

## 前言

爆炸乃因可燃性氣體、蒸氣或粉塵急速的燃燒而引起壓力升高之現象。爆炸決不是瞬間發生之現象，自爆炸開始至引起破壞工廠機械、建築物之壓力有一段時間存在。爆炸抑制裝置( explosion suppression system )，主要含事先感應爆炸起源處，並高速地散佈燃燒抑制劑，消滅火焰，抑制壓力上升之裝置。

此裝置最初於 1940 年，使用於飛機之燃料槽之爆炸防止。1950 年以壓力式感應與液態之鹵素化物滅火劑作為抑制劑，依照粉塵、氣體之不同，使用於工廠爆炸防止。最近，小規模容積 ( 10 m<sup>3</sup> 程度 ) 之抑制劑，限制使用於中等程度之激烈可燃物之爆炸抑制。1960 年也開始使用粉末抑制劑、水，隨著機器之改良進步，其應用範圍也逐漸擴大。現在無論任何等級之可燃物，大規模容積 ( 1,000 m<sup>3</sup> 程度 ) 者也可以抑制。

### 1. 由於可燃物燃燒而爆炸

#### (1) 燃燒與爆炸

燃燒是可燃物與氧氣起化學反應，產生大量熱能量之現象。為了燃燒，可燃物、氧氣和起火源須共存，可燃物與氧氣之反應，造成可燃物本身產生熱，接著為了產生連鎖反應，溫度加熱是必要的過程。

可燃性氣體或蒸氣排放至空氣中，形成可燃物、空氣之混合氣體，如果著火會成為燃燒反應帶 ( 火焰 )，於混合器內急速傳播而燃燒，此現象如果發生於密閉空間內，因為燃燒而產生熱，其影響會比在接觸開放狀態下還嚴重，密閉空間之溫度急速上昇，這就是爆炸現象。

將固體可燃物細粉化後，成為粉塵，比表面積增加，比表面積增加後，各粒子和空氣更容易接觸，變成更容易燃燒。因此，如果粉塵分散、浮游 ( 形成粉塵雲 ) 於空氣中，與氣體、蒸氣一樣會有引起爆炸之危險性。地板、樑柱所堆積之粉塵，不論何種原因，往上漂浮而分散浮游於空氣中，此時，如果有著火源存在，就會引起爆炸。

總而言之，爆炸、燃燒是因為發熱速度與放熱速度不平衡所引起的。

## (2) 爆炸壓力與壓力上昇速度

工廠等密閉容器、接近於密閉狀態之容器，如果引起爆炸就會產生很高之壓力，此時壓力上昇之速度，是決定到達破壞壓力時間之長短。圖 1 所示為密閉容器之中央，如果著火、引起爆炸時之容器內壓力之時間變化圖例。

此峰值（**peak**）壓力稱為最大爆炸壓力  $P_{max}$ 。爆炸壓力是由於引起爆炸之可燃物之濃度（粉塵雲濃度、氣體濃度）等產生變化而造成的。

爆炸壓力之時間變化曲線之最大斜率（**Slope**）稱為最大壓力上昇速度  $(dp/dt)_{max}$ ，此值是抑制裝置設計中最重要的因子。壓力上昇速度受到爆炸之容器容積大小之影響。圖 2 為不同容積之容器，在相同實驗之條件下，引起爆炸時之壓力、時間曲線之圖例。校正該容積所造成之影響，稱為“**Cubic Law**”（三次方定律），以下之關係式，可以得知相互關係。

$$(dp/dt)_{max} \cdot V^{1/3} = \text{const} (\text{bar} \cdot \text{m}/\text{sec}) \dots\dots\dots (1)$$

(1)式， $(dp/dt)_{max}$  是最大壓力上昇速度（**bar/sec**）， $V$  為容器之容積是（ $\text{m}^3$ ）。

此常數值，如果在  $V$  為 20 L 以上之容器中測量者，則與容積之內容積大小無關，數據還是一定，表示爆炸強度特性值，稱  $K_{st}$ 。（**st** 是德語 **staub**：粉塵之謂；氣體是  $K_G$ ）德國之工業規格 **VD 13673** 是使用  $K_{st}$  將粉塵做如表 1 之分類。

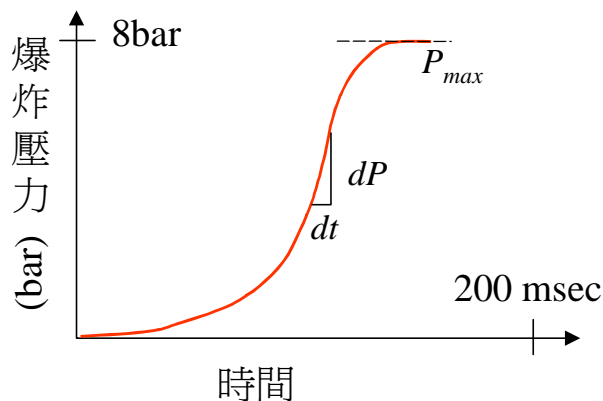


圖 1 因爆炸而引起容器內壓力變化圖例

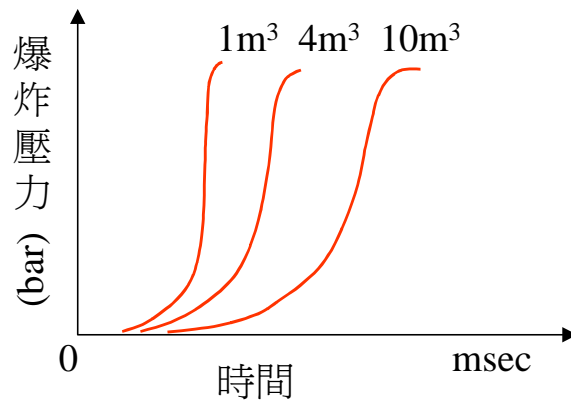


圖 2 因爆炸而引起容器內壓力受容器大小之影響

表 1 粉塵爆炸強烈分類表

Kst (bar•m/s)	爆炸等級	爆炸特徵
0	St 0	不會爆炸
200 以下	St 1	爆炸力小
超過 200，低於 300	St 2	強烈爆炸
超過 300	St 3	特別強烈爆炸

(3) 發火溫度

如果提升粉塵雲存在空間內之溫度，不久之後粉塵就會發火，此溫度之最低值，稱為粉塵雲之發火溫度  $T_c$ ，該值是表示粉塵容易爆炸程度，是抑制裝置設計中，重要之特性值。

(4) 可燃物濃度之控制

在製程中可燃物的使用難以避免，但可利用通風換氣設備控制使可燃物濃度不在爆炸範圍內。對粉塵而言，因其粒子有沈積現象，且沈積的粉塵可能受環境的影響被吹揚起，於侷限空間內達到爆炸範圍內之濃度，若遭遇火源可能產生危害。所以，對粉塵作業場所較難施行粉塵濃度控制，惟可以利用清潔或通風換氣方法來減少粉塵的堆積。或採用不易造成粉塵洩漏或飛散的機械設備。

(5) 惰化設計

當氧的濃度逐漸降低，物質產生的壓力和壓力上升速率都呈逐漸下降之現象，故可利用氮氣 ( $N_2$ ) 和二氧化碳 ( $CO_2$ ) 等非活性氣體將製程中的氧氣濃度減低至限氧濃度 (LOC) 以下，便可防止爆炸的發生，此種設計稱為惰化設計。

有些製造則利用真空方法來控制氧氣濃度，以避免爆炸產生，如真空乾燥設備等，而這類製程作回壓時，宜採用非活性氣體充填，以防止爆炸發生。

進行惰化設計的防護設備需具備氧氣濃度偵測器，並宜有控制系統隨著氧濃度的變化而自動控制非活性氣體的充填，維持氧氣濃度在限氧濃度以下。另外需有警告措施以告知作業人員該設備採用惰化設計，人員進入此等設備中進行清潔或維修前，必須先做設備通風和氣體分析，確定非活性氣體供應已關掉，且妥善地完全標示，通過許可後，方允許進入設備中，以防止人員因氧氣濃度不足而窒息。

#### (6) 著火源的預防

工廠著火源一般有電焊、香菸、切割等產生的明火與製程設備於操作中產生的電氣火花、機械火花、熱表面、炙熱物質、靜電等。工廠內應嚴禁煙火，若有明火作業亦應遵循動火許可制度等管理措施，電氣火花可選用合適之防爆電氣設備防範。

機械火花是一般工廠常見著火源，可經由研磨衝擊或摩擦產生，如設備的金屬零件掉落研磨設備中，經研磨輸送產生火花或是鼓風機的葉片與護罩接觸摩擦產生。一般機械火花的產生與金屬物轉動速率有極密切的關係，轉動的速度越快摩擦產生的機械火花越激烈，依經驗轉動設備之轉動速度若小於  $1 \text{ m/s}$ ，一般不會引起物質著火危害，但若超過  $10 \text{ m/s}$  則會有引起物質著火的危險性。避免機械火花的方法可藉由減低轉動金屬物的速度，選擇合適的機械設備材料，利用金屬磁性分離器或過濾器防止金屬零件進入設備中，同時加強擋板或護罩之結構強度，防止其因凹陷與葉片接觸摩擦產生火源。

當不慎發生局部摩擦時間過久，致使摩擦部位產生之熱量無法適當地排除，則此摩擦的局部位置會呈現非常高溫之熱表面，形成一個具有較機械火花更強的著火源。

熱表面產生的能量比機械火花高，一般物質的最小點火能量小於  $10 \text{ mJ}$  則有可能被熱表面與機械火花所引燃，但若物質的最小點火能量大於  $1 \text{ J}$  則物質可能被熱表面引燃，卻難讓機械火花給引燃。故宜藉由設備與各種機具的檢查來防止因疏忽而形成熱表面。

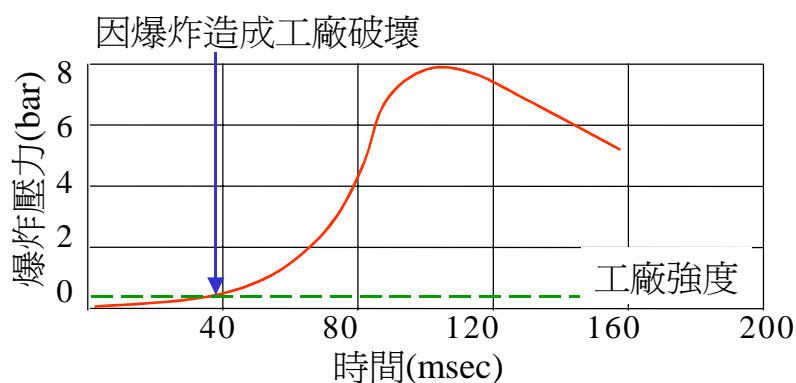
另粉體處理設備常因粉塵分佈不均或物質黏於牆壁、異常堆積現象而造成堆積的表面受熱硬化甚或結垢，內部粉體物質因蓄熱且熱量無法排出，而引起燻煙或自燃起火，成為製程中的火源，控制入料或製程處理速率可防止此種物質異常堆積而形成熾熱的物質團塊。

靜電亦常是許多工廠容易疏忽的引火源，往往因製程操作產生的靜電累積到達可燃物的最小點火能量而引起災害。製程中滾輪與輪帶的摩擦、噴嘴或龜裂口等高速噴出液體或氣體、金屬設備被旁邊流體管路所感應或物質卸料皆可能造成設備與物質帶電，而累積靜電。一般靜電產生的能量與放電形式有密切關係，常見的靜電放電形式有電暈放電（corona discharge）、刷狀放電（brush discharge）、大量粉堆放電（conical pile discharge）、火花放電（spark discharge）及射狀放電（propagating discharge）等。電暈放電是以放電的密度極小之微弱光形式放電，所以產生的能量極微弱，並不易引燃物質。刷狀放電主要是由非導體物摩擦產生，為放電密度較大的擴散狀中強光形式之放電，最高能量可達數 mJ，故可能引燃可燃性氣體或蒸氣及最小點火能量小於 3 mJ 的粉塵，常發生於製程中過濾介質或塑膠輸送管。大量粉堆放電其放電能量較刷狀放電大，產生的能量可達 10 mJ，可以引燃大部分可燃性氣體或蒸氣及最小點火能量很低的粉體如糖粉、澱粉、玉米澱粉、過氧化物粉塵，可由減低進料速度而避免。射狀放電為分離厚度小於 8 mm，且在導體層上的橡膠非導體層，其放電能量可達 1 J。故可引燃大部分氣體、蒸氣與最小點火能量小於 1 J 的粉體。若將設備使用導體材料即可避免。火花放電為放電密度極強的條狀強光，其能量可能產生至 1 J，故可引燃大部分氣體、蒸氣與最小點火能量小於 1 J 的粉體。

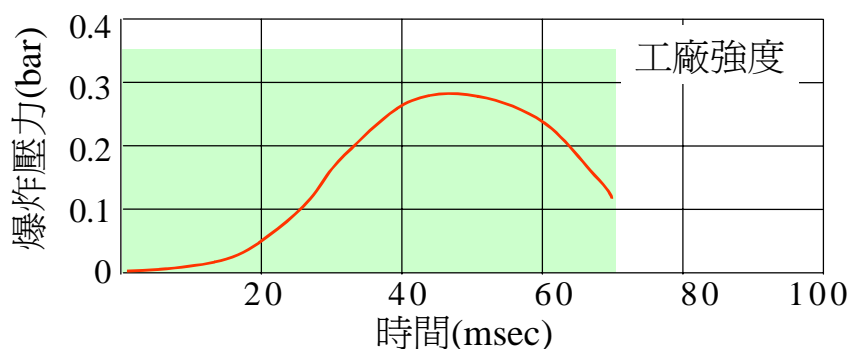
針對靜電危害的防止，工廠可以利用確實執行設備的接地、操作人員的接地及採用導體設備材料，並儘可能採低速輸送或入料，應可防止靜電對工廠造成的危害。

## 2. 爆炸抑制裝置之設備組成

抑制裝置是由爆炸之感應器、抑制器及控制單元（control unit）組成。抑制效果係受制於快速、正確之爆炸感應，和能夠包住逐漸擴大的火焰範圍之高速噴射抑制劑，圖 3 為抑制裝置之動作情形。



(a)無法抑制之爆炸



(b)抑制住之爆炸

圖 3 抑制裝置動作情形

(1) 爆炸的感應

由爆炸起源的燃燒開始，就會產生溫度、壓力及火焰。爆炸之火焰（產生放射之紫外線、紅外線）感應或壓力之瞬間傳播檢測以感應爆炸是很有趣的。惟溫度檢測，是因為溫度上昇之局部現象，其反應慢，所以不適合作為爆炸感應之檢測用。

碳氫化合物等可燃性氣體之爆炸感應係檢測與自火焰放射出之紫外線、紅外線之火焰感應器，為最有效的感應器。使用火焰感應器時，必須注意不可直接或間接的照射到陽光，必須先徹底觀察全部之防護空間後，再進行設置工作。火焰感應器對處理粉塵之

工廠並不適合，因為鏡面上會附著粉塵或粉塵雲本身會將火焰覆蓋，所以不適合該類型工廠使用。

密閉空間或接近於密閉容器之爆炸壓力波，因為自著火源以音速傳播，所以最適合一般使用之爆炸感應之偵測。以隔膜（diaphragm）與微動開關（micro switch）所組成之壓力感應器是以隔膜檢測壓力，如果壓力超過預先所設定之系統作動壓力 Pa 時，則微動開關就會使定壓式壓力感應器動作，作動壓力 Pa 是可以感應出平常壓力微小的壓力上昇而設定設置感應器之場所，必須先詳細調查平常之壓力變動幅度後再設定，平時壓力若會大幅變動，應預測出定壓式感應器會有感應延遲之現象發生，為檢測壓力上升率時應使用差壓式感應器。

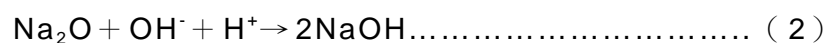
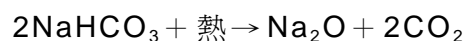
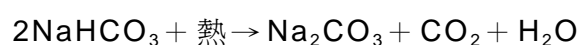
## (2) 爆炸之抑制

感應器如果於開始爆炸時感應，則管道、容器等防護空間就可以散佈抑制劑。抑制劑使用電器雷管於 1/1,000 秒打開高壓氣體容器的閥開關，以氮氣等加壓將抑制劑噴出。

抑制劑中有鹵素化合物滅火劑（海龍 1211，1301，2402）、水、乾粉抑制劑等，因為各個抑制劑之滅火作用、性質不同，有必要瞭解其特徵後再作選擇。含鹵素化合物之滅火劑在抑制效果、安全性、噴灑後整理的容易程度等方面而言，是最佳的抑制劑。惟其為臭氧層破壞物質，根據蒙特婁會議決定書，於 1993 年起禁止海龍 1301，2402 的生產；乾粉抑制劑之主要成份有磷酸銨與碳酸氫鈉。磷酸銨之抑制效果最大，為了安全性，使用後之清理工作必須慎重進行。相對的碳酸氫鈉與食品具相同等級之安全性，因為容易溶解於水，所以使用後之清理工作比較容易。

抑制劑靠冷卻作用、化學作用，切斷燃燒之連鎖反應以達到滅火效果，乾粉抑制劑、海龍滅火劑是使用化學作用來滅火；碳酸氫鈉則是利用燃燒熱分解產生金屬離子，與燃燒反應中所產生之游離基（自由游離基：OH<sup>-</sup>，H<sup>+</sup>）結合，抑制燃燒反應（產生熱）這種作用稱為負的觸媒作用。

碳酸氫鈉之反應式：



因水是利用冷卻作用來滅火，使火焰溫度降低至無法持續燃燒反應之界限值（發火溫度）以下，以充分的水量散佈於火焰面，可控制燃燒反應。本質上噴射之控制劑為：

- A 抑制、排除火焰面之熱產生，使火焰之溫度降低至自然發火溫度以下。
- B 使未燃混合氣體無法活化，妨礙熱傳導之進行，在粒子間形成物理性之阻止層，以抑制爆炸的發生。

為進行有效之抑制，有必要於防護空間整體中，以瞬間的速度、平均分散的抑制劑，選擇適用之抑制器尺寸、數量及設置場所，對於抑制裝置的有效性有很重要之影響。

### (3) 控制單元

控制單元是當感應器開始作動就會啟動抑制器，同時實施工廠作業之停止、發出警報。為了保持該裝置平時在正常狀態，有必要準備一旦回路故障、配線斷線接地之監視機能、常用電源故障時使用之預備電源等。

## 3. 抑制裝置之設計

### (1) 爆炸危險性之判定

系統之設計時，有必要掌握防護空間所引起之最適合爆炸形態。因此所謂的最適合爆炸形態係指因最大之壓力上昇速度  $(dp/dt)_{max}$  所產生之爆炸，抑制裝置同時也被要求以最快之感應速度來對付最惡劣的情形。如果可以抑制住此最惡劣之爆炸，無論任何條件下，其所有可能之可燃物爆炸都可以加以抑制。

國際化標準組織 ISO 或美國，德國等規定了可燃物之危險性，即燃燒特性之評估方法。該規定以標準之試驗裝置來表示爆炸之強度  $k_{st}$  值或檢測及評估粉塵雲之起火溫度  $T_c$ 。

### (2) 系統設計基準

抑制裝置之設計，有必要具備相關的專門知識，因為抑制效果優劣都依據許多參數，為了實現抑制效果，有必要儘早感應出爆炸的發生，另外在火焰傳播之前，有必要儘快散佈抑制劑於爆炸空間內，且抑制劑必須對火焰之滅火有效才可以。火焰滅火時，必要的抑制劑量是時間之函數，可以加以計算求得，如圖 4 所示，與抑制劑之供給量作重疊比較，可以預測抑制效果即最大可抑制之爆炸壓力  $P_{red,max}$ ，也可以評估其安全率。 $P_{red,max}$  為在製程設備



之耐衝擊強度，而且如果有充份之安全率就可以保證抑制效果。抑制效果之評估方法由 ISO6184/4 決定及確認。爲了確認抑制效果，其代表性之參數如表 2 所示。

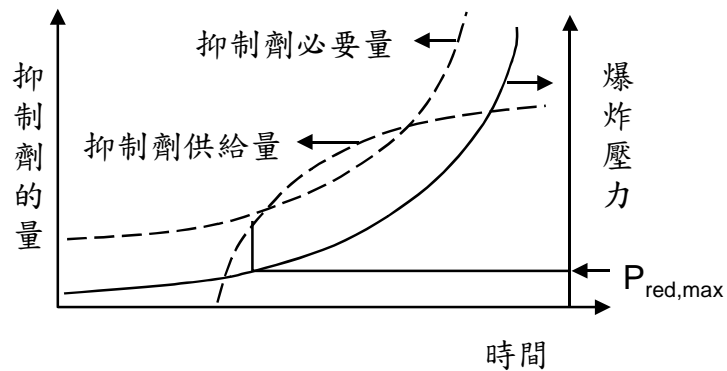


圖 4 抑制設置之設計原理 (抑制效果之確認)

表 2 系統設計參數

(1) 爆炸危險性 防護區間之容積、形狀 可燃物之燃燒特性 ( $P_{max}$ , $K_{max}$ , $T_c$ )
(2) 抑制裝置之規格 抑制劑之種類與特性 抑制器之容量與數量 抑制器之加壓壓力 抑制器之噴嘴形狀與尺寸 抑制器之配置 感應器之動作壓力( $P_d$ )

### (3) 抑爆設計

爆炸抑制是利用爆炸的初期階段，壓力的上昇緩和，可由檢測器檢測出此階段的微小壓力變化，隨後噴射抑制劑，於初期階段抑制爆炸，成功的爆炸抑制系統通常於爆炸壓力達 0.1 bar 時即可作動抑制劑，如此能將最大爆炸壓力減低至設備可耐受的 1 bar 左右（詳見圖 5）。此種裝置的好處，不只防止裝置破裂損壞，也可將爆炸封閉於裝置內，免除爆炸對設備的影響，亦適用於處理具毒性的可燃物料或容器上沒有多餘空間裝置洩放口的設備。抑爆系統包括偵測系統、抑制劑與噴灑系統、控制系統三部份（詳見圖 6）。

偵測系統乃是利用壓力偵測器偵測容器內壓力變化，並傳訊至控

制系統，由控制系統啓動高速噴灑系統噴出抑制劑，抑制火苗之蔓延與擴大。

目前抑制劑充填有 51、201、451 三種大小，最大充填壓力為 60 bar 與容器的連接閥有 3/4"和 5"二種形式。充填之抑制劑有海龍滅火劑、多效乾粉滅火劑（ $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ）和普通粉滅火劑碳酸氫鈉（ $\text{NaHCO}_3$ ），而水的抑制劑較適用於處理穀物和食品粉體的操作設備中。有效的抑制劑需能在極短時間被分散於防護設備中，故抑制劑的充填壓力與噴嘴形狀是決定其噴灑速率和範圍的因素，抑制劑的數量也是另一個有效抑制決定的重要因素。如果粉塵分佈為均勻的狀態，其所需高速抑制劑裝置數目（N）為：

$$N=0.113 * V_{\text{HRD}} - 0.76 * K_{\text{max}}^{2/3} * V^{2/3} \dots\dots\dots (3)$$

其中

N：設備裝置所需的高速抑制劑裝置數目。

$V_{\text{HRD}}$ ：裝抑制劑設備的體積。

$K_{\text{max}}$ ：粉塵的爆炸特性值。

V：設備裝置內的體積，此種體積適用於 1000 m<sup>3</sup> 以下的設備容器。

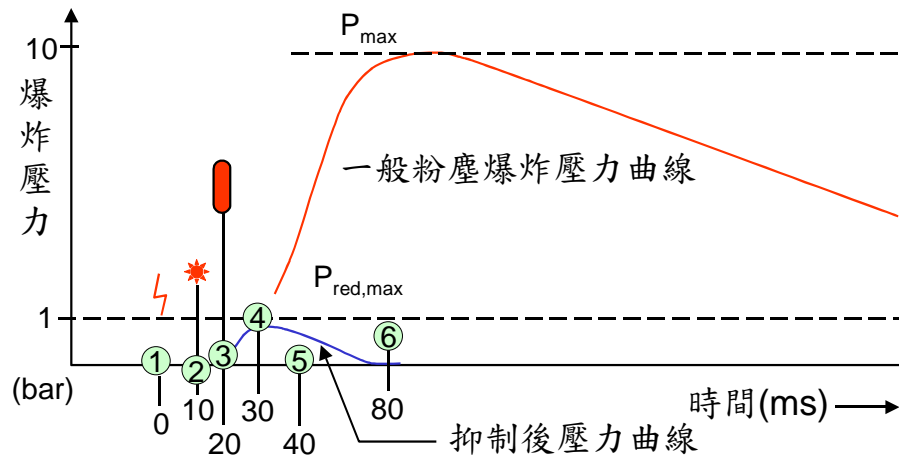
如果粉塵的分佈為非均勻的操作狀態，其所需高速抑制劑的數目約為：

$$N=0.0046 * V_{\text{HRD}} - 0.51 * K_{\text{max}} * V^{3/5} \dots\dots\dots (4)$$

控制系統包括接受偵測器訊號與作動措施的控制命令訊號，通常除了作動抑制噴灑系統外，亦作動其它安全裝置，如隔離設備、緊急應變警報設備、製程自動關掉系統和工廠自動灑水系統等。

#### (4) 耐爆設計

耐爆設計乃是將設備耐壓程度，設計到可耐其運作物質所能產生之最大壓力，一般粉塵作業製程之耐爆程度，需耐至 9 bar 的壓力，但不論設計的耐受壓力有多大，附屬的設備、容器也應能耐受此壓力，否則連接時會有弱點而破裂，通常此種的防護設備成本高，適用於小型過濾單元、小型流體化床、旋風分離機、旋轉閥及研磨機。



1. 著火 2. 偵測系統檢測出 3. 抑制劑 4. 抑制劑噴灑 5. 抑制劑噴灑 6. 抑制完成

圖 5 抑制系統作動與壓力變化圖

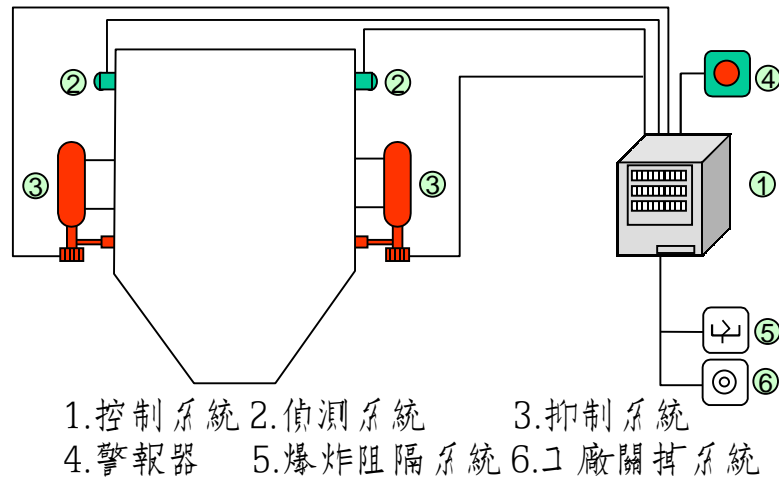


圖 6 抑制系統配置圖

#### 4. 其它系統 - 緊急遮斷系統

與抑制裝置同樣使用感應器與抑制劑，配管中形成抑制劑之阻止層，防止爆炸傳播。碳坑之坑道內，爲了防止碳塵爆炸傳播而使用水，在製程工業中之管道（duct）、箕式升降機（bucket elevator）的腳柱、輸送帶（conveyer）等使用乾粉抑制劑，已經廣泛地設置感應器以起動阻止層式遮斷系統（參考圖 7）。根據最近的研究，使用遮斷技術於碳氫化物之蒸氣管線（pipe line），防止爆震技術已不斷地實用化，（如圖 8 所示），使用感應器、抑制器、高速閘閥（Gate Valve）可以預防管線之蒸氣爆震。這種稱爲防爆震器（detonation arrester），可作爲紙回收裝置、石油之裝船、卸油用管線之新型爆炸預防使用，非常受

到注目。

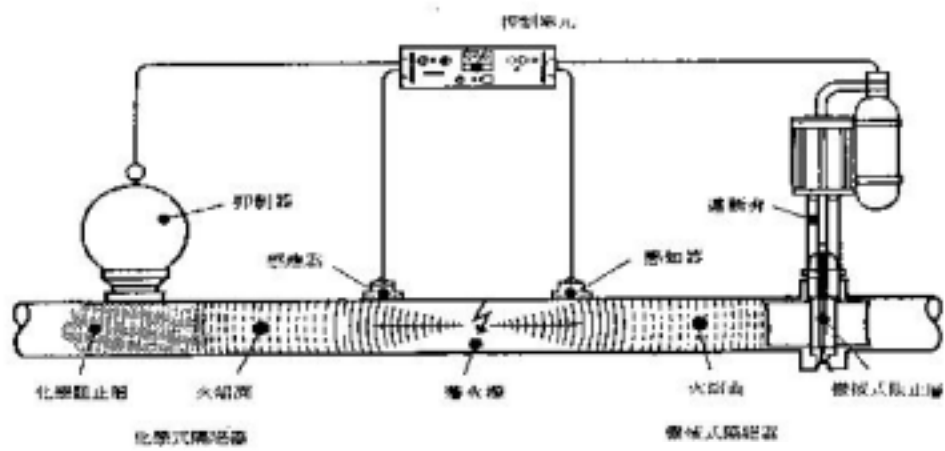


圖 7 爆炸遮斷系統

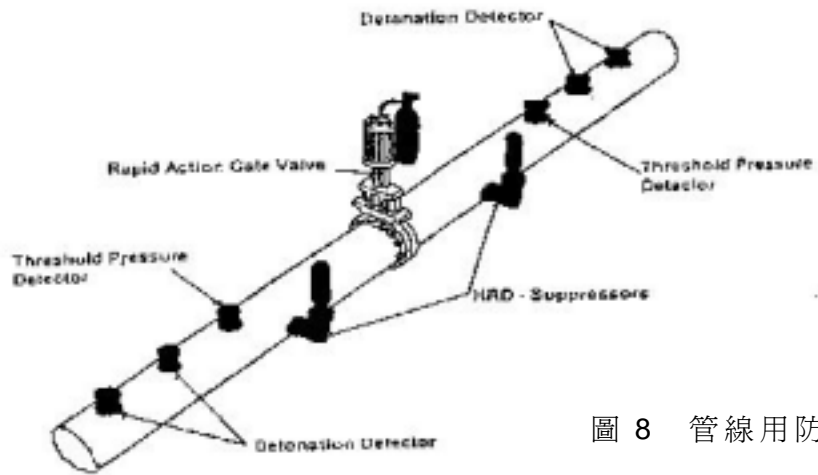


圖 8 管線用防爆震器

## 主要參考資料

1. F. P. Lees, 1996; "Loss Prevention in the Process Industries", 2nd Edition, ISBN 0-7506-1547-8, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, Vol. 1: 3/12-16.
2. American Society for Testing and Materials, 1983; "A Guide to the Safe Handling of Hazardous Materials Accidents", USA.
3. Trevor Kletz, 1991; "Plant Design for Safety : A User-Friendly Approach", ISBN 1-56032-068-0, Hemisphere Publishing Corporation, Loughborough, UK.
4. Daniel A. Crowl and Joseph F. Louvar, 1990; "Chemical Process Safety : Fundamentals with Applications", ISBN 0-13-129701-5, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
5. 高雄市政府勞工局勞工檢查所，1998；"氣體爆炸防護之研究"。
6. 謝明宏，1997；"火災爆炸危害控制與安全防護"，工業安全衛生，第 91 期：19-31。
7. 林木榮、林永芬、謝明宏，1996；"粉塵爆炸抑制效能分析報告（技術報告）"，工研院工安衛中心。