

二次燃油喷射对自吸直喷汽油机低速性能影响的 试验研究

孙雪迎, 苏方旭, 梁呈兴

(北京汽车动力总成有限公司, 北京 101106)

Experimental Investigation into Influence of Split-Injection on Low-Speed Performance of Gasoline Direct Injection Engine

SUN Xueying, SU Fangxu, LIANG Chengxing

(BAIC Motor Powertrain Co., Ltd., Beijing 101106, China)

Abstract: The influence of split-injection on the low-speed performance of gasoline direct injection (GDI) engine was researched experimentally with full load at the operating point of 2 000 r/min using a series of injection modules, focusing on the effect of split-injection on power and fuel economy. And the mechanism of the effect of split injection on the engine performance at low speed was investigated by analyzing the changes of cylinder pressure, combustion and emissions. The result indicates the optimized split-injection generating the stratified stoichiometric mixture in the combustion chamber can accelerate the flame propagation, and improve the power and fuel economy by 5% and 6% respectively.

摘要: 对一台自吸直喷汽油机采用不同的燃油喷射模式在 2 000 r/min 全负荷工况进行试验,研究了二次喷射对发动机低速动力性和经济性的影响,并根据缸压参数、燃烧参数及排放物的变化规律对二次喷射影响发动机低速性能的机理进行了探讨。结果表明,相比单次喷射,通过优化二次喷射时刻可以使动力性提升 5%,经济性提升约 6%。二次喷射的优化机理主要是实现了燃烧室内油气浓度的不均匀分布,可提升燃烧速度,通过分层燃烧实现动力性和油耗的改善。

关键词: 自吸直喷汽油机;低速性能;二次喷射

Key words: gasoline direct injection engine; low-speed performance; split-injection

DOI: 10.13949/j.cnki.nrjgc.2018.01.005

中图分类号: TK411

文献标识码: A

0 概述

汽油机缸内直喷(GDI)技术能够改善汽油机瞬态工况及冷起动时的排放^[1],降低部分负荷工况油耗水平,提高全负荷动力性,是目前乘用车汽油发动机的主流燃油喷射技术^[2-3]。缸内直喷技术对汽油机动力性和经济性的改善通常需要结合多次喷射的控制策略来实现。在部分负荷工况,通过多次喷射

实现分层燃烧,在点火时刻远离火花塞的区域形成稀混合气层,在靠近火花塞附近形成浓混合气层,实现混合气的可靠点燃和燃烧的分层传播;同时,由于整体的稀空燃比策略使得进气量增大而减小了泵气损失,在做功冲程缸壁附近的空气形成热阻层,可减少热量散失,提高工质做功能力并减少湿壁和猝熄现象^[4-9]。在全负荷工况采用多次喷射可以提高动力性,一般认为这是由于采用多次喷射可以在有效

降低燃烧室温度的同时改善混合气的均匀性,降低爆震倾向从而提高转矩输出^[10]。

本文以一台自主研发的自吸直喷汽油机为研究对象,通过改变喷射策略,对比了单次喷射与二次喷射及二次喷射不同的第二次喷射时刻下的低速特征转矩点(2 000 r/min)的转矩水平和油耗水平,并根据所监测的参数(如点火角、过量空气系数、燃烧积累放热率、瞬态缸压、瞬态燃烧放热率、爆震指数及机油稀释变化情况)分析了不同喷射策略对转矩、油耗和排放的影响及其影响机理,为同类机型的二次喷射及多次喷射策略的标定和优化提供了参考。

1 试验方法

试验对象为一台自吸直喷汽油机,相应技术参数如表 1 所示。

表 1 试验所用汽油机主要技术参数

项目	参数
发动机型式	直列 4 缸
排量/cm ³	1 498
缸径/mm×行程/mm	76.0×82.6
压缩比	11
标定功率/kW	90
最大转矩/(N·m)	155
燃油喷射类型	缸内直喷
配气类型	进、排气可变气门正时
喷油器位置	进气侧侧置
喷油器安装角度/(°)	25
喷油器规格	日立 6 孔 JSD8 喷油器
喷油压力/MPa	4~20
静态流量/(cm ³ ·s ⁻¹)	15 (油压 10 MPa)
燃油	市售 92# 汽油

采用 AVL Dyno Road 202/12SL 型测功机系统监测发动机转速和输出转矩,在发动机进排气管路、冷却液管路、机油管路及曲轴箱通风系统安装稳态温度、压力传感器实时监测与发动机运行状态相关的各温度、压力参数。采用 Kistler 6052B 柱塞式瞬态缸压传感器监控缸内压力变化,采用 Kistler 2613B 角标仪监测发动机曲轴转角信号,采用 AVL 735S 油耗仪监测燃油消耗量,采用 AVL 553 恒温系统控制冷却液温度,采用 AVL 554 恒温系统控制机油温度,采用 AVL 442 漏气量仪监测活塞漏气量,采用 Horiba MEXA-700 发动机排放分析系统监测发动机原始排放,采用 ETAS ES631 空燃比仪监测空燃比,采用特灵进气空调系统控制进气温度、湿度、压力,采用 ABB Sensyflow FMT700-P 流量计监测进气流量。数据采集和处理系统方面,采用 AVL

PUMA OPEN 1.5.1 测试系统处理测功机及台架其他温度、压力通道参数,采用 AVL Indimodule Gigabit 622 燃烧分析系统处理缸压信号和曲轴转角信号,采用 ETAS INCA 7.1 软件及 ES592 通讯工具进行发动机标定参数的在线设定。

选取 2 000 r/min 全负荷工况,过量空气系数设定为 0.92,喷油压力设定为 12 MPa,设置燃油喷射策略如表 2 所示,本文中喷射时刻以排气行程上止点为零点。点火角采用各喷射策略下的最佳点火角,即采用具有相同爆震及燃烧稳定性水平的点火角度。本文中曲轴转角正值代表上止点后(ATDC),负值代表上止点前(BTDC)。其他的控制参数保持相同,边界条件如表 3 所示。

表 2 试验所使用的燃油喷射策略

喷射策略	第一次喷射时刻/(°)	第二次喷射时刻/(°)	喷射质量比
1	57	—	—
2	57	100	2:1
3	57	120	
4	57	140	
5	57	150	
6	57	160	
7	57	190	
8	70	190	
9	57	210	
10	57	270	

表 3 试验边界条件

项目	控制值
发动机冷却液出口温度/℃	90±2
燃油温度/℃	20±4
机油温度/℃	100±2
进气温度/℃	25±2
进气湿度/%	30±10
进气压力/kPa	101±1

2 试验结果与分析

2.1 动力性、油耗对比

从单次喷射模式变为二次喷射模式后,动力性发生变化。如图 1 所示,喷射策略 7 的动力性最佳,比单次喷射提升约 5%左右,油耗降低约 6%。喷射策略 2 的动力性最差,比单次喷射降低约 1%。

2.2 燃烧参数对比

2.2.1 单次喷射与二次喷射策略的对比

通过图 2 点火角(AI00)及图 3 燃烧积累放热率的对比可以看出:喷射策略 7 的 5%燃烧放热率(AI05)对应的曲轴转角和 10%燃烧放热率对应的

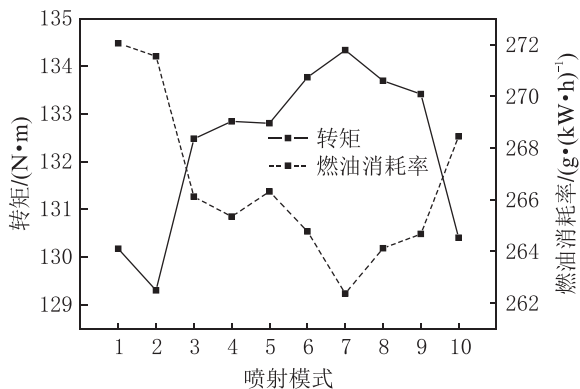


图1 不同燃油喷射策略下的动力性和经济性对比

曲轴转角(AI10)比单次喷射大,而50%燃烧放热率对应的曲轴转角(AI50)和90%燃烧放热率对应的曲轴转角(AI90)比单次喷射小。由图4可以看出:喷射策略7在各个燃烧阶段(如AI00~AI05、AI05~AI10、AI10~AI50、AI50~AI90)的持续期均比单次喷射短。由图5所示:喷射策略7最高燃烧压力对应的曲轴转角 $A_{p_{max}}$ 为上止点后 25.1° ,对应最大压力升高率 R_{max} 出现在上止点后 17.8° 曲轴转角处,其值为 $0.18 \text{ MPa}/(^\circ)$;单次喷射 $A_{p_{max}}$ 为上止点后 26.4° ,对应 R_{max} 出现在上止点后 13.2° 曲轴转角处,其值为 $0.13 \text{ MPa}/(^\circ)$ 。从单次喷射与二次喷射的曲轴转角-缸压曲线和瞬时放热率曲线(图6)上可以看到:以上止点后 11.6° 曲轴转角为分界点,在此之前单次喷射的瞬时缸压一直大于二次喷射策略7,在此之后直到放热期结束二次喷射策略7的瞬时缸压大于单次喷射;从瞬时放热率曲线来看,在上止点后 5° 曲轴转角之前二者基本具有相同的瞬时放热率,在上止点后 $5^\circ \sim 24^\circ$ 之间二次喷射策略7的放热率明显高于单次喷射,上止点后 24° 之后单次喷射具有更高的瞬时放热率。这表明,相比单次喷射,喷射策略7在主燃期燃烧速度加快,造成最大压力升高率和最高燃烧压力等增加,同时爆震倾向增大,导致点火角度推后。喷射策略7下主燃期燃烧速度的加快是其动力性提升的主要原因,而由此引起的爆震倾向增大是进一步提升其动力性最重要的制约因素。

一般认为二次喷射策略中的第二次燃油喷射对燃烧室具有显著的冷却作用,特别是第二次喷射时刻比较推后的策略的冷却效果更为明显。燃烧室温度的降低对抑制爆震具有显著效果,而爆震则是低速转矩提高的一个主要限制因素。即采用二次喷射策略后可以通过冷却燃烧室使爆震倾向得到抑制,从而可以采用更提前的点火角使燃烧的等容率升高以提高热效率从而提升低速转矩。通过调整点火角

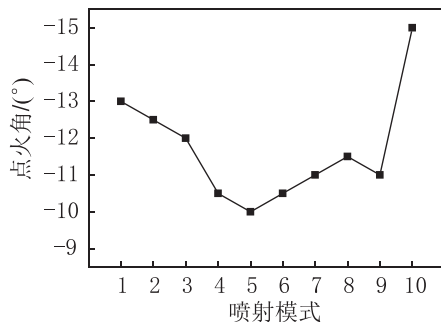


图2 不同燃油喷射策略下的点火角

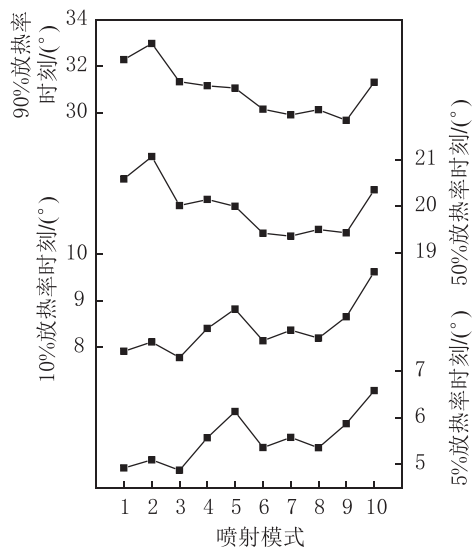


图3 各策略下的燃烧积累放热率对应曲轴转角

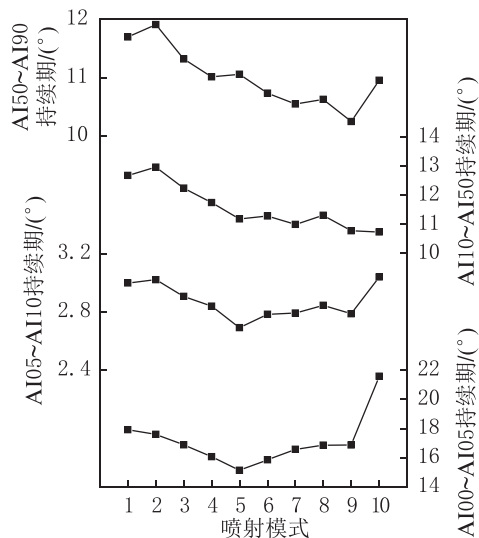


图4 各策略下的燃烧持续期

控制各喷射模式下具有相同的爆震水平,由图7可以看出,各策略下的爆震指数最大值、最小值及均值基本处于同一水平,且处于本发动机爆震控制目标值0.05以下。由图2可以看出,使用喷射策略7后点火角比单次喷射推后了 2° 曲轴转角,这说明采用

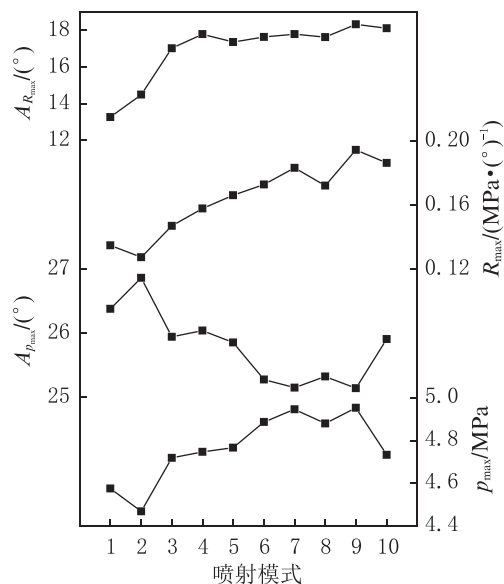


图 5 各策略下的缸内压力特征参数

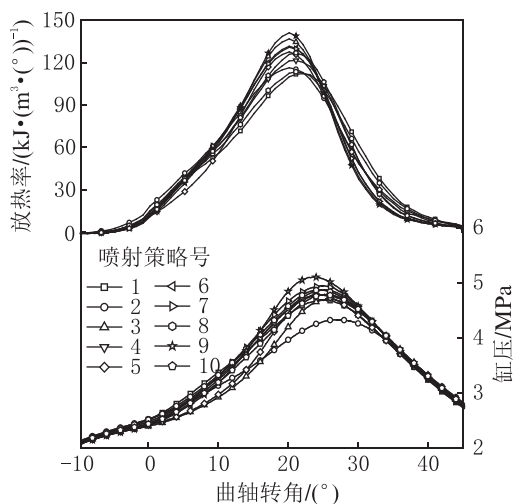


图 6 各燃油喷射策略下的瞬态缸压及放热率

喷射策略 7 后爆震倾向反而增大了,即在此策略下二次喷射对燃烧室的冷却作用不显著,此时动力性的提升不是由于冷却作用带来的点火角提前。只有在第二次喷射时刻非常滞后,如喷射策略 10 采用上止点后 270° 曲轴转角的第二次喷射角度后,二次喷射对燃烧室的冷却作用加强,点火角度比单次喷射提前 2° 曲轴转角,但此时的油气混合效果变差带来的负面效应抵消了点火角度提前带来的益处,综合效果为动力性相比单次喷射下降。

2.2.2 不同的二次喷射策略对比

对比喷射策略 7 与策略 8 可以看出,燃烧参数对第一次喷射时刻从上止点后 57° 变化到 70° 不敏感,这使得此工况点的第一次喷射角度的标定可以在约 10° 曲轴转角的偏差内进行,可以实现区域

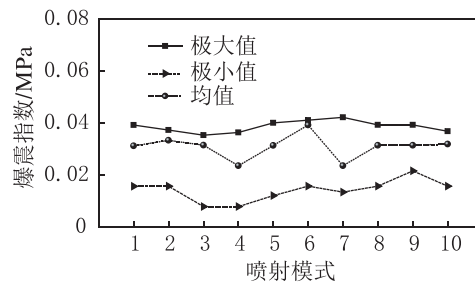


图 7 各燃油喷射策略下的爆震指数

MAP 工况标定的平顺性要求。从其他二次喷射策略对比可以看出,当第二次喷射时间发生变化后,燃烧特性相应变化:第二次喷射角度从上止点后 100° 变化至 150° ,滞燃期(AI00~AI05)和燃烧初期(AI05~AI10)持续期逐渐变短,燃烧速度变快;第二次喷射角度从上止点后 160° 变化至 270° ,滞燃期和燃烧初期持续期逐渐变长,燃烧速度变慢。在整个二次喷射策略试验涵盖角度范围内 AI10~AI50 的燃烧期逐步缩短;除上止点后 270° 外, AI50~AI90 的燃烧期也呈现逐渐缩短的趋势;第二次喷射角度为上止点后 270° 时,油气混合效果的恶化抑制了燃烧速度的提高。 p_{max} 及 R_{max} 随第二次点火角度的推后而逐渐增加,第二次喷射角度达到一定程度(如上止点后 190°)后开始减小。最大压力升高率对应角度 $A_{R_{max}}$ 随第二次喷射时刻的推后而逐渐增加,第二次喷射时刻推迟到一定角度(如上止点后 190°)后开始减小。除了二次喷射策略 2 转矩比单次喷射降低约 1% 外,其他二次喷射策略下的转矩水平平均高于单次喷射。

2.3 原始排放对比

2.3.1 单次喷射与二次喷射策略的对比

不同喷射策略下的排放情况如图 8 所示。喷射策略 7 比单次喷射的 HC 排放水平高约 24%。为排除湿壁及活塞漏气等因素的影响,根据尾气处测得的排放过量空气系数(α_{ex})及流量计测得的进入气缸的空气流量和燃油流量计测得的输入过量空气系数(α_{in})可得进入气缸但未参与燃烧且未随废气排出的燃油(即窜入曲轴箱和撞击到缸套及活塞的未参与燃烧或形成积炭的汽油)的量的比例 $\beta = (\alpha_{ex} - \alpha_{in}) / \alpha_{in}$ 。如图 9 所示,单次喷射和二次喷射策略 7 的 β 值相当,分别为 3.77% 和 3.79%,说明本试验中的二次喷射策略没有带来湿壁和漏气量的恶化。HC 排放的升高表明二次喷射策略 7 比单次喷射策略的油气混合均匀性差。从 NO_x 排放来看,二次喷射策略 7 比单次喷射高约 16.3% 左右,表明前者燃烧温度较高,与前述二者燃烧速率的关系相吻合。从 CO_2 和 CO 排放来看,二次喷射策略 7 相比单次喷射 CO_2

排放略高(约 4.3%),CO 排放略低(约 9.2%)。从单次喷射与所有二次喷射策略的排放物对比来看总体规律如下:相比单次喷射,二次喷射的 HC、CO₂、NO_x 排放偏高,而 O₂ 含量偏低。这是由于单次喷射策略下油气的缸内混合时间比二次喷射长,混合更均匀。研究表明,过量空气系数 α 为 0.8~0.9 时,滞燃期最短,火焰发展期燃烧传播速度快,因此在排放不发生恶化的前提下,在高负荷工况尤其是低速全负荷工况往往采用 0.9 左右的 α 值来加快燃烧速度并抑制爆震,达到提升动力性的效果。通过权衡排放和动力性输出,本汽油机在 2 000 r/min 全负荷工况的最佳 α 值为 0.92。在二次喷射策略 7 中,由于第二次喷射的燃油在缸内油气混合时间短,油气混合的不均匀性造成了燃烧室内的混合气浓度区域化差异,与单次喷射相比,这种区域性差异导致燃烧速度快及燃烧持续期短,从而实现了分层燃烧的效果,使得转矩提升且油耗降低,同时保持排放符合要求范围内。

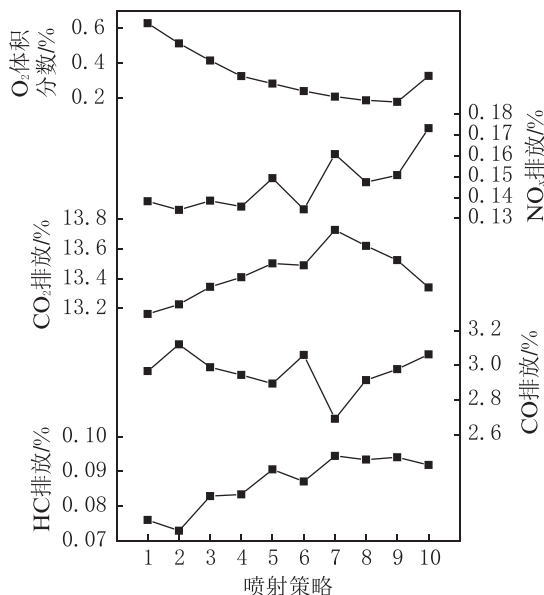


图 8 不同喷射策略下的原始排放物水平

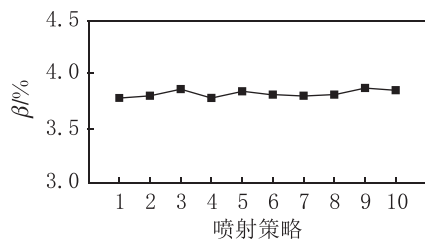


图 9 不同喷射策略下的燃油 β 值水平

2.3.2 不同的二次喷射策略的对比

第二次喷射角度从上止点后 100°曲轴转角逐渐

推后到 270°, HC 和 NO_x 排放量整体呈现增加趋势, O₂ 的排放量逐渐减少。CO₂ 和 CO 排放规律如下:在第二次喷射角度从上止点后 100°增大到 160°过程中 CO 排放呈降低趋势,CO₂ 排放呈增加趋势;在第二次喷射角度从上止点后 190°增大到 270°过程中 CO 排放呈增加趋势,CO₂ 排放呈降低趋势。由于随着第二次喷射角度的推后,汽油液滴蒸发时间缩短及油气混合均匀性变差,HC 排放量随第二次喷射角度增大而升高;同时燃烧室内的油气浓度不均匀性也随着第二次喷射角度增大而加大,导致快速燃烧期燃烧速率加快,燃烧温度升高,NO_x 排放升高。CO₂ 和 CO 排放量的变化规律呈负相关,受缸内温度、油气混合情况、燃烧温度等综合因素制约,未呈现单一变化规律。

3 结论

(1) 在 2 000 r/min 全负荷工况下采用二次喷射策略时,第二次喷射时刻对性能影响较大,经过第二次喷射时刻优化后,动力性比单次喷射有 5%左右的提升,同时油耗降低约 6%。

(2) 相比单次喷射,经过优化的二次喷射策略燃烧持续期短,燃烧速度加快,燃烧等容率高,动力性提高。随着第二次喷射时刻的推后,燃烧速率增加,但此角度过度滞后导致燃油蒸发时间过短,滞燃期及燃烧初期持续期变长,动力性下降,本试验中最佳第二次喷射时刻为上止点后 190°。

(3) 使用二次喷射策略未降低爆震倾向,相反由于燃烧速度加快,点火角相同时二次喷射的爆震倾向反而比单次喷射大,必须适当推迟点火以维持与单次喷射相同的爆震水平。

(4) 二次喷射与单次喷射相比,由湿壁等带来的燃油消耗未发生明显恶化;HC、NO_x 等排放物含量相比单次喷射增加并随第二次喷射时刻的推后而增大;O₂ 含量随此时刻的推后而逐渐减少,说明二次喷射模式下油气混合均匀性相比单次喷射变差,但主燃期燃烧温度升高。这种不均匀性随第二次喷射时刻推后而加剧。这种不均匀性带来的分层燃烧效果与燃油雾化效果差带来的负面效应相互作用,通过试验优化此喷油时刻可以在兼顾排放的同时使动力性达到最大。

参考文献:

- [1] 刘德新,刘斌. 二次喷油优化直喷汽油机冷启动排放特性的研究[J]. 西安交通大学学报, 2010, 46(1): 13-18.
LIU D X, LIU B. Study of two-stage injection in optimizing cold-start emission characteristics of GDI engine [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 46(1): 13-18.

(下转第 41 页)

- [2] ZHAO F Q, LAI M C, HARRINGTON D, et al. Automotive gasoline direct-injection engines[M]. Detroit:SAE Int. Ed,2002.
- [3] 蒋坚,高希彦.汽油缸内直喷式技术的研究与应用[J].内燃机工程,2003,24(5):39-44.
JIANG J,GAO X Y. The research and application of gasoline in 2 cylinder direct injection technology [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering,2003,24(5):39-44.
- [4] 高剑,蒋德明,黄佐华,等.缸内直喷汽油机燃油喷雾和分层燃烧的数值研究[J].内燃机学报,2005,23(4):297-306.
GAO J, JIANG D M, HUANG Z H, et al. The research and application of gasoline in 2 cylinder direct injection technology numerical study on spray and mixture stratified combustion in a direct Injection gasoline engine[J]. Transactions of CSICE, 2005,23(4):297-306.
- [5] 白云龙,王建昕,帅石金,等.缸内直喷汽油机喷雾、混合气形成和燃烧过程的三维数值模[J].燃烧科学与技术,2010,16(2):98-103.
BAI Y L, WANG J X, SHUAI S J, et al. 3D numerical simulation of the spray mixture formation and combustion processes for a GDI engine[J]. Journal of Combustion Science and Technology,2010,16(2):98-103.
- [6] 黄雅卿,王志,王建昕.二次喷射对直喷增压小排量汽油机影响的数值模[J].汽车工程,2014,36(10):1181-1188.
HUANG Y Q, WANG Z, WANG J X. Numerical simulation on the effects of split injection on a downsized turbocharged GDI engine [J]. Automotive Engineering, 2014, 36 (10): 1181-1188.
- [7] 白云龙,王志,王建昕,等.分层当量比混合气抑制爆震的燃烧排放特性研究[J].内燃机工程,2011,32(3):6-11.
BAI Y L, WANG Z, WANG J H, et al. Research on combustion and emission of stratified stoichiometric mixture for knocking suppression[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering,2011,32(3):6-11.
- [8] 韩文艳,许思传,周岳康,等.喷油开始时刻对缸内直喷汽油机性能的影响[J].同济大学学报(自然科学版),2013,41(4):565-570.
HAN W Y, XU S C, ZHOU Y K, et al. Start of injection impacts on performance of a direct injection spark ignition engine [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41 (4): 565-570.
- [9] 李相超,张玉银,许敏,等.直喷汽油机缸内喷雾湿壁问题研究[J].内燃机工程,2012,33(5):17-23.
LI X C, ZHANG Y Y, XU M, et al. Investigation on wall wetting for GDI engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering,2012,33(5):17-23.
- [10] SCHWARZ C, SCHUNEMANN E, DURST B, et al. Potentials of the spray guided BMW DI combustion system[C/OL]. SAE Paper,2006,2006-01-1265. [2006-04-03]. <http://papers.sae.org/2006-01-1265/>.