

縮短扣件用鋼材的 球化退火時間

文/白光

壹、前言

適時檢討球化退火模式，在確保球化退火品質良好下，縮短球化退火處理時間，降低球化退火處理成本，增加球化產品的產量，進而創造可觀的潛在效益，是球化處理業者應長期思考並努力的目標。亦即，如何改善球化退火模式，使能縮短球化處理時間並獲得品質良好的球化產品，符合後續扣件(含螺絲、螺栓)加工品質需求，實為棒線球化處理業者當務之急。

由於鋼材抽線後較易球化，且中低碳合金鋼材(含條鋼或線材盤元)，於粗抽前，已經過一次退火，故抽線後的第二次退火應有調整空間；此外，一般碳鋼方面，盤元尺寸越小，則球化效果越佳，亦應有調整空間。因此，本文針對抽線後之中低碳合金鋼材，及 $\phi 13\text{mm}$ 以下小尺寸碳鋼，設計及試驗評估可節省時間的新球化退火模式，以降低球化退火處理成本，進而增加球化產品的產量，並提升競爭力。

貳、抽線加工與球化原理

1. 球化理論探討

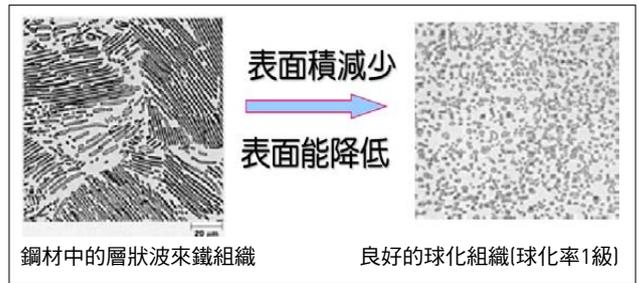
1. 鋼材中的波來鐵(Pearlite)組織，包括肥粒鐵與雪明碳鐵，當雪明碳鐵呈層狀排列時，其界面面積較大，若經球化退火使雪明碳鐵呈球狀，則可降低表面能，成為較穩定狀態且良好的球化組織，如圖1。則有利於螺絲(栓)、螺帽之冷鍛(打)成形。
2. 理論上，當加熱溫度不顯著的比A1點略高，同時均溫時間亦不充分時，則沃斯田鐵中碳濃度不均勻，而在碳化物最後分解之部份，其碳濃度比周圍要高，或碳化物不能完全固溶在沃斯田鐵中，而被分斷成粒狀殘存，此時再加以徐冷，完成 γ (沃斯田鐵) $\rightarrow \alpha$ (肥粒鐵)變態，則碳化物不呈層狀之析出而成為球狀化。

2. 抽線加工加速球化之原理

影響球化退火品質的因素主要為，球化退火前組織[包括熱軋(As-Rolled)鋼材(含條鋼或線材盤元)及冷加工鋼材]、球化退火溫度、均溫時間及冷卻速率等。

前組織與冷加工對鋼材之影響歸納如下：

1. 前組織為低溫變態者，其碳化物散佈較為均勻，則球化效果較佳。
2. 冷加工(含抽線)使鋼材中波來鐵的層狀組織破裂，則球化退火時，碳化物分斷變得較為容易，如圖2。
3. 由於冷加工造成鋼材中肥粒鐵及雪明碳鐵產生缺陷(差排)，再進行球化退火時，較易獲得良好的球化組織，如圖3。



鋼材中的層狀波來鐵組織 良好的球化組織(球化率1級)

圖1 層狀波來鐵組織經球化退火後呈球狀易於冷鍛(打)成形

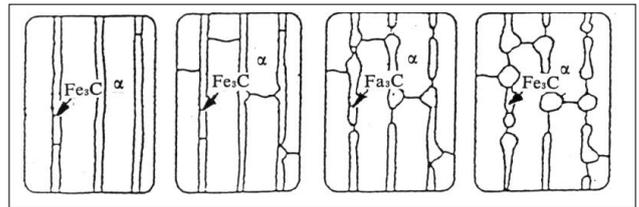


圖2 鋼材經抽線後球化退火期間波來鐵組織結構變化

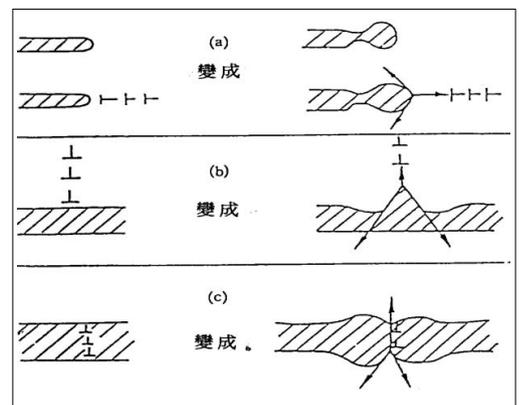


圖3 鋼材抽線後球化位置的三個型態

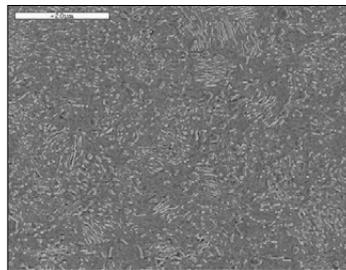


圖4 710°C均溫10hr球化組織

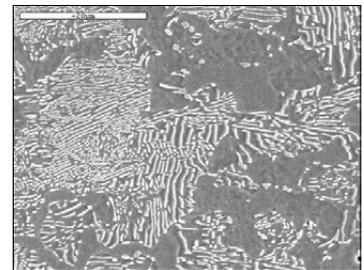


圖5 770°C均溫10hr再生波來鐵

3. 抽線球化鋼材的製程

與本次改善退火模式試驗有關之抽線球化鋼材的製程，說明如下：

1. 中低碳合金鋼(SAIP2製程)：熱軋鋼材(含條鋼或線材盤元) \rightarrow 酸洗 \rightarrow 中間退火 \rightarrow 酸洗被覆 \rightarrow 粗抽 \rightarrow 球化退火 \rightarrow 酸洗被覆 \rightarrow 精抽。
2. 13mm以下小尺寸碳鋼(SAIP1製程)：熱軋鋼材(含條鋼或線材盤元) \rightarrow 酸洗被覆 \rightarrow 粗抽 \rightarrow 球化退火 \rightarrow 酸洗被覆 \rightarrow 精抽。

4. 加熱溫度、均溫時間對球化退火品質的影響

1. 若加熱溫度太低且均溫時間不足時，則球化組織中含有未固溶之波來鐵，如圖4；反之，加熱溫度太高及均溫時間太長時，則球化組織中產生長條狀再生波來鐵，如圖5。



- 因此，球化溫度偏低時，會造成碳化物散佈率差，含有粗大碳化物之不良的球化組織，如圖6。則對鋼料之成形性（延性）有顯著的影響，易造成後續螺絲（栓）、螺帽之冷鍛（打）硬裂，如圖7。

參、退火製程改善的理念

依據上述分析結果，擬訂本次退火製程改善的理念如下：

1. 縮短中低碳合金鋼之第二次退火均溫時間

由於中低碳合金鋼材中，所添加之合金元素鉻(Cr)、鉬(Mo)、釩(V)均為強碳化物形成元素(Carbide-Former Elements)，所形成之合金碳化物，在較高的球化退火溫度之下，仍不易完全固溶，而能成為後續球化反應之理想核，獲得良好的球化組織，因此第一次退火溫度高達760°C且均溫時間長達5hr，亦不會因過度沃斯田鐵化(Homogeneous Austenite)，而造成成長條狀再生波來鐵，由於第二次退火僅在於實施應力消除(Stress-Relief)，因此嘗試縮短第二次退火均溫時間，期能降低球化退火成本並獲得品質良好之球化產品。

2. 提升小尺寸碳鋼之球化退火均溫溫度並縮短均溫時間

由於 $\phi 13\text{mm}$ 以下小尺寸線材，經抽線加工後，易使波來鐵中之雪明鐵破裂，鋼材較易球化，因此，試圖藉著提升球化退火均溫溫度，使鋼材球化加速進行，以彌補時間之縮短，並冀望獲得至少相同水準之球化品質。

肆、中低碳合金鋼第二次退火模式改善與試驗

1. 抽線及球化退火製程設計

As-Rolled鋼材→第一次退火→抽線→第二次退火

2. 改善前之球化退火模式設計

改善前：中低碳合金鋼之第一次退火模式與第二次退火模式，如圖8。

3. 改善後之球化退火模式設計

改善後之第一次退火模式不變，僅將第二次退火模式的均溫溫度760°C、均溫時間5小時，先提升至765°C、均溫0.5小時，再依球化爐設備能力儘速(MAX)降溫至735°C、均溫2.5小時，其餘設定不變。故整個球化退火時間實際上大約縮短了1小時。

改善後：中低碳合金鋼之第一次退火模式與第二次退火模式，如圖9。

4. 球化退火模式改善後取樣試驗

針對中低碳合金鋼SCM415鋼種，將 $\phi 16\text{mm}$ 條鋼盤元進行第一次退火，再抽成 $\phi 13.06\text{mm}$ 鋼線後，取6支長15公分試片，放在球化爐內不同位置，如圖10。

再以改善後之第二次退火模式進行退火，6支試片試驗結果，如表1。

- 硬度值HRB68.3~70.7，皆在良好硬度範圍內。
- 球化率1級，屬最佳之球化組織。

表1 SCM415鋼種球化退火模式改善後6支試片試驗結果

尺寸(mm)	試驗項目	1	2	3	4	5	6
16→13.06	硬度(HRB)	68.9	69.7	70.7	69.4	68.3	70.4
		69.8	70.2	69.8	70.4	69.1	70.0
	球化率	1	1	1	1	1	1

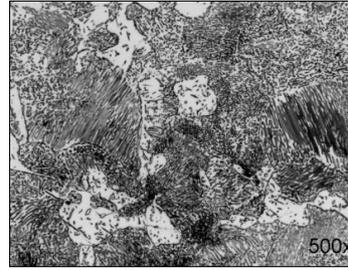


圖6 碳化物散佈率差的球化組織



圖7 螺栓頭部輪緣發生45°冷打硬裂



圖8 改善前：中低碳合金鋼之第一次退火模式與第二次退火模式

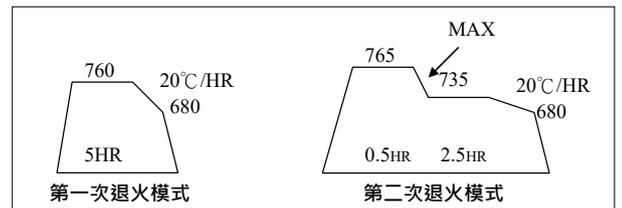


圖9 改善後：中低碳合金鋼之第一次退火模式與第二次退火模式

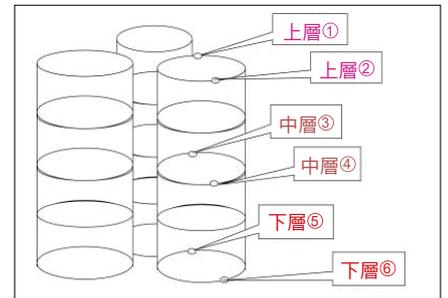


圖10 取6支試片放在球化爐內不同位置示意圖

5. 球化退火模式改善後再確認試驗

將不同尺寸、鋼種之盤元共同入爐，進行第一次退火，經抽成不同尺寸的鋼線後，再以改善後之第二次退火模式進行退火，退火後針對不同尺寸、鋼種之盤元端面取樣，試驗結果，如表2。

- 各尺寸、鋼種之硬度值皆符合要求。
- 各尺寸、鋼種之球化率皆為1級，屬最佳之球化組織。

表2 各尺寸、鋼種以改善後球化退火模式再確認試驗結果

尺寸(mm)	鋼種	硬度(HRB)	球化率	硬度要求
10→8.39	50BV30	67.5	1	75 ↓
12→9.72	SCM435	79.9	1	83 ↓
10→8.06		81.0	1	83 ↓
11→9.21		77.1	1	83 ↓
9→7.24		76.9	1	83 ↓



伍、 $\phi 13\text{mm}$ 以下小尺寸碳鋼球化退火模式改善與試驗

1. 抽線及球化退火製程設計

As-Rolled鋼材→抽線→球化退火

2. 改善前後之球化退火模式設計

將改善前的球化退火均溫溫度 730°C ，先提升至 745°C 、均溫1小時，再降溫至 730°C 、均溫2.5小時，其餘設定不變。

$\phi 13\text{mm}$ 以下小尺寸碳鋼改善前、後之球化退火模式，如圖11。



圖11 $\phi 13\text{mm}$ 以下小尺寸碳鋼改善前、後之球化退火模式

3. 改善後球化退火模式取樣試驗

$\phi 13\text{mm}$ 以下小尺寸碳鋼之改善後球化退火模式取樣試驗，以S45C鋼種為例，將 $\phi 9\text{mm}$ 線材盤元，經抽成 $\phi 7.24\text{mm}$ 鋼線後，再取6支長15公分試片，放在球化爐內不同位置。再以改善後之球化退火模式進行退火，6支試片試驗結果，如表3。

1. S45C鋼種的硬度值 HRB75.4~78.6，皆在良好硬度範圍內。
2. S45C鋼種的球化率皆為1級，屬最佳之球化組織。

表3 S45C鋼種球化退火模式改善後6支試片試驗結果

尺寸(mm)	試驗項目	1	2	3	4	5	6
16→13.06	硬度 (HRB)	68.9	69.7	70.7	69.4	68.3	70.4
		69.8	70.2	69.8	70.4	69.1	70.0
	球化率	1	1	1	1	1	1

4. 球化退火模式改善後再確認試驗

將S45C鋼種之 $\phi 13\text{mm}$ 線材盤元，經抽成 $\phi 10.52\text{mm}$ 鋼線後，再以改善後之球化退火模式進行退火，退火後於盤元端面取樣做試驗，如表4。

1. S45C鋼種的硬度值 HRB76.2，符合HRB80以下之硬度要求。
2. S45C鋼種的球化率1.5級，球化組織良好。

表4 S45C鋼種球化退火模式改善後再確認試驗結果

尺寸(mm)	鋼種	硬度(HRB)	球化率	硬度要求
13→10.52	S45C	76.2	1.5	80 ↓

陸、效果確認與應用

1. 為了証實改善後之球化退火模式的再現性，故進行改善效果之確認試驗，試驗評估結果，中低碳合金鋼，及 $\phi 13\text{mm}$ 以下小尺寸碳鋼(含S45C鋼種)之線材盤元，無論是球化率或硬度值皆在良好範圍內，故應採用改善後之球化退火模式，以節省球化退火時間。
2. 球化退火模式改善後，球化產品品質良好，皆符合扣件業者後續冷(鍛)打加工螺絲(栓)、螺帽之品質需求。

柒、結論

1. 本文透過冶金理論探討、取樣試驗印證及再現性球化產品品質追蹤，設計了合適的球化退火模式。
2. 球化退火模式改善後，球化產品的品質良好，並且每爐可節省1小時的球化退火處理時間，因此降低了球化處理成本，進而提升球化處理量，並創造可觀的潛在效益，提高了市場競爭力。

