

ПОЛУЧЕНИЕ АЭРОГЕЛЕЙ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ С МОДИФИКАЦИЕЙ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

А. В. Шиндряев, А. Е. Лебедев, Н. В. Меньшутина

*Кафедра химического и фармацевтического инжиниринга, andrew95x@gmail.com;
ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет
им. Д. И. Менделеева», Москва, Россия*

Ключевые слова: аэрогели диоксида кремния; гидрофобизация; сверхкритическая сушка, «золь–гель»-процесс, краевой угол смачивания.

Аннотация: Предложен способ получения гидрофобных гелей путем модификации внутренней поверхности. Проведены экспериментальные исследования по изучению физико-химических характеристик материалов и их влияния на коэффициент теплопроводности. У образцов с модифицированной внутренней поверхностью отмечены гидрофобные свойства, измерены значения краевого угла смачивания. Установлено, что теплопроводность и усадка аэрогелей уменьшаются при наличии стадии модификации внутренней поверхности в процессе получения образцов. В ходе эксперимента определено, что на втором этапе получения аэрогелей разбавление золя в 1,2 раза ведет к наилучшим характеристикам конечного продукта.

Введение

Аэрогели представляют собой высокопористые материалы, обладающие уникальными физическими свойствами, благодаря которым они привлекают внимание исследователей и ученых, работающих в различных сферах науки и техники. Структура аэрогеля представляет собой трехмерную сеть, которая образуется из микро- и наночастиц, объединенных в сферические кластеры. Полости этой сети заполнены воздухом [1, 2].

Благодаря такой структуре аэрогель обладает очень низкой теплопроводностью, плотностью, коэффициентом преломления света, диэлектрической проницаемостью и скоростью распространения звука внутри него [3]. В связи с этим аэрогели находят применение в самых различных областях науки и техники: в качестве теплоизоляционных материалов, в фармацевтике, хранении энергии, катализе, аэрокосмической промышленности, в качестве сорбентов, суперконденсаторов, ультразвуковых датчиков, газовых сенсоров [4]. Свойства данного материала достаточно легко варьируются в зависимости от условия синтеза, что позволяет получать его с заранее заданными необходимыми свойствами.

Наиболее часто получаемые аэрогели – на основе диоксида кремния. Аэрогелям свойственно иметь хрупкую структуру, которая зарождается в результате проведения жидкофазных реакций [4]. В роли прекурсоров, исходных веществ для их получения используются различные алкоксиды кремния, например, тетраэтоксисилан [5]. Получение аэрогелей включает в себя два основных этапа. *Первый* – «золь–гель»-процесс, при котором имеют место реакции гидролиза и конденсации [6]. Все основные характеристики конечного материала зависят именно от первого этапа: прекурсоров, растворителя, катализаторов, а также

мольного соотношения реагентов. Результатом этих реакций является пористый гель, в порах которого находится растворитель (чаще всего спирт). *Второй* этап заключается в удалении растворителя из пор геля (его сушка).

Аэрогели на основе чистого тетраэтоксисилана гидрофильны и способны быстро поглощать влагу из окружающего воздуха, а при помещении в воду их структура разрушается, а сами они очень быстро распадаются. Это связано с тем, что на поверхности пор геля имеют место полярные гидроксильные группы OH- , которые способны участвовать в образовании водородных связей с молекулами воды. Если заменить их на неполярные группы, являющиеся инертными по отношению к воде, то можно получить гидрофобный аэрогель [7]. Для проведения такой процедуры применяют специальные вещества-модификаторы, называемые силилирующими агентами, например метилтриметоксисилан (МТМС), триметилхлорсилан (ТМХС), гексаметилдисилазан (ГМДС) и др. Обычно, это различные замещенные алкоксисиланы [8].

Важно, когда именно применяется вещество-модификатор. Можно добавлять его как со-прекурсор на стадии получения золя [9]. В этом случае основной прекурсор и со-прекурсор будут параллельно гидролизоваться, тем самым образуя глобулы, имеющие на своей поверхности как гидроксильные полярные группы, так и неполярные группы от модификатора. Такие неполярные группы не принимают участия в реакциях гидролиза и конденсации, следовательно, они остаются на внутренней поверхности получаемого геля. Добавлять модификатор, таким образом, очень удобно, так как не требуется замена растворителя и увеличения количества стадий процесса. Но при таком подходе существует несколько недостатков. Каждое вещество гидролизуется с разной скоростью, поэтому основной прекурсор или со-прекурсор могут оказаться частично или полностью не гидролизованными. Это может привести к получению гидрофильного геля с негидролизованным модификатором в его порах.

Существует также метод добавления модификатора после стадии гелеобразования, когда структура геля уже сформирована [10]. В этом случае поверхностные группы ($\equiv\text{Si-OH}$), являющиеся причиной усадки аэрогелей на стадии старения, реагируют с веществом-модификатором, образуя группы $\equiv\text{Si-O-R}$.

Материалы и методы

Методика получения аэрогелей

Процесс получения аэрогелей на основе диоксида кремния с модификацией внутренней поверхности состоит из следующих стадий:

- 1) золеобразование;
- 2) гелеобразование;
- 3) замена растворителя и гидрофобизация;
- 4) сверхкритическая сушка.

Для получения монолитов аэрогеля на основе диоксида кремния использовались методики, представленные на рис. 1: с модификацией внутренней поверхности и без нее. Структурные и физико-химические свойства аэрогелей зависят от условий проведения каждой стадии.

Первый этап – золеобразование. В качестве прекурсора для приготовления золя выступает тетраэтоксисилан (ТЭОС). Прекурсор смешивается с изопропиловым спиртом (ИПС), и добавляется водный раствор соляной кислоты заданной концентрации 0,01 моль/л. Затем полученный раствор перемешивается 15 минут и оставляется на 24 часа при комнатной температуре.

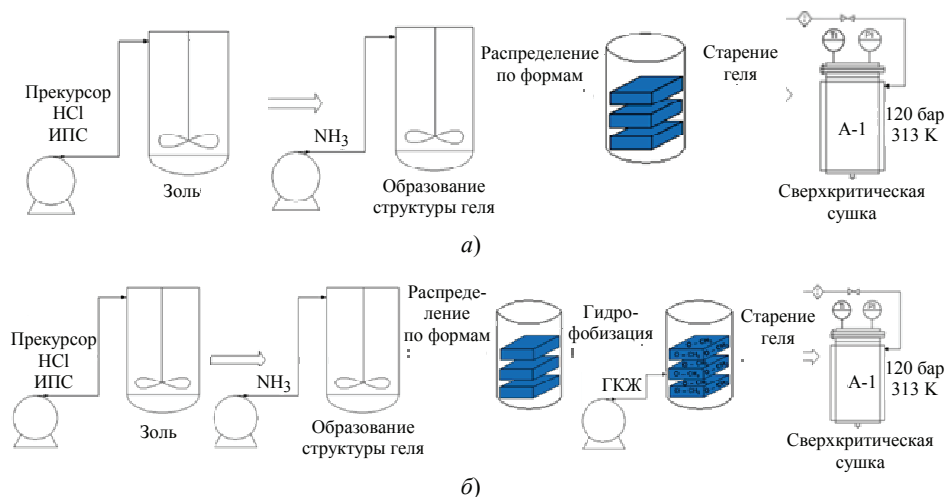


Рис. 1. Схема получения монолитов аэрогеля на основе диоксида кремния без модификации внутренней поверхности (а) и с ее модификацией (б)

Второй этап – гелеобразование. Перед данным этапом золь при необходимости разбавляют путем добавления заданного количества ИПС. Для получения геля необходимо провести конденсацию золя, что достигается добавлением в приготовленный золь заданного количества 0,3 М водного раствора гидроксида аммония. Реакционная смесь перемешивается в течение 15 минут и переносится в формы размерами 100 × 100 × 10 мм.

Третий этап – замена растворителя и гидрофобизация. Через 24 часа после гелеобразования полученные гели помещаются в ИПС для отмывки от непрореагировавших соединений. Через 24 часа монолиты помещают в раствор гидрофобизатора. Гидрофобизирующую кремнийорганическую жидкость (ГКЖ) готовят путем смешивания полиметилгидридсилоксана с ИПС. Монолиты выдерживают в ГКЖ в течение 24 часов при комнатной температуре, после чего помещают в ИПС для проведения процесса старения. Каждые 24 часа ИПС заменяют на новый в течение 96 часов. В схеме (см. рис. 1, а) этап гидрофобизации отсутствует.

Четвертый этап – сушка гелей. Данный процесс проводится в автоклаве при подаче сверхкритического диоксида углерода. Параметры процесса: $P = 120$ атм, $T = 40$ °С. Продолжительность процесса 8 – 12 часов. Технологическая схема установки сверхкритической сушки гелей представлена на рис. 2.

Образцы геля помещаются внутрь автоклава А-1, затем включается его обогрев. Сжиженный диоксид углерода подается из емкости хранения через насос Н-2, где давление потока достигает 120 атм. Далее поток нагревается в теплообменник Т-2 до 40 °С. Выходной поток, состоящий из растворителя и диоксида углерода, из автоклава проходит через теплообменник Т-3, где нагревается до 90 °С. Далее поток проходит через сепаратор А-2, в котором происходит разделение на газообразный диоксид углерода и ИПС. Газообразный диоксид углерода поступает на компрессор К-1, где его давление нагнетается до рабочего.

Таким образом, осуществляется рециркуляция диоксида углерода в течение всего процесса сверхкритической сушки. Выходящий из сепаратора А-2 поток спирта скапливается в сборной емкости А-3. Процесс сверхкритической сушки идет в два этапа. В первую очередь происходит вытеснение спирта из объема автоклава до тех пор, пока в сепараторе не прекратится его выделение. После этого происходит преимущественно диффузионное замещение растворителя внутри

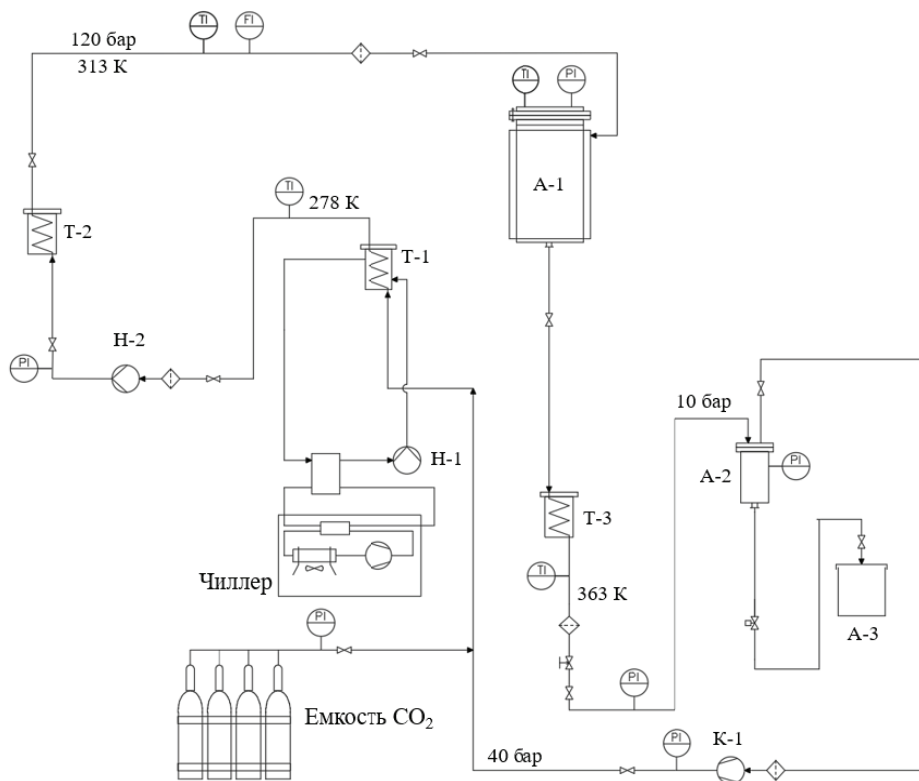


Рис. 2. Схема установки сверхкритической сушки гелей:

А-1 – автоклав; А-2 – сепаратор; А-3 – емкость для хранения изопропилового спирта;
 К-1 – компрессор; Н-1 – насос хладагента; Н-2 – насос высокого давления;
 Т-1 – конденсатор; Т-2, Т-3 – теплообменники; PI, TI, FI – датчики давления, температуры, расхода соответственно

геля на сверхкритический диоксид углерода, что и является основным этапом сверхкритической сушки. После завершения процесса сушки полученные аэрогели извлекаются из автоклава.

Методы исследования

Для определения кажущейся плотности $\rho_{\text{каж}}$ аэрогелей измеряли линейные размеры с использованием штангенциркуля с точностью до 0,1 мм. Для всех образцов каждое измерение повторяли не менее трех раз. Линейные размеры брались как среднее значение всех измерений. Далее определяли массу с использованием аналитических весов PA214C (OHAUS Corp., США) с точностью до 0,0001 г. Используя полученные данные, рассчитывали кажущуюся плотность образцов

$$\rho_{\text{каж}} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i}{\sum_{i=1}^N V_i}, \quad (1)$$

где m_i , V_i – соответственно масса, г, и объем, см^3 , i -го образца.

Линейная усадка монолитов аэрогелей L определялась по данным о линейных размерах образцов до процесса сверхкритической сушки и после по следующему уравнению:

$$L = (a_r / a_a) \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где a_r , a_a – линейные размеры после гелеобразования и аэрогеля соответственно, м.

При определении пористости образцов F использовались данные об истинной $\rho_{\text{ист}}$ и кажущейся $\rho_{\text{каж}}$ плотностях, г/см³, материалов

$$F = (1 - \rho_{\text{каж}}/\rho_{\text{ист}}) \cdot 100 \% . \quad (3)$$

Для определения истинной плотности образцов аэрогелей применялся метод гелиевой пикнометрии с помощью прибора AccuPyc 1340 (Micromeritics Instrument Corp., США). Аналитические исследования проводились на оборудовании Центра коллективного пользования РХТУ им. Д. И. Менделеева.

Для определения структурных характеристик материалов использовалась низкотемпературная азотная порометрия на анализаторе удельной поверхности и пористости NOVA 2200E (Quantachrome Instrument Corp., США). Перед анализом проводилась пробоподготовка образцов при давлении 0,5 мм рт. ст. (0,00067 бар) и температуре 323 К. Пробоподготовка проводилась в течение 12 ч для удаления всей адсорбированной влаги с поверхности образцов. Далее определялась удельная площадь поверхности $S_{\text{уд}}$ по методу Брунауэра–Эммета–Теллера (БЭТ), распределение пор по размерам, средний диаметр пор D и объем пор $V_{\text{БДХ}}$ по методу Баррета–Джойнера–Халенды (БДХ).

Общий объем пор в образцах $V_{\text{пор}}$ определялся по формуле

$$V_{\text{пор}} = F/\rho_{\text{ист}} . \quad (4)$$

Используя общий объем пор и объем пор, определенный по методу БДХ, определяли долю пор ω до 30 нм

$$\omega = (V_{\text{БДХ}}/V_{\text{пор}}) \cdot 100 \% . \quad (5)$$

Измерение коэффициента теплопроводности проводились с использованием прибора ИТП-МГ4 «100». Принцип работы прибора основан на создании стационарного теплового потока, проходящего через плоский образец определенной толщины и направленного перпендикулярно к лицевым граням образца, измерениях толщины образца, плотности теплового потока и температуры противоположных лицевых граней. Измерение краевого угла смачивания осуществлялось методом сидячей капли. Исследования проведены с помощью оборудования кафедр химического и фармацевтического инжиниринга РХТУ им. Д. И. Менделеева.

Результаты и их обсуждение

В рамках текущей работы получены образцы аэрогелей в форме параллелепипеда с размерами 100 × 100 × 10 мм. Фото образца представлено на рис. 3.

Для удобства описания характеристик полученных аэрогелей на основе диоксида кремния полученные образцы были промаркированы в зависимости от гидрофобизации и разбавления золя. В таблице 1 приводится расшифровка промаркированных образцов.

Изотермы адсорбции-десорбции азота при 77 К для полученных аэрогелей приведены на рис. 4. Полученные изотермы относятся к IV типу по классификации IUPAC. Данный тип изотерм характерен для мезопористого материала, в котором наблюдается капиллярная конденсация.

На рисунке 5 представлены графики распределения пор по размерам, полученные с помощью метода БДХ для аэрогелей на основе диоксида кремния. Очевидно, что диаметр пор полученных образцов находится в диапазоне 5...20 нм.

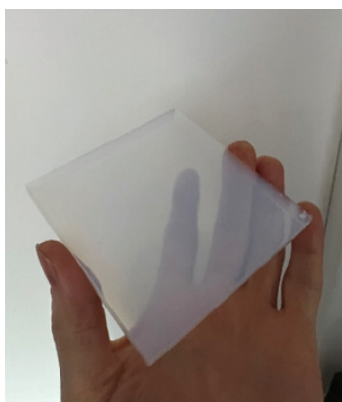


Рис. 3. Фотография полученного аэрогеля

Таблица 1

Расшифровка промаркированных образцов полученных аэрогелей

Маркировка	Гидрофобизация	Разбавление золя, раз
H-1,0	Не проводилась	1,0
H-1,2		1,2
H-1,4		1,4
Г-1,0	Проводилась	1,0
Г-1,2		1,2
Г-1,4		1,4

Для образцов Г-1,0, Г-1,2, Г-1,4 проведены измерения краевого угла смачивания. На рисунке 6 представлены фотографии капель воды на поверхности образцов.

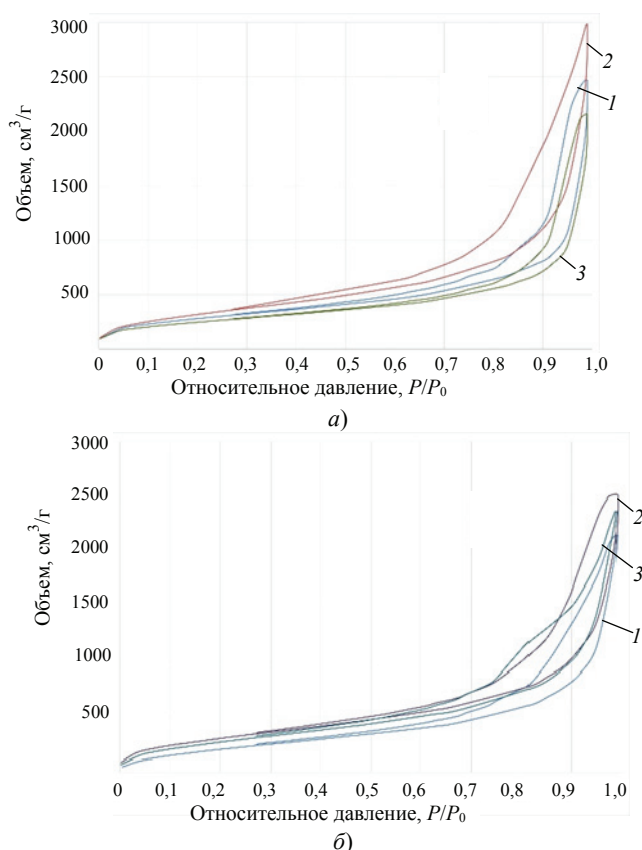
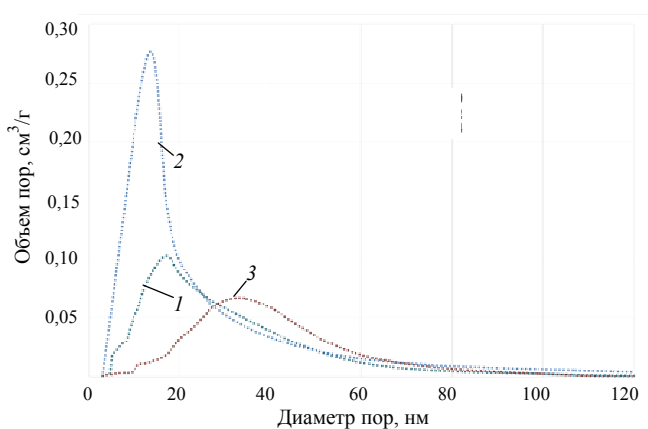
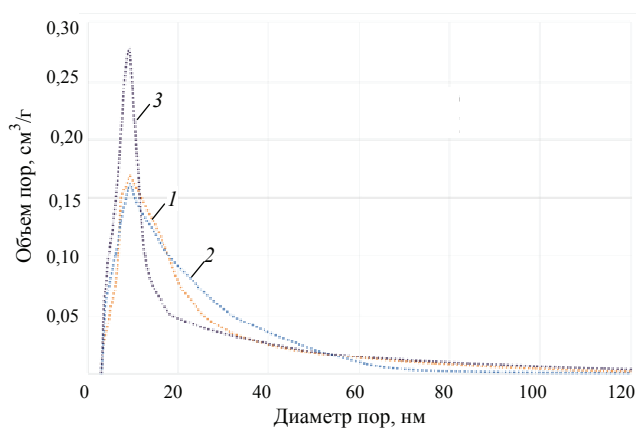


Рис. 4. Изотермы адсорбции – десорбции азота при 77 К для аэрогелей на основе диоксида кремния:

а – без гидрофобизации: 1 – H-1,0; 2 – H-1,2; 3 – H-1,4;
б – с гидрофобизацией: 1 – Г-1,0; 2 – Г-1,2; 3 – Г-1,4



а)



б)

Рис. 5. Распределение пор по размерам для аэрогелей на основе диоксида кремния:
 а – без гидрофобизации: 1 – Н-1,0; 2 – Н-1,2; 3 – Н-1,4;
 б – с гидрофобизацией: 1 – Г-1,0; 2 – Г-1,2; 3 – Г-1,4

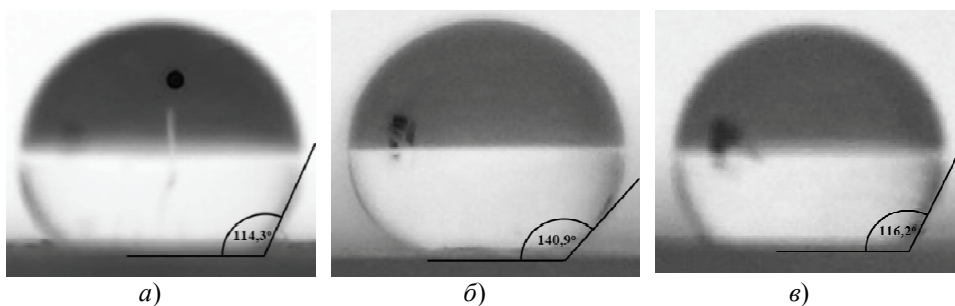


Рис. 6. Фотографии образцов при измерении краевого угла смачивания:
 а – Г-1,0; б – Г-1,2; в – Г-1,4

В таблице 2 представлены следующие характеристики аэрогелей на основе диоксида кремния: удельная площадь поверхность $S_{БЭТ}$, м²/г; объем пор $V_{пор}$, см³/г; пористость F , %; средний размер пор $d_{ср}$, нм; кажущаяся плотность ρ , г/см³; линейная усадка L , %; коэффициент теплопроводности λ , мВт/(м·К), краевой угол смачивания θ° . Данные показывают, что при модификации внутренней поверхности аэрогелей их усадка заметно уменьшается.

Таблица 2

Характеристики полученных аэрогелей на основе диоксида кремния

Образец	$S_{БЭТ},$ м ² /г	$V_{пор},$ см ³ /г	$F, \%$	$d_{ср},$ нм	$\rho,$ г/см ³	$L, \%$	$\lambda,$ мВт/(м·К)	$\theta, ^\circ$
Н-1,0	1029	3,7	88,06	24	0,216	25,69	17	–
Н-1,2	1216	3,6	91,78	24	0,143	17,29	15	
Н-1,4	898	3,2	88,64	25	0,191	27,4	20	
Г-1,0	855	3,3	90,13	26	0,156	9,85	14	114,3
Г-1,2	1177	3,8	92,08	23	0,134	9,26	13	140,9
Г-1,4	1075	3,7	90,48	26	0,159	13,25	15	116,2

Это связано с тем, что такие образцы имеют более прочную структуру, которая менее подвержена воздействию окружающей среды, возникающему в ходе сверхкритической сушки из-за градиента концентрации растворителя. Кроме того, наблюдается снижение плотности и усадки образцов. Все эти факторы влияют на конечную теплопроводность материалов. В результате исследований выявлено, что гидрофобизация аэрогелей позволяет снизить коэффициент теплопроводности, так как при уменьшении усадки сохраняется большая часть микро- и мезопор. Образцы аэрогелей показывают наилучшие характеристики при разбавлении золя в 1,2 раза. При таком разбавлении наблюдается наибольшая удельная площадь поверхности, объем пор и пористость, наименьшая усадка и коэффициент теплопроводности.

Заключение

В работе предложен способ получения монолитов аэрогелей диоксида кремния размерами 100 × 100 × 10 мм с гидрофобизацией внутренней поверхности. Проведены экспериментальные исследования по изучению физико-химических характеристик материалов и их влияния на коэффициент теплопроводности. В ходе эксперимента установлено, что на втором этапе получения аэрогелей разбавление золя в 1,2 раза ведет к наилучшим характеристикам конечного продукта; теплопроводность и усадка аэрогелей уменьшаются при наличии стадии модификации внутренней поверхности в процессе получения образцов. Гидрофобные образцы имеют краевой угол смачивания от 114,3° до 140,9°. Представленная методика получения гидрофобных аэрогелей может использоваться в лабораторном и при промышленном получении композиционных материалов, использующихся в качестве теплоизоляторов.

Список литературы

1. Смирнов, Б. М. Аэрогели / Б. М. Смирнов // Успехи физических наук. – 1987. – Т. 152, № 1. – С. 133 – 157. doi: 10.3367/UFNr.0152.198705e.0133
2. Pierre, A. C. Chemistry of aerogels and their applications / A. C. Pierre, G. M. Pajonk // Chemical Reviews. – 2002. – Vol. 102, No. 11. – P. 4243 – 4265. doi: 10.1002/chin.200304237
3. Acoustic Properties and Potential Applications of Silica Aerogels / V. Gibiat, O. Lefeuvre, T. Woignier, J. Pelous, J. Phalippou // Journal of Non-Crystalline Solids. – 1995. – Vol. 186. – P. 244 – 255. doi: 10.1016/0022-3093(95)00049-6

4. Activated Carbon Aerogels / Y. Hanzawa, K. Kaneko, R. W. Pekala, M. S. Dresselhaus // *Langmuir*. – 1996. – Vol. 12, No. 26. – P. 6167 – 6169. doi: 10.1021/la960481t
 5. Tailored Silica Based Xerogels and Aerogels for Insulation in Space Environments / L. Durães, M. Ochoa, A. Portugal, N. Duarte, J. Dias, N. Rocha, J. Hernandez // *Advances in Science and Technology*. – 2010. – Vol. 63. – P. 41 – 46. doi: 10.4028/www.scientific.net/AST.63.41
 6. Kozuka, H. Sol–Gel Processing: Characterization and Applications / H. Kozuka // In book: *Handbook of Sol–Gel Science and Technology* / L. Klein, M. Aparicio, A. Jitianu (Eds.). – Second ed. – New York : Kluwert Academic Publishers. – 2005. – Vol. 1. – P. 1980.
 7. Пат. 3015645А США. Silica Powders / L. J. Tyler ; заявитель и патентообладатель Dow Silicones Corp. – № 460773, заявл. 06.10.1954; опубл. 02.01.1962.
 8. Пат. 5647962А США. Process for the preparation of xerogels / R.-M. Jansen, A. Zimmermann ; заявитель и патентообладатель Cabot Corp. – № 495931 ; заявл. 28.06.1995 ; опубл. 15.07.1997.
 9. Superhydrophobic Silica Aerogel Powders with Simultaneous Surface Modification, Solvent Exchange and Sodium Ion Removal From Hydrogels / S. D. Bhagat, Y. H. Kim, K. H. Suh, Y. S. Ahn, J. G. Yeo, J. H. Han // *Microporous and Mesoporous Materials*. – 2007. – Vol. 112, No. 1-3. – P. 504 – 509. doi: 10.1016/j.micromeso.2007.10.030
 10. Hwang, S. W. Effect of Surface Modification Conditions on the Synthesis of Mesoporous Crack-Free Silica Aerogel Monoliths from Waterglass Via Ambient-Drying / S. W. Hwang, T. Y. Kim, S. H. Hyun // *Microporous and Mesoporous Materials*. – 2009. – Vol. 130, No. 1. – P. 295 – 302. doi: 10.1016/j.micromeso.2009.11.024
-

Preparing Silicon Dioxide Aerogels with Modification of the Inner Surface

A. V. Shindryaev, A. E. Lebedev, N. V. Menshutina

*Department of Chemical and Pharmaceutical Engineering, andrew95x@gmail.com;
D. I. Mendeleev Russian Chemical Technology University, Moscow, Russia*

Keywords: silica aerogels; hydrophobization; supercritical drying, “sol–gel” process, contact angle.

Abstract: A method for producing hydrophobic gels by modifying the internal surface is proposed. Experimental studies were carried out to study the physicochemical characteristics of materials and their influence on the thermal conductivity coefficient. Hydrophobic properties were noted for samples with a modified inner surface, and the contact angle values were measured. It has been established that the thermal conductivity and shrinkage of aerogels decrease in the presence of a stage of modification of the internal surface in the process of obtaining samples. During the experiment, it was determined that at the second stage of obtaining aerogels, diluting the sol by 1.2 times leads to the best characteristics of the final product.

References

1. Smirnov B.M. [Aerogels], *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Advances in Physical Sciences], 1987, vol. 152, no. 1, pp. 133-157. doi: 10.3367/UFNr.0152.198705e.0133 (In Russ., abstract in Eng.)

2. Pierre A.C., Pajonk G.M. Chemistry of aerogels and their applications, *Chemical Reviews*, 2002, vol. 102, no. 11, pp. 4243-4265. doi: 10.1002/chin.200304237
3. Gibiat V., Lefevre O., Woignier T., Pelous J., Phalippou J. Acoustic Properties and Potential Applications of Silica Aerogels, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1995, vol. 186, pp. 244-255. doi: 10.1016/0022-3093(95)00049-6
4. Hanzawa Y., Kaneko K., Pekala R.W., Dresselhaus M.S. Activated Carbon Aerogels, *Langmuir*, 1996, vol. 12, no. 26, pp. 6167-6169. doi: 10.1021/la960481t
5. Durães L., Ochoa M., Portugal A., Duarte N., Dias J., Rocha N., Hernandez J. Tailored Silica Based Xerogels and Aerogels for Insulation in Space Environments, *Advances in Science and Technology*, 2010, vol. 63, pp. 41-46. doi: 10.4028/www.scientific.net/AST.63.41
6. Kozuka H. Sol-Gel Processing: Characterization and Applications, In book: L. Klein, M. Aparicio, A. Jitianu (Eds.). *Handbook of Sol-Gel Science and Technology*, Second ed., New York: Kluwert Academic Publishers, 2005, vol. 1, p. 1980.
7. Tyler L.J. Silica Powders., USA, 1962, Pat. 3015645A.
8. Jansen R.-M., Zimmermann A. Process for the preparation of xerogels, USA, 1997, Pat. 5647962A.
9. Bhagat S.D., Kim Y.H., Suh K.H., Ahn Y.S., Yeo J.G., Han J.H. Superhydrophobic silica aerogel powders with simultaneous surface modification, solvent exchange and sodium ion removal from hydrogels, *Microporous and Mesoporous Materials*, 2007, vol. 112, no. 1-3. pp. 504-509. doi: 10.1016/j.micromeso.2007.10.030
10. Hwang S.W., Kim T.Y., Hyun S.H. Effect of surface modification conditions on the synthesis of mesoporous crack-free silica aerogel monoliths from waterglass via ambient-drying, *Microporous and Mesoporous Materials*, 2009, vol. 130, no. 1, pp. 295-302. doi: 10.1016/j.micromeso.2009.11.024

Herstellung von Siliziumdioxid-Aerogelen mit Änderung der inneren Oberfläche

Zusammenfassung: Es ist ein Verfahren zur Herstellung hydrophober Gele durch Modifizierung der Innenoberfläche vorgeschlagen. Es sind experimentelle Studien durchgeführt, um die physikalisch-chemischen Eigenschaften von Materialien und deren Einfluss auf den Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten zu untersuchen. Bei Proben mit modifizierter Innenoberfläche sind hydrophobe Eigenschaften festgestellt und die Kontaktwinkelwerte gemessen. Es ist festgestellt, dass die Wärmeleitfähigkeit und Schrumpfung von Aerogelen abnimmt, wenn bei der Probengewinnung eine Stufe der Modifikation der Innenoberfläche vorliegt. Während des Experiments ist festgestellt, dass in der zweiten Stufe der Aerogelgewinnung eine Verdünnung des Sols um das 1,2-fache zu den besten Eigenschaften des Endprodukts führt.

Obtention d'aérogels de silice avec modification de la surface interne

Résumé: Est proposé un moyen de la production des gels hydrophobes en modifiant la surface interne. Sont effectuées des études expérimentales pour étudier les caractéristiques physico-chimiques des matériaux et leur influence sur le coefficient de conductivité thermique. Sont notées les propriétés hydrophobes des échantillons avec

une surface interne modifiée; sont mesurées les valeurs de l'angle de mouillage. Il est établi que la conductivité thermique et le retrait des aérogels sont réduits en présence d'une étape de modification de la surface interne dans le processus d'obtention d'échantillons. Au cours de l'expérience, est déterminé que dans la deuxième étape de la production d'aérogels, la dilution du sol en 1,2 fois conduit aux meilleures caractéristiques du produit final.

Авторы: *Шиндряев Андрей Васильевич* – аспирант кафедры химического и фармацевтического инжиниринга; *Лебедев Артем Евгеньевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры химического и фармацевтического инжиниринга; *Меньшутина Наталья Васильевна* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой химического и фармацевтического инжиниринга, ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева», Москва, Россия.