

凹凸棒石基复合材料制备研究进展

董玲玉 张 婷* 钱春园

(兰州理工大学石油化工学院, 兰州 730050)

摘 要 凹凸棒石(ATP)黏土因性能优异被广泛应用于复合材料的制备,系统总结了 ATP 基吸附剂、催化剂及储能材料的制备方法,综述了 ATP 黏土在吸附剂、催化剂及储能材料领域的研究进展。今后 ATP 基复合材料形貌结构控制及其在环保领域的应用仍然是研究的重点。

关键词 凹凸棒石,吸附剂,催化剂,储能材料

Research progress in the preparation of attapulgite matrix composite

Dong Lingyu Zhang Ting Qian Chunyuan

(Department of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050)

Abstract Attapulgite has been widely used in the preparation of composite materials due to a series of excellent properties. The preparation methods of attapulgite-based adsorbents, catalysts and energy storage materials were systematically summarized and reviewed the research progress of attapulgite clay in adsorbents, catalysts and energy storage materials. The control of the morphology of the composite material and its application in the field of environmental protection were still the focus of future research.

Key words attapulgite, adsorbent, catalysts, energy storage material

凹凸棒石(ATP)是一种具有二维层状及棒状结构的含水富镁铝酸盐混合矿物材料,因成本低廉、储量丰富、机械强度高、化学稳定性好、实用性强、交换容量高、环保等优点,引起了科研人员的广泛关注^[1-2]。近年来,ATP被广泛应用于制备 ATP 基吸附剂、催化剂或作为掺杂材料用于复合材料的制备^[2-3]。

本文系统总结了 ATP 基吸附剂、催化剂及储能材料的制备方法,论述了 ATP 基复合材料在环境保护领域的研究进展。

1 ATP 基吸附剂的制备方法研究

ATP 具有良好的粘结性,有利于吸附剂成型,是制备负载型吸附剂的重要选择^[4-5]。ATP 基吸附剂即以 ATP 为载体,采用系列方法制备的非均相黏土吸附剂^[6-7]。ATP 基吸附剂系列制备方法主要包括水热法^[8]、共沉淀法^[9]和溶胶-凝胶法^[10-11]。

1.1 水热法

水热法即利用高温高压下各反应物间发生化学

反应制备复合材料的方法。根据反应类型,水热法可分为水热氧化法、水热还原法、水热沉淀法、水热合成法、水热水解法和水热结晶法等。近年来,水热法被广泛用于 ATP 基吸附剂的制备^[8]。

Zhou 等^[12]以 ATP 黏土为原料,采用水热碳化法制备氨基化 ATP 纳米吸附剂(ATP@CCS),用于废水中难降解有机污染物亚甲基蓝(MB)的吸附去除研究。ATP@CCS 对废水中难降解有机污染物 MB 的吸附属物理吸附,吸附过程符合 Langmuir 等温吸附。ATP@CCS 吸附剂表现出良好的稳定性和循环利用性能,其经 5 次循环利用后,对废水中难降解有机污染物 MB 的去除率依然高达 80%。Cheng 等^[13]以 ATP 黏土为载体,利用水热法制备真菌/凹凸棒石(F/ATP)复合吸附剂,采用单因素法讨论吸附剂用量、pH、温度等对吸附去除废水中 U(VI)效率的影响。结果发现,复合吸附剂 F/ATP 对废水中 U(VI)的最大吸附容量为 125mg/g,且吸附过程属 Langmuir 等温吸附。复合吸附剂 F/ATP 经 6 次循环利用,对废水中 U(VI)的吸附效率

基金项目:国家自然科学基金项目(51302123)

作者简介:董玲玉(1994-),女,硕士研究生,主要从事环境催化方面的研究。

联系人:张婷(1979-),女,副教授,博士,主要从事环境催化方面的研究。

依然高达 91%,表现出良好的吸附性能。吴雪平等^[14]以 ATP 黏土和葡萄糖为原材料,采用水热法制备 ATP/C 纳米复合吸附剂,用于废水中有机污染物苯酚的去除研究。实验发现,ATP/C 纳米复合吸附剂对废水中有机污染物苯酚去除效率为 73%,为 ATP 对废水中有机污染物苯酚去除效率的 3 倍;表现出良好的吸附性能,且其吸附过程属 Langmuir 等温吸附。

1.2 共沉淀法

共沉淀法即利用反应体系中加入的沉淀剂,经沉淀反应后制备复合材料的方法^[9,15]。共沉淀法具有操作工艺简单、反应条件易控等系列优点,被广泛用于吸附剂及催化剂的制备^[16-17]。

于建民等^[18]以 ATP 黏土为原料,采用共沉淀法制备了 TiO_2/ATP 、 NiO-ZnO 、 $\text{NiO-ZnO}/\text{ATP}$ 和 $\text{NiO-ZnO}/\text{TiO}_2/\text{ATP}$ 纳米复合吸附剂,并用于苯并噻吩吸附处理研究。在苯并噻吩吸附处理实验中, $\text{NiO-ZnO}/\text{TiO}_2/\text{ATP}$ 纳米复合吸附剂表现出更高的吸附性能,模拟油中硫含量从 80×10^{-6} 降至 10×10^{-6} ,穿透硫容为 161.3 mg/g。Mu 等^[19]以 ATP 黏土为原料,采用共沉淀法制备 $\text{ATP}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{聚苯胺(PANI)}$ 纳米复合材料,实验发现,ATP/ $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$ 纳米复合材料不仅具有良好的吸附性能,同时还具有良好的催化性能,可用于废水中染料的去除及 Au(III) 富集,还可用于废水中 4-硝基苯酚的催化去除。

1.3 溶胶-凝胶法

溶胶-凝胶法即以高化学活性物质为前驱体,经水解缩合形成稳定的溶胶体系,再经陈化处理胶粒间发生聚合形成网络凝胶,然后经干燥、煅烧处理制备复合材料的方法。按产生溶胶机制的不同,溶胶-凝胶法可分为传统胶体型、无机聚合物型和络合物型 3 种类型。

杨佳静等^[20]以 ATP 黏土为载体,采用溶胶-凝胶法制备纳米 TiO_2/ATP 吸附剂,用于工业废水中重金属离子 Ni(II) 的去除研究,实验发现,纳米 TiO_2/ATP 具有比 ATP 更高的吸附性能,且对废水中 Ni(II) 的吸附属放热过程。谢爱娟等^[21]以 ATP 黏土、钛酸四丁酯为原料,采用溶胶-凝胶法制备 TiO_2/ATP 吸附剂,用于废水中活性黑 KN-B 吸附研究。实验讨论了煅烧温度、吸附剂用量、废水浓度、pH 对活性黑 KN-B 脱色效率的影响,以优化 TiO_2/ATP 吸附去除废水中活性黑 KN-B 的操作条件。

2 ATP 基非均相催化剂的制备方法研究

2.1 浸渍法

浸渍法即利用载体吸附性能吸附液体及气体中的活性组分,使其负载于载体表面,待达到吸附平衡后,经过滤、干燥、焙烧、活化等系列处理制备复合材料的方法。近年来,浸渍法被广泛应用吸附剂及催化剂制备领域。

张婷等^[22]以 ATP 为载体,采用浸渍法制备 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ATP}$ 催化剂,用于十二烷基苯磺酸钠废水的处理研究。实验发现,在最优化条件下, $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ATP}/\text{H}_2\text{O}_2$ 非均相 Fenton 反应体系对染料废水中的十二烷基苯磺酸钠的去除率高达 99.99%。李恩博等^[23]以采用浸渍法制备的 $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{ATP}$ 为催化剂,用于肉桂酸环己酯的合成研究。实验发现, $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{ATP}$ 催化剂具有良好的稳定性,经 5 次循环使用,肉桂酸环己酯酯化率依然高达 81.5%,且其催化反应属准二级反应。冯涛等^[24]采用浸渍法制备 CuO/ATP 催化剂,用于 2,3-丁二醇脱氢反应的研究。研究表明,与 ATP 相比, CuO/ATP 催化剂有效提高了 3-羟基丁酮的选择性,抑制了 2,3-丁二醇脱水反应。当以 CuO 负载量为 10% 的 CuO/ATP 为催化剂时,反应体系中 2,3-丁二醇的转化率达 95.2%,3-羟基丁酮的选择性为 66.8%。

2.2 溶胶-凝胶法

溶胶-凝胶法被广泛用于金属氧化物活性组分催化剂的制备。近年来,溶胶-凝胶法被广泛应用于吸附剂^[25-26]、催化剂^[27-29]及色谱分析^[30-31]等众多领域。

朱鹏飞等^[32]以 ATP 为原料,采用溶胶-凝胶法制备光催化剂 $\text{Y-N-TiO}_2/\text{ATP}$,用于废水中难降解有机污染物诺氟沙星的降解研究。实验表明,在最优化条件下, $\text{Y-N-TiO}_2/\text{ATP}$ 对废水中有机污染物诺氟沙星的去除效率为 89.6%,Y、N 的掺杂有效提高了 TiO_2/ATP 的催化活性。李春全等^[33]以 ATP 黏土为原料、钛酸四丁酯为前驱体,采用溶胶-凝胶法制备 $\text{V-TiO}_2/\text{ATP}$ 复合光催化剂,用于废水中罗丹明 B 的光降解研究,并采用单因素法优化光催化剂 $\text{V-TiO}_2/\text{ATP}$ 的制备条件。实验发现,在最优化条件下, $\text{V-TiO}_2/\text{ATP}$ 对罗丹明 B 的去除率可达 90% 以上。陈荣等^[34]采用溶胶-凝胶法制备磷钨酸/ ATP 复合光催化剂(PW/ATP),用于气相苯的催化降解研究。以单因素法讨论负载量、焙烧温度、焙烧时间对 PW/ATP 催化性能的影响,优化 PW/ATP

的制备条件。实验发现,在最优条件下,PW/ATP 对气相苯的去除率可达 68.4%。刘亮等^[35]以 ATP 黏土为原料,经提纯、酸化、焙烧等处理后作为催化剂载体,采用溶胶-凝胶法制备纳米 TiO_2 /ATP 光催化剂,用于废水中甲基橙的降解研究,讨论焙烧温度对 TiO_2 /ATP 光催化性能的影响,优化 TiO_2 /ATP 的制备条件。实验发现, TiO_2 /ATP 对废水中难降解有机物甲基橙的去除效率高达 92%,且废水中甲基橙的去除过程符合 Langmuir-Hinshelwood 模型。

2.3 沉淀法

沉淀法制备催化剂即将目的金属的盐溶液添加至载体悬浊液中,形成混合均匀的悬浮液,通过调节 pH,使目的金属沉积在载体表面,再经过滤分离、干燥、煅烧等处理制备催化剂。采用沉淀法制备的非均相催化剂具有比表面积大、催化活性高等特点。

徐亚琳等^[36]采用沉积-沉淀法制备 Pd-Cu/ATP(PC/ATP)催化剂,作为对比,采用常规浸渍法制备 PC/ATP 催化剂,用于 CO 催化氧化反应。实验发现,采用沉积-沉淀法制备的 PC/ATP 表现出更高的催化活性,其中 Cu 以 $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ 、CuO 的形式存在,而 Pd 的掺杂有效提高了 PC/ATP 的催化活性。张晓杰等^[37]采用吸附-沉积沉淀法制备磷酸银/ATP(Ag_3PO_4 /ATP)复合催化剂,用于废水中罗丹明 B 和异丙醇的降解研究。实验发现,与纯 Ag_3PO_4 相比, Ag_3PO_4 /ATP 具有更高的催化活性,对废水中难降解物罗丹明 B 和异丙醇的去除速率分别提高了 2 和 2.5 倍。罗洁等^[38]采用原位沉淀法制备高效铬酸银/ATP(Ag_2CrO_4 /ATP)复合光催化剂,用于废水中罗丹明 B 降解研究。实验表明,与纯 Ag_2CrO_4 相比, Ag_2CrO_4 /ATP 表现出更高的催化活性,降解速率为纯 Ag_2CrO_4 的 1.5 倍; Ag_2CrO_4 /ATP 催化剂经 5 次循环利用,其对废水中有机污染物罗丹明 B 的去除效率依然高达 90%,表现出良好的稳定性和循环利用性能,且废水中罗丹明 B 的降解过程属准一级反应。李恩博等^[39]以 ATP 为载体,采用沉淀法制备 Ga_2O_3 /ATP 催化剂,用于肉桂酸正丙酯的合成研究,实验发现, Ga_2O_3 /ATP 经 6 次循环利用后,其催化活性依然高达 85.5%,表现出良好的稳定性。

3 ATP 基储能材料制备方法研究

相变储能材料即利用相变介质在相变过程中吸收或释放能量,实现储放热过程的一种新型材料。

近年来,相变储能材料被广泛应用于纺织、军事、太阳能及建筑节能等诸多领域。

3.1 熔融浸渍法

ATP 基储能材料通常采用浸渍法制备,即利用 ATP 黏土的毛细管作用将熔融态的相变材料引入载体孔结构中。熔融浸渍法因操作方便、设备简单等优点,被广泛用于相变储能材料的制备^[40-42]。由于 ATP 的特有结构,目前采用熔融浸渍法制备 ATP 基相变材料的研究相对较少^[43]。

Yang 等^[43]采用熔融浸渍法制备石蜡/ATP 纳米复合储能材料,讨论焙烧温度和煅烧时间对石蜡吸附值的影响,优化石蜡/ATP 的制备条件,并对其潜热进行了研究。实验发现,在最优条件下,石蜡/ATP 纳米复合储能材料的潜热和熔融温度分别为 126.08J/g 和 23.1℃。经热循环测试发现,石蜡/ATP 复合相变储能材料基本保持了原有的相变潜热(约为初始潜热的 92%),具有良好的储热性和热稳定性能。

3.2 真空浸渍法

真空浸渍法是在熔融浸渍法的基础上引入了真空条件,有效提高了相变介质的负载量,提高了相变储能材料的储热性能^[44]。近年来,真空浸渍法被广泛用于相变储能材料的制备^[45]。

Li 等^[44]以 ATP 作为支撑材料,采用真空吸附法制备了癸酸-棕榈酸/ATP(C-P/A)复合相变材料。当 C-P/A 复合相变材料中相变介质 C-P 的质量分数为 34.9%时,C-P/A 没有在熔融态中发生泄漏,其相变潜热为 48.2J/g,熔融温度为 21.71℃;C-P/A 复合相变储能材料表现出良好的储热性能。Song 等^[46]以硬脂酸、癸酸和 ATP 为原料,采用真空吸附法制备硬脂酸-癸酸/活化 ATP(S-C/a-ATP)复合相变材料。S-C/a-ATP 复合相变储能材料中 S-C 相变介质占 50%,且 S-C/a-ATP 在熔融态没有发生泄漏;S-C/a-ATP 复合相变材料的结晶焓和熔融焓分别为 71.9J/g、72.6J/g,结晶温度和熔融温度分别为 20.3℃、21.8℃;经 1000 次储放热循环后,该储能相变材料的相变温度及相变潜热变化较小,具有良好的热稳定性和储放热性能。Liang 等^[47]以 *n*-羧酸和 ATP 黏土为原料,采用真空法制备 *n*-羧酸/多孔 ATP(*n*-羧酸/*s*-ATP)复合相变储能材料。实验发现,*n*-羧酸/*s*-ATP 复合相变储能材料表现出良好的储热性能,当 *n*-羧酸在 *n*-羧酸/*s*-ATP 复合相变材料中的含量为 36.60%~37.71%时,该复合相变材料具有较高的储热性能,

其潜热值为 72.57~82.36J/g。

4 结语

ATP 黏土在吸附剂及催化剂制备领域的应用,有效提高了其可循环利用性能,降低废水处理的成本。目前,ATP 基吸附剂及催化剂的结构形貌依然不可控制,其结构形貌依然基于 ATP 黏土的原有结构。未来关于 ATP 基吸附剂及催化剂的研究应集中在以下两方面:(1)采用系列方法制备形貌可控的 ATP 基吸附剂及催化剂,并将其用于环境保护领域;(2)采用系列方法制备磁性 ATP 基吸附剂及催化剂,用于环境保护领域,有效地实现分离回收。

ATP 黏土在储能材料制备领域的应用,有效改善了储能材料的稳定性能。未来关于 ATP 基储能材料的制备应集中于以下 3 个方面:(1)采用系列方法制备形状结构可控的 ATP 定型材料;(2)采用系列方法降低 ATP 基储能材料的过冷度;(3)采用系列方法提高 ATP 基储能材料的潜热。

参考文献

- [1] Cao J L, Shao G S, Wang Y, et al. CuO catalysts supported on attapulgite clay for low-temperature CO oxidation[J]. Catalysis Communications, 2008, 9(15): 2555-2559.
- [2] Huang J, Liu Y, Jin Q, et al. Adsorption studies of a water soluble dye, Reactive Red MF-3B, using sonication-surfactant-modified attapulgite clay[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 143(1-2): 541-548.
- [3] Tian H, Guo Q, Xu D. Hydrogen generation from catalytic hydrolysis of alkaline sodium borohydride solution using attapulgite clay-supported Co-B catalyst[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(8): 2136-2142.
- [4] Karim A B, Mounir B, Hachkar M, et al. Removal of Basic Red 46 dye from aqueous solution by adsorption onto Moroccan clay[J]. J Hazard Mater, 2009, 168(1): 304-309.
- [5] Bouberka Z, Khenifi A, Benderdouche N, et al. Removal of Supranol Yellow 4GL by adsorption onto Cr-intercalated montmorillonite[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 133(1-3): 154-61.
- [6] 张婷, 俞树荣, 冯辉霞, 等. 凹凸棒石基复合吸附剂对亚甲基蓝的吸附平衡及吸附动力学、热力学研究[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2007(6): 29-31.
- [7] 于建民, 吴凤芹, 姚超, 等. NiO-ZnO/TiO₂/凹凸棒石纳米复合吸附剂的制备及其在苯并噻吩上的吸附性能研究[J]. 化工新型材料, 2016(8): 162-165.
- [8] 吴雪平, 朱王勇, 张先龙, 等. 一步水热制备凹凸棒石/Fe₃O₄/炭复合材料吸附剂[J]. 炭素技术, 2014, 33(1): 23-27.
- [9] Kim Y I, Kim D, Lee C S. Synthesis and characterization of CoFe₂O₄ magnetic nanoparticles prepared by temperature-controlled coprecipitation method[J]. Physica B Physics of Condensed Matter, 2003, 337(1): 42-51.
- [10] Belver C, Bedia J, Álvarez-Montero M A, et al. Solar photocatalytic purification of water with Ce-doped TiO₂/clay heterostructures[J]. Catalysis Today, 2016, 266: 36-45.
- [11] Belver C, Han C, Rodríguez J J, et al. Innovative W-doped titanium dioxide anchored on clay for photocatalytic removal of atrazine[J]. Catalysis Today, 2017, 280: 21-28.
- [12] Zhou Q, Gao Q, Luo W, et al. One-step synthesis of amino-functionalized attapulgite clay nanoparticles adsorbent by hydrothermal carbonization of chitosan for removal of methylene blue from wastewater[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2015, 470: 248-257.
- [13] Cheng W, Ding C, Sun Y, et al. Fabrication of fungus/attapulgite composites and their removal of U(VI) from aqueous solution[J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 269: 1-8.
- [14] 吴雪平, 盛丽华, 陈天虎, 等. 凹凸棒石/C 复合材料的制备及其对苯酚的吸附性能研究[J]. 化工新型材料, 2008, 36(11): 87-90.
- [15] Spahr M E, Novak P, Schnyder B, et al. Characterization of layered lithium nickel manganese oxides synthesized by a novel oxidative coprecipitation method and their electrochemical performance as lithium insertion electrode materials[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1998, 145(4): 1113-1121.
- [16] Ding Y, Jiang Y, Xu F, et al. Preparation of nano-structured LiFePO₄/graphene composites by co-precipitation method[J]. Electrochemistry Communications, 2010, 12(1): 10-13.
- [17] Ni J F, Zhou H H, Chen J T, et al. LiFePO₄ doped with ions prepared by co-precipitation method[J]. Materials Letters, 2005, 59(18): 2361-2365.
- [18] 于建民, 吴凤芹, 姚超, 等. NiO-ZnO/TiO₂/凹凸棒石纳米复合吸附剂的制备及其在苯并噻吩上的吸附性能研究[J]. 化工新型材料, 2016(8): 162-165.
- [19] Mu B, Wang A. One-pot fabrication of multifunctional superparamagnetic attapulgite/Fe₃O₄/polyaniline nanocomposites served as an adsorbent and catalyst support[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2014, 3(1): 281-289.
- [20] 杨佳静, 王冠, 管振杰, 等. 凹凸棒石黏土负载纳米 TiO₂ 的制备表征及对 Ni(II) 吸附研究[J]. 化工新型材料, 2014(7): 166-168.
- [21] 谢爱娟, 罗士平, 孔泳, 等. 凹凸棒石基复合材料处理印染废水的研究[J]. 环境科学与技术, 2013(8): 127-130.
- [22] 张婷, 冯辉霞, 苑晓微, 等. Fe₂O₃/凹凸棒石 Fenton 催化剂的制备及性能表征[J]. 矿物岩石, 2011, 31(4): 25-29.
- [23] 李恩博, 曹健宁, 许朝辉. Ga₂O₃/凹凸棒石复合催化剂的制备及催化合成肉桂酸环己酯[J]. 精细化工, 2016, 33(9): 1014-1019.
- [24] 冯涛, 姜霆, 黄娣, 等. CuO/凹凸棒土负载型催化剂的合成及其催化 2,3-丁二醇的脱氢反应[J]. 石油化工, 2017, 46(8): 979-984.
- [25] 杨宇彬, 钟辉. 溶胶-凝胶法合成锂吸附剂 H₂TiO₃ 及其性能

- 研究[J].化工科技,2018(1).
- [26] 张理元,刘义武,周大利,等.溶胶-凝胶法制备的偏钛酸型锂离子吸附剂模拟从盐湖卤水中吸附 Li^+ 研究[J].四川大学学报(自然科学版),2017,54(5).
- [27] 陈维苗,凌晨,丁云杰,等.溶胶-凝胶法制备 Cu-ZnO/SiO₂ 催化剂及其催化乙酸甲酯氢解反应的性能[J].石油化工,2013(5):512-517.
- [28] 唐培松,陈海锋,曹枫,等.溶胶-凝胶法制备可见光催化剂 YFeO₃(英文)[J].稀有金属材料与工程,2012(S3):602-604.
- [29] 夏畅斌,周付建,陈圆,等.溶胶-凝胶法合成 TiO₂/活性炭光催化剂及联用超声技术还原铬(Ⅵ)和铜(Ⅱ)废水[J].复合材料学报,2012(6):102-107.
- [30] 龚成科.溶胶-凝胶法制备 PLOT 毛细管色谱柱[D].兰州:兰州大学,2010.
- [31] 吴秀红.溶胶-凝胶法制备新型毛细管气相色谱柱[D].南京:南京师范大学,2005.
- [32] 朱鹏飞,陈彦君,李月,等.Y-N-TiO₂/凹凸棒土光催化剂制备及性能研究[J].非金属矿,2017(1):78-81.
- [33] 李春全,艾伟东,孙志明,等.V-TiO₂/凹凸棒石复合光催化材料的制备与研究[J].人工晶体学报,2016,45(3):655-660.
- [34] 陈荣,李冬妮,李云霞,等.磷钨酸/凹凸棒石复合催化剂光催化降解苯[J].环境科学与技术,2017,v.40(S1):77-81.
- [35] 刘亮,吕珺,李云,等.纳米 TiO₂/凹凸棒石光催化复合材料的制备及其动力学[J].过程工程学报,2011,11(1):117-123.
- [36] 徐亚琳,李潇,吕婷婷,等.沉积-沉淀法制备 Pd-Cu/凹凸棒土催化剂及其常温潮湿环境下 CO 催化氧化性能[J].工业催化,2017,25(5).
- [37] 张晓杰,杨继朋,卢鑫,等.Ag₃PO₄/Palygorskite 的静电调控合成及可见光催化降解罗丹明 B 和气相异丙醇[J].分子催化,2015,29(5):467-475.
- [38] 罗洁,陈建山,程凯英.TiO₂ 光催化氧化降解印染废水的研究[J].应用化工,2004,12(5):24-26.
- [39] 李恩博,尤俊轻,安鑫玉,等.Ga₂O₃/PAL 复合催化剂的制备及催化性能研究[J].硅酸盐通报,2016,35(11):3680-3685.
- [40] Fu X, Liu Z, Xiao Y, et al. Preparation and properties of lauric acid/diatomite composites as novel form-stable phase change materials for thermal energy storage[J]. Energy & Buildings, 2015, 104: 244-249.
- [41] Xu B, Li Z. Paraffin/diatomite composite phase change material incorporated cement-based composite for thermal energy storage[J]. Applied Energy, 2013, 105(2): 229-237.
- [42] Xu B, Li Z. Paraffin/diatomite/multi-wall carbon nanotubes composite phase change material tailor-made for thermal energy storage cement-based composites[J]. Energy, 2014, 72(7): 371-380.
- [43] Yang D, Peng F, Zhang H, et al. Preparation of palygorskite paraffin nanocomposite suitable for thermal energy storage[J]. Applied Clay Science, 2016, 126: 190-196.
- [44] Li M, Wu Z, Kao H. Study on preparation, structure and thermal energy storage property of capric-palmitic acid/attapulgitite composite phase change materials[J]. Applied Energy, 2011, 88(9): 3125-3132.
- [45] 陈培海,张焕芝,孙立贤,等.正十八烷/凹凸棒土复合相变储能材料的制备及热性能研究[J].材料导报,2014,28(14):62-66.
- [46] Song S, Dong L, Chen S, et al. Stearic-capric acid eutectic/activated-attapulgitite composite as form-stable phase change material for thermal energy storage[J]. Energy Conversion & Management, 2014, 81(5): 306-311.
- [47] Liang W, Chen P, Sun H, et al. Innovative spongy attapulgite loaded with n-carboxylic acids as composite phase change materials for thermal energy storage[J]. Rsc Advances, 2014, 4(73): 38535-38541.

收稿日期:2018-04-17

(上接第 13 页)

- [22] Zhang T, Yan H, Peng M, et al. Construction of flame retardant nanocoating on ramie fabric via layer-by-layer assembly of carbon nanotube and ammonium polyphosphate[J]. Nanoscale, 2013, 5(7): 3013-3021.
- [23] Patra D, Vangal P, Cain A A, et al. Inorganic suppresses nanoparticle thin film that suppresses flammability of polyurethane with only a single electrostatically-assembled bilayer[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(19): 16903-16908.
- [24] Kashiwagi T, Grulke E, Hilding J, et al. Thermal degradation and flammability properties of poly(propylene)/carbon nanotube composites[J]. Macromolecular Rapid Communications, 2002, 23(13): 761-765.
- [25] 王伟,陆愈实,潘海峰,等.基于氧化石墨烯和碳纳米管的二元杂化物的阻燃性能研究[J].工业安全与环保,2017,43(3):33-37.
- [26] 陈小璇.壳聚糖-海藻酸钾层层自组装防火涂层的制备与性能[J].高分子材料科学与工程,2016,32(7):121-124.
- [27] 肖利吉.超疏水自清洁涂层的研究进展[J].现代涂料与涂装,2017,20(3):32-35.
- [28] Shang Q, Zhou Y. Fabrication of transparent superhydrophobic porous silica coating for self-cleaning and anti-fogging[J]. Ceramics International, 2016(42): 8706-8712.
- [29] 蔡涛.微胶囊的制备技术及其国内应用进展[J].化学推进剂与高分子材料,2010,8(2):20-26.
- [30] 董翠华,龙柱,庞志强.微胶囊技术及其在功能纸中的应用[J].中国造纸,2008,27(4):53-56.
- [31] Der Mercato L L, Rivera-Gil P, Abbasi A Z, et al. LbL multi-layer capsules: recent progress and future outlook for their use in life sciences[J]. Nanoscale, 2010, 2(4): 458-467.
- [32] Yi Q, Sukhorukov G B. Externally triggered dual function of complex microcapsules[J]. ACS Nano, 2013, 7(10): 8693-8705.
- [33] 梁艳.肝素/壳聚糖微胶囊的制备及其抗凝血性能[J].食品与生物技术学报,2015,34(3):295-301.

收稿日期:2018-04-28

修稿日期:2019-05-24