



金属离子印迹聚合物的研究进展

聂卫光¹, 徐自力^{2*}

- (1. 北京化工大学材料科学与工程学院, 北京 100029;
2. 北京石油化工学院材料科学与工程学院, 北京 102617)

摘要:离子印迹技术以特定的目标分子为模板分子, 通过交联聚合, 合成对该目标分子具有特异选择性结合的聚合物。离子印迹聚合物由于制备简单、结构稳定、识别性强、吸附速率快、吸附容量大等特点, 而被广泛应用于离子分离与富集、污水处理、传感器识别、固相萃取等领域。针对离子印迹聚合物种类的多样性, 对其制备原理、制备方法及优缺点、表征方法及应用进行了综述, 并对其发展进行了展望。

关键词:离子印迹聚合物; 制备方法; 应用

分子印迹技术又称分子模板技术或烙印技术, 是指以特定的目标分子为模板, 通过聚合反应合成对该目标分子具有特异选择性聚合物一项技术。分子印迹源于免疫学, 1972 年 Wulff 等^[1]首次报道了第一个人工合成印迹聚合物。此后经过几十年的努力, 分子印迹技术发展趋于成熟, 并在固相萃取、模拟酶、生物传感器等领域显示出优异的应用潜力。

离子印迹技术是分子印迹技术的分支。1976 年 Nishide 等^[2]以聚 4-乙烯吡啶为功能配体制备了最早的离子印迹聚合物, 其对目标离子优异的选择性, 引起国内外学者的广泛关注, 并得到了极大的发展。

1 离子印迹聚合物

离子印迹聚合物(Ion imprinted polymers, IIP)是指当模板分子为阴、阳离子时, 利用分子印迹技术制备的对目标离子有专一选择性的聚合物。

1.1 聚合体系

1.1.1 模板分子 目前模板分子主要集中在过渡金属、重金属以及金属络合物(如 Pb(II) ^[3,4]、 Zn(II) ^[5,6]、 Cu(II) ^[7,8]、 Co(II) ^[9]、 Ni(II) ^[10]等); 对主族元素(如铯 Sr(II) ^[11]、铯 Cs(I) ^[12])及阴离子(如磷酸盐 (PO_4^{3-}) ^[13]、 CN^- ^[14]类))的研究还处于起步阶段, 对铜系和铜系金属的研究仅局限于几种常见离子(如镧 (La) ^[15]、铒 (Er) ^[16]、钕 (Nd) ^[17]、钍 Th(IV) ^[18]、铀 U(VI) ^[19]等)。

1.1.2 功能单体 目前功能单体主要有: (1)氨基二乙酸衍生物; (2)烷基磷酸类; (3)杂环弱碱类, 如乙烯基吡啶乙烯基咪唑; (4)羧酸类, 如乙烯基苯甲酸、甲基丙烯酸等。此外还有一些学者自己制备了一些功能单体。Yoshida 等^[20]制备了 3 种新型功能单体: 二磷酸二苯基十二烷基酯(DDPA)、二磷酸十二烷基酯(n -DDP)、二油酰基磷酸(DOLPA), 并制备了 Zn^{2+} 离子印迹聚合物。

1.1.3 交联剂的选择 目前常用的交联剂有: (1)醛类, 如: 戊二醛、乙二醛等; (2)冠醚类; (3)聚乙二醇类等。

1.1.4 溶剂 选择的溶剂首先必须能充分溶解功能单体和模板; 其次, 能为印迹高聚物提供多孔结构。

10.14028/j.cnki.1003-3726.2015.07.001

收稿: 2014-11-15; 修回: 2015-01-22;

作者简介: 聂卫光(1988—), 男, 硕士生, 研究方向为金属离子印迹聚合物的研究; Tel: 15510381209; E-mail: nwg1125@163.com;

* 通讯联系人, Tel: 010-81292208; E-mail: xuzili@bipt.edu.cn.

1.2 金属离子印迹聚合物的制备方法

1.2.1 本体聚合 本体聚合是将模板分子功能单体、交联剂、引发剂等按一定比例溶解在惰性溶剂中,然后通过聚合反应得到共聚物。赖晓绮等^[21]采用本体聚合法合成的钇(III)离子印迹聚合物吸附速率较快,吸附平衡时间为 60min,对钇离子有较好的选择吸附性,且重复使用性良好。李路娟等^[22]制备的铅离子印迹聚合物吸附速率更快,40min 达到吸附平衡;其饱和吸附容量为 22.53mg/g;重复使用 10 次后吸附量为原来的 89%。Gulay 等^[23]合成的 Cr(VI)印迹聚合物对 Cr(VI)最大吸附量为 3.31mmol/g;与 Ni(II)相比,印迹聚合物对 Cr(VI)有较好的吸附性。与竞争离子相比,杨利峰等^[10]制备的镍离子印迹聚合物对 Ni(II)离子具有较好的选择性,其最大吸附容量为 1.26mg/g。解西京等^[24]研究了 pH 值、吸附时间对 Zr-IIPs 吸附性能的影响。研究表明,印迹聚合物具有很好的选择识别性。

本体聚合法操作简单、周期短和易于实施,但其产物为块状,结合位点包埋过深,后处理复杂,且在粉碎过程中会毁坏一些印迹位点,会导致其印迹效果下降。

1.2.2 分散聚合 该方法在反应前将印迹分子、功能单体、引发剂、交联剂等加入到溶有分散剂的介质中,在搅拌作用下引发自由基聚合得到聚合物。Say 等^[25]采用分散聚合法制备出粒径在 150~200 μm 的 Cu^{2+} 印迹聚合物微球,并用于溶液中 Cu^{2+} 的吸附-解吸附,显示出良好的选择性。石光等^[26]制备的铜离子壳聚糖交联多孔微球在 40 $^{\circ}\text{C}$ 、pH=4 时饱和吸附容量为 1.89mmol/g,可重复使用 5 次。Dakova 等^[27]结合 FAAS 对 Cu(II)-印迹微球性的性能进行了研究,其检测限可达 0.001mol/L(3 σ),相对于 Ni(II)和 Co(II)的抗干扰吸附性良好。

分散聚合法工艺简单,制备的印迹聚合物粒径分布均匀、单分散性好,但这种方法制备的印迹聚合物交联度不高,受表面活性剂及分散剂的影响较大,目前研究的较少。

1.2.3 乳液聚合 乳液聚合法是先将模板分子、功能单体、交联剂溶于有机溶剂中,然后将有机体系转化成正相或反相乳液,经交联聚合制得球形聚合物。苏蕾等^[28]采用反相微乳液聚合得到的 Cu(II)印迹微球吸附速率较快,30min 达到吸附平衡,与 Ni^{2+} 相比,印迹聚合物对 Cu(II)有很好的识别性。朱建华等^[29]制备的 Cu(II)印迹聚合物对 Cu(II)的吸附效率高于 Mn(II)、Co(II)和 Ni(II)等竞争离子,具有较好的吸附选择性。王吉德等^[30]采用无皂乳液聚合法合成的铅离子印迹共聚物的吸附平衡时间为 2.5h。与价态相似的竞争离子相比,印迹聚合物表现出优异的选择性。李欣等^[31]制备的粉末状 Cu(II)-IIPs 的吸附平衡时间大约为 80min,印迹聚合物对 Cu(II)的选择性远大于 Mn(II)、Co(II)、Ni(II),可以有效地去除饮用水中的 Cu(II)。

1.2.4 沉淀聚合 沉淀聚合法是先制备均相的模板分子、功能单体、交联剂和引发剂的混合液,然后通过自由基聚合得到印迹聚合物。张朝晖等^[32]以 8-羟基喹啉镓为模板制备的镓离子印迹聚合物 150min 即可达到吸附平衡,最大吸附量 $Q_{\text{max}}=1373\text{g/g}$ 。与非印迹聚合物相比具有较高的选择吸附性;作为固相萃取填料时对镓离子的回收率高达 97.36%。李丽萍等^[33]以 Cu^{2+} -邻菲罗啉配合物为模板制备的铜离子印迹聚合物,对 Cu^{2+} 不仅具有较好的吸附选择性,而且用其制备的固相萃取柱对低含量 Cu^{2+} 的溶液具有较高的回收率和重现性。Taher 等^[34]对 Pb^{2+} 纳米离子印迹聚合物进行了表征,结果显示得出聚合物的颗粒范围在纳米级别(50~500nm)。

沉淀聚合法得到的聚合物微球表面干净,不需要进行研磨等操作;但该方法受溶剂黏度的影响较大,因此该方法对于溶剂的选择有很大的要求,需根据实际需要选择合适的溶剂。

1.2.5 悬浮聚合 悬浮聚合法是将单体溶于有机溶剂中,然后将其与含有稳定剂的极性溶剂形成悬浊液,最后引发聚合反应获得印迹聚合物。王丽敏等^[35]制备的 Cd^{2+} 印迹聚合物,并结合 FAAS 检测技术对富集后的 Cd^{2+} 进行测定,IIPs 在 20min 内可达吸附平衡,其检出限(3 σ)为 0.76 $\mu\text{g/L}$ 。Candan 等^[36]制备用于去除人体血浆中过量的镉离子的磁力镉离子印迹微球,其最大吸附容是 48.8 $\mu\text{mol/g}$,对 Pb^{2+} 和 Zn^{2+} 抗干扰性好。

该方法可以对微球大小进行控制,但是粒径分布较宽,因此该方法制备的聚合物对其应用有了很大

的限制,不能用于一些精密领域。

1.2.6 原位聚合 原位聚合法是在色谱柱或毛细管中直接合成分子印迹聚合物作为固定相的方法。康敬万等^[37]合成的用于电化学传感器的铜离子印迹聚合物的检测限为 1×10^{-7} mol/L,并且对 Co^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Ni^{2+} 的抗干扰性良好。侯琳熙等^[38]制备的 Cu^{2+} -IIPs 的最大吸附容量为 126mg/g,检测限 (3σ) 为 1.5ng/mL,可用作固相萃取材料。Ma 等^[39]在极薄玻璃片上制备的镉离子聚合膜的检测范围为 0.04~44.5 $\mu\text{mol/L}$,检测限为 0.039 $\mu\text{mol/L}$ 。

该方法不但使印迹微球的比表面积增大、粒径分布更均匀,而且也有利于提高色谱柱柱效和降低柱压,因此具有很强的实用性。

1.2.7 表面印迹与溶胶-凝胶技术 表面印迹法是将结合位点统一建立在具有可接近性良好的固相载体表面上,通过表面修饰或涂层,然后进行交联聚合。郭萌萌等^[40]以 Cd^{2+} 为模板分子,采用表面印迹技术制备了 Cd^{2+} 离子印迹硅胶材料。其吸附容量为 30.8mg/g;与竞争离子相比,印迹聚合物对 Cd^{2+} 有很好的选择识别性且重复使用性较好。相对 Cd^{2+} 与 Zn^{2+} ,安富强等^[41]制备的铜离子印迹聚合物对 Cu^{2+} 的选择性系数分别为 83.79 与 80.21,具有较好的选择识别性能。薛庆华^[42]制备的钡离子印迹聚合物的吸附量大约是非印迹聚合物的 3 倍。郭佳佳等^[16]制备的铈离子印迹聚合物的饱和吸附量为 58.01mg/g;均具有较好的选择识别性。陈美希等^[43]采用表面印迹与溶胶-凝胶技术在二氧化硅微球表面制备的 Cd^{2+} 印迹硅胶的最大吸附容量为 17.3mg/g,且印迹聚合物对模板 Cd^{2+} 具有较强的选择识别性,重复使用性良好。丁兰岚等^[44]制备的锌离子印迹聚合物与非印迹的静态吸附容量分别为 12.87 和 4.22mg/g,印迹吸附剂有较好的识别性和重复使用性。Gao 等^[45]对合成的镉离子印迹硅胶颗粒吸附性能进行研究,与 Cr^{2+} 和 Pb^{2+} 相比表现出了高的选择性。Li 等^[46]研究了有机-无机硅胶吸附材料的吸附性能,其最大吸附容量可达 1.14mmol/g,对锌离子的抗干扰性能良好。Fang 等^[47]制备用作固相萃取吸附剂的硅胶颗粒吸附剂,对其吸附性能进行了研究,其最大吸附容量为 284 $\mu\text{mol/g}$,检测限 (3σ) 为 0.07 $\mu\text{g/L}$,对 Pb(II) 的相对选择系数高达 220 以上。

该方法有效解决了传统方法结合位点不均一、识别动力学慢、结合位点包埋过深等问题;目前将利用表面分子印迹技术识别快,结合位点不宜包埋和溶胶凝胶法结合位点易控制等优点将两种方法结合起来成为目前国内外研究的热点。

1.3 表征方法

在不同的制备条件下,聚合物的结构、稳定性等均有所不同,为确保制备条件的最优化和确定产物符合要求,有必要对聚合物进行表征。常用的表征方法有表面形貌表征、结构成份表征和结合性能表征。郭萌萌^[40]和范洪涛等^[48]用扫描电镜制分别对制备的镉离子印迹聚合物和钴离子印迹硅胶材料进行了形貌分析,结果显示印迹聚合物表有很多凹凸不平的印迹空穴,提高了其吸附容量及识别能力。吕海霞等^[49]则采用红外光谱与 X 射线衍射分析了镉离子印迹聚合物的结构组成。结果显示,壳聚糖成功键合到了硅胶上,并且破坏了羧甲基壳聚糖的微晶结构,提高了其吸附量及识别性能。买迪娜木等^[50]采用紫外光谱证明了制备的铜离子印迹聚合物结构中铜离子与丙烯腈发生了络合作用。洪英等^[51]采用 XRD 证明了印迹聚合过程破坏了壳聚糖分子链的规整性,降低了其结晶能力,提高了可结合位点数,增加了对锌离子的吸附量。郭佳佳等^[16]制备的铈离子印迹聚合物具有较大 BET 比表面积 (186.42 m^2/g) 和较小的 BJH 吸附平均孔径 (4V/A) (为 6.59nm),增加了印迹硅胶的吸附容量。苏现伐等^[52]采用静态吸附实验对铅离子印迹聚合物的吸附选择性进行了表征,与非印迹聚合物相比,印迹聚合物对铅离子有较好的选择识别性,特异吸附容量为 0.766mg/g。王玲玲等^[53]采用原子吸附法对铜离子印迹聚合物的吸附性能进行了研究,得出印迹聚合物的饱和吸附容量为 50.3mg/g,具有较好的选择识别性。

1.4 应用

离子印迹聚合物因具有独特的选择识别性、抗化学腐蚀性、抗恶劣环境等优点,而被广泛应用于固相萃取、膜分离、传感器、水处理、生物医药等领域。

李丽萍等^[33]将制备的 Cu(II)印迹聚合物应用于固相萃取柱,其对 $5.0\mu\text{g/mL}$ 的 Cu^{2+} 的回收率为 89.7%,相对标准偏差为 4.7%($n=5$)。张朝晖等^[32]将制备的镓离子印迹聚合物作为固相萃取填料应用于粉煤灰中金属镓的分离和富集,具有较好的特异吸附性和选择性,回收率达 97.36%。Lü 等^[54]制备了镉离子表面印迹聚合物固相萃取剂,用于水样中的镉离子的分离与预富集;对自来水中镉离子的回收率达 98%以上。钟世安等^[55]将 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Mg^{2+} 为底物,做分离试验,结果显示制备的印迹膜对铜离子有较好的选择渗透性。Chen 等^[56]制备的铜离子印迹多孔膜的最大吸附量为 79.3mg/g ,与竞争离子 Zn(II)和 Cd(II)相比,印迹多孔膜对 Cu(II)有较高的吸附量。Yang 等^[57]制备了一种具有较高选择性和灵敏性的新型铜离子印迹传感器,该离子印迹传感器对铜离子具有较高的灵敏度、较短的响应时间(6min)和较低的检测限。Fu 等^[58]制备的 Hg^{2+} 印迹的玻碳电极传感器对 Hg^{2+} 具有良好的选择性,可用于自然水样本中 Hg^{2+} 的高效测定。Matsui 等^[59]制备的一种分子印迹聚合物用于选择催化苯乙酮和苯甲醛的碳-碳键反应,进而生成查耳酮。其催化活性是一般催化剂的八倍,而且在强烈的反应条下仍能保持原有的活性。陈星等^[60]将铅离子印迹聚合物应用于实际水样中 Pb^{2+} 的分离富集,其富集倍数高达 40.5 倍,有很好的应用前景。利斌等^[61]以牛血清蛋白为模板分子制备了牛血清蛋白印迹聚合物,其对模板分子的吸附量是非印迹聚合物的 21.9 倍,并且有很好的选择吸附性。

2 展 望

目前尽管离子印迹聚合物有较好的应用前景,但还存在一些问题:

(1)离子印迹聚合物目前主要集中在对人体有害的过渡金属离子,而对主族离子研究较少;

(2)由于阴离子与水易于形成氢键、受 pH 值影响较大和阴离子的疏水性等原因,目前主要研究对象是阳离子,而阴离子的研究很少;

(3)在蛋白质等的印迹过程中,金属离子一般只能应用于含有裸露组氨酸基的蛋白质,使得金属离子的印迹技术在蛋白质印迹中的应用受到了一定限制。在生物大分子方面的识别研究的种类还较少,期望能扩展到核酸、多糖甚至超分子水平的细胞与病毒的印迹;

(4)金属离子印迹聚合物还主要应用于对目标分子的分离富集方面,对金属离子的分析检测领域涉及较少。

未来离子印迹聚合物可能会朝以下几个方面发展:

(1)由于表面印迹技术克服了传统的印迹聚合物后处理复杂,结合位点被包埋过深等缺点,因此进一步发展表面印迹技术,制备出识别性能好,工艺简单的离子印迹聚合物是其一个发展方向;

(2)将离子印迹技术应用到一些检测技术中,借助光信号和电信号的响应来定量分析检测金属离子;

(3)对主族金属离子、常见的阴离子和稀有金属离子的研究将得到进一步的发展;

(4)现有的交联剂及功能单体比较单一,应用范围小,因此合成或者发现新的交联剂及功能单体也有待解决;

(5)在水处理方面,金属离子印迹聚合的吸附量及选择性还有待提高,期望在未来应用到实际的污水处理中;

(6)在医学领域的应用将得到进一步发展。

随着科技的发展,相信以上问题都会逐步得到解决,离子印迹技术也会得到更好的发展,在实际的应用中将会起到重要的作用。

参 考 文 献:

- [1] Wuff G, Sarhan A. Tetrahedron Lett, 1973, 14(44): 4329~4332.
- [2] Nishide H, Tsuchida E. Macromol Chem Phys, 1976, 177(8): 2295~2310.
- [3] 王丽敏,周美华,景志娟,钟艾夫. 分析测试学报, 2009, 28(2): 199~202.

- [4] Wang L M, Zhou M H, Jing Z J, Zhong A F. *Microchimica Acta*, 2009, 165(3/4): 367~372.
- [5] Zhao J C, Han B, Zhang Y F, Wang D D. *Anal Chim Acta*, 2007, 603(1): 87~92.
- [6] Zhai Y H, Liu Y W, Chang X J, Ruan X F, Liu J L. *React Funct Polym*, 2008, 68(1): 284~291.
- [7] 李欣, 朱建华, 齐晶瑶. 给水排水, 2007, 33(5): 35~37.
- [8] Jo S H, Lee S Y, Park K M, Yi S C, Kim D, Mun S. *J Chromatogr A*, 2010, 1217(45): 7100~7108.
- [9] 马向霞, 李文友, 何锡文, 张玉奎. 化学学报, 2005, 63(18): 1681~1685.
- [10] 杨利峰, 王群英, 张随成, 胡圣虹. 分析测试学报, 2011, 30(2): 135~139.
- [11] Pan J M, Zou X H, Yan Y S, Wang X, Guan W, Han J, Wu X Y. *Appl Clay Sci*, 2010, 50(2): 260~265.
- [12] Zhang Z L, Xu X H, Yan Y S. *Desalination*, 2010, 263(1/3): 97~106.
- [13] Özkütük E B, Ersöz A, Denizli A, Say R. *J Hazard Mater*, 2008, 157(1): 130~136.
- [14] Say R, Ersöz A, Türk H, Denizli A. *Sep Purif Technol*, 2004, 40(1): 9~14.
- [15] 李西中, 孙彦平. 太原理工大学学报, 2007, 38(4): 316~319.
- [16] 郭佳佳, 苏庆德, 凌飞, 储大勇, 黄颖. 功能材料, 2010, 41(S2): 288~291.
- [17] Guo J J, Cai J B, Su Q D. *J Rare Earth*, 2009, 27(1): 22~27.
- [18] Büyüktiryaki S, Say R, Ersöz A, Birlik E, Senizli A. *Talanta*, 2005, 67(3): 640~645.
- [19] Gladis J M, Rao T P. *Microchim Acta*, 2004, 146(3/4): 251~258.
- [20] Yoshida M, Goto M, Furusaki S, Uezu K. *Macromolecules*, 1999, 32(4): 1237~1243.
- [21] 赖晓绮, 杨远奇, 薛珺. 化学学报, 2009, 67(8): 863~868.
- [22] 李路娟, 刘慧君, 张磊. 化学通报, 2011, 74(6): 539~544.
- [23] Bayramoglu G, Arica Y M. *J Hazard Mater*, 2011, 187(1/2/3): 213~22.
- [24] 解西京, 董静, 王鹏程, 柳松. 高校化学工程学报, 2011, 25(4): 682~687.
- [25] Say R, Birlik E, Ersoz A, Yilmaz F, Gedikbey T, Denizli A. *Anal Chim Acta*, 2003, 480(2): 251~258.
- [26] 石光, 胡小艳, 郑建泓, 孙丰强. 离子交换与吸附, 2010, 26(2): 103~110.
- [27] Ivanka D, Irina K, Ivo I, Ventsislava G, Biseria E, George G. *Anal Chim Acta*, 2007, 584(1): 196~203.
- [28] 苏蕾, 吴根华, 汪竹青. 安庆师范学院学报(自然科学版), 2010, 16(1): 81~84.
- [29] 朱建华, 李欣, 强亮生. 高等学校化学学报, 2006, 127(10): 1853~1855.
- [30] 肖开提·阿布力孜, 阿不都热衣木·苏巴洪, 王吉德, 司马义·努尔拉. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(6): 1702~1706.
- [31] 李欣, 朱建华, 齐晶瑶. 给水排水, 2007, 33(5): 35~37.
- [32] 张朝晖, 张华斌, 胡宇芳, 李艳杰, 聂丽华. 化学通报, 2011, 74(1): 72~77.
- [33] 李丽萍, 杨赞金, 陶晋飞, 刘鹏, 曹秋娥. 云南民族大学学报, 2012, 21(1): 18~21.
- [34] Alizadeh T, Amjadi S. *Hazard J. Mater*, 2011, 190(1/2/3): 451~459.
- [35] 王丽敏, 周美华, 宫建龙, 袁静超, 陈燕波. 工业水处理, 2009, 29(8): 75~77.
- [36] Candan N, Tüzmen N, Andac M, Andac C A, Say R, Denizli A. *Mat Sci Eng C*, 2009, 29(1): 144~152.
- [37] 康敬万, 张会妮, 王志华, 李晓宁. 西北师范大学学报: 自然科学版, 2008, 44(5): 48~52.
- [38] 侯琳熙, 郭智勇, 王邃. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(10): 2446~2449.
- [39] Prabhakaran D, Ma Y H, Nanjo H, Matsunaga H. *Anal Chem*, 2007, 79(11): 4056~4065.
- [40] 郭萌萌, 章东升, 范雪蕾, 阎峰. 功能材料, 2013, 44(6): 800~804.
- [41] 安富强, 高保娇, 李刚. 高分子学报, 2007, 1(4): 366~373.
- [42] 薛庆华. 理化检验与化学分册, 2009, 45(7): 783~786.
- [43] 陈美希, 曹晓晴, 余自友, 张岗, 范洪涛, 孙挺. 高分子材料科学与工程, 2012, 28(8): 163~166.
- [44] 丁兰岚, 龙素群, 辉永庆, 邓义, 林涛. 环境科学与技术, 2013, 36(5): 28~32.
- [45] Gao B J, An F Q, Zhu Y. *Polymer*, 2007, 48(8): 2288~2297.
- [46] Li F, Jiang H Q, Zhang S S. *Talanta*, 2007, 71(4): 1487~1493.
- [47] Fang G Z, Tan J, Yan X P. *Anal Chem*, 2005, 77(6): 1734~1739.
- [48] 范洪涛, 隋殿鹏, 赵立兴, 任泽岩, 袁自云, 周勤, 孙挺. 高等学校化学学报, 2011, 32(12): 2902~2907.
- [49] 吕海霞, 安洪涛. 高分子材料科学与工程, 2013, 29(9): 136~139.
- [50] 买迪娜木·阿不都瓦依提, 司马义·努尔拉, 肖开提·阿布力孜. 分析试验室, 2013, 32(7): 84~87.
- [51] 洪英, 钟泽辉, 郭宾. 化工进展, 2011, 30(6): 1296~1301.
- [52] 苏现伐, 石慧丽, 朱桂芬, 高燕哺, 樊静. 冶金分析, 2009, 29(8): 16~20.
- [53] 王玲玲, 李春香, 邓月华, 杨艺雄, 闫永胜. 冶金分析, 2010, 30(2): 17~22.

- [54] Lü H X, An H T, Xie Z H. *Int J Biol Macromol*, 2013, 56: 89~93.
- [55] 钟世安, 袁周率, 李维, 乔蓉, 糖炒富. *应用化学*, 2008, 25(8): 989~991.
- [56] Chen J H, Lin H, Luo Z H, et al. *Desalination*, 2011, 277(1/3): 265~273.
- [57] Yang Z P, Zhang C J. *Sens Actuators B*, 2009, 142(1): 210~215.
- [58] Fu X C, Wu J, Nie L, Xie C G, Liu J H, Huang X J. *Anal Chim Acta*, 2012, 720: 29~37.
- [59] Matsui J, Nicholls I A, Karube I, et al. *J Org Chem*, 1996, 61(16): 5414~5417.
- [60] 陈星, 杨朝霞, 张朝晖, 饶维, 刘玉楠, 陈红军, 胡晓云, 蔡蓉, 聂利华. *分析化学研究报告*, 2013, 41(9): 1406~1412.
- [61] 利斌, 王艺峰. *高分子材料科学与工程*, 2010, 26(2): 125~127.

Research Progress of Metal Ion Imprinted Polymer

NIE Wei-guang¹, XU Zi-li^{2*}

(1. *Material Science and Engineering College of Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;*

2. *Material Science and Engineering College of Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)*

Abstract: Ion imprinting technology is a technique to design artificial polymers with a predetermined selectivity and specificity for a given target molecule by cross-linking polymerization in the presence of the target molecule (template). Due to the advantages such as simple preparation method, stable structure, excellent recognition property, rapid adsorption ability and large adsorption capacity, ion imprinted polymer is widely used in ion separation, enrichment, sewage treatment, sensing identification fields, solid phase extraction etc. For the diversity of ion imprinted polymer, the principles, preparation methods and its strong points and shortcomings, analysis methods and applications of ion imprinted polymer are reviewed. The future development of ion imprinted polymer are prospected as well.

Key words: Ion imprinted polymer; Preparation methods; Applications