

# Легкий как воздух, прочный как сталь

Удивительно, но материалы с такими свойствами действительно существуют. Класс, к которому они принадлежат, называется аэрогели (от лат. aer — воздух и gelatus — замороженный). Благодаря сочетанию уникальных оптических и механических свойств – твердости, легкости и способности рассеивать свет – эти материалы также называют «замороженным дымом» или «твердым воздухом». Это настолько необычные творения человеческих рук, что за свои нетривиальные качества они удостоены 15 титулов книги рекордов Гиннеса.

В чем же объяснение столь необычных свойств? Все дело в том, что аэрогели – это твердые вещества, представляющие собой древовидную сеть из объединенных наночастиц (2-5 нм) с огромным количеством чрезвычайно маленьких пор (100-10 нм). Из-за этого получается, что на 95-99% аэрогели состоят из воздуха. Благодаря этому аэрогели обладают практически самой малой плотностью среди твердых веществ (до 1 кг/м<sup>3</sup> в вакууме, 1.9 кг/м<sup>3</sup> на воздухе), очень развитой поверхностью (более 1000 м<sup>2</sup>/г), крайне низкой теплопроводностью (до 0.004 Вт/(м•К), т.е. много меньше, чем у воздуха (0.024 Вт/(м•К)). Аэрогели являются самыми лучшими термоизоляторами в мире (слоя толщиной 2.5

см достаточно, чтобы защитить человеческую руку от прямого воздействия паяльной лампы), они практически сводят на нет все три способа теплообмена – конвекцию, теплопроводность и излучение. Кроме этого, аэрогели характеризуются рядом других уникальных качеств: твердостью, прозрачностью (индекс рефракции до 1.03, их окраска изменяется от голубого до темно-красного цвета в зависимости от химического состава), жаропрочностью (2000°C это не предел), а также чрезвычайно низкой звуко- и электропроводностью.

Аэрогели и материалы на их основе находят или могут найти применение в качестве:

- прозрачных или полупрозрачных

- ных тепло- и звукоизоляционных материалов (в частности, для производства стекол, композитов с волокнистыми материалами для получения прочных и гибких тканей, прокладок и покрытий для высокотемпературной и криогенной изоляции);
- сверхлегких конструкционных материалов или добавок для модификации существующих материалов;
- эффективных осушителей или сорбентов (например, для сбора нефти с поверхности воды, адсорбции тяжелых металлов из растворов, эффективной осушки и/или молекулярной фильтрации газов);
- гетерогенных катализаторов, сенсоров;
- рабочего тела в детекторах Черенкова, в ловушках элементар-



Фотографии аэрогелей, на основе..... (слева) и на основе ..... (справа) получаемых в ИФАВ РАН

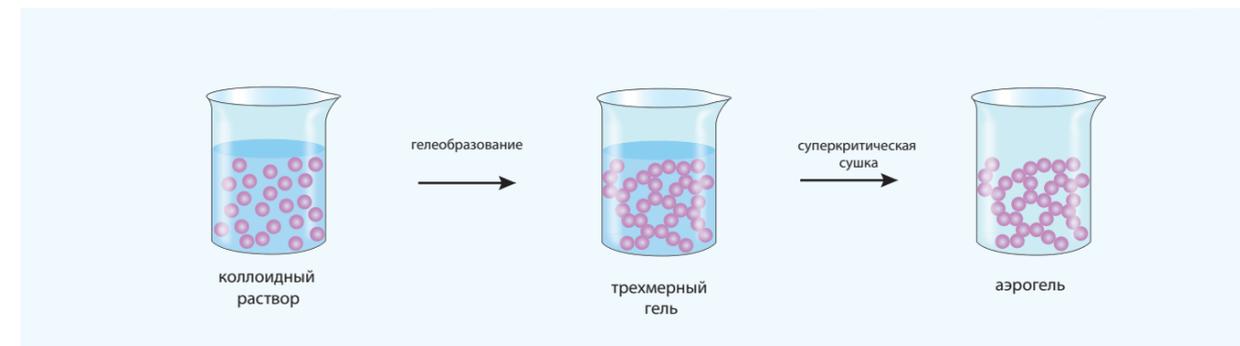


Схема образования аэрогелей

- ных частиц, космической пыли и т.п.;
- объектов доставки лекарств в медицине или загустителей в косметике (в силу своей биологической совместимости);
- основы для создания суперконденсаторов (в связи с развитой поверхностью аэрогелей размеры конденсаторов на их основе в 2000-5000 раз меньше аналогичных электролитических конденсаторов);
- матриц для запасаения энергии, основы для создания аккумуляторов водорода для топливных элементов (при внесении в матрицу наночастиц благородных металлов или интерметаллидов);
- покрытий для оптических волокон (из-за очень малого показателя рефракции);
- компонентов вооружения.

Но, как и всегда и везде, у аэрогелей наряду с положительными свойствами есть и отрицательные, являющиеся основными препятствиями для начала их широкой эксплуатации, – это высокая стоимость, чувствительность к действию влаги и склонность к хрупкому разрушению. Стоит, однако, отметить, что удельная прочность аэрогелей (т.е. прочность, приведенная к массе) в разы превосходит прочность обычных конструкционных материалов, поэтому аэрогели могут найти применение в ракетной и авиационной технике.

Различия в свойствах аэрогелей обусловлены возможностью варьировать их химический состав

и методику получения. Основные материалы для получения аэрогелей – это оксиды кремния, титана, алюминия, железа, олова, циркония, хрома и некоторых других элементов, например, лантаноидов. Активно проводятся исследования углеродных аэрогелей (пиролизированных композитов на основе углеродных волокон), органических аэрогелей (например, на основе агара-агара), аэрогелей, модифицированных другими элементами (для придания каталитических свойств, флуоресценции и т.п.), полимер-модифицированных аэрогелей и других.

Получение неорганических аэрогелей основано на золь-гель методе. На первой стадии в результате химической реакции происходит образование золя оксида выбранного элемента в растворе (в качестве исходного компонента может быть выбран растворимая соль этого элемента или элементарорганические соединения). Для наглядности, золь можно представить в виде шариков для настольного тенниса, которые лежат друг на друге. На второй стадии в процессе гелеобразования из-за протекания все той же химической реакции в объеме появляются мостики оксида между коллоидными частицами золя, в результате получается трехмерный гель, заполняющий весь объем и называемый лиогель (т.е. происходит образование химических связей между «теннисными шариками», что придает всей конструкции прочность и монолитность). Третьей стадией является

«суперкритическая сушка», в процессе которой жидкий компонент лиогеля заменяется на газ и образуется аэрогель. Суперкритические условия необходимы для того, чтобы избежать появления границы раздела фаз и, следовательно, сил поверхностного натяжения, которые «сожмут» и разрушат хрупкий лиогель. Для варьирования свойств получаемых аэрогелей в широких пределах можно выбирать разные исходные соединения и изменять их концентрацию, а также «играть» с составом растворителя и с природой жидкого компонента во время «суперкритической сушки».

В ИФАВ РАН ведутся работы по получению аэрогелей на основе оксидов кремния, титана, циркония, алюминия и олова из алкоксидов и солей соответствующих металлов. В полученных нами аэрогелях плотность достигает 40 кг/м<sup>3</sup>, а площадь поверхности превышает 1000 м<sup>2</sup>/г.

Некоторые ученые предсказывают, что в 2050 году аэрогели будут использоваться повсюду и так же широко, как пластмассы в настоящее время. Они уверены, что эти материалы могут сыграть решающую роль в решении климатических проблем в будущем. Это мнение разделяют правительства многих развитых стран мира.

*Зав. лабораторией органического синтеза ИФАВ РАН,  
дхн, проф. Лермонтов С.А.,  
кхн, снс Малкова А.Н.*