

预喷策略对柴油机燃烧和排放影响的研究

Research on the effects of the pilot injection strategies on combustion and emission in diesel engine

包宁 董颜 金华玉 刘江唯 胡芳 赵伟 李达 吕晓刚

(一汽解放商用车开发院, 长春 130011)

摘要: 喷油策略直接影响这柴油机的燃烧和排放, 同时也影响震动和噪声。本文利用 converge 软件搭建了柴油机燃烧模型, 研究了预喷量、主预喷间隔和轨压对柴油机燃烧和排放的影响。研究表明适量的预喷能够得到较好的燃烧和排放折中关系, 而且越小的主预喷间隔, 折中关系越好。提高轨压虽然能降低油耗, 但是会明显增加 NO_x 排放。

关键词: 预喷, 柴油机, CFD, 燃烧, converge

Abstract: Fuel injection strategy directly affects the combustion and emission of the diesel engine, and also affects vibration and noise. In this paper, a combustion model of diesel engine is built by using converge software. The effects of pre-injection volume, pilot-main injection interval and rail pressure on combustion and emission of diesel engine are studied. The results show that a good compromise relationship between combustion and emission can be obtained by proper pre-injection, and the smaller the pilot-main injection interval, the better the compromise relationship. Increasing rail pressure can reduce fuel consumption, but will significantly increase NO_x emissions.

Key words: pilot injection, diesel engine, CFD, combustion, converge

1. 引言

柴油机的扩散燃烧方式决定了其燃烧过程受喷油过程影响。不同的喷油策略能够影响柴油机缸内混合气的形成和分布。多次喷射是将每循环的燃油分两次或者更多次喷入缸内的策略。一般来说, 预喷一定量的燃油, 能够提高缸内温度, 缩短主喷滞燃期, 减少主喷预混燃烧比例, 从而降低燃烧噪声[1]。同时, 不同的预喷策略也在很大程度上影响主喷的燃烧, 从而影响柴油机的油耗和排放特性。合理的预喷油量和预喷时刻能够得到油耗和 NO_x 排放之间的较好折中关系[2]。合理的后喷能够明显降低碳烟排放, 但是会造成油耗的上升[3]。

三维模拟的方法能够较准确的得到柴油机缸内的燃烧情况。通过预设的喷油规律, 能够灵活实现各种喷射方式, 所以采用三维模拟燃烧的方式非常适合研究柴油机多次喷射的过程。本文利用 converge 软件搭建了柴油机燃烧模型, 通过三维模拟的方式研究预喷量、主预喷间隔和轨压对柴油机燃烧和排放的影响。

2. 计算模型

2.1 模拟所用柴油机的技术参数

所模拟直喷增压中冷柴油机采用了高压共轨系统, 其主要技术参数见表 1。

表 1: 柴油机主要技术参数

技术参数	指标
缸径/mm	123
行程/mm	155
压缩比	18
涡流比	1.5

2.2 计算网格

本研究利用专业计算软件 Converge 进行柴油机进气、燃烧模拟研究，Converge 采用自适应网格，网格参数设置如表 2 所示。

表 2: 网格设置

名称	设定值
最大网格尺寸 (m×m×m)	0.004×0.004×0.004
整体加密指数	1
喷嘴加密指数	3
喷嘴加密区小直径 (m)	0.0005
喷嘴加密区大直径 (m)	0.003
喷嘴加密区长度 (m)	0.02
网格数上限	3000000

2.3 计算模型及边界条件

本研究的湍流模型采用 RNG k-ε 模型。该模型来源于严格的统计技术：重整化群理论 (renormalization group theory)。在形式上与标准 k-ε 模型相似，但是 RNG k-ε 模型应用范围更广，并且计算的准确性和可靠性更高。

其湍动能输运方程为：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\mu}{Pr_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + S_s \quad (1)$$

其耗散率的输运方程为：

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Pr_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) - c_{\varepsilon 3} \rho \varepsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \left(c_{\varepsilon 1} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \tau_{ij} - c_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + c_s S_s \right) \frac{\varepsilon}{k} \\ & - \rho \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \varepsilon^2}{(1 + \beta \eta^3) k} \end{aligned} \quad (2)$$

这里，

$$\eta = \frac{k}{\varepsilon} |S_{ij}| \quad (3)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

其中, S_s 是源项, 各项系数如表 3 所示。

表 3 RNG k- ε 模型系数

C_μ	$1/\text{Pr}_k$	$1/\text{Pr}_\varepsilon$	$c_{\varepsilon 1}$	$c_{\varepsilon 2}$	$c_{\varepsilon 3}$	β	η_0	c_s	c_{ps}
0.0845	1.39	1.39	1.42	1.68	-1	0.012	4.38	0	0.03

初次破碎采用 KH-ACT 模型, 该模型是在 KH 模型基础上修改而来。KH-ACT 模型中考虑了空气动力学、空化和湍流对初次破碎的影响。二次破碎采用 KH-RT 模型, 即在大于液核长度 L_b 的距离时, 先考察液滴是否符合 RT 模型的破碎条件, 如果不符合, 再考虑 KH 模型的破碎条件。 L_b 可由下式得出:

$$L_b = C_{bl} \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} d_0 \quad (5)$$

其中, C_{bl} 是破碎长度常数, ρ_l 是液体密度, ρ_g 是气体密度, d_0 是喷孔直径。

燃烧模型采用详细化学反应机理, 其反应机理来自文献[4]。用正庚烷(C7H16)来代替柴油进行燃烧化学反应计算, 该反应机理包括 41 种组分和 124 个基元反应。

液滴碰撞聚合模型采用 NTC (No Time Counter)模型[5], 由 Schmidt 提出。该模型的推导源于随机碰撞最基本的概率模型, 该模型具有计算速度快, 准确度高的特点[8]。碰壁模型采用壁面油膜模型, 该模型计算中采用一种混合的计算方式, 即某些计算中采用假设的粒子量, 其他计算中采用油膜量。氮氧模型采用 extended Zel'dovich mechanism, 碳烟模型采用 Hiroyasu-NSC Model。

2.4 计算模型校核

本研究在 1200rpm100%负荷下进行研究。计算缸压与试验缸压对比如图 1 所示。计算缸压与试验缸压非常吻合, 计算结果较准确。

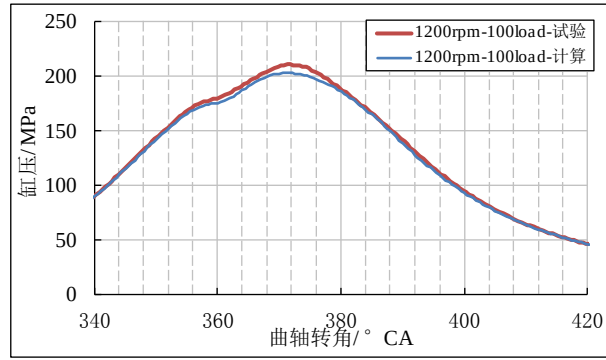


图 1 计算模型校核结果

3. 结果与讨论

3.1 不同预喷量对比

图 2 是预喷量分别是预喷量为 3mg、9mg、30mg、60mg 的喷油规律曲线。起初设定预喷时刻和主喷时刻不变。但是随着预喷量的增加，主预喷时间间隔越来越短。在 30mg 预喷量时，主预喷间隔几乎为 0° CA。这种主预喷间隔为零的情况在实际中是很难实现的，但是作为理论研究有一定的意义。在预喷量为 50mg 时，由于预喷持续时间过长，所以需要将主喷时刻延后。

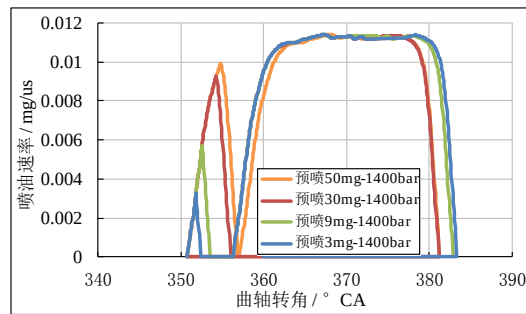


图 2 不同预喷量的喷油规律

图 3 是不同喷油时刻，不同预喷量对油耗和排放的影响。图中每条线代表一个预喷量，每条线上的不同点代表不同的喷油时刻。从图中可以看出，预喷量为 3mg 和 9mg 的工况油耗和 NOx 的折中曲线几乎一样，soot 和 NOx 的折中曲线区别也不大。当预喷量增加到 30mg 时，在 NOx 相同的情况下，油耗明显更低，soot 也有一定的降低。当预喷量增加到 50mg 时，在 NOx 相同的情况下，油耗较预喷量 30mg 时有所增加，soot 也有所增加。可见，对于随着预喷量的增加，在相同 NOx 的情况下，油耗先降低，之后升高，存在最佳的一个预喷量。

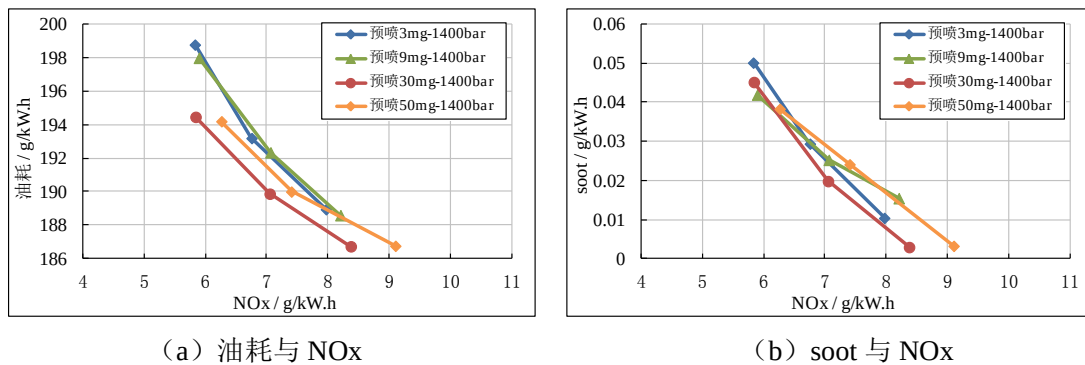


图 3 不同预喷量对油耗和排放的影响

图 4 是图 2 中喷油规律的计算结果，与图 5 中每条线的中间点对应。可以看出，增加预喷量后，

爆发压力明显增加了；初始放热率增加，但是放热率峰值降低；NO_x 初始值较高，但是中后期 NO_x 增加较少；soot 在燃烧前中期都较高，后期相差不大。在 370° CA 到 380° CA 的范围内，预喷量较多的放热率较低，NO_x 增加量较低，同时 soot 较高。

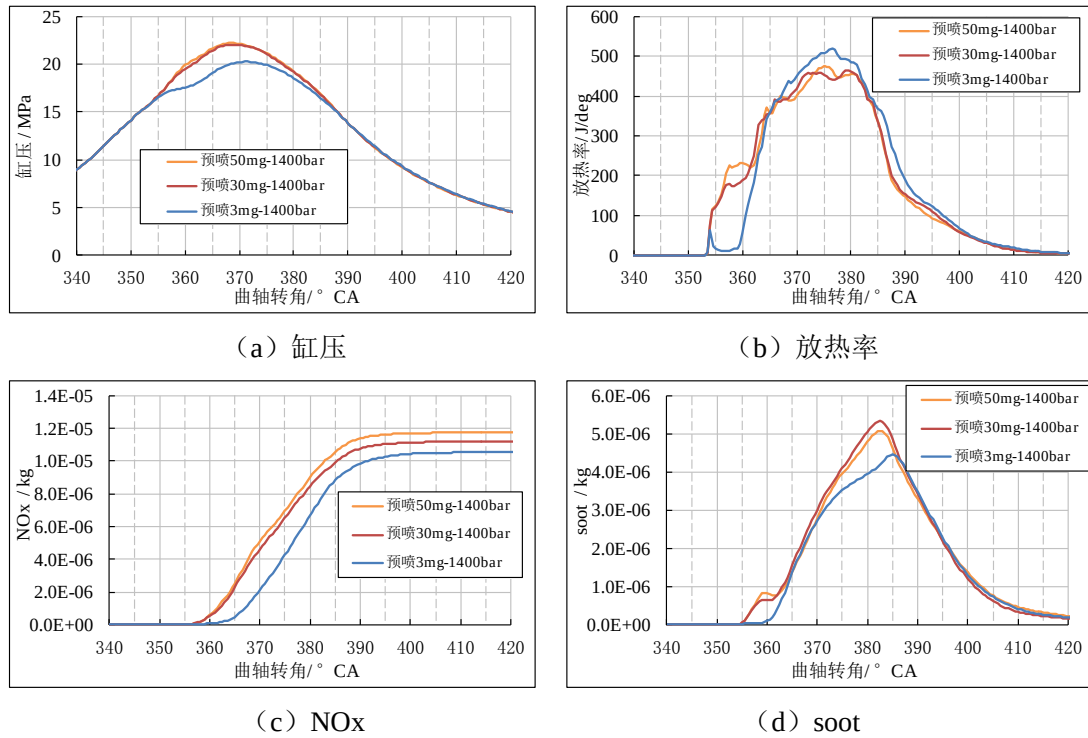


图 4 不同预喷量燃烧和排放的对比

图 5 是不同预喷量的活塞表面 lambda 云图对比。可以看出，在 365° CA 时，预喷量为 30mg 的工况在主喷混合气接触到活塞表面之前，预喷的混合气已经覆盖的喷油落点附近的区域。在 375° CA 时，预喷量为 30mg 的工况在活塞表面的混合气更浓。由于预喷量较大，相当于把主喷混合气喷到预喷混合气中，形成了较浓的混合气。这导致了在 370° CA 到 380° CA 的范围内，虽然喷油速率是相同的，但预喷量为 30mg 的工况放热率更低，同时 NO_x 增加较少，soot 生成较多。在 365° CA 时，相比于预喷量为 30mg，预喷量为 50mg 的工况预喷形成的混合气范围更大，而在喷油落点位置附件混合气较稀，这与预喷量 50mg 的预喷最大速度较预喷量 30mg 的速度大 10% 有关。由于喷油落点位置附件混合气较稀，之后燃烧室凹坑内的混合气浓度也较预喷量为 30mg 的工况稀，这导致预喷量 50mg 的工况 NO_x 更高，放热率峰值更高，soot 峰值更低。这种主预喷间隔为零燃烧过程与坡型喷射的燃烧过程[6]类似。

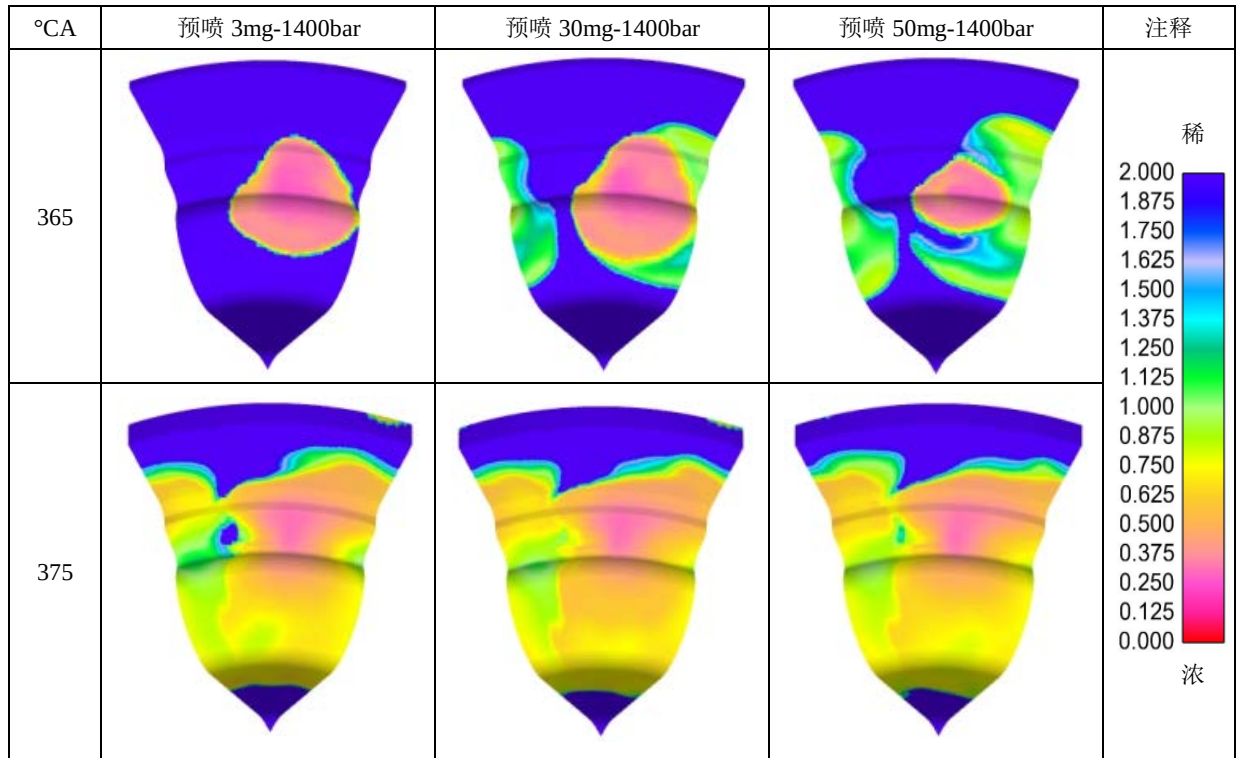


图 5 不同预喷量的 lambda 云图对比

3.2 不同主预喷间隔对比

主预喷间隔为零虽然会带来一定的好处，但是很难实现。因此，研究将主预喷间隔加大，对燃烧和排放的影响。图 6 是主预喷间隔为 0° CA 和 5° CA 的喷油规律曲线。

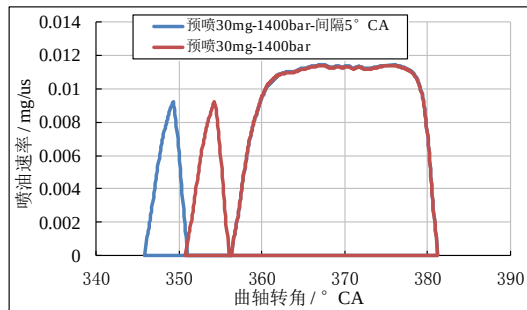


图 6 不同主预喷间隔的喷油规律曲线

图 7 是不同主预喷间隔对油耗和排放的影响。可以看出，增加主预喷间隔后，相同 NO_x 排放时，油耗增加，soot 也增加。图中黑色虚线圈内两点的喷油规律如图 6 所示，主喷正时相同。可以看出，正时相同的情况下，喷油间隔的增加主要是增加了油耗。当主预喷间隔变为 5° CA 后，虽有油耗有所增加，但是依然较预喷量为 3mg 时油耗低。

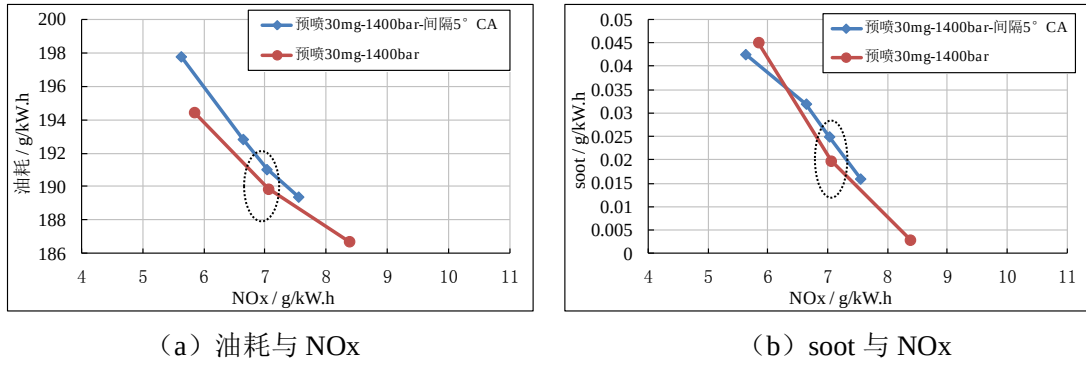


图 7 不同主预喷间隔对油耗和排放的影响

图 8 是图 7 中黑色虚线圈内两点的燃烧和排放对比。可以看出，由于预喷量较大，主预喷时间间隔较大的工况在上之点前缸压较高。365° CA 后两个工况的缸压相差不多。也就是说，在较大预喷量的情况下，过早的预喷提高了压缩负功，导致油耗较高。从累计放热量来看，除了预喷的区别，整个累计放热量曲线几乎相同。NOx 生成曲线和 soot 曲线也基本相同。

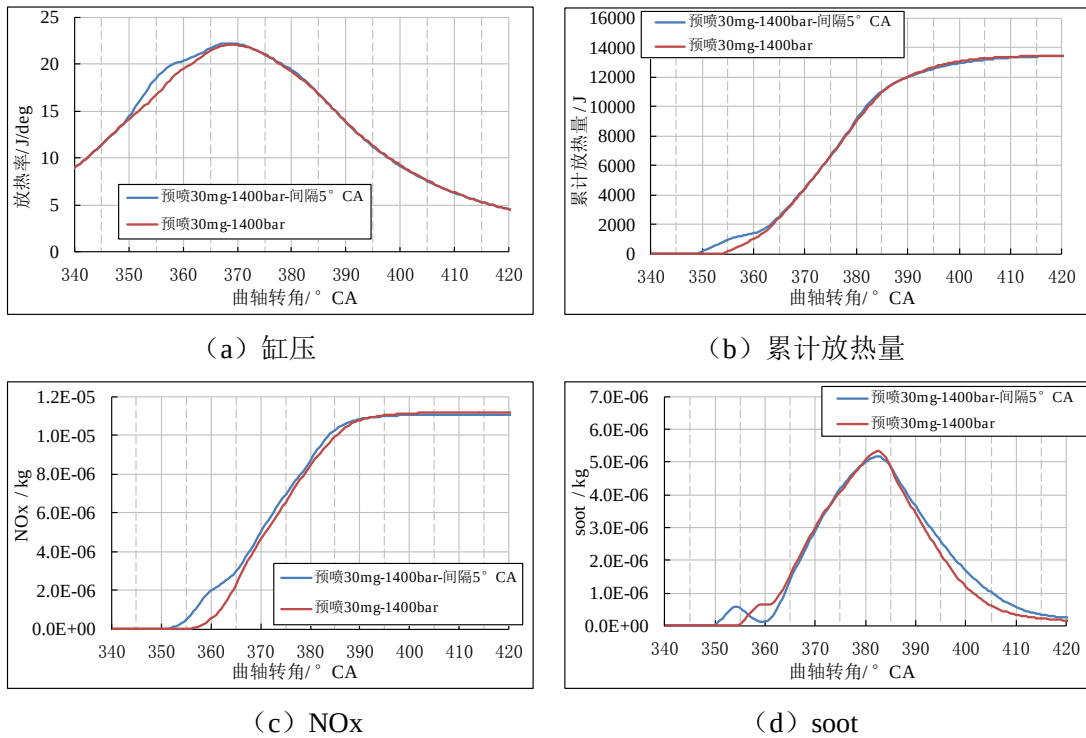


图 8 不同主预喷间隔对燃烧和排放的对比

3.3 不同轨压对比

图 9 是预喷量为 30mg，主预喷间隔为零，轨压分别为 1600bar 和 1400bar 的喷油规律曲线。轨压提高后，喷油速率峰值变大，喷油持续期缩短。

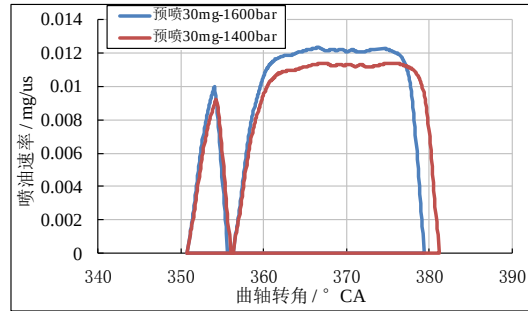


图 9 不同轨压的喷油规律曲线

图 10 是不同轨压的油耗与排放。图中每条线代表一个轨压，每个点代表不同的喷油时刻。图 9 中的喷油规律对应图 10 中每条线的中间点。从图 10 中可以看出，增大轨压后，油耗降低，NO_x 升高，soot 降低。在相同 NO_x 比排放下，大轨压的油耗较高，如图 10 中黑色虚线圈内两点所示。

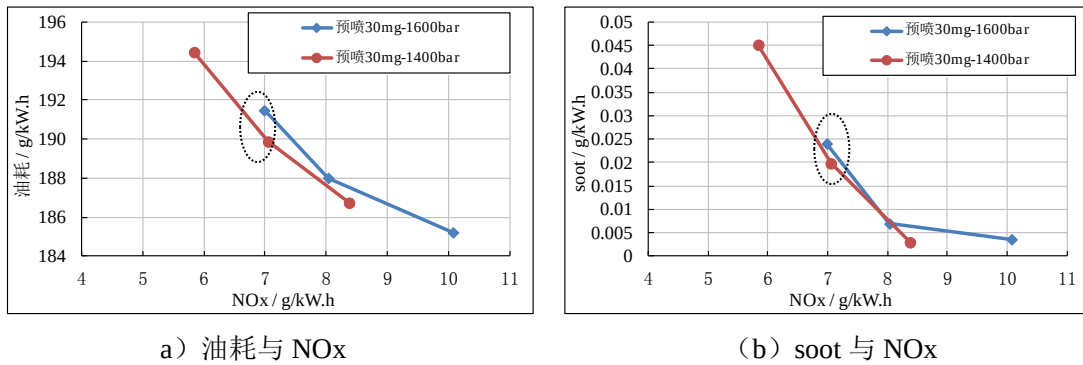
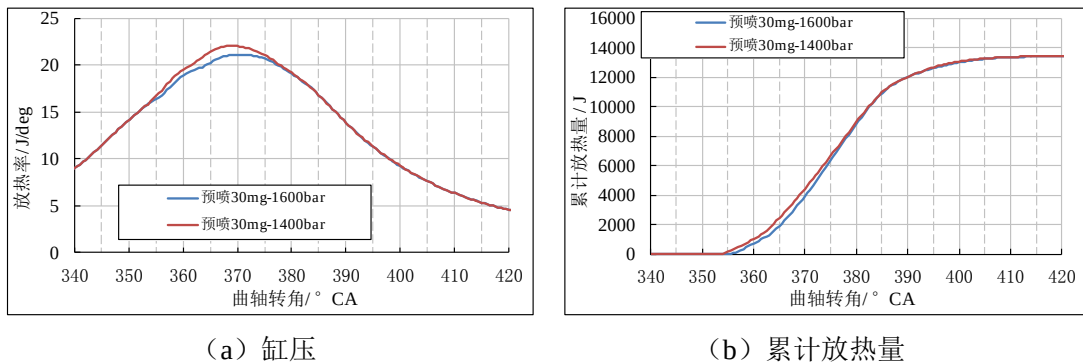


图 10 不同轨压对油耗和排放的影响

图 11 是图 10 中黑色虚线圈内两点的燃烧和排放对比。其中红线的喷油正时比蓝线提前 2° CA，因此红线爆发压力较高，油耗较低。从累计放热量来看，先喷油的低轨压工况初始放热量高，在 380° CA 附近被高轨压工况追上，之后两个工况放热量基本相同。从 NO_x 生成来看，先喷油的低轨压工况初始 NO_x 生成较多，但是在 380° CA 后 NO_x 的增加量小于高轨压工况，最终两个工况的生成的 NO_x 相差不大。从 soot 生成曲线来看，低轨压工况的 soot 峰值较高，但后期能够氧化大部分 soot，最终较高轨压工况略低。



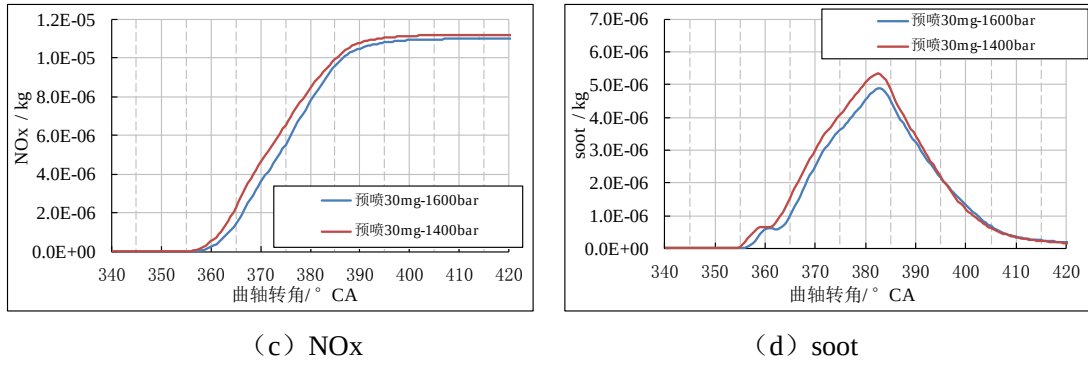
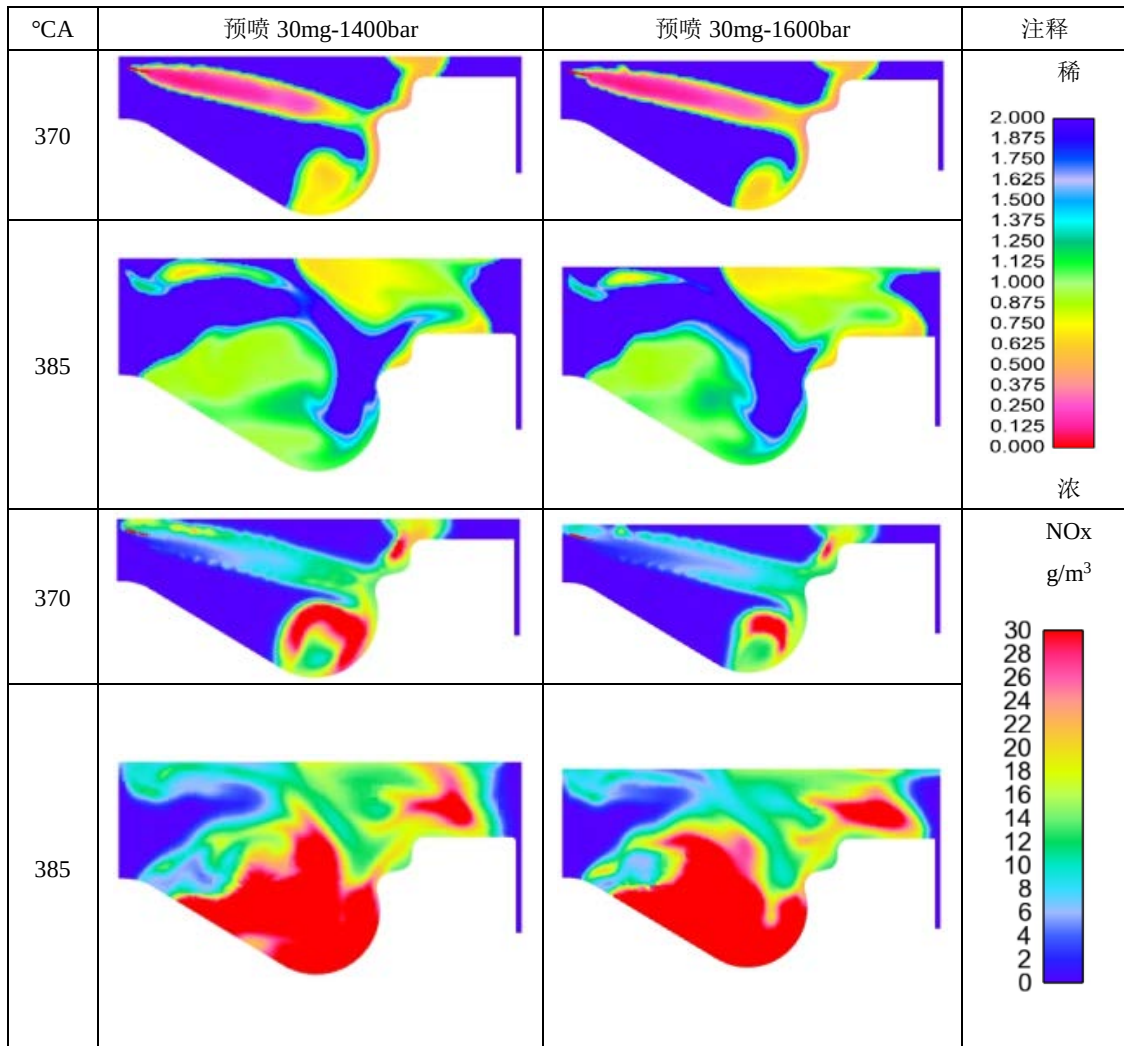


图 11 不同轨压燃烧和排放的对比

图 12 是图 10 中黑色虚线圈内两点的 λ 和 NO_x 云图对比。可以看出，低轨压的工况由于先喷油，在 370° CA 时混合气运动的较高轨压的远，同时也生成了更多的 NO_x。385° CA 时，高轨压工况的混合气运动范围开始超过低轨压工况，混合气的快速运动也导致了更多的 NO_x 生成。同时，高轨压工况有更多的混合气向壁面运动，这部分混合气产生的 soot 温度较低，较难被最终氧化，这导致了其 soot 排放稍高。


 图 12 不同轨压的 λ 和 NO_x 云图对比

4 结论

本文通过建立柴油机三维燃烧模型，研究了预喷量、主预喷间隔和轨压对柴油机燃烧和排放的影响。研究发现存在一个合适的预喷量，能够得到最佳的油耗和排放折中关系，且当主预喷间隔为零时这种关系最佳。虽然主预喷间隔为零很难实现，但对于预喷策略也具有一定的指导意义。提高轨压虽然能降低油耗，但是会明显增加 NO_x 排放。

5. 参考文献

- [1] SuSumu Kohketsu, Kazutoshi Mori, Tetsuro Kato. Technology for Low Emission, Combustion Noise and Fuel Consumption on Diesel Engine. SAE, No.940672. 1994
- [2] 张全长, 张朋辉, 郑尊清, 徐佳. 预喷对柴油机低温燃烧影响的试验研究. 内燃机工程, 2014 (35): 8-13.
- [3] D T. Hountalas, V. T. Lamarinis, E. G. Pariotis, H. Ofner. Parametric Study Based on a Phenomenological Model to Investigate the Effect of Post Fuel Injection on HDDI Diesel Engine Performance and Emissions-Model Validation Using Experimental Data. SAE2008-06-0641
- [4] 刘耀东. 基础燃料 (PRF) 及汽油表征燃料 (TRF) 化学反应动力学骨架模型的研究: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [5] Schmidt, D. P. and Rutland, C. J.. A New Droplet Collision Algorithm. Journal of Computational Physics, Vol.164, p.62, 2000.
- [6] 金华玉, 包宁, 赵伟, 陈长军, 胡芳, 坡形喷射对柴油机燃烧排放影响的模拟研究, 2015 年 idaj 中国区用户年会, 2015