

预浓缩-GCMS (SCD 法) 测定质子交换膜燃料电池汽车用氢气中含硫化物、甲醛和有机卤化物含量

SYS-GC-025

摘要： 本文采用岛津气质联用仪 (GCMS-QP2020 NX) 和硫化学发光检测器 (SCD-2030)，结合电制冷低温型预浓缩仪，一次进样实现质子交换膜燃料电池汽车用的燃料氢气中的痕量硫化物、甲醛和有机卤化物的同时分析。实验表明，痕量硫化物最低检出限均优于 0.0033 nmol/mol，且在 0.1 nmol/mol~10 nmol/mol 范围内表现出良好的线性和重复性。甲醛和有机卤化物分析同样能达到良好效果，甲醛在 1 nmol/mol 的低浓度水平下峰面积 RSD% 小于 2%，8 种有机卤化物在 5 nmol/mol 低浓度下的峰面积 RSD% 在 1.17-5.33% 之间，说明整套系统良好的运行稳定性，完全满足氢燃料电池检测标准的要求。

关键词： 氢气 预浓缩 硫化学发光检测 硫化物 甲醛

技术特点：

- ❖ GCMS 和 SCD 同步检测，一次进样，实现痕量硫化物、甲醛和有机卤化物的同时分析。
- ❖ 电制冷预浓缩仪，浓缩效果好、检测限低、残留量少，满足氢燃料电池标准要求。

中国作为世界第一大产氢国，氢能产业正在迅速发展，2021 年氢能被正式写入“十四五”规划中，中央政府及地方各级政府推广氢能的政策密集出台。

氢气质量是确保燃料电池正常运行的关键因素之一，比如硫化物、甲酸、甲醛、卤离子等杂质的存在影响燃料电池的催化反应，降低了电池性能。因此，有毒杂质分析是氢燃料电池用氢品质控制的重要部分。《质子交换膜燃料电池汽车用氢气 含硫化物、甲醛和有机卤化物的测定 气相色谱法》征求意见稿

中明确了氢气中杂质的分析方法和限量值。

本文采用岛津气质联用仪 (GCMS-QP2020 NX) 和硫化学发光检测器 (SCD-2030)，结合电制冷低温型预浓缩仪，一次进样，实现痕量的硫化物，甲醛和有机卤化物的分析。该系统采用电制冷，可以实现采样罐、气袋和在线等多种进样方式，为不同场景下氢气质量控制提供有力保障，检测结果表明，该方法完全满足氢燃料电池国标及团标的分析要求。

■ 实验部分

1.1 仪器

气相色谱仪：GCMS-QP 2020 NX（国内苏产品）+SCD-2030；
CIA Advantage -xr™ 罐自动进样器；
Kori-xr™ 水汽去除模块；
UNITY-xr™ 热脱附仪

1.2 流路图

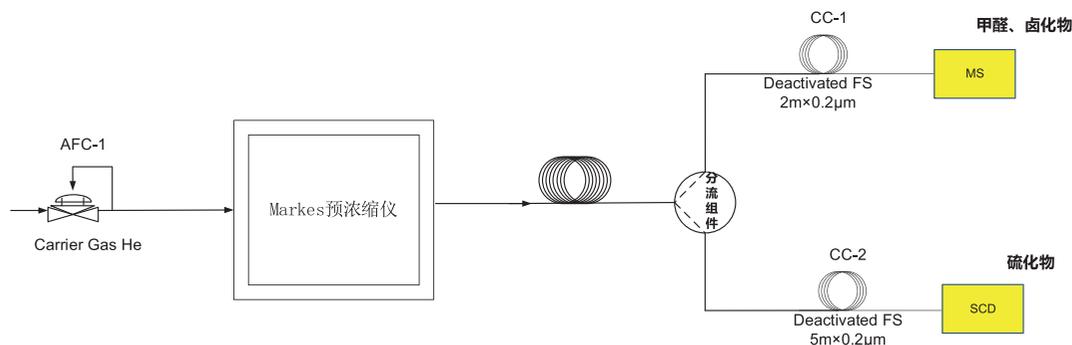


图 1 预浓缩仪 -GCMS/SCD 流路图

1.3 分析条件

1.3.1 气相色谱条件

色谱柱：SH-1, 60 m x 0.32 mm x 5 µm Shimcap-Deactivated FS 5 m x 0.2 mm
 程序升温条件：35°C (5 min) _8°C /min_100°C (1 min)_20°C /min_220°C (5 min)
 控制模式：恒压, 220 kPa 进样口温度：100°C
 载气：高纯 He, 纯度 > 99.9995%

1.3.2 MS 条件

离子源温度：200°C 传输线温度：230°C
 扫描方式：FASST (Scan&SIM)

1.3.3 SCD 检测器条件

加热器温度：850°C 接口温度：200°C
 H₂ 流速：80 mL/min O₂ 流速：10 mL/min
 N₂ 流速：40 mL/min O₃ 流速：25 mL/min

1.3.4 附加流量

A P C 1 : 90 kPa

1.3.5 热脱附条件

流路温度：120°C 冷阱吹扫：50 mL/min (1 min)
 冷阱低温：-30°C 冷阱高温：280°C (3 min)
 脱水模块：-30°C /300°C (未使用)

1.3.6 罐采样条件

样品吹扫：50 mL/min (4 min、大进样量) 采样体积：8~800 mL (根据实际情况对进样量进行调整)
 20 mL/min (4 min、小进样量)
 采样后吹扫：50 mL/min (5 min) 流路温度：120°C

1.4 标准气体信息

硫化物标准气体来自中国测试技术研究院，内含 7 种硫化物，氮气平衡，浓度标准值见下表 1。使用高纯氮气稀释硫化物混合标准气体，稀释后浓度为：约为 0.5 nmol/mol 和 10 nmol/mol。甲醛、8 种卤化物标气在同一气瓶，来自中国测试技术研究院，氮气平衡，浓度见表 2。甲醛须用高纯氮气稀释至约 400 nmol/mol、20 nmol/mol 和 1 nmol/mol。卤化物要用高纯氮气稀释浓度至约 100 nmol/mol 和 1 nmol/mol。

表 1 硫化物组分信息表

No.	化合物名称	浓度 (nmol/mol)
1	硫化氢	1.01
2	羰基硫	1.01
3	乙硫醇	1.02
4	甲硫醚	1.04
5	二硫化碳	0.991
6	噻吩	1.03
7	二甲基二硫醚	0.993
8	氮气	余量

表 2 甲醛、卤化物组分信息表

No.	化合物名称	浓度 (nmol/mol)
1	甲醛	1.04
2	一氯甲烷	0.975
3	溴甲烷	1.00
4	一氟三氯甲烷	0.998
5	二氯甲烷	0.981
6	顺 1,2- 二氯乙烯	1.01
7	三氯甲烷	0.993
8	四氯乙烯	1.01
9	氯苯	1.01
10	氮气	余量

■ 结果与讨论

2.1 硫化物分析

2.1.1 硫化物典型谱图

待测标准样品钢瓶与 Multi Gas CIA Advantage -xr™ 罐自动进样器连接，经浓缩后进样分析。按 1.3 分析条件一次进样完成 7 种硫化物的同时测定，典型谱图见图 2，组分信息如表 3 所示。

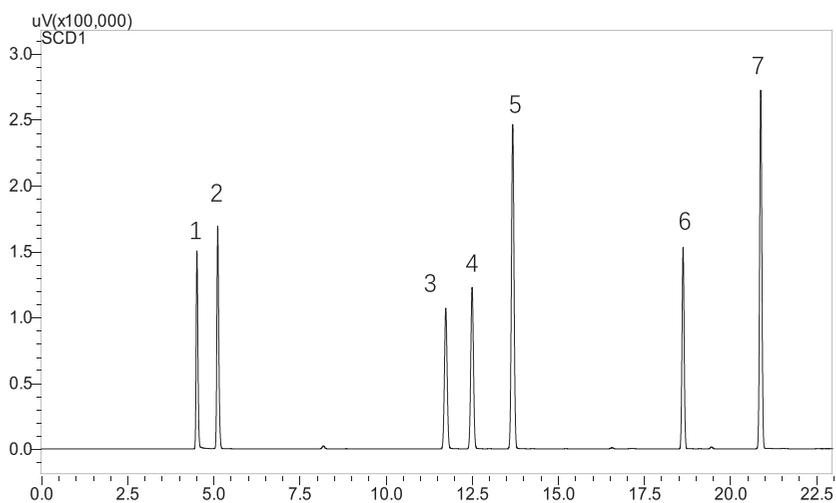


图 2 硫化物分析典型谱图 (SCD 检测器)

表 3 硫化物组分信息表

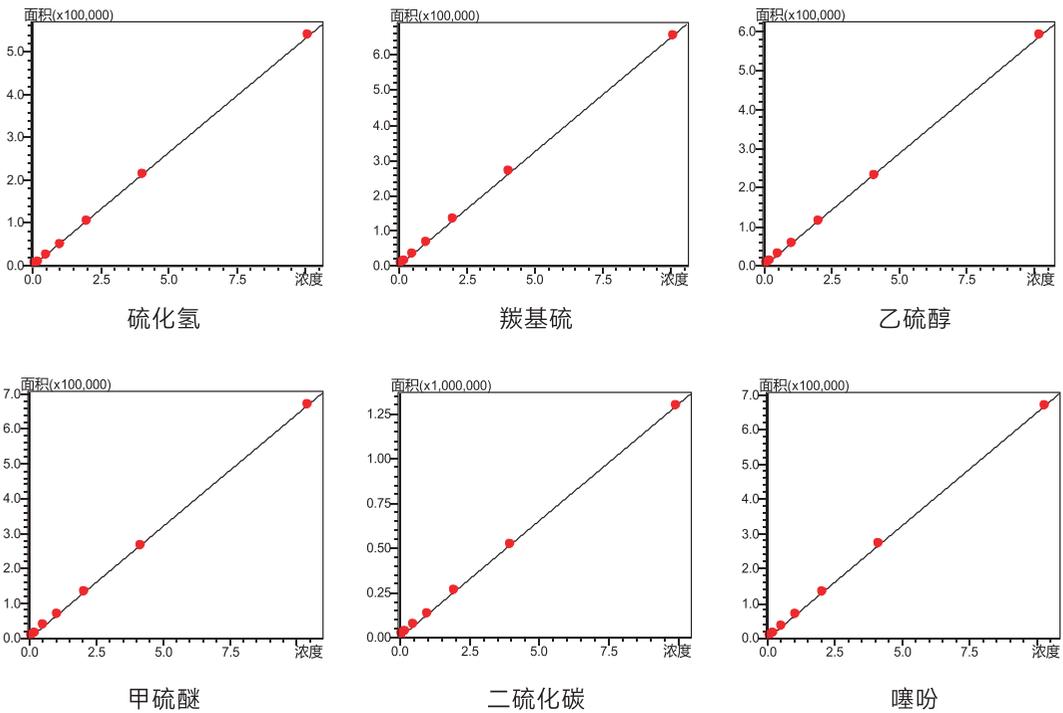
No.	化合物名称	英文名称	CAS 号	保留时间 (min)
1	硫化氢	Hydrogen Sulfide	7783-06-4	4.515
2	羰基硫	Carbonyl Sulfide	463-58-1	5.128
3	乙硫醇	Ethyl Mercaptan	75-08-1	11.753
4	甲硫醚	Dimethyl Sulfide	75-18-3	12.519
5	二硫化碳	Carbon Disulfide	75-15-0	13.700
6	噻吩	Thiophene	110-02-1	18.650
7	二甲基二硫醚	Dimethyl Disulfide	624-92-0	20.906

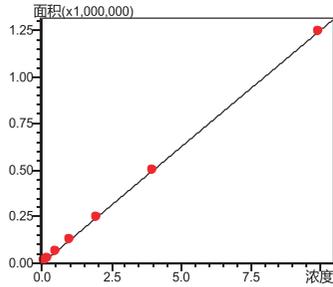
2.1.2 硫化物分析标准曲线及检出限

为最大限度的扩大校正曲线的覆盖范围，可以满足 0.1~10 nmol/mol 硫化物的准确分析。同时为了测定 0.01 nmol/mol 时的检出限，将 1 μmol/mol 硫化物标气采用稀释仪用 N₂ 稀释为 0.1 nmol/mol 和 10 nmol/mol 两个浓度。通过两个不同浓度标气的苏玛罐进样不同的体积，绘制标准曲线。具体进样体积与浓度请参考附录表 4，实际测试时可以根据线性范围调整进样体积和浓度。校正曲线详情参考图 3 和表 5。

表 4 硫化物进样体积与浓度表 (nmol/mol)

标气浓度	标气 (10 nmol/mol)						标气 (0.1 nmol/mol)	
进样体积 mL	8	16	40	80	200	400	800	80
实际浓度	0.1	0.2	0.5	1	2.5	5	10	0.01





二甲基二硫醚

图 3 7 种硫化物标准曲线

表 5 7 种硫化物校准曲线及检出限

No.	化合物名称	相关系数 R ²	检测限 (nmol/mol)
1	硫化氢	0.99993	0.0023
2	羰基硫	0.99992	0.0022
3	乙硫醇	0.99992	0.0033
4	甲硫醚	0.99998	0.0031
5	二硫化碳	0.99999	0.0013
6	噻吩	0.99996	0.0022
7	二甲基二硫醚	0.99999	0.0012

上述数据表明 7 种硫化物的最低检出限均低于 0.0033 nmol/mol，且在 0.1~10 nmol/mol 范围内呈现良好的线性。结果表明，岛津 SCD 检测器具有超高的检测灵敏度及良好的线性范围。

2.1.3 硫化物分析正确度测试

根据实验得到的各硫化物标准曲线方程和平均响应因子分别计算样品中各组分的含量，然后计算各化合物组分正确度。

按下式计算

$$B = \frac{\bar{x} - X_{CRm}}{X_{CRm}}$$

- B——组分的正确度；
- \bar{x} ——样品重复测量结果平均值；
- X_{CRm} ——样品的配制值

根据各硫化物组分的平均响应因子计算得到各浓度点的正确度，满足正确度小于 30% 标准验证要求。其结果如表 6 所示。

表 6 7 种硫化物 (nmol/mol) 平均 RF- 浓度正确度结果 (n=3, 正确度 %)

No.	化合物名称	保留时间 (min)	7 个浓度点 (nmol/mol)						
			0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	4.0	10
1	硫化氢	4.515	19.07	19.44	13.76	0.04	1.21	3.54	6.56
2	羰基硫	5.128	7.22	0.04	3.43	2.83	3.88	4.13	6.64
3	乙硫醇	11.753	19.58	22.67	17.28	0.33	0.70	1.20	3.73

4	甲硫醚	12.519	14.96	4.51	0.08	2.33	5.38	6.52	5.51
5	二硫化碳	13.700	19.05	3.95	4.13	7.19	9.22	9.67	9.59
6	噻吩	18.650	7.65	3.20	1.06	0.18	1.54	1.26	0.63
7	二甲二硫醚	20.906	6.36	5.52	3.41	1.24	2.20	1.54	1.50

硫化物校正浓度范围 0.1~10 nmol/mol 内, 对比校准曲线计算所得 7 个浓度校正点三次测试正确度与由平均响应因子计算所得的正确度数据均 $\leq 22.67\%$, 尤其是对于 0.10 nmol/mol 硫化氢这种低浓度且易被吸附的化合物以及乙硫醇、甲硫醚这两种活性物质, 两种正确度计算结果依然小于 30%, 反映了仪器整体卓越的稳定性、以及岛津 2030-SCD 稳定的线性响应。

2.1.4 硫化物分析重复性测试

选择标准曲线所有浓度, 7 个浓度点连续进样 3 次进行重复性测试, 考察仪器的稳定性, 测定结果见表 7。

表 7 7 种硫化物 (nmol/mol) 峰面积重复性结果 (n=3, RSD%)

No.	化合物名称	保留时间 (min)	7 个校正浓度点 (nmol/mol)						
			0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	4.0	10
1	硫化氢	4.515	2.47	2.06	1.44	0.76	0.19	0.76	1.00
2	羰基硫	5.128	1.62	0.51	0.27	0.75	0.77	1.08	4.15
3	乙硫醇	11.753	2.48	1.57	0.12	0.75	0.16	0.58	1.05
4	甲硫醚	12.519	1.18	0.76	0.33	0.34	0.31	0.15	1.08
5	二硫化碳	13.700	1.54	0.50	0.28	0.62	0.43	0.24	1.43
6	噻吩	18.650	1.69	0.70	0.06	0.89	0.42	1.15	1.41
7	二甲二硫醚	20.906	1.29	0.49	0.12	0.44	0.19	0.15	1.05

7 个浓度点 7 种硫化物连续 3 次分析峰面积 RSD% 在 0.12-4.15%, 尤其硫化氢、甲硫醇和乙硫醇这些高活性的物质在 0.1 nmol/mol 的低浓度水平下, RSD% 依然在 2.48% 以下。满足 GB/T 37244-2018 两次测定值的相对偏差不大于平均值的 10% 的要求。

2.1.5 硫化物分析单标回收率

选取硫化物标准气体中间浓度点 0.5 nmol/mol, 计算各浓度点的回收率, 验证数据良好的线性、确认仪器长期的稳定状态, 计算测试结果见表 8。

表 8 7 种硫化物 (nmol/mol) 单标回收率 (n=3, 回收率 %)

No.	化合物名称	保留时间 (min)	7 个校正浓度点 (nmol/mol)						
			0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	4.0	10
1	硫化氢	4.515	100.99	93.07	100.00	101.68	103.46	106.50	108.05
2	羰基硫	5.128	115.84	102.48	100.00	97.33	97.87	98.00	95.71
3	乙硫醇	11.753	102.94	94.23	101.96	99.42	101.37	102.70	104.89
4	甲硫醚	12.519	114.42	100.96	100.00	95.58	92.60	91.83	92.21
5	二硫化碳	13.700	138.24	111.00	100.00	95.46	93.54	93.31	92.99
6	噻吩	18.650	103.88	98.06	100.00	97.67	96.89	98.86	97.48
7	二甲二硫醚	20.906	107.75	100.70	100.00	98.69	98.24	98.69	98.48

结果显示以 0.5 nmol/mol 的硫化物的单标曲线计算其他个浓度点的回收率，计算数值在 92.21%~138.24% 范围内，10 nmol/mol 硫化氢的单标回收率为 92.21%，0.1 nmol/mol 硫化氢的加标回收率为 138.24%。单标样品计算其他各浓度校准点良好的回收率展示了系统超高的稳定性。

2.2 甲醛分析

2.2.1 甲醛分析典型谱图

参照 1.2 分析条件，对甲醛标气采用 GCMS 进行分析，分析典型谱图如下图 4，组分信息见表 9。

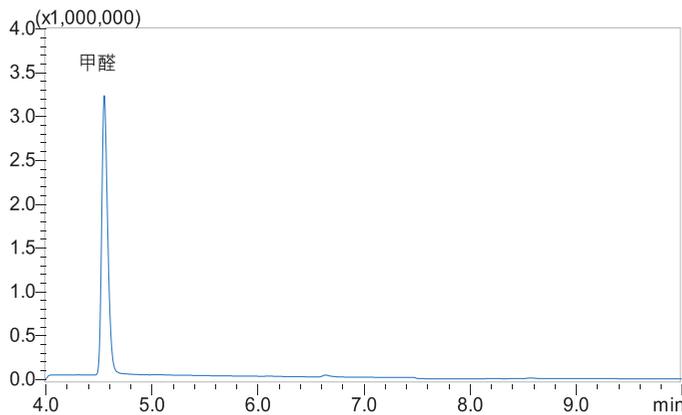


图 4 甲醛分析典型谱图 (SIM)

表 9 甲醛组分信息表

No.	化合物名称	英文名称	CAS 号	保留时间 (min)	定性离子	定量离子
1	甲醛	Formaldehyde	50-00-0	4.550	29	30

2.2.2 甲醛分析标准曲线及检出限

1 μmol/mol 的标气经 N₂ 稀释后浓度为 400 nmol/mol，后继续用 N₂ 经过二级稀释到 20 nmol/mol 进样不同体积绘制标准曲线。进样体积与浓度参照表 10，标准曲线如图 5，线性及检出限见表 11。

表 10 进样体积与硫化物浓度表 (SIM 30)

标气浓度		标气 (400 nmol/mol)				标气 (20 nmol/mol)			
进样体积 (mL)	80	200	400	800	40	200	400	800	
浓度 (nmol/mol)	40	100	200	400	1	5	10	20	

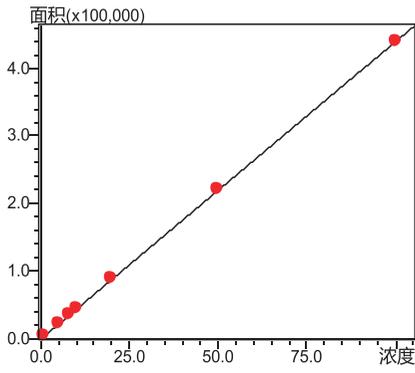


图 5 甲醛标准曲线 (GCMS)

表 11 甲醛校准曲线及检出限

No.	化合物名称	线性相关系数 R ²	检出限 (nmol/mol)
1	甲醛	0.99996	0.11

2.2.3 甲醛分析正确度测试

根据甲醛的平均响应因子计算得到各浓度的正确度（参考 2.1.3），数值均不大于 7.26%，满足正确度小于 30% 实验要求。其结果如表 12 所示。

表 12 甲醛平均 RF- 浓度正确度结果 (n=3, 正确度 %)

No.	化合物名称	保留时间 (min)	8 个校正曲线浓度点 (nmol/mol)							
			1	5	10	20	40	100	200	400
1	甲醛	4.550	7.26	2.82	1.54	6.72	6.26	6.52	6.70	5.98

2.2.4 甲醛分析重复性测试

取选择标准曲线上 8 个浓度点，连续进样 3 次进行重复性测试，考察仪器的稳定性，测定结果见表 13。甲醛在各个浓度点连续 3 次分析峰面积 RSD% 在 0.1-9.86% 之间。满足 GB/T 37244-2018 两次测定值的相对偏差不大于平均值的 10% 的要求

表 13 甲醛峰面积重复性结果 (n=3, RSD%)

No.	化合物名称	保留时间 (min)	8 个校正曲线浓度点 (nmol/mol)							
			1	5	10	20	40	100	200	400
1	甲醛	4.550	1.99	0.99	9.86	3.56	0.61	0.44	0.10	0.26

2.2.5 甲醛分析回收率测试

选取甲醛标准气体中间浓度点 20 nmol/mol，计算各浓度点的回收率，结果见表 14。

表 14 甲醛单标回收率 (n=3, %)

No.	化合物名称	保留时间 (min)	8 个校正曲线浓度点 (nmol/mol)							
			1	5	10	20	40	100	200	400
1	甲醛	4.550	93.43	96.48	92.93	104.29	106.03	106.07	106.46	105.78

甲醛在校正浓度范围 1~400 nmol/mol 内，各浓度点的单标回收率平均值在 92.93%~106.46%。

2.3 有机卤化物分析

2.3.1 有机卤化物典型谱图

有机卤化物 GCMS 分析典型谱图如下图 6，组分信息表见表 15。

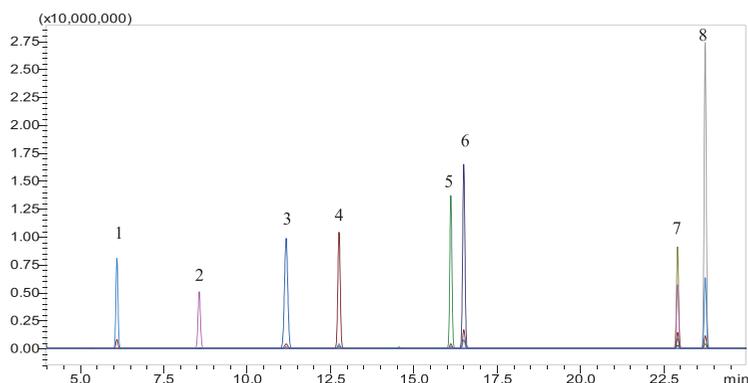


图 6 有机卤化物分析典型谱图 (Scan)

表 15 卤化物组分信息表

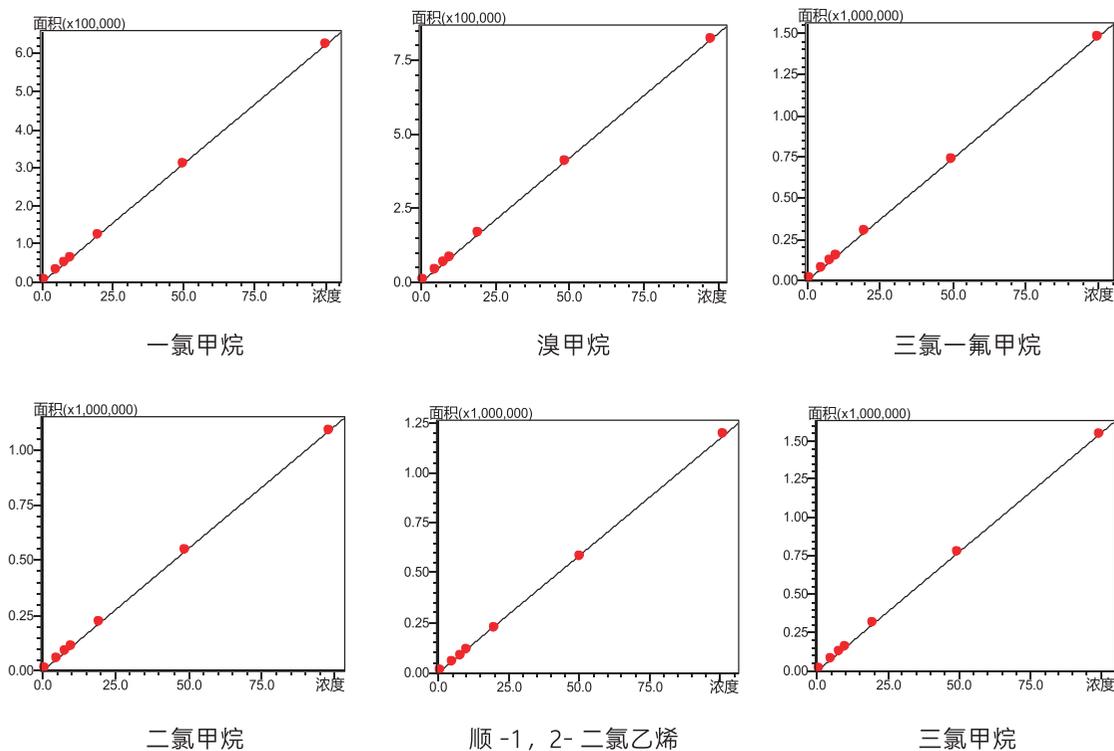
No.	化合物名称	英文名称	CAS 号	保留时间 (min)	定性离子	定量离子
1	一氯甲烷	Methyl chloride	74-87-3	6.100	52	50
2	溴甲烷	Bromomethane	74-83-9	8.565	96	94
3	一氟三氯甲烷	Trichlorofluoromethane	75-69-4	11.185	103	101
4	二氯甲烷	Dichloromethane	75-09-2	12.760	84	49
5	顺 1,2- 二氯乙烯	Cis-1,2-Dichloroethylene	156-59-2	16.120	96	61
6	三氯甲烷	Trichloromethane	67-66-3	16.510	85	83
7	四氯乙烯	Tetrachloroethene	127-18-4	22.925	129	166
8	氯苯	Chlorobenzene	108-90-7	23.760	77	112

2.3.2 有机卤化物分析标准曲线及检出限

通过进样不同体积的 100 nmol/mol 标气，得到 1-100 nmol/mol 的标准曲线，进样体积及浓度见表 16，部分典型物质标准曲线如图 7，有机卤化物标准曲线信息与检出限如表 17。

表 16 进样体积与浓度表 (nmol/mol)

进样体积 (mL)	8	40	64	80	160	400	800
实际浓度 (nmol/mol)	1	5	8	10	20	50	100



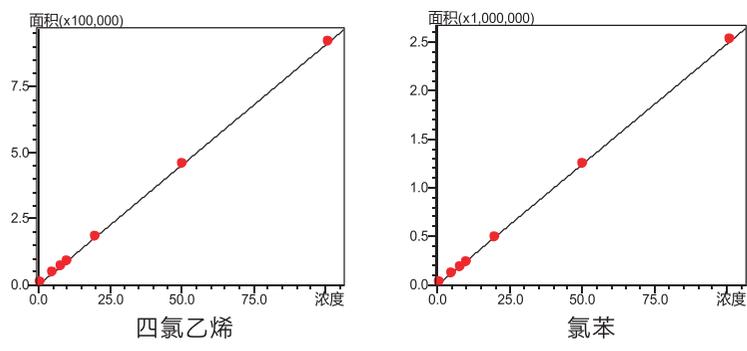


图 7 8 种典型有机卤化物标准曲线

表 17 8 种有机卤化物标准曲线信息与检出限

No.	化合物名称	线性相关系数 R ²	检出限 (nmol/mol)
1	一氯甲烷	0.9999962	0.88
2	溴甲烷	0.9999689	0.16
3	一氟三氯甲烷	0.9999770	0.06
4	二氯甲烷	0.9999650	0.73
5	顺 1,2- 二氯乙烯	0.9982336	0.59
6	三氯甲烷	0.9999748	0.04
7	四氯乙烯	0.9997675	0.10
8	氯苯	0.9990905	0.02

有机卤化物校正浓度范围 1~100 nmol/mol，线性范围内各物质线性相关系数均大于 0.998 以上。且各化合物的检出限均小于 0.88 nmol/mol。结果表明，岛津 GCMS 具有了良好的线性及高灵敏度。

2.3.3 有机卤化物分析正确度测试

根据有机卤化物平均响应因子计算得到各浓度的正确度（参考 2.1.3），满足正确度小于 30% 验标要求。

表 18 8 种有机卤化物平均 RF- 浓度正确度结果 (n=3, 正确度 %)

No.	化合物名称	保留时间 (min)	7 个校正浓度点 (nmol/mol)						
			1	5	8	10	20	50	100
1	一氯甲烷	6.100	2.45	3.58	0.15	0.01	0.32	0.78	0.14
2	溴甲烷	8.565	6.13	2.53	3.30	1.85	3.76	3.58	4.44
3	一氟三氯甲烷	11.185	12.93	1.09	2.04	1.87	3.57	4.21	4.09
4	二氯甲烷	12.760	12.45	1.82	2.04	2.26	3.02	3.26	2.65
5	顺 1,2- 二氯乙烯	16.120	0.27	4.06	4.57	4.39	2.27	5.99	13.88
6	三氯甲烷	16.510	6.02	0.46	2.55	2.03	1.96	1.53	1.02
7	四氯乙烯	22.925	14.04	2.85	0.28	1.75	2.42	5.63	9.33
8	氯苯	23.760	18.52	9.11	6.40	4.30	3.19	14.88	21.80

卤化物校正浓度范围 1~100 nmol/mol 内, 对比校准曲线计算所得 7 个浓度校正点三次测试正确度与由平均响应因子计算所得的正确度数据在 0.01%-21.80%, 尤其是对于 1 nmol/mol, 三次平行测定值的正确度计算结果依然小于 21.80%, 反映了仪器整体卓越的稳定性。

2.3.4 有机卤化物分析重复性测试

选择标准曲线七个浓度点, 连续进样 3 次进行重复性测试, 考察仪器的稳定性, 测定结果见表 19。7 种卤化物在不同浓度下峰面积 RSD% 在 0.13-9.69% 之间, 尤其在低浓度点 1 nmol/mol 时甲醛以及各卤化物依然能表现出良好重复性。

表 19 有机卤化物峰面积重复性结果 (n=3, RSD%)

No.	化合物名称	保留时间 (min)	7 个校正浓度点 (nmol/mol)						
			1	5	8	10	20	50	100
1	一氯甲烷	6.100	2.59	3.30	0.73	1.37	0.82	0.81	0.30
2	溴甲烷	8.565	9.69	5.33	1.63	1.02	1.32	0.31	0.61
3	一氟三氯甲烷	11.185	2.00	1.42	0.97	0.34	0.99	0.32	0.32
4	二氯甲烷	12.760	2.82	1.17	2.00	0.48	0.77	0.67	0.19
5	顺 1,2- 二氯乙烯	16.120	2.80	1.72	1.43	0.91	0.77	1.39	0.16
6	三氯甲烷	16.510	4.78	1.59	0.64	0.55	1.21	0.96	0.72
7	四氯乙烯	22.925	0.5	1.24	0.55	1.25	0.16	0.30	0.17
8	氯苯	23.760	2.96	1.47	0.59	0.13	0.87	0.16	0.24

8 种有机卤化物校正浓度范围 1~100 nmol/mol, 线性范围内甲醛以及各种卤化物峰面积重复性均在 9.69% 以下。满足 GB/T 37244-2018 两次测定值的相对偏差不大于平均值的 10% 的要求。

2.3.5 有机卤化物单标回收率

选取卤化物标准气体中间浓度点 20 nmol/mol, 计算各浓度点的回收率, 结果见表 20 进一步验证数据良好的线性、确认仪器长期的稳定状态。

表 20 有机卤化物单标回收率 (n=3, %)

No.	化合物名称	保留时间 (min)	7 个校正浓度点 (nmol/mol)						
			1	5	8	10	20	50	100
1	一氯甲烷	6.100	99.59	103.75	102.24	101.12	102.56	102.33	102.46
2	溴甲烷	8.565	79.30	92.56	98.68	97.47	100	98.07	98.48
3	一氟三氯甲烷	11.185	119.34	107.45	101.82	103.06	100.20	100.16	100.67
4	二氯甲烷	12.760	122.02	106.06	102.05	104.00	101.94	102.30	101.19
5	顺 1,2- 二氯乙烯	16.120	102.18	96.67	97.94	96.77	99.01	106.62	116.21
6	三氯甲烷	16.510	115.31	104.15	101.62	102.10	100.70	101.14	101.93
7	四氯乙烯	22.925	84.26	94.06	96.81	98.18	100	103.54	106.93
8	氯苯	23.760	76.04	86.79	90.59	91.95	100	110.52	117.15

结果显示以 20 nmol/mol 的甲醛以及各卤化物的单标曲线计算其他个浓度点的回收率，计算数值在 76.04%~122.02% 范围内，1 nmol/mol 氯苯的加标回收率为 76.04%，氯苯的 1 nmol/mol 加标回收率为 122.02%。单标样品计算其他各浓度校准点良好的回收率进一步证实了系统超高的稳定性。

■ 结论

本文采用岛津 GCMS-QP2020 NX+SCD，与 Markes 电制冷低温型预浓缩仪联用，一次进样，能一次实现痕量的硫化物，甲醛和有机卤化物的同时分析。实验表明，痕量硫化物最低检出限可达 0.003 nmol/mol，且在 0.1 nmol/mol-10 nmol/mol 范围内表现出优异的线性 ($R^2 > 0.9999$) 和峰面积重复性 ($RSD < 4.15\%$)。甲醛同样在 1 nmol/mol-400 nmol/mol 的线性 ($R^2 > 0.9999$) 达到理想效果，卤化物的校正浓度范围在 1~100 nmol/mol 线性 ($R^2 > 0.998$) 良好，且 7 种硫化物在 0.01 nmol/mol 的低浓度水平下峰面积 RSD% 小于 3.54% ($n=7$)，甲醛在 1 nmol/mol 的低浓度下峰面积 RSD% 小于 2.08% ($n=7$)，8 种有机卤化物同样在 1 nmol/mol 峰面积 RSD% 小于 7.88% ($n=7$)，足以说明整套系统良好的运行稳定性，完全满足国标中的要求。该系统无需液氮致冷，可以实现吸附管、采样罐、气袋和在线等多种进样方式，可为不同应用场景客户提供多种便利，为氢气质量控制提供强有力的保障。

岛津应用云

