

高原环境下主预喷策略对农用柴油机燃烧与排放的影响

毕玉华, 彭正华, 聂学选, 申立中, 陈贵升, 刘少华

(昆明理工大学 云南省内燃机重点实验室, 昆明 650500)

摘要: 基于发动机试验台架和大气模拟系统, 研究了 $1400\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $200\text{ N}\cdot\text{m}$ 的工况下主喷正时、轨压、预喷油量和预喷正时对柴油机燃烧与排放性能的影响规律。研究表明: 随着海拔的升高, 柴油机燃烧的缸内压力降低, 放热率降低, 燃烧温度升高, 压力升高率略有下降, 总碳氢化合物 (THC) 和烟度的排放分别降低 38.77% 和 27.85%, 一氧化碳 (CO) 和氮氧化物 (NO_x) 的排放分别升高 23.31% 和 0.64%。主喷正时提前可降低有效燃油消耗率, 但显著增加 NO_x 排放, 高原需进一步提前主喷正时以补偿滞燃期延长。轨压从 80 MPa 增至 120 MPa 可改善雾化, 降低 THC、CO、烟度排放及 BSFC, 但 NO_x 排放升高 25%~30%。增加预喷油能够缩短滞燃期, 降低 BSFC, 但需结合主喷正时抑制 NO_x 生成。预喷正时提前在高海拔可小幅抑制 NO_x 排放。高原环境下适合采用“主喷正时提前+100 MPa 轨压+适量预喷油量”组合, 通过主预喷策略和喷油压力的协调优化能改善高海拔下农用柴油机的性能, 为农用柴油机高原适应性设计提供理论依据。

关键词: 动力工程; 海拔; 柴油机; 主预喷策略; 燃烧; 排放

中图分类号: TK427 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2026)06-1477-11

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20241296

Impact of main pilot injection strategy on combustion and emission performance of agricultural diesel engines under high-altitude conditions

BI Yu-hua, PENG Zheng-hua, NIE Xue-xuan, SHEN Li-zhong, CHEN Gui-sheng, LIU Shao-hua
(Yunnan Key Laboratory of Internal Combustion Engines, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Based on an engine test bench and atmospheric simulation system, this study systematically investigated the influence of main injection timing, rail pressure, pilot fuel quantity, and pilot injection timing on the combustion and emission performance of a diesel engine under conditions of $1400\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ and $200\text{ N}\cdot\text{m}$. The study findings indicate that with the increase in altitude, the in-cylinder pressure and heat release rate of the diesel engine decrease, while the combustion temperature and rate of pressure rise

收稿日期: 2024-12-04.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52066008); 云南省基础科学研究项目 (202401AS070102); 云南省教育厅科学研究基金项目 (2026J1150).

作者简介: 毕玉华 (1967-), 女, 教授, 博士. 研究方向: 内燃机现代设计和排放控制. E-mail: yuhuabi97@163.com

slightly decline. The emissions of total hydrocarbons and smoke opacity are reduced by 38.77% and 27.85%, respectively, whereas the emissions of carbon monoxide and nitrogen oxides increase by 23.31% and 0.64%, respectively. Advancing main injection timing in agricultural diesel engines at high altitudes can lower effective fuel consumption rate but significantly increase NO_x emissions. To compensate for the prolonged ignition delay, further advancement of main injection timing is necessary. Raising rail pressure from 80 MPa to 120 MPa enhances atomization, reducing THC, CO, smoke emissions, and BSFC, yet NO_x emissions rise by 25%~30%. Increasing pilot injection shortens the ignition delay, lowers BSFC, but requires combining with main injection timing advancement to curb NO_x formation. Advancing pilot injection timing slightly suppresses NO_x emissions at high altitudes. A combination of "main injection timing advancement + 100 MPa rail pressure + appropriate pilot injection volume" is suitable for high-altitude environments. Coordinating and optimizing the main-pilot injection strategy and injection pressure can enhance the performance of agricultural diesel engines at high altitudes and offer a theoretical basis for their high-altitude adaptability design.

Key words: power engineering; altitude; diesel engine; main pre-injection strategy; combustion; emissions

0 引言

随着全球能源消耗的增大和环境保护要求的不断提高,柴油机作为一种重要的动力源,其燃烧效率和排放性能备受关注^[1]。高原地区大气压力较低,空气密度小,这会导致柴油机进气量减少,燃烧不充分,从而影响发动机的动力性和经济性^[2,3],容易产生不完全燃烧产物,如一氧化碳(Carbon monoxide, CO)、碳氢化合物(Hydrocarbons, HC)和颗粒物(Particulate matter, PM)等^[4-7]。柴油机具有高转矩、低油耗、高热效率等优点^[8],95%以上的农业机械采用柴油机作为动力单元^[9]。在我国,大多数城市位于高海拔地区(大约1 500米)^[10],以柴油机为动力的车辆、农业机械、工程机械以及特种动力长期工作在高原环境下,我国现行的非道路用第四阶段排放法规对于燃烧和排放提出了更高的要求,因此研究高原环境下的主预喷策略对柴油机燃烧与排放的影响具有重要意义。

近年来,王霞等^[11]研究了柴油机在不同海拔高度下的低温起动性能,试验结果显示,随着海拔升高,起动时间变长;雷蕾等^[12]研究了海拔对柴油机瞬态排放的影响,研究发现氮氧化物(nitrogen oxides, NO_x)体积分数随海拔升高逐渐增大,但其他参数稳定后, NO_x 体积分数随海拔升高而降低,烟度和PN排放随海拔升高而增加;陈贵升等^[13]构建国六柴油机与DPF耦合的一维瞬态模型,发现DPF使柴油机瞬态扭矩与热效率降低,

燃油消耗率上升,高海拔及增扭矩时表现更突出;王俊等^[14]研究了基于VNT驱动的EGR对轻型柴油机燃烧和排放的影响,EGR能有效降低 NO_x 排放,但对CO和烟度的影响取决于工况;王建等^[15]通过试验探究不同海拔对柴油发动机缸内燃烧及排放的影响,研究发现海拔增加,缸内峰值压力明显上升,各工况燃烧持续期随海拔增加而延长,海拔增加,常规污染物排放大多呈上升趋势;文献[16]研究了高海拔对涡轮增压直喷柴油机燃烧和性能的影响,研究发现高海拔导致着火延迟延长,燃烧效率降低,排放增加,功率损失;文献[17]研究了高原环境对柴油机碳烟生成和氧化的影响,高原环境降低了燃烧质量,增加了碳烟排放,在超过4 000 m的海拔下,碳烟排放急剧上升;文献[18]研究了高海拔对柴油撞击喷雾分裂喷射燃烧过程的影响,发现随着海拔的升高,首次喷射产生的碳烟量减少,碳烟净氧化率的最大值降低;Li等^[19]研究了海拔高度对柴油机性能和排放的影响。结果表明,随着海拔的升高,发动机的功率输出显著下降,当海拔超过3 000 m时,性能和排放的恶化变得显著。

综上所述,对柴油机在高海拔下的性能的研究涵盖了起动、燃烧、排放等方面,通过优化喷油策略和研究燃烧过程与控制技术的结合在努力提升柴油机的效率与环境友好性。在高原环境下,主预喷策略可以通过优化喷油时刻、喷油压力和喷油次数等参数,提高柴油机的燃烧效率和动力

性,同时降低污染物排放。对于高海拔下的主预喷策略对柴油机的性能和排放的研究较少。通过对高原环境下柴油机燃烧与排放特性的研究,可以为高原柴油机的优化设计和燃烧控制提供理论依据和技术支持,同时也有助于推动高原地区的经济发展和环境保护。

1 试验装置与方法

1.1 试验设备

试验使用的发动机为 3.0 L 四缸高压共轨涡轮增压柴油发动机,其主要技术参数见表 1。高原柴油机试验的关键设备包括 AVL 交流电力测功机、AVL AMA i60 排放测量仪、AVL 622 燃烧分析仪、AVL 735 油耗仪、AVL 进气流量计、

表 1 发动机主要技术参数

Table 1 Main technology engine specifications	
参 数	数值
柴油机类型	4 冲程
气缸数	4
(缸径/行程)/mm	95/105
发动机排量/L	3.0
发动机压缩比	16.6:1
(最大扭矩/转速)/[(N·m)/(r·min ⁻¹)]	400/1 400
(额定功率/转速)/[(kW)/(r·min ⁻¹)]	115/3 200

AVL 415S 排放测量仪。图 1 为试验台架的布局示意图。

1.2 海拔模拟控制

试验中研究了 0 m 和 2 000 m 海拔高度的影响,在这些测试中,由于测试台架位于海拔 2 000 m 处,相应的环境压力为 80 kPa。为模拟较低海拔的条件,对进气和排气系统进行了加压。具体来说,为模拟海拔 0 m 处的情况,进气和排气压力增加了 20 kPa。进气压力的模拟是通过进气空调系统实现的,而排气压力则由排气端的背压阀控制。空调系统调节进气压力、温度和湿度。风扇压力由变频驱动器控制,精度为±0.1 kPa。空气的温度和湿度由制冷机组和加热器控制,温度控制精确度在±2℃以内,湿度控制精确度在±3% RH 以内。

1.3 试验条件

为研究主预喷策略对柴油机燃烧与排放的影响,试验在发动机转速和扭矩恒定在 1 400 r·min⁻¹ 和 200 N·m 的工况下进行。在测试过程中,主喷正时、预喷油量、预喷正时和油轨压力均使用 IN-CA 软件控制。此外,废气再循环(EGR)完全关闭,节气门完全打开。详细试验方案见表 2。在试验过程中,通过平均 200 个循环获得了缸内压

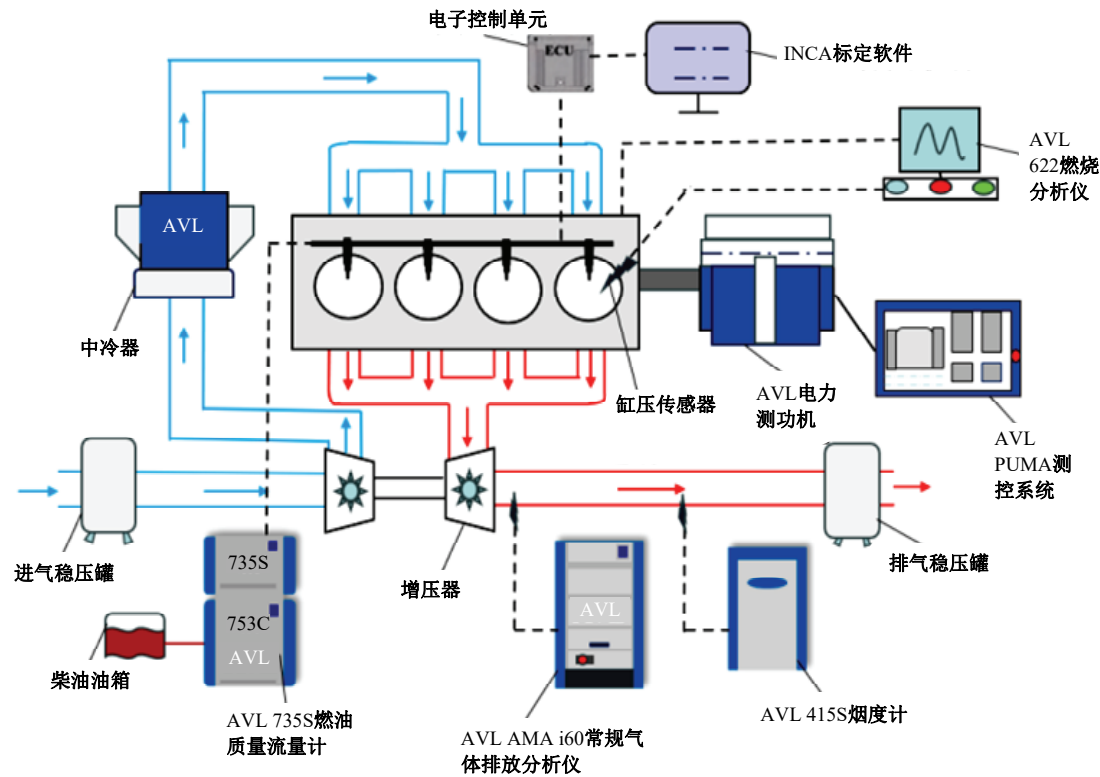


图 1 台架布局示意图

Fig. 1 Schematic diagram of platform layout

表 2 试验方案

Table 2 Simulation boundary conditions

工况	转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	转矩/ ($\text{N}\cdot\text{m}$)	海拔/m	过量空 气系数	柴油预喷射量/ ($\text{mg}\cdot\text{cycle}^{-1}$)	柴油预喷射正时/ ($^{\circ}\text{CA BTDC}$)	柴油主喷射正时/ ($^{\circ}\text{CA BTDC}$)	柴油喷射压力/MPa
1	1 400	200	0	2.70	1.5	6, 8, 10, 12, 14	-4, -2, 0, 2, 4	90
2	1 400	200	2 000	2.35	1.5	6, 8, 10, 12, 14	-4, -2, 0, 2, 4	90
3	1 400	200	0	2.70	1.5	10	0	80, 90, 100, 110, 120
4	1 400	200	2 000	2.35	1.5	10	0	80, 90, 100, 110, 120
5	1 400	200	0	2.70	0, 1, 2, 3, 4	10	0	90
6	1 400	200	2 000	2.35	0, 1, 2, 3, 4	10	0	90
7	1 400	200	0	2.70	1.5	6, 8, 10, 12, 14	0	90
8	1 400	200	2 000	2.35	1.5	6, 8, 10, 12, 14	0	90

力的高速采样数据。燃烧分析仪计算了放热率、燃烧温度和压力升高率。试验重复了 3 次以验证其准确性,并取 3 次结果的平均值。试验过程中,为确保测试空气环境的一致性,进气口温度保持在 $(25\pm 2)^{\circ}\text{C}$,湿度控制在 $(50\pm 3)\%$ RH。

2 结果与分析

2.1 不同海拔下不同主预喷策略对柴油机燃烧的影响

2.1.1 不同海拔下主喷正时对柴油机燃烧的影响

正确的喷油正时可以确保喷入的燃油在最佳着火点燃烧,从而保证更好地燃烧,增加动力输出。图 2~图 5 分别显示了海拔为 0 m 和 2 000 m 条件下不同主喷射正时对缸内压力、放热率、缸内燃烧温度和压力升高率的影响,彩图参见电子版,下同。主喷正时在上止点前 4°CA 时,随着海拔从 0 m 升高到 2 000 m,缸压的峰值降低 0.938 MPa,放热率峰值降低 $4.16\text{ J}\cdot^{\circ}\text{CA}^{-1}$,燃烧温度峰值升高 54.1 K,压力升高率峰值降低 0.021。大气压力降低,空气密度减小,进入发动机气缸的空气量减少,导致缸内压力降低。同时,进气量降低使缸内氧浓度下降,燃烧速率降低,燃烧放热率下降,最高瞬时放热率降低。滞燃期的增加意味着可燃混合物的量增大,导致燃烧过程

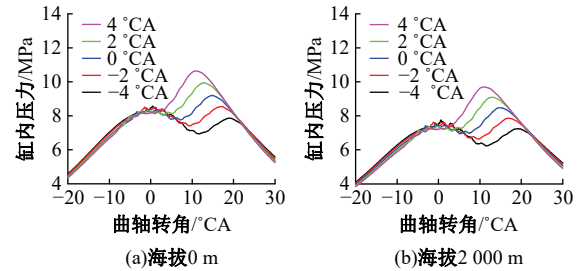


图 2 0 m 和 2 000 m 海拔下不同主喷射正时的缸内压力

Fig. 2 In-cylinder pressure for different main injection timing at 0 m and 2 000 m altitude

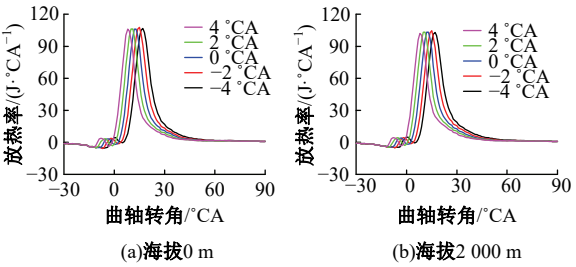


图 3 0 m 和 2 000 m 海拔下不同主喷射正时的放热率

Fig. 3 Heat release rate for different main injection timing at 0 m and 2 000 m altitude

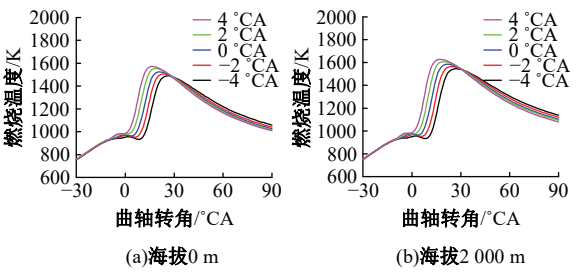


图 4 0 m 和 2 000 m 海拔下不同主喷射正时的燃烧温度

Fig. 4 Combustion temperature for different main injection timing at 0 m and 2 000 m altitude

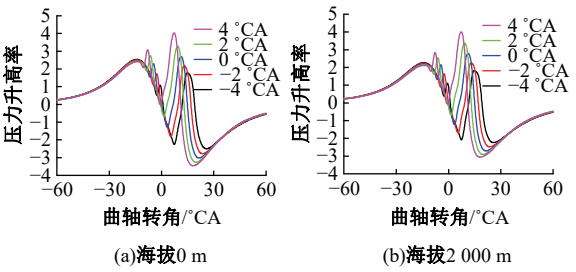


图 5 0 m 和 2 000 m 海拔下不同主喷射正时的压力升高率

Fig. 5 Pressure rise rate for different main injection timing at 0 m and 2 000 m altitude

中出现更多的预混合燃烧,从而增加了燃烧温度。主喷正时从上止点前 4°CA 到上止点后 4°CA ,海拔 0 m 时主燃期的最大缸压降低 2.767 MPa,海拔 2 000 m 时主燃期的最大缸压降低 2.456 MPa,海拔 0 m 时的最高燃烧温度降低 83.84 K,海拔

2 000 m时的最高燃烧温度降低 80.9 K。主喷射正时提前,由于缸内温度较低,使滞燃期延长,在滞燃期内形成的可燃混合气增加,预混合燃烧占整个燃烧的比例增加,使缸内压力及压力升高率升高,缸内温度升高。

高海拔环境下,主喷正时需进一步提前,补偿氧气稀薄导致的滞燃期延长,缩短燃烧持续期。

2.1.2 不同海拔下轨压对柴油机燃烧的影响

油轨压力是喷油器喷射燃油时的压力,该压力直接影响燃油的雾化质量、喷射时间和喷射量,进而影响燃烧效率和发动机性能。图6~图9分别显示了海拔为0 m和2 000 m下不同柴油油轨压力对缸内压力、放热率、缸内燃烧温度和压力升高率的影响。轨压在120 MPa时,随着海拔从0 m升高到2 000 m,缸压的峰值降低0.81 MPa,放

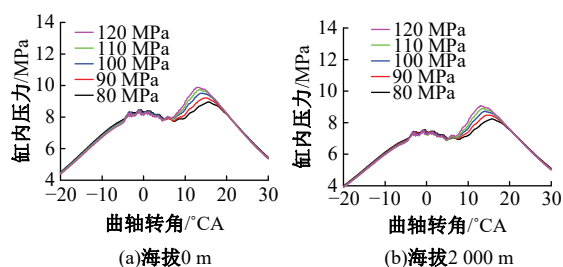


图6 0 m和2 000 m海拔下不同轨压的缸内压力
Fig. 6 In-cylinder pressure for different rail pressure at 0 m and 2 000 m altitude

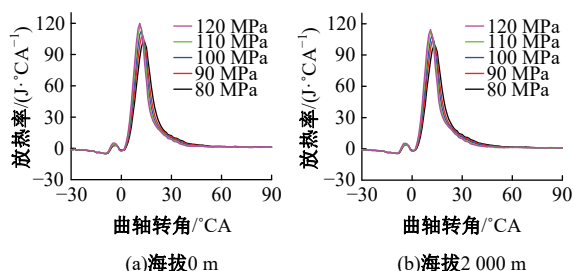


图7 0 m和2 000 m海拔下不同轨压的放热率
Fig. 7 Heat release rate for different rail pressure at 0 m and 2 000 m altitude

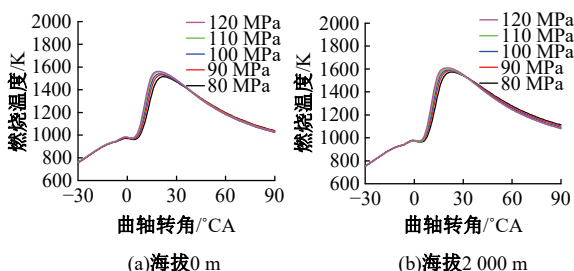


图8 0 m和2 000 m海拔下不同轨压的燃烧温度
Fig. 8 Combustion temperature for different rail pressure at 0 m and 2 000 m altitude

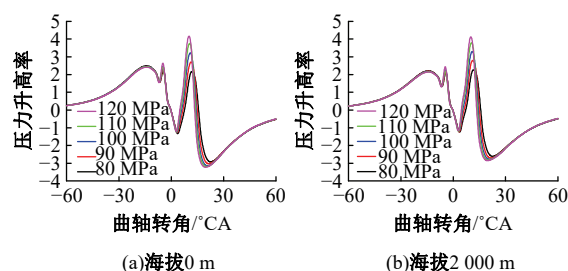


图9 0米和2 000米海拔下不同轨压的压力升高率
Fig. 9 Pressure rise rate for different rail pressure at 0 m and 2 000 m altitude

热率峰值降低 $5.48 \text{ J} \cdot \text{°CA}^{-1}$, 燃烧温度峰值升高 47.71 K , 压力升高率峰值降低 0.043 1 。大气压力降低, 空气密度减小, 进入发动机气缸的空气量减少, 导致缸内压力降低。同时, 进气量降低使缸内氧浓度下降, 燃烧速率降低, 燃烧放热率下降, 最高瞬时放热率降低。滞燃期的增加意味着可燃混合物的量增大, 导致燃烧过程中出现更多的预混合燃烧, 从而增加了燃烧温度。轨压从80 MPa升高到120 MPa, 海拔0 m时主燃期的最大缸压升高 0.903 MPa , 海拔2 000 m时主燃期的最大缸压升高 0.828 MPa , 海拔0 m时的最高燃烧温度升高 17.60 K , 海拔2 000 m时的最高燃烧温度升高 15.38 K 。增大喷射压力直接影响燃油的雾化质量。较高的喷射压力通常会导致更好的雾化, 从而在燃烧室内形成更细小的燃油滴, 这有助于更好地燃烧, 从而使缸内压力、燃烧放热率、燃烧温度和喷油之后的压力升高率均增大。海拔升高, 轨压需适当提高, 弥补空气密度降低导致的混合气不均匀问题。

2.1.3 不同海拔下预喷油量对柴油机燃烧的影响

图10~图13分别显示了海拔为0 m和2 000 m下不同柴油预喷油量对缸内压力、放热率、缸内燃烧温度和压力升高率的影响。随着海拔从0 m升高到2 000 m, 预喷油量为 $4 \text{ mg} \cdot \text{cycle}^{-1}$ 时的缸内压力峰值降低 0.731 MPa , 放热率峰值降低

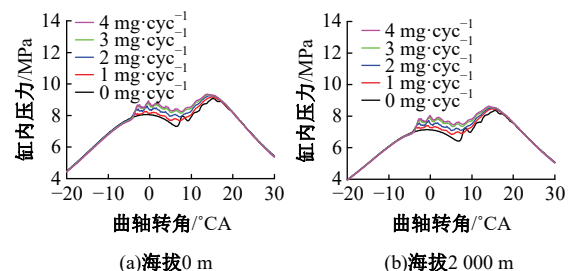


图10 0 m和2 000 m海拔下不同预喷油量的缸内压力
Fig. 10 In-cylinder pressure for different pre-injection quantity at 0 m and 2 000 m altitude

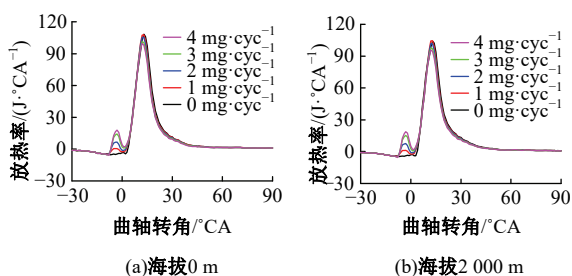


图 11 0 m 和 2 000 m 海拔下不同预喷油量的放热率

Fig. 11 Heat release rate for different pre-injection quantity at 0 m and 2 000 m altitude

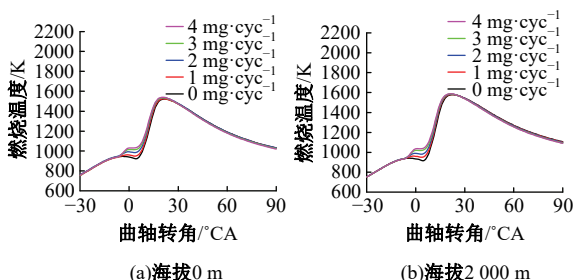


图 12 0 m 和 2 000 m 海拔下不同预喷油量的燃烧温度

Fig. 12 Combustion temperature for different pre-injection quantity at 0 m and 2 000 m altitude

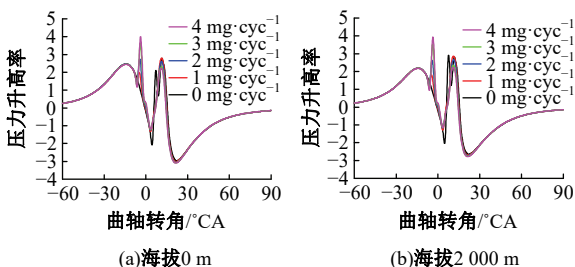


图 13 0 m 和 2 000 m 海拔下不同预喷油量的压力升高率

Fig. 13 Pressure rise rate for different pre-injection quantity at 0 m and 2 000 m altitude

3.73 J·°CA⁻¹, 燃烧温度峰值升高 48.9 K, 压力升高率峰值降低 0.071 9。大气压力降低, 空气密度减小, 进入发动机气缸的空气量减少, 导致缸内压力降低。同时, 进气量降低使缸内氧浓度下降, 燃烧速率降低, 燃烧放热率下降, 最高瞬时放热率降低。滞燃期的增加意味着可燃混合物的量增大, 导致燃烧过程中出现更多的预混合燃烧, 从而增加了燃烧温度。随着预喷油量的增加, 预燃期的缸内压力、放热率、缸内燃烧温度和压力升高率都升高, 着火延迟期缩短。预喷的少量燃油在主喷之前进入气缸, 这些预喷的燃油在较低温度和压力下开始蒸发和混合, 形成了部分可燃混合气。当主喷燃油进入气缸时, 由于已经有了预喷的燃油形成的可燃混合气, 使燃烧反应能更快启动, 从而缩短了着火延迟期。高海拔下, 需增加预喷油

量, 通过预燃期局部高温加速主喷燃烧, 补偿氧气不足, BSFC 降低。

2.1.4 不同海拔下预喷正时对柴油机燃烧的影响

图 14~图 17 分别显示了海拔为 0 m 和 2 000 m 下不同预喷正时对缸内压力、放热率、缸内燃烧温度和压力升高率的影响。预喷正时为上

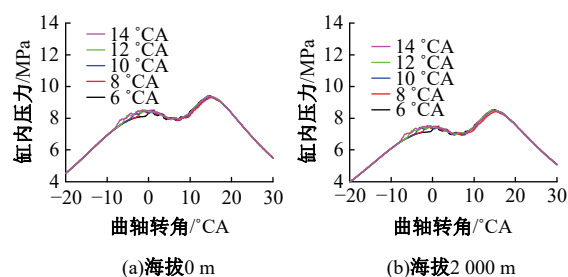


图 14 0 m 和 2 000 m 海拔下不同预喷正时的缸内压力

Fig. 14 In-cylinder pressure for different pre-injection timing at 0 m and 2 000 m altitude

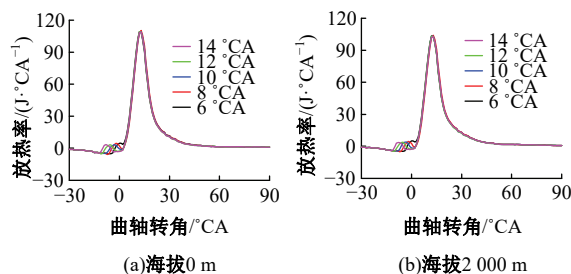


图 15 0 m 和 2 000 m 海拔下不同预喷正时的放热率

Fig. 15 Heat release rate for different pre-injection timing at 0 m and 2 000 m altitude

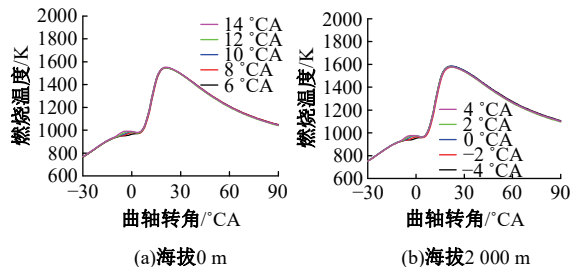


图 16 0 m 和 2 000 m 海拔下不同预喷正时的燃烧温度

Fig. 16 Combustion temperature for different pre-injection timing at 0 m and 2 000 m altitude

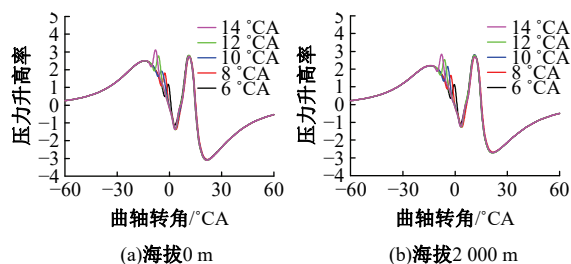


图 17 0 m 和 2 000 m 海拔下不同预喷正时的压力升高率

Fig. 17 Pressure rise rate for different pre-injection timing at 0 m and 2 000 m altitude

止点前 14 °CA 时,随着海拔从 0 m 升高到 2 000 m,缸内压力峰值降低 0.903 MPa,放热率峰值降低 6.22 J·°CA⁻¹,燃烧温度峰值升高 25.47 K,压力升高率峰值降 0.278。大气压力降低,空气密度减小,进入发动机气缸的空气量减少,导致缸内压力降低。同时,进气量降低使缸内氧浓度下降,燃烧速率降低,燃烧放热率下降,最高瞬时放热率降低。滞燃期的增加意味着可燃混合物的量增大,导致燃烧过程中出现更多的预混合燃烧,从而增加了燃烧温度。预燃期燃烧提前,预燃烧持续时间延长,预燃期的缸内压力、放热率、缸内燃烧温度和压力升高率随之增大。

2.2 不同海拔下不同主预喷策略对柴油机排放的影响

图 18(a)和图 19(a)显示海拔为 0 m 和 2 000 m 下不同主喷射正时对总碳氢化合物(Total hydrocarbons, THC)、CO、NO_x、烟度排放的影响。主喷正时在上止点后 4 °CA 时,随着海拔从 0 m 升高到 2 000 m,THC 的排放降低了 38.77%,CO 的排放升高 23.31%,NO_x 的排放升高了 0.64%,烟度的排放降低 27.85%,THC 和烟度的排放有一定的降低,CO 和 NO_x 的排放升高。随着海拔从 0 m 升高到 2 000 m,大气压力降低,空气密

度减小,滞燃期增加意味着可燃混合物的量增大,导致燃烧过程中出现更多的预混合燃烧,从而增加了燃烧温度,引起了 NO_x 和 CO 的排放一定程度上的增大。在低负荷下,发动机的燃烧过程更加稳定,有助于减少未完全燃烧产生的 THC 和烟度。随着海拔的升高,空气变得稀薄,氧气含量减少,燃烧反应所需的氧气不足,减少了热分解和不完全燃烧产生的 THC 和烟度。主喷正时从上止点后 4 °CA 到上止点前 2 °CA,海拔 0 m 时的 CO 排放降低了 35.35%,NO_x 的排放升高了 53.27%;海拔 2 000 m 时的 CO 排放降低了 39.83%,NO_x 的排放升高了 52.58%。随着主喷射正时的提前,燃烧温度升高,NO_x 的排放升高,燃烧温度越高,CO 氧化为 CO₂ 的速率越快,从而降低 CO 排放。主喷射正时对于 THC 排放的影响没有明显规律,而对于烟度排放的影响有着先减后增的趋势。缸内预混燃烧比例增加,后期扩散燃烧比例减少,烟度排放下降^[20]。主喷正时过于提前,较高的燃烧温度和过长的燃烧时间导致更多的热分解,产生更多的碳烟。由图 18(a)和图 19(a)可以看出统合 THC、CO、NO_x、烟度四个排放来看,主喷正时在上止点前 0 °CA 时整体的排放最低。

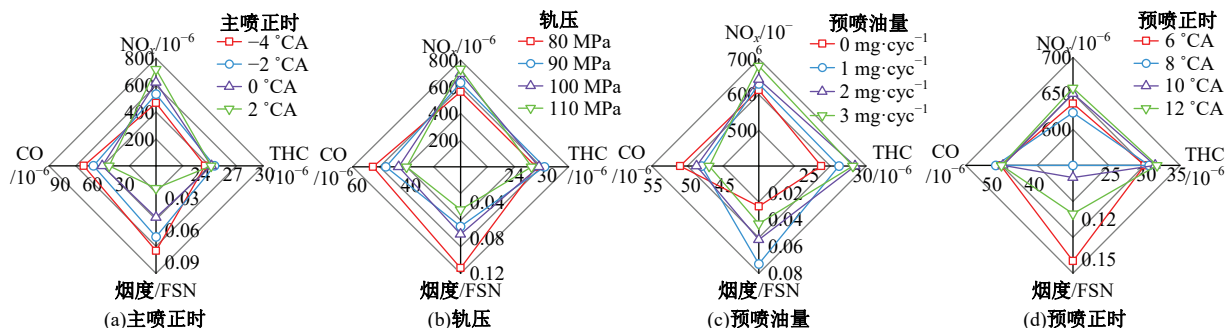


图 18 0 m 海拔下不同主预喷策略下的 THC、CO、NO_x 和烟度排放

Fig. 18 THC、CO、NO_x and Smoke emissions at different main pre-injection strategy under attitudes of 0 m

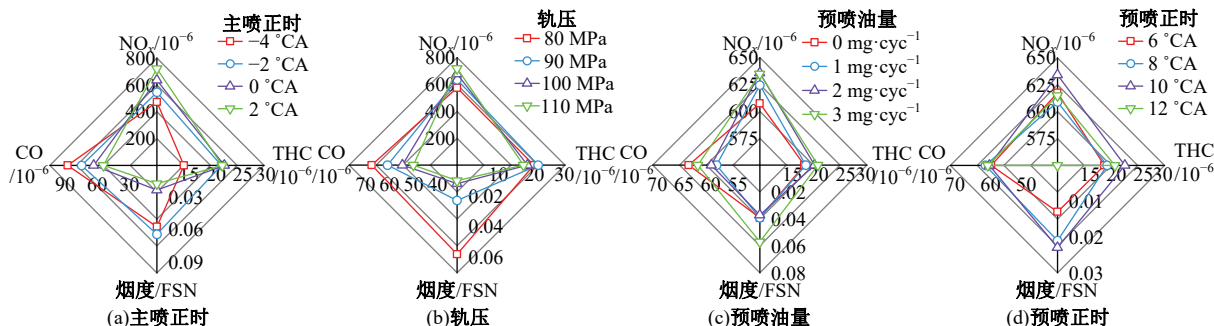


图 19 2 000 m 海拔下不同主预喷策略下的 THC、CO、NO_x 和烟度排放

Fig. 19 THC、CO、NO_x and Smoke emissions at different main pre-injection strategy under attitudes of 2 000 m

图 18(b)和图 19(b)显示海拔为 0 m 和 2 000 m 下不同柴油轨压对 THC、CO、NO_x和烟度排放的影响。轨压在 80 MPa 时,随着海拔从 0 m 升高到 2 000 m,THC 的排放降低 26.32%,CO 的排放升高 25.14%,NO_x的排放升高 2.05%,烟度的排放降低 49.12%,THC 和烟度的排放有一定的降低,CO 和 NO_x的排放升高。轨压从 80 MPa 增大到 110 MPa 海拔 0 m 时的 CO 排放降低了 23.68%,NO_x的排放升高了 30.3%;海拔 2 000 m 时的 CO 排放降低了 26.46%,NO_x的排放升高了 25.07%。随着柴油喷射压力的增大,柴油的雾化效果更好,燃烧效果更好,THC、CO 和烟度的排放降低。燃烧温度升高,NO_x的排放升高。由图 18(b)和图 19(b)可以看出,统合 THC、CO、NO_x、烟度四个排放来看,轨压在 100 MPa 时整体的排放最低。

图 18(c)和图 19(c)显示海拔为 0 m 和 2 000 m 下不同预喷油量对 THC、CO、NO_x、烟度排放的影响。预喷油量为 3 mg·cycle⁻¹时,随着海拔从 0 m 升高到 2 000 m,THC 的排放降低 27.66%,CO 的排放升高 31.21%,NO_x的排放升高 6.6%,烟度的排放降低 32.56%,THC 和烟度的排放有一定的降低,CO 和 NO_x的排放升高。相比没有预喷,增加了预喷后 THC 和烟度的排放有一定量的升高,随着预喷油量的增加呈现先增后减的趋势。相比没有预喷,增加了预喷后 CO 的排放都有一定量的降低,但 NO_x的排放升高,随着预喷油量增加后 NO_x和 CO 的排放先增加后减少。由图 18(c)和图 19(c)可以看出统合 THC、CO、NO_x、烟度四个排放来看,海拔 0 m 时不采用预喷,整体的排放要更低,但 CO 的排放要更高,海拔 2 000 m 时预喷油量为 1 mg·cycle⁻¹时整体的排放最低,但 NO_x的排放有一定的升高。CO 和

NO_x的排放升高。随着预喷正时的提前,THC 的排放有着缓慢上升的趋势,对于 CO 的排放没有太明显的影响,低海拔下的 NO_x排放有缓慢上升的趋势,高海拔下 NO_x有下降的趋势。对于碳烟的排放没有太明显的影响规律,可能是由于时间间隔太小或者试验误差。

图 18(d)和图 19(d)显示海拔为 0 m 和 2 000 m 下不同预喷正时对 THC、CO、NO_x、烟度排放的影响。预喷正时为 上止点前 12 °CA 时,随着海拔从 0 m 升高到 2 000 m,THC 的排放降低 34.86%,CO 的排放升高 27.44%,NO_x的排放升高 6.5%,烟度的排放降低 0.116 FSN,THC 和烟度的排放有一定的降低,CO 和 NO_x的排放升高。随着预喷正时的提前,THC 的排放有着缓慢上升的趋势,对于 CO 的排放没有太明显的影响,低海拔下的 NO_x排放有缓慢上升的趋势,高海拔下 NO_x有下降的趋势。对于碳烟的排放没有太明显的影响规律,可能是由于时间间隔太小或者试验误差。由图 18(d)和图 19(d)可以看出统合 THC、CO、NO_x、烟度四个排放来看,海拔 0 m 时预喷正时为 8 °CA 时整体的排放要更低,但烟度的排放要更高,海拔 2 000 m 时预喷正时为 12 °CA 时整体的排放要更低。

2.3 不同海拔下不同主预喷策略对柴油机有效燃油消耗率和排放的影响

图 20 显示 0 m 和 2 000 m 海拔下不同主喷正时的有效燃油消耗率(BSFC)和排放。主喷正时从上止点前 4 °CA 到上止点后 4 °CA,NO_x的排放降低,CO 和 Smoke 的排放升高,THC 的排放没有太明显的变化但有效燃油消耗随之升高,随着主喷正时提前,可燃混合气的混合时间延长,混合均匀度增大,有效燃油消耗随之降低,反之亦然。CO 和烟度的排放与有效燃油消耗呈同增同减的

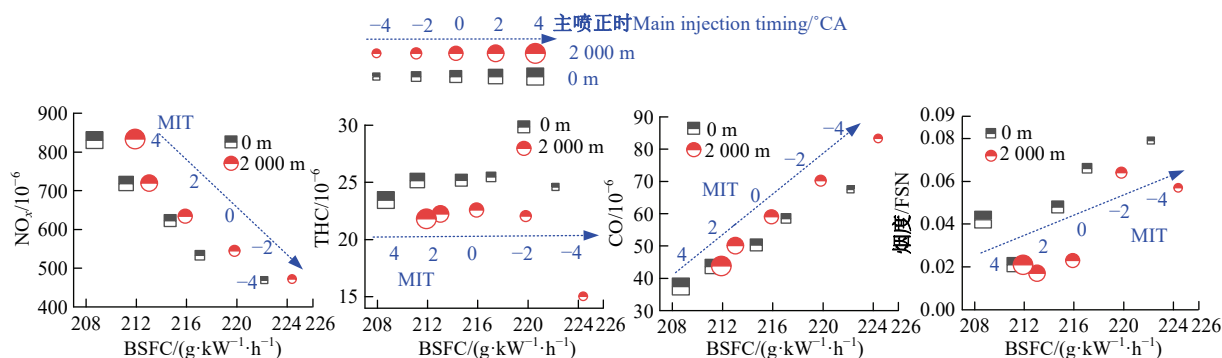


图 20 0 m 和 2 000 m 海拔下不同主喷正时的有效燃油消耗率和排放

Fig. 20 BSFC and emissions at different main injection timing under attitudes of 0 m and 2 000 m

关系。随着海拔的升高有效燃油消耗率随之升高,其主要原因是随着海拔的升高进气量减少,而要保持相同的输出功率和转速就需要消耗更多燃油。图21显示0 m和2 000 m海拔下不同轨压的有效燃油消耗率和排放。轨压从80 MPa到120 MPa, NO_x 的排放升高, THC、CO和烟度的排放降低,有效燃油消耗率降低,由此可知增大轨压有利于燃烧,降低 THC、CO、烟度排放和有效燃油消耗率,但 NO_x 的排放随之升高。图22显示0 m和2 000 m海拔下不同预喷油量的有效燃油消耗率和排放。预喷油量从0 $\text{mg} \cdot \text{cycle}^{-1}$ 增大到4 $\text{mg} \cdot \text{cycle}^{-1}$, NO_x 和 THC 的排放升高, CO 的排放降

低,有效燃油消耗率降低,增大预喷油量,柴油滞燃期缩短,燃烧速率增大,使燃烧更加完全,减少后燃,更多的燃油能量能够被有效利用,也就降低了有效燃油消耗。图23显示0 m和2 000 m海拔下不同预喷正时的有效燃油消耗率和排放。由图可知,预喷正时对于油耗和排放相比于预喷油量的影响要小得多。

柴油机在高原环境下的作为农用时主要的工作条件处于低转速高扭矩工况。基于上文对于该工况下的柴油机燃烧和排放的分析,对于高海拔下的主预喷参数的调整提出一些简单策略:海拔升高主喷正时需进一步提前,补偿氧气稀薄导致

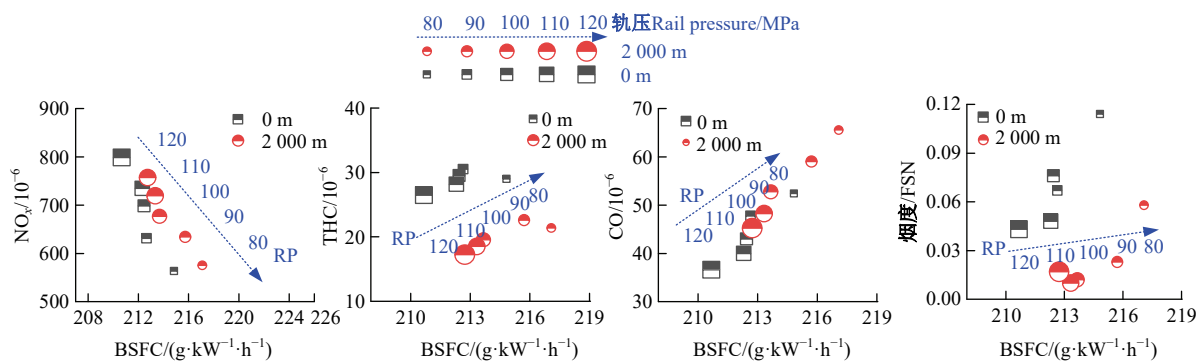


图21 0米和2 000米海拔下不同轨压的有效燃油消耗率和排放

Fig. 21 BSFC and emissions at different rail pressure under attitudes of 0 m and 2 000 m

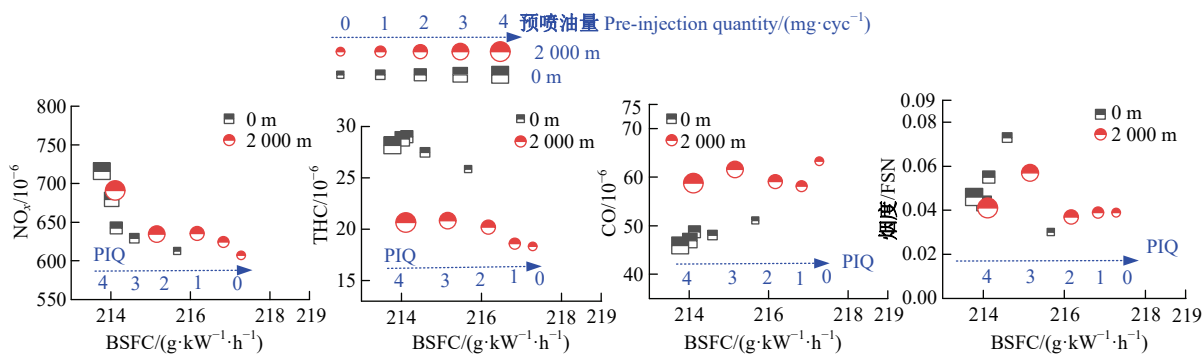


图22 0 m和2 000 m海拔下不同预喷油量的有效燃油消耗率和排放

Fig. 22 BSFC and emissions at different pre-injection quantity under attitudes of 0 m and 2 000 m

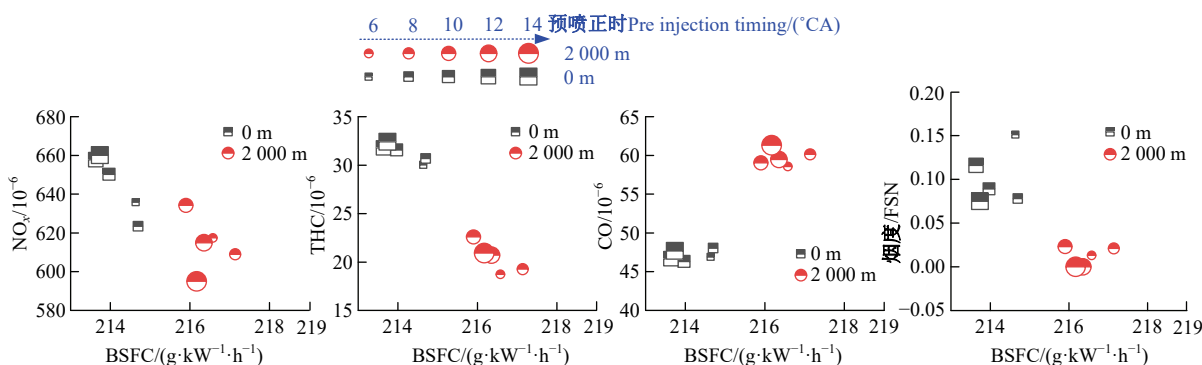


图23 0 m和2 000 m海拔下不同预喷正时的有效燃油消耗率和排放

Fig. 23 BSFC and emissions at different pre injection timing under attitudes of 0 m and 2 000 m

的滞燃期延长,缩短燃烧持续期,降低油耗,但 NO_x 排放的升高,需要协调轨压降低 NO_x 的排放。在高海拔环境下轨压需提高,弥补空气密度降低导致的混合气不均匀问题,油耗以及THC和CO排放会降低,但同时会导致 NO_x 排放的升高,故也不能过度提高轨压。高海拔环境下需增加预喷油量,通过预燃期局部高温加速主喷燃烧,补偿氧气不足,BSFC降低,但需配合主喷正时以抑制 NO_x 生成。高海拔环境下推迟预喷正时,以减少预燃期热量损失,避免燃烧温度过高导致 NO_x 排放升高。

3 结 论

(1)海拔升高(0 m到2 000 m)导致缸内压力峰值下降,放热率降低,但燃烧温度升高;THC与烟度排放分别减少38.77%和27.85%,而CO与 NO_x 排放分别增加23.31%和0.64%。

(2)主喷正时提前可降低有效燃油消耗率,但显著增加 NO_x 排放。高原需进一步提前主喷正时以补偿滞燃期延长。

(3)轨压从80 MPa增至120 MPa可改善雾化,降低THC、CO、烟度排放及BSFC,但 NO_x 排放升高25%~30%;高原推荐100 MPa轨压以平衡经济性与排放。

(4)增加预喷油能够缩短滞燃期,降低BSFC,但需结合主喷正时抑制 NO_x 生成;预喷正时提前在高海拔可小幅抑制 NO_x 排放。

(5)高原环境下适合采用“主喷正时提前+100 MPa轨压+适量预喷油量”组合,如果能再结合SCR与DPF后处理技术,能更好地实现高原柴油机高效清洁运行的目标。

参考文献:

- [1] Apergi M, Eicke L, Goidthau A, et al. An energy justice index for the energy transition in the global South[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 192: 114238.
- [2] Jiao Y F, Liu R L, Zhang Z J, et al. Comparison of combustion and emission characteristics of a diesel engine fueled with diesel and methanol-fischer-tropsch diesel-biodiesel-diesel blends at various altitudes[J]. *Fuel*, 2019, 243: 52-59.
- [3] Liang F, Lou D M, Hu Z Y, et al. Study on the first-firing-cycle combustion characteristics of high-altitude and low-temperature environments during diesel engine cold start[J]. *Fuel*, 2022, 322: 124186.
- [4] Liu Z T, Liu J L. Effect of altitude conditions on combustion and performance of a turbocharged direct-injection diesel engine[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2022, 236(4): 582-593.
- [5] Liu J L, Li Y Y, Zhang C H, et al. The effect of high altitude environment on diesel engine performance: comparison of engine operations in Hangzhou, Kunming and Lhasa cities[J]. *Chemosphere*, 2022, 309: 136621.
- [6] Girald M, Huertas J I. Real emissions, driving patterns and fuel consumption of in-use diesel buses operating at high altitude[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2019, 77: 21-36.
- [7] Liu Z T, Liu J L. Investigation of the effect of altitude on in-cylinder heat transfer in heavy-duty diesel engines based on an empirical model[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2022, 144(11): 112303.
- [8] 王俊,申立中,王贵勇,等.基于参变量扫值的非道路用柴油机增压匹配[J].*农业工程学报*, 2014, 30(17): 63-70.
Wang Jun, Shen Li-zhong, Wang Gui-yong, et al. Turbocharger matching for non-road diesel engine based on parametric sweeping[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(17): 63-70.
- [9] 谭丕强,王德源,楼狄明,等.农业机械污染排放控制技术的现状与展望[J].*农业工程学报*, 2018, 34(7): 1-14.
Tan Pi-qiang, Wang De-yuan, Lou Di-ming, et al. Progress of control technologies on exhaust emissions for agricultural machinery[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(7): 1-14.
- [10] Wang J, Shen L Z, Bi Y H, et al. Modeling and optimization of a light-duty diesel engine at high altitude with a support vector machine and a genetic algorithm[J]. *Fuel*, 2021, 285: 119137.
- [11] 王霞,陈月春,李素婷,等.不同海拔高度下柴油机低温起动性能试验研究[J].*内燃机与动力装置*, 2022, 39(1): 7-11.
Wang Xia, Chen Yue-chun, Li Su-ting, et al. Ex-

- perimental study on cold starting performance of diesel engine at different altitudes[J]. *Internal Combustion Engine & Powerplant*, 2022, 39(1): 7-11.
- [12] 雷蕾, 於永华, 申立忠, 等. 不同海拔下柴油机瞬态排放试验[J]. *内燃机学报*, 2023, 41(5): 420-426.
Lei Lei, Yu Yong-hua, Shen Li-zhong, et al. Investigation on transient emissions of diesel engine at different altitudes[J]. *Transactions of the Chinese Society of Internal Combustion Engines*, 2023, 41(5): 420-426.
- [13] 陈贵升, 金纳俊哲, 罗国焱, 等. 变海拔下柴油机颗粒捕集器及灰分对柴油机瞬态特性影响[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2026, 56(2): 333-344.
Chen Gui-sheng, Jin Na-jun-zhe, Luo Guo-yan, et al. Effects of altitude variation on diesel engine transient characteristics with consideration of particulate filters and ash[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2026, 56(2): 333-344.
- [14] 王俊, 申立中, 毕玉华, 等. 不同海拔下基于VNT驱动的EGR对轻型柴油机燃烧与排放的影响[J]. *汽车工程*, 2022, 44(7): 1088-1097.
Wang Jun, Shen Li-zhong, Bi Yu-hua, et al. Effect of EGR driven by VNT on combustion and emission of light-duty diesel engine at different altitudes[J]. *Automotive Engineering*, 2022, 44(7): 1088-1097.
- [15] 王建, 于威, 王斌. 高原状态下甲醇替代率对柴油机燃烧与排放的影响[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2023, 53(4): 954-963.
Wang Jian, Yu Wei, Wang Bin. Effects of methanol substitution percent on combustion and emission of diesel engines under plateau condition[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2023, 53(4): 954-963.
- [16] Zhang C X, Li Y Y, Liu Z R, et al. An investigation of the effect of plateau environment on the soot generation and oxidation in diesel engines[J]. *Energy*, 2022, 253: 124086.
- [17] Yang K, Shen Y H, Jin Y, et al. Effect of altitude on the split injection combustion process of diesel impinging spray[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2024, 157: 107826.
- [18] Li Z P, Zhang Q, Zhang F J, et al. Experimental investigation of the effect of altitude on efficiency and emissions of a diesel engine[J]. *Thermal Science*, 2024(2): 1621-1634.
- [19] Li Z Y, Wang Y, Wang Y J, et al. Effects of fuel injection timings and methanol split ratio in M/D/M strategy on a diesel/methanol dual-fuel direct injection engine[J]. *Fuel*, 2022, 325: 124970.