

基于 CONVERGE 的某发动机 EGR 进气过程缸内流动 CFD 分析

CFD analysis of in-cylinder flow with external EGR by CONVERGE

张孚^{1,2} 赵铮^{1,2} 杨敏敏^{1,2} 杨海龙^{1,2} 宋建强^{1,2}

(长城汽车股份有限公司, 河北省汽车工程技术研究中心, 保定 071000)

摘要: 依托某发动机开发过程, 运用 CONVERGE 软件分别对两种不同的 EGR 进气结构(由进气歧管支管进 EGR 和由进气歧管总管进 EGR)进行了分析。过程中发现第二种结构的 EGR 气体和空气在进气歧管内经过了若干循环后才进入缸内, 为保证仿真结果的真实性, 首先对其进气歧管进行单独的分析, 然后将进气歧管计算结果中的 EGR 分布映射为缸内流动计算的初始条件。结果发现: 第二种结构由于 EGR 与空气在进气歧管内经过了一段时间的混合, 进入缸内后在滚流的作用下混合更加均匀; 同时, 第一种结构在 EGR 进气过程中对气道内气流产生干扰, 进而影响了缸内滚流和湍动能。

关键词: CONVERGE、EGR、均匀性

Abstract: In an engine development process, Using CONVERGE software analyzed the two different structure of EGR (one is EGR connected with the branch pipe of intake manifold, the other one was connected with the main pipe of intake manifold). In the process, it was found that the EGR gas and air of the second structure entered the cylinder after several cycles in the intake manifold. In order to ensure the authenticity of the simulation results, the intake manifold was firstly analyzed separately, and the EGR distribution in the intake manifold calculation results was mapped to the initial conditions of the flow calculation in the cylinder. The results showed that the EGR and air mixed in the intake manifold for a period of time, and mixed more evenly in the cylinder under the action of the tumbling flow. At the same time, the first structure interfered the flow of the port during the EGR intake process, which further influenced on the in-cylinder tumble flow and turbulent kinetic energy.

• **Keyword:** CONVERGE, EGR, Uniformity

1. 前言

采用排气再循环(EGR)可以使工作混合气的总热容大大增加, 最高燃烧温度下降, 能有效的降低发动机的NOx排放, 同时还能有效的抑制汽油机爆震的发生。然而EGR废气与缸内混合气的混合均匀性将直接影响到点燃式发动机的燃烧速度, 进而影响整机热效率的提升。

随着计算机技术和计算流体力学的快速发展, 已完全具备利用CFD软件采用数值模拟的方法来研究缸内EGR气体分布情况的能力。本文利用CONVERGE软件分别对两种不同形式的EGR进气过程进行缸内流动CFD分析, 以评价缸内EGR气体混合均匀程度, 为EGR管路设计提供参考。

2. 方案及边界说明

2.1 方案说明

本文分别对两种EGR进气形式进行了分析, 旨在对两种结构下缸内EGR气体混合均匀性进行评价, 两方案结构分别如图1、图2所示。

其中, case1方案为EGR气体由进气歧管支管进入。为缩短计算时间, 同时尽可能保证计算与实际流场相一致, 在模型处理时将进气歧管稳压腔部分省略, 直接设置进气歧管支管入口为新鲜空气入口。

case2方案为EGR气体由进气歧管总管进入, 模型处理时保留全部进气歧管。

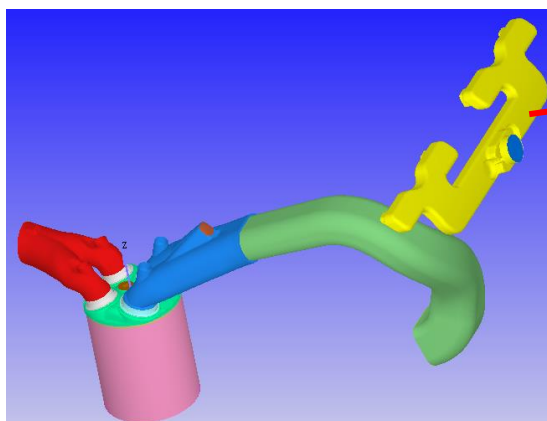


图1 case 1方案

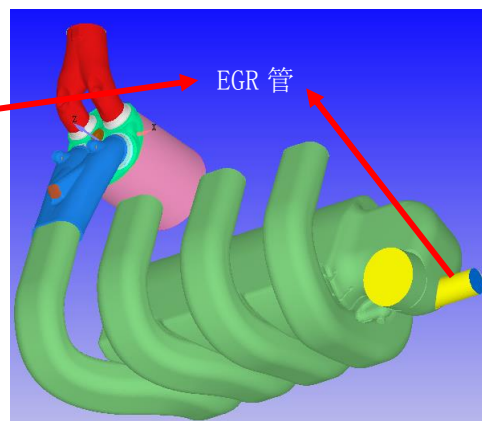


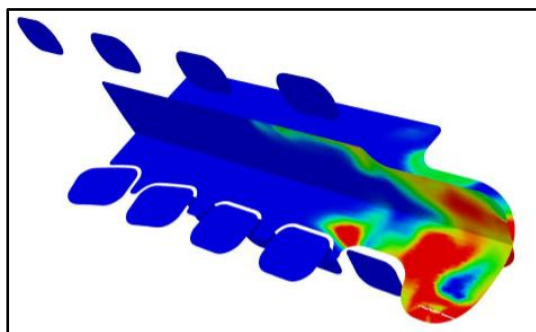
图2 case 2方案

2.2 边界条件说明

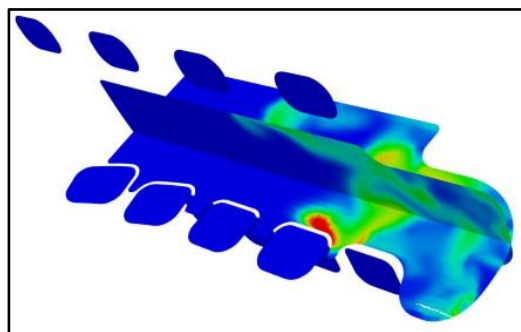
本文计算过程中，入口全部采用瞬态质量流量和温度边界，出口则采用瞬态压力和温度边界。计算的壁面温度和边界条件全部由一维模型校核得到。

气体组分上，设置进气歧管入口为 N_2 和 O_2 的混合气；EGR管入口气体则设置为一定当量比和EGR率混合气充分燃烧后的产物。计算过程中对EGR管中及由EGR入口进入的气体标记为EGR，以监控其在缸内的分布情况。

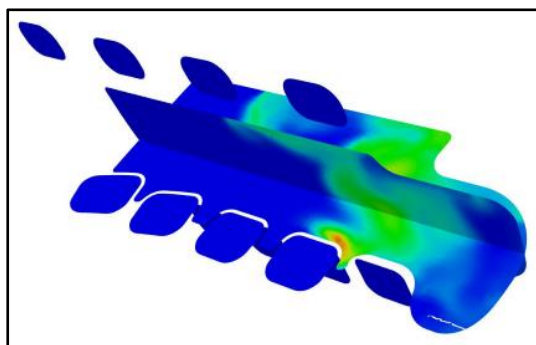
网格基础尺寸设置为4mm，缸套区域加密到1mm，所有网格根据计算中速度梯度限值自适应加密到0.5mm。设定 720° CA为压缩上止点。



(a) 进气门最大升程时刻



(b) 进气门关闭时刻



(c) 上止点时刻

图3 不同时刻下进气歧管内EGR气体分布图

在计算过程中发现对case1方案如果只计算一个循环，进入缸内的EGR气体量达不到设定的EGR率，存在一部分EGR气体残留在气道内，故本次对case1方案进行了两个循环的计算，以保证仿真结果和实际情况尽可能相一致。

而对case2的计算过程中发现直接进行缸内流动计算的情况下气缸内未能监测到EGR气

体。针对此问题特对进气歧管内EGR分布情况以及过程中缸内和进气歧管内气体质量的变化进行分析。

图3为进气歧管内EGR质量分数分布图。图中可以看出，从进气门最大升程到进气门关再到上止点时刻，标记的EGR气体只在进气歧管稳压腔内有分布，而在各进气歧管支管内并无EGR分布，说明标记的EGR气体并未在本循环直接进入缸内，而是在稳压腔内与空气进行混合。

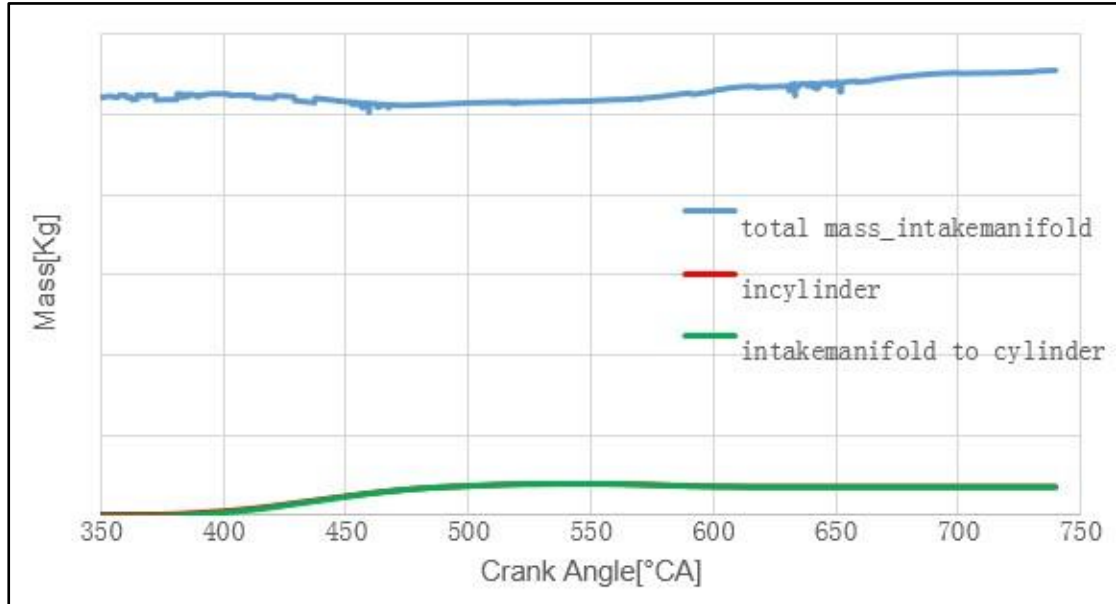


图4 进气过程中进气歧管和缸内质量变化

如图4所示，其中蓝线表示进气歧管内的气体质量随曲轴转角的变化曲线，红线表示整个过程中进入缸内的气体质量，而绿线则表示从进气歧管进入到缸内的标记的初始进气歧管内的气体质量。图中可以看出，初始时刻进气歧管内的气体质量和缸内单循环进气量完全不在一个数量级上，大约15倍的关系，可见进入缸内的气体完全有可能全部是进气歧管内已经混合的EGR和空气混合气。

图中还显示，红色曲线和绿色曲线完全重合，即进入缸内的气体全部为标记的初始时刻进气歧管内的气体。充分说明了进入缸内的气体确实全部为进气歧管内已经混合的EGR和空气混合气。

针对此现象，若要监控缸内EGR分布情况，必须在初始条件中设置有进气歧管内EGR分布。故在计算前首先对进气歧管+EGR进行了单独的分析。

在对进气歧管计算时，设置进气歧管内初始组分全部为空气，以验证经过一段时间的混合后进气歧管内EGR与空气的混合均匀程度。同时为保证进气歧管内混合气达到稳定状态，本次计算长度设置为1s时间（超过20个循环）。

图5为进气歧管内气体组分质量变化曲线。图中可以看出，随着计算时长的增加进气歧管内的空气和EGR气体质量均逐渐趋于稳定，认为进气歧管内混合气已达稳定状态。

图6为进气歧管内EGR的分布情况。图中可以看出，进气歧管内大部分区域都呈现绿色状态，仅在个别区域存在较浓或较稀的EGR分布。图7为进气歧管支管内EGR质量分数体积占比分布。图中横坐标每一格代表1%的跨度，图中显示EGR质量分数在后边四个区间内的体积占比已超80%，可以说EGR混合是比较均匀的。

基于上述结果，在进行缸内流动计算时，将上述EGR分布状态直接映射为进气歧管的初始条件，以评价缸内EGR分布情况。

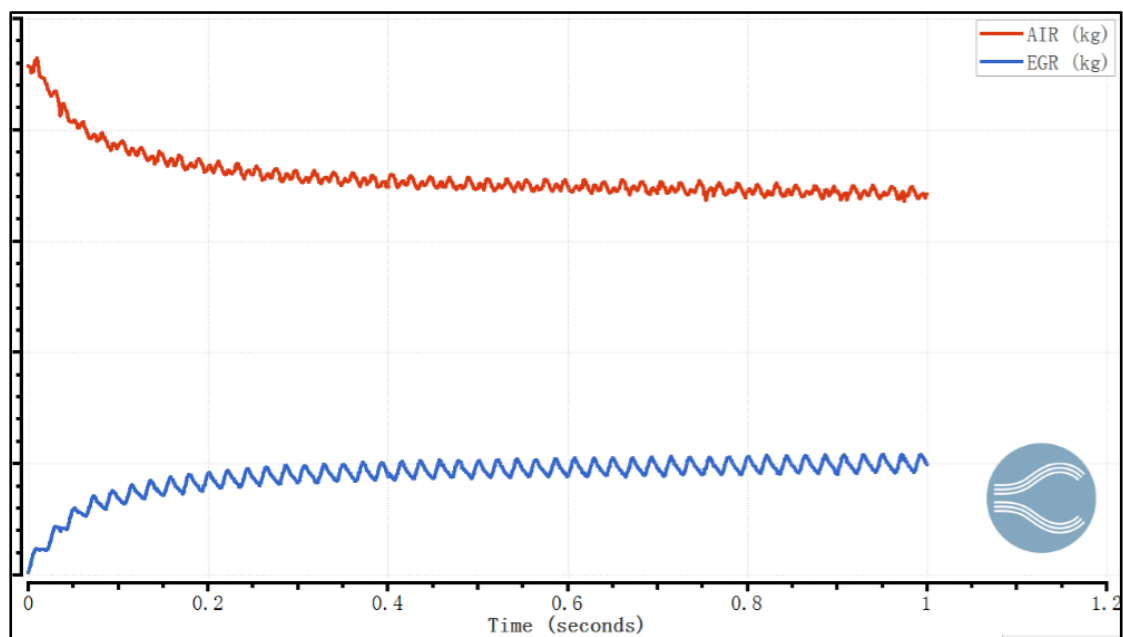


图5 进气歧管内气体组分质量变化曲线

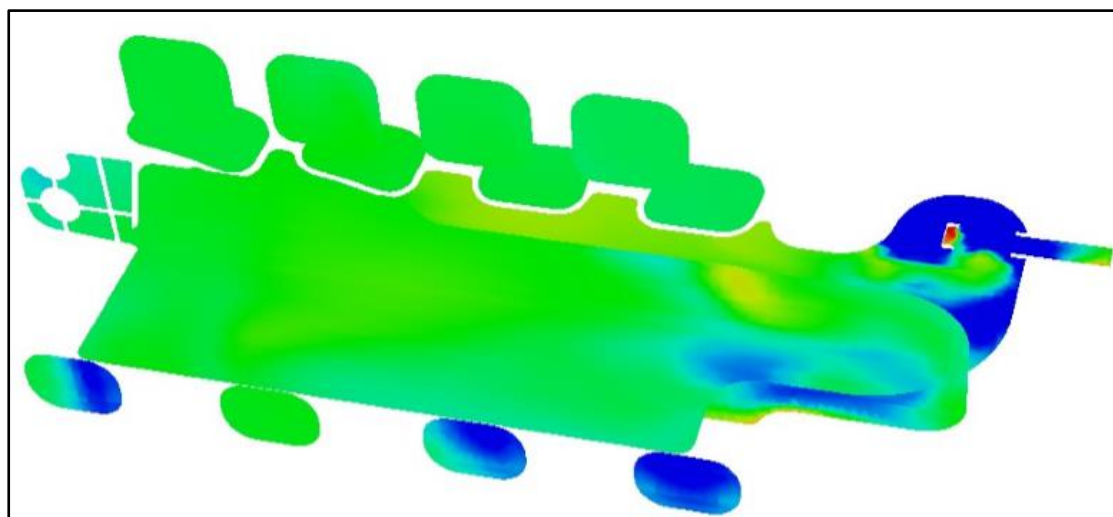


图6 进气歧管内EGR分布情况

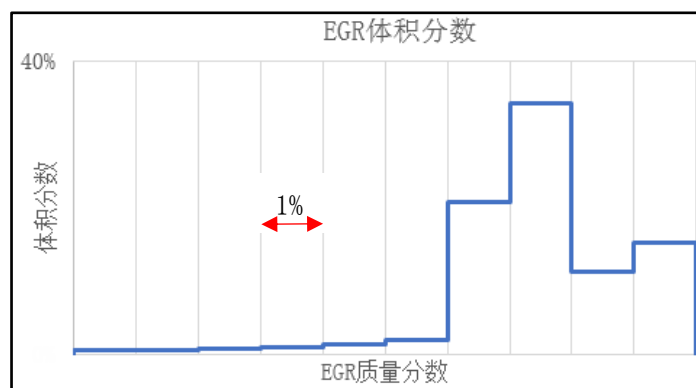


图7 进气歧管支管内EGR质量分数的体积占比

3. 结果分析

通过对两种方案缸内流动进行分析，重点关注两方案缸内流场以及缸内EGR气体分布均匀性之间的差异。

3.1 缸内流场结果对比

图8为两方案缸内平均滚流比和平均湍动能随曲轴转角的变化曲线。从缸内滚流比来看，两方案缸内滚流比整体趋势一致，但在进气过程中case2方案缸内滚流比明显高于case1方案。这可能是由于进气过程中，EGR进气过程对气道内气流产生了干扰。然而这种差异并不大，在进气过程中两方案缸内滚流比峰值差异在6%左右。

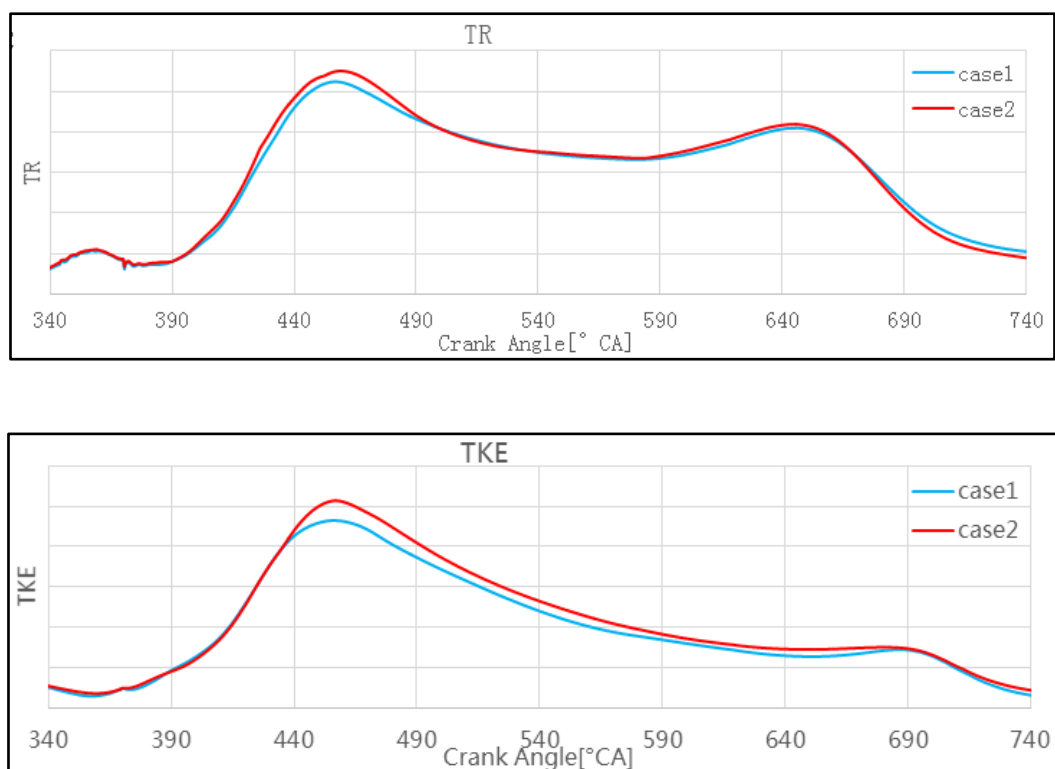


图8 两方案缸内滚流比和湍动能的对比

而对于缸内湍动能，case2方案缸内湍动能明显较高，然而随着曲轴转角的增加这种差异也逐渐减小，点火时刻两方案缸内湍动能差异在3%以内，差异甚微。

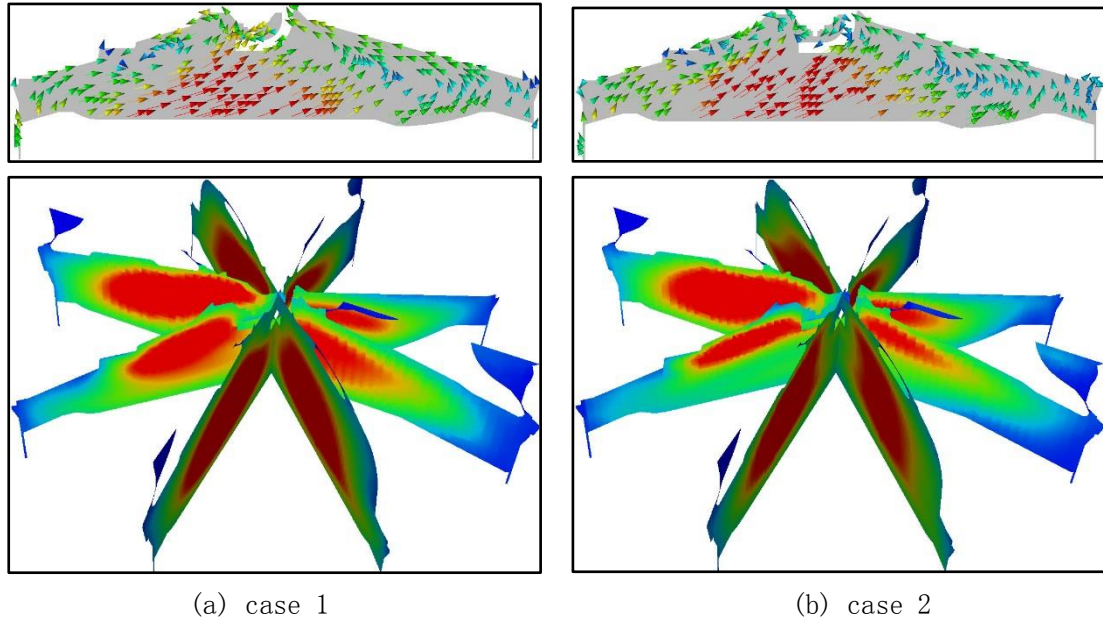


图9点火时刻两方案缸内流速和湍动能分布图

图9为点火时刻两方案缸内流速和湍动能分布图。图中可以看出两方案缸内流场方向一致，但case1方案火花塞附近流速稍强。而对于缸内湍动能，case2方案存在某一方向上较弱现象，各方向上分布均匀性不如case1方案。

为验证前文中对case1方案缸内滚流低原因的猜测，截取了进气道不同位置处的速度场切片，以观察气道内速度场的差异。

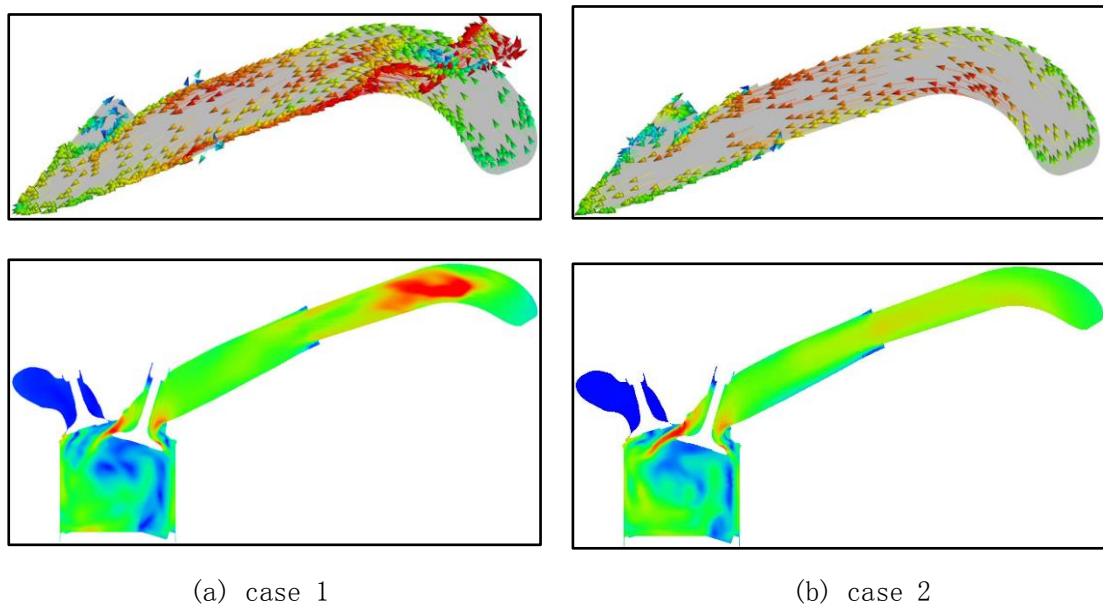


图10 气道不同位置处速度切片图

图10为缸内滚流比峰值时刻下进气道内不同位置处截取的速度分布图。上图中速度矢量切片图为气道中心位置，而标量切片图则是过气门中心位置。图中可以看出case1方案气流在EGR气流的冲击下气道底部流速明显较高，而case2方案气流则是沿气道方向流动，高速气流分布在气道上方，进而造成了标量图中气门位置case1方案较case2方案明显的正向流弱，逆向流强的局势。这也将直接导致case1方案缸内滚流低于case2方案。

可见进气歧管支管进EGR方案确实对气道内流场产生干扰，导致缸内滚流降低。

3.2 EGR分布均匀性

本次分析除了关注缸内流场外还将重点关注缸内混合气的混合质量。

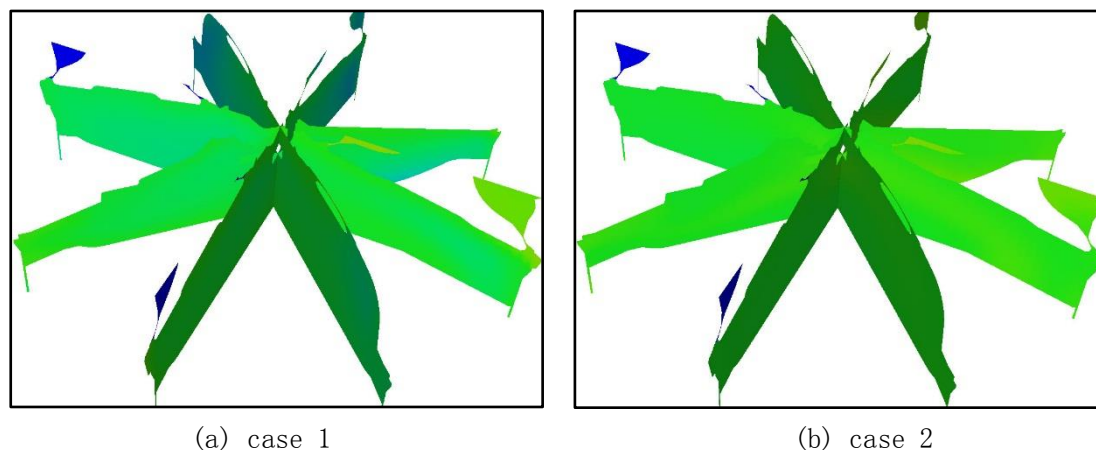


图11 点火时刻两方案缸内EGR分布图

图11为两方案在点火时刻进入缸内的被标记EGR气体分布情况。如图所示，case1方案缸内个别区域内分布有少量较稀EGR，而case2方案缸内EGR分布非常均匀，整个缸内全部为绿色所示状态。

如图12所示，点火时刻两方案缸内不同EGR质量分数所占体积比分布图，其中横坐标每一格代表的EGR质量分数为1%。图9显示，case1方案缸内EGR质量分数区间跨度为5%，而在这5%的跨度区间内EGR质量分数又集中分布在前三个区间内，其体积总占比超过90%；而case2方案缸内EGR质量分数区间跨度仅为3%，且集中分布在前两个区间内，其体积总占比几乎达到99%的水平，缸内混合气非常均匀。

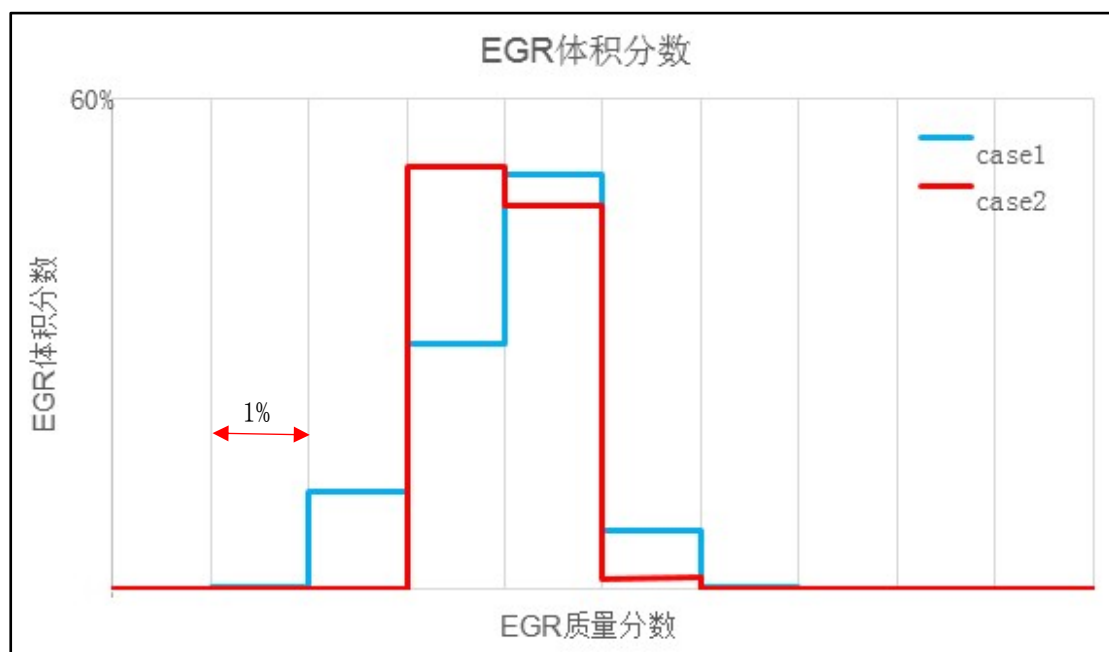


图12 点火时刻两方案缸内不同EGR质量分数所占体积比分布图

4. 总结

借助CONVERGE软件，分别对两种不同结构的EGR进气过程进行了缸内流动CFD分析，并对两方案缸内流场以及EGR气体混合均匀程度之间的差异进行了评价。

从计算结果分析可以得到以下结论：

- (a) 由进气歧管支管进EGR方案(case1方案), 点火时刻缸内EGR质量分数区间跨度为5%, 而前三个区间内的体积占比超过90%, 缸内EGR整体分布比较均匀。但由进气歧管支管进EGR对缸内流场有所影响, 缸内滚流有所降低, 点火时刻湍动能也稍低于进气歧管总管进EGR方案。
- (b) 由进气歧管总管进EGR方案(case2方案), EGR气体在进气歧管内与空气混合已经比较均匀了, 而进入缸内后在滚流作用下混合气更加均匀, 缸内EGR质量分数区间跨度仅为3%, 而其中前两个区间内的体积占比几乎达到99%的水平, 缸内EGR整体分布非常均匀。
- (c) 由进气歧管支管进EGR对缸内流场有所影响, 进气阶段缸内滚流稍弱(差6%左右), 点火时刻湍动能也稍低于进气歧管总管进EGR方案(差异不足3%)。

5. 参考文献

- [1] CONVERGE CFD MANUAL SERIES:V2.4, 2018
- [2] 周龙保, 内燃机学(第三版)[M], 北京: 机械工业出版社, 2015