

基于 CONVERGE 的某机型喷雾燃烧分析

(山东大学 济南市历下区 250012)

摘要: 在能源危机和环境保护的双重压力下,人们对柴油机的性能和排放的要求也越来越高,而柴油机燃烧过程的好坏对其性能及排放有着至关重要的影响。数值模拟方法具有成本低、周期短、信息量大和便于优化等特点广泛地应用于柴油机的燃烧过程的研究。本文主要利用 Hypermesh 软件进行网格划分,随后用 CONVERGE 软件进行计算,侧重于验证在高喷油压力下不同的破碎和蒸发模型对柴油机喷油雾化、蒸发、燃烧的影响。并对不同的网格划分策略进行对比,最后选取一组适合的破碎模型和雾化参数,对某机型进行模拟研究。

关键词: CONVERGE 喷雾破碎模型 蒸发模型 高压喷射

1 国内外研究现状

柴油机燃烧是一个强紊流、高可压缩性的瞬态过程。国内外的研究也就集中在两方面,一种是对各种现象模型的改进,另一种则是基于现有模型的一些参数化研究。

2009 年, S. Som 和 S.K. Aggarwal 认为在高喷油压力下,喷嘴内的穴蚀已经不容忽略,为此提出了新的破碎模型 KH-ACT,能够更好地贴合实验数据。2010 年, Sibendu Soma 和 Anita I. Ramirez 研究了三种不同的喷孔对柴油机燃烧的影响。

国内, 2009 年, 杨铁皂、刘文艺等针对 O'Rourke 模型对网格严重的敏感性,提出了一种新的液滴碰撞模型 MIC, 2010 年, 成传松、李云清研究了不同的燃油粘度和喷油背压对喷油破碎的影响,研究结果表明,结果表明环境压力的增加,使得碰撞反弹概率增加而聚合概率下降;燃油粘度的增加使得碰撞聚合比例增加而碰撞分离比例下降。

2 计算过程的建立

2.1 几何文件的准备

提取需要的表面如火力面、气道、气门、活塞顶、缸套等,然后在 Hypermesh 进行处理,提供给 CONVERGE。生成的几何文件如下图所示。关键则是余隙高度的确定,由于没有提供具体的数值,所以通过压缩比反推得到了余隙高度。

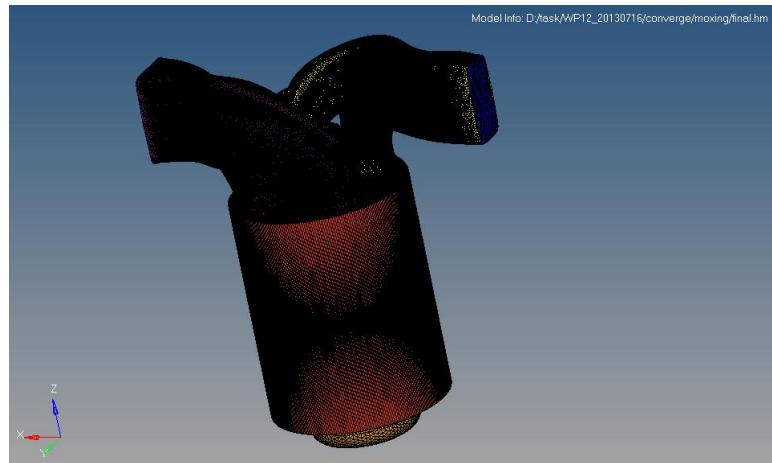


图 1 计算所用几何文件

2.2 计算文件的通用设定

通用设定主要包含计算起止角、算法控制、离散方法控制、时间步长控制、网格控制等。重点则是网格的控制。在本文的计算中都只计算一个完整的工作循环。计算从进气门开启时刻 346CA 开始，到 1066CA 结束。

在文献中，给除了计算网格的推荐值，最好最小尺寸能够保持在 0.5mm^[1]。另外，在计算中还发现，当网格尺寸减小时会带来收敛上的困难，本文将基本尺寸定为 8mm，同时最小尺寸保持在 1mm。

2.3 现象模型的指定

油滴被高速喷入气缸后，会经历破碎、蒸发、燃烧等过程。油滴在雾化过程中还可能存在各个液滴的相互碰撞，文献中，给出了液滴基于不同的韦伯数会有五种不同的碰撞产出：(I) 小变形聚合、(II) 反弹、(III) 大变形聚合、(IV) 反射分离以及(V) 拉伸分离^[2]。而在高负荷时，喷雾还有可能碰壁，因此也会存在油滴和壁面的交互。下面将以此介绍各个现象模型的指定。

2.3.1 破碎

CONVERGE 中提供 KH、RT、KH+RT、以及 TAB 模型。另外文献 1 中也提到，在喷雾破碎的初始阶段，破碎的过程与所选的破碎模型没有太大关系，所以喷油规律的获得显得尤为关键。由于缺乏本机型的喷油规律曲线，所以通过类比的方法来模拟某机型的喷油规律。

近年来，人们逐步意识到喷孔内部流动对喷雾发展的重要影响，虽然并没有达成完全的共识^[3]，但有种观点认为在高压喷油过程中形成的气蚀和紊流会对加速油滴的破碎，从这个角度来看，气蚀是有助于完全燃烧的，但气蚀同样会对材料造成破坏。目前所用版本还无法考虑气蚀对喷雾的影响。

本文主要计算了 20 个不同的喷雾破碎模型，由于篇幅所限，本文只对具有代表性的几种破碎模型进行分析研究。具体的参数设置如下表所示。

表 1 不同破碎模型的设定

编号	模型	KH	子液滴开关	RT	TAB	蒸发	B_0	C_{RT}	$C\tau$	B_1	C_{bl}
0	KH-RT M	1	1	2	0	1	0.61	0.5	1	7	99999

1	KH-RT M	1		1	2	0	2	0.61	0.5	1	7	99999
3	KH	1		1	0	0	1	0.61	0.5	1	7	99999
8	RT	0		1	2	0	1	0.61	0.5	1	7	3.5
10	RT	0		1	1	0	1	0.61	0.5	0.5	7	3.5
11	KH+RT L	1		1	1	0	1	0.61	0.5	1	7	3.5
15	TAB	0		0	0	1	1	0.61	0.5	1	7	3.5

所有的计算都采取相同的喷油规律，即在 712CA 开始喷油，喷油持续期为 40CA，喷油曲线如下图所示。

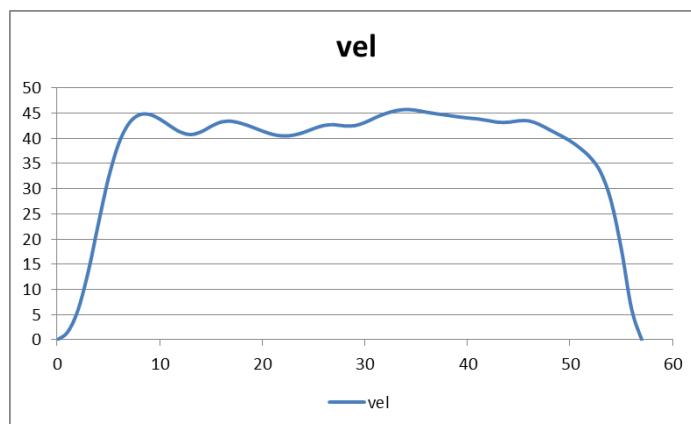


图 2 喷油规律

2.3.2 碰撞、与壁面交互模型模型

液滴之间的碰撞采用 NTC 模型，碰撞产气采取 POST 模型，但由于碰撞网格不能很好地并行，所以关闭了碰撞网格的自适应。与壁面的交互作用选用 wall film 模型。

2.3.3 蒸发、燃烧模型

CONVERGE 只提供了两种蒸发模型，分别对液滴随时间的变化率提出了不同的修正。燃烧模型则采取标准的 shell+CTC 模型，分别模拟柴油的预混燃烧和扩散燃烧。CONVERGE 公司则推荐使用 sage 模型。

3 模拟结果分析

3.1 蒸发模型的比较

由于喷油规律相同，所以主要比较缸内压力、瞬态放热率、累积放热率、燃烧室内液滴质量 4 条二维曲线以及三维的油束落点分析图。

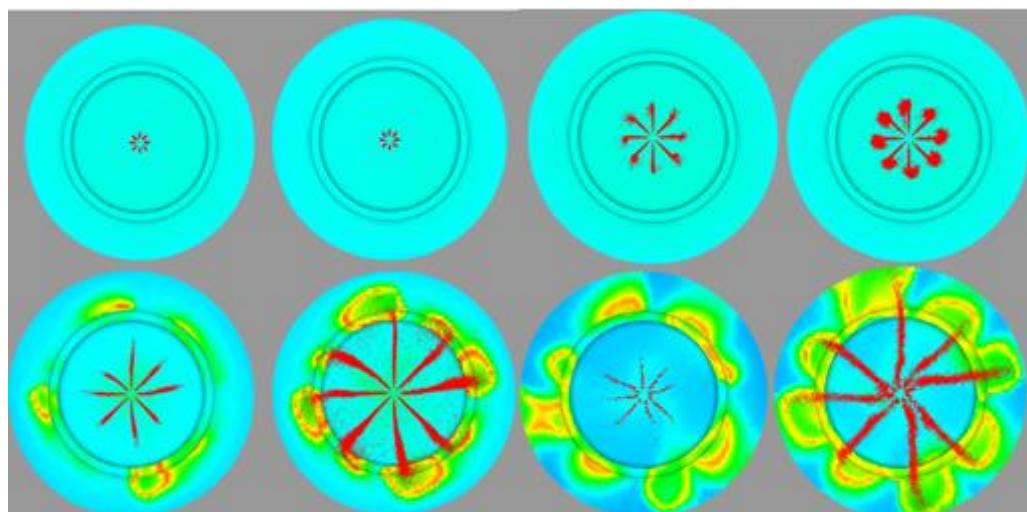


图 3 不同 CA 对应的油束发展 (从左上至右下依次为 714CA, 718CA, 740CA, 756CA, 每一图左侧的蒸发模型 2, 右侧蒸发模型为 1)

由图可以看出蒸发模型为 2 时, 贯穿小, 散布角小, 蒸发强烈。

图 4、5、6、7 因此给出了缸内压力、累积放热率、瞬态放热率、和计算域内液滴质量。

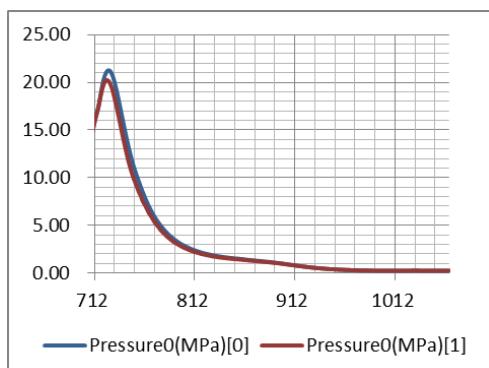


图 4 缸内压力变化曲线

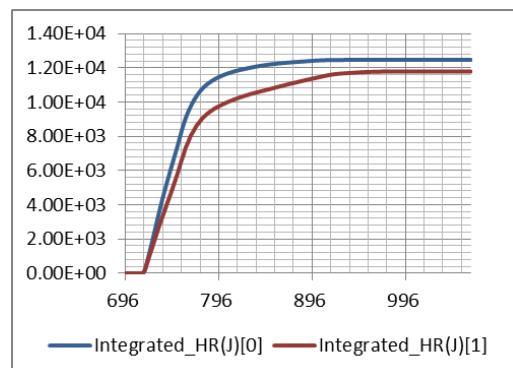


图 5 累积放热率变化曲线

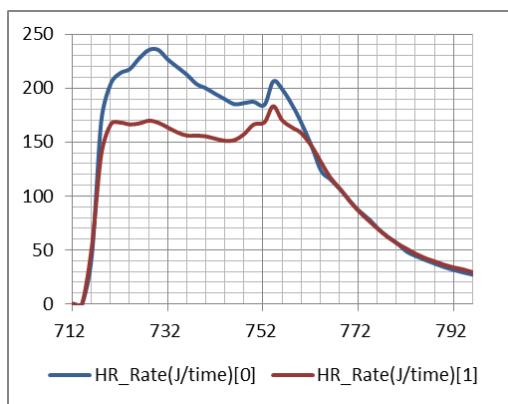


图 6 瞬态放热率变化曲线

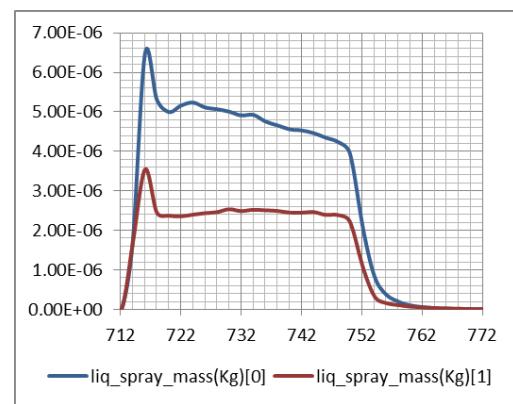


图 7 计算域内液体质量变化曲线

当蒸发模型为 2 时, 最大爆发压力减小大约 1MPa, 累积放热量减少 682J, 液体质量的变化趋势基本相同但峰值要小一半 (都出现在 716CA)。而在瞬态放热率上, 虽然初期上升规律

一致，但蒸发模型为 2 时的放热率峰值要低很多，甚至低于扩散燃烧的峰值。因为压缩比很高所以，滞燃期很短，所以预混合的柴油也较少，导致预混燃烧的放热率峰值不是太高，大部分都被扩散燃烧消耗掉了。另外虽然 2 的蒸发能力更强但混合气并没能很好地利用如下图所示。

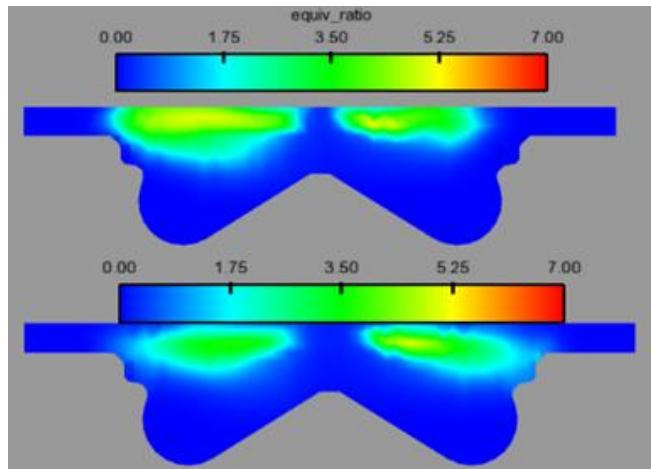


图 8 两种模型某一曲柄转角的当量比切面图（上部蒸发模型为 2，下部蒸发模型为 1）

3.2 不同破碎模型的比较

分别选取编号为 0、3、8、11、15 的模拟结果进行比较，则可以得出不同喷雾模型的破碎、雾化和燃烧行为。

KH 模型认为液滴的破碎时由于气液两相之间的相对速度导致交互面上 KH 不稳定波的增长而是液滴从液体表面分离，对于高压液体射流的雾化，这是其主导作用的。编号为 3 代表这一模型。RT 模型则认为在气液界面的法向上存在的由于两相之间密度的巨大差别而产生的惯性力会引起另一种扰动波 RT 波的不稳定增长，导致液滴分裂雾化^[4]。编号为 8 代表这一模型。

更普遍的做法是两者联合使用，即 KH+RT 模型。CONVERGE 提供了两种一种是 KH-RT Breakup Length Model 和 Modified KH-RT Model，两者的区别在于以破碎长度的指定^[5]。编号为 11 和 0 的则分别代表着两种模型。

TAB 模型，它是基于弹性力学理论将液滴的破碎和弹簧系统类比得到的。对于特别高的韦伯数，喷雾液滴散落分布，用弹簧质量系统类比是不适合的^[6]。编号 15 代表了这一种模型。

下图给出了五种模型的油束发展情况，从左至右依次为编号 0、3、8、11、15. 从上至下依次为 716CA, 726CA, 740CA, 754CA 和 760CA。

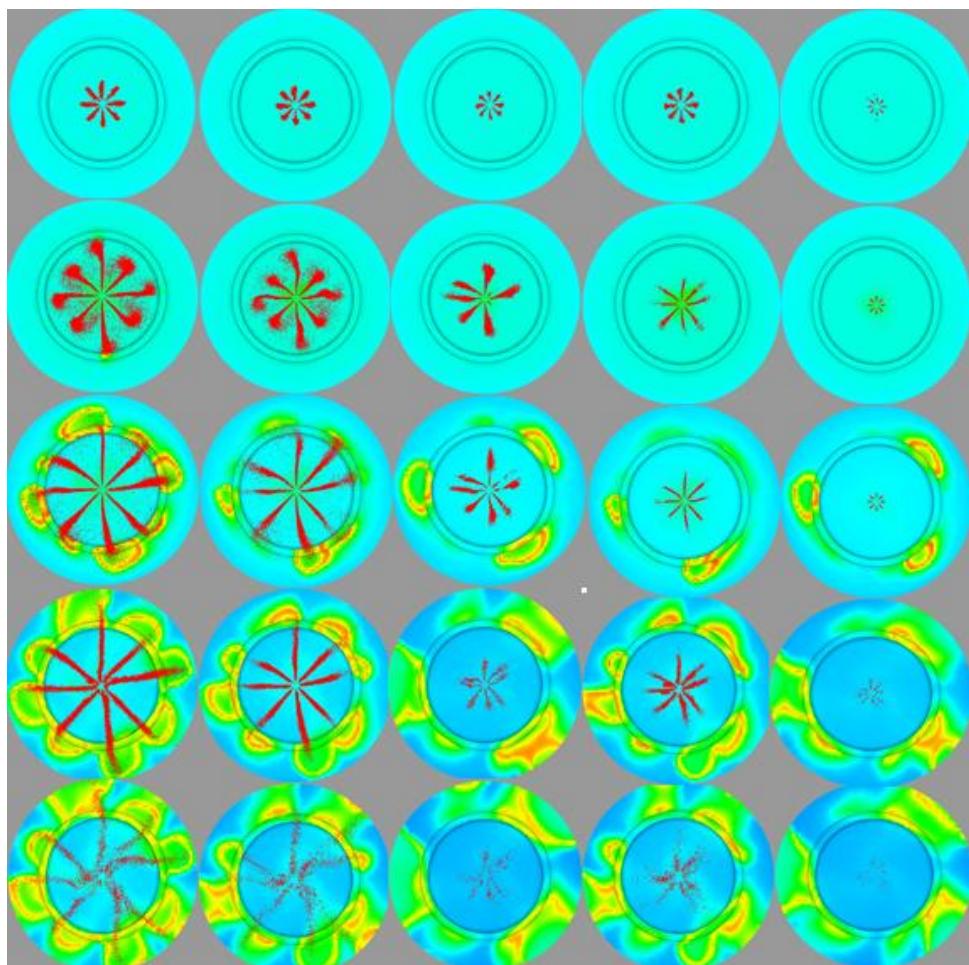
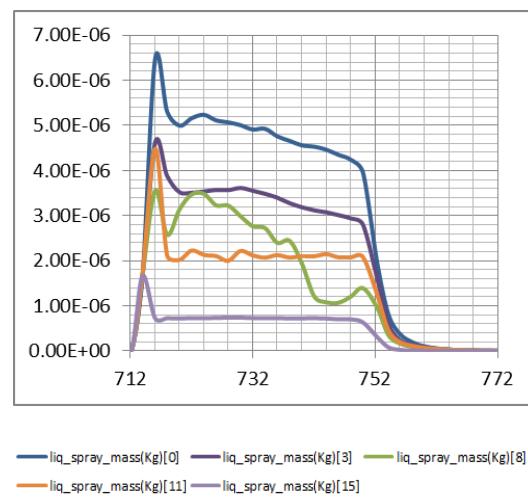
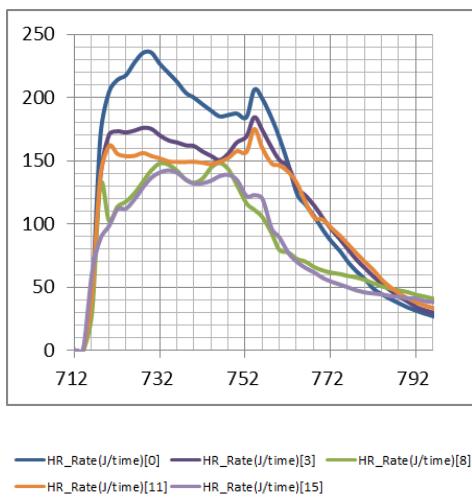
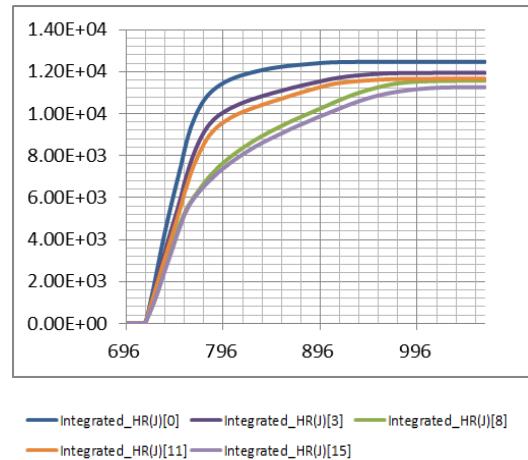
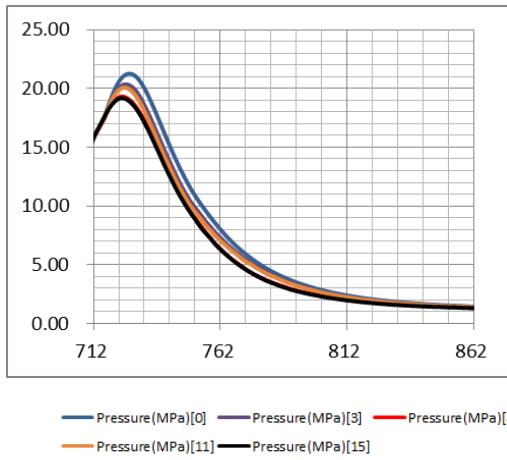


图 9(从左至右依次为编号 0、3、8、11、15. 从上至下依次为 716CA, 726CA, 740CA, 754CA 和 760CA)

从上图中可以看出，基于空气动力学的破碎行为在初期还是比较一致的。在 716CA 之后开始有差别。KH 模型 (3) 与 Modified KH-RT Model (0) 的破碎行为基本一致，KH (3) 模型的蒸发更快，贯穿距离也相对小一些，因此燃烧向壁面的传播收到抑制。RT (8) 模型则显示出高度的不对称性，8 个喷孔的发展很不均匀，而在喷雾燃烧后期，贯穿距离才又逐步加长。KH-RT Breakup Length Model (11) 通过破碎长度的指定，使得破碎机制分区。该模型的各喷孔发展均匀性较好，贯穿距离也较小，蒸发强烈，燃烧区域受到抑制。综合比较前四种模型，在该喷油规律下，RT (8) 模型的破碎和蒸发都要更加迅速，而 KH (3) 模型各个喷孔的喷雾燃烧发展比较均匀。

TAB (15) 贯穿距离始终保持很小，直至全部蒸发燃烧。可能是喷雾压力比较大，气液相对速度很高，所以韦伯数已经超出了 TAB 模型的应用范围。

图 10、11、12、13 因此给出了缸内压力、累积放热率、瞬态放热率、和计算域内液滴质量。



由图 10 和图 11 可以看出 Modified KH-RT Model (编号 0) 爆发压力最大为 21MPa 左右, KH 模型 (编号 3) 和 KH-RT Breakup Length Model (编号 11) 以及 RT (编号 8) 和 TAB (编号 15) 有相近的爆压, 分别为 20MPa 和 19MPa 左右。累积放热率的稳定值 Modified KH-RT Model、KH、RT、KH-RT Breakup Length Model、TAB 分别为 12469.14J、11942.18J、11575.43J、11663.54J、11256.27J。

由图 13 可以看出 KH 和 Modified KH-RT Model 有着很相似的变化规律, 但峰值 KH 要小 1mg 左右, 这是由于 KH 蒸发能力更强的原因, 而 KH 和 KH-RT Breakup Length Model 相比, 后者在峰值之后的下降要更快更多, 原因也在于前者的蒸发作用要弱于后者。而 TAB 模型的残余液体质量则最低, 这也与三维图 9 中的结果相一致。除了 RT 模型四条曲线中间都有一个相对平稳的阶段表示这一阶段蒸发和因喷油带入的质量达到平衡, 752CA 之后喷油停止, 残余液体质量降为 0.

在图 12 中, 除了 RT 和 TAB 都可以看到比较明显的预混、扩散燃烧。但 KH-RT Breakup Length Model 的预混燃烧之后的放热率下降已经不明显。而 TAB 的预混燃烧的放热率峰值已经消失, 在扩散开始之后放热率依然在升高, 而 RT 模型的放热率则显得很不稳定, 原因还是在于破碎过程本身的不稳定。

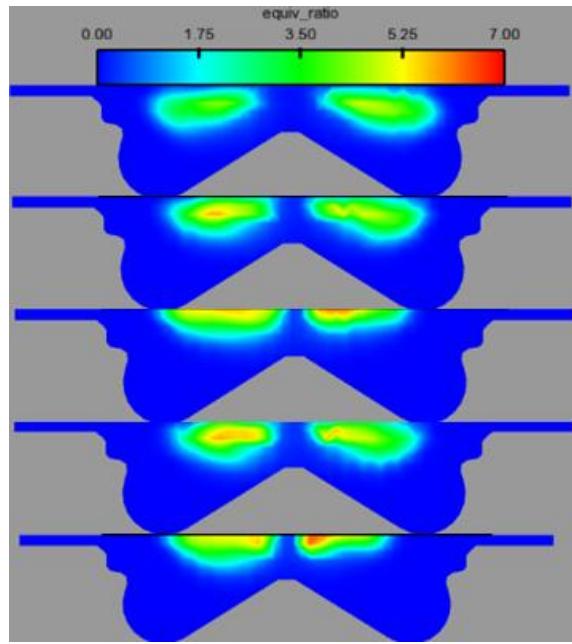


图 14 从上至下依次为编号 0、3、8、11、15 模型

图 14 为五个模型在 724CA 时的喷油发展状况，由图可以看出，虽然后四种模型的蒸发过程都要强于第一种，但由于油束的发展都不同程度的贴近火力面导致燃烧发展恶化，放热率表现不好。

3.3 不同网格密度的比较

由于网格的基准尺寸减小时会带来收敛上的问题，为此本文通过改变网格加密策略来实现不同的网格密度的方案的比较，三种网格加密策略的因子分别为 2、3、4。最小网格尺寸分别为网格尺寸的 $1/4$ 、 $1/8$ 、和 $1/16$ 。三种方案分别成为 A、B 和 C。生成的网格图下图所示（此处指展示燃烧室一切面上的网格）。有图可见，随着加密因子的增加，粗细网格的分化也更加明显。

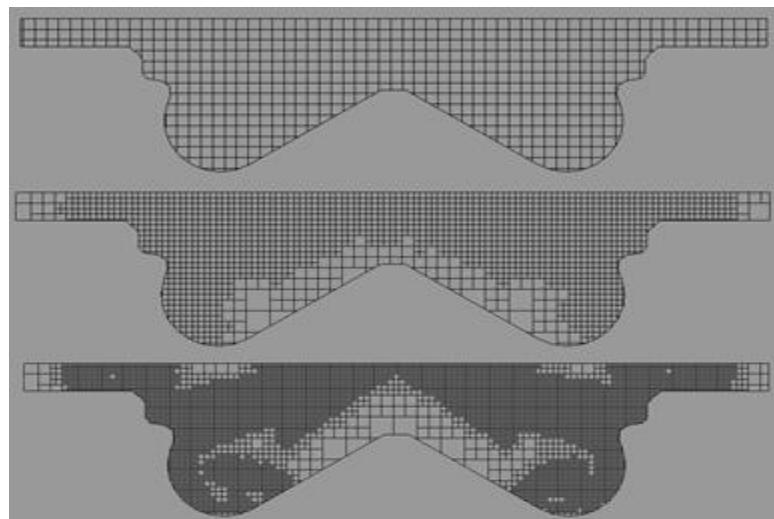


图 15 三种方案生成的网格（从上至下依次为 A、B 和 C）

在同等计算资源下，三者的计算时间依次为 7、11 小时和 38 小时（近似值）。

图 16、17 给出了三种方案的喷油发展，三种方案在整体规律上很类似只是发展程度不同

而已，所以只给出一具有代表性的截图。

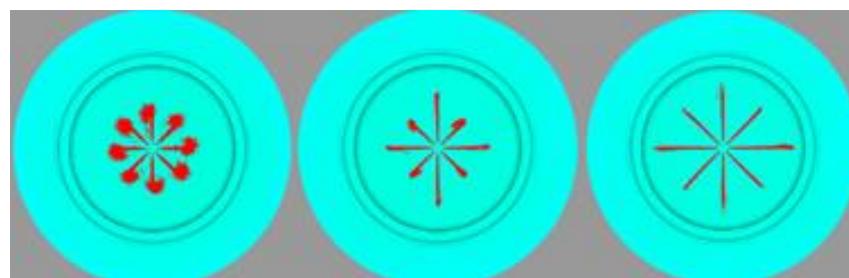


图 16 三种方案在 718CA 时的喷油发展 (从左至右依次为 A、B、C)

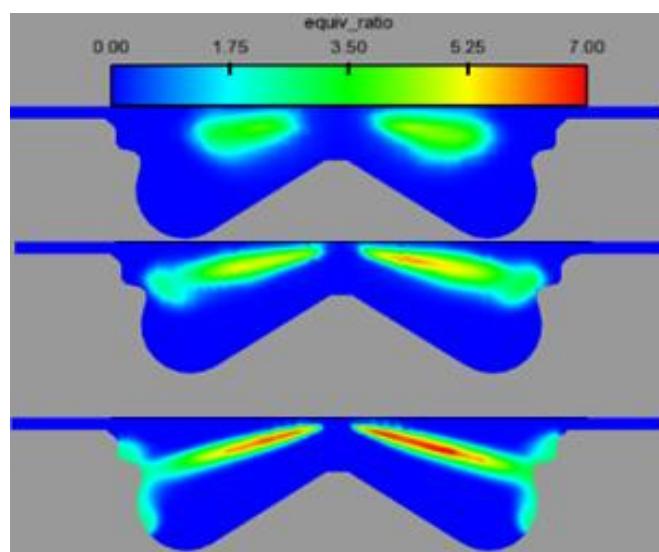


图 17 三种方案在 718CA 时的当量比切面图 (从左至右依次为 A、B、C)

文献 1 中提到，网格尺寸减小时，喷油受到的气相阻力减小，同时网格加密之后液滴碰撞频率增加，液滴直径也增加导致蒸发变差。本文中也观察到了类似的现象。网格加密之后，喷雾形成的锥角变小，贯穿增强。

图 18、19、20、21 给出了三种方案的缸内压力、累积放热率、瞬态放热率、和计算域内液滴质量。

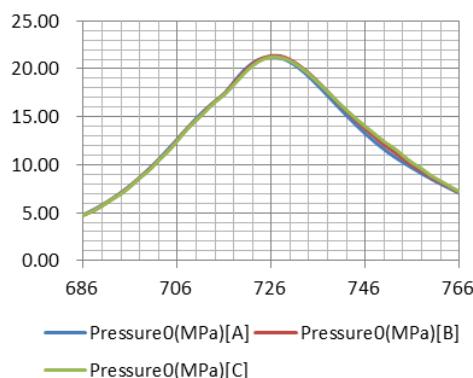


图 18 缸内压力变化曲线

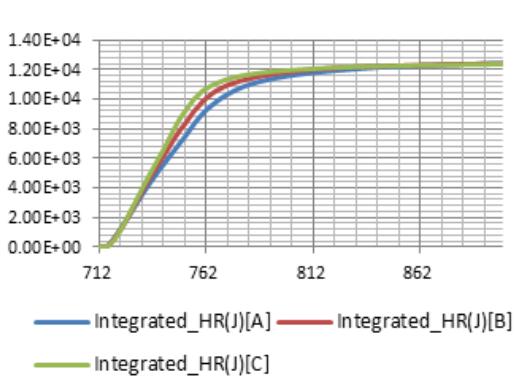


图 19 累积放热率变化曲线

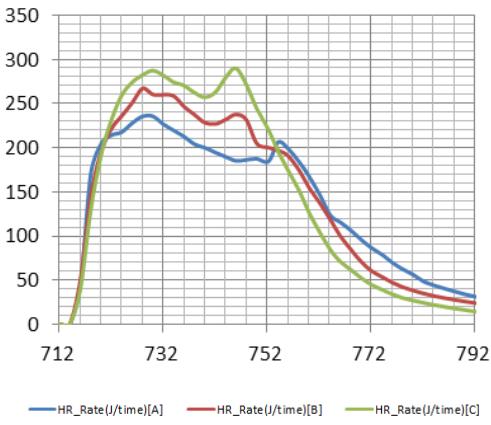


图 20 瞬态放热率变化曲线

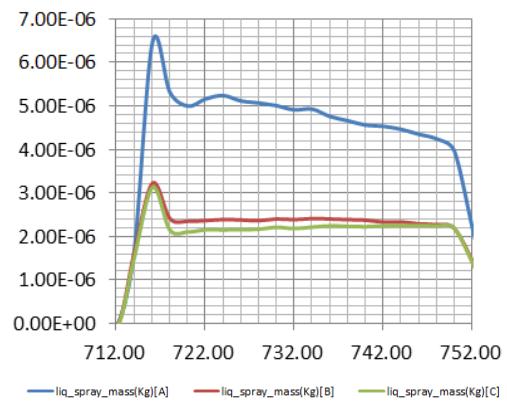


图 21 计算域内液体质量变化曲线

三者的压力变化曲线很相似，网格越密时累计放热率的增长也越快，但最终的稳态值差别并不大。网格越细预混燃烧也越强烈初期放热率变大，扩散燃烧的放热率的下降也更快。液体质量的变化在初期很相似，燃烧开始后（714CA）则有了明显的区别，网格尺寸减小时，液体质量的增加收到限制冰最终导致了峰值要比粗网格低了一半。计算域内的液体质量是喷油和蒸发之间的相互竞争，由于喷油规律一直所以，造成图 21 的原因是蒸发上的差异，蒸发则受到两个过程的影响：破碎和发放热。由于初期放热率曲线基本一致（720CA 之前），而在这一阶段的液体残余质量已经偶很明显的变化，因此考虑这一阶段的主导因素是破碎。正是由于网格尺寸减小，阻力下降，贯穿增强，相对速度变快所以破碎作用增强，从而蒸发迅速导致液体质量的增长受到抑制甚至是液体质量的负增长，在燃烧速率放缓后，液体质量达到动态平衡，随后随着喷油的结束而减少。

放热率急缓差异的原因也可以从下图的紊动能曲线上得到解释。

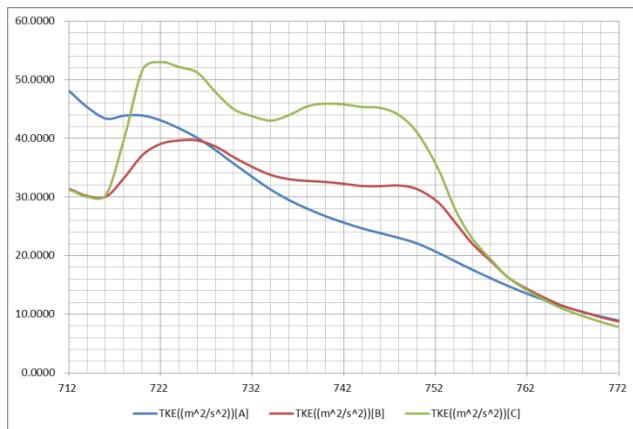


图 22 三种方案的紊动能变化曲线

由于采用相同的 shell 模型来模拟预混燃烧，因此三种放热的初期放热率比较一致，而在扩散燃烧阶段，其控制作用的是油气的混合速率，即紊动能。由于网格加密后的紊动能增加所以扩散燃烧阶段的放热率也更高。

综合考虑，方案 2 的模拟结果和方案 3 的比较接近同时计算时间比较短，所以采用方案 2 的网格加密策略。

4 结论

本文利用三维计算软件对某机型进行燃烧计算，并对不同的蒸发模型、喷雾破碎模型和不同的网格划分策略进行分析比较。柴油的喷射、破碎、蒸发和燃烧是一个连续且存在相互作用的过程，各个现象模型的选取对燃烧的发展影响很大，同时网格尺寸也严重影响计算结果，网格越小喷雾的贯穿也越强。所以要较精确的模拟燃烧过程需要实验数据对模拟的选取进行标定。

本文的重点在破碎和雾化的现象研究，燃烧以及边界条件的研究会是今后的方向。比如 shell+ctc 与 sage 模型的比较以及边界条件之间的处理。

参考文献

- [1] SOM S. Development and Validation of Spray Models for Investigating Diesel Engine [D]. Mechanical Engineering, 2009.
- [2] 成传松, 李云清, 黎一锴等. 燃油粘度与环境压力对喷雾碰撞过程的影响 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(11)
- [3] Payri R, Salvador F. Diesel nozzle geometry influence on spray liquid-phase fuel [J]. Fuel, 16, July 2007 (87): 1165 – 1176.
- [4] 解茂昭. 内燃机计算燃烧学 [M]. 第二版. 大连理工大学, 2005. 9.
- [5] Science C, Inc. CONVERGE_Theory_Manual [M]. 1st edition. CONVERGENT Science, Inc, 2013. 9.
- [6] 史春涛, 任立红. 喷雾破碎模型在内燃机 CFD 中的应用 [J]. 拖拉机与农用运输车, 2006. 6, 33(3)..