

进出口位置对槽道流体分配和换热的影响

刘东¹ 蒋斌¹ 刘明侯²

(¹西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010
²中国科学技术大学热科学和能源工程系, 安徽 合肥 230027)

摘要 针对平行小槽道的流量分配问题, 设计了不同的进出口方式, 并采用数值方法研究其对槽道散热器内流量分配和换热特性的影响。结果表明, 进出口方式对槽道散热器内流量分配特性影响很大; 提出流量和换热不均匀系数来评价进出口方式的影响, 发现相同进出口方式下, 流量不均匀系数随着流量的增大而增大; 当槽道散热器流量相同时, 顶部中间(UC)进出口形式的散热器内流量不均匀系数最小; 当槽道面积一定时, 流量不均匀系数随槽道个数增加而减小; 流量一定时, 槽道的表面温度不平均系数随加热功率的上升而增加; 加热功率一定时, 热阻随着流量的增加逐渐减小并趋于定值。

关键词 激光器; 流量分配; 不均匀系数; 小槽道; 压降; 换热

中图分类号 TK124 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1003005

Inlet/Outlet Arrangement Effect on the Flow Distribution and Heat Transfer in Mini-Channels

Liu Dong¹ Jiang Bin¹ Liu Minghou²

¹ School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China

² Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology China, Hefei, Anhui 230027, China

Abstract Different inlet/outlet arrangements are proposed for parallel mini-channels and their effects on the flow distribution and heat transfer are numerically studied. It is found that different arrangements have great impact on the characteristics of flow distribution. The velocity and surface temperature inequalization coefficient are introduced to evaluate the effects of inlet/outlet arrangements. The results show that the velocity inequalization coefficient increases with the rise of flow flux when the inlet/outlet arrangement is fixed. The velocity inequalization coefficient of upper center (UC)-type arrangement is minimum in these numerical cases. And when the channel area is fixed, the velocity inequalization coefficient decreases with the rise of channel numbers. The surface temperature inequalization coefficient increases with the heat power. When the heat flux is fixed, the heat resistance decreases with the rise of heat flux and finally trends to a constant.

Key words lasers; flow distribution; inequalization coefficient; mini-channels; pressure drop; heat transfer

OCIS codes 140.3320; 140.6810; 350.5340

1 引言

强激光和高功率微波技术已经广泛应用于测量^[1]、通信^[2]、加工^[3]等方面。随着激光功率的提高其产生的废热也越来越多, 传统的冷却方式已经无法满足需求^[4]。1981年 Tuckerman 等^[5]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。将微槽道散热技术应用于激光冷却也越来越受到人们的重视^[6,7], 均匀、快速、有效地冷却激光器是研究者一直追求的目标。对于多槽道散热器而言, 其换热效

收稿日期: 2012-05-31; 收到修改稿日期: 2012-07-04

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

果直接取决于流量分配特性,同时也直接影响到激光器的冷却效果。

现有的多槽道散热器往往在槽道进口设置静压箱来均匀各个槽道内的流量。实验处理时,一般假设各个槽道内流量分配均匀,该假设与实际有一定差别^[8]。槽道内流量的分配直接影响槽道散热器换热效果,Lalot等^[9]研究换热器内部流量不均匀分配对换热效果的影响时发现,流量的不均匀分配可导致换热性能下降7%~25%。为此,研究者也试图采用不同的进出口方式来实现流体的均匀分配^[10~13]。Facão等^[12]采用实验和数值方法研究了平行槽道网络内的流量分配特性,并且提出了基于当地摩擦阻力的模型来设计和优化进出口形状。通常研究者应用微小槽道散热器时,往往采用在进出口设置静压箱来均匀流量。对于微小槽道而言,由于尺度的影响,静压箱上进出口设置方式对流量的分配影响很大。本文针对不同进出口排布方式的小槽道散热器内的流量分配和换热特性的影响进行研究,采用三维(3D)数值方法模拟平行槽道内的流量分配和换热特性,并参照实验结果提出无量纲流量和温度不均匀系数来评价进出口排布方式的影响,并分析影响平行小槽道内流量分配和换热的主要因素。

2 不同进口方式布置简述

为了研究不同的进出口方式对槽道散热器流量的影响,设计了8种不同类型进出口结合方式[端部中间(IC)、端部单侧(IO)、端部双侧(IT)、顶部中间(UO)、顶部单侧(ZO)、顶部双侧(UT)、侧面单侧(ZO)、侧面双侧(ZT)],如图1所示,并对其内的流动和换热特性进行了数值模拟。其中顶部中间(UC)设置进出口的小槽道散热器结构如图2所示。

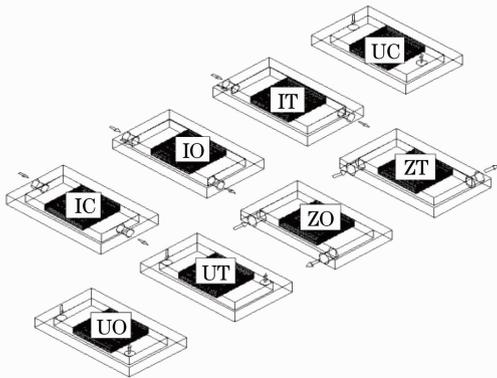


图1 不同槽道进出口形式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of channels in/out types

其具体尺寸为50 mm×30 mm×4 mm。在槽道散热器每边预留5 mm用于封装,在槽道进出口分别设置静压箱(20 mm×10 mm×3 mm)来安装散热器进出口和匀流;槽道静压箱顶部两端水平居中位置设置直径为3 mm的圆管作为散热器进出口,进出口圆心位于距散热器底边6.5 mm处(进出口边缘与封装内边缘相切)。槽道的有效冷却面积(槽道部分)尺寸为20 mm×20 mm。在该区域均匀设置33个宽度 W_c 为380 μm、深度 H 为3000 μm的槽道,槽道间肋片宽度 W_e 为220 μm。

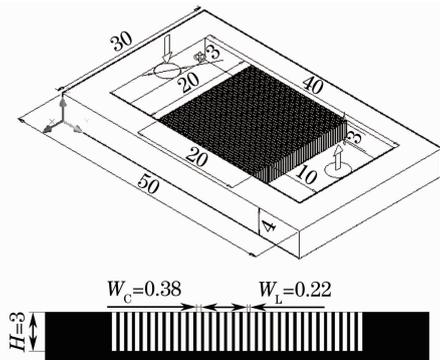


图2 UC型小槽道散热器结构图(单位:毫米)

Fig. 2 Schematic diagram of UC-type channel (unit: mm)

3 数值模型和计算方法

采用三维立体控制方程对流体在整个散热器的流动进行数值模拟,并做如下假设:1) 流体不可压缩且为层流;2) 流体在3D槽道中定常流动;3) 流体和固体的物性参数为常数;4) 槽道表面光滑;5) 忽略重力影响,散热器出口压力为大气压力。具体的控制方程为

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

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

式中 ρ 为密度, μ 为动力粘度, k 为固体导热系数, T 为温度, c_p 为流体定位比热。

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

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

计算时取散热器进口为质量进口,出口为压力出口,并且采用流固耦合边界条件。

4 参数设置和数据验证

采用去离子水 $[\rho=998.2 \text{ kg/m}^3, \mu=0.001003 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}]$ 为流体质。将整个散热器作为计算区域划分网格并计算,为了兼顾计算精度和计算量,在槽道进出口部分区域采用三角形网格,其余地方采用四边形网格。分别采用 15.1×10^5 、 9.7×10^5 、 6.5×10^5 个网格对端部中间进出槽道进行计算,考核网格独立性。图 3 给出流量为 0.01667 kg/s 时各个槽道内的最大流速分布图。从图中可以看出网格数为 6.5×10^5 时其中心部分槽道的流量较其他两种网格偏大,而其他两种槽道计算结果相差不大。为了节约计算量和优化计算结果,选用 9.7×10^5 网格来计算不同槽道内的流量分配。图 4 为端部中间进出槽道采用 9.7×10^5 网格划分后散热器的中部截面形状,其余结构的网格划分方法同该网格。

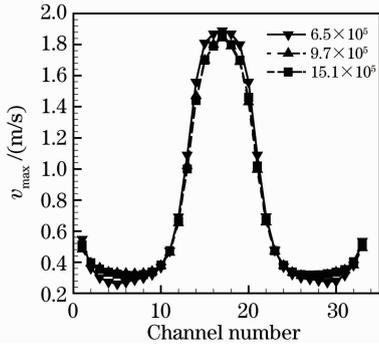


图 3 不同网格时 IC-type 槽内最大流速图
Fig. 3 Max velocity of IC-type channel with difference meshes

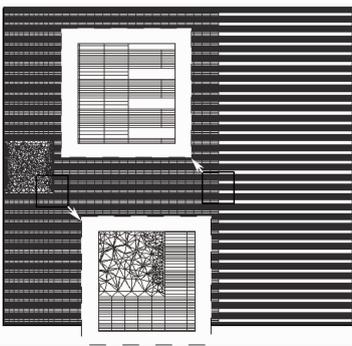


图 4 最优计算网格示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the optimum numerical mash

为了验证数值模型的正确性,对不同流量时 UC 槽道压降特性进行数值模拟,并与文献[13]实验结果比较(图 5),获得较好结果。

5 结果和讨论

图 6 给出了不同进出口条件下单槽流量分布关

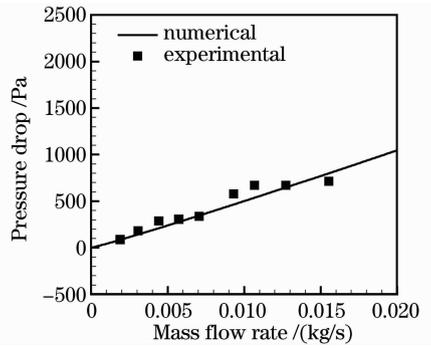


图 5 UC-type 槽道计算压降与实验结果对比

Fig. 5 Comparison between numerical and experimental data of the pressure drops in UC-type channel

系。从图中可以看出,进、出口形式对槽道内的流量分配影响很大。

从图 6 可以看出,I 系列(IC、IT 和 IO)散热器在正对进口位置的槽道存在一个质量流量峰,在峰值两侧槽道流量依次递减,远离进口位置槽道内质量流量较小。通过分析认为,由于进口位置流速较大,流体静压箱起不到太大的匀流作用。U 系列(UC、UO 和 UT)散热器内质量流量较为均匀。流体进入散热器时其速度方向垂直于槽道截面,其直接冲击静压箱底面并均匀分布到各个方向,从而增强流体在各个槽道内分配的均匀性。对比 UC 和 UO/UT,由于 UO 和 UT 位于槽道侧壁附近,此时侧壁的附壁效应导致流体在壁面附近几个槽道内流量较大,而其余槽道流量较为一致。UC 结构槽道内流量分配相对较为均匀。Z 系列(ZO 和 ZT)散热器内当流量较小时分布较为均匀;而当流量较大时,各个槽道内质量流量分配呈抛物线型分布。位于槽道进口 1/3 处质量流量最小,而距进口最远处的槽道内质量流量最大。当流量较小时,进口静压箱起到均流作用;当流量较大时,流体在进入槽道后迅速冲向侧面,撞击后进入槽道。此时距离侧壁面较近的槽道内流量较大,然后逐渐递减。且当流量较大时,由于出口位置压力大于该地区局部压力,此位置槽道还有可能出现回流现象。对比 ZO 和 ZT,由于 ZT 在出口区域回流区较 ZO 强烈,因而当流量较大时,ZT 回流更为明显。同时从图 6 还可以看出,最边上的槽道(第 33 槽)流量要稍微大一些,这是由于流体进入静压箱后会在静压箱中产生漩涡,此时,无论何种进出口方式,当漩涡撞击槽道和边壁夹角时,部分流体都会进入最边上槽道(第 33 槽)从而导致其流量偏大。

为更好地表述不同进出口排布方式对槽道内流

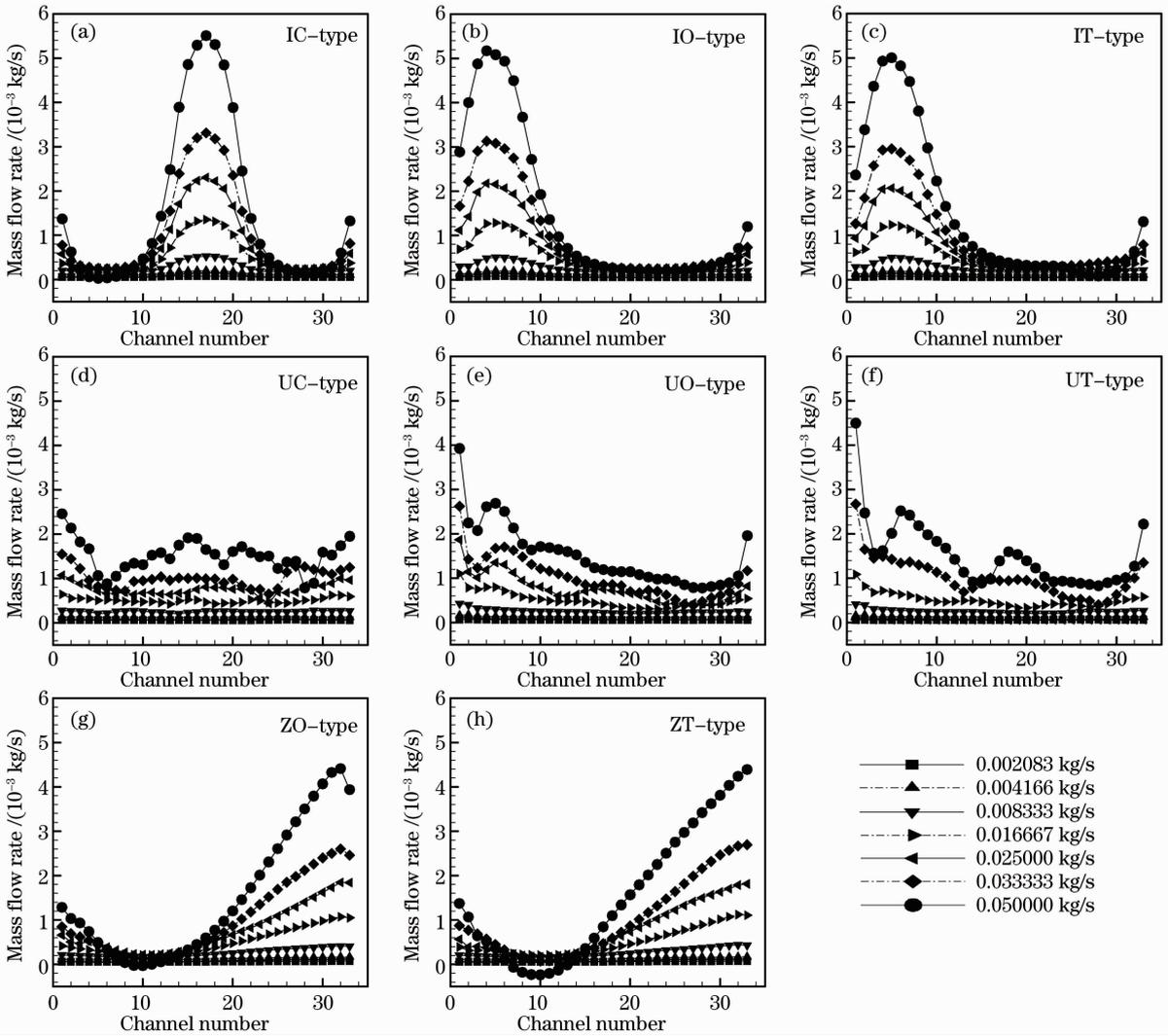


图6 不同槽道内的流量分配情况

Fig. 6 Flow distributions in different type channels

量分配特性的影响,综合考虑槽道个数、单个槽道内的流量及槽道的平均流量等因素,定义流量无量纲不均匀系数为

$$\zeta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{(G_i - \bar{G})^2}{\bar{G}^2}}, \quad (5)$$

式中 N 为槽道个数, G_i 为单槽道内的质量流量, \bar{G} 为各个槽道内的平均质量流量。分别计算不同进出口排布方式时 33 个平行槽道散热器内的不均匀系数,结果如图 7 所示。

从图 7 可以看出,不同的进出口形式对槽道内流量分配影响很大,同时还可以发现,同一类型槽道内的不均匀系数随质量流量的增加而增大。当流量增加到一定程度时,其增加趋势变缓,其中 I 系列槽道最为明显。U 系列槽道中,当质量流量大于 0.033 kg/s 时几乎不再增加。UC 槽道的不均匀系数最小,IC 槽道的不均匀系数最大。可见,相同结

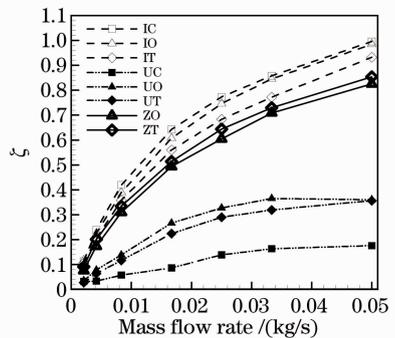


图7 不同进出口方式时无量纲不均匀系数与质量流量关系

Fig. 7 Relationship between the velocity inequality coefficient and mass flux

构的散热器结构,其槽道内流量分配与散热器总流量有一定关系。

为了研究不同槽道数量对流体分配不均匀系数的影响,对上述结果中最优(UC 槽道)和最差(IC 槽

道)的进出口形式进行分析,计算不同流量时槽道数量对槽道内流量分配的影响。在模拟中为了保证散热器尺寸、槽道内平均流速及槽道分布形式不变。当槽道个数改变时,肋宽度相应变化如表 1 所示。图 8 为 IC 型散热器各流量不均匀系数随槽道数量的变化。结果表明,当流量一定时,随着槽道数量的增加,流量不均匀系数减小。IC 槽道进入散热器时为射流状态,射流到达肋片端部时被肋端阻挡形成一个滞止区,流体绕过滞止区进入旁边槽道或向其他槽道分流。射流到达槽道时与被阻挡的流体相互作用,或进入槽道内或分流到其他槽道。当槽道数量较少时,射流覆盖区域内的肋片数量少,且槽道宽度较大,此时肋端的分流效应对射流的影响较小,大部分流体直接进入槽道。随着槽道数量增加,肋端的扩散效应增大,于是流量不均匀系数变小。图 9 为不同流量时 UC 型散热器不均匀系数随槽道数量的变化。流量一定时,流量不均匀系数随槽道数量的增加而减小。UC 槽道内流体进入散热器时射流直接冲击散热器底部后向四周流动;当流体遇到肋片端部阻挡时会形成二次分流,二次分流流体直接和未撞击到肋片的流体一起进入槽道或向旁边槽道流动。当槽道数量较少时,肋片数量较少,且肋片宽度较大。此时二次分流对进入槽道的流体影响较小。随着槽道数量的增加,二次分流效应对进入槽道的流体影响越来越大,进口处的流体流动复杂,进口静压箱的效应显现。因此,流量分配不均匀系数迅速减小并趋于定值。

表 1 不同槽道个数下槽道尺寸

Table 1 Channel size of different channels

Channel number N	10	20	33
Channel width W_C /mm	1.254	0.627	0.38
Channel height H /mm	3	3	3
Fin width W_E /mm	0.782	0.3705	0.24

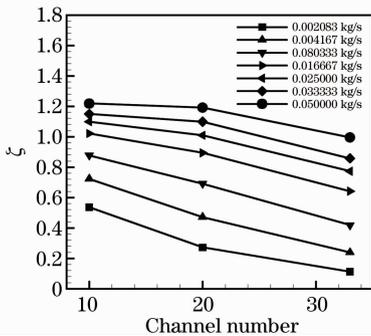


图 8 IC 流量不均匀系数与槽道数量关系

Fig. 8 Relationship between the velocity inequality coefficient of IC-type and channel number

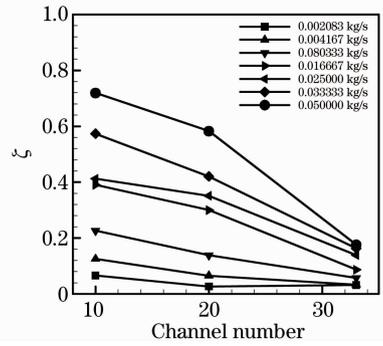


图 9 UC 流量不均匀系数与槽道数量关系

Fig. 9 Relationship between the velocity inequality coefficient of UC-type and channel number

对散热器而言,槽道内的流量均匀性直接影响换热效果,Lalot 等^[9]总结了流量分配对换热的影响:当槽道内流量分配均匀时,换热效果最好且表面温度不平均度最小。因此只针对最优的进口排布方式(UC)下的槽道散热器内不同流量、不同加热功率对换热的影响进行研究。

小槽道散热研究中,研究者不仅关注散热量的大小,散热器底面温度均匀性也是关注的重点,定义温度不平均系数 ζ_T 和散热器热阻 R_{th} 为

$$\zeta_T = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{ave}} \quad (6)$$

$$R_{th} = \frac{T_{max} - T_{in}}{q_w A} \quad (7)$$

式中 T_{max} 、 T_{min} 分别为槽道底面最高和最低温度, T_{in} 为流体进口温度, T_{ave} 为槽道底部平均温度, q_w 为槽道加热热流密度, A 为槽道底面面积。

图 10 和图 11 分别为底面厚度为 0.0001 m 时 UC 进出口排布形式散热器温度不平均系数随加热功率及热阻随槽道内质量流量的变化关系图。从图 10 可以看出,流量一定时,槽道的表面温度不平均系数随加热功率的上升而增加;而进口温度对槽

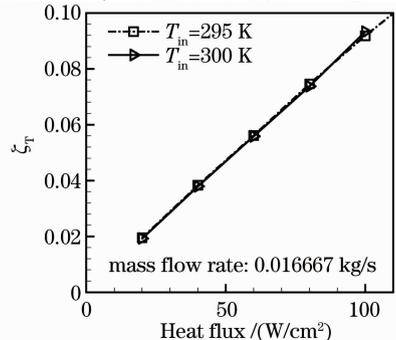


图 10 温度不平均系数与加热功率关系

Fig. 10 Relationship between the temperature inequality coefficient and heat flux

道底面温度不平均系数影响不大。由图 11 可以看出,当加热功率为 80 W/cm^2 时,随着质量流量增加,热阻减小,但减小的趋势变缓并趋于定值。在加热功率一定,流体流量较小时,流体流出散热器的温度较高。此时,散热出口部分的底面温度也高,热阻较大。随着流量的增加,流体流出散热器时温度变低,相应散热器底面温度降低,热阻逐渐减小;随着流体流量的增加,流体温升速率越来越小,散热器底面温度降低速率变小。因此热阻减小幅度变小,最后趋于定值。

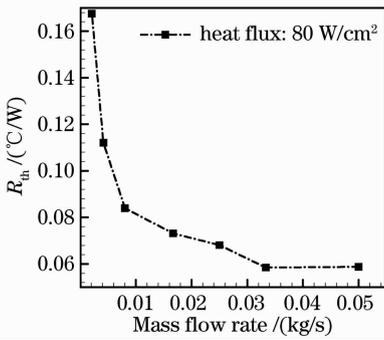


图 11 热阻随质量流量变化关系图

Fig. 11 Relationship between the heat resistance and flow flux

6 结 论

采用数值方法对不同进出口的槽道散热器内流量分配进行研究,得到如下结论:

1) 进出口方式排布对小槽道内流量的分配影响很大。UC 进出口排布方式槽道间流量分配最均匀,而 IC 进出口排布方式槽道间流量分配最不均匀。在本文的研究范围内,UC 进出口排布方式的流量不平均系数在 0.2 以下。

2) 相同进出口排布方式时,流量不均匀系数随进口流量的增大而增大,但随槽道数量的增加而减小。

3) 对平行槽道散热器而言,UC 进出口排布方式可较好地均匀槽道内流量。

4) 流量一定时,槽道的表面温度不平均系数随加热功率的上升而增加。而进口温度对槽道底面温度不平均系数影响不大;当加热功率一定时,热阻随着流量的增加逐渐减小并趋于定值。

参 考 文 献

- Ye Zhenxing, Su Yang, Zhu Yong *et al.*. Study on the pressure sensing measurement based on Stokes parameters of fiber gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(6): 0605003
- 叶振兴, 苏洋, 朱勇等. 基于光纤光栅斯托克斯参量的压力传感测量研究[J]. *中国激光*, 2012, **39**(6): 0605003
- Xu Gang, Liao Yong, Meng Fanbao *et al.*. Characteristics of two-lower patch microstrip antenna for high power wide-band microwave radiation [J]. *High Power Laser and Particles Brams*, 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
- Mei Lifang, Chen Genyu, Liu Xufei *et al.*. Three-dimensional laser cutting technology in auto-body panel [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3308~3312
- 梅丽芳, 陈根余, 刘旭飞等. 车身覆盖件的三维激光切割工艺[J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3308~3312
- 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
- D. B. Tuckerman, R. F. W. Prese. High-performance heat sinking for VLSI[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 1981, **2**(5): 126~129
- Liu Dong, Liu Minghou, Wang Yaqing *et al.*. Experimental studies on large height/width ratio and mini-channel radiator for high power density laser cooling [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 640~645
- 刘东, 刘明侯, 王亚青等. 大高宽比小槽道冷却大功率激光器的实验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 640~645
- Wang Aiguo, Yuan Junfei, Wu Deyong *et al.*. Micro-channel heat sink with two phase impinging jets for laser diode bar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1002003
- 王爱国, 袁俊飞, 武德勇等. 两相冲击强化换热激光二极管用单片热沉[J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 1002003
- H. C. Chiu, J. H. Jang, H. W. Yeh *et al.*. The heat transfer characteristics of liquid cooling heatsink containing microchannels [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, **54**(1-3): 34~42
- S. Lalot, P. Florent, S. K. Lang *et al.*. Flow maldistribution in heat exchangers [J]. *Applied Thermal Engineering*, 1999, **19**(8): 847~863
- J. M. Commenge, L. Falk, J. P. Corriou *et al.*. Optimal design for flow uniformity in microchannel reactors [J]. *AIChE Journal*, 2002, **48**(2): 345~358
- J. Yue, R. Boichot, L. Luo *et al.*. Flow distribution and mass transfer in a parallel microchannel contactor integrated with constructal distributors [J]. *AIChE Journal*, 2010, **56**(2): 298~317
- J. Facão, J. Gruss. Flow distribution in a network of minichannels: simulation and experiment [C]. *SHF-Microfluidics*, 2006. 12~14
- Liu Dong, Liu Minghou, Wang Yaqing *et al.*. Experimental study on the friction pressure drop of water flow in mini-channels with circular cylinder disturbed flow [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2010, **42**(6): 1006~1012
- 刘东, 刘明侯, 王亚青等. 带扰流小槽道内单相流动阻力特性实验[J]. *力学学报*, 2010, **42**(6): 1006~1012