

# 沖壓製程對矽鋼片鐵損劣化影響之研究

## Effect of Stamping Process on Iron Loss of Electrical Steel Sheets

蔡孟豪<sup>1\*</sup>、楊玉森<sup>2</sup>

國立高雄科技大學 機電工程系

\*E-mail:F109102107@nkust.edu.tw

### 摘要

本研究主要探討沖壓條件對矽鋼片鐵損劣化的影響，利用均勻設計實驗分析鐵損劣化結果，以沖壓前後的劣化差異定義鐵損劣化百分比，觀察劣化百分比找出最佳沖壓參數，以此參數進行沖壓製程，探討優化後之鐵損劣化，最後量化驗證鐵損劣化情形，統計數據並觀察在隨著大量沖壓過後，有何不良影響產生。實驗以中鋼料號 50CS290 矽鋼片進行沖壓，以沖切間隙量（10 $\mu$ m、17.5 $\mu$ m、25 $\mu$ m）、沖壓速度(21~50Spm)及壓料力(485、970、1553Kgf)等沖壓參數設計均勻實驗(U30)，找出此料號之最佳參數。實驗結果顯示，50CS290 之沖壓參數設定在沖切間隙量 17.5 $\mu$ m、壓料力 1553kgf 時，可獲得最低鐵損劣化百分比 15.93%，沖壓速度與鐵損劣化無明顯關聯性。利用上述的最佳化沖壓條件進行量化驗證鐵損值變化，連續沖壓八千片矽鋼片並以一百片為單位計算平均鐵損值，統計第一百片與第八千片的趨勢觀察劣化情形，發現在最佳化條件下鐵損值從原本的 2.76w/kg 升高至 2.80w/kg，鐵損劣化百分比為 0.98%，結果顯示大量沖壓導致的沖頭磨損對於鐵損劣化無太大影響。

**關鍵詞：**矽鋼片、沖壓、鐵損值、均勻實驗

## **Abstract**

This study mainly discusses the stamping condition effect on the iron loss degradation value of silicon steel sheets. The uniform design experiment is used to analyze the iron loss conversion results and compares before with after to define the average iron loss degradation percentage. Observe the average iron loss degradation percentage to find the optimal stamping condition and take advantage of this condition to start the process. The final stage investigates the optimal stamping conditions through quantitative analysis and statistical data to observe if the situation after enormous stamp will occur adverse effects. Punching with China Steel No. 50CS290 silicon steel sheet, punching parameters such as trimming tolerance (10 $\mu$ m 、 17.5 $\mu$ m 、 25 $\mu$ m), stamping speed (21~50Spm) and blank hold force (485 、 970 、 1553Kgf) Design uniform experiment (U30) to discuss the relationship between the silicon steel sheet and iron loss value for finding the optimized parameters. The experimental results are as follows that 50CS290 optimal stamping conditions are 17.5 trimming tolerance, 1553kgf blank hold force, and the lowest average iron loss degradation percentage of 15.93%. There doesn't have an obvious correlation between stamping speed. At last, discuss the variety of iron loss degradation value through quantitatively analyze the abovementioned best stamping condition. By means of stamping the silicon steel sheets 8,000 consecutive times to calculate the variety of average iron loss degradation percentage per 100 pieces and statistics the hundredth to eighth thousand trend to observe the degradation situation. As we can see that the iron loss degradation value rise slightly almost 2.76w/kg to 2.81w/kg, the average iron loss degradation percentage 0.98%. The results show that the enormous stamping led to punch wear will not affect considerably the average iron loss degradation percentage.

**Keywords:** silicon steel sheets & stamping, iron loss degradation value, uniform design experiment

# 1. 緒論

## 1.1 前言

馬達的應用非常廣泛，已成為現今生活上常見之機械，無論是減速電機、交直流電機、步進電機、外轉子電機、發電器、繼電器以及家庭各式電器內部鐵芯，幾乎都是由矽鋼片所組成，隨著工業的成長，能源、電源之損耗需求大幅增加，而在綠能環保意識興起，如何降低馬達之能源損失，以及提高馬達效能，且達到節能減碳。而為了改善馬達效率，其影響矽鋼片主要之性能其降低矽鋼片之鐵損、提高磁通密度、提高導磁率，為矽鋼片主要的性能影響。

馬達鐵芯之材料，主要是以最常規的方法沖壓成型進行加工，依據中鋼公司的資料顯示[1]，沖壓之不適當的沖壓條件，會使矽鋼片造成大量的殘留應力及晶粒破壞，模具間隙設計不當，會使矽鋼片產生翹曲變形，導致磁性質劣化，此現象稱作鐵損(iron loss)。由於馬達能源耗損，大多部分都來自於矽鋼片，本研究以均勻設計實驗，找出沖壓參數對矽鋼片鐵損值之影響，並建立最佳化之沖壓參數條件，再以上述的最佳化沖壓條件進行量化驗證鐵損值，觀察第一百片到第八千片的趨勢來探討劣化情形。

## 2. 實驗步驟與流程

### 2.1 實驗流程

本研究探討中鋼料號 50CS290 的馬達矽鋼片，並進行鐵損值的量測，以下分為兩部份探討，首先以均勻設計實驗進行矽鋼片沖壓製程，探討沖壓參數對於鐵損劣化的影響，並找出優化的沖壓參數。第二階段連續沖壓八千片矽鋼片並以一百片為單位計算平均鐵損值，統計第一百片與第八千片的趨勢觀察劣化情形，圖 1 為本實驗步驟與流程。

1. 對料號 50CS290 馬達矽鋼片進行鐵損值量測，鐵損量測 3 次取平均值。
2. 將材料依照均勻設計表列之沖壓參數進行沖壓，每一沖壓參數皆取 3 次試樣。
3. 量測馬達矽鋼片沖壓過後鐵損值，鐵損量測 3 次取平均值。
4. 探討沖壓參數對於馬達矽鋼片鐵損劣化的影響。
5. 釐清馬達矽鋼片經加工後鐵損劣化之原因，並找出最佳化沖壓參數。
6. 使用最佳化參數沖壓 50CS290 並量測鐵損值。
7. 使用伺服沖床進行大量衝壓製程，並逐一量測每百片的鐵損劣化值。
8. 觀察劣化趨勢並探討劣化原因。

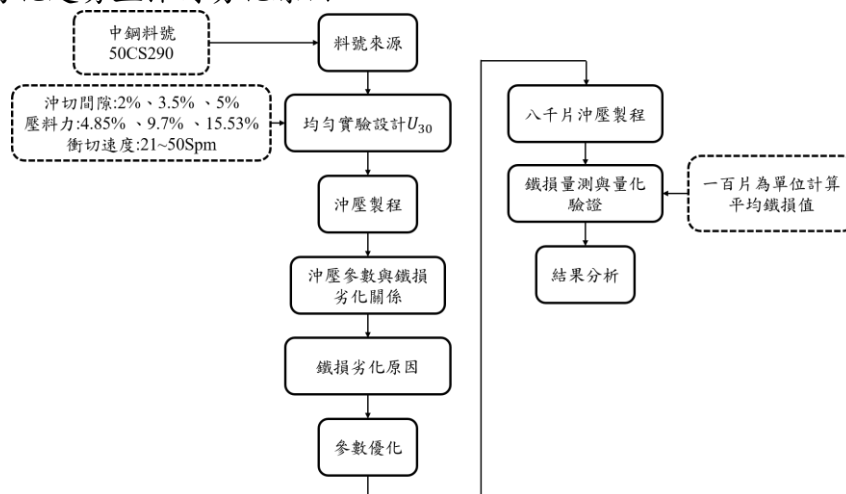


圖 1 實驗流程圖

## 2.2 材料製備

本研究所採用料號為 50CS290 的馬達矽鋼片。表 1 為中鋼生產馬達矽鋼片規範表，從表可得知馬達矽鋼片料號鐵損值低於 JIS 保證值。觀察馬達矽鋼片金相組織，量測晶粒尺寸得知 50CS290 晶粒尺寸為  $72\mu\text{m}$ 。圖 2 為矽鋼片 2D 設計圖，矽鋼片設計須考慮磁能、磁路與輸入電能等三個要素，針對這三點進行製圖並進入後續製程，圖 3 為此次沖壓製程設備伺服沖床 SD1-200，為協易機械所提供。

表 1 中鋼馬達矽鋼片規範

中國鋼鐵-非方向性矽鋼片				
料號	鐵損-W15/50(W/kg)			板厚
	JIS保證值	實際值	馬達效率	
50CS290	$\leq 2.9$	$\leq 2.65$	93.60%	0.5mm

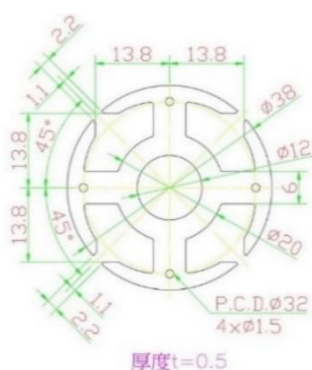


圖 2 馬達矽鋼片設計圖



圖 3 伺服沖床 SD1-200 (協易機械)

## 2.3 沖壓製程

表 2 顯示本實驗選用的實驗參數，有三種不同的沖壓參數分別為沖切間隙量、壓料力及沖壓速度，下列為每個因子對於本研究之影響：

(1) 壓料力之影響：若能施以適當的壓料力，便能夠減少成形後板材周圍的翹曲、變形。(2) 沖切間隙量之影響：當模具間隙小時，會使沖切力過大，而導致沖頭斷裂，因此發展重點為，降低沖壓時之過大沖切力以及毛邊之高度。(3) 沖壓速度之影響：沖壓速度越大沖擊力量越大，不僅對沖剪力大小有影響，對於沖頭使用壽命也有影響。

表 2 50CS290 沖壓參數表

均勻設計實驗				
材料		50CS290		
U30	沖切間隙( $\mu\text{m}$ )	10	17.5	25
	壓料力(kgf)	485	970	1553
	沖壓速度(spm)	21~50		

## 2.4 均勻設計表選用

均勻設計表與正交設計表相似，皆通過一套精心設計的表來進行實驗設計。每一個均勻設計表都有一個代號  $U_n(m^k)$  或  $U_n^*(m^k)$  表示，各符號所代表的意義，如圖 4 所示。均勻設計表  $U_7(7^4)$ ，代表要做 7 次實驗，可安排 4 個因子，每個因子有 7 個水準。

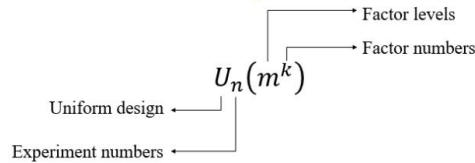


圖 4  $U_n(m^k)$  各符號所代表意義表

當確定實驗因子與水準數時，可選用適當的均勻實驗設計表進行實驗。因本實驗一共考慮了 3 個實驗因子，其中一因子有 30 個水準，根據查表[19]得知  $U_{30}$  符合本實驗需求，因此本實驗選用  $U_{30}$  均勻實驗設計表，將章節 2.3 討論的沖壓參數套用進  $U_{30}$  均勻實驗設計表，如表 3 所示。

表 3 50CS290 均勻設計實驗( $U_{30}$ )參數表

No.	沖切間隙(um)	沖壓速度(spm)	壓料力(kgf)	No.	沖切間隙(um)	沖壓速度(spm)	壓料力(kgf)
1	10	38	1553	16	10	29	1553
2	17.5	25	970	17	17.5	47	970
3	25	43	485	18	25	34	970
4	10	30	1553	19	10	21	485
5	17.5	48	1553	20	17.5	39	1553
6	25	35	970	21	25	26	970
7	10	22	485	22	10	44	485
8	17.5	40	1553	23	17.5	31	485
9	25	27	1553	24	25	49	1553
10	10	45	970	25	10	36	970
11	17.5	32	485	26	17.5	23	485
12	25	50	1553	27	25	41	485
13	10	37	970	28	10	28	1553
14	17.5	24	970	29	17.5	46	970
15	25	42	485	30	25	33	485

### 3. 結果與討論

#### 3.1 50CS290 $U_{30}$ 均勻設計實驗結果

根據2.4設計的均勻實驗設計表進行沖壓，並於圖5統計 $U_{30}$ 實驗數據，每一組分別進行三次沖壓並量測，總共會有90個試片進行統計，可以看到50CS290在沖切間隙量 17.5 $\mu\text{m}$ 、壓料力1553kgf、沖壓速度39spm可獲得最低15.93%的平均鐵損劣化百分比，後續將個別針對每一個實驗參數進行結果驗證。

No.	沖切間隙(um)	沖壓速度(spm)	壓料力(kgf)	鐵損劣化百分比1	鐵損劣化百分比2	鐵損劣化百分比3	平均鐵損劣化百分比
1	10	38	1553	18.33%	18.26%	17.99%	18.19%
2	17.5	25	970	16.60%	16.60%	16.53%	16.57%
3	25	43	485	18.83%	17.92%	17.62%	18.12%
4	10	30	1553	19.17%	18.18%	17.62%	18.32%
5	17.5	48	1553	18.49%	16.60%	16.73%	17.27%
6	25	35	970	21.70%	20.08%	19.67%	20.48%
7	10	22	485	18.93%	19.34%	18.93%	19.07%
8	17.5	40	1553	17.08%	18.14%	18.72%	17.98%
9	25	27	1553	20.51%	17.23%	19.01%	18.92%
10	10	45	970	18.75%	18.83%	18.60%	18.72%
11	17.5	32	485	16.53%	17.45%	17.09%	17.02%
12	25	50	1553	18.64%	16.39%	17.36%	17.46%
13	10	37	970	15.90%	17.95%	17.80%	17.21%
14	17.5	24	970	13.99%	17.24%	18.61%	16.62%
15	25	42	485	19.50%	19.42%	18.26%	19.06%
16	10	29	1553	18.30%	17.95%	18.64%	18.30%
17	17.5	47	970	16.95%	18.38%	16.46%	17.26%
18	25	34	970	19.92%	17.15%	19.01%	18.69%
19	10	21	485	19.26%	19.26%	19.34%	19.29%
20	17.5	39	1553	16.24%	16.17%	15.38%	15.93%
21	25	26	970	16.95%	17.52%	19.91%	18.13%
22	10	44	485	19.83%	21.19%	20.00%	20.34%
23	17.5	31	485	16.81%	16.24%	17.39%	16.81%
24	25	49	1553	18.91%	16.39%	17.01%	17.44%
25	10	36	970	18.26%	20.33%	22.18%	20.25%
26	17.5	23	485	14.63%	17.99%	16.67%	16.43%
27	25	41	485	20.00%	16.53%	14.98%	17.17%
28	10	28	1553	19.01%	17.36%	18.52%	18.29%
29	17.5	46	970	17.95%	16.95%	17.02%	17.31%
30	25	33	485	18.07%	18.11%	17.09%	17.76%

圖 5 均勻設計實驗表( $U_{30}$ )之數據統計

### 3.2 沖切間隙量對於50CS290鐵損性質驗證

在矽鋼片經由均勻設計實驗( $U_{30}$ )沖壓參數進行沖壓後，會發現當沖切間隙量為  $10\mu\text{m}$  時會產生最大的鐵損劣化百分比，而隨著沖切間隙量增加至  $17.5\mu\text{m}$  時，鐵損劣化百分比則會隨著沖切間隙量增加而下降，當間隙量持續增加至  $25\mu\text{m}$  後，鐵損劣化百分比則又會開始增加。

由於本實驗採用的均勻設計實驗( $U_{30}$ )方法，故在圖 6 為沖切間隙量分組呈現，沖切間隙量  $10\mu\text{m}$  時會造成平均鐵損劣化 18.80%，沖切間隙量  $17.5\mu\text{m}$  時會造成平均鐵損劣化 16.92%，沖切間隙量  $25\mu\text{m}$  時會造成平均鐵損劣化 18.32%，因而發現切間隙量  $17.5\mu\text{m}$  為 50CS290 最佳之沖切間隙量參數。

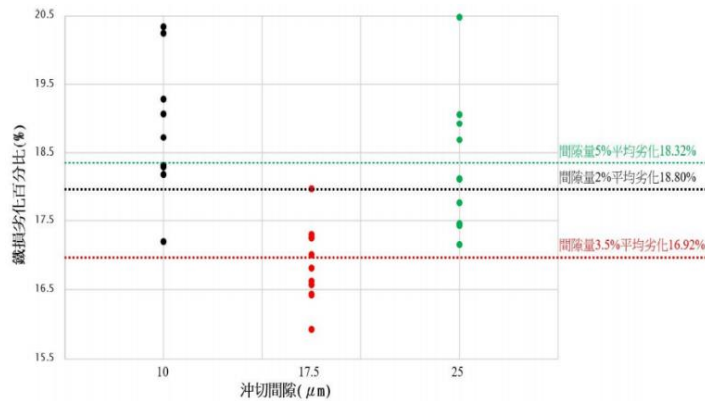


圖 6 沖切間隙量對於 50CS290 鐵損劣化百分比影響

### 3.3 壓料力對於50CS290鐵損性質驗證

在矽鋼片經由均勻設計實驗( $U_{30}$ )沖壓參數進行沖壓後，會發現當壓料力為  $1553\text{kg}$  時會產生最小的鐵損劣化百分比，而隨著壓料力降至  $9.70\%$  及  $4.85\%$  時，鐵損劣化百分比反而會產生上升的現象。

由於本實驗採用的均勻設計實驗( $U_{30}$ )方法沖壓，故在圖 7 為壓料力分組呈現，當壓料力為  $485\text{kgf}$  時會造成平均鐵損劣化為  $18.11\%$ ，壓料力  $970\text{kgf}$  時會造成平均鐵損劣化為  $18.13\%$ ，而壓料力  $1553\text{kgf}$  時會造成平均鐵損劣化降為  $17.81\%$ ，因而發現壓料力  $1553\text{kgf}$  為 50CS290 最佳之壓料力參數。

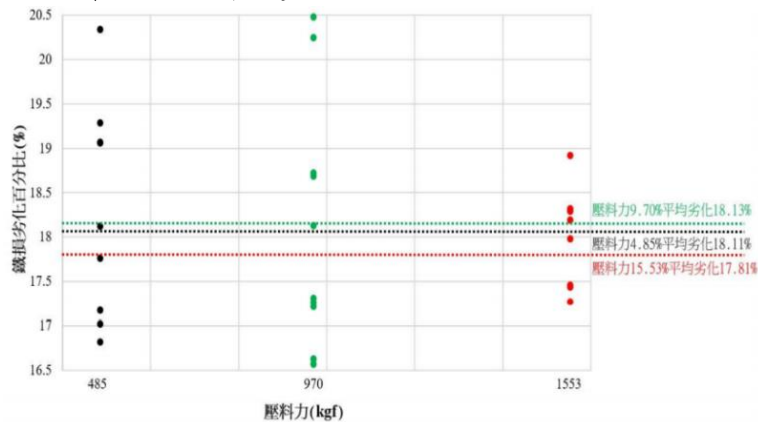


圖 7 壓料力對於 50CS290 鐵損劣化百分比影響



### 3.4 沖壓速度對於50CS290鐵損性質驗證

由於本實驗採用的均勻設計實驗( $U_{30}$ )方法沖壓，故在圖 8 為沖壓速度分組表達，沖壓速度 21Spm 時會造成鐵損劣化 18.12%，沖壓速度 20-30Spm 時會造成平均鐵損劣化 17.99%，沖壓速度 31-40Spm 時會造成平均鐵損劣化 18.03%，沖壓速度 41-50Spm 時會造成平均鐵損劣化 18.02%，會發現沖壓速度對於鐵損劣化百分比無明顯關係。

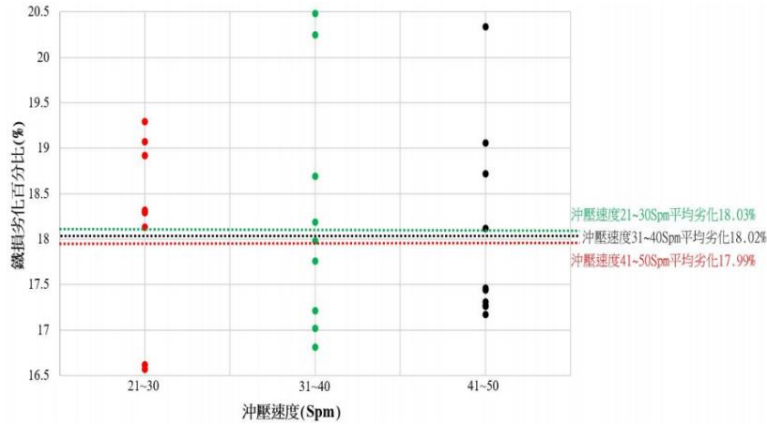


圖 8 沖壓速度對於 50CS290 鐵損劣化百分比影響

### 3.5 沖壓製程量化驗證

以上述最佳化參數進行八千片矽鋼片沖壓，將原材送進料帶，設定好參數進行自動化製程，完成後按照沖壓順序以每一百片進行編號，後續針對編號逐一量測鐵損值並記錄。

圖 9 顯示量化驗證結果，可觀察到在前兩千片時鐵損劣化值皆維持在 2.77w/kg 左右，之後逐漸上升，進入四千片時已有到達 2.79w/kg 的趨勢，到最後八千片皆維持在 2.8w/kg 上下。將鐵損劣化值轉換成鐵損劣化百分比，以最初的第一百片與最後第八千片作為前後對比，算出鐵損劣化百分比為 0.98%。



圖 9 八千片連續沖壓鐵損值

#### 4. 結論

在本研究中，選用矽鋼片料號 50CS290 矽鋼片進行沖壓製程，研究沖壓參數對於矽鋼片鐵損劣化影響，並以 CNS14400 標準中之 200kW-4P-3Φ-220V-60Hz-Fclass 馬達作為效率計算之範例，並使用均勻設計實驗 $U_{30}$ 進行參數優化，得到以下的結論：

1. 可從 $U_{30}$ 實驗表中設計的參數得知，在沖切間隙量 17.5 $\mu\text{m}$ 、壓料力 1553kgf 可得到最低的鐵損劣化百分比 15.93%。
2. 衝切間隙量為 17.5 $\mu\text{m}$  時得出最小平均鐵損劣化 16.92%。
3. 壓料力為 1553kgf 時得出最小平均鐵損劣化 17.81%。
4. 沖壓速度在 20-50Spm 的參數範圍下得出的實驗數據，皆對於平均鐵損劣化百分比無太大影響。
5. 量化驗證八千片矽鋼片發現在最佳化條件下鐵損值從原本的 2.76w/kg 升高至 2.80w/kg，鐵損劣化百分比為 0.98%。



## 5. 誌謝

本論文為科技部計畫編號MOST-109-2218-E-992-004之計畫，由於科技部的支持，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

## 6. 參考文獻

1. 蕭一清，2014，電磁鋼片生產實務，中鋼公司鋼鐵研究發展處，2014年 12月08日
2. 林哲安，2015，電磁鋼板之沖切斷面品質與殘留應力分析”，國立高雄應用科技大學模具工程系，碩士論文。
3. H.A. Weiss, N. Leuning, S. Steentjes, K. Hameyer, T. Andorfer, S. Jenner, W. Volk, Journal of Magnetism and Iron loss Materials Volume: 421, August, 2016, pp.250-259.
4. M. Emura, F.J.G. Landgraf, W. Ross, J.R. Barreta, The influence of stamping technique on iron loss properties of electric steel, Journal of Magnetism and Iron loss Materials, 2003 ,pp358-360.
5. KAIDO Chikara, WAKISAKA Takeaki, "無方向性電磁鋼板の鉄損に及ぼす素材要因の影響," 電氣学会論文誌 .A, 基礎・材料・共通部門誌 , vol. 117, pp. 685-690, 1997.
6. K. Yamazaki, S. Tada, H. Mogi, Y. Mishima, C. Kaido, S. Kanao, et al., "Eddy current analysis considering lamination for stator core ends of turbine generators," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 44, pp. 1502-1505, 2008.
7. M. Takezawa, K. Kitajima, Y. Morimoto, J. Yamasaki, and C. Kaido, "Effect of strain by mechanical punching on nonoriented Si-Fe electrical sheets for a nine-slot motor core," IEEE transactions on magnetics, vol. 42, pp. 2790-2792, 2006.
8. H.naumoski, B. Riedmuuler, A. Minkow, U. Herr, Investigation of the influence if different stamping procedures on the global and local iron loss properties of non-oriented electrical steel, Journal of Magnetism and Iron loss Materials, 2015, pp.126-133