

Laboratorní a výpočetní technika

ROZDĚLENÍ VELIKOSTÍ PRŮCHOZÍCH PÓRŮ POSTUPEM PODLE L. ŽAGARA

MILAN HLOŽEK

Výzkumný ústav stavebních hmot, 617 00 Brno, Hněvkovského 65

Došlo 3. 1. 1978

Byla provedena úprava způsobu vyhodnocení výsledků měření, která zjednodušuje postup výpočtu navržený autorem metody a současně umožňuje provádět vyhodnocení výsledků měření i v těch případech, kdy v měřené hmotě jsou zastoupeny průchozí póry malého průměru.

ÚVOD

Postup stanovení rozdělení velikostí otevřených, průchozích pórů navržený L. Žagarem [2]—[3] vychází z výsledků měření průtoku vzduchu přes vrstvu suché, pórovité hmoty v závislosti na přetlaku vzduchu (závislost $Q = f_1(\Delta p)$) a z výsledků měření průtoků vzduchu přes tutéž vrstvu, s póry zaplněnými vodou, v závislosti na přetlaku vzduchu, kterým je voda z průchozích pórů vytlačována (závislost $Q = f_2(\Delta p)$). Výsledky těchto měření jsou vyhodnocovány za předpokladu, že reálná struktura pórového prostoru, tvořeného průchozími póry, je zjednodušena na systém kapilár kruhového průřezu a stejné délky, shodné s tloušťkou měřené vrstvy.

Předpokládá se, že k vytlačení vody z kapilár o poloměru r je nezbytný přetlak vzduchu Δp , nutný pouze k překonání kapilárních sil

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{r}, \quad (1)$$

který vyplývá z podmínky rovnováhy sil

$$\Delta p \pi r^2 = \sigma 2 \pi r \cos \varphi, \quad (2)$$

kde σ je povrchová energie vody a φ úhel smáčení (v daném případě vody na pevném silikátu $\varphi = 0$). Průběh závislosti $Q = f_1(\Delta p)$ je v měřeném rozsahu lineární a může být vyjádřen za použití zákona D'Arcyho

$$Q = D_s \frac{A}{\eta l} \Delta p, \quad (3)$$

kde Q je objem plynu o viskozitě η , proteklý při přetlaku Δp za časovou jednotku vrstvou hmoty o celkové ploše průřezu A a tloušťce l . Na základě uvedeného vztahu (3) lze počítat hodnotu měrné propustnosti D_s jako součin konstanty K a směrnice přímk, znázorňující průběh závislosti $Q = f_1(\Delta p)$ v souřadnicovém systému p, Q

$$D_s = \frac{\eta l}{A} \cdot \frac{Q}{\Delta p} = K \frac{Q}{\Delta p}. \quad (4)$$

Na základě výsledků měření považuje Žagar rovněž průběh závislosti $Q = f_2(\Delta p)$ od určité hodnoty tlaku vzduchu, označené $p_{\max}$, za lineární a před-

pokládá, že po vytlačení vody z nejmenších ve hmotě zastoupených průchozích pórů o poloměru $r_{\min}$ bylo dosaženo stejné hodnoty měrné propustnosti jako v případě měření suché hmoty. Uvedený předpoklad vychází ze zjištění, že tečna sestavená ke křivce znázorňující průběh závislosti $Q = f_2(\Delta p)$ v bodě T_s o souřadnicích $(p_{\max}; Q)$ má stejnou směrnici jako přímka znázorňující průběh závislosti $Q = f_1(\Delta p)$ v případě suché hmoty. Měrná propustnost je počítána podle vztahu

$$D_s = K \cdot \frac{Q}{p_{\max} - p_0}, \quad (5)$$

kde p_0 je úsek, který vytíná tečna na ose x .

Část celkové pórovitosti, která se po dosažení tlaku $p_{\max}$ podílí na průtoku vzduchu přes vrstvu měřené hmoty, je označena ε_{eff} a je počítána pomocí závislosti

$$D_s = \frac{\varepsilon_{\text{eff}} \cdot r_{\text{eff}}^2}{8}, \quad (6)$$

kde r_{eff} je ztotožněno s $r_{\min}$, příslušným podle (1) hodnotě tlaku $p_{\max}$. Stejným postupem je při zvolených hodnotách tlaku v intervalu $(p_{\min}, p_{\max})$ určována po sestavení tečny ke křivce naměřené závislosti $Q = f_2(\Delta p)$ v bodě T_i o souřadnicích $(p_i; Q_i)$ a odečtení úseku na ose x , označeného p_{0i} , propustnost D_i a jí odpovídající část celkové pórovitosti $\varepsilon_{\text{eff } i}$

$$D_i = K \frac{Q_i}{p_i - p_{0i}} = \frac{\varepsilon_{\text{eff } i} \cdot r_{\text{eff } i}^2}{8}, \quad (7)$$

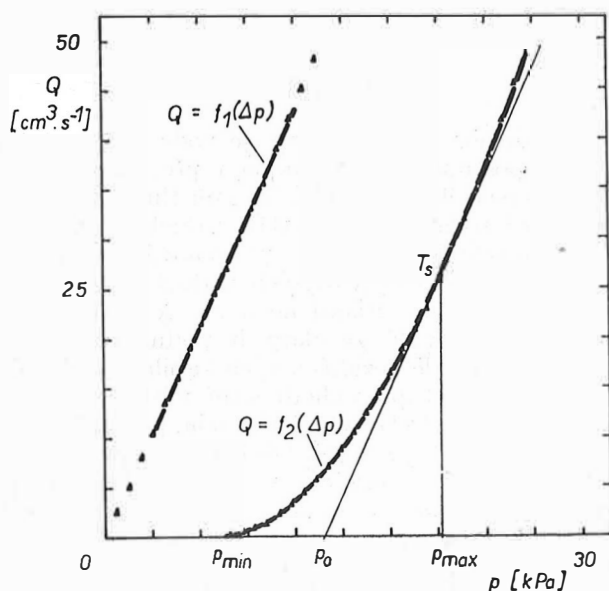
kde hodnota $r_{\text{eff } i}$ přísluší podle (1) hodnotě p_i .

Pro usnadnění výpočtu je doporučeno převést pomocí vztahu (1) měření získané hodnoty tlaku na příslušné hodnoty poloměru a tyto při grafickém zpracování výsledků vynést v logaritmické stupnici na osu x v závislosti na hodnotách průtoku vzduchu Q , vynášených na osu y . Křivka proložená body znázorňujícími výsledky měření v souřadnicovém systému $\log r, Q$ je rozdělena na určitý počet stejně velkých úseků podle $\log r$ a v každém takto získaném bodě o souřadnicích $(\log r_i; Q_i)$ je ke křivce sestavena tečna protínající osu x v bodě $(\log r_{0i}; 0)$. Hodnoty r_{0i} jsou pomocí vztahu (1) převedeny na odpovídající hodnoty p_{0i} a za použití rovnice (7) jsou počítány příslušné hodnoty D_i a $\varepsilon_{\text{eff } i}$. Na základě hodnot $\varepsilon_{\text{eff } i}$, vyjádřených v procentech vzhledem k hodnotě ε_{eff} a jim příslušných hodnot r_i , je vynášena součtová křivka, znázorňující rozdělení velikostí otevřených, průchozích pórů.

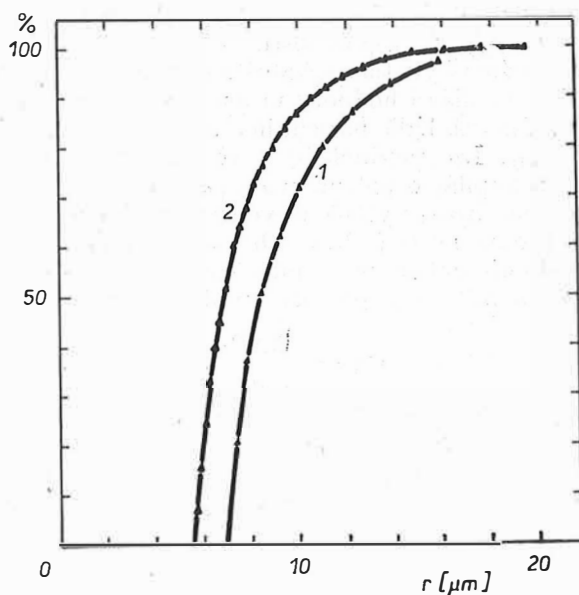
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Měření rozdělení velikostí průchozích pórů ve hmotě šamotu byla prováděna přístrojem vyráběným firmou Netzsch (NSR) pod označením Porometer 425/1. Tento přístroj umožňuje měření průtoku vzduchu do hodnoty $50 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ při postupně se zvětšujícím tlaku vzduchu do 39,24 kPa. Zkušební tělíska o průměru 50 mm a tloušťce 10 mm byla připravena broušením ze šamotových kamenů kvality ST II. Průběh závislosti $Q = f_1(\Delta p)$ a $Q = f_2(\Delta p)$, získaný měřením za použití suchého a vodou nasáklého zkušebního tělíska, je uveden na obr. 1. Měrná propustnost suché hmoty byla vypočtena podle (4) jako

součin směrnice přímky, získané použitím metody nejmenších čtverců z naměřených hodnot průtoku a tlaku a konstanty K . Po sestrojení tečny se stejnou směrnicí ke křivce znázorňující průběh závislosti $Q = f_2(\Delta p)$ bylo zjištěno,



Obr. 1. Průběh závislosti $Q = f_1(\Delta p)$ a $Q = f_2(\Delta p)$ získaný měřením za použití suchého a vodou nasáklého tělíska šamotu.



Obr. 2. Rozdělení velikostí průchozích pórů počítané podle Žagara [1] a upraveným postupem [2].

že při hodnotách tlaku větších než $p_{\max}$ není průběh této závislosti lineární. Výpočtem rozdělení velikostí průchozích pórů, provedeným v intervalu ($p_{\min}$, $p_{\max}$) výše uvedeným postupem, byla získána součtová křivka znázorněná na obr. 2.

DISKUSE

Při měření na uvedeném typu přístroje je voda z pórovité vrstvy měřené hmoty vytlačována postupně se zvětšujícím přetlakem vzduchu nad tuto vrstvu, kde vytváří vrstvičku vody několik mm tlustou. V tomto uspořádání je k vytlačení vody z kapilár nutný přetlak vzduchu postačující k překonání kapilárních sil, hydrostatického tlaku a povrchového napětí vody, který je zčásti kompenzován vztlakem vytvářených vzduchových bublinek. Již dříve bylo poukázáno, že hodnota přtlaku nezbytná k vytlačení vody z kapilár kruhového průřezu neodpovídá za daných podmínek hodnotě vypočtené podle vztahu (1) ani v případě nezákřivených kapilár neměnného průřezu [4]. Jak plyne z uvedeného postupu vyhodnocení výsledků měření, je výpočet poloměru kapilár, ze kterých byla vytlačena voda, prováděn pomocí vztahu (1) z celkové hodnoty přtlaku ($\Delta p_i = p_i$), kdežto při výpočtu příslušné hodnoty propustnosti je tento výpočet prováděn na základě hodnoty přtlaku zmenšené o hodnotu p_{oi} ($\Delta p_i = p_i - p_{oi}$). Ztráta tlaku při měření (p_{oi}) tedy není uvažována při výpočtu poloměru kapilár, ale současně je s ní počítáno při výpočtu hodnot propustnosti. Předpoklad, že hodnota směrnice tečny ke křivce závislosti $Q = f_2(\Delta p)$, při určité hodnotě tlaku p_i , je úměrná hodnotě propustnosti při tomto tlaku není oprávněn, neboť tato hodnota je první derivací funkce $Q = f_2(\Delta p)$ v bodě (p_i ; Q_i) a z průběhu závislosti $Q = f_2(\Delta p)$ je zřejmé, že může nabýt větší hodnoty, než je hodnota odpovídající podle vztahu (4) stanovené měrné propustnosti.

Vzhledem k uvedenému byla tlaková ztráta při vlastním výpočtu zanedbána a hodnoty poloměru kapilár i hodnoty propustnosti byly počítány z celkové hodnoty přtlaku. Na základě následující úvahy byl pozměněn i způsob výpočtu hodnoty ε_{eff} . Lze předpokládat, že jestliže při přtlaku $\Delta p_i = p_i$ je vytlačena voda z kapilár o poloměru r_i , pak zvětšením přtlaku o malou hodnotu je přtlakem Δp_{i+1} vytlačena voda z kapilár o poloměru r_{i+1} . Odpovídající změna propustnosti ($\Delta D_i = D_{i+1} - D_i$) může být přiřazena příslušné střední hodnotě poloměru kapilár ($r_{\text{stř } i} = r_{i+1} + (r_i - r_{i+1})/2$). Za použití hodnot $r_{\text{stř } i}$ a ΔD_i byly pomocí rovnice (7) vyjádřeny hodnoty $\varepsilon_{\text{eff } i}$

$$\varepsilon_{\text{eff } i} = \frac{8 \Delta D_i}{r_{\text{stř } i}^2}.$$

Součtem hodnot $\varepsilon_{\text{eff } i}$ získaná hodnota ε_{eff} je v tomto případě úměrná zastoupení kapilár, jejichž poloměr je větší než hodnota poloměru odpovídající podle (1) největší, při měření dosažené hodnotě přtlaku. Zastoupení kapilár o menším poloměru, které zůstaly zaplněny vodou, není v uvedeném výsledku zahrnuto (obr. 2).

ZÁVĚR

Navrhovaný způsob hodnocení výsledků měření a výpočtu rozdělení velikostí průchozích pórů odstraňuje některé, výše uvedené nedostatky původního, autorem metody doporučeného postupu. Umožňuje provádět výpočet rozdělení velikostí průchozích pórů v keramických i jiných silikátových hmotách, obsahujících průchozí póry malých průměrů, které i při největší hodnotě přetlaku dosažené při měření zůstávají zaplněny vodou. S ohledem na uvedená zjednodušení reálné struktury pórů jsou výsledky tohoto stanovení pouze relativní.

Literatura

- [1] Žagar L.: *Silicates Industr.* 24, 306 (1959).
- [2] Žagar L.: *Ber. Deut. keram. Ges.* 35, 294 (1958).
- [3] Žagar L.: *Archiv Eisenhütt.* 27, 657 (1956).
- [4] Lohre W.: *Tonind. Zeit.* 83, 334 (1959).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ ПРОПУСКАЮЩИХ ПОР СПОСОБОМ СОГЛАСНО Л. ЖАГАРУ

Милан Гложек

Научно-исследовательский институт строительных материалов, Брно

Метод определения распределения размеров пропускающих пор, предлагаемый Жагаром, основывается на результатах измерения изменений водонепроницаемости пропитанной массы, из проходящих пор которой вода выдавливается постепенно в зависимости от растущего избыточного давления воздуха. Предполагается, что избыточным давлением воздуха, полученным при измерении, вода выдавливается из всех пропускающих пор. Так как это предположение, как правило, не выполняется, нами проводилась поправка способа оценки результатов измерений, на основании которой можно проводить исчисление распределения размеров пропускающих пор, из которых выдавливалась вода даже в тех случаях, когда пропускающие поры небольшого диаметра при наибольшей величине избыточного давления воздуха, полученной при измерении, остаются заполненными водой. Ввиду того, что при расчете предполагаются упрощения реальной структуры пространства пор, полученные результаты имеют характер относительных величин.

Рис. 1. Ход зависимостей $O = f_1(\Delta p)$ и $O = f_2(\Delta p)$, полученный на основании измерения с применением сухого и пропитанного водой тела из шамота.

Рис. 2. Распределение размеров пропускающих пор рассчитанное по Жагару [1] и поправленным нами способом [2].

DETERMINATION OF OPEN PORE SIZE DISTRIBUTION BY THE METHOD AFTER L. ŽAGAR

Milan Hložek

Research Institute of Building Materials, Brno

The method for the determination of open pore size distribution suggested by Žagar is based on the results of measurements of changes in the permeability of a water-saturated material, from the pores of which the water is forced out by gradually increasing air overpressure. It is assumed that by the air overpressure attained during the measur-

ement the water is forced out of all the pore channels. However, as this assumption is usually not complied with, the present author has proposed a modified procedure for the evaluation of experimental results which allows the pore size distribution to be determined even in the cases when the small size open pores have remained filled with water even at the highest air overpressures attained during the measurement. In view of the assumption made in the calculation, the results obtained should be regarded as relative values only.

Fig. 1. The course of the $Q = f_1(\Delta p)$ and $Q = f_2(\Delta p)$ relationships obtained by measuring a dry fireclay sample and a water-saturated one respectively.

Fig. 2. Open pore size distribution calculated after Žagar [1] and by the adjusted procedure [2].