

超高压压缩比混动专用发动机的爆震控制研究

张子庆 蔡霁蕾

(上海汽车集团股份有限公司技术中心, 上海 200438)

【摘要】为抑制混动发动机爆震现象,基于超高压压缩比混动发动机,建立计算流体力学(CFD)模型,通过台架试验分析发动机子系统及控制参数对爆震的影响。结果表明:提高进气道滚流比可实现快速燃烧;提升燃烧室加工精度可改善燃烧一致性;缸体、缸盖分离式冷却可实现分区温度智能调节;增加挡水板可降低金属温度;对于该发动机最大有效热效率点,降低废气再循环(EGR)系统压损,可使EGR率达到25%;高温环境下,需对发动机有效压缩比及出水温度进行精确控制。

关键词: 高压压缩比 爆震 热效率 燃烧 冷却系统 废气再循环

中图分类号: TK411 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19620/j.cnki.1000-3703.20240039

Research and Knock Control of High Compression Ratio Hybrid Engine

Zhang Ziqing, Cai Jilei

(SAIC Motor R&D Innovation Headquarters, Shanghai 200438)

【Abstract】In order to suppress the knocking phenomenon of hybrid engine, a Computational Fluid Dynamics (CFD) model is established based on the ultra-high compression ratio hybrid engine. Bench tests are carried out to analyze the influence of engine subsystem and control parameters on knocking. The results show that rapid combustion can be achieved by increasing the inlet tumble ratio. Improving the machining accuracy of the combustion chamber can improve the consistency of combustion. Separate cooling of cylinder block and cylinder head can realize intelligent temperature regulation. The addition of a water baffle can reduce the temperature of the metal. For the maximum effective thermal efficiency point of the engine, reducing the pressure loss of the Exhaust Gas Recirculation (EGR) system can make the EGR rate reach 25%. In high-temperature environments, the effective compression ratio and engine outlet temperature require precise control.

Key words: High compression ratio, Knock, Thermal efficiency, Combustion, Cooling system, Exhaust Gas Recirculation (EGR)

【引用格式】张子庆,蔡霁蕾.超高压压缩比混动专用发动机的爆震控制研究[J].汽车技术,2024(9):25-31.

ZHANG Z Q, CAI J L. Research and Knock Control of High Compression Ratio Hybrid Engine[J]. Automobile Technology, 2024(9): 25-31.

1 前言

发动机爆震现象主要源于缸内末端混合气体在火焰到达前发生了自燃,导致缸内局部压力和温度骤增,从而产生高频压力振荡^[1-2]。混合动力发动机可通过提高压缩比有效改善燃油经济性,但极易导致爆震和早燃倾向加剧,造成发动机性能下降、油耗增加、振动及噪声恶化,甚至损坏缸体^[3]。

Livengood-Wu 积分^[4]假设某关键自由基的浓度达到一定值时会发生自燃,可用于自燃时刻预测。Li等^[5]通过提升汽油机压缩比,改善中低负荷工况的燃油经济性,但在高负荷工况下会加剧爆震,增加油耗。张小矛^[6]

通过计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)仿真,研究各缸的爆震发生强度,认为爆震极易发生在高温、燃油浓度偏稀区域,同时伴随大量羟基(OH)自由基产生。胡祯等^[7]利用快速压缩机分析了能量密度和壁面温度对爆震的影响,发现这两种因素与爆震影响呈正相关。邱立明^[8]提出活塞头部形貌特征中的连通区域对爆震影响显著,可通过优化设计降低爆震敏感性。

为抑制发动机爆震现象,本文基于自然吸气混动专用超高压压缩比发动机,分析发动机燃烧系统、冷却系统、废气再循环系统、标定控制等对发动机爆震的影响,提升发动机热效率,减少动力损失。

2 模型构建与验证

2.1 发动机模型

本试验使用自主研发4缸1.5L四冲程自然吸气发动机,该混动专用发动机采用超高压压缩比、阿特金森循环(Atkinson)、外部冷却废气再循环(Exhaust Gas Recirculation, EGR)等技术,其特征参数如表1所示。台架试验所用试验仪器设备如表2所示。

表1 发动机特征参数

参数	取值	参数	取值
发动机型式	直列四缸	最大功率/kW	80
排量/L	1.498	最大扭矩/N·m	135
缸径/mm	72	进气方式	自然吸气
冲程/mm	92	喷油型式	进气道喷射
压缩比	16	点火能量/mJ	120

表2 试验仪器设备型号

名称	型号
电力测功机	AVL INDY S22-2/0525-1 BS-1
瞬态油耗仪	AVL 7351CST
缸压传感器	KISTLER 6115
排放分析仪	HORIBA MEXA-7100DEGR
燃烧分析仪	AVL INDIMODEUL 622

发动机相关仿真分析项所采用的仿真模型中,湍流模型采用RNG(Renormalization Group) $k-\varepsilon$ 模型,喷雾破碎模型采用KH-RT(Kelvin-Helmholtz & Rayleigh-Taylor)模型,壁面传热模拟采用O'Rourke模型,燃烧模型采用G方程耦合化学反应动力学模型^[9-10]。利用G方程描述由火花点火引发的主火焰传播过程。其中, $G=0$ 的等值面为平均火焰面位置, $G>0$ 为已燃区域, $G<0$ 为主火焰未到达的末端混合气区域。

化学反应动力学机理^[11]包含异辛烷和正庚烷的骨架机理,共48种组分和152个反应步。计算时,燃油组分采用异辛烷和正庚烷的质量分数配比为92:8,替代92号汽油。

采用CONVERGE软件对燃烧系统模型进行网格划分及加密,网格模型基本尺寸为2mm,进气道和燃烧室网格尺寸均为1mm,最小网格加密到0.5mm,网格数量为 $1.3 \times 10^6 \sim 1.8 \times 10^6$ 个。

文献[6]对仿真模型的准确性及可靠性进行了验证,仿真的喷雾形态、喷雾贯穿距、缸内压力、放热率等试验误差均在5%以内,因此,可采用标定的仿真模型研究缸内燃烧及爆震现象。

2.2 爆震的评价

鉴于OH自由基为爆震时缸内末端混合气体由低温化学反应向高温化学反应转变的示踪组分^[12-13],因此,三维CFD仿真计算可通过OH自由基监测缸内末端混合气的爆震发生位置。

试验通过在缸内设置缸压传感器,获取缸内瞬态缸压信号,并进行傅里叶变换和滤波处理,得到缸压震荡幅值绝对值最大值作为爆震强度评价指标^[14],如图1所示。

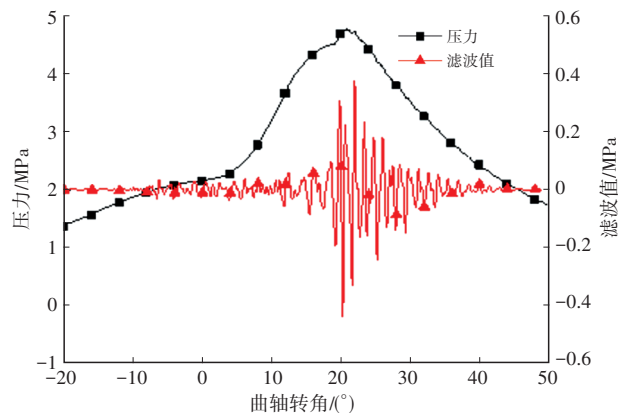


图1 发动机缸内压力与滤波值

3 系统研究与分析

为提高混动发动机抗爆性能,对爆震影响较大的关键系统进行优化,提高燃烧系统湍动能,加强冷却系统、标定软件精准控制,提升压缩比加工精度与EGR率。

3.1 抑制爆震的燃烧系统开发

3.1.1 进气道设计

湍流火焰传播速度计算公式为^[15]:

$$S_t = S_l + u' \left\{ -\frac{ab_2^2}{2b_1} Da + \left[\left(\frac{ab_2^2}{2b_1} Da \right)^2 + ab_2^2 Da \right]^{1/2} \right\} \quad (1)$$

式中: S_t 、 S_l 分别为湍流火焰和层流火焰传播速度, u' 为湍流耗散速度均方根值, a 、 b_1 、 b_2 为模型常数, Da 为达姆科勒数。

通常,在压缩冲程末期,缸内湍动能越强,对应的 u' 和 S_t 越大。因此,增大进气道滚流比可提升点火时刻的气流脉动速度,从而实现快速燃烧,避免末端混合气体在火焰面未到达前自燃。对标2015~2023年乘用车市场1.0~2.0L排量自吸和增压发动机数据库信息,将进气道流量系数和滚流比数据进行拟合,结果如图2所示。

基于数据库拟合的流量系数和滚流比关系,自然吸气发动机、增压发动机方程分别为:

$$\begin{cases} y_1 = -0.0157x_1 + 0.1177 \\ y_2 = -0.0146x_2 + 0.1101 \end{cases} \quad (2)$$

式中: y_1 、 y_2 分别为自然吸气发动机与增压发动机进气道流量系数, x_1 、 x_2 分别为两种发动机进气道滚流比。

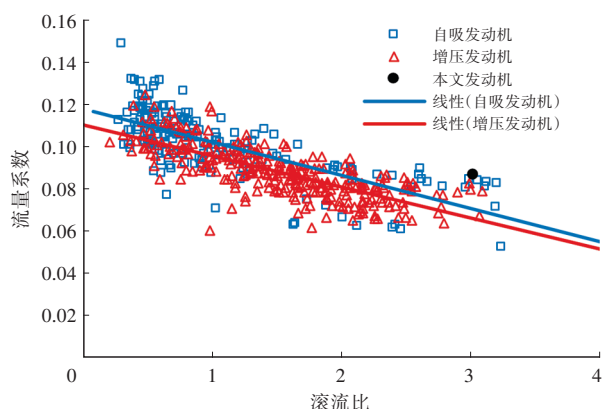


图2 流量系数和滚流比数据拟合

对比式2可看出,自吸发动机的斜率绝对值更大,且拟合直线位于增压发动机上方。主要源于自吸发动机在设计进气道时,更侧重提升流量系数以提升发动机性能,对进气道流量系数的要求往往要高于增压发动机;增压发动机由于有增压器补偿进气量,在设计理念中更侧重于提升滚流。

本文发动机流量系数和滚流比均处于自吸发动机拟合直线的右上方,对于高压压缩比混动发动机,兼顾高EGR率下的充气效率要求的同时,也满足高滚流比气道的抗爆特性。

通过将进气道下底面调整为弧形过渡,增强流动分离效果,从而形成更高的滚流,气道形态几何对比如图3所示。

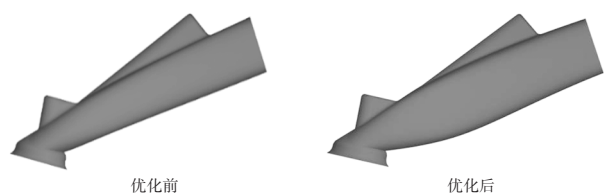


图3 进气道形态几何对比

对比优化前、后发动机进气道的缸内滚流比与湍动能。如图4所示,在整个进气与压缩冲程中,优化后的进气道均保持较高的滚流比,不仅有助于促进油气混合,也有利于在压缩冲程末期滚流破碎,形成较大的湍动能。

对比优化前后进气道燃油湿壁量、点火时刻缸内油气混合均匀性以及爆震指示物分布,结果如图5所示。较高的滚流比会促进油气混合,因此,气道优化后缸内的燃油湿壁量较少。点火时刻缸内的空燃比分布也较为均匀,点火后,优化后的燃烧系统缸内火焰面传播面积增加,火焰传播速度较快,更有利于快速消耗掉末端混合气,因而未出现爆震指示物。

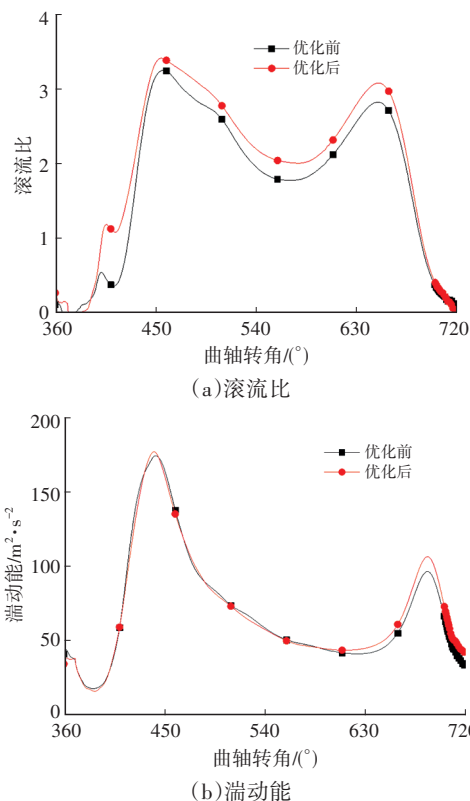


图4 进气道发动机缸内滚流比和湍动能对比

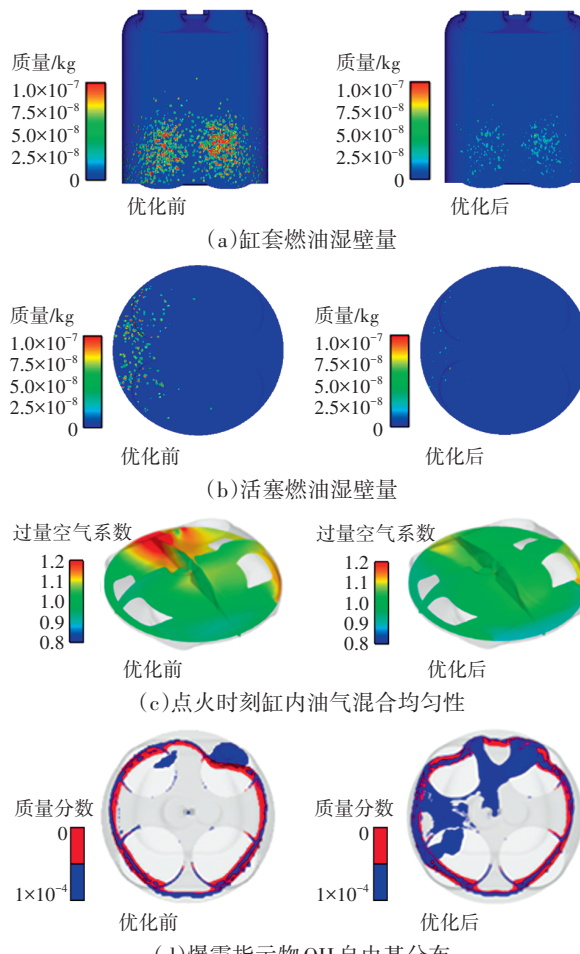


图5 优化前、后发动机试验结果对比

综上,优化后的进气道、高滚流燃烧系统的流动、油气混合以及燃烧爆震现象均有所改善。

本文发动机在转速为 2 500 r/min、平均有效压力 0.8 MPa 工况下,进气道优化后,缸内 50% 放热的曲轴转角(CA50)相较于优化前(10.6°)提前 2.3°;从 10% 放热到 50% 放热的燃烧持续期(B1050)相较优化前(9.5°)减少 2.8°,表明燃烧速度加快。该工况下,进气道优化前、后的爆震指数如图 6 所示,试验统计了 100 个循环的缸压滤波后的爆震指数,可以看出,进气道滚流比提升,优化后燃烧系统的爆震发生频率和强度都显著降低。

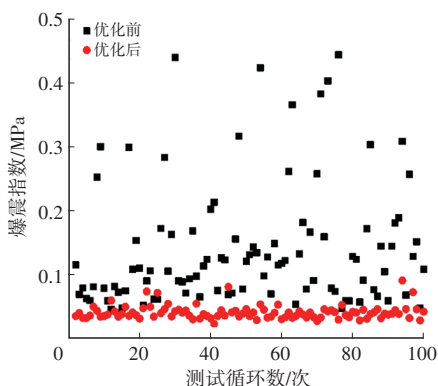


图6 优化前、后发动机仿真结果

3.1.2 燃烧系统加工精度控制

发动机压缩比的适当性和一致性直接影响发动机的动力性、经济性和排放水平^[16]。压缩比制造公差越小,对爆震一致性控制更有利。

将发动机燃烧室曲面、气门头及活塞端面等部位由锻造改为机加工,加工精度由 ± 0.3 mm 提升至 ± 0.05 mm,同时,对轴瓦分组装配,可以更好地控制压缩比公差以及各缸一致性。燃烧系统加工精度提升后,压缩比公差可由 16.0 ± 0.7 降低为 16.0 ± 0.3 。此外,机加工明显改善燃烧室表面粗糙度,有效减少表面热点,防止燃烧过程中热点早燃或者爆震。

3.2 抑制爆震的冷却系统开发

3.2.1 缸体和缸盖分离式冷却的影响

混动发动机压缩比较高,且多运行在大负荷油耗经济区,热负荷及爆震问题突出,其冷却需求更高。文献[17]表明,水套流速影响金属壁面传热系数,从而影响散热,因此,可通过改善水套设计缓解爆震问题。

本文发动机冷却系统原理如图 7 所示,采用缸体缸盖分离冷却,可实现缸体、缸盖的分区智能调节。通过缩短冷却液流经路径,降低冷却液流阻的同时,增加水流速度,从而有效控制爆震。

发动机转速 6 000 r/min 外特性工况缸盖水套、缸

体水套流速云图如图 8 所示。缸盖、缸体的水流量比例约为 7:3 时,各缸排气鼻梁区流速较均匀,能够达到 2.2 m/s,缸间流速超过 2 m/s,冷却效果明显且能够抑制爆震。

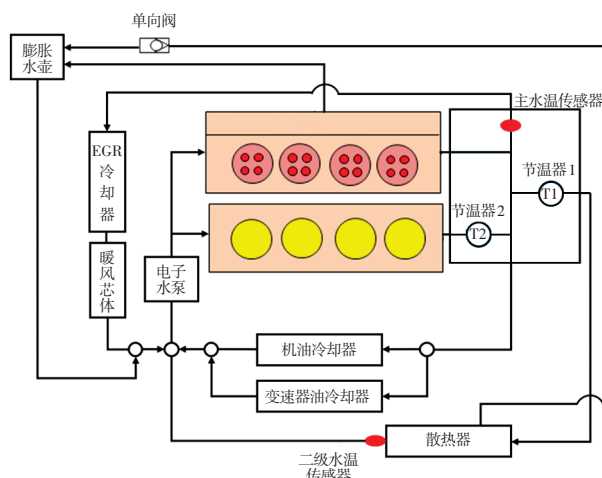


图7 发动机冷却系统原理

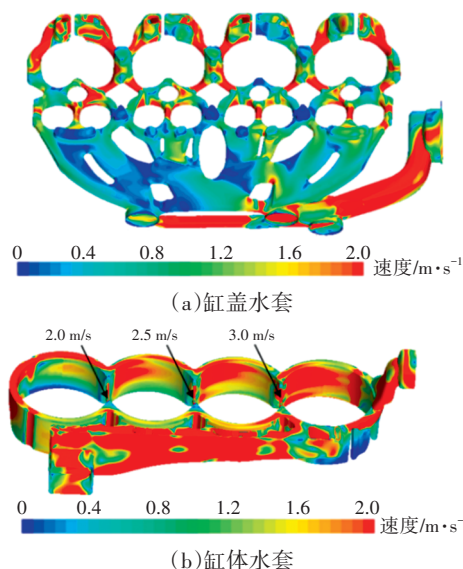
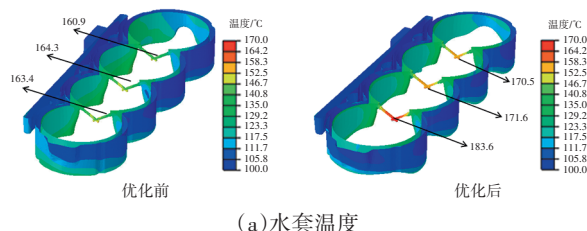


图8 不同部位水套流速云图

3.2.2 缸体增加挡水板对爆震的影响

缸体增加挡水板可降低缸体、缸盖金属温度和水套温差,从而改善爆震,同时降低缸孔变形幅值。优化挡水板前、后的各部位温度见图 9。可以看出,通过增加挡水板,水套、缸体及缸盖的最高温度分别下降 20 °C、6 °C、2 °C,发动机金属温度显著降低,各缸均匀性得到明显改善。



(a) 水套温度

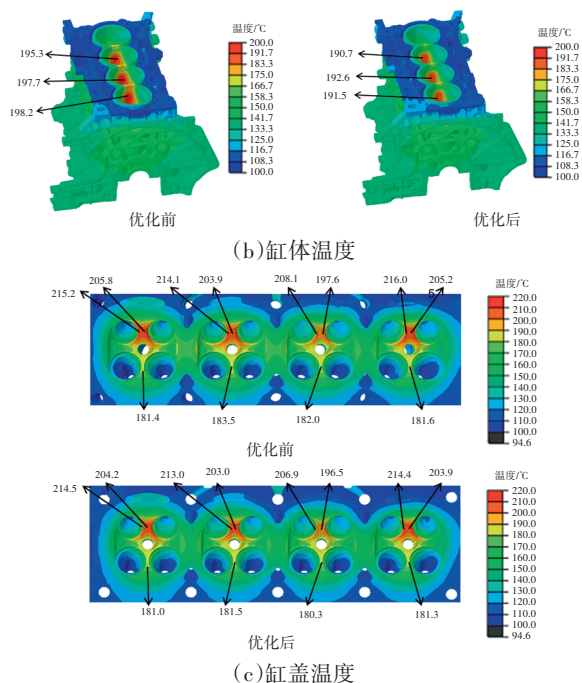


图9 增加挡水板各部位温度对比

在发动机转速 2 500 r/min 及平均有效压力 0.8 MPa 工况下对比优化挡水板前、后试验结果,如图 10 所示。加挡水板后,燃烧重心 CA50 提前 0.6°,燃烧持续期缩短了 0.9°,有效燃油消耗率由 195.9 g/kW·h 降低为 195.4 g/kW·h,改善 0.3%,可以有效抑制爆震。

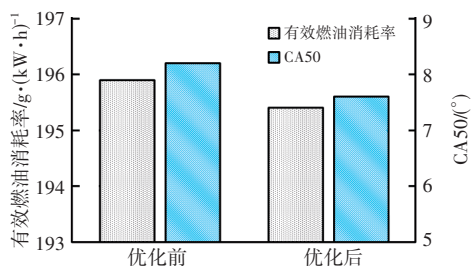
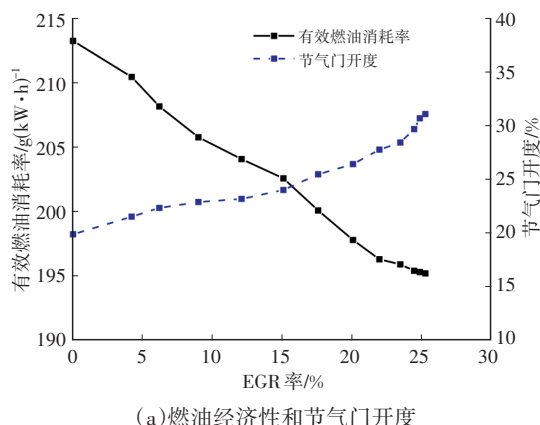


图10 增加挡水板CA50及有效燃油消耗率对比

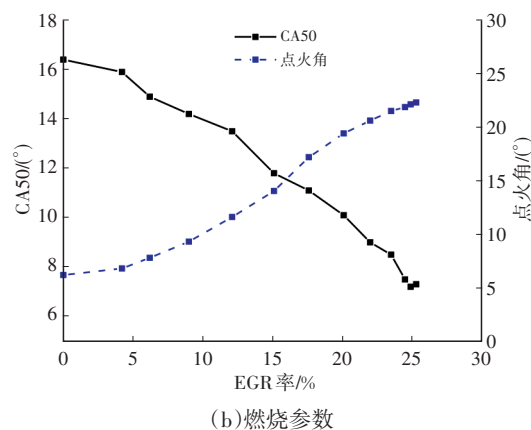
3.3 抑制爆震的EGR开发设计

EGR将排气系统的部分废气引入燃烧室,令其重新参与燃烧。由于废气中含有大量的惰性气体,能够降低燃烧温度,有效抑制末端混合气的自燃,减少爆震,使点火角提前,降低油耗并减少NO_x等有害气体排放。引入EGR可以降低进气歧管真空度,减少泵气损失,进一步提升热效率^[18-19]。

EGR率对发动机油耗、点火角、节气门开度、CA50 等的影响,如图 11 所示,当 EGR 阀全开时,发动机 EGR 率可达 25%,EGR 的通入可以稀释缸内氧气浓度,降低燃烧温度,爆震倾向减弱,因此点火角可以进一步提前,使得燃烧重心 CA50 值由 16° 逐渐提前到 8° 附近,节气门开度增加约 13%,从而使得发动机有效燃油消耗率减少 18 g/kW·h。



(a)燃油经济性和节气门开度



(b)燃烧参数

图11 EGR率对各参数的影响

对比EGR系统优化前、后各部分压损,结果如图 12 所示。通过增大进气管路直径、平顺进气腔入口、将EGR冷却器翅片由5层增加为8层、增大出气波纹管直径、增大EGR阀喉颈,使得EGR系统的总压损由9.65 kPa降低至6.16 kPa,改善36.2%,EGR率由20%提升至25%。

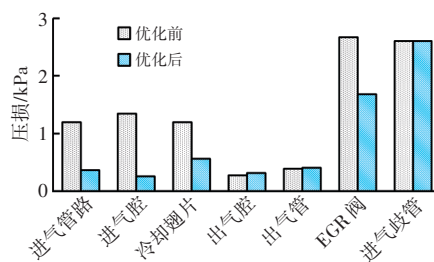


图12 EGR系统优化前、后各部分压损对比

3.4 抑制爆震的发动机控制参数优化

在高温条件下,阿特金森循环发动机通过调整进、排气门正时,改变发动机的有效压缩比和缸内残余废气量,降低压缩过程中缸内温度,提升发动机热效率的同时抑制爆震^[20]。该发动机性能可表示为:

$$\varepsilon_M = \frac{V_{IVC}}{V_C} \quad (3)$$

式中: ε_M 为有效压缩比, V_{IVC} 为进气门关闭时刻气缸的总容积, V_C 为燃烧室容积。

进气温度 60 °C 条件下进排气可变气门正时(Variable

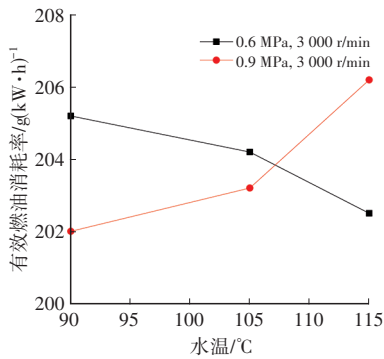
Value Timing, VVT)优化对2 000 r/min外特性性能的影响如表3所示,提前开启进气门、增大气门重叠角可以降低有效压缩比,提升扭矩,从而降低性能衰减幅度。

表3 VVT优化对2 000 r/min外特性性能影响

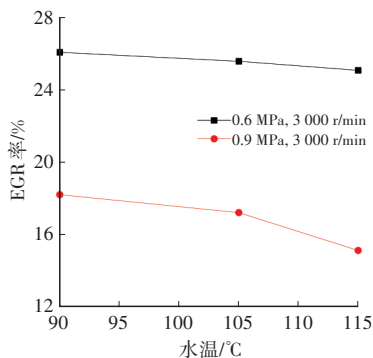
发动机	进气开启相位/(°)	排气关闭相位/(°)	气门重叠角/(°)	有效压缩比	扭矩/N·m
优化前	-5	5	-10	15.3	106
优化后	-24	4	7	13.9	111

在大负荷(转速3 000 r/min、平均有效压力0.9 MPa)以及中小负荷(转速3 000 r/min、平均有效压力0.6 MPa)工况点,发动机出水温度对油耗及燃烧参数的影响,如图13所示。随着水温升高,大负荷工况爆震倾向增强,点火角推迟,EGR通入减少,燃烧重心CA50变大,导致有效燃油消耗率升高;对于中小负荷工况点,随着水温升高,燃烧重心CA50仍可维持在6°~8°的最佳燃烧相位。由于水温升高,燃烧散热减少,发动机出水温度及机油温度升高,使机油粘度降低,减少摩擦损耗,降低了有效燃油消耗率。

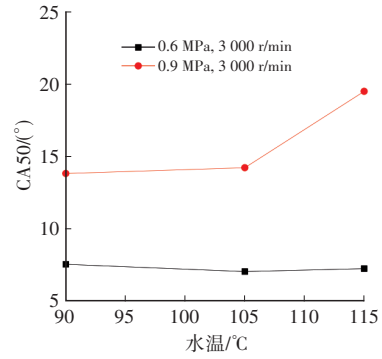
分析不同环境下发动机出水温度控制对各参数影响,结果如图14所示。在整车应用中,中小负荷工况下,将水温提升至105 °C,或在大负荷工况下,将水温降低至90 °C,发动机均能够达到最佳的性能及油耗水平。在高温环境下,由于进气温度升高,发动机爆震倾向加剧,此时,发动机出水温度应低于常温环境。



(a)油耗

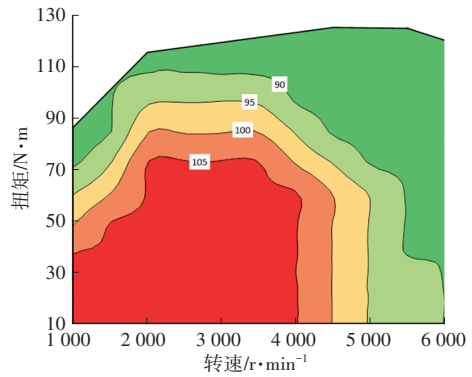


(b)EGR率

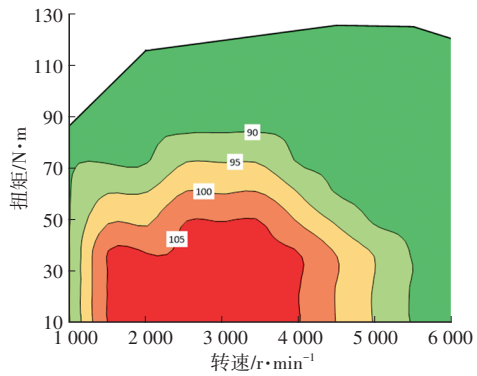


(c)CA50

图13 发动机水温对油耗及燃烧参数的影响



(a)常温环境



(b)高温环境

图14 不同环境中发动机转速及扭矩关系

4 结束语

在工程开发中,本文通过对混动专用发动机各子系统结构、出水温度、点火角等参数进行优化,抑制爆震的同时,提高发动机热效率并减少动力性损失。未来,将在此基础上进一步提升发动机热效率、降低碳排放。

参考文献

- [1] WESTBROOK C K, PITZ W J, LEPPARD W R. The Autoignition Chemistry of Paraffinic Fuels and Pro-Knock and Anti-Knock Additives: A Detailed Chemical Kinetic Study[J]. SAE Transactions, 1991: 605-622.
- [2] SCHMITT M, BOULOUCHOS K. Role of the Intake Generated Thermal Stratification on the Temperature Distribution at Top

- Dead Center of The Compression Stroke[J]. International Journal of Engine Research, 2016, 17(8): 836-845.
- [3] 谭丕强,周捷,楼狄明,等. 废气再循环率对高压压缩比增压直喷汽油机燃烧与排放特性的影响[J]. 内燃机工程, 2022, 43(3): 100-108.
- TAN P Q, ZHOU J, LOU D M, et al. Effects of Exhaust Gas Recirculation Rates on Combustion and Emission Characteristics of High Compression Ratio Turbocharged Direct Injection Gasoline Engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2022, 43(3): 100-108.
- [4] LIVENGOOD J C, WU P C. Correlation of Autoignition Phenomena in Internal Combustion Engines and Rapid Compression Machines[J]. Symposium on Combustion, 1955, 5(1): 347-356.
- [5] LI T, GAO Y, WANG J S, et al. The Miller Cycle Effects on Improvement of Fuel Economy in A Highly Boosted, High Compression Ratio, Direct-Injection Gasoline Engine: EIVC vs. LIVC[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 79: 59-65.
- [6] 张小矛. 基于多缸CFD方法的直喷增压汽油机爆震研究[J]. 内燃机学报, 2021, 39(4): 306-313.
- ZHANG X M. Study on Knock of a Turbocharged Direct Injection Gasoline Engine Based on Multi-Cylinder CFD Simulation[J]. Transactions of CSICE, 2021, 39(4): 306-313.
- [7] 胡祯, 卫海桥, 潘家营, 等. 能量密度和壁面温度对爆震影响的试验研究[J]. 内燃机工程, 2019, 40(4): 1-7.
- HU Z, WEI H Q, PAN J Y, et al. Experimental Research on the Effects of Energy Density and Wall Temperature on Knock[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2019, 40(4): 1-7.
- [8] 邸立明, 孙万千, 杨海龙. 活塞头部形貌对汽油机爆震敏感性影响研究[J]. 内燃机工程, 2020, 41(2): 62-69.
- DI L M, SUN W Q, YANG H L. Effect of Piston Head Shape on Detonation Sensitivity of a Gasoline Engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2020, 41(2): 62-69.
- [9] EWALD J, PETERS N. A Level Set Based Flamelet Model for the Prediction of Combustion in Spark Ignition Engines[C]// 15th International Multidimensional Engine Modeling User's Group Meeting. Detroit, Michigan, USA: SAE, 2005.
- [10] LIANG L, REITZ R D, IYER C O, et al. Modeling Knock in Spark-Ignition Engines Using A G-Equation Combustion Model Incorporating Detailed Chemical Kinetics[C]// SAE World Congress & Exhibition. Detroit, Michigan, USA: SAE, 2007.
- [11] LIU Y D, JIA M, XIE M Z, et al. Enhancement on A Skeletal Kinetic Model for Primary Reference Fuel Oxidation by Using A Semi-Decoupling Methodology[J]. Energy and Fuels, 2012, 26(6): 7069-7083.
- [12] YUICHI S, HIDEKI O, SHINICHI K, et al. Gasoline S.I. Engine Combustion and Knocking Analysis on the Mixture Formation in the Various Direct Injection Fuel Spray Patterns[C]// SAE 2006 World Congress & Exhibition. Detroit, Michigan, USA: SAE, 2006.
- [13] WANG Z, WANG Y, REITZ R D. Pressure Oscillation and Chemical Kinetics Coupling during Knock Processes in Gasoline Engine Combustion[J]. Energy and Fuels, 2012, 27: 599-599.
- [14] JONATHAN M B, ALEX C A. Characterization of Autoignition in a Knocking SI Engine Using Heat Release Analysis[C]// Powertrain & Fluid Systems Conference and Exhibition. Detroit, Michigan, USA: SAE, 2006.
- [15] TAN Z, REITZ R. Modeling Ignition and Combustion in Spark Ignition Engines Using a Level Set Method[C]// SAE 2003 World Congress & Exhibition. Detroit, Michigan, USA: SAE, 2003.
- [16] 龚华, 许敏, 李冕, 等. 提高发动机性能一致性的公差优化[J]. 内燃机工程, 2015, 36(6): 99-104.
- GONG H, XU M, LI M, et al. Tolerance Optimization for Improvement of Consistency in Engine Performance[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2015, 36(6): 99-104.
- [17] GRANDIN B, DENBRATT I. The Effect of Knock on Heat Transfer in SI Engines[C]// SAE 2002 World Congress & Exhibition. Detroit, Michigan, USA: SAE, 2002.
- [18] 刘鸿森, 胡君, 黄德军, 等. 废气再循环对汽油缸内直喷汽油机燃烧和排放的影响[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(33): 263-267.
- LIU H M, HU J, HUANG D J, et al. Effect of EGR on Combustion and Emissions of Gasoline Direct Injection Engine[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(33): 263-267.
- [19] AMANN M, ALGER T, MEHTA D. The Effect of EGR on Low-Speed Pre-Ignition in Boosted SI Engines[J]. SAE International Journal of Engines, 2011, 4(1): 235-245.
- [20] WANG Z, WANG Y, REITZ R D. Pressure Oscillation and Chemical Kinetics Coupling during Knock Processes in Gasoline Engine Combustion[J]. Energy & Fuels, 2012, 26(12): 7107-7119.

(责任编辑 瑞 秋)

修改稿收到日期为2024年4月29日。