

球形瓦斯儲槽之熱效應模式與 相關法規研究

陳錫仁¹ 張承明² 吳鴻鈞² 林滿興¹ 趙富源¹

¹淡江大學化工研究所

²行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所

摘 要

液化石油氣 (LPG) 是一種非常重要的燃料外也是很多石化產品的進料；然而，液化石油氣亦伴隨許多重大火災與爆炸，其中一種災害為「液體沸騰氣體膨脹爆炸」(BLEVE)，係指液體貯存溫度大於大氣壓沸點溫度時，突然從封閉容器中釋放出來的一種物理現象。由於壓力突然釋放而使部份的液體氣化產生具爆炸性的蒸氣雲。大部分的 BLEVE 與可燃性液體有關，且大部分的 BLEVE 一旦被周圍的火源點燃常形成火球。此研究之目的主要在建立液化石油氣球形儲槽為火焰吞沒之熱效應模式，而其控制對策，包括撒水冷卻與兩儲槽間之安全距離也藉此模式提出分析，有關 BLEVE 現象引發之熱輻射風險分析一併提出。此研究發展之模式尚可應用到其它高壓氣體如乙烯、液氨等儲槽受火災危害時之安全評估。此外，我們亦探討以 API 法規為基礎，提供國內液化石油氣相關法規之修正參考。

關鍵字：液體沸騰氣體膨脹爆炸，球形液化石油氣儲槽，熱效應，法規

Thermal Response Model and Related Regulation of Spherical LPG Storage Tanks

Hsi-Jen Chen¹ Cheng-Ming Chang² Hong-Gen Wu²

Mann-Hsin Lin¹ Fu-Yuan Chao¹

¹Graduate Institute of Chemical Engineering, Tamkang University

²Institute of Occupational Safety and Health, Council of Labor
Affairs, Executive Yuan

Abstract

LPG is a very important fuel and chemical feed stock as well; however, it has been involved in many major fires and explosions. One of these incidents is boiling-liquid, expanding-vapor explosion (BLEVE). It is a phenomenon that results from the sudden release from confinement of a liquid at a temperature above its atmospheric-pressure boiling point. The sudden decrease in pressure results in the explosive vaporization of a fraction of the liquid and a cloud of vapor and mist with the accompanying blast effects. Most BLEVEs involve flammable liquids, and most BLEVE releases are ignited by surrounding fire and result in a fireball. The objective of this study is to develop computer model in order to determine the thermal response of LPG tanks involved in fire engulfment accidents. The assessment of protection measures, including safety spacing between tanks, water spray cooling, and prediction of tank failure, were analyzed. The risk associated with the thermal radiation due to BLEVE of the LPG tank was analyzed. The model used in this work can be applied to safety/reliability assessment of other pressure-liquefied-gas (PLG) tanks, such as ethylene, ammonia, and so forth. In addition, we studied API's regulation for purpose of suggestion in modifying the current domestic LPG-related regulations.

Key Words : BLEVE, Spherical LPG tank, Thermal response, Regulations

符號說明

A_1	氣體熱傳面積 (m^2)	H_{BLEVE}	BLEVE 中心的高度 (m)
A_2	液體熱傳面積 (m^2)	H_c	LPG 之燃燒熱 (kJ/kg)
A_{12}	氣體與液體接觸面之熱傳面積 (m^2)	h	熱對流係數 ($kW/m^2.K$)
A_{34}	沸騰熱傳面積 (m^2)	h_{1ah}	大氣與受熱氣體接觸槽壁的熱傳係數 ($kW/m^2.K$)
A_s	儲槽表面之水膜面積 (m^2)	h_{2ah}	大氣與受熱液體接觸槽壁的熱傳係數 ($kW/m^2.K$)
b_{wat}	水膜厚度 (m)	h_{12}	氣體槽壁對液體槽壁的熱傳係數 ($kW/m^2.K$)
C	方程式 11 中之常數 (=0.228)	h_{13}	氣體槽壁對氣體的熱傳係數 ($kW/m^2.K$)
C_{nb}	方程式 13 中之常數 (=0.015)	h_{24}	液體槽壁對液體的熱傳係數 ($kW/m^2.K$)
C_{pg}	氣體的比容值 (kJ/kg.K)	h_{34}	氣體對液體的熱傳係數 ($kW/m^2.K$)
$C_{p\ell}$	液體的比容值 (kJ/kg.K)	h_{fg}	蒸發潛熱 (kJ/kg)
C_{pw}	槽壁的比容值 (kJ/kg.K)	Ja	Jakob 數
C_{pwt}	水的比容值 (kJ/kg.K)	K	水之質傳係數 (=0.0083 m/s)
D	儲槽直徑 (m)	k	熱傳導係數 ($kW/m.K$)
D_{max}	最大 BLEVE 直徑 (m)	k_ℓ	液體熱傳導係數 ($kW/m.K$)
D_f	火源直徑 (m)	k_w	槽壁熱傳導係數 ($kW/m.K$)
E	表面放射通量 (kW/m^2)	L_r	火燄長度 / 火源半徑
F_{21}	觀察因子	ℓ	火燄長度 (m)
F_{rad}	輻射分率	M	灑水速率 (ℓ/m^2)
g	重力加速度 ($9.81 m/s^2$)	M_{wat}	水之分子量 (kg/kmol)
H	儲槽液位高度 (m)	m	方程式 13 中之常數
m''	單位面積之燃燒速率		

	($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)		(=4.1)
Nu	Nusselt 數	t_e	暴露時間 (s)
n	方程式 11 中之常數(=0.226)	V_l	氣體槽壁的體積 (m^3)
P^{sat}	水之飽和壓力 (Pa)	V_2	液體槽壁的體積 (m^3)
Pr	致死機率	V_g	氣體體積 (m^3)
Pr_L	Prandtl 數	V_ℓ	液體體積 (m^3)
Pw	大氣壓下水汽分壓 (Pa)	V_{wat}	在儲槽上灑水的體積
Q_E	BLEVE 之熱輻射量 (kW/m^2)		(m^3)
R	火球半徑 (m)	W	LPG 釋放的質量 (kg)
Ra	Rayleigh 數	X	火燄表面至接受物間的 長度 (m)
R_f	火源半徑 (m)	x	儲槽間之安全距離 (m)
R_g	氣體常數 (=8.314 $\text{kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kmol} \cdot \text{K}$)	Y	probit 變量
r	儲槽半徑 (m)	希臘字母	
S	火球中心至目標物的 距離 / 火源半徑	α	熱擴散係數 (m^2/s)
T_1	節點 1 的溫度 (K)	β	容積熱膨脹係數 (1/K)
T_2	節點 2 的溫度 (K)	ΔH_C	燃燒熱 (kJ/kg)
T_3	節點 3 的溫度 (K)	ΔH_v	在沸點的蒸發熱 (kJ/kg)
T_4	節點 4 的溫度 (K)	ΔH_v^*	修正蒸發熱 (kJ/kg)
T_a	環境溫度 (K)	ΔT	溫差 (K)
T_b	標準沸點 (K)	ϵ	火燄放射率
T_{sat}	飽和溫度	θ	時間 (min)
T_{wat}	灑水的溫度 (K)	κ	吸收係數
T_w	槽壁溫度 (K)	λ	平均火燄長度因子
t	槽壁厚度 (m)	μ	水的黏度 ($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$)
t_{BLEVE}	BLEVE 持續時間 (s)	ν	動黏度 (m^2/s)
ρ_g	氣體密度 (kg/m^3)		

- ρ_ℓ 液體密度 (kg/m^3)
- ρ_o 大氣的密度 (kg/m^3)
- ρ_w 槽壁的密度 (kg/m^3)
- ρ_{wat} 水的密度 (kg/m^3)
- σ_ℓ Stefan-Boltzmann 常數
($5.67 \times 10^{-11} \text{ kW}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$)
- σ_ℓ 表面張力 (N/m)
- τ 大氣穿透率

緒 言

液化石油氣其實是一種利用價值甚高的產品，除了廣泛當成燃料外也是許多煉油與石化工業基本原料的進料。此物質亦伴隨許多重大火災與爆炸，這些災害包括開放性蒸氣雲爆炸 (UVCE)、液體沸騰氣體膨脹爆炸 (BLEVE) 與火災。液化石油氣主要來自於天然氣與煉油氣。液化石油氣主要組成爲單獨或混合之以下碳氫化合物：丙烷、丁烷 (正丁烷或異丁烷) 加上少許的丙烯、丁烯等。丙烷在 38°C (100°F) 時需約 1380 kPa (200 psi) 的壓力將其液化，而丁烷在 38°C (100°F) 時需約有 415 kPa (60 psi) 的蒸氣壓。丙烷之爆炸界限 (燃燒範圍) 爲 2.1% 至 9.5% ，丁烷之爆炸界限 (燃燒範圍) 爲 1.6% 至 8.4% ，均屬「可燃性氣體」。一立方米的液化石油氣可揮發成 245 至 275 立方米的蒸氣，液化石油氣熱值很高，是甲烷氣的 2.5 至 3 倍，因此液化石油氣很小的儲存體積即有很高的儲存能量。理論上計算一公斤的丙烷氣引爆有 10.1 公斤的 TNT 當量，而一公斤的丁烷氣引爆有 9.91 公斤的 TNT 當量，所以每一公斤 LPG 引爆約有相當於十公斤 TNT 的能量。據美國 Garrison 報告「三十年石油/石化製造業百大災害」指出約有 30% 竟與液化石油氣相關〔1〕。BLEVE 一詞濫觴於解釋因過壓而造成化學反應槽破裂的災害〔2〕。

BLEVE 亦定義為所儲存之液體溫度大於大氣壓下之沸點造成容器嚴重的破裂。許多容器損害的形式屬於這一種類，LPG 儲槽的破裂是 BLEVE 中的一種，因發生重大災害而廣受注意。大部分的 BLEVE 常被周圍的火源點燃形成火球，火球的大小為容器體積、容器填充程度、氣體組成與槽內氣體的溫度和壓力的函數，半徑 50 公尺的火球是常見的。因為最初火球形成時，大部分的液體並未氣化與燃燒，然而在儲槽體破裂口附近持續幾分鐘激烈的燃燒結果造成猛烈的爆炸進而危害臨近的儲槽，伴隨爆炸所形成的碎片可散落至數百公尺之遙並危害臨近的社區。1926~1986 年全世界著名 BLEVE 案例可參見文獻〔3〕，其中最著名的為 1984 年在墨西哥的 Mexico City 發生的 LPG 儲槽爆炸事件，此事故造成了超過 500 人死亡與 7000 人受傷，Pietersen〔4〕詳細描述整個意外事件的經過。Birk 與 Cunningham〔5〕做了一連串有關 BLEVE 現象的實驗。Birk〔6〕做了大小體積不同儲槽在明火下的試驗。幾種廣為人知的儲槽 BLEVE 防護措施包括明火的預防、槽壁之灑水冷卻、保溫材料的使用及適當的壓力釋放裝置〔7〕。幾位研究人員提出了 LPG 儲槽之熱效應數學模式〔8〕〔9〕，但模擬的理念未盡相同。由於商業機密 Ramskill〔8〕在他的團併參數(lumped-parameter)模式省略了最重要的微分方程式，Beynon 等〔9〕則採用分配參數(distributed-parameter)模式。本研究主要提出球形 LPG 儲槽 BLEVE 之熱效應模式中最糟狀況的模擬、撒水冷卻的影響與兩儲槽間安全距離的效應。此外，我們亦估計 BLEVE 所引發的熱輻射致死區域。本研究可做為評估 LPG 儲槽安全性的參考。

熱效應模式

圖 1 表示儲存 LPG 之球形儲槽，圖中顯示儲槽部分充填並完全為火燄包圍(箭頭代表環境的熱輻射)，這相當於最糟的狀況。

況。其中有四個溫度節點需要計算，分別為槽壁與蒸氣及與液體接觸部份，槽內蒸氣及液體四個部份。基於以下幾個假設：
 (1)各節點溫度均勻分佈。(2)槽內各部份接受均勻之熱輻射。
 (3)太陽熱輻射可忽略。(4)槽體、LPG 及空氣之部份熱物性質不隨溫度變化而改變。整個系統可以幾個偶合的微分方程式描述之。藉由各節點與流體間之能量平衡分別可得：

$$\rho_w V_1 C_{pw} \frac{dT_1}{d\theta} = h_{1ah} A_1 (T_a - T_1) - h_{13} A_1 (T_1 - T_3) - h_{12} A_{12} (T_1 - T_2) + Q_E A_1 \quad (1)$$

$$\rho_w V_2 C_{pw} \frac{dT_2}{d\theta} = h_{2ah} A_2 (T_a - T_2) - h_{24} A_{21} (T_2 - T_4) - h_{12} A_{12} (T_2 - T_1) + Q_E A_2 \quad (2)$$

$$\rho_g V_g C_{pg} \frac{dT_3}{d\theta} = h_{13} A_1 (T_1 - T_3) - h_{34} A_{34} (T_3 - T_4) \quad (3)$$

$$\rho_\ell V_\ell C_{p\ell} \frac{dT_4}{d\theta} = h_{24} A_2 (T_2 - T_4) - h_{34} A_{34} (T_4 - T_3) \quad (4)$$

受熱氣體熱傳面積與受熱液體熱傳面積，分別可證明是：

$$A_1 = 2\pi r (2r - H) \quad (5)$$

與

$$A_2 = 2\pi r H$$

(6)

其中 $A_1 + A_2 = 4\pi r^2$ 。氣體與液體的槽壁接觸面積 A_{12} 可寫成：

$$A_{12} = 2\pi \sqrt{2rH - H^2} \quad (7)$$

沸騰熱傳面積 A_{34} 可寫成：

$$A_{34} = \pi (2rH - H^2)$$

(8)

槽體內液體體積與液位高度的關係可證實如下：

$$V_\ell = \pi (rH^2 - \frac{1}{3}H^3) \quad (9)$$

其中液位高度 H 為已知，槽內液體體 V_ℓ 即可算出，其它：

$V_1=2\pi r(2r-H)t$ ， $V_2=2\pi rHt$ ， $V_g=\frac{4}{3}\pi r^3-V_\ell$ 。自然對流熱傳係數 h_{1ah} 與 h_{2ah} 可用〔10〕：

$$h = 1.31(T_w - T_a)^{1/3} \quad (10)$$

因此可得 $h_{1ah}=1.31(T_1-T_a)^{1/3}$ ， $h_{2ah}=1.31(T_2-T_a)^{1/3}$

槽內流體與槽壁的熱傳係數 h_{13} 與 h_{24} 可依據公式〔11〕：

$$Nu = \frac{hH}{k} = C(Ra)^n \quad (11)$$

式中 $Ra = \frac{g\beta\Delta T D^3}{\alpha\nu}$

槽壁有效熱傳係數 h_{12} 可用〔8〕：

$$h = \frac{k_w}{\Delta x}$$

(12)

其中 $\Delta x = (k_{wt})^{1/2} \left(\frac{1}{(h_{1ah} + h_{13})^{1/2}} + \frac{1}{(h_{2ah} + h_{24})^{1/2}} \right)$ 。

最後，沸騰熱傳係數 h_{34} 可用〔12〕：

$$Nu = 0.304 \frac{Ja^2}{C_{nb}^3 Pr_L^m} \quad (13)$$

式中 $Ja = \frac{C_{p\ell}(T_w - T_{sat})}{h_{fg}}$

撒水冷卻為保護儲槽不致發生 BLEVE 現象之有效方法。假如加入撒水冷卻，我們需要增加一微分方程式來描述水膜的溫度：

$$\rho_{wat} V_{wat} C_{p_{wat}} \frac{dT_{wat}}{d\theta} = MA_s C_{p_{wat}} (T_{wati} - T_{wat}) + h_{wat} A_1 (T_1 - T_{wat}) + h_{wat} A_2 (T_2 - T_{wat}) + h_a A_s (T_a - T_{wat}) + Q_E A_s - Q_{wat} \lambda_{wat} \quad (14)$$

)

式(14)中，右邊第一項為水膜的顯熱，第二項為節點 1 之對流熱，第三項為節點 2 之對流熱，第四項為大氣對流熱，第五項為外在熱源，第六項為冷卻水之蒸發熱。

式(1)需修改為

$$\rho_w V_1 C_{pw} \frac{dT_1}{d\theta} = h_{wat} A_1 (T_{wat} - T_1) - h_{13} A_1 (T_1 - T_3) - h_{12} A_{12} (T_1 - T_2) \quad (15)$$

式(2)需修改為

$$\rho_w V_2 C_{pw} \frac{dT_2}{d\theta} = h_{wat} A_2 (T_{wat} - T_2) - h_{24} A_2 (T_2 - T_4) - h_{12} A_{12} (T_2 - T_1)$$

(16)

其中半實驗性質的熱傳係數 h_{wat} 為 [13] :

$$h_{wat} = 8500(Mr)^{1/3} \quad (17)$$

冷卻水之蒸發熱 Q_{wat} 為 [14]

$$Q_{wat} = \frac{M_{wat} K A_s P^{sat}}{R_g T_{wat}}$$

注意式(14)中 V_{wat} 為附著於儲槽表面水的體積，此體積的計算必須先知道水膜的厚度 b_{wat} ，可採用 Chen 等 [15] 之報告資料：

$$b_{wat} = 0.304 \left[\frac{(MH)^{1.75} \mu^{0.25}}{g \rho_{wat}^2} \right] \quad (18)$$

Robertson [16] 提出當儲槽火災發生時，臨近儲槽所接受熱輻射量超過 37.8 kW/m^2 時就可能產生危險。因此利用本文所提之熱效應模式可評估儲槽與儲槽之間的安全距離。圖 2 所示係圓柱狀火燄模式(solid flame model)，此種模式假設火焰為圓柱形，且其表面熱輻射量各點均勻，若假設平均火燄溫度與均勻放射係數，則 Stefan-Boltzmann 方程式可資應用：

$$Q_E = F \tau \epsilon \sigma (T_f^4 - T_a^4) \quad (19)$$

式中觀察因子 F (熱輻射作用於目標物之分率)，可由〔17〕：

$$F = \frac{1}{\pi S} \tan^{-1} \left(\frac{L_r}{\sqrt{S^2 - 1}} \right) + \frac{L_r}{\pi} \left[\frac{(A - 2S)}{S\sqrt{AB}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{A(S-1)}{B(S-1)}} - \frac{1}{S} \tan^{-1} \sqrt{\frac{S-1}{S+1}} \right] \quad (20)$$

其中， $R_f = D_f / 2$ ， $S = x / R_f$ ， $L = \ell / R_f$ ， $A = (S+1)^2 + L_r^2$ ， $B = (S-1)^2 + L_r^2$ 。而火焰長度 ℓ 則依據經驗式可得〔18〕：

$$\ell = 42D_f \left(\frac{m''}{\rho_0 \sqrt{gD_f}} \right) \quad (21)$$

式中 m'' 為單位質量之燃燒速率，可寫成：

$$m'' = m_\infty [1 - \exp(-\kappa \lambda D_f)]$$

其中 $m_\infty = 10^{-3} \frac{\Delta H_C}{\Delta H_V^*}$ ，且 $\Delta H_V^* = \Delta H_V + \int_{T_a}^{T_b} C_p(T) dT$

熱輻射風險分析

由熱輻射所造成皮膚的傷害一般可分為：一級、二級、三級灼傷，這取決於對皮膚的損害程度而定，皮膚的構造可分為三層：表皮、真皮與皮下組織，第一級灼傷傷及皮膚表面的特徵為紅腫、乾燥與疼痛；第二級灼傷傷及表皮(厚度 0.07-0.12 mm)，其灼傷特徵為皮膚組織形成水泡狀態，亦會紅腫；第三級的灼傷延伸至真皮(厚度 1-2 mm)是毛髮髮根與神經末梢等存在的區域，灼傷的皮膚會失去知覺、乾燥與呈現白色、黃色和黑色。二級與三級灼傷會導致殘疾，亦會有傷亡的機率產生，依皮膚灼傷的面積對個人年紀大小而不同，來自於火災的熱輻射量，能量的吸收幾乎百分之百，視溫昇大小與熱滲透的深淺，多多少少會造成皮膚的灼燒。火災所形成之熱輻射量熱傳進入皮膚的數學模式可視為一維熱傳問題〔19〕，熱輻射所造成之傷害統計模式常依據熱輻射強度與暴露時間而定，值得一提的是 BLEVE 所造成的熱輻射通量可高達 200-350 kW/m² 且火球可持續 10-20 秒鐘。

Eisenberg 等 [20] 提出機率單位方程式 (probit equation) 用池火與明火的熱劑量來估計對人體所造成傷害的程度。

$$Y = -14.9 + 2.56 \ln(t_c Q_E^{4/3}) \quad (22)$$

式中 probit 變量 Y 與致死機率 Pr 有關，可由下式表之：

$$Pr = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y-5} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$$

(23)

雖然上式之積分可在書上查出 [14]，但對特定 Y 值仍不方便計算 Pr 。為計算方便，我們將式 (23) 改寫成誤差函數 (error function) 即：

$$Pr = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{Y-5}{\sqrt{2}}\right) \right]$$

(24)

通常誤差函數的數值可由電腦計算得知，所以式 (24) 中只要輸入任意 Y 值即可算出致死機率 Pr ；反之， Pr 已知亦可求出 Y 值。

有許多公式可計算 BLEVE 的物性參數，其中較有用的公式是： $D_{\max} = 6.48W^{0.325}$ ， $t_{\text{BLEVE}} = 0.825W^{0.26}$ 與 $H_{\text{BLEVE}} = 0.75D_{\max}$ ，其中 D_{\max} 為最大火球直徑， t_{BLEVE} 為火球持續時間與 H_{BLEVE} 為火球的中心高度 [21]。BLEVE 發生時，物體接受到的熱輻射量亦可寫為：

$$Q_E = \tau E F_{21}$$

(25)

注意到大氣穿透率 τ ，可用一個包含溼度的相關式計算 [22]。

$$\tau = 2.02(P_w X)^{-0.09}$$

(26)

上式之適用範圍為 P_w 與 X 皆不得為零；例如，在 20°C 時，水之蒸氣壓為 $2,238 \text{ Pa}$ (17.54 mmHg)，在 70% 的相對溼度下，水汽分壓為 $P_w = 1,636 \text{ Pa}$ ，若 X 之距離為 150 m ，則 $\tau = 0.66$ 。

式 (25) 中，表面放射熱量 E 取代了需要火燄溫度的 Stefan-Boltzmann 方程式，Roberts [23] 與 Hymes [24] 則提

供了一個計算表面放射熱量的公式：

$$E = \frac{F_{\text{rad}} W H_C}{\pi D_{\text{max}}^2 t_{\text{BLEVE}}}$$

(27)

針對 BLEVE 對人的傷害，火球之幾何觀察因子可表為：

$$F_{21} = \frac{D_{\text{max}}^2}{4R^2}$$

(28)

最後，我們可以計算出火燄表面與接受者之間的路徑距離 X ，可表示成：

$$X = \sqrt{H_{\text{BLEVE}}^2 + R^2} - 0.5D_{\text{max}} \quad (29)$$

模擬結果與討論

利用適應性的 Runge-Kutta-Fehlberg[27]演算法，我們將方程式(1)~(13)寫成 FORTRAN 程式。我們可以改變 BLEVE 的變數以模擬 BLEVE 的現象，這些變數包括外在的熱源、儲槽的填充程度與儲槽的體積。圖 1 為火燄完全包圍的儲槽溫度分佈的四個節點。圖 3 表示在相同外在熱源(100 kW/m²)四個節點的溫度變化，LPG 儲槽的安全界限定為 600°C，超過這個溫度會導致儲槽因金屬疲勞超過最大允許應力而破裂。圖 4 表示節點 1 在 Q_E 為 100 kW/m²、125 kW/m²、150 kW/m²、175 kW/m² 與 200 kW/m² 之溫度變化，很明顯的外在熱源愈高，儲槽愈快破裂。通常環境溫度到達大約 40°C 時 LPG 儲槽就應該灑水冷卻，為了模擬此種情況，式(14)~(18)需結合式(3)~(13)。圖 5 表示出灑水冷卻對溫度的變化。圖 6 顯示出不同灑水量(從 2 到 8 ℓ/m².min)對儲槽的影響。為瞭解不同的儲槽安全距離之影響，式(19)~(21)

與式(1)~(13)併聯，節點 1 溫度模擬的結果如圖 7 所示，由圖可得知較遠的距離儲槽較安全。圖 8 用式(22)與式(24)顯示出致死機率對熱輻射強度與暴露時間的關係。茲以流程圖(圖 9)評估 BLEVE 的危險範圍：首先輸入燃燒液體的質量(W)、燃燒熱(Hc)、輻射分率(F_{rad})、水汽分壓(P_w)與致死機率(P_r)，其次計算 D_{max} 、 t_{BLEVE} 、 H_{BLEVE} 及式(24)中之 Y 值，將式(26)、(27)、(28)、(29)代入式(25)，可得危險半徑 R 的代數式，此為非線性方程式的根，需滿足 Q_E 除以 $\tau E F_{21}$ 等於 1(另註： Q_E 可由式(22)求得，因為 Y 值與 t_e 現為已知，且 t_e 等於 t_{BLEVE})。危險區域即為此半徑所包圍的一個圓形範圍，此危險區域通常會延伸進入住宅區。LPG 不同洩露量對危險半徑與致死機率的影響如圖 10 所示，不同洩露量對熱輻射接收量與致死機率的影響如圖 11 所示，從這兩個圖形，可看出危險半徑愈大，致死機率愈小，而熱輻射愈強致死機率愈大。若在儲槽之間有不適當的安全距離，圖 5~11 可協助我們訂定一個保護程度的標準。再者，對於安全法規的制定者與 LPG 儲槽的監督管理者，此模式亦能提供相當大的幫助。根據 API(1989)〔25〕，當儲槽火災發生時，外在火燄的高度超過槽內液位是非常危險的。直接暴露於火燄大約經過 10-30 分鐘後，儲槽就會爆裂，而爆裂的確實時間與熱源的強度、暴露於火燄中的槽壁面之厚度有關，這與我們所提之熱效應數學模式的結果是一致的。

法規研究

以美國石油學會(API)之法規為參考[25][26]，將液化石油氣儲槽之設計與建造描述如下：

1. LPG 儲槽的設計與建造

此標準涵蓋液化石油氣在煉油廠、海域接收站、天然氣處理廠、石化工廠、儲槽區、灌裝和卸載系統、消防保護系統及相

關裝備的設計、建造與位置。安裝的大小和類型、環境區域(商業區、工業區或人口密集的住宅區)、相關設備的位置、地形和氣候情況也必需審慎考慮。

2. 位置場所

位置的選擇意謂針對儲存設備在火災或爆炸時，使其對鄰近的設備與財產的潛在危險能減至最低。在位置選擇時，下列各項因素需要考慮：

- (1) 與居住社區的距離
- (2) 與公路的距離
- (3) 對鄰近設備的危險性
- (4) 儲槽的儲存容量
- (5) 對鄰近產業的發展性
- (6) 位置的地理與氣候環境，包括海拔和地形坡度
- (7) 對緊急狀況的應變
- (8) 公共設施的取得
- (9) 地區對產物的接收與外送
- (10) 地方法律和規章

3. 安全距離

這些標準的特徵趨向於如何避免較大的意外事件。在可燃性氣體洩漏並被點燃時所造成的重大災害中，最小安全距離的存在，將可對鄰近儲槽、裝置、設備所暴露的危險減至最低，並提供適當必要的保護。安全分析(safety analysis)和擴散模式(dispersion model)，在評估安全距離方面為減低對鄰近設備造成災害的有效方法。最小安全距離的需求如下：

- (1) LPG 高壓儲槽與鄰近財產線(shell-property line)之間的最小安全距離，如下表所示：

LPG 高壓儲槽與鄰近財產線(shell-property line)之間的最小安全距離

儲槽的水容量(公升)	最小安全距離(公尺)
------------	------------

7,570-113,550	15.24
113,551-264,950	22.86
264,951-340,650	30.48
340,651-454,200	38.1
大於 454,201	60.96

在對住宅，公共建築物，裝配廠或位於鄰近財產的工業位置，必需提供較大的距離或其他輔助的保護。

(2)介於兩 LPG 高壓儲槽或 LPG 高壓儲槽與其他危險可燃性儲槽殼到殼(shell-shell)的最小水平安全距離，必需符合下列各項規定：

- A.介於兩球型儲槽之間、球型與立式儲槽之間或兩立式儲槽之間的最小安全距離為 1.52 公尺或較大儲槽直徑的一半，選擇一個比較大的數值。
- B.介於兩臥式儲槽之間、臥式與球型或立式儲槽之間的最小安全距離為 1.52 公尺或較大儲槽直徑的四分之三，選擇比較大的那一個數值。

(3)LPG 高壓儲槽與非高壓或易燃的儲槽的最小水平距離必需符合以下各項：

- A.如果另一個儲槽是冷凍儲槽，安全距離為較大直徑中的四分之三。
- B.如果另一個儲槽是常壓儲槽，且所設計儲存的物質其閃火點小於 37.8°C，安全距離為較大儲槽的直徑。
- C.如果另一個儲槽是常壓儲槽，且所設計儲存的物質其閃火點大於 37.8°C，安全距離為較大儲槽直徑的一半。
- D.最遠安全距離為 30.48 公尺。

(4)在 LPG 儲槽的殼邊到建築物之間的最小水平距離如下：

- A.如果建築物用做為儲槽設備的控制之用，安全距離為

15.24 公尺。

B. 如果建築物做為其他目的使用(與儲存體設備的控制無關)，安全距離為 30.48 公尺。

(5) 其它設備與 LPG 槽殼之間的最小水平距離：

A. 製程塔槽，安全距離為 15.24 公尺。

B. 燃燒塔或其他含暴露的火焰的裝備，安全距離為 30.48 公尺。

C. 其他的燃火設備，包括加熱爐和公用鍋爐，安全距離為 15.24 公尺。

D. 轉動裝備，安全距離為 15.24 公尺(除了 LPG 儲槽的吸取幫浦，安全距離為 3.05 公尺)。

E. 電力傳輸線和變電所，安全距離為 15.24 公尺。除此之外需注意電力傳輸線斷裂時不會掉落在儲槽上。

F. 槽車或火車的灌裝和卸載設備，安全距離為 15.24 公尺。

G. 可航行的航路、碼頭或港口，安全距離為 30.48 公尺。

H. 與固定的內燃機引擎，安全距離為 15.24 公尺。

另外，LPG 槽殼和防液堤的最小水平距離是 3.05 公尺。

依據上述的安全距離規章，我們以台灣常見的標準大型 LPG 儲槽(2,000 公秉)為 5 中心，畫出同心圓的安全距離如下圖 12。

4、LPG 高壓儲槽和設備的位置

LPG 高壓儲槽不可置於建築物內，或可燃性液體儲槽及冷凍儲槽可能溢出區域的附近。臥式 LPG 儲槽若容積超過 12,000 加侖(45 公秉)，其所組成的槽區不可超過六個。每個槽區與鄰近槽區之間的殼對殼最小水平距離為 15.24 公尺。

另註：每個臥式儲槽需要定向，長軸端(longitudinal axes)不可指向其它鄰近的儲槽、製程設備、控制室、灌裝或卸載設備及其他可燃或易燃的液體儲存設備。

5、排水

在儲槽地下或周圍需設有排水設備，使溢出的液體能排到安全區域而遠離儲槽，並可防止積水，其傾斜的坡度至少需百

分之一。

排水系統用來避免溢出的液體在儲槽下到處流動且能在LPG溢出時對管線所造成的危害減至最低。溢出排水區域除了此標準允許之外不能內含其他設備。防火牆、防火堤、渠道或溝流等輔助排水系統可允許在此區域內。

6、防液堤

在儲槽周圍的防液堤用來作為包容溢出物的包含，堤防區域的設計必需依照下述的規定。

- (1) 儲槽下圍處所洩漏或溢出的任何液體需被集中於堤防區域的邊緣，並被導離儲槽與任何管線設備，最小的傾斜坡度至少必需百分之一。
- (2) 若為LPG球型儲槽，則每個球體將必需有專屬的堤防區域。
- (3) 若為LPG臥式儲槽，一個槽區只需有一個堤防區域。
- (4) 在堤防區域裡面的滯留量將至少為最大儲槽體積的百分之二十五。假如儲槽所儲存的物質其蒸汽壓在溫度100°F時小於100 psia時，在堤防區域裡面的滯留量將至少為最大儲槽體積的百分之五十。
- (5) 蒸汽壓由於隨氣候的情況或材質的物理性質而改變，所以堤防區域裡面可能必需提供比上述更大的滯留量。
- (6) 土製防液堤或防液牆需高0.46公尺以上，若為水泥、磚塊或其他抗侵蝕材料建造則需0.31公尺以上。
- (7) 若防液堤高度高於1.83公尺，在防液堤周圍必需預留正常或緊急進出口。
- (8) 若防液堤高度高於3.66公尺或自由通風受防液堤限制時，需有能正常操作管閥及攀上槽頂的設施。
- (9) 用來包圍LPG儲槽的任何防液堤或防液牆，應有自由通風之設計，並避免未經認可的車輛進出。
- (10) 如果用來包圍LPG儲槽的防液堤或防火牆之地面不能在24小時內使雨水消散，則必需安裝排水系統。

結論與建議

1. 本文除了提供一個球形瓦斯儲槽為火燄包圍最糟狀況的熱效應模式，同時亦指出與 BLEVE 相關之熱輻射風險，這些結果或許對關心 LPG 儲槽安全的人員有所幫助。此外，此研究發展出的技術尚可應用到其它高壓液化氣 (PLG) 如氨、乙烯、丁烷等之安全評估。本文只探討儲槽受熱之溫度效應，尚未探討受熱後之壓力效應，值得一提的是 LPG 儲槽通常設計工作壓力在 $17.6 \text{ kg/cm}^2\text{g}$ (250 psig)，安全因子為四倍，然而，當 BLEVE 發生時儲槽破裂的壓力大約在 $21.1\sim 28.1 \text{ kg/cm}^2\text{g}$ (300~400 psig)，這說明了金屬受高溫影響其容忍之最大允許應力遠比儲槽破裂壓力來得快，我們認為更進一步的發展儲槽受火燄包覆時的壓力效應模式是必要的。
2. 研究指出 BLEVE 發生時，將造成十分嚴重的災害，由國外爆炸事故統計得知許多 BLEVE 事故是因瓦斯儲槽爆炸所引起的，LPG 是目前國內主要民生用燃料，所以瓦斯儲槽的設計、工廠佈置及安全措施等相關法令規章的訂定是迫切需要的。王安石曾云：「制而用之存乎法，推而行之存乎人」，是法貴能行，但工欲善其事，必先利其器。國內瓦斯儲槽之法規並未建全，本文研究期間蒐集與整理時常覺得有其修改之必要，並提出以下建議以茲參考：
 - (1) 適用性：國內多為參照日本與美國之相關法規，台灣地狹人稠、天候與地理環境並不與日本與美國相同，法規定訂之時需與有關學者專家及現場實地操作人員共同商討，以確保其實用性與有效性。
 - (2) 整體性：美國石油學會針對 LPG 制定了專屬之法規，而國內「高壓氣體勞工安全規則」中並無明確顯示，當以

整體性與系統性的編輯，檢索時才不至於誤漏以達清晰連貫。

- (3)簡明性：隨社會的進步、工廠的林立與環境的變遷，法規內容更趨複雜，是故減少法規繁雜，以利擷取時發揮其實效有其必要性。

3. 根據以往的經驗，高壓 LPG 儲槽火災不但嚴重且難以控制並常波及其他設備與人員的安全，更損害儲槽本身，故評估儲槽保護安全措施實為政府與事業單位最需重視之計畫。本研究小組綜合幾次現場調查(field trip)的心得，認為有關 LPG 儲槽之設計基準與系統規劃應含：

- (1)設計對每一球槽表面噴灑 $7 \ell/\text{min}\cdot\text{m}^2$ 之消防灑水裝置。
- (2)設計對每一球槽由槽頂至槽底 6 圈灑水環。
- (3)設計球槽最上圈之灑水環同時可作為平時冷卻球槽之用，其噴灑量 $2 \ell/\text{min}\cdot\text{m}^2$ 。
- (4)採自動感應火災之設計，採噴洪閥系統(water deluge system)作動，每座球槽一組。
- (5)設計每座球槽至少有三組固定式消防栓作為輔助消防之用。
- (6)設計每一球槽火災警告訊號接至控制室火警受信總機。
- (7)設計每一座球槽有漏氣自動警報系統。
- (8)槽體上之安全閥出口裝置滅燄器不宜直接排大氣。

誌 謝

本研究計畫由行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所於八十六年度研究計畫(IOSH86-S132)經費贊助下完成，在此致謝。謹此特別感謝勞工安全衛生研究所戴所長基福、楊副所長瑞

鍾、吳組長世雄的支持與指導；勞工委員會勞工檢查處林技正進基、中油公司高雄煉油總廠工務處設備設計組戴士奇副組長以及工業技術研究院工業安全衛生技術發展中心謝明宏博士之寶貴意見謹此敬表謝忱。此外，三家液化石油氣罐裝場提供一些現場數據與相關資料在此亦表謝意。

參考文獻

- 〔1〕 Garrison, W.G., 1986; "One Hundred Largest Losses-A Thirty-year Review of Property Damage Losses in the Hydrocarbon-Chemical Industries - Ninth Edition," M&M Protection Consultants, Chicago, Ill.
- 〔2〕 Walls, W.L., 1978; "Just What Is A BLEVE," *Fire Journal*, National Fire Protection Association, Mass.:46-47.
- 〔3〕 Prugh, R.W., 1991; "Quantify BLEVE Hazards," *Chem. Eng. Prog.*, (2):66-72.
- 〔4〕 Pietersen, C.M., and Huerta, S.C., 1985; "Analysis of the LPG Incident in San Juan Ixhuatepec, Mexico City, 19 Nov. 1984", TNO Report B4-0222, P.O. Box 342, 7300 AH, Apeldoorn, The Netherlands.
- 〔5〕 Birk, A.M., and Cunningham, M.H., 1994; "The Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion," *J. Loss Prev. Process Ind.*, 7(6): 474-480.
- 〔6〕 Birk, A.M., 1995; "Scale Effects with Fire Exposure of Pressure-Liquefied Gas Tanks," *J. Loss Prev. Process Ind.*, (8): 275-290 .
- 〔7〕 Shebeko, Yn.N., et al., 1996; "BLEVE Prevention Using Vent Devices," *J.Hazardous Mat.*, (50):227-238.

- [8] Ramskill, P.K., 1988; "A Description of the ENGULF Computer Code," *J. Hazardous Mat.*, (20):177-196.
- [9] Beynon, G.V., et al., 1988; "Fire Engulment of LPG Tanks: HEATUP, A Predictive Model," *J. Hazardous Mat.*, (20):227-237.
- [10] Holman, J.P., 1992; "*Heat Transfer*," 7th ed. In SI units, McGraw-Hill, New York: 354.
- [11] Incropera, F.P., and DeWitt, D.P., 1992; "*Fundamentals of Heat and Mass Transfer*," Prentice Hall, New Jersey: 636.
- [12] Mills, A.F., 1992; "*Heat Transfer*," Prentice Hall, New Jersey: 636.
- [13] McAdams, W.H., 1954; "*Heat Transmission*," 3rd ed., McGraw-Hill, New York: 244.
- [14] Crowl, D.A., and Louvar, J.F., 1990; "*Chemical Process safety: Fundamentals with Applications*," Prentice Hall, New Jersey: 37,64.
- [15] Chen, J.R., et al., 1995; "Thermal Radiation Hazard of Storage Tank Fires and Its Relation to Tank-to-Tank Spacing," Paper Presented at the 2nd Intl. Conf. And Exhib. On Loss Prev. in the Oil, Chem. Process Ind., Singapore: 84-89.
- [16] Robertson, R.B., 1976; "*I.Chem.E. Symp. Ser.*," (47): 157.
- [17] Crocker, W.P., and Napier, D.H., 1986; "Thermal Radiation Hazards of Liquid Pool Fires and Tank Fires," *I.Chem.E. Symp. Ser.* (97): 159-183.
- [18] Thomas, P.H., 1963; "9th Int'l Symposium on Combustion," Academic Press, New York: 844.
- [19] Hardee, H.C., and Lee, D.J., 1977; "A Simple Conduction Model for Skin Burns Resulting from Exposure to Chemical Fireballs," *Fire*

Research, (1): 199-205.

- [20] Eisenberg, N.A., et al., 1975; "Vulnerability Model-A Simulation System for Assessing Damage Resulting from Marine Spills," U.S. Coast Guard, Office of Research and Development, Report No. CG-D-136-75, NTISAD-015-245, Springfield, VA.
- [21] AIChE/CCPS, 1989; "*Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*," Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers, New York: 126.
- [22] Pietersen, C.M., 1988; "Analysis of the LPG-Disaster in Mexico City," *J. Hazardous Mat.*, (20): 85-107.
- [23] Roberts, A.F., 1981; "Thermal Radiation Hazards from Releases of LPG from Pressurized Storage," *Fire Safety J.*, 4(3): 197-212.
- [24] Hymes, I., 1983; "The Physiological and Pathological Effects of Thermal Radiation," UKAEA Safety and Reliability Directorate, Report SRD R275, Culcheth, UK.
- [25] API, 1989; "Fire-Protection Considerations for the Design and Operation of LPG Storage Facilities," 2510A.
- [26] API, 1995; "Design and Construction of LPG Installation," 2510.
- [27] Burden, R.L., and Faires, J.D., 1993; "*Numerical Analysis*," PWS-Kent Publishing Company, Boston, Mass: 266-267.