

易燃液體輸送靜電爆炸案例探討

張日誠

勞工安全衛生研究所 勞工安全組

一、前言

靜電為大自然中的一種自然現象，當一定條件下兩種不同的物質相互摩擦、接觸、分離起電，就可能產生靜電，輕者造成人體的感到不適，嚴重者可能引燃周圍易燃性環境，發生火災或爆炸事故。因此靜電問題及所造成的危害越來越引起人們的關注。在化學、石油、塗料、塑膠、印刷和電子等行業，容易有潛在靜電危害的問題導致意外事故發生，從而造成人員傷亡及財產損失。

在工業生產過程中靜電可能伴隨各種不同作業而產生，例如撕裂、剝離、拉伸、撞擊物質，粉碎、篩分、滾壓、攪拌、輸送、噴塗和過濾物料，還有氣、液體的流動、濺潑、噴射等各種操作，若靜電蓄積至危險程度，即會發生靜電放電。而靜電能夠引起各種危害的根本原因，在於靜電放電火花具有點燃之能量（電火花能量 W_H ），因此當靜電放電所產生的火花能量大於爆炸性混合物所需之最小點火能量（Minimum Ignition Energy, MIE），即 $W_H > W_i$ （周圍物質之最小點火能），就可能成為引起火災或爆炸之點火源^[1]。表 1 為一般空氣中具代表性物質的最小著火能量^[2]。

表 1 在空氣中物質之最小點火能量^[2]

物 質	最小點火能量 (mJ)
氣體蒸汽	0.1
液體微粒子	1
粉 塵	10
	5 (建議值)

根據本所 94 年研究報告資料庫統計顯示^[3]，以石化業所發生之火災或爆炸危害為最高，其次為化學材料業及化學製品等製造業，主要原因為石化業與化學工業多半為易燃性之液、氣體等物質，因此在靜電危害事故行業別中，這三類之比例為較高之發生比例。

而以作業製程與靜電產生的案例統計結果來看，如表 2 所示，液體傳送作業以摩擦帶電，發生靜電危害事故之機率為最高，其次為流動帶電。主要為液體（有的還會夾帶固體或液體雜質）在管道中高速流動，會與管壁大面積摩擦或者與容器壁及其它介質摩擦，從而導致靜電的產生。以及裝卸或貯存時，靜電會隨著液體進入、槽車或貯罐，自液面導向容器內壁，再由接地裝置導走。此過程中若在液面上進行取樣、檢尺作業或接地裝置不確實均易造成火花放電^[4]。故液體傳送作業時所引起之靜電危害，並非是由液體所產生之帶電所引起，而往往是因液體傳送過程中，其容器或其他物體反覆的發生接觸與分離過程，所引起之靜電火花引燃易燃性液體造成之事故危害。

表 2 作業製程與靜電產生方式之交叉比例分析^[3]

	摩擦帶電	剝離帶電	流動帶電	攪拌帶電	沉降帶電	噴出帶電	感應帶電	其他帶電	總計
材料成品輸送作業	18	-	1	1	-	1	2	2	25
薄片捲送作業	1	4	-	-	-	-	-	-	5
液體輸送作業	140	1	60	5	2	8	7	6	229
氣體輸送作業	1	-	2	-	-	26	1	-	30
粉體輸送方式	32	3	-	-	-	-	1	-	36
塗佈作業	2	-	-	-	-	-	1	-	3
印刷作業	-	1	-	-	-	-	-	-	
粉碎作業	4	2	-	-	-	-	-	-	6
乾燥作業	5	4	-	-	-	-	-	-	9
剝離作業	1	8	-	-	-	-	-	-	9
噴出作業	-	-	-	-	-	1	-	-	1
包裝作業	5	-	1	-	1	1	1	-	9
混和及攪拌作業	15	1	5	13	4	11	1	5	55
過濾及篩選作業	6	3	3	-	-	3	1	-	16
其他作業	39	8	6	16	3	23	8	14	118
合計	269	35	78	35	10	74	23	27	551

因此，靜電問題一直困擾著石化業的安全儲存。主要是因為大部分石化產品是電導率較低的碳氫化合物，且電阻率大於 $10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ 之液體都具有較大的帶電能力^[5]，如醚（Ether）、酯（Esters）、芳香烴

(Aromatic Hydrocarbons)、二硫化碳 (Carbon Disulfide,CS₂)、石油及油產品等常因靜電引起火災之事故亦時有所見。此外，靜電的產生與積聚，除與其物質本身的內在因素有關，還與生產過程和作業環節中介質的流速、壓力、管道內壁粗糙程度、管徑及其所含雜質等有關^[6]。另外，氣候對靜電的產生與積聚也有很大影響，在台灣一般每年11月份至次年的3月份氣候較為乾燥，在這期間靜電產生的頻率較高，所以必須要注意靜電問題。最後，還必須提及的是，人體在許多情況下都可能產生帶電的情況。人體所能感受到發生在人體上的最小火花能量約為1mJ^[7]，若發生人體靜電放電，會使人體遭受電擊，並且極易成為大部分的可燃性氣體或引火性液體之蒸氣的爆炸引火源，故亦是不容忽視的危險源之一。

二、職災案例

案例一：

2007年10月29日下午13時左右，位於美國愛荷華州某化學品儲運場所發生火災和一連串的爆炸^[8]，如圖1，該生產區正在進行乙酸乙酯 (Ethyl acetate) 注入300加侖桶槽分裝之作業，操作員利用合成橡膠軟管輸送溶劑至料桶頂部開口，不久聽到爆炸聲響，大火延燒至一座倉庫，並引燃所存放的其他易燃和可燃性液體，造成1名員工輕傷、及1名消防人員灼傷。

本次事故調查結果認定^[8,9]，在料桶開口附近可燃物蒸氣與空氣混合濃度已達可燃下限。雖當時料桶、磅秤與泵浦皆已有接地，但加料管嘴的鋼材部位與軟管裝置則被合成橡膠軟管所絕緣，而未聯結與接地，且易燃性乙酸以酯由上方噴濺入料，使液體向上飛濺成許多微小的液滴，產生的大量靜電荷。而靜電可能累積在這些組件上，其火花放電至不鏽鋼的料桶，引燃分裝作業時所累積在進料口附近的可燃性蒸氣，而一發不可收拾，如圖2所示。



圖 1 發生事故現場火球直竄天際^[8]

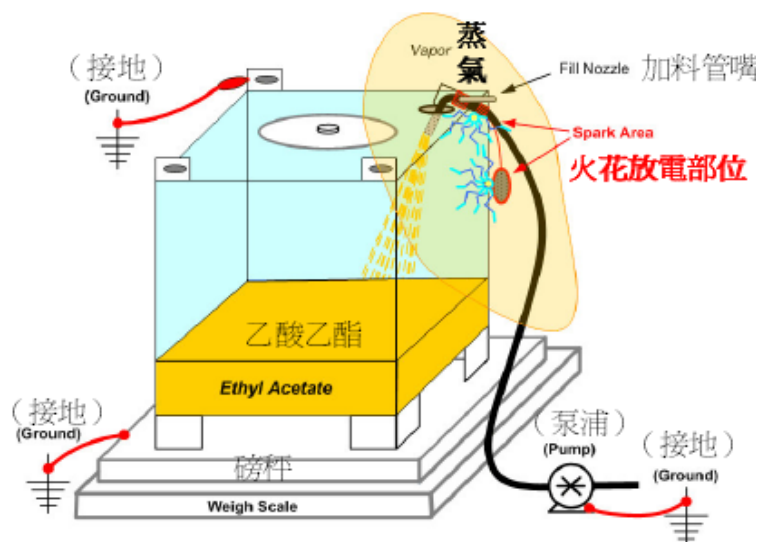


圖 2 300 加侖桶槽分裝之作業示意圖^[9]

案例二：

2008 年 11 月 11 日下午 14 時左右，位於桃園縣某生產防水塗料公司發生火災爆炸意外^[10]，事故發生當時，廠內正在進行溶劑型塗料生產製程，以有機溶劑甲苯 (Toluene) 及油漆溶劑混合塗料原料 (添加物) 進行混合攪拌之作業，在將底部甲苯桶槽以空氣加壓輸送甲苯溶劑注入至攪拌槽體上方的進料口內時，突然發生火災爆炸意外，兩名現場作業員其中 1 名重傷不治死亡、另 1 名嚴重灼傷。

根據現場操作人員敘述及災害發生後現場實物判斷^[10,11]，本案因以加壓空氣加壓方式，將地面鐵桶內之甲苯及油漆溶劑壓出，經過橡膠輸送管送至高度約 230 公分高作業平台之投料口，入料作業中使甲苯及油漆溶劑混合蒸氣揮發出來，輸送甲苯及有機溶劑過程因流體本身摩擦及與橡膠輸送管磨擦而產生之靜電引起爆炸，在甲苯及油漆溶劑桶與橡膠管線未設置靜電去除設施，後因人體或是物體接觸輸送管線引起靜電火花，引燃攪拌槽內部之甲苯及油漆溶劑混合蒸氣而發生爆炸，火勢在廠內蔓延並造成甲苯蒸氣與容器桶 BLEVE (Boiled Liquid Evaporate Vapor Explosion) 爆炸，發展出後續的延燒災害事故。



圖 3 發生事故之混合攪拌製程區^[10]

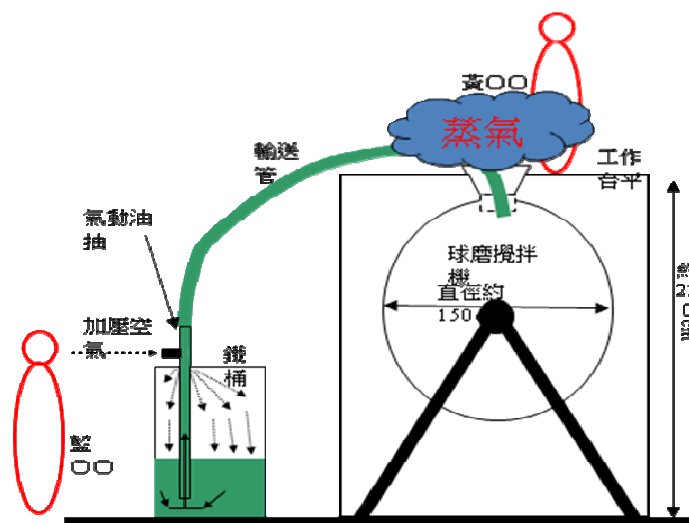


圖 4 入料作業示意圖^[11]

三、預防措施

靜電爆炸著火的條件為：靜電產生、累積並達到足以引起火花放電的靜電電壓，靜電放電和存在爆炸性混合氣體，因此為預防靜電火災爆炸的防護措施，應從以下條件著手。

(一) 聯結與接地 (Bonding and Grounding)

在兩容器之間做好聯結及接地之工作為防止在易燃液體傳輸當中產生靜電及火花之最有效之方法。

大部分靜電事故災害，是在接地不完全時所發生者。在大量操作容易發生靜電之溶劑等危險物的塗料製造，即對各設備、機器、容器等之金屬類全部須施予接地，是為防止靜電事故、災害之基本條件。

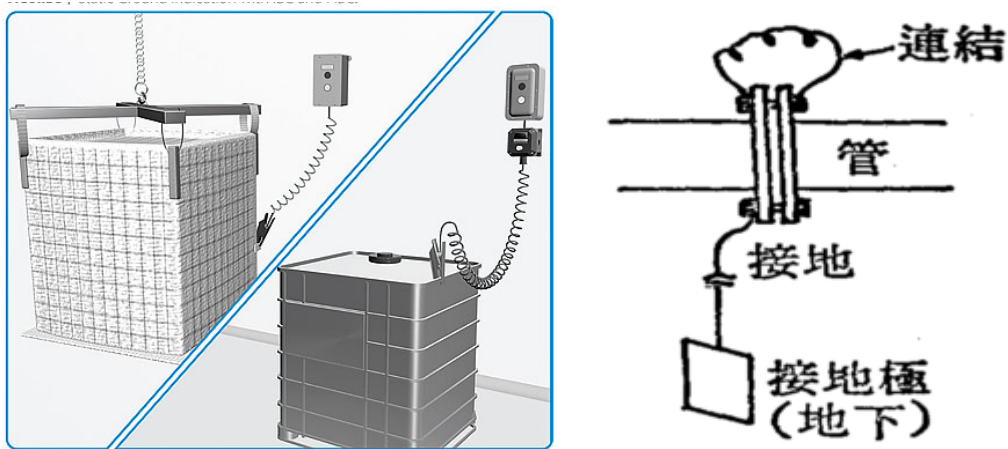


圖 5 容器或管線接地示意圖

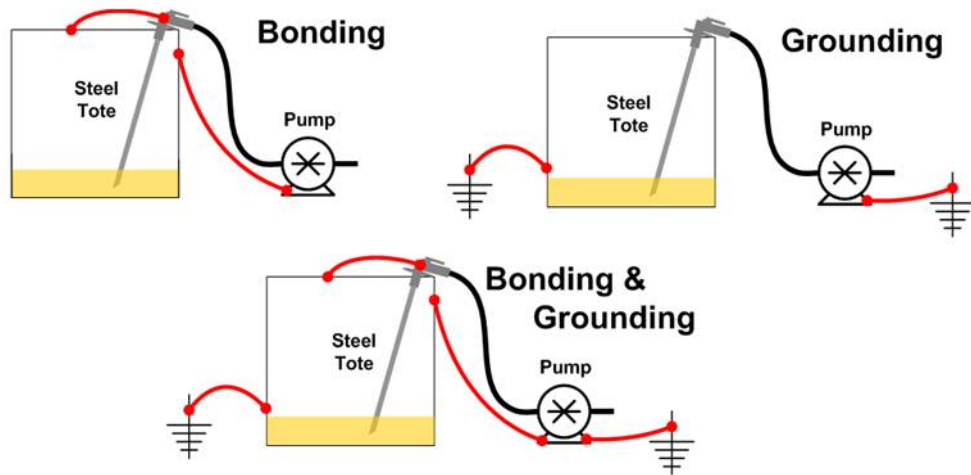


圖 6 容器與泵浦間之聯結與接地示意圖^[8]

(二) 加濕

在生產作業現場安裝空調設備、噴霧器或懸掛濕布片，以提高空氣的濕度，從而降低或消除靜電的危險。

一般60至70%的相對濕度會在物料上產生足夠的濕氣以避免靜電累積。甚至於靜電產生時，靜電會溜走，不會造成累積。相對濕度低會促進靜電發生。若在冬天室內相對濕度低於30%，作業過程中物料表面又沒有或一點點濕氣，大多數的靜電火災在此情況下發生。

表3 相對濕度之電阻值

RH (%)	相對電阻 (MΩ)
100	1
80	4
70	3×10
60	8×10 ²
50	3×10 ⁴
40	6×10 ⁷

(三) 靜電消除器

安裝靜電消除器是靜電中和法的具體應用^[12]。此類產品生產廠家較多，要注意選擇作用範圍大、消電效果好、耗電低、易於安裝和便於管理的靜電消除器，消除器要適應場所的電氣

安全要求。

表 4 靜電消除器之種類、特點及適用對象^[12]

種類	特點	適用對象
標準型	消除能力強，種類多	紙、布、羊毛、底片
送風型	消除範圍較遠較廣	管內、局部地點
加電壓式	防爆型	不會引起易燃物著火 易燃物存在之環境，如可燃性膠液塗佈等需防爆要求之場所
	直流型	正負離子產生比例可控制 產生特定極性電荷之製程，如高速傳送纖維、紙等
自放電式	簡單、便宜、易安裝，但消除能力受帶電體影響	布、紙、傳動皮帶、底片、橡膠、粉體
放射線式	沒有電暈放電問題，有放射線問題，消除能力較低	密閉具危險性及不允許有電源存在之場所

(四) 配管移送、填充

1. 防止液體飛濺

當易燃性液體之填充中在槽內等，有由於發生液體蒸氣及霧氣而形成爆炸性蒸氣雲之虞時，為防止發生霧氣伴隨發生靜電及放電，須依下列之任一項防止液體之飛濺。

- (1) 從設置於靠近槽底側壁之填充管嘴以水平填充。此時，填充管嘴端為防止液體之飛濺，最好加裝變流板。
- (2) 如槽車、油罐車等從槽頂端填充時，應使用能垂直通到槽底附近的下懸管。此時，下懸管下端最好做成液體不易飛濺之形狀，如圖5所示。且依據NFPA 77^[13]亦推薦的實務方式是以液下輸送方式入料。

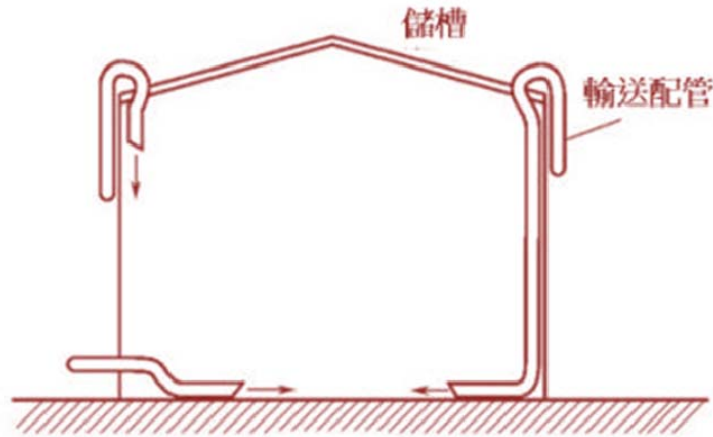


圖 5 輸送配管以液下輸送之設計

2. 初期流速限制

當填充可燃性液體之初期在槽內，有由於發生蒸氣等而形成爆炸性蒸氣雲之虞時，為防止發生蒸氣伴隨發生靜電及放電，須限制填充管內之流速為約1m/s。

(1) 最大流速限制 (在輸送管內) (參照表5)

導電率 10^{-10} S/m以下之可燃性液體(甲苯、二甲苯等)之最大流速限制值，即依下式算出^[14]。

$$vd = 0.25 \sqrt{(\sigma \cdot L)}$$

式中， v (m/s)：最大流速限制值

d (m)：填充用配管之直徑

σ (pS/m)：液體之導電率

L (m)：槽水平剖面之對角線長度

表5 最大流速之限制值例^[14]

配管內徑 (mm)	在 $L \leq 2.9$ 的流速 (m/s)	在 ≥ 7.2 的流速 (m/s)
80	4.8	-----
100	3.8	6.0
150	2.5	4.0
200	1.9	3.0

註：以 $\sigma=0.8\text{pS/m}$ 算出(L 在 2.9m 以下時，當作 $L=2.9\text{m}$)

3. 防止水分等之混入

若可燃性液體中含有水分、空氣等，即在配管內發生帶電之增加及槽內發生沉降帶電、浮上帶電，因此應盡量防止水之混入。

4. 過濾器（亦稱篩檢程式）

過濾器的濾芯相當於千千萬萬個平行的小管線，它將依照液體經管線起電的原理而發生極大的靜電之放電及著火。經實驗顯示^[15]，油品流速為1.5~5.8m/s時，過濾器所產生的電荷相當於20m管道和泵產生電荷的10~20倍。故應實施以下之對策。

- (1) 過濾器盡可能設置於配管之上端，且以其後（下游）之配管來緩和帶電電荷。
- (2) 為緩和帶電為目的在過濾器下游端，設置直徑大的緩和管。

5. 靜置時間

貯罐中剛注入的帶電液體，液體中的電荷不會馬上洩漏導走，為緩和液體帶電使待至由帶電的液面不會發生危險的靜電放電的程度，經填充後須靜置一定之時間方可實施，如表4所示。再者，由靜置時間的對策，是應與防止靜電發生對策、其他靜電器對策併合實施，不宜作為單獨之安全對策。

表6 靜置時間之推薦值^[14]

帶電物體之導 電率 (S/m)	帶電物體之容積 (m ³)			
	10 以下	10~50	50~5000	5000 以上
10 ⁻⁸ 以上	1 以上	1 以上	1 以上	2 以上
10 ⁻¹² ~10 ⁻⁸	2 以上	3 以上	10 以上	30 以上
10 ⁻¹⁴ ~10 ⁻¹²	4 以上	5 以上	60 以上	120 以上
10 ⁻¹⁴ 以下	10 以上	10 以上	120 以上	240 以上

(單位：分鐘)

6. 採取試樣、量尺度作業

採取試樣、檢尺作業，及填充等作業終了後，可依靜置時間施行，若無執行此對策時，以使用防止帶電劑，施予防止帶電。

(五) 人體靜電消除

人體在動作時，特別是穿著化纖類衣物，人體靜電可達2~15kV，故為減少靜電在人體上的積聚，可穿著防靜電鞋與工作服等防護措施。就典型的人體電容大約為 100 至 300 μF [16]，其電容值大小與所穿的鞋底厚度（如表 7）、所站之地面（表 8）、人體姿勢（表 9）等均有絕對的關係。因此，工作人員穿著靜電鞋，行走於抗靜電材質之地板，將可有效預防人體放電的發生。

另為確保安全，可在爆炸危險場所儘量設置本安型人體靜電消除裝置，並配用防靜電型採樣器、防靜電型量油尺和採樣繩電阻檢測儀等。且人員在工作場所不應穿脫、拍打衣物等。

表 7 人體電容與鞋底厚度之關係

鞋底厚度(mm)	0.25	0.5	1.1	12.8	46	89	155
人體電容(μF)	6,800	2,300	850	190	130	100	75

表 8 人體電容與地面之關係

電容(μF)	鞋 類	
	棉膠鞋	涼鞋
水泥	1,100	450
地 橡膠	220	200
面 木板	53	60
	鐵板	3,500
		1,000

表 9 人體電容與人體姿勢之關係

人體姿勢	單腳站立	雙腳站立
對地電容值(μF)	110	170

四、結語

靜電最為嚴重的危害是引起爆炸和火災，其在瞬間即釋，放電能量大是其引發靜電危害的突出特點。因此，對於具引發火災爆炸潛在危害之作業場所，欲避免火災爆炸事故之發生，應加強個人防護工作、廠房防火區劃之規劃、及滅火設備設置等相關安全措施，做好安全化設計，並充分掌握物料之基本火災爆炸特性，以制訂製程安全操作限制，規劃是當之預防與控制措施，才能將意外災害發生時將危害降至最低。

參考文獻

- (1) 村崎憲雄，靜電氣障災害対策手冊(上)，東京；マグロウヒル出版，1997年。
- (2) 勞工安全衛生研究所，IOSH 安全資料表—爆炸抑制系統安全設計，2008年。
- (3) 蘇文源、葉芳俊，工廠靜電危害案例之成因分析，行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所研究報告，2006年3月。
- (4) 許小群，化工生產過程中的靜電火災爆炸危害與防護，安全、健康和環境，Vol.4 No.10, p.13，2004年10月。
- (5) 冀和平、崔慧峰，防火防爆技術，北京；化學工業出版社，2004年4月。
- (6) 行政院勞工委員會，化學暨石油工廠之防災措施，1988年6月。
- (7) 中國集裝袋網，<http://www.fibcn.com>，2009年。
- (8) U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board (CSB) Case Study, Static Spark Ignites Flammable Liquid during Portable Tank Filling Operation, No. 2008-02-I-IA, Sep. 2008.
- (9) Center for Chemical Process Safety (CCPS), Static Electric Discharge Causes Fire, Process Safety Beacon, Dec. 2008.
- (10) 行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所，桃園○○股份有限公司火災職災鑑定報告，97年12月。
- (11) 行政院勞工委員會北區勞動檢查所，○○股份有限公司所僱勞

工藍○○及黃○○從事入料作業引起爆炸致一死一重傷職業災害案，97年11月。

- (12) 勞工安全衛生研究所，IOSH 安全資料表－靜電消除設備，2008年。
- (13) NFPA 77：Recommended Practice on Static Electricity, section 8.13.1.5.
- (14) 日本產業安全研究所技術指南，靜電安全指南，1978年10月。
- (15) 唐洪艦，淺談石油庫靜電的危害與預防，中國油脂，Vol.33 No.3, p.72，2008年。
- (16) 日本早稻田工學綜合研究所、日本東北橡皮股份公司，日本工業の靜電気災害は調べた—靜電気の災害の事例，東京，2003。