

# 高原环境下重型柴油机的性能优化研究

谭丕强<sup>1</sup>, 王德源<sup>1</sup>, 王成官<sup>1</sup>, 李远<sup>1</sup>, 楼狄明<sup>1</sup>, 李云广<sup>2</sup>, 刘胜<sup>2</sup>, 杨振寰<sup>2</sup>

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 中国北方发动机研究所, 山西 大同 037036)

**摘要:** 为改善重型柴油机在高原环境下的动力下降和燃烧恶化等问题, 针对某型重型柴油机进行了不同海拔高度(简称海拔)及不同柴油-空气-燃烧室(简称油-气-室)匹配方案的性能优化研究。通过模拟海拔4 500 m的高原进气状态, 开展了重型柴油机不同压缩比、涡流比和喷油器喷孔直径的试验研究。结果表明, 随着海拔的升高, 柴油机实际运行工况呈现由低速、低负荷向高速、高负荷工况迁移的特性。研究了海拔4 500 m高原环境下柴油机5种油-气-室匹配方案下的性能, 5种方案分别为: 方案A(涡流比2.2, 喷油器10×0.32 mm, 压缩比13.3)、方案B(涡流比2.2, 喷油器10×0.32 mm, 压缩比14.1)、方案C(涡流比1.5, 喷油器10×0.32 mm, 压缩比13.3)、方案D(涡流比1.5, 喷油器10×0.32 mm, 压缩比14.1)和方案E(涡流比1.5, 喷油器10×0.30 mm, 压缩比14.1)。油-气-室匹配仿真与试验研究结果显示: 适当提高压缩比、降低涡流比以及选取适当的喷孔直径, 可提高柴油机在高原环境下油-气-室的匹配状况; 最佳方案D的油-气-室匹配效果最优, 柴油机动力性、经济性和排放性均有较明显的改善。

**关键词:** 重型柴油机; 高原环境; 性能; 优化

**中图分类号:** TK421<sup>+</sup>.28

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-1093(2018)03-0436-08

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.03.003

## Performance Optimization of Heavy-duty Diesel Engine in Plateau Environment

TAN Pi-qiang<sup>1</sup>, WANG De-yuan<sup>1</sup>, WANG Cheng-guan<sup>1</sup>, LI Yuan<sup>1</sup>, LOU Di-ming<sup>1</sup>,

LI Yun-guang<sup>2</sup>, LIU Sheng<sup>2</sup>, YANG Zhen-huan<sup>2</sup>

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. China North Engine Research Institute, Datong 037036, Shanxi, China)

**Abstract:** The performances of different fuel-air-chamber matching schemes at different altitudes are optimized for a heavy-duty diesel engine. The results show that, with the increase in altitude, the actual operating conditions of diesel engine are shifted from low speed and low load to high speed and high load. The five schemes are presented, such as Scheme A (swirl ratio of 2.2, 10 × 0.32 mm injector, and compression ratio of 13.3), Scheme B (swirl ratio of 2.2, 10 × 0.32 mm injector, and compression ratio of 14.1), Scheme C (swirl ratio of 1.5, injector 10 × 0.32 mm, and compression ratio of 13.3), Scheme D (swirl ratio of 1.5, 10 × 0.32 mm injector, and compression ratio of 14.1), and Scheme E

收稿日期: 2017-08-21

基金项目: 国防“973”计划项目(613252)

作者简介: 王德源(1992—), 男, 博士研究生。E-mail: wangdeyuantj@163.com

通信作者: 谭丕强(1974—), 男, 教授, 博士生导师。E-mail: tpq2000@163.com

(swirl ratio of 1.5,  $10 \times 0.30$  mm injector, and compression ratio of 14.1). Simulated and experimental results show that the fuel-air-chamber matching condition of diesel engine in plateau environment can be improved by appropriately increasing the compression ratio, reducing the swirl ratio and selecting the appropriate nozzle diameter. The difference between the internal and external equivalent ratios of the best scheme is smaller. The fuel-air-chamber optimization of the best scheme is optimal, and the power, economy and emission performance of diesel engine are improved.

**Key words:** heavy-duty diesel engine; plateau environment; performance; optimization

## 0 引言

我国高原地区分布较广,其中海拔高度(简称海拔)在1 000 m以上的高原面积超过我国国土面积的三分之一。与平原相比,高原地区气压降低,环境温度降低,进入气缸的介质密度降低<sup>[1-3]</sup>,柴油机会出现转矩和功率输出下降、燃烧恶化和启动困难等故障频发状况<sup>[4-6]</sup>,对柴油机的动力性、排放性、经济性、可靠性和耐久性能等产生恶劣影响<sup>[7-9]</sup>。在我国国VI排放法规中,重型柴油机要求进行高海拔条件下的车载尾气排放测试。因此,需要进行高原环境下柴油机的性能优化研究。

针对高原环境下柴油机的性能表现,国内外学者已进行了许多相关研究。王宪成等<sup>[10]</sup>对高原环境下的重型车用柴油机热负荷性能进行了分析,以高原修正的广安博之喷雾模型为基础,建立了具有环境适应性的某特种车辆柴油机缸内燃烧与冷却系统传热耦合模型。余林啸等<sup>[11]</sup>对重型柴油机在不同海拔地区的燃烧与排放特性进行了相关研究。楼狄明等<sup>[12]</sup>在高原低温环境模拟试验台上,通过调整喷油量和喷油提前角抑制升速阶段的“滞速现象”,在海拔1~4 km条件下改善了柴油机的高原低温启动性能。陈贵生等<sup>[13]</sup>构建了两级增压共轨重型柴油机的一维热力学仿真模型,并对比模拟了柴油机采用两级增压和单级增压的变海拔工作特性,发现随着废气再循环率的增加,双级增压传热损失逐渐高于单级增压,但高海拔时排气损失率显著降低,氮氧化物与油耗之间的矛盾关系也得到改善。王宪成等<sup>[14]</sup>还针对海拔对重型柴油机缸内机油消耗的影响进行了研究,建立了最大误差不大于7%的缸内机油消耗数值仿真模型。Liu等<sup>[15]</sup>为提高高海拔条件下柴油机的功率,开发了适用于不同海拔的可调节型两级涡轮增压器。

然而,通过同时改变进气道形状、喷油器参数和压缩比等实现重型柴油机高原性能优化的研究较少。本文以某重型单缸柴油机为研究对象,对重型柴油机的实际运行工况以及进气压力的变海拔迁移特性进行了分析,并以此为基础开展了单缸机负荷特性试验,通过5种方案的试验结果对比,优选试验方案并进行了仿真验证。

## 1 试验系统及方案

### 1.1 试验系统

试验设备和主要测试仪器及用途如下:1)以空压机供气,用于模拟高原环境下进气方式的某重型单缸柴油机;2)上海同圆发动机测试设备有限公司产ToCeIL-CMFD010型发动机瞬时油耗测量仪,测量精度为0.1%,响应时间 $<0.1$  s;3)澳大利亚AVL公司产415S烟度仪,符合ISO 10054标准;4)采用美国Kistler公司产6061缸压传感器,通过该公司产Kibox燃烧分析仪采集缸压数据,实现对缸压和燃烧放热率的实时显示;5)空气经空气压缩机加压,通过进气放气阀和进气节流阀实现进气压力的调整,为单缸机提供指定的进气压力。高原环境模拟试验系统如图1所示。

试验用柴油为我国国IV-50号柴油,试验用润滑油为Mobil 10 W-40润滑油。重型柴油机的主要技术参数见表1。

### 1.2 试验方案

#### 1.2.1 试验程序和方法

1)进气压力调整。试验台由外气源供给压缩空气,通过进气放气阀和进气节流阀实现进气压力的调整,为单缸机提供指定的进气压力。

2)状态确认及外特性试验控制规范。在进行高原海拔条件下的燃烧过程性能优化匹配试验之前,选取工况点进行发动机状态的检查验证试验。

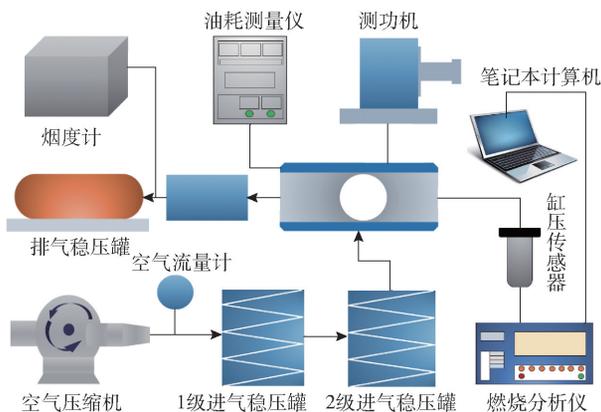


图 1 重型柴油机高原环境模拟试验系统

Fig. 1 Plateau environmental simulation test system for heavy-duty diesel engine

表 1 重型柴油机技术参数

Tab. 1 Engine specifications

参数	数值	进气方式
缸径/mm	150	空压机供气
行程/mm	160	
排量/L	2.83	
压缩比	13.3	
涡流比	2.2	
标定功率/kW	247(转速 1 900 r/min)	
最大扭矩/(N·m)	1 500(转速 1 200 r/min)	
喷孔数	10	
喷孔轴线夹角/(°)	150	
最大爆发压力限值/MPa	13	

### 1.2.2 柴油-空气-燃烧室匹配方案

在重型柴油机上,通过复现整机高原状态的进气条件,开展海拔 4 500 m 条件下的燃烧过程试验研究,通过提高压缩比(从 13.3 提高到 14.1)、增大进气道流通能力(涡流比从 2.2 降低到 1.5)、调整喷油器参数(10 × 0.30 mm 和 10 × 0.32 mm 两款喷油器中优选)三方面实现高原环境下重型柴油机的性能优化。本文中,柴油机的静态供油提前角为 32°CA,具体试验方案如表 2 所示。

## 2 试验结果分析

### 2.1 重型柴油机实际运行工况分析

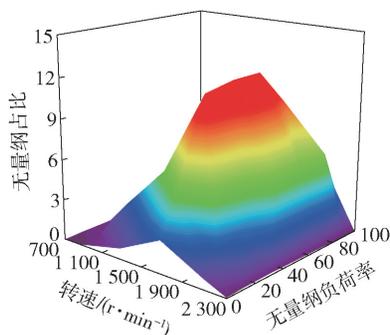
经过大量实车试验,分别在海拔 1 000 m 和 4 500 m 测取重型柴油机的实际稳态运行工况点

表 2 性能优化试验方案

Tab. 2 Performance optimization test schemes

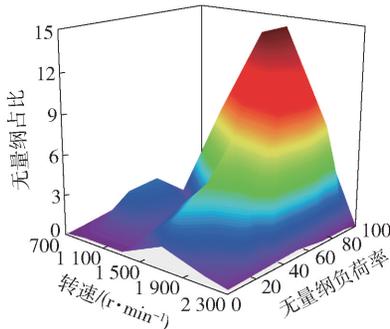
方案	涡流比	喷油器尺寸	压缩比
A	2.2	10 × 0.32 mm	13.3
B	2.2	10 × 0.32 mm	14.1
C	1.5	10 × 0.32 mm	13.3
D	1.5	10 × 0.32 mm	14.1
E	1.5	10 × 0.30 mm	14.1

5 377 个和 2 890 个,得到重型柴油机在不同海拔条件下的实际运行工况图谱,如图 2 所示。



(a) 海拔 1 000 m 时实际运行工况

(a) Actual operating conditions at an altitude of 1 000 m



(b) 海拔 4 500 m 时实际运行工况

(b) Actual operating conditions at an altitude of 4 500 m

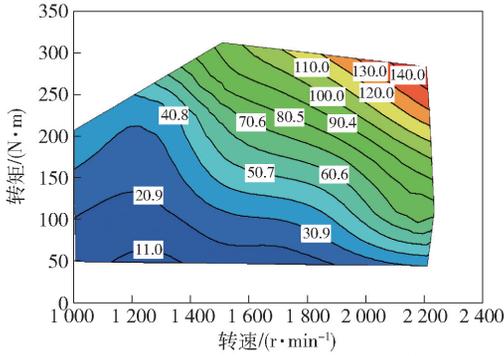
图 2 不同海拔下的重型柴油机实际运行工况

Fig. 2 Actual operating conditions of diesel engines at different altitudes

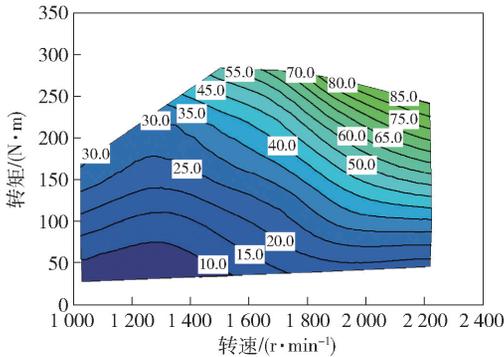
由图 2 可见,重型柴油机的实际运行工况在不同海拔下具有较大差异。随着海拔的增加,实际运行转速向高转速迁移,平均转速由 1 656 r/min 上升至 1 716 r/min;实际运行负荷也呈现向高负荷迁移的趋势,当海拔从 1 000 m 上升到 4 500 m 时,平均无量纲负荷率从 54.66 上升到 63.20。因此,高原环境下的重型柴油机需更加重视低速、低负荷区域的优化。

### 2.2 进气压力变海拔特征分析

在试验过程中,为了给后续柴油-空气-燃烧室(简称油-气-室)匹配优化提供指导,分别测取重型柴油机在海拔 1 000 m(试验当地海拔)和模拟高原海拔 4 500 m 时 30 个工况点的进气压力,绘制进气压力变工况图谱如图 3 所示。



(a) 海拔 1 000 m 时进气压力分布  
(a) Intake pressure distribution at an altitude of 1 000 m



(b) 海拔 4 500 m 时进气压力分布  
(b) Intake pressure distribution at an altitude of 4 500 m

图 3 不同海拔下进气压力变化

Fig. 3 Changes of intake pressures at different altitudes

如图 3 所示:在海拔 1 000 m 和 4 500 m 时,低速、低负荷区域的进气压力较低,高速、高负荷区域的进气压力较高;随着海拔的升高,相同的进气压力值会产生由低速、低负荷向高速、高负荷区域迁移的趋势;当海拔从 1 000 m 上升到 4 500 m 时,平均进气压力从 53.88 kPa 滑落到 32.42 kPa,降幅达 39.85%;随着海拔的升高,较低转速( $\leq 1\ 800\ \text{r}/\text{min}$ )下的平均进气压力从 44.35 kPa 滑落到 26.60 kPa(降幅达 40.02%),较高转速( $> 1\ 800\ \text{r}/\text{min}$ )下的进气压力从 83.70 kPa 滑落到 50.5 kPa(降幅达 39.67%)。由此可见:进气压力随海拔变化的区域迁移现象明显,但不同海拔对较高转速段和较低转速段的影响无明显差异;随着海拔的升高,同一海拔下的较高转速与较低转速的进气压力降幅分别为 47.01% 和

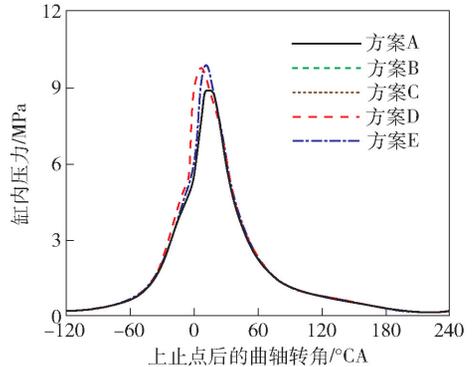
47.33%,表明同一海拔下的不同转速段进气压力差异很小,不受海拔变化的显著影响。

### 2.3 外特性试验结果

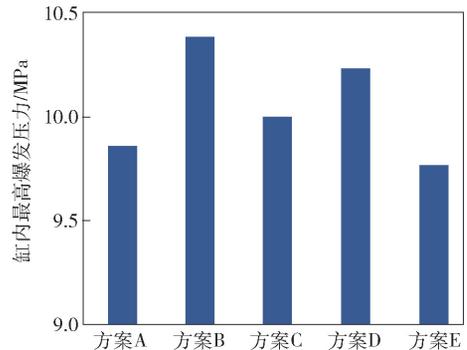
依据方案 A ~ 方案 E,在转速分别为 1 500 r/min、1 600 r/min、1 700 r/min、1 800 r/min、1 900 r/min 和 2 200 r/min 条件下进行外特性试验,试验结果分述如下。

#### 2.3.1 缸内压力

图 4 为海拔 4 500 m 条件下不同试验方案的缸内压力变化。图 4 中缸内压力均低于最大爆发压力的限值 13 MPa。



(a) 1 800 r/min 的缸内压力变化  
(a) Changes of cylinder pressures at 1 800 r/min



(a) 不同方案最高爆发压力平均值对比  
(b) Comparison of average highest cylinder pressures of different schemes

图 4 缸内压力变化

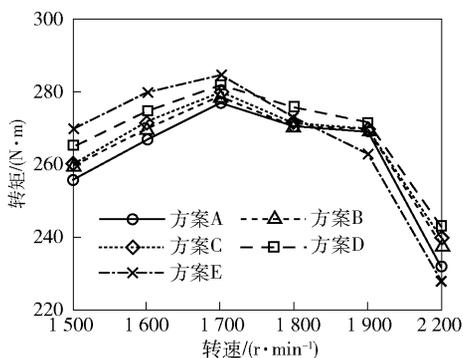
Fig. 4 Changes of cylinder pressures

图 4(a) 为重型柴油机在海拔 4 500 m、转速 1 800 r/min 时外特性试验的缸内压力变化曲线。由图 4(a) 中可见,方案 A ~ 方案 E 对缸内的压力变化产生了明显影响,方案 D 和方案 E 的重型柴油机在转速 1 800 r/min 时的缸内压力峰值较高,方案 A 的峰值最低。这说明在高原环境下,高的压缩比和低的涡流比有助于重型柴油机缸内扩散火焰的快速发展以及缸内压力的快速累积。当然,较高的缸内压力会使发动机承受更严重的机械负荷,振动和摩擦

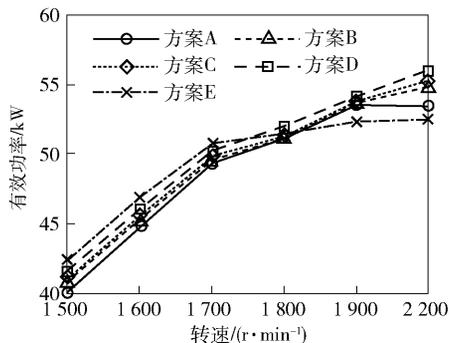
加剧。图 4(b) 为外特性试验获取的不同试验方案在不同转速下最高爆发压力的对比。由图 4(b) 可知: 方案 A ~ 方案 E 的最高爆发压力平均值分别为 9.865 MPa、10.388 MPa、10.005 MPa、10.233 MPa 和 9.769 MPa; 方案 B 和方案 D 的压力值最高, 方案 A 和方案 E 的压力值最低。这说明在高原环境下, 相对于进气道结构, 压缩比对缸内压力产生的影响更大; 在高涡流比条件下, 压缩比的变化对缸内燃烧过程产生的影响更加明显。

### 2.3.2 动力性指标分析

图 5 为海拔 4 500 m 条件下不同试验方案的转矩输出和有效功率输出。



(a) 不同试验方案下的转矩变化  
(a) Changes of torque for different schemes



(b) 不同试验方案下的有效功率变化  
(b) Changes of effective powers for different schemes

图 5 转矩及有效功率的变化

Fig. 5 Changes of torque and effective power

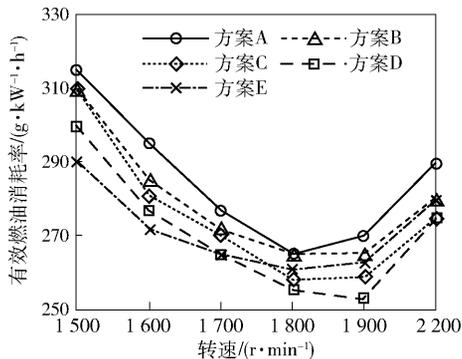
由图 5 可见: 在相同涡流比情况下, 压缩比越大, 输出转矩越大; 在相同压缩比情况下, 涡流比越小, 输出转矩越大; 在转速大于 1 900 r/min 后, 不同方案中压缩比和涡流比对转矩和功率输出的影响接近线性; 高压压缩比、低涡流比方案的重型柴油机在海拔 4 500 m 的转矩始终要大于低压压缩比、高涡流比方案的转矩, 增加幅度在 1.81% ~ 4.74% 范围内; 压缩比 13.3、涡流比 1.5 方案的发动机转矩整体上大于压缩比 14.1、涡流比 2.2 方案的发动机转矩。

方案 A ~ 方案 E 均在转速为 1 700 r/min 时取得最高转矩, 此时不同试验方案的转矩和有效功率输出变化较为平稳有序。在此转速段内, 随着转速升高, 转矩输出和功率不断增大, 方案 E 动力性表现最好, 输出的转矩和功率可达 285 N·m 和 50.74 kW, 相对于原始方案 A 提升了 2.89%。这说明在较低转速下, 喷油器孔径对重型柴油机高原环境下的动力性产生了更重要影响。在低转速阶段, 小孔径喷油器在相同喷油量前提下会产生更小的喷雾粒径, 更利于与卷吸进喷油雾束的空气混合、形成均匀可燃混合气, 优化缸内的燃烧放热。但由前面分析可知, 随着海拔升高, 实际运行工况向高转速迁移, 转速大于 1 700 r/min 的工况点占比达到 61.04%。在较高转速阶段, 方案 D (高压压缩比、低涡流比和大的喷油器孔径) 在动力性表现上具有优势。高压压缩比有利于柴油机有效热效率的提升, 对柴油机转矩和有效功率输出都具有积极作用; 低涡流比虽然降低了进气道形状对缸内气流运动的促进作用, 但其减少的进气阻力也会促进均匀混合气的形成, 这种现象在高转速阶段表现更加明显; 在高转速下, 由于喷油直径过小, 较大的气流惯性可能会造成油束交叉现象, 使缸内燃烧恶化。因此, 在高转速阶段小孔径喷油器动力性急剧恶化, 当转速由 1 900 r/min 上升到 2 200 r/min 时, 输出转矩由 263 N·m 下降到 228 N·m, 降幅达 13.31%。综上分析可知, 方案 D 的重型柴油机动力性表现更加优良。

### 2.3.3 经济性指标分析

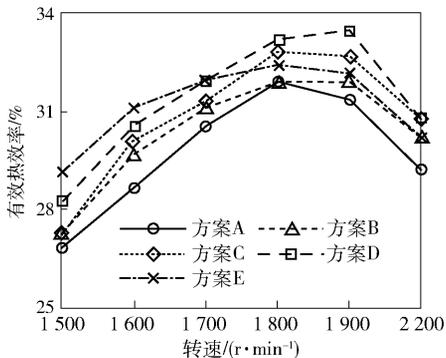
图 6 为海拔 4 500 m 条件下不同试验方案的有效燃油消耗率和有效热功率变化。

由图 6 可见: 在低转速区域, 方案 B 和方案 C 的有效燃油消耗率差别不大, 方案 B 略高于方案 C。尽管在低转速区域涡流和缸内湍流弱化, 混合气不均匀度降低, 但是由于高压压缩比的燃烧室容积小或出现喷雾撞壁加剧现象, 湮没了高压压缩比燃油消耗量减小的优势。如前所述, 高转速时缸内的气流运动强, 在大涡流比下喷雾交叉更严重, 对缸内燃烧产生了劣化影响, 进而使有效燃油消耗率增加、有效热效率降低。在 1 900 r/min 时, 方案 D 的有效燃油消耗率、有效热效率分别为 253 g/(kW·h) 和 33.48%, 相对于方案 A 可提升 6.72%。



(a) 不同试验方案下的燃油消耗率变化

(a) Fuel consumption rates for different schemes



(b) 不同试验方案下的有效热效率变化

(b) Effective thermal efficiencies for different schemes

图6 燃油消耗率和有效热效率的变化

Fig. 6 Changes of fuel consumption rate and effective thermal efficiency

### 2.3.4 排放性指标分析

图7为海拔4500m条件下不同试验方案的排气烟度变化。

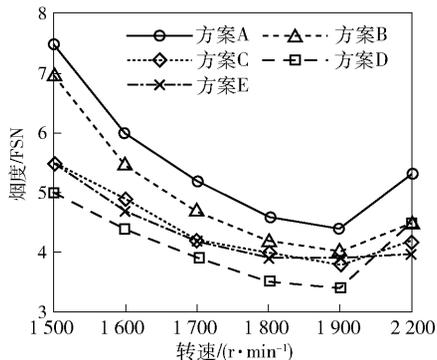


图7 排气烟度变化

Fig. 7 Changes of exhaust smoke

柴油机颗粒和氮氧化物排放一直是备受关注的问题。柴油机颗粒主要由干碳烟、可溶性有机物、硫酸盐、硝酸盐和少量金属含量的灰分等组成,而排气烟度可在一定程度上反映排气中的颗粒质量。在高

原环境,较低的进气压力与气体介质密度使得缸内燃烧变动情况更加剧烈,并且烟度是直接受其影响的排放性指标。从图7可以看出,方案D的排气烟度在不同转速下表现最好,方案C和方案E接近,方案A的烟度值最高并在低转速(1500 r/min)和高转速(2200 r/min)时达到7.5 FSN和5.3 FSN,明显高于其余方案,甚至高于方案D在5种转速下的最高烟度值。随着压缩比增大,燃烧始点提前,燃烧持续期增大,预混燃烧比例减小,扩散燃烧比例增大,这些都可能使烟度增加,但相同转速的缸内燃烧温度也会升高,缸内颗粒氧化愈加充分;由于较高的涡流比增加了喷油雾束的卷吸空气量,颗粒的氧化得到促进,减低了排气烟度。但从方案A和方案B的试验结果可知,对于高原环境下的试验柴油机,高涡流比对颗粒氧化过程的促进作用并不明显,压缩比仍起到主导作用,从试验结果看,后者在高原环境下对排气烟度的影响更加明显。对比方案D和方案E,由广安博之模型可知:在该试验条件下,小孔径喷油器的喷雾贯穿距因受空气扰动会变小,在高原环境低介质密度的环境下其雾化效果相对减弱,对燃烧的促进作用并不明显;大孔径喷油器相对较长的喷雾贯穿距在低介质密度下虽然可能会引起撞壁现象,但其喷雾抗扰动能力增加,在存在进气道涡流条件下油束交叉等现象减弱,混合气形成的均匀度更好,利于缸内燃烧放热,因此方案D的重型柴油机烟度排放表现也较为良好。

### 3 混合气形成仿真分析

为进一步验证5种不同方案对缸内混合气形成均匀性的影响,本文针对转速2200 r/min的外特性工况,利用发动机仿真软件AVL FIRE和三维设计软件Pro/E建立三维数值计算模型,对5种方案进行仿真分析。图8为活塞位于上止点时燃烧室的计算网格。设计燃烧室网格时,应尽量使不同试验方案中的网格数量和网格布置相同,以减少网格差异对计算精度的影响。

根据该样机燃烧室的几何结构图纸,在Pro/E软件中建立其燃烧室的三维模型,并将该模型导入AVL FIRE软件建立数值计算模型。该模型的计算从压缩行程上止点前125°CA(-125°CA)开始到压缩行程上止点后110°CA终止,上止点为0°CA。

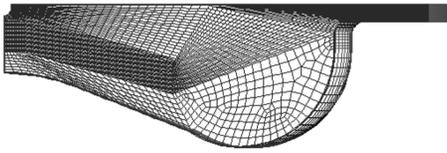


图 8 燃烧室计算网格

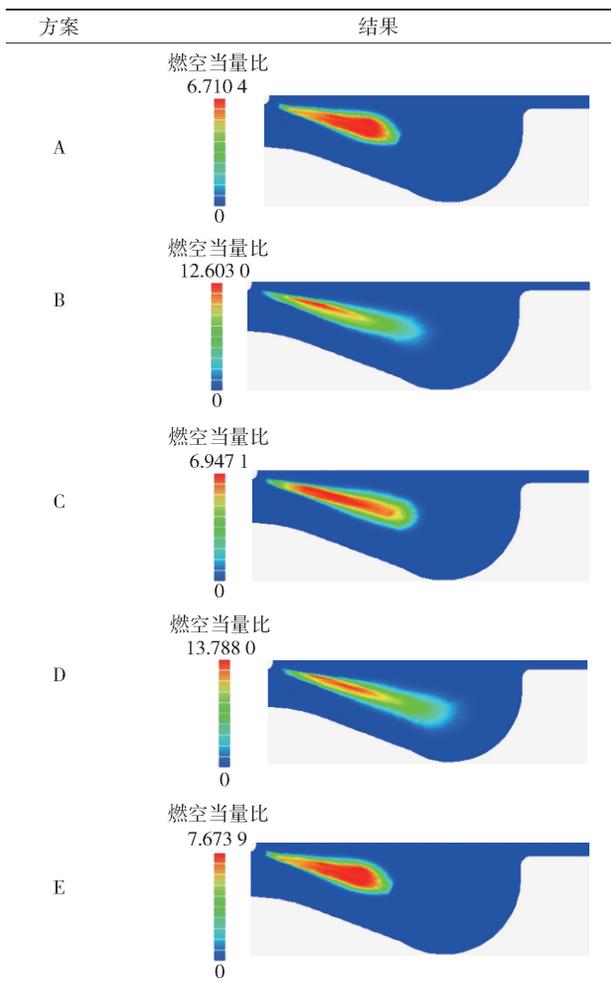
Fig. 8 Combustion chamber calculation grid

模型中的燃油二次破碎、撞壁模型分别选用标准液滴破碎和 Bai-Gosman 模型,湍流模型选用完全湍流流动  $k-\epsilon$  模型,燃烧模型选用广义涡团破碎模型。对于仿真结果(见表 3),依据燃空当量比的分布情况,对 5 种方案的燃料喷射阶段形成的混合气均匀性进行分析。

选取曲轴转角为  $-2^\circ\text{CA}$ 、方案 A ~ 方案 E 的燃空当量比分布进行分析。如表 3 所示:方案 A 油束内部燃空当量比与油束表面混合气形成区域的燃空当量比差异较大,混合气形成的均匀性较差;方案 D

表 3 燃空当量比仿真结果

Tab. 3 Simulated results of fuel-air equivalence ratio



和方案 E 相比,后者因喷油器孔径减小,油束抗扰动能力变差,贯穿距会变小,混合气形成的均匀性相对较差;方案 D 油束的周围燃空当量比相对较小,油束的内部峰值也相对较低,混合气形成更加均匀,油-气-室匹配效果最优,与试验结果一致。

## 4 结论

1) 随着海拔升高,实际运行工况呈现出向高速、高负荷迁移的现象;在海拔 1 000 m 和 4 500 m 时,低速、低负荷工况区域的进气压力较低,高速、高负荷区域的进气压力较高;随着海拔升高,相同的进气压力值呈现由低速、低负荷区域向高速、高负荷区域迁移的趋势。

2) 在重型柴油机 4 500 m 海拔性能优化试验中,方案 D(涡流比 1.5,喷油器规格  $10 \times 0.32 \text{ mm}$ ,压缩比 14.1)在动力性输出、经济性和排气烟度上的表现要优于其他方案;适当提高压缩比、降低涡流比以及选取相对较大的喷孔直径,可以改善高原环境下柴油机的喷雾和油气混合质量,并促进碳烟颗粒的氧化。

3) 仿真结果显示了 5 种方案下的缸内混合气形成状况,结果表明:方案 D 喷雾油束周围及内部燃空当量比相对其余方案较小,油束内部和外部差异也相对较小,形成的混合气相对最均匀,与试验结果保持一致。

## 参考文献 (References)

- [1] Liu J, Ge Y, Wang X, et al. On-board measurement of particle numbers and their size distribution from a light-duty diesel vehicle: Influences of VSP and altitude [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, 57(7):238-248.
- [2] Benjumea P, Agudelo J, Agudelo A. Effect of altitude and palm oil biodiesel fuelling on the performance and combustion characteristics of a HSDI diesel engine[J]. *Fuel*, 2009, 88(4):725-731.
- [3] Maloney B, Ge Y W, Petersen R C, et al. Experimental investigation of the impact of biodiesel on the combustion and emission characteristics of a heavy duty diesel engine at various altitudes [J]. *Fuel*, 2014, 115(1):220-226.
- [4] Xia M, Zhao C L, Zhang F J, et al. Modeling the performance of a new speed adjustable compound supercharging diesel engine working under plateau conditions [J]. *Energies*, 2017, 10(5):689.
- [5] Bermúdez V, Serrano J R, Piqueras P, et al. Analysis of the role of altitude on diesel engine performance and emissions using an atmosphere simulator [J]. *International Journal of Engine Re-*

- search, 2017, 18(1/2): 105–117.
- [6] Ramos Á, García-Contreras R, Armas O. Performance, combustion timing and emissions from a light duty vehicle at different altitudes fueled with animal fat biodiesel, GTL and diesel fuels [J]. *Applied Energy*, 2016, 182(1): 507–517.
- [7] Kan Z C, Lou D M, Cao Z Z, et al. Effects of altitude on combustion characteristic during cold start of heavy-duty diesel engine [J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2017, 18(2): 209–217.
- [8] Wang X, Ge Y, Yu L, et al. Effects of altitude on the thermal efficiency of a heavy-duty diesel engine [J]. *Energy*, 2013, 59(1): 543–548.
- [9] Wang X, Ge Y, Yu L, et al. Comparison of combustion characteristics and brake thermal efficiency of a heavy-duty diesel engine fueled with diesel and biodiesel at high altitude [J]. *Fuel*, 2013, 107(9): 852–858.
- [10] 王宪成, 郭猛超, 张晶, 等. 高原环境重型车用柴油机热负荷性能分析[J]. *内燃机工程*, 2012, 33(1): 49–53.  
WANG Xian-cheng, GUO Meng-chao, ZHANG Jing, et al. Thermal load analysis of heavy duty vehicular diesel engine in plateau area[J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2012, 33(1): 49–53. (in Chinese)
- [11] 余林啸, 葛蕴珊, 谭建伟, 等. 重型柴油机在不同海拔地区的燃烧与排放特性[J]. *内燃机学报*, 2013, 31(6): 507–512.  
YU Lin-xiao, GE Yun-shan, TAN Jian-wei, et al. Combustion and emission characteristics of a heavy-duty diesel engine at different altitudes [J]. *Transactions of CSICE*, 2013, 31(6): 507–512. (in Chinese)
- [12] 楼狄明, 阚泽超, 曹志义, 等. 重型柴油机高原低温起动升速稳定性试验[J]. *长安大学学报: 自然科学版*, 2017, 37(1): 120–126.  
LOU Di-ming, KAN Ze-chao, CAO Zhi-yi, et al. Stability test of cold starting speed rising stage for heavy duty diesel engine under plateau environment[J]. *Journal of Chang'an University: Natural Science Edition*, 2017, 37(1): 120–126. (in Chinese)
- [13] 陈贵升, 狄磊, 苏娜, 等. 基于不同增压系统共轨柴油机变海拔工作特性模拟[J]. *内燃机学报*, 2016, 34(6): 504–512.  
CHEN Gui-sheng, DI Lei, SU Na, et al. Simulation on performance of common-rail diesel engine equipped with different turbocharging systems at different altitudes [J]. *Transactions of CSICE*, 2016, 34(6): 504–512. (in Chinese)
- [14] 王宪成, 胡俊彪, 和穆, 等. 海拔高度对重型柴油机缸内机油消耗影响研究[J]. *内燃机工程*, 2014, 35(1): 115–120.  
WANG Xian-cheng, HU Jun-biao, HE Mu, et al. Research on effect of high altitude environment on in-cylinder lubricant consumption in heavy duty diesel engine [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2014, 35(1): 115–120. (in Chinese)
- [15] Liu R, Zhang Z, Dong S, et al. High-altitude matching characteristic of regulated two-stage turbocharger with diesel engine [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2017, 139(9): 094501.