

## Dinamica dei fenomeni esplosivi

### 1. Pressione massima di esplosione e velocità massima di aumento della pressione.

La conoscenza della pressione massima di un'esplosione e della velocità massima di aumento della pressione permettono di stabilire la resistenza di progetto delle apparecchiature e degli apparati di sfogo. Queste grandezze si determinano in apparecchiature sperimentali unificate [1, 2]. Nella tabella 1 sono riportate le proprietà, misurate, di miscele di gas e di polveri in aria.

I valori di pressione massima delle esplosioni di atmosfere esplodibili risultano costantemente inferiori a quelli ottenuti dalla decomposizione di sostanze instabili, mentre la velocità di aumento della pressione è comunque notevole.

Per le dispersioni di polveri e le nebbie, pressione massima e velocità di aumento crescono al diminuire delle dimensioni medie delle particelle e tendono ad un valore costante quando queste scendono al disotto di dimensioni di poche decine di  $\mu\text{m}$  [3].

Per le miscele polvere - aria la velocità massima di aumento della pressione è legata al volume (V) del contenitore in cui avviene l'esplosione dalla seguente espressione empirica (legge cubica) [3]:

$$(dP/dt)_{\max} V^{1/3} = KST,$$

dove KST è una costante caratteristica della miscela in esame. I valori di KST per alcune polveri sono indicati nella tabella 2.

Per queste miscele anche la pressione massima di esplosione dipende dal volume del contenitore, purché questo non superi i 10 l [4]. Nelle piccole apparecchiature l'alto rapporto superficie/volume dà luogo a fenomeni di dispersione termica e, di conseguenza, alla sottostima del valore di  $(dP/dt)_{\max}$  (ossia di KST) [4].

Tabella n. 1	Pressione massima e minima, velocità di incremento di pressione ottenuta nell'esplosione di miscele polvere-aria e gas-aria in concentrazioni stechiometriche [5].	
	$\Delta P_{\max}$ (MPa)	$\Delta P/\Delta T$ (MPa s <sup>-1</sup> )
Idrogeno (30%)	0,67	68,0
Etilene (6%)	0,8	57,8
Alluminio	0,8	136,0
Vitamina B1	0,8	61,2
Polipropilene	0,5	37,4

Tabella n. 2	Valori di KST per alcune polveri [6].	
Tipo di polvere	$P_{\max}$ (MPa)	KST(MPa m s <sup>-1</sup> )
PVC	0,67 - 0,85	2,7 - 9,8
Polvere di latte	0,81 - 0,97	5,8 - 13,0
Polietilene	0,74 - 0,88	5,4 - 13,1
Zucchero	0,82 - 0,94	5,9 - 16,5
Lignite	0,81 - 1,00	9,3 - 17,6
Segatura	0,77 - 1,05	8,3 - 21,1
Cellulosa	0,80 - 0,98	5,6 - 22,9
Alluminio	0,54 - 1,29	1,6 - 75,0

L'umidità della polvere di una miscela riduce notevolmente entrambi questi parametri. [3].

## 2. Energia di innesco

L'accensione di miscele esplodibili richiede una temperatura elevata oppure l'azione di un "innesco" e questo innesco deve apportare alla miscela una quantità sufficiente di energia. L'innesco può verificarsi anche in una zona ristretta del sistema, mentre il fenomeno si propaga più o meno rapidamente, ma più spesso molto rapidamente, nell'intera miscela.

Molte ricerche sono state condotte per misurare l'energia di innesco (o accensione) di miscele esplodibili. La quantificazione del fenomeno è sperimentalmente problematica, per le difficoltà che si incontrano nel valutare correttamente l'energia realmente assorbita dalla miscela in esame. I dati della letteratura meno recente sono di solito approssimati per eccesso e per alcune miscele idrocarburo-aria [7] debbono essere ridotti di almeno un ordine di grandezza. Solo misure tra loro omogenee consentono un corretto confronto tra varie miscele.

I risultati più significativi mostrano in particolare che per una data miscela l'energia di innesco presenta un minimo, definito energia minima di innesco, che varia con la composizione. Nel caso di miscele ossigeno-azoto-combustibile, il suo valore diminuisce con l'aumentare della pressione, della temperatura e della percentuale di ossigeno; nella tabella 3, sono riportati dati relativi a miscele con aria. I valori inferiori si riscontrano per sostanze quali l'idrogeno, l'acetilene e l'ossido di carbonio che, per tale ragione, presentano un rischio più elevato rispetto ad altri composti, quali ad esempio gli idrocarburi paraffinici.

Maggiori difficoltà sperimentali caratterizzano la determinazione dell'energia di innesco di miscele esplodibili di polveri per l'influenza esercitata dalle caratteristiche fisiche dei granelli di polvere e dall'omogeneità della nube di polvere [7].

L'energia minima di accensione per le polveri è generalmente dell'ordine di qualche decina di mJ (v. tabella 4), ma può scendere al di sotto di 1 mJ (ad esempio 0,3 mJ nel caso di una nube di zolfo finemente disperso in aria). I valori relativi a diverse miscele gassose sono superiori a questi livelli, così da dubitare della loro attendibilità.

Tabella n. 3	Energia minima di innesco (in mJ): in aria, a pressione atmosferica e a temperatura ambiente [7]			
	Sostanze con energia minima < 0,25 mJ			
	Acetilene	0,02	Etilene	0,096
			Furano	0,225
	Benzene	0,22	Idrogeno	0,018
	Butadiene	0,175	Idrogeno solforato	0,068
	n-Butano	0,25	Metanolo	0,215
	Cicloesano	0,14	Metilacetilene	0,152

Ciclopropano	0,24	Ossido di carbonio	0,1
n-Eptano	0,25	Ossido di etilene	0,087
n-Esano	0,25	n-Pentano	0,25
Etano	0,24	Propano	0,25
		Solfuro di carbonio	0,015
Sostanze con energia minima fra 0,25 e 0,6 mJ			
		Metano	0,28
Alcool isopropilico	0,65	Metiletilchetone	0,28
Etere dietilico	0,49	Tetraidrofurano	0,54
Etere dimetilico	0,29		
Sostanze con energia minima > 0,6 mJ			
Acetato di etile	1,42	Etere diisopropilico	1,14
Acetato di vinile	0,70	Isottano	1,35
Acetone	1,15	Trietilammina	0,75
Ammoniaca	> 100		

Tabella n. 4	Energia minima di accensione di miscele polvere-aria [9].	
	Polvere	mJ
	Acetato di cellulosa	35
	Acido adipico	60
	Acido fumarico	85
	Acido tereftalico	50
	Alluminio atomizzato	50
	Anidride ftalica	15
	Aspirina	15
	Benzoato di sodio	50
	Caffè	25
	Caprolattame	70

Carbone attivo	100
Cellulosa	45
Legno	20
Lignina	40
Magnesio	30
Metilcellulosa	30
Polietilene	20
Polimetilmetacrilato	20
Polipropilene	20
Polistirene	20
Resina fenolo-formaldeide	15
Resina urea-formaldeide	20
Vitamina B1	35
Vitamina C	70
Zolfo	35
Zucchero	45

### 3. Cause di innesco accidentale

Le principali cause di innesco accidentale di miscele (e di sostanze) esplodibili sono riportate nella tabella seguente e descritte nel seguito:

- fiamme libere;
- superfici calde e reazioni esotermiche;
- scintille di attrito e d'urto;
- scariche atmosferiche;
- scariche elettriche;
- scariche elettrostatiche;
- impulsi di pressione e urti.

### **3.1 Fiamme libere**

Nel caso di fiamme libere anche modeste (ad es. fiammiferi e sigarette) l'apporto di energia e la temperatura sono superiori ai valori minimi richiesti per innescare praticamente tutte le miscele esplosibili.

Fiamme accidentali possono derivare a seguito dell'ignizione di incrostazioni piroforiche costituite da coke, sali metallici e polveri varie che si possono formare sulle superfici di serbatoi od altre apparecchiature. Sono da ricordare al riguardo i sali organici di metalli (ad es. ftalato di ferro) ed il solfuro di ferro, che può formarsi per esempio sulla superficie di serbatoi contenenti idrocarburi impuri di  $H_2S$ . In tal caso l'ingresso di aria può dar luogo alla brusca ossidazione del solfuro e all'innescò di eventuali miscele esplosibili. Il fenomeno assume particolare importanza nei serbatoi normalmente mantenuti in atmosfera inerte, a causa di un accumulo significativo di solfuro di ferro.

### **3.2 Superfici calde e reazioni esotermiche**

Le superfici calde, anche di limitate dimensioni, possono innescare un'esplosione. Possono far parte di strutture o apparecchiature (circuiti di riscaldamento, tubazioni di vapore), o essere riscaldate per attrito di parti in movimento o per ragioni di origine elettrica, come, ad esempio, lampadine elettriche non adeguatamente protette, motori elettrici, prese.

Reazioni esotermiche possono innescare incendi ed esplosioni come pure le sostanze termodinamicamente instabili, ad esempio fertilizzanti contenenti nitrato ammonico, e polveri come farine o gomme che possono reagire o bruciare spontaneamente con l'ossigeno dell'aria, anche senza sorgente di accensione.

### **3.3 Scintille di attrito e d'urto**

L'urto e l'attrito tra parti metalliche o tra materiali solidi duri possono provocare scintille in grado di accendere miscele esplosibili. Le scintille sono particelle metalliche staccatesi per effetto del lavoro meccanico, lanciate in aria che, bruciando, possono raggiungere temperature anche superiori ai  $1500^{\circ}C$ , in funzione del materiale.

Non tutti i metalli formano scintille con un'energia sufficiente per incendiare una miscela esplosibile: ad esempio, le leghe metalliche utilizzate per la fabbricazione degli utensili antiscintilla, spesso a base di rame. È, però, possibile che si formino scintille nella percussione tra una superficie di acciaio ed un utensile antiscintilla più duro dello stesso acciaio.

Un fenomeno di natura diversa si produce percuotendo utensili su minerali contenenti quarzo, che è piezoelettrico: l'energia meccanica dell'urto è convertita in una scarica elettrica. Una situazione ancora diversa si verifica tra pietre od altri materiali contenenti solfuri metallici (ad esempio pirite). L'innescò di nubi di polveri o di nebbie in aria è generalmente più probabile che nel caso di miscele gassose, per l'urto di una scintilla contro una particella, che assorbe tutta l'energia.

### **3.4. Scariche atmosferiche**

Le scariche atmosferiche (fulmini) possiedono energie molto elevate (dell'ordine di un GJoule) e sono pertanto in grado di innescare esplosioni.

### **3.6. Scariche elettrostatiche**

Le scariche elettrostatiche figurano tra le cause frequenti di inneschi accidentali di miscele esplodibili. L'effetto è dovuto al semplice contatto tra materiali di natura diversa, soprattutto se in moto relativo, che determina una differenza di potenziale e la possibile produzione di una scarica.

L'energia delle scariche elettrostatiche è sovente dell'ordine di diverse decine di mJ, tale cioè da innescare miscele esplodibili. Le cariche formate su un dato materiale si possono accumulare o trasferirsi per induzione sulle superfici vicine se queste sono isolate da terra. L'accumulo di elettricità statica per scorrimento di sostanze in tubazioni dipende dai vari parametri e caratteristiche del sistema. Nel caso di liquidi il fenomeno è più pronunciato per sostanze a bassa conducibilità, quali gli idrocarburi; ad esempio, potenziali di 18 kV sono stati misurati sulle pareti e sulle flange di tubazioni di vetro (anche molto corte) attraversate da xilene [8].

Nel trasporto di polveri l'elettricità statica si accumula nei sili di raccolta e sulle superfici costituite da materiali non conduttori (ad esempio su nastri trasportatori di gomma o di plastica). Il fenomeno è molto pronunciato quando le polveri sono mantenute in sospensione (ad esempio negli essiccatori a letto fluido o nel trasporto pneumatico).

Durante il riempimento di autobotti e serbatoi, le particelle fluide in caduta si caricano di elettricità statica anche se il serbatoio e il braccio di carico sono adeguatamente messi a terra. Il riempimento dei recipienti attraverso condutture connesse al fondo dei recipienti, invece che a caduta dall'alto, è più sicuro, purché la tubazione impiegata sia conduttiva e di un materiale non diverso da quello del recipiente.

Anche le gocce di acqua che attraversano un idrocarburo possono caricarsi per attrito, sviluppando alte differenze di potenziale all'interfaccia acqua-idrocarburo: questo fenomeno deve essere adeguatamente considerato nel programmare gli interventi di lavaggio dei recipienti.

La messa a terra delle apparecchiature limita gli inneschi accidentali, ma si deve ricordare che i tempi di rilassamento delle cariche, ossia i tempi necessari a ridurre spontaneamente l'accumulo di carica nel liquido, i quali dipendono dalla conducibilità elettrica e dalla costante dielettrica dei materiali, possono essere prolungati, fino a ore o giorni.

Il tempo di rilassamento è l'intervallo necessario affinché le cariche cadano al 37% del loro valore iniziale. La caduta delle cariche avviene in maniera approssimativamente esponenziale con il tempo.

Tabella n. 5	Tempo di rilassamento delle cariche per alcuni prodotti petroliferi e dell'acqua demineralizzata [8].	
<b>Prodotto</b>	<b>Tempo di rilassamento s</b>	
Petrolio grezzo	0,02 - 0,00002	
Combustibile per motore diesel	40 - 0,4	
Cherosene	200 - 0,45	
Cherosene per motore di aviazione + additivo antistatico	0,4 - 0,06	
Acqua demineralizzata	10,6 - 0,7	

### 3.7. Impulsi di pressione e urti

L'azione di una forte onda d'urto (originabile ad esempio con un esplosivo) su sostanze instabili o miscele esplodibili provoca una compressione istantanea con conseguente riscaldamento. Il risultato finale può essere rispettivamente la decomposizione o l'autoaccensione del materiale. L'esplosione di alcune sostanze (quali la nitroglicerina) può essere innescata da urti di modesta energia.

#### Bibliografia

- [1] PALMER K.N., Dust Explosion and Fires, Chapman and Hall, London 1973.
- [2] NAGY J., SEILER E.C., CONH J.W., VERAKIS H.C., Explosion development in closed vessels, US Bur. Mines, Rep. Invest. 7507, 1971.
- [3] BARTKNECHT W., Explosions, Springer Verlag, Berlin 1981.
- [4] AVELLA F., Riv. Cotnb., 38, 218, 1984.
- [5] CARDILLO P, Antincendio, p. 99, dic.1982.
- [6] SCHOLL E. W., Abschlussbericht zu Forschungsvorhaben: Ermittlung von taub explosion und deren Folgeschaden - Bergbau Versuchsstreche, Dortmund-Derne, giugno 1978.
- [7] ECKHOFF R.K., Combust. Flame, 24, 53, 1975.
- [8] FIUMARA A., Comunicazione presentata al convegno "La sicurezza negli impianti chimici", Milano 23-24 novembre 1978.
- [9] CARDILLO P., Tuttochimica, 4, (5), luglio 1986.

**Data di chiusura del documento:**

**15 gennaio 2018**



### **Conoscere il rischio**

Nella sezione Conoscere il rischio del portale Inail, la Consulenza Tecnica Accertamento Rischi e Prevenzione (Contarp) mette a disposizione prodotti e approfondimenti normativi e tecnici sul rischio professionale, come primo passo per la prevenzione di infortuni e malattie professionali e la protezione dei lavoratori. La Contarp è la struttura tecnica dell'Inail dedicata alla valutazione del rischio professionale e alla promozione di interventi di sostegno ad aziende e lavoratori in materia di prevenzione.

### **Per informazioni**

[contarp@inail.it](mailto:contarp@inail.it)