线。可见, 由于煤油与水的物性 (如汽化潜热、饱和温度、密度、比热与表面张力等) 不同, 其中水的汽水潜热比煤油高 8 倍多。因此, 用煤油为冷却介质在管内沸腾流动时, 其沿程壁温 T_w 比用水为冷却介质时高得多, 相应的换热系数 α 则低约一个数量级; 而环状流起始点 Z_N 提前。

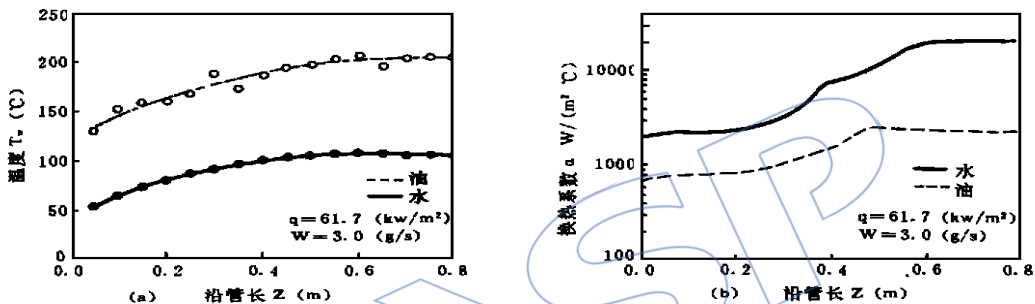


图 4 用水和煤油为冷却介质时的 T_{w-z} 和 α_z (a. T_{w-z} b. α_z)

图 5 为根据实验数据整理得出的环状流起始点无因次参数 Z_N/L 与 E_N 的变化关系。由此关系曲线可整理成环状流起始点控制的经验公式为

$$Z_N/L = 0.0032863E_N - 0.097178$$

式中, 无量纲量 $E_N = (WC_{p,L}/qd_i^2)(\Delta T_{s,in} + \xi_N)$; 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油液温度 (K), W 为质量流率 (kg/s), $C_{p,L}$ 为油液定压比热 ($J/kg \cdot K$), q 为热流密度 (W/m^2), d_i 为试验段管内径 (m); $\xi_N = 0.022 + 0.0288(R^2\rho_L/W)(\rho_L/\sigma g)^{-0.25}] \cdot Y/C_{p,L}$; R 为试验管半径 (m), ρ_L 为油液密度 (kg/m^3), σ 为表面张力 (N/m), Y 为煤油汽化潜热 (J/kg)。可见, 由于煤油与水的物性参数不同, 其环状流起始点的控制关系式也有所不同。但是仍可用无量纲量 E_N 表示, 在 E_N 表达式中除了有流量, 热流密度和进口过冷度外, 余者都是物性参数。

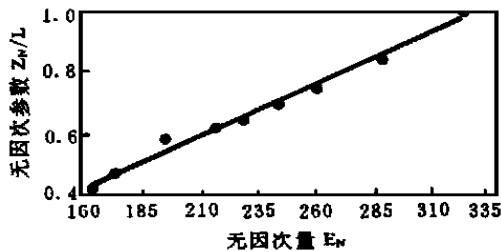


图 5 Z_N/L 与 E_N 的关系

3. 2 煤油在不同工况下的沿程壁温与换热系数的变化规律

图 6 为在相同的热流密度下, 流量变化时, 沿程壁温与换热系数的变化规律。可见, 随着流量增大, 壁温降低, 换热系数相应提高; 同时, 当流量增大时, 环状流起始点推后; 环状流区的换热系数比单相液流区提高一个数量级 (从 10^2 提高至 10^3)。

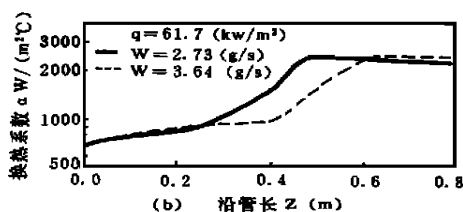
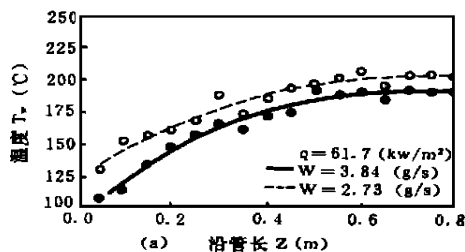


图 6 在相同的热流密度下沿程壁温与换热系数的变化

图 7 为在相同的流量下, 热流密度变化时, 沿程壁温与换热系数的变化规律。可见, 随着热流密度增大, 环状流起始点提前。

3.3 关于壁温的脉动

实验结果表明, 在单相液流区和环状流区, 壁温的脉动量较小, 为 1~5, 最大脉动误差为 2.5%; 从始沸点到饱和沸腾点的壁温脉动量较大, 可达 5~13, 最大脉动误差为 7.2%; 相应的换热系数最大脉动误差分别为 6.2% 和 15.4%。由于煤油的物性不同于水, 因此, 其壁温的脉动量均比水小 (水为介质时, 环状流区的壁温最大脉动量为 5.8%, 未饱和压为 13.6%^[2])。结果还表明, 当提高进出、口压力或增加流量时, 对壁温的脉动都可起抑制作用。

3.4 关于“结焦”问题

图 8 为在相同工况下, 煤油“结焦”前后, 沿程换热系数的变化规律。可见, 结焦是从始沸点开始, 其相应的换热系数也开始下降。从实验过程中还可明显看出, 在前 30 分钟, 结焦层厚度不断增加, 平均每 10 分钟壁温升高 1~3.5, 到 30 分钟后结焦层基本稳定。图 8 中的曲线 1 为刚开始实验 (未结焦) 时的情况, 曲线 2 为经 30 分钟后的情况。实验结果还表明, 当提高进出口压力时, 可减少或抑制结焦, 因为压力提高后, 相应的饱和温度也提高, 文献 [4] 根据实验结果得到航空煤油在 120~190 的范围内是结焦严重的温度区, 当提高工作压力后, 可使始沸点 T_v 、饱和沸腾起始点温度 T_B 和环

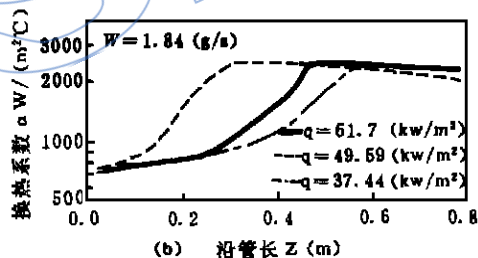
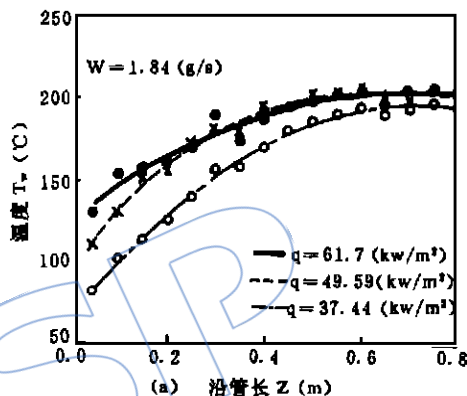


图 7 在相同的流量下沿程壁温与换热系数的变化

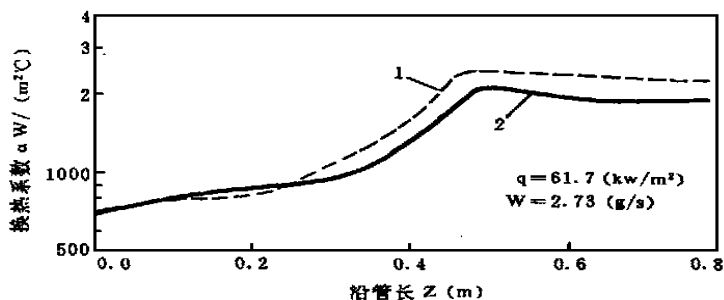


图 8 煤油结焦前后沿程换热系数的变化

状流起始点温度 T_N 都相应提高。当它们都超过结焦严重的温度区后, 便可阻止结焦的出现。

从对经过实验的试验件解剖也可看出, 距进口段一定长度, 未出现结焦, 不锈钢管的颜色未变; 从图中结焦起始点开始, 越向后, 颜色从灰到深黑, 表明结焦层逐步增厚。结焦层的厚度

很小 (由壁温变化的数据计算, 可得结焦层最大厚度为 $0.014mm$), 但它与管壁结合很紧密, 用刀片都不易刮落。

3. 5 含汽率 x 对换热系数的影响

图 9 为含汽率 x 变化时, 换热系数 α 的变化规律。图中横座标 x 的零值表示饱和沸腾起始点, 其含汽率为零。可见, 随着含汽率的增加, 换热系数 α 增大, 当含汽率增加到某一数值, 即达到环状流起始点并进入环状流区。随后, 虽然 x 继续增加, 但换热系数 α 仍保持在一稳定值, 说明环状流区换热情况稳定。

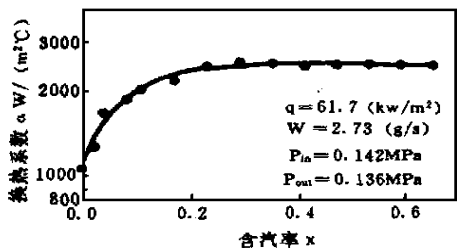


图 9 含汽率 x 与 α 的变化规律

4 实验结果分析与结论

(1) 煤油沸腾在环状流区的换热系数比单相液流压提高近一个数量级, 比空气高两个数量级。因此, 仍可大大强化换热, 作为高温涡轮叶片的冷却介质是有效的。

(2) 煤油在一定的温度范围内 ($120 \sim 190$) 有结焦现象, 粘附于壁面上的结焦层将导致换热效果降低, 换热系数减少 10% 左右, 减小幅度不是太大。而且, 在实际工作中, 可以通过控制流动参数 (如提高工作压力), 使其始沸点高于结焦的温度范围, 并尽快进入环状流区。这样, 就既能阻止结焦的出现, 又可提高换热效果。

(3) 煤油在沸腾汽液两相流动时, 也有不稳定性 (壁温脉动) 出现, 但比用水为介质时小, 而且也可以通过改变流动参数 (主要是提高工作压力) 来进行抑制。

(4) 本阶段的研究结果表明, 可为将煤油作为高温涡轮叶片的冷却介质, 为进行实际叶片通道的模型叶片实验提供良好的基础。下一阶段的工作是将煤油作为实际 (或模型) 叶片 (导叶) 冷却介质的应用研究。

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, 1990, 5 (2): 135
- 2 刘德彰, 欧阳宁. 高温涡轮叶片液冷机理的试验研究. 航空动力学报, 1991, 6 (2): 175
- 3 三 O 四所. 热电偶. 北京: 国防工业出版社, 1978
- 4 梁克明. 烃类燃料电热试验研究. 航空航天部十一所, 1987

A PLATINUM- FILM RESISTANCE TEMPERATURE PROBE FOR UNSTEADY FLOW MEASUREMENTS

Peng Jian, Jiang Haokang

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

ABSTRACT

A platinum-film resistance temperature probe has been designed. Steady tests show that the linearity error of the probe is less than 0.5%. The thermal response of the probe has been checked by both shock tube and high frequency hot jet. It is shown that the frequency response of 6 kHz can be expected. According to heat transfer analysis, the thermal properties and the size of the base bar are the main factors of the effect on thermal response of the probe. The probe has been successfully used for measuring rotating stall signals of a single stage transonic compressor. The study shows that the film resistance temperature probe features high frequency response, fine linearity, high sensitivity and ease to use, so it has a bright prospect in application to unsteady flow measurements.

A PARALLEL MULTI-CHANNEL HIGH-SPEED DATA ACQUISITION SYSTEM BHD-200- FOR DYNAMIC MEASUREMENT IN TURBOMACHINE

Xiong Zhang, Liu Xudong, Chen Wangmei, Jiang Haokang

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

ABSTRACT

A parallel multi-channel high-speed data acquisition system has been designed for dynamic flow measurement in turbomachine. With the swallowing and spitting capacity of 800 kc/s in all, the system can parallelly sample and process 16-channel signals. The structure, principles of operation, function and operation of the system are described in detail and two typical application examples are given.

EXPERIMENTAL RESEARCH ON CONDITION MONITORING AND FAULT DIAGNOSIS

Yang Leping, Chen Qizhi, Wang Kechang

(National University of Defense Technology)

ABSTRACT

A micro-computer system is introduced for condition monitoring and fault diagnosis in the ground testing of a throttling liquid rocket engine. The system presented is capable of monitoring all conditions of the static and dynamic performance parameters of the tested engine under each condition. According to the original data and curves provided by the monitoring system, it is possible to realize fault diagnosis for the throttling liquid rocket engine system in ground testing. The corresponding testing data and curves are presented in this paper.

THE MECHANISM OF LIQUID-COOLING OF VANE IN HIGH-TEMPERATURE TURBINE

Liu Dezhang, Liu Minhou, Wu Weidong

(Nanjing Aeronautical Institute)

ABSTRACT

In this research kerosene is used as coolant instead of water in the respect of identical and distinct properties. The heat transfer coefficient along full flow path

has obtained with the kerosene coolant through an even-heated straight tube, and relation between the heat transfer cooling of kerosene and water has been determined in the case of the vapor-liquid two-phase boiling flow. The key problem of the kerosene used as coolant is "coking property" and instability of wall temperature. However, it does happen in some particular working conditions, but the working conditions can be regulated with an empirical formula for the initial point annular flow Z_N to eliminate the coking zones. The Several useful conclusions have been drawn for the cooling passage of turbine vane.

STUDY ON FLOW CHARACTERISTICS OF SEPARATED IMPINGEMENT JETS AT SHORT DISTANCE

Kang Ying, Qiu Xuguang, Cao Yuzhang, Zhou Wei
(*Beijing University of Aeronautics and Astronautics*)

ABSTRACT

In conventional practice a row of separated circular jets is used in turbine blade or vane for impingement cooling and the relative distance z_n/d_n is very small ($z_n/d_n \leq 2$). In this case, study on longitudinal uniformity of the cooling on the surface of the blade or vane is necessary. In our experiments, the uniformity of the velocity distribution at large relative distance ($z_n/d_n > 10$) is achieved by free jet in atmosphere, but the distribution of jet velocity is rapidly uniformized when the jets strike against the target surface and flow along the surface. The reason of the uniformization is the turbulence mixing and the effect of pressure difference. This work contributes to good understanding for uniformization of cooling on the surface of the blade or vane.

COMPARATIVE EXPERIMENTAL RESEARCH ON SPRAY FIELDS OF HEAVY AND CONVENTIONAL AVIATION KEROSENE

Wang Jian (*The 31th Research Institute*)
Wang Jiahua (*Nanjing Aeronautical Institute*)

ABSTRACT

Laser holography was used to measure the fuel spray characteristics of heavy jet kerosene and conventional aviation kerosene downstream after a simple orifice injector. The spatial distribution of droplet size and Sauter Mean Diameters (SMD) for two kinds of kerosene have been obtained and compared. In this paper, the effects of air velocity and pressure drop on the fuel spray field are considered. The following conclusions are drawn from the experimental data: 1. The magnitude and distribution of droplet size are determined by the air velocity. 2. The SMD for the two fuels are, to some extent, related to the fuel pressure. 3. The variation of the fuel pressure has less influence on the SMD of the two fuels. 4. The empirical formulas are provided for evaluating the effects of the air velocity and the fuel pressure on the SMD.

RESEARCH ON WZ-5 TURBOSHAFT ENGINE WITH A REBUILT HIGH-TEMPERATURE TURBINE

Tian Wangnan (*Nanhua Power Research Institute*)

ABSTRACT

A WZ-5 turboshaft engine has been modified with a rebuilt high-temperature turbine as a ground power plant. The engine can make full use of its turbine inlet temperature through varying areas of both gas generator turbine and power turbine nozzles and reduce the rotor speed, thus a sufficient surge margin is provided and the output shaft