

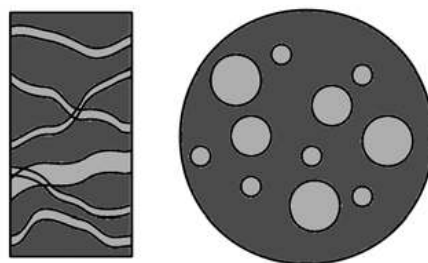
2 Порометрия

Условие

Задача 11.2 Порометрия

В данной задаче мы предлагаем Вам рассмотреть методы исследования пористых тел. Используя порошок, волокна или ячеистый материал можно получать пористые тела с различными размерами и геометрией пор. Основной характеристикой таких тел является пористость, равная отношению объема пустот к общему объему образца:

$$\xi = V_{\Pi}/V_0.$$



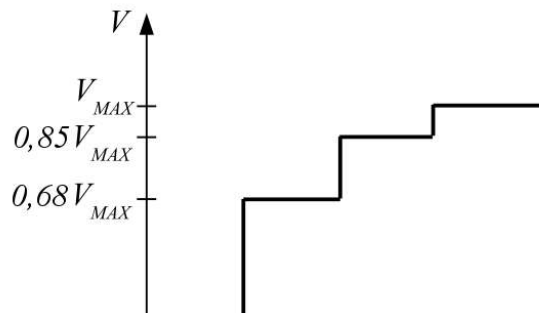
Простая модель пористого тела изображена на рисунке. Поры представляют собой каналы различного радиуса, но практически одинаковой длины. Все поры открытые и имеют выход на поверхность образца. Диаметры пор на рисунке, безусловно, очень сильно преувеличены. Для простоты, можно считать, что поры не пересекаются друг с другом. Кроме того, исследуемый в задаче образец сделан из материала очень хорошо смачиваемого водой.

Часть 1. Взвешивание в воде

Самый простой способ определения пористости состоит в следующем. Образец взвешивают в воздухе, затем в воде. После это высушивают, обмазывают тонким слоем парафина, закрывающего поры, и снова взвешивают в воде. Оказалось, что исследуемый нами образец весит в воде в два раза, а с закрытыми порами в три раза меньше. Определите пористость образца.

Часть 2. Ртутная интрузионная порометрия

Данный метод позволяет не только определить пористость, но и узнать распределение пор по диаметру. Суть метода заключается в следующем. В специальной камере из пор выкачивают воздух, а затем начинают вдавливать в образец ртуть. В эксперименте измеряют зависимость



вошедшего в образец объема ртути от давления. Используя график этой зависимости и считая известными значения давления p_0 и поверхностного натяжения ртути σ_P , определите, поры какого радиуса

существуют в исследуемом образце и какое их относительное количество (отношение количества пор данного радиуса к общему количеству пор).

Ртуть совсем не смачивает материал образца. V_{MAX} - максимальный объем ртути, который можно вдавить в образец.

Часть 3. Порометрия капиллярных потоков

Еще один метод, позволяющий измерить диаметр пор. Исследуемый образец погружают в воду, которая заполняет все поры (материал образца хорошо смачивается водой). Затем образец устанавливается в трубу. С одной стороны трубы под давлением подается идеальный газ, который постепенно вытесняет воду, с другой — регистрируется массовый расход газа, прошедшего через образец. В эксперименте измеряют зависимость массового расхода газа q от разности давления газа Δp по обе стороны образца.

Считайте, что скорость движения газа в поре прямо пропорциональна разности давлений и одинакова по сечению поры.

Нарисуйте качественный график зависимости q от Δp для образца, исследованного в части 2. Объясните полученные вами зависимости.

Поверхностное натяжение воды — σ_B . Температура газа поддерживается постоянной.

Решение

Задача 11.2 Порометрия

Часть 1

Введем следующие обозначения: ρ_B — плотность воды, ρ — плотность материала пористого тела. Пренебрегая силой Архимеда действующей в воздухе, можем записать выражение для веса тела в воздухе:

$$P_{\text{Возд}} = \rho(V_0 - V_{\Pi})g. \quad (1)$$

Вес тела в воде:

$$P_B = \rho(V_0 - V_{\Pi})g - \rho(V_0 - V_{\Pi})g. \quad (2)$$

Вес в воде пористого тела с закрытыми порами:

$$P_{B3} = \rho(V_0 - V_{II})g - \rho V_0 g. \quad (3)$$

Согласно условия задачи:

$$P_{\text{Возд}} = 2P_B = 3P_{B3}. \quad (4)$$

Решая систему получим:

$$V_0 = 4V_{II}, \quad (5)$$

т. е. пористость образца равна:

$$\xi = 25\%. \quad (6)$$

Часть 2

Рассмотрим отдельную пору, которая, как сказано в условии, представляет собой трубку определенного радиуса r . Т. к. ртуть не смачивает материал пористого тела, то ее движение внутри поры возможно только в случае, если сила, создаваемая внешним давлением ($p \cdot \pi r^2$), превосходит силы поверхностного натяжения $\sigma_P \cdot 2\pi r$ (краевой угол 180°). Другим словами, как только давление достигает значения:

$$p = 2\sigma_P / r, \quad (7)$$

ртуть полностью заполняет пору с радиусом r .

Анализируя график, приведенный в условии, делаем вывод, что максимальный радиус пор равен:

$$r_1 = 2\sigma_P / p_0, \quad (8)$$

т. к. при меньшем давлении ртуть не входит в образец.

Затем, при достижения давления $2p_0$ и $3p_0$ объем вошедшей ртути, снова резко увеличивается, т. е. ртуть проникает в поры с радиусами $r_2 = \sigma_P / p_0$ и $r_3 = 2\sigma_P / 3p_0$. Таким образом в исследуемом образце существуют поры трех видов с радиусами r_1 , $r_2 = r_1/2$ и $r_3 = r_1/3$.

Пусть общее количество пор равно $N = N_1 + N_2 + N_3$. Согласно зависимости приведенной на графике, объем ртути вошедшей в поры радиуса r_1 равен:

$$N_1 \pi r_1^2 l = 0,68 V_{MAX}, \quad (9)$$

где l - длина поры.

Объем ртути вошедшей в поры радиуса r_2 и r_3 :

$$N_2 \pi r_2^2 l = 0,85 V_{MAX} - 0,68 V_{MAX} = 0,17 V_{MAX} \quad (10)$$

и

$$N_3 \pi r_3^2 l = V_{MAX} - 0,85 V_{MAX} = 0,15 V_{MAX} \quad (11)$$

соответственно.

Тогда отношение числа пор:

$$N_1 r_1^2 / N_2 r_2^2 / N_3 r_3^2 = 0,68 / 0,17 / 0,15. \quad (12)$$

Подставляя соотношения между радиусами пор, получим:

$$N_1 / (1/4) N_2 / (1/9) N_3 = 0,68 / 0,17 / 0,15. \quad (13)$$

Преобразовав выражение (13), получим:

$$N_1 / N_2 / N_3 = 1 / 1 / 2. \quad (14)$$

Таким образом, 50 % пор имеют радиус r_3 , 25 % - радиус r_2 и 25 % радиус r_1 .

Часть 3

В случае порометрии капиллярных потоков необходимо вытеснять воду из пор образца. Вода выйдет и поры с радиусом r , когда разность давления достигнет значения:

$$\Delta p = 2\sigma_B / r. \quad (15)$$

т. е. при разности давлений меньше $\Delta p_0 = 2\sigma_B / r_1$ (значение r_1 определено в предыдущем пункте) газ не будет проходить через образец. После того, как откроются поры большего радиуса, установится некоторый массовый расход газа:

$$q = \rho v S, \quad (16)$$

где ρ - плотность газа;

v - скорость движения газа в порах;

S - суммарная площадь поперечного сечения пор определенного радиуса.

При увеличении давления (если не открываются поры меньшего радиуса) массовый расход газа будет увеличиваться, т. к. с одной стороны возрастает скорость движения газа в порах ($v \sim \Delta P$), а с другой возрастает плотность газа $\rho \sim \Delta P$. Таким образом массовый расход будет изменяться пропорционально квадрату разности давлений $q \sim \Delta p^2$.

Затем при достижении давления $\Delta p = 2\sigma_B/r_2 = 2\Delta p_0$, расход снова резко увеличится, т. к.

откроются поры радиуса r_2 . Суммарная площадь поперечного сечения этих пор в 4 раза меньше по сравнению с порами радиуса r_1 (количество пор такое же, но радиус в два раза меньше). Поэтому расход газа резко увеличится на 25 %.

Аналогичный «скачок» расхода произойдет, когда откроются самые маленькие поры. Площадь поперечного сечения увеличится на $0,15/(0,68 + 0,17) = 0,176 \approx 18\%$. На столько увеличится и расход газа. Качественный график зависимости расхода газа от разности давлений представлен на рисунке.

