

活性炭材料作为载体的应用进展

王程¹ 曹强¹ 张玉全² 汤海涌³

(1.庆阳职业技术学院能源工程系,庆阳 745000;2.陇东学院化学化工学院,庆阳 745000;
3.木林森炭业集团,南京 210000)

摘 要 活性炭材料因其独特的物化性质和表面特性,受到国内外研究者的追捧。活性炭材料作为载体具有其它载体材料所不具备的一些特性,具有广泛的适用性和实用性。借助引文可视化分析软件(CiteSpace),综合国内外先进研究成果,综述了活性炭材料用作载体负载磷酸盐、金属或金属化合物、药物等方面的应用进展,最后展望了活性炭材料作为载体应用的未来发展前景。

关键词 活性炭,载体,进展

Application progress of activated carbon material as carrier

Wang Cheng¹ Cao Qiang¹ Zhang Yuquan² Tang Haiyong³

(1.Department of Energy Engineering,Qingyang Vocational and Technical College,Qingyang 745000;2.College of Chemistry and Chemical Engineering,Longdong University, Qingyang 745000;3.Mu Lin Sen Activated Carbon Group,Nanjing 210000)

Abstract Activated carbon materials are favored by researchers at home and abroad for their unique physicochemical properties and surface properties. Activated carbon material as a carrier has some characteristics that other carrier materials don't have, and it has extensive applicability and practicability. With the help of CiteSpace, the application progress of activated carbon materials for supported phosphotungstic acid, metal or metal compound, medicine and others was summarized based on comprehensive domestic and foreign advanced research results. Finally, looks forward to the future development prospect of activated carbon materials as the carrier.

Key words active carbon, carrier, progress

活性炭是由含碳原料经热解、活化加工制备而成,具有发达的空隙结构、较大的比表面积和丰富的表面化学基团,是特异性吸附能力较强的炭材料的统称^[1]。活性炭因其独特的物化性质和表面特性,被广泛运用于生产生活及科研等诸多领域,其作为载体材料的应用,更是受到国内外研究者的追捧。

关于活性炭生产中所涉及的碳化、活化及再生等技术,以及活性炭应用过程中作为净水材料、电极材料、储氢材料等方面的应用进展均已有所著述,而有关活性炭作为载体材料的应用进展论述较少。笔者以“中国知网”为数据来源,将“活性炭”和“载体”及“活性炭”和“负载”设定为篇名所需包含词进行检索,并对检索到的文献运用引文可视化分

析软件(CiteSpace)进行关键词分析,具体结果见图1。本课题组综合了国内外的研究成果,将活性炭材料作为载体的应用研究进展进行概述,以期为今后以活性炭为载体材料的研究及应用提供有益借鉴。



图 1 CiteSpace 对于检索到的文献关键词分析结果图

1 活性炭负载杂多酸或磺酸

1.1 活性炭负载杂多酸用于催化有机反应

磷钨酸属于杂多酸中酸性较强的一种,作为酸性催化剂在有机合成中具有活性高、选择性好和反应条件温和等优点,但其易溶于极性溶剂,因而造成回收困难,将磷钨酸负载于活性炭载体上,不但有助于磷钨酸催化活性的提高,更有助于其回收再利用。于清跃等^[2]采用活性炭负载磷钨酸作催化剂,高选择性地实现了由环氧乙烷制备二氧六环,催化剂连续使用 180h,催化选择性依然没有明显变化,催化性能稳定。Friedel-Crafts 反应一般有酰化反应和烷基化反应两种,是有机合成中最有用的反应之一。Zhao 等^[3]采用改性活性炭负载磷钨酸作催化剂,有效实现了芳香族化合物的 Friedel-Crafts 烷基化反应,合成了 10 余种芳香族化合物烷基化产物,且反应的选择性和产率均较高。此外,活性炭负载磷钨酸催化剂还可以用于催化氧化脱硫^[4]及醚化反应^[5]等。罗茜等^[6]以活性炭为载体,采用回流吸附法制备了活性炭负载硅钨钼杂多酸催化剂,并用于催化苯直接羟基化制苯酚,催化剂表现出高的催化选择性。

1.2 活性炭负载磺酸用于催化有机反应

Rechnia 等^[7]在活性炭表面引入—SO₃H 基,制备了 AC-SO₃H 催化剂用于催化 2-甲基丁烯-2-烯和甲醇反应合成甲基叔戊基醚,催化剂制备简单,且热稳定性高;最近,该课题组还报道了采用活性炭负载—SO₃H 催化剂用于制备生物质柴油的研究^[8]。郑帆等^[9]采用活性炭负载对甲苯磺酸催化剂合成三羟甲基丙烷油酸酯,酯化率高达 98.4%,且催化剂重复使用 5 次仍可保持较高催化活性。

2 活性炭负载金属或金属化合物

2.1 活性炭负载 TiO₂

TiO₂ 因其物化性质稳定、无毒、光催化活性高、对有机物降解选择性低等优点受到广泛关注,但是 TiO₂ 与降解物混合后回收困难。为了解决这一问题,国内外众多研究人员尝试对 TiO₂ 进行改性,结果发现采用活性炭材料作为载体,制成活性炭材料负载 TiO₂ 催化剂,不但有利于 TiO₂ 高光催化活性的保持,还可以很好解决其与降解物混合后回收困难这一问题。

2.1.1 活性炭负载 TiO₂ 用于光催化降解有机物

2,4-二氯苯酚(DCP)广泛存在于合成杀虫剂、防腐剂、染料等生产废水中,是一种有毒,且难以生物降解的有机污染物。Gu 等^[10]利用溶胶-凝胶法制备了活性炭负载 TiO₂ 催化剂,用于光催化降解 DCP,结果表明,在中性条件下,DCP 的降解速度最快,并通过对光催化过程中吸附、光解及光催化过程的综合比较,揭示了光催化降解过程中三者之间的协同效应。Vishnuganth 等^[11]利用活性炭负载 TiO₂ 光催化降解水溶液中的卡巴呋喃,结果表明,活性炭的存在能有效提高 TiO₂ 的光催化效率。

Wang 等^[12]通过溶胶-凝胶法制备了氮掺杂 TiO₂ 微粒,并将其负载到活性炭纤维(ACF)上,得到了 ACF 负载氮掺杂 TiO₂ 光催化剂,将其用于甲基橙的光催化降解,研究表明,活性炭纤维负载氮掺杂 TiO₂ 光催化剂的可见光光催化活性增强,并指出了可见光光催化活性增强的原因可能是因为 ACF 的强吸附性和氮掺杂 TiO₂ 的可见光光催化活性之间的协同作用所致,所制备的光催化剂可多次循环利用,而光催化活性不降低。

2.1.2 活性炭负载 TiO₂ 用于电催化降解有机物

电催化氧化法属于高级氧化技术的一种,其具有无需加入太多额外的化学催化剂,既可将有机污染物最终完全矿化成 CO₂ 和 H₂O,且具有二次污染和处理设备简单、占地少等优点^[13-14]。殷钟意等^[15]采用溶胶-凝胶-动态吸附法制备活性炭负载纳米 TiO₂ 催化剂处理甲基橙染料废水,结果表明,一定条件下,电催化氧化 30min,甲基橙脱色率达 99.2%,化学需氧量(COD)去除率达 93.1%,效果明显优于直接电解法和活性炭负载直接降解法。陆素洁等^[16]采用活性炭纤维负载 TiO₂ 催化剂,电催化降解邻苯二甲酸二甲酯(DMP),研究表明,一定条件下,TiO₂/ACF 对 DMP 的降解具有较高催化活性,TiO₂/ACF 在反应过程中可以原位再生,经 6 次重复使用后其仍保持很高的催化活性。

2.2 活性炭负载锰或锰氧化物

2.2.1 活性炭负载锰或锰氧化物用于去除有机物

高雯雯等^[17]以高锰酸钾为浸渍液,采用浸渍法对果壳活性炭进行改性制备了负载锰活性炭(Mn/AC),结果表明,Mn/AC 对苯酚的去除率是未负载锰活性炭的 3.7 倍。史欢欢等^[18]以共沉淀和热分解法制备改性活性炭(MnO₂-AC),并考察其对罗丹明 B 的吸附效能,实验证明,活性炭通过共沉淀-热

分解法改性后, $\text{MnO}_2\text{-AC}$ 表面吸附位点增多, 与罗丹明 B 之间的相互作用加强, 进而提高了活性炭的脱色性能。

2.2.2 活性炭负载锰或锰氧化物用于吸附金属离子

镉是水环境中典型的重金属污染物, 范少蓓等^[19]通过浸渍焙烧法制备了活性炭负载氧化锰的除镉 $[\text{Cd}(\text{II})]$ 吸附剂, 结果表明, 未改性前活性炭的吸附量为 3.2mg/g , 改性后吸附量大幅度提升, 高达 84.15mg/g 。陈红燕等^[20]以城市污水处理厂的剩余污泥为原料, 掺杂一定量的软锰矿, 采用氯化锌活化法制备了一种软锰矿-活性污泥活性炭, 实验证实其对废水中 Pb^{2+} 的去除率可达 88% , 效果明显优于纯污泥活性炭。

2.2.3 活性炭负载锰或锰氧化物用于电极材料

超级电容器具有优于化学电池和燃料电池的几大特征, 包括充电和放电速度快(几秒钟)、功率密度高、循环使用寿命长、温度特性好等。超级电容器电极材料直接决定着电容器性能的高低^[21]。活性炭是超级电容器最早应用的碳质电极材料。在原有研究的基础上, 通过对传统活性炭的改性, 制备新型及高性能的活性炭电极材料倍受关注, MnO_2 则是常用的改性物质之一。李兰廷等^[22]分别采用催化法和物理法制得含锰氧化物的中孔活性炭(AC-Mn)和普通活性炭(AC), 结果表明, AC-Mn 电极比电容较未负载 Mn 的 AC 电极高近 140% 。高强等^[23]用 $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$ 溶液通过浸渍-高温热解法对普通活性炭进行表面改性处理, 热解产生的多价态氧化锰有法拉第赝电容效应, 尤其是立方晶形结构的 $\alpha\text{-Mn}_2\text{O}_3$, 与活性炭的双电层电容构成了复合电容, 比未改性活性炭的质量比电容提高了 54% 。

2.3 活性炭负载铁或铁化合物

2.3.1 活性炭负载纳米零价铁

纳米零价铁因其粒径小、比表面积大、抗氧化性能好, 且还原性强而受到越来越多关注^[24], 然而纳米零价铁由于团聚现象而使得利用率较低^[25], 采用活性炭负载法可以使纳米零价铁得到更好的分散效果, 有利于提高其利用率。溴酸盐是 2B 级致癌污染物, 晏江波等^[26]采用浸润法制备活性炭负载纳米零价铁材料用于去除水中的溴酸盐, 实验证明, 活性炭负载纳米零价铁材料在偏酸性条件下可以较好地溶液中的溴酸根还原成无毒的 Br^- 。刘大前等^[27]采用 NaBH_4 还原 Fe^{2+} 制备活性炭负载纳米

零价铁, 以去除水溶液中铀酰离子 $[\text{U}(\text{VI})]$, 结果表明, 一定条件下, 活性炭负载纳米零价铁对 $\text{U}(\text{VI})$ 的去除率为 98.52% 。

2.3.2 活性炭负载铁的化合物

氧杂蒽类衍生物在医疗、染料和分子荧光材料等方面有着广泛的应用。肖立伟等^[28]制备了一种改性活性炭负载 FeCl_3 催化剂, 将其用于催化氧杂蒽类衍生物的合成, 制备的催化剂催化性能稳定, 且可以重复使用。欧陶莎等^[29]用过硫酸盐预处理活性炭, 然后用化学沉淀法联合超声技术制备出磁性活性炭用于吸附水溶液中的 Pb^{2+} , 结果表明, 磁性活性炭对 Pb^{2+} 的饱和吸附量为 68.925mg/g , 远超过活性炭对 Pb^{2+} 的吸附量(30.125mg/g)。

2.4 活性炭材料负载贵金属

活性炭作为贵金属催化剂的载体, 具有稳定性好、表面性质可调、有利于贵金属分散等优点, 更重要的是在催化剂失活以后, 可以通过燃烧法来方便地回收贵金属, 因此活性炭成为了一种非常重要的负载贵金属催化剂的载体材料^[30-31]。Jia 等^[32]将聚苯胺/改性木质素磺酸钠复合材料经过碳化处理得到活性炭材料, 然后通过液相还原法将 Pd 纳米颗粒负载在所制备的活性炭材料上, 制备的 Pd/C 催化剂可用于甲酸氧化。唐月等^[33]采用溶胶固定法制备了活性炭负载纳米 Au 催化剂用于氧化葡萄糖, 结果表明, 一定条件下, 葡萄糖在 1h 内, 选择性及转化率均可同时达到 100% 。Wang 等^[34]利用浓硫酸处理活性炭, 制备了磺化活性炭负载 Ru 催化剂, 研究表明, 磺化活性炭负载 Ru 催化剂在温和条件下可以使苯乙酮以 100% 转化率和 90% 选择性实现加氢脱氧, 催化剂性能稳定, 可多次重复使用而活性不减。王红琴等^[35]以氧化活性炭(OAC)为载体, 自制 $[\text{Rh}(\text{COD})\text{Cl}]_2$ 为活性组分, 制备了负载型催化剂 $[\text{Rh}(\text{COD})\text{Cl}]_2/\text{OAC}$, 将所制备的催化剂用于催化 β -蒎烯加氢, 结果表明, 在最佳反应条件下, β -蒎烯转化率均值为 99.88% , 顺式蒎烷的选择性均值为 89.00% , 催化剂重复使用 4 次后, β -蒎烯转化率仍可达 89.64% 。

2.5 活性炭负载双金属或多金属催化剂

Li 等^[36]采用电镀法制备了活性炭负载 Ni 和 Pd 双金属催化剂, 并用于 HI 催化分解, 结果表明, 负载 1% Ni 和 1% Pd 双金属的催化剂活性最高, 且稳定性高于活性炭负载 Pd 催化剂。Huang 等^[37]利用活性炭负载 TiO_2 和 AuCl_3 制备了 $\text{TiO}_2\text{-}$

AuCl₃/AC 催化剂,并用于乙炔和氯化氢的加成反应,研究表明,TiO₂ 的加入很大程度上提高了 AuCl₃/AC 催化剂的稳定性。Asami 等^[38] 制备了活性炭同时负载铁、铜、锰的 Fe-Cu-Mn/AC 催化剂,并用于催化合成气生成短链烯烃,结果表明,Fe-Cu-Mn/AC 催化剂具有很高的活性和选择性,Mn 的加入有效抑制了烯烃的连续氢化反应。

3 活性炭负载离子液体

离子液体自身也是一类常用载体材料,底物、催化剂或反应试剂均可装载到离子液体上^[39]。倪邦庆等^[40]以活性炭(AC)负载酸性离子液体[Hmim-BS][HSO₄]/AC 为催化剂,用于催化制备生物柴油,结果表明,催化剂催化性能良好,生物柴油收率超过 92%。重复使用 4 次后,生物柴油收率仍可达到 83% 左右。王建英等^[41]以等体积浸渍法将[C₃O₁Mim]+[H₃CSO₃]- (1-(2-甲氧基乙基)-3-甲基咪唑甲磺酸盐)和 [C₅O₂Mim]+[H₃CSO₃]- (1-(2-甲氧基乙氧基乙基)-3-甲基咪唑甲磺酸盐)负载到活性炭纤维上用于脱硫研究,结果表明,两种物质的吸附量分别为 45.34mgSO₂/g 和 60.08mgSO₂/g,吸附性能良好,且经过 5 次吸附-脱附循环利用,其脱硫效果基本不变。

4 活性炭材料作为载体用于临床医学

多孔 SiO₂ 材料作为药物载体已经取得了较好的研究成果。然而,多孔 SiO₂ 材料的毒性和昂贵的生产成本也被相关文献所报道。因此,探索相对安全和生产成本低廉的药物载体就显得尤为重要,活性炭材料因满足了上述要求而受到国内外研究人员的关注。活性炭纤维除了具有良好的吸附性能外,还具有远红外放射性能。Tasi 等^[42]将银吸附在活性炭纤维上,用于治疗慢性创面患者,病人在接受治疗的数月时间内伤口没有任何不良反应。张加强等^[43]以椰壳活性炭为载体负载加替沙星,结果表明,其对加替沙星负载能力较好,可以用于喹诺酮药物的缓释载体。Miriya 等^[44]选用扑热息疼和布洛芬作为模型药物,采用活性炭作为药物载体,结果表明,活性炭颗粒表现出非常低的细胞毒性,此项研究为活性炭作为无定型药物的载体提供了支持。

5 结语

从目前国内外对于活性炭作为载体材料的应用

研究进展来看,活性炭材料作为载体具有其他载体材料所不具备的一些特性,如广泛的适用性和实用性。活性炭负载杂多酸或磺酸能够催化多种有机反应,对于在温和条件下探索新的有机合成方法及新型催化剂的制备都具有很好的借鉴意义;活性炭材料作为金属催化剂的载体,对于金属或金属化合物的选择性低,可以很好地负载多种类型的金属及其化合物,为了更好地提升负载型催化剂的催化性能,综合各种因素,利用活性炭材料同时负载多种金属或金属化合物来制备更经济、更高效、更环保的新型催化剂将是未来活性炭材料负载金属催化剂领域发展的趋势;对于离子液体的研究与应用正在引发越来越多化学工作者的兴趣,对于活性炭材料负载离子液体的研究国内外的报道还不是很多,这一研究领域前景还非常广阔;在临床医学方面,尤其是在癌症治疗和负载药物方面,活性炭的安全性将发挥积极作用。活性炭材料作为载体的应用研究,将有效推动活性炭新型应用方式的发展。

参考文献

- [1] 蒋剑春,孙康.活性炭制备技术及应用研究综述[J].林产化学与工业,2017,37(1):1-13.
- [2] 于清跃,张云良,潘斯林.活性炭负载磷酸催化环氧乙烷合成二氧六环[J].精细石油化工,2018,35(3):6-10.
- [3] Zhao Z K, Wang X H. Supported phosphotungstic acid catalyst on modified activated carbon for Friedel-Crafts alkylation of diverse aromatics to their corresponding α -arylstyrenes[J]. Applied Catalysis A: General, 2015, 503: 103-110.
- [4] Xiao J, Wu L M, Wu Y, et al. Effect of gasoline composition on oxidative desulfurization using a phosphotungstic acid/activated carbon catalyst with hydrogen peroxide[J]. Applied Energy, 2014, 113: 78-85.
- [5] Obali Z, Doğu T. Activated carbon-tungstophosphoric acid catalysts for the synthesis of tert-amyl ethyl ether (TAEE)[J]. Chemical Engineering Journal, 2008, 138(1-3): 548-555.
- [6] 罗茜,陶明,张林,等.活性炭负载硅钨杂多酸催化苯基化反应[J].光谱实验室,2011,28(4):1901-1904.
- [7] Rechia P, Malaika A, Kozłowski M. Synthesis of tert-amyl methyl ether (TAME) over modified activated carbon catalysts[J]. Fuel, 2015, 154: 175-178.
- [8] Rechia P, Malaika A, Kozłowski M. Acidic activated carbons as catalysts of biodiesel formation[J]. Diamond and Related Materials, 2018, 87: 124-133.
- [9] 郑帆,刘成林,吴波,等.活性炭负载对甲苯磺酸催化合成三羟甲基丙烷油酸酯[J].天津工业大学学报,2016,35(2):52-55.
- [10] Gu L, Chen Z, Sun C, et al. Photocatalytic degradation of 2,4-dichlorophenol using granular activated carbon supported

- TiO₂[J].Desalination,2010,263(1):107-112.
- [11] Vishnuganth M A, Remya N, Kumar M, et al. Photocatalytic degradation of carbofuran by TiO₂-coated activated carbon: model for kinetic, electrical energy per order and economic analysis[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 181: 201-207.
- [12] Wang X D, Zhang K, Guo X L, et al. Synthesis and characterization of N-doped TiO₂ loaded onto activated carbon fiber with enhanced visible-light photocatalytic activity [J]. New Journal of Chemistry, 2014, 38(12): 6139-6146.
- [13] Chen G H. Electrochemical technologies in wastewater treatment [J]. Separation and Purification Technology, 2004, 38(1): 11-41.
- [14] Zhang C, Jiang Y H, Li Y L, et al. Three-dimensional electrochemical process for wastewater treatment: a general review [J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 228(3): 455-467.
- [15] 殷钟意, 李小红, 侯青山, 等. 活性炭负载纳米 TiO₂ 电催化氧化处理染料废水[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(1): 150-153.
- [16] 陆素洁, 孙亚兵, 赵泽华, 等. 活性炭纤维负载 TiO₂ 催化剂的制备及其电催化性能[J]. 化工环保, 2014, 34(6): 571-574.
- [17] 高雯雯, 苏婷, 闫龙, 等. 负载锰活性炭对苯酚吸附性能的研究[J]. 非金属矿, 2017, 40(2): 79-82.
- [18] 史欢欢, 赵建海, 李海燕, 等. 活性炭负载二氧化锰的制备及其对罗丹明 B 吸附效能[J]. 环境工程, 2017, 35(9): 58-63.
- [19] 范少蓓, 许仕荣, 文武. 氧化锰改性活性炭的优化制备及其对 Cd(II) 的吸附研究[J]. 环境工程, 2017, 35(5): 34-39.
- [20] 陈红燕, 羊依金, 谭显东, 等. 软锰矿——污泥活性炭的制备及其对废水中铅离子的吸附[J]. 环境工程学报, 2010, 4(11): 2473-2478.
- [21] Pandolfo A G, Hollenkamp A F. Carbon properties and their role in supercapacitors[J]. Journal of Power Sources, 2006, 157(1): 11-27.
- [22] 李兰廷, 郝丽娜, 张军, 等. 掺锰活性炭的制备及其电化学性能[J]. 新型炭材料, 2008, 23(3): 269-274.
- [23] 高强, 刘亚菲, 胡中华, 等. 氧化锰表面改性活性炭电极材料的电化学特性[J]. 物理化学学报, 2009, 25(2): 229-236.
- [24] Rangasivek R, Jekel M R. Removal of dissolved metals by zero-valent iron (ZVI): kinetics, equilibria, processes and implications for stormwater runoff treatment[J]. Water Research, 2005, 39(17): 4153-4163.
- [25] Yuan T G, Chen D Y. Experimental study on the treatment of uranium-contaminated mine wastewater using zero-valent iron nanoparticles[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 316-317: 516-519.
- [26] 晏江波, 杨秀英, 何勇, 等. 活性炭负载纳米零价铁去除水中溴酸盐研究[J]. 应用化工, 2017, 46(2): 249-253.
- [27] 刘大前, 刘峙嵘, 王长福, 等. 活性炭负载纳米零价铁去除水溶液中 U(VI) 的研究[J]. 人工晶体学报, 2016, 45(5): 1328-1334.
- [28] 肖立伟, 高红杰, 任丽磊, 等. 改性活性炭负载氯化铁催化氧杂蒽衍生物的合成[J]. 应用化学, 2015, 32(3): 304-309.
- [29] 欧陶莎, 黄华颖, 邓培雁, 等. 改性活性炭负载铁氧化物及其对 Pb²⁺ 的吸附特性[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2017, 49(2): 94-101.
- [30] Auer E, Freund A, Pietsch J, et al. Carbons as supports for industrials precious metal catalysts[J]. Applied Catalysis A: General, 1998, 173(2): 259-271.
- [31] Radovic L R, Moreno C C, Rivera U J. Chemistry and physics of carbon[M]. New York: Marcel Dekker, 2000, 101-140.
- [32] Jia Y J, Jiang J C, Sun K, et al. Oxidation of formic acid over palladium catalyst supported on activated derived from polyaniline and modified lignosulfonate composite [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2017, 45(1): 100-105.
- [33] 唐月, 胡红定, 朱明乔, 等. 活性炭负载的纳米金催化剂上葡萄糖氧化工艺[J]. 化学反应工程与工艺, 2012, 28(3): 200-205.
- [34] Wang J T, Zhang Y, Zhang M, et al. Hydrodeoxygenation of acetophenone over a sulfonated carbon-supported ruthenium catalyst[J]. Catalysis Today, 2018, 314(15): 164-169.
- [35] 王红琴, 王亚明, 蒋丽红. 活性炭负载[Rh(COD)Cl]₂ 催化剂的制备及其催化性能[J]. 精细化工, 2018, 35(2): 246-254.
- [36] Li D C, Wang L J, Zhang P, et al. HI decomposition over active carbon supported binary Ni-Pd catalysts prepared by electroless plating[J]. Catalysis Communications, 2013, 37: 32-35.
- [37] Huang C F, Zhu M Y, Kang L H, et al. Active carbon supported TiO₂-AuCl₃/AC catalyst with excellent stability for acetylene hydrochlorination reaction [J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 242(15): 69-75.
- [38] Asami K, Komiyama K, Yoshida K, et al. Synthesis of lower olefins from synthesis gas over active carbon-supported iron catalyst[J]. Catalysis Today, 2018, 303(1): 117-122.
- [39] 霍聪德, 王程. 离子液体支载反应研究进展[J]. 有机化学, 2013, 33(10): 2108-2118.
- [40] 倪邦庆, 黄江磊, 范明明, 等. 活性炭负载酸性离子液体催化制备生物柴油[J]. 化工新型材料, 2014, 42(7): 58-61.
- [41] 王建英, 张丽喆, 穆惠英, 等. 活性炭纤维负载功能化离子液体的脱硫性能[J]. 环境工程学报, 2016, 10(1): 248-256.
- [42] Tsai C H, Hsu H C, Lin C J. Treatment of chronic wounds with the silver-containing activated carbon fiber dressing: three cases[J]. J Med Cases, 2014, 5(11): 587-591.
- [43] 张加强, 谭非, 肖琳隆, 等. 椰壳活性炭对加替沙星的吸附及缓释性能研究[J]. 生物质化学工程, 2017, 51(1): 39-43.
- [44] Miriyala N, Ouyang D, Perrie Y, et al. Activated carbon as a carrier for amorphous drug delivery: effect of drug characteristics and carrier wettability[J]. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 2017, 115: 197-205.

收稿日期: 2018-11-16