

碱熔-碲共沉淀-ICP-AES 法测定二次资源物料中的钌

刘 伟, 崇 彪, 刘荣正, 刘 文*, 罗 仙, 罗 雄, 金云杰, 林 波
(贵研资源(易门)有限公司 贵研铂业股份有限公司, 昆明 650106)

摘 要: 建立了碱熔分解样品、碲共沉淀分离, 电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-AES)测定含钌二次资源物料中钌含量的方法。对样品分解、钌的分离和测定、方法准确度和精密度进行了研究。约 0.5 g 粉末样品与 5 g 的过氧化钠混匀, 于 730 °C 马弗炉中熔融 25 min, 冷却后用水浸出, 盐酸酸化, 加氧化剂使钌保持较高价态, 用碲共沉淀法分离钌, ICP-AES 测定钌含量。样品加标回收率 98.8%~99.8%, 相对标准偏差(RSD , $n=9$)为: 0.3%~1.0%, 方法快速、简便, 已应用于生产测定。

关键词: 分析化学; 钌; 碱熔; 碲共沉淀; ICP-AES; 二次资源

中图分类号: O657.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2023)02-0057-05

Determination of ruthenium contents in secondary resource by ICP-AES after alkali fusion-tellurium coprecipitation

LIU Wei, CHONG Biao, LIU Rongzheng, LIU Wen*, LUO Xian, LUO Xiong, JIN Yunjie, LIN Bo
(Sino-Platinum Metals Resources (Yimen) Co. Ltd., Sino-Platinum Metals Co. Ltd., Kunming 650106, China)

Abstract: A method was established for the determination of ruthenium contents in secondary ruthenium resource by ICP-AES after alkali fusion-tellurium coprecipitation. The decomposition of the sample, the separation and determination of ruthenium, the accuracy and precision of method were systematically investigated. The sample (0.5g) was pretreated by the following procedures to produce a solution: mixing with 5 g sodium peroxide, melting in muffle furnace at 730 °C for 25 min, leaching with water after cooling, acidifying with hydrochloric acid, adding oxidant to keep ruthenium in a higher valence state. Ruthenium was separated from the solution by tellurium coprecipitation and then submitted for ICP-AES measurement. The spiked recovery was found to be 98.8%~99.8% and the relative standard deviation (RSD , $n=9$) was 0.3%~1.0%. The established method is simple and time-saving, and can be applied to the analysis of the ruthenium contents in secondary resource.

Key words: analytical chemistry; ruthenium; alkali fusion; tellurium coprecipitation; ICP-AES; secondary resource

钌是一种坚硬耐磨、耐腐蚀性强、催化性能良好的稀有贵金属, 主要应用在电镀、靶材、浆料、合金和工业催化剂等行业。钌在地壳中的含量仅为十亿分之一, 是最稀有的金属之一。全球钌矿储量的 90% 以上分布在俄罗斯、南非、北美洲和南美洲等地^[1]。全世界采矿业产出的钌年产量仅有几十吨, 尤其是我国的钌矿产资源极度稀缺。因此, 从各种

边角废料、失效废物等钌二次资源中回收钌具有重要意义, 既可以实现钌的循环利用, 创造良好的经济效益, 对节省外汇、节约资源和保护环境也具有积极作用。

在回收钌二次资源时, 需要准确测定其中的钌含量才能确定物料交易价值和回收工艺流程。钌二次资源的行业来源不同, 载体成分不同, 有铝、硅、

收稿日期: 2022-08-04

基金项目: 云南省重大专项科技计划(202102AB080007); 固废资源化专项(国家重点研发计划 2019YFC1907505)

第一作者: 刘 伟, 男, 高级工程师; 研究方向: 贵金属分析应用与研究; E-mail: liuweiyinkm@sina.com

*通信作者: 刘 文, 男, 高级工程师; 研究方向: 贵金属冶金与分析技术研究; E-mail: liuwen@ipm.com.cn

镁、锆、钛、铁、铬、锰、铅、锌、碳、硫等多种共存元素, 钌含量差异也较大。由于钌的价态复杂多变, 传统的化学滴定法测定钌的报道并不多见。目前文献报道测定钌的方法有: 光度法测定于矿石中痕量钌^[2]; 氢还原重量法测定高含量钌^[3-4]; 蒸馏-石墨炉原子吸收法测定化学原料药中的痕量钌^[5]; 电感耦合等离子体发射光谱(ICP-AES)法^[6-10]测定砂铂矿、贵金属控液物料、钌钌合金、氧化铝载体催化剂中的钌, 但是能够适用于各种含钌二次资源中钌的测定方法未见报道。

采用碱熔蒸馏钌再吸收钌, 能够实现钌与干扰元素的分离, 加以氯化铵沉淀、氢还原成钌粉再称重, 针对高含量钌样品中钌的测定效果良好, 但是对于低含量样品则需要较大的样品量, 限制了其应用范围。碱熔蒸馏 ICP-AES 法测定高含量钌样品的稀释液中的钌结果良好; 由于低含量钌样品吸收液稀释倍数小, ICP-AES 测定受其中乙醇的正干扰, 钌测定结果容易偏高。

为避免 ICP-AES 测定时干扰成分对钌的影响, 本文针对粗钌粉、钌碳烧渣、钌氧化铝、钌氧化锆、钌钛涂层、钌渣等样品, 采用约 10 倍的过氧化钠高温熔融分解样品、双氧水氧化-碘化钾还原碲共沉淀分离和 ICP-AES 法测定钌, 以建立适用于各种钌二次资源样品分析的方法。

1 实验部分

1.1 试剂和样品

所用试剂过氧化钠、盐酸、硝酸、过氧化氢等均为分析纯试剂; 碘化钾溶液(0.5 g/mL, 避光保存); 碲溶液(2.5 mg/mL, 20%盐酸); 二氯化锡溶液(1 mol/L, 30%盐酸); 钌标准贮存溶液(1000 $\mu\text{g/mL}$, 10%盐酸介质)购自国家钢铁材料测试中心钢铁研究总院。仪器用氩气纯度大于 99.99%。实验用水为去离子水。

钌标准溶液(100.0 $\mu\text{g/mL}$): 移取 20.00 mL 钌标准贮存溶液于 200 mL 容量瓶中, 加入 20 mL 盐酸, 用水稀释至刻度, 混匀。钌校准曲线溶液: 分别移取一定量的钌标准溶液, 配制成一组钌的质量浓度依次为: 0.50、1.00、5.00、10.00、25.00 和 50.00 mg/L 的校准曲线溶液, 介质为(1+9)稀王水溶液。

实验用样品: 纯钌粉($\omega(\text{Ru}) \geq 99.95\%$); 钌碳烧渣($\omega(\text{Ru}) \approx 59\%$)。

1.2 仪器和设备

电感耦合等离子体发射光谱仪, Avio 500, 美

国 PE 公司。振动盘式研磨仪, RS200, 德国莱驰公司。马弗炉, YFX 2/12 Q-GC, 上海意丰电炉有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 试样分解

样品经过烘干, 研磨, 过 120 目标准筛。称取 0.4~0.5 g 样品(钌含量>50%的称取约 0.1 g 样品)至高铝坩埚中, 加入约 3 g 过氧化钠, 搅拌均匀, 再覆盖约 2 g 过氧化钠, 盖上坩埚盖, 于 730 $^{\circ}\text{C}$ 马弗炉中恒温 25 min。取出, 冷却。将高铝坩埚及坩埚盖置于 400 mL 烧杯中, 加 70 mL 水, 盖上表面皿, 待反应停止后, 加入 40 mL 盐酸, 用少量(20%)盐酸洗净坩埚及坩埚盖, 加热至溶液清亮。取下, 冷却。用水转移至 200 mL 容量瓶中, 定容, 摇匀。

1.3.2 碲共沉淀分离

移取 5.0 mL 试样分解定容溶液(1.3.1)至 400 mL 烧杯中, 加 40 mL 水和 5 mL 过氧化氢, 盖上表面皿, 加热微沸, 至无小气泡冒出, 取下, 用少量水冲洗烧杯壁及表面皿, 加入 8 mL 碘化钾溶液, 加入 40 mL 盐酸, 加热至微沸, 加入 10 mL 碲溶液, 滴加 5 mL 二氯化锡溶液, 盖上表面皿, 保持微沸 30 min, 至沉淀絮凝, 溶液清亮。取下, 用玻砂漏斗过滤, 用水洗涤烧杯及沉淀各 3~5 次, 弃去滤液。取 10 mL 盐酸和 2.5 mL 硝酸至原烧杯中, 加热煮沸后倒入玻砂漏斗中溶解沉淀, 溶液接于 100 mL 容量瓶中, 用水洗涤烧杯和漏斗 3~5 次, 洗涤液接于容量瓶中, 冷却后用水稀释至刻度, 混匀。

1.3.3 测定

电感耦合等离子体发射光谱仪运行稳定后, 选择射频功率 1.3 kW、载气流速 0.2 L/min、保护气流速 0.75 L/min、冷却气流速 12 L/min、进样速率 1.2 mL/min、径向观测、预燃时间 40 s、自动积分、积分 3 次取平均值。推荐分析线为 Ru 240.272 nm。

在上述选定的条件下, 测定准曲线溶液和样品试液, 仪器根据校准曲线自动处理数据并输出钌的质量浓度, 再计算得出钌的含量。

2 结果与讨论

2.1 碱熔条件

对于钌二次资源样品的分解, 不管是常压酸溶解法或是闷罐酸溶解法, 都只能部分溶解钌, 无法实现完全溶解钌。玻璃封管法虽可实现含钌样品甚至钌粉的完全溶解, 但须高温高压的条件, 且分解

费时^[9]。采用碱熔分解含钌样品，样品分解完全，高效便捷。常用的碱熔试剂为过氧化钠，坩埚采用高铝坩埚，比铁坩埚、镍坩埚更方便观察熔融物浸出和洗出是否干净，同时减少酸化过程盐酸的用量。金属状或粒状样品需要用锌粒锌粉混合熔融，碎化成粉末再碱熔。

在常见的碱熔条件下(700 ℃保温 15~20 min)进行试验，部分钌含量高的样品分解不完全，坩埚底部有黑色残渣。为了找到适用性更好的碱熔融条件，熔融时间延长至 25 min，在不同温度条件下做熔融实验。称取 0.5 g 钌碳烧渣试样(钌参考值 59%)于高铝坩埚中，加入 3 g 过氧化钠搅拌均匀，再覆盖约 2 g 过氧化钠，置于马弗炉中，分别在 700、715、730、750 ℃下保温 25 min，取出，冷却。其余步骤按实验方法进行，测定钌含量，结果如表 1 所列。

表 1 不同熔融温度的比较

Tab.1 Comparition of different melting conditions /%		
温度/℃	平行样结果	平均值
700	56.49, 56.81	56.65
715	57.58, 57.66	57.62
730	59.22, 59.34	59.28
750	58.92, 59.17	59.04

由表 1 可见，试样在 700~750 ℃范围内熔融 25 min，随着温度升高钌的测定结果升高，至 730 ℃时最高，再升温结果无变化。故选定样品熔融条件为：采用高铝坩埚做容器，称样量 10 倍的过氧化钠作熔融剂，于 730 ℃马弗炉中熔融 25 min，取出，冷却。将高铝坩埚置于 400 mL 烧杯中，加 100 mL 水，盖上表面皿，放置至反应停止后，加入 40 mL 盐酸，加热至溶液清亮，可将高含量钌废料完全分解。此条件下 0.05 g 纯钌粉能被完全分解转成溶液。

2.2 钌的分离和测定方法的选择

称取不同钌含量的样品，碱熔后采用 4 种方法处理和测定钌。方法 1) 蒸馏分离钌，氢还原重量法测定钌；方法 2) 不分离直接稀释 20 倍 ICP-AES 测定钌；方法 3) 蒸馏分离钌，以 20 mL 含 50%盐酸和 5%乙醇的混合液吸收钌，定容至 100 mL，再根据钌浓度高低稀释后 ICP-AES 测定钌；方法 4) 按照本文实验方法处理后测定钌，所得结果列于表 2。

方法 1) 碱熔蒸馏-氢还原法可实现含钌样品中钌的提取和称重，但是操作过程较长，钌吸收液需要长时间浓缩、加氯化铵沉淀和通氢气还原，每一步转移都需要细心操作避免钌损失，低含量样品需

表 2 不同的处理和测定方法的比较

Tab.2 Comparition of different treatment and determination /%						
方法	分离及测定方法	样品1	样品2	样品3	钌碳烧渣	纯钌粉
1)	碱熔蒸馏-氢还原	\	\	\	58.76	99.28
2)	碱熔稀释-ICP-AES	1.41	6.54	11.10	54.24	96.54
3)	碱熔-蒸馏 ICP-AES	1.62	7.72	11.93	58.79	99.05
4)	碱熔-碲共沉淀 ICP-AES	1.53	7.65	11.85	59.28	99.51

要较多的样品量才能收集到适宜称重的钌。

方法 2) 由于受到共存的钠盐及其它元素影响，碱熔直接稀释 ICP-AES 法测定钌的结果普遍偏低 5%左右，仅适用于高含量非交易样品的快速分析。

方法 3) 和方法 4) 的测定结果比较接近，对于高含量样品两种方法的结果相符，但是低含量(Ru<10%)样品测得的钌结果不一致；为查明两种方法的低含量样品结果差异的原因，重点考察了 10%盐酸介质中不同浓度的乙醇对 ICP-AES 法测定钌(Ru 240.272 nm)的干扰情况，结果列于表 3。

表 3 乙醇浓度对 ICP-AES 测定钌的影响

Tab.3 Effect of ethanol concentration on the determination of ruthenium by ICP-AES					
乙醇浓度 (V/V)/%	钌加入 值/(mg/L)	轴向测 得值	径向 测得值	轴向 干扰/%	径向 干扰/%
0	20	19.95	19.75	0	0
0.2	20	20.61	20.64	3	3.2
0.8	20	21.72	22.29	8.6	11.4
1.5	20	23.38	24.49	16.9	22.4
3	20	26.45	29.91	32.2	49.6
7	20	仪器熄火	仪器熄火	\	\

从表 3 可知，0.2%的乙醇对 ICP-AES 法测定钌已经有 3%的正干扰，浓度越高干扰越大，相同浓度下对轴向观测比径向观测的干扰小。进一步降低乙醇浓度，用轴向观测验证乙醇的干扰，结果列于表 4。从表 3、表 4 可知，乙醇的正干扰与其浓度成正相关，0.1%以下乙醇的干扰才能忽略不计。文献[11]报道了乙醇对 ICP-AES 测定具有一定的增强效应，原因是乙醇的加入降低溶液表面张力，从而提高雾化效率，导致光谱强度增加。乙醇在蒸馏钌的吸收液中起还原 RuO₄ 的作用，有利于快速吸收钌；生产上提钌的蒸馏吸收液不加乙醇，采用多级吸收，这种方式对于分析操作和蒸馏装置不易实现，存在玻璃装置易破损、沾污等问题。

表 4 乙醇浓度对 ICP-AES 测定钌的影响(轴向)

Tab.4 Effect of ethanol concentration on the determination of ruthenium by ICP-AES (Axial)

乙醇浓度 (V/V)/%	钌加入 值/(mg/L)	轴向 测得值	干扰/%
0	5	4.99	0
0.01	5	5.01	0.2
0.05	5	5.04	0.8
0.1	5	5.10	2.0
0.2	5	5.16	3.2
0.5	5	5.40	8.0

基于上述实验, 本文选择方法4), 采用碱熔碲共沉淀和 ICP-AES 测定钌, 避免乙醇对测定干扰, 可同时处理多个样品, 结果准确, 方法快速、简便, 试剂消耗低, 排污少。

2.3 碲共沉淀条件

碲作沉淀剂、氯化亚锡为还原剂的共沉淀法可以同时定量富集金、铂、钯和铑, 但是碲共沉淀钌不完全, 本文实验钌只有大约 80%的收率, 原因是溶液中钌以多种价态共存, 低价态的钌不易被吸附沉淀下来。

碱熔过程中钌与过氧化钠熔融生成可溶于水的钌酸钠(Na_2RuO_4)^[13], 用水浸出后溶液呈现橙黄色, 用盐酸酸化后 Ru(VI)与盐酸反应生成 Ru(IV)、Ru(III)和 Ru(II)呈黑褐色。实验选择加入弱氧化剂过氧化氢, 既可以将不同价态的钌氧化为 Ru(VI)和 Ru(VII), 也不会过度氧化生成 RuO_4 气体逸出。分取的溶液中总量低于 2.0 mg 的钌, 加入 5 mL 过氧化氢, 加热微沸约 10 min, 低价态的钌被完全氧化形成 Ru(VI)和 Ru(VII), 过量的过氧化氢加热即可分解, 对后续处理无影响。

碲共沉淀时加入一定量的碘化钾与溶液中的碲反应生成游离碲和游离碘, 在氯化亚锡还原作用下产生大量游离碲聚集在游离碘表面, 吸附钌-氯配合物使晶核长大后一起析出, 形成沉淀从而与其它共存离子分离。

2.4 方法精密度

称取不同钌含量的样品各 9 份平行样, 按实验方法处理和测定, 所得结果列于表 5。由表 5 可见样品 9 次测定结果的平均值与推荐值相符, 相对标准偏差(RSD)均小于 2%。

2.4 方法准确度

以钌碳烧渣($\omega(\text{Ru})=59\%$)为实验样品进行加标回收实验, 称取约 0.1 g 钌碳烧渣试样, 平行 3 份,

分别加入一定量的钌, 按照本方法处理和测定, 结果列于表 6, 加标回收率在 98.8%~99.8%之间。

另外称取约 0.05 g 纯钌粉($\omega(\text{Ru})=99.95\%$)做对照样品, 平行 2 份, 按照本方法处理和测定, 测得结果为 99.51%和 99.92%。

表 5 方法测定精密度

Tab.5 Measurement precision of the method /%

样品	推荐值	平行样结果	平均值	RSD
含钌渣	0.67	0.673, 0.678, 0.674, 0.671, 0.677, 0.683, 0.692, 0.683, 0.689	0.68	1.01
Ru/Al ₂ O ₃	1.09	1.097, 1.101, 1.094, 1.091, 1.121, 1.092, 1.109, 1.085, 1.101	1.10	0.92
Ru-Ti 涂层	5.78	5.841, 5.832, 5.833, 5.751, 5.740, 5.755, 5.832, 5.871, 5.820	5.81	0.77
Ru/ZrO ₂	11.1	11.07, 11.06, 11.14, 11.12, 11.07, 10.98, 10.95, 10.98, 11.03	11.04	0.56
铑钌废料	34.6	34.64, 34.38, 34.33, 34.42, 34.73, 34.56, 34.78, 34.62, 34.61	34.56	0.43
铂钌废料	48.5	48.40, 48.82, 48.71, 48.26, 48.53, 48.19, 48.74, 48.33, 48.65	48.53	0.43
粗钌	75.3	74.86, 75.13, 75.19, 75.42, 75.18, 75.48, 74.92, 75.31, 75.54	75.23	0.30

表 6 加标回收试验

Tab.6 Recovery of standard addition

称样量	试液中钌 /(mg/L)	加入钌 /(mg/L)	测得钌 /(mg/L)	加标 回收率/%
0.1042	15.37	5.0	20.31	98.8
0.1016	14.99	10.0	24.89	99.0
0.1038	15.31	20.0	35.26	99.8

表 7 二次资源样品钌含量测定结果

Tab.7 Determination results of ruthenium in secondary resource samples /%

样品类型	本方法结果	蒸馏-ICP-AES	相对偏差
粗钌	81.67	81.02	-0.8
铂钌废料	68.60	68.84	0.4
钌碳烧渣	55.24	55.07	-0.4
Ru/ZrO ₂	11.70	11.81	0.8
Ru/ZrO ₂	7.65	7.72	1.0
含钌废料	4.07	4.20	3.0
Ru/Al ₂ O ₃	2.07	2.12	2.4
Ru/Al ₂ O ₃	0.87	0.90	4.4
含钌渣	0.76	0.79	5.0

2.5 实际样品分析

本方法已用于不同类型的钌二次资源样品分析, 结果列于表7。本方法与蒸馏分离 ICP-AES 测定钌相比, 高含量样品结果相符; 但是随着钌含量降低到 10% 以下两种方法的结果偏差增大, 如前文所述, 由于乙醇的干扰, 蒸馏法 ICP-AES 测定钌含量 5% 以下的偏高增加到 2% 以上, 本方法结果更为准确。

3 结论

1) 采用高铝坩埚做容器, 5.0 g 过氧化钠做熔融剂, 于 730 °C 马弗炉中熔融 25 min, 可将不同成分和含量的粉末状钌二次资源样品完全分解。

2) 碱熔蒸馏 ICP-AES 法测定高含量钌的高倍稀释液中的钌结果良好, 但是低含量钌样品吸收液由于稀释倍数小, ICP-AES 测定时受其中乙醇的正干扰, 钌测定结果容易偏高, 0.1% 以下乙醇的干扰才能忽略不计。

3) 加入过氧化氢既可将不同价态的钌氧化为 Ru(VI) 和 Ru(VII), 也不会生成 RuO₄ 气体逸出, 对提高钌的碲富集回收率起关键作用。

4) 采用过氧化钠碱熔分解样品, 碲共沉淀分离富集钌, ICP-AES 法测定不同成分和含量钌二次资源中的钌, 相对标准偏差(RSD)均<2.0%, 加标回收率为 98.8%~99.8%。方法准确、快速, 满足生产分析要求。

参考文献:

- [1] 贺小塘, 王欢, 赵雨, 等. 钌的资源及应用[J]. 贵金属, 2015, 36(S1): 182-186.
HE X T, WANG H, ZHAO Y, et al. Resources and application of ruthenium[J]. Precious Metals, 2015, 36(S1): 182-186.
- [2] 王淑志. 棉红-Ru(III)-KBrO₃ 催化体系动力学及痕量钌的测定[J]. 光谱实验室, 2013, 30(4): 1753-1758.
WANG S Z. Determination of trace ruthenium(III) and cotton red-ruthenium(m)-potassium bromate catalytic kinetic system[J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 2013, 30(4): 1753-1758.
- [3] 朱武勋, 管有祥, 李楷中, 等. 氢还原重量法测定三氯化钌中 Ru 含量[J]. 贵金属, 2007, 28(1): 55-57.
ZHU W X, GUAN Y X, LI K Z, et al. Determination of ruthenium in ruthenium trichloride by hydrogen reduction gravimetric method[J]. Precious Metals, 2007, 28(1): 55-57.
- [4] 郁丰善. 蒸馏-吸收重量法测定高含量钌废料中的钌[J]. 中国资源综合利用, 2015, 33(11): 21-23.
- [5] 池海涛, 黄伟, 赵婷, 等. 原子吸收光谱法测定化学原料药中的钌[J]. 分析仪器, 2018(1): 174-174.
CHI H T, HUANG W, ZHAO T, et al. Determination of ruthenium in aptiom (eslicarbazepine acetate) by atomic absorption spectrometry[J]. Analytical Instrumentation, 2018(1): 174-174.
- [6] 刘伟, 刘文, 吴喜龙, 等. 电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)快速测定砂铂矿中的铂铱钌铑和金含量[J]. 中国无机分析化学, 2013, 3(S1): 7-9.
- [7] 张学欢, 刘同银, 张立岩, 等. ICP-AES 测定贵金属控液物料中的钌[J]. 世界有色金属, 2013(1): 76-77.
- [8] 周恺, 李国平, 孙宝莲, 等. ICP-AES 测定钌合金中的钌[J]. 光谱实验室, 2013, 30(3): 1200-1203.
ZHOU K, LI G P, SUN B L, et al. Determination of ruthenium in palladium-ruthenium alloy by ICP-AES[J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 2013, 30(3): 1200-1203.
- [9] 赵文虎, 杨洋, 杨辉, 等. 碱熔-蒸馏-ICP-AES 法测定载体催化剂中钌[J]. 贵金属, 2020, 41(S1): 192-195.
ZHAO W H, YANG Y, YANG H, et al. Determination of ruthenium content in carrier catalyst by ICP-AES after alkalifusion-distillation separation[J]. Precious Metals, 2020, 41(S1): 192-195.
- [10] 杨红艳. 复杂二次资源物料中钌的富集方法及 ICP-AES 测定技术研究[D]. 昆明: 昆明贵金属研究所, 2012.
- [11] 杨红艳, 李青, 马媛, 等. ICP-AES 测定复杂二次资源物料中钌含量干扰情况研究[J]. 贵金属, 2013, 34(2): 56-60.
YANG H Y, LI Q, MA Y, et al. Study on the interference in determination of Ru in secondary resource materials by ICP-AES[J]. Precious Metals, 2013, 34(2): 56-60.
- [12] 陈金忠, 周永利, 郭庆林, 等. 乙醇添加剂对 ICP 光源等离子体辐射的增强效应[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(1): 183-187.
CHEN J Z, ZHOU Y L, GUO Q L, et al. Enhancing effect of ethanol additive on the plasma emission in ICP source[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(1): 183-187.
- [13] 贺小塘. 钌的氯配合物及其分离提纯理论基础[J]. 有色冶金(冶炼部分), 2016(11): 39-42.
HE X T. Ruthenium chloride complexes and theoretical basis of separation and purification for ruthenium[J]. Nonferrous Metallurgy (Smelting part), 2016(11): 39-42.