

文章编号:1000-8055(2011)09-1964-06

喷雾仿真中的网格依赖性

成传松, 李云清, 王艳华, 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: 基于离散油滴模型, 比较了原始喷雾模型与修正喷雾模型的网格依赖性. 计算结果表明: 原始喷雾模型由于采用 O'Rourke 碰撞模型以及最近节点法耦合算法, 使得预测结果出现明显的网格依赖性. 相反, 修正喷雾模型采用独立的拉格朗日碰撞单元降低碰撞过程的网格依赖性, 联合使用拉格朗日插值算法以及气相射流模型降低气液耦合过程对于网格的依赖性. 因此修正喷雾模型能获得较好的低网格依赖性从而保证粗大网格下的计算精度.

关 键 词: 喷雾模拟; 碰撞模型; 动量耦合; 气相射流模型; 网格依赖性
中图分类号: TK421 **文献标志码:** A

Investigation of the grid dependency from the spray simulation

CHENG Chuan-song, LI Yun-qing, WANG Yan-hua, ZHAO Li-feng

(School of Transportation Science and Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on the discrete droplet model, the grid dependencies of the original spray model and revised spray model were compared. The results show that the apparent grid dependency exists in the simulated results with original spray model due to the application of O'Rourke collision model and momentum coupling algorithm with nearest node. However, the separate Lagrangian collision mesh is utilized to reduce the mesh dependency from the collision prediction, and the Lagrangian interpolation coupling algorithm and the gas-jet model are combined to cut down the mesh dependency from the momentum coupling calculation. Therefore, the revised spray model successfully achieves significant lower grid dependency so that the simulated accuracy of coarse grid is improved.

Key words: spray simulation; collision model; momentum coupling; gas jet model; grid dependency

对于柴油燃烧, Hiroyasu 等^[1]将其热力循环关键过程归结为燃油喷射雾化—进气—燃烧室三者之间的匹配过程. 对于燃油系统, 影响因素包括喷油压力、喷油时刻、喷油量、喷孔数量、喷孔直径、喷雾锥角以及喷孔安装高度等; 对于进气系统, 影响因素包括进气温度、压力以及进气涡流强度等; 对于燃烧室, 影响因素通常包括缸径、径深比、缩口比等. 所以在发动机燃烧排放优化过程

中, 涉及多参数多水平的组合, 此过程计算负荷巨大, 虽然现在计算机的计算能力增长迅速, 但是要全面地考虑关键因素的影响还是相对困难. 对于燃烧喷雾仿真计算, 计算量随着网格数量的增加而迅速增加. 因此若能采用粗大的计算网格, 就能极大地减少计算时间. 故如何保证粗大网格下的计算精度, 即喷雾计算的低数值依赖性研究意义重大.

收稿日期: 2010-09-01; 修订日期: 2010-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(50376003)

作者简介: 成传松(1983—), 男, 江西九江人, 博士生, 主要从事燃烧喷雾模拟、燃烧系统优化等方面研究.

对于喷雾两相流动问题,可以采用拉格朗日油滴-欧拉气体(LDEF方法)和欧拉油滴-欧拉气体(多流体方法).在多流体方法中需要同时求解油滴液体以及气体的N-S(Navier-Stokes)守恒控制方程,还需要采用VOF(volume of fluid)或者level set等方法去追踪油滴的界面.不管是LDEF方法还是多流体方法都存在计算精度依赖于网格尺度的问题.对于多流体方法,需要采用足够细的网格保证油滴界面识别精度;对于LDEF方法,同样需要采用足够细的网格保证气液耦合精度.由于多流体方法计算量更大,在实际的应用中更偏向于LDEF方法.商用软件FIRE, TAR-CD以及FLUENT等均无一例外地采用LDEF方法.因此本文借助于开源代码KIVA-3V重点讨论LDEF框架下喷雾两相流仿真中的网格依赖性.

1 碰撞模型的修正

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(computational fluid dynamical)气相单元中,称作“欧拉碰撞网格”.这就使得喷雾碰撞概率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,有必要采用独立的碰撞网格. Schmidt等^[2-3]提出的NTC(no-time-counter)碰撞模型也采用独立碰撞网格,但是其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.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_{is} 或 R_{il})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($R_{is} + R_{il}$)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时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 $R_{col} = u_{12} \Delta t$,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^[4]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.但是如果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.为了降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

$$\begin{cases} |\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1| \leq R_{col} \\ (\mathbf{U}_1 - \mathbf{U}_2) \cdot \frac{\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1}{|\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1|} < 0 \end{cases} \quad (1)$$

Qian等^[5]指出油滴二元碰撞过程中将依次出现小变形聚合、反弹、大变形聚合、反射分离以及拉伸分离五种碰撞结果. Ashgriz等^[6]对水滴的二元碰撞试验以及Brenn等^[7-8]对丙醇油滴的二元碰撞试验结果都表明在高韦伯数下出现非稳态碰撞过程,即出现碰撞二次破碎过程而生成新的卫星油滴. O'Rourke碰撞模型仅仅考虑碰撞聚合以及拉伸分离,忽略高韦伯数下的碰撞二次破碎过程.相反,在复合碰撞模型中除了采用拉格朗日独立碰撞网格之外,同时考虑反弹、聚合、反射分离以及拉伸分离,而且借助于分离动能、表面能以及耗散能之间的平衡确定是否出现碰撞二次破碎与破碎比例.

图1与图2分别给出了复合碰撞模型与O'Rourke碰撞模型在奇数与偶数单元下的喷雾索太尔平均半径(SMR)计算结果.复合碰撞模型在奇数或者偶数单元下的喷雾SMR具有较好的一致性,但是O'Rourke碰撞模型在奇数单元下的喷雾SMR要显著地大于偶数单元下的喷雾SMR.当单元数在奇数与偶数间变化时, O'Rourke碰撞模型下碰撞聚合累计次数显著变化.在奇数单元中,喷雾轴线位于单元中心,处于同一单元中的油滴数密度显著增加,碰撞聚合数

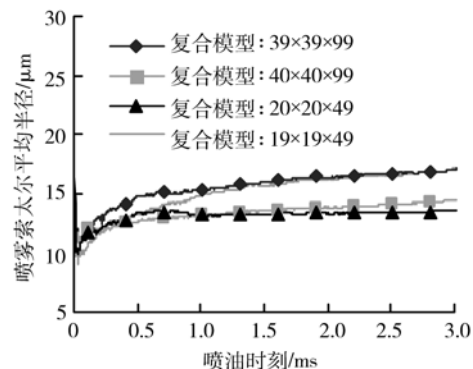


图1 复合碰撞模型下的喷雾索太尔平均半径

Fig. 1 Spray SMR with composite collision model

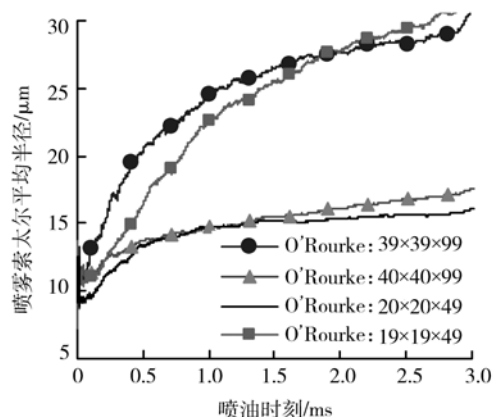


图2 O'Rourke碰撞模型下的喷雾索太尔平均半径
Fig. 2 Spray SMR with O'Rourke collision model

量剧增,导致喷雾 SMR 急剧增加;而在偶数单元中,喷雾轴向位于单元边线,喷雾轴线位置的单元边线将油滴分成四组(左右前后),极大地降低了同一单元中的液滴包数量,使得满足 O'Rourke 碰撞模型所对应的碰撞必要条件的液滴包数量下降,发生碰撞聚合的数量也显著地下降,此时喷雾 SMR 增长平缓.复合碰撞模型采用拉格朗日独立碰撞网格允许两个相邻而处于不同气相单元的液滴包之间发生碰撞,这就降低了奇数单元与偶数单元之间喷雾计算结果的差别.

2 气液耦合过程的修正

在 DDM(discrete droplet model)喷雾模型中,准确的气液耦合关系包括液相→气相和气相→液相两个方面^[9].在气相守恒方程中加入喷雾油滴对应的作用源项而考虑液相对气相的影响,此时需要准确计算喷雾油滴的源项大小以及源项在空间位置上的合理分布;同时气相对喷雾油滴的运动阻力出现在喷雾油滴的动量守恒方程中,故在计算油滴阻力时需要提供油滴空间位置处准确的气相参数.在 KIVA 程序喷雾模型中,喷雾油滴所在空间位置的气相参数取为动量单元所对应节点的参数,计算得到的气相源项均匀地分布于油滴所在单元或者动量单元中,这种气液耦合算法称为最近节点法.最近节点法的空间精度仅仅只有零阶.为了达到一定的计算精度要求,需要采用非常细的网格.反过来说,最近节点耦合法的精度依赖于计算的网格尺度,这势必造成喷雾计算过程中的网格依赖性.

2.1 拉格朗日插值算法

油滴处于某一气相单元中,其空间位置处的

气相参数同单元所有节点相关联,故应该充分利用所有节点处的气相信息.当采用较粗的计算网格时,此时单元中不同节点间的速度梯度明显,如果联合使用单元中各个节点的气相信息就能更准确地获得油滴空间位置处的气相参数,在一定程度上降低气液耦合的网格依赖性.Nordin^[4]提出了距离加权平均的插值算法;徐海涛等^[10]提出了三维线性插值算法;文华^[9]提出了速度梯度耦合算法.本文中采用拉格朗日插值算法计算气液耦合过程.

在气相守恒控制方程中加入对应的质量、动量以及能量源项后,隐式求解气相守恒方程,得到 B 阶段的气相速度.同时根据新求解的气相速度求解油滴动量守恒方程,得到油滴 B 阶段的新速度,即

$$v_p^B = \frac{v_p' + \Delta t D_p u_p'}{1 + \Delta t D_p} + \frac{\Delta t D_p}{1 + \Delta t D_p} u_{ijk}^B \quad (2)$$

在最近节点法中,油滴对气相单元的源项 S'_{ijk} 和 R'_{ijk} 全部加至油滴动量单元所对应节点上,而在拉格朗日插值气液耦合算法中则根据包含油滴的气相单元中八个节点的拉格朗日插值权重 $\hat{L}_\beta$ 分配气液耦合源项 S'_{ijk} 和 R'_{ijk} 至单元的八个节点上.在计算油滴 B 阶段速度时,最近节点法采用油滴动量单元所对应的节点速度;而在拉格朗日插值气液耦合算法中,首先插值得到油滴空间位置处的气相速度

$$u_g^B = \sum_{k=1}^8 \hat{L}_k(r, s, t) u_k^B \quad (3)$$

其中拉格朗日插值基函数

$$\hat{L}_\beta = \frac{1}{8}(1 + rr_\beta)(1 + ss_\beta)(1 + tt_\beta), \quad \beta = 1 \sim 8 \quad (4)$$

则拉格朗日插值气液耦合算法下,油滴 B 阶段的速度为

$$v_p^B = \frac{v_p' + \Delta t D_p u_p'}{1 + \Delta t D_p} + \frac{\Delta t D_p}{1 + \Delta t D_p} u_g^B \quad (5)$$

图3与图4分别给出了两套网格下拉格朗日插值与最近节点法在气液耦合过程中应用所得到的喷雾形态俯视图.在最近节点法中,若采用奇数单元的直角网格,喷嘴位于网格中心单元的中心,距离喷雾轴线最近的四个节点的速度方向与坐标系成交错 45° ,油滴就基本沿着这个方向运动,使得喷雾出现“苜蓿叶”状;若采用圆柱网格,径向的气相速度与径向网格的方向一致,处于气相单元中的油滴所受到的气相作用力也同径向网格方向一致,所以油滴都沿着径向网格线运动而使得喷

雾呈现“花瓣”状. 因此在最近节点法下, 气液耦合过程严重地依赖于所采用网格. 相反, 在拉格朗日插值气液耦合过程中, 综合了油滴所处单元中所有节点的信息, 使得在不同网格形状下计算的喷雾形态都比较一致, 油滴在周向均匀分布, 因此说明其可以在一定程度上降低喷雾计算的网格依赖性.

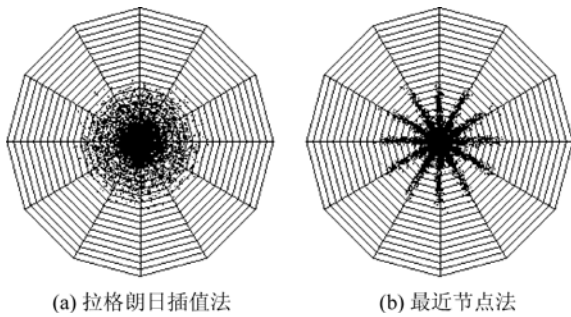


图3 圆柱网格坐标下气液耦合算法差别
Fig. 3 Different coupling algorithms with cylinder grid

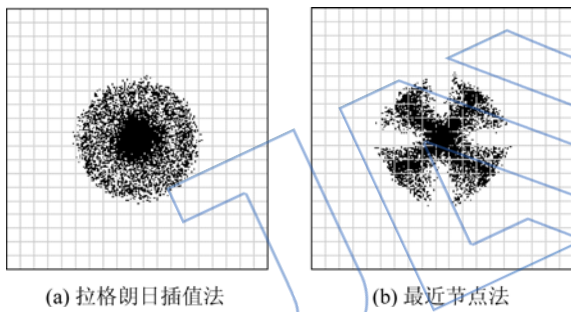


图4 直角坐标网格下气液耦合算法的差别
Fig. 4 Different coupling algorithms with cube grid

2.2 气相射流模型

喷雾流动由所有油滴构成的液相以及夹带气体组成, 而夹带气体的速度通过气相射流理论确定, 从而确定气液相对速度. 根据射流动量守恒以及速度型线自相似性, 得到射流轴向速度大小为^[11-12]

$$V_{ax,jet} = \frac{3U_{inj}^2 d_{eq}^2}{32\nu_z \left[1 + \frac{3U_{inj}^2 d_{eq}^2 r^2}{256\nu_z^2 z^2} \right]^2} \quad (6)$$

式中 U_{inj} 为液相射流的有效喷射速度, 同时假设 U_{inj} 为气相射流的喷射速度; z 为液滴包到喷嘴的轴线距离; r 为液滴包到喷雾轴线的径向距离; d_{eq} 为气相射流的当量直径; ν_z 为射流的湍流黏度.

在不进行气相射流修正时, CFD 求解的气相

速度可以直接用来计算气液相对速度. 对气相速度沿着喷雾轴线方向以及垂直于喷雾轴线方向进行速度分解, 使得 $u_{fld} = (u_x, u_y, u_z)$, 则 u_x 与 u_y 为垂直于喷雾轴线方向的两个速度分量, 而 u_z 为喷雾轴线方向的速度分量. 根据气相射流确定的喷雾轴向射流速度去修正气相轴向速度分量 u_z , 则修正后的速度分量 $\tilde{u}_z$ 为

$$\tilde{u}_z = \min \left[U_{inj}, \frac{3U_{inj}^2 d_{eq}^2}{32\nu_z \left[1 + \frac{3U_{inj}^2 d_{eq}^2 r^2}{256\nu_z^2 z^2} \right]^2} \right] \quad (7)$$

3 网格依赖性比较

由 O'Rourke, KH-RT (Kelvin-Helmholtz Rayleigh-Taylor) 破碎模型以及最近节点法组成原始喷雾模型; 而由复合碰撞模型、KH-RT 破碎模型、拉格朗日插值算法与气相射流模型组成修正喷雾模型. 下面将比较两者的网格依赖性, 其中试验条件与试验结果来自文献[13].

图5与图6分别给出了原始喷雾模型下网格

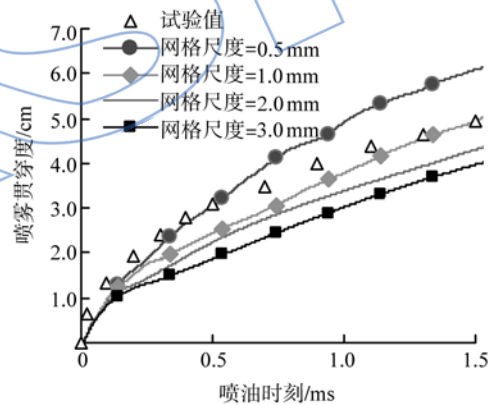


图5 原始喷雾模型下网格尺度对贯穿度的影响
Fig. 5 Influence of grid size on spray penetration with original model

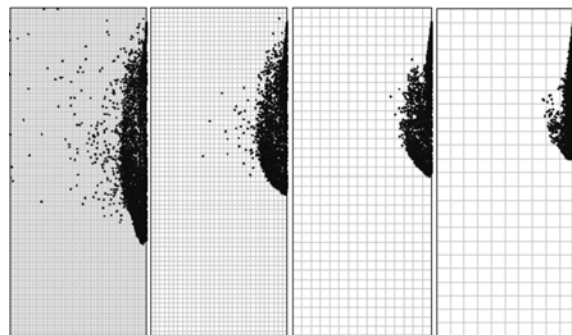


图6 原始喷雾模型下喷雾形态(1.0 ms)
Fig. 6 Spray structure with original model (1.0 ms)

尺度对喷雾贯穿度与形态的影响. 在粗网格下, 喷雾贯穿度被明显低估; 相反, 在细网格尺度下, 喷雾贯穿度被明显高估. 采用细网格, 则碰撞单元被限制在较小的 CFD 计算单元中, 此时破碎产生的较小油滴就不会碰撞聚合在一起. 在喷嘴附近由于速度梯度大, 破碎相对较快, 容易产生较多的小油滴, 其动量基本等于喷雾射流动量. 这些小油滴遭遇较大的空气阻力而在离喷嘴不远的区域内损失全部动量. 这就使得喷嘴附近存在较高的气相动量, 导致后面喷射的油滴贯穿度过大. 因此在细网格下, 由于碰撞模型失效使得气相动量或者空气夹带率被高估. 对于较粗的计算网格, 液体油滴所损失的动量均传递至整个较粗的 CFD 气相单元, 而实际上气相单元的体积远大于油滴动量的实际影响体积, 即油滴加速气相的质量被高估而低估了气相速度. 因此油滴空间位置处的气相速度被低估, 油滴遭遇气相的阻力被高估, 导致了最终的喷雾贯穿度较小.

图7与图8分别给出了修正喷雾模型下网格尺度对喷雾贯穿度与形态的影响. 计算结果表明修正模型下的网格依赖性明显下降, 在网格尺度从0.5 mm增加至3.0 mm的过程中, 喷雾轴向贯穿度基本一致, 整个喷雾的形态也基本一致. 需要说明的是气相射流修正仅仅是针对喷雾的轴线方向, 而径向没有进行修正, 因此喷雾径向还是存在一定的差别. 在细网格尺度下, 喷雾沿径向发展遇到的空气阻力相对较小, 因此破碎形成的小油滴在喷雾外围比较大范围内扩散. 但是在粗网格下, 就基本没有小油滴在径向扩散. 由于喷雾轴向是喷雾的主要发展方向, 尤其是在蒸发喷雾中, 即使在细网格下也不会出现小油滴在喷雾径向扩散范

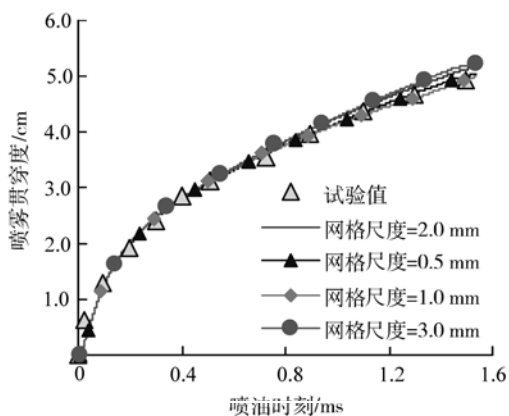


图7 修正喷雾模型下网格尺度对贯穿度的影响
Fig. 7 Influence of grid size on spray penetration with revised model

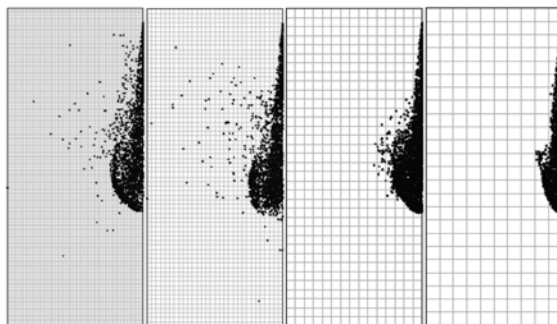


图8 修正喷雾模型下的喷雾形态(1.0 ms)
Fig. 8 Spray structure with revised model (1.0 ms)

围较广的现象, 因此对喷雾轴向分量进行气相射流修正, 其降低喷雾计算网格依赖性的效果还是非常明显的.

4 结 论

通过上述分析可以得出如下结论:

1) O'Rourke 碰撞模型中油滴发生碰撞的必要条件是两个油滴处于同一气相单元中, 使得碰撞概率依赖于气相单元尺度, 同时由于限制了处于不同单元的相邻油滴间的碰撞过程, 使得奇数与偶数单元下的碰撞过程出现显著差别, 喷雾索太尔平均半径差别极大, 相反, 在复合碰撞模型中, 采用拉格朗日独立碰撞单元, 降低了碰撞计算过程对于气相单元的依赖性.

2) 原始喷雾模型由于碰撞模型中把 CFD 气相单元作为碰撞单元使得碰撞过程计算结果依赖于计算网格大小, 在气液耦合过程中采用最近节点法使得气液耦合精度严重地依赖于计算网格的精度, 从而导致了最终计算结果出现明显的网格依赖性. 粗大网格尺度下, 喷雾贯穿度明显被低估.

3) 在修正喷雾模型中采用拉格朗日插值替代最近节点气液耦合方式, 同时使用气相射流模型对喷雾轴向的气液相对速度进行修正, 从而降低了气液耦合过程对网格精度的依赖性. 采用复合碰撞模型替代原始的 O'Rourke 碰撞模型, 降低了碰撞过程对于网格的依赖性. 结果表明修正喷雾模型相对原始喷雾模型能明显降低网格依赖性.

参考文献:

- [1] Hiroyasu H, Arai M. Structures of fuel sprays in diesel engines[R]. SAE Paper 900475, 1990.
- [2] Schmidt D P, Rutland C J. A new droplet collision algorithm[J]. J. Comput. Phys., 2000, 164(1): 62-80.
- [3] 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.
- [4] Nordin P A. Complex chemistry modeling of diesel spray combustion[D]. Goteborg: Chalmers University of Technology, 2001.
- [5] Qian J, Law K. Regimes of coalescence and separation in droplet collision[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1997, 331(1): 59-80.
- [6] Ashgriz N, Poo J Y. Coalescence and separation in binary collisions of liquid drops[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1990, 221(1): 183-204.
- [7] Brenn G, Valkouska D, Danov K D. The formation of satellite droplets by unstable binary drop collisions[J]. Physics of Fluids, 2001, 13(9): 2463-2477.
- [8] Brenn G, Kolobaric V. Satellite droplet formation by unstable binary drop collisions[J]. Physics of Fluids, 2006, 18(8): 0871011-08710118.
- [9] 文华. 基于 CFD 的柴油机喷雾混合过程的多维数值模拟[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- WEN Hua. Multi-dimensional numerical modeling of spray mixing process in diesel engines based on CFD[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004. (in Chinese)
- [10] 徐海涛, 刘永长, 贺萍. 对 KIVA 程序中气液耦合算法的修正[J]. 内燃机学报, 1998, 16(2): 203-207.
- XU Haitao, LIU Yongchang, HE Ping. A correction to the gas-fluid coupling algorithm in KIVA code[J]. Transaction of CSICE, 1998, 16(2): 203-207. (in Chinese)
- [11] Abraham J. Entrainment characteristics of transient jets[J]. Numerical Heat Transfer, Part A, 1996, 30(4): 347-364.
- [12] Abani N, Munnannur A, Reitz R D. Reduction in numerical parameter dependencies in diesel spray models[J]. Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 2008, 130(3): 032809-032817.
- [13] Alfuso S, Allocca L, Auriemma M, et al. Analysis of a high pressure diesel spray at high pressure and temperature environment conditions [R]. SAE Paper 2005-01-1239, 2005.