

性能与排放

大气环境对增压柴油机缸内燃烧特性的影响

郭猛超¹, 王宪成¹, 常强²

(1. 装甲兵工程学院机械工程系, 北京 100072; 2. 军事交通学院指挥系, 天津 300161)

摘要: 在试验校准的基于GT-POWER的平原环境柴油机工作过程模型基础上, 模拟大气环境对增压柴油机输出性能和燃烧特性的影响。计算结果表明: 海拔高度从0~4000 m, 在外特性工况下, 柴油机功率最大下降14%, 油耗增加近10%, 排气温度最大升高100℃, 后燃严重; 4000 m海拔和0 m相比, 缸内燃烧放热率重心最大拖后7℃A, 瞬时放热率峰值最大降低0.009 kJ/℃A, 缸内最高燃烧压力降低1.6 MPa, 缸内平均温度峰值增加220℃以上; 1400 r/min, 100%负荷时, 缸内最高燃烧压力最大, 缸内平均温度最高, 随转速增大, 放热速率减慢; 随负荷增加, 放热速率增大, 燃烧始点略有提前。研究为柴油机高原功率恢复和性能改进提供了参考。

关键词: 增压柴油机; 大气压力; 燃烧特性

中图分类号: TK421.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2011)01-0009-05

Combustion Characteristics of Turbocharged Diesel in Different Atmosphere Environment

Guo Mengchao¹, Wang Xiancheng¹, Chang Qiang²(1. Department of Mechanical Engineering, Academy of The Armored Force Engineering; Beijing 100072;
2. Department of Automobile Command, Academy of Military Transportation; Tianjin 300161)

Abstract: Based on the calibrated GT-POWER model which focuses on working process of diesel engine in plain area, the influence of atmosphere on turbocharged diesel engine's output power and combustion characteristics are simulated. The results show: under external characteristics operating conditions, power reduces 14% mostly, fuel consumption increases 10%, exhaust temperature increases 100℃ the most, after-combustion is serious; when the altitude is from 0m to 4 000 m, the center of gravity of heat release rate delays 7℃A, HRR_{max} reduces 0.009 kJ/℃A, p_{max} reduces 1.6 MPa, T_{max} increases 220℃ above; under 1 400 r/min, full load, the p_{max} and in-cylinder average temperature reach the highest level, when the engine speed increases, the velocity of HRR (heat release rate) gets lower; when the load increases, HRR increases, the combustion point is advanced. The simulation results supply a research foundation for power recovery and performance improvement of turbocharged diesel engine working in plateau area.

Keywords: turbocharged diesel; atmosphere pressure; combustion characteristic

0 前言

研究表明, 在大气压力、大气温度、大气湿度

三个影响柴油机性能的主要大气因素中, 大气压力对柴油机燃烧过程的影响最为关键。以某型增压柴油机为例, 在平原环境进行试验, 大气压力不变,

收稿日期: 2010-04-01; 修回日期: 2010-11-10

基金项目: 军队科研项目: 2009WG01。

作者简介: 郭猛超(1984-), 男, 博士研究生, 研究方向为柴油机工作过程与排放控制, E-mail: 13820167243pappy@163.com。

大气温度由0℃升高到30℃，柴油机缸内最高燃烧压力降低6%，功率降低1.5%，燃油消耗率升高1.5%，而当大气温度不变，大气压力由30 kPa升高至150 kPa时，柴油机缸内最高燃烧压力升高117%，功率升高60.1%，燃油消耗率降低37.3%^[1,2]。大气压力下降导致气缸内进气量减少，气缸内的进气终点压力低于设计标准，致使压缩终点压力达不到应有水平，过量空气系数下降，可燃混合气过浓，着火延迟期变长，后燃现象严重，进而使柴油机热负荷升高、动力性、经济性和排放变差，整车动力系统的可靠性和寿命都会受到严重影响。基于此，有必要研究不同大气环境(主要是大气压力)下柴油机的燃烧特性，探求大气压力对涡轮增压柴油机燃烧过程的影响，为运行在不同海拔的涡轮增压柴油机的设计匹配和改进提供参考，为在用柴油机高原运行功率恢复提供理论依据。

本文采用GT-POWER软件建立某增压柴油机的性能仿真模型，在不调整增压器的情况下进行上述研究。

1 柴油机模型建立与验证

在建模过程中，对柴油机缸内非定常、非均匀的压力场、温度场、速度场和化学组分浓度场耦合在一起的实际燃烧过程作出一定的假设和简化：在计算进排气管内的流动与传热时，用一维流动计算代替实际的三维流动；在进行缸内燃烧计算时，采用广安博之(Hiroyasu)模型，计算缸内传热采用沃希尼(Woschni)公式^[3-6]；该柴油机所匹配增压器压气机的流量特性、效率特性以及涡轮的流量特性按已知MAP进行匹配。采用模块化建模的方法，将进气总管、进气支管、进排气门、喷油嘴、气缸与曲轴箱、排气支管、排气总管、压气机和涡轮等模块集成为柴油机整体模型。

试验所用柴油机形式：V型四冲程废气涡轮增压水冷直喷，缸径：150 mm，气缸数：12，压缩比：13.5，额定功率/转速点：537 kW/2 000 r/min，最大扭矩/转速点：3 050(N·m)/1 400 r/min，最大燃油消耗率：238 g/(kW·h)。

为了验证模型的正确性，在环境气压为101.3 kPa、环境温度为29℃时进行了发动机台架

试验，试验工况为额定功率点。测试仪器采用AVL的数据采集及燃烧分析仪如图1所示。

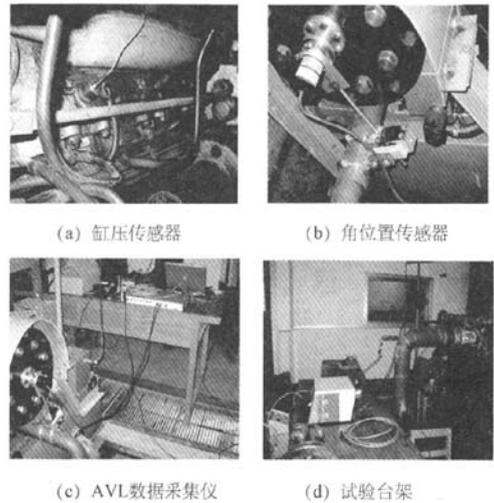


图1 发动机台架试验图

图2为缸内压力曲线计算与实测对比图，计算所得缸内最高燃烧压力为8.8 MPa，与实测缸内最高燃烧压力8.44 MPa相比，误差为4.1%；计算得出的最高燃烧压力对应曲轴转角为9.6℃A与实测值(10℃A)误差为4%。模型的精度满足工程实际需求。

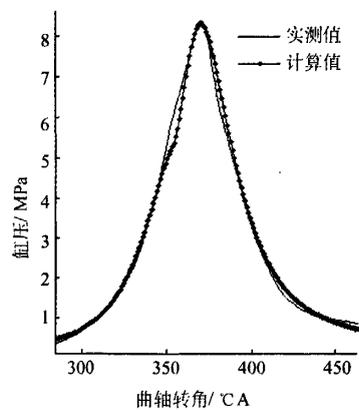


图2 额定功率点气缸压力曲线对比

2 不同大气环境对柴油机性能的影响

图3给出了海拔从0~4 000 m(同时考虑大气压力和大气温度)，外特性下柴油机功率(P, kW)、燃油消耗率(B_e, g/(kW·h))和排气温度(T, K)的变化曲线。

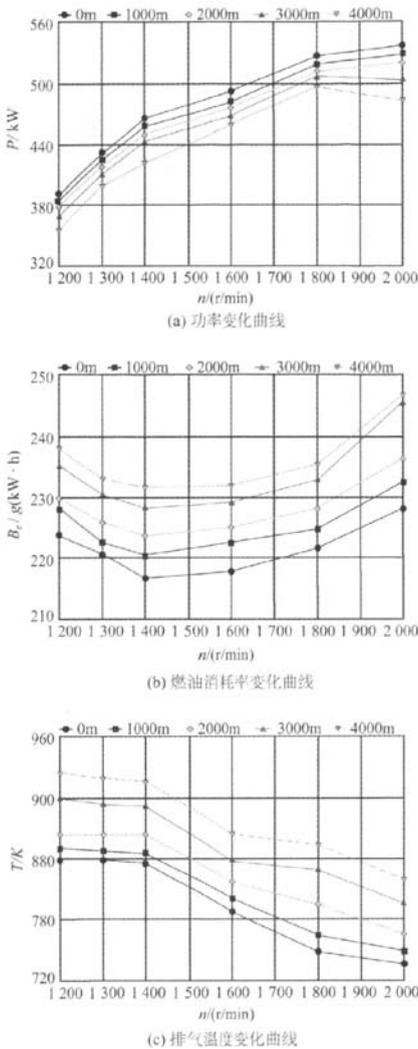


图3 不同海拔，柴油机外特性下输出功率、燃油消耗率和排气温度变化曲线

从图3可以看出，功率、油耗、排气温度随转速的变化趋势并未随外界环境的变化而变化，海拔每增加1 000 m，功率平均下降11 kW，油耗平均上升5.1 g/(kW·h)，排气温度平均增加22.9℃。当海拔高度为4 000 m时，额定功率点功率下降到467.2 kW，下降约14%，最大燃油消耗率从228.3 g/(kW·h)增加到246.9 g/(kW·h)，增加近10%，排气温度增加近100℃，增加率为12%。分析可知，随海拔高度上升，大气压力从101.3 kPa下降到61.6 kPa；大气年平均温度下降到5℃以下，空气密度从1.22 kg/m³下降到0.82 kg/m³，空气中的氧含量从0.25 kg/m³下降到0.17 kg/m³。环境压力下降，进气密度降低，使得

充气系数下降，通过发动机的空气的质量流量下降，而此时循环供油量仍保持不变(不同大气压力对柴油机喷油泵的喷油量影响极小)，致使过量空气系数降低。过量空气系数和压缩行程终点的气体压力下降，导致着火延迟期和燃料燃烧过程的持续时间加长，柴油机燃烧滞后和后燃期延长导致柴油机指示热效率下降，燃油消耗率上升，有效功率下降，排气温度升高。

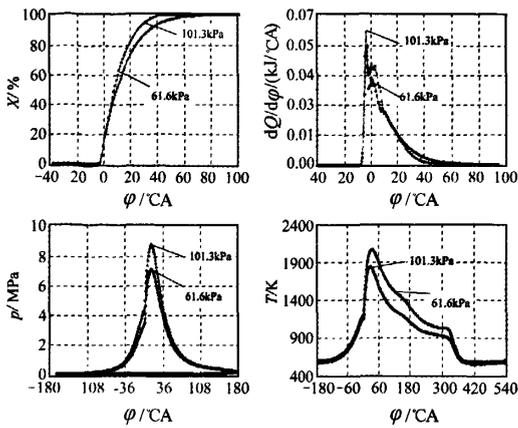
3 大气环境对柴油机燃烧特性的影响

柴油机在高原工作时，一方面由于空气稀薄，进入气缸的空气量减少，当活塞压缩到上止点时气缸内的空气压力和密度降低，影响油气混合质量，降低混合气的温度，使燃烧迟后；另一方面是参与燃烧的氧含量降低，造成燃烧不充分，后燃期延长，大负荷时尤为明显。下面的计算结果给出了高原运行柴油机在不同转速和负荷下的燃烧特性。

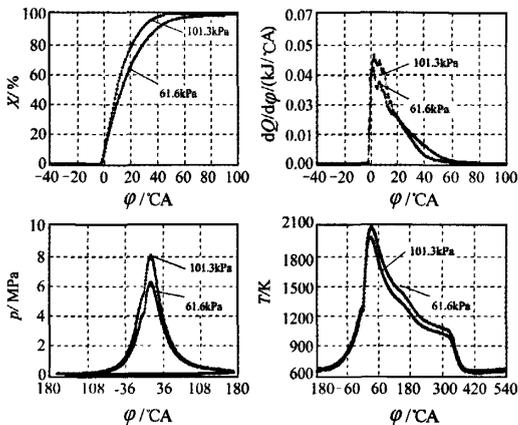
3.1 大气压力对燃烧特性的影响

环境参数：温度 25℃A；工况：全负荷，1 400 r/min和2 000 r/min；缸内参数不调整。在大气压力分别为101.3 kPa和61.6 kPa下，柴油机工况分别设定在柴油机最大转矩点和额定功率点，计算柴油机第1缸工作过程中累积放热率($X, \%$)、瞬时放热率($dQ/d\varphi, \text{kJ}/\text{C}^\circ\text{A}$)、燃烧压力(p, kPa)、燃烧温度(T, K)随曲轴转角的变化。计算结果如图2所示。

从图4(a)可以看出：大气压力为61.6 kPa时，累积放热率曲线的上升速率比101.3 kPa海拔时慢，燃油基本放出所有热量时，所对应的曲轴转角比平原推迟约20℃A。瞬时放热率峰值($dQ/d\varphi)_{\text{max}}$ 从0.062 kJ/C^oA降低到0.053 kJ/C^oA，降低14.3%，放热率重心后移近7℃A。压力循环线低于平原，最高燃烧压力(p_{max})从8.8 MPa降低到7.1 MPa，降低19.3%，且最高燃烧压力点比平原略有滞后；由于缸内吸气终了的压力、温度减小，造成早期放热率增加，燃烧持续期缩短。缸内燃烧温度峰值(T_{max})比平原高225℃以上，最高燃烧温度出现的位置比平原滞后7℃A。由图2(b)可知，当大气压力从101.3 kPa下降到61.6 kPa时， X 增加降低，燃油基本放出所有热量时，所对应的曲轴转角比平原推迟约25℃A以上，($dQ/d\varphi)_{\text{max}}$ 从0.056 kJ/C^oA降低到0.049 kJ/C^oA，降低11.9%，放热率重心后移3.6℃A，最高燃烧压力从8.1 MPa降低到6.5 MPa，降低19.7%。



(a) 最大转矩点



(b) 额定功率点

图 4 不同大气压力, 典型工况, 缸内累积放热率、瞬时放热率、燃烧压力、燃烧温度曲线

分析可知: 高原工况下, 由于进气压力的降低, 增压压力下降, 柴油机进气空气流量率下降, 导致整个压缩冲程中缸内压力下降, 缸内温度降低, 故在喷油提前角不变的情况下, 涡轮增压柴油机高原工况时的最高燃烧压力、示功图面积均低于平原工况。又因为过量空气系数降低, 燃料的焰前反应减弱; 高原混合气密度的减小、含氧量低导致反应物分子之间的碰撞机率和反应几率减小, 在着火之前混合气预反应的物理和化学反应时间延长, 滞燃期增加, 进而使得燃烧拖后, 缸内燃烧温度升高。

3.2 高原环境转速对燃烧特性的影响

环境参数: 压力 61.6 kPa、温度 25 °C、全负荷, 缸内参数不调整。图 5 给出发动机运行转速分别为 1 000、1 400 和 2 000 r/min 时燃烧特性参数变化曲线。最大转矩点的放热速率最快, 放热率重心所对应的曲轴转角分别为: 7.8、7.9、13.3 °CA, 即中高速和高转速柴油机缸内燃烧放热速率差别

不大, 但比低转速明显变快; 瞬时放热率由于增压压力不断上升, 缸内最高燃烧压力也随之增大, 燃烧始点明显推迟; 三转速下缸内最高燃烧压力分别为 6.2、7.1、6.5 MPa, 即随着转速的升高, 最高燃烧压力先升高后下降, 做功面积先是随转速的增大而增大, 而后随转速的升高而减小。由它们的形状可见, 最高燃烧压力越大, 图形顶峰越尖, 图形与轴围成的面积越大, 做功越多。这主要因为柴油机转速过低时, 增压器带入的新鲜空气较少, 燃气浓度太浓从而燃烧不完全, 所得热能较小, 做功也较少, 最高燃烧压力相对就较小。1 000、1 400、2 000 r/min 时, 增压比分别为: 1.2、1.6、2.1; 增压器带入的新鲜空气多, 使得燃料燃烧逐渐趋于完全燃烧, 所得热能逐渐增大, 活塞能量变大, 做功能力变大, 最高燃烧压力也逐渐增大。但当柴油机转速继续增大, 增压器带入的新鲜空气继续增多, 但燃料是一定的, 故可燃燃气浓度相对稀薄从而所得到的热能小, 做功能力相对变小, 最高燃烧压力则略有下降^[7-8]。1 400 r/min 时压比较大, 缸内循环喷油量最多, 柴油机动性力最优依据此工况设计, 缸内燃烧温度最高, 做的有效功最多。

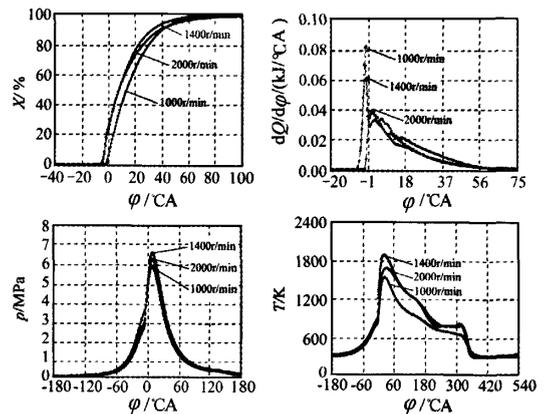


图 5 不同转速, 100% 负荷, 缸内累积放热率、瞬时放热率、燃烧压力、燃烧温度曲线

3.3 高原环境负荷对燃烧特性的影响

环境参数: 压力 61.6 kPa、温度 25 °C, 计算表 1 所示的工况点的燃烧特性。图 6 给出了 1 400、2 000 r/min 不同负荷的燃烧特性变化曲线。

表 1 计算所选取的工况点

转速 / (r/min)	工况点 1 负荷 / kW	工况点 2 负荷 / kW	工况点 3 负荷 / kW
1 400	486.4	384.3	261.3
2 000	518.9	413.7	305.6

从累积放热率来看，即中高负荷比低负荷放热速度明显加快，瞬时放热率的双峰明显，瞬时放热率峰值明显增大， $(dQ/d\varphi)_{max}$ 出现的位置越靠近止点。从压力曲线明显可以看出，在低负荷时燃烧呈现两阶段放热，有明显的预混燃烧的放热峰值；随负荷的增加，缸内最高压力增加，预混合燃烧比例逐渐减小，放热规律由双峰趋向单峰。1 400 r/min下三个负荷点的最高燃烧温度分别为：1 650、1 810、2 140 K；对应的曲轴转角分别为：28.4、29.1、30.9 °CA。2 000 r/min下三个负荷点的最高燃烧温度分别为：1 475、1 820、1 930 K；对应的曲轴转角分别为：28.1、30.1、31.7 °CA。即负荷增加，放热峰值增大，放热量多使得燃烧温度升高；同时， T_{max} 出现的位置会有所后移。

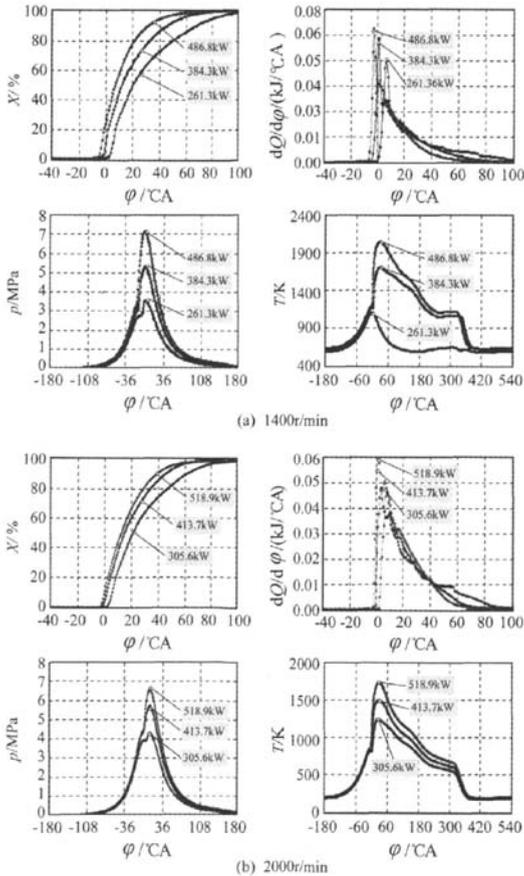


图6 1 400 r/min, 2 000 r/min, 不同负荷, 缸内累积放热率、瞬时放热率、燃烧压力、燃烧温度曲线

4 结论

1) 基于 Hiroyasu 燃烧模型和 Woschni 传热模型等建立某型增压柴油机工作过程模型，计算结果

万方数据

表明：随着大气压力减小，大气温度降低(海拔高度从0~4 000 m)导致吸入气缸内的空气量减少，缸内吸气终了时温度和压力下降，从而使得增压柴油机缸内最高燃烧压力下降，燃油消耗率和排气温度升高，而且在不同转速、不同工况下，其变化率不同。

2) 大气温度不变，随着大气压力由101.3 kPa 下降至61.6 kPa，瞬时放热率峰值从0.062 kJ/°CA 降低到0.053 kJ/°CA，降低 14.3%，放热率重心后移 7 °CA；压力循环线低于平原，最高燃烧压力从8.8 MPa降低到7.1 MPa，降低 19.3%，且最高燃烧压力点比平原略有滞后。缸内燃烧温度峰值(T_{max})上升 225 °C，最高燃烧温度出现的位置比平原滞后 7 °CA。

3) 中高转速和高转速柴油机缸内燃烧放热速率差别不大，但比低转速明显变快；高负荷比低负荷放热速度明显加快，瞬时放热率的双峰明显，瞬时放热率峰值明显增大，最高燃烧温度出现的时间较晚。进一步的研究应着眼于将大气压力、大气温度、大气湿度等环境因素综合考虑研究增压柴油机的环境适应性。

参考文献

- [1] 骆清国, 刘红彬, 聂彬, 等. 基于 GT-POWER 的柴油机环境适应性研究[J]. 装甲兵工程学院学报, 2009(5): 31-34.
- [2] J. Galindo, J. M. Lujan, J. R. Serrano, etc. Combustion simulation of turbocharger HSDI Diesel engines during transient operation using neural networks [J]. Applied Thermal Engineering, 2005(25): 877-898.
- [3] 何学良, 李疏松. 柴油机计算燃烧学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [4] 刘永长. 柴油机热力过程模拟[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001. 2.
- [5] 解茂昭. 计算燃烧学[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2005.
- [6] 魏名山, 张博, 程晓青, 等. 利用广安博之模型对柴油机高原运行性能和排放特性的模拟研究[J]. 汽车工程, 2006, 28(6): 539-541.
- [7] 任素慧. 机车柴油机的高原工作过程数值模拟[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- [8] 张俊军, 乔信起, 吴君华, 等. 车用增压二甲醚发动机的燃烧特性[J]. 上海交通大学学报, 2008, 40(8): 1301-1306.