

稀散金属铼的分离富集与分析方法研究进展

王丹,王宝庆,廖耀华,任保增

郑州大学化工与能源学院,河南 郑州 450001

摘要:综述了近年来分离富集铼的研究进展.对离子交换法、溶剂萃取法、萃淋树脂法、液膜法、活性炭吸附法等不同分离方法的特点进行了阐述,并对铼的分析方法作了较全面的介绍,同时指出了不同方法的特点和使用范围,最后对铼分析方法的发展方向作了展望.

关键词:铼;分离富集;分析方法;展望

中图分类号:TQ028.8

文献标识码:A

铼属稀散金属,在地壳中的丰度仅为 1×10^{-10} ,常以微量的形式伴生于辉钼矿、铜铼矿、铂、铀等矿物中.稀散金属分布的特殊性造成了对铼的分离富集有一定的难度,这就导致了铼的产量低、价格昂贵,从而制约了铼的应用.因此,铼的提取富集成为研究铼的一项重要工作.

铼及其合金被广泛应用于石油化工、国防、航空航天、冶金等行业中,由于其重要技术特性及经济前景,对铼的分析提出更高的要求.近些年来,国内外已建立了多种铼测定的方法,包括矿石、废催化剂、金属及其合金等中痕量、微量、低、高含量铼的测定,而分析技术有光度法、中子活化分析、X射线荧光光谱法、色谱分析、等离子体质谱法等^[1].

1 铼的分离富集

铼主要与钼伴生,故大量文献报道均是针对钼、铼的分离,铼与常见金属离子的分离也有一定的研究.目前分离富集铼的方法主要包括:离子交换法、溶剂萃取法、萃取色谱法、液膜法、活性炭吸附法等.

1.1 离子交换法

离子交换法是利用离子交换树脂中的活性基团

与溶液中的 ReO_4^- 进行离子交换、然后用洗脱剂将 ReO_4^- 洗脱下来,从而达到分离富集目的.该法的优点是操作简便、不伤害人体和环境、回收率高及树脂能够进行再生等^[2].

Benke等人^[3]采用几种不同的强酸性阳离子树脂以制备高纯度低钾的高铼酸铵,在体积分数为32%的硝酸溶液中,C160离子交换树脂有最佳的 NH_4ReO_4 提纯效率.经中和蒸发后得到的高铼酸铵产品可用于制备W-Re-Ni-Fe重合金.蒋晓辉等人^[4]采用D_{302-II}阴离子交换树脂从组分复杂的地浸采铀浸出液中分离低浓度铼,吸附容量为62.5 mg/g,采用3 mol/L的氨水解吸,解吸液蒸发浓缩、冷却结晶后可得到产品高铼酸铵,回收率为91%~101%.陈昆昆等人^[5]采用D296树脂从含铼酸性溶液中提取铼,在反应温度25℃、料液pH=1.5、流速每小时7.2倍树脂床体积的动态实验条件下,铼吸附率高达97.91%,树脂的饱和吸附量为114 mg/g.

1.2 溶剂萃取法

溶剂萃取是当前工业生产中富集提取铼的主要方法,工艺条件相对成熟,应用较多的萃取剂为胺类、酮类、膦类及季铵盐类,从碱性料液中提铼一般

用季铵盐萃取剂。

胺类萃取剂的应用最为广泛,典型代表是叔胺类中的三正辛胺(TOA或N235)。邹振球等人^[7]将钼精矿经石灰焙烧、稀硫酸浸出后,采用N235对浸出料液中的钼铼进行溶剂萃取,富钼铼有机相采用氨水进行反萃,反萃液中的钼铼酸沉回收,铼经201号树脂吸附回收,得到四钼酸铵和高铼酸铵产品。曹占芳等人^[8]选用组成为30%的N235+20%的仲辛醇+50%的煤油的有机相(均为体积分数),对电氧化浸出液中的钼、铼进行萃取回收,其萃取率分别为99.84%和95.19%,再通过氨水反萃、D201树脂吸附来实现钼铼的分离。

酮类萃取剂萃取不需要后序的反萃工序,与碱熔法配合使用在分离地质样品中的铼等方面具有显著优势,但其存在萃取能力相对较低的缺点。牟婉君等人^[9]发现碱性浓度较低时,甲基酮对铼有较好的萃取效果,对钼几乎不萃取,这可有效地分离钼、铼。Mushtaq等人^[10]研究了甲基酮对医药用¹⁸⁸Re的溶剂萃取,随着有机相体积的增加,¹⁸⁸Re的萃取率逐步提高。当 $V(A)/V(O)=1:2$ 时,大约80%的¹⁸⁸Re被萃取进入有机相中。

膦类萃取剂具有萃取酸度低、选择性高、易反萃等优点,但其存在萃取容量及分离系数较低的缺点。研究发现,将其运用于协同萃取体系中比单一萃取体系中具有更高的选择性,同时改善萃取过程的动力学、热力学性能,提高萃取饱和容量。Leszczyńska-Sejda等人^[11]从浓度为25 g/L及pH值为1.0的高铼酸铵溶液中萃取 ReO_4^- 以制备高铼酸,萃取剂为体积比1:1的磷酸三丁酯和甲苯的混合液,最后用80℃的水从有机相中洗脱 ReO_4^- 。经过多次萃取和洗脱可实现 ReO_4^- 和 NH_4^+ 的完全分离,最终得到含铼浓度为300 g/L的高铼酸,其中杂质(Na,K,Mg, NH_4^+)的含量不超过0.01 g/L。

1.3 萃取色谱法

萃取色谱法是将离子交换和溶剂萃取两种方法结合起来,同时兼有两者的优点。萃淋树脂在与某些金属离子结合时按萃取机理进行,但在使用时的操作类似于离子交换剂的吸附和淋洗过程^[12]。萃淋树脂使萃取剂固态化,减小了萃取剂的损失;另外,树脂中的多孔材料在实际操作中相当于多级萃取,故分离效率比溶剂萃取高得多^[12-13]。宋金如等人^[14]对萃淋树脂P350在硫酸介质中吸附铼的性能及微色谱

柱分离微量铼的条件和选择性进行了研究,采用丁基罗丹明B光度法测定含铼0.005%的铀矿样时,相对标准偏差为1.2%。M. Lucaniková等人^[15]比较了新型萃淋树脂A336-PAN和PAN-A336及商业树脂TEVA对铼的分离性能,其中A336-PAN由甲基三辛基氯化铵(Aliquat336)直接加入到聚丙烯腈PAN基质中制得,PAN-A336由甲基三辛基氯化铵(Aliquat336)浸渍在现成的聚丙烯腈PAN珠体中制得。结果显示,新型萃淋树脂的性能完全超越了TEVA树脂的,PAN-A336甚至有着更好地动态容量。

1.4 液膜分离富集

液膜分离富集技术是一种快速、高效、节能及有选择性的高分离技术。王献科等人^[16]采用以二苯并-18-冠醚-6为流动载体、L113B为表面活性剂、 CCl_4 和 n -Hexane油状物为溶剂以及 NaClO_4 溶液为内相的乳状液膜体系,实现了对辉钼精矿、复杂(多金属)矿石和合金中微量铼的分离富集,铼的迁移富集率可达99.5%~100.5%,常见共存离子如 Mo^{6+} , NH_4^+ , Na^+ 和 K^+ 等都不能迁移透过该乳状液膜。李玉萍等人^[17]采用磷酸三丁酯、异戊醇、L113B、液体石蜡、磺化煤油和 NH_4NO_3 水溶液等液膜体系提取铼,在外相料液2 mol/L的 H_2SO_4 介质中, ReO_4^- 的提取率在99.4%以上。

1.5 活性炭及泡沫塑料吸附法

活性炭由于结构蓬松、表面积大及吸附能力强,已被广泛用于工业生产中,活性炭对铼的吸附属于物理吸附,易解吸^[18]。该法与萃取法相比,无环境污染;较离子交换法价格便宜,分离效率高。但活性炭的吸附易受吸附液的温度、酸度及其本身粒度的影响。周迎春等人^[19]通过活性炭吸附法分离钼铼,调整吸附液的pH值,即可有效地分离钼铼,当 $\text{pH}>8.2$ 时,分离系数 $S(\text{Re}/\text{Mo})>3042$ 。

泡沫塑料是吸附的理想介质,早在1970年,Bowen首次以泡塑从盐酸中萃取铼。周长祥等人^[20]研究了泡沫塑料对铼的吸附性能,在HF介质中,对铼的全流程吸附率大于97%,铼的富集倍数为 1×10^4 。

1.6 其它分离富集方法

铼的分离富集方法还有沉淀法、电渗析法、氧化还原法及纸上层析法等^[21-23]。分离铼最早是采用沉淀

法,此法现已基本不用,但随着新型凝结剂的出现,及共沉淀操作的简便性,共沉淀法又引起研究者的关注;电渗析法中 ReO_4^- 由于易于迁移到阳极室,而钼因以 $[\text{MoO}_2(\text{SO}_4)_n]^{2(n-1)-}$ 和中性分子 $\text{MoO}_2(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 形态存在而难以迁移到阳极室,从而使两者得以分离.也有研究人员采用纳米材料、生物质吸附剂对钼和铈进行富集分离^[24-25].

2 铈的分析测定

2.1 电化学分析方法

电化学分析法是仪器分析的重要组成部分之一.分析铈的方法主要集中在不同体系的示波极谱法、络合吸附波极谱法、催化极谱法、伏安法等.

李永梅^[26]采用单扫描示波极谱法测定铜烟道灰中的铈,在 HClO_4 (浓度为 2 mol/L)– H_3PO_4 (浓度为 1.5 mol/L)– NaH_2PO_4 (浓度为 0.02 mol/L) 体系中,微量铈在电位 -0.40 V 下产生一个灵敏的极谱波峰,铈浓度在 $1.51 \times 10^{-3} \sim 1.08 \times 10^{-5}$ mol/L 范围内与峰电流线性关系良好,检出限为 1.08×10^{-5} mol/L. Chopabaeva 等人^[27]利用示波极谱法测定了天然高分子材料木质素中吸附的高铈酸根含量.宋成晟等人^[28]利用高铈酸根对碲酸还原产生催化极谱波,采用 H_2SO_4 – Na_2SO_4 –Te 底液催化极谱法,在 JP-2D 极谱仪上测定辉钼矿痕量铈,铈浓度在 0.0005~1.0 $\mu\text{g/mL}$ 范围内与波高呈线性关系,可用来测定矿石中 0.00005%~0.01% 的铈.其它电化学分析法如库仑滴定法、离子选择电极法应用的不多.

2.2 铈的光度分析

目前在测定铈的方法中分光光度法应用的最广泛,主要包括功能团显色光度法、碱性染料法、催化动力学光度法等.功能团显色法中铈的显色试剂主要分为以硫脲及其衍生物、硫氰酸盐为主的含硫试剂和苯并氧肟酸、 α -二吡喃乙二肟、丁二肟等含肟基的有机试剂.金珊等人^[29]提出了测定重整催化剂中铈含量的方法,催化剂样品经盐酸、磷酸、过氧化氢加热溶解,溶液中的铈(VII)在盐酸介质中被 SnCl_2 还原成铈(II),并与硫脲形成稳定的黄色配合物,在波长 440 nm 处进行测定.铈含量在 0~20 $\mu\text{g/mL}$ 范围内符合比尔定律,表观摩尔吸光系数为 $5.66 \times 10^3 \text{ L/mol} \cdot \text{cm}$.

碱性染料法中 ReO_4^- 与碱性染料阳离子形成有

色电中性配合物或沉淀,经有机溶剂萃取,用萃取比色法测定铈含量.常用的碱性染料有罗丹类、亮绿、结晶紫、乙基紫等.王玉静等人^[30]选用乙基紫作显色剂,在 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和酒石酸存在下, $\text{pH} = 2.2 \sim 3.6$ 的 Na_2HPO_4 –柠檬酸缓冲体系中和 ReO_4^- 形成蓝绿色缔合物,苯作萃取剂,在 $\lambda = 610 \text{ nm}$ 处测定,铈量在 0~12 μg 范围内符合郎伯–比尔定律,可应用于电吸尘铜烟灰中铈的分析测定.周煜等人^[31]通过将钼(VI)氧化为钼(V)后生成的盐酸羟胺–钼–EDTA 稳定络合物的方法来掩蔽钼,硫脲光度法测定了含钼粗铈酸钾中的铈,在 3.0 mol/L 盐酸介质中,波长为 440 nm 处测定,铈量在 0~20 $\mu\text{g/mL}$ 范围内符合朗伯–比尔定律,检出限为 $1.91 \times 10^{-8} \mu\text{g/mL}$.

催化动力学光度法主要用于微量和痕量铈的分析,该法灵敏度高,但其选择性较差、干扰多,需经较为彻底的分离.蒋克旭等人^[32]在表面活性剂聚乙烯醇存在下,确立了在柠檬酸–碲酸钠–高铈酸钾–二氯化锡介质中,采用催化动力学光度法测定铈的最佳实验条件,可用于钼矿样品中铈的测定.邓桂春等人^[33]发现在硫酸(0.6 mol/L)–柠檬酸(0.0025 mol/L)介质中,水浴 50 $^\circ\text{C}$ 下加热 20 min,铈(VII)能显著提高碲酸钠氧化二氯化锡的反应速率,据此采用催化动力学光度法对钼冶炼烟尘吸收液中铈含量进行测定,铈量在 50~1200 $\mu\text{g/L}$ 范围内与吸光度呈线性关系.

2.3 等离子体–质谱法

等离子体–质谱法(ICP–MS 法)综合了等离子体极高的离子化能力和质谱的高分辨、高灵敏度及连续测定多元素的优点,是目前最灵敏的元素分析手段.ICP–MS 可使 Re 有效电离成为阳离子,对样品制备要求简单、测定速度快,对 Re 检出限低至 $1 \times 10^{-12} \sim 1 \times 10^{-10} \text{ g/mL}$,在铈的测定中越来越受到重视.ICP–MS 常与其它技术联用以提高测定的准确度,如激光剥蚀电感耦合等离子体质谱法(LA–ICP–MS)、多接收等离子体质谱法(MC–ICP–MS)等,广泛应用于地质样品中铈同位素、水样和标准样品中痕量铈的测定^[34].

形智等人^[35]通过 HF 和 HNO_3 溶解样品,应用阴离子交换树脂对溶液中的铈进行静态振荡吸附,用 50% 的 HNO_3 溶液解脱,采用同位素稀释等离子体质谱法测定,检出限达到 $4 \times 10^{-12} \text{ g/g}$. Malinovsky 等人^[36]采用 LA–ICP–MS 原位测定了辉钼矿中的 Re 和

Os,但因为辉钼矿中 Re 与 ^{187}Os 存在失耦现象,该法在实际应用中受到一定限制。

2.4 负离子热表面电离质谱法(N-TIMS)

负离子热表面电离质谱法是近年发展起来的质谱技术,测量精度高、质量蒸馏小、能够获得较高精度的同位素比值。由于 Re 很难熔,且电离能很高,形成负离子所需的能量要低的多,所以离子化率高,检出限比 ICP-MS 法的更低。王礼兵等人^[37]对 Re-Os 同位素定年方法中原有丙酮萃取分离 Re 的流程进行改进,可直接点带用于 N-TIMS 测定,1 ng 的 Re 测量信号可达到 100 mV 以上。

2.5 中子活化分析法(NAA)

中子活化分析法的灵敏度和选择性高、准确性好、污染少,适用于测定地质样品中的痕量铼,检出限低于等离子质谱法。但是所使用的仪器设备昂贵,并且中子源通常为反应堆、加速器或放射核素,核辐射会危害人体,使得该法难以普及应用。周长祥等人^[38]通过泡沫塑料预富集中子活化测定铜矿中的铼,Re 的检出限 1×10^{-8} g/g。

2.6 X 射线荧光光谱分析(XRF)

X 射线荧光光谱法(XRF)具有分析快速、范围广及适合多元素同时测定等特点,不受样品形式和元素化学状态的限制,可以实现无损分析。现已普遍应用于矿样的现场测试,以及合金、植物等中铼的测定。分析准确性的关键取决于样品是否均匀、与标样是否一致及基体效应,故制样、校正等成为了 XRF 研究的重点问题。包生祥等人^[39]用 X 射线荧光光谱法测定行波管用钨铼合金中高含量铼,测定结果准确。

2.7 色谱法

色谱技术的发展使得高效液相色谱法(HPLC)在分离和测定金属离子方面得到广泛重视,该方法具有样品处理简单、干扰少等优点,易于实现样品的快速、连续、灵敏的分析测定。牟婉君等人^[39]采用反相液相色谱法,在 Agilent ODS C_{18} (4.6 mm \times 150 mm) 色谱柱上,以 $V(\text{甲醇}):V(\text{水})=3:7$ 的溶液为流动相,流速为 0.8 mL/min,在紫外检测波长 254 nm 处对铼进行分离和检测。 ReO_4^- 浓度在 1~40 mg/L 范围内与峰面积线性关系较好,相对标准偏差(RSD)为 1.11%。此外,反向离子对色谱法、金属的反相薄

层色谱法在铼有机化合物的分离分析中均显现了良好的应有前景。

2.8 电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)

电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)是现代分析化学领域中不可缺少的分析技术,具有操作简单、灵敏度和稳定度高、精密度高、检出限低、基体效应和第三元素干扰小等优异的分析性能,被广泛应用于土壤、冶金、地质、水质样品等中痕量和常量元素的精密分析及基础研究中。李延超等人^[40]采用 ICP-AES 法测定加压氧化钼精矿浸出液中铼的含量,检出限为 0.05~30 $\mu\text{g/mL}$,RSD 小于 2.0%。Manshilin 等人^[41]应用 ICP-AES 法测定了废催化剂中的铼、铂等元素,此法可测定样品含量为 2 mg/g 的铼。

ICP-AES 法在多种元素同时测定和动态线性范围等方面有着其它分析方法无法取代的优势,但灵敏度低于 ICP-MS 元素分析技术,且不能用于同位素的测定。此外,还有共振激光烧灼法、共振瑞利散射光谱法(RRS)、多道石墨炉原子吸收光谱法等^[42]。

3 结 语

离子交换法富集铼虽然操作简便、污染小、回收率高,但其选择性差,还需要在树脂的筛选方面做出探索。溶剂萃取法是目前应用最广泛的方法,其价格便宜、工艺条件相对成熟,但需要消耗大量易燃且有毒的萃取剂,而且萃取时常会产生第三相,造成分离效果不好。如果将简便除杂工艺和萃取法相结合,也可以大大提高铼的纯度和提取率。液膜法简单、选择性好、无污染,若探索出适合于工业化的工艺条件,将会有非常好的应用前景。萃淋树脂兼有离子交换与萃取法等分离技术的优点,高富集、高选择性、无污染,给传统的铼提纯技术带来了革新。

目前,分光光度法因操作简便、选择性较好、准确度高和成本经济等优点,在铼的分析中至今仍占据主要地位。但其灵敏度较低、检出限过高,已经不能满足当下对测定结果高精度的要求。精密仪器法如 ICP-MS、ICP-AES 等,由于样品处理简单、准确度高正逐渐成为主要检测手段,对铼特别是痕量铼的测定有很好的灵敏度、选择性好、分析快速,铼的测定新方法如 HPLC、RRS 等,也都有一定程度的研

究进展.但仪器前期投入昂贵,应用受到限制.因此,探求经济实用的铼的检测方法将是今后研究的方向.

参考文献:

- [1] 杨尚磊,陈艳,薛小怀,等.铼(Re)的性质及应用研究现状[J].上海金属,2005,27(45):45-47.
- [2] 邱朝辉,钟宏,曹占芳,等.铼的分离分析方法研究进展[J].稀有金属与硬质合金,2010,38(1):58.
- [3] 于世昆,伍艳辉.铼的分离提取研究进展[J].中国铝业,2010,34(2):7-9.
- [4] LESZCZYNSKA-SEJDA K, MAJEWSKI T, BENKE G, et al. Production of high-purity ammonium perrhenate for W-Re-Ni-Fe heavy alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 513: 347-352.
- [5] 蒋小辉,罗明标,陈国贞,等.用D(302-II)树脂从地浸采铀溶液中分离铼的研究[J].有色金属:冶炼部分,2013(7):44-46.
- [6] 陈昆昆,吴贤,王治钧.D296树脂从含铼酸性溶液中吸附铼的研究[J].有色金属:冶炼部分,2015(7):43-45.
- [7] 邹振球,周勤俭.钼精矿石灰焙烧-N235萃取工艺提取铼[J].矿冶工程,2002,22(1):79-81.
- [8] 曹占芳,钟宏,姜涛,等.德兴铜矿辉钼矿精矿的选择性电氧化浸出与分离过程[J].中国有色金属学报,2013,23(8):2290-2294.
- [9] 牟婉君,宋宏涛,王静.铼的萃取分离和测定[J].中国铝业,2008,32(4):34-36.
- [10] MUSHTAQ A, BUKHARI T H, KHAN I U. Extraction of medically interesting ^{188}Re -perrhenate in methyl ethyl ketone for concentration purposes [J]. Radiochimica Acta, 2007, 95(9): 535-537.
- [11] LESZCZYNSKA-SEJDA K, BENKE G, KROMPIEC S, et al. Synthesis of perrhenic acid using solvent extraction [J]. Hydrometallurgy, 2009, 95(3): 325-332.
- [12] 刘军深,蔡伟民.萃淋树脂技术分离稀散金属的研究现状及展望[J].稀有金属与硬质合金,2003,31(4):36-38.
- [13] 游健男.萃淋树脂分离技术的发展及其在湿法冶金分析中的应用[J].湿法冶金,2000,19(1):57-63.
- [14] 宋金如,龚治湘,刘淑娟,等.P350萃淋树脂吸附铼的性能研究及应用[J].华东地质学院学报,2003,26(3):274-278.
- [15] LUČANÍKOVÁ M, KUČERA J, ŠEBESTA F. New extraction chromatographic material for rhenium separation [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2008, 277(2): 479-485.
- [16] 王献科,李玉萍,李莉芬.液膜分离富集测定铼[J].中国铝业,2000,24(4):38-41.
- [17] 李玉萍,李莉芬.液膜法提取高纯铼[J].中国铝业,2001,25(6):23-26.
- [18] 周迎春,刘兴江,张启俭.活性炭吸附高铼酸铵性质的研究[J].表面技术,2004,33(1):40-41.
- [19] 周迎春,冯世红,周艳君.活性炭吸附法分离铼钼的研究[J].化工生产与技术,2003,10(5):7-9.
- [20] 周长祥,王卿,姜怀坤,等.泡沫塑料预富集中子活化测定铜矿中的铼[J].分析化学,2005,33(5):657-659.
- [21] 王永斌,黄建芬,栗威,等.硫代硫酸钠沉淀法富集铜冶炼废酸中铼的实验研究[J].岩石矿物学,2015,34(1):110-116.
- [22] 杨坤彬,华宏全,李文勇,等.从铜冶炼废酸中沉淀铼的试验研究[J].湿法冶金,2014,33(1):50-52.
- [23] 孟吟琪,吴贤,陈昆昆,等.碱熔-水浸法从高温和金废料中回收铼[J].有色金属工程,2014,4(4):44-46.
- [24] 许佳. Laminaria japonica 褐藻改性微球的构筑及铼铈分离研究[D]. 沈阳:辽宁大学,2013.
- [25] 李叶霞.天然壳聚糖磁性复合材料的构筑及吸附铼铈研究[D]. 沈阳:辽宁大学,2014.
- [26] 李永梅.稀散元素铼(VII)的示波极谱分析法研究[J].河北能源职业技术学院学报,2004(1):95-96.
- [27] CHOPABAEVA N N, ERGOZHIN E E, TASMAGAMBET A T, et al. Sorption of perrhenate anions by lignin anion exchangers [J]. Solid Fuel Chemistry, 2009, 43(2): 99-102.
- [28] 宋如晟,钟鸣,涂建球.安徽省金寨县沙坪沟钼矿中贵重分散元素铼的分析[J].安徽地质,2011,21(1):32-34.
- [29] 金珊,吕娟,谢莉.分光光度法测定铂-铼催化剂中铼含量[J].分析试验室,1999,18(6):42-44.
- [30] 王玉静,窦艳梅,张娜,等.稀有元素铼的光度分析[J].沈阳师范大学学报:自然科学版,2004,22(1):42-45.
- [31] 周煜,谭艳山,朱利亚,等.硫脲光度法测定粗铼酸钾中铼时钼干扰的消除[J].冶金分析,2013,33(9):57.
- [32] 蒋克旭,邓桂春,赵丽艳,等.催化动力学光度法测定钼样品中痕量铼[J].分析化学,2009,37(2):312.
- [33] 邓桂春,吕改芳,鞠政楠,等.催化动力学分光光度法测定钼冶炼烟尘吸收液中铼[J].理化检验:化学分册,2012,48(10):1137-1139.
- [34] TAGAMI K, UCHIDA S. Rhenium contents in Japanese river waters measured by isotope dilution ICP-MS and the relationship of re with some chemical components [J]. Nucl Sci Technol, 2008(supplement 6):128-132.
- [35] 形智,漆亮.阴离子交换树脂分离同位素稀释等离子体质谱法快速测定地质样品中的铼[J].分析实验室,2014,33(10):1229-1232.
- [36] MALINOVSKY D, RODUSHKIN I, AXELSSON M D, et al. Determination of rhenium and osmium concentrations in

molybdenite using laser ablation double focusing sector field ICP-MS [J].Journal of Geochemical Exploration, 2004,81(1):71-79.

[37] 王礼兵,屈文俊,李超,等.负离子热表面电离质谱法测量铼的化学分离方法研究[J].岩矿测试,2013, 32(3):402-408.

[38] 包生祥,王守绪,马丽丽,等.行波管用钨铼合金中高含量铼的 X 射线荧光光谱测定 [J]. 光谱学与光谱分析, 2005,25(3):460- 461.

[39] 牟婉君,宋宏涛,王静.高效液相色谱法测定铼[J].分析实验室,2008,27(12):211-212.

[40] 李延超,李来平,周恺,等.加压氧化钼精矿浸出液中铼的测定[J].分析实验室,2014,33(9):1030 -1033.

[41] MANSILIN V I,VINOKOUROV E K,KAPELYUSHNY S A.Determination of Pt,Pd,Rh in the samples of spent catalyst by atomic emission spectrometry with inductively coupled plasma [J].Methods and Objects of Chemical Analysis,2009,4(1):97-100.

[42] 梁波,沈宏伟,罗明标,等.铼的分析方法研究进展[J].江西化工,2014 (3):78.

The research progress of rhenium separation and enrichment
and analytical methods

WANG Dan,WANG Bao qing,LIAO Yaohua,REN Baozeng
College of Chemical engineering and Energy,Zhengzhou University,Zhengzhou 450001, China

Abstract: The research progress about the enrichment of rhenium in recent years are reviewed in this paper. The characteristics of the different separation methods,such as ion-exchange,solvent extraction,separation with extractive resins,liquid membrane separation,activated carbon absorption,and so on,are elaborated.The analytical methods of rhenium are also made a more comprehensive presentation in this paper. The characteristics and the application range of the different methods was discussed and outlook of the rhenium development finally.

Key words: rhenium;separation and enrichment;analytical methods;outlook