

# 丁苯橡胶吸油材料的制备及吸油机理研究

毕文超, 阮一平, 姜博文, 李鹏, 陈忠仁\*

(宁波大学材料科学与化学工程学院, 浙江宁波 315211)

**摘要:**通过测试橡胶的硫化曲线及静态吸油倍率,研究了硫化程度、交联剂 DCP 用量对橡胶吸油性能的影响。将橡胶发泡方法应用到丁苯橡胶吸油材料的制备中,通过交联剂用量和硫化时间控制交联密度,通过发泡剂用量和发泡工艺控制材料孔径结构,制得了一种高选择性、高吸油倍率、高吸收速率的吸油材料,并研究了吸油倍率与发泡剂用量的关系。运用自由发泡法和模压法分别制得具有开孔和闭孔 2 种结构的吸油材料,通过扫描电镜及吸油动力学曲线对 2 种材料进行分析,并对丁苯橡胶吸油材料的吸油机理进行初步探讨。为该材料下一步在溢油应急实践中的应用提供一定的理论依据。

**关键词:**吸油性能;硫化曲线;橡胶发泡;吸油机理

中图分类号:TQ333.1

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2014)06-0062-05

## Preparation and mechanism of styrene-butadiene rubber based oil-absorbing material

BI Wen-chao, RUAN Yi-ping, JIANG Bo-wen, LI Peng, CHEN Zhong-ren\*

(Ningbo University, The school of Materials Science and Chemical Engineering, Ningbo 315211, China)

**Abstract:** As an oil-absorbing material, the oil-absorbing capacity of styrene-butadiene rubber in oil spill emergency still needs to be better understood. In this study, the effects of vulcanization degree and the amount of DCP on the oil-absorbing capacity are studied through testing the vulcanization curve of rubber and the oil-absorbing properties in static conditions. A styrene-butadiene rubber-based oil-absorbing material with high selectivity, high oil-absorbing capacity and rate is developed by using rubber foaming method. The scanning electron microscopy structure and the oil-absorbing kinetics curves are combined to discuss its oil-absorbing mechanism. It is expected to provide references for the oil-absorption testing methods and further study in the application of oil spill practice.

**Key words:** oil-absorbing capacity; vulcanization curve; rubber foam; oil-absorbing mechanism

近年来,水体表面的溢油事件和有机溶剂泄漏事件时有发生,并且呈逐渐上升的趋势,给环境带来极大的威胁,因此对快速、高效、高选择性吸油材料的研究得到人们的广泛关注。

目前国内外对于吸油材料研究分为 2 个方向:一个是利用表面吸附作用,将材料加工成纤维状或制成多孔材料,这些材料有高比表面积、多间隙、多空腔,通过毛细管作用吸收油类。如 Juuso T. Korhonen 等<sup>[2]</sup>通过冷冻干燥纤维素水凝胶的方法制得纤维素气凝胶,吸油性能优越;Xuchun Gui 等<sup>[3]</sup>用碳纳米管制得对油类吸收倍率最高达 100 g/g 的吸油材料,可循环使用且后处理方便;Jinyou Lin 等<sup>[1]</sup>通过一步静电纺丝的方法制备出纳米多孔聚苯乙烯纤维,对机油的吸收倍率高达 113.87 g/g;Ilknur Karakutuk 等<sup>[4]</sup>将橡胶溶解于苯中,在低温下橡胶在苯的晶体间隙中通过一氯化硫进行交联得到有机凝胶,低温减压干燥得到孔径在 10~100 μm 的材料,对原油和橄榄油的吸收倍率达到了 33~38 g/g 和 24~27 g/g;杜晰晰等<sup>[5]</sup>制得一种改性聚氨酯泡沫

材料,对原油的吸收倍率达到 40~50 g/g。另一个方向是将亲油疏水单体聚合得到高聚物,然后利用其溶胀特性来吸收油类。如周美华等<sup>[6]</sup>以 EPDM 和 tBS(4-叔丁基苯乙烯)为单体,通过构建悬浮聚合体系得到了高吸油树脂,对四氯化碳和甲苯的最高吸油率分别为 51.6 g/g 和 22.8 g/g;丁磊等<sup>[7]</sup>以 β 环糊精的一种衍生物、丙烯酸十八酯、丙烯酸丁酯为单体共聚反应得到一种高吸油材料,对四氯化碳和二甲苯的吸油倍率分别为 79.1 g/g 和 45.7 g/g;Xuepei Xuan 等<sup>[8]</sup>以 1-辛烯、苯乙烯、二乙烯基苯为单体,按照一定比例共聚得到一种吸油材料,对油类的吸收倍率达到 45 g/g;Chitsan Lin 等<sup>[9]</sup>以废轮胎粉末和剪碎的聚丙烯纤维为原料制成复合材料,对油品的吸收倍率为 5 g/g。

然而这些吸油材料仍存在诸多不足,如生产工艺复杂,原材料不易获得,油水选择性差,吸油速率较慢,后处理复杂等,更重要的是难以实现批量化生产。因此,笔者以成本低廉的丁苯橡胶为基体,用模压法和自由发泡法制得生产工艺简单、成本低廉,具

收稿日期:2014-01-22

基金项目:国家自然科学基金面上项目(21274070);宁波市重大科技公关项目(2011A31002);特种高分子新材料团队项目(2012S001)

作者简介:毕文超(1987-),男,研究生,主要研究方向为橡胶加工,magic77586@163.com;陈忠仁(1964-),男,博士,教授,国家“千人计划”入选者,国家特聘专家,研究方向为高分子材料合成、加工及改性,通讯联系人,chenzhongren@nbu.edu.cn。

有较高综合吸油性能的橡胶发泡吸油材料。

## 1 实验部分

### 1.1 主要仪器和试剂

实验仪器及试剂分别如表1和表2所示。

表1 实验仪器设备

仪器名称	型号	生产厂家
开炼机	XK160	青岛光越橡胶机械有限公司
直驱式无转子硫化仪	MD-3000A	台湾高铁检测仪器有限公司
平板硫化仪	YM-C37	无锡阳明橡胶机械有限公司
分析天平	CP-114	奥豪斯仪器(上海)有限公司
恒温电磁搅拌机	HWCL-3	郑州长城科工贸有限公司
台式电子显微镜	TM-3000	日本日立公司
高速冷冻离心机	3K15	德国Sigma公司
真空干燥箱	XMTD-8222	上海精宏实验设备有限公司
其他	500 mL广口瓶、金属滤网、温度计、时钟等	

表2 实验原料

原材料名称	规格	生产厂家
丁苯橡胶(SBR)	1502	吉林石化
偶氮二甲酰胺(AC)	工业级	江西世龙实业股份有限公司
过氧化二异丙苯(DCP)	工业级	中国石化上海高桥分公司
硬脂酸(SA)	工业级	广州卓迪化工有限公司
氧化锌(ZnO)	工业级	广州卓迪化工有限公司
2-硫醇基苯并噻唑 (促进剂M)	工业级	上海正上化工科技有限公司
N-环己基-2-苯并噻唑 次磺酰胺(促进剂CZ)	工业级	上海正上化工科技有限公司
二甲苯、四氯化碳、 四氢呋喃	分析纯	国药集团化学试剂有限公司
苏丹IV	生物染色剂	天津科密欧化学试剂有限公司
0#柴油	市售	中国石化

### 1.2 试样制备

丁苯橡胶组成及配比如表3所示。

表3 丁苯橡胶组成及配比

样品编号	SBR/份	ZnO/份	SA/份	M/份	CZ/份	DCP/份	AC/份
A	100	5	5	2	2	0	0
B	100	5	5	2	2	0.2	0
C	100	5	5	2	2	0.4	0
D	100	5	5	2	2	0.6	0
E	100	5	5	2	2	0.8	0
F	100	5	5	2	2	0.4	2-12

根据表3所示配比将丁苯橡胶在开炼机上开炼,控制辊温在40~45℃,依次加入橡胶助剂,最后加入硫化剂DCP混炼均匀,薄通5次后出片,制得混炼胶,胶料放置1d后进行硫化曲线测试。混炼好的F胶料分别采用自由发泡法和模压法制得不同孔径结构的样品<sup>[10-11]</sup>,分别测试其吸油倍率。

### 1.3 硫化曲线的测定

采用台湾高铁MD-3000A直驱式无转子硫化仪测试硫化曲线,测试温度为160℃,摆动角度为0.5°,测试时间为30min,得到各个样品的硫化曲线。

### 1.4 吸油材料的扫描电镜分析(SEM)

试样经脆断后,断面经过真空喷金处理,在扫描电子显微镜下观察断面形貌并摄像,分析材料的断面结构。

### 1.5 吸油性能的测试

#### 1.5.1 吸油倍率的测试

静态条件下吸油倍率的测试方法<sup>[5]</sup>:室温下将样品剪成边长0.5cm的正方体,取一定数量并称量,将其放入装有二甲苯的500mL广口瓶中,选取时间5、10、20、40、60、80、100、120min,分别取出试样,在金属网上静置3min后称重,计算吸油倍率。120min后每隔2h按上述方法测量试样质量,2次质量差不超过0.1g为止,同一样品测试3次吸油倍率求取平均值,绘制Q-t曲线。吸油倍率Q计算方法如下:

$$\text{吸油倍率 } Q(\text{g/g}) = \frac{[\text{试样吸油后质量}(\text{g}) - \text{试样吸油前质量}(\text{g})]}{\text{试样吸油前质量}(\text{g})}$$

#### 1.5.2 保油率的测定

采用称量法测定吸油材料的保油率。在离心管中加一层金属滤网,称取一定量饱和吸油材料,将其放入准备好的离心管金属滤网上,将离心管放入离心机,在转速1000r/min下运转3min后,取留在滤网上的试样称量其质量,保油率计算方法如下:

$$\text{保油率 } P(\%) =$$

$$[\text{离心后的质量}(\text{g}) / \text{离心前的质量}(\text{g})] \times 100\%$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 橡胶硫化程度对吸油倍率的影响

吸油橡胶的膨胀吸油过程实际上是高分子链段溶剂化的过程<sup>[12]</sup>,当链段溶剂化作用和弹性回缩力作用平衡时吸油达到了饱和。橡胶硫化程度的大小决定了橡胶的网络结构,对橡胶吸油倍率有直接的影响。

样品 C 的硫化曲线如图 1 所示。根据硫化曲线确定 a~g 点对应的硫化时间,按照硫化时间硫化得到试样 a~g 并分别测试吸油倍率,得到吸油倍率对转矩的曲线,如图 2 所示。吸油倍率在转矩 1.5  $\text{dN}\cdot\text{m}$  左右达到最大。为了确定最大吸油倍率对应的准确转矩,按上述方法制得转矩 ( $\text{dN}\cdot\text{m}$ ) 为 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 的样品进行不同油品的吸油倍率测试,如图 3 所示。

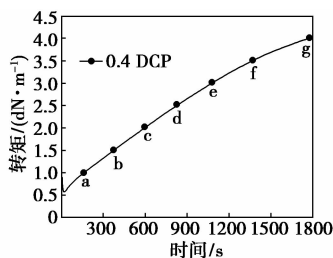


图 1 样品 C 的硫化曲线

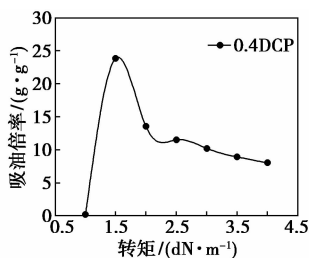
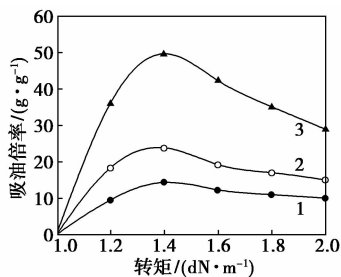


图 2 硫化程度与吸油倍率的关系



1—0#柴油;2—二甲苯;3—四氯化碳

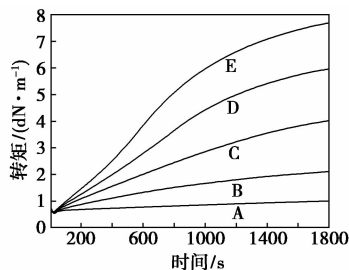
图 3 种不同油类硫化程度与吸油倍率关系

由图 3 可知,对于不同油品有相同的趋势:初期吸油倍率随着转矩的增加而增加,硫化达到一定程度后,吸油倍率随着转矩的增加而下降。这是因为在硫化初期,分子链并未大范围交联在一起,三维分子网络还未形成,这时候橡胶分子链由于溶剂化作用逐步溶解于油类中,所以吸油倍率很低。随着硫化的进行,交联剂逐渐发挥作用,橡胶分子链由于交联剂的作用,逐步形成三维分子网络,使得溶解在油类中的橡胶分子链越来越少,并且交联的分子链较长伸展良好,吸油倍率逐步增加,当转矩为 1.4  $\text{dN}\cdot\text{m}$

时,吸油倍率(二甲苯)达到最大值 24.6  $\text{g}/\text{g}$ 。随着硫化的进行,橡胶分子交联程度增加,交联分子链逐渐增多,交联点间链段变短,三维分子网络的伸展受到束缚,橡胶吸油倍率逐渐下降。由于不同油类密度、黏度及溶解度不同,材料对他们的吸收情况也不相同。

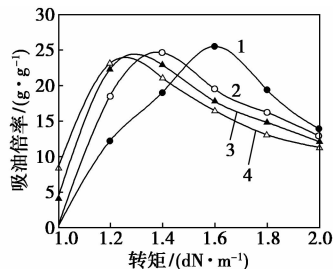
## 2.2 交联剂 DCP 用量对吸油倍率的影响

样品 A~样品 E 在 160 $^{\circ}\text{C}$  下的硫化曲线如图 4 所示,样品 B~样品 E 吸油倍率随转矩的变化曲线如图 5 所示。



A—0 DCP; B—0.2 DCP; C—0.4 DCP; D—0.6 DCP; E—0.8 DCP

图 4 不同样品硫化曲线



1—0.2 DCP; 2—0.4 DCP; 3—0.6 DCP; 4—0.8 DCP

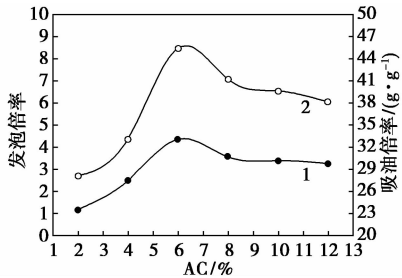
图 5 DCP 含量不同的样品硫化程度和吸油速率关系

样品 A 作为对比在开炼过程中没有加入交联剂 DCP,由图 5 可知,样品 A 转矩变化很小,实验中制得的样品在吸油过程中完全溶解在油品中。

由图 5 可知,样品 B~样品 E 的吸油倍率均随着转矩的增加呈现先增大后减少的趋势,但同时随着 DCP 用量的增加,样品达到最高吸油倍率时的转矩逐渐变小。这是因为 DCP 用量较小时,硫化过程中引发交联的活性中心数目很少,交联反应慢,交联点之间分子链较长,会有部分长链和油类相互作用溶解于油类中,导致吸油倍率降低,达到最高吸油倍率时转矩较大。而随着 DCP 用量的增加,引发交联的活性中心数目增加,交联点之间分子链短,合适的三维网络结构形成的较快,在较低转矩就达到较合适的三维网络结构。

### 2.3 发泡剂质量分数对吸油性能的影响

按照 F 配比(发泡剂质量分数分别为 2%、4%、6%、8%、10%、12%) 在开炼机共混均匀,放置 1 d 后在平板硫化机进行模压发泡,发泡温度为 160℃,发泡时间为 450 s,得到样品 1~样品 6,分别测试其发泡倍率、吸油倍率,并在扫描电镜下观察其孔洞形貌,结果分别如图 6、图 7 所示。



1—发泡倍率;2— $Q$ (g/g)

图 6 AC 用量对样品发泡倍率和吸油倍率的影响

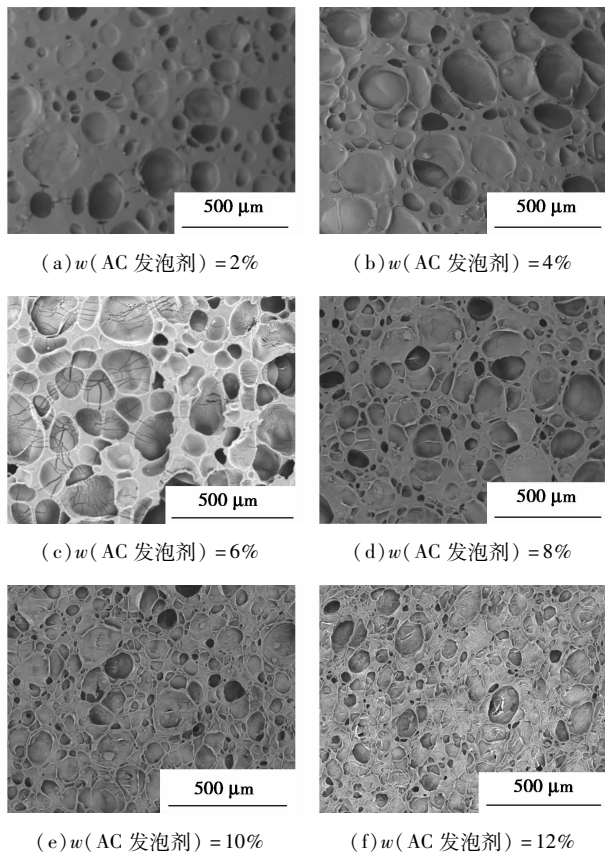


图 7 不同质量分数 AC 的发泡吸油材料的电镜图

由图 6 可知,吸油材料的发泡倍率随着 AC 发泡剂质量分数的增加呈现先急剧增加,然后又下降,最后趋于平缓;吸油倍率随着 AC 发泡剂质量分数

的增加也呈现该趋势,在 AC 质量分数为 6% 时,发泡倍率和吸油倍率均达到最大值。由图 7 可以看出,AC 质量分数较低(2%)时,泡孔较小,很分散,孔壁较厚;随着 AC 质量分数的增加,泡孔孔径逐渐增大,孔壁变薄,到 6% 时,呈现不规则的细胞结构,骨架明显;AC 质量分数继续增加,泡孔数量增加,孔径变小,由于 AC 量较多,产生气体速率变快,孔洞开始出现破裂现象,继续增大 AC 质量分数,破裂现象更明显,孔洞大小不均匀,整体上变小,数量变多。宏观上的表现就是发泡倍率先增加后变低,最后趋于稳定,由于孔洞结构的变化,也导致吸油倍率呈现相同的变化。因此在该发泡条件下,AC 质量分数为 6% 时,吸油材料的吸油性能最优,为 47.8 g/g。

### 2.4 发泡方法及发泡橡胶吸油机理探讨

按照 F 配比将橡胶混炼均匀,在平板硫化机上分别用自由发泡法和模压法,在相同发泡温度、时间下制得具有开孔结构和闭孔不同结构的吸油材料,其扫描电镜图如图 8 所示。图 8(a)、图 8(d) 为开孔结构的橡胶发泡材料,该材料属于网络空隙结构,泡孔形状为不规则细胞型,开孔为主,内部网络交联,骨架结构明显,且泡孔壁较闭孔厚;图 8(b)、图 8(e) 为模压法制得的具有闭孔结构的橡胶发泡材

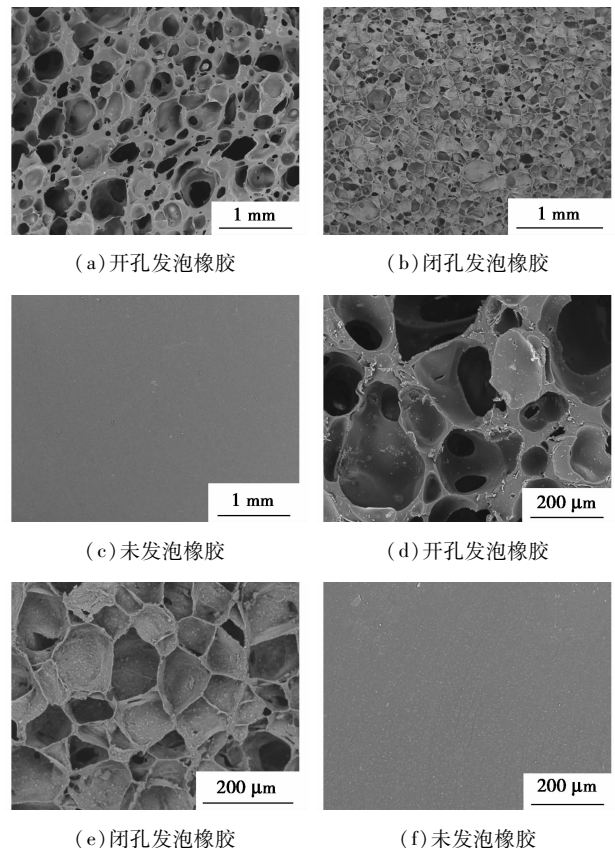
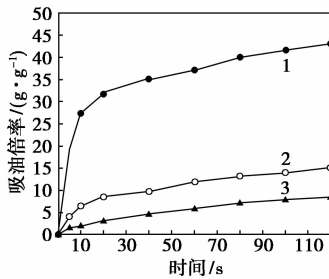


图 8 扫描电镜图

料,该材料以闭孔为主,孔壁较薄;图 8(c)、图 8(f) 为样品 C 硫化到转矩为 1.6 dN·m 时的扫描电镜图,由于没有加入发泡剂,所以断面较为光滑并无明显孔洞结构。

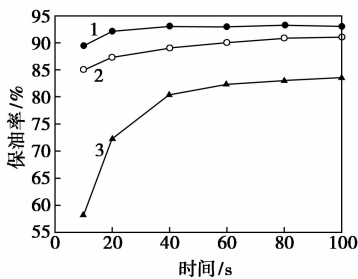
3 种样品 120 min 内吸油倍率随时间变化的曲线如图 9 所示,由图 9 可知,开孔结构的吸油材料,在前 10 min 内吸油倍率快速上升,然后吸油倍率上升变得缓慢;闭孔结构的吸油材料的吸油速率较慢,接近未发泡的吸油橡胶,对于未发泡的吸油材料,其吸油倍率增长较为缓慢,增长速度无明显变化。



1—开孔发泡橡胶;2—闭孔发泡橡胶;3—未发泡橡胶

图 9 不同结构发泡橡胶吸油倍率曲线

通过观察材料结构及绘制吸油速率曲线,开孔发泡材料吸油过程中的吸附量由毛细吸附量和溶胀凝胶量 2 部分组成,开孔发泡橡胶内部为多孔结构,不仅具有高比表面积还有丰富的毛细孔道,吸油开始时由于表面吸附的作用油类吸附在材料表面,然后由于毛细作用油类逐渐进入毛细孔道,填充孔洞空间,这个过程相对溶胀过程较为迅速,所以从吸油速率曲线上看开孔发泡橡胶在初始吸油时吸油倍率迅速增大,当发泡橡胶材料被油类包围时溶胀过程开始<sup>[13]</sup>,最终达到热力学平衡,吸油达到饱和。这个过程较为缓慢,所以在吸油速率曲线上体现为吸油倍率上升速率下降,后期由于溶胀作用,导致一些细小的毛细管堵塞,提高了吸油材料的保油率,保油率随时间的变化如图 10 所示。对于闭孔发泡橡胶材料,由于孔洞之间没有连通,只有表面具有一些孔



1—无孔;2—开孔;3—闭孔

图 10 不同结构发泡橡胶保油率曲线

道,因此毛细作用不明显,其吸油过程主要为溶胀过程,因此刚开始吸油时油类吸附在材料表面,然后是溶胀过程,吸油倍率增长较为缓慢。对于开孔、闭孔、无孔的 3 种橡胶材料都是以溶胀过程为主,所不同的是由于开孔结构较闭孔、无孔来说比表面积更大,油类对于橡胶材料的包围更好,所以其溶胀速率较闭孔、无孔快。

### 3 结论

(1)通过对丁苯橡胶吸油材料影响因素的研究发现,丁苯橡胶吸油材料的吸收倍率与硫化程度有关。硫化剂用量一定时,其吸油倍率随硫化程度的增加先增大后减小,对于不同质量分数硫化剂的橡胶,该规律仍然适用,但达到最大吸油倍率所对应的转矩随着硫化剂质量分数的增大而减小。

(2)对于具有开孔、闭孔结构的发泡橡胶吸油材料,其吸油机理不同,开孔橡胶吸油材料的吸附量包括毛细吸附量和溶胀凝胶量 2 部分,开孔结构极大地增大了吸油材料与油类的接触面积,加快了吸油速率,保油率的变化也说明了开孔材料的吸收机理是毛细作用和溶胀作用相结合;闭孔橡胶吸油材料的吸附量主要以溶胀凝胶量为主,与未发泡的橡胶吸油材料相比,最大吸收倍率有所增加,吸油速率无明显增加。

(3)通过橡胶发泡法极大提高材料的吸油速率和倍率,通过实验发现,开孔发泡橡胶吸油材料对油类具有较好的吸附效果,静态下 120 min 内达到饱和,对二甲苯及四氯化碳的最大吸收倍率达到 45 g/g 和 90 g/g,对柴油的吸收倍率达到 30 g/g,高于同类吸收材料,对水面有机油类污染物有很好的吸收效果,且生产工艺简单,易于大规模生产,具有较好的应用发展前景。

### 参考文献

- [1] Lin J Y, Shang Y W, Ding B. Nanoporous polystyrene fibers for oil spill cleanup [J]. Marine Pollution Bulletin, 2012, 64 (2): 347-352.
- [2] Korhonen Juuso T, Kettunen Marjo, Ras Robin H. Hydrophobic nanocellulose aerogels as floating, sustainable, reusable, and recyclable oil absorbents [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2011, 3(6): 1813-1816.
- [3] Gui X C, Li H B, Wang K L. Recyclable carbon nanotube sponges for oil absorption [J]. Acta Materialia, 2011, 59(12): 4798-4804.
- [4] Karakutuk Ilknur, Okay Oguz. Macroporous rubber gels as reusable sorbents for the removal of oil from surface waters [J]. Reactive & Functional Polymers, 2010, 70(9): 585-595.

### 1.3 体外试验

将生物玻璃粉浸泡在模拟体液 (SBF) 中,其体外生物活性正如 kokubo 等所述<sup>[11]</sup>; SBF 溶液的组成和离子浓度类似于人体血浆,150 mg 样品浸泡在 100 mL 的 SBF 中,在 37℃ 浸泡 12 h 后,经过滤后用丙酮和蒸馏水清洗,在室温下干燥,用傅里叶变换红外光谱仪 (FT-IR) 和 X 射线粉末衍射 (XRD) 分析样品表面。

## 2 结果与讨论

### 2.1 XRD 图

用盐酸作催化剂合成生物玻璃粉的广角 XRD 图如图 1 所示。从图 1 可以看出,并无尖锐峰,表明在 700℃ 煅烧所获得的粉体为无定形。

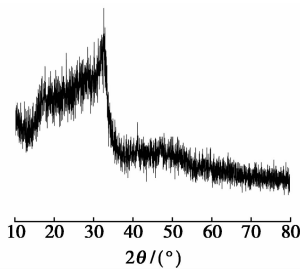


图 1 HBG 的广角 XRD 图

### 2.2 N<sub>2</sub> 吸附脱附分析

HBG、ABG 和 CBG 的 N<sub>2</sub> 吸附/脱附等温线及孔径分布曲线如图 2 所示,3 种粉体的比表面积、孔体积和孔径如表 1 所示。从图 2(a) 可以看出,所有样品都是 IV 型等温线,为典型的介孔结构<sup>[12]</sup>。结合 H1 型磁滞回线,表明圆柱形孔道具有孔径分布窄的

特点。从图 2(b) 可以看出,ABG 和 CBG 具有较窄的孔径分布,表明这 2 种粉体的孔径分布较均匀<sup>[13]</sup>。通过 BET 曲线的线性部分计算,HBG、ABG 和 CBG 的比表面积分别为 206.3、213.6 m<sup>2</sup>/g 和 141.5 m<sup>2</sup>/g,其中 ABG 具有更高的比表面积。

表 1 3 种粉体的比表面积、孔体积和平均半径

材料	比表面积/ (m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	孔体积/ (cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )	平均孔半径/ nm
HBG	206.3	0.45	8.5
ABG	213.6	0.41	7.4
CBG	141.5	0.22	6.2

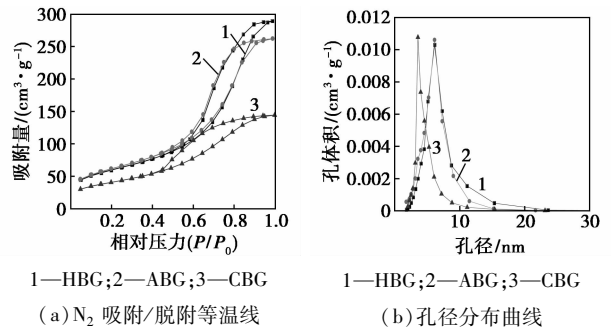


图 2 HBG、ABG 和 CBG 的 N<sub>2</sub> 吸附/脱附等温线及孔径分布曲线

### 2.3 TEM 分析

HBG 和 ABG 的 TEM 图如图 3 所示。HBG 呈现出凝聚形态,如图 2(a) 所示;MBG 呈现出介孔形态,如图 2(b);与 HBG 相比,MBG 表现出更均匀的孔径分布。

(上接第 66 页)

[5] 杜昕昕,王善慧,王耀兵.一种吸油泡沫材料的吸油性及吸油机理探讨[J].环境科学与管理,2012,37(5):115-119.

[6] Zhou M H, Cho W J. High oil-absorptive composites based on 4-tert-butylstyrene-EPDM-divinylbenzene graft polymer[J]. Polymer International, 2001, 50(11):1193-1200.

[7] Ding L, Li Y, Jia D.  $\beta$ -Cyclodextrin-based oil-absorbents: Preparation, high oil absorbency and reusability [J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 83(4):1990-1996.

[8] Yuan X P, Chung T C. Mike. Novel solution to oil spill recovery: Using thermodegradable polyolefin oil superabsorbent polymer (Oil-SAP) [J]. Energy & Fuels, 2013, 26(8):4896-4902.

[9] Lin Chitsan, Hong Yu-jue, Hu Allen H. Using a composite material containing waste tire powder and polypropylene fiber cut end to recover spilled oil [J]. Waste Management, 2010, 30(2):263-

267.

[10] Fuchs E, Reinartz K S. Optimisation of the production of foamed rubber goods with a lab scale method[J]. Cellular Polymers, 2000, 19(3):205-221.

[11] Noordermeer J W M. Recent advances in sponge technology of EPDM-rubber in automotive weatherstrips: A review[J]. Cellular Polymers, 1997, 16(5):331-348.

[12] 吴波,周美华.高吸油性树脂[J].现代塑料加工应用,2006,18(2):62-64.

[13] 王洁,商平.有机膨润土改性高吸油树脂的制备与性能研究[J].中国塑料,2009,23(11):48-52.

[14] Chu Ying, Pan Qinmin. Three-Dimensionally macroporous Fe/C nanocomposites as highly Selective oil-absorption materials [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2012, 4(5):2420-2425. ■