

# 整鑄錳鋼岔心製作工藝及應用

徐展賦<sup>1</sup> 陳信智<sup>2</sup>

## 摘要

軌道工程中道岔是引導列車變換行車方向之元件，其重要性及安全性不言而喻，再者，道岔磨耗甚鉅，因此期望藉由高錳鋼材料耐衝擊、擠壓、磨耗的特性以減少完工後營運期間之維修頻率並提高行車安全，也期望藉由本文，能讓國內更多相關單位了解高錳鋼岔心，進而提升國內軌道工程視野、提升軌道工程品質。

關鍵詞：高錳鋼岔心、奧氏體、加工硬化、水韌處理

## Production Process and Application of Full Cast Manganese Steel Frogs

Chan-Fu Hsu<sup>1</sup> Hsin-Chih Chen<sup>2</sup>

### Abstract

The turnout, which guides train directional changes, is an important component associated with major safety concerns. Since it is prone to wearing out, the turnout is made of high manganese steel materials that resist impact, compression, and abrasion. This reduces maintenance frequency and improves operational safety.

This paper aims to help domestic agencies understand more about high manganese steel frogs. It will broaden trackwork vision and enhance trackwork quality.

**Keywords: high manganese steel frog, austenitic, work hardening, water toughening treatment**

<sup>1</sup> 森業營造股份有限公司軌道部資深經理

chanfu.hsu@senyeh.com

<sup>2</sup> 森業營造股份有限公司軌道部品管工程師

steven.chen@senyeh.com

## 一、前言

軌道工程是提供車輛運行之承載結構，基本上軌道係由鋼軌、扣件及軌床所構成，而在轉轍段之運行軌則倚賴所謂的道岔。道岔是引導列車變換行車方向之元件，其重要性及安全性不言而喻，再者，道岔磨耗甚鉅，因此如何增長道岔使用年限及維持基本的行車安全便成為軌道工程之重要課題。

錳鋼岔心型式之道岔具有韌性好、加工硬化和耐磨性佳等優點。其於1894年已被用於美國紐約的布魯克林大西洋鐵路上，由於獲得很好的使用性能，逐漸被其他各國廣泛應用。因此，近年來台北捷運信義線及松山線亦陸續於主線之道岔採用錳鋼型岔心，相信對於道岔的耐用年限能有正面的影響。【1】

高錳鋼最重要的特點是在強烈的衝擊、擠壓條件下，表層迅速發生加工硬化現象，使其在心部仍保持奧氏體(Austenite)良好的韌性和塑性的同時硬化層具有良好的耐磨性能。這是其它材料所不及的。目前，世界各國對錳鋼岔心材料訂定了許多標準，對應機械性能也相對不同，台北捷運所使用錳鋼岔心符合UIC 866/O之規定。【2】

由於高錳鋼加工硬化現象，必須盡量避免對鑄件進行加工；再者，其耐磨性只有在具備足夠加工硬化的條件下才能表現出其優越性，其他情況下則很差；在軌道工程中，更需考量高錳鋼材料與碳鋼鋼軌之間的接合。因此如何將高錳鋼產品加以成型、工藝程序上須注意事項以及錳鋼的預硬化等等問題，將詳加說明。【3】

## 二、高錳鋼岔心材料組成

錳鋼材料性能非常特殊，當鋼中加入2.5~3.5%的錳，那麼所製得的低錳鋼脆得像玻璃一樣，一敲就碎；然而，如果加入13%以上的錳，製成高錳鋼，將能變得既堅硬又富有韌性。

高錳鋼岔心主要組成元素為C、Si、Mn、P、S，其中C和Mn為組成奧氏體組織並產生加工硬化的必要元素，而Si、P、S為雜質元素，其中P更是影響高錳鋼岔心使用壽命主要元素，因此世界各國標準對化學組成差異，即是P元素的上限要求。

在台北捷運信義線、松山線所使用之高錳鋼岔心，符合台北捷運規範要求UIC 866/O之規定，相對化性比較如表1所述。

表1 世界主要國家高錳鋼岔心化學成分標準

國家標準	化學成分(%)					Mn/C	
	C	Mn	Si	P	S		
台灣	CNS	0.95~1.30	11.5~14.0	< 0.65	< 0.040	< 0.030	≥ 10
法國	UIC	0.95~1.30	11.5~14.0	< 0.65	< 0.040	< 0.030	≥ 10
中國	TB	0.95~1.35	11.0~14.0	0.30~0.80	≤ 0.045	≤ 0.030	≥ 10
日本	JIS	0.90~1.30	11.0~14.0	-	≤ 0.100	≤ 0.050	≥ 10
美國	ASTM	1.00~1.40	≥ 10.0	-	≤ 0.100	≤ 0.050	-
英國	BS	1.00~1.35	> 10.0	< 1.00	< 0.12	< 0.060	-

表1所列各國標準對高錳鋼岔心在化學成分之定義均不相同，惟以下幾點化學成分及雜質含量均會對高錳鋼岔心產生影響，因此必須加以控制，以維持產品穩定性。

#### (一) 碳化物的影響

降低衝擊韌性及抗拉強度

#### (二) 非金屬夾雜物的影響

當鋼液凝固時，大量的氧化錳會以非金屬夾雜物的形式析出在鋼的周圍，降低鋼的衝擊韌度，並使鑄件的熱裂紋傾向增大。

#### (三) 化學成分的選擇及影響

1. 含碳量和含錳量：鋼中含碳量過低時，不足以產生有效的加工硬化效果；但是當碳含量過高時，又會在鑄造中出現大量的碳化物，甚至出現粗大的碳化物，因此為了避免析出碳化物，必須控制含碳量不得過高。

同時為了保證高錳鋼的性能，必須有足夠的含錳量。含錳量過低時不能形成單一的奧氏體組織；而過高的含錳量也是不必要的，生產中如表1規定，Mn大部分控制在11.0%~14.0%，而C控制在0.9%~1.3%。規範亦明顯指出，含錳量與含碳量之間應有適當的比例，即應有適當的錳碳比，一般控制在 $Mn/C \geq 10$ 。

2. 含矽量：矽會降低碳在奧氏體中的溶解度，促使碳化物析出，使鋼的耐磨性和衝擊韌度降低，因此雖然高錳鋼中Si的含量訂定為0.3%~0.8%之間，但仍應控制矽量在規格下限。

3. 含磷量：熔煉高錳鋼時，由於錳鐵中的含磷量較高，因此在一般情況下錳鋼成品中的含磷量也比較高。但是因為磷會降低鋼的衝擊韌度並使鑄件容易開裂，所以應儘量降低鋼的含磷量，如表1所示，高錳鋼P含量控制在 $\leq 0.1\%$ 。

4. 含硫量：由於高錳鋼含錳量高，會使鋼中大部分的硫與錳在熔煉過程中化合形成硫化錳(MnS)而進入爐渣中，因為高錳鋼中硫的有害作用比磷高，因此在高錳鋼的標準中要求S含量 $\leq 0.06\%$ 。

## 三、製造工藝

### (一) 鑄造工藝

高錳鋼極易因加工而硬化，使得產品很難加工，因此大多數為鑄件，極少量用鍛壓方法加工。高錳鋼的鑄造性能較好、熔點低（約為 $1400^{\circ}\text{C}$ ）、液相與固相溫度間隔較小（約為 $50^{\circ}\text{C}$ ）、導熱性低，因此鋼水流動性好，易於澆注成型。但高錳鋼的線膨脹係數約為純鐵1.5倍，為碳素鋼的2倍，故鑄造時凝固收縮大，散熱性差，容易出現應力和裂紋，據此，用以下幾個方式解決膨脹性大的問題：

1. 型砂與砂芯的退讓性一定要好。

2. 澆注系統採取開放式，使多個分散的內澆道從鑄件的薄壁處引入，且成扁而寬的喇叭狀靠近鑄件處的截面積大於與橫澆道相聯的截面積，使金屬液快速平穩地注入鑄型，防止整個鑄型內的溫差過大。

3. 冒口直徑大於熱節直徑，緊靠熱節，高度是直徑的2.5~3.0倍，必須採用熱冒口甚至澆冒口合一，讓充足的高溫金屬液來補足鑄件在凝固收縮時之空位。

4. 將直澆道、冒口位於高處（砂箱有 $5^{\circ}$ ~ $8^{\circ}$ 的斜度）。澆注時儘可能低溫快澆。

5. 一旦凝固，應及時鬆砂箱。

## (二) 熱處理

高錳鋼的熱處理與普通鋼淬火處理不同，高錳鋼在水中淬火後不是變硬，而是變軟。所以，高錳鋼的淬火也叫水韌處理，即將高錳鋼鑄件加熱到碳化物固溶的溫度 $1050^{\circ}\text{C}$ ，保溫一定時間，然後在水中快速冷卻，形成單一的奧氏體組織，使鋼的強度和韌性大幅度提高。然後透過預硬化或服役過程中受到衝擊力作用，產生加工硬化，從而達到耐磨的作用。在熱處理過程中，碳化物是在固溶狀態下溶解到奧氏體中的，所以又叫固溶強化處理。熱處理後力學性能為：抗拉強度 $615\sim 1275\text{MPa}$ ；降伏強度 $340\sim 470\text{MPa}$ ；硬度： $\text{HBI}80\sim 225$ 。

### 1. 加熱速率

高錳鋼在加熱升溫時，為了避免 $650^{\circ}\text{C}$ 以下發生珠光體轉變，開始溫度要慢，升溫速度為 $90^{\circ}\text{C/h}$ ；溫度高於 $650^{\circ}\text{C}$ 時，超過了高錳鋼的彈性變形溫度，高錳鋼由彈性狀態進入塑性狀態，同時脆性碳化物逐漸溶入奧氏體中，改善了鋼的強度和塑性，所以要以 $150^{\circ}\text{C/h}$ 的升溫速度快速升溫到 $1050^{\circ}\text{C}$ ，加熱速率如圖1所示。

### 2. 加熱溫度的選擇

選擇加熱溫度的依據是既能保證碳化物充分溶解，又不會使奧氏體晶粒過熱粗大。由於高碳高錳耐磨鋼中 $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{C}$ 型碳化物加熱到 $1000^{\circ}\text{C}$ 即能全部溶解，為了提高擴散速度，使成分更均勻，固溶溫度在 $1000\sim 1050^{\circ}\text{C}$ 為宜。溫度超過 $1050^{\circ}\text{C}$ ，奧氏體晶粒開始長大；當溫度達到 $1150^{\circ}\text{C}$ 時，不僅奧氏體晶粒粗大，而且產生明顯的過熱現象，材質變脆。

### 3. 保溫時間的選擇

選擇適當的保溫時間，使碳化物能充分溶解、成分均勻；保溫時間過長，晶粒容易粗化，影響材料力學性能。高錳鋼鑄件加熱溫度為 $1050^{\circ}\text{C}$ 時，保溫時間2h時，力學性能最好。

### 4. 水韌處理

水韌處理中的水冷處理，目的是要得到奧氏體，把高溫奧氏體保留到常溫，使鋼有很好的韌性。由於高錳鋼的相變溫度為 $960^{\circ}\text{C}$ ，如果鋼件從出爐到入水時間過長，鋼件溫度降到 $960^{\circ}\text{C}$ 以下時奧氏體析出的碳化物分佈在奧氏體晶界上；在隨後的水冷過程中，在奧氏體晶界上出現裂紋，導致鋼材脆性增大。高錳鋼在空氣中從 $1050^{\circ}\text{C}$ 降到 $960^{\circ}\text{C}$ 需要超過30s，所以在水淬處理時，鋼件從出爐到入水不能超過30s，這樣就能保證水淬後不析出碳化物，得到單一奧氏體組織。

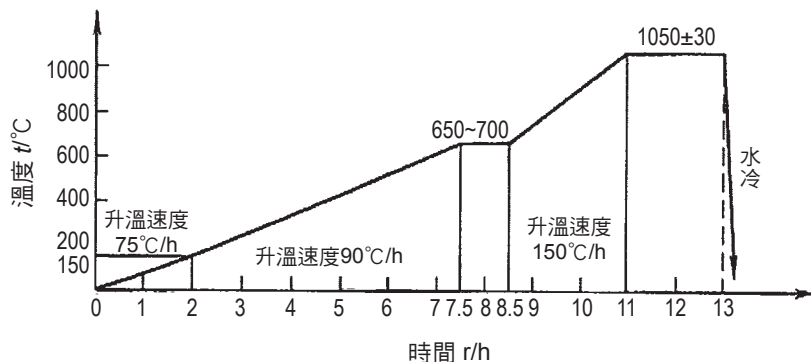


圖1 熱處理曲線圖



圖2 岔心模型製作



圖3 熱處理-水冷

### (三) 切削加工【4】

高錳鋼在切削過程中，由於塑性變形大，奧氏體組織轉變為細晶粒的馬氏體(martensite)組織，從而產生嚴重的硬化現象。加工前硬度一般為HB200~220，加工後表面硬度可達HB450~550，硬化層深度0.1~0.3 mm，因此，嚴重的加工硬化使切削力增大，加劇了刀具磨損，也容易造成刀具崩刃而損壞；此外，高錳鋼導熱係數低(13 W/m·K)，當切削速度高時，產生的高熱量無法擴散，繼而使得刀具磨損劇烈、耐用度降低；又高錳鋼熱膨脹係數高，使得高溫切削時，工件精度降低；另外高錳鋼的高韌性，使得切屑不易折斷，造成加工上的困擾。以下幾個方法克服加工上的困擾：

#### 1. 提高鑄造精度

為盡量避免對鑄件進行加工，鑄件上的孔、槽儘可能鑄出，並提高鑄模的精度。使得刀具修整以一次進刀加工完成。

#### 2. 熱處理加工

將高錳鋼加熱回火至600°C~650°C，保溫兩小時後冷卻，使高錳鋼的奧氏體組織轉變為索氏體(sorbite)組織，降低加工硬化程度，改善加工性能。加工完成的岔心在使用前應再進行淬火處理，使其內部組織重新轉變為單一的奧氏體組織。

#### 3. 刀具選擇

一般來說，要求刀具材料紅硬性高、耐磨性好，有較高的強度、韌性和導熱係數。切削高錳鋼可選用硬質合金、金屬陶瓷做刀具材料，也可以用CN25塗層刀片或CBN（立方氮化硼）刀具。目前應用最普遍的還是硬質合金，其中YG類（鎢鈷）硬質合金具有較高的抗彎強度和衝擊韌性，可減少切削時的崩刃。同時，YG類硬質合金的導熱性較好，有利於切削熱從刀尖散走，降低刀尖溫度，避免刀尖過熱軟化。YG類硬質合金的磨加工性較好，可以磨出銳利的刀口。YG類硬質合金中含鈷量較多時，抗彎強度和衝擊韌性好，特別是提高了疲勞強度，因此適於在受衝擊和震動的條件下作粗加工用；含鈷量較少時，其硬度、耐磨性和耐熱性較高，適合作連續切削的精加工。應當注意的是，YG類硬質合金不適用於高速切削，因為在高速切削鋼料時，切削時的高溫將使刀具前刀面上形成強烈的月牙窪磨損，並加速後刀面磨損，刀具耐用度降低。採用金屬陶瓷刀片進行高錳鋼的精車、半精車，可選用較高的切削速度，加工表面品質好，刀具耐用度高。

#### (四) 預硬化

高錳鋼在使用初期由於其優異的加工硬化性能尚未有效發揮，強度較低、耐磨性稍差，因此為提高岔心初期抵抗磨耗以及變形的能力，故對高錳鋼岔心進行爆炸預硬化處理。

為提高鑄造整體高錳鋼型岔心初期使用性能，採用專用炸藥，對輪軌過渡區進行2~3次爆破處理；錳鋼岔心通過爆炸處理後可以提高表面硬度，降低營運初期之使用磨耗，減少維護工作進行之次數。然而因為考慮到錳鋼岔心初期使用階段輪軌接觸存在相互適應之過程，故岔心表面之硬度不宜過高，一般控制在BHN310至390之間。爆破方式操作過程介紹如下：

1. 高錳鋼岔心於毛胚進廠後，將表面經過打磨等預處理過程，以便使炸藥能伏貼敷設於岔心表面。
2. 炸藥製片。取性能合格的炸藥用專用工具在爆破專用場所製成一定厚度的藥片，按處理部件之不同規格尺寸要求裁剪。
3. 將裁剪好的藥片貼服在需硬化處理的部位並壓實。
4. 連接雷管，所有人員安全撤離爆炸現場後起爆。
5. 測試表面硬度及其它專案的檢驗鑒定工作，如硬度沒有達到要求，再重複上述1-4步驟。估計共需進行2-3次爆炸，於表面經銑、刨後，其表面硬度達到310-390 BHN要求後方能合格出廠【5】。



圖4 岔心加工



圖5 岔心表面敷炸藥

#### (五) 錳鋼岔心與鋼軌焊接

一般而言，道岔區中均使用R350HT級硬化處理鋼軌，但高錳鋼與鋼軌焊接性能差異大，必須利用屬沃斯田鐵系不鏽鋼之中間介質將錳鋼岔心與鋼軌於岔心踵端及趾端藉由火花焊接方式各銲接一段延伸軌完成後出廠，以便於現場組裝時可以與導軌區鋼軌及岔後運行軌焊接，故此段與中間介質焊接之延伸鋼軌均為硬化處理鋼軌。

高錳鋼岔心鑄件與高碳鋼鑄件由於成分不同，故焊接性能亦存在明顯差異。高碳鋼之焊接要求緩冷，以防止熱影響區出現麻田散鐵及產生過大的熱應力。然而，高錳鋼焊接卻要求快冷，以抑止麻田散鐵晶界的碳化物析出，否則將導致熱裂紋之產生與其韌性急遽下降。另外，由於高碳鋼與高錳鋼兩種材料的熱物理性能差異很大，直接焊接將導致接頭處產生很大的內應力，不僅降低接頭的強度和韌性，也嚴重降低其疲勞壽命。因此，必須利用中間介質作為一種物理性質和組織結構介於高錳鋼和高碳鋼之間的焊接材料，而應用於高錳鋼岔心和高碳鋼鋼軌焊接，以降低晶界碳化物析出和液化裂紋形成的傾向。所以當中間介質和鋼軌焊接完成後所進行之熱處理，是為了消除對鋼軌的熱影響，而帶有中間介質的硬化處理鋼軌與

高錳鋼岔心鑄件焊接時，會根據焊接燒損量計算並保留與高錳鋼焊接所需中間介質的長度，並切除剩餘之中間介質後進行與錳鋼鑄件之焊接。由於對於鋼軌並沒有熱影響發生，熔融的僅僅是介質與錳鋼接觸的部份，故焊接後直接於空氣中冷卻，不需再做熱處理，而鋼軌一側則採用風冷控制溫度，故而不影響到鋼軌。

中間介質材料是一種沃斯田鐵(Austenite)系不鏽鋼。可以將焊接性能差異較大之高錳鋼和鋼軌通過火花焊接方式焊接在一起，焊接後之焊道長度（介質區）約為焊接前長度之30~40%，為避免材料脆化現象，焊道及熱影響區（Heat Affect Zone；HAZ）必須進行熱處理，且焊道位置硬度品質不得低於母材（在此母材指錳鋼岔心）硬度80%。焊接完成後最終中間介質之寬度為8-14mm。

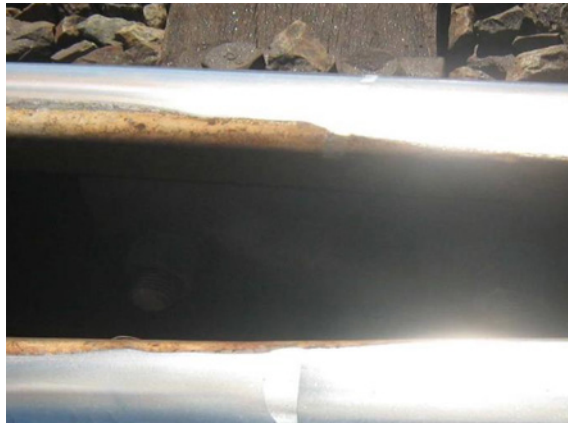


圖6 錳鋼與碳鋼間由中間介質接合

#### 四、結語

在軌道設備中，道岔區往往是軌道線路上最重要的區域，該處鋼軌不論是受到撞擊還是磨耗，都是最嚴重的部分，導致該處鋼軌元件在營運之後不時更換。雖然半鉚接式耐磨鋼軌可以抵抗大部分的磨損，但焊接處卻經不起長時間的撞擊，因此自台北捷運信義線工程開始，於契約規範加入「正線與機廠連絡線之岔心須為整體錳鋼型或堅心錳鋼型」條文，期望藉由高錳鋼耐衝擊、擠壓、磨耗的特性以減少完工後營運期間之維修頻率並提高行車安全，也期望藉由本文，能讓國內更多使用單位了解高錳鋼材料，繼而提升國內軌道工程視野、提升軌道工程品質。

#### 參考文獻

1. 趙福生，(民97)，「臺北捷運工程軌道道岔演進」，捷運技術半年刊，2008年第39期。
2. 張福成，(民99)，「高錳鋼轍叉材料研究進展」，燕山大學學報，2010年第34卷第3期。
3. 郝麗清、劉恒亮，(民97)，「高錳鋼組合轍叉心軌鑄造工藝的研究與應用」，鐵道技術監督，2009年第36卷第5期。
4. 胡永科、李淑娟，(民100)，「高錳鋼ZGMn13的切削加工工藝研究」，機械工程與自動化，2011 第1期。
5. 陳智誠，(民100)，「淺談錳鋼岔心」，台北捷運報導，2011年第279期。