

海泡石的改性方法及其应用研究进展

孟雪芬 冯辉霞 张斌 冯泽宇 尚琼 陈娜丽 谭琳

(兰州理工大学 石油化工学院,甘肃 兰州 730050)

摘要:综述了海泡石的存在形式、分布范围以及海泡石的改性方法(热处理、酸改性、表面活性剂改性、偶联剂改性以及聚合物包覆等改性)及在吸附、催化、阻燃、调湿、建筑和摩擦等方面应用领域的研究进展。通过改性研究使得海泡石的应用范围更加广泛,但将海泡石用作增强型硅酸盐水凝胶、吸波、超级电容器等方面的研究比较空白;此外,随着经济社会的快速发展,人类生活质量的提高和环保意识的增强,对材料性能和环保性能也造成了一定的挑战,故而实现海泡石对环境以及健康的无毒性以及多样化应用,即满足不同领域生产和生活需求,将会是未来海泡石发展的方向。

关键词:海泡石;改性;性能;应用

中图分类号:TQ 170.4 文献标识码:A 文章编号:1671-3206(2020)09-2319-05

DOI:10.16581/j.cnki.issn1671-3206.2020.09.007

Progress in modification method and application of sepiolite

MENG Xue-fen, FENG Hui-xia, ZHANG Bin, FENG Ze-yu,
SHANG Qiong, CHEN Na-li, TAN Lin

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

Abstract: The existing form and distribution range of sepiolite are reviewed, as well as the modification methods (heat treatment, acid modification, surfactant modification, coupling agent modification and polymer coating modification) and the research progress of the application fields of adsorption, catalysis, flame retardation, humidification, construction and friction. Sepiolite is widely used through modification research, but the research on sepiolite as enhanced silicate hydrogel, wave absorption, supercapacitor and so on is blank. In addition, with the rapid development of economic society, the improvement of human life quality and the enhancement of environmental protection consciousness, the material performance and environmental performance have been a challenge. Thus realizing sepiolite non-toxic and diverse applications on the environment and health will be the future developing direction of the sepiolite.

Key words: sepiolite; modification; performance; application

海泡石在我国主要分布在河南、江西、湖南、河北等地,储量十分丰富,其主要有低温热液腐蚀而成的 α -海泡石和岩石沉积生成的 β -海泡石两种类型,是一种纤维状的富镁硅酸盐黏土矿物,化学式为 $MgSiO(OH)_4(OH)_4 \cdot 8H_2O$ ^[1-2]。海泡石资源丰富,价格低廉,因其具有可塑性、粘结性,作为一种纤维状的富镁硅酸盐黏土矿物,在吸附、催化、阻燃、调湿等领域的应用研究十分活跃^[3]。

1 海泡石的改性研究

天然海泡石含有大量杂质,导致比表面积较小、孔道狭窄,在作为复合材料应用于其他领域时需对

其进行提纯和改性等处理。海泡石的提纯和改性方法主要有热处理、酸改性、表面活性剂改性、偶联剂改性以及聚合物包覆等改性。

1.1 热处理

海泡石热处理主要有水热处理和焙烧法两种方法,水热处理是将海泡石与水的混合液置于反应釜,并在一定温度下搅拌一段时间得到超细化海泡石的方法;焙烧法是指通过系列升温可以使得海泡石中所含有的一些有机物、碳酸盐类物质在高温条件下被烧结或者发生相态的转变,在该过程中也伴随着海泡石中吸附水、沸石水、结晶水和结构水依次脱出

收稿日期:2019-10-24 修改稿日期:2019-12-18

基金项目:国家自然科学基金(21664009,51063003)

作者简介:孟雪芬(1996-),女,甘肃金昌人,硕士生,师从冯辉霞教授,主要从事功能材料方面的研究。电话:15352386589, E-mail:15352386589@163.com

通讯联系人:冯辉霞(1966-),女,甘肃临夏人,教授,博士,博士生导师,主要从事化学功能材料方面的研究。电话:13008783050, E-mail:fenghx66@163.com

使其结构发生了相应变化。通过水热处理的海泡石不仅可以解决纤维单体聚集的现象,而且增加了比表面积和酸活化速度,但在处理过程中应选择适当的搅拌温度、搅拌速度以及搅拌时间;焙烧法在增加海泡石比表面积的同时会使其结构发生破坏。

绝大部分海泡石存在层间或纤维束间粘合力强、溶胀后纤维强度仍较高等不足,为了得到既超细化又易分离的均分散纤维状海泡石,翟学良等^[4]将海泡石和二十倍海泡石重量的水加入反应釜、在 393 ~ 493 K 范围内水热一段时间发现,水热前后海泡石分别以粗大的聚集纤维束和纤维单体存在,但水热前后海泡石晶体结构并没有发生明显变化,然而海泡石的比表面积随着温度的升高表现出明显的增大趋势,此外,水热处理后的海泡石酸活化速率加快以及酸活化海泡石吸附脱色率亦增加。

Zhang 等^[5]以原状海泡石为原料,研究了程序升温对海泡石纤维相变和形貌的影响。研究发现海泡石黏土中吸附水和沸石水的相转变温度分别为 120 °C 和 340 °C,结晶水和结构水的相转变温度分别为 500 °C 和 810 °C;此外,脱出结构水后斜方顽辉石($MgSiO_3$)于 852 °C 再结晶,在 970 °C 转变成原顽火辉石并随着温度的上升,原顽火辉石晶体沿着 c 轴持续长大;海泡石脱出结构水的非晶态相在 1130 ~ 1200 °C 范围内再结晶为方晶石,并开始在该温度范围内熔化。就形貌而言,海泡石束和海泡石条在 1000 °C 以内几乎保持不变,当温度达到 1100 °C 时出现烧结现象;随温度持续升高到 1200 °C,海泡石纤维束部分熔化并相互粘合形成多孔结构,当温度升高到 1300 °C 时,除一小部分原顽火辉石和方晶石外基本熔化。

1.2 酸改性

酸改性海泡石是海泡石提纯的主要手段之一,即用一系列强酸与海泡石混合,搅拌一段时间烘干后便可制得。Sakizci 等^[6]用 1 ~ 5 mol/L HCl 对土耳其产海泡石进行活化,研究结果表明,经酸改性的海泡石比表面积比未改性的要大,但随着酸浓度的增加,其比表面积和去除能力逐渐降低。酸处理与未处理海泡石相比, H^+ 取代 $-Si-O-Mg-O-Si-$ 骨架中的 Mg^{2+} 形成 $-Si-O-H$ 键,使得海泡石成分中 SiO_2 含量增高, MgO 等金属氧化物含量降低。

在有机酸对海泡石的改性方面,主要是利用海泡石表面活性的 $-Si-OH$ 与有机酸进行酯化,通过引入不同碳链长度的羟基改善其表面的疏水亲油性,已用于海泡石表面改性的有机酸有辛酸、庚酸、肉桂酸、硬脂酸等。硬脂酸的羧基可以与海泡石表面羟基通过酯化反应结合在一起,使得憎水基团

排列在其表面,降低了海泡石的表面张力,由于脂肪酸亲油性基团的引入,可以有效提高海泡石分散程度,防止其聚集结块^[7]。

1.3 表面活性剂改性

表面活性剂是一类能改变溶液体系界面状态的两亲性物质,通常一端拥有亲水的极性基团、另一端拥有亲油的非极性基团。常用在海泡石表面改性的活性剂有十二烷基苯磺酸钠等磺酸盐类阴离子表面活性剂以及十六烷基三甲基溴化铵等季铵盐类阳离子表面活性剂。通过表面活性剂改性不仅可以降低表面能,改变海泡石的极性问题,使海泡石由亲水性向亲油性转变,而且还可以增大硅氧四面体和镁氧八面体层状单元所致的层间距,使高分子链或单体进入层间进一步改善其性能成为可能^[8]。

汤敏等^[9]利用海泡石作为载体的优势,以硝酸铋、氯化钾为原料,十二烷基苯磺酸钠(SDBS)为表面活性剂,采用水热法制备了三维花状的 $BiOCl$ /海泡石复合光催化剂,经 3 次再生使用后对双酚 A 的去除率仍然保持在 95% 以上。

将海泡石分散在乙醇与水的混合液中,随后加入十四烷基三甲基溴化铵(TTAB)、十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)和十八烷基三甲基溴化铵(OTAB)等阳离子改性剂,即可得到表面润湿性从高度亲水向疏水转变、电荷也由原来的负电向正电转变、比表面积以及孔体积随表面活性剂烷基链长度的增加而增大的改性海泡石;在去除乳化油研究中,三种改性材料对乳化油的去除能力依次提升^[10]。

1.4 偶联剂改性

偶联剂分子中含有亲无机物以及亲有机物的两个化学性质不同的基团,用以改善无机物和有机物之间的界面作用,从而大大提高复合材料的性能。在偶联剂改性海泡石研究中使用较为普遍的是硅烷偶联剂^[11]。硅烷偶联剂由对无机物具有反应性的硅烷氧基以及对有机物有反应性或兼容性的有机官能基组成,在改性过程中,有机硅烷水解后产生的硅醇与海泡石表面的 $-OH$ 发生醚化反应,从而使有机硅烷接枝到海泡石表面,不仅可以提高其表面的缩水性能,而且可以降低其表面能^[12-14]。

Somaya 等^[15]以氨基硅烷为偶联剂,在单纤维表面实现了海泡石纤维在水触变凝胶中的功能化,并采用超声波辐照法将不同质量含量(3%、30%和 50%)的改性海泡石纤维分散在聚乙烯醇的乙醇溶液中,采用静电纺丝法制备了纳米复合纤维,研究了成型工艺条件对其均匀性、形貌和结构的影响。研究表明,在低流速(0.5 mL/h)、高集电极距(15 cm)和 24 kV 恒定电压下,制备的纳米纤维直

径最为均匀。

有人首先对无机海泡石进行酸剥离,制备了酸性海泡石团聚体(aSep),随后采用KH570对aSep改性制备了有机海泡石团聚体(oSep),最后分别以酸性海泡石(aSep)和有机海泡石(oSep)为原料,采用共混和热塑法制备了纤维海泡石/氟橡胶纳米复合材料(Sep/FKM)。研究发现,加入海泡石后的FKM复合材料的表观交联密度、固化速度和拉伸强度均有所提高,虽然oSep/FKM的固化速度低于aSep/FKM,但oSep/FKM的拉伸强度高于aSep/FKM^[16]。

1.5 聚合物包覆改性

将聚合物单体或聚合物分散或溶解在溶剂中作为聚合物复合材料的基体,并加入无机填料分散相在一定条件下作用一段时间即可得到无机-有机复合材料。目前研究较多的无机填料主要是一类天然的层状硅酸盐粘土矿物,如硅藻土、蒙脱土、海泡石等。虽然在一定技术条件下可以直接实现聚合物与海泡石的包覆,但经过有机化处理的海泡石能够提高其与聚合物的亲和性,改善聚合物的性能。

Zhang等^[17]以海泡石、丙烯酸(AA)、丙烯酰胺(AM)和N,N'-亚甲基双丙烯酰胺(MBA)为原料,采用溶液共聚法制备了新型水凝胶纳米复合材料,与无海泡石水凝胶相比,海泡石对液体吸收率有一定的贡献,其重量含量为15.0%时, Q_w 和 Q_p 分别提高了11.6%和14.5%。

天津科技大学商平研究组以环氧树脂为基体、酚醛胺(T31)为固化剂、有机改性后的海泡石为增强剂,制备了有机海泡石/环氧树脂复合材料。研究表明,环氧树脂可插层进入有机海泡石中;随着有机海泡石加入量的增加,环氧树脂的力学性能和耐热性能逐渐增强,有机海泡石含量为1%时,其拉伸剪切强度比纯环氧树脂提高了69.5%;有机海泡石含量为2%时,热分解温度提高了31℃^[18]。

2 海泡石的应用研究

海泡石因资源丰富、价格低廉、具有较好的可塑性和粘结性等物理化学性能,有着许多潜在的应用前景。近些年来,越来越多的研究者从不同应用角度对海泡石复合材料进行了研究,如在吸附、催化、阻燃、调湿等领域的应用方面。

2.1 在吸附领域的应用

海泡石骨架结构中拥有贯穿整个结构的孔道和空隙,具有大的比表面积和孔容积,故而具有良好的吸附性能。海泡石的吸附性能与表面存在的三类活性中心有关:①硅氧四面体中的氧原子;②在边缘与 Mg^{2+} 配位的水分子,可以与吸附质形成氢键;③四面体外表面Si—O—Si键断裂形成Si—OH,其可与

吸附在海泡石外表面的分子相互作用,还可以与一些有机试剂形成共价键^[3,19]。

谢治民等^[20]采用 Fe^{2+} 和 Al^{3+} 对海泡石原矿进行改性制备了高效Fe-海泡石和Al-海泡石复合吸附剂,其对模拟活性艳蓝废水脱色率可达99%,吸附容量最高可达58.44 mg/g;与同条件下的活性炭及海泡石原矿相比,最高吸附容量分别提高了3~4倍和9~10倍。Cheng等^[21]利用海泡石负载氧化石墨烯制备了在低pH条件下可通过离子交换去除铀离子、碱性条件下络合铀离子的GO@sepiolite复合材料。Zhang等^[22]以3-氨基丙基三乙氧基硅烷有机改性活化海泡石制备了高分散的有机-无机复合纳米纤维 NH_2 -ASEP,其因对刚果红阴离子的去除效率高、吸附时间短、材料再生性能优异而有望用于水处理、膜分离、催化以及其他环境问题。

虽然海泡石的多孔性、比表面积以及层状结构赋予了其对重金属、有机染料和农药等都具有不同程度的吸附能力,但当吸附质溶液浓度较低时,其去除效果不佳;在动态吸附过程中很容易造成孔道堵塞问题;当单一海泡石用于吸附材料,存在一定的分离回收问题;并且吸附机理问题也需进一步研究和深化。要将海泡石广泛的应用于吸附领域,还需要科研工作者对其提纯和改性工艺路线进行简化和改进。

2.2 在催化领域的应用

海泡石因具有比表面积大、孔隙率高、机械性能强、热稳定性高、良好的吸附性能及其本身存在的酸碱中心使其可以作为载体直接用于催化剂,如加氢催化、加氢裂化、环己烯骨架异构化和乙醇脱水等反应;与此同时,可以负载Cu、Zn、Fe、Mo等金属及其化合物用于脱氮、加氢硫化、脱金属以及脱沥青等在催化领域广泛应用^[23-24]。

吴琼等^[25]以乙酸锰和高锰酸钾为前驱体,将锰氧化物负载在海泡石(SEP)载体表面制备了具有较佳 NH_3 -SCR低温脱硝活性、高空速适应性的 Mn_x /SEP催化剂,并且锰氧化物活性组分均匀分布在海泡石表面和高的分散性使催化剂具有较大的有效比表面积,有利于催化剂的 NH_3 -SCR反应。常婕等^[26]采用共沉淀法制备了具有良好孔结构以及热稳定性的Ni/Al₂O₃-ZrO₂-sep(海泡石)甲烷合成催化剂。

在国内外研究报道中,海泡石作为催化剂主要应用于加氢催化、加氢裂化、脱氢氧化、聚合等领域,在催化领域应该深化改性海泡石催化材料的探索;此外,在海泡石上负载稀土金属用于催化剂的研究较少,可在这方面加强实验研究。

2.3 在阻燃领域的应用

海泡石是富含Mg、Si等非卤阻燃元素的天然矿

物因导热系数小及耐高温(可达 1 500 ~ 1 700 ℃),而作为阻燃剂或阻燃协效剂用于聚合物阻燃性能研究。将海泡石用于膨胀型防火涂料中,不仅可以起到促进材料表面膨胀炭层的形成和稳定,而且可以提高膨胀炭层的隔热效果,其所含有的不可燃成分通过在高温条件下增加残余物的量,使得点燃时间延长、降低了燃烧时的热量释放速率,这样反馈到聚合物表面的热量得以减少,故基质的热裂解得以抑制^[27];海泡石在一些非膨胀型阻燃材料中,主要是利用一层釉状的保护层使被保护物体与氧气隔绝而起到阻燃的效果^[28]。

刘国胜等^[29]将海泡石添加到聚磷酸铵(APP)/双季戊四醇(DPER)膨胀阻燃聚丙烯(PP/IFR)体系中不仅可以提高膨胀炭层的热稳定性,而且增加高温时残炭量;同时,海泡石及热解的含硅类氧化物起到了阻隔的作用。Zotti等^[30]制备了海泡石/环氧树脂复合材料,海泡石的存在对环氧树脂的热稳定性都有轻微的影响,预处理海泡石引起的炭层形态变化将显著影响最终纳米复合材料的燃烧行为,证实了海泡石经预处理后是一种有效的阻燃无机填料。

2.4 在调湿领域的应用

调湿材料是一类通过对环境湿度进行感应、结合自身吸湿和放湿特性制动调节环境湿度的功能性材料。海泡石因绝缘隔热、无毒无害、吸放湿速率快和放湿容量大而用作调湿材料,其调湿能力主要依靠内部较多的孔道以及大比表面积产生的水分子吸附和脱附作用。

Wang等^[31]制备了海泡石/聚丙烯酸(钠)纳米复合材料,在聚合过程中,丙烯酸单体与羟基接枝在海泡石表面,成功地插入海泡石的四面体二氧化硅层中,复合材料湿度控制性能的影响随海泡石含量、分散剂含量和中和程度的增加而增加。Gonzalez等^[32]为了提高相对湿度(RH)的范围,制备了海泡石活性炭微丸。研究表明,当海泡石与活性炭混合时,RH范围较宽(如 89% ~ 39%),可得到控制性能较好的材料,这种行为是海泡石的亲水性和纤维性与活性炭的疏水性和多孔结构混合的结果;当氯化钙浸渍海泡石时,由于氯化钙保留了大量的水分,这些水分通过吸附作用被转移到海泡石中,从而大大提高了海泡石的吸湿性能。

2.5 在其他领域的应用

海泡石除了在催化领域、阻燃领域、调湿领域以及吸附领域有广泛应用之外,在建筑材料以及摩擦材料等方面都有应用。

贾堤等^[33]对海泡石用作建筑涂料增稠流变剂的可行性进行了研究,结果表明,由于海泡石良好

的分散性和悬浮稳定性,用其作为建筑涂料的增稠流变剂是完全可行的;既可以通过控制其含量调整涂料的黏度,又可以使涂料的对比率提高,同时还可避免因使用有机增稠剂影响环境,并可降低生产成本。

胡珊等^[34]以天然硅石灰和海泡石复合矿物代替石棉作为增强材料制备了无石棉汽车制动摩擦片,可提高产品的各项性能;针对纤维状的硅石灰和海泡石进行了改性研究,获得了硅石灰和海泡石的最佳改性工艺,深入研究了硅石灰和海泡石制备制动摩擦片的基本工艺及性能。研究表明,采用硬脂酸作表面改性剂,当改性后的硅石灰和海泡石混合使用且比例 < 1:2 时,其各项性能可达到国标,完全可代替石棉作为摩擦材料的增强材料。

3 展望

海泡石作为天然无毒无害、又具有很多优异性能的无机非金属材料,科研工作者已经在其改性研究方面做了很多工作,但对其改性及处理方法做进一步研究,对提升其应用质量、开拓其应用范围提供了一定的基础数据和理论依据。

海泡石作为摩擦材料在摩擦系数以及强度方面都达到国家标准,在局部领域可以作为石棉的替代品使用,也可在海泡石中掺杂其他无机矿物或有机物来进一步扩展其摩擦应用领域。

但随着经济社会的快速发展,人类生活质量的提高和环保意识的增强,因此对材料性能也造成了一定的挑战,故而实现海泡石对环境以及健康的无毒性以及多样化应用,即满足不同领域生产和生活需求,将会是未来海泡石发展的方向。

参考文献:

- [1] MAISANABA S, PICHARDO S, PUERTO Maria, et al. Toxicological evaluation of clay minerals and derived nanocomposites: A review [J]. *Environmental Research*, 2015, 138: 233-254.
- [2] GUERRA D L, BATISTA A C, PAULO C Correa da Costa, et al. Adsorption of arsenic ions on Brazilian sepiolite: Effect of contact time, pH, concentration and calorimetric investigation [J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 2010, 346(1): 178-187.
- [3] ADEYEMO A A, ADEYOYE I O, BELLO O S. Adsorption of dyes using different types of clay: a review [J]. *Applied Water Science*, 2017, 7(2): 543-568.
- [4] 翟学良, 李纪标, 周相廷. 海泡石的水热法超细化处理后结构、形态与活性研究 [J]. *化学世界*, 1998(3): 126-129.
- [5] ZHANG Y, WANG L, WANG F, et al. Phase transformation and morphology evolution of sepiolite fibers during

- thermal treatment [J]. *Applied Clay Science*, 2017, 143 (3): 205-211.
- [6] SAKIZCI M. Effect of salt modification and acid activation on ethylene adsorption properties of sepiolite [J]. *Adsorption-Journal of the International Adsorption Society*, 2013, 19(6): 1083-1091.
- [7] 喻亚琴. 海泡石改性及对硝酸铵性能影响的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
- [8] ZHAO S, HUANG G, MU S, et al. Immobilization of phenanthrene onto gemini surfactant modified sepiolite at solid/aqueous interface: Equilibrium, thermodynamic and kinetic studies [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 598(4): 619-627.
- [9] 汤敏, 汪彤艳, 贺玥莹, 等. 三维花球状 BiOCl/海泡石的制备及其在可见光催化降解双酚 A 中的应用 [J]. *现代化工*, 2018, 38(10): 137-142.
- [10] LI Y, WANG M, SUN D, et al. Effective removal of emulsified oil from oily wastewater using surfactant-modified sepiolite [J]. *Applied Clay Science*, 2018, 157(3): 227-236.
- [11] ALBERICIO F, EL-FAHAM A. Choosing the right coupling reagent for peptides: A twenty-five-year journey [J]. *Organic Process Research & Development*, 2018, 22(7): 760-772.
- [12] 佚名. 硅烷偶联剂改性氧化石墨烯的制备及表征 [J]. *应用化工*, 2019, 48(1): 105-107.
- [13] 王晓东, 云斯宁, 张太宏, 等. 硅烷偶联剂表面改性玄武岩纤维增强复合材料研究进展 [J]. *材料导报*, 2017, 31(5): 77-83.
- [14] XIE Y, HILL C A S, XIAO Z, et al. Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites: A review [J]. *Composites Part A*, 2010, 41(7): 806-819.
- [15] SOMAYA A B H, STOJANOVI D B, KOJOVI A, et al. Preparation and characterization of poly(vinyl butyral) electrospun nanocomposite fibers reinforced with ultrasonically functionalized sepiolite [J]. *Ceramics International*, 2014, 40(1): 1139-1146.
- [16] YAN P, WANG Y, WANG M, et al. Preparation and characterization of fibrous sepiolite modified silane coupling agent/fluororubber nanocomposite [J]. *Polymer Composites*, 2015, 38(5): 208-213.
- [17] ZHANG F Q, GUO Z J, GAO H, et al. Synthesis and properties of sepiolite/poly(acrylic acid-co-acrylamide) nanocomposites [J]. *Polymer Bulletin*, 2005, 55(6): 419-428.
- [18] 商平, 闫丰, 高留意, 等. 有机海泡石/环氧树脂复合材料的研究 [J]. *非金属矿*, 2012, 35(1): 4-6.
- [19] WANG Z, LIAO L, HURSTHOUSE A, et al. Sepiolite-based adsorbents for the removal of potentially toxic elements from water: A strategic review for the case of environmental contamination in Hunan, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(8): 1653-1662.
- [20] 谢治民, 陈镇, 戴友芝. 海泡石复合吸附剂研制及处理染料废水性能研究 [J]. *环境科学与技术*, 2009, 32(2): 130-133.
- [21] CHENG H, ZENG K, YU J. Adsorption of uranium from aqueous solution by graphene oxide nanosheets supported on sepiolite [J]. *Journal of Radioanalytical & Nuclear Chemistry*, 2013, 298(1): 599-603.
- [22] ZHANG J, YAN Z, OUYANG J, et al. Highly dispersed sepiolite-based organic modified nanofibers for enhanced adsorption of Congo red [J]. *Applied Clay Science*, 2018, 1579(5): 76-85.
- [23] MINGYI H E, ZHANG H, DAI Y, et al. Preparation and photocatalytic activity of sepiolite/flowerlike BiOCl nanocomposites [J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2015, 29(3): 178-184.
- [24] 杜玉, 汤丹丹, 张高科, 等. Ag₂O-TiO₂/海泡石复合光催化剂制备及其可见光光催化性能 [J]. *催化学报*, 2015, 36(12): 2219-2228.
- [25] 吴琼, 张先龙, 马康, 等. Mn_x/SEP(海泡石)催化剂低温 NH₃-SCR 脱硝性能 [J]. *环境化学*, 2018, 37(7): 169-178.
- [26] 常婕, 李稣领, 李晨佳, 等. 焙烧温度与海泡石含量对 Ni/Al₂O₃-ZrO₂-sep(海泡石)催化剂耐高温性能的影响 [J]. *精细石油化工*, 2018, 35(2): 15-19.
- [27] LAOUTID F, PERSENAIRE O, BONNAUD L, et al. Flame retardant polypropylene through the joint action of sepiolite and polyamide 6 [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2013, 98(10): 1972-1980.
- [28] 段晓东. 建筑物用防火涂料的研究现状及进展 [J]. *硅酸盐通报*, 2012, 31(5): 1190-1193.
- [29] 刘国胜, 郝建薇, 吴娜. 海泡石协同膨胀阻燃聚丙烯的 TGA/XPS 分析 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2012, 28(11): 133-136.
- [30] ZOTTI A, BORRIELLO A, RICCIARDI M, et al. Effects of sepiolite clay on degradation and fire behaviour of a bisphenol A-based epoxy [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 73: 139-148.
- [31] WANG J, REN S, GUO M. Preparation and humidity controlling behaviors of sepiolite/polyacrylic acid (sodium) composite [J]. *Procedia Engineering*, 2012, 27(8): 423-430.
- [32] GONZALEZ J C, MOLINA-SABIO M, RODRIGUEZ-REINOSO F. Sepiolite-based adsorbents as humidity controller [J]. *Applied Clay Science*, 2002, 20(3): 111-118.
- [33] 贾堤, 武梦笔, 林文桐. 海泡石用作建筑涂料增稠流变剂的研究 [J]. *新型建筑材料*, 2003(3): 53.
- [34] 胡珊, 沈上越, 李珍, 等. 两种纤维状非金属矿物在汽车制动摩擦片中的应用 [J]. *汽车技术*, 2003, 10(8): 35-37.