

空气冷却旋转盘的萘升华传热—传质模拟实验研究

北京航空航天大学 曹玉璋** 林宇震 冯华仲 徐国强 邱绪光

【摘要】对空气冷却的旋转盘换热进行了萘升华传热—传质模拟实验。共采用两种模型：自由盘的实验结果与换热实验数据和理论预测吻合得很好；对带罩盘模型得到了盘表面局部施伍德数 sh 和平均施伍德数 $\overline{sh}$ 以旋转雷诺数 Re_ω 、流量系数 C_m 、间距比 G_s 和间隙比 G_c 为参变量的实验数据。实验结果对旋转盘（如涡轮盘）的换热研究有一定参考价值。

关键词：萘升华 传热—传质模拟 旋转盘

1 前言

目前国内在静止传热元件上进行了一些萘升华的传热—传质模拟实验研究^[1~3]，但是，尚未见到对旋转部件传热的萘升华类比实验研究。本文以空气冷却的旋转圆盘传热为研究对象进行了萘升华传热—传质模拟实验研究。建立了旋转盘的萘升华传热—传质实验台，测取了自由盘和带罩盘的局部施伍德数 sh 分布。

国外也曾报导过带罩盘的空气冷却实验数据^[4~6]，但是这些数据彼此差异较大、参数范围相差悬殊。对转动元件的换热实验研究，其实验设备较复杂，尤其是对旋转表面的温度测量和热流测量，要经过一个由旋转系统到静止系统的过渡环节（如滑环引电器）才能将转动元件上的测量信号引到静止的测量仪表上，这对于高速旋转元件的换热实验研究带来很多麻烦。

文献[7]对空气冷却旋转盘的萘升华传热—传质模拟实验进行了探讨，对其实验原理进行了分析。认为这一手段是可行的。

2 实验原理

本实验的模型示意如图 1。旋转表面上的传质系数 $\alpha_M = m / (C_w - C_f)$ ，式中 m 为单位面积、单位时间萘表面的萘升华量 ($\text{kg} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$)， C_w 和 C_f 分别为萘表面处和远前方来流的萘浓度 (kg / m^3)。局部施伍德数的定义为

$$sh = (\alpha_M \cdot r) / D \quad (1)$$

这里采用 r 为定性尺度， D 为萘蒸汽在空气中的扩散系数。经过时间 τ 秒以后，萘表面由于升华，其厚度的减薄为 $\delta(r)$ (μm)，于是表面质量流 $m = (\delta(r) \rho_s / \tau) \times 10^{-6}$ ， ρ_s 为固态萘的密度，其值取为 $1145 \text{ kg} / \text{m}^3$ 。根据热力学，可以得到萘表面上萘蒸汽的浓度 $C_w = \rho_w = P_w / R T_w$ ， R 为通用气体常数， T_w 为萘表面温度， P_w 为相应 T_w 下的萘饱和蒸汽压。 P_w 与 T_w 的关系可用下式表示^[8]

$$\lg P_w = B_1 + (B_2/T_w) \quad (2)$$

其中 $B_1 = 13.564$, $B_2 = 3729.4$, T_w 单位为 (K), P_w 单位为 (N/m^2), C_w 的单位为 (kg/m^3)。远前方萘的浓度 C_f 取为零。于是

$$\alpha_M = (\delta(r) \cdot \rho_s) / (\tau \cdot \rho_w) \quad (3)$$

在实验中测量 $\delta(r)$ 和 T_w 值, 根据 (2)、(3) 式整理 α_M 值, 并根据 (1) 式整理 sh 的数据。

旋转雷诺数定义为 $Re_o = (\Omega R_o^2) / \nu$, 式中 Ω 为圆盘旋转角速度 ($1/\text{s}$), ν 取为空气的运动粘性系数。本实验研究的旋转雷诺数范围为 $0.65 \times 10^5 \sim 3.14 \times 10^5$ 。流量系数 $C_m = m / \mu R_o$, μ 为空气的动力粘性系数, C_m 变化范围由 $0.3 \times 10^4 \sim 1.5 \times 10^4$ 。间距比 $G_s = s / R_o$, s 为旋转盘萘表面与静止隔板之间的间距。间隙比 $G_c = c / R_o$, c 为带罩盘冷却气流出口间隙。 G_s 变化范围为 $0.012 \sim 0.172$; G_c 变化范围为 $0.0064 \sim 0.040$ 。

3 实验设备及测量

实验设备示意图如图 2。1 为轴, 2 轴承, 3 主轴变速塔轮, 4 隔热段, 5 盘, 6 排气口, 7 罩, 8 静止隔板, 9 进气口, 10 辅轴变速塔轮, 11 电机, 12 电机塔轮, 13 三角皮带。旋转圆盘 5 由交流异步电机驱动, 两级变速、三级变速塔轮, 共 9 个转速, 4 为特殊结构的尼龙隔热段, 以阻止轴承发热传到盘上。实验件示意图见图 1, 铝质圆盘表面上车出沟槽, 与盖板组合成一个萘试件的浇铸模空腔, 以供浇铸融化的萘。萘表面直径为 D_o (半径为 R_o), 间距 s 以及间隙 c 连续可调。进气口直径 $d_o = 30\text{mm}$ 。为保证升华量测量的准确性, 制做了一个专门的定位框架, 框架上在 7 个不同半径位置上固定了 7 块 $1/1000\text{mm}$ 分辨率的千分表。每次实验工况前后, 测量这 7 个特定点上萘表面与基准面的距离, 从而得到这 7 个半径位置上的 δ 值。为了消除测量时和启动—停车过程中萘升华的影响, 专门进行了圆盘静止的自然对流传质实验和 40 次启动—停车实验, 得到上述因素的修正值。 δ 的绝对值控制在 $25\mu\text{m}$ 左右, 测量误差为 $\pm 1\mu\text{m}$ 。

4 实验结果及其分析

4.1 自由盘

当去掉罩 7 和静止隔板 8 时, 使转盘在自由空间旋转。改变转速, 测量局部传质系数以获取局部施伍德数 sh 与旋转雷诺数 Re_o 的关系。其实验结果如图 3。

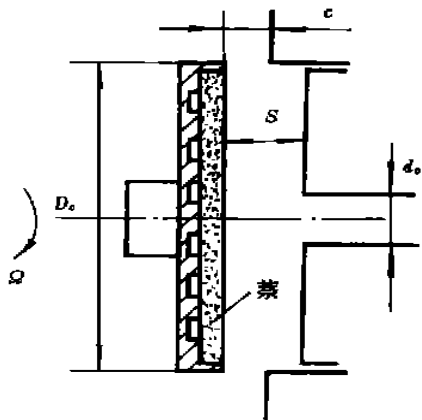


图 1 模型示意图

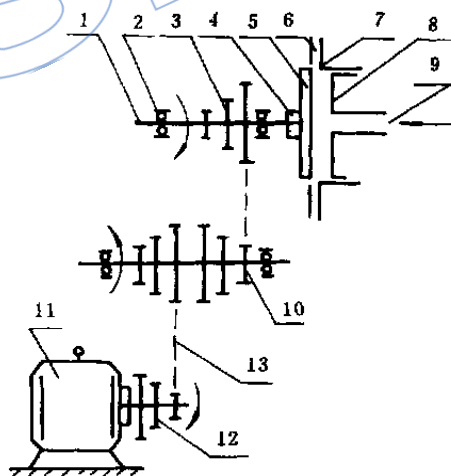


图 2 实验设备示意图

对于自由盘, 目前认为 $(r/R_o)^2 \cdot Re_o \approx 3 \times 10^5$ 为层流转捩到紊流的判据。在本实验转速范围内最大雷诺数为 3.14×10^5 , 可见全部自由盘数据基本上处于层流范围内。Dorfman^[9]对自由盘层流对流换热的分析解为 $Nu(R_o/r) = 0.308 Pr^{1/2}(n+2)^{1/2} Re_o^{1/2}$, 对于等温边界条件, 式中 $n=0$, 于是 $Nu(R_o/r) = 0.436 \cdot Re_o^{1/2} Pr^{1/2}$ 。该式已被实验结果所证实^[4]。根据类比原则, 对于与其类似的传质问题, 上式可改写为

$$sh(R_o/r) = 0.436 Re_o^{1/2} Sc^{1/2}$$

因 $Sc = 2.5$

$$\therefore sh(R_o/r) = 0.689 Re_o^{1/2} \tag{4}$$

图 3 中实线为(4)式分析解, 图中表明传质实验结果与根据类比原则得到的解析式(4) 符合得很好。可以得出结论, 在旋转盘系统中萘升华传热—传质模拟实验技术是可行的。

4.2 带罩盘

对于带罩盘, 改变的参变量有 4 个, 它们是旋转雷诺数 Re_o 、流量系数 C_m 、间距比 G_s 和间隙比 G_c 。图 4 为施伍德数与旋转雷诺数的关系。实验表明, 根据间距比和间隙比的大小, 有两种不同形式的施伍德数分布。图 4(a) 为大间距比、大间隙比的局部施伍德数 sh 分布情况, 实验结果表明, 这时局部施伍德数随 (r/R_o) 的加大而单调下降, sh 数的峰值在 $(r/R_o) = 0$ 处, 并且 sh 数随 Re_o 数加大而单调加大。对于小间距比、间隙比情况(图 4b), 在整个盘表面上局部施伍德数呈双峰状态, 即最大施伍德数由盘心向边缘移动。从盘心指向边缘, sh 逐渐加大, 达到峰值后,

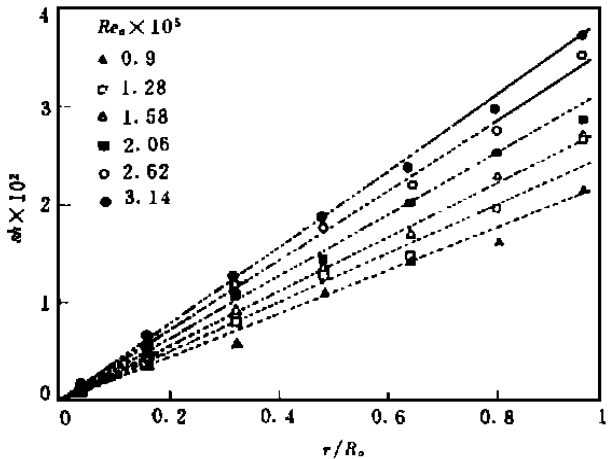


图 3 自由盘实验结果

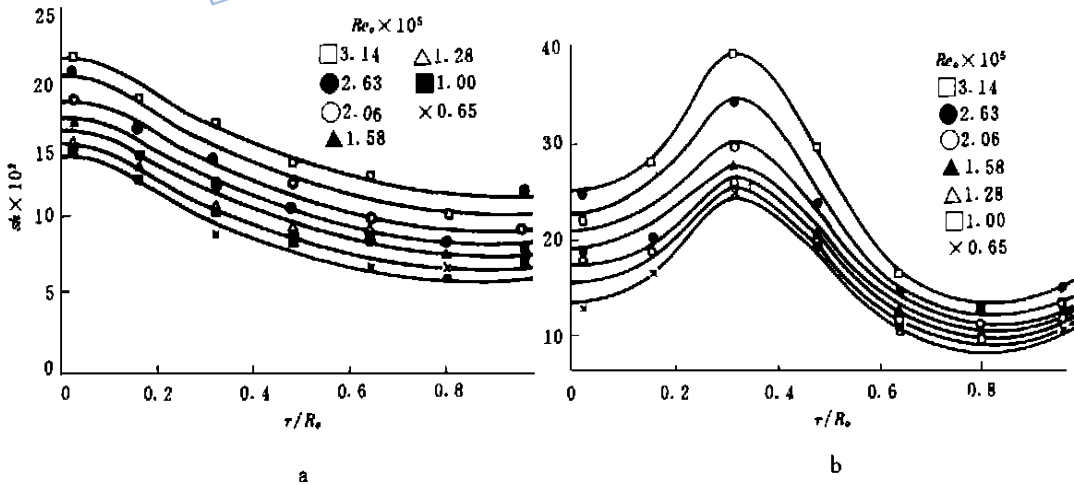


图 4 施伍德数与旋转雷诺数的关系

sh 随 (r/R_o) 的增加而迅速下降。实验中, 在雷诺数 Re_o 变化了 5 倍的情况下, 施伍德数 sh 峰值位置无明显变化, 并且在边缘处 sh 有挠起的趋势。从位置上看, 盘心区 sh 受 Re_o 影响明显, 而盘缘区 Re_o 对 sh 的影响较弱。

图 5、6 为施伍德数 sh 与流量系数 C_m 的关系。图 5 为大间距比、间隙比的情况, 当 $C_m < 0.86 \times 10^4$ 时, sh 呈单峰分布, 沿半径单调下降, 且下降较平缓。而当 C_m 大到一定值时, 则 sh

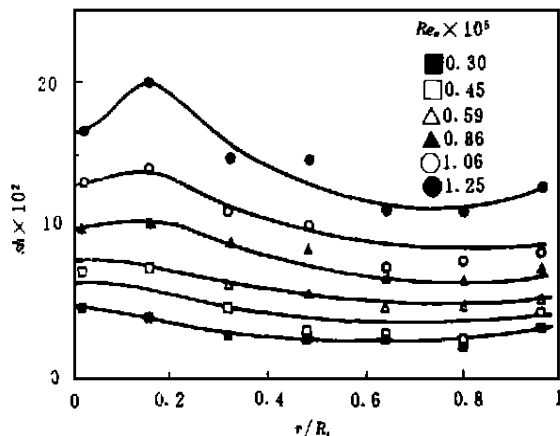


图 5 sh 与 C_m 的关系(大间距比、间隙比)

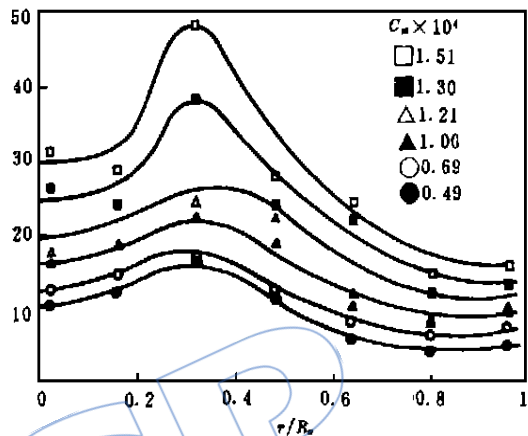


图 6 sh 与 C_m 的关系(小间距比、间隙比)

沿径向分布出现双峰状态。由图 5、6 可看到, sh 随 C_m 的加大而加大。图 6 为小间距比、间隙比情况。这时 sh 沿径向呈双峰分布, 并且峰后 sh 迅速下降。实验中 C_m 变化了 3 倍, 其峰值位置基本不变。图中还可看到, 在盘缘处, sh 受 C_m 影响较弱, 而盘心区, sh 受 C_m 影响显著。即增大 C_m , 对盘缘区的 sh 不会带来很大变化。

图 7 为施伍德数 sh 与间距比的关系。由于图 7 是在小间距比、间隙比情况下获得的数据, 所以 sh 分布曲线呈双峰形式。对 $S/R_o = 0.012$, 这时 $G_c = G_s$ 。即这时的结构是典型的转—静盘系统(如图 8(a)), 这时双峰的位置向盘心靠拢。

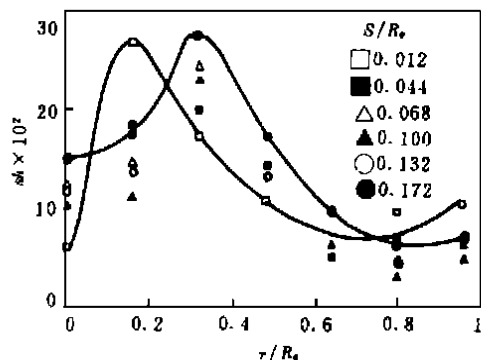


图 7 sh 与间距比的关系

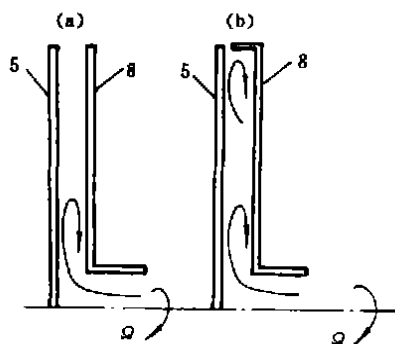


图 8 转—静盘系统

图 9 是施伍德数与间隙比的关系。同样是在小间距比、间隙比情况的数据, 故 sh 呈双峰分

布,并且在 G_c 变化 6 倍情况下, sh 峰值位置基本不变; sh 随 G_c 的减小而加大,并且,当 G_c 小到一定值时,在整个传质表面上 sh 呈 3 峰分布,这里 3 峰消失的 $G_c=0.021$ 。 sh 的双峰分布和盘缘的挠起现象,与这一冷却流动结构形式有关。在这种情况下,冷气入口和出口附近形成两个涡(见图 8),当 G_s 与 G_c 下降时,这两个涡加强并且对其附近的传质表面扰动加强,因此使最大 sh 数位置偏离中心,并且这个位置与进、出口处涡的位置相对应。

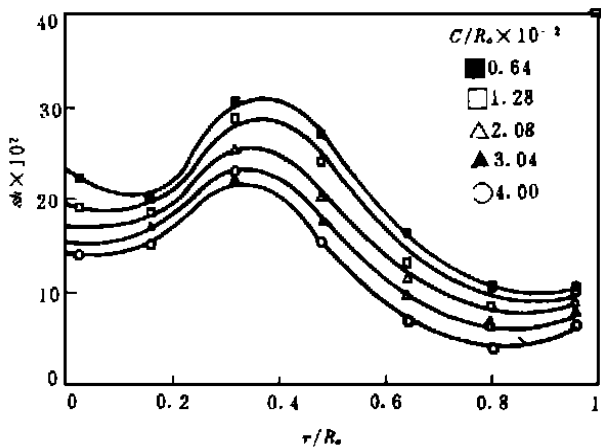


图 9 sh 与间隙比的关系

结束语 (1) 采用萘升华传热—传质实验技术研究空气冷却旋转盘换热问题是可行的技术手段。(2) sh 与 Re_o 、 C_m 、 G_s 和 G_c 的变化规律对带罩旋转盘换热研究有一定参考价值。

参 考 文 献

- 1 洪新,刘慰俭.气固两相固定床强制对流换热的萘升华热—质比拟实验研究.中国工程热物理学会年会,1986, No. 863 179
- 2 辛荣昌,陶文铨.波纹通道内换热与阻力特性的实验研究.中国工程热物理学会年会,1987, No. 873053
- 3 张玉文,陈钟欣.纵掠恒热流加热萘平板时的流动及其传热传质研究.中国工程热物理学会年会,1987, No. 873057
- 4 Owen J M. Fluid Flow and Heat Transfer in Rotating Disc System. Heat and Mass Transfer in Rotating Machinery: 85- 103
- 5 Bayloy F J, Owen J M. The Fluid Dynamics of a Shrouded Disc System with a Radial out Flow of Coolant. J. Eng. Power. Trans. ASME Series A, 1970, 92: 335
- 6 Haynes C M, Owen J M. Heat Transfer from a Shrouded Disc System with a Radial outflow of Coolant. J. Eng. Power. Trans. ASME Series A, 1975, 97: 28
- 7 曹玉璋,苗娅兰.涡轮盘传热—传质模拟实验研究的探讨.中国航空学会第七届燃烧与传热学术讨论会, CSAA PC- 90- 080
- 8 Sogin H H, Jakob M. Sublimation from Disk to Air Streams Flowing Normal to Their Surface. Trans. ASME 1950, 80: 61- 71
- 9 Dorfman L A. Hydrodynamic Resistance and Heat Loss of Rotating Solids. Oliver and Boyel Edinburgh, 1963

(责任编辑 杨再荣)

航空动力学报》受到《工程索引》(EI) 空前重视

1992 年 3 月至 6 月,《工程索引》(EI) 连续报道了 9 期《航空动力学报》共 189 篇。这是继《推进技术》及《航空学报》英文版(Chinese Journal of Aeronautics)之后,进入 EI 的第 3 种我国航空航天刊物。EI 在 4 个月内报道《航空动力学报》189 篇之多,这是空前的。尤其显示出 EI 的重视是这其中有 58 篇的内容介绍在 18 行以上(北航 24 篇,西工大 11 篇,其它单位 23 篇),且有 23 篇的内容介绍在 24 行以上(西工大 10 篇,北航 7 篇,其它单位 6 篇)。

摘自《西北工业大学学报》1992 年第 10 卷 4 期胡沛泉教授的通讯报告

HEAT-MASS TRANSFER ANALOG OF AIR-COOLING ROTATING DISC WITH NAPHTHALENE SUBLIMATION

Cao Yuzhang, Lin Yuzhen, Feng huazhong, Xu Guoqiang, Qiu Xuguang
(*Beijing University of Aeronautics and Astronautics*)

ABSTRACT

The heat transfer characteristics of rotating disc have been investigated experimentally by means of a mass transfer analog of naphthalene sublimation. Two models are used: free rotating disc and shrouded rotor-stator system. Mass transfer test results of free disc are in good agreement with experimental results of heat transfer and theoretical prediction. The test results of local Sherwood number are obtained, which are dependent on rotational Reynolds number, flow coefficient, gap ratio and shroud-clearance ratio.

TECHNICAL NOTES

EFFECT OF STEAM INJECTION INTO GAS GENERATOR ON COMBUSTION EFFICIENCY AND PRESSURE LOSS

Liu Gao'en, Wang Huafang
(*Beijing University of Aeronautics and Astronautics*)

ABSTRACT

The influence of steam injection into combustor on combustion efficiency and pressure loss in the combustor is investigated. The testing was conducted with a WZ-5 gas generator burning low BUT gaseous fuel ($H_{uv} = 8172 \text{ kJ/N} \cdot \text{m}^3$). The steam injection was arranged in either the diffuser or the dilution zone of the combustor. The test results show that the steam injection has only a little effect on combustion efficiency and a considerable effect on pressure loss. In the case of the ratio of steam flow rate to air flow rate being 10%, the steam injection into dilution zone would cause an 12% increase in pressure loss, and even larger than that the steam injection into diffuser would cause.

FRONTALLY TAPERED SQUARED TRENCH CASING TREATMENT FOR IMPROVEMENT OF COMPRESSOR PERFORMANCE

Du Zhaohui (*Shanghai Jiaotong University*)
Liu Zhiwei (*Northwestern Polytechnical University*)

ABSTRACT

A new type of frontally tapered squared trench casing treatment was designed and tested over the rotor tip in a single axial-flow compressor. Variations in the rotor tip penetration into the trench and the distance of the trench front from the blade leading edge were investigated. Through the measurements of velocity and pressure, the effects of each geometric parameter upon compressor efficiency and stall margin were evaluated. An optimal configuration has been found which gives not only 0.4% improvement in efficiency but 2% in stall margin in comparison with the smooth wall baseline. The mechanism of enhancement in the efficiency and the reason for existence of optimum configuration for frontally tapered squared trench casing treatment are considered in this paper.