

VI. Studium reologického chování látek

Reologické chování látek

Chování viskózní tekutiny lze popsat závislostí mezi smykovým napětím τ a rychlostí smykové deformace D . Funkční závislost mezi τ a D se nazývá *rovnici toku*

$$\tau = f(D) . \quad (1)$$

Jestliže tekutina splňuje Newtonův viskózní zákon, tj. závislost mezi τ a D je lineární,

$$\tau = \eta D , \quad (2)$$

nazýváme takovou látku *newtonovskou tekutinou*. Dynamická viskozita tekutiny η je pro newtonovskou tekutinu nezávislá na deformační rychlosti a můžeme ji určit z grafu závislosti $\tau(D)$. Newtonovskými kapalinami jsou zpravidla nízkomolekulární látky (např. voda, ethanol, glycerol).

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 D různá, tj. převyšuje-li systematická odchylka viskozity chybu přístroje. Viskozita nenewtonovské kapaliny není materiálovou konstantou, ale závisí na rychlosti deformace nebo smykovém napětí. Pro závislost viskozity na rychlosti deformace pro některé nenewtonovské kapaliny platí mocninný zákon

$$\eta = m D^{n-1} , \quad (3)$$

kde m je konstanta. Látky, pro které zdánlivá viskozita s rostoucí rychlostí deformace klesá ($n < 1$), se nazývají pseudoplastické (např. roztoky mýdel, krev, jogurt), v případě rostoucí závislosti ($n > 1$) se jedná o tzv. dilatantní kapalinu.

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, k Boltzmannova konstanta, T termodynamická teplota a C je konstanta.

Chceme-li určit aktivační energii, lze 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 výměnnými rotory. Rotor tvaru válce nebo disku je

ponořen do kapaliny a je měřena síla, která je potřebná pro překonání odporu proti otáčení. Rotor je připevněn na hřídeli motoru, která se otáčí určitou rychlostí. Na základě znalosti rychlosti otáčení a geometrie rotoru se pomocí viskozimetru určuje kroutící moment motoru a z něj viskozita kapaliny.

Moment síly M působící na rotující válec je odečítán čidlem umístěným přímo na hrací ose. Označíme-li S plochu pláště válce, platí mezi momentem síly M a napětím τ rovnice

$$M = \tau S r . \quad (6)$$

Po dosazení a úpravě platí

$$\tau = \frac{M}{2\pi r^2 l} , \quad (7)$$

kde l je výška a r poloměr válce. Rychlost deformace D kapaliny je pro válec rotující v nekonečném prostředí dána výrazem

$$D = 2\omega , \quad (8)$$

kde ω je úhlová rychlost válce. Dosadíme-li z (7) a (8) do (2), dostaneme vztah pro viskozitu

$$\eta = \frac{M}{4\pi r^2 l \omega} . \quad (9)$$

Pokud viskozimetr umožňuje měření pouze v určitém rozsahu kroutícího momentu M , lze vhodnou volbou rotoru změnit interval měřených viskozit (větší válce slouží k měření menších viskozit).

Viskozimetr HAAKE Viscotester 7 je vybaven čtyřmi různými rotory, rychlost otáčení je možno volit v rozsahu 0,1–200 otáček za minutu (relativní chyba udávaná výrobcem je 0,5 %). Lze měřit viskozitu 10–6.10⁶ mPa.s s přesností 1 % ze zvoleného rozsahu. Doporučené množství kapaliny pro měření je 600 ml, rotor musí být ponořen až k rysce, která je na něm vyznačena.

Viskozita kapalin je zpravidla silně závislá na teplotě. Proto je třeba stanovit teplotu, při které byla viskozita zjištěna.

Kuličkový viskozimetr

Pomocí kuličkového viskozimetru lze určit viskozitu průhledné newtonovské kapaliny. Měřenou veličinou je čas, který potřebuje kulička volně padající zkoumanou kapalinou, aby urazila definovanou vzdálenost.

Na tuhou kuličku padající ve viskózní kapalině tíhová F_G , vztahová síla F_{vz} a odporová hydrodynamická síla F_h . Odporová síla F_h roste se zvyšující se rychlostí kuličky, v ideálním případě pomalého pohybu kuličky v neohraničeném prostředí platí Stokesův vzorec

$$F_h = 6\pi\eta r v , \quad (10)$$

kde η je dynamická viskozita kapaliny, ve které se kulička pohybuje, r je poloměr kuličky a v rychlost kuličky. Při pádu kuličky kapalinou roste rychlost v až do jisté mezní rychlosti, při které je zrychlující síla právě rovna odporové síle, kterou klade kapalina. Po dosažení mezní rychlosti je pohyb kuličky přibližně rovnoměrný.

Základními součástmi kuličkového viskozimetru HAAKE je skleněný válec a sada čtyř kuliček. Vnitřní průměr válce je $(15,94 \pm 0,01)$ mm. Na válci jsou vyznačeny tři kruhy. Vnější kruhy vymezují vzdálenost 100 mm, kterou kulička musí urazit. Válec je připevněn ke stojanu tak, že jeho osa svírá úhel 10° s vertikálou.

Měřicí válec je umístěn ve vnější válcové nádobě, kterou protéká voda z oběhového termostatu. Termostat umožňuje měření teplotní závislosti viskozity zkoumané kapaliny. Teplotu lze kontrolovat na teploměru, který je umístěn přímo v nádobě protékané vodou. Je k dispozici několik teploměrů s různými rozsahy.

Měřicí válec spolu s vnější temperovanou nádobou lze překlápět, aby bylo možno vrátit kuličku do startovní pozice před zahájením dalšího měření. Válec je na obou koncích uzavřen zátkou, z nichž jedna obsahuje kapiláru a malou nádržku. Pomocí této zátky jsou eliminovány nežádoucí změny tlaku ve zkoumané kapalině.

Při přípravě měření nejdříve nalijeme cca 45 ml zkoumané kapaliny do měřicího válce (hladina kapaliny je asi 20 mm pod okrajem válce). Dále do válce vhodíme vhodnou kuličku. Po zasunutí zátky s kapilárou musí kapalina sahat těsně ke kapiláře. Vzorek v měřicím válci nesmí obsahovat vzduchové bubliny. Před zahájením vlastního měření necháme kuličku několikrát projet měřicím válcem, abychom zajistili teplotní homogenitu vzorku.

Výběr kuličky se provádí podle viskozity zkoumané kapaliny na základě tabulky 1. Někdy je nutné použít dvě různé kuličky, abychom pokryli širší rozsah viskozity (např. měříme-li teplotní závislost viskozity). V tomto případě vhodíme do měřicího válce obě kuličky najednou, menší musí být vhozena jako první.

č.	materiál	m [g]	ρ_1 [g.cm ⁻³]	d [mm]	K [mPa.cm ⁻³ g ⁻¹]	η [mPa.s]
1	sklo	4,61	2,229	15,81	0,01092	0,6-10
2	sklo	4,42	2,224	15,61	0,1025	7-130
3	ocel	16,12	8,125	15,59	0,1144	30-700
4	ocel	14,92	8,127	15,19	0,7061	200-4800
5	ocel	11,68	8,125	14,00	6,634	800-10000
6	ocel	5,66	8,126	11,00	33,38	6000-75000

Tab. 1: Parametry kuliček: m – hmotnost, ρ_1 – hustota, d – průměr, K – konstanta kuličky, η – rozsah dynamické viskozity, pro který je kulička vhodná.

Viskozimetr Haake může pracovat v teplotním rozsahu $-20 \div 120$ °C. Válec se zkoumanou kapalinou musí být v lázni zvolené teploty minimálně 10 minut, než je zahájeno měření. Čas, za který urazí kulička dráhu vymezenou kruhovými ryskami, měříme stopkami. Stopky spínáme v okamžiku, kdy dolní okraj kuličky prochází přes horní rysku, která se musí jevit jako úsečka.

Stopky vypínáme při průchodu dolního okraje kuličky přes dolní rysku, která se opět musí jevit jako úsečka. Měření provádíme několikrát, kuličku vracíme do startovní pozice překlopením válcové nádoby viskozimetru.

Dynamická viskozita η (v jednotkách mPa.s) se stanoví využitím vztahu

$$\eta = K(\rho_1 - \rho_2)t, \quad (11)$$

kde K je konstanta kuličky (viz tab. 1), ρ_1 hustota kuličky (tab. 1), ρ_2 hustota zkoumané kapaliny při dané teplotě a t je čas, za který kulička urazí dráhu vymezenou ryskami.

Je-li zkoumaná kapalina newtonovská, stanovená viskozita nezávisí na volbě kuličky. V případě neneutronovské kapaliny se může viskozita, kterou určíme měřením pomocí viskozimetru s padající kuličkou, lišit podle zvolené kuličky.

Literatura:

- [1] Brož J. a kol.: Základy fyzikálních měření I., SPN, Praha 1967, kap. 2.5.3, čl 2.5.3.3
- [2] Brož J. a kol.: Základy fyzikálních měření I., SPN, Praha 1983, kap. 2.4.3, čl 2.4.3.3
- [3] Brož J. a kol.: Základy fyzikálních měření II B., SPN, Praha 1974, kap. 10.3, str. 351-357