

# 微尺度燃烧过程中传热准则数分析\*

潘剑锋<sup>1</sup> 周俊<sup>1</sup> 唐爱坤<sup>1</sup> 邵霞<sup>1</sup> 薛宏<sup>2</sup>

(1. 江苏大学能源与动力工程学院, 镇江 212013; 2. 美国加州州立工业大学机械工程系, 波莫纳 CA91768, 美国)

**【摘要】** 在微尺度条件下, 由于对流传热和燃烧过程耦合发生在很小的范围内, 因此微燃烧室内部的对流换热问题比较复杂。根据微燃烧室内部流动、传热和燃烧过程模拟计算的结果, 采用无量纲分析方法, 计算出表征距入口  $x$  处各通道截面平均对流换热强度的努塞尔数  $Nu_x$ , 并分析入口参数对  $Nu_x$  的影响。对多组计算结果进行多元回归拟合, 最终得到各截面平均  $Nu_x$  与雷诺数  $Re_x$ 、普朗特数  $Pr_x$  和无量纲变量  $\theta$  之间的函数表达式。

**关键词:** 微尺度燃烧 传热准则数 无量纲参数 多元回归拟合

中图分类号: TK5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)12-0197-05

## Analysis of Criterion Number of Heat Transfer in Micro Combustion Process

Pan Jianfeng<sup>1</sup> Zhou Jun<sup>1</sup> Tang Aikun<sup>1</sup> Shao Xia<sup>1</sup> Xue Hong<sup>2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. Mechanical Engineering Department, California State Polytechnic University, Pomona CA91768, USA)

### Abstract

In the micro-scale conditions, due to the heat transfer coupling with the combustion process within the micro-combustor, the convection and heat transfer in the micro-combustor were rather complicated issues. Based on the simulation results of the flow, heat transfer and combustion process in the micro-combustor. Dimensionless analysis method was used to calculate the dimensionless  $Nu_x$  number which described the convection and heat transfer intensity in the channel cross-section away from the entrance at  $x$ . Then effects of inlet parameters on the dimensionless  $Nu_x$  number were analyzed. The formula between the dimensionless variables  $\theta$  and average  $Nu_x, Re_x, Pr_x$  numbers in the channel cross-section was obtained by multiple regression analysis.

**Key words** Micro combustion, Criterion number of heat transfer, Dimensionless numbers, Multiple regression analysis

### 引言

近年来, 微机电系统 (MEMS) 的发展和和应用备受瞩目, 这对其能量供给部分提出了高能量密度的要求, 基于燃烧的微动力系统有望满足这一要求<sup>[1]</sup>。微动力系统的核心部件是微燃烧室, 其结构设计的依据是微尺度燃烧的特性和机理。针对这一研究领域, 很多学者已经对微尺度燃烧进行了研究<sup>[2-8]</sup>, 对其特性有了规律性的认识, 并发现层流火焰结构对于整个微燃烧室内部的热流分布影响很

大, 从而会影响整个微燃烧室的效率。由于尺度缩小, 燃烧过程中各种影响传热因素的相对重要性发生了变化<sup>[9]</sup>, 这会影响到整个燃烧室的传热效果。同时, 由于在很小的范围内传热和燃烧过程相耦合, 微燃烧室内部的对流传热问题比较复杂。目前很少有学者做相关的影响因素分析, 也没有通过无量纲参数对微燃烧传热过程进行描述, 比如通过传热准则数努塞尔数  $Nu$  等去表征传热过程。本文采用无量纲分析法对模拟的数据结果进行统计分析, 利用传热准则数去表征微尺度燃烧的相关特征, 并得出

收稿日期: 2011-01-04 修回日期: 2011-03-04

\* 国家自然科学基金资助项目 (50706016)、江苏省基础研究计划资助项目 (BK2008245)、江苏省高校优势学科建设工程资助项目和江苏大学“拔尖人才培养工程”资助项目

作者简介: 潘剑锋, 副教授, 博士, 主要从事动力机械燃烧过程和微动力系统研究, E-mail: mike@ujs.edu.cn

相关无量纲数间的关系式,为微尺度燃烧的传热理论发展提供基础数据和可行性分析。

## 1 计算模型及边界条件

### 1.1 计算对象及网格划分

微燃烧室结构如图 1 所示,其内部为矩形通道,长×宽×高为 10 mm×10 mm×0.6 mm,壁面厚度为 0.35 mm。计算过程中,设定坐标原点位于入口的中心位置。燃料采用氢氧预混气体,当量比  $\varepsilon = 1$ ,微燃烧室所采用 SiC 的物性参数如下:导热系数为 92 W/(m·K),密度为 3.10 g/cm<sup>3</sup>,红外辐射率为 0.77 (法向)。由于燃烧室结构规则,采用结构化网格进行模拟计算,网格数量为 36 448。

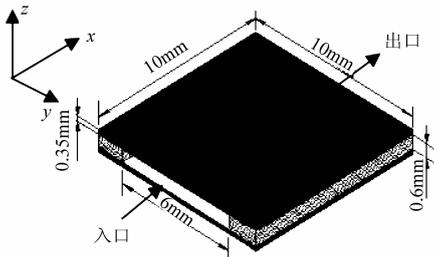


图 1 微燃烧室结构  
Fig. 1 Configuration of micro-combustor

### 1.2 控制方程和边界条件

为进一步简化控制方程,作如下假定:预混气体和生成物都视为不可压缩理想气体;燃烧室内部气体的对流换热作为强迫对流处理;忽略 Sort 效应(温度梯度引起的质量扩散)和 Dufour 效应(浓度梯度引起的热传递)。经过假设,基本控制方程具体形式见文献[10]。

设置边界条件时,给定入口的速度和气体混合物的质量流量及组分,出口设定为自由流动。

## 2 分析与讨论

### 2.1 微通道内部热量分析

燃烧产生的总热量  $Q_{in}$  一部分用于提升混合气体的焓值,以尾气的形式扩散到大气中,这部分的截面热流密度为  $q_x$ ;另一部分沿着纵向( $z$  方向)向固体壁面传递热量,其截面热流密度为  $q_z$ ,如图 2 所示。

Li<sup>[11-12]</sup> 等对燃烧区域内的热流密度进行了分析,发现  $\frac{q_z}{q_x} = \left(\frac{\delta_r}{R}\right)^2$ ,即与反应区厚度  $\delta_r$  有关系, $R$  为微燃烧室水力半径,此区域厚度  $\delta_r$  计算式<sup>[5]</sup>为

$$\delta_r = \frac{k}{\rho c_p s_t} \quad (1)$$

式中  $k$ ——反应区气体导热系数, W/(m·K)

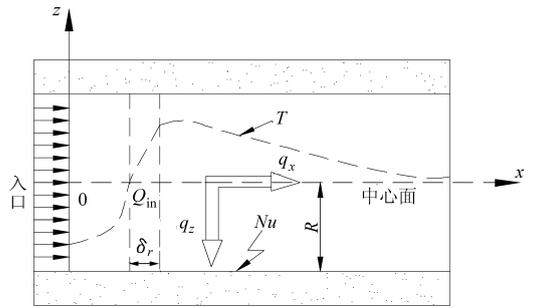


图 2 微燃烧室内部热量扩散示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of heat diffusion in micro-combustor channel

$\rho$ ——未燃气体密度, kg/m<sup>3</sup>

$c_p$ ——反应区气体比热容, J/(kg·K)

$s_t$ ——层流火焰传播速度<sup>[13]</sup>, m/s

由于燃烧室尺度的缩小,热惯性很大,为了简化分析,认为微燃烧室各通道截面上都近似有  $\frac{q_z}{q_x} = \left(\frac{\delta_r}{R}\right)^2$ ,再根据热量守恒  $q_x + q_z = q$  ( $q$  为截面总热流密度),则有

$$\frac{q_z}{q} = \frac{1}{1 + \left(\frac{R}{\delta_r}\right)^2} \quad (2)$$

### 2.2 截面平均 $Nu_x$ 的数学模型与论证

$q_z$  通过壁面传递到外环境,此过程用截面平均  $Nu_x$  去表征内通道距入口距离  $x$  处截面的平均对流换热强度,其定义为

$$Nu_x = \frac{q_z L}{k_f (T_{f,m} - T_{j,m})} \quad (3)$$

其中

$$T_{f,m} = \frac{\int_A T_f v dA}{\int_A v dA} \quad (4)$$

$$T_{j,m} = \frac{1}{y} \int_0^y T_{j,x} dy \quad (5)$$

式中  $L$ ——微燃烧室水力直径, mm

$k_f$ ——混合气体导热系数, W/(m·K)

$T_{f,m}$ ——各通道截面气体平均温度, K

$T_{j,m}$ ——气固界面横向局部平均温度, K

$A$ ——燃烧室通道横截面积, m<sup>2</sup>

$v$ —— $x$  方向上气体速度, m/s

$T_f$ ——各通道截面流体温度, K

$T_{j,x}$ —— $x$  处气固界面横向( $y$  方向)温度, K

将式(2)代入式(3)得

$$Nu_x = \frac{qL}{k_f (T_{f,m} - T_{j,m}) \left[ 1 + \left(\frac{R}{\delta_r}\right)^2 \right]} \quad (6)$$

通过式(6)可以利用模拟获得的各通道截面总

热流密度  $q$  求得各截面平均  $Nu_x$ 。为了验证模型的准确性,另外采用直接模拟方法计算  $Nu_x$ ,计算式为

$$Nu_x = \frac{h_x L}{k_f} \quad (7)$$

式中  $h_x$ ——气固界面的截面平均对流换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$

通过对微燃烧室内燃烧过程进行数值模拟,以 1 mm 为步长,依次分析燃料入口温度  $T_{in} = 300\text{ K}$ 、燃料入口速度  $v_{in} = 4\text{ m/s}$  时,10 个通道截面上的平均  $Nu_x$ 。

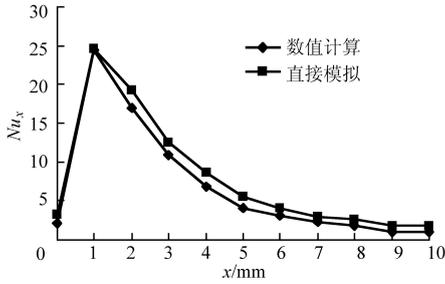


图 3 数值计算与直接模拟数据比较

Fig. 3 Comparison between numerical and direct simulation data

在图 3 中,数值计算数据是由式(6)计算得到,直接模拟数据是将 Fluent 软件模拟得出的  $h_x$  等相关参数代入式(7)计算得到,图中两组数据结果有较好的吻合,可见本文所采用的数学模型分析合理,  $Nu_x$  的简化计算式(6)可适用于微燃烧通道内部的所有区域。综上分析,燃烧室尺寸及反应区厚度  $\delta_r$  对  $Nu_x$  的影响在式(6)中得到了统一关联,而反应区厚度  $\delta_r$  又包含了入口燃料物性及入口参数的影响因素。

### 2.3 入口参数对截面平均 $Nu_x$ 的影响

#### 2.3.1 入口速度 $v_{in}$

模拟发现,  $T_{in} = 300\text{ K}$  时,依次增加  $v_{in}$  可以使  $q_z/q$  减小,即通过壁面损失的热量比例缩小,具体变化数值如表 1 所示。

表 1 入口速度对热流扩散比例的影响

Tab.1 Effect of inlet velocity on ratio of heat diffusion

$v_{in}/m \cdot s^{-1}$	$q_z/q$
4	0.36
5	0.29
6	0.18
7	0.15
8	0.13

结合表 1 数据分析,在一定的燃料/氧气的混合比界限内,增加入口速度本质都是在增加燃烧温度,一般地,  $s_l$  随着燃烧温度的增加而增加<sup>[14]</sup>,而化学反

应区的厚度  $\delta_r \propto 1/s_l$ ,所以  $\delta_r$  随着入口速度的增加而减小,进而使  $q_z/q$  减小,但是入口速度的增加同时使截面总热流密度  $q$  增加,且其增加的幅度比  $q_z/q$  缩小的幅度大,所以  $q_z$  实质是增加的。由此分析,在一定的燃料/氧气的混合比界限内,当入口温度一定时,认为  $q_z/q$  只是取决于混合物入口速度,增加入口速度可使  $Nu_x$  增加。

图 4 为表 1 条件下,计算得到的微通道截面平均  $Nu_x$  随不同  $v_{in}$  的变化趋势。由图 4 可以看出,  $Nu_x$  先急剧升高后缓慢降低,在反应区内达到最大值,这说明在燃烧区域的对流换热最强烈。从图 4 还可以看出,随着入口速度的增加,  $Nu_x$  的峰值增加,且峰值后面的数值也增加,这是因为随着流量的增加,火焰面的反应剧烈程度增加,同时,燃料驻留时间减小,燃烧的不完全性增加,使火焰面后方的反应增强,从而传热也较剧烈。这在  $v_{in} = 8\text{ m/s}$  时表现得更明显。

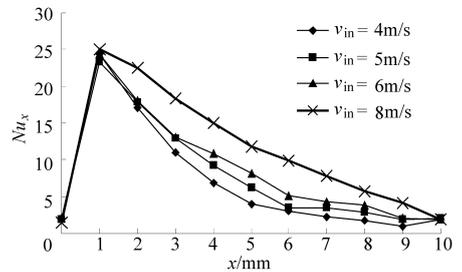


图 4 入口速度对  $Nu_x$  的影响

Fig. 4 Effect of inlet velocity on the  $Nu_x$

#### 2.3.2 入口温度 $T_{in}$

图 5 为  $v_{in} = 4\text{ m/s}$  时,  $Nu_x$  随  $T_{in}$  变化的结果。整体上看,截面平均  $Nu_x$  是随着  $T_{in}$  的增加而增大,尤其在入口附近,  $T_{in}$  对  $Nu_x$  的影响很大,当温度从 300 K 增加到 340 K 时,  $Nu_x$  的最大值从 25 增加到 33,可见  $T_{in}$  的微小变化对在入口附近的传热影响甚大,但在燃烧室的后半段,  $Nu_x$  基本不变,与图 4 比较发现,图 5 曲线重合在一起的区域比较大,即说明了  $T_{in}$  对传热的影响较  $v_{in}$  的影响弱,温度只在化学反应区内对反应速率起到很大影响,但是对于反应区外的区域影响很弱,而恰恰相反,速度可以在反应区

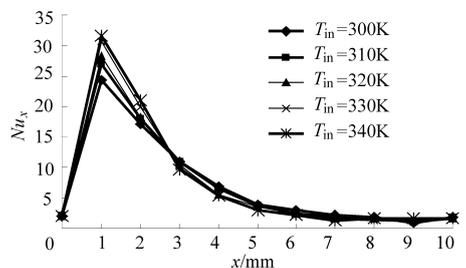


图 5 入口温度对  $Nu_x$  的影响

Fig. 5 Effect of inlet temperature on the  $Nu_x$

外的空间影响到燃烧室内的流态,所以温度的影响具有范围局限性,而速度影响范围较大。

结合图中数据,还发现  $Nu_x$  的最大值在 30 左右波动,而常规尺度的传热  $Nu_x$  一般在 100 左右<sup>[15]</sup>,由此可见,当尺度缩小时,相对于热对流,纵向的热传导不可以再忽略了,热传导的相对重要性增强了,微燃烧室内热传递的过程是由热对流和纯的热传导共同实现的。

### 3 数据结果的无量纲分析

#### 3.1 数据结果的拟合与分析

采用无量纲分析方法,将层流边界层的控制方程无量纲转换为守恒方程的无量纲形式,通过求解可以得出一系列相关变量的解,并得到一些很重要的无量纲相似参数,如雷诺数  $Re$ 、普朗特数  $Pr$  等,由  $Nu$  的定义可知,对于给定的几何形状,各截面平均  $Nu_x$  必定是相应截面平均  $Re_x$ 、 $Pr_x$  的某个通用函数<sup>[15]</sup>,即

$$Nu_x = f(Re_x, Pr_x) \quad (8)$$

模型已计算出截面平均  $Nu_x$  的分布(图 4、5),再从模拟结果中提取出相应的各截面平均  $Re_x$ 、 $Pr_x$  的组数据,通过多元回归方法,可以得到平均  $Nu_x$  与  $Re_x$ 、 $Pr_x$  的拟合关系式。影响微燃烧过程传热特性的因素除了微通道内混合气体的流速及温度等物性外,还有入口燃气本身的物性及微燃烧室结构尺寸,所以定义一个无量纲因变量  $\theta$ ,即

$$\theta = \frac{R}{\delta_r} \quad (9)$$

基于此,本模型中考虑的人口燃料物性、状态以及微燃烧室尺寸对整个微燃烧室内部对流换热的影响通过定义  $\theta$  找到了统一的数学表述。对数值模拟得到的多组数据( $Re_x < 700$ 、 $Pr_x > 1$ )进行多元回归拟合分析,可以得到如下的拟合关系式

$$Nu_x = \theta Re_x^{0.382} Pr_x^{0.425} \quad (10)$$

通过对其他燃烧室模型数据验证,即分别改变壁面的间距  $d = 0.3 \text{ mm}$ 、 $d = 0.8 \text{ mm}$ ,相应的水力半径分别为  $R = 0.14 \text{ mm}$ 、 $R = 0.35 \text{ mm}$ ,发现拟合公式的误差是可以接受的。因此拟合公式(10)在层流  $Re_x < 700$ 、燃烧室尺寸  $0.14 \text{ mm} \leq R \leq 0.35 \text{ mm}$  的范围内,拟合计算结果较合理。由拟合关系式可以看出,关系式形式与指数形式  $Nu = CRe^m Pr^n$  是相符的,对于常规尺度的传热过程,很多学者已经得出相关的经验关系式<sup>[16]</sup>,即

$$Nu = 0.011 Re^{0.5} Pr^{0.3} \quad (11)$$

将式(10)与常规尺度传热的关系式对比后可发现,微燃烧时,各个无量纲参数的指数都有变化,

影响传热特性的各参数的相对重要性发生了变化,且  $Pr_x$  增加的幅度比较大,而  $Pr_x$  刚好表征了温度和速度边界层的一个比值,所以由此可见,当尺度缩小时,边界层的考虑将变得很重要,同时  $Pr_x$  也表示了物性对于传热的影响,气体的动量扩散能力和热量扩散能力已经变为影响传热的关键因素; $Re_x$  对  $Nu_x$  的影响较常规尺度下小,由于在壁面间距很小的空间内, $Re_x$  的变化很小,微通道内流动处于很低速的层流状态,气体在空间内的驻留时间也很短,所以  $Re_x$  数对传热特性的影响将有所减缓。

式(10)中增加考虑了  $\theta$ ,且  $Nu_x \propto \theta$ ,这个结论与图 4、5 曲线变化是吻合的,在相应的燃烧状态下其影响系数始终为 1,说明当燃烧室特征尺度缩小到和燃烧火焰厚度达到同一个数量级时,必须考虑入口燃料物性、状态以及燃烧室尺寸对整个传热特性的影响,其影响系数比其他因素都大。对于特定的燃料,燃烧室尺寸以及燃料入口状态参数, $\theta$  的值是确定的,即对于不同的入口参数, $\theta$  有对应的数值,模型计算了  $R = 0.275 \text{ mm}$  时,不同入口速度对应的  $\theta$ ,数据结果如表 2 所示。

表 2  $R = 0.275 \text{ mm}$  时不同入口速度对应的  $\theta$  值

Tab. 2 Values of  $\theta$  corresponding to different values of inlet velocity with  $R = 0.275 \text{ mm}$

$v_{in}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\theta$
4	1.31
5	1.52
6	1.83

之前分析了  $\delta_r$  会随着入口速度的增加而减小,所以  $\theta$  就相应的增大了,在有了  $\theta$  的修正值后,在一定的范围内,式(10)对于其他的燃烧模型同样具有适用性。

分析整个热量传递公式,发现控制过程的作用力会发生变化,微尺度系统在几何上最大特点是表面积与体积之比远远大于常规尺度系统,这样与体积呈正比的力以及与表面积呈正比的力在过程中的重要性就会发生变化,最终导致阻力与热量传递规律的变化。

#### 3.2 拟合公式的精度分析

对多元回归分析拟合得到的式(10)进行精度分析,拟合公式计算结合了表 2 的整理数据,图 6 为数值计算结果散点分布与拟合公式计算结果的对照(此处略去入口  $x = 0$  处数据点的比较)。

从图中可以看出在出口处的误差较大,出口处的线段基本上是水平重合在一起的,这是因为在出口处  $Re_x$  变化不大,且入口速度对出口附近的  $Re_x$

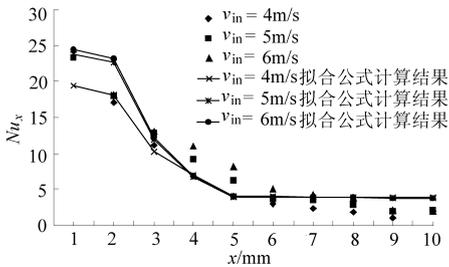


图 6 拟合公式精度分析比较

Fig. 6 Accuracy analysis and comparison of the fitting formula

影响较小;另外在入口速度较大时,误差也较大,最大误差在 20% 左右,但是,从整体上分析,拟合公式计算结果的连线基本沿着数值计算的数据点分布的,拟合公式可以作为表征微燃烧过程传热变化规律的经验关系式。

## 4 结论

(1) 采用无量纲分析方法,给出了表征平均传

热强度的  $Nu_x$  的计算方法,并将数值计算结果和直接模拟结果进行对照,结果表明误差合理,计算方法可靠。

(2) 入口参数对  $Nu_x$  有较大影响,入口温度的增加会使  $Nu_x$  的峰值增加,而入口速度的增加则会影响  $Nu_x$  峰值的大小和位置,并使火焰峰面后面的数值增加。

(3) 当燃烧室特征尺度缩小到和燃烧的层流火焰厚度达到同一个数量级时,燃料的物性成为影响传热的关键因素,在分析计算微燃烧过程的传热问题时,应该考虑化学反应区厚度  $\delta_r$  对传热特性的影响。

(4) 对模型数值计算得出的数据进行多元回归拟合,定义了一个无量纲因变量  $\theta$ , 得出微尺度下表征截面平均换热强度  $Nu_x$  的计算式,即  $Nu_x = \theta Re_x^{0.382} Pr_x^{0.425}$ ; 对比常规尺度下  $Nu$  计算公式可知,影响传热特性的参数的相对重要性已发生改变,不能再用常规尺度的传热规律公式去求  $Nu$ 。

## 参 考 文 献

- 李德桃,潘剑锋,薛宏,等. 微动力机电系统的发展动态与展望[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2006,27(6):481~492.  
Li Detao, Pan Jianfeng, Xue Hong, et al. Development and prospect on micro-power systems [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2006, 27(6): 481~492. (in Chinese)
- 张帅,贾育秦. MEMS 技术的研究现状和新进展[J]. 现代制造工程,2005,44(9):109~112.  
Zhang Shuai, Jia Yuqin. Research status and new development of MEMS technology [J]. Machinery Manufacturing Engineer, 2005, 44(9): 109~112. (in Chinese)
- Kaisare N S, Vlachos D C. Optimal reactor dimensions for homogeneous combustion in small channels [J]. Catalysis Today, 2007, 120(1): 96~106.
- Hua J S, Wu M, Kurichi K. Numerical simulation of the combustion of hydrogen/air mixture in micro-sealed chambers. part I: fundamental study [J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(13): 3 497~3 506.
- Li J, Chou S K, Li Z W, et al. Development of 1D model for the analysis of heat transport in cylindrical micro-combustors [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(8~9): 1 854~1 863.
- 范爱武,刘思远,康鑫,等. 径向微通道中甲烷/空气预混燃烧的实验研究[J]. 工程热物理学报,2010,31(5):891~894.  
Fan Aiwu, Liu Siyuan, Kang Xin, et al. Experimental investigation on premixed combustion of  $CH_4$ /air mixture in a radial micro-channel [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(5): 891~894. (in Chinese)
- 杨卫娟,周俊虎,汪洋,等. 微尺度燃烧中的温度及热回流分布[J]. 中国电机工程学报,2010,30(20): 28~32.  
Yang Weijuan, Zhou Junhu, Wang Yang, et al. Temperature and heat-recirculation distribution in micro-scale combustion [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(20): 28~32. (in Chinese)
- 李军伟,钟北京,王宁飞,等. 空气槽对微型双通道螺旋型过量焓燃烧器工作特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(2): 40~45.  
Li Junwei, Zhong Beijing, Wang Ningfei, et al. Effects of air groove on combustion characteristics of a micro swiss-roll combustor [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(2): 40~45. (in Chinese)
- 过增元. 国际传热研究前沿——微细尺度传热[J]. 力学进展,2000,30(1):1~6.  
Guo Zengyuan. Frontier of heat transfer—micro-scale heat transfer [J]. Advances in Mechanics, 2000, 30(1): 1~6. (in Chinese)
- 潘剑锋,黄俊,李德桃,等. 微热光电系统带环形翅片燃烧室的数值模拟[J]. 热科学与技术,2006,5(4):346~350.  
Pan Jianfeng, Huang Jun, Li Detao, et al. Numerical simulation of combustor with annular fins of microthermophotovoltaic systems [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2006, 5(4): 346~350. (in Chinese)

- 8 Lee K M, Shah D K. Kinematic analysis of a three-degrees-of-freedom in-parallel actuated manipulator [C] // 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1988, 4(3): 354 ~ 360.
  - 9 吴光中, 李剑锋, 费仁元, 等. 3-PU\*U\*型平动并联机构的运动学分析[J]. 中国机械工程, 2004, 15(9): 816 ~ 819.
  - 10 胡福生, 郝秀清, 陈建涛. 3PSS 并联机构的运动学分析[J]. 山东理工大学学报: 自然科学版, 2006(1): 47 ~ 50.
  - 11 高征, 高峰. 6 自由度 3-U<sup>r</sup>SR 并联机构的位置正解分析[J]. 机械工程学报, 2007, 43(12): 171 ~ 177.
  - 12 韩方元, 赵丁选, 李天宇. 3-RPS 并联机构正解快速数值算法[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4): 229 ~ 233.  
Han Fangyuan, Zhao Dingxuan, Li Tianyu. A fast forward algorithm for 3-RPS parallel mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 229 ~ 233. (in Chinese)
  - 13 吴鑫, 陈美丽, 张彦斌. 2T1R 并联机构位置及奇异性分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(2): 208 ~ 213.  
Wu Xin, Chen Meili, Zhang Yanbin. Analysis of position and singularity of a parallel mechanism with three degrees of freedom [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 208 ~ 213. (in Chinese)
- 

(上接第 201 页)

- 11 Li Z W, Chou S K, Shu C, et al. Characteristics of premixed flame in micro-combustors with different diameters [J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(2 ~ 3): 271 ~ 281.
  - 12 Li Z W, Chou S K, Shu C, et al. Predicting the temperature of a premixed flame in a micro-combustor [J]. Journal of Applied Physics, 2004, 96(19): 3 524 ~ 3 530.
  - 13 高静, 王恒, 苏庆泉, 等. 层流预混火焰传播速度与火焰稳定传播界限的测定[J]. 热能工程, 2009, 38(1): 14 ~ 16.  
Gao Jing, Wang Heng, Su Qingquan, et al. Measurements of burning speed and stabilization limits for laminar premixed flames [J]. Thermal Engineering, 2009, 38(1): 14 ~ 16. (in Chinese)
  - 14 王谦, 李德桃, 潘剑锋. 燃烧学[M]. 北京: 中国科学文化出版社, 2002.
  - 15 葛新石, 叶宏. 传热和传质基本理论[M]. 6 版. 北京: 化学工业出版社, 2007.
  - 16 彭晓峰, 张扬. 传热词汇 A-Z(原著《Wärmeübertragung A-Z》)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- 

(上接第 234 页)

- 12 侯东海, 刘忠明, 吴序堂. 用工具斜齿条法加工斜齿非圆齿轮的啮合理论模型[J]. 机械工程学报, 2003, 39(8): 49 ~ 54.  
Hou Donghai, Liu Zhongming, Wu Xutang. Meshing theory analysis model for the manufacturing of helical noncircular gear by the helical tooling rack generating method [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(8): 49 ~ 54. (in Chinese)
- 13 胡昌军, 钱瑞明, 史雷. 基于回转车床的正多面体车削及刀尖轨迹仿真[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 255 ~ 260.  
Hu Changjun, Qian Ruiming, Shi Lei. Simulation on regular polygon forming and locus of knife point based on rotary cutting machine tool [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 255 ~ 260. (in Chinese)