

УДК 620.22-022.532

Полубояринов Дмитрий Алексеевич,

Лапин Даниил Вадимович

Аспиранты

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»

Научный руководитель: Буракова Елена Анатольевна

д.т.н., доцент

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»

**МЕЗОПОРИСТЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ: МЕТОДЫ
ПОЛУЧЕНИЯ, ОБОРУДОВАНИЕ, СВОЙСТВА И ПЕРСПЕКТИВЫ
ПРИМЕНЕНИЯ**

Аннотация: Статья посвящается обзору и анализу методов, оборудования для производства мезопористого углеродного материала, а так же рассмотрению свойств получаемого материала и перспективам его применения. Рассмотрены самые распространённые методы получения мезопористого углеродного материала, оборудование, используемое в ходе осуществления каждого метода. Полученные результаты могут быть полезны как для специалистов в области нанотехнологий и наноматериалов, так и для специалистов в области материаловедения и инженерных специальностей.

Ключевые слова: мезопористый углерод, пористость, углерод, углеродные материалы, способы получения мезопористого углерода, оборудование, сырьё, активация углерода, оборудование, синтез, методика получения, применение, промышленность, промышленные процессы, мезоразмерные структуры.

Abstract: The article is devoted to the analysis of methods and equipment for the production of mesoporous carbon material, as well as to the consideration of the properties of the resulting material and the prospects for its application. The most common methods of obtaining mesoporous carbon material and the equipment used during the implementation of each method are considered. The results obtained can

be useful both for specialists in the field of nanotechnology and nanomaterials, as well as for specialists in the field of materials science and engineering specialties.

Key words: mesoporous carbon, porosity, carbon, carbon materials, methods of obtaining mesoporous carbon, equipment, raw materials, carbon activation, equipment, synthesis, production method, application, industry, industrial processes, mesoscale structures.

Введение

Мезопористые углеродные материалы представляют собой уникальные структуры, которые имеют полости и каналы с диаметром от 2 до 50 нм которые находят широкое применение в различных областях, таких как катализ, адсорбция, электроника и экология. Их высокая пористость и большая площадь поверхности делают их идеальными кандидатами для использования в качестве эффективных катализаторов, адсорбентов, суперконденсаторов, аккумуляторных систем и компонентов в электронике [1,12].

В данной статье мы рассмотрим основные методы получения мезопористого углеродного материала, сырьё для их синтеза, а также современные тенденции и перспективы развития этой области.

Объекты и методы исследования

Обзор литературных источников позволил установить наиболее распространённые методы получения мезопористого углеродного материала, сырьё, оборудование, которое используется при реализации этих методов. Исходя из проанализированных данных будет разработана собственная методика получения мезопористого углерода, в лабораторных условиях на данном этапе, технологическая схема для дальнейшей проработки процесса и

методика расчёта и углубления понимания необходимости определённого оборудования.

Основными свойствами мезопористого углеродного материала являются: высокая пористость, электропроводность, химическая стабильность, высокая термостойкость, возможность модификации структуры [1-5]. Так же были изучены методы получения мезопористого углерода. Выбор исходного сырья и порирующих агентов в разных источниках довольно разнообразен, вот некоторые из них: органические полимеры, сахара и углеводы, силикагель, амины и т.д. [6-8].

Основные методы получения мезопористого углеродного материала и используемое оборудование

Метод золь-гель

Данный метод является одним из наиболее распространённых. В ходе реализации данного процесса используются органические прекурсоры в присутствии порирующих агентов, задающих структуру пористости получаемого материала. Процесс получения методом золь-гель состоит из: гидролиза; формирования (заливание золя в форму); образование геля; старения, уплотнения структуры геля; сушки – удаление жидкости из геля; дегидратации; уплотнения геля, путём термообработки при температуре порядка 850°C [7, с.165].

Метод золь-гель подразумевает использование реакторов для синтеза золя, установки для контроля температуры, сушильные установки, печи для фильтрации, пропыки.

К достоинствам данного метода можно отнести высокую контролируемость структуры, низкие температуры процесса, широкий выбор прекурсоров и экологичность. У данного метода есть и недостатки, такие как сложность и длительность процесса.

Метод химического осаждения из газовой фазы (CVD)

CVD метод позволяет получать материал с мезопористой структурой на поверхности катализаторов из углеродсодержащих газов, посредством

воздействия высоких температур, порядка 1000°C [9].

Параметры получаемого материала зависят от температуры, давления и выбранной газовой смеси. Технический эффект заявляемого способа заключается в простоте и скорости получения пористых углеродных материалов при характеристиках, превосходящих аналоги, получаемые через традиционный темплатный синтез [9].

Данный способ позволяет получать из растительной высокозольной биомассы углеродные материалы с высокими текстурными характеристиками и высокой долей мезопор в минимальное число стадий.

Материал, полученный по предлагаемому способу, может найти широкое применение в качестве носителя для широкого спектра катализаторов, а также в качестве адсорбента [9].

При реализации данного метода используется CVD реактор с системой подачи газов и контроля давления и температуры.

Достоинствами данного метода являются чистота и качество получаемого материала, высокий контроль над структурой и относительная быстрота процесса. Недостатками являются дороговизна используемых установок, довольно высокая температура процесса и объём получаемого материала довольно мал, что затрудняет более масштабное производство.

Метод химической активации

Метод химической активации является одним из широко используемых методов для получения пористых углеродных материалов. Суть метода состоит в том, что структура углеродного материала создается путём воздействия химических реагентов, щёлочи и кислоты, на него.

Прекурсорами могут выступать различные органические соединения (древесина, фруктовые косточки, фенолформальдегидные смолы и т.п.). Далее прекурсор смешивают с активатором (гидроксид калия, фосфорная кислота и т.д.), после смешивания следует термическая обработка смеси в атмосфере инертных газов, при температуре от 300 до 750°C. Полученный углеродный материал промывают от активатора в несколько этапов, чтобы добиться

достаточной чистоты продукта, измельчают и высушивают [10,11].

Данный метод позволяет получать материал с высокой удельно поверхностью, довольно экономичен и доступен, однако материал получает не всегда равномерное распределение пористой структур, сравнительно ограниченный контроль над морфологией, а так же требует использование довольно агрессивных химикатов в процессе. Для осуществления процесса необходим смеситель-реактор, сушильное и фильтрационное оборудование, печь и средства контроля и анализа параметров процесса.

Метод пиролиза

Пиролизный метод получения мезопористого углерода подразумевает получение материала с пористой структурой после воздействия на органические соединения высоких температур, порядка 900°C, в отсутствие кислорода, в среде инертного газа, с последующей промывкой и сушкой [12, с.34-35,].

В качестве сырья так же, как и в остальных методах, используются органические соединения, такие как углеводороды, полимеры и т.п. В процессе пиролиза органические соединения разлагаются на углеродные остатки, образуя пористую структуру. Контроль температуры и времени пиролиза является критически важным для достижения необходимых характеристик (пористость, удельная поверхность) [13].

В исследованиях, где применяется пиролизный метод упоминается, что на СЭМ-изображениях наномодифицированных видно, что сформированная структура УНТ распределена равномерно [14].

Применение данного метода в сочетании с другими методиками открывает новые горизонты для создания функциональных материалов с высокой эффективностью.

Метод пиролиза отличается доступностью, простотой и экономичностью, однако процесс ограничивает контроль пористости и однородности структуры. При осуществлении этого метода используются реакторы для пиролиза, система подачи газов, сушильное оборудование.

Заключение и выводы

В ходе проведения работы над данным обзором была сформирована сравнительная таблица по методам, представленным выше (табл.1).

Установлен перечень оборудования для осуществления каждого из методов

Таблица 1

Сравнительный анализ методов получения мезопористого углерода

Метод	Преимущества	Недостатки
Золь-гель	Точный контроль структуры и пористости; высокая однородность	Сложность и длительность процесса; высокая стоимость
CVD (химическое осаждение)	Высокая чистота и качество; возможность наноструктурирования	Дороговизна оборудования; высокие температуры; сложность процесса
Химическая активация	Высокая удельная поверхность; простота и доступность	Использование агрессивных химикатов; возможные остатки реагентов
Пиролиз	Простота и экономичность; широкая доступность материалов	Ограниченный контроль пористости; возможная неоднородность структуры

Результаты проведённой работы показывают нам, что область получения недостаточно проработана, доступные и экономичные методы дают на выходе менее качественный продукт, по сравнению с менее доступными, дорогими и сложными. Это указывает на актуальность работы в направлении разработки гибридного метода получения мезопористого углерода, с целью сделать процесс менее энергоёмким, а в следствие и более экономичным, с достаточной чистотой и качеством выходящего продукта, а так же возможностью масштабирования процесса при надобности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Eftekhari, A., & Fan, Z. Eftekhari, A., & Fan, Z. (2017). Ordered mesoporous carbon and its applications for electrochemical energy storage and conversion. *Materials Chemistry Frontiers*, 1(6), 1001–1027. doi:10.1039/c6qm00298f // *Materials Chemistry Frontiers*. - 2017. - №1.

2. Файзуллаев Н.И., Мамирзаев М.А., Асроров Д.А. Структурные особенности и сорбционные свойства мезопористого углеродного материала, полученного из природного шунгита // *Universum: химия и биология*. - 2023. - №5(107).

3. Попов М.В., Брестер А.Е., Юминз С.И., Баннов А.Г. Исследование пористых углеродных материалов для суперконденсаторов // *Химия в интересах устойчивого развития*. - 2021. - №29. - С. 691–701.

4. Ся Т., Вакабаяси К., Пан З. и другие. Химия реакций сжатия в мезопористом углероде, состоящем из слоёв графена с минимальным количеством слоёв // *Chemical Science (RSC Publishing)*. - 2023. - №29. - С. 8448–8457.

5. Синь В., Сон Ю. Мезопористый углерод: последние достижения в синтезе и типичные области применения // *RSC Advances*. - 2015. - №5

6. Синельникова Ю. Е. Синтез мезопористых углеродных материалов // XXX Зимняя Школа по химии твёрдого тела. - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2021. - С. 34–35.

7. Шабанова Н. А., Саркисов П. Д. Золь-гель технологии. Нанодисперсный кремнезём. - М.: БИНОМ.Лаборатория знаний, 2012

8. Hunter R.D., Rowlandson J.L. et al The effect of precursor structure on porous carbons produced by iron-catalyzed graphitization of biomass // *Materials Advances*. - 2020. - №9. - С. 3281–3291.

9. Елецкий П.М., Яковлев В.А., Пармон В.Н. Способ получения мезопористого углеродного материала. Патент РФ 2008114697, заявл. 14.04.2008, опубл. 10.09.2009

10. Ткачев А. Г., Мележик А. В., Соломахо Г. В. Способ получения мезопористого углерода. Патент РФ 2620404. Заявл. 26.01.2016, опубл. 25.05.2017.

11. Елецкий П.М., Яковлев В.А., Пармон В.Н. Способ получения мезопористого углеродного материала. Патент РФ 2336501. Заявл. 14.04.2008, опубл. 10.09.2009.

12. Синельникова Ю. Е. Синтез мезопористых углеродных материалов // XXX Зимняя Школа по химии твёрдого тела. - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2021. - С. 34–35.

13. Дуйшеева С. С., Жогаштиев Н. Т., Садыков Э., Ташполтов Ы. «Изучение процесса эволюции наночастиц углерода и кремния с использованием электрофизической ионизации» // Известия ОшГУ. — 2013. — №2. — С. 159–162.

14. Бураков А.Е., Романцова И.В., Буракова Е.А., Ткачев А.Г., Туголуков Е.Н. Повышение качественных характеристик адсорбентов при формировании поверхностной структуры углеродных нанотрубок каталитическим пиролизом углеводородов // Собрционные и хроматографические процессы. - 2012. - №3. - С. 344-352.