

Gauss 型粗糙表面对微通道流动与换热的影响^{*}

叶 仪¹ 殷晨波¹ 贾文华² 李 萍¹ 高俊庭¹ 周玲君¹

(1. 南京工业大学车辆与工程机械研究所, 南京 211816; 2. 南京工程学院机械工程学院, 南京 211167)

摘要: 采用高斯分布描述粗糙表面形貌, 提出了利用 Coons 曲面构造三维矩形粗糙微通道的方法, 建立了光滑微通道和三条粗糙微通道。在等温壁面条件下, 数值模拟了饱和水在微通道内的层流流动, 分析了表面粗糙度对流动阻力特性及传热特性的影响。研究表明: 区别于光滑微通道, 粗糙微通道的 Po 和 \overline{Nu} 高于理论值, 不再保持常数, 随着雷诺数的增大呈近似线性增加; 受表面轮廓高度随机性的影响, 沿程压降和 Nu_x 呈随机波动式变化, 粗糙度越大波动越剧烈; Po 和 \overline{Nu} 随等效相对粗糙度的增加而变大, 且在所研究 Re 范围内相对粗糙度对层流换热的强化作用比对流动阻力的影响更显著; 微通道内等温线向粗糙度大的下表面偏移, 温度分布呈现非对称性, 随着粗糙度差距的变大, 非对称性愈来愈明显。

关键词: 粗糙微通道 高斯分布 Coons 曲面 流动阻力 传热

中图分类号: TK124; S275.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)12-0294-07

Effects of Gaussian Rough Surface on Fluid Flow and Heat Transfer in Microchannels

Ye Yi¹ Yin Chenbo¹ Jia Wenhua² Li Ping¹ Gao Junting¹ Zhou Lingjun¹

(1. Institute of Automobile and Construction Machinery, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China

2. School of Mechanical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: Gaussian distribution was used to describe the rough surface, and a novel method was proposed to generate 3-D rectangular rough microchannel by using Coons surfaces. With this method, one smooth microchannel and three rough microchannels were created. Constant wall temperature condition was applied to simulate the laminar flow of the saturated water in microchannels, and the effects of the surface roughness on flow and heat transfer characteristics were all investigated. The results indicated that different from the smooth microchannel, Poiseuille number and average Nusselt number were larger than the theoretical values, and increase approximately linearly with Re . As the height of the surface profile changed randomly, both pressure drop and local Nusselt number along the channel fluctuated randomly. The larger the roughness was, the more intense the fluctuation was. Poiseuille number and average Nusselt number increased with increasing equivalent relative roughness. Furthermore, within the scope of the Re , the effect of relative roughness on laminar heat transfer was stronger than that on flow resistance. In the microchannel, isotherm migrated to the lower surface, where the roughness was larger. As a result, the temperature distribution was asymmetric. As the gap of the roughness got increasingly larger, the asymmetry was more and more distinct.

Key words: Rough microchannel Gaussian distribution Coons surface Flow resistance Heat transfer

收稿日期: 2012-10-18 修回日期: 2012-11-05

^{*} 国家自然科学基金资助项目(50875122)和江苏省科技支撑计划资助项目(BE2011187)

作者简介: 叶仪, 博士生, 主要从事微尺度流动和传热研究, E-mail: yeyi_@126.com

通讯作者: 殷晨波, 教授, 博士生导师, 主要从事微纳制造和液压系统控制研究, E-mail: yinchenbo@njut.edu.cn

引言

微通道作为微流动系统中应用最多、最基本的单元之一,在滴灌设备的微小流量输送和电子器件散热及生物工程的检测分析等方面有广泛应用。大量研究发现,微通道内层流流动的传质传热特性与经典理论存在明显的偏差,而表面粗糙度可能是导致差异产生的根本原因。由于实验研究条件的难以实现和测试误差的难以控制, Gamrat^[1-3] 等学者的研究结果存在很大的分歧。

尽管数值模拟可以避免实验研究中存在的入口效应、粘性耗散、非均匀热传递等因素的影响,但构造精确的微通道几何模型一直是研究的难点。近年来,国内外学者在微通道层流流动的研究中已经提出了多种描述表面粗糙度的模型,在二维模拟^[4-6]中,粗糙元被设计成二维波浪、三角形、梯形、椭圆形;三维模拟^[7-9]中,粗糙元则被简化为了圆锥、正棱柱、金字塔,此外, Kleinstreuer^[10] 和金文^[11] 分别独立地将多孔介质模型引入了微通道内摩擦阻力的数值模拟研究中; Mala^[12] 等使用粗糙度-粘度系数模型研究流动阻力的偏差; Daniel^[13] 采用在光滑表面随机生成不同形状的粗糙元来模拟构建粗糙表面; Zhang^[14] 等利用分形几何对矩形微通道表面进行表征建模。上述研究对揭示微尺度下表面粗糙度对传质传热的影响机理有重要的推动作用,但至今还没有形成一套成熟完善的微通道流动理论体系,构造能精确表征实际表面形貌的模型,仍值得深入研究。

机械加工表面微观形貌往往过于复杂,呈现凸凹不平的波峰和波谷,轮廓高度有明显的随机性,难以在模型中完整体现,但可以采用统计学参数描述粗糙表面的主要特征^[15]。Bahrami^[16] 等使用高斯分布来描述表面粗糙形貌,建立了粗糙微圆管内充分发展层流流动的一维模型,准确预测了流动阻力随相对粗糙度增加的变化趋势,但研究仅限于理论分析,且没有涉及通道内传热特性。本文采用数值模拟的方法,使用 Coons 曲面造型法建立粗糙度高度服从高斯分布的矩形微通道模型,研究等温壁面条件下表面粗糙度对层流流动和传热特性的影响。

1 物理模型建立

在直角坐标系中,假设空间有 4 个点 $P_i(X_i, Y_i, Z_i)$, 其中 $i = 1, 2, 3, 4$, 为了简化复杂的表面微观形貌,将 x, y 方向的间距固定,只考虑 z 方向即轮廓高度的随机性,4 个点间的关系如下

$$X_{i+1} = X_i + \Delta x \quad (i = 1, 3) \quad (1)$$

$$Y_{i+2} = Y_i + \Delta y \quad (i = 1, 2) \quad (2)$$

$$Z_i = Z + \theta_i R \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (3)$$

式中 Δx —— x 方向上的增量

Δy —— y 方向上的增量

Z ——轮廓表面基准面的高度

R ——粗糙表面轮廓峰值

θ_i ——由高斯分布产生的随机数

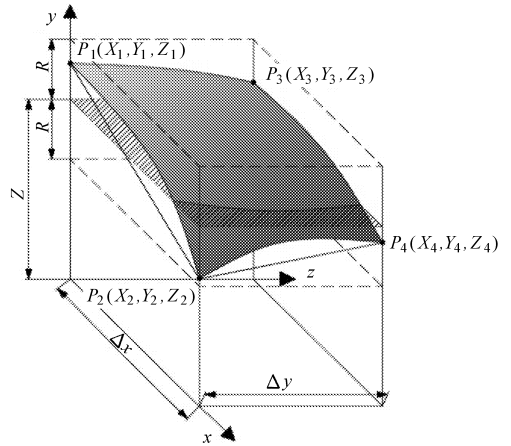


图 1 空间 4 点及构造的 Coons 曲面

Fig. 1 Four points in space and Coons surface formed by them

假设 θ_i 服从均值为 μ , 标准差为 σ 的高斯分布, 即 $\theta_i \sim N(\mu, \sigma^2)$, 概率密度函数表达为

$$f(\theta_i) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\theta_i - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

设定 $\mu = 0, \sigma = 1/3$, 因此 99.7% 的 θ_i 在 $[-1, 1]$ 区间内, 即绝大部分的 Z_i 在 $[Z - R, Z + R]$ 范围内。由于 z 方向轮廓高度的随机性, 空间 4 个点不在同一平面内, 需要生成以这 4 个非共面点为角点的曲面。提出使用双三次 Coons 曲面片的方法来实现粗糙表面的造型, 它通过连接若干微小曲面片构造并组成任意复杂的表面, 可以满足表面微观形貌的拟合。由空间 4 点生成 Coons 曲面片的主要步骤如下: 首先, 用直线依次连接相邻的点, 得到 4 条线性边界, 再通过 Hermite 基函数来创建 4 条边界曲线, 分别将相对的两条边界曲线沿着对应的线性边界进行超限插值, 得到两个曲面片, 最后用布尔和法将两个曲面片叠加即可得 Coons 曲面(图 1)。

设矩形微通道长 $L = 2 \text{ mm}$, 宽 $W = 120 \text{ }\mu\text{m}$, 高 $H = 15 \text{ }\mu\text{m}$ 。为简化计算, 假设只有上、下表面为粗糙面, 侧面为光滑面。取长、宽向的间距 $\Delta x, \Delta y$ 分别为 $4 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $3 \text{ }\mu\text{m}$, 则模型上下粗糙面分别被划分成了 20 000 个微小区域, 每个区域的 4 个角点由 Z, θ_i, R 确定, 对所有区域重复使用双三次 Coons 曲面片法生成若干微曲面, 并将所有微曲面拼接, 即可构造粗糙表面。通过控制峰值高度 R , 可获得不同粗糙程度的表面, 这使得建立的微通道模型具有通用性。实际微通道中, 不同粗糙表面往往具有不同的

粗糙度,因此文中设定模型的下表面具有比上表面更大的粗糙度。调整 R 的取值(表 1),建立了 1 条光滑微通道和 3 条粗糙微通道,图 2 可看出随着 R 值的增加,矩形微通道表面变得越来越粗糙。

表 1 微通道表面几何参数

Tab. 1 Microchannels with different geometric parameters of surfaces

微通道		$R/\mu\text{m}$	相对粗糙度 $\alpha/\%$
光滑微通道		0	0
粗糙微通道 1	上表面	0.25	1.83
	下表面	0.50	3.67
粗糙微通道 2	上表面	0.50	3.67
	下表面	1.00	7.33
粗糙微通道 3	上表面	0.75	5.50
	下表面	1.50	11.00

注:相对粗糙度定义为轮廓最大高度与水力直径 D_h 的比值,即 $\alpha = 2R/D_h \times 100\%$ 。

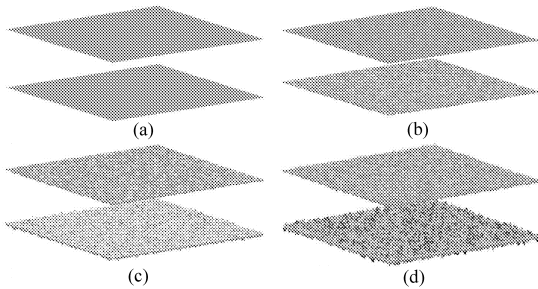


图 2 不同粗糙度的微通道模型

Fig. 2 Microchannels with different roughness

(a) 光滑微通道 (b) 粗糙微通道 1
(c) 粗糙微通道 2 (d) 粗糙微通道 3

4 条通道上表面和下表面的相对粗糙度分别呈等差递增的关系,为了方便研究相对粗糙度对微通道层流的流动和换热特性的影响,提出等效相对粗糙度 α_{eq} 的概念,表征整个通道的相对粗糙度定义为

$$\alpha_{eq} = \frac{\alpha_{up} + \alpha_{down}}{2} \quad (5)$$

式中 α_{up} ——上表面相对粗糙度

α_{down} ——下表面相对粗糙度

得到 4 条通道的等效相对粗糙度分别为 0%、2.75%、5.50%、8.25%,同样具有等差递增的特点,可用于揭示相对粗糙度对微通道内层流流动的影响。

2 数值计算

研究表明,对于微尺度下液体的层流流动,Navier-Stokes 方程仍然适用,因此求解的控制方程可以以矢量形式表示

$$\nabla(\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (6)$$

$$\mathbf{v} \nabla(\rho \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla(\mu \nabla \mathbf{v}) \quad (7)$$

$$\mathbf{v} \nabla(\rho C_p T) = \nabla(k \nabla T) \quad (8)$$

式中 ρ ——液体密度 μ ——动力粘度

C_p ——比热容 k ——热传导率

T ——温度 p ——流体压力

\mathbf{v} ——速度矢量

模型上下表面设置为等温壁面,温度取 333 K,使用饱和水作为工质,流体进口的平均温度为 303 K,由于计算中温度场的变化显著,饱和水的粘度随温度的变化较大,不能忽略工质的粘温特性,对粘温关系采用 Sutherland 方程表述

$$\mu = \mu_o \exp\left(c_1 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_o}\right) + c_2 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_o}\right)^2\right) \quad (9)$$

式中 T_o ——参考温度 c_1, c_2 ——粘温系数

μ_o —— T_o 时的动力粘度

模拟层流流动的雷诺数范围为 50 ~ 1 500。对所建立的微通道层流流动模型作如下假设:①稳态层流。②忽略重力影响。③边界无滑移。④忽略粘性耗散。

采用控制容积有限差分法和 SIMPLE 算法对控制方程进行求解,设置求解精度为 10^{-6} 。整个微通道模型采用六面体网格进行划分,并在近壁区域加密网格,以保证在粗糙表面处获得高精度的解。

分别采用 Poiseuille 数和 Nusselt 数表征微通道中层流的流动特性和传热特性, Po 、平均 Nusselt 数 \overline{Nu} 及局部 Nusselt 数 Nu_x 分别定义如下

$$Po = \overline{f} Re = \frac{1}{L - L_h} \int_{L_h}^L f(x) Re(x) dx \quad (10)$$

$$\overline{Nu} = \frac{1}{L - L_t} \int_{L_t}^L Nu_x dx \quad (11)$$

$$Nu_x = \frac{q_x}{T_w - T_{b,x}} \frac{D_h}{k} \quad (12)$$

式中 f ——阻力系数 Re ——雷诺数

D_h ——水力直径 T_w ——壁面温度

q_x ——流动方向上 x 处截面的热流量

$T_{b,x}$ —— x 处截面的流体平均温度

L_h ——动力进口长度

L_t ——热力进口长度

L ——微通道长度

由 Shah^[17] 提出的 L_h 计算式为

$$\frac{L_h}{D_h} = \frac{0.6}{1 + 0.035 Re} + 0.056 Re \quad (13)$$

由 Ozisik^[18] 提出的 L_t 计算式为

$$\frac{L_t}{D_h} = 0.008 Re Pr \quad (14)$$

式中 Pr ——普朗特数

为了确保所得的数值解都具有网格无关性,以 Po 和 \overline{Nu} 为目标结果,对粗糙微通道 2 在 $Re = 100$ 时

做网格无关性验证。如图 3 所示,随着网格的不断加密,相邻两套网格的目标结果变化率不断减小,当网格数量达到 1.8×10^6 时, Po 的变化率为 0.11%, Nu 的变化率为 0.02%, 已经可以提供独立于网格的结果,因此在后面的计算中均采用此网格精度。

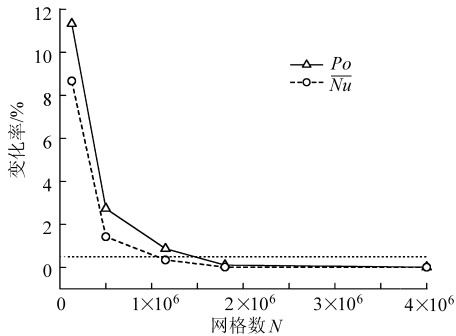


图 3 网格无关性检测

Fig. 3 Grid-independence test

3 结果与分析

3.1 层流流动

3.1.1 速度分布

图 4 给出了 $Re = 600$ 时,3 条粗糙通道内的流速分布。从粗糙微通道 1 中看出,由于受到表面粗糙轮廓的扰动,壁面附近的流动速度分布发生变化,但这种扰动会随着壁面的远离而逐渐衰减,主流区的流线依然保持清晰,速度带之间分隔明显。从粗糙微通道 2 到粗糙微通道 3,随着粗糙度的增加,扰动程度变深、作用范围变广,流速的变化已经渗透到了主流区,在速度最大的区域流线已经变得杂乱,整个通道内的流动都受到影响,因此可以预测当流速继续增加时,转折将首先出现在粗糙度较大的通道中。

3.1.2 沿程压降

图 5 所示为饱和水在光滑微通道和粗糙微通道中沿程的压力损失分布 ($Re = 400$)。对比图中 4 条曲线可以发现,动力入口段之后,压降沿 x 向保持近似的线性增加,且粗糙度越大,增幅越大,粗糙微通道 1、2、3 的压降分别比光滑微通道分别高出了约 14.42%、35.15%、53.02%。此外,从曲线局部放大图中可以看出光滑通道的压降是线性增加,而粗糙通道中压降是呈随机波动增加,这是因为当流体掠过粗糙表面的波峰时,会在其背面产生一定程度的漩涡,在波谷处形成背压,引起局部压降的突增,而通道表面的轮廓高度符合高斯分布,生成的波峰波谷的高度和分布具有随机性,从而使得局部压降的增加也具有一定的随机性。对比 4 条曲线可以看出,表面粗糙度越大,局部压降增加越明显,曲线波动越剧烈。

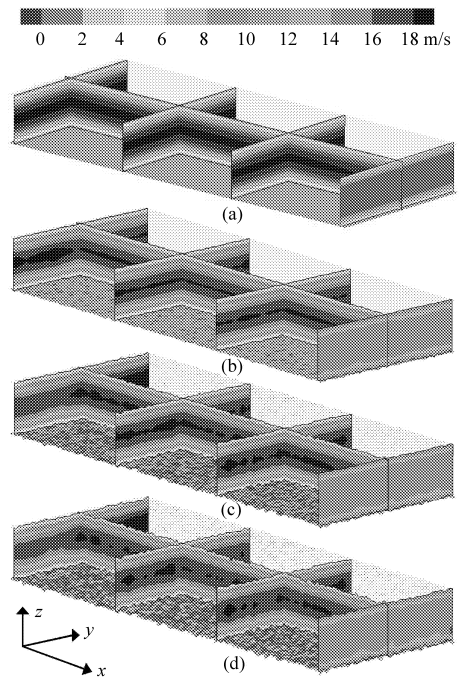


图 4 微通道内流速分布

Fig. 4 Velocity contours in microchannels

(a) 光滑微通道 (b) 粗糙微通道 1
(c) 粗糙微通道 2 (d) 粗糙微通道 3

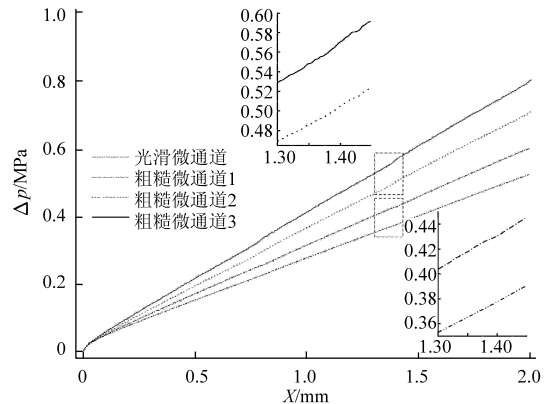


图 5 沿程压降分布

Fig. 5 Pressure drop along stream

3.1.3 流动阻力

经典理论中,矩形微通道内不可压缩、充分发展层流流动的 Poiseuille 数理论值仅与截面形状相关, Hartnett^[19] 拟合出 Po 的关系式为

$$Po = fRe = 96(1 - 1.355 3\varepsilon + 1.946 7\varepsilon^2 - 1.701 2\varepsilon^3 + 0.954 6\varepsilon^4 - 0.253 7\varepsilon^5) \quad (15)$$

其中

$$\varepsilon = H/W$$

式中 ε ——截面形状因子, $0 < \varepsilon < 1$

选取 9 个雷诺数 (50、100、200、400、600、800、1 000、1 200、1 500) 下饱和水在微通道中的层流流动进行流动阻力特性分析。图 6 给出了微通道中流动充分发展段的阻力系数 f 和 Po 随雷诺数的变化曲线,并与理论值作了比较。从图 6a 可见,阻力系数随着雷诺数的增加而降低,对数坐标下理论值保

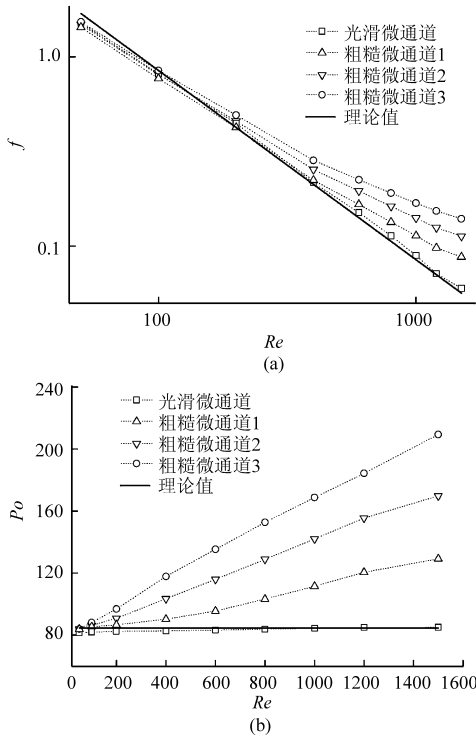


图6 阻力系数 f 和 Po 数随 Re 的变化
Fig.6 Effect of Re on friction factor f and Po number

持线性关系,在低雷诺数下的4条曲线与理论值基本吻合,但随着 Re 的继续增大,光滑通道的阻力系数曲线继续保持线性下降,而粗糙通道的阻力系数下降速度减缓,曲线逐渐偏离理论值。同样的,由图6b可知,光滑通道中, Po 不随 Re 改变,可近似地看作为常数,与理论值没有明显的偏差。而在粗糙通道中, Po 不再遵循经典理论,在所研究的范围内随着 Re 呈线性迅速增加,且粗糙度越大,增加的幅度越大。以上现象说明,在微通道层流流动中,相对粗糙度的存在会对流动产生不可忽略的影响,致使阻力系数 f 及 Po 都高于经典理论值。当微通道中流动速度很小时,壁面附近的流动近似与粗糙表面平行,由表面粗糙度引起的分离、回流很微弱,从图6中可看到,在 $Re < 200$ 时,阻力系数 f 及 Po 与理论值相差不大,但随着雷诺数的增大,流速加快,经过粗糙表面产生的分离、回流越来越强烈,造成了流动阻力的显著增加,阻力系数 f 和 Po 持续增大,逐渐偏离理论值。

图7所示为微通道的 Po 数随等效相对粗糙度的变化情况。从图中可以看出,随着 α_{eq} 增加, Po 数大致呈线性增加,且 Re 越大, Po 增加的幅度也越大。 $Re = 200$ 的情况下,等效相对粗糙度从0%增加到8.25%时, Po 数增加的幅度约为11.7%,而 $Re = 1500$ 时,增加幅度达到了146.03%。流体经过粗糙表面产生的分离、回流引起流动阻力增加,当相对粗糙度较小时,分离、回流现象仅作用在壁面周围,影

响程度有限,随着相对粗糙度的增加,通道中表面粗糙度干扰的范围变广,回流区域变大,导致流动阻力大幅增加。

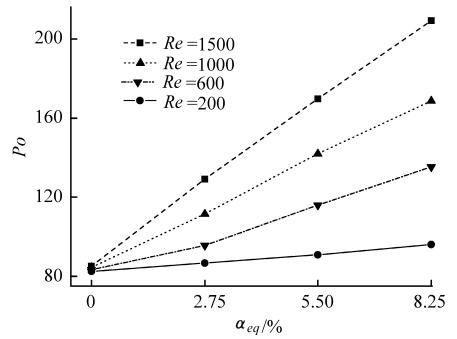


图7 Po 数 α_{eq} 的变化
Fig.7 Effect of α_{eq} on Po

3.2 层流换热

3.2.1 温度分布

图8所示为 $Re = 50$ 时,微通道中沿 x 方向的截面均温曲线,可以看出4条通道的曲线变化趋势基本一致。在 $X < 50 \mu m$ 的入口区域,流体与壁面的温差较大,4条通道的截面均温迅速升高,且上升速率基本相同,此时温差对换热特性的影响占主导,粗糙度因素对曲线的变化几乎没有影响。在此之后,流体温度与壁温差值逐渐缩小,换热能力减弱,各通道截面均温出现差异,粗糙度对流体传热特性的影响开始显现,从图中看出表面越粗糙,温升速率减缓得越慢,形成这种现象的原因是粗糙度越大,表面形貌凹凸越剧烈,与流体的接触面积更大,越有利于壁面向流体的热传递。但当 $X > 500 \mu m$ 后,在表面粗糙度和温差的作用下,4条曲线近似保持平行,从局部放大图可以看出,在 $X = 1200 \mu m$ 附近,粗糙微通道3的截面均温首先达到壁温,随后依次是粗糙微通道2、粗糙微通道1和光滑微通道。

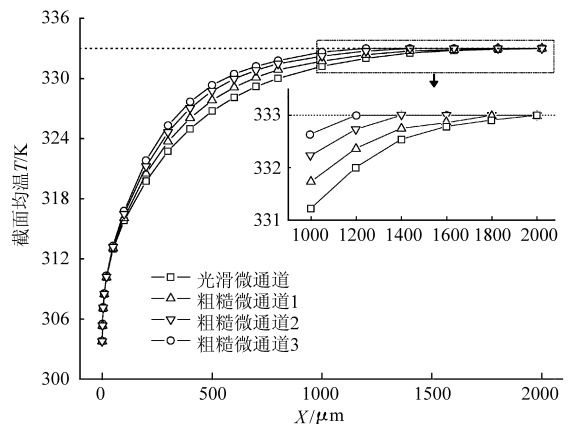


图8 沿程截面均温曲线
Fig.8 Curves of bulk temperature along stream

图9给出了相同情况下, x 方向 $0 \sim 1000 \mu m$ 范围内,4条通道 $x-z$ 截面的温度分布情况。从图中

可以看出,在入口处等温线分布非常密集,换热能力强,温度梯度大,温升迅速,沿流动方向等温线的分布逐渐疏松,换热能力减弱,温度梯度变小,温升也变得平缓,与截面均温曲线的变化趋势一致。受表面粗糙形貌的干扰,区别于光滑微通道中光滑的等温线,粗糙微通道 1、2、3 的等温线具有一定程度的波动性,且粗糙度越大,波动越明显,并在远离表面的过程中逐渐衰弱,与流场的变化相似。根据场协同原理,层流流动的速度场与温度场是耦合的,由 3.1.1 可知,受表面粗糙形貌的扰动,通道中流速分布发生了变化,必将影响温度分布。另由图可知,粗糙通道下壁面附近沿 z 向的温度梯度比上表面大,等温线整体向下偏移,温度分布呈现非对称性,且随着上下表面相对粗糙度差距的变大,粗糙微通道 1、2、3 的温度非对称性愈来愈显著,同样说明粗糙度越大热传递效果越好。

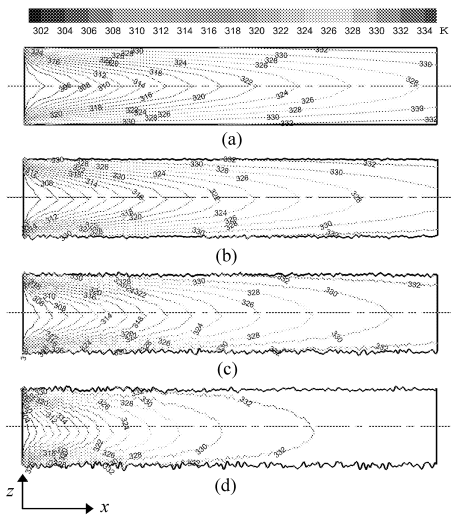


图 9 $x-z$ 截面温度分布

Fig. 9 Temperature distribution at $x-z$ section

- (a) 光滑微通道 (b) 粗糙微通道 1
- (c) 粗糙微通道 2 (d) 粗糙微通道 3

3.2.2 传热特性

经典理论中,微通道内层流热交换充分发展区的 Nu 数与雷诺数无关,仅取决于通道形状,当截面形状因子固定时 Nu 为常数。图 10 给出了不同粗糙度的微通道中 Nu 数随 Re 的变化趋势。由图可知,与流动特性的 Po 数变化相似,光滑通道的 Nu 数与理论值也吻合很好,几乎不随 Re 变化,粗糙度通道中 Nu 数高于理论值,与 Re 呈线性增加,此现象说明表面粗糙度引起的分离、回流有提高层流换热的作用,并伴随流速的变大不断增强。

图 11 所示为等效相对粗糙度对微通道内换热特性的影响。由图中看出,相同雷诺数下,换热能力随 α_{eq} 提升,但趋势逐渐平缓。 Re 为 200 和 1 500

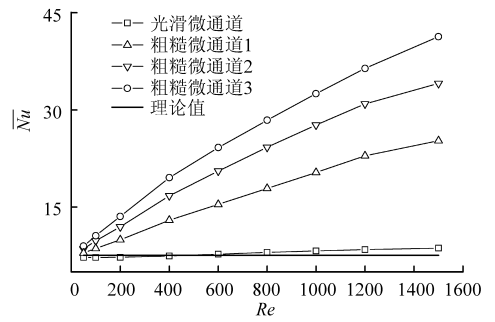


图 10 Nu 数随 Re 的变化

Fig. 10 Effect of Re on Nu

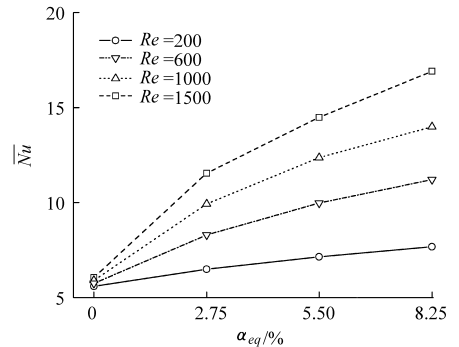


图 11 Nu 数随 α_{eq} 的变化

Fig. 11 Effect of α_{eq} on Nu

时, Nu 数分别增大 13.71% 和 177%, 稍大于 Po 数的增幅,说明相对粗糙度对层流换热的强化作用比流动阻力的影响更突出。

图 12 比较了 $Re = 400$ 时不同粗糙度通道中局部 Nu_x 数的沿程分布。由图看出,入口处 Nu_x 最大,并沿流动方向迅速降低直至相对稳定,由于粗糙通道内表面凹凸分布的随机性,热力进口段之后, Nu_x 呈现随机波动,随粗糙度的增加波动范围越广。

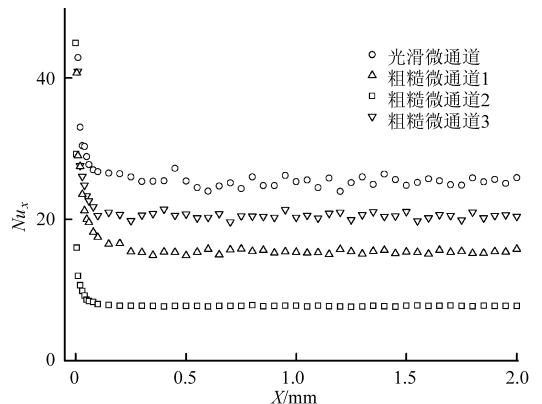


图 12 Nu_x 的沿程分布

Fig. 12 Nu_x along stream

4 结束语

采用高斯分布描述粗糙表面形貌,提出了使用 Coons 曲面造型法构造三维矩形微通道的方法,通过控制轮廓峰值建立了光滑微通道和 3 条粗糙微通

道。在等温壁面条件下,并考虑粘温特性,数值模拟了雷诺数 Re 在 50 ~ 1 500 之间,饱和水在微通道内的层流流动。研究了表面粗糙度对层流流动的速度分布、温度分布、流动阻力特性及传热特性的影响,得到:区别于光滑微通道,粗糙微通道内充分发展层流流动的 Po 数和 \overline{Nu} 数高于理论值,不再保持常数,随着雷诺数的增大呈线性增加,表面粗糙度导致了流热传递的强化和流动阻力的增加。受表面轮廓高度随机性的作用,粗糙微通道内充分发展段的沿程压降和 Nu_x 呈随机波动式变化,表面粗糙度越大

波动越剧烈。相对粗糙度较小时,由表面粗糙度引起速度场和温度场的变化主要发生在近壁区域,随着相对粗糙度的增加,扰动逐渐渗透进主流区,影响了整个通道内速度与温度的分布。 Po 和 \overline{Nu} 等效相对粗糙度的增加而变大,前者保持近似线性增加,后者增速逐渐放缓,且在所研究的 Re 范围内相对粗糙度对层流换热的强化作用比对流动阻力的影响更显著。粗糙微通道内等温线整体向下偏移,温度分布呈现非对称性,随着上下表面相对粗糙度差距的变大,非对称性愈来愈明显。

参 考 文 献

- Gamrat G, Favre-Marinet M, Le Person S, et al. An experimental study and modelling of roughness effects on laminar flow in microchannels[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2008, 594: 399 ~ 423.
- Shen S, Xu J L, Zhou J J, et al. Flow and heat transfer in microchannels with rough wall surface[J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(11 ~ 12): 1 311 ~ 1 325.
- Flockhart S M, Dhariwal R S. Experimental and numerical investigation into the flow characteristics of channels etched in 100 silicon[J]. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 1998, 120(2): 291 ~ 295.
- Duan Z, Muzychka Y S. Effects of corrugated roughness on developed laminar flow in microtubes[J]. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2008, 130(3): 0311021 ~ 0311027.
- Croce G, D'Agaro P. Numerical analysis of roughness effect on microtube heat transfer[J]. *Superlattices and Microstructures*, 2004, 35(3 ~ 6): 601 ~ 616.
- Ji Y, Yuan K, Chung J N. Numerical simulation of wall roughness on gaseous flow and heat transfer in a microchannel[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, 49(7 ~ 8): 1 329 ~ 1 339.
- Rawool A, Mitra S, Kandlikar S. Numerical simulation of flow through microchannels with designed roughness[J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2006, 2(3): 215 ~ 221.
- Gamrat G, Favre-Marinet M, Le Person S. Modelling of roughness effects on heat transfer in thermally fully-developed laminar flows through microchannels[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2009, 48(12): 2 203 ~ 2 214.
- Baviere R, Gamrat G, Favre-Marinet M, et al. Modelling of laminar flows in rough wall microchannels[J]. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2006, 128(4): 734 ~ 741.
- Kleinstreuer C, Koo J. Computational analysis of wall roughness effects for liquid flow in micro-conduits[J]. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2004, 126(1): 1 ~ 9.
- 金文,张鸿雁. 微尺度内流流场数值模拟方法及实验[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(3): 67 ~ 71.
Jin Wen, Zhang Hongyan. Numerical simulating approaches and experiment on micro-scales flow field[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(3): 67 ~ 71. (in Chinese)
- Mala G M, Li D. Flow characteristics of water in microtubes[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 1999, 20(2): 142 ~ 148.
- Daniel G, Heinz H. Microchannel roughness effects; a close-up view[J]. *Heat Transfer Engineering*, 2009, 30(1 ~ 2): 62 ~ 69.
- Zhang C B, Chen Y P, Shi M H. Effects of roughness elements on laminar flow and heat transfer in microchannels[J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2010, 49(11): 1 188 ~ 1 192.
- 邹江,彭晓峰,颜维谋. 壁面粗糙度对通道流动特性的影响[J]. *化工学报*, 2008, 59(1): 25 ~ 31.
Zou Jiang, Peng Xiaofeng, Yan Weimou. Effects of roughness on fluid flow behavior in ducts[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2008, 59(1): 25 ~ 31. (in Chinese)
- Bahrami M, Yovanovich M M, Culham J R. Pressure drop of fully developed, laminar flow in rough microtubes[J]. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2006, 128(3): 632 ~ 637.
- Shah R K, London A L. *Laminar flow; forced convection in ducts*[M]. New York: Academic, 1978.
- Ozisik M N. *Heat transfer—a basic approach*[M]. New York: McGraw-Hill, 1985.
- Hartnett J P, Kostic M. Heat transfer to Newtonian and non-Newtonian fluids in rectangular ducts[J]. *Advances in Heat Transfer*, 1989, 19: 247 ~ 356.