

# 不同流速对微型换热器性能影响研究

**摘要** 微通道换热器是一种高效换热设备，与普通换热器相比，微型换热器体积小，传热系数高，具有广泛的应用前景。微型换热器的实验研究存在较大的难度，而数值模拟则是深入研究微型换热器的重要方法。本文采用通用商用软件 comsol 模拟了微型错流式换热器 (MCHE) <sup>[1]</sup>。

与传统换热器不同，微型换热器固体材料内部沿流体流动方向的热传导会显著地影响换热性能，而以往针对这方面研究是非常有限的。在本文中，通过数值模拟的方法研究了流速对 MCHE 温度场、压力场、换热系数等的影响。

**关键词：**微型错流换热器，轴向导热，数值研究，总传热系数

## 引言

微化工设备主要包括微反应器、微换热器和微混合器等，与传统化工设备相比，由于设备特征尺度的微细化，微化工设备具有高传递速率、易于直接放大、设备安全性高、易于控制、适应面广等优点，可实现化工过程强化、微型化和绿色化。化学工业中有许多反应过程属于强放热反应过程，普遍存在爆炸的危险，对人类生命和自然环境等危害极大。而采用微化工技术实现反应过程强化与微型化，可大大提高过程的效率和安全性，将化工生产的危害降到最小 <sup>[2]</sup>。

微通道换热器是 20 世纪 90 年代发展起来的高效换热设备，是重要的微化工设备之一。与普通换热器相比，微型换热器体积小，换热面积大，传热系数高；在微电子、航空航天、医疗、化学生物工程等领域有重要的应用前景 <sup>[3]</sup>。

微型换热器的实验研究存在较大的难度，而数值模拟则是深入研究微型换热

器的重要方法。本文采用通用商用软件 comsol 模拟了微型错流式换热器（MCHE）

对于微型换热器，由于流体通道的水力学直径与间壁厚度相差不大，金属间壁内部沿流体流动方向的温差推动的热传导会引发“热返混”现象，即间壁固体内部的轴向导热会显著地影响换热器的效率，导致间壁径向的温差减小而降低换热性能<sup>[4]</sup>。而宏观尺寸传统换热器管壁的横截面面积远小于管道的总换热面积，轴向热阻远大于径向热阻，轴向导热的影响通常是非常有限的，可以忽略不计。因此微型换热器与宏观尺寸的换热器相比有很多差异。研究微型换热器与传统换热器的差异，并对影响其换热性能的因素并进行优化具有重要的意义<sup>[5]</sup>。

## 1.数值模型

### 1.1 几何模型

利用 comsol 直接建立三维模型，材料为不锈钢，流体通道为长方形截面，不是微型换热器中常见的圆形横截面。模型如下，

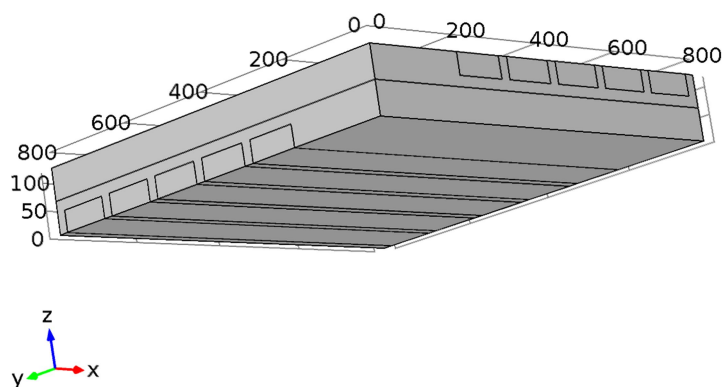


图 1 几何模型

## 1.2 网格划分与考核

利用 comsol 中的网格划分技术，是由物理场控制的情况下有软件自动划分网格，选择的网格类型是细化。网格统计为最小单元质量为 0.1712，平均单元质量 0.7675，四面体单元为 1244743，三角形单元为 126686。如下图：

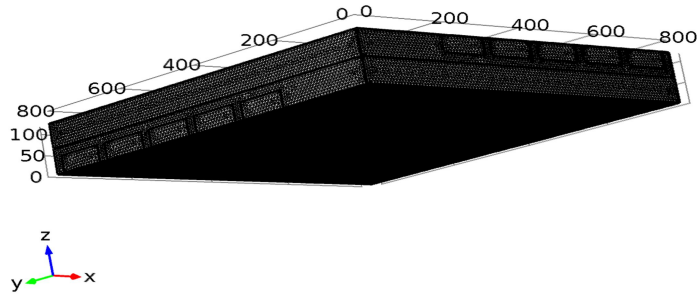


图 2 划分网格

## 1.3 控制方程

微型换热器流体的动量传递以及流体和导热材料内部的热量传递都遵循基本的控制方程，包括连续性方程、动量守恒方程和能量守恒方程。本文假设传递过程是稳态，流体不可压缩而且流动状态为层流，在这些假设条件下得到控制方程如下：

连续性方程又称质量守恒方程

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1.1)$$

式中， $u$  为流体的速度矢量。

动量方程为：

$$\rho u \cdot \nabla u = -\nabla p + \mu \nabla^2 u \quad (1.2)$$

式中， $\rho$ 为流体的密度， $p$ 为流体的压强， $\mu$ 为流体的粘度。

能量方程表述为微元体能量的增加率等于进入微元体的净热流量加上体力与面力对微元体所做的功。对于流体，有流体对流条件下的传热微分方程表示为：

$$\rho C_p u \cdot \nabla T = k_i \nabla^2 T \quad (1.3)$$

式中， $C_p$ 为流体的比热容， $k_i$ 为流体的热导率。

对于固体导热材料，无内热源存在的热传导方程如下：

$$k_w \nabla^2 T = 0 \quad (1.4)$$

式中， $k_w$ 为固体材料的热导率<sup>[6]</sup>。

## 1.4 边界条件

本文模拟选用的流体为水，热水温度为 330k，冷水温度为 300k，入口分别为 2.5mm/s, 3mm/s, 4mm/s, 5mm/s, 8mm/s 等不同的平均流入速度，材料选用的是不锈钢，出口边界条件为压力出口。

## 2 结果分析

### 温度分析

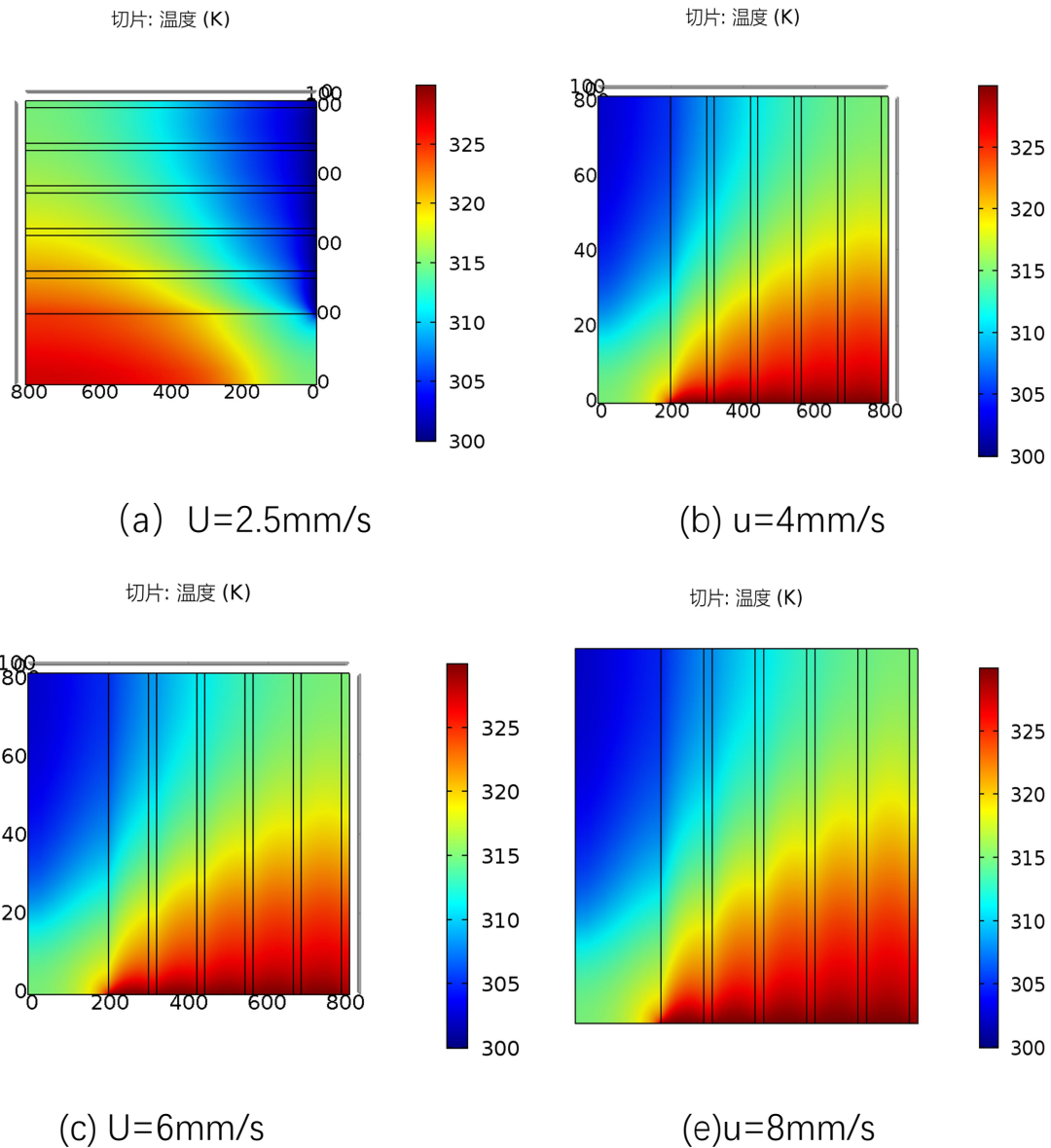


图 3 不同速度下的温度云图

从图 3 中分析可知，对流项对通道壁的温度分布的影响。当速度增大时，温度的分布并没有发生太大的变化，因此，在冷热流体的温度不变时，速度的变化并不影响对流项对温度分布的作用，而可能只和壁的材料和流体的温度有关。

压力分析

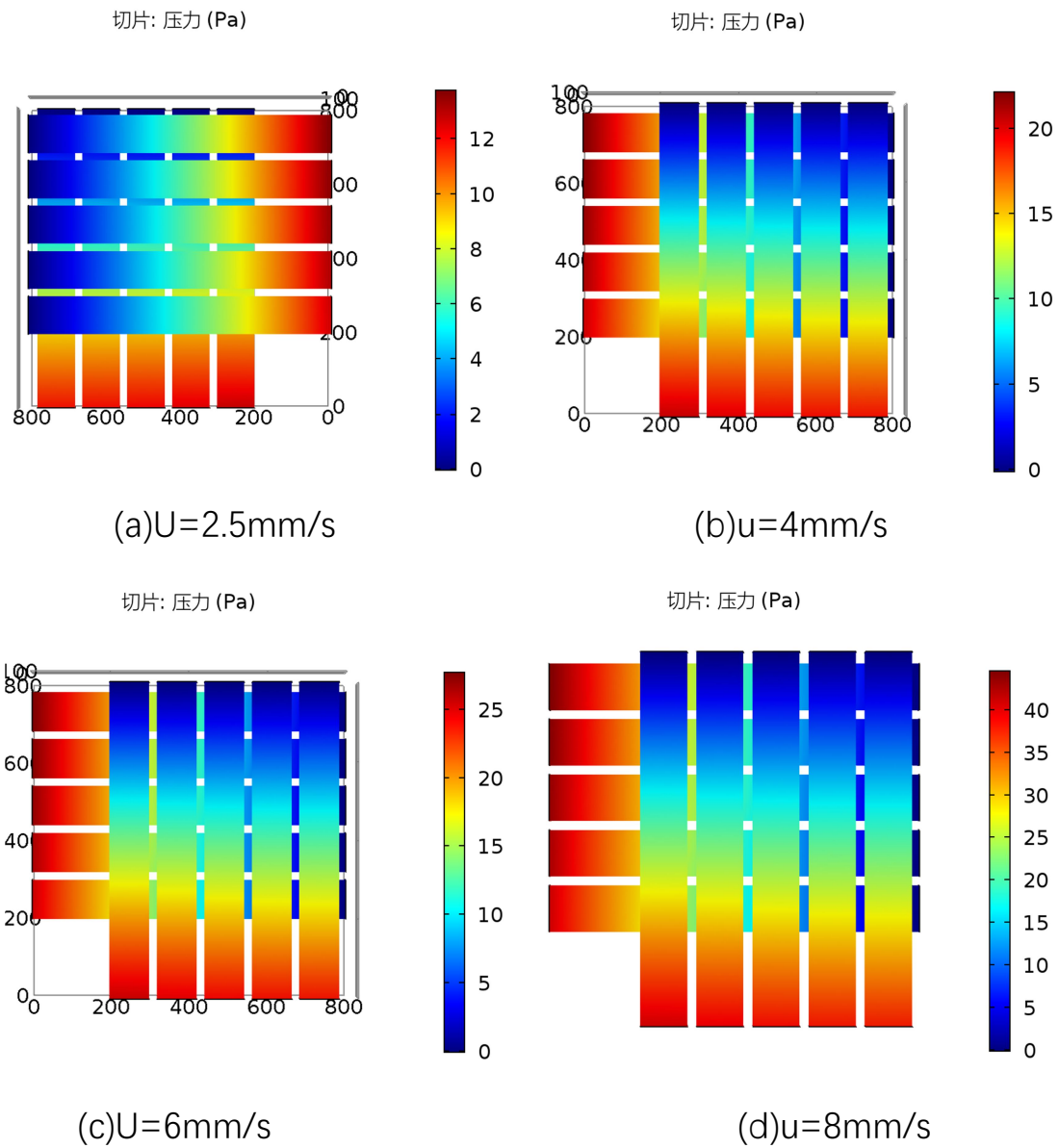


图 4 不同速度下的压力云图

从图 4 中分析可知，进口的压力较大，出口的压力较小，并且随着速度的增大，压力逐渐增加，与温度的分布刚好相反。

出口温度

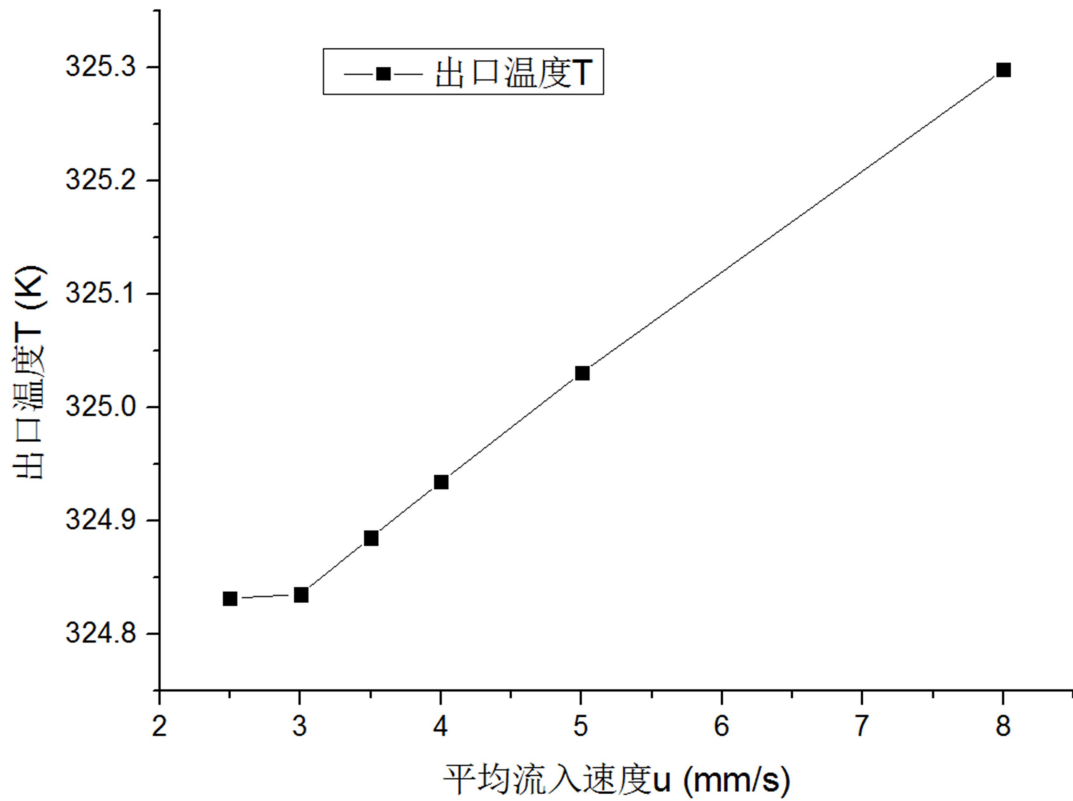


图 5 出口温度随平均流入速度的变化曲线

图 5 给出了错流微型换热器的出口最大温度随平均流入速度的变化趋势。如图所示，随着速度的增加，出口的温度逐渐增加，并且近似呈现处线性变化，可能由于在速度增大的过程中，导热系数增加，传热热阻减小，增大了传热效率。

传热系数分析

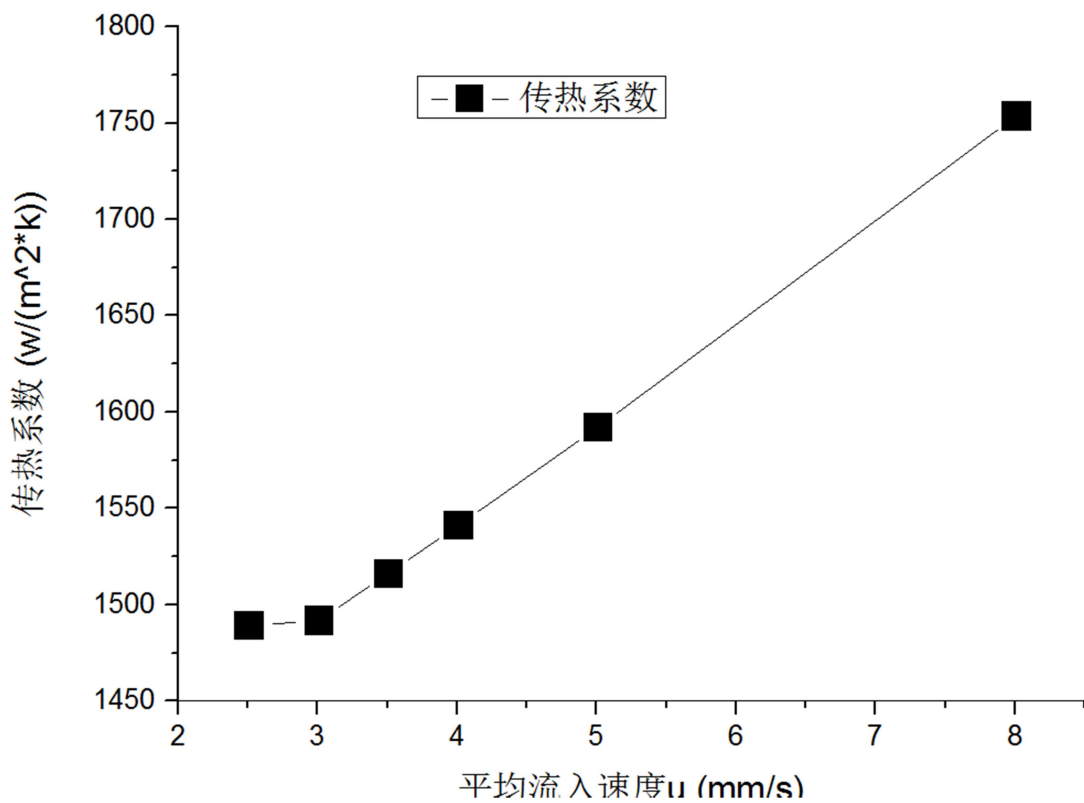


图 6 传热系数随平均流入速度的变化曲线

图 6 给出了错流微型液体换热器的传热系数随流体平均流入速度的变化趋势。如图所示，不同速度下的传热系数都随速度的增大而增大。传热系数是由对流和热传导的热阻共同决定，因为随着速度的增加，流体速度边界层减薄，对流换热增强，因此对流部分的热阻显著减小<sup>[7]</sup>。

## 压降分析



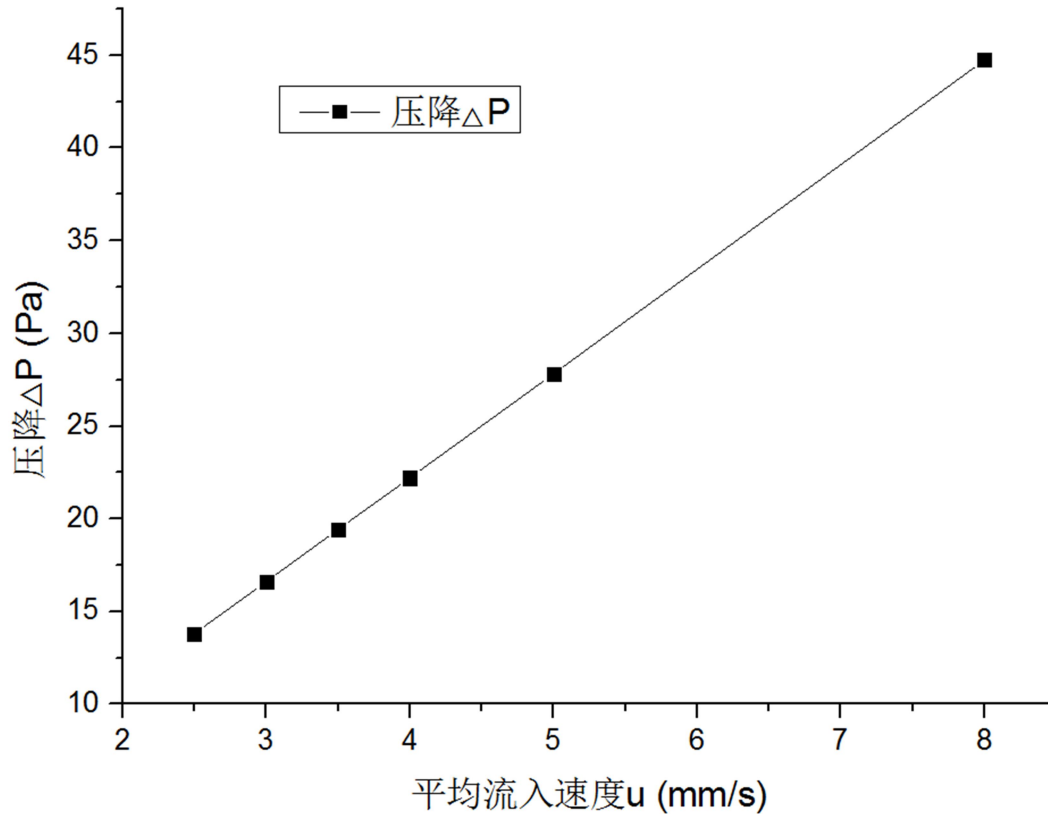


图 7 压降随平均流入速度的变化曲线

图 7 给出了错流微型液体换热器的压降随流体平均流入速度的变化趋势。当速度增加时，压降随着速度的增加呈现出线性的变化，速度越大，压降越大，和传热系数的变化相一致，间接的印证随着速度的增加，微型换热器的导热热阻减小<sup>[8]</sup>。

### 3 结论

- 1 对流项对通道壁的温度分布的影响。当速度增大时，温度的分布并没有发生太大的变化。
- 2 随着速度的增加，出口的温度逐渐增加，并且近似呈现处线性变化，可能由于在速度增大的过程中，导热系数增加，传热热阻减小，增大了传热效率。
- 3 不同速度下的传热系数都随速度的增大而增大

4 当速度增加时, 压降随着速度的增加呈现出线性的变化, 速度越大, 压降越大

## 参考文献

- [1] 段宏悦.错流微型换热器内导热影响的模拟研究[D].天津: 天津大学.2012
- [2] 牟薇.热传导对微型错流换热器换热性能影响的数值研究[D].天津:天津大学.2010
- [3] Tien C.L., Cunnington G.R., Recent advances in high-performance cryogenic thermal insulation. *Cryogenics*, 1972, 12(6): 419-421.
- [4] Becker E.W., Ehrfeld W., Hagmann P., et al., Fabrication of microstructures with high aspect ratios and great structural heights by synchrotron radiation lithography, galvanofforming, and plastic moulding (LIGA process). *Microelectronic Engineering*, 1986, 4(1): 35-56.
- [5] 吴江航, 韩庆书, 计算流体力学的理论、方法及应用[M], 北京: 科学出版社, 1998
- [6] 刘导治, 计算流体力学基础[M], 北京: :北京航空航天大学出版社, 1989
- [7] S V Patanker, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, Wshington, 2009,3(4):402-405
- [8] H K Versteeg, Malalasekera. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*:2007,50(17-18):3447-3460