

# 动能歧视碰撞-电感耦合等离子体质谱法 测定高纯石英砂中16种元素

何沙白,白露,杜天军\*

(河南省地质研究院,河南 郑州 450000)

**摘要:**采用动能歧视碰撞模式消除多原子离子干扰,以干扰方程扣除 Sr 对 Ca 的双电荷干扰,建立一种用单四级杆电感耦合等离子体质谱仪同时测定 Al、Ca、Cr、Cu、Fe、Ge、K、Li、Mg、Mn、Na、Ni、P、Sr、Ti、Zn 16 种杂质元素含量的方法,检出限为 0.001~0.1  $\mu\text{g/g}$ ,样品回收率为 92%~110%。将其应用于高纯石英标准物质测定,结果的相对误差(RE)为 -29.03%~10.77%,相对标准偏差(RSD)不大于 6.0%( $n=10$ ) (仅考察给出认定值的元素)。方法用于 4N8 纯度高纯石英砂中杂质含量的测定,结果满意。

**关键词:**高纯石英砂;电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS);动能歧视碰撞池模式

中图分类号:O657.6

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2024)10-0237-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.10.044

## Determination of sixteen elements in high-purity quartz by kinetic energy discrimination collision-inductively coupled plasma-mass spectrometry

HE Sha-bai, BAI Lu, DU Tian-jun\*

(Henan Academy of Geology, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** Through taking a kinetic energy discrimination collision mode to eliminate the interference of multiple atomic ions and deducing the double charge interference of Sr on Ca from the interference equation, a method using a single quadrupole inductively coupled plasma mass spectrometer is established to simultaneously determine the content of 16 kinds of impurity elements, including aluminum, calcium, chromium, copper, iron, germanium, potassium, lithium, magnesium, manganese, sodium, nickel, phosphorus, strontium, titanium, and zinc. The detection limit ranges from 0.001  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  to 0.1  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ , and the sample recovery rate ranges from 92% to 110%. As this method is applied to determine standard substances in high-purity quartz, the result delivers a relative error (RE) in the range of -29.03%~10.77% and a relative standard deviation (RSD) of no more than 6.0% ( $n=10$ ) when only examining the elements that provide a recognized value. Satisfactory results are obtained when the method is used to determine the impurity content in quartz sand with a purity of 4N8.

**Key words:** high-purity quartz; inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS); kinetic energy discrimination collision pool mode

高纯石英砂是以天然石英矿为原料,经浮选、磁选、化学处理等工艺加工提纯得到的二氧化硅含量为 99.9%~99.999% (质量分数,下同) 的石英晶体,因具有特殊的物理化学性能,被广泛应用于电子信息、光伏等战略性新兴产业。我国目前的石英工业化生产尚处于含量在 99.995% (4N5) 阶段,多数 4N8 及以上产品依赖进口<sup>[1-2]</sup>,成为制约我国高纯石英产业发展的“卡脖子”技术。由于直接分析二氧化硅含量误差较大,无法满足高纯产品—尤其是二氧化硅含量 $\geq 99.99\%$  (4N) 产品的分析要求,目前高纯石英砂的二氧化硅含量是通过 1 减去杂质元素总量得到的差值。不同纯度等级的石英砂用途差

别很大,因此准确测定高纯石英砂中的杂质元素含量具有重要意义。

目前公认的国际标准以美国尤尼明公司 ITOA 系列产品的指标为依据,杂质元素包括 Al、B、Ca、Cr、Cu、Fe、K、Li、Mg、Mn、Na、Ni、P、Ti、Zn 15 项<sup>[3]</sup>,检测方法主要有电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)和电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)等,已有多项国家标准和丰富的研究成果<sup>[4-9]</sup>。张海啟等<sup>[10]</sup>通过降低等离子体功率,大幅消除背景干扰,确定了测定高纯石英中痕量钾的前处理和仪器条件。张宏丽等<sup>[11]</sup>使用冷焰模式,避免了氧化物及多原子离子对铁的干扰,实现对痕量铁的测定。

收稿日期:2024-06-06;修回日期:2024-08-07

基金项目:河南省地质研究院 2024 年度地质科技攻关项目(2024-331-XM01)

作者简介:何沙白(1985-),女,本科,工程师,主要从事岩石矿物光谱和质谱分析工作,448198056@qq.com;杜天军(1977-),女,硕士,高级工程师,主要从事岩石矿物光谱和质谱分析工作,通讯联系人,yuhang7118@163.com。

李晓丽<sup>[12]</sup>与张宏丽等<sup>[13]</sup>分别采用在前处理过程中加入磷酸和甘露醇的方法,有效降低氟化硼的挥发损失,实现硼元素的准确回收和测定。这些方法测定元素较少,需要多种方法配合使用才能满足检测要求。

ICP-AES 法由于检出限较高,难以满足 4N 及以上纯度高纯石英砂中杂质含量的测定要求;ICP-MS 具有更低检出限和更高灵敏度,但目前关于高纯石英砂中多元素同时测定方法的研究仍然较少。基于此,笔者使用单四级杆电感耦合等离子体质谱仪,采用动能歧视碰撞池(KED)模式消除多原子离子干扰,以干扰方程扣除 Sr 对 Ca 的双电荷干扰,建立了同时测定 16 种杂质元素的方法,实现多种痕量元素的准确测定。方法检出限为 0.001~0.1 μg/g,加标实验样品回收率 92%~110%,该方法用于 4N 及以上纯度高纯石英砂中杂质含量的测定,结果满意。

## 1 试验部分

### 1.1 仪器及工作条件

ICAP RQ 型电感耦合等离子体质谱仪(赛默飞世尔科技公司)。质谱仪的工作条件见表 1。

表 1 ICP-MS 工作条件

仪器参数	数值	仪器参数	数值
功率/W	1550	采样深度/mm	5.0
测量模式	KED	数据采集方式	跳峰
冷却气流量/(L·min <sup>-1</sup> )	14.0	扫描次数	30
辅助气流量/(L·min <sup>-1</sup> )	0.80	读数通道	3
雾化气流量/(L·min <sup>-1</sup> )	1.05	采样深度/mm	5.0
氦气流量/(L·min <sup>-1</sup> )	4.90	分辨率	普通
氧化物产率 ( <sup>156</sup> CeO <sup>+</sup> / <sup>140</sup> Ce)/%	2	双电荷产率 ( <sup>69</sup> Ba <sup>2+</sup> / <sup>138</sup> Ba <sup>+</sup> )/%	3

SYNERGY@UV 超纯水系统(默克密理博),实验用水均由此纯水系统制备(电阻率=18.2 MΩ·cm, 25℃)得到。

### 1.2 试剂与材料

Al、Ca、Cr、Cu、Fe、Ge、K、Li、Mg、Mn、Na、Ni、P、Sn、Sr、Ti、Zn、Zr、Sc、Y 单元素标准储备溶液(国家有色金属及电子材料分析测试中心),1 000 μg/mL;多元素混合标准溶液(GNM-M330198-2013,10%盐酸、5%硝酸、痕量氢氟酸,国家有色金属及电子材料

分析测试中心): Al、Cr、Cu、Fe、Ge、K、Li、Mg、Mn、Ni、P、Sn、Sr、Ti、Zn 的质量浓度均为 100 μg/mL;氢氟酸(上海麦克林生化科技股份有限公司);MOS 级;硝酸(赛默飞世尔科技有限公司): MOS 级;HandyStep S 手动连续分液器(普兰德(上海)贸易有限公司)。标准物质 58A SiO<sub>2</sub>-99.99 C(北京加联标物检测技术有限公司)。

校准溶液配制和样品前处理全程在洁净室进行,前处理所加试剂均使用手动连续分液器准确加入,所用坩埚、容量瓶均在体积分数 10% 稀硝酸中浸泡 48 h,用纯水洗净备用。

### 1.3 实验方法

样品经 105℃ 干燥 2 h,称取 1.000 g 样品(精确至 0.1 mg)于聚四氟乙烯坩埚中,滴加少量水润湿,加入 15.0 mL 氢氟酸,盖上坩埚盖,150℃ 加热 4 h,升温至 190℃ 加热至白烟冒尽。冷却后取下坩埚,加入 10.0 mL 硝酸(1+1),加盖微热使杂质溶解,取下冷却,将溶液转移至 100 mL 聚乙烯容量瓶中,用水定容。在选定的仪器条件下,由三通在线加入 50 ng/mL 的钪、钇混合内标溶液,采用内标法,用 ICP-MS 测定溶液中杂质元素的含量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 元素同位素的选择与校准曲线

ICP-MS 的质谱干扰主要有以下 4 个方面:同量异位素干扰,多原子离子干扰,难熔氧化物干扰,氧化物和双电荷离子干扰。在分析测定的过程中,需尽量选择在自然界中丰度较高,不受干扰或者干扰较少的同位素作为目标分析对象,将其对测量结果的影响减小到最低。<sup>40</sup>Ca 丰度为 96.94%,但 KED 模式下因有 <sup>40</sup>Ar 干扰,故选择 <sup>44</sup>Ca,而 <sup>44</sup>Ca 又有 <sup>88</sup>Sr 双电荷干扰,因此 Sr 选择质量数 86。其余不受多原子离子干扰或者受干扰小的元素,选择仪器推荐的同位素。

内标元素要求与被测元素质量数接近、样品中含量低且不能产生干扰,因此内标元素设定为 Sc 和 Y。Ge 和 Sr 元素选择 Y 作为内标,其余的元素选择 Sc 作为内标。

为保证稳定性,对信号值较低和稳定性较差的元素如 Ca、P、Sr 等,应增大驻留时间至 0.1 s,以便获得较为可靠的结果。各元素质量数、驻留时间以及所选内标元素见表 2。

表2 元素质量数、内标及驻留时间

元素	质量数	驻留时间	内标元素	元素	质量数	驻留时间	内标元素
Li	7	0.05	Sc	Cr	52	0.05	Sc
Na	23	0.10	Sc	Mn	55	0.05	Sc
Mg	24	0.10	Sc	Fe	56	0.05	Sc
Al	27	0.10	Sc	Ni	60	0.05	Sc
P	31	0.10	Sc	Cu	63	0.05	Sc
K	39	0.10	Sc	Zn	66	0.05	Sc
Ca	44	0.10	Sc	Ge	73	0.05	Y
Ti	48	0.05	Sc	Sr	86	0.10	Y

钙单标储备溶液逐级稀释,配制成浓度10、20、50、100、150、200、300、500 ng/mL的钙单标校准系列,其余元素配制成浓度0.05、0.1、0.5、1.0、5.0、10、20、50、100、200、500、1 000 ng/mL的混标校准系列,所测元素的校准曲线范围、校准曲线方程和 $r$ 值见表3。

表3 校准曲线

元素	校准曲线范围/ (ng·mL <sup>-1</sup> )	方程	$r$
<sup>7</sup> Li	0.5~200	$y=34.215x+0.748$	1.000
<sup>23</sup> Na	1.0~500	$y=840.038x+9544.634$	1.000
<sup>24</sup> Mg	0.5~100	$y=400.838x+412.260$	1.000
<sup>27</sup> Al	10~1000	$y=93.315x+1183.565$	1.000
<sup>31</sup> P	5.0~500	$y=6.750x+119.764$	1.000
<sup>39</sup> K	1.0~500	$y=287.443x+6685.111$	1.000
<sup>44</sup> Ca	10~500	$y=18.440x+261.272$	1.000
<sup>48</sup> Ti	1.0~500	$y=2177.736x+50.578$	1.000
<sup>52</sup> Cr	0.05~20	$y=15740.019x+1773.081$	1.000
<sup>55</sup> Mn	0.05~50	$y=6101.963x+561.508$	1.000
<sup>56</sup> Fe	1.0~100	$y=11413.703x+39597.820$	1.000
<sup>60</sup> Ni	0.05~100	$y=7933.651x+914.164$	1.000
<sup>63</sup> Cu	0.1~50	$y=22805.229x+2146.046$	1.000
<sup>66</sup> Zn	0.1~50	$y=1461.078x+223.277$	1.000
<sup>73</sup> Ge	0.5~200	$y=118.172x+2.334$	1.000
<sup>86</sup> Sr	0.05~5.0	$y=248.550x+23.494$	0.999

## 2.2 氦气流量的设置

质谱中的干扰分为质谱干扰和非质谱干扰,由于高纯石英的主要成分二氧化硅已被氢氟酸去除,溶液中盐分不高,非质谱干扰可忽略。质谱干扰又分为同量异位素干扰、多原子离子干扰、氧化物和双电荷离子干扰<sup>[14-15]</sup>,在本实验中最主要的干扰为多原子离子干扰和双电荷干扰。多原子离子干扰可通

过KED模式消除<sup>[16-18]</sup>,加入氦气会降低待测元素的信号,尤其是Mg、P、Ca这些KED模式下信号不高且样品中含量较低的元素,因此调整氦气流量要兼顾除干扰效果和稳定性。在调谐液中观察Co信号值和<sup>59</sup>Co/<sup>35</sup>Cl<sup>16</sup>O<sup>+</sup>比值,当信号值 $>3.0 \times 10^4$  Cps,且<sup>59</sup>Co/<sup>35</sup>Cl<sup>16</sup>O<sup>+</sup> $>18$ 时达到仪器设定要求。

参考样品中元素含量,在KED模式下分别吸取20 ng/mL的混标溶液、20 ng/mL钙单标溶液和调谐液,设置驻留时间0.1 s,通道3,调节不同氦气流量,记录5次变化的<sup>7</sup>Li、<sup>24</sup>Mg、<sup>31</sup>P、<sup>44</sup>Ca、<sup>59</sup>Co的信号值、<sup>59</sup>Co/<sup>35</sup>Cl<sup>16</sup>O<sup>+</sup>比值,计算平均值,结果见表4。

表4 不同氦气流量下的元素信号值( $n=5$ )

氦气流量/ (L·min <sup>-1</sup> )	<sup>7</sup> Li Cps	<sup>24</sup> Mg Cps	<sup>31</sup> P Cps	<sup>44</sup> Ca Cps	<sup>59</sup> Co Cps	<sup>59</sup> Co/ <sup>35</sup> Cl <sup>16</sup> O <sup>+</sup> 比值
4.6	$3.5 \times 10^3$	$1.6 \times 10^4$	$3.4 \times 10^2$	$8.5 \times 10^2$	$4.7 \times 10^4$	15
4.7	$3.1 \times 10^3$	$1.3 \times 10^4$	$2.5 \times 10^2$	$6.8 \times 10^2$	$4.5 \times 10^4$	17
4.8	$3.0 \times 10^3$	$1.1 \times 10^4$	$1.9 \times 10^2$	$5.3 \times 10^2$	$4.1 \times 10^4$	21
4.9	$2.6 \times 10^3$	$9.7 \times 10^3$	$1.6 \times 10^2$	$4.5 \times 10^2$	$3.8 \times 10^4$	25
5.0	$2.2 \times 10^3$	$8.2 \times 10^3$	$1.2 \times 10^2$	$3.5 \times 10^2$	$3.5 \times 10^4$	28
5.1	$2.0 \times 10^3$	$6.8 \times 10^3$	95	$2.9 \times 10^2$	$3.2 \times 10^4$	30
5.2	$1.8 \times 10^3$	$5.8 \times 10^3$	70	$2.5 \times 10^2$	$2.9 \times 10^4$	32

<sup>59</sup>Co/<sup>35</sup>Cl<sup>16</sup>O<sup>+</sup>比值代表了多原子离子干扰的消除程度,比值越大效果越好,但随着氦气流量增大,元素信号值均有所降低。综合考虑,本试验氦气流量设定为4.9 L/min。

## 2.3 Sr对Ca双电荷干扰的消除

双电荷干扰很难通过仪器消除,必要时需用干扰方程来修正。一般容易形成双电荷的元素有碱土金属、一些过渡元素和稀土金属。结合样品中元素含量,容易被干扰主要元素有<sup>24</sup>Mg、<sup>44</sup>Ca、<sup>48</sup>Ti、<sup>60</sup>Ni,干扰元素分别为<sup>48</sup>Ti<sup>2+</sup>、<sup>88</sup>Sr<sup>2+</sup>、<sup>96</sup>Zr<sup>2+</sup>、<sup>120</sup>Sn<sup>2+</sup>。绘制Mg、Ca、Ti、Ni单标校准曲线,分别测定对应的干扰元素单标溶液,观察各元素的实际测定浓度,结果见表5。

表5 被干扰元素的测定浓度 ng/mL

	<sup>24</sup> Mg	<sup>44</sup> Ca	<sup>48</sup> Ti	<sup>60</sup> Ni
干扰元素单标( $\rho=100$ ng/mL)	0.6	1549	0.12	0.9

结果表明除了Ca之外,双电荷干扰对待测元素影响不明显。

参照样品种含量配制Sr单标校准系列,在Ca单标和多元混标校准曲线中测量Ca和Sr浓度,

结果如表 6。

表 6 Sr 单标校准系列测定结果 ng/mL

Sr 测定浓度	Ca 测定浓度	Sr 测定浓度	Ca 测定浓度
0.000	0.000	0.555	8.609
0.067	1.208	1.214	18.420
0.109	2.456	3.628	53.230
0.295	4.312		

以测定出的 Sr 浓度为横坐标,测定出的 Ca 浓度为纵坐标,作图并拟合曲线,得干扰方程  $y = 14.604x + 0.363, r = 0.9997$ ,如图 1。

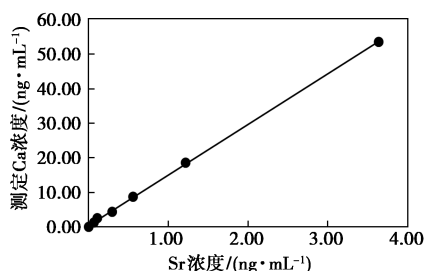


图 1 干扰曲线

以样品 A 和标准物质 58A SiO<sub>2</sub>-99.99 C 为例,将 Sr 浓度带入方程,计算干扰浓度,Ca 测定浓度减去干扰浓度即为实际浓度。测定及计算结果见表 7。

表 7 干扰方程修正后的 Ca 值

	样品 A	58A SiO <sub>2</sub> -99.99 C
<sup>44</sup> Ca 测定浓度/(ng·mL <sup>-1</sup> )	48.20	7.02
<sup>86</sup> Sr 测定浓度/(ng·mL <sup>-1</sup> )	0.63	0.15
干扰浓度/(ng·mL <sup>-1</sup> )	9.56	2.55
<sup>44</sup> Ca 实际浓度/(ng·mL <sup>-1</sup> )	38.64	4.47
Ca 测定结果/(μg·g <sup>-1</sup> )	3.86	0.45
认证值与不确定度/(μg·g <sup>-1</sup> )	—	0.42±0.09

由表 7 可见,未经修正的结果远远超出范围,而经过方程修正的结果落在推荐值范围内,因此钙校准曲线不能使用混标,应用单标拟合。由于每次调谐后仪器条件都会有所改变,因此调谐后应重新评估 Sr 对 Ca 的双电荷干扰程度,拟合新曲线,计算新干扰方程。

## 2.4 方法的检出限、测定下限与正确度

### 2.4.1 方法检出限和测定下限

在上述优化的实验条件下,对各杂质元素混合标准溶液系列进行测定。测定 10 个全流程空白样品溶液,以 2.821 倍空白标准偏差计算方法中各元素的检出限,以 3 倍检出限作为方法测定下限。结

果见表 8。

表 8 各元素检出限及测定下限 μg/g

元素	平均值	标准偏差	检出限	测定下限
Li	0.00156	0.0013	0.004	0.010
Na	-0.00601	0.0090	0.030	0.090
Mg	0.00679	0.0050	0.010	0.030
Al	0.00909	0.0303	0.090	0.300
P	0.06791	0.0467	0.100	0.300
K	0.00672	0.0271	0.100	0.300
Ca	-0.01635	0.0466	0.100	0.300
Ti	0.00169	0.0010	0.003	0.009
Cr	0.00047	0.0003	0.001	0.003
Mn	0.00040	0.0004	0.001	0.003
Fe	0.00420	0.0033	0.010	0.030
Ni	0.00101	0.0002	0.001	0.003
Cu	0.00061	0.0002	0.001	0.003
Zn	0.00159	0.0014	0.004	0.010
Ge	0.00033	0.0005	0.001	0.003
Sr	0.00054	0.0007	0.002	0.006

### 2.4.2 加标回收

选取一实际样品,根据测定结果,分别加入相近浓度的各元素单标,采用同样的前处理和测定方法,计算样品回收率,结果见表 9。

表 9 样品回收率

元素	样品测定值/ (μg·g <sup>-1</sup> )	加标量/ μg	测定总量/ (μg·g <sup>-1</sup> )	样品回收率/ %
Li	1.860	2.000	3.840	99
Na	6.530	5.000	11.800	104
Mg	0.200	0.500	0.720	110
Al	28.400	30.000	60.500	107
P	0.450	0.500	0.990	109
K	3.440	5.000	8.360	98
Ca	8.350	10.000	19.100	109
Ti	6.960	5.000	12.200	103
Cr	0.068	0.100	0.173	107
Mn	0.400	0.500	0.920	105
Fe	1.140	1.000	2.220	107
Ni	0.052	0.100	0.155	106
Cu	0.150	0.100	0.250	100
Zn	0.110	0.100	0.201	92
Ge	2.770	5.000	7.830	102
Sr	0.140	0.100	0.244	103

样品各元素的回收率为 92% ~ 110%, 满足要求。

## 2.4.3 正确度

使用有证标准物质 58A SiO<sub>2</sub>-99.99 C 检验正

确度。在再现性条件下测定 10 次元素含量,计算平均值、*RE* 和 *RSD* 值,结果见表 10。

表 10 58A SiO<sub>2</sub>-99.99 C 测定结果

元素	测定结果/( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )	平均值/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )	<i>RE</i> / %	<i>RSD</i> / %	认证值及不确定度/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )
Li	0.25,0.25,0.26,0.24,0.25,0.23,0.25,0.23,0.24,0.27	0.250	-1.20	4.1	0.25±0.14
Na	0.71,0.73,0.69,0.69,0.73,0.70,0.73,0.75,0.73,0.68	0.710	—	3.4	<2
Mg	0.086,0.086,0.087,0.106,0.094,0.086,0.087,0.088,0.100,0.081	0.090	—	8.5	<0.5
Al	8.72,8.80,9.06,8.71,8.79,9.02,8.99,9.12,8.77,8.45	8.840	1.61	2.3	8.7±0.7
K	0.41,0.45,0.46,0.39,0.39,0.46,0.42,0.49,0.42,0.45	0.430	-10.42	7.4	0.48±0.27
Ca	0.42,0.39,0.43,0.43,0.44,0.42,0.45,0.45,0.43,0.40	0.430	2.38	4.2	0.42±0.09
Ti	1.36,1.48,1.47,1.40,1.46,1.41,1.44,1.47,1.44,1.46	1.440	10.77	2.7	1.3±0.4
Cr	0.042,0.045,0.043,0.043,0.043,0.044,0.043,0.051,0.044,0.042	0.044	-29.03	6.0	0.062±0.021
Mn	0.013,0.013,0.012,0.012,0.010,0.016,0.015,0.016,0.013,0.012	0.013	—	15.0	<0.2
Fe	0.54,0.56,0.61,0.58,0.60,0.58,0.61,0.57,0.66,0.56	0.590	-4.84	5.8	0.62±0.12
Ni	0.031,0.029,0.030,0.031,0.032,0.030,0.030,0.030,0.029,0.030	0.030	—	3.0	<0.2
Cu	0.006,0.006,0.006,0.005,0.005,0.006,0.005,0.005,0.006,0.004	0.005	—	12.9	<0.1
Zn	0.005,0.005,0.004,0.009,0.001,0.006,0.007,0.003,0.007,0.002	0.005	—	50.0	<1.3
Ge	0.69,0.68,0.68,0.70,0.67,0.71,0.68,0.71,0.69,0.70	0.690	—	1.9	<1

检测结果的相对误差 (*RE*) 为 -29.03% ~ 10.77%, 相对标准偏差 (*RSD*) 不大于 6.0% ( $n=10$ ) (仅考察给出认定值的元素), 满足要求。

## 3 结论

本法采用单四级杆电感耦合等离子体质谱仪, 动能歧视碰撞池模式结合干扰方程, 同时测量 16 种杂质元素, 经过加标回收、标准物质验证和测定方法比对, 证明数据准确有效, 能够满足 4N8 高纯石英产品中杂质含量的测定。

## 参考文献

- [1] 汪灵. 高纯石英的概念及其原料品级划分[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(5): 55-63.
- [2] 李金超, 栗亚芝, 孔会磊. 中国高纯石英产业链现状及发展建议[J]. 西北地质, 2023, 56(5): 214-222.
- [3] 武志超, 张海敏, 谭秀民, 等. 高纯石英应用及化学提纯技术研究进展[J]. 化工矿物与加工, 2023, 52(9): 72-80.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 32650—2016. 电感耦合等离子体光谱法检测高纯石英砂中痕量元素[S].
- [5] 中华人民共和国工业和信息化部. JC/T 2027—2010. 高纯石英中杂质含量的测定方法——电感耦合等离子体原子发射光谱法[S].
- [6] 中华人民共和国工业和信息化部. YS/T 1164—2016. 硅材料用高纯石英制品中杂质含量的测定 电感耦合等离子体发射光谱法[S].
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. SN/T 3365—2012. 石英砂中铅、铁、钛、铜、锰、锌、铬、铝含量的测定 电感耦合等离子体原子发射光谱法[S].
- [8] 孔晓彦, 霍成玉, 鲁海妍. ICP-OES 法测定石英中三氧化二铝的方法研究[J]. 当代化工, 2022, 51(8): 2008-2011.
- [9] 谭秀珍, 李江霖, 李瑶, 等. 锗二次阴极-直流辉光放电质谱法测定高纯石英中 9 种杂质元素[J]. 冶金分析, 2022, 42(11): 24-29.
- [10] 张海敏, 倪文山, 刘磊, 等. 低射频功率-电感耦合等离子体质谱法测定高纯石英样品中痕量钾[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(4): 166-172.
- [11] 张宏丽, 倪文山, 刘磊, 等. 冷焰模式-电感耦合等离子体质谱法测定高纯石英中痕量铁[J]. 冶金分析, 2021, 41(7): 28-34.
- [12] 李晓丽. ICP-AES 法测定保护渣中微量硼的研究[J]. 包钢科技, 2000, 26(2): 54-58.
- [13] 张宏丽, 孙启亮, 刘同, 等. 电感耦合等离子体原子发射光谱法测定高纯石英选冶流程样品中痕量硼[J]. 冶金分析, 2023, 43(7): 69-75.
- [14] 赵小学, 张霖琳, 张建平, 等. ICP-MS 在环境分析中的质谱干扰及其消除[J]. 中国环境监测, 2014, 30(3): 101-106.
- [15] 洪光辉, 王晴晴, 崔喜平, 等. ICP-MS 分析中的干扰消除研究进展[J]. 实验科学与技术, 2021, 19(3): 14-21.
- [16] 辛晓东, 胡芳, 孙莉, 等. 基于碰撞池技术的电感耦合等离子体质谱法同时测定水中 10 种金属元素[J]. 化学分析计量, 2015, 24(6): 353-358.
- [17] 王晶, 黄伟雄, 梁旭霞, 等. 土壤和海洋沉积物中 16 种稀土元素电感耦合等离子体-质谱测定的酸消解体系选择与消除钪元素背景干扰研究[J]. 环境与健康杂志, 2016, 33(5): 448-455.
- [18] 侯鹏飞, 江冶, 曹磊. KED ICP-MS 测定云南地区红壤中的铁、钴、镍、铜、铅、锌、镓、锗、镉[J]. 地质学刊, 2020, 44(1/2): 218-222. ■