

表面铼离子印迹聚合物载体研究进展

黄宗朋, 沈裕军, 彭俊, 周小舟, 蔡云卓, 沈凌畅

(长沙矿冶研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012)

摘要: 与传统的离子印迹技术相比, 表面离子印迹技术利用螯合作用、静电作用等多种作用力将模板离子固定在功能单体中, 再将功能单体接枝在载体表面, 不仅可以获得更加均一的反应结合位点, 而且解决了传统离子印迹材料制备过程中存在的包覆深、洗脱难的问题, 进一步提高了表面离子印迹聚合物载体的选择性识别能力和选择性吸附能力。对近年来报道的表面铼离子印迹聚合物载体进行了分类阐述, 主要包括硅材料、生物质材料和功能化纳米材料印迹复合膜等, 指出了表面铼离子印迹聚合物在制备和应用过程中存在的一些不足, 并对其未来的发展方向和应用前景进行了展望。

关键词: 表面离子印迹; 载体; 铼离子; 选择性吸附; 研究进展

中图分类号: TF841.8; TG146.4⁺18 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2023)01-0083-06

引用格式: 黄宗朋, 沈裕军, 彭俊, 等. 表面铼离子印迹聚合物载体研究进展[J]. 中国材料进展, 2023, 42(1): 83-88.

HUANG Z P, SHEN Y J, PENG J, *et al.* Research Progress of Surface Rhenium Ion-Imprinted Polymer Carrier[J]. Materials China, 2023, 42(1): 83-88.

Research Progress of Surface Rhenium Ion-Imprinted Polymer Carrier

HUANG Zongpeng, SHEN Yujun, PENG Jun, ZHOU Xiaozhou,
CAI Yunzhuo, SEHN Lingchang

(Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co., Ltd., Changsha 410012, China)

Abstract: Compared with the traditional ion imprinting technology, surface ion imprinting technology uses various forces, such as chelation and electrostatic interactions, to fix the template ions in the functional monomer, and then graft the functional monomer on the surface of the carrier. Uniform reaction binding sites solve the problems of deep coating and difficult elution in the preparation process of traditional ion imprinted materials, and further improve the selective recognition ability and adsorption ability of the surface ion imprinted polymer carrier. The surface rhenium ion-imprinted polymer carriers reported in recent years are classified and explained, mainly including silicon materials, biomass materials and functional nanomaterials, *etc.* Some deficiencies in the preparation and application of surface rhenium ion-imprinted polymers are noted, and looked forward to its future development direction and application prospects.

Key words: surface ion imprinting; carrier; rhenium ion; selective adsorption; research progress

1 前言

铼是一种优质的战略性矿产资源, 因具有良好的塑性、机械稳定性及耐热冲击性等性能, 被广泛应用于航

空航天、石油化工、电子工业、医疗等领域^[1]。目前, 我国主要从钼精矿氧压浸出液、钼/铜焙烧烟尘以及烟气洗涤污酸和废石油催化剂浸出液中提取铼^[2]。然而, 这些含铼溶液成分复杂、杂质含量高、离子种类繁多, 用传统分离方法从中分离和富集铼的难度较大, 存在工艺流程长、试剂耗量大、成本较高的问题。研究表明, 采用离子印迹技术制备的离子印迹聚合物载体对目标离子能够选择性识别, 对目标离子的吸附与富集十分有效^[3-5]。但传统的离子印迹聚合物是通过本体聚合法^[6]、沉淀聚合法^[7]等方法得到的, 合成过程中存在结合位点分布不均一、周期长且吸附率低的问题。表面离子印迹技术是在传统离子印迹技术基础上, 把离子识别位点建

收稿日期: 2021-06-21 修回日期: 2021-08-24

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(5200041112);
国家重点研发计划“固废资源化”重点专项(2019YFC1904200)

第一作者: 黄宗朋, 男, 1996 年生, 硕士研究生

通讯作者: 彭俊, 男, 1987 年生, 高级工程师, 硕士生导师,
Email: pengjgy@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202106020

立在载体表面,从而使表面离子印迹聚合物具有选择性识别强、结合速度快和吸附容量高等优点,有利于提高表面印迹聚合物的选择性识别和吸附/解吸循环性能^[8]。

近年来,国内外许多学者进行了表面铼离子印迹聚合物制备的研究,根据载体不同可划分为不同类型,通常载体为硅基材料、生物质材料、功能化纳米材料、磁性 Fe_3O_4 等^[9]。本文归纳了近年来不同载体类型的表面铼离子印迹聚合物,并对其吸附机理、制备方法、吸附容量等进行了阐述,总结了表面铼离子印迹材料在制备和应用过程中存在的问题,并对其未来发展方向和应用前景进行了展望。

2 表面铼离子印迹聚合物的选择性吸附机理

表面铼离子印迹聚合物是以铼酸根离子为模板,将与铼酸根离子具有结构互补性的功能单体结合在载体表面,再将铼酸根离子洗脱,从而获得对铼酸根离子具有多重作用位点的印迹材料。铼离子印迹聚合物分布大量的印迹空穴,这些空穴在尺寸大小、空间结构及结合位点等方面与铼酸根离子高度吻合^[10-13],使得表面铼离子印迹聚合物载体对铼酸根离子具有特异性识别能力,能够高效选择性地吸附复杂含铼溶液中的铼酸根离子。表面铼离子印迹聚合物吸附机理如图 1 所示。

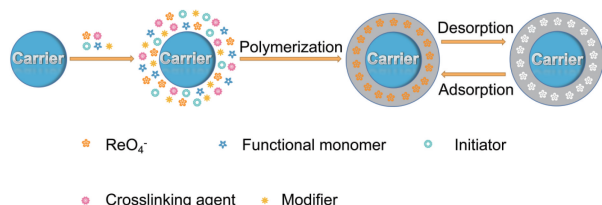


图 1 表面铼离子印迹聚合物吸附机理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of adsorption mechanism of surface rhenium ion-imprinted polymer

3 表面铼离子印迹聚合物载体研究进展

3.1 硅基表面铼离子印迹聚合物

目前常见的表面离子印迹聚合物载体主要以硅基材料为主^[14-16],硅胶表面含有大量的羟基,能够与含有氨基、羧基等功能基团的偶联剂发生接枝反应,通常能够形成具有双(多)功能单体的功能微粒,从而显著提高活性位点对 Re(VII) 的作用灵敏度^[17],强化与 Re(VII) 的作用能力。此外, Re(VII) 的印迹空穴建立在硅胶表面,能达到快速吸附与解离铼的效果。

Shan 等^[18]利用表面印迹技术,以戊二醛为交联试剂、廉价硅酸钠为硅前体,将高密度活性位点($\text{C}=\text{N}$ —基团)引入氨基功能化的二氧化硅表面,制备了化学改性

的席夫碱功能化表面铼离子印迹聚合物 ($\text{SS-0.5h-0.5N-}\alpha\text{GA}$),并应用于水溶液中 Re(VII) 的吸附。结果表明,在一定的酸性范围内, SS-0.5h-0.5N-15GA 对含有 Cu(II) 、 Zn(II) 、 Mn(II) 、 Fe(III) 、 Mo(VI) 、 Re(VII) 的共存离子溶液中的 Re(VII) 具有较好的选择性吸附作用,其吸附过程符合准二级动力学模型和朗缪尔吸附等温模型。当溶液 $\text{pH}=3$ 时,最大铼吸附容量为 270.13 mg/g 。此外,该表面铼离子印迹聚合物具有良好的吸附/解吸循环再生性能,经 4 次循环后,铼的吸附容量无明显下降。图 2 是 SS-0.5h-0.5N-15GA 对 Re(VII) 的吸附机制示意图。

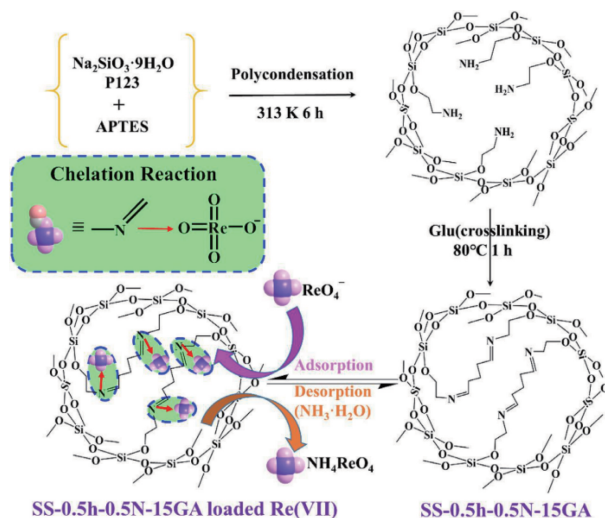


图 2 SS-0.5h-0.5N-15GA 对 Re(VII) 的吸附机制示意图^[18]

Fig. 2 Schematic diagram of the adsorption mechanism of Re(VII) on SS-0.5h-0.5N-15GA ^[18]

3.2 生物质材料表面铼离子印迹聚合物

生物质材料是指动物、植物以及微生物等生命体衍生得到的材料,主要是由 C, H, O 这 3 种元素组成的有机高分子物质材料,常见生物质材料有秸秆、纤维素、褐藻、壳聚糖等^[19-23]。我国生物质资源丰富,将废弃的生物质资源与矿产资源废水中金属离子的回收利用结合起来,对我国环境保护和资源循环利用具有重大意义^[24]。

Xiong 等^[25]采用表面离子印迹和高分子交联相结合的方法制备了如图 3 所示的 Mo(VII) 离子印迹乙二胺接枝壳聚糖 I-EDA-CS。结果表明,当加入的钼酸铵和壳聚糖的质量比为 $(1\sim3) \text{ g} : 25 \text{ g}$ 时,所制备的印迹聚合物有利于实现更强的 Re(VII) 吸附能力。当溶液温度为 303 K 、初始铼浓度为 500 mg/L 时,利用表面离子印迹和高分子交联相结合的方法所制备的印迹聚合物对 Re(VII) 的最大吸附量为 418.98 mg/g ,远高于同等条件下的非印迹吸附剂对 Re(VII) 的最大吸附量 (83.92 mg/g)。在竞争离

子存在的情况下, 该吸附剂 I-EDA-CS 对 Re(VII) / Cu(II) 、 Re(VII)/Zn(II) 、 Re(VII)/Mn(II) 和 Re(VII)/Fe(II) 的最大选择性系数分别为 1.29, 1.90, 2.31 和 1.81, 表明了此吸附剂在 Cu(II) 、 Zn(II) 、 Mn(II) 、

Fe(II) 等离子存在的情况下具有对 Re(VII) 的选择性吸附能力。研究表明, 铼的选择性吸附主要归因于“腔”中胺基和 Re(VII) 阴离子配合物之间的螯合作用和静电作用。目前该技术已经成功应用于工业废水中铼的分离回收。

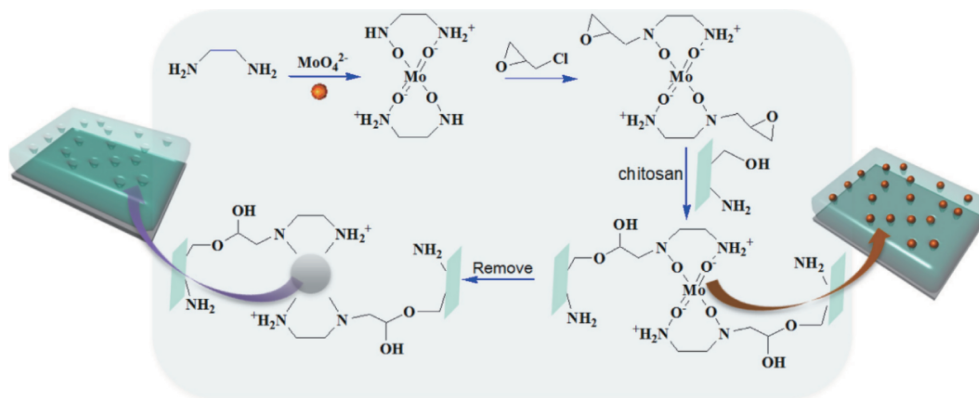


图 3 吸附剂 Mo(VII) 离子印迹乙二胺接枝壳聚糖(I-EDA-CS)的制备示意图^[25]

Fig. 3 Schematic diagram of preparation of adsorbent Mo(VII) ion-imprinted ethylenediamine grafted chitosan (I-EDA-CS)^[25]

Li 等^[26]通过调节壳聚糖的交联作用, 以 Re(VII) 为模板, 通过表面离子印迹技术制备了一种包裹甲基三辛基氯化铵(N263)且具有核壳结构的离子凝胶胶囊(CSN)(如图 4 所示)。当溶液 pH 值为 2~12 时, CSN 对 Re(VII) 具有良好的吸附性能, 且 CSN 对 Re(VII) 的吸附行为符合朗缪尔等温吸附方程, 最大铼吸附容量为 222 mg/g。将 CSN 置于钼铼溶液中进行选择性吸附实验时发现, 当溶液 $\text{pH} > 3.5$ 时, CSN 对 Mo(VI) 的吸附能力差, 通过控制溶液 pH 值为 4~12, 可实现 Re(VII) 和 Mo(VI) 的有效分离, 分离因子 $\beta_{\text{Re/Mo}}$ 高达 1000~50 000。

3.3 功能化纳米材料表面铼离子印迹聚合物

纳米吸附剂具有较高的比表面积和活性位点密度,

被广泛应用于材料、化工、环境等研究领域^[27]。但由于纳米吸附剂本身的吸附选择性相对较低, 国内外许多学者通过在纳米材料中加入活性基团对其进行改性^[28-30], 从而提高对目标离子的吸附性与选择性。

Shu 等^[31]以高铼酸铵离子为模板, 通过“一锅法”自由基聚合和季铵化制备了表面铼离子印迹磁性微球(IIP-3)。相比于非离子印迹微球 $\text{Fe}_3\text{O}_4 @ \text{SiO}_2 - \text{C} = \text{C}$, IIP-3 具有清晰的核壳结构(如图 5 所示), 其吸附效率随表面氮含量的增加而增加, 吸附过程遵循朗缪尔等温吸附模型以及动力学准二级模型。当反应温度为 298.15 K、 $\text{pH} = 6$ 时, 该印迹微粒的最大铼吸附容量为 62.8 mg/g。

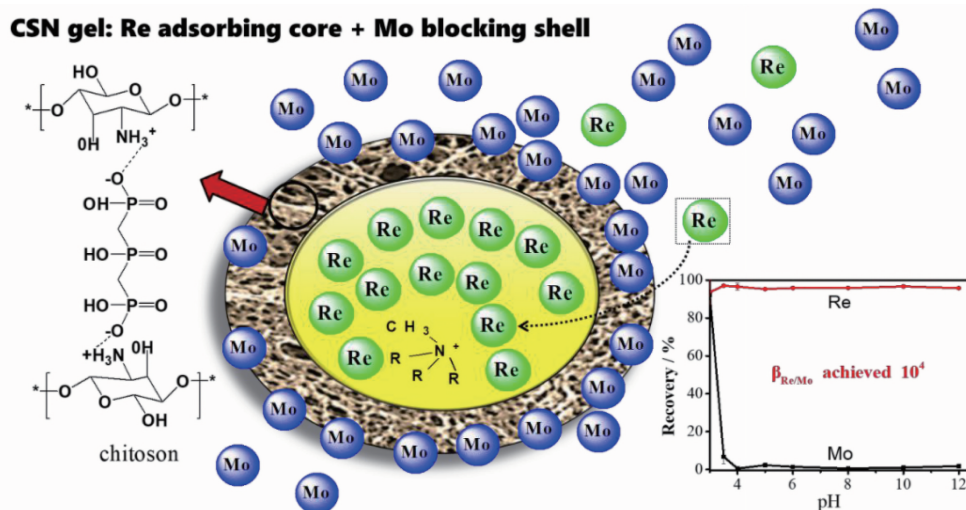


图 4 离子凝胶胶囊(CSN)的制备及对 Re(VII) 和 Mo(VI) 的吸附分离示意图^[26]

Fig. 4 Schematic diagram of preparation of ionic gel capsule (CSN) and its adsorption and separation of Re(VII) and Mo(VI) ^[26]

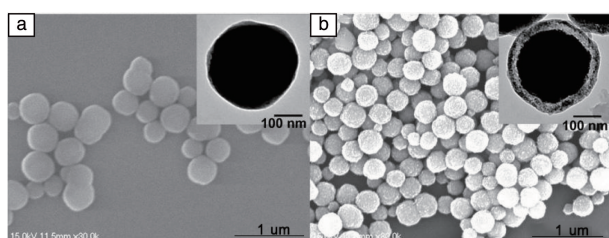


图 5 非离子印迹微球 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2-\text{C}\equiv\text{C}$ (a) 和表面来离子印迹磁性微球 IIP-3 (b) 的 SEM 照片, 右上角插图分别为微球的高倍 TEM 照片^[31]

Fig. 5 SEM images of non-ionic imprinted microsphere $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2-\text{C}\equiv\text{C}$ (a) and surface ionic imprinted magnetic microsphere IIP-3 (b), and the inserts give the TEM images of the microspheres at high magnification^[31]

3.4 印迹复合膜表面铼离子印迹聚合物

利用表面离子印迹技术对复合膜进行修饰, 在膜表面引入识别位点, 可在保留复合膜比表面积大、通透性好、孔隙率高的优点基础上, 赋予印迹复合膜对目标离子的高选择性分离能力。膜的表面印迹通常是将印迹聚合物通过物理或化学键合作用负载在膜表面, 表面离子

印迹复合膜已成为印迹聚合物的研究热点^[32-35]。

Zhang 等^[36]以 Re(VII) 为离子模板, 将聚 N,N -二乙基丙烯酰胺 (PDEA) 接枝到印迹聚合物上, 合成了一种新型的热敏表面铼离子印迹复合膜 Re-TRICM。Re-TRICM 具有对 ReO_4^- 的热响应性识别位点, 实验结果表明, 它能在不同温度下调节印迹孔穴结构, 在 ReO_4^- 的选择性分离和纯化方面表现出优异的性能。当温度为 35°C 、平衡吸附时间为 2 h 时, Re-TRICM 对 Re(VII) 的最大吸附量为 30.96 mg/g , $\text{ReO}_4^{2-}/\text{MnO}_4^-$ 的选择性分离系数为 19.3, Re(VII) 的脱附率为 78.3%。经 10 次吸附/解吸循环后, Re-TRICM 对铼的吸附量降至原吸附量的 61.3%, $\text{ReO}_4^{2-}/\text{MnO}_4^-$ 选择性分离系数降至 13.3。Zhao 等^[37]在 Re-TRICM 的基础上合成了热敏表面铼离子印迹复合膜 (Re-ICMs), 相比于 Re-TRICM 具有更优异的循环吸附/解吸性能, 在温度为 35°C 、平衡吸附时间为 2 h 的条件下经过 10 次吸附/解吸循环, Re-ICMs 对铼的吸附容量为原有吸附容量的 73.5%, $\text{ReO}_4^{2-}/\text{MnO}_4^-$ 选择性分离系数由 24.5 降至 15.9。图 6 是印迹复合膜 Re-ICMs 的制备过程, 以及交联、接枝和柔性接枝 PDEA 的结构对比示意图。

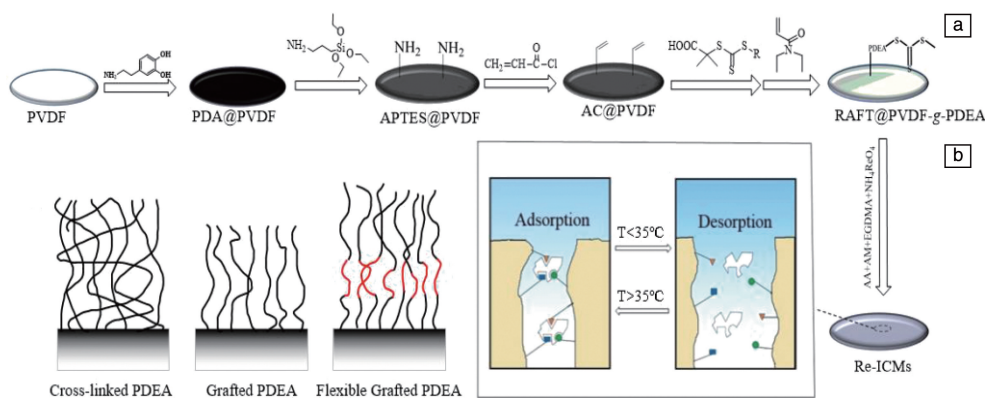


图 6 热敏表面铼离子印迹复合膜 (Re-ICMs) 的制备过程 (a) 以及交联、接枝和柔性接枝 PDEA 的结构对比示意图 (b)^[37]

Fig. 6 The preparation process of composite film with rhenium ion imprinting on thermosensitive surface (Re-ICMs) (a) and the differences of cross-linked, grafted and flexible grafted PDEA (b)^[37]

3.5 其他表面铼离子印迹聚合物

Zhang 等^[38]采用 N -乙烯基吡咯烷酮 (NVP) 和丙烯酸 (AA) 作为功能单体, ReO_4^- 作为模板离子, 双氧水-抗坏血酸作为引发剂, N,N -亚甲基双丙烯酰胺 (NMBA) 作为交联剂, 通过水溶液聚合方法制备铼离子印迹聚合物。考察并优化了不同的操作条件对铼离子印迹聚合物吸附性能与分离效果的影响。结果表明, 当 NMBA、AA、双氧水、抗坏血酸与 NVP 物质的量的比分别为 2.0, 1.9, 0.03 和 0.003 时, 在聚合反应温度 35°C 、聚合反应时间 24 h 时, 所制备的铼离子印迹聚合物对铼的吸附容量和

$\text{Re(VII)}/\text{Mn(VII)}$ 分离系数分别为 6.89 mg/g 和 2.31, 而非离子印迹聚合物对铼的吸附容量和 $\text{Re(VII)}/\text{Mn(VII)}$ 分离系数仅为 1.67 mg/g 和 0.22。此外, 该铼离子印迹聚合物还具有良好的吸附/解吸循环性能, 经 7 次循环后, 铼的吸附容量无明显下降。

Chen 等^[39]通过可逆加成-断裂链转移法 (RAFT) 将 PDEA 作为智能热敏嵌段引入离子印迹聚合物的基质中, 制备了一种新型智能铼离子印迹聚合物 (SIIP), 如图 7 所示。同时, 在相同的反应条件下合成了不含 PDEA 嵌段的铼离子印迹聚合物 (IIP)。PDEA 的作用是在不同温

度下通过可逆的溶胶-凝胶相变来调整压印腔的形状,从而改变印迹聚合物的吸附性能和选择性。结果表明,SIIP和IIP对 ReO_4^- 的吸附容量分别为12.10和11.17 mg/g, $\text{Re(VII)}/\text{Mn(VII)}$ 分离系数分别为3.25和3.00,经11次吸附/解吸循环后,SIIP和IIP对 ReO_4^- 的吸附容量分别降至8.01和4.49 mg/g, $\text{Re(VII)}/\text{Mn(VII)}$ 分离系

数分别下降至2.05和1.09,表明SIIP对 ReO_4^- 的吸附容量和循环性能均优于IIP。此外,在二次高温合金浸出液中,SIIP对 ReO_4^- 的吸附容量和循环性能也优于IIP。SIIP和IIP对 ReO_4^- 的吸附容量分别为0.6779和0.298 mg/g,解吸率分别为74.30%和64.23%,经吸附/解吸循环后Re的纯度分别升至62.94%和37.17%。

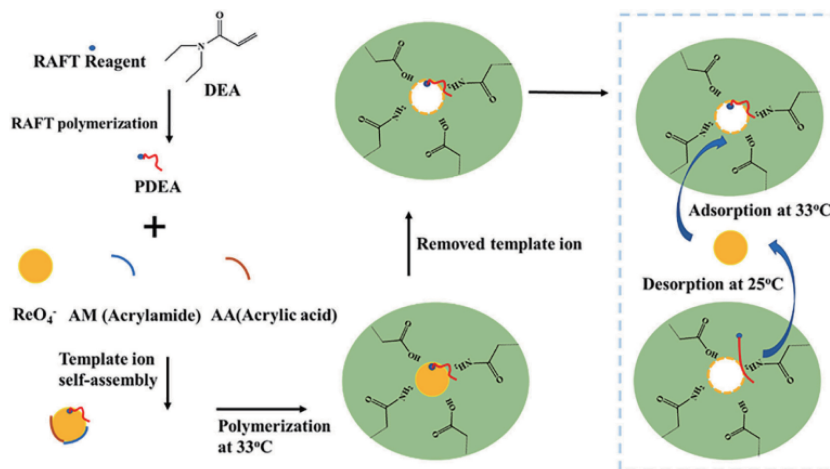


图7 用于 ReO_4^- 吸附的新型智能铼离子印迹聚合物SIIP的制备示意图^[39]

Fig. 7 Schematic diagram of preparation of new smart rhenium ion imprinted polymer SIIP for ReO_4^- adsorption^[39]

4 结 语

近年来表面离子印迹技术的相关研究发展迅猛。尤其是在高杂质含量、高浓度溶质、强酸强碱等极为苛刻的环境下,表面离子印迹材料能够快速、高效地富集溶液中极低浓度的目标离子。相比于本体聚合和悬浮聚合等传统离子印迹技术,表面离子印迹技术及其新型载体材料的应用都已成为当前离子印迹聚合物的研究热点。

如何高效、经济地从溶液中分离回收极低浓度的铼,一直是相关行业的难点。利用表面离子印迹技术,选择合适的载体材料合成表面铼离子印迹聚合物,使之对 Re(VII) 具有特异识别选择性与优良的结合性,有望实现铼从复杂低浓度含铼溶液中的选择性吸附/分离。其中,印迹材料载体的选择尤为重要,应综合考虑聚合物的比表面积、机械强度、热稳定性等特性。通常选用比表面积大、表面易于修饰、热稳定性好的载体材料,将结合位点固定于载体表面,提高物质迁移速度,降低非特异性吸附。本文对以硅胶、壳聚糖、纳米微球、复合膜等载体合成的表面铼离子印迹聚合物进行了介绍,拓宽了铼的分离提取思路,有利于丰富铼离子有机配位化学理论。尽管表面铼离子印迹材料展现出了良好的选择性和高度识别能力,但其制备和应用过程中仍存在问题:

(1)目前的表面铼离子印迹技术还处于应用基础研

究阶段,对更深层的机理性研究较缺乏,工业化应用较少。

(2)制备表面铼离子印迹材料过程中所使用的单体、引发剂、交联剂以及溶剂大部分都是有机物,价格昂贵且具有一定的挥发性和毒性,易对人体造成危害并造成环境污染。且制备过程通常在有机相中,可能导致在实际水溶液吸附过程中对铼离子识别机制存在差异,影响铼离子印迹聚合物的性能。

综上,在今后的研究中,要深入研究铼离子印迹材料对铼离子的选择性吸附机理,从吸附动力学和热力学角度探究吸附选择性能,开发价格低廉、毒性低的环境友好型功能单体、新型载体材料以及工艺简单的制备方法,进一步制备出比表面积更大、选择性识别性能更好、循环稳定性更高、吸附性能更优异的新型表面铼离子印迹材料,加快表面铼离子印迹技术产业化进程,早日实现对表面铼离子印迹材料的工业化应用,促进我国铼资源的绿色循环利用。

参考文献 References

- [1] 彭真, 罗明标, 花榕, 等. 湿法冶金[J], 2012, 31(2): 76-80.
PENG Z, LUO M B, HUA R, *et al.* Hydrometallurgy[J], 2012, 31(2): 76-80.
- [2] 李红梅, 贺小塘, 赵雨, 等. 贵金属[J], 2014, 35(2): 77-81.
LI H M, HE X T, ZHAO Y, *et al.* Precious Metals[J], 2014, 35

- (2): 77–81.
- [3] 梁琦, 赵宏, 刘伟峰, 等. 材料工程[J], 2020, 48(10): 39–47.
LIANG Q, ZHAO H, LIU W F, *et al.* Journal of Materials Engineering[J], 2020, 48(10): 39–47.
- [4] HUANG R J, SHAO N, HOU L, *et al.* Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects[J], 2019, 566: 218–228.
- [5] ZHAO H, LIANG Q, YANG Y Z, *et al.* Separation and Purification Technology[J], 2021, 265(3): 118513.
- [6] GUO Z S, ZHANG F, LI D, *et al.* Journal of Molecular Structure [J], 2020, 1221: 128887.
- [7] SHAMSIPUR M, BESHARATI-SEIDANI A. Reactive and Functional Polymers[J], 2011, 71(2): 131–139.
- [8] 张磊, 徐斐, 袁敏, 等. 应用化工[J], 2018, 47(2): 351–354+364.
ZHANG L, XU F, YUAN M, *et al.* Applied Chemical Industry[J], 2018, 47(2): 351–354+364.
- [9] 余清风, 解庆林, 钟溢健, 等. 离子印迹吸附材料载体研究进展 [C]//2017 中国环境科学学会科学与技术年会论文集. 厦门: 中国环境科学学会, 2017: 1170–1175.
YU Q F, XIE Q L, ZHONG Y J, *et al.* Research Progress of Ion-imprinted Adsorption Material Carrier[C]//Proceedings of the 2017 Annual Meeting of Science and Technology of the Chinese Society for Environmental Sciences. Xiamen: Chinese Society for Environmental Sciences, 2017: 1170–1175.
- [10] LIU P, JIA W W, OU X J, *et al.* ACS Omega[J], 2021, 6(14): 9973–9973.
- [11] 徐峰, 张坤, 阴凤琴, 等. 应用化学[J], 2021, 38(2): 123–135.
XU F, ZHANG K, YIN F Q, *et al.* Chinese Journal of Applied Chemistry[J], 2021, 38(2): 123–135.
- [12] ZHANG X Y, JIA W W, LI D H, *et al.* Journal of Polymer Research [J], 2020, 27(8): 1–13.
- [13] MOHAMMED M, IBRAHIM Y, AHMED E. Polymer International [J], 2020, 69(1): 31–40.
- [14] HUANG R F, MA X G, LI X, *et al.* Journal of Colloid and Interface Science[J], 2018, 514: 544–553.
- [15] SHAMSIPUR M, FASIHI J, ASHTARI K. Analytical Chemistry[J], 2007, 79(18): 7116–7123.
- [16] ZHENG X D, PAN J M, GAO L, *et al.* Microchimica Acta[J], 2015, 182(3/4): 753–761.
- [17] LIU Y, MENG X G, LIU Z C, *et al.* Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids[J], 2015, 31(32): 8841–51.
- [18] SHAN W J, WANG D D, ZHANG Z T, *et al.* Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers[J], 2019, 100: 277–284.
- [19] 刘立华, 杨正池, 赵露. 中国材料进展[J], 2018, 37(2): 100–108+125.
LIU L H, YANG Z C, ZHAO L. Materials China[J], 2018, 37(2): 100–108+125.
- [20] ELSAYED N H, ALATAWI R A S, MONIER M. Carbohydrate Polymers[J], 2021, 256: 117509–117509.
- [21] ZHENG X D, BIAN T T, ZHANG Y, *et al.* Cellulose[J], 2020, 27(2): 455–467.
- [22] MARIA V D, IONEL A D, MARIA M L, *et al.* Carbohydrate Polymers[J], 2018, 186: 140–149.
- [23] HU Z H, WANG Y F, AHMED M O, *et al.* International Journal of Biological Macromolecules[J], 2018, 107: 453–462.
- [24] 李文静, 黄龙, 唐和清, 等. 中国有色金属学报[J], 2020, 30(1): 214–226.
LI W J, HUANG L, TANG H Q, *et al.* The Chinese Journal of Non-ferrous Metals[J], 2020, 30(1): 214–226.
- [25] XIONG Y, SONG Y, TONG Q, *et al.* Separation and Purification Technology[J], 2017, 177: 142–151.
- [26] LI W J, DONG X L, ZHU L H, *et al.* Chemical Engineering Journal [J], 2020, 387: 124078.
- [27] ZHAO L J, ZHAO F Q, ZENG B Z. Biosensors and Bioelectronics [J], 2014, 62(2): 19–24.
- [28] SONG H, ZHANG L, YU F, *et al.* Electrochimica Acta[J], 2016, 208: 10–16.
- [29] ARABI M, GHAEDI M, OSTOVAN A, *et al.* Journal of Colloid and Interface Science[J], 2016, 480(10): 232–239.
- [30] LIANG Y T, HE J, HUANG Z P, *et al.* Microchimica Acta[J], 2019, 187(16): 117–122.
- [31] SHU X W, SHEN L, WEI Y Q, *et al.* Journal of Molecular Liquids [J], 2015, 211: 621–627.
- [32] WANG Z, KONG D L, QIAO N, *et al.* Applied Surface Science[J], 2018, 457(11): 981–990.
- [33] WU Y L, YAN M, LU J, *et al.* Chemical Engineering Journal[J], 2017, 309: 98–107.
- [34] YU C, LU J, DAI J W, *et al.* Journal of Colloid and Interface Science [J], 2020, 572(1): 340–353.
- [35] ZHANG J, WANG C Y, NIU Y H, *et al.* Sensors & Actuators: B. Chemical[J], 2017, 249(11): 747–755.
- [36] ZHANG J, WANG R T, OU X J, *et al.* Separation and Purification Technology[J], 2021, 259: 118165.
- [37] ZHAO S Y, WANG R T, OU X J, *et al.* Talanta[J], 2021, 235(12): 122791–122794.
- [38] LIU P, JIA W, X OU, *et al.* ACS Omega[J], 2020, 5(38): 24356–24366.
- [39] CHEN Z C, OU X J, JIA W W, *et al.* Reactive and Functional Polymers[J], 2021, 164: 104929.

(编辑 张雨明)