

doi:10.3969/j.issn.2095-1035.2023.11.009

高频红外碳硫仪测定区域地球化学样品中的硫

聂高升¹ 石友昌² 阿米娜·胡吉^{1*} 孙阳阳¹ 贡麻宇¹ 陈林¹

(1. 中国地质调查局 乌鲁木齐自然资源综合调查中心, 乌鲁木齐 830057;

2. 中国地质调查局 昆明自然资源综合调查中心, 昆明 650100)

摘要 高频红外碳硫仪由于便捷高效,常应用于区域地球化学样品中硫的分析检测。通过对样品称样量、助熔剂的种类、加入顺序和用量等因素进行探讨,以纯铁屑、锡粒和钨粒为助熔剂,确定了最佳分析岩石、土壤和水系沉积物中硫含量的条件,建立了高频红外碳硫仪测定低中高含量硫的方法,并且用国家一级标准物质验证了方法的准确度和精密度。结果表明,当称样量、助熔剂的加入顺序和质量分别为 0.05 g 样品、0.5 g 铁助熔剂、1.7 g 钨粒时,土壤和水系沉积物中硫的测定结果最稳定,岩石标准样品额外加入 0.5 g 锡改善样品流动性,提高分析准确度。方法的相对标准偏差(RSD)小于 6% ($n=12$),相对误差绝对值小于 8%。方法具有操作简单、高效、稳定性好的特点,适合于大批量区域地球化学样品中硫的检测。

关键词 高频红外碳硫仪;硫;助熔剂;最佳条件

中图分类号:O657.33 TH744.41 文献标志码:A 文章编号:2095-1035(2023)11-1215-06

Determination of Sulfur in Regional Geochemistry Samples by High-frequency Infrared Carbon and Sulfur Analyzer

NIE Gaosheng¹, SHI Youchang², HOJI Amina^{1*}, SUN Yangyang¹, YUN Xiuyu¹, CHEN Lin¹

(1. Urumqi Comprehensive Survey Center on Natural Resources, China Geological Survey, Urumqi, Xinjiang 830057, China;

2. Kunming Center of Natural Resources Comprehensive Survey, China Geological Survey, Kunming, Yunnan 650100, China)

Abstract High frequency infrared carbon and sulfur analyzer is widely used to measure sulfur content in regional geochemistry samples due to its convenience and efficiency. The optimum conditions for analyzing sulfur content in rock, soil and stream sediments were determined by exploring factors such as sample weighing, type of flux, addition order, and dosage. A method for determining low, medium and high sulfur content was established by high-frequency infrared carbon and sulfur meter. In this process, pure iron filings, tin particles and tungsten particles were used as fluxes. In addition, the accuracy and precision of the method was verified by national first-level reference standard materials. The results showed that when the sample weight, the order and quality of the flux addition were 0.05 g of sample, 0.5 g of pure iron, and 1.7 g of tungsten particles, respectively, the determination result of sulfur were the most stable in soil and stream sediment. For rock standard samples, 0.5 g of tin was added

收稿日期:2023-01-06 修回日期:2023-07-19

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(ZD20220127, ZD20220126)

作者简介:聂高升,男,工程师,主要从事地质样品分析检测研究。E-mail:1273639197@qq.com

* 通信作者:阿米娜·胡吉,女,助理工程师,主要从事地质样品分析检测研究。E-mail:2474784342@qq.com

引用格式:聂高升,石友昌,阿米娜·胡吉,等. 高频红外碳硫仪测定区域地球化学样品中的硫[J]. 中国无机分析化学, 2023, 13(11): 1215-1220.

NIE Gaosheng, SHI Youchang, HOJI Amina, et al. Determination of Sulfur in Regional Geochemistry Samples by High-frequency Infrared Carbon and Sulfur Analyzer[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2023, 13(11): 1215-1220.

to improve the fluidity of samples and improve the accuracy of analysis. The precision of the method(RSD)was less than 6%,and the absolute value of relative error was less than 8%. This method has the characteristics of simple operation,high efficiency and good stability,and is suitable for the detection of sulfur in a large number of regional geochemistry samples.

Keywords high frequency infrared carbon and sulfur analyzer;sulfur;flux;optimal conditions

硫(S)是土壤农作物生长必需的营养成分,其含量高低对农作物的产量有较大影响。随着我国农用地质量调查工作的不断深入与扩大,区域地球化学样品对硫的检测有了较高的要求^[1]。现有的标准分析方法大多采用分光光度法、硫酸钡重量法^[2]、高频红外燃烧法^[3]、X射线荧光光谱法^[4]、燃烧碘量法^[5]等测定硫含量。这些方法虽然能满足硅酸盐岩石、土壤和沉积物等地质样品的测试需求,但是分析过程繁琐、效率低,且分析质量不能令人满意,比如燃烧碘量法用于测定盐碱土中硫时,样品中的氯离子和碘反应,使得滴定终点时颜色变深,影响测定结果的准确性;硫酸钡重量法测定低含量硫的时候,硫酸钡不易完全沉淀,分析重复性差;X射线光谱仪一是设备昂贵,二是不能满足土壤和沉积物中低含量硫测定的要求。随着仪器设备的发展,电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)^[6]、高频红外碳硫仪^[7-8]等仪器用于测定不同样品中的硫。

高频红外碳硫仪由于固体进样、红外检测、分析效率高和线性范围宽的特点,在地球化学样品中硫的测定应用广泛。由于基体和硫含量范围的不同,因此不同地质样品的分析条件不同。陈伟锐^[9]对样品称样量、样品和助熔剂叠放顺序、助熔剂添加量进行对比实验,优化出适合分析土壤和水系沉积物中硫含量的最佳条件。龚仓等^[10]筛选出了测定岩心钻探样品中硫的最佳实验条件。张明杰等^[3]对样品称样量、助熔剂的加入量、氧气流量等测定条件进行优化实验,解决了基体影响和低电磁感应等问题。石友昌等^[11]前期优化出了称样量、燃烧时间、分析时间、氧气流量的最优条件,本文主要研究高频红外碳硫仪法测定土壤、水系沉积物和岩石中的硫时,样品和助熔剂的加入顺序、助熔剂的种类和添加量等因素。通过国家一级标准物质对该方法进行了验证,为实现快速、高效、准确和大批量测定硫提供了参考。

1 实验部分

1.1 主要仪器与设备

KR-205 高频红外碳硫分析仪(德阳市科瑞仪

器设备厂),仪器工作条件为燃烧温度 1 800 ℃、燃烧时间 25 s、分析时间 40 s、氧气流量 4.0 L/min。

CPA225D 电子天平(赛多利斯科学仪器有限公司),HIR-944C 管式电阻炉(无锡市高速分析仪器有限公司),碳硫分析仪专用陶瓷坩埚(德阳市科瑞仪器设备厂)。

1.2 实验材料和试剂

C型纯铁助熔剂(铁含量>99.8%,德阳市科瑞仪器设备厂),COREY-1 助熔剂钨粒(380 μm,德阳市科瑞仪器设备厂),锡粒(380~830 μm,德阳市科瑞仪器设备厂),高纯氧(纯度≥99.999%)。

硫酸钙、硫酸钡(基准试剂)在 105 ℃下烘干 2 h,冷却后保存于干燥器中,备用。

国家标准物质使用 GBW 系列(土壤、水系沉积物和岩石)均由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所研制,在 105 ℃下烘干 2 h,冷却后保存于干燥器中,备用。

1.3 实验方法

将碳硫分析仪专用瓷坩埚放入 1 000 ℃管式电阻炉中煅烧 2 h,去除瓷坩埚自身硫含量及水分含量,待冷却后放在干燥器中备用。

将瓷坩埚置于电子天平上,称取粒径 0.074 mm 的土壤样品约 0.05 g(精确至 0.000 1 g)于坩埚内,使样品均匀平铺在坩埚底部后,依次加入纯铁助熔剂 0.5 g、钨粒助熔剂 1.7 g,最后覆盖锡粒助熔剂 0.5 g,使用坩埚钳将坩埚夹入坩埚托上,设定工作参数进行分析。在样品进行测试前,先测定 10 个空白样品对仪器进行预热,待仪器稳定后进行样品测定。

2 结果与讨论

2.1 称样量的选择

样品称样量小容易产生较大的测量误差;称样量大,熔化不完全,导致分析结果的不准确。文献^[11]中显示称样量在 0.025~0.100 0 g 时,样品燃烧充分,测试结果准确且稳定性好;在相同测量条件下,样品量越大,样品与助熔剂混匀后越厚,坩埚下部与氧气接触比例越小,燃烧热量难以使样品中硫完全燃烧转化为二氧化硫,导致样品燃烧不完全,对

结果所产生的影响较大,因此选择称样量为 0.05 g。选取 14 个不同含量的土壤、水系沉积物和岩石国家一级标准物质,判断称样量对标准物质中硫含量结果的影响用以验证(表 1)。实验结果满足《生态地球化学评价样品分析技术要求》《土地质量地球化学评价》以及《多目标区域地球化学调查规范(1:250000)》测定要求。

表 1 样品称样量对硫含量测定的影响

Table 1 Effects of the sample amount on

sulfur content determination /($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)

标准物质	硫含量标准值	硫含量测试平均值	相对误差 RE ^①
GBW07727	115	115	0.30
GBW07104	192	197	2.6
GBW07726	326	308	5.5
GBW07103	466	424	9.0
GBW07427	160	161	0.60
GBW07446	108	107	0.90
GBW07425	217	243	12
GBW07451	440	479	8.8
GBW07405a	839	833	0.70
GBW07308a	66.5	66	0.80
GBW07309	160	179	11.9
GBW07304a	361	330	8.6
GBW07360	532	548	3.0
GBW07378	1 060	1 034	2.5

注:①单位为%,下同。

2.2 助熔剂的选择

助熔剂的选择关系到地质样品在燃烧过程中是否能完全释放出硫,本文选取纯铁屑、锡粒、钨粒三种助熔剂展开实验,其中,纯铁屑属于高电磁感应性金属,通过高频感应产生较大的涡电流和较多的焦耳热,提高炉温,使样品完全燃烧。钨粒属于高熔点金属,也能感应产生涡电流,氧化燃烧放出热量,可使纯铁氧化燃烧平稳,不飞溅,WO₃的生成有利于SO₂的释放。锡粒能提高熔渣的流动性,降低熔渣凝固点,有利于硫释放;缺点是易形成粉尘,影响硫的测定。选择 3 个硫含量具有低、中、高差异的国家标准物质 GBW07451、GBW07726、GBW07449。分别取样品 0.050 0 g、纯铁助熔剂 0.5 g、钨粒 1.5 g、锡粒 0.5 g,不同排列组合考察助熔剂的种类和加入顺序对硫测定值的影响。实验结果如表 2 所示,助熔剂加入铁屑、钨粒和锡粒时燃烧最充分,测定值与理论值的相对偏差小。一般土壤和水系沉积物样品分析时只需要加入纯铁助熔剂与钨粒便可满足生产要求,岩石类可以加入适当量锡粒提高样品流动性,提高分析结果准确性。实际生产中,在满足分析要求的条件下,为提高生产效率,助熔剂选择“试样+铁粒+钨粒+锡粒(岩石类样品)”的加入顺序。

表 2 助熔剂的选择对硫测定值的影响

Table 2 Effects of the different flux on sulfur determination

/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)

序号	助熔剂加入顺序	GBW07451			GBW07726			GBW07449		
		理论值	测试值	RE ^①	理论值	测试值	RE ^①	理论值	测试值	RE ^①
1	铁屑+试样	440	146	-66.8	326	91	-72.1	27 000	24 394	4.41
2	钨粒+试样	440	233	-47.0	326	138	-57.7	27 000	26 124	1.43
3	锡粒+试样	440	燃烧不充分		326	燃烧不充分		27 000	燃烧不充分	
4	钨粒+试样+铁屑	440	421	-4.3	326	274	-16.0	27 000	27 070	0.11
5	钨粒+试样+锡粒	440	436	-0.9	326	252	-22.7	27 000	26 901	0.16
6	铁屑+试样+锡粒	440	396	-10.0	326	232	-28.8	27 000	27 486	0.77
7	铁屑+试样+钨粒+锡粒	440	491	11.6	326	324	-0.6	27 000	29 618	4.02
8	钨粒+铁屑+试样+锡粒	440	495	5.12	326	321	0.67	27 000	燃烧不充分	
9	试样+铁屑+钨粒+锡粒	440	480	3.78	326	294	4.49	27 000	26 226	4.49

2.3 助熔剂添加量的选择

当铁助熔剂量多时,容易造成样品飞溅,但没有加入铁助熔剂样品燃烧又不完全。在确定称样量、助熔剂种类和加入顺序等最佳实验条件下,采用控制变量法,先固定纯铁 0.5 g 和锡粒 0.5 g,分别称取钨粒助熔剂 1.0、1.1、1.2、1.3、1.4、1.5、1.6、1.7、1.8 g。根据测试结果和理论值的相关系数,确定钨粒重量对测试结果的影响,从而找出最佳钨粒助熔剂重量。同理采用相同方法,确定铁粒和锡粒不同重量对测试结果的影响。由表 3 可见,当铁的

添加量在 0.1~0.8 g 时,硫的测定值接近理论值,相对误差变化不大;随着铁添加量逐渐增大,硫含量测定值也逐渐变大,故实验选择铁助熔剂的添加量为 0.5 g,结果与陈伟锐等^[9]选择的铁添加量相符。在满足 DZ/T 0258—2014《多目标地球化学调查规范(1:25000)》和 DZ/T 0295—2016《土地质量地球化学评价规范》要求的前提下,土壤和水系沉积物标准物质样品加 1.7 g 的钨粒时,硫的测定结果最稳定,样品燃烧后坩埚壁上无黏结物。岩石标准样品可额外再加入 0.5 g 锡改善样品流动性,提高分析准确度。

表 3 助熔剂加入量对硫测定的影响

Table 3 Effects of flux addition on sulfur determination

/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)

钨粒重量/g	GBW07451			GBW07726			GBW07449		
	理论值	测试值	RE ^①	理论值	测试值	RE ^①	理论值	测试值	RE ^①
1.0	440	514	6.8	326	388	7.6	27 000	26 309	1.1
1.1	440	519	7.2	326	368	5.3	27 000	26 000	1.6
1.2	440	629	15.5	326	361	4.4	27 000	26 400	0.98
1.3	440	436	0.40	326	285	5.8	27 000	25 300	2.8
1.6	440	454	1.4	326	276	7.2	27 000	24 600	4.0
1.5	440	454	1.4	326	287	5.5	27 000	16 800	20.61.0
1.6	440	459	1.8	326	291	4.9	27 000	24 900	3.5
1.7	440	456	1.6	326	307	2.6	27 000	25 100	3.2
1.8	440	499	5.5	326	323	0.40	27 000	24 600	4.0

铁粒重量/g	GBW07451			GBW07726			GBW07449		
	理论值	测试值	RE ^①	理论值	测试值	RE ^①	理论值	测试值	RE ^①
0.1	440	466	2.5	326	324	0.27	27 000	27 500	0.80
0.2	440	521	7.3	326	319	0.94	27 000	26 400	0.98
0.3	440	467	2.6	326	285	5.8	27 000	25 700	2.1
0.4	440	457	1.6	326	300	3.6	27 000	27 000	0.00
0.5	440	443	0.30	326	321	0.67	27 000	25 800	2.0
0.6	440	471	3.0	326	353	3.5	27 000	25 100	3.2
0.7	440	492	4.8	326	311	2.0	27 000	24 900	3.5
0.8	440	467	2.6	326	319	0.94	27 000	23 900	5.3

锡粒重量/g	GBW07451			GBW07726			GBW07449		
	理论值	测试值	RE ^①	理论值	测试值	RE ^①	理论值	测试值	RE ^①
0.1	440	435	0.50	326	269	8.3	27 000	27 500	0.80
0.2	440	423	1.7	326	284	6.0	27 000	27 000	0.00
0.3	440	469	2.8	326	307	2.6	27 000	27 700	1.1
0.4	440	482	4.0	326	382	6.9	27 000	29 700	4.1
0.5	440	414	2.6	326	303	3.2	27 000	27 800	1.3
0.6	440	525	7.7	326	435	12.5	27 000	27 800	1.3
0.7	440	495	5.1	326	352	3.3	27 000	30 000	4.6
0.8	440	512	6.6	326	409	9.8	27 000	33 400	9.2

2.4 硫酸盐岩石燃烧效率

在保证称样量、助熔剂种类、助熔剂加入顺序以及助熔剂用量实验中,所有样品测试温度都已达到充分燃烧的必要条件,故选取熔点较高的硫酸钡和硫酸钙基准物质,分别称取试样 0.050 0 g,依次加入纯铁助熔剂为 0.5 g、钨粒为 1.7 g,设置燃烧温度为 1 800 °C、燃烧时间为 25 s、氧气流量 4.0 L/min、分析时间为 40 s,每个样平行分析 3 次,取平均值。研究该燃烧条件下硫酸钡和硫酸钙的燃烧效率,从而验证称样量、助熔剂种类、助熔剂加入顺序以及助熔剂用量中仪器条件满足实验要求。实验结果如表 4 所示,硫酸钙和硫酸钡基准物质硫理论值和测定值几乎接近,说明该优化的条件下能充分燃烧样品。

2.5 精密度和准确度实验

选用 12 个土壤、水系沉积物和岩石国家一级标准物质 GBW07449、GBW07403、GBW07406、GBW07453、

GBW07364、GBW07360、GBW07365、GBW07106、GBW07446、GBW07361、GBW07423、GBW07424,按照实验条件分别测试 12 个标准样品,每个样品平行分析 12 次,计算 12 次测试的平均值,以相对标准偏差(RSD)考察方法的精密度,以相对误差考察方法准确度,结果如表 5 所示。12 个标准物质的精密度 RSD 小于 6%、相对误差绝对值小于 8%,实际测定精密度满足 DZT 0258—2014《多目标区域地球化学调查规范(1:250000)》的要求。

表 4 硫酸盐岩石燃烧效率

Table 4 Combustion efficiency of sulfate rocks /%

序号	名称	理论值	测试值	平均值	标准偏差 S	RE
1	硫酸钙	23.50	23.40	23.50	0.081	0.01
			23.59			
			23.52			
2	硫酸钡	13.73	13.80	13.73	0.077	0.03
			13.65			
			13.75			

表 5 精密度和准确度实验
Table 5 Sampling veracity and precision
of the method($n=12$)

样品编号	硫含量标准值/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	硫含量测试平均值/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	RSD/%	RE/%
GBW07449	27000±290	27 100	0.60	-0.40
GBW07403	123±14	122	5.5	0.80
GBW07406	260±43	260	2.0	-3.9
GBW07453	2000±300	2 100	1.8	-5.0
GBW07364	6700±600	6 600	1.5	1.5
GBW07360	532±84	534	1.9	-0.40
GBW07365	6 200	6 400	3.2	-3.2
GBW07106	860±42	890	4.0	-3.5
GBW07446	108±14	100	5.3	7.4
GBW07361	66±10	67.2	5.9	-1.5
GBW07120	36±8	37	5.4	-2.8
GBW07423	241±22	240	1.9	1.4

2.6 实际样品的测定

为验证本方法的可靠性,采用以上最优实验条件,随机选取 20 个未知硫含量的地球化学调查样品,使用本方法和 DZ/T 0279.28—2016 燃烧碘量法测试硫的含量,每个样品分析 3 次,取平均值,统

计分析结果之间的相对偏差(RD),评估方法质量水平。由表 6 可见,高频燃烧-红外碳硫仪法和燃烧-碘量法测定硫含量的相对偏差均小于 10%,说明该方法可行,可用于土壤、水系沉积物和岩石中硫的测定。

表 6 实际样品中硫的测定结果
Table 6 Analytical results of sulfur in real samples

样品编号	高频燃烧-红外碳硫仪法	燃烧-碘量法	相对偏差 ^①	样品编号	高频燃烧-红外碳硫仪法	燃烧-碘量法	相对偏差 ^①
M1	369	365	1.1	M11	377	355	6.0
M2	193	175	9.8	M12	200	215	-7.2
M3	270	255	5.7	M13	350	340	2.9
M4	134	140	-4.4	M14	261	255	2.3
M5	146	155	-6.0	M15	364	390	-6.9
M6	206	215	-4.3	M16	291	275	5.7
M7	431	395	8.7	M17	187	180	3.8
M8	250	240	4.1	M18	243	250	-2.8
M9	175	180	-2.8	M19	606	585	3.5
M10	201	195	3.0	M20	253	255	-0.8

3 结论

高频红外碳硫仪由于采用固体直接进样、无需化学试剂、成本低等特点,适合于分析大批量和复杂基体样品。土壤、水系沉积物和岩石类样品的高频红外碳硫仪测试条件不同。针对不同基体、不同硫含量的样品,分别选择高、中、低浓度且不确定度小的多个土壤、水系沉积物和岩石类标准物质,主要明确了助熔剂种类、加入顺序和添加量,以及选取熔点较高的硫酸钡和硫酸钙基准物质来验证所优化的实验条件能够充分燃烧样品。在仪器最佳测试条件下,严格控制坩埚空白,样品称取 0.05 g、纯铁助熔剂 0.5 g,土壤和水系沉积物样品分析时加入 1.7 g 钨粒便可满足生产要求,岩石类样品则需额外加入

0.5 g 锡粒混合燃烧,可以获得重复性和准确度良好的硫的分析结果。

参考文献

- [1] 杨旭龙. 高频红外碳硫仪测定土壤中硫的方法优化[J]. 化学工程师, 2021(3): 76-78, 82.
YANG Xulong. Optimization of the method of high-frequency infrared carbon-sulfur analyzer for determining sulfur in soil[J]. Chemical Engineer, 2021(3): 76-78, 82.
- [2] 漆寒梅, 周言凤, 陈利娟, 等. 硫酸钡重量法测定硫条件实验探讨[J]. 中国无机分析化学, 2021, 11(4): 31-34.
QI Hanmei, ZHOU Yanfeng, CHEN Lijuan, et al. Discussion on the condition of measuring sulfur by barium sulfate gravimetric method[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2021, 11(4): 31-34.

- [3] 张明杰,戴雪峰,陆丁荣,等. 高频燃烧-红外碳硫仪用于农用地土壤质量调查样品中碳硫的快速测定[J]. 岩矿测试,2010,29(2):139-142.
ZHANG Mingjie, DAI Xuefeng, LU Dingrong, et al. Rapid determination of carbon and sulfur in farmland soil samples by high frequency-infrared carbon-sulfur analyzer[J]. Rock and Mineral Analysis, 2010, 29(2): 139-142.
- [4] 许刚. X射线荧光光谱与碳硫仪联用测定土壤样品中的硫[J]. 化学与粘合,2019,41(6):486-488.
XU Gang. Determination of sulfur in soil samples by the X-ray fluorescence spectrometry and carbon sulfur analyzer[J]. Chemistry and Adhesion, 2019, 41(6): 486-488.
- [5] 马一嘉,罗冰虹,谭凯馨. 高温燃烧碘量法测定土壤中总硫含量的方法优化[J]. 中国无机分析化学,2018,8(6):25-28.
MA Yijia, LUO Binghong, TAN Kaixin. Optimization of method for determination of total sulfur in soil by high temperature combustion iodine method[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2018, 8(6): 25-28.
- [6] 赵小学,王建波,王龙飞,等. 电感耦合等离子体发射光谱法测定土壤和沉积物中硫的适用性研究[J]. 中国环境监测,2022,38(2):164-171.
ZHAO Xiaoxue, WANG Jianbo, WANG Longfei, et al. Study on the applicability of inductively coupled plasma-optical emission spectrometry for the determination of sulfur in soil and stream sediment[J]. Environmental Monitoring in China, 2022, 38(2): 164-171.
- [7] 秦超,李飞,李贺,等. 高频红外碳硫仪测定土壤中低含量的碳、硫、有机碳[J]. 当代化工研究,2022(8):47-49.
QIN Chao, LI Fei, LI He, et al. Determination of low content of carbon, sulfur and organic carbon in soil by high frequency infrared carbon and sulfur analyzer[J]. Modern Chemical Research, 2022(8): 47-49.
- [8] 冯丽丽,王成林,管嵩,等. 高频燃烧红外吸收法测定萤石中的硫[J]. 中国无机分析化学,2023,13(5):484-489.
FENG Lili, WANG Chenglin, GUAN Song, et al. Sulfur determination in fluorite by high frequency combustion infrared absorption method[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2023, 13(5): 484-489.
- [9] 陈伟锐. 高频红外碳硫仪测定土壤和水系沉积物中的硫实验条件改进[J]. 岩矿测试,2019,38(1):123-128.
CHEN Weirui. Improvement of experimental conditions for the determination of sulfur in soil and stream sediments by high frequency infrared carbon and sulfur analyzer[J]. Rock and Mineral Analysis, 2019, 38(1): 123-128.
- [10] 龚仓,付桂花,黄艳波. 高频燃烧-红外碳硫仪测定岩心钻探样品中碳硫[J]. 黄金,2016,37(12):77-80.
GONG Cang, FU Guihua, HUANG Yanbo. Determination of carbon and sulfur in drilling core samples by high frequency combustion-infrared carbon and sulfur analyzer[J]. Gold, 2016, 37(12): 77-80.
- [11] 石友昌,陈贵仁,赵萌生,等. 酸溶-电感耦合等离子体发射光谱法和燃烧-红外吸收法测定不同类型地球化学样品中的硫[J]. 岩矿测试,2022,41(4):663-672.
SHI Youchang, CHEN Guiren, ZHAO Mengsheng, et al. Determination of sulfur in different types of geochemical samples by ICP-OES with acid dissolution and combustion-infrared absorption spectrometry[J]. Rock and Mineral Analysis, 2022, 41(4): 663-672.