


Výbuchové parametry uhelného prachu za nestandardních podmínek

 30.09.2019

COAL DUST Explosion Parameters AT NONSTANDARD CONDITIONS

Jana Spáčilová¹, Jan Skřínský^{2*}, Ján Vereš², Stanislav Bajer²

¹Fakulta strojní, VŠB-TU Ostrava, 17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava, Česká republika, e-mail: jana.spacilova.st@vsb.cz

²Výzkumné energetické centrum, VŠB-TU Ostrava, 17. Listopadu 15/2172, 708 00 Ostrava, Česká republika; e-mail: jan.skrinsky@vsb.cz

výbuchové charakteristiky

uhelný prach

uhlí

fosilní paliva

Abstrakt

Oblast zabývající se procesy výbuchu je velice žádoucí z pohledu ochrany zaměstnanců před účinky výbuchu v souladu s Evropskou direktivou ATEX 137 a také ve vztahu k prevenci a minimalizaci možných škod souvisejících s účinky výbuchu na technologie v energetice. Cílem práce je analyzovat a experimentálně potvrdit vliv počátečních podmínek na výbuchové parametry směsí uhelného prachu. Dílčími cíli jsou sestavení experimentální aparatury pro měření, kalibrace přístroje certifikovanými materiály, optimalizace měřicího systému pro reálné podmínky. Příprava vzorků pro laboratorní měření. Změření výbuchových parametrů za standardních a reálných podmínek a diskuse odchylek výsledků založená na výsledcích experimentálních studií. Návrh zlepšení experimentálního zařízení. Výsledky je plánováno uplatnit v ČR přednostně na energetiku, avšak budou k dispozici i pro další průmyslové sektory.

Klíčová slova: výbuchový parametr, uhlí, palivo

Abstract

The explosion process area is highly desirable from the point of view of protecting workers from the effects of explosion in accordance with the European ATEX Directive 137 and also in relation to the prevention and minimization of potential damage related to explosion effects on energy technologies. The aim of this work is to analyze and experimentally confirm the influence of initial conditions on explosion parameters of coal dust mixtures. Partial goals are the creation of experimental apparatus for measuring, calibration of the instrument with certified materials, optimization of the measuring system for real conditions. Preparation of samples for laboratory measurements. Measurement of explosion parameters under standard and real conditions, and discussion of results deviations based

on experimental studies. Improvement of experimental equipment. The results will be used in the Czech Republic primarily for energy, but will also be available for other industrial sectors.

Keywords: explosion parameter, coal, fuel

Přiját k publikování / Received for publication 24. 5. 2019

1. Úvod

Nebezpečí výbuchu hrozí tam, kde hořlavý prach vzniká, skladuje se nebo se zpracovává a dostane se do směsi se vzduchem. Výbuch prachové disperze ve směsi se vzduchem je velmi rychlá chemická reakce hořlavé složky s oxidační látkou, při které vzniká velké množství tepelné energie za podmínek, které umožňují jeho okamžitou přeměnu na mechanickou energii. Při výbuchu vznikají pevné a plynné zplodiny, které se působením tepelné energie ohřívají na vysokou teplotu a díky expanzi konají mechanickou práci. Kvantifikace generovaného nárůstu tlaku patří mezi jednu ze základních a stále otevřených úloh při charakterizaci fyzikálních, resp. fyzikálně-chemických jevů souvisejících s procesy výbuchu. Dobrá znalost podmínek započítání chemické reakce a podmínek ovlivňujících šíření hoření v hořlavé směsi na základě znalostí výbuchových parametrů může jednak výrazně přispět k řešení úlohy identifikace rizik v průmyslu s nebezpečnými látkami ve formě prachu, jednak nám může poskytnout řadu informací týkajících se elementárních principů chemismů výbuchu. Výzkum, prezentovaný v tomto článku, je úzce spojen se současným stavem poznání a řešení problematiky v EU. Současný výzkum EU v oblasti výbuchových parametrů je primárně zaměřen na standardní laboratorní podmínky a tím je potlačena komplexnost nazírání na daný problém. Výsledky výzkumu prováděné v oblastech studia výbuchových parametrů prachů ukazují, že v současnosti jsou pro výzkum používány převážně dva objemy výbuchových autoklávů, odbornou veřejností přijaté jako standardní a to 0,02 m³ a 1 m³. Jako referenční je zkoumán prach niacinu (kyselina nikotinová), prach lycopodia (spor definovaného průměru a konstantního velikostního rozložení rostliny plavuně vidlačky) a prach Pittsburského uhlí. Základními parametry jsou hodnoty maximálního výbuchového tlaku a deflagrační index [1].

Fosilní paliva jsou v současné době jedním ze základních energetických zdrojů, se kterými se počítá i do budoucna. Proto je nezbytné zabývat se problematikou výbuchů uhelného prášku. Jako prevence výbuchu prachu se zavádějí protivýbuchová opatření. Jako příklad konkrétních studií výbuchových parametrů uhelných prachů lze dohledat černouhelný multiprach a Pittsburské uhlí. Výbuchové parametry uvedených látek jsou shrnuty v tabulce 1.

UHELNÝ PRACH [-]	P_{MAX} [BAR]	DP/DT [BAR/S]	K_{ST} [BAR·M/S]
Antracit sibiřský	7,8	-	41
JSW Budryk	6,9	558	151
Ruské uhlí	6,5	-	67
OKD Lazy	6,6	-	123
Uhlí Darkov	6,5	333	90
Pittsburské uhlí	7,0	430	117

Tabulka 1. Výbuchové parametry uhelných prachů

Na základě výsledků uvedených studií lze konstatovat, že všechny parametry byly stanoveny pro atmosférické

podmínky a chemickými iniciátory. Nelze stanovit, jaký byl použit rozvířovací systém. Jako dvě nejzávažnější otázky týkající se postupu měření jsou iniciační doba a rozvířovací tlak. Tyto parametry jsou normativně fixovány. Z hlediska principu nebezpečnosti materiálu, který lze kvantifikovat výbuchovými parametry, však je možné prozkoumat, zda tyto fixní hodnoty poskytují opravdu nejkonzervativnější výsledky. Předmětem řešení článku bude podrobné studium uhelných směsí prachů ve směsi se vzduchem za nestandardních podmínek. Zmíněná oblast, zvláště pak část týkající se různých počátečních teplot, nebyla dosud pro případ výbuchu uhelných směsí dostatečně prozkoumána. Získané informace mohou významně přispět k prevenci výbuchu prachu zavedením protivýbuchových opatření a k objasnění tvorby výbuchového tlaku různými fyzikálně-chemickými mechanismy.

2. Popis experimentálního zařízení

Použité zkušební zařízení bylo vyrobeno firmou OZM Research, s.r.o. (Hrochův Týnec, Česká republika). Jedná se o nádobu kulového tvaru o objemu $0,02 \text{ m}^3$ konstruovanou tak, aby vydržela přetlak 30 bar. Systém pro rozvířování prachu se skládá z nádoby o objemu $0,6 \text{ dm}^3$, která je uzavřena víkem. Nádoba je dnem připojena ke spojovacímu potrubí, které je opatřeno rychloventilem. Samotný rychloventil je následně zespodu připojen potrubím k tělu výbuchové komory. Výbuchový autokláv je vybaven dvěma tlakovými čidly pro měření dynamického tlaku v závislosti na čase. Tlaková čidla mohou měřit dynamický tlak do 25 bar při teplotě do $200 \text{ }^\circ\text{C}$ s přesností $0,00125 \text{ bar}$. Chlazení nebo ohřev autoklávu jsou realizovány teplotním regulačním systémem (Presto A30, Česká republika). Malý objem média zajišťuje rychlou reakci na změnu teploty. Vnitřní okruh výměníku je vybaven chlazenou expanzní nádobou, která je určena k vyrovnávání objemových změn chladicího/topného média. Chladicím médiem výměníku je vzduch. Jako iniciační zdroj byly pro výbuchové zkoušky použity permanentní elektrická jiskra a elektricky aktivované chemické zapalovače. Energie zapalovače je 5 kJ . Energie je jmenovitá, kalorimetrická, odvozená od hmotnosti pyrotechnického prášku v zapalovači. Zapalovač se iniciuje elektrickou rozbuškou do 10 ms od iniciace. Po aktivaci chemický zapalovač uvolní hustý mrak velmi horkých částic s malým obsahem plynu. Kromě chemického zapalovače byla použita permanentní elektrická jiskra. Aby bylo dosaženo zapálení směsi, byla pro iniciaci ve výbuchových experimentech použita série zápalných jisker s efektivní hodnotou 10 kV a zkratovým proudem 40 mA s dobou výboje nastavenou na 200 ms . Ve vzduchu za atmosférických podmínek má takový zdroj energie na základě kalorimetrické a elektrických měření přibližně 10 W , což při době 200 ms odpovídá přibližně hodnotě energie 50 J . Tedy hodnotě přibližně 100 krát menší, než je hodnota energie chemického zapalovače. Výbuchový autokláv je ovládán pomocí programovací logické řídicí jednotky (model 5073A211, Siemens, Německo). Signály jsou z hlavní rozvodné skříně přenášeny přímo k jednotlivým akčním prvkům systému. Komunikace mezi uživatelem a programovací logickou řídicí jednotkou probíhá pomocí uživatelského programu (PROMOTIC, MICROSYS, spol. s.r.o.), který obsahuje veškeré potřebné informace pro provoz autoklávu a následně i pro vyhodnocování naměřených hodnot. Tímto zařízením byly stanoveny maximální výbuchový tlak rozvířeného prachu, maximální rychlost nárůstu výbuchového tlaku a deflagrační index [2].

3. Postup a vyhodnocení dat

Výbuchový tlak p_{ex} se stanoví pro každou koncentraci. Výbuchový tlak se vynese do grafu v závislosti na koncentraci. Tímto způsobem je nalezena maximální hodnota p_{ex} . Stanovení musí být provedeno minimálně pro dvě následující a dvě předchozí hodnoty od hodnoty maximální. Příkladem může být série 250 g/m^3 , 500 g/m^3 , 750 g/m^3 , 1000 g/m^3 , 1250 g/m^3 , kde p_{max} náleží 750 g/m^3 . Maximální hodnotu výbuchového tlaku nazýváme maximální výbuchový tlak p_{max} . Pokud tímto postupem není získána definitivní maximální hodnota, musí být zkušební série opakována v rozsahu maximální hodnoty výbuchového tlaku a za p_{max} je pak považován aritmetický průměr maximálních hodnot zjištěných v každé zkušební sérii [3]. Pro každou koncentraci se stanoví rychlost nárůstu výbuchového tlaku $(dp/dt)_{\text{ex}}$ a ta se vynese do grafu v závislosti na koncentraci. Tímto způsobem je nalezena hodnota $(dp/dt)_{\text{max}}$. Pokud tímto postupem není získána definitivní maximální hodnota, musí být zkušební série opakována v rozsahu maximální hodnoty rychlosti

nárůstu výbuchového tlaku a za $(dp/dt)_{\max}$ je pak považován aritmetický průměr maximálních hodnot zjištěných v každé zkušební sérii [4]. Na obrázku 1 je vzorový graf stanovených výbuchového parametrů Pittsburského uhlí v závislosti na čase.

Obrázek 1. Vzor stanovení výbuchového parametrů v závislosti na čase.

Parametr t_d na obrázku 1 je čas od začátku měření do otevření ventilu a rozvíření prachu. V tomto případě byl počátek rozvíření v čase $t_d = 22$ ms. Parametr t_1 je čas od iniciace k dosažení maximálního výbuchového tlaku daného maximem oranžové křivky. V tomto případě byla jako iniciace použita permanentní jiskra iniciovaná v čase $t_v = 80$ ms od rozvíření prachu. Uvedené parametry jsou důležité pro porovnání podmínek k získání průběhů jednotlivých tlakových křivek.

4. Výsledky

4.1 Typ a energie iniciátorů

Obrázek 2. shrnuje výsledky porovnání iniciačních zdrojů, jmenovitě chemického iniciátoru s energií 5 kJ a elektrické jiskry s hodnotou 10 J.

Obrázek 2. Srovnání iniciačních zdrojů při změně koncentrace.

Porovnáním křivek na obrázku 2 získáme informace o vlivu iniciačního zdroje na zapálení prachovzduchových uhelných směsí. Seřazením výsledků výbuchového tlaku podle velikosti můžeme konstatovat, že nejvyšší hodnota výbuchového tlaku 7,0 bar odpovídá použití jednoho chemického iniciátoru pro 250 g/m^3 a nejvyšší hodnota výbuchového tlaku při použití permanentní jiskry je 6,9 bar pro 500 g/m^3 . Zajímavým zjištěním je fakt, že oba tyto výsledky leží v intervalu spolehlivosti statistických hodnot používaných pro validaci zařízení dvěma chemickými iniciátory. Pro srovnání, normativní hodnota p_{max} pro validaci Pittsburským uhlím je $7,0 \pm 0,7 \text{ bar}$ ($25 \text{ }^\circ\text{C}$, 1 bar). Podstata rozdílu v naměřených hodnotách spočívá v tom, že při používání chemických iniciátorů dochází k vytvoření proudu žhavých částic ve tvaru kužele, zatímco při použití elektrické jiskry se jedná o bodový iniciační zdroj. Maximální výbuchový tlak stanovený v uzavřené kulové nádobě o objemu $0,02 \text{ m}^3$ je závislý na tlakovém účinku chemických zapalovačů v důsledku malého objemu koule. Zatímco při použití elektrické jiskry, jako iniciačního zdroje, je tlakový účinek zanedbatelný.

4.2 Velikost částic

Obrázek 3. shrnuje výsledky porovnání maximální rychlosti nárůstu výbuchového tlaku pro různé velikosti částic vzorku. Vzorek byl síťován přes síta s velikostí částic s velikostí částic nacházející se v intervalu velikosti mezi síty (500 - 200, 200 - 100, menší než 100). Iniciačním zdrojem byl chemický zapalovač 5 kJ při koncentraci 250 g/m^3 .

Obrázek 3. Srovnání rychlostí nárůstu výbuchového tlaku při změně velikosti částic.

Z obrázku 3 je zřejmé, že s klesající velikostí částic roste hodnota maximální rychlosti nárůstu výbuchového tlaku. Dále lze vidět, že změna maximálních hodnot odpovídajících 500 μm a 200 μm je stejná, jako změna maximálních hodnot odpovídajících 200 μm a 100 μm . Z uvedeného lze konstatovat, že zatímco u prachových disperzí větších velikostí částic je nutné snížit jejich velikost o 300 μm k dosažení nárůstu o 50 bar/s, u menších částic lze dosáhnout stejného efektu snížením velikosti částic o 100 μm . Tento jev je dán velikostí povrchu, na kterém probíhá oxidace látky. Toto zjištění, lze však aplikovat pouze na uhelný prach, a to v mezi zrnitosti 500 - 100 μm .

4.3 Počáteční teplota

Obrázek 4. shrnuje výsledky z měření závislostí maximálního výbuchového tlaku na počáteční teplotě.

Obrázek 4. Závislost maximálního výbuchového tlaku na počáteční teplotě.

Ze zákona ideálního plynu vyplývá, že po zvýšení počáteční teploty se maximální výbuchový tlak sníží. To je způsobeno snížením koncentrace kyslíku na jednotku objemu prachového oblaku při daném tlaku s rostoucí počáteční teplotou. Na druhou stranu, při zvyšování počáteční teploty klesá minimální výbušná koncentrace prachu. Na obrázku 4 je uveden průběh výbuchového tlaku v závislosti na počáteční teplotě prachovzduchové směsi. Měření byla provedena vždy při koncentraci 250 g/m^3 , konstantním tlaku 1 bar a iniciační energii 5 kJ. Nejvyšší hodnota maximálního výbuchového tlaku je dosažena při počáteční teplotě směsi $5 \text{ }^\circ\text{C}$ a nabývá hodnoty 7,6 bar. Z Obrázku 5 je zřejmé, že maximální hodnota výbuchového tlaku s rostoucí počáteční teplotou klesá, přičemž při teplotě $25 \text{ }^\circ\text{C}$ je pokles již výrazný, jelikož výbuchový tlak dosahuje hodnoty 7,0 bar. Stejně výrazný pokles můžeme sledovat při počáteční teplotě $45 \text{ }^\circ\text{C}$, kdy výbuchový tlak dosahuje 6,6 bar. Tento trend neplatí při hodnotě dp/dt , kde tato hodnota se zvyšující se počáteční teplotou zůstává téměř konstantní.

5. Závěr

Cílem článku bylo analyzovat a experimentálně potvrdit vliv počátečních podmínek na výbuchové parametry směsí ve vybraném palivovém hospodářství. Byl proveden popis experimentální aparatury, jejích jednotlivých systémů a metodiky měření použité v práci. Byla provedena optimalizace systému pro měření za reálných podmínek počátečních teplot. Bylo změřeno více než 50 originálních záznamů závislosti tlaku na čase, ze kterých bylo možné získat výbuchové parametry: maximální výbuchový tlak a maximální rychlost nárůstu výbuchového tlaku. Na základě výsledků práce byly jednoznačně kvantifikovány: vliv iniciační energie, vliv velikosti částic a vliv počáteční teploty. V rámci budoucích studií plánujeme na základě výsledků získaných pro $0,02 \text{ m}^3$ provést vybraná měření v 50x větším objemu použitím $1,00 \text{ m}^3$ výbuchové komory dostupné na VEC, VŠB-TU Ostrava a stanovit vliv objemu na výbuchové parametry spolu s výše prezentovanými vlivy teploty a typu a energie iniciačních zdrojů.

6. Poděkování

Tato práce byla vypracována v rámci projektu „Inovace pro efektivitu a životní prostředí - Growth“, identifikační kód LO1403 za finanční podpory MŠMT v rámci programu NPU I a specifického výzkumu SP 2019/89.

7. Literatura

[1] PROUST, Ch.; ACCORSI, A.; DUPONT, L. Measuring the violence of dust explosion with the “20 l sphere” and with the standard “ISO 1 m³ vessel”: systematic comparison and analysis of the discrepancies. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2007, vol. 20, s. 599 606.

[2] *Výbuchová komora CA 20-L pro měření výbuchových parametrů prachových disperzí, plynů a par za standardních i zvýšených teplot: uživatelský manuál pro instalaci, provoz, údržbu a odstraňování problémů: ver. 2*. OZM Research, 21. leden 2016. Dostupný na vyžádání z: <http://www.ozm.cz/en/>.

[3] ČSN EN 14034-1+A1. *Stanovení výbuchových charakteristik rozvířeného prachu - Část 1: Stanovení maximálního výbuchového tlaku p_{max} rozvířeného prachu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.

[4] ČSN EN 14034-2 +A1. *Stanovení výbuchových charakteristik rozvířeného prachu - Část 2: Stanovení maximální rychlosti nárůstu výbuchového tlaku (dp/dt) max rozvířeného prachu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.

Vzorová citace

SPÁČILOVÁ, Jana ...[et al.]. Výbuchové parametry uhelného prachu za nestandardních podmínek. *Časopis výzkumu a aplikací v profesionální bezpečnosti* [online]. 2019, roč. 12, č. 2. Dostupný z: <https://www.bozpinfo.cz/josra/vybuchove-parametry-uhelneho-prachu-za-nestandardnich-podminek>. ISSN 1803-3687.

Autor článku:

[Bc. Jana Spáčilová](#)

[Ing. Jan Skřínský, Ph.D.](#)

[Ing. Ján Vereš, Ph.D.](#)

[Bc. Stanislav Bajer](#)