

應用田口方法於低碳鋼球化處理製程參數之改善

A Study on the Process Parameters Improvement of Spheroidization on Low Carbon Steel by Using Taguchi Method

李宜鴻*、黃煒盛**、傅兆章***、楊政家****、蘇湘淳*****
Lileo Li*, Wesley Huang**, Tsow-Chang Fu***, Cheng-Jia Yeang****, Siang-Chun Su*****

摘要

本研究主要探討如何應用田口方法提高低碳鋼球化處理製程的球化率。影響球化率之因素繁多，包括升溫速度、升溫溫度、持溫時間、降溫速度、空冷溫度、鋼料合金成分、前加工率、鋼料大小、爐中位置，甚至是爐的特性。本研究是以升溫溫度、持溫時間、空冷溫度及爐中位置四個因子，利用田口方法設計出九組直交表參數並進行實驗，並計算球化率及其訊噪比(SNR)，求得最佳球化率之球化處理參數，並進行驗證實驗。最後進行變異數分析(ANOVA)，討論各因子的貢獻度。

關鍵詞：低碳鋼、球化處理、球化率、田口方法

Abstract

This paper presents an approach to promote the sphericity of low carbon steel material with optimized process parameters by Taguchi method. The factors effect sphericity including heating rate, soaking temperature, soaking time, cooling temperature rate, air-cooling temperature, alloy composition, pre-treatment, work piece size, location in furnace and furnace feature. Four factors including soaking temperature, soaking time, location in furnace and air-cooling temperature were chosen in Taguchi experiments. A L9 orthogonal array experiment was applied in this study. The sphericity and signal-noise ratio were also estimated from experimental result. A set of optimal process parameters was determined from the effect plot of SNRs. The verification experiment was also processed and proved the reproducibility. Finally, the analysis of variance (ANOVA) was carried on to investigate the percent contribution and the interaction of each experimental parameter.

Keywords: Low Carbon Steel, Spheroidization, Sphericity, Taguchi Method

* 國立高雄第一科技大學資通訊服務創新產業碩士專班

** 第一科技技術股份有限公司經理，博士

*** 第一科技技術股份有限公司董事長，博士

**** 國立高雄第一科技大學電腦與通訊工程系碩士班

***** 國立高雄第一科技大學機械與自動化工程系碩士班

通訊作者：李宜鴻，E-mail: lileo1031@gmail.com，聯絡電話：07- 6011730

1. 前言

螺絲螺帽類產品統稱為緊固件或扣件，可分兩大類，一是螺紋扣件，包括螺絲、螺栓、螺樁及螺帽；一是非螺紋緊扣件，包括鉚釘、墊圈、梢及扣環。扣件可說是各項產業不可或缺的基礎零件，其主要應用市場包括航太、海陸運輸、建築、工業設備、消費性產品、電機裝具以及電子資訊設備等領域。

扣件係以線材加工而成，當線材鍛打成形時易因加工硬化而碎裂，因此須經球化處理使線材增加韌性，以增加扣件成形性。影響線材球化率的主要原因分別為持溫溫度、持溫時間、退火爐特性及冷卻速率。持溫溫度不足或持溫時間太短會使線材碳化物球化不完全，使後續產品易碎裂；而持溫溫度過高或持溫時間過長除會使晶粒粗化及材質弱化外，也會增加熱加工成本。因此，**線材球化製程的掌控技術可說是相當重要**。本研究主要探討如何應用田口方法提高低碳鋼球化處理製程的球化率。

2. 球化處理

球化處理指的是藉由球化退火處理方式，將鋼鐵組織內長條狀或沿晶界生長之碳化物改變其形態，使其成為顆粒形狀。

2.1 球化處理的原理

常用的扣件用線材材料，為中低碳鋼材。而其球化處理，是將波來鐵中雪明碳鐵球狀化的退火處理，使板狀雪明碳鐵在後續加工之前變成球粒，並埋於肥粒鐵（Ferrite）中以使材料能具有較佳之延展性。在後續伸線冷鍛過程中，線材往往要承受 70 ~ 80 % 的總變形量，因此需使材料具有良好的塑性與較低的硬度，以降低成形模具的耗損。在正常碳鋼組織中的波來鐵組織內的雪明碳鐵成薄片狀而球化處理後之雪明碳鐵則皆為球狀，而且皆埋於肥粒鐵內，此組織謂之粒狀波來鐵（Globular Pearlite），又雪明碳鐵經球化者為球狀雪明碳鐵（Spheroidizing Cementite）。

由於亞共析鋼在冷卻的過程中，初析肥粒鐵會從沃斯田鐵晶界析出，其餘沃斯田鐵經共析溫度形成層狀波來鐵，如 Fig.1 所示。球化處理即可藉高溫擴散作用加速轉變碳化物型態和分佈。亞共析鋼最常使用的球化處理持溫溫度為 A_1 上方攝氏 20~40 度或 A_{cm} 下方攝氏 20~30 度，保溫後等溫冷卻或直接緩慢冷卻。使部分雪明碳鐵固溶於基地內，而未固溶之碳化物，由與表面張力促成球狀化，而後以緩慢之冷卻速度通過 A_1 變態點，此時原先固溶之雪明碳鐵再度析出，由於冷卻速度慢，使碳元素有充分的時間擴散並生成碳化物，而一般物質皆有向最低能量發展之趨勢，球狀化使物質介面能降低，以此為驅動力，而達到球化處理之目的，如 Fig.2 所示。

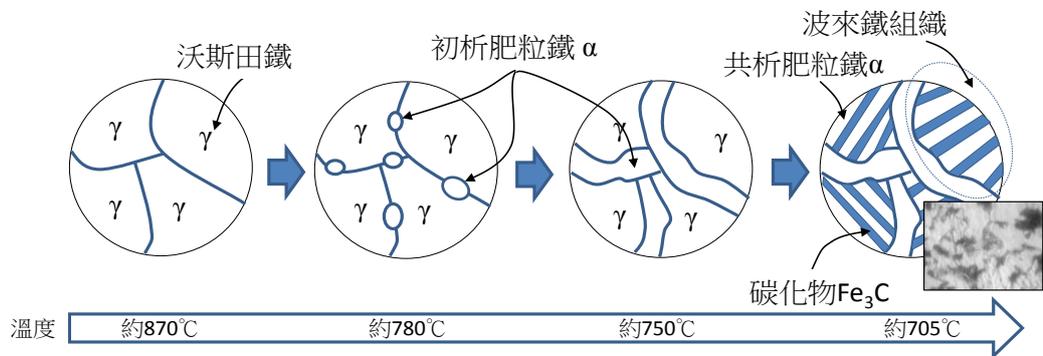


Fig.1 Precipitation of hypo-eutectoid steel in cooling process

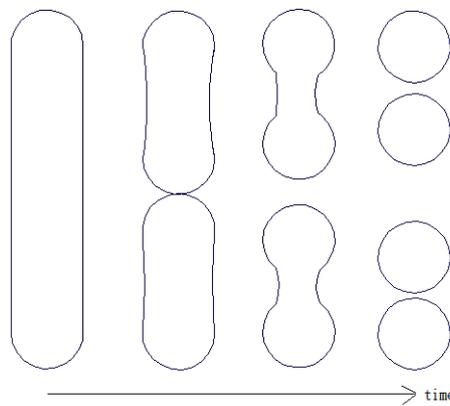


Fig.2 Spheroidization process of Strip carbide in Pearlite structures

碳化物加熱球化處理的驅動力包含三種因素，第一種為粗化，第二種為聚集，第三種為長大。

根據合金能量學原理，碳化物不同曲率半徑界面處，基本中合金元素的濃度差如式(1)所示，

$$C_{k1} - C_{k2} = \frac{2\Omega C_0 \sigma}{RT} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (1)$$

其中， C_{k1} 及 C_{k2} 分別為曲率 $k1$ 及 $k2$ 處合金元素的濃度； $r1$ 和 $r2$ 分別為 $k1$ 及 $k2$ 處碳化物的曲率半徑； C_0 為碳化物曲率為 0 處基本中合金元素的平衡濃度； Ω 為莫耳體積， σ 為碳化物與基體間的界面能， R 為氣體常數， T 是持溫溫度，單位是絕對溫度。

在板狀碳化物粗化(coarsening)的部分。碳化物粗化時的瞬時長大速度(transient growing speed)為 $V_{\text{coarsening}}$ 。如式(2)所示，

$$V_{\text{coarsening}} = \frac{2D\Omega C_0 \sigma}{RTl_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2)$$

其中， D 為合金元素的擴散係數； l_0 為碳化物的長度。

在板狀碳化物間聚集(aggregation)的部分。板狀碳化物間聚集時的瞬時長大速度為 $V_{\text{aggregation}}$ 。如式(3)所示，

$$V_{\text{aggregation}} = \frac{4D\Omega C_0 \sigma}{RTrl_0} \cdot \frac{(1/r_1 - 1/r_2)}{(1/r_1 - 1/\lambda)} \quad (3)$$

其中， r 為碳化物粗化後的柱面半徑，為粒狀二次碳化物之間的距離。

在二次碳化物長大(grow up of second carbide)的部分，二次碳化物長大時的瞬時長大速度為 V_{grow} 。如式(4)所示。

$$V_{\text{grow}} = \frac{2D\Omega C_0 \sigma}{RT r^2} \cdot \frac{(1/r_1 - 1/r_2)}{(1/r_1 - 1/\lambda)} \quad (4)$$

影響碳化物球化的動力學因素有 4 點，如下所述：

- (i) 擴散係數 D 愈大，碳化物的球化也愈容易。
- (ii) 持溫溫度 T 愈高，碳化物的球化速度愈快。
- (iii) 共晶碳化物的板狀碳化物愈細小，間距愈小，愈有利於碳化物的球化。
- (iv) 對於二次碳化物的板狀碳化物愈細小，基體中碳化物顆粒直徑差愈大，

碳化物的團聚速度愈快。

2.2 球化處理的目的

球化處理的目的在於使鋼中之碳化物形成顆粒狀，具有降低原材料硬度及提升其延性之功能。

就低碳鋼盤元線材用於螺絲成形而言，將共析之雪明碳鐵球化，可提升其成形性，亦可避免在螺絲成形時，因過大之成形剪應力，沿波來鐵內較硬之條狀雪明碳鐵延伸碎裂，造成成形脆斷之結果。

一般而言，碳含量愈高，變形阻力愈大的材料，愈需要完全的球化組織。為有些材料加工時，若冷間加工度高，或者期望使製品變形阻力均勻，有時低碳鋼材也要求進行球化處理。故是否需球化處理，並不在於含碳量的多寡，而決定在後續加工製程是否有此需要。

2.3 球化處理的方法

球化處理有許多方法，有長時間加熱法、反覆加熱冷卻法、碳化物固溶法、徐冷法以及恆溫變態法，如 Fig.3 所示。這要依據退火前碳化物的形狀、大小、冷間加工的內容、目的來決定。本研究球化處理方法是選用長時間加熱法，此法乃是將鋼材加熱至 A_1 下方的溫度範圍(約攝氏 650~700 度)，然後長時間保溫後徐冷，如 Fig.3(a)所示。

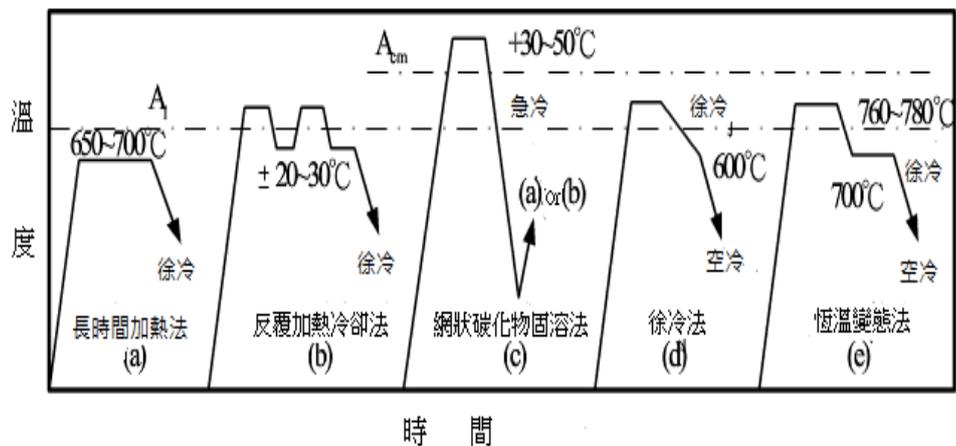


Fig.3 Spheroidization process types

3. 球化率檢測方式

球化率的檢測可分為金相圖片比對以及數位化影像辨識檢測。一是以顯微鏡拍攝之金相圖進行圖片比對，另一項是以數位化影像辨識檢測，計算其球化率。

3.1 金相圖片比對

以顯微鏡拍攝金相試片之金相圖，並以人工比對方式依照相關球化率金相標準判別之。目前在市面上常用的判別標準有以下三種:(1) JB/T 5074—2007: 中華人民共和國機械行業標準, 低、中碳鋼球化體評級;(2) JIS G3507-2: 日本工業標準, 冷鍛鍛用碳素鋼絲;及(3) ASTM A892-88: 美國材料和實驗協會, 高碳軸承鋼微觀結構的定義和等級。如 Table 1 所示, 分別表示其國別, 標準名稱, 應用鋼種, 比對圖數, 及使用倍率等。本研究比對式球化率判定方式是選用 JISG3507-2 做為判定標準。

Table 1 Different metallographics comparison standards

國別	名稱	應用鋼種	比對圖數	使用倍率
日本	JIS G3507-2	冷作碳鋼線	4	400X
中國	JB/T 5074—2007	低、中碳鋼	6	400X
美國	ASTM A892-88	高碳軸承鋼	6	1000X

3.1.1 JIS G3507-2

為日本工業標準，應用到冷鍛鍛用碳素鋼絲，共分 4 級，其放大倍率為 400X，如 Fig.4 所示，最好等級是 No.1，最差等級是 No.4。

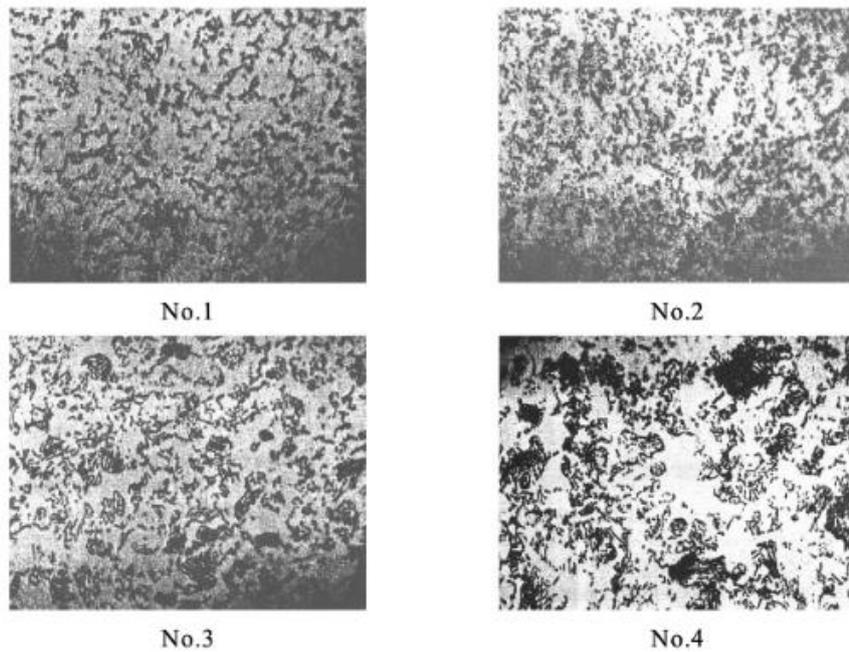


Fig.4 Standard metallographics of JIS G3507-2

3.2 數位化影像辨識檢測

因應數位化時代來臨，為將檢測結果納入數位化管理，數位化影像辨識系統的納入為提升產品品質的關鍵，同時亦可以增加產品競爭力與可信度。數位化影像辨識檢測係以金相顯微鏡拍攝金相圖，以程式進行數位化影像辨識檢測。

3.2.1 FOS®數位化球化率判定系統

本系統判定碳化物球化率之演算法係根據中國鋼鐵訂定之球化定義所設計。即碳化物長寬比小於 5 為球化，碳化物長寬比大於 5 則未球化，故其球化率 S.R.判定方程式如式(5)所示。

$$S.R. = \frac{A_p}{A_{Total}} \times 100\% \quad (5)$$

其中 S.R.為球化率， A_p 為符合長寬比小於五之碳化物總面積， A_{Total} 為碳化物總面積。

本系統使用之步驟(a)將金相圖匯入本系統；(b)按下計算球化率，系統即

自動分析金相圖，包含進行影像二值化、物件分割、碳化物長寬比計算、球化與未球化碳化物統計，最後導入球化率判定方程式計算並獲得球化率結果。如 Fig.5 所示為 FOS® 球化率判定範例。

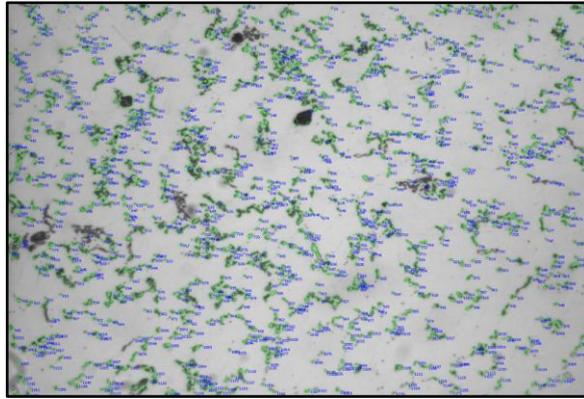


Fig.5 Recognition result image of FOS®

4. 實驗方法與步驟

本研究對 1022 低碳鋼線材試片以 L9 (3^4) 直交表進行球化處理實驗，分析各項球化製程參數對 1022 線材之球化率的影響程度，並依各項參數水準找出最佳之參數組合。

4.1 田口實驗計畫法

4.1.1 田口實驗設計與規劃

本研究為尋找一可獲得最佳球化率之製程參數，採用田口實驗法進行實驗規劃與安排，共選擇四項主要影響線材球化率之製程參數：爐中位置(A)、持溫溫度(B)、持溫時間(C)及空冷溫度(D)，每因子訂定三水準，選擇 L9 (3^4) 直交表作為實驗條件之配置，實驗因子及各水準條件如 Table 2 所示，L9 直交表配置如 Table 3 所示。

Table 2 Control factors and levels

水準	因 子			
	A	B	C	D
	爐中位置	持溫溫度 ($^{\circ}\text{C}$)	持溫時間 (hr)	空冷溫度 ($^{\circ}\text{C}$)
1	後	620	5	500
2	中	660	7	400
3	前	700	9	300

Table 3 L9 (3⁴) orthogonal array experimental parameter assignment

參數	爐中位置	持溫溫度	持溫時間	空冷溫度
單位	-	°C	hr	°C
因子	A	B	C	D
NO.				
L1	後	620	5	500
L2	後	660	7	400
L3	後	700	9	300
L4	中	620	9	400
L5	中	660	5	300
L6	中	700	7	500
L7	前	620	7	300
L8	前	660	9	500
L9	前	700	5	400

4.2 實驗步驟

本研究實驗步驟如 Fig.6 所示，將 1022 線材以 9 組不同的製程參數進行球化處理，並進行金相處理與金相圖拍攝，最後利用 FOS® 數位化球化率判定系統進行球化率判定。

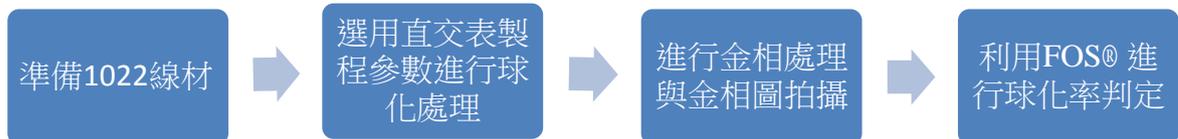


Fig.6 Experimental flow

5. 實驗結果

5.1 最佳參數

球化處理實驗後，各組試片球化率判定結果如 Table 4 所示。並利用此結果進行訊噪比(Signal-to-noise Ratios, SNR)的計算，目標為望大特性，計算公式如下：

$$SNR = -10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{y_i^2} \right) \quad (6)$$

其中，SNR 為訊噪比，n 為樣本點， \bar{y} 為觀察值，s 為變異數。其計算結果如 Table5 所示，並以計算所得之 SNR 繪製因子效果圖，如 Fig.7 所示。由因子效果圖可選

取最佳製程參數為 A2B3C3D3，即爐中位置為中間、持溫溫度為 700°C、持溫時間為 9hr、空冷溫度為 300°C。

Table 4 L9 (3⁴) orthogonal array experiment results

NO	A	B	C	D	球化率			平均值	標準差 S	SNR
					1	2	3			
1	1	1	1	1	57.38	58.52	62.37	59.42	2.13	50.26
2	1	2	2	2	89.15	77.74	88.7	85.20	5.28	53.40
3	1	3	3	3	92.43	95.49	93.95	93.96	1.25	54.23
4	2	1	3	2	81.62	83.66	82.13	82.47	0.87	53.10
5	2	2	1	3	92.67	92.96	90.92	92.18	0.83	54.06
6	2	3	2	1	90.92	92.65	87.55	90.37	2.12	53.89
7	3	1	2	3	77.18	82.27	76.7	78.72	2.52	52.70
8	3	2	3	1	87.65	84.51	87.76	86.64	1.51	53.53
9	3	3	1	2	88.43	89.86	88.92	89.07	0.59	53.77

Table 5 SNR response table

因子	水準 1	水準 2	水準 3	平均值	最佳水準
A	53.33	53.69	52.63	53.21	A2
B	52.02	53.66	53.96	53.21	B3
C	52.70	53.33	53.62	53.21	C3
D	52.56	53.42	53.66	53.21	D3

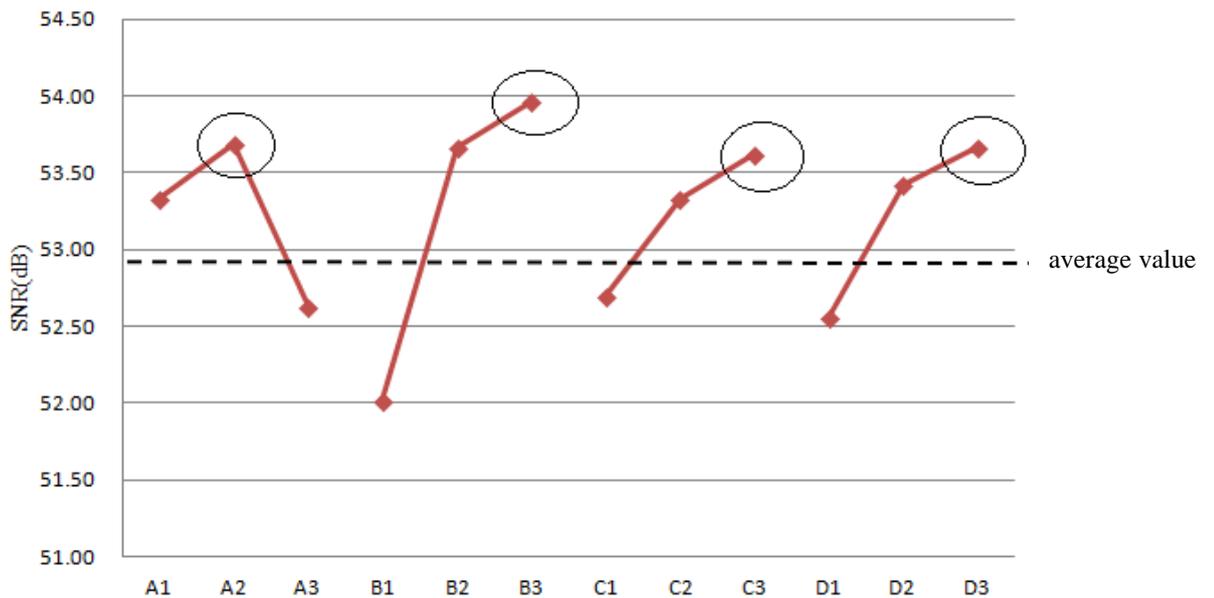


Fig.7 SNR effect plot

5.2 變異數分析

爾後進行變異數分析(Analysis of Variance, ANOVA)，討論各因子貢獻度，如 Table 6 所示，得知其貢獻度由大到小排序為持溫溫度 B(56.38%)、空冷溫度 D (17.3%)、爐中位置 A(14.88%)與持溫時間 C(11.44%)。並選擇貢獻度最高的前兩項因子觀察其交互作用，如 Fig.8 所示，由圖中結果顯示因子 B 與 D 有正向交互作用。最後利用加法模式預測其增益(Gain)，如式(7)所示。

$$\sigma_{\text{predict}} = \bar{\sigma} + (\sigma_{A2} - \bar{\sigma}) + (\sigma_{B3} - \bar{\sigma}) + (\sigma_{C3} - \bar{\sigma}) + (\sigma_{D3} - \bar{\sigma}) \quad (7)$$

其中， σ_{predict} 為增益、 $\bar{\sigma}$ 為 SNR 因子回應平均值、 σ_{A2} 為 SNR 因子 A 水準 2、 σ_{B3} SNR 因子 B 水準 3、 σ_{C3} 為 SNR 因子 C 水準 3、 σ_{D3} 為 SNR 因子 D 水準 3。而其增益計算結果為 2.03dB。

Table 6 Analysis of variance table results

因子	平方合 SS	自由 度 DOF	淨平方合	F-ratio	貢獻度 P(%)	排 序
A	1.74	2	-	-	14.88	3
B	6.59	2	-	-	56.38	1
C	1.34	2	-	-	11.44	4
D	2.02	2	-	-	17.30	2
Error	0.00	0	-	-	0.00	-
Total	11.69	8	-	-	100.00	-

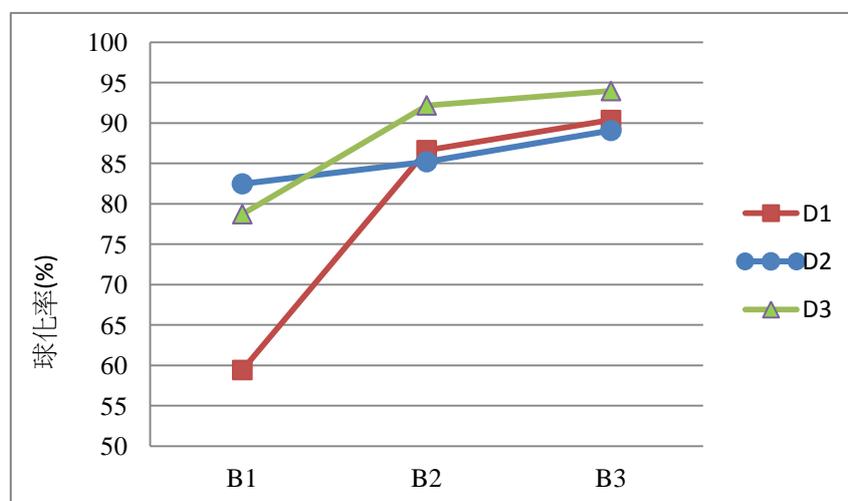


Fig.8 Interaction between factors B and D

5.3 確認實驗

以田口實驗所得之最佳化參數 A2B3C3D3 進行球化處理，並取得其金相圖，利用 FOS® 數位化球化率判定系統進行球化率判定，其判定結果為 96.70%。且 SNR 計算結果為 54.48dB，與加法模式差異僅 0.76dB，故適用加法模式進行預測。因此，依判定結果可知以 A2B3C3D3 製程參數進行球化處理所得之球化率皆高於本研究另外 9 組，因此可確認此製程參數為本研究之最佳參數。

6. 結論

本研究以升溫溫度、持溫時間、空冷溫度及爐中位置四個因子，利用田口方法設計出九組直交表參數並進行實驗，並計算球化率及其訊噪比 (SNR)，求得最佳球化率之球化處理參數。研究結論如下：

1. 本研究利用 L9 (3⁴) 直交表參數配置進行球化處理實驗，並進行球化率計算。其中，球化率所計算之最佳值為 L3 的 93.96%。
2. 使用因子效果圖進行分析，得到最佳製程參數為 A2B3C3D3，即爐中位置為中間、持溫溫度為 700°C、持溫時間為 9hr、空冷溫度為 300°C。並以加法模式預測其增益為 2.09dB，與實際 SNR 僅差異 0.76dB。且確認實驗的球化率計算結果為 96.70%，確實利用田口方法成功的提高了鋼料的球化率。
3. 以 ANOVA 結果顯示，貢獻度最高的因子是持溫溫度(56.38%)，次之為空冷溫度(17.30%)，並根據因子交互作用圖的觀察，說明了此兩項因子確實是有交互作用的影響。

參考文獻

1. 財團法人日本規格協會，JIS ハンドブッケー鉄鋼 II, 2005.
2. 台灣區鋼線鋼纜工業同業公會，鋼線鋼纜生產技術集錦，臺灣區鋼線鋼纜工業同業公會, 1998.
3. 黃煒盛，楊玉森，傅兆章，黃柏禎，低碳鋼盤元線材球化率檢測方法之探討，台灣金屬熱處理學會 95 年會員大會暨論文研討會，台南，2006.12.16, pp.

102-110.

4. 曾光宏, 許傳宗, 鋼材球化退火處理及碳化物球化程度評估介紹, 惠達雜誌, Vol.88, 2004, pp. 103-107.
5. Yang Yu-Sen, Tsow-Chang Fu, Wesley Huang and An-Cheng Lo, A Study of the Measuring Method of Spheroidizing Rate of Low Carbon Steel Coils, 4th International Conference on Thermal Process Modeling and Computer Simulation (ICTPMCS 2010), Shanghai, China, 2010.05.31-06.02.
6. 黃煒盛, 傅兆章, 李宜鴻, 李國維, 低合金中碳鋼線材球化率數位化檢測方法, 鍛造, 第 22 卷第 2 期, pp.8-12, Jun. 2013.
7. 黃煒盛、傅兆章、李宜鴻, 盤元線材球化率的檢測方法, 機械月刊, Vol.450, 2013, pp. 文 103-109.
8. 台灣區鋼線鋼纜工業同業公會, 條線產品品質特性與加工應用班, 2008.