车用柴油十六烷值测定的影响因素分析

宋利军　凌瑞枫
中国石化销售股份有限公司油品技术研究所　天津　300384

摘　要：使用GB/T 386方法测定车用柴油十六烷值时，受众多因素影响导致结果不确定度较大，边界值难以准确判定。副标准燃料、标准检验燃料以及人为操作中的手轮调整手法、压缩终点判断均对测定结果有重要影响，最大达1.0个十六烷值单位。仪器状态和维护保养同样对测定结果有不确定影响，不容忽视。

关键词：车用柴油；十六烷值；副标准燃料；检验燃料

Analysis of influencing factors for determination of cetane number of vehicle diesel oil

Lijun Song, Ruifeng Ling
Oil Technology Research Institute of Sinopec Sales Co., Ltd. (Tianjin 300384)

Abstract: When the GB/T 386 method is used to determine the cetane number of automobile diesel, the result is uncertain due to many factors, and the boundary value is difficult to determine accurately. The secondary standard fuel, standard inspection fuel, manual manipulation of handwheel adjustment, and the judgment of compression end point all have important effects on the determination results, up to 1.0 cetane number units. The state of the instrument and maintenance also have uncertain effects on the measurement results, which should not be ignored.

Keywords: vehicle diesel; Cetane number; Sub standard fuel; Inspection fuel

引言：

车用柴油的十六烷值是评价其着火性的重要指标。十六烷值的大小直接影响燃料的燃烧效率和柴油机排放，对柴油机及整车工况具有决定作用。一方面，柴油十六烷值越高，其着火滞后期越短，着火性能越好，进而燃烧比较完全，不完全燃烧所生成的HC化合物则较少。另一方面，高十六烷值燃料的着火滞后期较短，在滞燃期内生成的可燃混合气量较少，最高爆发压力和压力升高速率降低，同时，预混合燃料比例降低，扩散比例相对提高，使得NO_x排放量有所降低[1]。

从十六烷值测定原理上分，目前车用柴油十六烷值的测定方法主要有压缩比法、风量调节法、等容燃烧法三种。我国车用柴油产品标准中规定，车用柴油十六烷值唯一采用GB/T 386-2010《柴油十六烷值测定法》测定，该标准参照ASTM D613 Standard Test Method for Cetane Number of Diesel Fuel Oil（柴油十六烷值测定法）制定，属于压缩比调节法[2, 3]。

柴油的十六烷值测定采用单缸可调压缩比四冲程发动机进行。通常，汽油和柴油的十六烷值与辛烷值之和一般为一常数。同一燃料其辛烷值越高，十六烷值越低。在气缸固定的压缩比下，燃料的十六烷值越高，其着火滞后期越短。相应的，对于同一油品，随着压缩比的升高，其实际着火滞后期越短。测定时，通过调节压缩手轮，将标准燃料和待测燃料的着火滞后期均调节为上止点前13°，对比手轮读数，通过内插法可以算出待测油品的十六烷值，这一过程原理与辛烷值的测定在本质上较接近[4]。

在十六烷值测定过程中，由于众多因素影响，导致数据精密度往往不高，不确定度分量众多，合成不确定度值较大。不同实验室对同以样品测定时，再现性高达4~5个十六烷值单位，对准确判定临界值样品带来一定困难[5, 6]。

1　实验条件

柴油十六烷值测定通过一台预燃室型压燃试验机，在规定操作条件下，将待测柴油与已知十六烷值的不同标准燃料混合物分别在相同条件下进行着火性质测定，通过比较得出柴油十六烷值。

本文基于GB/T 386-2010《柴油十六烷值测定法》和美国Waukesha公司生产的典型的CFR F-5型十六烷值机[2]，对车用柴油十六烷值测定过程中影响结果的潜在因素进行分析，主要来自以下五个方面：

2 测定影响因素讨论

2.1 副标准燃料

一种典型的高标准检验燃料为T32、低检验燃料为U32。所有副标燃料均由T32和U32以不同比例配制，与待测油样在同工况下进行测定，使用内插法计算。如采用质量比自动配样器，规定质量允差为±0.2%，经换算为结果，误差限＜0.1个十六烷值单位。如采用经校正的量管，放液尖嘴在关闭后液滴体积不得超过0.5mL，按0.5mL计算后，十六烷值单位仍＜0.1，忽略不计。但是，如果配制时采用同样符合标准要求的500mL或400mL量筒，最小分度值为5mL，读数存在误差，对测定结果存在影响。以配制1000mL副标燃料为例，根据配比表，T32 ： U32为580 ： 420时十六烷值为51.1，T32 ： U32为590 ： 410时十六烷值为51.7，500mL量筒读数误差为±1mL，可算出对十六烷值测定误差为0.1个单位。因采用内插法进行计算，配制时至少为2个一组，最终误差可达0.2个十六烷值单位。

2.2 标准检验燃料

目前常见的车用柴油十六烷值多在51~56间，需使用高十六烷值检验燃料（以下简称高检）对仪器状态进行检验。一种典型高检的参考十六烷值为52.99±1.02。根据GB/T 386-2021《柴油十六烷值测定法》中11.3.2节要求，允许误差可成乘以允差极限因素K使用，K通常取值为1.5，即：对高检的十六烷值测定，标准允许范围为51.97~54.01，极限允许范围为51.46~54.52[2]。在此范围内方可进行未知样测定，否则，视为仪器状态未达标，无法测出有效结果。另外，试验方法中并未允许在把检验燃料的测定偏差修正至结果中。

由此可见，仪器状态在高检燃料实测十六烷值51.46~54.52间时，均视为满足试验要求，但极差达3.06个十六烷值单位，对高检测定结果偏高或偏低的幅度，在样品测定时会带来同方向的偏差。由于实际样品与高检燃料组成、燃烧状态难以完全一致，故实际偏差值可超过3.06个十六烷值单位。低十六烷值检验燃料（简称低检）原理相同，由于其常见参考值为41.37±1.27，主要用于十六烷值在40~45间样品，对目前第Ⅵ阶段车用柴油的十六烷值测定无影响。

3 人为操作因素

3.1 手轮调整速率

提高压缩比时，手轮旋转速度快易导致手轮读数偏低，反之亦然。标准中未规定手轮调整速度。实际操作过程中，如标准燃料、检验燃料和油样均为同一人操作时，该误差较小。若中途更换人员或压缩手法，误差则较大，最大可超过1.0个十六烷值单位。

对于手轮倒退读数对十六烷值的影响，针于GB/T 386-2021《柴油十六烷值测定法》而言，手轮单向调节，压缩比减小。一旦着火滞后期稳定且低于13.0°，需重新减小压缩比至接近起始压燃点，不可将手轮逆时针旋转调整，换言之，手轮倒退时读数无效。因为手轮通过梯形丝杠带动小活塞前进，预燃室体积发生细微变化从而改变压缩比，而丝杠外螺纹与小活塞内螺纹在公差配合时采用过渡配合，不可避免的存在空程差，空程差为0.010个手轮读数单位，那么，以高、低标准燃料十六烷值差为5.0，手轮展宽0.400计算，其带来的十六烷值为0.13个单位，引入了较大的人为误差。近年来，国内石化研究机构与装备制造公司基于风量调节法，成功研发了国产压缩比法十六烷值机。该机型经过二代至三代升级，在设计和装配时对进口仪器手轮调节做了全新改良设计、装配与标定，将空程差控制在极小量级，对于十六烷值几乎没有影响。同时，压缩比手轮可以实现倒退读数，这一设计又提高了实验的便利性[7]。同时，研究人员起草风量调节法试验标准，并在发动机其它核心部件进行了优化设计，使得上述不确定度大幅降低。以十六烷值的柴油52.0为例，再现性提高了0.3个十六烷值单位，而实测精密度可达1.0个十六烷值单位以上[7]。但是，截至2022年中旬，尚未纳入车用柴油产品标准中的推荐方法。

3.2 燃油流速

标准规定燃油流速范围规定为13±0.2mL/min，需通过秒表与量管配合计时，秒表计时误差、量管示值误差与人手眼脑反应时间误差叠加，燃油流速在标准规定范围内时对十六烷值影响仅约0.1个单位，超出而未及时调整则对十六烷值影响实测已超0.5个单位。

3.3 压缩终点的判断

通过调节压缩手轮提高压缩比，直至着火滞后期13±0.2°时稳定5~10min方可读数。但由于仪器示数波动或燃烧未稳定达5~10min时读数，则可能造成十六烷值差。仪器稳定性和油品燃烧状态影响较明显，实测对十六烷值结果影响超1.5个单位，也是主要误差来源之一。

3.4 着火滞后期与提前喷油角

读数前着火滞后期与喷油提前角需实时调整，如未达达规定的13±0.2°，对十六烷值影响可达0.5个单位

以上。

3.5 副标的展宽

两种副标燃料的十六烷值差要求不大于5.6个十六烷值单位，高十六烷值副标、低十六烷值副标和油样十六烷值三者越接近结果越准确，误差限为 ±0.5个单位。该因素主要受机械加工性能影响，如气缸重镗内径、气缸高度和压缩压力校准等。

3.6 油路切换

切换燃料时油路需放空并用待测燃料清洗3次，清洗与排气泡是否彻底会对结果产生影响。清洗不彻底时，十六烷值相差达1.0个单位。

3.7 其他操作

副标燃料混合均匀情况，燃料温度高低对十六烷值影响在0.2个单位。

4 仪器参数

4.1 冷机时参数

包括进/排气阀间隙、威克斯泵及曲轴箱润滑油状况、大气压力等。其中，海拔在500m以下时，大气压力影响较小，海拔1000m以上时，可相差达1.0个单位以上，但试验标准对此无修正要求，这需要在校验压缩压力时予以补偿。

4.2 预热时参数

实验室温度湿度、冷却水温度压力、市电状况、润滑油温度和压力、进气温度、冷却液温度、喷油冷却器温度等均需在预热结束时满足技术要求。其中，喷油冷却器温度或进气温度相差1 ℉时，十六烷值约相差0.1个单位；润滑油温度相差5 ℉时，十六烷值相差约0.1个单位。

4.3 实验时参数

实际着火滞后期的动态调整、实际提前喷油角的动态校正、压缩比、可变活塞积碳情况、标尺安装位置导致的示数误差将对测定结果产生不确定影响。

4.4 大修时参数

至少包括GB/T 386-2010标准中第9节“发动机和仪器的工作状况及标准操作条件”中规定的机械参数，包括发动机转速、气门正时和升程、燃料泵正时与入口压力、排气背压、活塞过度移动、皮带张力、喷油油雾图形、标准手轮读数、基础压缩压力、可变压缩压力校正、参比仪表、发动机合格性检定、喷油嘴状态、喷枪开启压力等，对待测样的十六烷值均存在微小影响，但具体数值难以单独考量。

5 压缩比与手轮读数关系

通常，农用低速柴油机压缩比在14.0以上，中、高速柴油机，尤其是高压共轨喷射技术的柴油机压缩比可达18.0以上，喷射压力高达100MPa以上，十六烷值机的工作压缩比不但影响十六烷值测定，其测定结果在实际柴油机上的适用性也是值得考量的课题。

根据压缩比的定义：活塞位于下止点时，燃烧室的总体积为V_0，活塞位于上止点时燃烧室体积为V_1，压缩比$CR=V_0/V_1$。由于燃烧室体积由小活塞控制，故活塞位于上止点时，V_1可分为主燃烧室体积V_2和可变预燃室体积V_{pc}。即$V_1=V_2+V_{pc}$。可知压缩比与预燃室体积成反比例函数关系。通过十六烷值机技术参数可知，其压缩比可在8 ： 1至36 ： 1范围内调节。手轮标尺量程为0.500~3.000，标尺读数与预燃室体积V_{pc}呈线性关系，那么假设0.500标尺读数对应实际压缩比为8.0，相应的，标尺读数3.000对应压缩比为36.0，根据经验公式F.2，$CR=(V_s+V_{pc}+0.659)/(V_{pc}+0.659)$，其中，$V_s$为活塞在汽缸中扫过的容积。那么，通过线性拟合可得到手轮读数x与V_{pc}关系曲线为y=1.7065x-0.4457。

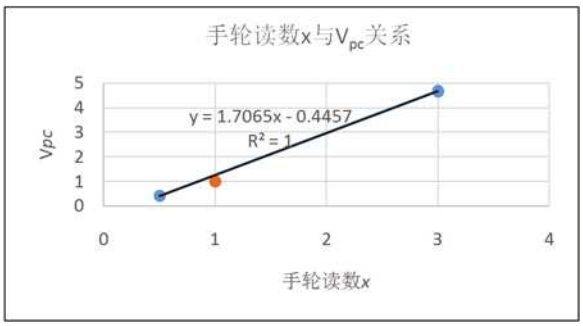

图1 手轮读数x与预燃室容积V_{pc}的关系曲线

表1 压缩比CR、预燃室容积Vpc与手轮读数x关系数值模拟

压缩比/CR	预燃室容积Vpc	手轮读数x
36.00001	0.40757	0.500
26.00001	0.83420	0.750
20.44445	1.26083	1.000
16.90909	1.68746	1.250
14.46154	2.11409	1.500
12.66667	2.54071	1.750
11.29412	2.96734	2.000
10.21053	3.39397	2.250
9.33333	3.82060	2.500
8.60870	4.24723	2.750
8.00000	4.67386	3.000

表1列出了压缩比CR、预燃室容积V_{pc}与手轮读数x关系数值模拟的部分数据，根据模拟数据进行反比例函数拟合，可得到手轮读数与压缩比关系曲线，如图2。拟合曲线为y=20.35x-0.849，相关系数R^2=0.9998。

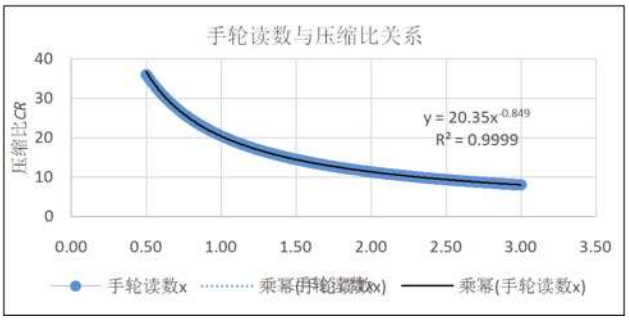

图2　手轮读数与压缩比关系

6　仪器管理因素

6.1计算结果数值修约误差限为 ±0.05个单位，对最终报出的结果影响为0.1个单位。

6.2待测油样量过少影响重复测定，幅度以重复性要求考量。油样的取样、存放、运输等也可能对仪器性能产生影响，间接影响测定结果。

6.3副标和高低检验燃料证书齐全、验收合格，参数满足方法要求，需严格运输、储存、转移，否则对十六烷值影响可能较大。需指出，对于美国进口CFR F-5型十六烷值机，配备的用于校验压缩压力的英制压力表，由于接口问题，目前国内多数检定机构无法出具校准证书，使其不确定度难以精确考量。

6.4方法本身精密度、偏差和不确定度影响。

6.5是否按时按质对仪器进行核查、校验、维护、保养、大修均对仪器状态与测定结果有影响。

7　结束语

车用柴油十六烷值对于燃料燃烧性和发动机工况有重要影响，而检测方法单一，精密度要求较宽泛，影响测定结果因素较多，精准测定存在困难。

十六烷值测定主要影响因素来自标准燃料配比误差、检验燃料允差、人为调节压缩比手法、压缩终点与读数判定、燃料流量与着火滞后期调节误差、仪器动态状态参数偏差等，最大影响因素为压缩比调节误差和检验燃料允差，对实验结果最大影响超过1.0个十六烷值单位。

仪器机械性能、维护保养、检测方法本身精密度同样对结果有影响，在日常操作和仪器维护中，需做到严格按标准和使用说明进行操作与维护，才能将数据结果精密度把控在理想范围。

十六烷值机压缩比、燃料十六烷值展宽与手轮读数可推导出关联拟合式，将实测十六烷值与实际发动机压缩比建立联系，对实车燃烧工况评价有一定指导作用。

参考文献：

[1]陈文淼，吴复甲，王建昕等.十六烷值对欧Ⅳ柴油机燃烧与排放性能的影响[J].内燃机工程，2008，29（6）：1-5

[2]GB/T 386-2021，柴油十六烷值测定法[S].中国标准出版社，2021

[3]ASTM D613-17c Standard Test Method for Cetane Number of Diesel Fuel Oil[S]

[4]GB/T 5487-2015，汽油辛烷值的测定　研究法[S].中国标准出版社，2016

[5]宗丽娜.柴油十六烷值测定方法的研究进展[J].山东化工，2015，44（8）：59-61

[6]刘丰.影响柴油十六烷值测定准确度的因素探析[J].化工管理，2020.1：65

[7]GB/T 33298-2016，柴油十六烷值的测定　风量调节法[S].中国标准出版社，2015