

doi:10.3969/j.issn.2095-1035.2024.07.010

固体粉末直接进样-交流电弧发射光谱 快速测定铝土矿中的硼

马景治^{1,2} 向兆¹ 张秦锋^{1,2,3*}

- (1. 湖北省地质实验测试中心, 武汉 430034;
2. 自然资源部稀土稀有稀散矿产重点实验室, 武汉 430034;
3. 资源与生态环境地质湖北省重点实验室, 武汉 430034)

摘要 铝资源是全球瞩目的战略性矿产资源, 2016 年被国土资源部列入 24 种战略性矿产目录。找矿过程中通过分析微量元素硼含量变化反映区域成矿条件, 并计算硼/镓比值以推测沉积环境, 因此准确测定硼为铝土矿矿产勘探提供了重要依据。但铝土矿的矿物组成主要是一水硬铝石、一水软铝石、三水铝石等含铝矿物, 高含量铝产生的光谱分析干扰导致微量硼的分析结果存在较大误差。并且现有铝土矿标准物质也并未对硼元素定值, 限制了铝土矿中硼分析方法的量值溯源能力。因此, 通过向硅酸盐光谱分析标准物质中加入氧化铝构建铝土矿基质模拟标准系列, 利用与样品类似的基体建立校准曲线, 消除基体元素铝的干扰, 进而建立了铝土矿中硼元素的交流电弧-发射光谱直接快速定量分析方法。结果表明, 建立的方法对铝土矿样品中硼的检出限为 $0.51 \mu\text{g/g}$, 方法的精密度小于 5.2% , 加标回收率为 $95.9\% \sim 103\%$; 利用铝土矿国家一级标准物质 GBW07177~GBW07182 通过与电感耦合等离子体质谱法测定结果比对以证明方法的可靠性, 发现无显著性差异。建立的方法无需样品前处理流程, 固体粉末直接进样提高了分析通量, 若配套使用台式微型仪器可实现野外现场直接分析, 对新一轮找矿突破战略行动具有一定的应用潜力。

关键词 铝土矿; 硼; 固体粉末进样; 交流电弧发射光谱

中图分类号: O657.31 文献标志码: A 文章编号: 2095-1035(2024)07-0939-06

Rapid Determination of Boron in Bauxite by Alternating Current Arc Emission Spectrometry with Powder Direct Injection

MA Jingzhi^{1,2}, XIANG Zhao¹, ZHANG Qinfeng^{1,2,3*}

- (1. Hubei Geological Research Laboratory, Wuhan, Hubei 430034, China;
2. Key Laboratory of Rare Mineral, Ministry of Natural Resources, Wuhan, Hubei 430034, China;
3. Hubei Key Laboratory of Resources and Eco-environment Geology, Wuhan, Hubei 430034, China)

Abstract Aluminum resources are the strategic mineral resources, and it was included in the catalog of 24 strategic minerals formulated by the Ministry of Land and Resources in 2016. In the process of prospecting,

收稿日期: 2023-10-26 修回日期: 2024-02-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC2903000); 湖北省地质局项目(KJ2023-38)

作者简介: 马景治, 男, 工程师, 主要从事光谱、质谱分析研究。E-mail: cugedu@163.com

* 通信作者: 张秦锋, 男, 工程师, 主要从事地球化学复杂基质样品分析研究。E-mail: qfzhang@whu.edu.cn

引用格式: 马景治, 向兆, 张秦锋. 固体粉末直接进样-交流电弧发射光谱快速测定铝土矿中的硼[J]. 中国无机分析化学, 2024, 14(7): 939-944.

MA Jingzhi, XIANG Zhao, ZHANG Qinfeng. Rapid Determination of Boron in Bauxite by Alternating Current Arc Emission Spectrometry with Powder Direct Injection[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2024, 14(7): 939-944.

regional metallogenic conditions can be reflected by analyzing the change of trace element boron content, and the boron/gallium ratio can be calculated to predict the depositional environment. Therefore, accurate quantitative boron provides an important basis for bauxite mineral exploration. However, the mineral composition of bauxite is mainly aluminum-containing minerals such as diaspore, boehmite and gibbsite. The presence of high aluminum content will interfere with the spectral analysis of trace boron, resulting in a large error in the analysis results. Moreover, the existing standard materials for bauxite have not determined the value of boron, which limits the traceability ability of boron analysis methods in bauxite. Therefore, according to the particularity of bauxite samples, a direct and rapid quantitative analysis method of boron in bauxite was established in this study. The bauxite matrix simulation standard series was constructed by adding alumina to the silicate spectral analysis standard material, and the calibration curve was established by using the matrix composition similar to that of the sample, so as to eliminate the interference of the matrix element aluminum. The results showed that the detection limit of boron in bauxite samples was $0.51 \mu\text{g/g}$, the precision of the method was less than 5.2% , and the spiked recovery rate was $95.9\%—103\%$. By comparing the results of bauxite standard material GBW07177—GBW07182 with the results of inductively coupled plasma mass spectrometry, it was found that there was no significant difference in the analysis results, which showcased the reliability of this method. The proposed method does not required sample pretreatment process, and the direct injection of solid powder greatly improved the analytical flux. This method holds a great promise to direct field analysis if matched with benchtop miniaturized instruments.

Keywords bauxite; boron; powder direct injection; alternating current arc emission spectrometry

铝资源作为紧缺战略性矿产,在国家资源安全层面具有举足轻重的地位。作为世界重要矿产之一的铝土矿是生产铝的主要原料,我国铝土矿资源储量位居世界第五^[1]。在找矿过程中,通过硼(B)的定量结果可计算硼/镓比值,从而反映铝土矿沉积环境,B的准确定量对于认识和研究铝土矿成矿条件及矿藏分布具有重要的意义^[2-3]。

目前对于微量B的定量分析方法主要包括电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)^[4]、电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)^[5-6]和交流电弧发射光谱法(AC-ES)^[7-8]。如唐晓星等^[9]建立 ICP-OES 方法实现铍盐中B的定量分析,方法检出限为 0.012 mg/kg ;赵海等^[10]通过在消解样品过程中加入少量磷酸,有效避免了硼元素的挥发,建立了电热板敞开酸溶-ICP-OES 法测定地质样品中的B。但铝土矿较难分解,无论采用常规敞开消解、高压密闭消解还是微波消解,极易生成的不溶性氟化物(AlF_3)会导致B定量结果偏低。虽然碱熔可将待测组分彻底溶出且能有效避免B损失,但极其复杂的前处理过程降低了分析通量,冗长的前处理环节也增大了引入偶然误差的风险^[11-12]。

AC-ES 则有潜力避免前处理过程的这些难题:依靠固体进样无需酸、碱消解,避免了不溶性氟化物

的产生,简单快捷的前处理也提高了分析通量。如龚仓等^[13]建立了 AC-ES 测定地质样品中B的方法,采用侧孔方式有效解决了摄谱过程中样品逸出的问题。肖细炼等^[14]通过在样品装入电极后加入 10% 盐酸处理,有效避免了因摄谱过程中产生 CO_2 造成样品飞溅的问题,实现碳酸盐矿物中B的检测。黄海波等^[15]在前人研究的基础上建立了应用全谱发射光谱仪准确测定地质样品中B的方法,采用基体相似的标准物质进行二次曲线校正以提高分析质量。但迄今为止,仍未有研究针对铝土矿中的微量B建立 AC-ES 定量方法,根本原因在于铝土矿基质特殊导致标准物质难以获取,且现有铝土矿标准物质中B未得到定值。

因此,针对铝土矿样品的特殊性,本研究通过向硅酸盐光谱分析标准物质加入一定量氧化铝制取模拟铝土矿基质标准系列,实现与样品基体的一致性,有效降低基体效应带来的系统误差。利用自主研制的 AC-ES,通过改进电极结构、采用多孔平口电极有效避免由于样品喷溅、粘连等造成的误差;并通过加入内标有效降低由于弧焰波动以及制样等外部因素对定量结果造成的影响。经过针对激发电流、缓冲剂和曝光时间进行系统性的优化,建立了一种铝土矿中硼元素的固体粉末直接进样-交流电弧发射

光谱快速定量分析方法,为铝资源战略找矿突破提供了一种有潜力的分析工具。

1 实验部分

1.1 仪器和工作条件

CCD-I 型平面光栅交流电弧直读发射光谱(湖北省地质实验测试中心自主研制),其中 CCD 检测器为六块 CCD 覆盖光谱检测范围约 82 nm,分辨率 0.01 nm;全息闪耀光栅的光栅刻线为 2 400 条/mm,色散倒数 0.37 nm/mm;高压激发源为 WJD 型交直流电弧发生器,前置稳压电源,预燃时间 3 s,预燃电流 5 A,激发时间 30 s,激发电流 15 A,背景采集时间 8 s。YKHM I-1 型自动搅拌机(武汉质检实验器材中心);振动频率 3 300 Hz,振动时间 14 min。BSA124S 型电子天平(塞多利斯科学仪器有限公司)。

1.2 材料和试剂

光谱纯石墨电极:上电极为平头圆柱状、直径 2.5 mm、长 10 mm,下电极为细颈杯状、直径 4.2 mm、孔深 8.0 mm、壁厚 0.9 mm、细颈直径 2.6 mm、颈长 4.0 mm,距离杯口 5.0 mm 处打双对孔。

成分组成为焦硫酸钾:氟化钠:三氧化铝:碳粉=22:20:44:14(质量分数之比,其中内含有 0.007% 的 GeO₂ 作为内标)的光谱缓冲剂和成分组成为二氧化硅:三氧化二铝:三氧化二铁:纯白云石:硫酸钠:硫酸钾=72:15:4:4:2.5:2.5(质量分数之比)的合成硅酸盐基物购于中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所。Al₂O₃(光谱纯)购于国药集团化学试剂有限公司(上海)。蔗糖-乙醇溶液(20 g/L):称取 20.0 g 蔗糖溶于乙醇-水(1+1,v/v)溶液中并定容至 1 L,摇匀。

1.3 模拟铝土矿基质标准系列的制备

由于铝土矿标准物质难以获取且未对 B 进行定值,故研究中采用具有不同 B 含量的合成硅酸盐光谱分析标准物质(GBW07702、GBW07703、GBW07704、GBW07705、GBW07706、GBW07707、GBW07708)与氧化铝混合,制得模拟铝土矿标准系列(STD1~STD9)。并考虑到铝土矿中氧化铝含量一般在 50%(质量分数)以上,因此标准物质均与氧化铝以一定比例配制,最终模拟铝土矿标准系列中的 B 含量如表 1 所示。

1.4 AC-ES 定量分析铝土矿样品中的硼

样品碎至粒径小于 74 μm(200 目),于 105 °C 烘箱中干燥 1 h。称取试样和缓冲剂各 0.100 0 g 于 5 mL 瓷坩埚中,加入一颗直径 4 mm 的玛瑙珠并盖上坩埚

盖,将坩埚置于自动搅拌机并于振动频率 3 300 Hz 混合 14 min。混合完成后将样品装入碳棒电极中并压紧,滴加 2 滴蔗糖-乙醇溶液(20 g/L),于 75 °C 烘箱中干燥 1 h。采用垂直电极方式于交流电弧发射光谱中摄谱,以 B(249.773 3 nm)/Ge(270.962 6 nm)各

自扣除背景后的强度比的对数值 $\lg \frac{I_{B\text{峰值}} - I_{B\text{背景}}}{I_{Ge\text{峰值}} - I_{Ge\text{背景}}}$ 为纵坐标,以含量值的对数值 $\lg c$ 为横坐标,采用一次拟合建立校准曲线。通过内标线强度对分析谱线强度进行校正,得到 B 定量结果。若样品中 B 含量超过标准曲线范围,可采用合成硅酸盐基物稀释样品后测定。并利用锆作为内标元素与 B 组成分析线对,校正因电弧波动及制样等外部因素造成的干扰影响;平口杯状的下电极开双对孔也有效防止因样品飞溅、鼓泡、粘连等造成测定误差。

表 1 标准系列的配制比例及 B 含量

Table 1 Standard series mixing ratios and B contents

STDseries number	STD mixing ratio	Boron content/ (μg · g ⁻¹)
STD1	GBW07702 : Al ₂ O ₃ = 1 : 1	2.55
STD2	GBW07703 : Al ₂ O ₃ = 1 : 1	5.00
STD3	GBW07704 : Al ₂ O ₃ = 1 : 1	10.0
STD4	GBW07705 : Al ₂ O ₃ = 1 : 1	25.0
STD5	GBW07706 : Al ₂ O ₃ = 1 : 1	50.0
STD6	GBW07706 : Al ₂ O ₃ = 3 : 1	75.0
STD7	GBW07707 : Al ₂ O ₃ = 1 : 1	100
STD8	GBW07707 : Al ₂ O ₃ = 3 : 1	150
STD9	GBW07708 : Al ₂ O ₃ = 1 : 1	250

2 结果与讨论

2.1 激发电流的确定

在 AC-ES 中,电流大小直接影响分析谱线的灵敏度和精密度。因此,研究使用两级程序式激发电流,通过有效的预热避免了样品在瞬间高温刺激下产生飞溅。通过一级电流参数的优化,研究发现一级电流为 5 A 时可实现与二级电流的稳定衔接。对于二级电流强度的确定,选取国家一级标准物质 GBW07706,考察了 7、9、11、13、15、17 和 19 A 不同二级电流强度对 B 谱线强度(扣除背景后的净信号强度)的影响(图 1)。结果表明,谱线强度随着二级电流强度的增加而显著增强,直至电流强度大于 15 A 后逐渐达到平台,谱线强度缓慢增加并趋于稳定。考虑到电流过大对电极夹以及负载的影响,最终选择二级电流强度为 15 A。

2.2 缓冲剂及曝光时间的选择

缓冲剂在 AC-ES 中主要起稳定电弧、调节待测

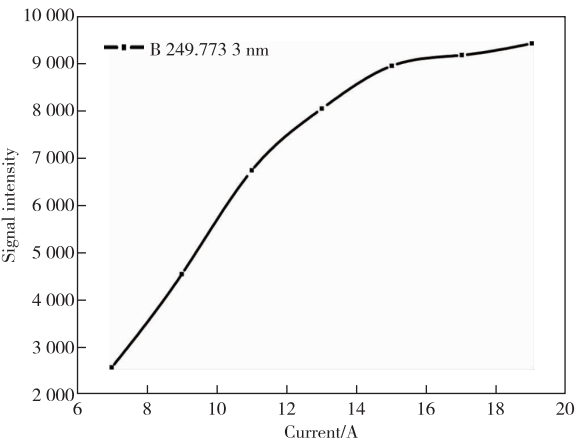


图 1 不同激发电流对信号强度的影响

Figure 1 Effect of excitation currents on signal intensity.

元素蒸发行为的作用,同时可与样品在高温熔融下更好结合,有效避免摄谱过程中样品飞溅,因此其组成和配比直接影响测试条件和分析质量。采用的缓冲剂主要组成为焦硫酸钾、氟化钠、三氧化铝和碳粉,其质量分数配比为 22 : 20 : 44 : 14,其中含有 0.007% 的 Ge_2O 作为内标。采用该缓冲剂与样品等质量混匀进行蒸发摄谱,绘制蒸发曲线(图 2)。结果表明,样品与选用的缓冲剂混合后,B 具有较好的蒸发行为且与 Ge 具有相似的蒸发趋势,说明缓冲剂能够有效地调节 B 的蒸发行为。

除缓冲剂之外,合适的曝光时间选择同样对于提高分析灵敏度以及精密度具有重要作用。由图 2 可以看出,当曝光时间为 30 s 内时,B 和 Ge 信号强度均较高,说明待测元素得到充分激发,而 30 s 后强度降低并趋于平稳,因此后续研究中将曝光时间

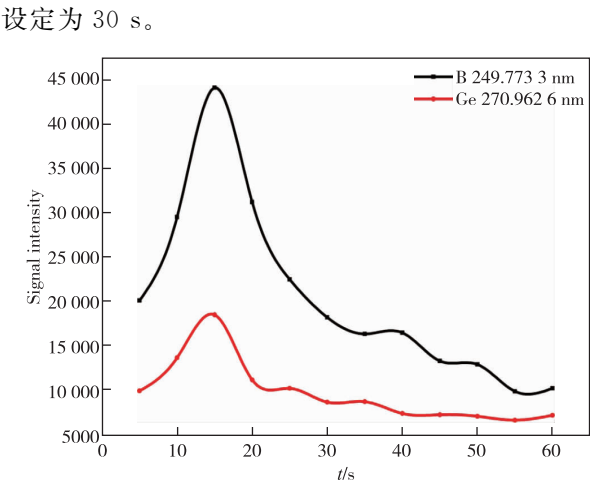


图 2 蒸发曲线

Figure 2 Evaporation curves.

2.3 方法检出限、定量限及动态范围

通过对配制的模拟铝土矿标准系列样品在 ACES 中的激发电流、缓冲剂及曝光时间的探究,建立了适用于铝土矿的固体粉末直接进样-交流电弧发射光谱 B 快速定量方法,并进一步研究了该方法的检出限、定量限及工作曲线动态范围。通过准确称取不含 B 的合成硅酸盐基准物质 0.05 g,与 0.05 g 氧化铝及 0.1 g 缓冲剂均匀混合,制备 12 份平行样品并进行定量分析。将测定结果的 3 倍标准偏差作为方法的检出限,测定结果的 10 倍标准偏差作为方法的定量限(表 2)。结果表明,方法检出限为 $0.51\text{ }\mu\text{g/g}$,定量限为 $1.70\text{ }\mu\text{g/g}$,且工作曲线动态范围为 $1.70\sim 250\text{ }\mu\text{g/g}$,方法具有较好的灵敏度和宽的动态范围,适用于不同含量铝土矿中 B 的高通量快速定量分析。

表 2 检出限、定量限和动态范围

Table 2 LOD,LOQ and dynamic range of the method($n=12$)						$/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	
Element	Parallel experiment results			Standard deviation	LOD	LOQ	Dynamic range
B	0.62	0.72	0.98	0.17	0.51	1.70	1.70—250.00
	0.88	0.44	0.49				
	0.56	0.53	0.85				
	0.61	0.78	0.59				

2.4 方法学验证

由于目前铝土矿国家标准物质难以获取且均无 B 的定值结果,为了保证方法的准确性,采用固体加标的方法进行方法学验证。选取模拟铝土矿标准系列 STD1、STD2、STD5、STD6 共计 4 个,分别称取 0.5 g 样品和 0.5 g 标准物质(GBW07706、GBW07705、GBW07707、GBW07707),研磨均匀后,分析计算各个样品的加标回收率。结果表明(表 3),方法

的加标回收率为 $95.9\%\sim 103\%$,说明方法准确、可靠。

选取 6 件产自贵州的铝土矿实际样品,使用建立的方法平行分析 12 次以验证方法精密度。结果表明(表 4),6 件具有不同 B 含量铝土矿实际样品的定量结果相对标准偏差(RSD,%)均小于 5.2%,良好的方法精密度完全满足《地质矿产实验室测试质量管理规范》(DZ/T 0130—2006)中的要求。

表 3 硼的加标回收率

Table 3 The spiked recoveries of B

Standard number	Results/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	Spiked content/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	Spiked results/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	Recoveries/%
STD1	90.7	100	96.8	103
STD2	48.6	50	48.9	98.4
STD5	148.0	200	171.0	95.9
STD6	196.0	200	195.0	96.9

表 4 方法精密度

Table 4 Precision of the methods($n=12$)

Sample number	Results/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)				Mean/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	Standard deviation/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	RSD/%
Sample 1	91.1	89.8	90.8	88.9	90.7	1.01	1.1
	90.6	90.7	91.5	92.2			
	91.3	91.5	89.1	91.4			
Sample 2	51.3	46.0	48.8	49.5	48.6	2.15	4.4
	48.3	51.4	45.9	48.8			
	46.0	48.8	46.7	51.9			
Sample 3	57.0	58.8	62.1	61.1	60.1	2.11	3.5
	63.6	61.2	57.7	58.6			
	59.2	59.3	59.4	63.2			
Sample 4	64.7	61.5	59.9	58.5	59.8	3.09	5.2
	57.3	60.1	65.4	60.0			
	56.0	60.8	58.0	55.4			
Sample 5	148	148	151	148	148	3.02	2.0
	148	149	144	145			
	143	151	152	144			
Sample 6	198	196	192	190	196	5.82	3.0
	198	189	193	189			
	203	202	206	198			

2.5 与其他方法的比较

为进一步验证方法定量结果的可靠性,选择不同分析原理的碱熔-树脂交换-电感耦合等离子体质谱法^[6]对 6 件铝土矿国家标准物质(GBW07177、GBW07178、GBW07179、GBW07180、GBW07181、GBW07182)中 B 进行定量分析,与建立的 AC-ES 方法定量结果进行对比(表 5)。结果表明,两种不同原理方法的相对误差小于 5.73%,说明建立的方法在无需前处理直接进样的基础上仍对铝土矿中的 B 具有极好的定量性能。

表 5 两种方法结果比对

Table 5 Comparison results of both methods

CRM number	Boron content/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)		Relative error/%
	AC-ES	ICP-MS	
GBW07177	179	181	1.10
GBW07178	173	168	2.98
GBW07179	155	151	2.65
GBW07180	85.2	88.9	4.16
GBW07181	83.1	78.6	5.73
GBW07182	80.5	84.2	4.39

3 结论

利用自主研制的交流电弧发射光谱,通过将合成硅酸盐光谱分析标准物质与氧化铝混合制得模拟铝

土矿标准系列,从而在基体匹配的基础上建立校准曲线,解决了铝土矿标准物质难以获取且没有 B 定值的现实难题。通过系统性优化激发电流、缓冲剂和曝光时间,成功建立了铝土矿中硼元素的交流电弧发射光谱快速定量方法,固体粉末直接进样缩减了常规前处理流程所消耗的人力物力。除此之外,建立的定量方法各项分析性能指标均满足《地质矿产实验室测试质量管理规范》要求,简便快捷的方法流程适合大批量样品的高通量分析。本方法避免使用酸碱等对人体、环境有害的物质,是一种相对绿色的分析手段,未来通过仪器微型化可用于矿石样品的野外现场检测,为战略性矿产的找矿工作提供了一种有潜力的分析工具。

参考文献

[1] 高兰,王登红,熊晓云,等.中国铝土矿资源特征及潜力分析[J].中国地质,2015,42(4):853-863.
GAO Lan, WANG Denghong, XIONG Xiaoyun, et al. Minerogenetic characteristics and resource potential analysis of bauxite in China[J]. Geology in China, 2015, 42(4): 853-863.
[2] CHENNA R B, YIANNIS P, KOEN B, et al. Leaching of rare earths from bauxite residue (red mud)[J].

- Minerals Engineering, 2015, 76. DOI: 10. 1016/j. mineng. 2015. 01. 005.
- [3] 叶彤,谷静,王甘露,等. 铝土矿中伴生三稀元素研究进展[J]. 矿物学报,2021,41(4/5):391-399.
YE Tong, GU Jing, WANG Ganlu, et al. Research progress on the associated rare earth, rare metal, and rare dispersed elements in the bauxite deposit[J]. Acta Mineralogical Sinica, 2021, 41(4/5): 391-399.
- [4] 张征莲,唐碧玉,古行乾,等. 乙醇增敏-电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES)法测定土壤中的全硼[J]. 中国无机分析化学,2023,13(12):1402-1407.
ZHANG Zhenglian, TANG Biyu, GU Xingqian, et al. Determination of boron in soil by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry with ethanol sensitization[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2023, 13(12): 1402-1407.
- [5] 刘金龙,何汉江,冯慧琳,等. 阳离子树脂交换分离-电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法测定地质石膏样品中硼[J]. 中国无机分析化学,2023,13(8):883-887.
LIU Jinlong, HE Hanjiang, FENG Huilin, et al. Determination of boron in geochemical gypsum samples by inductively coupled plasma mass spectrometry with cationic resin exchange separation[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2023, 13(8): 883-887.
- [6] 马景治,胡伟康,董学兵,等. 树脂交换分离-电感耦合等离子体质谱法测定土壤中碘硼锆锡锑铋钽钨[J]. 分析仪器,2021(3):33-41.
MA Jingzhi, HU Weikang, DONG Xuebing, et al. Determination of iodine, boron, germanium, tin, arsenic, antimony, niobium, tantalum and tungsten in soil by ICP-MS with resin exchange separation[J]. Analytical Instrumentation, 2021(3): 33-41.
- [7] 孙慧莹,李小辉,王亚萍,等. AES-8000 发射光谱法测定植物样品中微量硼[J]. 化学工程师,2021,35(8):31-33.
SUN Huiying, LI Xiaohui, WANG Yaping, et al. Determination of boron in plant samples by AES-8000 emission spectrometry[J]. Chemical Engineer, 2021, 35(8): 31-33.
- [8] 王顺祥,龚仓,吴少青,等. 固体进样-CCD 光电直读发射光谱法测定地球化学样品中微量银、硼和锡[J]. 中国无机分析化学,2023,13(8):863-868.
WANG Shunxiang, GONG Cang, WU Shaoqing, et al. Determination of trace silver, boron and tin in geochemical samples by CCD optical direct-reading emission spectrometer with solid injection[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2023, 13(8): 863-868.
- [9] 唐晓星,马继飞,刘忠英,等. 电感耦合等离子体发射光谱法测定铍盐中痕量硼[J]. 分析实验室,2020,39(8): 910-913.
TANG Xiaoxing, MA Jifei, LIU Zhongying, et al. Determination of boron at trace level in beryllium salts by inductively coupled plasma optical emission spectrometry[J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2020, 39(8): 910-913.
- [10] 赵海,李灵凤. 电热板酸溶-电感耦合等离子体原子发射光谱法同时测定地质样品中的硼、砷、硫[J]. 中国资源综合利用,2020,38(8):19-21.
ZHAO Hai, LI Lingfeng. Simultaneous determination of boron, arsenic and sulfur in geological samples by acid dissolution of electric heating plate-inductively coupled plasma atomic emission spectrometry[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2020, 38(8): 19-21.
- [11] 夏传波,赵伟,姜云,等. 铝土矿样品分解方法和分析测试技术研究进展[J]. 冶金分析,2020,40(7):29-39.
XIA Chuanbo, ZHAO Wei, JIANG Yun, et al. Progress of sample digestion methods and analytical techniques for bauxite[J]. Metallurgical Analysis, 2020, 40(7): 29-39.
- [12] WEN Z, LIANG Q, ZHAO C H, et al. An investigation of digestion methods for trace elements in bauxite and their determination in ten bauxite reference materials using inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 2016, 40(2): 195-216.
- [13] 龚仓,帅林阳,夏祥,等. 交流电弧直读光谱法快速测定地质样品中银、锡、钼、硼和铅[J]. 理化检验-化学分册,2020,56(12):1320-1325.
GONG Cang, SHUAI Linyang, XIA Xiang, et al. Rapid determination of silver, tin, molybdenum, boron, and lead in geological samples by AC arc direct reading spectroscopy [J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis), 2020, 56(12): 1320-1325.
- [14] 肖细炼,王亚夫,陈燕波,等. 交流电弧光电直读发射光谱法测定地球化学样品中银硼锡[J]. 冶金分析,2018, 38(7):27-32.
XIAO Xilian, WANG Yafu, CHEN Yanbo, et al. Determination of silver, boron and tin in geochemical samples by alternating current arc optoelectronic direct reading emission spectrometry[J]. Metallurgical Analysis, 2018, 38(7): 27-32.
- [15] 黄海波,沈加林,陈宇,等. 全谱发射光谱仪应用于分析地质样品中的银锡硼钼铅[J]. 岩矿测试,2020,39(4): 555-565.
HUANG Haibo, SHEN Jialin, CHEN Yu, et al. Simultaneous determination of silver, boron, tin, molybdenum and lead in geological samples by atomic emission spectrometer with full spectrum[J]. Rock and Mineral Analysis, 2020, 39(4): 555-565.