

第六章 齒形變異之田口實驗

6-1 實驗目的

利用銅熔滲製程，將可以大幅提高粉末冶金齒輪的機械強度，但製程的複雜化也相對造成了齒輪精度的降低，而粉末冶金技術之製程參數非常多，任何一個參數變動，都可能會影響到齒輪的品質與精度，因此，對於粉末冶金齒輪製程參數的控管是很重要的，而探討哪些製程參數對齒輪精度所造成的影响較大則是首要工作之一。

本實驗配合實際生產線上之操作狀況，選擇了五項製程參數：原料粉、生胚密度、含銅量、燒結速度及放銅方式，以田口（Taguchi）式實驗方法探討銅熔滲製程對於粉末冶金齒輪之齒形變異的影響。本實驗將追蹤齒輪精度在粉末冶金製程各工程中的變化情形，以田口實驗取得製程的最佳化，並比較各工程對齒輪的機械性質之影響，做為未來針對粉末冶金正齒輪進行銅熔滲製程之參考依據，藉由製程參數的改變與控管，來提高粉末冶金正齒輪之精度。

6-2 實驗材料

粉末的性質決定了有關的成形和燒結行為，甚至對於粉末冶金製品最後的機械性質與品質，有著相當顯著的影響，而粉末變化率更影響著產品的精度與模具尺寸的設計，因此，如何依金屬的種類、粉末冶金製程的需求及產品的用途，來選擇最適用的原料粉，便成為粉末冶金工業中一項很重要的工作了。

本實驗所使用之原料粉分為 A、B 兩種粉末，A 粉末為霧化海綿鐵粉，碳含量大約在 1%左右，而 B 粉末除了含有碳之外，還包含了銅、鎳、鉬等金屬元素，表 6.1 為本實驗所用 A、B 兩粉末之調和及

其特性。

表 6.1 實驗原料粉之調和及特性

粉末代號	A	B
MPIF 標準	—	FN0205\8
合金元素	Fe, C	Fe,Cu,C,Ni,Mo
含碳量 (%)	0.90~1.10	0.54~0.66
視密度 (g/cm ³)	3.20~3.35	3.05~3.25
流動率 (s/50 g)	38	32

6-3 實驗設備



本研究採用台灣保來得公司實際生產線上的設備進行實驗，包含有：成形模具、成形設備、燒結設備及量測設備等四項，以下將分別對各項設備作簡略的介紹。

6-3-1 成形模具

為避免齒輪外徑過大造成精度量測上之困難，和模數過小使得齒形變化不顯著，以至於不易分析比較，故本實驗採用台灣保來得公司現有的齒輪模具中，圖號為 CCJ030F 之齒輪，該齒輪模具之齒形設計參數如表 6.2 所示。該模具結構為 L-Type，由一支上沖頭（短）、一支下沖頭（長）、一個中模（外棒）和一支芯棒所組成，如圖 6.1 所示。

表 6.2 齒輪模具之齒形設計參數（台灣保來得公司提供）

齒輪圖號 齒輪設計參數	CCJ030F
齒 數	22
壓力角 (D/M/S)	20/00/00
模 數 (mm/tooth)	1.75
齒外徑 (mm)	42.00



圖 6.1 CCJ030F 齒輪之成形模具組

6-3-2 成形設備

本實驗所使用之成形設備為日本 Tamagawa 公司所製造的氣壓式 100 噸成形機，如圖 6.2 所示。以鋼模冷壓成形過程，包含填料、加壓和退模三個步驟的循環。此機型屬於床台可動式，並採用浮動模式加壓，可將單一之上沖頭加壓，改變成為上下加壓之動作，而其退模機構為下拉式退模，即當加壓完成時，浮動的中模會下降而使壓胚體被下沖頭頂出模端面，此時餵料盒再滑動至模腔上餵料，形成一個可自動化循環的連續動作。其成形作動之示意圖如圖 6.3 所示。



圖 6.2 100 噸氣壓式粉末成形機（日本 Tamagawa）

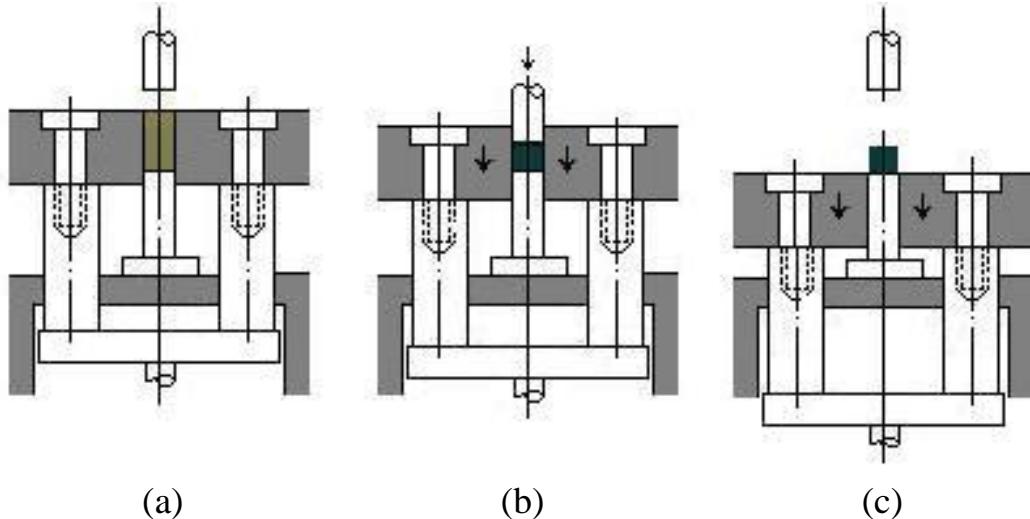


圖 6.3 浮動模式加壓及其退模示意圖

6-3-3 燒結設備

本實驗所使用的燒結爐，為日本山崎公司所製造之輸送帶式連續燒結爐，如圖 6.4 所示。其最高燒結溫度為 1149°C ，而本實驗所採用的燒結溫度為 1120°C ，使用的保護性氣氛為 RX (丙烷)。而透過輸送帶速的調整，可將燒結速度分為 80、100 及 120(mm/min)三種，以此控制燒結時間參數。



圖 6.4 輸送帶式連續燒結爐（日本山崎公司）

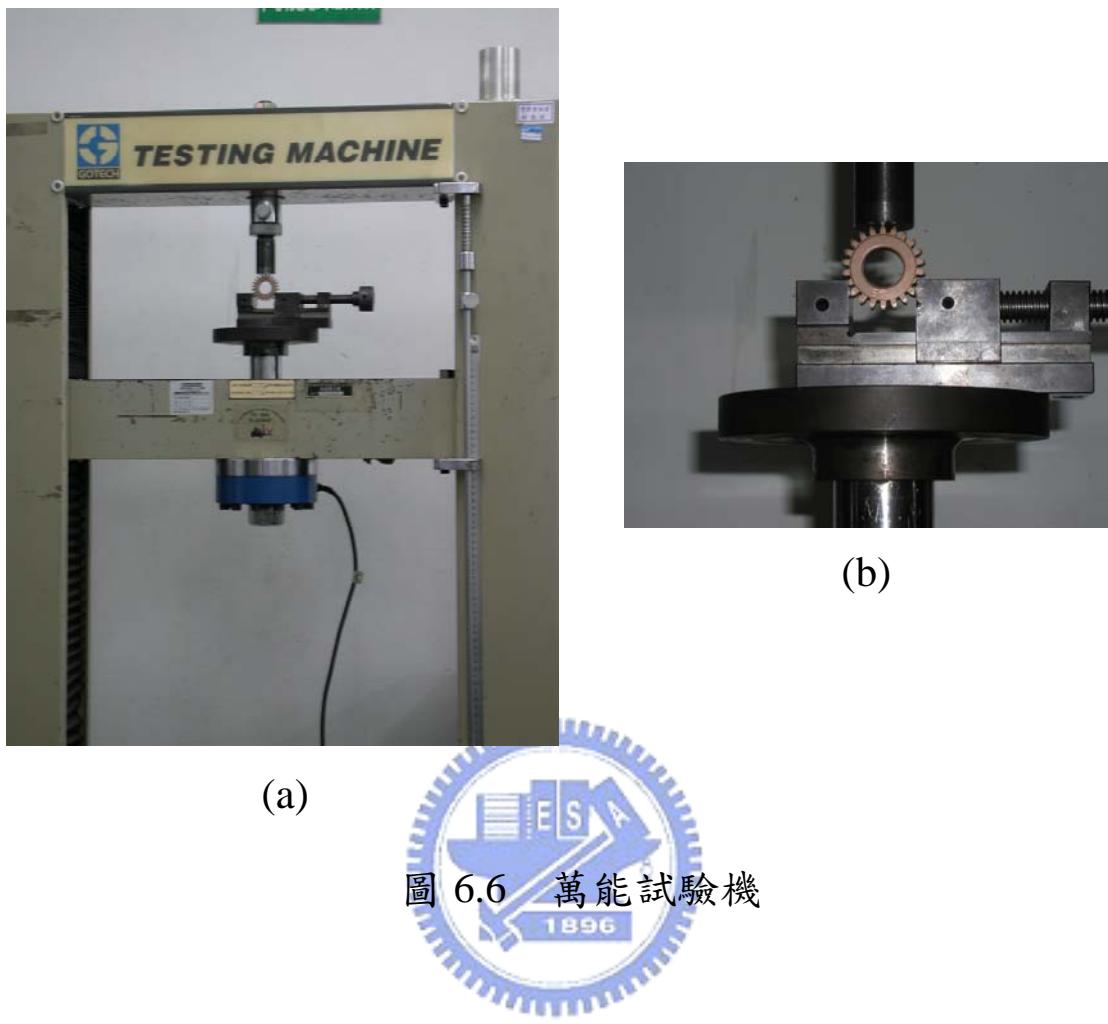
6-3-4 量測設備

本實驗所使用到的量測設備主要有：(1) 分厘卡，(2) 精密電子秤，(3) 齒輪精度量測儀，(4) 萬用試驗機。

分厘卡係用以量測齒輪的全長及外徑；精密電子秤則可求得齒輪之重量，再利用阿基米得原理（Archimedes Principle）來測定齒輪之實體密度；量測齒輪精度之設備為日本 Tokyo Technical Instrument Inc. 所生產製造之 TTi-300E CNC 齒輪精度量測儀，如圖 6.5 所示。齒輪精度量測儀之量測原理是使用微小直徑的量測頭，與待測齒面保固定壓力接觸，直接掃瞄齒面，再透過電腦計算出齒形誤差、導程誤差及節距誤差等誤差值。實驗中亦需用萬能試驗機，以測試齒輪齒部的彎曲強度（Bending Strength），如圖 6.6 所示。



圖 6.5 TTi-300E—CNC 齒輪精度量測儀



6-4 田口實驗計畫法

由田口玄一博士 (Dr. Genichi Taguchi) 所提倡的田口式品質工程 (Taguchi's Quality Engineering) [14,15]，為產品設計及製程技術開發的工具，以及工程最佳化的策略，用在產品/製程設計的初期階段最有效用，現今已廣泛的應用於各種工程領域。

田口法結合了工業實驗設計、品質控制技術及統計方法，使得產品和製造過程都能達到最佳設計條件，進而改善品質、降低成本並提高生產力。

6-4-1 要因試驗與田口試驗

以傳統的實驗設計所建立之檢測方法，例如單因子實驗法(single factor experiment)，其主要缺點為未能考慮介於因子間的任何可能之交互作用(interaction)、實驗結論的再現性可能很差；而全因子實驗法(full factorial experiment)包含了所有因子可能的組合，可考慮到所有的交互作用，但是當實驗因子增加時，所需進行的實驗次數將會以幾何級數增加。以一個兩水準的因子，七個三水準的因子之實驗為例，其所需進行的實驗次數為 $2^1 \times 3^7 = 4374$ ，因此全因子實驗並不是一個有效率的實驗方法，此外在操作上卻有其實質上的困難。

採用田口法之部分因子實驗(fractional factorial experiment)，可應用直交表於完整排列組合的全因子實驗中，先行均勻分佈的選擇，而後進行所選取的部分實驗。其優點在於能以較少的實驗次數，仍保有交互影響訊息的效果，為一種經濟且具有效率的方法。

6-4-2 標準直交表

直交表(orthogonal arrays, OA)為 Professor C. R. Rao [15] 於1947年所創，在統計學上主要被應用於實驗設計方面。在直交表中均以代號來表示各實驗因子及其水準，以 $L_4(2^3)$ 直交表為例，4 為實驗總數，2 為各因子之水準數，3 為實驗因子之總數，如表 6.3 所示。

在處理大量的實驗資料時應選用水準較少的直交表，如實驗次數較少的兩水準直交表。而兩水準直交表的缺點包括：(1) 兩個水準所設之參數值太接近時無法顯現分析結果的差異，而兩個參數值差異太大時，所選擇之水準可能過於極端。(2) 兩水準直交表所得之實驗結果，無法判斷回應值與水準間是否為非線性之相關性。

表 6.3 直交表： $L_4(2^3)$

直交 組合	因子	A	B	C
	1	1	2	3
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	2	1	2	2
4	2	2	1	1

6-4-3 訊號雜音 (S/N) 比

S/N 比是 n 個實驗數據所濃縮成的一個“統計量”，這個統計量即代表了產品的變異，也就是具有品質損失的意義，S/N 比越大則代表品質損失越小。S/N 比之計算方式依產品特性可分為望大、望小和望目三種形式，分別敘述如下：

(1) 望小特性 (smaller-the-better)

指非負數且其值越小越好，希望最終目標值為零。如排氣量、損耗量等。

$$\eta_s = -10 \log_{10} \left(\frac{\sum y_i^2}{n} \right) \quad (6.1)$$

(2) 望大特性 (larger-the-better)

指非負數且其值越大越好，其最佳值為無限大。如彎曲強度、可靠度等。

$$\eta_B = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (6.2)$$

(3) 望目特性 (nominal-the-better)

具有一特定目標值，期望值能趨近於目標值即為望目特性。如產品的規格、尺寸等。

$$\eta_T = -10 \log_{10} \left(\frac{\sum \bar{Y}^2}{S^2} \right) \quad (6.3)$$

6-4-4 控制因子分析

按照直交表設計好實驗計畫，並按計畫來進行實驗，可得各直交參數組合之實驗數據。首先按實驗數據計算 S/N 比，其計算方式則視產品特性而定。接著便是建立輔助表，以 6.4 式計算出各因子同一水準 S/N 比值的和 P_i ，再以 6.5 式算出因子水準主效果值 ΔP ，並且將這些數據製作成輔助表如表 6.4，進行各因素的效應分析。若其中某一因子的主效果值 ΔP 越大，則表示該因子對整個系統的影響越大，改善品質也越大。



$$P_i = \sum_{j=1}^m \eta_j \quad (6.4)$$

$$\Delta P = \text{Max } P_i - \text{min } P_i \quad (6.5)$$

式中： i 表示因子的水準別

m 表示在直交表中水準為 j 的個數

表 6.4 輔助表

	A	B	C
1	A_1	B_1	C_1
2	A_2	B_2	C_2
ΔP	ΔP_A	ΔP_B	ΔP_C

6-4-5 變異數分析

變異數分析（Analysis of Variance, ANOVA）之主要目的，在於篩選實驗因子對於實驗結果的影響是否為顯著，並且採用 F 檢定法，來彌補田口式實驗無法研判各實驗參數，對品質特性影響程度之方向的不足。其檢定方法為利用 F 表進行定性評價，當變異比之值大於 F 分佈（信賴區間99%）之參考值時，可以說在信賴度99% 下為顯著；當變異比之值比 F 分佈（信賴區間95%）之參考值大，而比信賴區間99% 之 F 值小時，可說其在信賴度95% 下為顯著。另外，當變異比之值比信賴度95% 之F 值還小時則不為顯著，可將之合併入誤差項之中。

變異數分析如表 6.5 所示，其中自由度（Degree of Freedom）即是某一因子之水準減 1，平均變異和平方(CF)，總變異平方和(S_T)，變數 j 之平方和(SS_j)，誤差平方和(S_e)，變數 j 之變異數(V_j)，誤差的變異數(V_e)，變數 j 之變異比(F_j)，變數 j 之貢獻率(ρ_j)，誤差的貢獻率(ρ_e)，所謂貢獻率是表示該要因之變動，相當於全體變動的多少%之一種定量性尺度。 m 代表直交表樣本組合數， w 為因子之個數和， n 為某因子之各個水準別的樣本個數。

$$CF = \frac{1}{m} \left(\sum_{i=1}^m \eta_i \right)^2 \quad (6.6)$$

$$S_T = \sum_{i=1}^m (\eta_i)^2 - CF \quad (6.7)$$

$$SS_j = \frac{1}{r_A} \left(\sum_{i=1}^a (P_i)^2 \right) - CF = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{m/n} \left(\sum_{i=1}^n \eta_{ik} \right)^2 - CF \quad (6.8)$$

$$S_e = S_T - \sum_{j=1}^w SS_j \quad (6.9)$$

$$V_j = \frac{SS_j}{f_j} \quad (6.10)$$

$$V_e = \frac{S_e}{f_e} \quad (6.11)$$

$$F_j = \frac{V_j}{V_e} \quad (6.12)$$

$$\rho_j = \frac{S_j - f_j V_e}{S_T} \times 100\% \quad (6.13)$$

$$\rho_e = \frac{S_e + (f_T - f_e)V_e}{S_T} \times 100\% \quad (6.14)$$

表 6.5 變異數分析表

要因	f (自由度)	S (變動)	V (變異)	F (變異比)	$\rho\%$ (貢獻率)
A					
B	f_j	SS_j	V_j	F_j	ρ_j
C					
e : 誤差	f_e	S_e	V_e		ρ_e
T : 總和	f_T	S_T	—	—	100

6-5 實驗方法與設計流程

本研究之整個實驗設計及分析流程如圖 6.7 所示。將實驗所測得的齒形誤差數據，依望小特性計算出 S/N 比值，並進行 S/N 比的變異數分析，以判斷各因子的主效果影響是否顯著，進而判斷各因子的最佳水準。

6-5-1 選擇控制因子及直交表

為了達到製程的最佳化，慎選控制因子是非常重要的，圖 6.8 為影響齒形精度的魚骨圖，從所示的魚骨圖中，選擇可能影響齒形精度較大的因子，並訂定其水準，如表 6.6 所示。本研究將選擇原料粉、生胚密度、含銅量、燒結速度及放銅方式等五項製程參數，以田口實驗法來探討銅熔滲製程對於齒形變異的影響。

本實驗共計選取了三個兩水準的因子，以及兩個三水準的因子，其自由度為： $3 \times (2-1) + 2 \times (3-1) = 7$ ，因此採用實驗次數最少且自由度為 8 稍大於 7 的 $L_9(3^4)$ 直交表以配合實驗，但由於此直交表僅能配置四個控制因子，所以必須透過組合法及虛擬水準法來進行配置。

組合法就是將 2 水準的因子放入 3 水準系的直交表，將不需求交互作用之 2 水準的 2 因子加以組合的方法。3 水準的組合因子(AB)如下安排：

$$(AB)_1 = A_1 B_1$$

$$(AB)_2 = A_1 B_2$$

$$(AB)_3 = A_2 B_1$$

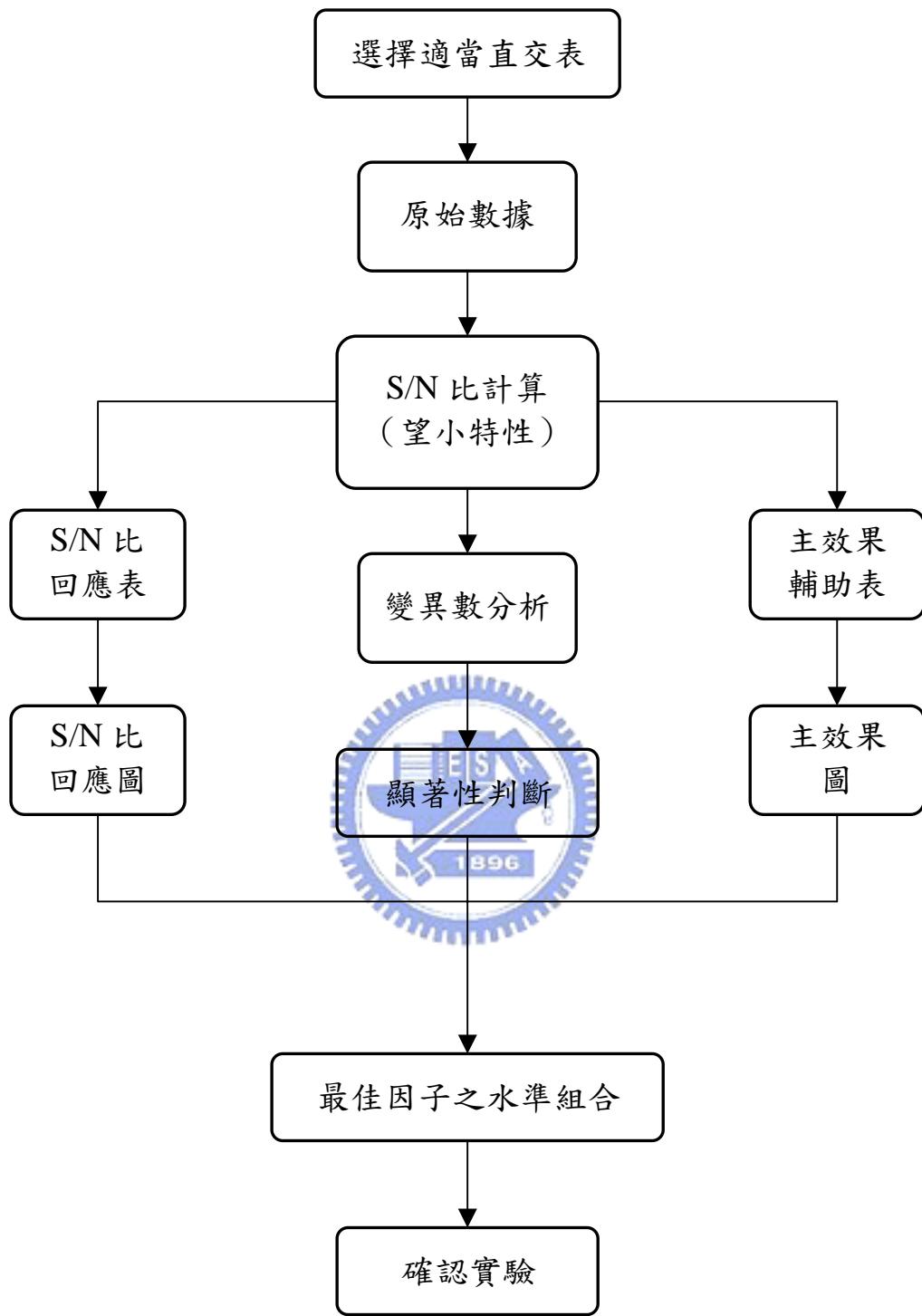


圖6.7 田口式參數設計流程

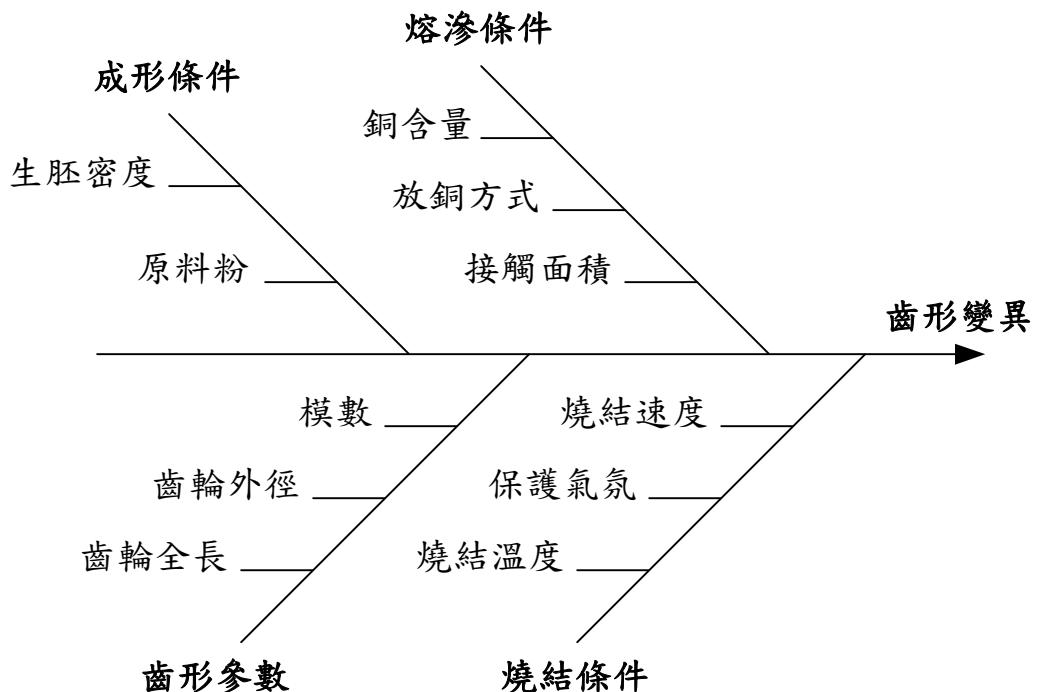


圖 6.8 銅熔滲製程影響齒形變異因素之魚骨圖



表 6.6 控制因子水準表

要因	要因說明	水準1	水準2	水準3
A	原料粉	A 粉末	B 粉末	—
B	生胚密度(g/cm^3)	6.7	6.6	—
C	銅含量(%)	10.0	13.5	17.0
D	燒結速度(mm/min)	80	100	120
E	放銅方式	上	下	—

如此一來，A 的主效果即可以 $(AB)_1$ 與 $(AB)_3$ 之差來求，B 之主效果則以 $(AB)_1$ 與 $(AB)_2$ 之差來求。

而虛擬水準法則是將 2 水準的因子 E 放入 3 水準系中，在形式上要使 E 成為 3 水準，亦即，將 E 當作 3 水準，實際上將某 2 水準之中認為重要（標準）者使之重複的方法。譬如，

$$E_1 = E_1, E_2 = E_2, E_3 = E_1$$

把 E_3 在形式上如第 3 水準一般地表示，但實際的內涵則為 E_1 。本實驗利用組合法及虛擬水準法進行配置之結果如表 6.7 所示。

表 6.7 組合法與虛擬水準法之配置

因子 直交 組合	(AB)	C E S A 1896	D	E
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	1'
4	2	1	2	1'
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	1'
9	3	3	2	1

註： $E_{1'}$ 為因子 E 所虛擬的第 3 水準，其實際內涵為 E_1

6-5-2 執行實驗

本實驗依據實際生產操作狀況，採用相同的成形及燒結條件，再依直交表上各因子的水準組合進行實驗及量測。首先將選取的原料粉末調和，再以自動填粉機構進行粉末充填，利用成形機台成形出壓胚體。在此必須注意的是備粉量必須隨時保持充足，以維持粉末充填的均勻性，確保壓胚體符合實驗所需之生胚密度。

為避免成形機台的穩定性及重現性而產生的誤差因素，在成形時所設定的壓胚體數量之實驗樣本，必須遠大於取樣所需之數量。亦即在符合密度及尺寸要求之樣本中，隨機選出實驗待測齒輪來，盡可能使取樣的齒輪其重量與尺寸分佈範圍降低，以確保實驗數據的準確性。在隨機抽樣出實驗所需之待測齒輪後，將待測齒輪加以編號，先進行成形品的尺寸量測、精度測定及一般機械性質的測量，之後再進行銅熔滲之燒結工程，最後則是量測尺寸、精度以及機械性質上的變化。

進行燒結工程時同樣必須考慮到燒結爐參數控制的穩定性，所以必須完成所有成形品之量測工作後，再將全部之實驗齒輪同時送進燒結爐中，以期能將實驗誤差降至最低。另外，在進行熔滲處理之燒結工程時，必須先將成形品放置在石墨盤上才能進行燒結，以防止銅流失到輸送帶上造成損壞。而銅熔材則必須與齒輪之間完全接觸，否則沒有接觸到的熔材部份將會無法滲進齒輪內，造成銅的流失以致滲銅不完全。圖 6.9 為實驗齒輪之成形品、燒結品以及經過熔滲處理之燒結品。



圖6.9(a) 實驗齒輪之成形品



圖6.9(b) 實驗齒輪之燒結品



圖6.9(c) 實驗齒輪經銅熔滲之燒結品

6-5-3 銅熔滲實驗之參數

本實驗所採用之 A、B 兩種原料粉如表 6.1 中所示，在實驗中將製造二種不同生胚密度之正齒輪，分別為 6.70 g/cm^3 及 6.60 g/cm^3 ，經由量測結果，實驗待測齒輪的實際生胚密度如表 6.8 所示。而實驗中之固定參數為模具結構、齒形參數、燒結溫度和燒結氣氛等，如表 6.9 所示。

表 6.8 實驗待測齒輪之實際生胚密度

原料粉	設計之生胚密度 (g/cm^3)	實際生胚密度 (g/cm^3)
A	6.70	6.762
	6.60	6.618
B	6.70	6.759
	6.60	6.623

表 6.9 實驗中之製程固定參數

輸送帶式 連續燒結爐 之燒結參數	脫脂區溫度	$760^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$
	加熱區溫度	$1120^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$
	燒結氣氛	Endothermic Gas (C_3H_8)
	氣體流量	25 (kl/h)