

特種設備安全

SAFETY OF SPECIAL EQUIPMENT

1991-5 創刊 2021-6 出刊

雙月刊 第72期

發行所 台灣省鍋爐協會
發行人 邱華瑞
總編輯 賴桂堂
發行地址 台中市 40452 北區崇德路一段 631 號 10F-2
電話 (04) 2235-1628
傳真 (04) 2238-0960
E-mail tw.boiler@msa.hinet.net
網址 www.tbva.org.tw
台中職訓中心 台中市 40452 北區崇德路一段 629 號 4F-3
電話 (04) 2236-2977
傳真 (04) 2236-2997
E-mail boiler.tw@msa.hinet.net
彰化職訓中心 彰化市 50056 中央路 184 號 3 樓之 3
南投職訓中心 南投縣 54048 南投市文昌街 45 號 4 樓之 2
印刷廠 洪記印刷有限公司
電話 (04) 2314-0788
E-mail hg2527@ms32.hinet.net

行政院新聞局局版字第 11469 號
中華郵政台中雜字第 2056 號登記證
台中郵局許可證台中字第 1321 號登記為
雜誌交寄 發行數：3000 本

廣告索引

國方化工科技股份有限公司
大震企業股份有限公司
三浦鍋爐股份有限公司
大華高科股份有限公司
岱洋股份有限公司
台灣紳藝實業有限公司
金瑛發機械工業股份有限公司
利峰機械有限公司
東庚實業股份有限公司
興志五金企業有限公司
天鴻興業股份有限公司
威鼎企業有限公司
潔康企業有限公司
吾豐機電廠股份有限公司
原鈺峰工業有限公司
東立鐵工廠有限公司
辰鼎企業有限公司
增大股份有限公司
申昌機械股份有限公司
鴻羽有限公司
宏榮鋼瓶股份有限公司
正熊機械股份有限公司
志豪工業有限公司
霖興機械工業股份有限公司

目錄

CONTENTS

技術報導

- ★淺談流體化床式鍋爐燃燒控制技術 2
- ★高壓氣體設施防爆電氣設備規劃與選用 14
- ★燃氣鍋爐的爐膛爆炸 25

訓練訊息

- ★本會舉辦各項訓練日程表
台中職業訓練中心 31
彰化職業訓練中心 32
南投職業訓練中心 32

本刊內容已刊載於本會網頁，請進
台灣鍋爐協會網站 (www.tbva.org.tw) :
點進“刊物報導”進入覽閱

淺談流體化床式鍋爐燃燒控制技術

謝永昌／環興科技股份有限公司

前言

近年 PM2.5 及霧霾等空污議題持續引起民衆關注，在考量空污改善之前提下，經濟部與環保署皆大力補助協助工業鍋爐轉型，由以往使用之重油及煙煤等燃料，輔導並補助廠商改用天然氣、液化石油氣、柴油等相對較清潔之燃料，故目前國內主流鍋爐型態已由液體燃料鍋爐（以重油鍋爐為大宗）逐漸轉向氣體燃料（如天然氣）鍋爐，且因「鍋爐空氣污染物排放標準」於 109 年 7 月 1 日上路實施等原因，固體燃料鍋爐亦逐漸減少。

站在整體環保之角度，空污僅是環境保護領域中的一部份，固體燃料鍋爐的減少，雖對空污改善有幫助，惟在焚化廠與事業廢棄物焚化爐無法短期內提高處理量之情況下，反而限縮了一部分原本可以協助去化事業廢棄物的重要處理設施，亦即改善空污卻使廢棄物去化管道變得較為緊縮，這恐怕也非經濟部和環保署所樂見。那麼，有沒有對於空污和廢棄物同樣有利的作法呢？

答案雖然隨著時代的技術和觀念演變而有不同，但是在符合循環經濟概念下的大方向趨勢卻是可以確定的，其中之一就是經濟部和環保署都在推動的廢棄物能源化作法：將廢棄物作為燃料進行能源回收，並盡量導入高效而節能減碳的技術手段，將廢棄物作為燃料使用並盡量燃燒完全，使空污和廢棄物（底渣與飛灰）盡量減少，其中近年以推動流體化床式鍋爐去化廢棄物為主流作法，亦即本文所討論之主題，筆者曾於本會「鍋爐知識」發表「淺論流體化床鍋爐技術與實務」一文，對流體化床式鍋爐技術及熱效率控制實務有初步。

註：焚化也是廢棄物能源化的作法之一，但其目的是「去化廢棄物」而非「能源回收」，我國焚化廠僅將廢棄物能源回收用於發電，熱效率平均僅約 19%，故屬於低效能源回收。以流體化床式鍋爐而言，其目的在於蒸汽或熱媒之熱值利用，設計著重於高度熱效率利用，通常熱效率約在 9 成附近，相對焚化而言，屬於高效之能源回收，在廢棄物生命週期結束前，盡量榨取其能量，亦可減少其他燃料之開採與購買使用之數量，故此作法更符合循環經濟之精神。

經濟部工業局曾在 109 年委託本協會編撰「鍋爐高效燃燒控制技術手冊（以流體化床鍋爐為實例）」，鼓勵產業針對既存流體化床鍋爐可在燃料選用上，依據鍋爐處

理能力考量是否採用廢棄物製成之固體再生燃料（下稱SRF）^註，例如自行處理自廠製程產出之衍生廢棄物（如有機污泥、廢塑膠、廢橡膠、廢木材等）；如要新設鍋爐，則盡量考量採用本文所介紹之流體化床鍋爐，除燃燒較完全、能源利用率較高外，搭配合宜的空污防制設備，可同時達到高效能源回收及強化空污防制之目的，更可協助處理部分事業廢棄物。目前國內已有廠商使用7成SRF作為主要燃料，甚至有廠商規劃100%全燒廢棄物之流體化床式專燒爐，預計於110年商轉，將為我國廢棄物能源化領域帶來全新的視野。

註：依環保署事業廢棄物清理計畫書審查作業參考指引（第3次修訂版）中附件四、固體再生燃料製造技術指引與品質規範第一章第二條：

本規範所稱固體再生燃料（Solid recovered fuel, SRF），係指以具適燃性之廢棄物做為燃料，並須符合附表1燃料品質標準者，稱為SRF（Solid recovered fuel），中文亦可稱為固體回收燃料、固體再利用燃料或固體再生燃料。

上述作法對廠商與政府而言，使用流體化床式鍋爐具有許多經濟與環境面之優點，為雙贏之政策，概述如下：

（一）經濟面

提高鍋爐或燃燒設備之熱利用效率，可在使用較少燃料情況下即能產生所需之蒸汽熱值，故可減少燃料成本與燃料使用量、底飛灰產生量與其清除處理費等衍生優點。

（二）環境面

因燃料使用量減少或以部分低排碳量燃料替代煙煤，可連帶減少碳排量，亦因燃燒較完全且搭配適當空污防制設備時，可降低空污排放量。

在高效燃燒控制技術中的所謂「高效」，並無法規上的定義，僅是相對以往傳統的一般固體燃料鍋爐如鏈排爐等相比，鍋爐熱效率較高之意。一般鏈排爐約可達60~80%熱效率，通常約7成，故此處「高效」係指平均高於7成者，例如本手冊所介紹之流體化床鍋爐。鍋爐熱效率通常可達8成以上，其中循環式甚至可達9成。

要瞭解鍋爐如何可達到「高效」，首先要瞭解燃燒控制的基本原理，讓燃料發揮到最高效益，其次再瞭解如何避免熱效率的損失，以下說明。

一、燃燒理論與3T（Temperature、Time、Turbulence）控制原理

（一）燃燒理論

燃料與氧化劑快速混合產生氧化還原反應，產生光和熱的現象稱為燃燒。引發燃燒反應需要適當的溫度與能量，才能引燃火焰，這種溫度稱為著火溫度（ignition

temperature)，工業界所使用的燃料多數使用碳氫化合物，也含有少許的硫、氮、氧與部分的水。

燃燒過程中供氧量與燃燒完全與否有密切關係，因此定義完全燃燒反應所需的空氣與燃料比例關係為定當量空氣燃料比（stoichiometric air-fuel ratio），當空氣/燃料比供給超過定當量下的空氣/燃料比，表示這個燃燒反應會存在過剩空氣，為貧油燃燒（fuel-lean combustion）；相反，則為富油燃燒（fuel-rich combustion）。而火焰在常態下，可以引燃傳播的當量比，則稱為可燃極限（flammability）。

(二) 燃燒熱定義

所有的化學反應都伴隨著能量的吸收或釋放，而能量通常是以熱量的形式出現。一莫耳的燃料和氧化劑在等溫等壓條件下完全燃燒釋放的熱稱為燃燒熱。標準狀態的燃燒熱稱為標準燃燒熱，以 Δh_{c298}° 表示，單位千焦耳/莫耳（kJ/mol）、千卡/公斤（kcal/kg）、千卡/立方米（kcal/m³）或千焦耳/立方米（kJ/m³）。

碳氫化合物燃料在等溫等壓條件下燃燒後的產物為 $H_2O_{(l)}$ 、 $CO_{2(g)}$ 及 $N_{2(g)}$ 。產物當中的水是液體或氣體所獲得的燃燒熱，分別高熱值（High heating value, HHV，亦稱高位熱值）與低熱值（Low heating value, LHV，亦稱低位熱值），高熱值與低熱值的定義如下：

1. 高熱值

單位體積（或質量）燃氣完全燃燒時所放出的熱量，且燃燒產物中水蒸氣凝結為水時之發熱量，又稱為總發熱量（淨熱量+水蒸氣的凝結熱）。

2. 低熱值

單位體積（或質量）燃氣完全燃燒時所放出的熱量，而燃燒產物中水蒸氣以氣態存在時之發熱量又稱淨熱量。

(三) 絕熱火焰溫度

某一等壓、絕熱燃燒系統，反應放出的全部熱量完全用於提高燃燒產物的溫度，這個溫度就叫絕熱火焰溫度（Adiabatic flame temperature, T_{ad} ），對於燃燒產物溫度低於 1,250 K 的反應系統，由於燃燒產物 CO_2 、 H_2O 、 N_2 和 O_2 等是正常的穩定物質，可以以簡單的莫耳分率與質量平衡的方式計算粗略出火焰溫度，但由於解離反應會吸收大量的熱，因此少量的解離會顯著降低火焰的溫度。

(四) 燃燒 3T 控制

燃燒需要氧化劑、燃料與燃點三要素，在鍋爐燃燒過程中要達到良好的燃燒效果，就必須特別留意燃燒三要素，如何在鍋爐燃燒中要控制好燃燒 3T 與當量比（空燃比），當中 3T 為溫度（Temperature）、時間（Time）與紊流（Turbulence），這

三個因素簡單的說就是，火焰溫度，燃燒停留時間與擾動強度等。做好燃燒 3T 控制，也可以控制鍋爐空氣污染、漸少燃料消耗與提高能源效率。

1. 溫度

燃料需要達到這個溫度與氧化劑混合，才能克服活化能（activation energy）產生燃燒化學反應，釋放出光與熱。這個溫度稱為自燃溫度（auto-ignition temperature），又稱為著火溫度。在溫度下，燃料與氧化劑達到適當比例時，可以產生燃燒現象。在鍋爐燃燒室中，火焰的熱釋放需略高於燃燒室中的熱交換及熱損失，則可維持燃燒效率，另外，燃燒室中的溫度的分佈也需均勻，避免某些熱點或低溫點造成鍋爐內壁的損壞與 Thermal NO_x 及黑煙的產生。

2. 時間

燃料與生成物在燃燒室的滯留時間是影響燃燒反應是否完成與燃燒產物的生成重要因素之一，燃料通過燃燒反應區的時間，需要足以讓燃料充分反應，這個反應時間為燃料的反應速率倒數。而燃燒後的產物停留於燃燒室中，更因為高溫作用造成氮氧化物的生成。因此如何決定燃燒室的幾何外形與尺寸，考量燃料滯留時間之外，也須考量鍋爐的建置成本。因此許多的鍋爐燃燒室設計，除了依賴長久的設計與操作經驗之外，也須進行許多模擬研究，藉以改善整個燃燒室的幾何設計與氣體流道等。

3. 紊流

流體的流動若是在雷諾數低於一定數字下，此時的流場為層流流場，反之，流場的雷諾數高於某個數字時，便稱之為紊流場。流場中的擾動或是攪動是紊流場的特性，因此燃料在這個流場中有助於燃料與氧化劑的混合，適當的紊流強度可以提升燃燒速度，但太強的紊流強度會造成火焰過度拉伸而產生局部熄滅。

4. 空燃比

當燃料與空氣完全氧化，產生二氧化碳與水，倘若空氣的量供應不足，燃燒就不完全，易產生黑煙與一氧化碳；若空氣供應過多，則會降低爐溫，增加排煙量與熱損失。

二、鍋爐熱效率說明及評估

(一) 鍋爐熱效率計算

燃燒效率的定義為輸入燃料熱量與燃燒室發熱量比，計算方式可分為進出熱量法及熱損失法，其熱量輸入、輸出及損失關係如圖 1（參考 CNS 2141 標準計算方式），說明如後。

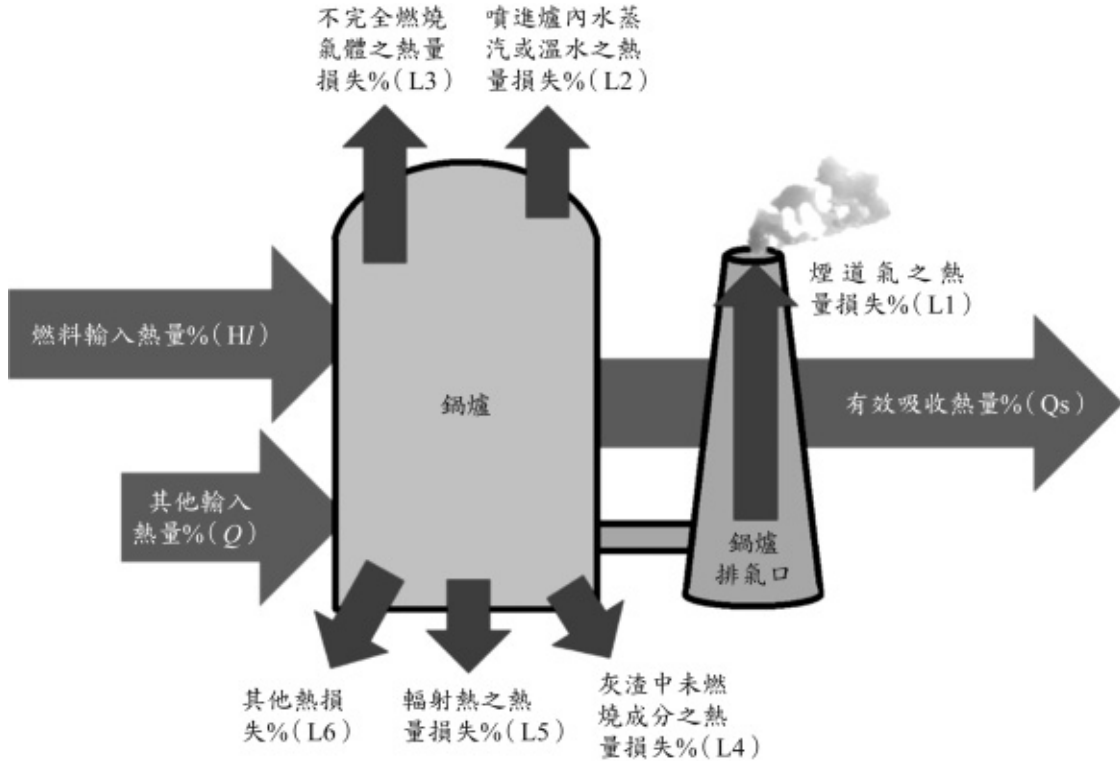


圖 1 鍋爐熱量輸入、輸出及損失關係

1. 進出熱量法之鍋爐熱效率

$$\text{鍋爐熱效率} = \frac{\text{有效吸熱量}}{\text{輸入總熱量}} \times 100\% = \frac{Q_s}{H_1 + Q} \times 100\%$$

H_1+Q 為燃料及燃料用空氣側所發生或加進熱量之和，其中 $Q=Q_1+Q_2+Q_3+Q_4$ ； Q_s 為有效吸熱量，意指水及蒸汽所吸收熱量之和，其中 $Q_s=Q_{s1}+Q_{s2}+Q_{s3}+Q_{s4}$ ；而各項參數將於後續章節詳細說明。

2. 熱損失法之鍋爐熱效率

$$\text{鍋爐熱效率} = \left(1 - \frac{\text{總損失熱量}}{\text{輸入總熱量}}\right) \times 100\% = \left(1 - \frac{L_1}{H_1 + Q}\right) \times 100\%$$

其中熱損失 $L_1=L_1+L_2+L_3+L_4 + L_5+L_6$ ，各項參數於後續章節詳細說明。

(二) 鍋爐燃料輸入熱量

計算各種型態與種類的燃燒熱值，燃燒熱值也稱為燃料發熱量，是指單位質量（固體／液體）或是單位體積（氣體）的燃料完全燃燒，燃燒產物冷卻到燃燒前時所釋放的熱量，各種型態與種類燃料，可參考表 2。此外，各種型態與種類燃料熱量計算方式將於以下進行說明：

表 2 各型態燃料熱值表

燃料型態	燃料名稱	熱值 (MJ/kg)	燃料型態	燃料名稱	熱值 (MJ/kg)
氣態燃料	天然氣	36.22	固態燃料	焦炭	25-29
	油田伴生氣	45.46		無煙煤	25.12-32.65
	礦井氣	18.85		煙煤	20.93-33.50
	焦爐煤氣	18.26		乾木柴 (約)	12
	直立爐煤氣	16.15		RDF-5	23-27
	液化石油氣 (氣態)	87-100		液態燃料	重油
	液化石油氣 (液態)	45-50	柴油		46.04
	發生爐煤氣	5.01-6.07	煤油		43.11
	水煤氣	10.05-10.87	汽油		43.11
	兩段爐水煤氣	11.72-12.57	瀝青		37.69
	高爐煤氣	3.52-4.19	焦油		29.31-37.69
	沼氣	18.85			

1. 固體燃料

(1) 燃料組成

依 CNS 10820 之規定，先求出使用時燃料之全水分 $w\%$ (使用時之基準)。工業分析組成 (恆濕基) 之水分 $w_1\%$ 、灰分 $a_1\%$ 與元素分析 (無水基準) 之碳 $c_0\%$ 、氫 $h_0\%$ 、硫 $s_0\%$ 、氮 $n_0\%$ 等成分百分比質量，固體燃料 (使用時基準) 之碳 $c\%$ 、氫 $h\%$ 、硫 $s\%$ 、氮 $n\%$ 、灰分 $a\%$ 及氧 $o\%$ 可由下列公式計算出。

(2) 使用時燃料之高/濕基低位發熱量

依 CNS 10820 之規定，以恆濕試料測定之高發熱量為 H_0 ，使用燃料之高發熱量及濕基低位發熱量分別為 H_h 及 H_l ，並於下列呈現如下。

$$\text{高發熱量 } H_h = \frac{100-w}{100-w_1} H_0 \quad (\text{kcal / kg})$$

$$\text{濕基低位發熱量 } H_l = H_h - 5.9(9h + w) \quad (\text{kcal / kg})$$

若無元素分析數據時， $h\%$ 值得由下式估算

$$h = 5.7 \frac{100 - (w_1 + a_1)}{100} \times \frac{100 - w}{100 - w_1} \quad (\%)$$

2. 液體燃料

(1) 燃料組成

依 CNS 1217、3383、3576、6357 及 6538 等規定，測定碳、氫、硫、氮、灰分、氧及水分之質量百分比。

(2) 使用時燃料之高/濕基低位發熱量

依 CNS 6359 之規定，測定其高發熱量 H_h ，可藉由下式換算其濕基低位發熱量 H_l 。

$$H_l = H_h - 5.9(9h + w) \quad (\text{kcal / kg})$$

若無元素分析時， $h\%$ 值依不同油種而定，如煤油、輕油、原油（13%），重油（12%），並以水分為 0 進行濕基低位發熱量 H_l 計算。

3. 氣體燃料

(1) 燃料組成

先求出氣體燃料之成分中氣體之含有率（體積%），並以氫 H_2 、一氧化碳 CO 、各種碳氫化合物 C_xH_y （ CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_6 、 C_3H_6 、 C_3H_8 、 C_4H_8 、 C_4H_{10} 等）、二氧化碳 CO_2 、氮 N_2 、氧 O_2 、水蒸氣 w 表示其百分比。

(2) 使用時燃料之高/濕基低位發熱量

依 CNS 2632 之規定，測定其高發熱量 H_h ，可藉由下式換算其濕基低位發熱量 H_l 。

$$H_l = H_h - 4.7 \left[\left(h_2 + \frac{1}{2} \sum y c_x h_y + w_v \right) \right] \quad (\text{kcal / kg})$$

4. 燃料顯熱（燃料由外界熱源預熱時）

有關燃料藉由外界熱源預熱時之輸入顯熱 Q_1 ，可由下式計算：

$$Q_1 = c_f(t_f - t_0) \quad (\text{kcal / kg})$$

其中： c_f = 燃料平均比熱（ $\text{kcal / kg}^\circ\text{C}$ ）

T_f = 加熱後燃料溫度（ $^\circ\text{C}$ ）

T_0 = 戶外空氣溫度（ $^\circ\text{C}$ ）

未量測燃料之比熱時，可取以下比熱值進行假設，煤炭 $0.25 \text{ kcal / kg}^\circ\text{C}$ ；重油 $0.45 \text{ kcal / kg}^\circ\text{C}$ ；煤油、輕油、原油 $0.48 \sim 0.50 \text{ kcal / kg}^\circ\text{C}$ ；煤氣 $0.34 \text{ kcal / kg}^\circ\text{C}$ ；天然氣 $0.38 \sim 0.42 \text{ kcal / kg}^\circ\text{C}$ ；石油氣 $0.7 \sim 1.0 \text{ kcal / kg}^\circ\text{C}$ 。

5. 空氣顯熱（空氣由外界熱源預熱時）

有關空氣藉由外界熱源預熱時之輸入顯熱 Q_2 ，可由下式計算：

$$Q_2 = A c_a (T_a - T_0) \quad (\text{kcal / kg})$$

其中： A = 每 1kg 燃料所消耗之空氣量（ m^3 / kg ）

c_a = 空氣之平均比熱（ $0.31 \text{ kcal / kg}^\circ\text{C}$ ）

T_a = 加熱後燃料溫度（ $^\circ\text{C}$ ）

T_0 = 戶外空氣溫度（ $^\circ\text{C}$ ）

由燃料組成燃燒氣體之歐式分析值，而以上式消耗之空氣量 A ，必要時使用實際量測值進行計算，其計算式如下所式，而各項參數亦將於下列進行說明：

$$A = mA_0(1+1.61z) \quad (\text{m}^3 / \text{kg})$$

其中：m = 空氣比

z = 戶外空氣之絕對濕度

A₀ = 理論空氣量 (m³ / kg)

(1)理論空氣量

A₀ 為理論乾空氣量是理論上計算燃燒所需要的空氣量，依照燃燒化學反應式中各元素之耗氧量，在換算出完全燃燒所需之空氣量，各種常見燃料之理論空氣量如表 3。

表 3 常見液態與固態燃料之理論空氣量

燃料	理論空氣量 (Nm ³ / kg)	燃料	理論空氣量 (Nm ³ / kg)
重油	10.0-11.0	瀝青油	7.5-8.5
輕油	11.2	褐煤	3.5-6.5
無煙煤	9.0-10.0	焦煤	8.5

(2)實際空氣量與過剩空氣

實際空氣量是實際燃燒所送入的空氣量，一般來說都會大於理論空氣量。因此空氣比是指實際空氣量對理論空氣量之比，假設理論空氣量 A₀，實際空氣量 A、空氣比 m，則 A = mA₀，m 又稱為空氣過剩係數。過剩空氣是指實際空氣與過剩空氣之差，A - A₀，也等於 (m-1) A₀。(m-1) × 100 稱為過剩空氣率 (%)。需要過剩空氣是由於實際燃燒時，爐內滯留時間有限，理論空氣量不可能全部接觸可燃分子而反應。需要過剩空氣是由於實際燃燒時，爐內的滯留時間有限，空氣不可能全部接觸可燃分子，因此實際空氣量勢必比理論空氣量大，而空氣比 m 計算式如下：

$$m = \frac{21}{21 - 79 \left[\frac{O_2 - 0.5(CO)}{N_2} \right]}$$

在實際鍋爐操作上，過多或過少的過剩空氣都會造成鍋爐的影響如下：

過剩空氣過少時，鍋爐會出現冒黑煙、殘留未燃份、鍋爐熱效率下降等現象。

過剩空氣過多時，鍋爐會出現燃燒溫度下降、排氣量增多、鍋爐熱效率下降等現象。

(3)空氣之絕對濕度

在一定的氣壓和一定的溫度的條件下、單位體積的空氣中能夠含有的水蒸

氣是有極限的，若該體積空氣中所含水蒸氣超過此限度，則水蒸氣會凝結而產生水，而該體積空氣中實際含有水蒸氣的數值，用絕對濕度來表示。水蒸氣含量越多，則空氣的絕對濕度越高，其空氣中之絕對濕度可查表得出。

6. 噴進爐內之蒸汽或溫水輸入熱量

由外界熱源加熱之蒸汽或溫水噴進爐內時，輸入熱量 Q_3 可由下列式計算：

$$Q_3 = W_b (h_b - h_a)$$

其中： W_b = 每 1kg 燃料所需噴進蒸汽或溫水量 (m^3 / kg)

h_b = 噴進蒸汽之焓 (kcal / kg)，蒸汽約 600 (kcal / kg)

h_a = 戶外溫度下蒸汽或溫水之焓 (kcal / kg)，溫水 t °C 時，
約為 t kcal / kg

(三) 鍋爐有效吸收熱量

1. 蒸汽吸收熱量

蒸汽所吸收之熱量，將依據蒸汽發生裝置之種類，其吸收熱量計算方式，可經由查飽和蒸汽表（壓力基準）得出焓值計算。

2. 沖放水之吸收熱量

在試驗時應盡量避免沖放之情形，如有沖放發生之情形時，沖放水冷卻器之冷卻水量及冷卻水之上昇溫度，計算出沖放水之吸收熱量 Q_d ，其計算式如下：

$$Q_d = W_d (h_d - h_1)$$

其中： W_d = 燃料所產生之沖放水 (m^3 / kg)

h_d = 沖放水之焓 (kcal / kg)

h_1 = 給水之焓 (kcal / kg)

(四) 鍋爐損失熱量

1. 煙道氣之熱量損失 (L_1)

是指隨煙氣的排出而被帶走的熱量，亦是鍋爐熱量損失中最大的一項，一般約為 4~8%，計算式如下所式。影響這項損失的主要因素是煙氣容積及排煙溫度，而煙氣容積大排煙溫度高，則排煙帶走熱損失也大。為了解決排煙熱損失的問題，許多廠商會在鍋爐後段加裝煙氣餘熱回收裝置回收利用煙氣餘熱。

$$L_1 = GC_g (T_g - T_0) \text{ (kcal/kg)}$$

其中： G = 燃料所產生之實際煙道量 (m^3 / kg)

C_g = 煙道氣體比熱 0.33 (kcal / kg)

T_g = 煙道氣體出口溫度 (°C)

T_0 = 戶外空氣溫度 (°C)

而實際產生之煙道量 G 會因為燃料的屬性不同，而計算上有所差異，因此以下將分別說明各種燃料屬性之實際煙道量計算方式：

固體及液體燃料之屬性

$$G = G_0 + G_w + (m-1)A_0 + G_{w1}$$

$$G_0 = \frac{1}{100} \left[8.89c_1 + 21.1 \left(h - \frac{0}{8} \right) + 3.3s + 0.8n \right]$$

$$G_w = \frac{1}{100} [1.24(9h + w)]$$

$$G_{w1} = 1.61zmA_0$$

其中： G_0 = 理論乾煙道氣量

G_w = 燃燒所生之水蒸氣量及燃料中水分所變成水蒸氣量之總和

G_{w1} = 燃燒用空氣所用之水蒸氣量

z 、 m 及 A_0 可參考空氣顯熱章節

氣體燃料之屬性

$$G = G_0 + G_w + (m-1)A_0 + G_{w1}$$

$$G_0 = \frac{1}{100} [2.88co + 1.88(h_2) + \sum(4.76x + 0.94y) c_x h_y + n_2 + co_2 - 3.76o_2]$$

$$G_w = \frac{1}{100} \left[h_2 + \frac{1}{2} \sum y c_x h_y + w_v \right]$$

$$G_{w1} = 1.61zmA_0$$

其中： G_0 = 理論乾煙道氣量

G_w = 燃燒所生之水蒸氣量及燃料中水分所變成水蒸氣量之總和

G_{w1} = 燃燒用空氣所用之水蒸氣量

z 、 m 及 A_0 可參考空氣顯熱章節

2. 噴進爐內水蒸氣或溫水之熱量損失 (L_2)

噴進爐內水蒸氣或溫水所造成之排氣熱量損失 L_2 ，如下式進行計算。

噴進由外界熱源所供給之蒸汽或溫水時：

$$L_2 = W_b(h_g - h_s) \quad (\text{kcal} / \text{kg})$$

其中： W_b = 燃料所噴進蒸汽或溫水量 (m^3 / kg)

h_g = 煙道氣溫下蒸汽之焓 (kcal / kg)

h_s = 戶外溫度下蒸汽或溫水之焓 (kcal / kg)

噴進試驗鍋爐本身之部分蒸汽時：

$$L_2 = W_b(h_g - h_1) \quad (\text{kcal} / \text{kg})$$

其中： h_1 = 給水之焓 (kcal/kg)

3. 不完全燃燒氣體之熱量損失 (L_3)

指煙氣中含有一部分可燃氣體在爐內沒有達到完全燃燒而隨煙氣排放出去，此損失稱為氣體不完全燃燒熱量損失，其熱量損失 L_3 計算如下式。

$$L_3 = 30.1[G_0 + (m-1)A_0](\text{CO}) \quad (\text{kcal} / \text{kg}) \quad (\text{kcal} / \text{kg})$$

4. 灰渣中未燃燒成分之熱量損失 (L_4)

在鍋爐的灰渣和隨煙氣帶出的飛灰中，皆含有未燃燒完全的燃料顆粒，而這些沒有燃燒完的固體可燃物所儲有的熱量稱為灰渣中未燃燒之熱量損失 L_4 ，其計算式如下。

$$L_4 = 81c_2 \quad (\text{kcal} / \text{kg})$$

$$c_2 = au / (100 - u)$$

其中： c_2 = 未燃燒碳量

a = 使用燃料中之灰分量 (%)

u = 灰渣中之平均未燃碳 (%)

5. 輻射熱之熱量損失 (L_5)

鍋爐是暴露於大氣中的金屬結構，包含爐牆、煙道等，而鍋爐中的熱向外界散失之熱量為輻射熱損失，此種損失與鍋爐的種類、構造及隔熱情形有直接關係，其計算式如下所式。

$$L_5 = \frac{1}{100} l_r H_1 \quad (\text{kcal} / \text{kg})$$

其中： l_r = 為對應濕基低位發熱量之輻射熱損失之百分比，其值隨鍋爐種類、構造及蒸發量等而不同。

6. 其他熱量損失 (L_6)

熱量損失除上述 1~5 項說明外，如有其他熱損失都包含於此項熱量損失 L_6 中。

三、AI 技術應用於鍋爐控制技術

人工智慧技術 (Artificial Intelligence, 下稱 AI) 及物聯網技術 (Internet of Things, 下稱 IoT) 應用於鍋爐控制技術，可以提高鍋爐熱效率並降低空氣污染物排放。其中 AI 可以透過燃燒特性、重要參數及燃燒優化控制系統，提高鍋爐整體效率

（燃燒效率及熱效率），亦可降低鍋爐煙氣中 NO_x 的排放，達到空污排放標準甚至更低。而 IoT 則整合物聯網雲端平台、終端應用、大數據分析服務等技術，並收集鍋爐運作的相關數據做為設備訊息反饋，讓鍋爐使用更加安全且穩定，有利於提高整體運作效率。

目前許多大型鍋爐已具備高度自動化之設計，甚至有些在近 20 年前設置的流體化床鍋爐，通常除起爐與停爐外，其餘燃燒參數皆交由自動化系統自行控制，顯見自動化於鍋爐操作使用上扮演著重要的角色。

常見的 AI 人工智慧技術大多採用 4 個步驟，步驟一為「數據處理」，蒐集鍋爐進風量、給水、用煤量、排氣口氧氣含量、排氣溫度等；步驟二為「機器學習模型」，利用深度機器學習模型，將步驟一所蒐集之相關數據輸入至模型中，經複雜的演算方式，可得出學習結果（如進風量調整量、給水溫度控制量等）；步驟三為「即時控制」，針對步驟二所學習出之結果，控制鍋爐給煤、給風等設備來優化鍋爐系統；步驟四為「模型驗證」，驗證機器學習模型輸出控制結果是否達成預期成效。

以日本日立造船株式會社（Hitachi Zosen Corporation）為客戶設計製造之大型鍋爐或焚化爐為例，除自動化控制燃燒狀況之設計外，甚至可設計將資料回傳該公司日本總部機房，除有利於收集大數據進階統計分析外，如有操作異常等狀況，廠商亦可提請日本總廠由遠端操控參數，大數據分析後所產生之軟體功能修正後，亦可連線廠商鍋爐系統控制電腦，自動更新其控制軟體，達到比傳統化控制方式更為先進且方便之設計。

另 108 年世界人工智慧大會於上海世博中心及上海世博展覽館舉行，其中中國無錫中正鍋爐有限公司於此發表在人工智慧和物聯網的應用實例，中正鍋爐除了採用潔淨燃燒技術、低氮燃燒機及在鍋爐尾端設置冷凝器，更將人工智慧及物聯網技術運用

到鍋爐控制中，讓鍋爐操作人員利用簡易的控制系統操作介面，來實現系統起爐與停機、參數設定、數據查詢等功能，以快速進行鍋爐運作現況分析，另在鍋爐水位安全裝置及燃燒聯鎖保護等方面架構安全輔助系統，確保鍋爐全自動安全運行，實現智能化控制。

目前最新 AI 技術應用趨勢，係於鍋爐燃燒之中以 CCD 攝像機擷取影像，並將這些影像發送到電腦模式中運算，可預測燃燒狀態，並由控制單元根據燃燒狀態送出控制調整操作參數之訊號，使火焰穩定並高效燃燒。

雖目前較高階之 AI 技術尚在起步階段，尚未普及運用於流體化床鍋爐，然後續如有商業應用，預計將使廠商獲得更為自動化、控制燃燒及空污防制等更高效益，值得廠商關注，如未來應用至商業化領域時，建議廠商參考使用。

高壓氣體設施防爆電氣設備規劃與選用

黃文進、李昆峰、林文忠

前言

防爆電氣設備廣泛設置使用於各種可燃性高壓氣體設施、鍋爐燃料之儲存與供應設施及可燃性或爆燃性粉塵等危險場所，該等設備及其相關事業單位係為勞動部所公布之勞動檢查方針^[1]列為之監督檢查重點項目之一及應優先實施專案檢查之對象。因應職業安全衛生法^[2]第 7 條相關規定，已自 104 年 1 月 1 日起實施，有關防爆電氣設備除應依母法及其附屬法規之規定，實施源頭管制外，勞動部另已指定適用國家標準 CNS3376^[3]及 CNS15591^[4]等系列標準。法規面向業已建置自製造、輸入、供應至設置使用端等一系列完整的管理架構。本文將由火災爆炸原理、法規面向及國家標準或團體標準等相關規定，探討介紹防爆電氣之規畫與選用的基本原理與相關規定。

一、火災爆炸原理

燃燒是一種激烈之氧化反應過程，須有燃燒三要素同時存在，燃燒才會進行。所謂燃燒三要素係指可燃物（燃料）、助燃物（氧）及有效火源（足夠大之能量），其中火源係為各種不同型態之能量，如明火、電氣火發、靜電、電流、超音波、電磁波、光熱、摩擦撞擊、高溫金屬表面等，其能量如果足夠大，均可成為燃燒三要素之有效火源。

有關火災爆炸與防爆電氣設備相關名詞摘述如下：

(一) 最小著火能量（Minimum Ignition Energy, MIE）：

使易燃液體之蒸氣、可燃性氣體、可燃性或爆燃性粉塵著火所需之最小能量稱之，又稱最小引燃能。係利用電容電路組成之電火發實驗，以獲得各種物質之最小著火能量值，以毫焦耳（mJ）為單位。常見可燃性氣體之最小著火能量如表 1 所示，該值之大小代表該可燃性物質火災爆炸的風險指標之一。由表 1 知，氫氣、乙炔及二硫化碳等之最小著火能量值相對偏低，該等氣體的火災爆炸風險最高。

(二) 最小點火電流比（Minimum Ignition Current Ratio, MIC Ratio）：

可以引燃易燃液體之蒸氣或可燃性氣體與空氣之混合物的最小電火花電流值，與相同測試條件下，可以引燃甲烷與空氣之混合物的最小電火花電流值之比值稱之，亦即甲烷之最小點火電流比為 1。甲烷之最小點火電流為 80mA，氫氣之最小點火電流為 21mA，故氫之最小點火電流比為 0.26（=21/80）。最小點火電流比也代表該可燃性物質的火災爆炸風險指標之一，其值越低，表示該物質越容易引燃，火災爆炸之風險越高。可燃性氣體或易燃液體之蒸氣之氣體群族分類與該氣體的最小點火電流比有關。

(三)最大實驗安全間隙 (Maximum Experimental Safe Gap, MESG) :

量測可燃性氣體或易燃液體之蒸氣於特定具間隙之密室內引燃爆炸後，不致引燃外部可燃性氣體或蒸氣之最大間隙稱之，亦稱為火焰逸走間隙。其值越低表示火災爆炸風險越高。可燃性氣體或易燃液體之蒸氣之氣體群族分類與該氣體的最大實驗安全間隙有關。

(四)自燃溫度 (Ignition Temperature, Auto-Ignition Temperature, IT) :

可燃性物質 (氣體、液體、固體) 不需火焰或電氣火花等火種引燃情形下，可自行在空氣中維持燃燒之最低溫度稱之，亦稱引燃溫度。電氣設備之外殼金屬表面溫度如達環境中氣體之引燃溫度時，高溫金屬表面亦可成為燃燒三要素之有效火源，成為引火源，故防爆電氣設備允許之金屬表面溫度，須受限於環境中可燃性氣體或易燃液體之蒸氣的引燃溫度。

表 1 可燃性物質最小著火能量 (最小引燃能)

可燃性氣體或粉塵	MIE (mJ)	可燃性氣體或粉塵	MIE (mJ)
甲烷	0.29	氫	>100
乙烷	0.24	氫	0.019
丙烷	0.26	二硫化碳	0.015
丁烷	0.25	乙炔	0.017
乙烯	0.12	玉米粉塵	0.3
苯	0.22	鐵粉	0.12

二、法規與相關標準簡介

(一)職業安全衛生法規規定

依據職業安全衛生設施規則^[5]第 109 條之規定，雇主對於可燃性高壓氣體之貯存，電氣設備應採用防爆型，不得帶用防爆型攜帶式電筒以外之其他燈火，並應有適當之滅火機具；另依據同規則第 177 條之規定略以，雇主對於作業場所有易燃液體之蒸氣、可燃性氣體或爆燃性粉塵以外之可燃性粉塵滯留，而有爆炸、火災之虞者，應依危險特性採取通風、換氣、除塵等措施外，使用之電氣機械、器具或設備，應具有適合於其設置場所危險區域劃分使用之防爆性能構造；同規則第 177 條之 1 規定，雇主對於有爆燃性粉塵存在，而有爆炸、火災之虞之場所，使用之電氣機械、器具或設備，應具有適合於其設置場所危險區域劃分使用之防爆性能構造。前述所稱易燃液體，依據職業安全衛生設施規則第 13 條之規定，係指閃火點未滿 65℃者，

所稱可燃性氣體，依據高壓氣體勞工安全規則^[6]第 4 條之規定，係指爆炸下限在 10% 以下或爆炸上限與下限之差在 20% 以上之氣體；另依據高壓氣體勞工安全規則第 54 條之規定，可燃性氣體之高壓氣體設備或冷媒設備使用之電氣設備，應具有適應其設置場所及該氣體種類之防爆性能構造。高壓氣體勞工安全規則已明確規範防爆電氣設備之構造除與設置場所有關外，其性能另與環境中的氣體之種類有密切關連，此規定符合前述可燃性氣體火災爆炸風險指標之概念。惟目前職業安全衛生設施規則第 177 條及第 177 條之 1 均僅規範電氣設備之防爆性能構造與設置場所之危險區域劃分有關，但並未完整規範防爆電氣設備之性能尚與氣體種類性質具關連性，其法規之完整性，顯有所不足。

(二)源頭管制

依據職業安全衛生法第 7 條第 1 項規定，製造者、輸入者、供應者或雇主，對於中央主管機關指定之機械、設備或器具（其中之一為防爆電氣設備），其構造、性能及防護非符合安全標準者，不得產製運出廠場、輸入、租賃、供應或設置；同法第 7 條第 3 項亦規定，製造者或輸入者對於指定之機械、設備或器具，符合前項安全標準者，應於中央主管機關指定之資訊申報網站登錄，並於其產製或輸入之產品明顯處張貼安全標示，以供識別。其安全標示如圖 1 所示。自 104 年 1 月 1 日起，事業單位於選用防爆電氣設備時，應選用具安全標示者，此為基本要求。

另職業安全衛生設施規則第 177 條之 2 也明定，雇主對於應有防爆性能構造之電氣機械、器具、設備，於中央主管機關公告後新安裝或換者，應使用符合中央主管機關指定之國家標準、國際標準或團體標準規定之合格品。前項合格品，指經中央主管機關認可公告之機構實施型式認證合格，並張貼認證合格標識者。所稱認證合格標識即為前述之安全標示（如圖 1 所示）。有關防爆電氣設備之相關規定，目前法規面向業已建置自製造、輸入、供應至設置使用端等一系列完整的管理架構。



圖 1 安全標示

(三)國家標準與團體標準

職業安全衛生法授權訂定之機械設備器具安全標準^[7]第 110 條規定，用於氣體類之防爆電氣設備，其性能、構造、試驗、標示及危險區域劃分等，應符合國家標準 CNS3376 系列、國際標準 IEC60079 系列或與其同等之標準規定。依據同標準第 111 條規定，用於粉塵類之防爆電氣設備，其性能、構造、試驗、標示及塵爆場所區域劃分等，應符合國家標準 CNS15591 系列、國際標準 IEC60079、IEC61241 系列或與其同等之標準相關規定。前述所稱同等標準如美國防火協會 NFPA 497、美國石油協

會 API 505、日本工場電氣設備防爆指針（ガス蒸氣防爆）^[8]等常用標準均列屬之，惟依據職業安全衛生設施規則第 20 條規定，該等同等標準應報經中央主管機關指定公告後始適用之。

國家標準 CNS 3376 及 CNS15591 系列標準摘錄如下列：

- CNS 3376-0 爆炸性氣體環境用電機設備-一般要求
- CNS 3376-1 爆炸性氣體環境用電機設備-耐壓防爆 “d”
- CNS 3376-2 爆炸性氣體環境用電機設備-正壓外殼 “p”
- CNS 3376-5 爆炸性氣體環境用電機設備-填粉防爆構造 “q”
- CNS 3376-6 爆炸性氣體環境用電機設備-浸油型 “o”
- CNS 3376-7 爆炸性氣體環境用電機設備-增加安全 “e”
- CNS 3376-10 爆炸性氣體環境用電機設備-危險區域劃分
- CNS 3376-10-2 爆炸性氣體環境-區域劃分-可燃性粉塵環境
- CNS 3376-11 爆炸性氣體環境用電機設備-本質安全 “i”
- CNS 3376-15 爆炸性氣體環境用電機設備-保護型式 “n”
- CNS 3376-18 爆炸性氣體環境用電機設備-模鑄防爆構造 “m”
- CNS 3376-20 爆炸性氣體環境用電機設備-與使用電機設備有關之可燃性氣體與蒸氣之資料
- CNS15591-0 可燃性粉塵環境用電機設備-一般規定
- CNS15591-1 可燃性粉塵環境用電機設備-外殼保護 “tD”
- CNS15591-4 可燃性粉塵環境用電機設備-保護型式 “pD”

三、危險區域劃分

依據 CNS 3376-10 爆炸性氣體環境用電機設備第 10 部-危險區域劃分^[3]及 CNS3376-10-2 爆炸環境-第 10-2 部-區域劃分-可燃性粉塵環境^[3]等國家標準之規定，危險區域之劃分係依據氣體或粉塵發生之頻率及滯留時間所衍生之風險，將爆炸性氣體或粉塵環境區分為如表 2 所列三種危險區域，危險區域之劃分是一種氣體或粉塵洩漏風險概念之陳述，其洩漏之風險與洩漏源之洩漏等級、通風狀況（滯留時間）、氣體之性質（如比重、LEL、引燃溫度）、作業型態（頻率）…等參數息息相關，該等參數有些係屬環境的因素，有些則為氣體的自有特性因素，皆須列為考慮因素。

危險區域之劃分依 CNS3376-10 附錄 B 之規定，應計算洩漏源之最大流率（ dG/dt ）max、所需通風量（ dV/dt ）max、假想體積 VZ 、換氣數次 C 等參數，據以劃分危險區域區分，程序較為繁瑣。危險區域劃分如依日本產業安全研究所技術指針-工場電氣設備防爆指針^[8]規定，可簡單地以定性的方式劃分為如表 3 所列三種危險區域（場所）。有關危險區域劃分實例如圖 2 及圖 3^[9]所示。

表 2 危險區域分類 (CNS3376-10 CNS3376-10-2) [3]

危險區域	描述
0 區 (Zone 0) (氣體或蒸氣) 20 區 (Zone 20) (粉塵)	爆炸性氣體或粉塵環境連續性或長期存在之場所
1 區 (Zone 1) (氣體或蒸氣) 21 區 (Zone 21) (粉塵)	爆炸性氣體或粉塵環境在正常操作下可能存在之場所
2 區 (Zone 2) (氣體或蒸氣) 22 區 (Zone 22) (粉塵)	爆炸性氣體或粉塵環境在正常操作下不太可能發生，若存在亦僅為偶爾發生且只存在短期間之場所

表 3 危險區域分類^[8]

危險區域	描述	適用例
第 0 種場所 (ZONE_0)	一般狀態下，可燃性氣體濃度可連續達到 LEL 以上之場所。	可燃性儲槽液面上方空間、開放容器液面上方空間
第 1 種場所 (ZONE_1)	在正常狀態下，有可能產生危險之場所。(可燃性氣體濃度瞬間有可能達到 LEL)	正常之取樣、投料、取料、開蓋、安全閥作動排放口附近
第 2 種處所 (ZONE_2)	在異常狀態下，有可能產生危險之場所。	強制排氣設備故障致可燃性氣體滯留之場所、管路設備腐蝕裂化致可燃性氣體洩漏、破裂，誤操作致可燃性氣體洩漏

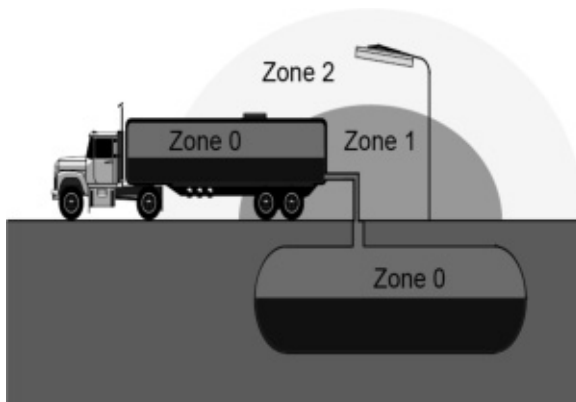
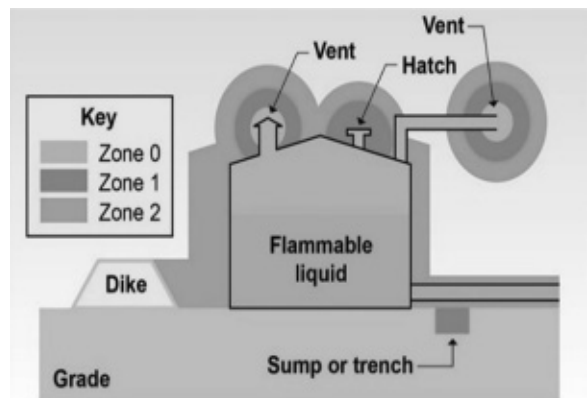


圖 2 危險區域劃分實例一

圖 3 危險區域劃分實例二^[9]

前述法規均已明確規範，電氣設備之防爆構造與性能應適合設置場所之危險區域劃分，亦即防爆電氣設備構造及規格之選用與危險區域劃分有關，故危險區域劃分實為防爆電氣設備規劃與選用的首要工作，須將作業場所做適當的危險區域劃分，再依據危險區域區分，選用適合該場所風險等級之防爆構造與規格。

四、氣體分類

(一) 氣體群組分類

可燃性氣體或易燃液體之蒸氣因其最小著火能量（MIE）或最小點火電流比（MIC Ratio）及最大實驗安全間隙（MESG）之差異，其易燃易爆之風險指標亦隨之顯有不同，因此電氣設備之防爆構造與性能之選用，除與前述設置場所之危險區域區分有密切之關係外，另與氣體種類及性質更是息息相關。

有鑒於爆炸性氣體種類繁多，為使爆炸性氣體之風險與防爆電氣設備之構造分類能夠相對應，CNS3376 系列標準係依據該氣體之最大實驗安全間隙或最小點火電流比，區分為如下 IIA、IIB 及 IIC 三個氣體群組（Gas Group），選用防爆電氣設備之構造與性能時，除應考慮危險區域分類區分外，另應考慮其所適用的氣體群組分類。

IIC 群組（Group IIC）爆炸性氣體：

1. $MESG \leq 0.50 \text{ mm}$
2. $MIC \text{ Ratio} \leq 0.45$
3. 典型氣體：乙炔、氫氣等

IIB 群組（Group IIB）爆炸性氣體：

1. $0.50 \text{ mm} < MESG < 0.90 \text{ mm}$
2. $0.45 < MIC \text{ Ratio} < 0.80$
3. 典型氣體：乙烯、乙醛等

IIA 群組（Group IIA）可燃性物質：

1. $MESG \geq 0.90 \text{ mm}$
2. $MIC \text{ Ratio} \geq 0.8$
3. 典型氣體：乙烷，丙烷，丙酮等

(二) 氣體溫度等級

前述引燃溫度係指可燃性物質不需火種引燃情形下，可自行在空氣中維持燃燒之最低溫度。電氣設備之外殼金屬表面溫度如達環境的氣體之引燃溫度時，電氣設備的高溫金屬表面亦可能成為燃燒三要素之有效火源，故防爆電氣設備允許之外殼金屬表面溫度，將受限於可燃性氣體之引燃溫度，始可效控制電氣設備引起的火災爆炸風險。

CNS3376 系列標準將爆炸性氣體依其引燃溫度（Ignition Temperature，IT）區分 6 個溫度等級（Temperature Class），如表 4 所示。選用防爆電氣設備時，除應考慮危險區域劃分區分及適用的氣體群組分類外，另應考慮其金屬最高表面溫度引起之風險，確保不會達到該可燃性氣體或易燃液體之蒸氣的自燃溫度，以免電氣設備之高溫金屬表面成為有效引火源。

表 4 溫度等級^[3]

氣體溫度等級	氣體自燃溫度 (IT)
T1	IT > 450°C
T2	450°C ≥ IT > 300°C
T3	300°C ≥ IT > 200°C
T4	200°C ≥ IT > 135°C
T5	135°C ≥ IT > 100°C
T6	100°C ≥ IT > 85°C

(三)可燃性氣體或蒸氣風險等級

可燃性氣體或易燃液體洩漏引起火災爆炸之風險，取決於該氣體或蒸氣之最大實驗安全間隙 (MESG)、最小點火電流 (MIC) 或最小點火電流比 (MIC Ratio)、引燃溫度 (IT)、密度等氣體自有特性或參數，常見可燃性氣體或易燃液體的蒸氣之性質摘錄如表 5 所示。

由可燃性氣體之最大實驗安全間隙或最小點火電流比所決定之氣體群族分類及由其引燃溫度所決定之氣體溫度等級，更直接關係可燃性氣體或易燃液體的蒸氣之風險高低。可燃性氣體或易燃液體之蒸氣的風險，可以下列風險矩陣表示如表 6 所示。

表 5 常見可燃性氣體或蒸氣之性質^[3]

名稱	化學式	自燃溫度 (°C)	蒸氣密度	MESG (mm)	MIC (mA)	MIC Ratio (甲烷=1)	溫度等級	氣體群組
乙炔	C ₂ H ₂	305	0.9	0.37	24	0.3	T2	IIC
氫氣	H ₂	560	0.1	0.28	21	0.26	T1	IIC
甲烷	CH ₄	537	0.55	1.14	85	1.	T1	IIA
丙烷	C ₃ H ₈	470	1.56	0.92	70	0.87	T1	IIA
丁烷	C ₄ H ₁₀	372	2.0	0.98	80	1	T2	IIA
丙烯	CH ₂ =CHCH ₃	455	1.5	0.91			T1	IIA
乙烯	CH ₂ = CH ₂	425	0.97	0.65	45		T2	IIB
丙酮	CH ₃ COCH ₃	535	2.0	1.01			T1	IIA
苯	C ₆ H ₆	560	2.8	0.99			T1	IIA
甲醇	CH ₃ OH	386	1.1	0.92	70		T2	IIA
硫化氫	H ₂ S	270	1.19	0.89			T3	IIB
二硫化碳	CS ₂	95	2.6	0.2			T6	IIC
氨	NH ₃	630	0.59	3.18			T1	IIA

表 6 常見可燃性氣體或蒸氣風險矩陣

氣體分類	溫度等級					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
IIA	甲烷、丙烷、苯、 丙烯、丙酮、氨、 二甲苯、乙酸乙酯	丁烷、甲醇、 氯乙烯、	松節油、 煤油、 正己烷	二己基醚		亞硝酸乙酯
IIB	氰化氫、一氧化碳	乙烯、甲醛、 環氧乙烷	硫化氫、 丙烯醛	乙醚、 甲乙醚		
IIC	氫、水煤氣	乙炔				二硫化碳

五、防爆電氣設備之構造與規格

(一) 防爆電氣設備之分類

依據國家標準 CNS3376-0 規定，係將防爆電氣設備區分為如表 7 所示三個設備群組 (Group)：

表 7 設備群組

設備群組	適用
第一群組 (Group I)	適用於易發生沼氣之礦坑的電氣設備
第二群組 (Group II)	適用於易發生沼氣之礦坑內除外的爆炸性氣體環境中之電氣設備
第三群組 (Group III)	適用於易發生沼氣之礦坑內除外的爆炸性及可燃性粉塵環境中之電氣設備

第二群組可依其預定使用所處之爆炸性氣體環境的性質，再予細區，其細分目如下：

IIA：適用於氣體群組為 A 群組的氣體，典型之氣體為丙烷。

IIB：適用於氣體群組為 B 群組的氣體，典型之氣體為乙烯。

IIC：適用於氣體群組為 C 群組的氣體，典型之氣體為氫。

標示 IIB 之電氣設備亦可用於氣體群組為 A 之環境中；同樣地，標示 IIC 之電氣設備亦可用於氣體群組為 B 或 A 之環境中。

(二) 防爆電氣設備之構造與適用區分

防爆電氣設備之構造依國家標準 CNS3376 系列標準，可區分為耐壓防爆構造、正壓防爆構造、增加安全防爆構造、油浸防爆構造、本質安全防爆構造、模鑄防爆構造、填粉防爆構造、n 型防爆構造及特殊防爆構造等九種。各種防爆構造有其適用之危險區域區分，各種防爆構造之 CNS 編號、標示符號及適用危險場所區分如表 8 及表 9 所示。特殊防爆構造 (s) 可適用於特殊客製化之危險區域劃分或場所。

表 8 防爆電氣設備構造與適用區分

防爆構造	CNS	符號	適用危險場所區分		
			0 區	1 區	2 區
本質安全	CNS 33376-11	Ex ia	V	V	V
		Ex ib	X	V	V
耐壓防爆	CNS 33376-1	Ex d	X	V	V
正壓防爆	CNS 33376-2	Ex p	X	V	V
增加安全防爆	CNS 33376-7	Ex e	X	V	V
油浸防爆	CNS 33376-6	Ex o	X	V	V
模鑄防爆	CNS 33376-18	Ex m	X	V	V
填粉防爆	CNS 33376-5	Ex q	X	V	V
n 型（簡易）防爆	CNS 33376-15	Ex n	X	X	V
特殊防爆	-	Ex s	V	V	V

表 9 防爆電氣設備構造與適用區分

區（場所）	防爆構造
Zone 0	Ia s
Zone 1	Ia ib d p e o q m s
Zone 2	ia ib d p e o q m n s

(三)設備溫度等級

前述電氣設備之金屬表面溫度如達環境可燃性氣體之引燃溫度時，高溫金屬表面可成為燃燒三要素之有效火源，故防爆電氣設備允許之金屬表面溫度，將受限於可燃性氣體之引燃溫度。選用防爆電氣設備時亦應考慮環境中可燃性氣體之引燃溫度所對應之溫度等級，據以選擇防爆電氣設備之溫度等級。防爆電氣設備之最高金屬表面溫度與溫度等級如表 10 所示。

表 10 防爆電氣設備之最高表面溫度與溫度等級

溫度等級	最高表面溫度範圍（℃）
T1	超過 300，450 以下
T2	超過 200，300 以下
T3	超過 135，200 以下
T4	超過 100，135 以下
T5	超過 85，100 以下
T6	85 以下

(四) 防爆電氣設備之保護位準

因為危險區域劃分區分之場所風險等級不同，因此在選用防爆電氣設備時，尚必須考慮防爆電氣設備的保護位準（Equipment Protection Levels, EPL）或防爆構造的適用性，始能有效控制火災爆炸的風險。防爆電氣設備之保護位準與危險區域劃分之適用，詳如表 11 所示。

表 11 防爆電氣設備之保護位準等級與區域劃分

設備保護位準等級	類別	EPL 符號	適用區域區分
非常高保護等級	II	Ga	Zone 0
	III	Da	Zone 20
高保護等級	II	Gb	Zone 1
	III	Db	Zone 21
加強保護等級	II	Gc	Zone 2
	III	Dc	Zone 22

(五) 防爆電氣設備之標示與選用

防爆電氣設備之標示至少應包括下列：

- Ex 符號
- 設備群組、氣體群符號
- 溫度等級或最高表面溫度或兩者
- 保護位準等級符號

圖 4 防爆電氣設備標示例中所示，防爆電氣設備標示為 Ex d IIB T4 Gb X，其中 d 表示該設備為耐壓防爆構造，適用於危險區域劃分為 1 區之場所（2 區亦可適用）；IIB 表示該設備之群組區分，適用於氣體群組為 IIB 之爆炸性氣體環境（IIA 的爆炸性氣體環境亦可適用）；T4 表示該設備溫度等級，適用於氣體溫度等級為 T4 的氣體環境中（T3、T2、T1 的氣體環境亦可適用）；Gb 表示該設備保護位準（EPL）：Gb 適用 Zone1 或 Zone2；X 為註記特殊使用條件。

六、結論與建議

防爆電氣設備除製造者、輸入者或供應者應依職業安全衛生法第 7 條之規定，實施源頭管制，張貼安全標示，以確保設備符合安全標準外，雇主於規畫及選用時，應考慮設置場所之危險區域劃分區分及因氣體之種類與性質的差異所衍生之風險，據以選用適合的防爆構造與性能規格。我國現行職業安全衛生設施規則第 177 條及第 177

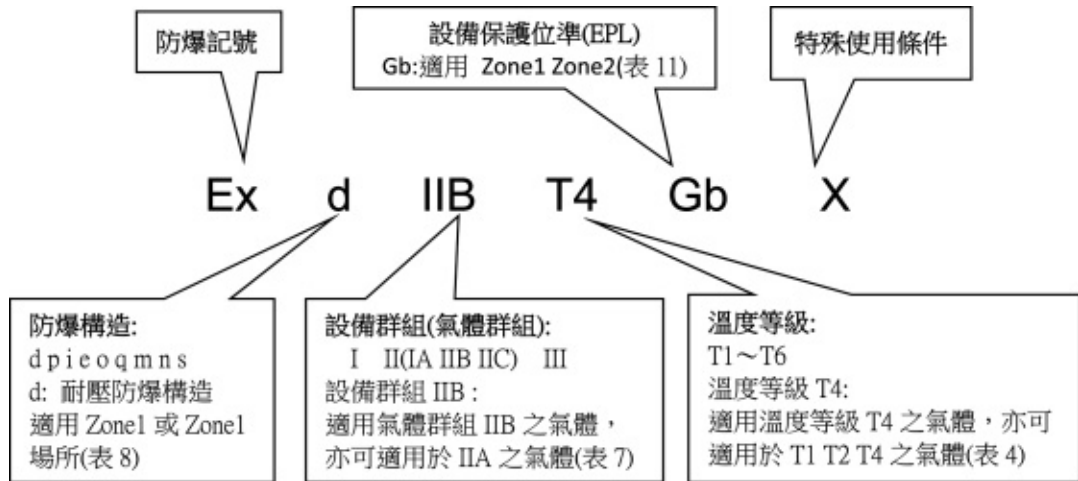


圖 4 防爆電氣設備標示例

條之 1，雖已就防爆電氣設備構造之選用，應適合作業場所危險區域劃分做原則性的規範，惟尚未進一步部規範應再就氣體之種類（氣體群族）與性質（溫度等級）等火災爆炸之風險指標納入考量，法規之完整性顯有不足，建議應予修正，以符合火災爆炸原理及現行國家標準或相關團體標準之規定。（摘自本會鍋爐知識第 40 期）

參考資料

- [1] 一百零八年度勞動檢查方針 勞動部 107 年 6 月 29 日
- [2] 職業安全衛生法 勞動部 102 年 7 月 3 日
- [3] CNS 3376 系列標準 經濟部標準檢驗局 91 年 10 月 31 日
- [4] CNS19551 系列標準 經濟部標準檢驗局 101 年 10 月 8 日
- [5] 職業安全衛生設施規則 勞動部 103 年 7 月 1 日
- [6] 高壓氣體勞工安全規則 勞動部 103 年 6 月 27 日
- [7] 機械設備器具安全標準 勞動部 107 年 10 月 12 日
- [8] 工場電氣設備防爆指針（ガス蒸氣防爆 2006）日本獨立行政法人産業安全研究所 2006 年
- [9] Jim Dunn “Automation Basics : Hazardous area installation challenges and solutions” The International Society of Automation InTech Magazine 2017

燃氣鍋爐的爐膛爆炸

本會資料室

隨著我國對大氣環境污染的治理和天然氣資源的開發利用，不少城鎮鍋爐（主要是大城市的工業鍋爐）燃料正逐步由煤改為天然氣。事物總有其兩面性，鍋爐改燒天然氣後，由於其燃燒產物（煙氣）基本不含煙塵和二氧化硫，所以其排放物也不會造成對大氣的污染，有利於對大氣環境質量的改善。但另一方面，由於天然氣（以下亦稱燃氣）是易燃氣體，具有爆炸危險性，這就使原本就存在汽水爆炸危險的鍋爐又增加了燃氣爆炸的危險，且後者發生事故的概率和事故後果的嚴重性往往比前者還要大，也就是燃氣的危險度比汽水的危險度更高。近年來發生的燃氣鍋爐爐膛及煙道爆炸的嚴重事故，甚至特重大事故也證明了這一點。所以，對鍋爐燃料由煤改為天然氣所帶來的不安全因素要有足夠的認識，並採取相應的預防措施。

一、燃氣的危險性質

燃氣的危險性質是指燃氣有造成人員傷亡和財產損失的爆炸危險性，這是由燃氣的易燃特性及其物理特性決定的。

(一)燃氣的易燃性

天然氣是一種以氣態烓為主要成分的混合氣體，其烓類組分總含量可達 95% 以上。由於氣態烓如 CH_4 （甲烷）、 C_2H_6 （乙烷）、 C_3H_6 （丙烯）和 C_3H_8 （丙烷）等都是些低分子碳氫化合物，他們在空氣中以很小的濃度和不高的溫度即可著火燃燒，所以天然氣十分易燃，即屬易燃氣體。

1. 著火（爆炸）極限

在燃氣技術中，將燃氣在空氣中能著火燃燒的最低濃度成為著火下限，低於此濃度，火焰就不能傳播；而濃度超過某一界限時，因缺氧也不能繼續燃燒，此最高濃度就稱為著火上限，著火下限和著火上限之間的濃度範圍就稱為著火極限。著火極限通常用燃氣在燃氣和空氣的混合物中的容積百分率來表示。各種燃氣的著火極限決定於其組成的各單一氣體的著火極限。各單一氣體的著火極限可通過實驗測定（見表 1）。

對於鍋爐用燃氣，因其是由多種單一氣體組成的混合氣體，其著火極限既可通過試驗測定，也可根據其組分用式①和式②計算求得（即呂一查特里爾公式）。

表 1 一些單一氣體的有關特性

名稱	分子式	著火（爆炸）極限%		最低著火溫度/°C
		下限	上限	
甲烷	CH ₄	5.0	15.0	540
乙烷	C ₂ H ₆	2.9	13.0	515
乙烯	C ₂ H ₄	2.7	34.0	525
丙烷	C ₃ H ₈	2.1	9.5	450
丙烯	C ₃ H ₆	2.0	11.7	460

對不含惰性氣體的燃氣的著火下（上）限：

$$L = \frac{100}{\frac{a}{A} + \frac{b}{B} + \frac{c}{C} + \dots} \% \quad \text{①}$$

對含有惰性氣體的燃氣的著火（下）上限：

$$L_i = \frac{\left(1 + \frac{B_i}{1 - B_i}\right) 100}{100 + L \left(\frac{B_i}{1 - B_i}\right)} \% \quad \text{②}$$

式中：L 及 L_i—— 不含及含有惰性氣體的燃氣的著火下（上）限：

a, b, c...及 B_i —— 燃氣中各可燃及惰性氣體的容積組分：

A, B, C... —— 燃氣中各可燃單一氣體的著火下（上）限。

例如北京用的陝甘寧天然氣的組分 CH₄=95.95%、C₂H₆=0.91%、C₃H₆=0.14% 及 CO₂=3%。先將各可燃單一氣體的組分析算成純燃氣的組分，並從表 1 中查的它們的著火下（上）限，代入式①即可算得其不含惰性氣體的著火下限為 4.96%，上限為 14.96%。然後將此計算結果及惰性氣體 CO₂ 的組分代入式②，即可算得陝甘寧天然氣的著火極限是 5.1%~14.8%。

著火極限受助燃氣體和混合物的溫度或壓力的影響，上述燃氣著火極限是助燃氣體為空氣，在大氣壓力下的著火極限，適用於通常情況（包括鍋爐）燃氣的著火燃燒。

在著火極限範圍內的可燃混合物著火後，其火焰就會在混合氣體中傳播，其單位時間內傳播的距離稱燃燒速度。燃氣在常溫常壓下的正常燃燒速度一般為 40~40cm/s。但在某種條件下（如著火前已均勻混合），其燃燒速度可達正常速度的幾千倍，此時的高速燃燒就轉化成了爆炸。所以，燃氣的著火極限又稱為爆炸極限。天然氣的爆炸極限約為 5%~15%，其下限如此之低，就決定了天然氣的易燃性。

2. 著火溫度

在著火極限範圍內的燃氣與空氣的混合物只有達到一定的溫度時才能著火燃燒，通常將燃氣發生自燃的溫度稱為著火溫度。各種單一氣體和燃氣的著火溫度是通過標準的實驗裝置測定的，裝置不同，所測得的著火溫度略有差別。表 1 所列單一氣體的著火溫度是在氧氣中測定的。實際燃氣的著火溫度還受其濃度、加熱熱源及散熱情況等因素的影響。天然氣在氧氣中的著火溫度約為 540℃，其在空氣中的著火溫度為 640℃ 左右。

(一) 燃氣的易擴散（混合）性

燃氣必須與空氣混合才能著火燃燒，也就是必須擴散於空氣之中。氣體的擴散性隨其密度的減小而增強。天然氣的密度一般為 0.75~0.9kg/Nm³，而空氣的密度為 1.29kg/Nm³，所以天然氣對空氣的相對密度只有 0.58~0.70。特別是天然氣是以甲烷為主的混合氣體（通常占 90% 以上），而甲烷的密度僅為 0.72kg/Nm³，其擴散性非常好。因此，天然氣一旦進入空氣，就會迅速於空氣摻混形成可燃（爆炸）混合氣體。

(二) 燃氣的隱伏性

天然氣是一種無色透明，也基本無味的氣體。輸送到城鎮的天然氣要在其門站進行加臭處理，加臭劑量一般為天然氣著火（爆炸）下限的 20%。因天然氣的著火下限為 5%，則加臭劑量僅為天然氣量的 1%。所以，送到用戶的天然氣如果發生洩漏，是難以準確覺察的；若漏入爐膛中則更是難以覺察。所以，天然氣的存在具有隱伏性，即潛在的危險性。

二、爐膛爆炸

(一) 爆炸機理

燃氣鍋爐爐膛（含煙道，下同）爆炸實際上是燃氣在爐膛內產生的一種意外的特殊形態的著火燃燒。

燃氣鍋爐一般都採用擴散式燃燒器，就是助燃空氣和燃氣按規定的比例（即空氣／燃氣比）和速度分別進入爐膛，在爐膛中邊混合邊燃燒。鍋爐正常點火和運行時，整個爐膛燃燒系統處於一種平衡穩定狀態，即：進入爐膛的空氣和燃氣於其燃燒的生成物處於物質平衡；燃燒產物的放熱量與爐膛的煙氣量相平衡；燃燒產物的放熱量與爐膛的吸熱量相平衡等。這些平衡使鍋爐處於一種連續穩定的狀態。

爐膛爆炸則不同。如果燃氣在某種異常情況下進入沒有燃燒的爐膛，因其擴散性好，很快就與爐膛中的空氣形成良好的混合。當混合氣體中燃氣的濃度達到著火極限時，遇火種或熱源就會立即著火燃燒，並在瞬間（以 ms 計）就全部完成。由此可知，與正常燃燒相比，這種燃燒呈以下異常狀態（特點）：

1. 由於燃燒基本沒有經過燃氣和空氣的擴散（混合）過程，燃燒方式就稱為動力式燃燒；
2. 因高速燃燒，所產生的熱量來不及被爐膛吸收而使燃燒過程接近絕熱燃燒；
3. 受絕熱燃燒加熱的燃燒產物溫度急劇升高，發生絕熱膨脹。
4. 膨脹的氣體不能立即從爐膛出口流出，又受爐膛殼壁的約束（定容），導致壓力急劇升高。當壓力超過爐膛結構強度時，爐膛殼壁破裂，爐膛內蓄積的巨大能量得到釋放，並伴有激烈響聲，形成爐膛爆炸。

所以，爐膛爆炸實際上就是一種異常狀態的高速燃燒，也稱燃燒爆炸。

(二) 爆炸的破壞力

爐膛爆炸的後果十分嚴重，它不僅直接導致鍋爐的損壞，而且爆炸損壞設備的飛散物和爆炸氣體引起的衝擊波將造成人員傷亡和建築物的破壞。

1. 爆炸的壓力

爐膛爆炸前和爆炸後爐膛內的介質分別是燃氣、空氣和煙氣。由於燃氣、空氣和煙氣均具理想氣體性質，所以爆炸前、後介質的熱力參數變化符合理想氣體狀態方程。如前所述，爐膛爆炸可視為絕熱過程；由於爐膛容積是一定的，所以它還是一個定容過程，則爆炸前、後介質參數的關係應為：

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \dots\dots\dots ③$$

$$\text{或 } p_2 = \frac{p_1 T_2}{T_1} \dots\dots\dots ④$$

式中： p_1 —— 爆炸前爐膛內介質的絕對壓力，一般可視為大氣壓力，即 $p_1 = 0.1\text{MPa}$ ；

T_1 —— 爆炸前爐膛內介質的熱力學溫度，冷態點火時可視為常溫，可取 25°C ，即 $T_1 = 298\text{K}$ ；

p_2 —— 爆炸後介質的峰值絕對壓力，MPa

T_2 —— 爆炸時的絕熱燃燒溫度（燃燒熱量計溫度），K。

由燃燒計算知：

$$T_2 = \frac{Q_{\text{net} \cdot \text{ar}}}{V_y^0 \cdot C} + 273 \dots\dots\dots ⑤$$

式中： $Q_{\text{net} \cdot \text{ar}}$ —— 燃氣收到基低位發熱量， kJ / Nm^3 ；

V_y^0 —— 理論煙氣量， $\text{Nm}^3 / \text{Nm}^3$ ；

C —— 煙氣比熱， $\text{Kj} / \text{Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ 。由於 C 受溫度影響不十分顯著，天然氣燃燒產物在 $1800\sim 2100^\circ\text{C}$ 時，可取 $C = 1.67 \text{kJ} / \text{Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$

由爆炸壓力計算就可以得出：

(1) 鍋爐冷態點火時爆炸破壞力最大

由式④可以看出，爆炸產生的介質峰值壓力 p_2 與爆炸前介質的溫度 T_1 是反比關係。對同一種燃氣，爆炸前介質的溫度越低，爆炸產生的壓力就越高。若天然氣的絕熱燃燒溫度為 $T_2 = 2233\text{K}$ (1960°C)，則冷態點火時的爆炸壓力可達 0.65MPa 表壓力。如此高的冷壓足以造成鍋爐結構的破壞。這也說明，為什麼在燃氣鍋爐爐膛爆炸破壞事故的統計數據中，點火爆炸的比例高達 70% 以上。

(2) 運行中的“爆燃”壓力不大

有論著指出：燃氣鍋爐運行中發生的爐膛熱態爆炸比冷態點火時發生的爆炸要“頻繁得多”。但這些頻繁爆炸並未引起人們太多關注，其原因就是熱態下發生的爐膛爆炸一般不會造成鍋爐的嚴重損壞。如取運行時爐膛內介質的平均溫度為 1550°C ，即 $T_1 = 1823\text{K}$ ，代入式④計算可知，其爆炸峰值壓力 $p_2 = 0.12\text{MPa}$ 表壓力，此壓力甚至不會對鍋爐運行造成太大影響。何況這種爆炸在爐膛中還往往是局部性的。對這種不造成鍋爐損壞的爆炸通常稱為爆燃。

(3) 尾部煙道爆炸應予重視

與爐膛爆燃不同，如果尾部煙道因燃燒不穩定而使煙氣中有可燃混合物，一旦發生爆炸，其危害將十分嚴重。其原因就是煙道中介質溫度已接近鍋爐的排煙溫度，也就是爆炸前介質的溫度低，產生的爆炸力就大。京津唐電網一台大型電站燃氣鍋爐在運行中曾發生尾部煙道爆炸，造成嚴重損壞就是例證。

(4) 燃氣的發熱量越大，爆炸壓力越大

由式⑤可知，燃氣熱量計溫度 T_2 與比值 $(Q_{\text{net} \cdot \text{ar}} / V_y^0 C)$ 成正比關係。由於燃燒產物的比熱 C 變化不很明顯，所以可簡化為 T_2 與比值 $(Q_{\text{net} \cdot \text{ar}} / V_y^0)$ 成正比關係，也就是 $(Q_{\text{net} \cdot \text{ar}} / V_y^0)$ 越大， T_2 就越高，爆炸產生的峰值壓力 p_2 就越大。如天然氣的 $(Q_{\text{net} \cdot \text{ar}} / V_y^0)$ 在 3200 左右，其峰值壓力可達 0.65MPa 表壓力；而高爐煤氣的 $(Q_{\text{net} \cdot \text{ar}} / V_y^0)$ 為 2020 左右，其爆炸壓力就為 0.3MPa 表壓力。通常情況下， $Q_{\text{net} \cdot \text{ar}}$ 越高， V_y^0 也越大，但比值 $(Q_{\text{net} \cdot \text{ar}} / V_y^0)$ 增長趨勢要大於 V_y^0 的增長，也就是燃氣的發熱量越大，爆炸產生的壓力越大。

2. 空氣衝擊波的破壞力

爐膛爆炸釋放出的高溫、高壓燃燒產物，以極高的速度強烈壓縮周圍禁止的空氣，使其壓力突然升高，並向外傳播，形成很強的衝擊波，衝擊波的波峰超壓會導致人員傷亡和建築物破壞。

按衝擊波的傳播規律，離爆炸中心越近，其超壓越強，破壞力也就越大。隨傳播距離的增加，其超壓迅速減小。據有關試驗資料介紹，超壓值達 0.7MPa 時，

鋼筋混凝土結構會出現較大的裂縫；超壓值為 0.5MPa 時，磚牆會出現嚴重裂縫和傾斜；超壓值為 0.1MPa 時可致人死亡和建築門窗玻璃被震碎；超壓值在 0.03~0.05MPa 時，可造成人體內傷和耳膜破裂。

三、爐膛爆炸的預防

以天然氣為燃料的鍋爐確實存在爐膛爆炸的危險，而且一旦發生爆炸，其後果往往十分嚴重，但也不是說燃氣鍋爐就一定會發生爐膛爆炸。”無危則安，無缺則全”，只要將引起爆炸的危險因素及能導致危險和爆炸發生的各種缺陷及時消除，燃氣鍋爐是可以安全運行的。

(一)防止爐膛爆炸的基礎和原則

由前述可知，爐膛爆炸的實質是燃氣得高速燃燒，發生這種燃燒必須具備 3 個條件（或稱燃燒三要素）：

1. 爐膛內有空氣積存；
2. 燃氣進入爐膛，並與空氣混合形成達到爆炸極限的混合氣體；
3. 具有點燃可燃混合物的點火源。

3 個條件，缺一不可，這就是防止爐膛爆炸的技術基礎，也就是為了防止爆炸，只允許 3 個條件中的任意 2 個排列組合存在，不允許 3 個條件同時存在。

由於爐膛中總是有空氣的，而鍋爐本身存在熱源的機會就很多，且天然氣的著火溫度並不高，所需點火熱源並不需要很大。所以在對 3 個條件進行剝離時，應將放置燃氣與空氣形成爆炸性氣體做為關鍵，這就是防止爐膛爆炸的原則措施。

(二)實行全方位和多環節的安全保護

為實現上述原則措施，就要對燃氣鍋爐採取全方位和多環節的安全保護，概括起來應包括一下幾個方面：

1. 鍋爐的燃燒設備系統，包括鍋爐本體，燃氣和空氣的供應，以及點火和燃燒器等，應滿足安全工作的要求；
2. 配備完整的燃燒控制和安全保護系統；
3. 從維護公共安全出發，以法規或標準的形式，對燃氣鍋爐設計製造、安全調適，特別是運行操作，做出相應安全規定，並強制執行。

〔摘自中國特種設備安全第 24 卷第 5 期〕