

# 进气道对缸内直喷增压汽油机油气混合影响研究

## Research on Intake Port Effect on Mixture of Fuel and Air for Gasoline Direct Injected Turbocharged Engine

张小矛<sup>1</sup>, 陈明<sup>1</sup>, 平银生<sup>1</sup>, 张万平<sup>1</sup>, 邬文睿<sup>1</sup>, 丁宁<sup>2</sup>

( 1. 上海汽车集团股份有限公司乘用车公司技术中心, 上海 201804;

2. 同济大学 汽车学院, 上海 201804)

**摘要:** 本文基于高低滚流比进气道对缸内直喷增压汽油机进气和压缩两冲程油气混合的影响进行了分析, 结果表明, 高滚流比气道在缸内能形成更规则的大尺度漩涡, 而且在缸内的瞬态滚流比比低滚流比气道更高, 两种对称气道瞬态涡流比基本为零。进气道流量系数对增压发动机充气效率影响较小。高滚流比气道的缸内油气分布要比低滚流比气道更均匀, 湍动能 TKE 也高于低滚流比气道, 为了减小增压直喷汽油机爆震倾向, 应提高滚流比, 增加低速扭矩, 以提高动力瞬态响应性。

**关键词:** 缸内直喷汽油机、增压、滚流比、油气混合

**Abstract:** This paper analyzes high and low tumble intake port effect on mixture of fuel and air of gasoline direct injected turbocharged engine during intake stroke and compress stroke. The analysis shows high tumble intake port can generate more regular large dimension swirl than low tumble port. The transient tumble ratio of the high tumble port is higher than the low tumble port and the swirl ratio of both symmetry ports are closely zero. The effect of flow coefficient of the port on volumetric efficiency of the turbocharged engine is very small. The mixture of fuel and air of high tumble port is more uniform than low tumble port. The turbulent kinetic energy value of high tumble port is higher than low tumble port. Therefore, the tumble ratio should be increased in order to decrease the knock sensitivity of GDI turbocharged engine, which can increase torque at low speed and improve the transient power response of the engine.

**Keywords:** GDI engine, Turbocharged, Tumble ratio, Mixture of fuel and Air

## 1 前言

近年来, 随着全球能源危机和环保问题的日益严峻, 改善燃油经济性, 降低 CO<sub>2</sub> 排放和降低排放成为内燃机行业所面临的重大挑战。汽油缸内直喷能够更准确的控制燃油喷射和混合气形成, 因而能提高发动机燃油经济性和动力性, 减少冷启动排放且具有更良好的瞬态性能。另外, 利用增压可以提高进气密度, 从而增加进气量, 更大幅度的提高动力性。在欧洲和日本, 通过引进汽油缸内直喷、增压、减小排量等技术, 整车燃油经济性比传统非增压、气道喷射汽油机可提高 15%到 20%,

已经很接近柴油机, 排放水平已达到欧 5, 并且可实现欧 6。因此, 汽油机采用缸内直喷与涡轮增压相结合技术成为满足较低 CO<sub>2</sub> 排放法规的重要技术之一。目前, 越来越多的缸内直喷增压汽油机投入乘用车市场, 比如 Audi 1.8TSI 发动机, Fiat 1.8T GDI 发动机, BMW 1.6T Prince 发动机和大众 1.4TSI 发动机等, 而且, 随着更为严格的 CO<sub>2</sub> 排放法规的进一步制订, 各大公司有往小排量缸内直喷增压汽油机的开发趋势。

如上所述, GDI 汽油机优点众多, 但在开发过程中, 也存在一些需要注意解决的问题, 比如要避免汽油喷射“湿壁”现象造成的机油释稀, 分层充气燃烧后处理, 增压均匀混合爆震等问题。目前, 利用 CFD 分析成为辅助开发新 GDI 燃烧系统的前期开发重要手段之一。本文利用 Star-CD 软件对某款缸内直喷增压器汽油机进行油气混合 CFD 分析, 着重分析了不同滚流比进气道对缸内油气混合的影响。

## 2 喷雾模型校核

喷雾模型的选择对缸内油气混合过程的模拟分析非常重要。计算采用拉格朗日多相流耦合算法, 喷嘴模型采用 Effective, 雾化及破碎模型采用 Reit, 能量、动量及质量传递模型采用 Standard, 燃油物性可变并通过子程序实现, 撞壁模型采用 Bai+Switch30, 考虑液膜, 湍动能耗散和重力的影响。

定容喷雾校核喷油器喷嘴为 7 孔, 喷射压力为 15MPa, 背压 1bar, 燃油温度 20℃, 喷射出口流速 138m/s, 图 1 为不同时刻喷雾模拟结果与试验的对比结果, 两者贯穿距非常接近, 形状也较为吻合, 因此选用喷雾模型和喷嘴参数进行下步的油气混合分析。

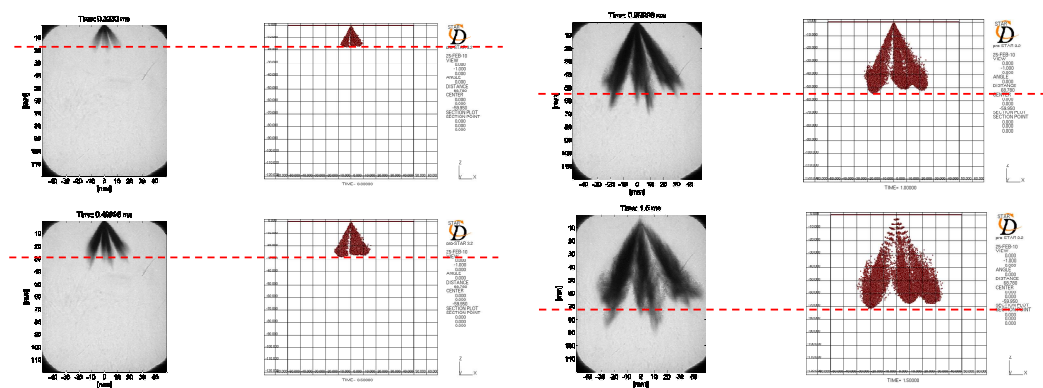


图 1 喷雾模型定容校核

## 3 计算模型及方案

### 3.1 计算模型

本文计算进气和压缩两个冲程, 计算发动机运行工况为 1500r/min 全负荷, 计算模型如图 2 所

示，进排气道出入口采用压力和温度边界，如图 3 所示，边界条件来自 GT-Power 一维模型，其他壁面设置相应的温度边界条件。

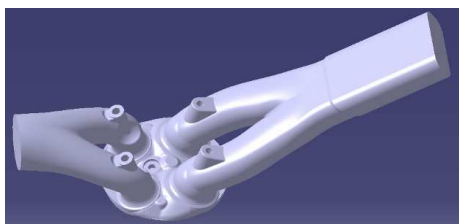


图 2 计算几何模型

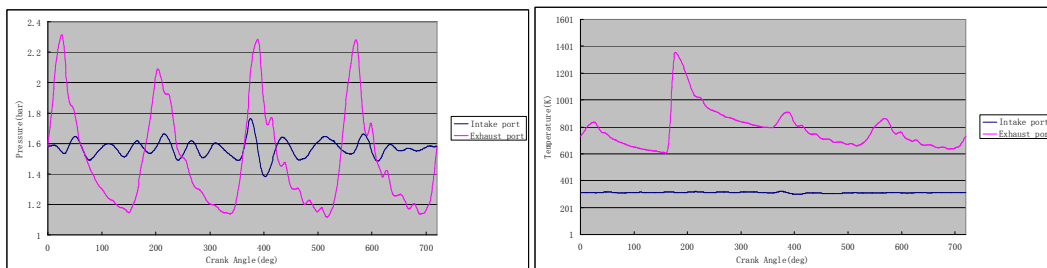


图 3 进排气道边界条件

### 3.2 计算方案

计算两种方案，低滚流比气道 LT Port 和高滚流比气道 HT Port，如图 4 所示，仅修改进气道形状，导致两种气道滚流比和流量系数不同，流量系数和滚流比通过稳态 CFD 分析得到。流量系数结果是在气门最大升程下且参考直径为缸径计算得到，滚流比也是最大气门升程下计算，且在 0.5 倍缸径截面处进行评价。如下表所示。其他参数设置均相同。

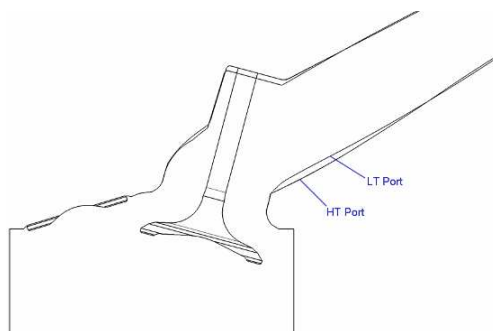


图 4 高低滚流比进气道对比

表 1 计算方案对比

计算方案	进气道	流量系数	滚流比	喷油始点(CA, 压缩上止点为 0CA)	每循环喷油量(mg)	喷油持续期(CA)
LT Port	低滚流比	0.1858	1.2781	420	70.35	31.1
HT Port	高滚流比	0.1563	1.5585	420	70.35	31.1

## 4 计算结果分析

### 4.1 进气流场分布

如图 5 所示, 在 470CA, 此时进气门处于最大升程, 高滚流比气道 HT Port 在缸内形成两个明显的漩涡, 而低滚流比气道 LT Port 则在多处形成漩涡, 但均不明显, 分布显得有点杂乱。在 590CA 进气门关闭时, HT Port 在缸内形成一明显漩涡, 而 LT Port 则不是那么明显, 这种趋势一直保留到活塞快接近上止点。

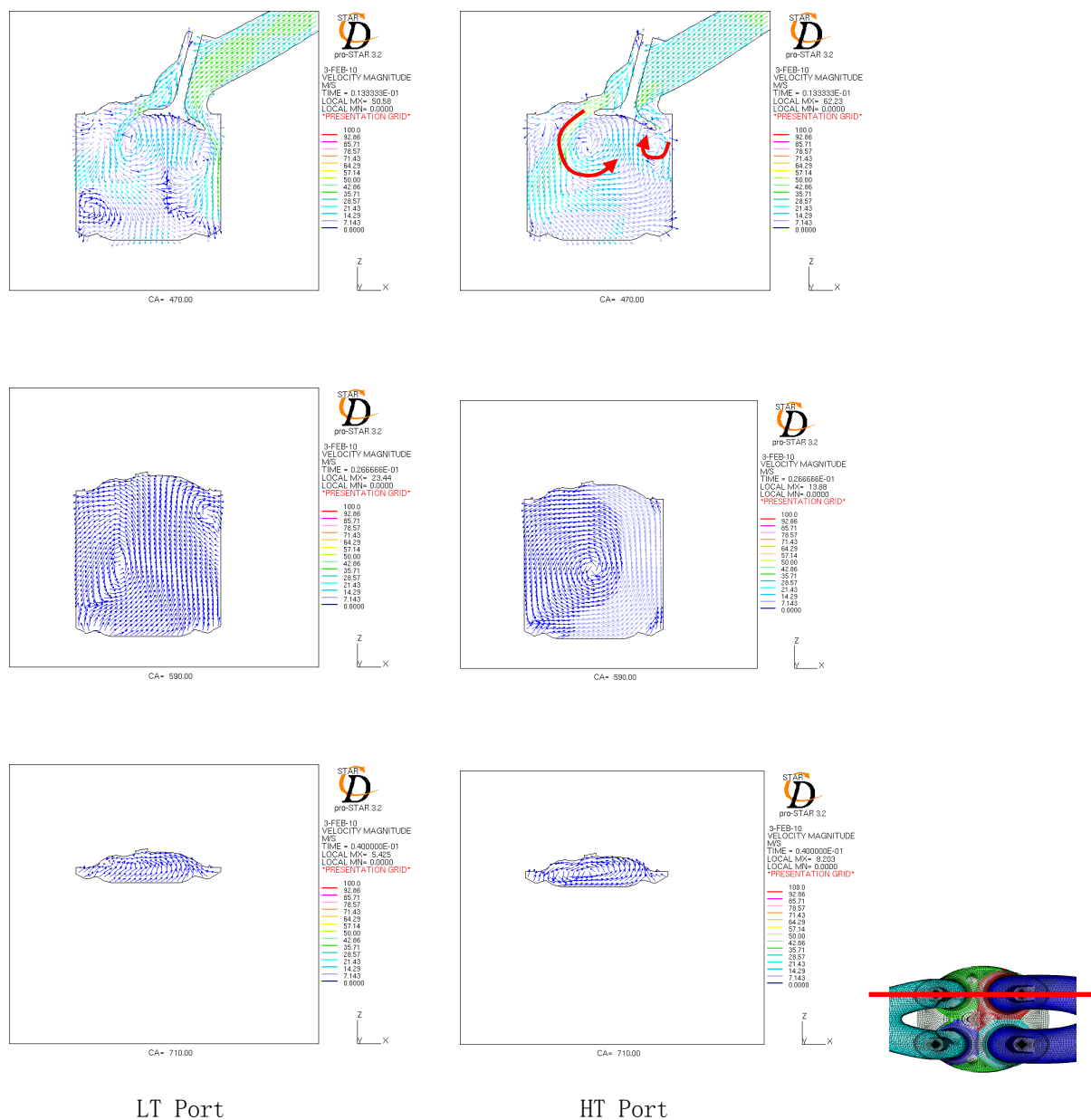


图 5 速度分布

由于增压, 进气道进口压力大于环境压力, 气流靠压气机压缩进入缸内, 虽然两气道的流量系数差 16%, 但进气量差别却不明显, 在 1500rpm 全负荷工况下均为 815mg 左右, 如图 6 所示, 此时  $\lambda$  为 0.7881 左右。因此, 对于增压 GDI 发动机, 进气道流量系数对充气效率影响较小。

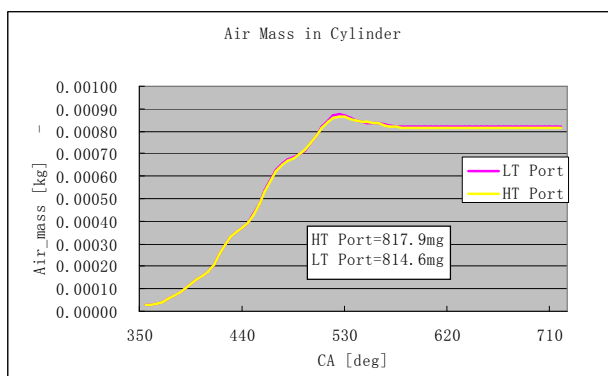


图 6 进气量比较

如图 7 所示, 由于高滚流比气道在缸内形成更为规则的大尺度的漩涡, 高滚流比气道在缸内的瞬态滚流比低滚流比气道更高, 在气门最大升程 470CA 时, LT Port 气道滚流比为 0.256, HT Port 气道滚流比为 1.455, 差别较大, 这也与稳态 CFD 分析结果趋势一致。对于涡流比, 由于两种气道均对称, 因此气流作用相互抵消, 缸内瞬态涡流比基本为零。

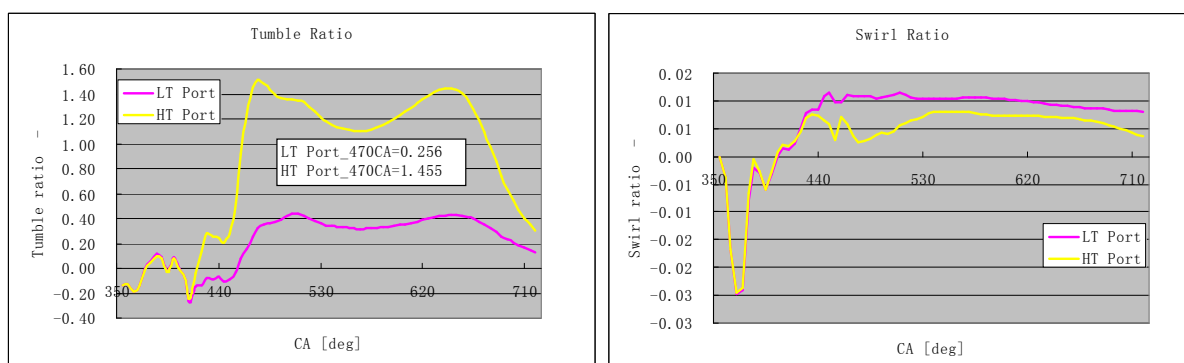


图 7 滚流比及涡流比比较

## 4.2 湍动能 TKE 分布

如图 8 所示, 在气门最大升程 470CA 时, 由于 HT Port 滚流比高, HT Port 湍动能强度空间分布比 LT Port 强烈且范围广, 这有利于油气混合。在 700CA 时, 此时接近点火时刻, 在火花塞周围的湍动能高滚流比气道明显高于低滚流比气道。如图 9 所示, 在 710CA 时, LT Port 的 TKE 为  $8.21 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , 而 HT Port 的 TKE 为  $16.8 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , 高于指导值  $15 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , 这有利于点火成功。因此, 高滚流比气道有利于提高火焰传播速度, 加快燃烧速率。特别是对于增压机而言, 为了减小爆震倾向, 在对充气效率影响较小的情况下, 更应提高滚流比, 在中低速部分负荷下, 提前点火, 增加扭矩, 提高低速瞬态响应。

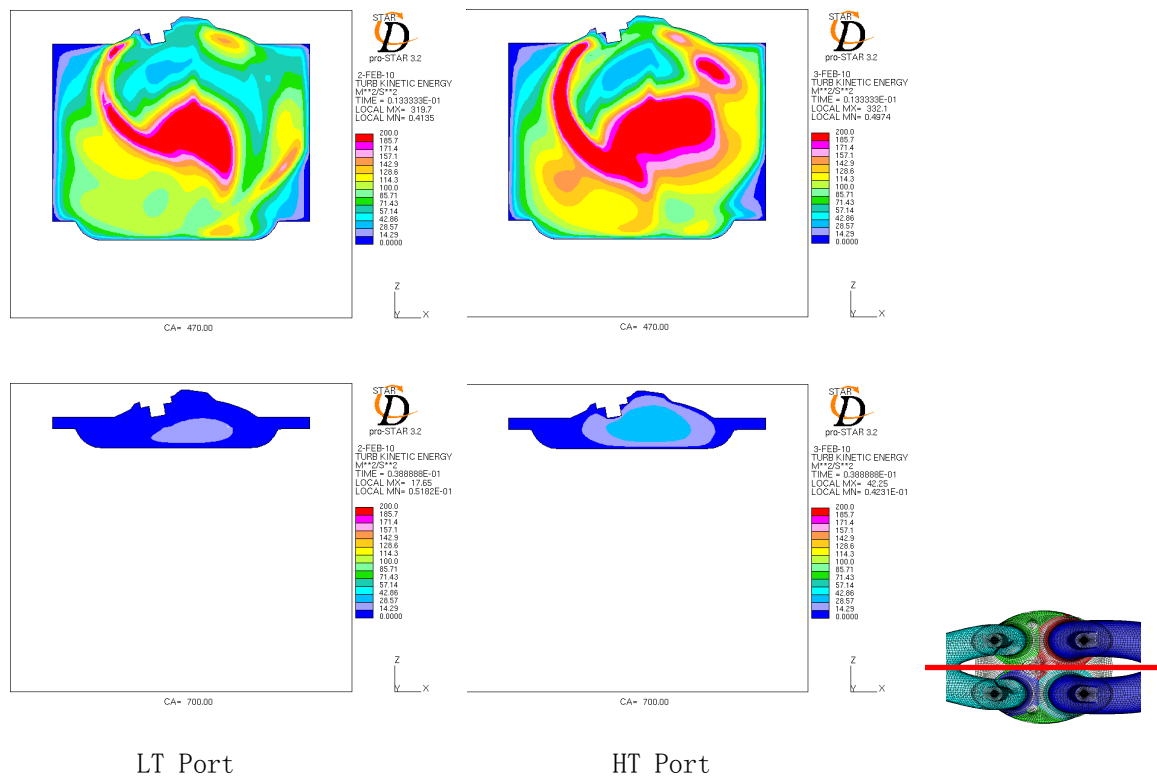


图 8 湍动能 TKE 分布

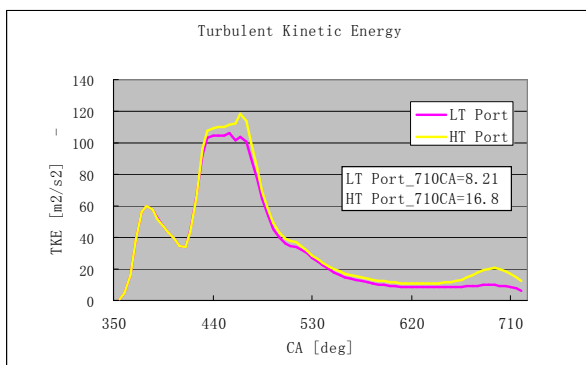


图 9 湍动能 TKE 对比

### 4.3 缸内油气混合均匀性

如图 10 所示两气道在 550CA 时的油气混合分布图，此时喷雾已经结束，从图中可以看出，油气在高滚比明显漩涡的气流下，被卷入空间的油雾分子要比低滚流比气道要多，也就是说，在进气和压缩冲程气流对喷雾和雾化是会产生影响的。这也直接影响到未蒸发油粒在活塞和气缸套上的分布量，从而影响到“湿壁”，这为解决 GDI 发动机机油稀释问题提供指导方向。

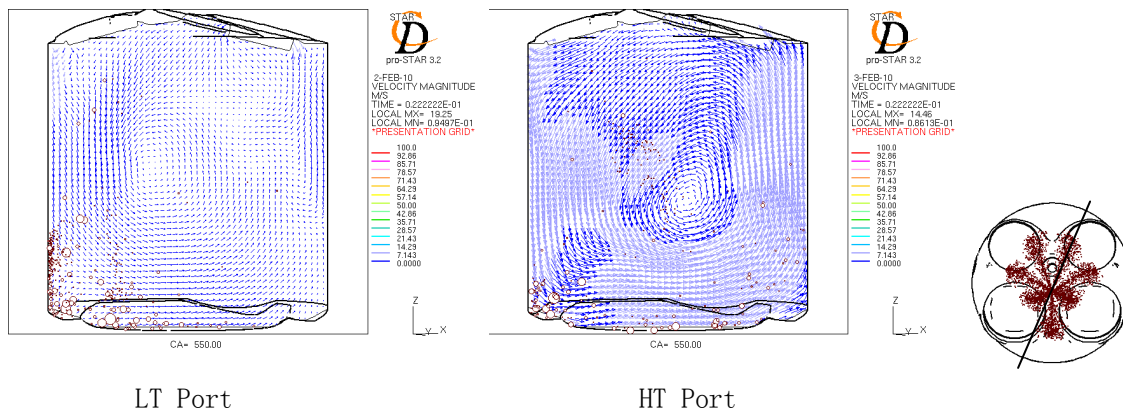


图 10 油气混合

如图 11 所示，在 710CA 点火时刻，高滚流比气道 Lamda 分布要比低滚流比气道均匀，从图 12 也可以看出，HT Port 气道 Lamda 比 LT Port 分布曲线瘦高，这表明，HT Port 在某一 Lamda 下的概率高于 LT Port，也就是说，高滚流比气道在缸内的油气分布总体上比低滚流比气道分布更均匀，这有利于增加燃烧速率，减少 HC 和 NOx 排放。另外，如图 13 所示，喷雾油滴平均直径 SMD 两种气道差别不大，均小于 15 μm，这有利于油气的均匀混合。

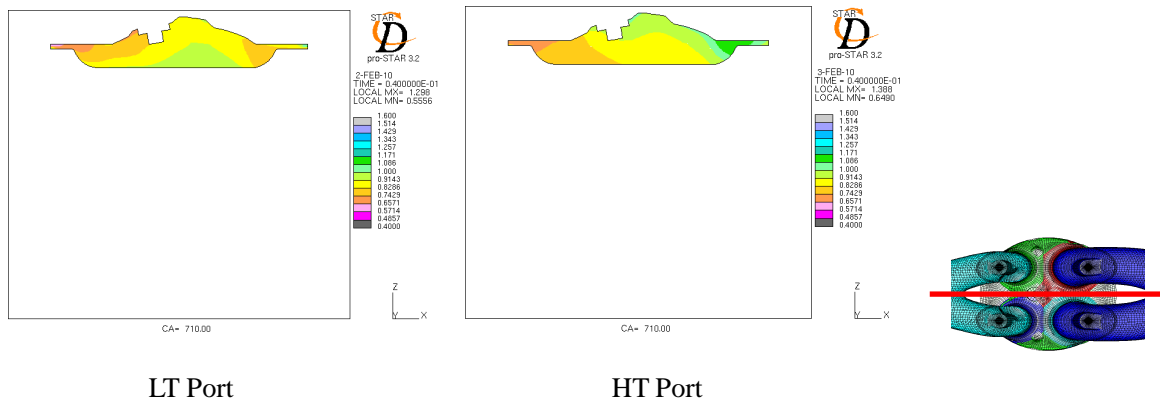


图 11 Lamda 分布图

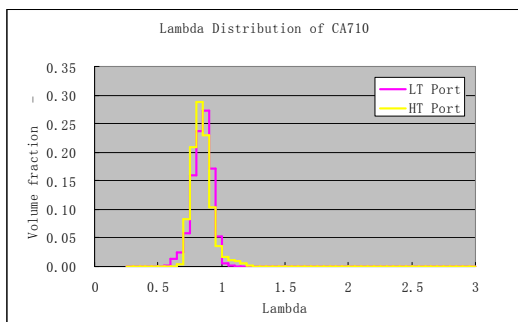


图 12 Lamda 在 710CA 时分布

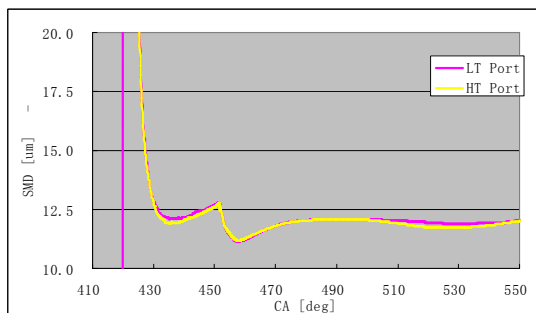


图 13 喷雾油滴平均直径 SMD 值

## 5 结论

(1) 本文对高低滚流比两种气道进行了进气冲程和压缩冲程的缸内流场分析, 结果表明, 高滚流比气道在缸内形成更规则的大尺度漩涡, 高滚流比气道在缸内的瞬态滚流比低滚流比气道更高, 这与稳态 CFD 分析结果趋势一致。对于涡流比, 由于两种气道均对称, 因此气流作用相互抵消, 缸内瞬态涡流比基本为零。

(2) 对于增压 GDI 发动机, 由于进气道进口压力大于环境压力, 气流靠压气机压缩进入缸内, 虽然两气道的流量系数差别较大, 但进气量差别不大, 进气道流量系数对增压发动机充气效率影响较小。

(3) 高滚流比气道缸内湍动能 TKE 高于低滚流比气道, 因此, 高滚流比气道有利于提高火焰传播速度, 加快燃烧速率。对于增压机中低速部分负荷, 为了减小爆震倾向, 应提高滚流比, 提前点火, 增加扭矩, 提高低速瞬态响应性。

(4) 高滚流比气道 Lamda 分布要比低滚流比气道均匀, 这有利于增加燃烧速率, 减少 HC 和 NO<sub>x</sub> 排放。两者喷雾油滴平均直径 SMD 差别不大, 均小于 15 μm。这有利于油气的均匀混合。

(5) 进气和压缩冲程气流对喷雾和雾化是会产生影响, 从而影响到“湿壁”, 通过 CFD 分析能为解决缸内直喷汽油机的机油稀释问题指明方向。

## 6 参考文献

- [1] Henning Kleeberg and Dean Tomazic, Oliver Lang and Knut Habermann. Future Potential and Development Methods for High Output Turbocharged Direct Injected Gasoline Engines. SAE Paper. 2006-01-0046.
- [2] Luca Olmo and John Thornton. CFD Analysis of Mixture Formation and Combustion Process for High Performance DI Gasoline Engine. SAE Paper. 2005-01-0214
- [3] 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.
- [4] 周龙保, 刘巽俊, 高宗英. 内燃机学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [5] Bertrand Lecointe and Gaetan Monnier. Downsizing a Gasoline Engine Using Turbocharging with Direct Injection [C]. SAE Paper. 2003-01-0542.