

技術資料 No. 185

TG251.2
1

耐 磨 鋼 鐵 鑄 造

劉嵩俊 編著

中華民國鑄造學會 編印

1995年12月

技術資料 No. 185

耐 磨 鋼 鐵 鑄 造

編 著：劉 嵩 俊

發 行：中 華 民 國 鑄 造 學 會

高雄市楠梓區高楠公路 1001 號

電話：(07)3534791・3534792

FAX：(07)3 5 2 4 9 8 9

編 輯：中華民國鑄造學會出版委員會

印 刷：佳興印刷局企業有限公司

高雄市前鎮區一心一路 172 號

電話：(07)7718363 (代表)

FAX：(07)7712516

中 華 民 國 八 十 四 年 十 二 月 出 版

AUTHOR EXPERIENCE



Sung-Chun Liu

After obtaining a master degree in metallurgical engineering plus one year advanced study, he joined American Steel Foundries at the Manufacturing Research Laboratory as a research metallurgist. He was promoted to senior research metallurgist after ten years service.

In the first ten years at the ASF Research Laboratory, his assignments were to solve the problems in wearpack steel production and to develop a super wear resistance steel which could be used to replace the wearpack steel in the marketplace. Thereafter, effects of residual stress on fatigue, quench cracks, and delayed cracks became his research subjects. The production problems in manufacturing coil springs up to 5" in diameter, and failure analysis of rail road steel castings such as side frame, bolster, and coupler etc. were also an important part of his work. He was only metallurgist in the American Steel Foundries having experience in cast iron. In order to meet the need and/or to understand the nature of a particular iron in the marketplace, research in austempered ductile iron and accicular cast iron was then conducted in his study.

In the thirty years career in American Steel Foundries, he wrote thousand reports and developed three new steels: SL super wear resistance steel, 1% Si modified grade "C" steel, and super service steel. The super service steel was invented just prior to his retirement, and could be heat treated to various levels of strength to replace U. S. rail road grade steel from "B" to "E" by a single steel. The characteristics of the super service steel were excellent weldability, and fatigue properties, as well as a very low tendency of hot tearing cracks. It was patented by American Steel Foundries.

Prior to study, he worked in Taiwan Industry and Mining company and Yue-Lung Motor company as a metallurgical engineer in charge of foundry, electric arc furnace and cupolar operation. He had a lot of experience in iron and steel casting, electric arc furnace steel making, and Meehanite Process.

作者簡介

本書作者劉嵩俊先生在赴美留學之前，曾在台灣工礦公司和裕隆汽車公司擔任工程師，負責翻砂、電弧爐和化鐵爐等工作，有豐富的鋼鐵鑄造、電弧爐煉鋼和米漢納金屬控制之經驗。在美國得到碩士學位並繼續進修一年後，進入美國鑄鋼公司研究室擔任冶金研究員，十年後升為高級研究員。在最初十年工作中，作者負責解決強力鋼生產上發生之問題，和研究比強力鋼更耐磨的新鋼種。內應力影響疲勞破裂、冷水急冷破裂和遲緩性破裂為作者的主要研究課題；也致力於解決彈簧生產上發生的問題，以及鐵路鑄件破裂原因之分析。作者是美國鑄鋼公司唯一具有鑄鐵經驗的研究員。當市場上有些鑄鐵產品和美國鑄鋼公司的鑄鋼產品競爭時，作者常需研究那些特殊鑄鐵件，例如 ADI 和針狀耐磨鑄鐵等。

在美國鑄鋼公司三十年的工作中，作者寫了上千篇研究報告，並發明 SL 超級耐磨鋼、1% Si 新“C”鋼和超級工作鋼等三種新鋼。超級工作鋼是作者退休前所發明，可以熱處理獲得不同的強度，用來代替美國鑄路鑄鋼從“B”級到“E”級。超級工作鋼的專利權則為美國鑄鋼公司所有。

序

中國是地大物博歷史悠久的國家，礦山資源正待開發，工業建設，築路工程在不斷發展之中，需要各種不同耐磨鋼鐵，應用在不同開發建設工程之中，作者積數十年來在美工作經驗之中，不斷聚集許多耐磨鑄鋼鑄鐵的知識，試驗研究的結果，和產品應用操作之經驗。如果能把這些累積研究所得，有系統的寫一本關於“耐磨鋼鐵鑄造”的冶金書籍，想是對中國冶金工業，冶金學術界有些用處和貢獻，這也算是寫這本書的動機。

這書一共分為六章，每章討論一種耐磨鑄鋼或鑄鐵，一共有四個耐磨鑄鋼，兩個耐磨鑄鐵。每個專題給予詳細的敘述和分析，這些敘述和分析，是作者從試驗室中研究之結果和心得，以及產品在作業中使用之經驗，鑄件斷裂之原因，和解決問題之方法，利用冶金常識和理論來解析，以促使問題能得到應有的了解。

第一章是強力耐磨鋼（Wearpact Steel），美國歷史悠久，廣負盛名的耐磨鑄鋼，美尼蘇答鐵礦使用結果最耐磨的鑄鋼品，其他鑄鋼均不能十分勝任愉快，現廣為澳洲礦山採用。

第二章是SL超級耐磨鋼，是作者研究所得新耐磨鑄鋼，硬度555 BHN比強力鋼477 BHN硬度高，卻有和強力鋼一樣之韌度，但SL鋼之耐磨度，超過強力鋼之耐磨度30%。

第三章是5% Cr空氣硬化鋼，有著良好硬度，耐磨度和適可的韌度，是生產成本低廉的耐磨鋼，可廣用在水泥工業和築路工程之中。

第四章是12% Mn奧氏體錳鋼，注重在鑄件破裂之分析和耐磨度改善之方法。

第五章是針狀鑄鐵，敘述如何控制鑄鐵成分和操作方法，用來控制金相顯微組織，針狀鑄鐵有著優良耐磨度和石墨自動滑潤作用和快速散熱之性能。

第六章是耐磨延性鐵，從鑄鐵成分和熱處理之方法，以達到高硬度，高韌度和延伸性的耐磨鑄鐵，這是新品種耐磨鑄鐵，用途在推廣中。

因為寫這本書的資料，是作者在美國鑄鋼公司工作三十年來，所寫的報告中取來的，試驗分析的資料，均使用美國度量衡制度，直接從報告中取來，沒有改變為公制。有些試驗結果，卻是公制，美制並列*。

本書使用冶金專有名詞*使用“英華冶金工業詞典”翻譯中文名辭，例如鐵素體（Ferrite），貝氏體（Bainite），馬丁體（Martensite），淬火（Quench），回火（Temper），夏氏韌度（Charpy Impact Strength）等等。統一冶金學上的名辭，可能幫助讀者易於了解，如果同一名辭用久之后，后面附註的英文冶金名辭，就可以省略。

為了增加讀者容易了解，在作者多用圖片來說明和解釋，金相顯微圖片和鑄件圖片是本書帶給讀者每個專題實際操作之經驗，能體驗到在生產作業時所遭遇到的困難，這些困難在產品過程中，是不可避免的。圖片裡給予讀者遭遇到之問題，有個正確的認識，以及暗示

* 編審註：為我國讀者閱讀方便，本書部分工程名詞改用我國習慣用語；度量衡則並列英制及公制，特向著者致歉。

如何解決問題的方法。

作者有著一段很長的時間，研究鑄件裡的內應力（Residual Stress），對生產過程和產品作業之影響，所以在這本冶金書籍裡，多方注意到內應力的問題，提議如何利用內應力來解決冶金上發生的問題。

作者感謝美國鑄鋼公司給予和諧平靜追求問題解決之研究工作環境，研究室諸位主管和工作同仁協助和合作，在此致謝。

中文電腦是我們第一次使用之經驗，謝謝內人林定治女士從事使用中大電腦和全書用電腦編排而成，衷心感激。女婿哲大衛（Dr. Gerard Davis）多方協助安排圖片和指導電腦之使用，也在此謝謝。

卷末索引使用英文為本，中文名辭附后為原則，比使用筆劃索引簡單些。因為研究冶金者，均了解英文冶金專用名辭，而且從英文名辭開始第一個字母，去找這個名辭，在本書中何處使用這個冶金專用名辭，比較方便些。

作者深恐疏忽之處，有負衆望，還請學者，專家們多賜指示是幸。

劉嵩俊

1994年8月1日

目 錄

序

第一章 強力耐磨鋼

1.1 強力耐磨鋼的化學成分	1
1. 碳	1
2. 錳	2
3. 矽	2
4. 矽錳的關係	2
5. 磷硫	3
6. 鉻鉬	3
7. 硼鈦	3
8. 鋁和稀土金屬	4
1.2 強力耐磨鋼的熔煉	4
1. 回爐料使用量	4
2. 熔化碳的控制	4
3. 矽或鋁的阻塞	6
4. 鋼水浸入電極加碳	7
5. 一次爐渣和二次爐渣煉鋼法	7
6. 鉻鉬合金的加入	8
7. 去氧作用	8
8. 出鋼溫度	8
9. 復錳	8
10. 氮和氫之吸收與熔化的關係	9
1.3 強力耐磨鋼的熱處理	9
1. 正火	11
2. 硬化	11
3. 回火	11
4. 時效熱處理	14
5. 重複淬火	16
6. 淬火破裂	17
1.4 強力耐磨鋼的金相組織	18
1. 正火金相組織	18
2. 硬化金相組織	20
3. 回火金相組織	20

1.5	強力耐磨鋼的機械性能	20
1.6	強力耐磨鋼的 NDT 試驗	23
1.7	強力耐磨鋼的耐磨度	25
1.7.1	1. 耐磨試驗	25
1.7.2	2. 低硬度強力鋼的耐磨度	30
1.7.3	3. 砂模鑄件和金屬模鑄件的耐磨度	31
1.8	強力耐磨鋼鑄件的焊補	34
1.8.1	1. 焊後熱處理	34
1.8.2	2. 焊補對疲勞壽命的影響	36
1.9	強力耐磨鋼鑄件的修磨	39
1.10	強力耐磨鋼鑄件破裂分析	40
1.10.1	1. 遲緩性破裂	44
1.10.2	2. 低韌度破裂	50
1.10.3	3. 疲勞破裂	52
1.10.4	4. 鑄件表面缺陷造成的破裂	56
1.10.4.1	(1) 焊補	56
1.10.4.2	(2) 砂眼和氣孔	57
1.10.4.3	(3) 碳偏析	62
1.10.4.4	(4) 殼模鑄件表面缺陷	62
第二章	SL 超級耐磨鋼	
2.1	SL 超級耐磨鋼的化學成分	65
2.1.1	1. 錳	66
2.1.2	2. 矽	68
2.1.3	3. 錳鉻和鉬	69
2.1.4	4. 磷和硫	69
2.1.5	5. 鋁	69
2.1.6	6. 稀土金屬	70
2.1.7	7. 鎳	73
2.1.8	8. SL 超級耐磨鋼化學成分工作範圍	74
2.2	SL 超級耐磨鋼的熱處理	74
2.2.1	1. 均化溫度和時間	76
2.2.2	2. 硬化和留駐溫度	76
2.2.3	3. 回火和時效熱處理	77
2.2.4	4. SL 超級耐磨鋼的機械性能	78
2.3	SL 超級耐磨鋼的硬化率	79
2.4	SL 超級耐磨鋼的落錘試驗	84

2.5	SL 超級耐磨鋼的耐磨度	86
1.	耐磨度的計算方法	86
2.	矽含量對耐磨度的影響	87
3.	各種冶金因素對耐磨度的影響	88
2.6	SL 超級耐磨鋼的焊接性能	89
2.7	鑄模對 SL 超級耐磨鋼鑄面的影響	89
2.8	結 論	94
第三章	5%Cr 空氣硬化耐磨鋼	
3.1	5%Cr 空氣硬化耐磨鋼的化學成分	95
3.2	5%Cr 空氣硬化耐磨鋼的熱處理	95
3.3	5%Cr 空氣硬化耐磨鋼的機械性能	97
3.4	5%Cr 空氣硬化耐磨鋼的金相組織	99
3.5	碳對 5% Cr 空氣硬化耐磨鋼的影響	99
3.6	結 論	105
第四章	奧氏體錳鋼	
4.1	奧氏體錳鋼鑄件的破裂分析	106
1.	熱處理	106
2.	縮孔	108
3.	熱裂	109
4.	低澆注溫度	111
5.	遲緩性破裂	111
6.	結 論	116
4.2	奧氏體錳鋼鑄件的分散硬化熱處理	116
1.	碳化物的性能	116
2.	分散硬化熱處理溫度的選擇	116
3.	12-2錳鋼的耐磨度	118
4.3	奧氏體錳鋼鑄件的其他改善法	118
1.	2% Mo 對拉力性能和硬度的影響	119
2.	6-1和12-2錳鋼的比較	121
(1)	6-1錳鋼的熱處理和金相組織	121
(2)	6-1錳鋼的機械性能和耐磨度	121
(3)	6-1錳鋼的應用	123
第五章	針狀鑄鐵	
5.1	針形片狀石墨鑄鐵	125
5.2	針形球狀石墨鑄鐵	129
5.3	應用	131

第六章 耐磨球墨鑄鐵

6.1 等溫淬火熱處理 135

 1. 奧氏化溫度和時間 136

 2. 等溫淬火溫度 137

6.2 淬火回火熱處理 139

6.3 應用 140

索引 141

耐 磨 鋼 鐵 鑄 造

第一章 強力耐磨鋼

強力耐磨鋼 (Wearpact steel) 是美國鑄鋼公司 (American Steel Foundries) 專利的鑄鋼成分。在1955—1975年間，廣為使用礦山機械上，特別是採石機上的挖掘齒 (dipper teeth)。一般耐磨鋼使用在密尼蘇達洲的鐵礦上，均不耐用，或是使用時斷裂，唯有強力耐磨鋼能夠信用愉快。強力耐磨鋼的硬度高達477 H_B，而且-40°F 夏氏韌度超過15ft-lb (20.3 J)。因為1970年來，美國鋼鐵業不景氣，鐵礦砂大大減產，需要耐磨鋼件不多，美國鑄鋼公司因此不再從事生產強力耐磨鋼。現在強力耐磨鋼在澳洲和美國幾家工廠尚在使用。澳洲 Wearpact Pty Ltd 常要求美國鑄鋼公司協助，解決製造上發生的問題。強力耐磨鋼在澳洲礦山和築路作業使用很廣。中國是一個正在開發的國家，許多礦山作業及築路工程需用大量強力耐磨鋼。

1.1 耐力耐磨鋼的化學成分

強力耐磨鋼是中碳鉬鉻錳合金鋼，含有少許硼和鈦，它的化學成分如表 1-1。化學成分影響硬度和韌度甚大，在這指定成分範圍之內，強力耐磨鋼能達成444-512 H_B 硬度和15-22 ft-lb -40°F 夏氏韌度 (Charpy impact strength)。如果採用中間成分，硬度是477 H_B 和18 ft-lb 韌度，下面敘述每個元素對強力耐磨鋼影響。

表 1-1 強力耐磨鋼的化學成分

(%)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	B	Al
0.25—0.31	1.40—1.65	0.32—0.48	<0.02	<0.02	0.75—0.90	0.40—0.55	0.002—0.003	0.04—0.07

1. 碳

碳能和錳鉬和鉻組成碳化物，有的是單元性，例如碳化鉻、碳化錳；有的是復元性，例如碳化鉻鉬、碳化錳鐵。這些碳化物是硬度的來源。若是不到0.25% C 時，硬度降低到444H_B 以下。我們曾經試驗過幾次0.18% C 強力耐磨鋼，其化化學成分不變，同樣熱處理，硬度是395—410 H_B，韌度並不因低碳而升高，僅15ft-lb 上下而已。如果碳超過0.31% C，金相組織就有過多沒有溶解碳化物 (Undissolved carbides)。這些沒有溶解碳化物增加了硬度，並且大部存在晶體邊界，促進晶體脆化作用 (grain embrittlement)，因此夏氏韌度降低，達不到在-40°F 韌度15ft-lb 之要求。

2. 錳

錳是強力耐磨鋼的淬硬性 (hardenability) 元素。強力耐磨鋼的理想硬化直徑 (ideal diameter) 達 6 寸 (15cm) 之多，大部是靠錳而來的，單靠碳、鉻和鉬是不夠的。錳在鋼中取代部份碳化鐵，組成碳化鐵錳，在奧氏化 (austenitizing) 時，溶解在奧氏體 (austenite) 內，這就是給於馬氏體 (martensite) 硬度主要之來源。強力耐磨鋼至少要有 1.40% Mn，如低過 1.40% Mn，淬硬性就大大降低。

碳化鐵錳在回火 (tempering) 時，能從馬氏體析出，成為碳化鐵錳顆料，它的大小，以回火溫度高低而定。如果低於 1.40% Mn 時，可能造成馬氏體和貝氏體 (bainite) 混合金相組織，以鑄件厚度而定，特別在鑄件斷面的中央部份。所以低錳時，不但硬度降低，而且鋼脆易斷；超過 1.65% Mn 時，硬度過高，韌度降低，所以高低錳的成分均不適合於強力耐磨鋼。

3. 矽

矽能除去鋼水中氧，是主要脫氧劑 (deoxidizer) 之一，如果鋼鑄件脫氧不完成，則鋼件含有氣泡或氣孔，影響鑄件之健全性 (soundness) 和機械性能。矽能在奧氏化時，溶解在奧氏體內，增強肥粒體 (ferrite) 的強度。強力耐磨鋼含矽 0.32~0.48%，低於 0.30% Si 時，能移動強力耐磨鋼之等溫轉變圖 (TTT diagram) 的鼻尖部份至左邊，這樣增加了游離肥粒體 (free ferrite) 轉變數量。由於肥粒體在金相組織中數量增加，因此強力耐磨鋼之韌度降低。如果強力耐磨鋼超過 0.48% Si 時，沒有重大影響強力耐磨鋼的硬度和韌度。

從試驗結果，在 0.70%—1.65% Si 之強力耐磨鋼，發現高矽能轉移強力耐磨鋼之 TTT diagram 的鼻尖至右邊，這樣降低了強力耐磨鋼轉變為自由肥粒體的可能性。強力耐磨鋼馬氏體針葉特別短，這是由於變小晶體而來的，0.70% Si 強力耐磨鋼晶體是 ASTM G. S. No 6, 1.65% Si 是 ASTM G. S. No9，晶體因矽增高而變細小，馬氏體針葉長短是受晶體粗細而控制的，雖然高矽能給予強力耐磨鋼金相組織有利的因素，但不能增進強力耐磨鋼之韌度，所以高矽不採用。

4. 矽錳的關係

前面提過高低矽元素能移動強力鋼 TTT diagram 之鼻端，但發現並不移動 TTT diagram 的奧氏灣 (austenitic bay)。鑄鋼件在奧氏灣留駐時，在初期的金相轉變 (transformation)，矽比錳更有影響之效力，促使游離肥粒體之轉變。但矽之效力卻漸漸消失，到了后期，錳之影響效力增加。在這複雜情況之下，在留駐奧氏體灣期內，矽錳有相等對游離肥粒體轉變之影響。試驗得知，游離肥粒體轉變數量之多少，是和矽錳聯合成分成直線之關係，可以用下列方程式來代表：

$$\%F = a + b(\text{Si}\% + \text{Mn}\%)$$

因鑄件留駐在奧氏灣時間不同，產生游離肥粒體也不一樣，試驗留駐時間 5 分 30 分和 120 分鐘，得到下列三個方程式：

$$\text{留駐 } 5\text{min } \%F = 100.628 - 47.748 (\text{Si}\% + \text{Mn}\%) \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{留駐 30min } \%F = 169.928 - 80.237 (\text{Si}\% + \text{Mn}\%) \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{留駐120min } \%F = 182.547 - 84.417 (\text{Si}\% + \text{Mn}\%) \dots\dots\dots (3)$$

最低矽錳聯合成分能得到強力耐磨鋼沒有游離肥粒體之計算如：

留駐 5min	Si% + Mn% = 2.11
留駐 30min	Si% + Mn% = 2.12
留駐120min	Si% + Mn% = 2.16
	平均2.13

強力耐磨鋼含矽錳合計2.13%，經熱處理后的基體（matrix）完全沒有游離肥粒體。但在實際作業上，強力鋼可以允許6%游離肥粒體存在，而不會降低硬度和韌度，相當矽錳合計成分在1.85—2.0%之間，強力耐磨鋼有著很好機械性能和優良金相組織。

5. 磷硫

磷和硫是鋼中雜質，常存在晶界（grain boundaries），在鑄造冷卻時，它們和其他雜質最后在晶界凝固。磷和硫含量以少於0.02%為宜，特別是高強度鋼件，超過0.02%有害韌度。

磷硫高低是由廢鋼廢鐵而來，如果當地鐵礦含磷很高，例如澳洲出產之強力耐磨鋼高達0.035%P，大大降低韌度，這時注意煉鋼方法，除去磷硫，以達到目標值。

6. 鉻鉬

鉻和鉬均為強力碳化物合金元素，存在鋼的基體內，是碳化鉻、碳化鉬和碳化鉻鉬，在奧氏化時，部分溶解在奧氏體內，它們溶解之數量，以奧氏化溫度高低而定，在回火時，有些碳化物從馬氏體析出，它們析出顆粒的大小，以回火溫度高低而定。這些析出鉻鉬碳化物，和沒有溶解的碳化物，有抵抗磨損之作能。它們在鋼組織中存在和分布狀況對強力耐磨鋼之磨損率（wear rate）有很大作用。這些碳化物粒子，如果過多分布不均，會降低強力耐磨鋼的韌度，使鋼體變脆，所以要控制鉻鉬成分，給予強力耐磨鋼的耐磨度和足夠的韌度，在作業時既能耐磨，又不至折斷。

溶解在奧氏體內鉻鉬碳化物，部分留存在馬氏體內，給予馬氏體硬度和強度，這就是強力耐磨鋼高硬度和高強度之來源。同時溶解的碳化鉬，能增加強力耐磨鋼之屈服強度（yield strength），使耐磨鋼鑄面能抵抗外來較高磨損力量。

7. 硼鈦

硼在強力耐磨鋼中，並不是用來增加末端淬硬性（Jominy hardenability），因為強力耐磨鋼有著足夠淬硬性，不需要硼來幫助。有和沒有硼之強力耐磨鋼，硬度均為477H_B。強力耐磨鋼含0.002—0.003%B。硼以硼矽合金（borosil）加入鋼內，硼溶解在鋼水裡，部分和氮結合成為氮化硼，對鋼沒有任何作用，僅溶解硼（soluble boron）對淬硬性和鑄鋼基體有影響。在分析報告裡的硼是指全部硼（total boron）為了有更多硼能溶解到鋼內，硼需要鈦的保護，就是利用鈦除去鋼中氮，因為氮化鈦之自由能（free energy）比氮化硼為高，因而先化合氮化鈦（TiN）。鋼水中氮減少了，硼溶解鋼水中，因此增加。鈦是以9—11% Ti

Graphidox 矽鈦合金加入。

硼並不能對末端淬硬性有影響，但是對硬化性、金相組織、韌度以及避除肥粒鐵素體轉變，有穩定作用，給予鑄件品質之控制，有著廣大之寬度，減少製作上的困難。

8. 鋁和稀土金屬

鋁和稀土金屬合金 Lamceramp 37X 最後加入鋼水中，是主要脫氧劑，同時還有控制晶體大小和雜質形狀（type of inclusions）之用處。因為稀土金屬如 Ce La，能促使雜質以球狀存在金相組織中，減少葉狀雜物的存在，對高強度鋼件之韌度有幫助。

避免鋁超過0.07%，因為鋁和氮結合成氮化鋁，它們存在晶體交界之處，促使斷裂在晶界之處發生，造成岩石狀斷口（rock candy fracture）這是鋼件非常脆化之現象。

1.2 強力耐磨鋼熔煉

強力耐磨鋼之熔煉在電弧爐裡進行。首先加入鐵料，以回爐鑄鋼件、澆口、冒口和廢鋼。廢鋼選擇是非常重要的。使用低廉廢鋼，含雜物太多，如鋁、銅、錫等，增加煉鋼之麻煩，降低鋼的品質，得不償失。希望得到品質優良強力耐磨鋼，應遵守下列煉鋼注意事項。

1. 回爐料使用量

根據工作經驗，加入爐料，如果廠內產生澆口、冒口和損壞鑄件到達50%時，生產之強力耐磨鋼韌度降低。其金相是馬氏體、貝氏體和肥粒體混合組織，且鋼可能含20%以上葉片狀雜物（type II inclusion），而且晶體大小難於控制，爐與爐間的鑄鋼品質，相差極大，這是因為熔化后的鋼水，缺乏氧化作用，或爐料中含矽鋁過高。回爐鑄件重複使用，則鋼內雜質愈積愈多，強力耐磨鋼的品質，因此降低。故回爐料使用量避免超過40%。

2. 熔化碳的控制

電弧爐內爐料熔落時鋼水之含碳量稱為熔化碳（melt carbon），對強力耐磨鋼鑄件作業時使用壽命有關；低熔化碳及高出爐碳（melt tap carbon）之強力耐磨鋼，發現破損件數比高熔化碳及高出爐碳之強力耐磨鋼鑄件高得多，其中必有原因。為了找尋它的原因，兩爐強力耐磨鋼有高低不同熔化碳和出爐碳因之熔煉而成，鋼之化學成分如表1-2。

表 1-2 高低熔化碳強力耐磨鋼的化學成分 (%)

爐號	熔化碳	出爐碳	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	B	Al
9127	0.48	0.24	0.26	1.49	0.44	0.013	0.014	0.87	0.51	0.0028	0.035
9190	0.30	0.14	0.26	1.49	0.38	0.015	0.013	0.81	0.50	0.0021	0.033

這兩爐鋼使用同樣原料和脫氧劑，澆鑄同樣礦山鑄件和一個 4"×4"×10" 模，給予同樣熱處理，夏氏韌試驗結果如表1-3。

表 1-3 熔化碳對夏氏韌度的影響

爐號	熔化碳(%)	出爐碳(%)	V 形缺口－40° F 夏氏韌度 ft-lb
9127	0.48	0.24	20、21、22、24 平均21.8
9190	0.30	0.14	17、18、18、18 平均17.8

兩支0.505"拉桿加工而成。加工后拉桿給予250°F時效熱處理（aging treatment），以除去加工而產生的拉內應力（residual tension stress），其拉力試驗結果如表 1-4。

表1-4 熔化碳對拉伸性能的影響

爐號	熔化碳 (%)	出爐碳 (%)	屈服強度 (psi)	抗拉強度 (psi)	伸長率 (%)	斷面收縮率 (%)
9127	0.48	0.24	185,000	241,000	9.0	23.4
			190,000	245,000	9.5	20.9
			平均187,500	242,250	9.3	22.1
9190	0.30	0.14	174,000	233,500	8.0	22.0
			185,000	233,500	9.0	22.7
			平均179,500	233,500	8.5	22.4

低熔化碳及低出爐碳有降低韌度伸長率和強度之傾向，特別是厚鑄件。高低熔化碳之強力耐磨鋼，有顯著不同的機械性能。用 X-Ray 方法量取鑄件之拉內應力發現低熔化碳的鑄件拉內應力，比高熔化碳鑄件超出10,000psi，這對鑄件疲勞破裂（fatigue failure）極為重要，因鑄件發生疲勞裂紋，均在表層開始。低熔化碳鋼件有特高拉內應力，所以疲勞破損因此增多。

試樣從 4"×4"×10"試塊取得，研究中央和邊緣部份之雜質（inclusions）形態大小和數量，對高低熔化碳強力耐磨鋼有何不同，檢查所得之結果如表 1-5。

表 1-5 熔化碳對鋼中雜質的影響

爐號	熔化碳 (%)	試樣	雜質量 (No/in ²)	雜質形態(%)			雜質大小 (μ)
				I	II	III	
9127	0.48	表層	370	13	11	76	10.3
		中央	365	6.4	14.5	79.1	13.1
9190	0.30	表層	435	8.7	19.0	72.3	13.5
		中央	400	5.1	21.7	73.2	17.3

雜物形態第一類呈球狀，第二類呈葉片狀，第三類呈多角形雜物，低熔化碳強力耐磨鋼含更多雜質，和第二類葉片狀雜物存在鋼裡，這是因為鋼水出爐時含碳低，僅0.14%C，有更多氧存在鋼水裡，組成氧化物之雜質因此加多。

查驗金相組織，高熔化碳之強力耐磨鋼，經完全熱處理后，是回火馬氏體，而低熔化碳鋼件，卻是馬氏體、貝氏體和肥粒體混合之金相組織，兩者有顯然不同之處。

爲了得到高級強力鋼之品質，對熔化碳應加以控制，爐料中含碳量之選擇，注意選用廢鋼材料，適量加入低硫焦炭或石墨到爐料中。有時以適量低硫低磷廢鐵和廢鋼同時加到爐裡去。

3. 矽或鋁的阻塞

矽阻塞（silicon block）是爐內鋼水完全失去氧化作用，鋼水沒有氣泡出來，這種情況稱爲靜止熔化（dead melting）。有的卻是故意的，有時是偶然。煉鋼者利用全部回爐鑄件作爐料，不願失去鋼之成分，僅僅是熔化而已。作者曾應台灣金屬工業研究發展中心之邀請協助台灣鑄鋼業，發現在台灣許多鑄鋼工廠採用感應電爐之熔化，這種情形是常有的。另一種是事出偶然，因爲加入爐料，不知不覺中，廢鋼中有許多廢鐵，或者使用汽車廢鋼，中間夾雜有鋁合金汽缸，經熔化之後，因爲廢鐵含矽高，或廢鋼含鋁太多，都能使爐內鋼水完全停止氧化作用，碳的沸騰（carbon boiling）不會發生，於是大量氫吸收到鋼水裡去。煉鋼工作人員，如果發現電爐內，這種靜止熔化情況，可以利用氧吹（oxygen blow）或氬吹（argon blow）恢復熔鋼碳的沸騰，以驅除鋼水吸收的氫。

靜止熔化鋼水澆鑄鋼件，如果厚度僅 1"（25cm）不到，氫能在熱處理時，滲透到體外，不致影響到強力耐磨鋼的機械性能。如果鑄件厚度達 2" 之多，正常熱處理很難降低氫到無害程度。下面是個試驗，說明矽阻塞對不同厚度強力耐磨鋼鑄件靜壓彎曲強度（static bend strength）之影響。

表 1-6 靜壓彎曲強度

厚度	時效處理	硬度(H _B)	靜壓彎曲強度(1b)
5/8"	沒有	477	54,200
	有	477	65,150
2"	沒有	495	25,700
	有	495	50,500

第二個試驗是用落錘（drop weight）來決定矽阻塞對鑄件吸收能量之影響，設備如圖 5-7 所示。根據標準 NDT 試驗規格，一是標準 5/8"×2"×5" P-3 試樣，另一試樣 P-3 是從 2"×2"×10" 鑄件加工而成。2" 鑄件在加工之前，一組給予時效熱處理，另一組卻沒有。按照 ASTM 標準方法，面上硬焊（hard facing welds）一條在 NDT 樣品上面，另加一小割口（notch）。

落錘試驗，將 NDT 樣品預熱到 100°F，錘從不同高度落下，錘重 75Lbs，試驗結果如表 1-7。

上面兩種試驗，證明矽阻塞鋼水，吸收大量氫氣。因爲氫是由分解空氣中水蒸氣而來的，氫可以從薄鑄件滲透而出，不致降低靜壓彎曲強度和落錘能量之吸收。2" 厚度之鑄件卻不一樣，機械性能受到氫的損害。這兩試驗，說明避免鋼水阻塞作用是很重要的。