

文章编号: 1000-5013(2010)02-0136-05

# 二甲醚发动机燃烧过程的数值模拟

廖水容<sup>1</sup>, 邵毅明<sup>2</sup>, 束海波<sup>3</sup>

(1. 华侨大学 机电及自动化学院, 福建 泉州 362021;

2. 重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074;

3. 重庆交通大学 机电与汽车工程学院, 重庆 400074)

**摘要:** 通过建立二甲醚发动机燃烧模型并耦合入 KIVA 程序中, 使其具有二甲醚发动机燃烧过程的数值模拟能力. 用数值模拟仿真计算二甲醚发动机燃烧过程, 得到缸内炭烟生成量、NO<sub>x</sub> 排放量、不同燃料防热率等实时数据信息. 研究结果表明, 仿真结果与试验结果相同, 基本反映二甲醚发动机燃烧过程的主要规律.

经过与原柴油机工作情况的对比分析, 表明二甲醚发动机排放性能较好.

**关键词:** 发动机; 二甲醚; 燃烧模型; 数值模拟; 排放

**中图分类号:** TK 46+ 6; TK 16

**文献标识码:** A

在能源危机和环境保护的双重压力下, 人们对高效能、低污染动力源的需求与日俱增, 对柴油机性能的要求越来越高. 目前, 车用的传统发动机从燃烧过程上无法同时降低 NO<sub>x</sub> 和炭烟的排放. 降低 NO<sub>x</sub> 排放导致温度降低<sup>[1]</sup>, 不利于炭烟的氧化反应, 使炭烟排放量增加, 即不能同时解决炭烟和 NO<sub>x</sub> 生成的权衡关系. 近年来, 二甲醚(DME)作为压燃式发动机的代用燃料, 引起了国内外的广泛关注. 柴油机燃用 DME 可以完全消除炭烟排放, 并能有效地降低发动机 NO<sub>x</sub> 排放和燃烧噪声. 在通常情况下, 二甲醚与柴油一样, 采用燃油喷射和进气涡流以组织燃料和空气的混合, 缸内存在较强的湍流, 因而在建立二甲醚燃烧模型时, 需考虑到湍流对混合和燃烧的影响. 本文利用数值模拟, 仿真计算了二甲醚发动机燃烧过程.

## 1 燃烧模型

燃烧模型包括油束模型、预混燃烧模型和扩散燃烧模型 3 个子模型. 在以柴油为燃料的柴油机燃烧模型中通常还包括自燃模型, 即低温自燃反应模型. 由于二甲醚自燃点低, 超过 740 K 后就进入高温反应阶段, 而在喷油持续期内缸内温度已远高于该温度, 所以该阶段持续的时间很短.

为简化燃烧模型, 不单独建立二甲醚的低温自燃反应模型. 衡量喷雾特性的主要参数, 包括贯穿度  $L$ 、喷雾锥角和索特平均直径  $d_{32}$ . 迄今为止, 喷雾模型主要有 TAB(Taylor Analogy Breakup), ETAB(Enhanced Taylor Analogy Breakup) 和 Wave 模型等, KIVA II 程序采用的是 TAB 破碎模型. 由于在计算油滴破碎的过程中, TAB, ETAB 模型往往过低地预测  $L$  和  $d_{32}$  值, 对粘度甚小的 DME, 不易得到其  $L$  和  $d_{32}$  的准确结果, 所以采用 Wave 模型计算 DME 的破碎过程.

### 1.1 Wave 破碎模型<sup>[2]</sup>

Wave 模型认为, 油滴破碎的原因在于液体表面波的不断增强. 新生成的油滴半径为

$$r = \begin{cases} B_0 \Lambda, & B_0 \Lambda \leq \alpha \\ \min \left\{ \begin{aligned} &(3\pi\alpha^2 / 2\Omega)^{0.33}, & B_0 \Lambda > \alpha & \text{一次} \\ &(3\alpha^2 / 4)^{0.33}, & B_0 \Lambda > \alpha, & \text{一次} \end{aligned} \right. \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2008-10-18

通信作者: 廖水容(1982-), 女, 助教, 主要从事车辆能源与污染控制的研究. E-mail: liaoshuirong@hqu.edu.cn.

基金项目: 重庆市科委自然科学基金计划资助项目(2007BB6429); 华侨大学科研基金资助项目(08HZR11)

式(1)中:  $B_0=0.6$ ,  $\alpha$  为油滴的半径,  $\Omega$  为波动的最大增长率. 原油滴半径的变化遵从的关系为

$$\frac{d\alpha}{dt} = -(\alpha - r)/\tau, \quad r \leq \alpha. \tag{2}$$

$$\tau = \begin{cases} 1.72B_1[\rho\alpha^3/2\eta]^{0.5}, & We_2 > 0.6, \\ B_1 \frac{\alpha}{U}(\rho/\rho_2)^{0.5}, & We_2/Re_2^{0.5} > 0.5. \end{cases} \tag{3}$$

其中:  $\tau$  为破碎时间,  $B_1$  为可调模型常数,  $U$  为液气相对速度; 气体的 Weber 数  $We_2 = \rho U^2 \alpha / \eta$ .

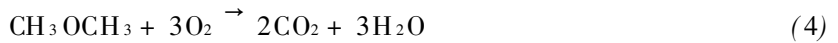
当油滴每次破碎后, 子油滴具有与父油滴相同的温度和位置. 速度矢量在父油滴速度方向上的分量  $u$  为父油滴的速度  $U$ , 而在其垂直平面上的两个速度分量分别为

$$v = |U| \tan(\theta/2) \sin \varphi, \quad \omega = |U| \tan(\theta/2) \cos \varphi$$

其中:  $\varphi$  按统计规律在  $[0, 2\pi]$  间随机选取<sup>[3]</sup>.

### 1.2 高温预混燃烧模型<sup>[4]</sup>

在燃烧进行的初期, 由于燃料与空气已经混合, 因此燃烧速度取决于化学反应动力学, 而不需考虑湍流对燃烧的影响. 这时, 二甲醚的高温预混燃烧反应采用全局反应式, 即



反应速率按扩充的 Arrhenius 定律求解<sup>[5]</sup>, 即

$$\dot{\omega}_{pre} = A c_{fuel} (c(O_2))^3 \exp(-E_A/RT). \tag{5}$$

式(5)中:  $c_{fuel}$  和  $c(O_2)$  分别为燃料和氧气的浓度. 已有的研究表明, 这类全局反应速率公式中的各个常数都是根据经验选取的. 通过反复试算, 反应式中的活化能  $E_A = 99.1 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ , 常数  $A = 1.2 \times 10^{20}$ .

### 1.3 从预混燃烧到扩散燃烧的过渡

在扩散燃烧阶段, 化学反应速度与混合速度相比要快得多, 混合成为影响燃烧的决定因素. 考虑湍流对燃烧的影响, 引入 Damkoler 数<sup>[6]</sup>, 则有

$$D \equiv \frac{A \exp(-E_A/RT)}{\varepsilon/k}. \tag{6}$$

式(6)中:  $k$  和  $\varepsilon$  分别为当地的湍动能和耗散率. 当  $D$  大于某一临界值  $D_{crit}$  时, 就认为燃烧由预混燃烧转变为扩散燃烧.

在扩散燃烧开始时, 假设燃烧是通过火焰表面的传播进行的, 因而需假设扩散燃烧初始时的火焰面积. 由于二甲醚燃料临界温度低, 当扩散燃烧开始时, 燃料可能已完全气化. 因而不能采用对柴油等高沸点燃料所采用的办法, 可假设此时火焰面积为网格内所有液滴的表面积之和. 研究表明<sup>[7]</sup>, 火焰初始面积对计算基本无影响, 故假设扩散燃烧初始时的火焰面积为网格表面积的 1%.

### 1.4 扩散燃烧模型<sup>[8]</sup>

扩散燃烧模型采用 Rutland 等提出的拟序火焰片模型(Coherent Flamelet Model, CFM), 即把扩散燃烧视为湍流流场中的一组层流火焰片的传播. 扩散燃烧模型的关键是求出当地火焰面积密度  $\Sigma$  为了求解方便, 引入变量  $S = \bar{\rho}\Sigma$ , 并建立  $S$  的输运方程为

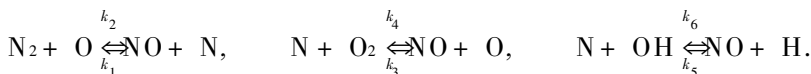
$$\frac{\partial}{\partial t}(S) + \nabla \cdot (Su) = \nabla \cdot \frac{\eta}{Sc} \nabla \frac{S}{\rho} + \bar{\rho} \frac{d\Sigma}{dt} \Big|_p - \bar{\rho} \frac{d\Sigma}{dt} \Big|_d. \tag{7}$$

式(7)中: 带“~”的变量为 Favre 平均值, 亦即质量平均值;  $\eta$  和  $Sc$  分别为湍流粘性系数和 Schmidt 数;  $\bar{\rho} \frac{d\Sigma}{dt} \Big|_p$ ,  $\bar{\rho} \frac{d\Sigma}{dt} \Big|_d$  分别为火焰面的增生项和消减项, 可根据当时火焰、湍流和混合气的特性求出.

## 2 排放模型

### 2.1 氮氧化物模型

缸内氮氧化物的生成采用扩展的 Zel'dovich 机理<sup>[9]</sup>, 有



NO 的生成率可表示为

$$\begin{aligned} \mathrm{d}c(\mathrm{NO})/\mathrm{d}t = & k_1 c(\mathrm{N}_2) c(\mathrm{O}) - k_2 c(\mathrm{NO}) C(\mathrm{N}) + k_3 c(\mathrm{N}) c(\mathrm{O}_2) - \\ & k_4 c(\mathrm{NO}) c(\mathrm{O}) + k_5 c(\mathrm{N}) c(\mathrm{OH}) - k_6 c(\mathrm{NO}) c(\mathrm{H}). \end{aligned}$$

(8)

式(8)中:  $c$  为各组分浓度,  $k_i(i=1, 2, \dots, 6)$  是反应率常数.

2.2 炭烟模型

炭烟模型包括炭烟的生成和氧化模型. 以燃烧化学反应的阿累尼乌斯方程<sup>[10]</sup>为基础, 炭烟的质量变化率可以表示为

$$\frac{\mathrm{d}m_s}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}m_{sf}}{\mathrm{d}t} - \frac{\mathrm{d}m_{so}}{\mathrm{d}t}.$$

炭烟的生成率采用 Hiroyasu 炭烟生成模型<sup>[11]</sup>, 有

$$\frac{\mathrm{d}m_{sf}}{\mathrm{d}t} = K_f m_{fv}.$$

(9)

式(9)中:  $m_{fv}$  为燃油蒸汽质量.  $K_f$  为炭烟生成系数, 其计算式为

$$K_f = A_{sf} P^{0.5} \exp(-\frac{E_{sf}}{RT}).$$

(10)

式(10)中: 频率因子  $A_{sf} = 150$ , 活化能  $E_{sf} = 52.3 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,  $P$  为缸内压力. 炭烟的氧化率采用 NSC (Nagle and Strickland-Constable) 模型<sup>[12]</sup>, 即

$$\frac{\mathrm{d}m_{so}}{\mathrm{d}t} = \frac{6m\omega_c}{\rho_s D_s} m_s R_t.$$

(11)

其中:  $m_s$ ,  $\omega_c$  分别为炭烟的质量和摩尔质量,  $\rho$  为炭粒的密度,  $D_s$  为炭粒直径, 常数  $R_t$  的计算式为

$$\begin{aligned} R_t = & (\frac{K_a P}{1 + K_z P}) X + K_b P (1 - X), \\ X = & P/[P + (K_T/K_B)]. \end{aligned}$$

其中:  $P$  为  $\text{O}_2$  的压强.

3 二甲醚发动机及其计算网格

为了便于仿真结果与试验结果的比较分析, 选用文[1]的非增压水冷直喷式 135 柴油机. 仿真柴油机主要结构参数: 135 型单缸、四冲程柴油机,  $\omega$  型燃烧室, 转速为  $1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 缸径  $\times$  冲程为  $135 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$ , 挤气间隙为  $0.24 \text{ mm}$ , 连杆长为  $280 \text{ mm}$ , 压缩比为 16.5, 原始涡流比为 2.3

二甲醚燃料喷射发动机数值模拟计算的上止点时刻的喷雾、燃烧空间网格划分, 如图 1 所示. 圆柱半径方向的分格数为 32, 圆周方向的分格数为 40,  $Z$  方向的分格数为 15, 且  $Z$  方向的分格数将随活塞的运动而变化. 沿燃料喷射轴线切面的位置. 如图 2 所示.

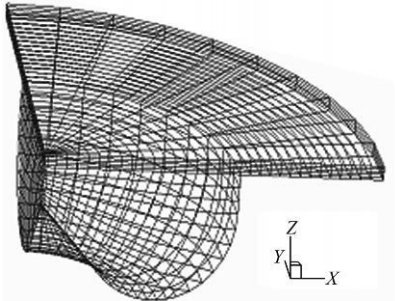


图 1 喷雾与燃烧空间计算网格  
Fig. 1 Computation mesh of spray and combustion

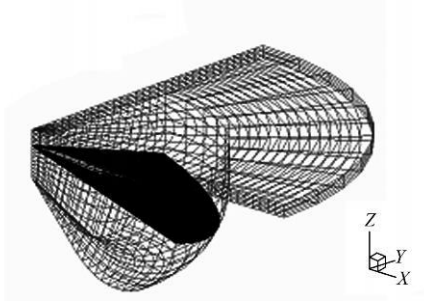


图 2 燃油喷射轴线切面的位置图  
Fig. 2 Location diagram of the axial cross section of fuel injection

4 仿真结果分析

4.1 炭烟生成量分析

两种燃料燃烧过程缸内炭烟生成量的变化曲线, 如图 3 所示. 从图 3 可以看出, 柴油机缸内的炭烟

生成量  $\varphi$ (炭烟) 随着燃烧的开始剧聚上升, 在压缩上止点后  $160^\circ$  的曲轴转角( $\theta$ ) 出现了炭烟生成量的峰值; 之后开始回落, 在压缩上止点后  $600^\circ$  的曲轴转角, 出现了炭烟生成量的平稳趋势. 燃用二甲醚时, 缸内的炭烟生成量为零. 这与文[ 2, 13] 的试验研究结果相吻合.

文[ 2] 在一台可视化四冲程单缸发动机机上进行了二甲醚燃料的燃烧和排放特性试验, 发动机的转速为  $1\,400\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 供油提前角( $\theta$ ) 为  $250^\circ$ . 试验研究结果表明, 二甲醚燃烧过程中没有炭烟产生, 柴油机燃用二甲醚可以完全消除炭烟排放. 因此, 使用二甲醚燃料发动机可以同时降低  $\text{NO}_x$  和炭烟的排放. 文[ 13] 在一台 D6114ZLQB 型增压中冷直接喷射柴油机上, 进行增压二甲醚发发动机燃烧和排放的研究. 实验结果表明, 在发动机的所有工况范围内, 二甲醚发动机的炭烟排放均为零.

显然, 二甲醚燃烧过程中的炭烟生成量显著下降, 有利于降低其发动机的炭烟生成量. 二甲醚燃烧过程中的炭烟生成量显著下降的原理是, 由于二甲醚喷雾和柴油喷雾相比其雾滴小, 蒸发速度快, 表现出明显的闪急喷雾特性, 其破碎期短, 只有  $0.2\sim 0.4\text{ ms}$ , 远比柴油小. 二甲醚雾化混合比柴油好, 更易与空气充分混合, 从而消除了炭烟生成的一个最重要的基础条件. 另外, 由于二甲醚有更快的燃烧反应速度, 抑制了高温环境下炭氢燃料发生凝聚和脱氢反应, 减少炭烟的生成. 所以, 二甲醚燃烧过程可以控制炭烟的生成, 减少其排放量.

### 4.2 $\text{NO}_x$ 排放量分析

二甲醚发动机和柴油机作了  $\text{NO}_x$  排放量  $\varphi(\text{NO}_x)$  的对比计算, 如图 4 所示. 从图 4 可以看出, 二甲醚发动机  $\text{NO}_x$  排放量明显少于柴油机  $\text{NO}_x$  的排放量, 扩散燃烧速度比柴油快, 燃烧持续期比柴油短, 二甲醚发动机的  $\text{NO}_x$  排放比柴油机大幅度降低.

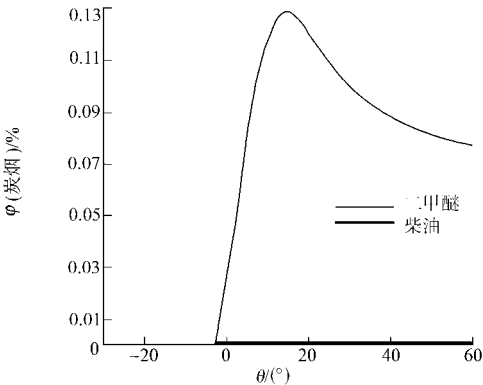


图 3 炭烟生成量的模拟计算

Fig.3 Simulation calculation of soot generation content

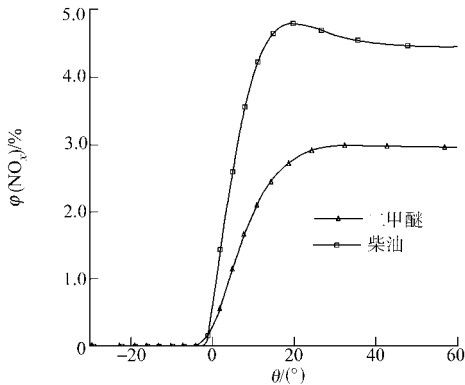


图 4  $\text{NO}_x$  排放量的模拟计算

Fig.4 Simulation calculation of  $\text{NO}_x$  emission content

### 4.3 不同燃料放热率比较

在不同燃料的情况下, 燃料喷射燃烧放热率( $q$ ) 随曲轴转角( $\theta$ ) 的变化曲线, 如图 5 所示. 由图 5 可以看出, 二甲醚的燃烧时刻相对提前. 这是由于二甲醚在喷射过程中的闪急沸腾效应, 雾化效果大大提高, 从而使得喷雾粒径更小, 分布更均匀. 因此, 着火较未溶气燃油提前.

二甲醚燃烧的最大放热率低于柴油的燃烧的最大放热率为  $207.5\text{ J}\cdot(^{\circ})^{-1}$ , 柴油的最大放热率是单峰形状, 而二甲醚燃烧的最大放热率是双峰形状(注: 放热率为每度曲轴转角放出的热量). 二甲醚燃烧数值模拟计算结果也与文[ 5] 的试验研究结果基本相同. 二甲醚的着火始点比柴油早, 预混合燃烧峰值较低, 扩散燃烧的峰值比预混合燃烧峰值高. 柴油机的预混合燃烧峰值很高, 扩散燃烧峰值却不明显.

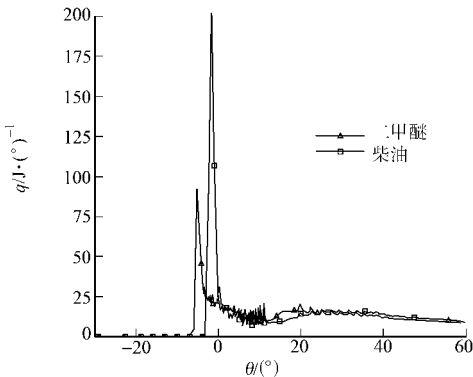


图 5 燃料放热率的模拟计算

Fig.5 Simulation calculation of fuel heat release rate

这说明了本数值模拟计算程序的正确性,为二甲醚发动机数值模拟仿真计算提供了一种有效的工具.

## 5 结束语

通过对二甲醚发动机数值模拟仿真计算,结果表明基本反映了柴油机燃烧过程的主要规律.这说明所建立的二甲醚燃烧过程数值模拟平台是有一定的实用性,可以用来模拟二甲醚发动机的燃烧过程,研究二甲醚发动机燃烧的内在机理.

### 参考文献:

- [1] 谢永杰. 惯性动力增压器在小型高速柴油机上的应用[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 1998, 19(1): 12-14.
- [2] 张光德, 黄震, 乔信起, 等. 二甲醚燃料喷射过程的试验研究[J]. 内燃机学报, 2002, 20(5): 12-14.
- [3] FLEISCH T, MC CARTHY C, BASU A, et al. A new clean diesel technology: Demonstration of ULEV emission on a navistar diesel engine fueled with dimethyl ether[C] // SAE Paper 950061. New York: Mc Graw-Hill Book Company, 1995: 123-128.
- [4] 王锡斌, 蒋德明, 周龙保. 二甲醚发动机湍流燃烧模型的研究[J]. 西安交通大学学报: 自然科学版, 2003, 37(11): 5-7.
- [5] 解茂昭. 内燃机计算燃烧学[M]. 2 版. 大连: 大连理工大学出版社, 2005: 46-56.
- [6] OROURKE P J, AMSDEN A A. The tab method for numerical calculation of spray droplet breakup[C] // SAE Paper 872089. New York: Mc Graw-Hill Book Company, 56-61.
- [7] 肖进. 气燃油射流雾化与燃烧机理研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2004.
- [8] MUSCULUS M P, RUTLAND C J. Coherent flamelet modeling of diesel engine combustion[J]. Combust Sci and Tech, 1995, 104(4/6): 295-337.
- [9] 赵新顺, 曹会智, 温茂禄. HCCI 技术的研究现状与展望[J]. 内燃机工程, 2004, 25(4): 15-18.
- [10] 王贺武, 周龙保, 蒋德明, 等. 直喷式柴油机燃用二甲醚排放特性研究[J]. 内燃机学报, 2000, 18(1): 6-10.
- [11] 王贺武, 周龙保. 二甲醚喷雾特性的研究[J]. 西安交通大学学报: 自然科学版, 2001, 35(9): 918-921.
- [12] 王锡斌, 蒋德明, 王贺武. 二甲醚的油束模型和试验研究[J]. 西安交通大学学报: 自然科学版, 2002, 36(9): 890-894.
- [13] 吴君华. 增压二甲醚发动机燃烧和排放控制试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.

## Numerical Simulation of Combustion Process of DME Engine

LIAO Shui-rong<sup>1</sup>, SHAO Yi-ming<sup>2</sup>, SHU Hai-bo<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;

2. College of Traffic and Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3. College of Mechatronics and Automotive Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** The combustion model of DME (dimethyl ether) engine is established and coupled into KIVA program so that it could have the capacity of numerical simulation of the combustion process of DME engine. The real-time data information including soot formation inside the cylinder,  $\text{NO}_x$  emission and heat rate of different types of fuels is obtained by numerical simulation and calculation of the combustion process of DME engine. The research results have indicated that the simulations results are identical to the experimental ones, which can basically reflect the main principle of the combustion process of DME engine. The comparative analysis of the corresponding working status of diesel engine and the DME engine has shown that the DME engine has better emission performance.

**Keywords:** engine; dimethyl ether; combustion model; numerical simulation; emission

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 郑亚青)