

# 数值正交方法在微槽道散热器性能优化上的运用

王亚青<sup>1</sup> 刘东<sup>2</sup> 刘明侯<sup>2</sup> 王璐<sup>1</sup> 郭红<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>中国电子科技集团第三十八研究所, 安徽 合肥 230088)  
(<sup>2</sup>中国科学技术大学热科学和能源工程系, 安徽 合肥 230027)

**摘要** 对自行设计的插入式微槽道散热进行数值计算。重点研究了影响散热效果、槽道阻力的 3 个主要因素: 流量、流体工质类型和插入肋片的接触方式。通过正交方法进行数值计算, 给出了最优的槽道设计方式、流量和流体工质的组合, 并计算了各个因素对散热效果的显著性水平。通过计算耗时和成本的比较, 说明数值正交方法在优化设计方法上的优势。

**关键词** 激光技术; 槽道散热; 正交模拟; 优化设计

**中图分类号** TK124 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0702011

## Optimized Design of Micro-channel Heat Sinks with Orthogonal Simulation

Wang Yaqing<sup>1</sup> Liu Dong<sup>2</sup> Liu Minghou<sup>2</sup> Wang Lu<sup>1</sup> Guo Hong<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>The 38th Institute of China Electronics Technology group Corporation, Hefei, Anhui 230088, China)  
(<sup>2</sup>Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China)

**Abstract** The brand-new micro-channel heat sinks are designed using plug-in fins and simulated. The impact factors, namely coolant, flow rate and heat sink geometry, are considered in the study of the flow and heat transfer performance of heat sink. The optimal operating condition is obtained by the method of orthogonal simulation by considering the notability of each factor. It is found that the orthogonal simulation method can save cost both in time and money. The orthogonal simulation method performs well in the design of channel sink.

**Key words** laser technique; channel heat sink; orthogonal simulation; optimized design

**OCIS codes** 000.6850; 020.3320; 140.6810

## 1 引 言

激光技术的发展已经深入到生活的各个领域, 随着激光发射功率的增加, 散热问题已成为制约其发展的重要瓶颈<sup>[1~7]</sup>。微槽道冷却由于单位体积的表面积较大、冷却能力强、集成简单, 已成为激光器冷却的首选方式。但由于工程设计、系统优化等存在一定的难度, 暂时还没有大规模的使用。

自 1981 年 Tuckerman 等<sup>[8]</sup>在硅基表面刻宽为 50~56  $\mu\text{m}$ 、高为 287~320  $\mu\text{m}$  的微槽, 以水作为冷却介质进行实验, 在进出口温差为 71  $^{\circ}\text{C}$  的情况下得到了 790  $\text{W}/\text{cm}^2$  的换热量, 从而开创了槽道冷却的

新途径。自此以后, 研究者对微槽道内流动和传热进行了大量的研究<sup>[9~11]</sup>。普遍认为: 随着槽道宽度的减小, 换热效率增加的同时压降急速增加。因此, 如何平衡换热效率和压降问题一直是研究重点。现有实验和数值计算, 大多针对某一槽道或某几个槽道的流动和散热特性进行分析, 给出一个或几个合适的经验公式或计算拟合公式。而针对几种槽道结构、换热介质以及流动速率的综合考虑的研究基本没有文献涉及。槽道研究中涉及参数较多, 包括槽长、槽高、槽宽、流量大小、压降高低、肋片接触方式等。由于实验条件和测试方法的差异, 实验结果千

收稿日期: 2010-12-15; 收到修改稿日期: 2011-03-17

作者简介: 王亚青(1983—), 男, 博士, 工程师, 主要从事大功率激光器件冷却方面的研究。

E-mail: wangyq05@mail.ustc.edu.cn

差万别,很难从不同文章的对比中获得一个最优的方案,给工程运用、系统优化带来了较大难度。现阶段微槽道的加工主要依赖于线切割,而加工线有一定的半径,槽道底端很难加工成规则的方型,这样给数值仿真优化设计带来了一定的难度。

本文针对 20 mm×20 mm 的散热面自行设计了插入小肋片的 5 槽道散热器,此种插入式设计可较好地解决线切割所带来的问题。运用数值正交方法研究不同的流体工质、质量流量以及肋片插入方式对换热性能和压降的影响,从而优化实验方案。

## 2 计算模型及边界条件

自行设计的散热器结构如图 1 所示,其由 5 个小槽道组成。每个小槽道的长宽高分别为 20 mm, 3 mm, 5 mm, 槽道底部为 1 mm。为增强换热,在槽道中插入小肋片来增大换热面积。肋片采用直接插入的方式,在每个小槽道内插入 8 块厚度为 100 μm 的肋片,且采用不同的连接方式(上部接触、全部接触、下部接触)。在连接情况不同时,工质和质量

流量亦选用了 3 种不同的工况,采用正交分析法确定最佳的连接方式、质量流量以及流体工质的组合。在正交方案设计中,各因素取 3 个水平,具体的影响因素及水平的取值见表 1。

表 1 影响因素及水平取值

Table 1 Effect factor and degree

Level	Mass flow A / (kg/h)	Fluid media B	Type of contact C
1	20	water	front
2	60	alcohol	all
3	40	methanol	bottom

由于槽道散热具有相似性和对称性,在对槽道进行数值计算时选取其一半作为计算区域,见图 2 (槽道长度方向为  $x$  轴,宽度方向为  $y$  轴,高度方向为  $z$  轴),具体尺寸见表 2。图 2 中虚线为对称面。槽道的长度在图中没有表示。 $L$  为槽道的高度, $L_d, L_k, L_f$  分别为槽道底部的厚度、小铜箔与槽道底部的非接触深度和铜箔的高度。 $W$  为半槽道的宽度, $W_f$  为原有肋片宽度, $W_i$  为插入肋片宽度, $W_c$  为槽道宽度。

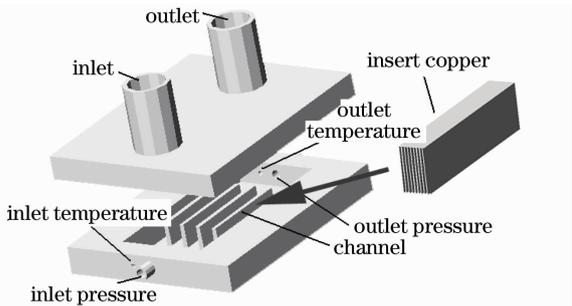


图 1 槽道散热器示意图

Fig. 1 Sketch map of channel heat sink

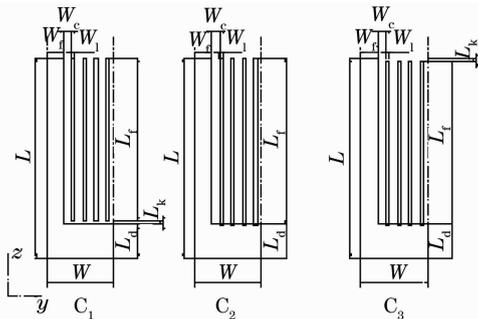


图 2 3 种槽道连接方式计算示意图

Fig. 2 Geometry of the channel heat sinks

表 2 槽道尺寸表

Table 2 Sizes of channels

Type of contact	$L$	$L_d$	$L_f$	$L_k$	$W$	$W_f$	$W_c$	$W_i$
Front not bottom ( $C_1$ ) /mm	6	1	4.9	0.1	2	0.5	0.244	0.1
Not contact ( $C_2$ ) /mm	6	1	5	0	2	0.5	0.244	0.1
Bottom not front ( $C_3$ ) /mm	6	1	4.9	0.1	2	0.5	0.244	0.1

在计算的工况下,雷诺数较小( $Re < 100$ )为层流。采用 3D 层流不可压缩 N-S 方程对冷却介质流动与传热过程进行数值计算。并采用如下假设:不可压缩定常流动;忽略重力影响;流动为层流;流体在进口完全发展。计算中取热流密度恒定为 30 W/cm<sup>2</sup>。边界条件为

$$x = 0, \quad u = u_{in}, \quad v = 0, \quad w = 0, \quad T = T_{in},$$

$$x = X, \quad \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0; \quad y = 0, \quad y = W,$$

$$v = 0, \quad \frac{\partial q}{\partial y} = 0; \quad z = 0, \quad \frac{\partial q}{\partial z} = \text{const},$$

$$z = L, \quad \frac{\partial q}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

式中  $u$  为速度,  $T$  为温度,  $q$  为热流密度。const 表示常数。

## 3 正交方案的确定

本模拟为 3 水平 3 因素的实验,选用  $L_9(3^4)$  型

正交表,不考虑各因素之间的交互作用。将各因素分别安排在正交表  $L_9(3^4)$  上方与列号对应的位置上,每个因素占有一列,不同因素占有不同的列(设一不放置任何因素的误差列)。将各因素分别填在所选的正交表的上方与列号对应的位置上,一个因

素占有一列,本实验得到 9 个方案,如表 3 所示,表 3 中  $K_{ij}$  为第  $j$  列上水平号为  $i$  的各模拟结果之和; $R_j = \max\{K_{ij}\} - \min\{K_{ij}\}$ , $R_j$  为第  $j$  列的极差或相应因素的极差。

表 3 正交表  
Table 3 Orthogonal table

Number	A	Queue empty	B	C	Experimental program	Surface temperature /K	Pressure drop /Pa	Membership of surface temperature	Membership of pressure drop	Total points
1	1	1	1	1	$A_1 B_1 C_1$	326.95	420.48	0.4715909	0.0767699	$y_1 = 0.3926267$
2	1	2	2	2	$A_1 B_2 C_2$	314.88	834.69	0.1972727	0.3297844	$y_2 = 0.2237751$
3	1	3	3	3	$A_1 B_3 C_3$	313.58	294.80	0.1677273	0	$y_3 = 0.1341818$
4	2	1	2	3	$A_2 B_2 C_3$	309.93	1931.90	0.0847727	1	$y_4 = 0.2678182$
5	2	2	3	1	$A_2 B_3 C_1$	340.13	916.64	0.7711364	0.3798424	$y_5 = 0.6928776$
6	2	3	1	2	$A_2 B_1 C_2$	306.20	1682.80	0	0.8478407	$y_6 = 0.1695681$
7	3	1	3	2	$A_3 B_3 C_2$	310.98	785.17	0.1086364	0.2995358	$y_7 = 0.1468162$
8	3	2	1	3	$A_3 B_1 C_3$	306.86	847.80	0.015	0.3377924	$y_8 = 0.0795585$
9	3	3	2	1	$A_3 B_2 C_1$	350.20	1279.70	1	0.6016126	$y_9 = 0.9203225$
Optimal case					$A_1 B_1 C_3$	308.82	419.81	0.059587	0.0763665	0.0629429
$K_{1j}$	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$						
$K_{2j}$	$F_5$	$F_6$	$F_7$	$F_8$						
$K_{3j}$	$F_9$	$F_{10}$	$F_{11}$	$F_{12}$						
$R_j$	$F_{13}$	$F_{14}$	$F_{15}$	$F_{16}$						
Order of factor							C→B→A			
Preferred embodiment							$C_3 B_1 A_1$			
Worst case							$C_1 B_2 A_3$			

$F_1 = 0.7505836, F_2 = 0.8072611, F_3 = 0.6417533, F_4 = 2.0058268,$   
 $F_5 = 1.1302639, F_6 = 0.9962111, F_7 = 1.4119158, F_8 = 0.5401594,$   
 $F_9 = 1.1466973, F_{10} = 1.2240725, F_{11} = 0.9738756, F_{12} = 0.4815585,$   
 $F_{13} = 0.396114, F_{14} = 0.416811, F_{15} = 0.770162, F_{16} = 1.524268$

#### 4 正交方案模拟的计算

对上述正交方案进行数值计算,得到散热器底部平均表面温度和压降,经过处理后列于表 3 中。图 3~8 为表面温度和压降随各因素之间的变化关系。微槽道散热器性能优异主要决定于两个因素,槽道底面的平均温度和压降。温度高低表征了散热器的散热能力强弱,压降大小表征着散热器槽道内部流动阻力。本文以散热器底面平均温度及其压降为研究指标。为了确定最优方案,采用指标隶属度<sup>[12]</sup>来评价各个方案的好坏。指标隶属度计算方法为

$$a = \frac{m - m_{\min}}{m_{\max} - m_{\min}}, \quad (2)$$

式中  $a$  为指标隶属度, $m$  为指标值, $m_{\min}$  为指标最小值, $m_{\max}$  为指标最大值。

从(2)式可以看出指标隶属度最大为 1,最小为

0。同时由于散热时对于表面温度的要求较高,所以在计算综合分数时选用表面温度和压降的权重分别为 0.8 和 0.2。于是综合分  $f$  与表面温度隶属度  $m$  和压降隶属度  $m_p$  满足  $f = 0.8m + 0.2m_p$ ,满分为 1.00。其结果如表 3 所示。

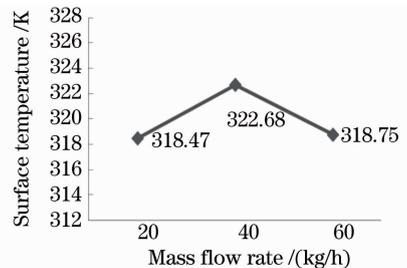


图 3 表面温度随质量流量的变化

Fig. 3 Surface temperature versus mass flow rate

#### 4.1 极差分析及各个主次因素确定

各因素水平的均值的计算式为

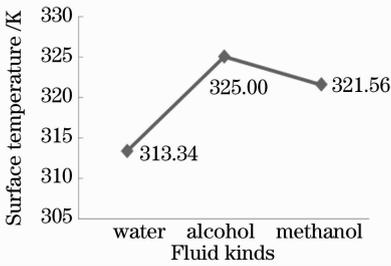


图 4 表面温度随流体工质的变化

Fig. 4 Surface temperature versus fluid kinds

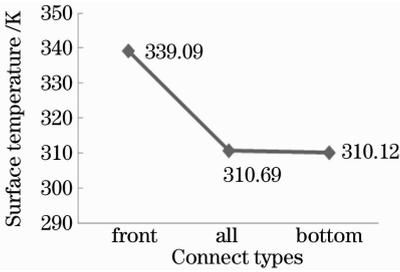


图 5 表面温度随接触方式的变化

Fig. 5 Surface temperature versus connect type

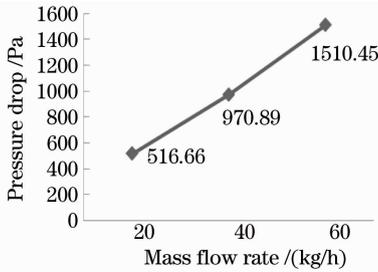


图 6 压降随质量流量的变化

Fig. 6 Pressure drop versus mass flow rate

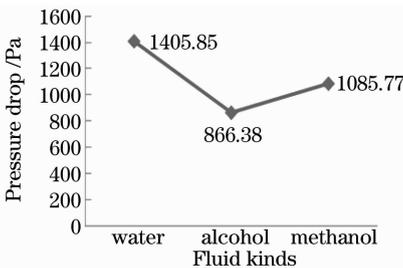


图 7 压降随流体工质的变化

Fig. 7 Pressure drop versus fluid kinds

$$\begin{aligned}
 K_{11} &= y_1 + y_2 + y_3, \\
 K_{21} &= y_4 + y_5 + y_6, \\
 K_{31} &= y_7 + y_8 + y_9, \\
 K_{12} &= y_1 + y_6 + y_8, \\
 K_{22} &= y_2 + y_4 + y_9, \\
 K_{32} &= y_3 + y_5 + y_7, \\
 K_{13} &= y_1 + y_5 + y_9, \\
 K_{23} &= y_2 + y_6 + y_7,
 \end{aligned}$$

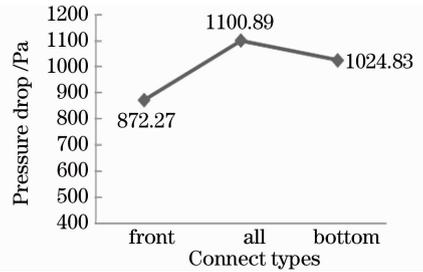


图 8 压降随接触方式的变化

Fig. 8 Pressure drop versus connect types

$$K_{33} = y_3 + y_4 + y_8,$$

$$R_j = \max\{K_{1j}, K_{2j}, K_{3j}\} - \min\{K_{1j}, K_{2j}, K_{3j}\} \quad (3)$$

具体的计算过程已省略,计算结果见表 3。

一般来说,极差反映了各个因素水平的改变对实验结果的影响,极差越大,表示该列因素的数值在实验范围内的变化会导致实验指标在数值上有更大的变化,所以极差最大一列就是因素水平对实验结果影响最大的,即为最主要因素。对于本实验,从表 3 中可以清楚看到:  $R_C > R_B > R_v > R_A$  (其中下标 v 表示空列),所以各个因素对实验的影响从大到小的顺序为:  $C \rightarrow B \rightarrow A$ 。因此,实验设计的 3 种因素对换热都有影响,但从正交结果可以看到插入方式对换热的影响最大,流体的工质种类次之,而流量的影响最小。

#### 4.2 最优化方案和最不利方案

最优化方案是各因素较优的水平组合,各因素最优水平的确定与实验指标有关。本文讨论的是在一定的热流密度下的散热器表面温度和压降的综合效果。对于目标而言,表面温度越低越好,压降越小越好,故选最优方案时应选指标水平最小的。由于  $K_{1A} < K_{2A} < K_{3A}, K_{1B} < K_{3B} < K_{2B}, K_{3C} < K_{2C} < K_{1C}$ , 故最优方案为  $A_1 B_1 C_3$ , 即质量流量为 20 kg/h, 纯水为工质, 下部接触。

最不利方案确定方法同最优化方案,但是目标应为: 表面温度最高, 压降最大故最不利方案为  $C_1 B_2 A_3$ 。即质量流量为 40 kg/h, 乙醇为工质, 上部接触。

#### 4.3 方案验证和显著性分析

为了验证方案的正确性,对最优化方案进行了数值验证。模拟结果表明,在该工况下,表面温度为 308.82183 K, 压降为 419.81962 Pa。通过指标隶属度和综合分析可知,该工况下的综合分为 0.0629429, 低于正交实验中的所有值,可以确定其为最优方案。

本正交方案考虑正交模拟误差,故在正交表设计中设计一空白列。同时本方案无交互作用的方差分析,采用正交表安排实验,总的模拟次数为 $n$ ,模拟结果为 $y_i(i=1,2,\dots,n)$ 。采用文献[13]的方差分析法,计算如下:

1)计算离差平方和

总离差平方和:

$$S_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)^2. \quad (4)$$

各因素引起的离散平方和:

$$S_j = \frac{r}{n} \sum_{i=1}^r (k_i - \bar{y})^2 = \frac{r}{n} \left( \sum_{i=1}^r K_i^2 \right) - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)^2, \quad (5)$$

$$S_A = \frac{3}{9} (0.7505836^2 + 1.1302639^2 + 1.1466973^2) - 1.0184475 = 0.03348147. \quad (6)$$

同理可求得 $S_B, S_C$ ,列于表4中。

实验误差的离差平方和:

$$S_e = \sum S_v. \quad (7)$$

2)计算自由度

总平方和的总自由度(其中 $n$ 为模拟总次数):

$$f_T = n - 1. \quad (8)$$

正交表中任一列离散差平方和对应的自由度(其中 $r$ 为因素水平数):

$$f_j = r - 1. \quad (9)$$

误差自由度:

$$f_e = \sum f_v. \quad (10)$$

3)计算 $F$ 值

将各因素均方除以误差的均方,得到 $F$ 值:

$$F_A = (S_A/f_A)/(S_e/f_e) = 1.15298. \quad (11)$$

$F_B, F_C$ 的计算结果见表4。

4) $F$ 检验

查得临界值 $F_{0.10}(2,2)=9.00$ ,对于给定的显著性水平 $\alpha=0.10$ ,因素C对实验结果有显著影响(以\*表示);因素A和B的影响是不显著的。

表4 显著性分析表

Table 4 Analysis table of notability

Source of variance	Sum of discrete square	Degree of freedom	Number of $F$	Significance
A	0.03348147	2	1.15298	
B	0.099482	2	3.4258067	
C	0.497223	2	17.1226	*
Error	0.029039	2		

#### 4.4 计算时间

计算采用Fluent软件进行,算例网格约130万,采用Simple算法。每个算例在P4 CPU2.2内存1G的计算机上需要运行5h。正交模拟9个算例计算,耗时为45h。加上正交优化方案验证算例5h,计算总耗时50h。如不采用正交设计的方法进行计算,共需要计算27个算例,每个5h,则需要135h。因此得到最佳工况的时间比不采用正交设计少85h。本文研究中因素水平较少,物理模型较为单一,所需计算机时不是很多。如果影响因素水平多,物理模型复杂,计算机时就会迅速增加。可以预见,正交方法的模拟在较为复杂的最优化设计上可以节约大量的机时。同时和以前的正交实验法相比,正交模拟可以节约实验材料,降低实验成本。

## 5 结论

微槽道散热由于多参数影响其工程运用和系统优化,运用正交的方法对自行设计的插入式微通道散热进行数值计算。列出影响散热效果和槽道阻力的三个因素,并对这三因素的各水平取值进行正交模拟,给出了最优的槽道设计方式和流量以及流体工质搭配。计算了各个因素对散热效果的显著性水平,其结果表明插入肋片与底部的接触方式是影响散热效果的最主要因素。通过计算耗时和成本的比较,说明数值正交方法在优化设计方向上可以很好地节约计算机机时和实验成本。

#### 参考文献

- Ren Hongliang, Zhuang Lihui, Li Yinmei. Measurement of interaction potential between colloidal particles using dual optical tweezers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 151~155  
任洪亮, 庄礼辉, 李银妹. 双光镊测量胶体微粒间相互作用势[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 151~155
- Wang Xiao, Zhang Huizhong, Ding Guomin et al.. Laser transmission welding polypropylene plastics [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 466~471  
王霄, 张惠中, 丁国民等. 聚丙烯塑料激光透射焊接工艺[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 466~471
- Lu Le, Zong Renhe, Zhou Zhangwu et al.. Study on the application of laser in cosmetology [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2002, **19**(4): 323~325  
罗乐, 宗仁鹤, 周章武等. 激光在美容中的应用研究[J]. *量子电子学报*, 2002, **19**(4): 323~325
- 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
- Wu Deyong, Gao Songxin, Lü Wenqiang et al.. Design of high efficient copper micro-channels cooler for diode laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(7): 840~842

- 武德勇, 高松信, 吕文强 等. 激光二极管高效铜微通道冷却器设计[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(7): 840~842
- 6 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
- 7 Wang Yaqing, Liu Minghou, Liu Dong *et al.*. Experimental study on spray cooling for high-power laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(12): 1761~1766
- 王亚青, 刘明侯, 刘 东 等. 大功率激光器喷雾冷却的实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(12): 1761~1766
- 8 D. B. Tuckerman. R. F. W. Prese. High-performance heat sinking for VLSI[J]. *IEEE Electr. Device Lett.*, 1981, **2**(5): 126~129
- 9 S. V. Garimella. C. B. Sobhan. Transport in microchannels-a critical review[J]. *Annual Review of Heat Transfer*, 2003, (13): 1~50
- 10 Gian Luca Morini. Single-phase convective heat transfer in microchannels: a review of experimental results[J]. *Thermal Sciences*, 2004, **43**(7): 631~651
- 11 Paisarn Naphon, Somchai Wongwises. A review of flow and heat transfer characteristics in curved tubes[J]. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2006, **10**(5): 463~490
- 12 Gao Jianshe, Wang Jun, Zhou Yongxue *et al.*. Studies on drought-resistance of five poplar clones [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2005, (2): 112~116
- 高建社, 王 军, 周永学 等. 5个杨树无性系抗旱性研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2005, (2): 112~116
- 13 Li Yunyan, Hu Chuanrong. Experiment Design and Data Processing [M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2005. 98~100
- 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. 98~100