

喷雾碰壁燃烧数值模拟研究*

秦文瑾, 韩天祥, 张振东, 孙跃东

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘要: 燃油喷雾碰壁是小型高压直喷式柴油机中普遍存在的现象.燃油碰壁会影响缸内燃烧过程,进而显著地影响柴油机的动力学、经济性和排放性.为了更好地认识燃油喷雾碰壁燃烧现象,该研究采用数值模拟的方法对该过程进行计算,探究其特殊的燃烧特性.研究表明:在碰壁喷雾的两阶段燃烧过程中,喷雾碰壁促进喷雾径向发展半径和卷吸高度的增加,促进近壁面油气混合,在近壁面形成有利于低温点火的条件.低温燃烧反应在混合气较为稀薄的近壁面区域开始,随后向碰壁喷雾中心浓混合气区域发展.随着低温氧化燃烧持续放热,碰壁喷雾束中心区域温度逐渐升高,同时积累大量甲醛.由于喷雾碰壁会导致碰壁雾束中心形成较浓混合气,并且低温燃烧放热量较少,导致部分碳氧化物无法完全燃烧,增加了碳烟的生成量.另外随着高温燃烧的进行,温度持续升高,碰壁喷雾卷吸更多环境气体,进而产生大量氮氧化物.

关键词: 喷雾碰壁; 喷雾燃烧; 碳烟; 氮氧化物

中图分类号: O242.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.21656/1000-0887.440077

Numerical Simulation Study of Spray Wall Impingement Combustion

QIN Wenjin, HAN Tianxiang, ZHANG Zhendong, SUN Yuedong

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology,
Shanghai 200093, P.R.China)

Abstract: Fuel spray wall impingement is a common phenomenon in small high-pressure direct injection diesel engines. Fuel spray wall impingement influences the in-cylinder combustion process, and significantly impacts the engine's dynamics, fuel economy, and emissions. To better understand the combustion characteristics of fuel spray wall impingement, the numerical simulation was applied to calculate the process and explore this process. The results show that, during the 2-stage combustion process of spray wall impingement, the impingement promotes the radial development radius and the vortex height of the spray, enhances oil-gas mixing near the wall, and forms favorable conditions for low-temperature ignition near the wall. Low-temperature combustion reactions start in the near-wall region, where the mixture is relatively dilute, and then develop into the dense mixed gas area in the center of the impinging spray. As low-temperature oxidation combustion continues to release heat, the maximum temperature in the center of the impinging spray will gradually increase, and a large amount of CH_2O will accumulate. Meanwhile, the impinging spray can cause the formation of a more concentrated mixture in the center of the impinging spray, and low-temperature combustion would release less heat, resulting in the incomplete combustion of some carbon, and increasing the amount of soot generated. Ad-

* 收稿日期: 2023-03-23; 修订日期: 2023-08-03

基金项目: 上海市科技计划项目(21010503000)

作者简介: 秦文瑾(1981—),男,副教授,博士,硕士生导师(通讯作者. E-mail: qinwenjin@usst.edu.cn).

引用格式: 秦文瑾, 韩天祥, 张振东, 孙跃东. 喷雾碰壁燃烧数值模拟研究[J]. 应用数学和力学, 2023, 44(9): 1087-1096.

ditionally, as high-temperature combustion proceeds, the temperature will continue rising, and the impinging spray will draw more oxygen, generating a large amount of NO_x through oxidation reactions.

Key words: spray wall impingement; spray combustion; soot; NO_x

0 引言

随着汽车工业的高速发展,内燃机成为了最主要的一种动力系统,其造成的汽车尾气排放污染已不可忽视。为保护环境,落实绿色可持续发展战略,我国制定的排放法规也越来越严格。当前由于传统内燃机主要以扩散燃烧为主,其燃烧热效率受油气混合程度的影响,混合不充分以及高温燃烧会产生大量碳烟(soot)和氮氧化物(NO_x)排放^[1-2]。柴油机缸内的高压喷雾行为容易造成燃油碰壁现象,燃油碰壁后会附着在缸套和活塞表面,影响燃油雾化形成混合气,加剧燃烧过程中有害尾气的排放^[3]。

多年来,国内外学者针对喷雾碰壁现象进行了大量的实验以及数值模拟研究。Wachters等^[4]根据水滴垂直撞击高温壁面实验发现液滴撞壁后行为可由液滴 Weber 数判别。Naber 和 Reitz^[5]提出了液滴的碰壁模型,将碰壁行为划分为附着、反弹和射流,但该模型没有考虑碰壁喷雾的动量及能量损失。Bai 和 Gosman 等^[6]根据前人工作,考虑了质量、动量和能量守恒,并将液滴碰壁细分为 7 种不同的行为,更精确地刻画了喷雾碰壁后的形态。O'Rourke 和 Amsden^[7]在原有的油膜模型中,考虑了喷雾碰壁时液滴飞溅以及碰壁液滴对附壁油膜的运动的影响,并在发动机内对真实工况进行了模拟,其结果与实验具有较高的一致性。Han 等^[8]进一步发展了 O'Rourke 和 Amsden 的模型,在此基础上利用概率分布函数描述了二次破碎液滴的分布,将水平速度改为正态分布,其验证结果更加符合实验。Kuhnke^[9]建立的模型中,定义了临界值控制参数,该模型考虑了壁面的干湿条件以及壁面温度,能够很好地捕捉到热壁面引起的热破碎以及湿壁面引起的冠状破碎。此外,为了更加深入地研究喷雾碰壁燃烧现象,学者们针对不同工况进行了大量的喷雾碰壁燃烧实验。Li 等^[10]采用定容燃烧弹对碰壁喷雾燃烧进行了研究,通过与自由射流火焰对比,发现喷油压力的增大有助于改善碰壁喷雾的火焰形态。此外,当发生碰壁行为后,会在近壁面形成较浓混合气导致燃烧恶化,相较于自由射流燃烧,其排放也会有所增加。Liu 等^[11]利用可视化定容弹,通过对比自由射流喷雾和碰壁喷雾形态以及燃烧后的火焰形态发现,喷雾碰壁后在壁面射流前锋形成有利于燃油与空气混合的小涡团,但近壁面混合气也较浓。而自由射流火焰和碰壁喷雾火焰的传播过程基本一致。

目前国内外学者对柴油喷雾碰壁燃烧的研究主要集中在喷射策略、碰壁距离及碰壁角度对喷雾碰壁的影响方面。鉴于实验测量手段的局限,对喷雾燃烧物理化学过程收集的信息有限,而数值模拟可对该过程进行精确刻画,进而获取更加系统、全面的信息。因此,采用数值模拟手段,针对燃油喷雾碰壁行为以及后续的着火和燃烧现象展开研究就显得极其重要。

1 数值方法

1.1 数值计算模型

本研究在定容弹中,采用 Euler-Lagrange 两相流的方法对燃油喷雾破碎、碰壁以及燃烧展开研究。针对燃油破碎剥离油束雾化的现象,本研究采用 KH-RT(Kelvin Helmholtz-Rayleigh Taylor)液滴破碎模型^[12]进行数值模拟。KH-RT 模型将 KH 不稳定扰动波机制和 RT 不稳定扰动波机制结合,将液滴的破碎划分为一次破碎和二次破碎。模型定义了破碎长度 L_b ,当喷雾贯穿距小于 L_b 时,破碎只考虑 KH 扰动波的影响;大于 L_b 时,通过 KH 模型和 RT 模型的竞争效应模拟二次破碎。破碎长度 L_b 定义如下:

$$L_b = C_{bl} \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} d_0, \quad (1)$$

式中, C_{bl} 为 RT 分裂长度常数; ρ_l, ρ_g 表示液体和气体的密度; d_0 为喷嘴的直径。

燃油喷雾碰壁后,液滴会发生附壁、反弹、破碎等现象,本研究采用 wall film model 模型^[13]对该现象进行数值模拟,根据液滴 Weber 数判断碰壁后液滴是否发生反弹行为。当满足 Weber 数小于临界反弹 Weber 数时($We < We_{rebound}$),液滴撞壁后就会触发反弹行为。同时在该模型中还耦合了 Kuhnke 飞溅子模型^[9],考虑了反

弹、热破碎、沉积和飞溅 4 种喷雾撞壁行为,能够更好捕捉到液滴碰壁行为特征,如图 1 所示。

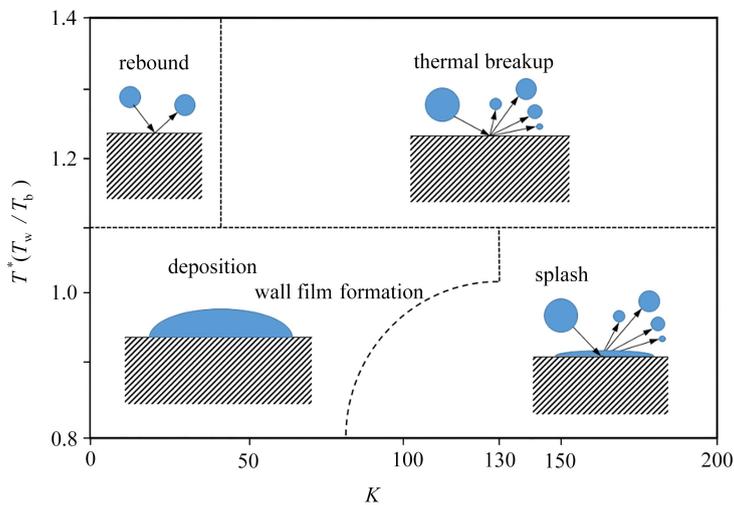


图 1 在 Kuhnke 薄膜飞溅模型中,4 种壁面相互作用类型

Fig. 1 Four types of wall interaction in the Kuhnke thin-film splash model

Kuhnke 模型为了考虑壁面温度和湿度对液滴飞溅程度的影响,定义了一个无量纲壁面温度 T^* 和一个无量纲液滴速度 K :

$$T^* = \frac{T_w}{T_b}, \quad (2)$$

$$K = We^{5/8} L_a^{1/8}, \quad (3)$$

$$L_a = \frac{\sigma \rho L}{\mu^2}. \quad (4)$$

当液滴的 K 值高于特定壁面条件下的溅射临界 K 值时,液滴将发生溅射、热破碎或两者的某种结合。式(4)中 L_a 为 Laplace 数, σ 为表面张力, ρ 为密度, L 为液滴直径, μ 为黏度。

此外,针对喷雾行为下复杂的湍流流场,本研究采用大涡模拟的数学方法进行模拟计算。大涡模拟的主要思想是对湍流在空间上进行过滤,将湍流流场分解为可以求解的大尺度涡和不可求解的小尺度涡。尺寸由计算所选用的网格大小决定,其中大尺度涡对整体流动影响较大,小尺度涡则需要通过亚网格模型计算,其对湍流耗散起作用,故大涡模拟可对较大尺度涡团的运动行为进行较为精准的刻画。为使大涡模拟控制方程组封闭,必须建立关于亚网格应力的数学模型,本研究采用亚网格动态模态模型^[14-15],模型不使用湍流黏度来模拟亚网格应力张量,而是将亚网格应力表示为一个张量系数与亚网格湍动能的函数:

$$\tau_{ij} = c_{ij} k, \quad (5)$$

式中 c_{ij} 表示张量系数, k 表示湍动能。

发动机缸内的燃烧过程涉及物质运输和化学反应,因此选用合适的化学反应机理以及燃烧模型计算模拟其燃烧过程尤为重要。柴油成分十分复杂,包含多种烃类结构,现阶段的计算机能力不足以支持具体成分均予以考虑,故在当下的科学计算环节中,常常采用单组分表征燃料来近似表达复杂的真实燃料。由于正庚烷是柴油的重要组成成分,且其辛烷值与柴油相近,常被作为柴油的表征燃料。故本文亦选用正庚烷作为柴油的表征燃料来有效地对柴油喷雾燃烧进行模拟计算。本研究采用 CONVERGE 软件中自带的正庚烷简化机理,该机理包含 42 种组分、168 步基元反应。通过 SAGE 燃烧模型^[16]将化学反应结果和流场输运方程直接耦合。燃油燃烧排放特性主要关注烟颗粒和氮氧化物。碳烟形成及氧化过程十分复杂,针对碳烟,本研究选用 Dalian 半经验碳烟模型^[17],而氮氧化物选用 Heywood^[18]提出的 extended Zel'dovich 机理模型。

1.2 模型验证

喷雾碰壁燃烧过程非常复杂,液体燃油以较高的喷射压力从喷嘴喷入燃烧室,会发生流动、喷雾破碎、液滴蒸发、油气混合、液滴碰壁和燃烧现象,且多种物化现象相互耦合、相互影响。为保证数值模拟结果的准确

性,本研究对 KH-RT 液滴破碎模型和液滴碰壁模型模拟结果进行了实验验证。

喷雾发生碰壁行为后,同时还伴随着液滴反弹、液滴间的碰撞以及液滴飞溅等行为。为了保证模拟结果的有效性,根据 Montanaro 等^[19]利用纹影和 Mie 散射成像系统技术对碰壁喷雾形态发展特性展开的实验研究结果,对本研究采用的 KH-RT 液滴破碎模型和 wall film model 碰壁模型以及 Kuhnke 飞溅子模型进行了验证。实验参数如表 1 所示。

图 2 为喷雾碰壁后液滴空间分布情况,对比可知,模拟喷雾碰壁后的喷雾形态、液滴空间分布和实验吻合度很高。从图 3 中可以看出,模拟碰壁喷雾的纵向发展半径以及轴向卷吸高度和实验具有较高的一致性,说明本研究采用的碰壁模型以及飞溅模型可以准确地描述喷雾碰壁后的行为。

表 1 喷雾碰壁等实验参数

Table 1 Experimental parameters of spray wall impingement et al

parameter	value
injection pressure P_1 /MPa	15
ambient pressure P_a /MPa	0.1
ambient temperature T_a /K	296
wall temperature T_w /K	473
impingement distance l /mm	22.5

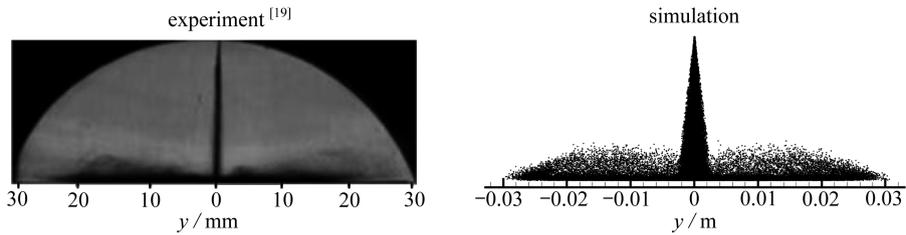


图 2 碰壁喷雾液滴空间分布与实验对比

Fig. 2 Comparison between the spatial distributions of impinging spray droplets and experimental results

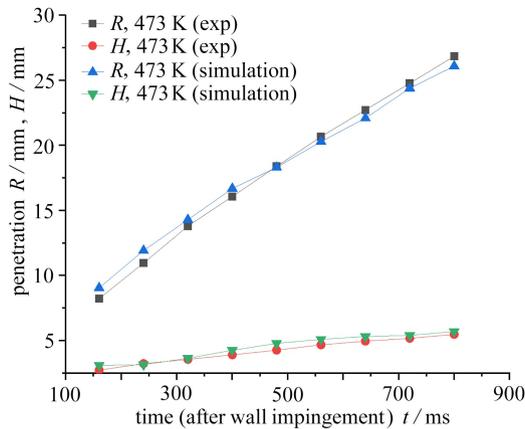


图 3 喷雾贯穿距与实验对比

Fig. 3 Comparison between the spray penetration distances and experimental results

注 为了解释图中的颜色,读者可以参考本文的电子网页版本,后同。

1.3 喷雾碰壁燃烧三维计算模型

针对喷雾碰壁燃烧,娄珏珏^[20]展开了相关的实验研究,采用高速摄影机直拍的方法,研究了喷雾碰壁着火和燃烧的特性。本文依据该实验展开关于喷雾碰壁燃烧的研究,详细实验参数如表 2 所示。因正庚烷的辛烷值与柴油相近,本研究采用正庚烷作为柴油的替代燃料进行模拟计算。模拟所用的定容弹结构模型为上壁面半径为 20 mm,下壁面半径为 40 mm,碰壁距离为 40 mm 的圆台形结构,如图 4 所示。计算网格采用加密策略,分别对喷孔、壁面边界以及碰壁火焰发展区域进行固定加密,另外还依据气相流场速度、温度以及组分采

取了自适应动态加密,计算域最小网格尺寸为 0.1 mm。

表 2 实验参数

Table 2 Numerical simulation parameters

parameter	value
injection pressure P_1 /MPa	40
impingement distance l /mm	40
ambient temperature T_a /K	813
wall temperature T_w /K	408

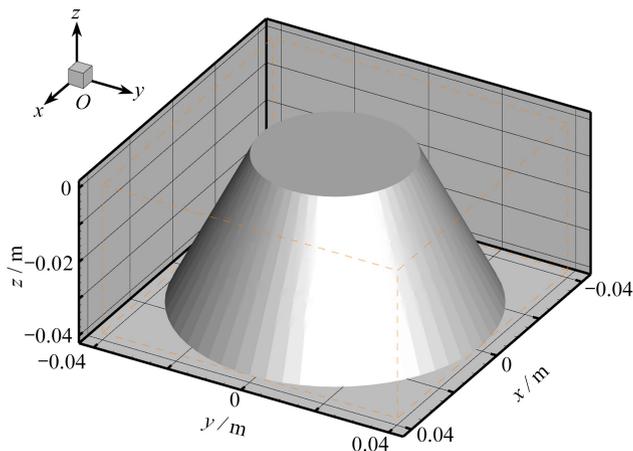


图 4 三维仿真模型

Fig. 4 The 3D simulation model

2 结果分析

喷雾火焰的着火过程是一个复杂的物理化学反应过程。低温液态燃油通过高压喷入高温高压的定容弹内,形成具有较大动量的燃油小液滴。随着喷雾的发展,喷雾射流吸热气化形成小涡团,并在喷雾射流前端出现可燃混合气。Skeen 等^[21]实验结果表明,喷雾火焰呈两阶段着火过程,存在低温和高温燃烧。即喷雾发展的早期,由于低温放热过程的出现,喷雾前锋的轮廓开始变得模糊,并且还能够测得较强的甲醛(CH_2O)信号。随后,高温火核在高浓度混合气区域出现,标志着燃烧反应从低温过渡到了高温。因此可根据反应中间组分的生成和消耗来识别两阶段着火,其中 CH_2O 是低温着火过程中的重要产物之一,可以作为着火标识物,同时也代表着喷雾中的冷焰区域。羟基(OH)主要在扩散火焰中形成,可以作为高温燃烧的标志物。

本研究采用 Pei 等^[22]对两阶段燃烧的定义,将环境温度开始升温并且温升小于 400 K 时认定为低温燃烧,将温升大于 400 K 时认定为高温燃烧。如图 5 所示,1.5 ms 时刻定容弹内最高温度已经有明显的上升趋势,故认为此时刻可为低温点火时刻。图 6 展示了低温点火时刻以及高温点火时刻气相中 CH_2O 、 OH 和温度的分布情况,通过与实验中燃烧火焰轮廓以及火焰的高度对比,可以得出模拟结果与实验结果有较高的吻合度,反应了模拟结果的有效性。低温燃油从喷孔高压喷入定容弹会经历破碎雾化,随后和壁面发生碰撞,整个过程中还伴随着液滴间的碰撞聚合、吸热蒸发等一系列复杂过程。喷雾碰壁会促进液滴索特平均直径减小,有利于小液滴快速蒸发,从而达到促进油气混合的效果。从低温点火时刻 CH_2O 云图中可以看出, CH_2O 首先出现在燃油混合质量分数低于当量混合分数的稀薄燃料区域,同时生成少量的 OH ,说明此时已经进入到低温燃烧阶段,正庚烷发生氧化反应,放出热量致使喷雾射流区以及喷雾雾束前端温度开始升高。

图 7 所示为 CH_2O 在低温燃烧进程中的质量分数分布,随着低温燃烧的进行,正庚烷氧化反应持续放热,定容弹内温度升高,混合气分子活性也相应增加,促进化学反应进程。为进一步分析低温燃烧过程,重点关注高温燃烧之前 CH_2O 质量分数的分布情况以及质量累计。从图中可以得出,低温火焰首先出现在碰壁喷雾雾束外围的低浓度混合气区域。这是因为喷雾发生碰壁之后,致使燃油液滴破碎更加剧烈,形成更加复杂

的涡团运动带动小液滴向喷雾雾束外围发展.随着壁面射流发展,不断卷吸高温环境气体,喷雾内部密度降低,体积膨胀,从而形成在低温环境更适合燃烧的混合气.结合图5中 CH_2O 质量变化图,可以得出在随后的低温燃烧氧化反应逐渐由低浓度混合气区域过渡到高浓度混合气区域,并且在高浓度混合气区域积累大量的 CH_2O .这是因为随着低温燃烧进程持续发展,正庚烷氧化不断放出热量,高浓度区域混合气活性增强,达到着火点开始燃烧产生 CH_2O .

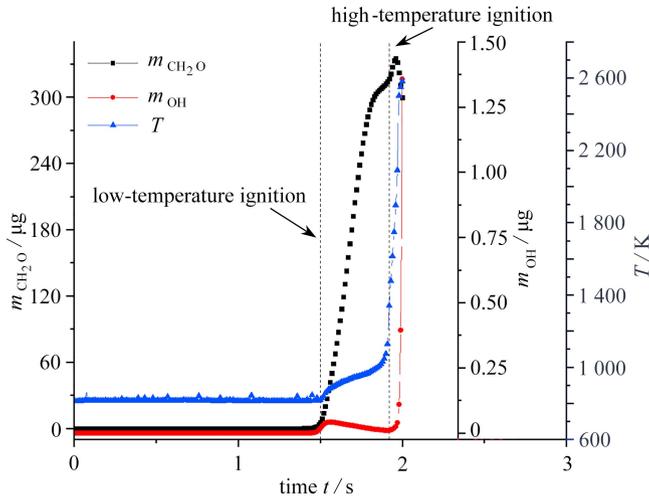
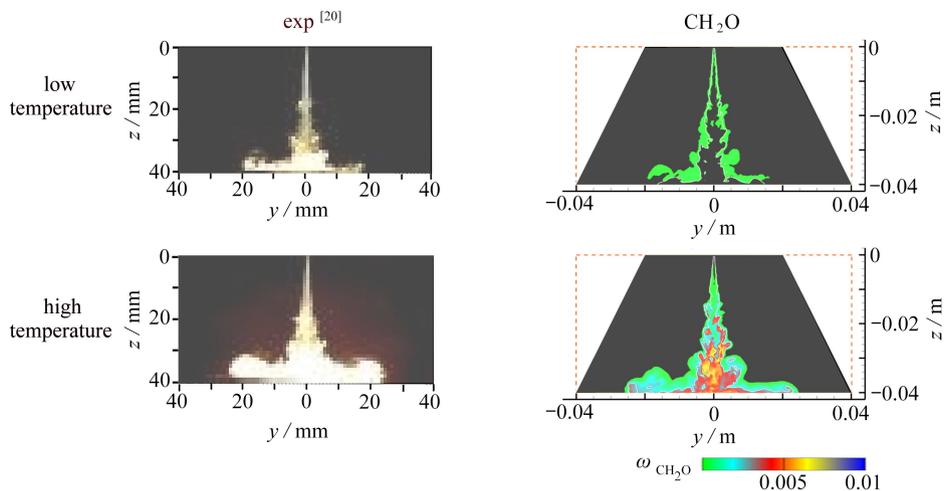


图5 CH_2O 质量、OH质量和温度变化

Fig. 5 Changes in CH_2O and OH masses and temperatures

另外还可以发现,在低温燃烧后期,相较于壁面射流区,自由射流区产生的 CH_2O 更多,说明低温燃烧阶段自由射流区火焰比壁面射流区火焰更稳定.这是因为壁面温度低于环境温度,导致在近壁面形成温度梯度.近壁面的混合气受温度的影响,其化学反应进程会受到一定的抑制作用.

根据此前定义温升在达到400 K以上时为高温燃烧阶段.由图5可知,在1.5 ms开始时刻产生少量的 CH_2O ,这是因为可燃混合气达到低温着火点,正庚烷氧化生成 CH_2O ,说明此时已经进入低温燃烧阶段.随着低温燃烧的进行,因为正庚烷持续发生氧化反应并放出热量,可燃混合气内部分子热运动更加剧烈,促进了反应进程,致使 CH_2O 累积质量逐渐增加至316.5 μg .随后在1.92 ms时刻定容弹内最高温度开始骤然上升至1341 K,与此同时 CH_2O 质量呈现下降趋势,同时表征高温燃烧的OH也在这一时刻呈现上升趋势.在1.92 ms之后温度开始迅速升高,高混合气浓度区域积累的大量 CH_2O 开始骤减,其质量从1.92 ms高温燃烧开始至2 ms内迅速消耗了5%,而与之相反,OH质量开始大量上升,其质量从1.92 ms高温燃烧开始时微量的0.01 μg 到2 ms时迅速增加至1.35 μg .



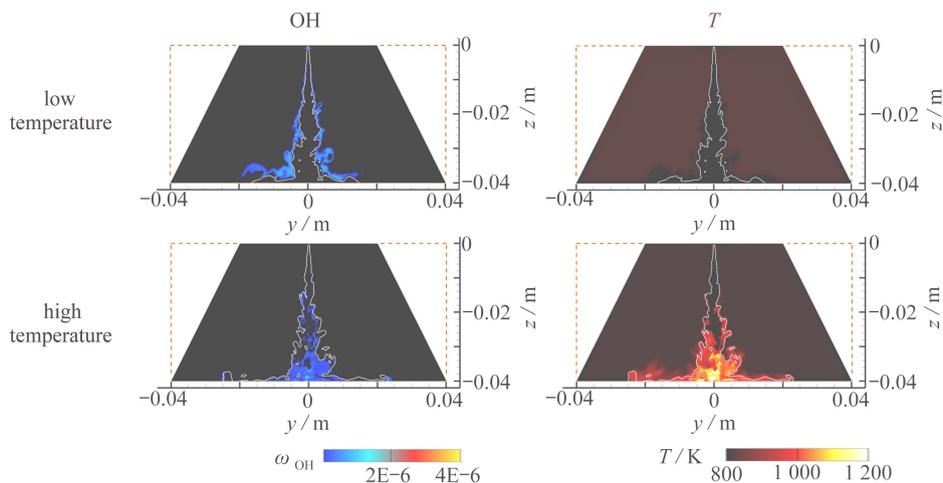


图 6 CH₂O、OH 和温度分布云图(白色轮廓线为当量混合分数 $Z_{st} = 0.068$)

Fig. 6 Distribution maps of CH₂O, OH, and the temperature (the white contour line represents equivalent mixture fraction $Z_{st} = 0.068$)

这是因为低温燃烧阶段正庚烷氧化持续放热,导致定容弹内温度逐渐升高至高温着火点温度,同时燃烧反应开始消耗 CH₂O 并生成大量 OH。故可认为 1.5~1.92 ms 时间段内为低温燃烧阶段,在 1.92 ms 时刻碰壁喷雾进入高温燃烧阶段。其点火延迟期与实验存在一定的差异,这是因为单一组分的正庚烷相比于成分复杂的柴油,理化性质有一定的差别。另外试验采用高速摄影机来拍摄点火时刻,定义出现明显火焰区域为点火时刻,也会存在一定的误差。所以,可以认为当前模拟结果较为合理地模拟了柴油喷雾碰壁燃烧过程,以及通过中间组分来区别两阶段燃烧也会相对精确。根据图 5 和图 7 中 CH₂O 质量分数分布以及累计质量,可以发现前期低温氧化燃烧在高浓度混合气区域已经积累了大量的 CH₂O,并且主要分布在喷雾碰壁中心处,导致在高温燃烧开始时刻已经存在大量 CH₂O。OH 主要在扩散火焰中形成,可以作为高温燃烧的标志物,此时在高混合气浓度区域已经开始积累 OH。进入高温燃烧阶段之后,温度开始迅速升高,在高混合气浓度区域积累的大量 CH₂O 开始骤减,与之相反,OH 质量开始大量上升。相比于图 6 中低温燃烧温度云图,在高温燃烧开始时刻,高温主要集中在高浓度燃油混合气区域。

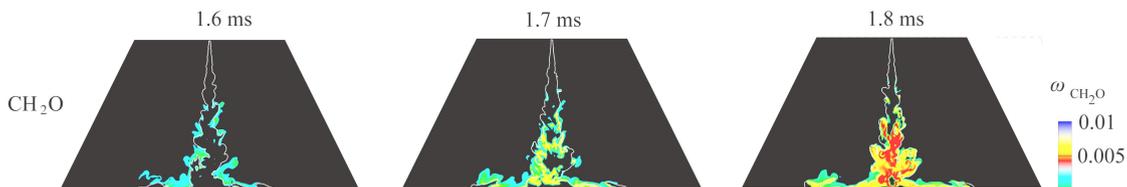


图 7 低温燃烧阶段 CH₂O 空间分布云图

Fig. 7 Spatial distribution maps of CH₂O during the low-temperature combustion stage

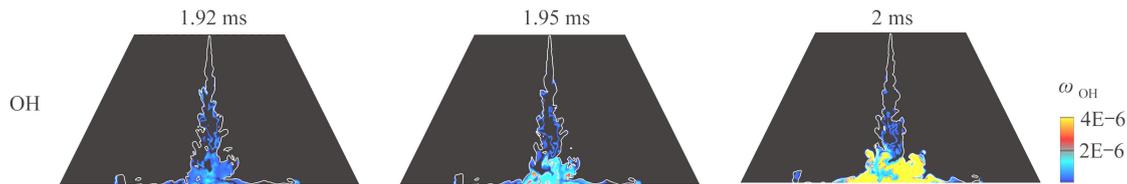


图 8 高温燃烧阶段 OH 空间分布云图

Fig. 8 Spatial distribution maps of OH during the high-temperature combustion stage

从图 8 高温点火时刻中可以得出,高温燃烧从近壁面高混合气浓度区域开始燃烧,生成大量 OH,放出大量热,促进了化学反应进程,同时高温扩散火焰迅速传向周围,从高混合气浓度区域过渡至低混合气浓度区域。图 9 分别为低温和高温燃烧阶段混合质量分数和温度的对应分布关系。可以得出低温燃烧阶段火焰首

先出现在贫燃区,随着燃烧反应的进行,富燃区低温燃烧加强,温度升高.这是因为喷雾碰壁导致壁面射流在向前发展的过程中伴随着更强的气相涡团运动,使得喷雾径向发展半径以及轴向卷吸高度都有所增加,油气混合更充分.低温燃烧反应由贫燃区向富燃区发展,喷雾碰壁致使燃油混合质量分数更均匀,所以有利于低温着火.低温着火后,积累大量 CH_2O ,并持续放热.当温度达到适宜高温燃烧时,高温火焰开始在近壁面高浓度混合气区域消耗 CH_2O 并产生大量 OH 的同时向低浓度混合气区域发展,对比定容弹内温度分布可以得出碰壁喷雾高温扩散火焰的面积更大,更有利于燃油充分燃烧,这与前面火焰传播分析一致.

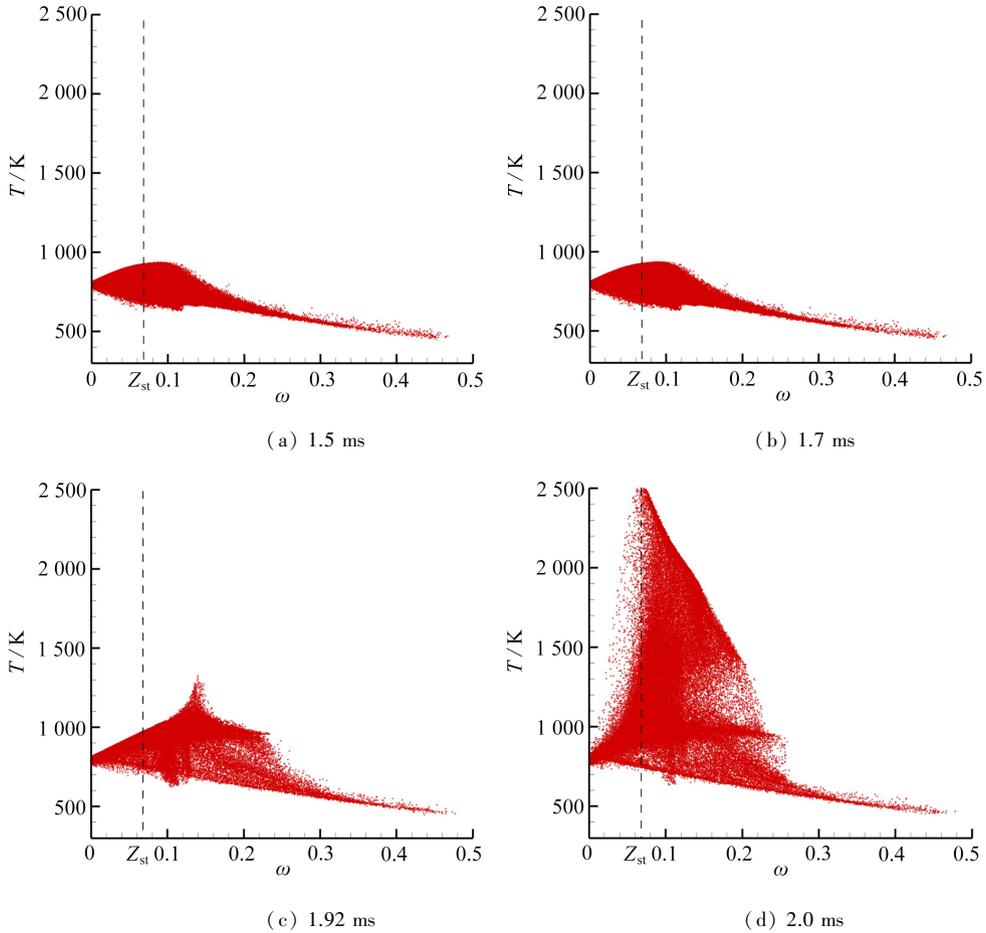


图9 不同时刻混合质量分数-温度散点图

Fig. 9 Scatter plots of the mixture mass fraction and the temperature at different moments

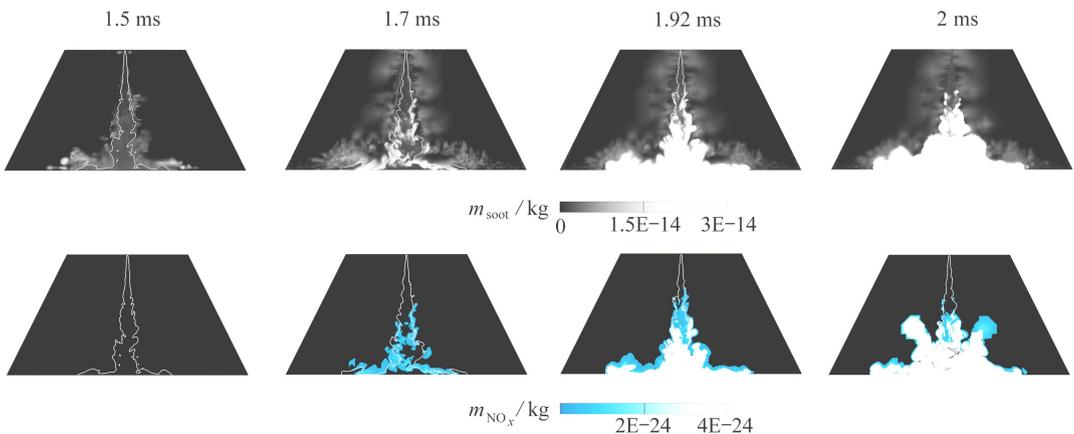


图10 碳烟和氮氧化物分布

Fig. 10 Distributions of soot and NO_x

图10为不同时刻燃烧产物碳烟以及氮氧化物分布情况,根据前面分析可知1.5 ms时刻为低温点火时刻,此时正庚烷已发生低温氧化反应,并放出热量.图中碳烟出现的位置与低温燃烧过程中 CH_2O 基本一致,即首先出现在燃油当量混合质量分数相对较小的稀薄混合气区域,随着氧化反应的进行逐渐向喷雾雾束中心较浓混合气区域发展.此时燃烧温度不够高,导致部分碳氢化合物无法完全反应,从而形成碳烟固体颗粒物.另一方面在喷雾雾束中心区域形成较浓混合气,氧气含量不足,也导致部分碳氢化合物无法完全氧化,使得在碰壁喷雾雾束中心生成大量碳烟,而 NO_x 主要是在高温燃烧阶段生成.由于喷雾发生碰壁行为之后有利于壁面射流前端的径向发展半径以及轴向卷吸高度增长,在该过程中会卷吸更多的空气,在高温燃烧放出大量热的条件下,易于产生大量的氮氧化物.

3 结 论

在高压直喷小缸径柴油机中,存在碰壁喷雾燃烧恶化的问题.本研究采用Euler-Lagrange两相流方法针对柴油喷雾碰壁燃烧进行了大涡模拟数值计算,考量了低温燃烧、高温燃烧以及排放特性.主要结论如下:

1) 喷雾碰壁之后,伴随的涡团运动会致使喷雾发展半径和卷吸高度增加,促进了喷雾雾束外围油气充分混合,有利于在喷雾雾束外围形成适合低温点火的条件.随着低温燃烧反应的进行,持续低温放热,燃烧反应逐渐由碰壁喷雾外围的贫燃区过渡到碰壁喷雾雾束中心富燃区,并积累大量的 CH_2O .

2) 喷雾碰壁导致碰壁雾束中心形成较浓的混合气,低温燃烧后期主要在高混合气浓度区域进行,高温环境主要分布在近壁面浓混合气区域,促进了在近壁面处的高温燃烧点火.温升达到400 K时, CH_2O 质量在0.02 ms内迅速消耗5%,而OH质量增长约100倍.即低温燃烧阶段氧化产生大量 CH_2O ,并持续放热,进入高温燃烧后会迅速消耗低温燃烧积累的 CH_2O 并产生大量OH.随着高温氧化反应沿壁面射流传播至贫燃区,增大了高温火焰面积,同时释放出大量的热量.

3) 由于低温反应放热量较少,碰壁喷雾雾束中心混合气较浓.由于该区域氧气含量不足,导致在近壁面部分碳氢化合物无法完全被氧化而生成大量的碳烟.高温燃烧氧化反应放出大量热,而喷雾碰壁会促进壁面混合气卷吸更多的空气,更容易促进氮氧化物的生成.

参考文献(References):

- [1] 赵昶博. 混合动力专用发动机燃烧优化及其整车匹配[D]. 硕士学位论文. 长春: 吉林大学, 2020. (ZHAO Changbo. Optimization of combustion for hybrid powertrain dedicated engines and their integration with vehicles[D]. Master Thesis. Changchun: Jilin University, 2020. (in Chinese))
- [2] 李文栋, 张文普. 预混燃烧边界层回火的数理模型及研究进展[J]. 应用数学和力学, 2023, 44(1): 36-51. (LI Wendong, ZHANG Wenpu. The mathematical model and research progress of the boundary layer flashback in premixed combustion[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2023, 44(1): 36-51. (in Chinese))
- [3] 陈燕, 文春景. 车用柴油机的排放污染与控制[J]. 山东交通科技, 2005, 2: 77-78. (CHEN Yan, WEN Chunjing. Emissions and control of pollutants from diesel engines used in vehicles[J]. *Shandong Transportation Technology*, 2005, 2: 77-78. (in Chinese))
- [4] WACHTERS L H J, WESTERLING N A J. The heat transfer from a hot wall to impinging water drops in the spheroidal state[J]. *Chemical Engineering Science*, 1966, 21(11): 1047-1056.
- [5] NABER J D, REITZ R D. Modeling engine spray/wall impingement[R]. SAE Technical Paper, 1988: 118-140.
- [6] BAI C X, RUSCHE H, GOSMAN A D. Modeling of gasoline spray impingement[J]. *Atomization and Sprays*, 2002, 12(1/3): 1-27.
- [7] O'ROURKE P J, AMSDEN A A. A spray/wall interaction submodel for the KIVA-3 wall film model[R]. SAE Technical Paper, 2000: 281-298.
- [8] HAN Z, XU Z, TRIGUI N. Spray/wall interaction models for multidimensional engine simulation[J]. *International Journal of Engine Research*, 2000, 1(1): 127-146.
- [9] KUHNKE D. *Spray/Wall Interaction Modelling by Dimensionless Data Analysis*[M]. Shaker, 2004.
- [10] LI K, NISHIDA K, OGATA Y, et al. Effect of flat-wall impingement on diesel spray combustion[J]. *Proceed-*

- ings of the Institution of Mechanical Engineers (Part D): Journal of Automobile Engineering*, 2015, **229** (5): 535-549.
- [11] LIU Y, YEOM J K, CHUNG S S. An experimental study on the effects of impingement-walls on the spray and combustion characteristics of SIDI CNG[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, **26**: 2239-2246.
- [12] BEALE J C, REITZ R D. Modeling spray atomization with the Kelvin-Helmholtz/Rayleigh-Taylor hybrid model [J]. *Atomization and Sprays*, 1999, **9**(6): 623-650.
- [13] Convergent Science. CONVERGE_2.4_Manual[Z]. CONVERGE CFD Manual Series, 2018.
- [14] POMRANING E D. *Development of Large Eddy Simulation Turbulence Models*[M]. The University of Wisconsin-Madison, 2000.
- [15] 龚升, 吴锤结. 超音速探测器-刚性盘-缝-带型降落伞系统的大涡模拟研究[J]. *应用数学和力学*, 2021, **42**(3): 233-247. (GONG Sheng, WU Chuijie. Large-eddy simulation of supersonic capsule-rigid disk-gap-band parachute systems[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2021, **42**(3): 233-247. (in Chinese))
- [16] AMSDEN A A, O'ROURKE P J, BUTLER T D. A computer program for chemically reactive flows with sprays; LA-11560-MS[R]. Los Alamos National Laboratory Report, 1989.
- [17] JIA M, PENG Z J, XIE M Z. Numerical investigation of soot reduction potentials with diesel homogeneous charge compression ignition combustion by an improved phenomenological soot model[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (Part D): Journal of Automobile Engineering*, 2009, **223**(3): 395-412.
- [18] HEYWOOD J B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*[M]. New York: McGraw-Hill, 1988.
- [19] MONTANARO A, ALLOCCA L, MECCARIELLO G, et al. Schlieren and Mie scattering imaging system to evaluate liquid and vapor contours of a gasoline spray impacting on a heated wall[R]. SAE Technical Paper, 2015. DOI: <https://doi.org/10.4271/2015-24-2473>.
- [20] 娄珏珏. 柴油喷雾碰壁着火及燃烧特性的试验研究[D]. 硕士学位论文. 北京: 北京理工大学, 2018. (LOU Yuyu. Experimental study on diesel spray wall impingement ignition and combustion characteristics [D]. Master Thesis. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018. (in Chinese))
- [21] SKEEN S A, MANIN J, PICKETT L M. Simultaneous formaldehyde PLIF and high-speed schlieren imaging for ignition visualization in high-pressure spray flames[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, **35** (3): 3167-3174.
- [22] PEI Y, SOM S, POMRANING E, et al. Large eddy simulation of a reacting spray flame with multiple realizations under compression ignition engine conditions[J]. *Combustion and Flame*, 2015, **162**(12): 4442-4455.