

# 基于正交试验方法的毛细矩形槽道 平均流速影响因素分析

苏开华, 吴磊, 程国飞

(中山火炬职业技术学院 装备智造学院, 广东 中山 528437)

**摘要:** **目的** 分析毛细矩形槽道平均流速的影响因素。**方法** 通过公式推导毛细矩形槽道平均流速的有关影响因素, 并且从中提取出部分因素, 选用三因素三水平的正交试验表对流速进行分析, 三因素分别为槽道宽度、槽道深度、槽道长度。通过CFX仿真得出对应的平均流速。**结果** 得到了各因素水平变化对毛细矩形槽道平均流速的影响程度。槽道宽度及槽道深度对于毛细槽道平均流速具有比较大的影响, 并得到最优的水平组合。**结论** 对于毛细矩形槽道平均流速的影响因素给出了比较清晰的剖析, 对于毛细矩形槽道传热的优化分析具有一定的参考意义。

**关键词:** 毛细矩形槽道; 平均流速; 正交试验

中图分类号: TK172

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)02-0052-05

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.02.009

## Analysis of Factors Affecting Average Velocity of Capillary Rectangular Channel Based on Orthogonal Test Method

SU Kai-hua, WU Lei, CHENG Guo-fei

(Equipment Manufacturing Department, Zhongshan Torch Polytechnic, Zhongshan 528437, China)

**ABSTRACT:** In order to analyze the factors affecting the average velocity of capillary rectangular channel, this paper deduces the factors affecting the average velocity through the formula, analyzes the flow velocity in terms of the channel width, channel depth, and channel length by the three-factor three-level orthogonal test table and obtains the average velocity through CFX simulation. Then, the influence of various factors on the average velocity of the capillary rectangular channel is obtained. Among them, the channel width and channel depth have a relatively great effect on the average velocity of the capillary channel. In addition, the optimal level combination is obtained. Therefore, a clear analysis of the factors affecting the average velocity of the capillary rectangular channel is given, which is of reference significance for the optimization analysis of heat transfer in capillary rectangular channels.

收稿日期: 2020-07-26; 修订日期: 2020-08-30

Received: 2020-07-26; Revised: 2020-08-30

基金项目: 广东省普通高校重点科研项(2018GKTSCX044)

Fund: Supported by the Key Scientific Research Project of General Colleges and Universities in Guangdong Province (2018GKTSCX044)

作者简介: 苏开华(1980—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为机械装备结构设计及其教学研究。

Biography: SU kai-hua (1980—), Male, Master, Engineer, Research focus: mechanical equipment structure design and teaching research.

通讯作者: 吴磊(1979—), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为机械设计与制造及其教学。

Corresponding author: WU Lei (1979—), Male, Master, Associate professor, Research focus: mechanical design and manufacturing and teaching.

引文格式: 苏开华, 吴磊, 程国飞. 基于正交试验方法的毛细矩形槽道平均流速影响因素分析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(2):052-056.

SU Kai-hua, WU Lei, CHENG Guo-fei. Analysis of factors affecting average velocity of capillary rectangular channel based on orthogonal test method[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(2): 052-056.

**KEY WORDS:** capillary rectangular channel; average velocity; orthogonal test

随着计算机性能的不不断提升,电子元器件的散热是制约其性能的重要因素之一<sup>[1-3]</sup>,目前均热板开始用于高热量的电子元器件散热<sup>[4-7]</sup>。均热板的散热性能与其内部的槽道有关<sup>[8-12]</sup>,而内部槽道的液体流速则可以更加直接地反应其散热效果。因此探究毛细矩形槽道平均流速的影响因素是非常有必要的。

### 1 毛细矩形槽道平均流速理论推导

毛细槽道如图 1 所示,槽道深为  $H$ ,宽为  $2W$ ,长为  $L$ ,侧面有一个面与空气接触,其余三个为铜壁面。为方便计算,等效为如图 2 所示槽道的下半部分,其中槽道深为  $2H$ ,宽为  $2W$ ,长为  $L$ ,四个侧面均为铜壁面。这是因为图 1 槽道与空气接触的面上槽道流体与空气接触的内摩擦力近似为 0,而图 2 槽道处中间层两侧由于对称性是相等的,因而由牛顿内摩擦定律可知,中间一层内摩擦力以为 0,故可近似等效于图 2 槽道的下半部分。

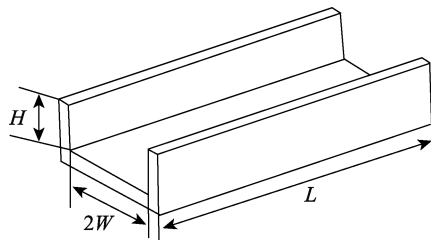


图 1 毛细槽道  
Fig.1 Capillary channel

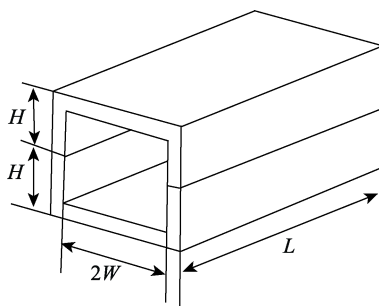


图 2 毛细槽道等效的计算图  
Fig.2 Equivalent calculation diagram of capillary channel

由于毛细矩形槽道的孔径很小,毛细矩形槽道内的液体在毛细力驱动下的流动可以认为是层流。层流的流动分为入口段和充分发展段<sup>[13]</sup>。流动入口段相对于充分发展段很小,因而可以忽略不计。现只考虑毛细矩形槽道内充分发展好的流动。

毛细矩形槽道内层流的流动控制方程可以由 Navier-Stokes 方程<sup>[14]</sup>得到,Navier-Stokes 方程在笛卡尔坐标系下的表达式为:

$$\begin{aligned} \rho \frac{du}{dt} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \left( 2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{u} \right) \right) + \\ &\frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right) + \rho g_x \\ \rho \frac{dv}{dt} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \left( 2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{u} \right) \right) + \\ &\frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right) + \rho g_y \\ \rho \frac{dw}{dt} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \left( 2 \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{u} \right) \right) + \\ &\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right) + \rho g_z \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{u}$  为速度矢量,  $\mathbf{u}=(u,v,w)$ ;  $\mu$  为液体黏度;  $p$  为毛细压。

对图 2 中的毛细矩形槽道建立如图 3 所示的笛卡尔坐标系,坐标原点建立在矩形槽道截面的中心位置。

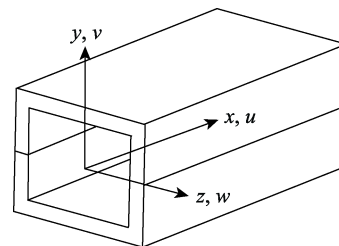


图 3 笛卡尔坐标系的建立  
Fig.3 Establishment of a Cartesian coordinate system

毛细矩形槽道中充分发展好的流动满足以下条件:

1) 流动是稳定的,属于定常流动,因而各参量不随时间变化,即  $\frac{\partial}{\partial t} = 0$ 。

2) 流动速度在  $y$ 、 $z$  轴方向的速度分量为 0,只有  $x$  方向的速度,即  $v=0, w=0$

3) 流体为不可压缩流体,  $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$ 。

4) 毛细压力在矩形槽道截面内分布均匀,即  $\frac{\partial p}{\partial y} = 0, \frac{\partial p}{\partial z} = 0$ 。

5) 相对于毛细压力,重力影响很小,忽略重力因素,即  $g = 0$ 。

式(1)简化为:

$$\begin{aligned} 0 &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ 0 &= \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ 0 &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

毛细矩形槽道毛细压力为  $2\Delta p$ ，长度为  $L$ ，则由式(2)得到：

$$\begin{aligned} \frac{u}{y} + \frac{u}{z} &= \alpha y + \beta z + \gamma \\ \alpha + \beta &= -\frac{2\Delta p}{\mu L} \\ u &= \frac{1}{2}\alpha y^2 + \frac{1}{2}\beta z^2 + \delta y + \varepsilon z + \zeta \\ \delta + \varepsilon &= \gamma \end{aligned} \quad (3)$$

考虑到毛细矩形槽道流速的对称性，则：

$$\begin{aligned} \delta &= \varepsilon = \gamma = 0 \\ u &= \frac{1}{2}\alpha y^2 + \frac{1}{2}\beta z^2 + \zeta \end{aligned} \quad (4)$$

考虑边界条件，根据解的形式，只考虑横截面以下两点处的速度并毛细矩形槽道速度滑移：

$$\begin{aligned} u(y=H, z=0) &= -b \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{(y=H, z=0)} \\ u(z=W, y=0) &= -b \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{(z=W, y=0)} \end{aligned} \quad (5)$$

式中： $b$ 为速度滑移长度。联立式(4)、(5)得：

$$\begin{aligned} \alpha &= -\frac{2\Delta p}{\mu L} \frac{W^2 + 2bW}{H^2 + W^2 + 2b(H+W)} \\ \beta &= -\frac{2\Delta p}{\mu L} \frac{H^2 + 2bH}{H^2 + W^2 + 2b(H+W)} \\ \zeta &= \frac{2\Delta p}{\mu L} \frac{(H^2 + 2bH)(W^2 + 2bW)}{H^2 + W^2 + 2b(H+W)} \end{aligned} \quad (6)$$

故图1中毛细矩形槽道单位时间内横截面的流量为：

$$\dot{V} = 2 \int_0^W \int_0^H u \, dy \, dz \quad (7)$$

由式(4)、(6)、(7)得：

$$\dot{V} = \frac{2\Delta p H^2 W^2}{3\mu L} \frac{4b(H+W) + HW + 12b^2}{H^2 + W^2 + 2b(H+W)} \quad (8)$$

图1中毛细矩形槽道毛细压力的大小为：

$$\Delta p = \frac{\sigma[(H+W)\cos\theta - W]}{HW} \quad (9)$$

式中： $\sigma$ 为液体表面张力； $\theta$ 为接触角。

将式(9)代入式(8)得：

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{2\sigma HW [(2H+W)\cos\theta - W]}{\mu L} \\ &\quad \frac{4b(H+W) + HW + 12b^2}{H^2 + W^2 + 2b(H+W)} \end{aligned} \quad (10)$$

图1毛细矩形槽道平均流速为：

$$u_B = \frac{\dot{V}}{2HW} = \frac{\sigma[(H+W)\cos\theta - W]}{3\mu L} \frac{4b(H+W) + HW + 12b^2}{H^2 + W^2 + 2b(H+W)} \quad (11)$$

当无速度滑移时，毛细矩形槽道平均流速为：

$$u_B = \frac{\sigma[(H+W)\cos\theta - W]}{3\mu L} \frac{HW}{H^2 + W^2} \quad (12)$$

从理论上讲，毛细矩形槽道平均流速是槽道宽度、深度和长度的函数，现需从仿真分析的角度来看槽道宽度、深度和长度对毛细矩形槽道平均流速的影响。

## 2 试验方法

正交试验法能够大幅度减少试验次数，而且不会降低试验可行性<sup>[15-21]</sup>。本试验采用正交试验方法对毛细矩形槽道平均流速的影响因素进行分析，主要的分析数据及根据来源于采用CFX仿真分析所得出的数据，实验过程中不考虑所选因素间的交互影响。具体的试验设计过程：首先分析毛细矩形槽道平均流速的影响因素，处理并提取3个可能对分析目标有较大影响的易处理因素；然后对提取的因素进行具体深入的分析，确定各因素对应的3个水平数；再选取适合的正交分析表，通过仿真实验处理相应数据并记录到正交表；最后进行计算、分析，得出试验结论。

## 3 试验过程

对毛细矩形槽道平均流速的影响因素进行分析，确定正交试验分析因素和水平，指定因素水平表。前文已经对毛细矩形槽道平均流速进行了理论上的分析，得出了毛细矩形槽道平均流速是槽道宽度（因素A）、深度（因素B）和长度（因素C）的函数，因此对该三种因素的取值见表1。选取 $L_9(3^3)$ 正交表，见表2。

根据上述参数建模进行仿真，采用公式(9)及相应的尺寸参数对毛细压力 $\Delta p$ 进行计算，建立模型。将进出口压差设置为 $\Delta p$ ，边界条件为速度无滑移。记录数据并作相应计算见表3。

表1 因素取值  
Tab.1 Values of factors

因素水平	A	B	C
1	0.0003	0.0001	0.01
2	0.0004	0.0002	0.02
3	0.0005	0.0003	0.03

表 2 正交表  
Tab.2 Orthogonal table

因素水平	A	B	C	空列
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

表 3 仿真结果  
Tab.3 Simulation results

因素水平	A	B	C	空列	毛细矩形槽道平均流速 $u/(m \cdot s^{-1})$
1	1	1	1	1	0.022 334
2	1	2	2	2	0.024 073
3	1	3	3	3	0.025 812
4	2	1	2	3	0.027 552
5	2	2	3	1	0.029 291
6	2	3	1	2	0.031 031
7	3	1	3	2	0.032 77
8	3	2	1	3	0.034 51
9	3	3	2	1	0.036 25
$K_1$	0.072219	0.082655	0.087875	0.087875	
$K_2$	0.087874	0.087874	0.087875	0.087874	0.263621
$K_3$	0.103529	0.093092	0.087873	0.087874	
$R$	0.03131	0.010437	0.000002	0.000001	

## 4 实验结果分析

根据正交试验方法理论， $R$  值越大，说明该因素的水平变化对试验结果指标影响越大，因而这个因素对试验指标就越重要。故在本试验中，槽道宽度及槽道深度是主要因素，槽道长度因素的影响相对小一些。

最优方案一般就是最优水平的组合，所谓最优水平的组合就是指全体最优水平组成的试验条件。当试验指标最大最好时，以每列的  $K_i$  中数值最大的相应水平为最优水平。

本试验中，因素 A 中最优水平为水平 3，因素 B 中最优水平为水平 3，因素 C 中最优水平为水平 1 或 2。因此，最优水平组合为 A3B3C1 或者 A3B3C2。

## 5 结论

文中采用正交试验方法对影响毛细槽道平均流速的槽道宽度、槽道深度、槽道长度等三个因素选取

三水平做了分析，得到了各因素水平变化对毛细槽道平均流速的影响程度以及最优的水平组合。总体而言，槽道宽度及槽道深度对于毛细槽道平均流速具有比较大的影响。

### 参考文献：

- [1] 桂许龙. 电子器件热可靠性及相关设备研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.  
GUI Xu-long. Researches on thermal reliability and relative equipment of electronic component[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [2] 李庆友, 王文, 周根明. 电子元器件散热方法研究[J]. 电子器件, 2005(4): 937-941.  
LI Qing-you, WANG Wen, ZHOU Gen-ming. Status of techniques on heat dissipation in electronic components[J]. Chinese journal of electron devices, 2005(4): 937-941.
- [3] 赵地. 嵌入式计算机系统功耗散热分析及优化设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.  
ZHAO Di. Design and optimization of power and heat dissipation in embedded computer system[D]. Xi'an Xi-dian University, 2007.
- [4] 陈慧雁. 高热流密度相变均热板传热特性的理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.  
CHEN Hui-yan. Numerical analysis of the heat transfer character of cold plate of two-phase with high heat flux[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [5] 姜勇, 李骥. 均热板散热器的数值分析与结构优化[J]. 中国科学院研究生院学报, 2012, 29(2): 169-174.  
JIANG Yong, LI Yi. Numerical simulation and structural optimization of a vapor chamber[J]. Journal of Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2012, 29(2): 169-174.
- [6] 彭毅. 基于植物叶片结构的仿生均热板研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.  
PENG Yi. Study of bionic vapor chamber based on the plant leaf structure[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [7] 田玉福. 新型分形结构及其电子器件微通道散热应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.  
TIAN Yu-fu. Research of a novel fractal structure and its application of micro-channels heat dissipation for electronic device[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [8] 曹莹, 孙定伟. 均热板散热效能研究[J]. 机械工程师, 2018(12): 150-151.  
CAO Ying, SUN Ding-wei. Research on heat dissipation performance of vapor chamber[J]. Mechanical engineer, 2018(12): 150-151.
- [9] 曹志良. 均热板散热结构的设计研究[J]. 电子器件, 2019, 42(5): 1344-1350.  
CAO Zhi-liang. Design and research of heat plate heat dissipation structure[J]. Chinese journal of electron de-

- vices, 2019, 42(5): 1344-1350.
- [10] 康明魁, 王晓明, 李海涛, 等. 铝基均热板散热性能试验对比研究[J]. 电子机械工程, 2019, 35(3): 31-34.  
KANG Ming-kui, WANG Xiao-ming, LI Hai-tao, et al. Experimental comparative research on heat dissipation performance of aluminous vapor chamber[J]. Electro-mechanical engineering, 2019, 35(3): 31-34.
- [11] 刘旺玉, 王力, 罗远强. 仿叶脉分形结构在均热板蒸发端的实验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2017, 45(1): 118-122.  
LIU Wang-yu, WANG Li, LUO Yuan-qiang. Analysis of heat transfer channel surface characteristic of micro heat exchanger based on young's theory[J]. Journal of South China University of Technology (natural science edition), 2017, 45(1): 118-122.
- [12] 鲁亚龙, 周俊杰. 弧形通道散热器流动与传热的数值模拟研究[J]. 低温与超导, 2019, 47(8): 80-84.  
LU Ya-long, ZHOU Jun-jie. Numerical simulation of flow and heat transfer of arc microchannel heat sink[J]. Refrigeration, 2019, 47(8): 80-84.
- [13] 刘君. 微通道流动特性的数值分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.  
LIU Jun. Numerical analysis of micro channel flow[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [14] 贾艳. 流体动力学方程组的性态研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2014.  
JIA Yan. The behaviors for equations modelling fluid dynamics[D]. Hefei: Anhui University, 2014.
- [15] 蔡奇或. 微通道散热器流道优化与传热性能研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.  
CAI Qiao. Research on the flowpath optimization of microchannel heat sinks and heat transfer performance[D]. Chengdu: University of Electronic Technology of China, 2015.
- [16] 成兰英, 王光辉. 正交试验法与代数法的联用原理[J]. 西南工学院学报, 1999(4): 68-71.  
CHENG Lan-ying, WANG Guang-hui. The test principle by combining cross-over experiment with algebraic method[J]. Journal of Southwest Institute of Technology, 1999(4): 68-71.
- [17] 丁承民, 张传生, 刘贵忠. 利用正交试验法优化配置遗传算法参数[J]. 西安交通大学学报, 1997(9): 83-88.  
DING Cheng-min, ZHANG Chuan-sheng, LIU Gui-zhong. Configure the control parameters of genetic algorithms using othogonal experimental method[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1997(9): 83-88.
- [18] 傅立军, 包忠诒, 陈泽中, 等. 正交试验法、神经网络和遗传算法的结合[J]. 南昌大学学报(工科版), 2003(1): 79-82.  
FU Li-jun, BAO Zhong-zhong, CHEN Ze-zhong, et al. Combination of orthogonal experimental method, neural networks and genetic algorithms[J]. Journal of Nanchang University (engineering & technology), 2003(1): 79-82.
- [19] 刘福东, 李毅, 刘焯. 单因素法和正交试验法在参数敏感性分析中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(6): 85-88.  
LIU Fu-dong, LI Yi, LIU Yi. The application of single index test and orthogonal test in the analysis of parameter sensitivity[J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2015, 13(6): 85-88.
- [20] 杨彬. 平板硫化机热板温度均匀性优化研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2017.  
YANG Bin. Study on optimization of temperature uniformity for heated plates of press curing machine[D]. Ningbo: Ningbo University, 2017.
- [21] 赵震. 基于正交试验法的对旋轴流风机 CFD 数值模拟分析[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.  
ZHAO Zhen. CFD numerical simulation analysis of the contra-rotating axial flow fan based on orthogonal test[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014.