

# 结构形式对微槽内流动换热特性的影响

刘东 蒋斌

(西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010)

**摘要** 针对矩形、三角形和梯形 3 种微结构换热器内的流动和换热特性进行分析, 并采用数值模拟的方法计算不同高宽比情况下 3 种微槽道结构散热器的流动和换热特性。结果表明: 微槽道的摩阻系数随着雷诺数  $Re$  的增加而降低, 但是随着高宽比的增加而增大; 在相同的  $Re$  和高宽比时, 矩形槽道的摩阻系数最大, 三角形槽道的摩阻最小; 当槽道类型和高宽比确定时, 努塞尔数  $Nu$  随着  $Re$  的增加而增加, 但是增加趋势逐渐趋于平缓。考虑进口效应等因素的影响, 对不同槽道内的换热特性进行分析, 给出了符合不同结构槽道的换热关系式。

**关键词** 测量; 激光器; 冷却; 微槽道; 流动; 换热

中图分类号 TK124

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP50.041202

## Effect of Channel Structures on the Fluid Flow and Heat Transfer in Micro-Channels

Liu Dong Jiang Bin

(School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China)

**Abstract** The fluid flow and heat transfer characteristics of rectangular, triangular and trapezoidal micro-channels are analyzed. The influence of height-width ratio and channel types on these characteristics is simulated. The results show that the coefficient of friction resistance decreases with the increase of Reynolds number but increases with the rise of aspect ratio in micro-channels. At the same Reynolds number and aspect ratio, the maximal coefficient of friction resistance appears in the rectangular structure, and the minimal one in the triangular micro-channel. When the channel type and the aspect ratio are fixed, the Nusselt number increases with the Reynolds number, but the increasing trend is slow. General empirical formulas are proposed to evaluate the heat transfer performance of different micro-channels with consideration of inlet effect and height-width ratio.

**Key words** measurement; lasers; cooling; micro-channel; fluid flow; heat transfer

**OCIS codes** 120.6780; 140.3320; 140.6810; 350.5340

## 1 引言

随着微机械加工技术和电子技术的发展, 大功率激光器越来越广泛地应用到生产和生活的各个方面<sup>[1~3]</sup>。但是随着激光器功率的提升, 散热问题越来越成为制约其发展的瓶颈<sup>[4]</sup>。不同的研究者尝试采用喷雾冷却、微结构槽道、热管等新型换热技术进行强化散热。针对微槽道而言, 1981年, Tuckerman等<sup>[5]</sup>采用微电子机械系统(MEMS)技术加工出了首个多槽道散热器, 并且实验证明了其强大的散热能力。随后, Peng等<sup>[6,7]</sup>和 Mchale等<sup>[8]</sup>都对其进行了系统的研究。本课题组采用喷雾<sup>[9,10]</sup>和大高宽比矩形微结构散热器<sup>[11,12]</sup>等方式进行了冷却大功率激光器的尝试。对于微槽道散热而言, 槽道结构形式的变化会导致流体流动特性的变化进而影响其换热特性。为了分析结构形式变化对流动和换热的影响, 本文采用数值模拟的方法对不同高宽比的微小矩形、三角形和梯形槽道内的流动和换热特性进行了研究, 并结合数值模拟结果给出了槽道结构形式对流动和换热影响的经验关系式。

收稿日期: 2012-12-18; 收到修改稿日期: 2013-01-11; 网络出版日期: 2013-03-08

基金项目: 四川省教育厅重点基金(11ZA132&11ZB110)和西南科技大学博士基金(11zx7159)资助课题。

作者简介: 刘东(1984—), 男, 博士, 讲师, 主要从事大功率器件散热方面的研究。E-mail: dtld123@mail.ustc.edu.cn

## 2 不同结构槽道类型简述

为了研究不同槽道结构对槽道内流动和换热特性的影响,设计了横截面为矩形、三角形、梯形 3 种形状的槽道,如图 1 所示,并且每一种槽道都设计了 4 种高宽比(1:1,2:1,3:1,4:1)。

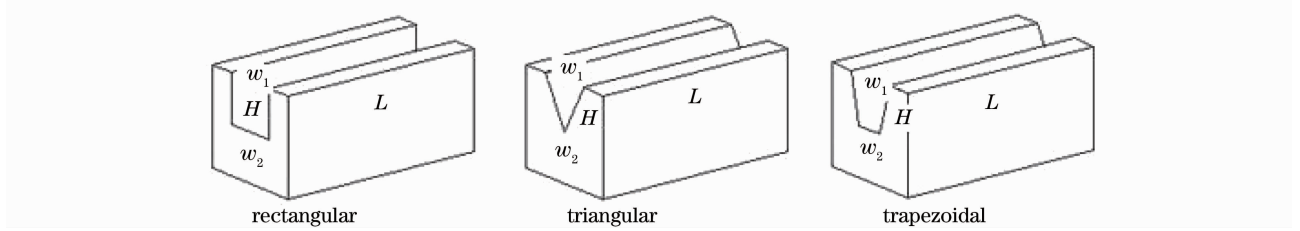


图 1 不同的微槽道结构形状

Fig. 1 Shapes of different micro-channels

为了更清楚表述槽道的特性,定义槽道顶部宽度为  $w_1$ ,底部宽度为  $w_2$ ,高度为  $H$ ,槽道长度为  $L$ ,并定义槽道的高宽比  $\lambda = H / \frac{(w_1 + w_2)}{2}$ 。以高宽比为 2:1 的矩形槽道为例,顶部宽度  $w_1 = 0.2$  mm,底部宽度  $w_2 = 0.2$  mm,高度  $H = 0.4$  mm,槽道长度  $L = 2.5$  mm。具体的槽道尺寸如表 1 所示。

表 1 微槽道具体尺寸

Table 1 Sizes of different type micro-channels

Micro-channel type	Height-width ratio $\lambda$	Top width of channel $w_1$ /mm	Bottom width of channel $w_2$ /mm	Height of channel $H$ /mm	Length of channel $L$ /mm
Rectangular	1:1	0.2	0.2	0.2	25
Rectangular	2:1	0.2	0.2	0.4	25
Rectangular	3:1	0.2	0.2	0.6	25
Rectangular	4:1	0.2	0.2	0.8	25
Triangular	1:1	0.4	0	0.2	25
Triangular	2:1	0.4	0	0.4	25
Triangular	3:1	0.4	0	0.6	25
Triangular	4:1	0.4	0	0.8	25
Trapezoidal	1:1	0.3	0.1	0.2	25
Trapezoidal	2:1	0.3	0.1	0.4	25
Trapezoidal	3:1	0.3	0.1	0.6	25
Trapezoidal	4:1	0.3	0.1	0.8	25

## 3 数学模型和边界条件

采用三维流体控制方程对流体在整个散热器的流动进行数值模拟,并且作如下假设:1)采用水作为工作介质,不可压缩且流动为层流;2)流体在三维槽道中的流动为定常流;3)流体和固体的热力学参数为定值;4)所有的槽道表面光滑;5)忽略重力浮力等影响,散热器出口压力为大气压力。具体的控制方程如下:

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

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (2)$$

固体区域能量方程为

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} = 0, \quad (3)$$

流体区域能量方程为

$$u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right). \quad (4)$$

(1)~(4)式中 $\rho$ 为密度, $p$ 为当地压力, $\mu$ 为动力粘度, $T$ 为温度, $c_p$ 为流体的定压比热, $k$ 为固体的导热系数。

分析槽道的特性可以看出,槽道中心对称,因此在模拟时只模拟半个槽道内的流动和换热特性。设置如下边界条件:槽道外壁面绝热,槽道中心采用对称边界条件,槽道进口采用质量进口,出口采用压力出口,在流体和固体接触区域采用流固耦合边界条件。槽道底部采用固定热流密度为 $q=20\text{ W/cm}^2$ ,进口水温为 $293\text{ K}$ 。基于不同的槽道结构划分不同的网格,并对网格独立性进行验证,发现当网格数量增加到一定程度时,其结果变化不大。以 $1:1$ 矩形槽道为例,当其网格数量为 $20\times 30\times 40$ (其中底部固体区域网格数量为 $20\times 10\times 40$ )和网格数量为 $40\times 50\times 50$ (其中底部固体区域网格数量为 $40\times 20\times 50$ )的结果相比,误差在 $10\%$ 以内。因此,选取 $20\times 30\times 40$ 的网格 $1:1$ 矩形槽道的最优化网格。图2为高宽比为 $1:1$ 的3种不同类型槽道某一垂直流体流动断面上的最优网格示意图。

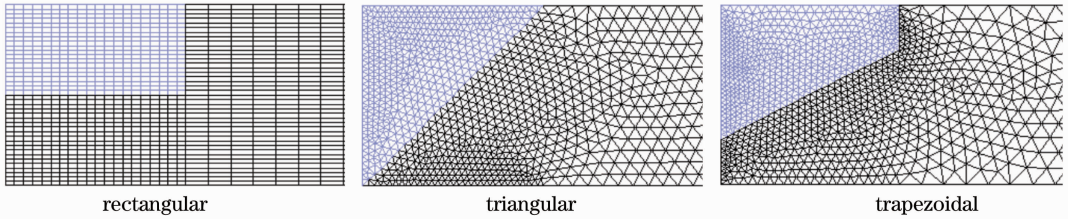


图2 不同槽道的网格示意图

Fig. 2 Numerical mesh for different channels

由于在小槽道中流动为层流流动,因此采用层流计算方程,并采用 Simple 算法进行迭代计算,当出口质量流量误差在 $10^{-5}$ 时,认为计算收敛。

## 4 数据处理方法

流体在微槽道中的平均温度 $T_m$ 为

$$T_m = \frac{1}{2}(T_{in} + T_{out}), \quad (5)$$

流体在槽道中流动的雷诺数为

$$Re = \frac{\rho u d_e}{\mu}, \quad (6)$$

流体和固体之间的对流换热系数 $h$ 为

$$h = \frac{q}{T_w - T_m}, \quad (7)$$

流体流动换热的努塞尔数为

$$Nu = \frac{hd_e}{k_f} = \frac{qd_e}{k_f(T_w - T_m)}, \quad (8)$$

无量纲摩擦系数

$$f = \frac{2\Delta P d_e}{\rho u^2 L} = \frac{2\rho d_e^3 \Delta P}{\mu^2 Re^2 L}. \quad (9)$$

(5)~(9)式中,进口平均温度为 $T_{in}$ ,出口平均温度为 $T_{out}$ ,壁面平均温度(流体底面与固体接触的水平面的平均温度)为 $T_w$ , $\rho$ 为流体(水)的密度, $d_e$ 为当量直径, $\mu$ 为水的动力粘度系数, $u$ 为流体速度, $q$ 为固壁底部加热热流密度, $k_f$ 为流体的导热系数。

## 5 结果和讨论

为了更为正确地表示不同槽道结构对换热的影响,分别对雷诺数 $Re=40, 80, 160, 320, 640, 1000$ 的6种流动状况下水流过3种不同高宽比结构的槽道的换热特性进行模拟。图3~5为不同结构槽道内的摩擦系数随着 $Re$ 的变化关系图。从图中可以看出,摩擦系数随着 $Re$ 的增加而降低;同一槽道高宽比越大,在相同的 $Re$ 下摩擦系数就越大,其中矩形槽道的影响最为明显,而三角形槽道受影响较小。当槽道结构固定时,

其内流动特性一致,当  $Re$  一定时,高宽比越大,其内流动速度就越小,摩阻系数就越大,这和常规的层流流动特性一致。为了更好地表现不同结构槽道的特性,将高宽比为 2:1 的 3 种不同槽道的计算结果示于图 6 中,也可以看出在  $Re$  相同的情况下,矩形槽道的摩阻最大,而三角形槽道的摩阻最小。这和 Kays 等<sup>[13]</sup>的常规槽道内流动特性的理论结果一致。

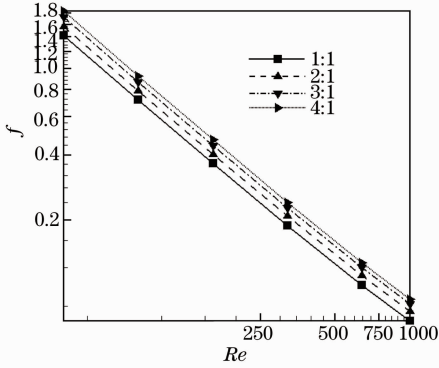
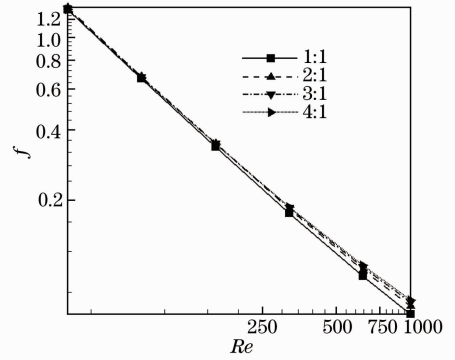
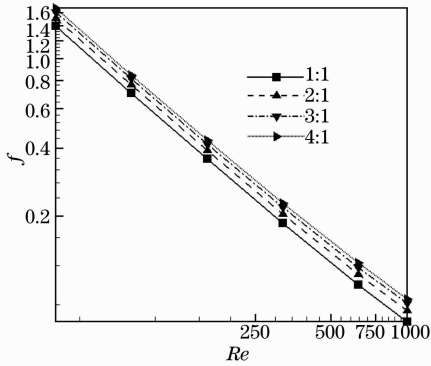
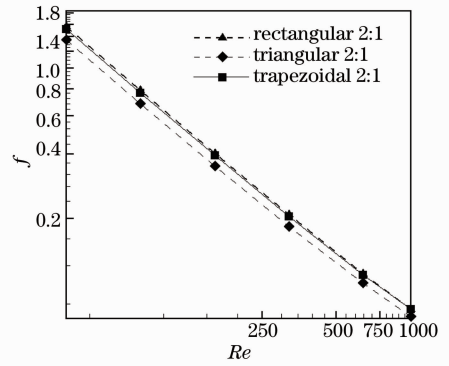
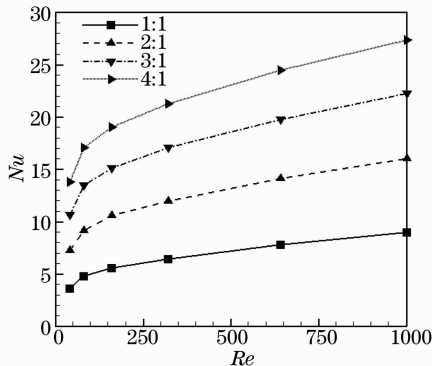
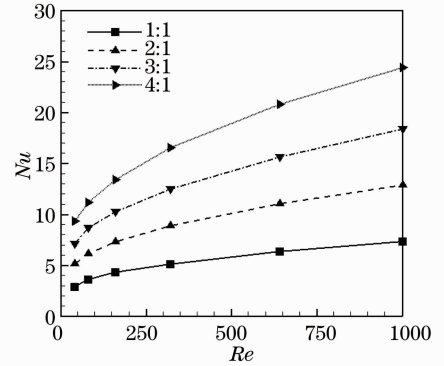
图 3 矩形槽道摩阻系数随  $Re$  变化关系Fig. 3 Coefficient of friction resistance versus  $Re$  in rectangular channels图 4 三角形槽道摩阻系数随  $Re$  变化关系Fig. 4 Coefficient of friction resistance versus  $Re$  in triangular channels图 5 梯形槽道摩阻系数随  $Re$  变化关系Fig. 5 Coefficient of friction resistance versus  $Re$  in trapezoidal channels图 6 3 种槽道摩阻系数随  $Re$  变化关系Fig. 6 Coefficient of friction resistance versus  $Re$  in three types of channels

图 7~9 给出了 3 种类型槽道在不同高宽比情况下  $Nu$  随着  $Re$  的变化关系。

从图 7~9 可以看出,当槽道类型和高宽比确定时,换热  $Nu$  都随着  $Re$  的增加而增加,但是增加趋势逐渐趋于平缓。在  $Re$  相同的情况下,同一种槽道换热  $Nu$  数随着高宽比的增加而增大。由于槽道长度较短,所以进口段在其中起了很重要的作用,从传热理论分析可知,针对固定长度的槽道而言,其在层流状态下管

图 7 矩形槽道  $Nu$  随  $Re$  变化关系Fig. 7  $Nu$  versus  $Re$  in rectangular channels图 8 三角形槽道  $Nu$  随  $Re$  变化关系Fig. 8  $Nu$  versus  $Re$  in triangular channels

道混合热进口段长度由格莱兹数 $[Gz_d = (D_e/x)RePr]$ 的倒数决定,式中 $D_e$ 为槽道的水力学直径, $x$ 为槽道内某点距离进口的长度, $Pr$ 为流体的普朗特数。当 $Gz_d^{-1} \approx 0.05$ 时,流体在管道中可以得到充分发展,而当 $Gz_d^{-1} < 0.05$ 时其处于入口段。当槽道类型和高宽比确定时,随着 $Re$ 的增加,其热入口段长度所占的比例越来越大,平均 $Nu$ 会增加,但增加的趋势逐渐减小。而当 $Re$ 固定时,随着槽道高度的增加,在 $Re$ 相同的情况下, $Gz_d$ 数就会增加,热入口段长度也相应增加,因此其换热 $Nu$ 就较大。考虑热进口段长度,高宽比和不同类型槽道的结构形状,将槽道的 $Nu$ 拟合成经验公式:

$$Nu = aGz_d^{0.26} (H/W)^{0.79}, \quad (10)$$

式中 $a$ 为形状系数(矩形为3.2,三角形为2.5,梯形为3.0)。

将计算数据点和拟合公式的计算误差对比于图10,从图中数据点可以看出,误差不超过15%。所以拟合关系式可以很好地表达微槽道内的换热特性。

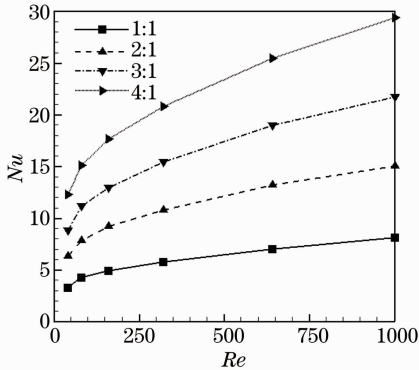


图9 梯形槽道 $Nu$ 随 $Re$ 变化关系

Fig. 9  $Nu$  versus  $Re$  in trapezoidal channels

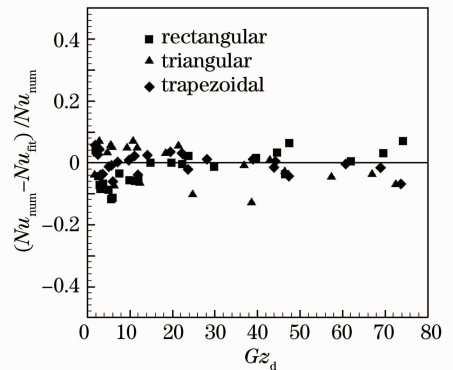


图10 模拟值与拟合关系式对比

Fig. 10 General empirical formula results versus numerical data in three types of channels

## 6 结 论

对不同高宽比的矩形、三角形和梯形微槽道内的流动和换热特性进行了数值分析,并结合数值计算结果分析得出如下结论:

- 1) 微小槽道内的摩阻系数随着 $Re$ 的增加而降低;摩阻系数随着高宽比的增加而增大,随着 $Re$ 的增加而减小。
- 2) 在雷诺数相同的情况下,矩形槽道的摩阻最大,而三角形槽道的摩阻最小。
- 3) 槽道类型和高宽比确定时, $Nu$ 随着 $Re$ 的增加而增加,但增加趋势逐渐趋于平缓。考虑进口效应、高宽比等因素的影响,拟合了符合不同槽道换热的经验公式,从模拟结果和拟合公式对比发现,拟合公式很好地表达了微槽道内的换热特性。

## 参 考 文 献

- 1 Liu Jun, Wu Pengli, Gao Ming. Wander and spreading of polarized and partially coherent laser propagation on slant path in turbulence atmospheric[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(10): 1013001  
刘 钧, 吴鹏利, 高 明. 偏振部分相干激光斜程湍流大气传输的漂移扩展[J]. *中国激光*, 2012, **39**(10): 1013001
- 2 Liu Kui, Feng Guoying, Deng Guoliang *et al.*. Difference in microstructures induced by femtosecond laser scanning on silicon surface at different temperatures[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(8): 0803003  
柳 崑, 冯国英, 邓国亮 等. 飞秒激光扫描不同温度下的硅片诱导形成微结构的差别[J]. *中国激光*, 2012, **39**(8): 0803003
- 3 Xu Gang, Liao Yong, Meng Fanbao *et al.*. Characteristics of two-layer patch microstrip antenna for high power wide-band microwave radiation[J]. *High Power Laser and Particles*, 2009, **21**(12): 1839~1844  
徐 刚, 廖 勇, 孟凡宝 等. 用于宽带高功率微波辐射的双层贴片天线特性[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(12): 1839~1844
- 4 Tao Yujia, Huai Xiulan, Li Zhigang *et al.*. Advancement of cooling techniques in high-power solid state laser[J]. *Laser*

Journal, 2007, **28**(2): 11~12

陶毓伽, 淮秀兰, 李志刚 等. 大功率固体激光器冷却技术进展[J]. 激光杂志, 2007, **28**(2): 11~12

5 D. B. Tuckerman, R. F. W. Pease. High performance heat sinking for VLSI [J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 1981, **2**(5): 126~129

6 X. F. Peng, G. P. Peterson. The effect of thermofluid and geometrical parameters on convection of liquids through rectangular microchannels [J]. *Internat. J. Heat & Mass Transfer*, 1995, **38**(4): 755~758

7 X. F. Peng, G. P. Peterson. Convective heat transfer and flow friction for water flow in microchannel structures [J]. *Internat. J. Heat & Mass Transfer*, 1996, **39**(12): 2599~2608

8 John P. Mchale, Suresh V. Garimella. Heat transfer in trapezoidal microchannels of various aspect ratios [J]. *Internat. J. Heat & Mass Transfer*, 2010, **53**(1-3): 365~375

9 Wang Yaqing, Liu Minghou, Liu Dong *et al.*. Effect of test surface temperature on the non-boiling heat transfer performance in spray cooling[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 115~120

王亚青, 刘明侯, 刘东 等. 喷雾冷却中散热面温度对无沸腾区换热特性的影响[J]. 中国激光, 2010, **37**(1): 115~120

10 Wang Yaqing, Liu Minghou, Liu Dong *et al.*. Experiment study on non-boiling heat transfer performance in spray cooling for high-power laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 1973~1978

王亚青, 刘明侯, 刘东 等. 大功率激光器喷雾冷却中无沸腾区换热性能实验研究[J]. 中国激光, 2009, **36**(8): 1973~1978

11 Dong Liu, Minghou Liu, Dan Xing *et al.*. Flow and heat transfer performance of a mini-channel radiator with cylinder disturbed flow [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2011, **35**(6): 1202~1208

12 Liu Dong, Liu Minghou, Wang Yaqing. Effect of cylinder disturbed flow on heat transfer performance of mini-channel radiators[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2508~2514

刘东, 刘明侯, 王亚青. 进口扰流对槽道散热器换热特性的影响[J]. 中国激光, 2010, **37**(10): 2508~2514

13 W. M. Kays, M. E. Crawford. *Convection Heat and Mass Transfer* [M]. New York: Mcgraw-Hill, 1993