

二次喷油优化直喷汽油机冷启动排放特性的研究

刘德新, 刘斌

(天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 300072, 天津)

摘要: 研究了一种通过特殊活塞顶面形状结合二次喷射策略来解决直喷汽油机冷启动工况排放问题的新方法. 该方法通过适当的二次喷油分配、结合缸内气流运动来改善燃油混合气的分布. 利用 AVL-Fire 对不同喷油策略下直喷汽油机启动时缸内油气混合分布进行了模拟, 对不同喷油策略的冷启动排放进行了实验研究. 结果表明, 采用特殊活塞顶面形状进行合理的壁面引导, 同时结合二次喷油策略, 能够优化直喷汽油机冷启动工况下缸内空燃比的分布, 使得混合气浓度在火花塞附近略高, 宜于火花点火, 在火花塞周围略低, 宜于火焰传播, 从而提高燃烧的稳定性, 减少燃油的湿壁现象, 降低 HC 的排放.

关键词: 二次喷油; 直喷汽油机; 活塞顶面形状; 冷启动排放

中图分类号: TK411 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)01-0013-06

Study of Two-Stage Injection in Optimizing Cold-Start Emission Characteristics of GDI Engine

LIU Dexin, LIU Bin

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

Abstract: A new solution to the cold start emissions of gasoline direct injection (GDI) engines was presented with two-stage injection strategy and special design of piston crown to improve the distribution of the air-fuel mixture and the combustion stability. AVL-Fire was used to simulate the distribution of fuel-air mixture in a cylinder under cold start condition. The cold-start-exhaust experiment with different injection strategies was conducted. The results show that the two-stage injection strategy combined with reasonably guiding the air flow would optimize the distribution of the fuel-air ratio in the cylinder under cold start condition, thus improving the characteristics of the spark ignition and the spread speed of the flame front, and mitigating fuel wetted-wall phenomenon. It seems that the present method may enhance the combustion stability and reduce the HC emissions.

Keywords: two-stage injection; gasoline direct injection engine; shape of piston crown; cold start emission

随着汽油机排放要求的不断提高,冷启动和暖机过程的排放便成为研究和控制的重点. 美国联邦测试规程 FTP75 要求的配有三效催化转化器的汽油机,其 80% 的 HC、CO 排放来自冷启动阶段^[1-4]. 尽管冷启动过程很短,但是启动过程中的各项参数,

如混合气的浓度及温度,燃烧反应的程度等,都将导致发动机燃烧出现不稳定、失火等不正常的现象,从而产生大量的未燃碳氢物.

推迟发动机点火可以让更多的高温流体快速通过催化器,使得催化器快速起燃,但这会降低发动机

燃烧的稳定性^[5-7],同时还需满足冷启动的要求,因此直喷汽油机冷启动优化极具挑战性.

本文针对 4G15 直喷汽油机,研究了一种通过特殊活塞顶面形状、结合二次喷油策略来解决直喷汽油机冷启动工况的排放问题的新方法,探讨了直喷汽油机缸内油气的混合状态,实验研究了不同的喷油策略.

1 实验方案

直喷汽油机的一个常见的问题是冷启动工况的排放,由于启动时的喷油压力不高,所以 HC 排放量较大.为了解决该问题,本文采用特殊活塞顶面形状对气流进行了合理的壁面引导,再结合二次喷油策略来改善缸内燃油分布.

图 1 为活塞顶面的形状,其中进气侧为凸起的斜坡,排气侧为凹陷的圆弧,凸起斜坡面上有一个圆弧凹槽,凹槽中心线正对火花塞.图 2 为 4G15 直喷汽油机燃烧系统示意图,其中喷油器在进气门的下方,气门的中心线与斜坡面上的圆弧凹槽中心线位于同一平面内.这种设计不仅可以避免活塞与燃烧室的其他部件发生干涉,而且有利于解决燃油积聚于凹坑的问题.

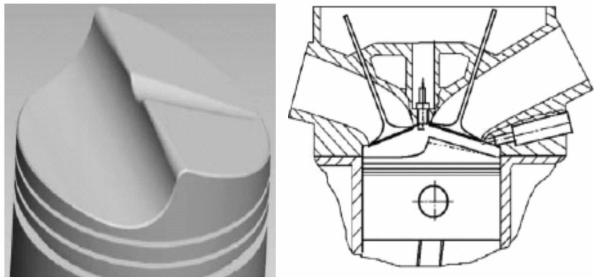


图 1 活塞顶面形状 图 2 汽油机燃烧室系统

2 4G15 发动机数值模拟

2.1 计算网格

4G15 发动机为 4 缸 4 冲程、进气可变配气机构(VVT)的直喷汽油(GDI)发动机,气门以双顶置凸轮轴驱动,点火在电子控制下进行,燃烧室形状为蓬顶的形状,具体参数见表 1.图 3 为三维模型下发动机的移动网格.

网格划分是从进气行程开始至压缩行程结束,亦即在 $360^{\circ}\sim 720^{\circ}$ 的单次喷射和二次喷射下对缸内混合气形成过程进行模拟分析.由于 4 个气缸的缸内油气混合状态基本一致,所以可将第 1 缸作为研究对象.另外,由于气缸是以气门中心线对称的,故可选取燃烧室模型的 1/2 作为模拟区域,这样既可

节省计算时间,又可保证计算精度.

表 1 直喷汽油机性能参数

排量/L	1.498
缸径/mm	77.8
气缸行程/mm	78.8
压缩比	12
气门数	16
进气气门座直径/mm	31
排气气门座直径/mm	26

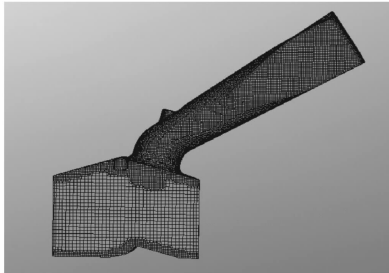


图 3 三维模型下发动机的移动网格

2.2 数学模型

计算湍流模型采用 $k-\epsilon$ 双方程模型,用拉格朗日-欧拉法(ALC)对流体控制方程进行迭代求解运算,动量守恒、连续性方程及湍流方程的差分格式为中迎风差分格式.

2.3 边界条件

本文主要研究直喷汽油机在启动工况下的缸内混合气形成机理,实验发动机转速为 300 r/min.壁面边界采用定温条件,即 268 K,边界层应用湍流壁面函数来处理.初始时刻,各流体计算区域内混合气的流动均视为空气组分下的三维可压缩黏性流动,不考虑燃油蒸气的成分.

入口边界为压力条件,压力值为循环平均值.图 4 为由一维发动机模拟软件 Boost 计算获得的进气道入口压力变化曲线.

初始的进气行程始于 360° ,喷油持续期在 45° .

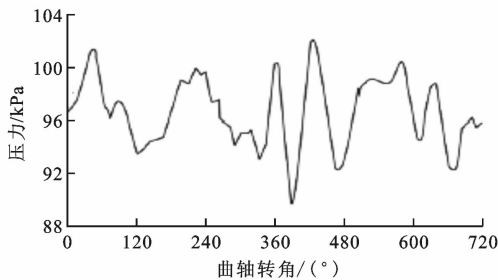


图 4 进气道入口压力变化曲线

3 模拟结果及分析

3.1 单次喷射

单次喷射喷油时刻在 640° (喷油角 θ),喷油持续期为 45° .图 5 为单次喷雾过程(喷油时刻为压缩冲程后期)的模拟结果.从图 5 可以看出,油束由于在喷射过程中受到气流的作用而不断雾化、混合.当喷油时刻在 670° 时,燃油喷射引起的气流和活塞上行形成的挤流相互作用,从而使得燃油向排气侧移动;当喷油时刻在 680° 时,随着活塞的上行,活塞凹弧侧的燃油出现了反滚流运动,从而使得排气侧混合气沿火花塞

旋转.受单次喷射喷雾动量较大的影响,喷雾引起的气流运动仍为主导,反滚流对混合气的作用并不大.

图 6 为单次喷射在喷油结束至点火前的缸内混合气的模拟结果.从图 6 可以看出,随着活塞的上行,活塞顶面的燃油进一步蒸发,反滚流增强,排气侧燃油逐渐移向火花塞侧,但反滚流强度仍比较小且混合气没有足够的时间返回火花塞,从而导致燃油主要分布在进、排气两侧,点火前浓混合气偏离火花塞中心,这均不利于点火.

3.2 二次喷射

GDI 发动机二次喷油是在进气和压缩冲程的 2

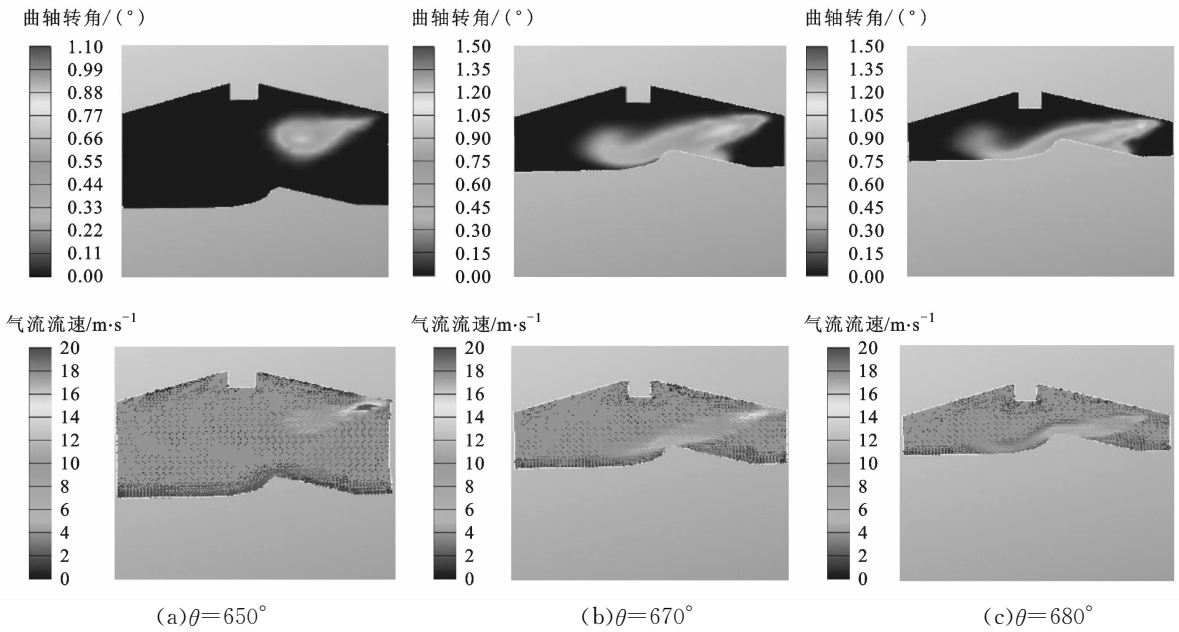


图 5 单次喷雾过程的模拟结果

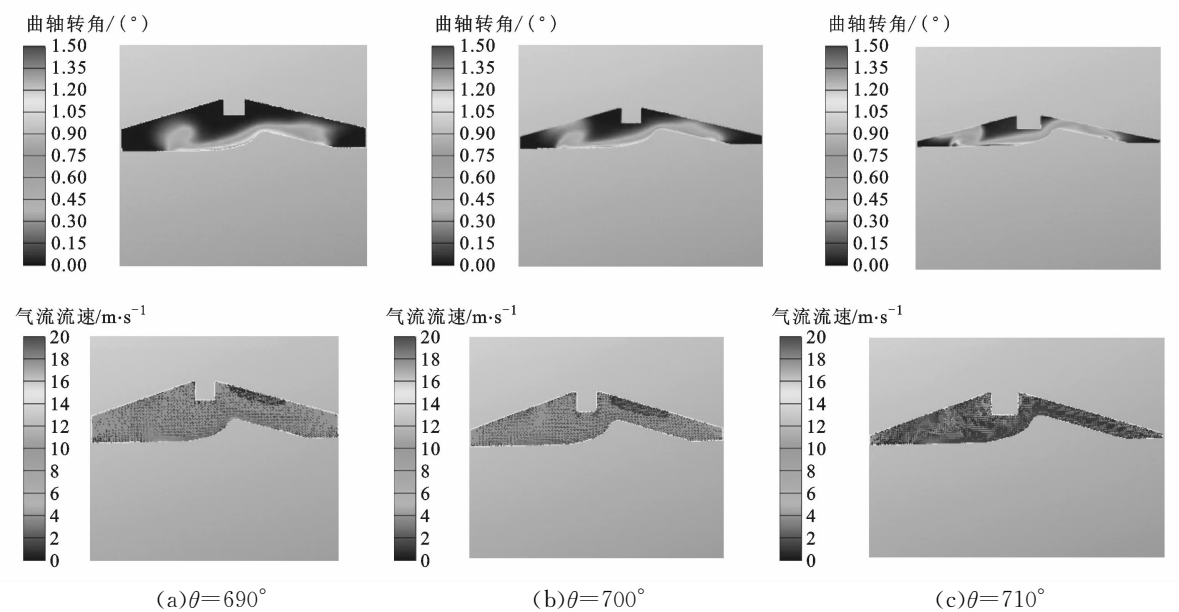


图 6 单次喷射在喷油结束至点火前的缸内混合气的模拟结果

次喷射实现的,第 1 次和第 2 次的喷油时刻分别在 450° 、 660° 。为了保证火花塞远端的混合气不至于过稀而导致失火,保证火花塞附近浓混合气的当量比略高,本文取 2 次喷油量之比为 4 : 5,第 2 次的喷油量与单次喷油总量保持不变。图 7、图 8 分别为 GDI 发动机第 1、第 2 次喷油及缸内混合气形成的过程。图 9 为 GDI 发动机 2 次喷油结束至点火前缸内混合气的形成过程。

从图 7 可以看出,随着活塞下行和喷雾导致的气流的发生,使得缸内形成强烈的滚流运动,这有助于燃油快速雾化。与单次喷射相比,分段喷射在第 1 次喷雾中的燃油质量有所减少,从而加快了燃油雾化,减少了燃油碰壁现象,所以喷油时刻为 480° 时

的混合气浓度明显降低。

从图 8 可以看出,分段喷射在第 2 次喷油中的动量、射程及燃油碰壁现象较单次喷射明显减少,混合气雾化明显加快。当喷油时刻为 665° 时,受喷雾引导及活塞斜坡的影响,火花塞处的反滚流运动开始形成,随着喷油的持续进行,反滚流强度逐渐增大;当喷油时刻为 680° 时,反滚流运动使得浓混合气围绕在活塞顶面的圆弧侧。

从图 9 可以看出,随着燃油的持续蒸发,排气侧逐渐形成稀混合气。随着活塞的持续上行,活塞顶圆弧侧的反滚流运动逐渐减弱,但仍足以维持浓混合气在火花塞附近运动。当喷油时刻为 700° 时,火花塞周围的气体当量比可达到 1.5 左右,且稀混合气

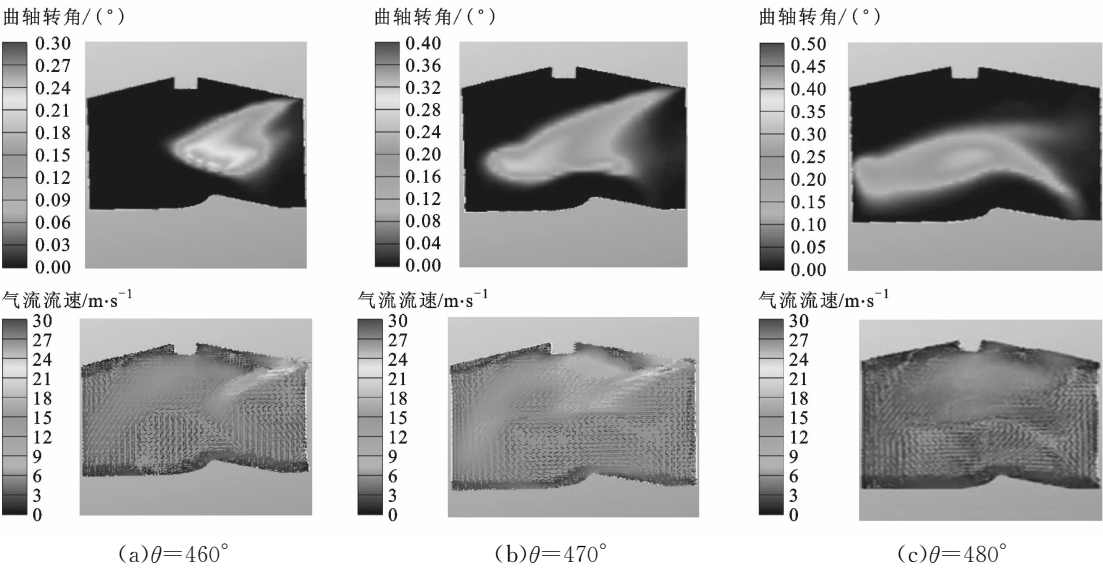


图 7 GDI 发动机第 1 次喷油及缸内混合气形成的过程

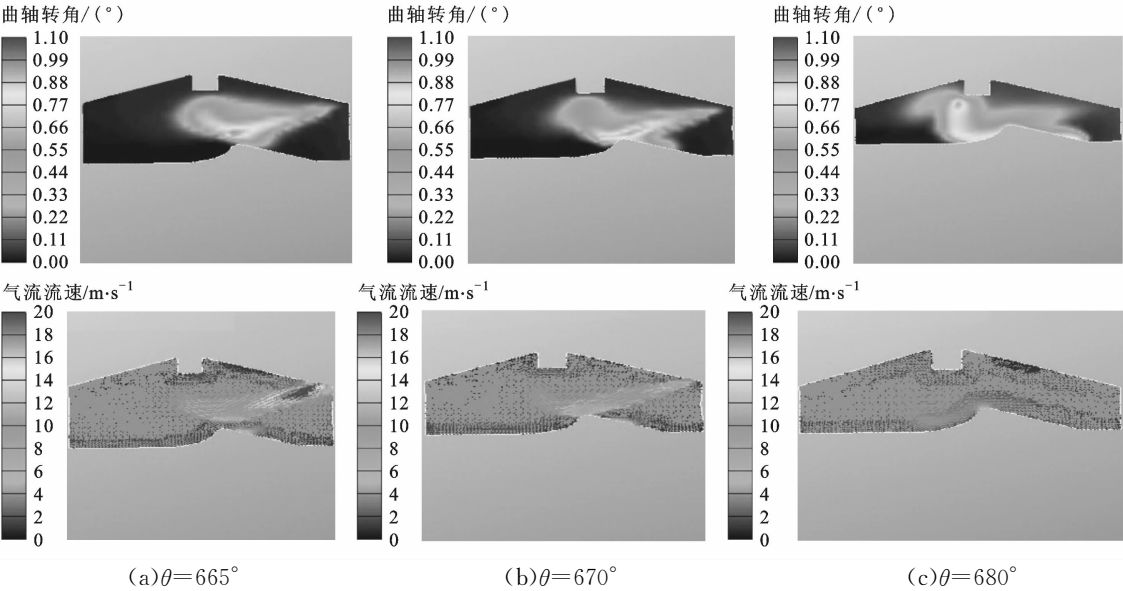


图 8 GDI 发动机第 2 次喷油及缸内混合气形成的过程

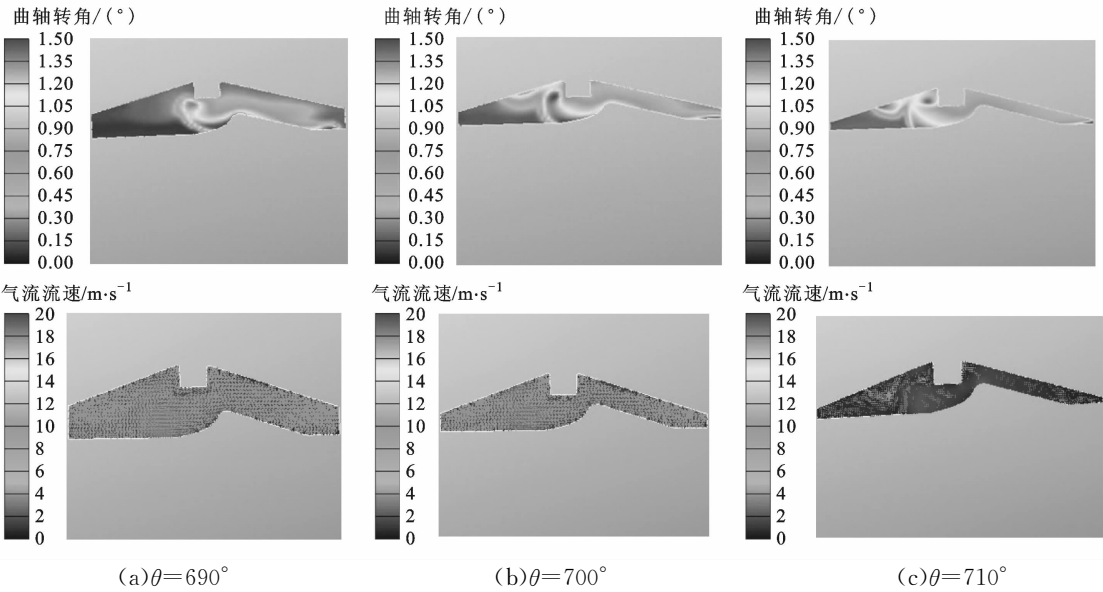


图 9 GDI 发动机 2 次喷油结束至点火前缸内混合气的形成过程

均匀分布。当喷油时刻为 710° 时,浓混合气继续上移,此时火花塞周围的气体当量比维持在 $1.0\sim 1.2$ 之间,火花塞远端混合气分布更为均匀,这有利于混合气的燃烧,所以未燃 HC 排放减少。

对比单次喷射和二次喷射可以看出,二次喷射可以减少燃油碰壁,提高燃油的蒸发速率。点火前,二次喷油可使缸内火花塞处的混合气较浓,火花塞远端的混合气较稀,这有利于点火及火焰的传播,所

以未燃 HC 排放减少。

4 实验结果及分析

在 4G15 直喷发动机上对 2 种启动喷射策略进行了实验研究。实验中大气环境温度为 -5°C ,进气温度为 5°C ,上止点的点火角为 0° ,上止点前的点火角为正,上止点后的点火角为负。

图 10 为 GDI 发动机在不同点火角下单次喷射

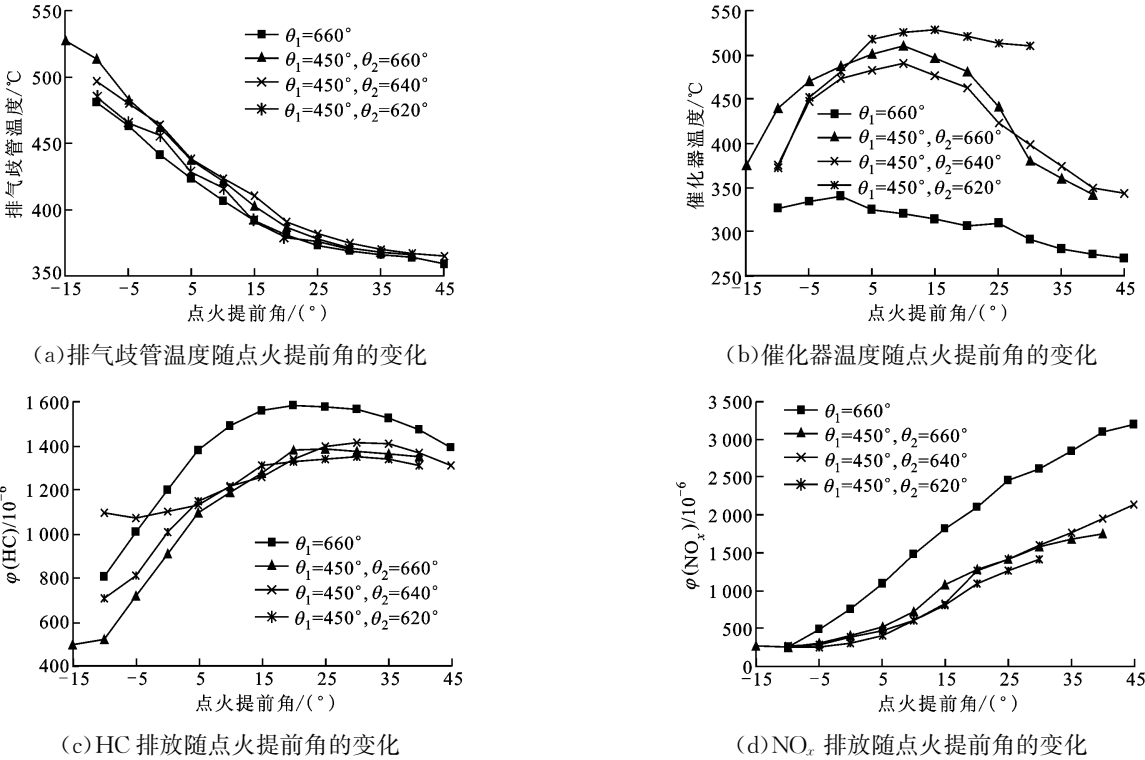


图 10 不同点火角下单次喷射与二次喷射的实验结果对比

与二次喷射的实验结果对比. 单次喷是在压缩上止点前 60° , 即 θ 为 660° ; 二次喷射中的第 1 次喷油时刻的 θ_1 为 450° , 第 2 次喷油时刻 θ_2 分别为 620° 、 640° 、 660° , 2 次喷油量的比例固定为 4:5.

从图 10 可以看出: 当点火提前角在 $-5^\circ \sim 5^\circ$ 时, HC 及 NO_x 排放最低, 且催化剂温度达到了起燃温度. 随着点火提前角的增大, 排气歧管温度逐渐升高, 这是由于部分燃油后燃而导致排气温度升高的缘故. 点火提前会影响催化剂的快速起燃, 使得燃油过早燃烧而放热, 这样废气流经催化剂时沿程放热损失较大; 点火推迟, 活塞下行, 缸内温度、压力开始降低, 燃油燃烧速度减小. 随着点火提前角的增大, NO_x 排放升高, 这是由于点火提前使得燃油过早燃烧而放热, 为 NO_x 生成提供了局部的高温环境. 当点火提前角在 $-5^\circ \sim 35^\circ$ 时, 随着点火的推迟, HC 排放减少, 催化剂温度升高, 催化剂起燃加速. 这是由于随着点火的推迟, 后燃增加, 排气温度升高, 进而催化剂温度提高.

与二次喷射相比, 单次喷射时催化剂温度较低, 这是由于单次喷射形成的混合气的质量较差, 燃油不能充分燃烧, 因此燃烧温度降低, HC 排放提高. 从单次喷射过程的模拟结果可以看出, 单次喷射容易造成局部混合气过稀或过浓, 过稀的混合气易产生未燃 HC, 而过浓的混合气易导致 NO_x 排放提高.

综上可以看出, 二次喷射可以显著降低冷启动阶段 HC 及 NO_x 的排放, 提高排气温度, 促使催化剂快速起燃.

5 结 论

本文通过模拟计算和实验, 结合二次喷油策略, 对 4G15 直喷汽油机的冷启动排放进行了研究, 结果如下.

(1) 通过模拟发现, 单次喷油过程容易造成燃油积聚, 不利于燃油的蒸发及混合, 缸内燃油分布不均, 燃油过浓区偏离火花塞, 从而造成未燃 HC 排放减少.

(2) 直喷汽油机通过特殊活塞顶面形状和二次喷油控制策略, 可以改善冷启动工况下缸内混合气的空燃比分布, 强化火花塞附近浓混合气分布, 从而降低 HC 排放.

(3) 适当的二次喷油策略和点火提前角可以大幅度降低 HC、 NO_x 排放, 促使催化剂快速起燃. 点火提前角在 $-5^\circ \sim 5^\circ$ 范围内, HC、 NO_x 排放最少.

参考文献:

- [1] LECOINTE B, MONNIER G. Downsizing a gasoline engine using turbocharging with direct injection, SAE 2003-01-0542 [R]. Warrendale, PA, USA: SAE, 2003.
- [2] ZHENG Xu, JIANG Yi. Modeling the cold start of the ford 3.5 L V6 EcoBoost engine, SAE 2009-01-1493 [R]. Warrendale, PA, USA: SAE, 2009.
- [3] 倪培永, 姚春德. 汽油机冷启动排放研究进展 [J]. 小型内燃机与摩托车, 2010, 39(4): 93-96.
NI Peiyong, YAO Chunde. Research process of emissions during cold-start of gasoline engine [J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle, 2010, 39(4): 93-96.
- [4] 栗工, 李理光, 邱冬平, 等. 冷启动首循环瞬态 HC 排放与进气道燃料输运特性的关系 [J]. 燃烧科学与技术, 2008, 14(1): 73-78.
LI Gong, LI Liguang, QIU Dongping, et al. Transient HC emissions and fuel transport in the intake port of the first firing cycle during cold start [J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle, 2008, 14(1): 73-78.
- [5] SANTOSO H, CHENG W K. Mixture preparation and hydrocarbon emissions behaviors in the first cycle of SI engine cranking, SAE 2002-01-2805 [R]. Warrendale, PA, USA: SAE, 2002.
- [6] 史鉴明, 李国祥. 汽油机缸内直喷技术的研究与发展 [J]. 山东机械, 2005, 24(3): 6-8.
SHI Jianming, LI Guoxiang. Research development of gasoline direct injection engine [J]. Shandong Machinery, 2005, 24(3): 6-8.
- [7] 程勇, 王建昕, 吴宁, 等. 降低汽油机启动及暖机过程中 HC 排放的探讨 [J]. 内燃机学报, 2002, 20(4): 292-296.
CHENG Yong, WANG Jianxin, WU Ning, et al. Investigation on reducing HC emissions during cold-start and warm-up periods of gasoline engine [J]. Transactions of CSAICE, 2002, 20(4): 292-296.

(编辑 苗凌)