



中国内燃机学会
CHINESE SOCIETY FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINES

2024世界内燃机大会

2024 World Congress on Internal Combustion Engines

中国·天津 TIANJIN, CHINA / 2024年04月19日-23日 APRIL 19-23, 2024

编号: (251-P3001)

吉利高效氢气发动机研究

袁爽, 韦虹, 张元东, 马学建, 刘鑫, 胡轲, 马文中, 丁佳青, 孙志杰, 马俊杰, 赵福成

- 1、宁波吉利罗佑发动机零部件有限公司, 宁波315336
- 2、宁波市重大科技攻关项目, 2022Z024)

1 摘要

氢气作为理论“零”排放的清洁能源, 具有较高的单位质量热值、较低的点火能量需求、更快的火焰传播速度, 更少的排放物等优点, 使其成为下一代主流内燃机研究的燃烧燃料, 相应氢内燃机的设计开发也应运而生。吉利汽车一直致力于氢燃料内燃机的应用开发, 初期通过歧管喷射方式对氢燃料特性进行摸底, 反复验证, 从而获取了大量台架性能数据, 最终在DHE的平台上选定合适基础机型, 针对氢气燃烧特性, 再匹配稀燃增压器、大流量进气道、长行程缸径比等产品设计持续进行优化完善, 于2023年上半年完成热力学开发, 试验实测氢气发动机有效热效率达到46%以上, 远超当前国内外主机厂氢气发动机公布的最高44%的热效率水平。并在开发过程中对氢气发动机的难点问题进行了优化, 主要包括氢气喷嘴的泄露问题、氢气燃料供给系统控制策略等问题, 对此进行深入研究, 取得了突出成果, 为吉利汽车下一步内燃机技术发展指引方向。

2 氢燃料特性

通过表1, 可以发现氢气作为燃料具有以下优势。第一, 氢气的点火能量约是汽油和天然气的十分之一, 因此启动性能好, 且不容易出现失火现象; 第二, 氢气的可燃界限宽且火焰传播速度快, 使其更加易于实现稀薄燃烧, 提升发动机热效率; 第三, 氢气自燃温度高, 相较于传统汽油燃料, 具备更高压缩比的可行性, 这一特性也决定了氢气发动机难以像柴油机那样采用压燃点火, 而适宜于火花塞点火。

物性参数	氢气	天然气	汽油
密度 (kg/m ³)	0.082	0.72	700-780
低热值 (kJ/g)	120	50	44.5
最小点火能 (mJ)	0.02	0.28	0.24
理论空燃比 (kg/kg)	34.2	17.1	14.6
可燃界限 (%)	4-75	5-15	1.4-7.6
层流火焰传播速度 (m/s)	1.85	0.38	0.37-0.43
自燃温度 (°C)	585	540	227-477
扩散系数 (cm ² /s)	0.61	0.19	0.05

表1 氢气、天然气、汽油物性参数对比

虽然氢气具有以上优点, 但作为燃料也存在自身的缺点。第一, 由于氢气扩散系数大, 与空气混合会更加容易形成均匀的混合气体, 但是由于氢气密度低需要大流量的氢气喷嘴, 再加以大的扩散系数, 导致氢气很容易造成泄漏, 同时搭载整车运行时相比天然气需要更大的储存容器; 第二, 热效率的提升使得发动机压缩比增大, 低的点火能量及广泛的点火界限也使得氢气更容易发生爆震。

3 氢气发动机结构设计

通过热力学开发试验发现 (图1), 采用2#气道可获得最高热效率。3#气道由于滚流弱, 缸内混合差, 燃烧恶化, NOx排放增加。

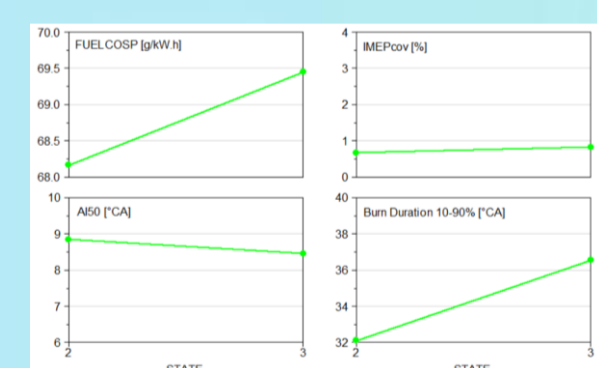


图1 CFD进气道试验结果对比

通过仿真可知, 几种进排气凸轮型线下发动机最大扭矩均可达300Nm, 最大功率也均能达到125KW。在2500rpm、11.56bar的工况下, 排气型线2#的BTE最高, 为45.9%, 进气型线1#的BTE最高, 为46.0%, 仿真计算的BTE结果如图2、3所示。最终综合考虑选择排气2#和进气1#方案。

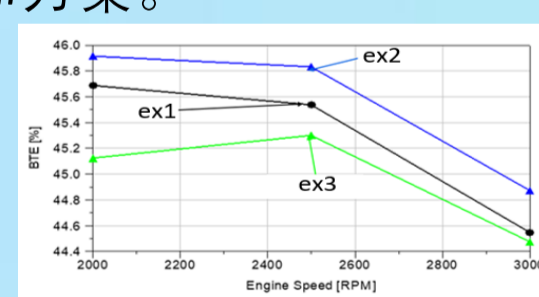


图2 排气凸轮型线仿真对比-BTE

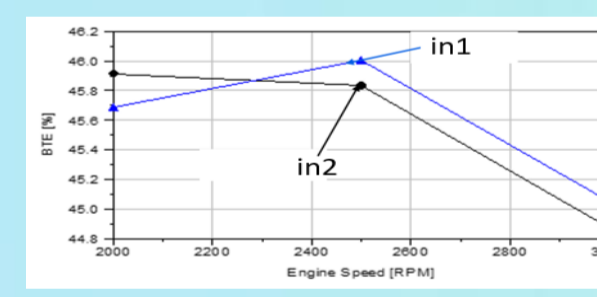


图3 进气凸轮型线仿真对比-BTE

受缸压的影响, 中压氢气喷嘴的EOI受到限制, 高压氢气喷嘴可以实现更晚的喷射, 延迟喷射可以形成更均匀的理想分层混合气, 最佳BTE优于中压氢气喷嘴。并且高压氢气喷嘴相对于中压氢气喷嘴, 可以实现更高的功率和扭矩, 有更好的动力性和经济性。但是相同的供氢系统下, 中压氢气喷嘴在续航问题上更有优势。见图3。

氢瓶	喷射压力/bar	氢瓶利用率/%	类型
35Mpa瓶组	150	57.1	氢内燃机
	50	85.7	
	20	94.3	

图3 不同轨压氢瓶利用率

为了验证更高的热效率, 我们设计了两种增压器方案。方案1保证BTE点有5%的放气阀余量, 将涡端流通能力做到最大; 方案2将涡端流通能力缩小, 保证发动机有充沛的进气能力。试验发现, 方案2虽然有着更高的进气能力, 但随之涡前压力升高, 导致发动机泵气损失增加, 发动机热效率下降, 如图4所示。

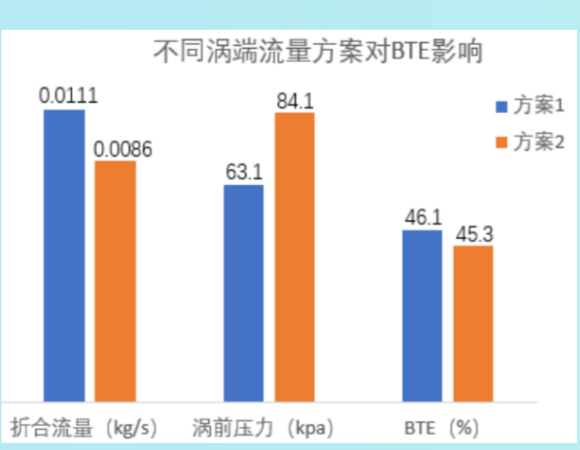


图4 不同涡端流通能力对比

4 氢气发动机特性

氢气发动机燃烧特性: 试验测试2500r/min, BMEP11.6bar, lambda=2.4固定工况点随喷氢相位的变化规律, 喷氢开始相位在110-260°CA BTDC范围变化, 统计测试结果随着喷氢结束相位EOI的变化规律。如图5所示, 从测试结果可以看出, 随着氢气喷射结束时刻EOI越靠近点火止点, 发动机有效热效率越高, 在点火止点前30-40°CA时刻, 发动机有效热效率达到峰值。主要得益于氢气晚喷的喷射策略, 使得缸内的混合气分层燃烧, 燃烧过程前半段的燃烧速度加快, 燃烧中值始终保持在最优位置, 所以发动机热效率提升。

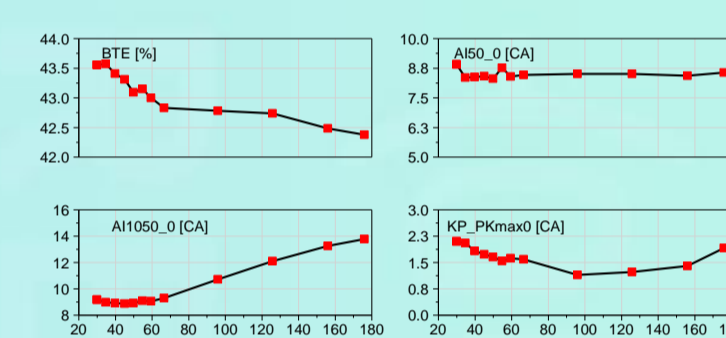


图5 喷氢相位测试规律

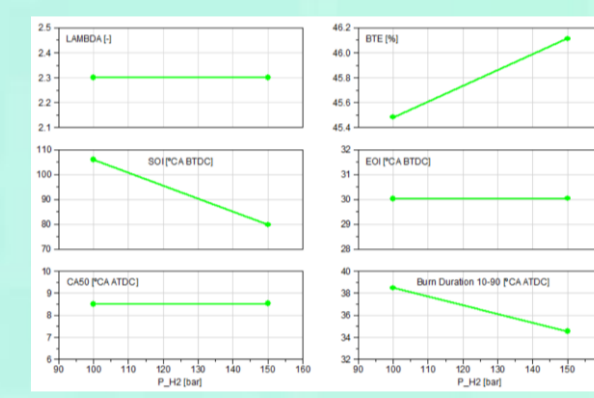


图6 不同氢气供给压力对热效率影响

发动机工作在大负荷时, 为了提高发动机热效率, 一般采取氢气晚喷策略。但不同的氢气供给压力对发动机热效率有不同的影响, 如图6, 在2400rpm_11.5bar工况点, EOI、LAMBDA及CA50均相同的情况下, 氢气供给压力较大时, 热效率较好。氢气供给压力越大, 进入气缸后的湍动能越强, 在火花塞周围形成更强混合气分层, 导致燃烧速度更快, 燃烧持续期变短, 燃烧持续期从38°CA ATDC缩短到34°CA ATDC, 从而提高热效率。同时, 由于供给压力提高, 会缩短注入脉冲宽度, 在EOI一定的情况下, 从而延迟SOI, 减少了负压缩功。在后期注入策略下, 当注入压力从100bar升到150bar时, 热效率提高了0.6%。

5 研究成果及应用

吉利全新开发的氢内燃机在热效率方面实现了行业领先的46.11%, 氢气消耗量降至65g/kW-h, 有效降低了氮氧化物的排放。在性能方面, 其最大功率接近110kW, 最大扭矩可达230N·m。

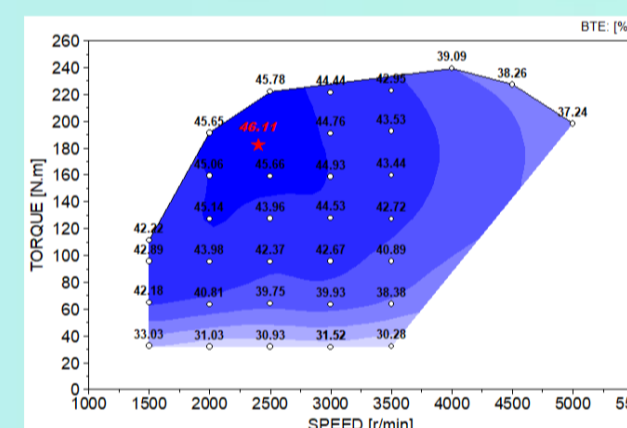


图7 氢气发动机有效热效率

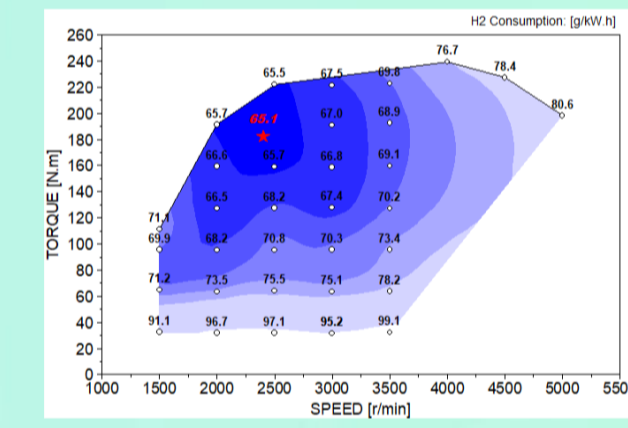


图8 氢气发动机氢气消耗量

除了拥有出色的最高热效率外, 吉利氢内燃机更是拥有广阔的高热效率区间范围。在中等负荷和低负荷区间, 热效率可达42%至45%之间。这使得它特别适合与电驱动系统结合使用, 无论是REEV、PHEV还是HEV等形式, 都能充分发挥内燃机在电混系统中的高效性能。

同时, 氢内燃机的唯一排放物NOx极低, 特别是在中小负荷区, 原排仅在10ppm以下。见图9通过采用紧耦合的SCR后处理系统就可以实现污染物近零排放。

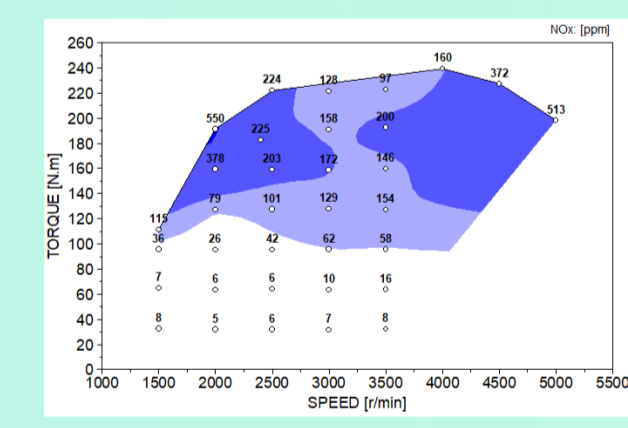


图9 氢气发动机NOx排放

在应用方面, 吉利氢内燃机存在多元化应用场景, 主要在乘用车、商用车、航空、轮船、供热及电力行业都已有应用案例。随着加氢站以及运输技术的提升, 氢内燃机未来应用前景非常广阔。

6 结论

- (1) 氢燃料其清洁、可再生以及燃烧特性决定, 未来具备代替化石燃料的可能性。
- (2) 氢燃料发动机相比传统汽油机更加适用于稀薄燃烧模式, 其热效率更高。
- (3) 未来如果能够完美解决制氢、储氢等问题, 氢燃料发动机应用前景将更加广阔。

作者联系方式

18668807007
E-mail: YS@Geely.com