

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ПОРОВЫХ КАНАЛОВ ФИЛЬТРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Калюжный А.Б., Маковецкий Д.Р.

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко

Платков В.Я.

Луганский национальный аграрный университет

Проведено сопоставление методов получения данных о размерах поровых каналов. Показано, что наиболее достоверные значения размеров поровых каналов обеспечивает гидравлический метод основанный на совместном решении уравнений Дарси и Гагена-Пуазейля. Определены максимальные и средние диаметры узких участков поровых каналов, коэффициенты извилистости, проницаемость пористого политетрафторэтилена в интервале значений пористости от 0,64 до 0,76. Установлено, что увеличение пористости материала от 0,64 до 0,76 сопровождается уменьшением коэффициента извилистости поровых каналов от 2,4 до 1,3 и увеличением их проницаемости от 1,85 до 101,23Д. С увеличением пористости также наблюдается увеличение отношения d_{max} и $d_{ср}$, что свидетельствует о росте неоднородности поровой структуры.

Ключевые слова: Пористый ПТФЭ, пористость, распределение пор по размерам, максимальные и средние диаметры пор, коэффициент извилистости пор.

Актуальность проблемы. Фильтрующие материалы имеют сложную поровую структуру, которую характеризуют комплексом таких параметров как пористость, распределение пор по размерам, максимальные и средние диаметры пор, коэффициент извилистости пор, удельная поверхность пор и т.д. [1].

При получении фильтрующих материалов с заданной тонкостью фильтрации важной характеристикой является распределение пор по размерам, которое дает представление о числе пор каждого размера и диапазона изменения размеров пор в материале.

Для нахождения распределения пор по размерам применяют методы: вдавливания ртути в поры, вытеснение жидкости из пор, исследование микрофотографий, адсорбция газов, рассеяния рентгеновских лучей и др. [2]. Распространенным методом оценки распределения пор по размерам в фильтрующих материалах является метод вдавливания ртути [3].

Однако, токсичность ртути делает данный метод не безопасным. Поэтому приходится ограничиваться экспресс-данными по максимальному и среднему размерам пор.

Максимальные по размерам поры играют существенную роль в процессе фильтрования, так как они определяют максимальные размеры частиц механических примесей, которые могут пройти через высокопористый материал. Средние диаметры пор используют как характеристику материалов для их сравнения.

Размеры пор можно определить многими методами [2], которые подразделяются на гидравлические, капиллярные и исследование микрофотографией.

В данной работе проведено сопоставление данных о максимальных и средних размерах пор пористого политетрафторэтилена (ПТФЭ) полученных методом вытеснения жидкости из пор и гидравлическим методом.

Анализ последних исследований. Исследования проведены на пористых ПТФЭ с различной пористостью. Материалы изготавливались путем предварительной подготовки смеси диспергированных порообразователя и порошка полимера с последующим прессованием при комнатной температуре, термообработкой, выщелачиванием порообразователя и сушки. В качестве порообразователя использовался хлорид натрия. Способы диспергирования порообразователя, смешения компонентов, условия прессования и термообработки приведены в [4]. Выщелачивание порообразователя достигалось кипячением в дистиллированной воде. Сушка образцов осуществлялась при $t = 100^{\circ}\text{C}$ в течении 12 час. Объемная пористость регулировалась соотношением количеств порообразователя и полимера и изменялась в диапазоне от 64 до 76%. Размер пор определялся главным образом дисперсностью порообразователя и материала основы.

Изложение основного материала. Метод вытеснения жидкости из пор основан на преодолении силами давления газа капиллярных сил, удерживающих жидкость в поровых каналах. При этом давление должно быть тем больше чем меньше сечение порового канала. Поровые каналы имеют, как правило, переменное сечение и для полного освобождения их от заполняющей жидкости следует приложить давление необходимое для освобождения самого узкого сечения порового канала. Следовательно, метод вытеснения жидкости из пор характеризует максимальный (d_{\max}) и средний ($d_{\text{ср}}$) диаметры узких участков поровых каналов объемной поровой структуры.

Схема установки для определения максимального и среднего диаметра узких участков поровых каналов методом выдавливания жидкости из пор приведена на рис. 1.

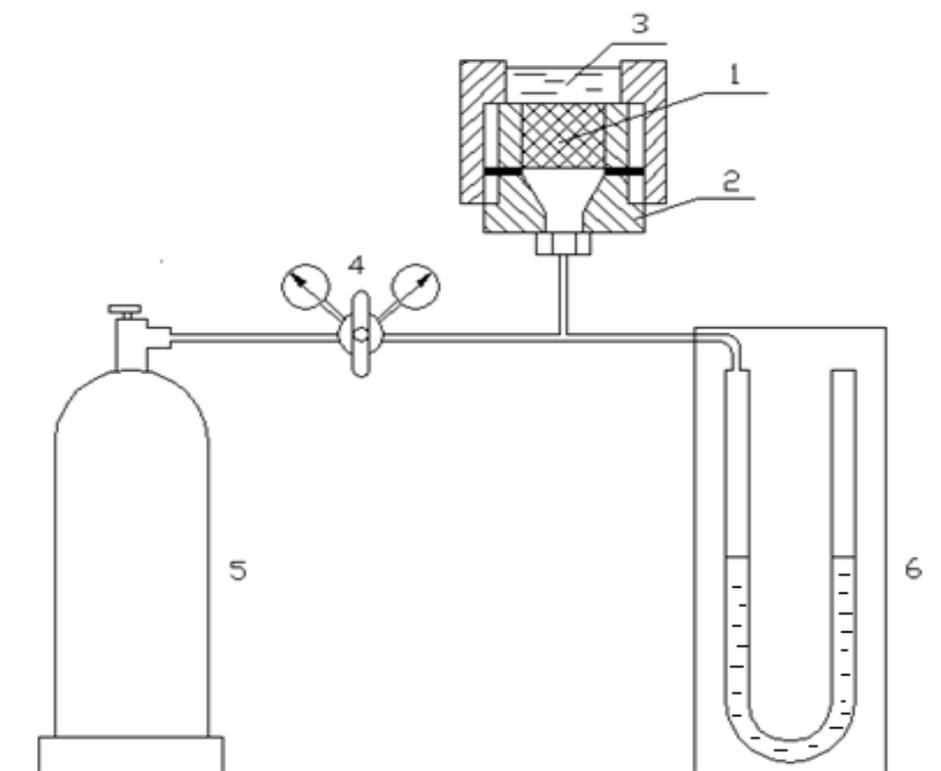


Рис.1. Схема установки для определения максимального и среднего диаметра узких участков поровых каналов: 1 - пористый материал; 2 - корпус; 3 - смачивающая жидкость; 4 - редуктор; 5 - баллон; 6 - дифференциальный манометр.

Перед опытом поры образца изучаемого материала заполнялись жидкостью с известным поверхностным натяжением (бензин Б-70). Затем образец помещался в корпус фильтра 2, где на его поверхность наливался слой жидкости толщиной 20 мм. Из баллона 5 в полость под образец подавался воздух, давление которого плавно повышалось с помощью редуктора 4 до тех пор, пока на поверхности образца не появлялся первый пузырек воздуха. Давление, измеряемое дифференциальным манометром, в момент появления первого пузырька, соответствовало максимальному диаметру узкого участка порового канала. По мере увеличения давления воздуха интенсивного выхода пузырьков нарастала по поверхности пористого образца. Давление при котором достигалась максимальная интенсивность выхода пузырьков соответствует среднему диаметру узких участков поровых каналов.

Жидкость, заполняющая капилляр, удерживается силами поверхностного натяжения:

$$F = \pi d \sigma \cos \Theta \quad (1)$$

где d - диаметр узкого участка порового канала, м;

σ - сила поверхностного натяжения смачивающей жидкости, Н/м (для бензина Б-70 $\sigma = 20,7 \cdot 10^{-3}$ Н/м);

Θ - краевой угол смачивания, град. (для бензина Б-70 на поверхности ПТФЭ $\cos \Theta = 0,92$).

Для преодоления сил поверхностного натяжения требуется приложить усилие, равное:

$$F = \frac{\pi d^2}{4} \rho_{ж} g H \quad (2)$$

где $\rho_{ж}$ - плотность жидкости дифференциального манометра, кг/м³ (для воды $\rho_{ж} = 1000$ кг/м³);

H - перепад давления на образце, по данным дифференциального манометра, м;

g - ускорение свободного падения, м/с².

В состоянии равновесия уравнение принимает вид:

$$\pi d \sigma \cos \Theta = \frac{\pi d^2}{4} \rho_{ж} g H \quad (3)$$

Из уравнения (3) диаметр узкого участка порового канала описывается уравнением:

$$d = \frac{4 \sigma \cos \Theta}{\rho_{ж} g H} \quad (4)$$

Для более точного расчета диаметров узких участков поровых каналов в расчетную формулу подставлялась скорректированная величина перепада давления, учитывающая противодействия, создаваемые высотой слоя жидкости над образцом и жидкости в образце:

$$H_{расч} = H - \frac{\rho_n}{\rho_{ж}} (h_{ж} + h_{обр}) \quad (5)$$

где $H_{расч}$ - скорректированный перепад давления, м;

$h_{ж}$ - высота столба жидкости над образцом, м;

$h_{обр}$ - толщина пористого материала, м;

$\rho_{п}$ - плотность смачивающей жидкости кг/м³.

Таким образом параметр, характеризующий средний диаметр узких участков поровых каналов, определенный методом выдавливания жидкости из пор, является в известной мере субъективным и определяется с погрешностью. Поэтому, для получения более достоверных данных о средних диаметрах узких участков поровых каналов, используется гидродинамический метод, основанный на совместном решении уравнений Дарси и Гагена-Пуазейля [5].

Введение понятия гидравлический диаметр поровых каналов по существу означает переход от реальной пористой среды к модельной. Таким образом с помощью гидродинамического метода можно найти гидравлический диаметр поровых каналов модельной пористой среды, идентичной реальной пористой среде по гидравлическому сопротивлению. В настоящей работе была принята модель Корнелла и Катца, согласно которой поровые каналы имеют постоянную площадь поперечного сечения и направлены таким образом, что эффективная длина поровых каналов больше толщины пористого тела (т.е. извилистые поровые каналы имеют одинаковое сечение по всей длине).

Согласно принятой модели пористого тела из совместного решения уравнений Дарси и Гагена-Пуазейля следует:

$$d_z = \beta \sqrt{\frac{32K}{\varphi}} \quad (6)$$

где d_z - гидравлический диаметр пор;

β - коэффициент извилистости пор;

φ - пористость;

K - коэффициент проницаемости, Д.

Данная зависимость учитывает комплекс таких структурных параметров, как пористость, коэффициент извилистости пор и проницаемость. Пористость определяется расчетным методом по разности плотностей (удельных весов) компактного и пористого материала.

$$\varphi = 1 - \frac{m}{V\rho_k} \quad (7)$$

где m - масса пористого материала, кг;

V - объем пористого материала, м³;

ρ - плотность ПТФЭ, кг/м³.

Преимущество расчетного метода состоит в том, что свойства пористого материала при определении пористости не изменяются и исследуемый материал можно использовать для дальнейшей работы.

Коэффициент извилистости поровых каналов определялся по отношению удельной электропроводности электролита и удельной электропроводности пористого материала, насыщенного этим электролитом:

$$\beta = \sqrt{\frac{j_{эл}}{j_{обр}}} \varphi \quad (8)$$

где $j_{эл.}$ - удельная электропроводность электролита, 1/Ом·м;

$j_{обр.}$ - удельная электропроводность пористого элемента, насыщенного электролитом, 1/Ом·м;

Использование зависимости (6) для нахождения гидравлического диаметра пор требует знания коэффициента проницаемости пористого материала K , который определяется экспериментально по расходной (гидравлической) характеристике пористого материала при ламинарном режиме фильтрования жидкости или газа в порах.

В табл. 1 представлены данные о максимальных и средних диаметров узких участков поровых каналов полученных методом вытеснения жидкости из пор и гидравлические диаметры пор полученные расчетным методом для пористых ПТФЭ с различной пористостью.

Таблица 1

Максимальные и средние диаметры узких участков поровых каналов и гидравлические диаметры пор пористых ПТФЭ с различной пористостью.

| Пористость ПТФЭ ϕ | Коэффициент извилистости пор β , мкм | Коэффициент проницаемости K , Д | Диаметры узких участков поровых каналов | | Гидравлический диаметр пор d_e , мка |
|------------------------|--|-----------------------------------|---|----------------|--|
| | | | d_{max} , мкм | d_{cp} , мкм | |
| 0,64 | 2,4 | 1,85 | 29 | 25 | 23,1 |
| 0,72 | 1,8 | 8,5 | 52 | 43 | 35 |
| 0,74 | 1,6 | 27,3 | 93 | 82 | 55 |
| 0,76 | 1,3 | 101,23 | 132 | 98 | 85 |

Выводы

Проведено сопоставление методов получения данных о размерах поровых каналов. Установлено, что увеличение пористости материала от 0,64 до 0,76 сопровождается уменьшением коэффициента извилистости поровых каналов от 2,4 до 1,3и увеличением их проницаемости от 1,85 до 101,23Д. С увеличением пористости также наблюдается увеличение отношения d_{max} и d_{cp} , что свидетельствует о росте неоднородности поровой структуры. Показано, что наиболее достоверные значения размеров поровых каналов обеспечивает гидравлический метод основанный на совместном решении уравнений Дарси и Гагена-Пуазейля.

Список использованных источников

1. Kalyuzhny A.B., Karpova T.L., Kalyuzhny B.G., Platkov V.Ya. Structure and functional properties of high-porosity material based on Fluoroplast-4 // Functional Materials. - 1999. - Vol. 6, №2. - P. 305-309
2. Anovitz, L.M., Cole, D.R.: Characterization and analysis of porosity and pre structures// Rev. Mineral. Geochem. - 2015. Vol. 80, P. 61–164
3. Shivley, M.L., Analysis of Mercury Porosimetry for the Evaluation of Pore Shape and Intrusion-Extrusion Hysteresis. J. Pharm. Sci. - 1991. 80(4), P. 376-379.
4. Kalyuzhny A.B. Structure of porous materials and their permeability: determination by computer-aided simulation / A.B. Kalyuzhny, V.Ya. Platkov // Functional Materials. – 2001. – Vol. 8, №1.– P. 90-93.
5. Sh. Ma, N.R. Morrow, Paper 9610 presented at the 1996 International Symposium of the Society of Core Analysts, Montpellier, September 8-10

Abstract

DETERMINATION OF THE SIZE OF POROUS CHANNELS OF FILTER MATERIALS

Kalyuzhny AB, Makovetsky D.R., Platkov V.Ya.

A comparison of methods for obtaining data on the sizes of pore channels has been made. The most reliable values of the porous channels sizes is shown to be provided by the hydraulic method based on the joint solution of the Darcy and Hagen-Poiseuille equations. The maximum and average diameters of narrow sections of the pore channels, the tortuosity coefficients, and the permeability of porous polytetrafluoroethylene in the range of porosity values from 0.64 to 0.76 have been determined. It is established that an increase in the porosity of the material from 0.64 to 0.76 is accompanied by a decrease in the coefficient of tortuosity of the porous channels from 2.4 to 1.3 and an increase in their permeability from 1.85 to 101.23D. With an increase in porosity, an increase in the ratio d_{max} and d_{av} is also observed, which indicates an increase in the inhomogeneity of the pore structure.

Keywords: *Porous PTFE, porosity, pore size distribution, maximum and average pore diameters, coefficient of tortuosity of porous.*