

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2015.06.010

# 运行参数对微型内燃机微燃烧特性影响机理分析

唐刚志<sup>1</sup>, 张 力<sup>2</sup>, 尚会超<sup>2</sup>, 杜宝程<sup>2</sup>

(1.重庆交通大学机电与汽车工程学院,重庆 400074;2.重庆大学汽车工程学院,重庆 400044)

**摘 要:**微型内燃机微燃烧过程对当量比和转速变化非常敏感,采用层流有限速率模型和甲醇氧化反应机理对其预混层流微燃烧过程开展仿真研究,探讨当量比和转速对微燃烧特性的影响规律及临界运行参数。在此基础上,提出采用热着火理论和化学反应动力学理论探索当量比对微燃烧特性的影响机理。结果表明仿真与实验比较吻合。当量比从0.6增加到1.1时,燃烧速率增加,压力和温度增加,压力最高值增加约 $1.5E+6$  Pa,温度最大值增加约1300 K,此后随当量比增加,燃烧速率减小,压力和温度减小。研究还进一步揭示了当量比影响微燃烧特性的机理:稀燃区当量比主要通过温度变化来影响微燃烧特性,随当量比增加,燃料浓度增加,燃烧释放的总热量增加,所以温度和压力增加,燃烧速率增加;浓燃区当量比主要通过氧气量变化来影响微燃烧特性,当量比越大,氧气量越不足,基元反应速率越小,所以燃烧速率越小,温度和压力越低。转速越高,燃烧时间越短,燃烧越不充分,所以温度、压力越低。受微燃烧相对热损大、驻留时间短的特征影响,微型发动机实现完全燃烧的运行区域较窄,其实现完全燃烧的稀燃极限约0.9,最高转速约6000 r/min。这在设计微型内燃机时值得关注。

**关键词:**微型内燃机;微燃烧;甲醇化学反应机理;仿真**中图分类号:**TK421.1**文献标志码:**A**文章编号:**1000-582X(2015)06-068-07

## Effect mechanism analysis of operation parameters on micro combustion characteristics in micro IC engines

TANG Gangzhi<sup>1</sup>, ZHANG Li<sup>2</sup>, SHANG Huichao<sup>2</sup>, DU Baocheng<sup>2</sup>

(1.College of Mechatronics &amp; Automotive Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P.R.China; 2. College of Automotive Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China)

**Abstract:** Micro combustion process of micro IC engine is very sensitive to changes of equivalent ratio and speed. The laminar flow finite rate model and methanol chemical reaction mechanism is adopted to simulation its premixed laminar combustion process. And then, the influence law of equivalent ratio and speed on micro combustion characteristic is explored, and the critical operation parameters are investigated. Finally, the thermal ignition theory and chemical reaction kinetics theory is adopted to explore the influence of equivalent ratio on micro combustion characteristic mechanism. The results show that simulation results agree well with experiment. When equivalent ratio increases from 0.6 to 1.1, the combustion rate, the pressure and the temperature increase, pressure peak increases by about  $1.5E+6$  Pa

**收稿日期:**2015-07-15**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51175530);国家教育部博士点基金资助项目(20130191110001)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51175530) and The Ph.D. Programs Foundation of Ministry of Education of China(20130191110001).

**作者简介:**唐刚志(1980-),男,重庆交通大学讲师,博士,主要研究方向为内燃机工作过程,(E-mail) tanggz1980@163.com.

and the maximum temperature increases by about 1 300 K. Since then, with the increase of ratio equivalent, the combustion rate, the pressure and the temperature also reduce. Moreover, the research reveals the mechanism that equivalent ratio affects micro combustion characteristic. In dilute zone, equivalent ratio mainly affects micro combustion performance by temperature changes. As equivalent ratio increases, fuel concentration and released heat increase, thus the temperature and the pressure increase, and then combustion ratio increases. In thick zone, equivalent ratio mainly affects micro combustion performance by oxygen changes. As equivalent ratio decreases, oxygen volume and reaction rate decrease, thus combustion ratio decreases, and then the temperature and the pressure decrease. When the speed lifts, the time for combustion is shortened, thus the complete combustion level reduces and the temperature and the pressure drop. Because of relatively large heat loss and short residence time of micro combustion, the complete combustion operation area of micro engine is narrow. The lean burn limit to realize complete combustion is about 0.9 in our experiments, and the highest speed is about 6 000 r/min. It is worth to being paid attention to when the micro IC engine is designed.

**Key words:** micro IC engine; micro combustion; methanol reaction mechanism; simulation

Power MEMS 即基于 MEMS 的微型动力能源系统,它通过利用燃烧化学反应能量来实现超高能量密度。液态烃类燃料低,热值可达  $10^5$  kJ/kg,采用液态烃类燃料的 Power MEMS 能量密度比当今最好的 LiSO<sub>2</sub> 电池高 20~30 倍,能满足远距离传输要求,且液态燃料充装方便,在便携式能源系统领域具有重要的研究价值<sup>[1]</sup>。MIT 的 Epstein 最早提出微型涡轮发动机概念,并在微流体力学、微燃烧和微气体轴承等基础领域取得了很多进展,但仍未见完整样机的实际稳定运行<sup>[2]</sup>。其他典型的 Power MEMS 研究还包括:汪克尔转子发动机<sup>[3]</sup>、微型外热机<sup>[4]</sup>、NASA 的微型蒸汽轮机<sup>[5]</sup>及微热电系统等<sup>[6]</sup>。其中,微热电系统无运动部件,运行平稳,但转换效率较低。相比其他 Power MEMS,微型内燃机结构相对简单,热功转换原理成熟,更易于微型化,采用液态烃类燃料微型活塞式内燃机应当是最有可能实用化的超高能量密度微能源系统。

基于发展微动力能源系统的要求,微燃烧研究得到重视。欧盟研究人员采用详细化学反应和质量传输方程通过多维数值模拟方法对环境压力燃空当量比 0.5 稀预混合氢-空气在内径 1.0 和 1.5 mm 管内燃烧火焰进行了研究<sup>[7]</sup>。俄克拉何马州立大学 Olinger 对管道式微燃烧器氢氧燃烧过程进行了模拟,并通过简单的传热模拟对淬息条件进行了计算<sup>[8]</sup>。马里兰大学帕克分校 Leach 采用一维连续方程与能量方程并结合充分化学机理,数值模拟了壁面传热和管壁导热对微通道氢氧燃烧的影响<sup>[9]</sup>。上述研究主要针对微型管道式燃烧器具有过程连续性和开口热力系特性的准稳态燃烧过程开展研究,指出微燃烧具有相对热损大,驻留时间短的特征。

鉴于此,为了研究当量比和转速对微型活塞式内燃机带有移动边界的闭口热力系的强时变性瞬态微燃烧过程的影响规律和机理,采用层流有限速率模型和甲醇氧化反应机理以及动网格技术,对其瞬态预混层流燃烧过程开展仿真研究,探讨当量比和转速对微燃烧特性的影响规律及临界运行参数。在此基础上,提出采用着火理论和化学反应动力学理论探索当量比对微燃烧特性的影响机理。

## 1 层流有限速率模型及甲醇氧化机理

### 1.1 层流有限速率模型

对于微型发动机,要求缸内具有较短的停留时间和较快的燃烧速度。而甲醇具有较大的层流火焰传播速度(0.327 m/s),燃烧持续期较短,燃烧效率较高,适应于微型燃烧要求。分析微型燃烧室内混合气体流动状态,发现雷诺数为 568~1 840(随转速变化),流动状态为层流。对于层流预混燃烧,化学反应时间尺度远大于微混合时间尺度,燃烧反应速率受化学反应控制。因此,将层流有限速率模型应用于微型内燃机甲醇预混瞬态燃烧过程的数值仿真。

燃烧过程数学模型包括质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程和组分质量守恒方程,其守恒方程通用形式为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \nabla \cdot (\rho v\varphi) = \nabla \cdot (\Gamma_\varphi \nabla \varphi) + S, \quad (1)$$

式中： $\varphi$  为通用求解变量； $\Gamma_\varphi$  为广义扩散系数； $S$  为广义源项； $\rho$  为混合物密度； $v$  为速度， $\nabla$  为散度。 $\varphi$ 、 $\Gamma_\varphi$  和  $S$  在特定方程中具体代表如表 1。

表 1 符号在特定方程的意义  
Table 1 Sense of symbol in control equation

符号	质量方程	动量方程	能量方程	组分方程
$\varphi$	1	$v$	$T$	$Y_i$
$\Gamma_\varphi$	0	$\mu$	$k/c_p$	$D_{i,m}$
$S$	0	$\frac{\partial p}{\partial x_j}$	$S_r$	$R_i$

表 1 中： $\mu$  为气体粘度； $k$  为气体导热系数； $c_p$  为气体比热容； $T$  为气体温度； $Y_i$  为组分质量分数； $D_{i,m}$  为组分扩散系数； $R_i$  为组分化学反应源项。

在求解组分  $i$  的质量守恒方程时，层流有限速率模型采用 Arrhenius 公式计算化学反应源项。组分  $i$  的化学反应净源项通过有组分  $i$  参加的  $N_R$  个化学反应的 Arrhenius 反应源的和计算得到：

$$R_i = M_{w,i} \sum_{r=1}^{N_R} \hat{R}_{i,r}, \quad (2)$$

式中： $M_{w,i}$  是组分  $i$  的分子量； $\hat{R}_{i,r}$  为组分  $i$  在第  $r$  个反应中的产生或分解 Arrhenius 摩尔速度。如式(3)写出第  $r$  个反应式为：

$$\sum_{i=1}^N \nu'_{i,r} M_i \xrightleftharpoons[k_{b,r}]{k_{f,r}} \sum_{i=1}^N \nu''_{i,r} M_i, \quad (3)$$

式中： $N$  为系统中化学组分数目； $\nu'_{i,r}$  为反应  $r$  中反应物  $i$  的化学计量系数； $\nu''_{i,r}$  为反应  $r$  中生成物  $i$  的化学计量系数； $M_i$  为组分  $i$  的符号； $k_{f,r}$  为反应  $r$  的正向速率常数； $k_{b,r}$  为反应  $r$  的逆向速率常数。

第  $r$  个反应中，组分  $i$  的产生或分解摩尔速度为

$$\hat{R}_{i,r} = \lambda (\nu''_{i,r} - \nu'_{i,r}) \left( k_{f,r} \prod_{j=1}^{N_r} [C_{j,r}]^{\eta'_{j,r}} - k_{b,r} \prod_{j=1}^{N_r} [C_{j,r}]^{\eta''_{j,r}} \right), \quad (4)$$

式中： $N_r$  为反应  $r$  的化学组分数目； $C_{j,r}$  为反应  $r$  中每种反应物或生成物  $j$  的摩尔浓度； $\eta'_{j,r}$  为反应  $r$  中每种反应物或生成物  $j$  的正向反应速度指数； $\eta''_{j,r}$  为反应  $r$  中每种反应物或生成物  $j$  的逆向反应速度指数； $\lambda$  为第三体对反应速率的净影响。反应  $r$  的正向速率常数  $k_{f,r}$  通过 Arrhenius 公式计算：

$$k_{f,r} = A_r T^{\beta_r} e^{-\frac{E_r}{RT}}, \quad (5)$$

式中： $A_r$  为指数前因子； $\beta_r$  为温度指数； $E_r$  为反应活化能； $R$  为气体常数。逆向速率常数  $k_{b,r}$  计算式为：

$$k_{b,r} = \frac{k_{f,r}}{k_r}, \quad (6)$$

式中  $k_r$  为平衡常数。对于反应速率常数基于压力变化的处理采用 Troe 方法。

## 1.2 详细甲醇氧化反应机理

Tsang<sup>[10]</sup> 系统研究整理了甲醇反应相关的数据，为构建甲醇反应机理提供了完善的数据基础。Held 等<sup>[11]</sup> 基于分级构建的方法构建了一个比较完善的甲醇氧化详细反应机理。Li 等<sup>[12]</sup> 以 Held 和 Dryer 机理为基础，采用部分新的反应速率常数和热力学数据，利用 CO/H<sub>2</sub>O/H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>、CH<sub>2</sub>O、CH<sub>3</sub>OH 的反应机理分级构建了一个甲醇氧化详细反应机理，与 Held 和 Dryer 机理相比，该机理更加完善，适用范围更广泛。Li 机理被国内学者广泛采用<sup>[13-14]</sup>，这里也采用 Li 机理，共 84 步基元反应，17 个组分。另外再加上高温 NO 热生成机理。

## 2 微燃烧过程动态仿真模型建立

仿真对象为微型二冲程活塞式发动机,缸径 10.8 mm,行程 10 mm,压缩比为 7.6。燃料为甲醇<sup>[15]</sup>,甲醇十六烷值低,不易着火,所以采用电热丝助燃点火。燃烧室由下半部的圆柱体和上半部的圆锥体构成,助燃热丝位于燃烧室中心,所以燃烧室结构中心轴对称。仿真从进气结束的上止点前 105°曲轴转角开始,结束于开始排气的上止点后 105°曲轴转角。由于仿真时缸内处于封闭状态,此时缸内流场主要在径向和轴向上变化,忽略进排气流动对流场初始条件的影响,这里假定缸内流场轴对称。又考虑到仿真时采用详细化学反应机理,为了节约计算时间,所以只对缸内一个二维轴对称平面内的流场进行仿真。对燃烧室建立二维轴对称几何模型,燃烧室几何空间由顶面、热丝火头、壁面、对称轴和表现为可移动边界的活塞构成。

采用四边形和三角形混合网格划分方案,壁面施加边界层网格,经过网格独立性检查,最终取网格尺寸为 0.2 mm,网格总数约 2 100。采用动态分层动网格技术划分动网格,动态分层分割因子取为 0.4,压缩合并因子取为 0.1。

对于微型燃烧室,壁面热边界对燃烧过程的影响远大于宏观尺度,较为合理和可行的处理是施加第三类热边界条件,而固体材料内部导热则按一维假设处理。燃烧室外壁面平均对流换热系数采用强制横掠管外对流换热关系式  $Nu = CRe^n Pr^{\frac{1}{3}}$  求解获得,其中  $Nu$  为努塞尔数,  $Nu = hd/\lambda$ ,  $h$  为传热系数,  $d$  为汽缸外径,  $\lambda$  为空气导热系数,  $Re$  为雷诺数,  $Pr$  为普朗特数。实验时外部强制冷却风速为 3.7 m/s,根据雷诺数,系数  $C$  取为 0.683,  $n$  取为 0.466。定性温度取汽缸外壁温度与空气温度的平均值,根据实验,汽缸外壁平均温度取为 450 K,空气温度为 293 K。最终的外壁面平均传热系数为 85 W/(m<sup>2</sup>·K)。采用 PISO 算法求解方程,压力采用二阶差分格式,其他方程也采用二阶差分。对步长进行无关性检查,最终取时间求解方案为 0.1°曲轴转角一个时间步长,每步长最大迭代取 100 次。

将仿真结果与实验结果进行对比,对比时工况初始压力为 7.0E+04 Pa,初始温度为 370 K,转速为 6 000 r/min,当量比为 1.8,压缩比为 7.6。图 1 显示仿真结果与实验结果比较吻合。数值仿真结果误差主要由数值误差和建模误差组成,数值误差主要由网格产生的离散误差和时间步长产生的离散误差以及控制方程离散所产生的截断误差组成。为了控制离散误差,在划分网格时,比较了不同网格尺寸的模型,发现当网格尺寸为 0.2 mm 时,再进一步细化网格,数值解已基本不再变化,所以最终取网格尺寸 0.2 mm,获得网格独立的解。对于时间步长的选取,也做了类似的处理,最终取 0.1°CA 一个时间步长。且经过对比发现,当每步长最大迭代数为 100 次时,进一步增大迭代数结果已基本不再变化,所以每步长最大迭代取 100 次,获得时间步长独立的解。为了控制截断误差,控制方程中对流项和扩散项都采用二阶离散格式。综合上述比较和分析,仿真结果有效。

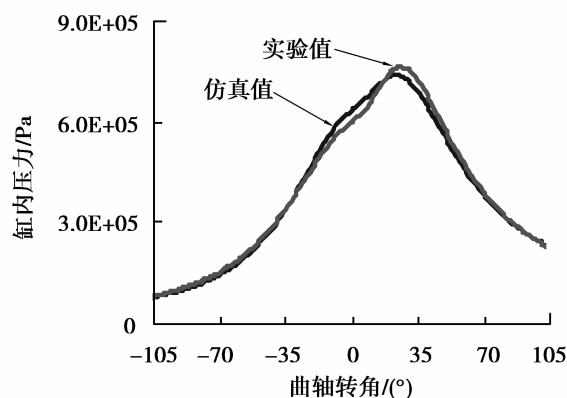


图 1 仿真与实验结果对比

Fig.1 Comparison between simulation and experiment

## 3 结果与讨论

### 3.1 当量比对燃烧性能的影响

图 2 为不同当量比下的燃烧性能图,工况起始压力为 1.0E+05 Pa,起始温度为 370 K,转速为 5 000 r/min,压缩比为 7.6。压力变化图显示,当量比对燃烧过程的影响显著,在稀薄燃烧区域,当量比越小,即混合燃气越稀薄,同一曲轴转角下,缸内压力越低,特别是在上止点后,随当量比的减小,缸内压力下降非常明显,且峰值也有明显的下降。在浓燃区内,随当量比增加,同一曲轴转角下缸内压力先增大后减小,当量比为 1.1 时压力最大。浓燃区缸内压力随当量比的变化没有稀薄燃烧区敏感。

温度变化图显示,燃烧过程中缸内平均温度随当量比变化情况与压力随当量比变化类似。稀燃区随当量比减小,缸内平均温度显著减小,峰值也明显减小。在浓燃区内,随当量比增加,同一曲轴转角下缸内平均

温度先增大后减小,当量比为 1.1 时缸内平均温度最大。浓燃区缸内平均温度随当量比的变化没有稀薄燃烧区敏感。 $\text{CH}_3\text{OH}$  燃料消耗图显示,在稀薄燃烧区,当量比越小,混合气越稀薄,甲醇消耗速率越小,到排气开始时,当量比为 0.6、0.8 情况下燃料没有完全消耗。在浓燃区,1.1 当量比时甲醇完全消耗所需时间最短,3 个工况下甲醇最后都完全消耗。

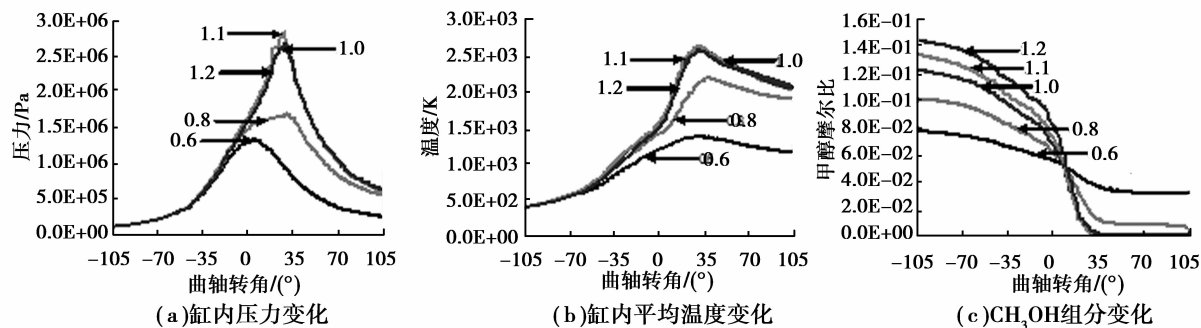


图 2 当量比对缸内燃烧特性的影响

Fig.2 Effect of equivalent ratio to combustion characteristics

应用热着火理论分析以上燃烧特性,在稀薄燃烧区内,随当量比的增加,燃料浓度增加,同一区域燃烧时释放的总热量增加,导致缸内平均温度和压力随之增加,从而缸内更多燃料温度达到燃料燃点进而开始燃烧,所以总的燃烧速率增大,缸内温度和压力也进一步增大。而且,由于 0.6、0.8 当量比下燃料浓度较小,燃烧所释放的热量较少;又微尺度发动机面积/体积比较大,相对散热量也较大,而甲醇燃料本身燃点较高,不易燃烧,所以部分区域燃料温度未达到燃点燃烧,导致整个缸内燃料未实现完全消耗。

应用化学反应动力学理论进一步分析以上燃烧特性,稀薄燃烧区内,一方面,随当量比的增加,燃料分子浓度增加;另一方面,随当量比的增加,同一区域燃烧时释放的总热量增加,将会有更多的反应热从火焰锋面传导入未燃区,导致未燃区有效活性基浓度增加,使得基元反应速率增加,整个燃烧过程加快,所以缸内温度和压力增加。鉴于反应  $15 \text{H}_2\text{O}_2(+\text{M})=\text{OH}+\text{OH}(+\text{M})$  具有最大的正温度敏感系数,以该基元反应为例,对  $5^\circ\text{CA}$  曲轴转角时当量比 0.6 和 1.0 的缸内燃烧状况进行对比如图 3 所示,自由基  $\text{OH}$  浓度对比图显示,随当量比的增加,缸内  $\text{OH}$  浓度增大。从基元反应 15 反应速率对比图显示,位于各自火焰前锋面中的反应速率随当量比的提高而增大,基元反应速率增大使燃料燃烧过程加快,所以缸内平均温度和压力随当量比的增大而增大。

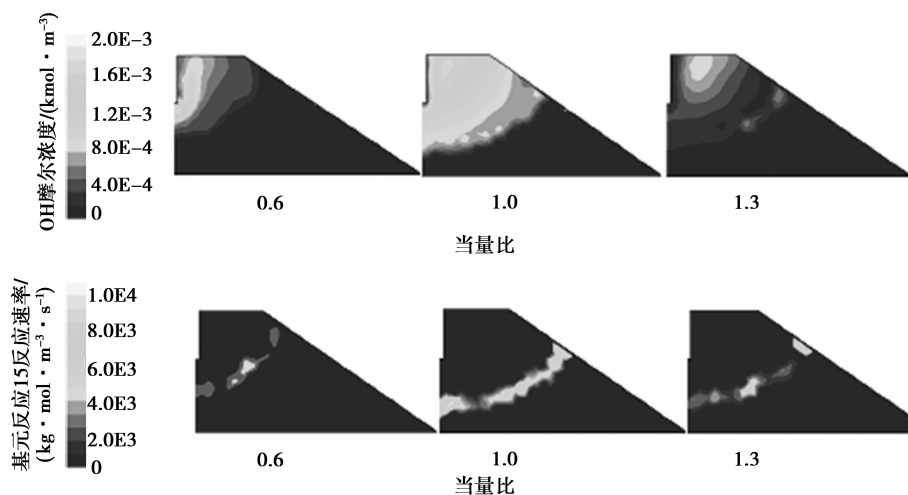


图 3 不同当量比下  $5^\circ$  曲轴转角的缸内燃烧对比图

Fig.3 Combustion comparison at  $5^\circ$  Crank Angel under different equivalent

浓燃区内,当量比大于 1.1 时,当量比越大,氧化有效活性基浓度越小,相应基元反应速率越小,总的燃烧速率越小,所以缸内平均温度和压力越小。图 3 显示,OH 摩尔浓度和基元反应 15 反应速率随当量比的增大而减小。

对当量比从 1.0 到 1.1 的浓燃区燃烧特性进行分析,为此对  $5^\circ$  曲轴转角时当量比为 1.1 和 1.0 的燃烧数据进行统计。此时当量比为 1.1 的 OH 浓度为  $0.000\ 27\ \text{kmol}/\text{m}^3$ ,CO 摩尔浓度为  $0.001\ 6\ \text{kmol}/\text{m}^3$ ,基元反应  $23\text{CO}+\text{OH}=\text{CO}_2+\text{H}$  反应速率为  $12.1\ \text{kg}\cdot\text{mol}/(\text{m}^3\cdot\text{s})$ ,当量比为 1.0 的 OH 摩尔浓度为  $0.000\ 32\ \text{kmol}/\text{m}^3$ ,CO 摩尔浓度为  $0.001\ 1\ \text{kmol}/\text{m}^3$ ,基元反应  $23\text{CO}+\text{OH}=\text{CO}_2+\text{H}$  反应速率为  $9.3\ \text{kg}\cdot\text{mol}/(\text{m}^3\cdot\text{s})$ 。虽然此时当量比为 1.1 的 OH 摩尔浓度小于当量比为 1.0 的 OH 浓度,但由于前者的 CO 摩尔浓度大于后者,使得前者的基元反应 23 反应速率大于后者,而反应 23 是整个燃烧过程最主要的放热反应,所以此时当量比为 1.1 时缸内温度和压力大于当量比为 1.0 时的情况。即在浓燃区内,虽然整体上氧气含量相对不足,但当量比为 1.1 情况下,缸内 OH 浓度并不呈均匀分布,更多的 OH 提前与 CO 反应,所以在燃烧后期,OH 含量更加不足,导致图 2(b)中当量比为 1.1 时温度下降幅度比当量比为 1.0 时大。

### 3.2 转速对燃烧性能的影响

图 4 为不同转速下的燃烧性能图,仿真时参数起始压力为  $1.0\text{E}+05\ \text{Pa}$ ,起始温度  $370\ \text{K}$ ,当量比为 1.0,压缩比为 7.6。平均温度变化图显示,随发动机转速提高,温度上升阶段缸内平均温度减小,平均温度峰值也减小。温度下降阶段,转速越低,平均温度下降幅度越大,结果到达排气开始时,转速最大和最小两个工况平均温度最低。压力变化图显示,随转速提高,缸内压力减小,且压力峰值也减小。转速对缸内压力的影响与对平均温度的影响类似。9 000 r/min 时由于缸内未燃燃料量较大,所以稍有不同。 $\text{CH}_3\text{OH}$  燃料消耗图显示,7 000 r/min 和 9 000 r/min 下燃料未完全消耗,转速越低,燃料完全消耗时刻越接近于上止点。

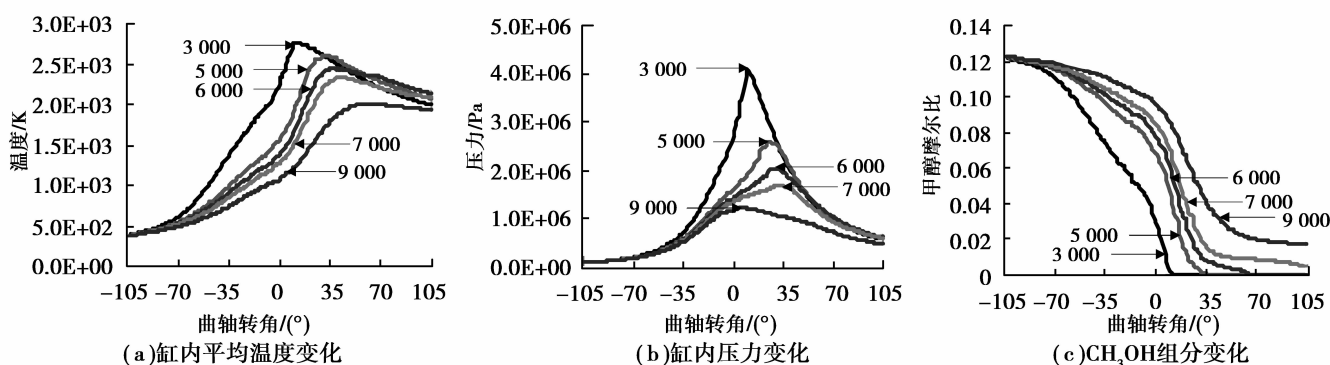


图 4 转速对燃烧特性的影响

Fig.4 Effect of rotational speed to combustion characteristics

由于转速越低,同一转角下所对应的实际经历时间越长,留给缸内燃料燃烧时间越长,反应更加充分,释放出的反应热更多,所以温度上升阶段同一转角下转速越低,缸内平均温度和压力越高。而温度下降阶段,转速越低,对环境散热时间越长,散热总量越大,所以到排气开始时,平均温度下降幅度越大。7 000 r/min 和 9 000 r/min 时由于留给燃料燃烧时间过短,所以最终燃料未完全燃烧。

## 4 结 论

1) 当量比对微燃烧特性影响显著,当量比从 0.6 增加到 1.1 时,燃烧速率增加,压力和温度都增加,最大压力值增加约  $1.5\text{E}+6\ \text{Pa}$ ,温度最大值增加约  $1\ 300\ \text{K}$ 。当量比进一步增大时,燃烧速率减小,压力和温度转而下降。

2) 运用热着火理论和化学反应动力学理论对以上燃烧特性进行了探讨,进一步揭示了当量比影响微燃烧特性的机理:稀燃区,当量比主要通过缸内温度变化来影响微燃烧特性,随当量比增加,由于燃料浓度增加,燃烧释放的总热量增加,所以温度和压力增加,使得有效活性基浓度增加,导致基元反应速率增加,燃烧速率增加。浓燃区当量比主要通过氧气量变化来影响微燃烧特性,氧气量不足,当量比越大,氢氧活性基团浓度越小,基元反应速率越小,所以燃烧速率越小,温度和压力越低。

3) 转速对微燃烧具有显著影响, 转速越高, 留给燃料燃烧时间越少, 燃烧越不充分, 释放总热量越少, 所以温度和压力越低。

4) 受微燃烧相对热损大、驻留时间短的特征影响, 微型发动机实现完全燃烧的运行区域较窄, 文中实现完全燃烧的稀燃极限约 0.9, 最高转速约 6 000 r/min。这在设计微型内燃机时值得关注。

#### 参考文献:

- [1] Chou S K, Yang W M, Chua K J, et al. Development of micro power generators: A review[J]. Applied Energy, 2011, 88(1): 1-16.
- [2] Epstein A H, Epstein A H. Millimeter-scale, micro-electro-mechanical systems gas turbine engines [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 126 (2): 205-226.
- [3] Fernandez-Pello A C, Pisano A P, Fu K. MEMS rotary engine power system [J]. IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines, 2003, 123 (9): 326-330.
- [4] Whalen S, Richards R, Bahr D, et al. Operation and testing of a micro heat engine [C] // Proceedings of 2003 Nanotechnology Conference and Trade Show - Nanotech 2003. San Francisco, CA: Computational Publications, February 2003: 404-407.
- [5] Frechette L G, Lee C, Arslan S, et al. Design of a microfabricated Rankine cycle steam turbine for power generation [C] // ASME 2003 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 15-21, 2003, Washington, DC, USA. [S.L.]: ASME, 23(3): 335-344.
- [6] Xue H, Yang W M, Chou S K, et al. Microthermophotovoltaics power system for portable MEMS devices [J]. Microscale Thermophysical Engineering, 2005, 9(1): 85-97.
- [7] Pizza G, Frouzakis C E, Mantzaras J, et al. Three-dimensional simulations of premixed hydrogen/air flames in microtubes [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2010, 658(9): 463-491.
- [8] Olinger D. Modeling of pressure and temperature development in micro-scale combustion [C] // 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, January 10-13, Reno, Nevada, [S.L.]: Aiaa Journal, 2005.
- [9] Leach T T, Cadou C P, Jackson G S. Effect of structural conduction and heat loss on combustion in micro-channels [J]. Combustion Theory and Modeling, 2006, 10(1): 85-103.
- [10] Tsang W. Chemical kinetic data base for combustion chemistry. Part 2. Methanol [J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data (S0047-2689), 1987, 16(3): 471-620.
- [11] Held T J, Dryer F L. A comprehensive mechanism for methanol oxidation [J]. International Journal of Chemical Kinetics, 1998, 30(11): 805-830.
- [12] Li J, Zhao Z, Andrei K, et al. A comprehensive kinetic mechanism for CO, CH<sub>2</sub>O, and CH<sub>3</sub>OH combustion [J]. International Journal of Chemical Kinetics, 2007, 39 (3): 109-136.
- [13] 冉景煜, 秦昌雷, 吴晟. 壁面参数对甲烷微尺度催化燃烧的影响 [J]. 重庆大学学报, 2012, 35(2): 1-9.  
RAN Jingyu, QIN Changlei, WU Shen. The effects of wall parameters on CH<sub>4</sub> catalytic combustion in microchannel [J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(2): 1-9. (in Chinese)
- [14] 王刚, 刘训标, 袁春, 等. 一个新的甲醇氧化简化化学动力学机理 [J]. 燃烧科学与技术, 2009, 15(6): 557-564.  
WANG Gang, LIU Xunbiao, YUAN Chun, et al. A new reduced chemical kinetic mechanism for methanol oxidation [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2009, 15(6): 557-564. (in Chinese)
- [15] 蒋德明, 黄佐华. 内燃机替代燃料燃烧学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.  
JIANG Deuming, HUANG Zuohua. Internal combustion engine alternative fuel combustion [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2007. (in Chinese)

(编辑 张 芊)