

进气压力对发动机性能的影响研究

黄开胜^{1,5}, 张 尧², 刘 刚^{1,3}, 刘 胜⁴, 贾 桢⁴, 张扬军¹

(1. 清华大学 汽车工程系 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084; 2. 北京航天发射技术研究所, 北京 100076; 3. 军事交通学院 军用车辆系, 天津 300161; 4. 中国北方发动机研究所, 天津 300400; 5. 北京电动车辆协同创新中心, 北京 100084)

Research on Influence of Inlet Pressure on Diesel Engine Performance

HUANG Kaisheng^{1,5}, ZHANG Yao², LIU Gang^{1,3}, LIU Sheng⁴, JIA Zhen⁴, ZHANG Yangjun¹

(1. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Department of Automotive Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Institute of Space Launch Technology, Beijing 100076, China; 3. Department of Military Vehicle, Academy of Military Transportation, Tianjin 300161, China; 4. China North Engine Research Institute, Tianjin 300400, China; 5. Collaborative Innovation Center of Electric Vehicle in Beijing, Beijing 100084, China)

Abstract: An experimental study was carried out on a 3.8 L turbocharged inter-cooled diesel engine to reveal the influences of intake pressure on the performance of the engine. In the experiments, the turbocharger and intercooler of the engine were removed and the intake and exhaust pressures of the engine were controlled directly by a self-made pressure control system. The experiment and simulation results show that when the exhaust back pressure is kept constant, the maximum cylinder pressure is in linear relationship with the intake pressure, and the maximum cylinder pressure rises by 4.8~7.0 MPa every time the intake pressure increases by 100 kPa. The corresponding crank angle of the maximum cylinder pressure has no clear relationship with the intake pressure. The mass flow rate is in linear relationship with the intake pressure, and the mass flow rate goes up by 13~37 kg/h every time the intake pressure increases by 10 kPa. The exhaust temperature has obvious linear relationship with the air to fuel ratio, and the exhaust temperature decreases by 4.2 °C every time the air to fuel ratio increases by 1. With the increase of the intake pressure, the ignition delay will be smaller, the combustion starts earlier, but the combustion duration has no clear change. The brake torque of the engine will increase by 0.8~2.5 N·m every time the intake pressure increases by 10 kPa.

摘要: 在一台 3.8 L 涡轮增压中冷 4 缸柴油机上通过试验和仿真研究了进气压力对柴油机燃烧和性能的影响。试验中拆除了原机增压器及中冷器,通过自制压力调节装置直接控制柴油机进、排气压力。试验及仿真结果表明:在排气压力维持不变的条件下,最高燃烧压力与进气压力具有明显的线性关系,进气压力每增加 100 kPa,最高燃烧压力增加约 4.8 MPa~7.0 MPa;进气压力对最高燃烧压力相位的影响不明显;空气质量流量与进气压力具有明显的线性关系,进气压力每增加 10 kPa,空气质量流量增加约 13~37 kg/h;柴油机排气温度与空燃比具有明显的线性关系,空燃比每增加 1,柴油机排气温度降低约 4.2 °C;随进气压力增加,柴油机缸内燃烧滞燃期缩短,燃烧始点提前,但进气压力对燃烧持续期没有明显影响;进气压力

收稿日期: 2015-06-17

基金项目: 总装重大预研项目(7131319)

作者简介: 黄开胜(1971—),男,副研究员,博士,主要研究方向为汽车动力系统控制与优化, E-mail: huangks@tsinghua.edu.cn。

每增加 10 kPa,发动机转矩增加约 0.8~2.5 N·m。

关键词: 柴油机;进气压力;气缸压力;燃烧;性能

Key words: diesel engine; intake pressure; cylinder pressure; combustion; performance

DOI: 10.13949/j.cnki.nrjgc.2017.02.013

中图分类号: TK123

文献标识码: A

0 概述

高热效率和高功率密度是车用发动机的重要追求。为了提高发动机的热效率和功率密度,增压中冷技术得到了广泛的研究和应用,进气压力对发动机性能的影响得到深入的研究^[1-7]。以上研究一部分采用 FIRE 商业软件仿真进行,一部分采用发动机台架试验进行,进气压力均不高。针对车用发动机进一步提高进气压比的要求,本文中采用发动机台架试验及仿真手段,研究了进气压比从 1.0 至 3.4 之间变化对发动机燃烧和性能的影响。

1 试验设备与试验方案

1.1 试验设备

试验发动机为昆明云内动力股份有限公司出产的 YN38CDR 电控高压共轨涡轮增压中冷柴油机,其主要技术参数、试验设备分别如表 1、表 2 所示。发动机台架布置方案见图 1。进、排气压力调节系统为自制。

表 1 发动机主要技术参数

项目	参数
发动机型式	直列 4 缸,增压中冷
排量/L	3.8
压缩比	17.5
高压共轨最大压力/MPa	160
标定功率/kW	85(3 000 r/min)
最大转矩/(N·m)	350(1 800 r/min)
缸内最高燃烧压力限制/MPa	14
标定功率点燃油消耗率/(g·(kW·h) ⁻¹)	249
增压器压比	2.1

表 2 发动机台架主要仪器设备技术参数

名称	型号	精度
测功机	HORIBA LI145	±0.2%
联轴器	HORIBA D700	±0.2%
油耗仪	AVL KMA4000	±0.5%
空气流量计	ABB V/4224	±1%
缸压传感器	Kistler 6056A	-20 pC/100 kPa
燃烧分析仪	Kistler 5073A	±0.5%

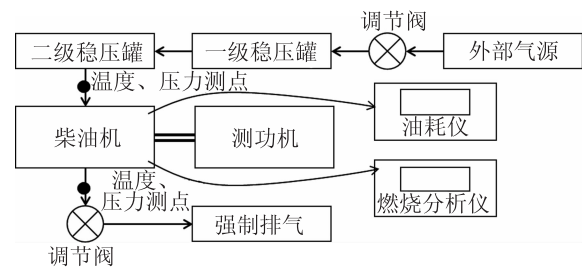


图 1 发动机台架布置方案

1.2 试验方案

试验选取柴油机转速为 1 000、2 000 和 3 000 r/min 的 3 个工况点,各工况点的喷油参数如表 3 所示,其中主喷定时与预喷定时正值表示上止点前。

表 3 柴油机喷油参数

转速/ (r·min ⁻¹)	总喷油量/ mg	主喷定时/ (°)	预喷油量/ mg	预喷定时/ (°)
1 000	50.0	8.0	1.50	10
2 000	27.4	1.5	2.27	14
3 000	39.0	8.0	1.50	16

试验中将原机增压器拆除,并通过自制压力调节系统控制柴油机的进气压力和排气压力。原机增压器压比为 2.1,因而试验中将柴油机排气压力控制在 210 kPa 左右。试验中控制柴油机的进气压力分别为大气压力(由于压力调节系统限制,实际约为 115 kPa)、125 kPa、150 kPa、175 kPa、200 kPa、250 kPa、275 kPa。

2 试验结果与分析

2.1 进气压力对缸内压力及最高燃烧压力的影响

试验所选取的 3 种工况点缸内压力变化如图 2~图 4 所示。

随进气压力的增加,柴油机缸内压力在整个循环过程中都有较明显的增加。3 种工况点的最高燃烧压力及对应相位如图 5 所示。由图 5 可见,在 3 种转速下最高燃烧压力与进气压力具有明显的线性关系。1 000 r/min、2 000 r/min 和 3 000 r/min 时最高燃烧压力与进气压力的拟合关系式分别为:

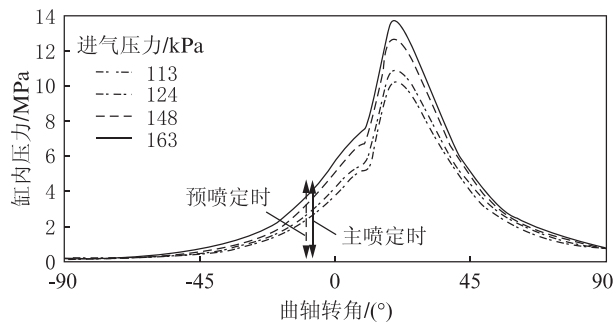


图2 1000 r/min 工况点缸内压力

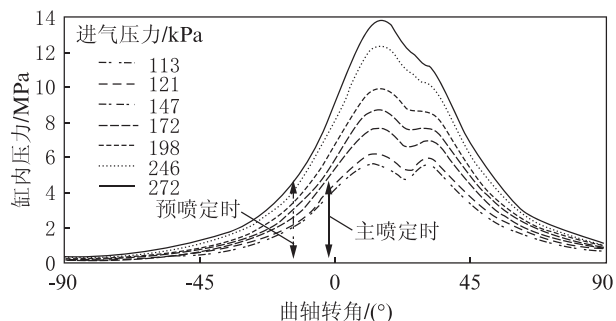


图3 2000 r/min 工况点缸内压力

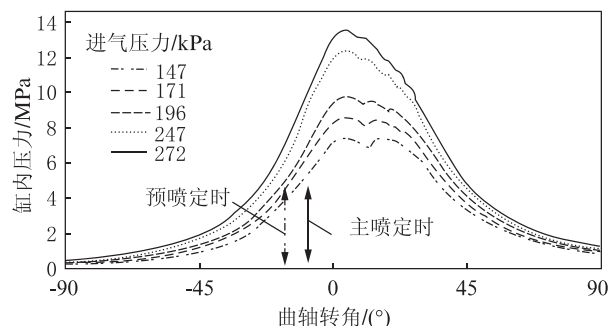


图4 3000 r/min 工况点缸内压力

$$y=0.070\ 2x+2.313\ 3 \quad (1)$$

$$y=0.050\ 4x+0.122\ 5 \quad (2)$$

$$y=0.048\ 7x+0.326\ 1 \quad (3)$$

式中, y 表示最高燃烧压力, MPa; x 表示进气压力, kPa。3 个拟合关系式的相关系数均接近 1。2000 r/min 和 3000 r/min 试验工况点循环喷油量较少, 柴油机负荷率较低, 最高燃烧压力与进气压力拟合关系式的斜率较小; 1000 r/min 试验工况点循环喷油量较多, 柴油机负荷率较大, 最高燃烧压力与进气压力拟合关系的斜率增大。综上所述, 最高燃烧压力与进气压力具有较好的线性关系, 但斜率和截距受喷油量和喷油定时的影响。

3 种工况下, 进气压力对最高燃烧压力相位的影响不明显。1000 r/min 时最高燃烧压力相位在上止

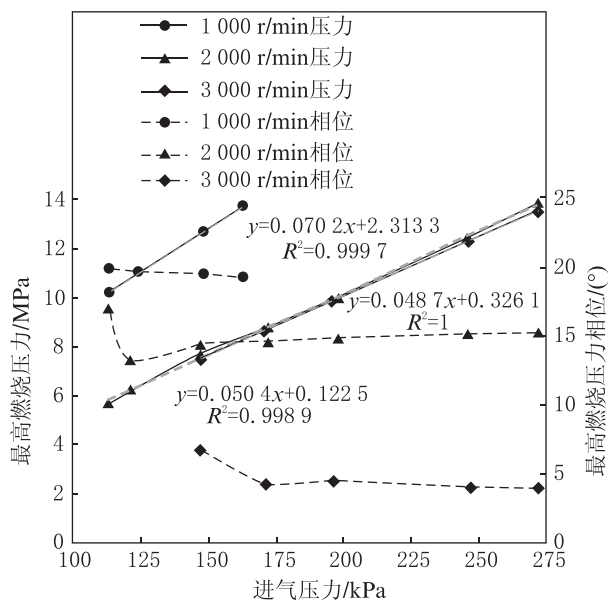


图5 3种试验工况最高燃烧压力及对应相位

点后 19° 左右; 2000 r/min 时最高燃烧压力相位在上止点后 15° 左右, 波动幅度约为 $\pm 1.5^\circ$ 曲轴转角; 3000 r/min 时最高燃烧压力相位在上止点后 5° 左右, 波动幅度约 $\pm 1.5^\circ$ 曲轴转角。由图 5 可见, 相同进气压力下不同转速时, 最高燃烧压力相位相差较大。由表 3 可知, 这种差别主要是由喷油量和喷油定时不同造成。

2.2 进气压力对空气质量流量及空燃比的影响

3 种工况下空气质量流量和空燃比的变化如图 6 所示。由图 6 可见, 在发动机转速不变的条件下, 空气质量流量和空燃比与进气压力近似呈线性关系。

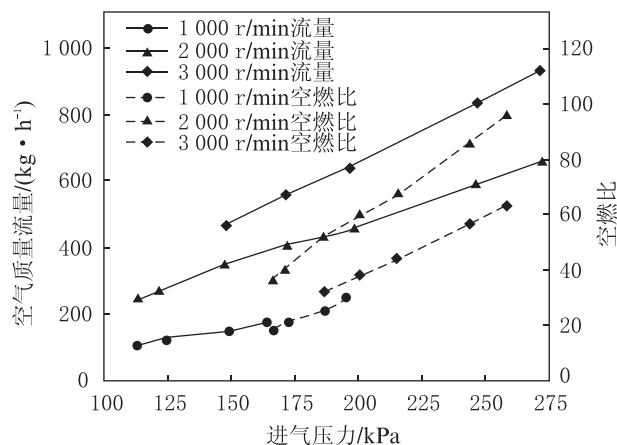


图6 3种试验工况空气质量流量及空燃比

3 种工况下, 排气温度与空气质量流量的关系及排气温度与空燃比的关系分别如图 7、图 8 所示。

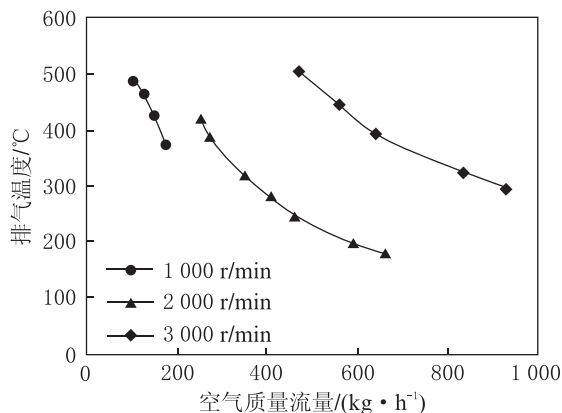


图 7 3 种试验工况排气温度与空气质量流量的关系

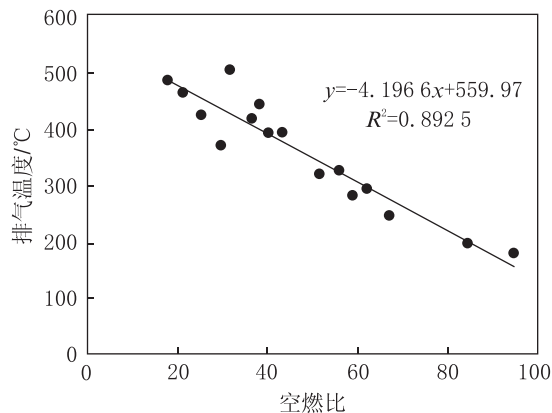


图 8 3 种试验工况排气温度与空燃比的关系

由图 7 可见,当保持喷油量和喷油定时不变时,随空气质量流量的增加,排气温度逐渐减小。然而,喷油量和喷油定时不同时,排气温度随空气质量流量增加而减小的速度并不相同:喷油量较多(1 000 r/min)时,排气温度随空气质量流量增加而迅速减小,空气质量流量每增加 10 kg/h,排气温度减小约 16 °C;喷油量较少(2 000 r/min 和 3 000 r/min)时,排气温度随空气质量流量增加而减小的速度较小,空气质量流量每增加 10 kg/h,排气温度约减小 5 °C。

由图 8 可见,排气温度与空燃比具有一定的线性关系。排气温度与空燃比的拟合关系式为:

$$y = -4.1966x + 559.97 \quad (4)$$

式中, y 表示排气温度,°C; x 表示空燃比。拟合式相关系数 $R^2 = 0.8925$ 。

综上所述,在发动机转速及喷油参数不变的条件下,进气压力直接影响发动机空气质量流量,进而影响缸内燃烧的空燃比,对发动机排气温度造成重要影响。

2.3 进气压力对燃烧始点及燃烧持续期的影响

以下分析中以累计燃烧放热率达到 5% 为燃烧

始点,累计燃烧放热率达到 90% 为燃烧终点,根据两者之差可以计算燃烧持续期。3 种试验工况下,燃烧始点和燃烧持续期如图 9、图 10 所示。

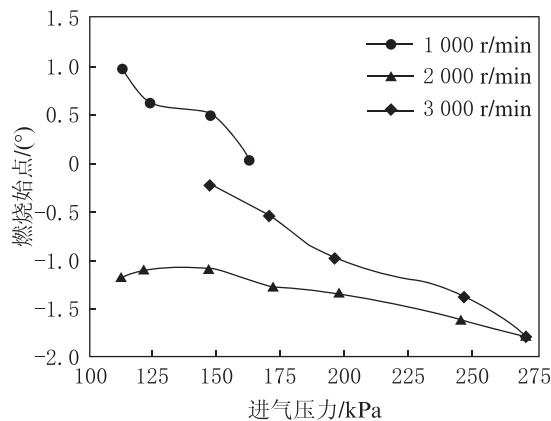


图 9 3 种试验工况燃烧始点

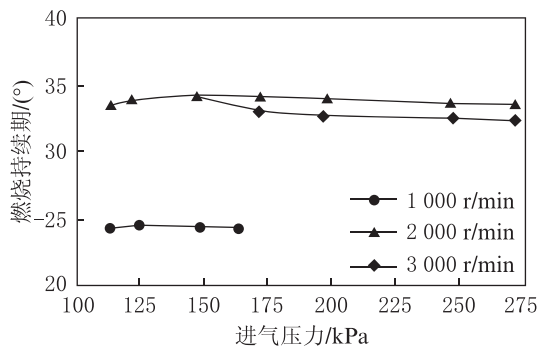


图 10 3 种试验工况燃烧持续期

由图 9 可见,随进气压力增加,燃烧始点逐渐提前。一方面随进气压力增加,缸内压力和温度增加,滞燃期缩短,从而使燃烧始点提前;另一方面,随进气压力增加,发动机空气质量流量增加,缸内空气质量增加,也有利于燃烧始点提前。另外,不同转速下,由于预喷油量及预喷定时不同,因而燃烧始点存在较大差别。进气压力为 150 kPa 时,1 000 r/min 工况点与 3 000 r/min 工况点预喷油量均为 1.50 mg,3 000 r/min 预喷定时比 1 000 r/min 提前了 0.7° 曲轴转角,其燃烧始点提前约 1.6°;2 000 r/min 预喷定时比 3 000 r/min 落后 2.0° 曲轴转角,但预喷油量增加 0.77 mg,其燃烧始点提前 0.8° 曲轴转角。

由图 10 可见,随进气压力增加,燃烧持续期基本不变。不同转速下,由于总喷油量不同,燃烧持续期相差较大。

2.4 进气压力对动力性的影响

3 种试验工况下,进气压力对发动机转矩的影响如图 11 所示。

由图 11 可见,随进气压力增加,发动机转矩逐

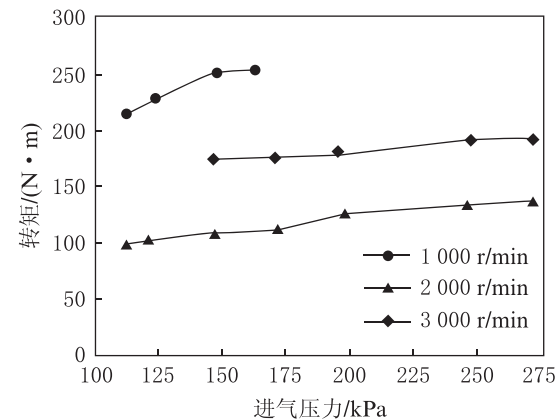


图 11 3 种试验工况发动机转矩

渐增加。进气压力每增加 10 kPa, 发动机转矩增加约 0.8~2.5 N·m。

发动机的泵气过程功率算式为:

$$P_{\text{pump}} = \Delta p V n / (60 \times 2) \tag{5}$$

式中, P_{pump} 为泵气过程功率, kW; Δp 为进排气压力差, kPa; V 为发动机排量, L; n 为发动机转速, r/min。进而, 得到发动机的泵气过程转矩算式, 见式(6)。

$$T_{\text{pump}} = P_{\text{pump}} / [(n/60) \cdot 2\pi] \tag{6}$$

式中, T_{pump} 为泵气过程转矩, N·m。

根据发动机排量可得, 在排气压力不变的条件下, 进气压力每增加 10 kPa, 泵气过程转矩增加约 3 N·m, 若其他条件不变, 则发动机转矩相应增加 3 N·m。与实测数据对比可见, 进气压力增加时, 发动机转矩实际增加值小于 3 N·m, 这是因为进气压力增加时缸内压力增加, 从而导致发动机摩擦损失增加。

3 GT-Power 仿真分析

根据发动机结构参数在 GT-Power 中搭建其仿真模型, 并根据试验数据对模型进行了标定。发动机 GT-Power 仿真模型如图 12 所示。

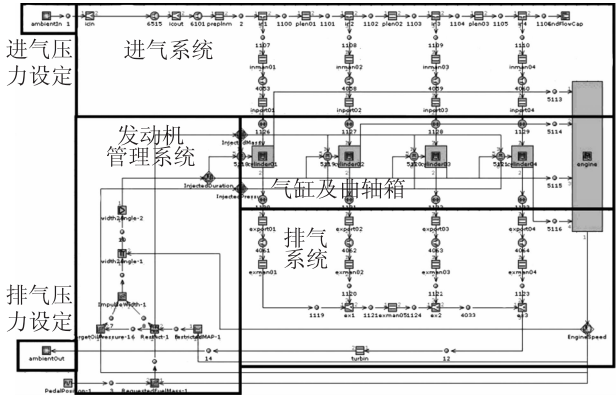


图 12 发动机 GT-Power 仿真模型

利用 GT-Power 仿真模型, 对表 3 所示 3 种工况分别进行了仿真计算, 排气压力设定为 210 kPa, 进气压力分别为 300 kPa 和 340 kPa。其中, 由于 1 000 r/min 工况进气压力为 165 kPa 时缸内最高燃烧压力已达到限定值, 因而在仿真中对该工况增加了进气压力为 175、200、250、275 kPa 的计算。

柴油机缸内最高燃烧压力仿真结果如图 13 所示。

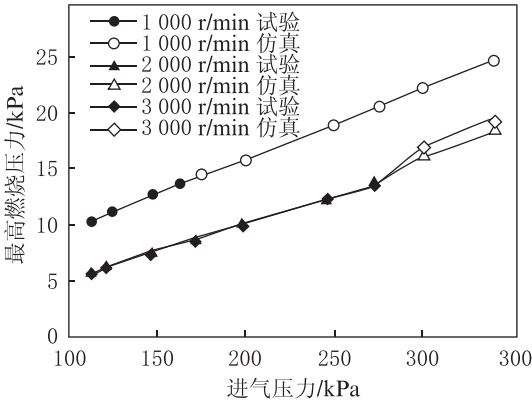


图 13 柴油机最高燃烧压力仿真结果

由图 13 可见, 当进气压力进一步增加时, 最高燃烧压力与进气压力之间的线性关系仍然存在。当进气压力达到 300 kPa 时, 最高燃烧压力将超过限定值, 因而机械负荷将成为柴油机进气压力进一步提升的障碍。柴油机转矩仿真结果如图 14 所示。由图 14 可见, 当进气压力进一步增加时, 柴油机转矩与进气压力之间的线性关系仍然存在。对于 1 000 r/min 工况, 当进气压力增加时, 柴油机转矩增加幅度较大, 这说明此时限制柴油机转矩增加的因素是进气压力。进气压力增加, 柴油机空气质量流量增加, 使柴油机缸内燃烧过程改善, 动力性提高。对于 3 000 r/min 工况, 当进气压力增加时, 柴油机转矩增加幅度较小, 说明此时限制柴油机转矩增加的因素不是进气压力。进气压力增加引起的柴油机空气质量流量增加并不能改善燃烧, 进而提高柴油机动力性。

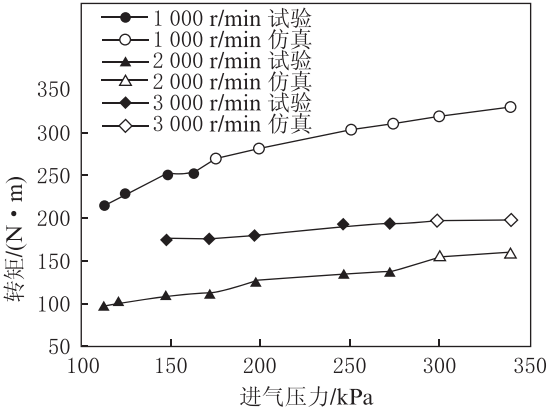


图 14 柴油机转矩仿真结果

4 结 论

(1) 随进气压力增加,柴油机缸内压力在整个循环过程中明显增加。最高燃烧压力与进气压力具有明显的线性关系,但斜率和截距受喷油量和喷油定时影响明显。在排气压力维持不变的条件下,进气压力每增加 100 kPa,最高燃烧压力增加约 4.8~7.0 MPa。进气压力对最高燃烧压力相位的影响不明显。

(2) 当柴油机转速不变时,空气质量流量与进气压力具有明显的线性关系。在排气压力维持不变的条件下,进气压力每增加 10 kPa,空气质量流量增加约 13~37 kg/h。随空气质量流量的增加,柴油机缸内燃烧空燃比逐渐增加,从而使柴油机排气温度降低。柴油机排气温度与空燃比具有明显的线性关系,空燃比每增加 1,柴油机排气温度降低约 4.2 °C。

(3) 随进气压力增加,柴油机缸内燃烧滞燃期缩短,燃烧始点提前。进气压力对燃烧持续期没有明显影响。

(4) 在排气压力不变时,随进气压力增加,柴油机泵气损失减小,发动机转矩逐渐增加。进气压力每增加 10 kPa,发动机转矩增加约 0.8~2.5 N·m。然而进气压力增加也会导致摩擦损失增加,从而导致进气压力增加,降低了动力性改善效果。

参考文献:

- [1] 刘建勋,万善鹏,赵二丽,等. 不同进气压力对高密度-低温柴油机燃烧的数值模拟[J]. 交通信息与安全,2011,29:124-127.
LIU J X, WAN P P, ZHAO E L, et al. Numerical simulation

- of different intake pressure on high density-low temperature diesel combustion [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2011, 29: 124-127.
- [2] 殷勇,杨尚丽. 发动机进气状态对燃油经济性影响的仿真研究[J]. 汽车科技, 2011(6): 26-30.
YIN Y, YANG S L. The simulation study for influence of engine inlet state on fuel economy [J]. Automobile Science & Technology, 2011(6): 26-30.
- [3] 杨兴林,张静,周望存,等. 进气参数对 LNG 发动机燃烧及排放特性的影响[J]. 内燃机工程, 2016, 37(1): 51-56.
YANG X L, ZHANG J, ZHOU W C, et al. Influence of intake parameters on diesel combustion and emissions characteristics [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2016, 37(1): 51-56.
- [4] 张全长,尧命发,郑尊清,等. 进气压力对柴油机低温燃烧的影响[J]. 内燃机学报, 2012, 30(5): 385-389.
ZHANG Q C, YAO M F, ZHENG Z Q, et al. Effects of intake pressure on diesel low temperature combustion [J]. Transactions of CSICE, 2012, 30(5): 385-389.
- [5] 汪硕峰,高谦,纪常伟,等. 进气压力对汽油混氢发动机性能影响的研究[J]. 车用发动机, 2010(1): 44-47.
WANG S F, GAO Q, JI C W, et al. The influence of intake pressure on hydrogen-enriched gasoline engine performance [J]. Vehicle Engine, 2010(1): 44-47.
- [6] 杜维明,李君,陈立,等. 增压比对汽油机燃烧及性能影响的试验研究[J]. 汽车工程, 2011, 33(9): 745-748.
DU W M, LI J, CHEN L, et al. An experimental study on the effects of boost ratio on the combustion and performance of gasoline engine [J]. Automotive Engineering, 2011, 33(9): 745-748.
- [7] DESHMUKH D S, MODAK J P, NAYAK K M. Experimental analysis of backpressure phenomenon consideration for C. I. engine performance improvement [J]. Human Reproduction, 1997, 12(3): 403.