

直喷式柴油机准维现象学多区喷雾燃烧模型

严兆大¹, 赵洛伟¹, 芮 阳¹, 张镇顺²
(1. 浙江大学 能源工程学系, 浙江 杭州 310027; 2. 香港理工大学 机械工程学系, 香港)

摘 要:以燃料与空气分布状态控制可燃混合气的形成和燃烧过程为基本思路, 建立直喷式柴油机准维现象学多区喷雾燃烧模型及碳粒预测子模型, 较好地预测了柴油机火焰温度和碳粒浓度, 为柴油机气缸内热辐射研究提供一定的依据¹⁹.

关键词:喷雾燃烧; 火焰温度; 碳粒浓度

中图分类号: TK 401; TK 421⁺. 2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-973X(2001) 02-0119-05

燃油的喷射、雾化、蒸发及其与空气的混合对柴油机的燃烧和排放有至关重要的作用¹⁹. 由于气缸内宏观的流动, 如旋流、滚流, 以及微观的湍流脉动等, 对喷雾过程都有显著的影响, 因而喷雾的数值模拟是一个难题¹⁹. 本文以喷雾场特性为基础, 建立工程中较为实用的准维现象学多区燃烧模型及碳粒浓度预测子模型^[1], 目的在于预测燃烧室内火焰温度和碳粒浓度的变化规律, 以此作为气缸内热辐射研究的基础¹⁹.

1 模型的物理描述

在接近压缩冲程末了, 伴随着液体燃料喷入燃烧室, 卷吸的空气使微元燃料迅速加热、雾化、蒸发, 一旦燃油蒸汽与空气形成可燃混合气并经历着火迟后, 在喷雾边缘首先达到理想混合比而着火燃烧、释放热量, 使微小单元温度急剧升高、体积迅速膨胀, 并挤压相邻单元¹⁹. 温度的升高加大了剩余燃料的蒸发速度, 新蒸发的燃油蒸汽和卷入的空气再次混合, 燃烧继续发生, 如此连锁进行, 使整个燃烧室内压力和温度迅速升高, 直至燃烧结束¹⁹.

上面所描述的柴油机燃烧主要受控于燃料与空气的混合质量和速度, 而混合质量和速度又受到喷雾特性的影响¹⁹. 由此就形成了多区喷雾燃烧模型的基本思想, 按喷雾中燃料浓度分布的物理和几何特征现象, 将喷雾分区构造了喷雾混合、燃烧、传热和碳粒排放四个子模型¹⁹. 然后根据工质的质量守恒、能量守恒, 并以各区容积等为约束条件, 建立子模型间的联系, 以综合描述整个燃烧过程¹⁹.

图 1 是开始着火时刻燃烧室内喷雾区域划分的示意图¹⁹. A 为喷雾外围空气区, C 为喷雾核心区, 两个不同燃油空气混合比的可燃混合区为 B₁ 和 B₂¹⁹. B₁ 区与 C 区是以富油极限为界限, B₂ 区和 A 区是以贫油极限为界限, 模型假设 B 区中混合气为均质¹⁹. 在喷雾过程中 A 区中空气不断卷吸入 B 区和 C 区, C 区中可燃混合气将进入 B 区, 在 B 区以理想混合比进行着火燃烧¹⁹. 碳粒主要产生在富油区边界层以及燃烧化学反应的 B 区¹⁹.

2 准维现象学多区喷雾燃烧模型

2.1 喷雾混合计算

假设通过喷嘴的流动为准稳态、一维不可压缩流动, 喷雾体呈对称¹⁹. 其喷雾中燃料分布规律如图 2 所示¹⁹.

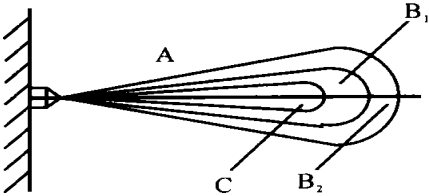


图 1 喷雾燃烧区域划分示意图

Fig.1 Division of zones in a fuel spray

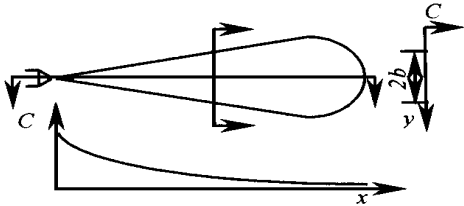


图 2 喷雾中燃料浓度分布简图

Fig.2 Distribution of concentration of fuel in the spray

沿 x 轴方向,

$$C_x(x, o, t) = \begin{cases} 1/[1 + \zeta(t)x], & o < x < x_t; \\ 0, & x > x_t, \end{cases} \tag{1}$$

式(1)中, x_t 为喷雾体前端贯穿距离, 可由式(3) 确定; $\zeta(t)$ 为瞬态参数^[13]

沿宽度 y 方向,

$$C(x, y, t)/C_x(x, o, t) = 1 - (y/b)^{1.5}, \tag{2}$$

式(2)中, b 为喷雾宽度的 $1/2$ ^[13]

喷雾贯穿距和锥角 θ 可按 shahed 公式计算:

$$x = \frac{450d_n^{0.5}(\rho/\rho_0)^{0.4}}{1 + (\rho_a/\rho_0)}(\rho_a/\rho_0)^{0.5}\Delta p^{0.25}t^{0.6}, \tag{3}$$

式(3)中, d_n 为喷嘴直径; Δp 为通过喷嘴的压力降; ρ, ρ_a, ρ_0 分别为燃料、参照柴油、燃烧室内气体及大气的密度^[13]

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{dy}{dx} = 0.12 \left[1 + \frac{\rho_a}{\rho} \right], \tag{4}$$

式(4)中, ρ 为喷雾的密度^[13]

为求得喷雾中燃料浓度分布必须求取 $\zeta(t)$, 可由在 t 时刻内喷雾体中燃油总量的关系来求得.

$$\int_0^t \frac{dG_f}{dt} dt = 2\pi e_n \int_0^t \int_0^t C \rho_y dy \cdot dx, \tag{5}$$

式(5)中, e_n 为喷油器喷孔数; dG_f/dt 为喷油率^[13]

对式(5) 进行数值迭代可求得 $\zeta(t)$, 喷雾中燃料浓度分布也随之确定^[13]

2.2 各区燃料和空气质量变化率

各区质量守恒

C 区:

$$\frac{dG_C}{dt} = \frac{dG_f}{dt} + \frac{dG_{aC}}{dt} - \frac{dG_{BA}}{dt}; \tag{6}$$

A 区:

$$\frac{dG_A}{dt} = - \frac{dG_{aC}}{dt} - \sum_{i=1}^2 \frac{dG_{aBi}}{dt}; \tag{7}$$

B 区:

$$\sum_{i=1}^2 \frac{dG_{Bi}}{dt} = \frac{dG_{BA}}{dt} + \sum_{i=1}^2 \frac{dG_{aBi}}{dt}. \tag{8}$$

式(6) ~ (8) 中, 下标 f 指燃料, a 指空气, A, B, C 分别指三个区域; G_{BA} 为 C 区形成并随之进入 $B_i(i = 1, 2)$ 区的可燃混合气^[13]

将(6) ~ (8) 式相加, 得到质量变化率控制方程:

$$\frac{dG_f}{dt} = \frac{dG_C}{dt} + \frac{dG_A}{dt} + \sum_{i=1}^2 \frac{dG_{Bi}}{dt}. \tag{9}$$

各区燃料和空气质量变化率的计算主要为燃烧和放热计算作准备^[13]

2.3 燃烧和放热计算

各区能量守恒

C 区:

$$\frac{d(G_C E_C)}{dt} = -p \frac{dV_C}{dt} + \frac{dQ_C}{dt} + \frac{dG_f}{dt} H_f + \frac{dG_{aC}}{dt} H_a - \frac{dG_{BA}}{dt} H_m; \tag{10}$$

A 区:

$$\frac{d(G_A E_A)}{dt} = p \frac{dV_A}{dt} + \frac{dQ_A}{dt} - \frac{dG_a}{dt} H_a; \tag{11}$$

B 区:

$$\frac{d(G_{Bi} E_{Bi})}{dt} = -p \frac{dV_{Bi}}{dt} + \frac{dQ_{Bi}}{dt} + \frac{dG_{aBi}}{dt} H_a + \frac{dG_{BA}}{dt} H_m \tag{12}$$

式(10)~(12)中, E_A 、 E_{Bi} 、 E_C 、 V_A 、 V_{Bi} 、 V_C 、 Q_A 、 Q_{Bi} 、 Q_C 分别为A、B、C区工质的内能、容积和传热量; G_{aBi} 、 G_{aC} 分别为卷入B区及C区的空气量; p 为燃烧室工质瞬时压力; G_f 为燃油量; H_a 、 H_f 、 H_m 分别为空气、燃料及混合气的热焓^[13]

模型假设总热量变化率按工质温度和质量成比例在各区分配,因而各区放热率为

$$\frac{dQ_A}{dt} = \frac{G_A T_A}{M} \frac{dQ}{dt}, \frac{dQ_{Bi}}{dt} = \frac{G_{Bi} T_{Bi}}{M} \frac{dQ}{dt}, \frac{dQ_C}{dt} = \frac{G_C T_C}{M} \frac{dQ}{dt}, \tag{14}$$

式(14)中, $M = \sum_{i=1}^2 G_{Bi} T_{Bi} + G_A T_A + G_C T_C$, dQ/dt 为工质总热量变化率, T_A 、 T_{Bi} 、 T_C 为各区温度^[13]

由式(10)~(14),加上各区状态方程和容积约束条件 $V_A + \sum_{i=1}^2 V_{Bi} + V_C = V$,就可以求解出各区的工质温度、容积、压力等参数^[13]

2.4 燃气温度及燃烧产物

模型定义燃气温度为各区工质温度的权重温度:

$$T_f = \frac{G_C T_C + \sum_{i=1}^2 G_{Bi} T_{Bi} + G_A T_A}{G_C + \sum_{i=1}^2 G_{Bi} + G_A}. \tag{15}$$

燃烧产物只是在B区生成,可以通过在理论当量比条件下燃烧,算出10种燃烧产物的组分和相应的各组分的平衡参数^[2],如各组分的分压 P_{O_2} 、 P_{H_2O} 等^[13]

3 碳粒预测子模型

模型认为喷雾燃烧着火后,喷雾温度迅速升高,喷嘴附近燃油核心区(C区)的燃油因卷入空气量不足,高温缺氧而裂解脱氢,形成了以碳为主要成分的固态碳核,它由高碳高分子烃类或碳粒组成^[13]随着扩散燃烧的进行,燃油核心区裂解出的碳粒,始终处于缺氧状态而成为碳粒形成的主要区域^[13]而对燃烧混合区 B_1 、 B_2 ,因A区空气卷入,使得这两个区域中的部分碳粒进一步氧化,因而这两个区域中净碳粒量将是碳粒形成量和氧化量之差值^[13]

描述碳粒形成机理是较为复杂的,工程计算中一般采用一些符合所研究机型的碳粒生成和氧化的经验公式^[13]本模型中选择适用本文研究对象G4135直喷柴油机的Hiroyuki的经验公式:

$$\frac{dm_{sc}}{d\Phi} = A_f G_{fC} p_c^{0.5} \exp\left[-\frac{E_f}{RT_C}\right], \tag{16}$$

式(16)中, A_f 为实验常数; G_{fC} 为C区中燃料质量; T_C 、 p_c 为C区工质的温度和分压; Φ 为曲轴转角; m_{sc} 为C区生成碳粒质量; $E_f = 5.23 \times 10^4 \text{ J/mol}$ ^[13]

B_1 、 B_2 区采用Morel等提出的经验公式^[3]^[13]

碳粒形成量变化率:

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\frac{dm_{sc}}{d\Phi} = A_i M_i \exp\left[-\frac{A_i^2}{T_{Bi}}\right] / (1 + 1.76 Y_{O_2}), \tag{17}$$

碳粒氧化量变化率:

$$\frac{dm_{sci}}{d\phi} = -B_1 m_{si} / (R d_s) \exp\left(-\frac{B_2}{T_{Bi}}\right) P_{O_2}^{1/2}, \quad (18)$$

式(17)和式(18)中, M_f 为燃油燃烧率; Y_{O_2} 为燃烧区中氧气的摩尔百分比; P_{O_2} 为氧气分压; m_{si} 为*B_i*区中碳粒质量; R, d_s 为碳粒密度和直径; B_1, B_2 为实验常数, $A_1 = 0.38, A_2 = 5\,000$ (13)

B 区中碳粒生成量为

$$\frac{dm_{si}}{d\phi} = \frac{dm_{sfi}}{d\phi} - \frac{dm_{sci}}{d\phi}. \quad (19)$$

4 模型预测结果与分析

本文研究对象为 G4135 直喷式柴油机,其技术参数: $D \times S = 135\text{ mm} \times 140\text{ mm}, P_e/n = 30\text{ kw}/(1\,500\text{ r/min}), \epsilon = 16.5$, 喷油器喷孔数 $\times$ 孔径 $= 4\text{ mm} \times 0.35\text{ mm}$ (13)

4.1 火焰温度

本文引用了光纤多色法测量 G4135 柴油机气缸内火焰温度和碳粒浓度的结果^[4],图 3 为 A, B, C 三个区的火焰温度曲线¹⁹.因缸盖上仅布置一个测点,靠喷油器转动来测取三个区域的参数,图 3 中 A 区实际上是处在 A 区和 B 区的边缘,可燃混合气因该处有充足的氧气,而最先着火使温度升高(约 3~4 °CA ATDC),但温度较低¹⁹.而 B 区由于混合气较浓,虽然温升迟于 A 区,但温度值最高¹⁹.C 区为燃油喷注区,因燃烧迟后及未燃油滴吸收热量,所以温度低于 B 区¹⁹.图 4 为本文模型预测的结果,不难看出,各区温度值和变化趋向与实验结果十分相近¹⁹.

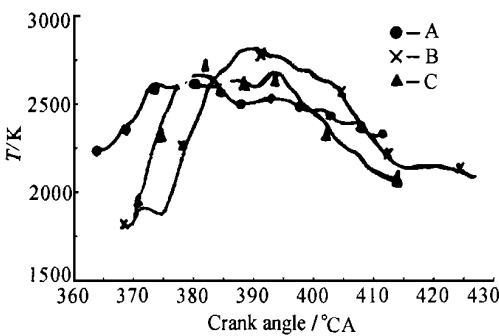


图 3 实验所测得的不同区域的火焰温度
Fig. 3 Experimental zonal flame temperature

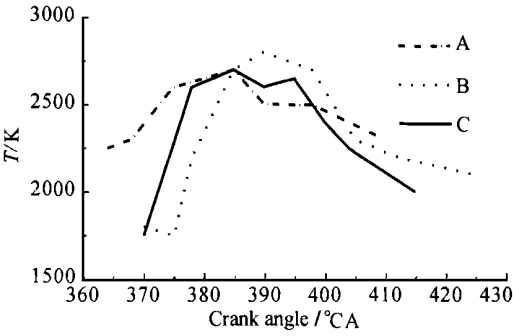


图 4 由模型计算的各区温度
Fig. 4 Simulated zonal flame temperature

4.2 碳粒浓度

图 5 为实验所得各区的碳粒浓度曲线¹⁹.由图可见,C 区碳粒浓度早在 8 °CA ATDC 左右就上升,且浓度最大¹⁹.这是因为该区为燃油核心区,燃油密度大、油滴粗、卷入空气量少,由前述实验和计算结果表明火焰温度率先上升,因而造成燃油核心区的边缘高温缺氧,大量碳粒生成,致使 C 区的

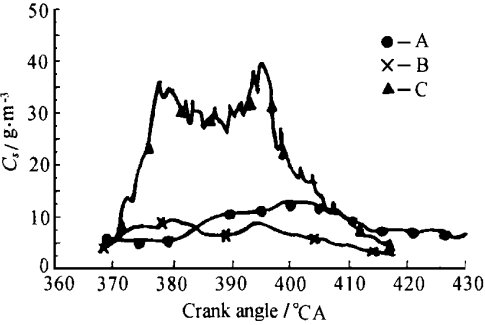


图 5 实验所测得的不同区域的碳粒浓度
Fig. 5 Experimental zonal soot concentration

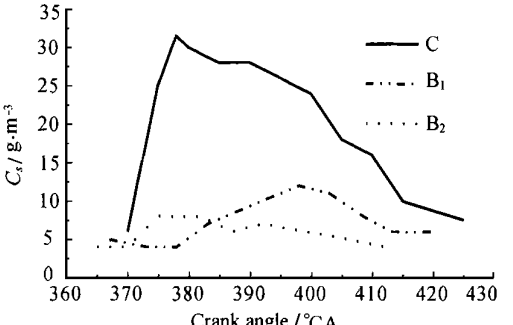


图 6 模型计算各区的碳粒浓度
Fig. 6 Simulated zonal soot concentration

碳粒浓度远大于 A, B 区¹⁹。图 6 为应用本文模型预测的各區碳粒浓度曲线,其数值和趋向与实验结果有较好的一致性¹⁹。

无论是实验还是预测的结果均表明,火焰温度开始上升的时间早于碳粒浓度上升的时间,高温区和碳粒高浓度区相应的曲轴转角约在 20~40 °CA ATDC,这和松岗信、Spicher 等人^[5]的结论是一致的¹⁹。结果还证实了燃油核心区在高温下产生高浓度碳粒的论述是正确的¹⁹。

模型还可以给出更多的预测结果,因为本文主要作为气缸内热辐射分析前期的基础研究,其它结果不在此一一列出¹⁹。

5 小 结

本文以燃料与空气的分布状态控制可燃混合气的形成和燃烧过程为基本思路,建立直喷式柴油机准维现象学多区喷雾燃烧模型及碳粒预测子模型,较好地预测了 G 4135 直喷式柴油机的火焰温度和碳粒浓度在扩散燃烧阶段的变化规律,计算结果和实验比较有较好一致性,说明建模思路和所采用的计算公式是可行的¹⁹。模型并无繁琐的计算,比较适合于工程应用,证实了高温缺氧碳粒生成的机理¹⁹。本文预测结果为柴油机缸内热辐射的研究打下良好的基础¹⁹。

参考文献:

[1] 陈红岩·直喷式柴油机气缸内辐射多区(多维)模型研究[D]·杭州:浙江大学能源工程学系,1998.
CHEN Hong-yan· Investigation on multi-zone and multi-dimensional radiation heat transfer model in a DI diesel engine cylinder[D]· Hangzhou:Dept· of Energe Engineering, Zhejiang Uni· ,1998.

[2] Mehta P S· Model for prediction of incylinder and exhaust soot emissions from direct injection diesel engine [J]· SAE paper 881251.

[3] Morel T· Heat radiation in DI diesel engines[J]· SAE paper 860445.

[4] 许斯都·用光导纤维多色法对柴油机燃烧室内火焰温度与碳粒生成的研究[J]·内燃机学报,1996,14:316—323.
XU Si-du· Study on flame temperature and soot formation in combustion chamber of DI diesel engine by multi-optical fiber poly-color method[J]· Trans of CSICE,1996,14:316—323.

[5] Spicher U· An experimental study of combustion and fluid flow in diesel engines[J]· SAE paper 872060.

A quasi-phenomenon multi-zone spray combustion model and for DI diesel engine

YAN Zhao-da¹, ZHAO Luo-wei¹, RUI Yang¹, ZHANG Zhen-shun²
(¹·Dept· of Energy Engineering·, Zhejiang Uni·, Hangzhou 310027, China;
²·Dept· of Mechanical Engineering, Hong Kong Uni· of Science and Technology, Hong Kong, China)

Abstract: According to the idea that the formation of combustible mixture and combustion process controlled by the distributing states of fuel and air, a quasi-phenomenon multi-zone spray combustion model and soot prediction submodel for DI(direst injection)· diesel engine are built up· The flame temperature and soot concentration are fairly good predicted by using the model, and the computed model provides good parameters for research of heat radiation transfer in DI diesel engines·

Key words: spray combustion; flame temperatures; soot concentration