

ICSC 2017

CAE for virtual product

CAE for innovation

CAE for process transformation

IDAJ CAE Solution Conference

掺氢汽油转子机缸内燃烧及排放形成过程的 数值模拟研究

汇报人： 杨金鑫

指导教师： 纪常伟

单位： 北京工业大学

一、研究背景

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

➤ 三角转子活塞旋转做功，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**；

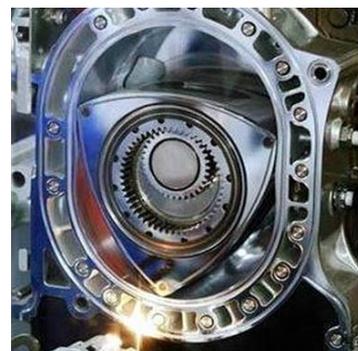
功率密度高

➤ 转子**旋转一圈曲轴旋转三圈**，相邻的三个燃烧室连续做功（转子机旋转一圈1080°CA）。

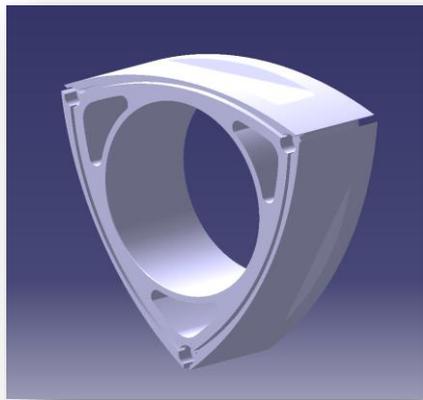
在无人机、军用特种车辆、便携式发电机以及电动车增程器等领域应用广泛！



Felix Wankel
(菲力斯·汪克尔)



一、研究背景

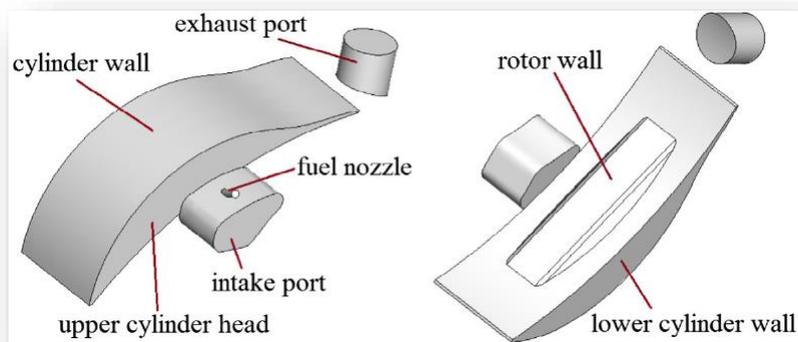


转子几何模型

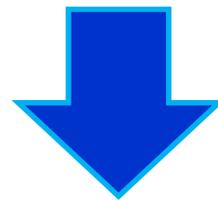


缸体几何模型

- 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。



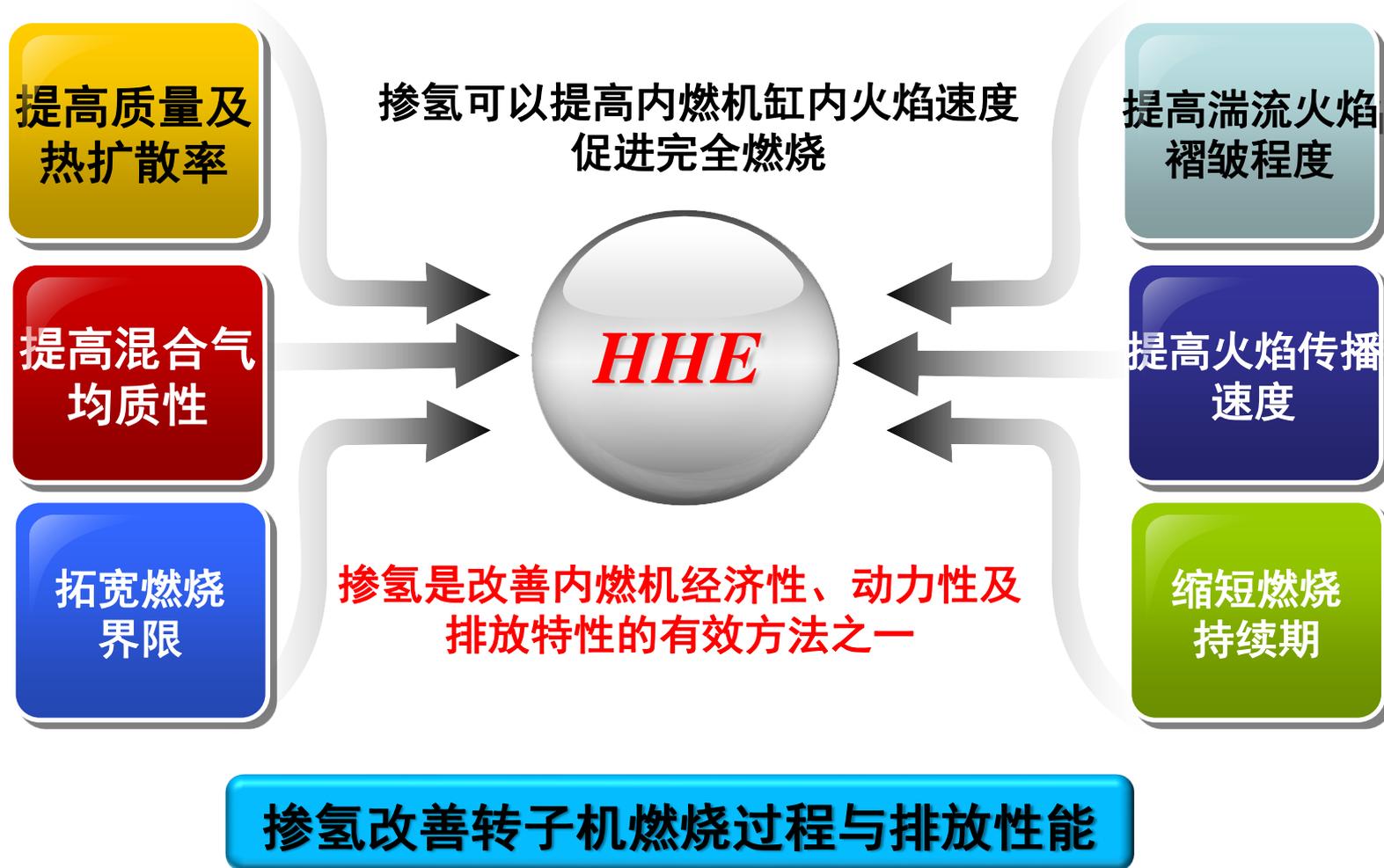
单燃烧室模型



高油耗、高排放

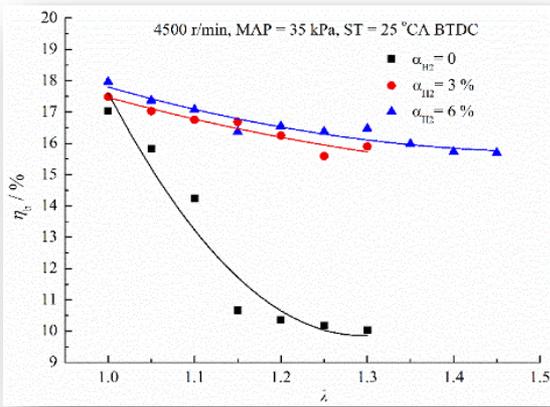
掺氢是改善汽油转子机性能的有效方法之一

一、研究背景

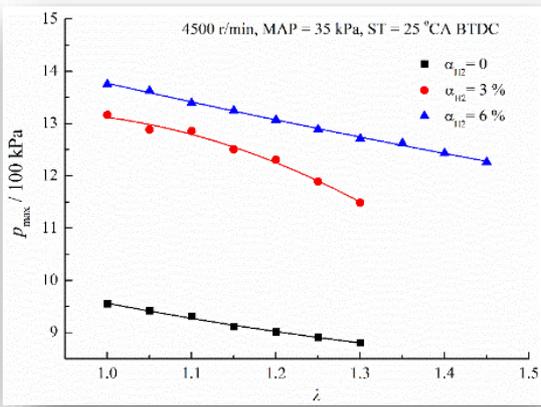


一、研究背景

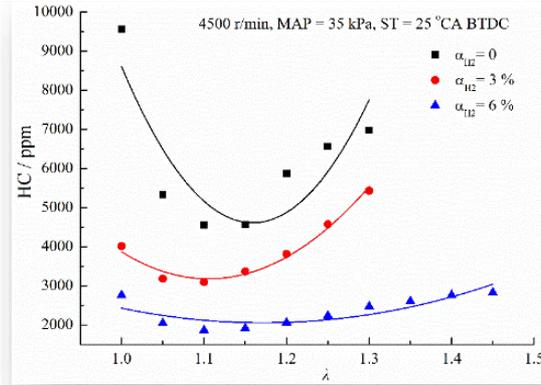
已有试验研究：掺氢是改善汽油转子机性能的有效途径



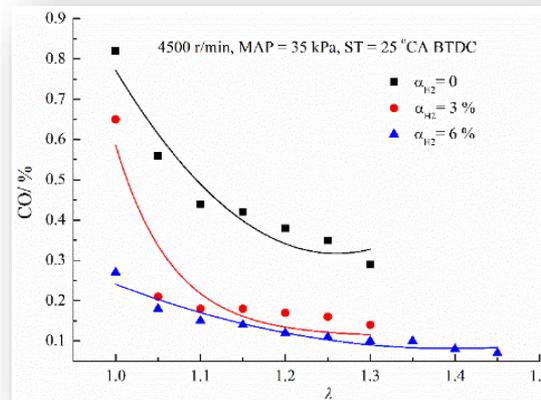
热效率提升



峰值压力提高



HC排放降低



CO排放降低



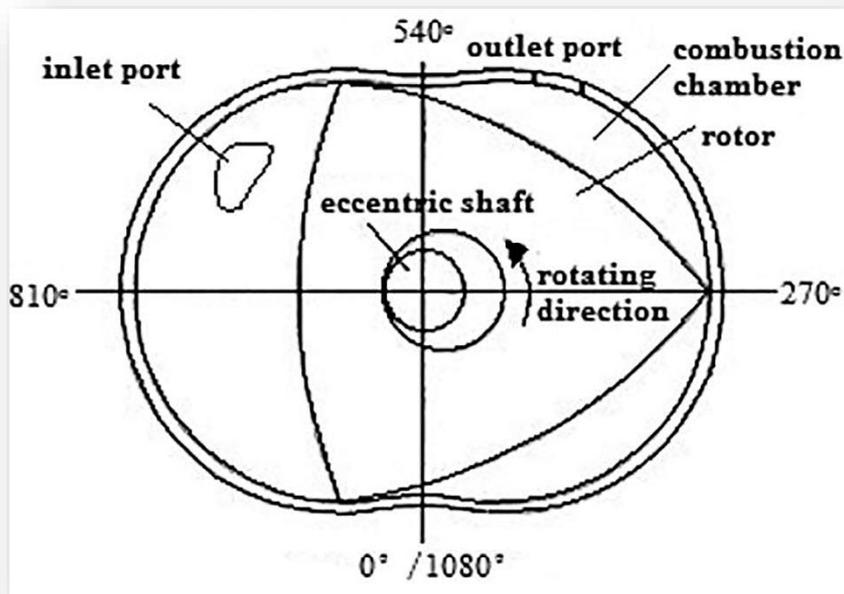
- 缸内流场的特性;
- 火焰的结构与发展;
- 排放物的产生分布;



CFD数值模拟研究：掺氢汽油转子机高效清洁燃烧微观机制

二、模型构建及验证

■ 2.1 模型构建



转子机结构示意图

Table 1

Specifications of testing rotary engine.

Specifications	Value
Generating radius/mm	69
Width of rotor/mm	40
Displacement/L	0.16
Compression ratio	8.0
Eccentricity/mm	11
Power output	3.8 kW/4000 rpm
Intake timing/(°CA)	75 ATDC, 61 ABDC
Exhaust timing/(°CA)	62 BBDC, 70 ATDC
Intake method	Side-ported
Cooling method	Air cooled
Ignition source	Spark plug
Number of rotors	Single rotor

Z160F转子机参数

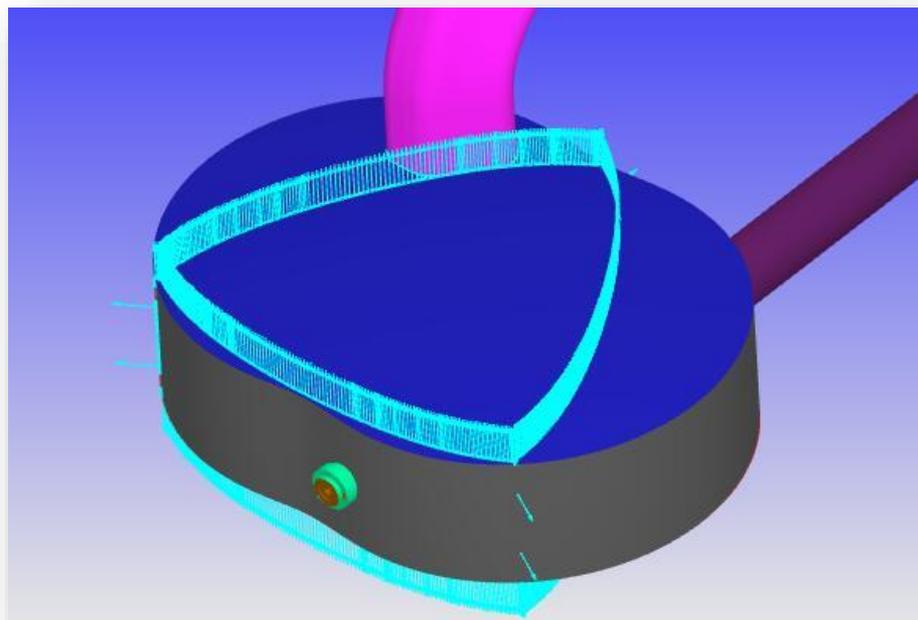
本文的模型基于陕西红岭制造厂Z160F转子机构建

二、模型构建及验证

■ 2.1 模型构建

本文基于**CONVERGE**软件构建了适合于计算掺氢汽油转子机工作过程的CFD模型

- 燃烧室主体尺寸1 mm ;
- AMR网格自适应 ; (速度 , 温度 , 组分)
- 网格数量50,000-250,000 ;
- 进气口为定压边界 : 35 kPa ;
- 排气口为定压边界 : 100 kPa ;
- 转子及燃烧室边界定义为温度及速度的壁面法则边界 , 温度均为 : 550 K ;
- 火花塞区域温度 : 750 K ;
- 火花塞电极温度 : 850 K ;



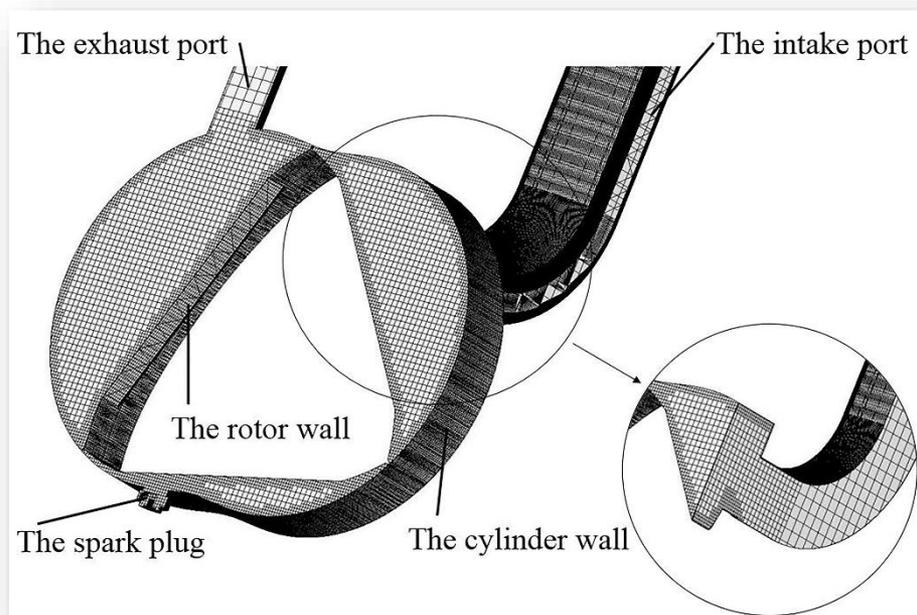
CONVERGE建模

二、模型构建及验证

■ 2.1 模型构建

模型边界条件：

- RNG k- ϵ 湍流模型；
- SAGE燃烧模型；
- Han^[1]壁面方程传热模型
- PRF骨架机理^[2]；(41-124, RON92)
- NO机理^[3]；
- Multi-zone(T: 5K, Φ : 0.05) .



初始网格模型

[1] Han Z, Reitz R. Int J Heat Mass Transfer 1997;40:613-25.

[2] Liu Y, Jia M, Xie M, Pang B. Energ Fuel 2012;26:7069-83.

[3] Golovitchev V L. <http://www.tfd.chalmers.se/~valeri/MECH.html>.

二、模型构建及验证

■ 2.2 模型验证

改装：

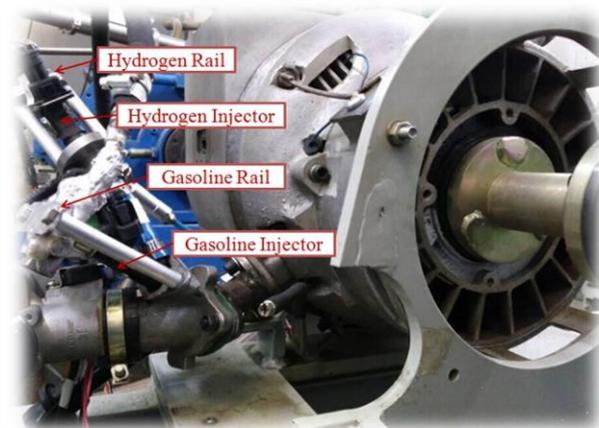
- 进气道安装**汽油轨和喷嘴**；
- 进气道安装**氢气轨和喷嘴**；
- 自主开发的**HECU**控制单元；

试验工况：

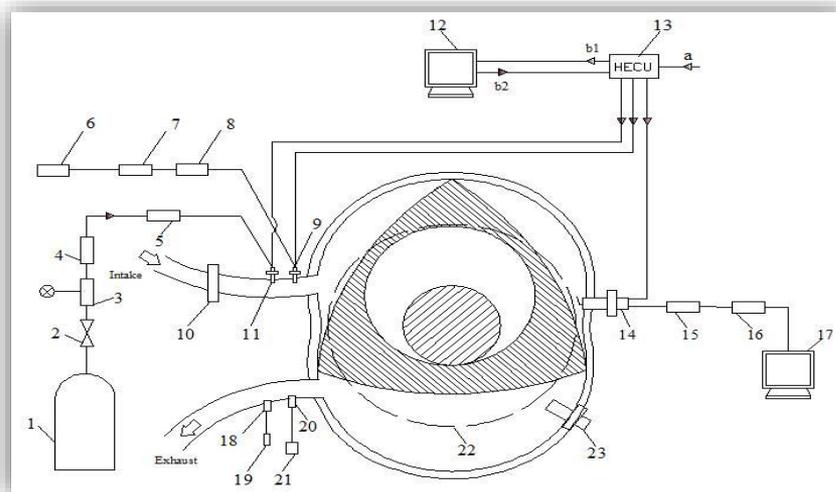
- 转速：4500 r/min；
- MAP：35 kPa；
- 点火角：25 °CA BTDC；
- 当量比 Φ ：1.0；
- 掺氢体积分数：0% , 2% , 4%.



试验台架



掺氢改装



试验系统示意图

二、模型构建及验证

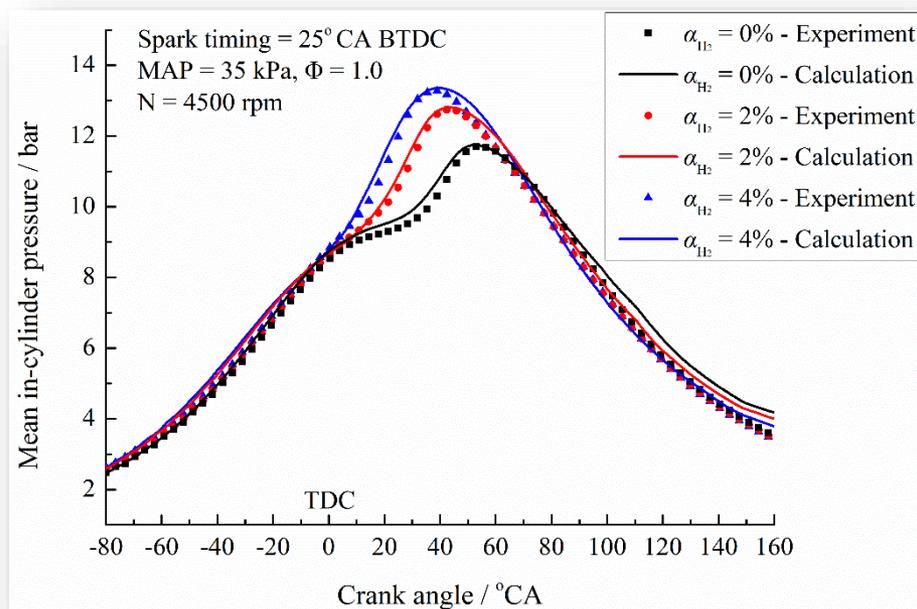
■ 2.2 模型验证

通过**对比**不同掺氢体积分数下，缸内平均

压力的计算值与试验值：

- 缸内峰值**压力误差小于1 bar**；
- 峰值压力对应**转角的误差小于2 °CA**；

证明了所建立模型的**准确性**，其计算结果可以用于掺氢汽油转子机缸内**流场、燃烧及排放形成过程的分析**。

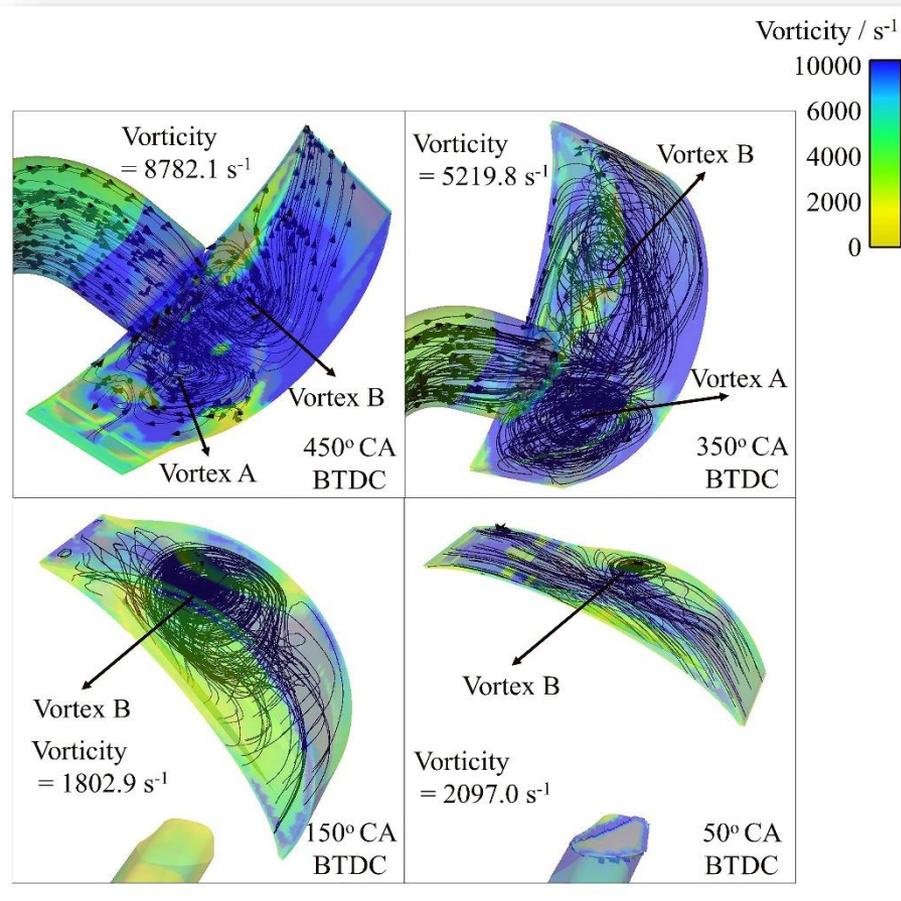


缸压验证

三、结果与讨论

3.1 流场特性

- **450 °CA BTDC**，气流撞击燃烧下端面，形成两个涡团（**涡团A和B**），此时的缸内平均涡度为**8782.1 s⁻¹**；
- **350 °CA BTDC**，曲轴转角增加，容积增大，**涡团A和B的半径随之增大**，涡度降低到**5219.8 s⁻¹**；
- **150 °CA BTDC**，压缩行程中，燃烧室容积迅速降低，**涡团A耗散消失**，**涡团B被挤入到燃烧室前端**，涡度进一步降低至**1802.9 s⁻¹**；
- **50 °CA BTDC**，**涡团B显著变小**，容积的快速降低，**涡度小幅度升高**。



缸内流线及涡度场

三、结果与讨论

■ 3.1 流场特性

30 °CA BTDC，不同掺氢体积分数下燃烧室中心平面上的速度场：

现象：

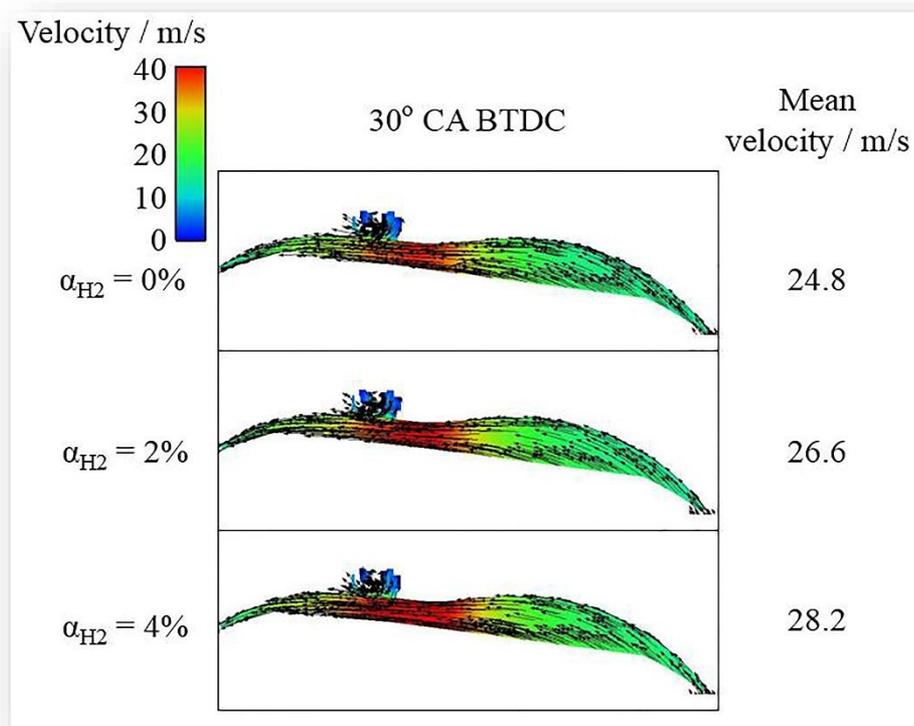
- ▶ 掺氢**0%**，**2%**和**4%**时，平均流速分别为**24.8**，**26.6**和**28.2 m/s**；
- ▶ **高速区域**集中在燃烧室中部**火花塞附近**；

原因：

- 氢气的掺混**降低**了进入气缸混合气的**总质量**，平均流速升高；

问题：

- ◆ 较高的缸内流速可能会对点火时刻的**火焰稳定性**以及**火焰发展**过程造成影响。



速度场

三、结果与讨论

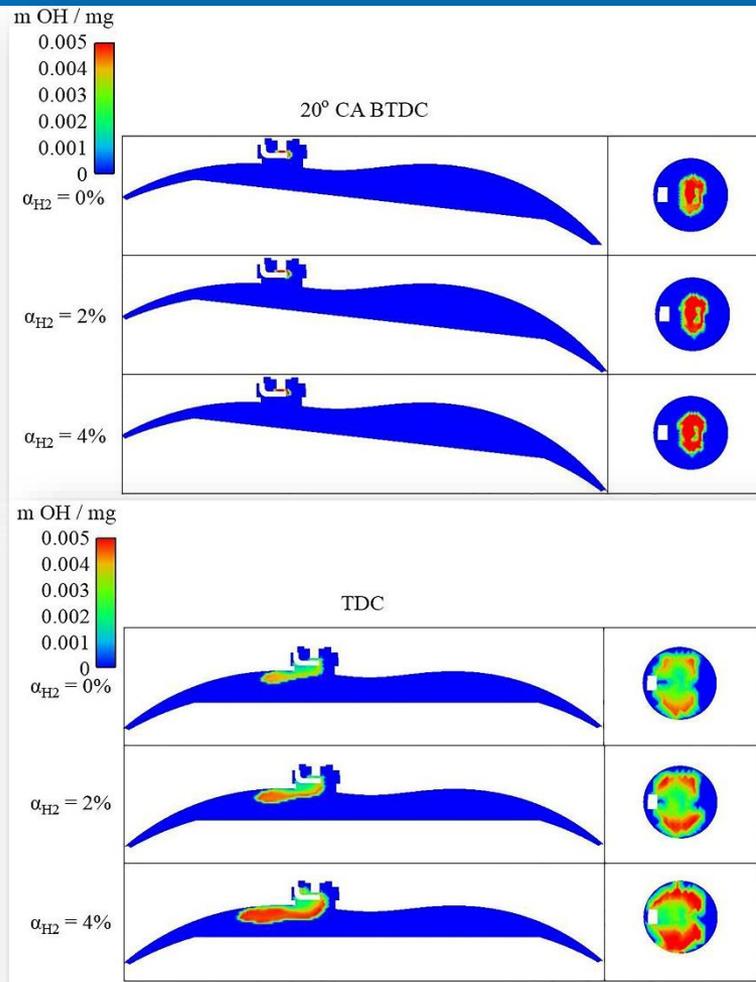
■ 3.2 燃烧过程

20 °CA BTDC :

- OH基团的分布面积**近似**；
- 点火初期燃烧过程主要由**点火**能量决定。

TDC :

- 火焰向着转子运动的**方向**发展；
- **掺氢**分数越高**OH基团**的分布面积和浓度**越大**；
- ◆ **主流流场**的存在是火焰发展发生偏转；
- ◆ **R1和R2**是碳氢燃料燃烧的重要支链反应，掺氢促进H基团生成（R1），H基团促进OH基团生成（R2）：

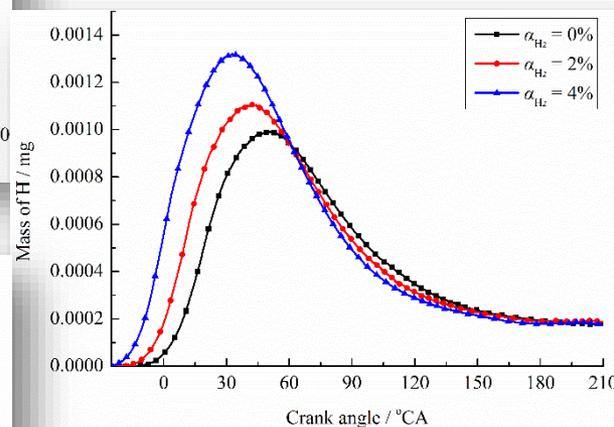
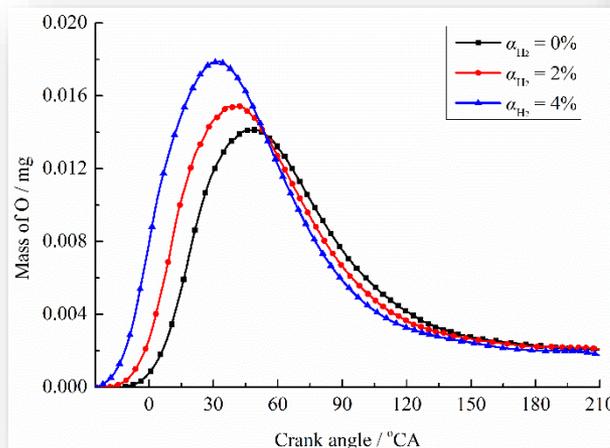
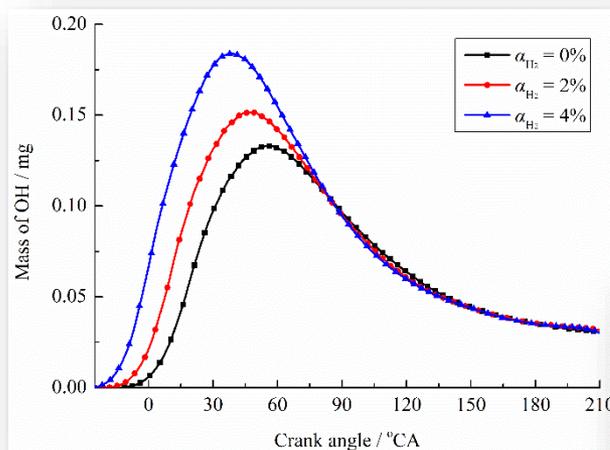


OH基团分布

三、结果与讨论

3.2 燃烧过程

- 随着掺氢体积分数的增加 **OH**，**H**和**O**基团的**浓度**均**增加**且**峰值提前**（说明**燃烧**进程被**加快**）；
- OH**，**H**和**O**基团拥有不成对的电子且**反应强度高**，是链式反应的**主要驱动力**，掺氢后活性自由基浓度的升高加快了混合气的燃烧进程。



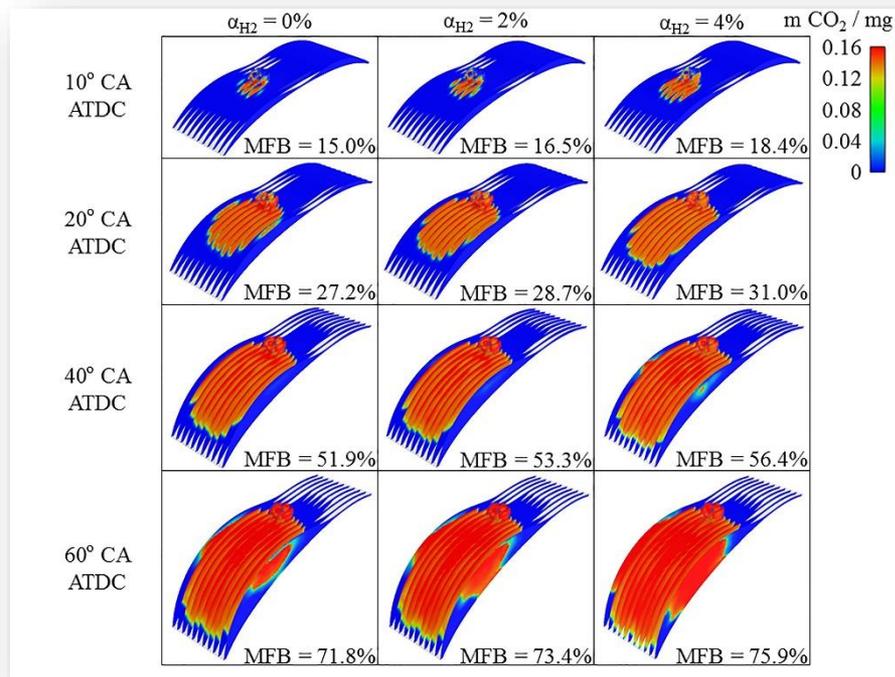
OH，H和O基团质量变化曲线

三、结果与讨论

■ 3.2 燃烧过程

不同掺氢体积分数下CO₂的质量分布特性

- **相同时刻**，**已燃区的容积**与已燃气体质量分数（**MFB**）随着**掺氢分数**的增加而**增加**；
- ◆ 掺氢**加快了燃烧进程**，因此火焰传播速度也提高。
- **已燃区**主要分布在燃烧室的**前端**；
- **燃烧室尾端**的**未燃混合气**直到被推入到容积较大区域后也未完全燃烧；
- ◆ 受转子机缸内**主流流场**的影响，与转子旋转**方向相同**的火焰传播过程被**促进**，**反之**则被**抑制**；
- **解决**燃烧室尾端**狭长区域未燃混合气**的问题是**提高转子机性能的关键**。



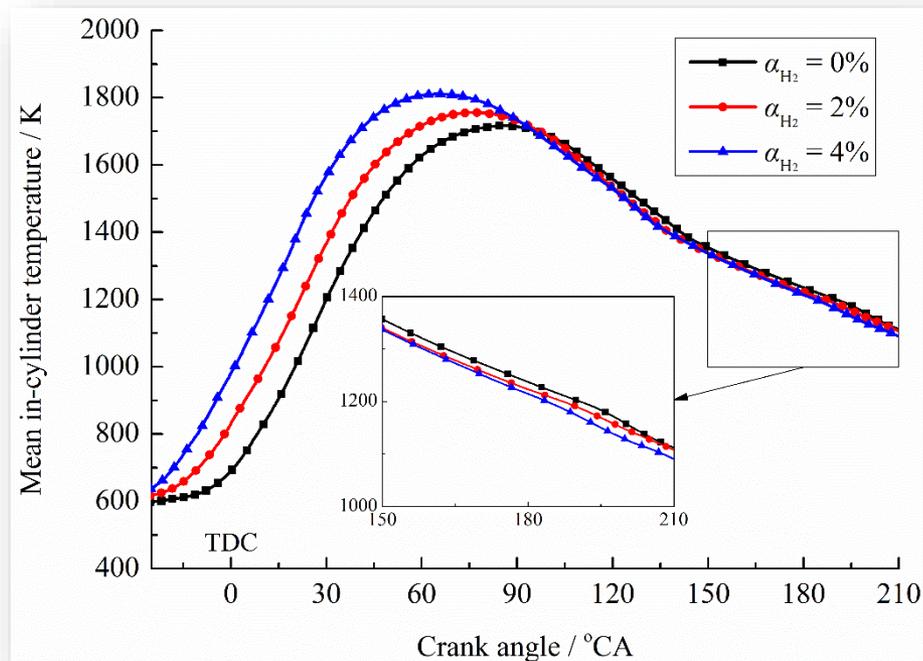
CO₂分布图

三、结果与讨论

■ 3.2 燃烧过程

不同掺氢体积分数下，缸内平均温度随转轴转角的变化规律：

- 缸内**温度峰值**显著**提高**且温度峰值对应**曲轴转角提前**；与原机条件下相比，掺氢**2%和4%**后，缸内峰值压力分别提高了**9.1%和13.7%**；
- ◆ 掺氢后**加快的燃烧进程**使得混合气燃烧**放热更加集中**；
- 掺氢后**排气门打开时刻**的缸内平均**温度降低**；
- ◆ **掺氢**后加快的燃烧进程**提高**了转子机**热效率**，进而有效**降低**了**后燃**。



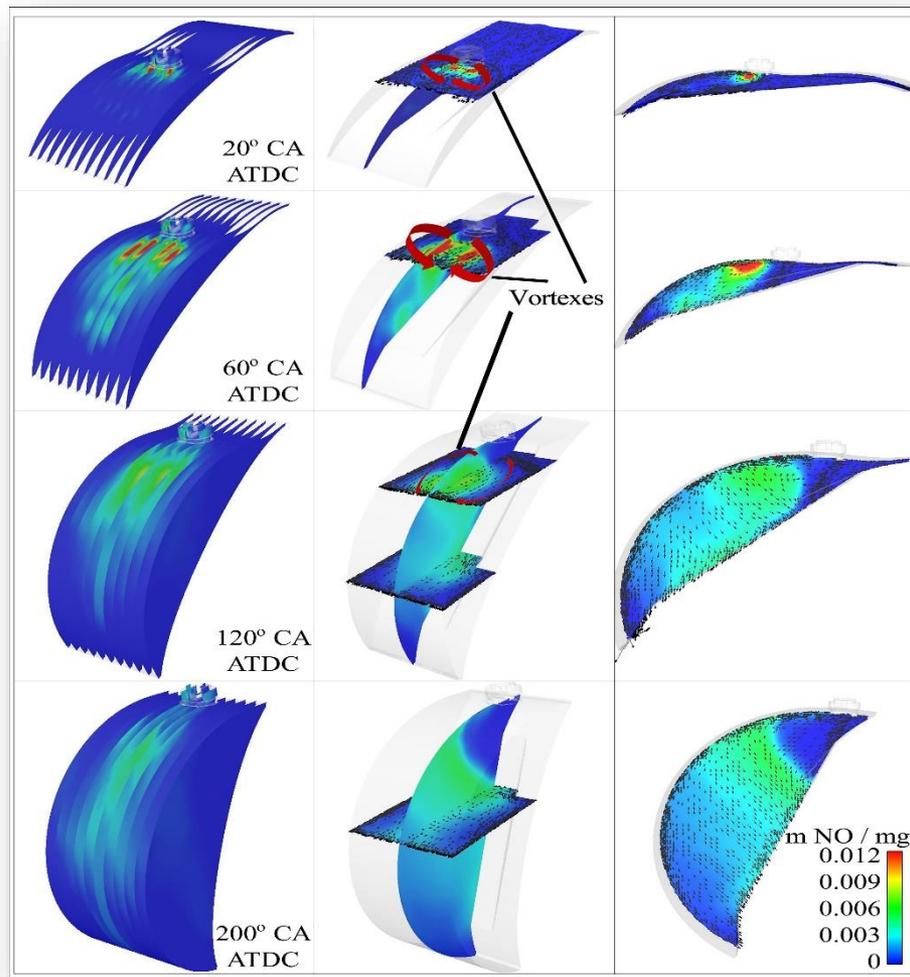
温度曲线

三、结果与讨论

3.3 排放特性

缸内NO排放的分布特性：

- **NO**主要分布在已燃区且在**火花塞附近**；
- ◆ 已燃区**温度较高**，而且燃烧室**尾部的火焰传播过程被主流流场抑制**，**持续的燃烧**使得火花塞附近的**温度较高**；
- **火花塞附近**的区域形成了**两个NO分布浓区**；
- ◆ 缸内主流流场撞击气缸壁后，形成了**两个方向相反的涡团**，对NO的**富集**作用，同时，涡团内的气体与氮气**继续反应生成NO**。
- 随着曲轴**转角**的进一步**增加**，缸内**容积增大**，相向的**涡团**逐渐**耗散**且平均**温度降低**，**NO浓度降低**。



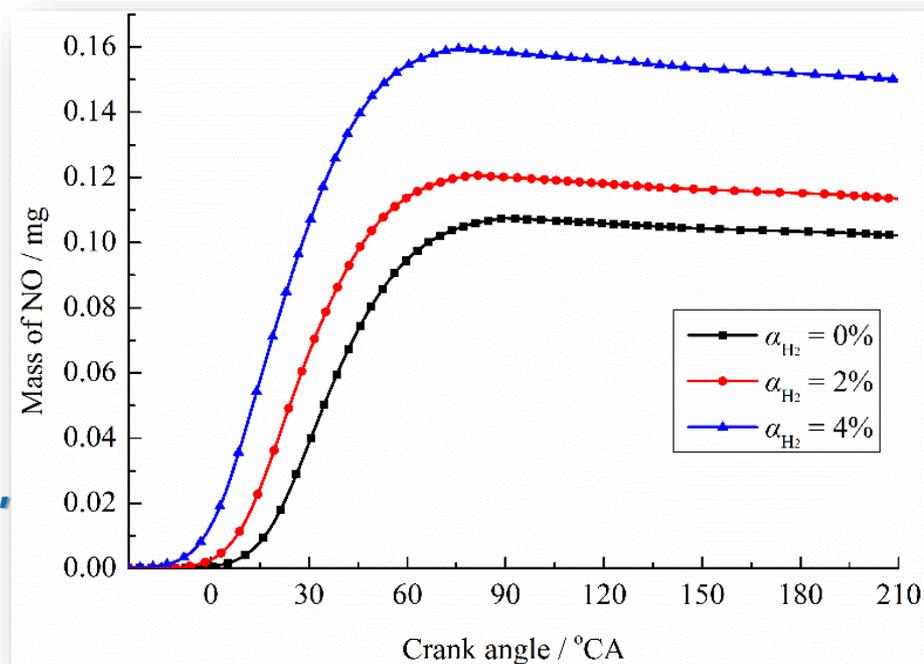
NO分布特性

三、结果与讨论

■ 3.3 排放特性

缸内NO质量随曲轴转角变化的曲线：

- **掺氢分数的提高**，NO质量的峰值显著升高；
- ◆ **氢气较高的燃烧温度**增加了缸内的平均温度；
- **排气门打开时刻**，掺氢**0%、2%和4%**条件下，NO的质量分别为**0.102、0.113和0.148 mg**，可见掺氢会提高汽油转子机的NO排放。



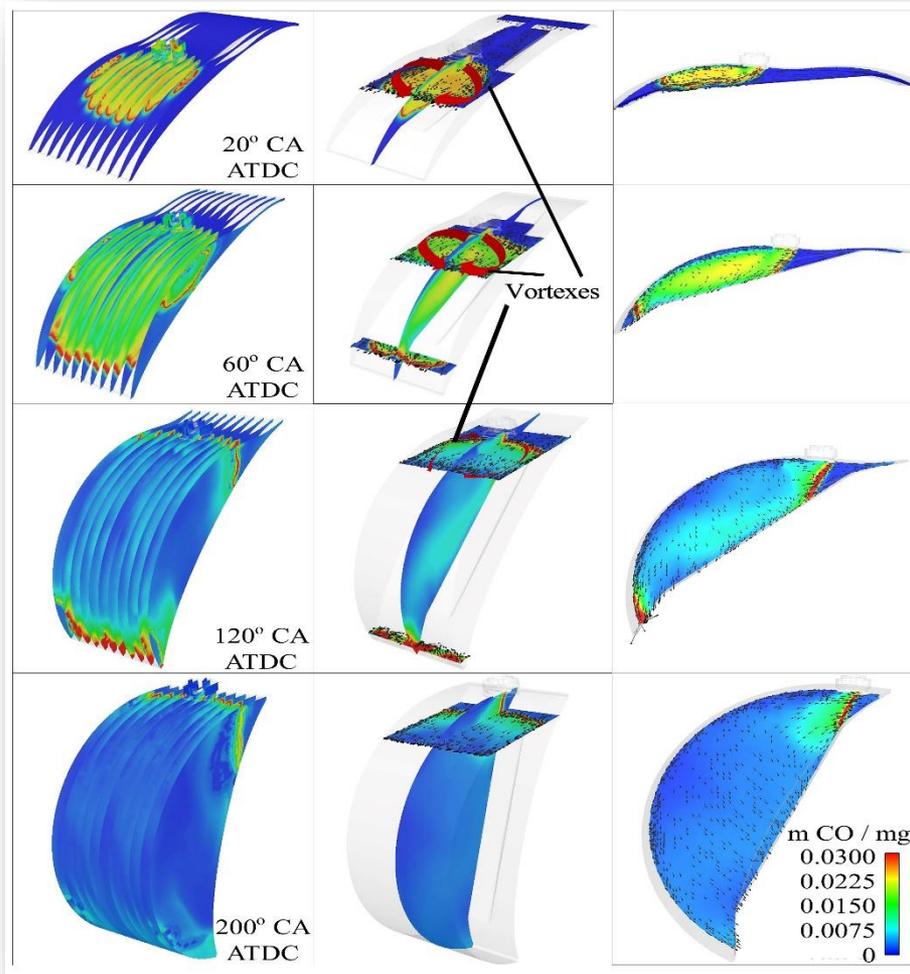
NO质量曲线

三、结果与讨论

3.3 排放特性

缸内CO排放的分布特性：

- CO主要分布在**火焰封面上**；
- ◆ CO是碳氢燃料燃烧过程中的**中间产物**，因此分布在反应剧烈的火焰面上；
- CO在已燃区的涡团中仅有一个**较高的浓区**；
- ◆ CO在已燃区中会**进一步与O反应**并放热，使得CO在涡团中**富集的同时也在被消耗**；
- 200 °CA ATDC时刻，较高的CO分布在**燃烧室尾端**；
- ◆ 燃烧室尾端未燃的**混合气**被**持续**推入到火焰中**燃烧**。



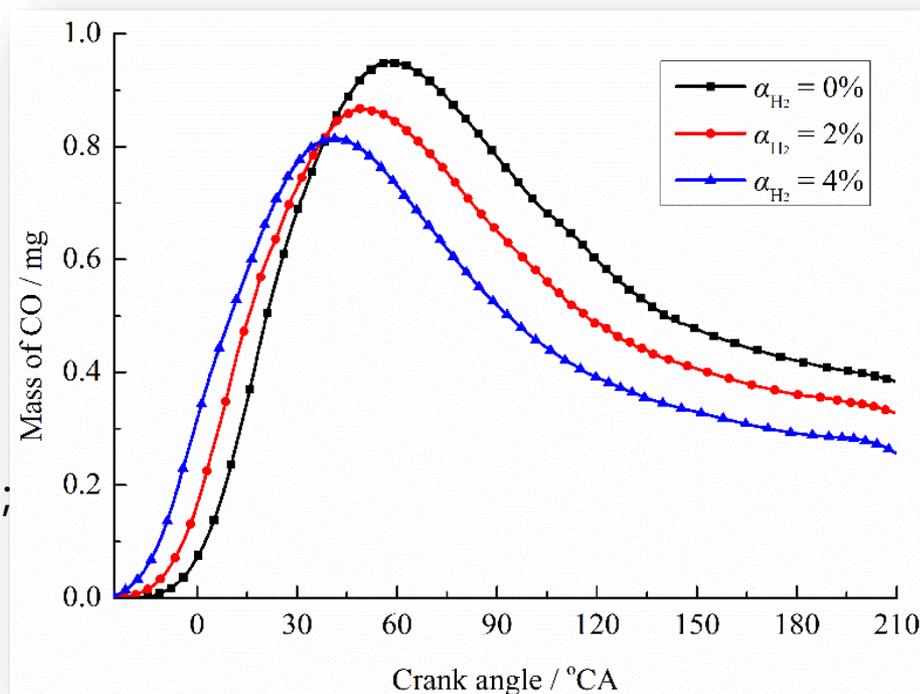
CO分布特性

三、结果与讨论

■ 3.3 排放特性

缸内CO质量随曲轴转角变化的曲线：

- 掺氢后CO质量的**峰值显著降低**；
- ◆ 氢气的掺混挤占了进气道中的空气体积，使得进入气缸的**含碳燃料减少**；
- ◆ R3是CO氧化的主导反应路径，掺氢后OH浓度的**升高促进了CO的进一步氧化**；
R3 : $\text{CO} + \text{OH} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}$
- 随着掺氢分数的升高，在**燃烧初期CO生成较多**而在**燃烧中后期CO质量显著降低**；
- ◆ 掺氢后**加快的燃烧进程**促进了CO的进一步氧化，同时，氢气**更短的淬息距离**也一定程度上减少了燃烧室尾部的不完全燃烧；
- 排气门打开时刻，**与原机相比**，掺混**2%和4%**氢气后的CO排放量分别**降低了14.7%和33.0%**。



CO质量曲线

四、主要结论

- **进气**气流进入到燃烧室后，撞击在燃烧室下端面并形成**两个反向的涡团**。随着燃烧室容积的增加两个涡团的**半径增大且涡度逐渐降低**。在压缩过程中，燃烧室容积的迅速降低使得尾部区域的**涡团A逐渐耗散**，中部区域的**涡团B被挤入到燃烧室前端**。在TDC附近，缸内形成与转子运动方向相同的主流流场，**掺氢分数越大主流平均流速越高**，从掺氢分数0%的24.8 m/s升高到掺氢分数4%的28.3 m/s。
- 由于**主流流场的存在**，火焰传播方向与转子运动**方向相同的燃烧被促进，反之则被抑制**。进而导致在燃烧室尾部的**狭长区域存在一定量的未燃混合气**，直到排气门打开也为完全燃烧。掺氢后**OH, H和O基团浓度的升高加快了燃烧进程**，使得缸内混合燃料发热更加集中，**缸内平均温度和压力均显著提高**。与原机相比，掺氢2%和4%缸内峰值压力分别升高9.1%和13.7%。掺氢后热效率的升高也有有效的降低转子机后燃。
- **NO主要分布在已燃区中火花塞附近**温度较高的区域。同时，由于**已燃区中已燃气体与氮气持续反应**并生成NO，以及主流流场撞击气缸壁形成**方向相反涡团的富集作用**，在燃烧室中形成了**两个NO分布浓区**。随着曲轴转角增加，NO浓区体积增大。直到燃烧室容积快速增加，缸内温度降低以及涡团耗散，NO浓度逐渐降低。**CO主要分布在燃烧剧烈的火焰锋面附近**，且同样**受到涡团的作用产生浓区**，但由于CO在已燃区中**进一步氧化**，因此**仅有一个CO浓区**在已燃区中形成。在**排气门即将打开时刻**，燃烧室尾部区域**未完全燃烧的混合气继续燃烧**，导致较高质量的CO分布在此区域。与原机相比，掺氢4%后**NO排放升高45.1%**，**CO排放降低33%**。
- 通过本文的研究内容可以看出，**掺氢可以一定程度上改善汽油转子机燃烧与排放特性**，也证明了**高火焰速度的燃料更适用于转子机的使用**。但是，由于转子机燃烧室尾部狭长区域的未燃混合气难以完全燃烧，导致其高排放和高油耗问题依然存在，因此在**掺氢的基础上，可考虑优进气道结构，燃烧室凹坑结构，化点火策略及喷射策略来进一步提高转子机性能**。

Thank You!

欢迎批评指正！



关注微信公众号，推送年会报告早知道