doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.044

高压喷射条件下非常态燃油喷嘴内部空化流动特性

刘琦'欧阳光耀'杨昆'孙宇鹏2

(1. 海军工程大学动力工程学院, 武汉 430033; 2. 海军大连地区装备修理监修室, 大连 116041)

摘要:为了改善柴油机喷嘴出口处燃油液滴的破碎状态并增加初始湍动能,采用了180 MPa的高压燃油喷射。推导了受高压喷射影响时非常态燃油各个物性参数与压力之间的关系。搭建了高压定容器喷雾闪光摄影试验台架, 在 AVL FIRE 软件平台上建立了喷油嘴喷孔内部流场的三维 CFD 模型,通过喷雾测试结果对仿真模型进行了修 正。分析了喷孔内部气液两相流场的三维流态以及空化流动特性。结果表明,非常态燃油物性参数的变化有利于 增强空化效应;增大燃油喷射背压对孔内的空化效应具有抑制作用;随着喷孔直径增加,燃油高速区域扩大,空化 效应增强;增大喷射夹角也有利于增强空化效应,但效果不明显。

关键词:柴油机;喷嘴;高压喷射;空化效应;流动特性

中图分类号: TK421 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)06-0333-07

Nozzle Inner Cavitation Flow Characteristics of Non-normal Fuel Based on High Pressure Injection Condition

Liu Qi¹ Ouyang Guangyao¹ Yang Kun¹ Sun Yupeng²

(1. Academy of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China
2. Dalian Navy Area Equipment Maintenance Supervisor Room, Dalian 116041, China)

Abstract: In order to improve the breakup condition of oil beams and increase their initial turbulent kinetic energy at the exit of the nozzle, the high injection pressure of 180 MPa was used. The changing relationship between the physical properties of the non-normal fuel and the pressure under the influence of the high pressure injection was derived. The spraying flash photography test bench based on the high pressure constant vessel was set up. The three-dimensional CFD model of nozzle inner flow field was established on software AVL FIRE. The simulation model was modified according to the spraying test results. The three-dimensional flow state and cavitation flow characteristics of nozzle inner gas-liquid twophase flow field were analyzed. The results show that when the temperature is constant, the density, the speed of sound and the bulk modulus of fuel increase with the ascent of pressure, the change of these physical parameters of non normal fuel is beneficial to the production of cavitation gas and enhance the cavitation effect; increasing the fuel injection back pressure restrains the flow of cavitation gas and fuel, so the cavitation effect is weakened; with the increase of nozzle diameter, the high speed region of fuel becomes more extensive and the cavitation effect becomes more prominent. The increase of the injection angle also helps to enhance the cavitation effect, but the effect is not obvious due to the limitation of the structure form. So the reasonable matching relationship between the nozzle diameter and injection angle is helpful to improve the initial turbulent kinetic energy intensity at the outlet of the nozzle, and obtain a better jet state.

Key words: diesel engine; nozzle; high pressure injection; cavitation effect; flow characteristics

收稿日期:2016-01-15 修回日期:2016-02-16

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51379212)和国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(613252)

作者简介:刘琦(1988—),男,博士生,主要从事动力机械及热力系统设计、仿真与优化研究,E-mail: 339096073@qq.com

引言

高压共轨燃油喷射技术由于其具有较高的喷油 压力和灵活可控的喷油策略,在柴油机节能减排上 体现出了极大的优越性。近年来的研究表明^[1-2], 高压共轨系统的燃油喷射压力还有进一步提高的趋 势,在某些柴油机上已经可以实现 180 MPa 以上的 高压喷射。

为了改善燃油的雾化效果,高压喷射通常采用 小孔径多孔数的喷油嘴。这对喷嘴内部的气液两相 流动特性产生了很大的影响,直接决定了缸内可燃 混合气的均匀扩散程度^[3-4]。喷油过程模拟计算的 介质是燃油,燃油本身的物理性质对数学模型的精 度有很大影响。而当喷射压力较高时,燃油本身 的物性参数发生了很大的变化,不能再以常态作 为计算的介质^[5-7]。本文将密度、声速和弹性模量 等物性参数随压力发生变化的燃油定义为非常态 燃油。在180 MPa 的高压喷射条件下研究喷孔内 部气液两相流动特性,并分析燃油物性参数的变 化以及喷射背压和喷嘴系统各个参数对空化效应 的影响。

1 燃油物性参数

柴油机在运行时,其每一次工作循环的喷油持 续期都很短,燃油温度可基本假定不变。但燃油自 共轨轨腔流经喷油器直至喷孔出口处,其压力发生 了很大的变化。为了研究燃油各个物性参数的变化 趋势同时减少变量之间的影响,将密度、声速和弹性 模量同时表示成压力和温度的函数来研究它们之间 的关系^[8]。

1.1 密度

对于矿物油, DONSON 和 HIGGINSON 研究发现, 无量纲密度 ρ 与压力 p 存在如下关系^[9]

$$\overline{\rho} = \frac{\rho}{\rho_0} = 1 + \frac{6 \times 10^{-10} p}{1 + 1.7 \times 10^{-9} p} \tag{1}$$

式中 ρ ——在压力 p 下的密度

 ρ_0 ——在常压下的密度

把温度对密度的影响作为修正因素,则密度的 表达式为

$$\rho = \rho_0 \left[1 + \frac{6.9 \times 10^{-10} p}{1 + 3.23 \times 10^{-9} p} - \lambda_T (t - t_0) \right]$$
(2)

式中 t→ 燃油系统工作时柴油温度,测定为60℃ t₀ → 常压下柴油温度,℃

 λ_T ——热膨胀系数

 λ_r 的取值见文献[10]。密度与压力的变化关系如图 1 所示,当温度一定时,密度随着压力的增加

而增加,近似呈现正比例的线性关系。



1.2 声速

根据流体力学理论,声速计算公式^[11]为

$$a = \left(\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}\rho}\right)^{\frac{1}{2}} = \left\{\rho_0 \left[\frac{6.9 \times 10^{-10}}{(1+3.23 \times 10^{-9}p)^2} + 1.8 \times 10^{-4} \zeta \left(\frac{t+135.15}{t_0+135.15}\right)^{-d} (t-t_0)\right]\right\}^{-\frac{1}{2}}$$
(3)

ζ——粘压系数

d——粘温系数

声速与压力的变化关系如图 2 所示。声速受到 温度的影响较小,而对压力的变化较为敏感,压力增 大时声速大幅提高。





1.3 弹性模量

弹性模量表征的是燃油在受力压缩时其自身抵 抗弹性变形的能力^[12]。弹性模量为

$$B = \rho \frac{dp}{d\rho} = \frac{1 + \frac{6.9 \times 10^{-10} p}{1 + 3.23 \times 10^{-9} p} - \lambda_T (t - t_0)}{\frac{6.9 \times 10^{-10} p}{(1 + 3.23 \times 10^{-9} p)^2} + 1.8 \times 10^{-4} \zeta \left(\frac{t + 135.15}{t_0 + 135.15}\right)^{-d} (t - t_0)}$$
(4)

弹性模量与压力的变化关系如图3所示。弹 性模量随着压力的增大而增大,并且增速越来越大。



Fig. 3 Bulk modulus variation with pressure

2 仿真模型建立与试验验证

以一个孔数为8的喷嘴为研究对象,各个喷孔 沿圆周方向对称布置。利用 AVL FIRE 软件建立喷 油器内部流场的三维仿真模型。由于各孔的流动特 性及影响因素基本一致,为了能够直观简洁地观察 喷孔内燃油的流态同时节省计算时间,仅取 22.5° 部分模型进行研究。由于针阀与针阀体之间的区域 和喷孔内流通区域的流场特性比较复杂,划分网格 时做了加密处理,如图4 所示。



图 4 三维计算网格 Fig. 4 Three-dimensional calculation grid

为了验证仿真模型的准确性,通过对缸内燃油 喷雾贯穿距的仿真结果与试验结果进行对比分析。 搭建高压定容器喷雾闪光摄影试验台架,如图 5 所 示。以经过自主设计改装后的高压共轨燃油喷射系 统为燃油系统。可视化装置为 400 mm × 400 mm 正 方体高压定容器,利用外置闪光灯和单反相机对燃 油喷射过程进行图像采集,之后通过 Matlab 软件进 行后处理得到喷雾贯穿距离结果^[13]。试验中主要 参数见表1。

分别对 2.5、2.0、1.5、1.2 mm 这 4 种网格尺寸 的仿真模型进行计算,之后与试验所得的贯穿距离 进行比较,如图 6 所示。可以看出,随着网格尺寸的 减小,喷雾贯穿距离增大。当网格尺寸由 1.5 mm 减小到 1.2 mm 时,贯穿距离的结果基本不再发生 变化,并且与试验数值基本吻合。说明此时的网格 尺寸已达到了最大精度,所建立的仿真模型和设置



图 5 喷雾测试试验台架 Fig. 5 Experimental bench of spray testing

表1 试验参数设置

Tab.1 Test parameter setting

参数	数值
燃油喷射压力/MPa	180
喷孔个数	8
喷孔直径/mm	0.15
喷射夹角/(°)	144
燃料	0号柴油
喷油脉宽/ms	2



的初始边界条件较为合理,可以模拟实际情况。后 文中的仿真计算与此喷雾贯穿距离的仿真原理和方 法相同,具有关联性。

3 结果分析

由前节可知,在高压喷射条件下燃油密度、声速 和弹性模量都随着压力的升高而相应地增大。为了 准确地研究这些物性参数对喷孔内部气液两相流动 特性的影响,将密度、声速和弹性模量随压力变化的 函数关系作为燃油的物性条件导入模型,计算并分 析常态燃油和非常态燃油在 180 MPa 喷射压力时的 流场特性。之后以非常态燃油为研究对象,研究喷 射被压、喷孔直径和喷射夹角等参数对喷孔内部流 动特性的影响。

3.1 常态燃油和非常态燃油的喷嘴内部流动特性

如图 7 和图 8 所示为常态燃油和非常态燃油喷

孔内部空化气体分布和速度分布的对比结果。在高 压喷射条件下,2种燃油均于上孔壁内部产生空化 气体,空化气体由低密度核心区域逐渐向四周扩展 延伸,在喷孔内占据了相当大的空间。非常态燃油 在喷孔内产生得空化气体体积明显大于常态燃油, 其低密度核心区域的范围也较大,有更多的空化气 体随燃油流出喷孔。在图 8 中,2 种燃油在流经喷 孔拐角之后流速急剧增加,与空化气体充分混合后 平均流速趋于均匀,并作高速运动直至喷孔出口。 非常态燃油的平均流速要大于常态燃油的平均流 速,同时上孔壁内部的低流速区域范围明显较小,说 明非常态燃油在喷孔内具有较大的湍流强度^[14]。



通过以上现象分析原因,空化气体的产生是依 据伯努利方程,流体压力随其速度的增大而降低。 燃油流过喷孔拐角之后有效流通截面明显减小,其 流速急剧增大而压力急剧减小,当压力低于饱和蒸 汽压时柴油便汽化生成气泡,最终产生空化效 应^[15-16]。由前文可知,在高压喷射条件下,燃油的 物性参数发生了很大变化。与常态燃油相比,非常 态燃油的声速和弹性模量都随着压力的增大而大幅 提高。一方面更高的声速导致喷孔中的压降较大, 产生气泡的数量势必增加。另一方面更大的弹性模 量减少了燃油分子间的弹性变形,增强了流体湍动



图 10 不同喷射背压下的空化分布对比

Fig. 10 Cavitation distribution contrast under different injection back pressures



Fig. 8 Velocity contrast of normal fuel and non-normal fuel

能的传递效果,所以非常态燃油的空化效应变得更 加显著。

图9 所示为2 种燃油的出口流量对比结果。由 于非常态燃油的流速大于常态燃油的流速,故它的 出口流量更大。但另一方面,由于空化效应的增强 导致空化气体增多,空化气体随燃油喷出时在一定 程度上阻碍了流量的增加,所以两者的流量差距并 不十分明显。



3.2 不同喷射背压对非常态燃油的喷嘴内部流动 特性的影响

如图 10 为非常态燃油在喷射背压为 0.5、1.0、 1.5、2.0 MPa 时的空化分布。随着喷射背压的增 大,喷孔内空化气体体积分数明显减小,低密度区域 也在逐渐收缩并远离喷孔出口。当喷射背压达到 2.0 MPa时,空化区域已经脱离了喷孔上壁面,只有 一小部分空化气体随燃油一起流出。图 11 和图 12 中,平均流速随着喷射被压的增加而减小,高速燃油 的分布范围逐渐下移,同时喷孔出口流量也相应地 减少。当喷射背压较大时,燃油向缸内喷射时遇到 的阻力增大,较大的阻力通过连续流动的燃油向喷 孔内部传递,使燃油流动的速度降低。由于非常态 燃油的弹性模量较大,燃油分子的抗压缩能力较强, 分子间的作用力得以更加有效地传递,故空化效应 明显被削弱了^[17]。







3.3 不同喷孔直径对非常态燃油的喷嘴内部流动 特性的影响

图 13 和图 14 为非常态燃油在喷孔直径为 0.13、0.15、0.17、0.19 mm 时的喷孔内部空化分布 和速度分布。随着喷孔直径的增大,空化气体的体 积分数和燃油的平均速度越来越大。当喷孔直径增 大到 0.19 mm 时,高速燃油的分布区域已逐渐扩展 至整个喷孔。图 15 表明,直径较小的喷孔其出口流 量较小。由于燃油流动产生得空化区域往往集中在 喷孔内壁的上表面处,喷孔内壁对燃油的流动具有 阻碍作用,孔径越小对流动的阻碍作用越明显。燃 油受阻后流速下降,根据伯努利定理空化气泡的数 量势必会减少。但同时也要认识到,喷孔直径的增 大对于增强空化效应并不是始终有利的。因为孔径 增大的同时有效流通截面也在同时扩大。当有效流 通截面积扩大到一定数值以后,单位数量的燃油通 过喷孔时其流速不会像之前那样大幅提高,低流速 的燃油在流动过程中只会产生少量气泡,空化效应 也会随之削弱^[18]。

3.4 不同喷射夹角对非常态燃油的喷嘴内部流动 特性的影响

如图 16 和图 17 所示为非常态燃油在喷射夹角 α为140°、144°、148°和152°时的喷孔内部空化分布 和速度分布。喷射夹角是指以喷油器主体的中轴线 为基准,喷油器上互成轴对称的2个喷孔在Z轴负 方向上所夹的角度,如图16a所示。当喷射夹角较 小时,孔内气泡体积分数较小,分布范围远离喷孔出 口处。随着喷射夹角的增大,空化气体的分布区域



图 13 不同喷孔直径的空化分布对比

Fig. 13 Cavitation distribution contrast under different nozzle diameters







逐渐扩大、向喷孔出口处移动,同时与液态燃油大面 积混合,两者的平均流速逐渐增大,空化效应增强。 图 18 中的出口流量结果也显示相同的趋势,随着喷 射夹角的增大,喷孔出口流量逐渐增加,但是递增的 幅度不大。说明增大喷射夹角有利于增强空化效 应,但由于喷射夹角受到喷油器结构形状的限制,故 空化效应的增强效果并不那么明显^[19-20]。

4 结论

(1)在高压喷射条件下非常态燃油较之于常态 燃油具有更强的空化效应,空化气体与液态燃油能







Fig. 17 Velocity contrast under different injection angles

Chinese)



够充分混合并且高速区域分布更广,可以在喷孔出 口处获得较大的湍动能。 (2) 燃油喷射背压对孔内的空化效应起着一定 的抑制作用。燃油喷射被压增大时, 空化气体分布 区域缩小, 平均流速下降, 喷孔出口的质量流量减 小。

(3)喷孔直径在一定范围内增大时会促进空化 效应的产生,但这并不是简单的递增关系。当孔径 大到足以忽略燃油流经壁面的沿程损失时,增大孔 径反而会降低燃油流速,削弱空化效应。

(4)随着喷射夹角的增大,空化气泡的数量和 喷孔出口的质量流量增加,液态燃油高速区域向四 周扩大,空化效应增强,但由于受到结构形式的限 制,效果并不明显。

参考文献

- 田径,刘忠长,韩永强,等.喷油参数对车用发动机油气混合及燃烧的影响[J].吉林大学学报:工学版,2010,40(2):370-375.
 TIAN Jing, LIU Zhongchang, HAN Yongqiang, et al. Influence of fuel injection parameters on air-fuel mixing and combustion of a common rail diesel engine[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2010, 40(2):370-375. (in
- 2 李煜辉,崔可润,朱国伟.柴油机超高增压的电控技术[J].内燃机学报,2004,20(6):541-545. LI Yuhui, CUI Kerun, ZHU Guowei. The electronic control technology on ultra-high supercharged diesel engine[J]. Transactions of CSICE, 2004, 20(6):541-545. (in Chinese)
- 3 SCHMIDT D P, CORRADINI M L. The internal flow of diesel fuel injector nozzles [J]. International Journal of Engine Research, 2001, 2(1): 1468 1474.
- 4 PARK S H, SUH H K, LEE C S. Effect of cavitating flow on the flow and fuel atomization characteristics of biodiesel and diesel fuels [J]. Energy & Fuels, 2008, 22(1):605-613.
- 5 HYUN Kyu Suh, CHANG Sik Lee. Effect of cavitation in nozzle orifice on the diesel fuel atomization characteristics [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2008, 29(4):1001-1009.
- 6 Salvador F J, Romero J V. Validation of a code for modeling cavitation phenomena in diesel injector nozzles [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2010, 52(7-8):1123-1132.
- 7 JIA Ming, XIE Maozhao, LIU Hong, et al. Numerical simulation of cavitation in the conical-spray nozzle for diesel premixed charge compression ignition engines [J]. Fuel, 2011, 90(8):2652 2661.
- 8 段炼,袁寿其,胡林峰,等. 高压共轨喷油器控制阀空化研究[J]. 农业机械学报,2015,46(5):321-327. DUAN Lian,YUAN Shouqi, HU Linfeng, et al. Cavitation analysis of control-valve in high-pressure common rail injector [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(5):321-327. (in Chinese)
- 9 张鹏顺,陆思聪.弹性流体动力润滑及其应用[M].北京:高等教育出版社,1995.
- 10 王钧效,陆家祥,王桂华,等.柴油机燃油物性参数的研究[J].内燃机学报,2001,19(6):507-510.
 WANG Junxiao, LU Jiaxiang, WANG Guihua, et al. Study on physical characters parameters of fuel used in diesel engines[J].
 Transactions of CSICE, 2001, 19(6):507-510. (in Chinese)
- 11 孔珑.工程流体力学[M].北京:水利电力出版社,1992.
- 12 NIKOLIC B D, KEGL B, MARKOVIC S D, et al. Determining the speed of sound, density, and bulk modulus of rapeseed oil, biodiesel, and diesel fuel[J]. Thermal Science, 2012, 16(Supp. 2):505-514.
- 13 孙柏刚,张大鹏,冯旺聪.高压共轨燃油喷雾 PIV 测试方法及结果分析[J].北京理工大学学报,2006,26(7):574-576. SUN Baigang, ZHANG Dapeng, FENG Wangcong. Particle image velocimetry test methods for high pressure common rail spray and results of analysis[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2006,26(7):574-576. (in Chinese)
- 14 SU T F. An experimental study of high injection pressure diesel sprays[D]. Madison: University of Wisconsin, 1995.
- 15 沃恒洲,姚智华,张亚芳,等.发动机喷嘴内部空化出生的数值模拟研究[J].中国机械工程,2011,22(17):2071-2075.
 WO Hengzhou, YAO Zhihua, ZHANG Yafang, et al. Numerical simulation of cavitation inception in engine orifice [J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(17): 2071-2075. (in Chinese)
- 16 张军,杜青,杨延相,等.柴油机不同类型喷嘴内部空化流动特性的研究[J].内燃机学报,2010,28(2):133-140. ZHANG Jun, DU Qing, YANG Yanxiang, et al. Study on cavitating flow in different types of diesel nozzle orifice [J]. Transactions of CSICE, 2010, 28(2): 133-140. (in Chinese)

- 18 VIANA H, ARANHA J, LOPES D, et al. Estimation of crown biomass of *Pinus pinaster* stands and shrubland above-ground biomass using forest inventory data, remotely sensed imagery and spatial prediction models [J]. Ecological Modelling, 2012, 226: 22-35.
- 19 WANG Guangxing, ZHANG Maozhen, GERTNER G Z, et al. Uncertainties of mapping aboveground forest carbon due to plot locations using national forest inventory plot and remotely sensed data [J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2011, 26(4):360-373.
- 20 DU Huaqiang, ZHOU Guomo, FAN Wenyi, et al. Spatial heterogeneity and carbon contribution of aboveground biomass of moso bamboo by using geostatistical theory [J]. Plant Ecology, 2010, 207(1): 131-139
- 21 MENG Qingmin, CIESZEWSKI Chris, MADDEN Marguerite. Large area forest inventory using Landsat ETM + : a geostatistical approach [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2009, 64(1): 27 36.
- 22 李艳丽,杨华, 亢新刚,等. 长白山云冷杉针阔混交林天然更新空间分布格局及其异质性[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2):311-317.

LI Yanli, YANG Hua, KANG Xin'gang. Spatial heterogeneity of natural regeneration in a spruce-fir mixed broadleaf-conifer forest in Changbai Mountains[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(2) : 311-317. (in Chinese)

- 23 曾春阳,唐代生,唐嘉锴.森林立地指数的地统计学空间分析[J].生态学报,2010,30(13):3465-3471. ZENG Chunyang, TANG Daisheng, TANG Jiakai. Spatial pattern analysis of forest ecosystem site index using geostatistical technology[J]. Acta Ecologica Sinaica, 2010, 30(13): 3465-3471. (in Chinese)
- 24 PAVEL Propastin. Modifying geographically weighted regression for estimating aboveground biomass in tropical rainforests by multispectral remote sensing data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, 18: 82 - 90.
- 25 刘琼阁,彭道黎,涂云燕. 基于偏最小二乘回归的森林蓄积量遥感估测[J].中南林业科技大学学报,2014,34(2):81-84,132. LIU Qiongge, PENG Daoli, TU Yunyan. Estimation of forest stock volume based on partial least squares regression[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2014, 34(2): 81-84, 132. (in Chinese)
- 26 孟宪宇. 测树学[M]. 3 版. 北京:中国林业出版社, 1996:18-19.
- 27 冯益明. 空间统计学理论及其在林业中的应用[M]. 北京:中国林业出版社,2008.
- 28 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京:科学出版社,1999:35-141.
- 29 范磊,程永政,郑国清,等.基于 Cokriging 插值修正冬小麦面积遥感监测[J].农业工程学报,2010,26(10):206-211. FAN Lei, CHENG Yongzheng, ZHENG Guoqing, et al. Monitoring of winter wheat area by remote sensing based on Cokriging [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(10): 206-211. (in Chinese)
- 30 石淑芹,陈佑启,李正国,等.基于土壤类型和微量元素辅助信息的土壤属性空间模拟[J].农业工程学报,2010,26(12): 199-205.

SHI Shuqin, CHEN Youqi, LI Zhengguo, et al. Spatial interpolation of soil properties based on soil types and trace microelements[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(12): 199 - 205. (in Chinese)

31 LIU Xingmei, WU Jianjun, XU Jianming. Characterizing the risk assessment of heavy metals and sampling uncertainty analysis in paddy field by geostatistics and GIS[J]. Environmental Pollution, 2006,141(2): 257 - 264.

(上接第 339 页)

- 17 YUAN W, SCHNERR G H. Numerical simulation of two-phase flow in injection nozzles interaction of cavitation and external jet formation [J]. Journal of Fluids Engineering, 2003, 125(6): 963 969.
- 18 左承基,钱叶剑,徐天玉,等.EGR 与富氢进气对柴油机性能和排放的影响[J].农业机械学报,2010,41(4):12-15.
- ZUO Chengji, QIAN Yejian, XU Tianyu, et al. Effect of EGR and intake hydrogen enrichment on performance and emissions of automotive diesel engine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4):12 15. (in Chinese)
 PAYRI F, BENMUDZ V, PAYRI R, et al. The influence of cavitation on the internal flow and the spray characteristics in diesel
- injection nozzles[J]. Fuel, 2004,83(4): 419 431.
- 20 孙春华,宁智,吕明,等. 气泡雾化喷嘴气体溢出过程声波信号的时频特征研究[J]. 农业机械学报,2015,46(1):315-322. SUN Chunhua,NING Zhi,LÜ Ming, et al. Time-frequency characteristics of acoustic signal in gas flowing process of effervescent spray nozzle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(1):315-322. (in Chinese)