

研究论文

# 定热通量加热下微三角形槽道中 滑移流动的换热特性

朱 恂 辛明道

(重庆大学工程热物理研究所, 重庆 400044)

**摘 要** 微三角形截面通道是现代工程实际应用中常涉及到的流动通道. 针对微三角形槽道利用正交函数法求解了滑移流区内带温度跳跃边界条件的能量方程, 对不可压缩气体在微三角形槽道内充分发展层流滑移流动的换热特性进行了理论分析, 获得了轴向定热通量加热、周向均匀壁面温度条件下微三角形槽道内的温度分布和换热特性的分析解. 计算结果表明: 正交函数法适用于微三角形槽道内滑移流动换热特性的分析计算; 在滑移流区, 微三角形槽道内的平均 Nusselt 数随 Knudsen 数的增加而减小, 其随高宽比变化的分布曲线随 Knudsen 数的增加而平行下移, Nusselt 数随 Knudsen 数的变化关系基本不受高宽比的影响.

**关键词** 滑移流区 微三角形槽道 换热特性

**中图分类号** TK 124

**文献标识码** A

**文章编号** 0438-1157 (2004) 07-1060-06

## ANALYSIS OF HEAT TRANSFER FOR GAS SLIP FLOW IN TRIANGULAR MICRO-CHANNELS WITH UNIFORM HEAT FLUX

ZHU Xun and XIN Mingdao

(Institute of Engineering Thermophysics, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract** In this paper a theoretical analysis of heat transfer characteristics is presented for the fully developed laminar flow of the incompressible gas in the triangular microchannels in slip flow regime. The energy equation with the temperature jump boundary conditions is solved by using a computation-oriented method of the orthonormal function analysis in the triangular microchannels heated with uniform heat flux along flowing direction and with isothermal walls. The theoretical calculations of dimensionless temperature profiles and the average Nusselt number in the microchannels are obtained. The results show that the orthonormal function method is applicable to study the heat transfer characteristics in the triangular microchannels. The average Nusselt number in triangular microchannels is lower for slip flow than that for no-slip flow, and decreases with increasing Knudsen number. The relation curve of average Nusselt number *vs* the aspect ratio of the triangular microchannels moves downward parallelly with increasing Knudsen number.

**Keywords** slip flow regime, triangular microchannel, heat transfer

### 引 言

各种微槽道的对流传热问题是近年来一个活跃

的前沿研究领域. 由微槽道构成的微型换热器具有结构紧凑、热负荷高等优点, 在解决集成电路的散热、超导技术中的低温冷却以及航空航天领域相关

2003-03-31 收到初稿, 2003-07-25 收到修改稿.

**联系人及第一作者:** 朱恂, 女, 34 岁, 博士, 副教授.

**基金项目:** 国家自然科学基金“九五”重大资助项目

(No. 59995550-3).

**Received date:** 2003-03-31.

**Corresponding author:** Dr. ZHU Xun. **E-mail:** lqzx@cqu.edu.cn

**Foundation item:** supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 59995550-3).

工程问题的应用中都表现出了非常乐观的应用前景。由于目前发展中的微尺度热流体系统控制尺度的减小, 反映气体分子自由程与特征尺度之比的 Knudsen 数进入了  $10^{-3} \sim 10^{-1}$  的速度滑移和温度跳跃区, 因此对微尺度热流体系统的研究必须考虑滑移流动及温度跳跃的影响。1981 年 Tuckerman<sup>[1]</sup> 以水为冷却介质在  $50 \mu\text{m}$  宽、 $300 \mu\text{m}$  深的平行槽道内进行了换热实验, 结果表明冷却剂温升为  $71 \text{ }^\circ\text{C}$ 、压降  $350 \text{ kPa}$  下可散热  $790 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。此后 Choi<sup>[2]</sup>、Yu<sup>[3]</sup>、Wu<sup>[4]</sup> 和 Adams<sup>[5]</sup> 等分别以氮气以及蒸馏水等为工质对微圆管、微矩形槽道及微平行平板槽道内的换热性能进行了实验研究; Rujano<sup>[6]</sup> 对高热流密度电子设备中梯形微槽冷却器内水力及热力发展层流流动与换热过程在曲线坐标系统下采用控制容积法进行了数值研究, 获得了相应的速度分布、温度分布及 Nusselt 数等; Kavehpour<sup>[7]</sup> 利用控制容积有限差分方法对定热通量和等壁温加热条件下微平行平板通道内的换热特性进行了求解, 讨论了气体可压缩性及稀薄性对换热的影响; Barron<sup>[8]</sup> 利用分离变量法将圆管内的 Graetz 问题延伸到了滑移流区, 获得滑移流动条件下的特征函数及特征值; Yu<sup>[9]</sup> 采用修正的积分变换方法对均匀定热通量加热下的微矩形槽道内水力充分发展的热进口段流动换热进行了分析; 作者<sup>[10,11]</sup> 采用直接积分法获得了非均匀加热条件下微平行平板、微环缝通道内换热特性的解析解。

微三角形截面通道为工程实际应用中的常见通道, 如微间距紧凑式叉流气-气换热器、微多孔管换热器、微间距管带式换热器等均涉及到微三角形截面通道内的流动与换热问题。同时, 由于三角形等微小异形截面通道较之微圆管通道更接近多孔介质内流道的特点, 因此对类似于三角形等微小异形截面通道内流动与换热特性的研究将了解微多孔介质内的流动与换热特性打下基础。但目前该方面的实验及理论分析都尚未见到有关研究论文报道, 仅见作者<sup>[12]</sup> 对三角形微槽内的滑移流动特性进行了理论分析。本文将利用正交函数法对微三角形槽道内充分发展层流滑移流动的换热特性进行理论研究。

## 1 方程的建立与求解

所分析的微三角形槽道及坐标的建立如图 1 所示, 气体在该种微槽中的流动为水力充分发展和热

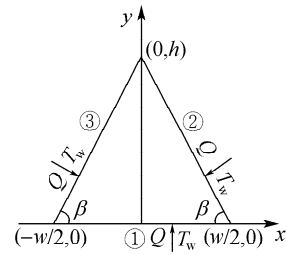


Fig. 1 Physical model and co-ordinates for triangular microchannel with isothermal walls (case 1)

充分发展的层流流动, 忽略气体的可压缩影响。考虑沿流动方向单位长度热通量  $Q$  为定值, 而微槽的周向边界为均匀等壁温  $T_w$ 。由于在滑移流区, 流体温度在近壁面处不等于微槽壁面温度, 而存在温度跳跃现象, 因此, 此时的控制方程和边界条件为:

能量方程

$$\rho c_p u \frac{\partial T}{\partial z} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

边界条件

$$T(x_c, y_c) = T_w - \xi'_T \lambda \left( l \frac{\partial T}{\partial x} + m \frac{\partial T}{\partial y} \right)_c \quad (2)$$

式中  $\xi'_T = \left( \frac{2 - \sigma_T}{\sigma_T} \right) \left( \frac{\nu}{\nu + 1} \right) \left( \frac{2}{Pr} \right)$ ,  $\sigma_T$  为热协调系数, 反映入射的气体分子与壁面之间能量交换的完善程度, 依赖于表面粗糙度、温度及气体种类等, 热协调系数的实验数据可由相关文献<sup>[13]</sup> 查得, 对于常用的工程材料表面, 通常取  $\sigma_T = 0.8$ <sup>[14]</sup>。 $\nu$  为气体的比热比,  $Pr$  为气体的 Prandtl 数;  $\lambda$  为气体分子平均自由程 [ $\lambda = (\mu/\rho) \sqrt{\pi/(2RT)}$ ];  $l$  和  $m$  分别为微三角形槽道各壁面的方向余弦, 微三角形槽道底边、斜边②及斜边③的方向余弦分别为  $(0, -1)$ 、 $(\sin\beta, \cos\beta)$ 、 $(-\sin\beta, \cos\beta)$ 。引入量纲 1 参数

$$X = \frac{x}{D_h}, Y = \frac{y}{D_h}, U = \frac{u}{u_m}, \theta = \frac{T - T_w}{\frac{Q f Re D_h^2}{kA} 2}$$

$$\gamma = \frac{h}{w}, W = \frac{w}{D_h}, H = \frac{h}{D_h}, Kn = \frac{\lambda}{D_h}$$

并由文献 [12] 引入速度比

$$\frac{u}{u_m} = \frac{f Re}{2} \left[ \sum_{i=1}^N B_i G_i(X, Y) - \frac{1}{4} (X^2 + Y^2) \right] \quad (3)$$

此外, 令

$$\theta(X, Y) = \theta^*(X, Y) + \sum_{i=1}^N B_i H_i(X, Y) - \frac{X^2 + Y^2}{48} \quad (4)$$

式中

$$G_i(X,Y) = \frac{\partial^2 H_i(X,Y)}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 H_i(X,Y)}{\partial Y^2} \quad (5)$$

同时考虑定热通量加热条件下的热充分发展流动, 则能量方程转换为

$$\frac{\partial^2 \theta^*(X,Y)}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta^*(X,Y)}{\partial Y^2} = 0 \quad (6)$$

边界条件也相应转变为

$$\begin{aligned} \theta^*(X_c, Y_c) + \sum_{i=1}^N B_i H_i(X_c, Y_c) - \frac{1}{48}(X^4 + Y^4) \\ = -\xi'_T Kn \left\{ l \left[ \theta^*(X_c, Y_c) + \sum_{i=1}^N B_i \frac{\partial H_i(X_c, Y_c)}{\partial X} - \frac{1}{12} X_c^3 \right] + \right. \\ \left. m \left[ \theta^*(X_c, Y_c) + \sum_{i=1}^N B_i \frac{\partial H_i(X_c, Y_c)}{\partial Y} - \frac{1}{12} Y_c^3 \right] \right\} \quad (7) \end{aligned}$$

可以看出, 式(6)是变量  $\theta^*(X, Y)$  的 Laplace 方程形式, 则复变函数  $(X + iY)^n$  ( $n=0, 1, 2, \dots, N$ ) 的实部和虚部即均为其精确特解, 在此以函数  $G_i(X, Y)$  表示, 即  $G_1(X, Y) = 1, G_2(X, Y) = X, G_3(X, Y) = Y, G_4(X, Y) = X^2 - Y^2, G_5(X, Y) = 2XY$  等, 以此类推. 显然, 各项特解之和仍为方程的解, 项数  $N$  的取值决定了计算误差的大小. 因此方程(6)的解可以表示为

$$\theta^*(X,Y) = \sum_{i=1}^N D_i G_i(X,Y) \quad (8)$$

式中  $D_i$  为待定任意常数, 由边界条件决定. 将该解应用于边界条件(7), 并进行整理可得

$$\sum_{i=1}^N D_i G T_i(X,Y,Kn,l,m) = FT(X,Y,Kn,l,m) \quad (9)$$

式中

$$\begin{aligned} G T_i(X,Y,Kn,l,m) \\ = -\xi'_T Kn \left[ l \frac{\partial G_i(X,Y)}{\partial X} + m \frac{\partial G_i(X,Y)}{\partial Y} \right] - G_i(X,Y) \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} FT(X,Y,Kn,l,m) = \sum_{i=1}^N B_i H_i(x,y) - \frac{1}{48}(X_c^4 + Y_c^4) + \xi'_T Kn \times \\ \left[ l \sum_{i=1}^N B_i \frac{\partial H_i(x,y)}{\partial X} + m \sum_{i=1}^N B_i \frac{\partial H_i(x,y)}{\partial Y} - \frac{1}{12}(lX_c^3 + mY_c^3) \right] \quad (11) \end{aligned}$$

从上两式可以看出,  $G T_i(X, Y, Kn, l, m)$  是与能量方程的解有关的函数, 而  $FT(X, Y, Kn, l, m)$  是与边界条件有关的函数. 为了确定待定常数  $D_i$ , 利用 Gram-Schmidt 方法, 以函数族  $G T_i(X, Y, Kn, l, m)$  为基础, 构建一个正交化函数系  $\varphi T_i(X, Y, Kn, l, m)$ .

$$\varphi T_i(X,Y,Kn,l,m) = \sum_{k=1}^i \beta T_{ik} G T_k(X,Y,Kn,l,m) \quad (12)$$

式中  $\beta T_{ik}$  为正交化常数. 而对于函数  $FT(X_c, Y_c, Kn, l, m)$ , 可以将之在所构建的正交化函数系基础上展开成 Fourier 级数

$$FT(X_c, Y_c, Kn, l, m) = \sum_{i=1}^N E_i \varphi T_i(X_c, Y_c, Kn, l, m) \quad (13)$$

式中 Fourier 系数  $E_i$  由下式确定

$$E_i = \oint_C FT(X_c, Y_c, Kn, l, m) \varphi T_i(X_c, Y_c, Kn, l, m) ds \quad (14)$$

综合整理式(9)、式(12)、式(13), 可以得到待定系数

$$D_i = \sum_{j=1}^N E_j \beta T_{ji} \quad (15)$$

因此, 根据 Gram-Schmidt 正交化程序求出正交化常数  $\beta T_{ji}$ , 再通过沿微槽横截面周线计算线积分得出 Fourier 系数  $E_j$  后, 即可求得系数  $D_i$ , 从而获得在轴向定热通量加热、周向均匀等壁温条件下微三角形槽道内滑移流动换热的温度分布  $\theta(X, Y)$ , 即

$$\theta(X,Y) = \sum_{i=1}^N D_i G_i(X,Y) + \sum_{i=1}^N B_i H_i(X,Y) \quad (16)$$

定义该条件下微槽内气体流动的截面平均传热系数为

$$\bar{\alpha} = \frac{Q/P}{(T_w - T_m)} = - \frac{1}{\left(\frac{P}{kA}\right) \left(\frac{fReD_h^2}{2}\right)} \theta_m \quad (17)$$

则微槽内换热的平均 Nusselt 数为

$$\begin{aligned} \overline{Nu} = \frac{\bar{\alpha} D_h}{k} \\ = - \frac{WH / [2(fRe)^2]}{\int_0^H \int_{(Y-H)/2Y}^{(H-Y)/2Y} \left[ \sum_{i=1}^N B_i G_i(X,Y) - \frac{1}{4}(X^2 + Y^2) \right] \theta(X,Y) dXdY} \quad (18) \end{aligned}$$

则根据温度分布式(16)、文献[12]求出的微三角形槽道内的流动阻力特性, 即可获得定热通量加热条件下微三角形槽道内滑移流动的换热特性.

## 2 计算结果及分析

为了验证本分析计算方法的正确性, 首先对  $Kn=0$  时, 即连续流动下气体在不同高宽比微三角形槽道内的平均 Nusselt 数 ( $\overline{Nu}$ ) 进行计算, 并与 Sadik Kakac<sup>[15]</sup> 的结果进行了比较, 如图 2 所示. 由图可看出, 计算结果与大尺度三角形槽道内

的连续流动、轴向定热通量、周向等壁温加热条件下的换热特性 ( $Nu_{HI}$ : case 1) 相当吻合. 此外, 作者还曾应用该分析计算方法对滑移流区内微矩形槽道内的滑移流动特性进行过计算, 并与前人的实验数据进行了比较<sup>[16]</sup>, 结果表明计算值与实验数据比较吻合.

其次, 计算了滑移流区微三角形槽道中定热通量加热条件下的换热特性, 计算结果如图 3 和图 4 所示. 图 3 反映了在不同  $Kn$  下微槽内  $\overline{Nu}$  随微槽高宽比的变化规律. 从图中可看出, 随着  $Kn$  的增大,  $\overline{Nu}$  减小, 且不同高宽比下  $\overline{Nu}$  的减小程度相差不多, 这使得  $\overline{Nu}$  随高宽比的分布曲线基本上是平行下移. 图 4 反映了不同高宽比下微槽内的  $\overline{Nu}$  与相同加热条件下常规大槽道内平均 Nusselt 数之比 ( $\overline{Nu}/Nu_0$ ) 随  $Kn$  的变化关系. 由图可知, 由于滑移流动及温度跳跃的影响, 微槽内换热性能下降, 使得  $\overline{Nu}/Nu_0$  随着  $Kn$  的增加而下降, 此外, 在相同  $Kn$  下, 高宽比很小时的  $\overline{Nu}/Nu_0$  比其他高宽比时的  $\overline{Nu}/Nu_0$  要略大, 这可能是由于高宽比小的微三角形槽道中角区的影响减弱所致; 而在大部分的高宽比范围内, 周向均匀等壁温条件下的  $\overline{Nu}/Nu_0$  随  $Kn$  的变化关系基本不受高宽比的影响, 也即其换热性能下降的相对程度一致.

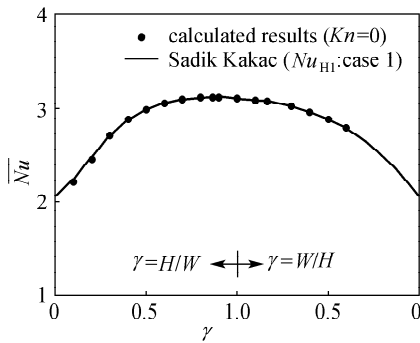


Fig. 2 Comparison of calculated results at  $Kn=0$  with that of continuum model for average Nusselt number of case 1 in triangular microchannels

为方便本理论计算结果的应用, 微三角形槽道轴向定热通量加热、周向均匀等壁温条件下的换热特性的计算结果如表 1、表 2 所示. 最后, 对均匀加热边界条件下微正三角形槽道内的换热特性进行相应的拟合, 得到以下计算关联式

$$\overline{Nu} = Nu_0(1 - 0.0448Kn - 31.9Kn^2 + 246Kn^3 - 714Kn^4) \quad (19)$$

关联式的最大相对误差为  $-0.04\% \sim +0.01\%$ .

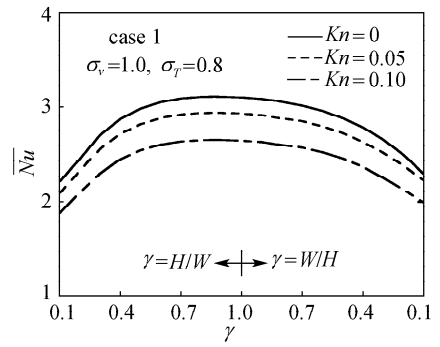


Fig. 3 Effects of  $Kn$  on average Nusselt number of case 1 in triangular microchannels

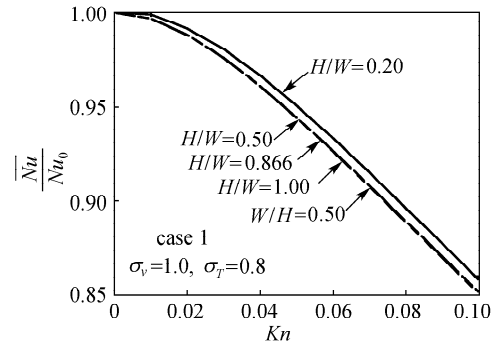


Fig. 4 Influence of aspect ratio on average Nusselt ratio for case 1 in triangular microchannels

Table 1 Average Nusselt number in triangular microchannels with isothermal walls

$\gamma$	$\overline{Nu}$ ( $Kn=0$ )	$\overline{Nu}$ ( $Kn=0.05$ )	$\overline{Nu}$ ( $Kn=0.10$ )
0.1	2.2137	2.0896	1.8782
0.2	2.4451	2.3246	2.0979
0.3	2.6981	2.5513	2.2982
0.4	2.8718	2.7114	2.4420
0.5	2.9834	2.8170	2.5382
0.6	3.0525	2.8827	2.5981
0.7	3.0912	2.9194	2.6316
0.8	3.1084	2.9356	2.6464
0.866	3.111	2.9382	2.6487
0.9	3.1105	2.9376	2.6482
1.0	3.1024	2.9300	2.6412
1.11	3.0857	2.9143	2.6270
1.25	3.0682	2.8876	2.6027
1.43	3.0156	2.8480	2.5667
1.67	2.9573	2.7928	2.5165
2.0	2.8813	2.7205	2.4506
2.5	2.7826	2.6259	2.3642

**Table 2 Average Nusselt number in triangular microchannels with isothermal walls**

Kn	$\overline{Nu}$				
	$\gamma=0.2$	$\gamma=0.5$	$\gamma=0.866$	$\gamma=1.0$	$\gamma=2.0$
0	2.4451	2.9834	3.111	3.1024	2.8813
0.01	2.4416	2.9736	3.1011	3.0924	2.8718
0.02	2.4247	2.9482	3.0747	3.0661	2.8473
0.03	2.3978	2.9115	3.0366	3.0281	2.8119
0.04	2.3638	2.867	2.9902	2.9818	2.7688
0.05	2.3246	2.817	2.9382	2.93	2.7205
0.06	2.2820	2.7635	2.8826	2.8745	2.6687
0.07	2.2371	2.7079	2.8249	2.8169	2.615
0.08	2.1911	2.6514	2.7661	2.7583	2.5602
0.09	2.1445	2.5946	2.7072	2.6996	2.5053
0.1	2.0979	2.5382	2.6487	2.6412	2.4506

### 3 结 论

(1) 采用正交化函数法分析了轴向定热通量加热、周向均匀等壁温条件下微三角形槽道中滑移流动的换热特性，获得了该边界条件下的温度分布及平均 Nusselt 数的理论计算式，并拟合得到微正三角形槽道内换热特性的计算关联式。

(2) 通过对微三角形槽道的换热特性计算可知，微三角形槽道内的平均 Nusselt 数低于相同加热条件下大尺度三角形槽道中的 Nusselt 数，且随 Knudsen 数的增加而减小。

(3) 微三角形槽道中  $\overline{Nu}$  随高宽比的分布曲线随 Knudsen 数的增加而平行下移；在大部分的高宽比范围内， $\overline{Nu}/Nu_0$  随 Knudsen 数的变化关系也基本不受高宽比的影响。

### 符 号 说 明

- A——微槽截面积， $m^2$
- $D_h$ ——微槽的当量直径，m
- $f$ ——微槽内流动阻力系数
- H——微槽的量纲 1 高度
- $h$ ——微槽的高度，m
- Kn——Knudsen 数
- $k$ ——流体的热导率， $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
- $l, m$ ——壁面的方向余弦
- $\overline{Nu}$ ——微槽内平均 Nusselt 数
- $Nu_0$ ——大尺度槽道内平均 Nusselt 数
- P——微槽截面周长，m
- Pr——Prandtl 数
- Q——沿流动  $z$  方向单位长度热通量， $W \cdot m^{-2}$
- Re——Reynolds 数
- T——微槽内流体温度，K

- $T_m$ ——微槽内流体平均温度，K
- $T_w$ ——微槽壁面温度，K
- U——量纲 1 速度
- $u$ ——微槽内流速， $m \cdot s^{-1}$
- $u_m$ ——微槽内平均截面流速， $m \cdot s^{-1}$
- W——微槽的量纲 1 宽度
- $w$ ——微槽的宽度，m
- X——量纲 1  $x$  轴坐标
- $x$ —— $x$  轴坐标
- Y——量纲 1  $y$  轴坐标
- $y$ —— $y$  轴坐标
- $\gamma$ ——微槽的高宽比
- $\theta$ ——微槽内流体量纲 1 温度
- $\theta_m$ ——微槽内流体量纲 1 平均温度
- $\lambda$ ——气体分子平均自由程
- $\nu$ ——比热比
- $\sigma_T$ ——热协调系数

### 下角标

- C——槽道边界

### References

- 1 Tuckermann D B, Pease R F W. High-performance Heat Sinking for VLSI. *IEEE Electronic Device Letters*, 1981, **EDL-2** (5): 126—129
- 2 Choi S B, Barron R F, Warrington R O. Fluid Flow and Heat Transfer in Microtubes. In: *Micromechanical Sensors, Actuators, and System*. New York: ASME, 1991. 123—134
- 3 Yu D, Warrington R O, Barron R F, Ameel T A. An Experimental and Theoretical Investigation of Fluid Flow and Heat Transfer in Microtubes. In: *Proceedings of 4th ASME/JSME Thermal Engineering Conference*. Hawaii: 1995. 523—530
- 4 Wu P, Little W A. Measurement of the Heat Transfer Characteristics of Gas Flow in Fine Channel Heat Exchangers Used for Microminiature Refrigerators. *Cryogenics*, 1983, **8**: 415—420
- 5 Adams T M, Abdel-khalik S I, Jeter S M, Qureshi Z H. An Experimental Investigation of Single-phase Forced Convection in Microchannels. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1998, **41** (6—7): 851—857
- 6 Rujano J R, Rahman M M. Analysis and Computation of Conjugate Heat Transfer in Trapezoidal Microchannel Heat Sinks in a Silicon Substrate. In: *1995 National Heat Transfer Conference*. ASME, 1995. Volume 3. 175—185
- 7 Kavehpour H P, Faghri M, Asako Y. Effects of Compressibility and Rarefaction on Gaseous Flow in Microchannel. *Numerical Heat Transfer*, 1997, **32** (A): 677—696
- 8 Barron R F, Wang X M, Ameel T A. The Graetz Problem Extended to Slip-flow. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1997, **40** (8): 1817—1823
- 9 Yu S P, Ameel T A. Slip Flow Convection in Isoflux

- Rectangular Microchannels. *J. of Heat Transfer*, 2002, **124** (4): 346—355
- 10 Zhu Xun (朱恂), Xin Mingdao (辛明道). Laminar Flow and Heat Transfer in Micro-annular Channel in Slip Flow Regime. *J. of Engineering Thermophysics* (工程热物理学报), 2001, **22** (2): 203—206
- 11 Zhu X, Xin M D, Liao Q. An Analysis for Heat Transfer Between Two Unsymmetrically Heated Parallel Plates with Micro Space in Slip Flow Regime. *Microscale Thermophysical Engineering*, 2002, **6** (4): 287—302
- 12 Zhu Xun (朱恂), Xin Mingdao (辛明道), Liao Qiang (廖强). Analysis of Gas Slip Flow in Triangular Microchannels. *J. of Thermal Science and Technology* (热科学与技术), 2002, **1** (2): 141—145
- 13 Rohsenow W M. Handbook of Heat Transfer Fundamentals [传热学基础手册 (下)]. Beijing: Science Press, 1992. 157—158
- 14 Chen Xi (陈熙). The Kinetic Theory and Its Application in Heat Transfer and Fluid Flow (动力论及其在传热与流动研究中的应用). Beijing: Tsinghua University Press, 1996. 9—10
- 15 Sadik Kakac, Ramesh K Shah, Win Aung. Handbook of Single-phase Convective Heat Transfer. New York: Wiley, 1987
- 16 Zhu Xun (朱恂), Xin Mingdao (辛明道), Liao Qiang (廖强). Analysis of Gas Flow in Microchannel of Arbitrary Shape in Slip Flow Regime. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2003, **54** (7): 902—906

## 信息与交流

# 中国化工学会石油化工专业委员会“乙苯/苯乙烯学术技术研讨会”征文

中国化工学会石油化工专业委员会拟定于 2004 年 8 月在北方召开“乙苯/苯乙烯学术技术研讨会”。本次会议由上海石油化工研究院承办。会议就近年来乙苯、苯乙烯生产过程中的科技发展和技术进步进行交流。

征文内容包括乙苯、苯乙烯生产工艺中所涉及的新型催化剂合成和工业应用, 工艺过程改进、成套技术开发及技术发展趋势的综述等业界关心的内容。

### 会议筹备处

地 址: 上海市浦东北路 1658 号, 上海石油化工研究院

邮政编码: 201208

联系人: 周辉

电 话: 021—68462197—7504

021—68462433

传 真: 021—68462283

E-mail: zhouhui@sript.com.cn

会议具体时间和地点另行通知。

中国化工学会石油化工专业委员会

2004 年 4 月 22 日

(摘自: www.ciesc.org.cn)