

文章编号: 1000-8055(2006)04-0647-5

旋转封闭循环小通道内液态金属 热驱动换热特性研究

毛军逵, 徐若颖, 常海萍

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 高速旋转条件下, 封闭循环小通道内的流体(热驱动介质)在浮升力的作用下会产生热驱动运动, 将热量不断的从高温端携带至冷却端释放。本文通过数值模拟的方法, 研究了离心力场下封闭循环小通道中, 不同性质流体的流动和换热特性。重点分析了以液态金属锂、钠和钠钾合金为热驱动介质时, 热驱动运动的换热特性 Nu 随 Bu 和 Ro 两个参数的变化规律。研究中发现, 在一定的 Bu 数变化范围内, 以液态金属锂、钠以及钠钾合金为热驱动介质所得到的 Nu 均随 Ro 数的增大而减小; 当 Ro 数相同时, Nu 随 Bu 数的增加而变大。研究结果表明, 高转速, 低加热量时, 采用液态钠钾合金为热驱动介质可以得到最好的热驱动换热效果; 在高转速, 高加热量时以液态锂为热驱动介质时, 热驱动换热能力最强。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 换热; 旋转; 液态金属; 热驱动

中图分类号: TK 124

文献标识码: A

Heat transfer characteristics of liquid metal thermal drive in rotating closed cyclic small channel

MAO Jun kui, XU Ruoying, CHANG Haiping

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Using thermal drive in the small cyclic channel, heat can be efficiently transferred from the high temperature side to the cooled side. Numerical simulations were carried out to study the flow and heat transfer properties of different fluids under centrifugal force field. Three different liquid metals (Na, Li and alloy of Na-K) were applied as thermal drive medium (fluid inside the channel) and the average heat transfer coefficient Nu on the heated side varying with the Bu number and Ro number was studied. All the results show the average Nu number increases with Bu number and decreases with Ro number. Maximum heat transfer performance of thermal drive can be achieved in high rotating speed and lower heat flux if liquid Na-K was employed as thermal drive medium. When the rotating speed and heat flux both are high, the proper thermal drive medium is liquid Li which can result in maximum heat transfer performance.

Key words: aerospace propulsion system; heat transfer; rotating speed; liquid metal; thermal drive

高温热端部件(涡轮叶片等)的冷却是航空发动机发展的关键技术之一, 现有的常规涡轮叶片

收稿日期: 2005-07-11; 修订日期: 2005-12-30

基金项目: 国家自然科学基金资助(50276027)

作者简介: 毛军逵(1976-), 男, 浙江杭州人, 南京航空航天大学能源与动力学院副教授, 中国燃气涡轮研究院在职博士后, 主要从事发动机高温部件冷却、电子冷却的研究。

冷却技术耗用冷却空气量大,难以满足更高性能发动机设计的要求。南京航空航天大学的常海萍教授和清华大学的过增元院士提出了一种基于热驱动理论的新型冷却技术^[1]。其基本构想就是在涡轮叶片中构造出若干微小循环封闭通道,将通道两端分别置于高(低)温区,同时在通道内充满着流体(本文中统称为热驱动介质)。当涡轮叶片高速旋转时,形成了极强的离心力场,热驱动介质由于存在温差(密度差),在浮升力的作用下将会在封闭循环通道内形成热驱动流动,不断地从热端吸收热量,将热量携带到冷端并释放。

前期对于该技术的各种机理性研究结果表明其强化换热效果明显^[2-5],但研究中采用的热驱动介质比较单一。本文以数值模拟为主,开展了旋转条件下不同类型的热驱动介质在微小循环通道内热驱动换热特性研究。重点分析以液态金属作为热驱动介质时,其换热效果随 Bu , Ro 等参数的变化规律。

1 研究模型及相关准则参数

为了更好的从机理上研究离心力场下封闭通道内液态金属的热驱动换热特性,本文研究中选取了最简单的几何通道—矩形槽道,图1给出了

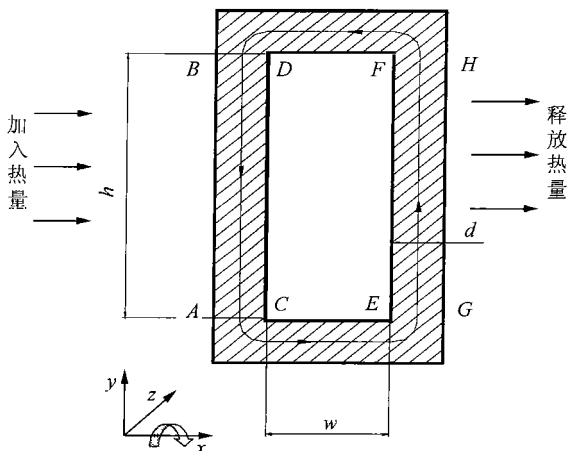


图1 热驱动换热物理模型

Fig. 1 Scheme of thermal drive model

模型中截面示意图。图中斜线阴影区域为热驱动介质的流动区域。 AB 和 CD 为加热端壁面, EF 和 GH 为冷却端壁面, 旋转方向如图1所示, 轴心坐标为 $(5, -400, 0.5)$, 旋转轴矢量方向 $(1, 0, 0)$ 。通道宽度 d 为 1 mm, 通道高度 h 为 10 mm, 冷热两端间距 w 为 8 mm。参照在旋转相对坐标系下的基本控制方程组^[2], 可以得到相应于本文研究模型无量纲化后的控制方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial x_j^*} (\rho^* w_j^*) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i^*} (\rho^* w_i^* w_j^*) = \frac{1}{Re} \left[\left(\frac{\partial w_i^*}{\partial x_j^*} + \frac{\partial w_j^*}{\partial x_i^*} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial w_k^*}{\partial x_k^*} \right] + 2BuRo e_{ijk} w_k^* e_j \rho^* - Bu \frac{1}{l^*} \frac{\partial l^*}{\partial x_i^*} \rho^* \quad (2)$$

$$w_j^* \frac{\partial}{\partial x_j^*} (\rho^* \Theta) = \frac{Ecr}{l^*} w_j^* \frac{\partial}{\partial x_j^*} (\rho^* l^*) - Ec \frac{\partial}{\partial x_j^*} \left(\rho^* \frac{w_i^* w_j^*}{2} \right) + \frac{1}{RePr} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x_j^2} \quad (3)$$

方程中上标* 表示该变量为无量纲量, 其中:

$$Re = \frac{\rho w_o x_o}{\mu}, \quad l^* = \frac{R}{x_o}, \quad Ro = \frac{w_o}{\omega x_o}, \quad Bu = \frac{\beta \Delta T \omega^2 x_o^2}{w_o^2}$$

$$Ecr = \frac{(\omega R)^2}{C_p \Delta T}, \quad Ec = \frac{w_o^*}{C_p \Delta T}, \quad x_j^* = \frac{x_j}{x_o}, \quad w_j^* = \frac{w_j}{w_o}$$

$$\rho^* = \frac{\rho}{\rho_o}, \quad \Theta = \frac{T - T_o}{T_1 - T_o}, \quad w_o = \frac{(\chi \Omega)^{1/2}}{x_o}$$

Ro 表示旋转条件下哥氏力与离心力之比。 Bu 表征了旋转条件下热驱动介质所受浮升力的大小。旋转条件下, 温差 (ΔT) 的大小和转速 (ω) 的高低共同影响了流体浮升力的大小, Bu 数中综合考虑了这两个因素的影响。 l^* 为相对坐标系中旋转半径和特征尺寸之比, 它表明不仅特征尺寸对流体热驱动有影响, 旋转半径也有影响。

Ecr 表明旋转切向速度动能对热驱动换热的影响。 Ec 是单位体积内流体的动能和热能之比, 表明了流体相对运动的动能对热驱动的影响。

从方程(1)~(3)中推导出离心力场下热驱动的换热特性可以表示为:

$$Nu = f(Re, Ro, Pr, Bu, Ecr, Ec, l^*) \quad (4)$$

从图1中可以看到, 计算模型的几何尺寸以

及转轴位置固定不变, 所以 l^* 的影响可以不予考虑; 相应于本文的研究参数范围, 虽然整个矩形通道在高速旋转, 但通道内液态金属的相对运动速度和温差均较小, 因此 Ec , Re , Ec_r 和 Pr 的值变化不大, 也可以忽略它们的影响。因此最终离心力场下封闭循环通道内液态金属的热驱动换热特性可以简化的表示为:

$$Nu = f(Ro, Bu)$$

(5)

2 数值计算模型和模拟工况

考虑到试验中采用液态金属作为热驱动介质难度很大, 因此在本文的研究中利用 CFD 软件, 通过数值计算的方法进行数值仿真。为了保证数值计算的准确度, 本文首先对数值计算开展了准确性验证。毛军逵等^[2]进行了以液态饱和水为热驱动介质时, 离心力场下微小通道内热驱动的换热特性试验研究。具体的试验台构造和试验件(封闭通道宽度 $d=1\text{ mm}$) 请参见文献[2], 本文就不再加以描述了。

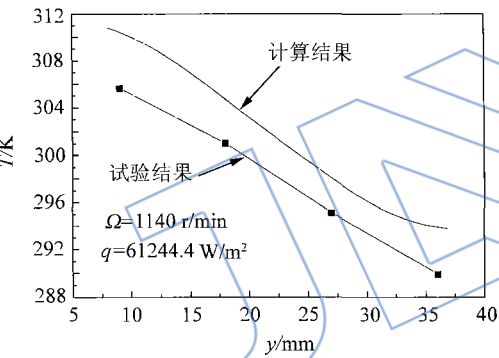


图 2 转速 1 140 r/min 计算和试验结果比较
Fig. 2 Comparison local temperature on heated wall between numerical results and experimental results (Ω= 1 140 r/min)

图 2~ 图 3 为以液态饱和水为热驱动介质时, 试验中测量得到的封闭通道热端壁面的温度和利用 Fluent 软件计算所得结果之间的比较。从图中可以看到, 计算得到的温度变化规律和试验测量所得到的是一样的, 即在 y 方向上, 随 y 的增加温度逐渐降低; 同时可以看到当转速提高后, 计算所得到的温度均有不同程度的降低, 温度梯度也在降低, 这同试验中测量值变化规律也是相同。由于试验中不可能做到完全绝热, 造成计算得到的封闭通道加热端壁面的温度值偏高。

在此基础上, 本文开展了旋转条件下, 以液态

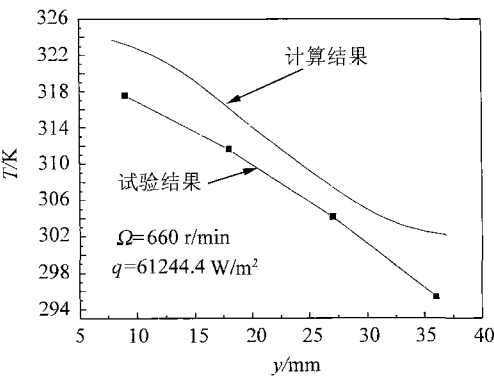


图 3 转速 660 r/min 计算和试验结果比较
Fig. 3 Comparison local temperature on heated wall between numerical results and experimental results (Ω= 660 r/min)

金属为热驱动介质时, 封闭微小循环通道内热驱动换热特性的数值研究。计算所需的网格由 GAMBIT 软件生成。通过网格试验, 当网格单元为 123 480 时, 基本可以满足数值结果和网格数之间的独立性要求。数值计算中采用 Fluent 的耦合稳态隐式求解器 (Coupled Implicit Steady Solver) 和 RNG $k-\epsilon$ 紊流模型, 在近壁区采用了 Two- σ -layer 模型。各参数的离散均采用二阶精度的迎风格式, 判断解收敛的标准是各项残差小于 1×10^{-4} 和迭代过程中壁面最高温度基本保持不变。

数值计算中具体的边界条件和计算工况如下表所示: 加热端边界[等热流条件 $q \times 10^{-5} \text{ (W/m}^2\text{)}]$ $q=4, 4.7, 5.5, 7, 8.5$; 冷却端边界(等温条件) $T=600\text{ K}$; 旋转速度为 1 500, 2 500, 3 500, 4 000, 5 000 和 6 000 r/min。

3 计算结果分析

3.1 Bu 数的影响

图 4~ 图 6 分别表示以液态金属钠钾合金、钠和锂为热驱动介质时, 加热端的平均换热系数 Nu 随着 Bu 数的变化规律。图 4 中所标识的曲线 1~ 5 分别表示转速为 1 500, 2 500, 3 500, 4 000, 5 000 和 6 000 r/min。图 7~ 图 9 分别表示液态金属钠钾合金、钠、锂的 Nu 随着 Ro 的变化规律。曲线 1, 2, 3, 4 和 5 分别表示加热量 $q=400\ 000\text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, $470\ 000\text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, $550\ 000\text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, $700\ 000\text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 和 $850\ 000\text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 。

从图 4~ 图 6 中可以清楚的看到不同的液态

强度越大,意味着流体能够更为有效的从加热端吸收热量,携带至冷却端并释放热量。因此从图 4~ 图 6 中可以看到, Ro 数相同时, Bu 数越高(即温差 ΔT 越大),热驱动运动的平均换热系数 Nu 越大。

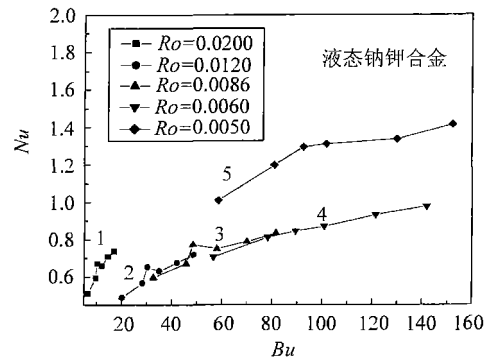


图 4 Nu 随着 Bu 数的变化图 (钠钾合金)
Fig. 4 Effect of Bu on Nu (Alloy of Na and K)

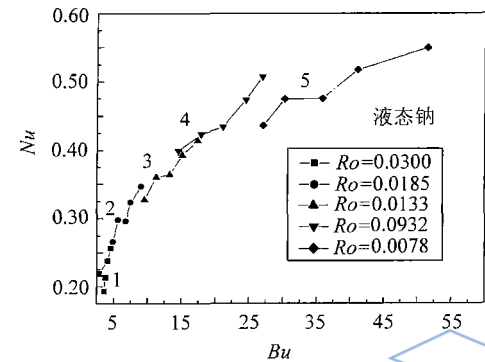


图 5 Nu 随着 Bu 数的变化图 (液态钠)
Fig. 5 Effect of Bu on Nu (Liquid Na)

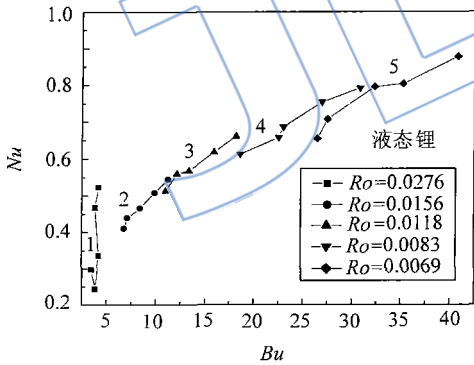


图 6 Nu 随着 Bu 数的变化图 (液态锂)
Fig. 6 Effect of Bu on Nu (Liquid Li)

金属作为热驱动介质时,平均换热系数 Nu 随 Bu 数的变化规律基本相同:在 Ro 数不变的情况下, Nu 均随着 Bu 的增加而变大。

液态金属在封闭微小通道内产生热驱动运动时,其热驱动力的大小受到离心加速度和温度差 2 个因素的共同影响。 Ro 数不变时,旋转产生的离心力对热驱动运动的影响基本不变,温度差直接关系到热驱动力的大小。温差越大,所能产生的热驱动力越大,即封闭通道内所形成的热驱动

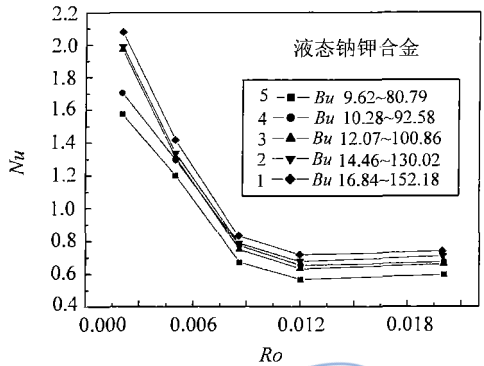


图 7 Nu 随着 Ro 数的变化图 (钠钾合金)
Fig. 7 Effect of Ro on Nu (Alloy of Na and K)

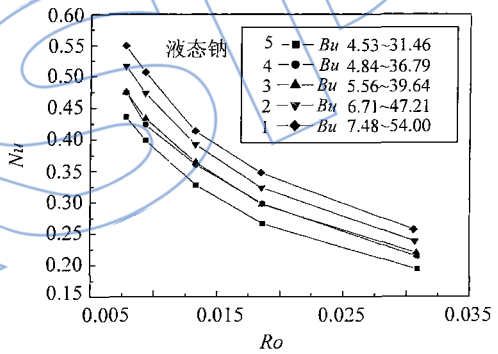


图 8 Nu 随着 Ro 数的变化图 (液态钠)
Fig. 8 Effect of Ro on Nu (Liquid Na)

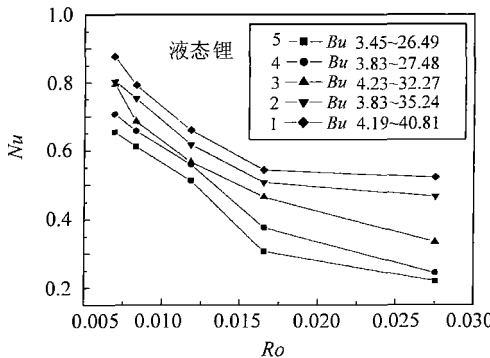


图 9 Nu 随着 Ro 数的变化图 (液态镍)
Fig. 9 Effect of Ro on Nu (Liquid Ni)

从图 4~ 图 6 中还可以看出, Ro 数越小, Bu 越大, Nu 就越高。这是因为,转速越高, Bu 越大,浮升力就越大,热驱动介质在封闭通道内可以更快的将加热面的热量带到冷却端,所以换热的

效果就越好。如图 6 中当 $Ro=0.0118$ 时, 随着 Bu 从 13.36 增加到 15.92, Nu 从 0.56 增加到 0.62。

3.2 Ro 数的影响

需要指出的是, 当旋转速度发生改变时, Bu 数和 Ro 数将同时变化。数值计算中, 没法保证 Bu 数恒定的情况下, 去单独改变 Ro 数。因此图 7~ 图 9 中的 Bu 存在一个变化范围, 计算点均反映了旋转带来的综合影响, 这同时也表明哥氏力和浮升力共同影响了换热效果。

比较图 7~ 图 9 中的曲线, 可以看到当采用不同的液态金属作为热驱动介质时, 加热端平均 Nu 数随 Ro 数的变化规律存在着一定的差异。例如如图 7 中所示的以液态钠钾合金作为热驱动介质时, 当 Ro 数增加后, Nu 显著降低; 但是当 Ro 数进一步增加, 如达到 0.012 后, Nu 却基本保持不变了。当热驱动介质为液态钠时, 随着 Ro 的不断变大, Nu 始终逐步降低, 如图 8 所示。以液态锂为热驱动介质时, 其 Nu 随 Ro 的变化规律更为复杂, 当 Bu 的变化范围分别为 3.45~26.49, 3.83~27.48, 4.23~32.27(对应的加热量分别为 $400\,000\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, $470\,000\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, $550\,000\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) 时, 开始 Nu 随着 Ro 数的增大而逐渐减小, 当达到一定程度后, Ro 对 Nu 的影响变缓(同采用液态钠为热驱动介质时的情况相似); 当 Bu 的变化范围分别为 3.83~35.24, 4.19~40.81(对应的加热量分别为 $700\,000\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, $850\,000\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) 时, Nu 随着 Ro 的变化规律与钠钾合金一样。

Ro 数表征了旋转条件下哥氏力与离心力之比。由于热驱动介质在封闭循环通道中存在着温度差(密度差), 在离心力的作用下产生浮升力, 从而驱动热驱动介质来循环换热, 哥氏力将导致热驱动介质在通道内运动时发生偏转, 因此离心力增加时换热将会得到强化, 而哥氏力变大时换热将会被削弱。当 Ro 数增加时, 哥氏力作用效果变大, 故此从图 7~ 图 9 中看到 3 种液态金属条件下 Nu 均随着 Ro 的增加而有不同程度的降低, 只是由于热驱动介质物性的不同, 导致 Nu 随 Ro 数的降低幅度存在着差异。

3.3 3 种热驱动介质的比较

为了更加明确地来比较采用不同热驱动介质所能得到换热效果的大小, 本文进一步利用热驱动能力参数 KH 来比较不同热驱动介质的换热

效果。它表征了热驱动介质通过循环流动, 将热量携带至冷端的能力, 其具体定义如下:

$$KH = \frac{q}{T_{\max} - T_{\min}} \tag{6}$$

其中: q 为加热面的热流密度; $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 为封闭小通道壁面的最高和最低温度。

由表达式(6)可知, 在热端的热流密度一定的情况下, 如果最高和最低温度之间差值越小, 就表明通道内流体能更高速地将热量从热端携带到冷端, 相应的此时热驱动换热效果也就越好。图 10 和图 11 分别为采用 3 种不同液态金属作为热驱动介质时, 热驱动能力参数 KH 随转速 Ω 以及热流密度 q 的变化规律图。

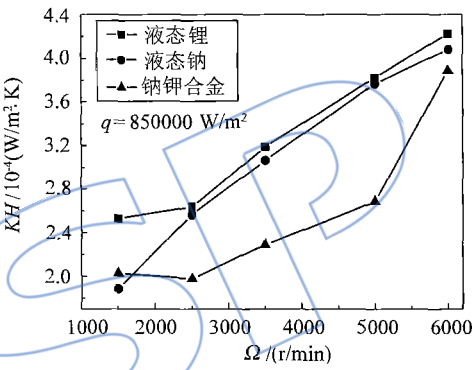


图 10 KH 随转速变化规律图
Fig. 10 Effect of rotating speed on KH

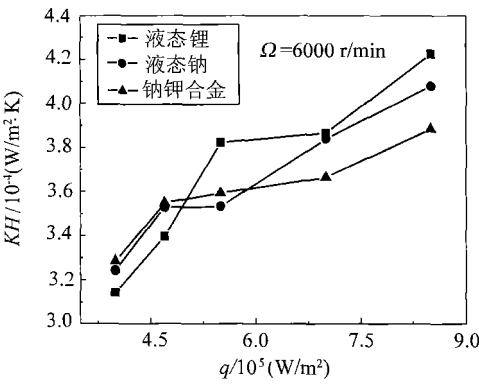


图 11 KH 随加热量变化规律图
Fig. 11 Effect of heat flux on KH

从图 10 和图 11 中可以看到, 旋转速度和热流密度增加后, 热驱动换热能力参数 KH 均有不同程度的增加。当热流密度 q 不变时, 随着转速的提高, 以液态锂为热驱动介质时的 KH 始终要高于液态钠和钠钾合金的情况, 如图 10 中所示。

同时从图 11 中看到, 当 q 从 $400\,000\text{ W/m}^2$ 增加到 $500\,000\text{ W/m}^2$ 时, 以液态钠钾合金为热

驱动介质时热驱动换热能力最强, 其次为液态钠, 最低为液态锂; 随着 q 从 $500\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ 增加到 $850\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$, 以液态锂为热驱动介质时热驱动换热能力高于液态钠、钠钾合金。可见高转速, 低加热量时, 采用液态钠钾合金为热驱动介质可以得到最好的热驱动换热效果; 在高转速, 高加热量时以液态锂为热驱动介质时, 热驱动换热能力最强。

4 结 论

(1) 分别以液态钠、钾和钠钾合金为热驱动介质时, 在相同的 Ro 数下, 热端壁面平均 Nu 均随着 Bu 的增加而变大。

(2) 本文的数值模拟工况中, 在一定的 Bu 变化范围内, 采用不同液态金属作为热驱动介质时, 热端壁面平均 Nu 均随着 Ro 数的增加而减小。当 Bu 减小到一定程度后, Ro 数对 Nu 的影响变小。

(3) 比较不同转速和加热量条件下, 热驱动换热能力参数 KH 的变化规律, 得到高转速, 低加热量时, 采用液态钠钾合金为热驱动介质可以得到最好的热驱动换热效果; 在高转速, 高加热量

时以液态锂为热驱动介质时, 热驱动换热能力最强。

参考文献:

[1] 常海萍, 过增元. 一种燃气涡轮冷却技术[P]. 发明专利, 专利号: ZL 01108222. 4, 2003.

[2] 毛军逵. 一种基于热驱动理论的新型冷却技术机理的研究[D]. 江苏 南京: 南京航空航天大学, 2003.

[3] 毛军逵, 常海萍, 方立. 离心力场下封闭通道内 $R12$ 的热驱动换热研究[J]. 航空动力学报, 2003, 18(4): 489-501.
Mao Junkui, Chang Haiping, Fang Li. Experimental investigation of flow and heat transfer about the thermal driving of $R12$ in rotating small size circular enclosures [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2003, 18(4): 489-501.

[4] 杨敏, 常海萍, 毛军逵. 离心力场下 H_2O 和 $R12$ 热驱动换热特性试验研究[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(2): 302-304.
Yang Min, Chang Haiping, Mao Junkui. Experimental investigation of thermally driving heat transfer characteristics of H_2O and $R12$ in a centrifugal force field [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2004, 25(2): 302-304.

[5] 毛军逵, 常海萍. 离心力场流体热驱动准则参数确定[R]. 中国工程热物理学会传热传质学学术年会, 北京: 2003: 101-104.