

模型参数对直喷汽油发动机喷雾特性的影响

冷鹏飞, 胡超群, 杨春雨, 阮慧琳, 赵文伯, 于洋, 李理光, 吴志军

(同济大学汽车学院, 上海 201804)

摘要: 基于单向耦合模拟方法, 研究了湍流模型参数、单向耦合模型参数和破碎模型参数对喷雾贯穿距和粒径的影响。结果表明, 湍流模型参数 C_{ei} 和 RT(Rayleigh-Taylor) 破碎模型尺寸参数 C_{RT} 对喷雾贯穿距的影响最大, KH(Kelvin-Helmholtz) 破碎模型尺寸参数 C_{KH} 和 C_{RT} 对粒径的影响最大。在此基础上建立了适用于不同工况的高精度喷雾模型, 标准 Spray G 工况下, 模拟结果与实验结果误差在 3% 以内; 不同环境气体密度下, 多种工况的模拟结果与实验结果误差在 10% 左右。

关键词: 发动机; 模型参数; 贯穿距; 粒径

中图分类号: TK411

文献标志码: A

Effects of Model Parameters on Spray Characteristics of Gasoline Direct-Injection Engines

LENG Pengfei, HU Chaoqun, YANG Chunyu,

RUAN Huilin, ZHAO Wenbo, YU Yang,

LI Liguang, WU Zhijun

(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: This paper investigates the effects of turbulence model parameter, one-way coupling model parameter, and break-up model parameters on spray penetration and droplet size based on the VOF-spray one-way coupling model. The results indicate that the RANS constant C_{ei} and the RT model size constant C_{RT} have the greatest effect on the spray penetration, and size constants C_{KH} and C_{RT} have the greatest effect on the droplet size. Based on the above analysis, it establishes a high precision spray model for different working conditions. The error between experiment and simulation is within 3% for standard Spray G condition, and around 10% error for different ambient gas densities.

Keywords: engine; model parameters; spray

penetration; droplet size

截至 2022 年, 我国汽车保有量达到 3.12 亿辆, 其中纯电动汽车 810.4 万辆, 占汽车总量的 2.6%^[1]。在未来相当长的一段时间内, 内燃机依然是目前机动车能耗和排放的主要来源^[2], 降低燃油消耗和污染物的排放仍然是近年来发动机研究者的主要目标。内燃机喷雾特性直接决定混合气组织形式和形成质量, 是影响汽车能耗和排放的主要因素之一, 因此越来越多的人对喷雾特性进行研究。

近年来, 研究人员发现除喷射压力外, 喷嘴内部结构及流动状态对喷雾特性的影响也极大^[3]。江苏大学曹天义^[4]使用比例放大透明喷嘴研究了喷孔内几何诱导空化和线空化的发展规律及其引起的内部压力波动, 并基于粒子图像测速技术研究了空化和压力波动对喷雾特性的影响。但由于透明放大喷嘴尺寸及材质的不同, 不能完全反映真实喷嘴的各项特性, 国内外越来越多的学者采用同步辐射 X 射线成像技术对金属喷嘴进行研究。高能 X 射线可以穿透金属喷嘴, 获得喷嘴内部结构高精度测量模型, 实现喷嘴内部内流成像和近场喷雾速度场及密度场成像^[5-9]。

除实验研究外, 数值模拟也是目前喷雾研究的主流研究方法之一^[10-12], 其中主要包括基于连续相的 VOF(volume of fluid)方法模拟喷嘴内部流动, 基于离散相的 DDM(discrete droplet model)模型模拟外场喷雾。而单独的外场喷雾模拟无法反映内流对喷雾的影响, 目前能反映内流对喷雾影响的模拟方法主要有单向耦合方法和 ELSA(Eulerian-Lagrangian spray atomization)方法^[13]。但 ELSA 模型计算耗时较长, 综合模型准确性和计算耗时, 本文选用单向耦合方法进行计算。而无论使用哪种方法, 喷雾模型

收稿日期: 2022-11-24

基金项目: 国家自然科学基金(U1832179); 上海市自然科学基金(19ZR1460200)

第一作者: 冷鹏飞, 博士生, 主要研究方向为燃料喷射与雾化。E-mail: tjlpf@tongji.edu.cn

通信作者: 吴志军, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为内燃机喷雾与燃烧。E-mail: zjwu@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

的准确性对模拟效果影响极大。

喷雾模型中影响喷雾特性的参数极多,如湍流模型参数、单向耦合参数以及破碎模型参数等,Saha等^[14]研究了湍流系数和单向耦合模型阈值对喷雾贯穿距的影响,发现随湍流系数和液相体积分数阈值的增大,喷雾贯穿距变大,但未涉及各参数对喷雾粒径的影响。Mohan等^[15]使用单向耦合方法研究了Kelvin-Helmholtz和Rayleigh-Taylor(KH-RT)破碎模型中的各项参数对喷雾贯穿距的影响,但粒径模拟结果比实验值大了近30%,预测效果较差。

环境气体密度对喷雾二次破碎影响巨大,目前多数喷雾模型中基本仅适用于单工况。Paredi等^[16]从贯穿距、羽流速度和粒径等方面对不同工况的喷雾特性进行了模型验证,但标准Spray G工况下的粒径结果仍然偏差较大,极大影响了模型预测效果。

本文基于单向耦合方法,将内流流动模拟与外场喷雾模拟相结合,研究湍流参数、单向耦合模型参数和喷雾破碎模型参数对GDI(gasoline direct injection)发动机喷雾贯穿距和粒径的影响,建立了多参数喷雾模型标定方法。在此基础上获得了高精度喷雾模型,数值计算得到的喷雾贯穿距和粒径与实验结果误差在3%以内,最后使用多种工况对模型进行验证,多工况误差在10%以内。

1 仿真模型及验证

1.1 内流模型及边界设置

内流模拟采用VOF(volume of fluid)方法对两相流进行模拟,该方法将液相与气相均视为连续相,需要对连续方程、动量方程和能量方程进行求解。VOF方法中用气相体积分数 α 来表示计算网格内气相组分的体积分数,其定义如公式(1)所示。

$$\begin{cases} \alpha = 0 & \text{网格内只含有液体} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{网格内同时含有液体和气体} \\ \alpha = 1 & \text{网格内只含有液体} \end{cases} \quad (1)$$

气相体积分数 α 通过如公式(2)所示的守恒方程来求解。

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} u_i \alpha = 0 \quad (2)$$

式中: u_i 为速度矢量的分量; x_i 为方向矢量的分量。

网格内整体密度 ρ 如公式(3)所示。

$$\rho = \alpha \rho_g + (1 - \alpha) \rho_l \quad (3)$$

式中: ρ_g 为网格内的气体密度; ρ_l 为网格内的液体密度。

湍流模型选用更适用于强旋流和带有弯曲壁面流动的RNG $k-\epsilon$ 模型。空化现象中液体的气化过程和闪急沸腾现象相似,空化模型是基于Shields等^[17]提出的闪急沸腾假设建立的,采用均质松弛模型来描述空化过程中的气液相质量交换。

为减少计算耗时提高计算精度,内流模拟所用模型为ECN(engine combustion network)网站中标准Spray G喷油器^[18]中的喷孔5,喷孔直径为165 μm ,喷孔长170 μm ,喷孔轴线与喷油器轴线夹角为37°。如图1所示,图中左侧为Spray G喷孔5及定容弹三维模型,右侧为导入CONVERGE后的边界划分,设定入口边界为压力入口,入口压力设定为20 MPa。

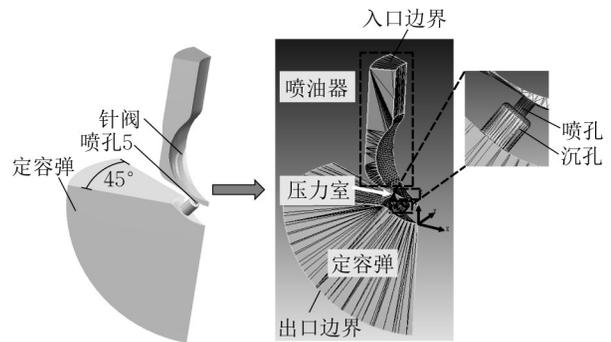


图1 内流模型及边界划分

Fig. 1 Geometric model and definition of boundaries

各边界区域初始条件根据ECN中Spray G标准工况进行设定,使用异辛烷作为工质,如表1所示。针阀升程曲线使用Powell^[19]通过X射线成像技术测得的真实针阀运动曲线。

表1 边界区域初始条件设定

Tab. 1 Initiation of boundary conditions

边界区域	组分	压力/MPa	温度/K
入口边界	异辛烷	20.0	363
出口边界	氮气	0.6	573
喷油器	异辛烷	20.0	363
压力室	氮气	0.6	573
喷孔区域	氮气	0.6	573
定容弹	氮气	0.6	573

设置基础网格尺寸为0.2 mm,对压力室及沉孔区域采用 2^5 局部加密,对喷孔区域采用 2^6 局部加密,加密后最小网格尺寸3.125 μm 。综合考虑计算资源,对喷油器主体区域及定容弹靠近沉孔出口区域采用 2^3 局部加密,加密后网格尺寸为25 μm ,如图2所示。此外,对定容弹区域采用基于速度的自适应加密,加密级数设定为 2^4 。针阀达到最大升程后网

格总数约为75万。

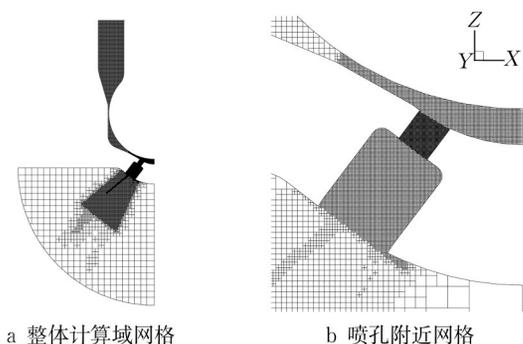


图2 网格划分示意图

Fig. 2 Mesh grid of VOF model

1.2 喷雾模型及边界设置

将内流计算输出的位置、速度、湍流、温度等结果作为外场喷雾的输入,可实现内流模拟和外场喷雾模拟的单向耦合计算。当网格内液相体积分数高于设定阈值时,将连续流转换为离散相,并且至少注入一个粒子;当网格内液相体积分数低于设定阈值时,则不会注入粒子。由于外场喷雾无弯曲壁面及强旋流,湍流模型选用标准 $k-\epsilon$ 模型,具体模型设置如表2所示。

表2 喷雾模型设置

Tab. 2 Setting of spray model

模型类型	模型设置
湍流模型	标准 $k-\epsilon$ 模型
湍流扩散模型	O'Rourke 模型
液滴碰撞模型	NTC 模型
破碎模型	KH-RT 模型
子液滴模型	开

如图3所示,计算域为一个直径100 mm高100 mm的圆柱形定容弹,为提高计算精度采用嵌入式网格,将笛卡尔坐标下的网格方向改为沿喷雾发展方向。计算域网格基础尺寸为2.0 mm,嵌入式网格尺寸为0.5 mm。

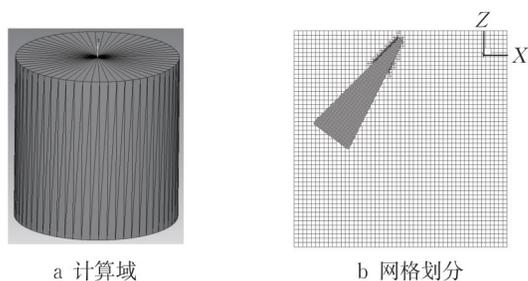


图3 喷雾模拟计算域及网格划分

Fig. 3 Mesh grid of spray model

2 结果验证与分析

2.1 内流模型验证

在研究喷雾模型参数的影响前,需先验证内流VOF模型的准确性。图4为喷嘴出口质量流量的实验和模拟结果,其中实验结果为Parrish^[20]利用博世长管法测得的Spray G标准工况数据,在稳定喷射阶段,平均质量流量约为 $13.87 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$,模拟仅选取了其中一个喷孔,单孔平均质量流量为 $1.79 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$,八孔平均质量流量为 $14.32 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$,误差为3.2%,模拟结果与实验结果具有较好的一致性。

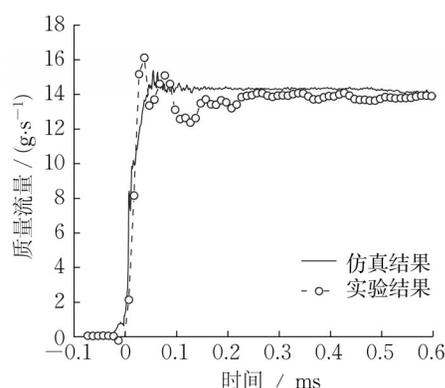


图4 Spray G喷嘴质量流量模拟结果与实验结果对比

Fig. 4 Comparison of simulation results and experimental results of mass flow rate

2.2 模型参数影响分析

本节主要介绍湍流模型参数、单项耦合模型参数以及破碎模型参数对喷雾贯穿距和粒径的影响,探讨各参数对喷雾特性的影响规律。前人研究中提出湍流模型参数 $C_{\epsilon 1}$ 对喷雾贯穿距影响较大, $C_{\epsilon 1}$ 是标准 $k-\epsilon$ 模型中湍动能耗散率输运方程中的经验常数,一般取1.44^[14]。一些学者发现使用推荐值会出现过度预测的情况,建议将此值增大^[21],而也有一些学者发现将此值调小后的预测结果与实验值更为接近^[14]。因此本文在推荐值附近选取了一些点来了解 $C_{\epsilon 1}$ 对喷雾贯穿距和粒径的影响。图5为湍流参数 $C_{\epsilon 1}$ 从1.35变化到1.47时喷雾贯穿距随时间的变化,以喷雾从沉孔刚出现的时刻为0时刻点,0.1 ms之前不同 $C_{\epsilon 1}$ 的贯穿距结果区别不大,而0.2 ms之后随着时间的增长,不同 $C_{\epsilon 1}$ 之间的贯穿距差值逐渐增大, $C_{\epsilon 1}$ 值越大,喷雾贯穿距的增长速率越大。

图6为0.4 ms时刻喷雾贯穿距和粒径随 $C_{\epsilon 1}$ 的变化。实验测量一般选取距喷油器顶端15 mm处,模拟结果同样选取沿Z轴方向(喷油器轴向)距喷孔

15~16 mm处粒子粒径。随着 C_{ei} 从 1.35 增大到 1.47, 贯穿距从 18.4 mm 增大到了 21.6 mm, 增大了 17.4%, 且基本呈线性增大, 而粒径也从 $7.82 \mu\text{m}$ 增大到 $9.90 \mu\text{m}$ 。湍流系数 C_{ei} 对贯穿距和粒径都有很大影响。

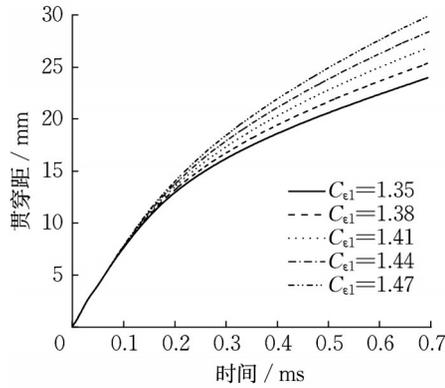


图5 湍流参数 C_{ei} 对喷雾贯穿距的影响
Fig. 5 Effect of turbulence parameter C_{ei} on spray penetration

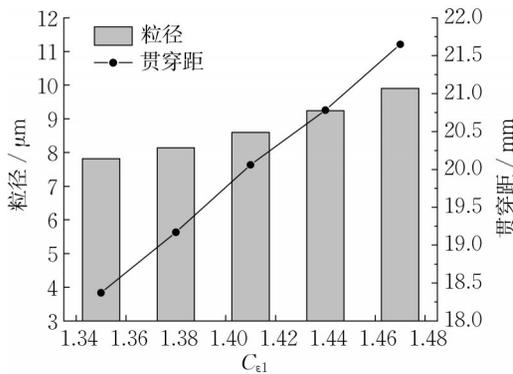


图6 0.4 ms 时刻贯穿距及粒径随 C_{ei} 的变化
Fig. 6 Penetration and mean droplet size versus C_{ei} at 0.4 ms

单向耦合模型中的参数 Threshold (T_h) 是每个网格内从连续相转化为离散相的重要参数, 当网格内气相体积分数大于此阈值时, 生成至少一个粒子; 当网格内气相体积分数小于此阈值时, 此网格不生成粒子。 T_h 值的大小影响喷嘴出口附近粒子的数量, 取值范围一般在 0.1~0.5 之间。图7为不同 T_h 对贯穿距的影响。 T_h 主要影响喷雾贯穿距的前期发展, 0.2 ms 之前 T_h 值越大, 贯穿距增长速度越快, 而从 0.3 ms 之后, 各曲线斜率基本相同, 不同 T_h 的贯穿距增长速度基本相同, 可以认为 T_h 对喷雾发展后期基本没有影响。 0.4 ms 时刻不同 T_h 值下贯穿距及粒径结果如图8所示。由于 T_h 值主要影响喷射初期, T_h 值越大, 0.4 ms 时刻的喷雾贯穿距越大, 但 T_h

值对粒径几乎没有影响。

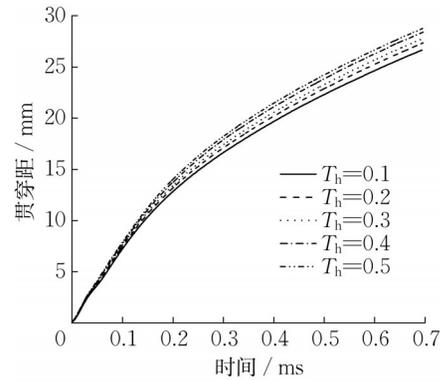


图7 单向耦合模型参数 T_h 对喷雾贯穿距的影响
Fig. 7 Effect of one-way coupling model constant T_h on spray penetration

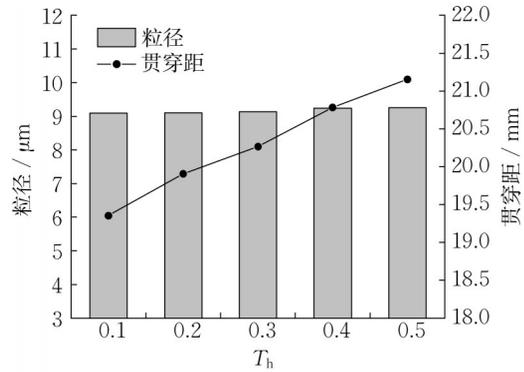
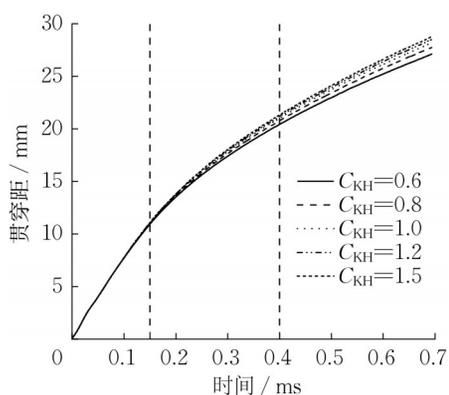
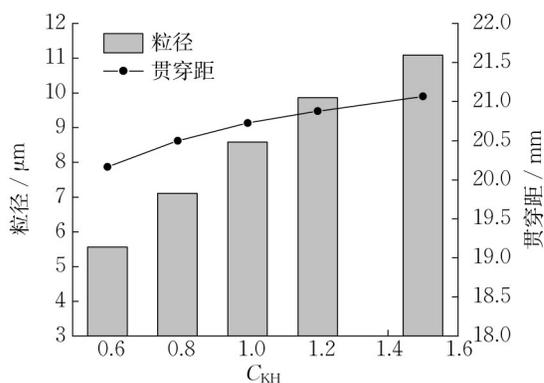


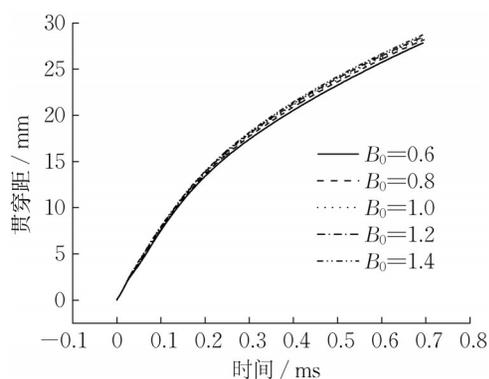
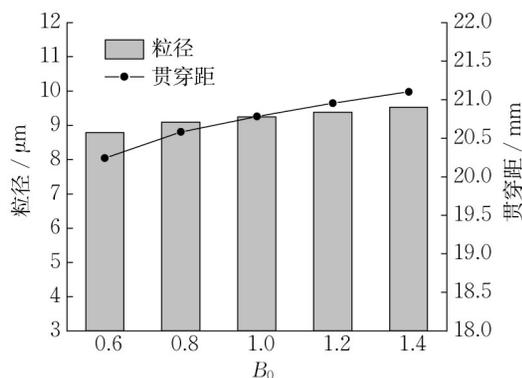
图8 0.4 ms 时刻贯穿距及粒径随 T_h 的变化
Fig. 8 Penetration and mean droplet size versus T_h at 0.4 ms

KH(Kelvin-Helmholtz)破碎模型是基于射流稳定性分析所建立的, 该模型认为液滴的破碎雾化是由不稳定波引起的, 喷雾液滴的粒径大小与增长速度最快的不稳定波长成正比, 适用于相对速度较高或环境密度较大的情况。研究发现, KH模型中的尺寸参数 (C_{KH}) 对喷雾特性影响较大, C_{KH} 即为不稳定波长的比例系数。一般而言 C_{KH} 值越大, 粒径越大, 取值范围一般在 1 附近。图9展示了 C_{KH} 对喷雾贯穿距的影响。 0.15 ms 之前不同尺寸参数贯穿距基本相同, 0.15 ms 之后贯穿距随 C_{KH} 的增大而增大, 但 C_{KH} 值大于 1 之后, 贯穿距增长速度变缓, 且喷雾发展后期 (0.4 ms 以后) 贯穿距斜率基本相同。可以发现, 尺寸参数 C_{KH} 主要影响喷雾发展过程中的中间段。如图10所示, C_{KH} 对粒径的影响较大, 随 C_{KH} 从 0.6 增大到 1.5, 粒径从 $5.56 \mu\text{m}$ 增大到 $11.08 \mu\text{m}$, 增大了 99.3%。 C_{KH} 小于 1.2 时, 粒径基本与 C_{KH} 线性变化, C_{KH} 大于 1.2 后, 粒径增长速率减缓。

图9 KH模型尺寸参数 C_{KH} 对喷雾贯穿距的影响Fig. 9 Effect of KH model constant C_{KH} on spray penetration图10 0.4 ms时刻贯穿距及粒径随 C_{KH} 的变化Fig. 10 Penetration and mean droplet size versus C_{KH} at 0.4 ms

RT(Rayleigh-Taylor)机制是由于液滴快速减速而导致的表面波在液滴背风面快速增长,引起大液滴变形破碎成小液滴的过程。KH-RT模型认为燃油喷射过程中,液滴破碎雾化是由KH机制和RT机制共同作用完成的,通过液核破碎长度 L_b 决定哪种机制占主导作用。从喷孔出口到液核破碎长度 L_b 的范围内,仅由KH机制主导破碎过程,超出 L_b 的范围,由KH机制和RT机制共同作用完成破碎。本研究由于使用的GDI喷油器长径比较短,一般认为从喷孔出口开始RT机制即开始启用。针对RT模型参数,首先研究了RT模型中的破碎时间参数 B_0 对喷雾特性的影响,增大 B_0 可以延长RT破碎时间, B_0 的取值范围一般在1附近。如图11所示, B_0 越大,贯穿距在整个喷射周期内都略微增大,但增幅较小。图12结果也说明 B_0 对粒径影响较小。

虽然RT模型中的破碎时间参数对贯穿距和粒径影响较小,但尺寸参数 C_{RT} 对贯穿距和粒径影响较

图11 RT模型破碎时间参数 B_0 对贯穿距的影响Fig. 11 Effect of RT model break time constant B_0 on spray penetration图12 0.4 ms时刻贯穿距和粒径随 B_0 的变化Fig. 12 Penetration and mean droplet size versus B_0 at 0.4 ms

大。 C_{RT} 主要影响RT破碎过程中粒径的大小,如图13所示, C_{RT} 在整个喷射周期内都对贯穿距有较大影响, C_{RT} 越大,贯穿距越大,但当 C_{RT} 大于0.8后,增大 C_{RT} 对贯穿距的影响减弱。0.4 ms时刻不同 C_{RT} 贯穿距和粒径对比如图14所示,随 C_{RT} 的增大,贯穿距增长速率逐渐降低。 $C_{RT} \leq 0.8$ 时,粒径从 $3.5 \mu\text{m}$ 增大到 $9.24 \mu\text{m}$ 且基本呈线性增大,而 $C_{RT} > 0.8$ 时,粒径基本不变。可见, C_{RT} 在0.4~0.8范围内调节对贯穿距和粒径影响最大。

综合对比各参数对喷雾贯穿距和粒径的影响,可以发现湍流参数 C_{e1} 和RT模型的尺寸参数 C_{RT} 对贯穿距影响较大,KH模型的尺寸参数 C_{KH} 和RT模型的尺寸参数 C_{RT} 对粒径影响最大,单项耦合参数 T_h 仅对喷雾发展初期有一定影响,对粒径几乎没有影响。KH模型中的破碎时间参数 B_0 对贯穿距和粒径影响微乎其微。喷雾贯穿距的标定主要以调节湍流系数 C_{e1} 和RT模型尺寸参数 C_{RT} 为主,粒径的标定主

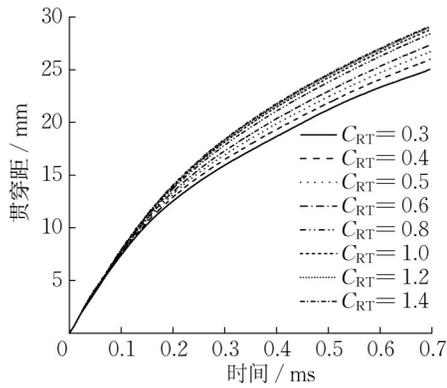


图13 RT模型尺寸参数 C_{RT} 对贯穿距的影响
Fig. 13 Effect of RT model constant C_{RT} on spray penetration

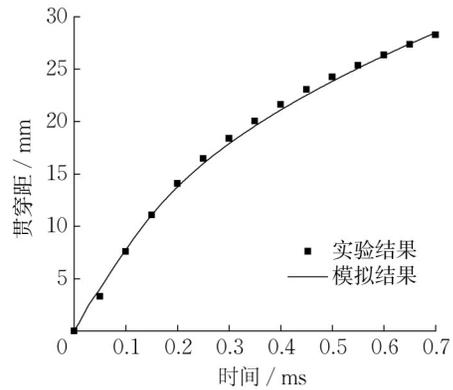


图15 Spray G喷雾贯穿距实验结果与模拟结果对比
Fig. 15 Comparison of simulation and experimental results of Spray G penetration

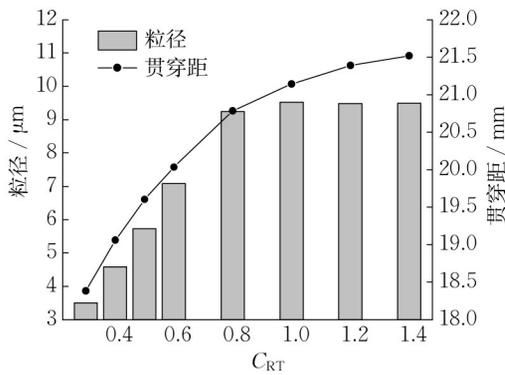


图14 0.4 ms时刻贯穿距和粒径随 C_{RT} 的变化
Fig. 14 Penetration and mean droplet size versus C_{RT} at 0.4 ms

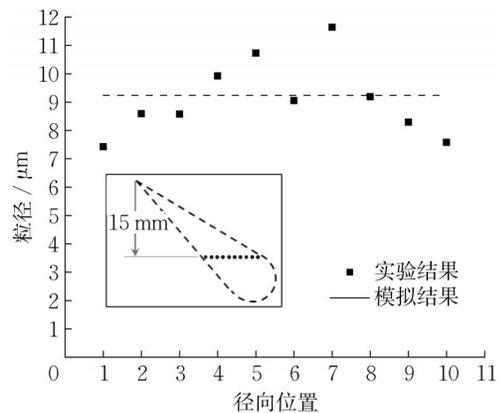


图16 轴向距离15 mm处喷雾粒径实验与模拟结果对比
Fig. 16 Comparison of experimental and simulation results of droplet size at an axial distance of 15 mm

要依靠调节尺寸参数 C_{KH} 和 C_{RT} 。

2.3 多工况喷雾模型验证

根据上述湍流参数、单向耦合参数和破碎模型参数对喷雾特性的影响,选定 C_{el} 为 1.44, T_h 为 0.4, C_{KH} 为 1.1, C_{RT} 为 0.8, B_0 为 1, 贯穿距模拟结果与实验结果如图 15 所示。实验数据为由墨尔本大学测得^[22]。模拟结果在喷射的前中后期均与实验结果匹配良好。Parrish 等^[23]使用相位多普勒粒子分析仪,测量了距喷孔出口轴向距离 15 mm 处 10 个径向位置的粒径,实验结果与模拟结果对比如图 16 所示,模拟结果平均粒径为 9.24 μm ,试验中 10 个径向位置的平均粒径为 9.01 μm ,误差仅为 2.6%。

喷雾形态实验结果与模拟结果对比如图 17 所示,由于模拟采用 RANS 湍流模型,无法再现喷雾表面的纹理褶皱,但基本轮廓与实验结果较为相似,与目前的多数模拟相比,更为贴合实验形态。

现有的大部分模型仅用一个工况点进行标定,

变动工况后模拟结果往往与实验结果差距较大。为验证综合多个参数调教出的模型的适用性,本文模拟了不同环境密度和温度下的喷雾特性,其中包括墨尔本大学测量的早期喷射工况^[22],以及 Payri 等^[24]在较高环境气体密度下测试的工况,具体边界条件如表 3 所示。

上述 3 种工况的贯穿距实验结果和仿真结果如图 18 所示,环境气体密度为 $1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,模拟结果与实验结果在前期和后期匹配良好,在 0.25 ms 附近时预测结果略微偏高。环境气体密度较高的工况下,模拟结果比实验结果略低,推测是由于这两种工况与前述 ECN 网站上的数据非同一机构测试,数据处理方式的不同导致了结果有所区别,但总体趋势基本相同,且最大误差仅为 10% 左右。

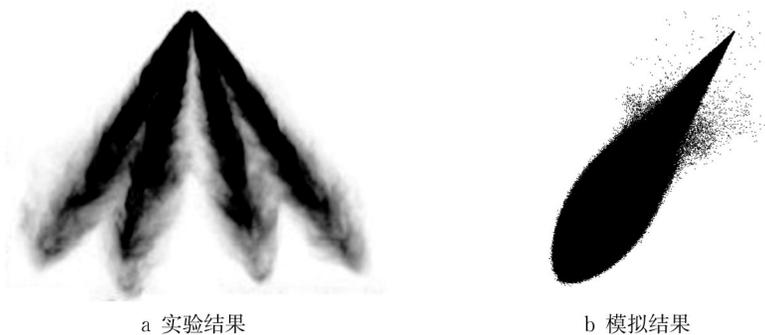


图17 喷雾形态实验结果与模拟结果对比

Fig.17 Comparison of experimental and simulation results of spray morphology

表3 不同工况边界条件设置

Tab.3 Setting of different boundary conditions

喷射压力/MPa	环境气体密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	环境温度/K
20	1	333
20	4	500
20	5	500

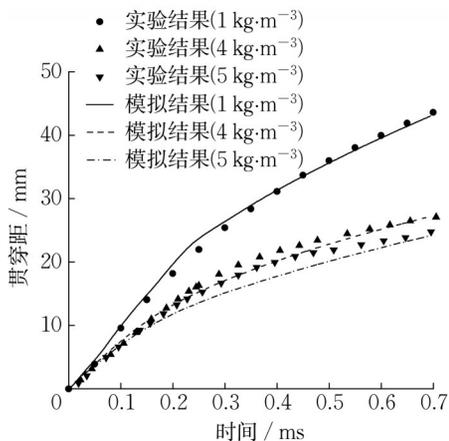


图18 不同工况喷雾贯穿距实验结果与仿真结果对比

Fig.18 Comparison of experimental and simulation results of penetration in different conditions

3 结论

本文基于单向耦合方法,依托 Spray G 喷油器,研究了湍流模型参数、单向耦合模型参数和破碎模型参数对 GDI 发动机喷雾特性的影响,综合多参数实现了不同工况贯穿距和粒径的高精度标定,提出了喷雾模拟的多参数标定方法。在此基础上获得了高精度喷雾模型,模拟结果显示 Spray G 工况贯穿距和粒径与实验结果误差在 3% 以内,不同环境气体密度的多种工况误差在 10% 左右。具体结论如下:

(1)湍流系数 C_{e1} 主要影响喷雾发展过程中的中后期,随 C_{e1} 的增大,喷雾贯穿距的增长速率增大,粒

径略微增大。调节 C_{e1} 可在保持粒径变化较小的基础上大幅改变贯穿距大小。

(2)单向耦合模型参数 T_h 主要影响喷雾发展前期,增大 T_h 基本不影响粒径大小,但会使贯穿距小幅增大。

(3)KH 模型尺寸参数 C_{KH} 主要影响喷雾发展中期,粒径随 C_{KH} 的增大而增大,调节 C_{KH} 会略微影响贯穿距,但可以大幅改变粒径。

(4)RT 模型破碎时间参数 B_0 对贯穿距和粒径影响较小,但尺寸参数 C_{RT} 对贯穿距和粒径影响较大。 C_{RT} 小于 0.8 时,贯穿距及粒径随 C_{RT} 的增大大幅增大,但 C_{RT} 大于 0.8 后,其对贯穿距和粒径的影响变小。

(5)喷雾贯穿距的受湍流系数 C_{e1} 和 RT 模型尺寸参数 C_{RT} 影响最大,粒径的大小主要受尺寸参数 C_{KH} 和 C_{RT} 的影响,标定时可优先考虑调整这 3 个参数。

作者贡献声明:

冷鹏飞:喷雾模型各参数影响研究。

胡超群:模拟数据整理归纳。

杨春雨:内流模型标定。

阮慧琳:参考文献收集整理。

赵文伯:协助指导内流及喷雾模型参数研究。

于洋:指导论文整体架构。

李理光:论文研究方法指导。

吴志军:指导论文研究内容,论文整体架构指导。

参考文献:

- [1] 马文华. 我国汽车保有量 4.08 亿辆[EB/OL]. (2022-08-12) [2022-11-16]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-08/12/content_5705101.htm.
MA Wenhua. China has 408 million vehicles[EB/OL]. (2022-08-12) [2022-11-16]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-08/12/content_5705101.htm.

- [2] ASHFAQ M, BUTT O, SELVARAJ J, *et al.* Assessment of electric vehicle charging infrastructure and its impact on the electric grid: a review [J]. *International Journal of Green Energy*, 2021, 18(7): 657.
- [3] LI T, MOON S, SATO K, *et al.* A comprehensive study on the factors affecting near-nozzle spray dynamics of multi-hole GDI injectors[J]. *Fuel*, 2017, 190: 292.
- [4] 曹天义. 柴油机喷嘴内空化形态特性及对系统压力波动和喷雾的影响研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
CAO Tianyi. The study on cavitating pattern characteristics and their effects on pressure fluctuations and spray in the diesel nozzle[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021.
- [5] 李治龙, 吴志军, 高原, 等. 基于同步辐射高能X射线的喷油器喷嘴内部几何结构及尺寸的测量[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2011, 41(1): 128.
LI Zhilong, WU Zhijun, GAO Yuan, *et al.* Measurement method for diesel nozzle internal geometry and size using high-energy synchrotron radiation X-ray [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology)*, 2011, 41(1): 128.
- [6] MOON S, KOMADA K, LI Z, *et al.* High-speed X-ray imaging of in-nozzle cavitation and emerging jet flow of multi-hole GDI injector under practical operating conditions [C]// *Proceedings of ICLASS 2015*. Tainan: Nstitute for Liquid Atomization and Spray Systems-A, 2015: 1-8.
- [7] 高雅. 基于同步辐射X射线的高压燃油射流液核破碎特性测量及内在机理研究[D]. 上海: 同济大学, 2021.
GAO Ya. Liquid-jet breakup characteristics and mechanism analysis in high-pressure gasoline nozzles using synchrotron X-ray techniques[D]. Shanghai: Tongji University, 2021.
- [8] WU Z, ZHAO W, LI Z, *et al.* A review of engine fuel injection studies using synchrotron radiation x-ray imaging [J]. *Automotive Innovation*, 2019, 2(2): 79.
- [9] PRATAMA R H, HUANG W, MOON S, *et al.* Hydraulic flip in a gasoline direct injection injector and its effect on injected spray[J]. *Fuel*, 2022, 310: 122303.
- [10] 王梓森. 闪急沸腾喷雾特性及燃烧和排放影响的仿真研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
WANG Zisen. Simulation study of flash boiling spray characteristics and combustion and emission effects [D]. Changchun: Jilin University. 2022.
- [11] 张威龙. 喷孔内气穴生成及喷雾近场耦合特性数值研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
ZHANG Weilong. Numerical study on the characteristics of in-nozzle cavitation formation coupling the near-field spray [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [12] ZHAO W, LI Z, DENG J, *et al.* Experimental and numerical study on the effects of nozzle geometry features on the nozzle internal flow and cavitation characteristics [J]. *Atomization and Sprays*, 2021, 31(6): 67.
- [13] PANDAL B A. Implementation and development of an Eulerian spray model for CFD simulations of diesel sprays[D]. València: Universitat Politècnica de València, 2016.
- [14] SAHA K, QUAN S, BATTISTONI M, *et al.* Coupled Eulerian internal nozzle flow and Lagrangian spray simulations for GDI systems[R]. Detroit: SAE, 2017.
- [15] MOHAN B, BADRA J, SIM J, *et al.* Coupled in-nozzle flow and spray simulation of engine combustion network spray-G injector[J]. *International Journal of Engine Research*, 2021, 22(9): 2982.
- [16] PAREDI D, LUCCHINI T, D'ERRICO G, *et al.* Validation of a comprehensive computational fluid dynamics methodology to predict the direct injection process of gasoline sprays using Spray G experimental data [J]. *International Journal of Engine Research*, 2020, 21(1): 199.
- [17] SHIELDS B, NEROORKAR K, SCHMIDT D P. Cavitation as rapid flash boiling [C]// *ILASS Americas. 23rd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*. Ventura: Institute for Liquid Atomization and Spray Systems-North and South America, 2011: 110-117.
- [18] Pickett L. Mesh and geometry-engine combustion network [EB/OL]. (2014-04-05) [2022-11-08]. <https://ecn.sandia.gov/data/melbourne-spray-g-data/>.
- [19] POWELL C. Measured needle motion (x-ray phase contrast) [EB/OL]. [2022-11-16]. https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fecn.sandia.gov%2FG%2Fdata%2FneedleLift%2FSprayG28_Xray_NeedleLift.xlsx&wdOrigin=BROWSELINK.
- [20] PARRISH S. Rate of injection (tube method) [EB/OL]. [2022-11-16]. <https://ecn.sandia.gov/gasoline-spray-combustion/target-condition/primary-spray-g-datasets/>.
- [21] GARCIA-OLIVER J M, PASTOR J M, PANDAL A, *et al.* Diesel spray CFD simulations based on the Σ - γ Eulerian atomization model [J]. *Atomization and Sprays*, 2013, 23(1):71.
- [22] PAREDI. Melbourne Spray G data- engine combustion network [EB/OL]. [2022-11-16]. <https://ecn.sandia.gov/data/melbourne-spray-g-data/>.
- [23] PARRISH S. Drop size and velocity at $z = 15$ mm [EB/OL]. [2022-11-16]. <https://ecn.sandia.gov/gasoline-spray-combustion/target-condition/primary-spray-g-datasets/>.
- [24] PAYRI R, SALVADOR F J, MARTÍ-ALDARAVÍ P, *et al.* ECN spray G external spray visualization and spray collapse description through penetration and morphology analysis [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 112: 304.