分析测试经验介绍 (414 ~ 420)

苯系物相对质量校正因子的测定与比较分析

李紫腾[1], 李　盼[2]
（1. 河北新勘环境检测有限公司, 河北 保定　071000; 2. 保定宏晓环保科技有限公司, 河北 保定　071000）

摘要: 为降低苯系物对实验人员健康的影响和对环境空气的污染, 结合氢火焰离子化检测器等碳响应的特点, 用同一台气相色谱仪, 在相同条件下测得不同浓度苯系物相对质量校正因子的相对标准偏差不大于 4.0%, 测得不同时间苯系物相对质量校正因子的相对标准偏差不大于 3.1%, 与利用有效碳数估算的相对质量校正因子无显著差异. 此外, 使用相对质量校正因子法与外标法对标准样品进行测定, 各组分测定结果相对误差不大于 4.7%, 由此得出相对质量校正因子法具有较高的正确度. 因此, 将利用试验测得的相对质量校正因子与外标法相结合进行苯系物定量, 能够保证监测结果的质量, 同时可减少苯系物标准物质的使用种类.

关键词: 气相色谱; 苯系物; 氢火焰离子化检测器; 相对质量校正因子; 有效碳数
中图分类号: O657. 7^{+}1; O625.11　　**文献标志码:** B　　**文章编号:** 1006-3757(2023)04-0414-07
DOI: 10.16495/j.1006-3757.2023.04.011

Determination and Comparative Analysis of Relative Mass Correction Factors for Benzene Series Compounds

LI Ziteng[1], LI Pan[2]
(1. *Hebei Xinkan Environmental Testing Co. Ltd.*, *Baoding* 071000, *Hebei China*; 2. *Baoding Hongxiao Environmental Protection Technology Co. Ltd.*, *Baoding* 071000, *Hebei China*)

Abstract: In order to reduce the impact of benzene derivatives on the health of laboratory personnel and the pollution of environmental air, combined with the characteristics of the isocarbon response of a hydrogen flame ionization detector, the relative standard deviation (RSD) of the relative mass correction factor of benzene series compounds with different concentrations was not more than 4.0%, and the RSD of the relative mass correction factors for benzene series compounds at different times was not more than 3.1%, when measured under the same gas chromatograph and under the same conditions. There was no significant differences with the relative mass correction factors estimated using effective carbon number. In addition, using the method of relative mass correction factor and the external standard for the determination of the standard samples, the relative error of the determination results of each component was not more than 4.7%, indicating that the method of relative mass correction factor has a high accuracy. Therefore, combining the relative mass correction factor measured by the test with the method of external standard to quantify the benzene series can ensure the quality of monitoring results and reduce the types of benzene series standard substances.

Key words: gas chromatography; benzene series compounds; hydrogen flame ionization detector; relative mass correction factors; effective carbon number

实验室废弃物中的有机物(如苯、甲苯等)会挥发到空气中, 工作人员长时间吸入会引起头痛、头昏、乏力、面色苍白、视力减退、中毒等症状, 同时会造成免疫力下降, 增加患癌风险. 随着科研活动

收稿日期: 2023-08-11;　**修订日期:** 2023-10-30.
作者简介: 李紫腾(1991-), 男, 工程师, 主要从事环境监测与环境治理, 603963602@qq.com
通信作者: 李盼(1991-), 女, 工程师, 主要从事环境影响评价与监测, 1273153009@qq.com.

越来越频繁、深入, 实验室试剂的用量和废弃物的排放量也迅速增长, 废气、固体废弃物、废液等的污染及其排放问题日渐凸显, 实验室亟需构建安全与环保的管理模式[1-2].

苯系物是化学实验中常用的一类试剂, 也是人类工业活动排放的重要且常见的污染物, 对人体健康有一定危害作用, 对环境特别是城市大气环境具有重要影响[3]. 此外, 苯已被列入《世界卫生组织国际癌症研究机构致癌物清单》, 且属于 1 类致癌物[4], 可以损害人体骨髓, 减少血小板、红血球、白细胞的数量, 并诱发染色体畸变, 从而导致白血病, 甚至出现再生障碍性贫血, 所以应减少实验室苯系物(特别是苯)的使用, 此问题值得大家关注.

目前国内苯系物相关分析方法有气相色谱法、气相色谱质谱联用法, 其中固定污染源和环境空气中苯系物分析以气相色谱法应用最为广泛. 我国生态环境部于 2022 年 7 月 14 日发布了一项适用于固定污染源废气中苯系物的测定方法(HJ 1261—2022)[5], 与此前已经发布十余年的两项环境空气中苯系物的测定方法(HJ 583—2010、HJ 584—2010)[6-7], 共同构成了我国大气污染中苯系物的检测方法体系.

在色谱学文献中, 基本将色谱定量分析方法分为内标法、外标法、叠加法和归一化法 4 种[8], 上面所提到的我国现行的三项苯系物测定方法均采用外标法对检测结果进行定量分析. 近年来, 引入校正因子对测试结果进行校正的优势日渐显著, 范国梁等[9] 优化了氢火焰离子化检测器校正因子的理论计算过程. 赵景婵等[10] 用气相色谱氢火焰检测法对氟氯烃类相对质量校正因子进行了测定, 能够在无标准对照品的情况下直接准确测定氟氯烃类样品. 美国材料与测试协会(American Society for Testing and Materials, ASTM)颁布了一项苯系物的分析标准(ASTM D7504-2023)[11], 该标准首先根据有效碳数计算出校正因子, 再结合归一化法进行苯系物的定量分析.

由于外标法需要配备相应的标准物质, 无论是采用 HJ 583—2010 还是 HJ 584—2010 方法测定苯系物, 都需要配备规格为 1.5~2.0 mL/支的储备液, 每次配制校准系列仅需约 300 μL 储备液. 剩余储备液保存难度大, 大多被当作废液处理. 即使是配制好的校准系列, 也仅有很少一部分进入色谱检测器被燃烧, 大部分挥发至实验室或由排风系统排放. 采用 HJ 1261—2022 方法测定苯系物不仅需要配备价格相对昂贵、有效期短的气态标准物, 还需要购置价值不菲的自动稀释系统, 所以目前该方法的普适性不强. 与外标法相比, 归一化法的定量方法中试剂消耗少、费用低、分析更便捷, 而采用相对质量校正因子与外标法也可达到节省标准物质, 减少污染物排放的效果.

本文利用气相色谱仪测定一系列苯系物标准品, 根据试验结果统计得出苯、乙苯、对二甲苯、间二甲苯、邻二甲苯、异丙苯、苯乙烯相对于甲苯的相对质量校正因子, 并对同一台气相色谱测得的相对质量校正因子进行一致性分析, 进一步与经有效碳数计算得出的校正因子进行比较, 为采用相对质量校正因子和外标法进行苯系物定量测定提供重要的数据支持.

1　试验部分

1.1　仪器与试剂

GC-2010Plus 气相色谱仪(配有 FID, 日本 SHIMADZU 有限公司); Rtx-Wax 色谱柱(规格 30 m×0.32 mm×1.0 μm, 日本 SHIMADZU 有限公司).

二硫化碳(无苯, 经色谱鉴定无干扰峰, Macklin); 1 000 μg/mL 二硫化碳中 8 种苯系物混合物(GBW(E)082623, 北京坛墨质检科技有限公司); 二硫化碳中 8 种苯系物混合标准溶液(BYT400038, 北京坛墨质检科技有限公司).

1.2　气相色谱条件

进样口温度: 200.0 ℃; 分流比: 5∶1; 进样量: 1 μL; 柱箱温度: 75.0 ℃ 保持 11 min, 25.0 ℃/min 升至 100.0 ℃, 保持 4 min; 柱流量: 1.50 mL/min; 检测器温度: 250.0 ℃; 氢气流量: 40.0 mL/min; 空气流量: 400.0 mL/min; 尾吹气流量: 30.0 mL/min.

1.3　标准混合溶液配制

按照《环境空气 苯系物的测定 活性炭吸附/二硫化碳解吸-气相色谱法》[7], 用 500 μL 微量注射器移取 200 μL 质量浓度为 1 000 μg/mL 二硫化碳中 8 种苯系物混合标准溶液, 至装有 1.80 mL 二硫化碳的进样瓶中, 混匀得到质量浓度为 100 μg/mL 的苯系物标准使用液. 再使用规格为 10、500 μL 的微量注射器分别移取 5、10、100、200 和 500 μL 苯系物标准使用液, 稀释至装有 0.995、0.990、0.900、

0.800、0.500 mL 二硫化碳的进样瓶中，配制成质量浓度依次为 0.5、1.0、10、20 和 50 μg/mL 的标准系列溶液. 通过自动进样器吸取标准系列溶液 1.0 μL 注射到气相色谱仪进样口，按照 1.2 项下条件进行分析.

1.4 相对质量校正因子的测定

在色谱定量分析中，为了获得准确的分析结果必须使用校正因子. 本次试验采用相对质量校正因子进行定量分析，相对质量校正因子(RWR)定义如下：

$$f_{is}^{A} = \frac{f_i^A}{f_s^A} = \frac{A_s W_i}{A_i W_s} \quad (1)$$

式中：f_{is}^{A} 为组分 i 的相对质量校正因子；f_i^A，f_s^A 分别为组分 i 与基准组分 s 的面积绝对质量校正因子；A_i，A_s 分别为组分 i 与基准组分 s 的峰面积；W_i，W_s 分别为组分 i 与基准组分 s 通过检测器的质量.

1.5 样品测定

通过自动进样器吸取二硫化碳中 8 种苯系物混合标准溶液 1.0 μL 注射到气相色谱仪进样口，按照 1.2 项下条件进行分析. 使用外标法与相对质量校正因子法对样品测定结果进行计算.

2 结果与讨论

2.1 苯系物测定结果分析

用气相色谱仪测定苯系物混合标准溶液，得到典型色谱图如图 1 所示. 由图 1 可见，在选定的色谱条件下，二硫化碳溶剂峰与目标化合物苯分离度很好，苯系物各组分色谱峰保留时间适合，峰型对称，分离效果也较好，测定数据准确.

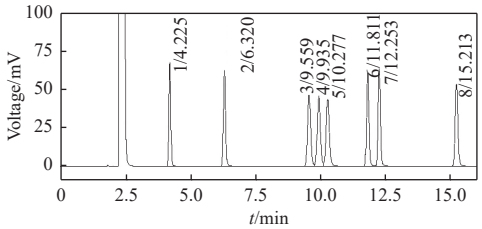

图 1 苯系物典型色谱图

(1) 苯，(2) 甲苯，(3) 乙苯，(4) 对二甲苯，(5) 间二甲苯，(6) 异丙苯，(7) 邻二甲苯，(8) 苯乙烯

Fig. 1 Typical chromatogram of benzene series compounds

(1) Benzene, (2) Toluene, (3) Ethylbenzene, (4) *p*-Xylene, (5) *p*-Xylene, (6) Cumene, (7) *o*-Xylene, (8) Styrene

2.2 相对质量校正因子测定结果

按照 1.2 项下所述条件，将现配的苯系物标准系列溶液非连续(间隔 3 个月以上)进行 6 次测定，测得各组分的峰面积，以甲苯为基准组分，代入公式(1)，得到其他组分相对甲苯的相对质量校正因子. 所配制标准系列溶液不同浓度、不同时间苯系物相对质量校正因子测定结果如表 1、2 所列. 由表可知，该方法测定的不同浓度苯系物相对质量校正因子的相对标准偏差(RSD)不大于 4.0%. 不同时间苯系物相对质量校正因子的 RSD 不大于 3.1%，测得的相对质量校正因子具有良好的重现性，能够满足气相色谱重复性测定的要求.

2.3 样品测定结果

按照 1.2 项下所述条件，对编号为 BYT400038

表 1 不同浓度苯系物相对质量校正因子（RWR）测定结果

Table 1 Measurement results of relative mass correction factors for benzene series compounds with different concentrations

组分	保留时间/min	RWR					平均值	标准偏差	RSD/%
		0.5 μg/mL	1.0 μg/mL	10 μg/mL	20 μg/mL	50 μg/mL			
苯	4.225	0.98	0.96	0.94	0.95	0.90	0.95	0.03	3.1
甲苯	6.320	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	—	—
乙苯	9.559	1.02	0.98	1.02	1.03	1.02	1.01	0.02	1.8
对二甲苯	9.935	0.98	1.02	1.02	1.03	1.03	1.02	0.02	2.1
间二甲苯	10.277	1.02	1.05	1.03	1.03	1.05	1.04	0.01	1.4
异丙苯	11.811	1.00	1.00	1.04	1.03	1.02	1.02	0.02	1.8
邻二甲苯	12.253	0.98	1.09	1.02	1.04	1.02	1.03	0.04	4.0
苯乙烯	15.213	0.99	1.04	1.03	1.04	1.02	1.02	0.02	2.1

表 2　不同时间苯系物相对质量校正因子（RWR）测定结果

Table 2　Measurement results of relative mass correction factors for benzene series compounds at different times

组分	RWR						平均值	标准偏差	RSD/%
	1	2	3	4	5	6			
苯	0.98	0.98	0.97	0.94	0.96	0.95	0.96	0.02	1.7
甲苯	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	—	—
乙苯	0.98	0.98	1.03	1.01	1.00	1.02	1.00	0.02	2.1
对二甲苯	0.96	0.96	1.03	1.02	0.98	1.01	0.99	0.03	3.1
间二甲苯	0.99	0.99	1.04	1.04	1.01	0.97	1.01	0.03	2.8
异丙苯	0.98	0.98	1.02	1.02	1.01	1.02	1.00	0.02	2.0
邻二甲苯	1.02	1.02	1.02	1.03	1.00	1.03	1.02	0.01	1.1
苯乙烯	1.01	1.01	1.03	1.02	0.99	1.02	1.01	0.01	1.4

的二硫化碳中 8 种苯系物混合标准溶液进行测定, 测得各组分的峰面积, 分别用外标法(峰面积用 y 表示, 化合物浓度用 x 表示)、相对质量校正因子法(以甲苯为基准组分)对测定结果进行校正, 结果如表 3 所列. 两种校正方式计算结果均在标准样品标准值范围内, 且各组分相对质量校正因子法与外标法校正结果的相对误差不大于 4.7%, 具有较高的正确度, 能够满足气相色谱准确性测定的要求.

2.4　相对质量校正因子的比较

校正因子的获得方法主要有 3 种, 分别为计算方法、试验数据和文献数据.

美国国家环境保护局发布的气体污染检测方法 Compendium Method TO-14A, 给出了气相色谱氢火焰检测法分析 33 种挥发性有机物的绝对体积校正因子[12], 利用物质的相对分子质量及气体的摩尔体积将其转换为相对质量校正因子得到文献数据.

氢火焰检测器对烃类的相对质量响应因子值基本上是相等的, 即分子中有一个碳原子, 就有一份响应值, 为等碳响应[13]. 因为氢火焰离子化检测器具有对所有烃类化合物(碳数≥3)的相对响应值几乎相等, 对含杂原子的同类有机物中的同系物(碳数≥3)的相对响应值也几乎相等的特性, 这也给化合物的定量带来很大的方便[14]. 结合有效碳数理论研究, 在使用氢火焰检测器时, 可利用同系物的摩尔相对响应值与其分子中的碳数或分子量呈线性关系这一规律, 近似估算某些同系物组分的摩尔相对响应值[15], 利用这一特点对苯系物相对质量校正因子进行计算得到估算值. 将本次试验数据、文献值和估算值进行比较, 结果如表 4 所列.

表 3　样品测定结果

Table 3　Results of sample determination

组分	标准值/(μg/mL)	外标法		相对质量校正因子法		相对误差/%
		校准曲线	校正结果/(μg/mL)	RWR	校正结果/(μg/mL)	
苯	24.7±2.0	y=3 696.01x − 704.36	24.0	0.97	22.9	−4.6
甲苯	24.6±2.0	y=3 772.78x − 1 045.75	23.4	1.00	23.4	—
乙苯	24.6±2.0	y=3 815.46x − 1 227.53	23.4	1.00	23.6	0.9
对二甲苯	24.5±2.0	y=3 842.91x − 1 518.01	23.1	0.99	23.2	0.3
间二甲苯	24.7±2.0	y=3 931.29x − 1 748.13	22.9	1.01	23.9	4.4
异丙苯	24.0±1.9	y=3 854.42x − 1 456.95	23.5	1.00	23.9	1.7
邻二甲苯	24.6±2.0	y=3 888.18x − 1 440.87	23.3	1.02	24.3	4.7
苯乙烯	24.6±2.0	y=3 863.22x − 1 414.47	23.1	1.01	23.8	3.0

注: 相对质量校正因子法计算结果以甲苯外标校正曲线乘以相对质量校正因子(RWR)所得

表 4 苯系物相对质量校正因子（RWR）的比较

Table 4 Comparison of relative mass correction factors for benzene series compounds

组分	绝对体积校正因子文献值	RWR估算值①	RWR②			RD1/%	RD2/%	RD3/%
			试验数据	文献值	估算值			
苯	0.117	1.12	0.97	1.08	1.05	5.5	4.0	1.5
甲苯	0.092	1.07	1.00	1.00	1.00	—	—	—
乙苯	0.092	1.03	1.00	1.15	0.96	7.1	1.9	9.0
对二甲苯	0.095	1.00	0.99	1.19	0.93	9.2	2.9	12.0
间二甲苯	0.095	1.04	1.01	1.19	0.97	8.0	2.1	10.0
异丙苯	—	0.97	1.00	—	0.91	—	5.0	—
邻二甲苯	—	1.02	1.02	—	0.95	—	3.3	—
苯乙烯	0.143	—	1.01	1.76	—	27.0	—	—

注：①以正庚烷的重量校正因子为1；②以甲苯的重量校正因子为1；RD1~RD3分别为试验数据-文献值、试验数据-估算值、估算值-文献值的相对偏差

对比上述结果可知，本次试验数据与利用有效碳数估算的苯系物相对质量校正因子相对偏差范围在 1.9%~5.0% 之间，并无显著差异，这与张育红等[16]得出的试验结果一致. 除苯乙烯外，与 Compendium Method TO-14A 给出的其他组分相对质量校正因子的相对偏差范围在 5.5%~9.2% 之间，存在差异较明显，苯乙烯相对偏差为 27.0%，存在更明显差异. 此外将 Compendium Method TO-14A 给出值与利用有效碳数估算的苯系物相对质量校正因子进行对比，发现乙苯、对二甲苯、间二甲苯估算值与相对质量校正因子分别为 9.0%、12.0%、10.0%，同样存在一定差异.

2.5 差异性分析

根据氢火焰离子化检测器的检测机理，原则上凡含有-CH 基的物质都能在氢火焰中裂解，给出响应信号，而且对不同烃类的响应灵敏度都很接近[17]. 研究表明，有机物在氢火焰中离子化效率很低，只有 0.01%~0.05%，其原因是生成 CHO+所需的氧，必须由火焰外部扩散进来. 助燃空气中氧含量增加，扩散进火焰的速度加快，可使离子数增加，响应信号增大. 此外组分在氢气中燃烧时应在最高的能量释放速度，才能生成最多的粒子流. 高少华等[18]发现，FID 响应因子与各因素关联强度的排序为：被测气体种类>FID 型号>被测气体浓度.

本次试验所测定苯系物仅涉及单环芳烃与烯烃，且碳原子数在 6~9 之间，测得的相对质量响应因子与有效碳数计算所得的相对质量响应因子基本吻合. Compendium Method TO-14A 给出的校正因子同样来自试验所得，该方法中规定：当测得的响应因子与方法给出校正因子数据的 RSD 小于 30%，曲线可接受，因此本试验数据符合 Compendium Method TO-14A 有关校正要求. 此外 Compendium Method TO-14A 给出的数据自 1999 年 1 月至今未进行更新，FID 技术已在过去 20 多年更新发展，如今检测器离子化效率有所提升，同时操作条件如载气流量、氢气、助燃气配比的改变，也会导致检测器离子化效率发生改变，因此本试验数据所得部分组分相对质量校正因子不能与其较好吻合.

基于利用有效碳数计算所得的相对质量校正因子与试验数据相差不大，且不同 FID 响应因子可能存在较大差异这两点原因. 为了能够获得更准确的测定结果，同一气相色谱仪在相同条件下测得的相对质量校正因子，用于计算无标准品的苯系物组分结果，不仅可以避免不同 FID 响应因子之间可能引入校正结果的巨大差异，而且能纠正使用有效碳数校正结果所带来的偏倚.

2.6 相对质量校正因子的应用

根据分析标准方法优化并确定仪器设备参数条件，使用标准物质，在该分析条件下，建立包含 8 种苯系物的校准曲线. 根据公式(1)获得各组分在该设备条件下相对于基准组分的相对质量校正因子.

在今后的分析过程中，可仅使用包含部分组分（1 种组分作为基准组分，其余组分可用作质控分析）

苯系物的标准样品进行外标法曲线绘制, 所有待测物均使用基准组分校准曲线进行定量校正, 并乘以各自对应的相对质量校正因子, 求得最终结果.

考虑到苯属于 1 类致癌物, 建立相对质量响应关系应优先选取毒性相对较低的苯系物组分作为基准组分, 使定量校正所用的标准物质对人体和环境的影响降至最低.

3　结论

(1)同一台气相色谱仪, 在相同条件下测得的不同浓度苯系物相对质量校正因子的 RSD 不大于 4.0%, 测得的不同时间苯系物相对质量校正因子的 RSD 不大于 3.1%, 具有较好的重复性.

(2)使用相对质量校正因子法与外标法对标准样品测定结果进行校正, 各组分校正结果相对误差不大于 4.7%, 具有较高的正确度.

(3)本试验与利用有效碳数估算的苯系物相对质量校正因子的相对偏差范围在 1.9%~5.0% 之间, 并无显著差异.

(4)通过试验法获得苯系物相对质量校正因子后, 在设备和分析条件一致的情况下, 可使用苯系物中的 1~2 种待测组分进行外标法定量, 其余组分采用相对质量校正因子进行定量, 既可以节省标准物质用量, 又能减少苯系物污染.

参考文献:

[1] 任淑霞, 闰明涛, 刘磊, 等. 化学实验室安全与环保建设的探索与实践[J]. 实验室研究与探索, 2017, 36(9): 287-290. [REN Shuxia, RUN Mingtao, LIU Lei, et al. Construction and practice of environmental protection and safety in chemical laboratory[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2017, 36 (9): 287-290.]

[2] 陈卫华. 实验室安全风险控制与管理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2017: 136-137. [CHEN Weihua. Control and management of laboratory safety risk[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2017: 136-137.]

[3] 杨婷, 李丹丹, 单玄龙, 等. 北京市典型城区环境空气中苯系物的污染特征、来源分析与健康风险评价[J]. 生态毒理学报, 2017, 12(5): 79-97. [YANG Ting, LI Dandan, SHAN Xuanlong, et al. Pollution characterization, source apportionment and health risk assess-ment of benzene homologues in the ambient air of a typical urban area in Beijing, China[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2017, 12 (5): 79-97.]

[4] IARC. List of Classifications-IARC monographs on the identification of carcinogenic hazards to humans[EB/OL]. WHO. int. , 2020. [2023-10-25]. https://monographs.iarc.who.int/list-of-classifications.

[5] 中华人民共和国生态环境部. 固定污染源废气 苯系物的测定 气袋采样/直接进样-气相色谱法: HJ 1261 —2022[S]. 2022. [Ministry of Ecology and Environment. Stationary source emission-determination of benzene and its analogies-bags sampling/Direct injection-gas chromatography: HJ 1261 —2022[S]. 2022.]

[6] 中华人民共和国环境保护部. 环境空气 苯系物的测定 固体吸附/热脱附-气相色谱法: HJ 583—2010[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010. [Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Ambient air-determination of benzene and its analogies using sorbent adsorption thermal desorption and gas chromatography: HJ 583 —2010[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2010.]

[7] 中华人民共和国环境保护部. 环境空气 苯系物的测定 活性炭吸附/二硫化碳解吸-气相色谱法: HJ 584—2010[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010. [Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Ambient air-determination of benzene and its analogies by activated charcoal adsorption carbon disulfide desorption and gas chromatography: HJ 584—2010[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2010.]

[8] 王春丽. 环境仪器分析[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2014: 243-245. [WANG Chunli. Environmental instrumental analysis[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2014: 243-245.]

[9] 范国梁, 宋崇林, 周维义, 等. 氢火焰离子化检测器校正因子的理论计算[J]. 分析化学, 2002, 30(8): 906-910. [FAN Guoliang, SONG Chonglin, ZHOU Weiyi, et al. Theoretical calculation of the relative mass calibration factor of hydrogen flame ionization detector[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2002, 30 (8): 906-910.]

[10] 赵景婵, 杨会娥, 郭治安, 等. 氟氯烃类物质相对质量校正因子的测定[J]. 化学试剂, 2009, 31(2): 115-116, 141. [ZHAO Jingchan, YANG Huie, GUO Zhian, et al. Measurement of relative mass calibration factors of CFCs[J]. Chemical Reagents, 2009, 31 (2): 115-116, 141.]

[11] U. S. Standard test method for trace impurities in monocyclic aromatic hydrocarbons by gas chromatography and effective carbon number: ASTM D7504-2023[S/OL]. (2023-05-15) [2023-10-25]. https://www.astm.org/d7504-23.html.

[12] U. S. Compendium Method TO-14A: Determination of volatile organic compounds(VOCs) in ambient air using specially prepared canisters with subsequent analysis by gas chromatography. 2th edition: EPA/625/R-96/010b[S/OL]. [2023-10-25]. https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-11/documents/to-14ar.pdf.

[13] 吴烈钧. 气相色谱检测方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000: 72-73. [WU Liejun. Gas chromatographic detection method[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000: 72-73.]

[14] 许国旺. 现代实用气相色谱法[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 46-47. [XU Guowang. Modern practical gas chromatography[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 46-47.]

[15] 詹益兴. 实用气相色谱分析[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1983: 180-185. [ZHAN Yixing. Practical gas chromatographic analysis[M]. Changsha: Hunan Science & Technology Press, 1983: 180-185.]

[16] 张育红, 王川, 彭振磊. 有效碳数法在芳烃气相色谱分析中的应用[J]. 石油化工, 2015, 44(6): 753-757. [ZHANG Yuhong, WANG Chuan, PENG Zhenlei. Application of effective carbon number approach in aromatic hydrocarbon analysis by gas chromatography[J]. Petrochemical Technology, 2015, 44 (6): 753-757.]

[17] 夏之宁, 季金苟, 杨丰庆. 色谱分析法[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2012: 69-70. [XIA Zhining, JI Jingou, YANG Fengqing. Chromatography[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2012: 69-70.]

[18] 高少华, 邹兵, 崔积山, 等. 基于氢火焰离子化检测仪响应因子的设备泄漏排放核算[J]. 化工环保, 2017, 37(6): 707-712. [GAO Shaohua, ZOU Bing, CUI Jishan, et al. Emissions accounting of VOCs from equipment leakage based on response factors of FID[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2017, 37 (6): 707-712.]