

# 鋼鐵冶煉技術發展綜論

## Development of Iron and Steel Smelting Technologies: A Review

■ 呂錫民<sup>1</sup>  
S.M. Lu

現代鋼鐵生產技術的崛起，大約是發生在半個世紀之前。從此之後，原料預處理、焦炭生產、高爐技術本身皆有大幅度提升，連帶使得能源消耗及溫氣排放下降，從而提高生產率及產品質量。尤其是先進頂部、底部、組合式鼓風轉爐技術的開發，徹底改變以鐵礦石精煉為主的鋼鐵生產方式。目前，氧氣轉爐工法是為煉鋼技術主流，約占世界鋼鐵產量三分之二左右。煉鋼工法的另一項發展技藝是以回收鋼為原料，其中鋼鐵廢料少量作為轉爐冷卻材料，而大部分則在超高功率電爐中熔化。這些主要煉鋼技術的進展，是20世紀60年代以來，與澆斗中二次煉鋼技術的出現及連鑄製程的突破有著密切的關連。這些技術全然改寫整個煉鋼理論，這意味著新鋼種將有更高的生產率、更低的材料與能源消耗、以及在無與倫比的前提下，具有高度改進、嚴格定制的性能。本文討論了在不同單元中，最新鋼鐵冶煉技術的發展成果。其中，二次冶金和連續鑄造是當前冶金技術的關注焦點。最後，本文討論到相關鋼鐵冶煉技術開發的未來願景。

**關鍵詞：**煉鋼，二次冶金，連鑄，技術開發

The development of modern iron and steel making technologies started about a half century ago. Raw material pretreatments, coke production and blast furnace process itself were significantly improved; energy consumption and emissions were curtailed; and productivity and product quality were enhanced. Modern top, bottom, and combined blowing converter processes were developed that revolutionized steel production based on iron ore concentrates. Today, oxygen converter process is the main steelmaking technology that produced about two thirds of the world steel production. Another mainstream of steelmaking is based on recycled steel as raw material. Smaller share of the scrap is used in converters as cooling material, but most of it is melted in ultra-high power electric furnaces. The progresses in these primary steelmaking technologies are associated with the emergence and developments of secondary steelmaking processes in ladles and with the breakthrough of continuous casting. These technologies radically changed the steelmaking principle, which has meant much higher production rates, and lower materials and energy consumption per unit as well as unequalled premises for development of new steel grades with improved and tailored properties. The present paper discussed the latest achievements in different unit processes. Latest progresses in secondary metallurgy and continuous casting are considered with emphasis on the metallurgical constraints of the current processes. Finally, some future perspectives influencing the process development were discussed.

**Key words:** Steelmaking, Secondary metallurgy, Continuous casting, Process development

### 一、前言

過去150年間，世界鋼鐵生產的總體進度，如圖1<sup>(1)</sup>和圖2<sup>(1)</sup>所示。在19世紀初，全球鋼鐵產量每年僅有百萬噸左右。自從新製程突破後，於1870年超過1000萬噸，1900年達到3000

<sup>1</sup> 退休研究員，能源與環境研究所，工業技術研究院，(M) 0910-354-790

Retired Researcher, Energy and Environmental Laboratories, Industrial Technology Research Institute  
(E-Mail) shyimin@gmail.com

萬噸，1927 年達到 1 億 1 千萬噸，而 1951 年則突破 2 億噸。在“新型工業革命”下，鋼鐵業進行創新技術與廣泛投資，日本、蘇聯、美國、韓國等新興鋼鐵廠一一崛起。20 世紀 70 年代，世界鋼鐵產量進一步來到 7 億噸/年，1979 年創紀錄來到 7 億 490 萬噸。

然而，由於經濟危機及政治變化，全球鋼鐵產量有一陣子停滯不前，到 2000 年千禧年才成長到 8.6 億噸。這是近期第一個“熱潮”跡象，亦是以中國成為主要驅動力者的時代（圖 2）。近十年來，當中國似乎達到“飽和生產水平”之際，其他發展中國家（如印度、巴西、俄羅斯等）也大大提高了鋼鐵生產量。在不久的將來，發展中國家消費量增長將會發生。

目前全球 70% 以上的粗鋼產自使用高爐鐵水的轉爐，其餘產品則來自採用回收廢鋼為料源的電爐，另外採用直接還原鐵（DRI）的比例還很小（圖 2）。半個世紀以來，開爐技術（Open-

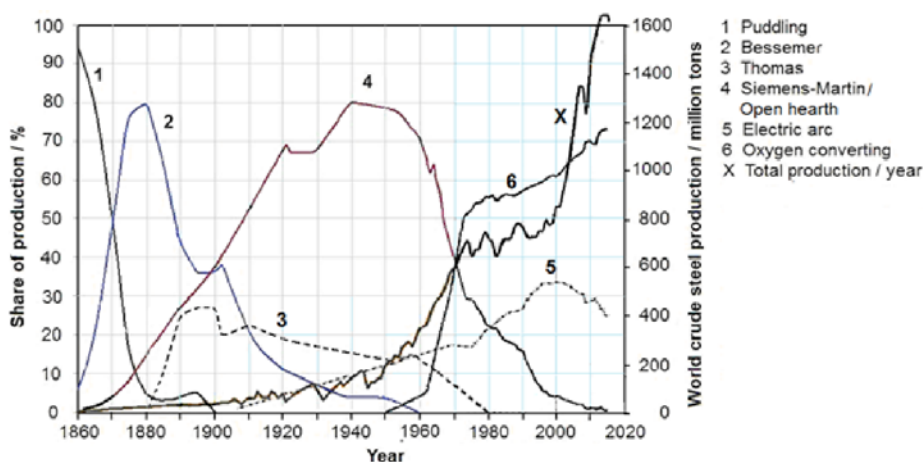


圖 1 來自檔案夾<sup>(1)</sup>，1860 年以來，全球粗鋼年產量（百萬噸），以及各種冶煉技術之間的份額(%)。

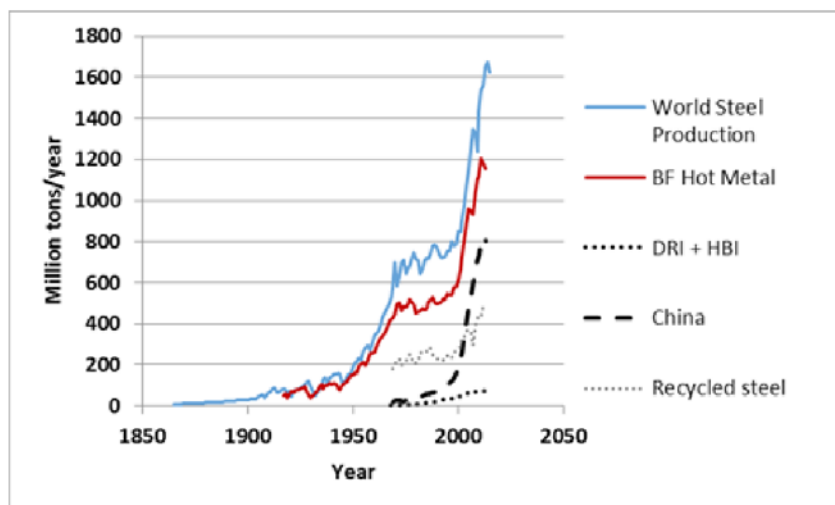


圖 2 同時表示：從 1860 年到 2015 年間，全球的鋼鐵產量、高爐鐵水、直接還原鐵、中國鋼鐵產量、回收廢鋼估計分數<sup>(1)</sup>。

hearth Process) 幾乎完全消失，目前採用占比僅剩 0.5%。2014 年全球粗鋼產量來到 16.7 億噸<sup>(1)</sup>，創下歷史新高紀錄。

## 二、發展概況

如圖 3 所示，依據一貫作業煉鋼廠及電弧爐煉鋼廠操作流程，本研究介紹鋼鐵冶煉主要技術發展概況，分別如以五大單元說明於下節：(1) 高爐煉鐵；(2) 轉爐煉鋼；(3) 電煉鋼；(4) 澆斗冶煉；(5) 連續鑄造。

### 1. 高爐煉鐵 (Blast Furnace Ironmaking)

高爐 (Blast Furnace, BF) 技術起源於中世紀，但是以木炭為基礎，直到十八世紀為止，當時人們從「礦物煤」中學到了焦炭，並使用在 BF 中<sup>(2)</sup>。即使在一開始，業界早就認知硫問題的存在，以及用於 BF 最佳焦炭特性的要求。這三個世紀以來，鋼鐵產業已做大量工作，方能達到目前技術水平。在十八世紀初，人們早知道，空氣在進高爐之前，需要先行加熱。從那時起，高爐系統已經強力發展，從而具有更高的熱效率、更高的鼓風溫度和壓力、以及使用氧氣進行空氣富集等功能。同時，高爐尺寸也從最早期的「微型爐 (Micro BF)」，至 1900 年初，開始製造生產 100 千噸/年、直徑 4-5 米的「迷你爐 (Mini BF)」，到目前，直徑 13-15 米、生產 3-4 百萬噸/年的「巨型爐 (Mega BF)」已經問世。

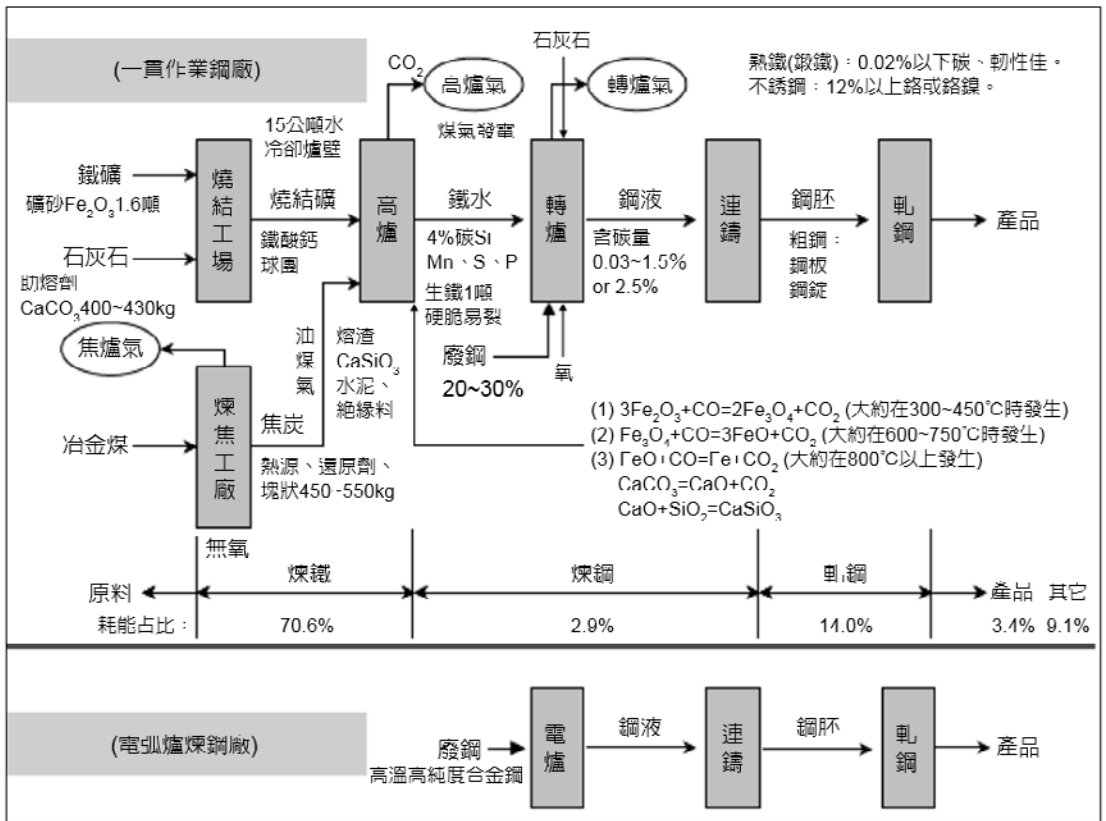


圖 3 一貫作業煉鋼廠與電弧爐煉鋼廠主要操作程序流程圖 (本研究自行整理)

煉鐵技術成功發展的另一項關鍵因素在於鐵原料的改進與處理，包括：使用富鐵礦石/濃縮物，利用團聚以燒結或顆粒化，設計特殊進料方式，藉此優化、平滑負載下降與還原過程，最後則是熔化、滲碳作業。由於鐵含量豐富，目前先進 BF 爐渣形成量相當少。例如，在過去，渣量可能超過 500 公斤/噸 HM(=Hot Metal)，有一陣子降到 300-200 公斤/噸 HM，目前在一些先進 BF 中，爐渣生成率僅剩 150 公斤/噸 HM。

經由程序控制，我們可以開發出更合乎現代化的 BF，其特色包括：監控過程狀態的複雜測量設備與先進模型的結合，藉此方便模擬、預測、控制等操作程序的進行。

一般 BF 效率的衡量，係以能源消耗為標竿。20 世紀 50 年代，典型 BF 的焦炭消耗量為 1000 公斤/噸 HM。今天的數字則在 500 至 450 公斤/噸 HM 之間。實際上，焦炭消耗量可以低更多，甚至達到 300 公斤/噸 HM，其餘則可經由風口注入熱煤粉來抵銷。改用「粉煤噴注 (Powdered Coal Injection, PCI)」的經濟原因在於替代昂貴的焦炭的使用，讓其量下降至 250kg/噸 HM，但仍能保持焦炭層間的積極作用，亦即，控制 BF 中氣流的均勻性<sup>(2)</sup>。

## 2. 轉爐煉鋼 (Converter Steelmaking)

在焦炭高爐技術開發後，整個鋼鐵生產率的瓶頸不在於煉鐵，而是富碳“生鐵”轉化為鋼料的煉鋼程序當中。包括攪拌在內的各種氧化爐處理效率實在不高。然當 Bessemer 於 19 世紀 50 年代開發了以空氣吹入底部的轉爐之後，鋼鐵產量方才大幅提升，如圖 1 所示。在 Bessemer 轉爐技術中，脫碳率以高於當代流程一個數量級的速率急遽增加。由於 Bessemer 轉爐內裝有酸性二氧化矽襯裡，因此無法將當時英國高爐常見的高磷鐵水精煉出所需鋼料。

當 S.G. Thomas 和 P.C. Gilchrist 在 1879 年成功開發人造石襯裡 (Doloma Lining)，並應用在工業後<sup>(3)</sup>，上述問題得以順利解決。因為熱金屬含有高達 2% 的磷，因此當時形成副產品的“Thomas 渣”時，具有甚高的磷含量 (約 5% 重量比) 且含有豐富石灰 (CaO)，所以可以當作優良肥料。當高磷鐵礦石被使用時，Thomas 轉爐因而擄獲不少市場訂單。

19 世紀，雖然氧氣在轉爐煉鋼中扮演的角色十分了然，但是當時並無經濟有效的方法來生產純氧。一般而言，將空氣吹入轉爐，會導致鋼中含氮量過高，這對鋼料品質產生不良影響。同時，大量氮氣具十分強大冷卻效果，從而降低 Bessemer 或 Thomas 轉爐中廢料熔化能力。這時，使用氧氣替代空氣是最理想的程序。在 Bessemer 之後，曾有不少人士嘗試將氧氣應用在轉爐當中，但是在底部或風口區域常有災難性的磨損發生。

二十世紀二三十年代，因為屬於經濟可行，大規模氧氣生產規模被建立，並大量應用在加工產業當中。然而，底部磨損問題仍然存在。最後，水冷超音速噴槍實施氧氣頂吹的發明解決此一問題。這項技術是在 20 世紀 40 年代後期開發，1952 年由林茨 (Linz) 成功引進產業界<sup>(3)</sup>。該方法因此稱為 LD (Linz-Donawitz) 或 BOP (Basic Oxygen Process)。

LD 技術在 20 世紀 60 年代迅速湧現，馬上取代了舊有底吹轉爐工藝。對於高磷熱金屬，舊的 Thomas 方法逐漸被許多頂部鼓風替代案所取代。B. Kalling 開發了具有氧槍的旋轉傾斜轉爐，並於 1956 年在瑞典 Domnarvret 安裝使用<sup>(3)</sup>。該獨創過程稱做卡爾多 (Kaldo) 工法。熔渣和金屬運動導致相 (Phases) 間密集的質量與熱能傳遞，從而實現了有效的脫磷作用。經由二次氧槍的使用，碳氧化形成的 CO 氣體絕大部分可被後燃燒成 CO<sub>2</sub>。由於後燃燒的實施，從而造成了特別好的熱能經濟性，使得 50% 以上的廢料使用率的達成<sup>(3)</sup>。雖然當時安裝了不少台的



Kaldo 轉爐，但是當基礎原料轉向低磷濃縮時，特殊頂吹轉爐需求逐漸消失，最後 Kaldo 轉爐在七十年代末就此不見。

1950 年代後期，針對高磷熱金屬，專家開發一些 LD 修正技術，如使用組合式氧-石灰注入的特殊噴槍，即所謂的 LD-AC (Linz-Donawitz-ARBED-CNRM) 及 OLP (Oxygen, Lime, Powder)<sup>(4)</sup>。它們的生存直到 20 世紀 80 年代為止。

1950 年代，在加拿大的 L'Air Liquid 試驗中，G. Savard 及 R. Lee 以高壓（超過 2760 kPa）的噴嘴設備，解決了氧氣底吹問題<sup>(5)</sup>。然而，最後的解決方案應是環形噴嘴，其中氧氣經由內管吹送，藉此保護/冷卻氣體，例如氧氣；另一方面，丙烷經過外管注入。歷史上第一台工業底吹氧氣轉爐於 1967 年的德國馬克西特 (Maxhütte) 投產<sup>(5)</sup>。該技術命名為 OBM (OxygenBottom-Maxhütte)。在美國，它被稱為 Q-BOP。根據統計，底吹轉爐使用比例約為轉爐總容量的 10%。另外，不銹鋼製側吹 AOD 轉爐 (Argon Oxygen Decarburization) 也採用類似同心噴嘴原理，其中，惰性氬氣當作周圍冷卻氣體，同時稀釋由脫碳反應所形成的 CO 氣體<sup>(6)</sup>。

OBM 使用經驗清楚地揭露出頂吹方法的主要缺點，亦即，由於氧氣噴射的弱攪拌效應，因此產生相當靜止的液浴，結果，上方爐渣和金屬浴都被過度氧化。事實上，將頂吹與底吹兩項技藝結合在一起是相當可取的作法。20 世紀 70 年代末到 80 年代初，許多組合式技術被開發，其中大多數是以惰性氣體底吹 LD 技術為基礎。今天，這些混合式工藝已成為大多數轉爐主流。與純粹頂吹式相比，組合式吹風具有下列優點：

- 使用強化熔融攪拌，提升吹風效率；
- 爐渣中含氧化鐵量降低，具有較佳鋼材產量；
- 降低鋼料最終含氧量，讓合金和鉛產量更高；
- 避免過熱“FeO”豐富爐渣的產生，從而增加耐火襯裡壽命；
- 由於更好的均勻性，從而提高成分及溫度的成功率；
- 較少熔渣飛濺及噴出。

表 1 收集各種轉爐煉鋼技術，從原始 LD 技術開始，然後採用惰性氣體攪拌方式，到進一步的 O<sub>2</sub> 頂部+O<sub>2</sub> 底部技術，以及純粹底吹技術等等，這些皆是各類型 LD 技術的綜整<sup>(7)</sup>。另外，表 1 包括：若干用於增加廢料熔融的幾乎沒有等離子體燃燒/加熱方法，以及用於不銹鋼製造的特殊轉爐技術。

### 3. 電煉鋼 (Electric Steelmaking)

「電弧爐 (Electric Arc Furnace, EAF)」在煉鋼中的應用始於 1889 年的 Paul Héroult<sup>(8)</sup>。20 世紀初，發電設施廣泛設置之際，EAF 適時出現。第一個 EAF 容量約 1 至 15 噸之間。該項新技術十分適用於以廢鋼為原料的鋼材生產。但是，EAF 有一個強悍的競爭對手，即 Open Hearth (平爐，西門子-馬丁) 方法，該工法也能夠經由燃料燃燒加熱，藉此熔融低溫進料。EAF 的特點在於：於特殊鋼材的生產過程中，能夠滿足高鐵合金的熔化，以及長時間精煉所需的高溫度與靈活性等要求。根據全球統計數據，直到 20 世紀 80 年代初，EAF 才超過 Open Hearth。

20 世紀 60 年代，隨著連續鑄造工藝的出現，EAF 因而具有另一項利基：它能成為微型工廠需要熔化程序，以及生產鋼筋與線材進而提供坯料的連鑄機。此一想法也同樣應用在帶鋼生

表 1 從各類文獻中所收集的各種轉爐技術<sup>(7)</sup>

|                                   | Process   | Developer                       | Top blowing    |                             | Bottom blowing |                             |                          |                         |                             |                 |      |      |       |
|-----------------------------------|-----------|---------------------------------|----------------|-----------------------------|----------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------|------|------|-------|
|                                   |           |                                 | O <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> +fine<br>CaO | O <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> +fine<br>CaO | Gaseous<br>hydro-carbons | Liquid<br>hydro-carbons | N <sub>2</sub> +/-<br>or Ar | CO <sub>2</sub> | Coke | Coal | Steam |
| Top blowing                       | LD        | Voest-Alpine                    | +              |                             |                |                             |                          |                         |                             |                 |      |      |       |
|                                   | LD-AC     | Arbed-CRM                       | +              | +                           |                |                             |                          |                         |                             |                 |      |      |       |
|                                   | AOB       | Ireland Steel/Union Carbide     | +              | O <sub>2</sub> +Ar          |                |                             |                          |                         |                             |                 |      |      |       |
|                                   | LD-S      | Voest-alpine                    | +              |                             |                |                             |                          | +                       |                             |                 |      |      |       |
| Top + bottom<br>blowing I         | LD-KG     | Kawasaki                        | +              |                             |                |                             |                          |                         |                             | +               |      |      |       |
|                                   | LD-AB     | Nippon-Kokan                    | +              |                             |                |                             |                          |                         |                             | +               |      |      |       |
|                                   | LD-BC     | CRM                             | +              |                             |                |                             |                          |                         |                             | +               |      |      |       |
|                                   | TBM       | Thyssen                         | +              |                             |                |                             |                          |                         |                             | +               |      |      |       |
|                                   | M-TBI     | Mannesmann                      | +              |                             |                |                             |                          |                         |                             | +               |      |      |       |
|                                   | LBE       | Arbed                           | +              |                             |                |                             |                          |                         |                             | +               |      |      |       |
|                                   | NK-CB     | Nippon-Kokan                    | +              |                             |                |                             |                          |                         |                             | +               |      |      |       |
|                                   | LD-CL     | Nippon-Kokan                    | +              |                             |                |                             |                          |                         |                             | +               |      |      |       |
|                                   | LD-OTB    | Kobe                            | +              |                             | (+)            |                             |                          |                         |                             | +               |      |      |       |
|                                   | LD-CB     | Nippon-Kokan                    | +              |                             | +              |                             |                          |                         |                             | +               | +    |      |       |
| Top + bottom<br>blowing II        | LD-STB    | Sumitomo                        | +              |                             | +              |                             |                          |                         |                             | +               | +    |      |       |
|                                   | LD-OB     | Nippon steel                    | +              |                             | +              |                             |                          | +                       |                             | +               |      |      |       |
| Top + bottom<br>blowing III       | LD-HC     | Maxhütte                        | +              | +                           | +              |                             | +                        |                         |                             | +               |      |      |       |
|                                   | K-OBM     | Klöckner                        | +              |                             | +              |                             | +                        | +                       |                             | +               |      |      |       |
|                                   | K-BOP     | Kawasaki                        | +              |                             |                |                             | +                        | +                       |                             | +               |      |      |       |
|                                   | OBM/Q-BOP | Maxhütte/ US-Steel              |                |                             | +              |                             | +                        | +                       |                             | +               |      |      |       |
| Bottom<br>blowing                 | LWS       | Creusot-Loire                   |                |                             |                |                             | +                        | +                       |                             | +               |      |      |       |
|                                   | KMS       | "                               |                |                             | +              |                             | +                        | +                       |                             |                 | +    | +    |       |
| Allothermal<br>processes          | KS        | "                               |                |                             | +              |                             | +                        | +                       |                             |                 |      | +    |       |
|                                   | Z-BOP     | Zapsib                          | +              |                             |                |                             |                          |                         |                             |                 | +    | +    |       |
| High alloy<br>steel<br>converting | AOD       | Union Carbide Lindé<br>Division | +              |                             | +              |                             |                          |                         |                             | +               |      |      |       |
|                                   | VOD(C)    | Witten (Thyssen)                | +              |                             |                |                             |                          |                         |                             |                 |      |      |       |
|                                   | CLU       | Uddeholm/ Creusot Loire         |                |                             | +              |                             |                          |                         |                             |                 |      |      | +     |
|                                   | K-OBM-S   | Maxhütte- Klöckner              | +              |                             |                |                             | +                        | +                       |                             |                 |      | +    |       |

產作業上。

20 世紀 60 年代，自從二次冶金（Secondary Metallurgy）在澆斗中出現後，立即改變了煉鋼的整體哲學，也就是說，煉鋼途徑因此分為兩路：在轉爐 / EAF 等爐中的主要煉鋼程序；以及，在澆斗中的二次煉鋼程序。此時，EAF 本身改造為僅用於熔融作用的單元。而另一個驅動力則是連鑄（Continuous Casting），它依次需要幾個熱量提供步驟。由於每一澆斗的鑄造時間只有 1 小時或更短，所以這對 EAF 可說是一項艱鉅挑戰。此際，超高功率（UHP）爐因此開發。然而，使用 UHP 會導致爐襯快速磨損。這個問題已由在上壁中安裝水冷板，以及採用泡沫渣工法，來加以解決。更重要的是，經由這些方式，冶煉時間可與鑄造時間因而無間配合。

EAF 技術發展進程如圖 4<sup>(9)</sup> 所示，我們看到“tap-to-tap（出鋼到出鋼）”時間已從 3 小時縮短到 45 分鐘。由於熔融能力增強、化學能源利用，亦即，氧燃料燃燒器使用與廢料預熱等功能，使得 EAF 電力消耗已從 630 kWh/t 下降到 350 kWh/t。根據報導，目前更低值更可小於 300 kWh/t。同時，電極消耗率也從 6.5 kg/t 下降到 1.5 kg/t。

#### 4. 澆斗冶煉（Ladle Metallurgy）

簡單說，轉爐內煉鋼程序就是一種氧化作用，最終目標在於去碳，另外目的則在於除磷。在一貫化簡單操作實務裡，首先將粗鋼，從轉爐倒入澆斗，並在鋼液中進行合金化，最後再把澆斗運到鑄造場。與轉爐不同的是，在澆斗的爐膛及電爐中，電加熱可以進一步冶煉粗鋼，亦即，粗鋼可在該爐中進行脫氧、脫硫、合金化等二次冶鍊。

起初，在轉爐內，氧化爐渣脫落，形成一種新的強鹼性“白”爐渣<sup>(10)</sup>。當然，這樣處理方式十分消耗時間。然後，再將“純化”鋼料倒入澆斗中，並轉移至鑄造區域。因此，澆斗起初只是一個沒有特殊處理程序的運輸集裝容器。

1970 年代，在電爐或平爐中生產鋼材，品質被進一步要求。這使得煉鋼策略完全改變。首先，粗鋼在主爐（轉爐，EAF）中製成，然後倒入澆斗，通常在澆倒期間，將同時實施主要的合金化程序，亦即，進行所謂的澆斗處理。這些處理程序含括：鋼材成分的調整、精煉、“清

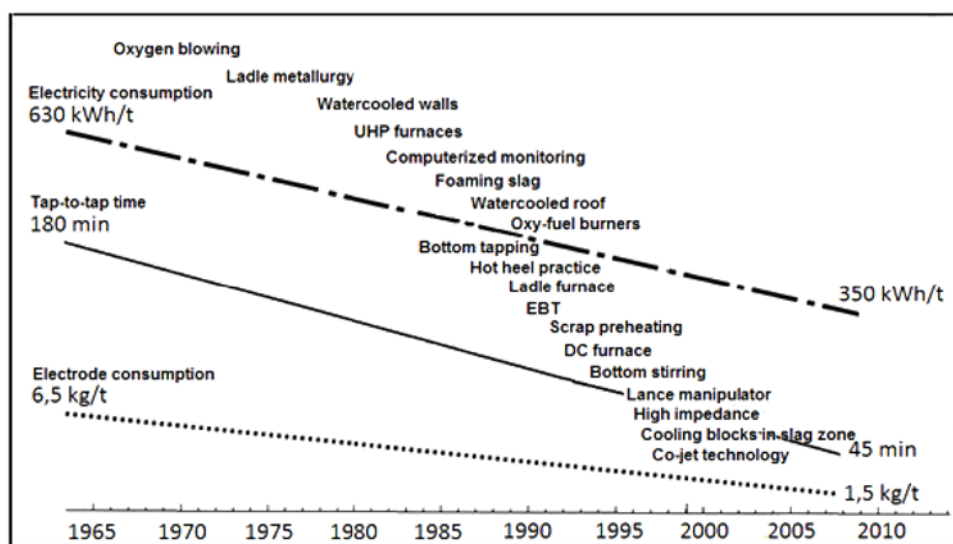


圖 4 自 1965 年以來 EAF 技術的發展<sup>(9)</sup>

洗”有害雜質，並在目標溫度下，進行鑄造程序。針對這些目的，單元工法、脫氧、脫硫、藉由真空處理 - 進行脫氣等過程被加入。另外，氣體沖洗或感應攪拌成為增強熔體運動、促進鋼液 / 爐渣反應、去除脫氧產物、均化等常用方法<sup>(10)</sup>。為了加熱和控制溫度，鋼熔體電弧加熱（如澆斗爐）或化學加熱（如 CAS-OB）被應用。在澆斗中進行上述處理，鋼材達成所需組成及清潔度之後，其在隨後鑄造過程中必須持續保持或甚至改善。鑄造期間，鋼液必須防止再次氧化，亦即必須避免與周圍大氣接觸。所以，在現代連鑄工法裡，鋼液從澆斗經由漏斗倒入模具期間，所有鋼液流動必須為惰性氣體、保護爐渣或氣密結構等措施所防護。

總之，二次精煉過程係由若干單元所構成，其中最常見者不外：脫氧、脫硫、脫氣（去除氫氣，甚至氮氣）、脫碳等等，直到低碳或超低碳含量境界的達到。很自然地，不同單元過程的需求，取決於鋼種及其要求的不同而異。此外，合金化、組成調整、加熱、溫度控制等，也可視為二次精煉過中一些不可或缺的單元。

針對近幾十年來相關二次冶金技術的進展，我們總結出下列若干重要成果。關於要求“極度純度”的特殊鋼種，最低雜質含量可被定義，這些雜質種類包括：H, N, O, S, P, C 等。如上所述，取決於鋼品種類，這些元素含量百分比將是關鍵之所在。在“IF (Interstitial Free, 間隙自由) 鋼”中，其特徵是具有低含量的氫、氮、碳。在“ULC (Ultra-Low-Carbon, 超低碳) 鋼”中，主要成分標竿在於碳含量。

我們以在過去五十年中，鋼中雜質含量可達到的程度，作為二次煉鋼技術發展進度的具體說明。在表 2 中，部分數據來自文獻收集，部分數據則由作者估計<sup>(10-11)</sup>。特別是在預測到 2020 年的未來數據時，必須牢記熱力學上的限制，從而避免過度簡單的線性預測盲點。其中，二次煉鋼基本技術的進展表示在表 2 下方，相關技術發展里程碑包括：真空處理的出現、真空 - 吹氧的組合、電弧澆斗中的加熱、使用鋁與氧氣放熱氧化反應的化學加熱等。在 1960-70 年代，包括真空處理及在同一單元實施加熱的混合方法已有建立。如今，分別用於真空處理與加熱的分離式單元則比較常見。

表 2 鋼中雜質可達到的進度，ppm<sup>(10-15)</sup>

|                | 1960                                                                                                               | 1985 | 2010    | 未來  |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|---------|-----|
| 氧 (Oxygen)     | 30                                                                                                                 | 15   | 10 (16) | 3-5 |
| 碳 (Carbon)     | 250                                                                                                                | 50   | 15      | 10  |
| 磷 (Phosphorus) | 300                                                                                                                | 100  | 50      | 30  |
| 硫 (Sulphur)    | 300                                                                                                                | 30   | 10      | <10 |
| 氮 (Nitrogen)   | 100                                                                                                                | 50   | 30      | 20  |
| 氫 (Hydrogen)   | 6                                                                                                                  | 3    | 1       | <1  |
| 二次冶金相關技術進展     | → 真空：RH/DH/TD → VOD/RH-OB → OMVR*<br>→ 加熱：電弧澆斗 / 化學加熱 → → → { OMVR +<br>→ 混合 (Asea-SKF) / Finkl/VAD → → → Heating} |      |         |     |

\* Optimized Mixing Vacuum Reactor



“清潔 (Cleanliness)” 是現代鋼鐵另一項特質，經常被討論到。基本上，“清潔”有一部分可在線上衡量，但是更具體的後期監測則是必須的。通常，“清潔鋼”相關於少量的非金屬夾雜物，特別是氧化物，但也可以涉及其它夾雜物，如硫化物、氮化物、碳化物、碳氮化物。該“清潔”標準不僅是夾雜物的質量分數，同時也包含鋼料中夾雜物的類型、尺寸、形狀、分佈。最後，夾雜物的物理性質及其對鋼性能的影響也是清潔度的定義。

有幾種技術可以用來表徵鋼料中夾雜物的含有情況，如光學暨掃描電子顯微鏡、抽取技術、超音測試等方法，其等可以對液態鋼、固體錠、滾軋半成品、最終產品等進行樣品檢測。

就總氧含量 ( $O_{tot}$ ) 來講，鋼清潔度的總體進展如圖 5 所示<sup>(10-15)</sup>。直到 20 世紀 60 年代，最高要求標準等級鋼，如滾珠軸承鋼，可直接由酸性敞口平爐來生產。其中，以 Si, Mn, C 為基礎的脫氧程序，讓  $O_{tot}$  往往超過 40ppm。實際上，鋼料中含有許多夾雜物，但基本上是相對無害的。

到了 20 世紀 80 年代，當真空技術及澆斗爐變成可用時， $O_{tot}$  含量立即減少一半。為了加強脫氧能力，在實務上人們改成以鋁脫氧，其次業界對於夾雜物也實施了高效率去除措施。然而，由於鋼中低溶解氧 [O] 和高溶解鋁 [Al] 的緣故，從而引發另一嚴重缺失，即在澆斗處理與鑄造過程中，來自空氣、爐渣和耐火材料中的成分容易造成再氧化。產業近期致力於這些不利影響因素的消除。在下面章節中，我們會進一步討論到這個問題。

## 5. 連續鑄造 (Continuous Casting)

連鑄是煉鋼與軋製之間的重要連接過程。早在 1856 年，亨利·貝斯邁爾 (Henry Bessemer) 就提出了雙軋施工法，但是直到 20 世紀 60 年代之後，該項技藝才在鋼鐵鑄造業中普遍流行<sup>(16)</sup>。到了 20 世紀 80 年代中期，連鑄數量超越常規鑄錠。與鑄錠相比，連鑄具有許多優點：更好的產量、改進的鑄造結構與均勻性、顯著節省能源與勞動力等等。今天，全球有超過 96% 的鋼材是由連鑄工法製成，範圍含括大多數鋼種及各種尺寸鋼料。鑄造和凝固現象此處

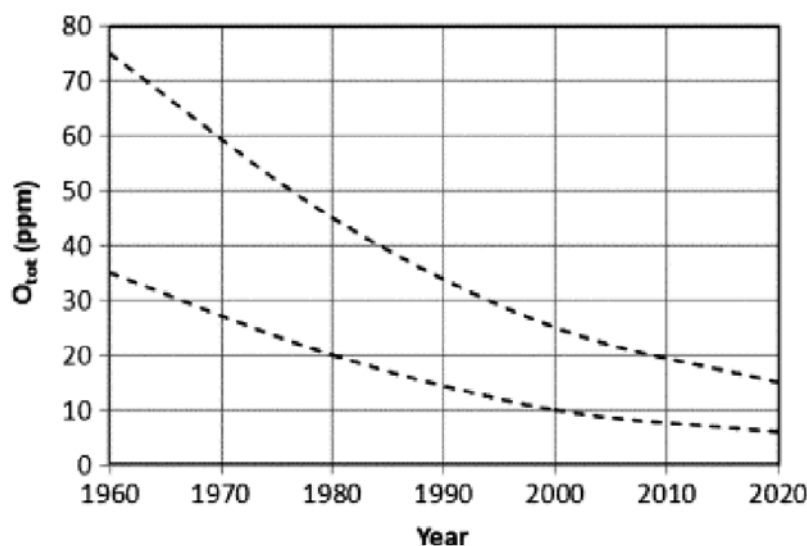


圖 5 自 1960 年以來，“高級鋼”中總氧含量 ( $O_{tot}$ ) 的減少狀況。該圖為半示意圖，數據來自文獻<sup>(10-15)</sup>。

並不討論，我們將重點擺在“清潔鑄造”。

在現代鑄造業中，鋼液從澆斗倒入漏斗，再從漏斗引入模具。最初，漏斗的作用是一個“儲庫和分配器”，其將液態鋼，從澆斗倒入系列式連鑄機的諸模具當中。最近，“主動漏斗”的潛力被充分發揮，亦即，其中鋼鐵溫度和化學控制功能從而強化。由於鋼鐵清潔度被認為是當今重要課題，因此漏斗成為從鋼液中去除夾雜物的一項利器，其能夠有效抑制鋼鐵質量的降低與防止最常見大型夾雜物的出現。

隨著清潔鋼 IISI 研究文獻的發表<sup>(15)</sup>，以及 Sahai 及 Emi 關於漏斗技術與清潔鋼生產書籍<sup>(12)</sup>的出版，漏斗設計、操作技術等演進如火如荼展開，非但促進夾雜物的去除，同時也顯著保護鋼熔體，免受再氧化。這些措施包括：澆斗和漏斗、漏斗和模具之間圍護系統的建立，以及漏斗和模具中爐渣的使用。另外一種方法是裝有惰性氣體的漏斗。然而，在高速生產率下，對於高難度鋼種的生產，尤其在各項鑄造實施程序的轉換期間，如連鑄循序開始、澆斗更換、鑄造速度改變等時期，外源性大型夾雜物的發生<sup>(12)</sup>還是沒有辦法消除。

由於漏斗是最後一項可顯著操作冶金反應的關鍵器具，所以漏斗覆渣在控制鑄造產品質量上，扮演十分重要的角色。如果鋼料與漏斗渣的相互作用被優化，則鋼鐵品質可望保持與提升。基本上，適當的漏斗渣應該能夠吸收脫氧、再氧化等產物。同時，漏斗渣應該限制偶而來自澆斗等大型夾雜物的侵入<sup>(17)</sup>。

### 三、未來展望

鋼鐵消費與經濟發展息息相關。況且，由於發展中國家的進步，其等基礎設施、居宅、交通、運輸等各方面的急遽擴大，鋼鐵消費的一定程度增長，將是不爭的事實。依據保守估計，到 2050 年，全球鋼鐵消費將增加 50%，這意味著每年將有 25 億噸鋼鐵產出。這種產量擴張趨勢與舒緩全球氣候變遷、削減二氧化碳排放等目標必須相互配合。因此，開發新技術、新能源，從使用化石能源到減少碳及無碳能源形式的節能與轉型，實為當今與未來鋼鐵產業發展的主題<sup>(18)</sup>。

鋼鐵是人類主要中心材料，然而，必須在競爭發展下，才能保持既有地位。當以更便宜的價格瞄準更好的品質時，這些發展過程中的挑戰亦隨之而來。雖然，現代電腦科技、數位化、程序監控、先進過程控制系統等科技，是未來鋼鐵生產過程的重要運用工具。然而，光靠“大數據”並不能解決冶金問題，因為精於物理、化學定律與學理限制的專家仍是不可或缺的關鍵者。“清潔鋼鐵”就是一個很好例子，此議題一定是未來關注焦點，甚至是未來業界實務上追求的目標。

### 四、結 論

目前大多數煉鐵和煉鋼技術都可追溯到二十世紀中期所開發的工法與技藝。然而，從那個時代之後，另外許多重大技術發展進度已被取得。在本文綜論中，我們對高爐技術、轉爐加工、電弧爐煉鋼等主要成果進行調查。接著，澆斗冶煉與連鑄工法於現代煉鋼技術所扮演的角色，則聚焦於“清潔鋼鐵”的生產過程。最後，針對 2050 年鋼鐵產業前景展望，我們將二氧化碳排放大幅減量列為首要追求目標。

## 參考文獻

- (1) <http://www.worldsteel.org/statistics/statistics-archive.html>
- (2) Y. Yang, K. Raipala, L. Holappa, Ironmaking: in S. Seetharaman, (Ed.), Treatise on Process Metallurgy, Vol.3: Industrial Processes, Part 1 Ferrous Process Metallurgy; L. Holappa, (Ed.), 2-88, 2013.
- (3) R.F. Barracglough, Steelmaking 1850-1900, 320, The institute of Metals, London, 1990.
- (4) E.M. Michaelis, Basic oxygen steelmaking - a new technology emerges, Proceedings, The Metals Society, London, 1979, 1-10.
- (5) P.J. Mackey, J.K. Brimacombe, Solid-Liquid and Gas-Liquid Interactions in a Bath-smelting Reactor. Proc. Savard/Lee International Symposium on Bath Smelting, The Met. Society of AIME, Warrendale, PA, 1992, 353-375.
- (6) W.A. Krivsky, The Linde argon-oxygen process for stainless steel; A case study of major innovation in a basic industry. Metall. Trans., 4, 1973, 1439-1447.
- (7) H. Jalkanen, L. Holappa, Converter Steelmaking; in S. Seetharaman, (Ed.), Treatise on Process Metallurgy, Vol.3: Industrial Processes, Part 1 Ferrous Process Metallurgy; L. Holappa, (Ed.), 2013, pp. 223-270.
- (8) H.M. Cobb (Ed.), Dictionary of Metals, Appendix I: Metals History Timeline, ASM International, Materials Park, OH, USA 2012, 304.
- (9) H.-B. Lungen, M. Peters, P. Schmöle, Measures to increase efficiency and to reduce CO<sub>2</sub> emissions in iron and steelmaking in Germany and Europe. AISTech 2012 Proceedings, 109-119.
- (10) L. Holappa, Secondary Steelmaking; in S. Seetharaman, (Ed.), Treatise on Process Metallurgy, Vol.3: Industrial Processes, Part 1 Ferrous Process Metallurgy; L. Holappa, 2005, pp. 301-346.
- (11) L. Holappa; On Physico-Chemical and Technical Limits in Clean Steel production Steel research, 81, 10, 2010, 869-874.
- (12) Y. Sahai, T. Emi, Tundish Technology for Clean Steel Production, World Scientific Publishing Co. Singapore, 2008, p. 316.
- (13) L. Zhang, B. Thomas, State of the art in the control of inclusions during steel ingot casting, Met. Trans. 37B, 10, 2006, 733-761.
- (14) R. Fandrich, H.-B. Lungen, C.-D. Wuppermann, Actual review on secondary metallurgy, Rev. Met. Paris, 105, 7-8, 2008, 364-374.
- (15) K. Wünnenberg, S. Millman, M. Nadif, C. Marique, M. Sumida, H.-J. Weddige, IISI Study on Clean Steel, IISI Techco 2004, p. 503.
- (16) S. Louhenkilpi, Continuous Casting; in S. Seetharaman, (Ed.), Treatise on Process Metallurgy, v. 3: Industrial Processes, Part 1 Ferrous Process Metallurgy; L. Holappa (Ed.), 373-434.
- (17) L. Holappa, M. Kekkonen, S. Louhenkilpi, R. Hagemann, C. Schroder, P. Scheller, Active Tundish Slag. Steel Research Int., 84, 2013, 638.
- (18) L. Holappa, Toward Low Carbon Metallurgy in Iron and Steel Making, Proceedings of the Guthrie Honorary Symposium, June 6-9, 2011, Montreal, 248-254.

✱

## 廣告索引 Ad. Index

鑛冶 · 第六十一卷 · 第四期 December 2017

|                     |                       |
|---------------------|-----------------------|
| 中國鋼鐵股份有限公司..... 封底  | 台灣保來得股份有限公司..... 1    |
| 台灣電力公司..... 封面裡     | 光和耐火工業股份有限公司..... 144 |
| 台灣中油股份有限公司..... 封底裡 |                       |