

DAL MONDO
DELL'INDUSTRIA

PROVA DI ESPLOSIONE DI UN CAMPIONE IN POLVERE
REALIZZATO NELLA FIKE ACADEMY

PREPARAZIONE DEL CAMPIONE DURANTE UNA PROVA
DI LABORATORIO

TEST DI ESPLOSIONE IN SERBATOI PROTETTI INTERCONNESSI CONDOTTI
DA HEALTH AND SAFETY LABORATORY (REGNO UNITO)

MODALITÀ DI PROPAGAZIONE A CONFRONTO

Esplosioni da polveri: realtà e leggende

Chiarire come avviene la propagazione delle esplosioni da polveri per una strategia generale di protezione dalle esplosioni. il presente articolo elenca, descrive e sfata una serie di leggende comuni sulla propagazione delle esplosioni.

A CURA DI JÉRÔME TAVEAU
FIKE CORPORATION, USA

In numerosi incidenti del passato è stata segnalata l'infausta propensione delle esplosioni da polveri a distruggere intere strutture e a causare decessi. Ne è un esempio recente l'enorme esplosione verificatasi il 7 febbraio 2008 presso l'Imperial Sugar Company di Port Wentworth (Georgia), che ha causato 36 morti e 14 feriti.

Spesso, i processi di gestione delle polveri sono costituiti da vani e apparecchi interconnessi. Le fiamme e la pressione derivanti da un'esplosione da polveri possono pertanto propagarsi attraverso tubazioni e gallerie, investendo altri vani e apparecchi, con conseguenti danni gravi.

Sebbene la capacità di propagazione delle esplosioni da polveri sia ormai ampiamente riconosciuta, alcune concezioni errate portano a una sensazione di sicurezza immotivata, in base a cui si ritiene che l'isolamento delle esplosioni non sia necessario.

Rifacendosi al libro di Amyotte [1], il presente articolo elenca, descrive e sfata una serie di leggende comuni sulla propagazione delle esplosioni.

LEGGENDA N° 1: PER CONSENTIRE LA PROPAGAZIONE DELLE ESPLOSIONI È NECESSARIA UNA GRANDE QUANTITÀ DI POLVERI

Le esplosioni da polveri non necessitano di grandi quantità di combustibile per propagarsi. Nel suo libro [2], Eckhoff sottolinea come sia sufficiente uno strato di appena 1 mm per creare un pericolo di esplosione da polveri. Tale affermazione ha trovato conferma sperimentale da parte di Tamanini [3], il quale ha svolto una serie di test di esplosione da amido di mais in un condotto a grandezza naturale (2,44 x 2,44 x 24,38 m) dotato di una serie di pannelli di sfogo. Ha dimostrato che un'esplosione necessita di uno strato di appena 0,25 mm di amido di mais per propagarsi completamente.

Durante lo sfogo di un'esplosione, la parte incombusta viene espulsa all'esterno del vano principale ed è in grado di bruciare e dare luogo a un'esplosione secondaria. Lo stesso fenomeno si verifica quando



VISTA DEL FILTRO DEPOLVERATORE E DEL SISTEMA DI CARICO DOPO L'ESPLOSIONE DA POLVERI



un'esplosione da polveri ha luogo in un serbatoio dotato di pannelli di sfogo collegato a tubazioni. Valiulis *et al.* [4] hanno studiato la propagazione di fiamma in un condotto d'aria pulita lungo 27,12 m (diametro 20,32 e 50,8 cm) per esplosioni da amido di mais e polvere fenolica in un vano protetto da 0,64 m³. I test effettuati hanno mostrato distanze di propagazione della fiamma comprese fra 6,71 e 27,12 m. Recenti studi del programma di ricerca di Fike Corporation sulla propagazione delle esplosioni da polveri [5, 6] hanno dimostrato che una fiamma si propaga ancora più facilmente se la concentrazione delle polveri nei tubi è bassa (50 g/m³ rispetto a 500 g/m³), sia per combustibili a bassa reattività (farina di legno) che per combustibili ad alta reattività (polvere fenolica); ciò è stato attribuito all'aumento dell'inerzia nelle miscele polveri-aria più concentrate.

LEGGENDA N° 2: UN'ESPLOSIONE DA POLVERI CHE HA INIZIO IN UN SERBATOIO PROTETTO NON PUÒ PROPAGARSI ATTRAVERSO LE TUBAZIONI CONNESSE

Spesso si afferma che proteggere un vano (tramite sfogo o soppressione) abbia un effetto tale sulla propagazione delle esplosioni da



TEST DIMOSTRATIVO CONDOTTO DA FIKE CORPORATION (USA)

rendere superfluo l'isolamento delle stesse. All'inizio degli anni novanta, Chatrathi *et al.* [7] hanno condotto esperimenti sulle esplosioni da gas utilizzando un serbatoio da 2,6 m³ collegato a delle tubazioni, dimostrando che "[...] sebbene lo sfogo protegga un serbatoio dalle pressioni elevate generate da un'esplosione, non necessariamente impedisce all'esplosione di propagarsi ad altri serbatoi tramite le tubazioni".

Van Wingerden *et al.* [8] hanno provocato esplosioni da polveri con amido di mais, torba e polveri di frumento, al fine di studiare la propagazione delle esplosioni in un impianto integrato, comprendente un filtro a sacco da 5,8 m³ (dotato di pannelli di sfogo) collegato a un serbatoio da 2 m³ da un condotto di 15,24 cm lungo 21,95 metri. Gli esperimenti con l'amido di mais hanno mostrato una propagazione delle esplosioni in tutto l'impianto.

Successivamente, Holbrow *et al.* [9] hanno condotto test di esplosione con polveri di antrachinone, toner e carbone, utilizzando combinazioni di due serbatoi protetti (2 m³, 6,3 m³, 20 m³) collegati da una tubazione di lunghezza massima – 14,94 m (diametro da 15,24 a 50,8 cm). I test hanno dimostrato che l'esplosione che genera nel serbatoio principale può propagarsi a un serbatoio secondario anche se entrambi sono protetti da pannelli di sfogo (Figura 1).

Fike Corporation esegue regolarmente test dimostrativi presso il proprio stabilimento. Uno di questi test si svolge in un filtro di depolverazione connesso a due tubazioni. Nella Figura 2, si può osservare che, sebbene il filtro di depolverazione sia protetto, le fiamme riescono a propagarsi attraverso le tubazioni. In definitiva, è necessario l'isolamento chimico con bicarbonato di sodio (la nuvola azzurra sulla destra della figura) per estinguere le fiamme provenienti dalla tubazione.

Il fatto che un'esplosione da polveri da un serbatoio protetto possa propagarsi per lunghe distanze attraverso le tubazioni è ben illustrato anche dall'incidente verificatosi il 29 ottobre 2003 a Huntington, Indiana, negli Stati Uniti. In questo stabilimento, che produce ruote per autoveicoli, si originò un'esplosione da polveri di alluminio in un filtro protetto da un pannello di sfogo; tale esplosione si propagò in tutto lo stabilimento attraverso le tubazioni causando una vittima e sette feriti [10].

LEGGENDA N° 3: UN'ESPLOSIONE DA POLVERI NON PUÒ PROPAGARSI IN DIREZIONE CONTRARIA A QUELLA DEL FLUSSO DI PROCESSO

Un'altra convinzione diffusa è che un'esplosione da polveri non possa propagarsi in direzione contraria a quella del flusso di processo.

Per smentire questa tesi, Vogl [11] ha condotto test di propagazione delle esplosioni in un impianto di trasporto pneumatico composto da un tubo convogliatore da 39,93 o 47,85 metri (diametri di 10,16, 15,24 e 20,32 cm), un depuratore a ciclone e una ventola di aspirazione alimentata con la giusta concentrazione di polveri. Come combustibili sono stati utilizzati amido di mais, polvere di licopodio e farina di frumento. La concentrazione delle polveri nel tubo è stata variata fra 75 e 450 g/m³. Gli stessi autori, in uno studio successivo [12], hanno incluso un ulteriore serbatoio protetto. Entrambi i programmi sperimentali hanno dimostrato chiaramente che un'esplosione è in grado di viaggiare sia nella direzione del flusso di processo che in quella contraria, anche su grandi distanze.

Più di recente [5, 6], Fike Corporation ha messo in atto un vasto pro-

gramma sperimentale per studiare la propagazione delle esplosioni da polveri negli impianti di trasporto industriale.

A tale proposito, è stato allestito un impianto pilota di grandi dimensioni, comprendente un serbatoio protetto collegato a due tubazioni, presso l'area test di Fike Corporation. Tramite un ventilatore, sono state stabilite condizioni di flusso diverse (da 15 m/s a 30 m/s). È stato sviluppato uno speciale impianto di iniezione di flusso a massa costante, per generare condizioni di flusso rappresentative della fase di diluizione nella tubazione e nel serbatoio. Il sistema così allestito permette la variazione di diversi parametri, come la concentrazione delle polveri, la direzione e la velocità del trasporto, i parametri dello sfogo esplosione, l'ubicazione dell'accensione e la geometria dell'apparecchiatura.



TEST DI PROPAGAZIONE DELLE ESPLOSIONI DA POLVERI (CONVOGLIAMENTO ATTIVO) CONDOTTO DA FIKE CORPORATION (USA)



TEST DI PROPAGAZIONE DELLE ESPLOSIONI DA POLVERI CONDOTTI DA FSA (GERMANIA)

Fra gli altri risultati, il programma di ricerca di Fike Corporation ha dimostrato che la propagazione delle esplosioni da un serbatoio protetto è possibile sia nella stessa direzione che in direzione contraria al flusso di processo.

LEGGENDA N° 4: UN'ESPLOSIONE DA POLVERI NON SI RAFFORZA MAN MANO CHE SI PROPAGA

La letteratura scientifica presenta numerosi dibattiti sul comportamento delle esplosioni in serbatoi interconnessi. È stato dimostrato sperimentalmente che le esplosioni non solo si propagano, ma diventano progressivamente più dannose a causa di tre fenomeni principali [13]:

- *accelerazione della fiamma*: il flusso di gas generato dall'esplosione primaria in un serbatoio favorirà la propagazione della fiamma nelle tubazioni, aumentandone la superficie e la velocità di combustione e portandola quindi a velocità e pressione maggiori. Col tempo, la deflagrazione iniziale (subsonica) può diventare una detonazione (supersonica), con conseguenti pressioni di esplosione molto più elevate;
- *ignizione di fiamma*: quando le fiamme più grandi e veloci prove-

nienti dal serbatoio principale raggiungono il vano secondario, accenderanno il materiale incombusto residuo in modo più violento, portando a pressioni e velocità di esplosione superiori;

- *accumulo di pressione*: l'espansione del gas in seguito all'esplosione primaria aumenterà la pressione nelle tubazioni e nel vano secondario ("precompressione") prima del passaggio della fiamma, portando a un'esplosione più violenta rispetto a quella che si verificerebbe in condizioni ambientali.

Lunn et al. [14] hanno causato esplosioni da polveri di toner e carbone, utilizzando in diverse combinazioni due serbatoi controllati (2 m³, 4 m³, 20 m³) connessi da una tubazione lunga fino a 4,88 m (diametro di 15,24, 25,4 e 50,8 cm). È stato dimostrato che un'esplosione nel serbatoio principale può essere oggetto di propagazione e causare un'esplosione molto più violenta nel serbatoio secondario (sia in termini di velocità che di pressione massima dell'esplosione; si veda la **Tabella 1**). Lo stesso effetto è stato riscontrato, sebbene in misura inferiore, da Holbrow et al. in serbatoi protetti interconnessi [9]. Questo aspetto è ben illustrato anche da alcune delle peggiori esplosioni da polveri mai verificatesi negli elevatori per cereali [15]:

- nel 1982 a Metz, in Francia, un'esplosione da polveri originatasi in



VISTA DELL'ELEVATORE PER CEREALI DEBRUCE DOPO L'ESPLOSIONE (FOTO A DESTRA)

TABELLA 1: RIEPILOGO DI TEST SELEZIONATI SU SERBATOI DI CONTENIMENTO INTERCONNESSI EFFETTUATI DA HEALTH AND SAFETY LABORATORY (REGNO UNITO)

Serbatoio principale (m³)	Serbatoio secondario (m³)	Valore massimo della pressione dell'esplosione (bar)
2	20	8,4
20	20	11,4
2	2	14,7
20	4	19,7

un magazzino si è diffusa in tutto il condotto superiore e negli spazi fra i silos,

- nel 1997 a Blaye, sempre in Francia, si è verificata un'esplosione da polveri nel magazzino settentrionale, per poi propagarsi nel condotto superiore, fino a raggiungere l'estremità meridionale della stessa,

- nel 1998 a Wichita, Kansas, negli Stati Uniti, si verificò l'accensione delle polveri presenti nel tunnel orientale della serie meridionale di silos e l'esplosione si propagò per l'intero elevatore per cereali. In tutti questi casi, un evento principale di piccola entità si è rapidamente sviluppato in un'esplosione considerevole che ha coinvolto un intero stabilimento, portando al crollo parziale o totale di strutture in cemento armato.

LEGGENDA N° 5: TUBAZIONI DI DIAMETRO PIÙ PICCOLO NON FAVORISCONO LA PROPAGAZIONE DELLE ESPLOSIONI DA POLVERI

La propagazione delle esplosioni da polvere in tubi di diametro ridotto è sempre stata un argomento controverso. La tesi principale in materia afferma che la propagazione delle fiamme è sfavorita dalla dispersione del calore attraverso le pareti del tubo.

In alcuni degli esperimenti citati in precedenza [11], Vogl ha utilizzato una tubazione da 10,16 cm, osservando una propagazione totale. Van Wingerden *et al.* [8] hanno osservato diverse modalità di pro-

pagazione delle esplosioni in tubazioni da 15,24 cm, a seconda della reattività delle polveri: se con le polveri di frumento ($K_{St} = 55$ bar.m/s) non si è verificata propagazione, l'amido di mais ($K_{St} = 145$ bar.m/s) è stato in grado di alimentare una propagazione totale in quasi tutti i casi. Le conclusioni sono state che "più una polvere è reattiva, maggiore è la probabilità che le fiamme si propagano in tutto l'impianto e che gli effetti siano dirompenti". Tuttavia, si è anche osservato che "Le polveri con valori simili di K_{St} non mostrano sempre comportamenti affini quando si propagano all'interno di condotti".

Andrews *et al.* [16] hanno messo in atto un programma sperimentale completo in materia di ignizione di fiamma delle nubi di polvere. Hanno analizzato l'influenza di diversi parametri (dimensioni e sfogo del serbatoio principale, polveri, diametro e lunghezza delle tubazioni, presenza di ostacoli) sulla probabilità che una fiamma originata nel serbatoio principale si propaghi e dia fuoco ad una nube di polvere in un serbatoio secondario. Hanno utilizzato alternativamente un serbatoio da 2 m³ e uno da 20 m³ collegati da una tubazione lunga 4,88 metri (con diametri di 15,24, 25,4 e 50,8 cm) a un serbatoio da 18,25 m³ (serbatoio con accensione da getto di fiamma).

Sebbene la propagazione della fiamma non si sia verificata utilizzando il tubo da 15,24 cm collegato al serbatoio da 2 m³, la fiamma si è propagata in quasi tutti i casi utilizzando il serbatoio da 20 m³.

Secondo il programma di ricerca condotto da Fike Corporation con diversi combustibili [11, 12], la propagazione delle esplosioni è influenzata più dalla riduzione della pressione e dall'impulso sviluppato nel serbatoio principale (che siano generati da cambiamenti di K_{St} , della concentrazione di polveri o dell'area di sfogo) che dal diametro del tubo. Recenti test nell'impianto con tubazioni e serbatoio da 5 m³ di Fike Corporation, effettuati utilizzando tubi da 15,24 cm, hanno mostrato una propagazione completa nella direzione del flusso di processo e in quella contraria.

Sebbene le condizioni che determinano la propagazione delle esplosioni da polveri in tubi di piccolo diametro non siano state ancora pienamente acclamate, la loro capacità di propagarsi è stata chiaramente dimostrata da diversi ricercatori.

CONCLUSIONI

Un'analisi di vari incidenti ed esperimenti rivela che la propagazione delle esplosioni da polvere in tubazioni di tipo industriale è una realtà, non una leggenda. La storia dimostra che le esplosioni da polveri più devastanti sono avvenute quando la deflagrazione iniziale si è propagata e rafforzata, causando danni diffusi e numerose vittime.

Mentre per vani e apparecchiature vengono adottate tecniche di protezione dalle esplosioni, come sfogo e soppressione, la necessità di isolamento delle esplosioni viene sottovalutata a causa del persistere di una serie di leggende sulla propagazione delle esplosioni da polveri. Il presente articolo ha elencato alcune di queste leggende, smentendole.

La propagazione delle esplosioni è influenzata da numerosi parametri. Pertanto, una serie di conoscenze specifiche è di importanza fondamentale per determinare le condizioni in cui le esplosioni si propagano.

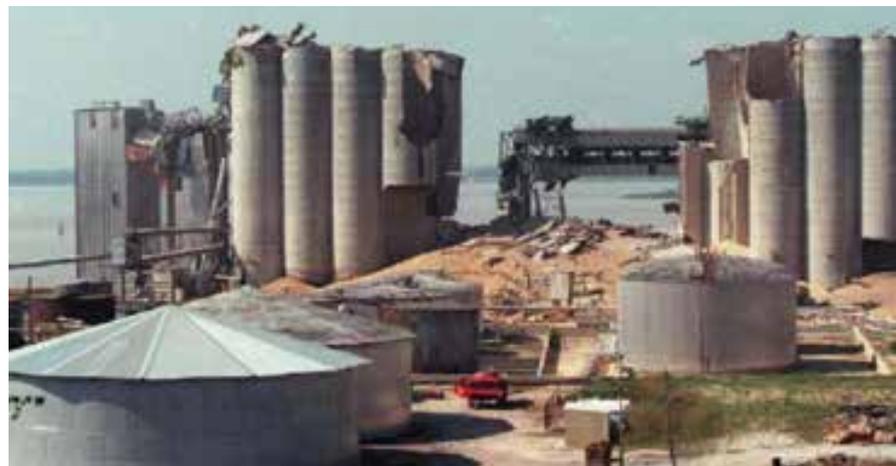
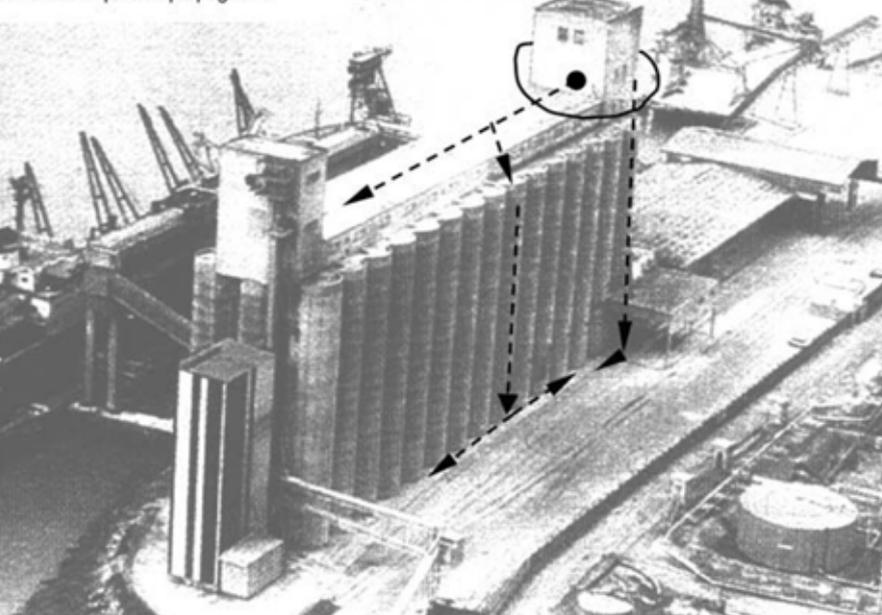
RINGRAZIAMENTI

L'autore desidera ringraziare il team di test di Fike Corporation (Tom Farrell, Josh Berry, John Sours, Jason Lechner, Tim Wolff, Nathaneal Wilson) per l'impegno impagabile nel condurre il programma di ricerca sulla propagazione delle fiamme. Inoltre, l'autore ringrazia Fike Corporation per il sostegno garantito con le risorse e i fondi necessari per mettere in atto il programma e il permesso di pubblicare il presente lavoro.

RIFERIMENTI

1. Amyotte, P.R., "An Introduction to Dust Explosions: Understanding the Myths and Realities of Dust Explosions for a Safer Workplace", IChemE, 2013
2. Eckhoff, R.K., "Dust Explosion in the Process Industries", 3rd edition, Elsevier, 2003
3. Tamanini, F., "Dust Explosion Propagation in Simulated Grain Conveyor Galleries", Technical Report FMRC J.I. OFIR2.RK. National Grain and Feed Association, Washington, D.C., 1983
4. Valiulis, J.V., Zalosh, R. G., Tamanini, F., "Experiments on the Propagation of Vented Dust Explosions to Connected Equipment", Process Safety Progress, Volume 18, Issue 2, 99-106, 1999
5. Farrell, T., Vingerhoets, J., Snoeys, J., Going, J., "Dust Flame Propagation in Industrial Scale Piping - Part 1: Empirical Study in a Conveying Vessel-Pipeline System", 9th Global Congress on Process Safety, San Antonio, Texas, 2013
6. Vingerhoets, J., Farrell, T., Snoeys, J., "Dust Flame Propagation in Industrial Scale Piping - Part 2: CFD Study of a Conveying Vessel-Pipeline System", 9th Global Congress on Process Safety, San Antonio, Texas, 2013
7. Chatrathi, K., DeGood, R., "Explosion Isolation Systems Used in Conjunction with Explosion Vents", Process Safety Progress, Volume 10, Issue 3, 159-163, 1991
8. van Wingerden, K., Alfert, F., "Dust Explosion Propagation in Connected Vessels", VDI Berichte 975, 1992

Assumed explosion propagation



RAFFIGURAZIONE SCHEMATICA DELLA PRESUNTA ESPLOSIONE (IN ALTO) E VISTA DEI DANNI CAUSATI DALL'ESPLOSIONE DI BLAYE

9. Holbrow, P., Andrews, S., Lunn, G.A., "Dust Explosions in Interconnected Vented Vessels", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 9, Issue 1, 91-103, 1996
10. Chemical Safety Board, "Aluminum Dust Explosion and Fire, Hayes Lemmerz International, Inc., Huntington, Indiana, October 29, 2003", Report n° 2004-03-I-IN, 2005
11. Vogl, A., "Flame Propagation in Pipes of Pneumatic Conveying Systems and Exhaust Equipment", Process Safety Progress, Volume 15, Issue 4, 219-226, 1996
12. Vogl, A., "Explosionsübertragung aus Behältern in Rohrleitungen pneumatischer Anlagen", VDI Berichte 1272, 1996
13. Bjerketvedt, D., Bakke, J.R., van Wingerden, K., "Gas Explosion Handbook", Journal of Hazardous Materials, Volume 52, Issue 1, 1-150, 1997
14. Lunn, G.A., Holbrow, P., Andrews, S., Gummer, J., "Dust Explosions in Totally Enclosed Interconnected Vessel Systems", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 9, Issue 1, 45-58, 1996
15. Taveau, J., "Secondary Dust Explosions: How to Prevent them or Mitigate their Effects?", Process Safety Progress, Volume 31, Issue 1, 36-50, 2012
16. Andrews, S.P., "Jet Ignition of Dust Clouds", Health and Safety Laboratory, 1998

Jérôme Taveau è consulente scientifico presso Fike Corporation, Industrial Protection Group. Fa parte dei comitati sulle polveri combustibili NFPA e ASTM E27. Lo si può contattare all'indirizzo jerome.taveau@fike.com.