

喷油压力和提前角对柴油机排放影响的试验研究

李龙¹, 庞振龙², 张宁¹, 穆振仟², 孙镇¹

1. 淄柴机器有限公司, 山东 淄博 255000; 2. 淄柴动力有限公司, 山东 淄博 255000

摘要:为降低船舶柴油机排放,以某船用四冲程中速柴油机为研究对象,通过改变发动机的喷油压力和供油提前角,进行多组对比试验,研究喷油压力和供油提前角对CO、NO_x和PM排放的影响。试验结果表明:随着喷油压力的增加,尾气中CO和PM的质量分数降低,NO_x的质量分数小幅增加;随着供油提前角的减小,尾气中NO_x的质量分数显著降低,CO和PM的质量分数整体上升。

关键词:排放性能;喷油压力;供油提前角;排放物

中图分类号:TK421.5

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2022)06-0014-05

引用格式:李龙,庞振龙,张宁,等. 喷油压力和提前角对柴油机排放影响的试验研究[J]. 内燃机与动力装置, 2022,39(6):14-18.

LI Long, PANG Zhenlong, ZHANG Ning, et al. Experimental study on effect of fuel injection pressure and advance angle on diesel engine emission[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2022,39(6):14-18.

0 引言

环境保护日益受到全社会的重视,柴油机的发展方向正在从“提升发动机的动力性和经济性”转向“提供绿色环保的清洁动力”^[1-3]。文献[4]提高了对船用柴油机污染物排放限值要求。柴油发动机的主要排放物为CO、NO_x、CH和颗粒物(particulate matter, PM)^[5],为了降低柴油机的污染物排放,相关学者进行了大量的研究:方平等^[6]分析了船舶柴油机排放的烟气污染物种类及其来源,结合发动机台架试验研究了主要烟气污染物的排放规律,指出进行尾气治理是实现船舶尾气达标排放的有效措施;王辉等^[7]将柴油-甲醇组合燃烧技术应用到船舶柴油机上,进行台架试验和实船验证,结果表明,船舶柴油机掺烧甲醇后的碳烟和NO_x排放均大幅降低,弱化了碳烟排放和NO_x排放此消彼长的难题;周金喜^[8]基于台架试验从燃油性质、柴油机类型、PM粒径分布、化学组分等方面深入系统地研究排放颗粒物的理化性质,通过理论计算得出船舶废气洗涤器对颗粒物的去除效果。但是关于喷油压力和供油提前角对发动机排放影响的研究较少。

本文中以某船用四冲程中速柴油机为研究对象,采用控制变量法,改变发动机的喷油压力和供油提前角,进行多组对比试验,研究喷油压力和供油提前角对船用柴油机排放的影响,为实现船用柴油机达标排放打下良好基础。

1 试验设备和方案

1.1 试验目的

进行船舶柴油机台架试验,利用排放测试设备对柴油机排气中的CO、NO_x和PM进行测量,研究喷

收稿日期:2022-09-02

基金项目:山东省企业技术创新项目(202150300026)

第一作者简介:李龙(1989—),男,山东淄博人,工程师,主要研究方向为船用柴油机性能优化, E-mail: lilongbubai@126.com。

油压力、供油提前角对排气污染物的影响规律。

1.2 试验主要装置

试验主要设备有船用四冲程中速柴油机、测功器、柴油机气态污染物和颗粒物排放测试仪器;试验使用的滤纸为碳氟化合物涂层的玻璃纤维滤纸(DOP),滤纸直径为70 mm,捕集率为95%。柴油机主要技术参数如表1所示,气体成分分析仪技术参数如表2所示。PM质量计量室的温度维持在-40~150℃,温度偏差不大于0.1℃,相对湿度保持在20%~98%,湿度偏差不大于0.1%,露点温度为9.5℃。PM分析天平型号为MSX125P-1CE-DI,测量范围为0.02~60.00 g,分辨率和精度为10 μg。

表1 发动机主要技术参数

缸径/mm	行程/mm	压缩比	转速/(r·min ⁻¹)	标定功率/kW	进气型式
225	290	14.5	1000	1213	增压中冷
燃烧室型式	涡流比	高压油泵	喷油器喷孔孔数	喷油器喷孔直径/mm	喷油器喷孔锥角/(°)
浅盆型	1.0	机械式单体泵	10	0.35	150

表2 气体成分分析仪技术参数

分析仪	测量范围	精度	分析仪	测量范围	精度
AIA-240 CO 分析仪	0~10 ⁻³	10 ⁻⁶	IMA-241 O ₂ 分析仪	0~25%	0.01%
AIA-240 CO ₂ 分析仪	0~16%	0.01%	FCA-246 HC 分析仪	0~5×10 ⁻³	10 ⁻⁶
FCA-246 NO _x 分析仪	0~5×10 ⁻³	10 ⁻⁶			

注:气体分析仪的测量范围及精度均为质量分数。

1.3 试验方法

喷油压力测点设置在高压油管与喷油器之间的高压接管上,通过调整燃油凸轮相位调整供油提前角;按照文献[4]中规定的“按推进特性运行的船用主机”的试验循环以及污染物排放计算方法进行试验和计算。对于按照推进特性运行的船用主机,75%负荷工况点的加权系数为0.5,所占比重最大,因此选择对75%负荷工况点(转速为910 r/min、功率为910 kW)进行污染物排放研究。

研究喷油压力对各污染物排放的影响时,将供油提前角(本文中供油提前角均指上止点前曲轴转角,简记为曲轴转角)对应的曲轴转角设置为9°,调整喷油压力进行试验;研究供油提前角对各污染物排放的影响时,保持喷油压力为102 MPa,通过调整燃油凸轮相位调节供油提前角。测量75%负荷工况点各污染物的排放,计算此工况下的污染物比排放,之后换算为各污染物在总排放中的质量分数,要求各步骤相对误差在±2%以内。污染物比排放计算公式为

$$q_{m,e} = q_{m,a} + q_{m,f}, \quad (1)$$

$$q_{m,m} = \mu c q_{m,e}, \quad (2)$$

$$g = q_{m,m} / P, \quad (3)$$

式中: $q_{m,e}$ 为湿基排气质量流量, kg/h; $q_{m,a}$ 为湿基进气质量流量, kg/h; $q_{m,f}$ 为燃油质量流量, kg/h; $q_{m,m}$ 为排放物质量流量, kg/h; μ 为质量流量计算用湿基因数; c 为某组分的体积分数, %; g 为每种气体的比排放, g/(kW·h); P 为试验台测量的净功率, kW。

2 试验结果和分析

2.1 喷油压力和供油提前角对 CO 排放的影响

目前船用柴油机均采用增压中冷技术,过量空气系数较大,氧气较充足,在发动机正常工况范围内,CO生成量较低^[9]。但在柴油机负荷过大时,燃料供给大,与空气混合不均匀,燃烧室局部缺氧区域较多,

产生大量 CO;柴油机缸内喷射油束中心的空气较少,此处的过量空气系数偏低,CO 生成率较高。应提高燃油雾化质量,使燃料与空气混合更均匀,可减少油束中心处 CO 生成。

试验中采用 TPS 系列涡轮增压器,压比最高为 4.5,此次 75% 负荷工况点的压比约为 3.3,高压比增压器的使用造成缸内压缩压力的提高,影响油束的贯穿力,不利于燃油与空气混合。为改善高压比的不利影响,试验中提高了泵端压力,额定工况泵端压力可达 120 MPa,可以提供给油束更高的贯穿力和雾化效果,有助于改善缸内燃烧和减少排放污染物的生成。

2.1.1 喷油压力的影响

不同喷油压力下 CO 排放曲线如图 1 所示。由图 1 可知: 1) 喷油压力为 92~103 MPa 时,随喷油压力增加,尾气中 CO 质量分数由 30% 下降至 21% 左右; 2) 喷油压力大于 103 MPa 时,尾气中 CO 质量分数略微上升,大于 107 MPa 时,CO 质量分数基本不变。CO 质量分数下降的原因为:提高喷油压力可有效提高燃油的雾化质量,使得油气混合更加均匀,改善燃烧,显著减少 CO 的排放;此外,随着燃烧质量的提高,缸内最高燃烧温度和压力均相应增加, O₂ 充足,部分 CO 转化为 CO₂,进一步减少了 CO 的生成。由于燃烧室为小涡流比设计,喷油压力提高至一定值后,油气混合改善不明显,CO 质量分数基本不变。

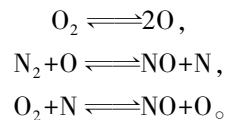
2.1.2 供油提前角的影响

不同供油提前角的 CO 排放曲线如图 2 所示。由图 2 可知,随着供油提前角对应的曲轴转角由 9° 减小至 5°,尾气中 CO 质量分数呈现整体上升趋势。分析其原因为:本次试验用柴油机涡流比较小,为 1.0,随着供油提前角的减小,喷油靠近上止点,部分燃油喷落至燃烧室壁面,导致缸内燃烧恶化,缸内最高燃烧温度降低,产生大量 CO。

供油提前角的变化对柴油机的缸内燃烧过程影响较大,较小的供油提前角改变也会导致部分工况出现冒黑烟的情况。

2.2 喷油压力和供油提前角对 NO_x 排放的影响

柴油机排放的 NO_x 中,NO₂ 占比较小,NO 占比最大,NO 的主要来源是空气中参与燃烧的 N₂,因此重点对 NO_x 排放中的 NO 进行试验分析。N₂ 生成 NO 的化学反应机理是扩展的泽耳多维奇(Zeldovitch)机理^[10-11]。在过量空气系数为 1 附近,空气中 NO 生成和消失的主要反应为:



在较浓的混合气中同时也有反应:



影响柴油机 NO_x 排放的主要因素是缸内的燃烧温度、O₂ 的浓度,随着缸内燃烧温度的升高,NO_x 的生成呈指数急剧增长。为了抑制 NO_x 生成,必须保证较低的缸内燃烧温度以及燃烧时较低的 O₂ 浓度。

2.2.1 喷油压力的影响

不同喷油压力下 NO_x 排放曲线如图 3 所示。由图 3 可知:

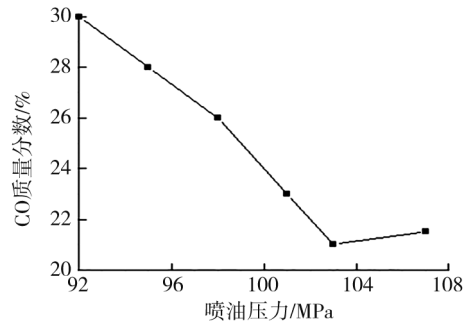


图 1 不同喷油压力下的 CO 排放曲线

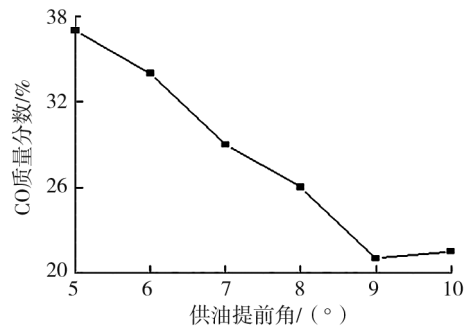


图 2 不同供油提前角的 CO 排放量曲线

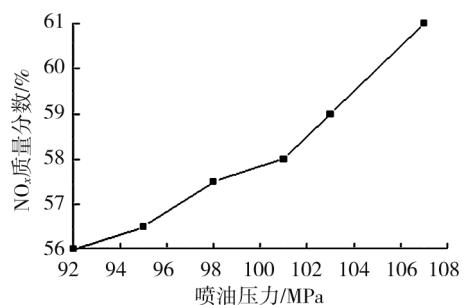


图 3 不同喷油压力下的 NO_x 排放变化

喷油压力由 92 MPa 提高至 107 MPa,尾气中 NO_x 的质量分数呈缓慢上升趋势,由 56% 升高至 61%。其原因为:随着喷油压力的不断提高,喷油速率增加,滞燃期内形成的混合气增加,燃烧扩散速度加快,燃烧持续期减小,燃烧得到明显改善,各缸平均爆发压力由 12.9 MPa 升高至 13.2 MPa,缸内最高温度升高, NO_x 排放相应增加;此时柴油机燃烧室内的过量空气系数较大, O_2 充足,在高温富氧的条件下,导致 NO_x 排放相应增加。

2.2.2 供油提前角的影响

不同供油提前角下 NO_x 排放曲线如图 4 所示。由图 4 可知:供油提前角对应的曲轴转角由 10° 减小至 5° , NO_x 质量分数由 64% 降低至 35%,降幅明显。分析其原因为:随着供油提前角的减小,滞燃期内形成的混合气减少,燃烧持续期增加,导致缸内最高燃烧温度和压力均下降, NO_x 生成量减小;但随着供油角度的不断减小,缸内燃烧恶化,燃烧持续期加长并产生后燃,对柴油机的经济性产生不利影响。

减小供油提前角是降低 NO_x 排放的有效手段,但调整供油提前角降低排放的同时,应同步优化燃烧过程,使燃烧更完全,保证柴油机性能。

2.3 喷油压力和供油提前角对 PM 排放的影响

运行工况对柴油机 PM 排放的影响较大,其中排气温度对 PM 的影响尤为明显,排气温度不同,PM 会呈现不同形态,当排气温度过高时,一般呈现碳质微球的聚集体,称为碳烟;当排气温度过低时,碳烟可吸附多种有机物。碳烟是柴油机污染物的排放问题核心。碳烟一般是在高温和缺氧条件下生成,因此改善柴油机的油气混合均匀性,是降低 PM 的有效措施。

2.3.1 喷油压力的影响

不同喷油压力下 PM 排放曲线如图 5 所示。由图 5 可知:喷油压力由 92 MPa 增大至 107 MPa,尾气中 PM 质量分数由 14.0% 降至 8.5% 左右,降幅显著。其原因为:随着喷油压力的提高,燃油雾化更均匀,促进燃油与空气的混合,改善油气混合的宏观及微观均匀性,局部缺氧地区明显减小,预混燃烧比例增加,缸内燃烧充分,从而有效降低 PM 排放。

2.3.2 供油提前角的影响

不同供油提前角的 PM 排放曲线如图 6 所示。由图 6 可知:随着供油提前角对应的曲轴转角由 10° 减小到 5° ,尾气中 PM 质量分数由 9.0% 提高至 14.0%。其原因为:随着供油提前角的减小,滞燃期内形成的混合气减少,导致整个燃烧过程中油气混合不均匀,燃烧持续期增加,扩散燃烧比例增大,同时出现部分后燃现象,从而导致排气温度过高,导致 PM 大量生成。

3 结论

通过改变喷油压力、供油提前角等条件,在发动机台架上对船用柴油机污染物的排放进行试验研究,得到喷油压力、供油提前角对 CO、PM 和 NO_x 排放的影响。

1) 喷油压力增大,燃油雾化质量更好,油气混合更加均匀,燃烧质量提高,减少了 CO 和 PM 的排放;缸内最高燃烧质量提高,部分 CO 转化为 CO_2 ,进一步减少了 CO 的生成;提高喷油压力后,缸内燃烧情况得到明显改善,缸内燃烧最高温度、压力升高,导致 NO_x 排放量随之增加。

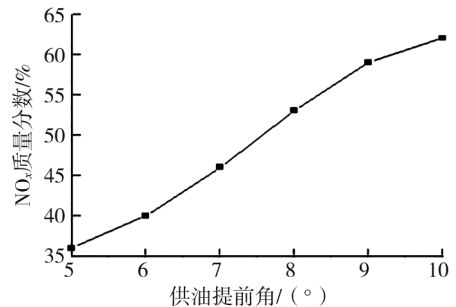


图 4 不同供油提前角下的 NO_x 排放变化

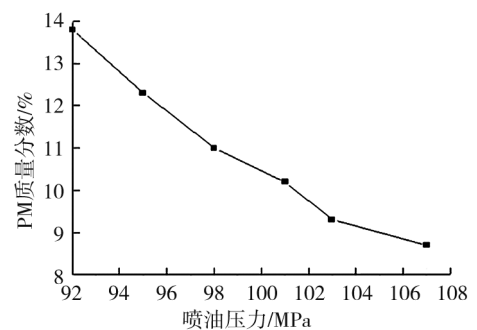


图 5 不同喷油压力下的 PM 排放曲线

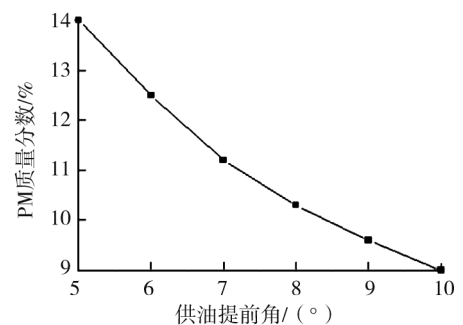


图 6 不同供油提前角的 PM 排放曲线

2) 供油提前角的减小,缸内最高燃烧压力和温度均降低,可使 NO_x 排放量显著降低;但减小供油提前角,燃烧混合气形成时间缩短,油气混合不均匀,导致燃烧不完全,排气温度升高,CO和PM排放量相应增加。

参考文献:

- [1] 汪宗御,张继锋,纪玉龙. 船舶尾气污染物排放控制研究进展[J]. 化工进展,2017,36(6):2289-2297.
- [2] 何郭靖. 船用柴油机燃烧机理与排放模拟研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011.
- [3] 于恩中,刘进军. 柴油机颗粒物排放机理及控制措施的研究[J]. 内燃机,2009(4):41-43.
- [4] 环境保护部. 船舶发动机排气污染物排放限值及测量方法(中国第一、二阶段):GB 15097—2016[S]. 北京:中国环境出版社,2017.
- [5] 张建才. 车用柴油机有害排放物机内净化技术应用研究[J]. 甘肃科技,2015(14):45-48.
- [6] 方平,陈雄波,唐子君,等. 船舶柴油机大气污染物排放特性及控制技术研究现状[J]. 化工进展,2017,36(3):1067-1076.
- [7] 王辉,姚安仁,王斌,等. 船舶柴油机掺烧甲醇对碳烟和氮氧化物排放影响的试验分析[J]. 船海工程,2019,48(4):68-72.
- [8] 周金喜. 船舶柴油机颗粒物排放特性及其控制技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2019.
- [9] 纪晓静,焦运景. 降低柴油机 NO_x 排放的控制技术研究[J]. 柴油机设计与制造,2015,21(2):8-11.
- [10] 董明. 船舶柴油机节能减排技术解析[J]. 中国水运(下半月),2019,19(2):98-99.
- [11] 关敏. 试验室环境条件对柴油机性能和排放的影响研究[J]. 上海汽车,2016(4):32-35.

Experimental study on effect of fuel injection pressure and advance angle on diesel engine emission

LI Long¹, PANG Zhenlong², ZHANG Ning¹, MU Zhenqian², SUN Zhen¹

1. Zichai Machines Co.,Ltd.,Zibo 255000,China;2. Zichai Power Co.,Ltd.,Zibo 255000,China

Abstract: In order to reduce the emission of marine diesel engine, a four stroke medium speed diesel engine is taken as the research object. By changing the fuel injection pressure and fuel injection advance angle of the engine, several groups of comparative tests are carried out to study the effects of fuel injection pressure and fuel injection advance angle on CO, NO_x and PM emissions. The results show that the mass fraction of CO and PM in exhaust gas decreases and the mass fraction of NO_x increases slightly with the increase of injection pressure. With the decrease of fuel supply advance angle, the mass fraction of NO_x in exhaust gas decreases significantly, and the mass fraction of CO and PM increases.

Keywords: emission performance; fuel injection pressure; fuel supply angle; emissions

(责任编辑:郎伟锋)