

停缸技术对缸内直喷点燃式发动机燃烧与排放及燃油经济性的影响

杨尚升¹, 黄勇成¹, 曹银波²

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 联合电子汽车有限公司, 201206, 上海)

摘要: 为了定量阐明采用停缸(CDA)技术改善发动机部分负荷工况燃油经济性的机理,通过台架试验对CDA发动机在停缸和全缸模式下的燃烧与排放及燃油经济性进行了研究,并结合数值模拟方法对CDA发动机的能量平衡进行了定量分析,以确定各因素对节油的影响。结果表明:与全缸模式相比,在停缸模式下工作缸滞燃期和燃烧持续期缩短,最高缸内压力和最大瞬时放热率增加,燃烧循环变动降低;HC和CO排放降低,但NO_x排放增加。在试验工况下,CDA发动机节油率为8.2%~15.8%,其中缸内传热损失和泵气损失减少,两者节油贡献率分别为80%~111.9%和30.3%~37.4%,而摩擦损失和排气能量增加,两者节油贡献率分别为-9.2%~-20.3%和-1.2%~-26.5%。因此,缸内传热损失减少是CDA发动机最主要的节油因素。

关键词: 点燃式发动机;停缸;燃油经济性;燃烧特性;排放特性

中图分类号: TK411.2 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202007009 **文章编号:** 0253-987X(2020)07-0068-07



OSID 码

Influence of Cylinder Deactivation (CDA) on Combustion and Emission Characteristics and Fuel Economy of Direct-Injection Spark-Ignition Engine

YANG Shangsheng¹, HUANG Yongcheng¹, CAO Yinbo²

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. United Automotive Electronic System Co. Ltd., Shanghai 201206, China)

Abstract: To quantitatively expound the mechanism of using cylinder deactivation (CDA) technology to improve the partial-load fuel economy of a direct-injection spark-ignition engine, bench test was carried out to investigate the combustion and emission characteristics and fuel economy of the engine in the CDA and full-cylinder modes. Moreover, numerical simulation was used to quantitatively analyze the energy balance and determine the effects of various factors on fuel saving of the CDA engine. The results show that, in comparison with the full-cylinder mode, the ignition delay and combustion duration are shortened, the peak values of the in-cylinder pressure and heat release rate are increased, and the cyclic variation of combustion is reduced in the CDA mode. In addition, HC and CO emissions are reduced, while NO_x emissions are increased in the CDA mode. Under the test conditions, the fuel economy of the CDA engine is improved by 8.2% to 15.8%. In comparison with the full-cylinder mode, the in-cylinder heat-transfer losses and pumping losses in the CDA mode are reduced, which contributes to the fuel saving rates by 80% to 111.9% and 30.3% to 37.4%, respectively. While the friction losses and

收稿日期: 2020-01-16。 作者简介: 杨尚升(1995—),男,硕士生;黄勇成(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB0105900)。

网络出版时间: 2020-04-02

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20200402.1531.002.html>

exhaust energy are increased, resulting in the decrease in the fuel saving rates by -9.2% to -20.3% and -1.2% to -26.5% , respectively. Therefore, the reduction of in-cylinder heat-transfer losses is the most important fuel-saving factor for CDA engines.

Keywords: spark-ignition engine; cylinder deactivation (CDA); fuel economy; combustion characteristics; emission characteristics

汽车在城市道路环境下行驶时发动机大多工作在部分负荷工况下,扭矩需求较低,进气量较少,节气门开度较小,进气节流损失较大且缸内燃烧较差,使得发动机的燃油经济性较差,而停缸(CDA)技术能够有效地提升发动机在部分负荷工况下的燃油经济性^[1-7]。发动机在部分负荷工况下停止部分气缸工作后,为了保证相同的扭矩输出,需增大节气门开度以增加工作气缸的进气量,此时进气节流损失减小且工作气缸燃烧改善,从而达到提升发动机经济性的目的。

CDA 发动机可以在全缸模式和停缸模式之间切换。当发动机以停缸模式运行时,部分气缸会停止喷油和点火,此时若使用适当机构停止气阀运动^[8-12],可以使发动机的燃油经济性进一步提高。停缸时可以总是对固定气缸进行停缸,也可以对多个气缸轮流进行停缸^[13],其中固定停缸是较容易实现的方式。对直列4缸机固定停缸时,停中间两缸(2缸和3缸)扭矩输出平顺性更好^[1,10]。

国内外学者对CDA发动机的性能及节油原理开展了广泛的研究。吉林大学的杨文海利用数值模拟方法对CDA发动机的燃油消耗、各因素(有效功、传热损失和排气损失)在燃油总能量中的占比变化以及泵气损失变化等进行了研究,结果表明发动机在停缸模式(停两缸)下燃油节省约5%,有效功和排气损失占比增加,传热损失占比降低,发动机泵气损失减小15.9%,但该结论缺乏试验数据验证^[4]。王凌峰等将2L自然吸气发动机的凸轮改装为零升程凸轮,并对停缸和全缸模式下发动机油耗、倒拖功等进行了试验对比研究,结果显示发动机在停缸模式下最佳节油率达27%,倒拖功减少约20%^[6]。钱冬羽等对4缸固定停缸CDA汽油机停缸前后的油耗、泵气损失、摩擦损失、排温、燃烧参数等进行了试验研究,结果表明停缸模式下,最大节油率超过20%,泵气损失降低约20%~70%,摩擦损失降低但并未给出定量数据,涡前排温升高,燃烧相位后移^[11]。Kuruppu等通过数值模拟对CDA发动机在不同转速和负荷条件下的燃油消耗、排放等进行研究,获得了停缸模式下的节油map图,其研究

工况的节油率约为6%~18%,CO排放量在低转速、低负荷工况下减少,NO_x排放峰值向低转速低负荷区域移动^[7]。Choi等通过性能模拟和台架试验研究了在不同压缩比条件下CDA技术对发动机的泵气损失、燃油消耗、燃烧相位等的影响,在研究工况下节油率为5%~20%,在低负荷工况停缸模式下泵气损失减少,燃烧相位后移^[14]。Muhamad等利用数值模拟方法对比研究了一台4缸固定停缸CDA汽油机在两种模式下燃油消耗和工作缸指示热效率、泵气损失及缸内最大压力等性能参数,结果表明停缸模式下燃油节省5.2%,工作缸指示热效率增加6.3%,工作缸泵气损失减少45%,缸内最大压力增加16.7%^[15]。

尽管上述文献对停缸式CDA发动机的性能及节油原理进行了一定的研究,但是尚不完善:一方面,多数文献仅围绕泵气损失变化来分析CDA技术的节油原理,部分文献虽然提及摩擦、传热、排气等因素对节油有一定影响,但并未定量分析其对节油的影响程度;另一方面,对停缸模式下发动机的燃烧和排放特性进行研究的文献较少,且研究也不全面。因此,本文旨在利用台架试验和数值模拟的方法对零升程凸轮CDA发动机在停缸和全缸模式下发动机燃烧与排放特性、燃油经济性等进行对比研究,以期定量阐明停缸模式下各因素对节油的影响程度,得到CDA发动机的节油原理。

1 试验装置及方法

试验用发动机的基本参数如表1所示,发动机为一台直列4缸涡轮增压缸内直喷汽油机,进排气系统采用双可变气门正时(VVT),并采用零升程凸轮来实现停缸。零升程凸轮结构如图1所示,在正常凸轮旁边增加一组升程为零的凸轮,并在每组气阀凸轮附近增加两个方向相反的螺旋凹槽,通过电磁阀控制两根插销插入螺旋凹槽可以左右移动凸轮轴,进而实现全缸模式与停缸模式相互切换。

发动机试验台架主要测试配置如图2所示。试验利用电力测功机测量发动机的转速和输出扭矩;利用KISTLER公司生产的KiBox燃烧分析仪来记

表 1 发动机基本参数

参数	数值或属性
发动机形式	直列 4 缸四冲程
排量/L	1.5
缸径/mm	72.8
行程/mm	90
连杆长度/mm	138.5
压缩比	11
喷油方式	缸内直喷
点火顺序	1 缸-3 缸-4 缸-2 缸
标定功率/kW	124(6 000 r · min ⁻¹)
最大扭矩/(N · m)	275(2 000~3 500 r · min ⁻¹)

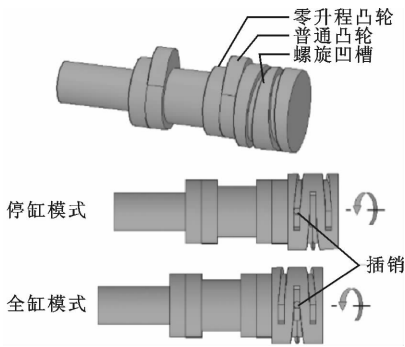


图 1 零升程凸轮停阀机构

录由缸压传感器、电荷放大器和角标仪采集的示功图,并获得燃烧放热率等相关数据;利用热线风速仪测量发动机进气流量;采用 HORIBA 7100 型排放仪测量排放物浓度,其中 NO_x 用化学发光法(CLD)分析,HC 由氢火焰离子法(FID)分析,CO 由不分光红外线法(NDIR)分析。试验通过计算机修改电控单元参数来实现停缸插销的控制,电控单元会控制发动机在停缸机构响应的同时自动停止中间两缸的喷油。试验时首先记录全缸模式下发动机各项运行参数,然后将发动机切换到停缸模式,并增大节气门开度使发动机输出扭矩与停缸前保持一致,待发动机稳定后再记录停缸模式下各项运行数据。试验工况如表 2 所示,在试验工况发动机均组织理论空燃比混合气。

表 2 试验工况

工况	转速/r · min ⁻¹	平均有效压力/MPa	负荷率/%
1	1 500	0.2	9.5
2	2 000	0.4	17.3
3	3 000	0.3	13.0
4	3 500	0.2	8.7

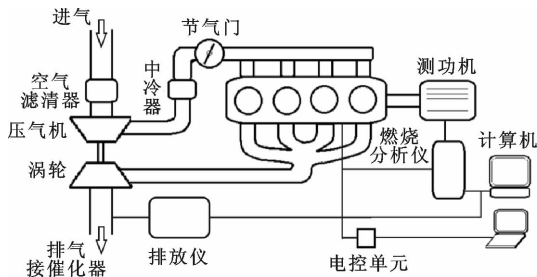


图 2 发动机台架示意图

2 结果分析

2.1 发动机燃烧特性的对比

图 3 和图 4 给出了工况 1 全缸模式与停缸模式下 1 缸的缸压曲线和瞬时放热率曲线。由图可以看到,停缸模式下最高缸压增大,瞬时放热率峰值更高,缸内燃烧放热更快。

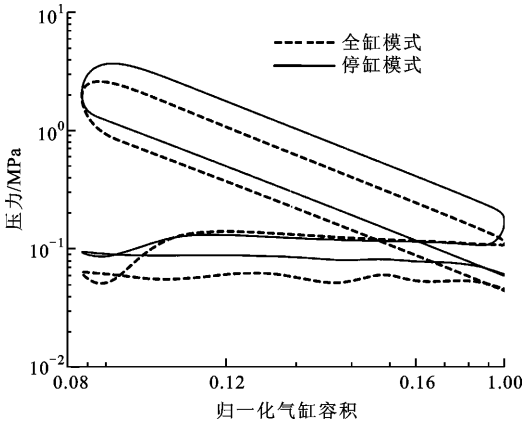


图 3 工况 1 全缸模式与停缸模式缸压曲线对比

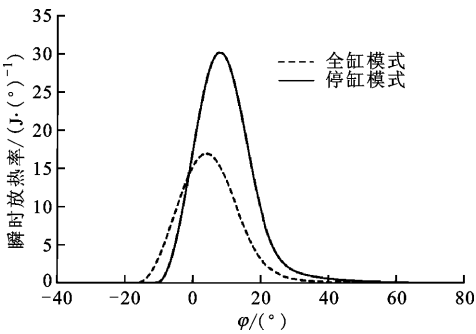


图 4 工况 1 全缸模式与停缸模式瞬时放热率对比

文中将累积燃烧放热率达到 5%、10%、50%和 90%时所对应的曲轴转角分别记为 φ_5 、 φ_{10} 、 φ_{50} 和 φ_{90} 。图 5 和图 6 分别比较了两种模式下各试验工况的 φ_{50} 和燃烧过程持续角。由图 5 可以看出,停缸模式下 φ_{50} 相比全缸模式时后移,这主要是因为点火角后推导致的。停缸模式下工作缸负荷增加, φ_{50} 后移虽然降低了工作缸的等容燃烧度,但同时也降低

了压缩负功,这有利于提升工作缸的指示热效率。由图 6 可以看出,与全缸模式相比,停缸模式下滞燃期和燃烧持续期明显缩短,工况 1、2、3、4 的滞燃期(从点火到 φ_5)分别缩短了 37.7%、32.3%、29.2%、21.6%,快速燃烧持续期(从 φ_{10} 到 φ_{90})分别缩短了 11%、1.9%、13.7%、16.1%。快速燃烧持续期缩短使得发动机工作缸的燃烧质量得到改善,燃烧放热速率更快,燃烧时间损失降低。

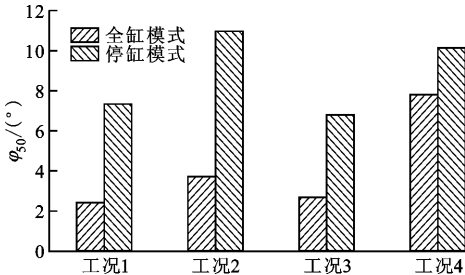


图 5 全缸模式与停缸模式燃烧相位对比

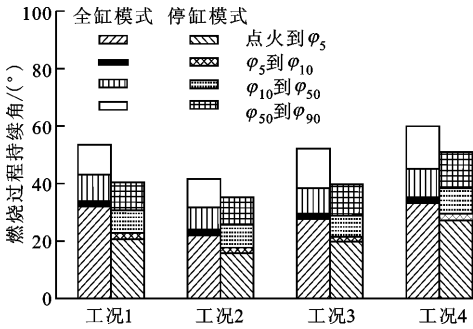


图 6 全缸模式与停缸模式燃烧过程持续角

各工况缸内最大压力如图 7 所示,停缸模式下,工作缸的缸内最大压力增大 41.6%~55.1%。图 8 比较了两种模式下整机的平均指示压力循环变动,各个工况下停缸模式的循环变动均有小幅度降低。这可能是因为停缸模式下进气量增加,进气气体流场扰动随机性减弱,同时缸内燃烧速度更快,燃烧一致性更好。

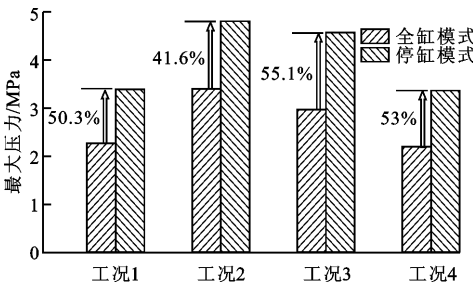


图 7 全缸模式与停缸模式缸内最大压力对比

2.2 排放性能分析

图 9 给出了发动机在全缸和停缸模式下未燃

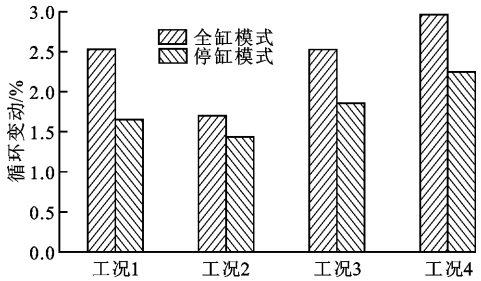
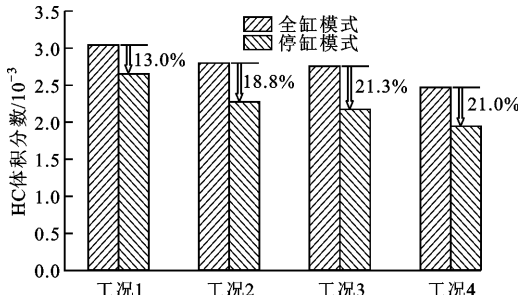
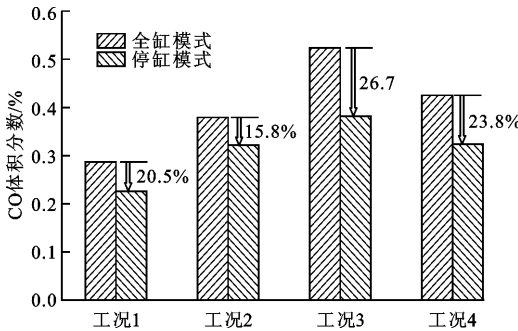


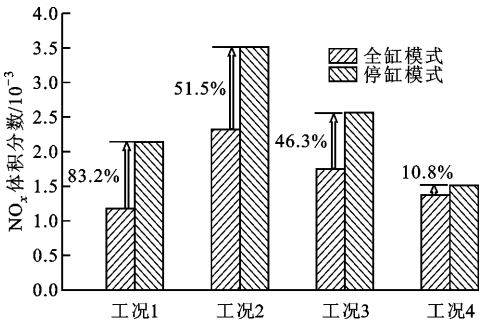
图 8 两种模式下整机的平均指示压力循环变动对比



(a) HC 排放对比



(b) CO 排放对比



(c) NO_x 排放对比

图 9 全缸模式与停缸模式下的排放对比

HC、CO 和 NO_x 排放量(体积分数)的对比。由图可以看出,与全缸模式相比,发动机在停缸模式下 HC 和 CO 排放降低, NO_x 排放增加。这是因为停缸模式下发动机缸内燃烧改善,缸内燃烧压力和温度升高,有利于促进 HC 和 CO 的氧化,但高的缸内温度却有利于 NO_x 的生成。

2.3 节油原理分析

图10比较了全缸和停缸模式下的比油耗。由图可以看到,在每个试验工况下,停缸模式下发动机的比油耗都较全缸模式下低,且转速、负荷较小时,节油效果更加明显,最小节油率为8.2%,最大节油率为15.8%。

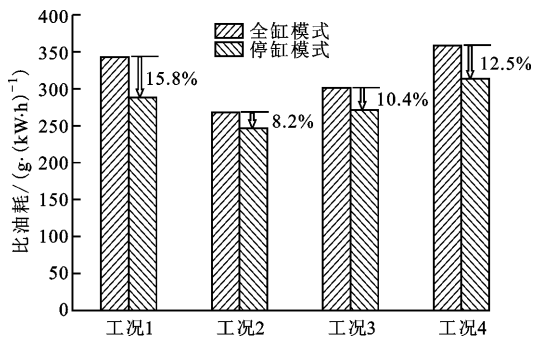


图10 全缸模式与停缸模式下的比油耗对比

为了定量分析各项因素对节油的影响,可以对发动机进行能量平衡分析。全缸模式下,第 k 缸的总油耗能量 $\dot{Q}_{f,k}$ 可以分解为指示功 $P_{i,k}$ 、泵气损失 $P_{p,k}$ 、缸内传热损失 $\dot{Q}_{ht,k}$ 、排气能量 $\dot{Q}_{e,k}$ 和未燃损失 $\dot{Q}_{ic,k}$,即

$$\dot{Q}_{f,k} = P_{i,k} + P_{p,k} + \dot{Q}_{ht,k} + \dot{Q}_{e,k} + \dot{Q}_{ic,k} \quad (1)$$

因为试验时发动机工作在当量比工况下,燃料燃烧较充分,未燃损失极小,所以式(1)中 $\dot{Q}_{ic,k}$ 可以忽略不计。式(1)中 $P_{i,k}$ 和 $P_{p,k}$ 可以通过第 k 缸示功图积分计算得到。

发动机的总油耗能量 $\dot{Q}_f$ 为各缸油耗能量相加,发动机各项因素的能量也为各缸对应因素能量相加,即

$$\begin{aligned} \dot{Q}_f &= \sum \dot{Q}_{f,k} = \\ &= \sum P_{i,k} + \sum P_{p,k} + \sum \dot{Q}_{ht,k} + \sum \dot{Q}_{e,k} = \\ &= P_i + P_p + \dot{Q}_{ht} + \dot{Q}_e \end{aligned} \quad (2)$$

式中的求和符号表示对所有工作缸进行求和,即全缸模式下对 $k=1\sim4$ 缸的结果求和,停缸模式下,对 $k=1,4$ 两缸的结果求和。这是因为停止缸没有喷油、燃烧和进排气,所以停止缸油耗能量为0,而停止缸每循环产生的负功,相当于摩擦损失,其消耗的能量包含在工作缸的指示功中。

将式(2)中的 P_i 进一步分解为有效功 P_b 和摩擦损失 P_{fr} ,因为 P_b 可以通过测功机测得,则 P_{fr} 可由差值($P_i - P_b$)算得,于是发动机总油耗能量可以分解为

$$\dot{Q}_f = P_b + P_{fr} + P_p + \dot{Q}_{ht} + \dot{Q}_e \quad (3)$$

式(3)中有效功、摩擦损失和泵气损失均可由试验数据计算得到,但是试验中并未测量传热损失和排气能量,因而首先将这两项的和作为剩余因素进行分析,其值可以通过总油耗能量减去那些已知因素的能量(即有效功、摩擦损失和泵气损失)计算得到。最后,利用发动机一维性能仿真模型计算得到传热损失和排气能量这两项,用于进一步分析。所用发动机一维性能仿真模型采用GT-SUITE软件搭建,并利用试验数据对模型进行标定,扭矩、比油耗、排气温度等的试验值与模拟值对比如图11所示,模拟误差均控制在3%以内。

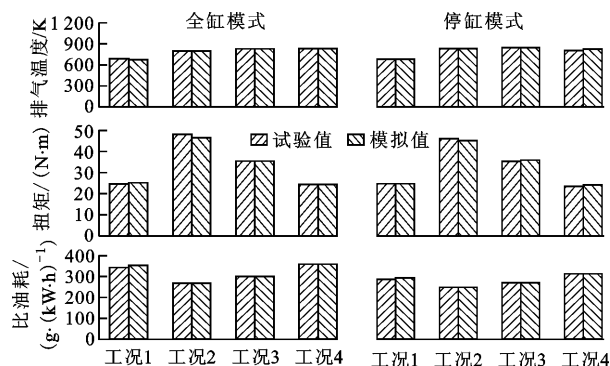


图11 比油耗、扭矩、排气温度的试验值与模拟值对比

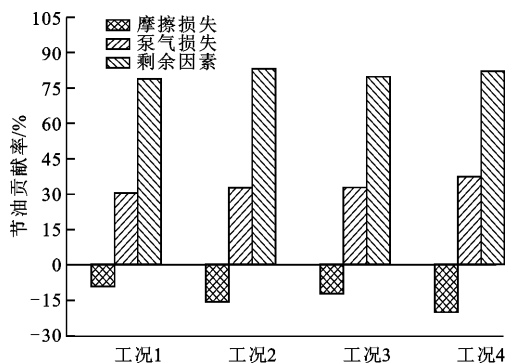
为了定量分析各个因素对节油的影响,可以计算各个因素的节油贡献率。因素 N 的节油贡献率 α_N 为停缸模式与全缸模式下,因素 N 消耗的能量差值与两种模式下总油耗能量差值之比,即

$$\alpha_N = \frac{\dot{Q}_{N,half} - \dot{Q}_{N,full}}{\dot{Q}_{f,half} - \dot{Q}_{f,full}} \times 100\% \quad (4)$$

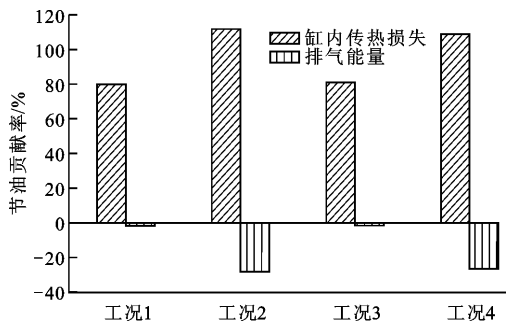
因为停缸模式与全缸模式是在相同输出扭矩条件下进行比较,两者有效功相等,所以不用比较有效功对节油的影响。图12a给出了摩擦损失、泵气损失和剩余因素节油贡献率的对比,其中摩擦损失的节油贡献率在工况1、2、3、4下分别为-9.2%、-15.8%、-12.5%和-20.3%,均为负值,这说明停缸模式下发动机摩擦损失较全缸模式下高。一方面停缸模式下工作缸的最高缸内压力较全缸模式下更高,这导致工作缸摩擦损失增加;另一方面,停止缸没有燃烧,其最高缸内压力较全缸模式工作缸的低,这使得停止缸摩擦损失减小。因为停缸模式下工作缸的摩擦损失增加量大于停止缸的减少量,所以停缸模式下发动机摩擦损失增加。泵气损失的节油贡献率在工况1、2、3、4下分别为30.3%、32.6%、32.5%和37.4%,均为正值,这说明与全缸模式相比停缸模式下泵气损失较小。这是因为停缸

模式下有两缸的气阀停止运动,发动机节气门开度增大,节流损失减小。剩余因素(缸内传热损失和排气能量)的节油贡献率在工况 1、2、3、4 下分别为 78.8%、83.5%、79.9%和 82.5%,明显大于泵气损失的节油贡献率。

图 12b 展示了根据模拟计算得到的缸内传热损失和排气能量的节油贡献率。缸内传热损失的节油贡献率在工况 1、2、3、4 下分别为 80%、111.9%、81.3%和 109%,均为正值。在停缸模式下,虽然工作缸的缸内温度更高、传热损失增加,但是对发动机整体而言,中间两缸停止燃烧,发动机散热的总气缸数减少,所以整体散热损失减少。排气能量的节油贡献率在工况 1、2、3、4 下分别为 -1.2%、-28.4%、-1.4%和 -26.5%,均为负值,这说明停缸模式下发动机排气能量增加。虽然停缸模式下工作缸负荷增大,热效率提升,使发动机总进气量相对于全缸模式降低,从而排气流量降低,但是热效率提升同时使缸内温度升高,进而使排气温度升高。由于排气温度升高使排气能量增加的量超过了进气流量降低使排气能量减小的量,所以停缸模式下排气能量增加。停缸模式下各工况排气能量变化是排气流量和排气温度相互竞争的结果,导致不同工况排气能量增加程度并不一致。



(a) 泵气损失、摩擦损失及剩余因素的节油贡献率



(b) 剩余因素(缸内传热损失、排气能量)的节油贡献率

图 12 各因素节油贡献率对比

综合对比所有因素的节油贡献率可以发现,缸内传热损失的节油贡献率为 80%~111.9%,大于泵气损失的节油贡献率 30.3%~37.4%,因此缸内传热减少是 CDA 技术节油最主要的原因。

3 结 论

本文对零升程凸轮 CDA 发动机进行了台架试验,根据试验数据比较了 CDA 发动机在停缸和全缸模式下发动机燃烧与排放及燃油经济性的变化,并结合数值模拟数据对发动机能量平衡进行分析,发现了 CDA 技术节油的主要原因,得到的主要结论如下。

(1)与全缸模式相比,停缸模式下工作缸 φ_{50} 位置后移,滞燃期和燃烧持续期缩短,瞬时放热率峰值明显增加,燃烧放热更加迅速,缸内最大燃烧压力增大 41.6%~55.1%,燃烧循环变动小幅度降低。

(2)采用 CDA 技术在中低转速、中低负荷下能够减少发动机 HC 和 CO 的排放量,但是会使得 NO_x 排放量明显增加。

(3)CDA 发动机在中低转速、中低负荷下具有较高的节油率,在研究工况下,发动机节油率为 8.2%~15.8%。停缸模式下,传热损失和泵气损失的节油贡献率分别为 80%~111.9%和 30.3%~37.4%,是利于节油的因素;摩擦损失和排气能量损失的节油贡献率分别为 -9.2%~-20.3%和 -1.2%~-26.5%,是不利于节油的因素。停缸模式下传热损失减少是 CDA 发动机节油的主要原因。

参考文献:

- [1] 丁明峰. 可变排量技术在直喷汽油机上应用的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [2] 武聪山. 四缸汽油机停缸曲轴扭转特性研究 [D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [3] 胡茂杨, 常思勤, 刘梁, 等. 车用汽油机停缸时循环功耗研究 [J]. 中国机械工程, 2019, 30(1): 46-52.
HU Maoyang, CHANG Siqin, LIU Liang, et al. Study on cycle's energy losses of vehicle gasoline engine for CDA [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(1): 46-52.
- [4] 杨文海. GDI 发动机可变排量技术的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [5] 钱冬羽. 停缸技术对汽油发动机油耗及运行参数的影响 [J]. 汽车实用技术, 2019(18): 170-173.
QIAN Dongyu. The research of stop cylinder technology in gasoline engine [J]. Automobile Applied Tech-

- nology, 2019(18): 170-173.
- [6] 王凌峰, 朱小春, 刘宏江, 等. 汽油机停缸技术的燃油经济性研究 [J]. 内燃机, 2019(2): 55-57.
WANG Lingfeng, ZHU Xiaochun, LIU Hongjiang, et al. Study on performance of gasoline engine with cylinder deactivation [J]. Internal Combustion Engines, 2019(2): 55-57.
- [7] KURUPPU C, PESIRIDIS A, RAJOO S. Investigation of cylinder deactivation and variable valve actuation on gasoline engine performance; SAE Paper 2014-01-1170 [R]. New York, USA: SAE, 2014.
- [8] ZHAO Jinxing, XI Qingyuan, WANG Shuwen, et al. Improving the partial-load fuel economy of 4-cylinder SI engines by combining variable valve timing and cylinder-deactivation through double intake manifolds [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 141: 245-256.
- [9] BATES B, DOSDALL J, SMITH D. Variable displacement by engine valve control; SAE Paper 780145 [R]. New York, USA: SAE, 1978.
- [10] MUELLER R, UITVLUGT M. Valve selector hardware; SAE Paper 780146 [R]. New York, USA: SAE, 1978.
- [11] FUJIWARA M, KUMAGA K, SEGAWA M, et al. Development of a 6-cylinder gasoline engine with new variable cylinder management technology; SAE Paper 2008-01-0610 [R]. New York, USA: SAE, 2008.
- [12] HUBER R, KLUMPP P, ULBRICH H. Dynamic analysis of the Audi valvelift system [J]. SAE International Journal of Engines, 2010, 3(1): 839-849.
- [13] 韩宗奇. 轿车发动机变工作排量技术与应用研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2010.
- [14] CHOI M, KWAK Y-H, ROTH D B, et al. Synergies of cooled external EGR, water injection, miller valve events and cylinder deactivation for the improvement of fuel economy on a turbocharged-GDI engine; part 2 Engine testing; SAE Paper 2019-01-0242 [R]. New York, USA: SAE, 2019.
- [15] MUHAMAD S M, ABDUL A A, ABDUL L Z, et al. Investigation of cylinder deactivation (CDA) strategies on part load conditions; SAE Paper 2014-01-2549 [R]. New York, USA: SAE, 2014.

(编辑 荆树蓉)

(上接第8页)

- [17] CHANG H B, SUN P, WANG S Y. Output tracking control for an omnidirectional rehabilitative training walker with incomplete measurements and random parameters [J]. International Journal of Systems Science, 2017, 48(12): 2509-2521.
- [18] SUN P, WANG S Y, KARIMI H R. Robust redundant input reliable tracking control for omnidirectional rehabilitative training walker [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014, 2014: 1-10.
- [19] PARK S H, HAN S I. Robust-tracking control for robot manipulator with deadzone and friction using backstepping and RFNN controller [J]. IET Control Theory and Applications, 2011, 5(12): 1397-1417.
- [20] BHAT S P, BERNSTEIN D S. Finite-time stability of continuous autonomous systems [J]. SIAM Journal on Control and Optimization, 2000, 38(3): 751-766.
- [21] 孙平. 不确定康复训练机器人速度与加速度同时约束的跟踪控制 [J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(10): 1067-1072.
SUN Ping. Tracking control for uncertain rehabilitative training walker with velocity and acceleration simultaneous constraints [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(10): 1067-1072.

(编辑 陶晴)