

# 海泡石精细化加工及在战略性新兴产业的应用

纪慧超<sup>1,2</sup>, 董雄波<sup>1,2</sup>, 杨华明<sup>3</sup>

1. 中国地质大学(武汉) 纳米矿物材料及应用教育部工程研究中心, 湖北 武汉 430074;
2. 中国地质大学(武汉) 材料与化学学院, 湖北 武汉 430074;
3. 中南大学 资源加工与生物工程学院, 湖南 长沙 410083

中图分类号: TD985 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2020)06-0016-10  
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2020.06.003

**摘要** 海泡石在战略性新兴产业领域已得到了广泛应用。首先介绍了海泡石的结构及物化特性, 阐述了海泡石提纯加工技术, 综述了海泡石在节能环保、新能源、生物及新材料四个战略性新兴产业领域的研究进展。海泡石独特的表界面结构赋予其较大的比表面积、较好的吸附性、流变性、热稳定性和催化性, 为海泡石的多功能化应用奠定了基础。随着科学技术的发展, 海泡石作为一种战略性非金属矿物, 功能化开发应用研究将更加深入, 其在各应用领域具有广阔的应用前景。

**关键词** 海泡石; 节能环保; 新能源; 生物领域; 新材料

## 引言

自然界中, 硅酸盐矿物储量十分丰富, 是现代工业的基础材料, 也是战略性新兴产业的支撑材料, 在国民经济建设中具有重要的地位和作用<sup>[1]</sup>。在众多的黏土矿物中, 海泡石(Sepiolite)是一种含水富镁硅酸盐黏土矿物, 呈纤维状结构, 在自然界中属于特种稀有非金属矿, 分布较少, 常与蒙脱石、滑石、凹凸棒石、石英、方解石、白云石等矿物伴生<sup>[1,3]</sup>。世界已探明海泡石储量为5 000多万t。西班牙是目前海泡石储量最丰富的国家, 储量为3 000多万t, 占世界总储量的70%。我国的海泡石储量约为1 200万t, 主要分布在湖南、江西、河北、湖北、贵州等省区<sup>[4]</sup>。

海泡石具有独特的微观结构和纤维形态、低密度、高比表面积、强吸附性和热稳定性、价格低廉和储量丰富等特点, 其开发利用已成为增强材料、吸附剂、药物载体、催化剂载体等众多研究领域的热门课题<sup>[5-9]</sup>。海泡石的用途多达130余种, 是应用最广泛的矿物原料之一<sup>[10,11]</sup>。现阶段, 海泡石在战略性新兴产业中,

已得到了广泛的应用。

## 1 海泡石的结构及物理化学特性

### 1.1 海泡石的结构

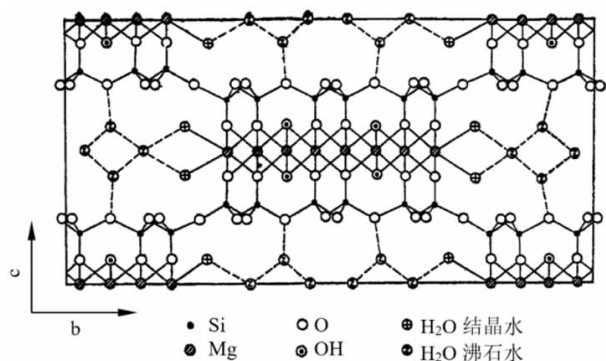
海泡石是一种层链状硅酸盐黏土矿物, 结构中两层硅氧四面体中间夹一层镁氧八面体, 形成2:1型的层状结构单元。其四面体的顶层是连续的, 每六个硅氧四面体顶角相反, 形成如图1所示结构<sup>[2,12,13]</sup>。由于八面体层的不连续, 使其结构中出现了许多通道, 通道的取向与纤维轴一致, 允许水分子、金属阳离子、有机小分子等进入其中。因此, 海泡石具有较大的比表面积, 较高的孔隙率, 拥有贯穿整个结构的沸石水纳米孔道, 孔道的截面约0.35 nm × 1.06 nm, 理论表面积达900 m<sup>2</sup>/g<sup>[14]</sup>, 其中, 内表面积为500 m<sup>2</sup>/g, 外表面积400 m<sup>2</sup>/g。这些结构基于具有平行通道的不连续薄层, 导致海泡石呈纤维形态。纤维的尺寸差异很大, 其长度分布在0.2~5 μm之间, 宽度分布在100~300 nm之间, 厚度分布在50~100 nm之间<sup>[15,16]</sup>。

收稿日期: 2020-10-16

基金项目: 国家重点研发计划资助(2017YFB0310903); 中国博士后科学基金(2020TQ0298)

作者简介: 纪慧超(1991-), 男, 陕西宝鸡人, 博士生, 主要从事矿物材料研究, E-mail: jhc12580@163.com。

通信作者: 董雄波(1993-), 男, 湖北荆州人, 博士后, 主要从事矿物材料研究, Email: 18810672030@163.com。

图1 海泡石的晶体结构示意图<sup>[13]</sup>Fig. 1 The crystal structure of sepiolite<sup>[13]</sup>

## 1.2 海泡石的物理化学特性

海泡石属于斜方晶系或单斜晶系,化学式为  $Mg_8(H_2O)_4[Si_6O_{16}]_2(OH)_4 \cdot 8H_2O$ <sup>[17]</sup>,理论化学成分为  $SiO_2$  55.65%,  $MgO$  24.89%,  $H_2O^+$  8.34%,  $H_2O^-$  11.12%<sup>[2]</sup>。 $Fe^{2+}$ 、 $Fe^{3+}$ 和  $Mn^{2+}$ 等可与  $Mg^{2+}$ 进行置换<sup>[1]</sup>。海泡石的物理化学性质如表1所示<sup>[18]</sup>。

表1 海泡石的物理化学性质

Table 1 Physical and chemical properties of sepiolite

理化性质	海泡石
外观	颜色多变,有灰白色、浅黄色、浅灰色等
硬度	2~2.5(莫氏硬度)
比重	2~2.3
相对密度	2.4~2.6
熔点	1 500~1 700 ℃,耐高温
吸附性	吸收大于自身质量 150% 的水
吸水率	160%~200%
饱和盐水吸附率	饱和盐水吸附率:180%~260%
热稳定性	300 ℃ 以内,损失吸附水或沸石水;300~800 ℃ 时,结晶水脱离,结构出现畸变;800 ℃ 以上时,结构中羟基水脱离,形成斜顽辉石和方解石
溶液酸碱性	海泡石 $\Phi = 10\%$ 悬浮液 pH 值约为 9

## 2 海泡石的提纯加工

### 2.1 选矿提纯

我国的海泡石主要以中低品位矿石为主,品位分布于 20%~30% 之间,天然优质矿石较少,难以满足工业应用要求,因此,选矿提纯成为提高其应用价值的关键<sup>[19]</sup>。海泡石的选矿提纯技术主要分为干法和湿法两种,其中,湿法选矿提纯技术使用较多。湿法选矿提纯技术以解聚分散、重力、离心力、选择性絮凝分离

等物理方法为主,辅之以浮选等综合选矿提纯工艺<sup>[1,20]</sup>。

李虹等<sup>[19]</sup>以品位为 28%~44%,主要伴生矿为滑石、方解石、石英等的海泡石原矿为研究对象,采用机械搅拌使海泡石单体充分解离,加入分散剂和抑制剂等辅助药剂,并采用高剪切、高转速离心设备进行分散沉降分选,最终得到了品位为 95%、回收率为 60% 的海泡石精矿。

Zhou 等<sup>[21]</sup>采用沉淀法和微波酸处理相结合的方法成功去除了海泡石矿物中的杂质,提高了海泡石的纯度。原矿中主要脉石矿物为石英和方解石,沉淀法可有效去除石英等杂质,微波酸处理法可去除海泡石中的非硅酸盐杂质。研究表明:经沉降及微波照射后,该海泡石纯度由 42% 提高至 90% 以上。

谭建杰等<sup>[22]</sup>利用海泡石与脉石矿物在颗粒直径、密度上的差异性,采用捣浆—离心分离法将海泡石与各脉石矿物分离。首先对矿物表面电位进行了调整,加入六偏磷酸钠改善分散性,在碱性环境(pH=9),捣浆转速 1 600 r/min,时间 25 min,离心机转速 3 100 r/min,时间为 5 min。经上述处理后,该海泡石品位由 38% 提升至 77.33%。

屈小梭等<sup>[23]</sup>采用擦洗—离心分离法对海泡石进行提纯。研究表明,经调浆擦洗,过筛及离心分选后,该海泡石纯度由 56.0% 提高至 89.2%,回收率高达 75.34%。

### 2.2 海泡石加工

海泡石纯度越高,其物化性能和工艺性能越优,使用范围更广,应用价值也将进一步提升。目前,海泡石的加工主要分为基础加工和深加工两个方面。

基础加工:球磨和选矿提纯是海泡石基础加工的主要方法。对于粗粒级的海泡石,使用球磨可得到粒度范围为 0.2~0.6 mm 的海泡石。针对不同产地、不同用途的海泡石,可采用不同类型的球磨机进行基础加工。基础的球磨加工不但有利于选矿提纯,也可以添加不同的组分来满足各种材料的制备要求。

深加工:海泡石的应用前景取决于深加工的程度。海泡石的深加工主要有超细加工、活化、表面改性处理等方式。其中,超细加工根据对产品细度要求的不同,通常采用气流磨和高速机械式冲击磨机进行加工<sup>[1]</sup>。目前,海泡石改性的方法主要有酸改性、离子交换改性、焙烧处理改性以及有机改性等<sup>[24]</sup>。

曹伟城等<sup>[24]</sup>首先采用盐酸对海泡石进行酸化处理,再采用十六烷基三甲基溴化铵对海泡石进行有机化改性,制备得到多功能有机海泡石。结果表明,酸活化处理可以有效除杂,提高纯度;海泡石层间距经有机

化处理之后,从12.16 nm增加到12.30 nm,且海泡石纤维得到解束而变松散,从而提高了其反应活性,展现出了良好的吸附性能。

贺洋<sup>[25]</sup>采用联合分级、解聚、活化等方法,对低品质海泡石原矿进行分选改性处理,成功制备了超细海泡石粉体吸附材料。试验结果表明:与海泡石原矿相比,制备得到超细海泡石粉体吸附材料粒度较细,比表面积较大,表面活性较高,对氨、甲醛等气体的吸附性能更优。

Chen等<sup>[26]</sup>采用正硅酸乙酯和十六烷基三甲氧基硅烷为前驱体对海泡石进行改性,并通过喷涂环氧树脂和改性海泡石的悬浮液制备涂层。研究了改性海泡石与环氧树脂的配比对涂层形貌和疏水性的影响。结果表明:该涂层具有良好的机械耐久性,在强酸、强碱溶液中浸泡30 d后仍能保持良好的超疏水性能。

## 3 海泡石在节能环保领域的应用

### 3.1 节能材料

相变材料(PCM)因其可重复利用、热源温度恒定、热回收率高、储能密度大等优点而被广泛应用于保温服、建筑节能、空调系统、太阳能储存、余热回收等领域<sup>[27, 28]</sup>。海泡石与有机PCM具有良好的化学相容性,且具有无毒、多孔、耐火等优良的物理性能,是一种极具潜力的储热相变原材料。

Shen等<sup>[27]</sup>首先采用焙烧、碱法浸出和盐酸法对海泡石进行了处理,改善其孔结构特性。然后,采用真空浸渍法将月桂酸(LA)吸附在原料中,制备得到海泡石/月桂酸复合材料(SEP-LA)。结果表明:LA成功吸附于海泡石多孔结构中,并具有良好的相容性,LA在SEP-LA复合材料中的最大负载量高达60%。SEP-LA复合材料具有适宜的熔点和凝固点(42.5℃和41.3℃),分别对应的熔融潜热和冷却潜热值为125.2 J/g和113.9 J/g,导热系数比原材料LA高0.59 W/(m·K)。该复合材料在建筑节能领域具有良好的应用前景。

Shen等<sup>[28]</sup>采用真空浸渍法制备了硬脂酸(SA)吸附海泡石的新型复合相变材料。结果表明, $\alpha$ -海泡石( $\alpha$ -SPL)和 $\beta$ -海泡石( $\beta$ -SPL)对SA的最大吸附量分别为60%和49%。 $\alpha$ -SPL/SA和 $\beta$ -SPL/SA的潜热分别为118.7 J/g和95.8 J/g。热循环试验表明, $\alpha$ -SPL/SA和 $\beta$ -SPL/SA复合材料具有良好的结构稳定性和热可靠性;并对该复合PCM石膏板的热性能进行了评价,其在储热方面具有巨大的应用潜力。

Sari等<sup>[29]</sup>采用直接浸渍法将癸酸(CA)和硬脂酸(SA)共晶混合物与海泡石进行复合,制备了性状稳定

的海泡石/脂肪酸共晶复合材料,并对蓄热性能及其水泥基石膏的温控性能进行了研究。结果表明,所制备的复合材料具有适宜的熔点(22.8℃)和相对较高的潜热值(76.16 J/g)。海泡石/脂肪酸共晶复合材料在1 000次熔融/冷却循环中仍表现出优异的化学稳定性和蓄热可靠性。此外,与普通水泥砂浆相比,含海泡石/脂肪酸共晶复合材料的水泥砂浆展现了良好的温控性能。所制备的海泡石/脂肪酸水泥复合砂浆作为建筑围护结构,在室内调温节能应用领域具有广阔的市场前景。

### 3.2 环境修复

#### 3.2.1 重金属污染修复

随着社会的快速发展,土壤重金属污染治理需求日益迫切<sup>[30]</sup>。在处理重金属污染的方法中,吸附法是最为有效和经济的手段。现阶段研究已经表明,海泡石对土壤中或水中的 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{V}^{5+}$ 、 $\text{Hg}^{2+}$ 、 $\text{Co}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{Cd}^{2+}$ 等离子均显现了较好的吸附效果<sup>[31]</sup>。

海泡石具有很好的吸附性能,是一种优良的土壤改良剂,能对土壤中的重金属离子进行吸附,可用于重金属污染土壤的固化修复<sup>[32]</sup>。杨秀敏等<sup>[32]</sup>通过对土壤重金属形态的分析表明:添加海泡石可使土壤的pH值从3.86增加至8.19,同时可以降低重金属的可交换态浓度,使可交换态重金属转化为其他形态。并且重金属形态与土壤pH值存在显著的相关性。

黄湘云等<sup>[33]</sup>采用酸热活化、巯基有机化、羟基铁铝柱撑3种方法对天然海泡石进行改性,然后将其作为吸附剂加入土壤中,探究添加了改性海泡石的土壤对钒(V)的吸附效果。结果表明:海泡石经改性之后比表面积增大,吸附能力进一步增强,添加了羟基铁铝柱撑、酸热活化、巯基有机化改性后海泡石的土壤对 $\text{V}^{5+}$ 的吸附量分别为2 159.71 mg/kg、1 619.57 mg/kg、936.57 mg/kg。可以看出,添加了羟基铁铝柱撑法改性海泡石的土壤对钒的吸附效果最佳,但其稳定性仍有待进一步加强。

谢婧如等<sup>[34]</sup>采用静态吸附试验,研究了改性海泡石对水中 $\text{Hg}^{2+}$ 的吸附动力学和热力学特征。结果表明:通过有机改性向海泡石中引入了巯基,改性海泡石的表面孔隙增多,且带有更多的负电荷,有利于提高其对 $\text{Hg}^{2+}$ 的吸附能力。

#### 3.2.2 有机污染物分离降解

伴随着经济社会的高速发展,大量工业、农业、生活等有机废水直接排放,严重威胁着人们的生命健康。

海泡石作为一种重要的天然环境矿物材料,在有机废水处理领域展现了良好的应用前景。

腐殖酸(HA)作为天然水体中有机物质的主要成分之一,是日常饮用水水源有机微污染控制的重点对象<sup>[35]</sup>。陈卫等<sup>[35]</sup>制备得到磁改性海泡石(MSEP)用于去除水源中HA,研究MSEP对水源中HA的吸附和脱附行为。结果表明:室温下,MSEP添加量为0.6 g/L时对HA的吸附去除效果明显,去除率达到78.4%,中性pH时,去除效果最优。脱附再生结果表明:MSEP具有良好可再生性。

Naing等<sup>[36]</sup>采用水热法成功制备了BiVO<sub>4</sub>/海泡石纳米复合材料,研究了基于界面效应的光生载流子的传输机理。结果表明:所获得的BiVO<sub>4</sub>/海泡石纳米复合材料表现出优异的可见光光催化性能。在可见光照射下,纳米复合材料对抗生素四环素和亚甲基蓝的光催化降解率分别是纯BiVO<sub>4</sub>的2倍和5.34倍。XPS和拉曼光谱证实了BiVO<sub>4</sub>和海泡石之间存在较强的界面效应,该研究为设计黏土负载型光催化剂降解有机污染物提供了一种新的策略。

徐西蒙等<sup>[37]</sup>采用共沉淀法制备得到了磁改性海泡石催化剂,并用于催化过硫酸钾,去除水体中有机污染物双酚A。结果表明,高比表面积磁改性海泡石催化剂对双酚A展现了优越的吸附性能。同时,当催化剂投量为2 g/L、过硫酸钾投量为4 g/L、溶液pH=5时,20 min内完成了对双酚A(30 mg/L)的完全降解。该研究首次将磁改性海泡石作为过硫酸盐活化剂,为水中有机污染物的吸附-催化氧化体系设计提供了新的思路和方向。

### 3.2.3 VOCs 催化降解

挥发性有机化合物(VOCs)是空气污染的主要来源<sup>[38]</sup>,其排放量逐年递增,严重影响人们的日常生活。海泡石因其优良的界面及孔结构特性,在VOCs吸附与降解领域展现了广阔的工业应用前景。

韩静等<sup>[39]</sup>采用酸和水热改性海泡石,同时,研究了酸和水热改性对海泡石吸附气相丙酮性能的影响规律及机理。研究发现,在质量分数为13%的盐酸改性海泡石12 h后,对丙酮的静态吸附效果最好,吸附量高达54.41 mg/g;水热温度为170 ℃、改性4 h的海泡石对丙酮的吸附量较酸改性低,仅为23.20 mg/g。改性海泡石对于丙酮的吸附,尤其是高浓度丙酮的吸附具有显著效果,该研究为开发经济高效的吸附剂应用具有一定的参考价值,并为丙酮污染的治理提出了新思路。

Ardakani等<sup>[40]</sup>制备得到了海泡石铜钴双金属复合催化材料,在甲苯催化降解中展现了良好的性能。与

单组分金属氧化物催化剂相比,优化后的Co-Cu/海泡石催化剂为甲苯的完全氧化提供了更多的活性中心,表现出更高的催化活性。

熊巧<sup>[41]</sup>采用溶液法将TiO<sub>2</sub>溶胶与酸改性海泡石纤维(AAS)进行复合,制备了TiO<sub>2</sub>/酸改性海泡石纤维(TiO<sub>2</sub>/AAS)复合光催化剂,并探讨了甲醛光催化降解的机理。研究表明,在最佳条件下制备的TiO<sub>2</sub>/AAS复合光催化剂在2 h内对空气中甲醛的降解率能够达到93.1%,并且在催化降解甲醛五次之后,对甲醛的降解率还可以达到85%,说明该复合光催化剂具有良好的催化稳定性。TiO<sub>2</sub>/AAS复合光催化剂良好的光催化性能归因于双中孔结构、较高的比表面积、良好的吸附性能以及所制备的TiO<sub>2</sub>/AAS复合光催化剂中存在的锐钛矿相和金红石相TiO<sub>2</sub>的共同作用。利用天然黏土矿物良好的吸附性能和催化载体性能制备复合光催化材料,将在光催化领域拥有广阔的应用前景。

## 4 海泡石在新能源领域的应用

### 4.1 生物质能源转化

生物质是地球上储量最为丰富且可再生的碳源,形成周期短、成本低,受到越来越多的关注。利用资源丰富、价格低廉的生物质转化为高价值的化工产品成为我国发展可再生能源的一个重要方向<sup>[42]</sup>。海泡石因其特殊的结构与性质,在生物质转化过程中作为载体制备复合催化剂有着广泛的应用。

戊内酯(GVL)是一种便于储存和运输的源自生物质的能源,无毒,泄漏易于识别、易溶于水、对环境友好等特点,被广泛应用。García等<sup>[43]</sup>采用浸渍法,制备得到了Ni纳米颗粒/海泡石复合催化剂。研究发现,复合材料表面Ni纳米颗粒粒径均小于4 nm,该催化剂能够在常温常压下,在LA水相体系中,以Zn金属作为原位产生氢气的位点,在没有任何外来氢源时,将LA加氢高效且环保地催化还原为GVL。其中,当Ni纳米颗粒负载量为2%时,GVL的产率最高(25%),为纯Ni催化剂催化效率的4倍。同时,催化剂在三次循环利用后,依然表现出良好的稳定性。然而,当催化剂中Ni负载量过大时,纳米颗粒的团聚加剧,GVL产率逐渐降低。因此,Ni纳米颗粒与海泡石载体的比例以及Ni纳米颗粒在载体上的分散程度是控制LA加氢催化性能的关键参数。

糠醛是呋喃环系最重要的衍生物,化学性质活泼,可以通过氧化缩合制取众多的衍生物。其中,糠酸作为糠醛氧化所得的典型产品,被广泛应用于塑料、食品、医疗、化妆以及合成等领域<sup>[44]</sup>。因此,将生物质转

化为高价值的糠醛产品引起了广泛关注。Peng 等<sup>[45]</sup>首次报道了 Sn/海泡石复合催化剂,将秸秆转化为糠醛。采用丙酮、酒精以及 NaOH 预处理去除秸秆中的蜡及二氧化硅,然后以硫酸活化过的 Sn/海泡石复合材料为催化剂,在 170 °C 时,将秸秆在 20 min 内转化成糠醛,其产率为 42.2%。最后,将该 Sn/海泡石复合催化剂与携带马肝醇脱氢酶的大肠杆菌细胞重组,最终将秸秆转化为糠醛化工产品。

## 4.2 乙醇重整制氢

氢气由于绿色、能量密度高、利用率高、可再生等特点,被认为是未来能源的最终形式,但目前作为主要氢源的化石燃料是氢能发展的主要障碍。长远来看,相对绿色的制氢气方法有水蒸气重整、水电解等。目前以海泡石作为模板或载体制备催化剂的研究基本局限于乙醇重整制氢。因此本部分主要以乙醇蒸气重整为例,综述了海泡石在制氢方面的应用。

目前,在乙醇水蒸气重整领域,催化剂的效率及稳定性相对较低,乙醇还原过程中碳在催化剂表面的沉积等问题依然是制氢的难点。Chen 等<sup>[46]</sup>通过酸化处理、煅烧等工艺对海泡石进行提纯、加工。以提纯、加工后的海泡石为载体,采用共沉淀法将 Co 和 Ce 引入到海泡石载体上,制备了一系列 Co - xCe/海泡石催化剂,用于催化乙醇蒸气重整制氢。研究表明,酸化有效地去除了海泡石中的镁氧八面体层,将海泡石溶解成为无定形 SiO<sub>2</sub>,其结构中产生了丰富的可容纳 Co、Ce 掺杂原子的八面体空位,并暴露出更多的活性吸附中心、分散金属粒子及捕获乙醇蒸气分子的硅羟基。此外,该工艺有效地提高了海泡石的纯度、孔隙率,增加内片层的数量和表面积,提高催化剂的吸附容量。研究发现,在 600 °C (S/C(水蒸气/乙醇) = 3) 时,Co - 0.3Ce/SEP 在催化乙醇产氢时,效果最佳,C 和 H<sub>2</sub> 的转化率分别达到了 90.8%、69.1%。在 100 h 反应中,催化剂表现出了良好的稳定性,这是因为海泡石的引入,显著提升了催化剂的热稳定性。

Wang 等<sup>[47]</sup>采用表面活性剂十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)和聚乙烯吡咯烷酮(PVP)辅助共沉淀法制备得到了 Co - Ce/海泡石复合催化材料。催化剂制备过程中,利用表面活性剂的络合能力对复合催化剂的结构、形貌进行了原位改性。研究表明:长链表面活性剂的“空间效应”扩大了海泡石表面金属团簇之间的距离,增加了催化剂的孔隙率,致使 Co/Ce 原子在海泡石表面富集,有效地提高了乙醇蒸气产氢时的重整特性,缓解催化活性组分在还原乙醇产氢过程中的聚集、烧结性能以及无定形焦炭的形成。通过对比发现,相对于未改性的催化剂,改性后 Co - Ce/海泡石复合催

化剂的 Co、Ce 表面原子密度明显提高。当该催化剂的成分被调至最佳比例时,催化剂在 600 °C S/C(水蒸气/乙醇) = 3 时催化乙醇重整产氢,乙醇转化率为 96.2%,氢气的产率为 77.9%,稳定性可以达到 100 h。当 S/C = 1.5 时,在重整乙醇产氢时,复合材料仍呈现优良的催化活性。

Selvitepe 等<sup>[48]</sup>以磷酸酸化后的海泡石为原料,制备得到了 CoB/海泡石复合催化剂。研究发现,经磷酸处理后,海泡石变为非晶态,其中的钙、镁离子均被去除,孔容增加,表面的氧化态发生变化,且海泡石的粒径约为 2.2 nm,其聚集纤维束转变为分散纤维结构。CoB/海泡石复合催化剂催化 NaBH<sub>4</sub> 水解制取氢气结果表明,催化 NaBH<sub>4</sub> 分解水产氢的完成时间仅需 80 min,在 30 °C 和 60 °C 时的产氢速率分别为 1 486 mL/(min · g<sup>-1</sup>) 和 5 025 mL/(min · g<sup>-1</sup>),相对于未经酸处理的 CoB/海泡石复合材料提高了 5 倍。以上结果说明,磷酸活化是一种有效的改性途径,可显著改善海泡石的成分、结构、形貌以及表面性质。同时,作者研究了磷酸浓度对催化剂效率的影响,发现过高的磷酸浓度会使得海泡石结构变形,降低催化剂的产氢性能。

## 5 海泡石在生物领域的应用

### 5.1 细胞生长

海泡石和坡缕石被证明具有抗炎抗菌的作用<sup>[49]</sup>。Paola 等<sup>[50]</sup>通过构建小鼠炎症模型,分析了海泡石和坡缕石的免疫调节作用,重点描述了一组促炎细胞因子的基因表达水平。采用逆转录聚合酶链反应(RT - PCR)进行定量检测。模型中选择白细胞介素 IL - 1 和 IL - 6,肿瘤坏死因子(TNF - TNF)和干扰素(IFN - TNF)作为促炎细胞因子。结果表明:海泡石和坡缕石在抗炎性疾病的治疗中可以作为药理调节剂。

Javiera 等<sup>[6]</sup>采用 SRB 法研究了海泡石对人类癌细胞增殖行为的影响机理。结果表明:海泡石对 U251 或 SKLU 细胞的增殖反应均有抑制或增强作用,但增殖反应与海泡石成分或微孔特性之间没有明显的相关性。

### 5.2 DNA 转移载体

在各种黏土矿物中,海泡石具有较低的细胞毒性,是一种潜在的纳米载体,可将质粒 DNA 稳定地转移到细菌、哺乳动物和人类细胞中。Fidel 等<sup>[51]</sup>采用海泡石预组装 DNA 所产生的生物杂交材料培养细菌,能以快速、方便、廉价的方法,显著提高质粒 DNA 转化细菌的效率。虽然最终的转化效率相对较低,但该方法在很大程度上足以满足分子生物学的应用,从而节省时间

和节约资金。此外,海泡石与细胞膜之间的物理相互作用可能是水的过滤和去污等应用的基础。这些结果为利用海泡石为基础的生物模型开辟了道路,为学术和应用科学提供了新的研究方向。

Piétrement 等<sup>[52]</sup>首先对海泡石进行超声处理,使海泡石纤维解聚,提高其与 DNA 和细胞的相互作用效率。然后,采用质粒 DNA 和超声处理的海泡石为原料,合成了新的生物杂交体(海泡石/DNA)。试验结果表明:在海泡石/DNA 合成之前,对海泡石进行超声处理可将稳定的质粒 DNA 转染效率提高 100 倍。

### 5.3 载药抗菌

硅酸盐黏土矿物基抗菌材料是当前新兴的抗菌剂,基于其独特的形貌结构以及物化特性,能够抑制细菌、病毒及真菌等微生物的增殖而被广泛应用<sup>[53-55]</sup>。Eusepi 等<sup>[56]</sup>研究了坡缕石和海泡石作为三种香芹酚前药的低成本纳米载体,以改善其药代动力学和生物制药特性。为了得到药物-黏土杂化体系,进行了吸附平衡研究。结果表明:在混合体系中,三种香芹酚前药的化学稳定性均得到了改善,并且前药可以持续释放具有药理活性的香芹酚,从而提高了抗菌活性。

## 6 海泡石在新材料领域的应用

### 6.1 传感器

海泡石除具有独特的纳米纤维形态外,还具备丰富的亲水官能团(-OH),展现了优良的吸水性能,是一种极具潜力的湿敏传感器原料。

Ahmed 等<sup>[57]</sup>以湿法提纯、微粉化、盐酸酸化改性后海泡石为原料,采用沉淀法及热处理方法,在海泡石中引入各种金属( $W^{4+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Gd^{3+}$ ,  $La^{3+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Nd^{3+}$ ,  $Sm^{3+}$ ,  $Sr^{2+}$ ,  $Y^{3+}$  和  $Zn^{2+}$ )氧化物/氢氧化物纳米颗粒,将所得氧化物或氢氧化物/海泡石复合材料在 300 MPa 下单轴压制成电阻式湿敏元件。其中,掺杂钨的海泡石在相对湿度(RH)高于 40% 的范围内有显著的响应效果。然而,其湿度响应范围比较窄。

Hassan 等<sup>[58]</sup>以盐酸酸化改性后的海泡石为原料,通过沉积及煅烧工艺制备得到 ZnO/海泡石复合湿敏材料,煅烧工艺可去除海泡石表面或结构中的水分子,这些有利于提高材料对于水分子的吸附。试验结果表明:基于 ZnO/海泡石复合材料制备的湿敏材料,在室温下的温度检测下限可达到 30%。

Duan 等<sup>[59]</sup>以天然、低成本的海泡石纳米纤维为原料,仅仅采用简单的涂布法制备得到了一种电阻式湿度传感器。湿敏测试结果表明:在室温(25 °C)下,该湿度传感器在 10.9% ~ 91.5% 的相对湿度范围内都具

有良好的湿敏特性(响应快、线性特性好、重复性好)。该工作为海泡石在廉价湿度传感器的实际应用奠定了重要基础。

### 6.2 介电、压电材料

压电、介电材料由于可以实现能量的转换与存储,在能源供应领域具有重要作用和意义<sup>[60]</sup>。

基于海泡石优异的吸附水能力以及高的阳离子交换容量,Zhang 等<sup>[61]</sup>以海泡石为原料,通过  $Li^+$  取代海泡石中  $Mg^{2+}$  和  $Ca^{2+}$ ,制备得到了具有优异介电、压电性能的海泡石基复合材料。以改性后的海泡石为基体,采用传统涂层技术制备了海泡石/聚偏氟乙烯-六氟丙烯(PVDF-HFP)柔性复合薄膜。研究结果表明:当改性后海泡石材料中海泡石与  $H_2O$  含量分别为 15% 和 13% 时,该复合材料的压电常数( $d_{33}$ )为 32,短路电流为  $7.5 \times 10^{-7}$  A,介电常数为 48。 $Li^+$  和吸附水对  $d_{33}$ 、介电常数、短路电流的影响研究结果表明:海泡石中吸附的  $H_2O$  分子通过氢键增强了极性- $\beta$  相,引入电流,而  $Li^+$  则改善了复合材料的极化性能,从而提高了复合膜的压电性能和介电性能。

### 6.3 摩擦材料

石棉纤维是制动系统中摩擦纤维增强聚合物复合材料的主要材料,但因其致癌特性已被禁止使用<sup>[62]</sup>。海泡石纤维与石棉纤维相似,其微观结构和性能表现出高吸附性、高纤维强度和良好的热稳定性,因此海泡石在摩擦领域具有替代石棉的潜力。

Hou 等<sup>[63]</sup>采用化学改性后海泡石增强制动复合材料对树脂的结合力。研究结果表明,改性海泡石与作为制动摩擦材料的有机物具有更好的相容性。海泡石纤维改性的复合材料在不同摩擦温度下的摩擦磨损性能检测结果表明,用硬脂酸(SA)和乙酰丙酮钛(TA)对海泡石纤维进行表面改性有助于增强其机械性能,从而降低磨损率。与天然矿物纤维(硅灰石)和人工合成矿物纤维(玄武岩)相比,海泡石在摩擦复合材料中显示出优异的耐热褪色性。因此,采用海泡石纤维制备摩擦材料经济合理且技术可行。

### 6.4 成型材料

Mar 等<sup>[64]</sup>以纳米纤维素和海泡石为原料,采用高剪切均匀化和超声辐照的方法,制备了新型功能性杂化纤维材料。纳米纤维素与海泡石纤维的物理交联,形成均匀且稳定的高黏度凝胶,可用于制备具有机械性能的杂化纳米纸。海泡石的存在改变了浇铸过程中薄膜的表面粗糙度,提升薄膜的机械行为、表面性质和化学反应性。将该杂化纳米纸进一步与其它组分组

装,如碳纳米管、磁铁矿或氧化锌纳米颗粒等,可生产多功能杂化纳米纸,为开发其它多种用途广泛的有机-无机材料开辟了一条新途径。

Kim 等<sup>[65]</sup>利用聚对苯二甲酸乙二醇酯(PETG)和海泡石制备纳米复合材料,并将其应用于 3D 打印。通过添加海泡石可使三维打印 PETG 样品的拉伸强度提高 35.4%,而注射成型 PETG 样品的拉伸强度提高了 7.2%。以上结果表明:3D 打印制备的 PETG/海泡石纳米复合材料的物理性能优于传统注塑成型的复合材料。随着海泡石含量的增加,FDM-3D 打印 PETG/海泡石复合材料的物理强度提升效率高于注塑成型的复合材料。基于具有良好力学性能的新型 PETG/海泡石复合材料,通过 FDM-3D 打印技术,制备高强度成型复合材料具有较好的应用前景。

## 6.5 微波吸收材料

当今,快速发展的通信技术造成了严重的电磁波污染,影响了敏感电子设备的运行,威胁着人类的健康。所以,对微波吸收材料进行进一步改性至关重要<sup>[66]</sup>。棒状海泡石纤维形成的网络结构有利于入射电磁波的多次反射和散射,在微波吸收材料方面具有一定优势<sup>[67]</sup>。

Shang 等<sup>[67]</sup>采用原位聚合技术,将海泡石与导电性高的聚苯胺微波吸收剂(PANI)进行复合,制备了以海泡石为“骨架”、以 PANI 作为“皮肤”结构的复合材料。这种结构不仅具有丰富的导电网络和极化弛豫,可以很好地平衡材料中的阻抗以及介电常数。当两者质量相等时,复合材料具有最优的微波吸收性能。性能测试结果表明:复合材料在厚度为 2.5 mm,其最小反射损耗为 -50.23 dB;厚度为 1.8 mm 时,其有效吸收带宽小于 -10 dB ( $f = 5.01$  GHz)。当改变材料厚度至 1.5~5.0 mm 时,反射损耗小于 -20 dB,有效吸收带宽可以覆盖整个 Ku、X 和 C 波段。该 PANI/海泡石复合材料具有制备工艺简单、成本低、密度小、吸收性能好、物理化学性质稳定等优势,为黏土基复合材料的电磁应用提供了新的视角。

## 6.6 阻燃、防火涂料

木塑复合材料是一种环保型材料,由于其性能好、可重复利用、价格低廉等优点而被广泛使用<sup>[68]</sup>。但木塑复合材料易燃,因此开发安全环保且具有优异阻燃特性的木塑复合材料具有重要意义<sup>[69]</sup>。李歆等<sup>[70]</sup>在聚丙烯/木粉(PP/WF)复合材料中,添加海泡石和聚磷酸铵(APP),探究了海泡石和 APP 对该体系阻燃抑烟性能的影响。结果表明:在海泡石与 APP 的质量比为 1:9、阻燃剂总质量分数为 20% 的条件下,复合材

料的极限氧指数可以达到 27.2%;相比于纯 PP/WF 复合材料的热释放速率峰值和总热释放量分别降低了 49.3% 和 28.6%,海泡石的添加显著提高了该复合材料的热稳定性。

透明防火涂料以其独特的光学透明性和防火性能成为阻燃研究领域的热门课题,该涂料可降低木材和木制品的火灾危险性,被广泛应用于文物、历史建筑和高档家具<sup>[71, 72]</sup>。Xu 等<sup>[73]</sup>通过将聚磷酸酯(PPB)接枝到海泡石表面上,合成了一系列 PPB 改性海泡石(SPPBs)阻燃剂;然后将所得 SPPBs 与三聚氰胺甲醛树脂混合制成氨基透明防火涂料。光学透明性和形貌分析表明:海泡石片材在氨基基体中的完全剥离和均匀分散保持了涂层的高透明度。此外,适量海泡石的存在可提高涂层的热稳定性、防火性能和抑烟性能。当 PPB 与海泡石的质量比为 95:5 时,所制备样品在 800 °C 下的残余量高达 32.8%,火焰蔓延率和烟度被有效地降低。

## 7 结论及展望

近年来海泡石相关产业发展迅速,应用需求日益广泛,研究逐渐深入,尤其是在节能环保、生物、新能源和新材料等战略性新兴产业已经取得了较好的应用。但是,我国高品位海泡石储量较少,生产企业规模较小,生产技术相对单一,在国际海泡石功能材料市场所占份额较低。海泡石表界面结构及理化特性等基础研究有待进一步深入,为低品位海泡石提纯加工及功能化应用奠定坚实基础。同时,针对市场需求,基于密度泛函理论计算设计开发新兴多功能海泡石基复合材料,是海泡石资源战略性开发及高附加值应用领域的重要研究方向。

### 参考文献:

- [1] 郑水林. 非金属矿加工与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 143-147.
- [2] 杨华明, 等. 硅酸盐矿物功能材料 [M]. 北京: 科学出版社, 2019: 6-7.
- [3] ZHUANG G Z, GAO J H, CHEN H W, et al. A new one-step method for physical purification and organic modification of sepiolite [J]. Applied Clay Science, 2018, 153: 1-8.
- [4] 黄小红. 海泡石的功能化改性及其在吸附和催化性能方面的研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2008: 1-10.
- [5] GÜR E, ALTINISIK A, YURDAKOC K. Preparation and characterization of chitosan/sepiolite bionanocomposites for tetracycline release [J]. Polymer Composites, 2017, 38(9): 1810-1818.
- [6] JAVIERA, CERVINI-SILVA, MARIÁ, et al. Cell growth underpinned by sepiolite [J]. Applied Clay Science, 2017, 137: 77-82.
- [7] KUTALKOVA E, PLACHY T, SEDLACIK M. On the enhanced sedimentation stability and electrorheological performance of intelligent fluids based on sepiolite particles [J]. Journal of Molecular Liquids, 2020,



- 309; 113 – 120.
- [8] 何明乙,张欢,戴亚堂,等. 海泡石-花球状 BiOCl 纳米复合材料的制备及其光催化性能 [J]. 材料研究学报,2015,29(3):178 – 184.
- [9] LIU Y, MAO Y Y, TANG X X, et al. Synthesis of Ag/AgCl/Fe – S plasmonic catalyst for bisphenol A degradation in heterogeneous photo – Fenton system under visible light irradiation [J]. Chinese Journal of Catalysis, 2017, 38(10): 1726 – 1735.
- [10] 于生慧. 纳米环境矿物材料的制备及重金属处理研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学,2016:17 – 19
- [11] 王雪琴,李珍,杨友生. 海泡石的改性及应用研究现状 [J]. 中国非金属矿工业导刊,2003(3):11 – 14.
- [12] TARTAGLIONE G, TABUANI D, CAMINO G. Thermal and morphological characterisation of organically modified sepiolite [J]. Microporous & Mesoporous Materials, 2008, 107(1 – 2):161 – 168.
- [13] 吴平霄. 黏土矿物材料与环境修复 [M]. 北京:化学工业出版社,2004: 58 – 62.
- [14] 商增耀. 海泡石矿物纳米纤维表面阳离子的输运与转移研究 [D]. 天津:河北工业大学,2016:4 – 8.
- [15] DEGIRMENBASI N, BOZ N, KALYON D M. Biofuel production via transesterification using sepiolite – supported alkaline catalysts [J]. Applied Catalysis B Environmental, 2014, 150 – 151: 147 – 156.
- [16] 郑承辉,欧阳静,侯凯,等.  $\beta$  – 海泡石提纯与胺基改性及其用作 CO<sub>2</sub> 固体吸附剂的研究 [J]. 矿冶工程,2017,37(3):129 – 132.
- [17] ESTEBAN – CUBILLO A, MARCO J F, MOYA J S, et al. On the nature and location of nanoparticulate iron phases and their precursors synthesized with in a sepiolite matrix [J]. Journal of Physical Chemistry C, 2008, 112(8): 2864 – 2871.
- [18] 张学兵,司炳艳. 海泡石的性状及应用研究 [J]. 中外建筑,2011(1):135 – 136.
- [19] 李虹,杨兰芬. 湖南永和低品位海泡石提纯研究 [J]. 非金属矿,1995(3):47 – 48.
- [20] 杜高翔,郑水林,赵纪新,等. 海泡石的生产应用与研究现状 [J]. 矿冶工程,2004,24(z1):34 – 39.
- [21] ZHOU F, YAN C, ZHANG Y, et al. Purification and defibering of a Chinese sepiolite [J]. Applied Clay Science, 2016, 124/125(may): 119 – 126.
- [22] 谭建杰,程琪林,吴婷,等. 海泡石提纯改性及在内墙涂覆材料中的应用研究 [J]. 非金属矿,2017,40(3):89 – 92.
- [23] 屈小梭,宋贝,郑水林,等. 海泡石的选矿提纯与精矿物化特性研究 [J]. 非金属矿,2013,36(4):35 – 36,68.
- [24] 曹伟城,谢襄漓,刘伟,等. 海泡石的酸处理和有机海泡石的制备 [J]. 化工矿物与加工,2012,41(4):7 – 11.
- [25] 贺洋. 低品质海泡石提纯及吸附性能研究 [J]. 非金属矿,2019,42(4):56 – 57.
- [26] CHEN B B, JIA Y H, ZHANG M J, et al. Facile modification of sepiolite and its application in superhydrophobic coatings [J]. Applied Clay Science, 2019, 174: 1 – 9.
- [27] SHEN Q, OUYANG J, ZHANG Y, et al. Lauric acid/modified sepiolite composite as a form – stable phase change material for thermal energy storage [J]. Applied Clay Science, 2017, 146: 14 – 22.
- [28] SHEN Q, LIU S Y, OUYANG J, et al. Sepiolite supported stearic acid composites for thermal energy storage [J]. Rsc Advances, 2016, 113(6): 112493 – 112501.
- [29] SARI A, SHARMA R K, HEKIMOGLU G, et al. Preparation, characterization, thermal energy storage properties and temperature control performance of form – stabilized sepiolite based composite phase change materials [J]. Energy and Buildings, 2019, 188(4): 111 – 119.
- [30] 方至萍,廖敏,张楠,等. 施用海泡石对铅、镉在土壤 – 水稻系统中迁移与再分配的影响 [J]. 环境科学,2017,38(7):3028 – 3035.
- [31] 凤迎春,何少华,高伟,李虹霞. 海泡石对废水中有机物和重金属的吸附 [J]. 净水技术,2006(5):63 – 66.
- [32] 杨秀敏,任广荫,李立新,等. 土壤 pH 值对重金属形态的影响及其相关性研究 [J]. 中国矿业,2017,26(6):79 – 83.
- [33] 黄湘云,何文艳,李金鑫,等. 酸热活化,有机化,柱撑改性海泡石对土壤中钒的吸附固定 [J]. 环境工程,2020,38(2):147 – 152.
- [34] 谢婧如,陈本寿,张进忠,等. 巯基改性海泡石吸附水中的 Hg(II) [J]. 环境科学,2016,37(6):2187 – 2194.
- [35] 陈卫,马龙,刘海成. 磁改性海泡石对水源水中腐殖酸的吸附性能 [J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(2):109 – 115.
- [36] NAING H H, WANG K, LI Y, et al. Sepiolite supported BiVO<sub>4</sub> nanocomposites for efficient photocatalytic degradation of organic pollutants: Insight into the interface effect towards separation of photogenerated charges [J]. Science of The Total Environment, 2020 722. 137825. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137825>.
- [37] 徐西蒙,宗绍燕,刘丹. 磁改性海泡石催化过二硫酸盐降解双酚 A [J]. 哈尔滨工业大学学报,2019,51(8):60 – 66.
- [38] CHEN D L, PAN K L, CHANG M B. Catalytic removal of phenol from gas streams by perovskite – type catalysts [J]. 环境科学学报:英文版,2017,56(6):131 – 139.
- [39] 韩静,段二红,尹丽妮,等. 改性海泡石对丙酮的吸附特性研究 [J]. 河北工业科技,2017,34(5):381 – 388.
- [40] ARDAKANI M B, MAHABADI H A, JAFARI A J. Removal of toluene from air streams by cobalt – copper bimetallic catalysts supported on sepiolite [J]. Toxicological and Environmental Chemistry, 2019, 101(3): 1 – 16.
- [41] 熊巧. 双晶相 TiO<sub>2</sub>/海泡石纤维复合光催化剂的制备及其光催化性能研究 [D]. 武汉:武汉理工大学,2013.
- [42] WANG Z H, BUI Q, ZHANG B, et al. Biomass energy production and its impacts on the ecological footprint: An investigation of the G7 countries [J]. Science of the Total Environment, 2020, 743: 140741.
- [43] GARCÍA, SANCHIS R, MIGUEL P J, et al. Low temperature conversion of levulinic acid into  $\gamma$  – valerolactone using Zn to generate hydrogen from water and nickel catalysts supported on sepiolite [J]. RSC Advances, 2020, 10(35): 20395 – 20404.
- [44] HE Y C, JIANG C X, JIANG J W, et al. One – pot chemo – enzymatic synthesis of furfuralcohol from xylose [J]. Bioresource Technology, 2017, 238: 698 – 705.
- [45] PENG B, MA C L, ZHANG P Q, et al. An effective hybrid strategy for converting rice straw to furoic acid by tandem catalysis via Sn – sepiolite combined with recombinant E. coli whole cells harboring horse liver alcohol dehydrogenase [J]. Green Chemistry, 2019, 21: 5914 – 5923.
- [46] CHEN M Q, WANG C S, WANG Y S, et al. Hydrogen production from ethanol steam reforming: Effect of Ce content on catalytic performance of Co/Sepiolite catalyst [J]. Fuel, 2019, 247: 344 – 355.
- [47] WANG C S, WANG Y S, CHEN M Q, et al. Hydrogen production from ethanol steam reforming over Co – Ce/sepiolite catalysts prepared by a surfactant assisted coprecipitation method [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(49): 26888 – 26904.
- [48] SELVITEPE N, BALBAY A, SAKA C. Optimisation of sepiolite clay with phosphoric acid treatment as support material for CoB catalyst and



- application to produce hydrogen from the  $\text{NaBH}_4$  hydrolysis [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(31): 16387 – 16399.
- [49] CERVINI – SILVA J, NIETO – CAMACHO A, RAMÍREZ – APAN M T, et al. Anti – inflammatory, anti – bacterial, and cytotoxic activity of fibrous clays [J]. *Colloids & Surfaces B Biointerfaces*, 2015, 129: 1 – 6.
- [50] LÓPEZ – PACHECO C P, NIETO – CAMACHO A, ZARATE – REYES L, et al. Sepiolite and palygorskite – underpinned regulation of mRNA expression of pro – inflammatory cytokines as determined by a murine inflammation model [J]. *Applied Clay Science*, 2017, 137: 43 – 49.
- [51] CASTRO – SMIRNOV F A, PIÉTREMENT O, ARANDA P, et al. Biotechnological applications of the sepiolite interactions with bacteria: Bacterial transformation and DNA extraction [J]. *Applied Clay Science*, 2020, 191: 105613.
- [52] PIÉTREMENT O, CASTRO – SMIRNOV F A, CAM E L, et al. Sepiolite as a new nanocarrier for DNA transfer into mammalian cells: proof of concept, issues and perspectives [J]. *Chemical Record*, 2017, 18: 849 – 857.
- [53] BIDDECI G, CAVALLARO G, DI BLASI F, et al. Halloysite nanotubes loaded with peppermint essential oil as filler for functional biopolymer film [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 152: 548 – 557.
- [54] BEHROOZIAN S, SVENSSON S L, DAVIES J. Kisameet clay exhibits potent antibacterial activity against the ESKAPE pathogens [J]. *mBio*, 2016, 7(1): 01842 – 15.
- [55] 舒展,张毅,谢虹忆,等. 硅酸盐黏土矿物在抗菌方面研究进展[J]. *材料工程*, 2018, 46(4): 23 – 30.
- [56] EUSEPIA P, MARINELLIA L, BORREGO – SÁNCHEZ A, et al. Nano – delivery systems based on carvacrol prodrugs and fibrous clays [J]. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 2020, 58: 101815.
- [57] AFIFY A S, HASSAN M, PIUMETTI M, et al. Elaboration and characterization of modified sepiolites and their humidity sensing features for environmental monitoring [J]. *Applied Clay Science*, 2015, 115: 165 – 173.
- [58] HASSAN M, AFIFY A S, TULLIANI J M. Synthesis of ZnO nanoparticles onto sepiolite needles and determination of their sensitivity towards humidity,  $\text{NO}_2$  and  $\text{H}_2$  [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2016, 32: 573 – 582.
- [59] DUAN Z H, JIANG Y D, ZHAO Q N, et al. Facile and low – cost fabrication of humidity sensor using naturally available sepiolite nanofibers [J]. *Nanotechnology*, 2020, 31: 355501.
- [60] WU W H, ZHANG Q, ZHOU X, et al. Self – powered photovoltaic photodetector established on lateral monolayer  $\text{MoS}_2$  –  $\text{WS}_2$  heterostructures [J]. *Nano Energy*, 2018, 51: 45 – 53.
- [61] ZHANG S J, TONG W S, WANG J, et al. Modified sepiolite/PVDF – HFP composite film with enhanced piezoelectric and dielectric properties [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2020, 48412.
- [62] JAURAND M C F, RENIER A, DAUBRIAC J. Mesothelioma: Do asbestos and carbon nanotubes pose the same health risk [J]. *Particle & Fibre Toxicology*, 2009, 6: 16.
- [63] HOU K, OUYANG J, ZHENG C H, et al. Surface – modified sepiolite fibers for reinforcing resin brake composites [J]. *Materials Express*, 2017, 7(2): 104 – 112.
- [64] M. MAR GONZÁLEZ DEL CAMPO, M DARDER, P ARANDA, et al. Nanomaterials; functional hybrid nanopaper by assembling nanofibers of cellulose and sepiolite [J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(27): 1870187.
- [65] KIM H, RYU K H, BAEK D, et al. 3D printing of polyethylene terephthalate glycol – sepiolite composites with nanoscale orientation [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12: 23453 – 23463.
- [66] LIANG C B, QIU H, SONG P, et al. Ultra – light MXene aerogel/wood – derived porous Carbon composites with wall – like Mortar/Brick structures for electromagnetic interference shielding [J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(8): 616 – 622.
- [67] SHANG Q, FENG H X, FENG Z Y, et al. Facile fabrication of sepiolite functionalized composites with tunable dielectric properties and their superior microwave absorption performance [J]. *Journal of Colloid and Interface ence*, 2020, 576: 444 – 456.
- [68] YIN H J, YPASEUTHF D S, SCHUBERT M, et al. Routes to halogen – free flame – retardant polypropylene wood plastic composites [J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2019, 30(1): 187 – 202.
- [69] PAN P P, GUO C G, LI L P. Flame retardancy and thermal degradation properties of polypropylene/wood flour composite modified with aluminum hypophosphite/melamine cyanurate [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2018, 135: 3085 – 3093.
- [70] 李歆,贺茂勇,李凯,等. 海泡石和 APP 对 PP/WF 复合材料的阻燃抑烟作用[J]. *工程塑料应用*, 2019, 47(11): 128 – 133.
- [71] LIU X L, GUO J, SUN J, et al. The preparation of a bisphenol A epoxy resin based ammonium polyphosphate ester and its effect on the char formation of fire resistant transparent coating [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2019, 129: 349 – 356.
- [72] GUO B T, LIU Y Z, ZHANG Q, et al. Efficient flame – retardant and smoke – suppression properties of Mg – Al layered double hydroxide nanostructures on wood substrate [J]. *Acs Appl Mater Interfaces*, 2017, 9(27): 23039 – 23047.
- [73] XU Z S, LIU D L, YAN L, et al. Synergistic effect of sepiolite and polyphosphate ester on the fire protection and smoke suppression properties of an amino transparent fire – retardant coating [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2020, 141: 105572.

# Fine Processing of Sepiolite and Its Application in Strategic Emerging Industries

Ji Huichao<sup>1,2</sup>, DONG Xiongbo<sup>1,2</sup>, YANG Huaming<sup>3</sup>

1. Engineering Research Center of Nano – Geomaterials of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

2. Faculty of Materials Science and Chemistry, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

3. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China

**Abstract:** Sepiolite is widely used in the strategic emerging industries. The structure and physicochemical properties of sepiolite are introduced. The purification and processing technology of sepiolite are illustrated. The research progress of Sepiolite in four strategic emerging industries, such as energy conservation, environmental protection, new energy, biology and new materials, are reviewed. The large specific surface area, good adsorption ability, rheological properties, thermal stability and catalytic properties of sepiolite are the foundation for its multifunctional application. More in – depth research on the exploiting multifunctional sepiolite will be investigated with the development of science and technology. Sepiolite presents broad application prospects in various research fields.

**Key words:** sepiolite; energy saving and environmental protection; new energy resource; biological field; new material

引用格式:纪慧超,董雄波,杨华明.海泡石精细化加工及在战略性新兴产业的应用[J].矿产保护与利用,2020,40(6):16–25.

Ji HC, Dong XB, and Yang HM. Fine processing of sepiolite and its application in strategic emerging industries[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2020, 40(6): 16–25.

投稿网址:<http://kcbh.cbpt.cnki.net>

E – mail:kcbh@chinajournal.net.cn