

天然气分段喷射规律下柴油引燃缸内气态直喷 天然气发动机的燃烧与排放特性

肖民, 周星星

(江苏科技大学 能源与动力学院, 江苏镇江 212003)

摘 要: 本文针对 6L190 柴油/天然气双燃料发动机, 采用天然气分段气态直喷的喷射规律, 通过改变其主预喷间隔与预喷量, 利用 AVL Fire 软件, 对缸内燃烧及排放进行数值模拟研究。结果表明: 天然气预喷射改善了混合气形成质量, 能够缩短主喷射着火滞燃期, 降低缸内最大爆发压力和最高燃烧温度, 减少 NO_x 排放, 优化燃烧。但这需要对预喷量和主预喷间隔进行优化调整: 间隔角较大时, 宜采用较大预喷量。间隔角较小时, 预喷量宜减少。且间隔角不宜过小, 否则效果会适得其反; 预喷量固定时, 较大的间隔角有利于改善排放; 预喷量较小时, 排放对间隔角变化相对不敏感。

关键词: 双燃料; 天然气; 分段喷射; 燃烧特性; NO_x

中图分类号: U661.31⁺3 **文献标识码:** A

Combustion and Emission Characteristics of Gaseous Direct Injection to Natural Gas Engine with Diesel Ignition under Multi-injection Laws of Natural Gas

XIAO Min, ZHOU Xing-xing

(Jiangsu University of Science and Technology, Jiangsu Zhenjiang 212003, China)

Abstract: In this paper, the law of direct injection of natural gas for the 6L190 diesel/natural gas dual fuel engine are studied by using AVL Fire software to simulate the combustion and emissions of the gas by changing the distance between the main pre-spray and the quantity of natural gas injection. The results show that natural gas pre-injection improves the quality of the mixture gas, and it does shorten the ignition delay of the main injection, reduce the maximum burst pressure and the maximum combustion temperature in the cylinder, as well as reducing Nox emissions and optimizing the combustion, but it is necessary to optimize the pre-spray and main pre-spray interval. When the pre-spray interval is relatively bigger, more natural gas pre-injection is better; when the pre-spray interval becomes smaller, less natural gas pre-injection is better. And the pre-spray interval should not be too small, otherwise the effect will be counterproductive; for fixed pre-spray conditions, the longer interval of pre-injection is better to improve emissions, and emissions is relatively insensitive to the changes of the interval when the quantity of pre-injection is small.

Key words: dual fuel; natural gas; multi-injection; combustion characteristics; NO_x

0 引言

近年来, 随着电控技术的发展, 尤其是高压共轨技术的日益成熟, 燃料的分段喷射规律已越来越多地被研究和应用在内燃机领域, 并取得良好的效果。韩国的 Su Han Park 等人采用生物柴油作为燃料进行多次喷射实验。结果表明: 预喷射使得动力性增强, 即可以提供更高的平均有效压力; 主预喷间隔角减小时, 有 NO_x 、Soot 增加, HC 和 CO 减少的趋势; 单次喷射相比, 多次喷射可以减少 PM 排放^[1]。2005 年, 菲亚特汽车公司成功研发出采用 3 次喷射的 1.3L 四气门共轨喷射柴油机, 可以满足欧 IV 排放标准^[2]。2010 年, Seung Hyun Yoon^[3] 等人基于柴油机高压共轨系统, 在一台单缸自然吸气式柴油机上研究生物燃油二甲醚燃料的特性。试验表明, 采用分段喷射时, 较小的油束夹角可以降低 NO_x 和 Soot 的排放。天津大学苏万华教授等人提出了稀扩散燃烧与预混燃烧相结合的复合燃烧方式, 并针对喷油控制参数的优化, 运用微种群遗传算法进行研究^[4,5]。其采用的多脉冲复合喷射控制技术实现了预混燃烧。试验结果表明: 采用高压共轨喷油系统控制多脉冲复合喷射, 使脉冲喷射各个参数得到调节, 燃

烧过程得到优化，在降低HC与碳烟排放的同时使得NO_x的排放大幅度降低^[6,7]。2010年，石秀勇^[8]等人为探究分段喷射对柴油机燃烧噪声及排放特性的影响，在一台电控共轨重型柴油机上建立了试验测控系统。结果表明：合理的分段喷射参数既可使噪声明显降低，也可使碳烟和NO_x的排放得到降低。尽管以上研究内容已经很丰富，但是对于天然气的分段喷射，人们研究的甚少。故本文针对柴油引燃天然气气态直喷发动机，通过天然气的分段喷射，着重研究预喷量与预喷间隔对缸内燃烧与排放特性的影响，得到一般性的规律，从而为样机的优化试验提供理论指导以满足更高的排放标准。

1 数值模型的建立与验证

以 6L190 柴油/天然气双燃料发动机为数值计算模型建模，发动机基本参数如表 1。模型中采用的是油气共用喷射器^[9-12]。安装位置位于缸盖居中、垂直布置。结合国内外相关参考文献^[12-16]、原有喷油器参数以及实际工况，柴油天然气双燃料喷嘴的主要设置参数如表 2。

表 1 发动机基本参数

型号	6L190
型式	四冲程、直列 6 缸、增压中冷
缸径×冲程/(mm×mm)	190×210
额定转速/(r·min ⁻¹)	1000
压缩比	12.5
连杆长/mm	410
额定功率/kW	400
燃烧室类型	带预燃室，主燃烧室浅盆形 连接通道 8 个
进气门关闭时刻	下止点后 51°
排气门开启时刻	上止点前 11°

表 2 油气共用喷射器主要参数

主要参数	柴油	天然气
喷孔直径/mm	0.2	2.0
单缸喷射量/(g·cyl ⁻¹)	0.03	0.45773
喷嘴孔数	7	7
喷孔夹角	145°	150°
喷射压力（MPa）	65	12
喷射持续角	2°CA	10°CA
喷射时刻	702°CA	719°CA

1.1 网格模型的建立

本文以 720°CA 为压缩上止点，主要研究缸内混合气形成、燃烧以及排放物生成的过程，即从进气门关闭到排气门打开，也就是 591°CA~849°CA。本文建立的仿真系统中没有包含进排气道，活塞的运动规律依据原发动机。预燃室与主燃室之间由 8 个通道等间距连接。图 1 为活塞位于进气门关闭与上止点时的网格。动网格质量良好，无坏网格。

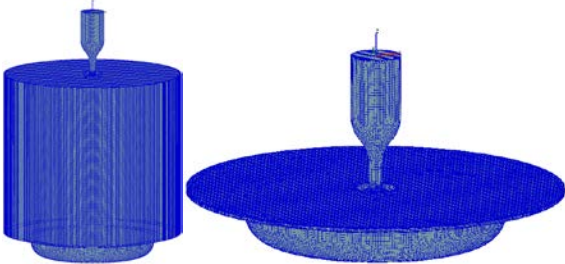


图 1 网格模型

1.2 计算模型的选取

计算模型的选取如下： $k-\epsilon$ 湍流模型、ECFM-3Z 燃烧模型、Blob Injection 初次破碎模型、KH-RT 二次破碎模型、Enable 湍流扩散模型、Multi-component 蒸发模型、Walljet1 碰壁模型、O' Rouke 相互作用模型、NO_x生成机理选择 Extended Zeldovich 模型。

1.3 初始条件与边界条件的设定

本文使用的温度边界均为恒温边界，其中缸盖底部温度为 500 K，气缸壁温度为 450 K，活塞顶部温度为 520 K。活塞的速度设置依据原发动机，其它面均为固定壁面。通过试验获取的初始温度为 340 K，初始压力为 0.16MPa。燃料喷射温度为柴油 330.15 K，天然气 300.15 K。初始涡流比取 1.3，通过计算，初始湍动能（TKE）的大小为 $TKE=18.375\text{ m}^2/\text{s}^2$ ，湍流尺寸长度 $TLS=0.010\text{ m}$ 。计算选取的工况为原发动机额定工况。

1.4 数值模型的验证

为确保仿真结果的可靠性，需对建立的数值模型进行验证。由于针对 6L190 柴油引燃天然气缸内高压直喷的试验台架正在搭建阶段，故选取原柴油机额定工况，将所建立的模型仿真结果同原柴油机的实验数据进行对比，以此来最大程度地验证数值模型的准确性。试验台图片如图 2 所示，台架主要试验设备见表 3，对比结果见图 3。对原柴油机试验中，将 AVL 水冷式压电晶体传感器安装在气缸盖处，通过测录 6L190 发动机第 1 缸的示功图来进行燃烧分析。将采样频率设定为 0.5 度曲轴转角，连续测量 50 个循环的气缸压力数据，并进行了多次对比分析。数据统计结果表明，每次测量结果的统计值基本一致。因此采用了 50 个循环的气缸压力统计数据进行分析。

如图 3 可见，模拟所得的压力峰值比实验值稍微偏小且略有滞后。一方面可能是由于数值模型中一些参数的设置基于经验公式，不能与实际工况完全吻合。另一方面，实验数据测量过程中会产生一定的误差。但从整体趋势来看，数值模拟结果和实验数据的曲线吻合良好，故本数值模型能够满足本文研究的需要。

表 3 台架主要试验设备

名称	型号	生产厂商
共轨试验台	EFS8246	EFS 公司
发动机电控燃油系统	EDC7UC31-13.CO	博世公司
瞬态测功机	APA-B500/PUMA5	AVL 公司
油耗仪	AVL733	AVL 公司
消光式烟度计	AVL415	AVL 公司
废气分析仪	CEB-II	AVL 公司



图 2 试验台

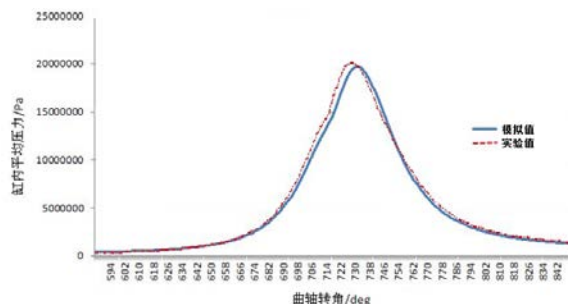


图3 实测压力曲线和模拟压力曲线

2 计算方案的确定

为便于数据记录与分析,本文定义了燃料喷射中的几个常用术语。天然气单次喷射方案为 SI(Single Injection),并将其作为基准方案(Baseline),详细设置见表2。预喷射方案为 Pi- α %- b° CA(Pilot Injection), Pi 表示预喷, α %表示天然气预喷比例 η , b° CA 表示主喷预喷间隔,如预喷比例 5%,主喷预喷间隔 12° CA 的工况,表示为 Pi-5%- 12° CA。柴油喷射参数已定(见表1)。结合国内外相关参考文献^[12,17-22]以及实际工况,确定了表4所列的不同天然气预喷射计算方案,共12种。天然气总喷射时长已定(表2),预喷天然气的喷射时长与其所占比例成正比。

表4 天然气预喷射计算方案

天然气喷射常数		可变参数	
单缸喷射总量 $m(g/cyl)$	0.45773	预喷天然气比例 $\eta/(cyl)$	5%, 10%, 15%
主喷提前角 $SOI_{main}(^{\circ}CA \text{ BTDC})$	1	预喷间隔($^{\circ}CA$)	3, 6, 9, 12

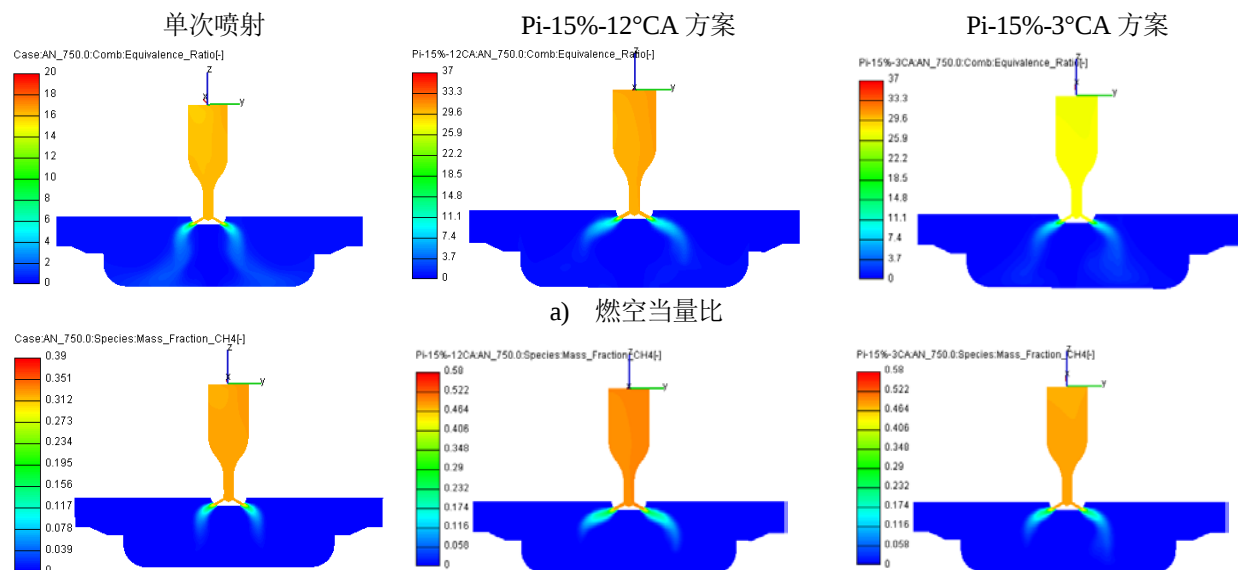
3 数值模拟结果与分析

针对不同的计算方案,通过对缸内燃烧结果、热力学参数以及排放性能进行分析,研究不同的天然气预喷量和预喷间隔对燃烧过程及排放的影响,以此得到一般性的结论,从而为挖掘样机能够满足更高排放标准的优化试验提供理论指导。因天然气主要燃烧产物为 NO_x ,故也是本文主要的排放物讨论对象。

3.1 缸内燃烧结果分析

为了分析不同的天然气预喷量和预喷间隔对燃烧过程及排放的影响,通过控制变量法进行对比分析。因为对比案例较多,且较大的预喷量与较大的喷射间隔的现象对比更为明显,故在研究不同天然气预喷间隔对燃烧及排放的影响时,选取预喷方案 Pi-15%- 12° CA 与 Pi-15%- 3° CA 进行结果分析。在研究分析不同天然气预喷量对燃烧及排放的影响时,选取预喷方案 Pi-5%- 12° CA 与 Pi-15%- 12° CA 进行结果分析。

图4为单次喷射方案、预喷方案 Pi-15%- 12° CA 与 Pi-15%- 3° CA 在上止点后 30° CA 的计算结果,针对不同天然气预喷间隔对缸内燃烧及排放的影响进行分析比较。



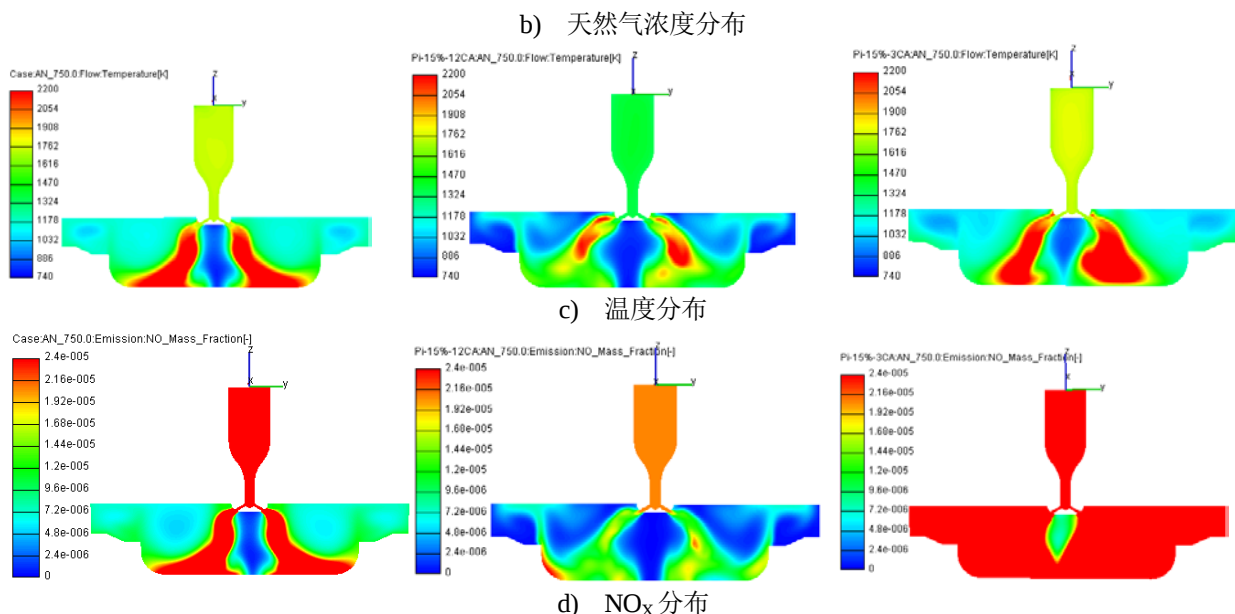
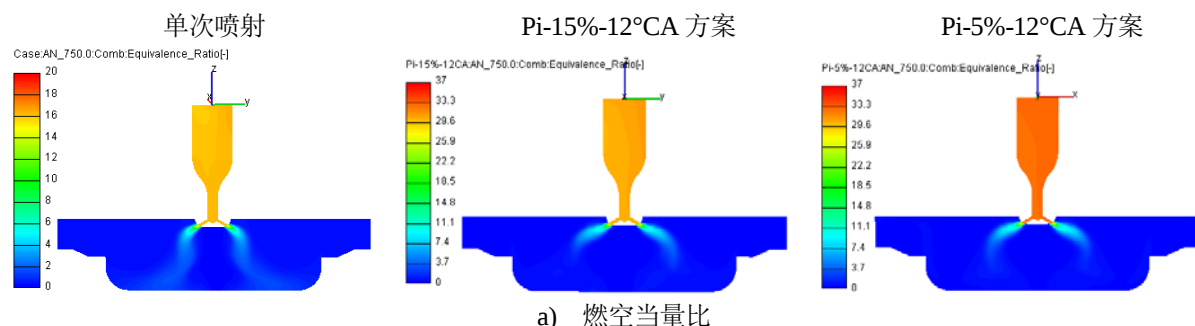


图4 上止点后 30°CA 各计算结果的对比

从图4可以看出,天然气采用预喷射后,与单次喷射相比,预燃室内燃空当量比普遍增大,且方案 Pi-15%-12°CA 的燃空当量比高于方案 Pi-15%-3°CA。这与以往柴油机多次喷射情况相反。分析认为: 气态天然气以较高压力喷入预燃室内, 有很大的初速度, 对空气有较强的扰动作用, 能够很好的促进与空气的混合。且预喷天然气较大的初速度能够产生较大的贯穿距离, 能够减少主喷天然气后续喷射受到的空气阻力。主预喷间隔角越小, 预喷天然气对空气的扰动以及产生的贯穿距离对主喷天然气的喷射以及扩散有更好的促进作用(单次喷射相当于主预喷间隔角为 0°CA)。尽管当主预喷间角较大时, 预喷天然气的充分燃烧放热能够加速主喷天然气的扩散, 但对于此种情况, 前者起到更大作用。且天然气为气态高压直喷, 无需经过柴油的雾化、加热、蒸发等过程, 因而造成了与以往柴油机多次喷射相反的结果。由图 4c)可以看出, 与单次喷射相比, Pi-15%-12°CA 方案的缸内最高燃烧温度明显降低, 高温区域减少, 有了更均匀的温度分布。一方面是由于预喷射减少了主喷混合燃烧比例, 其燃烧使得主喷前缸内温度上升, 从而缩短了主喷射滞燃期, 燃烧提前所致。另一方面是由于此方案主预喷间隔较长, 预喷射有充分的时间燃烧。到主喷开始时, 其燃烧已基本完成。主喷射天然气因卷吸了预喷天然气的燃烧产物而抑制了其放热率峰值, 使得主喷燃烧时的缸内火焰温度较低, 进而也抑制了主喷燃烧期的 NO_x 生成, 由图 4d)中 NO_x 分布可见。然而对于方案 Pi-15%-3°CA, 此工况缸内局部最高温度高于单次喷射方案。这是由于主预喷间隔较短, 主喷开始时, 预喷射燃烧尚未结束, 使得预喷燃烧与主喷燃烧联结在一起, 相当于燃烧提前, 导致混合燃烧比例增加, 主喷天然气的着火滞燃期延长, 造成燃烧温度升高。由图 4c)中温度分布可知此时缸内温度普遍较高, 且高于 2000K 的温度分布有较大范围, 从而导致大量 NO_x 的生成, 此点由图 4d)中 NO_x 分布可见。

图5为单次喷射状态和预喷方案 Pi-15%-12°CA 与 Pi-5%-12°CA 时在上止点后 30°CA 的计算结果,用来分析不同天然气预喷量对燃烧与排放的影响。



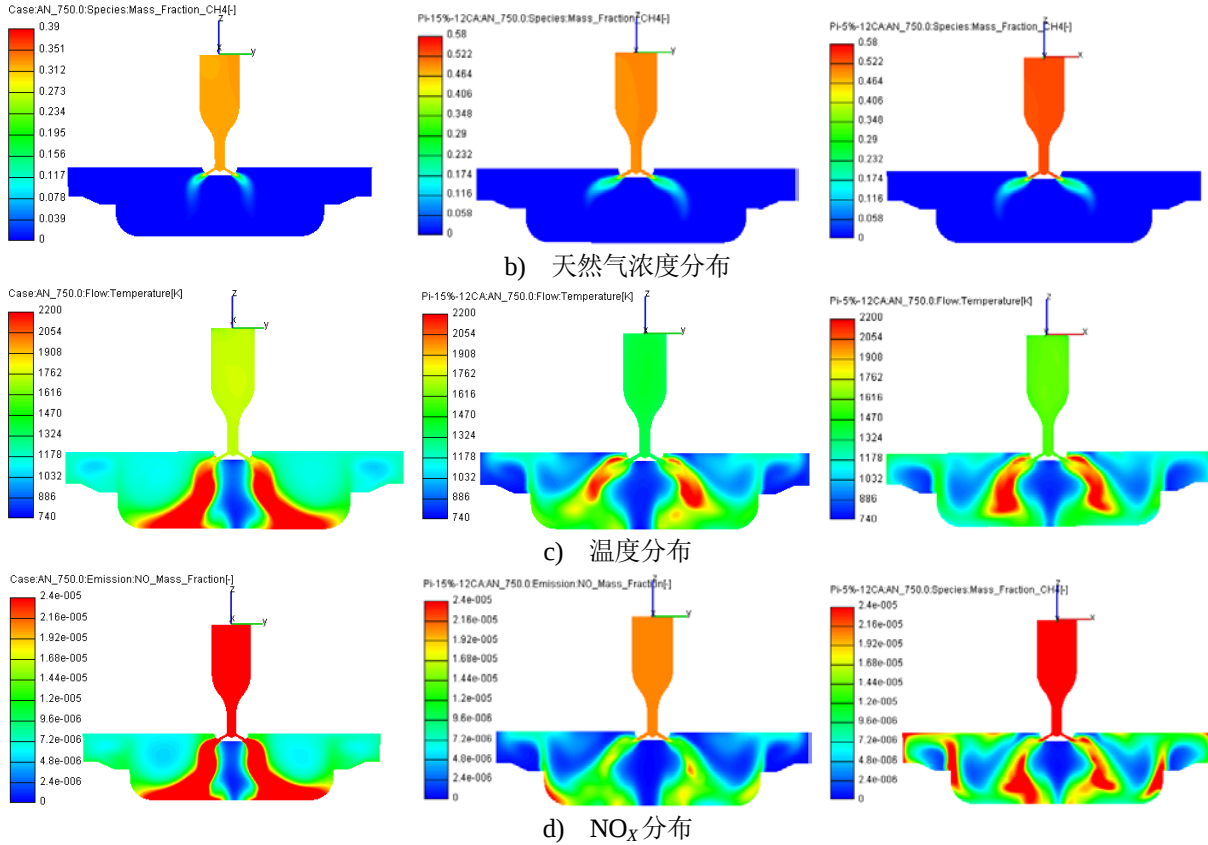


图5 上止点后 30°CA 各计算结果的对比

由图 5a)、图 5b)可见, 与方案 Pi-15%-12°CA 相比, 在预燃室内, 方案 Pi-5%-12°CA 有更大的燃空当量比和分布更集中的天然气浓度。追其原因, 此时主预喷间隔角较大, 预喷天然气能够得到充分燃烧。且预喷量相差较多, 此时预喷天然气的燃烧放热量对主喷天然气与空气的混合有更大的影响。当预喷天然气量较少时, 其燃烧放热量较少, 所造成的温升较小, 从而减弱了对天然气扩散的促进作用, 导致上述情况。与单次喷射相比, 两者缸内燃空当量比普遍增大, 原因前文已述。由图 5d) NO_x 分布可见, 方案 Pi-15%-12°CA 缸内最高温度低于方案 Pi-5%-12°CA, 高温区面积更小, 且 NO_x 分布也较小。这是由于当主预喷间隔角较大时, 预喷射天然气在主喷前得到充分燃烧。随着预喷量的增大, 更多的燃烧产物被卷吸入主喷天然气中, 进而抑制了主喷燃烧的放热率、减缓了其燃烧速率, 从而降低了缸内温度, 使 NO_x 排放减少, 且两者 NO_x 分布均较单次喷射减少。

以上分析结果表明: 天然气预喷射改变了缸内混合气的形成, 其所形成的预混合燃烧的确可以减少 NO_x 排放, 优化缸内燃烧, 但这需要对预喷量和主预喷间隔进行优化调整。在主预喷间隔较大时, 宜采用较大预喷量。主预喷间隔较小时, 预喷量宜减少。且间隔角不宜过小, 否则会起到适得其反的效果。

3.2 热力学参数分析

为分析不同预喷量对热力学参数的影响, 选取预喷间隔 12°CA 的方案, 结果如图 6 所示。为分析不同预喷间隔对热力学参数的影响, 选取预喷量 15% 的方案, 结果如图 7 所示。选取理由如上文所述。

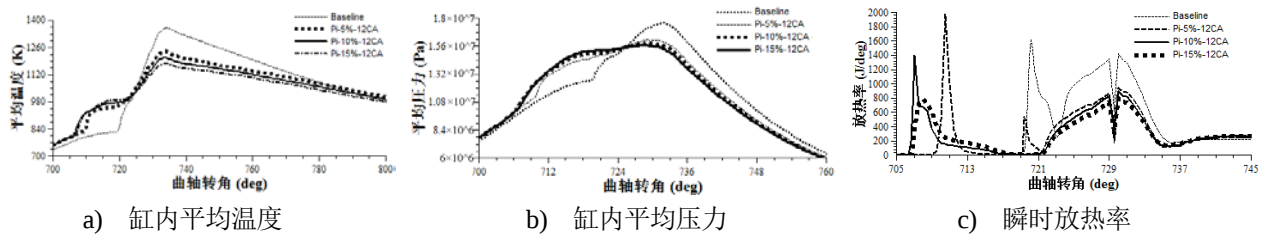


图6 相同间隔不同预喷量的影响结果

从图 6 结果曲线可以看出, 相比于单次喷射方案, 由于预喷射天然气的燃烧放热, 使得主喷射前期缸内平均

压力、平均温度均有提高,从而使主喷射天然气的滞燃期缩短,且有了更为平缓柔和的燃烧,缸内最大爆发压力和缸内最高温度均有所降低。当主预喷间隔角较大且固定时,随着预喷量的增加,上述两最值均呈减小趋势。预喷方案的主喷放热率低于单次喷射方案,且随着预喷量的增加而减小。

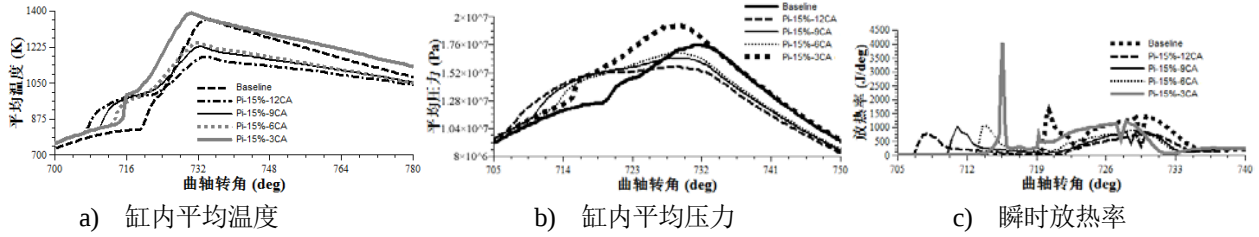


图7 相同预喷量不同间隔的影响结果

由图7可见,与单次喷射方案相比,预喷方案的热力学参数变化如图6所示。当预喷量固定时,随着主预喷间隔角的增大,上述两最值也呈减小趋势。然而当主预喷间隔角过小时,上述两最值均比单次喷射有所提高。主要是因为当主预喷间隔过小时,此时预喷天然气尚未完全燃烧,使得主喷天然气的着火滞燃期延长,预混合燃烧比例增加,并导致温度升高。当主预喷间隔角较大时,预喷射天然气有了较长时间的燃烧,到主喷开始时预喷燃烧已基本完成,主喷射天然气因卷吸了预喷天然气的燃烧产物而抑制了其放热率峰值,使主喷燃烧时的缸内火焰温度较低。以上结果与上文对缸内燃烧结果的分析相符合。

3.3 排放性能分析

图8为主预喷间隔分别为3°CA、6°CA、9°CA、12°CA时,不同天然气预喷量对 NO_x 排放的模拟结果。

从图8可见,当主预喷间隔为12°CA时,其 NO_x 的排放随着天然气预喷量的增加一直减小,且均低于单次喷射状态。当预喷间隔为3°CA时,其 NO_x 的排放随着天然气预喷量的增加一直增大,且均高于单次喷射状态。在主预喷间隔为9°CA,当预喷量不大时, NO_x 排放对于天然气预喷量的变化并不敏感,即 NO_x 排放量随着预喷量的改变而基本不变化,且都略低于单次喷射状态。预喷量较大时, NO_x 排放值有较大降低。预喷间隔为6°CA时,其 NO_x 排放随着预喷量的增加先增大后减小,且均低于单次喷射状态。

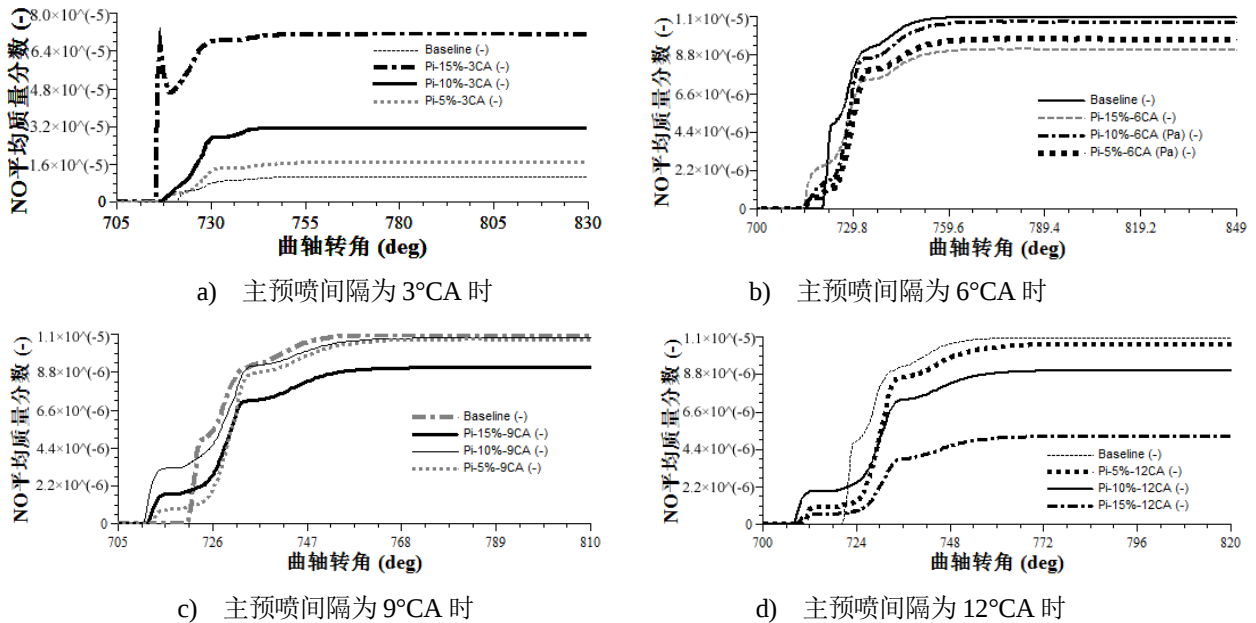


图8 不同天然气预喷量对 NO_x 排放的影响模拟结果

以上结果与上文对缸内燃烧结果的分析相符合。故由此认为:当主预喷间隔固定且较小时,较少天然气预喷射量有利于改善排放;在主预喷间隔固定且较大时,较大的天然气预喷射量有利于改善排放。且主预喷间隔角不宜过小,否则效果会适得其反。

图9为天然气预喷量分别为5%、10%、15%时,不同天然气主预喷间隔对 NO_x 排放的模拟结果。

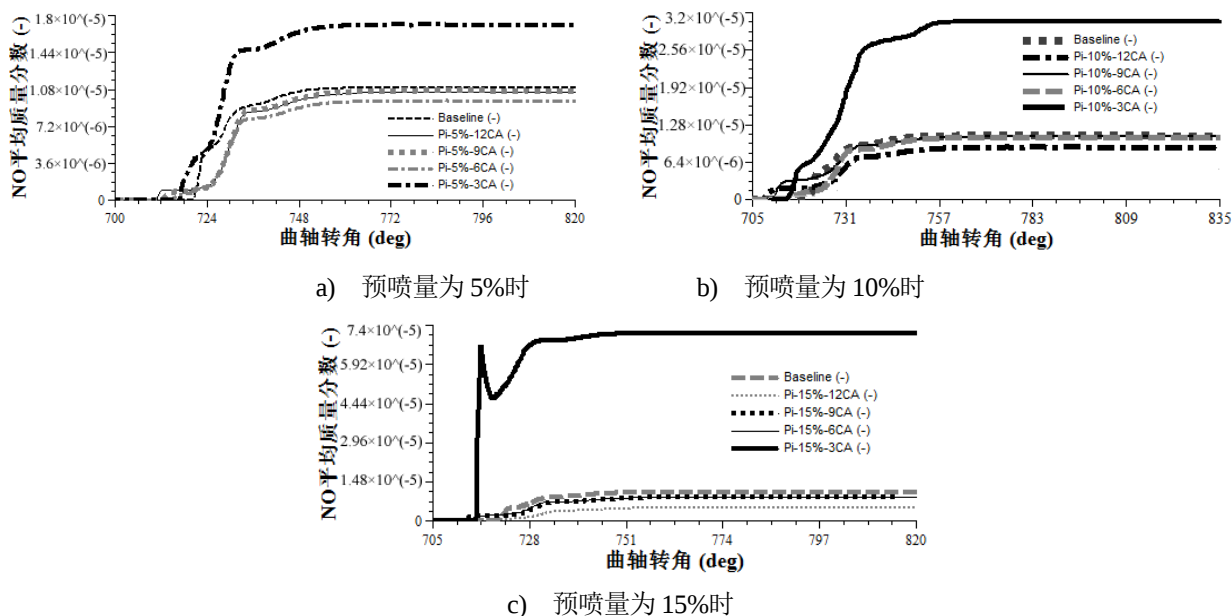


图9 不同天然气主预喷间隔对 NO_x 排放的影响模拟结果

从图9可见,当预喷量为10%和15%时,随着主预喷间隔的增大,其NO_x的排放一直减小。主预喷间隔从3°CA到6°CA,NO_x有非常大的减少量。从6°CA~9°CA,减小趋势很小。从9°CA~12°CA,NO_x则又有了相对较大的下降。当预喷油量为5%时,NO_x排放变化情况较复杂,随间隔的增大呈现先减小再增大再减小的趋势。除了主预喷间隔为3°CA时,其余预喷方案的NO_x排放均低于单次喷射方案。当预喷量增加时,NO_x的变化量随主预喷间隔变化更为明显。

以上结果与上文对缸内燃烧结果的分析相符合。故由此认为:预喷量固定时,较大的主预喷间隔有利于改善排放;预喷量较小时,其排放对间隔变化相对不敏感。

4 结论

1) 天然气预喷射改善了混合气形成质量,其所形成的预混合燃烧能够缩短主喷射的着火滞燃期,降低缸内最大爆发压力和最高燃烧温度,的确起到了减少NO_x排放,优化缸内燃烧的作用。但这需要对预喷量和主预喷间隔进行优化调整。

2) 在主预喷间隔较大时,宜采用较大预喷量。主预喷间隔较小时,预喷量宜减少。且主预喷间隔角不宜过小,否则会起到适得其反的效果;

3) 预喷量固定时,较大的主预喷间隔有利于改善排放;预喷量较小时,排放对主预喷间隔变化相对不敏感。

参考文献

- [1] Su Han Park, Seung Hyun Yoon, Chang Sik Lee. Effects of multiple-injection strategies on overall spray behavior, combustion, and emissions reduction characteristics of biodiesel fuel[J]. Applied Energy, 2011: 88-97.
- [2] Christian Bartsch, Aktuell Entw. lung, M. K. ropp. 新颖的菲亚特 1.3L 四气门共轨多次喷射柴油机[J]. 现代车用动力, 2005 (3): 7-10.
- [3] Seung Hyun Yoon, June Pyo Cha, Chang Sik Lee, An investigation of the effects of spray angle and injection strategy on dimethyl ether combustion and exhaust emission characteristics in common-rail diesel engine[J]. Fuel Processing Technology, 91(11), 2010: 1364-1372.
- [4] 黄豪中, 苏万华, 裴毅强等. MULINBUMP 复合燃烧系统多次脉冲喷油控制参数的优化研究 I: 发动机参数优化模拟平台的建立[J]. 内燃机学报, 2009, 27(3): 193-201.
- [5] 黄豪中, 苏万华, 裴毅强等. MULINBUMP 复合燃烧系统多次脉冲喷油控制参数的优化研究 II: 发动机参数优化模拟平台的建立[J]. 内燃机学报, 2009, 27(4): 289-297.

- [6] Wanhua Su, Tiejian Lin and Yiqiang Pei, A Compound Technology for HCCI Combustion in a DI Diesel Engine Based on the Multi-Pulse Injection and the BUMP Combustion Chamber[C], SAE 2003-01-0741.
- [7] 林铁坚, 苏万华, 裴毅强. 基于电控高压共轨燃油系统的多脉冲复合控制燃烧系统[J]. 内燃机学报, 2002, 20(6): 475-480.
- [8] 石秀勇, 乔信起, 倪计民, 郑媛媛. 多次喷射改善柴油机噪声及污染物排放的试验研究[J]. 内燃机工程, 2010, 31(5): 25-29.
- [9] 李书泽, 张武高, 黄震. 天然气发动机燃料供给系统[J]. 天然气工业, 2004, 24(5): 127~129
- [10] 李国岫. 柴油—天然气发动机电控气体燃料喷射技术的研究[J]. 车用发动机, 2000, 126(2).
- [11] 李书泽, 张武高, 黄震. 天然气发动机燃料供给系统研究现状[J]. 农业机械学报, 2005, 36(2).
- [12] 戴礼明. 天然气/柴油双燃料喷射混合特性与燃烧模拟研究[D]. 江苏大学, 2016.
- [13] F Payri, V Bermudez, R Payri, et al. The influence of cavitation on the internal flow and the spray characteristics in diesel injection nozzles[J]. Fuel, 2004, 83: 419-431.
- [14] 耿文娟, 袁亚飞, 宋睿智. GDI 多孔喷油器关键设计参数对喷油嘴流量系数的影响[J]. 现代车用动力, 2016, 162(2).
- [15] 于子东, 刘胜吉, 王建, 等. 小型柴油机用喷油嘴结构的优化设计研究[J]. 内燃机工程, 2005, 26: 3.
- [16] 刘晓鑫. 柴油引燃缸内直喷天然气发动机燃料喷射对燃烧过程的影响研究[D]. 重庆交通大学, 2016.
- [17] 祝轲卿, 徐全奎, 杨林, 等. 高压共轨喷油系统分段喷射油量精确测量与规律分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8): 117-121.
- [18] 石秀勇. 喷油规律对柴油机性能与排放的影响研究[D]. 山东大学, 2007.
- [19] 孙建国. 柴油机燃油分段喷射对缸内燃烧的影响及匹配研究[D]. 北京理工大学, 2015.
- [20] Mohammad Reza Herfatmanesh Lu Pin Moham-madreza Anbari Attar et al. Experimental investigation into the effects of two-stage injection on fuel injection quantity combustion and emissions in a high-speed optical common rail diesel engine[J]. Fuel, 2013, 109: 137-147.
- [21] 刘亮欣, 黄佐华, 蒋德明, 任毅, 王金华, 王倩. 不同喷射时刻下缸内直喷天然气发动机的燃烧特性[J]. 内燃机学报, 2005, 05: 469-474.
- [22] 张蕾. 微引燃柴油喷射对缸内直喷天然气燃烧过程的影响研究[D]. 吉林大学, 2012.

作者简介：肖民（1969—），女，教授，主要研究领域为船舶动力设备和系统设计制造与性能优化

地址：江苏省镇江市梦溪路2号江苏科技大学（东校区）能源与动力学院

邮编：212003

电话：13952860401

E-mail: xiaomin_just@126.com

周星星，男，硕士研究生

电话：18260631575

E-mail: zhouxingxing66@163.com