

喷油策略耦合 EGR 对柴油机燃烧过程与 CDPF 再生性能的影响

陈贵升¹, 王 凯¹, 杨 杰¹, 张 韦¹, 徐劲松¹, 雒 婧²

(1. 昆明理工大学 云南省内燃机重点实验室, 昆明 650500;

2. 河北工业大学 能源与环境工程学院, 天津 300401)

Effects of Fuel Injection Strategy with EGR on Diesel Engine Combustion Process and CDPF Regeneration Performance

CHEN Guisheng¹, WANG Kai¹, YANG Jie¹, ZHANG Wei¹, XU Jinsong¹, LUO Jing²

(1. Yunnan Key Laboratory of Internal Combustion Engine, Kunming University of

Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. School of Energy and

Environment, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: Based on a D19 high pressure common-rail diesel engine with VGT (variable geometry turbocharger), an one-dimensional thermodynamic engine model and a three-dimensional CDPF (catalytic diesel particulate filter) model were built by using the GT-Power and AVL Fire. At 3 000 r/min with 50% load, the effects of fuel injection strategy with EGR (exhaust gas recirculation) on engine combustion process and CDPF regeneration performance were studied. The results show that, with the advance of the main-injection timing, the BSFC (brake specific fuel consumption) decreases first and then increases, and the exhaust temperature reduces, while the changes of the exhaust flow and oxygen concentration are not obvious. In addition, the NO in exhaust increases, the CDPF regeneration rate decreases gradually, and the residual particulate matter, pressure drop, as well as NO₂ at the CDPF outlet increase simultaneously. With the increase of the EGR rate, the BSFC and exhaust temperature increase, while the exhaust flow, oxygen concentration and NO in exhaust all reduce simultaneously. With delayed main-injection timing, the CDPF regeneration rate increases first and then decreases as the EGR rate increases, while the residual particulate matter decreases first then increases slightly. With earlier main-injection timing, the CDPF regeneration rate reduces while the residual particulate matter increases as the EGR rate increases. With later main-injection timing, increasing the injection pressure can decrease the BSFC and exhaust temperature obviously, while with earlier main-injection timing, improving the injection pressure can increase the BSFC greatly. In addition, with the increase of the injection pressure, the changes of the exhaust flow and oxygen concentration are slight, the NO in exhaust increases, the CDPF regeneration rate decreases slowly, and the residual particulate matter, pressure drop as well as NO₂ emission at the CDPF outlet increase simultaneously. In short, compared with the injection pressure, the influence of the main-injection timing on the CDPF regeneration process is greater.

收稿日期: 2016-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51665023, 61263026); 云南省教育厅科学研究基金项目(2016YJS027); 河北省自然科学基金项目(E2015202321)

作者简介: 陈贵升(1979—), 男, 副教授, 主要研究方向为内燃机燃烧与排放, E-mail: cgs_yly@163.com;

杨 杰(联系人), E-mail: 328516727@qq.com。

摘要:以匹配了可变截面几何增压系统(VGT)的 D19 高压共轨柴油机为研究机型,采用 GT-Power 和 AVL FIRE 构建了一维热力学整机模型和催化型微粒捕集器(CDPF)三维仿真模型,针对 3 000 r/min、50%负荷工况,研究了喷油策略耦合废气再循环(EGR)对燃烧过程和 CDPF 再生性能的影响。研究表明:随主喷定时提前,有效燃油消耗率(BSFC)先降后升,排气温度降低,排气流量与氧浓度变化则较小,排气中一氧化氮(NO)增加,CDPF 再生速率逐渐降低,颗粒物残余量、压降与 CDPF 出口端二氧化氮(NO₂)同时增加;随 EGR 率增大,BSFC 和排气温度升高,排气流量、排气氧浓度、排气中 NO 浓度则同时降低。在主喷定时较晚时,随 EGR 率增大,CDPF 再生速率先升后降,颗粒物残余量先降低后略升高;而在主喷定时较早时,随 EGR 率的增大,CDPF 再生速率降低,颗粒物残余量增多。在主喷定时较晚时,提高喷油压力使 BSFC 和排气温度明显降低;而在主喷定时较早时,提高喷油压力导致 BSFC 反而快速增加。此外,随喷油压力提高,排气流量与氧浓度变化较小,排气中 NO 浓度增加,CDPF 再生速率逐渐减小,颗粒物残余量、压降和 CDPF 出口端 NO₂排放同时升高。总体上,相比喷油压力,主喷定时对 CDPF 再生过程影响更大。

关键词:共轨柴油机;喷油策略;废气再循环;催化型微粒捕集器;再生性能

Key words: high pressure common rail diesel engine; injection strategy; exhaust gas recirculation; catalytic particulate filter; regeneration performance

DOI: 10.13949/j.cnki.nrjgc.2017.03.021

中图分类号: TK421+.2

文献标识码: A

0 概述

柴油机因其功率大、动力性和经济性好等优势而得到越来越广泛的应用^[1]。随着柴油车保有量日趋增多,柴油机的微粒物(PM)和氮氧化物(NO_x)排放备受关注,其中 PM 排放是汽油机车的 30~80 倍^[2]。随着节能减排要求的日益严格,柴油机排放控制技术已成为国内外的研究热点^[3]。废气再循环(EGR)技术是控制 NO_x排放最有效的措施之一,但引入 EGR 会导致 PM 排放升高,即 NO_x与 PM 之间存在此消彼长的关系^[4]。催化型微粒捕集器(CDPF)具有对 PM 的捕集和再生两大功能^[5],其作为满足欧 VI 排放法规的技术路线,对降低机外 PM 排放发挥着重要作用。

研究表明,主喷参数(喷油定时、喷油压力)对柴油机燃烧特征关键参数(燃烧持续期、燃烧重心等)有极大的影响^[6-7],进而严重影响发动机的综合性能与排气特性。与此同时,EGR 是控制 NO_x生成最有效的机内手段^[8],确定合理的 EGR 率十分关键。文献[9]在一台电控共轨柴油机上,开展了多次喷射与 EGR 耦合控制对柴油机燃烧和排放特性影响的试验研究。研究表明,不同主喷定时下将 NO_x控制在 2.0 g/(kW·h)(国 V 限值)所需要的 EGR 率随主喷定时的推迟而降低,碳烟排放则先下降后上升。文献[10]借助数值模拟技术,研究了单次喷射耦合 EGR 对柴油机低温燃烧中 NO_x与碳烟生成的影响

机理。研究表明,提高喷油压力可增加燃油对空气的卷吸,加快油气之间的混合速率,缩短燃烧持续期,NO_x增加,而碳烟生成峰值相当,但后期氧化增加使得碳烟最终排放量降低。

目前,关于喷油策略对柴油机性能和排放的影响规律已有大量文献报道,但将高增压技术、喷油策略与 EGR 耦合来综合研究柴油机整机特性对 CDPF 再生性能的影响却鲜有报道。本文基于数值模拟技术,采用 GT-Power 构建了基于可变截面几何增压系统(VGT)的 D19 高压共轨柴油机整机热力学模型,研究喷油策略(主喷定时和喷油压力)对柴油机燃烧过程、排气特性及 CDPF 再生性能的影响规律,以期在现代柴油机机内优化控制及 CDPF 再生优化控制提供一定科学理论依据与工程指导。

1 模型的构建与验证

1.1 GT-Power 一维模型构建

本文以匹配了 VGT 的 D19 高压共轨柴油机为研究机型,其主要结构参数见表 1。根据发动机实际结构参数与台架布置,采用 GT-Power 7.5 构建了基于 VGT 耦合 EGR 的柴油机整机一维热力学仿真模型。

在模型构建中,通过 Turbine Map VGT 模块构建单级可变截面涡轮增压模型,在 Rack Array 里输入不同 VGT 开度,本模型设置了 8 个开度,在 MAP

Object 里输入对应的 MAP 离散数据(由增压器公司提供),采用不同开度对应的 MAP 数据来模拟实际 VGT 开度相对应的增压器流通性能。

表 1 试验发动机主要技术参数

发动机指标	参数
燃油喷射系统	BOSCH 共轨系统
增压系统类型	霍尔赛特-VGT
发动机型式	直列 4 缸
排量/L	1.9
缸径/mm×行程/mm	80×92
燃烧室类型	缩口 ω 型
压缩比	16.5
最大转矩/(N·m)	360(2 200~2 500 r/min)
标定功率/kW	115(4 000 r/min)

仿真模型中建立了高、低压 EGR 两种循环系统:高压 EGR 将废气直接从涡轮前高压排气端引入 EGR 中冷器中,经增压冷却后,进入进气端的电控节气门后侧;低压 EGR 则将涡轮后废气直接引入到压气机前,与新鲜充量混合后再经压气机压缩,然后进入进气管^[11]。EGR 率的控制通过 EGR 阀与节气门的联合调控实现。由于研究机型采用 VGT+选择性催化还原(SCR)技术路线,出于对燃油经济性的考虑,匹配时 VGT 偏向高速设计,因此涡轮前与进气压差较小,高压 EGR 的引入能力较差。本文中模拟计算均采用低压 EGR。EGR 率定义如下:

$$R_{\text{EGR}} = M_1 / (M_1 + M_2) \times 100\% \quad (1)$$

式中, R_{EGR} 为 EGR 率; M_1 为 EGR 的质量流量,kg/h; M_2 为空气的质量流量,kg/h。

仿真模型设置中,发动机进、排气系统工作过程采用一维非定常流动数学模型求解。缸内流动过程设置主要的燃烧室尺寸及初始涡流、滚流和湍流强度。喷油器模型采用可实现和预测多次喷射策略(预喷+主喷+后喷)的 InjMultiProfileConn 喷油模块,并导入实测喷油规律数据,为燃烧模型的准确标定提供条件。缸内燃烧过程及排放物(主要针对 NO_x)生成的准确预测主要取决于燃烧模型的精度,依靠经验建立的传统韦伯燃烧模型难以准确反映和预测缸内实际放热过程与排放物生成,因此,燃烧模型采用准维燃烧模型——Hiroyasu 油滴蒸发模型(DIJet)。对于 Hiroyasu 准维多区油滴蒸发模型,本文借鉴以往研究者对热力学模型的调整经验,并通过正交试验设计法^[12],经仿真模型验证(与试验值对比)最终确定了对燃烧过程影响最强的 3 个参数及其参数值:射流破碎成液滴时间系数(breakup time

multiplier, BTM)、燃烧开始前空气卷吸系数(entrainment multiplier before combustion, EMBC)、燃烧开始后空气卷吸系数(entrainment multiplier after combustion, EMAC)。其中 BTM 是对燃烧过程影响作用最强的参数,其次为 EMBC、EMAC 及其交互作用。

此外,GT-Power 采用扩展 Zeldovich 机理来预测 NO_x 生成,并采用 Woschni-GT 传热模型和 Chen-Flynn 摩擦损失压力模型。模型构建中发动机无额外附件(如发电机等),即附件损失总功率为零。在 GT-Power 中,发动机排气损失包含排气热能、不完全燃烧产物与未燃燃油等带走的能量总损失。

1.2 发动机整机一维热力学模型的验证

在平原环境下,针对发动机各转速(1 600~4 000 r/min,其中包括欧洲稳态循环(ESC)的 A、B、C 转速)100%负荷工况及 3 000 r/min(B 转速)不同负荷工况进行了发动机台架试验,为仿真模型准确标定提供可靠验证数据。试验均在无 EGR、0 km 海拔下进行,试验过程中喷油控制参数见表 2 和表 3,其中 BTDC 表示上止点前,加负号后表示上止点后。

表 2 不同转速、100%负荷工况点喷油控制参数

转速/ (r·min ⁻¹)	预喷时刻 BTDC/(°)	预喷油量/ (mg·cycle ⁻¹)	主喷时刻 BTDC/(°)	主喷油量/ (mg·cycle ⁻¹)
1 600	19.9	1.7	5.6	62.07
2 000	25.6	1.7	7.8	65.48
2 400	30.2	1.7	8.7	65.44
3 000	39.8	1.7	13.0	61.93
3 400	45.3	1.7	15.9	57.73
3 600	49.0	1.7	17.7	56.70
4 000	50.9	0.0	21.0	56.41

表 3 3 000 r/min、不同负荷工况点喷油控制参数

负荷/ %	预喷时刻 BTDC/(°)	预喷油量/ (mg·cycle ⁻¹)	主喷定时 BTDC/(°)	主喷油量/ (mg·cycle ⁻¹)
25	28.0	1.7	5.0	15.13
50	31.0	1.4	8.6	31.85
75	34.0	1.2	12.1	48.01
100	39.8	1.7	13.0	61.93

图 1 为 1 600~4 000 r/min、100%负荷时的转矩和进气流量模拟值与试验值对比。图 2 为 3 000 r/min、50%负荷(165 N·m,对应 ESC 测试循环中 B50 工况)时,缸内压力和瞬时放热率的模拟值与试验值对比。图 3 为 3 000 r/min、不同负荷工况下,发动机转矩、有效燃油消耗率(BSFC)、 NO_x 排放及排气温度模拟值与试验值对比。

由图 1 和图 2 可知:不同转速外特性下发动机转矩和进气流量模拟值与试验值的重合度较高;发

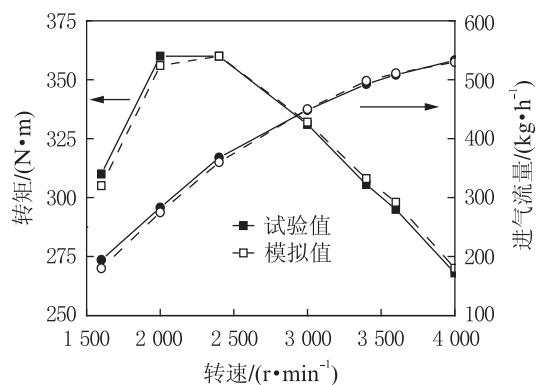


图1 转矩和进气流量验证对比

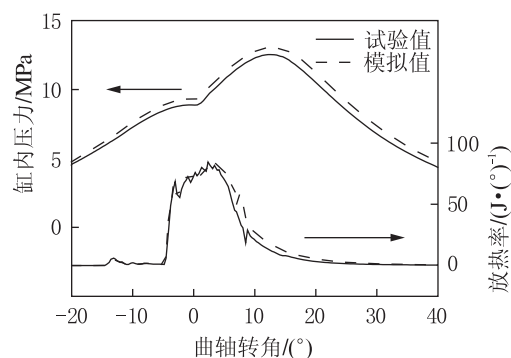
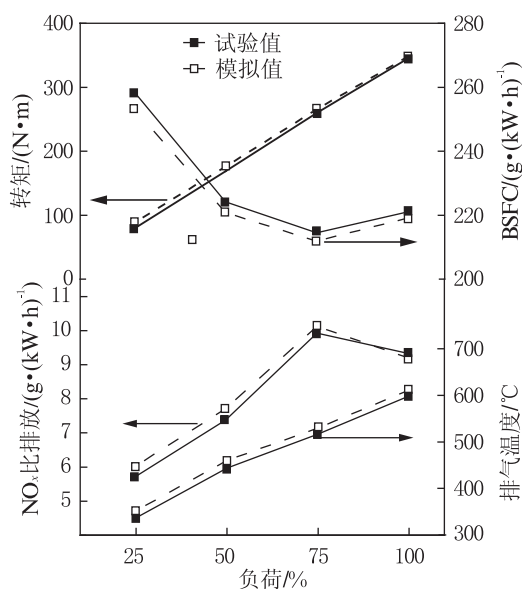


图2 缸内压力和瞬时放热率验证对比

图3 不同负荷性能、NO_x排放和排气温度验证对比

动机缸内压力、瞬时放热率模拟值与试验值吻合性较好。从图3可知,在转速3000 r/min,不同负荷下的转矩、BSFC和NO_x排放的模拟值与试验值误差较小,同时排气温度模拟值与试验值的变化趋势总体一致。综上,本文所构建的柴油机一维热力学仿真模型的计算结果较为准确,能够满足对真实发动机工作过程的预测需求,可用于模拟计算。

1.3 CDPF 三维模型的构建

根据D19高压共轨柴油机匹配的实际CDPF物性参数(表4),采用AVL FIRE构建了CDPF三维计算流体力学(CFD)仿真模型(图4)。根据模型划分空间网格,共计253884个计算网格,网格形式为精度较高的空间六面体网格,并通过定义CDPF载体、入口、出口及连接面等,使该模型尽可能准确模拟真实的CDPF实体。在正常柴油机排气温度下O₂难以有效氧化碳烟,而CDPF在过滤体表面涂覆催化剂铂(Pt),NO可在Pt作用下被氧化成NO₂,NO₂在较低温度条件下可氧化碳烟。

表4 CDPF物性参数及模型参数设置

项目	技术参数
材质	碳化硅
催化剂	Pt
载体直径/mm×长度/mm	143×152
孔密度/cm ⁻²	47
孔道壁厚/mm	0.4318
载体密度/(kg·m ⁻³)	1500
多孔壁面渗透率/m ²	3.5×10^{-13}
碳烟层渗透率/m ²	2×10^{-14}
深层碳烟渗透率/m ²	9×10^{-15}
深层碳烟厚度/mm	0.01
深层碳烟密度域值/(kg·m ⁻³)	2.50

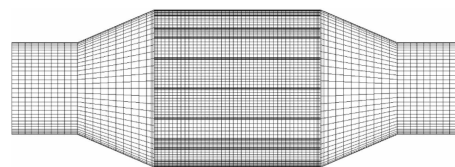


图4 CDPF三维仿真模型

本文图4中CDPF再生方式主要为连续被动再生,基于AVL FIRE中用户自定义模块,编译了文献^[13]中的碳烟详细再生机理。该详细机理涉及碳烟与O₂、NO₂、NO及NO+O₂的多步反应,并包含碳烟氧化过程中产生的中间产物。与AVL FIRE自带的碳烟再生机理对比,该机理能更加详细、能更准确地预测柴油机CDPF中碳烟的再生规律(图5)。

1.4 CDPF 三维模型的验证

本文构建的三维CDPF仿真模型的载体物理参数与文献^[14]中CDPF载体物理参数完全一致(主要参数见表4)。本文借助文献中的试验数据对该CDPF模型及其与碳烟详细再生机理耦合进行模型验证。文献中CDPF进口气体质量流量为0.236 kg/s,初始温度为400 K,初始碳载量为0 g/L,排气中碳烟含量为 500×10^{-6} 。图5为CDPF三维模型压降的模拟结果与文献试验结果的对比。

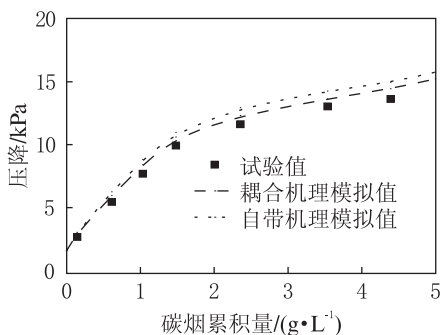


图5 CDPF压降随碳烟累积量的变化趋势

由图5可知:在碳烟加载初期,CDPF压降增速较快,这是因为碳烟主要沉积在CDPF多孔的过滤壁面上;随着时间推移,CDPF压降增速变缓,这是由于碳烟主要沉积在碳饼层上,表现出更小的压降梯度。此外,CDPF压降的模拟计算值稍高于试验值,当碳烟累积量较大时,模拟值与试验值差距增大,但二者的变化趋势总体保持一致。对比耦合机理模拟值和AVL FIRE自带再生机理模拟值:在碳烟加载初期两者重合度较高;随着碳烟累积量增多,自带机理模拟的压降值略高于采用耦合机理的模拟值,与试验值相差更大。之前的相关研究也表明^[1],耦合碳烟详细再生机理CDPF仿真模型具有良好的预测能力。综上,采用耦合碳烟详细再生机理的CDPF模型可更好地对真实CDPF再生过程进行预测。

1.5 计算工况与方案

本文中以3 000 r/min、50%负荷(B50)为计算工况,通过GT-Power软件,采用定转矩模式,转矩输出保持在165 N·m。考虑到采用EGR,研究中取消了预喷射,基于构建的一维热力学整机模型和CDPF三维模型,研究单次喷射下喷油策略耦合EGR对匹配了VGT的D19柴油机整机燃烧过程与CDPF再生性能的影响规律。以GT-Power计算得到的整机排气特性参数作为CDPF的计算边界条件,CDPF初始加载颗粒物质量浓度为6 g/L,其他参数设置见表4。

2 计算结果与分析

CDPF的再生与排气特性(组分、温度、流量等)密切相关,而发动机的排气特性主要取决于进气边界条件与燃烧过程的控制策略。主喷策略(主喷定时、喷油压力)耦合EGR对缸内燃烧过程和排气特性有着极大的影响,因此准确预测主喷定时和喷油压力耦合EGR对发动机燃烧过程与排气特性的影响规律,是预测CDPF再生特性的重要前提。

2.1 主喷定时耦合EGR对燃烧过程和CDPF的影响

2.1.1 主喷定时耦合EGR对发动机燃烧过程的影响

图6和图7分别为3 000 r/min、50%负荷工况(B50,165 N·m)在原机喷油压力(130 MPa)下,主喷定时(BTDC 0°~BTDC 24°)耦合EGR率(0%~30%)对发动机进气流量、空燃比、有效燃油消耗率(BSFC)、NO_x排放和燃烧特性的影响规律,表5为图7中所对应的各个工况。

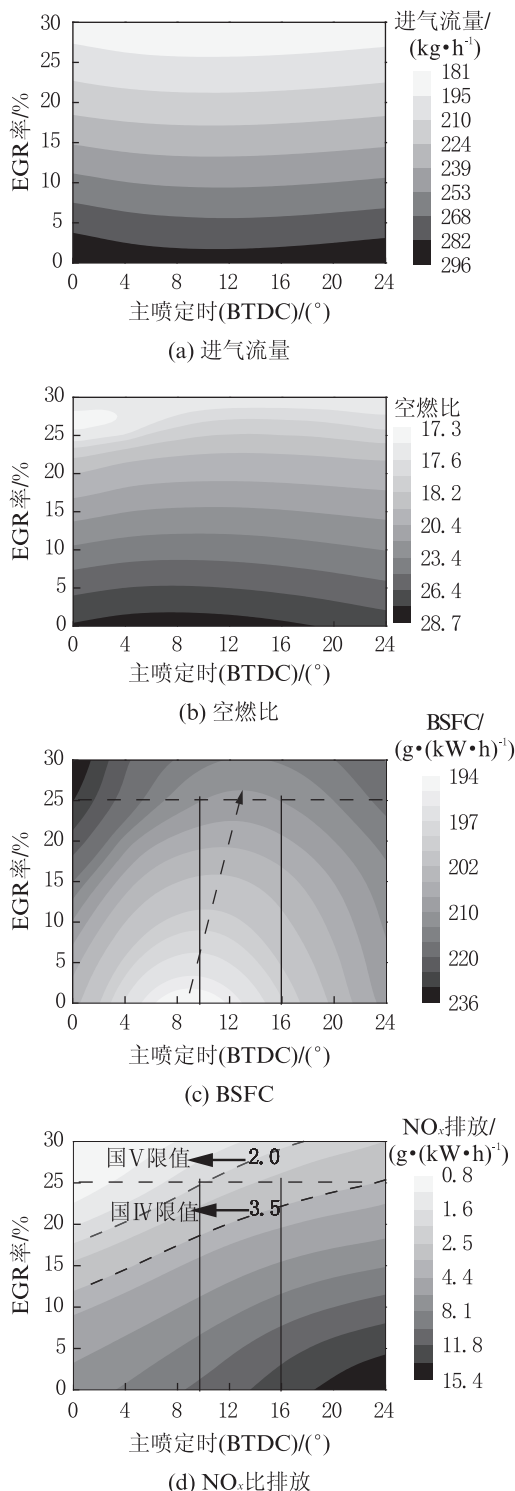


图6 主喷定时耦合EGR对性能与排放的影响

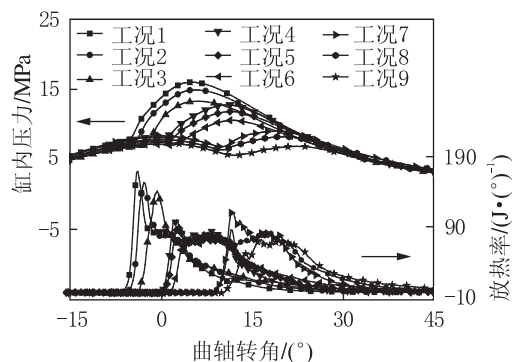


图 7 主喷定时耦合 EGR 对缸压和放热率的影响

表 5 图 7 所对应的工况

工况	主喷定时(BTDC)/(°)	EGR 率/%
1	16	0
2		15
3		30
4	8	0
5		15
6		30
7	0	0
8		15
9		30

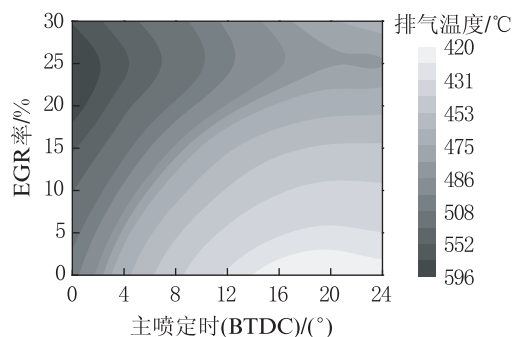
由图 6(a)和图 6(b)可知,EGR 率的变化对进气流量和空燃比的影响比主喷定时的影响更为显著,在等转矩输出模式下二者都随 EGR 率的增大而快速降低。由图 6(c)可知,相同 EGR 率下,随主喷定时的提前,BSFC 呈现先降低后升高的趋势,即都有一最优主喷时刻,且最优主喷定时随 EGR 率的增加而逐渐前移(见图 6(c)中虚线箭头)。相同主喷时刻下,BSFC 随 EGR 率的增大而不断升高,且在主喷定时较晚时,EGR 率对 BSFC 的影响增大。这是因为主喷定时较晚时,燃油喷入时缸内压力和温度本身较低,而 EGR 会进一步降低缸内温度和氧浓度,燃烧放热率降低更明显(图 7),且燃烧重心更偏离上止点向后移。由图 6(d)可知,相同 EGR 率下, NO_x 排放随主喷定时的提前而不断增大。当 EGR 率较小时,主喷定时提前导致预混燃烧比例增加且燃烧重心更靠近上止点(图 7),其对 NO_x 排放的影响更为显著。当 EGR 率较大时,主喷定时对 NO_x 排放的影响明显减弱,EGR 率成为控制 NO_x 排放的主导因素。从图 6(c)虚线可知,EGR 率为 25%时,主喷定时在整个变化范围内, NO_x 原始比排放都低于 $3.5 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ (国Ⅳ限值),而部分区域低于 $2.0 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ (国Ⅴ限值)。

综合考虑到柴油机燃油经济性和 NO_x 排放控

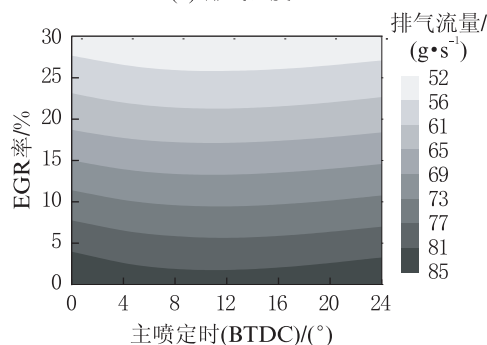
制,该计算工况将主喷定时控制在 BTDC $10^\circ \sim 16^\circ$ 之间,EGR 率控制在 25%时较为合理。

2.1.2 主喷定时耦合 EGR 对发动机排气特性的影响

图 8 是主喷定时耦合 EGR 对发动机排气特性(排气温度、排气流量、排气氧质量浓度、排气中 NO 质量浓度)的影响规律。



(a) 排气温度



(b) 排气流量

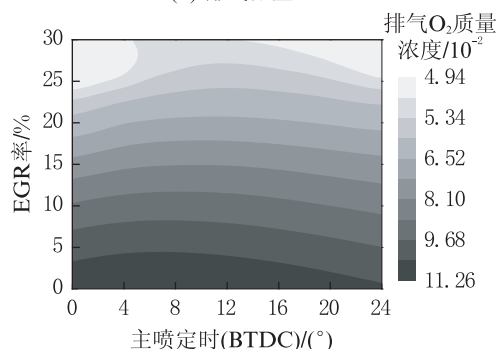
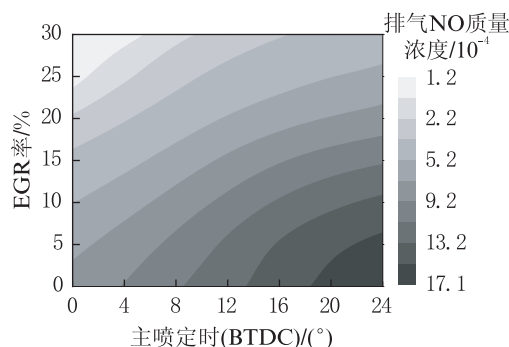
(c) 排气 O_2 质量浓度(d) 排气 NO 质量浓度

图 8 主喷定时耦合 EGR 对排气特性的影响

由图 8(a)可知,相同 EGR 率下,随主喷定时提前,排气温度呈逐渐降低的趋势。这是由于主喷定时提前,燃烧重心靠近上止点(图 7),有效膨胀比升高使得排气温度降低。相同主喷定时下,排气温度随 EGR 率的升高逐渐上升。由图 8(b)和图 8(c)可知,相比主喷定时,EGR 率对排气流量和排气氧浓度的影响较大,且二者随 EGR 率的增大呈现不断降低的趋势。由图 8(d)可知,排气中 NO 质量浓度与图 6(d)中 NO_x 比排放的变化趋势保持一致。

2.1.3 主喷定时耦合 EGR 对 CDPF 再生特性的影响

图 9 为主喷定时耦合 EGR 对 CDPF 再生过程的影响,工况见表 5。

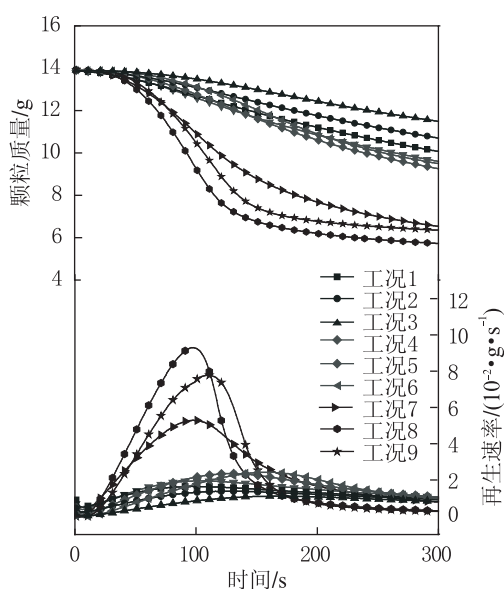


图 9 主喷定时耦合 EGR 对 CDPF 再生过程的影响

由图 9 可知,在主喷定时较晚时,随 EGR 率的增大,CDPF 再生速率先增大后减小,颗粒物残余量则呈先降低后升高趋势;而在主喷定时较为靠前时,随 EGR 率的增大,因 CDPF 再生速率减小,颗粒物残余量不断增多。在相同 EGR 率下,随主喷定时的推迟,因发动机排气温度提高,CDPF 再生速率逐渐增大,颗粒物残余量快速减少。

图 10 为主喷定时耦合 EGR 对 CDPF 再生结束(300 s)时的性能及其出口端 NO_2 排放的影响规律。

CDPF 残余颗粒主要受排气温度、排气氧浓度和排气 NO 质量浓度等综合影响。对 CDPF 再生性能的研究表明^[1]:当排气温度低于 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,CDPF 中 NO_2 氧化引起的颗粒减少占主导;而当温度高于 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, O_2 氧化引起的颗粒质量减少占主导。

由图 10(a)可知,在相同 EGR 率下,随着主喷

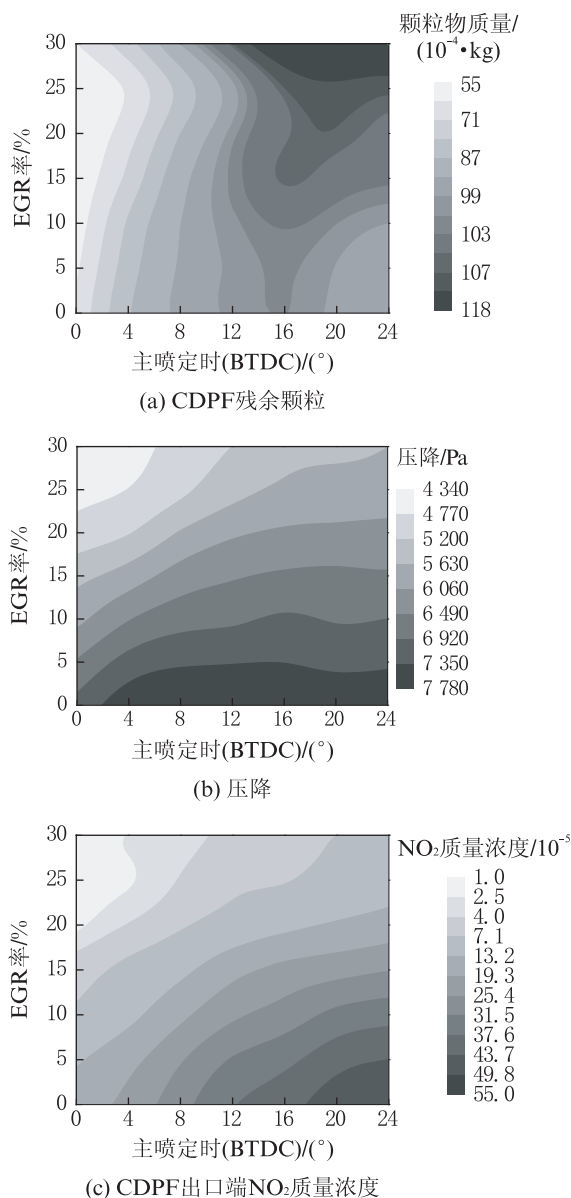


图 10 主喷定时耦合 EGR 对 CDPF 再生和 NO_2 排放的影响

定时提前,CDPF 残余颗粒量总体呈现逐渐升高的趋势,在主喷定时较为靠后时,随 EGR 率增大,残余颗粒总体呈现先降低后略有升高的变化趋势(见图 9 和图 10);在主喷定时较为提前时,随 EGR 率增大,残余颗粒快速增多,即主喷定时靠后时 CDPF 残余颗粒物总体较少,且采用 EGR 对 CDPF 再生的影响较小。当主喷定时提前时,EGR 率增大虽然使排气温度有所升高,但在此温度下 NO_2 与碳烟的反应占主导,此时排气中的 NO 质量浓度随 EGR 率增加而降低且总含量减低,催化剂氧化生成的 NO_2 较少,不利于 CDPF 再生,残余颗粒物有所增加。

CDPF 压降的变化受排气流量、排气温度及颗

颗粒物氧化反应程度三个因素的综合影响。通常排气流量与压降成正比,与颗粒物反应程度成反比。而排气温度对压降的影响有两方面:一是排气温度的升高有利于颗粒物氧化再生,使得压降降低;二是温度升高使得气体分子的布朗运动加强,使得压降升高。在排气温度低于 400 °C 时,颗粒物氧化速率较低,温度升高带来的压降升高占主导,压降呈现升高趋势;当排气温度高于 400 °C 时,颗粒物氧化速率较高,使压降呈现下降趋势。

由图 10(b)可知:在 EGR 率较低时,随主喷定时提前,CDPF 压降先略有升高后趋于平稳;随 EGR 率进一步增加,CDPF 压降随主喷定时的提高而一直升高。这是因为:随主喷定时提前,排气流量变化较小,但排气温度降低,再生速率下降使压降先呈现升高趋势;但随主喷定时提前时,一方面颗粒物有所增加使得压降升高,另一方面排气温度有所降低,CDPF 产生的热应力减小,引起压降降低,两者相互影响使压降变化趋于平缓。在 EGR 率较高时,提前主喷定时会导致发动机排气温度快速降低,CDPF 残余颗粒物大幅增加导致压降不断升高。在同一主喷时刻下,随 EGR 率的升高,排气流量快速减小,因此 CDPF 压降不断降低。

柴油机 NO_x 排放主要是以 NO 和 NO_2 为主,其中 NO 占总 NO_x 排放的 90% 以上^[15]。因此,被动再生所需的 NO_2 小部分来自于发动机本身燃烧所产生的 NO_x ,绝大部分是 NO 经过 CDPF 时被壁面上所涂覆的催化剂催化而来,二者共同参与 CDPF 中 PM 的被动再生。即 CDPF 出口端 NO_2 浓度一方面取决于 NO 的原始排放量(生成),一方面取决于颗粒物的催化再生(消耗)。由图 10(c)可知,不同主喷定时下 EGR 率对 CDPF 出口端 NO_2 排放的影响与排气中 NO 质量浓度的变化呈现出较好的一致性(图 8),这表明 CDPF 促进 NO 转化为 NO_2 的作用大于 CDPF 中 NO_2 氧化颗粒物的消耗过程。

2.2 喷油压力耦合 EGR 对燃烧过程和 CDPF 的影响

研究表明,柴油机缸内燃烧过程主要取决于燃油与空气的混合程度,而喷油压力直接影响混合气形成历程。提高喷油压力不仅能使液体油束的湍动能增加,提高燃油的雾化质量,而且有利于混合气的形成。本节针对模拟工况点(B50),在 EGR 率为 25% 条件下,在不同主喷定时下($0^\circ \sim 24^\circ \text{BTDC}$)研究喷油压力(100~170 MPa)对柴油机工作过程及 CDPF 再生性能的影响规律。

2.2.1 喷油压力耦合 EGR 对发动机燃烧过程的影响

图 11 和图 12 是 3 000 r/min、50% 负荷工况下, EGR 率为 25% 时,不同主喷定时下喷油压力(100~170 MPa)对发动机进气流量、空燃比、BSFC、 NO_x 排放和燃烧特性的影响,表 6 为图 12 中所对应的各个工况。

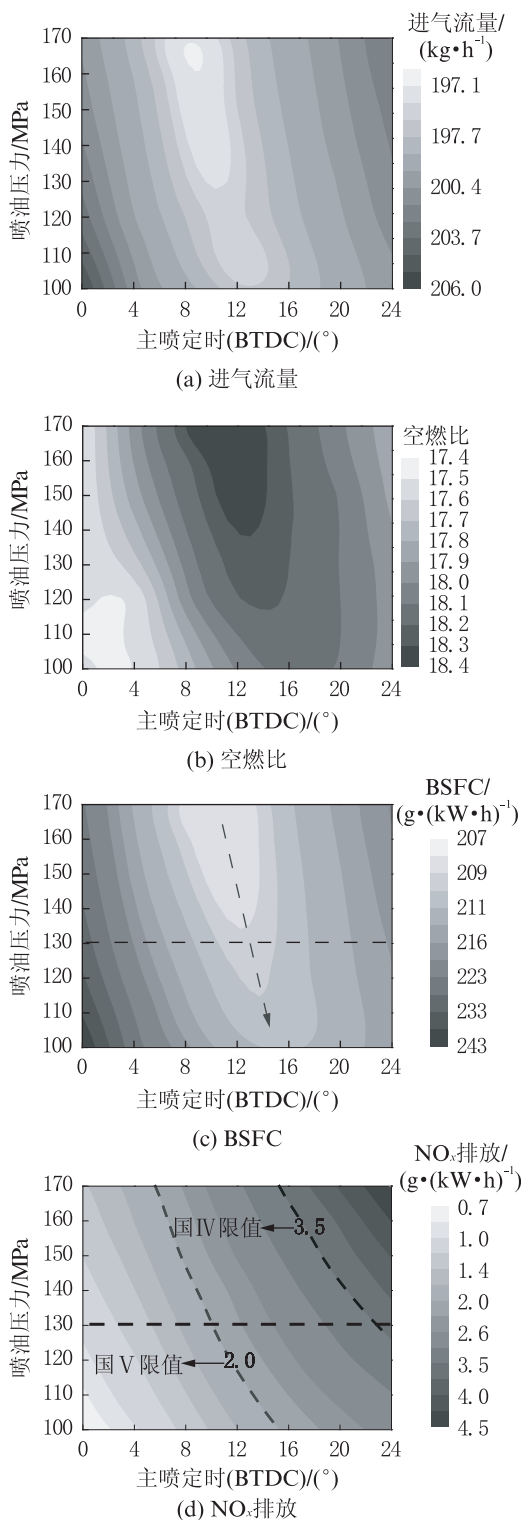


图 11 不同主喷定时下喷油压力对燃烧性能及排放的影响

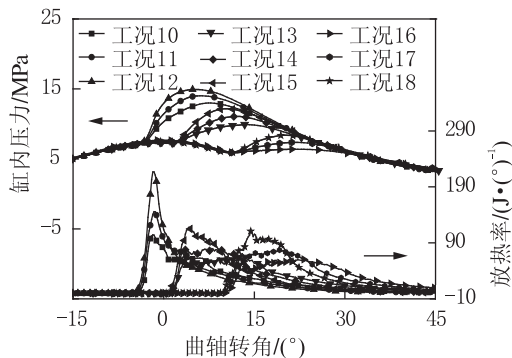


图 12 不同主喷定时下喷油压力对缸压和放热率的影响

表 6 图 12 所对应的工况

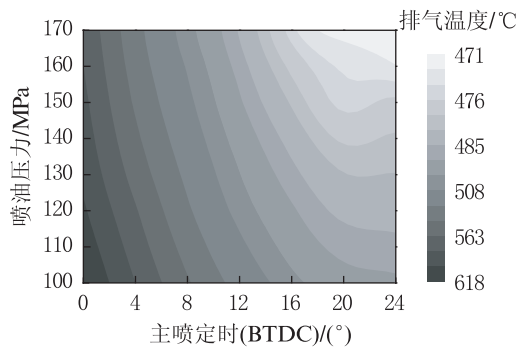
工况	主喷定时(BTDC)/(°)	喷油压力/MPa
10	16	100
11		130
12		170
13	8	100
14		130
15		170
16	0	100
17		130
18		170

由图 11(a)~图 11(c)可知,在主喷定时较晚时,提高喷射压力导致进气流量稍有减少,但因喷射压力增大提高了油气混合速率,BSFC 明显降低,因此空燃比反而增大。在主喷定时提前时,随喷油压力的提高,进气流量却呈现一定程度的增加,但因 BSFC 快速增加,从而使空燃比反而稍有降低。总体而言,喷油压力对进气特性的影响较小。

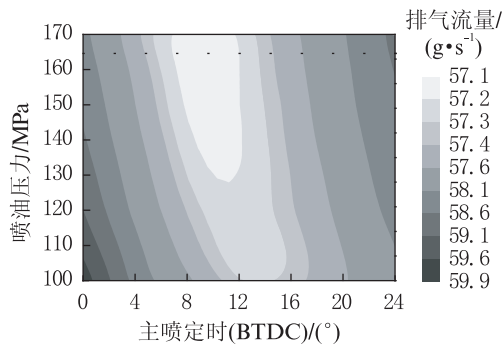
由图 11(c)可知,在一定主喷定时范围内(BTDC 0°~BTDC 16°),提高喷油压力改善了油气混合,使燃烧速率增加(图 12),因而 BSFC 呈减小的趋势,这在主喷定时较晚时更显著。但当主喷定时进一步提前(超过 BTDC 16°)时,由于燃烧相位前移,压缩负功增加导致喷油压力提高反而造成 BSFC 升高。此外,相同喷油压力下,随主喷定时的提前,BSFC 呈先降低后升高的趋势,即存在一最优主喷时刻,且最优主喷定时随喷油压力的降低而逐渐向前移(图 11(c)中虚线箭头)。由图 11(d)可知,提高喷油压力会导致 NO_x 排放增加,这在主喷定时较早时更明显。综上,主喷定时较晚时适宜提高喷油压力,主喷定时较早时适宜适当降低喷油压力。

2.2.2 喷油压力耦合 EGR 对发动机排气特性的影响

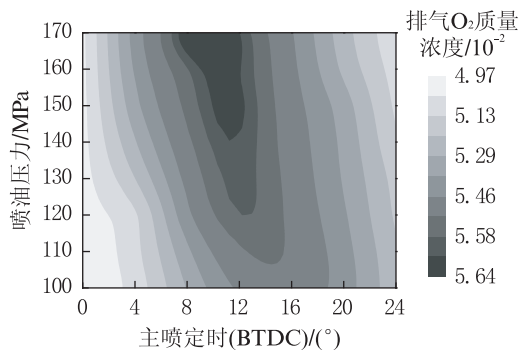
图 13 是 3 000 r/min、50% 负荷工况下, EGR 率为 25% 时,不同主喷定时下喷油压力对排气特性的影响。



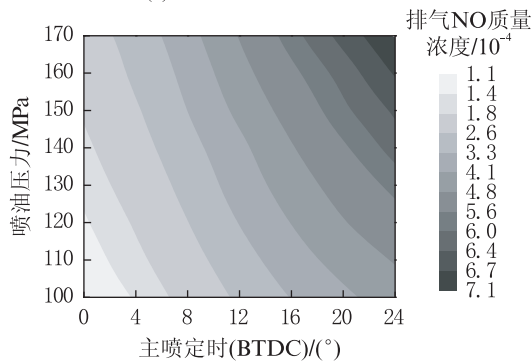
(a) 排气温度



(b) 排气流量



(c) 排气 O₂ 质量浓度



(d) 排气 NO 质量浓度

图 13 不同主喷定时下喷油压力对排气特性的影响

由图 13(a)可知:随着主喷定时提前,排气温度

逐渐降低;随着喷油压力增大,排气温度逐渐下降,这在主喷定时较晚时更加明显。这是因为提高喷油压力有利于改善缸内油气混合过程,整个燃烧持续期缩短,使排气温度降低。由图 13(b)和图 13(c)可知,排气流量和排气氧浓度随喷油压力和主喷定时的变化规律与图 11 中进气流量和空燃比的变化趋势总体一致。由图 13(d)可知,排气中 NO 质量浓度与 NO_x 比排放的趋势保持一致,即:随着主喷定时的提前和喷油压力的增大,排气中 NO 质量浓度均逐渐升高。

2.2.3 喷油压力对 CDPF 再生特性的影响

图 14 是 3 000 r/min、50% 负荷工况下, EGR 率为 25% 时,不同主喷定时下喷油压力对 CDPF 再生过程的影响规律,工况见表 6。

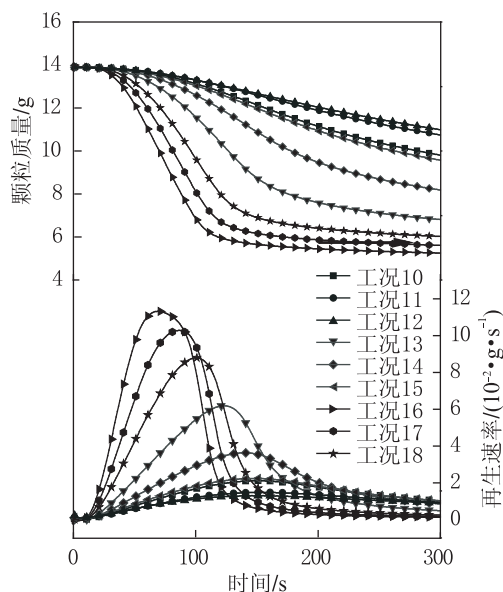


图 14 不同主喷定时下喷油压力对 CDPF 再生过程的影响

由图 14 可知:随着喷油压力增大,CDPF 再生速率逐渐减小,颗粒物残余量逐渐升高;但随主喷定时提前时,喷油压力对 CDPF 再生特性的影响作用减弱;此外,相比喷油压力,主喷定时对 CDPF 再生过程的影响更大。

图 15 是 3 000 r/min、50% 负荷工况下, EGR 率为 25% 时,不同主喷定时下喷油压力对 CDPF 再生结束(300 s)时性能及其出口端 NO_2 排放的影响。

由 15 图(a)可知,同一主喷定时下,随着喷油压力的提高,CDPF 残余颗粒逐渐升高。这是因为提高喷油压力使排气温度降低(图 13),不利于颗粒物与 O_2 反应,因此 CDPF 残余颗粒逐渐增多。由图 15(b)可知,随着喷油压力增大,CDPF 压降总体呈

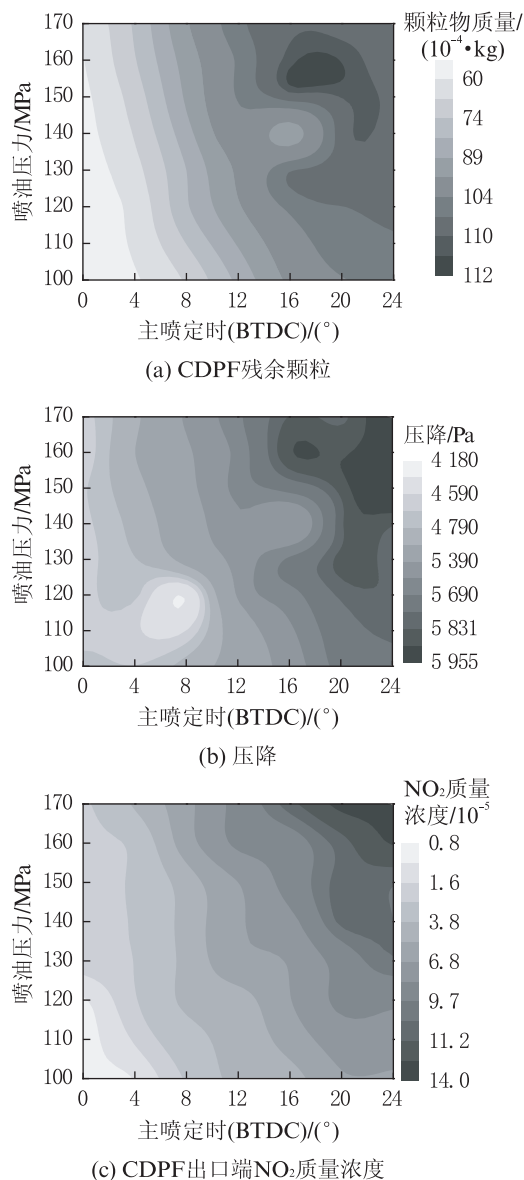


图 15 不同主喷定时下喷油压力对 CDPF 再生和 NO_2 影响

现增大趋势。从图 13(a)和图 13(b)及图 14 可知,提高喷油压力后,排气温度降低导致 CDPF 再生速率下降,因此 CDPF 压降升高。由图 15(c)可知,随喷油压力的提高,CDPF 出口端 NO_2 质量浓度逐渐升高,这在主喷定时较早时更为明显,其与排气中 NO 质量浓度呈现较好的一致性(图 13)。这主要因为 CDPF 内的 NO_2 主要是在催化剂的作用下由 NO 氧化而生成,提高喷油压力一方面使 NO 原始排放升高, NO 被氧化生成 NO_2 的总量增加,另一方面因为 CDPF 再生速率降低使得 NO_2 消耗量减少。

3 结论

(1) 随主喷定时提前,BSFC 先降后升,且最优主喷定时随 EGR 率增加而逐渐前移,同时排气温度降低,排气流量与氧浓度变化则较小, NO_x 比排放和

排气中 NO 同时增加。随 EGR 率增大, BSFC 和排气温度升高, 而排气流量、排气氧浓度和排气中 NO 则同时减小, 且在主喷定时较晚时, EGR 对 BSFC 和排气温度的影响作用逐渐增大。

(2) 随主喷定时推迟, CDPF 再生速率逐渐增大, 颗粒物残余量、压降与 CDPF 出口端 NO₂ 同时减少; 在主喷定时较晚时, 随 EGR 率增大, CDPF 再生速率呈先升后降, 颗粒物残余量呈先降后升; 而在主喷定时较早时, 随 EGR 率增大, CDPF 再生速率一直减小, 颗粒物残余量增多。压降与 CDPF 出口端 NO₂ 排放都随 EGR 率的增加而降低。

(3) 在主喷定时较晚时, 提高喷油压力使 BSFC 和排气温度明显降低; 而在主喷定时较早时, 提高喷油压力导致 BSFC 反而快速增加。此外, 随喷油压力的降低, 最优 BSFC 对应的主喷定时逐渐前移, 排气流量与氧浓度变化较小, 排气中 NO 浓度降低。

(4) 随喷油压力提高, CDPF 再生速率逐渐减小, 颗粒物残余量、压降和 CDPF 出口端 NO₂ 排放同时升高。但随主喷定时提前, 喷油压力对 CDPF 再生过程的影响作用减弱。相比喷油压力, 主喷定时对 CDPF 再生过程的影响更大。

参考文献:

- [1] 沈颖刚, 杨杰, 陈贵升, 等. 进气充量特征参数对 CPF 再生过程的影响[J]. 车用发动机, 2016, (2): 58-65.
SHEN Y G, YANG J, CHEN G S, et al. Effects of intake charge parameter on CPF regeneration[J]. Vehicle Engine, 2016, (2): 58-65.
- [2] 马荣, 何超, 赵龙庆, 等. 柴油机微粒捕集器被动再生平衡研究[J]. 车用发动机, 2014, (5): 75-82.
MA R, HE C, ZHAO L Q, et al. Balance of DPF passive regeneration[J]. Vehicle Engine, 2014, (5): 75-82.
- [3] PARK C, KOOK S, BAE C. Effects of multiple injections in a HSDI diesel engine equipped with common rail injection system [C]//SAE Paper. Warrendale, PA, USA, 2004, 2004-01-0127.
- [4] 陈贵升. 基于 EGR 技术的低排放重型柴油机燃烧技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [5] 李志军, 杨士超, 焦鹏昊, 等. 催化型微粒捕集器主被动再生性能数值模拟[J]. 农业机械学报, 2014, 45(05): 37-43.
LI Z J, YANG S C, JIAO P H, et al. Computational investigation in active and passive regeneration characteristics of catalytic particulate filter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 37-43.
- [6] 陈贵升, 狄磊, 雷基林, 等. EGR 和主喷定时对重型柴油机燃烧特性与排放的影响[J]. 内燃机学报, 2015, 33(3): 210-216.
CHEN G S, DI L, LEI J L, et al. Effects of EGR and main-injection timing on combustion characteristics and emissions of a HD diesel engine[J]. Transactions of CSICE, 2015, 33(3): 210-216.
- [7] 顾文钰, 姜淑君, 邹斌扬, 等. 供油策略与 EGR 联合控制对恒转速突加载响应性能和排放的影响[J]. 内燃机学报, 2014, 32(5): 385-392.
GU W Y, JIANG S J, WU B Y, et al. Combined effect of EGR and fuel injection on engine torque response and emissions under engine load transient operation at constant engine speed [J]. Transactions of CSICE, 2014, 32(5): 385-392.
- [8] 田径, 刘忠长, 韩永强, 等. 基于 EGR 耦合多段喷射技术实现超低排放[J]. 内燃机学报, 2010, 28(3): 228-234.
TIAN J, LIU Z Z, HAN Y Q, et al. Ultra-low emissions based on multi-injection coupling with EGR strategy [J]. Transactions of CSICE, 2010, 28(3): 228-234.
- [9] 王浒, 尧命发, 郑尊清, 等. 多次喷射与 EGR 耦合控制对柴油机性能和排放影响的试验研究[J]. 内燃机学报, 2010, 28(1): 26-32.
WANG H, YAO M F, ZHENG Z Q, et al. Experimental study of the influence of multi-injection coupled with EGR on diesel performance and emission[J]. Transactions of CSICE, 2010, 28(1): 26-32.
- [10] 李研芳. 柴油机喷油与 EGR 耦合控制机理数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [11] 谭丕强, 刘庆鹏, 徐宁. 轻型柴油机 EGR 与喷油正时的协同性能研究[J]. 内燃机工程, 2014, 35(6): 7-13.
TAN P Q, LIU Q P, XU N. Study on synergic performance of EGR and injection timing of a light duty diesel engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2014, 35(6): 7-13.
- [12] 王完成, 郭猛超, 胡俊彪, 等. 高原环境柴油机准维燃烧模型参数优化研究[J]. 汽车工程, 2013, 35(2): 111-115.
WANG X C, GUO M C, HU J B, et al. A study on the parameter optimization of quasi-dimensional combustion model for diesel engine in plateau environment [J]. Automotive Engineering, 2013, 35(2): 111-115.
- [13] PISCAGLIA F, FERRARI G. A novel 1D approach for the simulation of unsteady reacting flows in diesel exhaust after-treatment systems[J]. Energy, 2009, 34(12): 2051-2062.
- [14] JOHANN C, SUSANNE K. Advanced simulation technologies for diesel particulate filters, a fundamental study on asymmetric channel geometries [C]//SAE Paper. Detroit, MI, USA, 2007, 2007-01-1137.
- [15] 冯谦, 楼狄明, 计维斌, 等. DOC/DOC+CDPF 对重型柴油机气态排放物的影响研究[J]. 内燃机工程, 2014, 35(4): 1-6.
FENG Q, LOU D M, JI W B, et al. Effects of DOC and DOC+CDPF on gaseous emissions from a heavy-duty diesel engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2014, 35(4): 1-6.