

不同供氢方式对 X 型转子发动机 性能影响的仿真研究

耿琪¹, 王学德¹, 杨正浩¹, 杜洋², 何光宇¹

(1. 空军工程大学等离子体动力学重点实验室, 710038, 西安;

2. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了进一步提升新型动力装置 X 型转子发动机的性能, 采用掺氢燃烧的方式改善发动机的燃烧过程。利用数值仿真建立并验证了 XMv3 型转子机的掺氢 CFD 模型, 选择了进气道掺氢和燃烧室直喷掺氢两种供氢方式进行对比, 探究了掺氢对缸内流动、燃烧和排放过程的影响, 揭示了掺氢比例以及不同供氢方式对缸内湍动能和涡度、自由基团、缸温和缸压以及 CO 和 NO_x 排放的影响规律。结果表明: 在进气过程中, 缸内形成了伴随着两个涡团的主流场, 将气体带向燃烧室的两侧, 充分混合空气与燃料, 有利于燃烧过程; 掺氢后, 燃烧区域向燃烧室两侧狭缝扩展, 改善了燃烧性能, 且直喷掺氢的效果要明显优于气道掺氢的; 同时, 由于采取高当量比的燃烧策略和掺氢提高了缸内温度, 分别使得 CO 和 NO_x 的排放量明显增加; 相比未掺氢的情况, 掺氢能量分数为 5% 时, 气道掺氢和直喷掺氢的缸压峰值分别提高了 16.71% 和 43.15%。本研究可为 X 型转子发动机供氢方式的设计提供参考依据。

关键词: X 型转子发动机; 直喷掺氢; 气道掺氢; 燃烧

中图分类号: TK45 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202302009 **文章编号:** 0253-987X(2023)02-0078-12

Performance Numerical Analysis of X-Type Rotary Engine under Different Hydrogen Supply Methods

GENG Qi¹, WANG Xuede¹, YANG Zhenghao¹, DU Yang², HE Guangyu¹

(1. Science and Technology on Plasma Dynamics Laboratory, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To further improve the performance of X-type rotary engine (XRE), a new-type power unit, hydrogen-blended combustion is adopted to enhance the engine's combustion process. Firstly, by numerical simulation, a CFD model of the XMv3 engine with hydrogen-blending is established and verified. On this basis, two hydrogen supply modes, port injection (PI) at intake and direct injection (DI) at combustion chamber, are selected for comparison to investigate the influence of hydrogen-blending on in-cylinder flow, combustion and emission process, thus revealing effects of hydrogen contents and hydrogen supply modes on in-cylinder turbulent kinetic energy and vorticity, free radicals, in-cylinder temperature and pressure, as well as CO and NO_x emissions. The results show that a main flow field accompanied by two vortexes is formed in the

收稿日期: 2022-05-22。 作者简介: 耿琪(1998—), 男, 硕士生; 何光宇(通信作者), 男, 副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61873351); 装备预研重点实验室开放基金资助项目(6142202210201)。

网络出版时间: 2022-09-14

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220913.1448.002.html>

cylinder during the intake process and the gas is brought to both sides of the combustion chamber for mixing with air and fuel, thus facilitating the combustion. Upon hydrogen-blending, the combustion area expands to the slits on both sides of the combustion chamber so that the combustion performance is improved. It is also shown that hydrogen DI yields better performance than hydrogen PI. Meanwhile, the combustion strategy with a high equivalent ratio and the increased in-cylinder temperature due to hydrogen-blending lead to significant increase of CO and NO_x emissions, respectively. Compared with combustion without hydrogen, the peak cylinder pressure is increased by 16.71% and 43.15% for PI and DI respectively with a hydrogen-blending energy fraction of 5%. This study provides a reference for the hydrogen supply design of XRE.

Keywords: X-type rotary engine; hydrogen direct injection; hydrogen port injection; combustion

三角转子发动机是一种旋转式的内燃机,与传统往复式的活塞发动机相比,转子发动机具有结构紧凑、噪声低、功重比高等独特优势,但同时存在油耗高、密封润滑困难、难以冷却等一些缺陷^[1-3]。X型转子发动机是一种特殊形式的新型转子发动机,同样拥有上述三角转子发动机的优点。在结构设计上,它有着新颖的结构特点:将三角转子发动机的转子型线与缸体型线倒置,以外旋轮线作为转子型线,以外包络线作为缸体型线。在热力循环上,它借鉴了狄塞尔循环、奥托循环、阿特金森循环以及朗肯循环的优缺点,采用高效混合循环。这些设计使得X型转子发动机具有高热效率、高功重比以及高可靠性的特点,能够解决上述三角转子发动机难以克服的问题^[4-6]。因此,X型转子发动机作为小型动力,在汽车增程器、小型发电机、无人机等上拥有着广阔的应用前景。

目前,美国 Liquid Piston 公司研发了3款X型转子发动机^[7-9]——70 mL 排量 XMv3 型点燃式转子发动机、130 mL 排量 X1 型压燃式转子发动机、750 mL 排量 X4 型压燃式转子发动机,已经在汽油和柴油燃烧上做了大量研究。但是,他们对X型转子机的研究仅进行了化石能源燃烧的一些验证性实验和预测模型的理论计算,对于氢气-汽油混合燃料的燃烧方面仍存在着大量的空白。

氢气作为一种清洁、高效、绿色的新能源,拥有着极高的火焰速度,较快扩散速度,宽泛的燃烧极限等优点^[10-11],很适合在高速运转的转子机中燃烧。为了进一步提高X型转子机的性能,掺氢可以作为提高其燃烧性能的有效措施之一^[12]。在掺氢对三角转子发动机性能影响的研究方面,Amrouche等^[13-14]研究了掺氢对汽油转子机燃烧与排放特性的影响,结果表明:掺氢可以加快燃烧进程,促进缸内混合气的完全燃烧。Fan等^[15-16]基于 Fluent 软

件对掺氢天然气转子机缸内混合气运动及燃烧过程进行了研究,结果表明:提前氢气的喷射时刻可以获得更均质的混合气分布。Yang等^[17-19]建立了ZF160型汽油转子机的掺氢数值仿真模型,探究了不同掺氢策略对于转子机缸内流动、燃烧以及污染物生成的影响。Chen等^[20-21]建立了氢气直喷转子发动机的三维动态仿真模型,研究了进气方式和喷氢时间对气体流动的影响。

但是,他们的研究关注的是掺氢对传统的三角转子机的影响。X型转子机由于燃烧室的结构以及循环方式与传统的三角转子机有很大不同,在流动和燃烧方面也会存在很大差异,因此很有必要对X型转子机进行掺氢燃烧的性能研究。为了探究不同供氢方式下,X型转子机的流动和燃烧性能,本文建立了XMv3型转子机的CFD模型,选择气道掺氢和燃烧室直喷掺氢两种方式进行对比,来改善X型转子机的燃烧性能。

1 仿真模型的建立和验证

1.1 物理模型的建立

X型转子发动机基本的三维结构如图1(a)所示,主要由椭圆形转子、类三角形缸体、前后端盖、3个排气道、一个进气道等组成。X型转子发动机的示意如图1(b)所示,燃烧室由固定的1/4球状区域和随转子转动而变化的区域两部分构成,其中火花塞位于1/4球状区域的顶部。以每720°(曲轴转角,后文同)为一个做功循环,在上止点位置时,燃烧室的容积达到最小。该发动机的进排气方式为:可燃混合气从进气道进入转子内腔后通入缸体中;已燃废气通过转子周向排气口通入转子内腔与冷却气体混合,通过前端盖的三个排气道排出发动机。本文所建立的CFD模型以XMv3型发动机为研究对象,其基本的三维几何参数如表1所示。

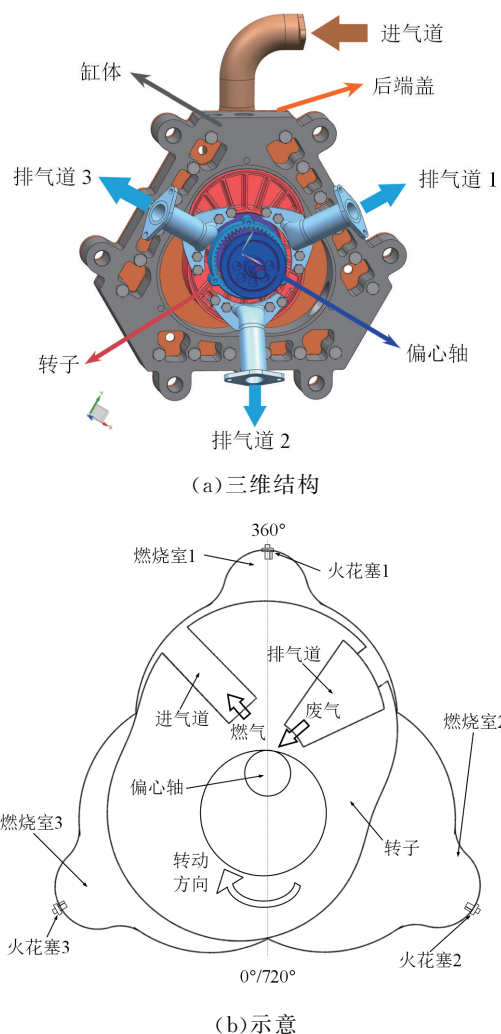


图 1 X 型转子发动机的三维结构和示意

Fig. 1 Geometry structure and schematic of the X-type rotary engine

表 1 XMv3 型发动机的主要几何参数^[5]

Table 1 Main structural parameters of XMv3 rotary engine

参数	数值	参数	数值
创成半径 R/mm	41	冷却方式	水冷
偏心距 e/mm	6	点火方式	火花塞
转子宽度 B/mm	18.5	上止点位置/ $^\circ$	120
平移距 a/mm	0.7	进气门关闭相位/ $^\circ$	585
几何压缩比	11:1	排气门开启相位/ $^\circ$	161
单个燃烧室排量/ mL	23		

1.2 边界条件以及数学模型的确定

在划分网格时,将各个区域的表面网格划分为进气道、排气道、3 个燃烧室共 5 个区域,同时采用软件的密封功能分别对转子的上下两个端面与缸体上下两端面密封、缸体周向密封片与转子壁面密封。

设置基础网格尺寸为 3 mm,同时打开自适应网格加密的设置,对计算区域的速度、温度与组分采用最大细化等级为 3 的加密。X 型转子机计算初始条件的具体参数如表 2。

表 2 计算初始条件^[5]

Table 2 Calculated initial conditions

参数	数值	参数	数值
发动机转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	9 000	进气压力/ kPa	103
当量比	1.18	冷却气体流量/ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	171
点火提前角/ $^\circ$	30	燃料	汽油,氢气-汽油

对于湍流模型的选取,由于大涡模拟对网格精度和计算资源的要求很高,因此本文采用 RNG $k-\epsilon$ 模型来提高高速流动的计算准确性和旋流流动的精度^[22]。对于壁面换热模型的选取,Liquid Piston 公司将实验数据与不同换热模型仿真结果进行对比,验证了 Han-Reitz 模型用于 X 型转子发动机壁面换热计算的准确性^[6],因此本文采用 Han-Reitz 模型作为壁面换热模型。对于燃烧模型的选取,本文采用较易调整的 SAGE 燃烧模型进行燃烧过程的数值仿真。

对于氢气-汽油燃料,采用 Liu 等^[23]提出的异辛烷 IC_8H_{18} 骨架反应机理,该机理包含 48 组分与 152 基元反应,已广泛用于汽油燃料在发动机缸内燃烧的三维数值仿真过程中。同时,该 PRF 化学机理也包含详细的氢气氧化机理,可以用于氢气-汽油燃烧特性的数值模拟研究。

点火模型采用直接添加点火能量的方式模拟火花塞的点火工作过程。在 3 个燃烧室点火位置设置直径为 0.5 mm 的球形火核,分两个时段(点火时刻至点火时刻后 0.5° ,点火时刻至点火时刻后 10°)释放点火能量,给定能量均为 20 mJ。

1.3 网格无关性及模型的验证

为了保证计算结果的准确性和较高的计算效率,对所建立的 CFD 模型进行了网格无关性验证,设置了 4 种燃烧室基本网格尺寸,分别为 2、3、4、5 mm。同时,网格的加密等级与前面所叙述的保持不变,并在表 2 所给定的参数且在不掺氢的条件下,进行转子机工作过程的数值计算。

图 2 给出了不同燃烧室网格尺寸下缸内平均压力随曲轴转角的变化关系。可以看出,随着网格精度的提高,5 mm 内的网格计算结果差异越来越

越小,说明网格无关性得到验证。为了节省计算成本并保持较高的计算精度,本文的数值模拟研究均采用基本网格尺寸为 3 mm 并带有自适应加密的网格。

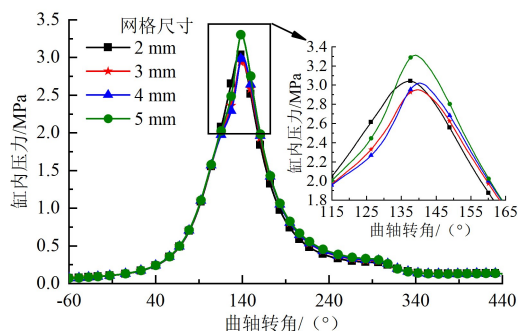


图 2 不同网格尺寸下的缸内平均压力

Fig. 2 In-cylinder mean pressure under different grid sizes

为了验证 CFD 模型的准确性,进行了表 2 工况下的汽油燃烧实验,具体见文献[6]。缸内的平均压力变化反映了发动机的进气压缩、燃烧膨胀等重要过程,是验证模型准确性的关键参数。因此,在相同的工况下,对比了转子发动机三维仿真计算结果与实验结果的缸内平均压力,如图 3 所示。可以看出,两者的最大误差小于 10%,峰值压力误差小于 1%,仿真结果和实验结果相差不大,而且仿真得到的缸压压力发展趋势与实验结果吻合。这表明内燃机中的仿真计算是允许的,可以进行下一步的掺氢计算。

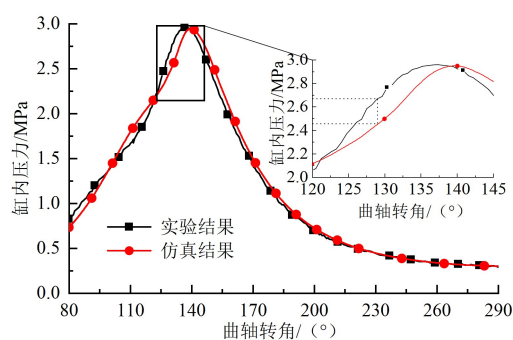


图 3 缸内压力随曲轴转角变化的实验与仿真结果对比

Fig. 3 Comparison between experimental and simulation results of in-cylinder pressure versus crank angle

1.4 供氢方式的确定

内燃机进行氢气-汽油燃烧时,通常采用的供氢方式主要有两种:一种是气道掺氢(PI),即在进气歧

管处直接进行氢气与燃料的预混;另一种供是直喷掺氢(DI),即在发动机缸体某位置打孔安装氢气喷嘴,氢气通过喷嘴直接喷射进缸体内。本文选择这两种供氢方式进行计算,对比仿真后的流动、燃烧以及排放特性。选择掺氢比例是在保持氢气-汽油燃料总当量比不变的情况下,改变氢气的能量分数。在氢气-汽油燃料的单位质量燃料中,设定掺氢能量分数^[19]为

$$\alpha(\text{H}_2) = \frac{m(\text{H}_2)q(\text{H}_2)}{m(\text{IC}_8\text{H}_{18})q(\text{IC}_8\text{H}_{18}) + m(\text{H}_2)q(\text{H}_2)} \times 100\% \quad (1)$$

式中 $q(\text{H}_2) = 120 \text{ MJ/kg}$ 和 $q(\text{IC}_8\text{H}_{18}) = 44 \text{ MJ/kg}$ 分别代表 H_2 和汽油 IC_8H_{18} 的低热值。

转子机掺氢的具体参数如表 3 所示。在直喷掺氢时,通过改变喷射压力和喷射脉宽控制掺氢能量分数。直喷氢气喷孔位置示意图如图 4 所示,在直喷掺氢时,设置 3 个喷嘴的直径为 1 mm,喷嘴位置位于 1/4 球状燃烧室顶部,喷射方向为喷向转子中心位置。

表 3 转子机掺氢的具体参数

Table 3 Specific parameters of hydrogen-blending in engine

参数	数值
气道掺氢的能量分数	3%, 5%
直喷掺氢的能量分数	5%
直喷掺氢的喷嘴数量	3
直喷掺氢时刻对应曲轴转角/(°)	50
直喷掺氢的脉宽/(°)	3, 5
直喷掺氢的喷射压力/Pa	833 333.3

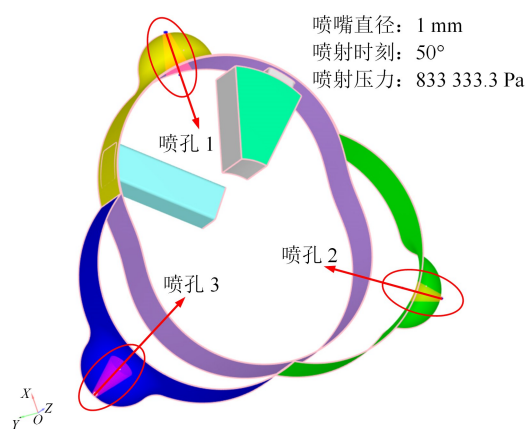


图 4 直喷氢气喷孔位置示意

Fig. 4 Location diagram of hydrogen direct injection hole

2 仿真结果与讨论

2.1 流动分析

不同阶段缸内速度场和流线的分布如图5所示。图中,BTDC、ATDC 分别表示上止点前、上止点后。

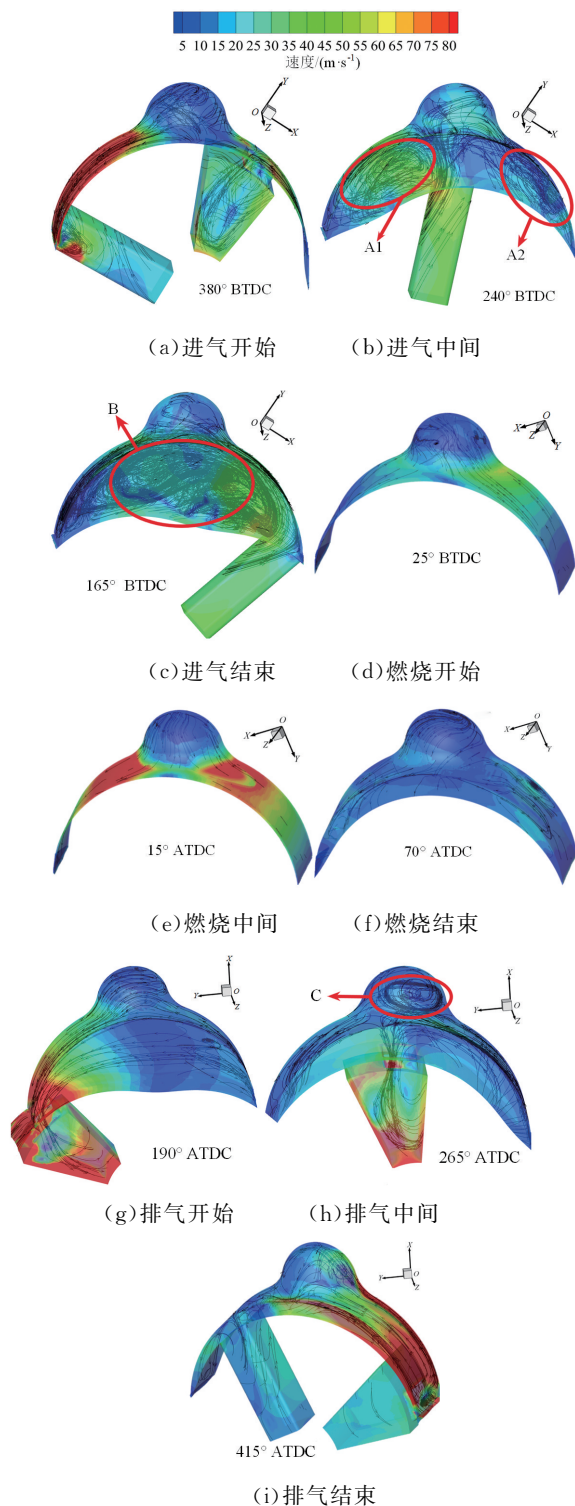


图5 不同阶段缸内速度场和流线的分布

Fig. 5 Distribution of in-cylinder velocity field and streamline under different stage

图5(a)~(c)展示了从进气开始到进气中间再到进气结束的流线和速度场的分布。在进气初始时刻(380° BTDC),进气气流经过进气道通过燃烧室左侧的窄缝流入燃烧室内,此时进气与排气过程同时存在。由于气流在燃烧室左侧窄缝碰撞堆积,因此该处气流速度较大。球状燃烧室内的流线分布较为紊乱,同时流出的气流在排气道内形成滚流。在进气中间时刻(240° BTDC),进气气流在缸体内撞击于燃烧室左侧形成一个大的涡团 A1,剩余气流在燃烧室右侧形成一个较小的、方向相反的涡团 A2,此时进气口全开,进气流量达到最大。同时,左侧涡团 A1 所在区域的速度大于右侧涡团 A2 所在区域的速度。在进气结束时刻(165° BTDC),气流沿着燃烧室的外侧进入,在内部形成一个大的涡团 B。同时,越靠近进气道的区域,速度就越高。

图5(d)~(f)展示了从燃烧开始到燃烧中间再到燃烧结束后的流线和速度场的分布。在燃烧初始时刻(25° BTDC),燃烧室整体速度较低且分布均匀。流线分布较少,主要位于球状燃烧室内。在燃烧中间时刻(15° ATDC),燃烧室两侧狭缝的速度分布较为对称且速度很高,说明此处燃烧较为剧烈。整体流线的分布十分平整且稀少。在燃烧结束后(70° ATDC),燃烧室内速度开始降低,速度分布十分均匀,但流线开始扰动起来。

图5(g)~(i)展示了从排气开始到排气中间再到排气结束的流线和速度场的分布。在排气开始时刻(190° ATDC),气流从燃烧室内经过排气道开始向大气中排放废气,越靠近排气口,速度越高。除少数几个微小涡团外,流线方向都流向排气口。在排气中间时刻(265° ATDC),气流在燃烧室的球状区域内形成一个涡团 C,其余气流都流向排气口。燃烧室内的速度分为较为均匀,排气口处的速度由于气流堆积,速度较高。在排气结束时刻(415° ATDC),此时进排气过程同时存在,流线的分布较为混乱。燃烧室内靠近排气道区域的速度要高于其余区域。

缸内湍动能和涡度可以反映缸内流场的变化情况,是影响火焰传播的关键因素之一^[24]。湍动能 k 和涡度 ω 主要与缸内气流速度有关,计算式为

$$k = \frac{3}{2} (UI)^2 \quad (2)$$

$$I = \frac{u'}{U} = \frac{\sqrt{(v_x'^2 + v_y'^2 + v_z'^2)/3}}{\sqrt{U_x + U_y + U_z}} \quad (3)$$

$$\omega = \left(\frac{\partial U_z}{\partial y} - \frac{\partial U_y}{\partial z} \right) \mathbf{i} + \left(\frac{\partial U_x}{\partial z} - \frac{\partial U_z}{\partial x} \right) \mathbf{j} + \left(\frac{\partial U_y}{\partial x} - \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) \mathbf{k} \quad (4)$$

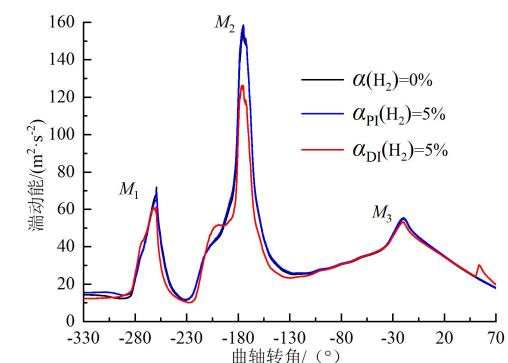
式中: I 为气流的湍流强度; U 为气流的平均速度; u' 为湍流脉动速度的均方根。

图6分别给出了不同供氢方式下缸内平均湍动能和涡度随着曲轴转角的变化。以未掺氢的为例,可以发现缸内平均湍动能和涡度变化趋势相同,大体上为先增加后减少,有 M_1 、 M_2 、 M_3 共3个峰值,分别位于进气开始阶段、进气中间、进气结束后。在进气开始时,高速的气流从进气口进入燃烧室内的夹缝中,夹缝处容积小且较为堵塞,速度较高,气流扰动大,平均湍动能和涡度有了小幅度提高,形成峰值 M_1 ;在进气中期,燃烧室内出现了两个大涡团A1和A2,形成了强烈的气流扰动,平均湍动能和涡度急速升高,达到最大 M_2 ,然后涡团A1和A2逐渐破碎,融为一个体积更大但强度有所降低的涡团B,平均湍动能和涡度开始降低;在进气结束后,涡团B开始耗散消失,平均湍动能和涡度有了小幅度的升高,直到 M_2 ,随后下降。另外,对比发现,无论是气道掺氢还是直喷掺氢对整个进气过程中的缸内平均湍动能和涡度变化趋势的影响都不是很大。由于直喷掺氢在未开始喷氢前,缸内气体质量少于气道掺氢和

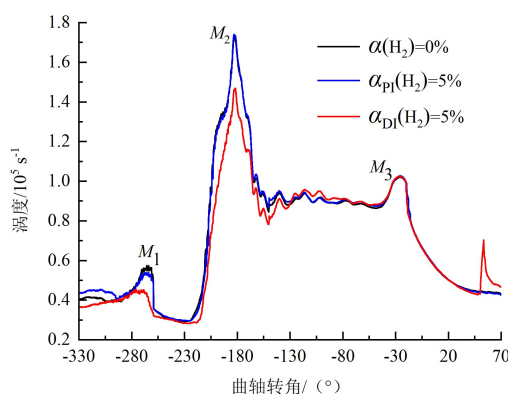
未掺氢,因此在 M_2 处气流扰动略小,造成此处峰值相对较低。

从X型转子机缸内进排气以及燃烧时的气流运动过程可以看出,气流在进入燃烧室的过程中形成了较强涡团,该涡团有助于在转子机运行过程中燃料与空气的快速混合,进而形成更均质的混合气。同时发现,气流会在转子和缸体形成的两侧缝隙处堆积,造成该处的速度较高,可能存在燃烧不完全现象。因此,需要通过掺氢的方式,改变燃烧前缸内涡团的分布情况,提高缸内气流的湍流强度,增加火焰传播距离,扩大燃烧极限,从而改善X型转子机的缸内燃烧性能。

喷氢前,不同阶段下缸内变化无明显差异;喷氢后,直喷掺氢的缸内变化较为明显。为此,进行了喷氢过程中,气道掺氢和直喷掺氢的缸内速度场、涡度场以及流线的分布对比,结果如图7所示。可以看出,在喷氢过程中,由于气道掺氢没有进行喷射,流场变化不大,在燃烧室球状顶部,流线汇集形成了一个涡团D。与气道掺氢相对比,发现直喷掺氢在喷氢中间时刻的流场变化十分明显,喷射氢气能把涡团D不断地吹向燃烧室左侧,逐渐耗散破碎。同时,气流迅速向喷嘴直射的区域汇集,在燃烧室球状的中间区域形成一个比较紊乱的涡团E。



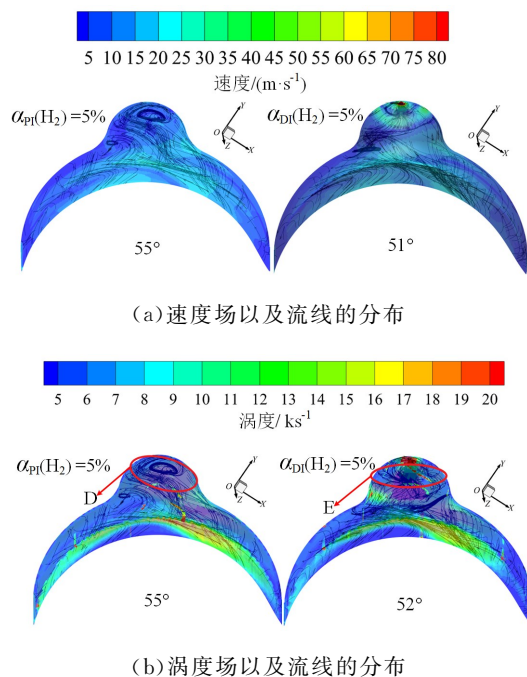
(a) 平均湍动能



(b) 平均涡度

图6 不同供氢方式下缸内平均湍动能和涡度的变化

Fig. 6 Variation of in-cylinder mean turbulent kinetic energy and vorticity versus crank angle under different hydrogen supply methods



(b) 涡度场以及流线的分布

图7 喷氢阶段缸内速度场和涡度场以及流线的分布

Fig. 7 Distribution of in-cylinder velocity and vorticity field and streamline under H_2 DI stage

对比气道掺氢和直喷掺氢的缸内速度场可以发现:在喷射时间内,气道掺氢的燃烧室内整体速度较低且分布均匀;直喷掺氢较气道掺氢在喷嘴位置以及1/4球状燃烧室顶部和中间的速度场有了一定的提高。对比缸内涡度场发现,气道掺氢情况下,在1/4球状燃烧室靠近下端面处存在涡团D,此处涡度较高。直喷掺氢情况下,由于喷嘴处扰动过大,1/4球状燃烧室中间处存在涡团E,因此这两个区域的涡度较高。可以发现,在喷氢后,直喷掺氢显著增强了缸内的气流扰动,改变了涡团的分布。这些涡团将会对氢气的分布会有显著影响,从而影响后续火焰的传播过程。

2.2 燃烧分析

在燃烧阶段,缸内氢气与汽油混合将会影响发

动机的燃烧。为了观察喷氢对氢气分布的影响,图8给出了不同转角下气道掺氢和直喷掺氢缸内氢气的分布情况。可以看出:气道掺氢的氢气呈现为均匀分布,且质量较小,在燃烧室顶部的氢气质量略有减少。直喷掺氢的氢气主要在喷氢后(55°)开始扩散,逐步扩散至燃烧室靠近转子的区域(底部),并在此处堆积。在点火时(120°),气道掺氢情况下首先在1/4球状燃烧室中心处开始燃烧,直喷掺氢情况下首先在燃烧室底部开始燃烧,这是因为这两处区域的氢气质量明显降低。由此发现,受喷射时缸内涡团的影响,直喷掺氢情况下缸内气流会把氢气富集在一个区域,相对气道掺氢情况下氢气分布更加集中。因此,造成了点火时燃烧区域的差异,影响了燃烧速度以及燃烧区域的分布。

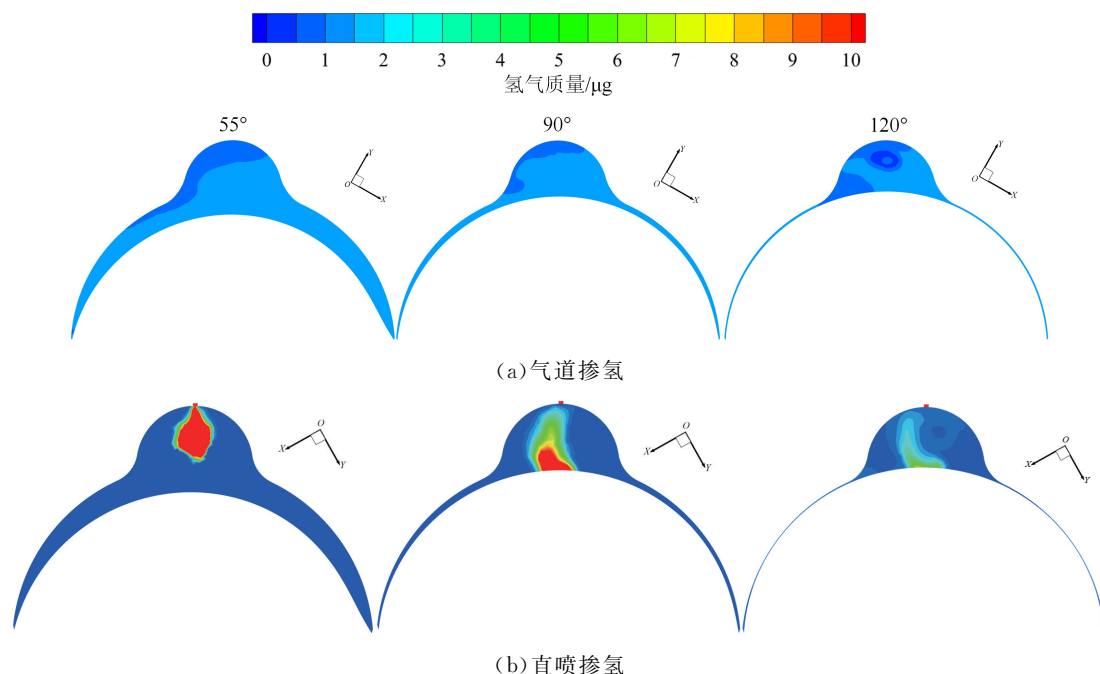


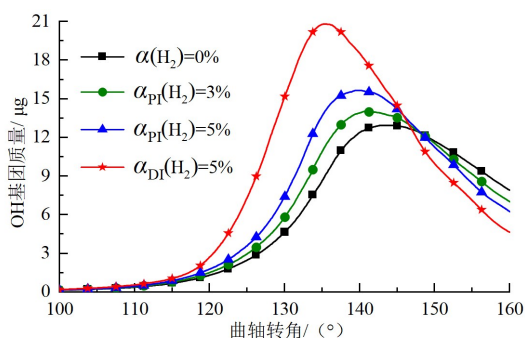
图8 在喷氢阶段缸内氢气质量的变化

Fig. 8 Movement of in-cylinder H_2 mass under H_2 DI stage

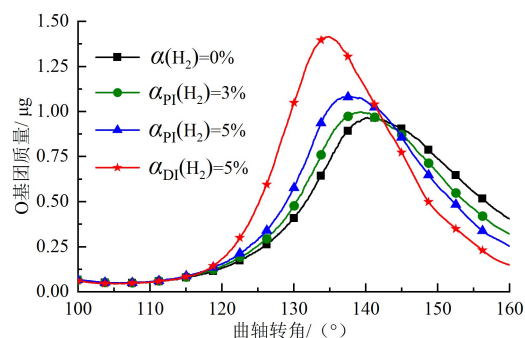
在燃烧的产物中,OH、O和H基团拥有不成对的电子且反应强度高,是整个燃烧过程重要的中间产物。这些基团作为链式反应的主要驱动力,可以反映燃烧过程的剧烈程度^[25]。图9给出了不同供氢方式下,OH、O、H基团质量随曲轴转角的变化曲线。可以看出,在燃烧的初期阶段(100°~110°),不同供氢方式下OH、H、O基团质量相差不大。这说明在燃烧初期,掺氢对燃烧过程影响不是很大。主要原因是此时处于点火阶段,燃烧过程主要由火花塞的点火能量决定,且火焰受到主流流场的影响较小,所以自由基的质量变化不明显。

在110°之后,OH、H和O基团质量有明显的增加,且掺氢能量分数越高,增加的就越多,峰值就越高,同时峰值对应的曲轴转角有所提前。与气道喷氢相比,直喷掺氢自由基的质量增加量更多,角度提前得更快;在掺氢能量分数为5%时,直喷掺氢的OH、H和O基团质量峰值比气道掺氢的分别增加了32.9%、30.56%、76.98%。这说明掺氢可以促进自由基化学反应的正向进行,生成更多的自由基,加快汽油的消耗速度,使得燃烧放热增强且角度提前,提高燃烧速度。同时,掺氢能量分数越高,汽油的燃烧速度就越快。在相同掺氢能量分数下,

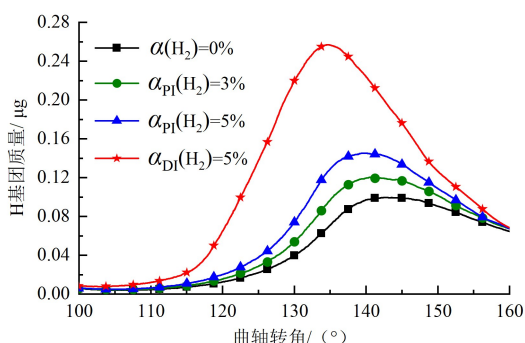
直喷掺氢的燃烧速度要显著大于气道掺氢的,即掺氢有利于X型转子机燃料利用率的提高。



(a) OH 基团



(b) O 基团

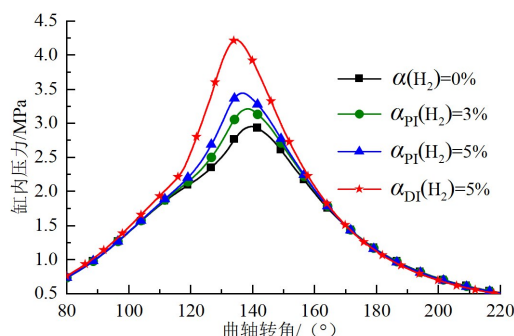


(c) H 基团

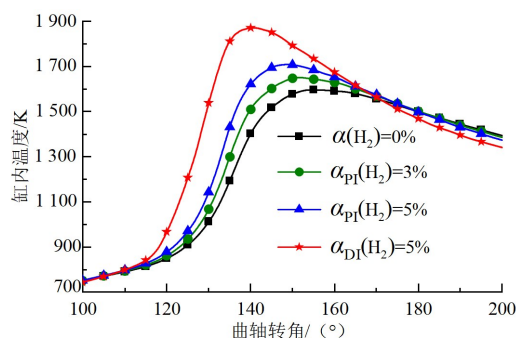
图9 不同供氢方式下OH、O、H基团随曲轴转角的变化
Fig. 9 Mass of OH, O and H radicals versus crank angle under H₂ PI and DI stage

图10给出了不同供氢方式下缸内平均压力和温度随曲轴转角的变化曲线。可以看出,随着掺氢能量分数的增加,缸内平均压力和温度快速升高,缸压和缸温的峰值增加且峰值对应的曲轴转角提前。这是因为氢气的掺混加快了燃烧进程,混合气的放热过程更快且更为集中。同时,掺氢能量分数越高,加速效果越显著。在掺氢能量分数为5%时,直喷掺氢的缸压和缸温峰值和升高的速度都显著大于气道掺氢的。对比计算结果发现,此时直喷掺氢的缸压和缸温峰值比气道掺氢的分别提高了22.64%和

9.52%,缸压和缸温峰值对应的曲轴转角分别提前了2.2°和8.4°。这说明直喷掺氢对燃烧的促进效果明显要好于气道掺氢的。主要原因是直喷掺氢的燃烧速度最快,燃烧剧烈,释放的热量多,压力升高快,从而提高了缸内的压力和温度,改善了发动机的性能。



(a) 平均压力



(b) 平均温度

图10 不同供氢方式下缸内平均压力和温度随曲轴转角的变化

Fig. 10 In-cylinder mean pressure and temperature versus crank angle under H₂ PI and DI stage

为了对比未掺氢、气道掺氢和直喷掺氢缸内燃烧情况的差异性,图11列出了燃烧阶段4个时刻下缸内温度云图的对比。在5° ATDC时刻,未掺氢和气道掺氢的温度云图分布差异不大,未掺氢的燃烧区域位于球状燃烧室中间,气道掺氢的偏向于燃烧室左侧;直喷掺氢的燃烧区域不仅存在燃烧室顶部,由于燃烧室底部有氢气堆积,因此燃烧室底部也开始燃烧。在10° ATDC时刻:未掺氢的燃烧区域在燃烧室中间继续扩大;气道掺氢的燃烧区域不仅在燃烧室左侧扩大,燃烧室右侧也开始燃烧;直喷掺氢的顶部燃烧区域和底部燃烧区域都向燃烧室右侧扩散,燃烧区域逐步连通为一个整体,主体位于燃烧室右侧。在15° ATDC时刻,未掺氢的燃烧区域扩散到燃烧室右边,气道掺氢的燃烧区域在左右两侧分别扩大,直

喷掺氢的燃烧区域从右侧蔓延到燃烧室左侧。在 20° ATDC 时刻,三者的温度云图分布趋于相同,但掺氢

后的燃烧区域在燃烧室狭缝处有了明显的扩展,且直喷掺氢在狭缝的燃烧区域要大于气道掺氢的。

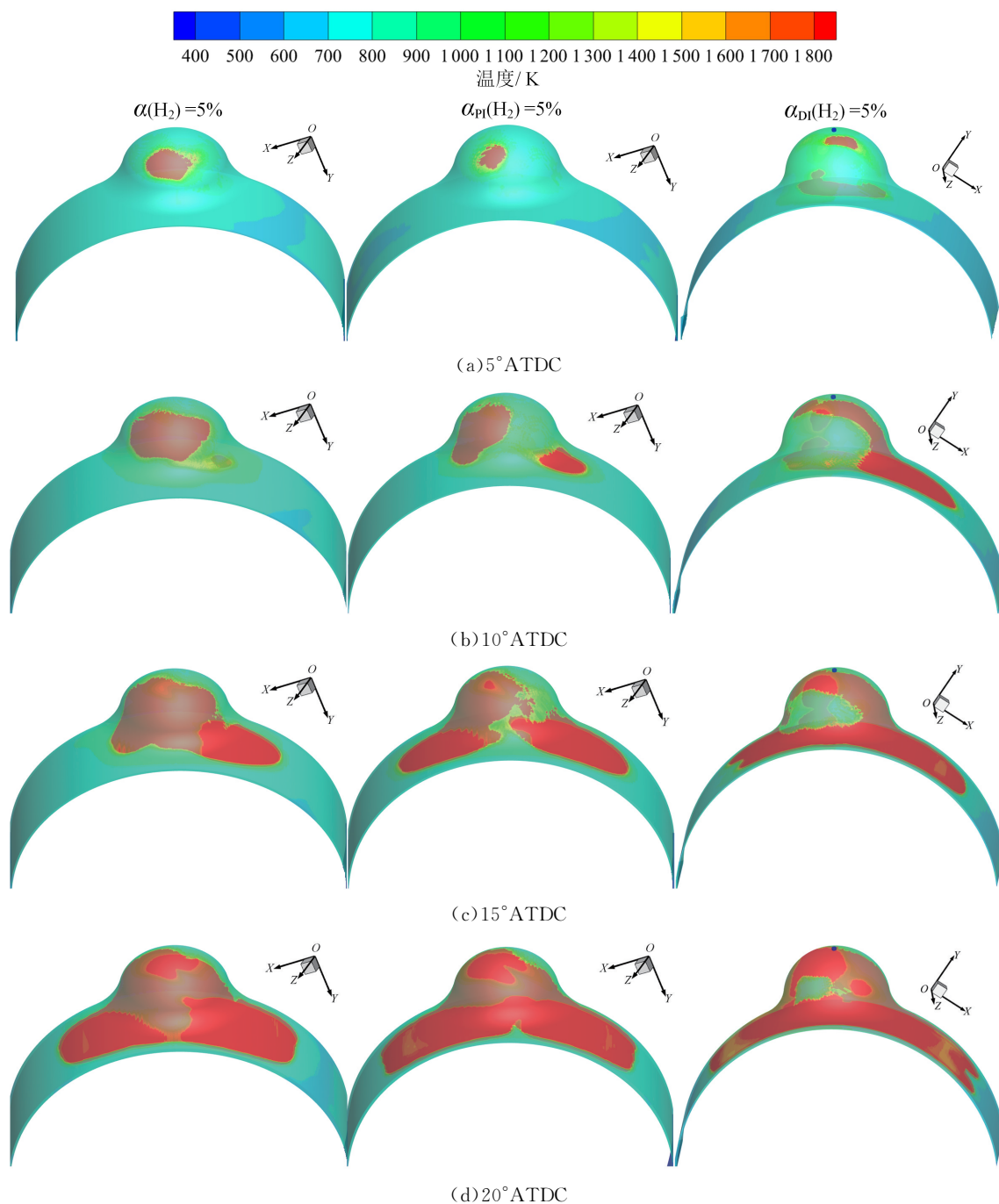


图 11 不同供氢方式下缸内温度变化云图

Fig. 11 Cloud map of in-cylinder temperature change under H_2 PI and DI stage

综合分析可以看出,直喷掺氢情况下,燃气在燃烧室内的燃烧速度最快,气道掺氢的次之,未掺氢的最慢。同时,直喷掺氢的火焰向燃烧室左右两侧传播的速度明显大于气道掺氢和未掺氢的火焰传播速度。这说明掺混少量的氢气可以使得火焰传播距离更远,改善燃烧室左右两侧燃料的燃烧,有利于解决

在燃烧室两侧狭缝中燃烧不完全的问题。

2.3 排放分析

作为汽油燃烧过程中的中间产物,CO 的含量可以直接反映汽油燃烧的完全程度^[26]。图 12 给出了不同供氢方式下缸内 CO 质量随曲轴转角的变化曲线。可以看出,随着曲轴转角的增加,CO 排放的

质量呈现先增加后降低的变化趋势。随着掺氢能量分数的增加,CO 质量随之增加,且直喷掺氢的 CO 生成速度和峰值质量要显著大于气道掺氢的。在掺氢能量分数为 5% 时,直喷掺氢的 CO 峰值质量相对气道掺氢和未掺氢的分别提高了 40.74% 和 89.9%。

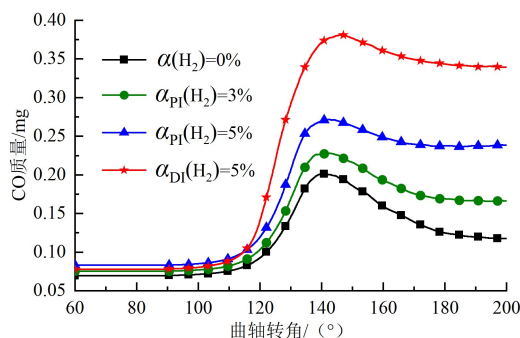


图 12 不同供氢方式下缸内 CO 质量随曲轴转角的变化
Fig. 12 Mass of CO versus crank angle under H₂ PI and DI stage

正常情况下,氢气掺混会挤占缸内空气的体积,导致充气效率降低。在相同当量比的条件下,进入燃烧室内的汽油会随着掺氢能量分数的增加而降低,所以转换生成的 CO 的质量会逐步降低。但是,该燃烧的当量比大于 1,本身燃烧就不完全。同时,等能量分数的氢气消耗的氧气要大于汽油的,且氢气的燃烧速度大于汽油。汽油燃烧所配给的氧气量明显减少,造成燃烧更加不完全,产生大量中间排放物 CO。而且,掺氢能量分数越高,氢气消耗的氧气就越多,汽油燃烧时的氧气含量就越少。采用直喷掺氢时,消耗氧气速度会大幅度提升,也同样减少了汽油燃烧时的氧气,从而比气道掺氢产生更多的 CO。因此,在高当量比的情况下,燃烧会产生大量的 CO,且掺氢会加剧这一过程。

图 13 给出了不同供氢方式下,缸内 NO_x 质量随曲轴转角的变化曲线。可以看出,随着曲轴转角的增加,NO_x 质量呈现先增加后不变的趋势,而掺氢会导致 NO_x 质量快速增加。掺氢能量分数越高,NO_x 生成速度越快,其峰值质量也越高,且直喷掺氢的生成速度要快于气道掺氢的。与气道掺氢和未掺氢相比,在掺氢能量分数为 5% 时,直喷掺氢的 NO_x 峰值质量分别提高了 12.79% 和 43.15%。

产生上述现象的原因是,NO_x 的生成主要受到缸内平均温度、氧气浓度和燃烧反应时间的影响^[27]。本文 CFD 模型耦合的 NO_x 机理中,仅考虑了热 NO_x 的生成,所以缸内平均温度对 NO_x 的生

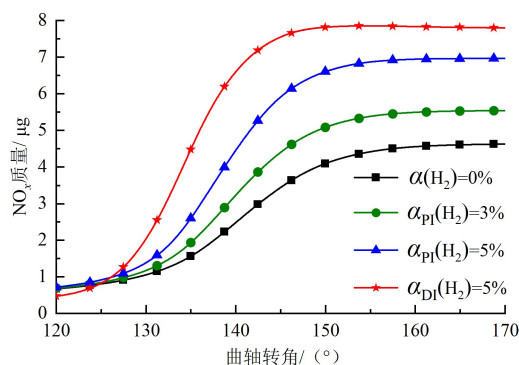


图 13 不同供氢方式下缸内 NO_x 质量随曲轴转角的变化
Fig. 13 Mass of NO_x versus crank angle under H₂ PI and DI stage

成起着决定性的作用,即温度越高,NO_x 生成速度就越快,产生的 NO_x 量就越多。由图 10(b)可知,直喷掺氢的平均温度高于气道掺氢和未掺氢的。因此,直喷掺氢生成 NO_x 的速度以及产生的 NO_x 质量要大于气道掺氢和未掺氢的。此外,当缸内平均温度降低到不再适合 NO_x 产生的温度时,NO_x 质量不再增加。

为了降低 CO 和 NO_x 排放,可以采用稀燃控制策略,降低燃烧当量比,增加汽油燃烧的氧气量,使得汽油可以完全燃烧。同时,氧气的减少也会降低燃烧过程中的缸内平均温度,从而降低 NO_x 的质量。因此,在选择直喷掺氢提高燃烧效率情况下,可以进一步选择稀燃的方法,达到控制 X 型转子机 CO 和 NO_x 排放的目的。

3 结 论

(1) X 型转子发动机在进气阶段会在燃烧室两侧产生两个方向相反的涡团,它们相互作用,使得空气与燃气充分混合,缸内平均湍动能和涡度达到最大值。掺氢后,缸内平均湍动能和涡度的变化不大。在喷氢阶段,直喷掺氢在喷嘴处的速度和涡度提升明显,且此处气流扰动较大。

(2) 掺氢能够提高燃烧过程中 OH、H 和 O 基团的含量,加快汽油的燃烧速度,使得燃烧放热增强且提前,扩大火焰向燃烧室两侧燃烧的范围,并且直喷掺氢的效果明显优于气道掺氢的。掺氢能够提高缸内平均压力和温度,在掺氢能量分数为 5% 时,与未掺氢相比,气道掺氢和直喷掺氢的缸压峰值分别提高了 16.71% 和 43.15%,缸温峰值分别提高了 7.53% 和 17.77%。

(3) 掺氢后, 由于高当量比使燃烧不完全, 氢气的加入会使得氧气消耗得更多, 产生更多的 CO 。掺氢能够提高燃烧过程的温度, 加速 NO_x 的生成, 导致 NO_x 排放增加。与未掺氢相比, 掺氢能量分数为 5% 时, 气道掺氢和直喷掺氢方式下 CO 排放量分别增加了 34.8% 和 89.9%, NO_x 排放量分别增加 50.65% 和 69.91%。因此, 需要采用稀薄燃烧的策略降低排放物对环境的影响。

参考文献:

- [1] 裴海灵, 周乃君, 高宏亮. 三角转子发动机的特点及其发展概况综述 [J]. 内燃机, 2006(3): 1-3, 10.
PEI Hailing, ZHOU Naijun, GAO Hongliang. The characteristics and improvement of rotary engines [J]. Internal Combustion Engines, 2006(3): 1-3, 10.
- [2] 张耀元. 端面进气天然气掺氢转子发动机燃烧过程的数值模拟研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
- [3] 潘剑锋, 陈瑞, 范宝伟, 等. LPG 转子发动机缸内燃烧影响因素研究 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 329-337.
PAN Jianfeng, CHEN Rui, FAN Baowei, et al. Affecting factors on combustion progress in LPG rotary engine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 329-337.
- [4] SHKOLNIK A, LITTERA D, NICKERSON M, et al. Development of a small rotary SI/CI combustion Engine [C]//SAE/JSAE 2014 Small Engine Technology Conference & Exhibition. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2014: 2014-32-0104.
- [5] LITTERA D, NICKERSON M, KOPACHE A, et al. Development of the XMv3 high efficiency cycloidal engine [C]//JSAE/SAE 2015 Small Engine Technologies Conference & Exhibition. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2015: 2015-32-0719.
- [6] COSTA T J, NICKERSON M, LITTERA D, et al. Measurement and prediction of heat transfer losses on the XMv3 rotary engine [J]. SAE International Journal of Engines, 2016, 9(4): 2368-2380.
- [8] NICKERSON M, KOPACHE A, SHKOLNIK A, et al. Preliminary development of a 30 kW heavy fueled compression ignition rotary 'X' engine with target 45% brake thermal efficiency [C]//WCX World Congress Experience. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2018: 2018-01-0885.
- [9] LEBOEUF M, DUFAULT J F, NICKERSON M, et al. Performance of a low-blow by sealing system for a high efficiency rotary engine [C]//WCX World Congress Experience. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2018: 2018-01-0372.
- [10] 李祥晟, 郭菡, 郁鸿飞, 等. 掺氢对燃气轮机燃烧室燃烧和排放性能的影响研究 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(6): 9-16.
LI Xiangsheng, GUO Han, YU Hongfei, et al. Study on combustion and emission performance of hydrogen fuel gas turbine combustor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(6): 9-16.
- [11] 耿卅捷, 潘禾吉田, 杨欢, 等. 燃气轮机天然气掺氢燃烧及排放特性数值模拟研究 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(12): 1-11.
GENG Sajie, PAN Hejitian, YANG Huan, et al. Numerical study on influence of H_2 blending on combustion and emission characteristics in gas turbine [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(12): 1-11.
- [12] 苏腾. 掺氢汽油转子机试验研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
- [13] AMROUCHE F, ERICKSON P, PARK J, et al. An experimental investigation of hydrogen-enriched gasoline in a Wankel rotary engine [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(16): 8525-8534.
- [14] AMROUCHE F, ERICKSON P A, PARK J W, et al. Extending the lean operation limit of a gasoline Wankel rotary engine using hydrogen enrichment [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(32): 14261-14271.
- [15] FAN Baowei, ZHANG Yaoyuan, PAN Jianfeng, et al. The influence of hydrogen injection strategy on mixture formation and combustion process in a port injection (PI) rotary engine fueled with natural gas/hydrogen blends [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 173: 527-538.
- [16] FAN Baowei, PAN Jianfeng, LIU Yangxian, et al. Numerical investigation of mixture formation and combustion in a hydrogen direct injection plus natural gas port injection (HDI + NGPI) rotary engine [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(9): 4632-4644.
- [17] YANG Jinxin, JI Changwei, WANG Shuofeng, et al. Numerical investigation of the effects of hydrogen enrichment on combustion and emissions formation processes in a gasoline rotary engine [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 151: 136-146.
- [18] YANG Jinxin, JI Changwei, WANG Shuofeng, et al. A comparative study of mixture formation and combustion processes in a gasoline Wankel rotary engine with hydrogen port and direct injection enrichment [J]. Energy

- Conversion and Management, 2018, 168: 21-31.
- [19] YANG Jinxin, JI Changwei, WANG Shuofeng, et al. Numerical investigation on the mixture formation and combustion processes of a gasoline rotary engine with direct injected hydrogen enrichment [J]. Applied Energy, 2018, 224: 34-41.
- [20] CHEN Wei, PAN Jianfeng, FAN Baowei, et al. Numerical investigation of dual-fuel injection timing on air-fuel mixing and combustion process in a novel natural gas-diesel rotary engine [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 176: 334-348.
- [21] CHEN Wei, YU Shiwu, PAN Jianfeng, et al. Effect analysis of the forward flow fuel injection angle on stratified combustion process in a high-pressure direct injection diesel Wankel engine (HPDI-DWE) [J]. Energy Conversion and Management, 2022, 253: 115179.
- [22] 张岩, 左正兴, 刘金祥, 等. 基于大涡模拟的小型转子发动机缸内湍流研究 [J]. 工程热物理学报, 2019, 40(11): 2678-2686.
- ZHANG Yan, ZUO Zhengxing, LIU Jinxiang, et al. Investigation on small rotary engine in-cylinder turbulent flow based on large eddy simulation [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40(11): 2678-2686.
- [23] LIU Yaodong, JIA Ming, XIE Maozhao, et al. Enhancement on a skeletal kinetic model for primary reference fuel oxidation by using a semidecoupling methodology [J]. Energy & Fuels, 2012, 26(12): 7069-7083.
- [24] 范宝伟, 潘剑锋, 陈瑞, 等. 点火提前角对天然气转子发动机燃烧过程的影响 [J]. 兵工学报, 2014, 35(1): 1-8.
- FAN Baowei, PAN Jianfeng, CHEN Rui, et al. Effect of ignition advance angles on combustion process in natural gas-fueled rotary engine [J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(1): 1-8.
- [25] 马泽东. 转子发动机进气系统设计及优化研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2020.
- [26] 左磊, 梅德清, 张登攀, 等. 加氢生物柴油-乙醇-柴油在高压共轨柴油机上的燃烧与排放特性 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(9): 189-196.
- ZUO Lei, MEI Deqing, ZHANG Dengpan, et al. Combustion and emission performance of hydrogenated biodiesel-ethanol-diesel blends in a common rail diesel engine [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(9): 189-196.
- [27] 王长安, 侯育杰, 刘成昌, 等. 燃煤链条炉掺烧半焦 NO_x 生成特性及配风优化数值模拟研究 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(4): 1-12.
- WANG Changan, HOU Yujie, LIU Chengchang, et al. Numerical simulation study on NO_x emission characteristics and the optimization of air induction of coal-fired chain boiler blended with semi-coke [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(4): 1-12.
- (编辑 陶晴 杜秀杰)