

二甲醚微火源引燃汽油混合燃烧中油气混合过程数值模拟

Simulation of the oil and gas mixing process in the dimethyl ether micro flame ignition

冯译方 谢辉 陈韬 杨欢

(天津大学, 内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津, 300072)

摘要: 本文采用发动机三维仿真软件 Converge 对二甲醚微火源引燃混合燃烧中不同 DME 喷射时刻对缸内油气混合过程进行模拟。本文从仿真模型建立、喷雾模型原则与验证、缸内流场分析、缸内燃空当量比分析等方面介绍了不同 DME 缸内直喷时刻对缸内流动和燃空当量比的影响, 为控制混合燃烧提供了理论依据和方法指导。

关键词: 二甲醚、CFD、Converge、混合燃烧

Abstract: In this study, the flow in cylinder and the oil and gas mixing process on different direct injection time of dimethyl ether are analyzed by three-dimensional numerical simulation with Converge software, which can be theoretical basis to control the DME micro flame ignition hybrid combustion. The simulation module and the spray module are also shown in this paper.

Key words: Dimethyl Ether, CFD, Converge, hybrid combustion

1. 概述

火花点火-可控自燃 (SI-CAI 燃烧) 作为一种新型燃烧方式, 通过火花点火提高缸内的压力温度水平引起终燃混合气自燃。由于 SI 火焰传播速度远低于自燃放热, 因此混合燃烧的持续期要比 CAI 燃烧长^[1, 2], 拓宽了 CAI 燃烧的运行范围^[3]。而混合燃烧对缸内残余废气率、燃空比等参数极为敏感, 在可视化发动机平台^[4, 5]和仿真平台^[6, 7]上均发现由于残余废气引起的 IMEP 循环变动现象^[8]。为了更好地控制混合燃烧过程, 天津大学谢辉教授课题组提出了通过 DME 引燃缸内混合气实现混合燃烧的燃烧方式, 即 DME 微火源引燃汽油混合燃烧。

DME (dimethyl ether, 二甲醚) 微火源引燃汽油混合燃烧作为一种新型的混合燃烧控制方式, 由于其具备更高的点火能量注入以及区域点火的特性, 能够在更高的废气率下稳定有效地引燃混合气, 从而实现对燃烧起点的稳定控制, 并加速燃烧放热过程, 缩短火焰传播持续期, 提升燃烧稳定性。同时 DME 作为高辛烷值燃料的助燃剂, 通过与高辛烷值燃料预混, 可以提高燃料整体活性, 优化特定工况下的燃烧和排放特性^[9]。

由于 DME 喷入气缸, 喷射过程会穿越 DME 的饱和蒸汽压线, 喷雾将会发生闪急沸腾现象, 该现象对三维仿真模拟提出了新的要求。基于 Converge 仿真软件平台, 合理地选取喷雾模型并进行标定, 可以准确模拟 DME 喷入气缸内的状态, 包括贯穿距、喷雾形态等, 为分析 DME 微火源引燃混合燃烧打好基础。同时通过对缸内三维流场和当量比分析, 可以更好地评估缸内油气混合状态, 控制 DME 微火源引燃混合燃烧。

2. Converge 三维仿真平台介绍

2.1 研究对象

本研究的研究对象是基于一台 Ricardo Hydra 140 型双顶置凸轮轴四冲程单缸汽油机构建的数字三维仿真模型。在该模型中保留了进排气道。发动机采用气道汽油喷射和缸内 DME 直喷，通过内外部废气和火花辅助压燃的方式实现 DME 微火源引燃混合燃烧。进气道喷射采用德尔福 4 孔喷油器，喷油压力 3bar，缸内 DME 直喷喷油器选用了德尔福 6 孔喷油器，喷射压力 40bar。在本实验中，为了实现内部废气再循环，实验采取了负气门重叠角策略（Negative Valve Overlapping, NVO）。发动机基本参数如表 1 所示，发动机三维仿真模型如图 1 所示。

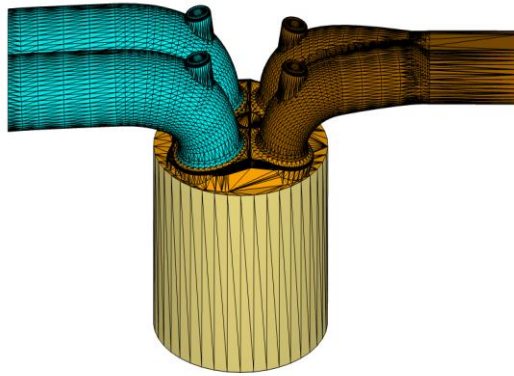


图 1 单缸发动机三维仿真模型

表 1 单缸发动机基本参数

参数	指标
缸径	86 mm
行程	86 mm
气缸排量	0.5 L
连杆长	143 mm
压缩比	14
燃烧室类型	棚顶型两进两排四气门
进气方式	自然吸气
喷油器	压电式外开型
喷油压力	40 bar
节气门	全开

2.2 计算网格及模型

由于本研究中提出的 DME 微火源引燃混合燃烧在混合气制备过程中涉及到不同燃料在不同时刻下的注入，存在复杂的物理过程变化。因此，为了深入分析 DME 微火源引燃混合燃烧的混合气制备过程和缸内分层特征，本研究采用商业流体力学软件 Converge 开展计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)仿真研究工作。Converge 软件由于其网格自动生成和自适应网格加密(Adaptive Mesh Refinement, AMR)功能，对发动机燃烧室复杂的几何形态有较高的网格适应性，提高了 CFD 仿真工作的效率。

在本研究中,发动机的网格基本尺寸为 4mm,缸内的基本尺寸加密到 1mm,缸内直喷喷油器附近使用嵌入式网格加密,在其周围植入半径 4mm 的球形加密网格,网格加密到 0.25mm;同时整个缸内采用温度与速度自适应网格加密,可以根据设定的温度与速度梯度限定值加密到 0.125mm,缸内除喷油器附近网格尺寸为 0.25mm 或 0.125mm 外,缸内其他区域网格最小为 0.5mm,最大为 1mm,在整个计算过程中网格数约为 12-35 万。

在模型选取上,本文我们采用的湍流模型是 RNG $\kappa-\varepsilon$ 模型,其中 κ 代表湍动能, ε 代表湍动能耗散率。该湍流模型采用了雷诺平均纳维斯托克斯方程 (Reynolds Average Navier-Stokes, RANS)^[10] 结合重整化群 (Re-Normalisation Group, RNG)^[11] 的方法,该方法在数值计算方面具有较好的稳定性和收敛性。壁面传热模型采用了 O'Rourke and Amsden 模型^[12],该模型可以很好地处理工质与燃烧室壁面的传热过程,包括对流换热和辐射换热。数值求解方法采用 PISO (Pressure Implicit with Split Operator)^[13] 方法。燃烧模型采用纯化学反应动力学 SAGE 模型,其中化学反应机理采用本课题组开发的一个包含 79 种组分 267 个基元反应的 DME-PRF 混合燃料简化机理^[14]。

2.3 DME 喷雾模型验证

DME 在内燃机中喷射时会呈现其闪急沸腾的特性,即 DME 喷入气缸后,温度大于燃烧室压力对应的饱和温度,从而迅速变为气态,在喷雾中产生大量气泡的现象。为了模拟 DME 喷雾过程,我们建立了与实际实验用于纹影法测量喷雾的定容弹相同的三维数值模型,如图 2 所示,其最大原始网格尺寸为 16mm,最小网格大小为 0.25mm。计算过程中,时间步长在 0.001-0.01ms 之间自动调整。整个计算过程中网格数恒定为 70-75 万。

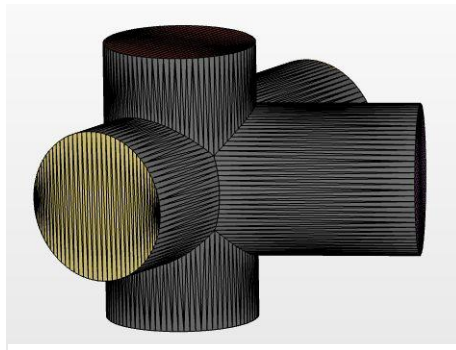


图 2 定容弹三维仿真模型

在模型选取上,喷雾碰壁模型采用 Wall Film 模型^[15];液滴碰撞模型采用 NTC Collision 模型^[16];破碎模型采用 KH-RT Breakup Length 模型^[17]。为了更好地模拟 DME 的闪急沸腾特性^[18],本文蒸发模型选取了 Frossling Drop Evaporation 模型^[17]耦合 Boiling 模型^[19]。其中 Frossling Drop Evaporation 模型可以较好的反映液滴大小的的时间变化率,而 Boiling 模型反映了液滴蒸发过程中液滴直径的变化。二者通过 Converge 软件可以进行耦合,从而很好地模拟出 DME 在缸内的闪急沸腾现象。

对 DME 喷雾模型来说,其主要的验证标准为 DME 喷雾的贯穿距和其在缸内的发展情况。在本研究中,我们选取了定容弹中喷射背压分别为 0.3Mpa、0.7Mpa、1.5Mpa 的工况,其贯穿距如图 3 所示,喷雾的发展情况与定容弹实验结果对比如图 4 所示。可以看出,本文所选取的 DME 喷雾模型能够很好地模拟 DME 喷雾在缸内或定容弹内的发展情况,满足本文所进行研究的要求。

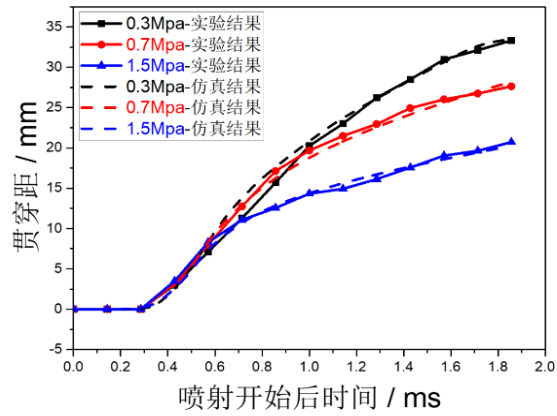


图 3 DME 喷雾贯穿距实验与仿真结果对比

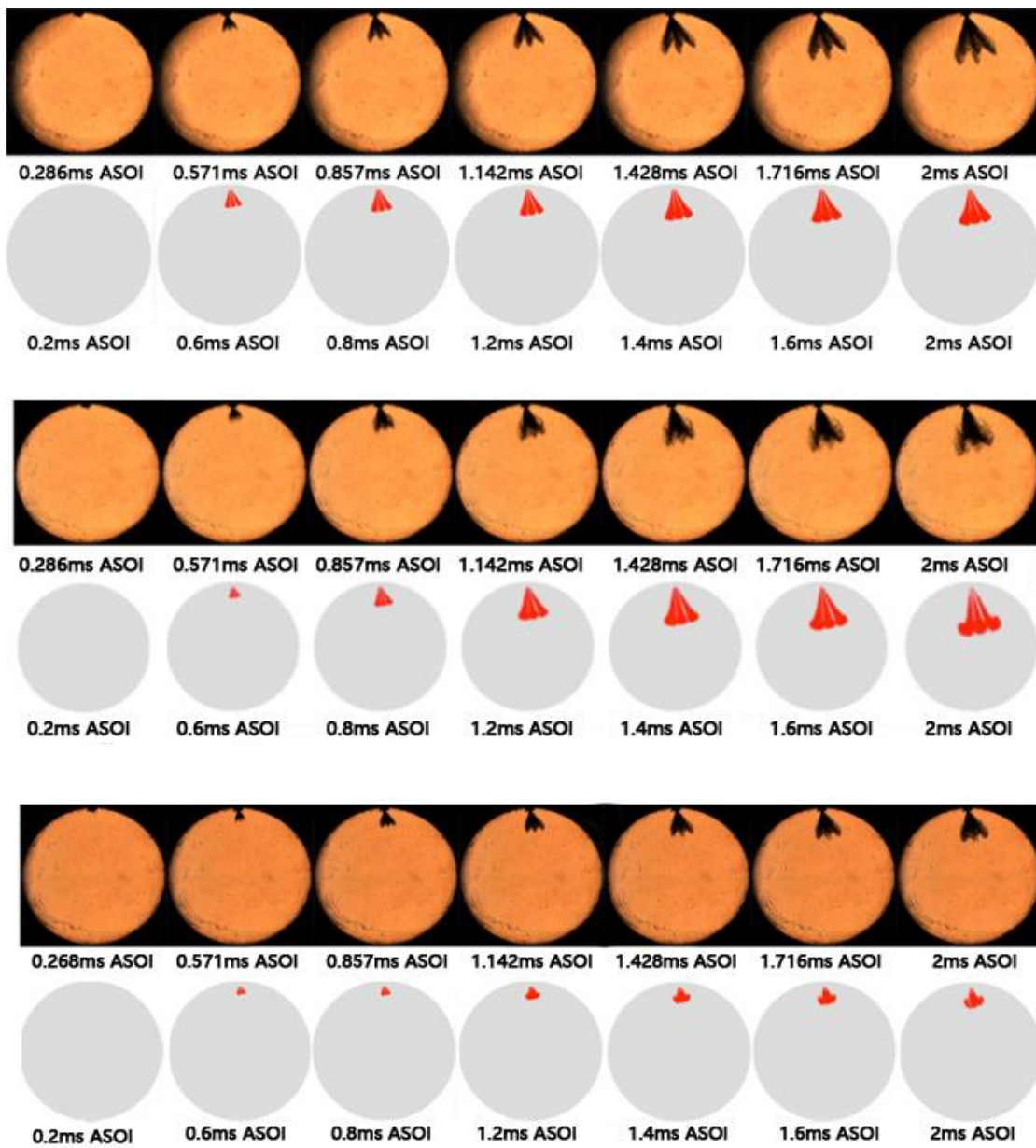


图 4 0.3、0.7、1.5Mpa 下缸内喷雾形态实验（上）与仿真（下）结果对比

3. 算例设置及结果分析

3.1 仿真算例设置

为了分析不同 DME 喷射时刻对缸内油气混合情况的影响,在本研究中,分别选取了 120° CA BTDC 和 40° CA BTDC; 两种 DME 喷射时刻进行仿真研究, 分别将其算例定义为 Case1 和 Case2。除 DME 喷射时刻条件外, 其余发动机运行参数均保持一致, 如表 2 所示。在仿真计算中, 汽油表征燃料为 PRF93。

表 2 发动机运行参数

参数	指标
发动机转速 [$\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$]	1500
IMEP[bar]	4.1
排气门开启时刻 [$^{\circ}$ CA]	171.5
排气门关闭时刻 [$^{\circ}$ CA]	278.5
排气门升程 [mm]	4.83
进气门开启时刻 [$^{\circ}$ CA]	425.6
进气门关闭时刻 [$^{\circ}$ CA]	534.4
进气门升程 [mm]	5.01
循环气道喷油量 [$\text{mg} \cdot \text{cycle}^{-1}$]	9.23
DME 直喷油量 [$\text{mg} \cdot \text{cycle}^{-1}$]	2.55
过量空气系数 (λ)	1.98
进气温度 [$^{\circ}$ C]	40
冷却水温 [$^{\circ}$ C]	85

3.2 缸内流场分析

对于棚顶式四气门单缸发动机而言, 缸内的主要流动形式为滚流, 而缸内流动会直接影响缸内油气的混合过程和缸内不同位置的当量比, 对 DME 微火源引燃产生巨大影响。本文中定义的缸内流动方向如图 5 所示。图中左侧为进气侧, 正交滚流、滚流和涡流的流动方向判定采用 X、Y、Z 轴的右手定则。

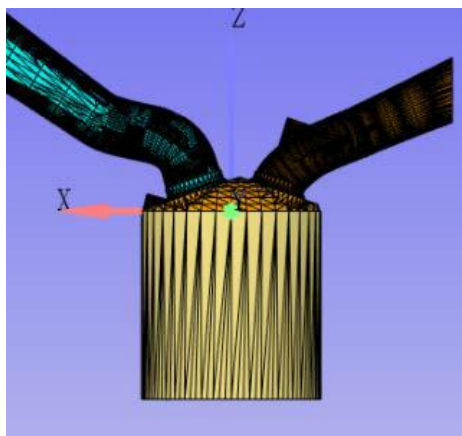


图 5 缸内流动方向定义

从图 6-a 可以看出, 在 Case1 中缸内的流动主要是以逆滚流为主, 由于 DME 喷入气缸时缸内压力较小, DME 喷雾的贯穿距较大, 可以在缸内行程较大的滚流, 但是随着 DME 喷雾受到流动、压力等影响, 逐渐在缸内扩散, 缸内流动随着活塞上行也随着减弱, 在 15° CA BTDC 时, 缸内流动如图 6-b 所示。而从图 6-c 中, 我们可以看出, 由于 Case2 中 DME 喷射时刻较晚, DME 喷入气缸之后, 由于缸内压力较大, DME 喷雾贯穿距缩短, 无法在缸内形成大量的滚流。在该工况下 15° CA BTDC 的缸内流动情况如图 6-d 所示。由于缸内 DME 喷射时刻与该时刻距离较近, 缸内流动较 Case1 相同时刻 (6-b 图) 更加剧烈。

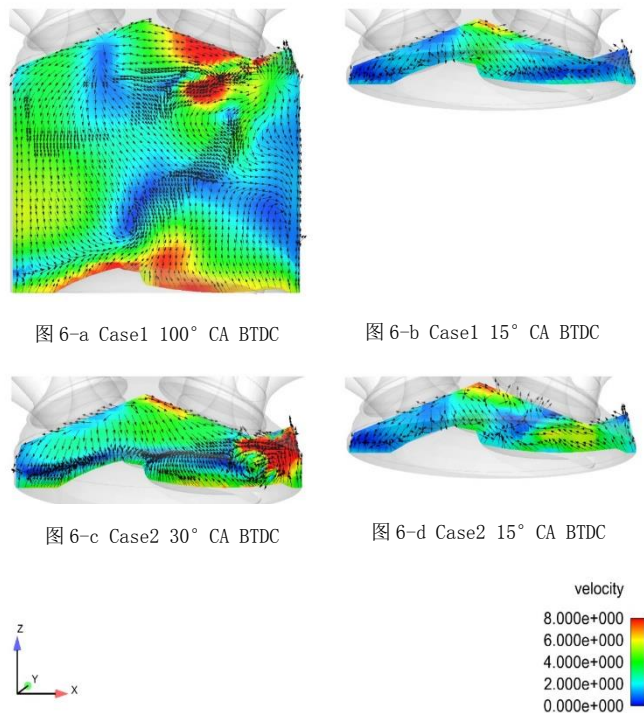


图 6 不同 DME 喷射时刻对缸内流动的影响

3.3 缸内当量比分析

在 DME 微引燃混合燃烧中, DME 喷入气缸后通过产生微火源, 微火源提高缸内温度压力水平导致终燃混合气自燃, 因此缸内燃空当量比对 DME 微火源产生、火焰传播等都有着至关重要的影响。在本研究中, 我们依旧对比了不同 Case 的缸内燃空当量比情况。从图 7 中可以看出, 缸内混合气当量比受 DME 喷射时刻影响较大。在 15° CA BTDC 时, Case1 和 Case2 缸内的燃空当量比分布如图 7-b 和 7-d 所示。由于 Case1 中 DME 较早喷入气缸, 当活塞运行接近上止点的时候, DME 已经与缸内混合气充分混合。而在 Case2 中, DME 晚喷导致部分 DME 喷射到活塞底部, 缸内流场没有足够的时间和强度使 DME 分布到整个气缸。从图 7-d 中可以看出, 在活塞底部由于 DME 聚集, 导致活塞底部燃空当量比较高。

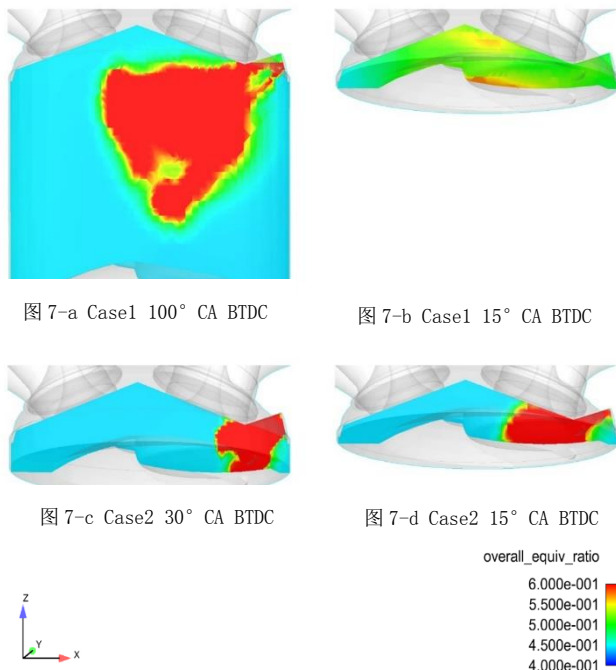


图 7 不同 DME 喷射时刻对缸内燃空当量比的影响

为了更好地分析缸内当量比受到缸内流动和 DME 喷射时刻的影响，本研究选取了 Case1 中从 100° CA BTDC 到 15° CA BTDC 的缸内流动过程，分析其对缸内当量比的作用机制，如图 8 所示。燃油喷雾会显著改变缸内流场，而缸内流场影响缸内 DME 的分布，从而改变缸内当量比分布。在 DME 喷入气缸前期，缸内滚流使 DME 喷雾保持在气缸中心的集聚状态，同时有少部分 DME 随流动扩散到气缸中。当活塞上行到 60° CA BTDC 时，在气缸盖附近 DME 开始扩散，同时缸内逆滚流与活塞产生碰撞，导致 DME 向缸内扩散，直到 15° CA BTDC，除少部分 DME 留在活塞凹坑中，大部分 DME 已经扩散到气缸中。同时在 15° CA BTDC 时，在气缸内正上方形成了一股较浓的混合气，有利于在气缸中心产生微火源和火焰向气缸壁区域传递。

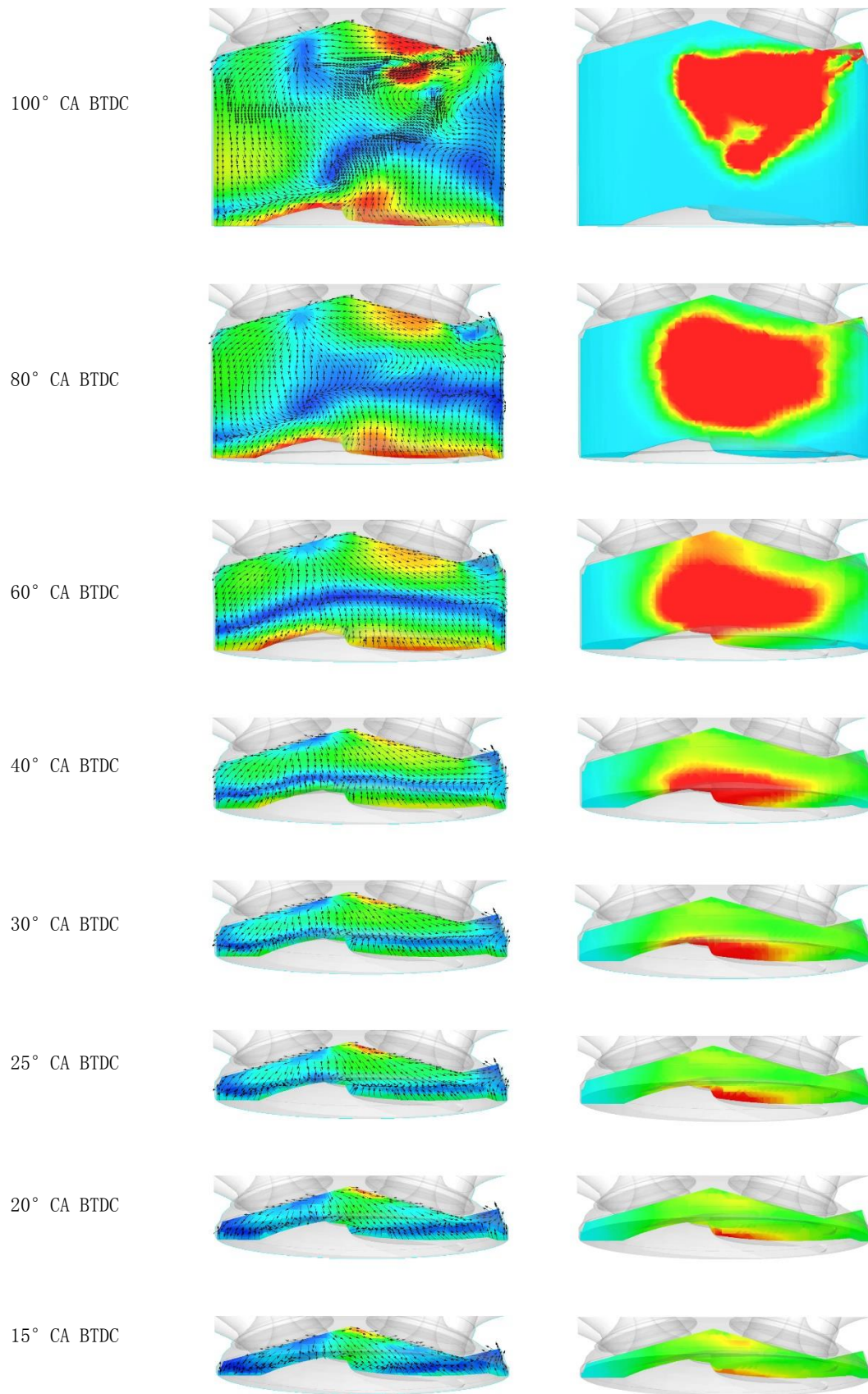


图 7 不同 DME 喷射时刻对缸内燃空当量比的影响

4. 全文总结

(1) Converge 软件通过其多蒸发模型耦合功能可以较好地反映出 DME 的闪急沸腾特性, 其对 DME 喷雾的仿真结果与定容弹实验结果相符。

(2) Converge 软件可以较好地描述缸内的流场和当量比分布, 为分析缸内油气混合状态提供有力保障。

(3) 通过 Converge 软件三维仿真, 得出在 DME 早喷工况与晚喷工况相比, 缸内当量比浓度更均匀, 更利于火焰传播。

5 参考文献

- [1] Zigler B, Keros P, Helleberg K, et al. An experimental investigation of the sensitivity of the ignition and combustion properties of a single-cylinder research engine to spark-assisted HCCI. International Journal and Engine Research. 2011, 12: 353 - 375.
- [2] Persson H, Hultqvist A, Johansson B, et al. Investigation of the Early Flame Development in Spark Assisted HCCI Combustion Using High Speed Chemiluminescence Imaging. SAE Paper, 2007-01-0212
- [3] Lavoie G, Martz J, Wooldridge M, et al. A multi-mode combustion diagram for spark assisted compression ignition. Combustion and Flame. 2010, 157: 1106 - 1110.
- [4] Reuss D, Kuo T, Silvas G, et al. Experimental metrics for identifying origins of combustion variability during spark-assisted compression ignition. Int. J. Engine Res. Vol. 9, 2008, 409-434.
- [5] Persson H, Johansson B, Remón A. The Effect of Swirl on Spark Assisted Compression Ignition (SACI). SAE Paper, 2007-01-1856.
- [6] Joelsson T, Yu R, Bai X. Large Eddy Simulation of Turbulent Combustion in a Spark-Assisted Homogenous Charge Compression Ignition Engine. Combustion Science and Technology. 2012, 184: 1051 - 1065.
- [7] Yoo C, Luo Z, Lu T, et al. A DNS study of ignition characteristics of a lean iso-octane/air mixture under HCCI and SACI conditions. Proceedings of the Combustion Institute. 2013, 34(2): 2985-2993.
- [8] Chen T, Zhao H, Xie H, et al. Analysis of cyclic variations during mode switching between spark ignition and controlled auto-ignition combustion operations. Int. J. Engine Research. 2015, 16(3) 356-365.
- [9] 徐康. DME 微火源对汽油机高稀释混合燃烧调控机理研究[D]. 天津大学, 2017.
- [10] Rezaei R, S Pischinger, J Ewald, et al. A New CFD Approach for Assessment of Swirl Flow Pattern in HSDI Diesel Engines. SAE Technical Paper 2010-32-0037.
- [11] Han Z, Reitz RD. Turbulence Modeling of Internal Combustion Engines Using RNG $\kappa-\epsilon$ Models. Combustion Science and Technology, 1995. 106: 267-295.
- [12] Angelberger C, Poinot T, Delhay B. Improving Near-Wall Combustion and Wall Heat Transfer Modeling in SI Engine Computations. SAE Technical Paper 972881.
- [13] Issa RI. Solution of the implicit discretised fluid flow equations by

operator-splitting. J. Comput. Phys., 1986. 62: 40 - 65.

[14] 李秀兰. DME-PRF 混合燃料化学反应动力学简化模型[J]. 燃烧科学与技术, 2017.

[15] O'Rourke P J, Amsden A A. A spray/wall interaction submodel for the KIVA-3 wall film model [C]. SAE Paper. Detroit, MI, USA, 2000, 2000-01-0271.

[16] Schmidt David P, Rutland C J. A new droplet collision algorithm[J]. Journal of Computational Physics, 2000, 164(1):62-80.

[17] Richards K J, Senecal P K, et al. Converge (Version 2.3) Manual [R]. Middleton, WI: Convergent Science, Inc, 2016.

[18] 张鹏. 二甲醚闪急沸腾喷雾的数值模拟和实验研究[D]. 华中科技大学, 2009.

[19] Endrullis J, Hendriks D, Bodin M. An introduction to combustion : [M]. WCB/McGraw-Hill, 2000.