

喷氢正时及喷氢脉宽对于缸内直喷氢气发动机混合气形成及燃烧特性的影响

王家俊¹, 谭丕强¹, 楼狄明¹, 张允华¹, 刘登程²

(1. 同济大学 汽车学院, 上海市 201804; 2. 南昌智能新能源汽车研究院, 南昌市 330044)

Effects of Hydrogen Injection Timing and Pulse Width on Mixture and Combustion Characteristics of In-cylinder Direct Injection Hydrogen Engine

WANGJiajun¹, Tan Piqiang¹, LOU Diming¹, ZHANG Yunhua¹, LIU Dengcheng²

(1.School of Automotive Studies, TongjiUniversity, Shanghai201804, China;

2.NanchangAutomotive Institution ofIntelligence and New Energy, Nanchang330044, China)

Abstract:In order to study the effect of hydrogen injection strategy on the combustion characteristics of the in-cylinder direct injection hydrogen engine, a single-cylinder simulation model of the hydrogen engine was established by using three-dimensional simulation software, and the effects of different hydrogen injection pulse widths and injection timing on the in-cylinder mixture formation and combustion were investigated. The results show that: with the growth of hydrogen injection pulse width, the peak pressure in the cylinder rises gradually, but at the same time, the turbulent kinetic energy in the cylinder also rises, which makes it easier for abnormal combustion phenomena to occur; when the hydrogen injection pulse width is extended from 65°CA to 85°CA, the peak pressure in the cylinder is increased by 11.2% for every 5°CA of extension on the average, and at the same time, the engine has a better combustion characteristic at the hydrogen injection pulse width of 80°CA. When the hydrogen injection timing is earlier, the cylinder is prone to abnormal combustion phenomena such as vibration, when the hydrogen injection timing in -130 ° CA ~ -55 ° CA, can produce a larger peak pressure in the cylinder and no abnormal combustion phenomena, the maximum peak pressure in the cylinder is 5.9MPa; when the hydrogen injection timing is earlier, the ignition time of the cylinder gas movement is concentrated in the outside of the combustion chamber, in 140 ° CA and before the hydrogen injection, the cylinder gas mixing is not even enough to affect the stability of combustion. affecting combustion stability.

摘要:为研究喷氢策略对于缸内直喷氢气发动机燃烧特性的影响,利用三维仿真软件建立了氢气发动机单缸仿真模型,不同喷氢脉宽、喷氢正时对于缸内混合气形成以及燃烧的影响。结果表明:随着喷氢脉宽的增长,缸内峰值压力逐渐上升,但同时其缸内湍动能也会有所上升,更易发生异常燃烧现象,当喷氢脉宽从 65° CA 延长至 85° CA 时,平均每延长 5° CA,缸内峰值压力提高 11.2%,同时,发动机在 80° CA 喷氢脉宽下有着较好的燃烧特性;当喷氢正时较早时,气缸内易产生爆震等异常燃烧现象,当喷氢正时在-130° CA~-55° CA 时,能产生较大缸内峰值压力且无异常燃烧现象,最大缸内峰值压力为 5.9MPa;当喷氢正时提前时,点火时刻的缸内气体运动集中在燃烧室外,在 140° CA 及之前喷氢,缸内气体混合不够均匀,影响燃烧稳定性。

关键词:直喷氢气发动机,喷氢正时,喷氢脉宽,燃烧特性,混合气特性

Key words:directinjection hydrogen engine; hydrogen injection timing, hydrogen injection pulse width, combustion characteristics, mixture characteristics

收稿日期: 2023-8-20;

基金项目: 上海市科学技术委员会项目(22dz1206402);江西省重点研发计划“揭榜挂帅”项目(20223BBE51014);南昌汽车智能研究院前瞻性研究基金(TPD-TC202303-08)

作者简介: 王家俊(1998—),男,硕士研究生, E-mail:2131604@tongji.edu.cn;

谭丕强(联系人), E-mail:tanpq@hotmail.com。

1 引言

在应对碳排放问题方面, 全球各国普遍采取了积极的措施并在多个领域达成了共识^[1-2]。中国计划在 2030 年实现碳排放峰值, 并在 2060 年达到碳中和^[3-4]。美国在短暂退出后也重新加入了《巴黎协定》^[5]。汽车产业产生的碳排放占据了全球排放总量的一大部分, 而作为汽车主要动力来源的发动机则依赖于燃烧传统化石燃料, 从而导致了大量的碳排放。尽管使用天然气作为发动机燃料可以一定程度上减少碳排放, 但这并不能从根本上解决这一问题。为了彻底解决这个问题, 人们开始寻找一种新型的清洁、可再生和零碳能源。氢气作为一种燃料具有许多优点, 如高热值、低点火能量、宽可燃界限和易于实现稀薄燃烧等^[6]。此外, 氢气燃烧的产物只有水, 因此被认为是解决发动机碳排放问题的最佳替代燃料^[7]。目前, 将氢气燃料应用于发动机通常是通过传统汽油机或柴油机进行改装实现的。只需对喷射系统和结构进行优化设计, 重新匹配增压器, 并调整相应的点火或喷射策略, 就可以实现零碳排放的燃烧^[8]。这种方法不仅降低了开发的难度, 而且保留了原有的产业化基础, 从而降低了成本。

在进气道喷射氢气发动机领域, 学者们针对各种问题进行了深入研究。例如, Srinivas Jilakara^[9]等学者对一款 2.5L、压缩比为 12:1 的增压中冷氢气发动机进行了优化。为了避免回火等异常燃烧现象并获得最佳的 NO_x 排放水平, 空燃比应控制在 0.5 到 0.6 之间。高玉国^[10]等人针对氢气发动机易出现早燃和回火问题, 采用三维数值模拟方法研究了弯管进气道和切向进气道对氢气发动机进气和压缩过程中流场、温度场和混合气分布等方面的影响, 并重点分析了弯管和切向两种进气道对早燃和回火的抑制作用。弯管气道排气门附近的湍动能较低, 局部温度较高, 特别是离进气门最远的排气门边缘的狭缝中流速小, 高浓度氢气空气混合燃料停留时间长, 容易发生早燃。切向气道所形成的斜轴涡流在燃烧室排气门附近壁面高温区和火花塞处的流动速度较大, 增强火花塞内和壁面狭缝的扫气和冷却效

果, 减小了排气门附近的局部高温区, 减少高浓度氢空气混合气在高温区的停留时间, 有助于避免早燃。李维康等人^[11]通过对喷氢正时和配气正时进行优化, 通过仿真模拟手段, 得到了氢气的浓度分布特征, 对回火现象进行优化。洪琛^[12]等人从燃空当量比、残余废气系数和反应物温度 3 个参数入手, 基于压力、温度参数、混合气浓度分布等研究并量化早燃和回火, 提出并定义早燃强度 IP 和回火强度 IB, 分析各参数对早燃和回火的影响显著性, 联立进气道残余氢气质量、IP 和 IB 等深入探究早燃对回火的作用机制。结果表明, 在氢-空气混合气浓度较低时, 早燃不会导致回火; 在浓度较高时, 早燃会导致回火的发生且两者之间呈现正相关关系。刘海朝等人^[13]研究了不同的喷氢方式: 单路单次喷射、单路多次喷射、双路对称喷射, 喷氢相位与喷氢压力对缸内湍动能、缸内浓度均匀性的影响及不同喷氢方式对早燃、回火等异常燃烧的抑制作用。

而为了若想彻底抑制氢气发动机的早燃、回火异常燃烧现象, 就需要从原理层面进行优化。目前应对异常燃烧现象的一个关键手段是采用直喷氢气发动机, Yip 等^[14]综合讨论了缸内直喷技术, 提出目前的氢燃料内燃机仍存在一些问题, 包括预点火、爆震、回火、低容积效率和压缩损失等, 限制了氢燃料内燃机可达到的热效率, 而规避或缓解这些限制的一个解决方案则是使用缸内直喷技术。Ali Mohammadi^[15]等以一台缸径为 102mm、冲程为 105mm 的单缸四冲程自然吸气 SI 内燃机为对象, 研究了缸内直喷氢气发动机的性能和燃烧特性, 结果表明在氢气发动机中采用直喷技术对于控制氢的异常燃烧并实现高热效率和输出功率非常有效; 直接喷射策略还消除了回火的可能性。同时, J. M. Gomes Antunes^[16]等研究了缸内直喷氢气发动机的性能, 结果表明将氢气直接喷射到压燃式内燃机燃烧室中, 其功率输出大约是在预混合模式下运行的同一内燃机的两倍。氢气的自燃温度为 585℃ 较汽油机和天然气都要高, 利于提高压缩比, 但是这一特性也决定了氢气发动机难以采用压燃式点火方式, 而适宜于火花塞点火。涂展飞^[17]等人基于仿真研究了喷射策略对直喷氢气发动机燃烧与排放的影响, 结果表明随着喷射压力的增大, 喷射持续期缩短, 喷氢持

收稿日期: 2023-8-20;

基金项目: 上海市科学技术委员会项目(22dz1206402); 江西省重点研发计划“揭榜挂帅”项目(20223BBE51014); 南昌汽车智能研究院前瞻性研究基金(TPD-TC202303-08)

作者简介: 王家俊(1998—), 男, 硕士研究生, E-mail: 2131604@tongji.edu.cn;

谭丕强(联系人), E-mail: tanpq@hotmail.com。

续期内端动能增大,有利于提高混合气均匀性,但喷氢结束后缸内端动能迅速衰减,对混合气的混合影响作用变小。李海娟^[18]等人通过改造一台高压直喷汽油机,研究了发动机燃用氢气与汽油时的燃烧和排放特性差异,结果表明,当量燃烧模式下,相比汽油发动机,氢气发动机的燃烧持续期明显缩短,有效热效率降低,NO_x排放升高,CO及总碳氢排放显著降低。

本研究以某直喷氢燃料发动机为原型,建立了三维发动机实体模型,并基于仿真,对于直喷氢气发动机在不同喷氢脉宽及不同喷氢正时下进行了仿真研究。

2 研究方法

2.1 模型建立

以一台单缸直喷氢燃料发动机为研究对象,建立适用于 converge 的仿真模型,如图 1 所示。该发动机采用火花塞点火,该发动机的具体参数如表 1 所示。

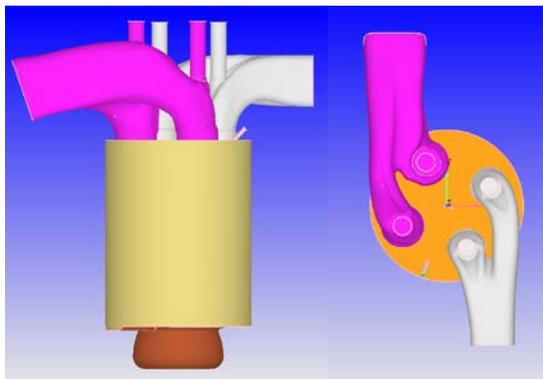


图 1 发动机模型示意图

表 1 发动机具体参数

参数	值
排量(L)	13
缸径(mm)	130
行程(mm)	161
压缩比	11:1
连杆长度(mm)	245
喷氢压力(bar)	20
发动机转速(r/min)	1800
点火方式	火花塞点火
燃料	氢气
燃料喷射方式	缸内直喷

为了减少计算量和计算时间,我们采用了以下方法来建立单缸内燃机的三维实体模型。首先,我们导入了 STL 格式的文件,并对模型几何表面进行了检测和修复。然后,我们将整个模型分为进气区域、气缸区域和排气区域,并为每个区域定义了边界类型和边界条件。通过这些步骤,我们生成了面网格文件(surface.dat)。在仿真过程中,我们使用 CONVERGE 软件根据预设的网格生成规则自动生成网格。计算网格的尺寸对计算精度和计算时间有很大影响。我们在 CONVERGE 中设置了基础网格尺寸为 8mm,并在不同位置和时刻设置了不同的网格加密等级。基础网格尺寸为 5-20mm,分为 5 个加密等级,其中加密等级为 n 的网格边长为基础网格边长的 $\frac{1}{2^n}$ 。在本研究中,我们将气缸内的网格加密等级设置为 2 级,进排气门设置为 3 级,火花塞附近及火焰前锋面设置为 3 级,喷嘴设置为 3 级。通过计算验证,我们发现这些设定的网格尺寸和加密等级可以保证计算精度的同时大大缩短计算时间。

2.2 模型选择

本研究采用的燃烧模型是耦合了化学反应机理的 SAGE 模型,该模型允许使用 Chemkin 格式化的化学反应动力学机理文件,该文件格式是化学反应机理文件的标准格式。本研究采用的氢气燃烧机理为爱尔兰国立高威大学燃烧化学中心 H.J. Curran 研究组构建的燃烧机理,共 21 步可逆基元反应。湍流模型采用经过压缩修正的 RNG k- ϵ 模型对缸内流动进行模拟。该模型具有较好的稳定性和收敛性,适用于精细模拟各种雷诺数范围的缸内气流运动,能相对准确地模拟本研究中所模拟的缸内状态。其湍动能方程 κ 和湍流耗散率 ϵ 方程的具体表达式为:

$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \text{div}(\rho\kappa\mathbf{u}) = \text{div}\left[\left(\mu + \frac{\mu_1}{\sigma_k}\right) \cdot \text{grad}\kappa\right] - \rho\epsilon + \mu_1 P_G \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho\epsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho\epsilon\mathbf{u}) = \text{div}\left[\left(\mu + \frac{\mu_1}{\sigma_\epsilon}\right) \cdot \text{grad}\epsilon\right] - \rho C_2 \frac{\epsilon}{k} + \mu_1 C_1 \frac{\epsilon}{k} P_G \quad (2)$$

式中, $P_G = 2\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2\right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right)^2$, C_1 、 C_2 、 C_μ 、 σ_k 、 σ_ϵ 均为常数。

为了研究氢气发动机的性能,本文采用了一些

模型来模拟喷雾和湍流扩散过程。首先，我们选择了 NTC 模型来模拟微粒碰撞和聚合过程。NTC 方法是一种基于直接模拟蒙特卡罗 (DSMC) 计算方法的空气动力学模型，相比于 O'Rourke 模型，NTC 方法更快且更准确。在湍流扩散模型方面，我们在 CONVERGE 中使用了 O'Rourke 湍流扩散模型。根据之前选择的湍流模型，我们得到了相应的脉动速度 u'_i ，并将其与气体速度 u_i 相加，以模拟湍流对喷雾液滴的作用。需要注意的是，本文的研究重点是氢气发动机的性能，因此并不涉及喷油过程，所以不需要设置喷雾破碎模型。我们的模型选择和方法设计旨在提供准确且高效的模拟结果，以支持氢气发动机的优化设计和控制。

在该模型中，假设每个脉动速度 u'_i 遵循高斯分布，关系式如下：

$$G(u'_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(u'_i)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

2.3 边界条件设置

利用一维仿真软件 GT-Power 仿真模型计算得到发动机进排气口处边界瞬时压力和温度值，并将其设置为 converge 里的边界条件，具体初始条件及边界条件见表 2。

表 2 仿真初始条件及边界条件

区域与边界	温度(K)	压力(MPa)
活塞	700	-
缸壁	700	-
缸盖	700	-
火花塞	800	-
进气道	300	-
排气道	700	-
排气门顶部	700	-
排气门倒角	700	-

排气门底部	700	-
进气门顶部	550	-
进气门倒角	550	-
进气门底座	700	-
气缸区域	800	0.1
进气道区域	310	0.1
排气道区域	760	0.1
喷嘴壁	300	-
喷嘴内区域	300	20

2.4 仿真工况选择

本次仿真共设置 5 组不同喷氢脉宽，分别为 65°CA 、 70°CA 、 75°CA 、 80°CA 、 85°CA ，喷氢时刻设定在 -120°CA ，进气压力设置为 0.1MPa ，发动机转速为 1800RPM ，额定功率为 $1850\text{N}\cdot\text{m}$ 同时也设置了 5 组不同的喷氢正时，分别设置在 -150°CA 、 -140°CA 、 -130°CA 、 -120°CA 以及 -110°CA ，保持每段喷氢脉宽均为 75°CA ，具体工况参数如表 3 所示，具体研究方法如图 2 所示。

表 3 仿真工况

组别	喷氢脉宽($^\circ\text{CA}$)	喷氢提前角($^\circ\text{CA}$)
1	65	120
2	70	120
3	75	120
4	80	120
5	85	120
6	75	110
7	75	130
8	75	140
9	75	150

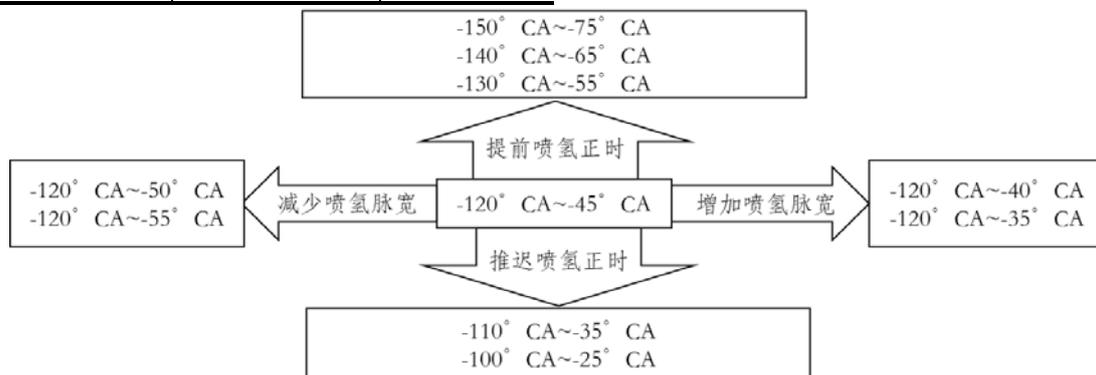


图 2 喷氢策略研究示意图

3 结果分析

3.1 不同喷氢脉宽对于氢气发动机燃烧特性的影响

为了研究不同的喷氢脉宽对发动机燃烧性能的影响,本文选取发动机的额定功率工况点:1800rpm-1850N·m 为研究对象,研究点火时刻(12°CA BTDC)以及喷氢时刻(-150°CA)一致的情况下,不同的喷氢脉宽对氢气发动机的燃烧性能。选取了五个喷氢脉宽作为研究对象,分别为 65° CA、70° CA、75° CA、80° CA、85° CA,其余边界条件保持一致。

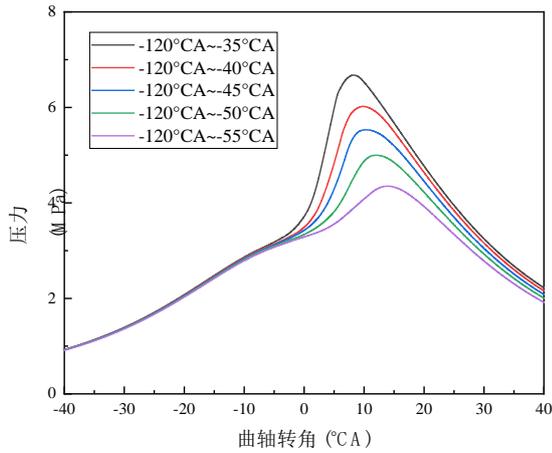


图3 缸内压力曲线

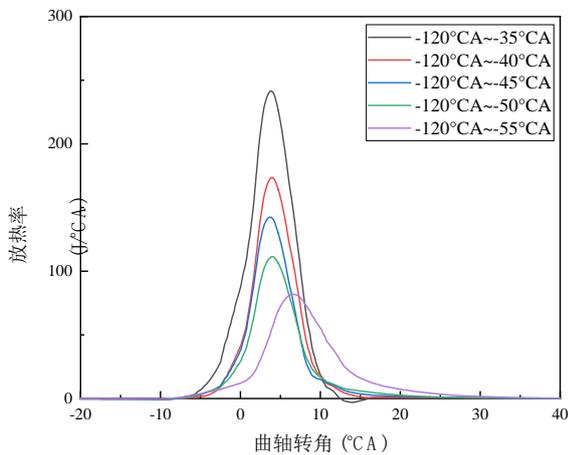


图4 放热率曲线

图3 为不同喷氢脉宽对于缸内压力的影响。由

图3可知,随着喷氢脉宽的延长,缸内压力峰值升高,且峰值相位有所提前,当喷氢脉宽为 85° CA 时,缸内最大压力为 6.67MPa,同时,当喷氢脉宽为 65° CA 时,喷氢脉宽每延长 5° CA,最高压力平均相比于之前提高 11.2%,同时,峰值相位分别提前 1.91° CA、1.46° CA、0.56° CA、1.67° CA。图4为不同喷氢脉宽对于放热率的影响,喷氢脉宽的增加同时也会加快燃烧的速率,减少其着火延迟期以及快速燃烧期的时间。由图4可知,当喷氢脉宽在 65° CA 时,由于缸内气体浓度较小,其燃烧放热较慢,峰值出现在 6.7° CA 附近,而当喷氢脉宽在 70° CA-85° CA 时,峰值相位则为 3.8° CA 附近,同时,脉宽每延长 5° CA,其放热率峰值分别提高 37%, 28%, 22%, 38%。

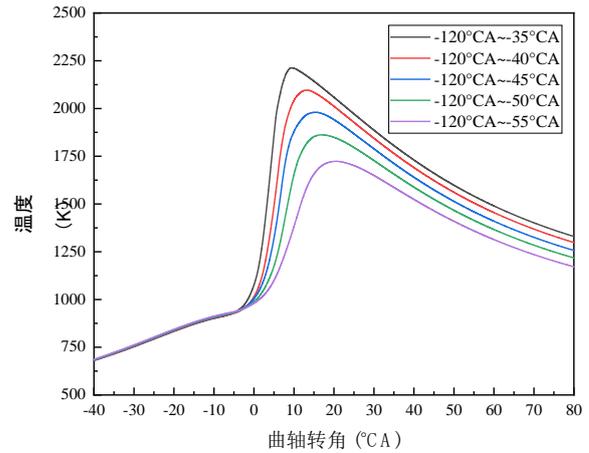


图5 缸内温度曲线

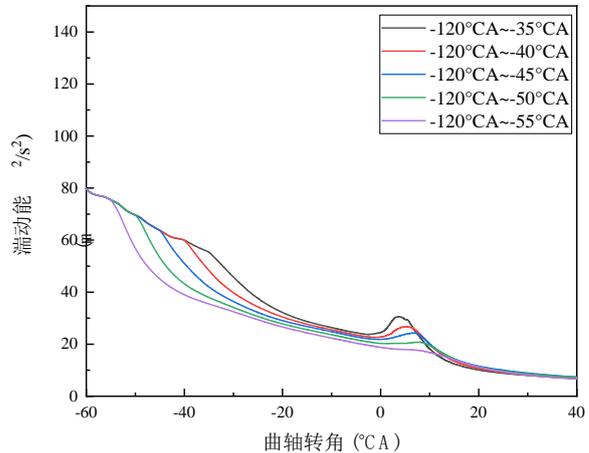


图6 湍动能曲线

图5 为不同喷氢脉宽对于缸内温度的影响。由图可知,随着喷氢脉宽的延长,缸温峰值提高,峰

收稿日期: 2023-8-20;

基金项目: 上海市科学技术委员会项目(22dz1206402);江西省重点研发计划“揭榜挂帅”项目(20223BBE51014);南昌汽车智能研究院前瞻性研究基金(TPD-TC202303-08)

作者简介: 王家俊(1998—),男,硕士研究生, E-mail:2131604@tongji.edu.cn;

谭丕强(联系人), E-mail:tanpq@hotmail.com.

值相位提前。以 65° CA 喷氢脉宽为基础，以 5° CA 喷氢脉宽为步长，延长到 85° CA 时，缸温峰值分别提高 8%、6.3%、5.8%、5.6%。当喷氢脉宽为 65° 时，其峰值相位为 20.4° CA，以 5° CA 喷氢脉宽为步长，延长到 85° CA 时，峰值相位分别较之前提前 3.6° CA、 1.4° CA、 2.3° CA、 3.7° CA。

图 6 为不同喷氢脉宽对于缸内湍动能的影响。当喷氢脉宽为 85° CA，燃烧时缸内具有最大湍动能，由于湍动能过大容易导致爆震等异常燃烧现象，因此延长喷氢脉宽也需要考虑较长喷氢脉宽工况下，发动机爆震的可能性及影响，同时还需考虑其经济性。

3.2 不同喷氢正时对于氢气发动机燃烧特性的影响

图 7 为不同喷氢正时对于氢气发动机缸内压力的影响。由图可知，随着喷氢正时的推迟，缸内压力峰值相位逐渐提前，当在 -110° CA 开始喷氢时，压力峰值为 5.9MPa ，对应相位为 8.57° CA，当喷氢正时提前至 -150° CA 时，压力峰值为 6.0MPa ，对应相位为 13.53° CA，可以看出喷氢正时对于峰值压力影响不大，但是对于峰值压力相位有所影响，这是因为喷氢正时会影响混合气的形成与分布，随着喷氢正时的提前，在点火时刻的混合气更易分离，混合更加不均匀，因此燃烧更加不稳定，峰值相位会略微推迟，平均喷氢正时每提前 10° CA，峰值相位延后 1.24° CA。

图 8 为不同喷氢正时下，氢气发动机放热率的变化。由图可知，当喷氢正时提前至 -150° CA 时，峰值放热率最大，但是其曲线平滑性最差，最易发生爆震等异常燃烧现象，同时，随着喷氢正时的延后，缸内放热率峰值增高，峰值相位提前。同时，喷氢提前角在 120° CA BTDC 到 140° CA BTDC 时，其放热率峰值基本保持一致，当喷氢提前角在 150° CA BTDC 时，其放热率峰值较之前提高约 40.5%。

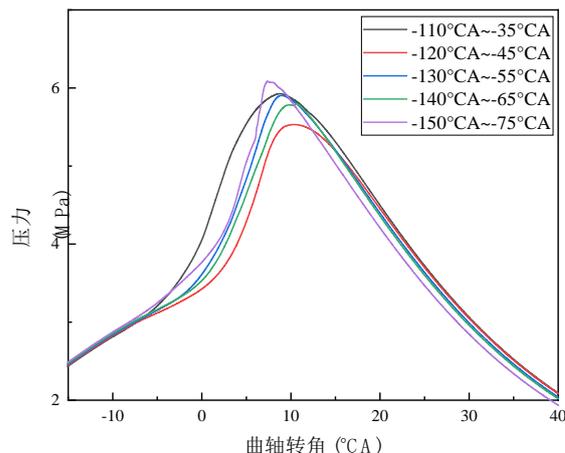


图 7 缸内压力曲线

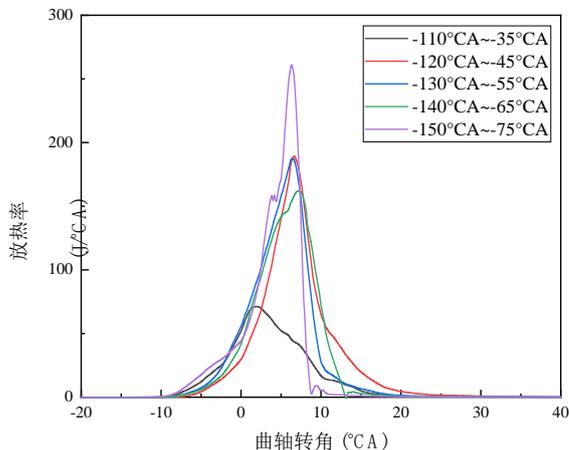


图 8 放热率曲线

图 9 为不同喷氢正时对于缸内温度的影响。由图可知，不同喷氢正时对于缸内峰值温度影响不大，平均为 2013K ，值得注意的是，在 150° CA BTDC 时，峰值温度相位相较于其他喷氢正时略微有所提前，且其温度下降相比于其他喷氢正时更快。

图 10 为不同喷氢正时对于缸内湍动能的影响。由图可知，在喷氢提前角为 150° CA BTDC 的时候，在燃烧时刻其湍动能出现较大变化，即发生了爆震等异常现象，可能由于过早的喷氢导致在点火时刻时，混合气产分离，氢气聚集在火花塞附近，加快了燃烧进程，缩短了速燃期。

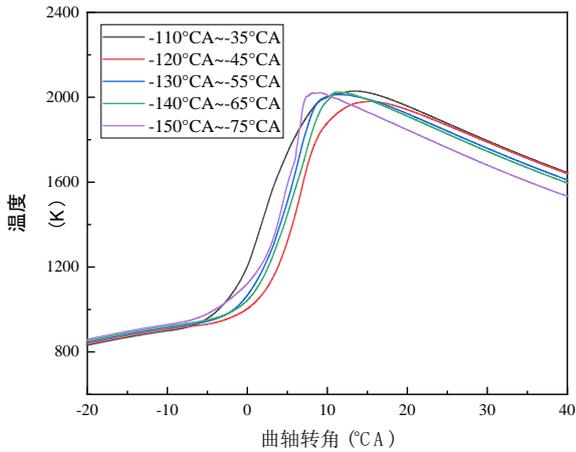


图9 缸内温度曲线

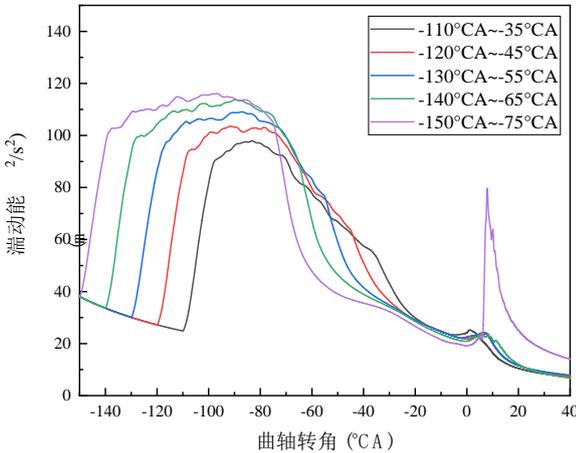
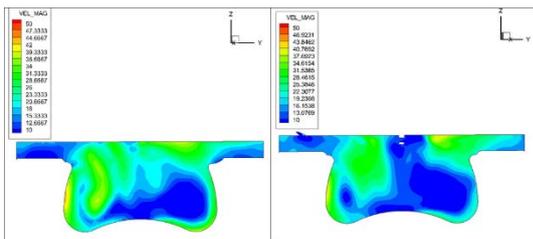


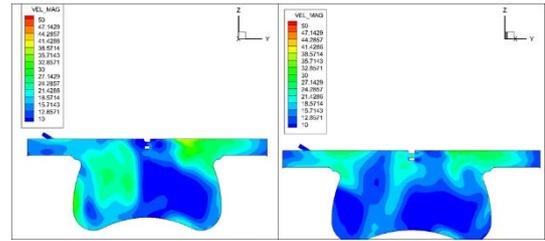
图10 湍动能曲线

3.3 不同喷氢正时对于氢气发动机混合气形成的影响

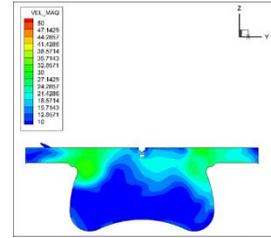
氢气发动机缸内混合气混合质量直接影响火焰传播速度、燃烧持续时间。而随着喷氢正时的推迟，氢气和空气混合的时间将缩短，氢气混合扩散的时间取决于喷射正时，理论上，氢气喷射进入气缸的时间越早，氢气扩散的时间就越长，从而能使混合气更均匀；但实际上，由于活塞的上行，氢气可能会经过活塞顶面的 ω 型凹坑产生滚流，从而加速氢气与空气的混合，同时也有利于形成理想分层混合气，因此延迟喷射正时也有可能形成更均匀的理想分层混合气。



(a) 喷氢提前角 110° CA (b) 喷氢提前角 120° CA



(c) 喷氢提前角 130° CA (d) 喷氢提前角 140° CA



(e) 喷氢提前角 150° CA

图11 不同喷氢提前角下点火时刻缸内气体运动分布

图11为不同喷氢提前角下点火时刻的缸内气体速度分布云图，由图可知，当喷氢正时提前时，点火时刻的缸内气体运动集中在燃烧室外，在喷氢提前角为140°CA及更大时，缸内气体在点火时刻易产生分离。结合上一小节对于燃烧性能的分析可以得出，喷氢提前角在120°CA至130°CA区内，氢气发动机有较好的燃烧性能以及混合气特性。

4 结论

本文基于仿真模拟的方法，研究了喷氢脉宽及喷氢正时对于氢气发动机燃烧的影响，结合缸内混合气形成的情况，探讨有利于提高氢气发动机燃烧性能的方法，得出以下结论：

(1) 当喷氢脉宽延长时，氢气发动机的缸内温度和压力峰值均有所提高，同时峰值相位也都有所提前，但是当喷氢脉宽过长时，其缸内湍动能也将有所上升，更易造成爆震等异常现象。当喷氢脉宽为65°CA时，喷氢脉宽每延长5°CA，最高压力平均相比于之前提高11.2%，同时，压力峰值相位分别提前1.91°CA、1.46°CA、0.56°CA、1.67°CA。

(2) 当喷氢脉宽一定时，随着喷氢正时的推迟，缸内压力峰值相位逐渐提前，当在-110°CA开始喷氢时，压力峰值为5.9MPa，对应相位为8.57°CA，当喷氢正时提前至-150°CA时，压力峰值为6.0MPa，对应相位为13.53°CA。这是因为喷氢正时会影响混合气的形成与分布，随着喷氢正时的提前，在点火时刻的混合气更易分离，混合更加不均

匀, 因此燃烧更加不稳定, 峰值相位会略微推迟。

(3) 喷氢正时会影响点火时刻的缸内混合气分布。当喷氢正时提前时, 点火时刻的缸内气体运动集中在燃烧室外, 在喷氢提前角为 140° CA 及更大时, 缸内气体在点火时刻易产生分离。在实际中应当选取喷氢提前角在 120° CA 至 130° CA 附近最佳。

参考文献:

- [1] TAKESHITA T. Assessing the co-benefits of CO₂ mitigation on air pollutants emissions from road vehicles[J]. *Applied Energy*, 2012, 97:225-237.
- [2] LIU W, MCKIBBIN WJ, MORRIS A C, et al Global economic and environmental outcomes of the Paris Agreement[J]. *Energy Economics*, 2020, 90 :104838.
- [3] YU S, ZHENG S, LI X The achievement of the carbon emissions peak in China: The role of energy consumption structure optimization[J]. *Energy Economics*, 2018, 74:693-707.
- [4] FANG K, ZHANG Q, LONG Y, et al. How can China achieve its Intended Nationally Determined Contributions by 2030?: a multicriteria allocation of China's carbon emission allowance[J]. *Applied Energy*, 2019 , 241:380-389.
- [5] SALMAN M, LONG X, WANG G, et al Paris climate agreement and global environmental efficiency; new evidence from fuzzy regression discontinuity design[J]. *Energy Policy*, 2022, 168;113128.
- [6] 孙柏刚, 张冬生, 刘福水. 氢内燃机循环变动特性的评价方法[J]. *内燃机学报*, 2013, 31(2):133-138.
- [7] 孙柏刚, 包凌志, 罗庆贺. 缸内直喷氢燃料内燃机技术发展及趋势[J]. *汽车安全与节能学报*, 2021, 12(3):265-278.
- [8] RANA K, NATARAJANS, JILAKARA S Potential of hydrogen fuelled IC engine to achieve the future performance and emission norms[J]. *SAE Technical Paper*, 2015, 26:0050.
- [9] JILAKARA S, VAITHIANATHAN J V, NATARAJAN S, et al. An Experimental Study of Turbocharged Hydrogen Fueled Internal Combustion Engine[J]. *SAE International Journal of Engines*, 2015, 8(1):314-325.
- [10] 高玉国, 杨振中, 郭树满, 等. 不同形式的进气道对氢气发动机混合气形成的影响[J]. *内燃机工程*, 2014(3):106-111.
- [11] 李维康. 增压氢气发动机喷氢策略研究[D]. 北京理工大学, . 2017. 000409.
- [12] 洪琛. 氢气发动机早燃对回火的作用机制[D]. 华北水利水电大学, 2021. 000214.
- [13] 刘海朝. 喷射方式对氢燃料内燃机混合气形成、燃烧及排放的影响研究[D]. 西安理工大学, 2020. 001434.
- [14] YIP H L, SRNA A, YUEN A C Y, et al. A review of hydrogen direct injection for intern combustion engines: towards carbon-free combustion[J]. *applied sciences*, 2019, 9(22): 4842.
- [15] MOHAMMADI A, SHIOJI M, NAKAI Y, et al. Performance and combustion characteristics of a direct injection SI hydrogen engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(2):296-304.
- [16] ANTUNES J G, MIKALSEN R, ROSKILLY A P. An experimental study of a direct injection compression ignition hydrogen engine[J]. *International journal of hydrogen energy*, 2009, 34(15): 6516-6522.
- [17] 涂展飞, 王毅, 邢孔钊等. 喷射策略对直喷氢气发动机燃烧与排放的影响[J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2023, 48(02):341-351.
- [18] 李海娟, 张海婷, 陶磊等. 氢气直喷对发动机燃烧及排放性能的影响[J]. *内燃机工程*, 2022, 43(05):48-53+60.