第 49 卷第 12 期
2021 年 12 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 12
December，2021

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20210558

发泡–注凝成型/表面改性制备超亲水–疏油硅藻土多孔陶瓷

李孝建，韩 磊，黄 仲，董龙浩，张海军

(武汉科技大学，省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室，武汉 430081)

摘 要：先采用发泡–注凝成型法制备了硅藻土多孔陶瓷，并以此为基体，以 Capstone FS–50(CS-50)为改性剂，通过真空浸渍法制备了超亲水–疏油硅藻土多孔陶瓷，研究了烧结温度对硅藻土多孔陶瓷物相组成、显微形貌及常温物理性能及 CS-50 用量(质量分数)对改性硅藻土多孔陶瓷表面的油接触角及化学稳定性的影响。结果表明：随着烧结温度的升高(1 100~1 200 ℃)，硅藻土多孔陶瓷中圆盘状硅藻土自身的多孔结构被堵塞的越来越严重，孔隙率由 84.3%降至 81.6%，而抗压强度从 0.93 MPa 增至 2.01 MPa；随着 CS-50 用量的增大，所制备改性硅藻土多孔陶瓷的油接触角呈先增加后趋于稳定的变化趋势；当 CS-50 的用量为 5%(质量分数)时，改性多孔陶瓷的油接触角高达 138°，且其水接触角约为 0°。此外，改性硅藻土多孔陶瓷在强酸、强碱以及盐腐蚀条件下，仍能保持稳定的亲水疏油性能。

关键词：发泡–注凝成型；表面改性；硅藻土多孔陶瓷；超亲水–疏油
中图分类号：TB34　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)12–2572–09
网络出版时间：2021–10–29



Foam–gelcasting/Surface Modification Synthesis of Superhydrophilic-oleophobic Diatomite Porous Ceramics

LI Xiaojian, *HAN Lei*, *HUANG Zhong*, *DONG Longhao*, *ZHANG Haijun*
(The State Key Laboratory of Refractories and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: An efficient and eco-friendly oil-water separation strategy is urgently needed to solve the problem of oily sewage due to the frequent occurrence of oil leakage accidents. Diatomite porous ceramics were firstly prepared by a foaming-gelcasting method, and then superhydrophilic-oleophobic diatomite porous ceramics were prepared by a simple vacuum impregnation method with the diatomite porous ceramics as a matrix and fluorine-containing polymer (Capstone FS-50) as a modifier. The effect of sintering temperature on the phase composition, microscopic morphology and physical properties of porous diatomite ceramics was investigated and the influence of CS-50 concentration on the oil contact angle and chemical stability of the surface of modified diatomite porous ceramics was also analyzed. The mesopore structure of disk-like diatomite becomes more and more blocked, the porosity of the porous samples decreases from 84.3% to 81.6% and the compressive strength increases from 0.93 MPa to 2.01 MPa as the sintering temperature increases from 1 100 to 1 200 ℃. The oil contact angle of the prepared modified diatomite porous ceramics firstly increases and then becomes stable with increasing Capstone FS-50 concentration. At the concentration of Capstone FS-50 of 5%, the oil contact angle of the porous ceramic is high up to 138°, and whose water contact angle is about 0°. In addition, the modified diatomite porous ceramics still maintain hydrophilic and oleophobic after soaking in acid, alkali and salt solutions, thus exhibiting superior chemical corrosion resistance.

Keywords: foam–gelcasting; surface modification; diatomite porous ceramics; superhydrophilic-oleophobic

含油污水处理是环境保护的热点问题之一。一方面，频发的海上漏油事故不仅破坏了生态平衡系统[1]，还造成了大量的资源损耗；另一方面，城镇及工业含油废水的随意排放导致内陆近海水域的油污染日益严重，给人类的身体健康和生存环境带来了极大的危害[2–5]。因此，如何有效地收集和分离含

收稿日期：2021–07–09。　修订日期：2021–08–20。
基金项目：国家自然科学基金面上项目(51872210 和 52072274)；湖北省教育厅高等学校优秀中青年科技创新团队计划(T201602)；湖北自然科学基金创新群体项目(2017CFA004)。
第一作者：李孝建(1995—)，男，硕士。
通信作者：张海军(1970—)，男，博士，教授。

Received date: 2021–07–09.　**Revised date:** 2021–08–20.
First author: LI Xiaojian (1995–), male, Master.
E-mail: 1711790893@qq.com
Correspondent author: ZHANG Haijun (1970–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: zhanghaijun@wust.edu.cn

油污水引起了国内外研究人员的广泛关注[6–11]。传统的含油污水处理方法主要有微生物降解、就地焚烧及吸附剂吸附等，但这些方法通常存在着分离效率低、成本高等问题，不仅导致资源的大量损耗，而且还对环境造成 2 次污染[12]。因此，研究开发具有高效、低成本、绿色环保且稳定可靠的油水分离新材料具有重要意义[13–18]。

自然界中许多动、植物具有特殊润湿性的表面，如荷叶的蜡质表面具有良好的疏水性，鲨鱼皮展现出优异的水下疏油性等[19]。基于仿生学原理，许多可用于物理选择性分离的超亲油–疏水和超亲水–疏油材料被制备出来，且物理选择性分离法被认为是一种高效环保的分离方法。超亲油–疏水材料由于其自身的润湿特性易被油类污染，重复利用率较低；相比之下，超亲水–疏油材料具有自清洁性且重复利用率高，其应用范围更为广阔[20–22]。然而，目前所制备的超亲水–疏油材料(如不锈钢网、海绵以及气凝胶等)通常存在化学稳定性差及机械强度低等缺点，限制了其应用范围。

多孔陶瓷具有孔隙率高、体积密度低、吸附能力强、力学性能优异以及化学稳定性好等特点[23–26]，以其为基体，经修饰后可成为油水分离材料的理想选择。硅藻土的主要成分为 SiO_2，由于其生物成因，硅藻土内部含有许多有序排列的介孔(2~50 nm)及大孔(>50 nm)结构，这种独特的结构赋予其高孔隙率、低密度、高比表面积及强吸附性等优点；此外，硅藻土还具有价格低廉、环保无害及来源广泛的特点。我国是世界第 2 大硅藻土生产国，储量高达 3.5 亿吨，约占世界总量的 20%。此外，借助发泡法可形成大孔结构及硅藻土自身多孔的特性，以硅藻土为原料，采用发泡法可成功制备出具有大孔–多孔复合的硅藻土多级孔陶瓷。

采用发泡–注凝成型法制备了硅藻土多孔陶瓷，研究了烧结温度对所制备硅藻土多孔陶瓷的物相、显微结构以及常规物理性能的影响，以其为基体、以 Capstone FS-50 (CS-50)为改性剂，采用真空浸渍法制备了超亲水–疏油硅藻土多孔陶瓷，并研究了 CS-50 用量(即质量分数)对改性硅藻土多孔陶瓷接触角的影响及强酸、强碱及盐环境下其表面接触角的变化情况。

1　实验

1.1　样品制备

以硅藻土粉体为原料(粒径约为 45 μm)，由吉林嘉鹏硅藻土研发有限公司提供；以黄原胶(GXT，中粘度)为稳泡剂，由上海山普化工有限公司提供；分散剂为异丁烯–马来酸酐共聚物(ISOBAM-104，工业级)，由日本仓敷聚酯纤维有限公司提供；发泡剂为十二烷基硫酸钠(SDS，40%)，由国药集团化学试剂有限公司提供。

称取 40 g 硅藻土粉体(化学元素分析见表 1)，加入到 60 g 去离子水中并均匀混合；然后加入 0.24 g GXT、0.2 g ISOBAM-104 及 0.1 g SDS，并通过机械搅拌制得泡沫陶瓷浆料，将所制得的泡沫陶瓷浆料浇注到 160 mm×30 mm×30 mm 的模具中，经室温干燥 24 h 后脱模得到硅藻土多孔陶瓷湿坯体，再经 100 ℃保温 24 h 干燥制得干坯，随后将坯体置于中温马弗炉中以 4 ℃/min 的升温速率加热至 1 100~1 200 ℃，并保温 2 h，而后冷却至室温制得硅藻土多孔陶瓷。随后，以 CS-50 为改性剂，以乙醇为溶剂，配制质量分数为 1%~7%(质量分数)的改性溶液；然后，将所制备的陶瓷样品浸没到改性溶液中，通过真空浸渍(100 Pa 保温 4 h)的方法对其进行表面改性；最后，在常压下静置 0.5 h 后取出，将其放置在 80 ℃的烘箱中干燥 6 h 制得改性多孔陶瓷。

表 1　硅藻土粉体的化学成分分析

Table 1　Chemical composition of raw diatomite powder　　*w*/%

SiO_2	Al_2O_3	Fe_3O_4	CaO	MgO	Component	Na_2O	K_2O	TiO_2	IL
92.91	2.03	1.42	0.21	0.32	*w*/%	2.30	0.31	0.12	0.42

w—Mass fraction.

1.2　样品表征

采用 X-Pert Pro 型 X 射线衍射仪(XRD)对产物进行 X 射线衍射测定。测试条件为：Cu K_α 射线(λ =0.154 2 nm)，电压 40 kV，电流 40 mA，扫描范围 2θ=10°~90°。采用场发射扫描电子显微镜(Nova 400 Nano 型 SEM，工作电压 15 kV)观察产物的显微结构。多孔陶瓷的常温抗压强度采用万能压力实验机测试，样品尺寸为 20 mm×20 mm×20 mm；体积密度和气孔率采用 Archimedes 排水法测定。采用接触角(OCA15EC，Germany)测试仪对样品与水滴和油滴

的接触角进行测试。将干燥后的样品表面进行处理以保证被检测面平行于载物台，水滴和油滴的体积分别为 5 μL 和 3 μL；每个样品测量 5 次，取其平均值来表征接触角。采用 VG Multilab 2 000 型 X 射线光电子能谱(XPS)对改性样品的表面结构组成进行分析测定。采用 TG–DSC(Netzsch STA 449C，Germany)对改性剂的负载量进行分析测定。

2 结果与讨论

2.1 烧结温度对物相组成及显微形貌的影响

图 1 为不同烧结温度条件下所制备硅藻土多孔陶瓷的 XRD 谱。由图 1 可见，所制备硅藻土多孔陶瓷的物相为 SiO_2，其主要晶型为方石英(ICDD：00–039–1425)，且随着烧结温度的升高，其结晶程度逐渐增强。

图 2 和图 3 分别为不同烧结温度条件下所制备硅藻土多孔陶瓷的 SEM 照片和孔径分布。由图 2 和图 3 可知，多孔陶瓷同时具有球形大气孔和窗口小气孔，呈复杂的多级孔结构；且随着烧结温度的升高，样品中球形大气孔的平均孔径呈现逐渐减小的趋势，这可能是由于样品在高温下发生了较大的收缩所致。当烧结温度由 1 100 ℃升高至 1 200 ℃时，其平均孔径大约由 237 μm 减小至 136 μm (图 3)。此外，从 SEM 照片局部放大照片可以看出，随着烧结温度的升高，圆盘状硅藻土自身的多孔结构被堵塞的越来越严重，这可归因于：1) 原料中存在的杂质(Na_2O 和 K_2O 等)在高温下形成了液相，在冷却降温阶段转化为玻璃相堵塞了气孔；2) 硅藻土孔结构的坍塌或变形及高温下材料整体结构的致密化对其孔结构的改变。

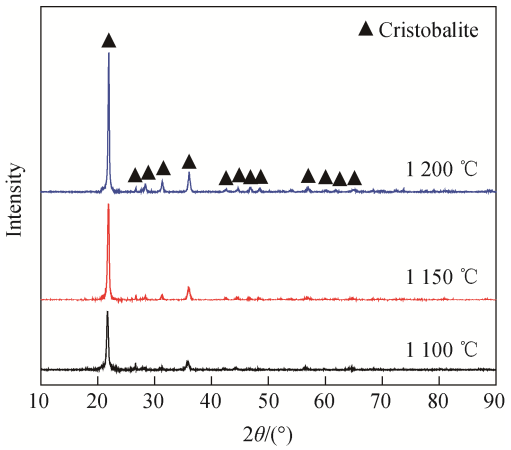
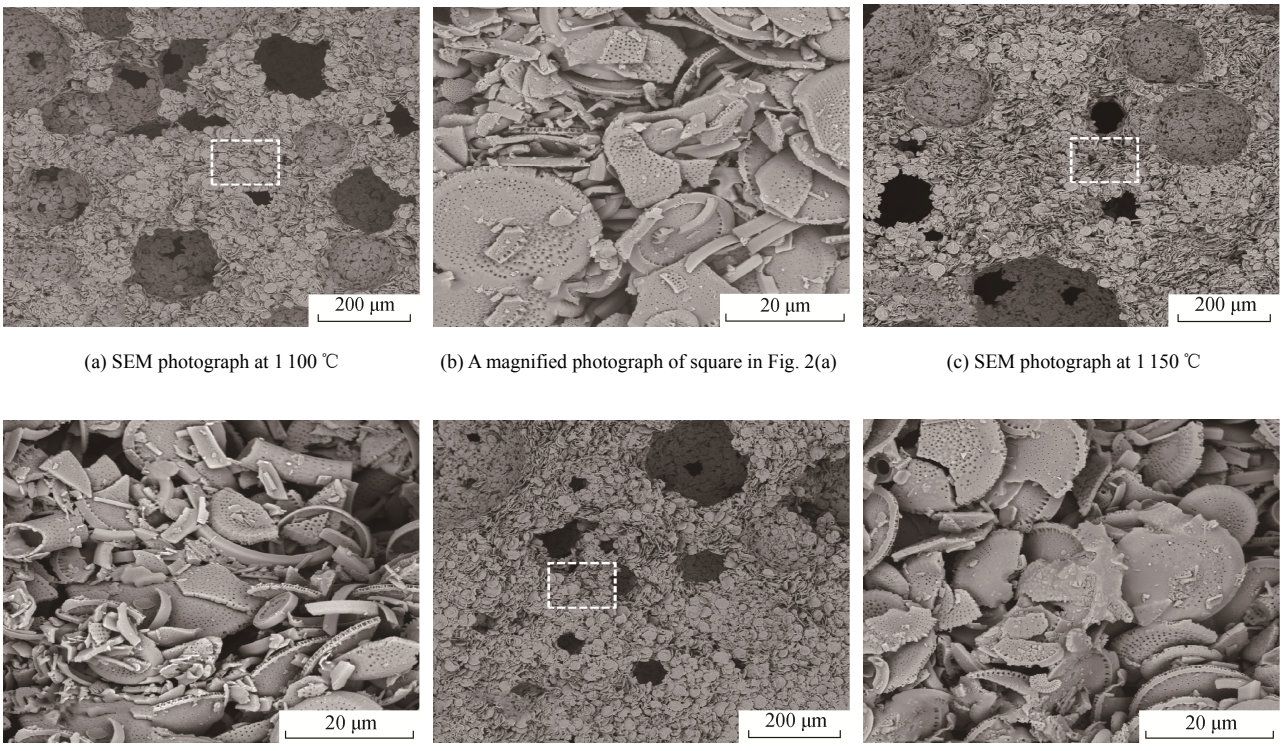


图 1 不同温度保温 2 h 制备多孔陶瓷的 XRD 谱

Fig. 1 XRD patterns of diatomite porous ceramics synthesized with various temperatures

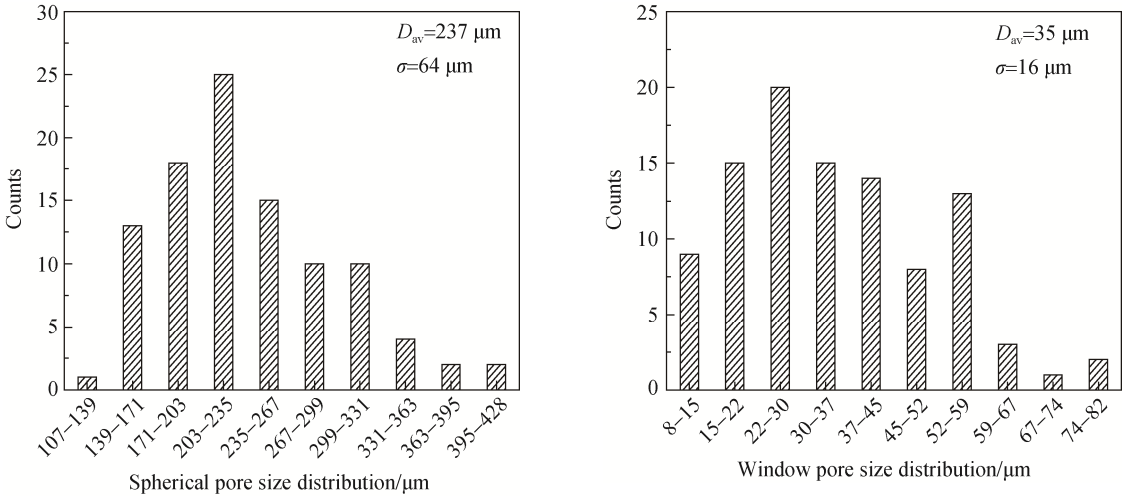


(a) SEM photograph at 1 100 ℃ (b) A magnified photograph of square in Fig. 2(a) (c) SEM photograph at 1 150 ℃

(d) A magnified photograph of square in Fig. 2(c) (e) SEM photograph at 1 200 ℃ (f) A magnified photograph of square in Fig. 2(e)

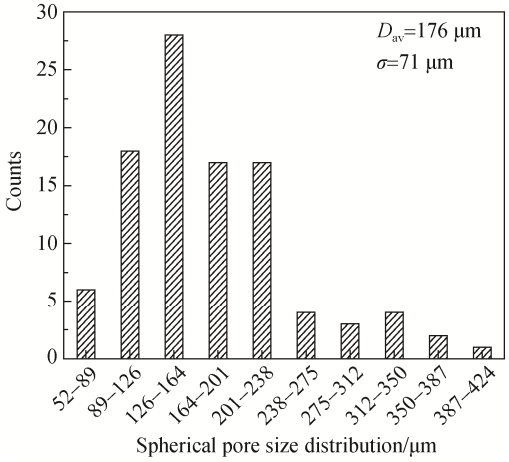
图 2 不同烧结温度时所制备多孔陶瓷的 SEM 照片

Fig. 2 SEM images of diatomite porous ceramics prepared with different sintering temperatures

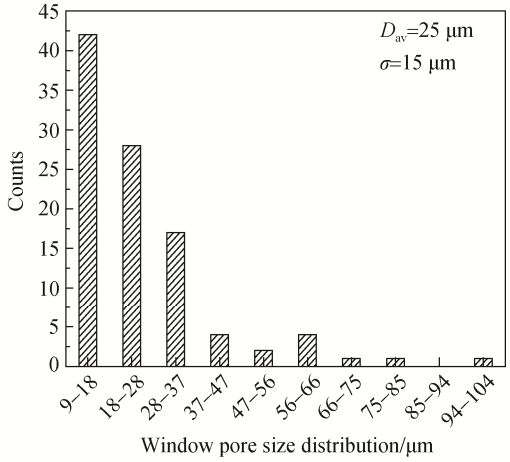


(a) Spherical pore size in Fig. 2(a)

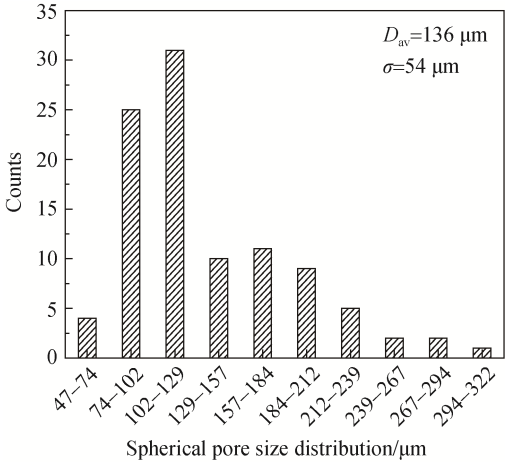
(b) Window pore size in Fig. 2(a)



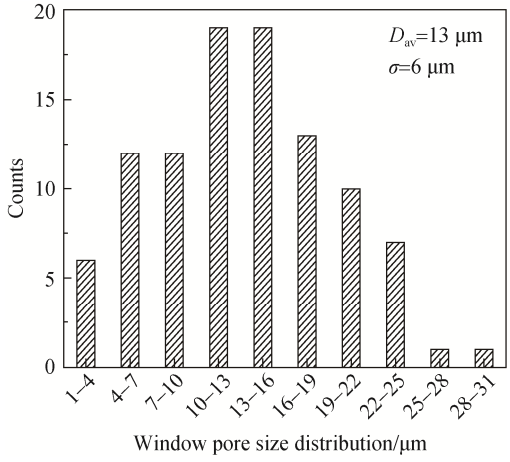
(c) Spherical pore size in Fig. 2(c)



(d) Window pore size in Fig. 2(c)



(e) Spherical pore size in Fig. 2(e)



(f) Window pore size in Fig. 2(e)

图 3　不同烧结温度时所制备多孔陶瓷的孔径分布

Fig. 3　Pore size distribution of diatomite porous ceramics prepared with different sintering temperatures

2.2　烧结温度对硅藻土多孔陶瓷物理性能的影响

图 4 为样品孔隙率和体积密度随烧结温度变化关系曲线。由图 4 可知，随着烧结温度的升高，多孔陶瓷的孔隙率逐渐降低，而体积密度逐渐增大。当烧结温度由 1 100 ℃升高至 1 200 ℃时，多孔陶瓷的孔隙率由 84.3%降至 81.6%，其相应的体积密度则由 0.35 g·cm^{-3} 增加至 0.44 g·cm^{-3}，其原因是烧结温度较高时，多孔陶瓷样品发生了更大的体积收缩。

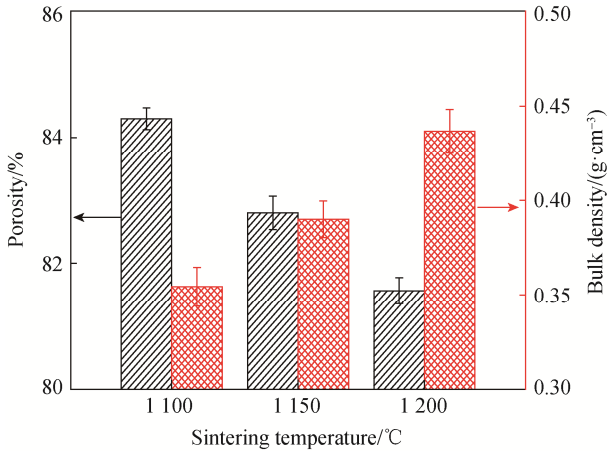


图 4 不同烧结温度时所制备硅藻土多孔陶瓷的孔隙率及体积密度

Fig. 4 Porosity and volume density of diatomite porous ceramics prepared with different sintering temperatures

图 5 为不同烧结温度制备的硅藻土多孔陶瓷的抗压强度。由图 5 可见，当烧结温度为 1 100 ℃时，样品的抗压强度为 0.93 MPa；随着烧结温度的升高，抗压强度逐渐增大，当烧结温度为 1 150 ℃和 1 200 ℃时，其抗压强度分别升至 1.54 MPa 与 2.01 MPa。

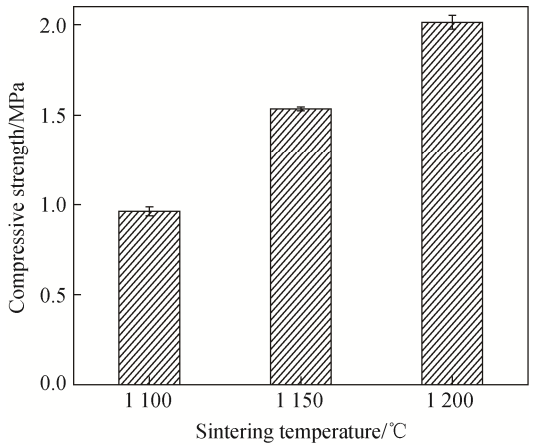


图 5 不同烧结温度时制得多孔陶瓷的强度

Fig. 5 Strength of diatomite porous ceramics prepared with different sintering temperatures

2.3 CS-50 用量对改性硅藻土多孔陶瓷表面性质的影响

为了进一步探究 CS-50 用量对多孔陶瓷表面性质的影响，以 1 150 ℃条件下所制备的多孔陶瓷为基体进行表面改性，其改性前后的表面水和油的接触角照片如图 6 所示。从图 6 可以看出，随着 CS-50 用量的增大(1%~7%)，所制备改性硅藻土多孔陶瓷的表面油接触角呈现出先增加后趋于稳定的变化趋势，且当 CS-50 用量为 5%时，其油接触角达到最大，约为 138°(图 6c)；而水滴依然可在改性硅藻土多孔陶瓷表面快速铺展，其接触角趋近于 0°，这表明改性硅藻土多孔陶瓷具有超亲水–疏油性。

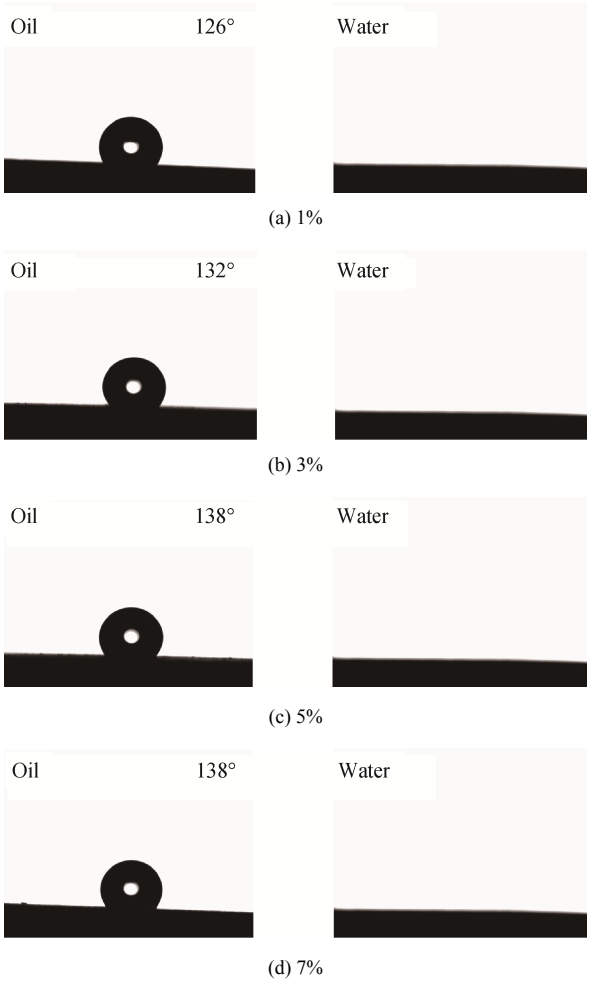


图 6 不同用量 CS-50 改性后硅藻土多孔陶瓷的油/水接触角光学照片

Fig. 6 Optical photos of water and oil contact angles of diatomite porous ceramics after CS-50 modification with various dosage

为进一步证实所制备改性硅藻土多孔陶瓷样品的亲水–疏油效果，还对不同用量 CS-50 改性后样品的断面接触角接触角进行了研究，结果如图 7 所示。由图 7 可知，改性硅藻土多孔陶瓷的断面同样具有超亲水–疏油的选择润湿性，且随着 CS-50 用量从 1%增至 7%，多孔陶瓷的断面油接触角分别为 125°、132°、138°及 138°，与其表面接触角无明显差别，这表明所制备多孔陶瓷表面与内部均被成功改性。

为了探究改性硅藻土多孔陶瓷空气中具有亲水–疏油特性的原因，采用 XPS 分别对改性前后多孔陶瓷表面的化学组成以及化学键变化进行表征，其结果如图 8 与图 9 所示。由图 8a 和图 9a 可见，未改性样品的 XPS 谱中仅包含 C、O 及 Si 3 种元素；改性后样品的 XPS 图谱中能够观察到 C、O、Si 及 F 4 种元素，且图谱发生右移，其原因可归因于 F

原子较强的电负性，吸引了其它原子的未成对电子，使原子之间的核外电子轨道发生杂化，原子共用的电子数量增多，进而使电子云密度增大，结合能降低。此外，多孔陶瓷改性前后的 XPS 元素含量分析如表 2 所示。对改性前后硅藻土多孔陶瓷中的元素组分的 XPS 谱进行解谱分析。由图 8b~图 8d 可以看出，改性前，C1*s* 分谱中能够观察到 2 个峰，分别对应为 C═C (284.8 eV)与 C—O (286.5 eV)；从 Si2*p* 分谱中能够观察到 Si—O (103.1 eV)的峰；从 O1*s* 分谱中能够观察到 Si—O (532.5 eV)及 C—O (530.8 eV)的峰。而改性后(图 9b~图 9e)，从 C1*s* 分谱中能够观察到 4 个峰，分别对应为 C═C(284.8 eV)、C═O (287.4 eV)、CH_2—CF_2 (290.3 eV)及 CF_2—CF_2 (292.5 eV)；从 Si2*p* 分谱中能够观察到 Si—O (101.7 eV)的峰；从 O1*s* 分谱中能够观察到 Si—O (531 eV)及 C═O (530.2 eV)的峰；从 F1s 分谱中能够观察到 CH_2—CF_2 (687.4 eV)及 CF_2—CF_2 (688.2 eV)。结合以上 XPS 结果可知，改性多孔陶瓷的亲水疏油性能主要可归因于 CH_2—CF_2 及—CF_2 含氟官能团作用的结果。

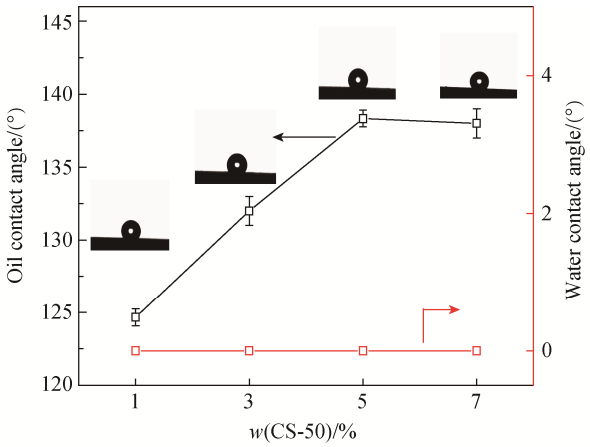
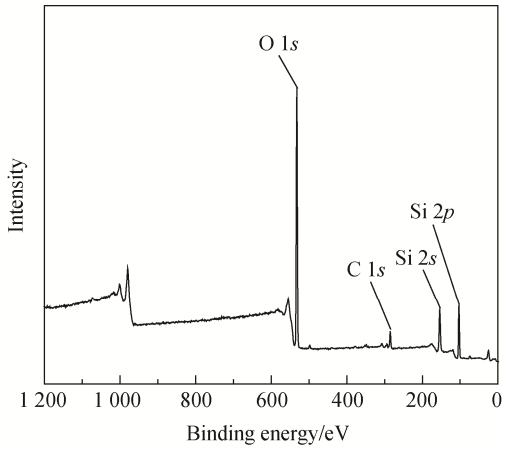
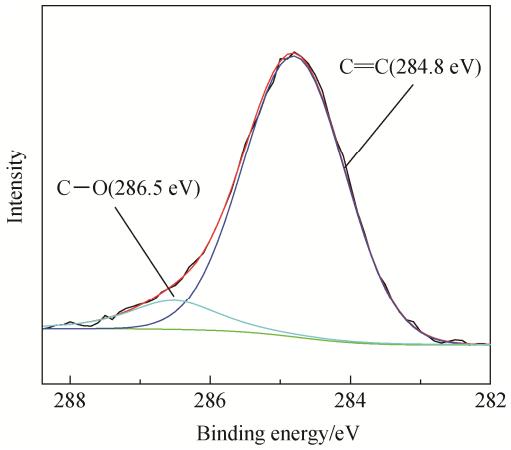


图 7　不同用量 CS-50 改性硅藻土多孔陶瓷断面的油与水接触角

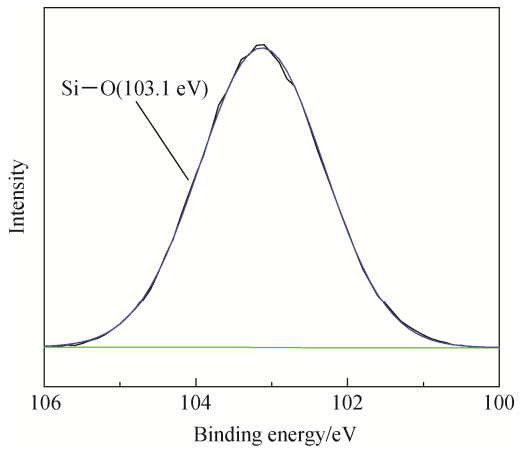
Fig. 7　Oil and water contact angle of cross-section of modified diatomite porous ceramics with different CS-50 dosage



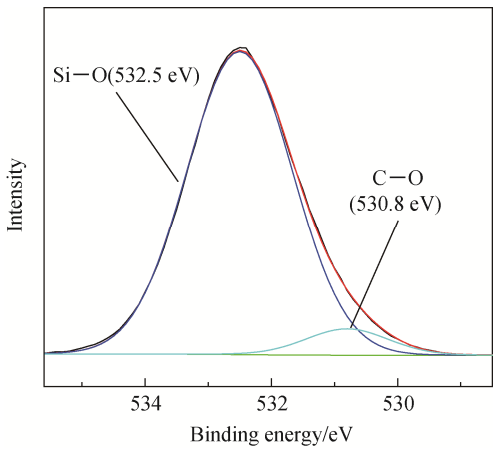
(a) XPS full spectra before CS-50 modification



(b) C1*s* spectra before CS-50 modification



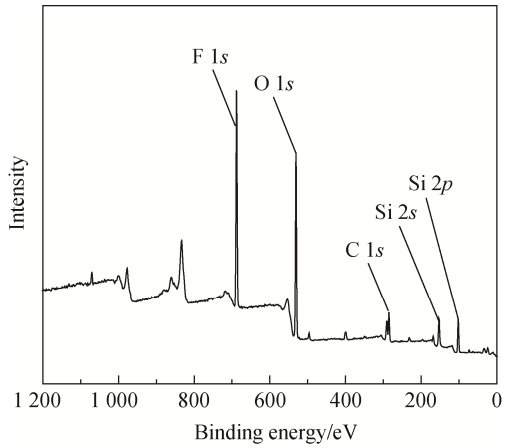
(c) Si2*p* spectra before CS-50 modification



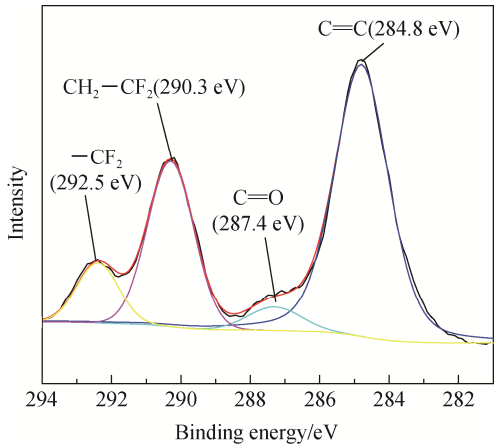
(d) O1*s* spectra before CS-50 modification

图 8　CS-50 改性前硅藻土多孔陶瓷的 XPS 谱

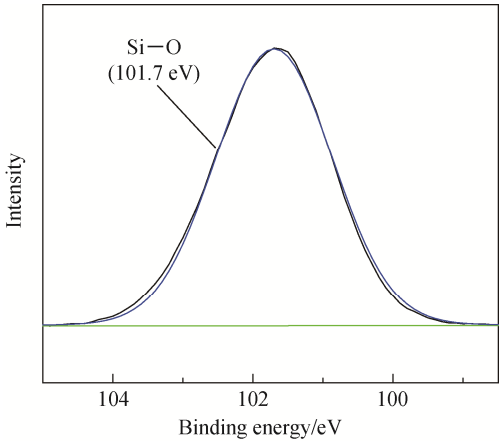
Fig. 8　Overall XPS spectra of diatomite porous ceramics before CS-50 modification



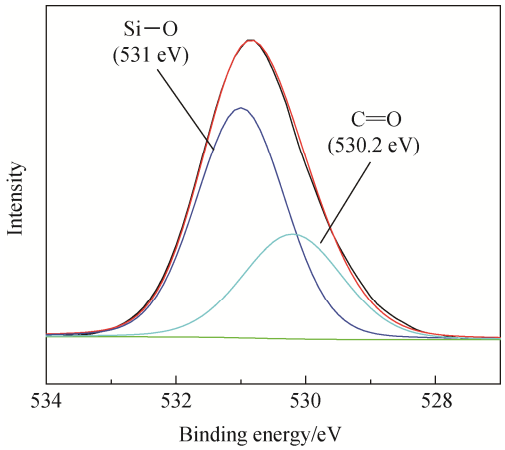
(a) XPS full spectra after CS-50 modification



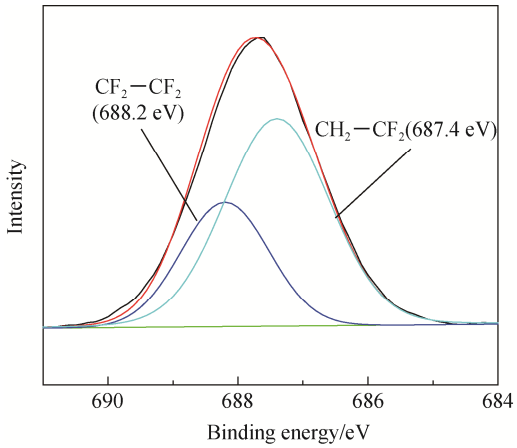
(b) C1*s* spectra after CS-50 modification



(c) Si2*p* spectra after CS-50 modification



(d) O1*s* spectra after CS-50 modification



(e) F1*s* spectra after CS-50 modification

图 9 CS-50 改性后硅藻土多孔陶瓷的 XPS 谱

Fig. 9 XPS spectra of diatomite porous ceramics after CS-50 modification

表 2 CS-50 改性前后硅藻土多孔陶瓷的表面 XPS 元素含量

Table 2 XPS element contents of diatomite porous ceramic before and after CS-50 modification *x*/%

Element	Before modification	After modification
C	10	13
Si	29	19
O	61	40
F		28

x—Mole fraction.

对于超亲水–疏油材料，由于水的表面张力比油的表面张力大，一般疏油材料的表面同样也疏水，故超亲水–疏油的材料制备具有一定难度。从分子层面上，水分子为极性分子，而油分子为非极性分子。相似相溶原理表明，空气中材料表面的亲水–疏油性应通过在材料表面修饰极性分子来实现。然而，由于油的表面张力低，相比在材料表面

修饰一些常见的极性分子，表面能的更低含氟物质才能更好实现材料的表面疏油性；同时 C—F 为强极性键，可通过相似相溶及低表面能的协同作用实现含氟物质改性材料表面的亲水–疏油性。此外，若材料表面在空气中表现为亲水性，根据相似相溶原理，水分子和材料表面的分子均为极性。而将表面呈极性的材料置于水中，极性水分子在材料表面具有更大的吸附能并表现出更强的亲和能力和润湿性；相反，非极性油分子由于与材料间较弱的相互作用和材料表面致密水分子层的阻碍，则表现出弱亲和能力和相疏性。所制备样品具有超亲水–疏油性主要可归结为改性剂 CS-50 的亲水–疏油性特殊表面的构筑所致。

为了探究 CS-50 改性剂的负载量，对 CS-50 用量为 5%的改性样品进行 TG 和 DSC 表征，其结果如图 10 所示。结果表明：CS-50 在 191.8 ℃到 272.9 ℃范围内快速分解，且 600 ℃时完全分解，其质量损失达最大约为 2.53%。这说明改性剂 CS-50 的负载量约为 2.53%，且该改性剂的分解温度区间为 191.8 ℃到 600 ℃。同时，也表明改性样品在不高于 200 ℃的温度下具有较好的热稳定性。

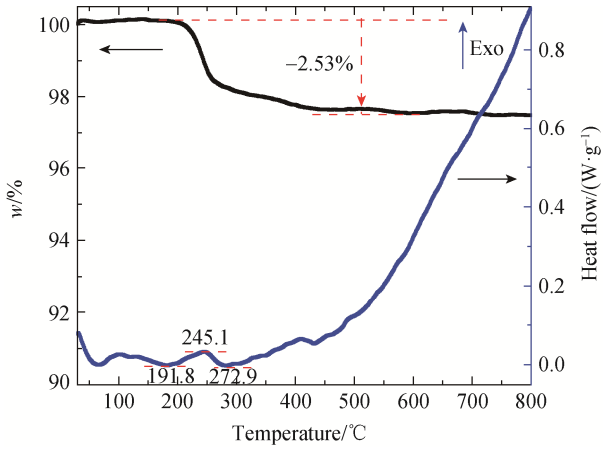


图 10　CS-50 (5%)改性后硅藻土多孔陶瓷的 TG–DSC 曲线
Fig. 10　TG–DSC profile of diatomite porous ceramic after CS-50 (5%) modification

2.4　强酸、强碱及盐环境对改性硅藻土多孔陶瓷接触角的影响

图 11 为改性硅藻土多孔陶瓷(5% CS-50)在不同条件下(强酸、强碱及盐)的表面润湿性变化结果。由图 11 可知，经盐、强酸以及强碱腐蚀后，改性多孔陶瓷的油接触角分别为 138°、137°及 137°。与腐蚀前的改性多孔陶瓷(图 11a)相比，其油接触角无明显变化。此外，其水接触角仍然趋于 0°，这表明其具有优异的耐化学腐蚀性。

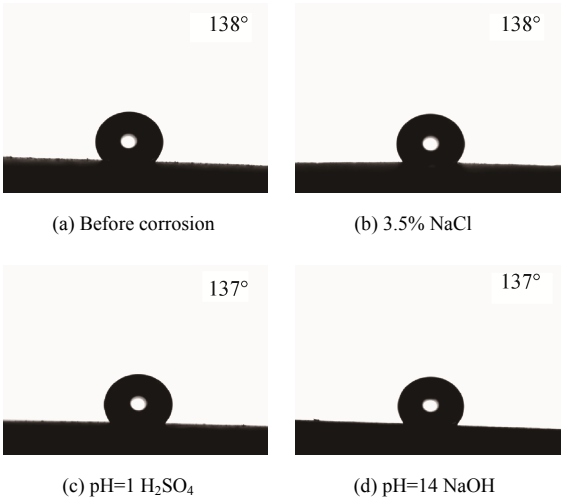


图 11　不同环境下 CS-50 改性硅藻土多孔陶瓷油接触角照片
Fig. 11　Oil contact angle photos of CS-50 modified diatomite porous ceramics eroded in different conditions

图 12 为高温/低温对改性硅藻土多孔陶瓷表面接触角的影响结果。由图 12a~图 12e 可知，改性多孔陶瓷在–196、100、150、200 ℃及 250 ℃温度下处理 4 h 后，其接触角分别对应为 138°、137°、138°、135°及 128°，这表明改性多孔陶瓷在 200 ℃以下具有良好的耐高/低温稳定性。为了进一步揭示高温处理后(250 ℃)样品油接触角有所下降的原因，对比了

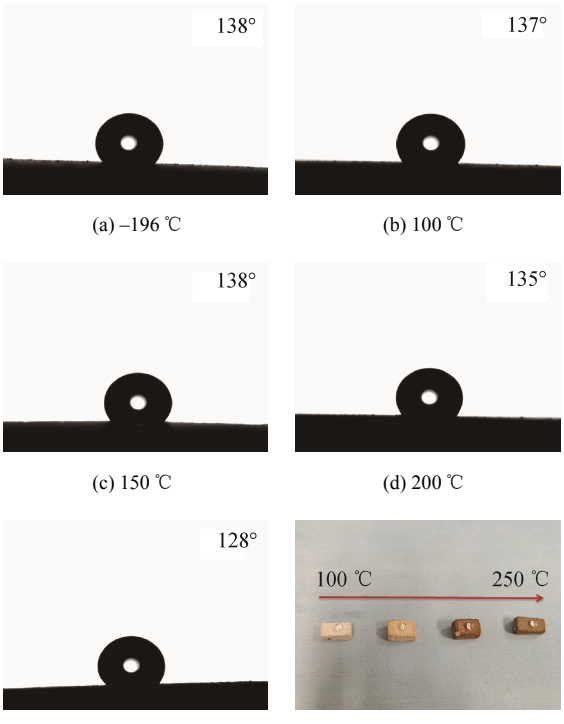


图 12　不同温度处理后改性多孔陶瓷的油接触角照片
Fig. 12　Photos of oil contact angle of modified porous ceramics treated at different temperatures

不同温度处理后样品的表面颜色，结果如图 12f 所示。随着处理温度的升高，样品表面由原来的淡黄色逐渐转变为棕色，说明改性剂 CS-50 在高温处理过程中发生了部分分解，进而导致了改性多孔陶瓷表面油接触角的降低。

3 结论

1) 随着烧结温度从 1 100 ℃升高至 1 200 ℃，多孔陶瓷的物相组成均为方石英，但结晶程度逐渐增强，圆盘状硅藻土自身的多孔结构被堵塞的越来越严重，相应地多孔陶瓷的孔隙率由 84.3%降至 81.6%，而抗压强度可从 0.93 MPa 增至 2.01 MPa。

2) 当以用量为 5%的 CS-50 为改性剂时，所制备改性硅藻土多孔陶瓷的油接触角最大，约为 138°。

3) 改性硅藻土多孔陶瓷在高温(100~200 ℃)、低温(–196 ℃)、强酸(pH=1)、强碱(pH=14)及盐溶液等多种环境下，其相应的油接触角均能保持在 135°以上，表明其具有良好的耐化学稳定性和耐高温/低温稳定性。

参考文献:

[1] WOLFAARDT A C, UNDERHILL L G, ALTWEGG R, et al. Impact of the treasure oil spill on african penguins spheniscus demersus at dassen island: Case study of a rescue operation[J]. Afr J Mar Sci, 2008, 30(2): 405–419.

[2] BI Y B, HAN L, ZHENG Y F, et al. Lotus-seedpod-bioinspired 3D superhydrophobic diatomite porous ceramics comodified by graphene and carbon nanobelts[J]. ACS App Mater Inter, 2018, 10:27416–27423.

[3] ZHAOH Y, HONG W, HUANGL A, et al. Advanced sorbents for oil-spill cleanup: Recent advances and future perspectives[J]. Adv Mater, 2016, 28(47): 10459–10490.

[4] ROBERTO N, FLAVIA F, FEDERICO C, et al. Chitosan-derived iron oxide systems for magnetically guided and efficient water purification processes from polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. ACS Sustain Chem Eng, 2017, 5(1): 793–801.

[5] 张俊, 韩磊, 曾渊, 等. 选择性油水分离材料[J]. 化学进展, 2019, 31(1): 134–143.
ZHANG Jun, HAN Lei, ZENG Yuan, et al. Prog Chem (in Chinese), 2019, 31(1): 134–143.

[6] CHEN L, GUO Z, LIU W. Outmatching super hydrophobicity: Bio-inspired re-entrant curvature for mighty super amphiphobicity in air[J]. J Mater Chem A, 2017, 5: 14480–14507.

[7] EMELYANENKO A M, BOINOVICH L B, BEZDOMNIKOV A A, et al. Reinforced superhydrophobic coating on silicone rubber for longstanding anti-icing performance in severe conditions[J]. ACS Appl Mater Inter, 2017, 9: 24210–24219.

[8] 李文涛, 雍佳乐, 杨青, 等. 基于特殊润湿性材料的油水分离[J]. 物理化学学报, 2018, 34(5): 18–37.
LI Wentao, YONG Jiale, YANG Qing, et al. Chin J Chem Phys (in Chinese), 2018, 34(5): 18–37.

[9] TANG X, SHEN C, ZHU W, et al. A facile procedure to modify filter paper for oil–water separation[J]. RSC Adv, 2017, 7(48): 30495–30499.

[10] GUO Z, WANG Z. Biomimetic superwettable materials with structural colours[J]. Chem Commun, 2017, 53(97): 12990–13011.

[11] XIA B, LIU H, FAN Y, et al. Novel fabrication of nano functionalized amorphous tungsten oxide coatings with colorful superamphiphobic surface study[J]. Mater Design, 2017, 135(5): 51–61.

[12] ZHU Y, WANG D, JIANG L, et al. Recent progress in developing advanced membranes for emulsified oil/water separation[J]. NPG Asia Mater, 2014, 6(5): e101.

[13] DRELICH J, CHIBOWSKI E, MENG D D, et al. Hydrophilic and superhydrophilic surfaces and materials[J]. Soft Matter, 2011, 7(21): 9804–9828.

[14] LIU K S, TIAN Y, JIANG L. Bio-inspired superoleophobic and smart materials: Design, fabrication, and application[J]. Prog Mater Sci, 2013, 58(4): 503–564.

[15] ZHANG W, SHI Z, ZHANG F, et al. Superhydrophobic and superoleophilic PVDF membranes for effective separation of water-in-oil emulsions with high flux[J]. Adv Mater, 2013, 25(14): 2071–2076.

[16] 殷俊, 陈猛, 蔡新安. 聚醚砜复合超滤膜的制备及其油水分离性能[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(4): 100–108.
YIN Jun, CHEN Meng, CAI Xinan. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(4): 100–108.

[17] 徐卜琴, 赵宗倩, 徐桂龙, 等. 超疏水超亲油玻璃纤维过滤膜的制备及其乳化水分离效率[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(8): 1173–1177.
XU Boqin, ZHAO Zongqian, XU Guilong, et al. J Chin Ceram Soc, 2018, 46(8): 1173-1177.

[18] 胡学兵, 周健儿, 汪永清, 等. 平均孔径与改性氧化物对 α–Al_2O_3 微滤膜油水分离效率的影响[J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(10): 1900–1904.
HU Xuebing, ZHOU Jianer, WANG Yongqing, et al. J Chin Ceram Soc, 2010, 38(10): 1900–1904.

[19] 李孝建, 张海军, 李赛赛, 等. 超亲水疏油材料的制备及其油水分离性能[J]. 化学进展, 2020, 32(6): 851–860.
LI Xiaojian, ZHANG Haijun, LISaisai, et al. Prog Chem (in Chinese), 2020, 32(6): 851–860.

[20] GUNATILAKE U B, BANDARA J. Efficient removal of oil from oil contaminated water by superhydrophilic and underwater superoleophobic nano/micro structured TiO_2 nanofibers coated mesh[J]. Chemosphere, 2017, 171: 134–141.

[21] HOU K, ZENG Y, ZHOU C, et al. Durable underwater superoleophobic PDDA/halloysite nanotubes decorated stainless steel mesh for efficient oil–water separation[J]. Appl Surf Sci, 2017, 416(15): 344–352.

[22] XUE Z, WANG S, LIN L, et al. A novel superhydrophilic and underwater superoleophobic hydrogel-coated mesh for oil/water separation[J]. Adv Mater, 2011, 23(37): 4270–4273.

[23] DENG X, RAN S, HAN L, et al. Foam-gelcasting preparation of high-strength self-reinforced porous mullite ceramics[J]. J Eur Ceram Soc, 2017, 37: 4059–4066.

[24] MATSUNAGA C, FUKUSHIMA M, HYUGA H, et al. Fabrication of porous silica ceramics by gelation-freezing of diatomite slurry[J]. J Eur Ceram Soc, 2017, 37: 5259–5264.

[25] XIONG Q M, CHEN Z, HUANG J T, et al. Preparation, structure and mechanical properties of Sialon ceramics by transition metal-catalyzed nitriding reaction[J]. Rare Metals, 2020, 39: 589–596.

[26] YUAN L, MA B, ZHU Q, et al. Preparation and properties of mullite-bonded porous fibrous mullite ceramics by an epoxy resin gel–casting process[J]. Ceram Int, 2017, 43: 5478–5483.