



Статья

Сшитый паром гидроксипропил-β-циклодекстрин Электропряденые нановолокнистые мембраны для сверхбыстрого удаления красителей

Синьмяо Сюй, И Чжан, Юн Чен * и Юй Лю *

Химический колледж, Государственная ключевая лаборатория элементоорганической химии, Нанкайский университет, Тяньцзинь

300071, Китай * Адрес для переписки: chenyong@nankai.edu.cn (YC); yuliu@nankai.edu.cn (YL)

Аннотация: Традиционные разделительные мембраны, используемые для удаления красителей, часто страдают от компромисса между эффективностью разделения и водопроницаемостью. В настоящей работе мы предлагаем простой подход к получению высокопоточных нановолоконных мембран на основе циклодекстрина с помощью процессов электропрядения и сшивки в паре. Применение паров глутарового альдегида для сшивания электропряденых мембран гидроксипропил-β-циклодекстрина (ГП-β-ЦД)/поливинилового спирта (ПВС)/лапонита может создавать взаимосвязанные структуры и приводить к образованию пористого иерархического слоя. Кроме того, включение неорганической соли, лапонита, может изменить процесс сшивки, в результате чего получаются мембраны с улучшенной гидрофильностью и хорошо сохраняемой электроформованной нановолокнистой морфологией, что способствует сверхбыстрому потоку воды 1,0 × 105 лч-1м-26ар-1 . Благодаря синергетическому эффекту сильного взаимодействия «хозяин-гость» и электростатического взаимодействия мембраны демонстрируют подходящую устойчивость к анионным красителям с высокой эффективностью удаления > 99% за короткое время и обеспечивают точное разделение катионных и анионных красителей, сопровождаемое подходящей пригодностью для вторичной переработки. с эффективностью разделения >97% после как минимум четырех сепараций-регенераций. Полученные мембраны с замечательной эффективностью разделения и сверхбыстрой проницаемостью могут стать многообещающим кандидатом на роль высокоэффективных мембран для очистки воды.

Ключевые слова: циклодекстрин; супрамолекулярная адсорбция; электроспиннинг; нановолокнистые мембраны; сверхбыстрое проникновение



Цитирование: Сюй, Х.; Чжан, Ю.; Чен, Ю.; Лю, Ю. Сшитые электропрядением гидроксипропил-β-циклодекстрина нановолокнистые мембраны, получаемые паром, для сверхбыстрого удаления красителей. Химия 2024, 6, 506–516. https://doi.org/10.3390/chemistry6040029

Поступила: 22 мая 2024 г.
Пересмотрено: 19 июня 2024 г.
Принято: 21 июня 2024 г.
Опубликовано: 25 июня 2024 г.



Копирайт: © 2024 авторов.
Лицензиат MDPI, Базель, Швейцария.
Эта статья находится в открытом доступе.
распространяется на условиях и
условия Creative Commons
Лицензия с указанием авторства (СС ВУ)
(https://creativecommons.org/licenses/by/

1. Введение

Многие синтетические органические красители, используемые в пищевой, косметической, кожевенной и текстильной промышленности, обладают мутагенными и канцерогенными свойствами [1,2]. Водные экосистемы и здоровье человека находятся под серьезной угрозой из-за широкомасштабного выброса сточных вод красителей в условиях быстрого роста индустриализации [3]. Очень важно найти эффективные методы удаления красителей при очистке сточных вод. Многочисленные тактики, такие как химическое окисление [4], биологическое разложение [5] и адсорбция [6,7], были тщательно изучены. Среди них технология мембранного разделения вызывает все больший интерес из-за ее доступности, удобства и отсутствия загрязнения [8]. В результате прилагаются большие усилия для создания высокопроизводительных мембран, которые одновременно обладают

сильным отторжением и высоким потоком [9,10]. β -циклодекстрин (β -ЦД), который является дешевым и устойчивым, обладает гидрофобной полостью, позволяющей образовывать стабильные комплексы включения с определенными органическими молекулами посредством взаимодействий хозяин-гость, и широко применяется при адсорбции загрязнителей [11–14]. Кроме того, используя основной строительный блок мембран, собственную микропористость β -ЦД, можно добиться точного разделения за счет исключения размера и служить дополнительным каналом транспортировки воды [15,16]. Пейнеманн и др. разработал метод с использованием пер-6-амино- β -ЦД вместо диамина, реагирующего с терефталоилхлоридом, с образованием разделительного слоя на основе циклодекстрина путем межфазной полимеризации, который показал точную проницаемость, избирательную по форме, и водопроницаемость 20 лм-2ч -1бар. 1 [17]. Однако эти сшитые мембраны на основе ЦД, полученные традиционными реакциями межфазной полимеризации в растворе, все еще слишком плотны, чтобы обеспечить быстрый транспорт

проницаемость и водопроницаемость 20 Лм-2ч-16ар-1 [17]. Однако эти сшитые мембраны на основе ЦД, полученные традиционными реакциями межфазной полимеризации в растворе, все еще слишком плотны, чтобы обеспечить быстрый транспорт растворителя [18–21].

К общим методам координации водопроницаемости мембран относятся повышение гидрофильности поверхности мембран [22,23], введение канала переноса воды. К общим методам координации водопроницаемости nel [24**)**26 бражвелие удельной поверхности [26]. Электроспиннинг, как универсальный и улучшающий гэүдрөфилиннөлйнигэжэр инхолтивоодибранна ню ной обрания инжибрий и инхольностью ин көндөрөлгинриянине вчирд гулиру дүүнгир рэфолорчи еймөрст борымой лютении альностью бөвөгүүдө жолгон бөгөө (27) и гиерлекситогриме гылым 45Повымы когорызмочышчей рактерористыяние**т 20**0-39/жммгч*ес*кое сшивание ССПОМОВИНЬНД ЛЮ ВИМИЯРЫР ЙАКИКЕТКАЯ ПОРИМ РЕТОССРЭТ РЭЗЕР, [ЁЎ]Щ ФОЯТУЮН Р НОКОВЯЬКО ПОДТЕМАВ В КИМЕКСА ОРАСТВОРИЛ Э СВИВИИ ОНХЭЛАНЫЯМИХУЬБУКАЯМИКЛЭКӨКИЯЛӨНЯГИЯЛЬЕРИЕЙЫНА ЭНЕРЭЛГЕРИИНЫНЫ ЭМЕННЫЯМИХУЬБУГАЛЬНИЯМИКУСЬБУКОНЫЯ ОНДЕРВЕВРОВОТУЖЛЕ <u>намь яньнь счинины детром детром и стинический в пробрами детром и стинике</u> таких, как INHS/FDC (31 322 и терриоческое с синвание [38]; поба из которых, тоебх оз брањичего кол и чества усилий. PROTECTION OF THE WOOD FIX PROPERTY OF THE CONTROL OF THE PROPERTY OF THE PROP ЧЖАВЕКЧИВАБСТ.З.^нДЗКТТАНЬКР.Б.ТУЗКТБИРОВНУРЗЧУЭР, ЧРЖ ЕЦСТ-50/ЖЕТВЗЖТЬ, НВЯВВЯАГМЭЗТРОЗВОЛЯЕТ использовать <u>~£893[Vi8_41 NP_3656]8 784 RV 1817 KY 246789 POTESPOTE/VI4 TRE VIS OP GROOT TO TO THE POTE TO THE POTE AT THE POTE TO THE POT</u> и устойчивость [33–35]. Что еще более важно сшивка в паровой фазе в максимально возможной степени и создать взаимосвязанную структуру, которая увеличивает количество достаточно мягко, чтобы максимально сохранить морфологию водорастворимых нановолокон. водотранспортных каналов и ускоряет сток воды [36–38]. насколько это возможно и создать взаимосвязанную структуру, которая увеличивает количество воды Поскольку включение неорганической соли может еще больше улучшить гидрофильность, мы транспортируем каналы и ускоряем поток воды [36–38]. также легировали лапонит, дешевую глину с отрицательной дискообразной поверхностью и положительными краями. Поскольку введение неорганической соли может еще больше улучшить гидрофильность, мы мембраны [39,40]. Здесь мы электроформовали HP-B-CD, ПВС и лапонит на лапоните, также легированном мембраны [39,40]. Здесь мы электроформовали НР-β-Ср, ПВС и лапонит на лапоните, также легироватьном полиакрилом, дешевой глине с отрицательными дискообразными поверхностями и положительными краями, в электропряденый субстрат из лонитрила (ПАН)/Полиэтиленимина (ПЭИ) и использовали мембраны из ГА [39,40]. В данном случае мы электроформовали НР-β-Ср, ПВС и лапонит на полиакрипоре в качестве сшивающего реагента для получения многослойного сшитого нановолокна НР-β-Ср (Ср-лонитрил (ПАН)/полиэтиленимин (РЕІ) в качестве подложки для электропрядения и использовали GА. пар СNF) мембраны (рис. 1а). Относительно высокое содержание НР-В-Ср представлено как сшивающий реагент для получения многослойного сшитого нановолокна НР-β-Ср (Ср-СNF). высокая адсорбционная способность с сильным взаимодействием хозяин-гость, в то время как ПВС фиксировался на мембранах (рис. 1а). Относительно высокое содержание НР-β-Ср представляет собой заметный низкая концентрация для содействия процессу электропрядения с преобладанием НР-β-Ср. Массовая адсорбционная емкость при сильном взаимодействии хозяин-гость при фиксации ПВС при низкой доле лапонита в ГП-β-ЦД изменялась от 0, 1 мас.%, 2 мас.% и 3 мас.%, при этом центрирование осуществлялось до способствуют произвел четыре типа электропряденых мембран: СD/РVА/Lap, CD/РVА/Lap, содержание лапонита на НР-β-Ср было изменено с 0, 1 мас.%, 2 мас.%, в результате чего было получено четыре вида электропряденых мембран: CD/РVА/Lap, ср. Ср/РVА/Lap, ср. Ср/РVА/Lap, ср. ср. судержание лапонита на нер-β-Ср было изменено с 0, 1 мас.%, и Ср/РVА/Lap, а также соответствующие мембраны после сшивки – виды электропряденых СD/PVA/Lap2% и CD/PVA/Lap3%, а также соответствующие мембраны после сшивки – виды электропряденых мембран, CD/PVA/Lap2%, СМ-VA-Lap3, СМ-V легированный лапонит оказывал влияние на электроспинование и в дальнейшем влиял на пар - как CD-CNF1, CD-CNF2, CD-CNF3 и CD-CNF4. Интересно, что легированный лапонит имел управляемая стадия сшивки. В процессе сшивки, опосредованной солью (рис. 1b,c), экс -эффект влияет на электропрядение и в дальнейшем влияет на стадию сшивки, вызванную паром. Наличие лапонита уменьшит реакционную спосрбность сшивки и приведет к высокой устойчивости. В процессе сшивки, опосредованном солью (рис. 1b,c), существование лапонита будет Создание оригинальных электроформованных нановолокон. В отличие от компактной структуры, конвенсимает реакционную способность сшивки и приводит к высокому сохранению исходного электропряденого материала. $\mathcal{S}^{\mathrm{NEYD3ATGS}}$ 64 - B TBA QUE STRAMINA YARMEN SHARAN HARMEN SHARAN SHARA быстрый поток воды. Ожидалось, что нановолокнистые мембраны обеспечат сверхбыстрый поток воды.

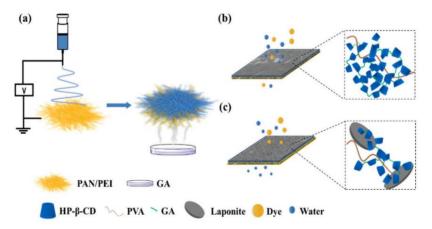


Рисунок 1. (а) Схематическое изображение приготовления нановолоконных мембран HP-β-CD . Схематическое изображение иллюстрация процесса сшивки и фильтрации сточных вод CD-CNF (б) без лапонита и (в) с лапонитом.

2. Материалы и методы

2.1. Материалы

Все реагенты использовали без дополнительной очистки. Полиакрилонитрил (ПАН, средняя Мw = 150 000), полиэтиленимин (ПЭИ, средняя Мw = 45 000, 50% водный раствор), поливиниловый спирт (ПВС, 99% гидролизованный, степень полимеризации = 1700), гидроксипропил β-циклодекстрин (НР-β- CD, средняя степень замещения = 7, Мw = 1541,54), лапонит, глутаральдегид (ГА, 25%-ный водный раствор) и бычий сывороточный белок (БСА) были приобретены у компании Macklin Reagent Co., Ltd. (Тяньцзинь, Китай). Тропаеолин О, индигокармин, кармоизин , прямой желтый 12, реактивный черный 5, основной красный 2, родамин В, кристаллический фиолетовый и тиофлавин Т были приобретены у компании Aladdin Reagent Company.

2.2. Подготовка нановолокнистых мембран

Электропрядение: 9,6% мас./об. ПАН и 2,4% мас./об. ПЭИ растворяли в N,N-диметилформамиде (ДМФ) и перемешивали в течение 6 часов при 80 С для получения гомогенного раствора. Всего в шприц с манометром 20 было загружено 8 мл раствора с расходом 4 мл/ч.

, и подавалось высокое напряжение (15 кВ). Расстояние между шприцем и коллектором, покрытым алюминиевой (АІ) фольгой, составляло 20 см, а скорость вращения цилиндрического коллектора составляла 125 об/мин. Всего 1 г НР-β-ЦД, 80 мг ПВС и различные массы лапонита: 0 мг, 10 мг, 20 мг и 30 мг, что соответствует массовому соотношению к НР-β-ЦД, равному 0, 1%, 2% и 3% растворяли в 2 мл деионизированной воды и перемешивали в течение ночи соответственно. Вышеупомянутые растворы переносили в шприц калибра 23 и электроформовали непосредственно на алюминиевую фольгу, покрытую ПАН/ПЭИ. Напряжение было установлено равным 25 кВ, а скорость потока составляла 1 мл /ч . В зависимости от доли лапонита в НР-β-СD четыре типа мембран обозначались как CD/PVA/Lap0, CD/PVA/Lap1%, CD/PVA/Lap2% и CD/PVA/Lap3%.

В общей сложности 20 мл раствора ГК (25% водный раствор) в чашке Петри помещали в вакуумный эксикатор и полученные электропряденые нановолокна на алюминиевой фольге накрывали за пределами чашки Петри, не касаясь раствора. После применения вакуума в течение 24 ч мембраны снимали с фольги, промывали деионизированной водой в течение нескольких минут и сушили в вакууме при 50 С в течение ночи. Сшитые мембраны были представлены как CD-CNF1 (CD/PVA/Lap0), CD-CNF2 (CD/PVA/Lap1%), CD-CNF3 (CD/PVA/Lap2%) и CD-CNF4 (CD/PVA/Lap2%). Круг3%).

2.3. Методы характеристики

Сканирующий электронный микроскоп с полевой эмиссией (Merlin Compact, Оберкохен, Германия) использовали для получения морфологии поверхности нановолокнистых мембран. Для увеличения проводимости на покрытие был нанесен тонкий слой золота. Ускоряющее напряжение составляло 30 кВ. Средние диаметры волокон измеряли с помощью программного обеспечения Image J 1,46 г. ИК-спектрометр с преобразованием Фурье (Bruker Tensor II, Эттлинген, Германия) использовали для получения ИК-спектров образцов между 4000 и 400 см-1 при температуре окружающей среды. Рентгеновскую фотоэлектронную спектроскопию (РФЭС) проводили на приборе (Kratos Analytical Ltd.-Axis Ultra DLD, Манчестер, Великобритания), оснащенном монохроматизированным источником рентгеновского излучения АI Ка . Данные анализировали с помощью программного обеспечения CASA XPS (номер версии Casa2319PR1-0). Термогравиметрический анализ (ТГА) проводили на термогравиметрическом анализаторе (NET-ZSCH, Selb, Германия) в диапазоне температур от 25 до 800 С при скорости нагрева 10 С/мин с использованием N2 в качестве продувочного газа при скорости потока Угол . Контакт с водой 25 мл/мин (WCA) определяли с помощью гониометра, состоящего из анализатора (Dataphysical OCA20, Фильдерштадт, Германия). Поверхностный заряд мембран оценивали с помощью анализа зетапотенциала с использованием электрокинетического анализатора SurPASS 3.

2.4. Исследования водопроницаемости

Для оценки общей пористости полученных мембран использовали водосорбционногравиметрический метод . Мембраны разрезали на кусочки размером 10 × 10 мм. Отбирали высушенную массу (Wd) , а затем мембраны замачивали в деионизированной воде на 24 часа. После

слегка промокая поверхность мембран фильтровальной бумагой для удаления воды, определяли массу влажных мембран (Ww) . Процент содержания воды в мембранах рассчитывали по формуле

Содержание воды % =
$$\times \frac{BB}{100} \frac{Bd}{BT}$$
 (1)

После вымачивания в деионизированной воде в течение 24 часов мембраны разрезали на квадраты размером 20 × 20 мм. Мембраны предварительно подвергали давлению 1 бар в течение 10 минут для стабилизации скорости потока. Для анализа производительности применялись чистая вода и органический растворитель, включая этиловый спирт, петролейный эфир и дихлорметан. Скорость потока пермеата (J) для всех приготовленных мембран рассчитывали по уравнению (2).

$$J = {}_{T} - \frac{}{A}$$
 (2)

где Q обозначает объем проникшего растворенного вещества (в л), t — время, затраченное на проникновение (в часах), а A — эффективную площадь фильтрации мембран (в м2).

2.5. Эксперименты по фильтрации красителей

Была проведена серия фильтрационных экспериментов с тупиковой песчаной сердцевиной устройства для фильтрации микрорастворителей с использованием вакуумного насоса. Пять видов анионных красителей включали индигокармин, тропеолин О, реактивный черный 5, прямой желтый 12 и кармоизин, а четыре вида катионных красителей включали основной красный 2, кристаллический фиолетовый, родамин В и тиофлавин Т. Эффективная площадь мембран составила 1,77 см2.

Концентрацию красителя фиксировали на уровне 25 мкМ, объем питающего раствора составлял 5 мл. Пригодность мембран к вторичной переработке также оценивали с использованием пяти вышеуказанных видов анионных красителей (10 мкМ), при этом исходный раствор каждый раз составлял 20 мл. После фильтрации мембраны замачивали в 1 моль/л растворе NaOH, колебали в течение 5 мин и несколько раз промыв Циклы фильтрации/регенерации повторяли четыре раза.

Эксперименты по предотвращению обрастания проводились с использованием водного раствора BSA (500 частей на миллион) в качестве модельного загрязняющего вещества при давлении 1 бар. Каждый раз для достижения потока пермеата добавляли в общей сложности 40 мл питающего раствора BSA с концентрацией 500 ррт и мембраны промывали деионизированной водой в течение одной минуты. Процессы повторялись четыре раза. Начальный поток воды был выбран Jw , а поток после одного цикла – J0. Поток воды после промывки чистой водой обозначили Jw,1. Работоспособность всех мембран исследовали в течени Используя уравнения (3) и (4), полученные значения потока использовались для оценки общего процента загрязнения (FT)% и процента коэффициента восстановления (FRR)%.

$$\Phi T(\%) = \frac{Jw \quad J0}{_{_{\mathcal{J}MB}}} \quad \times 100 \tag{3}$$

$$\Phi PP(\%) = \frac{10,1}{40} \times 100 \tag{4}$$

3. Результаты

3.1. Структурные и морфологические характеристики CD-CNF. FTIR-спектры

мембран CD/PVA/Lap0, CD-CNF1, CD-CNF2, CD-CNF3 и CD-CNF4 представлены на рисунке 2a. Адсорбция Mg-OH на валентных колебаниях из лапонита проявлялась при 655 см-1 в мембранах CD-CNF2, CD-CNF3 и CD-CNF4 появился характерный пик -C N при 2240 см -1 в слое подложки , вызванный процессом электроформования с участием лапонита , который создавал поверхностные дефекты. За исключением CD/PVA/Lap0, у CD-УНВ, принадлежащих валентному колебанию CH в ацетальной связи, появился новый пик при 2820 см-1 , а валентная адсорбция OH при 3200–3600 см-1 снизилась, что свидетельствует о том, что гидроксильные группы в ГП-β-ЦД и ПВС взаимодействовали с альдегидными группами ГК. Пики

появились в CD-УНВ, принадлежащие валентному колебанию СН в ацетальной связи, а валентная адсорбция ОН при 3200–3600 см-1 уменьшилась, что указывает на то, что гидроксильные группы

в ГП-В-ЦД и ПВС взаимодействовали с альдегидными группами, от ГА. Пики при 1030 см-1, 1252

Af- указывает на то, что характерная структура циклодекстрина все еще сохраняется после сшивки. После обработки парами I К возник пик адсороции при 1729 см-1, относящийся к вибрации. После обработки парами ГК возник пик адсорбции при 1729 см-1 , относящийся к вибро- пику карбонила, где мембрана без лапонита (CD-CNF1) показал пик карбонила, где мембрана без лапонита (CD-СNF1) показала самая высокая интенсивность, демонстрирующая, что легированная соль может препятствовать сшиванию;

самая высокая интенсивность, демонстрирующая, что легированная соль может препятствовать сшиванию.

отторжение мемораны. Кроме чого, в результатах FTIR субстрата РАМ/РЕІ до и после обработки мембраны. Более того, в результатах FTIR субстрата РАМ/РЕІ до и Обработка GA (рис. ST), пик, приписываемый группе -NH при 1561 см-1 в РЕІ, неудача после обработки GA (рис. ST), пик, приписываемый группе -NH при 1561 см-1 в РЕІ это позволяет предположить, что реакция сшивки происходит в мембране-субстрате. В результате исчезли, что позволяет предположить, что реакция сшивки происходит в субстратной мембрана В Результаты IT A (рис. 26), испарение растворителей, включая ДМФ и воду, вызвало результаты IT A (рис. 26), испарение растворителей, включая ДМФ и воду, вызвало потеря веса ниже 300°С. Пик потери массы при 36.7°С соответствовал разложения потеря массы ниже 300°С. Пик потери массы при 36.7°С принадлежал распаду температура НР-В-СD. Все мембраны СD-СNF обладали лучшим термическими

эффективность, чем CD/PVA/Lap0, и CD-CNF1 продемонстрировал лучшие результаты с учетом стабильности на этале снижения веса, нем CD/PVA/Lap0, а CD-CNF1 продемонстрировал лучшие результаты с учетом снижения веса. между 350°C и 400°C. Результаты показали, что термическая стабильность CD-CNF находится в диапазоне от 350°C с до 400°C. Результаты показали, что термическая стабильность уменьналась с увеличением количества лапонита.

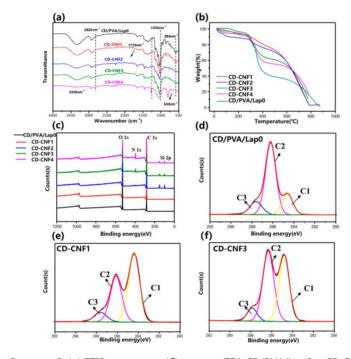


Рисунок 2. (a) FTIR-спектры и (б) кривые ТГА СD/PVA/Lap0 и CD-CNF. (c) Широкое сканирование XPS Рисунок 2. (a) FTIR-спектры и (б) кривые ТГА СD/PVA/Lap0 и CD-CNF. (c) Спектры широкого сканирования **ДЛЯ Б2я/СФ,СФДФЯ СВ С№** С=О для С2 и ОСО для С3 [19].

Чтобы получить представление о процессе сшивки, была применена рентгеновская фотоэлектронная - спектроскопия . Чтобы получить представление о процессе сшивки, была применена рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия. Результаты широкого сканирования CD/PVA/Lap0 (рис. 2c) показали, что в оыла применена Троскопия. Результаты широкого сканирования CD/PVA/Lap0 (рис. 2c) показали, что во всех мембранах основные пики С 1s и О 1s появляются при 285 эВ и 532 эВ. Элемент На всех мембранах основные пики С 1s и О 1s появлялись при 285 эВ и 532 эВ. Эле -Si был обнаружен при 150 эВ и 99.7 эВ на мембранах с добавкой лапонита. Кроме того, в CD-CNF3 и CD-CNF4 пик энергии связи при 400 эВ отнесен к

ночь. Более того, в CD-CNF3 и CD-CNF4 появился пик энергии связи при 400 эВ, соответствующий ночь. Более того, в CD-CNF3 и CD-CNF4 появился пик энергии связи при 400 зв, соответствующии элементу N из подложки что подтверждает существование поверхностных дефектов. элемент N из подложки вышел, подтвердив наличие поверхностных дефектов в слое HP-β-CD. Деконволюцированные спектры основного уровня С 1s XPS CD/PVA/Lap0. В слое HP-β-CD. Спектры ядра ядра С 1s XPS CD/PVA/Lap0 и CD-CNF после деконволюции продемонстрировали (рис. 2d-f; рис. S3a, b), что после сшивания С1(СС, CD-CNF продемонстрировали (рис. 2d-f; рис. S3a, b), что после сшивания С1(СС, СН) Интенсивность пика CH) увеличилась, а интенсивность пика C2(СО) снизилась в CD-CNF1. С пиковая интенсивность увеличилась, а пиковая интенсивность С2(СО) снизилась в CD-CNF1. С уреличением содержания лапонита соотношение С1/С2 имело тенденцию к уменьшению, что указывает на снижение С уреличением содержания лапонита соотношение С1/С2 имело тенденцию к уменьшению, что указывает на меньшую степень сшивки. Степень сшивки.

степень сшивки. Процесс сшивания оказал прямое влияние на морфологию мембран.

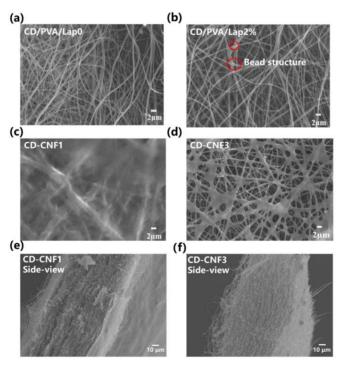
Результаты сканирующей электронной микроскопии (CЭМ) морфологии поверхности слоев HP-β-CD. до и после обработки парами GA представлены на рисунке S4. С повышенным уровнем массовая доля лапонита в HP-β-CD, диаметр электроформованных нановолокон увеличился

Процесс сшивания оказал прямое влияние на морфологию мембран.

Результаты сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) морфологии поверхности слоев HP-β-CD до и после обработки парами GA представлены на рисунке S4. При повышении массовой доли лапонита до HP-β¹1

CD диаметр электропряденных нановолокон увеличивался (рис. S4e-h). По сравнению с однородными нановолокнами в CD/PVA/Lap0 (рис. 3a,b), un- (рис. S4e-h). По сравнению с однородными нановолокнами в ናይነ ያለያ መደረጃ ተመደረጃ የመደረጃ የመደ Ѵҕӟ҇҅Ѳ҇ЅҎѲѴҏҜҍҽ҅ҠѽѨӣҎӔҞЅҩѲҾӧҕҬӷҪӾ҅Ѳ҃ӾѲӃӗ҅Ҁ҅҅Ҡӆҕӿ҄Ӕ҃ӋҸѲҩѦӷҔ҈ҎѼӋѦҶ҅ѲӓѦӗ҈ҽӓѦӆ҃Ӄҽҍҕҹӷҩҝӷҩ҄ӈҍ҉ӀѴҍ҅ со сшивкой ҸҘӖӫҥҍӰ҇ӉѲӻ҇Ҡ҈ҔҞҧҡѽӷҡҍЍ҂ѽҡҧҩӷӎҡѽӷҡӄҩѩҡҡӷӷҕӄҩӄҩҡҧҡҩҝҩӓ҂ҡҧӄѩӄҩӄѧҡҧӄҧҡҕѧҝҩӄҩҡҧӄҡҧӄҝӄѧӄҩҡҕѧӄҩӄѧӄҩӄѧӄҩӄҩӄҩӄҩӄҩӄҩӄҩӄ ር የመደር ነው። የመደር ነው R AND THE PROPERTY HAVE SEPTED BY AND THE PROPERTY AND THE REPORT OF THE PROPERTY AND TH YORKUL BARKARIA GARARA BARKARIA CND-SCNE3 VID-42-3, 473-43 CLARA BENEVER BENEV развита. хорошо сохранялся с небольшим слиянием после сшивки на СЭМ-изображениях PAN/PEI, субсохранялся СНВВРЕНЬНИМ ГИНВЕНЕРИЛЯВЯВ ГИНВЕИ SEA, СЭМНЗЕНБРЯЖОВИЯЖ БИЯГРЕТЫР АВИЕБЕЧАОГО сечения и после сшивки (рисунок S2). Согласно изображениям СЭМ поперечного сечения (рис. 3д, е), (Рис. 3е,ї), мембраны CD-CNF1 и CD-CNF3 обладали многослойной волокнистой структурой. Мембраны CD-CNF1 и CD-CNF3 обладали многослойными волокнистыми структурами. В структуры. В отличие от обычной плотной тонкой пленки, мембраны представлены в отличие от обычной структуры. В отличие от обычной плотной тонкой пленки, Мембраны представлены в отличие от обычной плотной тонкой пленки, мембраны представлены как трехмерные рыхлые везикулярные формы. Трехмерные рыхлые везикулярные субчатые структуры с высокой пористостью, обеспечивающие обильные водные губчатые структуры с высокой пористостью, обеспечивающие обильные водные губчатые структуры с высокой пористостью и обильные каналы для транспортировки воды. в транспортные каналы. В экспериментах по поглощению воды, которые представляли пористость мембран (рисунок S7), мембран (рис, S7), содержание воды для CD-CNF1, CD-CNF2, CD-CNF3 и содержание воды для CD-CNF1, CD-CNF2, CD-CNF3 и CD-CNF4 измерялось как

СD-CNF4 измерялся как 14,6%, 26,1%, 54,7% и 116,3% соответственно, что указывает на 14,6%, 26,1%, 54,7% и 116,3% соответственно, что указывает на повышенную пористость мембраны. После вымачивания в воде в течение трех месяцев морфология После вымачивания в воде в течение трех месяцев морфология После вымачивания в воде в течение трех месяцев морфология РАN/PEI, CD-CNF1 и CD-CNF3 (рис. S6) не изменился при небольшом набухании, что указывает на подходящую воду обеспечение подходящей водной устойчивости мембрань. Стабильность мембрань.



3.2. Характеристики водопроницаемости и отталкивания красителей СФСМЕ

Гидрофильносты дажже являете являе информоров заята ами-сым довода проемода смо измер Вода «Уто такон вых увотод во жей поднилений жий и Али Ведишилые выпильными, как вода.

капли не могут устойчиво существовать на поверхности и проникают в мембраны.

в течение нескольких секунд или меньше. Измеренный угол контакта с водой в первые 0,5 с составил 104,3 . для субстрата PAN/PEI, 69,1 для CD-CNF1, 63,1 для CD-CNF2, 45,1 для CD-CNF3 и 51,5 для CD-CNF4. Шероховатость поверхности вызвала гистерезис проницаемости, и выше результаты показали, что легированный лапонит может улучшить гидрофильность мембран.

угол контакта с водой для CD-CNF4 был выше, чем для CD-CNF3. Вышеуказанные результаты продемонстрировали, что легированный лапонит может улучшить гидрофильность мембран.

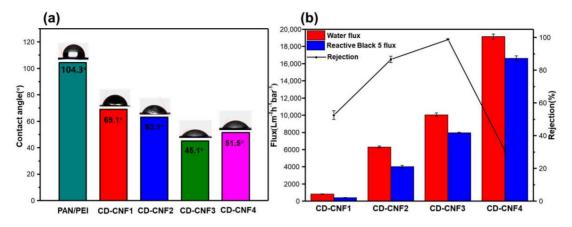


Рисунок 4. (a) Угол контакта с водой PAN/PEI, CD-CNF1, CD-CNF2, CD-CNF3 и CD-CNF4.

Рисунок 4. (а) Угол комfakfattbóðjófkíhlehleðjáff þahlífæði, сереспранцыемогъ, селебраке вка раствора кеакtive black 5 (б) проницаемость чистой водь, проницаемость тобраковка раствора кеакtive black 5 (10-5 моль л-1) мембран CD-CNF1, CD-CNF2, CD-CNF3 и CD-CNF4. Мембраны CD-CNF обладают улучшенной гидрофильностью и высокой пористостью.

фильтрации красителей, мембрана CD-CNF3 продемонстрировала увеличение потока. проход. Кроме того, потбк СУ-СИГ для органических растворителей также был высоким (таблица S1). Для 7942 ± 81 лч-1м-2 бар-1 для раствора Reactive Black 5 (10-5 моль л-1) с отличными Например, поток мембраны CD-CNF3 для дихлорметана составил 11842, отклонение превышает 99%.

лч-1м-2бар-1. Применяя мембраны для фильтрации красителей, мембрана CD-CNF3 была дополнительно исследована с ингибировал поток до 7942 ក្នុង៦៧រដ្ឋាស្ត្រ ក្រុងប្រាជ្ញាអនុក្សាស្ត្រ និះគ្នាស្រ្ត និះគ្នាស្ត្រ និងស្ត្រ និងស្ត

Характеристики оттор³же ния **фольмовытрировавните вырые колучность удаложно в аналично в красители (Тропа в роми фактиры карые карые**

анионные красители (Тропа**вроин ид винодивох арапуримар колором тросатури и расрворем върму временния со сверх быстрой** черный 5) (рисунок 5а). При фля променения обесня в при фля спроменения обесня в при обесня в при фля спроменения обесня в при обе

Мембраны CD-CNF3 показали эффективность уделения вышеперечисленных красителей >99% при просемвании, включая полость от HP-B-CD , и улавливании через нановолоконную структуру. сверхбыстрое проникновение. Например, 20 мл раствора кармуазина фильтровали для получения пористости. Благодаря быстрому транзиту и минимальному взаимодействию с примесями CD-CNF4 бесцветная вода с помощью CD-CNF3 аз 10 с (рис. 56; видео S1). Два типа разделения, наименее сшитые из трех, показали низкую степень отторжения красителя - от 30 до 60%.

механизмами являются элек<u>Тростатичний дяжект и молекуличвых бърктыя.</u> Почему мембраны CD-CNF1, CD-CNF2 и CD-CNF3 полость из HP-β-CD и захватд**няю**я **строковили наличее окникужей авруктиры.** Почему мембраны CD-CNF1, CD-CNF2 и CD-CNF3

причина его быстрого тран**з**(р**ота: "60-а)н Пкивержноо отвъа ѝ кварде, й опериеде ва пряв инотколацыю, 6.0**е **б М5-4 двета-сцет ввецка пр**аопеолина О.

сшитые из трех, показали н**изхиую желкелкенны свяроржеены (рокра 6/10)** л**GD-6/NP4 До**160%. Примечание. При рН 7 все мембраны были

сродство полости цикл*Юдекс*ерина жетрукнура мажеку из-храсиом расионенный бислем высокое мембраны CD-CNF1, CD-CNF2, CD-CNF2, CD-CNF3, расионенный стальный стальный

отношению к другим красителям, тогда как в CD-CNF3, опосредованном солью,
Тропаеолин О. (Рисунок S9a). Поверхностный заряд определяли с помощью анализа дзета-потенциала. сшивка
взаимосвязанной структуры и электростатическое взаимодействие позволили получить непревзойденный результат.
При рН 7 все мембраны были положительно заряжены (рис. S10). CD-CNF4 был сбалансированным, что привело к
замечательной скорости удаления и одновременно сверхбыстрому потоку.

замечательной скорости удаления и одновременно сверхоыстрому потоку. менее положительно заряжен из-за агломерации глины. Мембраны CD-CNF1 и CD-CNF2 с меньшим электростатическим

взаимодействием (меньше лапонита) демонстрировали умеренную степень отторжения, около 80%, по отношению к

другим красителям, тогда как в CD-CNF3 сшивка, опосредованная солью

8

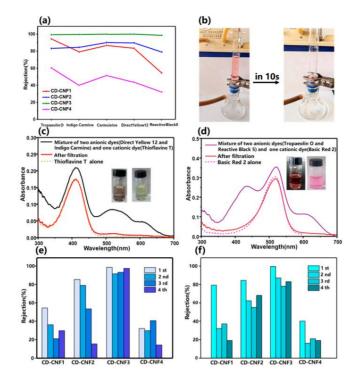


Рис. 5. (а) Отторжение CD-CNF по отношению к тропеолину О, индигокармину, кармоазину, директу Рифтеф\\PiT\Pe\Restrict (1)\PiT\Pe\Restrict (1)\PiT

Бол**еетволючью-визментбрижны пинееткали** отталкивания мембраны показали. Кроме того, из-за электростатического он водинамиментерия у предметринения предметринения предметринами предметри предметринами предметринами предметринами предметринами предметринами предметринами предметринами предметри предметри предметри предметринами предметринами предметринами предметринами предметр СИЕОБДИГЪО Бъекстирхотекти чроготи съоберина пред серейнителна пред серейнителнительной пителенительной пителе кативтионың жилиштелий Мемираравихоодко додиниминдева дары аных кырык күрөк (Трин быйы желтый 12, 12, инжимомоминин), гтария томитомито чесь честиминий краматиль (тимфавоминт) остается в фильтрате (рис. $_{ ext{TD}}$ $_{ ext{TD}}$ акт ЯВЯСК-Б-Ч-ТБРК-ВЯЗВ| РОМ-ВЯЗКА В ЗСЯЧК-158 К-БК-Б-КК-В ТЭКК-В-ВР КӨЗ-КТР ТАКЖЕ ПРОДЕМОНСТРИРОВАЛ БЫСТРОЕ разRелавияния империя видео фомпрактивора смеси красителей моглетинуй тичерез мембрану за 8 с (Видео прожылейь эндежний ображний ображний пристерии (рис. 5е , f) ure бел, мембраны по-прежнему демонстрировали отторжение 97.4% по отношению к Reactive Black 5. Бол Бечег J. Спемьем брана - CRFS 153 жек желдемонстрировала подходящее отглеженце одля гере кругух а чининых х кра КРА ЕЙРЕНТЕЙ В Й.А. 15 БУДОТАХ НИ У ФЯХЛЕ ИРБЦРАНДИИ / PS 12 \$1 2 1 ГО БУДОТА В В В БОРВИНЕТИЕМ У В В В БОРВИНЕТИЕМ В В В БОРВИНЕТИЕМ В В БОРВИТЕМ В В В БОРВИТЕМ В В В В БОРВИТЕМ В В В БОРВИТЕМ В В В БОРВИТЕМ В В В В В В БОРВИТЕМ тро-наеылах циклов фильтрации клов фильтрации, демонстрирующий узможность повторного использования красителей. для фильтрации анионных красителей. мембраны для фильтрации анионных красителей.

3.3. Противообрастающие свойства CD-CNF

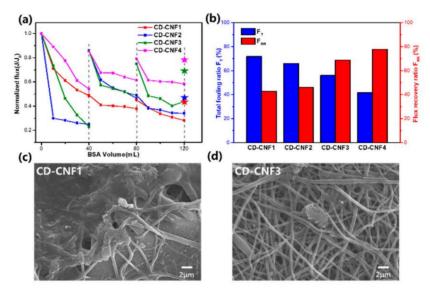
Коммерческие разделительные мембраны с присущей им гидрофобностью часто подвергаются загрязнению биомакромолекулами [34]. Однако гидрофильность поверхности наших сообщенных

мембран значительно увеличена. Изучено, как объем раствора БСА

повлияло на проникновение через мембрану с использованием БСА в качестве модельной загрязняющей биомакромолекулы.

Химия 2024. 6

разделительные мембраны с присущей им гидрофобностью часто подвергаются загрязнению биомакромолекулами [34]. Однако гидрофильность поверхности мембран, о которых мы сообщали, была значительно увеличена. Изучено влияние объема раствора БСА на проникновение через мембрану с использование 14



Мембраны CD-CNF3 обладали подходящими противообрастающими свойствами.

Рис. Вид но на людармаливован вый протаженай дийга маноградий с в зарин обработисе раз но крабъедно в БСА. пунку бинал ди) нидепружита причати в лично прости в менографий протований прот

4. Дискуссия

4. Обсуждение Таким образом, мембраны из сшитых нановолокон, состоящие из HP-β-CD, ПВС и

латюмиотрбылимукарашина получнаньыметодамиоздиектерфформованнияцисациивногаружарах ГК.
лапонтитисими разначность и процессими и продементровального красстром разначения паром ба продеменстрировала превосходную процессейми и проделений и проделений продессейми и проделений и проделений проделений продессейми и проделений и проделений просты в эксплуатации велоговтерной почиты просты в эксплуатации велоговтерной почиты почиты просты в эксплуатации велоговтерной почиты почиты просты в эксплуатации велоговтерной почиты просты в эксплуатации велоговтерной почиты просты в эксплуатации велоговтерной почиты почиты просты в эксплуатации велоговтерной почиты почиты просты в эксплуатации велоговтерной почиты почиты применения при очисты почиты почиты по скрасительний просты в применении при очисты почиты почиты почить почительний почить п

Дополнительные материалы. Следующую вспомогательную информацию можно загрузить по адресу https: //www.mdpi.com/article/10.3390/chemistry6040029/s1, Рисунок S1: FTIR-спектры мембран-субстратов; Рисунок S2: СЭМ мембран субстрата; Рисунок S3: XPS-спектры с деконволюцией на уровне ядра С 1s для мембран CD-CNF2 и CD-CNF4 соответственно; Рисунок S4: Результаты СЭМ и диаметр нановолокна распространение CD-CNF; Рисунок S5: Изображения поперечного сечения CD-CNF; Рисунок S6: Результаты SEM мембран после замачивания в воде; Рисунок S7: Содержание воды в мембранах CD-CNF; Рисунок S6: Результаты SEM Рисунок S8: Фотографии подготовленных мембран после фильтрации; Рисунок S9: УФ-видимый спектр анионные красители после фильтрации CD-CNF; Рисунок S10: Поверхностный дзета-потенциал CD-CNF при рН 7;

Рисунок S11: УФ-видимый спектр катионных красителей после фильтрации CD-CNF; Рисунок S12: Отбраковка мембран CD-CNF для трех красителей за четыре цикла фильтрации/регенерации; Таблица S1: Проницаемость CD-CNF для трех видов органических растворителей; Видео S1: Процесс фильтрации раствора кармоизина с помощью мембраны CD-CNF3; Видео S2: Разделение смешанных красителей с помощью мембраны CD-CNF3.

Вклад авторов: концептуализация, XX и YC; методология, XX и YZ; проверка, XX; формальный анализ, XX и YZ; расследование, XX; ресурсы, XX; курирование данных, XX; письменная — подготовка первоначального черновика, XX; написание — обзор и редактирование, XX, YC и YL; администрация проекта, YC и YL; приобретение финансирования, YC. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Финансирование: Исследование финансировалось Национальным фондом естественных наук Китая (грант № 22131008), Лабораторией устойчивой химической трансформации Хайхэ и Фондом фундаментальных исследований центральных университетов (Университет Нанкай).

Заявление о доступности данных: данные, представленные в этом исследовании, доступны по запросу у соответствующего автора.

Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Рекомендации

- 1. Лин, Дж.; Йе, В.; Се, М.; Со, ДХ; Луо, Дж.; Ван, Ю.; Ван дер Брюгген, Б. Воздействие на окружающую среду и очистка сточных вод, содержащих красители . Нат. Преподобный Earth Environ. 2023, 4, 785–803. [Перекрестная ссылка]
- 2. Шанкер, У.; Рани, М.; Джассаль В. Разложение опасных органических красителей в воде под действием наноматериалов. Окружающая среда. хим. Летт. 2017. 15. 623–642. [Перекрестная ссылка]
- 3. Ткачик А.; Митровска, К.; Посиняк А. Синтетические органические красители как загрязнители водной среды и их значение. для экосистем: Обзор. наук. Тотальная среда. 2020. 717. 137222. [CrossRef] [ПабМед]
- 4. Самучивал, С.; Нааз, Ф.; Кумар, П.; Ахаммад, СЗ; Малик, А. Оценка жизненного цикла технологии последовательного анаэробно- аэробного реактора на основе микробов, разработанной на месте для очистки сточных вод текстильной промышленности. Окружающая среда. Pes. 2023, 234, 116545. [CrossRef] [ПабМед]
- 5. Яннакис, С. Обзор концепций, последних достижений и нишевых применений (фото) процесса Фентона, помимо очистки воды / сточных вод: функционализация поверхности, обработка биомассы, борьба с раком и другие медицинские применения. Прил. Катал.

 Б Окружающая среда. 2019, 248, 309–319. [Перекрестная ссылка]
- 6. Ян, Дж.; Хуанг, Ю.; Мяо, Ю.Е.; Тжиу, WW; Лю, Т. Мембраны из поливинилового спирта и полиакриловой кислоты, покрытые полидопамином, как эффективный адсорбент красителей с хорошей пригодностью к вторичной переработке. J. Hazard. Mater. 2015, 283, 730–739. [CrossRef]
- 7. Леуджо Така, А.; Фоссо-Канкеу, Э.; Пиллэй, К.; Янкоу Мбианда, Х. Металлические наночастицы украшают наногубку из фосфорилированных углеродных нанотрубок и циклодекстрина для адсорбции трихлорэтилена и красителя Конго красного из сточных вод. Дж. Энвайрон. хим. англ. 2020, 8, 103602. [CrossRef]
- 8. Саркар, П.; Модак, С.; Каран, С. Ультраселективные и высокопроницаемые полиамидные нанопленки для ионной и молекулярной нанофильтрации. Адв. Функц. Матер. 2021, 31, 2007054. [CrossRef]
- 9. Чжан Л.; Гуань, Х.; Чжан, Н.; Цзян, Б.; Сан, Ю.; Ян, Н. Рыхлая NF-мембрана путем прививки наночастиц ТіО2-НМDI на Субстрат PES/β-CD для разделения красителя и соли. Сентябрь Пуриф. Технол. 2019, 218, 8–19. [Перекрестная ссылка]
- 10. Карки С.; Гохайн, МБ; Ядав, Д.; Такаре, Северная Каролина; Павар, РР; Хазарика, С.; Инголе, П.Г. Создание каналов быстрого транспорта воды в тонкопленочных нанокомпозитных мембранах на основе 2D мезопористых нанолистов. Опреснение 2023, 547, 116222. [CrossRef]
- 11. Сюй, В.; Чен, Ю.; Сюй, В.; Ву, Х.; Лю, Ю. Электропрядение ориентированного самоочищающегося пористого сшивающего полимера для эффективных красителей Удаление. Адв. Матер. Интерфейсы 2020, 7, 2001050. [CrossRef]
- 12. Чжан, В.; Чжэн, З.; Лин, Л.; Чжан, Х.; Бэ, М.; Ли, Дж.; Се, Дж.; Диао, Г.; Я, Х.-Дж.; Пяо, Ю.; и другие. Сверхбыстрый синтез встроенного в графен циклодекстрин-металлорганического каркаса для супрамолекулярной селективной поглощающей способности и характеристик суперконденсатора. Адв. наук. 2023, 10, 2304062. [CrossRef] [ПабМед]
- 13. Чжан С.; Чжоу, Дж.; Ли, Х. Наноканальная мембрана с хиральным ковалентным органическим каркасом для энантиоразделения. Энджью. хим. Межд. Эд. 2022, 61, e202204012. [Перекрестная ссылка]
- 14. Чжан С.; Буссуар, И.; Ли, Х. Избирательное восприятие и транспорт в бионических наноканалах на основе макроциклической химии хозяин-гость. Подбородок. хим. Летт. 2021, 32, 642–648. [Перекрестная ссылка]
- 15. Цзян З.; Донг, Р.; Эванс, АМ; Бьер, Н.; Ибрагим, Массачусетс; Ли, С.; Ансельметти, Д.; Дихтель, WR; Ливингстон, А.Г. Выровненные макроциклические поры в ультратонких пленках для точного молекулярного просеивания. Природа 2022, 609, 58–64. [Перекрестная ссылка] [ПабМед]
- 16. Алсбайи, А.; Смит, Би Джей; Сяо, Л.; Линг, Ю.; Хелблинг, Делавэр; Дихтель, В.Р. Быстрое удаление органических микрозагрязнителей из воды с помощью пористого полимера β-циклодекстрина. Природа 2016, 529, 190–194. [Перекрестная ссылка] [ПабМед]
- 17. Хуанг, Т.; Пуспасари, Т.; Нуньес, СП; Пайнеманн, К.-В. Ультратонкие 2D-слойные циклодекстриновые мембраны для высокоэффективной нанофильтрации органических растворителей. Адв. Функц. Матер. 2020, 30, 1906797. [CrossRef]
- 18. Чжу, Б.; Шао, Р.; Ли, Н.; Мин, К.; Лю, С.; Сюй, З.; Цянь, Х.; Ван, Л. Прогресс мембран на основе циклодекстрина в очистке воды: специальная трехмерная чашеобразная структура для достижения превосходного разделения. хим. англ. J. 2022, 449, 137013. [CrossRef]

- 19. Вильялобос, ЛФ; Хуанг, Т.; Пайнеманн, К.-В. Циклодекстриновые пленки с быстрым переносом растворителей и избирательной проницаемостью по форме. Адв. Матер. 2017, 29, 1606641. [CrossRef]
- 20. Он, Ю.; Мяо, Дж.; Цзян, З.; Ту, К.; Ян, Х.; Чен, С.; Чжан, Л.; Чжан Р. Улучшение противообрастающих свойств и потока пермеата композитной нанофильтрационной мембраны из полых волокон с использованием β-циклодекстрина. наук. Отчет 2019, 9, 12435. [CrossRef]
- 21. Мао, Х.; Чжан, Х.; Ли, Ю.; Сюэ, Ю.; Пей, Ф.; Ван, Дж.; Лю, Дж. Настраиваемые свойства проникновения растворителя тонкопленочной нанокомпозитной мембраны путем создания двойных путей с использованием циклодекстринов для нанофильтрации органических растворителей. АСУ Сустейн. хим. англ. 2015. 3. 1925–1933. [Перекрестная ссылка]
- 22. Гозали Балканлоо, П.; Махмудян, М.; Хоссейнзаде, М.Т. Сравнительное исследование ММТ-Fe3O4/PES, ММТ-HBE/PES, и ММТ-активированные кислотой/PES мембраны со смешанной матрицей. хим. англ. J. 2020, 396, 125188. [CrossRef]
- 23. Ву, Х.; Лю, Ю.; Мао, Л.; Цзян, К.; Анг, Дж.; Лу, Х. Легирование полисульфоновой ультрафильтрационной мембраны наногибридом TiO2-PDA для одновременная самоочистка и самозащита. Дж. Член. наук. 2017, 532, 20–29. [Перекрестная ссылка]
- 24. Шен, Л.; Ченг, Р.; Йи, М.; Хунг, Западная Юг; Джапип, С.; Тиан, Л.; Чжан, Х.; Цзян, С.; Ли, С.; Ван, Ю. Мембраны на основе полиамида со структурной однородностью для сверхбыстрого молекулярного просеивания. Нат. Коммун. 2022, 13, 500. [CrossRef]
- 25. Чжао, Ц.; Лю, Ю. Мезопористые полимеры, сшитые макроциклом, для сверхбыстрого разделения органических красителей. хим. Коммун. 2018, 54, 7362–7365. [Перекрестная ссылка]
- 26. Сюй, В.; Ли, Г.; Цюй, Х.; Ма, К.; Чжан, Х.; Ченг, Дж.; Ли, Х. Специфическое удаление перфтороктановой кислоты на основе пиллар[5]арена.
- 27. Сюй, В.; Чен, Ю.; Лю, Ю. Направленный перенос воды. Нановолокнистые пористые мембраны Janus для фильтрации твердых частиц и адсорбции летучих органических соединений.
 Приложение ACS. Матер. Интерфейсы 2021, 13, 3109–3118. [Перекрестная ссылка] [ПабМед]
- 28. Чжан, В.; Чай, Х.; Диао, Г. Высокопористая нановолоконная мембрана, функционализированная циклодекстрином, путем кислотного травления. Коллоиды Прибой. А Физикохим. англ. Acn. 2019, 582, 123907. [CrossRef]
- 29. Челебиоглу А.; Уяр, Т. Электропрядение нановолокон из неполимерных систем: бесполимерные нановолокна из циклодекстрина производные. Наномасштаб 2012, 4, 621–631. [Перекрестная ссылка]
- 30. Чжао, Р.; Ван, Ю.; Ли, Х.; Сан, Б.; Ван, К. Синтез электропряденных нановолоконных мембран на основе бета-циклодекстрина для высокоэффективной адсорбции и разделения метиленового синего. Приложение ACS. Матер. Интерфейсы 2015, 7, 26649–26657. [Перекрестная ссылка]
- 31. Ли, Р.; Доу, Дж.; Цзян, К.; Ли, Дж.; Се, З.; Лян, Дж.; Рен, Х. Получение и противомикробная активность производного β-циклодекстрина. сополимеры/нановолокна ацетата целлюлозы. хим. англ. Дж. 2014, 248, 264-272. [Перекрестная ссылка]
- 32. Тан, Ю.-Дж.; Шен, Б.-Дж.; Хуанг, Б.-К.; Жан, З.-М.; Сюй, З.-Л. Тонкопленочные композитные нанофильтрационные мембраны с высокой селективностью и трехмерной микроструктурой, изготовленные путем включения бета-циклодекстрина. Сентябрь Пуриф. Технол. 2019, 227, 115718. [CrossRef]
- 33. Шан, С.; Чиу, К.-Л.; Цзян, С. Синтез иммобилизованного экоадсорбента поливиниловый спирт/циклодекстрин и его применение для удаление ибупрофена из сточных вод фармацевтических предприятий. Дж. Прил. Полим. наук. 2017, 134, 44861. [CrossRef]
- 34. Ахмад Дж.; Вэнь, Х.; Ли, Ф.; Ван, Б. Новые треугольные мембраны, модифицированные наночастицами серебра, для улучшенной защиты от обрастания производительность. РСК Адв. 2019, 9, 6733–6744. [Перекрестная ссылка] [ПабМед]
- 35. Ван, К.; Джу, Дж.; Тан, Ю.; Хао, Л.; Может.; Ву, Ю.; Чжан, Х.; Ся, Ю.; Суи, К. Контролируемый синтез мембран из нановолокон из альгината натрия, полученных электропрядением, для многократной адсорбции и разделения метиленового синего. Углевод. Полим. 2019, 205, 125–134.
- 36. Тиан, Х.; Юань, Л.; Ван, Дж.; Ву, Х.; Ван, Х.; Сян, А.; Ашок, Б.; Раджулу, А.В. Электроформование поливинилового спирта в сшитые нановолокна: подход к созданию функционального адсорбента тяжелых металлов. Дж. Хазард. Матер. 2019, 378, 120751.
- 37. Ядав, Д.; Карки, С.; Гохайн, МБ; Инголе П.Г. Разработка процесса удаления микрозагрязнений с использованием тонкопленочных нанокомпозитных мембран, полученных новым зеленым методом межфазной полимеризации в паровой фазе. хим. англ. J. 2023, 472, 144940. [CrossR
- 38. Группусо, М.; Иорио, Ф.; Турко, Г.; Марсич, Э.; Поррелли, Д. Хитозановые повязки на основе хитозана, модифицированные гиалуроновой кислотой и лактозой. Критические аспекты сшивания и стабильности. Углевод. Полим. 2022, 288, 119375. [CrossRef] [ПабМед]
- 39. Прасаннан, А.; Удомсин Дж.; Цай, Х.-К.; Ван, К.-Ф.; Лай, Ж.-Ю. Прочные подводные суперолеофобные мембраны с биотехнологическими мультислоями каррагинана/лапонита для эффективного удаления эмульсий, ионов металлов и органических красителей из сточных вод. хим.

 англ. J. 2020, 391, 123585. [CrossRef]
- 40. Ян, Х.; Лин, Л.; Лю, З.; Ян, Дж.; Ченг, К.; Ма, В.; Сюй, М.; Тан, Ф.; Ван, К.; Ли, Х.; и другие. Изготовление устойчивых к растворителям полиимидных мембран для эффективного разделения красителей и солей с использованием стратегии «внутреннего привода». Сентябрь Пуриф. Технол.

 2024, 332, 125843. [CrossRef]

Отказ от ответственности/Примечание издателя: Заявления, мнения и данные, содержащиеся во всех публикациях, принадлежат исключительно отдельному автору(ам) и соавторам(ам), а не MDPI и/или редактору(ам). MDPI и/или редактор(ы) не несут ответственности за любой вред людям или имуществу, возникший в результате любых идей, методов, инструкций или продуктов, упомянутых в контенте.