

## Skúmanie nabíjateľnosti kremičitých minerálov

Karol Marton<sup>1</sup> a Araujo Jose<sup>2</sup>

### Characterization of charging ability of the silicate minerals.

To separate granular material it is important to know its charging ability. In this contribution the method of charge determination of particles due to the triboelectric charging is described. Three different materials are applied for the transport of powders. They are: metal (iron), polyvinylchloride (PVC) and rubber.

The classification of used silicate minerals was carried out based on the theory of electrical double layer. The results are presented in the form of current-time curves which characterize the amount of charge in the vessel with exactly defined specific capacity.

**Key words:** electrics charge, particles, silicates, capacity, electrokinetic charging, capacitor.

### Úvod

Pri výskume elektrofyzikálnych vlastností kremičitých minerálov určených na separáciu vo vysokonapäťovom poli (DC) je nevyhnutne potrebné poznať povrchové vlastnosti častíc.

Tieto vlastnosti úzko súvisia s fyzikálno-chemickou stavbou látky v nadväznosti na vytváranie sa elektrickej dvojvrstvy na ich povrchu.

Stav povrchu častíc je závislý tiež od polarizovateľnosti častíc. Bude ovplyvnený elektrokinetickými javmi (triboeфекt) alebo polarizovateľnosťou v homogénnom elektrickom poli vytvorenom zdrojom jednosmerného vysokého napätia. V podstate sa jedná o získanie elektrických nábojov na povrchu kremičitých minerálov, určených na separáciu. Pre naše účely je výhodné využiť kontaktný - elektrokinetický spôsob nabíjania častíc počas ich transportu do priestoru merného kondenzátora. Na základe presne definovanej kapacity merného kondenzátora je možné zabezpečiť kontinuálny záznam závislosti elektrického náboja na čase a tým stanoviť veľkosť náboja presne určeného množstva transportovaných prachových častíc.

Keďže v technickej praxi sa vyskytujú materiály s rôznymi chemickými vlastnosťami, boli navrhnuté tri druhy transportných podávačov:

- technická guma transportéra,
- PVC materiál (polyvinylchlorid),
- technické železo (Fe).

### Vznik elektrických nábojov na časticiach práškových materiálov

Častice práškových látok sa dostávajú do separačného zariadenia z podávača prášku. Z toho dôvodu je potrebné počítať s tým, že pri akejkoľvek zmene polohy častice v závislosti na čase pri jej interakcii s časticami susednými, prípadne so stenou trubice, dochádza k vzniku elektrického náboja na jej povrchu. Z toho vyplýva, že častice práškových materiálov sa dostávajú do priestoru separátora elektricky nabité.

Vytváranie a zhromažďovanie sa nábojov na aplikovanom materiáli úzko súvisí s týmito postupmi:

- Musí dôjsť ku kontaktu povrchov dvoch telies, v dôsledku čoho sa vytvorí elektrická dvojvrstva. Veľkosť náboja a jeho polarita na mieste styku je úzko spätá s hodnotou výstupnej práce každej látky.
- Jeden z kontaktujúcich sa povrchov musí byť z dielektrického materiálu. Náboje ostanú na povrchu oddeľujúcich sa častíc iba vtedy, ak doba potrebná na prerušenie styku bude kratšia, než doba relaxácie nábojov. Tento jav v značnej miere určuje hodnotu nábojov na povrchu častíc.

Rozoberme model za určitých zjednodušujúcich predpokladov. Majme potrubie, do ktorého vstupujú častice elektricky neutrálne. Pri transporte častíc dochádza k zrážkam v oblasti pružných deformácií so stenou trubice. Dá sa predpokladať, že chaotický pohyb častíc môže mať turbulentný charakter.

Postup relaxácie elektrického náboja pri prerušení styku pevnej dielektrickej čiastočky guľovitého tvaru od položky (steny trubice) je nasledovný (Moore, 1978): V okamžiku kontaktu náboj častice bude mať hodnotu  $Q_c = \sigma_{dv} \cdot S_k$ , pričom:  $S_k$  - plocha styku dvoch telies,  $\sigma_{dv}$  - hustota elektrického náboja v elektrickej dvojvrstve.

<sup>1</sup> Prof. Ing. Karol Marton, DrSc., F EI, TU v Košiciach, [Karol.Marton@tuke.sk](mailto:Karol.Marton@tuke.sk)

<sup>2</sup> Ing. Araujo Jose, Fakulta BERG, TU v Košiciach, [Araujo.Jose@tuke.sk](mailto:Araujo.Jose@tuke.sk)

(Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 4. 10. 2004)

V okamihu oddelenia sa častice od povrchu dielektrika, sa náboje čiastočne rekombinujú buď cez povrchový odpor, ako aj v dôsledku absorpcie iónov, ktoré sa vytvárajú v mikrovýboji plynu, ktorý vzniká v medzere medzi oddeľujúcimi sa časticami v dôsledku vzniku silného elektrického poľa.

Ak majú povrchy pomerne nízky elektrický odpor, prípadne rýchlosť akou sa od seba oddeľujú je malá, potom k neutralizácii (rekombinácii) náboja dochádza predovšetkým prostredníctvom ohmického odporu. V prípade vysokých ohmických odporov k rekombinácii nábojov dochádza predovšetkým pôsobením výbojových procesov v medzerách medzi stýkajúcimi sa povrchmi.

Náboj častice po prerušení styku dvoch povrchov môžeme potom vyjadriť:

$$Q_c = \sigma_{dv} \cdot S_k - Q_v - Q_i \quad [ C ] \quad (1)$$

kde  $Q_v$  - náboj, ktorý odtieká cez ohmický odpor kontaktujúcich sa povrchov,

$Q_i$  - hodnota náboja, ktorý sa neutralizuje v dôsledku ionizačných procesov, prebiehajúcich v priestore medzi oddeľujúcimi sa povrchmi.

Relaxáciu náboja spôsobenú vodivosťou povrchov styku počas prerušenia kontaktu môžeme popísať rovnicou :

$$\gamma \cdot \mathbf{E} = - \frac{d\sigma}{dr_k} \cdot v, \quad [ A \cdot m^{-1} ] \quad (2)$$

kde E - intenzita elektrického poľa, podmieňujúca relaxáciu náboja,  
 v - rýchlosť častice,  
 $r_k$  - polomer kontaktujúcej sa plochy,  
 $\gamma$  - merná vodivosť kontaktu.

Riešením vyššie uvedenej rovnice dostávame:

$$\sigma = \sigma_{dv} \cdot e^{\frac{\gamma \cdot r_k}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot v}} = \sigma_{dv} \cdot e^{\frac{1}{K}} \quad [ C \cdot m^{-1} ] \quad (3)$$

V exponente rovnice hustoty náboja vystupuje relatívna permitivita prenášanej častice. Zároveň pomer vodivosti a permitivity udáva časovú konštantu, ktorej hodnota je veľmi dôležitá pri aplikácii fyzikálnych poznatkov. Keď ďalej analyzujeme odvodenú rovnicu, potom dospejeme k týmto záverom: Maximálna hustota náboja na povrchoch stýkajúcich sa telies po ich oddelení bude pri  $\gamma r_k = 0$ , to znamená  $r_k = 0$  alebo vodivosti nekonečne malej  $\gamma \rightarrow 0$ . Najmenšia hustota nábojov bude pri veľmi malých rýchlostiach častíc, čiže  $v \rightarrow 0$  alebo pri  $\gamma r_k = \rightarrow \infty$ . Exponent v rovnici poukazuje vlastne na intenzitu elektrizovateľnosti častíc a zároveň charakterizuje prebiehanie dvoch procesov: konvekciu nábojov, ako výsledok ich mechanického transportu a relaxáciu. Náboj na oddelených povrchoch bude narastať so zväčšujúcim sa koeficientom K v exponente ( $K = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot v}{\gamma \cdot r_k}$ ). S rozmerom dotykovej plochy sa zvyšuje hustota náboja a približuje sa pri  $r_k \rightarrow 0$  k hustote náboja elektrickej dvojvrstvy.

### **Teoretická úvaha o nabíjaní častíc v mernom kondenzátore**

V dôsledku kinetiky častíc, teda aj pri dotyku dvoch látok, majúcich elektropozitívne, resp. elektronegatívne vlastnosti vzniká nabíjanie makročastíc elektrickými nábojmi. V závislosti na čase dochádza k saturácii náboja na povrchu, čo vyjadríme rovnicou (Horváth, Berta, Pohl, 1984):

$$i_0 = \frac{dQ}{dt} = i_c + i_R \quad [ A ] \quad (4)$$

Tento jav sa dá znázorniť aj RC modelom na obr. 1

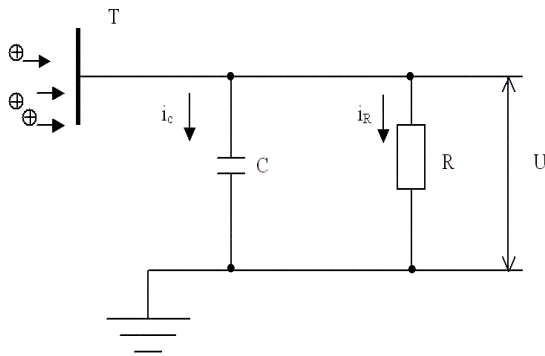
Prúd  $i_c$  závisí od rýchlosti prúdenia (prenosu) častíc ako aj od ich koncentrácie. Častice zachytávané terčíkom T nabíjajú kapacitu útvaru a vytvárajú tok prúdu odporom R, charakterizujúcim vodivosť dielektrika (izolačnej látky). Tento proces môžeme vyjadriť diferenciálnou rovnicou, ktorá poukazuje aj na napäťové pomery na útvare:

$$C \cdot \frac{dU}{dt} + \frac{U}{R} = i_0 = i_C + i_R \quad [A] \quad (5)$$

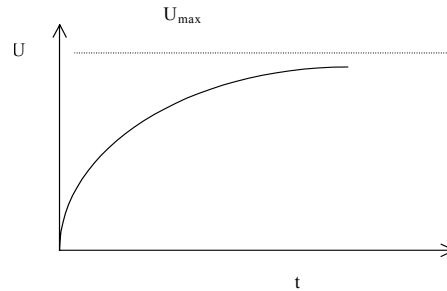
Riešením tejto rovnice je výraz pre napätie:

$$U(t) = i_0 \cdot R \left( 1 - e^{-\frac{t}{R \cdot C}} \right) \quad [V] \quad (6)$$

Grafickým obrazom tohoto vyjadrenia je krivka na obr. 2, ktorá poukazuje na význam RC člena v exponente. Vyjadruje časovú konštantu materiálu, charakterizujúcu dobu, potrebnú na odvedenie náboja.



Obr. 1. Model tvorený RC článkom  
Fig. 1. RC cell model



Obr. 2. Nabíjanie sa kapacitného útvaru  
Fig. 2. Capacitor charging

Maximálne (saturačné) napätie na odpore R bude:

$$U_{\max} = i_0 R \quad [V] \quad (7)$$

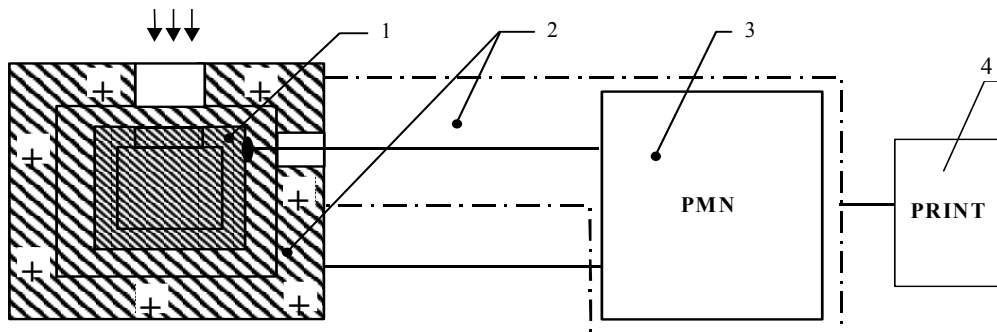
Čím sa dá vysvetliť závislosť napätia od vodivostných vlastností aplikovaného materiálu. Maximálny náboj  $Q_{\max}$ , nazhromaždený na RC útvaru bude:

$$Q_{\max} = i_0 R C \quad [C] \quad (8)$$

Týmto výrazom sa dá vyjadriť aj vzťah náboja k veľkosti kapacity útvaru C.

### Meranie elektrostatických vlastností prachových častíc

Prášok nabitý elektrickým nábojom nechajme padat' do nádoby z vodivého materiálu cez úzky otvor. Táto nádoba je umiestnená v ďalšom kryte, s ktorým vytvára kapacitný útvar. Elektricky nabité častice vyvolávajú v dôsledku influencie náboj, ktorý je možné merať nami zhotoveným prístrojom. Schéma zariadenia je na obr. 3 (Marton, 1974).



Obr. 3 Schéma zariadenia pre meranie elektrických vlastností prachových materiálov.  
Fig. 3 Scheme of equipment for the measurement of electric properties of powder materials.

Vysvetlivky:

- 1 - nádoba na zachytávanie prášku,
- 2 - tienenie,
- 3 - prístroj na meranie náboja,
- 4 - zapisovač.

Pri definovanej kapacite zariadenia je možné náboj pri známom napätí voči zemi presne stanoviť podľa vzťahu:

$$Q = C \cdot U, \quad [C; F, V] \quad (9)$$

Kde:

- Q - množstvo náboja v prášku,
- C - kapacita nádoby,
- U - napätie na mernom kondenzátore.

Na meranie náboja práškových častíc sme použili merný kondenzátor, ktorý pozostáva z dvoch valcov sústredene uložených. Veká vnútorného valca tohto kondenzátora sú vyrobené tak, že sa dajú na valec voľne naskrutkovať. Na vrchnom veku je v strede otvor na prívod prášku a prebytočného vzduchu. Na spodnom veku je na tomto mieste vyrobený strediaci kolík. Vonkajší valec merného kondenzátora je pevne pripevnený k izolačnej podložke, od ktorej je odizolovaný teflonovými izolačnými krúžkami. Vnútorý valec zapadá pomocou strediaceho kolíka do otvoru vyvítaného v teflonovej izolačnej podložke, ktorá je v strede vonkajšieho valca. Tým je valcový kondenzátor dokonale vystredený.

Meraním na kapacitnom mostíku pri rôznych frekvenciách bola zistená kapacita merného kondenzátora, hodnotou 167 pF. Prachové častice z jednotlivých dokonale vysušených vzoriek boli vysypávané do merného kondenzátora po transportnom vodítku, čím sme zabránili vzniku parazitných elektrostatických nábojov. Doba vysypávania sa odporúča na 5 sekúnd a musí byť udržiavaná na konštantnej hodnote.

Znamienko nábojov, vznikajúcich na povrchu stýkajúcich sa látok sa vo väčšine určovalo experimentálne. Mnohí autori vypracovali súpis izolačných látok na základe skúmania ich fyzikálnych vlastností, v dôsledku čoho vznikne takzvaný elektrizačný rad. Látky boli usporiadané podľa veľkosti a znamienka ich kontaktného potenciálu pri trení s oceľou. Pretože sklon k separácii nábojov a polarita závisí od kontaktného potenciálu oboch látok, môžeme povedať: materiály na koncoch radu vykazujú výrazný sklon nabíjať sa kladne alebo záporne; materiály v strede tabuľky sa nabíjajú slabo, polarita je nevykázaná (Marton, 1989).

### Výsledky a diskusia

Na základe princípu nabíjateľnosti častíc bo zvolený nasledovný postup pri meraní: z prachových separovaných minerálov boli odobraté vzorky o definovanom objeme 40 ml a hmotnosti, ktorá prislúchala tomuto objemovému množstvu.

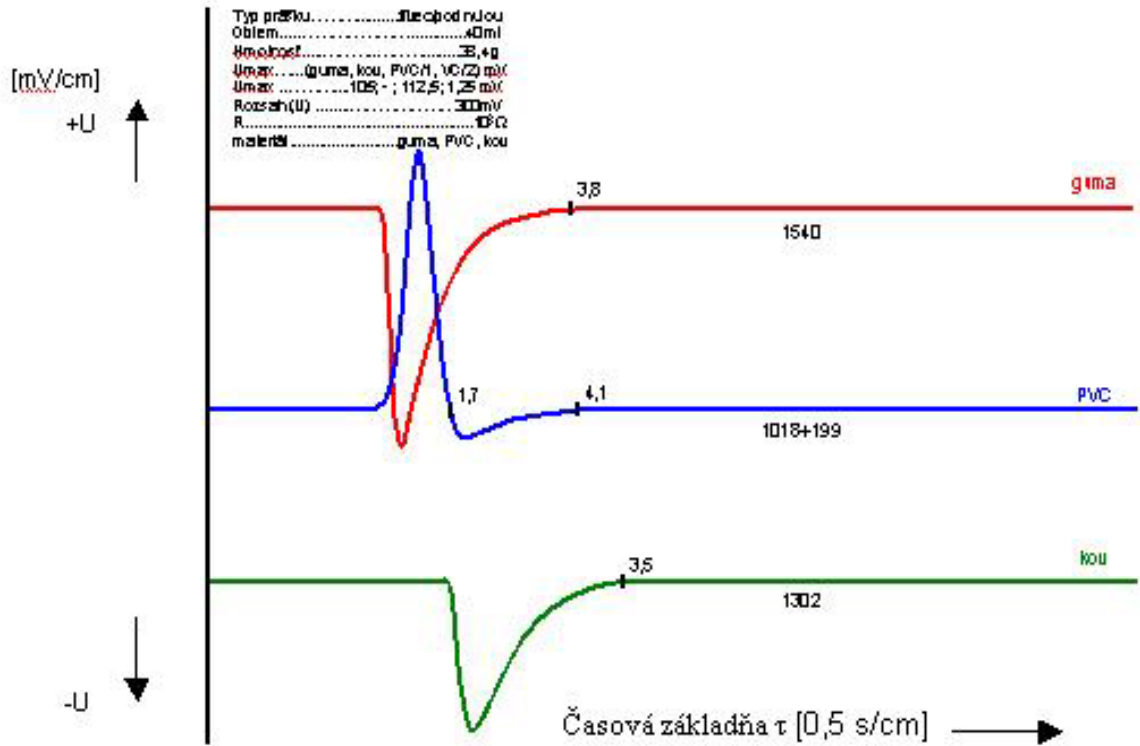
Z odmerky (anorganické sklo zo štruktúrnou polarizáciou) boli dopravované práškové minerály do merného kondenzátora v presne definovanom čase.

Častice minerálu v dôsledku kinetického javu získali náboj a odovzdali ho koaxiálnemu meraciemu kondenzátoru. Tento proces sa prejavil prúdovým impulzom, v závislosti na čase, ktorý zodpovedal veľkosti náboja vyjadreného výrazom

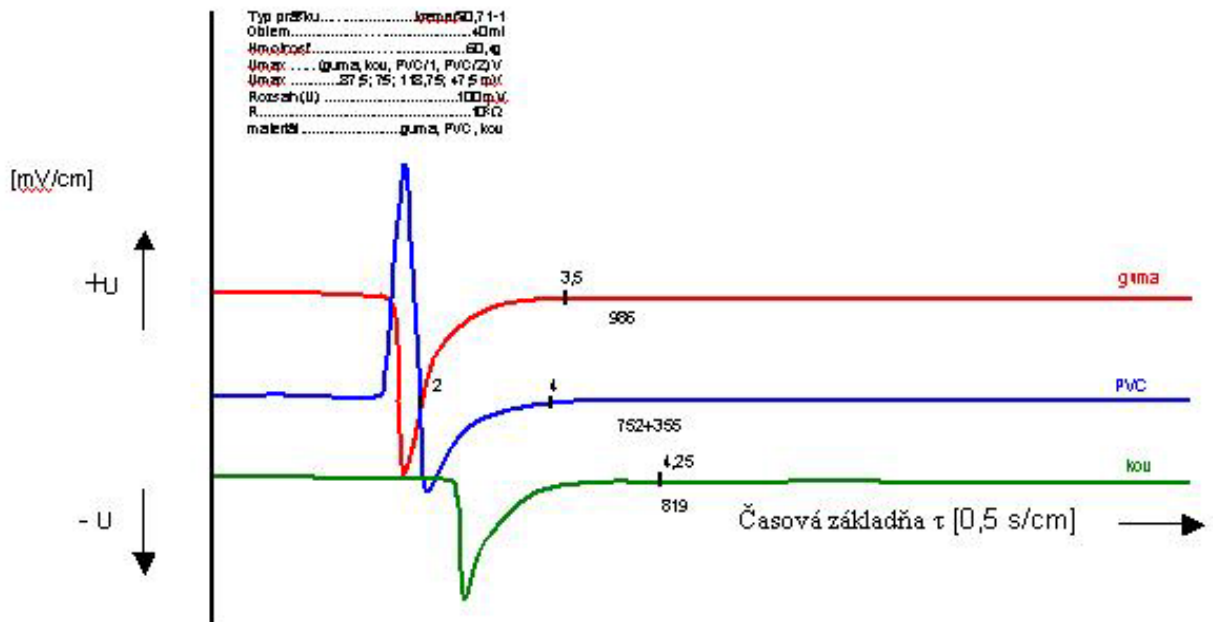
$$Q = \int i dt \quad [C; A, s] \quad (10)$$

Podľa očakávania mali získané krivky impulzný charakter odpovedajúci času vysypávania práškového minerálu, s prudkým nárastom čela impulzu a s miernym poklesom po doznení množstva sypaného prášku.

Znamienko nábojového impulzu záviselo od podložky, s ktorou sa materiál stýkal. Pri separovaní na troch podložkách: guma, PVC, kov bolo pozorované, že pri styku minerálu s PVC bol zaregistrovaný opačný typ náboja, pričom dochádzalo tiež k prepólovaniu častice, čo sa prejavilo na krivkách za kmitom do opačnej polaroty. Tento jav čiastočne ovplyvnil aj separáciu, keďže podávač bol z tvrdého PVC materiálu. Pre ilustráciu uvedieme dve závislosti charakterizujúce nabíjateľnosť práškov v prípade minerálov živec a kremeň. Tieto závislosti sú zobrazené na obr. 4 a obr. 5.



Obr. 4. Závislosť napätia  $U$  na kapacite  $C$  pri vsypávaní zrníček živca.  
 Fig. 4. Dependence of voltage  $U$  on capacity  $C$  at pouring feldspar grains.



Obr. 5. Závislosť napätia  $U$  na kapacite  $C$  pri vsypávaní zrníček kremeňa.  
 Fig. 5. Dependence of voltage  $U$  on capacity  $C$  at pouring quartz grains.

Môžeme konštatovať, že merania pre živce a kremeň boli reprodukovateľné a prispeli k zaradeniu týchto práškov z hľadiska kvalitatívneho a kvantitatívneho do radu, na základe ktorého je možné optimalizovať separačný proces.

### Záver

Popísaný spôsob merania nabíjateľnosti práškových častíc makroskopickej veľkosti patrí medzi klasické meracie metódy. Využíva sa pritom správny fyzikálny fenomén, vychádzajúci z elektrokinetiky transportovaných častíc. Pri súčasných poznatkoch z monitorovacej techniky, umožňujúcej detailné snímanie generovaných nábojov na povrchu kremičitých minerálov, je možné bezprostredne vyhodnotiť z kvantitatívneho hľadiska integrálny náboj v objeme vsypaného prášku. Experimentálne boli preskúvané všetky typy a rôzne zrnitosti poskytujúcich práškov a bol urobený výber podložky pre styk: vibračný podávač – transportované médium, s orientáciou na tvrdý polyvinylchlorid (PVC) polárneho charakteru. Tento typ vibračného podávača bol aplikovaný aj v systéme lineárneho separátora.

### Literatúra - References

- Moore, A., D.: *Electrostatics and its Applications*, John Wiley and Sons, *New York*, 1973 *Budějovice*, 1978.  
Horváth, T., Berta, J., Pohl, J.: *Az elektrosztatikus feltöltődések*, *Muszaki Könyvkiadó Budapest*, 1984.  
Marton, K.: Príspevok k štúdiu mechanizmu nanášania práškov, *Statická elektrina 78,DT České Budějovice*.  
Marton, K.: Laboratórne praktikum z elektrotechnických materiálov, *ES VŠT Košice*, 1974.  
Marton, K.: Štúdium unipolárneho korónového vývoja a jeho využitie v praxi, *Doktorská práca, SVŠT Bratislava 1989*.