

## Advance in research of flame propagation in microchannels

Zheng WANG<sup>1,2</sup>, Xiangdi ZHAO<sup>1</sup>, Guoxin CHEN<sup>1</sup>, Shuai YANG<sup>1</sup>, Qingshan HUANG<sup>2</sup>, Fuhua JIANG<sup>2\*</sup>

1. State Key Laboratory of Safety and Control for Chemicals, SINOPEC Research Institute of Safety Engineering, Qingdao, Shandong 266071, China

2. Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, Shandong 266101, China

**Abstract:** Both the microcombustor and the quenching units of the flame arrestors are microchannels containing combustible gas burning. Although the researches on the microcombustor are abundant, the study of the quenching units in the flame arrestors is relatively scarce. In this work the principal factors affecting the flame propagation in the microchannels are summarized. It is shown that a more systematic study is desired to settle the disputes. The advance of the mathematical model for the flame propagation in the microchannels is reviewed. It is proposed that the fluid flow pattern in the microchannel is worth discussing. It is determined that the flow in the flame arrestor is turbulent under high-speed detonation conditions. The combination of the Reynolds stress model with the laminar finite rate model is recommended here to be employed for the numerical simulation of detonation flame propagation in the flame arrestors. A density-based algorithm is recommended. In the concluding remark, research achievements and shortcomings in the investigation of flame propagation in the microchannels are pointed out, and the outlook is also addressed.

**Key words:** microchannel; mathematical model; flame quenching; laminar finite rate; turbulent combustion

## 微通道内火焰传播的研究进展

王 正<sup>1,2</sup>, 赵祥迪<sup>1</sup>, 陈国鑫<sup>1</sup>, 杨 帅<sup>1</sup>, 黄青山<sup>2</sup>, 蒋夫花<sup>2\*</sup>

1. 中国石化青岛安全工程研究院, 化学品安全控制国家重点实验室, 山东 青岛 266071

2. 中国科学院青岛生物能源与过程研究所, 山东 青岛 266101

**摘 要:** 微燃烧器与阻火器淬灭单元均为可燃气体燃烧的微通道, 目前对微燃烧器的研究较充分, 而对阻火器淬灭单元的研究较少。本工作概述了影响火焰在微通道内传播的因素, 指出对各因素的研究还需深入, 有利于澄清争议; 简述了火焰在微通道内传播的数学模型的研究进展, 提出微通道内流体流动流型的判定亟需完善; 确定在高速爆轰条件下, 阻火器内的流动为湍流; 推荐将雷诺应力湍流模型与层流有限速率模型结合进行阻火器内高速爆轰火焰传播的数值模拟, 推荐采用以密度为基础的算法进行求解; 指出了微通道内火焰传播研究的成果与不足, 展望了其发展方向。

**关键词:** 微通道; 数学模型; 火焰淬熄; 层流有限速率; 湍流燃烧

中图分类号: TK16 文献标识码: A 文章编号: 1009-606X(2018)04-0669-11

### 1 前 言

流动过程特征尺度划分通常将大于 1 mm 的尺度称为宏尺度(Macro scale), 100  $\mu\text{m}$ ~1 mm 称为细尺度(介尺

度, Meso scale), 小于 100  $\mu\text{m}$  称为微尺度(Micro scale)<sup>[1]</sup>。

目前对微尺度燃烧(Micro-combustion)的研究主要包括微燃烧器和阻火器淬灭单元。微燃烧器[图 1(a)]<sup>[2]</sup>通常采用烃类或氢气作为燃料, 能量密度为锂离子电池的数

收稿: 2017-12-08, 修回: 2018-01-19, 网络发表: 2018-05-15, Received: 2017-12-08, Revised: 2018-01-19, Published online: 2018-05-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 21706268; 91434114; 21376254); 中国科学院科研装备研制项目(编号: YZ201641); 青岛市博士后应用研究项目(编号: Y7330419DM)

作者简介: 王正(1977-), 男, 安徽省巢湖市人, 博士, 高级工程师, 研究方向为安全工程, E-mail: wz.qday@sinopec.com; 蒋夫花, 通讯联系人, E-mail: jiangfh@qibebt.ac.cn.

**引用格式:** 王正, 赵祥迪, 陈国鑫, 等. 微通道内火焰传播的研究进展. 过程工程学报, 2018, 18(4): 669-679.

Wang Z, Zhao X D, Chen G X, et al. Advance in research of flame propagation in microchannels (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2018, 18(4): 669-679, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.217416.

十倍<sup>[3]</sup>,受到广泛关注<sup>[4]</sup>.微燃烧器比表面积较大,导致热损失大<sup>[5]</sup>,火焰很难在微燃烧器中保持稳定,关于微燃烧器的研究大多集中在如何避免熄火.阻火器[图1(b)]<sup>[6]</sup>一般安装于运输可燃气体和蒸气的管线中或石油产品储罐<sup>[7,8]</sup>的顶部,以避免火焰蔓延至管网或储罐内造

成火灾.阻火器能淬熄火焰是因为其内部的微小通道,研究阻火器的目的在于使火焰熄灭.微燃烧器与阻火器的研究目的相悖,但二者均存在火焰传播的微通道,许多特性共通.



图1 两种微通道反应器

Fig.1 Two types of microchannel reactors

国内外对微燃烧器的研究较多,而对阻火器内微通道的研究还有待深入,二者的研究可相互借鉴.本工作系统地总结了微燃烧器和阻火器淬火单元的微通道内火焰传播的研究进展,对影响微通道内部火焰传播的各因素进行了总结,对微通道理论发展的成果与不足进行了概括,指出了微通道内火焰传播研究的发展方向.

## 2 微通道内火焰传播的影响因素

火焰是发生自燃烧化学反应的一定体积气体.火焰在微通道中的传播可分为两大类:爆燃火焰与爆轰火焰,以火焰传播速度是否大于声速区分<sup>[9]</sup>,火焰传播速度小于声速时为爆燃火焰,火焰传播速度大于声速时为

爆轰火焰.爆燃火焰与爆轰火焰的微观特征明显不同,主要区别在于是否具有胞格结构<sup>[10]</sup>,胞格结构是爆轰波阵面由入射激波、马赫杆和横向激波形成的非定向三维结构<sup>[11]</sup>,是爆燃转爆轰的典型特征.微燃烧器中多为爆燃火焰,阻火器中大多为爆轰火焰.Wu等<sup>[10]</sup>通过实验拍摄方法研究了爆轰边界(Detonation boundary,即爆燃转爆轰的分界线),如图2所示,爆轰边界左侧即爆燃,微观显示无胞格结构,而爆轰边界右侧为爆轰,微观显示有大量菱形胞格结构.

火焰在微通道内的传播受诸多因素影响,除点火能量、点火位置、初始温度和初始压力等因素<sup>[12-18]</sup>外,还包括可燃混合物的组成和微通道结构及壁面参数等.

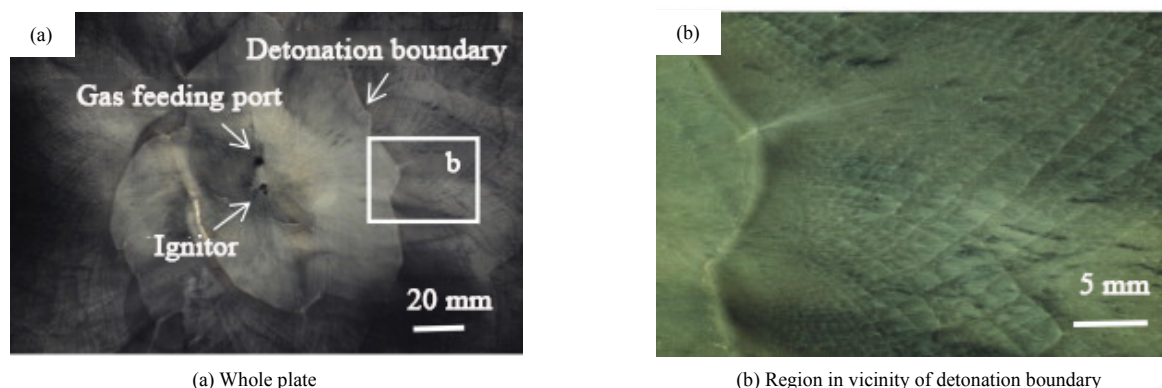


图2 间隙 260  $\mu\text{m}$  的平行薄板上的烟迹记录<sup>[10]</sup>

Fig.2 Soot records of 260  $\mu\text{m}$  gap between parallel plate<sup>[10]</sup>

### 2.1 可燃混合物组成对火焰传播的影响

可燃混合物的组成影响微通道内的火焰传播,其中

可燃气体种类影响最大.燃空当量比、惰性或活性气体的添加比例等对火焰在微通道内的传播均有影响.

2.1.1 可燃气体种类对火焰传播的影响

可燃气体种类影响火焰传播特征. 李传家等<sup>[19]</sup>的实验研究表明, 相同条件下不同燃料在管道中传播的超压峰值不同. 烷烃是重要的可燃气, 年志远<sup>[20]</sup>对烷烃淬熄距离进行了实验研究, 发现采用不同温度变化方式(不锈钢平板由低温升至高温或由高温降至低温)达到同一壁面温度对淬熄距离有微弱影响. 将两种温度变化方式下的淬熄距离平均, 4 种烷烃在不同壁面温度的不锈钢平板间的淬熄距离如图 3 所示. 由图可知, 不同可燃气体烷烃的淬熄距离不同, 可推断不同可燃气体火焰穿过管道的能力不同.

表征火焰穿过狭缝能力的通用参数为最大实验安全间隙(Maximum Experimental Safe Gap, MESG), 是指在标准实验条件下, 空腔内所有浓度的被试气体或蒸气与空气混合物点燃后, 通过 25 mm 长的火焰通路均不能点燃外部爆炸性混合物的内空腔两部分之间的最大间隙<sup>[21]</sup>. 一些学者<sup>[22-25]</sup>对 MESG 进行了研究, 部分常见可燃气体或可燃蒸气的 MESG 值如表 1<sup>[21]</sup>所示. 由表可看出, 不同可燃气体的 MESG 值差异较大, 表明火焰穿过

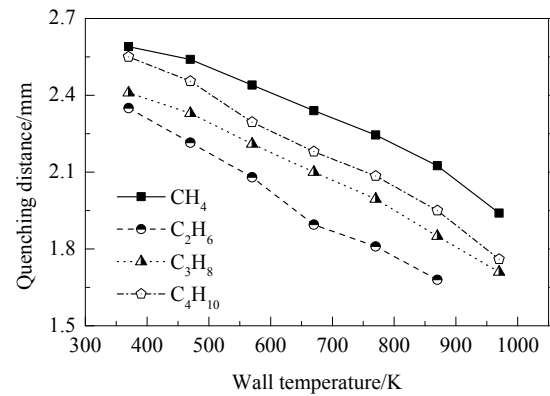


图 3 不同温度下 4 种烷烃的熄火距离  
Fig.3 Quenching distances of four alkanes at different temperatures

管道的能力不同. MESG 值为评价爆炸性物品传爆能力的参数, 按可燃气体的 MESG 值可对其传爆能力分级. 选取热值大、MESG 值小的气体作燃料有利于提高微燃烧器能量密度. MESG 值可用于指导选取阻火器微通道尺寸.

表 1 部分可燃气体或可燃蒸气的最大试验安全间隙<sup>[21]</sup>

Table 1 Maximum experimental safe gap for some combustible or flammable vapors<sup>[21]</sup>

| Gas            | Maximum experimental safe gap/mm | Gas              | Maximum experimental safe gap/mm |
|----------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|
| Ammonia        | 3.17                             | Hydrogen cyanide | 0.80                             |
| Methane        | 1.14                             | Acrylonitrile    | 0.87                             |
| Isopropanol    | 0.99                             | Propylene oxide  | 0.70                             |
| Methyl acetate | 0.99                             | Dimethyl ether   | 0.86                             |
| Amyl acetate   | 0.99                             | Methyl acrylate  | 0.85                             |
| Butanol        | 0.94                             | Butadiene        | 0.79                             |
| Methanol       | 0.92                             | Ethylene         | 0.65                             |
| Acetone        | 1.02                             | Carbon disulfide | 0.34                             |
| Butane         | 0.98                             | Acetylene        | 0.37                             |
| Propane        | 0.92                             | Hydrogen         | 0.29                             |

2.1.2 其它因素对火焰传播的影响

燃空当量比( $\phi$ )是指单位质量燃料完全燃烧所需的理论空气质量与实际供给的空气质量之比, 是表征可燃混合气组成的重要物理量. 是否预混<sup>[26]</sup>、添加气体(惰性或活性两种)的种类及比例<sup>[10,27]</sup>等也影响可燃气体的燃烧特征. Wei 等<sup>[28]</sup>认为燃空当量比是影响燃烧的最重要的因素. 研究者<sup>[28-33]</sup>针对燃空当量比对火焰结构、火焰传播速度、超压等特征的影响进行了大量研究. 研究<sup>[29]</sup>表明,  $\phi=1$  时可燃混合物最易点燃, 其火焰结构最稳定. 燃空当量比对最大火焰速度的影响研究结论有差异: Lapp 等<sup>[34]</sup>的研究表明,  $\phi=1$  的可燃混合气体点燃后, 会产生最大的火焰速度和最强的火焰压力; Wei 等<sup>[28]</sup>的研究发现,  $\phi=1.25$  时湍流火焰速度最大; 何学超<sup>[35]</sup>认为碳氢燃料燃烧火焰传播速度最大值在  $\phi=0.96$  处, 且

不随压力和温度变化. Wang 等<sup>[31]</sup>通过实验和数值模拟研究发现, 随  $\phi$  增加, 爆轰火焰传播速度先增大后减小. Wang 等<sup>[32]</sup>采用直接数值模拟方法研究发现, 在贫燃情况( $\phi<1$ )下, 当 Karlovitz 数( $Ka$ )和 Damkohler 数( $Da$ )固定时, 湍流火焰速度不受燃空当量比变化影响.  $Ka$  数定义为化学特征时间  $\tau_c$  与 Kolmogorov 时间  $\tau_\eta$  的比, 用于表征不同的湍流预混机制;  $Da$  数定义为反应物在燃烧室内停留时间  $\tau_i$  与化学特征时间尺度的比值, 可表征反应是否进行完全.

$$Ka = \frac{\tau_c}{\tau_\eta} = \frac{u'(\eta)/\eta}{s_l/\delta_l} = \left(\frac{\delta_l}{\eta}\right)^2, \tag{1}$$

$$Da = \frac{\tau_i}{\tau_c} = \frac{s_l}{u'(\eta)} \frac{L_o}{\delta_l}, \tag{2}$$

其中,  $\eta$  为 Kolmogorov 长度尺度(流体的最小涡, m),

$u'$ 为湍流脉动速度(m/s),  $s_1$ 为层流火焰速度(m/s),  $\delta_1$ 为层流火焰厚度(m),  $L_0$ 为通道长度(m).

不同研究者所测火焰速度最大值时的 $\phi$ 不同,原因可能与可燃气体的种类有关<sup>[36]</sup>,具体需对不同种类的可燃气体进行系统深入的研究,进一步明确燃空当量比对火焰结构及火焰传播速度的影响. Lapp等<sup>[34]</sup>在实际管道系统中测试了影响火焰传播的9种因素(可燃气体种类、可燃混合物、预点燃压力、点火能量、可燃混合物初始温度、点火位置、管道结构、受保护侧限制、稳定火焰的耐受性)对火焰特性的影响,明确了可燃气体混合物的燃空当量比和初始压力比点燃能量和初始温度更重要. 各因素重要程度排序目前并无定论,亟需对影响火焰传播的各因素开展研究.

## 2.2 微通道结构和壁面参数对火焰传播的影响

许多研究者对微通道的结构进行了研究. Sanchez-Sanz等<sup>[29]</sup>研究发现,微通道尺寸越大,火焰稳定性越好. Wu等研究了乙烯/空气在透明平板组成的不同间隙(260和120  $\mu\text{m}$ )<sup>[10,37]</sup>及在内径0.5~3.0 mm的玻璃圆管<sup>[38]</sup>中的火焰传播,结果表明在常温、常压下,小尺度管道内起爆距离随管径增大而增大,即火焰能传播得更远. 从以上研究可看出,增大微通道尺寸有利于火焰稳定,缩小微通道尺寸可促进火焰淬熄. 微燃烧器由于体积限制其尺寸不能无限增大,为避免阻力过大,阻火芯单元尺寸也不可能无限小. 尺寸与性能的平衡是今后研究的重点. 微燃烧器可借助其它方法实现微通道中的稳定燃烧,一种是改变其结构,如设计成瑞士卷结构<sup>[39-41]</sup>或增加钝体<sup>[12,42-44]</sup>等实现热循环;另一种是在微燃烧器内表面涂敷催化剂<sup>[45,46]</sup>. 阻火器可通过改变阻火芯厚度、通道尺寸及阻火芯间距提高其对火焰的淬熄能力<sup>[6,47,48]</sup>. 除微通道形状外,壁面材质对火焰传播特性影响较大<sup>[49]</sup>.

微通道壁面的热损失占可燃气体燃烧放热的30%~40%甚至更高<sup>[50-52]</sup>,不仅壁面的热传导和对流对燃烧影响显著,壁面与环境之间的热辐射也会造成热损失. 辐射换热与温度的4次方成正比,因此壁面温度升高直接导致微通道热损失增加. 微通道热损失率可由下式<sup>[3]</sup>计算:

$$\frac{Q_{\text{loss}}}{Q_{\text{total}}} = \frac{Sk\Delta T}{V\dot{Q}} \propto \frac{S}{V} \frac{(T_f - T_\infty)}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta_w}{\lambda_w} + \frac{1}{h_2}}, \quad (3)$$

其中,  $Q_{\text{loss}}$ 为微通道热损失(J),  $Q_{\text{total}}$ 为微通道理论热负荷(J),  $S$ 为微通道散热表面积( $\text{m}^2$ ),  $V$ 为微通道容积( $\text{m}^3$ ),  $k$ 为传热系数( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ),  $T_f$ 为火焰温度(K),  $T_\infty$ 为环境温度(K),  $\dot{Q}$ 为燃料的放热量( $\text{J}/\text{m}^3$ ),  $h_1$ 为火焰与壁面间

的换热系数( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ),  $\delta_w$ 为壁面厚度(m),  $\lambda_w$ 为壁面热传导系数( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ),  $h_2$ 为壁面与环境间的换热系数( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ).

由式(3)可知,除表面积和体积比外,微通道壁面材质和温度对热损失影响较大. 微燃烧器需选择合适的材质以提高火焰的稳定性,阻火器需选择合适的材质使其热损失尽可能大以实现熄火. 微通道壁面温度及材质对火焰传播影响的代表性研究<sup>[53-55]</sup>如图4所示. 由图可知,壁面材质对火焰淬熄距离影响较大. 由于实验条件(燃空当量比和燃料伴流速度等)不同,测得的淬熄距离存在差异,但趋势相同,即随壁面温度升高,所需淬熄距离减小. 其他学者<sup>[56,57]</sup>得出了相同结论.

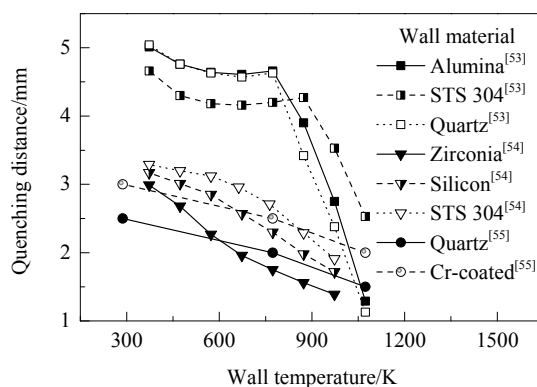


图4 壁面材质和温度对甲烷/空气熄火距离的影响  
Fig.4 Quenching distance of CH<sub>4</sub>/air measured for a series of wall materials with different wall temperatures

关于火焰淬熄机理主要有两种观点:冷壁效应和器壁效应<sup>[58,59]</sup>.冷壁效应认为当火焰通过微通道时,因壁面散热温度会明显下降,导致火焰熄灭.冷壁效应可解释许多火焰淬熄,但也有许多现象不能解释,有实验证明不同材质的微通道导热系数虽相差数百倍,但其最大淬熄直径相同<sup>[60]</sup>.器壁效应解释了该现象,器壁效应认为自由基与器壁碰撞导致被销毁的自由基数量变多,参加反应的自由基减少,链式反应中断进而导致火焰淬熄.学者们对两种淬熄理论进行了研究. Raimondeau等<sup>[61]</sup>采用数值模拟方法研究了考虑自由基淬熄的甲烷/空气火焰在微通道中的燃烧特性,结果表明燃烧器的壁面热损失和自由基淬熄是影响火焰传播的重要因素. Kim等<sup>[53]</sup>研究了壁面温度和材质对淬熄距离的影响,发现壁面温度较低时壁面材质对淬熄距离无影响,壁面温度较高时淬熄距离受壁面材质影响很大. Miesse等<sup>[57]</sup>得出在低温(约500 K)下淬熄距离与材质无关,而在高温(约1273 K)时淬熄距离与壁面材质密切相关. Bai等<sup>[62]</sup>从热力学和动力学角度对火焰在微通道中的传播进行了理论分析,

得出了自由基淬熄在高温壁面下作用更明显. Saiki 等<sup>[63]</sup>将数值模拟和实验相结合, 采用 OH 平面诱导荧光技术 (OH-PLIF) 对甲烷/空气在微通道内预混燃烧的自由基分布进行了研究, 结果表明高温下自由基与石英壁面作用活跃. 自由基的淬熄在数值模拟中可通过添加壁面反应的方法实现. 张立志等<sup>[64]</sup>采用氢气/空气预混火焰, 结合气相燃烧和固体壁面反应, 通过数值模拟方式考察了不同尺度及热损失下微小通道内的燃烧情况, 结果表明壁面反应的存在不仅引起着火点延迟, 也引起熄火提前, 且随尺度减小, 壁面效应更明显. Saiki 等<sup>[65]</sup>采用实验和数值模拟的方法研究了自由基淬熄对甲烷/空气预混气在微通道内传播的影响, 发现常压下自由基淬熄对火焰位置无影响, 但小于常压时 ( $0.1 \times 10^5$  和  $0.05 \times 10^5$  Pa) 影响较大. 由此可见, 自由基淬熄不仅与壁面温度、壁面材质有关, 还受初始压力影响. 关于火焰淬熄的机理研究已取得较大进展, 但对于器壁效应与冷壁效应两种机理各在何种情况下占主导地位仍需研究.

### 3 微通道燃烧的理论

由于空间狭小, 通过实验方法对微燃烧器或阻火器微通道进行设计及性能测试成本高、费时长、危险性大且准确性低, 数值模拟方法具有成本低、耗时短、无危险性等特点, 用于微燃烧器或阻火器设计及性能预测具有广阔前景. 对高温单相燃烧反应进行数学建模, 通常采用如下的控制方程<sup>[46]</sup>.

#### (1) 质量守恒方程

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (4)$$

其中,  $\rho$  为气体混合物密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $\mathbf{v}$  为速度向量 ( $\text{m}/\text{s}$ ).

#### (2) 动量守恒方程

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[ (\mu + \mu_t) \left( \nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{v} \mathbf{I} \right) \right] + \rho \mathbf{g}, \quad (5)$$

其中,  $p$  为压力 (Pa),  $\mu$  为分子粘度 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ),  $\mu_t$  为湍流粘度 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ), 当反应流为层流时,  $\mu_t = 0$ , 否则需对其进行封闭,  $\mathbf{I}$  为单位张量,  $\mathbf{g}$  为重力加速度 ( $\text{m}/\text{s}^2$ ).

#### (3) 热量守恒方程

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v} H) = \nabla \cdot \left( \frac{\lambda}{c_p} \nabla H \right) + S_{h, \text{chem}} + S_{h, \text{rad}}, \quad (6)$$

其中,  $H$  为总焓 (J),  $\lambda$  为热传导系数 ( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ),  $c_p$  为组分定压比热容 ( $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ),  $S_{h, \text{chem}}$  为化学反应热量 (J),  $S_{h, \text{rad}}$

为辐射热量 (J).

#### (4) 组分传输方程

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v} Y_i) = \nabla \cdot \left[ \left( \rho D_{i, \text{m}} + \frac{\mu_t}{Sc_i} \right) \nabla Y_i + D_{T, i} \frac{\nabla T}{T} \right] + R_i, \quad (7)$$

其中,  $Y_i$  为质量分数,  $D_{i, \text{m}}$  为质量扩散系数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $Sc_i$  为斯密特数,  $D_{T, i}$  为热扩散系数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $T$  为温度 (K),  $R_i$  为化学反应中组分  $i$  的净生成率 [ $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^3)$ ].

微通道内的火焰燃烧是复杂过程, 包括高温流体流动、化学反应及二者的相互作用, 对流体流动流型、湍流与燃烧的相互作用的研究至关重要.

#### 3.1 微通道内流体流动的流型

关于微通道内可燃气体燃烧的理论研究已取得很大进展, 对流型的最新研究如表 2 所示, 其中  $d$  为微通道直径,  $L$  为微通道长度,  $Re$  为雷诺数. 从表 2 可看出, 对阻火器微通道的数值模拟研究不充分, 仅 Wang 等<sup>[6]</sup>采用层流模型对爆燃和低速爆轰火焰进行了先导性研究. 对火焰在微通道内的传播流型尚存在争议, 层流模型和湍流模型均有应用, 且大多数采用层流模型, 仅少数研究者采用湍流模型. 对微通道中流体流动的流型判定大多沿循宏观尺度的标准, 即以雷诺数  $Re$  进行判断. 微通道中流体流型的判定与宏观尺度不同<sup>[56, 72]</sup>, 若以宏观尺度  $Re > 2300$  作为判定流型为湍流的标准不够严谨. Bear<sup>[73]</sup>研究了流体在微通道中的流动, 发现当  $Re = 1 \sim 10$  时流体处于层流区,  $Re = 10 \sim 100$  时进入过渡区,  $Re > 100$  时进入湍流区. 有学者<sup>[74]</sup>发现  $Re = 150$  时微通道内流体由层流转变为湍流. 陈作义<sup>[75]</sup>研究发现交叉三角形波纹板通道很容易达到湍流,  $Re = 275$  时流动趋于过渡流,  $Re = 1000$  时流动趋于湍流. Kuo 等<sup>[76]</sup>指出, 在微燃烧器中,  $Re > 500$  时使用湍流模型更合适. 不同研究者所得湍流时的  $Re$  明显不同, 可能与定性尺寸选取不同有关<sup>[77]</sup>. 由此可见, 在对微通道进行数值建模时, 对流型的判定及流动模型的选择是亟待解决的问题. 阻火器微通道内火焰速度是微燃烧器中火焰速度的几十甚至上百倍, 如在微燃烧器中, 火焰速度通常为几十厘米/秒<sup>[45]</sup>, 而在阻火器微通道中火焰速度可高达几十至上百米/秒<sup>[6]</sup>, 在极端爆轰条件下速度可达几倍声速. Wang 等<sup>[6]</sup>研究得出, 在阻爆燃火焰的  $A_1$  结构与阻爆轰火焰的  $A_3$  结构的中心平面上绝大多数区域湍流粘度与层流粘度的比值远大于 1 (图 5), 表明湍流的影响不可忽略. 因此在阻火器微通道中使用层流模型是否准确值得进一步讨论. 对阻火器内爆轰条件下的模拟仿真倾向于认为其流型为湍流<sup>[6]</sup>.



表 2 微通道内燃烧的数值模拟所采用的流型  
Table 2 Numerical simulation of combustion in microchannels

| Ref. | Microchannel geometry   | Fuel/oxidizer                      | Reaction mechanism       | Re or inlet velocity, $v_i$ /(m/s) | Flow pattern | Object of study   |
|------|---|------------------------------------|--------------------------|------------------------------------|--------------|---|
| [66] | Cubic box, 10 mm×5 mm×5 mm  | CH <sub>4</sub> /air               | 16 species, 25 reactions | $v_i=10$ , $Re=383$                | Turbulence   | Microcombustor, effect of inlet velocity on flame structure   |
| [67] | Parallel plate, 16 mm×1 mm  | H <sub>2</sub> /air                | 13 species, 19 reactions | $v_i=36, 43$                       | Turbulence   | Microcombustor, effect of bluff body shape on the blow-off limit  |
| [68] | Cylindrical tube, $d=18$ mm, $L=100$ mm                                     | CH <sub>4</sub> /air               | 17 species, 73 reactions | $Re<1500$                          | Laminar      | Microcombustor, effects of the flame holder and its physical properties on combustion                                     |
| [69] | Cylindrical tube, $d=2$ mm, $L=12$ mm                                       | CH <sub>4</sub> /air               | 16 species, 25 reactions | $v_i=2\sim8$                       | Laminar      | Microcombustor, effects of combustor size, geometry, inlet velocity and slip wall boundary condition on flame temperature |
| [70] | Cylindrical tube, $d=280$ $\mu$ m, $L=50$ mm                                | CH <sub>4</sub> /air               | 16 species, 25 reactions | $v_i=1.2\sim18.3$                  | Laminar      | Microcombustor, effect of coflow air inlet velocity on flame structure  |
| [71] | Cubic box, 20 mm×10 mm×1 mm   | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> /air | 4 species, 1 reactions   | $v_i=0.3$                          | Laminar      | Microcombustor, effect of microreactor geometry on fuel burning process stability   |
| [6]  | Triangle channel, bottom length 2.13 mm, height 0.87 mm, axial length 15 mm | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> /air | 4 species, 1 reactions   | $v_i$ =Dozens or hundreds          | Laminar      | Flame arrester, relationship between the flameproof velocity and arrester structures                                      |

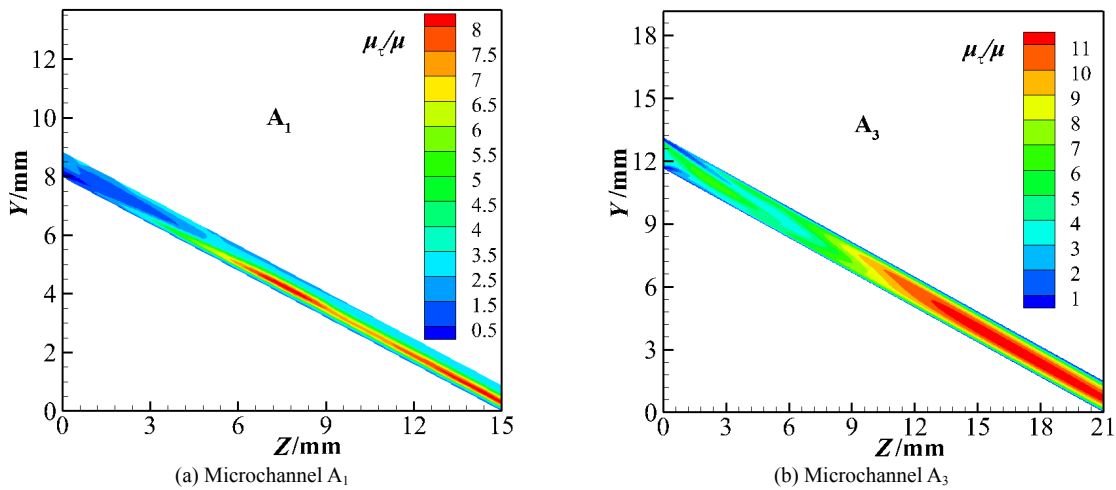


图 5 阻火器微通道中心面湍流粘性比<sup>[6]</sup>  
Fig.5 Turbulent viscosity in the center surface of microchannels in flame arrestors<sup>[6]</sup>

流体速度不同所用算法不同<sup>[78]</sup>。低马赫数、不可压缩流动的数值模拟宜采取压力为基础的算法<sup>[79]</sup>，该情况下压力主要影响速度而不影响密度。对于高马赫数、可压缩的流动，一般采用以密度为基础的算法<sup>[80]</sup>，该情况下压力主要影响密度而不影响速度。对于阻火器微通道内的火焰传播，在爆燃和低速爆轰情况下可采用以压力为基础的算法；对于高速爆轰火焰，其在微通道内的实际气速远超过声速，属于高马赫数的情况，宜采用以密度为基础的算法进行方程求解。

3.2 湍流与燃烧的相互作用

燃烧表现为宏观火焰结构与微观化学反应。湍动

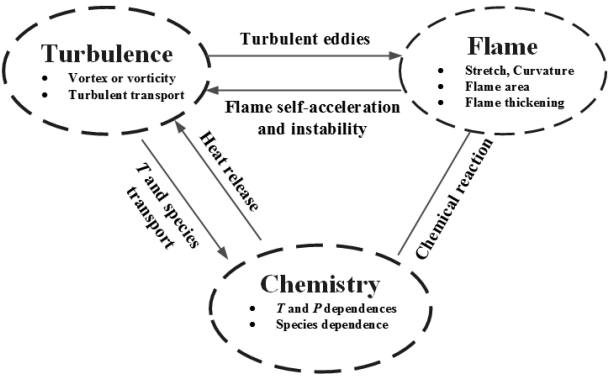


图 6 湍流与火焰和化学反应耦合示意图<sup>[81]</sup>  
Fig.6 The schematic diagram of the coupling of turbulence, flames and chemical reactions<sup>[81]</sup>

与燃烧相互作用、相互影响, 湍流与燃烧的相互作用如图 6<sup>[81]</sup>所示. 由图可知, 湍流通过湍动涡的作用使火焰发生拉伸、扭曲, 从而影响火焰结构, 其中包括火焰面积和火焰厚度; 燃烧微观上为伴随剧烈放热的化学反应, 大量放热会显著改变湍流流动. 近期研究<sup>[61,65]</sup>表明, 自由基输运与其链分支反应会影响火焰的拉伸率, 进而影

响火焰结构. 因此, 需进一步研究化学反应在湍流燃烧中的角色. 迄今为止已发展出多种湍流模型及燃烧模型, 如表 3 所示. 对微通道中湍流与燃烧相互作用研究不充分, 而较大尺寸反应器的研究可为微通道所借鉴, 表 3 所列不局限于微通道反应器, 也包含较大尺寸反应器中湍流与燃烧相互作用的研究.

表 3 湍流与燃烧相互作用模型  
Table 3 Interaction between turbulence and combustion

| Ref. | Model of turbulence model                      | Combustion model               |
|------|--|--------------------------------|
| [49] | DNS (Direct numerical simulation)              | —                              |
| [82] | DNS  | —                              |
| [83] | LES (Large eddy simulation)                    | CFM (Coherent flame model)     |
| [66] | LES  | PaSR (Partial stirred reactor) |
| [84] | LES  | LFM (Laminar flamelet model)   |
|      | LES  | EDC (Eddy dissipation concept) |
|      | RANS (Renolds average navier stokes equations) | LFM                            |
| [85] | RANS   | LFR (Laminar finite rate)      |
|      | RANS   | Flamelet model                 |
| [67] | RANS   | LFR                            |
| [86] | RANS   | Flamelet/progress variable     |
| [87] | RANS   | LFR                            |

由表 3 可看出, 目前进行湍流燃烧模拟的主要方法有直接数值模拟(Direct Numerical Simulation, DNS)、大涡模拟(Large Eddy Simulation, LES)、雷诺平均纳维-斯托克斯方程(Renolds Average Navier Stokes Equations, RANS)等, 这些模型在模拟精度、经济性、合理性上各有不同, 寻找合理又经济的模型是尚待解决的问题, 需建立适合反应器设计的快而准的模型. 从精确度考虑, 多数研究者采用 DNS 或 LES 方法, 这两种方法计算成本较高, 不适用于工程湍流的设计, 对湍流进行模式化处理是大势所趋. 不少研究者尝试将 RANS 湍流模型与燃烧模型耦合进行数值计算, 并与 LES 或 DNS 结果相比较, 取得了一些进展. Gharebaghi 等<sup>[88]</sup>分别采用 RANS 和 LES 模型对工业燃烧装置进行了数值模拟, 燃烧模型为涡耗散模型, 结果表明对于以空气为氧化剂的燃烧反应, RANS 预测结果更合理; 对于以纯氧气为氧化剂的燃烧, RANS 的预测结果与实验值偏差较大. 可见氧化剂影响湍流模型的选择, 可能是因为氧化剂浓度越大, 燃烧反应越剧烈, 对湍流预测的依赖性也增强. 一般情况下 LES 比 RANS 准确, 且 LES 对火焰湍流特性的预测优于 RANS. 对温度分布 LES 与 RANS 的预测结果差别不大<sup>[88]</sup>, 原因是温度分布不仅受湍流影响, 还受传热和燃烧影响, 特别受高浓度烃类燃烧主要产物 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 的非灰辐射影响. Benim 等<sup>[84]</sup>用 OPENFOAM 软件对甲烷/空气在燃气涡轮燃烧室内的燃烧进行了数值模拟, 将不同湍流模型与燃烧模型组合 (LES-LFM, LES-EDC, RANS-LFM), 比较了预测结果的准确性、运

行成本等, 结果表明基于 LES 的组合准确性优于 RANS. 但 RANS 依然必不可少, 这是因为微通道尺寸较小, 其网格尺寸大多只有几微米, 网格数较多, 复杂模型虽可获得较优结果, 但目前的计算能力消耗时间较长. 简化的 RANS 模型预测的关键设计参数相对准确, 运行成本较低, 是现阶段解决工程湍流燃烧问题的关键.

采用何种湍流模型对 RANS 进行封闭可使高温燃烧计算更经济合理迄今尚无定论. 学者们采用不同湍流模型对 RANS 进行封闭, Gharebaghi 等<sup>[88]</sup>采用标准  $k-\epsilon$  模型, 曾卓熊等<sup>[87]</sup>采用可实现的  $k-\epsilon$  模型, Benim 等<sup>[84]</sup>采用剪切应力输运模型(Shear Stress Transport Model, SST), Gao 等<sup>[85]</sup>采用  $k-\omega$  SST 湍流模型, Davani 等<sup>[89]</sup>与 Zhang 等<sup>[90]</sup>均采用 RSM 模型. Davani 等<sup>[89]</sup>比较了采用雷诺应力模型(Reynolds Stress Model, RSM)进行封闭的 RANS 和 LES 模型对轴向速度预测的准确性, 结果表明 RSM 和 LES 模型均可准确预测轴向速度波动的关键特征. Zhang 等<sup>[90]</sup>研究发现 RSM 模型与部分预混燃烧模型组合预测的火焰形状更合理. 可见采用 RSM 模型封闭的 RANS, 其精确度近似于 LES, 而其计算量比 LES 少. 为了节省计算成本, 推荐采用 RSM 模型替代 LES 模型.

Gao 等<sup>[85]</sup>将 RANS 分别与 LFR(Laminar Finite Rate)及火焰面燃烧模型组合, 所得预测结果与实验结果比对, 发现 LFR 模型在多个实验条件下的预测结果均合理, 特别在高马赫数下, 其预测结果比火焰面燃烧模型更合理. Fan 等<sup>[67]</sup>与曾卓雄等<sup>[87]</sup>将 LFR 与 RANS 组合获得了

满意的结果。RSM模型是现阶段预测精度最接近LES的RANS模型，LFR与RANS组合进行湍流燃烧的模拟已取得一些成果<sup>[67,85,87]</sup>。对于爆轰条件下阻火器的模拟，推荐将RSM与LFR模型相结合，可在计算条件允许的情况下，获得极端复杂条件下的传递和反应细节。以上研究均在未考虑非灰辐射的基础上开展，模拟过程中辐射对整个换热过程的影响未能很好体现。若能在传统仅考虑热量对流和扩散的基础上充分考虑辐射对热损失的影响，将极大地提升数值模拟的科学性和准确度。

## 4 结语与展望

对影响火焰在微燃烧器和阻火器中微通道内传播的因素、火焰传播的理论研究及数学建模的进展等进行了总结，得出以下几点认识：

(1) 对影响火焰传播的各因素的研究取得了很大进展，但由于影响微通道内火焰传播的因素较多，各因素对火焰传播影响的重要程度尚无定论，甚至研究结果相互矛盾，有待进一步探索。

(2) 火焰在微通道内的淬熄机理研究中，冷壁效应研究相对充分，器壁效应如何影响火焰传播及在何种工况下为导致火焰熄灭的主要原因，需进一步深入研究。

(3) 对微燃烧器的研究较多，阻火器微通道由于被包裹在阻火器外壳内，且尺寸过小，难以通过实验测量方法研究，相关研究较少。用实验方法对阻火器性能进行测试，成本较高且具一定危险性。对阻火器淬熄单元的关键结构微通道开展模拟研究，建立快而准的阻火器微通道数学模型，实现对阻火性能准确预测迫在眉睫。

(4) 微通道狭缝内流型的判定标准不同于尺寸较大的通道，判定标准需确立。高速爆轰条件下阻火器微通道内的流体流型为湍流。湍流燃烧模拟需寻找经济、合理的湍流与燃烧模型，建议将RSM-LFR模型用于阻火器爆轰条件下的湍流燃烧模拟，并采用以密度为基础的算法进行方程求解。

## 参考文献

- [1] 陶然, 权晓波, 徐建中. 微尺度流动研究中的几个问题 [J]. 工程热物理学报, 2001, 22(5): 575-577.  
Tao R, Quan X B, Xu J Z. Several questions in research of micro scale flow [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2001, 22(5): 575-577.
- [2] Deng W, Klemic J F, Li X, et al. Liquid fuel microcombustor using microfabricated multiplexed electrospray sources [J]. Proc. Combust. Inst., 2007, 31(2): 2239-2246.
- [3] Fernandez-Pello A C. Micropower generation using combustion: issues and approaches [J]. Proc. Combust. Inst., 2002, 29(1): 883-899.
- [4] Sahota G P S, Khandelwal B, Kumar S. Experimental investigations on a new active swirl based microcombustor for an integrated micro-reformer system [J]. Energy Convers. Manage., 2011, 52(10): 3206-3213.
- [5] 孙冰, 朱红伟, 姜杰, 等. 微混合与微反应技术在提升化工安全中的应用 [J]. 化工进展, 2017, 36(8): 2756-2763.  
Sun B, Zhu H W, Jiang J, et al. Application of micromixer and microreactor in improving process safety [J]. Chemical Industry and Engineering Process, 2017, 36(8): 2756-2763.
- [6] Wang L, Ma H, Shen Z. The quenching of propane deflagrations by crimped ribbon flame arrestors [J]. J. Loss Prev. Process Ind., 2016, 43: 567-574.
- [7] Capp B. Temperature rise of a rigid element flame arrester in endurance burning with propane [J]. J. Loss Prev. Process Ind., 1992, 5(4): 215-218.
- [8] Howard W B. Flame arresters and flashback preventers [J]. Process Saf. Prog., 1982, 1(4): 203-208.
- [9] 国家质量监督检验检疫总局. 石油气体管道阻火器: GB/T 13347-2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011: 1.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Flame arresters for petroleum gas pipeline systems: GB/T 13347-2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011: 1.
- [10] Wu M H, Kuo W C. Accelerative expansion and DDT of stoichiometric ethylene/oxygen flame rings in micro-gaps [J]. Proc. Combust. Inst., 2013, 34(2): 2017-2024.
- [11] 邓博, 胡宗民, 滕宏辉, 等. 变截面管道中爆轰胞格演变机制的数值模拟研究 [J]. 中国科学 G 辑: 物理学, 力学, 天文学, 2008, 38(2): 206-216.  
Deng B, Hu Z M, Teng H H, et al. Numerical study on cellular structure evolution of detonation in section-changing chambers [J]. Science in China Series G: Physica, Mechanica & Astronomica, 2008, 38(2): 206-216.
- [12] Tong Y, Li M, Thern M, et al. Experimental investigation on effects of central air jet on the bluff-body stabilized premixed methane-air flame [J]. Energy Procedia, 2017, 107: 23-32.
- [13] Dorofeev S B. Hydrogen flames in tubes: critical run-up distances [J]. Int. J. Hydrogen Energy, 2009, 34(14): 5832-5837.
- [14] Guo J, Sun X, Rui S, et al. Effect of ignition position on vented hydrogen-air explosions [J]. Int. J. Hydrogen Energy, 2015, 40(45): 15780-15788.
- [15] Broustail G, Seers P, Halter F, et al. Experimental determination of laminar burning velocity for butanol and ethanol iso-octane blends [J]. Fuel, 2011, 90(1): 1-6.
- [16] Miao H, Jiao Q, Huang Z, et al. Effect of initial pressure on laminar combustion characteristics of hydrogen enriched natural gas [J]. Int. J. Hydrogen Energy, 2008, 33(14): 3876-3885.
- [17] Pekalski A A, Zevenbergen J F, Lemkowitz S M, et al. A review of explosion prevention and protection systems suitable as ultimate layer of protection in chemical process installations [J]. Process Saf. Environ. Prot., 2005, 83(1): 1-17.
- [18] Grabarczyk M, Teodorczyk A, Di Sarli V, et al. Effect of initial temperature on the explosion pressure of various liquid fuels and their blends [J]. J. Loss Prev. Process Ind., 2016, 44: 775-779.
- [19] 李传家, 王伯良, 黄菊, 等. 爆炸形成过程中火焰加速的试验研究 [J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(10): 76-81.  
Li C J, Wang B L, Huang J, et al. Experimental study on flame acceleration in the forming process of explosion [J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(10): 76-81.



- [20] 年志远. 平板狭缝间碳氢燃料微小火焰特性的实验研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2016: 17.  
Nian Z Y. Experimental study on the micro flame characteristics of hydrocarbon fuels in plate slit [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016: 17.
- [21] 国家质量监督检验检疫总局. 爆炸性环境: 第11部分 由隔爆外壳"d"保护的设备的最大试验安全间隙测定方法: GB 3836.11-2008/IEC 60079-1-1:2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 3-4.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Explosive atmospheres—part 11: Equipment protection by flameproof enclosures "d"—method of test for ascertainment of maximum experimental safe gap: GB 3836.11-2008/IEC 60079-1-1:2002 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 3-4.
- [22] Strehlow R A, Nicholls J A, Magison E C, et al. An investigation of the maximum experimental safe gap anomaly [J]. J. Hazard. Mater., 1979, 3(1): 1-15.
- [23] Phillips H. Differences between determinations of maximum experimental safe gap in Europe and U.S.A. [J]. J. Hazard. Mater., 1981, 4(3): 245-256.
- [24] Lunn G A. An apparatus for the measurement of maximum experimental safe gaps at standard and elevated temperatures [J]. J. Hazard. Mater., 1982, 6(4): 329-340.
- [25] Capp B. The maximum experimental safe gap for a spray of higher flash point liquid [J]. J. Hazard. Mater., 1988, 18(1): 91-97.
- [26] Boulal S, Vidal P, Zitoun R. Experimental investigation of detonation quenching in non-uniform compositions [J]. Combust. Flame, 2016, 172: 222-233.
- [27] Bauer P. Experimental investigation on flame and detonation quenching: applicability of static flame arresters [J]. J. Loss Prev. Process Ind., 2005, 18(2): 63-68.
- [28] Wei H, Zhao J, Zhou L, et al. Effects of the equivalence ratio on turbulent flame-shock interactions in a confined space [J]. Combust. Flame, 2017, 186: 247-262.
- [29] Sanchez-Sanz M, Fernandez-Galisteo D, Kurdyumov V N. Effect of the equivalence ratio, Damköhler number, Lewis number and heat release on the stability of laminar premixed flames in microchannels [J]. Combust. Flame, 2014, 161(5): 1282-1293.
- [30] Wang T, Zhang X, Zhang J, et al. Numerical analysis of the influence of the fuel injection timing and ignition position in a direct-injection natural gas engine [J]. Energy Convers. Manage., 2017, 149: 748-759.
- [31] Wang Y, Wang J. Effect of equivalence ratio on the velocity of rotating detonation [J]. Int. J. Hydrogen Energy, 2015, 40(25): 7949-7955.
- [32] Wang Z, Motheau E, Abraham J. Effects of equivalence ratio variations on turbulent flame speed in lean methane/air mixtures under lean-burn natural gas engine operating conditions [J]. Proc. Combust. Inst., 2017, 36(3): 3423-3430.
- [33] Lv X, Zheng L, Zhang Y, et al. Combined effects of obstacle position and equivalence ratio on overpressure of premixed hydrogen-air explosion [J]. Int. J. Hydrogen Energy, 2016, 41(39): 17740-17749.
- [34] Lapp K, Werneburg H. Detonation flame arrester qualifying application parameter for explosion prevention in vapor handling systems [J]. Process Saf. Prog., 1995, 14(2): 139-146.
- [35] 何学超. 丙烷空气预混火焰在 90° 弯曲管道内传播特性的实验和模拟研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010: 40.  
He X C. Experimental and numerical study on characteristics of premixed propane-air flame in a rectangular duct with a 90° bend [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010: 40.
- [36] 蒋利桥. 微尺度火焰及微燃烧器的稳燃强化技术研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008: 38.  
Jiang L Q. Study on micro flames and combustion stability enhanced technology in micro combustor [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008: 38.
- [37] Wu M H, Kuo W C. Transmission of near-limit detonation wave through a planar sudden expansion in a narrow channel [J]. Combust. Flame, 2012, 159(11): 3414-3422.
- [38] Wu M H, Wang C Y. Reaction propagation modes in millimeter-scale tubes for ethylene/oxygen mixtures [J]. Proc. Combust. Inst., 2011, 33(2): 2287-2293.
- [39] Kim N I, Kato S, Kataoka T, et al. Flame stabilization and emission of small swiss-roll combustors as heaters [J]. Combust. Flame, 2005, 141(3): 229-240.
- [40] Il Kim N, Aizumi S, Yokomori T, et al. Development and scale effects of small swiss-roll combustors [J]. Proc. Combust. Inst., 2007, 31(2): 3243-3250.
- [41] Zhong B J, Wang J H. Experimental study on premixed CH<sub>4</sub>/air mixture combustion in micro swiss-roll combustors [J]. Combust. Flame, 2010, 157(12): 2222-2229.
- [42] Kashir B, Tabejamaat S, Jalalati N. The impact of hydrogen enrichment and bluff-body lip thickness on characteristics of blended propane/hydrogen bluff-body stabilized turbulent diffusion flames [J]. Energy Convers. Manage., 2015, 103: 1-13.
- [43] Jeong C, Bae J, Kim T, et al. Investigation of flashback characteristics coupled with combustion instability in turbulent premixed bluff body flames using high-speed OH-PLIF and PIV [J]. Proc. Combust. Inst., 2017, 36(2): 1861-1868.
- [44] Fan A, Zhang H, Wan J. Numerical investigation on flame blow-off limit of a novel microscale swiss-roll combustor with a bluff-body [J]. Energy, 2017, 123: 252-259.
- [45] Yan Y, Wang H, Pan W, et al. Numerical study of effect of wall parameters on catalytic combustion characteristics of CH<sub>4</sub>/air in a heat recirculation micro-combustor [J]. Energy Convers. Manage., 2016, 118: 474-484.
- [46] Yan Y, Huang W, Tang W, et al. Numerical study on catalytic combustion and extinction characteristics of pre-mixed methane-air in micro flatbed channel under different parameters of operation and wall [J]. Fuel, 2016, 180: 659-667.
- [47] Okawa Y, Youn C, Kagawa T. A study of the characteristics of flow rate and extinction in a flame arrester with radial slit structure [J]. J. Loss Prev. Process Ind., 2012, 25(2): 242-249.
- [48] Lietze D. Crimped metal ribbon flame arrestors for the protection of gas measurement systems [J]. J. Loss Prev. Process Ind., 2002, 15(1): 29-35.
- [49] Yenerdag B, Minamoto Y, Naka Y, et al. Flame propagation and heat transfer characteristics of a hydrogen-air premixed flame in a constant volume vessel [J]. Int. J. Hydrogen Energy, 2016, 41(22): 9679-9689.
- [50] Chia L C, Feng B. The development of a micropower (micro-thermophotovoltaic) device [J]. J. Power Sources, 2007, 165(1): 455-480.
- [51] Yuasa S, Oshimi K, Nose H, et al. Concept and combustion

- characteristics of ultra-micro combustors with premixed flame [J]. *Proc. Combust. Inst.*, 2005, 30(2): 2455–2462.
- [52] Wan J, Fan A. Effect of solid material on the blow-off limit of CH<sub>4</sub>/air flames in a micro combustor with a plate flame holder and preheating channels [J]. *Energy Convers. Manage.*, 2015, 101: 552–560.
- [53] Kim K T, Lee D H, Kwon S. Effects of thermal and chemical surface-flame interaction on flame quenching [J]. *Combust. Flame*, 2006, 146(1): 19–28.
- [54] 冯耀勋, 杨浩林, 赵黛青. 壁面材料对微火焰熄火影响的实验研究 [J]. *热能动力工程*, 2013, 28(1): 61–67, 110–111.  
Feng Y X, Yang H L, Zhao D Q. Experimental study of the influence of wall surface material on the extinguishment of a microscale flame [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2013, 28(1): 61–67, 110–111.
- [55] Fan Y, Suzuki Y, Kasagi N. Experimental study of micro-scale premixed flame in quartz channels [J]. *Proc. Combust. Inst.*, 2009, 32(2): 3083–3090.
- [56] 王恩宇. 气体燃料在渐变型多孔介质中的预混燃烧机理研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004: 20.  
Wang E Y. Study on premixed combustion mechanism of fuel gas in gradually-varied porous media [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004: 20.
- [57] Miesse C M, Masel R I, Jensen C D, et al. Submillimeter-scale combustion [J]. *AIChE J.*, 2004, 50(12): 3206–3214.
- [58] Lietze D. Limit of safety against Flame transmission for sintered metal flame arrester elements in the case of flashback in fuel gas/oxygen mixtures [J]. *J. Loss Prev. Process Ind.*, 1995, 8(6): 325–329.
- [59] Payman W, Wheeler R V. The propagation of flame through tubes of small diameter [J]. *J. Chem. Soc. Trans.*, 1918, 113: 656–666.
- [60] 喻健良. 预混火焰在微小通道中传播和淬熄的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2008: 9.  
Yu J L. The research of premixed flame's propagation and quenching in narrow channels [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008: 9.
- [61] Raimondeau S, Norton D, Vlachos D G, et al. Modeling of high-temperature microburners [J]. *Proc. Combust. Inst.*, 2002, 29(1): 901–907.
- [62] Bai B, Chen Z, Zhang H, et al. Flame propagation in a tube with wall quenching of radicals [J]. *Combust. Flame*, 2013, 160(12): 2810–2819.
- [63] Saiki Y, Suzuki Y. Effect of wall surface reaction on a methane–air premixed flame in narrow channels with different wall materials [J]. *Proc. Combust. Inst.*, 2013, 34(2): 3395–3402.
- [64] 张立志, 赵黛青, 冯耀勋, 等. 壁面反应对微小通道内燃烧影响的数值模拟 [J]. *工程热物理学报*, 2011, 32(11): 1973–1978.  
Zhang L Z, Zhao D Q, Feng Y X, et al. Effect of surface reactions on hydrogen/air premixed flames in microchannels [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2011, 32(11): 1973–1978.
- [65] Saiki Y, Fan Y, Suzuki Y. Radical quenching of metal wall surface in a methane–air premixed flame [J]. *Combust. Flame*, 2015, 162(10): 4036–4045.
- [66] Cicoria D, Chan C K. Large eddy simulation of lean turbulent hydrogen-enriched methane–air premixed flames at high Karlovitz numbers [J]. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2016, 41(47): 22479–22496.
- [67] Fan A, Wan J, Liu Y, et al. Effect of bluff body shape on the blow-off limit of hydrogen/air flame in a planar micro-combustor [J]. *Appl. Therm. Eng.*, 2014, 62(1): 13–19.
- [68] Giovannoni V, Sharma R N, Raine R R. Premixed combustion of methane–air mixture stabilized over porous medium: a 2D numerical study [J]. *Chem. Eng. Sci.*, 2016, 152: 591–605.
- [69] Li J, Chou S K, Yang W M, et al. A numerical study on premixed micro-combustion of CH<sub>4</sub>–air mixture: effects of combustor size, geometry and boundary conditions on flame temperature [J]. *Chem. Eng. J.*, 2009, 150(1): 213–222.
- [70] Li X, Zhang J, Yang H, et al. Combustion characteristics of non-premixed methane micro-jet flame in coflow air and thermal interaction between flame and micro tube [J]. *Appl. Therm. Eng.*, 2017, 112: 296–303.
- [71] Konakov S A, Dzyubanenko S V, Krzhizhanovskaya V V. Computer simulation approach in development of propane–air combustor microreactor [J]. *Procedia Comput. Sci.*, 2016, 101: 76–85.
- [72] 张义贵. 微尺度多孔介质中燃烧的电容层析成像应用研究 [D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2008: 47.  
Zhang Y G. Research on application of electrical capacitance tomography technique to microscale combustion in porous media [D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2008: 47.
- [73] Bear J. Dynamics of fluids in porous media [M]. New York: American Elsevier Publishing Company, 1972: 177.
- [74] Hiatt J P, Hall M J. Pore scale turbulence in porous ceramic burners [C]//*Proc. Cent. States Sect. Meeting Combust. Inst.*, Madison. 1994: 49–54.
- [75] 陈作义. 交叉三角形波纹板流道传热与流动特性的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2012: 48.  
Chen Z Y. Fluid flow and heat transfer in cross-corrugated triangular channels [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012: 48.
- [76] Kuo C H, Ronney P D. Numerical modeling of non-adiabatic heat-recirculating combustors [J]. *Proc. Combust. Inst.*, 2007, 31(2): 3277–3284.
- [77] 林瑞泰. 多孔介质传热传质引论 [M]. 北京: 科学出版社, 1995: 57.  
Lin R T. General introduction of porous media heat and mass transfer transport [M]. Beijing: Science Press, 1995: 57.
- [78] 黄青山. 多相环流反应器的传递和反应性能数值模拟 [D]. 北京: 中国科学院过程工程研究所, 2008: 43.  
Huang Q S. Numerical simulation of multiphase transport and reaction in loop reactors [D]. Beijing: Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, 2008: 43.
- [79] Moukalled F, Darwish M. A High-resolution pressure-based algorithm for fluid flow at all speeds [J]. *J. Comput. Phys.*, 2001, 168(1): 101–130.
- [80] Miettinen A, Siikonen T. Application of pressure- and density-based methods for different flow speeds [J]. *Int. J. Numer. Methods Fluids*, 2015, 79(5): 243–267.
- [81] 杨越, 陈正, 周豪, 等. 高雷诺数预混湍流火焰的数值模拟与结构表征 [J]. *中国科学 G: 物理学, 力学, 天文学*, 2017, 47(7): 46–61.  
Yang Y, Chen Z, Zhou H, et al. Numerical simulations and structure characterizations in high-reynolds-number premixed turbulence flames [J]. *Science in China Series G: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2017, 47(7): 46–61.

- [82] Miyata E, Fukushima N, Naka Y, et al. Direct numerical simulation of micro combustion in a narrow circular channel with a detailed kinetic mechanism [J]. *Proc. Combust. Inst.*, 2015, 35(3): 3421–3427.
- [83] Vendra C M R, Wen J X, Tam V H Y. Numerical simulation of turbulent flame-wall quenching using a coherent flame model [J]. *J. Loss Prev. Process Ind.*, 2013, 26(2): 363–368.
- [84] Benim A C, Iqbal S, Meier W, et al. Numerical investigation of turbulent swirling flames with validation in a gas turbine model combustor [J]. *Appl. Therm. Eng.*, 2017, 110: 202–212.
- [85] Gao Z, Jiang C, Lee C H. On the laminar finite rate model and flamelet model for supersonic turbulent combustion flows [J]. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2016, 41(30): 13238–13253.
- [86] 熊模友, 乐嘉陵, 黄渊, 等. 采用火焰面/反应进度变量方法模拟湍流燃烧 [J]. *航空动力学报*, 2016, 31(11): 2604–2612.
- Xiong M Y, Le J L, Huang Y, et al. Flamelet/progress variable approach for turbulent combustion [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2016, 31(11): 2604–2612.
- [87] 曾卓雄, 郭帅帅, 陈超杰, 等. 可控涡结构的三维湍流燃烧特性的数值分析 [J]. *热能动力工程*, 2016, 31(6): 42–47, 122–123.
- Zeng Z X, Guo S S, Chen C J, et al. Numerical simulation of turbulent combustion characteristics in the vortex controlled diffuser [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2016, 31(6): 42–47, 122–123.
- [88] Gharebaghi M, Irons R M A, Ma L, et al. Large eddy simulation of oxy-coal combustion in an industrial combustion test facility [J]. *Int. J. Greenhouse Gas Control*, 2011, 5: S100–S110.
- [89] Davani A A, Ronney P D. A jet-stirred chamber for turbulent combustion experiments [J]. *Combust. Flame*, 2017, 185: 117–128.
- [90] Zhang K, Ghobadian A, Nouri J M. Comparative study of non-premixed and partially-premixed combustion simulations in a realistic Tay model combustor [J]. *Appl. Therm. Eng.*, 2017, 110: 910–920.