

均质 GDI 汽油机混合气形成的 影响因素研

The study of influence factor on mixture formation of a homogeneous GDI engine

叶伊苏 王伟民 陈涛

(东风汽车公司技术中心 湖北 武汉 430058)

摘 要: 文中以一款增压直喷汽油机燃烧系统开发为例,从低速及高速两种工况,研究了气道及燃烧室形状、油束布置方案等因素对缸内混合气形成过程的影响。分析结果显示改变进气道及燃烧室屋脊形状、增加缸盖排气侧挤气面积以及调整油束喷射角度,可以提高缸内滚流运动强度、加强油气混合过程,从而有效改善了点火前缸内混合气的分布情况。研究了高转速下喷油时刻对混合气形成及燃油湿壁情况的影响,结果显示喷油起始角为 390°CA 时综合效果较好。采用较优方案组合进行的初步性能试验表明,外特性及部分负荷工况下的燃烧效率较高,动力性及经济性基本达到既定目标。

关键词: 混合气形成; 气道及燃烧室形状; 挤气面积; 油束角度; 喷油起始角

Abstract: In the development of a T-GDI engine combustion system, the influence of intakeport and combustion chamber and fuel spray scheme to mixture formation in cylinder was studied under two operating conditions (the low rotation speed an the high rotation speed). The results show that modifying the shape of intakeport and combustion chamber, increasing the squish area of cylinderhead near the exhaust valve and adjusting the angle of fuel spray can improve the tumble intensity and the mixing process, leading to a good result of fuel distribution at the ignition time. Under the high rotation speed condition, the influence of injection time to mixing process and wall wetting was studied. The results indicate that the best overall effects can be obtained at 410°CA SOI at the high speed. The test results of the engine which adopt those better scheme show that combustion efficiency is high at the full load and the part load, power performance and economy have reached the target.

Keywords: Mixture formation; The shape of intake port and combustion chamber; Squish area; The angle of fuel spray ; Start of injection (SOI)

前言¹

增压直喷汽油机 (GDI) 因具有较强的动力输出及较好的燃油经济性,现已成为国内外各大汽车公司研究开发的热点^[1~2]。按照燃烧方式的不同,其可分为两大类:均质燃烧和分层燃烧。但由于分

层燃烧导致的排放问题较难解决，目前产业化的 GDI 发动机大多数采用均质燃烧方式，并使用成熟的三效催化剂解决排放问题^[3]。

均质 GDI 汽油机在燃烧系统组成上一般由进排气道、进排气门、燃烧室、活塞、喷油器以及火花塞组成，如图 1 所示。喷油器目前主要采用侧置方式，且为了适应发动机工况的变化，大多采用多孔喷嘴。由于 GDI 汽油机是在缸内喷油，混合气形成时间很短，所以必须要组织合适的气流运动以及精确的喷油匹配（油束布置及喷油时刻），才能在点火前形成均匀的混合气，以保证高效的燃烧，从而使发动机获得较好的动力性、经济性和排放性能。

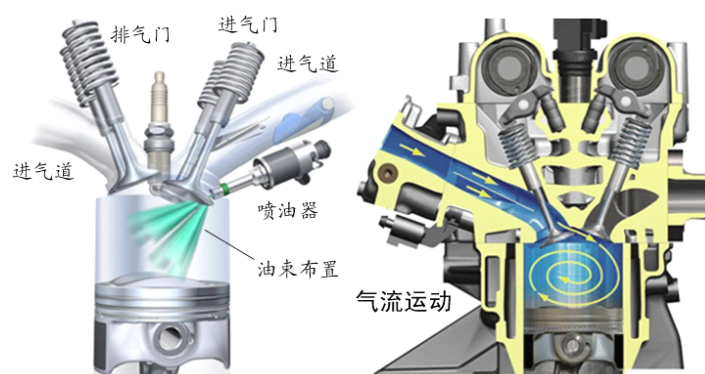


图 1 GDI 燃烧系统示意图

由以上叙述可知，影响 GDI 汽油机混合气形成质量的因素众多，如进气道滚流水平、活塞冠面形状、挤气面的设计、喷油油束布置以及喷油正时。所以在设计阶段，利用先进的 CFD 分析技术对这些因素的影响进行研究是非常重要的。这样可以快速对设计方案进行评估，并提出改进意见，从而大幅减少后期的试验费用。

1 研究对象

本文是以一台直列 4 缸、增压直喷、水冷汽油机的实际开发过程为例，介绍各因素对混合气形成过程的影响。该汽油机排量为 1.4L，压缩比为 10:1，喷油器为侧置的 6 孔喷油器，燃烧室为屋脊形燃烧室，峰值扭矩出现在 1800rpm~4500rpm 之间，最大功率点出现在 5500rpm。其燃烧系统在下止点位置的三维网格模型如图 2 所示，网格数量为 50 万左右。

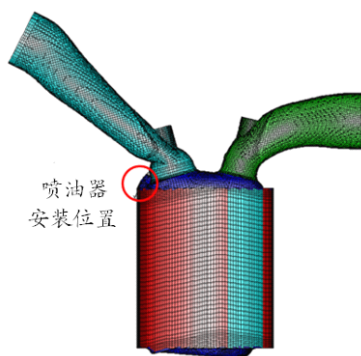


图 2 燃烧系统瞬态计算网格模型

下文以两种具有代表性的工况（1800rpm 及 5500rpm 全负荷）为基础进行各因素对点火前混合气形成质量的影响研究。

2 研究方法

利用 STAR-CD 软件对进气及压缩冲程中的混合气形成过程进行瞬态喷雾模拟，定义排气（结束）上止点为 360CA，压缩（终了）上止点为 720CA。缸内、进气道、排气道的初始化条件均来自一维性能分析软件 GT-POWER。进气道进口、排气道出口采用 Inlet 边界，流量和温度随时间的变化也同样从 GT-POWER 获取。

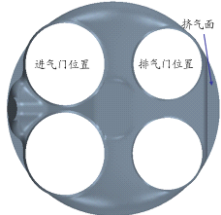
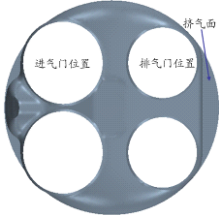
在进行喷雾模拟前，需要在定容燃烧弹内进行 GDI 喷油器相关参数的测量，一般称之为喷雾模型，主要包括喷射速度、喷雾锥角、贯穿距以及 SMD 油滴粒径分布等。关于 GDI 喷油器喷雾特性测量及标定工作，可参考文献 [4]。

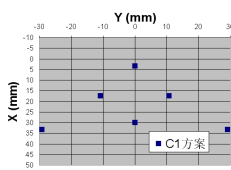
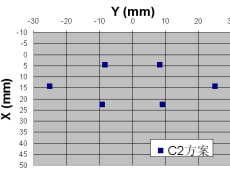
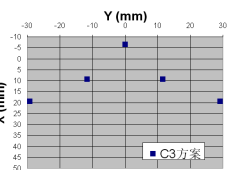
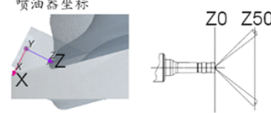
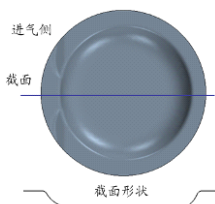
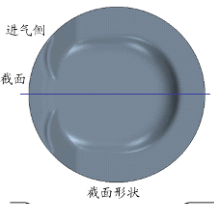
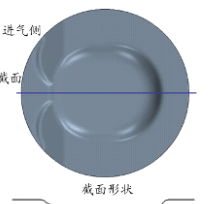
3 各因素的影响分析

以上已经说明在 1800rpm 及 5500rpm 两种全负荷工况下进行混合气形成的影响因素研究，在此工况下，为保证动力输出、降低排气温度，一般均采用加浓燃烧模式。在 1800rpm 工况下，由于转速较慢，每个循环内混合气形成时间相对充分；而在 5500rpm 下转速很快，混合气形成时间很短，此时要考虑喷油时刻对混合气形成的影响。

由于影响因素众多，所以在分析某一因素的影响时，将其它因素固定。表 1 是影响因素及对应的方案列表。

表 1 影响因素及其方案

影响因素	方案 1 及其代号	方案 2 及其代号	方案 3 及其代号	备注
进气道 +燃烧室屋脊 (A 因素)	 (A1)	 (A2)	——	A2 方案较 A1 方案的变化时将屋脊设置在进气侧以及抬高了进气门，同时对气道进行了局部修改
挤气面 (B 因素)	 (B1)	 (B2)	——	B2 方案在 B1 方案基础上增大了排气侧挤气面积

喷油油束布置 (C 因素)	 (C1)	 (C2)	 (C3)	 1、三种方案的图示为各油束在 Z=50mm 截面上的几何投影坐标； 2、C1、C2 为 6 孔，C3 为 5 孔
活塞冠面形状 (D 因素)	 (D1)	 (D2)	 (D3)	D3 方案在 D2 方案基础上减小凹坑
喷油时刻 (5500rpm) (E 因素)	390° (E1)	405° (E2)	420° (E3)	—

在这款发动机开发初期，对于各影响因素，燃烧系统结构上均是以第一种方案进行设计及分析的。后面方案一部分是通过分析结果进行改进设计的，如进气道形状及挤气面；一部分是通过通过供应商的建议进行设计的，如油束布置及活塞冠面。下面依次讲述各因素对混合气形成的影响。

3.1 进气道及燃烧室屋脊的影响

进气道及燃烧室需要最先确定形状，在对其进行对比分析时，其它因素均采用方案 1。以下从滚流及湍动能水平、点火前混合气浓度分布等方面考察其影响。

图 3 是 1800rpm 工况两种方案滚流比及湍动能变化趋势的对比情况，从中可以看出，采用 A2 方案进气道及燃烧室屋脊时，缸内滚流水平及由其破碎形成的湍流均明显增强，从而可以加强油气混合，而且点火前湍动能的增强还有利于火焰传播速度的增加，改善燃烧的稳定性及经济性。5500rpm 工况与此类似，不再赘述。

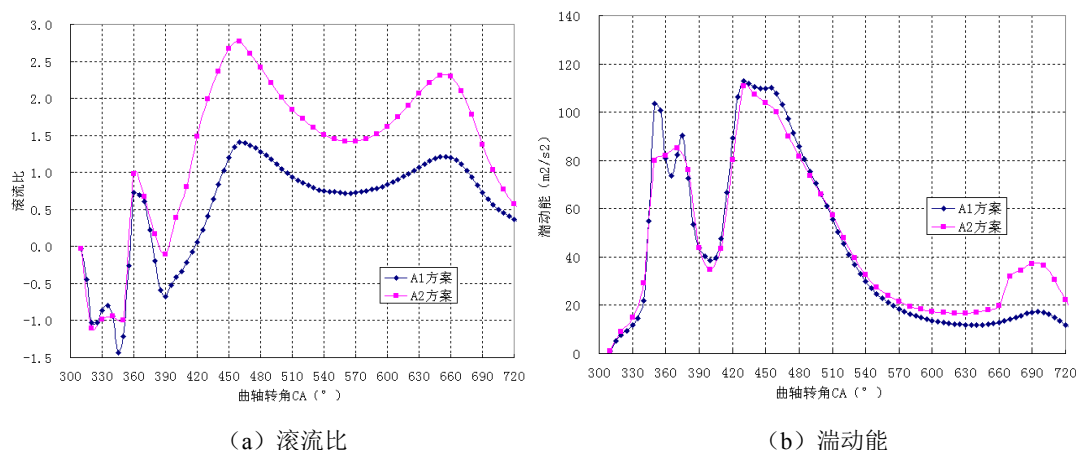


图3 进气道及燃烧室屋脊形状对 1800rpm 工况下滚流比及湍动能的影响

图4是 1800rpm 工况下 710°CA 时刻（接近点火）缸内混合气浓度分布云图（气缸中心截面）及此刻不同浓度混合气所占的体积分布图。一方面，从云图中可以明显看出，采用 A2 方案时，混合气分布更为均匀，整个气缸区域的 λ 基本都介于 0.9~1.1 之间，而采用 A1 方案时，混合气很不均匀，而且喷油器附近较浓可能会引起“爆燃”；另一方面，体积分布图中峰值越高，说明混合气越集中（一般要求大于 6%），显然 A2 方案较好。

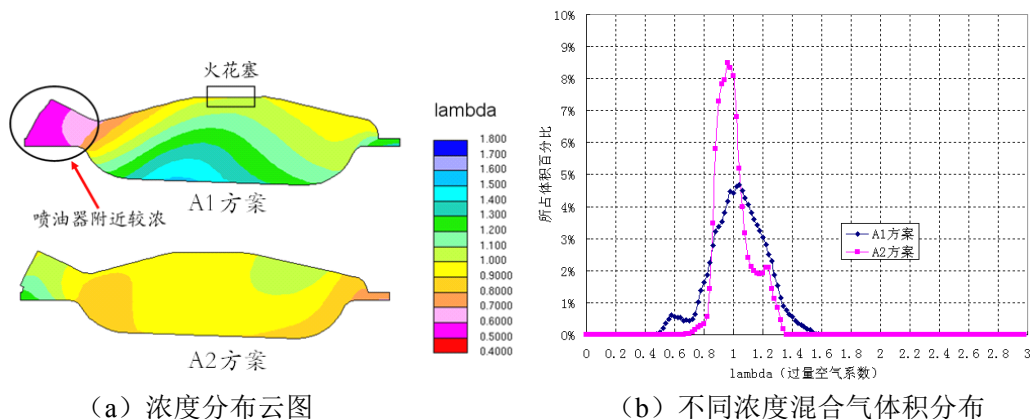


图4 进气道及燃烧室形状对 1800rpm 工况 710°CA 时刻缸内混合气分布的影响

对于 5500rpm 高转速工况，由于喷油量较大，每循环内相对于曲轴转角的喷射时间较长，喷射起始角必须提前，此时燃油湿壁现象不可避免。由于湿壁的燃油较多，所以总体上缸内混合气是偏稀的，这从图5中可以明显看出（体积分布曲线基本都在 $\lambda=1$ 的右边）。另外，因为在 5500rpm 这样的高转速下，气流运动本身已经很强烈了，所以虽然 A1 方案滚流较弱，但油气混合效果明显比 1800rpm 工况时要好。但在采用 A2 方案时，可以看到，混合气浓度由火花塞向周围递减，这有利于火焰传播。

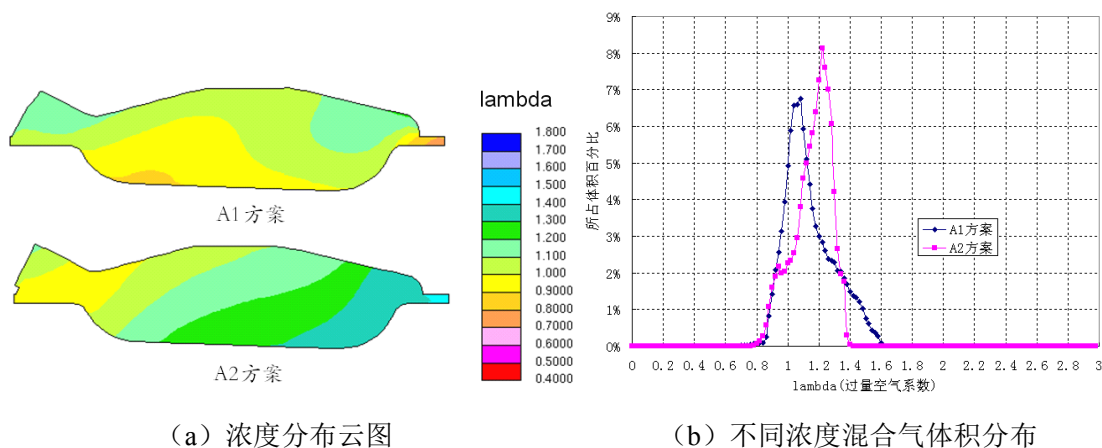


图 5 进气道及燃烧室形状对 5500rpm 工况 710°C 时刻缸内混合气分布的影响

综合来看, 采用 A2 方案进气道及燃烧室屋脊时, 更有利于组织缸内滚流, 从而增强油气混合, 改善点火前混合气分布的均匀性。

3.2 挤气面的影响

以上分析已经说明 A2 进气道及燃烧方案更好, 所以下面在分析其它因素的影响时, 均采用此方案。另外通过前面的分析发现 D1 方案的活塞冠面形状导致燃油湿壁较多, 后将其改成 D2 方案。所以在分析挤气面影响时, 其它因素采用 A2/C1/D2/E1 组合。

挤气面的设计主要是为了在压缩过程中能够挤压气流, 加速滚流破碎成湍流。如表 3 所示, B2 方案较 B1 方案增大了排气侧挤气面。

图 6 是挤气面对 1800rpm 工况滚流比及湍动能变化的影响对比, 从中可以看出, 采用 B2 方案(增大挤气面)后, 缸内滚流水平有所提高, 压缩冲程后期因滚流破碎产生的湍动能也随之稍有增强。5500rpm 工况与此类似, 这里不再赘述。

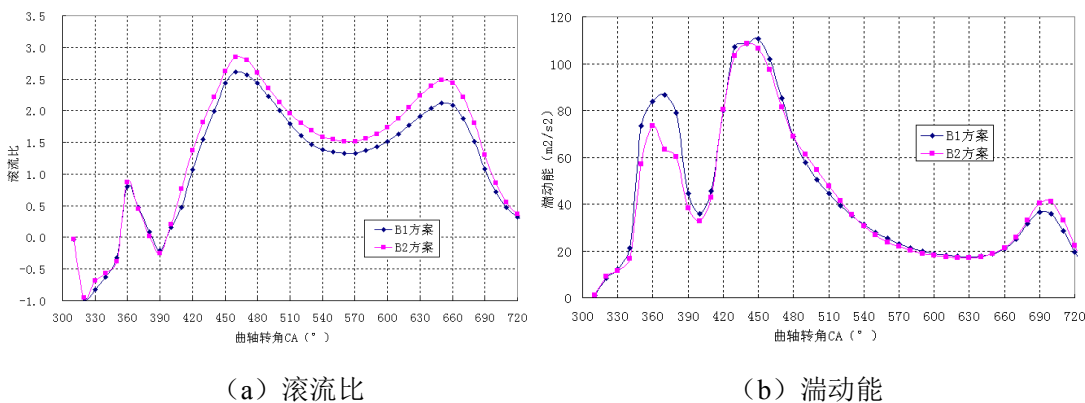


图 6 挤气面对 1800rpm 工况滚流比及湍动能变化的影响

进气及压缩冲程中滚流运动的加强可以改善燃油与空气的混合效果,使混合气更为均质。图 7 是 1800rpm 工况下 710°CA 时刻(接近点火)缸内混合气浓度分布云图(气缸中心截面)及此刻不同浓度混合气所占的体积分布图。一方面,从云图中可以看出,采用 B2 方案时,混合气分布更为均匀,整个气缸区域的 λ 都介于 0.9~1 之间,略为偏浓;另一方面,体积分布图中峰值越高,说明分布越集中(一般要求大于 6%即可),显然 B2 方案较好。

另外,对比图 4 和图 7,活塞冠面形状改成 D2 方案后,在其它因素不变的情况下(此时进气道及燃烧室屋脊均采用 A2 方案),混合气分布确实有了改善,说明了 D1 方案的活塞凹坑较深,对油气混合不利。

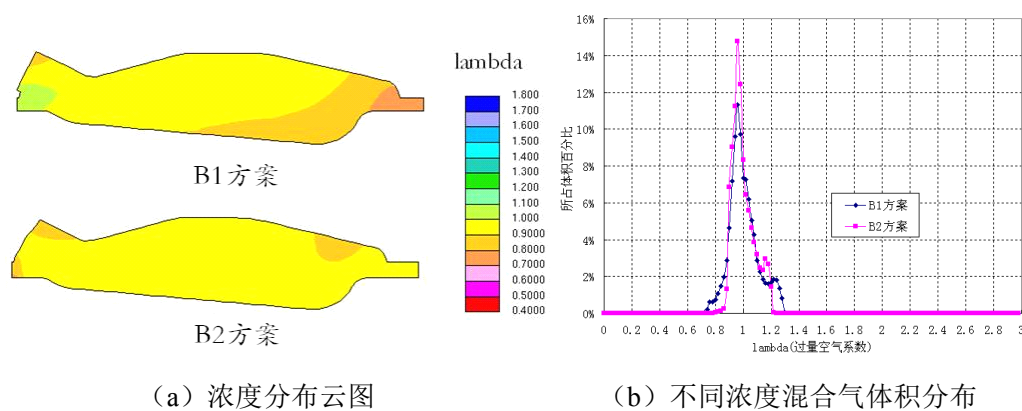


图 7 挤气面对 1800rpm 工况 710°CA 时刻缸内混合气分布的影响

与 1800rpm 工况类似,挤气面的增大对改善点火前混合气分布的均质程度有较好的促进作用,如图 8 所示。两种方案中,总体上混合气偏稀(λ 位于 1~1.2 之间),喷油器附近稍浓,但 B2 方案分布更为集中,对应图 8 (b) 中峰值更高。

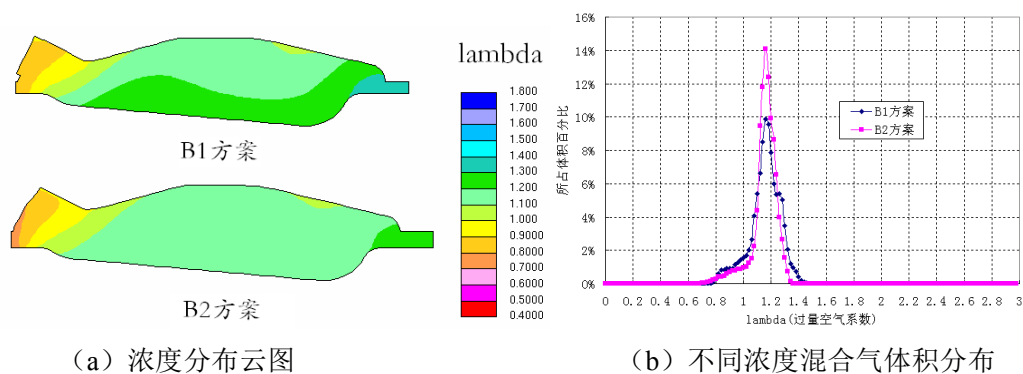


图 8 挤气面对 5500rpm 工况 710°CA 时刻缸内混合气分布的影响

综上所述,增大排气侧挤气面可以加强缸内的滚流运动,从而改善燃油与空气的混合。

3.3 喷油油束布置的影响

以上分析结果说明 A2 方案的进气道及燃烧室和 B2 方案的挤气面效果更好, 所以分别将这两个方案确定下来。在分析挤气面的影响时, 其它因素采用 A2/B2/D2/E1 组合。

对于 GDI 汽油机, 其多孔喷油器油束布置 (每一束燃油喷到气缸中的位置) 对最终的混合气形成效果有很大的影响。本文所分析的三款喷油器油束布置的区别如表 1 所示。

图 9 是 1800rpm 工况下 710°CA 时刻 (接近点火) 缸内混合气浓度分布云图 (气缸中心截面) 及此刻不同浓度混合气所占的体积分布的对比情况。与图 4 的分析类似, 可以看出, 在 1800rpm 工况下, 混合气形成效果依次为: C1>C2>C3。

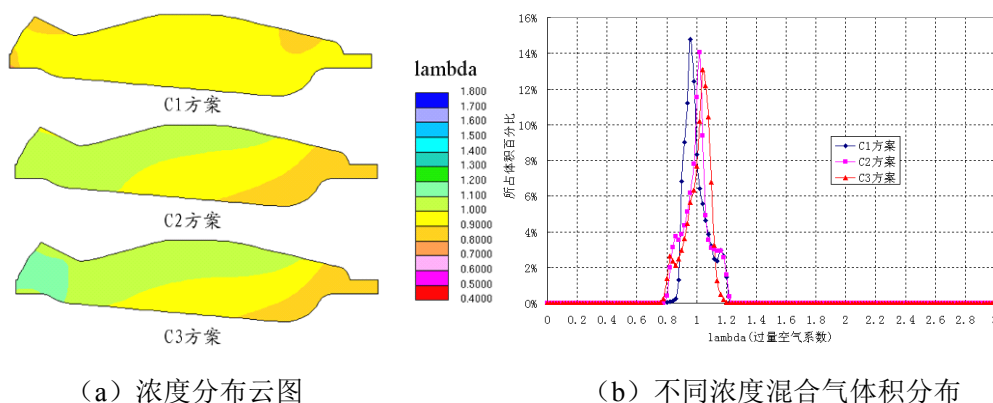


图 9 油束布置对 1800rpm 工况 710°CA 时刻缸内混合气分布的影响

图 10 及图 11 是 5500rpm 工况燃油气化及湿壁情况的对比图。由于喷射时间早, 且此时气流运动很强, 会将大量的油滴甩向气缸壁面, 所以湿壁较多, 最终的气化的燃油都只有 75%左右, 这在直喷汽油机中是不可避免的。从图中可以看出, C2 方案中, 燃油气化最多, 湿壁最少。

图 12 是 5500rpm 工况下 710°CA 时刻 (接近点火) 缸内混合气浓度分布云图 (气缸中心截面) 及此刻不同浓度混合气所占的体积分布的对比情况。图 12 (a) 中浓度分布云图差别并不大; 但从图 12 (b) 中可以看到 C2 方案较好, 因其气化的燃油较多, 此曲线略微偏左, 且峰值更高。

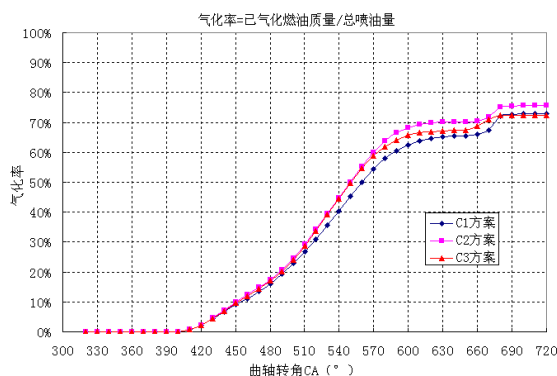


图 10 5500rpm 工况气化率比较

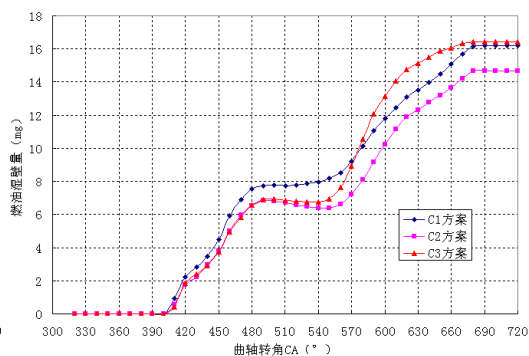
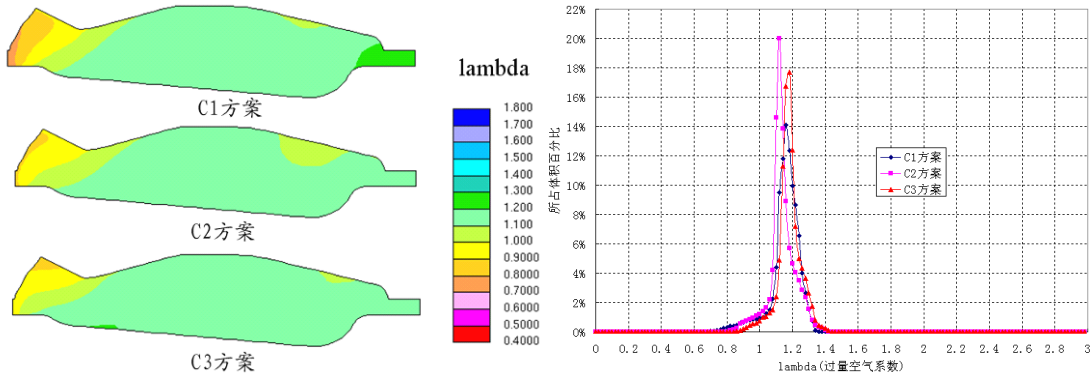


图 11 5500rpm 工况燃油湿壁量比较



(a) 浓度分布云图

(b) 不同浓度混合气体积分布

图 12 油束布置对 5500rpm 工况 710°CA 时刻缸内混合气分布的影响

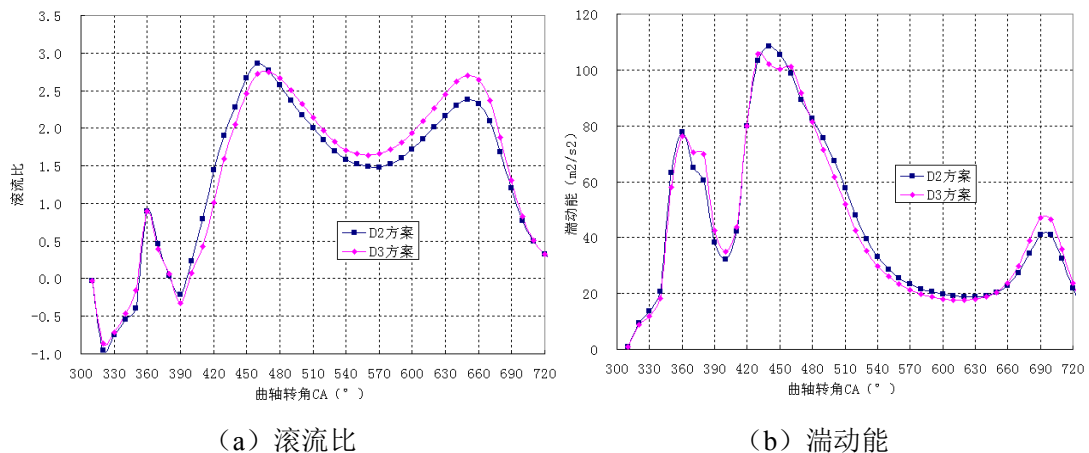
综合考虑 1800rpm 及 5500rpm 两种工况, 笔者认为 C2 方案的油束布置可以获得更好的油气混合效果。至此, 油束布置确定为 C2 方案。

3.4 活塞冠面形状的影响

活塞冠面与气道、燃烧共同组成燃烧系统, 其对混合气形成 (尤其是对压缩冲程的燃油雾化) 有较大影响。如表 1 中所示, 因此本节只分对 D2 及 D3 两种方案进行对比。

以上分析已经确定了 A2/B2/C2 方案, 所以在分析活塞冠面的影响时, 其它因素采用 A2/B2/C2/E1 组合。

图 13 是 1800rpm 工况两种方案滚流比及湍动能变化趋势的对比情况, 可以看出, D3 方案的活塞所产生的滚流及其破碎形成的湍流更强。5500rpm 工况与此类似, 这里不再赘述。



(a) 滚流比

(b) 湍动能

图 13 活塞冠面形状对 1800rpm 工况下滚流及湍动能的影响

与分析挤气面的影响相类似, 滚流及湍流水平的提高可以明显改善燃油与空气的混合。图 14 是

1800rpm 工况下 710°CA 时刻（接近点火）缸内混合气浓度分布云图（气缸中心截面）及此刻不同浓度混合气所占的体积分布图。可以看到，D3 方案中混合气分布更为合理（火花塞周围浓度稍高，并向周边递减）。

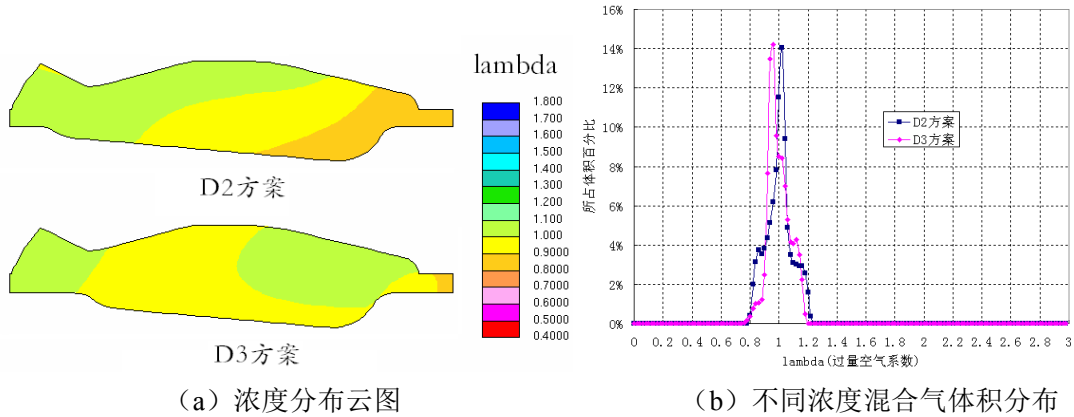


图 14 活塞冠面形状对 1800rpm 工况 710°CA 时刻缸内混合气分布的影响

图 15 是 5500rpm 工况下燃油气化及湿壁的对比情况，采用 D3 方案活塞时，因其凹坑减小，燃油聚集得到改善，所以气化的燃油较多，燃油湿壁同时减少。因燃油气化量的增加，710°CA（点火前）时刻，缸内混合气变浓，这在图 16（a）中 λ 分布云图中可以看出，图 16（b）中的曲线整体向左移动较多，同样说明了这一结论。虽然其峰值有所下降，但仍然大于 6%的目标值。

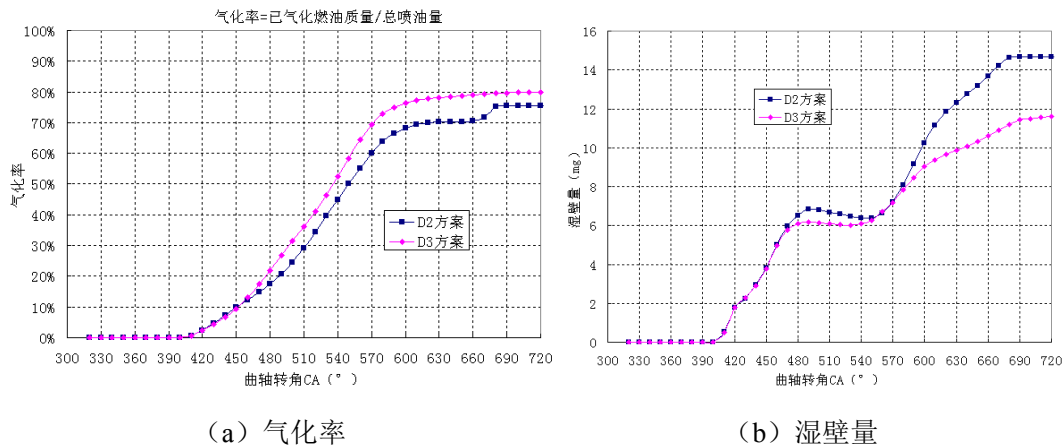


图 15 活塞冠面形状对 5500rpm 工况下燃油气化及湿壁的影响

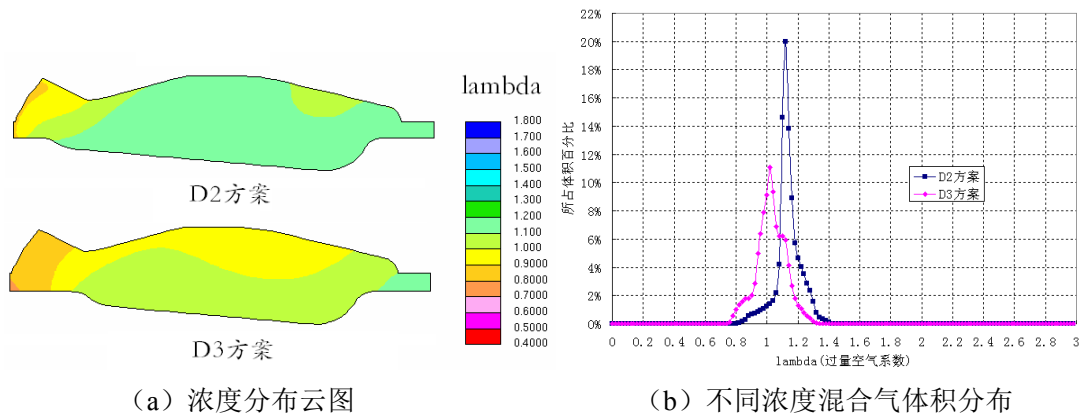


图 16 活塞冠面形状对 5500rpm 工况 710°CA 时刻缸内混合气分布的影响

从本节分析中，我们可以看到，减小活塞凹坑对改善混合气的均质程度有较明显的作用（尤其是对高转速工况）。但如何设计活塞冠面可以获得更好的效果，我们还需要进一步研究。活塞形状确定为 D3 方案。

3.5 喷油正时的影响

如上所述，高转速下由于喷油量大，相对于曲轴转角的喷射时间长，此时需要考虑喷油起始角对混合气形成的影响^[5]。表 1 中列出了三种喷油起始角方案：390°、405°、420°。

在燃烧系统结构上，我们已经确定了 A2 方案的进气道及燃烧室屋脊、B2 方案的挤气面、C2 方案的油束、D3 方案的活塞冠面。下面以此来分析喷油起始角对高转速下混合气形成的影响。

图 17 及图 18 是气化率及燃油湿壁量的变化曲线，可以看到，当喷油起始角为 390°时，气化的燃油最多，湿壁最少。（图中 SOI 即代表喷油起始角）

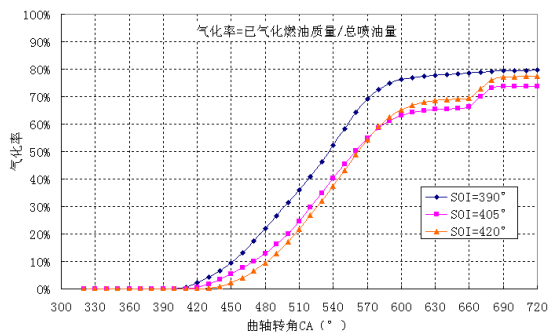


图 17 喷油起始角对 5500rpm 气化率的影响

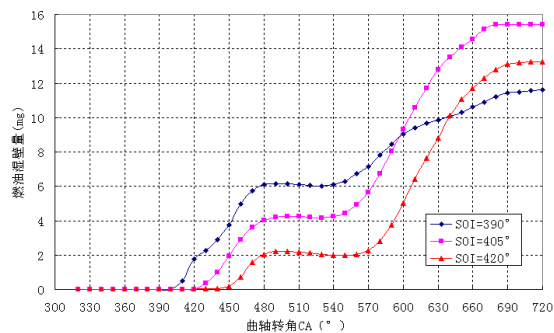


图 18 喷油起始角对 5500rpm 湿壁量的影响

图 19 是点火前（710°CA）缸内混合气浓度分布云图及体积分布图，可以看到，当喷油提前到 390°时，由于油气混合的时间较长，混合气的更为充分，从而更均匀。

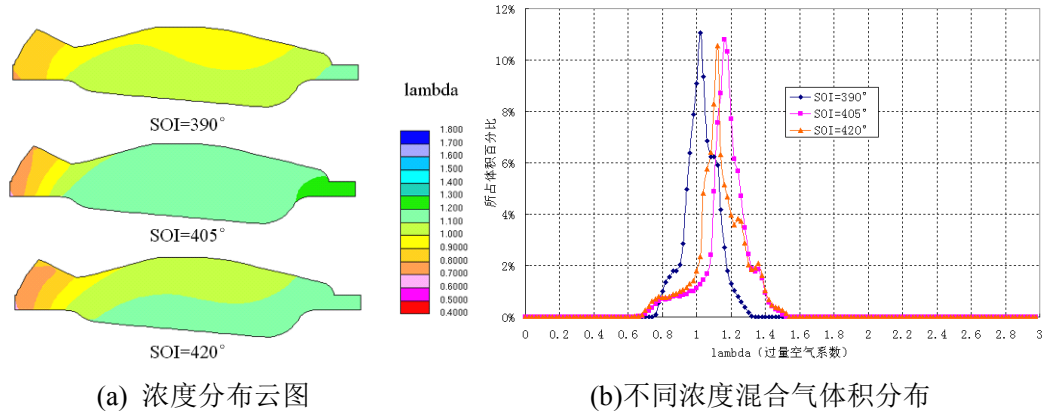


图 19 喷油起始角对 5500rpm 工况 710°CA 时刻缸内混合气分布的影响

4 试验结果

采用各因素的较优方案组合进行了样机试制，在性能试验中，调整点火角、进排气相位及空燃比到最佳状态，结果表明，外特性工况下动力性达到甚至超过预定目标，如图 20 所示。

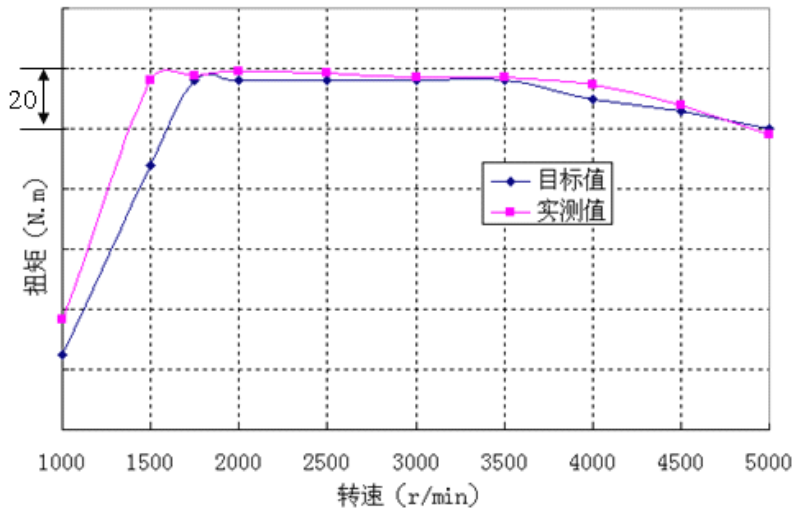


图 20 外特性工况扭矩性能

5 总结

本文利用 STAR-CD 软件，采用 CFD 模拟计算方法，分析了气道及燃烧室、挤气面、喷油油束布置、活塞冠面形状以及喷油正时等因素对混合气形成的影响。结论如下：

- (1) 改善进气道设计，抬高进气门位置，将燃烧室屋脊设置在进气侧均可加强缸内滚流运动水平，改善燃油与空气的混合效果；
- (2) 增大排气侧挤气面积可加强压缩冲程后期的湍流水平，从而改善油气混合；
- (3) 喷油油束的布置（燃油喷入气缸中的位置）对混合气形成有较大影响，至于如何才能

达到最佳效果，后续还要进一步研究；

(4) 减小活塞凹坑对改善混合气的均质程度有较明显的作用（尤其是对高转速工况），但如何设计活塞冠面可以获得更好的效果，我们还需要进一步研究；

(5) 高转速下，喷油起始角在 390°CA 时可以获得最佳的油气混合效果。

参考文献

- [1] 杨嘉林. 车用汽油发动机燃烧系统的开发[M]. 北京. 机械工业出版社, 2009.
- [2] Ning Ding, Wei-min Gao. Spray Characteristics of New Generation Multi-hole Injector for Spark-ignition Gasoline Engine with Direct Fuel Injection [C]. ICIE2010
- [3] 白云龙等. 缸内直喷汽油机喷雾、混合气形成和燃烧过程的三维数值模拟. 2009 年 APC 联合学术年会论文集. 200--207.
- [4] 叶伊苏, 王伟民等. 基于仿真的缸内直喷汽油机燃烧系统的开发与改进. 汽车工程. 2011, 10 (33). 838--844.
- [5] 丁宁, 陈明等. 均质直喷汽油机喷油起始角对高转速下缸内油气混合过程的影响. 2011 年 CDAJ 用户论文集.