

# 组喷孔喷雾雾化特性研究\*

成传松<sup>1</sup> 李云清<sup>2</sup> 王艳华<sup>2</sup> 赵立峰<sup>2</sup>

(1. 北京航空工程技术研究中心, 北京 100076; 2. 北京航空航天大学交通科学与工程学院, 北京 100191)

**【摘要】** 基于修正的喷雾模型,对组喷孔雾化特性进行了数值研究。计算结果表明平行组喷孔中喷孔直径减小所带来的微孔效应以及喷雾重叠区域的射流交互作用,使得其喷雾同单喷孔类似,均具有良好的轴对称性。平行组喷孔喷雾贯穿度略小于等截面单喷孔,而明显大于等直径单喷孔。随着喷孔间距以及夹角的增加,喷雾射流交互作用下降,组喷孔喷雾贯穿度下降,喷雾SMR(索特半径)下降,同时也逐渐失去轴对称性。相对于收缩型组喷孔,扩张型组喷孔失去轴对称性更快,喷雾贯穿度下降更多。

**关键词:** 组喷孔 雾化特性 碰撞模型 几何结构

**中图分类号:** TK421 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)07-0021-05

## Spray Atomization Characteristics of Group-hole Nozzle

Cheng Chuansong<sup>1</sup> Li Yunqing<sup>2</sup> Wang Yanhua<sup>2</sup> Zhao Lifeng<sup>2</sup>

(1. Beijing Aeronautical Technology Research Center, Beijing 100076, China

2. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

### Abstract

The atomization characteristics of group-hole nozzle were numerically investigated with the revised spray model. The results show that due to the compromise effect of micro-orifice from the reduction of nozzle diameter and jet interaction from the overlapping part of spray, the spray of parallel group-hole nozzle is similar to that of the single nozzle, both of which have good axial symmetry. However, the spray penetration of the parallel group-hole nozzle is slightly lower than that of single nozzle with the equivalent hole area, and is significantly larger than that of single nozzle with the same hole diameter. With the increase of the hole spacing and inclined angle, the jet interaction decreases, which results in the reduction of the spray penetration and SMR of the group-hole nozzle. Meanwhile, the spray axial symmetry of group-hole nozzle is finally lost. Compared to the converging group-hole nozzle, it is faster for the diverging group-hole nozzle to lose the spray axial symmetry and decrease the spray penetration.

**Key words** Group-hole nozzle, Atomization characteristics, Collision model, Geometry structure

### 引言

采用较小喷孔以及提高燃油喷射压力能有效地改善燃油雾化以及蒸发性能,从而降低发动机内的微粒排放<sup>[1]</sup>。但是随着喷孔直径的减小,喷雾贯穿度下降使得燃油的空间分布变差,燃油与空气混合过程变差<sup>[2]</sup>。在这种背景下,Nishijima等<sup>[3]</sup>提出采用组喷孔来控制发动机排放。相对于传统单喷孔,组喷孔由两个紧挨着的喷孔组成,它们或相互平行

或互成一定夹角从而在减小喷孔直径的同时而不明显降低喷雾的贯穿度。从两个紧密靠近的喷孔出来的喷雾有利于保持动量守恒从而促进喷雾贯穿度。Nishijima等<sup>[3]</sup>在一个带冷EGR(废气再循环)的3L柴油机中使用平行组喷孔实现预混燃烧,结果表明NO<sub>x</sub>(氮氧化物)与PM(微粒)排放同时明显减少。组喷孔中两束喷雾交互碰撞,属于同一喷油器不同喷孔间的碰撞喷雾,可以通过优化组喷孔的几何结构来匹配喷雾雾化特性。Gao等<sup>[4~5]</sup>对组喷孔喷雾

收稿日期: 2010-09-02 修回日期: 2010-10-26

\* 国家自然科学基金资助项目(50376003)

作者简介: 成传松,工程师,博士,主要从事发动机燃烧仿真研究,E-mail: cheng\_auto13@ae.buaa.edu.cn

进行了实验研究,但是组喷孔喷雾的模拟以及从数值计算角度研究组喷孔喷雾的雾化特性相对较少。本文借助于开放源代码 KIVA-3V,修正喷雾碰撞模型从而研究组喷孔雾化特性。

## 1 碰撞模型的修正

组喷孔喷雾中油滴的反复碰撞过程导致了油滴或者碰撞聚合形成大油滴或碰撞二次破碎形成小的卫星油滴。油滴二元碰撞过程出现的反弹、聚合、反射分离以及拉伸分离对喷雾油滴数量、大小、速度以及空间分布形态均有明显影响。因此,在各种燃油喷射过程中,都需要精确描述喷雾油滴的动态碰撞过程。相对于单喷孔的喷雾,组喷孔喷雾的碰撞过程模拟显得更加重要。

传统 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(计算流体)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。

为了降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<sup>[6]</sup>等提出的 NO-Time-Counter(NTC)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。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 $R_{col} = u_{12} \Delta t$ ,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<sup>[7]</sup>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。为了降低碰撞计算过程中对网格依赖性,本文将两个油滴发生碰撞的条件定义<sup>[8]</sup>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

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

Qian<sup>[9]</sup>等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等5种碰撞结果。Ashgriz等<sup>[10]</sup>对水滴的二元碰撞实验以及Brenn<sup>[11]</sup>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。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。

O'Rourke碰撞模型属于统计型碰撞模型,而复合碰撞模型接近于确定型碰撞模型。Kim<sup>[12]</sup>数值研究碰撞喷雾中指出在拉伸以及反射分离后,油滴速度沿着相对速度方向变化;而在反弹分离后,油滴速度沿着接触面法线方向变化。复合碰撞模型也采用类似于Kim的速度计算方法,从而使得碰撞模型能更加适合于组喷孔喷雾模拟。

## 2 组喷孔喷雾雾化特性

组喷孔几何结构如图1所示,其中组喷孔夹角为 $\theta$ ,喷孔间距为 $L$ 。在组喷孔中,两个紧靠的喷孔或平行或互成一定角度实现碰撞喷雾。组喷孔实现碰撞喷雾不需要增加喷油器数量,因此燃烧系统布置变得更加容易。

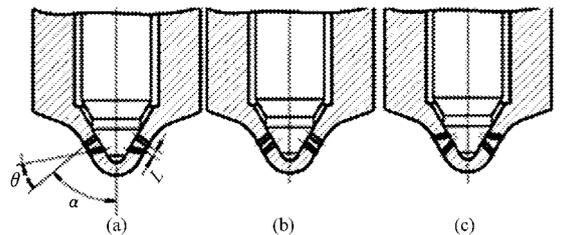


图1 不同组喷孔几何结构

Fig. 1 Structure of group-hole nozzle

(a) 收缩型组喷孔 (b) 平行组喷孔 (c) 扩张型组喷孔

### 2.1 单喷孔与组喷孔雾化特性比较

组喷孔由于两束紧挨着的喷雾相互之间的作用,使得其雾化特性有别于单喷孔。Park<sup>[13]</sup>采用博世长管法测量了组喷孔、等截面单喷孔以及等直径单喷孔的喷油规律,其结果表明在相同喷油脉宽以及喷油压力下,组喷孔喷油规律与等截面单喷孔差别甚小,而等直径单喷孔的喷油规律也与组喷孔相似,只是喷油规律的峰值下降至一半且喷油总量也

基本下降至组喷孔的一半。因此,在分析计算中,假设组喷孔、等截面单喷孔与等直径单喷孔喷油规律相似而等直径单喷孔的喷油量减半。

图2给出了组喷孔(两个喷孔直径为0.09 mm,喷孔间距为0.3 mm)、等截面单喷孔(喷孔直径为0.128 mm)以及等直径单喷孔(喷孔直径0.09 mm)喷雾形态比较结果。结果表明组喷孔喷雾贯穿度略小于等截面单喷孔,而等直径单喷孔喷雾贯穿度明显小于等截面单喷孔。Park<sup>[13]</sup>的实验结果表明平行组喷孔贯穿度小于等截面单喷孔,Gao<sup>[5]</sup>的实验结果也表明平行组喷孔贯穿度略小于等截面单喷孔而明显大于等直径单喷孔,因此文中所用喷雾模型能较好地模拟组喷孔喷雾间射流交互作用而保持贯穿度的过程。相对于等直径单喷孔,组喷孔由于两束喷雾之间的射流交互作用而有效地抑制了喷雾重叠区域内的气相夹带过程,使得喷雾更好地保持动量而促进了喷雾贯穿度。图中也可以看出平行组喷孔喷雾同单喷孔喷雾形态类似,此时垂直方向上的喷雾形态与平行方向的喷雾形态基本相同,从俯视图的喷雾形态也可以清晰地看到平行组喷孔喷雾同单喷孔一样具有良好的轴对称性。另外,组喷孔喷雾在径向的贯穿度也略大于单喷孔喷雾,因此喷雾宽度的增加使得喷雾能接触更多空气而有利于喷雾蒸发过程。

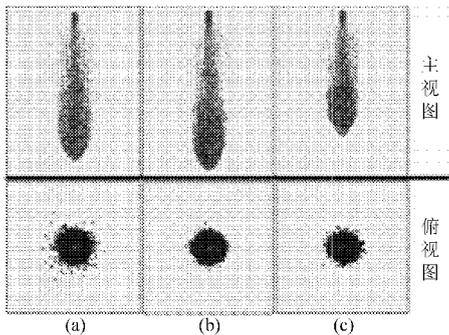


图2 不同类型喷孔下的喷雾形态比较

Fig. 2 Spray structure of different nozzles

(a) 平行组喷孔 (b) 等截面单喷孔 (c) 等直径单喷孔

一方面组喷孔中喷孔直径下降,使得喷雾 SMR 下降,油气接触面积增加,有利于燃油雾化与蒸发性能得到改善;另一方面组喷孔中由于喷雾射流间的相互作用使得更多油滴碰撞以及碰撞聚合,故组喷孔中的“微孔效应”与“射流交互作用”使得组喷孔喷雾与单喷孔喷雾形态类似。组喷孔能较好地保持喷雾轴向贯穿度而喷雾径向贯穿度要略大于单喷孔喷雾,因此相对于等截面单喷孔,组喷孔能采用较小的喷孔而保持喷雾贯穿度从而在一定程度上能改善燃油与空气的混合过程。Gao<sup>[4]</sup>也指出组喷孔燃油蒸汽浓度峰值更高,扩散程度更大可以反映出其促

进了油气混合过程。

## 2.2 组喷孔间距对雾化特性的影响

图3给出了平行组喷孔喷孔间距从0.3 mm 增加至1.5 mm 对组喷孔喷雾贯穿度的影响规律,从图中可以看出随着喷孔间距的增加,两束喷雾重叠区域减少,射流交互作用减弱,组喷孔保持射流动量的能力下降,喷雾贯穿度下降。Gao<sup>[4]</sup>实验研究了喷孔间距对喷雾贯穿度的影响,其结果也表明平行组喷孔随着喷孔间距的增加,喷雾贯穿度下降,因此文中仿真结果获得与实验一致的规律。

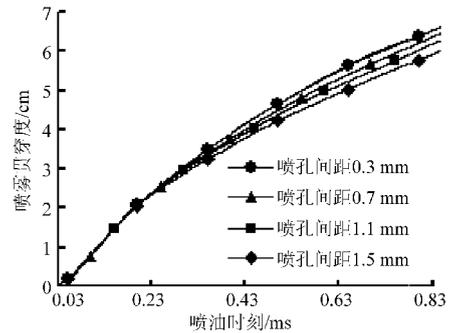


图3 喷孔间距对组喷孔喷雾贯穿度的影响

Fig. 3 Influence of hole-spacing on spray penetration

图4给出了喷孔间距对组喷孔喷雾 SMR(索特半径)的影响规律,从图中可以看出随着喷孔间距的增加,组喷孔喷雾 SMR 单调下降。在组喷孔中,由于两个喷孔相互紧挨着,两者的间距几乎接近于喷孔直径,因此来自组喷孔的两束喷雾之间的碰撞过程并不是简单地等同于两束独立喷雾之间的碰撞过程。组喷孔两束喷雾之间重叠区域的油滴碰撞过程,使得组喷孔喷雾的平均油滴半径要大于等直径单喷孔喷雾平均油滴半径。随着组喷孔间距的增加,喷雾重叠区域减少,单元内油滴数密度有下降趋势,故油滴碰撞以及碰撞聚合的程度下降,使得组喷孔喷雾的平均油滴半径下降。

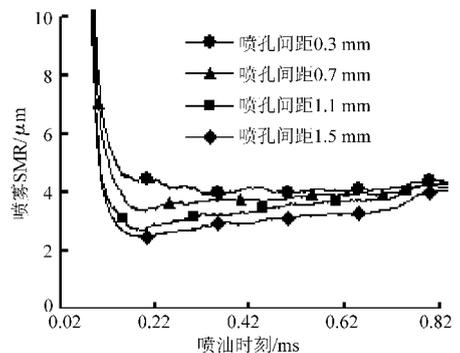


图4 喷孔间距对组喷孔喷雾 SMR 的影响

Fig. 4 Influence of hole-spacing on spray SMR

图5给出了喷孔间距对组喷孔喷雾形态的影响。从图中也可以看到随着喷孔间距增加,喷雾贯穿度下降的过程。随着喷孔间距增加,喷雾径向宽

度略有增加。由于几何空间的限制,喷孔间距并不能随意增加,同时组喷孔也是指两个紧挨着的喷孔会出现射流交互作用,因此组喷孔间距应小于单喷孔喷雾宽度。当喷孔间距从0.3 mm增加至1.5 mm的过程中,喷孔最大间距也仅仅为单喷孔喷雾宽度的10%左右,所以组喷孔喷雾还是呈现良好的轴对称性。如果进一步增加组喷孔间距,两股射流之间相互作用越来越弱,喷雾径向宽度增加,喷雾轴向贯穿度进一步下降,喷孔垂直方向与平行方向上的喷雾差异增加,组喷孔喷雾将失去轴对称性。

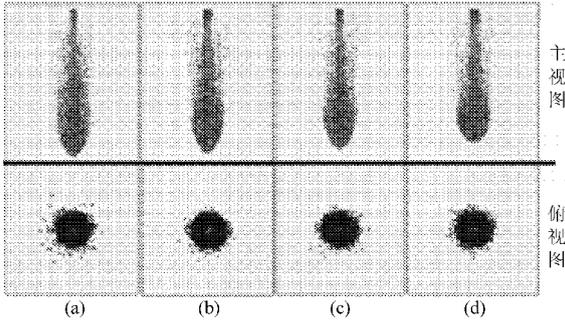


图5 喷孔间距对组喷孔喷雾形态的影响

Fig. 5 Influence of hole-spacing on spray structure  
(a) 0.3 mm (b) 0.7 mm (c) 1.1 mm (d) 1.5 mm

### 2.3 组喷孔夹角对雾化特性的影响

图6给出了喷孔夹角分别为 $0^\circ$  (平行组喷孔)、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 以及 $30^\circ$ 对扩张型组喷孔喷雾贯穿度的影响规律。计算结果表明随着喷孔夹角的增加,喷雾重叠区域减少,喷雾射流交互作用减弱,使得喷雾贯穿度下降。当喷孔夹角增至 $20^\circ$ 以后,扩张型组喷孔间的射流交互作用已经比较微弱,此时两束喷雾接近于独立发展,因此继续增加喷孔夹角,喷雾贯穿度下降程度较小。图7给出了喷孔夹角对扩张型组喷孔喷雾SMR的影响规律。可以看出随着喷孔夹角的增加,喷雾重叠区域减少,单元内油滴数密度下降,油滴碰撞以及碰撞聚合的程度明显下降,扩张型组喷孔喷雾SMR明显减小而有利于喷雾蒸发燃烧过程。

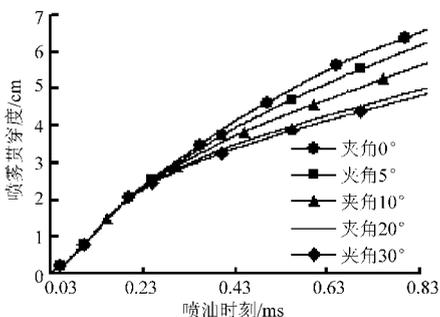


图6 喷孔夹角对扩张型组喷孔喷雾贯穿度的影响

Fig. 6 Influence of hole-angle on spray penetration

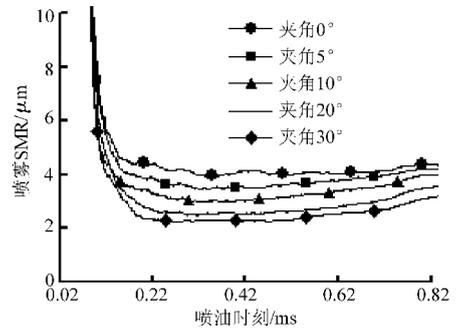


图7 喷孔夹角对扩张型组喷孔喷雾SMR的影响

Fig. 7 Influence of hole-angle on spray SMR

的影响。随着喷孔间距的增加,扩张型组喷孔喷雾轴向贯穿度明显下降,而喷雾径向贯穿度明显增加,喷雾在垂直于喷孔方向与平行喷孔方向差别越来越大。从图中可以看到,当喷孔夹角增加至 $10^\circ$ 以后,喷雾俯视结果已经呈现椭圆型,此时扩张型组喷孔喷雾已经失去轴对称性;当喷孔夹角增加至 $20^\circ$ 以后,已经能清晰地看到两束喷雾的分离,因此此时组喷孔喷雾射流交互作用已经明显下降而喷雾接近于单独发展。

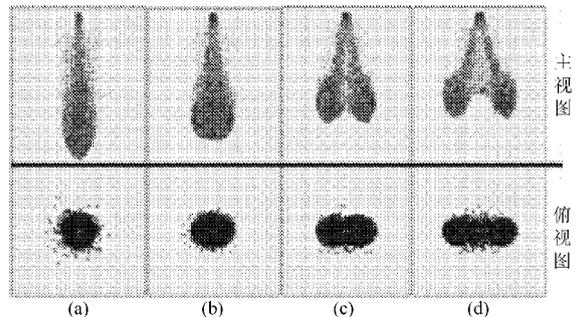


图8 喷孔夹角对扩张型组喷孔喷雾形态的影响

Fig. 8 Influence of hole-angle on spray structure  
(a)  $0^\circ$  (b)  $10^\circ$  (c)  $20^\circ$  (d)  $30^\circ$

从前面计算结果可以知道,平行组喷孔与单喷孔喷雾形态类似,此时垂直喷孔方向上的喷雾形态与平行喷孔方向的喷雾形态基本相同,喷雾具有良好的轴对称。对于所研究的扩张型组喷孔,当喷孔夹角增加至 $10^\circ$ ,喷雾基本失去轴对称性。图9给出了平行组喷孔、收缩型组喷孔以及扩张型组喷孔喷雾形态的差别,其中收缩型组喷孔与扩张型组喷孔中喷孔夹角均为 $10^\circ$ 。图中喷雾结果表明平行组喷孔喷雾贯穿度最大,收缩型组喷孔次之,而扩张型组喷孔喷雾贯穿度最小,但是收缩型组喷孔以及扩张型组喷孔喷雾的径向贯穿度都要大于平行组喷孔。因此对于相同夹角的组喷孔,收缩型组喷孔保持射流动量的能力要好于扩张型组喷孔。

### 3 结论

(1) 平行组喷孔在垂直于喷孔方向与平行于喷

图8给出了喷孔夹角对扩张型组喷孔喷雾形态

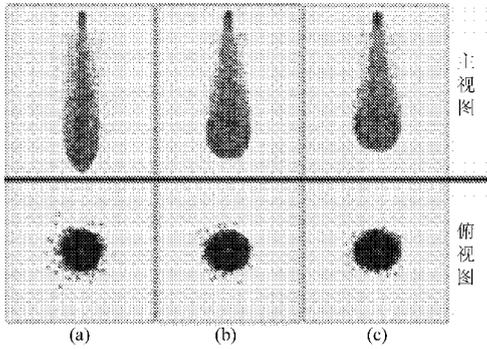


图9 不同组喷孔下的喷雾形态

Fig.9 Spray structure of different group-hole nozzles

(a) 平行型 (b) 收缩型 (c) 扩张型

孔方向的喷雾形态类似,具有和单喷孔一样的良好轴对称性。相对于等截面单喷孔,平行组喷孔喷雾的贯穿度略微下降,而相对于等直径单喷孔,平行组

喷孔由于喷雾射流交互作用使得喷雾具有良好的射流动量保持性而提高了喷雾的贯穿度。

(2)随着喷孔间距与夹角的增加,喷雾重叠区域减少,射流交互作用减弱,使得喷雾保持射流动量能力下降,喷雾贯穿度下降,同时单元内油滴数密度下降,油滴碰撞以及碰撞聚合程度下降,因此组喷孔喷雾 SMR 下降。当平行组喷孔间距增加至 10% 的单喷孔喷雾宽度时,喷雾具有良好的轴对称性。

(3)组喷孔并不能彻底解决喷雾雾化蒸发与喷雾贯穿度之间的矛盾,而是在一定程度上缓解了此矛盾,同时可以通过优化组喷孔几何结构参数(喷孔间距以及喷孔夹角)来匹配燃烧室几何以及进气流动从而为优化整个燃烧系统的性能提供更多的自由度。

#### 参 考 文 献

- 1 Hiroyasu H, Arai M. Structures of fuel sprays in diesel engines[C]. SAE Paper 900475, 1990.
- 2 Su T F, Farrell P V. Characterization of high-injection-pressure diesel sprays with relation to particulate and NO<sub>x</sub> emissions [J]. Atomization and Sprays, 1998, 8(1):83 ~ 107.
- 3 Nishijima Y, Mashida M, Sasaki S, et al. Successful approach to reduce emission by group holes nozzle[C]//Proceedings of 2005 JSAE Annual Congress, JSAE Paper 20055073, 2005.
- 4 Gao J, Matsumoto Y, Nishida K. Effects of group-hole nozzle specifications on fuel atomization and evaporation of direct injection diesel sprays [C]. SAE Paper 2007-01-1889, 2007.
- 5 Gao J, Matsumoto Y, Namba M, et al. Group-group-hole nozzle effects on mixture formation and in-cylinder combustion processes in direct-injection diesel engines [C]. SAE Paper 2007-01-4050, 2007.
- 6 Schmidt D P, Rutland C J. A new droplet collision algorithm[J]. Journal of Computational Physics, 2000, 164(1): 62 ~ 80.
- 7 Nordin N. Amesh independent collision condition for Lagrangian sprays [J]. Thermo and Fluid Dynamics, Chalmers University of Technology, 2000.
- 8 成传松,李云清,黎一锴,等. 燃油粘度与环境压力对喷雾碰撞过程的影响[J]. 农业机械学报, 2010,41(11):1 ~ 7. Cheng Chuansong, Li Yunqing, Li Yikai, et al. Investigation of the influences of droplet viscosity and environmental pressure on the spray collision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(11):1 ~ 7. (in Chinese)
- 9 Qian J, Law C K. Regimes of coalescence and separation in droplet collision [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1997, 331: 59 ~ 80.
- 10 Ashgriz N, Poo J Y. Coalescence and separation in binary collisions of liquid drops [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1990, 221:183 ~ 204.
- 11 Brenn G. The formation of satellite droplets by unstable binary drop collisions [J]. Physics of Fluids, 2001, 13(9): 2463 ~ 2477.
- 12 Kim S, Lee D J, Lee C S. Modeling of binary droplet collisions for application to inter-impingement sprays [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2009, 35(6):533 ~ 549.
- 13 Park S W, Reitz R D. A gas jet superposition model for CFD modeling of group-hole nozzle sprays [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2009, 30(6): 1193 ~ 1201.