

HAT 循环饱和器传热传质过程及相似分析

吴伟亮, 陈汉平

(上海交通大学 机械与动力学院, 上海 200030)

摘 要:以 HAT 循环中饱和器为研究对象, 讨论了实验研究的相似条件。在简化条件下建立了饱和器内部多相流的控制方程, 并给出了相应的边界条件; 对这些方程进行了无量纲化处理, 根据微分方程的不变性原理, 得到了饱和器实验研究中应遵循的相似准则, 并对这些准则在实验中作用进行说明, 指出了饱和器实验设计中应注意的主要问题。

关 键 词: HAT 循环; 饱和器; 传热传质; 相似分析

中图分类号: TK124 文献标识码: A

1 引 言

HAT 是一种新型的回热热力循环系统, 它利用水回收压气机中冷器、后冷器、涡轮排气中低品位热能, 循环水在饱和器内同空气接触并进行传热传质。这样即回收了低品位热能, 又通过湿化空气降低了燃烧中心温度并增加工质流量, 达到减少氮氧化物排放、提高比功的目的^[1~2]。这种循环方式具有高效率、低污染、高比功和良好的变工况性能, 引起了世界范围内的重视, 欧美等发达国家已经有示范性装置在工作^[3]。

同普通的燃气轮机回热循环不同, 饱和器是 HAT 循环中独有的传热传质部件。鉴于饱和器在 HAT 循环中所起的重要作用, 国内外在理论和实验上开展了研究^[3~9]。由于饱和器工作于高热、高压、高湿环境下, 内部是非常复杂的气液两相流动, 目前尚没有公认的设计计算方法, 相关实验资料也很少, 研究工作尚处在探索阶段。

由于饱和器内部物理过程非常复杂, 实验研究工作对于揭示其内部规律是必须的。按照相似理论, 在模型上进行实验时应满足一定条件, 即所谓的相似准则。可以通过不同方式建立饱和器的相似准则, 鉴于饱和器内部复杂的物理过程, 影响因素众多, 量纲分析等方法都有较大的局限性^[10]。在一定简化条件下推导饱和器内的控制方程, 从方程中进一步得出实验研究中的相似准则, 而且这些推导的方程还可以作为以后理论研究和饱和器 CFD 计算

时的参考。

2 饱和器控制方程

饱和器内部是高温高压条件下的气液两相流, 两相间相对速度的时间梯度又很大, 其内部的传热传质过程非常复杂, 在理论上准确描述存在一定的困难。作为初步研究, 在推导控制方程时作如下简化:

(1) 气相流动按一维处理; 喷淋的水滴运动是二维的, 这样可以研究水滴在饱和器中运动轨迹并考虑到壁面对过程的影响; 气体是准无粘的, 即不考虑气相间和气相与壁面的相互作用, 但水滴与气流之间的作用不可忽略。

(2) 不考虑水滴间的相互作用和碰撞合并, 所有水滴的粒径相等, 速度仅为空间坐标的函数。

(3) 循环热水通常是以喷淋方式进入饱和器, 液态水主要部分以水滴形式通过饱和器, 且水滴的传热传质条件优于水膜, 作为初步研究, 仅考虑水滴的传热传质。

(4) 气体的热物性参数为常数, 同压力、温度无关; 湿空气视为理想气体的混合物。

在推导饱和器气相控制方程时按下述方法选取控制体: 控制体内不包含水滴, 即控制体由外边界和其于水滴接触的内边界组成, 这时对于气相来讲是有源的(能量和质量)。

2.1 连续方程

根据文献 [11], 对于直径比分子平均自由程大得多的水滴来说, 蒸发的速率受蒸汽从液滴表面扩散的速率控制。蒸发过程可用下列方程描述:

$$\frac{dD_p}{dt} = \frac{4D_v M}{R \rho_p D_p} \left(\frac{p_\infty}{T} - \frac{p_p}{T_p} \right) \quad (1)$$

其中: R 、 ρ_p 、 D_v 、 M 、 p_p 、 p_∞ 、 T_p 、 T 分别为水蒸气气体常数、水滴密度、水蒸气分子的扩散系数、水分子量、水滴表面蒸汽压、远离水滴处水蒸气压力、水滴和空气温度。上式可以进一步变为水滴质量随时间变化

的微分方程:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{16\pi D_v MD_p}{R} \left(\frac{p_\infty}{T} - \frac{p_d}{T_d} \right) \quad (2)$$

对于一维流动, 任取一控制体, 并将水滴的蒸发式(2) 带入, 有:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V)}{\partial x} = N \frac{dm}{dt} = \frac{16\pi ND_v MD_p}{R} \left(\frac{p_\infty}{T} - \frac{p_p}{T_p} \right) \quad (3)$$

$$\text{或} \quad \frac{D\rho}{Dt} + \rho \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{16\pi ND_v MD_p}{R} \left(\frac{p_\infty}{T} - \frac{p_p}{T_p} \right) \quad (4)$$

m 为单个水滴的质量; N 为水滴的体积数量浓度。特别注意上式中的压力 p_∞ 是远离水滴处水蒸气的压力, 即为饱和器内气相主流中水蒸气的分压力。设湿空气的含湿度为 X , 相对湿度为 φ , 则 p_∞ 可以用下式表示:

$$p_\infty = \frac{Xp}{X+0.622} = \varphi p_s \quad (5)$$

式中: p 为控制体内湿空气的压力; p_s 为控制体温度条件下水蒸气的饱和压力。

2.2 动量方程

在推导动量方程时, 认为水蒸气从水滴表面逸出的瞬间速度为水滴运动速度 V_p , 进入控制体后即刻达到气流的主流速度。由前面简化条件(2) 知, 控制体内水滴与空气总作用力等于单个水滴作用力 F_p 的水滴数量的倍数。

据此, 动量方程可以描述为:

$$\frac{D(\rho V)}{Dt} + \rho V \frac{\partial V}{\partial x} - NV_p \frac{dm}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + NF_p \quad (6)$$

$$\text{或} \quad \frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V^2)}{\partial x} - \frac{16NV_p D_v M}{R\rho_p D_p} \left(\frac{p_\infty}{T} - \frac{p_p}{T_p} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + NF_p \quad (7)$$

其中: $F_p = \frac{C_D}{2} \rho (V - V_p)^2$, C_D 为阻力系数。

2.3 能量方程

饱和器内温度尚不够高, 在推导能量方程时忽略辐射传热的影响。控制体的热传导由控制体间和气流间热交换两个部分组成, 前者在处理方法上与单相流没有区别, 后者在数值等于蒸发掉水量的汽化潜热, 另外控制体要克服水滴摩擦力做功。在建立能量方程时认为水滴蒸发部分在进入控制体瞬间便达到控制体的状态, 即不考虑蒸汽与空气混合过程。据此, 用内能表述的能量方程式为:

$$\rho \frac{De}{Dt} = -k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + 4\pi\alpha ND_p^2 (T_p - T) + rN \frac{dm}{dt} -$$

$$eN \frac{dm}{dt} - \frac{\partial(\rho V)}{\partial x} + NF_p (V_p - V) + \frac{N}{2} \frac{dm}{dt} (V^2 \pm V_p^2) \quad (8)$$

能量方程也可以用焓的形式给出:

$$\rho \frac{Dh}{Dt} = \frac{Dp}{Dt} - k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - V \frac{\partial p}{\partial x} + (r - h + \frac{V^2 \pm V_p^2}{2}) N \frac{dm}{dt} + 4\pi\alpha ND_p^2 (T_p - T) + NF_p (V_p - V) \quad (9)$$

式中的内能 e 、焓 h 是湿空气的热物性参数, 它们不但同温度等状态参数有关, 还与湿度有关。如果饱和器中的湿空气可以按理想气体处理, 那么内能和焓都将只是温度的函数。这时能量方程可以用温度形式描述:

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \frac{Dp}{Dt} - k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - V \frac{\partial p}{\partial x} + (r - c_p T + \frac{V^2 \pm V_p^2}{2}) N \frac{dm}{dt} + 4\pi\alpha ND_p^2 (T_p - T) + NF_p (V_p - V) \quad (10)$$

同样, c_p 是湿空气混合物的定压比热, 可按理想混合气体来计算。

3 饱和器实验的相似条件分析

3.1 方程的无量纲化

对于任何形式空心饱和器的内部传热传质过程均可用上述方程进行描述, 如果根据饱和器特点选定一些物理量为特征量, 利用它们对上述方程组进行无量纲化处理, 这不但使结论可以得到更广泛的应用, 而且可为相似分析和相似准则导出提供基础理论准备。

本文仅研究饱和器在准定常情况下的工作情况, 上述方程中所有时间导数等于零。无量纲化的质量方程、动量方程和能量方程分别可以表示为:

无量纲化质量方程:

$$\frac{\partial(\rho^* V^*)}{\partial x^*} = \frac{m_0 L_0}{\rho_0 V_0 t_0} N^* \frac{dm^*}{dt^*} = \frac{N_0 D_{v0} M_0 D_{p0} L_0 p_{\infty 0}}{\rho_0 V_0 R_0 T_0} - \frac{16\pi N^* D_v^* M^* D_p^*}{R^*} \left(\frac{p_{\infty}^*}{T^*} - \frac{p_{p0} T_0}{p_{\infty 0} T_{p0}} \frac{p_p^*}{T_p^*} \right) \quad (11)$$

如果工作物质为水, 式中的传质分子量 M 和气体常数 R 均为常量, 上式等号右边可以简化为:

$$\frac{\partial(\rho^* V^*)}{\partial x^*} = \frac{m_0 L_0}{\rho_0 V_0 t_0} N^* \frac{dm^*}{dt^*} = \frac{MN_0 D_{v0} D_{p0} L_0 p_{\infty 0}}{\rho_0 V_0 T_0}$$

$$\frac{16\pi D_v^* N^* D_p^*}{R} \left(\frac{p_\infty^*}{T^*} - \frac{p_{p0} T_0}{p_{\infty 0} T_{p0}} \frac{p_p^*}{T_p^*} \right) \quad (12)$$

无量纲动量方程:

$$\frac{\partial(\rho^* V^{*2})}{\partial x^*} - \frac{N_0 D_{v0} M_0 D_{p0} L_0 V_{p0} p_{\infty 0}}{\rho_0 V_0^2 R_0 T_0}$$

$$\frac{16\pi N^* D_v^* M^* D_p^* V_p^*}{R^*} \left(\frac{p_\infty^*}{T^*} - \frac{p_{p0} T_0}{p_{\infty 0} T_{p0}} \frac{p_p^*}{T_p^*} \right) = - \frac{p_0}{\rho_0 V_0^2}$$

$$\frac{\partial p^*}{\partial x^*} + \frac{N_0 C_{D0} L_0}{2} N^* C_D^* \rho^* (V^* - \frac{V_{p0}}{V_0} V_p^*)^2 \quad (13)$$

用温度表示的无量纲能量方程:

$$\rho^* c_p^* V^* \frac{\partial T^*}{\partial x^*} = - \frac{k_0}{\rho_0 c_{p0} L_0 V_0} k^* \frac{\partial T^*}{\partial x^*} - [r^* -$$

$$\frac{c_{p0} T_0}{r_0} c_p^* T^* + \frac{V_0^2}{2r_0} (V^{*2} \pm \frac{V_{p0}^2}{V_0^2} V_p^{*2})]$$

$$\frac{r_0 M_0 L_0 D_{v0} D_{p0} p_{\infty 0} N_0}{\rho_0 c_{p0} V_0 R_0 T_0^2} \frac{2\pi M^* N^* D_{v0} D_p^*}{R^*} \left(\frac{p_\infty^*}{T^*} -$$

$$\frac{p_{p0} T_0}{p_{\infty 0} T_{p0}} \frac{p_d^*}{T_d^*} \right) + \frac{\alpha_0 N_0 D_{v0}^2 L_0}{\rho_0 c_{p0} V_0} 16\pi \alpha^* N^* D_p^{*2} \left(\frac{T_{p0}}{T_0} T_p^* -$$

$$T^* \right) + \frac{N_0 C_{D0} V_0^2 L_0}{2c_{p0} T_0} N^* \rho^* C_D^* \left(\frac{V_{p0}}{V_0} V_p^* - V^* \right)^3 \quad (14)$$

无量纲方程中, 下标“0”表示某物理量为特征量。

3.2 相似准则数

饱和器内的传热传质过程非常复杂, 实验是不可或缺的重要辅助研究手段, 由于原型实验费用高、周期长, 模型实验是一种多快好省的研究方法。按照相似理论, 模型实验中各物理参数选取必须保证满足微分方程的不变性原理。从单相流的流动方程中可以推出流场的相似条件, 这些相似准则数对于相似的多相流流场也是适用的。对于饱和器内部流动, 由于液态水的存在, 相间存在相互作用力、能量和质量交换等因素, 还会增加其它一些准则数。表 1 给出了根据上述无量纲方程得到的准则数及它们的物理含义。

实验中如果用水作为工作介质, 分子量 M 和气体常数 R 都是常量, 这两个量可以从准则数中剔除, 因此, 与传质有关的准则数可以进一步简化。而且, 水分子扩散系数 D_v 不是独立的, 它是压力和温度的函数。根据文献[12] 水分子在空气中的扩散系数可以由下面的公式计算:

$$D_v = 9.872 \times 10^{-5} \frac{T^{1.81}}{p} \quad (15)$$

这种情况下, 考虑到式(5), 相似准则 2、4、8 可以进一步得到简化, 如表 1 中准则 2 简化后的形式为:

$$\frac{X' L' D' M' N' D_p' T'^{0.81}}{(X' + 0.622) \rho' V' R'} = \frac{X'' L'' D'' M'' N'' D_p'' T''^{0.81}}{(X'' + 0.622) \rho'' V'' R''} \quad (16)$$

表 1 饱和器相似准则数及物理含义

序号	相似准则数	物理含义
1	$\frac{\phi' p_s' T'}{p_p' T'} = \frac{\phi'' p_s'' T''}{p_p'' T''}$	传质过程的“动力”相似。
2	$\frac{\phi' L' D' M' N' D_p' p_s'}{\rho' V' R' T'} = \frac{\phi'' L'' D'' M'' N'' D_p'' p_s''}{\rho'' V'' R'' T''}$	工质量与传质量的相似, 表示了干空气与蒸发水量间的相似关系。
3	$\frac{p'}{\rho' V'^2} = \frac{p''}{\rho'' V''^2}$	欧拉相似准则, 表示压力与惯性力间的相似关系。
4	$\frac{\phi' L' D' M' N' D_p' p_s' V_p'}{\rho' V'^2 R' T'} = \frac{\phi'' L'' D'' M'' N'' D_p'' p_s'' V_p''}{\rho'' V''^2 R'' T''}$	气相动量与液相蒸发产物动量之间的相似。
5	$\frac{V_p'}{V'} = \frac{V_p''}{V''}$	气相速度与水滴速度(包含方向因素)的相似关系。
6	$N' C_D L' = N'' C_D L''$	两个相似系统中水滴总阻力与气体惯性的相似关系。
7	$\frac{k'}{\rho' c_p' V' L'} = \frac{k''}{\rho'' c_p'' V'' L''}$	气相间热传导同其内能间的相似。
8	$\frac{\phi' r' M' L' D' D_p' p_s' N'}{\rho' c_p' V' R' T'^2} = \frac{\phi'' r'' M'' L'' D'' D_p'' p_s'' N''}{\rho'' c_p'' V'' R'' T''^2}$	液相汽化部分潜热同湿空气内能间的相似准则。
9	$\frac{c_p' T'}{r'} = \frac{c_p'' T''}{r''}$	液体气化潜热与混合气体焓之间的关系, 它表示系统相似时传质(水)同混合气体物性参数之间应满足的关系。
10	$\frac{V_r'^2}{r'} = \frac{V_r''^2}{r''}$	气体动能同气化潜热相似关系。
11	$\frac{\alpha' N' D'^2 L'}{\rho' c_p' V'} = \frac{\alpha'' N'' D''^2 L''}{\rho'' c_p'' V''}$ 或 $\frac{L' \alpha' S_p'}{\rho' c_p' V'} = \frac{L'' \alpha'' S_p''}{\rho'' c_p'' V''}$	水滴表面热传导同湿空气内能间的相似关系。
12	$T' / T_d' = T'' / T_d''$	水温度和湿空气温度间的相似关系。
13	$\frac{N' C_D V'^2 L'}{c_p' T'} = \frac{N'' C_D V''^2 L''}{c_p'' T''}$	液滴摩擦力做功同湿空气内能间的相似关系。

在其推导过程中并没有考虑流动时气相间和气相与壁面间粘性的影响, 但得到的相似准则数量远远高于单相流, 饱和器内传热传质过程的复杂性由此可见一斑。如果要求原型实验同模型实验所有的相似准则数相同, 在实际工作中很难做到, 只能对影响相似性较大的准则数重点处理, 下面对这些准则数对实验相似性的影响做一些定性说明。

准则数 1 描述了传质过程的“动力”相似。在描述液滴蒸发时采用了式(1)或式(2),由此得到的该准则数。式(1)是研究压力较低、温度不是很高情况下水蒸发得出的半经验半理论公式,在饱和器高温高压环境下的适用性还是需要进一步进行研究的,但它至少给出模型实验近似相似的一个条件。如果研究传质特性,该准则数是一个重点满足的条件。准则数 2 描述了水蒸气质量与空气质量间的相似关系,由于 HAT 循环中饱和器是实现空气湿化和能量交换的重要场所,而传质总量对 HAT 系统性能影响非常大;根据不同学者对 HAT 循环研究结论,饱和器最后要达到的空气——水蒸气重量比约在 0.1,甚至更高,因此水蒸气和空气流量位于同一数量级,它对饱和器整个工作特性都有影响,在研究工作中是应当尽量以该准则数进行实验设计。

相似准则数 2 的重要性还从动量和能量方程中体现出来:如果该相似准则数得到满足,则从动量方程导出的相似准则数 4 和 5、能量方程导出的 8 和 9 是相同的,这使实验的准则数减少两个,这样不但可以减小实验工作量,还可以提高实验总体准确性。

准则数 3 为众所周知的欧拉准则,它表示饱和器的压差力同惯性力间的关系,如果实验处在饱和器的“第二自模化区”,该准则可不考虑。当准则数 2 满足时,准则数 4 和 5 是相同的,这说明只要满足液相蒸发量同干空气量间相似和水滴、空气速度间的相似,它们间的动量相似是自动满足的。饱和器内水滴通常由喷淋产生,出喷嘴的速度相对较高,但由于水滴粒径小,惯性也小,在气流中运动时会在很短的距离内趋同于气流速度^[13]。所以在靠近喷嘴的区域内两相间动量交换很剧烈,而在距喷嘴较远的地方,这种动量交换将迅速变小。因此,在研究饱和器喷嘴附近流动状况时,准则数 5 应尽量满足。准则数 6 反映出了液态水喷淋对饱和器阻力特性的影响,当研究饱和器内部阻力特性时,准则数 6 是要满足的,如果研究重点是饱和器传质传热特性,准则数 6 是不重要的。

相似准则数 7 说明气相间热传导和气相内能间的关系,单相流相似理论中也包含该项,处理方法上也可以采用单相流的方式。如果准则数 2 成立,能量方程中准则数 8 和 9 有相同的含义,都表示液相汽化潜热量同气相焓值间的相似关系。对于 HAT 循环系统,传质是饱和器研究中的一个重点,进行实验设计时该准则数是应予以考虑。根据无量纲能量方程并结合量级分析可知,相对于液态水的汽化潜热,从蒸发过程产生的水蒸气带入到系统的动能是小量,相

似准则数 10 可以忽略,而且 $V^2 \pm V_p^2$ 项可以从方程中略去,这个论断不但可以用于相似实验的设计,还可以拓展到 CFD 研究中。相似准则数 11 表示的是水滴表面热传导同气相内能间的关系,如果实验研究的重点是喷嘴口附近或饱和器过冷段的情况,该准则数是需要考虑的,对于其它区域,由于水滴与气相间的温度差不是很大,可以放宽该准则数的限制,准则数 12 和 11 在特征上是相近的,可以根据具体情况具体对待。饱和器内部大部分区段,喷淋水滴同气流摩擦力做功同气相内能相比是小量,准则数 13 可以不予考虑;但如果研究喷嘴附近流动的特征,该准则数还需有所考虑。

另外,准则数 6、9、10 和 13 是相互关联的,只要实验中能够满足其中任意 3 个,则第四个自动成立。

推导描述饱和器控制方程过程中,没有完全考虑空气的粘性,没有出现一些公认的准则数,如雷诺数。但饱和器内空气的流动速度非常大,其雷诺数很高,对空气的流动来讲应处在“第二自模化区”,根据传统相似理论,此时只要两个系统的流动都处在同一自模化区,可以不要求它们的雷诺数相等;对欧拉准则也可得到同样的结论。当然,这也是有条件的,即:饱和器的几何尺寸相似,喷淋水滴同空气的初始相对运动方向相同。

4 结 论

饱和器中由于水蒸发现象的存在,即使在简化条件下相似准则数较单相流还是要复杂很多。通过方程组的无量纲化处理,得到了饱和器模型实验时需要遵循的相似准则,同单相流相比,它的相似准则数在数量上增加了许多。这些相似准则数有些对于饱和器研究是很重要的,而有些准则满足与否应由饱和器研究目的决定,还有一些准则在满足一定实验条件时可以自动满足,具体结论如下:

(1) 饱和器是 HAT 循环中主要的传质场所,准则数 2 正是表示系统传质相似的,而且该准则数还影响到饱和器中动量和能量的相似,所以它在所有饱和器实验中应尽量满足;而准则数 1 是反映传质动力相似的,如果研究的重点是饱和器中传质特性,则该准则数应以考虑。

(2) 饱和器工作在“第二自模化区”,雷诺数和欧拉准则可以自动满足;在研究喷嘴附近小区域内流动特性时,准则数 5 是应考虑的;如果研究液体水喷淋对饱和器阻力的影响,准则数 6 应予满足。

(下转第 44 页)

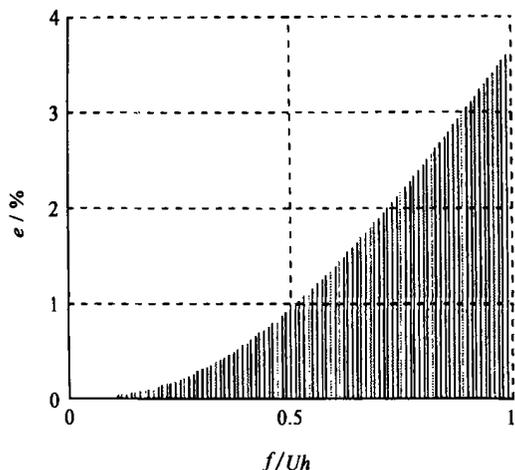


图 2 截侧面积比 $f/(Uh)$ 对相对误差的影响

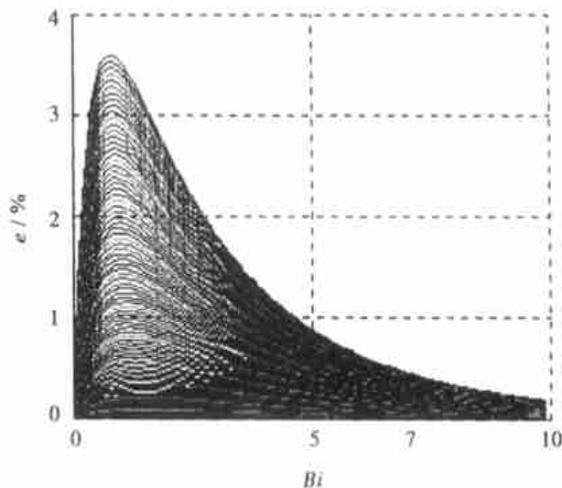


图 3 Bi 对相对误差的影响

4 结 论

利用假想肋高 $h' = h + f/U$ 代替实际肋高, 当等截面直肋的截侧面积比 $f/(Uh) < 0.5$, 或 $Bi > 7$ 两个条件满足一个, 用肋端绝热公式代替肋端对流换热公式计算肋的换热量的误差小于 1%。

参考文献:

[1] 翁中杰, 程惠尔. 传热学[M]. 上海: 上海大学出版社, 1987.

[2] HARPER W B, BROWN D R. Mathematical equations for heat conduction in the fins of air-cooled engines[R]. USA: NACA, 1922.
 [3] 杨世铭. 传热学[M]. 第 3 版. 北京: 高等教育出版社, 1996.
 [4] FRANK KREITH, WILLIAM Z. Black, basic heat transfer[M]. New York: Happer and Row Publishers, 1980.
 [5] 皮茨 D, 西索姆 L. 传热学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
 [6] 余佐平, 陆 煜. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995.
 [7] 王补宣. 工程传热传质学[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

(何静芳 编辑)

(上接第 41 页)

(3) 实验设计中准则数 7 可以按照单相流的方法进行考虑; 准则数 8 和 9 反映了传质潜热同气相内能间的关系, 考虑到饱和器研究的重点, 该准则数也是需要考虑的; 至于准则数 10 可以在实验设计中不予考虑; 准则数 11 ~ 13 可以根据实验的具体目的和研究的重点区域, 进行适当取舍。

参考文献:

[1] 焦树建. HAT 循环的热力学分析[J]. 燃气轮机技术, 1995, 8(2): 1-11.
 [2] 王永青, 严家禄, 闻雪友, 等. 湿空气透平(HAT)循环的研究发展现状[J]. 热能动力工程, 1998, 13(6): 387-391.
 [3] ABGEN N D, CAVANI A, WESTERMARK M O. New humidifier concept in evaporative gas turbine cycles[A]. **Thermodynamic Analysis and Improvement of Energy System**[C]. Beijing: Chinese Society of Engineering Thermophysic, 1997. 134-139.
 [4] 靳海明, 蔡颐年. 饱和器底部温差对 HAT 循环性能的影响[J]. 西安交通大学学报, 1996, 30(5): 80-85.
 [5] 尚德敏, 王永青, 陈安斌, 等. 湿化器的传热传质机理和性能研

究[J]. 热能动力工程, 2000 15(3): 229-231.

[6] 孙晓红, 翁史烈, 王永泓. 湿空气透平循环(HAT 循环)中饱和器性能实验台的设计[J]. 船舶工程, 1998 (2): 21-24.
 [7] 赵丽凤, 张世铮, 王 逊. HAT 循环关键部件——空气湿化器的初步实验性能[J]. 工程热物理学报, 1999, 20(6): 677-680.
 [8] XIAO YUNHAN, CAI RUIXIAN, LIN RUMOU. Modeling HAT cycle and thermodynamic evaluation[J]. **Energy Conversion & Management** 1997, 38(15): 1605-1612.
 [9] HEIROTH PAUL VON, GUSTAFSSON JANOLOF. A Model of an evaporative cycle for heat and power production[J]. **Energy Conversion & Management**. 1999, 40: 1701-1711.
 [10] 王 丰. 相似理论及其在传热学中的应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
 [11] HINDS W C. 气溶胶技术[M]. 孙聿峰, 译. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1989.
 [12] 凯斯 W M, 克拉福特 M E. 对流传热与传质[M]. 陈 熙, 翟殿春, 译. 北京: 科学出版社, 1986.
 [13] 吴伟亮, 陈汉平. HAT 循环系统饱和器喷淋方式的研究[A]. 中国工程热物理工程热力学与能源利用学术会议[C]. 南京: 中国工程热物理学会, 2000.

(何静芳 编辑)

on the steam share to be determined and the iteration of programming cycles, calculations were performed of the shares of steam extracted at the various stages of the above system and of the positive and negative thermal balance. On this basis and after a detailed analysis of the supplementary items of the nuclear power system a basic thermodynamic-calculation method both straightforward and precise was developed for the nuclear power plant by way of adding consecutively each supplementary item to the most simplified nuclear power system. **Key words:** pressurized water reactor, secondary circuit, positive and negative balance, supplementary item

电厂热力系统能效分布矩阵方程式及其应用 = **Energy-efficiency Distribution Matrix Equation for a Power-plant Thermodynamic System and Its Applications** [刊, 汉] / GUO Jiang-long, ZHANG Shu-fang, CHEN Hai-ping (Power Engineering Department, North China Electric Power University, Baoding, Hebei Province, China, Post Code: 071003), SONG Zhi-ping (Power Engineering Department, North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code, 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(1). — 29 ~ 32

The conception of a virtual thermodynamic system is proposed, which makes it possible to replace the actual complicated thermodynamic system by a virtual one through the use of a single main system featuring an invariant system configuration and thermo-economic indexes but changing parameters. On this basis an energy-efficiency distribution matrix equation was derived, which can be directly correlated with the thermodynamic system configuration. Moreover, the matrix elements, which characterize power plant thermo-economic indexes, can effectively overcome the defect of other currently popular thermo-economic matrix analysis method. The latter requires other simultaneous equations for solving the final thermo-economic indexes of the system. The matrix equation under discussion has the merits of versatility, high precision and ease of undergoing programming treatment. Exemplary calculations have attested to the effectiveness of the proposed method. **Key words:** thermo-economics, virtual thermodynamic system, energy-efficiency distribution matrix equation, thermodynamic system

重力对微槽平板热管传热性能的影响 = **The Influence of Gravitation on the Heat Transfer Performance of Micro-grooved Flat-plate Heat Pipes** [刊, 汉] / FAN Chun-li, SUN Feng-rui (Institute of Marine & Power Engineering under the University of Naval Engineering, Wuhan, China, Post Code: 430033), QU Wei, MA Tong-zu (Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(1). — 33 ~ 37

A systematic study was conducted of the impact of gravitation on the heat transfer performance of micro-grooved flat-plate heat pipes along with an analysis of such influencing factors as operating temperatures and cooling modes, etc. Through contrast experiments it has been found that there exists a very marked influence of gravitation on the liquid-film axial distribution, while in the peripheral direction the influence is significant only when high liquid-charging rates are employed. The latter condition enables an inclination angle to exercise a relatively great influence on the heat transfer capacity of heat pipes. A more detailed study has shown that deep-grooved flat-plate heat pipes offer fairly good heat transfer performance, providing them with bright prospects of usage in the area of micro-space heat dissipation for cooling microelectronic devices. **Key words:** miniaturized heat pipe, electronic device, micro-grooved flat-plate heat pipe, micro groove, thin liquid film

HAT 循环饱和器传热传质过程及相似分析 = **The Heat and Mass Transfer of a HAT (Humid Air Turbine) Cycle Humidifier and Its Similarity Analysis** [刊, 汉] / WU Wei-liang, CHEN Han-ping (Institute of Mechanical and Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(1). — 38 ~ 41, 44

With the humidifier of a humid air turbine (HAT) cycle serving as an objective of study similarity conditions are discussed during the conduct of experimental research. Under simplified conditions equations of control of multi-phase flows in the humidifier were established along with corresponding boundary conditions. These equations were subjected to a

non-dimensionalized treatment. On the basis of an invariance principle of differential equations similarity criteria were deduced, which the humidifier shall comply with during the experimental research. Some explanations are given concerning the role being played by these criteria during experiments. Moreover, some major issues requiring due attention during the tests of the humidifier are also presented. **Key words:** humid air turbine cycle, humidifier, heat and mass transfer, similarity analysis

等截面直肋传热简化计算的适用条件 = **Applicable Conditions for the Simplified Calculation of Heat Transfer for Straight Fins of Uniform Cross-section** [刊, 汉] / XU Zhi-ming, ZHOU Li-qun, BU Yu-bing, et al (Northeast Electric Power Institute, Jilin, China, Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2004, 19(1). - 42 ~ 44

With the help of a theoretical analysis method a fin-end adiabatic calculation formula is often used instead of a formula based on a fin-end convection heat exchange to calculate the heat transfer of straight fins of uniform cross-section. The approximate error thus obtained can be expressed as a function of the ratio of cross-sectional area to lateral area $f/(Uh)$ and also as a function of Biot number Bi . Through a calculation of the possible range of selected values it has been found that when one of the following two conditions is met, the error of the above calculation method will be less than 1%. The two conditions are 1. The ratio of $f/(Uh)$ of the straight fins is less than 0.5; 2. Number Bi is greater than 7. **Key words:** assumed fin height, Biot criteria, the ratio of cross-sectional area to lateral area

相变材料相变点温度热物性的测试及误差分析 = **Test Measurements and Error Analysis of Thermo-physical Properties of Phase-change Materials at a Phase-transition Point Temperature** [刊, 汉] / LI Chang-geng, ZHOU Jie-min (Institute of Physical Sciences under the Zhongnan University, Changsha, China, Post Code: 410083) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2004, 19(1). - 45 ~ 47

The moving phase-interface curves during a solid-liquid phase-transition process are closely related with such a variety of two-phase thermo-physical properties as specific heat, density, thermal conductivity and phase-transition latent heat. The authors have come up with a method for determining several thermo-physical parameters, among others, the thermal conductivity of phase-change materials at a solid-liquid phase transition temperature. The above determination was carried out through the measurement of phase-interface moving rates. A test measurement device was designed and a quantitative analysis of measurement errors performed of the test measurement system. It was found that the error of the measurement system based on a combination of numerical calculations and experimental tests would not exceed 3%. The thermal conductivity and thermal diffusion factor of several kinds of materials were measured by using the above-mentioned test measurement system with satisfactory results being obtained. This shows that the measurement method proposed by the authors is trustworthy. **Key words:** phase change materials, thermo-physical properties, measurement, error analysis

圆管状内壁面管口辐射传递的方向分布特性 = **Direction Distribution Characteristics of Radiation Transmission from a Cylindrical Inner-wall Surface Tube-end** [刊, 汉] / LU Yi-ping, LI Bing-xi, YUAN Li-ming, et al (Institute of Energy Science and Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2004, 19(1). - 48 ~ 51

To obtain the direction distribution of radiation transmission through the tube end of a cylindrical inner-wall surface the authors have introduced a Monte Carlo method for solving the radiation transmission factor RD among cylindrical tube inner-wall surface elements. With the inner wall being an isothermal gray body, of a diffuse emission and diffuse reflection the impact was studied of the change of tube inner-wall emission rate, and of the ratio of tube length to radius on the equivalent directional emission rate of a tube-end surface. The study results indicate the following general tendency. With the increase in tube length-to-radius ratio the maximum value point of the equivalent directional emission rate of the tube-end surface will shift in the direction of a small-angled zenith angle. When the ratio of tube length to radius is relatively great, the tube inner-wall emission rate will decrease with an increase in tube length. With a relatively small tube outlet