DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.11.001

燃油粘度与环境压力对喷雾碰撞过程的影响*

成传松 李云清 黎一锴 赵立峰

(北京航空航天大学交通科学与工程学院,北京100191)

【摘要】 O'Rourke 碰撞模型仅仅考虑了碰撞拉伸分离以及聚合,而忽略了碰撞反弹、反射分离以及高韦伯数 下的碰撞二次破碎过程,在碰撞分区过程中也忽略了燃油物性以及碰撞环境条件的影响,使得预测的碰撞分区临 界韦伯数偏低。复合碰撞模型根据相关的实验结果对碰撞分区进行油滴粘度以及碰撞环境压力修正,考虑碰撞反 弹、反射分离、拉伸分离以及碰撞二次破碎过程,提高了碰撞分区的预测精度。基于复合碰撞模型,分析了油滴粘 度与环境压力对喷雾碰撞过程的影响。结果表明环境压力的增加,使得碰撞反弹概率增加而聚合概率下降;燃油 粘度的增加使得碰撞聚合比例增加而碰撞分离比例下降。

关键词:内燃机 喷雾模拟 碰撞模型 燃油粘度 环境压力 中图分类号:TK421 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2010)11-0001-07

Investigation of the Influences of Droplet Viscosity and Environmental Pressure on the Spray Collision

Cheng Chuansong Li Yunqing Li Yikai Zhao Lifeng

(Academy of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract

The stretching separation and coalescence are only considered in the O'Rourke model while the bounce, reflexive separation and the secondary breakup under high Weber collision are ignored. Furthermore, the influences of droplet property and collision condition on the collision regimes are not included in the O'Rourke model so that the predicted critical Weber numbers are underestimated. In the composite collision model, the collision regimes were revised to consider the influence of droplet viscosity and environmental pressure, and the bounce, coalescence, reflexive separation, stretching separation and the secondary breakup under high Weber collision were also considered. Moreover, the influences of droplet viscosity and environmental pressure on the spray collision were investigated based on the composite collision model. The results showed that the probability of bounce was increased due to the increasing of environmental pressure while the probability of coalescence was decreased. However, the probability of coalescence was increased with the increasing of droplet viscosity while the probability of collision separation was reduced.

Key words Internal combustion engine, Spray simulation, Collision model, Droplet viscosity, Environmental pressure

引言

粒子二元碰撞过程在雨滴的形成、原子分裂以

及各种喷雾射流,尤其是内燃机中频繁出现^[1]。在 高压喷雾的稠密区域发生的油滴碰撞过程对喷雾的 平均油滴直径具有显著影响^[1-2],从而影响后续的

收稿日期: 2010-06-09 修回日期: 2010-06-21

^{*} 国家自然科学基金资助项目(50376003)

作者简介:成传松,博士生,主要从事发动机燃烧仿真研究,E-mail: cheng_auto13@ ae. buaa. edu. cn

喷雾蒸发以及燃烧过程。故在柴油机喷雾的模拟过 程中,油滴碰撞以及聚合过程模拟显得非常重要。

由于大气研究的需要,以前液滴碰撞研究多数 基于水滴的实验结果。传统的分区模型组成有反弹 模型^[3]、拉伸分离模型^[4-5]和反射分离模型^[5],但 是这些模型中都没有考虑油滴粘度以及环境压力对 油滴碰撞分区的影响。由于碳氢燃料油滴与水滴表 面张力以及粘度的差别,使得碳氢油滴与水滴的碰 撞特性有着明显差别^[6]。Qian 等^[7]的研究表明高 压环境下碰撞过程中的反弹作用更加明显。因此碰 撞模型需要考虑燃油物性以及碰撞环境的影响。

本文借助于开源代码 KIVA - 3V, 实现复合碰 撞模型。相对于 O'Rourke 碰撞模型, 复合碰撞模型 在碰撞分区中考虑燃油粘度与环境压力的影响, 考 虑高韦伯数碰撞下的二次破碎过程并采用拉格朗日 独立碰撞网格以降低网格依赖性。基于复合碰撞模 型, 分析燃油粘度与环境压力对喷雾碰撞过程的影 响规律。

1 碰撞分区的修正

油滴二元碰撞模型示意图如图 1 所示。大油滴 直径为 D_2 ,速度为 U_2 ;小油滴直径为 D_1 ,速度为 U_1 ,油滴间相对速度为 U_{rel} 。两油滴中心距离在垂 直于相对速度矢量方向的投影距离为 b。油滴密度 和表面张力分别为 ρ_L 和 σ 。通常采用无量纲韦伯 数 We、油滴直径比 Δ 以及碰撞因子数 B 来表征两个 油滴二元碰撞过程,分别为



Fig. 1 Sketch map of droplet binary collision

当B=0时,表示对心碰撞过程;当0 < B < 1表示偏心碰撞过程。油滴二元碰撞过程将可能出现 (I)小变形聚合、(II)反弹、(III)大变形聚合、 (IV)反射分离以及(V)拉伸分离5种碰撞结果^[7], 如图2所示。反弹、反射分离以及拉伸分离临界韦 伯数分别为 We_B 、 We_R 和 We_s ,其中 We_B 和 We_R 对应的 碰撞因子数为0,而 We,对应的碰撞因子数为0.5。



依据 Estrade^[3]、Jiang^[6]、Qian^[7]以及 Chen^[8]等 实验结果,考虑油滴粘度以及环境压力对油滴碰撞 各子分区临界韦伯数的影响。根据修正后的临界韦 伯数来修正二元油滴碰撞分区模型,其中碰撞分区 模型修正所涉及的油滴物性参数如表1 所示。

表 1 碰撞分区实验中的油滴物性参数 Tab. 1 Droplet properties in the collision experiments

抽米	密度	表面张力	粘度	
竹矢	$/kg \cdot m^{-3}$	$/N \cdot m^{-1}$	$/N \cdot s \cdot m^{-2}$	
乙醇	789	0.0220	0.001166	
十四烷	763	0.0262	0.002300	
十六烷	773	0.0270	0.003 420	
水	1 000	0.0730	0.001002	
柴油	817	0.028 3	0.003160	

1.1 反弹分离区

Estrade^[3]等假设油滴变形过程中不发生粘性耗 散并且碰撞油滴初始动能不足以使得油滴达到聚合 最小距离就发生碰撞反弹过程,其碰撞反弹准则为

$$We_{0B} = \frac{\Delta(1 + \Delta^2) (4\Phi' - 12)}{\chi_1 (\cos (\arcsin B))^2}$$
(1)

$$\ddagger \Phi \qquad \chi_1 = \begin{cases} 1 - \frac{1}{4} (2 - \tau)^2 (1 + \tau) & (\tau > 1.0) \\ \frac{1}{4} \tau^2 (3 - \tau) & (\tau \le 1.0) \end{cases}$$

$$\tau = (1 - B) (1 + \Lambda)$$

式中 Φ'——油滴变形形状因子,取Φ'=3.351 为了考虑油滴粘度以及气体粘度的影响,使用

3 个无量纲数:碰撞油滴 OH 数 $Oh_L = \frac{\mu_L}{\sqrt{\rho_L \sigma D_1}}$,环境

气体 OH 数
$$Oh_c = \frac{\mu_c}{\sqrt{\rho_c \sigma D_1}}$$
, 无量纲压力 $p^* =$

 $\sqrt{\frac{pD_1}{\sigma}}$,其中参数 μ_L 与 ρ_L 为油滴粘度和密度,而 μ_c 、 ρ_c 及p为碰撞环境气体粘度、密度和压力。综合考 虑以上参数,临界反弹韦伯数修正的经验模型为

$$\sqrt{We_B} = f(\theta) = f\left(\frac{Oh_L}{Oh_G}\sqrt{p^*}\right)$$
 (2)

反弹碰撞临界韦伯数同燃油物性(粘度、密度、 表面张力)以及碰撞环境(压力、粘度、密度)相关, 根据实验数据拟合的反弹碰撞临界韦伯数计算模型 为

$$\frac{1}{\sqrt{We_B}} = 21.2 \frac{Oh_G}{Oh_L} \sqrt{\frac{\sigma}{pD_1}} + 0.012 \sqrt{\frac{Oh_L}{Oh_G} \sqrt{\frac{pD_1}{\sigma}}}$$
(3)

由于 Estrade 反弹模型预测的分区曲线趋势准确而仅仅是临界韦伯数没有考虑粘度与环境压力的 影响,故联合方程式(1)与(3),平移修正得到不同 碰撞因子数下的反弹与大变形聚合过程分区准则为

$$We_{NB} = We_{B} + We_{OB} - (We_{OB}|_{B=0})$$
 (4)
1.2 反射分离区

Ashgriz 等^[5]假设反射分离过程中的有效动能 达到 75%的球形油滴表面能就发生发射分离,其反 射分离准则为

$$We_{OR} = 3 [7 (1 + \Delta^{3})^{2/3} - 4(1 + \Delta^{2})] \frac{\Delta (1 + \Delta^{3})^{2}}{\Delta^{6} \eta_{1} + \eta_{2}}$$
(5)

其中

$$\eta_1 = 2 (1 - \xi)^2 (1 - \xi^2)^{1/2} - 1$$

 $\eta_2 = 2 (\Delta - \xi)^2 (\Delta^2 - \xi^2)^{1/2} - \Delta^3$
 $\xi = 0.5B(1 + \Delta)$

式中 η1、η2---碰撞中动能参与反射分离的比例

Ashgriz 等提出的反射分离准则仅适用于无粘 或低粘性油滴。对于高粘性油滴的碰撞过程,由于 油滴变形过程中的粘性耗散作用损耗部分有效反射 能量,故反射分离过程更加困难。Cecilie^[9]等指出 反射分离的临界韦伯数随油滴 OH 数增加而增加。 根据 Estrade^[3]、Jiang^[6]和 Qian^[7]的实验结果拟合的 反射分离临界韦伯数经验模型为

$$We_R = 678.\ 8Oh_L + 13$$
 (6)

在 Ashgriz 提出的反射分离准则基础上,联合方程式(5)与(6),修正得到不同碰撞因子数下反射分离与大变形聚合的分区准则为

$$We_{NR} = We_{R} + We_{OR} - (We_{OR}|_{B=0})$$
(7)

1.3 拉伸分离区

Brazier – Smith^[4] 等假设暂时聚合油滴的旋转 能量大于从聚合油滴还原成原始油滴所需要的表面 能就发生拉伸分离,其拉伸分离准则为

$$We_{0S} = \frac{12 (1 + \gamma^{3})^{11/3}}{5B^{2}\gamma^{6} (1 + \gamma)^{2}} [1 + \gamma^{2} - (1 + \gamma^{3})^{2/3}] (8)$$

虽然 Braizer 所提出的拉伸分离与大变形聚合

分区准则对水滴碰撞过程具有较好的预测精度,但是 Jiang^[6]等的实验结果表明当油滴的粘度增加时, 拉伸分离临界韦伯数增大。根据 Estrade^[3]以及 Qian^[7]的拉伸分离实验结果,线性拟合得到的拉伸 分离临界韦伯数经验模型为

$$We_s = 630.5Oh_L + 21$$
 (9)

Braizer 拉伸分离模型对于低粘性具有较好的 预测精度,故仅对此模型的临界拉伸韦伯数进行修 正。修正后的拉伸分离与大变形聚合分区准则为

$$We_{NS} = \frac{We_{S}}{5.24B^{2}\gamma^{6}(1+\gamma)^{2}} [1+\gamma^{2}-(1+\gamma^{3})^{2/3}]$$
(10)

1.4 分区修正的实验验证

(1)十四烷油滴实验比较

图 3 给出了十四烷油滴在环境压力为 0.06、 0.24 MPa下的二元碰撞过程实验以及模型预测结 果,其中实验结果来自文献[7]。两个相向运动的 油滴在相互接触之前在两油滴之间滞留一层气膜, 油滴间的压力升高。如果油滴的动能不足以完全排 挤这层气膜碰撞油滴将反弹。增加环境压力会阻止 油滴聚合,实验结果表明随着环境压力的升高,反弹 临界韦伯数增加。对于十四烷油滴在不同压力下的 碰撞实验,修正模型预测的反弹临界韦伯数分别为: 9.0、12.0,故修正反弹临界韦伯数模型方程式(3) 与式(4)能较好地捕捉环境压力对碰撞反弹过程的 影响,而原碰撞模型没有考虑环境压力的影响,在上 述两种实验条件下的预测反弹临界韦伯数均为 2.8。十四烷碰撞分区结果比较表明考虑环境压力 与油滴粘度后,预测的分区结果同实验吻合更好。

(2)柴油油滴实验比较

图4给出柴油油滴等直径二元碰撞过程中实验 以及模型预测结果比较,其实验结果来自文献[8]。 原模型计算的柴油二元碰撞分区反弹、反射分离以 及拉伸分离临界韦伯数分别为2.8、18.6和12.5; 而修正模型计算的对应值分别为12.9、31.8和 36.6。图中结果亦说明原油滴二元碰撞模型中没有 考虑油滴粘度的影响使得碰撞分区临界韦伯数都要 低于实验值,而修正后的模型能与实验结果吻合较 好。

(3)不同燃油碰撞分区比较

从表1中可以看出,乙醇的表面张力和粘度均低于柴油,其中表面张力为柴油的78%,而粘度为柴油的37%。Jiang^[6]对烷烃以及水滴进行二元碰撞实验,实验结果表明水滴与烷烃油滴的碰撞分区有明显差别。对于烷烃,随着碳原子数的增加,油滴粘度增加,其对应的反弹分离临界韦伯数以及反射



图 3 十四烷碰撞模型修正验证







Fig. 4 Validation of collision regime model with diesel

分离临界韦伯数均增加。由于燃油物性对碰撞分区 具有明显影响,故不同种类的油滴碰撞分区特性以 及碰撞过程都不同。

图 5 给出了原始碰撞分区模型所预测的乙醇以 及柴油油滴碰撞分区结果,可以看出原始碰撞分区 模型由于没有考虑油滴物性的影响,故所预测的乙 醇与柴油油滴碰撞分区结果相同,这与前人的实验 结果不相符。图5给出了修正碰撞分区模型所预测 的乙醇与柴油油滴碰撞分区结果,从图中可以看出 相对柴油油滴,乙醇油滴的粘度降低,碰撞过程中能 量耗散程度减低,使得拉伸分离以及反射分离线都 朝低韦伯数移动,此时乙醇油滴碰撞聚合的机会就 减少。相反,柴油油滴碰撞聚合机会增加,同时碰撞 聚合朝更高的碰撞数移动,碰撞聚合变得更加容易。 故修正后的碰撞分区模型能更好地体现油滴粘度对 油滴碰撞过程的影响,也更适合于不同碳氢燃料油 滴的碰撞过程模拟。O'Rourke 碰撞模型中仅仅考虑 碰撞聚合以及拉伸(摩擦)分离两种碰撞结果,且聚 合与拉伸分区准则也没有考虑油滴物性影响,所以



其所考虑的碰撞分区是粗糙的。

2 碰撞二次破碎

Ashgriz^[5]等对水滴的二元碰撞实验以及 Brenn^[10~11]等对丙醇油滴的二元碰撞实验结果都表 明在高韦伯数下出现非稳态碰撞过程,也即出现碰 撞二次破碎过程而生成新的卫星油滴。而 O'Rourke 碰撞模型中仅考虑聚合以及拉伸分离两种碰撞结 果,没有考虑碰撞二次破碎过程。

碰撞破碎过程都出现在较高的韦伯数中,故碰 撞破碎出现在拉伸分离或者反射分离区域中。碰撞 过程中油滴交互作用区域的体积为

$$V_{T,i} = \phi_i V_i \quad (i = 1, 2) \tag{11}$$

式中 V_i----碰撞油滴的体积

φ_i ——碰撞过程中油滴交互作用区域的体积
 比例

对于拉伸分离过程, ϕ_i 由拉伸准则中的式(12)、(13)确定;对于反射分离过程, $\phi_i = 1$,此时整个油滴都参与碰撞交互作用。

$$\phi_{1} = \begin{cases} 1 - \frac{1}{4\Delta^{3}} (2\Delta - \tau)^{2} (\Delta + \tau) & \left(h > \frac{D_{1}}{2}\right) \\ \frac{\tau^{2}}{4\Delta^{3}} (3\Delta - \tau) & \left(h \le \frac{D_{1}}{2}\right) \end{cases}$$
(12)
$$\phi_{2} = \begin{cases} 1 - \frac{1}{4} (2 - \tau)^{2} (1 + \tau) & \left(h > \frac{D_{2}}{2}\right) \\ \frac{\tau^{2}}{4} (3 - \tau) & \left(h \le \frac{D_{2}}{2}\right) \end{cases}$$
(13)

其中

 $h = 0.5(D_1 + D_2)(1 - B)$

 $\tau = (1 - B)(1 + \Delta)$

碰撞过程中,参与交互作用区域的体积仅仅只

有部分从油滴分离出来形成液丝,液丝最终通过波 不稳定性(capillary wave instability)或者端部脱离 (end-pinching) 机理形成卫星油滴^[11~12]。Ko 等^[13~14]首先用分离体积系数来计算液丝体积,其假 设表面能和分离动能相互作用而共同决定分离体积 比例,但是其仅仅考虑表面能对分离过程的抑制作 用,而忽略了碰撞过程中能量的耗散。因此考虑能 量耗散之后的分离体积系数为

$$C_{V,i} = \frac{E_{\text{strtch}} - E_{\text{surten}} - E_{\text{dissip}}}{E_{\text{strtch}} + E_{\text{surten}} + E_{\text{dissip}}} \quad (i = 1, 2) \quad (14)$$

式中 E_{strtch} ——有效分离动能

式中

E_unten——碰撞交互区域的表面能

Edissin——碰撞过程中的耗散能量

根据交互区域的体积以及分离体积系数,则碰 撞破碎形成的液丝体积为

$$V_{Lig,i} = C_{V,i} \phi_i V_i \quad (i = 1, 2)$$
(15)

不同碰撞数以及韦伯数下,形成卫星油滴的数 量以及半径不同, Pan^[12]与 Munnannur^[15]指出液丝 形成卫星油滴的机理现在还不是十分清晰。同时由 于卫星油滴的加入,液滴包数目增加迅速,使得计算 量增加。故本文中假设碰撞二次破碎过程中并不真 正形成卫星油滴,而是通过碰撞母油滴半径减小而 实现对碰撞二次破碎的等价模拟。故碰撞破碎后的 母油滴直径变为

 $D'_{i} = \sqrt[3]{(1 - C_{V,i}\phi_{i})}D_{i} \quad (i = 1, 2)$ (16)而油滴包中数量根据质量守恒确定。

拉格朗日碰撞网格 3

O'Rourke 碰撞模型中油滴碰撞的必要条件是两 个油滴包处于同一个 CFD 气相单元中,称作"欧拉 碰撞网格"。这就使得喷雾碰撞计算过程严重地依 赖于网格大小。计算网格越大,油滴包之间进行碰 撞的机会越大,碰撞聚合的次数越多。同时两个相 邻油滴包由于处于两个不同的 CFD 计算单元中而 限制了其碰撞过程。

为了减低碰撞对于计算网格的依赖性,就有必 要采用独立的碰撞网格。Schmidt 和 Rutland^[16~17] 等提出的 NO-Time-Counter(NTC)碰撞模型需要在 生成碰撞网格以及确定液滴包在碰撞网格的位置等 方面花费额外的计算时间。在本文中,采用拉格朗 日独立碰撞网格,即以每个液滴包中心为中心,以影 响半径(R_{μ} 或 R_{μ})为半径形成每个油滴的影响区 域。以两个油滴中心连线的中心为球形,两个油滴 影响半径之和(R_{IS} + R_{II})为半径 R_{col} 形成两者的拉 格朗日碰撞网格。仅当两个油滴包之间的距离小于 拉格朗日碰撞网格半径才考虑两者之间的可能碰撞 过程。拉格朗日碰撞网格半径可以为固定值,也可 以根据碰撞油滴间的相对速度以及计算步长确定, 即 $R_{al} = u_{12}\Delta t$,但是后者将在碰撞过程的计算中引 入时间步长依赖性,故本文采用固定值作为碰撞网 格半径的大小。拉格朗日碰撞网格允许两个相邻且 不处于相同 CFD 计算单元中的两个油滴发生碰撞。 为了获得与 CFD 单元无关的碰撞计算条件. Nordin^[18]建议仅当两个油滴轨迹交叉且在同一个时 间步长内到达交叉点才考虑两个油滴间的碰撞过 程。但是对计算域内所有油滴都进行此碰撞条件检 测,则计算量较大。为了减低碰撞计算过程的网格 依赖性,本文将两个油滴发生碰撞的条件定义为: ①两个油滴包之间的距离小于拉格朗日碰撞网格半 径。②两个油滴做相向运动,即

$$\begin{cases} \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \leq R_{col} \\ (U_1 - U_2) \frac{x_2 - x_1}{|x_2 - x_1|} < 0 \end{cases}$$
(17)

复合碰撞模型在喷雾中的应用 4

修正的碰撞分区模型、碰撞二次破碎模型以及 拉格朗日碰撞网格组成了复合碰撞模型。基于复合 碰撞模型,本文重点分析油滴粘度与环境压力对喷 雾碰撞的影响。为了单独比较碰撞模型,关闭破碎 以及蒸发模型,采用 KIVA 提供的 χ^2 函数确定初始 油滴直径,以及 Hiroyasu^[19]经验公式确定喷雾初始 SMR(索特半径)。表2给出了碰撞模型验证过程 中所采用的计算条件,其数据来自文献[20]。

表 2 碰撞模型验证中的喷雾条件以及环境条件

[a]	b. 2	Simu	lation	condition	for	spray	collision	process
-----	-------------	------	--------	-----------	-----	-------	-----------	---------

参数	数值	参数	数值
喷孔直径/mm	0. 259	喷雾锥角/(°)	20
喷孔长度/mm	0. 755	SMR∕µm	10
喷油质量/mg	29.5	环境气体	空气
喷油持续期/ms	2. 91	环境压力/MPa	1.65
喷油压力/MPa	96.5	环境温度/K	293

(1)环境压力对喷雾碰撞的影响

为了分析环境压力对碰撞过程的影响,在定容 室(长×宽×高为6 cm×6 cm×15 cm)中分别进行 环境背压为 1.65、3.0 MPa 的计算,3 个方向的单元 数量分别为40×40×99,喷雾计算条件见表2。随 着环境压力的增加,环境气体密度增加,油滴运动过 程中遇到的阻力增加,喷雾贯穿度明显下降,如图6 所示。图7给出了环境压力对喷雾 SMR 的影响,结 果表明随着环境压力的增加,喷雾 SMR 也明显增 加。这也从另外一个角度说明喷雾贯穿度依赖于环



图 6 环境压力对喷雾贯穿度的影响

Fig. 6 Influence of environmental pressure on penetration



Fig. 7 Influence of environmental pressure on spray SMR

境压力的程度大于喷雾 SMR。

两个油滴在碰撞聚合之前,油滴之间滞留一层 气体。在两个油滴相互靠近的过程中,油滴之间的 气体层压力增加而阻止油滴进一步靠近。如果油滴 的动能不足以使油滴到达聚合的临界距离,则出现 油滴碰撞反弹。当增加环境压力,碰撞过程中油滴 排挤两者之间的气体层所需要的动能增加,故油滴 碰撞聚合将变得更加困难。图8给出了环境压力对 碰撞分区的影响,结果表明随着环境压力增加,碰撞 聚合比例下降,而反弹、反射分离以及拉伸分离比例 上升,尤其是反弹比例增加明显。



由于环境压力增加,喷雾贯穿度下降,喷雾油滴 更加密集,使得单元内油滴数密度增加。单元内油 滴数密度的增加使得更多油滴包满足复合碰撞模型 的碰撞必要条件(油滴间距离小于碰撞网格半径), 发生碰撞的油滴数量也明显增加,碰撞聚合的累计 次数也显著增加,如图9所示。在环境压力的增加 过程中,虽然碰撞聚合的比例下降,但是碰撞总次数 显著增加,使得碰撞聚合累计次数明显增加,导致了 图7中出现的喷雾 SMR 增加。故复合碰撞模型中 由于分区准则考虑了环境条件的影响,使得碰撞模 型能有效地考虑不同环境条件下的碰撞过程特性, 能有效地捕捉随着环境压力增加,碰撞反弹比例增 加而聚合比例下降这一物理现象。



(2)燃油粘度对喷雾碰撞过程的影响

不同的碳氢燃料,物性不同使得其对应的碰撞 分区特性也不同。表1给出了柴油以及乙醇物性参 数的比较,可知乙醇粘度为柴油的37%。图5b给 出了柴油油滴与乙醇油滴二元碰撞分区的比较结 果。由于乙醇粘度的减小,拉伸分离线以及反射分 离线均朝着低韦伯数移动而对反弹线影响不明显, 使得乙醇碰撞聚合的几率下降而碰撞拉伸分离以及 反射分离的机会增加。继续采用表2中给出的喷雾 计算条件,对乙醇以及柴油进行定容燃烧室的自由 喷雾模拟计算。

图 10 给出了乙醇油滴与柴油油滴在喷雾发展 过程中各个碰撞分区所占比例的比较结果。结果也 再次表明由于乙醇粘度低于柴油,使得碰撞聚合几



图 10 乙醇油滴与柴油油滴碰撞分区结果比较 Fig. 10 Comparison results of collision regimes

率明显下降,而反射分离以及拉伸分离比例显著增加。图 11 给出了乙醇油滴与柴油油滴在喷雾发展过程中各个碰撞分区累计次数的比较结果。相对于柴油,乙醇油滴碰撞聚合的累计次数下降,拉伸分离、反射分离以及反弹的累计次数均增加。由于乙醇碰撞聚合的次数明显下降,使得喷雾 SMR 增长相对平缓,导致乙醇喷雾所对应的 SMR 要明显小于柴油喷雾所对应的 SMR,如图 12 所示。





Fig. 11 Comparison results of collision times



Fig. 12 Comparison results of spray SMR

图 13 给出了乙醇与柴油喷雾 SMR 比较结果。 在喷雾的外围都出现直径较大的油滴,而由于柴油 碰撞聚合程度增加,在喷雾前端出现更多的大油滴。 同时由于柴油喷雾平均直径更大,在相同的环境背 压下,柴油喷雾贯穿度也要略大于乙醇喷雾。在此 复合模型中由于碰撞分区准则较好地考虑了燃油物 性参数的影响,使得其更好地反映不同种类燃油的 碰撞特性。



5 结论

(1)原始碰撞分区模型没有考虑燃油物性以及 环境条件的影响而低估了碰撞反弹临界韦伯数、反 射分离临界韦伯数以及拉伸分离临界韦伯数,而复 合碰撞模型根据燃油物性以及环境参数对碰撞分区 进行了修正,提高了碰撞分区与实验结果的吻合程 度。

(2)复合碰撞模型由于分区准则中考虑了燃油物性以及环境条件的影响,使其更好地反映出不同环境条件以及燃油物性下碰撞过程的特性。随着环境压力的增加,油滴碰撞反弹几率增加而聚合几率下降,但是喷雾贯穿度下降,喷雾更加密集,碰撞聚合的累计次数增加,喷雾 SMR 增加;随着燃油粘度的增加,碰撞聚合的几率增加而碰撞分离的几率下降,喷雾 SMR 增加。

- 参考文献
- 1 O'Rourke P, Bracco F. Modeling of drop interactions in thick sprays and a comparison with experiments [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1980, 9:101 ~106.
- 2 Gavaises M, Theodorakakos A, Bergeles G, et al. Evaluation of the effect of droplet collisions on the spray mixing[J]. Proc. Instn. Mech. Engrs., Part C, 1996,210(5):465~475.
- 3 Estrade J P, Carentz H, Lavergne G, el at. Experimental investigation of dynamic binary collision of ethanol droplets—a model for droplet coalescence and bouncing[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1999, 20:486 ~491.
- 4 Brazier-Smith P R, Jennings S G, Latham J. The interaction of falling water droplets: coalescence [J]. Proceedings of the Royal Society of London A, 1972, 326:393 ~ 408.
- 5 Ashgriz N, Poo J Y. Coalescence and separation in binary collisions of liquid drops[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1990, 221:183 ~ 204.
- 6 Jiang Y, Umemura A, Law C K. An experiment investigation on the collision behavior of hydrocarbon droplets [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1992, 234:171 ~290.

7

理。进一步对流场的研究将可以结合分析得到水力 基础。 机械空蚀磨损破坏的机理,为解决工程问题打下

参考文献

- 段生孝. 我国水轮机空蚀磨损破坏状况与对策[J]. 大电机技术,2001(6):56~64.
 Duan S X. The cavitation and abrasion damage condition of hydraulic turbine and countermeasures in China[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2001(6):56~64. (in Chinese)
- 2 Dular M, Bachert B, Stoffel B, et al. Relationship between cavitation structure and cavitation damage [J]. Wear, 2004, 257(11):1176~1184.
- 3 Dular M, Stoffel B, Širok B. Development of a cavitation erosion model [J]. Wear, 2006, 261(5~6):642~655.
- 4 Sato J, Usami K, Okamura T, et al. Basic study of coupled damage caused by silt abrasion and cavitation erosion [J]. JSME International Journal: A,1991,57(539):20 ~ 25.
- 5 服部修次,原田健司,杉山宪一. スラリー摩耗の衝突角度依存性に関する簡易予測法[J]. ターボ機械,2005, 33(7):443~451.
- 6 Toshima M, Okamura T, Satoh J, et al. Basic study of coupled damage caused by silt abrasion and cavitation erosion [J]. JSME International Journal; B, 1991, 57(539); 20 ~ 25.
- 7 Borkent B M, Arora M, Ohl C D, et al. The acceleration of solid particles subjected to cavitation nucleation [J]. J. Fluid Mech., 2008, 610:157 ~ 182.
- 8 倪汉根,何子干. 空泡溃灭冲击波对流场携带颗粒的作用[J]. 大连理工大学学报,1994,34(6):727~731.
- 9 Li Shengcai. Cavitation enhancement of silt erosion—an envisaged micro model [J]. Wear, 2005, 260(9~10):1 145~ 1 150.
- 10 陈丰,陈次昌,张涛. 空蚀磨损试验装置及其数据处理系统[J]. 农业机械学报,2007,38(8):93~96.
 Chen F, Chen C C, Zhang T. Experimental system of wear-cavitation and system of data real-time disposal[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(8):93~96. (in Chinese)

(上接第7页)

- 7 Qian J, Law C K. Regimes of coalescence and separation in droplet collision [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1997, 331: 59 ~ 80.
- 8 Chen R. Diesel-diesel and diesel-ethanol drop collisions [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(2~3): 604~610.
- 9 Cecilie G, Pavel H, Hugo A. Effect of viscosity on droplet-droplet collision outcome: experimental study and numerical comparison [J]. Physics of Fluids, 2007, 19(10):1 021 061 ~ 10 210 617.
- 10 Brenn G. The formation of satellite droplets by unstable binary drop collisions [J]. Physics of Fluids, 2001, 13:2463 ~ 2477.
- 11 Brenn G, Kolobaric V. Satellite droplet formation by unstable binary drop collisions[J]. Physics of Fluids, 2006, 18(8): 0871011 ~ 08710118.
- 12 Pan Y, Suga K. Numerical simulation of binary liquid droplet collision [J]. Physics of Fluids, 2005, 17(8): 0821051 ~ 08210514.
- 13 Ko G H, Ryou H S. Droplet collision processes in an inter-spray impingement system [J]. Journal of Aerosol Science, 2005, 36(11):1 300 ~ 1 321.
- 14 Ko G H, Ryou H S. Modeling of droplet collision-induced breakup process [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2005, 31(6):723 ~738.
- 15 Munnannur A. Droplet collision modeling in multi-dimensional engine spray computations [D]. Madison: University of Wisconsin, 2007.
- 16 Schmidt D P, Rutland C J. A new droplet collision algorithm [J]. J. Comput. Phys., 2000, 164(1):62 ~ 80.
- 17 Schmidt D P, Rutland C J. Reducing grid dependency in droplet collision modeling [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 126(2):227 ~233.
- 18 Nordin N. A mesh independent collision condition for Lagrangian sprays [D]. Gothenburg, SE: Chalmers University of Technology, 2000.
- 19 Hiroyasu H, Arai M. Structures of fuel sprays in diesel engines [C]. SAE Paper 900475, 1990.
- 20 Su T F. An experimental study of high injection pressure diesel sprays[D]. Madison: University of Wisconsin, 2005.