DOI: 10.16236/j.cnki.nrjxb.202502019

# 高温高压下柴油密度的变化

陈　萍[1]，徐荣武[1]，刘振明[1]，刘景斌[1]，李丽婷[2]，李　梅[2]
（1. 海军工程大学动力工程学院，武汉 430033；2. 先进船舶发动机技术全国重点实验室，上海 201100）

**摘要**：柴油密度是现代柴油机燃油系统设计和仿真中必须设置的重要参数. 柴油密度随温度和压力变化较大，密度的准确性是燃油系统设计和仿真正确性的重要保证. 利用自行设计的燃油压力波传播速度测试台对国标 0 号柴油高温、高压条件下的波速进行测试，并推导计算出相应的柴油密度，获得柴油密度随温度和压力的变化规律. 结果表明：柴油密度随温度的升高而减小，随压力的升高而增大，且压力对柴油密度的影响远大于温度. 在温度为 300 ~ 360 K、压力保持恒定的情况下，温度每升高 10 K，密度平均下降 0.004 043 ~ 0.006 038 g/mL，压力越高，密度随温度下降幅度越小；在压力为 20 ~ 200 MPa、温度保持恒定的情况下，压力每增加 10 MPa，密度平均增加 0.003 844 ~ 0.004 509 g/mL，温度越高，密度随压力增加的幅度越大.

**关键词**：柴油机；燃油系统；柴油密度；压力波传播速度
**中图分类号**：TK421　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-0909(2025)02-0158-06

# Variation of diesel density at high temperature and high pressure

**Chen Ping[1]，Xu Rongwu[1]，Liu Zhenming[1]，Liu Jingbin[1]，Li Liting[2]，Li Mei[2]**
（1. College of Power Engineering，Naval University of Engineering，Wuhan 430033，China；
2. National Key Laboratory of Advanced Marine Engine Technology，Shanghai 201100，China）

**Abstract**：Diesel density is an important parameter that must be set in design and simulation of a modern diesel engine fuel system. Diesel density varies greatly with temperature and pressure，and the accuracy of density is an important guarantee for the correctness of fuel system design and simulation. The wave velocity of national standard No.0 diesel under high temperature and high pressure was measured using a self-designed test platform of fuel pressure wave velocity，and the corresponding diesel density was derived and calculated. The law of variation of diesel density with temperature and pressure was obtained. The results show that the diesel density decreases with the increase of temperature and increases with the increase of pressure，and the influence of pressure on diesel density is much greater than that of temperature. Every increase of 10 K in the temperature of 300—360 K，the average density decreases by 0.004 043—0.006 038 g/mL，and the higher the pressure，the smaller the density decreases with temperature. In the pressure of 20—200 MPa，the density increases by 0.003 844—0.004 509 g/mL on average with every increase of 10 MPa. The higher the temperature，the greater the density increases with the pressure.

**Keywords**：diesel engine；fuel system；diesel density；pressure wave velocity

现代柴油机燃油系统设计主要依赖仿真手段，在柴油机燃油系统一维性能仿真及三维流体分析中，密度均是必须设置的重要参数，对仿真精度具有重要影响. 当前柴油机主要采用高压燃油喷射技术，喷射压力为 160 ~ 250 MPa，随着柴油机排放和经济性要求的不断提升，燃油喷射压力逐步提高[1]. 柴油密度随温度变化呈抛物线趋势[2]，在柴油机实际工作温度条件下，随温度的升高而降低，随压力升高而升高.

在柴油机燃油系统一维和三维仿真中，密度均采用的是常温、常压下密度值或自定值. 采用常温、常压下密度值进行高压燃油喷射仿真，误差较大；而自定值多采用国外文献中密度计算经验公式或密度测试数据，由于各国的柴油成分不同，其物理特性存在差异，密度自定值不适用于中国研究，因而有必要针

**收稿日期**：2024-06-21；**修回日期**：2024-09-02.
**基金项目**：国家自然科学基金资助项目(51879269).
**作者简介**：陈　萍，硕士，副教授，chenping_hg82@163.com.
**通信作者**：刘振明，博士，教授，liuzhenmingyk@163.com.

对国内常用柴油开展密度随温度、压力变化的研究.

Ndiaye 等[3]利用热物理试验方法测量了温度为 283.15 ~ 403.15 K、压力为 0.10 ~ 200.00 MPa 条件下的密度值. Safarov 等[4]用 DMA HPM 振动管密度计测量了温度为 263.15 ~ 468.40 K、压力为 0.10 ~ 200.00 MPa 条件下的密度值,并用状态方程(EOS)拟合了柴油的密度、压力和温度数据,建立了三者的关系函数. Payri 等[5]利用喷射试验台测量了 3 种不同种类燃料的声速,计算出温度为 298 ~ 343 K、压力为 15 ~ 180 MPa 条件下的密度值,得到了压力、温度和密度之间的相互影响规律. Rodriguez-Anton 等[6]对常压为 140 MPa 下 4 种柴油密度进行了测量,提出了一种由常压密度值估计高压密度值的方法. 以上研究虽然获得了柴油密度的计算经验公式,但只局限于某种柴油,种类不同,化学成分不同,密度经验计算公式存在较大差异,不适用于油品密度分析.

Meng 等[7]采用了 7 种经验公式估算了 3 种柴油的密度. 张建明等[8]对温度范围为 293 ~ 353 K、压力为 0.1 ~ 140.0 MPa 条件下柴油密度进行了试验,在其基础上得出了柴油密度随压力和温度变化的经验公式. 李海洋等[9]利用高压共轨试验台测试了不同压力下的燃油音速,并计算出 20 ~ 160 MPa 条件下燃油密度值,以及燃油密度随轨压变化的规律. 由于技术限制,燃料特性测量所能达到的最大值有限,喷射过程中所涉及的典型高压和高温也很难达到,大多研究集中在 160 MPa 以下[10],更高喷油压力且高温条件下的柴油密度特性还需进一步研究.

基于此,笔者选用国内 0 号柴油,对温度为 300 ~ 360 K、压力为 20 ~ 200 MPa 范围条件下高压油管内的压力波传播速度和柴油密度进行试验测试与计算,研究温度和压力对柴油密度变化的影响,得出压力波传播速度和柴油密度计算公式,以期为柴油机高压燃油系统的设计提供参考.

## 1　柴油的密度测试计算理论基础

### 1.1　流体的声速

流体的声速是衡量其热力学特性的重要指标. 流体的声速限定了在给定条件下压力波在流动中从一个位置向另一个位置的运动. 图 1 为压力波的传播示意. 在管道中,跟踪压力波传播的方法是假设一个振幅较小的扰动,从一个给定点传播到另一个给定点. 这种扰动现象在介质中的传播将以单一速度 $v$ 传播,可认为与波形和波的传播方向无关[5,11]. 当介质处于均匀状态时,波的传播方向和形式可以完全独立,$v$ 可由式(1)计算.

$$v = L/t_s \tag{1}$$

式中:$L$ 为压力波传输路径的长度;$t_s$ 为波穿过长度为 $L$ 的距离所需要的传输时长.

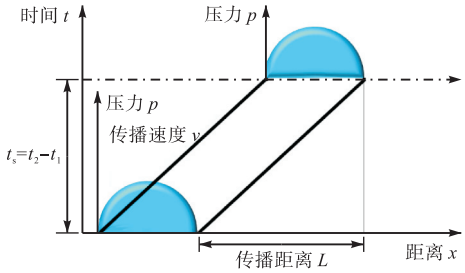



**图 1　压力波的传播示意**

**Fig.1　Schematic of propagation of pressure wave**

### 1.2　流体的密度

流体声速还可表示为

$$v^2 = B_S/\rho \tag{2}$$

式中:$B_S$ 为等熵体积模量;$\rho$ 为流体密度. 此外,$B_S$ 和等温体积模量 $B_T$ 可分别定义为

$$B_S = \rho\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_S \tag{3}$$

$$B_T = \rho\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_T \tag{4}$$

式中:$p$ 为压力. $B_S$ 与 $B_T$ 之间的关系可表示为

$$\frac{1}{B_T} = \frac{1}{B_S} + \frac{T\alpha^2}{\rho c_p} \tag{5}$$

式中:$\alpha$ 为等压热膨胀系数;$T$ 为温度;$c_p$ 为等压比热容. 联合式(2) ~ 式(5),得

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial p}\right)_T = \frac{1}{\alpha^2} + \frac{T\alpha^2}{\rho c_p} \tag{6}$$

通过求解式(6),可得到流体密度与声速之间的明确关系,即

$$\rho(p,T) = \rho(p_0,T) + \int_{p_0}^{p}\frac{\mathrm{d}p}{v^2} + T\int_{p_0}^{p}\left(\frac{\alpha^2}{c_p}\right)\mathrm{d}p \tag{7}$$

式中:右侧第一项为大气压 $p_0$ 下不同温度流体的密度,是高温、高压下密度的初始值[12];右侧第 2 项为流体压力增大导致的流体密度增量,与声速相关,可通过等温线声速评估;右侧第 3 项为温度对体积变化进而对密度变化的影响. 该项与等压比热容与等容比热容的差值 $c_p - c_v$ 有关,对流体而言,$c_p/c_v \approx 1$,两者差值接近于 0,因而研究不考虑第 3 项的影响[5,9].

可知,需对高压油管内压力波传播时间进行测量,获得不同压力、温度下压力波在柴油中传播的速度,同时,还需获得大气压下不同温度的柴油密度初

始值，即可计算出高温、高压下柴油的实际密度，基于此，笔者通过试验的方法获得压力波传播速度和柴油初始密度.

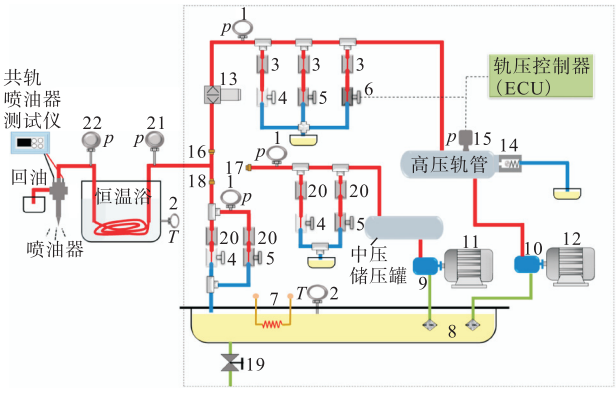
## 2　试验装置及方案

### 2.1　试验装置

图 2 为压力波传播速度检测系统原理示意，主要由高压燃油供给系统、恒温浴、高压共轨喷油器测试仪和压力波信号采集系统组成.

高压燃油供给系统调压范围为 0 ~ 250 MPa，最大供油量为 12 L/min，回油压力调节范围为 0 ~ 30 MPa. 该系统由高压模块和中、低压模块组成，两台共轨泵分别向中压共轨管和高压共轨管提供油压. 共轨管通过高压油管向测试件提供压力燃油. 管路上增加支路，通过支路泄压的方式调节轨压. 在各回油管路上设置有调节回油压力的调压阀. 高压模块中所选用的高压共轨泵为博世 CP4 型高压共轨泵，其标定压力为 250 MPa，每转供油能力为 1.33 mL，由标定功率为 22 kW 的电机驱动(最大转速为 3 000 r/min)，即最大供油量为 4.00 L/min；中、低压模块所选用的低压油泵为径向柱塞，其标定压力为 60 MPa，每转供油能力为 8.35 mL，由标定功率为 18.5 kW 的电机驱动(最大转速为 1 500 r/min)，即最大供油量为 12.53 L/min，符合试验需求. 共轨管为博世轨管，耐压为 270 MPa. 恒温浴温度调节范围为室温至 373 K，控制精度为 0.1 K.

喷油器由共轨喷油器测试仪进行控制，可实现连续喷射. 高压燃油供给系统出口和喷油器之间由一根长度为 12.03 m、直径为 6 mm 的高压油管相连，两端安装有压力波传感器，传感器型号为 Kistler 的 4067E3000DS1-2，测量范围为 300 MPa，测量最大偏差≤ ± 0.8 FSO，工作温度为−313 ~ 473 K，带数字补偿功能. 压力传感器信号通过 Kistler 4624 放大器放大，由示波器采集.




1—压力表；2—温度表；3—超高压截止阀；4—低压调压阀；5—中压调压阀；6—高压调压阀；7—加热器；8—过滤器；9—低压油泵；10—高压油泵；11，12—电机；13—高压过滤器；14—安全阀；15—压力传感器；16—高压进油接头；17—低压进油接头；18—出油接头；19—放油球阀；20—中压截止阀；21—压力波传感器 A；22—压力波传感器 B.

**图 2　压力波传播速度检测系统示意**

**Fig.2　Schematic of propagation velocity test system of pressure wave**

压力波通过高精度 Kistler 传感器和放大器测量. 高压油管长为 12.03 m，两个压力波传感器置于两端，使得两个信号之间有足够的间隔时间，能够清晰地采集到信号，但管长也不易过长，避免信号衰减.

大气压力下柴油初始密度测试装置主要包括：盖吕-萨克比重瓶(50 mL)、恒温浴和上海良平 FA2204 电子分析天平. 恒温浴温控精度为 0.1 K，使柴油试样恒温至测定温度；上海良平 FA2204 电子分析天平的量程为 220 g，精度为 0.1 mg，对测试试样进行称重.

### 2.2　试验方案

#### 2.2.1　压力波速度测试方案

在不同燃油温度和轨压条件下，分别测量长度为 12.03 m、直径为 6 mm 的高压油管内压力波动情况. 喷油拉升为 0.5 ms，喷油脉宽为 1.5 ms. 试验温度范围为 300 ~ 360 K，以 10 K 为单位递增；试验压力范围为 20 ~ 200 MPa，以 10 MPa 为单位递增. 实测得到不同压力和温度下压力波传播速度. 在试验中，由式(1)可知，柴油的声速是由高压油管入口到出口压力波的传播速度决定的. 测量压力波从高压供给系统出口处(压力波传感器 A)到喷油器入口处(压力波传感器 B)的传播时间，分别计算出不同温度和压力下真实的压力波传播速度. 由式(7)可知，通过测量常压下不同温度的柴油密度初始值、不同压力下传播速度和压力的关系就可以得到高压下柴油的真实密度.

#### 2.2.2　初始密度测试方案

根据式(7)可知，需对大气压力下不同温度(300 ~ 360 K，以 10 K 递增)的柴油密度进行测量. 采用 GB/T 2013—2010《液体石油化工产品密度测定法》中的比重瓶法对常压下不同温度的柴油初始密度进行测量[12]. 将试验柴油试样装入盖吕-萨克比重瓶，利用恒温浴使柴油试样恒温至测定温度，然后用分析天平进行称重. 由这一质量除以在相同比重瓶中水的重量与其密度值比，即可计算出试验柴油试样的密度. 任意温度下，柴油试样的密度可由式(8)或式(9)计算.

当 $t_t = t_c$ 时，按式(8)计算柴油试样密度 $\rho_t$，即

$$\rho_t=[(m_t-m_0)\rho_c]/(m_c-m_0)+C \tag{8}$$

式中：$t_c$ 为比重瓶用水校准时的温度（参比温度为 293 K）；$m_0$ 为空比重瓶在空气中的表观质量；$m_c$ 为校准温度 $t_c$ 时盛水比重瓶在空气中的表观质量；$m_t$ 为测定温度 $t_t$ 时盛柴油试样比重瓶在空气中的表观质量；$C$ 为空气浮力修正值；$\rho_c$ 为校准温度 $t_c$ 时水的密度；$\rho_t$ 为测定温度 $t_t$ 时柴油试样的密度.

当 $t_t \neq t_c$ 时，计算柴油试样密度 $\rho_t$ 的表达式为

$$\rho_t=\left[\frac{(m_t-m_0)\rho_c}{(m_c-m_0)}+C\right]\left[\frac{1}{1-\alpha_1(t_c-t_t)}\right] \tag{9}$$

式中：$\alpha_1$ 为玻璃的体积膨胀系数，研究用盖吕-萨克比重瓶为硼硅玻璃材质，$\alpha_1=10\times10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}$.

## 3　试验结果分析

### 3.1　声速计算分析

图 3 示出轨压为 200 MPa、温度为 300 K 条件下的测试结果. 压力波从高压供给系统出口到喷油器入口处传播的时间为 $t_s$，3 次测量结果取平均值.

由式(1)可算出柴油中压力波的传播速度，测量并计算出温度为 300 ~ 360 K、压力范围为 20 ~ 200 MPa 条件下的压力波传播速度. 图 4 为压力波传播速度随压力变化. 压力波传播速度随压力的增加而增大，变化呈近似线性关系. 当压力从 20 MPa 增加到 200 MPa，压力波传播速度增加幅度约为 0.52 m/ms，约增加 41%.

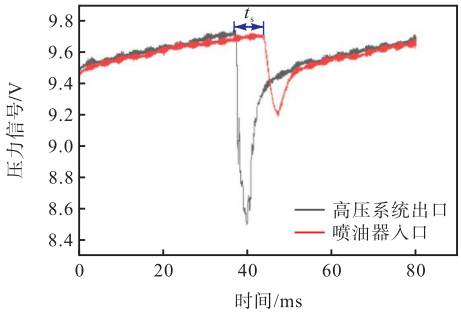



图 3　压力波传播时间

Fig.3　Propagation time of pressure wave

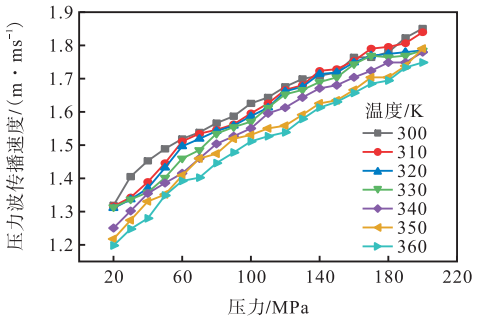



图 4　压力波传播速度随压力变化

Fig.4　Variation of propagation velocity of pressure wave with pressure

图 5 为压力波传播速度随温度变化. 可知，压力波传播速度随温度的增加而减小. 当温度从 300 K 增加到 360 K 时，压力波传播速度减小幅度约为 0.11 m/ms，约减小 0.07%. 可知，压力波变化对压力和温度的依赖性不同，压力变化对压力波传播速度的影响更大.

表 1 为柴油声速不同拟合方式拟合程度对比. 对获得的压力波传播速度数据和压力进行最小二乘法拟合，分别进行了线性、二次方、三次方和四次方多项式拟合. 以 300 K 条件为例，从拟合数据来看，线性拟合和二次方拟合的 $R^2$ 分别为 0.972 7 和 0.987 7，拟合偏差较大，三次方和四次方拟合的 $R^2$ 分别为 0.994 5 和 0.994 9，且残差范数均约为 0.040 00，拟合效果较接近，如图 6 所示. 因而笔者采用三次方拟合

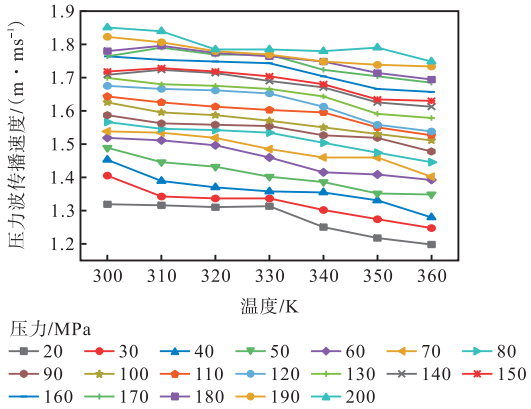



图 5　压力波传播速度随温度变化

Fig.5　Variation of propagation velocity of pressure wave with temperature

表 1　柴油声速不同拟合方式拟合程度对比

Tab.1　Comparison of fitting degree of diesel velocity with different fitting methods

| 参数 | 线性 | 二次方 | 三次方 | 四次方 |
|---|---|---|---|---|
| $R^2$ | 0.972 7 | 0.987 7 | 0.994 5 | 0.994 9 |
| 残差范数 | 0.103 20 | 0.069 22 | 0.046 52 | 0.044 55 |

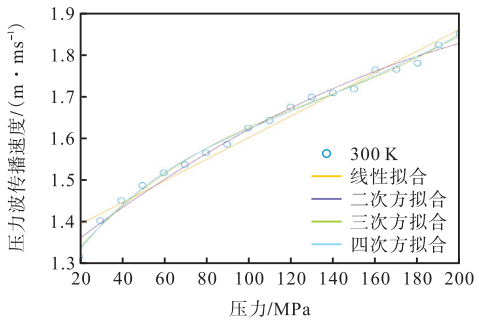



图 6　压力波传播速度与压力拟合方法对比

Fig.6　Comparison of propagation velocity of pressure wave and pressure fitting methods

方法来获得等温条件下压力和声速之间的多项式关系(式 10). 由拟合式可算出不同压力和温度下压力波传播速度,即柴油的声速,有

$$v = A_1 + A_2 p + A_3 p^2 + A_4 p^3 \tag{10}$$

式中:$A_1$、$A_2$、$A_3$ 和 $A_4$ 分别为不同温度下的系数,其对应的拟合系数如表 2 所示.

**表 2 拟合系数**

**Tab.2 Fitting coefficient**

| 温度/K | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ | $A_4$ |
|---|---|---|---|---|
| 300 | 1.216 | 0.006 887 | $-3.711\times10^{-5}$ | $9.252\times10^{-8}$ |
| 310 | 1.203 | 0.005 729 | $-2.056\times10^{-5}$ | $3.905\times10^{-8}$ |
| 320 | 1.213 | 0.004 723 | $-7.564\times10^{-6}$ | $-7.962\times10^{-9}$ |
| 330 | 1.232 | 0.003 476 | $4.441\times10^{-6}$ | $-4.027\times10^{-8}$ |
| 340 | 1.154 | 0.005 300 | $-1.387\times10^{-5}$ | $1.443\times10^{-8}$ |
| 350 | 1.075 | 0.007 852 | $-4.46\times10^{-5}$ | $1.152\times10^{-7}$ |
| 360 | 1.083 | 0.006 255 | $-2.624\times10^{-5}$ | $5.878\times10^{-8}$ |

## 3.2 密度计算与分析

### 3.2.1 初始密度测试

笔者测量大气压力条件下不同温度的柴油初始密度,采用 3 次测量求平均值的方法获得. 对获得的密度数据和温度进行最小二乘法拟合,分别进行了线性、二次方和三次方多项式拟合,如图 7 所示. 表 3 为柴油初始密度不同拟合方式的拟合程度对比.

可知,线性拟合 $R^2$ 为 0.951 7、残差范数为 0.008 266,拟合偏差较大,二次方和三次方拟合的 $R^2$ 分别为 0.957 3 和 0.957 9,且残差范数相近,拟合效果接近(图 6),因而笔者采用二次方拟合方法来获得柴油初始密度与温度之间的多项式拟合关系,得到的拟合多项式见式(11). 由拟合公式可算出不同温度条件下柴油的初始密度 $\rho_0$.

$$\rho = B_1 + B_2 T + B_3 T^2 \tag{11}$$

式中:$B_1$、$B_2$ 和 $B_3$ 分别为初始密度计算系数,有 $B_1$ = 0.710 2, $B_2$ = 0.001 335, $B_3$ = $-3.073\times10^{-6}$.

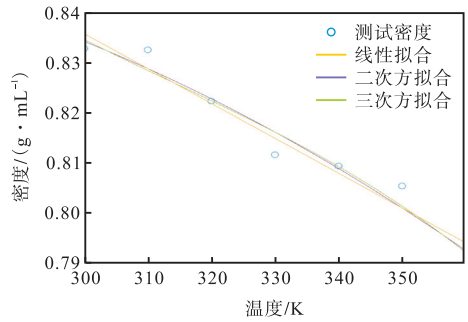



**图 7 柴油初始密度和温度拟合方法对比**

**Fig.7 Comparison of diesel initial density and temperature fitting methods**

**表 3 柴油初始密度不同拟合方式的拟合程度对比**

**Tab.3 Comparison of fitting degree of diesel initial density with different fitting methods**

| 参数 | 线性 | 二次方 | 三次方 |
|---|---|---|---|
| $R^2$ | 0.951 7 | 0.957 3 | 0.957 9 |
| 残差范数 | 0.008 266 | 0.007 771 | 0.077 140 |

### 3.2.2 高压条件下柴油密度测量与分析

根据不同压力、温度下柴油的声速和大气压力环境下柴油的初始密度值,由式(7)、式(10)和式(11)得到式(12),可计算出高压条件下的柴油密度.

$$\rho(p,T) = B_1 + B_2 T + B_3 T^2 + \int_{p_0}^{p} \frac{\mathrm{d}p}{(A_1 + A_2 p + A_3 p^2 + A_4 p^3)^2} \tag{12}$$

图 8 为柴油密度随温度变化. 随温度升高,柴油密度降低,这是因为温度升高后液体分子之间的空间变大,密度便会降低. 在温度从 300 K 升至 360 K、压力为 20 ~ 200 MPa 条件下,密度下降的范围为 0.024 26 ~ 0.036 23 g/mL. 压力越高,密度随温度下降幅度越小. 在压力为 20 MPa 条件下,温度每升高 10 K,密度平均减小 0.006 038 g/mL;在压力为 200 MPa 条件下,温度每升高 10 K,密度平均减小 0.004 043 g/mL.

图 9 为不同压力下的柴油密度. 随压力升高,柴油密度升高,因为压力增加,液体分子之间的空间被

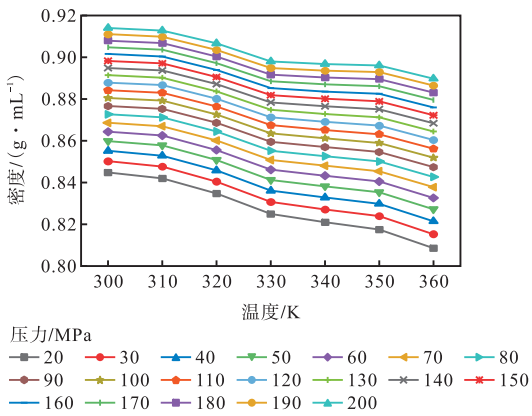



**图 8 不同温度下的柴油密度**

**Fig.8 Diesel density under different temperatures**

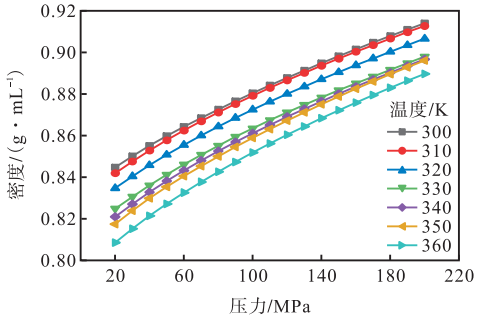
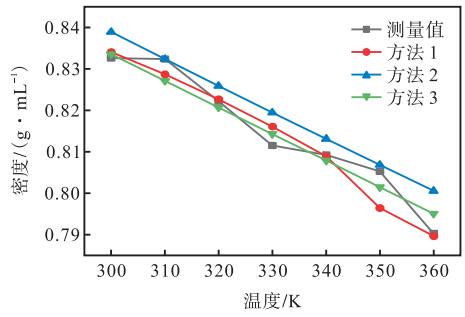



**图 9 不同压力下的柴油密度**

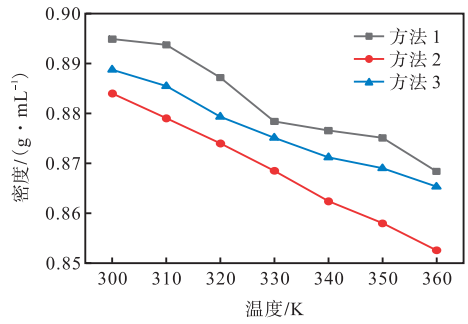
**Fig.9 Diesel density under different pressures**

压缩，密度变大. 压力与密度近似呈线性关系. 在压力从 20 MPa 升高至 200 MPa、温度为 300 ~ 360 K 条件下，密度升高幅度的范围为 0.069 19 ~ 0.081 16 g/mL. 温度越高，密度随压力增加幅度越大. 在温度为 300 K 条件下，压力每增加 10 MPa，密度平均增加 0.003 844 g/mL；在温度为 360 K 条件下，压力每增加 10 MPa，密度平均增加 0.004 509 g/mL. 压力对密度变化的影响大于温度对密度的影响.

图 10 为试验数据和拟合公式结果对比. 测量值为笔者实测 0.1 MPa 条件下国标 0 号柴油的密度，拟合方法 1、方法 2、方法 3 分别对应笔者测量值、文献[8]和文献[5]，其中 3 种方法的柴油样本分别为国标 0 号柴油、国标−20 号柴油和 Repsol Elite 柴油. 在压力为 0.1 MPa 条件下，3 种方法与柴油密度测量值的最大偏差分别为 0.004 567、0.012 83 和 0.004 659 g/mL. 在压力为 140.0 MPa 条件下，3 种方法最大偏差为 0.017 1 g/mL. 偏差产生的原因主要因为试验用柴油的品种不同则密度不同，环境温度波动、试验高压油管长度受温度、压力影响及仪器设备测量精度不同等也会造成以上偏差.




（a）0.1 MPa




（b）140.0 MPa

**图 10　柴油密度测量值与拟合结果对比**

**Fig.10　Comparison of measurement results and fitting results of diesel density**

## 4　结　论

（1）柴油密度随温度的升高而减小，随压力的升高而增加，且压力对柴油密度影响远大于温度.

（2）在温度范围为 300 ~ 360 K 条件下，每升高 10 K，密度平均下降 0.004 043 ~ 0.006 038 g/mL，压力越高，密度随温度下降幅度越小.

（3）在压力范围为 20 ~ 200 MPa 条件下，每增加 10 MPa，密度平均增加 0.003 844 ~ 0.004 509 g/mL，温度越高，密度随压力增加幅度越大.

**参考文献：**


[1] 杨强，杨建国. 船用中速柴油机高压共轨系统的现状与发展趋势[J]. 船海工程，2019，48(3)：142-146.

[2] 细矢治夫，丸山有成. 结构与物性[M]. 上海：上海科学出版社，1979：73-74.

[3] Ndiaye E H I，Bazile J P，Nasri D，et al. High pressure thermophysical characterization of fuel used for testing and calibrating diesel injection systems[J]. Fuel，2012，98：288-294.

[4] Safarov J，Ashurova U，Ahmadov B，et al. Thermophysical properties of diesel fuel over a wide range of temperatures and pressures[J]. Fuel，2018，216：870-889.

[5] Payri R，Salvador F J，Gimeno J，et al. The effect of temperature and pressure on thermodynamic properties of diesel and biodiesel fuels[J]. Fuel，2011，90：1172-1180.

[6] Rodriguez-Anton L M，Casanova-Kindelan J，Tardajos G. High pressure physical properties of fluids used in diesel injection systems[J]. SAE Transactions，2000，4：2155-2165.

[7] Meng X，Jia M，Wang T. Predicting biodiesel densities over a wide temperature range up to 523 K[J]. Fuel，2013，111(9)：216-222.

[8] 张建明，张卫刚，王亚伟，等. 柴油高压物理特性的研究[J]. 高压物理学报，2005(1)：41-44.

[9] 李海洋，杨海涛，张清林，等. 共轨系统燃油压力及物性参数测试研究[J]. 现代车用动力，2017(4)：43-47.

[10] 孙彩华. 柴油机燃油物性参数的分析[J]. 中国水运，2014，14(7)：155-156.

[11] 吴望一. 流体力学[M]. 北京：北京大学出版社，2021：92-93.

[12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫局. GB/T 2013—2010 液体石油化工产品密度测定法[S]. 北京：中国标准出版社，2011.