

# 分光光度法测定铁矿石中钍含量

周景涛<sup>1</sup>, 孙志峰<sup>1</sup>, 王瑞军<sup>2</sup>

- (1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司化检验中心, 内蒙古 包头 014010;  
2. 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:** 采用盐酸、氢氟酸分解铁矿石试样, 高氯酸冒烟飞硅后, 再经过1-苯基-3-甲基-4-苯甲酰基吡唑酮-5(PMBP)的乙酸丁酯溶液萃取, 盐酸反萃取消除钍的干扰元素, 利用偶氮胂III为显色剂, 与钍离子形成紫色螯合物, 通过分光光度计测定铁矿石中钍的含量。文章探讨了萃取及反萃取反应的酸度选择、显色反应的酸度、显色剂用量、显色时间等因素对测定的影响, 并优化了试验参数。在最大吸收波长660 nm处, 确定了钍的线性范围为0~1.0 μg/mL, 相关系数不低于0.999, 检出限为0.00044 μg/mL。该方法操作简便, 偶氮胂III与钍形成的络合物的摩尔吸光系数高达 $0.8 \times 10^5$  L/(mol·cm), 具有较高的灵敏度, 样品中钍分析结果的加标回收率在96.8%~105.8%, 方法具有良好的精密度和准确度。

**关键词:** 铁矿石; 测定; 钍; 偶氮胂III; 分光光度法

中图分类号: O657.3; TF521

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2023)03-0092-07

## Determination of Thorium Content in Iron Ore with Spectrophotometry

Zhou Jing-tao<sup>1</sup>, Sun Zhi-feng<sup>1</sup>, Wang Rui-jun<sup>2</sup>

- (1. Chemical Inspection Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd.,  
Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;  
2. Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010,  
Inner Mongolia Autonomous Region, China)

**Abstract:** The iron ore samples are decomposed with the hydrochloric acid and hydrofluoric acid. After the perchloric acid smokes and silicon is eliminated, it is then extracted by butyl acetate solution of 1-phenyl-3-methyl-4-benzophthalide-5(PMBP). The interference elements of thorium are eliminated by the reextraction with hydrochloric acid, arsenazo III is as color developing agent and forms purple-red chelate with thorium ion as well as the thorium content in iron ore is determined with spectrophotometer. In the paper, the selection of acidity for extraction and reextraction, effects of such factors as acidity of chromogenic reaction, amount of color developing agent and color developing time on determination are discussed as well as experimental parameters are optimized. At the maximum absorption wavelength of 660 nm, the linearity range of thorium is determined to be 0~1.0 μg/mL, correlation coefficient is not less than 0.999 and detection limit is 0.00044 μg/mL. This method is easy and simple to operate, molar absorption coefficient of the complex formed by arsenazo III and thorium is up to  $0.8 \times 10^5$  L/(mol·cm), which is with higher sensitivity. The adding standard recovery of thorium in the analysis results of samples is 96.8%~105.8%, so the method is with good precision and accuracy.

**Key words:** iron ore; determination; thorium; arsenazo III; spectrophotometry

收稿日期: 2023-04-03

作者简介: 周景涛(1969-), 女, 辽宁省瓦房店市人, 硕士, 正高级工程师, 现从事冶金材料化学分析研究工作。

钍是一种放射性金属元素,灰色,质地柔软,经过中子轰击,可得到钍 233,是一种潜在的核燃料。在自然界中,与钍离子大小相近的离子很多,如铀、钷、钍、稀土元素(从钍到铀)、钠离子,这些元素在矿物的结晶中往往互相置换而形成类质同象。钍在自然界中一般以含钍的矿物存在,已探明的矿物种类约有 100 多种,如含钍的氧化物、硅酸盐、磷酸盐、铀钼酸盐、钍酸盐和碳化物等,其中有工业价值的有独居石、钍石、方钍石和钍铀矿等。作为极有前途的能源材料,钍所储藏的能量比铀、煤、石油和其他燃料总和还要多许多,是今后国家乃至国际重要的能源材料之一。

由于不同矿石中的钍含量各有不同,例如独居石作为钍含量较多的矿石,主要由磷酸盐组成,含稀土氧化物 55% ~ 68%、二氧化钍 4% ~ 10%、钍 0.2% ~ 0.6%,是稀土元素和钍的重要资源。中国、巴西、印度、挪威、美国、澳大利亚、南非、前苏联等国家都有丰富的独居石矿床。此外,中国还含有某些富含钍的铀矿、氟碳铈钍矿、氟碳钍铀矿、绿帘钍铀矿、钍铀钙钍矿以及其他铀钼酸盐矿,而白云鄂博矿就是一种富含氟碳钍铀矿、独居石矿种资源的矿床,其中丰富的钍资源具有较高的综合利用价值。

目前白云鄂博矿针对不同类型的铁矿石只开发利用了其中的铁与部分稀土,而丰富的钍资源随工艺流程主要进入了总尾矿、铁精矿产生的高炉渣和稀土精矿产生的废渣中,基本上钍均难以回收利用,致使白云鄂博矿钍资源的利用率极低,造成了大量钍资源的浪费。而且钍与稀土属于伴生关系,在测定铁矿石中稀土总量时,往往需要减掉钍的含量。由于钍是一种放射性元素,会污染环境,并危及人类的健康,同时钍又可以作为新兴能源用于资源储备,因此研发钍含量的分析工作有着重要的意义<sup>[1]</sup>,可以为钍资源的利用和开发起到一定的指导作用。钍元素作为一种高毒性核元素,生产环境中的钍可通过消化道、呼吸道及皮肤伤口进入人体,所以准确知道其分布及含量,既有重要的科学意义,又有保护环境、保护土壤、保护农作物、保护人类健康的实际意义。

目前用于钍元素分析的方法很多,如重量法、容量分析法、分光光度法、中子活化分析法、X 射线荧光分析法、射气法、 $\gamma$  能谱法、等离子发射光谱法、等离子体质谱法等。EJ/T 349.3—1997《岩石中微量钍的分析方法》<sup>[2]</sup>是地质样品中分析微量钍的行业

标准,采用碱熔法对试样进行分解,阳离子交换树脂分离后用偶氮胂Ⅲ分光光度法测定钍含量,该方法的缺点是碱熔法会引入大量基体,前处理过程冗长、复杂。随着分析仪器的的发展,电感耦合等离子体发射光谱技术的应用更加广泛,其中电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法测定钍含量,具有检出限低、检测速度快的优点<sup>[3-6]</sup>,但是为了匹配 ICP-MS 的样品处理方法,要求分解矿样彻底,痕量钍能定量富集,并与共存元素离子具有较高的分离度,避免高含量组分对 ICP-MS 仪器的污染,因此操作条件较为苛刻,难于掌握。

国内外文献也有大量报道使用电感耦合等离子体质谱法、发射光谱法、中子活化-能谱联用法、光度法等测定海水、药物、生物样本中钍含量,如对氯偶氮氯磷分光光度法测定海产品中微量钍的研究<sup>[7]</sup>、电感耦合等离子体质谱法测定富钍矿样中的微量钍<sup>[8]</sup>等。但是采用酸分解试样,通过萃取及反萃取的方式分离富集钍,通过偶氮胂Ⅲ比色测定矿石中钍的方法报道较少。本文采用酸处理试样,通过 PMBP-乙酸丁酯溶液萃取、盐酸反萃取消除钍的干扰元素,利用偶氮胂Ⅲ与钍离子形成紫红色螯合物进行光度分析测定钍的方法,选择性好,线性范围宽,可以准确测定铁矿石中钍含量。

## 1 试验部分

### 1.1 主要仪器和试剂

分光光度计(波长范围 380 ~ 800 nm)。抗坏血酸(固体): AR;浓盐酸:  $\rho$  约为 1.19 g/mL, pH  $\approx$  1.5;稀盐酸:取约 1.3 mL 浓盐酸( $\rho = 1.19$  g/mL)用水稀释至 500 mL;氢氟酸:  $\rho$  约为 1.15 g/mL;高氯酸:  $\rho$  约为 1.68 g/mL;三氯化铁溶液(50 g/L):称取 5 g 三氯化铁加入 5 mL 盐酸(1+1)溶解,用水稀释至 100 mL;草盐混酸(1+1):草酸(40 g/L)溶液与浓盐酸等体积混合;PMBP-乙酸丁酯溶液(1%):称取 5.0 g PMBP 溶于 500 mL 乙酸丁酯中,混匀备用;偶氮胂Ⅲ溶液:1 g/L 水溶液;钍标准溶液储备液:100  $\mu$ g/mL,直接购买;钍标准溶液(10.0  $\mu$ g/mL):由 100  $\mu$ g/mL 钍标准溶液储备液稀释 10 倍获得。除另有说明外,分析中使用的试剂均为分析纯试剂。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 样品的分解

称取 0.2 g 试样(精确至 0.000 1 g)于 100 mL

聚四氟乙烯烧杯中,加入 10 mL 盐酸、5 mL 氢氟酸,置于低温电热板加热溶解试样至约 10 mL 左右,取下冷却,加入 2 mL 高氯酸于电热板加热溶解,高氯酸大烟冒尽至湿盐状,取下冷却至室温,加入 pH 约为 1.5 的稀盐酸加热溶解盐类,转移至 100 mL 容量瓶中,用 pH 约为 1.5 的稀盐酸定容摇匀备用。

### 1.2.2 萃取分离

根据钍含量的高低,分取不大于 20 mL 合适体积的试样溶液于 60 mL 分液漏斗中,取液不够 20 mL 时以稀盐酸(pH 约为 1.5)补足体积至 20 mL 后,加入 10 mL PMBP-乙酸丁酯溶液(1%)振荡 2 min,分相后弃去水相,重复操作一次,弃去水相。加盐酸(1+1)10 mL 于分液漏斗中反萃取,振荡 2 min,静置分层,反萃取水相收集于 50 mL 容量瓶中,重复操作一次,水相合并到 50 mL 容量瓶中。

### 1.2.3 显色测量

将反萃取水相的试液中加入少量抗坏血酸、10 mL 草盐混酸(1+1)、14 mL 盐酸,混匀后加 1 g/L 偶氮胂 III 溶液 2 mL,用水稀释至刻度,混匀。于波长 660 nm 处以试剂空白为参比,用 2 cm 比色皿在分光光度计上进行吸光度测定,并从工作曲线上查得相应的钍含量。

### 1.3 校准曲线的绘制

分别取 10.0  $\mu\text{g}/\text{mL}$  钍标准溶液 0、1.00、2.00、3.00、4.00、5.00 mL 于 50 mL 容量瓶中,各加 50 g/L 三氯化铁 1 mL、少量抗坏血酸、10 mL 草盐混酸(1+1)、14 mL 盐酸,混匀后加 1 g/L 偶氮胂 III 溶液 2 mL,用水稀释至刻度,混匀。于波长 660 nm 处以试剂空白为参比,用 2 cm 比色皿测定其吸光度,绘制校准曲线或计算回归方程。

## 2 结果与讨论

### 2.1 最佳波长的选择

固定一浓度的钍标准溶液,在不同的波长下测得吸光度值,确定最大吸收波长。本试验选用 1  $\mu\text{g}/\text{mL}$  钍标准溶液,其他条件按照显色反应的操作,进行了波长选择试验,波长试验范围为 550 ~ 740 nm,每隔 10 nm 扫描测定一次吸光度,同时增加扫描 655 nm 和 665 nm 波长测定吸光度,由试验数据可以看出,660 nm 时吸光度值最大。具体见图 1。

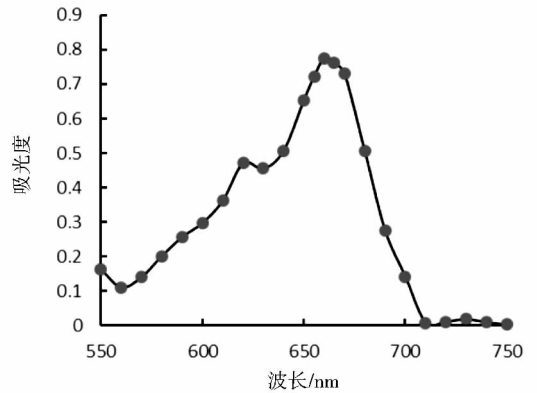


图 1 最佳波长选择

### 2.2 酸度选择试验

固定波长 660 nm,以 1  $\mu\text{g}/\text{mL}$  钍标准溶液进行盐酸的酸度试验,具体数据见表 1。

表 1 盐酸酸度的选择试验

盐酸浓度/( $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )	吸光度(A)
2.0	0.108
3.0	0.107
3.5	0.101
4.0	0.112
4.5	0.111
5.0	0.110
6.0	0.108

由试验数据可见,最佳试验酸度为 4.0 ~ 5.0 mol/L。

### 2.3 多因素正交试验设计

#### 2.3.1 正交试验多因素选择

在选择偶氮胂 III 与钍络合形成螯合物的试验中,因影响因素较多,其中显色剂用量、显色时间、溶液的酸度是关键的影响因素,因此在选择波长为 660 nm,比色皿为 2 cm 的条件下,选取 10  $\mu\text{g}/\text{mL}$  的钍标液 3 mL 于 50 mL 容量瓶中,加 10 mL 草盐混酸(1+1),按照表 2 设计的三因素三水平方案进行影响钍吸光度的正交试验,其中溶液的酸度以加入浓盐酸体积进行表述。正交试验结果见表 3、表 4。

表 2 试验因素与水平

水平	因素 A	因素 B	因素 C
	显色剂用量 /mL	显色时间 /min	加入浓盐酸 体积/mL
1	5.0	0	13
2	4.5	10	14
3	4.0	20	15

表3 多因素选择的正交试验结果

试验序号	显色剂用量/mL	显色时间/min	加入浓盐酸体积/mL	吸光度
1	5.0	0	13	0.414
2	5.0	10	14	0.413
3	5.0	20	15	0.365
4	4.5	0	14	0.485
5	4.5	10	15	0.438
6	4.5	20	13	0.459
7	4.0	0	15	0.475
8	4.0	10	13	0.534
9	4.0	20	14	0.547

表4 正交试验结果分析

试验序号	显色剂用量/mL	显色时间/min	加入浓盐酸体积/mL
T1	1.192	1.374	1.407
T2	1.382	1.385	1.445
T3	1.556	1.371	1.278
t1	0.397	0.458	0.469
t2	0.461	0.462	0.482
t3	0.519	0.457	0.426
R	0.122	0.005	0.056

\*注:T为因素试验结果之和,t为因素试验结果之和的均值,R为t值中的大数-小数。

由试验结果可以看出,最佳试验组合为A3B2C2,即显色剂用量为4 mL、显色时间为10 min、加入14 mL盐酸的时候试验效果最好。其影响力顺序为显色剂用量、酸度、显色时间。由于本次试验选择的钼标准溶液非最大浓度,因此对显色剂用量、显色时间进行了扩展试验。

### 2.3.2 显色剂用量扩展试验

取曲线最高点10  $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的钼标液5 mL于50 mL容量瓶中,加少量抗坏血酸(固体)、10 mL草盐混酸(1+1)、14 mL盐酸,混匀再加1 g/L偶氮胂III溶液数毫升,用水稀释至刻度,摇匀。于波长660 nm处以相应试剂空白为参比,用2 cm比色皿在分光光度计上进行吸光度测定,具体数据见表5。

表5 显色剂用量扩展试验结果

1g/L偶氮胂III溶液用量/mL	吸光度(扣除空白)
1.0	0.760
1.5	0.842
2.0	0.846
2.5	0.839
3.0	0.838
4.0	0.837

由试验结果可知,在显色剂用量为2.0 mL时,基本出现了平台区,结合空白考虑,选择1 g/L偶氮胂III显色剂用量2.0 mL为最佳量。

### 2.3.3 显色时间扩展试验

由正交试验结果可以看出,显色时间对钼的测定结果的影响较小,为了进一步确定影响的程度,进行了显色时间的扩展试验。

选择7组显色反应,每一组试验数据均是固定其他试验条件不变,分别选择不放置、放置10 min、放置20 min测其吸光度值,具体结果见表6。

表6 显色时间的扩展试验结果

序号	钼标准溶液/ $(\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1})$	吸光度		
		不放置	放置10 min	放置20 min
1	0.2	0.168	0.158	0.149
2	0.4	0.302	0.285	0.281
3	0.6	0.446	0.433	0.430
4	0.8	0.588	0.573	0.562
5	1.0	0.707	0.696	0.693
6	1.0	0.714	0.706	0.701
7	1.2	0.820	0.810	0.805

由试验数据可知,显色时间对结果影响不大,放置20 min吸光度值略有所下降,因此选择加入显色剂后同步进行比色测定即可,一般选择直接比色测定。

## 2.4 干扰试验

### 2.4.1 铁基干扰试验

改变比色反应加入的试剂及铁基情况,进行吸光度测定试验。分别取0、2.00、5.00、10.00、15.00、20.00、25.00 mL钼标准溶液(2  $\mu\text{g}/\text{mL}$ )于50 mL容量瓶中,按照加入试剂的不同方式加入不同的试剂,再加入14 mL浓盐酸和2 mL偶氮胂III溶液(1 g/L),用水稀释至刻度混匀备用。于波长为660 nm处以水空白为参比,用2 cm比色皿测定其吸光度,绘制工作曲线或计算回归方程。加入不同试剂的方式如下:

第一种加入试剂方式:不打铁基不加草盐混酸和抗坏血酸。

第二种加入试剂方式:加入50 g/L三氯化铁溶液、1 mL铁基,不加草盐混酸和抗坏血酸。

第三种加入试剂方式:加入50 g/L三氯化铁溶液、1 mL铁基,草盐混酸(1+1)10 mL和0.08 g抗

坏血酸。

第四种加入试剂方式:加入 50 g/L 三氯化铁溶液、1 mL 铁基,草盐混酸(1 + 1)10 mL,不加抗坏血

酸。

具体的试验结果见表 7。

表 7 铁基干扰试验

序号	加入 2 $\mu\text{g/mL}$ 钍标液体积/mL	吸光度			
		不打铁基不加草盐 混酸和抗坏血酸	打铁基不加草盐 混酸和抗坏血酸	打铁基加草盐 混酸和抗坏血酸	打铁基加草盐 混酸不加抗坏血酸
1	0	0.006	0.528	0.011	0.049
2	2.00	0.078	0.413	0.047	0.135
3	5.00	0.163	0.400	0.134	0.278
4	10.00	0.334	0.484	0.285	0.467
5	15.00	0.498	0.514	0.450	0.640
6	20.00	0.673	0.451	0.598	0.834
7	25.00	0.832	0.272	0.743	1.001

由试验结果可得,铁基本身具有一定的颜色,对试验结果有一定的干扰,可通过加入抗坏血酸掩蔽其干扰。

#### 2.4.2 其他元素的干扰试验

选择编号为 29XT61098 稀土矿标准样品称取

0.200 0 g 4 份,按照试验方法进行样品溶解、提取,其中 2 份不进行萃取,2 份进行萃取,其他操作步骤同试验方法,于波长 660 nm 处以试剂空白为参比,用 2 cm 比色皿测定其吸光度,平行测定,具体见表 8。

表 8 铁矿石其他元素干扰试验(质量分数)

测定元素	萃取			不萃取			证书 标准值
	试剂空白	平行 1	平行 2	试剂空白	平行 1	平行 2	
Th	0.029	0.079 3	0.076 8	0.015	0.074 7	0.073 2	0.073 7

由试验结果可以看出,矿石中其他元素对显色反应有一定影响,如果不进行萃取,试剂空白高,对试验的检出限和方法的检测下限的评定有影响,而且检测结果存在系统性,所以选择进行萃取分离消除干扰。

## 2.5 校准工作曲线

### 2.5.1 校准工作曲线的绘制

按照 1.3 校准工作曲线绘制要求配置并绘制校准工作曲线,校准工作曲线见图 2。

由图 2 可知,校准工作曲线方程为  $y = 0.67x + 0.004$ 。

分光光度法满足朗伯比尔吸收定律  $A = \epsilon bc$ ,其中当  $c$  的单位为 mol/L、 $b$  的单位为 cm 时,比例系数  $\epsilon$  称为摩尔吸收系数,根据图 2 的吸光度结果,可计算出采用偶氮胂 III 作为显色剂测定钍的  $\epsilon$  为

$0.8 \times 10^5 \text{ L}/(\text{mol} \cdot \text{cm})$ 。

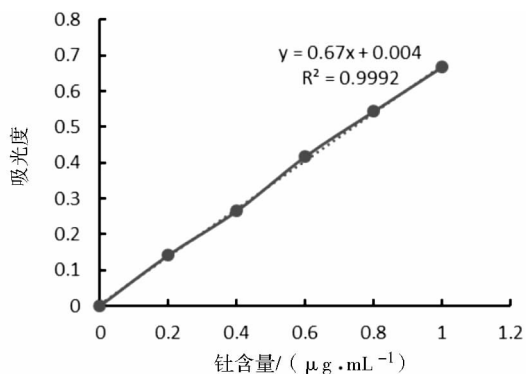


图 2 校准工作曲线

### 2.5.2 测定下限和测定范围的确定

以铁基体打底制作的空白标准溶液,同时测定

11次,标准偏差3倍为检出限,检出限10倍为测定下限;同时在钍含量为0.0737%的标准样品中加入900 μg钍标准液进行加标回收试验,具体数据见表11,经测定加标的回收率99.7%~100.8%,确定测定范围上限为1.0%,该方法最终测定范围为0.005%~1.0%,结果见表9。

表9 钍检出限和测定范围 %

测定元素	平均值	标准偏差	检出限	测定下限
Th	0.001 235	0.000 146 7	0.000 44	0.004 4

表10 准确度与精密度 %

标准样品号	测定值	平均值	标准值	标准偏差	相对标准偏差
29XT61098	0.073 1,0.073 4,0.074 7,0.074 8,0.074 2,0.074 4, 0.072 2,0.071 2,0.073 5,0.071 3,0.072 0	0.073 2	0.073 7	0.001 32	1.8

### 3.2 加标回收试验

目前实验室含有钍标准值的标准样品只有一个,因此对标准样品29XT61098进行加标回收率试验,称取0.1000g标准样品10份,分别加入0.1000g纯铁(99.99%),在其中8份试液中分别加入Th标准溶液(100 μg/mL)9、9、5、5 mL, Th标

## 3 样品分析

### 3.1 准确度及精密度试验

按试验方法选择编号为29XT61098的钍标准样品进行11次测定,从结果可以看出该方法的相对标准偏差(RSD)小于5%,测定值与标准值相吻合,具有较好的精密度和准确度,具体结果见表10。

准溶液(10 μg/mL)10、10、5、5 mL,然后按照试验方法溶解后提取,定容至100 mL容量瓶中,继续按照试验方法进行萃取显色测定。试验顺序从低含量到高含量。利用公式计算加标回收率,分析结果见表11。

表11 准确度与精密度

测定元素	标加量/μg	理论值/μg	测定值/μg	平均值/μg	回收率/%
Th	0	73.7	73.4	73.2	
Th	0	73.7	73.1		
Th	50	123.7	121.6	123.8	96.8
Th	50	123.7	126.1		105.8
Th	100	173.7	174.5	175.3	101.3
Th	100	173.7	176.1		102.9
Th	500	573.7	568.4	570.4	99.0
Th	500	573.7	572.4		99.8
Th	900	973.7	980.2	975.4	100.8
Th	900	973.7	970.5		99.7

从加标回收结果可以看出,回收率在96.8%~105.8%。

## 4 结束语

通过酸分解铁矿石试样,经过萃取和反萃取方式,消除矿石中微量元素的干扰,采用抗坏血酸消除

铁的干扰,通过偶氮胂III与钍形成紫红色螯合物,利用校准工作曲线,开发了分光光度法测定钍含量的方法。该方法具有简便、快速分析的优点,分析结果具有良好的精密度和准确度,能满足日常分析检测需求。

## 参 考 文 献

- [1] 曲静. 煤中钍的测定方法[J]. 煤炭与化工, 2014, 37(6): 144-145.
- [2] EJ/T 349.3—1997, 岩石中微量钍的分析方法[S].
- [3] 郝东梅, 张翼明, 王海涛, 等. ICP-MS法测定稀土矿石、合金及碳酸稀土等稀土样品中钍量[J]. 稀土, 2003, 24(6): 30-31.
- [4] Anders R. Complexation in Analytical Chemistry[M]. Newyork, London: Interscience Publishers, 1963.
- [5] 冯先进, 屈太原. 电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)最新应用进展[J]. 中国无机分析化学, 2011, 1(1): 46-52.
- [6] 李精英, 石磊, 鲁盛会, 等. 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)及其联用技术研究进展[J]. 中国无机分析化学, 2012, 2(2): 1-5.
- [7] 李欣, 郭昊, 刘锡林, 等. 对氯偶氮氯磷分光光度法测定海产品中微量钍的研究[J]. 分析测试技术与仪器, 2004, 10(3): 180-182.
- [8] 宋茂生, 张鑫, 柳金良, 等. 电感耦合等离子体质谱法测定富铀矿样中的微量钍[J]. 化学分析计量, 2018, 27(1): 27-30.

(上接第62页)

## 参 考 文 献

- [1] 徐春, 赵曼玲, 曹红. 搪瓷用钢抗鳞爆性能研究进展[J]. 应用技术学报, 2019, 19(3): 222-228.
- [2] 袁培东, 王丽, 冯益华, 等. 热水器内胆内部缺陷及缺陷的无损检测研究[J]. 齐鲁工业大学学报, 2018, 32(3): 43-47.
- [3] 孙全社, 金蕾, 张庆安, 等. 冷轧搪瓷钢板的抗鳞爆性能的研究[J]. 钢铁, 2000, 35(4): 44-46.
- [4] 张丹, 杜林秀, 秦盛伟, 等. 退火方式对低碳冷轧搪瓷用钢组织性能的影响[J]. 轧钢, 2012, 29(5): 1-4.
- [5] 商建辉, 王先进, 初元璋. Ti-IF钢热轧时第二相粒子析出行为研究的最新进展[J]. 钢铁研究学报, 2000, 12(6): 55-60.
- [6] EN 10209—2013, Cold Rolled Low Carbon Steel Flat Products for Vitreous Enameling - Technical Delivery Conditions[S].