

如何生產優良鑄鐵

How to Pour Good Cast Iron

沈 國 文 Shen, Kou-Wen

1. This article presents an introduction to modern process for manufacturing good cast iron.
2. The production of quality cast iron in Taiwan is [difficult because of the poor quality of local coke & pig iron.
3. The proposed improved Cupola using hot blast and O-ring opening tuyere provides better control NOC for pouring good castings.

緒 言

國家經濟建設如動力、農業、鑛業、化工業、紡織業、水利土木工程，以及交通運輸事業，均有賴機械工業之發達。機械工業之於國家，尤人手之於人。第二次世界大戰以來，生產技術迅速進步，金屬材料更日新月異。選用適當材料，製造機器配件，發揮機械工業之最大效能。

鑄鐵熔解容易，鑄造性良，成品加工切削性優，且具相當強度，自古為人用於生產機件；其耐磨、抗壓、及減振性佳，至今仍為製造機械配件之主要材料，更因熔解法之進步，鑄鐵之機械性能改善，機器之可靠性提高。例如 7 噸重之曲軸同為鑄鐵鑄成，其張力強度高達 65,000~85,000 psi；伸長率為 13.5~4.5%；硬度為 228~163 BHN；彈性係數為 21,500,000~23,500,000 psi；最小降伏強度亦達 45,000 psi。

優良鑄鐵之發展過程

1916年 Lauze 氏生產珠層組織鑄鐵，其含炭、矽量較諸普通鑄鐵為低，C 2.7~3.3%，Si 0.7~1.3%，冷卻速度需要滯緩，強度為 25~30 kg/mm²，硬度為 170 BHN，當時驚異非常，終以製鑄過程難以控制，未能推廣。1920年 Emmel 氏原料中多用廢鋼屑，減少鐵水中黑鉛含量，生產高強鑄鐵，然因需用大量廢鋼，普通熔鐵爐不易熔解，所成鐵水流動性不佳，凝固極速，鑄件品質較難控制，未能普及，但已為日後生產強韌鑄鐵奠立基礎。1923年 Meehan 氏應用反射爐、電爐、及熔銑爐熔化低炭低矽之鐵水，引用矽化鈣接種，生產強韌之灰口鑄鐵，為今日「米漢納

」鑄鐵之濫觴。1925年 Piwowarsky 氏於大氣中 1,500°C 以上高溫下熔解鐵水，由於過熱作用，黑鉛核消失而得分布均勻細微之共晶黑鉛組織，同屬強韌鑄鐵。1947年 Morrogh 氏於過共晶鐵水中，添加 0.02% Ce 後，發現鑄鐵中產生球狀黑鉛組織；與 1949 Gagnebin 氏於鐵水中添加 Mg 後，同得球狀黑鉛組織之鑄鐵。此與可鍛鑄鐵內之同火塊狀黑鉛相似，理化性質大為改善，用途增廣，通稱「韌性鑄鐵」。如前已述生產強韌鑄鐵之方法有(1)減低炭、矽含量，(2)多用鋼屑原料，(3)高溫熔解，及(4)接種處理。今日生產優良鑄鐵之方法，多引用上述方法中之一種或數種。

如何改良鑄鐵

影響鑄鐵品質之主要元素——炭，其黑鉛比重小，2.10~2.30，引張強度低，僅 2kg/mm²。設若鑄鐵含炭量為 3%，若形成黑鉛，其所佔體積約為 10%。此等黑鉛混雜鑄鐵組織中，使鑄鐵強度無法增高。更因黑鉛之形狀，排列及與作用力之方向相對位置，所受金相切痕 (Metallurgical notch) 影響，效果不一，有待吾人研究。普通改良方法，為黑鉛含量及其性質，以及鑄鐵組織之控制。

1. 減少黑鉛含量：減少鑄鐵含炭量，配合屑鋼，生產合金鑄鐵，以及熱處理鑄件。
2. 改良黑鉛之形狀、大小、及其分布情形：配合鋼屑，高溫熔解，造渣精煉，添加合金、鐵水接種，脫氧及吹送有用氣體鐵水內。球狀黑鉛最為理想。
3. 選料慎重，減少不純物之含量，避免導入不良因子，精煉熔解。

4. 添加合金，及熱處理改良鑄鐵形成珠層組織。

臺灣鑄鐵生產之現況

臺灣地處亞熱帶，四面濱海，為海洋性氣候。全年平均氣溫達 22°C ，空氣濕度很高達 81%。臺灣鐵鑛瘠貧，不合提煉標準。進口鐵鑛砂煉鐵者，為數亦少。民間鑄件原料，悉賴廢鐵舊品，或先熔成錠塊，再為熔化。其燃料原油缺如，出產原煤品質極差，其中水分、灰分、及硫分含量均高，揮發物質又多，固定炭分相對地低減。水洗煉焦，煤質仍差，不符冶金鑄焦之規格，為臺灣不能生產優良鑄鐵之主因。

影響熔銑爐鑄鐵品質之諸因素

1. 水分：——設空氣 72°F 時，飽和濕度時所含水分為 $19.44\text{gm}/\text{m}^3$ ，熔化 1 噸鐵水，約需空氣 850Nm^3 ，則送入爐中水分即達 $16,524\text{gm}$ ，或 16.524kg 。每 1kg 水分蒸發需耗焦炭 0.1kg 。水蒸氣升高達爐溫同需另吸熱量。臺灣熔鐵宜於濕度低之晴天，乾燥季節作業，較為有利。若能進爐空氣經過脫濕處理，效果更佳。焦炭水分含量，美國規格為 2.5~3.0%，雨水淋濕者可高達 15%，經久乾燥後仍含 5~8%。炭中水分過量時，除了水分蒸發耗熱，迫使爐溫不高，且不能與 CO_2 氣發生反應，形成 CO 氣。臺灣煉焦溫度應設法提高， $800^{\circ}\sim 1,000^{\circ}\text{C}$ 為鑄焦形成之溫度。煉焦出爐後，噴水冷卻，應設法控制成焦水分含量低於 3%。運搬車輛應張車蓬，勿使水濕。貯存場所，宜避雨水。如此可提高鑄鐵品質，否則大量水分進入爐中，鑄件容易發生氣孔、冷硬表面、鐵水溫度低下，流動性惡、折出不良異狀黑鉛組織。

2. 熱風：——利用爐頂廢氣之潛熱、預熱空氣送入爐中。可用次質之燃料，得到高溫鐵水，且可節省焦炭用量。由於空氣加熱後，體積膨脹， $\mu=\mu_0(1+dt)$ ， $\mu/\mu_0=(1+1/273t)$ ， $\mu/\mu_0=1+11/273t$ ，通風阻力因之增大，爐中進入空氣量減少，故需應用容量較大或送風壓力較高之送風機。較普通冷風所需動力為大。應用熱風之效果，他如第一次出鐵水之溫度高，作業全程中鐵水溫度高低差小，熔解速度增加，單位時間內鐵水生產量增加，因應用濕度高之空氣所生不良影響減少，鋼料可以多加，鐵水吸炭能力增加，含硫量降低，流動性良，成分均一，氧化現象較少，矽、錳元素熔失率小，石灰石需投量低，爐內架橋現象不易發生，作業容易控制，廢品率下降。

3. 平衡送風：——「米漢納」熔銑爐主要特色，

係平衡送風，風量及爐況可以控制，爐內無過熱及過冷不均現象，爐壁與爐中心風量相差甚微，其風口設計要求嚴格，作業期中如何避免爐渣堵塞，極為重要。筆者採用環式風口送風，爐內溫度分布均勻，從無爐渣阻礙風口之現象發生，爐壁與爐心風量近似，送風均衡，阻力低而平均爐內溫度高，過熱帶 (Superheating zone) 增高，鐵水溫度高，流動性增加，氧化物及矽化物減少，可用臺灣次質焦炭燃料。又送風量增加，燃燒速度加快，爐內發熱量增加，過熱帶內 CO_2 氣增加，上升速度同時增大，與炭還元反應不充分，但因過熱帶上升，爐內溫度增高，有促進還元反應，抵銷因 CO_2 流速增大之不良影響。如果送風過量，爐內溫度不能上升，而 CO_2 流速又大，向上溫度逐漸降低，至爐溫 $1,000^{\circ}\text{C}$ 以下時，即行停止還元反應，爐頂廢氣中 CO_2 量增多，所出鐵水溫度低下，且有過氧化之現象發生。臺灣煤質差，送風量均嫌過低，風口又無規格可言。

4. 焦炭：——焦炭之孔隙率美國規格為 41~55%，孔隙率小者，落下強度高，反應性低，耐壓而適於煉鐵。反之焦炭反應性高者，未達過熱帶之前，其中炭分即與 CO_2 反應，多為 CO_2 所吸收發生 CO 氣體，爐內燃燒溫度不高。故反應性高之焦炭過熱帶區域狹小，熔落鐵水滴過高溫部份所經路程極短，所出鐵水溫度低下。一般言之，不能生產優良鑄鐵。焦炭塊小，反應速度大，而大塊焦炭之表面積小，反應性小。又炭原子配列近似黑鉛者，反應性亦小。發熱量大者較為有利。焦炭塊尺寸以熔銑爐之內徑之 $1/8\sim 1/10$ 為最好，爐壁與爐心情況相似。普通焦炭大小，宜大於 2 吋，小於 2 吋者不應超過 2%。臺灣生產焦炭煉焦溫度低、揮發分高、孔隙率大。工廠喜用小塊焦炭，或以其熔銑爐過小，其燃燒反應迅速，不能生產優良鑄鐵。

5. 底炭高度：——熔銑爐中底炭之高度，普通約為爐之內徑 1.7 倍，高過風口 $1,100\sim 1,300\text{mm}$ 。筆者工廠採用 $1,200\text{mm}$ 。如果底炭過高，影響加料容量及預熱時間，爐解速度減小，鐵水溫度低下，爐渣生成量增多，操作費時，甚不經濟。他如底炭過低，爐中開始送風後，底炭燃燒迅速，加料預熱不夠充分，爐內溫度低下，過熱帶下降，鐵水溫度低下，於 CO_2 區域內吸受 O_2 增加，品質不良。追加焦炭量應等於底炭燃燒速度，方可維持過熱帶之位置不變，爐況一定。過熱帶之幅度增大，熔解鐵水滴過高溫地帶經過時間較久，鐵水溫度因之增高。設若追加焦炭，

不够充分，底炭燃燒速度較熔解速度為快，過熱帶逐漸下降，吸熱熔解鐵水，還元帶溫度低下，還元反應受阻，CO 氣體分布減少，鐵水容易氧化，出湯溫度亦低。焦炭之燃燒速度與其性質及爐內送風量之多少，關係極大。臺灣工廠多因每次鑄件有限，連續作業時間不久，為了經濟燃料，底炭添加高度較低，鐵水溫度不能提高，無法生產優良鑄鐵。

6. 加料：——加料之前，應慎重選擇，許多不良物質添加後，雖經多次熔化，仍無法去除此等不良影響，所謂「鑄鐵遺傳性」。鋼料均會淨化精煉，為害較少。故高級優良鑄鐵生產，加料中鋼屑均在 60 % 以上，或用其他高級銑鐵原料。鋼屑銹蝕過度，常引起鐵水氧化性，爐磚及造渣材料消耗量增多。鋼屑過於細小，常使爐況變劣，發生堵塞架橋現象。又為降低鐵水中硫分，常可加燒碱或電石爐內，但有損爐磚，由於爐溫較低，有時脫硫作用並不充分，若由風口送入爐內過熱帶，則與鐵水反應確實而有效。普通加料鐵塊不宜超過爐之內徑 $\frac{1}{6}$ ，過大時熔解速度低下，過熱帶下降，鐵水溫度低，鑄件不良。應將鋼鐵原料，依其大小，按其含分，分類備用。臺灣工廠由於爐溫不高，原料多用小塊生鐵，資金不足，更無貯料分類之舉，不易生產良質鑄件。

7. 爐底：——爐底過淺，鐵水容量較少，出鐵水時間短暫，鐵水與底炭作用時間縮短，吸受炭中不良物質因之減低，所得鐵水品質較純，溫度較高。筆者工廠採用淺爐底外，另搗鹽基性之白雲石粉鋪於爐底表面，期能使鐵水中含硫量減低，生產高級鑄鐵。設如澆鑄大件時，可以接連前爐，增大爐內鐵水容量，且免燃料不良影響之侵入。臺灣工廠熔鐵爐過小，為了多容鐵水，爐底過深，生產鑄鐵品質較次。

8. 接種處理：——熔融鐵水中投入其他元素或合金後，即行澆鑄，可得優良顯微鏡組織之鑄件，機械性質同時向上。解釋此一現象之學說很多，茲述於后。

a. 矽酸鹽微核說：添加矽鐵，或矽粉後，形成超顯微鏡之原子雲群，鐵水凝固時，以此等為核，形成 A 型片狀黑鉛。

b. 氣體作用說：接種劑大都同屬脫氧劑，與氧結合後而去除鐵水中氧氣，惹起組織變化，氮氣及氫氣均可逸出，使黑鉛重行均勻分佈。

c. 過冷說：D 型及 E 型黑鉛及其他異型黑鉛，均由鐵水凝固時過冷所致。接種後可防鐵水過冷，生成均勻 A 型片狀黑鉛。

d. 黑鉛核說：鐵水中黑鉛微粉於凝固之時，以其等為核，而增長形成片狀黑鉛，矽鐵或矽粉接種後，部份矽鐵發生變化，形成細微之黑鉛核。高溫熔解時，黑鉛核消失，但因低炭量鐵水較高炭鐵水所發生之黑鉛數核為少，故仍會發生 D 型及 E 型黑鉛。

e. 炭化物安定說：接種後可使炭化物安定性發生變化，生成超微細片狀黑鉛。由炭化物分解後所生成黑鉛核之大小，影響次後生成黑鉛之形狀及大小。此與接種後可減少炭化物及冷硬發生之趨向，頗為吻合。

f. 表面張力說：接種後黑鉛獲得吸着金屬能力之物質，而使鐵水表面張力消失，影響黑鉛之形狀及大小。

g. 同期凝固說 (Synchronous Solidification)：筆者認為接種係一種化學方法破壞黑鉛連續組織之發生，與利用機械震動方法可得微粒組織鑄件之原理相似，因之鐵水不受夾雜物黑鉛之影響，傳熱系統完整，鐵水中心溫度與周圍之熱傾度 (heat gradient) 小，結晶凝固同時，單位時間內放出全部潛熱，鑄件不生冷硬表層，內部偏析少，又無質量效果之影響。

以上諸說均未能證明，有待學者研究。接種劑之種類繁多，而臺灣工廠稻草灰習用已久。其他接種劑常用者列舉於后：

矽鐵、錳鐵、鉻鐵、矽化鈣 (CaSi_2)、炭化鈣 (CaC_2)、石墨粉、鋁粉、鎂粉、鈦粉、軋鋼氧化鐵皮、氧化鎂、稀土金屬氧化物、矽鈦合金、矽鉻合金、硼素、碲素、Si-Mn-Zr (SMZ)、Ca-Si-Ti (Graphidox)、Ni-Si (Nisiloy) 以及氣體 CO_2 及 N_2 等。筆者工廠曾試用氮氰化鈣 (CaCN_2)、氯化鈉、氯化鎂以及所有之滲炭劑用作接種劑，均得良好之結果，切片卷曲，粒度細微。接種劑之研究，前途遠大，有待吾人繼續研究。

改良熔銑爐一列

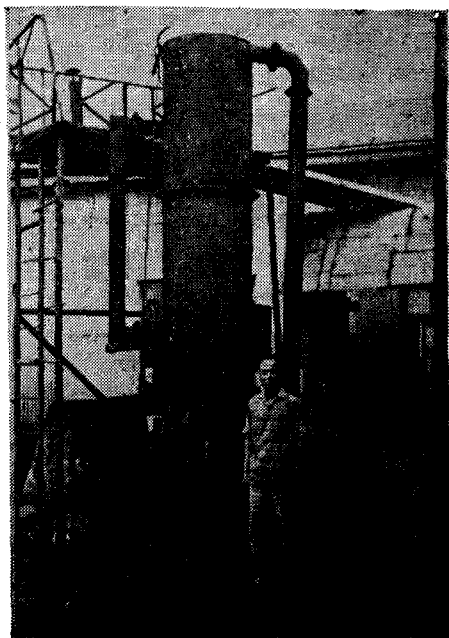
筆者依據上述各種理論，設計改良熔銑爐一式，容量為 1ton/hr，爐內徑 $D=20\frac{1}{2}''\phi$ ，有效高度 $H=96\frac{1}{2}''$ ，有效高度與爐徑比 $H/D=4.7$ ，風口面積 $A=330$ 平方吋，風口斷面積 $=\pi D \times 1''=64.4$ 平方吋，風口比 $A/a=\frac{330}{64.4}=5.1$ ，風口至爐底深度 $h=21''$ ，送風管直徑 $d=5''\phi$ ，風箱縱斷面為 $6'' \times 20''$ ，送風機翼輪為 $15''\phi$ ，送風機馬力

5HP，轉速3,460 r.p.m.，兩組送風機串聯，形成段送風機（two-stage blower），增強風壓。爐況可由作業後爐壁侵蝕情形推斷，由圖可知過熱帶位置升高而幅廣，鐵水高溫，容易生產優良鑄鐵，上部爐之預熱部份係用 $\frac{1}{8}$ " 鋼板製成，經久耐用，從無氧化現象，可以推知爐頂廢氣中 CO 含分極高，符合生產優良鑄鐵之條件。燃料仍採用臺灣之次質鑄焦，熱風溫度為 200~250°F，燃料節省 20~30%，適合臺灣工廠採用。熔銑爐生產鐵水，尤如母雞生蛋，飼料固屬重要，而雞種好生蛋率高，似為定則，優良之熔銑爐方可生產優良之鑄鐵，為不易之理也。國外每一改良熔銑爐發明後，政府即行獎勵，努力推廣，大量創設，以利推行！

生產高級鑄鐵之其他熔爐



2組5HP鼓風機串聯全景



1-順改良熔銑爐全貌

國外利用電爐、反射爐、熔銑爐或利用熔銑爐與電爐組合、或熔銑爐與反射爐、或反射爐與電爐二重熔煉鐵水，生產高級鑄鐵。目前臺灣電爐用於煉鋼，反射爐缺少，生產優良鑄鐵，似可利用本文所述之改良熔銑爐。筆者工廠由於工作需要，自行設計之反射爐及坩堝爐用以生產鑄鐵，發現高溫下熔失原料中之炭量，所得低炭鐵水性質優良，鑄件為珠層組織，片狀黑鉛屬於A型，切片卷曲富有韌性。如選料慎重，利用坩堝熔解，不與燃料接觸，同可生產優良鑄鐵。

後 記

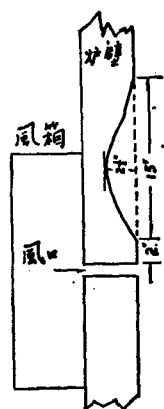
筆者參加石門水庫工作，有此珍貴之機會，良師益友之鼓勵，美國佛州大學金相研究所 Dr. Guy 教授百忙之中，代作之金相組織圖以及引用文獻之國外學者，特此致謝！



爐內環式送風口全景



石門水庫克難之加料手吊車遠景



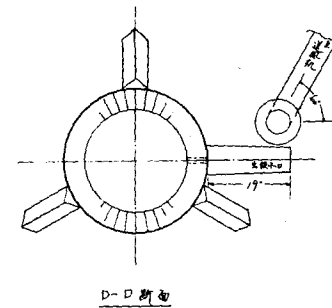
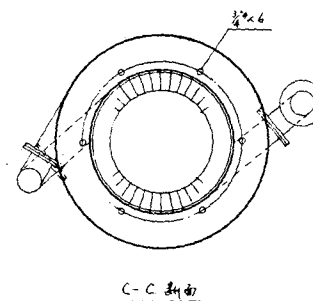
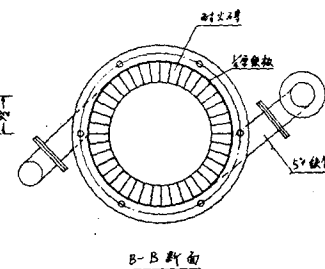
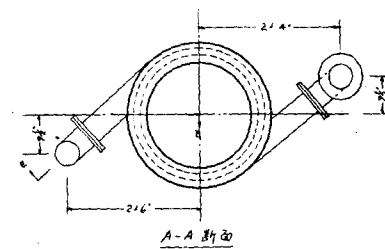
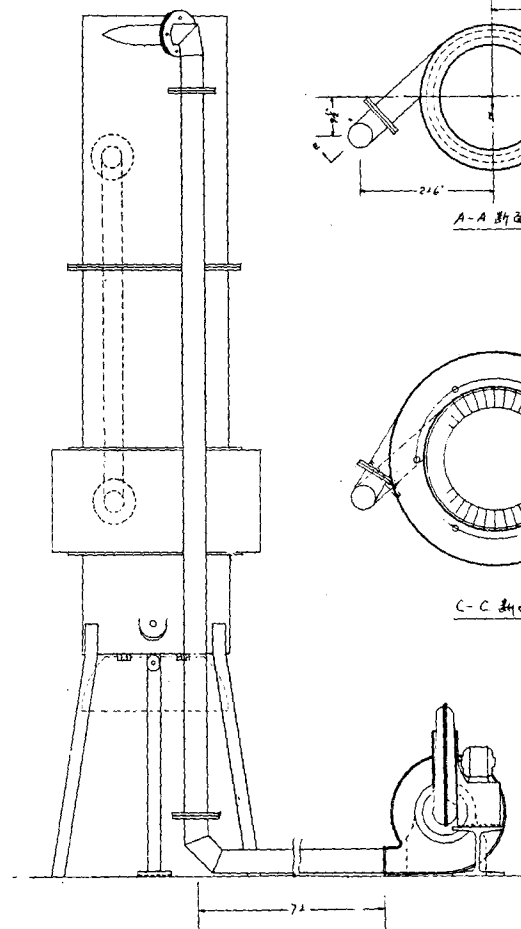
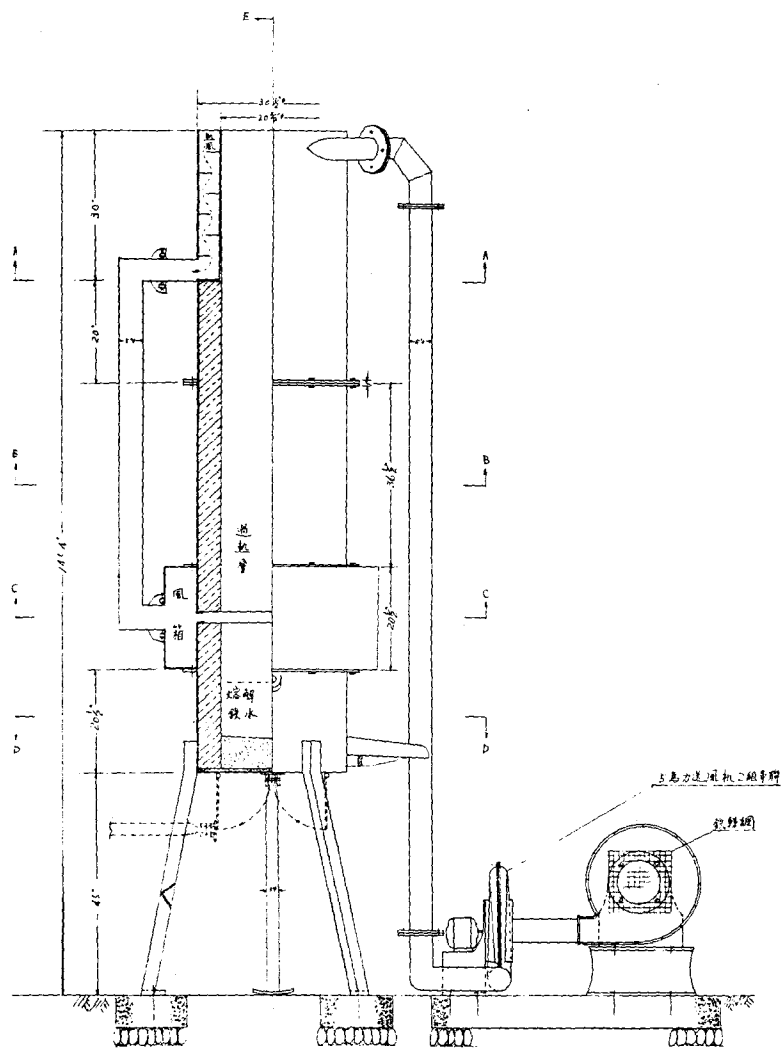
炉壁侵蚀情形



unetched $\times 750$ 片状黑铅A型



3% Nital etch $\times 750$ 珠层组织



1 吨 熔解炉
图尺 1/4"

