

VI. Studium reologického chování látek

Helena Valentová, KVOF MFF UK

Reologické chování látek

Chování viskózní tekutiny lze popsat závislostí mezi smykovým napětím τ a rychlostí smykové deformace $\dot{\gamma}$. Funkční závislost mezi τ_r a $\dot{\gamma}$ se nazývá *rovnici toku* [3]

$$\tau = f(\dot{\gamma}) . \quad (1)$$

Jestliže tekutina splňuje Newtonův viskózní zákon, tj. závislost mezi τ a $\dot{\gamma}$ je lineární,

$$\tau = \eta \dot{\gamma} , \quad (2)$$

nazýváme takovou látku *newtonovskou tekutinou*. Dynamická viskozita tekutiny η je pro newtonovskou tekutinu nezávislá na deformační rychlosti a můžeme ji určit z grafu závislosti $\tau(\dot{\gamma})$.

Kapalinám, pro které přímá úměrnost mezi napětím a rychlostí deformace (2) není splněna, říkáme *nenewtonovské*. Kapalina je nenewtonovská tehdy, vychází-li viskozita počítaná dle (2) pro různé rychlosti deformace $\dot{\gamma}$ různá, tj. převyšuje-li systematická odchylka viskozity chybu přístroje.

V případě nenewtonovské kapaliny můžeme předpokládat, že závislost τ a $\dot{\gamma}$ je dána mocninnou funkcí (tzv. *Ostwaldova – de Waeleova rovnice toku*). Potom

$$\tau = \eta_0 \dot{\gamma}^n , \quad (3)$$

kde η_0 a n jsou konstanty charakterizující chování kapaliny (pro $n \neq 1$ má konstanta η_0 jiný fyzikální rozměr než viskozita η).

Viskozita patří mezi transportní jevy. Jde v podstatě o přenos hybnosti mezi dvěma sousedními vrstvami kapaliny realizovaný prostřednictvím molekul. Tento proces je procesem tepelně aktivovaným. Změnu viskozity s teplotou můžeme charakterizovat vztahem

$$\eta(T) = C \exp\left(\frac{\varepsilon_A}{kT}\right) , \quad (4)$$

kde ε_A je aktivační energie a C je konstanta.

Chceme-li určit aktivační energii, lze teplotní závislost nafitovat nelineárním vztahem (4) nebo je možné rovnici (4) zlogaritmovat,

$$\ln \eta = \ln C + \frac{\varepsilon_A}{k} \cdot \frac{1}{T} , \quad (5)$$

dostaneme tedy rovnici přímky v proměnných $\ln \eta$ a $1/T$.

Rotační viskozimetr

Pro měření viskózních vlastností reologicky složitějších látek jsou vhodné rotační viskozimetry s proměnnou rychlostí otáčení a výměnným tvarem měrného prostoru. Takové viskozimetry umožňují studium funkčních závislostí mezi smykovým napětím τ a rychlostí

smykové deformace $\dot{\gamma}$. K určování této závislosti využíváme v praxi přístroj HAAKE Viscotester iQ (Thermo scientific).

Rotační viskozimetr může pracovat s měrným prostorem v několika základních úpravách:

- souosé válce se používají pro viskózní kapaliny, pro nízké viskozity je určen dvojité válce
- kužel-deska a paralelní desky (deska-deska) se používají pro vyšší viskozity
- různé typy lopatkových rotorů umístěných ve vnějším válci jsou naopak vhodné pro nižší viskozity než souosé válce.

V praxi jsou k dispozici dvě sady souosých válců. Vnitřní (horní) válec, rotor, se otáčí a k hnací ose je opevněn přes mechanickou rychlospojku. V místě spojení s hnací osou je válec opatřen čipem pro rychlou automatickou identifikaci použité geometrie. Vnější (spodní) válec se vkládá do prostoru temperovaného pomocí Peltierova článku, tento válec je nepohyblivý.

Určení geometrického faktoru a výpočet napětí a rychlosti deformace

Pro rotační reometr je smykové napětí τ dáno vztahem

$$\tau = A \cdot M_d , \quad (6)$$

kde M_d je torzní moment měřený nebo vkládaný na vzorek a A je geometrický faktor.

Rychlost deformace je pak dána vztahem

$$\dot{\gamma} = M \cdot \Omega , \quad (7)$$

kde Ω je úhlová rychlost a konstanta M opět geometrický faktor.

Rozsah měření reometru, tedy rozsah napětí τ , rychlosti deformace $\dot{\gamma}$ a tedy i rozsah měření viskozity závisí na rozsahu měření torzního momentu, rozsahu úhlové rychlosti a geometrických konstantách A a M . Platí

$$\tau_{\min} = A \cdot M_{d,\min} , \quad \tau_{\max} = A \cdot M_{d,\max} \quad (8)$$

$$\dot{\gamma}_{\min} = M \cdot \Omega_{\min} , \quad \dot{\gamma}_{\max} = M \cdot \Omega_{\max} \quad (9)$$

Dynamická viskozita η se určí ze vztahu

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} , \quad (10)$$

pro měřitelné mezní hodnoty dostaneme z rovnic (8), (9) a (10)

$$\eta_{\min}(\dot{\gamma}_{\min}) = \frac{\tau_{\min}}{\dot{\gamma}_{\max}} , \quad \eta_{\max}(\dot{\gamma}_{\min}) = \frac{\tau_{\max}}{\dot{\gamma}_{\min}} , \quad (11)$$

$$\eta_{\min}(\dot{\gamma}_{\min}) = \frac{\tau_{\min}}{\dot{\gamma}_{\max}} , \quad \eta_{\max}(\dot{\gamma}_{\min}) = \frac{\tau_{\max}}{\dot{\gamma}_{\min}} . \quad (11)$$

Rozsah měření lze pro jednotlivé geometrie najít v manuálu včetně vzorců pro výpočet geometrických konstant A a M_d . Pro zvolenou geometrii lze rozsahy měření zobrazit přímo pomocí měřicího programu. Nicméně rozsah a přesnost měření viskozity závisí na řadě faktorů a úkolem této úlohy je nejen změřit viskozitu konkrétní kapaliny, ale především uvědomit si meze přístroje.

Viskozita kapalin je zpravidla silně závislá na teplotě. Proto je třeba stanovit teplotu, při které byla viskozita zjištěna. Pro tento účel je měrný prostor přístroje obklopen temperační komůrkou, k regulaci teploty slouží Peltierův článek. Teplotní čidlo je umístěno mimo měřenou kapalinu, kovové části měrného prostoru zajišťují dobré vedení tepla, nicméně teplota nemusí přesně odpovídat teplotě měřené kapaliny.

Technická specifikace přístroje HAAKE Viscotester iQ

(verze ve fyzikálním praktiku I)

Měřicí mód: rotace (CS, CR)

Úhlová rychlost: 0,001 - 157 rads^{-1} , 0,01 - 1500 rpm

Rozlišení úhlové rychlosti: 1,25 μrad

Smyková rychlost: 0,004 - 11415 s^{-1}

Rozsah viskozit (rotace): závisí na geometrii (viz Tabulka 1)

Geometrie: koaxiální válce

Rozsah teplot Peltier: -5 - 160 $^{\circ}\text{C}$

Mechanické ložisko

Točivý moment: 0,2 - 100 mNm

Rozlišení točivého momentu: 0,01 mNm

Smykové napětí: 0,7 - 63660 Pa



Tabulka 1: Vlastnosti souosých válců – základní údaje

Měřicí geometrie	CC25/CCB25	CC10/CCB10
Geometrická faktor A (Pa/Nm)	22630	92220
ΔA (%)	0,2	0,2
Geometrický faktor M ($\text{s}^{-1}/(\text{rad}/\text{s}^{-1})$)	12,35	12,325
ΔM (%)	0,5	0,6
Objem vzorku V (cm^{-3})	16,1	3,95
Rozsah viskozity (optimální) (Pas)	1,17÷350	4,76÷1430

Literatura:

[1] HAAKE Viscotester iQ Reference manual, Version 2.2, ThermoFisher Scientific, 2018