

碱金属工质在基于毛细泵回路的多孔芯蒸发器内的热质传输特性

吴双应^{1,2}, 郑小峰^{1,2}, 肖 兰^{1,2}

- (1. 重庆大学 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044;
2. 重庆大学 动力工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 以基于毛细泵回路(CPL)原理的多孔芯蒸发器为研究对象,耦合多孔芯、蒸汽槽道和蒸发器壳体等多个部件,通过数值模拟的方法对碱金属工质在蒸发器内部的流动和相变传热特性进行分析,得到蒸发器内部的气相体积分数、温度、压力以及速度等分布。结果表明:碱金属液体极高的导热系数使得多孔芯部分的平均过热度不足 1 K;以碱金属为工质的多孔芯蒸发器,其内部的蒸发属于表面蒸发,气液界面稳定在多孔芯和蒸汽槽道的界面处,且在相同参数条件下,其毛细抽吸力比使用传统工质的蒸发器高 1~2 个数量级,具有更大的传输能力。

关 键 词: 热质传输; 碱金属; 毛细泵回路; 多孔芯蒸发器; 相变

中图分类号: V23; TK124

文献标志码: A

Heat and mass transfer characteristics of alkali metal working medium in porous wick evaporator based on capillary pumped loop

WU Shuangying^{1,2}, ZHENG Xiaofeng^{1,2}, XIAO Lan^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Low-Grade Energy Utilization Technologies and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Taking porous wick evaporator based on the principle of capillary pumped loop (CPL) as object and considering the wick, vapor groove and casing as a whole, the heat transfer and phase change characteristics of alkali metal working fluid in the porous wick evaporator were analyzed by numerical simulation method. The distributions of vapor phase volume fraction, temperature, pressure and velocity of working medium were obtained. The results showed that the average superheat of porous wick was less than 1 K due to high thermal conductivity of alkali metal liquid. The evaporation of alkali metal liquid took place at outside surface of the porous wick and the liquid-vapor interface was maintained at wick-groove interface. Under the same parameter conditions, the evaporator using alkali metal

收稿日期: 2016-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(51306215)

作者简介: 吴双应(1968—),男,教授、博士生导师,博士,主要从事传热传质、太阳能热电转换与利用方面的研究。

引用格式: 吴双应,郑小峰,肖兰. 碱金属工质在基于毛细泵回路的多孔芯蒸发器内的热质传输特性[J]. 航空动力学报,2017,32(12):2934-2940. WU Shuangying, ZHENG Xiaofeng, XIAO Lan. Heat and mass transfer characteristics of alkali metal working medium in porous wick evaporator based on capillary pumped loop[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(12):2934-2940.

had greater transport capacity since its capillary force was 1 to 2 orders of magnitude higher than that of the evaporator using conventional working fluid.

Key words: heat and mass transfer; alkali metal; capillary pumped loop; porous wick evaporator; phase change

碱金属热电转换器(alkali metal thermal to electric converter, AMTEC)是以碱金属为循环工质的热能直接转换装置,具有无运动部件、高效、免维修、低能耗等优点,适于太阳能、化石能、核能等多种形式的热源,目前多用于太空动力系统^[1-2]。文献[3]曾提出利用太阳能碟式装置作为 AMTEC 系统的能量源,并对其性能进行了理论计算。该系统采用基于毛细泵回路(capillary pumped loop, CPL)原理的多孔芯蒸发器为工质的循环提供动力。与目前 AMTEC 中采用的分体式结构蒸发器相比,基于 CPL 原理的多孔芯蒸发器中只有部分区域含多孔介质,因此工质循环中的过程压降将会大大减小,而传输流量和传热效率则会相应地增大。

目前多孔芯蒸发器主要用于 CPL 和环路热管(loop heat pipe, LHP)中。针对这类结构,国内外已有学者做了相关研究。文献[4-9]通过二维模型对平板式多孔芯蒸发器展开研究。其中, Figus 等^[4]分别采用连续介质模型(continuum model)和孔隙网络模型(pore network model)分析多孔芯区域的相变传热特性;王强等^[5]、万忠民等^[6]认为在蒸发器的肋片下方存在一个气相区域,并采用气液两相分层模型研究多孔芯区域的相变传热过程;Boubaker 等^[7]尤其关注不饱和多孔芯内部的热质传输特性,并分析不同热负荷条件对多孔芯蒸汽区域的影响;黄晓明等^[8]提出一个 3 层数学模型,将平板式多孔芯蒸发器的多孔芯部分分为干饱和区、两相区和液相饱和区;钱吉裕等^[9]采用焓模型研究多孔芯区域的相变问题,并通过分区计算的方法追踪气液相变界面。此外, Kaya 等^[10]、王俊^[11]研究了圆柱形多孔芯蒸发器内的流动和传热特性。在三维模型方面, Li 等^[12]通过格子玻尔兹曼方法研究蒸发器内的热质传输特性。Nishikawara 等^[13]分析了多孔介质的热导率、补偿腔过冷度等参数对平板式多孔芯蒸发器性能的影响。Li、Zhang 等^[14-15]耦合多孔芯以及蒸汽槽道等部件,分析稳态工况下平板式多孔芯蒸发器内的传热传质过程。

总之,目前关于多孔芯蒸发器流动和传热性能方面的研究已经取得了很大进展,但大多集中

于多孔芯蒸发器的局部区域,并主要分析某一截面上的流动和传热特性,而忽略了轴向上的影响。同时,目前多孔芯蒸发器的运行工质多采用甲醇、乙醇、氨等,对于高导热系数的碱金属液体在多孔芯蒸发器中的流动及相变传热特性的相关报道尚为少见。鉴于此,本文拟通过耦合多孔芯、蒸汽槽道和蒸发器壳体等多个部件,建立三维数学模型,对高温碱金属工质在基于 CPL 原理的多孔芯蒸发器内的流动与相变传热特性进行研究。

1 数学物理模型

多孔芯蒸发器接收能量输入的同时又为工质的循环提供动力,在整个 AMTEC 系统中占据极其重要的地位。图 1 给出了多孔芯蒸发器的结构示意图,其工作原理以及 AMTEC 系统的热电转换过程在文献[2]中有详尽的介绍。为了更加全面地分析多孔芯蒸发器内部的流动和相变传热特性,有必要建立三维的物理模型。因此,文中耦合多孔芯区域、蒸汽槽道以及蒸发器壳体(包括肋片)等多个部件,并建立物理模型,其中图 2(a)所示为整体模型的 1/8,图 2(b)为蒸汽槽道出口所

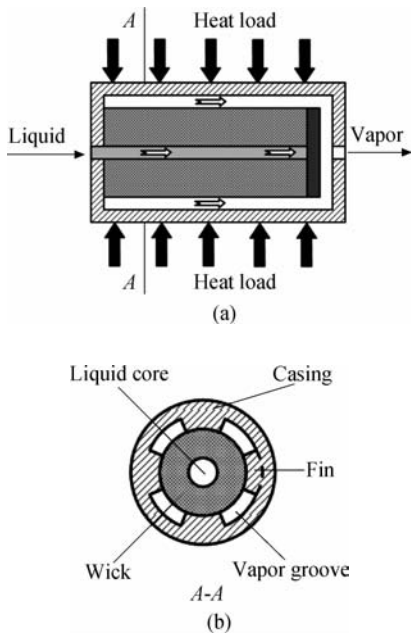
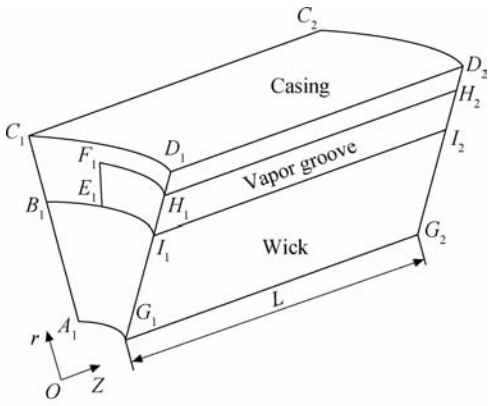
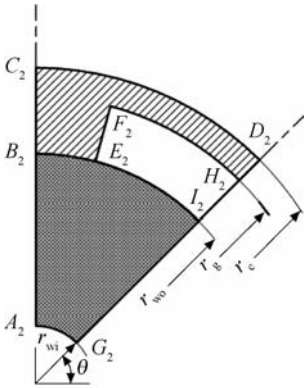


图 1 多孔芯蒸发器的结构示意图
Fig. 1 Sketch diagram of porous wick evaporator



(a) 多孔芯蒸发器的物理模型



(b) 蒸汽槽道出口截面

图 2 多孔芯蒸发器的物理模型和蒸汽槽道出口截面
Fig. 2 Physical model of porous wick evaporator and cross section at outlet of vapor groove

在截面。蒸发器长度为 L 、 r_{wi} 为多孔芯区域的内半径； r_{wo} 、 r_g 、 r_c 分别为多孔芯、蒸汽槽道以及蒸发器壳体的外半径。同时，在建立模型时，采用类似文献[9-10]的假设：稳态工况；流动为层流；忽略重力和辐射的影响；多孔介质的固体骨架各向同性，且与工质处于局部热平衡；工质为牛顿流体，物性参数为常数。

基于多孔芯蒸发器的物理模型和相应假设，其控制方程如下：

1) 气相区(蒸汽槽道)

连续方程

$$\nabla \cdot (\rho_v \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\rho_v (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla p + \mu_v \nabla^2 \mathbf{v} \quad (2)$$

能量方程

$$(\rho c)_v (\mathbf{v} \cdot \nabla) T = \nabla \cdot (\kappa_v \nabla T) \quad (3)$$

2) 多孔芯区

连续方程

$$\nabla \cdot (\rho_l \mathbf{V}) = 0 \quad (4)$$

动量方程

$$\rho_l (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\nabla p + \mu_l \nabla^2 \mathbf{V} - \frac{\mu_l}{K} \mathbf{V} + \mathbf{F} \quad (5)$$

能量方程

$$(\rho c)_f \cdot (\mathbf{V} \cdot \nabla) T = \nabla \cdot (\kappa_{eff} \nabla T) \quad (6)$$

3) 壳体区

能量方程

$$\nabla \cdot (\kappa_c \nabla T) = 0 \quad (7)$$

式中

$$\mathbf{V} = \varepsilon \mathbf{v} \quad (8)$$

$$\kappa_{eff} = \varepsilon \kappa_l + (1 - \varepsilon) \kappa_w \quad (9)$$

边界条件

$$A_1 A_2 G_2 G_1 \quad T = T_i, \quad M = M_i \quad (10)$$

$$E_2 F_2 H_2 I_2 \quad p = p_o, \quad \partial T / \partial n = 0 \quad (11)$$

$$C_1 C_2 D_2 D_1 \quad \kappa \cdot \partial T / \partial n = q \quad (12)$$

$$A_2 A_1 C_1 C_2 \text{ 和 } G_2 G_1 D_1 D_2 \quad \partial p / \partial \theta = 0, \quad \partial T / \partial \theta = 0 \quad (13)$$

其他外壁面均为绝热壁面边界条件。

以上各式中， c 为比热容 ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)， $\mathbf{F}$ 为动量源项 (N/m^3)， M 为质量流量 (kg/s)， p 为压力 (Pa)， q 为热流密度 (W/m^2)， T 为温度 (K)， $\mathbf{V}$ 为渗流速度 (m/s)， $\mathbf{v}$ 为实际速度 (m/s)， ε 为孔隙率， K 为渗透率 (m^2)， ρ 为密度 (kg/m^3)， κ 为导热系数 ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)， κ_{eff} 为有效导热系数 ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)， μ 为动力黏度 ($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$)， θ 为蒸发器的周向角。此外，下标“f”代表流体，“l”代表钠液，“v”代表钠蒸汽，“c”代表蒸发器壳体，“w”代表多孔芯，“i”代表工质进口，“o”代表工质出口。

根据 AMTEC 的运行工况^[2-3]，碱金属工质在蒸发器中的饱和温度为 $900 \sim 1300 \text{ K}$ 。参照文献[2,16]，设定饱和温度 $T_{sat} = 1000 \text{ K}$ 。工质在多孔芯区域发生相变，并在相变界面产生毛细力，从而驱动工质的自循环。文献[7,10-11]讨论了相变界面位于多孔芯外表面和深入多孔芯内部两种情形，而根据文献[17]中给出的工质在多孔芯中发生相变所需过热度的计算公式，碱金属液体在多孔介质中蒸发需要极高的过热度。因此，在进行数值计算时，假定多孔芯外表面的蒸发温度为饱和温度，多孔芯内部的蒸发则考虑相应的过热度。

数值计算时，首先用 Gambit 软件建立几何模型并进行网格划分，然后用 Fluent 15.0 求解

器进行数值求解。因涉及运行工质的相变,参照文献[11,18],选取 Mixture 两相流模型,并利用其中的 evaporation-condensation 模型模拟相变过程。此外,速度和压力采用 PISO(pressure-implicit with splitting of operators) 算法耦合求解,各方程的离散采用 2 阶迎风差分格式。考虑到圆柱形蒸发器结构的对称性,同时为了减小计算量,保证计算精度,在实际模型基础上减小结构的长径比,并把蒸发器简化为 4 槽道,计算区域如图 2 所示。具体的模型尺寸如下:多孔芯内半径 $r_{wi}=1.5\text{ mm}$,外半径 $r_{wo}=4.5\text{ mm}$,蒸发器外径 $r_o=7\text{ mm}$,长度 $L=15\text{ mm}$ 。

目前 AMTEC 中常用的碱金属工质有钠、钾和钠钾合金等^[1-2]。文中运行工质以钠为例,其物性参数在本文研究的温度范围内设定为常数,具体如表 1 所示^[19]。入口边界全部为液体,并且其温度取为饱和温度 $T_{\text{sat}}=1000\text{ K}$,质量流量 $M_i=2\text{ mg/s}$ 。壳体和多孔介质材料分别为不锈钢和金属钛,多孔介质的孔隙率、有效孔径和渗透率分别为 $\epsilon=0.4$, $r_p=5\text{ }\mu\text{m}$, $K=8.89\times10^{-13}\text{ m}^2$ 。

表 1 Na 的物性参数 ($T_{\text{sat}}=1000\text{ K}$)

Table 1 Physical properties of Na ($T_{\text{sat}}=1000\text{ K}$)		
参数	液相	气相
密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	778	0.06
黏度 $\mu/(\text{mg}/(\text{m}\cdot\text{s}))$	180.9	22.11
导热系数 $\kappa/(\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$	56.6	0.0455
比热容 $c/(\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K}))$	1260	2709

为了验证数值结果的网格独立性,监测蒸汽槽道出口的平均温度 T_a 以及图 2 中点 D_2 的温度 T_d ,并在表 2 中对比几种不同网格下各监测点在系统达到稳态时的温度值。由表 2 可知,在网格数为 36 000 时,所建模型可以得到较准确的收敛解,进一步加密网格,对数值计算的结果基本没有影响。因此,文中数值求解时,网格数全部取为 36 000。

表 2 网格的独立性验证

Table 2 Grid independency verification		
网格数	T_a/K	T_d/K
32 400	1 000.4	1 006.897
36 000	1 000.4	1 006.899
39 600	1 000.4	1 006.900

Santos 等^[20]对于以水为运行工质的多孔芯蒸发器进行了相关的实验研究。为了验证模型的可靠性,选取与文献[20]中相同的结构尺寸和运行参数,建立与本文类似的物理模型,求得不同热负荷(Q)下工质在蒸发器蒸汽槽道出口的平均温度(T_a),并与实验值进行对比,如图 3 所示。由图可知,出口平均温度与热负荷之间的变化趋势基本相同,且与实验值的相对误差都在 $\pm 8\%$ 以内,可以认为本文模型设置是合理的。

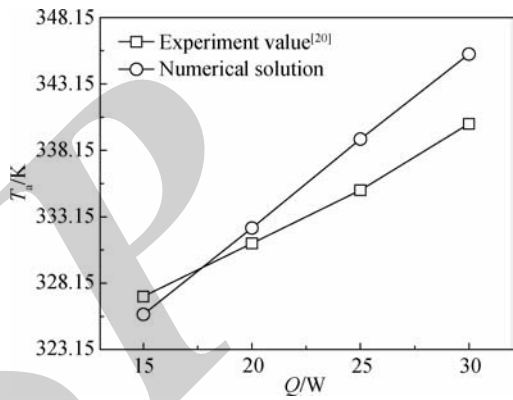


图 3 本文模型与文献[20]实验结果的比较

Fig. 3 Comparison of present model with experimental results in Ref. [20]

2 结果分析与讨论

图 4 和图 5 分别为蒸发器的多孔芯和蒸汽槽道部分的气相体积分数(φ)分布与温度分布。由图 4 可知,多孔芯区域全部为液态钠,气液相变界面稳定在多孔芯和蒸汽槽道的界面处。说明工质的蒸发发生在多孔芯外表面,而在多孔芯内部没有工质相变发生。这是因为碱金属液体在多孔介质中蒸发需要一定的过热度,而碱金属高导热系数使热量可及时导出到蒸发界面。文献[7,10]分

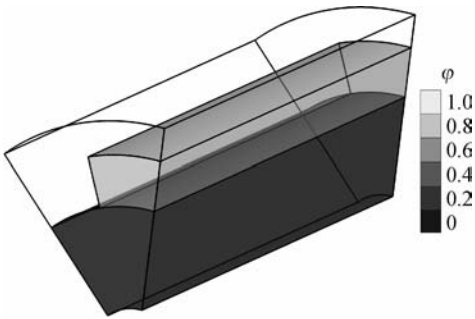


图 4 多孔芯蒸发器内的气相体积分数分布

Fig. 4 Volume fraction distribution of vapor phase in porous wick evaporator

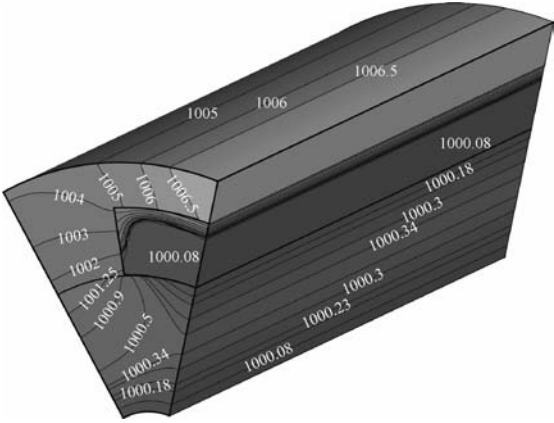


图 5 多孔芯蒸发器内的温度分布(单位:K)
Fig. 5 Temperature distribution in porous wick evaporator (unit:K)

别以甲醇、氨为运行工质,其结果表明部分相变界面位于多孔芯内部,同时在靠近肋片下方区域也有蒸汽产生。而相变界面深入到多孔芯内部而可能导致蒸发器失效^[21]。因此,相比传统工质,碱金属工质在多孔芯中的蒸发属于表面蒸发,降低了蒸发器失效的风险,在一定程度上提升了系统的稳定性和安全性。

由图 5 所示的计算区域的温度分布可知,热流施加在蒸发器壳体外表面,蒸发器壳体区域的温度明显高于其他部分,而壳体区域的温度并不均匀,且温度最高的地方出现在蒸汽槽道正上方。说明该部分壳体与蒸汽槽道内工质的表面传热系数较小,更多的热量通过壳体以导热形式传入多孔芯。在多孔芯区域,温度沿径向基本呈逐渐升高的趋势,且靠近蒸发器壳体的左上角部分温度最高,这与文献[10-12]中的结果一致。但多孔芯部分的过热度很小,平均过热度不足 1 K,说明热量被及时传递到相变界面,用于钠液体的蒸发。相比氨、甲醇等工质,碱金属钠液体具有极高的导热系数,使得热量能更迅速地传递,有利于蒸发过程的进行。此外,径向导热还会进一步加热液体通道内的液体,如果其温度达到饱和温度而蒸发,容易引起“汽塞”^[17]。文献[21]研究指出,在液体通道内加入插管可以很好地解决这个问题,但其简化了物理模型,没有研究蒸发器中的相变过程,而本文暂没有考虑插管对多孔芯蒸发器内热质传输特性的影响,有必要在后续工作中继续深入研究,并将另文报道。

图 6 给出了多孔芯蒸发器内部压力的分布。由图可知,工质沿流动方向,压力逐渐降低,并且对比蒸汽槽道内的压力变化,多孔芯区域的压降

更为明显,这是多孔介质的阻力作用所致。而多孔芯轴向方向的压力变化很小,说明钠液体在轴向上的流动极其微弱。此外,由于多孔介质微孔中表面张力的存在,压力在气液相变界面发生阶跃性突变,在此处急剧增大。这部分压力升高是驱动整个系统自循环的关键所在,同时也阻止槽道中的蒸汽回流到多孔芯区域。而在相变界面,钠工质的压力变化在数值上比传统工质高 1~2 个数量级。因为,钠工质在气液界面的平均表面张力 σ 是传统工质对应工作温度下的数倍^[19],而克服系统的压降从而为工质循环提供动力的最大毛细压头通常由公式 $\Delta p=2\sigma/r_p$ 确定。所以,在相同参数条件下,以钠为工质的多孔芯蒸发器能够提供更大的毛细抽吸力,具有更大的传输能力。钠蒸汽流入蒸汽槽道后,因黏性力的存在,压力沿着轴向方向逐渐降低,但是压降很小,几乎可以忽略不计。所以,在多孔芯和蒸汽槽道部分,压力损失主要发生在多孔芯区域,且多孔芯内部主要为径向流动。

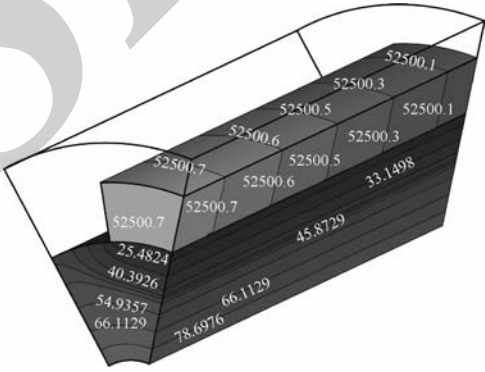


图 6 多孔芯蒸发器内的压力分布(单位:Pa)
Fig. 6 Pressure distribution in porous wick evaporator (unit:Pa)

图 7 给出了蒸发器 $Z/L=0.8$ 截面的径向速度分布和 $\theta=\pi/3$ 截面的轴向速度分布图。从图中可看出,在多孔芯区域,无论是径向速度还是轴向速度都很小,因此,式(5)中的对流项可以忽略,在文献[7,10]等中也均有此简化;此外,轴向速度比径向速度低了 2~3 个数量级,进一步证实钠液体在多孔芯内部的流动方向主要为径向。液态钠在多孔芯外表面蒸发为钠蒸汽,其速度明显增大,并且从图 7(a)中可以看出,在相变界面上,靠近肋片位置的速度最大,这是因为此处的温度更高,相应的蒸发速度更快。蒸汽槽道中沿流动方向汇集越来越多的蒸汽,因此轴向方向的速度也逐渐增大。

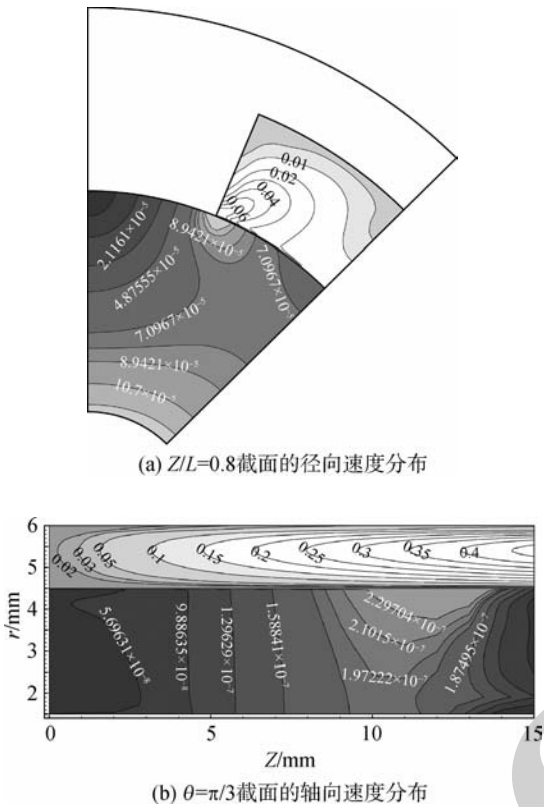


图 7 $Z/L=0.8$ 截面的径向速度分布和 $\theta=\pi/3$ 截面的轴向速度分布(单位:m/s)

Fig. 7 Radial velocity distribution in the cross section of $Z/L=0.8$ and axial velocity distribution in the cross section of $\theta=\pi/3$ (unit:m/s)

3 结 论

用数值方法对 AMTEC 系统中基于 CPL 原理的多孔芯蒸发器中的热质传输特性进行研究,得到相应的气相体积分数、温度、压力以及速度等分布,分析发现:

- 1) 与使用氨、甲醇等传统工质相比,以碱金属为工质的多孔芯蒸发器内部的蒸发属于表面蒸发,具有更好的稳定性和安全性。
- 2) 在相同参数条件下,以碱金属为工质的多孔芯蒸发器的毛细抽吸力比使用传统工质的多孔芯蒸发器高 1~2 个数量级,具有更大的传输能力。
- 3) 蒸发器内部的压力损失主要发生在多孔芯区域,且该部分的流动基本属于径向流动;多孔芯部分的平均过热度不足 1 K,碱金属工质极高的导热系数使热量可及时导出到蒸发界面,有利于蒸发过程的进行。

参考文献:

[1] 张来福,李然,童建忠,等. 碱金属热电转换器(AMTEC)的

新技术[J]. 能源技术,2001,22(1):21-23.

ZHANG Laifu,LI Ran,TONG Jianzhong,et al. The new technique of alkali metal thermal to electric converter (AMTEC)[J]. Energy Technology,2001,22(1):21-23. (in Chinese)

[2] 麻昔. AMTEC 内毛细泵回路流动与换热机理研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2012.

MA Xi. Mechnaism investigation on flow and heat transfer of capillary pumped loop in AMTEC[D]. Harbin: Harbin Engineering University,2012. (in Chinese)

[3] WU S Y,XIAO L,CAO Y D,et al. A parabolic dish/AMTEC solar thermal power system and its performance evaluation[J]. Applied Energy,2010,87(2):452-462.

[4] FIGUS C,BRAY Y L,Bories S,et al. Heat and mass transfer with phase change in a porous structure partially heated: continuum model and pore network simulations [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,1999,42(11):2557-2569.

[5] 王强,刘伟,刘志春,等. CPL 蒸发器多孔芯温压变化的数值模拟[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2004,32(5):87-89.

WANG Qiang,LIU Wei,LIU Zhichun,et al. Numerical study of the pressure and temperature changing of the porous wick in capillary pumped loop evaporator[J]. Hua-zhong University of Science and Technology (Nature Science Edition),2004,32(5):87-89. (in Chinese)

[6] 万忠民,刘伟,盖东兴,等. 带翅片的小型平板 CPL 蒸发器相变传热的数值模拟[J]. 化工学报,2007,58(12):2994-3000.

WAN Zhongming,LIU Wei,GAi Dongxing,et al. Numerical simulation of heat transfer with phase change in small-scale flat capillary pumped loop finned evaporator[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China),2007,58(12):2994-3000. (in Chinese)

[7] BOUBAKER R,PLATEL V,BERGES A,et al. Dynamic model of heat and mass transfer in an unsaturated porous wick of capillary pumped loop[J]. Applied Thermal Engineering,2015,76:1-8.

[8] 黄晓明,刘伟,韩延民. CPL 蒸发器多孔芯传热传质特性的新数学模型[J]. 工程热物理学报,2004,25(4):652-654.

HUANG Xiaoming,LIU Wei,HAN Yanming. A new model for the heat and mass transfer character of CPL e-vaporation[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2004,25(4):652-654. (in Chinese)

[9] 钱吉裕,李强,宣益民. 毛细泵回路蒸发器的数值研究[J]. 中国空间科学技术,2005,25(1):28-32.

QIAN Jiyu,LI Qiang,XUAN Yiming. Numerical investigation on evaporator for CPL[J]. Chinese Space Science and Technology,2005,25(1):28-32. (in Chinese)

[10] KAYA T,GOLDAK J. Numerical analysis of heat and mass transfer in the capillary structure of a loop heat pipe [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2006,49(17/18):3211-3220.

[11] 王俊. 微环路热管蒸发器内两相流动换热特性研究[D]. 江苏 镇江:江苏大学,2015.
WAN Jun. Study of two-phase flow and heat transfer characteristics in the evaporator of the MLHP systems[D]. Zhenjiang Jiangsu:Jiangsu University,2015. (in Chinese)

[12] LI Q,ZHAO K,XUAN Y M. Simulation of flow and heat transfer with evaporation in a porous wick of a CPL evaporator on pore scale by lattice Boltzmann method[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2011,54(13/14):2890-2901.

[13] NISHIKAWARA M, NAGANO H, MOTTET L, et al. Numerical study of thermal performance of a capillary evaporator in a loop heat pipe with liquid-saturated wick [J]. Journal of Electronics Cooling and Thermal Control, 2014,4(4):118-127.

[14] LI J,PETERSON G P. 3D heat transfer analysis in a loop heat pipe evaporator with a fully saturated wick[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2011,54(1/2/3):564-574.

[15] ZHANG X F,LI X Y,WANG S F. Three-dimensional simulation on heat transfer in the flat evaporator of miniature loop heat pipe[J]. International Journal of Thermal Sciences,2012,54(4):188-198.

[16] 马正军. 毛细蒸发流场数值模拟研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2009.
MA Zhengjun. Numerical Simulation study of capillary evaporator[D]. Haerbin:Haerbin Engineering University, 2009. (in Chinese)

[17] 钱吉裕. 毛细泵回路流动与换热机理研究[D]. 南京:南京理工大学,2005.
QIAN Jiyu. Flow and heat transfer mechanism of capillary pump loop[D]. Nanjing:Nanjing University of Science and Technology,2005. (in Chinese)

[18] 宋鹏杰. 环路热管蒸发器传热模拟研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2010.
SONG Pengjie. Heat transfer simulation study of loop heat pipe[D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2010. (in Chinese)

[19] 张红,杨峻,庄骏. 热管节能技术[M]. 北京:化学工业出版社,2009.

[20] SANTOS P H D,BAZZO E,OLIVEIRA A A M. Thermal performance and capillary limit of a ceramic wick applied to LHP and CPL[J]. Applied Thermal Engineering,2012,41(4):92-103.

[21] 吴双应,曹宝喜,肖兰,等. 插管对基于 AMTEC 太阳能热发电的毛细芯蒸发器性能的影响[J]. 太阳能学报,2013, 34(2):277-282.
WU Shuangying,CAO Baoxi,XIAO Lan, et al. Effect of bayonet tube on performance of capillary porous wick evaporator based on AMTEC solar thermal power generation[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2013, 34(2): 277-282. (in Chinese)

(编辑:叶 青)