

Esplosioni e combustioni

Premessa

Per esplosione è da intendersi ogni fenomeno caratterizzato da una brusca trasformazione chimico-fisica, anche di combustione, che produce un aumento della pressione e/o della temperatura (onda di pressione e gradiente di temperatura secondo la UNI EN 1127-1), che si verifica in un intervallo di tempo molto breve e con caratteristiche tali da generare un campo di sovrappressione sufficientemente intenso da provocare danni a persone o cose [1].

Le conseguenze delle esplosioni, che è possibile stimare sulla base dei dati nella tabella 1, sono essenzialmente legate al valore massimo dell'onda di sovrappressione che si propaga nell'ambiente. In altre parole, i gas ad alta pressione, prodotti da fenomeni diversi sui quali ci si soffermerà nel seguito, spingono e comprimono l'atmosfera nelle loro vicinanze che, a sua volta, spinge e comprime volumi di aria via via più lontani. La pressione in un punto subisce una variazione in maniera caratteristica, raggiunge un picco e poi discende.

L'intensità del valore massimo rispetto al valore nel centro dell'esplosione subisce una riduzione con un ritardo che è funzione della distanza del punto considerato rispetto al centro dell'esplosione.

Un oggetto, quando viene investito dall'onda dell'esplosione, si troverà esposto nel lato più vicino alla sorgente al valore della pressione massima, mentre sul lato opposto alla pressione atmosferica: più semplicemente, al passare dell'onda, sperimenterà differenze di pressione tra i due lati considerati, il cui valore massimo è la sovrappressione massima cui si è accennato in precedenza.

Come noto, una pressione produce su una superficie una forza F (misurata in Newton) di intensità pari al prodotto della sua area (A) moltiplicata per il valore della pressione

$$(P): F = P \times A,$$

e diretta ortogonalmente rispetto alla superficie medesima.

Se la pressione ha uguale intensità tutt'intorno all'oggetto considerato, si può facilmente dimostrare che la forza risultante è nulla. Se tale differenza non fosse nulla, le forze in gioco sarebbero notevoli.

L'unità di misura delle sovrappressioni che sarà utilizzata per gli scopi di questo lavoro è il kPa (chiloPascal), che corrisponde a circa un centesimo (1/100) della pressione atmosferica al livello del mare; per le superfici l'unità di misura è il m² (metro quadro).

Nelle tabelle 1 e 2 sono riportati dati sperimentali relativi a danni a persona o cose in funzione della sovrappressione massima dovuta a esplosione.

Tabella n. 1		Relazione tra sovrappressioni e danni a persone e cose [2]
Sovrappressione (in aria) kPa	Danno	
0,2 - 6	Rottura di vetri	
1	Rottura di vetri (valore tipico)	
3 - 15	Danni a edifici	
15 - 20	Distruzione di muri di mattoni	
20 - 30	Cedimento di serbatoi per combustibili liquidi	
30 - 70	Distruzione totale di edifici	
35	Rottura di timpani	
35	Abbattimento di pali di legno	
50 - 60	Rovesciamento di vagoni ferroviari carichi	
70	Danni letali ai polmoni	

1. Esplosioni

Le **esplosioni** possono essere provocate da:

- reazioni esotermiche di varia natura:** per effetto di una reazione chimica, ad esempio per combustione con aria, viene liberata una grande quantità di calore;
- rottture di parti di apparecchiature** contenenti gas o liquidi sotto pressione;
- rapida ebollizione di un liquido**, provocata da scambio termico o da una improvvisa depressurizzazione: nel primo caso, per contatto di acqua con superficie roventi, nel secondo, per rottura di una bombola contenente gas liquefatto.

Le reazioni esotermiche che conducono a fenomeni esplosivi sono di molteplice natura e possono verificarsi in ambienti sia chiusi che aperti. È evidente che le

esplosioni da atmosfera esplosiva sono reazioni esotermiche, perché sono prodotte dalla reazione di combustibili con l'ossigeno dell'aria.

La reazione di decomposizione - combustione di un comune esplosivo può avvenire in tempi molto brevi: è esotermica e dà luogo a sviluppo di gas. Nel caso della decomposizione dell'acetilene si ha solo espansione di gas dovuta allo sviluppo di calore che accompagna la reazione, che avviene senza variazione del numero di moli, ossia grossolanamente dei volumi, di prodotti gassosi ($C_2H_2 \rightarrow 2C + H_2$).

Medesimo discorso vale per l'ossidazione esplosiva dell'idrogeno, che è anzi accompagnata da una riduzione del numero di moli delle sostanze gassose:



L'effetto esplosivo delle reazioni nucleari è dovuto alla elevatissima quantità di energia in gioco (e quindi anche al conseguente fenomeno di espansione dell'aria coinvolta).

L'esplosione di miscele esplodibili aria - gas o vapori combustibili può avere gravi conseguenze anche se avviene in spazi non confinati (v. "*Nubi non confinate*").

Anche reazioni relativamente lente e blandamente esotermiche possono portare ad esplosioni (esplosioni termiche). Tale evento si può manifestare a seguito di reazioni chimiche che si sviluppano in contenitori chiusi e dai quali il calore di reazione non può essere smaltito. Se il recipiente contiene gas o sostanze evaporabili, il progressivo riscaldamento è accompagnato da un aumento di pressione che può portare alla brusca rottura del contenitore, con possibile conseguente esplosione dovuta all'istantanea fuoriuscita di una notevole quantità di gas o vapori. In questi casi le caratteristiche del fenomeno che fa seguito alla rottura (e le sue conseguenze) dipendono dal tipo di rottura, ad esempio se una fessura o un grande squarcio: nel primo caso si avrà la violenta fuoriuscita di un getto (*jet fire*), ma non un'esplosione, nel secondo invece si potrà manifestare un'esplosione che può anche condurre alla cosiddetta B.L.E.V.E. (*Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*).

Talune reazioni (ad es. decomposizione del metano: $CH_4 \rightarrow C + 2H_2$, che può avvenire oltre circa 550°C) sono accompagnate da un aumento del numero di moli di gas, ma **assorbono calore** per avvenire. In recipienti chiusi il fenomeno può dar luogo ad un aumento di pressione, che in genere è modesto (nel caso del metano la pressione raddoppia, a temperatura costante; in realtà la reazione, procedendo, abbassa la temperatura). In queste condizioni le esplosioni sono improbabili.

Il calore necessario alle esplosioni dovute a reazioni esotermiche è spesso dovuto a combustione. Le **combustioni** sono reazioni esotermiche che trasformano una sostanza o una miscela nei relativi prodotti di combustione in forma gassosa, dopo reazione con l'ossigeno: CO_2 , H_2O , CO , N_2 , SO_2 , P_2O_5 , eccetera e in grado di fornire energia e materia all'esplosione.

Nel caso degli esplosivi l'ossigeno necessario per tali reazioni è in tutto o in parte contenuto nella molecola stessa dell'esplosivo, in altri casi (ad esempio, miscele esplodibili combustibile - aria) partecipa alla reazione l'ossigeno dell'aria.

Tabella n. 2	Danni derivanti da esplosioni in relazione al valore della sovrappressione generata [3,4,5]
Sovrappressione (in aria) kPa	Danno
0,2	Rottura occasionale di grandi finestre di vetro.
1,0	Tipico valore per la rottura di vetri.
2,5	Rottura del 50% dei vetri.
3	Limitati danni strutturali di lieve entità e danni ai timpani.
3 - 7	Rottura di finestre con occasionali danni all'intelaiatura.
7 - 14	Parziale demolizione delle case.
.....	Danneggiamento della strumentazione di processo, di pannelli leggeri in lamierino o in alluminio.
9	Intelaiature di acciaio leggermente distorte
14 - 17	Danneggiamento di torri di raffreddamento e di serbatoi atmosferici a tetto fisso.
15 - 20	Distruzione delle pareti di mattoni o di blocchi di calcestruzzo leggero.
20 - 30	Deformazione di tubazioni e strumentazione di processo; cedimento di serbatoi atmosferici; macchine pesanti e costruzioni industriali danneggiate
35	Rottura di pali di legno. Rottura di timpani.
35 - 50	Distruzione pressoché completa delle case.
38	Deformazione del mantello di apparecchiature di processo non in pressione
42 - 45	Deformazioni di serbatoi in pressione. Rottura di tubazioni.
45 - 50	Rottura del mantello di apparecchiatura non in pressione.
50 - 60	Rovesciamento di carri ferroviari.
53 - 56	Danneggiamento di serbatoi sferici in pressione.
60 - 62	Distruzione di carri ferroviari.
70	Totale distruzione di edifici e di muri in cemento armato. Spostamento e grave danneggiamento di apparecchiature pesanti. Deformazione di strutture portanti di acciaio. Danni letali ai polmoni.

2. Deflagrazioni e detonazioni

Nei casi in cui un gas combustibile sia miscelato con l'ossigeno (o con aria), le reazioni di combustione si propagano sotto forma di onde di combustione che possono dar luogo a onde di sovrappressione che si propagano con velocità subsonica (inferiori a circa 367 m/s a condizioni ambiente $T=20^{\circ}\text{C}$ e $p=101323\text{ Pa}$) o supersonica (superiore a 367 m/s).

Nel primo caso l'esplosione è di tipo deflagrante (deflagrazione) e nel secondo di tipo detonante (detonazione).

Le **deflagrazioni** sono caratterizzate da un fronte di fiamma (zona all'interno della quale avvengono le reazioni di combustione) che si propaga con velocità subsonica, separando la zona dei prodotti combusti da quella dei prodotti non combusti. Il calore sviluppato viene trasmesso per conduzione e sostiene il processo.

La deflagrazione può essere laminare o turbolenta. Nel primo caso, per diverse miscele combustibile - aria, la velocità di avanzamento dell'onda di deflagrazione è di solito $< 1\text{ m/s}$: ad esempio 0,45 m/s per la miscela metano - aria e 0,18 m/s per quella ossido di carbonio - aria, ma 3,1 m/s per la miscela idrogeno - aria. In ossigeno la velocità può superare i 10 m/s (11,40 m/s per la miscela acetilene - ossigeno e 14,00 m/s per quella idrogeno - ossigeno). Nel caso di deflagrazione turbolenta la velocità di avanzamento dell'onda è fino a 10 volte superiore, ma si mantiene al disotto della velocità del suono.

Le velocità di propagazione della fiamma aumentano con la temperatura e, in generale, con la pressione. Una importante eccezione interessa il metano, la cui velocità di combustione diminuisce all'aumentare della pressione.

In recipienti chiusi le deflagrazioni provocano aumenti di pressione che si mantengono al di sotto della pressione adiabatica di combustione (in molti casi 8-10 volte la pressione iniziale). La pressione assume un andamento che dipende dal tempo, ma con valori pressoché uguali all'interno del recipiente, dato che la velocità di propagazione delle onde di deflagrazione è inferiore a quella del suono. Altre situazioni si hanno per recipienti aperti o inizialmente chiusi i cui dischi di rottura o valvole di sicurezza si aprono a seguito di un'esplosione interna.

Nelle **detonazioni** l'onda d'urto (onda di compressione) si propaga con una velocità supersonica (migliaia di m/s), ossia superiore di quella del suono nel materiale incombusto, lasciando indietro il fronte di fiamma iniziale. Poiché tale velocità è maggiore della velocità del suono, la pressione è notevolmente disuniforme nello spazio, ma presenta un massimo in corrispondenza dell'onda d'urto, che può essere anche di alcune decine di volte maggiore della pressione iniziale. Per tale ragione le detonazioni sono più distruttive delle deflagrazioni.

A causa della rapida compressione, l'onda d'urto provoca il riscaldamento della miscela, che brucia senza essere stata a contatto con gas caldi (fenomeno detto di autoignizione). L'onda è allora seguita da un fronte di fiamma che provoca, alle sue spalle, una espansione (con conseguente accelerazione del fronte di fiamma), da cui il sistema trae l'energia necessaria per autosostenere il fenomeno. Il fronte di fiamma

non ha conformazione regolare, ma molto frastagliata, a causa della turbolenza, degli attriti, ecc..

Il verificarsi delle esplosioni che possano manifestarsi come deflagrazioni o, piuttosto, detonazioni dipende da diversi fattori, quali, ad esempio, tipo ed intensità dell'innesco, natura delle sostanze interessate, eventuale presenza di impurezze, geometria e dimensioni dei contenitori, caratteristiche dell'ambiente nel quale si propaga la fiamma. Ad esempio, talune miscele esplosibili (ossido di etilene - aria e altre) detonano se innescate con esplosivi, mentre in presenza di altri inneschi deflagrano. Gli esplosivi possono dar luogo a deflagrazioni o detonazioni in funzione della massa di esplosivo coinvolto. Le deflagrazioni possono trasformarsi in detonazioni, in presenza di turbolenza o di ostacoli sul percorso della fiamma.

La lunghezza dei recipienti o degli ambienti può influenzare gli effetti dell'esplosione; esperienze condotte sull'acetilene mostrano ad esempio che l'esplosione innescata ad una estremità di un tubo di 20 cm di diametro e 2 m di lunghezza dà luogo ad una pressione di esplosione all'altra estremità del tubo uguale a circa 10 volte la pressione iniziale (corrispondente all'incirca al valore della pressione raggiungibile in condizioni adiabatiche).

Operando invece in un tubo di 20 cm di diametro e di 30 m di lunghezza, si riscontra, all'altra estremità del tubo, una pressione di esplosione 100 volte superiore a quella iniziale, indice della transizione del fenomeno in una detonazione.

Bibliografia

- [1] STREHLOW R.A., BAKER W.E., Progress in Energy and Combustion Science, 27, 1976.
- [2] TUFANO V., Riv. Comb., 40, 147, I 986.
- [3] ROTA R., MORBIDELLI M., CARRÀ S., RUBINO F., MESSINA S., Chimica e Industria, 70, (3), 58, 1988.
- [4] TUFANO V., Riv. Comb., 40, 147, 1986.
- [5] LEES F.P., Loss Prevention in the Process Industries, Butterworth, London 1980.

Data di chiusura del documento: 20/02/2019

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