

基于 Converge 的柴油机快速喷射燃烧模拟

Numerical simulation of diesel engine combustion with rapid injection based on Converge

吕晓刚 胡芳 刘江唯 包宁 金华玉

(一汽解放商用车开发院, 长春市, 邮编 130011)

摘要: 大量的试验以及国内外研究表明, 快速喷射是改善柴油机燃烧性能的主要措施之一。通过增加上止点附近的燃烧放热来提高燃烧的效率, 达到降低油耗的目的。本文基于某款柴油发动机, 通过 converge 软件进行大量 CFD 模拟计算探究快速喷射的喷油规律对发动机燃烧性能的影响。本次计算结合改变喷油嘴流量与轨压的手段实现缩短喷油持续期的目的, 最终确定了一个较为合适的流量与轨压的组合。

关键词: 柴油机快速喷射、轨压、喷油嘴流量、有效比油耗

Abstract: A large number of tests and studies at home and abroad have indicated that rapid injection is one of the main measures to improve the combustion performance of diesel engines. The efficiency of diesel combustion can be improved by increasing heat release near the TDC, which will reduce fuel consumption. This paper explores the effect of rapid injection on the combustion performance by a large amount of CFD simulated calculations based on a diesel engine. With different injection rates and rail pressure adopted to shorten the duration of fuel injection, a proper combination of a suitable injection rate with the rail pressure is finalized.

Key words: diesel rapid injection、rail pressure、injection rate、BSFC。

1. 引言

面对日益严峻的环境污染问题以及日益严格的排放法规, 柴油机性能以及排放都面临着巨大的挑战。增加燃油经济性以及减少污染物排放已成为柴油机发展研究的重点。随着电控燃油喷射技术的发展, 我们能够更加精准更加敏捷地实现对燃油喷射的控制。现阶段, 快速喷射技术已经成为国内外各大公司以及研究机构研究的热点。通过较快的喷油速率我们可以实现缩短扩散燃烧期、改善燃烧效率的目的。

本文通过使用 converge 软件对不同的快速喷射方案进行模拟计算, 根据计算结果分析其燃烧性能以及放热规律从而优化改进喷油规律参数。通过探究不同轨压、喷油嘴流量对燃烧性能的影响, 得出了一种在同等 NO_x 比排放下高效的燃烧方式。

2. 模拟计算条件说明

2.1 计算模型的建立

本次计算采用的是八孔喷油器，因此为简化计算采用 1/8 的 sector 模型进行模拟仿真，计算模型如图 1 所示。本次模拟基于一款 13L 柴油机，缸径 126.5mm，冲程 166mm，连杆长 261mm，压缩比为 17.6，进气涡流比为 1.5。计算中采用 C_7H_{16} 代替柴油进行模拟分析，所选择的模型如表 1 所示。

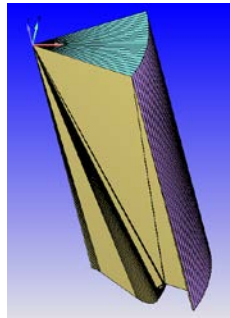


图 1. 计算采用的 sector 模型

表 1. 计算模型的选择

湍流模型	Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)
燃烧模型	The SAGE Detailed Chemistry Solver
油滴运动模型	O' Rourke model
油滴蒸发模型	Frossling Model
碰撞/破碎模型	NTC collision
油滴撞壁模型	Wall film
破碎模型	KH model
氮氧化物	Extended Zeldovich NOx model
SOOT 模型	Hiroyasu Soot model

2.2 边界条件说明

本次模拟选择发动机最大扭矩工况下进行计算，理由是该工况对整车经济性以及发动机经济性和排放特性影响较大。选择进气门关闭的 214°CA 到排气门开启的 485°CA 为计算区间，360°CA 为压缩上止点，计算工况相应参数选择如表 2 所示。

表 2. 计算工况相应边界

条件名称	单位	数据
缸内压力曲线	bar	3.849299
缸内温度曲线	K	396.788
缸盖温度	K	550
缸套温度	K	420
燃烧室温度	K	610
进气量	kg/h	1302.554
油耗量	kg/h	65.08
EGR 率	%	12.12522
扭矩	N·m	2698.4
转速	r/min	1200

3. 计算结果

3.1 试验校核

图 2 所示为模拟计算得到的缸压与试验结果对比, 表 3 为通过缸压计算得到的有效功率和有效比油耗对比结果。从结果可以看出, 模拟结果与试验结果吻合, 精度达到 99%, 说明所建立的数值模型可以用来模拟发动机的真实工况, 可以用该模型进行进一步研究。

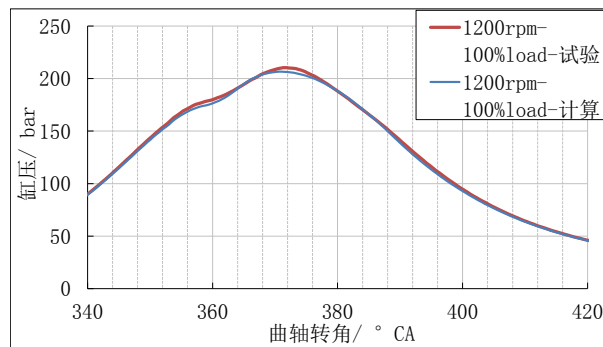


图 2. 计算与试验缸压对比

表 3. 模拟结果与试验结果对比

项目	单位	试验	模拟	精度
转速	rpm	1200	1200	—
循环油量	kg/h	65.08	65.08	—
有效功率	kW	339.12	338.5	99%
有效比油耗	g/kW·h	191.18	192.2	99%

3.2 模拟计算结果

首先对基础工况不同轨压进行模拟计算, 探究轨压对发动机性能的影响。原机基准点轨压为

1400bar, 选取的其他轨压分别为 2400bar, 1200bar, 1000bar, 800bar。图 3 为相同喷油嘴流量下不同轨压模拟计算的油耗-NO_x 比排放综合性能对比结果。轨压增加则喷油速度明显加快, 喷油持续期缩短, 轨压降低则会延长喷油持续期。由图中可以看出, 由基准工况的 1400bar 轨压增加至 2400bar 后综合性能恶化, 主要由于高轨压产生了大量的 NO_x 排放, 适当减少轨压能够略微改善综合性能。轨压降低至 1000bar 后基本到达极限值, 继续降低轨压则会出现性能无改善甚至恶化的现象。

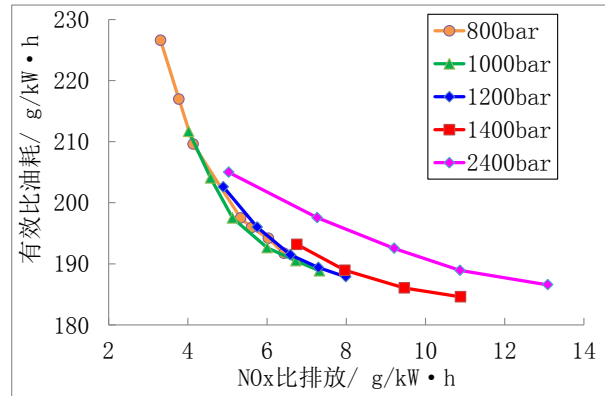


图 3.不同轨压的油耗-NO_x 比排放结果

根据对 NO_x 排放的要求, 本文中进行放热率对比的工况 NO_x 比排放基本都控制在 7g/kW·h 左右。通过对不同轨压达到相近 NO_x 比排放工况的放热率进行分析可以发现, 2400bar 为达到与低轨压相近的 NO_x 比排放需要大幅推迟喷油正时且高轨压的放热率上升迅速, 峰值远高于低轨压的工况, 因此高轨压虽然 NO_x 生成开始较晚, 生成速度却远高于低轨压工况。由计算结果看出, 2400bar 燃烧重心相较于基准的 1400bar 工况燃烧重心推迟了 1.8° CA, 而较低的 1000bar 轨压则提前了喷油正时, 燃烧重心提前 0.9° CA。在相同 NO_x 比排放下, 高轨压实现的快速喷射并不能改善有效比油耗, 低轨压则能实现较低的有效比油耗。

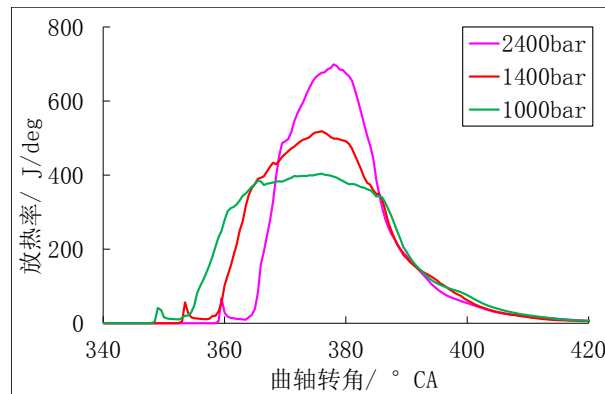


图 4.不同轨压在相同 NO_x 比排放下的放热率对比

增大喷油嘴流量也是实现快速喷射的有效方式之一, 本次模拟主要通过增大喷孔直径实现喷油流量的增大。在基准喷油嘴的 1760 ml/min 流量基础上, 本次计算还采用了 2640 ml/min, 3000 ml/min, 3200ml/min 等较大的喷油嘴流量。图 5 为相同轨压下不同喷油嘴流量的油耗-NO_x 比排放计算结果。由图中可以看出, 流量由 1760ml/min 增加至 2640ml/min 有效比油耗与 NO_x 排放综合性能有所改善, 由 2640ml/min 继续增加喷油嘴流量则性能变化不大。喷油嘴流量的增加缩短了喷油的持续期, 加快了燃油的喷射速度。由不同流量的放热率曲线 (见图 6) 可以看出, 流量增大后放热率迅速上升,

放热率峰值较高。然而快速增加的放热与过高的放热率峰值会产生大量的 NO_x 。受 NO_x 排放的限制,增大喷油嘴流量后需推迟喷油正时来抑制 NO_x 生成速度,这样便导致燃烧重心变化不大,对燃烧效率无明显的改善效果。喷油嘴流量为 3000ml/min 时燃烧重心略有提前,油耗也稍有改善,喷油嘴流量再增加则性能无明显改善。

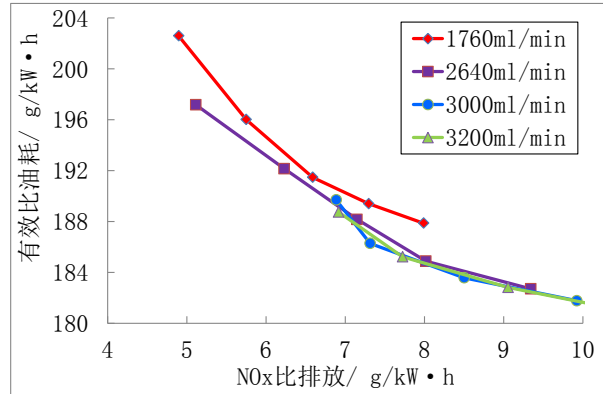


图 5.相同轨压下不同喷油嘴流量的油耗- NO_x 比排放结果

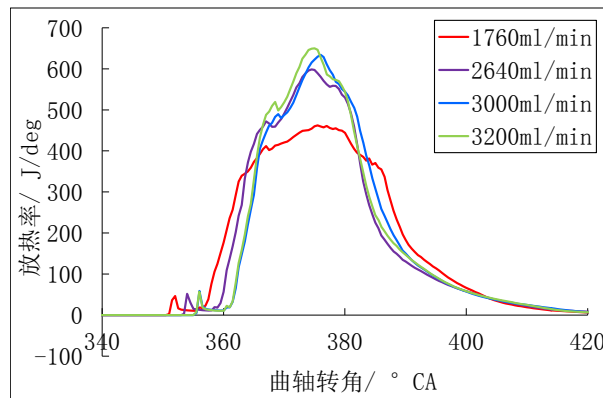


图 6.不同喷油嘴流量相同 NO_x 比排放下的放热率对比

通过对不同轨压及不同喷油嘴流量下发动机性能的变化进行研究,初步得出为改善油耗应加大喷油嘴流量并减小轨压的结论。根据不同喷油嘴流量与轨压的组合我们设计了多种方案,计算结果如图 7 所示。由图中可以看出,随着喷油嘴流量增加以及轨压的下降,发动机的有效比油耗- NO_x 比排放的综合性能逐渐改善。当喷油嘴流量增加至 3000ml/min,轨压降至 1000bar 左右时,性能基本达到最佳,继续增加喷油嘴流量并降低轨压性能无明显改善且会逐渐恶化。3000ml/min 的喷油嘴流量与 1000bar 的轨压作为改善方案,可实现燃烧重心提前 2.2°CA ,有效比油耗改善 2.8%左右。

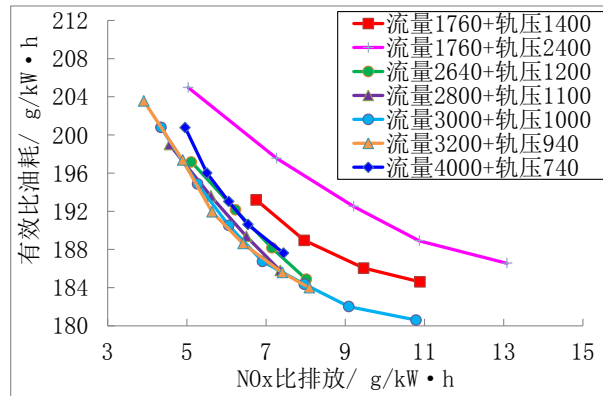


图 7.不同喷油嘴流量与轨压组合的油耗-NOx 比排放结果

对比改善后方案以及基准工况的喷油规律（见图 8）发现，改善后的方案较基准工况喷油始点提前约 2° CA，最大喷油速率明显提高，喷油持续期缩短 6.4° CA 左右。在这样的快速喷油条件下，此改善方案燃烧前期的放热上升早，放热峰值较高。由两个工况的 SOOT 排放对比（见图 9）可以发现，改善方案虽然实现了前期较高的放热，但也较基础工况生成了更多的 SOOT，此处还有较大的改善空间。由于改善方案喷油结束早，因此在 375° CA 左右（改善方案的燃烧重心之后）放热率开始快速下降，从而抑制了 NOx 的生成速度，最终与基础工况实现相近的 NOx 比排放。在燃烧末期约 400° CA 之后，改善后方案的放热高于基础工况，前期燃烧产生的 SOOT 逐渐被氧化，最终 SOOT 比排放较基础工况未发生明显恶化。两工况的具体性能参数见表 4。

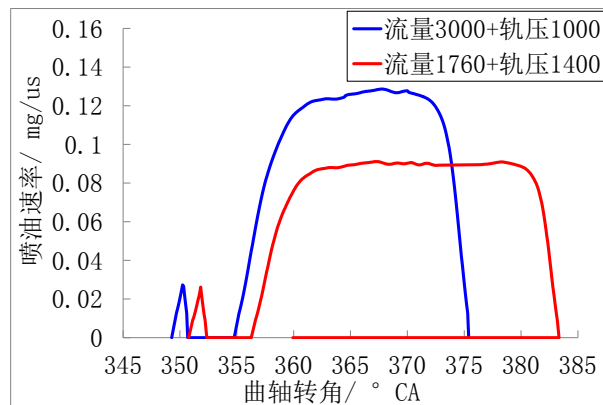


图 8.改善后方案（流量 3000 流量+轨压 1000）与基准工况（流量 1760+轨压 1400）喷油规律对比

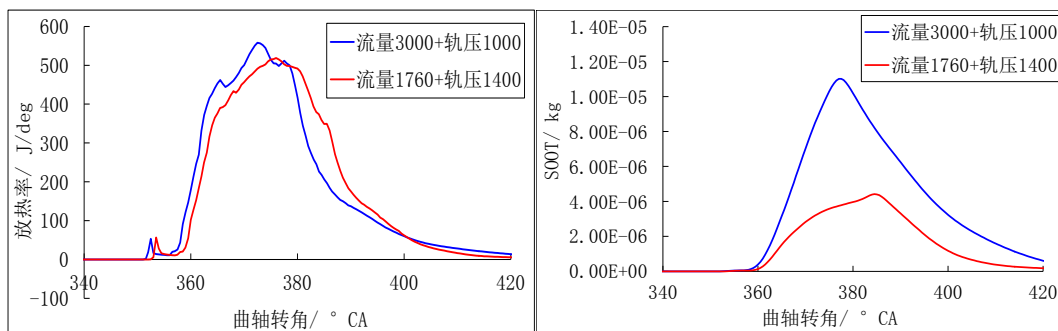


图 9.改善后方案与基准工况在相同 NOx 比排放下的放热率与 SOOT 排放对比

表 4. 基础工况与改善方案的性能参数对比

参数 设定	转速	负荷 率	喷油嘴 流量	轨压	孔数	喷油持 续期	有效比 油耗	NOx 比排 放	Soot 比 排放	爆压	CA50	燃烧 持续 期
	rpm	%	ml/min	bar		° CA	g/kW·h	g/kW·h	g/kW·h	bar	° CA	° CA
基础 工况	1200	100	1760	1400	8	32.565	192.2	6.97	0.03	206.6	376.4	27.4
改善 方案	1200	100	3000	1000	8	26.115	186.7	6.91	0.01	224.4	374.2	29.9

4. 结论

为了探究快速喷射的燃烧特性，本次计算主要通过改变轨压与喷油嘴流量实现快速喷射的喷油方式。。通过使用 converge 软件对某款 13L 柴油机 1200 转满载负荷工况进行加快喷油的燃烧模拟分析，对比其性能参数及燃烧放热曲线后得到以下结论：

- 1、单纯增加轨压的快速喷射会造成大量 NOx 排放，降低轨压并提前喷油则可能改善油耗。
- 2、增加流量对燃烧性能影响较小，大流量与低轨压的组合方式能够较好地降低油耗且不会引起 NOx 排放的显著增加。
- 3、采用喷油嘴流量 3000ml/min 与轨压 1000bar 的方案在同等 NOx 比排放下能够降低约 2.8% 的有效比油耗。改善方案的燃烧放热规律为今后的研究提供了方向。

5. 参考文献

- [1]周龙保. 内燃机学[M]. 机械工业出版社, 1999.
- [2]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.
- [3]赵伟, 胡芳, 金华玉, 包宁. 基于 Converge 和 Modefrontier 的柴油机过 VI 燃烧系统自动优化, 2017 年 IDAJ 中国区用户年会, 2017.