

# 热推力器层板换热芯流固耦合传热与流动仿真\*

邢宝玉,程谋森,黄敏超,刘 昆

(国防科技大学 航天科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

**摘要:**热推进技术采用小分子量气体作为推进剂可以获取较高的比冲,是具有巨大应用前景的空间推进技术,而提高热推力器换热芯换热效率是目前亟待解决的问题。本文设计了基于层板结构的换热芯,结合层板结构的传热特点与流固耦合传热理论,对层板换热芯传热和工质流动进行了模拟计算。根据耦合传热理论,将层板与工质的导热简化为系统内部边界条件,通过仿真计算得到了层板流固耦合温度场和流场分布特性,工质可以被加热至 2300K 以上,验证了层板结构用于热推力器换热芯的有效性。

**关键词:**热推进;流固耦合;层板换热;数值仿真

**中图分类号:**V439.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2013)04-0020-06

## Fluid-solid coupled heat transfer and flow simulation of platelet heat exchanger in thermal thruster

XING Baoyu, CHENG Mousen, HUANG Minchao, LIU Kun

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Thermal propulsion system includes solar thermal propulsion and nuclear thermal propulsion, and it is a significant issue to improve the heat transfer efficiency of the thermal thruster. Based on the fluid-solid coupled heat transfer, this study utilized the platelet heat transfer characteristics to simulate the heat transfer and flow field of the platelet passage. A coupled system included both the coupled flow and the heat transfer between fluid and solid parts, in addition to the coupled heat transfer among solid parts. Simulation result shows that the fluid-solid coupled method can solve the steady heat transfer in the platelet structure, and the propellant can be heated to the design temperature of 2300K for the thermal propulsion system.

**Key words:** thermal propulsion; fluid-solid coupled; platelet heat transfer; simulation

热推进技术采用推进剂从热源吸收热量来产生高温气体,进而通过气动喷管膨胀喷射产生推力<sup>[1]</sup>。按照热源不同,主要分为太阳能热推进和核热推进。热推进技术采用小分子量气体(如氢气)作为推进剂,可以获取 600~900s 的高比冲,现已成为国内外研究的热点。热推进系统可实现上面级推进和轨道机动飞行器的空间主推进,特别是可应用于卫星的轨道快速机动<sup>[2]</sup>。

高效的换热流道是热推进实现高比冲的关键,可以提高工质进入喷管的温度,进而提高推进系统的比冲。螺旋流道由于结构简单,易加工,是国外研究中多采用的结构。英国萨里大学设计和制造了两种结构 MK1 和 MK2,并在真空舱内加热到 1500~2000K<sup>[3]</sup>。MK1 系统结合了粒子床结构,使壁面与工质的热传递效果达到最大。MK2 使用了结构简单、换热效率略低的螺旋通道设计。实验结果表明粒子床结构的换热效率更高,但是

体积大,质量大。杨杰等<sup>[4]</sup>运用数值模拟方法得出了一般情况下螺旋通道的长度、宽度参数范围,深入分析了结构参数对推力、比冲等性能的影响。当以氢为工质,在 2300K 工作时,螺旋通道的长度要 165cm 才能获得理想的加热效果。推力室长度增加就意味着系统体积大,结构复杂,质量增加,推力器完成任务的能力降低。

本文借鉴层板发汗冷却结构设计<sup>[5~6]</sup>,采用多层板高效换热流道结构通过分流的方式,增大工质与层板的换热面积,使工质在推力室内得到充分加热。同时,工质沿径向从低温外壁向高温内壁流动,降低了外壁温度,减少了推力器对外部环境的热损失,提高了系统的能量利用效率。利用层板结构的这一优势,工质与高温层板的对流换热更加高效。

文献[7]对太阳能火箭发动机的实验情况,进行了结构分析和基本实验条件估算,对其吸收

\* 收稿日期:2013-01-11

基金项目:国家 863 计划资助项目

作者简介:邢宝玉(1984—),男,河北海兴人,博士研究生,E-mail:xingbaoyu1984@yahoo.com.cn;

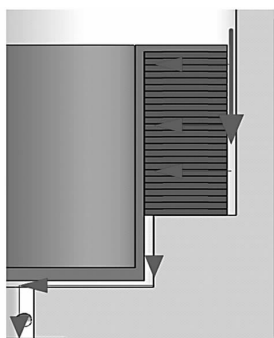
刘昆(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:Liukun@nudt.edu.cn

器/推力室的内部流动、传热情况,但由于采用了等壁温模型,计算过程进行了大量的简化。实际情况中工质与壁面的温度是相互影响的,忽略了固体内部的温度梯度对流固边界热流量的影响。本文采用了流固耦合传热的方法,来计算换热芯内的流动和温度分布规律。其最大优点是考虑了固体内部温度梯度对换热表面热流运输的影响,更接近实际的工况。

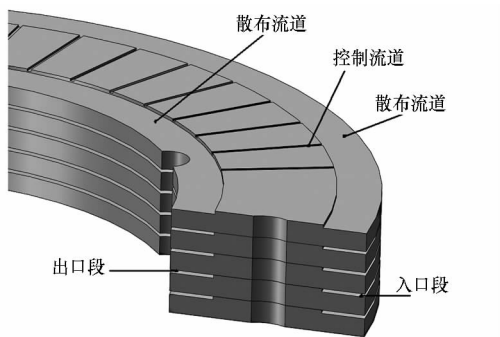
## 1 流固耦合计算模型

### 1.1 物理模型

热推力器设计方案在层板结构的基础上进行了改进,采用了多层层板微流道结构,通过分流的方式,增大工质与推力室壁面的换热面积,提高换热通道内的对流换热效果,使工质在推力室内得到充分加热。层板数量设计为 20 层,单个层板设计厚度 1mm,控制流道深度 0.1mm。层板内、外径分别为 28mm 和 46mm。层板的径向长度为 9mm,控制流道长度 5mm。层板之间工质的换热面积比相同条件下螺旋流道大出约 5~10 倍。工质沿层板外沿流入,经过控制流道,最后通过内沿的半圆形通道流入喷管。层板内沿与吸收腔的高温壁面紧密结合,其总体结构示意图如图 1 所示。



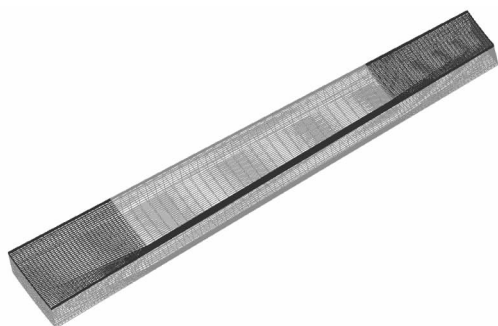
(a) 层板换热芯流动线路  
(a) The flow path of propellant



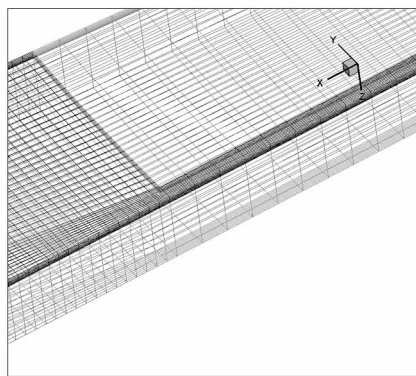
(b) 层板流道分布结构  
(b) The distribution of platelet passage

图 1 基于层板增强换热通道的总体结构

Fig.1 The structure based on platelet heat transfer path



(a) 网格总体结构  
(a) The overall structure



(b) 网格耦合边界局部放大  
(b) The detail view of the coupled boundary

图 2 流固耦合计算模型网格

Fig.2 The grid of the fluid-solid coupled model

由于该层板结构具有轴对称的结构特点,为减小计算量,计算时取层板结构的单条流道的一半作对称处理,模型的上下左右面均为对称面,计算模型的周向角度为  $8^\circ$ 。模型的坐标原点取在层板的物理中心,即对称轴与流道对称面的交点。流道的中心线设为  $X$  轴,沿层板径向向外延伸。 $Y$  轴在流道平面内垂直于  $X$  轴。 $Z$  轴由流道对称面指向层板固体对称面。采用六面体结构网格划分模型,对 0.1mm 的控制流道进行了加密处理,总单元数 75 600。对 0.1mm 的控制流道网格进行了多种处理,得到了网格无关解,该计算中的网格数为 16 000。对流固耦合界面处网格采用 4 层边界层网格进行了处理,第一层边界层网格厚度为 0.01mm,比例为 1.2。流固耦合计算三维模型网格如图 2 所示。

### 1.2 材料与工质属性

层板材料选用耐高温金属钼,外层隔热材料为氧化铝纤维包覆,其主要热物理性质如表 1 所示。推进剂为氢气,假定为理想气体。

表 1 层板材料热物性参数

Tab.1 Thermal parameter of the platelet material

	密度 g/cm <sup>3</sup>	导热系数 W/(m·K)	比热容 J/(kg·K)	熔点 ℃
钨	10.0	93.7	328	2622
氧化铝	0.2	0.01	200	2500

## 2 流固耦合微分方程及求解

### 2.1 流固耦合换热与流动微分方程

微流道尺寸较小,一般需要考虑稀薄气体流动的情况。但由于流道内并不是低压,经计算得努森数约为 0.0001,小于 0.001,连续介质模型是适用的。对于三维湍流流动及传热过程遵守质量守恒、动量守恒和能量守恒定律,写成爱因斯坦求和形式。

(1) 连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad j = 1, 2, 3 \quad (1)$$

其中  $u_j$  为时均速度,  $u_1, u_2, u_3$  分别对应于  $x, y, z$  方向的速度  $u, v, w$ 。坐标  $x_1, x_2, x_3$  分别对应于直角坐标  $x, y, z$ 。

(2) 动量守恒方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u'_i u'_j}) \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $-\rho \overline{u'_i u'_j}$  为雷诺应力张量,根据 Boussinesq 假设:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (3)$$

式中  $\mu_t$  为湍流粘度系数,  $k$  为湍动能。

(3) 能量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i c_p T) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j}) + S \quad (4)$$

其中  $c_p$  为定压比热,  $S$  为加热源项,  $\lambda_{eff}$  为有效导热系数:

$$\lambda_{eff} = \lambda + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t}$$

其中  $\lambda$  为导热系数,  $Pr_t$  为湍流 Prandtl 数,取值为 0.85。

(4) 湍流模型

在充分发展的湍流区域,反映湍流脉动量对流场影响的湍流动能方程和湍流应力方程可通过可实现的  $k-\varepsilon$  方程得到,其形式为:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \rho C_1 S \varepsilon \\ & - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b \end{aligned} \quad (6)$$

式中,  $\varepsilon$  为湍流动能耗散率;  $G_k$  为平均速度梯度对湍动能  $k$  产生项的贡献;  $G_b$  为浮力对的湍动能  $k$  产生项的贡献,本文不考虑重力作用,故  $G_b = 0$ ;  $Y_M$  为可压缩流的脉动膨胀对总的耗散率的贡献;  $C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$ ,  $\eta = Sk/\varepsilon$ ;  $C_{1\varepsilon}, C_2, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$  为经验常数,取值分别为  $C_{1\varepsilon} = 1.44, C_2 = 1.9, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

(5) 固体传热模型

固体区域采用能量输运方程,固体结构的导热满足傅里叶定律,微分方程为:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x_j \partial x_j} = 0 \quad (7)$$

式中  $T$  为固体温度。

基于有限元方法的能量平衡方程为:

$$[K] \{T\} = \{Q\} \quad (8)$$

式中,  $[K]$  为传导矩阵,包括导热系数和对流系数;  $\{T\}$  为节点温度向量;  $\{Q\}$  为节点热流率向量。

### 2.2 边界条件

流动边界条件:工质入口压力 1MPa,入口温度 300K。出口是需要得到的结果,所以在出口外加喷管,喷管外背压设置为 10Pa。

温度边界条件:热推进系统比冲高,以氢为工质时比冲可超过 800s,其对应的推进剂加热后温度要达到 2300K 以上。为达到此条件,固体高温侧设置定温 2400K,低温侧考虑推力器外部的隔热效果,设置为绝热条件,重点关注层板固体和流体的温度耦合影响。

在流固耦合界面处,使用标准壁面函数法处理流动边界层和热边界层。在第一个内节点  $P$  上与壁面平行的流速与温度应满足对数分布律,从而得到节点  $P$  与壁面间的当量粘性系数和当量导热系数为

$$\mu_t = \left[ \frac{y_P (c_\mu^{1/4} k_P^{1/2})}{\nu} \right] \frac{\mu}{\ln(Ey_P^+)/\kappa}$$

$$\lambda_t = \frac{y_P^+ \mu c_p}{\sigma_T [\ln(Ey_P^+)/\kappa + P]}$$

式中, Von Karman 常数  $\kappa = 0.4 \sim 0.42$ , 常数  $c_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s U^* \frac{k}{\varepsilon}}$ ,  $\sigma_T$  为湍流 Prandtl 数,  $\sigma_L$  为分子 Prandtl

$$\text{数}, Pr = 9 \left( \frac{\sigma_L}{\sigma_T} - 1 \right) \left( \frac{\sigma_L}{\sigma_T} \right)^{-1/4 [8]}$$

由此可计算壁面的切应力和热流密度。

内节点  $P$  上的  $k_p$  之值仍可按  $k$  方程计算,其边界条件取为  $\left( \frac{\partial k}{\partial y} \right)_w = 0$ ,  $y$  为垂直于壁面的坐标。已知  $k_p$  后,  $\varepsilon_p$  即可求出

$$\varepsilon_p = \frac{C_\mu^{3/4} k_p^{3/2}}{K y_p}$$

### 2.3 计算方法

耦合传热的热边界条件在热量交换过程动态地由计算确定,而不是预先设定,不能用常规的三类传热边界条件来描述。流体和固体边界上的热边界条件受到流体与壁面温度相互作用的制约。

本文采用整场离散、整场求解方法来解决流固耦合传热问题。该方法把不同区域中的热传递过程组合起来作为一个统一的换热过程来求解,不同的区域采用通用控制方程,区别仅在于扩散系数及广义源项的不同。采用控制容积积分法来导出离散方程时,界面上的连续性条件原则上都能满足,省去了不同区域之间的反复迭代过程,使计算时间显著缩短,成为解决耦合传热问题的主导方法。

### 3 仿真结果与分析

将上述流固耦合系统的层板和工质材料特性和边界条件施加到离散模型上,通过发展方程迭代到稳态,得到热推力器层板换热芯的温度场和流场。

经过流固耦合计算,单通道模型的整体三维温度分布如图 3 所示。流体部分与固体部分的温度变化呈现明显的差异。

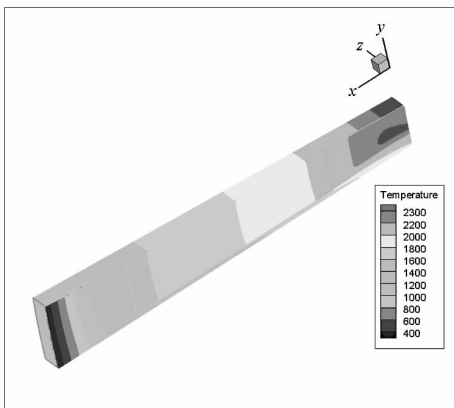
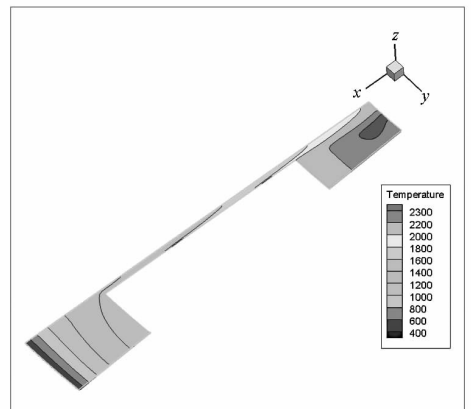


图 3 层板单通道模型的三维温度分布

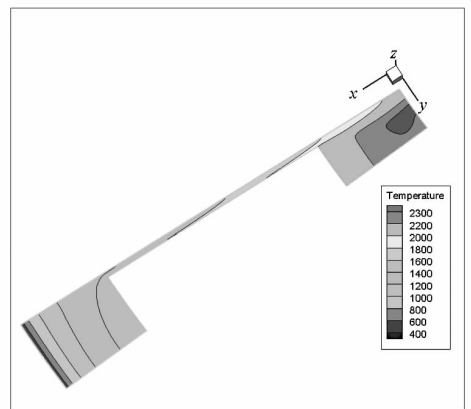
Fig. 3 3D temperature distribution of the platelet single path

沿垂直于  $z$  轴的方向对层板流道内的流体温度分布进行剖面分析,图 4(a) - (c) 分别显示了

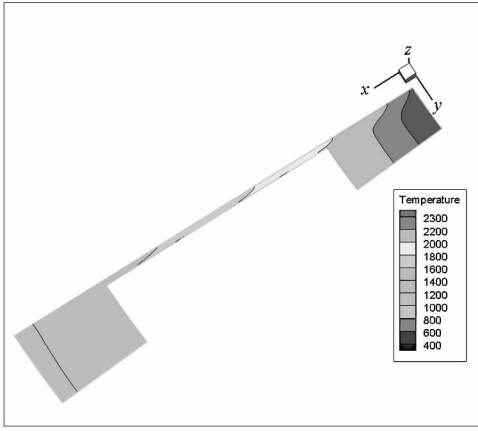
由流道中心到层板壁面的温度分布变化规律,流道中工质的温度整体上呈现从中心到壁面逐渐升高的趋势。层板与工质的换热主要在散布流道内进行,控制流道内工质的温度变化较小。(a)图流道中心主流温度在层板出口已经加热至 2200K,而出口散布流道的温度较高,达到了 2300K 以上,接近层板壁温的边界条件。0 ~ 0.02mm 的温度分布基本相同。(b)图显示了 0.03mm 和 0.04mm 处的温度分布,相对于对称面,变化已经比较明显。(c)图所示为贴近层板壁面的温度分布,可见流道出口的工质温度已经全部超过 2300K,最高温度为 2393K,与壁温接近一致。推进剂流过层板之后进入纵向夹层可以进一步加热,从而使推进剂整体温度超过 2300K。而文献[4]的仿真结果表明,采用螺旋通道结构,壁面加热温度为 2300K 时,螺旋通道末端和夹层段的最高温度为 2100K 以上,尚未达到 2200K,可见层板换热结构的热效率更高。由于流道尺度小,湍流在垂直于流动方向上对流动的影响不大。通过与层流的仿真结果对比发现,由于耗散的作用湍流的仿真结果得到的推进剂温度更高。



(a)  $z$  轴坐标 0, 流道对称面  
(a)  $z$  coordinate 0mm



(b)  $z$  轴坐标 0.03mm  
(b)  $z$  coordinate 0.03mm



(c) z 轴坐标 0.05mm

(c) z coordinate 0.05mm

图 4 层板流道内流体剖面温度分布

Fig. 4 The slice temperature distribution of the fluid in the platelet path

图 5 显示层板固体部分的沿垂直于  $y$  方向的温度分布剖面, 可见层板温度存在从 1400K 到 2400K 之间的梯度变化。在以往的仿真工作中, 推力器壁面的温度都是作为恒定的温度边界条件直接给定的, 可见是存在一定误差的。流体温度与固体温度的相互影响因素很大, 在不考虑系统与外界热交换的情况下, 固体冷端的温度只有 1400K。可见在层板散布流道工质和层板壁面之间的热交换很充分, 层板加热效果很好。层板固体与工质主流区温度沿径向变化曲线如图 6 所示。

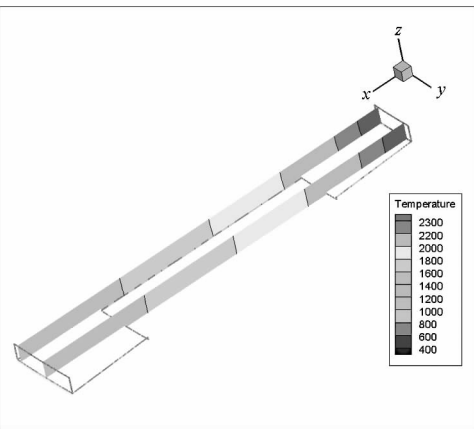


图 5 层板固体部分温度分布

Fig. 5 The slice temperature distribution of the solid part of the platelet

沿垂直于  $z$  轴的方向对层板流道内的流体速度分布进行剖面分析, 图 7(a) - (c) 分别显示了由流道中心到层板壁面的速度分布变化规律, 由于边界层的存在, 流道中工质的速度整体上呈现

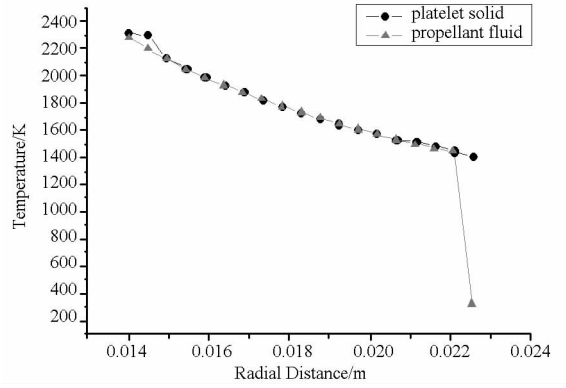
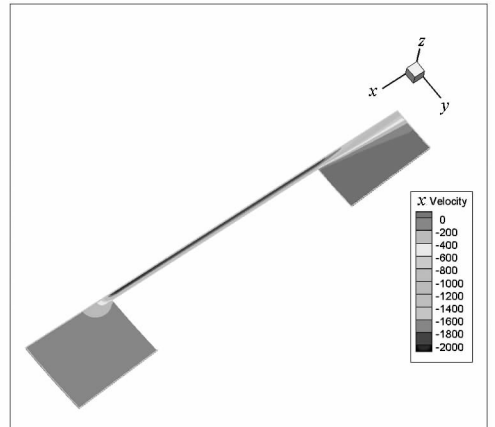


图 6 层板固体与工质温度径向变化曲线

Fig. 6 Platelet solid and fluid temperature variations along radial path

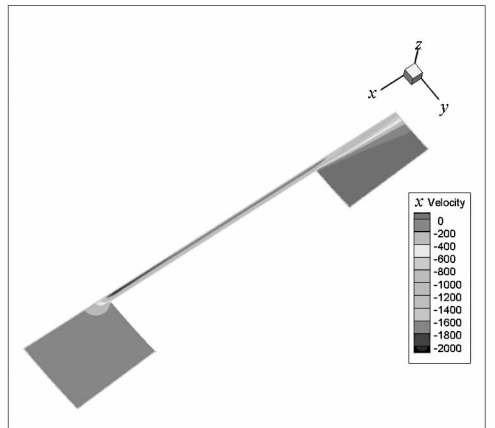
从中心到壁面逐渐降低的趋势。而层板的控制流道则起到了加速工质的作用, 控制流道内的最高速度达到了 2000m/s, 其当地马赫数在 0.6 ~ 0.7 变化, 防止了工质在流动过程中出现壅塞。

层板流道内的压力分布如图 8 所示, 结构内的压降损失小于  $10^5$  Pa, 对发动机性能影响不大。



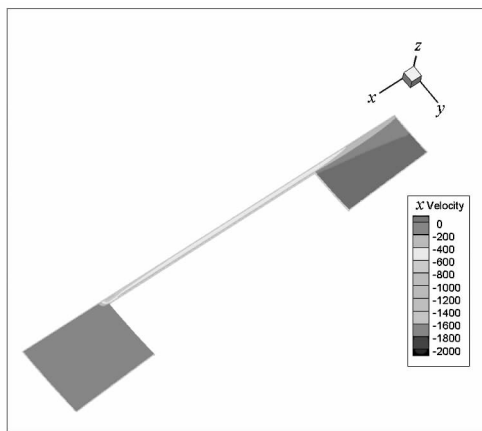
(a) z 轴坐标 0, 流道对称面

(a) z coordinate 0mm



(b) z 轴坐标 0.03mm

(b) z coordinate 0.03mm



(c) z 轴坐标 0.05mm

(c) z coordinate 0.05mm

图7 层板流道内流体剖面速度分布

Fig.7 The slice velocity distribution of the fluid in the platelet path

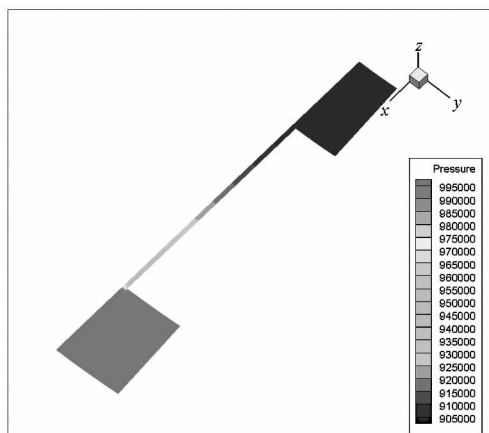


图8 层板流道内流体剖面压力分布

Fig.8 The slice pressure distribution of the fluid in the platelet path

## 4 结论

本文采用流固耦合的方法对热推进系统的层板换热芯进行了传热与流动仿真,获取了层板通道内的温度与速度分布规律,解决了流固界面的温度和换热系数等传热边界条件难以确定的问题。通过对推力器的热分析仿真,得到以下主要结论:

(1)层板流道中工质温度整体上呈现从中心到壁面逐渐升高的趋势。流道中心主流温度在层板出口已经加热至 2200K,而出口散布流道的温度更高,达到了 2300K 以上。贴近层板壁面工质最高温度为 2393K,与壁温接近一致。

(2)层板固体结构温度存在从 1400K 到 2400K 之间的梯度变化。流体温度对固体温度的

影响很大,在不考虑系统与外界热交换的情况下,固体冷端的温度只有 1400K。可见在层板散布流道工质和层板壁面之间的热交换很充分,层板加热效果很好。

(3)层板流道内的流体速度呈现从中心到壁面逐渐降低的趋势。控制流道内的最高速度达到了 2000m/s,其中当地马赫数在 0.6 ~ 0.7 变化,起到了加速工质的作用,防止出现壅塞。结构内的压降损失小于  $10^5$  Pa,对发动机性能影响不大。

(4)流固耦合传热数值仿真将计算温度场时的外边界条件变成内边界条件,既简化了边界条件,又使得仿真更符合推力器的实际工作状态,提高了计算精度。

## 参考文献 (References)

- [1] Morio S, Katsuya I, Yoshihiro N. Very small solar thermal thruster made of single crystal tungsten for micro/nanosatellites [C]. 34th AIAA Joint Propulsion Conference and Exhibit, July 2000, Huntsville, Alabama.
- [2] Olsen A D, Cady E D, Jenkins D S, et al. Solar thermal upper stage cryogen system engineering checkout test [C]. 35th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, June 1999, Los Angeles, California.
- [3] Kennedy F G, Palmer P L. Preliminary design of a micro-scale solar thermal propulsion system [C]. 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 7 - 10 July 2002, Indianapolis, Indiana.
- [4] 杨杰,杨立军. 推进剂通道结构对太阳热发动机影响数值研究[J]. 航空动力学报, 2010, 25(5): 1156 - 1162. (in Chinese)  
YANG Jie, YANG Lijun. Effects of propellant heat groove configuration on solar thermal propulsion performance [J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(5): 1156 - 1162.
- [5] Liu W Q, Chen Q Z. The effect of transpiration cooling with liquid oxygen on the flow field [R]. AIAA 98 - 3515, 1998.
- [6] 郁新华,全栋梁,刘松龄,等. 层板结构内部流场数值模拟研究[J]. 航空学报, 2004, 25(6): 534 - 539.  
YU Xinhua, QUAN Dongliang, LIU Songling, et al. Numerical simulation of the internal flow in lamilloy [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004, 25(6): 534 - 539. (in Chinese)
- [7] 张纯良,王平. 太阳能火箭发动机吸热/推力室流场及性能计算[J]. 航空动力学报, 2006, 21(5): 943 - 948.  
ZHANG Chunliang, WANG Ping. Flow and performance calculation of absorber/thruster of solar thermal propulsion [J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(5): 943 - 948. (in Chinese)
- [8] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2版. 西安:西安交通大学出版社, 2001.  
TAO Wenquan. Numerical heat transfer [M]. second edition. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001. (in Chinese)