

# Esplosioni di polvere ed esplosioni di gas a confronto

## 1. Introduzione

La prima esplosione di polvere documentata è avvenuta il 14 dicembre del 1785 in un panificio di Torino, le cui finestre, cornici comprese, sono saltate in aria in seguito a un'esplosione di polvere di farina, innescata probabilmente da una lampada.

Da allora ce ne sono state tante altre, ma il fenomeno rimane molto meno conosciuto rispetto a quello delle esplosioni di gas. Basti pensare che nell'industria chimica, dove c'è una lunga tradizione nel trattamento dei pericoli legati al gas, spesso i rischi relativi alle esplosioni di polvere vengono considerati alla stregua di quelli delle esplosioni di gas.

Le proprietà esplosive della maggior parte dei gas sono ben documentate, con variazioni minime tra le diverse fonti. Anche per le polveri sono disponibili molti dati, ma possono esservi differenze enormi, dovute principalmente al fatto che le proprietà delle esplosioni di polvere non dipendono solo dalla formula chimica ma anche in maniera molto consistente da caratteristiche quali:

- Dimensioni delle particelle
- Distribuzione delle particelle
- Forma delle particelle
- Contenuto di umidità

Di conseguenza è opportuno prendere sempre con cautela i dati in letteratura relativi alle polveri.

Un frequente equivoco è rappresentato dalla convinzione che le particelle grosse non comportino rischi di esplosione. Ma tra le particelle grosse se ne trovano normalmente alcune fini, che possono rimanere in sospensione a lungo. Ad esempio, quando un silo per cereali viene riempito, la nube che viene a formarsi all'interno non è composta da chicchi sospesi in aria, ma da una finissima polvere di cereali. Pertanto, allo scopo di ottenere caratteristiche da esplosione di polvere, è pratica comune setacciare finemente, a 63  $\mu\text{m}$ .

## 2. Caratteristiche di esplosione

### 2.1. Limiti di esplosione

Perché una nube di gas esploda, il gas deve avere una concentrazione compresa tra il limite inferiore di esplosività (LEL) e il limite superiore di esplosività (UEL). Nel caso di molti gas le due soglie sono molto vicine tra loro. Ad esempio: per il propano l'intervallo va dal 2 all'11%, ed è molto più ampio solo per gas altamente esplosivi, come l'idrogeno (dal 4 al 75%).

L'intervallo è sempre molto ampio invece per le polveri. Il limite inferiore di esplosività di una polvere comune come quella di polietilene è di circa 15  $\text{g}/\text{m}^3$ , mentre quello superiore non si conosce esattamente ma è stimato tra i 2 e i 6  $\text{kg}/\text{m}^3$ . Ciò significa che mentre per un comune gas il rapporto tra UEL e LEL ha un valore pari circa a 5, questo nel caso di una polvere comune si aggira attorno a 100: **un intervallo di esplosività estremamente ampio**.

Una regola empirica approssimativa per determinare se una nube è esplosiva è la seguente: se non si riesce a vedere la propria mano in fondo al braccio teso, la nube è probabilmente esplosiva. Quindi una nube di polvere vicina al LEL è già molto densa e offre una visibilità estremamente limitata. Una nube di polvere con una concentrazione oltre l'UEL può essere facilmente preparata in condizioni di laboratorio, ma si risconterà difficilmente nei processi industriali. Questo è il motivo principale per cui l'UEL non viene mai testato per le polveri. Si suppone che una miscela di polvere e aria sopra il LEL sia esplosiva.

Un'altra importante differenza tra gas e polvere è costituita dal comportamento delle nubi nel tempo. Se, in un ambiente chiuso, viene rilasciato gas caratterizzato da un peso specifico superiore a quello dell'aria, questo inizialmente si raccoglierà per lo più in prossimità del suolo. Ma poi inizierà a mescolarsi all'aria fino a formare una miscela omogenea in tutto l'ambiente.

Con la polvere avviene esattamente il contrario: se viene rilasciata in aria una nube di polvere, questa precipiterà verso il basso con il passare del tempo. Alla fine l'aria sarà priva di polvere, che giacerà a terra. Ciò ha enormi conseguenze in termini di rischi di esplosione. In uno stabilimento polveroso sono normalmente presenti vari livelli di polvere, che possono essere sollevati, ad esempio a causa di:

- Un colpo di vento improvviso
- Un'onda di pressione (da una piccola esplosione)

- Vibrazioni, che possono provocare la caduta di depositi di polvere da travi, tubi o vani per cavi

È questa la causa all'origine di alcune esplosioni di polvere devastanti: una prima piccola esplosione di polvere, seguita dalla caduta di depositi. La nube di polvere venutasi a creare si accende: un'esplosione di polvere secondaria, a sua volta alza ulteriore polvere, e così via. In questo modo può generarsi una serie di esplosioni di polvere in grado di distruggere un intero stabilimento.

Per avere un'idea dello spessore critico degli strati di polvere affinché si crei una miscela esplosiva di polvere e aria, prendiamo in esame una stanza alta 3 m. In questo caso quale sarebbe lo spessore minimo della polvere di polietilene, uniformemente distribuita a terra, necessario per creare una nube di polvere di 15 g/m<sup>3</sup> nell'intera stanza? Dato che la gravità specifica del polietilene è attorno a 1, lo spessore necessario sarà di 0,045 mm. In genere uno strato di polvere con uno spessore di 0,1-0,5 mm è sufficiente per generare una nube polvere esplosiva in una stanza.

In molti stabilimenti i pavimenti vengono puliti di frequente, ma la polvere rimane accumulata sui vani per cavi o sulle tubature. L'esempio riportato mostra come pochi centimetri di polvere su tali elementi siano sufficienti a creare una miscela esplosiva.

Uno dei modi per prevenire l'esplosione di gas è rilevarne la presenza. Ad esempio, se occorre svolgere lavori a caldo in un'area classificata, normalmente viene monitorata la presenza di gas durante le operazioni. Ciò non è possibile per le polveri. L'unico modo per prevenire la formazione di nubi di polvere in maniera del tutto affidabile è rimuoverne i depositi. Questi devono essere eliminati non solo nell'ambito di un determinato raggio a terra, ma prestando anche particolare attenzione agli accumuli venutisi a creare su elementi orizzontali sovrastanti la zona dove si svolgerà il lavoro a caldo!

## 2.2. Concentrazione limite di ossigeno

In questo caso la differenza tra gas e polvere è minima: entrambi hanno una concentrazione limite di ossigeno (LOC) intorno al 10%.

## 2.3. Energia minima di accensione

L'energia minima di accensione di molti gas si aggira attorno ai 0,25 mJ; per quelli più comuni è attorno ai 0,1-0,2 mJ. Solo i gas molto reattivi, come l'idrogeno e l'acetilene, hanno valori di energia minima di accensione di circa 0,01-0,02 mJ.

Nelle polveri, i valori di energia minima di accensione variano enormemente, ma sono (molto) più elevati rispetto a quelli dei gas:

- Un'energia minima di accensione inferiore a 10 mJ è considerata bassa
- I valori che si aggirano attorno ai 100 mJ sono considerati normali
- Ma si riscontrano anche valori molto elevati (superiori a 1.000 mJ)

A volte ci si trova in presenza di polveri con un'energia minima di accensione di circa 1 mJ, ne è un tipico esempio il bisfenolo A. Il valore varia inoltre per lo stesso tipo di polvere a seconda della granulometria. Valori che vanno da < 10 a > 1000 mJ si riscontrano nella letteratura riguardante il polietilene.

A causa di questa differenza nell'energia minima di accensione, le nubi di polvere sono molto meno sensibili all'accensione mediante scintille.

- Quando sussistono rischi di esplosione di gas, occorre utilizzare apparecchiature meccaniche antiscintilla. Ciò non ha sempre senso quando si tratta di polveri, poiché queste non verranno accese da una semplice scintilla da impatto, fenomeno che può interessare solo alcune polveri sensibili all'impatto con fasci di scintille derivanti da operazioni di molatura.
- Per i gas, le scariche a spazzola (come quelle derivanti da plastica o nylon) sono pericolose. Non è così nel caso di molte polveri. Le scariche a scintilla (che si verificano quando elementi conduttivi non sono interconnessi o messi a terra) rappresentano un pericolo solo in presenza di polveri quando gli elementi in questione sono piuttosto grandi.

Tuttavia, ciò non dovrebbe portare a concludere che le scintille siano innocue per le polveri: benché l'accensione delle nubi di polvere sia piuttosto difficile, non è così per gli strati di polvere. Una scintilla che cade su uno strato di polvere può facilmente generare una combustione senza fiamma. La probabilità che si accenda uno strato di polvere è determinata dall'indice di combustibilità. Mediante una fiamma a gas o un filo di platino rovente (1.000 °C) si prova ad accendere un cumulo di polvere. I risultati verranno classificati nei seguenti gruppi di accensione:

BG 1 Nessuna accensione

BG 2 Breve accensione e rapido spegnimento

BG 3 Combustione o luminescenza circoscritta, senza propagazione

BG 4 Propagazione di combustione luminescente

BG 5 Propagazione di fiamme libere

BG 6 Combustione esplosiva

In un filtro, dove la polvere viene separata dall'aria e quella fine vi si accumula, le combustioni senza fiamma possono verificarsi molto facilmente, a causa del continuo passaggio d'aria. Pertanto, le scintille che finiscono su un filtro hanno elevate probabilità di provocare esplosioni di polvere.

## 2.4. Temperatura minima di accensione

Il fatto che la polvere abbia un'energia minima di accensione (MIE) molto superiore a quella dei gas comuni, conduce al malinteso diffuso che questi ultimi siano molto più sensibili all'accensione. Ma ciò non vale per la temperatura minima di accensione (MIT). Molti gas hanno una temperatura minima di accensione che si aggira sui 500 °C. Ad esempio, quella del propano è 480 °C, quella dell'idrogeno è di 500 °C e quella del metano di 580 °C. Per le nubi di polvere siamo invece intorno ai 400 °C. A questo punto l'intervallo di valori è inoltre piuttosto limitato. Si consideri infatti che, secondo la letteratura specifica, la temperatura del forno BAM per il polietilene è compresa tra 400 e 420 °C.

**Importante:** Le nubi di polvere possono essere accese con facilità da superfici calde. In molti casi di esplosioni di gas la causa dell'innesco è determinata da una scintilla (meccanica, elettrica o elettrostatica). Benché, ovviamente, le scintille non vadano sottovalute quando si tratta di polvere, molte esplosioni di polvere risultano essere innescate da superfici calde, come ad esempio la frizione di una cinghia.

La temperatura minima di accensione esiste sia per le nubi sia per gli strati di polvere. In quest'ultimo caso si parla di temperatura di accensione dello strato, ovvero la temperatura necessaria a una superficie calda per accendere uno strato di polvere spesso 5 mm depositato su di essa. Questo valore è generalmente inferiore a quello della temperatura minima di accensione e, per molte polveri, compreso tra i 300°C e i 400°C.

Considerazioni importanti:

- La temperatura di accensione dello strato è definita per 5 mm. Occorre tenere presente che strati più spessi si accenderanno a temperature più basse, pertanto è importante limitare i depositi di polvere su superfici che possono divenire calde.
- Per molte polveri (tra cui la maggior parte delle plastiche) non è disponibile una temperatura di accensione dello strato e l'indice di combustibilità è molto basso, poiché il materiale si fonde a contatto con il calore. Se questo tipo di polveri viene mischiato ad altri tipi (anche polveri inerti come la cenere) ne possono risultare depositi facilmente combustibili!

## 2.5. Pressione massima di esplosione

Per molti gas la pressione massima va dagli 8 ai 10 bar: in questo le differenze tra gas e polveri sono irrilevanti, poiché la temperatura di una nube in combustione (fattore chiave per la pressione massima di esplosione) è piuttosto simile tra la maggior parte dei gas e delle polveri.

## 2.6. Velocità della fiamma o valore K

Nel caso dei gas è pratica diffusa determinare la forza di un'esplosione in base alla velocità della fiamma. Ma ciò non viene mai fatto con le polveri, per le quali si utilizza invece il valore  $K_{st}$ . Questo consiste nel massimo gradiente di innalzamento della pressione in un recipiente chiuso di 1 m<sup>3</sup>, in condizioni standard. Per i gas a volte viene utilizzato il valore  $K_G$  piuttosto che la velocità della fiamma. Risulta evidente il rapporto tra velocità della fiamma e il valore K: una fiamma veloce comporterà un rapido incremento della pressione.

Anche per il valore  $K_{st}$  la polvere di polietilene presenta un ampio intervallo, con valori compresi tra i 18 bar m/sec (polvere grossa) e i 157 bar m/sec (polvere molto fine). Nell'ambito dell'analisi dei rischi, è pratica comune fare riferimento al valore massimo (157 bar m/sec per il polietilene).

Si tratta di valori piuttosto diffusi. Molte polveri di prodotti agricoli presentano valori  $K_{st}$  compresi tra gli 80 e i 140 bar m/sec. Alcune polveri della plastica e dei prodotti farmaceutici hanno valori  $K_{st}$  più elevati. La polvere di alluminio, ad esempio, può avere un valore  $K_{st}$  pari a 750 bar m/sec.

Il valore  $K_G$  del propano e di molti solventi è di circa 80 bar m/sec. Ciò può indurre a concludere che una nube di polvere media esploda in maniera più violenta di una polvere di gas media, mentre non è così. Benché a prima vista non appaiano esserci differenze sostanziali tra la determinazione di  $K_G$  e  $K_{st}$ , ve ne è in realtà una molto rilevante:

- Per i valori  $K_G$  viene testata un miscela quiescente: non vi sono turbolenze.
- È invece impossibile creare una nube di polvere senza turbolenze (altrimenti la polvere si poserebbe). Pertanto la tecnica standard per testarla comporta una miscela caratterizzata da elevata turbolenza.

Se il propano fosse testato sotto le stesse condizioni della polvere, ovvero ad uno stato di elevatissima turbolenza iniziale, si otterrebbe un valore pari a 500 bar m/sec!

È noto che quando una nube di gas si crea all'aria aperta, senza limitazioni o ostacoli, l'accensione risulterà in una palla di fuoco, ma con una generazione di pressione irrilevante. Mentre in uno spazio confinato o in cui vi siano ostacoli multipli, che creeranno turbolenza e accelerazioni di fiamma, si otterrà una notevole sovrappressione (come è avvenuto, ad esempio, nell'esplosione di Flixborough). Con la polvere, non ci si attende una tale esplosione di nube di vapore non confinata (UVCE, unconfined vapour cloud explosion). Le nubi di polvere non si formano spesso all'aria aperta e, se ciò avviene, l'accensione non avrà praticamente effetti sulla pressione. In caso di confinamenti o in presenza di ostacoli multipli potrebbe generare della sovrappressione con polveri in grado di avere effetti molto potenti, come il bisfenolo A o le polveri di metalli.

### 3. Analisi dei rischi

Oltre che per le caratteristiche di esplosione, i gas e le polveri si differenziano tra loro per le seguenti caratteristiche:

- I gas sono normalmente contenuti in recipienti (o tubature) chiusi, in cui non sono presenti altre sostanze. In questo modo un pericolo di esplosione sussiste solo in caso di perdita. Pertanto le esplosioni di gas vengono prevenute mediante classificazione delle aree e applicazione di materiali (normalmente elettrici, ma talvolta anche meccanici) certificati per la specifica zona. In caso di vapori di liquidi con punti di infiammabilità bassi, a volte possono verificarsi miscele esplosive (ad esempio in un miscelatore) in cui è impossibile escludere le fonti di accensione. In tali circostanze una soluzione tipica per evitare le esplosioni è l'inertizzazione (mediante azoto).
- In molte situazioni è impossibile evitare il formarsi di nubi di polvere, come, ad esempio, durante il trasporto pneumatico o la fresatura. Inoltre, nel corso di diversi tipi di operazione è impossibile evitare fonti di accensione, come ad esempio quelle di tipo meccanico durante la fresatura. Poiché per molte applicazioni l'inertizzazione non è possibile, è in particolare in relazione alle esplosioni di polvere che sono spesso necessarie misure di sicurezza, come sistemi di sfogo e soppressione.

### 4. Sintesi e conclusioni

Benché le esplosioni di polvere (rapida combustione di una miscela di materiale combustibile ed aria) siano molto simili alle esplosioni di gas, esistono alcune differenze molto rilevanti tra i due fenomeni:

- L'intervallo di esplosione (LEL-UEL) è piuttosto limitato per i gas, mentre è molto ampio per le polveri.
- Il gas si diluisce nell'aria ed è possibile rimuoverlo tramite ventilazione. La polvere si posa a terra, creando depositi che possono esplodere accidentalmente. Ciò può provocare esplosioni di polvere secondarie, con effetti devastanti. Pertanto, nella protezione dalle esplosioni di gas un concetto fondamentale è la ventilazione. Se invece si parla di polvere, la parola chiave è pulizia, per evitare la formazione di depositi di polvere pericolosi.
- La polvere è caratterizzata da un'energia minima di accensione molto elevata, pertanto è meno sensibile alle scintille (elettriche, elettrostatiche o meccaniche). Tuttavia, le scintille possono provocare combustioni senza fiamma nei depositi di polvere, a loro volta in grado di accendere nubi di polvere.
- Le nubi di polvere possono essere facilmente accese da superfici calde.
- Nei processi di produzione, le miscele esplosive di gas e aria possono essere evitate piuttosto facilmente, cosa molto più difficile (se non impossibile) nel caso della polvere.

*di Franky Libeert*

