

采用改进的 Match piston 网格的后喷燃烧模拟

Combustion Simulation under Post Injection Mode with Improved Match Piston Mesh

金华玉¹, 刘忠长¹, 李康²

(1. 吉林大学 内燃机系, 长春 130025; 2. 中国第一汽车集团公司, 长春 130000)

摘要: 为了解后喷对柴油机燃烧、排放的作用, 利用商用计算软件 STAR-CD 对高压共轨柴油机进行了改变后喷量和主后喷间隔的燃烧模拟。采用了自创的气缸网格为中心部分的 0-grid 模板切割燃烧室网格, 在油束通过区域消除了耦合面并保证网格质量极佳, 求解稳定性提高且大大节省计算时长。模拟结果表明, 后喷对 NO 影响不大, 但 Soot 显著降低。随着后喷量逐渐增大, Soot 曲线由单峰演变为双峰, 且峰值明显降低, 这是后喷燃油恰处于氧气较浓的区域着火燃烧, 产生 Soot 相对较少的结果。后喷扰动使得燃油和 Soot 与氧气的混合加强, 燃烧强化, 高温区增大, 后期 Soot 氧化速率明显增大。主后喷间隔 4°CA 时 25% 后喷量的作用最显著, Soot 最终生成量减少 37.6%。主后喷间隔过大时, Soot 有增加的趋势。

关键词: 后喷; 燃烧模拟; 高压共轨柴油机; STAR-CD

Abstract: In order to find out the effect of post injection on the combustion and emissions of a common rail diesel engine, its combustion processes were simulated with STAR-CD under some different post injection modes that post injection quantity and the dwells between main injection and post injection were changed separately. The CMC-0-grid (cylinder mesh centering-0-grid) template was used to create Match piston mesh, which eliminated the couples within the field injection fuel passed through and ensured the mesh was so good that calculation stability was improved and saved calculation time was great. The results indicated that post injection has few effects on NO but makes Soot decreased remarkably. The curves of Soot in cylinder appear to have two apices rather than one with the increase of post injection quantity and the apices also decrease. It is because that vapor of post injection burns in the area having more oxygen and produces less Soot. The turbulence caused by post injection enhances the mix up of fuel vapor and Soot with oxygen, which leads to the strengthening of combustion and the expanding of high temperature field, so the oxidation speed of Soot in the latter combustion period is faster. When the dwell is 4°CA , 25% post injection has the biggest effect, 37.6% reduction of Soot emissions. If the dwell is too large, Soot may increase.

Keywords: Post injection; Combustion simulation; Common rail diesel engine; STAR-CD

1. 引言

柴油机高压共轨喷油系统在喷油速率形成方面具有极大的灵活性和自由度。基于这一独特优势才得以实现的多次喷射技术, 能够组织优化燃烧, 降低噪声、排放和油耗等, 成为改善发动机性能的关键技术和研究热点。后喷是考虑到加强燃烧后期碳烟的氧化作用而提出来的, 相关研究也表明后喷确实可以明显改善碳烟排放^[1-3]。但国内进行的相关研究较少, 对后喷作用的微观理解也相当有限。

作者简介: 金华玉 (1979 -), 男, 博士研究生. E-mail: jinhuaYu9815@sohu.com. Tel: 13504438201.

为此,本研究利用商用计算软件 STAR-CD 对采用后喷喷油规律的增压中冷柴油机燃烧进行了模拟,模拟出后喷参数与排放与效率之间的关系,并从微观角度对后喷的作用机理进行了解释。

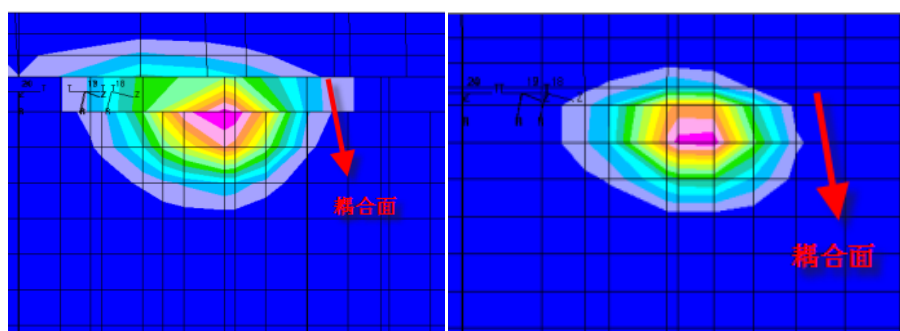
2 计算模型的建立

2.1 模拟所用柴油机的技术参数

模拟中所用直喷增压中冷柴油机采用了高压共轨系统,其主要技术参数见表 1。

表 1 柴油机主要技术参数

技术参数	指标
型 号	CA6DL2-35R
缸径×行程/mm	112×145
压缩比	17.0
标定功率/kW	257
标定转速/r·min ⁻¹	2100
最大转矩/ N·m	1300
最大转矩转速/r·min ⁻¹	1300
喷嘴喷孔数×直径/mm	8×0.186



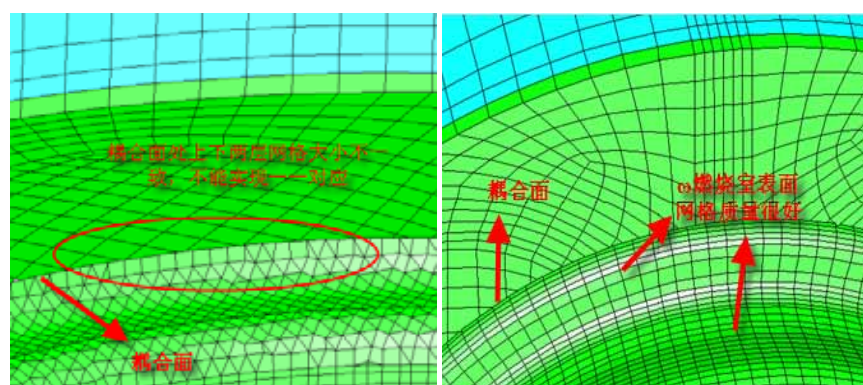
a) 上下层网格耦合 (couple) 时出现断层 b) 上下层网格 Vmerge 为一体时无断层

图 1 燃油浓度场的断层现象

2.2 计算网格

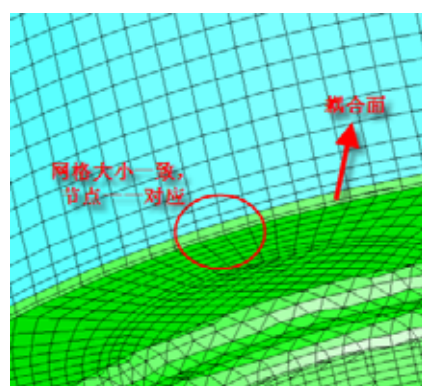
本研究采用 ES-ICE 的 Mapping 方法创建网格^[4]。该方法多采用 Match piston 方式形成燃烧室网格,就是将形状复杂的燃烧室几何等拿到 PRO-AM 中用模板切割生成燃烧室网格,然后再将它耦合到动网格(即气缸网格)上生成完整的计算网格。这种耦合是硬性地将两部分网格连接起来,必然会导致传质、传热等的计算出现偏差,故而耦合面上会出现浓度分布等的突变,与实际情况有一定差异,如图 1 a)所示。

Match piston 方式的优点是避开了在 ES-ICE 中做形状复杂的静网格,从而操作简单,工作量小。但它在理论上必然

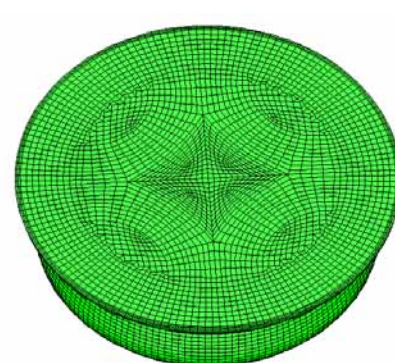


a) 直角坐标系模板切割

b) 0-grid 模板切割



c) 气缸网格模板切割



d) CMC-0-grid 模板切割

图 2 燃烧室网格质量的改进过程

会产生耦合面,导致模拟失真产生。另外,如果生成的燃烧室网格质量差,容易导致计算发散。随着研究的深入,不断地对此进行改进,网格质量得到很大的提高。大致经历的几个阶段如下:

1. 采用默认的直角坐标系生成的正六面体单元模板切割生成燃烧室网格——优点是所有网格大小均匀一致，缺点是表面网格质量较差，如图 2 a) 所示。用这种燃烧室网格形成计算网格时，会产生耦合面，再加上它本身表面网格质量差，容易导致计算发散。

2. 采用自制 0-grid 模板切割生成燃烧室网格——此方法是从改善表面网格质量的角度出发的。0-grid 模板一般是中心部分采用直角坐标系生成网格，外围部分采用极坐标系生成网格。由于 ω 燃烧室是回转体，因此用 0-grid 模板切割出来的燃烧室表面网格质量极佳，如图 2 b) 所示。这种方法也可以保证网格的大小尽量相当，但它同样会产生耦合面。

3. 以气缸网格作为自制模板切割生成燃烧室网格——这使得耦合面上下的网格形状大小完全一致，节点一一对应，因此将气缸网格和燃烧室网格合并 (Vmerge) 成为一体，这样就完全消除了耦合面。但是这种燃烧室表面网格质量也很差，如图 2 c) 所示。

4. 采用自创的气缸网格为中心部分的 0-grid 模板切割生成燃烧室网格——该模板简称 CMC-0-grid (Cylinder mesh centering-0-grid) 模板，外围部分仍采用极坐标网格。因此切割得到的燃烧室表面网格质量极好，但这部分会产生耦合面；中心部分采用气缸网格 (如图 2 d) 所示)，所以切割得到的燃烧室网格中心区域与动网格可以进行 Vmerge 合并为一体，消除该部分的耦合面，断层现象大大减少；设定中心部分的尺寸时保证油束通过区域消除耦合面。由于喷油过程十分剧烈，在油束通过区域消除耦合面，就消除了突变的断层现象 (如图 1 b) 所示)，将失真降到最低，也对计算稳定性很有利，出现不收敛和负密度的情形大大减少，计算步长也可以适当加大，节省的计算时间非常可观。

CMC-0-grid 方法是对 ES-ICE 的 Match piston 方式的极大改进，保留了其创建网格方法简单的原有特点，又最大限度地保证了网格质量、计算精度和求解稳定性。因此本研究采用了该方法，在缺乏进气道相关数据，无法准确建模的前提下，采用保证压缩比、近似建模缸盖底面形状的方式划分动网格，然后耦合燃烧室网格形成计算网格，如图 3 所示。

2.3 模型与算法选择

模拟计算采用了标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型，Huh 喷雾模型，Reitz/Diwakar 液滴破碎模型、Bai 撞壁模型，shell 点火模型，层流湍流时间尺度燃烧模型。并采用 PISO 算法。

2.4 模拟计算条件

- a. 涡流比：所模拟各工况采用的涡流比均为 2。
- b. 初始温度、压力：根据实验得到的示功图取得缸压，以保证进气量为原则计算得到初始温度。
- c. 壁面边界条件：采用的是绝热边界条件。

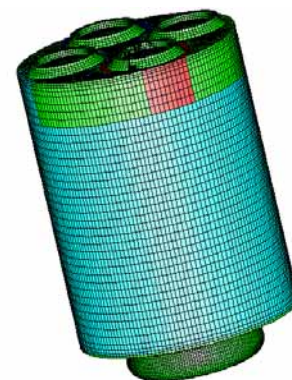


图 3 计算网格

3 后喷模拟

采用不同后喷量和主后喷间隔的喷油规律进行了燃烧模拟，模拟时保证初始、边界条件一致。排放物模拟计算结果如图 4 所示。从图中可以看到，后喷对 NO 影响不大，但对 Soot 生成量降低明显，后喷量 25 % 间隔 4° CA 的 Soot 最终生成量比无后喷的下降最多，达到 37.6%。随着后喷量逐渐增大，Soot 曲线由单峰演变为双峰，且主喷形成的第一个峰值渐小，后喷形成的第二个峰逐渐显著。后喷量 4 % 间隔 4° CA

工况的主喷结束时刻略晚, Soot 量一直在上升, 主喷形成的 Soot 在未被明显氧化掉前, 后喷燃油又产生了 Soot, 因此 Soot 曲线仍为单峰的形式。从图 4 c) 中可以看到, 后喷量为 10% 在不同间隔下 soot 曲线对应出现第二个峰, 后喷间隔变化不大时, 对 Soot 的最终生成量影响不大, 但间隔过大, 如间隔为 12° CA 时, Soot 明显有增加的趋势。

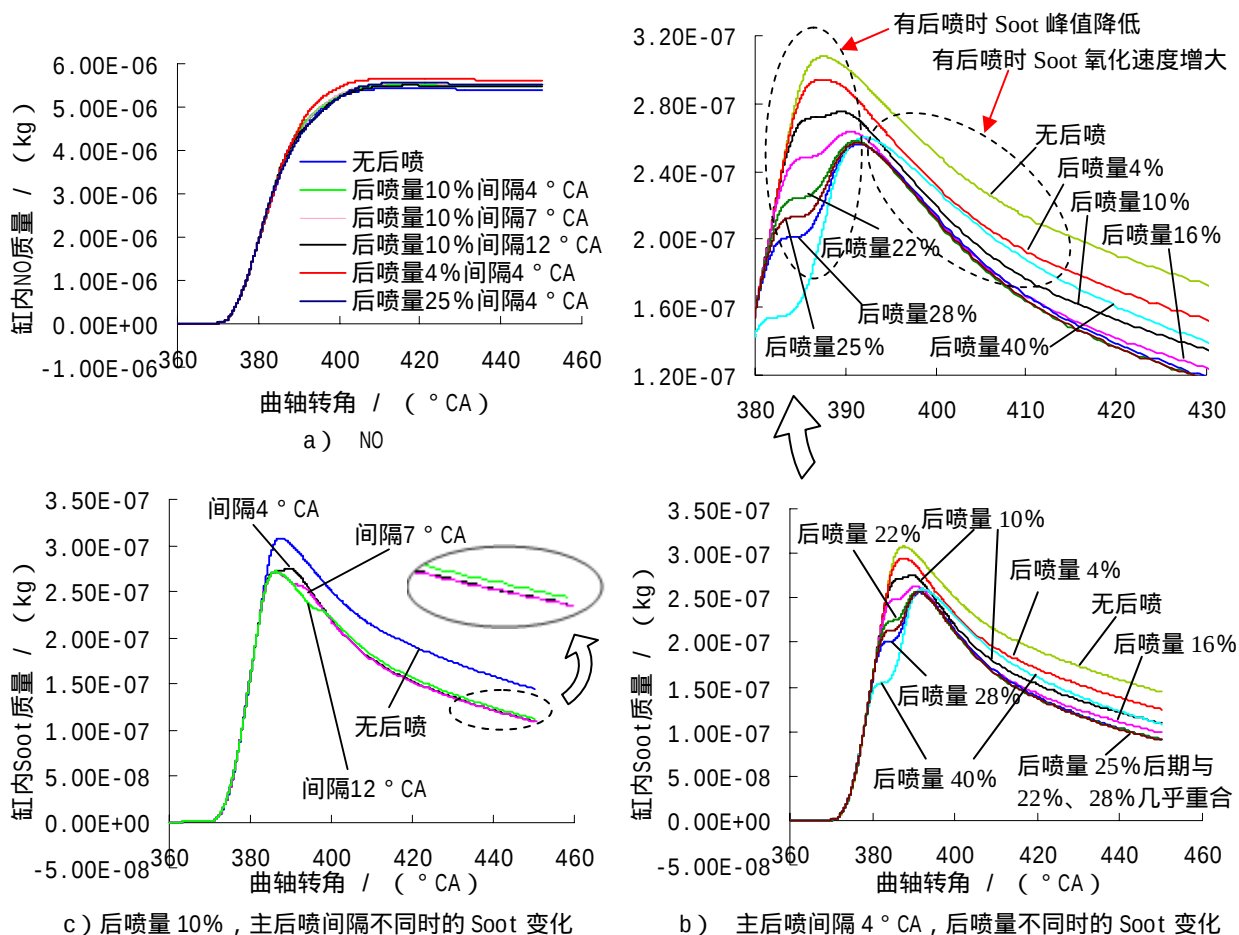


图 4 排放物模拟结果

图 4 中有两个突出的特征, 一个是有后喷时的 Soot 生成量的峰值明显低于无后喷的; 另一个是有后喷时, 后期 Soot 的下降速度快得多。间隔同为 4° CA 且后喷量小于 25% 时, 后喷量越大, Soot 的峰值越低, 下降速度越大; 大于 25% 之后, 后喷量再增大, 则刚好相反。正是这两个因素, 导致无后喷的 Soot 最终生成量最多; 后喷量为 25% 时, Soot 的最终生成量最少, 而后喷量为 40% 时 Soot 反而会增加, 且幅度已经相当明显。

本研究试图通过宏观参数和微观场分析相结合的方法解释有后喷时 Soot 峰值降低, 后期下降速度增大, 最终使得 Soot 排放降低的原因。

微观场以两张截面图来展示, 一张是沿八个油束中心线形成的喷油锥面剖切, 然后从上方即 +Z 方向观看得到的截面图; 另一张是沿一对油束中心线剖切, 因其对称, 取其中一半得到的纵截面图, 如图 5 所示。

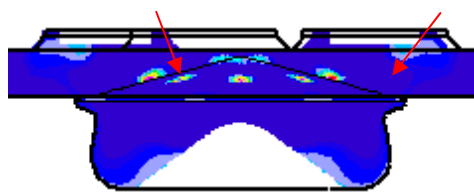


图 5 剖切截面示意图

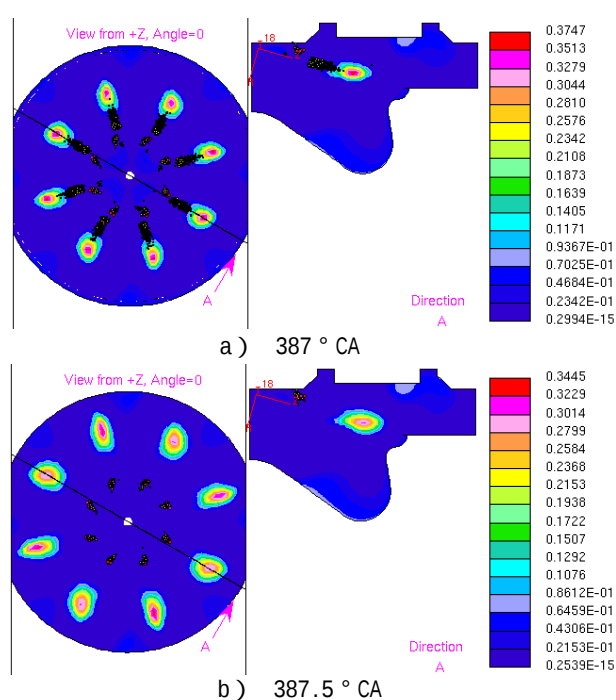


图 6 后喷量 10% 间隔 4° CA 工况燃油蒸汽浓度场

图 6 为后喷量 10% 间隔 4° CA 工况的燃油蒸汽浓度场。图 7 为 387° CA 时刻无后喷和后喷量 10% 间隔 4° CA 两个工况的氧气浓度场对比。

后喷量 10% 间隔 4° CA 工况的后喷在 385.4° CA 开始, 386.7° CA 结束。从图 7 中可以看到, 后喷燃油迅速雾化、蒸发, 到 387.5° CA 时就完成了全部液相油滴到气相燃油蒸汽的转变。对比图 6 b) 与图 7 b) 发现, 图中存在与燃油蒸汽形状、位置相似的低氧气浓度区, 而在无后喷时即图 7 a) 中此区域的氧气却是较浓的。分析原因为后喷迅速形成的燃油蒸汽恰好位于氧气浓度相对较高的区域, 并着火燃烧, 形成了前述的低氧气浓度区。

图 8 为 388° CA 时刻无后喷和后喷量 10% 间隔 4° CA 两个工况的 Soot 浓度场对比。可以看到后喷燃油蒸汽所处区域只生成了很少量的 Soot, 说明参与反应的氧气较多, 燃烧较完全, 印证了前述观点。

所以, 相比无后喷情况, 后喷燃油更充分地利用了剩余氧气, 其生成 Soot 量不明显, 这使得有后喷工况的 Soot 生成量峰值明显低于无后喷的。

湍流运动决定了各种物质在缸内的输运及其空间分布, 对可燃混合气的形成等具有直接的影响。湍流强度可由湍动能衡量。STAR-CD 中认为温度高于 1100 K 时是发生燃烧的

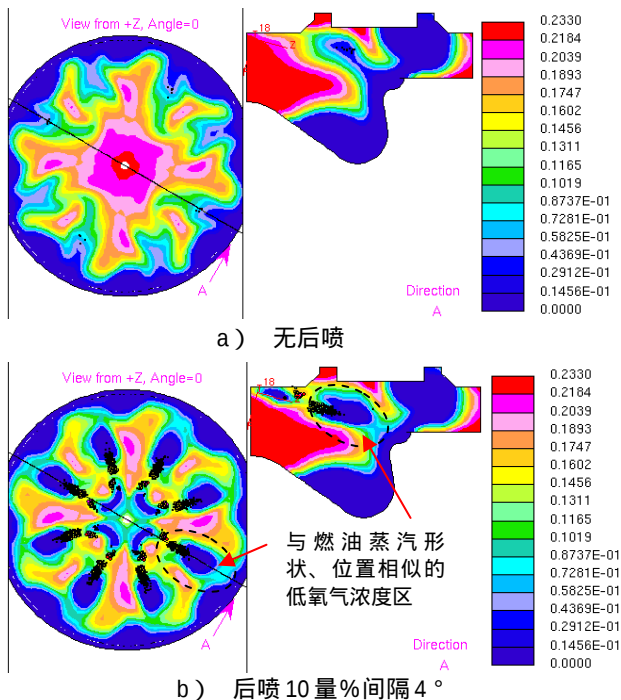


图 7 387° CA 时刻氧气浓度场对比

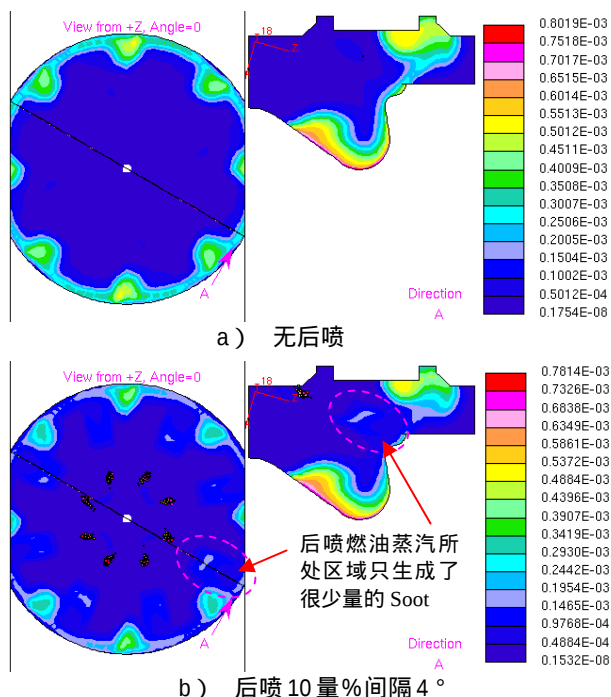
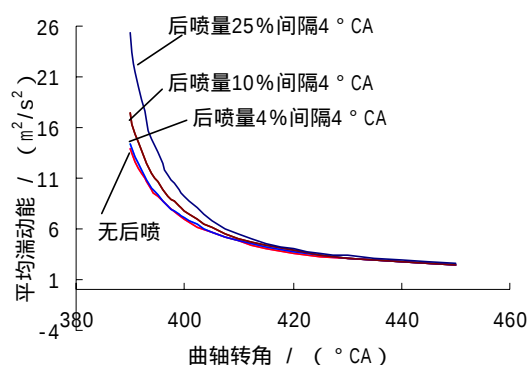


图 8 388° CA 时刻 Soot 浓度场对比

图 9 $T > 1100\text{K}$ 的所有网格的平均湍动能

一个表征。故在图 9 中给出了不同后喷量下, $T > 1100\text{K}$ 的所有网格的平均湍动能的对比。从图中可以看到 410°CA 之前, 后喷量 4% 工况的湍动能比无后喷情况略大, 后喷量 10% 的则比二者大出很多, 而 25% 的更大; 410°CA 之后, 各工况的平均湍动能逐渐接近相等。这说明后喷要达到一定的量, 湍动强度才显著增大, 其扰动作用才明显。对缸内流场扰动越大, 越有利于燃油、Soot 等与氧气混合, 更充分地利用氧气, 加强了燃烧, 使得缸内的温度升高。

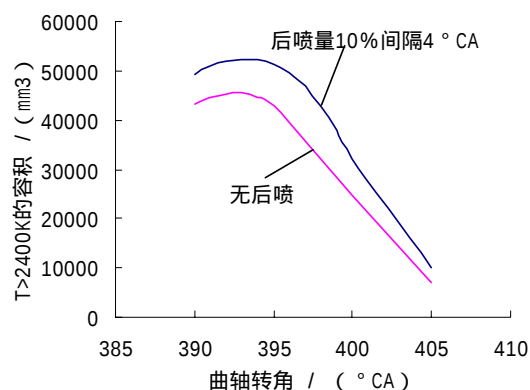
温度很高时有利于将已经生成的 Soot 氧化掉, 即使此时的氧气浓度不高。有研究表明^[5,6], 相应于不同的燃空当量比和燃烧温度, NO_x 和 Soot 的产生区域类似两个岛屿。在这个所谓的双岛图中, 当燃烧温度高于 2400K 时, 无论燃空当量比为多大, 都不产生或者只产生少量的 Soot。

以后喷量 10% 间隔 4°CA 为例, 图 10 a) 中给出了温度高于 2400K 的所有单元格占据的总体积随曲轴转角变化的情况。图 10 b) 为高于 2400K 的体积内含有的 Soot 量的对比。

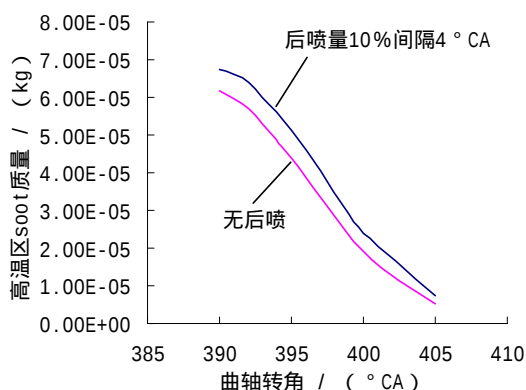
可以看到, 随曲轴转角增大, $T > 2400\text{K}$ 高温区渐小, 处于高温区内的 Soot 量渐少, 表现为氧化速度渐缓, 图 4 中 Soot 后期的下降速度降低。

无后喷生成的总 Soot 量总是高于后喷量 10% 间隔 4°CA 的, 而高温区内前者的 Soot 含量却低于后者。所以后喷量 10% 间隔 4°CA 工况的高温区内 Soot 量与缸内总 Soot 量的比值必然大于无后喷的, 如图 10 c) 所示。因此当高温区内的 Soot 全被氧化掉时, 表现出来的是后喷量 10% 间隔 4°CA 的 Soot 下降速率明显大于无后喷的, 如图 4 所示。

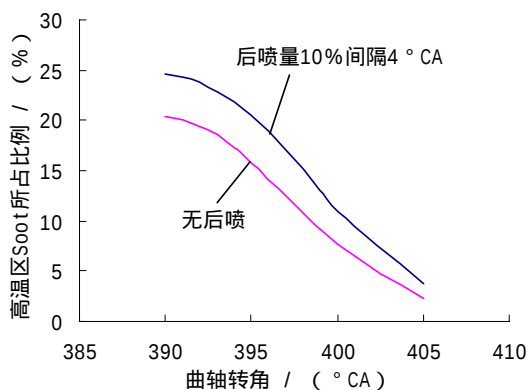
所以后喷注入后, 对流场扰动极大, 一方面 Soot 与氧气的混合增强, 对其氧化有利。另一方面由于加强了燃烧, 温度升高, 高温区增大, 使得 Soot 氧化速率明显增大。



a) 温度高于 2400K 的所有单元格的总容积



b) a) 中容积内含有 Soot 的总质量



c) b) 中质量与缸内 Soot 总质量的比值

图 10 温度高于 2400K 的容积和 Soot 量的对比

4 结论

(1) 采用自创的 CMC-O-grid 模板切割燃烧室网格, 能在油束通过区域消除耦合面并保证网格质量极佳, 使得求解稳定性提高且大大节省计算时长。

(2) 后喷对 NO 影响不大, 但对 Soot 影响很大, 随着后喷量逐渐增大, Soot 曲线由单峰演变为双峰。后喷使得 Soot 峰值降低, 并强化 Soot 的后期氧化, 故而 Soot 最终生成量显著减少。

(3) 与无后喷情况相比,后喷燃油的雾化、蒸发恰处于氧气较浓的区域,并在此区域着火燃烧,更充分地利用了氧气,燃烧较好,故后喷生成 Soot 量不明显,Soot 曲线的第 2 峰值明显低于无后喷的 Soot 峰值。

(4) 后喷对流场扰动极大。一方面 Soot 与氧气的混合增强,对其氧化有利;另一方面扰动加强了燃油与氧气的混合,燃烧强化,高温区增大,使得 Soot 氧化速率明显增大。

(5) 后喷要达到一定的油量,湍动能才显著增大,其扰动作用才更明显。后喷量越大,后期扰动越强烈,对 Soot 的氧化越有利。后喷量为 25%时对 Soot 的最终生成量降低最明显,可达 37.6%。

(6) 后喷间隔过大时,Soot 排放明显有增加的趋势。

5 参考文献:

- [1] S. Kevin Chen. Simultaneous Reduction of NO_x and Particulate Emissions by Using Multiple Injections in a Small Diesel Engine[C]. SAE Paper 2000-01-3084
- [2] N. A. Henein, M-C. Lai, I. P. Singh, L. Zhong and J. Han. Characteristics of A Common Rail Diesel Injection System Under Pilot and Post Injection Modes[C]. SAE Paper 2002-01-0218
- [3] P. J. Shayler and H. K. Ng. Simulation Studies of the Effect of Fuel Injection Pattern on NO and Soot Formation in Diesel Engines[C]. SAE Paper 2004-01-0116
- [4] Adapco. The es-ice User Manual Version 1.02. October 3, 2003
- [5] Kazuhiro Akihama, Yoshiki Takatori and Kazuhisa Inagaki. Mechanism of the Smokeless Rich Diesel Combustion by Reducing Temperature[C]. SAE paper 2001-01-0655
- [6] Sanghoon Kook and Choongsik Bae. The Influence of Charge Dilution and Injection Timing on Low-Temperature Diesel Combustion and Emissions[C]. SAE paper 2005-01-3837