

# ICP – AES 法测定铁矿石及炉渣中镧、铈、镨、钕、钐

段晓晨, 薛玉兰, 刘钢耀

(内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:** 文章研究了铁矿石、炉渣的溶解方法, 采用盐酸初步溶解再用碳酸钠 – 硼酸混合熔剂处理残渣的分解方法, 通过试验对镧、铈、镨、钕、钐元素的分析谱线进行优化选择, 确定了灵敏度高、干扰少的分析谱线作为分析谱线, 采用等离子体发射光谱法同时测定镧、铈、镨、钕、钐五元素含量。结果表明, 铁矿石、炉渣中镧、铈、镨、钕、钐元素的检出下限均为 0.005 0%, 铁矿石中各稀土元素测定上限: La 测定上限为 5%, Ce 测定上限为 10%, Pr 测定上限为 1%, Nd 测定上限为 2%, Sm 测定上限为 1%; 炉渣中各稀土元素测定上限均为 0.500%。

**关键词:** ICP – AES; 矿石; 炉渣; 稀土含量

中图分类号: O657.31

文献标识码: B

文章编号: 1009 – 5438(2023)01 – 0093 – 06

## Determination of Lanthanum, Cerium, Praseodymium, Neodymium and Samarium in Iron Ore and Slags with Inductively Coupled Plasma – Atomic Emission Spectrometry (ICP – AES)

*Duan Xiao – chen, Xue Yu – lan, Liu Gang – yao*

*(Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010,  
Inner Mongolia Autonomous Region, China)*

**Abstract:** In this paper, the dissolution methods of iron ore and slags are studied. The decomposition method of preliminarily dissolving with hydrochloric acid followed by treating the residue with mixed flux of sodium carbonate – boric acid is applied. The analytical spectral lines with high sensitivity and fewer interferences are determined as analytical spectral lines through optimizing and selecting the analytical spectral lines of lanthanum, cerium, praseodymium, neodymium and samarium by experiments. Moreover, the contents of such five elements as lanthanum, cerium, praseodymium, neodymium and samarium are determined simultaneously with ICP – AES. The results showed that the lower detection limit of lanthanum, cerium, praseodymium, neodymium and samarium in iron ore and slags was 0.005 0%, the upper detection limits of rare earth elements in iron ore were 5% for La, 10% for Ce, 1% for Pr, 2% for Nd and 1% for Sm as well as all the upper detection limits of rare earth elements in slags were 0.500%.

**Key words:** ICP – AES; ore; slag; rare earth content

稀土是包头白云鄂博铁矿的特色资源, 包钢充分利用稀土资源, 开发稀土钢产品, 打造稀土钢品牌, 在进行稀土钢的生产工艺研究以及稀土对钢铁

性能改善研究时, 稀土元素的检测分析显得尤为重要<sup>[1]</sup>。经查阅标准文献资料, 传统的分析方法对铁矿石、炉渣中低含量稀土的分析方法为分光光度法,

如偶氮胂Ⅲ光度法、DBC-偶氮胂光度法,这些方法检测分析的是稀土总量<sup>[2]</sup>。光度法的最大特点是需要消除干扰元素而且流程较长,所用分析试剂较多,比较繁琐。近几年来随着包钢稀土钢品牌战略的实施,对铁矿石、炉渣中稀土的检测不再只要求总量而是提出新的要求,即分析检测各单一稀土元素的含量。本文建立等离子体光谱仪测定铁矿石及炉渣中低含量镧、铈、镨、钕、钐五元素检测方法,实现铁矿石及炉渣中低含量镧、铈、镨、钕、钐的快速检测,为科研提供准确的数据,指导新产品的开发。

## 1 试验部分

### 1.1 主要仪器

美国 PE 公司生产的 ICP - AES、OPTIMA 5300DV 双向观测型全谱直读等离子光谱仪。

### 1.2 试剂与标准溶液

混合熔剂(2份无水碳酸钠+1份硼酸)、氢氟酸、高氯酸、盐酸、盐酸(1+1)、盐酸(5+95)均为优级纯试剂。

氧化镧、二氧化铈、氧化镨、氧化钕、氧化钐均为光谱纯。

氧化镧标准溶液:1 000  $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。准确称取 1.000 0 g 三氧化二镧,加 50 mL 盐酸(1+1),加热溶解后,以水稀释至 1 000 mL,摇匀。

二氧化铈标准溶液:1 000  $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。取二氧化铈于 750  $^{\circ}\text{C}$  灼烧 30 min 后置于干燥器中,冷却至室温。称取 1.000 0 g 二氧化铈,置于烧杯中,加入 15 mL 硝酸、2 mL 过氧化氢,加热溶解,煮沸分解过量的过氧化氢,冷至室温,移入 1 000 mL 容量瓶中,用水稀释至刻度,摇匀。

氧化镨标准溶液:1 000  $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。准确称取 1.000 0 g 氧化镨,加 50 mL 盐酸(1+1),加热溶解后,以水稀释至 1 000 mL,摇匀。

氧化钕标准溶液:1 000  $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。准确称取 1.000 0 g 三氧化二钕,加 50 mL 盐酸(1+1),加热溶解后,以水稀释至 1 000 mL,摇匀。

氧化钐标准溶液:1 000  $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。准确称取 1.000 0 g 三氧化二钐,加 50 mL 盐酸(1+1),加热溶解后,以水稀释至 1 000 mL,摇匀。

$\text{La}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CeO}_2$ 、 $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$ 、 $\text{Nd}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Sm}_2\text{O}_3$  混合标准溶液:浓度为 100  $\mu\text{g}/\text{mL}$ 、10  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ,通过 1 000  $\mu\text{g}/\text{mL}$   $\text{La}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CeO}_2$ 、 $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$ 、 $\text{Nd}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Sm}_2\text{O}_3$  标准溶液逐级稀释配制。

### 1.3 试验方法

方法一:酸溶法。称取 0.100 0 g 铁矿石或炉渣试样 2 份置于 250 mL 聚四氟乙烯烧杯中,加 5 mL 氢氟酸、10 mL 盐酸,电热板低温加热使试样分解后,加 2 mL 高氯酸,继续加热,使高氯酸发烟至剩余体积 1 mL 以下,稍冷。加 10 mL 盐酸(1+1)加热使盐类溶解,取下自然冷至室温后,转入 100 mL 容量瓶中,用纯水稀释到刻度、摇匀。随同试样做试剂空白。将上述方法制得的试液在优化的仪器工作参数下测定镧、铈、镨、钕、钐元素含量。

如试样中有机物较高时,应将试样置于瓷坩埚中于 600~800  $^{\circ}\text{C}$  灼烧 10~15 min,待冷却后再移入烧杯中按方法一操作。

方法二:碱熔法。称取 0.100 0 g 铁矿石或炉渣试样 2 份于 250 mL 烧杯中,加入 10 mL 沸水,在不断搅拌下缓缓加入 10 mL 盐酸(1+1),低温溶解试样(微沸),取下,用快速滤纸过滤于 300 mL 烧杯中,用擦棒擦烧杯内壁,以热水洗入滤纸中,继续以热水洗烧杯 3~4 次,滤纸上残渣用盐酸(5+95)洗至无黄色,用热水洗 2~3 次,保留滤液。将残渣连同滤纸移入铂金坩埚中,经烘干、低温灰化,加入 1.0 g 混合熔剂于 900~950  $^{\circ}\text{C}$  的马弗炉中熔融 15~20 min 取出冷却。将铂金坩埚放于原 300 mL 烧杯滤液中,加热浸取熔块,取出铂金坩埚,洗净,溶液自然冷至室温后,转入 100 mL 容量瓶中,用水稀释至刻度摇匀。随同试样做试剂空白。将上述方法制得的试液在优化的仪器工作参数下测定镧、铈、镨、钕、钐元素含量。

如试样中有机物较高时,应将试样置于瓷坩埚中于 600~800  $^{\circ}\text{C}$  灼烧 10~15 min,待冷却后再移入烧杯中按方法二操作。

## 2 结果与讨论

### 2.1 仪器测试条件的选择

ICP - AES 法工作参数的选择对分析元素的测定有明显的影响,通过对激发功率、载气流量、观测方式进行试验,选择 1 300 W 作为仪器的激发功率,0.80 L/min 作为载气流量,选择轴向观测。

通过改变激发功率对浓度为 10  $\mu\text{g}/\text{mL}$  5 种被测元素进行测定,见表 1,得到激发功率对被测元素强度的影响。各测定元素的强度随激发功率增加而增大,所以选择 1 300 W 做为仪器的激发功率。

表1 功率对被测元素的影响

分析元素	波长/nm	功率/W	净强度	功率/W	净强度	功率/W	净强度
La	408.672	1 100	300 905	1 200	312 000	1 300	332 010
Ce	418.660	1 100	461 132	1 200	493 008	1 300	507 630
Pr	422.293	1 100	115 500	1 200	128 650	1 300	138 560
Nd	406.109	1 100	17 645	1 200	18 540	1 300	19 754
Sm	359.260	1 100	92 000	1 200	942 40	1 300	100 241

通过改变载气流量对浓度为 10  $\mu\text{g}/\text{mL}$  5 种被测元素进行测定,见表 2。可以得知载气流量对被测元素强度的影响,元素的测定强度先随载气流量增加而增大,当达到载气流量 0.76 ~ 0.84  $\text{L}/\text{min}$  时强度最大,然后随载气流量增加而降低,因此仪器载气流量选择 0.80  $\text{L}/\text{min}$ 。

表2 载气流量与测定强度的关系

载气流量 /( $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ )	强度				
	La	Ce	Pr	Nd	Sm
0.60	241 002	274 654	33 429	283 773	40 827
0.64	339 010	362 706	48 035	415 573	56 694
0.68	369 233	333 889	43 538	364 393	53 254
0.72	380 546	405 955	56 526	461 780	69 516
0.76	527 789	564 751	76 208	625 895	94 832
0.80	607 559	672 953	98 655	746 459	119 345
0.84	592 893	604 962	90 107	745 712	115 676
0.90	436 844	457 122	73 299	580 963	98 222
1.00	140 126	122 480	27 337	222 484	39 554
1.04	22 415	20 918	8 001	46 513	19 226
1.08	6 823	6 026	3 316	15 856	15 068

测元素进行测定,见表 3,得出观测方式对被测元素强度的影响。本文主要研究铁矿石及炉渣低含量镧、铈、镨、钕、钐,轴向观测方式的测定强度是径向观测方式的 6 ~ 10 倍,因此选择轴向观测。

表3 观测方式对被测元素影响

分析元素	波长/nm	观测方式	净强度	观测方式	净强度
La	408.672	轴向	539 716	径向	68 698
Ce	418.660	轴向	418 887	径向	63 538
Pr	422.293	轴向	142 822	径向	24 499
Nd	406.109	轴向	19 754	径向	8 500
Sm	359.260	轴向	54 367	径向	7 119

## 2.2 试样分解方法的选择

将矿、渣试样按 1.3 方法一、方法二进行试样分解比对试验,试验数据见表 4。由于现有的矿、渣标样的标值为稀土总量,测定矿、渣试样稀土总量来进行比对,测定的数值与标准值稀土总量都比较吻合,各稀土元素测定值也相应吻合。考虑到 1.3 方法一中使用氢氟酸、高氯酸等试剂会对环境或皮肤有可能造成不良影响,故本项目试样的分解采用 1.3 方法二分分解试样方法。

通过改变观测方式对浓度为 10  $\mu\text{g}/\text{mL}$  5 种被

表4 不同分解方法检测结果(质量分数)

溶解方法	试样名称	编号	测定值					$\text{RE}_x\text{O}_y$ 标值	误差	
			$\text{La}_2\text{O}_3$	$\text{CeO}_2$	$\text{Pr}_6\text{O}_{11}$	$\text{Nd}_2\text{O}_3$	$\text{Sm}_2\text{O}_3$			
方法一	矿 B-K-2	1 <sup>#</sup>	0.502	1.13	0.070	0.341	0.052	2.10	2.24	-0.14
	矿 R-715	2 <sup>#</sup>	0.895	1.62	0.199	0.695	0.087	3.50	3.37	0.13
	渣样	3 <sup>#</sup>	0.491	0.797	0.052	0.294	0.0007	1.63		
方法二	矿 B-K-2	1 <sup>#</sup>	0.535	1.19	0.087	0.416	0.072	2.30	2.24	0.06
	矿 R-715	2 <sup>#</sup>	0.899	1.60	0.197	0.700	0.084	3.48	3.37	0.11
	渣样	3 <sup>#</sup>	0.509	0.810	0.048	0.309	0.000 4	1.68		

### 2.3 稀土元素分析谱线的选择

在谱线库中选择分析谱线,然后观察这些分析谱线的峰形和干扰情况,通过对镧、铈、镨、钕、钐浓度均为 10  $\mu\text{g}/\text{mL}$  和铁浓度为 1  $\text{mg}/\text{mL}$  的标液试验了各测量元素的谱线的信背比,初步确定了适宜的分析谱线。

分析谱线的选择应遵循所选谱线灵敏度高、干扰少、信背比高的原则。按照谱线的选择原则最终确定各稀土元素的最优分析谱线,La 元素为 408.672 nm, Ce 元素为 418.660 nm, Pr 元素为 422.293 nm, Nd 元素为 406.109 nm, Sm 元素为 359.260 nm。

### 2.4 标准曲线的绘制

在 7 个 250 mL 聚四氟乙烯烧杯中,称取 6 份 0.100 0 g 不含镧、铈、镨、钕、钐的铁矿石或炉渣标样作为打底基体,按酸溶法和碱熔法分别分解样品,冷却至室温分别转移于 7 个 100 mL 塑料容量瓶中,然后分别移取稀土氧化物  $\text{La}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CeO}_2$ 、 $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$ 、

$\text{Nd}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Sm}_2\text{O}_3$  混合标准溶液 0 mL、1.00 mL (10  $\mu\text{g}/\text{mL}$ )、5.00 mL (10  $\mu\text{g}/\text{mL}$ )、10.00 mL (10  $\mu\text{g}/\text{mL}$ )、2.00 mL (100  $\mu\text{g}/\text{mL}$ )、5.00 mL (100  $\mu\text{g}/\text{mL}$ )、10.00 mL (100  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ) 于 7 个 100 mL 容量瓶中,用纯水稀释至刻度,混匀。得到含量分别为 0、0.010%、0.050%、0.100%、0.200%、0.500%、1.00% 的标准系列溶液。

在选定的仪器工作参数下,分别按浓度由低到高测量标准系列溶液的待测元素信号强度,以标准溶液的浓度为横坐标,以其净信号强度为纵坐标绘制标准曲线。

### 2.5 检出限和测定范围的确定

#### 2.5.1 检出限

准确称取 0.100 0 g 不含被测元素铁矿石或渣样,按 1.3 方法二进行试样处理,定容后在仪器最佳工作条件下进行测试,以 10 次测量结果的标准偏差的三倍作为检出限,测定结果见表 5。

表 5 检出限和测定下限

%

项目	$\text{La}_2\text{O}_3$	$\text{CeO}_2$	$\text{Pr}_6\text{O}_{11}$	$\text{Nd}_2\text{O}_3$	$\text{Sm}_2\text{O}_3$
矿检出限 DL	0.000 03	0.000 06	0.000 09	0.000 09	0.000 21
矿测定下限	0.000 3	0.000 6	0.000 9	0.000 9	0.002 1
渣检出限 DL	0.000 03	0.000 12	0.000 24	0.000 09	0.000 12
渣测定下限	0.000 3	0.001 2	0.002 4	0.000 9	0.001 2

#### 2.5.2 测定下限

一般以检出限的 10 倍作为该方法的测定下限。由表 5 可得出,矿、渣中各稀土元素的测定下限均可以确定为 0.005 0%。

#### 2.5.3 检测上限

准确称取 0.100 0 g 不含被测元素铁矿石样,根据铁矿石、炉渣中低含量镧、铈、镨、钕、钐含量特点,

分别加入 1 000  $\mu\text{g}/\text{mL}$  的稀土氧化物标准溶液 5.00 mL、10.00 mL、1.00 mL、2.00 mL、1.00 mL,准确称取 0.100 0 g 不含被测元素渣样,加入 100  $\mu\text{g}/\text{mL}$  的稀土氧化物标准溶液各 5.00 mL。按照 1.3 方法二进行试样处理定容后,在选定的最佳仪器工作条件下进行测试,根据工作曲线计算各元素的回收率,试验结果见表 6。

表 6 检测上限测定回收率试验

%

元素	矿			渣		
	含量	测定值	回收率	含量	测定值	回收率
$\text{La}_2\text{O}_3$	5	5.020	100.4	0.5	0.495	99.0
$\text{CeO}_2$	10	9.820	98.2	0.5	0.498	99.6
$\text{Pr}_6\text{O}_{11}$	1	1.010	101.0	0.5	0.504	100.8
$\text{Nd}_2\text{O}_3$	2	2.080	104.0	0.5	0.512	102.4
$\text{Sm}_2\text{O}_3$	1	0.994	99.4	0.5	0.496	99.2

由表 6 可以看出,矿、渣中各元素的回收率均在 98% ~ 104% 之间,所以可以确定铁矿石中各稀土元素测定上限:La 测定上限为 5%,Ce 测定上限为 10%,Pr 测定上限为 1%,Nd 测定上限为 2%,Sm 测定上限为 1%;渣中各稀土元素测定上限均为 0.500%。

2.6 准确度试验

按 1.3 方法二进行试样处理,分别以标准物质

包头矿 R-717、包头矿 R-715、原矿 B-K-1、包头精矿 B-K-2、高炉渣 R-711 进行准确度试验。由于标准样品给定的参考值为各稀土元素含量之和且包头矿中 98% 以上稀土均为轻稀土,因此,本试验测定稀土元素含量之和进行比对。测定结果见表 7。将标准物质包头矿 R-717 和高炉渣 R-711 送稀土院进行分析比对;对包头精矿 B-K-2、渣样进行加标回收试验,测定结果见表 8。

表 7 准确度试验(质量分数)

样品名称	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CeO <sub>2</sub>	Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	RE <sub>x</sub> O <sub>y</sub> 测定值	RE <sub>x</sub> O <sub>y</sub> 标值	%
包头矿 R-717	3.55	6.44	0.712	2.27	0.254	13.23	13.06	0.17
包头矿 R-715	0.895	1.62	0.198	0.695	0.087	3.50	3.37	0.13
原矿 B-K-1	0.607	1.42	0.099	0.421	0.060	2.61	2.71	-0.10
包头精矿 B-K-2	0.502	1.13	0.070	0.341	0.052	2.10	2.24	-0.14
高炉渣 R-711	1.27	2.50	0.298	1.22	0.147	5.44	5.32	0.14

表 8 准确度比对试验

样品名称	项目	测定值/%				
		La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CeO <sub>2</sub>	Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
包头矿 R-717	技术中心	3.55	6.54	0.712	2.24	0.253
	稀土院	3.49	6.68	0.693	2.19	0.263
	差值	0.06	0.14	0.019	0.05	0.010
包头精矿 B-K-2	技术中心	0.502	1.13	0.070	0.341	0.052
	加标量	0.500	0.500	0.100	0.200	0.050
	测定值	1.01	1.633	0.168	0.537	0.103
高炉渣 R-711	回收率	101.6	100.6	98.0	98.0	102.0
	技术中心	1.27	2.50	0.294	1.20	0.149
	稀土院	1.29	2.54	0.288	1.18	0.153
渣 1 <sup>#</sup>	差值	0.02	0.04	0.006	0.02	0.004
	技术中心	0.118	0.230	0.034	0.106	
	加标量	0.100	0.200	0.050	0.100	0.050
	测定值	0.221	0.426	0.084	0.208	0.049
	回收率	103.0	98.0	100.0	102.0	98.0

由表 7、表 8 数据可以得出,本方法的测定结果与标准物质给定的参考值之间差值较小;标准物质包头矿 R-717 和高炉渣 R-711 与送稀土院进行分析比对结果一致;加标回收率在 98% ~ 103%,说明本方法具有较高的准确度,能够准确测定试样中各稀土元素的含量。

2.7 精密度试验

按 1.3 方法二进行试样分解处理后,分别以标准物质(无单稀土元素含量,只有稀土总量)包头矿 R-717、高炉渣 R-711 进行精密度试验(n = 10),测定结果见表 9、表 10。

由表 9、表 10 试验数据可以得出,标准物质的精密度试验数据的相对标准偏差均小于 5%,说明本方法具有较高的精密度。

表 9 包头矿(R-717)精密度试验

项目	测定值/%				
	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CeO <sub>2</sub>	Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
包头矿 R-717	3.55	6.54	0.712	2.27	0.254
	3.58	6.50	0.722	2.22	0.250
	3.51	6.56	0.711	2.23	0.255
	3.52	6.49	0.715	2.30	0.255
	3.57	6.59	0.721	2.32	0.250
	3.55	6.48	0.714	2.27	0.256
	3.56	6.60	0.714	2.28	0.254
	3.59	6.44	0.720	2.30	0.254
	3.54	6.63	0.716	2.26	0.255
	3.54	6.70	0.708	2.26	0.246
平均值	3.55	6.55	0.715	2.27	0.253
标准偏差	0.036	0.075	0.003	0.029	0.001
RSD	1.01	1.15	0.420	1.28	0.395

表10 高炉渣(R-711)精密度试验

项目	测定值/%					
	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CeO <sub>2</sub>	Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
高炉渣 R-711	1.27	2.50	0.298	1.22	0.147	
	1.25	2.53	0.298	1.21	0.147	
	1.22	2.51	0.291	1.23	0.145	
	1.24	2.50	0.300	1.23	0.149	
	1.28	2.50	0.300	1.21	0.146	
	1.27	2.51	0.301	1.22	0.147	
	1.27	2.51	0.296	1.20	0.147	
	1.28	2.49	0.298	1.19	0.146	
	1.29	2.49	0.298	1.20	0.148	
	1.25	2.46	0.297	1.21	0.146	
	平均值	1.26	2.50	0.298	1.21	0.147
	标准偏差	0.021	0.018	0.006	0.013	0.001
	RSD	1.67	0.720	2.03	1.07	0.680

### 3 结束语

通过试验确定了测定铁矿石、炉渣中镧、铈、镨、

钕、钆五元素含量的样品溶解方法,完成了仪器测定条件的优化选择。通过试验确定了稀土元素的最优分析谱线,确定了本方法的检测下限、检测上限及检测范围。铁矿石及炉渣中镧、铈、镨、钕、钆的精密度和准确度试验数据说明本方法能快速、准确同时测定铁矿石、炉渣中低含量镧、铈、镨、钕、钆含量。

### 参 考 文 献

- [1] 吴石头,王亚平,孙德忠,等. 电感耦合等离子体发射光谱法测定稀土矿石中15种稀土元素:四种前处理方法的比较[J]. 岩矿测试, 2014,33(1):12-19.
- [2] 王晏秋,张建军,刘钢耀,等. 离子体质谱法测定钢中镧、铈、镨、钕、钆[J]. 包钢科技,2019, 45(6):91-94.

(上接第92页)

### 参 考 文 献

- [1] 何瑞华. 化学成分测量不确定度的评定[J]. 冶金分析,2004,24(1):65-68,72.
- [2] CNAS-CL01:2018,检测和校准实验室能力认可准则[S].
- [3] CNAS-CL01-G003:2021,测量不确定的要求[S].
- [4] 陈秋云,王兰. 影响烟煤黏结指数测定准确性
- [5] 臧慕文,柯瑞华. 成分分析中数理统计及不确定度评定概要[M]. 北京:中国标准出版社,2012.
- [6] GB/T 5447—2014,烟煤黏结指数测定方法[S].
- [7] 符斌. ATC 020 重量分析法[M]. 北京:中国标准出版社,2013.