

高热效率重型柴油机燃烧系统优化研究

陈欢, 张辉亚, 郭智义, 刘贝, 殷勇, 李智

(东风商用车技术中心, 湖北 武汉 430056)

[摘要] 为提高柴油机热效率, 对柴油机燃烧系统进行优化, 分别从燃烧室型线优化和油嘴参数优化两个方面改善柴油机热效率。基于数值模拟指导燃烧室与喷油器优化匹配, 设计了5种深度, 2种类型, 3种压缩比燃烧室型线, 配合不同正时、喷射夹角进行DOE仿真, 并推荐较优方案进行试制加工和试验验证。计算结果表明: 在爆压设计边界250bar内, 高压压缩比对IMEP改善较为明显; 喷油器的喷射夹角设计为150°比原机147°时IMEP有改善; 冷EGR燃烧系统方案设计中, 双卷流类型燃烧室综合表现较好。对3种推荐型线方案进行试验验证, 结果表明: 计算预测的燃烧室形状、油嘴夹角的影响与试验趋势基本吻合。

关键词: 柴油机, 高热效率, 燃烧系统

Research on the Optimization of Combustion System of a High Thermal Efficiency Diesel Engines

Chen Huan, Zhang Huiya, Guo Zhiyi, Liu Bei, Yin Yong, Li Zhi

(Dongfeng Commercial Vehicle Technical Center, Wuhan 430056, China)

[Abstract] This paper studied on improving the thermal efficiency of diesel engine, the combustion system of diesel engine is optimized, and the thermal efficiency of diesel engine is improved from two aspects: combustion chamber profile optimization and oil nozzle parameter optimization. Based on numerical simulation to guide the optimal matching of combustion chamber and injector, 5 depth, 2 types and 3 compression ratio combustion chamber profiles are designed, DOE simulation is carried out with different timing and injection angles, and the optimal scheme is recommended for trial production processing and test verification. The calculation results show that within 250 bar of the burst design boundary, the high compression ratio improves IMEP significantly. The injection angle of the injector is designed to be 150°, which is an improvement over the IMEP of the original machine at 147°; In the scheme design of cold EGR combustion system, the comprehensive performance of the dual-coiled combustion chamber is better. The experimental verification of three recommended line schemes shows that the predicted influence of combustion chamber shape and oil nozzle angle is basically consistent with the test trend.

Key words: diesel engines; thermal efficiency; combustion system

前言

内燃机是当前主要的动力装置，其在一些领域内的应用短时期内仍无法被取代^[1]，其中热效率较高的柴油机将依然是主力军。随着排放和油耗法规的加严，这对柴油机的燃烧系统和后处理系统开发提出了更高的要求。因此，如何高效率、低成本地开发性能优良的燃烧系统，是柴油机设计必须考虑的问题。基于计算流体力学的三维燃烧模拟技术已被广泛应用于柴油机燃烧系统的开发研究^[2-3]，该技术可对进气流动、喷油器参数和燃烧室形状参数进行分析，提高系统一次开发成功率，缩短开发周期，从而降低开发成本^[4-5]。如果在样机开发阶段即开展燃烧模拟，那么物理样机阶段的试验验证效率将大大提高。然而，样机开发阶段往往输入参数不全，且缺乏校核计算模型的试验数据，有效地应用燃烧模拟具有一定难度。因此，本研究在某柴油机A样机开发阶段开展三维燃烧模拟的应用研究，探讨如何有效应用该技术提高燃烧系统开发效率，最终达成开发指标。

1 模型建立与标定

1.1 发动机基本参数

表 1 所示为设计输入。

表 1. 发动机参数

主要技术特征	六缸、直列、四冲程、四气门、电控共轨直喷、增压中冷
缸径×冲程 (mm)	123×152
标定压缩比	17.1
排量 (L)	10.8
发火顺序	1-5-3-6-2-4
转速 (r/min)	1200

1.2 模型标定

1.2.1 几何及网格模型

在本报告的模拟分析中，选定 1200r/min、75%负荷工况进行分析。对于不同方案，计算模型使用相同初始条件和边界条件。

通过 2D SKECTHER 重新绘制燃烧室形状。因为喷油器处于气缸中心轴线上，且每个喷孔的流量相同，故采用扇形区域进行计算。燃烧室的网格模型如图 7 所示，平均网格尺寸为 1mm。为了保证压缩比，燃烧室死区容积用调整压缩余隙高度来补偿，但建模时保证喷孔相对活塞顶面的位置与实际一致。

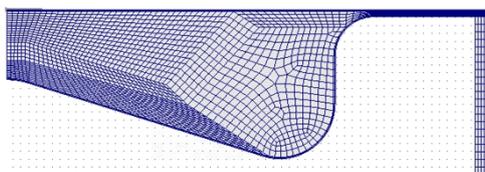


图 1. 网格模型

1.2.2 模型设置

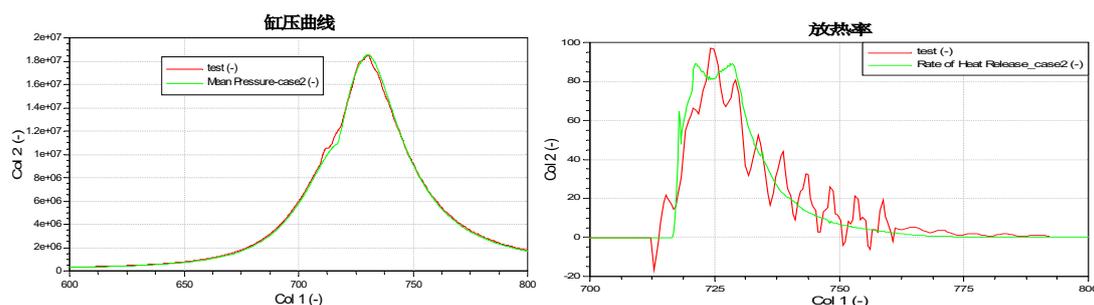
计算的工质为空气，理想流体，工况选 1200r/min-75%负荷工况点分析燃烧系统参数的影响及新燃烧室设计。计算模型的参数设置如表 2 所示。

表 2 参数设置

初始条件	初始压力 (MPa)	0.27
	初始温度 (K)	345.15
边界条件	缸盖温度 (K)	530
	缸壁温度 (K)	470
	活塞温度 (K)	575.15
计算模型	喷雾模型	WAVE
	燃烧模型	ECFM-3Z+
	NO 模型	Extended Zeldovich
	Soot 模型	Kinetic Model

1.2.3 模型标定结果

图 2 为模型标定结果，误差范围在 5%以内，认为模型可信。



(a) 试验和仿真缸压曲线对比

(b) 放热率曲线对比

图 2. 模型标定结果

2 计算结果与分析

2.1 计算方案

为提高燃油经济性，计划分别从燃烧室优化改善和油嘴两个方面改善油耗。

在燃烧室优化方面，以竞争力提升型线为基础，设计 20-22 不同压缩比的燃烧室方案，设计了 20 压缩比台阶型燃烧室 5 种型线(深度 15.5mm-19.5mm, 间隔 1mm)与喷射夹角(147-156) 进行扫描计算，20 压缩比双卷流型燃烧室 5 种型线与喷射夹角(147-156) 进行扫描计算，21 压缩比台阶型燃烧室 5 种型线与喷射夹角(147-156) 进行扫描计算，21 压缩比双卷流型燃烧室 5 种型线与喷射夹角(147-156) 进行扫描计算，22 压缩比台阶型燃烧室 3 种型线与喷射夹角(147-156) 进行扫描计算，22 压缩比双卷流型燃烧室 3 种型线与喷射夹角(147-

156) 进行扫描计算，探索不同燃烧室深度和喷射夹角对性能的影响，具体方案见表 3。

表 3 燃烧室方案

序号	深度	夹角	燃烧室类型	压缩比
1	15.5-19.5	147-156	台阶	20
2	15.5-19.5	147-156	双卷流	20
3	15.5-19.5	147-156	台阶	21
4	15.5-19.5	147-156	双卷流	21
5	15.5-19.5	147-156	台阶	22
6	15.5-19.5	147-156	双卷流	22

喷油器计算方案如 **Error! Not a valid bookmark self-reference.4** 所示，原机油嘴参数 5 孔，流量 2250ml/min，锥角 147 度，为了研究落点位置对性能的影响，分析的时候采用了相同流量，不同油束夹角。

表 4 喷油器选型方案

序号	孔数	流量 (mL/min)	锥角 (°)	最大喷射压力
1	5	2250	147	≥1800bar
2	5	2250	150	≥1800bar
3	5	2250	152	≥1800bar
4	5	2250	156	≥1800bar

在 1200r/min 75%工况对以上参数进行全因子搭配分析，研究不同深度对燃烧性能的影响，希望通过这些计算情况能对燃烧室深度，压缩比，不同燃烧室类型对性能的影响趋势有一个初步判断，再决定是否补充计算其它方案。总共 3 个压缩比，2 种类型燃烧室，6 个计算组，每个计算组 20 个方案。

3 计算结果分析

图 3 是 20 压缩比台阶型燃烧室（计算方案 1）计算结果，从 IMEP 与深度散点图可以看出，在同一喷射夹角下，随着深度增加 IMEP 先增大后减小；从 IMEP 与夹角散点图可以看出，在同一深度下，随着夹角增大，IMEP 增大；从 IMEP 主效应图可以看出，喷射夹角为 152° 和 154° 时 IMEP 均值高于平均值。同时发现 20 压缩比台阶燃烧室存在一个最优燃烧室深度，深度为 18.5mm 时 IMEP 值最大。

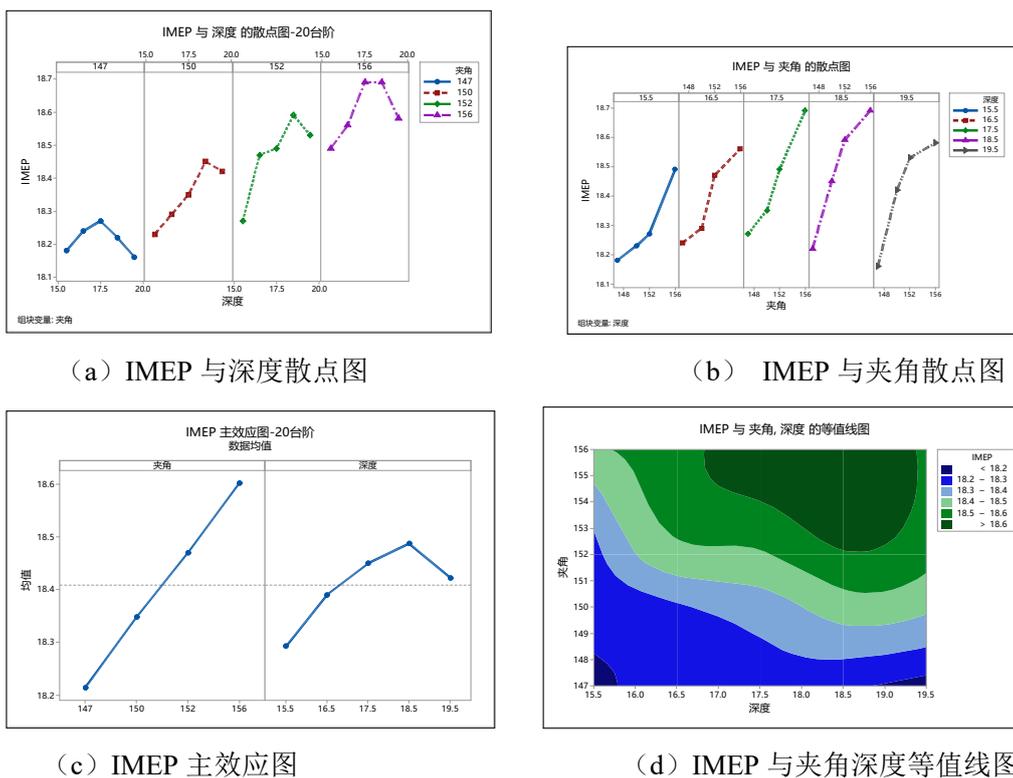
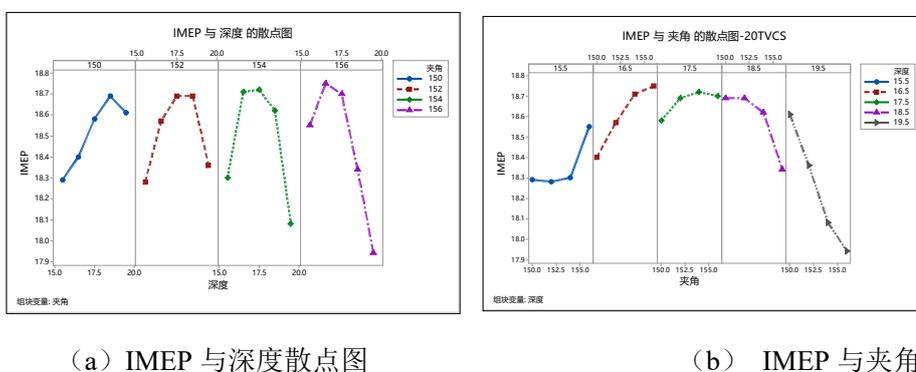
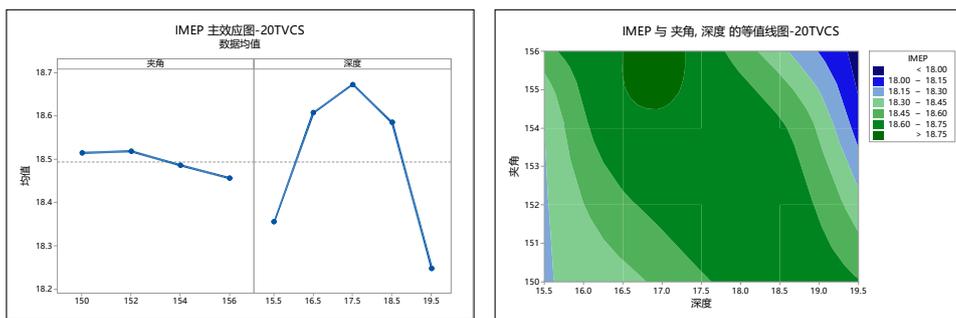


图 3 20 压缩比台阶型计算结果

图 4 为 20 压缩比 TVCS 燃烧室（计算方案 2）计算结果，从 IMEP 与深度散点图可以看出，在同一喷射夹角下，随着深度增加 IMEP 先增大后减小；从 IMEP 与夹角散点图可以看出，在深度小于 17.5mm 时，随着夹角增大，IMEP 增大；深度为 17.5mm 时，匹配较小夹角喷油器 IMEP 表现最好；深度大于 17.5mm 时，随着夹角增大 IMEP 减小。从 IMEP 主效应图可以看出，20TVCS 燃烧室深度 17.5mm 时 IMEP 值最大。从 IMEP 与夹角深度等值线可以看出，深度在 17.5mm 附近时，IMEP 值最大。因此以 IMEP 为优化目标，20 压缩比 TVCS 型线燃烧室深度 17.5mm 较为合适。



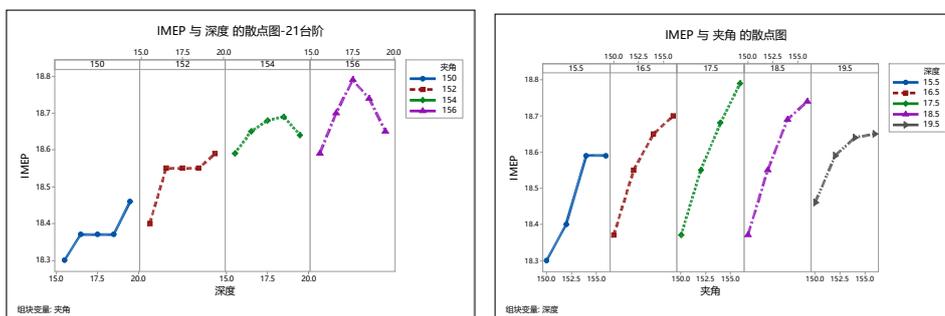


(c) IMEP 主效应图

(d) IMEP 与夹角深度等值线图

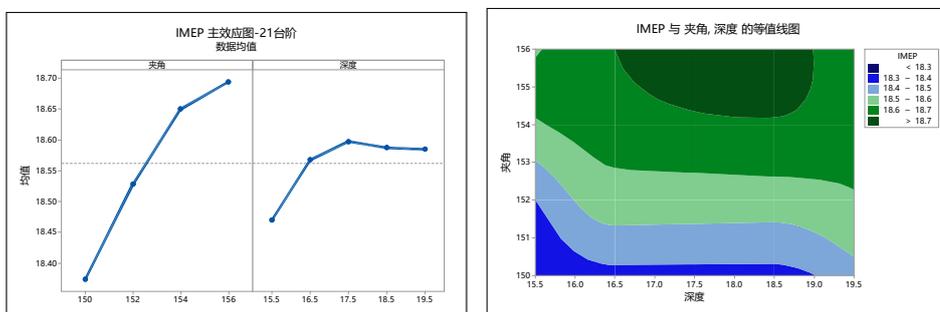
图 4 20 压缩比 TVCS 计算结果

图 5 为 21 压缩比台阶型燃烧室（计算方案 3）计算结果。从 IMEP 与深度散点图可以看出，较小喷射夹角需匹配较大深度燃烧室；从 IMEP 与夹角散点图可以看出，随着喷射夹角增大，燃烧室直径存在最佳值；在同一深度下，随着夹角增大，IMEP 增大。从 IMEP 主效应图可以看出，喷射夹角为 154° 和 156° 时，IMEP 值大于均值；深度大于 16.5mm 时，IMEP 值高于均值。对于 21 压缩比台阶燃烧室，深度为 17.5mm 时，IMEP 最大。从 IMEP 与夹角深度等值线图可以看出，深度在 17.5mm 附近匹配较大夹角喷油器对 IMEP 改善最明显。因此以 IMEP 为优化目标，21 压缩比台阶型燃烧室深度 17.5mm 较为合适。



(a) IMEP 与深度散点图

(b) IMEP 与夹角散点图



(c) IMEP 主效应图

(d) IMEP 与夹角深度等值线图

图 5 21 压缩比台阶型计算结果

图 6 为 21 压缩比 TVCS 型燃烧室（计算方案 4）计算结果。从 IMEP 与深度散点图可

可以看出,在同一喷射夹角下,IMEP 值存在拐点,随着深度增大 IMEP 先增大后减小;从 IMEP 与夹角散点图可以看出,深度小于 17.5mm 时,随着喷射夹角增大,IMEP 呈现增大趋势;深度大于 17.5mm 时,随着夹角增大,IMEP 呈现减小趋势。从 IMEP 主效应图可以看出,随着夹角增大,IMEP 减小。喷射夹角为 150° 和 152° 时,IMEP 高于均值;深度从 16.5mm-18.5mm 时,IMEP 大于均值。对于 21 压缩比 TVCS 燃烧室,深度为 17.5mm 时,IMEP 最大。从 IMEP 与夹角深度等值线图可以看出,21TVCS 燃烧室深度 17.5mm 附近对于 IMEP 改善明显。因此以 IMEP 为优化目标,21 压缩比 TVCS 型燃烧室深度 17.5mm 较为合适。

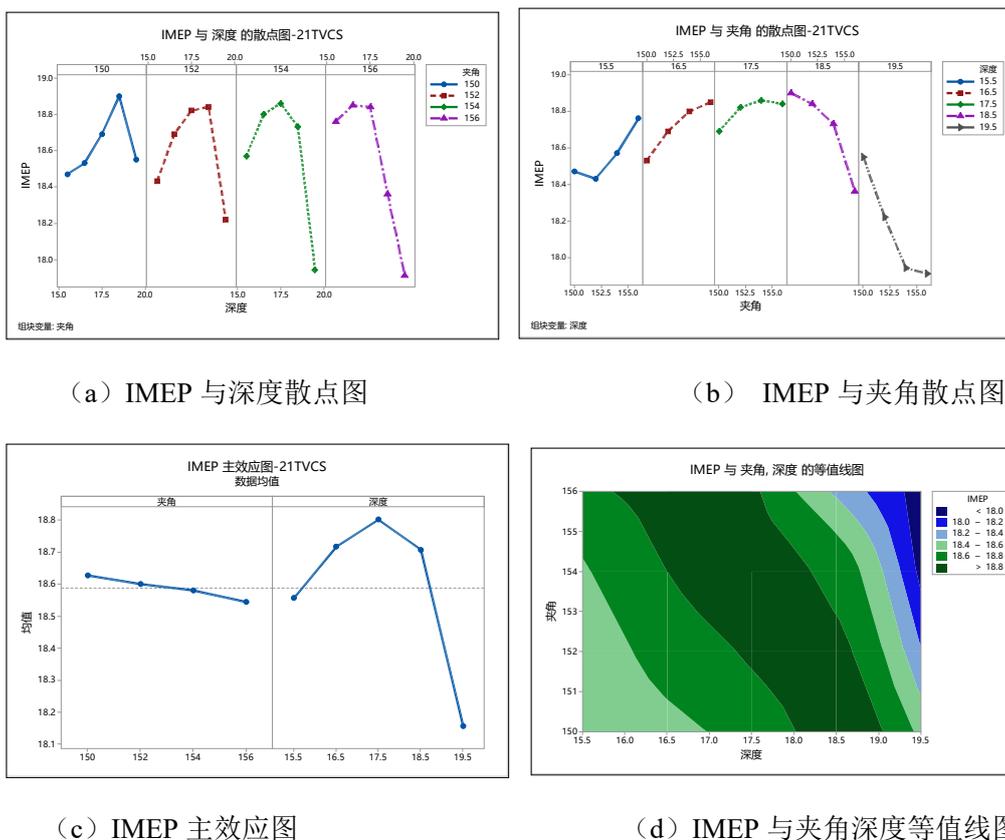


图 6 21 压缩比 TVCS 型计算结果

图 7 为 22 压缩比 (计算方案 5) 计算结果,从计算结果可以看出同一燃烧室随着喷射夹角增大,IMEP 呈现增大的趋势,其中台阶 4 燃烧室型线 IMEP 值最大。

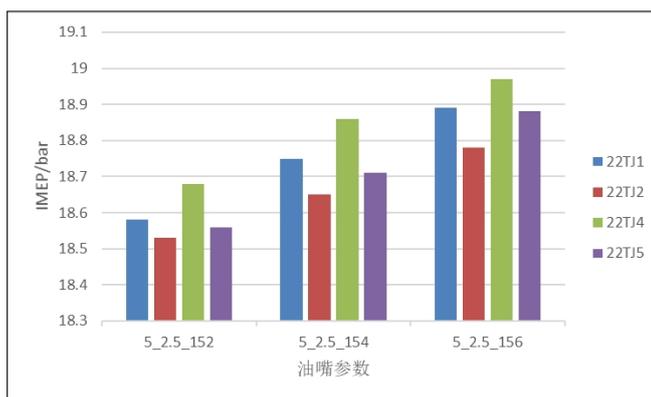


图 7 22 压缩比计算结果

图 8 为 22 压缩比双卷流型燃烧室匹配 5 孔 2.5L/min 油嘴（计算方案 6）计算结果，从计算结果可以看出，双卷流 1 号燃烧室 IMEP 最高，缸内油气分布较均匀。

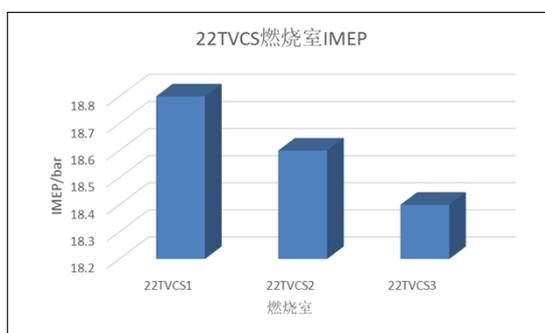


图 8 22 压缩比双卷流型线计算结果

根据上述分析结果，推荐 22 压缩比双卷流 1 号(T166)燃烧室，21 双卷流深度 17.5 (T175) 和 21 压缩比深度 17.3 (T173) 燃烧室方案试制加工。

4 性能台架试验验证

4.1 试验方案

对仿真推荐的几个燃烧室方案进行性能选型，选型工作按如下方案顺序开展。

表 5 试验配置

	燃烧室	喷油器	增压器	压缩比
方案一	T166	B857	J7	22
方案二	T166	B857	J7 二代	22
方案三	T175	B858	J7	21
方案四	T175	B857	J7	21
方案五	T173	B858	J7	21
方案六	T173	B858	J7 二代	21

4.2 试验结果

图9为性能排放试验结果，相对最优方案为方案二和方案六，二者最低原始油耗率相当，对应BSNO_x方案二略低，对应爆压方案二略低，对应涡后排温分别为相当；而且后者碳烟流量更低。经过对6个方案的试验对比，确定方案六综合性能最好，达成最低比油耗开发目标。

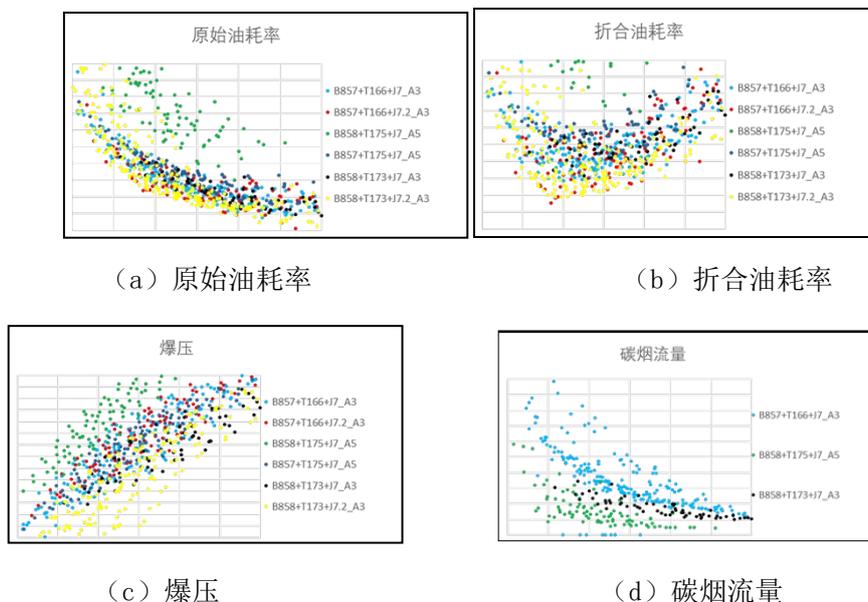


图9 性能排放试验结果

5 结论

为提高燃油经济性，对柴油机燃烧系统进行优化，分别从燃烧室优化改善和油嘴流量提升两个方面改善油耗。设计了 5 种深度，2 种类型，3 种压缩比燃烧室型线，配合不同正时、喷射夹角进行 DOE 仿真，并推荐最优方案进行试制加工和试验验证。得出以下结论：

- (1) 在爆压设计边界 250bar 内，压缩比 21 和 22 对 IMEP 改善较为明显；
- (2) 喷油器的喷射夹角设计为 150° 比原机 147° 时 IMEP 有改善；
- (3) 冷 EGR 燃烧系统方案设计中，双卷流类型燃烧室综合表现较好；
- (4) 经试验验证推荐方法达成最低比油耗开发目标。

参考文献：

参考文献

- [1] REITZ RD. Directions in internal combustion engine research[J]. Combustion and Flame, 2013,160 (1) :1-8
- [2] 李云清.CFD在柴油机燃烧系统开发中的应用[C].AVL用户大会.2008
- [3] 李军成, 韩志玉, 陈征, 等. 燃烧模拟在国六柴油机燃烧系统开发中的应用 [J]. 车用发动机, 2022.2021.01.007

[4]H. Bensler, F. Bühren, E. Samson, et al. 3-D CFD Analysis of the Combustion Process in a DI Diesel Engine Using a Flamelet Mode[C], SAE 2010-01-0662.

[5] M.Matti Maricq, Ning Xu. The Effective Density and Fractal Dimension of Soot Particles from Premixed Flames and Motor Vehicle Exhaust [J]. Journal of Aerosol Science, 2004, 35(10):1251-1274.