

# 不同截面形状的矩形微通道流动传热特性及综合性能研究

范凌灏, 田茂诚, 张冠敏, 张明建

(山东大学能源与动力工程学院, 济南, 250061, Email: [384779057@qq.com](mailto:384779057@qq.com))

**摘要:** 基于连续介质假设, 针对去离子水在不同截面形状的硅基矩形微通道中流动传热问题, 采用变物性参数设置和数值模拟方法, 研究在通道当量直径不变和通道底面宽度不变两种情况下, 随着截面高宽比改变, 微通道压降、表观平均  $Nu$  等参数的变化趋势, 分析不同截面的矩形微通道流动传热特性, 同时通过热沉底面平均温度和评价因子  $j/f$  两个参数共同考量其综合性能。结果表明, 在通道当量直径不变的情况下, 增大截面高宽比, 微通道流动恶化, 对流传热强度提升, 评价因子  $j/f$  下降, 热沉底面平均温度下降但趋势渐缓; 当通道底面宽度不变时, 增大截面高宽比, 通道传热特性和热沉底面平均温度与上述情况变化趋势相同, 但流动情况好转, 评价因子  $j/f$  出现跳跃性增长后基本稳定不变。

**关键词:** 矩形微通道; 高宽比; 流动传热; 温度; 评价因子  $j/f$

## 1 引言

1959年, Feynman<sup>[1]</sup>在美国物理学会年会上发表了题为“*There is plenty of room at the bottom*”的报告, 报告中指出微电子机械系统(Micro-electromechanical System, MEMS)及微加工技术将会成为未来制造技术的重要发展趋势。由于温度及其分布严重影响着电子产品的性能, 高热流密度微型器件的散热量接近  $10^7 \text{W/m}^2$  量级, 因此研究微通道的流动传热特性, 改进微通道结构, 提高传热效率, 提升微通道热沉的综合性能有十分重要的意义。

## 2 模型描述

在图 1 中, 图 a 为矩形微通道热沉整体结构图, 总的散热面积为  $W \times L$ , 单个流道的横截面积为  $W_c \times H_c$ , 两个通道的间距为  $W_w$ , 热流密度  $q$  均匀加在微通道基底上, 基底厚度为  $H_b$  图 b 为微通道数值计算区域三维示意图, 数值模拟中选取最小的流动单元进行计算, 计算区域中间位置为充满去离子水的微通道, 两侧为硅基固体肋壁, 假设顶部绝热。

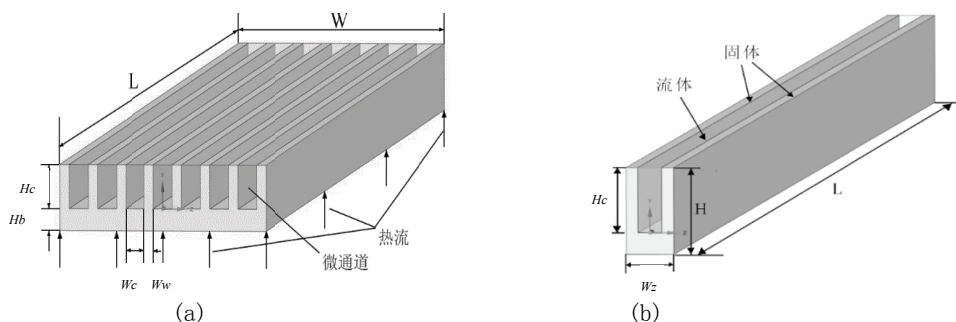


图1 矩形微通道热沉整体结构及计算单元示意图

Kandlikar 和 Grande<sup>[2]</sup>提出将  $D_h \geq 3\text{mm}$  作为常规通道的划分标准,  $D_h \leq 200\mu\text{m}$  作为微通道的划分标准, 本文所研究的微通道水力直径  $D_h$  均小于  $0.2\text{mm}$ 。

在微通道中, 流体温度沿流动方向变化大, 温度对流体热物性参数的影响不可忽略, 数值计算中设置去离子水的导热系数和动力粘度随温度变化, 其经验关系式如式(1)所示。去离子水的其他物性参数及固体硅的物性参数均为常数, 如表(1)所示。

$$\Lambda = -0.51402 + 0.00532T - 3.35719 \times 10^{-6}T^2 - 6.23349 \times 10^{-9}T^3 \quad (1a)$$

$$\mu = 0.11157 - 9.51523 \times 10^{-4}T + 2.7249 \times 10^{-6}T^2 - 2.61107 \times 10^{-9}T^3 \quad (1b)$$

表1 去离子水和硅的恒定物性参数

物性参数	水	硅
$c_p(\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K})$	4183	712
$\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	998.2	2329
$\lambda(\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}))$	-	148

综上所述, 为了简化运算, 对微通道内流体流动传热过程作以下假设: ①数值模拟选取的  $Re$  较小 ( $185 \sim 827$ ), 微通道内流体属于稳态、不可压缩、层流流动; ②微通道内去离子水为牛顿流体; ③流体的导热系数和动力粘度随温度变化, 流体的其他物性参数及固体的物性参数为常数; ④忽略重力及其他体积力、热辐射的影响。

矩形微通道中单相流体流动传热问题的连续性方程、动量方程、能量方程如下:

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0 \quad (2)$$

$$\rho_f (\vec{U} \cdot \nabla \vec{U}) = -\nabla P + \nabla (\mu_f \nabla \vec{U}) \quad (3)$$

$$\rho_f c_{p,f} (\vec{U} \cdot \nabla T_f) = \nabla (\lambda_f \nabla T_f) + \Phi \quad (4)$$

式中  $\rho_f, c_{p,f}, \lambda_f, \mu_f$  分别为流体密度, 流体比热容, 流体导热系数, 流体动力黏度。  $\Phi$  是耗散函数, 即因粘性作用, 由机械能转换为热能的部分。

本文采用 FLUENT 软件进行三维数值模拟计算。矩形微通道入口为速度入口边界条件, 模拟中选取入口流速  $u_{in}=1、2、3、4、5\text{m/s}$ , 入口处流体温度  $T_{in}=293\text{K}$ ; 微通道出口为压

力出口边界条件，即  $p_{out}=0$ ；计算域底面为恒热流边界条件  $q=100W/cm^2$ ，其他表面为绝热边界条件；流体和壁面的交界面无速度滑移，并设置为流固耦合边界。

为验证本文模拟结果的可靠性，将矩形微通道的数值模拟结果与理论值进行对比。对于矩形微通道内的层流流动，Shah<sup>[3]</sup>等提出的表观平均摩擦系数表达式为：

$$f Re = \sqrt{\left(\frac{3.2}{L/ReD_h}\right)^2 + Po^2} \quad (5)$$

图2给出了不同Re数下高宽比为4、特征长度为0.16mm、长度10mm的矩形微通道表观平均摩擦系数数值模拟结果与理论计算值对比。从图中得出，在设定的Re范围内，模拟结果与理论结果一致性较好，最大相对误差分别为6.24%，在工程应用允许的范围。

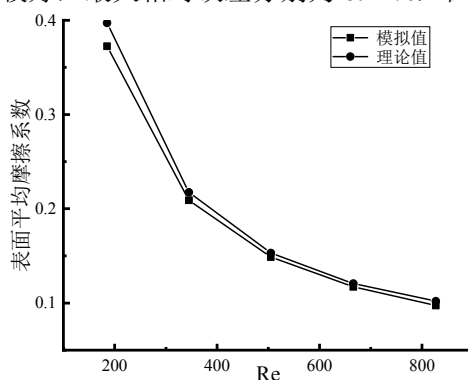


图2 矩形微通道平均表观摩擦系数

### 3 结果与讨论

#### 3.1 高宽比对微通道流动特性影响

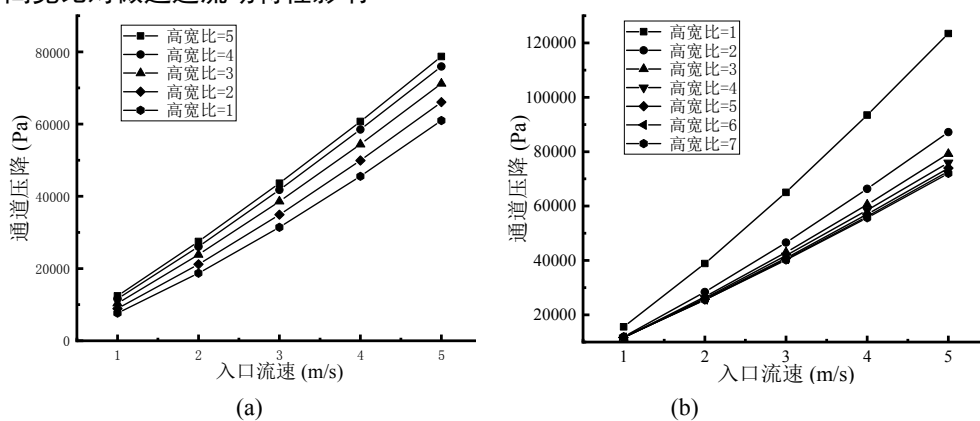


图3 高宽比对矩形微通道压降的影响

图 3 给出了 (a) 微通道特征长度为 0.16mm 不变; (b) 在微通道底面宽度  $W_c$  为 0.1mm 不变两种情况下, 随入口速度增加, 不同截面高宽比矩形微通道压降变化情况。

压降用以表征流体流动时所受到阻力的大小, 反映流体流动性能的优劣。从图 3 可以看出, 入口流速增加, 通道压降升高。图 3 (a) 指出, 在微通道特征长度不变时, 通道压降随高宽比增加而升高且增幅减小。图 3 (b) 指出, 在保持在微通道底面宽度  $W_c$  为 0.1mm 不变时, 通道压降随高宽比增加而降低且降幅减小, 高宽比从 1 到 2 时, 通道压降出现阶跃性降低, 降幅约为 28%, 而后增大通道高宽比, 压降降幅明显减小, 通道压降趋于稳定。

### 3.2 高宽比对微通道传热特性影响

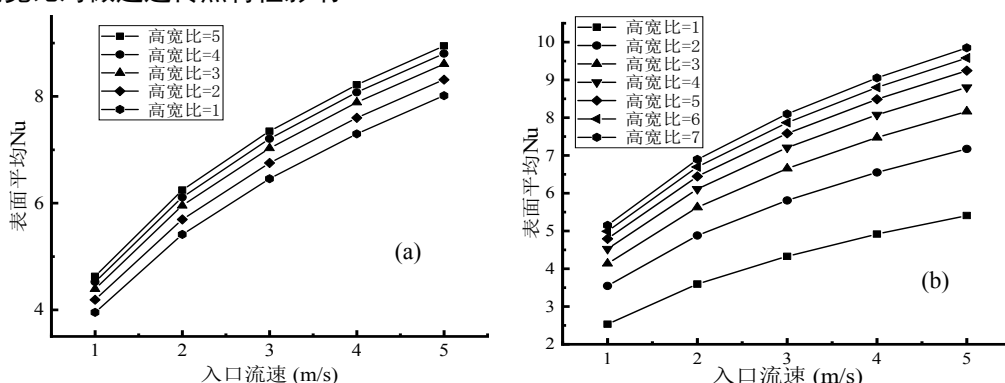


图 4 高宽比对矩形微通道表面平均 Nu 的影响

图 4 给出了 (a) 微通道特征长度为 0.16mm 不变; (b) 微通道底面宽度  $W_c$  为 0.1mm 不变两种情况下, 随入口速度增加, 不同截面高宽比的矩形微通道平均 Nu 变化情况。

努赛尔数是层流底层的导热系数与对流换热系数的比值, 表征对流换热强烈程度。从图 4 得出, 随入口流速增加, 通道平均 Nu 升高。图 4 (a) 指出, 在保持微通道特征长度不变的情况下, 通道平均 Nu 随截面高宽比的增加而升高, 且增幅不断减小。图 4 (b) 指出, 在保持在微通道底面宽度  $W_c$  为 0.1mm 不变的情况下, 通道平均 Nu 变化趋势相同, 当截面高宽比从 1 增大到 2 时, 平均 Nu 出现阶跃性增加, 增幅约为 32%, 而后增幅逐渐减小, 通道平均 Nu 趋于稳定。

### 3.3 高宽比对微通道综合性能影响

图 5 和图 6 分别给出了 (a) 微通道特征长度为 0.16mm 不变; (b) 保持在微通道底面宽度  $W_c$  为 0.1mm 两种情况下, 随入口速度增加, 不同截面高宽比的矩形微通道热沉底面平均温度和评价因子  $j/f$  的变化情况。

从图 5 可以看出, 随入口流速增加, 热沉底面平均温度降低。在两种情况下, 热沉底面平均温度随截面高宽比增加而降低且降幅不断减小, 高宽比从 1~2 时, 均出现阶跃性降低, 而后增大通道高宽比, 降幅明显减小, 热沉底面平均温度趋于稳定, 约为 300K。

Kays 和 London<sup>[4]</sup>提出用  $j/f$  因子来表征换热器性能的优劣, 评价因子越大, 则表示换热

器综合性能越好。从图 6 中可以看出,随着通道入口流速增加,评价因子升高,通道综合性能提升。图 6 (a) 指出,在保持微通道特征长度不变时,评价因子随截面高宽比的增加而降低且增幅不断减小,通道综合性能降低。图 6 (b) 指出,在保持在微通道底面宽度  $W_c$  为 0.1mm 不变时,当高宽比从 1 增大到 2 时,评价因子出现阶跃性增加,增幅约为 10%,而后增大高宽比,评价因子大小基本不变,通道综合性能稳定。

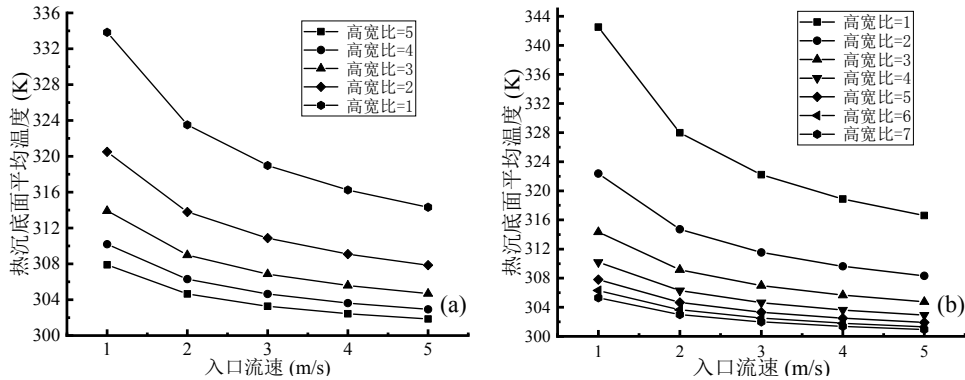
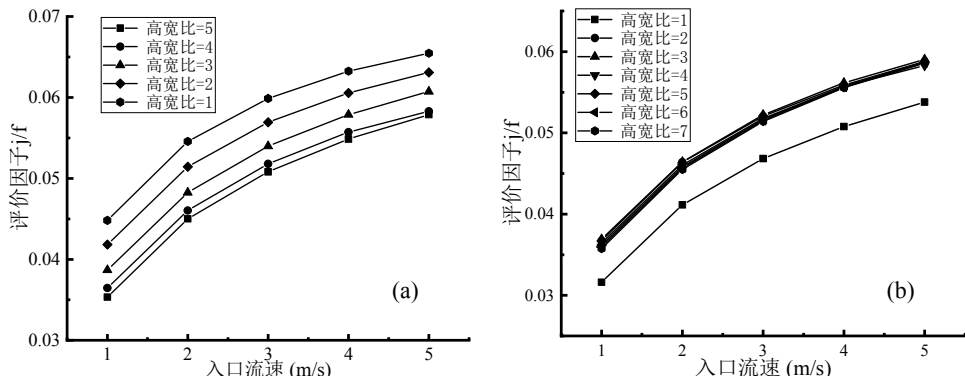


图 5 高宽比对矩形微通道热沉底面平均温度的影响

图 6 高宽比对矩形微通道评价因子  $j/f$  的影响

## 4 结论

(1) 在矩形微通道当量直径不变的情况下,增大截面高宽比,微通道压降升高,流动恶化,通道表面平均  $Nu$  升高,传热性能提升,评价因子下降,微通道换热器综合性能降低,热沉底面平均温度下降且趋势渐缓。

(2) 在矩形微通道底面宽度不变的情况下,增大截面高宽比,微通道压降降低,流动情况好转,通道表面平均  $Nu$  升高,传热特性提升,评价因子出现阶跃性增长后基本稳定不变,微通道换热器综合性能变化与评价因子一致,热沉底面平均温度下降且趋势渐缓;

## 参 考 文 献

1. Feynman R P . There's plenty of room at the bottom [data storage][J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 1992, 1(1):60-66.
2. Kandlikar S G , Grande W J . Evolution of Microchannel Flow Passages--Thermohydraulic Performance and Fabrication Technology[J]. 2003, 24(1):3-17.
3. Shah, R. K . Laminar Flow Forced Convection in Ducts || Longitudinal Fins and Twisted Tapes within Ducts[J]. 1978:366-384.
4. W. M. 凯斯, A. L. 伦敦. 紧凑式热交换器[M]. 北京: 科学出版社, 1997.

### **Research on flow heat transfer characteristics and comprehensive properties of micro-channels with different cross-section shapes**

FAN Ling-hao, TIAN Mao-cheng, ZHANG Guan-min, ZHANG Ming-jian

(School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan, 250061 Email: [384779057@qq.com](mailto:384779057@qq.com))

**Abstract:** In this paper, based on the continuum hypothesis, the flow and heat transfer of deionized water in silicon-based rectangular micro-channels with different cross-section shapes are studied by means of variable property parameter setting and numerical simulation. Under the condition that the equivalent diameter of the channel remains unchanged and the width of the underside of the channel remains unchanged, the variation trend of the micro-channel pressure drop, the apparent mean Nu and other parameters along with the change of the section aspect ratio is analyzed. In this way, the flow heat transfer characteristics of rectangular micro-channels with different sections are explored, and their comprehensive performance is considered through the average temperature of the hot bottom surface and the evaluation factor  $j/f$ . The results show that when the equivalent diameter of the channel remains unchanged, the section aspect ratio increases, the micro-channel flow deteriorates, the convective heat transfer intensity increases, the evaluation factor  $j/f$  decreases, and the average temperature of the thermal bottom surface decreases but the trend slows down. When the width of the bottom surface of the channel remains unchanged, the aspect ratio of the section increases. The heat transfer characteristics and the average temperature of the hot bottom surface of the channel have the same change trend as above, but the flow condition improves, the evaluation factor  $j/f$  is stable and unchanged after the step growth.

**Key words:** Rectangular microchannel; Aspect ratio; Flow heat transfer; Temperature; Evaluation factor  $j/f$