

可变喷嘴涡轮增压器 (VNT) 对高原地区车用柴油 油机性能与排放的影响研究

杨永忠^{1,2}, 申立中¹, 毕玉华¹, 雷基林¹, 王俊¹

(1.昆明理工大学 云南省内燃机重点实验室, 昆明 650500;

2.昆明云内动力股份有限公司, 昆明 650000)

摘要: **目的** 系统研究可变喷嘴涡轮增压器 (VNT) 对运行在高原地区的车用柴油机动性、经济性以及排放性能的影响关系, 为高原地区电控柴油机与 VNT 的匹配控制以及降低其污染物排放提供一定的理论指导。**方法** 在海拔高度约为 1960 m 的高原地区, 选取柴油机的典型运行工况, 即低速 1400 r/min 全负荷、2200 r/min 全负荷 (最大转矩工况) 以及 4000 r/min 全负荷 (额定功率工况), 通过试验研究 VNT 对柴油机性能与排放的影响。**结果** 在低速工况, 随着 VNT 喷嘴环开度的增大, 动力性降低, 经济性恶化; 在最大转矩与额定功率工况, 均存在一个最佳的 VNT 喷嘴环开度使得转矩最大, 同时油耗最低。随着 VNT 喷嘴环开度的增大, 进气流量、空燃比、中冷前压力、中冷前温度以及涡前压力均降低, 而涡前温度升高。在三个典型运行工况下, 随着 VNT 喷嘴环开度的增大, 氮氧化物 (NO_x) 比排放逐渐降低, 而烟度、一氧化碳 (CO) 以及碳氢 (HC) 比排放逐渐升高, VNT 对 HC 排放的影响较小。**结论** 在高原地区, 通过减小 VNT 喷嘴环开度可以降低涡前温度, 进而降低柴油机的热负荷, 提高其可靠性, 合理调节 VNT 喷嘴环开度可以获得较为满意的 NO_x 比排放与烟度排放。

关键词: 柴油机; 高原; 可变喷嘴涡轮增压器; 比排放

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.10.003

中图分类号: TJ07; TG147

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2017)10-0012-07

Influences of Variable Nozzle Turbocharger (VNT) on Performance and Emission of Vehicle Diesel Engine operating at High Altitude

YANG Yong-zhong^{1,2}, SHEN Li-zhong¹, BI Yu-hua¹, LEI Ji-lin¹, WANG Jun¹

(1. Yunnan Province Key Laboratory of Internal Combustion Engines, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Kunming Yunnei Power Co., Ltd, Kunming 650000, China)

ABSTRACT: Objective To have systematic study on the influences of variable nozzle turbocharger (VNT) on the power, economy and emission performance of a vehicle diesel engine running in plateau area and to provide some theoretical guidance for the matching control of the electronic control diesel engine with VNT as well as reducing the pollutant emission of the diesel engine operating at high altitude. **Methods** The effect of VNT on diesel engine performance and emissions was researched by experiment at an altitude of about 1960m and at the typical operating conditions, such as low engine speed 1400 r/min full load, 2200r/m in full load (peak torque condition) and 4000 r/min full load (rated power

收稿日期: 2017-06-01; 修订日期: 2017-07-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51466003, 51666005)

作者简介: 杨永忠 (1963—), 男, 云南昆明人, 高级工程师, 主要研究方向为柴油机设计与开发。

通讯作者: 申立中 (1956—), 男, 云南昆明人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为内燃机工作过程及增压技术。

condition). **Results** At low engine speed condition, with the increase of VNT nozzle opening, the power declined and the economy deteriorated. There was an optimal VNT nozzle opening which made the torque reach the peak value and the brake specific fuel consumption have the lowest value at peak torque condition and rated power condition respectively. With the increase of VNT nozzle opening, intake air mass flow rate, air-to-fuel ratio, compressor outlet gas pressure, compressor outlet gas temperature and turbine inlet gas pressure decreased; while the turbine inlet gas temperature increased. Brake specific nitrogen oxides (NO_x) emission decreased gradually and smoke, brake specific carbon monoxide (CO) emission and brake specific hydrocarbon (HC) emission increased gradually along with the increase of VNT nozzle opening at these three typical operating conditions. In addition, VNT had little effect on HC emission. **Conclusion** In plateau regions, the turbine inlet gas temperature can be reduced by closing the VNT nozzle opening so as to decrease the thermal load of diesel engine and improve its reliability. Satisfactory brake specific NO_x emission and smoke emission can be obtained by means of adjusting VNT nozzle opening reasonably.

KEY WORDS: diesel engine; high altitude; variable nozzle turbocharger; emission

高原地区较低的大气环境压力给柴油机带来诸多不利影响, 如动力性下降、经济性恶化、部分污染物排放增加以及可靠性下降等问题^[1-5]。目前, 国内外提高柴油机高原环境适应性开展的研究工作中, 增压技术是最重要的技术手段之一^[6]。增压匹配可以提升柴油机的功率密度, 降低油耗和污染物排放。当海拔上升时, 涡轮增压器具有自补偿能力, 能够在一定程度上补偿因海拔升高、大气压力降低引起的进气量减少问题。当前, 车用柴油机应用最多的是排气旁通式涡轮增压技术^[7-8]。当海拔上升到一定高度后, 受压气机喘振、增压器超速以及联合运行点等的限制, 传统的排气旁通式涡轮增压器的进气补偿作用将不足以弥补因大气压力和密度的大幅下降而带来的进气量降低, 因而柴油机的高原性能也受到一定的影响。为恢复柴油机的高原性能, 需要采用更加先进的高增压技术, 如可变涡轮增压技术。

可变涡轮增压技术, 如可变几何截面涡轮增压 (VGT) 或者可变喷嘴涡轮增压 (VNT), 通过调节导流叶片开度或者喷嘴环开度能够在较高的海拔地区保持较为充足的进气流量, 进而改善柴油机的运行性能。另外, 合理控制 VNT 喷嘴环开度, 还可以有效防止高原地区增压器超速现象的发生。张海雷等人^[9-10]进行了 VGT 柴油机变海拔匹配性能的仿真研究, 结果表明: 与匹配固定截面涡轮增压器 (FGT) 的柴油机相比, 匹配 VGT 的柴油机能够明显改善因海拔上升引起的柴油机性能下降的问题。靳嵘等人^[11]基于 VNT 建立了柴油机变海拔自适应增压系统, 利用高原柴油机模拟试验台进行了 0~4000 m 不同海拔下的模拟对比试验, 结果表明: 采用 VNT 之后, 改善了柴油机运行在高海拔地区性能下降的状况, 解决了高海拔地区增压器喘振的问题。杨殿勇等人^[12]在高原地区与平原地区上, 对装有匹配 VNT 柴油机的客车进行了起动、起步加速、换挡加速及减速等变工况下的瞬态性能试验研究。

除了单独研究 VGT 或 VNT 对恢复高原环境下柴油机的性能之外, 刘瑞林等人^[13]针对高压级匹配 VGT 的二级可调增压系统, 研究了不同海拔下 VGT 叶片开度对二级可调增压柴油机性能的影响, 得到了不同海拔全工况 VGT 叶片最佳开度脉谱。董素荣等人^[14-15]还研究了 VGT 叶片开度对运行在不同海拔下二级增压柴油机燃烧特性以及高海拔低速匹配特性的影响。文万斌等人^[16]通过仿真的方法研究了排气再循环 (EGR) 与 VNT 对高原环境下柴油机性能的影响。

2016 年 12 月, 中国环保部发布了“轻型汽车污染物排放限制及测量方法 (中国第六阶段)”, 将于 2020 年 7 月 1 日起施行该法规, 其中规定了轻型汽车污染物排放限值随海拔高度变化的要求^[17]。该法规的发布使得运行在不同海拔下的轻型汽车污染物排放也受到了相应的重视与关注。高原地区, 稀薄的空气使得进入柴油机的进气流量降低, 高原地区运行的柴油机性能有别于平原地区, 采用可变涡轮增压技术可以提高进气流量, 然而通过试验研究 VNT 对运行在高原地区车用柴油机性能与排放的影响还非常有限。因此, 系统研究 VNT 对运行在高原地区车用柴油机动力性、经济性以及排放性能的影响关系, 为高原地区电控柴油机与 VNT 的匹配控制以及降低其污染物排放提供一定的理论指导。

1 试验

1.1 试验设备

试验用发动机为一台增压中冷、直列 4 缸 4 气门车用高速直喷柴油机, 该机配备 VNT 与高压 EGR 系统, 主要技术参数见表 1。试验用到的主要仪器设备包括测功机、测控系统、冷却水恒温系统、燃油恒温装置、机油恒温装置、电控标定系统、排放测量系统等。台架试验用主要设备仪器见表 2。

表 1 试验用发动机基本设计参数

项目	参数
发动机型式	直列4缸四冲程, 增压中冷
缸径×行程	80 mm × 92 mm
发动机排量	1.85 L
压缩比	18.5
燃油喷射系统	BOSCH共轨系统 CRS2-16
最高喷油压力	160 MPa
EGR阀	皮尔博格IAA2012-03
涡轮增压器	霍尼韦尔GT C1446VZ
台架用ECU	带ETK的开发式ECU (BOSCH)
标定功率/转速	82 kW/4000 r·min ⁻¹
最大转矩/转速	265 N·m/2200 r·min ⁻¹

表 2 主要测试设备的特性参数

试验用主要设备仪器	测定量	量程	测量精度
WE31N水涡流测功机	转矩	0~400 N·m	±0.2% 满量程
WE31N水涡流测功机	转速	50~9 999 r/min	±1 r/min
FCMA油耗仪	小时油耗	0~40 kg/h	<±0.05% 满量程
EIM609测控系统	—	—	—
AVL SESAM i60 FTIR傅里叶变换红外光谱仪	氮氧化物 (NO _x)	0~10 000	2.5
AVL SESAM i60 FTIR傅里叶变换红外光谱仪	一氧化碳 (CO)	0~100 000 mg/L	1.0
AVL SESAM i60 FTIR傅里叶变换红外光谱仪	碳氢 (HC)	0~10 000	20
AVL SESAM i60 FTIR傅里叶变换红外光谱仪	二氧化氮 (CO ₂)	0~200 000 mg/L	200
AVL 415S G002 烟度计	滤纸烟度数 (FSN)	0~10 FSN	0.001
TOCEIL-LFE300 进气流量计	空气质量流量	0~800 m ³ /h	±1.0% 测量值

1.2 VNT 的控制

试验机型匹配的涡轮增压器是美国霍尼韦尔公司的 VNT。该 VNT 采用真空调节器控制真空度的大小对 VNT 喷嘴环的开度进行调节。VNT 喷嘴环开度主要通过电控标定系统实现。电控标定系统由德国博世公司带 ETK 的开发式电子控制单元 (ECU)、德国 ETAS 有限公司的电控标定软件 INCA V7.1、接口硬件 ES590 以及标定对象发动机组成。通过修改 VNT 喷嘴环开度的标定脉谱 (MAP) 得到 VNT 喷嘴环开度。在具体的控制系统中, 控制策略根据 INCA 软件或者 ECU 中相应的喷嘴环开度值转换为开度控制的占空比 (PWM), 真空调节器根据 PWM 信号改变所提供的真空度在 VNT 喷嘴环控制拉杆上的加载与释放时间比例, 从而改变 VNT 的喷嘴环开度。对于 VNT 喷嘴环开度的定义, 0%表示全关, 100%表示全开。

选取柴油机的典型运行工况, 即低速 1400 r/min 全负荷、2200 r/min 全负荷 (最大转矩工况) 以及 4000 r/min 全负荷 (额定功率工况) 进行研究分析。试验地点的海拔高度约为 1960 m, 大气压力约为 80 kPa。在试验过程中, 当柴油机的工况稳定之后记录相关的测试数据。

2 结果及分析

2.1 对动力性与经济性的影响

三个典型运行工况下 VNT 喷嘴环开度对动力性与经济性的影响如图 1 所示。由图 1 可见, 在低速 1400 r/min 全负荷工况时, 随着 VNT 喷嘴环开度的增大, 转矩逐渐降低, 有效燃油消耗率逐渐升高。在最大转矩与额定功率工况下, 均存在一个最佳的 VNT 喷嘴环开度使得转矩最大, 油耗最低。随着 VNT 喷嘴环开度的增大, 转矩呈现首先略有升高而后逐渐降低的趋势, 有效燃油消耗率呈现略有降低而后逐渐升高的趋势。

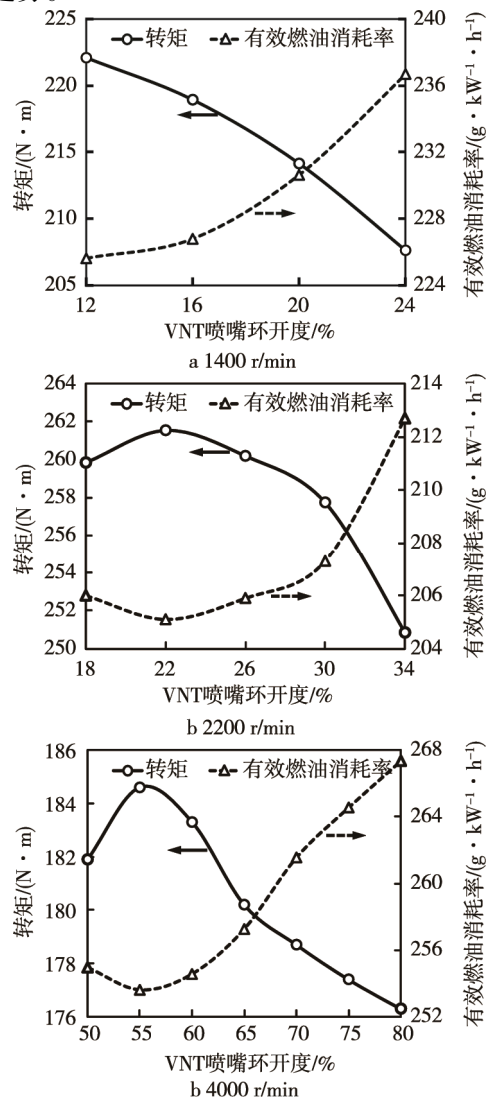


图 1 不同转速全负荷工况下 VNT 喷嘴环开度对动力性与经济性的影响

在 1400 r/min 时, 由于柴油机自身转速较低, 排气能量相对不足, 虽然采用可变喷嘴涡轮, 但是涡轮增压器的工作能力仍然较弱。随着 VNT 喷嘴环开度的增大, 进气流量降低, 燃烧恶化, 柴油机做功能力降低, 因而转矩降低, 油耗上升。柴油机存在一个最佳的空燃比使得燃烧效率最高, 在 2200 r/min 与 4000 r/min 时, 排气能量较为充足。在 VNT 喷嘴环开度较小时, 过大的进气流量会导致混合气过稀, 燃烧组织不良, 燃烧效率下降。同时较小的 VNT 喷嘴环开度还使得泵气损失较高, 因而转矩略有降低, 油耗有所恶化。随着喷嘴环开度的增大, 进气流量降低, 空燃比逐渐降低至燃烧效率的最大值, 此时输出转矩最大, 油耗最低。随着喷嘴环开度的进一步增大, 空燃比略显不足, 燃烧开始恶化, 转矩降低, 油耗升高。

2.2 对进气流量与空燃比的影响

VNT 喷嘴环开度对进气流量与空燃比的影响如图 2 所示。从图 2 可以看出, 在三个典型运行工况下,

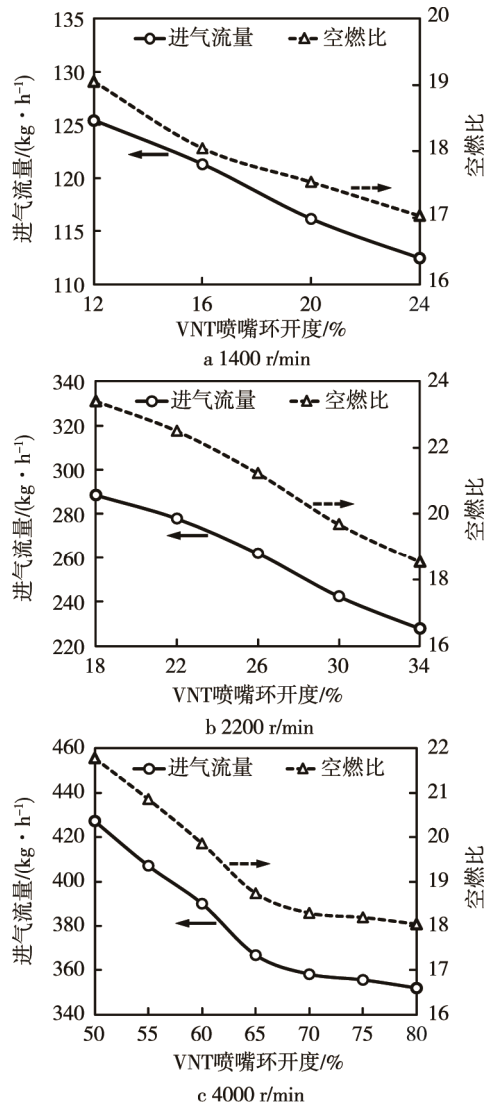


图 2 不同转速全负荷工况下 VNT 喷嘴环开度对进气流量与空燃比的影响

VNT 喷嘴环开度对进气流量与空燃比的影响律几乎一致。随着 VNT 喷嘴环开度的增大, 进气流量与空燃比均逐渐降低。在额定功率工况, VNT 喷嘴环开度从 65% 增大至 80% 时, 进气流量与空燃比降低缓慢。

VNT 喷嘴环开度增大, 涡轮转速降低, 带动同轴的压气机转速也随之降低, 压气机做功能力减弱, 进气流量降低。在全负荷工况下, 燃油流量不变, 因而空燃比也随之减小。涡轮增压器是一个非线性系统, 进气流量并不随 VNT 喷嘴环开度呈现线性变化^[18]。在 VNT 喷嘴环开度较大时, 此时涡轮效率较低, 涡轮流通截面较大, 喷嘴环开度对涡轮转速的影响较小, 涡轮做功能力变化不大。因而在 4000 r/min 全负荷工况 VNT 喷嘴环开度较大时, 进气流量与空燃比随着 VNT 喷嘴环开度的进一步增大下降缓慢。

2.3 对中冷前压力与中冷前温度的影响

中冷前压力与中冷前温度随 VNT 喷嘴环开度变化的变化如图 3 所示。由图 3 可见, 中冷前压力与中

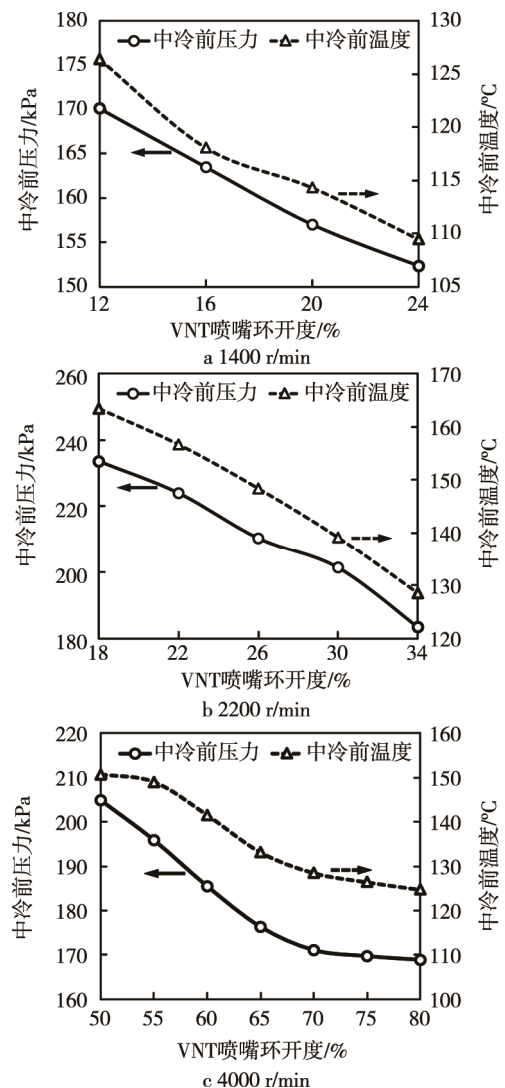


图 3 不同转速全负荷工况下 VNT 喷嘴环开度对中冷前压力与中冷前温度的影响

冷前温度均随着 VNT 喷嘴环开度的增大而减小。VNT 喷嘴环开度增大, 涡轮转速降低, 同轴的压气机转速也随之降低, 压气机做功能力减小, 增压压力降低。即中冷前压力降低, 压气机压力减小使得压气机出口气体温度也随之降低, 即中冷前温度降低。

2.4 对涡前压力与涡前温度的影响

VNT 喷嘴环开度对涡前压力与涡前温度的影响如图 4 所示。从图 4 可以看出, 随着 VNT 喷嘴环开度的增大, 涡前压力逐渐降低, 而涡前温度逐渐升高。VNT 喷嘴环开度增大, 涡轮的流通截面增大, 排气阻力减小, 涡前压力降低。从图 1 可知, 进气流量与空燃比均随着 VNT 喷嘴环的增大而降低, 进气流量与空燃比的降低导致缸内压缩终点时的压力与氧含量均减小, 滞燃期延长, 燃烧始点退后, 后燃现象加剧, 因而涡前温度升高。由图 4 可见, 在高原地区, 通过减小 VNT 喷嘴环开度可以降低涡前温度, 进而降低柴油机的热负荷, 提高其可靠性。

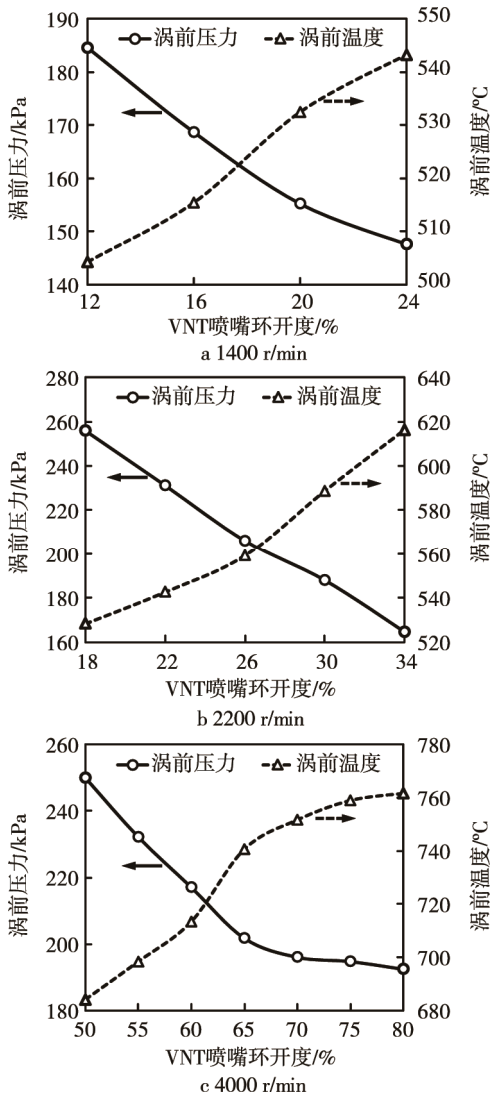


图 4 不同转速全负荷工况下 VNT 喷嘴环开度对涡前压力与涡前温度的影响

2.5 对 NO_x 比排放与烟度的影响

NO_x 比排放与烟度随 VNT 喷嘴环开度的变化如图 5 所示。由图 5 可见, 随着 VNT 喷嘴环开度的增大, NO_x 比排放逐渐降低, 而烟度排放逐渐升高。

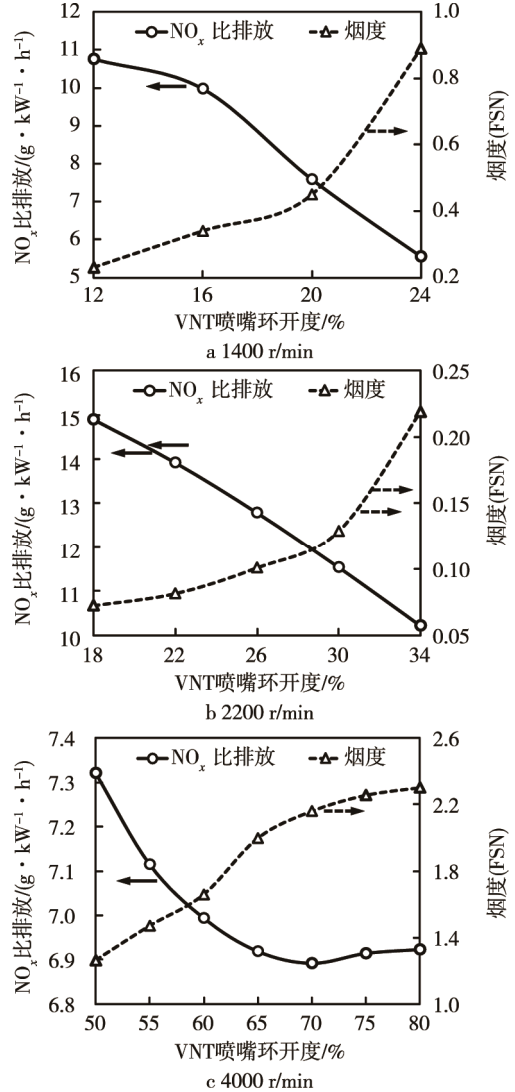


图 5 不同转速全负荷工况下 VNT 喷嘴环开度对 NO_x 比排放与烟度的影响

NO_x 的生成主要取决于燃烧过程中的氧浓度、燃烧温度以及反应时间。VNT 喷嘴环开度增大, 进气流量降低, 一方面, 滞燃期延长, 预混燃烧比例增大, 使得缸内的初期放热量增大, 有利于燃烧温度的提高, 促进 NO_x 的生成; 另一方面, 缸内氧含量的减少, 又抑制了 NO_x 排放的生成。同一工况下, 当氧含量的减少对 NO_x 生成的抑制作用占主导地位时, NO_x 比排放随着 VNT 喷嘴环开度的增大而降低。从图 5 还可以看出, 在最大转矩工况, NO_x 比排放较高。一般认为碳烟是不完全燃烧的产物, 随着 VNT 喷嘴环开度的增大, 进气流量降低, 混合气质量变差, 燃烧恶化, 同时缸内氧含量的降低使得碳烟后期的氧化受到抑制, 因而烟度升高。从图 5 还可以看出, 在三个典型

运行工况下, 在 NO_x 比排放与烟度的交叉点, 此时 NO_x 比排放相对较低, 而烟度排放尚未急剧升高, 这说明合理调节 VNT 喷嘴环开度可以获得较为满意的 NO_x 比排放与烟度排放。

2.6 对 CO 比排放与 HC 比排放的影响

VNT 喷嘴环开度对 CO 比排放与 HC 比排放的影响如图 6 所示。由图 6 可见, 随着 VNT 喷嘴环开度的增大, CO 比排放与 HC 比排放均逐渐升高, 但是 HC 比排放的变化范围较小。

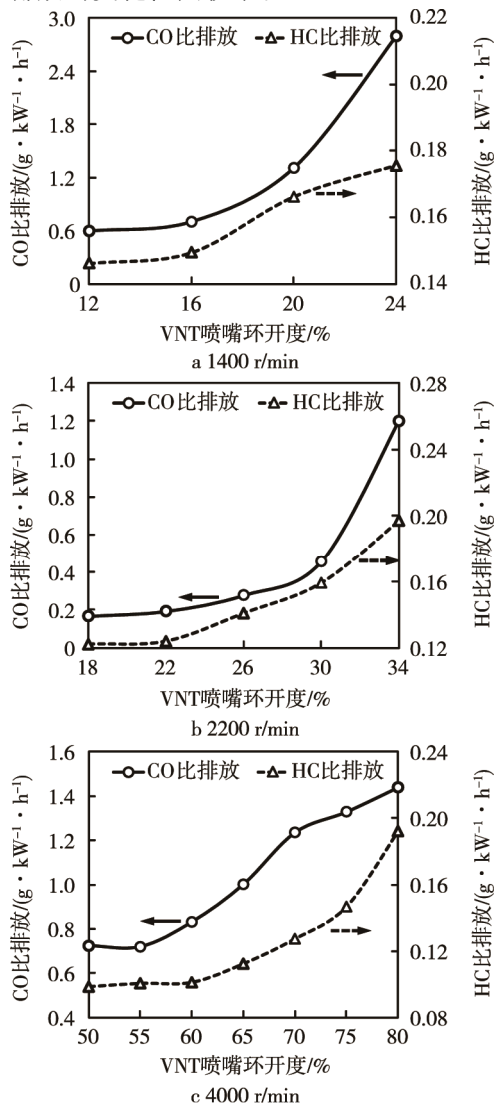


图 6 不同转速全负荷工况下 VNT 喷嘴环开度对 CO 比排放与 HC 比排放的影响

柴油机中 CO 的生成一般是由于不完全燃烧导致的, CO 的生成主要受混合气浓度的影响。VNT 喷嘴环开度增大, 进气流量降低, 燃烧室内局部过浓混合气区域增多, 混合气质量变差, 因而导致 CO 生成加大。影响柴油机 HC 排放的因素主要是混合气过稀与混合不良。随着 VNT 喷嘴环开度增大, 进气流量降低, 混合气质量逐渐恶化, 使得不完全燃烧和火焰淬

熄的机率增大。同时缸内氧含量的减少也使得 HC 后期氧化受到抑制, 所以 HC 排放呈现逐渐增大的趋势, 但是其变化范围相对较小, 这说明 VNT 喷嘴环开度对 HC 排放的影响相对较小。

3 结论

1) 在低速工况, 随着 VNT 喷嘴环开度的增大, 动力性降低, 经济性恶化。在最大扭矩与额定功率工况, 均存在一个最佳的 VNT 喷嘴环开度使得转矩最大, 同时油耗最低。

2) 随着 VNT 喷嘴环开度的增大, 进气流量、空燃比、中冷前压力、中冷前温度以及涡前压力均降低, 而涡前温度升高。在高原地区, 通过减小 VNT 喷嘴环开度可以降低涡前温度, 进而降低柴油机的热负荷, 提高其可靠性。

3) 在三个典型运行工况下, 随着 VNT 喷嘴环开度的增大, NO_x 比排放逐渐降低, 而烟度、CO 比排放以及 HC 比排放逐渐升高, VNT 对 HC 排放的影响较小。在高原地区, 合理调节 VNT 喷嘴环开度可以获得较为满意的 NO_x 比排放与烟度排放。

参考文献:

- [1] SODRÉ J R, SOARES S M C. Comparison of Engine Power Correction Factors for Varying Atmospheric Conditions[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2003, 25(3): 279-284.
- [2] 申立中, 杨永忠, 雷基林, 等. 不同海拔地区下增压中冷柴油机的性能研究[J]. 汽车工程, 2006, 27(6): 674-677.
- [3] 刘瑞林, 刘宏威, 秦德. 涡轮增压柴油机高海拔(低气压)性能试验研究[J]. 内燃机学报, 2003, 21(3): 213-216.
- [4] WANG X, GE Y, YU L. Combustion and Emission Characteristics of a Heavy-duty Diesel Engine at Idle at Various Altitudes[J]. SAE International Journal of Engines, 2013, 6(1): 1145-1151.
- [5] MASSUCHETTO M A, LODETTI J. Root Cause Analysis, and Influence of Environmental Characteristics on a Heavy Duty Diesel Engine Fault in High Altitude[R]. SAE Technical Paper, 2014, 2014-36-0379.
- [6] 林春城, 刘瑞林, 董素荣, 等. 柴油机高原可调增压技术[J]. 军事交通学院学报, 2015(9): 41-46.
- [7] 郭鹏江, 王天灵, 吴君华, 等. 可变喷嘴涡轮增压器喷嘴环叶片位置对柴油机性能的影响[J]. 内燃机工程, 2010, 31(2): 41-47.
- [8] 彭成成, 李德刚, 韩晓梅, 等. 废气涡轮增压器旁通阀开度优化研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(19): 233-237.
- [9] ZHANG H, ZHUGE W, ZHANG Y, et al. Study of the Control Strategy of the Plateau Self-adapted Turbocharg-

- ing System for Diesel Engine[R]. SAE Technical Paper, 2008, 2008-01-1636.
- [10] 张海雷. 柴油机变海拔涡轮增压技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2008.
- [11] 靳嵘, 张俊跃, 胡力峰, 等. 高原自适应柴油机涡轮增压技术研究[J]. 内燃机工程, 2011, 32(4): 27-31.
- [12] 杨殿勇, 王忠, 历宝录, 等. VNT 增压柴油机与整车速度瞬态响应的试验分析[J]. 车用发动机, 2005(5): 41-44.
- [13] 刘瑞林, 林春城, 董素荣, 等. 柴油机二级可调增压系统高海拔标定试验[J]. 内燃机学报, 2016(6): 543-548.
- [14] 董素荣, 那晓亮, 刘瑞林, 等. 不同海拔条件下 VGT 叶片开度对二级增压柴油机燃烧特性的影响[J]. 军事交通学院学报, 2017, 19(2): 39-43.
- [15] 董素荣, 刘卓学, 刘瑞林, 等. VGT 叶片开度对二级增压柴油机高海拔低速匹配特性的影响[J]. 车用发动机, 2016(6): 30-35.
- [16] 文万斌, 刘少华, 毕玉华, 等. 高原环境下 EGR 与 VNT 对柴油机性能影响的仿真研究[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2016, 45(6): 6-11.
- [17] GB18352.6—2016, 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)[S].
- [18] ZAMBONI G, CAPOBIANCO M. Experimental Study on the Effects of HP and LP EGR in an Automotive Turbocharged Diesel Engine[J]. Applied Energy, 2012, 94(2): 117-128.