



# 目錄

一、前言 .....	1
二、不同能源的工業加熱爐優劣比較 .....	2
三、工業爐的介紹 .....	3
四、常用工業爐 .....	6
(一)冶金爐 .....	6
(二)冶金爐種類 .....	6
(三)冶金爐生產設備 .....	8
五、鋼鐵工業熔煉爐 .....	10
(一)電爐 .....	10
(二)電阻爐 .....	10
(三)感應爐 .....	11
(四)電弧爐 .....	12
(五)真空電弧爐 .....	12
(六)轉爐 .....	13
(七)高爐 .....	13
(八)精煉電爐 .....	15
(九)電渣重熔 .....	15
(十)電弧爐煉鋼 .....	16



六、電弧爐操作 .....	17
(一)爐外精煉 .....	19
七、工業加熱爐的節能關鍵技術 .....	24
(一)傳統的加熱爐節能技術 .....	24
(二)能使熱射線儘快到位的節能技術 .....	25
(三)蓄熱式工業爐，對加熱爐的排放廢氣進行餘熱回收 .....	28
(四)富氧燃燒 .....	33
八、案例分析 .....	36
(一)直流電弧爐 .....	36
(二)廢鋼預熱技術 .....	36
(三)操作自動化技術 .....	36
(四)頂底同吹技術 .....	36
(五)盛鋼桶預熱應用 .....	37
(六)線材球化加熱罩應用 .....	38
九、結論 .....	40
十、參考資料 .....	41



# 前 言

眾所周知，工業生產是工業經濟的基礎，而機械、冶金、化工、建材工業又是工業生產的基礎。機械、冶金、化工、建材工業一般都有一個加熱問題，這就離不開工業爐。應該說，工業爐是熱加工生產中的關鍵設備。我國的工業爐量大、面廣、種類多，是耗能大戶。它的性能的好壞直接影響到工廠產品的質量、產量、能耗、成本及環境保護，對熱加工生產有著舉足輕重的作用。因此，從某種角度來看，工業爐加熱效率的高低在很大程度上制約著國家基礎工業甚至整個工業經濟的發展水準。那麼，探討工業爐的節能問題也就具有了非常重要的意義。





## 不同能源的工業加熱爐優劣比較

目前，從所使用的能源來分類，工業加熱爐主要有電加熱、油加熱、氣加熱、煤加熱四種。應該說，使用不同的能源各有利弊。對其優劣比較分析見表1。

表1 不同能源工業加熱爐優劣比較表

方 式	電加熱	燃重油加熱	燃氣加熱	
			燃氣加熱	燃煤加熱
優 點	對使用者來說快捷、方便、基本無污染	快捷、方便、污染程度較高	快捷、方便、可達排放標準	費用低、成本小
缺 點	屬二次能源投資大、費用高，發電廠都有污染	費用較高、成本大	費用高、成本大，不便於普及	占地大、污染高



## 工業爐的介紹



工業爐是在工業生產中，利用燃料燃燒或電能轉化的熱量，將物料或工件加熱的熱工設備。

工業爐的主要組成部分有：工業爐本體、工業爐排煙系統、工業爐預熱器和工業爐燃燒裝置等。不同行業有不同種類工業爐；機械工業應用的工業爐有多種類型，在鑄造有熔煉金屬的感應爐、電阻爐、電弧爐、真空爐、坩堝爐等；有烘烤砂型的砂型乾燥爐、鐵合金烘爐和鑄件退火爐等；在鍛壓有對鋼錠或鋼坯進行鍛前加熱的各種加熱爐，和鍛後消除應力的熱處理爐；在金屬熱處理有改善工件機械性能的各種退火、正火、淬火和回火的熱處理爐；在焊接有焊件的焊前預熱爐和焊後回火爐；在粉末冶金車間有燒結金屬的加熱爐等。

工業爐還廣泛應用於其他工業，如冶金工業的金屬熔煉爐、礦石燒結爐和煉焦爐；石油工業的蒸餾爐和裂化爐；煤氣工業的發生爐；矽酸鹽工業的水泥窯和玻璃熔化、玻璃退火爐；食品工業的烘烤爐等。

工業爐的創造和發展對人類進步起著十分重要的作用。中國在商代出現了較為完善的煉銅爐，爐溫達到 $1,200^{\circ}\text{C}$ ，爐子內徑達 $0.8$ 米。在春秋戰國時期，人們在煉銅爐的基礎上進一步掌握了提高爐溫的技術，從而生產出了鑄鐵。

1794年，世界上出現了熔煉鑄鐵的直筒形沖天爐。後到1864年，法國人馬丁運用英國人西門子的蓄熱式爐原理，建造了用氣體燃料加熱的第一台煉鋼平爐。他利用蓄熱室對空氣和煤氣進行高溫預熱，從而保證了煉鋼所需的 $1,600^{\circ}\text{C}$ 以上的溫度。1900年前後，電能供應逐漸充足，開始使用各種電阻爐、電弧爐和有芯感應爐。

二十世紀50年代，無芯感應爐得到迅速發展。後來又出現了電子束爐，利用電子束來衝擊固態燃料，能強化表面加熱和熔化高熔點的材料。





井式爐用於鍛造加熱的爐子最早是手鍛爐，其工作空間是一個凹形槽，槽內填入煤炭，燃燒用的空氣由槽的下部供入，工件埋在煤炭裏加熱。這種爐子的熱效率很低，加熱質量也不好，而且只能加熱小型工件，以後發展為用耐火磚砌成的半封閉或全封閉爐膛的室式爐，可以用煤，煤氣或油作為燃料，也可用電作為熱源，工件放在爐膛裏加熱。

為便於加熱大型工件，又出現了適於加熱鋼錠和大鋼坯的台車式爐，為了加熱長形杆件還出現了步進樑式爐。20世紀20年代後又出現了能夠提高爐子生產率和改善勞動條件的各種機械化、自動化爐型。

工業爐的燃料也隨著燃料資源的開發和燃料轉換技術的進步，而由採用塊煤、焦炭、煤粉等固體燃料逐步改用發生爐煤氣、天然氣、柴油、燃料油等氣體和液體燃料，並且研製出了與所用燃料相適應的各種燃燒裝置。

工業爐的結構、加熱工藝、溫度控制和爐內氣氛等，都會直接影響加工後的產品質量。在鍛造加熱爐內，提高金屬的加熱溫度，可以降低變形阻力，但溫度過高會引起晶粒長大、氧化或過燒，嚴重影響工件質量。在熱處理過程中，如果把鋼加熱到臨界溫度以上的某一點，然後突然冷卻，就能提高鋼的硬度和強度；如果加熱到臨界溫度以下的某一點後緩慢冷卻，則又能使鋼的硬度降低而使韌性提高。

為了獲得尺寸精確和表面光潔的工件，或者為了減少金屬氧化以達到保護模具、減少加工餘量等目的，可以採用各種缺氧化加熱爐。在敞焰的缺氧化加熱爐內，利用燃料的不完全燃燒產生還原性氣體，在其中加熱工件可使氧化燒損率降低到0.3%以下。

可控氣氛爐是使用人工製備的氣氛，通入爐內可進行氣體滲碳、碳氮共滲、光亮淬火、正火、退火等熱處理；以達到改變金相組織、提高工件機械性能的目的。在流動粒子爐中，利用燃料的燃燒氣體，或外部施加的其他流化劑，強行流過爐床上的石墨粒子或其他惰性粒子層，工作件埋在粒子層中能實施強化加熱，也可進行滲碳、氮化等各種無氧化加熱。在鹽浴爐內，用熔融的鹽液作為加熱介質，可防止工作件氧化和脫碳。

隨著無芯感應爐的出現，沖天爐有逐步被取代的趨勢。這種感應爐的熔煉工作不受任何鑄鐵等級的限制，能夠從熔煉一種等級的鑄鐵，很快轉換到熔煉另一種等級的鑄鐵，有利於提高鐵水的質量。一些特殊合金鋼，如超低碳不銹鋼以及



軋輥和汽輪機轉子等用的鋼，需要將平爐或一般電弧爐熔煉出的鋼水，在精煉爐內通過真空除氣和氬氣攪動去雜質，進一步精煉出高純度、大容量的優質鋼水。

工業爐按供熱方式分為兩類：一類是火焰爐(或稱燃料爐)，用固體、液體或氣體燃料在爐內的燃燒熱量對工作件進行加熱；第二類是電爐，在爐內將電能轉化為熱量進行加熱。

火焰爐的燃料來源廣，價格低，便於因地制宜採取不同的結構，有利於降低生產費用，但火焰爐難於實現精確控制，對環境污染嚴重，熱效率較低。

電爐的特點是爐溫均勻和便於實現自動控制，加熱質量好。按能量轉換方式，電爐又可分為電阻爐、感應爐和電弧爐。

工業爐按熱工操作又可分為兩類：一類是間斷式爐又稱週期式爐，其特點是爐子間斷生產，在每一加熱週期內爐溫是變化的，如室式爐、台車式爐、井式爐等；第二類是連續式爐，其特點是爐子連續生產，爐膛內劃分溫度區段。在加熱過程中每一區段的溫度是不變的，工件由低溫的預熱區逐步進入高溫的加熱區，如連續式加熱爐和熱處理爐、環形爐、步進式爐等。

以單位時間單位爐底面積計算的爐子加熱能力稱為爐子生產率。爐子升溫速度越快、爐子裝載量越大，則爐子生產率越高。在一般情況下，爐子生產率越高，則加熱每千克物料的單位熱量消耗也越低。因此，為了降低能源消耗，應該滿負荷生產，儘量提高爐子生產率，同時對燃燒裝置實行燃料與助燃空氣的自動比例調節，以防止空氣量過剩或不足。此外，還要減少爐壁蓄熱和散熱損失、水冷構件熱損失、各種開口的輻射熱損失、離爐煙氣帶走的熱損失等。

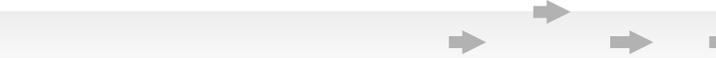
金屬或物料加熱時吸收的熱量與供入爐內的熱量之比，稱為爐子熱效率。連續式爐比間斷式爐的熱效率高，因為連續式爐的生產率高，而且是不間斷工作的，爐子熱度處於穩定狀態，沒有週期性的爐壁蓄熱損失，還由於爐膛內部有一個預熱爐料的區段，煙氣部分餘熱為由於爐膛內部有一個預熱爐料的區段，煙氣部分餘熱為入爐的冷工作件所吸收，降低了離爐煙氣的溫度。

為了使爐溫恒定和實現規定的升溫速度，除必須根據工藝要求、預熱器和爐用機械型式、燃料和燃燒裝置類別、工業爐排煙方式等確定優良的爐型結構外，還需要對燃料和助燃空氣的流量和壓力，或對電功率等可控變數通過各種控制單元進行相互調節，以實現爐溫、爐氣氛或爐壓的自動控制。



## 四

# 常用工業爐



### (一) 冶金爐

---

冶金生產過程中對各種物料或工作件進行熱工處理的工業爐。熱工處理是以物料或工作件的昇溫為重要特徵的處理過程，例如焙燒、熔煉、加熱、熱處理、乾燥等。鋼鐵冶金和有色冶金的大部分生產環節都離不開爐子。歷史上，許多生產環節的革新，產品的產量和質量的提高，都同舊冶金爐的改革和新冶金爐的應用緊密相關。平爐的出現，曾有力地推進了煉鋼生產的發展。冶金工業的能源消耗，在很大程度上取決於各種冶金爐的能耗。

18世紀以來，西方國家隨著航海業、機械工業、貿易的發展，冶金業取得了迅速進展，改進了各種熔煉爐、加熱爐和熱處理爐，出現了多種多樣的爐型。20世紀以來，冶金爐朝著大容量、高產量和高熱效率的方向發展。以軋鋼連續加熱爐為例，先是把室狀爐延長一段，以便利用廢氣餘熱，繼而把爐子改進成為兩段式。後來，由於軋機能力不斷增大，加熱爐朝著大容量、高產量的方向發展。30年代出現了三段式爐，爐子產量最高達每小時150噸，單位爐底面積產量為500~600公斤/(米<sup>2</sup>·時)。50年代末，開始採用五段式爐，在提高爐尾煙氣溫度(達1,000~1,200)的同時，採用高溫換熱設備回收餘熱，爐子產量提高到每小時150~250噸，單位爐底面積產量達700~800公斤/(米<sup>2</sup>·時)，同時，為了滿足產量和質量的要求，推廣應用了步進樑式爐，有的爐子採用全爐頂平焰燒嘴，爐子產量達每小時250~400噸，單位爐底面積產量達800~1,000公斤/(米<sup>2</sup>·時)。70年代中期，主要工業國出現石油危機以來，降低燃料消耗已成為爐子設計的中心問題。延長不供熱的預熱段的長度和降低煙氣排出溫度，是這個時期加熱爐爐型和熱工工藝改變的主要趨勢。

### (二) 冶金爐種類

---

現代冶金工業用爐，按熱源不同，可分為燃料爐、電爐、自熱爐三大類。



## 1. 燃料爐

以燃料的燃燒熱為熱源，冶金工業中使用最為廣泛。由於爐內的熱工特徵不同，燃料爐又可分為火焰爐、豎爐、流體化爐和浴爐等四類：

### (1) 火焰爐

特徵是火焰或燃燒產物佔據爐膛的一部分空間，物料或工作件佔據另一部分空間。一般情況下，火焰與物料直接接觸；但在有些情況下，例如為防止工作件的氧化，將火焰與工作件隔開，火焰的熱量通過隔牆傳給物料。

### (2) 豎爐

特徵是爐身直立，大部分空間堆滿塊狀物料，爐氣通過料層的孔隙向上流動，與爐料間呈逆流換熱。

### (3) 流體化爐

特徵是爐內為細顆粒物料的流體化床。氣體由下部通入。使物料“沸騰”成流體化。

### (4) 浴爐

特徵是爐內盛液體介質(熔融鹽類或熔融金屬)。將工作件浸入此介質中進行加熱，主要用於熱處理。浴爐熱源可用燃料，也可用電。

## 2. 電爐

特徵是以電為熱源。由於電熱轉換方法不同，又分為電阻爐、感應爐、電弧爐三種。

## 3. 自熱爐

特徵是靠爐料自身產生的熱量維持爐子的正常工作，除爐料的預熱或預熔化外，爐內不需要或基本上不需要外加熱量。例如：煉鋼轉爐，銅、鎳吹煉轉爐和鋁熱法冶煉爐。硫化礦的焙燒爐也往往是自熱爐。

冶金爐還有間歇式爐和連續式爐的區別。間歇式爐的特徵是分批裝料、出料，爐子溫度在生產過程中呈週期性變化。連續式爐特徵是物料或工作件連續穿爐運行，按工藝要求控制爐內各部分的溫度，並保持穩定。連續式爐在產量、質量、燃料消耗、機械化、自動化等方面都比間歇式爐優越。此外還有按裝料和出料方



法、裝料和出料機械、爐體形狀、附屬設備如空氣預熱器的名稱、溫度高低等稱呼爐子的。

### (三)冶金爐生產設備

一般由爐子熱工工藝系統、裝出料系統和熱工檢測控制系統等三部分組成。

#### 1. 冶金爐的熱工工藝系統

包括爐子的工作室(爐膛)、燃料的燃燒裝置或電熱轉換裝置、空氣和(或)煤氣的預熱器，以及風機、管道、煙道、餘熱鍋爐和煙囪等。工作室是爐子的核心。主要的熱工和工藝過程都在工作室內完成。其他部分的任務是為工作室內的熱工工藝過程提供有利條件。

#### 2. 冶金爐裝出料系統和熱工檢測控制系統

現代化冶金爐不可缺少的兩個工作系統。前者包括：爐前爐後的裝料、出料機械和爐內的運料機械。後者包括：熱工參數的測量儀錶、顯示儀錶或記錄儀錶、過程式控制儀錶和執行機構等。配備這兩個系統，可以實現爐子的自動化操作，從而提高爐子的生產指標。

**對冶金爐的基本要求：**能滿足產品的質量和產量要求；燃料和其他能源的消耗量低；建爐投資和運行費用低；耐用，勞動條件好，污染物的排放量符合環境保護要求。

一座好的爐子應同時滿足上述要求。為了使產品質量好，應控制爐內溫度和氣氛，選擇適宜的築爐材料。爐子的生產能力必須與生產過程所要求的產量相適應。為了節約燃料，在爐子的設計和操作中，必須重視熱量在爐膛內充分利用，並充分利用餘熱。為了降低建爐投資和運行費用，應提高爐子單位容積的生產能力，簡化爐子結構。爐子的廢氣、廢水、廢渣中往往含有污染物質，必須採取措施，使各種污染物的排放量不超過國家或地區的規定值。

爐子大型化、連續化、機械化和自動化，是全面滿足上述要求的重要途徑，目前，高爐的最大容積超過5,000米<sup>3</sup>，氧氣轉爐的最大爐容量超過300噸。有些爐子已採用電腦控制，自動化程度很高。

冶金爐理論1911年提出爐子的水力學原理，把一座正在工作的爐子，看成是一條“倒置的河床”，提出了爐子設計方面的若干重要原則。對當時爐子的單位



產量不高，爐內氣體呈自然流動的情況是適用的，在生產上也發揮了作用。後來，為使爐子不斷提高產量，逐步採用液體和氣體燃料的燃燒裝置，爐內氣體變成強制流動，這一理論就不適用了。50年代初較全面地研究了爐內的燃燒、氣體運動、傳熱等熱工過程。1960年代爐子的一般原理把爐子的工作制度分為三類：輻射制度、對流制度和層狀制度。在討論每一種工作制度時，都從熱交換出發，對燃料的選擇、燃燒過程、氣流的組織等提出相應的要求。

近年來，冶金爐熱工理論發展的主要特點是：在進一步明確研究對象的前提下，對爐子設計和操作(包括過程式控制制)的最適化問題進行了更深入的研究；利用電腦和現代實驗技術及模擬技術對爐內的燃燒、氣體運動、傳熱等熱工過程進行更全面的分析和研究。

爐子結構(幾何形狀、尺寸、築爐材料的種類等)和熱工操作(燃料量、空氣量、閘門開啟度等)的變動，會影響到爐內的熱工過程(傳熱、燃燒、氣體運動)。而熱工過程的變動又會影響到爐子的生產指標(單位生產率、單位熱耗、爐子使用壽命等)。主要目的是提高生產指標，但人們所能直接規定或操縱的因素，既不是熱工過程參數，也不是生產指標，而是結構和操作參數。爐子的結構和操作之間，必須互相適應；各個熱工過程之間也必須互相配合。同樣，各生產指標之間也互相關聯。在爐子熱工理論的研究工作中，要十分重視同一類變量之間的相互關係。在其他條件不變的情況下，爐子的生產率的變動將引起爐子熱效率的變動。為了提高爐子熱效率，爐子生產率的波動必須限制在某一合理範圍內。

研究冶金爐的最適化問題，不應孤立地著眼於爐子本身，還應包括爐子前後的冶金設備，因為它們在生產流程中是互相關聯的。如研究軋鋼廠的加熱爐，應該與軋機聯繫起來考慮。降低鋼坯的加熱溫度，一方面能減少加熱爐的燃耗，另一方面則會增加軋機的電耗。如加熱溫度的降低在合理範圍之內，可使加熱爐和軋機的總能耗下降；如加熱溫度過低，就會使總能耗增加。所以應權衡得失，尋求最佳方案。

# 五

## 鋼鐵工業熔煉爐

用於冶煉礦物和熔煉金屬的工業爐。鋼鐵工業中常用的有高爐、電爐、轉爐、鐵合金電爐，有色金屬工業中常用的有鼓風爐、反射爐、臥式轉爐、閃速爐等，其他如感應電爐、真空電子束爐等，就廣義而言都可稱為熔煉爐。

### (一)電爐

利用電熱效應供熱的冶金爐。電爐設備通常是成套的，包括電爐爐體，電力設備(電爐變壓器、整流器、變頻器等)，開閉器，附屬輔助電器(阻流器、補償電容等)，真空設備，檢測控制儀錶(電工儀錶、熱工儀錶等)，自動調節系統，爐用機械設備(進出料機械、爐體傾轉裝置等)。大型電爐的電力設備和檢測控制儀錶等一般集中在電爐供電室。同燃料爐比較，電爐的優點有：爐內氣氛容易控制，甚至可抽成真空；物料加熱快，加熱溫度高，溫度容易控制；生產過程較易實現機械化和自動化；勞動衛生條件好；熱效率高；產品質量好等。冶金工業上電爐主要用於鋼鐵、鐵合金、有色金屬等的熔煉、加熱和熱處理。19世紀末出現了工業規模的電爐，20世紀50年代以來，由於對高級冶金產品需求的增長和電費隨電力工業的發展而下降，電爐在冶金爐設備中的比額逐年上昇。電爐可分為電阻爐、感應爐、電弧爐等。

### (二)電阻爐

以電流通過導體所產生的焦耳熱為熱源的電爐。按電熱產生方式，電阻爐分為直接加熱和間接加熱兩種。在直接加熱電阻爐中，電流直接通過物料，因電熱功率集中在物料本身，所以物料加熱很快，適用於要求快速加熱的工藝，例如鍛造坯料的加熱。這種電阻爐可以把物料加熱到很高的溫度，例如碳素材料石墨化電爐，能把物料加熱到超過2,500°C。直接加熱電阻爐可作成真空電阻加熱爐或通保護氣體電阻加熱爐，在粉末冶金中，常用於燒結鎢、鈹、鈳等製品。採用這種爐子加熱時應注意：(1)為使物料加熱均勻，要求物料各部位的導電截面和電導率



一致；(2)由於物料自身電阻相當小，為達到所需的電熱功率，工作電流相當大，因此送電電極和物料接觸要好，以免起電弧燒損物料，而且送電母線的電阻要小，以減少電路損失；(3)在供交流電時，要合理配置短網，以免感抗過大而使功率因數過低。

大部分電阻爐是間接加熱電阻爐，其中裝有專門用來實現電-熱轉變的電阻體，稱為電熱體，由它把熱能傳給爐中物料。這種電爐爐殼用鋼板製成，爐膛襯耐火材料，內放物料。最常用的電熱體是鐵鉻鋁電熱體、鎳鉻電熱體、碳化矽棒和二矽化鋁棒。根據需要，爐內氣氛可以是普通氣氛、保護氣氛或真空。一般電源電壓220伏或380伏，必要時配置可調節電壓的中間變壓器。小型爐(<10千瓦)單相供電，大型爐三相供電。對於品種單一、批料量大的物料，宜採用連續式爐加熱。爐溫低於700°C的電阻爐，多數裝置鼓風機，以強化爐內傳熱，保證均勻加熱。用於熔化易熔金屬(鉛、鉛鈹合金、鋁和鎂及其合金等)的電阻爐，可做成坩堝爐；或做成有熔池的反射爐，在爐頂上裝設電熱體。電渣爐是由溶渣實現電熱轉變的電阻爐。

### (三)感應爐

利用物料的感應電熱效應而使物料加熱或熔化的電爐。感應爐的基本部件是用紫銅管繞製的感應圈。感應圈兩端加交流電壓，產生交變的電磁場，導電的物料放在感應圈中，因電磁感應在物料中產生渦流，受電阻作用而使電能轉變成熟能來加熱物料；所以，也可認為感應電熱是一種直接加熱式電阻電熱。

感應電熱的特點是在被加熱物料中轉變的電熱功率(電流分佈)很不均勻，表面最大，中心最小，稱為趨膚效應。為了提高感應加熱的電熱效率，供電頻率要合宜，小型熔煉爐或對物料的表面加熱採用高頻電，大型熔煉爐或對物料深透加熱採用中頻或高頻電。感應圈是電感量相當大的負載，其功率因數一般很低。為了提高功率因數，感應圈一般並聯電容器，稱為補償電容。感應圈和物料之間的間隙要小，感應圈宜用方形紫銅管製作，管內通水冷卻，感應圈的匝間間隙要儘量小，絕緣要好。感應加熱裝置，主要用於鋼、銅、鋁和鋅等的熔鑄，加熱快，燒損少，機械化和自動化程度高，適合配置在自動作業線上。

工業上應用的感應熔化爐有坩堝爐(無芯感應爐)和熔坩爐(有芯感應爐)。坩堝用耐火材料或鋼製成，容量從幾公斤到幾十噸。其熔煉特點是坩堝中熔體受電動力作用，迫使熔池液面凸起，熔體自液面中心流向四周而引起循環流動。這種現象稱為電動效應，可使熔體成分均勻，缺點是爐渣偏向周邊，覆蓋性差。與熔坩



爐比較，坩堝爐操作靈活，熔煉溫度高，但功率因數低，電耗較高。熔坩爐的感應器由鐵芯、感應圈和熔溝爐襯組成，熔溝為一條或兩條帶狀環形溝，其中充滿與熔池相聯通的熔體。在原理上，可以把熔坩爐看作是次級只有一匝線圈而且短路的鐵芯變壓器。感應電流在熔坩熔體中流動，而實現電熱轉變。

生產中，每爐金屬熔煉完畢後，不能把熔池放空，一定要保留一部分熔體作為下一爐的起熔體。熔坩溫度比熔池高，又承受熔體流動的沖刷，所以熔坩爐容易損壞，為便於維修，現代爐子的感應器製成便於更換的裝配件。熔坩爐的容量從幾百公斤到百餘噸。熔坩爐供高頻電，由於有用矽鋼片製作的鐵芯作磁通路，電效率和功率因數都很高。熔坩爐主要用於鑄鐵、銅、鋅、黃銅等的熔化，還可用來貯存和加熱熔體。

#### (四)電弧爐

利用電弧熱效應熔煉金屬和其他物料的電爐。按加熱方式分為三種類型：(1)間接加熱電弧爐。電弧在兩電極之間產生，不接觸物料，靠熱輻射加熱物料。這種爐子噪聲大，效率低，漸被淘汰。(2)直接加熱電弧爐。電弧在電極與物料之間產生，直接加熱物料；煉鋼三相電弧爐是最常用的直接加熱電弧爐。(3)埋弧電爐，亦稱還原電爐或礦熱電爐。電極一端埋入料層，在料層內形成電弧並利用料層自身的電阻發熱加熱物料；常用於冶煉鐵合金。

#### (五)真空電弧爐

是在抽真空的爐體中用電弧直接加熱熔煉金屬的電爐。爐內氣體稀薄，主要靠被熔金屬的蒸氣發生電弧，為使電弧穩定，一般供直流電。按照熔煉特點，分為金屬重熔爐和澆鑄爐。按照熔煉過程中電極是否消耗(熔化)，分為自耗爐和非自耗爐，工業上應用的大多數是自耗爐。真空電弧爐用於熔煉特殊鋼、活潑的和難熔的金屬如鈦。

電弧電熱可以認為是弧阻電熱。電弧(弧阻)穩定是爐子正常生產的必要條件。交流電弧爐通常採用高頻電，為使電弧穩定，爐子供電電路中要有適當的感抗，但是存在感抗會降低功率因數和電效率。降低電流頻率是發展交流電弧爐的途徑。弧阻阻值相當小，為獲得必要的熱量，爐子需要相當大的工作電流，因此爐子短網的電阻要儘量小，以免電路損耗過大。對於三相電弧爐，要使三相的阻抗接近一致，以免三相負荷不平衡。



## (六)轉爐

爐體可轉動，用於吹煉鋼。轉爐爐體用鋼板製成，呈圓筒形，內襯耐火材料，吹煉時靠化學反應熱加熱，不需外加熱源，是最重要的煉鋼設備，銅、鎳冶煉中也應用很廣。

**煉鋼轉爐：**早期都用空氣通過底部風嘴鼓入鋼水進行吹煉。側吹轉爐容量一般較小，從爐牆側面吹入空氣。煉鋼轉爐按不同需要用酸性或鹼性耐火材料作爐襯。直立式圓筒形的爐體，通過托圈、耳軸架置於支座軸承上，操作時用機械傾動裝置使爐體圍繞橫軸轉動。

50年代發展起來的氧氣轉爐仍保持直立式圓筒形，隨著技術改進，發展成頂吹噴氧槍供氧，因而得名氧氣頂吹轉爐，即L-D轉爐；用帶吹冷卻劑的爐底噴嘴的，稱為氧氣底吹轉爐。

## (七)高爐

橫斷面為圓形的煉鐵豎爐，用鋼板作爐殼，裡面砌耐火磚內襯。高爐本體自上而下分為爐喉、爐身、爐腰、爐腹、爐缸五部分。爐缸上部沿周均勻設風口，熱風通過熱風圍管、支管和彎頭、直吹管由風口鼓入爐內。風口平面之下有出渣口，渣口平面之下有出鐵口。隨著鋼鐵工業的發展，高爐本體和附屬設備也不斷擴大，高爐最大容積在20世紀初為幾百立方米，60年代為2,000~3,000米<sup>3</sup>，70年代達4,000~5,000米<sup>3</sup>。

高爐大型化帶來了技術指標先進、勞動生產率高和生產成本低的效果。從工藝操作和功能方面來說，高爐容積的大小，在很大程度上取決於鋼鐵廠規模以及礦石和燃料的質量。大型高爐要求焦炭強度高，礦石的強度、還原度、品位等也要高，粒度小於5毫米的粉礦要低於5%。

高爐內型：高爐內型輪廓要根據原料、燃料、高爐容積和操作等條件設計。設計爐型時首先確定爐缸直徑及單位爐缸面積每日燃燒焦炭的數量。設計的經驗式是  $d = 1.13 \sqrt{\frac{i \cdot V}{J}}$ ，式內  $d$  為爐缸直徑(米)； $i$  為冶煉強度〔噸/(米<sup>3</sup>·日)〕，取1.0~1.2； $V$  為高爐容積(米<sup>3</sup>)； $J$  為燃燒強度〔噸焦炭/(米<sup>2</sup>·日)〕，取24~28.8。然後按各部分尺寸比例和爐身角(85°左右)計算。設計的內型要與生產中的高爐內型對比，參考容積近似的其他高爐的尺寸進行修改。



過去高爐只設一個鐵口，大型高爐增至2~4個。渣口一般是2個，多鐵口和渣量不多的高爐可不設渣口。風口數目可根據經驗按爐缸圓周大小來確定。一般兩個風口的中心距沿爐缸內壁圓周上不應小於1,000毫米。

**高爐爐體結構：**按爐體外部結構、高爐基礎、高爐內襯和冷卻設備分述如下：

**爐體外部結構：**主要有自立式、爐缸支柱式、框架支柱式、框架自立式等四種，它們的差別在於支承爐頂、上部爐殼和磚襯負荷的地方不同。早期小高爐多是自立式，大型高爐大多採用框架自立式。現代大型高爐鼓風壓力高，爐體外殼鋼板加厚，殼內噴塗耐火材料，防止熱應力和晶間腐蝕引起開裂和變形。風口平臺有較寬敞的操作空間；取消渣口，改用矮式泥炮；風口平臺連成一片，以便叉車和換風口機行走。

**高爐基礎：**高爐基礎所承受的負荷按平均每立方米爐容約5~6噸考慮，用鋼筋混凝土基礎建在岩石、筒式樁或鋼管樁(內灌水泥)上。

**高爐內襯：**高爐爐殼內部砌有一層厚345~1,150毫米的耐火磚，以減少爐殼散熱量，磚中設置冷卻設備防止爐殼變形。高爐各部分磚襯損壞機理不同，為了防止局部磚襯先損壞而縮短高爐壽命，必須根據損壞、冷卻和高爐操作等因素，選用不同的耐火磚襯。爐缸、爐底傳統使用高級和超高級黏土磚。這部分磚是逐漸熔損的，因收縮和砌磚質量不良，過去常引起重大燒穿事故，現在爐缸、爐底大多用碳素耐火材料，基本上解決了爐底燒穿問題。爐底使用碳磚有三種型式：全部為碳磚；爐底四周和上部為碳磚，下部為黏土磚或高鋁磚；爐底四周和下部為碳磚，上部為黏土磚或高鋁磚。後兩種又稱為綜合爐底。設計爐底厚度有減薄趨勢(由 $0.5d$ 左右減至 $0.3d$ 左右或爐殼內徑的 $1/4$ 厚度， $d$ 為爐缸直徑)。碳磚的缺點是易受空氣、二氧化碳、水蒸氣和鹼金屬侵蝕。爐腰特別是爐身下部磚襯，由於磨損、熱應力、化學侵蝕等，容易損壞。採用冷卻壁的高爐，投產兩年左右，爐身下部磚襯往往全被侵蝕。爐身上部和爐喉磚襯要求具有抗磨性和熱穩定性的材料，以黏土磚為宜。爐腹磚襯被侵蝕後靠“渣皮”維持生產。

近幾年應用噴補技術修補磚襯已相當普遍。噴補高鋁質耐火材料(含 $\text{Al}_2\text{O}_3$  40~60%)，壽命為砌襯的 $3/4$ 。

**冷卻設備：**早期的小高爐爐壁無冷卻設備，19世紀60年代高爐磚襯開始用水冷卻。冷卻設備主要有冷卻水箱和冷卻壁兩種。因高爐各部分熱負荷而異。爐底四周和爐缸使用碳磚時採用光面冷卻壁。爐底之下可用空氣、水或油冷卻。爐腹



使用碳磚時可從外部向爐殼噴水冷卻，使用其他磚襯時，用冷卻水箱或鑲磚冷卻壁。爐腰和爐身下部多採用傳統的銅冷卻水箱，左右間距250~300毫米，上下間距1~1.5米。爐身上部可採用各種形式的冷卻設備，一般用鑄鐵或鋼板焊接的冷卻水箱。近幾年來爐腰和爐身有的用鑲磚冷卻壁汽化冷卻。但爐身下部由於熱負荷較高，多改用強制循環純水冷卻；爐喉一般不冷卻。冷卻介質過去使用工業水，現在改用軟水和純水。直流或露天循環供水系統也已被強制循環供水系統所代替，後者優點是熱交換好、無沈澱、消耗水量少等。

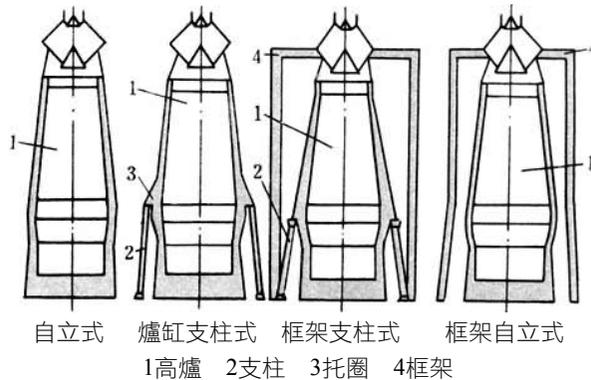


圖1 高爐爐體結構

## (八) 精煉電爐

用於精煉中碳、低碳、微碳鐵合金。電爐容量一般為1,500~6,000千伏安，採用敞口固定或帶蓋傾動形式。前者類似還原電爐，可配備連續自焙電極；後者類似電弧煉鋼爐，使用石墨或炭質電極。

## (九) 電渣重熔

把平爐、轉爐、電弧爐或感應爐冶煉的鋼鑄造或鍛壓成為電極，通過熔渣電阻熱進行二次重熔的精煉工藝，英文簡稱ESR。美國霍普金斯(R.K.Hopkins)於20世紀40年代首先提出這種精煉方法的原理。其後蘇聯和美國相繼建立工業生產用的電渣爐。60年代中期由於航空、航太、電子、原子能等工業的發展，電渣重熔在蘇聯、西歐、美國獲得較快的發展。生產的品種包括：優質合金鋼、高溫合金、精密合金、耐蝕合金以及鋁、銅、鈦、銀等有色金屬的合金。



電渣重熔基本過程如圖電渣重熔示意圖所示。在銅製水冷結晶器內盛有熔融的爐渣，自耗電極一端插入熔渣內。自耗電極、渣池、金屬熔池、鋼錠、底水箱通過短網導線和變壓器形成迴路。在通電過程中，渣池放出焦耳熱，將自耗電極端頭逐漸熔化，熔融金屬匯聚成液滴，穿過渣池，落入結晶器，形成金屬熔池，受水冷作用，迅速凝固形成鋼錠。在電極端頭液滴形成階段，以及液滴穿過渣池滴落階段，鋼-渣充分接觸，鋼中非金屬夾雜物為爐渣所吸收。鋼中有害元素(硫、鉛、銻、鉍、錫)通過鋼-渣反應和高溫氣化比較有效地去除。液態金屬在渣池覆蓋下，基本上避免了再氧化。因為是在銅製水冷結晶器內熔化、精煉、凝固的，這就杜絕了耐火材料對鋼的污染。鋼錠凝固前，在它的上端有金屬熔池和渣池，起保溫和補縮作用，保證鋼錠的緻密性。上昇的渣池在結晶器內壁上形成一層薄渣殼，不僅使鋼錠表面光潔，還起絕緣和隔熱作用，使更多的熱量向下部傳導，有利於鋼錠自下而上的定向結晶。由於以上原因，電渣重熔生產的鋼錠的質量和性能得到改進，合金鋼的低溫、室溫和高溫下的塑性和衝擊韌性增強，鋼材使用壽命延長。

電渣重熔設備簡單，投資較少，生產費用較低。電渣重熔的缺點是電耗較高，目前通用的渣料含 $\text{CaF}_2$ 較多，在重熔過程中，污染環境，必須設除塵和去氟裝置。

## (十) 電弧爐煉鋼

通過石墨電極向電弧煉鋼爐內輸入電能，以電極端部和爐料之間發生的電弧為熱源進行煉鋼的方法。電弧爐以電能為熱源，可調整爐內氣氛，對熔煉含有易氧化元素較多的鋼種極為有利，發明後不久，就用於冶煉合金鋼。並得到較大的發展。隨著電弧爐設備的改進以及冶煉技術的提高，電力工業的發展，電爐鋼的成本不斷降低，現在電爐不但用於生產合金鋼，而且大量用來生產普通碳素鋼，其產量在主要工業國家鋼總產量中的比重，不斷上昇。



# 六

## 電弧爐操作



電弧爐煉鋼以廢鋼為主要原料，有些電弧爐採用直接還原的海綿鐵來代替部分(30~70%)廢鋼。廢鋼經多次循環冶煉，會使某些對鋼質有害而又不能在冶煉過程中除去的元素(如銅、鉛等)富集。海綿鐵比廢鋼純淨得多，摻和使用就可起“淨化”的作用。冶煉合金鋼時，大多數採用成分相近或相應的合金廢鋼為爐料，以節約昂貴的鐵合金，不足之數在冶煉過程中再用鐵合金補充。

上一爐的鋼水和渣出淨以後，立即把被侵蝕的爐襯補好。補爐動作要快，以便利用爐內的殘餘高溫，將補爐料和原爐襯燒結在一起，並可減少熱損失，節約電能。

補爐完畢後，移開爐蓋，用料筐從爐子頂部把爐料裝入爐內。不易氧化和難熔的合金料如鎳、鉬等可與廢鋼同時裝入。爐料的塊度應適當搭配，堆密度以1.6~2.0噸/米<sup>3</sup>為宜。

裝好爐料，合上爐蓋後，即降下電極到爐料面近處，接通主電路開關，將電極調節系統的轉換開關放到自動控制位置，以次高級電壓通電起弧。約5~10分鐘，電弧伸入爐料熔成的“小井”後，改用最高電壓，達到輸入變壓器的最大有效功率，加速熔化爐料。電極隨“小井”底部的熔化而逐漸下降，直到電弧觸到鋼液，然後電極又隨鋼液面的升高而上提。當大部分爐料熔化，電弧就完全暴露在熔池面上，這時，為減少電弧對爐頂的強烈輻射，要改用較低電壓，直到爐料完全熔化。爐子輸入能量的制度，隨爐子的容量、冶煉鋼種和冶煉工藝而不同。

電弧暴露在熔池面上並降低輸入功率後，可即向熔池吹入氧氣，以加速廢鋼的熔化。氧氣壓力為6~10公斤力/釐米<sup>2</sup>。吹氧不宜過早，否則所生成的氧化鐵將積聚在溫度尚低的熔池中，待溫度上昇時會發生急劇的氧化反應，引起爆炸式的大沸騰，導致惡性事故。



在爐料將近全部熔化，而被爐渣覆蓋時，取樣分析並根據分析結果調整鋼和渣的成分。此時，爐內是氧化性氣氛，加上熔池中有來自鏽蝕廢鋼和在熔化過程中廢鋼氧化產生的氧化鐵，或者來自爐料鐵礦石的氧化鐵，鋼液中的矽、磷、錳等元素會大量氧化。如果熔池有足夠高的溫度尤其是在吹氧時，氧炬附近的鋼水就可引起碳的氧化。

**在熔化期**，合金廢鋼中除了矽、磷、錳、碳等元素氧化外，鉻、釩、鈦、鋁、硼等元素也會氧化，硫、鉛有少量氧化，只有鎳、鉬、銅、錫不氧化。

精煉過程通過對各階段鋼樣和渣樣的分析、溫度的測定來調整和控制。在**精煉期**，除碳的氧化物成為氣態逸出外，其他元素的化合物為固態或液態，分別浮入渣中，或留在鋼液內。精煉就是把對鋼質有害的一些元素和化合物，儘可能地從鋼液中排除掉。

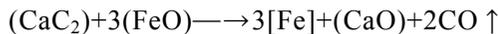
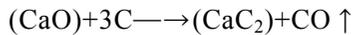
電弧爐冶煉分為**單渣法**和**雙渣法**。一般如廢鋼含磷高，則採用雙渣法，先加入氧化劑或向鋼液中吹氧氣，進行氧化，除去一部分碳、磷和其他雜質，扒去氧化渣再進行還原精煉。對含磷要求不高的鋼種可採用不扒去氧化渣、直接用脫氧劑進行還原精煉的單渣法。冶煉高合金鋼時，為避免爐料中合金元素的氧化損失，多採用以純淨廢鋼裝料的單渣法。普碳鋼和一般低合金鋼可採用只造氧化渣的單渣法冶煉，許多生產普碳鋼的大型電弧爐即採用此法；在氧化精煉末期，鋼液成分和溫度達到規定要求時出鋼，同時加入鐵合金到盛鋼桶脫氧。為了充分利用變壓器的容量，提高鋼的質量和產量，降低電耗，近年採用**爐外精煉**，把電弧爐的雙渣法中的還原期工作移到鋼包或精煉爐中進行。

**氧化精煉**的主要目的是去磷、去氣、去非金屬夾雜物，並將溫度均勻地提高至高於出鋼溫度。碳的氧化，使熔池沸騰，起強烈攪拌作用，增加鋼液和渣液的接觸面，促進渣中的氧向鋼液傳輸，以氧化雜質，提高熔池溫度並使非金屬夾雜上浮，進入爐渣。鋼液中的氫、氮等氣體擴散到一氧化碳氣泡中，一起逸入爐氣。鋼液經過氧化精煉，如果仍含較高的磷，則需除去部分爐渣，再造新渣去磷。

**還原精煉**操作過程是在氧化期結束除淨氧化渣後，加入鋁等進行預脫氧。隨後立即加石灰、火磚塊(或砂子)、螢石等先造稀薄渣，然後按照冶煉鋼種的要求再加還原渣料進行還原精煉。常用的還原渣有電石渣和白渣等幾種，它們都是還原性強的強鹼性渣(鹼度 $\text{CaO}:\text{SiO}_2=3\sim 4$ )。與其他煉鋼渣相比，它們可以更多更快地脫去鋼液中的氧和硫。由於爐氣也是還原性的，鋼液不易氧化，所加入的易氧化元素損失也很少。

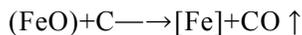
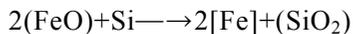


電石渣的大致成分為：CaO55~65%，SiO<sub>2</sub> 10~15%，MgO8~10%，Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>2~3%，MnO <1%，CaC<sub>2</sub> 1~4%，FeO <0.5%。電石渣分強電石渣和弱電石渣兩種，強電石渣含碳化鈣(CaC<sub>2</sub>)2~4%，冷後呈黑色並夾有白色條紋，無光澤。弱電石渣含CaC<sub>2</sub> 1~2%，冷後呈灰色。製造電石渣的方法是向爐內的稀薄渣上加較多的炭粉、矽鐵粉，密封爐子不使空氣進入，使碳與鈣在高溫下生成碳化鈣。這種爐渣脫氧能力強，碳化鈣與渣中氧化物反應生成CO逸出，而氧化物被還原成金屬進入鋼液：



為保持渣中有一定量的CaC<sub>2</sub>，需週期性地加入炭粉和石灰。由於形成CaC<sub>2</sub>所需的溫度較高，所以造渣時間較長。這種渣易使鋼液增碳，宜用於冶煉高碳鋼種。還因它不易與鋼液分離，會形成鋼中的夾雜物，所以在出鋼前要破壞電石渣，使它變成白渣。因為白渣與鋼液之間介面張力大，不致污染鋼液。

白渣的大致成分為：CaO60%，SiO<sub>2</sub>20%，MgO8%，Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>5%，MnO1%，FeO <0.5%。造渣方法是向稀薄渣上加矽鐵粉和適量的炭粉，使渣中FeO還原成鐵進入鋼液，並形成SiO<sub>2</sub>，因此需追加石灰以保持渣液的鹼度。



這種爐渣的形成時間較短，脫硫能力強。爐渣呈白色，冷卻後自行碎裂成白色粉末，以此得名。有時為了提高脫氧能力，在還原開始時，先造一個短時間的弱電石渣，隨即使之轉變為白渣。

另有火磚渣，用石灰、螢石和廢耐火磚塊造成，是中性渣，主要用於冶煉不鏽鋼；特點是加熱快，不易增碳，渣、鋼容易分離，但脫硫能力低。

## (一)爐外精煉

將轉爐或電爐中初煉過的鋼液移到另一個容器中進行精煉的煉鋼過程，也叫“二次煉鋼”。煉鋼過程因此分為初煉和精煉兩步進行。初煉：爐料在氧化性氣氛的爐內進行熔化、脫磷、脫碳和主合金化。精煉：將初煉的鋼液在真空、惰性氣體或還原性氣氛的容器中進行脫氣、脫氧、脫硫，去除夾雜物和進行成分微調等。這樣將煉鋼分兩步進行，可提高鋼的質量，縮短冶煉時間，簡化工藝過程並降低生產成本。



1933年法國佩蘭(R.Perrin)應用專門配製的高鹼度合成渣，在出鋼的過程中，對鋼液進行“渣洗脫硫”，這是爐外精煉技術的萌芽。1950年在聯邦德國用鋼液真空處理法脫除鋼中的氫以防止“白點”。60年代末期以來，爐外精煉技術經過不斷地發展，目前已有幾十種方法應用於工業生產，逐步形成了煉鋼工藝中的一個新分支。中國於1957年開始研究鋼液真空處理法。建立了鋼液脫氣、真空鑄錠裝置，70年代建立了氫氧爐、鋼包精煉爐和鋼包噴粉裝置等爐外精煉設備。

精煉主要通過下述作用：

### 1.真空脫氣

鋼液中氣體的溶解度服從平方根定律，鋼中氫含量 $[H]\% = K_H \sqrt{P_{H_2}}$ 。鋼液真空處理時，降低精煉容器中氫的分壓 $P_{H_2}$ ，即可達到鋼液脫氫的目的。氫的溶解反應平衡常數 $K_H$ 是溫度的函數，在 $1,600^\circ\text{C}$ 時， $K_H = 0.0027$ 。氫在鋼液中溶解平衡常數低，擴散速度快，所以鋼液脫氫速度很快，可使鋼中氫含量接近平衡值。同理，也可進行脫氮，但氮在鋼液中的溶解平衡常數較高， $K_H = 0.040$ ，擴散速度慢，因此鋼液真空處理時，氮的脫出率僅為10~25%。

### 2.真空脫氧

爐外精煉通常用兩種脫氧方法。真空下碳脫氧和加入合金元素矽、錳、鋁等進行沈澱脫氧。真空下碳氧反應為： $[C]+[O] \rightarrow CO \uparrow$ ，則 $[C]\% \cdot [O]\% = P_{CO} / K = mp_{CO}$ ，平衡常數 $K$ 為溫度的函數，在 $1,600^\circ\text{C}$ 和 $P_{CO} = 1$ 大氣壓時， $m\left(\text{即}\frac{1}{K}\right)$ 值為0.0020~0.0025，因此真空下碳的脫氧能力很強，可超過脫氧元素矽、錳和鋁。反應產物CO是氣態而不是呈夾雜物形態，在真空下極易排除。

### 3.惰性氣體處理

向鋼水中吹入惰性氣體，這種氣體本身不參與冶金反應，但從鋼水中上昇的每個小氣泡都相當於一個“小真空室”（氣泡中 $H_2$ 、 $N_2$ 、CO的分壓接近於零）具有“氣洗”的作用，爐外精煉生產不鏽鋼的原理，就是應用不同的CO分壓下碳鎢和溫度之間的平衡關係。用惰性氣體加氧進行精煉脫碳(工藝過程中不斷變換氫/氧的比例)，可以降低碳氧反應中CO的分壓，在較低溫度的條件下，降低碳含量而鎢不被氧化。



#### 4. 鋼液攪拌

爐外精煉過程中對鋼液進行攪拌，使鋼液成分和溫度均勻化，並能促進冶金反應。多數冶金反應過程是相界面反應，反應物和生成物的擴散速度是這些反應限制性環節。鋼液在靜止狀態下，冶金反應速度很慢，如電爐中靜止的鋼液脫硫需要30~60分鐘；爐外精煉中攪動鋼液進行脫硫只需3~5分鐘，即可達到同樣的效果。鋼液在靜止狀態下，夾雜物靠上浮除去，服從於斯托克斯(Stokes)定律，排除速度較慢；攪拌鋼液時，夾雜物的除去服從於指數規律， $X_t = X_0 e^{-kt}$ ，式中 $X_t$ 和 $X_0$ 分別表示時間 $t$ 和開始時間( $t=0$ )時夾雜物的濃度； $k$ 為常數，與攪拌強度、類型和夾雜物的特性有關。

處理方式：鋼包處理型爐外精煉，特點是精煉時間短(10~30分鐘)，精煉任務單一，沒有補償鋼水溫度降低的加熱裝置，工藝操作簡單，設備投資少。有鋼水脫氣、脫硫，成分控制和改變夾雜物形態等裝置。真空循環脫氣法，鋼包真空吹氫法(Gazid)，鋼包噴粉(CaSi或其他粉劑)處理法等均屬此類。

鋼包精煉型爐外精煉，特點是精煉時間長(60~180分鐘)，具有多種精煉機能，有補償鋼水溫度降低的加熱裝置，適於各類高合金鋼和特殊性能鋼種(如超純鋼種)的精煉生產。真空吹氧脫碳法(VOD)、真空電弧加熱脫氣法(VAD)和鋼包精煉爐法(ASEA-SKF)等，均屬此類。與此類似的還有氫氧脫碳法(AOD)。

典型的爐外精煉設備如圖2典型的爐外精煉設備所示。

工藝特點，爐外精煉具有共同工藝特點：(1)選擇一個理想的精煉氣氛條件，通常採用真空、惰性氣氛或還原性氣氛。(2)對鋼液進行攪拌，可採用電磁感應、惰性氣流或機械方法攪拌。(3)鋼液加熱，在精煉過程中通常採用電弧加熱、埋弧加熱或增加化學熱等。各種爐外精煉法不外乎這三個方面技術的不同組合。幾種爐外精煉的工藝特點和冶金機能見表2幾種爐外精煉法的工藝特點和冶金機能。

在各種爐外精煉方法中，鋼包處理型爐外精煉在工業生產中使用最多。70年代末期世界各國投入工業生產的爐外精煉設備約有400餘座。美國和日本生產軸承鋼全部都經真空處理(RH法、DH法等)，超低硫鋼的生產以及控制夾雜物形態的鋼種主要應用鋼包噴粉處理法生產(TN法、SL法)。AOD爐利用氫-氧混合吹煉生產不鏽鋼，鉻元素的回收率達98%以上，並可使用高碳鉻鐵做合金原料，經濟效果十分顯著。美國的不鏽鋼生產幾乎全部用AOD爐。目前世界上AOD爐生產的不鏽鋼約佔75%。ASEA-SKF爐和VAD爐均採用電弧加熱鋼液，用電磁感應或氫氣流攪拌

鋼液，可進行長時間的精煉操作，多用於生產高合金鋼。這類設備還可作鋼液保護爐，用於多爐聯合生產特大鋼錠。

爐外精煉法可以大幅度地提高冶金質量，並將鋼中有害雜質降低到以下水準： $[H]0.5\sim 3\text{ppm}$ ， $[O]5\sim 30\text{ppm}$ ， $[N]15\sim 50\text{ppm}$ ， $[C]0.002\sim 0.03\%$ ， $[S]0.002\sim 0.01\%$ ，提高現有煉鋼爐生產能力30~50%，使鋼液澆鑄溫度波動幅度保持 $\pm 3\sim 4^\circ\text{C}$ 範圍內，生產成本降低13~54%。幾種爐外精煉法的設備投資、操作費用、工業化水準的比較見表2爐外精煉法工業生產概況。

爐外精煉技術將會得到進一步發展。長期以來用電爐生產優質鋼的地位有被氧氣轉爐加爐外精煉和電爐加爐外精煉的工藝流程代替的趨勢。每種爐外精煉法，各有所長，應結合產品方向、生產操作經驗、設備狀況、原料供應條件和資金等情況進行綜合研究，作出選擇。

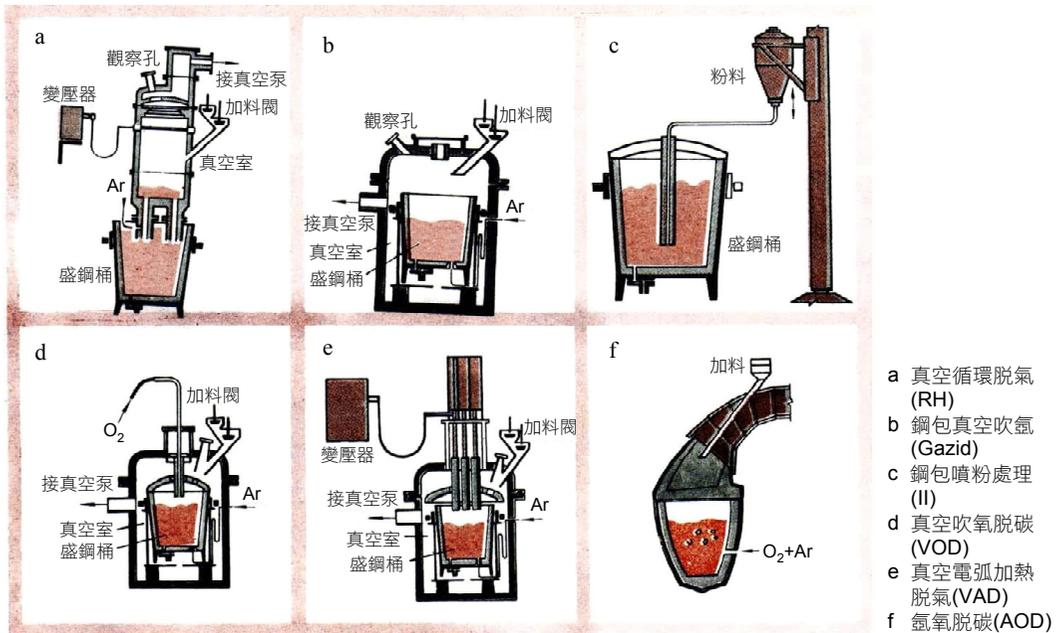


圖2 典型的爐外精煉設備



表2 幾種爐外精煉法的工藝特點和冶金機能

工藝類別		真空循環 脫氣法(RH)	鋼包真空 吹氬法(Gazid)	鋼包噴粉法 (IJ)	真空吹氧 脫碳法(VOD)	真空電弧加熱 脫氣法(VAD)	鋼包精煉爐法 (ASEA-SKF)	氬氣脫碳法 (AOD)
精煉條件		真空	真空吹氬	噴粉	真空	真空	真空	稀釋氣體
精煉用鋼包		通用	通用	鹼性包	通用	通用		轉爐
初煉爐出鋼溫度比 一般情況(°C)		高30	高40~60	高30	正常	正常	正常	正常
攪拌方式		鋼水循環	吹氬	吹氬	吹氬	吹氬		
加熱方式						電弧		
冶金 反應 機能	脫 氣	○○	○○		○○	○○	○○	○
	脫 氧	○○	○	○○	○○	○○	○○	
	脫 硫			○○	○	○	○	○
	脫 碳				○○		○○	○○
	去夾雜 氧化物還原		○	改變形態	○	○	○	○○
控制澆鑄溫度				○		○		

註：○有效果；○○效果顯著。

表3 幾種爐外精煉法的工藝特點和冶金機能

精煉方法	真空循環脫氣法 (RH)	鋼包真空吹氬法 (Gazid)	鋼包噴粉法 (IJ)	真空吹氧脫碳法 (VOD)	真空電弧加熱 脫氣法(VAD)	氬氣脫碳法
設備投資比較	中	中	低	高	高	較低
操作費用比較	中	中	低	高	高	高
精煉時間(分)	<20	<20	<20	90~120	60~90	90~120
鋼包容量(噸)	20~300	20~150	20~200	20~150	20~155	15~175
工業化水平 (70年代末期設備座數)	141 (包括DH法)	70(包括各類 真空鑄錠)	85(包括TN、 SL法)	26	48(包括ASEA- SKF法)	75
精煉適用鋼種	優質碳鋼、低合 金鋼、軸承鋼、 硅鋼	優質碳鋼、合金 結構鋼	超低硫鋼、特厚 板鋼、油氣管道 用鋼	各類不銹鋼	各類高合金鋼	超低碳不銹鋼、 各類不銹鋼



# 七

## 工業加熱爐的節能關鍵技術



### (一)傳統的加熱爐節能技術

(1) **築爐材料輕型化**，由熱平衡的測試或者計算可知，爐體蓄熱損失和散熱損失高達60%~70%，而加熱工作件的有效熱僅有25%~30%。於是採用熱容量很小的輕質耐火材料築爐，以達到不讓熱量被爐襯過多地“吃”掉，減少爐體的蓄熱損失，同時增強爐子的隔熱保溫，少讓熱量從爐子外表面跑掉，減少爐壁的散熱損失。

從20世紀70年代後期開始，更加廣泛地採用耐火纖維和各種輕質耐火材料做成複合爐襯，發展到極至，就是當前盛行的全纖維爐。

這種方法是把熱量盡力“堵”在爐膛中。但是，被堵在爐膛中的熱量是否能成為有效熱而被工作件吸收，這個問題並沒有解決。

(2) **對於高溫連續加熱爐**，從60年代中期開始，廣泛採用不定形耐火材料。其施工方法有現場搗打、現場澆灌和預製構件吊裝等。此項技術有利於爐壁氣密性增強，延長爐襯壽命，從整體而言，還省去了耐火材料砌築前的燒制過程。

(3) **改進和完善燃燒系統的節能**，旨在完全充分地釋放出燃料的熱能。

(4) **設置自動控制系統**，以各相關系統的及時精確配合和控制來實現節能。

(5) **有關減少爐子冷卻系統的節能**。眾所周知，工業加熱爐技術進步發展至今，如果只採用上述傳統的辦法，哪怕要想再降低能耗3%都是非常困難的。那麼，工業加熱爐熱效率難以再提高的原因究竟是什麼呢？

加熱爐熱效率低下的本質原因在爐膛內，熱源發出的熱能，是以電磁波即熱射線的形式，沿半球空間呈直線射出狀進行輻射的。電磁波遵循光學原理進行傳播。



實際上，這些熱射線只有一部分能夠直接射到了工作件上，被工作件吸收而成為有效熱；還有許多的熱射線卻射不到工作件上，而是射到了爐壁的某處。這些射到爐壁的熱射線中，有一部分要被爐牆吸收，並陸續地通過爐牆外壁向大氣空間散發損失掉；另一部分則按“入射角等於反射角”的規律，被爐牆反射出去。

被反射的熱射線中的一部分，此時可能射到工作件上，被工作件吸收成為有效熱；而另一部分仍然射不到工作件上，再一次發生上述的“爐牆吸收和反射”過程。

由於爐壁一般是粗糙的工程面，爐膛中來回反射的熱射線就形成了一種漫反射的分佈狀態，卻都不能到位。沒有射到工作件上的熱射線，不能成為有效熱被利用。

前述各種傳統的節能技術，都沒有解決爐膛內熱射線到位的問題，也就是沒有改變熱射線在爐膛中呈漫反射分佈的狀態，因此，工作件單位表面積上獲得的輻射熱較少，即輻照度較低。這就是傳統爐型和傳統的節能方法，在現有的基礎上熱效率難以再提高的本質原因。

## (二)能使熱射線儘快到位的節能技術

黑體強化輻射傳熱技術，是把紅外物理中黑體的概念加以技術化，製作成工業標準的黑體元件，安裝在爐膛內，用以調控熱射線，改變其漫反射狀態，使之集中、有效地射向工作件，增大了熱射線的到位率，提高了對工作件的輻照度，也就大幅度地提高了爐子的熱效率。採用黑體強化輻射傳熱技術，構成了多功能爐襯的工業爐。

### 1. 多功能爐襯的形成

- (1) 在爐頂和爐壁上設置眾多的黑體元件，這些元件有的突出在爐壁之外，有的凹入在爐壁的裏面。
- (2) 對熱源裝置如電熱體或燒嘴磚作保護性處理
- (3) 整體爐牆進行強化處理。處理的目的之一是強化爐襯並增強爐襯的氣密性；目的之二是提高爐襯的發射率。眾多的黑體元件和爐襯共同組成一個基本不老化的，且壽命又得以延長的紅外加熱系統——多功能爐襯。



## 2. 多功能爐襯強輻射元件安裝佈置

### (1) 強輻射元件

### (2) 爐膛空間

(3) 黑體元件是多功能爐襯工業爐的技術關鍵黑體元件是將絕對黑體的概念加以技術化，形成工業標準黑體，將其成功地應用於爐膛中，並以它為核心構成多功能爐襯。

黑體元件的結構形式是多孔陶瓷的空腔錐台，根據不同的爐型、不同的使用溫度，元件已經形成了完整的系列。其作用是：

#### A. 增大爐膛的傳熱面積

在不改變原爐膛結構的前提下，在爐膛內設置眾多的黑體元件後，爐膛的傳熱面積大幅度地增加，其數值可以達到原爐膛面積的1倍以上。

#### B. 提高爐膛的黑度

傳統的提高爐膛黑度的方法，是採用發射率高的紅外塗料對其進行塗裝，迄今能達到的最高水準為 $\epsilon=0.88\sim 0.92$ ，但其老化問題難以從根本上解決，塗層失效快，工業運用不能持久。黑體元件的全發射率為 $\epsilon=0.96$ (1,078 K，中國測試技術研究院測試)。

其特徵是：

- a. 元件的高發射率由其幾何參數和表面特性獲得，具有高穩定性，不老化的。
- b. 元件本身不是熱源，它只起中間傳熱的作用，工業實施方便可靠。

#### C. 能調控熱射線

黑體元件具有調控熱射線的功能：對爐膛內呈漫射狀的熱射線，元件首先以其高吸收特性儘快地吸收，並因不斷聚集熱量而使其自身溫度提高。當其再以高發射特性重新發射熱射線時，借其自身的幾何結構和佈置的位置，就完成了把熱射線從無序到有序的調控過程，使熱射線能夠射向工作件，大大地提高了熱射線的到位率，增大了對工作件的輻照度，即增多了工作件單位面積所吸收的輻射能。



#### (4)提高輻射傳熱的比例

在燃料爐中，當火焰流經黑體元件時，元件吸收對流傳遞的熱量後，再以輻射的方式向工作件傳遞，實現了傳熱方式的轉換，即把爐內的一部分對流傳熱轉化成輻射傳熱，增大了輻射傳熱的比例，提高了傳熱效率。黑體元件本身並不是熱源，它在爐膛內實際上就像是排球二傳手一樣，在熱能利用的源頭(爐膛內)進行著熱射線(熱能)的調控，使之迅速輻射到位，達到了強化輻射傳熱的目的。黑體元件又像是爐膛內的許多個“溫柔”的燒嘴，使工作件均勻地被加熱。

#### 4.多功能爐襯的多項功能

- (1) 節能20%~30%。
- (2) 提高生產率10%~20%，對有的工藝，如調質、正火，甚至可達50%。
- (3) 改善爐溫均勻性，提高產品加熱質量。
- (4) 延長爐襯壽命一倍以上。
- (5) 具有環保效應。可減少廢氣排放量，並降低廢氣溫度。

#### 5.多功能爐襯工業爐的適用範圍

適用於各種熱處理電阻爐、燃料爐及其生產線、軋鋼加熱爐、陶瓷燒成窯等。實踐證明，黑體強化輻射傳熱新穎的節能機理，是加熱爐節能的突破性進展。不論是電爐還是燃料爐，大爐子還是小爐子，高、中、低溫爐均可應用。

#### 6.多功能爐襯工業爐的技術優勢本技術具有國際競爭力

世界兩工業爐集團(日本黑旗窯業，法國斯太因工業爐集團)均不掌握此項黑體技術。

本技術經歷了較長時間的中試，直至進入市場。迄今，黑體元件已經發展到第三代，形成了完整的系列，**節能20%~30%，成熟可靠。**

本技術不僅實施方便，不改變原爐膛的結構，而且使用安全，運行成本低廉。用黑體強化輻射傳熱節能新技術裝備的爐窯，可以獲得綠色優勢；用作改造現有加熱爐窯，可以用較小的投資獲得“更新裝備”的價值，使我國工業加熱爐熱能利用接近或達到國際先進水準。大幅度節能，是可持續發展的必然要求；環保，是人類的共同追求。



21世紀綠色工業爐要求工業爐節能並減少或消除對環境的污染。在現有加熱爐的基礎上，能夠大幅度節能的創新技術是關鍵。黑體強化輻射傳熱節能新技術投資少、見效快、效果大，是改造傳統加熱爐窯的關鍵技術。

### (三)蓄熱式工業爐，對加熱爐的排放廢氣進行餘熱回收

蓄熱燃燒技術，現今已運用在許多的鋼鐵生產製程上，它的優點在於熱能回收效率高出傳統復熱式熱交換器許多，是一項更具優勢的廢熱回收節能技術；除此之外，也因為它的燃燒方式不同於以往的燃燒模式，因此可提昇工業加熱爐膛的加熱性能及其產品的品質。

蓄熱燃燒加熱是利用陶瓷材料當為熱的傳遞介質，因為陶瓷材料比金屬更具耐溫性，所以可置於相當高的溫區位置來回收排氣中的熱能，並同時加熱燃燒用的空氣。從熱交換器材質的溫度限制來看，復熱式熱交換器受限於它金屬材質的特性，無法如陶瓷材料直接接觸1,000°C以上的高溫煙氣，所以復熱式熱交換器的燃料節約率就無法比擬蓄熱燃燒方式，而且有一段明顯的落差。

例如圖3的空氣預熱與節能效率關係圖所示，其中最佳情況的復熱式熱交換器能將燃燒空氣預熱至500~600°C，而蓄熱燃燒方式則可預熱至1,100~1,200°C。就熱能回收的潛力來看，蓄熱燃燒方式約有兩倍的節能潛力，所以，適當的運用蓄熱燃燒方式於燃燒加熱的製程中是值得鼓勵的。

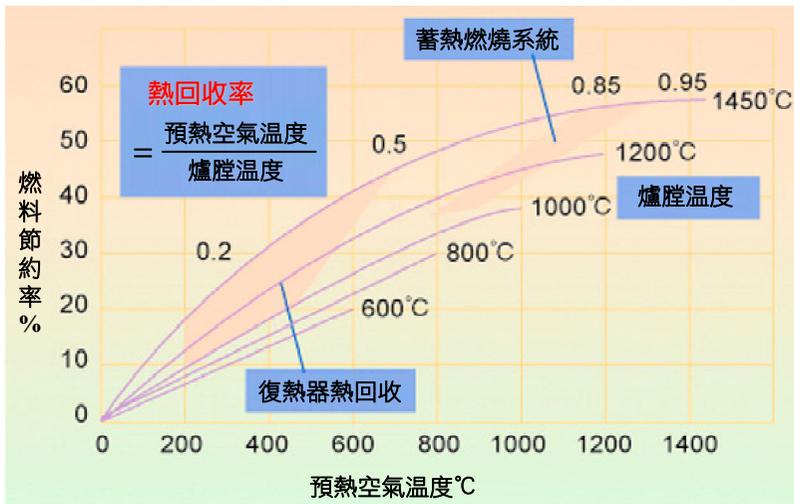


圖3 空氣預熱與節能效率關係



蓄熱燃燒系統的主要構成如圖4所示。蓄熱燃燒主要由燃燒器、蓄熱體及切換機構三者組合而成；燃燒器為週期性的交互切換運轉，當A燃燒器燃燒時，B燃燒器便作為高溫煙氣的排放通道，並將高溫煙氣中的熱能蓄積在B燃燒器裡的陶瓷材料中，而在下一個切換運轉時，B燃燒器開始運轉燃燒，並利用空氣將B燃燒器陶瓷中的熱能取出當作燃燒之用；此時A燃燒器為高溫煙氣的排放通道，並將煙氣中的熱能回收在A燃燒器的陶瓷材料裡。

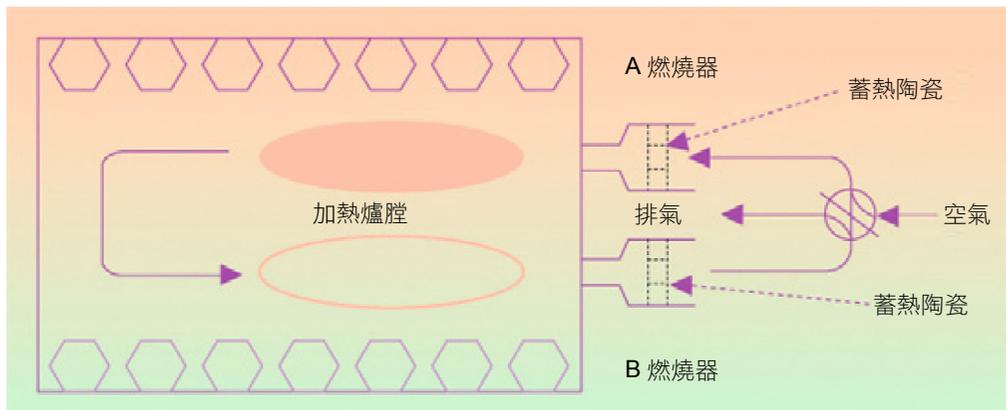


圖4 蓄熱燃燒系統及其運轉原理

從燃燒的角度來看，火焰溫度越高，越容易產生氮氧化物，所以學理上蓄熱燃燒方式容易產生高溫的火焰及大量的氮氧化物，因此，如果蓄熱燃燒模式僅具有高效率的節能效果，而無法符合氮氧化物的環保要求的話，它也不易為工業界接受。所以，蓄熱燃燒需要有特殊的機制以防治氮氧化物的產生；針對此點已可利用燃料分段燃燒及燃料直接噴入法，配合低氧氣氛的燃燒環境，以達到低氮氧化物排放的目的。圖5是採用不同的蓄熱燃燒模式進行重油燃燒試驗時，氮氧化物的實際排放狀況，由比較中得知採用燃料分段燃燒或燃料直接噴入法在低氧濃度的條件下，氮氧化物的排放值均可控制在250ppm以下，符合環保排放要求。

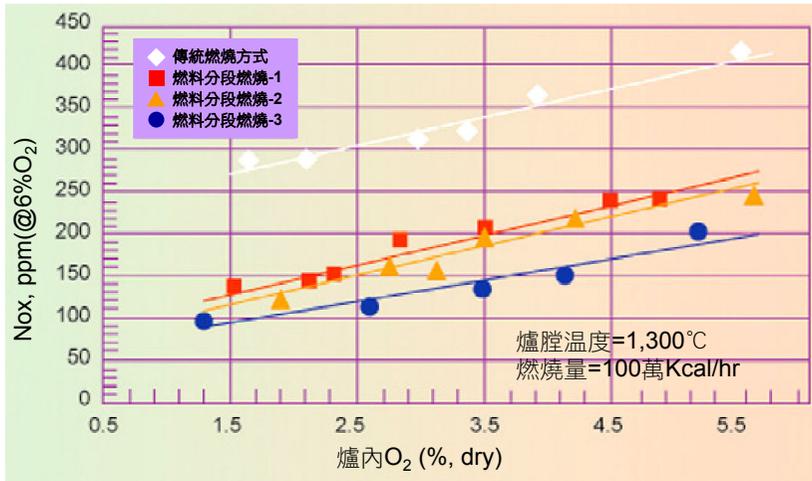


圖5 高溫空氣燃燒之氮氧化物控制

對於蓄熱燃燒的應用及燃燒節能診斷的方法，基本上可以從蓄熱燃燒機中的陶瓷蓄熱體上、下端溫度量測中得知，如圖6所示。簡單的蓄熱體溫度效率值計算乃以下述公式來計算初估：溫度效率 =  $(T_{APH} - T_a) \div (T_{FG} - T_a)$ 。其中  $T_{FG}$  為進入蓄熱體前之煙氣溫度、 $T_{APH}$  為通過蓄熱體後之燃燒空氣預熱溫度、 $T_a$  為進入蓄熱體前之新鮮冷空氣溫度。

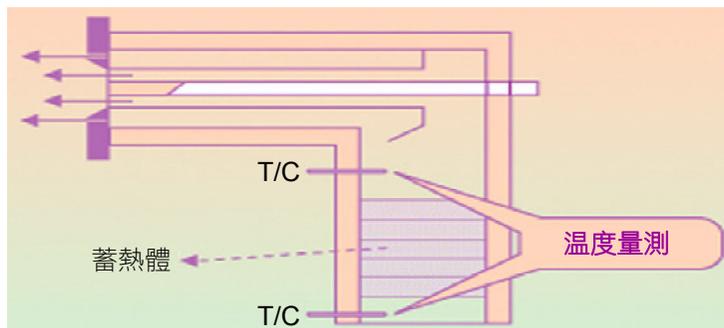


圖6 蓄熱燃燒節能評估

由研究中得知，爐膛溫度分別為800°C、1,000°C、1,100°C及1,200°C時，測得進入蓄熱體前之煙氣溫度分別為702°C、900°C、978°C及1,095°C，而通過蓄熱體後之燃燒空氣預熱溫度值則分別為625°C、828°C、910°C及1,039°C。由以上數據計算陶瓷蓄熱體的溫度效率值分別為0.89、0.92、0.93及0.95。



另外，可以參酌圖7的方法，來診斷及評估加熱系統的蓄熱燃燒節能效率。如圖7，採用蓄熱燃燒技術時，當燃燒空氣預熱在1,150°C的情況下，往上對應加熱爐內的溫度曲線為1,200°C，再往右對應代表燃料節省率的Y軸，其值為52%；此值意謂著蓄熱燃燒技術比未裝置任何熱回收裝置的製程節省燃料52%。而傳統的熱交換技術，將燃燒空氣預熱到400°C時，其對應未裝置任何熱回收裝置的製程，其燃料節約率約為25%。因此，採用蓄熱燃燒技術者比傳統熱回收裝置的製程，其燃料節約能力約為36%  $[(52-25)/(100-25)=36\%]$ 。

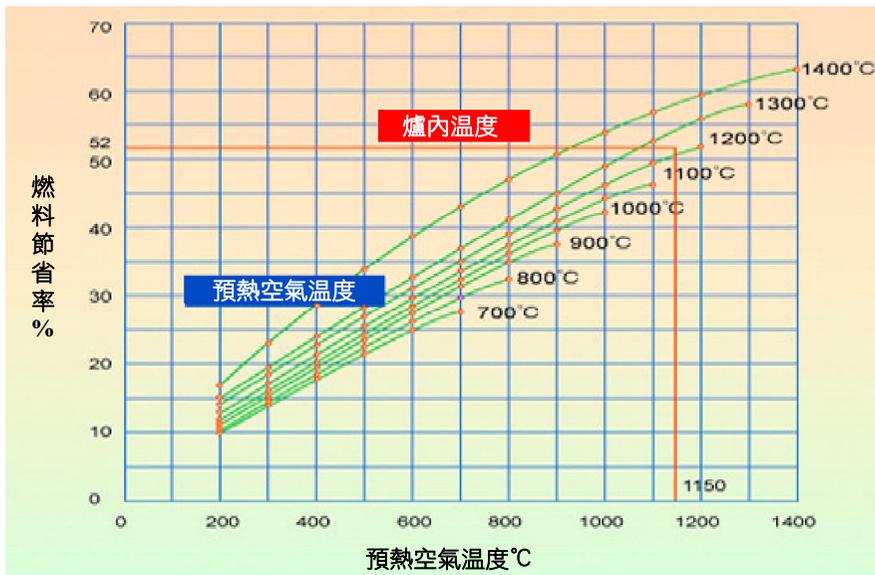


圖7 蓄熱燃燒之節能評估

蓄熱燃燒除了具有高效率的節能及符合氮氧化物排放的能力外，其爐膛內部的熱均勻性亦較其他燃燒模式優異，所以具有提昇產能、縮小爐體尺寸及提昇品質等優點。

圖8(A)為傳統式加熱爐，此類型燃燒的爐內溫度分佈和熱通量分佈相似，最高點均位於燃燒機爐前位置，然後沿著火焰的中心軸往下游的方向逐漸降低，在爐膛內分佈較不均勻。而蓄熱燃燒之圖8(B)則為間歇性的交互切換式燃燒，從整個爐體的空間分佈來看，週期性的交互切換結果，熱通量的時間平均分佈的相當均勻，且落在被加熱物及爐體可容許的範圍內，故不致有過熱現象，對於爐體空間大而溫度均勻性要求高的工業加熱系統而言，蓄熱燃燒的特性可符合此一要求。

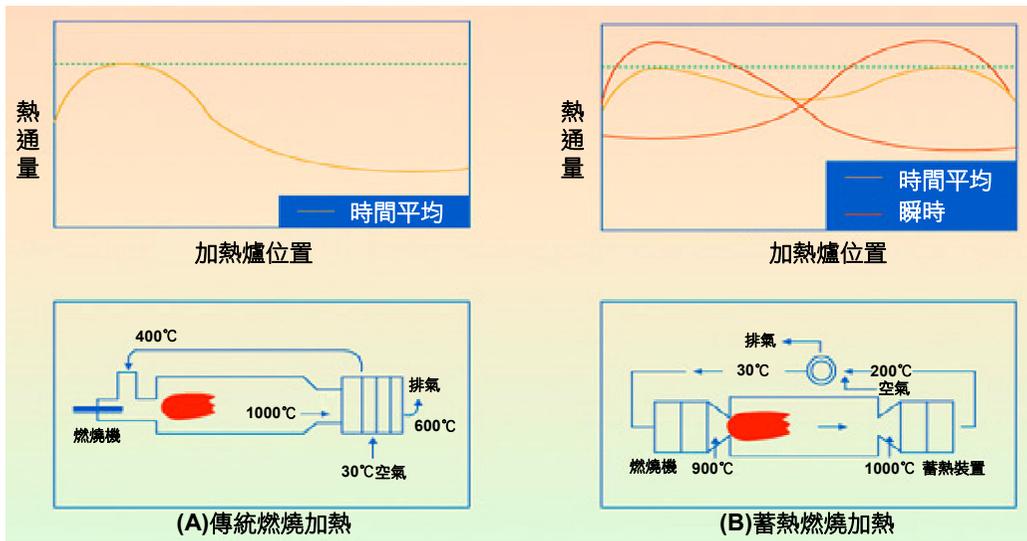


圖8 傳統與蓄熱燃燒加熱系統比較

蓄熱燃燒節能主要的方法是對燃燒後排放的煙氣進行廢熱回收，回收的熱能普遍應用於燃燒空氣的預熱，以減少燃料的消耗。蓄熱式燃燒器藉著將蓄熱體整合在燃燒器本體內，除維持原有的高溫度效率外，也避免預熱後燃燒空氣的散熱損失，因此在 $1,200^{\circ}\text{C}$ 的爐溫時，可將排氣的溫度降至 $250^{\circ}\text{C}$ 以內，燃燒空氣預熱的溫度提升至 $800^{\circ}\text{C}$ 以上，如此不但有效地回收煙氣中的熱能，也由於其高效率的燃燒節能效果，大幅降低燃燒系統 $\text{CO}_2$ 的排放量。

高溫預熱空氣燃燒技術在經濟部能源科技發展專案的推動下，藉由業界合作於煉鋼廠盛鋼桶預熱台，進行150噸的盛鋼桶預熱台燃控系統換裝一蓄熱燃燒器示範工作，結果證實蓄熱式燃燒技術在盛鋼桶加熱站的能源節約潛能及其加熱作業時間的縮短，成果可作為技術推廣與實務運作參考，並建立業主的經驗與信心。目前已可達成之目標如下：

1. 獲致節能效果驗證-35%以上。
2. 獲致低氮氧化物排放驗證--符合環保法規。
3. 獲致熱均勻分佈特性驗證---溫差 $30^{\circ}\text{C}$ 以內。
4. 獲致桶底溫度提高的驗證---較傳統燃燒為高。
5. 完成性能評估資料與技術的建立。



所以就蓄熱燃燒的開發與推廣而言，其可達到國家競爭力、產業及環境保護三贏的標的，包括節約能源30%、降低CO<sub>2</sub>排放、提升燃料使用效率、縮小爐膛體積20%、工業爐性能提昇、提高產品品質及大幅降低氮氧化物排放。

為進一步推廣與提昇蓄熱燃燒加熱的應用，目前正進行蓄熱式重油燃燒加熱的現場技術驗證工作，替國內使用重油為加熱熱源的工業使用者開啟另頁節能實務運用的新章。

#### (四) 富氧燃燒

富氧助燃節能的原理十分簡單，特別是被應用於爐窯時，其原理就是加熱助燃，據資料報道，向爐窯鼓風的空氣中含氧量每增加4~5%，火焰溫度可升高200~300°C，從而提高了燃料的燃燒效率。

鍛造加熱爐，若採用23~25%的富氧空氣助燃，則可節省燃料25%左右；石灰窯若採用23%的富氧空氣鼓風，就能增加生產能力大約25%。

其他如玻璃熔化爐、水泥生產窯、耐火材料生產窯、磚瓦窯以及其他各種工業爐窯，都能應用富氧助燃而獲得明顯的節能效果。

美國的賓夕半尼珍珠岩廠和美國Airco氣體工業公司開發的富氧系統，使珍珠岩的產量提高18%，並節省天然氣用量12%。

在電力工業中，一個月發電量為720萬千瓦小時的熱電廠，如果採用富氧助燃，則每天可以節約標準煤約為558噸。

日本的有關研究表明：欲使燃料在富氧狀態下燃燒，其富氧空氣的濃度一般為30%左右。過度提高富氧空氣中氧的濃度，只不過使火焰溫度處於飽和狀態，而不會繼續使火焰溫度提高。因為隨著富氧空氣中氧濃度的增加，使其火焰溫度上升，其速度最快的一段，是發生在富氧空氣中氧的濃度剛開始增加的一段時間內。

而當富氧空氣中的氧濃度繼續增加時，火焰溫度上升的速度反而下降。如下表所示：



表4 火焰溫度與富氧空氣中的氧濃度之間關係

空氣過量係數	火焰溫度℃					
	21%	23%	25%	27%	29%	31%
1.0	2,120	2,250	2,350	2,400	2,415	2,425
1.2	1,800	2,000	2,150	2,270	2,350	2,380
1.5	1,420	1,700	1,900	2,080	2,200	2,280

富氧助燃與空氣助燃相比，有著明顯的節能效果，現把日本試驗的有關資料列於下表5：

表5 富氧空氣助燃系統的節能效果(日本試驗資料)

富氧濃度%	所需能耗 kW.h/M3	燃燒量 M3	節能率 %	節能量 MJ
23	0.029	4.6	10~25	0.5~1.2
25	0.057	5.98	20~40	1.0~4.1
28	0.1	5.4	30~50	1.8~2.7

注：燃燒量為每1立方米富氧空氣。

節能量為1kW.h(度)=10.26MJ換算。

試驗表明，在爐窯中，如果富氧助燃從效率角度考慮，則以用23~25%富氧空氣為最合理。而當氧濃度在為25%時，又是以採用普通噴嘴，使用情況最佳。一般來講，爐溫越高，使用富氧空氣的節能效果便越大，只是增加到一定程度便有減少節能效果的傾向，因此富氧空氣中氧的純度一般不必太高。

富氧助燃的節能效果特別對玻璃熔化爐窯、陶瓷燒結爐窯的效果更大。見表6與表7。

表6 玻璃熔化爐窯採用富氧燃燒的節能效果

比較專案	立方米/公斤	相對比率
普通空氣燃燒：O <sub>2</sub> =21%	1.38	100
富氧燃燒：O <sub>2</sub> =22.7%	1.15	83.3
富氧燃燒：O <sub>2</sub> =25.3%	1.01	73.2
富氧燃燒：O <sub>2</sub> =26%	1.18	85.5



表7 各種爐窯採用富氧助燃後一次能的節能率

爐窯名稱	富氧濃度%	節能率%
玻璃爐窯	22.7	16.8
玻璃爐窯	25.3	26.8
陶瓷爐窯	28.0	26.1
鍛造加熱爐	25.0	24.7

為此，日本政府早已決定，從1990年起，全部工業爐窯，包括：大型鍋爐、工業用的中型鍋爐、取暖用的鍋爐、船舶動力裝置的鍋爐等都不得用普通空氣助燃，都應用富氧空氣助燃。我國各種工業爐窯年總耗能量約占全國能源總量的25%左右。我國工業爐窯的平均單耗比先進國家高出1/3左右，主要與管理落後和工業爐窯裝備技術水準低有關。因此如果能夠推廣富氧助燃，則節能是十分可觀的。

生成富氧空氣的方法目前主要有：

- 深冷法(cold box)制得純氧後混合普通空氣，適用大規模；
- 變壓吸附法，中等規模較合適；
- 高分子膜法，中小規模較合適；

**膜法制富氧空氣**當流量小於6,000立方米/時，富氧濃度在低於40%時佔有明顯的優勢，富氧因促進燃燒，加快燃燒速度而有效提高燃燒區溫度，這個優點對玻璃窯爐，對冶金都具有相當大的好處！





# 八

## 案例分析



### (一) 直流電弧爐

傳統電弧爐多為交流式，具有電弧不穩定、閃爍及鋼液溫度不均等缺點，直流式電弧爐具節省熔煉電力、節省電極棒之耗用及操作穩定與縮短熔煉時間之優點。一座30噸交流電弧爐改成直流爐後，用電量可減少10~30度/噸，電極棒用量減少40~60%。新一代直流電弧爐系統可採連續加料式，廢鋼預熱溫度達800℃，用電量可降低至260度/噸。

### (二) 廢鋼預熱技術

電弧爐吹煉過程產生1,000℃以上的高溫廢氣，若加以回收利用可有效節省能源。廢鋼預熱即為利用回收廢氣作為原料預熱源，以預熱廢鋼至400℃為例，將可節省約40度/噸；另一種是利用復熱器回收廢氣以預熱空氣，以回收900℃廢氣為例，可將3,700NM<sup>3</sup>/小時 空氣自常溫預熱至500℃，相當於節省燃料油55公升/小時。

### (三) 操作自動化技術

電爐的操作採取電腦化自動控制方式，架構DDC系統使量測數據可即時蒐集與轉換成數位訊號，並輸送到人性化操作的監控畫面。控制項目包括電極電壓與電流、電爐冷卻水流量、吹氧流量、設備異常監測等。透過此自動化操作，可較一般電爐節省20%以上的電力。

### (四) 頂底同吹技術

新開發的頂底同吹技術，係在電爐下方噴煤助燃，以較低成本的燃料煤取代電力，在用煤14~23公斤/噸及吹氧50 NM<sup>3</sup>/噸下，用電量可節省65度/噸，同時可縮短吹煉時間約16%，對提高產量有很大助益。



## (五)盛鋼桶預熱應用

圖9表示蓄熱式燃燒的盛鋼桶預熱台。



圖9

盛鋼桶的保溫與預熱站如無熱回收系統，其能源利用率非常低，約落在20%左右，故有極大的改善潛力。而蓄熱式燃燒系統是盛鋼桶預熱的最佳選擇，粗估應有降低30-40%能源消耗之能力，可以提昇內襯均溫性至30°C以內。

蓄熱式燃燒系統包括1對蓄熱式燃燒器、1個四向閥，總加熱能力為120萬kcal/hr (NG)，並可自動化溫控燃燒系統(溫度曲線設定)。其應用時之考量如下所述：

1. 預熱站屬批次作業，低風險。
2. 預熱站原無熱回收設備，增設蓄熱式燃燒系統效益大。
3. 預熱站加熱能力不足，藉蓄熱式燃燒系統提昇，改善預熱品質。
4. 原內襯預熱上部溫度高、底部溫度低、均溫性差，可藉蓄熱式燃燒系統改善。
5. 預期熱回收率70%，排氣溫度降至200°C，能源節約可達35%。



經過實際測試結果，蓄熱室燃燒系統可將廢氣溫度降至 $200^{\circ}\text{C}$ 以下，證實加裝蓄熱室燃燒器節約能源之實質效益大於35%，達到預期之目標。經濟效益預估如下：

1. 能源節約費用：(NG base)2,060,000元/年。
2. 二氧化碳減量：500噸/年。
3. 減少鋼液溫度回爐處理費用：330,000元/年。
4. 降低轉爐吹止溫度，增加轉爐使用回數：粗估62回/年。
5. 強化盛鋼桶預熱品質，提昇盛鋼桶使用回數，減少耐火材料消耗量。

## (六)線材球化加熱罩應用

圖10表示採用蓄熱燃燒的鐘罩式退火爐。



圖10

於線材工廠增設一座鐘罩式加熱罩，採用蓄熱式燃燒系統，取代舊有的傳統復熱器燃燒系統，作為線材盤元球化熱處理之用，以節省能源並降低污染，期望達到廢氣排放溫度低於 $250^{\circ}\text{C}$ 、廢氣中 $\text{NO}_x$ 含量低於150ppm(6%  $\text{O}_2$ )及熱回收效率由目前小於35%提升至70%以上之效果。蓄熱式燃燒系統包括4對蓄熱式燃燒器、4



個四向閥，總加熱能力為 $80 \times 10^4$  kcal/hr(焦爐氣，COG)，導入低氮氧燃燒機制(一、二次燃料自動切換系統)。蓄熱式燃燒器的應用考量如下：

1. 熱處理是批次製程(降低風險)。
2. 原熱回收器效率偏低(小於35%)，排氣溫度300-450°C。
3. 蓄熱式燃燒器熱回收效率大於70%，排氣溫度約200°C，能源節約率可達15-20%。

經過實際測試結果，排氣溫度與排氣組成應可再增加二次燃料量來降低NO<sub>x</sub>排放，CO排放量低於150ppm，顯然COG可以完全燃燒。另外，溫度效率在正常操作溫度範圍(大於700°C)可以維持70%以上。如此預估可達到每年節約能源實質效益107,500元，CO<sub>2</sub>減量55.3噸等之效益。





# 九

## 結 論



地球溫室氣體減量是現今國際上極為重視的課題，從燃燒排放二氧化碳氣體減量獲致效果最大。以能源使用效率提升之相關措施為首要工作，其減量原則可採行：節約能源、提高設備使用效率、提升單位能源製程產量、低碳高氫之燃料替換和再生能源的回收利用等手段，因此降低能源成本也可兼顧環保利益。由於每個工廠耗用能源情況各有不同，選擇其中適合的項目著手進行檢討改善較為實際。產業界應急謀應用技術之突破與改進，以促成產業升級的目標，邁向國際市場歷久彌堅的長征之途。



## 參考資料



1. 加熱爐改善成果 財團法人中技社節能技術發展中心 沈仲民
2. 工業燃燒加熱與節能技術 工業技術研究院能源與資源研究所 / 陳文杰
3. 蓄熱式燃燒技術 工業技術研究院能源與資源研究所 / 陳文杰
4. 工業加熱爐的節能關鍵技術 《機械工人·熱加工》 2005年02期
5. 工業爐強輻射傳熱節能新技術 中國工業爐網
6. 近代煉鋼新技術(噴射冶金和爐外精煉 上海科學技術文獻出版社, 上海, 1982。
7. 餘熱回收在鋼鐵行業的應用 中國選礦技術網
8. Electric Arc Furnace Steelmaking By Jeremy A. T. Jones
9. HOW A BLAST FURNACE WORKS by John A. Ricketts



