

缸内直喷汽油机复合燃烧技术

牟江峰, 刘德新, 舒歌群

(天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 300072, 天津)

摘要: 针对缸内直喷汽油机(GDI)存在的主要排放未燃 HC 和 NO_x 问题,提出了燃烧理论空燃比的复合喷射燃烧技术,运用了废气再循环(EGR)分层技术. 复合喷射通过稳压腔辅助喷射燃油和缸内直接喷射燃油,使缸内形成准均质混合气,以满足各种工况下 GDI 对混合气的要求. 在负荷由小到大直至满负荷的范围内都可避免出现过稀区、过浓区,这利于燃烧并减少 HC 排放;利用在进气管上设计的独特的废气通道,通过滚流分层充气方法,将进气冲程再循环的废气和油气分层,以形成废气-油气-废气馅饼状分层,从而提高了废气再循环率,降低了 NO_x 排放. 两种技术的结合,可以解决 GDI 发动机存在的主要排放问题. 实验证明:复合燃烧系统与 EGR 分层充气技术的有效结合,可以在各种工况下降低 NO_x 排放,降低量为 61%;可以降低冷启动时的 HC 排放,降低量至少为 50%.

关键词: 缸内直喷;理论空燃比;进气歧管;复合燃烧;废气再循环

中图分类号: TK411+.29 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)07-0014-05

A Compound Combustion Technology for Gasoline Direct Injection Engine

MOU Jiangfeng, LIU Dexin, SHU Gequn

(State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A combustion technology with stoichiometric air-fuel ratio using compound injection and exhaust gas recirculation (EGR) stratification was proposed to solve the problem of unburned HC and NO_x emission in gasoline direct injection (GDI) engines. The quasi-homogenous charge can be formed by compound injection technique, i. e., plenum injection and cylinder direct injection, to reduce the HC emission. Adopting the unique design of the exhaust passage in the intake manifold, the recirculated exhaust gas and fuel can be stratified in the intake stroke to achieve the higher EGR rate, leading to the lower NO_x emission. The experimental results show that the NO_x emission under all operating conditions and the HC emission during cold-start could decrease by up to 61% and 50%, respectively, with the combination of the compound combustion system and the EGR technology.

Keywords: gasoline direct injection; stoichiometric air-fuel ratio; air intake manifold; compound combustion; exhaust gas recirculation

缸内直喷发动机以其经济性上的优势成为目前汽油机发展的主要研究方向之一. 但是,由于所需的稀燃催化剂尚未成熟,因而造成了 NO_x 排放量大、分层稀燃混合气难以控制、中小负荷未燃碳氢(UB-HC)较高等问题. 从总体上讲,稀燃缸内直喷汽油机

(GDI)发动机的这些排放要高于传统的工作在化学计量比下的三元催化剂的气道喷射汽油机^[1]. 鉴于上述问题,从 2000 年以后,欧洲开始采用以均质混合气和理论空燃比(均质当量比)为特征的技术路线. 这条技术路线的难点是,需在很短的时间内形成

均质混合气,否则进气冲程中喷射的燃油容易润湿缸壁,从而引发 HC 排放升高等问题^[2]。

为了解决冷启动及中小负荷下的 HC 排放,本文提出了复合燃烧技术方案。该方案将在带预热的进气歧管稳压腔内设置一个辅助低压喷油器,并与缸内直喷高压主喷油器联合作用。在启动和怠速工况下,仅由进气管稳压腔上的辅助喷油器供油,这样燃油不仅有充足的气化时间,而且有良好的加热条件,因而在启动工况下无需喷油加浓。在其他工况下,稳压腔上的辅助喷油器提供一部分具有理论空燃比的燃油,由于气化混合时间充足,所以该喷油器可以提供优质均质混合气,以保证火花塞远端不会发生熄火现象;缸内主喷油器提供的另一部分燃油在火花塞处形成了较浓的混合气,这利于火核形成传播,从而解决了 GDI 易出现的混合气局部过浓、过稀带来的排放问题。

1 复合喷射技术

1.1 GDI 发动机排放问题产生的原因

1.1.1 小负荷下 UBHC 的排放 GDI 发动机的油气混合主要是喷雾和缸内的空气运动所致,而与冷启动时的低温关系不大,所以冷启动时无需过量供油^[3]。但是,在中小负荷的情况下,GDI 发动机的 UBHC 排放量比较大,主要原因是:①GDI 发动机采用的是分层稀薄燃烧,燃油在压缩行程后期喷入气缸,这样雾化时间不足,油气不能充分混合,故在燃烧室内出现了局部混合气过浓的现象;②大量的浓混合气集中在火花塞附近,使得火焰在蔓延时会因周围混合气过稀而熄灭;③稀薄燃烧会造成气缸内温度偏低,不利于 UBHC 化合物的继续氧化;④GDI 发动机压缩比较高,残留在狭缝容积中的 HC 会因此而增加;⑤使用高废气再循环(EGR)率将导致燃料燃烧条件恶化;⑥GDI 燃烧系统主要采用壁面引导法,该系统的喷雾易与活塞顶和缸壁发生碰撞,而缸壁的温度较低,从而导致燃油在着火前来不及完全蒸发而引起较多的 HC 排放^[4]。

1.1.2 NO_x 的排放 虽然 GDI 发动机采用了稀薄燃烧技术而使气缸内反应区的温度下降(从 NO_x 的生成原理上来说是可以减少 NO_x 的生成量的),但由于 GDI 发动机的混合气由浓到稀呈分层状态,所以不可避免地在空燃比为 1 附近出现了混合气偏浓的区域,这些区域的 NO_x 排放量会增加,而较高的压缩比和较快的反应放热率也是引起 NO_x 排放量升高的一个原因^[5]。此外,GDI 发动机本质上是稀薄

燃烧的,所以它仍受到稀薄燃烧 NO_x 催化转化问题的困扰。一般来说,GDI 发动机大部分时间都处于非满负荷工况, NO_x 排放量约占总排量的 1/2,发动机长期处于稀空燃比工况会导致废气排气中含氧量较大,排放温度较低,致使传统的三元催化器的转化效率不高,起燃困难,从而限制了 NO_x 在 GDI 发动机上的应用。

1.2 复合喷射的技术原理

1.2.1 燃烧理论空燃比混合气 本文方案是在 GDI 上采用燃烧理论空燃比混合气,并保持其在化学计量比下工作。同分层稀燃 GDI 发动机相比, $\lambda=1$ 的混合气燃烧发动机具有以下优点^[6]。

(1)燃烧过程不需要对分层充气和均质充气进行模式转换;缸内燃油蒸发冷却充气可以减小压缩行程放热损失,提高燃烧稳定性和 EGR 率,提高受爆震限制的压缩比;改用稀燃均质充气模式工作时系统无需修改。

(2)其控制系统比分层稀燃的更为简化,系统优化的灵活性更强。

(3)可与其他技术进行匹配,如增压,取消发动机怠速,采用直接启停、无级变速器(CVT)和混合动力技术。

(4)不需要稀燃 NO_x 后处理系统,但可以使用三效催化器。与分层稀燃 GDI 发动机相比具有更低的 NO_x 排放量,并能够在瞬态工况下降低 NO_x 的排放量。

综上所述,均质理论空燃比 GDI 发动机具有超低 NO_x 排放的潜力,是 GDI 发动机的一个重要发展方向^[7]。

1.2.2 复合喷射的原理 复合喷射技术就是将发动机每次循环所需的燃油分为两部分进行喷射:一部分由进气道进入气缸,该燃油与空气形成均质稀混合气并分布在整个燃烧室中;另一部分由缸内喷嘴直接喷入气缸,该燃油会将火花塞附近的混合气适当加浓。

复合喷射技术方案如下。

(1)启动工况下无需喷油加浓。缸内喷油采取不均匀喷射方式,2 个缸稀燃,2 个缸加浓,排气经催化器氧化后生热,使得催化器迅速升温,而冷启动的未燃 HC 排放量可进一步降低。

(2)在其他工况下,由进气道进入的一部分优质均质混合气来保证火花塞远端不会发生熄火现象,由缸内喷油器提供的另一部分燃油形成火花塞处较浓的混合气,这样利于火核形成和传播,从而解决了

直喷汽油机易出现混合气局部过浓、过稀带来的未燃 HC 排放问题. 每次循环所需燃油分别在进气冲程和压缩冲程喷入气缸, 缸中局部的浓混合气仅占总喷油量的一小部分, 缸中主体是均质稀混合气, 二者的燃油量与空气成理论空燃比的关系, 所以此时的混合气可称作准均质理论空燃比混合气.

相比单一进气冲程的较早喷射或压缩冲程的较晚喷射, 复合喷射能更好地满足不同工况下对混合气的要求, 降低对气流运动的要求, 且在工况过渡时能避免控制逻辑复杂的燃烧模式切换. 图 1 示出了单次喷油形成的传统分层混合气和复合喷油在缸内形成混合气的浓度分布情况对比. 这里仅以涡流轴向分层为例.

由图 1a~图 1d 可以看出, 单次喷油在整个气缸内形成了普通分层, 分层度高, 而在不同的负荷下出现了过浓或过稀区. 在过浓区, 碳烟、微粒易生成, 在过稀区, HC 排放量增加. 从图 1e~图 1h 可以看出, 复合喷油避免了过浓或过稀区的生成, 并允许负荷在大范围内变动. 这是因为, 当气缸内均质不能再稀释时(见图 1e 和图 1f), 可以通过改变分层喷射量来改变负荷; 当分层喷射量不可再增加时(见图 1g

和图 1h), 可以通过增加均质喷射量来增加负荷. 也就是说, 利用复合喷油技术, 缸内混合气浓度分布可以得到优化控制和调节.

当点火区混合气浓度不能再增加但需要增大负荷时, 可以增加均质混合气的浓度, 直到均质化学计量比达到最大为止, 这样不会出现混合气过浓区; 当需要减小负荷时, 可以减少均质喷油量, 也可以减少分层喷油量, 从而在负荷很低时保证不会出现混合气过稀区, 以避免生成过多的 HC. 所以, 在负荷由小到大直至满负荷时, 都可避免出现过稀、过浓区, 使排放得到改善.

利用复合喷射系统, 通过对主、辅喷油时刻及喷油脉宽的精确控制, 在气缸内可形成准均质分层理论空燃比混合气, 以满足 GDI 在各工况下对混合气的要求. 复合喷油方式中的两次喷油量的分配比例对发动机的经济性影响显著. 辅助喷油量决定着燃烧室内大范围均质混合气的浓度, 该浓度在组织方法上应注重雾化蒸发效果, 以使均质程度尽量高. 主、辅喷油共同决定着火花塞周围混合气的浓度, 所以两次喷油量的控制要相当精确.

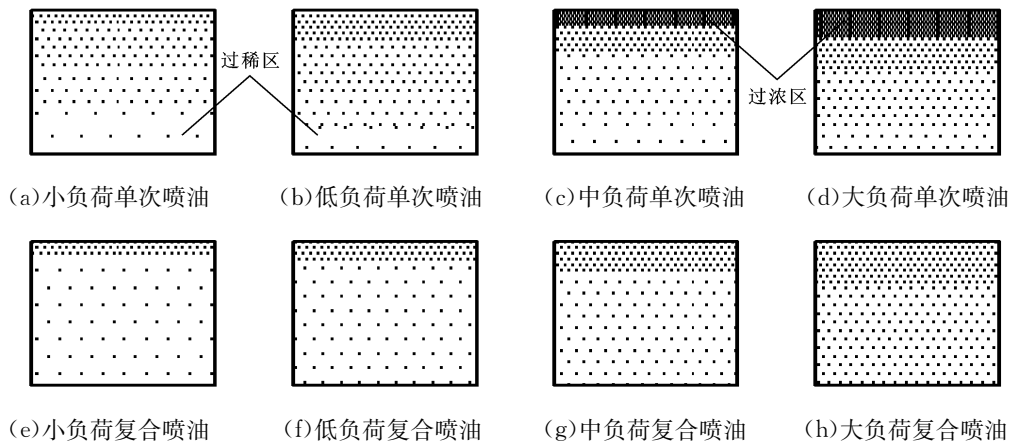


图 1 不同负荷下单次喷油和复合喷油形成缸内混合气的浓度分布

2 EGR 分层充气技术

EGR 是将发动机排出的一部分废气返回进气管, 并与混合气混合后再次进入气缸参加燃烧. 采用 EGR 技术可以使 NO_x 的排放水平很低, 因而是控制 NO_x 排放的主要措施^[8].

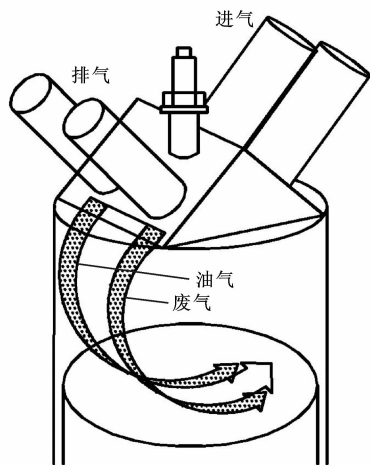
NO_x 的主要成分是 NO, 还有少量的继续氧化产物 NO_2 . NO 是在高温燃烧下(大于 2 200 K)由分解的氧原子和氮原子反应生成的, 故 NO 的生成量在很大程度上取决于燃烧温度, 此外 NO 还与 O_2

的体积分数直接相关.

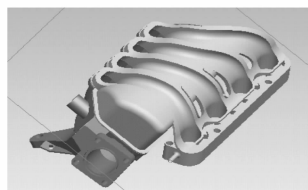
降低发动机 NO 排放, 可以通过降低燃烧室峰值火焰温度、降低 NO 生成阶段的 O_2 体积分数和缩短燃烧气体在高温下的滞留时间等来完成. 显然, O_2 体积分数的下降会使燃烧恶化, 并限制了 HC 和 CO 的进一步氧化, 从而导致发动机的热效率下降, 同时也不利于 HC 和 CO 的排放. 因此, 提高发动机的指示指标、改善发动机的 HC 和 CO 排放、改善 NO_x 排放, 三者之间存在着矛盾, 应综合考虑这些因素, 并给予必要的折中.

本文方案如图 2 所示.在进气冲程,通过滚流分层充气方法将再循环的废气和新鲜空气分层,形成形如馅饼的废气-空气-废气状态,由此大大提高了发动机对 EGR 的耐受力,实现了高达 30% 以上的 EGR 率.混合气分层可以一直保持到压缩冲程后

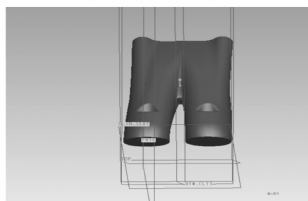
期,因此减小了废气对火花塞点火的影响.在燃烧冲程,滚流消失,废气与其他混合气掺混,此时可发挥废气对燃烧速度和燃烧温度的影响,最大程度地降低燃烧噪声,减少 NO_x 排放.



(a) 缸内气流流动



(b) 进气歧管中 EGR 通道



(c) 发动机气道

图 2 废气 EGR 分层充气示意图

3 复合喷射方案设计

3.1 复合喷射燃烧室设计

与复合燃烧系统相配合的燃烧室及活塞如图 3 所示.由于采用当量比燃烧的高压喷嘴与火花塞相距较远,所以缸内喷雾采用壁面引导.如图 4 所示,喷嘴的喷雾与火花塞上的特制导流槽相配合,使得喷油开始时刻为进气上止点后 60° .对于喷嘴喷出的油束,5 束中的 2 束喷向排气门,3 束喷向活塞,并在缸内形成如图 4 所示的反滚流,另外再配合进气管稳压腔上的低压喷嘴,使缸内形成均质混合气.所以,在进气行程,缸内气流运动以滚流为主;在压缩行程,缸内运动以滚流和挤流为主.配合 EGR,使得缸内形成的废气在缸壁四周,新鲜可燃混合气在气缸中心,从而形成馅饼型混合气.

实施复合燃油喷射技术将解决 GDI 启动、怠速和小负荷工况下未燃 HC 排放量较大的问题.为了使 4 个进气管都能均匀地喷射燃油,本文将辅助喷油器放置在稳压腔之上.复合燃油喷射技术结构如图 5 所示.

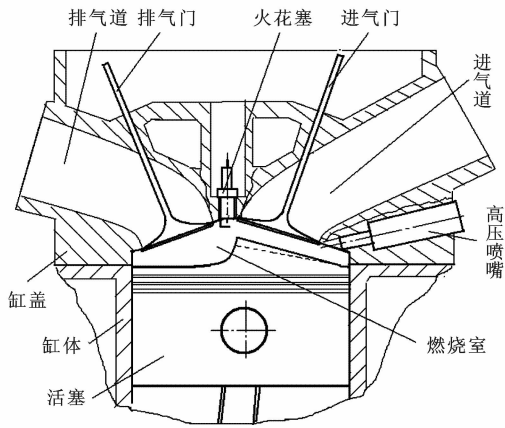
本文方案将在带预热的进气歧管稳压腔内设置了一个辅助低压喷油器,其与缸内直喷主喷油器联

合作用.在启动工况,由进气管稳压腔上的辅助喷油器供油,燃油经稳压腔、进气歧管、进气道进入缸内,这样燃油不仅有充足的气化时间,而且有良好的加热条件,因而启动工况下无需喷油加浓.同时,各缸采用缸内不均匀喷射方式,2 个缸稀燃,2 个缸加浓,其排气经催化器氧化后生热,使得催化器迅速升温,从而未燃 HC 排放问题得以解决.

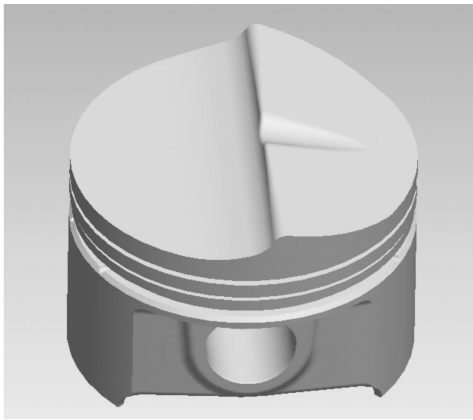
在其他工况下,由稳压腔上的辅助喷油器供油.由于气化混合时间充足,所以提供的优质均质混合气保证了火花塞远端不会发生熄火现象.缸内主喷油器提供的另一部分燃油,使火花塞处形成较浓混合气,这利于火核形成和传播,由此解决了 GDI 易出现混合气局部过浓、过稀区带来的 HC 排放问题.

3.2 实验结果

从图 6、图 7 中可以看出:复合燃烧系统可以有效降低冷启动工况下的 HC 排放,降低幅度达 50% 左右;EGR 可以在不同负荷下有效降低 NO 排放. EGR 率 $R_{\text{EGR}} \leq 20\%$ 时, NO_x 的排放基本没有变化,随着 EGR 阀开度的加大, NO_x 的排放明显降低; $R_{\text{EGR}} = 50\%$ 时,与 EGR 阀关闭相比, NO_x 的排放降低了 61%.考虑到 R_{EGR} 对燃油经济性的影响, R_{EGR} 应选择在 45%.

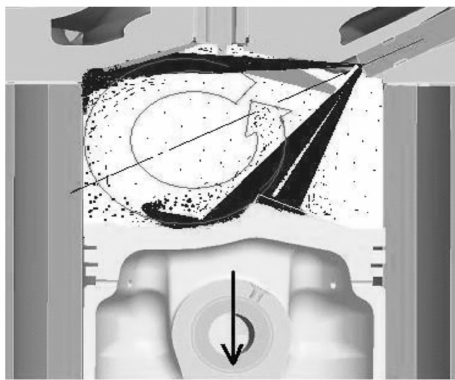


(a)系统燃烧室

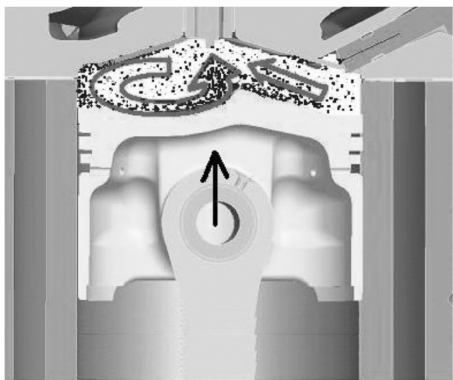


(b)系统活塞

图 3 缸内直喷复合燃烧系统燃烧室及活塞示意图



(a)进气行程



(b)压缩行程

图 4 复合燃烧系统喷油策略

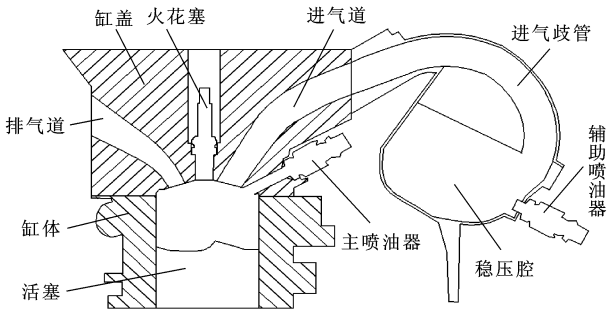


图 5 GDI 复合喷射示意图

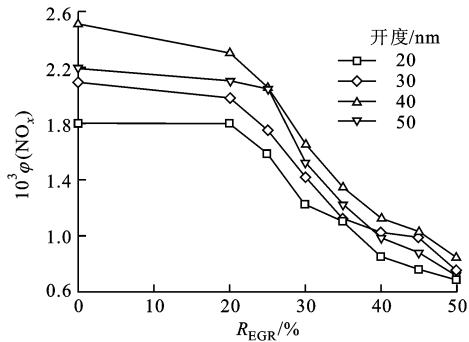


图 6 转速为 3 600 r/min 时 EGR 阀开度对 NO_x 排放的影响

4 结 论

(1)本文针对 GDI 发动机存在的未燃 HC 和 NO_x 排放问题,提出了燃烧理论空燃比的复合喷射燃烧技术和 EGR 分层技术.采用燃烧理论空燃比混合气,通过使用传统的三元催化器,能更好地降低 NO_x 排放,从而降低汽车催化剂成本.

(2)利用复合喷射系统,通过对主、辅喷油器喷油时刻及喷油脉宽的精确控制,使得气缸内形成准

均质分层理论空燃比混合气,以满足 GDI 在各工况下对混合气的要求.在负荷由小到大直至满负荷时,避免出现过稀、过浓区,使未燃 HC 排放问题得以改善.

(3)利用在进气管上设计的独特的废气通道,通过滚流分层充气方法,将进气冲程再循环的废气和油气分层,实现高 EGR 率.混合气分层可以一直保

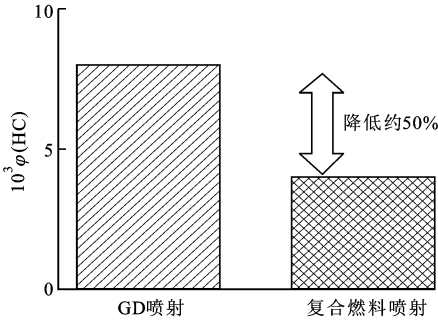


图 7 冷启动时复合喷射和普通缸内直喷的 HC 排放比较

持到压缩冲程后期,因此减小了废气对火花塞点火的影响.在燃烧冲程,滚流消失,废气与其他混合气掺混,此时可发挥废气对燃烧速度和燃烧温度的影响,最大程度地降低燃烧噪声,减少 NO_x 排放.

(4)实验证明:通过复合燃烧系统与 EGR 分层充气技术的有效结合,可以在各种工况下降低 NO_x 排放量,降低幅度为 61%,使冷启动时的 HC 排放量至少降低 50%.另外,因为燃烧理论空燃比混合气可用三元催化器来降低其排放量,从而使 GDI 的排放问题得以解决.

参考文献:

[1] ZHAO F, HARRINGTON D L. Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1999,25:437-562.

[2] LWAMOTO Y, NOMA K, NAKAYAMA O. Development of gasoline direct injection, SAE 970541 [R]. Warrendale, PA, USA; Society of Automotive Engineers, 1997.

[3] KONIG A R. Results on processes and catalyst materials for lean NO conversion, SAE 962041 [R]. Warrendale, PA, USA; Society of Automotive Engineers,

1996.

[4] 裴普成,刘书亮. 汽油机分层废气再循环与稀薄混合气燃烧 [J]. 清华大学学报, 2002,42(4):520-522.

PEI Pucheng, LIU Shuliang. Lean combustion and EGR spark with charge stratification in an ignition engine [J]. Journal of Tsinghua University, 2002, 42 (4):520-522.

[5] 王燕军,王建昕,帅石金. 汽油机稀薄燃烧研究的新进展——从 GDI 到 HCCI [J]. 汽车技术,2002(8):1-5.

WANG Yanjun, WANG Jianxin, SHUAI Jinshi. A new progress of lean combustion study for gasoline engine;from GDI to HCCI [J]. Automobile Technology, 2002(8):1-5.

[6] 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 Jian, GAO Xiyan. The research and application of gasoline in-cylinder direct injection technology [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2003,24(5):39-44.

[7] D'ERRICO G, ONORATI A. An integrated simulation model for the prediction of GDI engine cylinder emissions and exhaust after-treatment system performance, SAE 20040143 [R]. Warrendale, PA, USA; Society of Automotive Engineers, 2004.

[8] 白云龙,王志,王建昕. 利用废气滞留改善缸内直喷汽油机部分负荷性能的研究 [J]. 内燃机学报, 2009,27 (4):328-332.

BAI Yunlong, WANG Zhi, WANG Jianxin. Study on improvement of part-load performance in a GDI engine using exhaust gas trap [J]. Transactions of CSICE, 2009,27(4):328-332.

(编辑 王焕雪 苗凌)