

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2016.12.026

光学活性聚酰胺酰亚胺的合成研究进展

许杰, 杨云峰, 李宇飞, 刘亚坚

(中北大学理学院, 太原 030000)

摘要:介绍了光学活性聚酰胺酰亚胺的3种主要合成方法,即酰氯法、二异氰酸酯法及亚胺二羧酸法,讨论并总结了三种方法的优缺点,综述了以D-氨基酸和L-氨基酸为手性源的光学活性聚酰胺酰亚胺的合成研究现状,介绍了光学活性聚酰胺酰亚胺的性能如旋光性、热稳定性及可生物降解性等。

关键词:光学活性;聚酰胺酰亚胺;合成方法;研究进展

中图分类号: O631.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2016)12-0136-05

Research Advance on Synthesis of Optically Active Poly(amide-imide)s

Xu Jie, Yang Yunfeng, Li Yufei, Liu Yajian

(School of Science, North University of China, Taiyuan 030000, China)

Abstract: Three synthetic methods of optically active poly(amide-imide)s including the methods of acyl chloride, diisocyanate and imide-diacid were described, and both the advantages and disadvantages of these methods were discussed. The present status on synthesis of optically active poly(amide-imide)s derived from L-amino acids and D-amino acids were reviewed. The performance of optically active poly(amide-imide)s were introduced such as optical rotation, thermal stability and biodegradability and so on.

Keywords: optically active; poly(amide-imide); synthesis; research advance

聚酰胺酰亚胺是一种具有优异性能的耐高温非晶热塑性工程塑料,被广泛用于薄膜、纤维及光电子和介电材料等领域^[1-4]。虽然聚酰胺酰亚胺开发较早,但这类材料仍是高分子领域的研究重点之一。近年来,将手性氨基酸引入聚酰胺酰亚胺,获得了具有光学活性的聚酰胺酰亚胺。手性单体的引入,能够诱导聚合物形成某种高次结构,从而利用其卓越的热和化学稳定性,实现与光学活性有关的应用^[5]。这种新型功能材料不仅具有传统聚酰胺酰亚胺的优良特性,还在手性识别与分离、光学材料等领域有着巨大的应用潜力,已成为聚酰胺酰亚胺领域新的研究热点。笔者主要介绍以氨基酸为手性源合成光学活性聚酰胺酰亚胺的三类方法,即酰氯法、异氰酸酯法及亚胺二羧酸法,同时介绍了光学活性聚酰胺酰亚胺的性能,并综述了光学活性聚酰胺酰亚胺的合成研究现状。

1 酰氯法

采用光学活性二酰氯单体和二胺缩聚制备光学活性聚酰胺酰亚胺的方法即为酰氯法。其制备一般首先由酸酐与具有光学活性的氨基酸反应合成光学活性二酸,在氯代试剂作用下进一步得到光学活性二酰氯单体,最后与二胺单体进行缩聚得到光学活性聚酰胺酰亚胺。

S. Mallakpour等^[6]以L-蛋氨酸和结构不对称的5-(2,5-二氧四氢呋喃)-3-甲基-3-环己烯-1,2-二碳酸酐

在冰乙酸中回流得到光学活性二酰氯单体,并与芳香二胺在N-甲基吡咯烷酮(NMP)中缩聚,得到主链中含不对称结构的聚酰胺酰亚胺,产物在N₂中失重5%时的温度为295~327℃;而后,S. Mallakpour等^[7]以相同方法合成了结构对称的4,4'-(六氟异丙基)-N,N'-双(邻苯二甲酰-L-蛋氨酸)二酰氯,并将其与芳香二胺缩聚,得到主链含对称结构的聚酰胺酰亚胺,产物在N₂中失重5%时的温度为329~337℃,因其主链中含对称结构且含氟,该产物比含非对称结构的光学活性聚酰胺酰亚胺有着更好的热稳定性。此外,S. Mallakpour等^[8-9]还将N,N'-(均苯二甲酰亚胺)-双-L-异亮氨酸二酰氯等5种光学活性二酰氯单体分别与含酚基二胺在N,N'-二甲基乙酰胺(DMAc)中缩聚,得到了球型纳米结构的左旋聚酰胺酰亚胺,产率在84%~89%之间,并利用环氧丙烷吸收了对环境有害的副产物HCl。由于酚羟基在合适的电位可以发生氧化还原反应,S. Mallakpour等^[10]还进一步通过循环伏安法测定了分子链中所含酚羟基电流对电位的变化,并间接确定了产物聚合度的相对大小。其中,基于L-异亮氨酸合成的光学活性聚酰胺酰亚胺的氧化峰值最大,为3.19 μA,即基于L-异亮氨酸制得的光学活性聚酰胺酰亚胺含酚羟基最多,其聚合度相对较高,这为

联系人: 杨云峰,博士,教授,主要从事功能高分子材料的研究

收稿日期: 2016-09-13

同类型反应中 *L*-氨基酸的选择提供了参考。

微波加热直接作用于分子,加热均匀,反应体系不存在温度梯度,反应所需时间短^[11],在现代有机合成中得到广泛应用。A. Hajipour 等^[12]通过微波加热,使(3,3',4,4'-二苯甲酮二甲酰亚胺)-双-*L*-氨基酸二酰氯与含杯芳烃的二胺在不同溶剂中聚合,得到了两类不同聚合物。其中,在二氯乙烷/三乙胺(TEA)中得到的产物为聚酯酰胺,而在 NMP 中得到的产物为聚酰胺酰亚胺。所得的光学活性聚酰胺酰亚胺侧基含有杯芳烃结构,特性黏度在 0.18~0.26 dL/g 之间,其热失重温度较传统聚酰胺酰亚胺低约 50℃^[13]。虽然其热稳定性还有待提高,但由于杯芳烃结构对金属离子有着强烈的络合及有效的识别作用^[14],所制备的聚酰胺酰亚胺对一些有毒的金属离子,尤其是 Hg²⁺ 有很好的吸附作用,室温下 1 h 对 Hg²⁺ 的吸附率最高可达 53.39%。

Z. Rafiee 等^[15]在 *N*, *N'*-(均苯二甲酰亚胺)-双-*S*-缬氨酸二酰氯和芳香二胺的缩聚反应中,利用 TEA 作为催化剂,使反应温度由 100℃降低到室温(25~30℃),同时还吸收了反应中释放的 HCl,极大地改善了反应条件,并得到了特性黏度为 0.57 dL/g 的左旋聚酰胺酰亚胺,因此 TEA 被认为是比环氧丙烷更经济、更有效的催化剂。在以均苯四酸二酐-双-*L*-丙氨酸二酰氯和芳香二胺为原料反应时,用 TEA 作催化剂,在室温下即得到了旋光度为 -87°的聚酰胺酰亚胺,产率为 83%,产物在 N₂ 中失重 5% 时的温度为 303℃^[16],与传统聚酰胺酰亚胺相近。

虽然酰氯法制备流程长、工艺复杂,而且在实施过程中需要对 HCl 进行处理,但由于酰氯单体反应活性高,所以通过这种法可获得分子量较高的光学活性聚酰胺酰亚胺。

2 二异氰酸酯法

二异氰酸酯法是以光学活性酰亚胺二酸和二异氰酸酯为反应单体,通过二者缩聚制得光学活性聚酰胺酰亚胺,产物的主链与酰氯法产物的主链在结构上普遍存在差异。其中,光学活性二酸同样以酸酐和氨基酸在冰乙酸中回流制得,酸酐多为偏苯三酸酐。

2.1 传统溶剂的二异氰酸酯法

S. Mallakpour 等以 *N*-偏苯三酸亚胺-*S*-缬氨酸为原料,在 DMAc 中将其与二苯甲烷二异氰酸酯通过微波加热^[17-18]、直接高温和程序升温三种方法缩聚,得到聚酰胺酰亚胺^[19]。微波加热耗时短,但聚合物特性黏度不稳定;而直接高温缩聚会导致反应体系受热不均,聚合物分子量分布宽,影响产物性能;程序升温法的聚合体系受热均匀,产物特性黏度稳定。在此基础上,他们以程序升温法先后在 60~90℃、反应 4 h,100℃反应 2 h,120℃反应 2 h,得到侧基含异丁基的聚酰胺酰亚胺,旋光度最高达到 +76.04°,特性黏度在

0.29~0.35 dL/g 范围内^[20]。由于大侧基的引入增加了分子链的柔性,因此产物可在室温直接溶于 NMP、DMAc、*N*, *N*-二甲基甲酰胺(DMF)等常见的极性溶剂,相对于在室温只能溶于浓硫酸的传统聚酰胺酰亚胺,该产物有着更好的溶解性。

杨志勇等^[21]使用结构对称的联苯型酰亚胺光学活性二酸与二苯甲烷二异氰酸酯,在程序升温条件下,先后在 80℃和 120℃下分别反应 3 h 和 2 h,在大量甲醇中沉淀后,得到左旋聚酰胺酰亚胺,产物手性较弱,旋光度仅为 18.25°,但其在 N₂ 中失重 5% 的温度超过了 370℃,600℃时的残炭率接近 60%,由此可见,产物有着良好的热稳定性。由于在聚合物的主链中引入了联苯刚性结构,产物的热稳定性大大超出其它光学活性聚酰胺酰亚胺的热稳定性。

王大伟等^[22]用过量的均苯型酰亚胺光学活性二酸和二苯甲烷二异氰酸酯,通过程序升温法,反应体系先后经历 80℃,2 h 及 120℃,2 h,制得了左旋聚酰胺酰亚胺,玻璃化转变温度(*T*_g)为 192℃。分子链内大量的酰胺基团和烷基有效改善了分子链的柔性,使产物有着比传统聚酰胺酰亚胺更好的加工性能。聚合物不仅可溶于包括 NMP, DMAc 等常见的有机溶剂,还展示出了优异的结晶性能,熔点高达 357℃,显然,手性氨基酸的引入确实可以在一定程度上改变聚酰胺酰亚胺的某些微观结构,比如诱导其形成三次结构,使聚酰胺酰亚胺由非晶型高聚物转变为晶型高聚物。

同样采用程序升温法, Tian Xiaoyu 等^[23]对等量的均苯型酰亚胺光学活性二酸单体和二异氰酸酯的聚合反应进行了探究,在 100℃和 120℃分别反应 2 h 后,得到了旋光度为 -6.10°~-18.30°的聚酰胺酰亚胺,产物分子量较低但分布集中,数均分子量为 14900~16000。虽然同样采用均苯型酰亚胺光学活性二酸和二异氰酸酯制备聚酰胺酰亚胺,该产物却并未出现结晶行为,这可能与氨基酸种类不同有关。另外,该产物较结构与之完全相同的酰氯法产物^[24]相比,分子量较低,热稳定性也有待改善。

2.2 离子液体的二异氰酸酯法

离子液体具有不挥发、无污染、易与产物分离以及溶解性良好等优点,是传统挥发性溶剂的理想替代品,它有效避免了传统有机溶剂的使用造成的环境及健康等问题,是一种环境友好的绿色溶剂^[25],但将离子液体用于二异氰酸酯法以制备光学活性聚酰胺酰亚胺的报道寥寥无几。

S. Mallakpour 等^[26]以离子液体四丁基溴化铵(TBAB)为溶剂,通过 *N*-偏苯三酸亚胺-*L*-异亮氨酸和 4 种二异氰酸酯直接在 120℃进行熔融缩聚,得到左旋聚酰胺酰亚胺。产物具有良好的自熄性和阻燃性,极限氧指数(LOI)大于 35.0%,在 N₂ 中失重 10% 的温度超过 300℃。由于二异氰酸

酯的结构不同,该聚酰胺酰亚胺分别呈纳米球形和纳米圆柱形。与传统溶剂二异氰酸酯法的产物^[20-21,23]相比,在离子液体中得到的光学活性聚酰胺酰亚胺的产率高出近20%,且在缩聚时无需程序升温,使反应过程得到了简化,所以在异氰酸酯法中,离子液体比传统溶剂更可取。

从制备光学活性单体来看,二异氰酸酯法比酰氯法的工艺简单,但可用于聚合的二异氰酸酯种类非常有限,基本为二苯甲烷二异氰酸酯、异佛尔酮二异氰酸酯、甲苯二异氰酸酯和1,6-己二异氰酸酯等4种,而且由于异氰酸酯端基的存在,产物稳定性较差,不易储存和运输。

3 亚胺二羧酸法

利用光学活性酰亚胺二酸单体和二胺单体制备光学活性聚酰胺酰亚胺的方法即为亚胺二羧酸法。

3.1 传统溶剂的亚胺二羧酸法

K. Faghihi等^[27]对适用于亚胺二羧酸法的溶剂体系进行了探究和比较,首先以对甲苯磺酰氯(TsCl)/吡啶(Py)/DMF为溶剂体系,得到了光学活性聚酰胺酰亚胺,产率为74%,特性黏度为0.46~0.61 dL/g;而后以无水氯化钙(CaCl₂)/亚磷酸三苯酯(TPP)/Py/NMP为溶剂体系,得到了光学活性聚酰胺酰亚胺,产率为92%,产物特性黏度在0.51~0.85 dL/g之间。可以看出,以CaCl₂/TPP/Py/NMP为溶剂得到的产物具有更好的特性黏度,产率也高出近20%,因此该溶剂体系在合成光学活性聚酰胺酰亚胺时更具选择性。溶剂体系中,TPP和Py为缩合剂,NMP为溶剂,CaCl₂为助溶剂。得出最佳溶剂体系后,K. Faghihi等^[28]还在该溶剂中于110℃回流8 h,合成了含三苯基氧磷结构的右旋聚酰胺酰亚胺,重均分子量为 $1.7 \times 10^4 \sim 5.7 \times 10^4$ 。产物因主链含有磷元素而具有良好的阻燃性,LOI为32%~34%。

沿用上述CaCl₂/TPP/Py/NMP溶剂体系,K. Faghihi等^[29]用*N,N'*-(双环[2,2,2]辛-7-烯四羧酸)-双-*L*-氨基酸与含烯酮结构的二胺,在120℃反应7 h,获得手性极强的聚酰胺酰亚胺,旋光度为+128°~+160°,产物结构复杂,主链既含有双环结构又含环烯结构,同时还含有共轭的烯酮结构,因此聚合物在受到紫外光照射时发生烯炔双键电子的 $\pi \rightarrow \pi^*$ 跃迁和非键电子的 $n \rightarrow \pi^*$ 跃迁,使得聚合物在265 nm和370 nm处产生明显的吸收。并通过改变二胺单体,将恶唑环结构引入聚合物主链,得到右旋聚酰胺酰亚胺。由于该产物分子主链内含有大量的刚性和半刚性环结构,该产物有着与联苯型光学活性聚酰胺酰亚胺同样好的热稳定性,起始热分解温度高于300℃,在N₂中失重5%的温度高达375℃^[30]。除了采用上述结构复杂的光学活性酰亚胺二酸,也可通过结构复杂的二胺和光学活性酰亚胺二酸在

CaCl₂/TPP/Py/NMP中缩聚,获得结构复杂的光学活性聚酰胺酰亚胺,比如以1,2-双[4-氨基苯氧基]乙烷和偏苯三酸酰亚胺-*L*-氨基酸为原料^[31],将醚键引入聚合物主链,得到室温即可溶于极性溶剂的右旋聚酰胺酰亚胺,产率达89%~94%。

H. Moghanian等^[32]以*N,N'*-(均苯二甲酰亚胺)-双-*L*-亮氨酸等光学活性酰亚胺二酸与二胺基查尔酮在CaCl₂/TPP/Py/NMP中缩聚,得到光学活性聚酰胺酰亚胺,产物手性极强,旋光度为+68°~+118°,可作为固定相参与手性体的拆分。在紫外光的照射下,聚合物在波长为269 nm处产生最强吸收,并发生聚合物对紫外光的吸收随照射时间的延长而减弱的现象。他们认为这主要是由于在聚合物主链中存在共轭的查尔酮结构,且在紫外光的照射下,查尔酮中的碳-碳双键发生了顺-反转变。聚合物也因为主链中查尔酮结构的存在而具有光敏特性方面的应用潜力。

周文水^[33]同样以CaCl₂/TPP/Py/NMP为反应溶剂,用*N,N'*-(均苯四甲酰)-双-*L*-丙氨酸与二氨基二苯醚在N₂环境中于120℃反应8 h,制得了光学活性聚酰胺酰亚胺。由于二苯醚和酰亚胺环等在分子链中形成共轭体系,聚合物不仅对短波紫外线有很强的吸收,在294 nm激发波长的作用下还可以发出纯度好的荧光,其最大的发射波长位于348 nm处,斯托克斯位移为54 nm,荧光强度为2045 a.u.。此外,由于刚性环和酰亚胺环的存在,该聚合物5%失重温度超过280℃,600℃时残炭率达40%以上,具有较好的热稳定性。

除了合成基于*L*-氨基酸的光学活性酰亚胺二酸单体,杨志勇^[34]还合成了*N,N'*-(二邻苯二甲酰亚胺基)-双-*D*-苯甘氨酸。虽然采用的是*D*-氨基酸,但该光学活性酰亚胺二酸的旋光方向表现为左旋,而用同样方法合成的*N,N'*-(二邻苯二甲酰亚胺基)-双-*D*-丙氨酸的旋光方向则表现为右旋,可见光学活性酰亚胺二酸单体和相应的氨基酸的旋光方向不一定相同。同时,他以CaCl₂/TPP/Py/NMP为溶剂,将旋光度为右旋的*N,N'*-(二邻苯二甲酰亚胺基)-双-*L*-苯丙氨酸与芳香二胺缩聚,得到了左旋聚酰胺酰亚胺,产物旋光度为-33.75°,证明了光学活性酰亚胺二酸单体与聚合物的旋光方向也可能并不一致。

孔祥康等^[35]用均苯四酸二酐-*L*-苯丙氨酸为原料,先后在冰乙酸和二氯亚砷的作用下得到*N,N'*-(4,4'-二邻苯二甲酰亚胺基)-双-*L*-苯丙氨酸二酰氯,进一步通过与-*D*-丙氨酸作用,合成了含二肽结构的右旋*N,N'*-(4,4'-二邻苯二甲酰亚胺基)-双-*L*-苯丙氨酸-*D*-丙氨酸,旋光度为+115.09°。将该光学活性二酸与二氨基二苯醚在CaCl₂/TPP/Py/NMP中缩聚,在120℃反应8 h,得到主链含二肽结构的左

旋聚酰胺酰亚胺,旋光度为 111.33°,特性黏度为 0.50 dL/g,产物有熔点但熔程较宽。聚合物与光学活性单体的旋光方向相反,而且在数值上并无规律,他们认为,这也许是因为聚合物的旋光性不仅有二肽结构中的两个手性氨基酸的贡献,还可能与聚合物的构象有关。

Wu Qiuxiang 等^[36]以 CaCl_2 /TPP/Py/NMP 为溶剂,用二氨基二苯醚和自制的 N,N' -(4,4'-二邻苯二甲酰亚氨基)-双-D-缬氨酸为单体,在 120℃ 反应 8 h,得到了右旋聚酰胺酰亚胺,特性黏度为 0.46 dL/g,旋光方向与相应二酸单体的相同。由于分子链刚性较高,产物有着较高的 T_g ,为 260℃,被期望作为功能材料得到相关应用。在采用流延成膜法将产物制备成膜后,他们将其埋入土壤中,并在偏光显微镜下观察,4 周后发现原本平整的膜表面出现明显的裂纹并有微生物菌落聚集,8 周后在扫描电子显微镜下发现原本完整的膜变为多块碎片。在进一步探究中发现,在土壤中降解产物可为植物生长提供 N 元素。产物之所以有着良好的生物降解性且降解产物无毒,正是因为主链每个重复单元中都存在有手性氨基酸结构。

3.2 离子液体的亚胺二羧酸法

以离子液体代替传统方法中复杂的溶剂进行聚酰胺酰亚胺的制备,可简化反应体系,绿色环保。因此,新发展起来的以离子液体为反应介质,通过亚胺二羧酸法合成光学活性聚酰胺酰亚胺是今后的研究重点之一。

S. Mallakpour 等^[37]首先对离子液体用于亚胺二羧酸法制备光学活性聚酰胺酰亚胺进行了探究,确定使用的溶剂为 TBAB/TPP,两者物质的量之比为 1:1,并以此为基础,以 N,N' -(均苯四甲酰亚胺)-双-L-异亮氨酸与芳香二胺为单体,在 120℃ 进行熔融缩聚 12 h,获得的左旋聚酰胺酰亚胺产率为 93%,特性黏度为 0.49 dL/g,产物热失重 5% 的温度为 323℃,并通过简单的离子交换反应将产物插入到层状双金属氢氧化物中,得到了聚酰胺酰亚胺/层状双金属氢氧化物纳米复合膜材料,其热失重 5% 的温度为 413℃。该材料不仅具有旋光性,还具有很好的孔结构^[38],被认为在手性体拆分方面有着巨大的应用潜力。

李娟^[39]以 3,3',4,4'-(联苯四甲酰亚胺)-双-L-丙氨酸和二氨基二苯醚为单体,在 TBAB/TPP 中缩聚,得到左旋聚酰胺酰亚胺,特性黏度为 0.59 dL/g,产率高达 96%,产物还具有良好的热稳定性,在 N_2 中热失重 5% 的温度为 367.5℃。她发现 TBAB 和 TPP 的用量对反应时间及反应温度有直接影响,并利用正交试验法得到了最佳反应条件,即:TBAB 与单体的物质的量之比为 6,TPP 与单体的物质的量之比为 4,反应温度为 110℃,反应时间为 2.5 h。这一发现将原有反应时间缩短了近 10 h,既保证了产品的质和量,又

有效地提高了实验效率。另外,由于产物衍生自 L-氨基酸,又含有大量的酰胺键,因此在土壤浊液浸泡的条件下,聚合物可发生明显的降解。

A. Abdolmaleki 等^[40]用结构不对称的 N -偏苯三酸亚胺-S-缬氨酸和含氯二胺作单体,在熔融 TBAB/TPP 中反应,获得了光学活性聚酰胺酰亚胺,特性黏度为 0.48 dL/g。由于分子链中含氯元素和联苯结构,聚合物自身具有良好的阻燃性和热稳定性,LOI 为 39.5%,在 N_2 中热失重 5% 的温度高达 415℃。将该聚合物与羟基改性过的多壁碳纳米管通过超声分散,可得到光学活性聚酰胺酰亚胺/多壁碳纳米管纳米复合材料。聚合物分子链与多壁碳纳米管的结合力分为两种,一种是分子链中的酰胺键与多壁碳纳米管表面的羟基形成的氢键,更主要的一种是多壁碳纳米管和聚合物主链中芳环的 π - π 相互作用。复合材料具有纳米圆柱形结构,LOI 达到 42.9%,阻燃性得到明显提高。

与酰氯法相比,亚胺二羧酸法产率高,合成路线短,操作简单,也无须考虑对环境的影响,其产物又比二异氰酸酯法产物的结构多样,稳定性好。将离子液体用于亚胺二羧酸法,得到的光学活性聚酰胺酰亚胺由于产率高、特性黏度适中,通常可用于复合材料的制备。

4 结语

对光学活性聚酰胺酰亚胺 3 种合成方法的研究进行了概述,其中酰氯法工艺复杂,但可获得分子量较高光学活性聚酰胺酰亚胺。异氰酸酯法工艺简单,但可用于聚合的二异氰酸酯种类非常有限,且产物因为异氰酸酯端基的存在稳定性较差,也许正是因此才没有对离子液体用于异氰酸酯法进行更多研究。亚胺二羧酸法不用将光学活性酰亚胺二酸进一步制成相应二酰氯单体,所以比酰氯法工艺简单,产率基本在 90% 以上,普遍比酰氯法的产率高,而且亚胺二羧酸法的产物不存在活泼端基,稳定性好于异氰酸酯法的产物。因此亚胺二羧酸法目前被认为是一种较好的合成方法。适于亚胺二羧酸法的传统溶剂体系是 CaCl_2 /TPP/Py/NMP,反应温度一般为 110~120℃;将离子液体 TBAB 与 TPP 混合用于亚胺二羧酸法,温度也在 110~120℃。伴随着绿色化学的发展,可用于亚胺二羧酸法的离子液体种类及相应反应条件是今后的一个研究方向。

参考文献

- [1] Dutczak S M, et al. Separation and Purification Technology, 2013, 102:142-146.
- [2] Park S J, et al. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2015, 78:53-58.
- [3] Hamciuc C, et al. Dyes and Pigments, 2015, 114:110-123.
- [4] Diahm S, et al. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013, 46(18):1-8.

- [5] 康传清,等. 化学进展,2015,27(1):59-69.
Kang Chuānqīng, et al. Progress in Chemistry, 2015, 27(1):59-69.
- [6] Mallakpour S, et al. Polymer Advance Technology, 2005, 16:732-737.
- [7] Mallakpour S, et al. Polymer Bulletin, 2006, 57:169-178.
- [8] Mallakpour S, et al. Journal of Polym Research, 2011, 18(3):373-384.
- [9] Mallakpour S, et al. Chinese Journal of Polymer Science, 2011, 29(6):639-649.
- [10] Mallakpour S, et al. Journal of Solid State Electrochemistry, 2011, 15(9):2 053-2 061.
- [11] 邱静,等. 高分子通报, 2012(3):62-68.
Qiu Jing, et al. Polymer Bulletin, 2012(3):62-68.
- [12] Hajipour A, et al. Chinese Journal of Polymer Science, 2010, 28(5):731-743.
- [13] 姜曼,等. 化工新型材料, 2014, 42(6):197-202.
Jiang Man, et al. New Chemical Materials, 2014, 42(6):197-202.
- [14] 李英,等. 化学工业与工程技术, 2010, 31(1):39-43.
Li Ying, et al. Journal of Chemical Industry & Engineering, 2010, 31(1):39-43.
- [15] Rafiee Z, et al. Amino Acids, 2015, 47:2 293-2 302.
- [16] Rafiee Z, et al. Polymer Composites, 2016, 37(6):1 805-1 811.
- [17] Mallakpour S, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2004, 91(5):3 281-3 291.
- [18] Mallakpour S, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2004, 93(4):1 647-1 659.
- [19] Mallakpour S, et al. European Polymer Journal, 2005, 41:2 945-2 955.
- [20] Mallakpour S, et al. Polymer Bulletin, 2007, 59:587-596.
- [21] 杨志勇,等. 合成化学, 2012, 20(3):346-348.
Yang Zhiyong, et al. Chinese Journal of Synthetic Chemistry, 2012, 20(3):346-348.
- [22] 王大伟,等. 高分子材料科学与工程, 2011, 27(7):17-19.
Wang Dawei, et al. Polymer Materials Science & Engineering, 2011, 27(7):17-19.
- [23] Tian Xiaoyu, et al. Designed Monomers and Polymers, 2014, 17(3):201-207.
- [24] Mallakpour S, et al. European Polymer Journal, 2001, 37:2 435-2 442.
- [25] Noble R D, et al. Journal of Membrane Science, 2011, 369:1-4.
- [26] Mallakpour S, et al. Polymer Bulletin, 2013, 70:2 125-2 135.
- [27] Faghihi K, et al. Journal of Chilean Chemical Society, 2010, 55(4):491-496.
- [28] Faghihi K, et al. Chinese Journal of Polymer Science, 2010, 28(4):517-525.
- [29] Faghihi K, et al. Journal of Polymer Reserch, 2010, 17:379-390.
- [30] Faghihi K, et al. Polymer Bulletin, 2010, 65:319-332.
- [31] Faghihi K, et al. Journal of Saudi Chemical Society, 2014, 18:783-791.
- [32] Moghanian H, et al. Arabian Journal for Science Engineering, 2013, 38:1 721-1 729.
- [33] 周文水. 合成化学, 2013, 21(4):496-498.
Zhou Wenshui. Chinese Journal of Synthetic Chemistry, 2013, 21(4):496-498.
- [34] 杨志勇. 旋光性聚酰胺酰亚胺的合成与表征 [D]. 济南: 山东轻工业学院, 2011.
Yang Zhiyong. Synthesis and Characeerization Of Optically Active Poly(Amide-Imide)S[D]. Jinan: Shandong Polytechnic University, 2011.
- [35] 孔祥康,等. 齐鲁工业大学学报: 自然科学版, 2015, 29(3):39-43.
Kong Xiangkang, et al. Journal of Qilu University of Technology: Natural Science Edition, 2015, 29(3):39-43.
- [36] Wu Qiuxiang, et al. High Performance Polymers, 2016, 28(1):34-46.
- [37] Mallakpour S, et al. Journal of Polymer and Environment, 2013, 21:132-140.
- [38] Mallakpour S, et al. Polymer, 2013, 54:2 907-2 916.
- [39] 李娟,等. 塑料, 2013, 42(1):69-72.
Li Juan, et al. Plastics, 2013, 42(1):69-72.
- [40] Abdolmaleki A, et al. Progress in Organic Coatings, 2015, 80:71-76.

欢迎订阅 2017 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》杂志

邮发代号 24-42, 24-138 全国各地邮局均可订阅

欢迎广大读者到当地邮政局(所)订阅 2017 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》杂志, 订阅杂志及合订本光盘及过期刊物的读者可直接向杂志社办理订阅。《工程塑料应用》为月刊, 大 16 开本, 每月 10 日出版, 2017 年定价 15 元/期, 全年 180 元。《化学分析计量》为双月刊, 大 16 开本, 单月 20 日出版, 2017 年定价 15 元/期, 全年 90 元。

电话: (0531)85878223 85878057 传真: (0531)85947355