

喷射背压对喷油特性影响的仿真及试验研究

王昌庆, 黄立, 郭立君, 浦卫华, 赵伟, 刘广才

(七一一研究所, 上海 201108)

摘要: 以某型大功率船用柴油机机械式燃油系统为研究对象, 基于 AMESim 软件建立系统一维计算模型, 研究恒定及动态背压对喷油特性的影响。仿真结果表明: 随喷射背压升高, 循环油量呈线性趋势下降; 喷油持续期呈抛物线趋势上升。将柴油机台架试验测得的燃油喷射缸压曲线作为计算边界输入, 得到计算循环油量。相比 3.0 MPa 恒定背压时, 循环油量下降了 4.9%; 喷油持续期延长 3.1 °CA。针对该套燃油喷射系统的试验表明: 恒定背压设定值由从 6.0 MPa 升高至 10.0 MPa 时, 推进 25% 负荷时主要喷射性能参数对喷射背压变化的敏感性要比推进 100% 负荷更强。100% 负荷, 背压为 6.0 ~ 9.0 MPa 时, 循环油量变化不大; 背压为 10.0 MPa 时, 循环油量下降 7.0 mg。而 25% 负荷时, 背压为 7.0 ~ 10.0 MPa 时, 背压每上升 1.0 MPa, 循环油量约下降 6.0 ~ 8.0 mg。

关键词: 船用柴油机; 机械单体泵燃油系统; 喷射背压; 喷射特性

中图分类号: TK423.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2019)03-0005-06

Simulation and Experimental Study of the Influence of Injection Back Pressure on Injection Characteristics

Wang Changqing, Huang Li, Guo Lijun, Pu Weihua, Zhao Wei, Liu Guangcai;

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: The mechanical fuel system of a large marine diesel engine was studied, its 1D simulation model was built based on AMESim software. The effects of constant and dynamic back pressure on fuel injection performance were studied. The simulation results indicate that with the increasing of injection back pressure, the circulating fuel quantity decreases in linear trend, however, the injection duration prolongs in parabolic trend. The cylinder pressure curve during fuel injection measured in bench test was input as calculation boundary to get calculated circulating fuel volume. Compared with the constant pressure setting of 3.0 MPa, the circulation fuel quantity was decreased by 4.9%, the injection duration was extended by 3.1 °CA. The test on this type of fuel injection system shows that when the set value of constant back pressure increases from 6.0 MPa to 10.0 MPa, the main injection performance parameters is more sensitive to the change of injection back pressure at 25% propulsion load than at 100% load. At 100% load, when the back pressure is 6.0 ~ 9.0 MPa, the circulating fuel quantity changes little; when the back pressure is 10.0 MPa, the circulating fuel quantity decreases by 7.0 mg. At 25% load, when the back pressure is 7.0 ~ 10.0 MPa, the circulating fuel quantity decreases 6.0 ~ 8.0 mg for each 1.0 MPa increasing.

Key words: marine diesel engine; mechanical unit pump fuel injection system; injection back pressure; injection characteristics

收稿日期: 2018-09-03; 修回日期: 2018-09-25

作者简介: 王昌庆(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为柴油机燃料供给与调节, wgchgq@126.com。

0 引言

近年来,随着柴油机强化指标的不断升高,气缸压力也有升高的趋势。现有船用大功率中高速柴油机的最高燃烧压力一般在19~21 MPa。柴油机工作时,在扩散燃烧阶段,燃油边喷射边燃烧^[1],喷射过程伴随着气缸压力快速上升。

在定容弹喷雾模型标定试验研究中,通常采用不同喷射背压模拟柴油机缸内不同环境对喷雾特性的影响。但喷射背压改变对宏观喷油特性的影响常被忽略。

通常采用喷油规律测试仪对燃油系统的宏观喷射性能进行测试。测试时设定一个恒定的喷射背压值,测得的喷射性能可能与整机缸内喷射时的特性有差异。本文通过数值计算和平台试验两种方式研究不同喷射背压值对燃油系统喷油特性参数的影响规律。

1 数值计算研究

1.1 喷嘴流动特性理论计算

燃油在系统内流动特性遵循流体力学基本方程:连续性方程、伯努利方程。将燃油在喷嘴内的流动简化为黏性不可压缩流体一维流动的孔口出流^[2]情况。根据流体力学基本方程,可导出喷嘴的流量方程:

$$Q = \mu A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = \mu A \sqrt{\frac{2(p_d - p_g)}{\rho}} \quad (1)$$

式中: Q 为单位时间内的喷油量, ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); μ 为喷嘴的流量系数; A 为喷嘴的总流通截面积, m^2 ; p_d 为喷嘴油腔压力, Pa, 可取平均值; p_g 为气缸压力, 即喷油时的背压, Pa, 可取平均值; ρ 为燃油密度, ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)。

循环喷油量方程:

$$V = Qt \quad (2)$$

式中: V 为循环喷油量, m^3 ; Q 为单位时间内的喷油量, ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); t 为喷油持续期, s。

喷嘴总流通截面积为:

$$A = n \frac{\pi d_0^2}{4} \quad (3)$$

式中: A 为喷嘴的总流通面积, m^2 ; n 为喷嘴的喷孔个数; d_0 为喷孔的直径, mm。

某燃油系统油嘴结构: $n = 10$, $d_0 = 0.36 \text{ mm}$; 喷嘴流量系数 $\mu = 0.82$; 燃油密度采用平台试验用油密度 $\rho = 0.80 \text{ (g} \cdot \text{cm}^{-3})$ (40°C)。根据表1中燃油系统平台喷射恒定背压 $p_g = 3.0 \text{ MPa}$ 试验结

果: 100% 负荷下, 根据公式 (1)、(2) 和 (3) 算得喷嘴内部压力室平均压力 $p_d = 71.93 \text{ MPa}$ 。以 $p_d = 71.93 \text{ MPa}$ 为初始条件, 假定喷油持续期 t 及其初始条件不变, 根据公式 (1), 代入不同初始背压 $p_g = 0 \sim 10 \text{ MPa}$, 其循环油量质量的计算结果如图1所示。可见: 随背压上升, 循环油量呈近似线性下降的趋势。背压为 10 MPa 时比 3.0 MPa 时喷射油量减少约 75 mg , 减少量约 5.0% 。

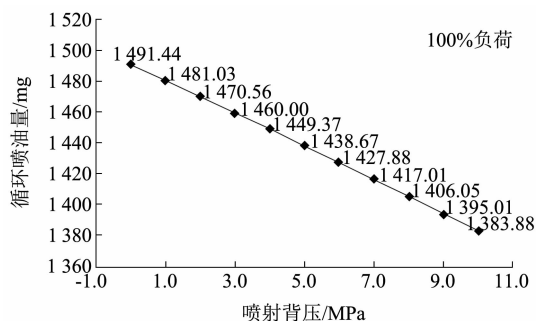


图1 循环油量变化趋势理论计算结果

1.2 仿真模型的建立与标定

基于流体力学基本理论, 以某机械式单体泵燃油系统为对象, 采用 AMESim 软件搭建燃油喷射系统一维流体仿真模型 (如图2), 并以系统 100% 负荷、喷射背压 3.0 MPa 时进行标定, 标定结果如表1所示。标定后的模型可用于变喷射背压的仿真研究。

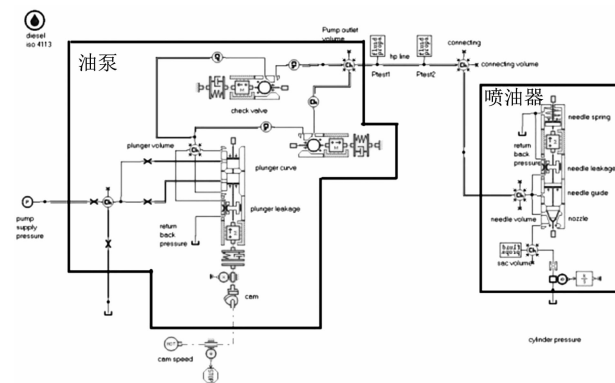


图2 机械式燃油系统仿真模型

表1 仿真模型标定结果试验值

	试验值	计算值	偏差
循环油量/mg	1 460	1 442	-1.2%
喷油持续期/ms	5.27	5.09	-3.4%

1.3 恒定喷射背压模拟

标定负荷下喷射背压为 $0 \sim 10 \text{ MPa}$, 循环油量及持续期变化的仿真结果如图3所示。可以看出: 在标定负荷下, 循环油量随喷射背压升高而下降。

对仿真结果进行回归分析,得到相关系数平方 $R^2=0.997$ 的线性拟合方程,也即循环油量随喷射背压升高,呈近似线性下降趋势,与理论计算的趋势相同。标定负荷下,喷油持续期随喷射背压升高而延长。对喷油持续期仿真结果也进行回归分析,得到相关系数平方 $R^2=0.988$ 的抛物线拟合方程,也即喷油持续期随喷射背压升高,呈抛物线上升的趋势。因此较低的喷射背压对喷油持续期影响较小,较高的喷射背压对持续期影响较大。

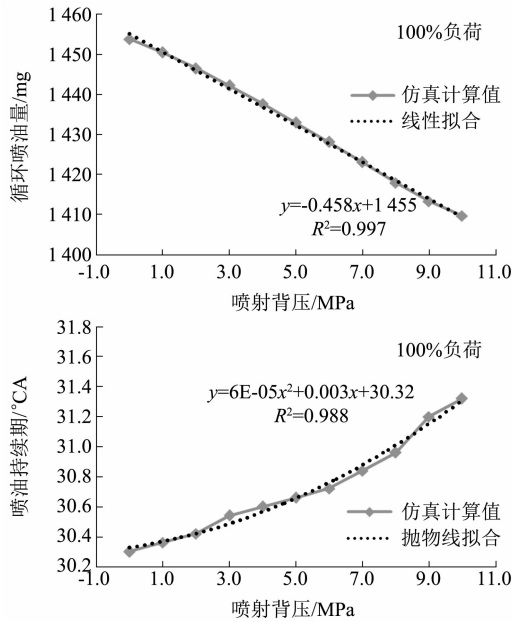


图3 不同背压值下计算循环油量与喷油持续期的变化规律

1.4 基于缸压曲线的动态喷射背压模拟

在整机试验测得 100% 负荷工况时的缸压曲线上,截取喷射区间内的缸压曲线作为喷射计算输入,计算喷油特性。动态喷射背压如图 4 所示,平均值为 18.7 MPa,其与静态背压 3.0 MPa 对喷射性能参数的影响如图 5 所示。由图 5 可见:齿条位置固定时,动态背压情况下,循环油量下降 70 mg,降幅为 4.9%;以曲轴转角计算的喷油持续期增加 3.1°,增幅为 10.2%;喷油器入口压力峰值增加 2.8 MPa,增幅为 2.0%。

2 试验研究

2.1 试验平台

船用柴油机机械式单体泵燃油系统测试平台如图 6 所示。平台测试用油为校泵油 JB-1,其油品与柴油接近。测试设备如表 2 所示。

2.2 测试工况

测试工况如表 3 所示。根据图 3 的仿真结果,试验以 6.0 MPa 喷射背压为测试基准工况,分别在

燃油系统的推进 100%、25% 负荷,固定齿条位置,设定 6.0~10.0 MPa 恒定背压,测试循环油量、喷油持续期、喷油率等喷射性能参数。

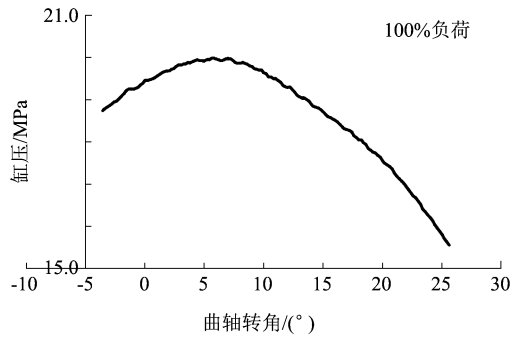


图4 动态喷射背压

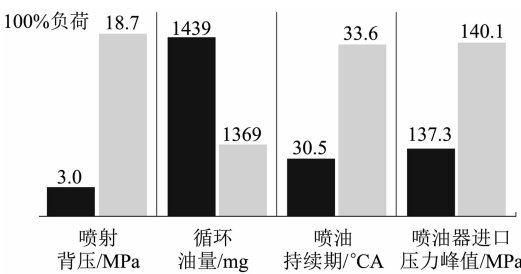


图5 动态背压与静态背压喷射性能对比

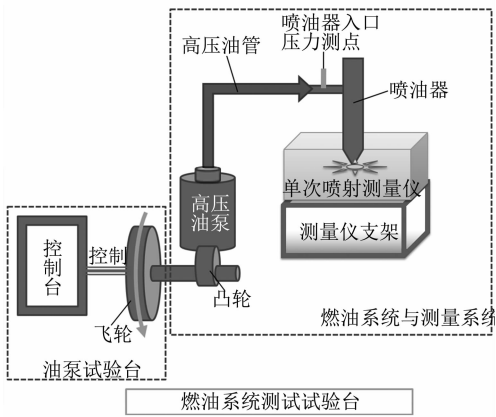


图6 机械式单体泵燃油系统测试试验台

表2 试验测试设备

设备与名称	作用	生产单位
油泵试验台	提供动力、转速	无锡威孚
喷油规律测试仪	测量喷油量、喷油规律	法国 EFSIFR6000
示波器	采集压力、电流信号	台湾泰克
压力传感器	测量喷油器入口压力	Kistler

表3 测试工况

油泵 工况	整机推进工况负荷			100%	25%
	凸轮转速/（r·min ⁻¹ ）			500	315
	目标循环油量/（mg·shot ⁻¹ ）			1 439	615
测试 背压/MPa	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0

循环喷油量偏差越小,供油越稳定,对发动机工作越有利。此次试验中定义循环油量稳定性为燃油系统连续100次喷油量的标准差。标准差越大,循环油量稳定性越差。标准差为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}} \quad (3)$$

式中: x_i 为样本值; μ 为样本均值,平均数; n 为样本个数。

2.3 测试结果与分析

2.3.1 100%负荷喷射特性变化规律

2.3.1.1 循环油量和喷油持续期规律

喷射背压的改变对100%负荷循环喷油量、喷油持续期的影响如图7所示。对循环油量测试结果进行回归分析,得到 $R^2 = 0.989$ 的三项式拟合曲线。试验时取喷射系统100次循环的平均值,而仿真结果为理想状态时的单次循环,因此仿真与试验结果有差异。试验表明:喷射背压为6.0~9.0 MPa对油量影响较小,背压10.0 MPa时喷射油量下降7.0 mg,对比6.0 MPa背压,油量下降幅度为0.5%。实际循环油量 V 根据公式(2)为 Q 与 t 的函数,流量 Q 的变化根据公式(1),喷射背压 p_g 的变化会影响喷孔内外压差 Δp ,100%负荷时的喷嘴油腔压力 p_d 高,喷射背压 p_g 的改变对流量的改变相对较小,导致流量下降较小。

喷油持续期是表征柴油机喷油时间特性的一个重要指标^[3]。对喷油持续期测试结果进行回归分析,得到 $R^2 = 0.912$ 的抛物线拟合曲线,与仿真得到的拟合曲线类型相同。试验表明:100%负荷下,喷射背压为6.0~10.0 MPa时,背压上升1.0 MPa,喷射持续期约增加0.1 °CA。根据公式(1)、(2),假设在每循环供油量相同的情况下,喷嘴油腔压力 p_d 不变,喷射背压 p_g 增加,流量 Q 下降,则喷油持续期 t 上升。

2.3.1.2 循环油量稳定性规律

喷射背压的改变对100%负荷循环喷油量稳定性的影响如图8所示。试验表明:7.0 MPa和10.0 MPa背压会降低循环油量的稳定性。因此,可推断:柴油机工作时的实际喷射过程中的动态背压对循环油量的稳定性不利。

2.3.1.3 喷油器入口压力峰值变化规律

喷油压力与燃油雾化情况密切相关^[3]。喷射背压的改变对喷油器入口压力峰值的影响如图9所示。100%负荷下,背压的增加对喷油器入口压力峰值影响不明显,其峰值在1.1%内变动。试验表

明:喷射背压对100%负荷喷油器入口压力峰值影响较小。其原因是循环供油量较大,在油管内形成的喷射压力较高,喷射背压对喷油器入口压力峰值影响相对不大。

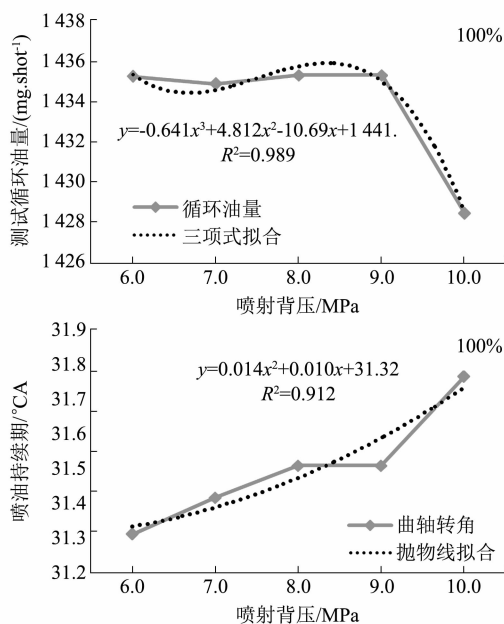


图7 100%负荷时循环油量与持续期的变化规律

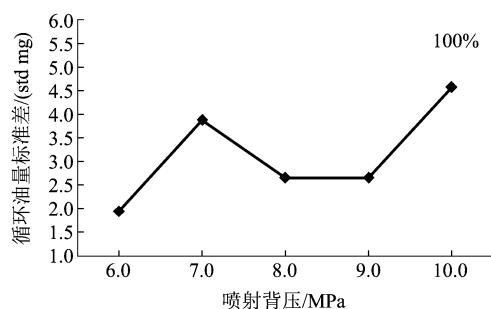


图8 100%负荷时循环油量稳定性变化

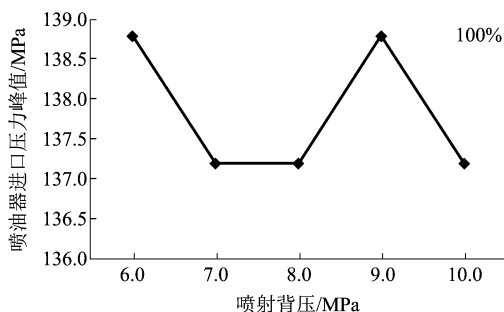


图9 100%负荷时喷油器入口压力峰值的变化

2.3.1.4 对喷油率的影响

喷油率对柴油机的燃烧过程有重大影响^[3]。100%负荷时,喷射背压的改变对喷油率的影响如图10所示。背压增加对喷油率的影响较小。其原因是100%负荷下,喷油入口压力峰值改变在

1.1%以内, 喷油器内外压差变动相对不大, 因此喷油率变化也不大。

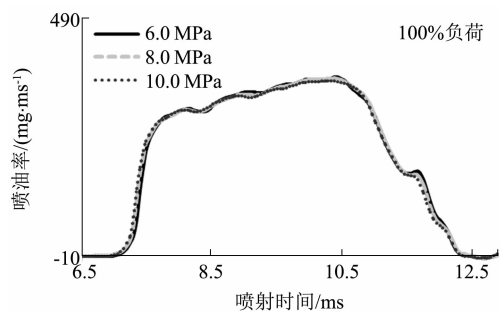


图10 100%负荷喷油率的变化

2.3.2 25%负荷喷射特性的变化规律

2.3.2.1 循环油量和喷油持续期规律

喷射背压的改变对25%负荷循环喷油量、喷油持续期的影响如图11所示。25%负荷时, 对循环油量测试结果进行回归分析, 得到 $R^2=0.937$ 的二项式拟合曲线。6.0~7.0 MPa背压使喷油量上升6 mg; 7.0~10.0 MPa背压使喷油量下降, 背压每上升1.0 MPa, 油量约下降6.0~8.0 mg。原因是喷射背压变化与油泵进回油孔节流作用^[3]共同影响。

对喷油持续期测试结果进行回归分析, 得到 $R^2=0.992$ 的抛物线拟合曲线。6.0~7.0 MPa背压使持续期下降0.2 °CA; 7.0~10.0 MPa背压使持续期上升, 背压每增加1.0 MPa, 持续期增加0.4~0.7 °CA。

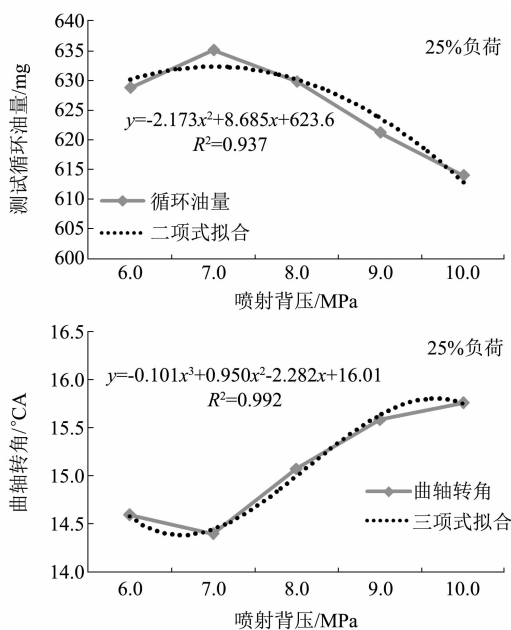


图11 25%负荷时循环油量与持续期的变化规律

2.3.2.2 循环油量稳定性变化规律

喷射背压的改变对25%循环油量稳定性的影

响如图12所示。25%负荷时背压6.0~9.0 MPa稳定性相近, 至背压10.0 MPa时, 喷射稳定性降低。

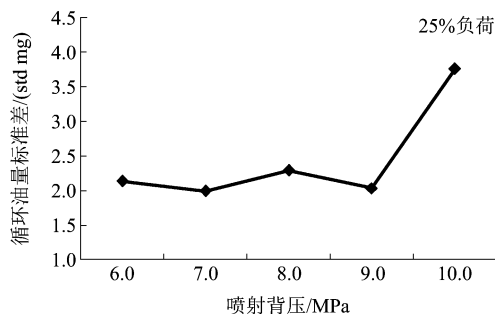


图12 25%负荷时循环油量稳定性变化

2.3.2.3 喷油器入口压力峰值的变化规律

25%负荷时喷油器入口压力峰值的变化如图13表示。25%负荷下, 背压6.0~8.0 MPa时, 背压每增加1.0 MPa, 峰值压力增加1.0 MPa左右; 背压8.0~10.0 MPa时, 背压改变对峰值影响不明显。25%负荷时, 循环供油量较小, 油管内部压力受到喷射背压的影响。根据公式(1)、(2)对喷油器入口压力峰值的分析, 可得出: 100%负荷比25%负荷的 p_d 高, 假设循环喷油量设置为负荷要求, 则100%负荷下每循环背压 p_g 变化对喷油持续期 t 的影响较小。

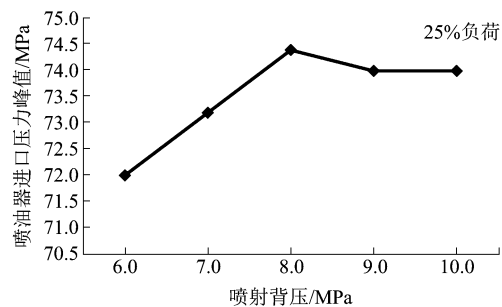


图13 25%负荷时喷油器入口压力峰值的变化

2.3.2.4 对喷油率的影响

25%负荷时喷射背压对喷油率的影响如图14所示。

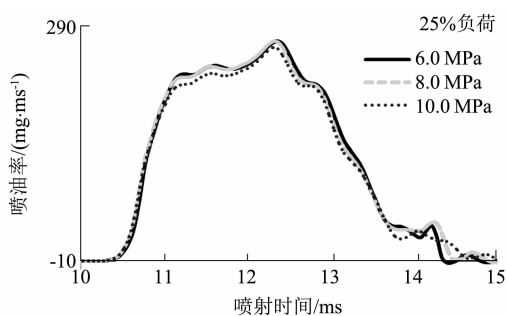


图14 25%负荷喷油率的变化

随背压增大, 喷油率的峰值下降, 喷射时间延长。25% 负荷、背压为 10 MPa 时, 喷射末期曲线改变。其原因可根据公式 (1) 分析: 25% 负荷时喷嘴油腔压力 p_d 比较小, 喷射背压 p_g 的改变对喷油率的改变较为明显; 在喷射末期, 瞬时 p_d 较小, p_g 对流量 Q 影响较为明显; 因机械燃油系统的喷射过程是联动的, p_g 为 10.0 MPa 时对喷射末期影响加大, 因此喷射末期的喷油率形状与其他背压工况有所不同。

3 结 论

(1) 仿真结果表明: 100% 负荷下, 燃油喷射期的平均背压可达 18.7 MPa, 此时循环油量下降 70 mg, 降幅为 4.9%。以曲轴转角计算的喷油持续期增加 3.1 °CA, 增幅为 10.2%, 喷油器入口压力峰值增加 2.8 MPa, 增幅为 2.0%。随喷射背压升高, 循环油量呈线性趋势下降, 持续期呈抛物线趋势上升, 持续期结果的拟合曲线类型与试验结

果的相同。

(2) 试验结果表明: 25% 负荷与 100% 负荷因凸轮转速不同, 循环油量不同; 推进 25% 负荷时喷油持续期、喷油率等主要喷射性能参数随喷射背压的变化比推进 100% 负荷时更敏感。

(3) 循环喷油量: 机械单体泵 100% 负荷时, 6.0 ~ 9.0 MPa 背压对循环油量影响不明显, 10.0 MPa 背压时油量下降 7.0 mg, 降幅为 0.5%。25% 负荷、背压为 7.0 ~ 10.0 MPa 时, 背压每上升 1.0 MPa, 循环油量约下降 6.0 ~ 8.0 mg。背压为 10.0 MPa 时会导

参考文献

- [1] 刘圣华, 周龙宝. 内燃机学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [2] 林剑忠, 阮晓东. 流体力学 [M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [3] 高宗英, 朱剑明. 柴油机燃料供给与调节 [M]. 北京: 机械工业出版社. 2009.

(上接第 4 页)

从计算结果看出: 冲孔板置于涡团终点处, 流体流速均匀度最佳且压力损失最小。经过优化分析后, 最终确定洗涤塔入口结构为加装冲孔板后无导流形式。

4 结 论

(1) 在脱硫塔入口处增加冲孔板结构虽然增加了一定量的进出口压力损失, 但是较好地改善了流场内流速均匀度, 使烟气流速更快达到稳定, 有利于塔内化学反应进行。

(2) 环形导流器虽然对脱硫塔上方流速稳定性起到一定作用, 但影响入口段气体混合, 并增加了进出口压力损失。在添加冲孔板之后, 应考虑去除环形导流装置。

(3) 冲孔板位置的变化也会引起流场的流速均匀度和进出口压降变化, 由于塔内存在双涡流, 而涡流中心流速较大, 冲孔板应置于涡流末端。

参考文献

- [1] WINNES H. Air pollution from ships-emission measure-

ments and impact assessments [D]. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2010.

- [2] 国际船舶网. Hamworthy 公司开发的 Krystallon 脱硫系统 [EB/OL]. [2016-07-18]. http://www.eworl-dship.com/html/2012/Manufacturer_0531/51473.html.
- [3] Wärtsilä. Exhaust gas scrubber installed onboard MT "SUULA" [R]. Finland: Wärtsilä, 2010.
- [4] HANSEN J P. Exhaust gas scrubber installed on board MV ficariaseaways [R]. Strandgade: Danish Environmental Protection Agency, 2012.
- [5] Couple Systems. The very new exhaust gas cleaning system [R]. Hamburger: Couple Systems, 2013.
- [6] 赵喆, 田贺忠, 阿庆兴, 等. 湿式烟气脱硫喷淋塔内部流场数值模拟研究 [J]. 环境工程学报, 2005, 6 (5): 16-20.
- [7] HANJALIC K, POPOVAC M, HADZIABDIC M. A robust near-wall elliptic-relaxation eddy-viscosity turbulence model for CFD [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2004, 25 (6): 1047-1051.
- [8] 李坦, 靳世平, 黄素逸, 等. 流场速度分布均匀性评价指标比较与应用研究 [J]. 热力发电, 2013 (11).