

## 化学品与环境

## 基于傅里叶变换红外气体分析仪的零气发生器检测方法研究

吕利\*, 夏春, 李剑, 程丽萍, 王海燕, 杨倩, 王国娟

(青岛市计量技术研究院, 山东 青岛 266101)

**摘要:**零气发生器性能能否满足标准要求,直接影响后续分析结果的准确性。为了检测零气发生器性能符合国家标准 GB 18285—2018 要求,设计了一种使用傅里叶变换红外气体分析仪检测零气发生器性能的方法。通过动态稀释法将不同种类的国家有证标准气体稀释到国标要求的检测用特定浓度值,文中称其为“参考标准气体”。傅里叶变换红外气体分析仪测量参考标准气体的响应值,并考察分析仪对不同参考标准气体的检出限。依次将国家有证标准气体先后输入 A、B、C 3 个厂家零气发生器,输出气体使用傅里叶变换红外气体分析仪测量响应值,并与参考标准气体的响应值做除法。结果表明,3 个厂家零气发生器都能满足国标的要求,该方法在零气发生器校准检测中的良好应用表现,提高了零气发生器检测效率和可靠性,为零气质量检测提供重要参考。

**关键词:**零气发生器;标准物质;傅里叶变换红外气体分析仪;动态稀释法;检出限

**中图分类号:** O65 **文献标识码:** A **文章编号:** 0258-3283(2026)05-0048-06

**DOI:** 10.13822/j.cnki.hxsj.2026.0009

**Research on the Detection Method for Zero-Gas Generator Based on Fourier-Transform Infrared Gas Analyzer** LV Li\*, XIA Chun, LI Jian, CHENG Li-ping, WANG Hai-yan, YANG Qian, WANG Guo-juan (Qingdao Institute of Measurement Technology, Qingdao 266101, China)

**Abstract:** The performance of a zero-gas generator directly affects the accuracy of the subsequent analysis results. To determine whether the performance meets the requirements of the national standard GB 18285—2018, a detection method incorporating a Fourier-transform infrared (FT-IR) gas analyzer was designed. Various nationally certified standard gases were dynamically diluted to the specific concentrations required by the national standard for detection, which are referred to as “reference standard gases” in the text. The FT-IR gas analyzer measured the responses of the reference standard gases, and the detection limits of the analyzer were determined for various reference standard gases. National certified standard gases were successively input into zero-gas generators from three different manufacturers: A, B, and C. The responses of the output gases were measured using the FT-IR gas analyzer and then divided by the responses of the reference standard gases. The results showed that the zero-gas generators from all three manufacturers met the requirements of the national standard. The robust performance of this method for the calibration and assessment of detection capability of zero-gas generators improves their detection efficiency and reliability, providing an important reference for the quality detection of zero gas.

**Key words:** zero air generator; reference material; FT-IR spectroscopy; dynamic dilution method; detection limit

氮氧化物( $\text{NO}_x$ )和一氧化碳是引发大气污染的主要因素。化石燃料在燃烧时会产生氮氧化物和一氧化碳,例如燃油发动机<sup>[1,2]</sup>、烧煤热电厂<sup>[3]</sup>、水泥工业<sup>[4]</sup>及铁矿石烧结<sup>[5]</sup>等都是其排放来源。当前,我国燃油车保有量仍在持续增长,汽车尾气排放污染不但会危害空气质量,更会给人民群众的健康造成威胁<sup>[6,7]</sup>。为了有效治理汽车尾气污染,国家出台了一系列的排放标准加大对汽车尾气排放的检测并减少机动车污染气体的排放。零气发生器是机动车尾气检测中一种重要的标准设备<sup>[8]</sup>。零气发生器将输入的气体经过净化、处理、干馏作用后输出到尾气分析仪<sup>[9]</sup>,旨在校准尾气分析仪的零点,其产生零气的质量直接

决定着尾气分析仪数据的准确性,因此,零气发生器能够输出稳定且气体质量可靠的零气,直接影响机动车检测数据的真实性和可信度。

近年来,在气体成分分析计量和气体标准物质研制领域,以傅里叶变换红外气体分析仪(FT-IR)为代表的光谱分析测量技术正得到了越来越广泛的应用<sup>[10-15]</sup>。FT-IR 的工作原理是基于

收稿日期:2026-01-26;修回日期:2026-03-18;接受日期:2026-03-23

基金项目:山东计量测试学会科技项目(2024KJ31)。

作者简介:吕利(1991-),男,山东青岛人,硕士,高级工程师,主要研究方向为气体分析计量,E-mail:lvli@stu.ouc.edu.cn。

红外光与物质原子间的相互作用,不同分子因其特有的化学键振动频率而吸收特定波长的红外光,从而产生特定的红外吸收光谱<sup>[16]</sup>,抗干扰能力强,不但适用于甲烷、碳氧化物等稳定性气体的测量<sup>[17,18]</sup>,而且可准确测量一些多组分气体的浓度<sup>[10,11,15]</sup>。相较于化学发光法、普通紫外等气体分析方法,FT-IR 具有较强的适用性。

本文主要通过动态稀释法<sup>[19-22]</sup>将不同组分的标准气体稀释到 GB 18285—2018《汽油车污染物排放限值及测量方法(双怠速法及简易工况法)》<sup>[23]</sup>中对汽车检测领域零气发生器的零气指标要求的浓度,本文称为“参考标准气体”。零气发生器的净化处理后输出气体响应值与“参考标准气体”响应值做除法并和“1”作比较,以此评价零气发生器性能能否满足要求。本文使用傅里叶变换红外气体分析仪检测零气发生器方法较为准确,检测效率高,能够满足判断零气发生器性能是否符合要求。

## 1 实验部分

### 1.1 主要仪器与试剂

MG6030 型傅里叶变换红外气体分析仪(光谱波数范围:400~4500  $\text{cm}^{-1}$ ,以下简称分析仪,美国 MKS 公司);SA-22142-PT 型质量流量计(精度为 MPE:±0.5%,分别记为 MFC1:0~1000 mL/min 和 MFC2:0~50 mL/min,用于稀释标准气体,美国 ALICAT 公司);φ19、φ45、φ140 型活塞式气体流量标准装置(测量范围:0.002~20 L/min,北京中计福泰普科技有限公司)。

氮中一氧化氮气体标准物质(51.6  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ,  $U_{\text{rel}} = 1\%$  ( $k = 2$ ))、氮中二氧化氮气体标准物质(20.7  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ,  $U_{\text{rel}} = 1.5\%$  ( $k = 2$ ))、氮中一氧化碳气体标准物质(50.24  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ,  $U_{\text{rel}} = 0.8\%$  ( $k = 2$ ))、氮中甲烷气体标准物质(99.9  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ,  $U_{\text{rel}} = 1\%$  ( $k = 2$ ))(中国计量科学研究院)。

零气发生器选择了 3 个国内外厂家的仪器,分别是 A 公司、B 公司、C 公司;国标 GB 18285—2018 中零气指标要求的浓度如表 1 所示。

表 1 零气各组分气体浓度要求

Tab.1 Concentration requirements for each component of the zero gas

气体种类	CO	NO	NO <sub>2</sub>	HC
含量/( $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ )	<1	<1	<1	<1

### 1.2 测量系统

将参考标准气体通入分析仪,其响应值记为  $c_0$ ,测量设备连接如图 1 所示。

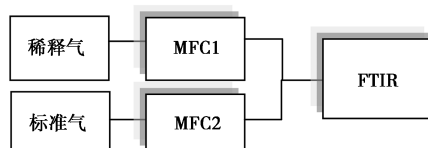


图 1 参考标准气体响应值测量示意图

Fig.1 Measurement diagram of reference standard gas response value

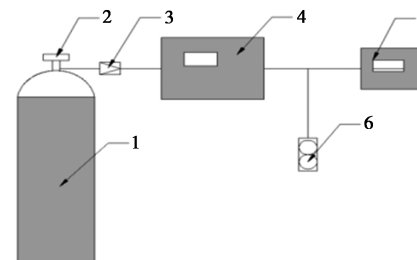
采用动态稀释法将气体标准物质分别稀释到如表 2 所示的浓度,称为“参考标准气体”。两个质量流量计均在本单位内部校准,两个质量流量计的重复性测量结果 RSD 均小于 1%,表明具有良好的重复性;质量流量计线性方程在其量程范围内的相关系数  $R^2$  均接近于 1,表明具有良好的线性度。

表 2 标准气体稀释前后浓度

Tab.2 Concentration before and after dilution with

标准气体名称	标准气体浓度	参考标准气体浓度
CO	50.24	1
NO	51.60	1
NO <sub>2</sub>	20.70	1
CH <sub>4</sub>	99.90	1

标准气体经零气发生器输出到分析仪,其响应值分别记为  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$ ,测量设备连接如图 2 所示。



1.标准气体钢瓶;2.开关;3.发生器减压阀;4.发生器;  
5.分析仪;6.流量计

图 2 标准气体通入零气发生器的设备连接示意图

Fig.2 Schematic diagram of the equipment connection for introducing standard gas into the zero gas generator

### 1.3 实验方法

朗伯-比尔定律表明,物质的吸光度是与其物质的量浓度成正比的,通过该组分的 FT-IR 响应值可以计算其对应的物质的量浓度。分析仪测量

参考标准气体 5 次, 计算其响应值的平均值  $\bar{c}_0$ ; A、B、C 3 个厂家的零气发生器输出气体经分析仪测量依次得到其相应的响应值的平均值  $\bar{c}_1$ 、 $\bar{c}_2$ 、 $\bar{c}_3$ , 分别将  $\bar{c}_1$ 、 $\bar{c}_2$ 、 $\bar{c}_3$  与  $\bar{c}_0$  做除法, 即:

$$Y = \bar{c}_i / \bar{c}_0 \quad (1)$$

式中,  $i=1, 2, 3$ 。

这样零气发生器的处理性能的判断, 就可以转化为  $Y$  与 1 的关系问题。当  $Y \leq 1$  时, 表明零气发生器该组分的处理性能符合国标要求; 当  $Y > 1$ , 表明零气发生器该组分的处理性能不符合国标要求。

零气发生器按照使用说明书的要求调节气体减压阀和发生器各级减压阀压力, 通过调节图中流量计使进入气体分析仪的流量满足气体分析仪要求。分析仪选择相应的组分校准曲线经零点校正后测量, 质量流量计在使用前使用本院 PVT-1 活塞式气体流量标准装置进行标定。

测量开始时, 首先将参考标准气体通入分析仪, 连续测量 5 次, 每隔 1 min 记录一次响应值; 之后依次将同种类的标准气体输入 A、B、C 3 个厂家的零气发生器测量输出气体的响应值, 同样连续测量 5 次, 每隔 1 min 记录一次响应值。测量完成参考标准气体和 3 个厂家的零气发生器输出气体的响应值之后, 再按照上述步骤测另一种类的气体, 直到 4 种气体全部测量完成。

#### 1.4 参考标准气体浓度的不确定度评定

参考标准气体通过调节 2 个质量流量计的流量按式(2)计算获得。

$$c_i = kc_0' \quad (2)$$

式中,  $k$  为稀释比;  $c_i$  为稀释后气体浓度;  $c_0'$  为标准气体浓度。

计算标准气体和稀释气体的流量比可以得到准确的稀释比, 如式(3)所示。

$$k = Q_1 / (Q_1 + Q_2) \quad (3)$$

式中,  $Q_1$  为标准气体流量;  $Q_2$  为稀释气体流量。

以式(2)  $c_i = kc_0'$  为数学模型, 以 CO 为例, 参考标准气体的不确定度来源是标准气体浓度  $c_0'$  的不确定度和稀释比  $k$  的不确定度。  $c_0'$  和  $k$  是不相关的两个量, 则参考标准气体的相对不确定度可用式(4)表示。

$$u_r(c_0) = \sqrt{u_r^2(c_0') + u_r^2(k)} \quad (4)$$

式中,  $u_r(c_0')$  是标准气体的相对不确定度;  $u_r(k)$  是稀释比的相对不确定度。

$u_r(c_0')$  引用标准气体证书给出的相对不确定度  $U_r = 1\%$ ,  $u_r(c_0') = U_r / k = 0.5\%$ 。

$u_r(k)$  的计算方法参考文献[20, 24], 如式(5)所示。

$$u_r(k) = \sqrt{Q_1^2 u^2(Q_2) + Q_2^2 u^2(Q_1)} / [Q_1(Q_1 + Q_2)] \quad (5)$$

质量流量计校准证书给出的相对不确定度  $u_r = 0.5\%$ , 各组分气体不确定度数据汇总如表 3 所示。

表 3 参考标准气体不确定度数据汇总

Tab.3 Summary of uncertainty for reference standard gases

气体	$u_r(c_0')/\%$	$u_r(k)/\%$	$u_r(c_0)/\%$	$U_r(c_0)(k=2)/\%$
CO	0.40	0.51	0.65	1.3
NO	0.50	0.51	0.72	1.5
NO <sub>2</sub>	0.75	0.48	0.90	1.8
CH <sub>4</sub>	0.50	0.50	0.71	1.5

由表 3 可以看出, 各组分气体相对不确定度范围是 0.65%~0.90%, 相对扩展不确定度经修约计算范围是 1.3%~1.8% ( $k=2$ )。

## 2 结果与讨论

### 2.1 检出限

依据 GB/T 27417—2017《合格评定 化学分析方法确认和验证指南》<sup>[25]</sup>, 计算各组分气体的检出限。在分析仪运行稳定后, 将标准气体用动态稀释法稀释到参考标准气体的浓度后通入分析仪中测量, 对该样品连续测试 10 次, 测量结果见表 4。根据参考标准气体的响应值, 计算出标准偏差 SD, 检出限 LOD 通过公式  $LOD = 3SD$  可得。

表 4 检出限响应值测量结果

Tab.4 Results of the detection limit response value

次数	气体			
	CO	NO	NO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
1	0.788	0.928	0.856	1.098
2	0.823	0.936	0.871	1.084
3	0.759	0.909	0.894	1.068
4	0.770	0.919	0.874	1.051
5	0.812	0.879	0.855	1.032
6	0.771	0.941	0.843	1.055
7	0.775	0.934	0.867	1.072
8	0.758	0.891	0.878	1.059
9	0.803	0.925	0.872	1.075
10	0.778	0.933	0.868	1.089
SD	0.022	0.021	0.014	0.020
LOD	0.067	0.062	0.042	0.059

由表中响应值数据可以算出各个参考标准气体组分的标准偏差数值都很接近, 最大的标准偏差是 CO 组分为 0.022, 检出限为 0.066; 最小的

标准偏差是 NO<sub>2</sub> 组分为 0.014,检出限为 0.042。因此,各个参考标准气体组分检出限保守估计为 0.1。

2.2 Y 值的不确定度评定

以式(1)为数学模型,Y 值的不确定度来源包括参考标准气体浓度 c<sub>0</sub> 的不确定度和零气发生器输出气体浓度 c<sub>i</sub> 的不确定度,c<sub>0</sub> 和 c<sub>i</sub> 是不相关的两个量,则参考标准气体的相对不确定度可用式(6)表示,即:

$$u_r(Y) = \sqrt{u_r^2(c_0) + u_r^2(c_i)} \quad (6)$$

式中,u<sub>r</sub><sup>2</sup>(c<sub>0</sub>) 在 1.4 中已然求得;u<sub>r</sub>(c<sub>i</sub>) 来源于 FT-IR 的测量不确定度,包括重复性引入的 A 类不确定度和仪器分辨力等因素综合评定 B 类不确定度。

将表 5 中的重复性数据按照贝塞尔公式计算 A 类不确定度,由表可知 B 类不确定度分量远小于 A 类不确定度,可忽略。

表 5 Y 值不确定度数据汇总

Tab.5 Summary of uncertainty for Y value

气体	u <sub>r</sub> (c <sub>0</sub> )/%	u <sub>r</sub> (c <sub>i</sub> )/%	u <sub>r</sub> (Y)/%	U <sub>r</sub> (Y)(k=2)/%
CO	0.65	0.70	0.96	2.0
NO	0.72	0.67	1.10	2.2
NO <sub>2</sub>	0.90	0.45	1.10	2.2
CH <sub>4</sub>	0.71	0.64	0.96	2.0

各组分 Y 值相对扩展不确定度经修约计算范围是 2.0%~2.2%(k=2)。

2.3 重复性

在分析仪运行稳定后,将标准气体用动态稀释法稀释到参考标准气体的浓度后通入分析仪中测量,对该样品连续测试至少 6 次,计算被测分析仪的各组分响应值的重复性 RSD,结果见表 6。

表 6 重复性响应值测量结果

Tab.6 Results of repetitive response value

次数	气体			
	CO	NO	NO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
1	0.863	0.942	0.916	0.985
2	0.859	0.931	0.925	0.978
3	0.872	0.919	0.934	0.974
4	0.879	0.929	0.928	0.981
5	0.873	0.932	0.921	0.975
6	0.878	0.941	0.930	0.972
平均值	0.871	0.932	0.926	0.978
RSD/%	0.8	0.8	0.6	0.5

表中重复性测量结果 RSD 均小于 1%,说明分析仪具有良好的重复性。

2.4 线性度

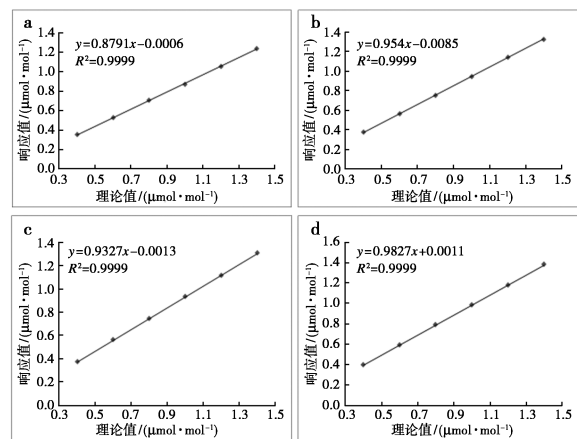
为了考察各组分气体在 1 μmol/mol 附近线性度情况,通过调节两个质量流量计的流量,配制不同浓度的标准气体,用分析仪测量不同浓度下的 FT-IR 响应值,测量结果见表 7。

表 7 各组分不同浓度的响应值测量结果

Tab.7 Results of response values for each component at different concentration (μmol/mol)

理论值	气体			
	CO	NO	NO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
0.4	0.352	0.376	0.372	0.396
0.6	0.528	0.562	0.560	0.591
0.8	0.705	0.750	0.744	0.786
1.0	0.871	0.946	0.931	0.982
1.2	1.054	1.142	1.114	1.177
1.4	1.234	1.324	1.308	1.381

采用最小二乘法绘制了各组分气体不同浓度下理论值和响应值的线性方程和标准曲线,线性方程见图 3。



a.CO;b.NO;c.NO<sub>2</sub>;d.CH<sub>4</sub>

图 3 各组分气体理论值和响应值的线性关系

Fig.3 Linear relationship between theoretical values and response values of each component

如图 3 所示,横坐标为气体在不同稀释倍率下的理论值,纵坐标为不同稀释倍率下的 FT-IR 响应值,各组分气体在 1 μmol/mol 附近浓度范围线性方程分别是 CO:y=0.8791x-0.0006;NO:y=0.954x-0.0085;NO<sub>2</sub>:y=0.9327x-0.0013;CH<sub>4</sub>:y=0.9827x+0.0011,其相关系数 R<sup>2</sup> 均为 0.9999,说明各组分气体在 1 μmol/mol 附近浓度范围的标准曲线均满足线性要求。

2.5 测量结果

按照实验方法分别测量参考标准气体和零气发生器输出气体的响应值,测量结果见表 8。

表 8 各组分气体响应值的测量结果

Tab.8 Measurement results of the response values of each component gas

气体种类	参考标准气体/ $c_0$	厂家 A/ $c_1$	厂家 B/ $c_2$	厂家 C/ $c_3$
CO	0.788	0.360	0.771	0.526
	0.759	0.325	0.735	0.516
	0.812	0.350	0.767	0.521
	0.775	0.372	0.767	0.515
	0.803	0.358	0.743	0.520
平均值	0.787	0.353	0.757	0.520
Y	1.0	0.45	0.96	0.66
NO	0.928	0.165	0.288	0.213
	0.909	0.185	0.256	0.232
	0.879	0.199	0.228	0.265
	0.934	0.173	0.249	0.246
	0.925	0.157	0.253	0.222
平均值	0.915	0.176	0.255	0.236
Y	1.0	0.19	0.28	0.26
NO <sub>2</sub>	0.856	0.335	0.308	0.298
	0.894	0.323	0.336	0.312
	0.855	0.319	0.318	0.319
	0.867	0.326	0.286	0.333
	0.872	0.312	0.335	0.321
平均值	0.869	0.323	0.317	0.317
Y	1.0	0.37	0.36	0.36
CH <sub>4</sub>	1.098	0.152	0.485	0.212
	1.068	0.176	0.458	0.234
	1.032	0.196	0.428	0.259
	1.072	0.174	0.457	0.244
	1.075	0.161	0.472	0.232
平均值	1.069	0.172	0.460	0.236
Y	1.0	0.16	0.43	0.22

从测量结果来看,综合比较 3 个厂家不同种类气体通过响应值计算的 Y 值,厂家 A 的零气发生器对于上述气体的处理能力最好,厂家 C 次之。结合表 6 数据具体来说,对于 CO 组分,厂家 B 零气发生器的 Y 值是厂家 A 的 2.1 倍,厂家 B 零气发生器的输出气体响应值也是厂家 A 的 2 倍多,也就是说厂家 B 零气发生器的输出气体浓度也是厂家 A 的 2 倍多。厂家 B 零气发生器的 Y 值是 0.96 时,根据表 5 中 Y 值的相对扩展不确定度,0.96+U 仍然满足 $<1$ ,可以认为满足规定的指标要求;对于 NO 和 NO<sub>2</sub> 而言,3 个厂家零气发生器的气体处理能力并不像 CO 组分差别那样大,但同样是厂家 A 好于 C 好于 B;对于 CH<sub>4</sub> 组分,厂家 B 零气发生器的 Y 值是厂家 A 的 2.7 倍,是厂家 C 的近 2 倍。零气发生器的净化处理能力与仪器催化炉的催化效率、处理系统的吸附效率、吸附饱和度以及环境因素都会影响零气发生器的

净化处理性能。

本实验的方法也可以比较同一零气发生器对不同组分气体间的处理能力,例如,对于厂家 A 的零气发生器来说,其对于 CH<sub>4</sub> 和 NO 的处理能力要好于其他两种气体组分。这也进一步说明了本方法对于零气发生器校准检测中的良好应用表现。

### 3 结论

零气发生器校准的本质在零气的检测分析,科研人员对于零气的分析研究从未停止,越来越精密的仪器设备正在不断突破气体分析的极限,更低浓度的气体得以量化。傅里叶变换红外气体分析仪是当前气体分析中最常用分析仪器之一。本文采用傅里叶变换红外气体分析仪测量参考标准气体响应值与经零气发生器输出气体响应值,将进行直接比较来判断零气发生器的性能是否满足要求,对零气发生器的校准检测效率高,使用其响应值计算 Y 值,通过比较 Y 值与 1 的大小直观的比较不同零气发生器性能的优劣,也能比较同一台零气发生器不同组分气体间的处理能力。相同组分测量节省了不同组分气体校准曲线切换和校准零点的时间。同时,同组分气体前后测量时间间隔短,浓度也接近,提高了零气发生器性能比较的可靠性。当前,零气的研究精度越来越高,希望本文能为选择合适的参考标准气体对零气发生器性能的判定提供一些借鉴,也为零气检测方法提供助益。后续可以将混合气体输入零气发生器,同时测量其多种输出气体的响应值,使测量方法更加接近零气发生器的实际使用场景。

### 参考文献:

- [1] Li N, Zhang Q. *Auto Maint.*, 2024, (22): 131-132.  
李宁, 张谦. 汽车维修技师, 2024, (22): 131-132.
- [2] Kumar M, Tsujimura T, Suzuki Y. *Energy*, 2018, 145: 496-506.
- [3] Wang S, Zhu F H, Wang H M, Qiu L, Sun X L, Li H, Zuo Y, Li Y C, Chen H. *Acta Sci. Circumstantiae*, 2012, 32(9): 2303-2309.  
王圣, 朱法华, 王慧敏, 仇蕾, 孙雪丽, 李辉, 左漪, 李亚春, 陈辉. 环境科学学报, 2012, 32(9): 2303-2309.
- [4] Jiang C L, Song X H, Zhong Y Z, Sun Y M, Lei Y. *Environ. Sci.*, 2018, 39(11): 4841-4848.  
蒋春来, 宋晓晖, 钟悦之, 孙亚梅, 雷宇. 环境科学, 2018, 39(11): 4841-4848.

- [5] Yu Z Y, Fan X H, Gan M, Ji Z Y, Chen X L, Jiang T, Li G H. *J. Iron Steel Res. Int.*, 2018, **25**(12): 1265-1272.  
余志元, 范晓慧, 甘敏, 季志云, 陈许玲, 姜涛, 李光辉. 钢铁研究学报, 2018, **25**(12): 1265-1272.
- [6] Sha G Z, Zhao L D. *Auto Maint.*, 2024, (24): 130-132.  
沙国忠, 赵利东. 汽车维修技师, 2024, (24): 130-132.
- [7] Zhao Z L, Yuan S H, Song T J. *China Stand.*, 2025, (5): 144-149.  
赵正龙, 袁士虎, 宋天佳. 中国标准化, 2025, (5): 144-149.
- [8] Chen M, Yao W, Sun T N, Deng Q X. *China Insp. Body Lab.*, 2025, **33**(2): 11-13.  
陈明, 姚武, 孙天男, 邓秋希. 中国检验检测, 2025, **33**(2): 11-13.
- [9] Jiang K, Zhang H B, Zheng X X, Ma M, Lin X T. *China Metrol.*, 2023, (3): 111-113.  
江鲲, 张洪宝, 郑晓晓, 马明, 林夕腾. 中国计量, 2023, (3): 111-113.
- [10] Li H G, Guan S C, Li Y G, Xie Y J, Zhang T. *J. Chengde Petrol. Coll.*, 2022, **24**(5): 47-52.  
李洪刚, 关淑翠, 李永刚, 解永杰, 张涛. 承德石油高等专科学校学报, 2022, **24**(5): 47-52.
- [11] Li J, Wang D F, Xia C, Wu H. *Meas. Tech.*, 2018, (4): 6-9.  
李剑, 王德发, 夏春, 吴海. 计量技术, 2018, (4): 6-9.
- [12] Liu L X, Huan H T, Andreas M, Shao X P. *Spectrosc. Spectr. Anal.*, 2020, **40**(3): 684-687.  
刘丽娴, 宦惠庭, Mandelis Andreas, 邵晓鹏. 光谱学与光谱分析, 2020, **40**(3): 684-687.
- [13] Sui F, Ma J, Li W B, Xu F. *Anal. Instrum.*, 2024, (1): 1-6.  
隋峰, 马镜, 李文博, 许峰. 分析仪器, 2024, (1): 1-6.
- [14] Wang D F, Zhou F R, Ye J, Zhang T Q, Zeng W, Han Q. *Metrol. Sci. Technol.*, 2021, **65**(5): 67-76.  
王德发, 周枫然, 叶菁, 张体强, 曾武, 韩桥. 计量科学与技术, 2021, **65**(5): 67-76.
- [15] Xia C, Wang S J, Wang H Y, Yang Q, Li J. *Chem. Reagents*, 2024, **46**(6): 112-118.  
夏春, 汪圣甲, 王海燕, 杨倩, 李剑. 化学试剂, 2024, **46**(6): 112-118.
- [16] Zhu J, Liu W Q, Liu J G, Lu Y H, Gao M G, Xu L. *Chin. J. Sci. Instrum.*, 2007, **28**(1): 80-84.  
朱军, 刘文清, 刘建国, 陆亦怀, 高闽光, 徐亮. 仪器仪表学报, 2007, **28**(1): 80-84.
- [17] Xu L, Liu J G, Gao M G, Lu Y H, Liu W Q, Wei X L, Zhu J, Zhang T S, Chen J. *Spectrosc. Spectr. Anal.*, 2007, **27**(5): 889-891.  
徐亮, 刘建国, 高闽光, 陆亦怀, 刘文清, 魏秀丽, 朱军, 张天舒, 陈军. 光谱学与光谱分析, 2007, **27**(5): 889-891.
- [18] Zhuo J B. *Fujian Anal. Test.*, 2023, **32**(1): 28-33.  
卓继斌. 福建分析测试, 2023, **32**(1): 28-33.
- [19] Yang Q, Zhang X, Li J, Xia C, Wang S J, Lv L. *Jiliang Kexue yu Jishu*, 2025, **3**: 15-21.  
杨倩, 张鑫, 李剑, 夏春, 汪圣甲, 吕利. 计量科学与技术, 2025, **3**: 15-21.
- [20] Li J, Xia C, Wang S J, Cheng L P. *Chem. Reagents*, 2021, **43**(4): 520-523.  
李剑, 夏春, 汪圣甲, 程丽萍. 化学试剂, 2021, **43**(4): 520-523.
- [21] Liu P Y, Li J, Xia C, He Y Y, Wang S J. *Metrol. Sci. Technol.*, 2023, **67**(7): 62-67; 52.  
刘培源, 李剑, 夏春, 贺媛媛, 汪圣甲. 计量科学与技术, 2023, **67**(7): 62-67; 52.
- [22] Wu Y T, Bi Z, Yang Y Z F, Ma H M, Wu H. *Acta Metrol. Sin.*, 2021, **42**(7): 956-963.  
吴雨彤, 毕哲, 杨扬仲夫, 马浩淼, 吴海. 计量学报, 2021, **42**(7): 956-963.
- [23] GB 18285—2018. Limits and Measurement Methods for Emissions from Gasoline Vehicles under Two-speed Idle Conditions and Short Driving Mode Conditions, 2019-05-01.  
GB 18285—2018. 汽油车污染物排放限值及测量方法(双怠速法及简易工况法), 2019-05-01.
- [24] Pan Y T, Zhang G C, Yang Z Q, Zhou Z K, Pan S S, Sun B R, Jing W J, Yang S Y. *Meas. Tech.*, 2019, (11): 52-56.  
潘一廷, 张国城, 杨振琪, 周志宽, 潘素素, 孙宝瑞, 荆文杰, 杨思远. 计量技术, 2019, (11): 52-56.
- [25] GB/T 27417—2017. Conformity Assessment—Guidance on Validation and Verification of Chemical Analytical Methods, 2018-04-01.  
GB/T 27417—2017. 合格评定 化学分析方法确认和验证指南, 2018-04-01.