文章编号：1000-5773(2005)01-0041-04

# 柴油高压物理特性的研究*

张建明[1]，张卫刚[1]，王亚伟[2]，王晓东[2]

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院，上海 200030；
2. 无锡威孚高科技有限公司，江苏无锡 214031)

**摘要**：柴油物理特性是模拟计算高压燃油喷射系统的基础。针对柴油的密度、体弹性模量和运动粘度等进行了试验研究，在其基础上得出了柴油密度、弹性模量和运动粘度随压力和温度变化的经验公式，能较好地把柴油的密度、弹性模量和声速统一起来，与试验的误差小于3%，相关系数大于0.998，能满足高精度燃油喷射系统仿真的精度要求。

**关键词**：柴油；物理特性；密度；体弹性模量；运动粘度
**中图分类号**：O521.2 **文献标识码**：A

## 1 引 言

对柴油燃油喷射系统的喷射过程进行准确的模拟计算，是设计和优化燃油喷射系统的重要手段之一，而柴油的物理特性是模拟计算的基础，它对燃油喷射系统的喷油压力、喷油率、回油率、泄漏率和喷射特征等有很大的影响，随着燃油喷射系统喷油压力的提高，这种影响越来越大，中硫轻柴油在20 ℃时从0.1 MPa加压到140 MPa其密度会增大7%；体弹性模量增大了126.4%。在高压燃油喷射系统中，压力和温度的变化很大，柴油的主要物理特征如体弹性模量、密度和运动粘度等都有较大的变化，可表示成压力和温度的函数。许多研究者如C. Arcoumanis[1]，L. M. Rodriguez-Anton[2]，V. Garla[3,4]，K. S. Varde[6]，K. Yamaoka[7]等等对燃油的物理特性进行了研究，研究结果存在较大的差异，推导的公式也不一致，不能较好地表达燃油的物理特性，况且各国的柴油成分不同，其物理特性存在差异。本研究针对－20柴油物理特性按GB 1884/256/6602等方法进行试验研究，得到了比较满意的结果。

## 2 柴油的体弹性模量(压缩率)

柴油体弹性模量是表示柴油可压缩性的指标，对燃油喷射系统的仿真结果的准确性有很大影响，特别对压力波的传播有直接影响，通常体弹性模量可表示为

$$K=-V\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}V}=\rho\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}\rho} \tag{1}$$

从(1)式可知，通过测量体积的变化率和压力的变化可求得体弹性模量。图1和图2为测试结果。

利用García[3,4]等人的研究，通过对图1和图2的数据处理可以得到以下公式

$$B_{\mathrm{M}}(p,T)=c_0(p+c_1-c_2T)^{c_3} \tag{2}$$

式中：$c_0=34.74$，$c_1=111\,061\,456.8$，$c_2=469\,742.34$，$c_3=0.947$。

为使推导合理，压力与温度的单位分别采用Pa和℃，拟合公式与测试的相关系数为0.999 99。拟合结果与测试结果的对比见图3和图4。

* **收稿日期**：2004-02-09；**修回日期**：2004-05-08
**基金项目**：国家经贸委重点产业项目“电控柴油机的开发”(BK005)
**作者简介**：张建明(1971—)，博士研究生，主要从事柴油发动机燃油喷射与燃烧方面的研究.
E-mail：zjm@sjtu.edu.cn

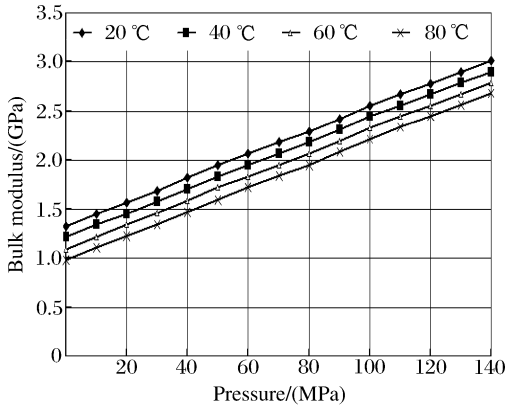



图 1 体弹性模量与压力的关系

Fig. 1 Bulk modulus versus pressure

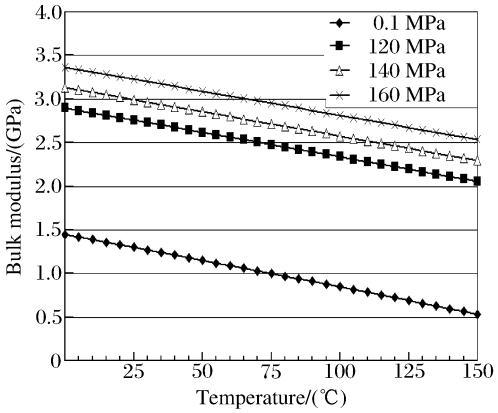



图 2 体弹性模量与温度的关系

Fig. 2 Bulk modulus versus temperature

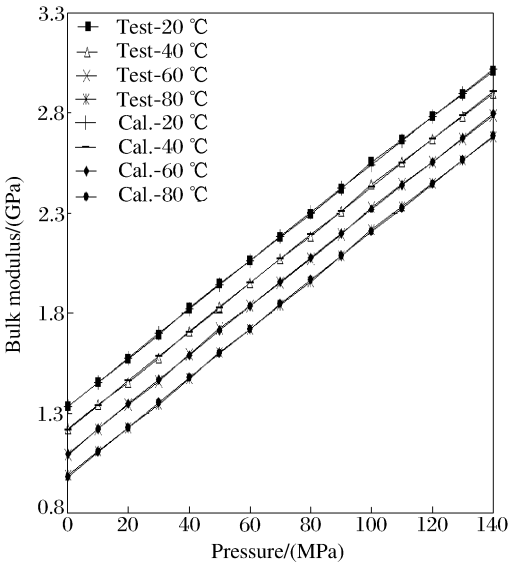



图 3 弹性模量测试与拟合结果对比

Fig. 3 Comparison of test and calculation data of bulk modulus versus pressure

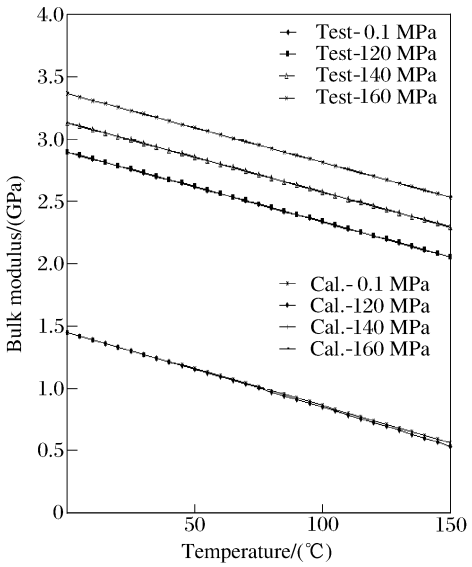



图 4 弹性模量与拟合结果对比

Fig. 4 Comparison of test and calculation data of bulk modulus versus temperature

## 3 柴油的密度

柴油的密度是柴油最重要的物理特性，它随压力与温度的变化而变化，对燃油喷射系统的仿真准确性有着特别大的影响。以前 C. Arcoumanis、K. S. Varde 等人对柴油的特性进行了试验研究，但推导的密度经验公式与弹性模量经验公式是相互独立的，不能满足柴油的内部特性，本研究利用(1)式和(2)式对密度的经验公式进行了推导，并对通过共振密度测量仪测得的实验数据进行了拟合，得出下面的密度经验公式(3)，与试验的相关系数为 0.999 9

$$\rho(p,T)=(a_0+a_1T+a_2T^2)\exp\left[\frac{1}{c_0(1-c_3)}(p+c_1-c_2T)^{1-c_3}\right] \tag{3}$$

式中：$a_0=199.134\,4$，$a_1=-0.099\,1$，$a_2=0.000\,15$，$c_0$、$c_1$、$c_2$ 和 $c_3$ 是(2)式中的系数，把它们代入(3)式可得(4)式

$$\rho(p,T)=(a_0+a_1T+a_2T^2)\exp\left[a_3(p+a_4-a_5T)^{a_6}\right] \tag{4}$$

式中：$a_0=199.269\,71$，$a_1=-0.101\,948$，$a_2=0.000\,191\,49$，$a_3=0.543\,1$，$a_4=111\,061\,456.8$，$a_5=$

469 742.34,$a_6$=0.053。

柴油密度的测试结果与拟合结果的对比见图 5。

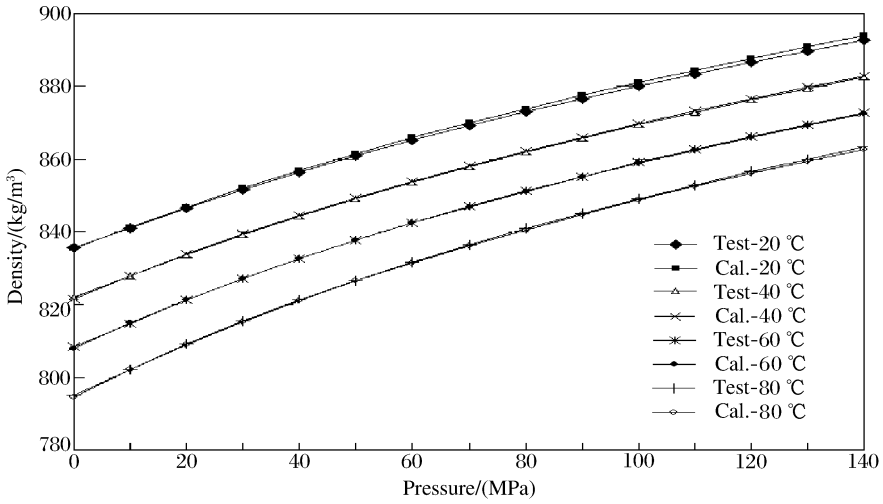



图 5　柴油密度测试值与拟合值的对比

Fig. 5　Comparison of test and calculation data of diesel density

## 4　柴油的运动粘度

柴油的运动粘度是柴油的一个重要特性,对管路压力损失、泵和喷油器等的渗漏影响很大。以前许多燃油系统的仿真没有考虑其随压力和温度的变化而变化,而导致在管路压力损失和渗漏方面出现较大的仿真误差,通过建立较准确的运动粘度模型可以减小误差。通过对试验数据的拟合,得到经验公式

$$\nu(p,T)=\frac{1}{T^{b_0}}\exp\left(b_1+\frac{b_2}{T}+b_3\mathrm{e}^{b_4/Tp}\right) \tag{5}$$

式中:$b_0$=1.505 9,$b_1$=−6.549 6,$b_2$=−23.541 7,$b_3$=1.38×10$^{-8}$,$b_4$=2.901 4,(5)式与测试数据的相关系数为 0.998,其误差小于 3%。试验与计算结果见图 6。

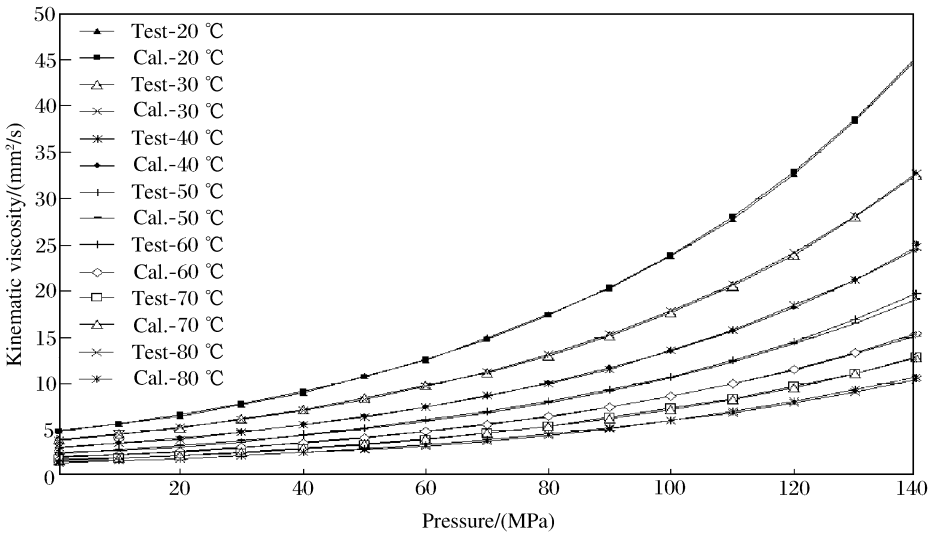



图 6　柴油的运动粘度试验结果与拟合结果的比较

Fig. 6　Comparison of test and calculation data of diesel kinematic viscosity

## 5 柴油的蒸汽压力

柴油的蒸汽压力在喷油系统仿真模型中也有比较重要的位置,它决定系统中产生气泡和气泡溃灭的压力值,虽然随温度的变化而变化,但变化范围不大,在0～100 ℃温度内其变化范围在75～84 kPa之间,取均值79.5 kPa就能满足燃油喷射系统的仿真精度的要求。

## 6 结 论

针对－20柴油的密度、体弹性模量、运动粘度和蒸汽压力进行了试验研究,从试验结果可知,柴油的密度、体弹性模量和运动粘度随压力和温度的变化而变化,而且其变化率比较大,在试验的基础上得出了柴油的密度、体弹性模量和运动粘度随压力与温度变化的经验公式,计算值与试验值的误差小于3%,相关系数大于0.998。对燃油压力大于100 MPa的燃油系统来说,进行仿真时必须考虑压力和温度对燃油物理特性所带来的影响。

## References:


[1] Arcoumanis C, Fairbrother R J. Computer Simulation of Fuel Injection Systems for DI Diesel Engines [R]. SAE 922223.

[2] Rodriguez-Anton L M, Casanova-Kindelan J, Tardajos G. High Pressure Physical Properties of Fluids Used in Diesel Injection Systems [R]. SAE 2000-01-2046.

[3] Garla V, Cáceres M, Nuñez J. The spinodal as a Reference Curve for the High-Pressure Volumetric Behavior of Liquids [J]. Chem Phys Lett, 1993, 216: 579－584.

[4] Garla V, Cáceres M, Nuñez J. High-Pressure Compressibility Behavior of Liquids Referred to a Pseudospinodal Curve [J]. Chem Phys Lett, 1994, 228: 137－143.

[5] Lee H-K, Russel M F, Bae C S, et al. Development of Cavitations and Enhanced Injector Models for Diesel Fuel Injection System Simulation [A]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers [C]. 2002, 216: 607－624.

[6] Varde K S. Compressibility of Diesel and Methanol Fuels at Low Temperatures [R]. SAE 890055.

[7] Yamaoka K, Saito A, Abe N, et al. Analysis of Bypass Control Fuel Injection Systems for Small Diesel Engines by Digital Computer [R]. SAE 730664.


## Study on High Pressure Physical Properties of Diesel Oil


ZHANG Jian-Ming[1], ZHANG Wei-Gang[1], WANG Ya-Wei[2], WANG Xiao-Dong[2]

(1. *Shanghai Jiaotong University, Shanghai* 200030, *China*;
2. *Wuxi Weifu High Technology Company, Ltd., Wuxi* 214031, *China*)



**Abstract**: The physical properties of diesel oil are the base of simulating high pressure fuel injection system, where the pressure and temperature fluctuation are significant. The density, bulk modulus, kinematic viscosity and vapor pressure of diesel oil are studied by experiments in this paper, from which the density, bulk modulus and kinematic viscosity variations with the pressure and temperature are abstracted. The errors between the calculation data and tested data are less than 3%, and its correlation coefficients are higher than 0.998. The obtained experimental functions have satisfied the high precision requirement for simulation of the fuel injection system.



**Key words**: diesel oil; physical characteristic; density; bulk modulus; kinematic viscosity