

3.3 蒸汽鍋爐系統節能技術介紹與案例分析

蒸汽鍋爐是一種利用燃料燃燒放出的熱能加熱水，以生產規定參數(溫度、壓力)的品質的蒸汽或熱水。鍋爐是由鍋和爐兩大部分組成。鍋是裝水的容器，由鍋筒和鋼管組成；爐是燃料燃燒的場所。燃料在爐內燃燒產生的高溫煙氣，藉由導熱、對流和輻射三種換熱的形式，將煙氣的熱量傳給鍋中的水而產生蒸汽。

3.3.1 蒸汽鍋爐概述

蒸汽為產業界(包含紙製品製造業)在各種生產流程中最普遍的傳熱、乾燥或動力媒介，其來源則由鍋爐經燃燒木柴、煤炭、重油或天然氣等能源加熱水所提供，所耗用能源占有相當高之成本比例。鍋爐所產製的熱源(蒸汽)藉由廠內的輸送管線源源不絕地送到製程設備，再將已釋放出熱能的冷凝水回收回鍋爐房再次加溫、加熱成蒸汽熱源。

1. 鍋爐定義

為以燃料燃燒或製程廢氣之熱量，經各種熱傳方式加熱密閉容器內之水或媒介質，使之產生蒸汽或熱能的裝置。依內政部 1974 年 12 月 20 日所訂頒之鍋爐及壓力容器安全規則第二條規定，鍋爐(該規則所稱之「鍋爐」係指蒸汽鍋爐及熱水鍋爐)之定義如下：

(1) 蒸汽鍋爐

係指以火焰、燃燒氣體、其他高溫氣體或以電熱加熱於水或熱媒，使產生超過大氣壓之壓力蒸汽，供給他用之裝置及其附屬過熱器與節煤器。

(2) 熱水鍋爐

係指以火焰、燃燒氣體、其他高溫氣體或以電熱加熱於有壓力之水或熱媒，供給他用之裝置。

2. 蒸汽鍋爐種類

鍋爐可因應市場的不同需求而有許多不同的型式，如表 3.3-1 所示。中小型企業所使用的蒸汽鍋爐種類基本上可分為煙管(火管)式鍋爐(Fire Tube Boiler)、水管式鍋爐(Water tube Boilers)和貫流式鍋爐(Once Through Boiler)等三大類型。依結構來分類約可分為下列幾種：

表 3.3-1 鍋爐的種類

種類	型式	種類	型式
1.圓筒鍋爐	1. 豎型鍋爐 2. 爐筒鍋爐 3. 臥型煙管式鍋爐 4. 臥型爐筒式煙管鍋爐	2.水管鍋爐	1. 直管式鍋爐及彎管式鍋爐 2. 豎管式鍋爐及斜管式鍋爐 3. 水牆鍋爐及無水牆鍋爐 4. 輻射型鍋爐 5. 自然、強迫循環式鍋爐 6. 特殊鍋爐
3.鑄鐵鍋爐	1. 鑄鐵製組合鍋爐	4.特殊鍋爐	1. 廢熱鍋爐 2. 特殊燃料鍋爐 3. 特殊流體鍋爐 4. 間接加熱鍋爐 5. 其他、如電熱鍋爐

資料來源：中華鍋爐協會。

(1) 爐筒鍋爐或稱為煙管(火管)式鍋爐

爐筒鍋爐(Cylindrical Boiler)是以直徑較大的爐筒體為主體，並在筒體內部裝設爐筒、火室、煙管等的鍋爐，因此種鍋爐較不耐高壓，加上筒體限制傳熱面積，所以不適合太大蒸發容量，通常在 15 公噸/小時以下使用。近年來爐筒鍋爐製造由於材料技術的進步，讓爐筒鍋爐能容納更多更薄的煙管，增加熱交換面積，提升鍋爐效率。這些鍋爐多以高溫煙道氣繞行煙管的次數區分型式。從圖 3.3-1 左圖中，可以看到這鍋爐有三層火管，火焰與熱氣從燃燒器噴到主火管的另一段後迴轉到另一層火管，到底端後，再度迴轉從排氣煙函管道出去。

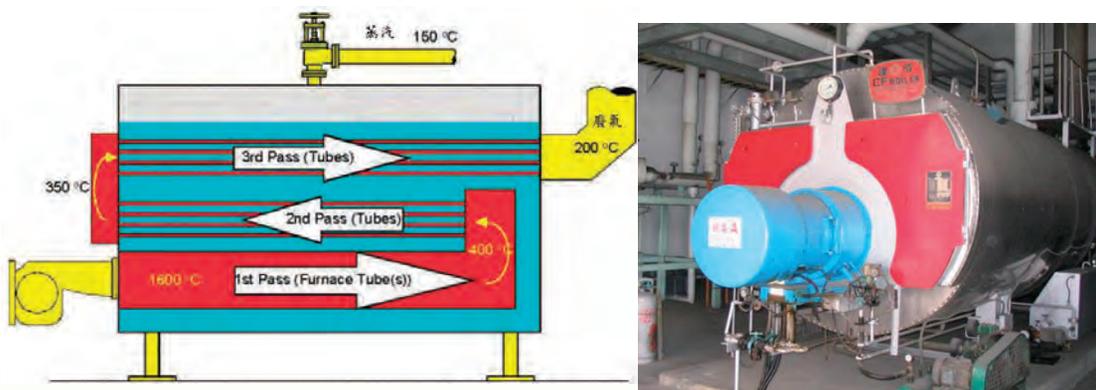


圖 3.3-1 臥型爐筒煙管式鍋爐示意及實體圖

(2)水管式鍋爐

水管式鍋爐與爐筒鍋爐的原理相反，其操作是利用爐水在管路中流動，氣體在燃燒室產生燃燒後經水管外壁，傳熱給管內的水而生成蒸汽。水管式鍋爐在國內使用的比率約在 15~20% 之間。水管式鍋爐多為產製中高壓蒸汽的大型鍋爐，尤其是發電用、大型石化廠或造紙工廠用的鍋爐，如圖 3.3-2 所示。

水管式鍋爐的體積龐大，也比爐筒鍋爐昂貴。一般產業多只需要使用單組或多組爐筒鍋爐就能滿足製程需求，但是如果單組鍋爐的蒸汽輸出需要達到 27,000kg/hr 以上或壓力超過 27bar 或蒸汽溫度超過 340℃，那就非得使用水管式鍋爐。這是由於火管式鍋爐受限於筒身厚度，無法將壓力增大，但水管式鍋爐可以。因為爐筒鍋爐的筒身直接與火受熱，有過熱爆炸的可能性。水管式鍋爐的汽鼓不須與火焰直接接觸，可以減少受熱破裂的危險。由於水管式鍋爐多為高壓產汽且大容量，要求的熱效率較高，因此多附裝上節煤器(Economizer)、過熱器(Superheater)、空氣預熱器(air preheater)等裝置。

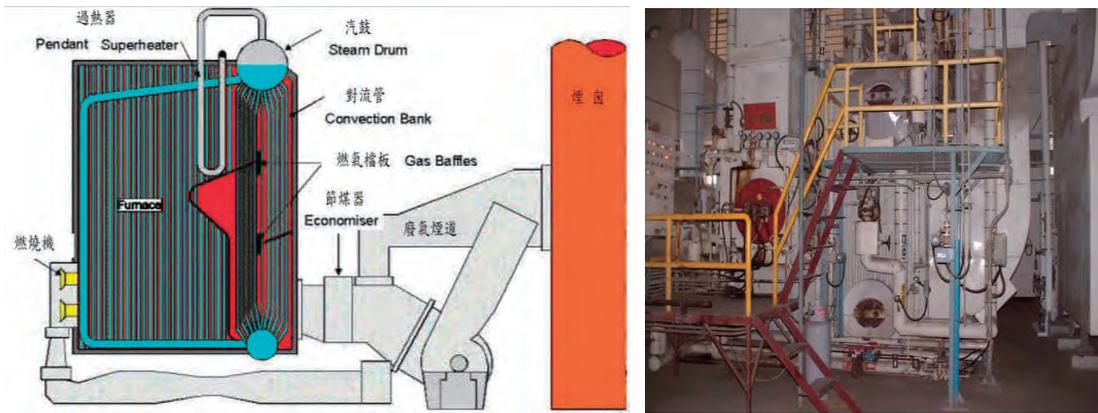


圖 3.3-2 水管式鍋爐示意及實體圖

(3)貫流式鍋爐

貫流式鍋爐與水管鍋爐的原理相似，其操作是利用爐水在管路中流動，氣體在燃燒室產生燃燒後經水管外壁，傳熱給管內的水加熱成蒸汽，如圖 3.3-3。小巧的貫流式鍋爐是水管式鍋爐的一種，蒸發壓力也可以很高。貫流式鍋爐由於沒有汽鼓，體積相當小，熱爐時間通常只需十數分鐘，不過也因此無法應付突然的大量蒸汽需求，更令人困擾的是，狹小的儲水空間會因快速的蒸發速度，使得水分很容易伴隨

蒸汽進到蒸汽輸送管路內，造成換熱效率變差。但貫流式鍋爐因爐體較小型精巧、組裝方便及供汽起動迅速等優點，所以隨著近年來加設熱回收裝置、改善水質處理方法和自動控制儀器的精進，已廣泛的普及到各中小型工廠和住商部門商家，是經濟實用的鍋爐之一。

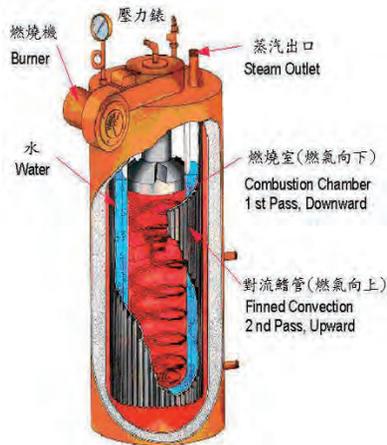
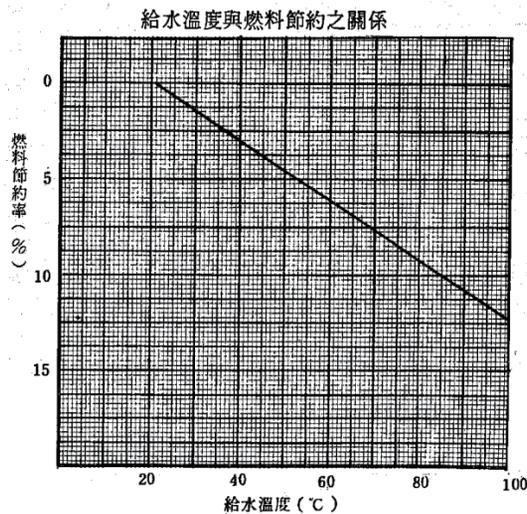


圖 3.3-3 貫流式鍋爐示意及實體圖

3.3.2 蒸汽節能技術

在特定的鍋爐效率值下，才有相當的蒸汽量或熱水量的產出，因此鍋爐的燃燒效率會直接影響到蒸汽量或熱水量，蒸汽鍋爐系統給水溫度與燃料節約之關係如圖 3.3-4 所示。



資料來源：節約能源技術手冊，經濟部能源委員會。

圖 3.3-4 給水溫度與燃料節約之關係圖

1.鍋爐效率節能改善項目及節能潛力評估

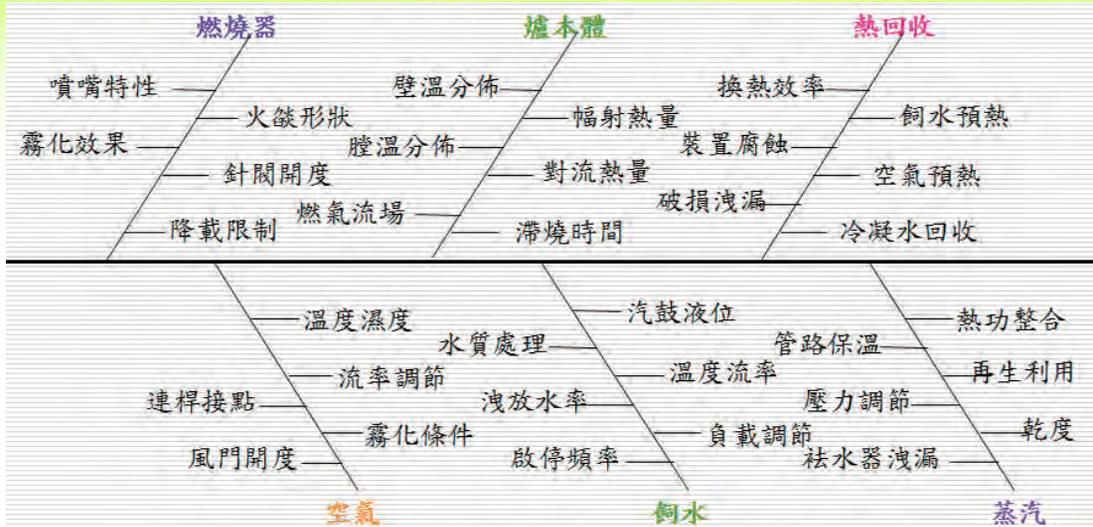
首先需先了解蒸汽鍋爐系統中可提出或檢討的系統設備效率之節能改善項目。圖 3.3-5 為一簡易可判別具有節能改善空間的系統設備項目別。

而影響鍋爐負載效率的主要因素是燃燒熱損、爐壁熱損、洩水熱損、尾氣熱損等操作項目。因此，提供表 3.3-2，為一簡易可判別鍋爐系統操作運轉時是否具有節能潛力改善空間及預期的改善效益。

表 3.3-2 鍋爐效率節能改善評估潛力與預期效益

序號	項目	改善潛力	預期效益
1	調整燃料霧化條件	飛灰殘碳減少 1.0%	鍋爐效率提升 0.8% ~ 1.0%
2	調整空氣比控制器	排氣含氧減少 1.0%	鍋爐效率提升 0.4% ~ 0.6%
3	調整給水穩定液位	變動範圍減少 5.0%	鍋爐效率提升 0.1% ~ 0.2%
4	控制爐水減量排放	洩放水量減少 1.0%	鍋爐效率提升 0.1% ~ 0.2%
5	檢修加強爐體保溫	爐壁溫度減少 10℃	鍋爐效率提升 0.3% ~ 0.5%
6	阻隔強風或冷氣流	爐壁風速減少 1.0m/s	鍋爐效率提升 0.3% ~ 0.4%
7	排氣廢熱回收裝置	排氣溫度減少 10℃	鍋爐效率提升 0.5% ~ 0.6%
8	增加冷凝水回收率	給水溫度提升 10℃	鍋爐負載減少 1.0% ~ 1.2%
9	多台鍋爐併聯分配	視個別鍋爐負載特性影響總效率提升程度	
10	避免換熱管群破裂	視本體及熱回收特性影響總效率損失程度	

資料來源：鍋爐高效率作業技術手冊，台灣綠色生產力基金會。



資料來源：鍋爐高效率作業技術手冊，台灣綠色生產力基金會。

圖 3.3-5 鍋爐效率節能改善項目之關係圖

2. 提高鍋爐效率

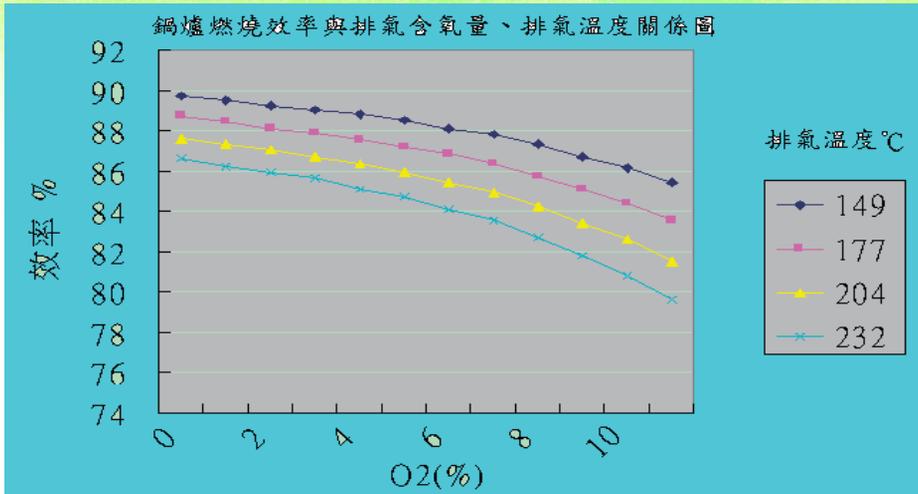
鍋爐效率好壞直接影響到耗油量大小，然而新鍋爐不一定絕對有較高的鍋爐效率，一部高效率鍋爐不僅系統設計要良好，還須有優良的操作管理人員才能將鍋爐操作得盡善盡美，以下各點均對鍋爐效率或多或少有所幫助，操作管理人員不妨加以參考：

(1) 降低排氣溫度

排氣溫度一般比所產出蒸汽溫度高約 20°C ~ 40°C ，排氣溫度太高時，可能是傳熱面積不足、積垢或後燃現象等，一般降低排氣溫度的方法有提高熱傳效率或增加熱傳面積，如定期清潔爐膛，加裝空氣預熱器或節熱器等方法，另外更須注意避免後燃現象。

(2) 減少排氣含氧量

理想的鍋爐過剩空氣量，於高負載時，其排氣含氧量應在3-5%之間，過多的空氣量造成燃油一部分熱能為空氣所帶走，但空氣量不足則會造成燃燒不完全排氣冒黑煙等問題，而不完全之燃燒可檢測煙囪排氣中一氧化碳含量多寡來判定。然而排氣含氧量亦隨鍋爐負載高低有所不同，因此鍋爐燃燒進氣量之調節，應於鍋爐高負載時(大火燃燒時)調降進氣量在最低量，此進氣量使鍋爐在高低負載變化時，空氣量不會有不足或過大的現象。如圖3.3-6所示。

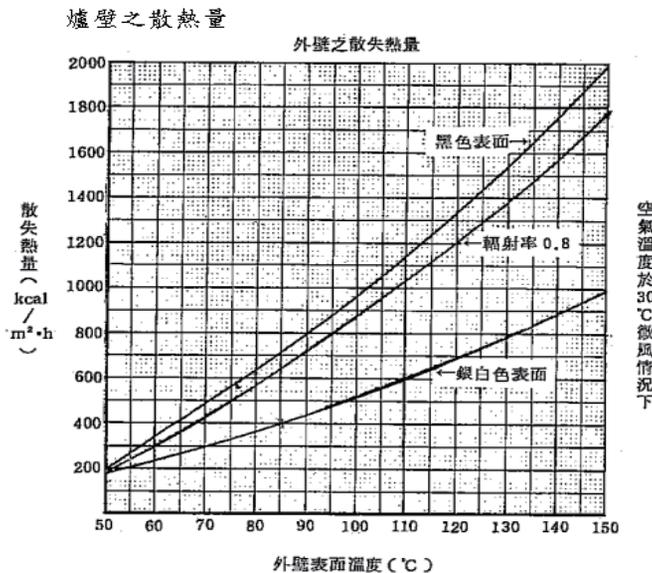


資料來源：Spirax Sarco 產品應用手冊，斯派瑞莎克(股)公司，2005 年。

圖 3.3-6 鍋爐燃燒效率與排氣含氧量、排氣溫度關係圖

(3) 加強保溫

爐體保溫良否直接影響到鍋爐效率，保溫正常則爐體表面平均溫度將不超過室溫 30°C 以上，而鍋爐房風速及外氣溫度條件也會影響爐體表面熱散失量。如圖 3.3-7 所示。



資料來源：節約能源技術手冊，經濟部能源委員會。

圖 3.3-7 鍋爐爐壁散熱量與熱損失關係圖

(4) 預熱燃油

為提高燃油燃燒效率，以中國石油公司供應之低硫燃料油(SO₂：0.5%)為例，必須預熱燃油降低其黏度使其霧化完全，而燃油霧化預熱溫度隨燃燒器型式不同而異，一般燃油預熱溫度範圍在80℃～120℃之間，如預熱溫度太低時，油黏度大，噴霧油滴太大，可能造成後燃燒使排氣溫度升高，甚至排氣冒黑煙，而不得不增加空氣量，以至使熱損失變大，但預熱溫度過高，可能造成油料碳化，使噴油嘴結碳，影響正常噴霧，也會使油料霧化不佳，產生後燃現象，而使排氣溫度升高，浪費能源。

(5) 改善飼水品質

鍋爐水經蒸發濃縮後，爐水中不純物比例增加，常造成水側管路結垢、腐蝕等問題，通常鍋爐飼水均須先行軟化處理或儘量利用回收之冷凝水做為鍋爐飼水來改善水質。

(6) 避免鍋爐經常低負載運轉

由於爐體表面熱損失相對增加，使得鍋爐效率非常低，鍋爐如經常低負載或以小火運轉時，應考慮改小燃燒器或換小噴油嘴或更換容量較小之鍋爐，使得鍋爐有較佳之效率。

3. 蒸汽及冷凝水系統的節能

在談論蒸汽及冷凝水系統的節能前我們先來估算蒸汽的成本：

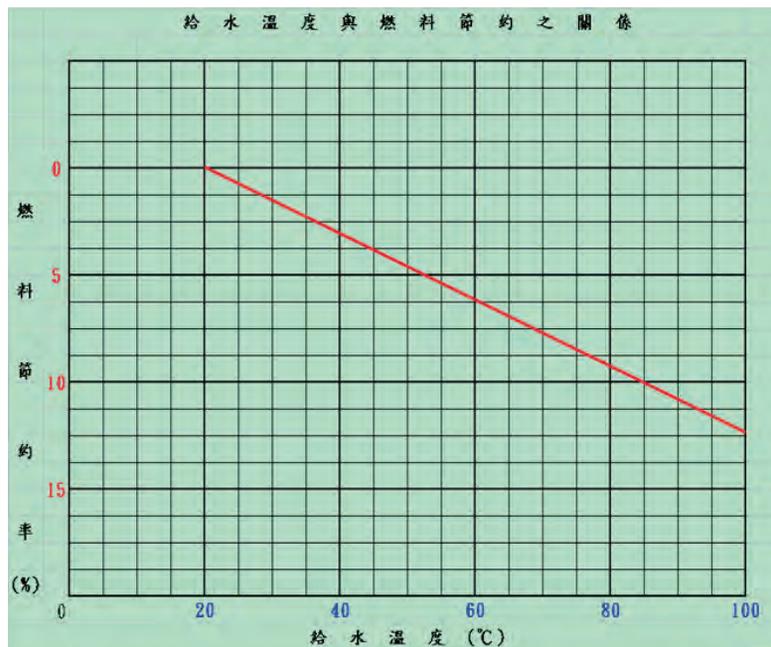
- (1) 燃料油價格：新台幣 16,287 元/kL(以 106 年 9 月 30 日臺灣中油公司報價、不含運費)
- (2) 燃料油密度：972.5 kg/kL
- (3) 燃料油熱值：9,600 kcal/L
- (4) 燃料油熱值：10,123.7 Mcal/kL
- (5) 1 公噸 7.0 kgf/cm²G 的蒸汽熱焓：661 Mcal
- (6) 每公噸蒸汽約需 82 公升燃油或新台幣 1,336 元的成本

若鍋爐效率為 85%，那油的熱值僅有 85% 會用來加熱水為蒸汽，其它 15% 必須燃燒更多油來彌補，所以每公噸蒸汽事實上約需要：

$$1,336 \text{元/每公噸蒸汽} \times 1.15 = 1,536 \text{元/每公噸蒸汽}$$

其它會增加蒸汽成本的因素：水費、電費、水處理藥劑與耗材費用、污水處理費，成本約為160元/每公噸蒸汽。

累計後總成本約為1,700元/每公噸蒸汽，因此除關心如何提高鍋爐效率外，熱能的有效管理和運用更是節約能源的項目之一。例如在蒸汽輸送系統上，可透過一組合適的祛水器和管線，以回收高溫冷凝水的節約能源手法，更是值得中小企業廠商參考，以達到節約能源之目的。冷凝水回收率與鍋爐效率關係如圖3.3-8所示。



資料來源：節約能源技術手冊，經濟部能源委員會。

圖 3.3-8 冷凝水回收率與鍋爐效率關係圖

4.蒸汽祛水器(Steam Trap)

由於保溫的不完全、水質的不良、蒸汽供應的不平衡等，都會造成管路中含有凝結水及水膜的發生，這些凝結水積集於管路底部，會產生水錘(Water Hammer)現象，影響正常生產操作，而水膜對熱的阻抗為一般鋼板的 60~70 倍，大大的阻礙蒸汽的熱傳效果。此外蒸汽管路中常有不凝結氣體(Incondensable Gases)存在，包括有空氣、二氧化碳等氣體物質，其主要來源有：

- (1) 熱設備在啟用前，蒸汽管路中有大氣存在。

- (2) 當停車時，熱設備中部分蒸汽慢慢冷凝而造成真空，使外界大氣倒灌入內。
- (3) 操作不當或使用的添加物混雜有空氣。

當空氣混於蒸汽進入熱設備時，空氣附著於傳熱表面形成空氣膜，分隔蒸汽與傳熱面，由於空氣的熱傳導度極低，故影響熱傳效果，降低熱設備的效率。因此，如何立即排除管中所形成的凝結水和混雜的不凝結氣體，對提高熱設備效率，節省能源浪費是非常重要的。一個優良的祛水器必須達到以下三個要求：

- (1) 凝結水一經形成，就將其排出。
- (2) 排放不凝結氣體，如空氣、二氧化碳等。
- (3) 盡可能使蒸汽的漏失減至最小。

蒸汽祛水器種類很多，並且各有特徵依其使用原理，一般可分四種型式，如表 3.3-3 所示。

表 3.3-3 蒸汽祛水器種類、特徵及其使用原理

型式	使用原理	種類
機械作動型 (Mechanical Type)	利用水蒸汽與凝結水 <u>密度</u> 之差異	1.直桶式祛水器(Open Bucket Traps) 2.倒桶式祛水器(Inverted Bucket Traps) 3.浮球式祛水器(Free Float Traps) 4.浮桶式祛水器(Free Ball Bucket Traps)
靜熱作動型 (Thermostatic Type)	利用水蒸汽與凝結水 <u>溫度</u> 之差異	1.脹管式祛水器(Bellows Type Traps) 2.雙金屬式祛水器(Bimetallic Traps)
熱力作動型 (Thermodynamic Type)	利用水蒸汽與凝結水 <u>熱力</u> 性質之差異	1.推進式祛水器(Impulse Type Traps) 2.圓盤式祛水器(Disc Type Traps)
節流型 (Orifice Type)	利用水蒸汽與凝結水通過小孔 <u>流量</u> 之差異	流孔板式祛水器(Orifice Type Traps)

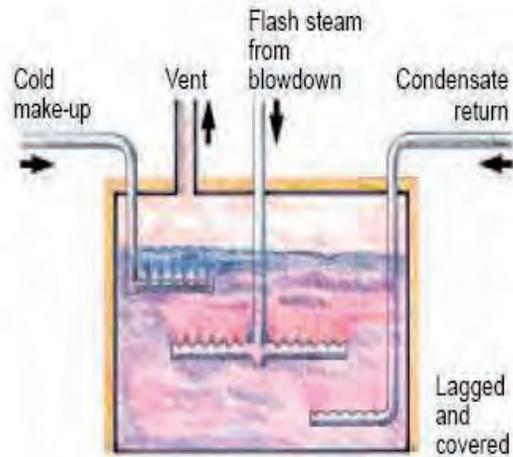
資料來源：Spirax Sarco 產品應用手冊，斯派瑞莎克(股)公司，2005 年。

5. 凝結水的回收

當蒸汽冷凝時，蒸汽的熱焓會移轉到被蒸汽加熱的物件上。但是這些熱焓只是鍋爐蒸發鍋爐水所用能源的75%而已，剩下的25%仍然存於凝結水內，另外除本身的高熱焓外，蒸汽凝結水更是最理想的鍋爐補給水，如圖3.3-9所示。

冷凝水回收有下列幾個優點：

- (1) 冷凝水為最純的蒸餾水，不含鍋垢之固體成分，可節省大量清鍋費、水費及電費。
- (2) 提高鍋爐給水水質，蒸汽品質提高，減少鍋爐排放(Blow Down)節約能源。
- (3) 減少鍋爐補給水量，並減少爐內外水處理費用。
- (4) 給水溫度提高，水中含氧量減少，避免鍋爐管線鏽蝕；增加熱傳導，提高效率。
- (5) 給水溫度提高，減少鍋爐氣鼓的溫度差，避免鋼板熱脹冷縮，應力不平衡，延長鍋爐壽命，同時蒸汽壓力穩定。
- (6) 給水溫度升高，增加鍋爐蒸發量，減少單位蒸汽生成熱能的需要量，直接節省燃油消耗，提高鍋爐效率。



資料來源：Spirax Sarco 產品應用手冊，斯派瑞莎克(股)公司，2005 年。

圖 3.3-9 冷凝水的回收

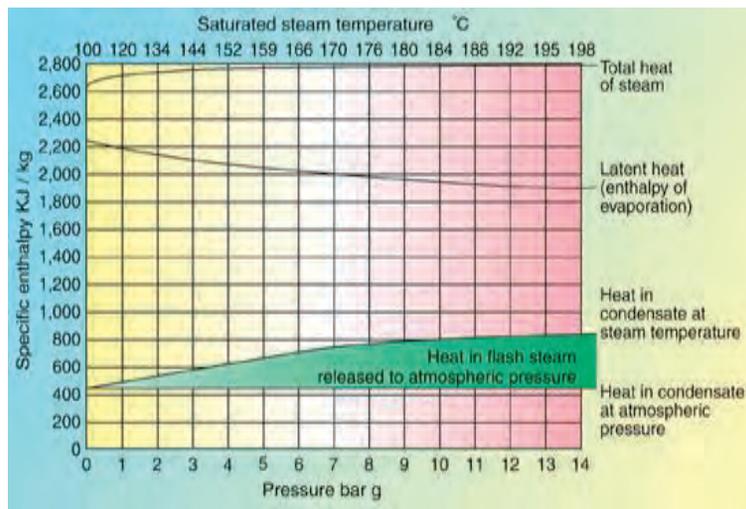
增設密閉式冷凝水回收系統一般多為開放式冷凝水回收系統，常使回收之高壓冷凝水至回收槽時，形成二次蒸汽排放掉，造成能源之浪費。如採用密閉式冷凝水回收系統，或將高壓冷凝水先經蒸汽再生槽形成中壓蒸汽，可供中、低壓力蒸汽系統使用或提高鍋爐飼水溫度，以節約能源耗用。但設計時要注意管線中不凝結氣體的存在，要設置排氣閥。密閉式冷凝水回收系統如圖3.3-10所示。



圖 3.3-10 密閉式冷凝水回收系統

6. 閃發蒸汽的回收

蒸汽冷凝水是由較高壓的蒸汽系統經由祛水器排到低壓的冷凝水回收系統。由於壓降的關係，部分冷凝水再蒸發成蒸汽(稱為“閃發蒸汽”)。閃發成蒸汽的比例依蒸汽與冷凝水回收系統的壓差而定。但是一般是在於10%~15%之間。冷凝水中所含的熱焓，約有半數會經由閃發蒸汽喪失去，因此閃發蒸汽的回收也是蒸汽系統能源節約中重要的一環。圖3.3-11為在各蒸汽壓力下，蒸汽冷凝水可回收閃發蒸汽量之相關比較圖。



資料來源：Spirax Sarco 產品應用手冊，斯派瑞莎克(股)公司，2005年。

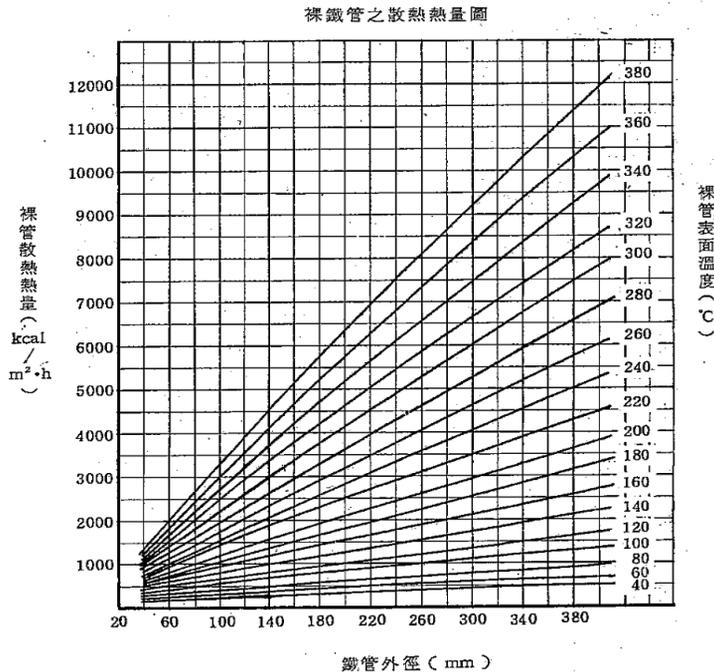
圖 3.3-11 蒸汽冷凝水可回收閃發蒸汽量圖

7.確實的蒸汽管線保溫與防止蒸汽外洩

未保溫的蒸汽與冷凝水管閥件會持續不斷的將熱能釋放到大氣中，確實的保溫蒸汽管路可以減少熱能損失將近 90%，也能防止因過度冷凝造成的管路積水與水錘問題，以及可能的壓力不足現象。

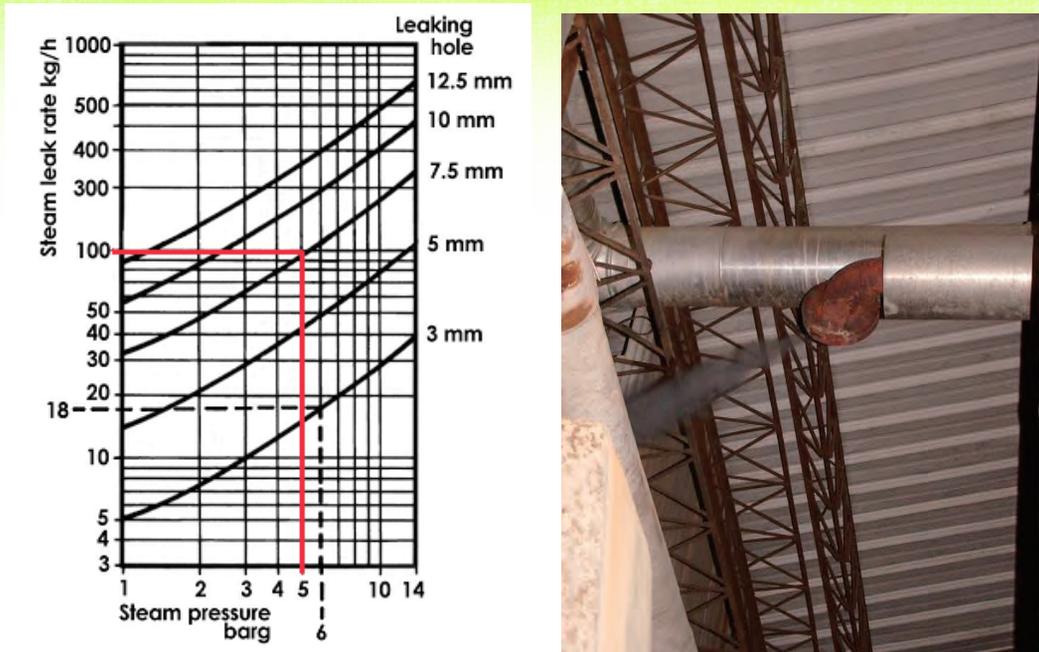
蒸汽與冷凝水管線的保溫，經過一段時間的使用後常有部分保溫會因損壞、變形、受潮變濕而喪失保溫功能。尤其是變濕的保溫更應立即更換，因為濕保溫會加速管中的熱能傳送到大氣的速度，濕保溫的熱損失比未保溫的裸管可能快 50 倍左右。蒸汽管線熱損失圖如圖 3.3-12 所示。

而蒸汽洩漏是最直接的能源損失。以一個 7.5mm 的小孔而言，5barg(約 5.1 kgf)壓力下，每小時洩漏 100kg/hr 的蒸汽量。若久未察覺或視而不管，全年 8,400 小時，至少造成 69 公秉的燃油消耗。蒸汽洩漏熱損失圖如圖 3.3-13 所示。



資料來源：節約能源技術手冊，經濟部能源委員會。

圖 3.3-12 蒸汽管線熱損失圖



資料來源：Spirax Sarco 產品應用手冊，斯派瑞莎克(股)公司，2005 年。

圖 3.3-13 蒸汽洩漏熱損失圖

8. 蒸汽祛水器的保養

美國能源局發現 3 至 5 年未檢測或未全面性保養的蒸汽祛水器通常會有 15~30% 的故障率，使得蒸汽不斷地洩漏造成能源損失。

美國能源局建議 10 kgf/cm^2 (150 psig) 以上的蒸汽系統應每週安排一次祛水器檢測， 2 kgf/cm^2 到 10 kgf/cm^2 (50 psig~150 psig) 的蒸汽系統應每季檢測一次，而 2 kgf/cm^2 以下的系統則是每年檢測一次。檢測目的在於將全廠的蒸汽祛水器故障率控制在 5% 以下，以避免昂貴的蒸汽洩漏損失，以擁有 200 顆祛水器的蒸汽系統而言，30% 的故障率表示有 60 顆祛水器在洩漏。

綜合上述在蒸汽、熱能與冷凝水系統的節能重點，大致在蒸汽鍋爐的燃燒效率、蒸汽輸送管線的保溫、製程設備合理化的使用與冷凝水及閃發蒸汽的回收這幾個項目內。雖然蒸汽佔有工廠不可或缺的地位，然而追求良好且合理的蒸汽鍋爐保養或蒸汽系統使用效率，卻常被工廠操作與經營者所忽略。因此，如能按照前述建議有效地維繫蒸汽熱能系統運轉於良好的效率下，其所能節省燃料之鉅，常是我們所

意料之外的。

近年來日益昂貴的燃料價格，已迫使業者不得不注重和檢討整個熱能系統的效率問題。然而一般中小企業，多屬勞力密集工業或只注重產值、產量，往往忽略能源使用效率的狀況，更遑論能源使用之管理及效率之改善。為提高設備能源使用效率和節約能源，上述目前國內外之先進蒸汽熱能節能技術，針對一般工廠易疏忽之蒸汽和熱能輸送系統、冷凝水回收和祛水器的洩漏，對管理和操作上的改善提出探討，使整個蒸汽熱能系統更有效率，進而達到節約能源、降低成本，提升中小企業產業競爭力。