

基于聚吡咯复合材料的制备及其应用研究进展

冯辉霞 白德忠 张永臣 谭琳 陈娜丽 李全珍 许鸿善

(兰州理工大学石油化工学院, 兰州 730050)

摘要 综述了导电聚吡咯及其复合材料最新的应用研究进展。详细介绍了聚吡咯和其复合材料在金属防腐、传感器、电极材料等领域的研究现状,尤其是近年来,聚吡咯二元复合材料(金属氧化物与聚吡咯、碳材料与聚吡咯)的制备及其应用已经成为了研究的热点。此外,基于聚吡咯的三元复合材料也取得了一定的研究成果,并将成为今后的研究重点。

关键词 聚吡咯, 复合材料, 防腐, 传感器, 电极材料

Research progress of preparation and application of composite based on polypyrrole

Feng Huixia Bai Dezhong Zhang Yongchen Tan Lin Chen Nali Li Quanzhen Xu Hongshan

(College of Petrochemical Technology, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050)

Abstract The newest research progress of applications of conductive polypyrrole and polypyrrole composites were summarized. And the research status of polypyrrole and its composites in metal corrosion, sensors, electrode materials and so on were detailed introduced, especially the preparation of binary composite materials of polypyrrole(metal oxide/polypyrrole, carbon material/polypyrrole) and their applications have been a hot area of research in recent years. In addition, some research achievements in the ternary composite materials based on polypyrrole have been obtained and these materials will become the research focus in future.

Key words polypyrrole, composite material, corrosion, sensor, electrode material

随着 20 世纪 70 年代导电聚乙炔的首次发现并快速发展,如今导电聚合物已经成为新型的多学科交叉领域。导电聚合物的制备简便、导电性好、质量轻、耐腐蚀和易加工等优点,最具商业价值的导电材料^[1]。

常见的导电有聚苯胺(PANI)、聚噻吩(PEDOT)、聚吡咯(PPy)及其衍生物,在众多导电聚合物中,PPy 具有良好的环境稳定性、光电性、热稳定性、并具有导电率可调、易于制备和掺杂。纯的 PPy 难溶于常用的有机溶剂,机械延展性差,电导率和比电容值不高,因此,为了改善 PPy 的性能,通常可在合成 PPy 时加入掺杂剂或将 PPy 与一些纳米粒子进行复合,使制得的 PPy 复合材料不仅保持原 PPy 的导电性能,同时热稳定性和机械延展性也得到提高,而且还获得了其他的功能特性,在传感器、防腐蚀材料、电池电极材料和超级电容器等领域应用广泛^[2-5]。

1 导电聚吡咯的制备方法及其研究进展

有吡咯黑之称的 PPy 粉末早在 1916 年就合成出来,但当时人们并没有认识到这种聚合物的导电能力,后来 Diaz 等^[6]报道了含有 1% 乙腈的溶液中制得电导率更好、热稳定的 PPy。导电聚吡咯的制备方法主要有 2 种:电化学聚合法和化学氧化法,化学氧化法制得的聚吡咯样品为粉末状,电化学方法制得的是导电聚吡咯薄膜。

1.1 导电聚吡咯的制备方法研究

1.1.1 电化学聚合法

PPy 的电化学聚合通常采用三电极体系,电解质溶液一般是含吡咯单体的水相溶液。采用恒电流、恒电位或循环伏安法,使单体在电极表面由电氧化引发生成聚吡咯薄膜。电化学氧化法是通过控制电化学聚合条件,如电解液、支持电解质和溶剂、聚合电位及电流等,在电极上沉积导电聚吡咯薄膜。电化学聚合的电极通常选为铂、金、不锈钢、镍、钛、导电玻璃、石墨和玻碳电极等。电极体系不同,掺杂剂不同,聚合电流或电压也有差异。

1.1.2 化学氧化聚合法

化学氧化聚合法是在一定的反应介质中加入氧化剂,让单体吡咯在反应过程中直接生成聚合物 PPy,并同时完成掺杂过程。与电化学掺杂不同,因为加入了 2 种物质,这些物质进入了聚合物的主链,对聚合物的电化学性质产生了非常重要的影响。在制备聚吡咯过程中加入表面活性剂对其导电性、产率和形貌有一定的影响。此外,表面活性剂种类、单体浓度、氧化剂种类及浓度、反应温度、掺杂剂的种类以及掺杂程度等因素都会影响导电聚合物的物理和化学性质。

1.2 导电 PPy 的应用研究

Diaz 等^[6]用电化学方法在铂电极上首次制得电导率高达 100S/cm、机械性能良好的 PPy 膜。在酒石酸存在的条件下,

基金项目:国家自然科学基金(21664009, 51063003); 国家科技部“科技人员服务企业行动项目”(2009GJG10041); 甘肃省高校基本科研业务费(1105ZTC136)

作者简介:冯辉霞(1966-),女,博士,教授,博导,主要研究方向为化学功能材料,绿色化学。

采用恒电流沉积的方法制得 PPy,对制得产品进行电化性能测试发现具有较好的电容特性^[7]。González 等^[8]采用电沉积的方法在钼酸盐和硝酸盐存在的条件下,在 316L 不锈钢上制得双层的聚吡咯膜,可以明显提高防腐性能。采用电化学聚合的方法制得的高密度的 PPy 纳米纤维,具有高的比表面积,在生物传感方面的灵敏度很高^[9]。

无搅拌条件下以过硫酸铵为氧化剂,以有机磺酸掺杂制备的 PPy 导电率最高可达 52.7S/cm,其中以木质素磺酸掺杂制得的 PPy 具有棒状的纳米结构^[10]。Jeon 等^[11]以 4-磺基苯甲酸钠单钾盐作为掺杂剂,三氯化铁作为氧化剂制得的 PPy 导电率最高可达 400S/cm。在 PPy 合成过程中加入生物分子多巴胺,制得的 PPy 具有较高的导电率,在水中具有较好的分散性和稳定性^[12]。不同的偶联染料可作为模板用于不同形貌导电 PPy 的合成^[13-15]。氧化还原分子 1,4-苯醌掺杂 PPy 电极材料比电容高达 550F/g,远高于未经 1,4-苯醌掺杂的 PPy (236F/g)^[16]。

2 基于导电 PPy 复合材料的制备及其研究进展

2.1 导电 PPy 复合材料的制备方法研究

导电聚合物 PPy 具有单双键交替的 π 键大分子链结构,导电率较高、抗氧化性能良好、易于合成和成膜。但 PPy 单双键交替的 π 键大分子链结构在具有优异性能的同时,也有缺点。PPy 分子链刚性较大,几乎不溶于任何溶剂,在分解温度之前难于熔化,难于加工,因此限制了导电 PPy 在工业生产中的推广应用。为了提高 PPy 的可加工性,对原有导电 PPy 材料进行改性,即将 2 种或 2 种以上的材料复合在一起,获得综合性能优良,能满足人们需要的导电 PPy 复合材料。

制备 PPy/无机纳米复合材料的常规方法是原位聚合法。原位聚合法就是将无机纳米粒子转移分散于有机单体溶液中,形成胶体溶液,引发聚合生成有机聚合物,形成分散的聚合物/无机纳米粒子复合材料,制得的复合材料的理想微观结构是导电高分子对无机纳米粒子的完全包覆,无机纳米粒子与导电高分子之间形成所谓的核-壳式结构。

2.2 导电 PPy 复合材料的应用研究进展

2.2.1 金属氧化物/PPy 复合材料的研究进展

利用金属氧化物和 PPy 自身的优点来制得二元复合材料,在电极材料、传感器和光电转换等领域具有广泛的应用前景^[17-19]。以三氧化钼(MoO_3)为前驱体,采用原位聚合的方法制得树枝状的 MoO_3 /PPy 复合材料,比电容值为 129F/g,经过 200 圈充放电测试后电容保持率为 90%,具有较好的循环稳定性^[20]。三维结构的氧化钴(CoO)@PPy 电极材料具有较高的电容值(2223F/g)、好的循环稳定性(经过 2000 次循环后电容保持率为 99.8%)^[21]。在草酸溶液中采用电化学聚合的方法在 316L 不锈钢基底上合成 PPy/ TiO_2 纳米复合材料,研究结果表明该复合材料具有很好的生物相容性和防腐性能^[22]。

2.2.2 碳基材料/PPy 复合材料的研究进展

由于碳材料具有较大的比表面积,一定的机械、热学和电学性能^[23-24],因此将碳基材料和 PPy 复合之后,能极大地改善 PPy 的机械性能和电学性能^[25],在超级电容器、燃料电池等领域取得了显著的研究成果^[26-27]。

氧化石墨(GO)的表面有许多含氧官能团如环氧基、羧基和羟基等亲水基团,在水中具有较好的分散性,因此 GO/PPy 的复合材料在超级电容器、传感器等领域有广泛的研究^[28-29]。Basavaraja 等^[30]以过硫酸铵为氧化剂,采用原位聚合方法来制得 PPy/GO 的复合材料,由于 GO 的加入,使复合材料相比 PPy 具有更好的导电率和热稳定性。在 3 种不同的掺杂剂(对甲苯磺酸、苯磺酸、硫酸)中通过恒电流的方法制备 GO/PPy 电极材料,所得单层电极和多层电极材料的比电容为 215F/g 和 332F/g,而且具有很好的循环稳定性^[31-33]。

石墨烯(GR)具有超高的导电率、优异的机械性能和热稳定性以及巨大的比表面积^[34-37],可以为 PPy 提供足够的电化学反应活性区域,与聚合物复合后对聚合物的电容特性具有显著的改善效果,因此以 GR 作为基体的 PPy/GR 复合材料作为超级电容器的电极材料引起了广泛关注。Feng 等^[38]以三氯化铁作为氧化剂,并以甲基橙作为反应模板,制得 PPy/GR 的复合材料,经实验研究发现,甲基橙的浓度对 PPy 的形貌有一定影响,因此所制得的复合材料具有不同的形貌结构,经电化学电容测试可知,纳米颗粒形貌较纳米线形貌具有更好的比电容。GR 经 1,4-二氨基苯表面修饰后与 PPy 复合制得的 GR/PPy 复合材料,在 1mol/L 的 NaNO_3 溶液中测得电容值最高为 191.2F/g,导电率最高达到 27.3S/cm^[39]。采用原位氧化聚合法制得的十二烷基苯磺酸钠修饰 PPy/GSR 的复合电极材料,其比电容值达到 277F/g^[40]。Wang 等^[41]研究了磺化石墨烯(SG)/PPy 复合材料的电学性能,导电率最高可达 50S/cm(SG 为 50%,wt,质量分数,下同),在 1.0mol/L 的 H_2SO_4 溶液中得到电极材料电容值最高为 261.0F/g(SG 为 30%)。

碳纳米管(CNTs)由于优异的电学、机械和电化学等性能以及奇特的结构,因此可以用来制备出性能优越的纳米复合材料,在增强材料力学性能的同时,又可以改善材料的热稳定性和导电性,因此,导电 PPy/CNTs 复合材料由于其出众的特性,在传感器、储氢材料、电极材料和场发射等领域得到了应用^[42-45]。Ryu 等^[46]首次以辣根过氧化物酶作为催化剂合成 PPy/多壁碳纳米管(MWCNTs)复合材料。将海绵状 CNTs 与吡咯单体混合并进一步聚合得到多孔 CNTs/PPy 核壳式的复合电极材料,其多孔网状结构使其具有高的结构弹性、比电容值(300F/g)和良好的循环稳定性^[47]。针对锂硫电池循环稳定性和倍率性能差的缺点,Kazazi 等^[48]制得的 PPy/硫化碳纳米管(S/CNTs)(PPy-S/CNTs)复合电极材料,可以改善锂硫电池的不足之处,具有较好的应用前景。

2.2.3 导电 PPy 三元复合材料的研究进展

将 CNTs 经苯乙烯磺酸钠处理并进一步制得具有三明治结构的 GR/PPy/CNTs(GN-PPy/CNTs)三元复合材料,制得的复合材料电容值最高达到 211F/g,高于 GR(73F/g)和 PPy/CNTs(164F/g),同时具有优异的循环稳定性(经 5000 次循环后电容损失仅为 5%),在储能方面、生物传感等方面具有很好的应用前景。Sookhakian 等^[49]通过电化学沉积的方法在导电玻璃上组装制得的 GR/硫化锌(ZnS)/PPy(graphene/ ZnS /PPy),可以显著提高光伏转换效率。采用电沉积的方法在铂电极上制得 CNTs/PPy/银(Ag)颗粒复合材料,可用于生物检测分析^[50]。Nia 等^[51]在玻碳电极上电沉积制得氧化铜

(Cu_xO)/PPy/还原氧化石墨烯(RGO)Cu_xO/PPy/RGO 纳米复合材料,用于葡萄糖的检测,具有显著的稳定性和选择性。以 CNTs 作为支持骨架,制得 CNT-PPy-二氧化锰(MnO₂)的三元复合材料,在超级电容器方面的研究取得了显著的成果,具有良好的电化学性能^[52]。以 Co₃O₄ 的纳米线为核,PPy 和 MnO₂ 为壳,制得了一维结构的 Co₃O₄@PPy@MnO₂ 纳米线复合材料,具有高的能量密度、功率密度以及出色的循环稳定性,在储能方面具有较好的应用前景^[53]。采用水热法在泡沫镍上得到 RGO@Co₃O₄@Ni(OH)₂ 三元复合电极材料,在 1mol/L 的 KOH 溶液中测得电容值高达 2133.3F/g,经 2000 次循环后其电容保持率达到 90.8%^[54]。

3 结语

导电 PPy 及其复合材料在金属防腐、传感器、超级电容器、燃料电池和光催化等领域的广泛研究,尤其是基于 PPy 的二元复合材料的制备已成为研究的热点,而关于 PPy 的三元复合材料的应用研究,鉴于 PPy、金属氧化物和碳材料自身的特点,如金属氧化物/碳材料/PPy、双金属氧化物/PPy 等三元复合材料的制备及其在电极材料、传感器、光电转换和光催化等领域将成为今后研究的重点,而且具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] Lu X, Zhang W, Wang C, et al. [J]. Progress in Polymer Science, 2011, 36(5): 671-712.
- [2] Gao Y S, Xu J K, Lu L M, et al. [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2014, 62: 261-267.
- [3] Flamini D O, M Saugo, Saidman S B. [J]. Corrosion Science, 2014, 81: 36-44.
- [4] Wang W, Li G C, Wang Q, et al. [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2013, 160(6): A805-A810.
- [5] Yang L F, Shi Z, Yang W H. [J]. Electrochimica Acta, 2015, 153: 76-82.
- [6] Diaz A F, Kanazawa K K, Gardini G P. [J]. Journal of the Chemical Society Chemical Communications, 1979(14): 635-635.
- [7] Karaca E, Pekmez NÖ, Pekmez K. [J]. Electrochimica Acta, 2014, 147: 545-556.
- [8] González M B, Saidman S B. [J]. Progress in Organic Coatings, 2011, 53(1): 276-282.
- [9] Palod P A, Singh V. [J]. Sensors and Actuators B, 2015, 209: 85-93.
- [10] Lü Q. [J]. Microchimica Acta, 2010, 168(3/4): 205-213.
- [11] Jeon S S, Park J K, Yoon C S, et al. [J]. Langmuir, 2009, 25(19): 11420-11424.
- [12] Zhang W, Yang F K, Pan Z, et al. [J]. Macromolecular Rapid Communications, 2014, 35(3): 350-354.
- [13] Li M, Li W, Liu J, et al. [J]. J Mater Sci: Mater Electron, 2013, 24(3): 906-910.
- [14] Upadhyay J, Gogoi B, Kumar A, et al. [J]. Materials Letters, 2013, 102: 33-35.
- [15] Kopecky D, Skodova J, Vrnate M, et al. [J]. Advances in Materials Physics and Chemistry, 2012, 2: 89-91.
- [16] Arcila-Velez M R, Roberts M E. [J]. Chemistry of Materials, 2014, 26(4): 1601-1607.
- [17] Bahloul A, Nessark B, Briot E, et al. [J]. Journal of Power Sources, 2013, 240: 267-272.
- [18] Bulakhe R N, Patil S V, Deshmukh P R, et al. [J]. Sensors and Actuators B, 2013, 181: 417-423.
- [19] Janáky C, Chanmanee W, and Rajeshwar K. [J]. Electrochimica Acta, 2014, 122: 303-309.
- [20] Zhang X, Zeng X, Yang M, et al. [J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2014, 6(2): 1125-1130.
- [21] Zhou C, Zhang Y, Li Y, et al. [J]. Nano Letters, 2013, 13(5): 2078-2085.
- [22] Kumar M A, Rajendran N. E [J]. Ceramics International, 2013, 39(5): 5639-5650.
- [23] Roy N, Sengupta R, Bhowmick A K. [J]. Progress in Polymer Science, 2012, 37(6): 781-819.
- [24] Mao X, Rutledge G C, Hatton T A. [J]. Nano Today, 2014, 9(4): 405-432.
- [25] Hernández-Ferrer J, Ansón-Casaos A, Martínez M T. [J]. Electrochimica Acta, 2012, 64: 1-9.
- [26] Kumar A, Singh R K, Singh H K, et al. [J]. Journal of Power Sources, 2014, 246: 800-807.
- [27] Memiöglu F, Bayrakçeken A, Öznüluer T, et al. [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(21): 16673-16679.
- [28] Mudila H, Zaidi M G H, Rana S, et al. [J]. International Journal of Chemical and Analytical Science, 2013, 4(3): 139-145.
- [29] Park J W, Park S J, Kwon O S, et al. [J]. Analytical Chemistry, 2014, 86(3): 1822-1828.
- [30] Basavaraja C, Kim W J, Thinh P X, et al. [J]. Polymer Composites, 2011, 32(12): 2076-2083.
- [31] De la Fuente Salasa I M, Sudhakar Y N, Selvakumar B M. [J]. Applied Surface Science, 2014, 296: 195-203.
- [32] Zhang Y, Li M, Yang L, et al. [J]. Journal of Solid State Electrochemistry, 2014, 18(8): 2139-2147.
- [33] Feng H X, Wang B, Tan L, et al. [J]. Journal of Power Sources, 2014, 246: 621-628.
- [34] Byon H R, Lee S W, Chen S, et al. [J]. Carbon, 2011, 49(2): 457-467.
- [35] Xu Y X, Lin Z Y, Huang X Q, et al. [J]. ACS Nano, 2013, 7(5): 4042-4049.
- [36] Guo F, Creighton M, Chen Y T, et al. [J]. Carbon, 2014, 66: 476-484.
- [37] Fakhari A R, Sahragard A, Ahmar H. [J]. Electroanalysis, 2014, 26(11): 2474-2483.
- [38] Feng X, Yan Z, Li R, et al. [J]. Polymer Bulletin, 2013, 70(8): 2291-2304.
- [39] Wang X, Wang T, Yang C, et al. [J]. Applied Surface Science, 2013, 287: 242-251.
- [40] Yan X, Zhang X, Liu H, et al. [J]. Synthetic Metals, 2014, 196: 1-7.
- [41] Wang X, Yang C, Li H D, et al. [J]. Electrochimica Acta, 2013, 111: 729-737.
- [42] Jalili R, Razal J M, Wallace G G. [J]. Scientific Reports, 2013, 3: 1001-1005.
- [43] Gao J, Li W, Shi H, et al. [J]. Composites Science and Technology, 2014, 92: 95-102.
- [44] Park S J, Kwon O S, Jang J. [J]. Chem Commun, 2013, 49(41): 4673-4675.

(下转第 18 页)

也阻碍了其广泛应用。为此,研究人员发展了多种界面处理技术和材料复合工艺,并取得了显著的成果。同时,针对超细 BaSO₄ 的抗辐射特性、阻燃性能、热稳定性等方面的研究正逐渐兴起,有望使其在功能复合材料中具有广阔的应用前景。

参考文献

[1] 沈小宁,潘明旺,袁金凤,等.微米硫酸钡增韧增刚聚丙烯复合材料的形貌与流变结晶行为[J].高分子材料科学与工程,2011,27(1):65-67.

[2] Cao X X,Zhang H,Chen M F,et al. Preparation, characterization, and properties of modified barium sulfate nanoparticles/polyethylene nanocomposites as T-shaped copper intrauterine devices[J]. Journal of Applied Polymer Science,2014,131(12):403931-403937.

[3] 徐佳伟,陈晔. BaSO₄ 填充改性对 PTFE 密封材料性能的影响[J]. 化工新型材料,2008,36(12):92-94.

[4] 徐妍,张小哲,周持兴,等. PVC/重晶石纳米复合材料力学性能与形态研究[J]. 高分子材料科学与工程,2007,23(5):144-147.

[5] Chen X L,Wang L M,Shi J G,et al. Effect of barium sulfate nanoparticles on mechanical properties and crystallization behaviour of HDPE[J]. Polymers & Polymer Composites,2010,18(3):145-152.

[6] Yang J N,Wang C,Shao K Y,et al. Morphologies, mechanical properties and thermal stability of poly(lactic acid) toughened by precipitated barium sulfate[J]. Russian Journal of Physical Chemistry A,2015,89(11):2092-2096.

[7] 王龙,窦强. 丙二酸处理硫酸钡填充等规聚丙烯复合材料的结晶性能[J]. 高分子材料科学与工程,2011,27(6):76-79.

[8] Gao W,Zhou B,Ma X Y,et al. Preparation and characterization of BaSO₄/poly(ethylene terephthalate) nanocomposites[J]. Colloids and Surfaces A:Physicochemical and Engineering Aspects,2011,385(1-3):181-187.

[9] Shimpi N G,Mishra S. Ultrasonic-assisted synthesis of nano-BaSO₄ and its effect on thermal and cross-linking density of epoxy nanocomposites[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites,2013,32(13):947-954.

[10] Wang J C,Zheng X Y,Chen Y H,et al. Properties and mechanism research on polybutadiene styrene rubber (SBR) composites containing nano-BaSO₄[J]. Journal of Elastomers and Plastics,2009,41(3):263-276.

[11] Shahzamani M,Rezaeian I,Loghmani M S,et al. Effects of

BaSO₄,CaCO₃,kaolin and quartz fillers on mechanical,chemical and morphological properties of cast polyurethane[J]. Plastics Rubber and Composites,2012,41(6):263-269.

[12] Romero-Ibarra I C,Bonilla-Blancas E,Sanchez-Solis A,et al. Influence of X-ray opaque BaSO₄ nanoparticles on the mechanical, thermal and rheological properties of polyoxymethylene nanocomposites[J]. Journal of Polymer Engineering,2012,32(4-5):319-326.

[13] 丁筠,盛平厚,乔辉,等. 纳米硫酸钡与 β 成核剂改性聚丙烯的性能研究[J]. 现代塑料加工应用,2014,26(1):45-47.

[14] 陈龙,张和平,潘健,等. 硫酸钡填充聚乙烯薄膜的制备及性能研究[J]. 长江大学学报(自科版),2014,11(28):16-19.

[15] 刘学习,庄辉,张大陆,等. 纳米 BaSO₄ 增强 PET 复合材料性能研究[J]. 塑料工业,2007,35(4):21-23.

[16] Wang Z G,Zhang F Q,Song N N,et al. The influence of barium sulfate on the mechanical properties of glass/epoxy resin composite[J]. Polymers & Polymer Composites,2008,16(4):257-262.

[17] 杨金兴,乔辉,史翎,等. 超细硫酸钡对等规聚丁烯-1 力学性能的影响[J]. 工程塑料应用,2013,41(6):19-22.

[18] 丁美平,唐玉生,党婧,等. BaSO₄ 填充改性聚四氟乙烯复合材料的制备[J]. 高分子材料科学与工程,2009,25(3):130-133.

[19] 颜录科,李炜光,寇开昌,等. BaSO₄/PTFE 复合材料在干摩擦条件下的摩擦磨损机理研究[J]. 航空材料学报,2010,30(5):78-81.

[20] Yao C G,Yang G S. Synthesis, thermal, and rheological properties of poly(trimethylene terephthalate)/BaSO₄ nanocomposites[J]. Polymers for Advanced Technologies,2009,20(10):768-744.

[21] Chen X L,Wang L M,Liu Y L,et al. Nonisothermal crystallization kinetics of high-density polyethylene/barium sulfate nanocomposites[J]. Polymer Engineering and Science,2009,49(12):2342-2349.

[22] Kim H C,Chung Y S. Preparation and radiopaque properties of chitosan/BaSO₄ composite fibers[J]. Fibers and Polymers,2013,14(2):292-297.

[23] 陈建国,姜宏伟. BaSO₄ 填充热塑性聚氨酯弹性体的热性能研究[J]. 中国塑料,2006,20(12):39-43.

[24] Lai B J,Ni X Y. Rheological behavior and interaction of polycarbonate/barium sulfate composites[J]. Journal of Macromolecular Science Part B-Physics,2008,47(5):1028-1038.

收稿日期:2015-12-30



(上接第 15 页)

[45] Alvi M A,Al-Ghamdi A A,Husain M. [J]. Physica B,2014,454:31-34.

[46] Ryu K,Xue H H,Park J H. [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology,2012,88(5):788-793.

[47] Li P,Shi E,Yang Y,et al. [J]. Nano Research,2013,7(2):209-218.

[48] Kazazi M,Vaezi M R,Kazemzadeh A. [J]. Ionics,2013,20(5):635-643.

[49] Sookhakian M,Amin Y M,Baradaran S,et al. [J]. Thin Solid Films,2014,552:204-211.

[50] Cesarino I,Galesco H V,Machado S A. [J]. Materials Science & Engineering C,2014,40:49-54.

[51] Nia P M,Woi P M,Forestani L,et al. [J]. Sensors and Actuators B,2015,209:100-108.

[52] Li P,Yang Y,Shi E,et al. [J]. ACS Appl Mater Interfaces,2014,6(7):5228-5234.

[53] Grover S,Shekhar S,Sharma R K,et al. [J]. Electrochimica Acta,2014,116:137-145.

[54] Min S,Zhao C,Chen G,et al. [J]. Electrochimica Acta,2014,135:336-344.

收稿日期:2016-01-11

修稿日期:2017-01-18