

文章编号: 1000-8055(2009)05-0994-06

微小通道流动换热特性分析及其结构优化

王 梦, 吴 宏, 徐国强, 陶 智, 刘庆东
(北京航空航天大学 能源与动力工程学院
航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 就一组不同水力直径的矩形微小直通道进行了实验研究, 并通过经验证的数值方法进行了大量 CFD 计算, 得到了通道内流体努塞尔数和阻力系数随雷诺数变化的规律. 结果表明, 在所研究微小尺度范围内通道内流动的转捩雷诺数提前到 1200~1300 之间, 以大量数值模拟结果为样本点经过多元线性回归建立了所研究范围内微小通道流体换热与流动特性的准则关系式, 并基于遗传算法, 对矩形微小通道的几何结构进行了优化, 为工程应用提供了依据.

关 键 词: 微通道; 对流换热; 流动特性; 结构优化; 遗传算法

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Investigation on flow and heat transfer characteristics and optimum structural design in the rectangular microchannels

WANG Meng, WU Hong, XU Guo-qiang, TAO Zhi, LIU Qing-dong
(National Key Laboratory on Aero-Engines, School of Jet Propulsion,
Beijing University of Aeronautics Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: For obtaining the basic characteristic of flow and heat transfer in the rectangular microchannels, experiment was executed under different hydraulic diameters, and a great deal of numeration simulations were carried out and validated experimentally. The transformation laws of Nusselt number and resistant coefficient were obtained. The critical Reynolds number was brought forward to about 1200~1300 in the studied scale range. Meanwhile, the correlation of Nusselt number and resistant coefficient within the studied scale range were built by multivariate linear regression. The optimization procedure (genetic algorithms) was carried out to optimize the structure of microchannels, providing beneficial theoretical and experiment data for engineering application.

Key words: microchannel; convective heat transfer; flow characteristics;
structure optimization; genetic algorithm

超大规模集成电路的飞速发展,使得电路芯片表面的热流密度急剧增加,研究行之有效的电子芯片冷却方案已经成为迫在眉睫的问题^[1]. 对于航空电子设备中的功率器件,由于其工作环境恶劣,可靠性要求高、体积小、重量轻,对电路集成度和热控制提出了较民用产品更为严格的要求.

自从 Tuckerman 和 Pease^[2]开创性地提出了微通道散热器这一实用高效的芯片内部冷却方式,微通道技术就被广泛地应用于电子设备的冷却散热领域^[3].

近年来国内外开展了许多微通道中流体流动换热特性的研究,但由于具体实验方案、计算方法

收稿日期: 2008-05-13; 修订日期: 2008-09-25

基金项目: 国家重点自然科学基金(50436010)

作者简介: 王梦(1981-),女,河北唐山人,博士生,主要从事传质传热学研究.

等的不同,研究针对某些相近工况,给出了定量甚至定性上相互矛盾的结论。Wu 和 Little^[4]研究了微小通道内气体的流动特性,发现通道内流动摩擦阻力系数远远高于充分发展层流理论计算值,由层流到湍流过渡的转捩雷诺数提前。另一些研究结果与之相反,Pfahler^[5]等研究了硅蚀刻出的微小通道内的气体流动特性,发现流体的流动阻力比传统不可压理论的预测值小。还有研究表明,尺度的减小不会引起现象与常规尺寸下的差异,如 Michael^[6]发现小尺度时的流动转捩雷诺数与常规尺度时一致。

通过总结以往微流体实验的研究情况,发现出现结论矛盾的原因主要有以下三点:①微通道中流体质量流量非常小($10^{-13} \sim 10^{-12}$ kg/s),因而难以测定;②微通道中压力和温度的逐点测量非常困难,迄今很少在实验中得到压力分布的数据;③微通道的尺寸和形状难以刻画,加工的粗糙度对结果影响较大。鉴于此,详细说明实验条件并得到准确的数据对校验微流体模型的合理性和发展标准测量方法具有重要意义。准确的数值模拟可以有效预示微尺度内的热和流量的输运特征,在生产微器件前对其性能予以评价,更重要的是数值方法能够快速方便的模拟出大量实验工况,从而节省实验时间,提高效率,以便于总结微尺度传热规律。当然无论对于实验还是数值模拟,研究的主要目的还是为了找出微通道中流动与传热的基本物理机制和特性,从而对流道的几何结构进行优化,以指导工程应用。

遗传算法(Genetic algorithm,简称 GA)是基于进化论,模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应全局优化概率搜索算法^[7]。该算法不受搜索空间的限制性假设的约束,也不要求目标函数的连续、可微和单峰等条件,对复杂系统的优化具有较强的鲁棒性,同时遗传算法进行解空间的多点搜索,全局性强,不易陷入局部最优,所以可被用于微小通道的结构优化中。

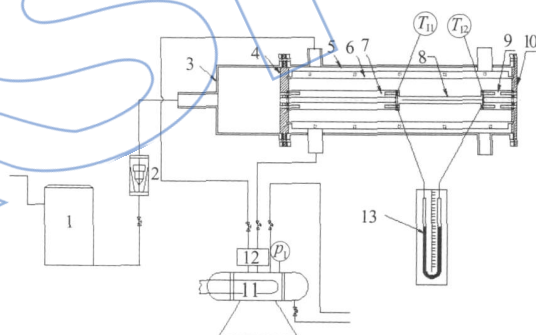
本文就一组不同水力直径的矩形微小直通道的流动与换热特性进行了详细的实验研究,并通过经实验验证的数值模拟方法进行了大量 CFD 计算,得到了不同水力直径通道内流体的努塞尔数和阻力系数随雷诺数变化的规律,确定了所研究的微小尺度范围内流动的转捩雷诺数,同时将大量数值模拟结果进行多元线性回归总结了矩形微小通道内流体换热特性和阻力特性的准则关系式,并应用遗传算法,以微小通道的综合传热特性

为优化目标,对其几何结构进行了优化,为其工程应用提供了理论依据和实验数据。

1 实验装置和实验方法

1.1 实验系统计实验方法

本实验是在北京航空航天大学航空发动机与气动热力重点实验室的微小通道流动与换热研究实验台上进行的。实验台结构如图 1 所示,主要由实验段、冷气供给系统、加热与控制系统以及测量与数据采集系统四部分组成。实验中,冷气供给系统将冷却空气送入进气腔,在腔内经过混合、稳压后流经进口段,进入实验段对矩形微小直通通道进行冷却,最后由出口段排出到大气。实验件内部通冷却空气,外部通以饱和水蒸气,并且为保证外部温度为水蒸气温度,采用了通双层水蒸气方式,外层水蒸气用以减少内层水蒸气和外界的对流换热损失和辐射热损失,这样很好地模拟了第一类边界条件。



1 稳压箱; 2 浮子流量计; 3 进气转接段; 4 前隔板;
5 蒸汽外腔; 6 蒸汽内腔; 7 进口段; 8 实验件;
9 出口段; 10 后隔板; 11 电热锅炉; 12 稳压分液器;
13 水银压差计; P_1 蒸汽压力; T_{11} 冷却空气进口温度;
 T_{12} 冷却空气出口温度。

图 1 实验台装置图

Fig. 1 Experimental facility

实验分为热态换热实验和冷态流阻实验。换热实验是在不同雷诺数条件下,测出冷却空气进出口温度和流量,水蒸气进出口温度和水蒸气冷凝后的水量,接着计算出实验段的换热量,传热温差,几何参数,进而得到平均换热系数和努塞尔数;冷态阻力系数测量实验时不对实验件表面加热,在实验件进出口布置测压点,改变进口冷气流流量,测量通道进出口静压差,从而计算出阻力系数。实验过程中,监视实验件出口冷气温度变化和实验件的外壁温,绘制出温度-时间和温度-质量

流量曲线,用以检验实验工况是否稳定和等壁温条件是否在整个实验过程中都成立.其中温度采集首先用热电偶传感器将温度信号变成电信号,然后由高精度多功能万用表读出电压值,最后通过查表插值将电信号换算成温度值;实验段进口压力采用压力校正仪测量,出口压力采用水排测量;流量测量采用LZB(LZJ)系列玻璃转子流量计;冷凝水从集水盒经导水管流出,通过锥形瓶收集导水管流出的水,并在精密电子天平上进行冷凝水测量.

1.2 实验件结构

实验件由铬镍钢(18-20Cr/8-12Ni)加工而成,为便于加工,将实验件平均分为两半,其通道截面形状如图2所示,通道长 L 均为150 mm,通道高 H 均为15 mm,通道宽度 W_c 在0.4~1.2 mm范围内,水力直径 D_e 在0.78~2.22 mm范围内.

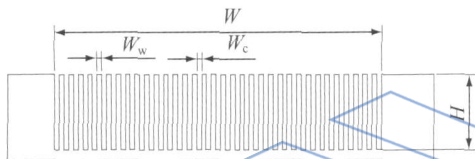


图2 实验件结构

Fig. 2 Configuration of the rectangular passage

1.3 数据处理

1) 微小通道进口雷诺数的定义

$$Re_{in} = \frac{\rho D_e u_{in}}{\mu} = \frac{D_e u_{in}}{\nu} \quad (1)$$

其中 ρ 为气体密度; D_e 为微小通道水力直径,其计算公式为: $D_e = 4A_{in}/F_{in}$, A_{in} 为通道入口截面面积; F_{in} 为通道入口截面湿周长; u_{in} 为通道进口气流速度; μ 为气体动力粘性系数; ν 为气体运动粘性系数.

2) 微小通道平均对流换热系数为

$$h = \frac{\Phi}{A(T_{wc} - T_0)} \quad (2)$$

其中 Φ 为微小通道总换热量; A 为微小通道总换热面积; T_{wc} 为通道内壁面平均温度; T_0 为进出口平均温度.

3) 努塞尔数的定义

$$Nu = \frac{h \cdot D_e}{\lambda_n} \quad (3)$$

其中 h 为平均对流换热系数; λ_n 是冷却空气导热

系数.

4) 阻力系数 ξ 的定义

$$\xi = \frac{p_{in} - p_{out}}{(1/2)\rho u_{in}^2} \quad (4)$$

其中 p_{in} 和 p_{out} 为进、出口总压.

2 数值模拟

微通道内流体流动与换热远比常规管道复杂,因而微通道内对流换热模型的建立必须考虑微尺度效应的影响.由于单相流体分子平均自由程 $l_m \ll 0.1 \mu m$,在水力直径为 $100 \mu m$ 时克努森数(分子平均自由程与特征长度的比值) $Kn \ll 0.001$,因而本研究对于微小通道内单相流体流动而言,连续介质假设依然成立,本文的数值模拟将建立在Navier-Stokes方程基础上.

为了着重研究微小通道内流体流动换热特性,取一个微小通道单元作为研究区域,如图3所示.边界条件与实验相符:通道上下壁面为373 K等温边界;通道两侧为循环周期边界;进口为相应的质量流量;出口进行局部单向化处理,法向速度满足总体流量守恒,压力给定环境大气压力.

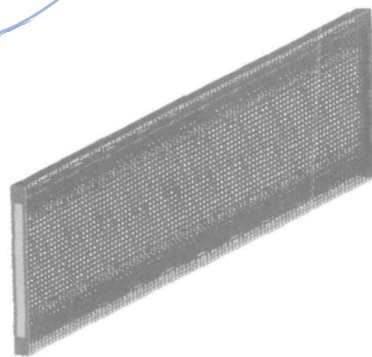


图3 通道模型示意图

Fig. 3 Conventional diagram of microchannel

研究采用结构化六面体网格生成技术,并对边界层附近的网格进行了加密.将此计算网格与沿流向网格数量为其1.5倍的网格进行计算比较,流道内最大温差在 $\pm 1\%$ 以内,表明这样的网格密度已经可以得出与网格无关的数值解.

以往研究对微小通道内流体由层流到湍流过渡的转捩雷诺数是否与常规尺度一致说法不一,因此为确定流体转捩雷诺数,本文分别对三维不可压情况下的湍流和层流流动方程进行了稳态求解,其中湍流模型采用可以较好模拟通道流动的 $k-\varepsilon$ 模型;采用有限容积法对控制方程进行离散;

对流项采用二阶迎风格式离散;扩散项采用中心差分格式;压力与速度耦合问题用 SIMPL E 方法处理.计算的收敛准则为:①各控制方程最大残差均小于 10^{-5} ;②连续 40 个循环内壁面温度无变化.

3 结果与讨论

3.1 微小通道流动转捩雷诺数的确定

本文采用转捩雷诺数 Re_{cr} 来区分湍流与层流,由于微小尺度条件下单相液体流动可视化的困难,本文依据流态转变时阻力系数的突变来确定 Re_{cr} .图 4 和图 5 分别为微小通道宽为 0.4 mm 时实验研究、层流模拟和湍流模拟中阻力系数 ξ 和努塞尔数 Nu 随 Re 变化的示意图.

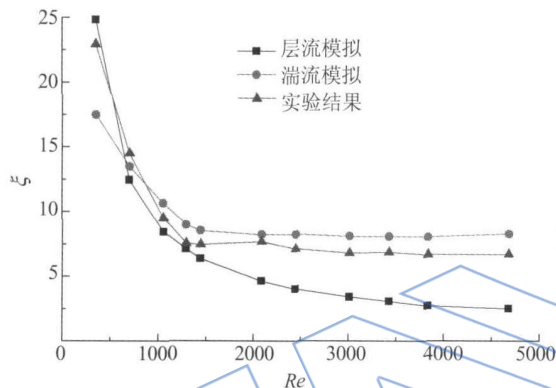


图 4 Re 对 ξ 的影响

Fig. 4 Development of flow resistance coefficient ξ with increasing Re

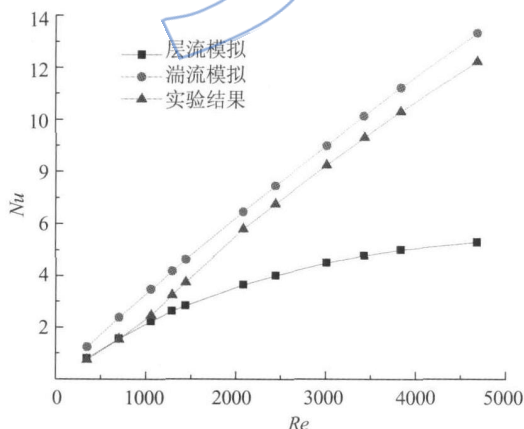


图 5 Re 对 Nu 的影响

Fig. 5 Development of Nu with increasing Re

由图 4 可知:① Re 为 1200~1300 时,实验和计算结果的 ξ 均存在一个明显突变.层流模拟与实验结果在 $Re < 1200$ 时吻合较好, $Re > 1200$ 以

后差距逐渐增大; $k-\epsilon$ 模型在 $Re > 1200$ 时与实验结果吻合较好,适用于此时对微小通道流场的模拟.以上现象表明,微小通道内流动的 Re_{cr} 数应在 1200~1300 之间,这与 Wu 和 Little 的研究结果^[4] 相吻合,该数值远低于传统尺度下管道内流动 2300 左右的 Re_{cr} .② ξ 随 Re 的增加而减小,当 $Re > 2500$ 时, ξ 减小的速度非常缓慢,由此认为当 $Re > 2500$ 时,微小通道内已达到旺盛湍流,而传统尺度下 $Re > 10000$ 才为旺盛湍流区.③在所研究尺度范围内,数值模拟与实验结果吻合较好,因此以数值计算结果作为比较依据是可行的.湍流结果比实验值稍微偏大,这是由于当 Re 为 1200~2500 时,流体流动处于过渡区域,计算则是按照充分发展湍流来模拟,因而出现偏差.

由图 5 可知, Nu 随 Re 的增加而增大,但增大趋势不断减缓. $Re < 1200$ 时,层流模拟和实验的结果吻合较好,最大偏差只有 10%,但是随着 Re 的增大,层流模拟和实验结果的偏差越来越大,可见当 $Re > 1200$ 时,层流模型已经不适用于对微小通道中流体特性的模拟,而 $k-\epsilon$ 模型的计算结果在 $Re > 1200$ 时与实验结果更接近,最大偏差为 7.1%.

3.2 微小通道尺度对流动换热的影响

对于微通道来说,仅靠 Re 无法全面反映其物理特性,于是研究了结构尺度对其流动换热的影响.图 6 为微小通道内流体换热特性曲线,由图可知, Nu 随 Re 的增加而增大; Re 相同时,水力直径越小, Nu 越大,水力直径小于 1.0 mm 时, Nu 增加的幅度非常大,这是由于随着水力直径的减小,通道扩展换热面积增加,因此换热增强,同时,微尺度效应^[7] 也使传热进一步增强.图 7 为微小通道内流体阻力特性曲线.由图可知, ξ 随着 Re 的增大而减小,然而下降的趋势逐渐减缓;当 Re 一定时,水力直径越小, ξ 越大,这是由于随着水力直径的减小,进口截面积变小,进出口总压降将增大,进而流阻系数增加.

3.3 准则关系式的建立

为了深入研究微小通道内流体换热和流动阻力特性,并找出主要几何因素对其影响的规律,本文以实验工况为基础通过数值模拟的方法,在一定 Re 和几何结构尺寸条件下对微小通道的流动换热进行了大量计算,将水力直径拓展到 0.3~3 mm,并对大量的样本点计算结果进行多元线形回归,得到了微小尺度下通道换热特性和阻力特

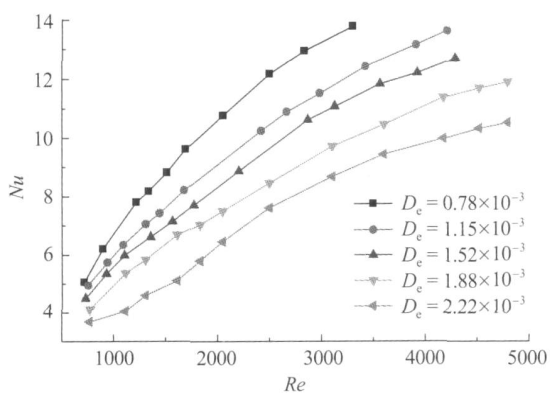


图 6 水力直径对 Nu 的影响
Fig. 6 Development of Nu for different hydraulic diameters

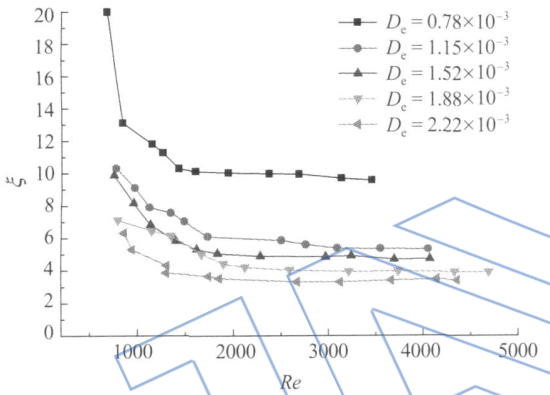


图 7 水力直径对 ξ 的影响
Fig. 7 Development of ξ for different hydraulic diameters

性的准则关系式. 其中 Re 是准则关系式的主线, 主要体现在速度上, 而关系式还要受到通道几何结构的影响, 所以应综合考虑. 本文将通道高宽比 (H/W)、水力直径和微小通道中心距的比值 (D_e/W_c) 体现在准则关系式中, 作为 Re 影响的修正, 由于 Pr 几乎没有变化, 所以不予考虑. 本文按层流和湍流分别整理了所研究微小尺度范围内通道换热特性和流动阻力特性的准则关系式如下:

当 $Re \leq 1200$ 时, 微通道内的流动为层流, 准则关系式为

$$Nu = 0.09 \left(\frac{D_e}{W_c} \right)^{1.489} \left(\frac{H}{W} \right)^{-0.116} Re^{0.61} \quad (5)$$

$$\xi = 281.83 \left(\frac{D_e}{W_c} \right)^{-1.67} \left(\frac{H}{W} \right)^{-0.177} Re^{-0.57} \quad (6)$$

当 $Re > 1200$ 时, 通道内流动开始由层流向湍流转捩, 直至 $Re > 2500$, 流动达到旺盛湍流, 为方便工程应用, 整理成统一的准则关系式为

$$Nu = 0.134 \left(\frac{D_e}{W_c} \right)^{5.75} \left(\frac{H}{W} \right)^{-0.193} Re^{0.8} \quad (7)$$

$$\xi = 281.84 \left(\frac{D_e}{W_c} \right)^{-0.96} \left(\frac{H}{W} \right)^{0.128} Re^{-0.67} \quad (8)$$

将由以上关系式拟合数据和实验数据作比较, 如图 8 所示, 由拟合关系式得到的 Nu 和实验得到的 Nu 基本吻合, 相对误差在 3.0% 左右. 只有三个实验点偏离较大, 误差 7.0% 左右.

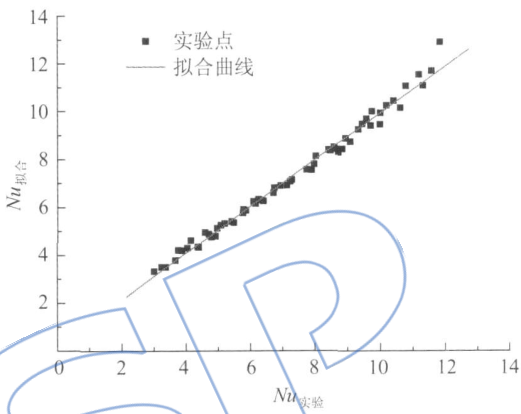


图 8 实验点和拟合点分布
Fig. 8 Distribution of experiment data and fitting data

3.4 利用遗传算法进行微小通道结构优化

微小通道在传热强化的同时也增大了流阻, 为了综合评价其换热效果, 本文将 $\eta = Nu/\xi^{1/3}$ 作为评价系数, 这是由于强化传热措施的采用可以在较低的介质流动速度下获得较高的换热系数, 而介质的传送功率几乎与速度的三次方成正比, 所以现将二者在同一个量级下进行比较. 下面针对湍流情况下的微小通道结构进行优化, 由准则关系式 (7), (8) 得到

$$\eta = 0.021 \left(\frac{D_e}{W_c} \right)^{60.7} \left(\frac{H}{W} \right)^{-0.236} Re^{0.577} \quad (9)$$

为了得到较好的微小通道综合换热性能 (即 η 最大), 本文基于 C++ 环境编制了复杂系统优化设计中应用广泛的遗传算法来对微小通道内部几何结构进行优化, 该程序具有较好的可移植性, 可应用于其他工程问题的优化.

遗传算法是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应全局优化概率搜索算法. 它使用群体搜索技术, 通过对当前群体施加选择、交叉、变异等一系列遗传操作, 从而产生出新一代的群体, 并逐步使群体进化到包含或接近最优解的状态, 其计算流程如图 9 所示. 遗传算法

只要求被优化的函数值是可计算的,是一种通用性较好的优化算法,它又是基于群体进行的搜索算法,总能收敛到全局最优解,所以它克服了传统的基于梯度优化方法的一些缺点,在优化设计中得到了广泛的应用^[7]。

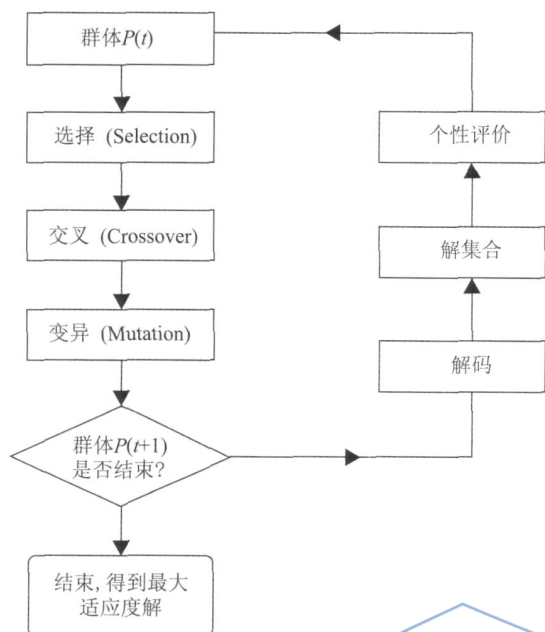


图9 遗传算法流程图

Fig. 9 Flow chart of genetic algorithms

本研究中优化变量:微小直通道的宽 W 、高 H 、通道中心距 W_c ;

目标函数:微小通道综合传热性能的评价系数 η ;

约束条件: $0.3\text{ mm} \leq D_e \leq 3\text{ mm}$, $200 \leq Re \leq 5000$, $W_c - W \geq 0.8\text{ mm}$ (考虑通道中肋片的结构强度),连续变量离散化处理;

选择二进制编码,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.05,最大进化代数 100 代,初始种群利用计算机在变量的范围内随机生成。经过遗传 100 代后,得到结果最优解。当 $W = 1.02\text{ mm}$, $H = 5.7\text{ mm}$, $W_c = 1.84\text{ mm}$, $u_{in} = 50\text{ m/s}$ 时,评价系数 η 的最大值为 17.3,此时微小通道的综合传热性能最好。

4 结 论

分别以实验和数值模拟的方法研究了不同水

力直径的矩形微小通道内的流动和换热特性,得出了以下主要结论:

1) 微小通道内的 Nu 随 Re 的增大而增大; ξ 随 Re 的增大而减小。在 Re 相同时,水力直径越小, Nu 越大, ξ 也越大。

2) 在所研究的微小尺度范围内,通道内流体的 Re_{cr} 数提前到 1200 ~ 1300 之间,远低于常规管道内 2300 左右的 Re_{cr} ,同时 $Re = 2500$ 成为旺盛湍流的界限。

3) 将大量数值模拟结果通过多元线形回归建立了所研究范围内矩形微小通道内流体换热特性和流动阻力特性的准则关系式,并基于遗传优化算法对矩形微小通道的几何结构进行了优化设计,得到了综合换热性能较好的微小通道的几何参数。

参考文献:

- [1] 张兆光. 电子设备冷却设计手册[M]. 北京:电子工业部第十四研究所, 1983:149-162.
- [2] Tuekerman D B, Pease R F W. Higher performance heat sink for VIS1[J]. IEEE Electron Device Letters, 1981, 2(4):126-129.
- [3] Sohiban B S, Garimella S V. A comparative analysis of studies on heat transfer and fluid flow in microchannels[J]. Microscale Thermophys Eng., 2001, 5: 293-311.
- [4] Wu P Y, Little W A. Measurement of friction factors for the flow gases in very fine channels used for microminature joule-thomson refrigerators[J]. Cryogenics, 1983, 23: 273-277.
- [5] Pfahler J, Harley J C, Bau H, et al. Gas and liquid flow in small channels[C]// Proc. ASME Micromech. Sensors, Actuators, Systems DSC3. New York: ASME, 1991, 1: 49-60.
- [6] Kohl M. An experimental investigation of microchannel flow with internal pressure measurements[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, May, 2004.
- [7] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2002.
ZHOU Ming, SUN Shudong. Theory and application of genetic algorithm[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)