

POSPEŠENO OHLAJANJE OBDELOVANEC V VAKUUMU

Vincenc Nemanič, Bojan Zajec

Institut "Jožef Stefan", Odsek za tehnologijo površin in optoelektroniko, Jamova 39, 1000 Ljubljana, Slovenija

Za dovolj visoko hitrost odvijanja kemijskih in fizikalnih procesov, ki jih imamo namen nadzorovano napraviti na površini ali v globini obdelovancev, moramo njihovo temperaturo močno dvigniti. Pri tem naletimo na problem, kako preprečiti oksidacijo površin z zračnim kisikom. Ena od metod je ta, da zrak v procesni posodi nadomestimo z inertnim plinom, kar dosežemo z večkratnim oplakovanjem ali vmesnim odčrpanjem zraka. Druga metoda pa je, da pred procesom pripravimo v posodi visoki vakuum, s čimer delcem plina podaljšamo povprečno pot, kar zato omogoča poleg izvajanja dolgih procesov (npr. sintranje) tudi naprevanje in naprševanje materialov. V smislu znižanja porabe energije so postopki v vakuumu racionalni, saj so toplotne izgube z obdelovancev med segrevanjem razmeroma majhne, a zato tudi ohlajanje poteka počasi. Hitrost ohlajanja je določena s toplotno kapaciteto, delno z obliko obdelovanca, emisivnostjo površin, temperaturo zunanje stene posode in toplotnega stika obdelovanca s podlago. Pospešeno ohlajanje s tehničnimi plini pa največkrat ni dopustno, vse dokler temperatura ne pade na dopustno nizko vrednost. Proizvodni postopek, ki vključuje hlajenje v vakuumu do te temperature, je za proizvodnjo potraten zaradi slabe izrabe delovnega časa. Ohlajanje s čistim inertnim plinom pa je lahko razmeroma drago zaradi njegove visoke cene. Tehnologi se lahko tako zlahka znajdejo v dilemi, kako izbrati optimalni način ohlajanja obdelovancev, upoštevaje ceno "čakanja" in ceno čistega plina.

FIZIKALNE OSNOVE

V termodinamiki zadoščajo za opis stanja plina podatki o temperaturi, tlaku in prostornini, ki jih povezuje splošna plinska enačba, ki velja tem bolj natančno, čim bolj je plin razredčen. Pri transportnih pojavih v plinu pa je treba upoštevati velikost opazovanega sistema, saj le-ta nastopa v karakterističnih brezdimenzijskih ali značilnih izrazih. Pomožna količina, Knudsenovo število, $Kn = L_g/d \cdot L_g$ (povprečna prosta pot d je karakteristična dimenzija, npr. premer cevi ali posode) je eden od izrazov, ki natančneje opredelijo način prenosa termične energije. Plin, ki je v majhnem zaprtem volumnu, se vede

Tabela 1: Povprečne proste poti molekul dušika L_g v odvisnosti od tlaka pri temperaturi 300 K

p (mbar)	L_g (m)
10^3	$5 \cdot 10^{-8}$
1	$5 \cdot 10^{-5}$
10^{-3}	$5 \cdot 10^{-2}$
10^{-6}	50

zaradi pogostejših interakcij s posodo drugače kot isti plini, ki se pri enakem tlaku nahaja v veliki posodi. Oglejmo si v tabeli 1 povprečne proste poti za dušik (zrak) v neomejenem volumnu v odvisnosti od tlaka pri sobni temperaturi.

Zamislimo si, da je idealni plin zaprt med neskončni paralelni steni, vsaka na svoji temperaturi T_1 in T_2 . Razdalja med njima je enaka d . Za obravnavanje prenosa toplote so zanimiva tri območja vrednosti Kn¹:

1. Povprečna prosta poti med molekulami L_g je **dosti krajša** od razdalje med stenama, ($L_g \ll d$, $Kn \ll 1$), za pretok velja t. i. viskozni režim. Toplotno prevodnost plina (brez konvekcije) izrazimo:

$$\lambda_{\text{gas}} = \frac{1}{3} \rho C_v v_a L_g = A \sqrt{\frac{T}{M}} L_g p \quad (1)$$

kjer je ρ gostota plina, C_v specifična toplota pri konstantnem volumnu, v_a povprečna hitrost molekule, ki sledi iz Maxwelllove porazdelitve hitrosti, p tlak in M molska masa plina. V desnem izrazu so v konstanti A zbrane veličine, ki so manj bistvene, preostale pa so zapisane tako, da je nazorneje razvidna odvisnost od temperature in molske mase.

Večina trkov se zgodi v reži, saj so medmolekularni trki dosti pogostejši kot med molekulami in steno. Temperatura in gradient v tem prostoru sta definirana (četudi težko merljiva). **Toplotna prevodnost je sorazmerna produktu povprečne proste poti in gostote (oz. tlaka), ki je v širokem območju tlakov konstanta** ($10 - 10^6$ mbar). Za zrak pri tlaku 1 bar in pri temperaturi 300 K je $\lambda_{\text{zrak}} = 0,026$ W/(m K). **Zniževanje tlaka vse do nekaj mbar tako ne prinese bistvenega zmanjšanja prevodnosti plina.**

2. Povprečna prosta pot je **dosti daljša** od razdalje med stenama ($L_g \gg d$, $Kn \gg 1$); pri pretoku velja t. i.

molekularni režim. Toplotne prevodnosti kot fizikalne lastnosti plinu ne moremo pripisati, saj praznemu prostoru ne moremo pripisati temperature. Posledično tudi temperaturni gradient ne obstaja. Gostota toplotnega toka je odvisna od akomodacijskega koeficienta za obe steni, ki pove, kolikšen del energije molekula z dano hitrostjo preda steni (se akomodira na njeno temperaturo). Število trkov pa je sorazmerno s **tlakom** in korenom iz srednje temperature, $T = (T_1 + T_2)/2$. Če gostoto toka delimo z razdaljo med stenama, lahko reži sicer pripišemo analogno količino: **navidezno ali nepravno prevodnost**. Formalizem obravnavanja prenosa toplote razredčenega plina in sevanja v evakuirani reži sta si ob primerjavi analognih količin zelo podobna. Z nižanjem tlaka postane sevanje prevladujoči del pri prenosu energije v vakuumu.

Predpostavimo, da je tlak v reži med stenama s temperaturo T_1 in T_2 dovolj nizek, da velja zgornji pogoj za molekularni režim. Gostoto toplotnega toka je podana z enačbo:

$$j_{gas} = \left(\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \right) \sqrt{\frac{R}{8\pi MT}} \frac{\alpha}{(2 - \alpha)} (T_1 - T_2) p \quad (2)$$

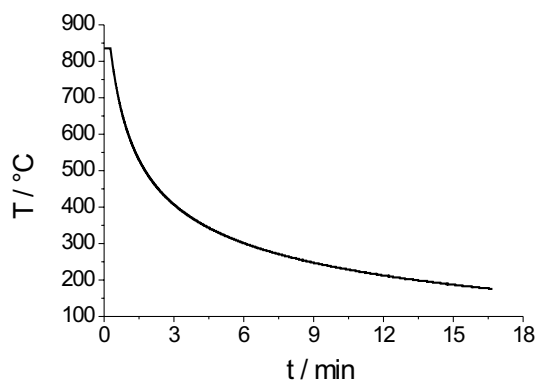
γ razmerje specifičnih toplot plina, R splošna plinska konstanta, T srednja temperatura in α akomodacijski koeficient (= veličina, analogna emisivnosti pri sevanju) za vrsto plina in izbrano površino. Predpostavili smo, da je le-ta enak za obe površini. Gostota toka je tako odvisna od absolutne srednje temperature, od razlike temperatur sten, šibka odvisnost je v α in za dvo- in večatomske molekule tudi v γ . Vrednost izraza (2) je za zrak pri 300 K in pri tlaku 10^{-4} mbar le še $j_{gas} = 0,005$ W/(m² K). To spoznanje že več kot stoletje uporabljamo v vakuumsko izoliranih posodah (termos steklenice itd).

3. ($L_g \gg d$, $Kn \gg 1$) V vmesnem območju med omenjenima limitama, ko je razdalja med ploščama d primerljiva z L_g , lahko izraz za toplotno prevodnost podamo le približno ¹. Nedvomno pa moramo optimalni tlak v vakuumski posodi iskati v tem področju, saj se sprememba od zanemarljivo nizke vrednosti v visokem vakuumu dvigne do skoraj konstantne vrednosti pri visokem tlaku. Od inertnih plinov je nedvomno najprimernejši helij, saj ima majhno molsko maso. Zaradi zahtevnosti večine izračunov, ki bi dali številске izraze šele ob dobrem poznavanju vseh površin, sklopitev itd., je v praksi nadaljnjo optimizacijo najbolje opraviti s poskušanjem na čim bolj enakih obdelovancih. Če je naš predmet 1 cm od stene posode, je zahteva za $Kn = 1$ izpolnjena pri tlaku

v območju $p \cong 10^{-2}$ mbar. Optimalni tlak leži verjetno leži v območju 1 mbar. Za vsakokratno ohlajanje bi porabili tako le majhen delež plina, ki bi ga sicer porabili za nebitveno hitrejšo ohlajanje pri tlaku 1 bar.

PRAKTIČNI PRIMER

Za zgled majhne hitrosti ohlajanja v visokem vakuumu je na sliki 1 podan potek ohlajanja le 1 mm debelega vzorca, dimenzij 2 cm × 4,5 cm, iz avsternitnega nerjavnega jekla AISI 316L. Vzorec je bil induktivno segret v vzdolžno postavljeni kremenovi cevi z notranjim premerom 22 mm, ta pa je bila vstavljena v stekleno cev (notranji premer 26 mm), ki je bila konvekcijsko hlajena z zrakom. Temperatura je bila merjena s točkasto privarjenim termočlenom. Vzorec je bil segret na 840 °C, ob segrevanju je izgubil del oksidov in postal zaradi izhajanja vodika iz globine svetlejši. Zunanja temperatura stekla ni presegla 50 °C. Za temperaturo kremenata tako nimamo zanesljivega podatka, nedvomno pa je bila njegova temperatura čez čas primerljiva s temperaturo obdelovanca, kar je skupno zalogo toplote povečalo. Iz vsakdanje izkušnje vemo, da bi enako debel vzorec na zraku ohladili nekajkrat hitreje, površina pa bi bila močno oksidirana. Pr večanju dimenzij vzorca iz istega materiala se značilni čas ohlajanja v vakuumu dramatično poveča, saj vsebuje izraz kvadrat linearne dimenzije (debelina plošče, premer valja itd) ².



Slika 1: Potek ohlajanja 1 mm debelega vzorca nerjavnega jekla, segretega na 840 °C. Tlak med ohlajanjem je bil v območju $7 \cdot 10^{-4}$ mbar, prevladujoč plin je bil vodik.

LITERATURA

¹J. M. Lafferty: Foundations of Vacuum Science and Technique, John Wiley & Sons, Inc., 1998

²J. P. Holman, Heat transfer, McGraw-Hill Book Company, 1992