

撰稿论文格式

# 基于大涡模拟的液氨喷雾雾化与相变特性模拟

褚晨涛<sup>1</sup>, 张延志<sup>1</sup>, 贾明<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学 能源与动力学院, 大连 116000)

## Large eddy simulation of atomization and phase change characteristics of liquid ammonia spray

CHU Chentao<sup>1</sup>, ZHANG Yanzhi<sup>1</sup>, JIA Ming<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Powering Engineering, Dalian University of Technology, 116000, China)

**Abstract:** The use of liquid ammonia as fuel in energy conversion devices shows attractive perspectives as it does not generate greenhouse gas emissions. However, the atomization and phase change characteristics of liquid ammonia are significantly different from common hydrocarbon fuels due to its unique physical properties, making accurate simulation of ammonia spray under wide ambient conditions very challenging using the popular Euler-Lagrange framework. To this end, firstly, the droplet non-sphericity effects are considered to mimic drag force and phase change characteristics of ammonia spray droplets owing to its low surface tension. And secondly, a new atomization model was developed to predict thermal breakup caused by flash boiling in which the nucleation and growth of bubbles within liquid droplets are modeled by the latest theories. The simulations were conducted with turbulence closure models of large-eddy simulation (LES), and the results were validated against experimental data under typical non-flash and flash boiling conditions. The results indicates that the new model shows better agreement with the measurements under non-flash and flash boiling conditions.

**摘要:**当前在能量转换装置中, 由于液氨燃烧不会产生温室气体的排放, 因此液氨作为燃料展示出了非常有吸引力的前景。然而, 由于其独特的物理性质, 液氨的雾化和相变特性与普通碳氢燃料有很大不同, 这使得使用流行的欧拉-拉格朗日框架来精确模拟广泛环境条件下的氨喷雾非常具有挑战性。为此, 首先考虑液滴的非球形效应模拟氨喷雾液滴的阻力和相变特性, 因为氨喷雾液滴具有低表面张力。其次, 建立了一个新的雾化模型来预测闪沸引起的热破碎, 其中液滴内气泡的成核和生长用最新的理论来模拟。采用大涡模拟(LES)的湍流闭合模型进行了模拟, 并与典型的非闪蒸和闪蒸条件下的实验数据进行了验证。结果表明, 新模型与非闪蒸和闪蒸条件下的测量结果吻合较好。

**关键词:** 液氨喷雾; 非球形效应; 闪沸; 相变; 大涡模拟; OpenFOAM

**Key words:** ammonia spray; non-sphericity effects; flash boiling; phase change; large eddy simulation; OpenFOAM

中图分类号: TU4\*\*\* (请查阅中图分类号第5版)

文献标识码: A

## 0 概述

当前, 温室气体排放问题日益严峻, 全球各国在联合国框架下构建了节能减排的愿景。我国较早得提出了2030年之前实现碳达峰、2060年左右实

现碳中和的重大战略决策。要实现碳达峰、碳中和, 必然要求开源节流, 发掘低碳或零碳燃料是其中重要的一种方式, 液氨作为一种零碳燃料引起了研究者的兴趣。

收稿日期: 2023-08-31

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(5266154); 中央高校基本科研业务费专项资金(82232036)

作者简介: 褚晨涛(1999-), 男, 硕士生, 主要研究方向为喷雾建模大涡模拟, E-mail: cctvictory666@mail.dlut.edu.cn;  
张延志(联系人), E-mail: zhangyanxzh@dlut.edu.cn。

氨作为无碳燃料，其具有低成本、较高的辛烷值和载氢能力、易于大规模合成和可压缩等优点。但氨的自然温度高、火焰传播速度低、着火极限窄、不同过热度条件变化大等缺点，使其在内燃机中难以直接应用。

目前，液氨喷雾实验的研究已经逐渐丰富。Akram 等人[1]的研究使用 z 型纹影成像技术对不同燃料温度条件下液氨和汽油喷射特性，通过在喷嘴尖端安装加热线圈来避免传热损失，实验结果表明，过热对液氨和汽油喷雾有显著影响，在闪沸时，喷雾液相和气相贯穿距离和图像面积减小，且从 0.5 MPa 到 3 MPa 环境压力下、100 °C 到 300 °C 环境温度条件下，液氨的贯穿距和图像阴影面积下降速度快于汽油，液氨受到闪沸的影响更大。Fang 等人[2]采用 DBI 高速成像技术，研究了高压注入 100MPa 时的液氨喷雾特性，发现在闪沸工况下，在喷雾初始阶段，液相贯穿和喷嘴速度受到了强烈的抑制作用，在 0.05 ms 时刻，喷嘴附近的喷雾形状发生突变，是由于喷嘴出口的强烈空化造成的。Li 等人[3]对不同过热度条件下液氨单孔喷雾实验近场和远场现象分别进行了研究。对于近场特性，过热度 and 燃料粘度在闪蒸区域有重要作用，考虑粘度、密度和表面张力影响的非尺寸分析，通过引入表示内部粘度耗散与表面张力能之比的无量纲数 Ohnesorge (Oh)，对  $Rp \leq 2$  和  $Rp > 2$  的近场闪沸区域的气泡爆炸强度进行描述。对于远场特性，在临界区域，液氨喷雾的演化过程与柴油喷雾非常接近，随着过热度的逐渐升高，闪沸中的气泡行为的影响也越来越大。

由于液氨的物性与传统燃油区别较大，其低沸点、高汽化潜热、低表面张力等特性，使得以往针对汽油机、柴油机的模型适用性下降，因此对液氨喷雾的建模非常重要。Zhang 等人[4]基于拉格朗日模型对液氨喷雾进行模型，采用初始过热度定义为初始燃料温度下环境压力与饱和蒸汽压的比值，以此来确定液氨建模中使用的闪沸模型边界。其结果发现在非闪沸工况下，传统化石燃料开发的 LPT 喷雾模型可以很好地预测其喷雾特性，但在闪沸工况下，喷嘴附近存在强闪沸区，随着液氨喷雾的冷却，在下游区域逐渐减弱，导致实验结果与预测结果具有明显差距。Pandal 等人[5]基于 OpenFOAM 构建了液氨的物性，采用拉格朗日粒子法对直接注射液氨喷雾进行建模，并使用 U-RANS 方法进行瞬态分析，对比其蒸发工况和闪沸工况，结果表明该模型可以较好地预测喷雾的形态和液相气相贯穿距，但对于雾化水平、索特平均直径等细节预测仍然需要改进。Bakir 等人[6]通过数值模拟研究了在柴油发

动机工况下在环境中加入 H<sub>2</sub> 的方式促进液氨喷雾自燃的影响，并构建了加入 H<sub>2</sub> 后的化学反应路径，结果表明在 6 MPa、1200 K 条件下，加入一定体积分数以上的氢气可以使氨在喷雾侧回流区产生自着火点，由于加入氢气的原因，火焰逐渐发展可以包裹整个喷雾。同时，随着液氨喷雾量的增加，由于液氨闪沸带来的环境温度下降会增加着火难度。

当前对于液氨喷雾在不同过热度下闪沸现象的数值模拟仍然不够准确，需要对液氨喷雾闪沸现象尤其是近场特性进行建模。本研究通过基于欧拉-拉格朗日的大涡模拟对不同过热度条件下液氨喷雾特性进行数值模拟，并基于两项已公开发表的实验数据对闪沸破碎模型和粘性相变阻力模型进行验证。

## 1 数值模拟方法与步骤

本研究基于 OpenFOAM-7 中瞬态欧拉-拉格朗日求解器 SprayFoam 对液氨喷雾的雾化和相变过程进行数值模拟研究。其中，气相（连续相）方程基于欧拉框架下的大涡模拟（Large Eddy Simulation）进行求解液相（离散相）方程采用拉格朗日粒子跟踪（Lagrangian Particle Tracking）进行求解。

### 1.1 连续相控制方程

在使用大涡模拟求解连续相方程时，假设气体为理想气体，传热过程遵循 Fourier 定律，传质过程遵循 Fickian 定律，不考虑化学反应且为可压缩流，使用 LES 模拟中的 Smagorinsky 模型，滤波后的控制方程如下。

连续性方程（质量守恒方程）：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho \tilde{u}_j}{\partial x_j} = \bar{S}_\rho^s \quad (1)$$

动量方程（动量守恒方程）：

$$\frac{\partial \rho \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho \tilde{u}_i \tilde{u}_j - \bar{\tau}_{ij} + \bar{\tau}_{ij}^{sgs} \right] = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \bar{S}_{u_i}^s \quad (2)$$

能量方程（能量守恒方程）：

$$\frac{\partial \rho \tilde{h}}{\partial t} + \frac{\partial \rho \tilde{u}_j \tilde{h}}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \bar{\lambda} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j} + h_j^{sgs} \right] = \bar{S}_h^s \quad (3)$$

其中，“~”和“-”分别表示 Favre 过滤和空间过滤；t 为时间， $\rho$  为密度，p 为压力， $\tilde{h}$  为显焓； $x_i$  和  $\tilde{u}_i$  为空间坐标和速度在三个方向的分量。亚网格应力项  $\bar{\tau}_{ij}^{sgs}$  由动态 Smagorinsky 模型求解，亚网格组分输运项与亚网格焓输运项基于梯度扩散假设进行建模。 $\bar{S}_\rho^s$ 、 $\bar{S}_{u_i}^s$ 、 $\bar{S}_h^s$  分别代表液滴相变引起的质量、动量以及能量源项。

使用大涡模拟时所使用的滤波函数为：

$$\overline{\Phi(x,t)} = \int G(r,x)\Phi(x-r,t)dr \quad (5)$$

$$\int G(r,x)dr = 1 \quad (6)$$

$$\overline{\rho\Phi} = \rho\tilde{\Phi} \quad (7)$$

## 1.2 离散相控制方程

拉格朗日粒子跟踪法将喷雾液滴视为大量液体包裹 (parcels) 组成的离散相, 每个包裹中包含的液滴具有相同的物理特性, 液滴包裹的运动方程和动量方程如下所示:

$$\frac{d}{dt}\vec{x}_p = \vec{u}_p \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt}\vec{u}_p = \frac{C_D Re_p}{\tau_p} \frac{1}{24}(\vec{u}_g - \vec{u}_p) + \mathbf{g} = \frac{C_D Re_p}{\tau_p} \frac{1}{24}\vec{V}_{rel} + \mathbf{g} \quad (9)$$

其中,  $x_p$  和  $u_p$  为液滴的坐标和速度矢量,  $u_g$  为气体的速度矢量,  $C_D$  为阻力系数,  $\tau_p$  为液滴弛豫时间,  $Re_p$  为液滴的雷诺数,  $\mathbf{g}$  为重力加速度,  $\vec{V}_{rel}$  表示相对速度矢量。

## 1.3 阻力模型更新

如图 1 所示液氨的表面张力比普通碳氢燃料小, 且随着温度增加其表面张力快速下降, 导致液滴在高温条件下的运动过程中变形更明显, 这对液滴的动力学和相变特性有显著影响。因此, 在液氨喷雾模型中考虑液滴畸变对阻力和相变行为的影响是十分必要的。

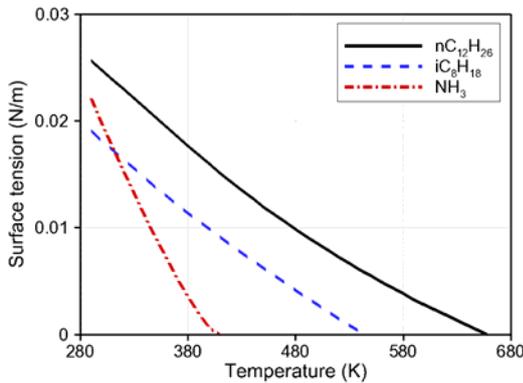


图 1. 液氨与其他常见燃料表面张力对比

标准球性阻力模型将喷雾液滴看作是一个刚性球体, 不发生形变, 其阻力计算公式如下:

$$C_{D,sphere} = \begin{cases} \frac{24}{Re_d} \left(1 + \frac{1}{6} Re_d^{2/3}\right) & Re \leq 1000 \\ 0.424 & Re > 1000 \end{cases} \quad (10)$$

Liu 等人[7]在标准球性模型的基础上考虑了液滴的形变:

$$C_D = C_{D,sphere}(1 + 2.632y) \quad (11)$$

本研究中提出了球形液滴的综合阻力系数, 当  $Re_p < 1000$  时考虑有限粘度效应, 当  $Re_p > 1000$  时采

用 Haider-Levenspiel 阻力模型[8]。

其中, 粘性效应区间对液滴的相变参数也进行了更新:

$$C_{D,sphere} = \begin{cases} \frac{2-\lambda}{2} C_{D,b} + \frac{4\lambda}{6+\lambda} C_{D,2} & 0 \leq \lambda \leq 2; 5 < Re < 1000 \\ \frac{4}{2+\lambda} C_{D,2} + \frac{\lambda-2}{2+\lambda} C_{D,s} & 2 \leq \lambda \leq \infty; 5 < Re < 1000 \end{cases} \quad (12)$$

$$Sh_{sphere} = \begin{cases} \frac{2-\lambda}{2} Sh_b + \frac{4\lambda}{6+\lambda} Sh_2 & 0 \leq \lambda \leq 2; 5 < Re < 1000 \\ \frac{4}{2+\lambda} Sh_2 + \frac{\lambda-2}{2+\lambda} Sh_s & 2 \leq \lambda \leq \infty; 5 < Re < 1000 \end{cases} \quad (13)$$

$$Nu_{sphere} = \begin{cases} \frac{2-\lambda}{2} Pr_b + \frac{4\lambda}{6+\lambda} Pr_2 & 0 \leq \lambda \leq 2; 5 < Re < 1000 \\ \frac{4}{2+\lambda} Pr_2 + \frac{\lambda-2}{2+\lambda} Pr_s & 2 \leq \lambda \leq \infty; 5 < Re < 1000 \end{cases} \quad (14)$$

Haider-Levenspiel 阻力模型如下:

$$C_D = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.1806 Re_p^{0.6459}) + \frac{0.4251}{1 + \frac{6880.95}{Re_p}} \quad (15)$$

同时, 为了进一步模拟液滴形状畸变后的阻力, 采用 Richter 和 Nikrityuk[9]提出的球形液滴与畸变液滴的相关性, 如下公式所示:

$$\frac{C_D}{C_{D,sphere}} = \frac{0.21 + \frac{20}{Re_p} \left(\frac{L}{d_p}\right)^{0.58} + \frac{6.9}{\sqrt{Re_p}} \left(\frac{L}{d_p}\right)^{-1.4}}{0.21 + \frac{20}{Re_p} + \frac{6.9}{\sqrt{Re_p}}} \quad (16)$$

其中,  $L$  定义为液滴的伸展长度, 其公式为  $L = d_p(1 - C_b y)$ , 同时,  $y$  为无量纲的形变参数 (球形失真参数), 其正负号代表伸展方向。

## 1.4 闪沸破碎模型

液氨的沸点较低, 容易出现闪沸现象。闪沸是一个包括气泡成核、生长和破裂在内的复杂过程, 对喷雾雾化和相变特性有重要影响。对于烃类燃料, 非均相成核更为合适。然而, 非均质成核很难量化例如溶解气体或添加的表面活性剂等相关杂质的影响。因此本研究采用均相成核理论代替。在液滴中心产生的气泡的初始半径确定为

$$R_i = \frac{2\sigma_l}{p_{sat} - p_g} \quad (17)$$

其中  $\sigma_l$  为液相的表面张力。  $p_{sat}$  是饱和蒸气压。

随后液滴中的气泡会逐渐发展, 当气泡膨胀到一定程度就会破裂。假设气泡破裂是由气泡表面的径向振荡引起的。当扰动超过一定阈值时, 气泡就会破裂。因此, 气泡破碎参数  $K(t)$  可定义为

$$K(t) = \frac{\eta_0 \exp(\omega t)}{R_0(t) - R_i(t)} \quad (18)$$

其中  $\eta_0$  为初始扰动, 与初始液滴半径成正比, 为  $\eta_0 = f \cdot R_0(0)$ 。  $\omega$  为扰动波的增长率。在线性稳定性分析的基础上, Zeng[10]建立了一个色散方程来求解。然而, Zeng 的模型忽略了流体的粘性力和表面张力。本研究采用 Lü等[11]提出的考虑流体粘

度影响的修正色散方程，通过破碎模型求解后的速度和索特平均直径（SMD）为

$$V_b = \frac{3R_i^2 V_i (R_o - R_i)}{R_o^3 + R_i^3} \quad (19)$$

$$R_{32}^{-1} = C \frac{R_o^2 + R_i^2}{R_o^3 + R_i^3} + \left( \frac{3R_i^4 (R_i^{-1} + R_o^{-1})}{2(R_o^3 + R_i^3)} V_i^2 - \frac{V_b^2}{2} \right) \frac{\rho_l}{3\sigma} \quad (20)$$

其中 C 是模型常数，用来表示球对称模态之外的振荡势能。本研究采用  $C = 1$ 。

## 2 数值计算模型

### 2.1 模型设置

为了验证新模型，上一章中描述的改进模型已经在 OpenFOAM-7 中实现。此外，还采用了 Smagorinsky 湍流模型对 LES 亚网格粘性应力张量进行了建模，使用 sprayFoam 并对相关模型进行设置。具体的喷雾模型设置如下表 1 所示：

表 1 模型设置

模型	模型选项
湍流模型	大涡模型 (Smagorinsky Model)
传热模型	Ranz-Marshall Model
破碎模型	闪沸破碎模型(Flash Boiling Breakup Model)
相变模型	形变沸腾模型(Distorted Boiling)
阻力模型	粘性形变球阻力模型 (Viscous Distorted Sphere Drag Force)
扩散模型	随机扩散模型(Stochastic Dispersion Model)

本研究对多孔直喷（GDI）液氨喷雾均进行了验证，多孔直喷喷雾采用 Pandal 等人[4]在典型非闪沸工况和闪沸条件下的两组实验数据，分别以 Case1 和 Case2 命名（见表 2），其中喷雾的喷射条件在表 3 中列出。

表 2 多孔液氨直喷喷雾验证工况

实验组	环境压力/MPa	环境温度/K
Case 1	1.5	293
Case 2	0.2	293

表 3 多孔液氨直喷喷雾基本条件

实验组	Pandal(多孔直喷)
喷嘴直径/mm	0.15
喷油持续期/ms	3.9
喷油质量/mg	4(per nozzle)
喷射压力/MPa	12
燃油温度/K	293

环境温度/K

293

### 2.2 网格无关性验证

为验证网格尺寸对模拟结果的影响，本研究使用多孔液氨直喷实验中 Case 1 的实验数据，分别设置了 0.5 mm、0.25 mm、0.2 mm 三种尺寸的网格进行模拟，设置如表 4 所示。

表 4 网格验证设置

网格类型	网格大小	网格数量
Base	0.5 mm	274 万
Fine	0.25 mm	2195 万
Refine	0.2 mm	4287 万

如图 2 所示，进一步细化网格尺寸不会对结果产生重大影响，特别是喷雾动力学部分区别很小。因此，本研究使用的网格如图 3 所示，尺寸为 120 mm × 80 mm × 80 mm，在喷雾区域细化网格，最小尺寸为 0.25 mm，既可以保留喷雾区域的湍流细节，又可以节约计算资源。

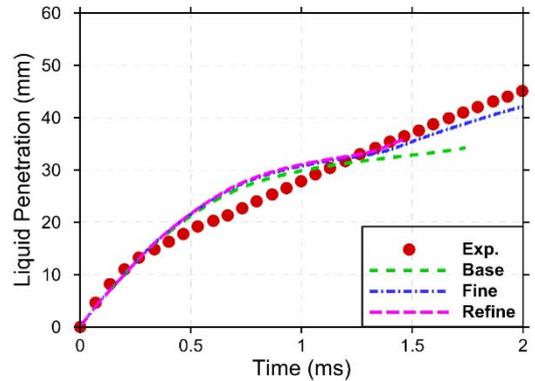


图 2. 不同网格尺寸下模拟 Case 1 工况液相贯穿距

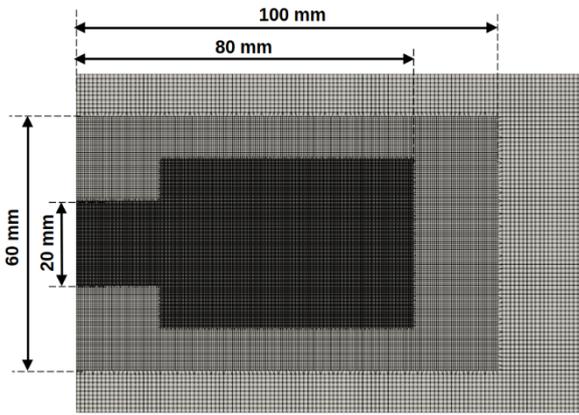


图 3. 本研究使用的网格

### 3 结果与讨论

#### 3.1 非球性阻力模型

图 4 展示了在非闪沸工况下预测的喷雾贯穿距与实验值的对比。可以看出，使用公式 (16) 考虑有限粘滞比和液滴形变的新模型比通常使用的 Liu 的球性模型在预测贯穿距时具有更好的效果。在喷雾发展的初期 ( $ASOI < 1\text{ms}$ )，纯蒸发工况下两种模型的预测效果差别不大，与实验值相当。在喷雾发展的后期 ( $ASOI > 1\text{ms}$ ) 的时间里，在远场区域的液滴运动受到液滴形变和粘滞作用的影响，受到的阻力进一步增加，从而减速，使得贯穿距预测数值更接近实验。

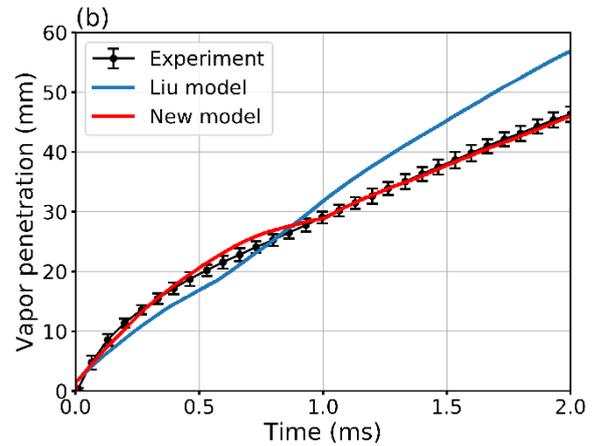
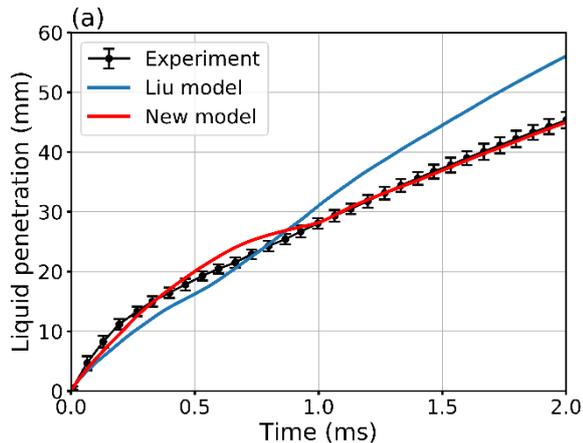


图 4. 纯蒸发工况下球性模型(Liu model)和新模型(New model)贯穿距



图 5. 纯蒸发工况下不同阻力模型的液相分布对比

如图 5 所示，使用球性模型时，液滴受到阻力较小，液相分布呈窄长型分布，引入粘性作用的新模型模拟，由于阻力增加和形状变化，液滴更倾向于向径向移动，因此成现处更宽更短的形状，与实验图像更加吻合。

#### 3.2 闪沸破碎模型

对于是否使用闪沸破碎模型，图 6 的结果显示，多孔液氨喷雾在考虑闪沸破碎后，喷雾初期液滴破碎更块更剧烈，可以显著降低贯穿距，对比未引入闪沸破碎模型的算例，其结果输出结果整体下降。

图 7 对比了有无闪沸破碎模型的液相分布图，可以明显看出无闪沸破碎模型时，液滴粒子破碎不显著，大的液滴集中在喷雾末端，喷雾形态几乎没有变化。开启闪沸破碎模型后，在初期就能明显观察到液滴破碎，喷雾形态受到剧烈破碎的影响发生了很大的改变，其喷雾形态与实验相近。

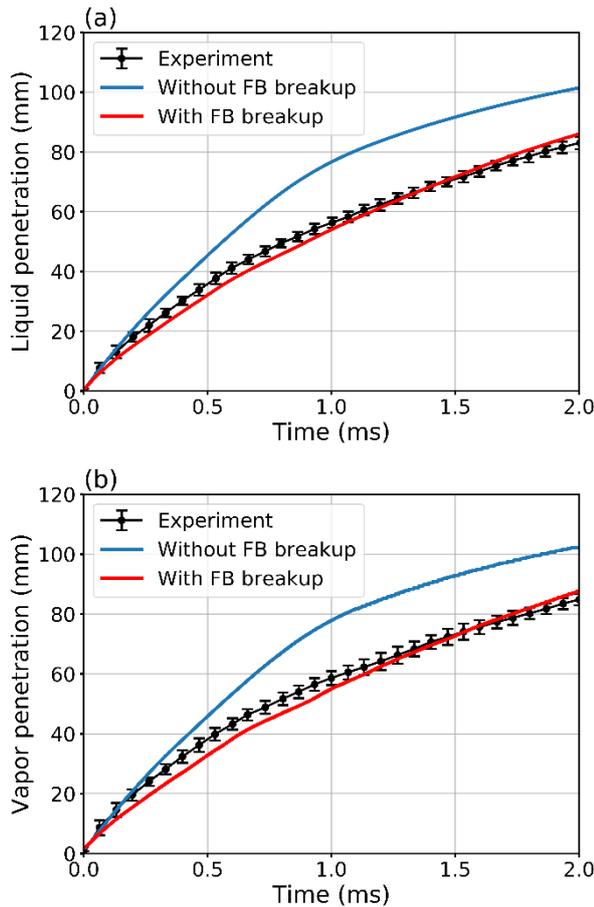


图 6. 闪沸工况下有无闪沸破碎模型 (Flash Boiling breakup model) 贯穿距

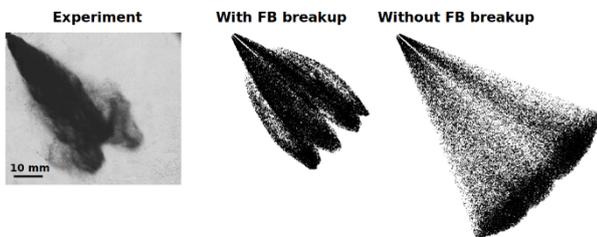


图 7. 闪沸工况下有无闪沸破碎的液相分布对比

### 3. 3 索特平均直径

为研究粘性相变阻力模型和闪沸破碎模型对粒子破碎情况的影响, 本研究将 Pandl 等人实验中选择五个位置的索特平均直径(SMD)输出与实验结果对比, 选取点的位置如下图 8 所示。其中, P0 位于喷雾中轴线上, P1 和 P4 位于喷雾初始阶段的边缘, P2 和 P3 位于喷雾发展阶段的边缘, 这 5 个点能够很好的反映液氨喷雾在整个生命周期的发展规律, 可以用来验证不同阶段的索特平均直径的模拟效果。

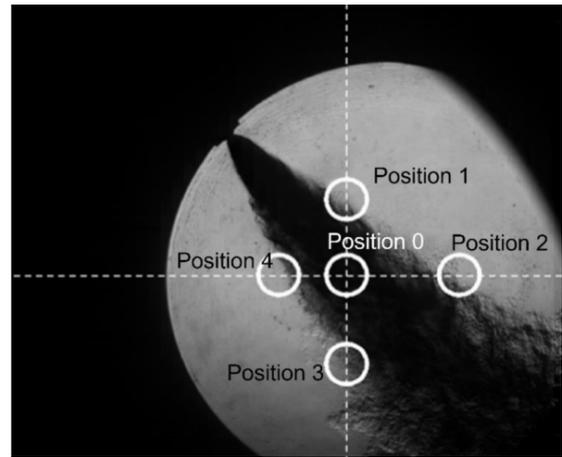


图 8. 实验选取测量粒子直径的区域, position 0 位于喷雾中轴线, 其他位于喷雾边缘区域

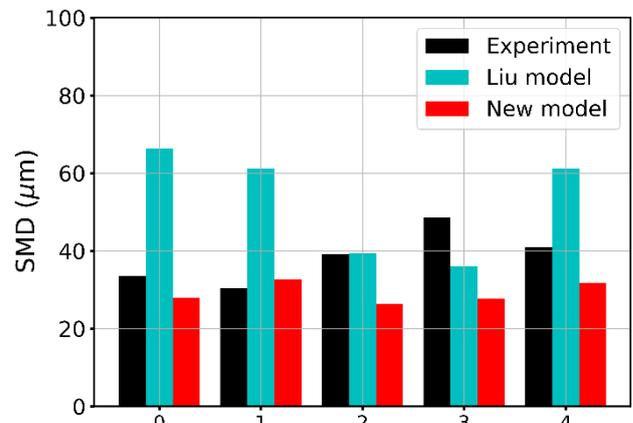


图 9. 在纯蒸发工况下 5 个不同区域的 SMD 对比

对于纯蒸发工况, 引入粘性相变阻力模型后, 相较于 Liu 的球形模型, 在喷雾中轴线上 P0 位置的 SMD 有显著的降低, 从  $67 \mu\text{m}$  降低到  $28 \mu\text{m}$ , 与实验数值更加接近, 改善效果较好。P1 与 P4 距离喷雾出口较近, 剧烈的湍流现象导致液滴形变与粘性相互作用, 进一步促进了液滴的破碎, 从而降低 SMD。但 P2 和 P3 位于较远的位置, 由于初期的破碎, 进一步破碎后 SMD 继续下降, 导致预测效果不佳。

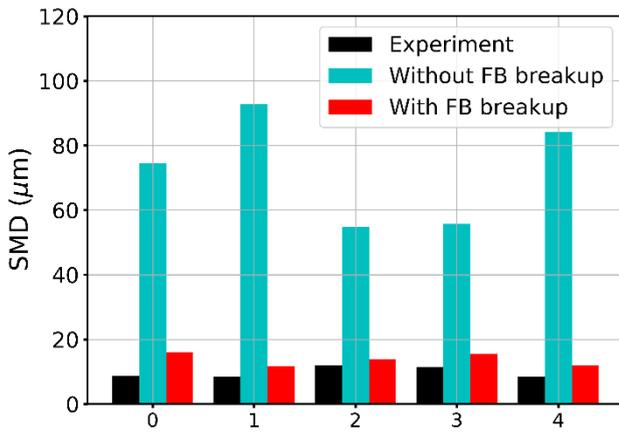


图 10. 在闪沸工况下 5 个不同区域的 SMD 对比

结果表明, 对于闪沸工况, 由于引入闪沸破碎模型, 在喷雾初期便发生了剧烈的破碎现象, 因此可以显著降低喷雾全过程的 SMD 数值。引入闪沸破碎模型后, 对 SMD 的预测误差可以降低 70% 以上。尤其是 P1 和 P4 两个位置, 距离喷孔较近, 在没有引入闪沸破碎模型时, 粒子破碎不充分, 近场位置的 SMD 普遍高于实验值 3 倍以上。引入闪沸破碎模型后, 近场位置的破碎更加剧烈, 预测误差降低到 50% 以内, 效果显著。

## 5 结论

本研究针对液氨喷雾进行 CFD 模拟, 在 OpenFOAM 中构建了基于欧拉-拉格朗日框架下的阻力和闪沸破碎模型, 对相变特性进行了修正, 并对蒸发和闪沸两种工况进行了模拟, 得出以下结论:

(1) 液氨的物性对模拟结果影响巨大, 在 OpenFOAM 中以温度函数 NSRDS 来实现, 准确的物性预测是模拟结果准确的基础。该模型修正了液氨物性中的表面张力项计算公式, 可以准确预测不同温度下液氨表面张力数值。

(2) 通过引入粘性作用与非球性阻力模型结合, 在喷雾发展阶段 ( $ASOI > 1$  ms), 能够更加精准地预测液氨喷雾贯穿距, 改善喷雾形态。

(3) 闪沸破碎模型强化了初次雾化时的破碎效果, 对比无闪沸破碎的情况下, 降低了喷雾贯穿距, 同时液滴的索特平均直径也极大地下降, 与实验值更加接近。在喷雾初期发生剧烈破碎后, 喷雾形态发生较大改变, 更符合实验图像。

(4) 该模型对不同过热度多孔直喷喷雾均进行了模拟验证, 结果表明, 引入新的粘性作用阻力模型和闪沸破碎模型, 可以改善喷雾贯穿距和 SMD

预测效果。

## 参考文献:

- [1] Akram M. S., Yeganeh M., Cheng Q., Kaario O., Larmi M. Experimental Study on Flash Boiling of Ammonia Fuel Sprays – A Potential Alternative Fuel [J]. SAE Technical Papers, 2023, DOI: 10.4271/2023-01-0304
- [2] Fang Y., Ma X., Zhang Y., Li Y., Zhang K., Jiang C., Wang Z., Shuai S. Experimental Investigation of High-Pressure Liquid Ammonia Injection under Non-Flash Boiling and Flash Boiling Conditions [J]. Energies, 2023, 16(6):2843, DOI: 10.3390/en16062843
- [3] Li, S., Li, T., An investigation on near-field and far-field characteristics of superheated ammonia spray [J]. Fuel, 2022, 324(B):124683, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124683>.
- [4] Zhang Y., Xu L., Zhu Y., Xu S., Bai X.-S. Numerical study on liquid ammonia direct injection spray characteristics under engine-relevant conditions [J]. Applied Energy, 2023, 334: 120680, DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.120680
- [5] Pandal A, Zemi J, Battistoni M, Hespel C, Pele R, Breuigny P, Rousselle C. GDI ammonia spray numerical simulation by means of OpenFOAM [J]. SAE Technical Paper, 2023, 2023-01-0311., 2007.
- [6] Bakir AH, Ge, H., Zhang, Z., Zhao, P. Autoignition enhancement of ammonia spray under engine-relevant conditions via hydrogen addition: Thermal, chemical, and charge cooling effects. International Journal of Engine Research. 2023
- [7] Liu, A., Mather, D., Reitz, R. Modeling the effects of drop drag and breakup on fuel sprays [J]. SAE Paper, 1993, 930072.
- [8] Haider, O. Levenspiel, Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles [J]. Powder Technology, 1989, 58:63 - 70
- [9] A. Richter, P. A. Nikrityuk, Drag forces and heat transfer coefficients for spherical, cuboidal and ellipsoidal particles in cross flow at sub-critical Reynolds numbers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55:1343 - 1354.
- [10] Zeng, Y., 2000. Modelling of Multicomponent Fuel Vaporization in Internal Combustion Engines (Ph.D.

---

thesis)

- [11] M. Lü, Z. Ning, K. Yan, J. Fu, C. Sun, Instability and breakup of cavitation bubbles within diesel drops[J]Chinese Journal of Chemical Engineering, 2015, 23:262 - 267.