

ICSC 2019

Core Competence Enhanced by MBD



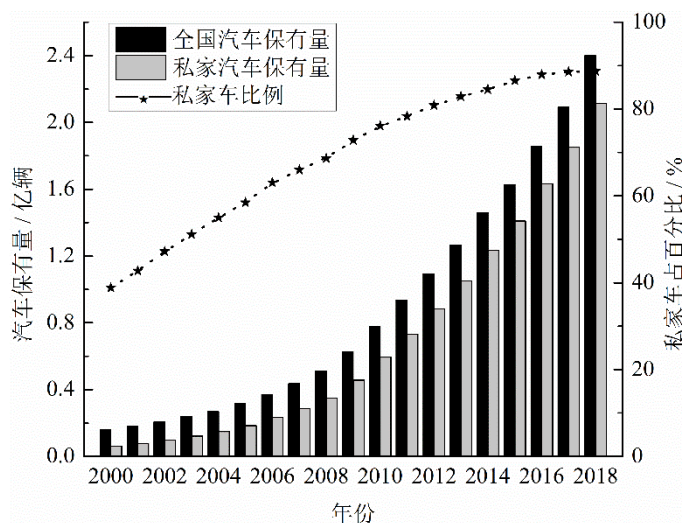
IDAJ CAE Solution Conference

复合进气对掺氢汽油转子机工作过程影响的数值模拟研究

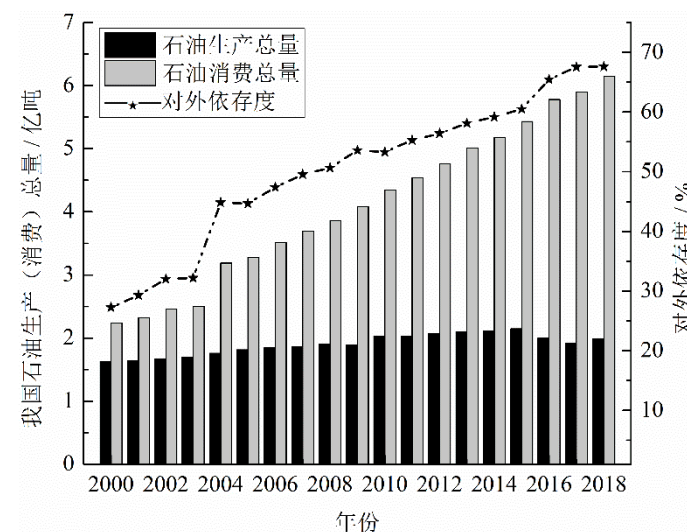
北京工业大学
环境与能源工程学院
动力工程及工程热物理专业
杨金鑫（博士后）

1、研究背景及研究内容

汽车工业的发展促进了我国经济的快速增长，但汽车保有量的逐年增加，也导致了一些列的**能源与环境问题**：



我国汽车保有量



我国石油生产和消费量

2018年我国汽车保有量已达到**2.4亿辆**，石油消耗总量为**6.1亿吨**，我国石油资源的**对外依存度**已高于**65%**。

能源安全问题

1、研究背景及研究内容

化石燃料大量消耗生成的有害气体，造成严重的大气污染，对环境造成破坏并危害人们的健康。

2017年北京生态环境局测算数据

污染物	年平均值 / $\mu\text{g}/\text{m}^3$	超过国家标准 / %
细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)	58	66
二氧化氮(NO_2)	46	15
可吸入颗粒物(PM_{10})	84	20



北京市大气污染物中的PM2.5有 $27.4 \pm 4.8\%$ 是由内燃机排放引起的。

环境污染问题

1、研究背景及研究内容

为了减少内燃机车辆对化石燃料的消耗，近年来我国大力发展**新能源汽车**。



	2018年保有总量	2018年增加量
新能源车	261万辆	107万辆
内燃机车	24000万辆	2840万辆
新能源占比	1.1%	3.8%

在相当长时间内，内燃机
仍将作为车辆主要动力源

能源安全问题

环境污染问题



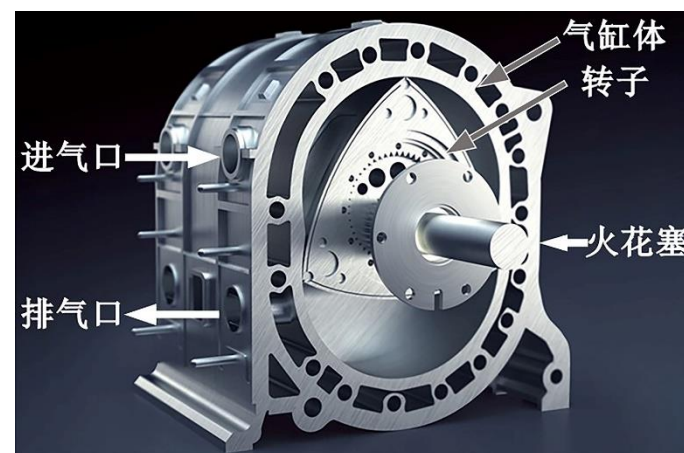
1、研究背景及研究内容

除了最常见的往复式活塞机（活塞机），还有一种应用较为广泛的**三角转子机（转子机）**。

- 1957年，德国工程师汪克尔发明了第一台转子机样机(专利)；
- 1963年，NSU公司开发出世界上第一台搭载转子机的量产车；
- 1964年，正式投产，自此转子机车正式面世。
- 随后，美、英、日等国家购买专利，陆续进行转子机开发，并广泛应用于军事和民用领域。



- 德国：NSU Spider(1963)和AR系列机型；
- 美国：SCORE和RPI系列机型；
- 英国：AR系列机型； **军用领域**
- 日本：Mazda cosmos(1967) **民用领域**
和RENESIS(RX-7和RX-8)；



1、研究背景及研究内容

转子机的工作过程与四冲程活塞机一样：

进气冲程、压缩冲程、做功冲程和排气冲程；

转子与曲轴的速比为1:3。

体积小 质量轻

- 在相同功率输出的前提下，转子机的设计重量相比于往复式活塞机减小了三分之一；

结构简单

- 膨胀功直接作用在转子上和偏心轴上，无连杆机构；转子旋转实现气门开闭，无配气机构；

转速高 扭矩均匀

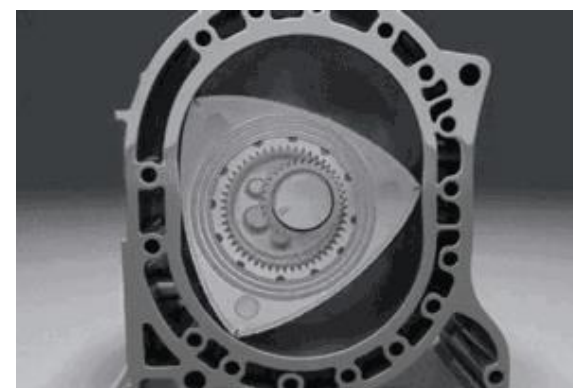
- 三角转子活塞旋转作功，输出扭矩均匀、高速性能好，扭矩波动与六缸往复式活塞机同等；

功率密度高

- 转子旋转一圈曲轴旋转三圈，相邻的三个燃烧室连续作功（转子旋转一圈1080°CA）。



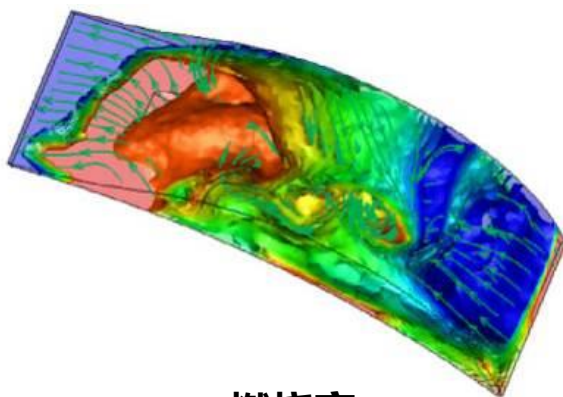
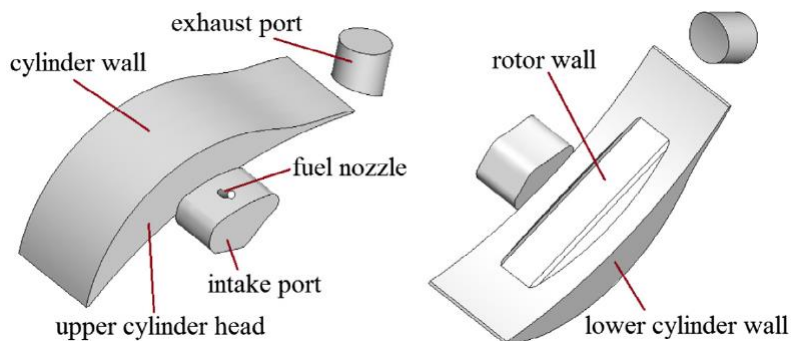
活塞机



转子机

1、研究背景及研究内容

转子机的**优点**使其在**军事和民用领域**内有着不可或缺**的应用价值**，但转子机的**缺点**也不能忽视：



燃烧室

- 狭长的燃烧室结构以及存在较多的狭小区域不利于湍流火焰的快速、完全燃烧；
- 较高的面容比增加了转子机缸内壁面淬熄区域面积；
- 转子机采用线密封的效果不佳，较高的漏气率。
- 转子机特殊的结构和运动形式，导致润滑油直接参与燃烧。

高油耗、高排放

改善
燃料
属性

1、研究背景及研究内容

氢气是地球上储量最丰富的化学物质，其可以通过电解水、微生物、太阳能等方法制得，被认为是**最有前景的内燃机代用清洁燃料**：

1. 最小的分子，在相同的温度下具有最快的分子运动速率 **极强的热扩散和质量扩散特性**
2. 不含碳燃料，燃烧过程中不存在缓慢的 $\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2$ 转化过程 **极高的层流火焰传播速率**
3. 具有极低的分子活化能 **较宽的燃烧界限、较低的火能量**
4. 具有较高的燃烧焓 **较高的绝热火焰温度、较小的火焰淬熄距离**
5. 在燃烧过程中快速生成H、OH等活性自由基 **良好的燃烧促进剂**

提高混合气均质性

提高火焰传播速度

拓宽燃烧界限

减少淬熄效应

促进完全燃烧

掺氢
燃料

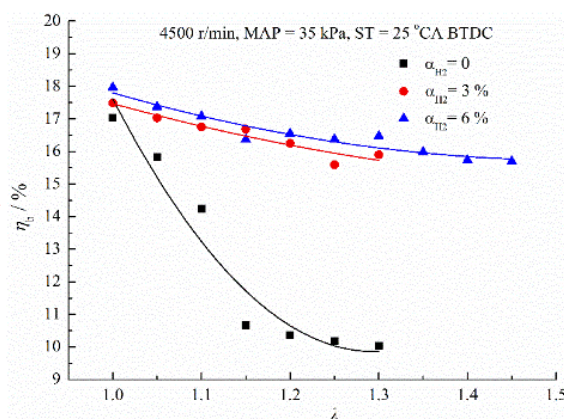


掺氢是改善内燃机经济性、动力性及排放特性的有效方法之一

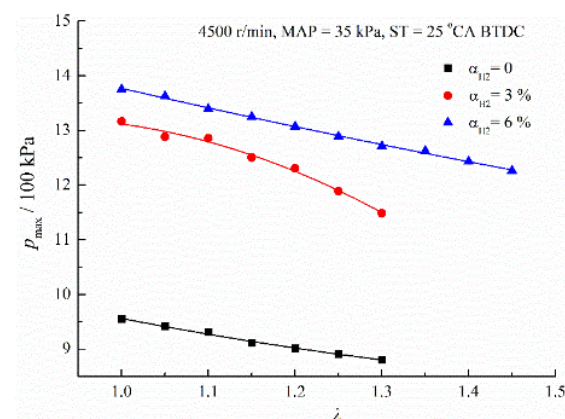
1、研究背景及研究内容

已有相关实验研究表明，在以乙醇、丁醇、天然气和汽油等为燃料的转子机中，**掺氢**可以有效：

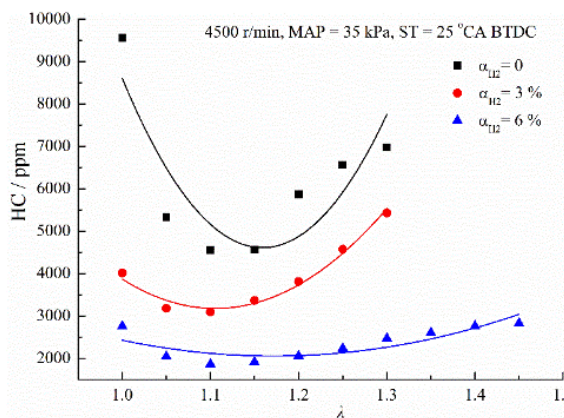
- 提高火焰速度；
- 加快燃烧进程；
- 拓宽稀燃极限；
- 提高缸内峰值压力；
- 提高转子机的热效率；
- 降低有害物质排放；



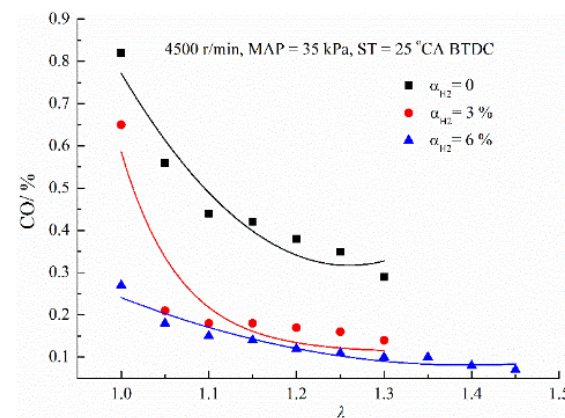
热效率提升



峰值压力升高



HC排放降低



CO排放降低

1、研究背景及研究内容

掺氢燃料转子机现有研究中存在的问题：

- 1.对掺氢燃料转子机的缸内气流运动规律、混合气形成及湍流火焰传播过程研究的缺失，**制约了进一步制定及优化掺氢控制策略**；
- 2.针对进气道掺氢导致转子机充量系数降低，影响其动力性的问题，可以通过**采用复合进气与氢气缸内直喷的手段进行改善，但缺乏数值模拟指导**；

本文研究内容：

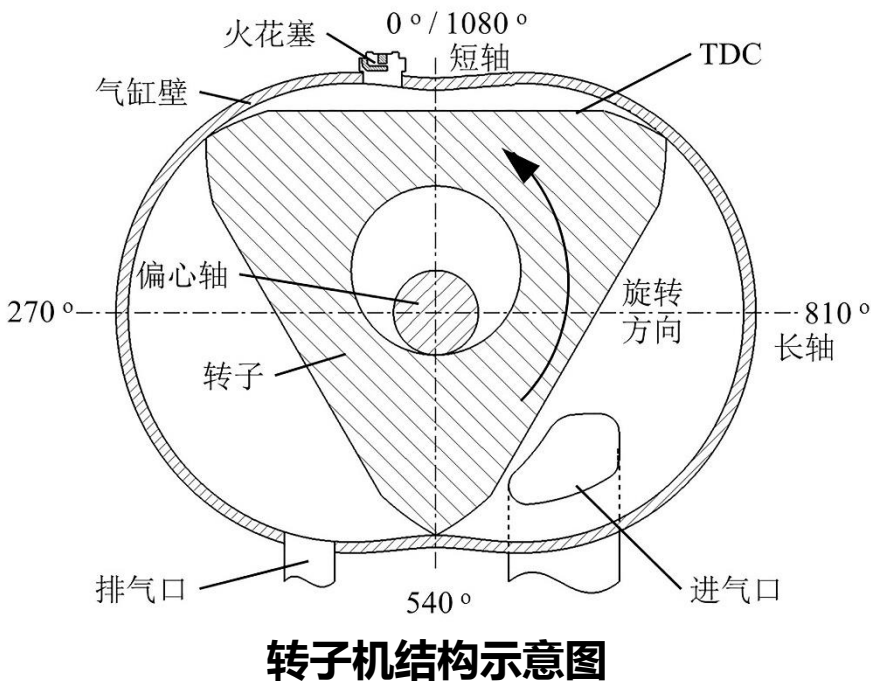
- 1.选取适当的湍流及燃烧模型，耦合可以表征掺氢汽油燃烧特性的化学机理，**构建掺氢汽油转子机CFD数值计算模型**，基于掺氢汽油转子机实验台架，**验证所建立模型的准确性**；
- 2.基于构建并验证的掺氢汽油转子机的CFD模型，**探究复合进气对气道掺氢及直喷掺氢汽油转子机缸内气流运动规律、火焰传播过程及排放特性，揭示复合进气改善汽油转子机燃烧与排放特性的作用机制**，为制定优化控制策略**提供理论指导和参数基础**；

2、CFD模型构建及验证

本文掺氢汽油转子机CFD模型是基于陕西红岭生产的**Z160F汽油转子机**进行搭建的。Z160F汽油转子机是一台**端面进气、风冷、单缸、火花塞点燃式内燃机**

Z160F转子机规格参数

规格参数	数值
创成半径	69 mm
偏心距	11 mm
转子宽度	40 mm
排量	0.16 L
压缩比	8.0
功率	3.8 kW /4000 r/min
进气相位	75 °CA ATDC, 61 °CA ABDC
排气相位	62 °CA BBDC, 70 °CA ATDC
进气方式	端面进气
冷却方式	风冷
点火方式	火花塞点火
气缸数	单缸

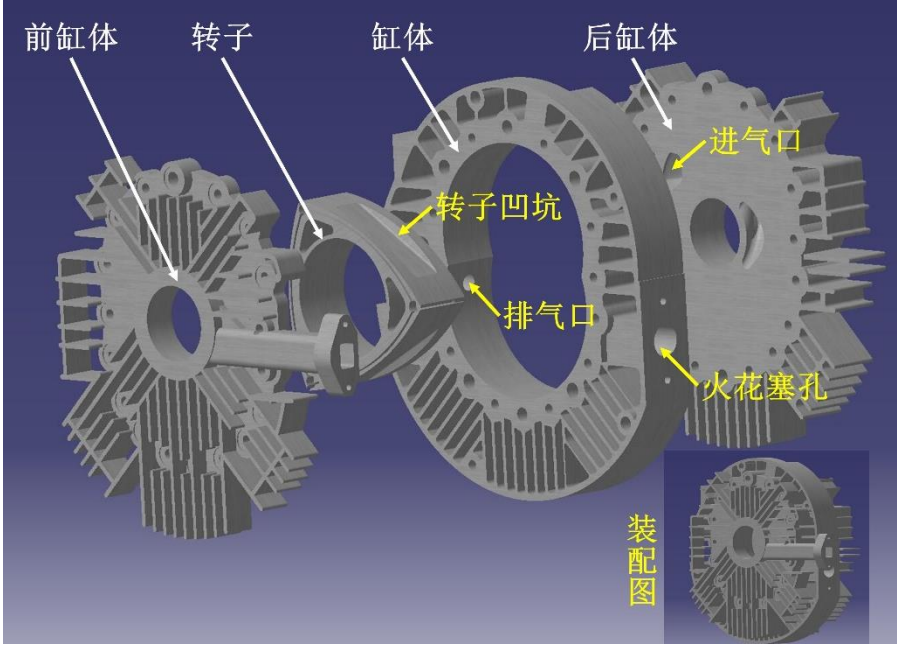


转子机结构示意图

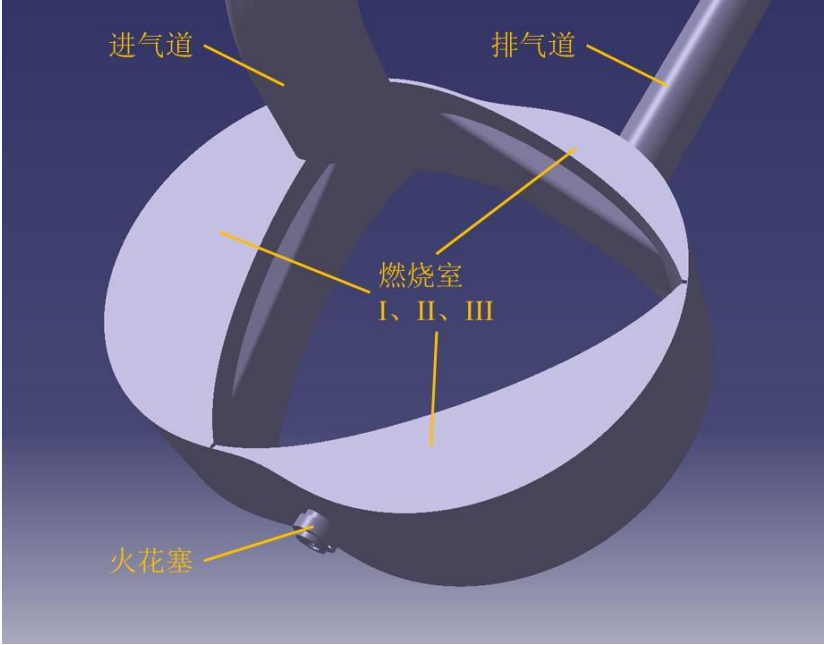
2、CFD模型构建及验证

CFD模型预处理：基于CATIA几何建模软件构建了转子机**零部件的几何模型**并进行**装配**，继而得到**计算域几何模型**。

转子理论 型线公式	$\begin{cases} x = e \cos \alpha + R \cos \frac{\alpha}{3} \\ y = e \sin \alpha + R \sin \frac{\alpha}{3} \end{cases}$	气缸理论 型线公式	$\begin{cases} x = R \cos 2v + \frac{3e^2}{2R} (\cos 8v - \cos 4v) \pm e(\cos 5v + \cos v)(1 - \frac{9e^2}{R^2} \sin^2 3v)^{1/2} \\ y = R \sin 2v + \frac{3e^2}{2R} (\sin 8v + \sin 4v) \pm e(\sin 5v - \sin v)(1 - \frac{9e^2}{R^2} \sin^2 3v)^{1/2} \end{cases}$
----------------------	--	----------------------	--



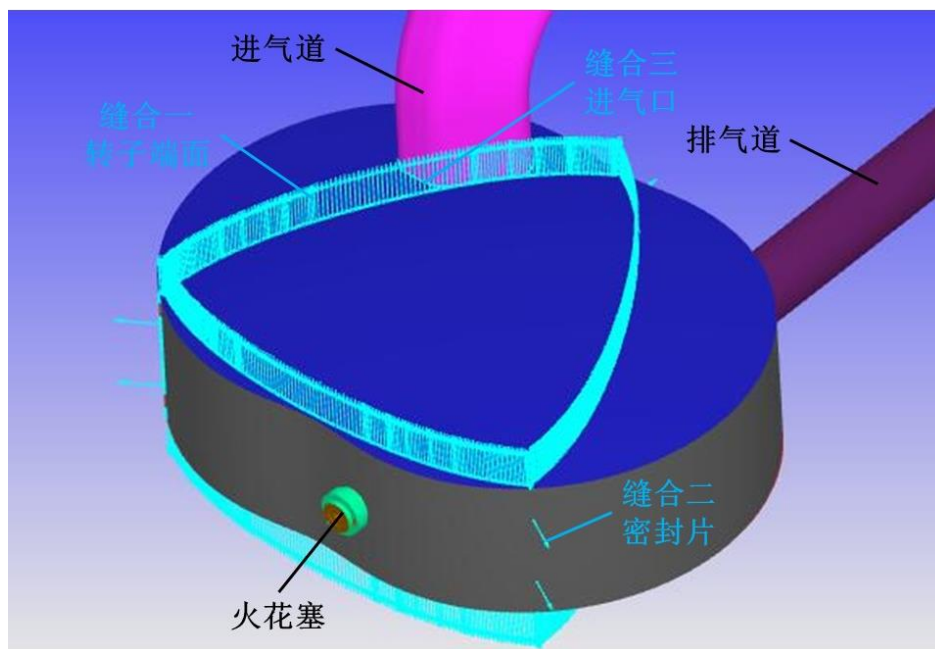
零部件及装配



计算域几何模型

2、CFD模型构建及验证

将计算域几何模型生成**表面网格**文件并导入到**CONVERGE**计算流体力学软件中，通过文献综述与调研选用适当的**计算子模型**。



CONVERGE表面网格

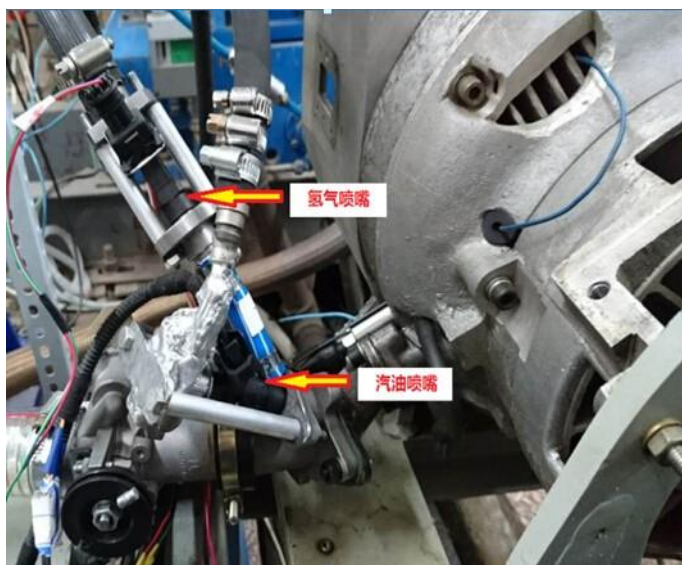
- RNG k- ϵ 湍流模型；
- SAGE燃烧模型；
- Han壁面方程传热模型；
- PRF骨架机理；（41-124, RON92）
- NO_x机理；
- Multi-zone(T: 5K, Φ : 0.05)；
- UDF（控制输入输出文件）

计算子模型

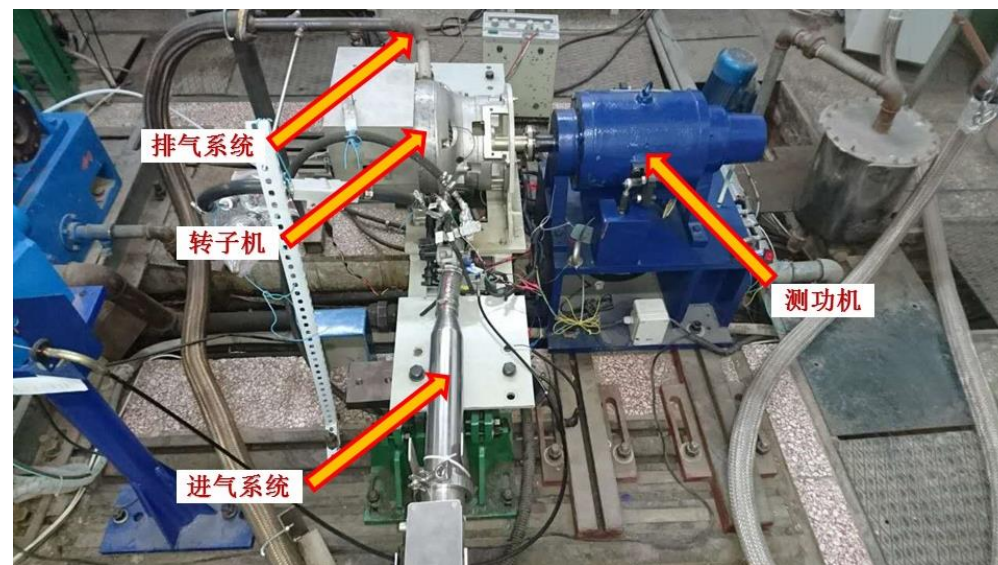
2、CFD模型构建及验证

实验台架系统搭建：基于Z160F汽油转子机搭建实验台架系统并对其进行改造：

- 实现氢气与汽油在进气道中的电控独立喷射与实时预混控制；
- 开发的HECU能够准确控制混合气的当量比、掺氢体积分数及点火角；
- 实现了对掺氢汽油转子机缸压和排放数据的采集与分析。



氢气、汽油气道喷射改装



掺氢汽油转子机实验台架系统

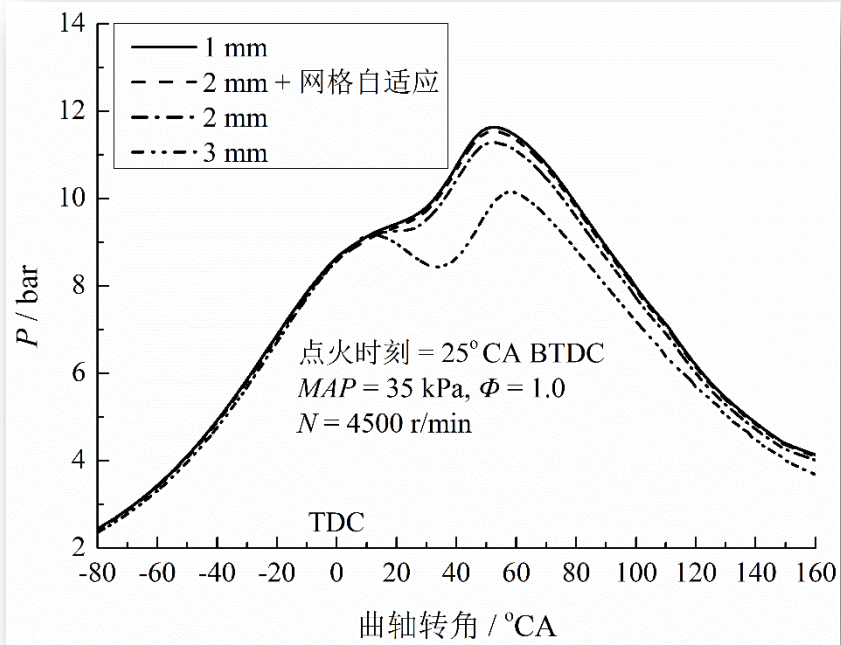
2、CFD模型构建及验证

CFD模型验证：基于搭建的实验台架测试系统，为CFD模型准确性的验证提供实验数据。

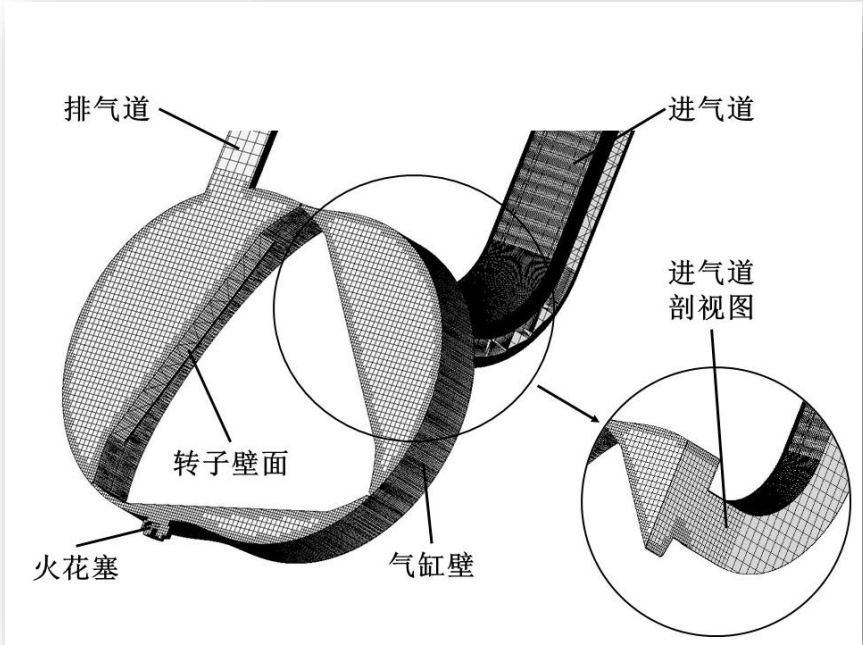
通过网格无关性验证，综合考虑计算精度和时间的需求：

➤ 选用燃烧室主体网格为2 mm+网格自适应加密的设置。

- 求解器根据速度场、温度场和组分浓度场的梯度增加而对网格进行自动加密；
- 最小网格尺寸设为0.5 mm。



网格无关性验证



网格模型

2、CFD模型构建及验证

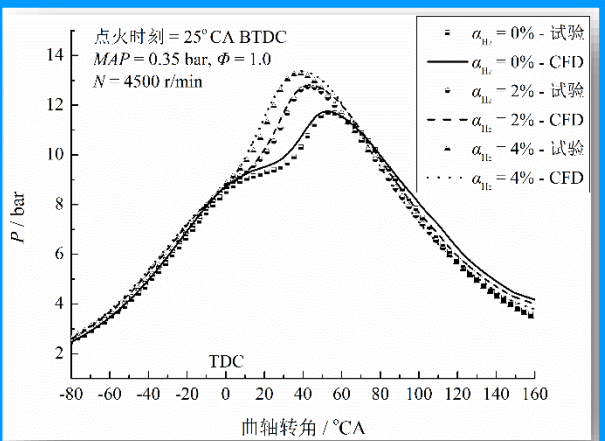
通过相同工况条件下**实验值**
与**计算值的对比**:

- 缸压峰值误差均小于0.2 bar ；
- 峰值压力转角误差小于3 °CA ；
- 放热率峰值误差小于0.1 J/°CA；
- 放热率峰值转角误差小于2 °CA。

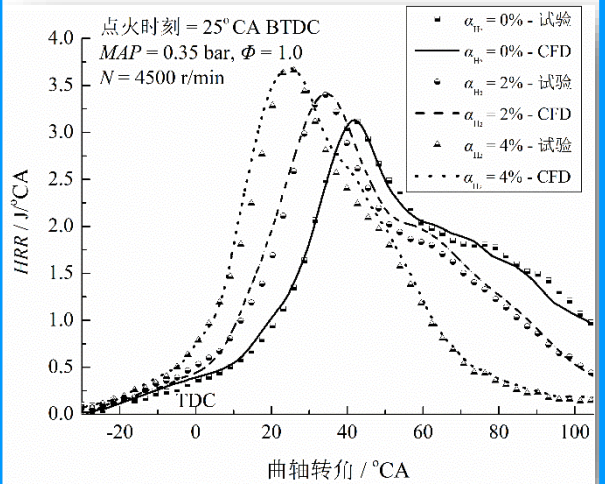
证明了所构建掺氢汽油转子
机CFD模型的准确性。

模型验证工况点

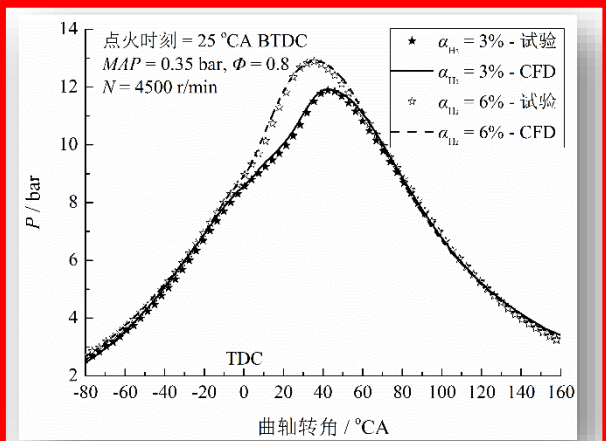
名称	参数
N	4500 r/min
MAP	0.35 bar
点火时刻	25 °CA BTDC
Φ	0.8、1.0
α_{H2}	0%、2%、 3%、4%、6%



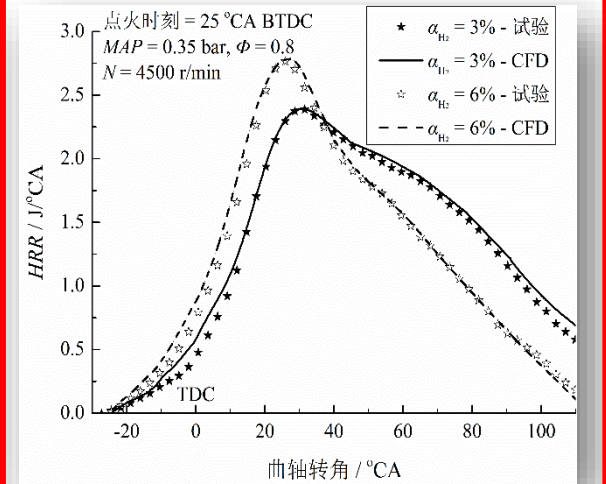
缸压验证



放热率验证



缸压验证



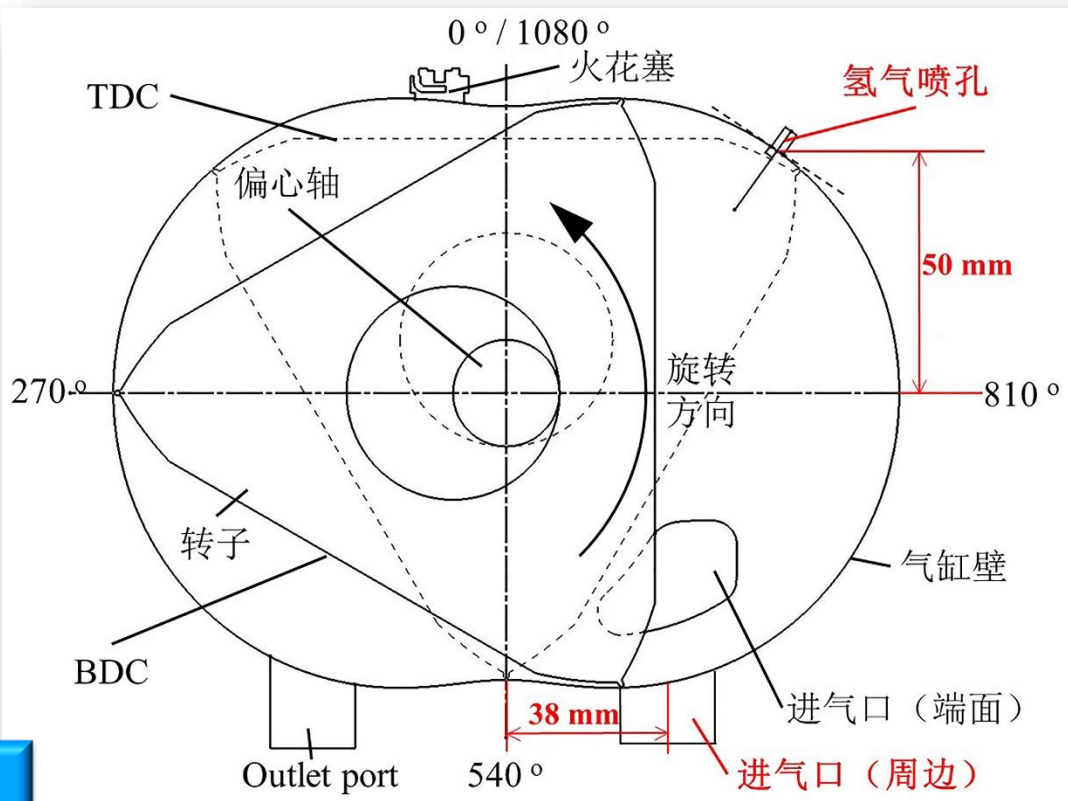
放热率验证

2、CFD模型构建及验证

复合进气气道掺氢与直喷掺氢汽油转子机CFD模型设置：

转速：4500 r/min；点火时刻：25 °CA BTDC；MAP：0.35 bar；当量比：0.8；掺氢：3%

- 氢气喷孔**位置与喷射方向**：
距离长轴50 mm(靠近火花塞)
该点法线方向
- 喷射**时刻**：110 °CA BTDC
- 喷射**脉宽**：40 °CA
- 周边进气口**位置**：
距离转子机短轴38 mm的气缸壁中心平面
(与端面进气口同侧)
直径为10 mm的圆形进气口



直喷模型设置

HPI+Intake_S HPI+Intake_C
HDI+Intake_S HDI+Intake_C

2、CFD模型构建及验证

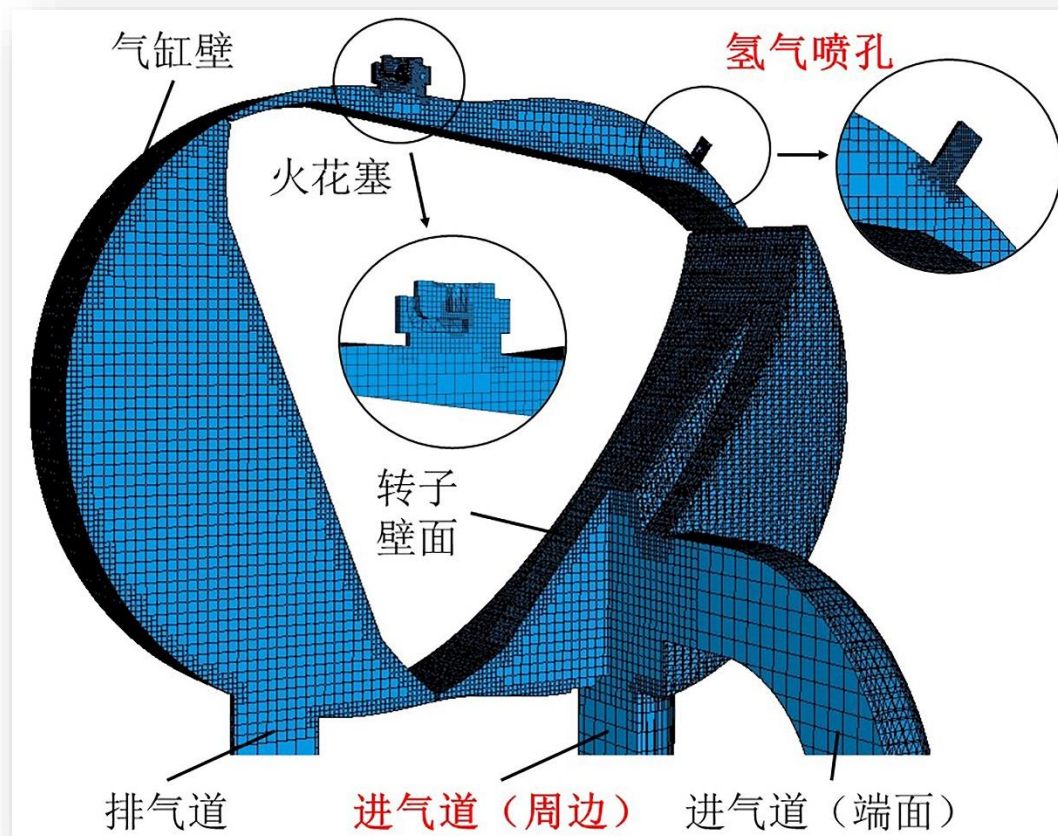
复合进气直喷掺氢汽油转子机CFD模型设置：

➤ 总共包含8个计算域：

- 1-3：3个燃烧室区域
- 4：火花塞区域
- 5：氢气喷孔区域
- 6：端面进气道区域
- 7：周边进气道区域
- 8：排气道区域

➤ 网格尺寸预设与前文一致：

- 燃烧室主体：2 mm + AMR
- 进、排气道：4 mm
- 火花塞区域：0.25 mm
- 氢气喷孔：0.125 mm

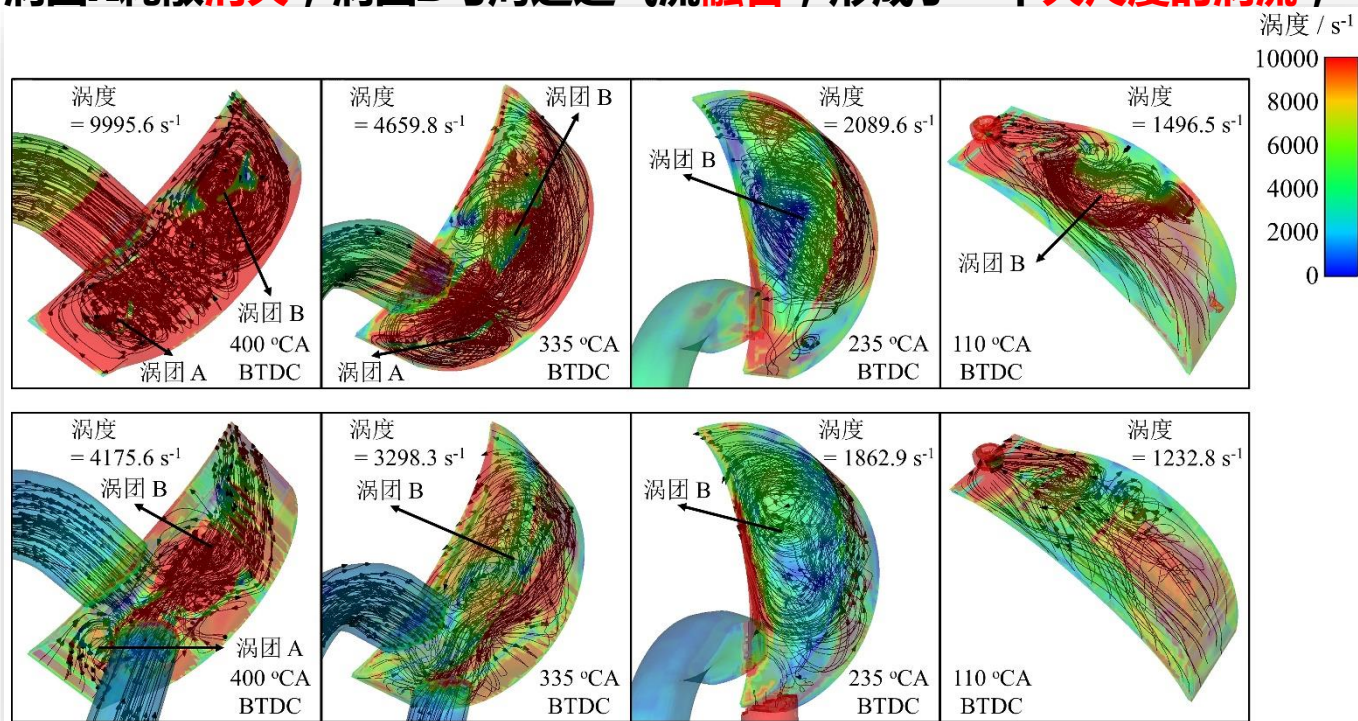


网格模型

3、计算结果分析与讨论

3.1 复合进气对缸内流场的影响：

- 400 °CA BTDC时刻，端面进气流直接**撞击**在周边进气流上（两个方向低涡度滚流），周边进气流**先撞击**转子壁面，**再撞击**气缸壁，然后向燃烧室**前端发展**，而且受到端面进气流的撞击向气缸壁**下端**面发生偏转，平均涡度 4175.6 s^{-1} 。
- 335 °CA BTDC时刻，涡团A耗散**消失**，涡团B与周边进气流**融合**，形成了一个**大尺度的涡流**，平均涡度 3298.3 s^{-1} ；
- 235 °CA BTDC时刻，涡团B**充满了**整个燃烧室，其**涡流结构**更加明显，平均涡度为 1862.9 s^{-1} 。
- 110 °CA BTDC时刻，**涡团B快速耗散**，仅在靠近气缸壁下端面一侧有较小的**不规则涡团**存在，平均涡度 1232.8 s^{-1} ，**主流流场的结构明显**。

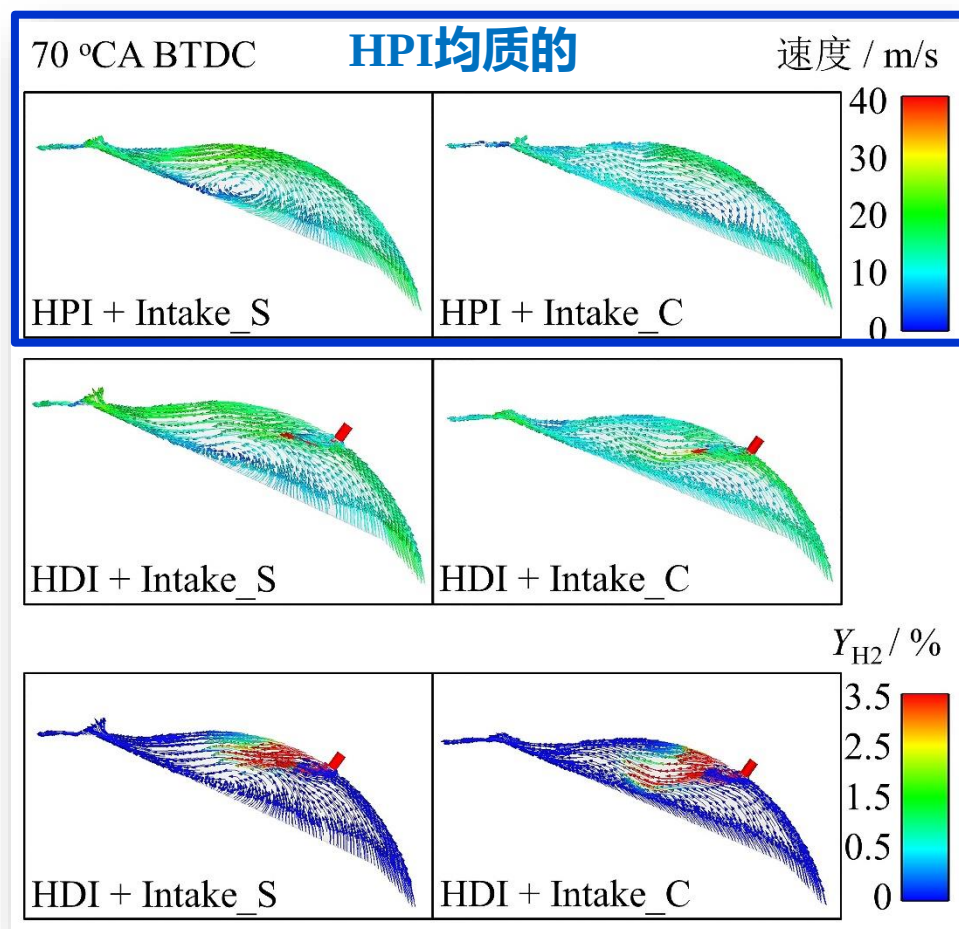


复合进气与端面进气流线对比图

3、计算结果分析与讨论

复合进气对缸内混合气形成的影响：

- 在70 °CA BTDC时刻：
 - 端面进气下，缸内存在逆时针旋转的涡流；
 - 复合进气下，周边进气流占主导地位，缸内更早的形成了主流流场。
-
- 端面进气下，氢气直喷射流在涡流的作用下靠近气缸壁，且向火花塞运动；
 - 复合进气下，氢气直喷射流向转子壁面运动，撞击后向火花塞运动。

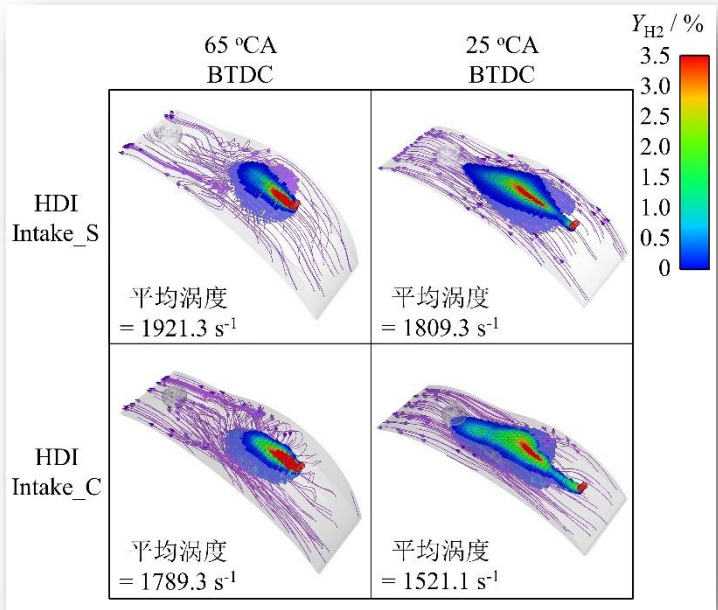


喷射终了时刻速度场及氢气分布

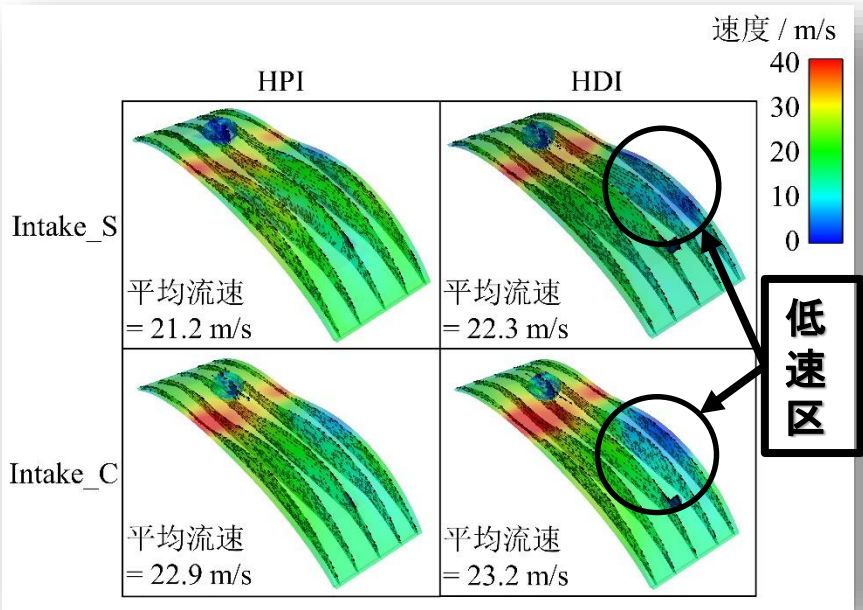
3、计算结果分析与讨论

复合进气对缸内混合气形成的影响：

- 端面进气下，主流流速较慢，氢气向燃烧室前端运动也慢，且更多的氢气分布气缸壁一侧；
- 复合进气下，主流流速较快，氢气向燃烧室前端运动也快，且更多的氢气分布在转子凹坑里；
- 点火时刻，直喷掺氢的流速均高于气道掺氢，且直喷掺氢下靠近气缸壁下端面均存在低速区；
- 点火时刻，复合进气的流速均高于端面进气；



速度流线及氢气分布

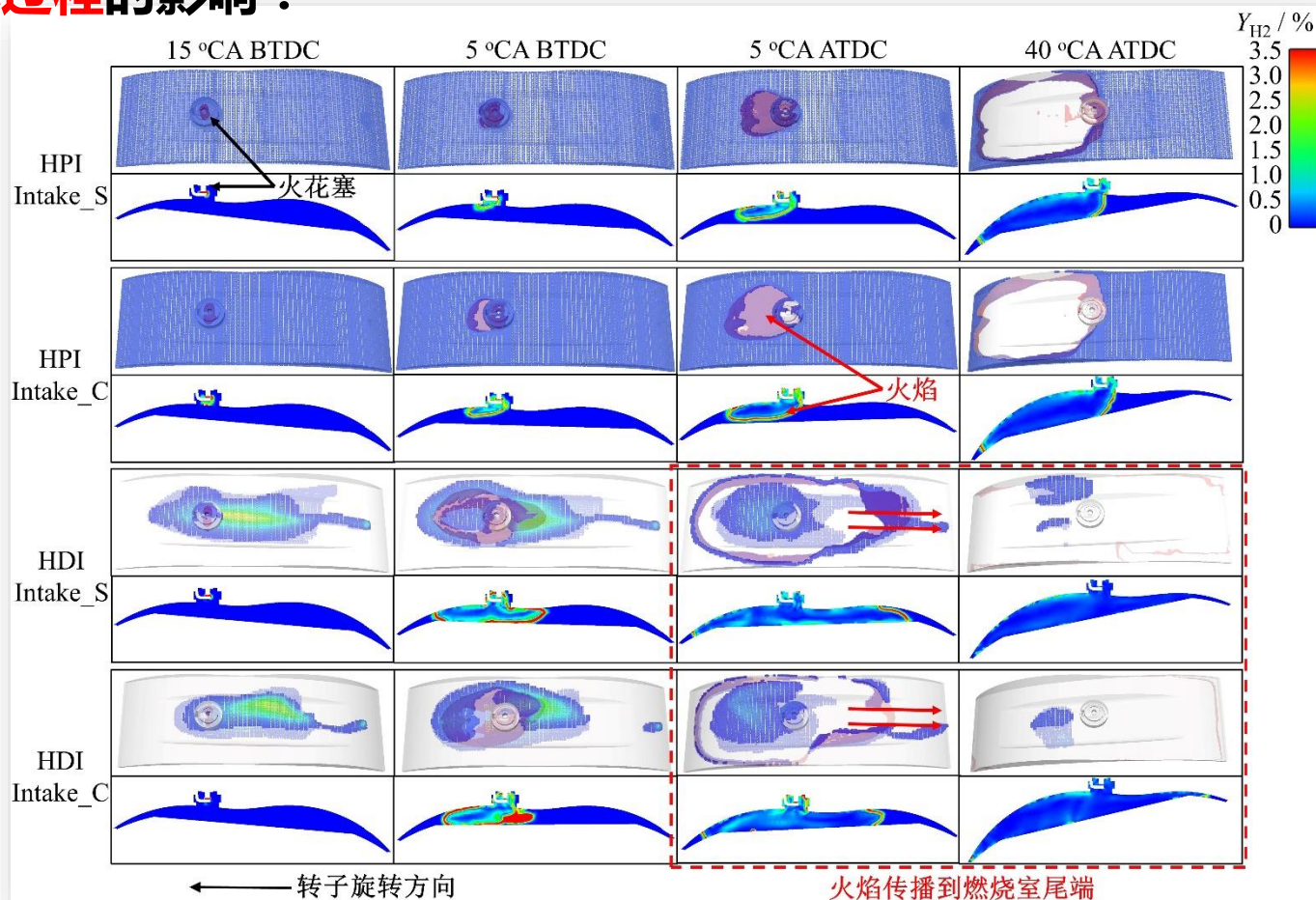


点火时刻速度场

3、计算结果分析与讨论

3.2 复合进气对燃烧过程的影响：

- 气道掺氢条件下，复合进气增加了主流流场的流速，向燃烧室前端发展火焰速度升高；
- 直喷掺氢条件下，由于在优化后的喷孔位置及喷射策略下，火焰均快速传播到燃烧室尾端，且在复合进气下的火焰速度略快于端面进气。

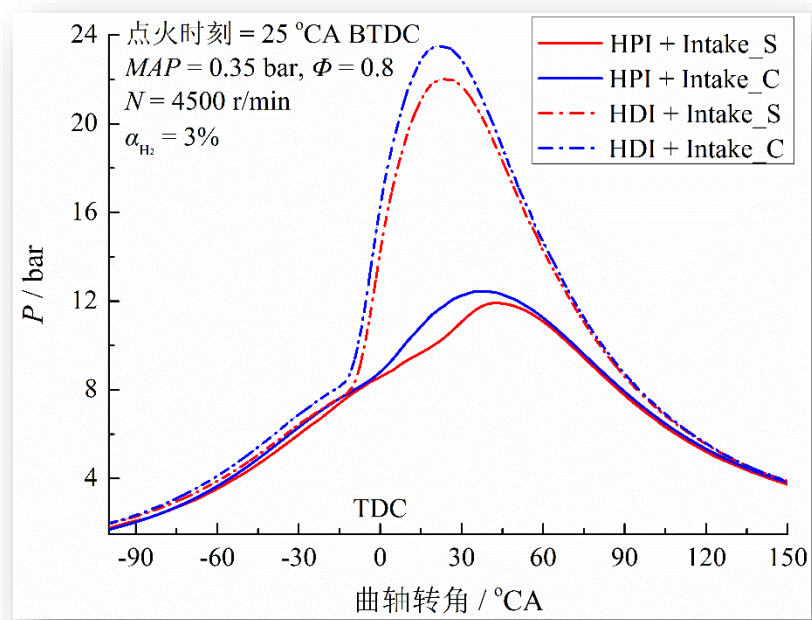


火焰传播过程

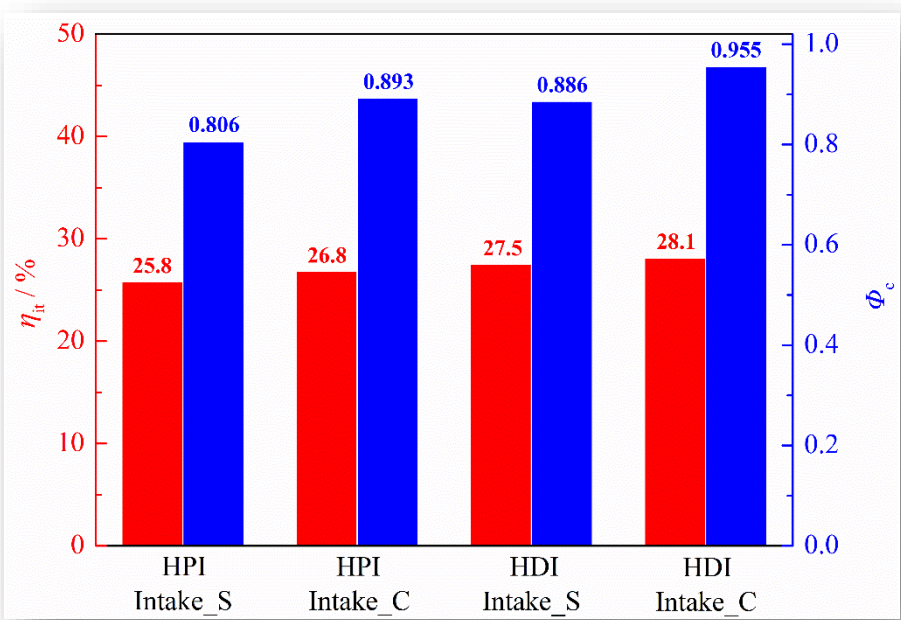
3、计算结果分析与讨论

复合进气对燃烧过程的影响：

- 气道掺氢下，复合进气增加了转子机的充量系数，从0.806提高到0.893，缸内峰值压力提高了4.5%，指示热效率由端面进气的25.8%提高到复合进气下的26.8%；
- 直喷掺氢下，复合进气增加了转子机的充量系数，从0.886提高到0.955，缸内峰值压力提高了6.8%，指示热效率由端面进气的27.5%提高到复合进气下的28.1%。



缸内压力对曲轴转角的变化关系



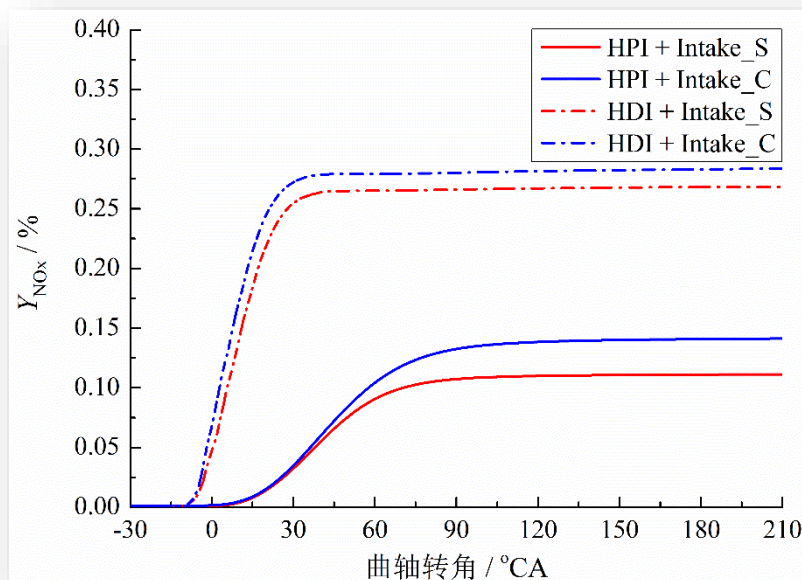
充量系数及指示热效率

3、计算结果分析与讨论

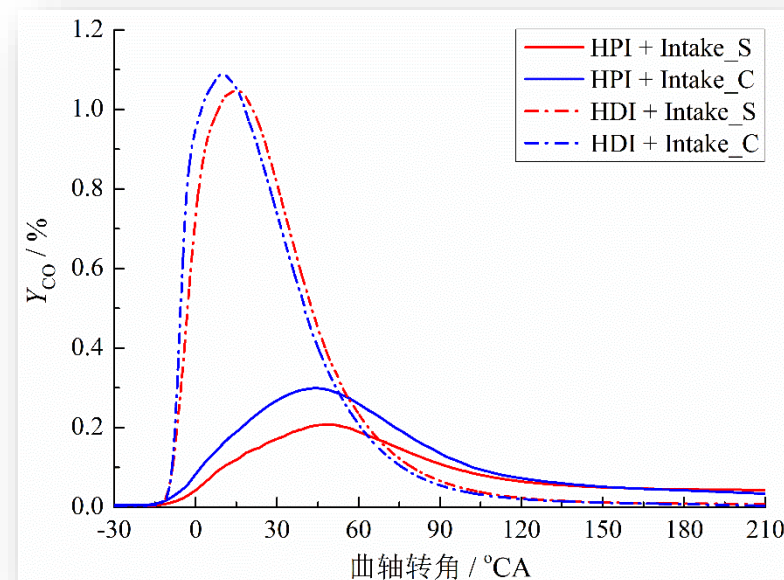
3.3 复合进气对排放性能的影响：

- 在气道掺氢条件下，复合进气使 NO_x 质量分数从0.111%增加到0.141%；
- 在直喷掺氢条件下，复合进气使 NO_x 质量分数从0.268%增加到0.284%；
- 在气道掺氢条件下，复合进气使CO质量分数从0.043%降低到0.033%；
- 在直喷掺氢条件下，复合进气使CO质量分数从0.008%降低到0.003%。

排气门开
启时刻



NO_x 质量分数曲线



CO 质量分数曲线

4、本研究的主要结论

本文基于CONVERGE软件构建了适用于计算掺氢汽油转子机工作过程的CFD模型，分析了复合式进气对气道掺氢和直喷掺氢汽油转子机缸内混合气形成及火焰传播过程的影响：

- 1、无论是在气道掺氢还是直喷掺氢条件下，采用复合进气后，周边进气气流占主导地位，加快了主流流场的形成，并提高了缸内平均流速；
- 2、采用复合进气增加了进气口的面积，转子机的充量系数升高，在气道掺氢和直喷掺氢条件下，分别由端面进气条件下的0.806和0.886升高到0.893和0.955；
- 3、主流速度的增加与充量系数升高后提高的缸内热氛围，均有效加快了火焰的传播，缸内峰值压力显著升高，在气道掺氢和直喷掺氢条件下，与端面进气相比，分别增加了4.5%和6.8%；
- 4、更高的缸内热氛围促进了缸内混合气的完全燃烧，在气道掺氢和直喷掺氢条件下，指示热效率也分别由端面进气下的25.8%和27.5%升高到复合进气下的26.8%和28.1%；
- 5、NO_x排放升高，CO排放降低。

感谢您的聆听！