

## 第七章 實驗結果與討論

### 7-1 齒形精度誤差

為進行齒形精度之量測與分析，本研究按實驗規劃準備材料及設備進行試驗，本試驗共進行兩個重複試驗。本研究針對粉末冶金齒輪其成形時左右齒面之齒形誤差，以及齒輪經過銅熔滲製成後左右齒面之齒形誤差，進行實驗量測。而直交組合 1，直交組合 2，……，直交組合 9 之齒形精度測定結果如圖 7.1 至圖 7.9 所示。表 7.1(a)、7.1(b) 為根據 A、B 兩次實驗所取得的樣本，經由齒形精度量測儀量測所得各直交參數組合之左、右齒面齒形誤差數據表，表中之誤差值係以粉末冶金齒輪經銅熔滲製成後之最後齒形誤差，扣減銅熔滲前已有之成形誤差，亦即銅熔滲製程前後之齒形誤差值。

#### 7-1-1 實驗結果分析

本研究為探討齒形精度之誤差量，所以希望此誤差量的值越小越好，故依據「望小」特性來計算齒形誤差之 S/N 比值，並據以製作回應表、主效果輔助表及變異數分析來選擇最佳參數。

##### 1. 計算 S/N 比

利用 (6.1) 之公式計算左齒面齒形誤差之 S/N 比值，並將此比值以符號  $\eta$  表示之，其計算方式如下：

$$\begin{aligned}\eta_1 &= -10\log_{10}\left(\frac{\sum y_i^2}{n}\right) \\ &= -10\log_{10}\left[\frac{1}{2}(11.4^2 + 8.9^2)\right] = -21.9 \text{ (db)}\end{aligned}$$

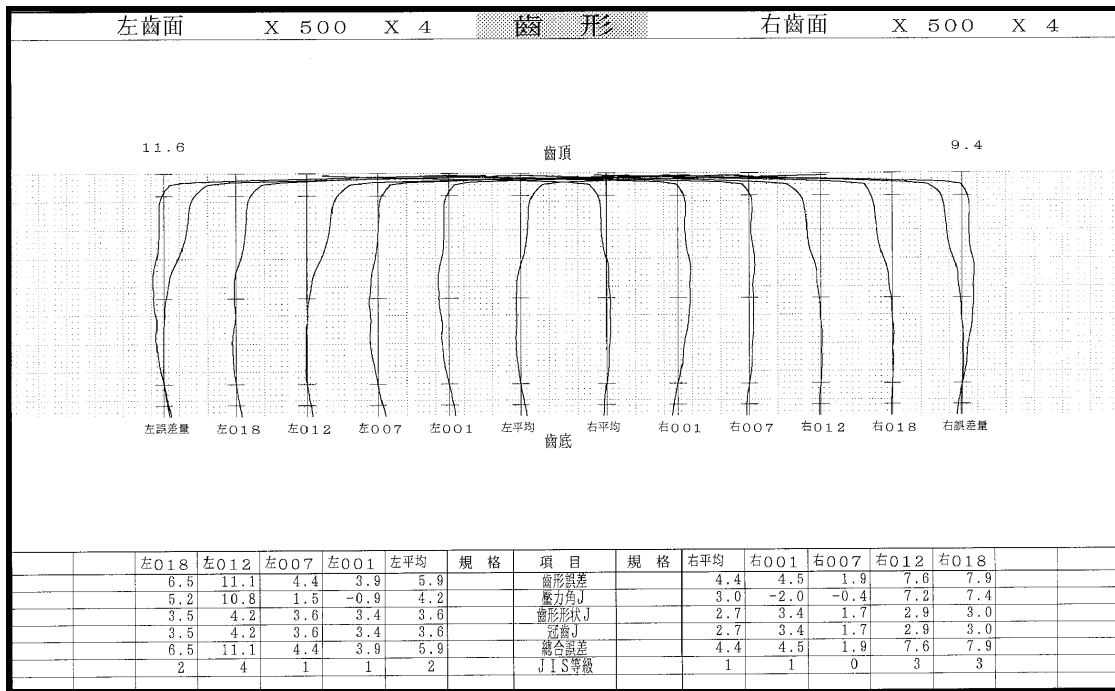


圖 7.1(a) 直交組合 1 之齒形精度量測圖 (成形)

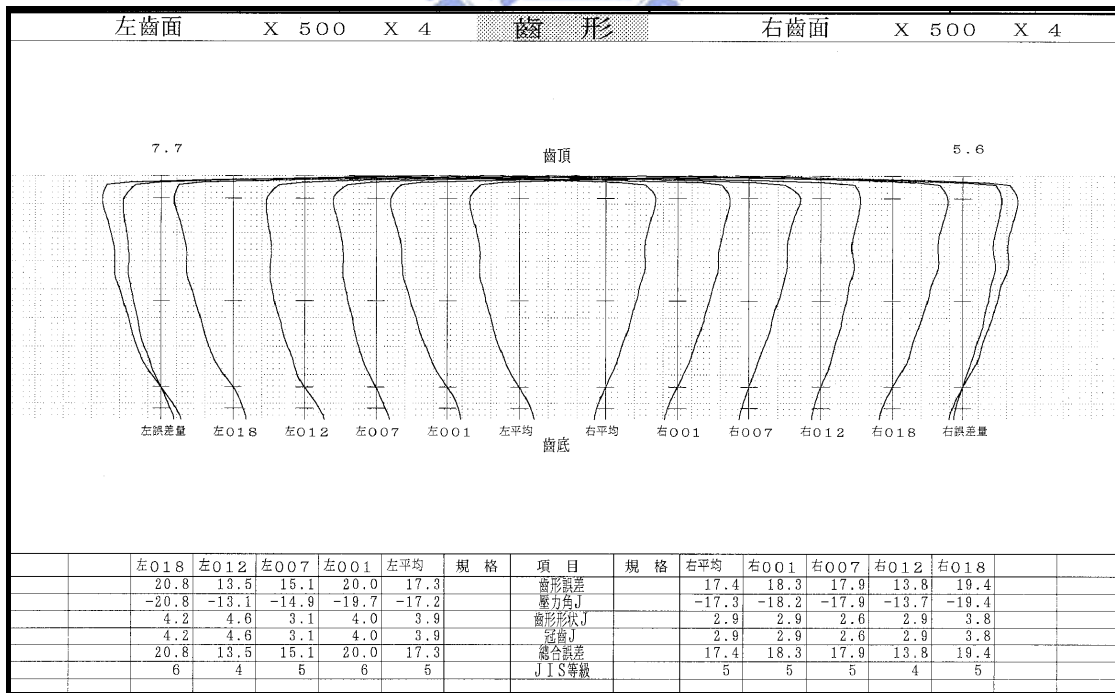


圖 7.1(b) 直交組合 1 之齒形精度量測圖 (銅熔滲)

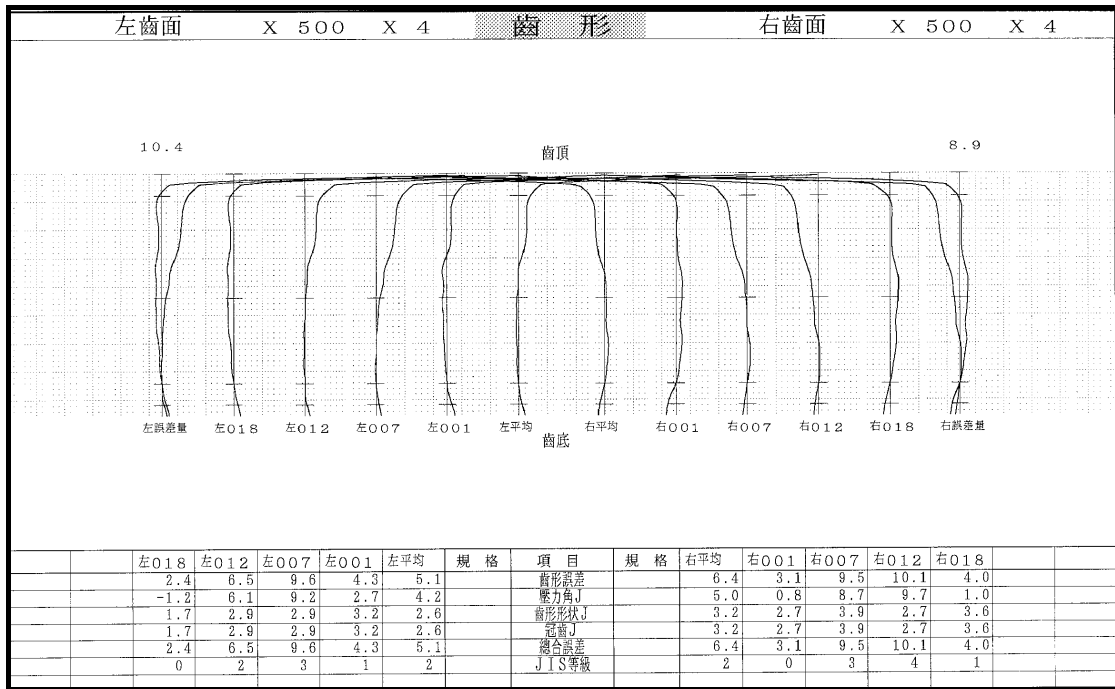


圖 7.2(a) 直交組合 2 之齒形精度量測圖 (成形)

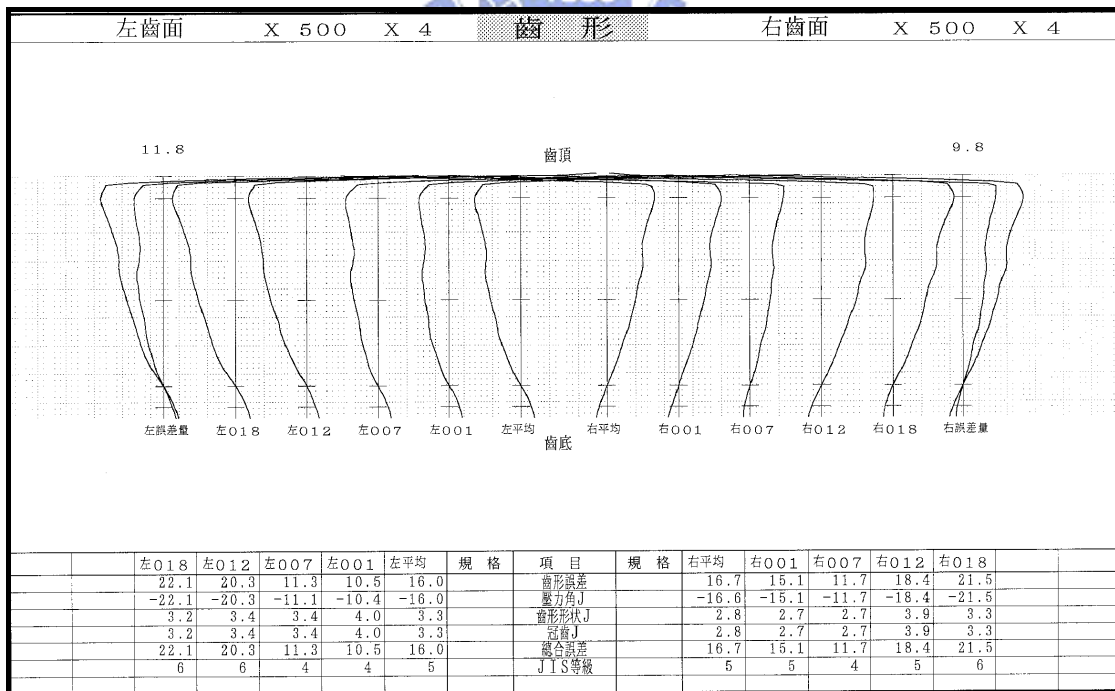


圖 7.2(b) 直交組合 2 之齒形精度量測圖 (銅熔滲)

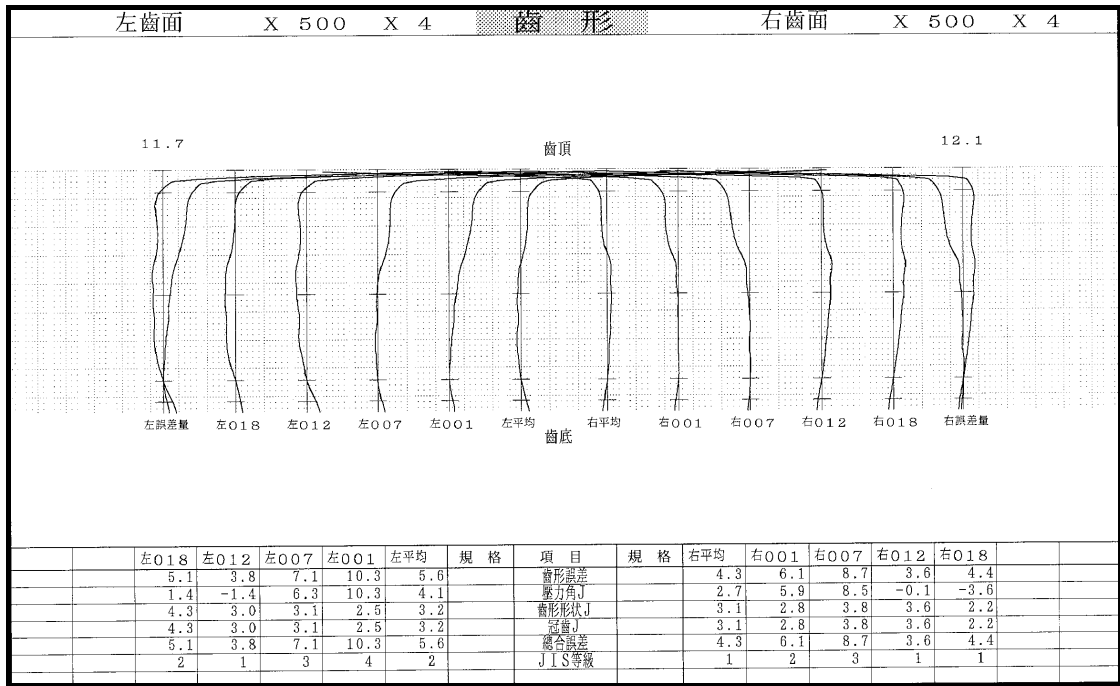


圖 7.3(a) 直交組合 3 之齒形精度量測圖 (成形)

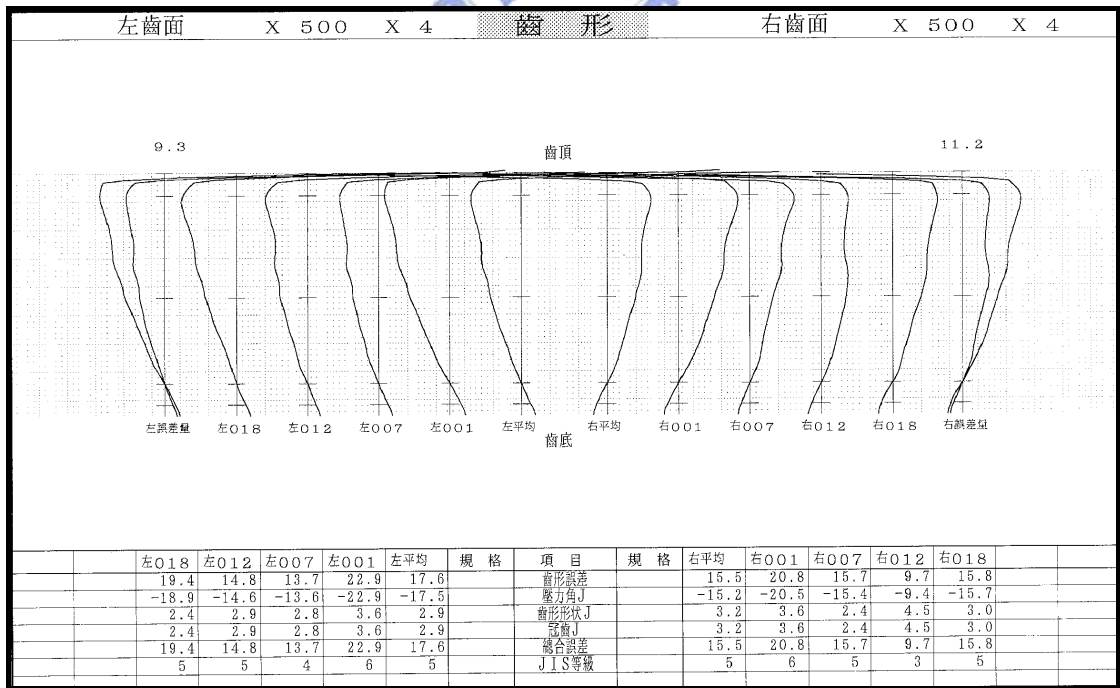


圖 7.3(b) 直交組合 3 之齒形精度量測圖 (銅熔滲)

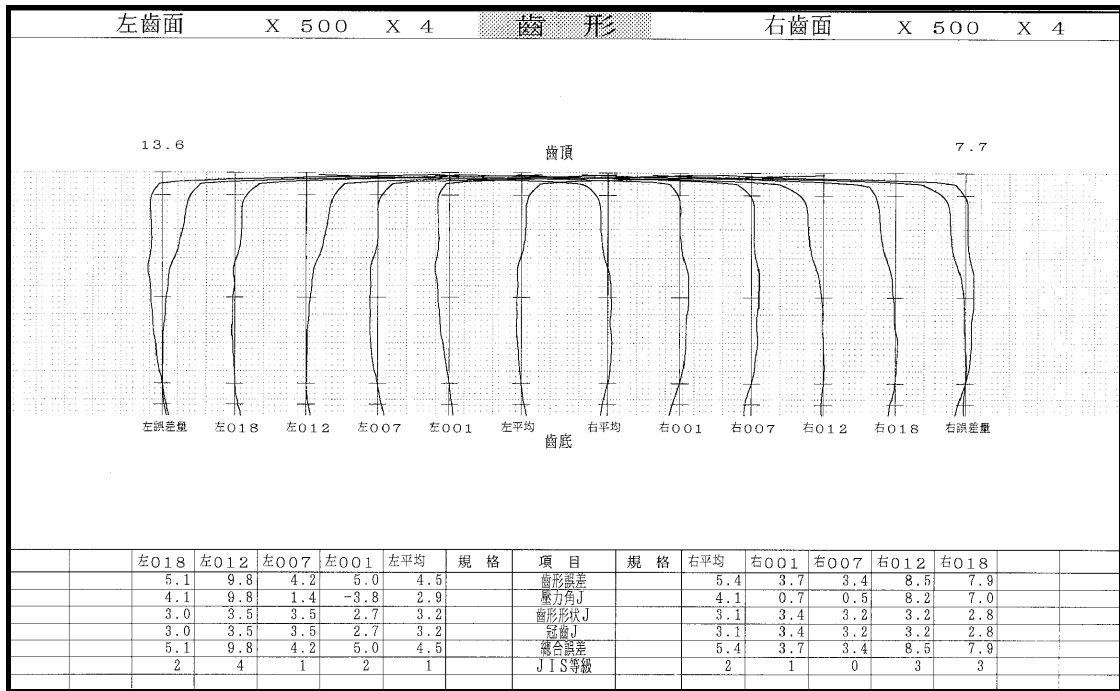


圖 7.4(a) 直交組合 4 之齒形精度量測圖 (成形)

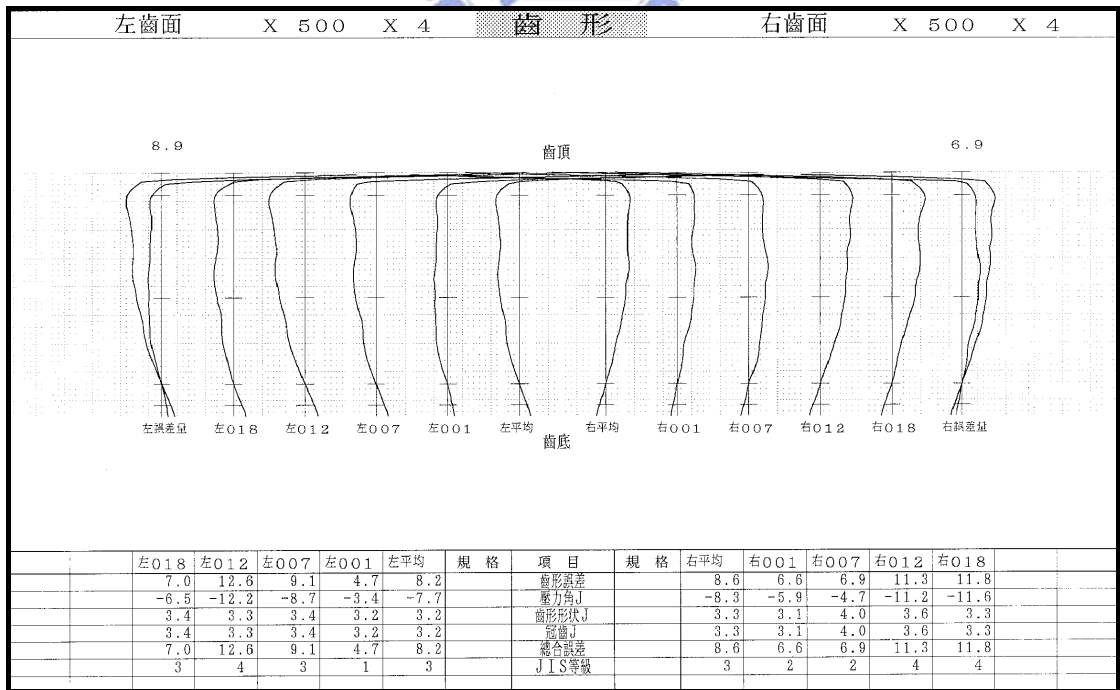


圖 7.4(b) 直交組合 4 之齒形精度量測圖 (銅熔滲)

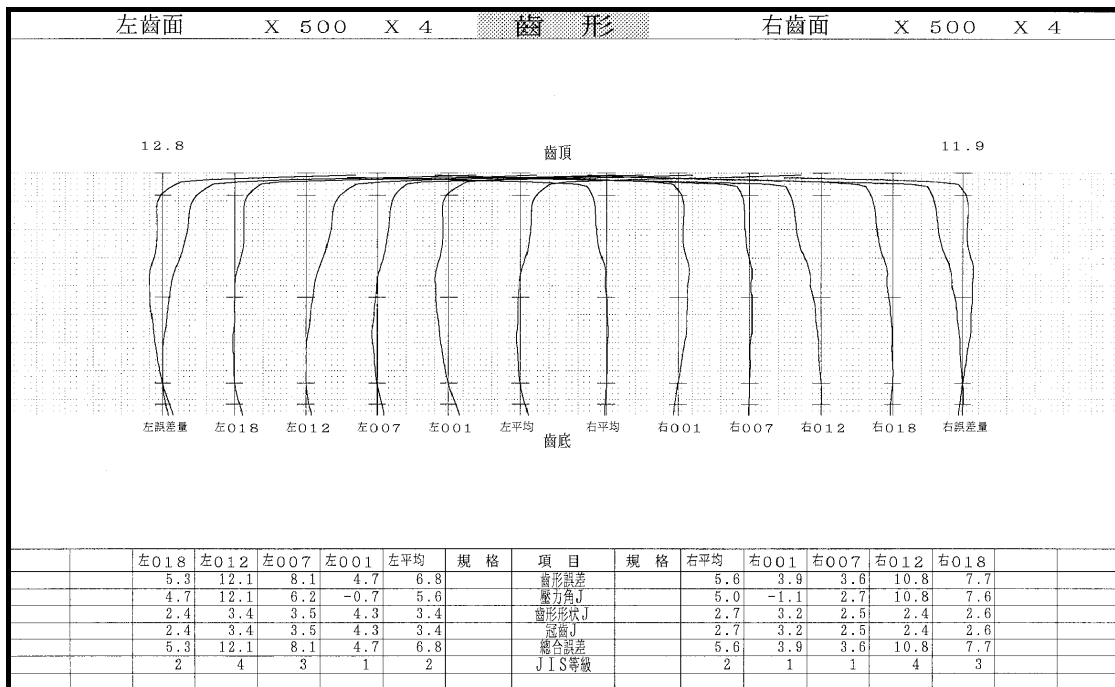


圖 7.5(a) 直交組合 5 之齒形精度量測圖 (成形)

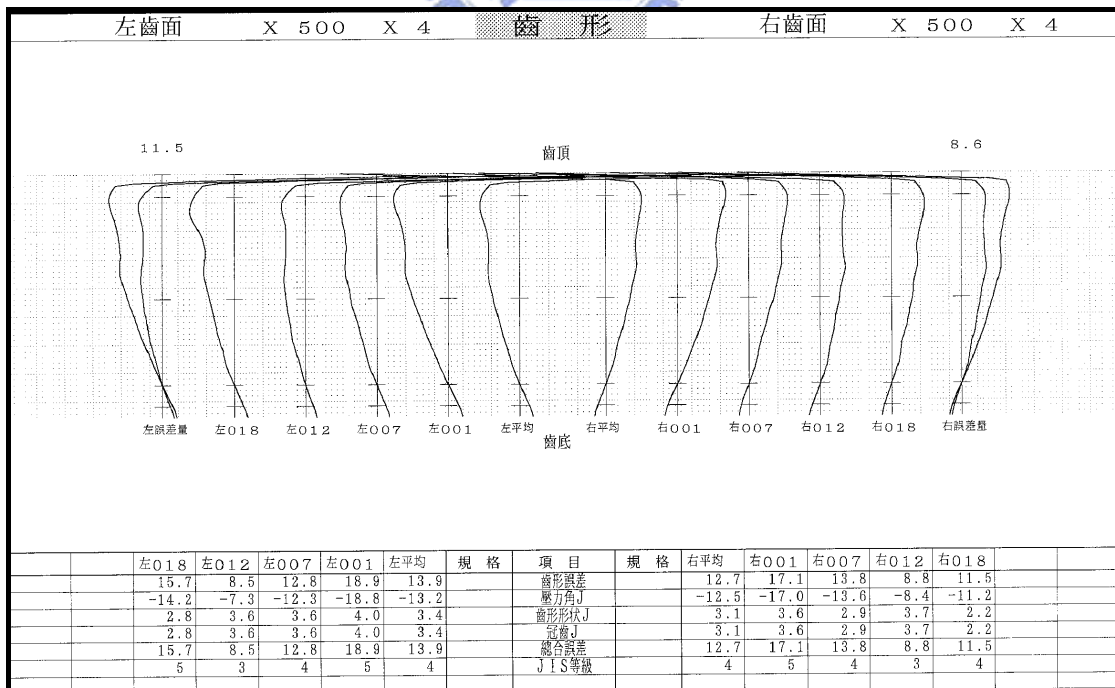


圖 7.5(b) 直交組合 5 之齒形精度量測圖 (銅熔滲)

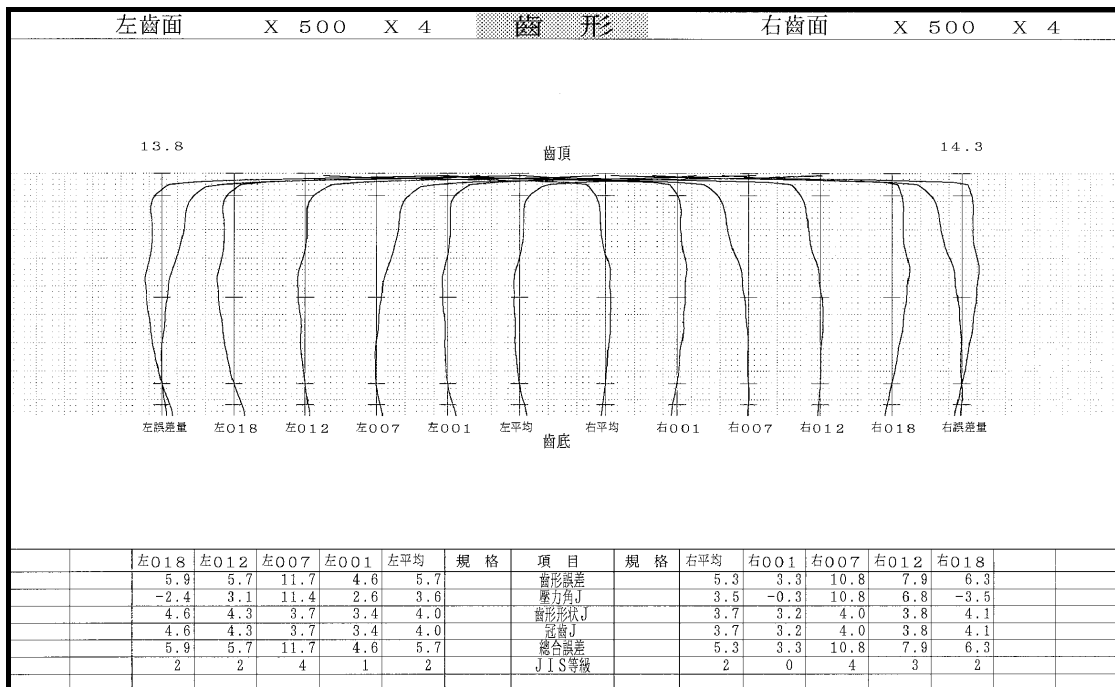


圖 7.6(a) 直交組合 6 之齒形精度量測圖 (成形)

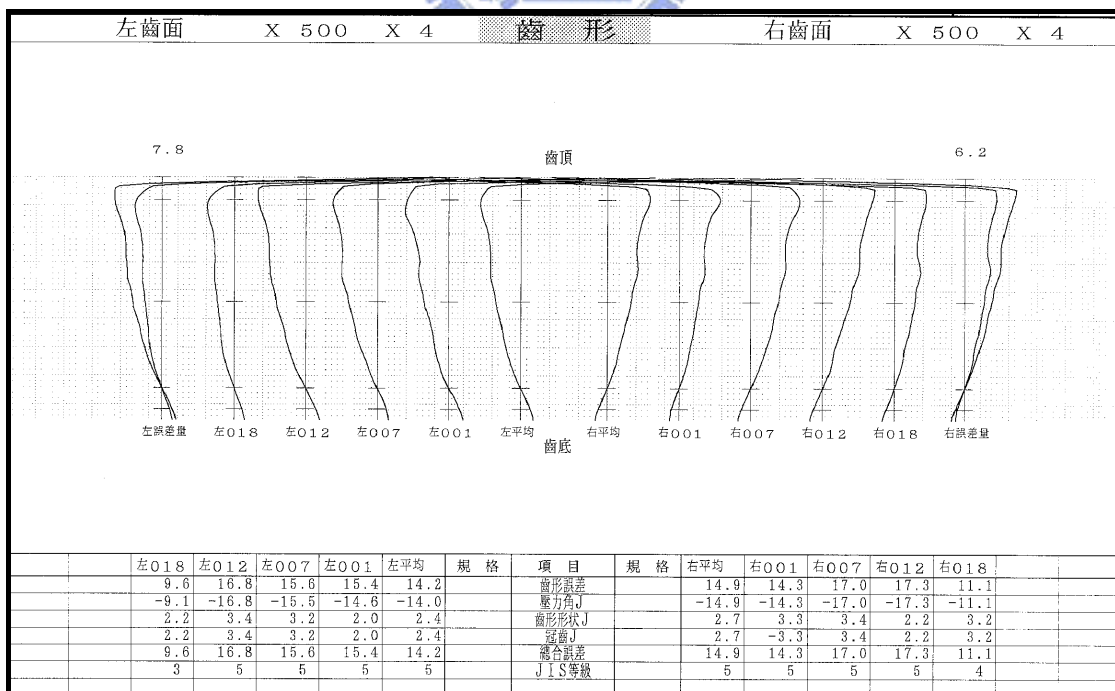


圖 7.6(b) 直交組合 6 之齒形精度量測圖 (銅熔滲)

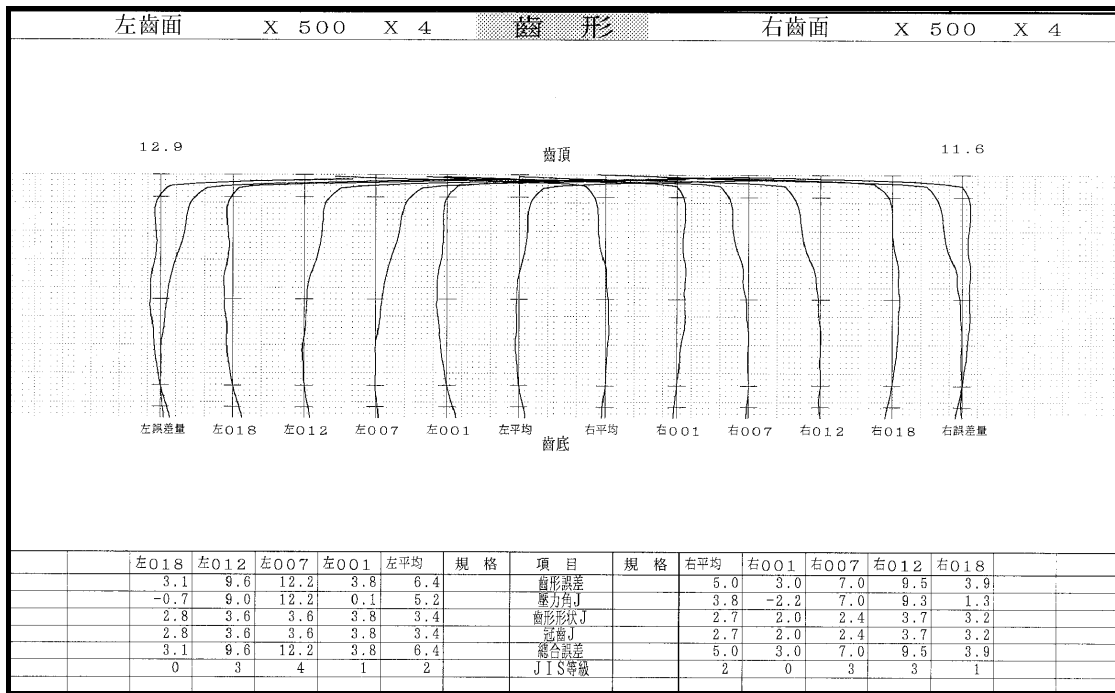


圖 7.7(a) 直交組合 7 之齒形精度量測圖 (成形)

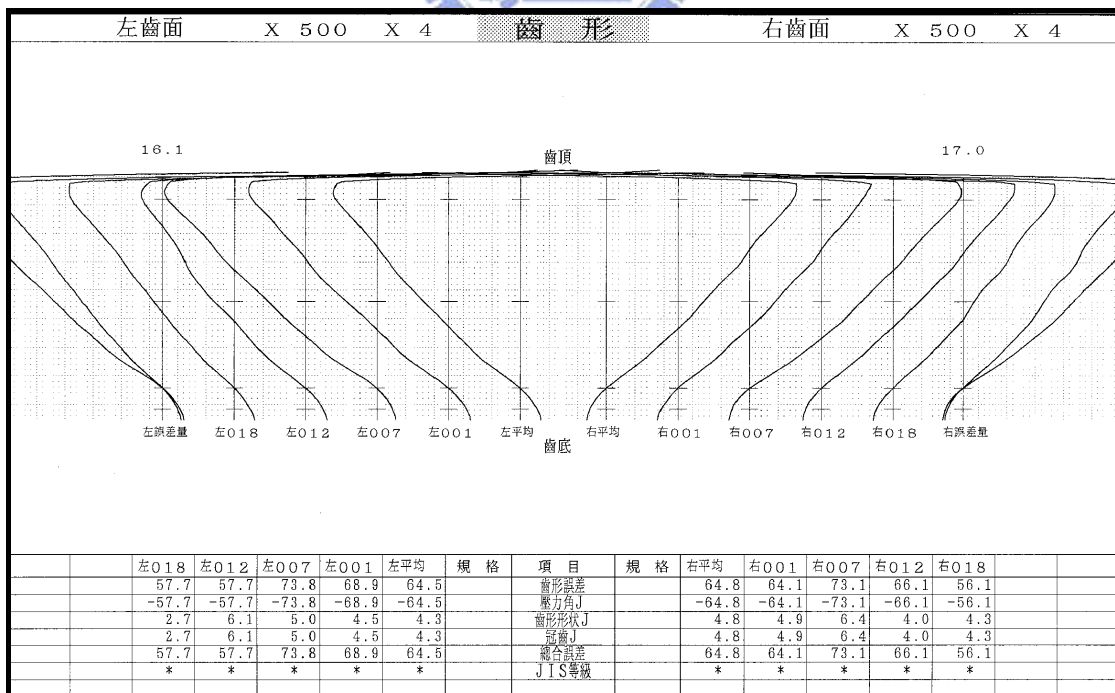


圖 7.7(b) 直交組合 7 之齒形精度量測圖 (銅熔滲)



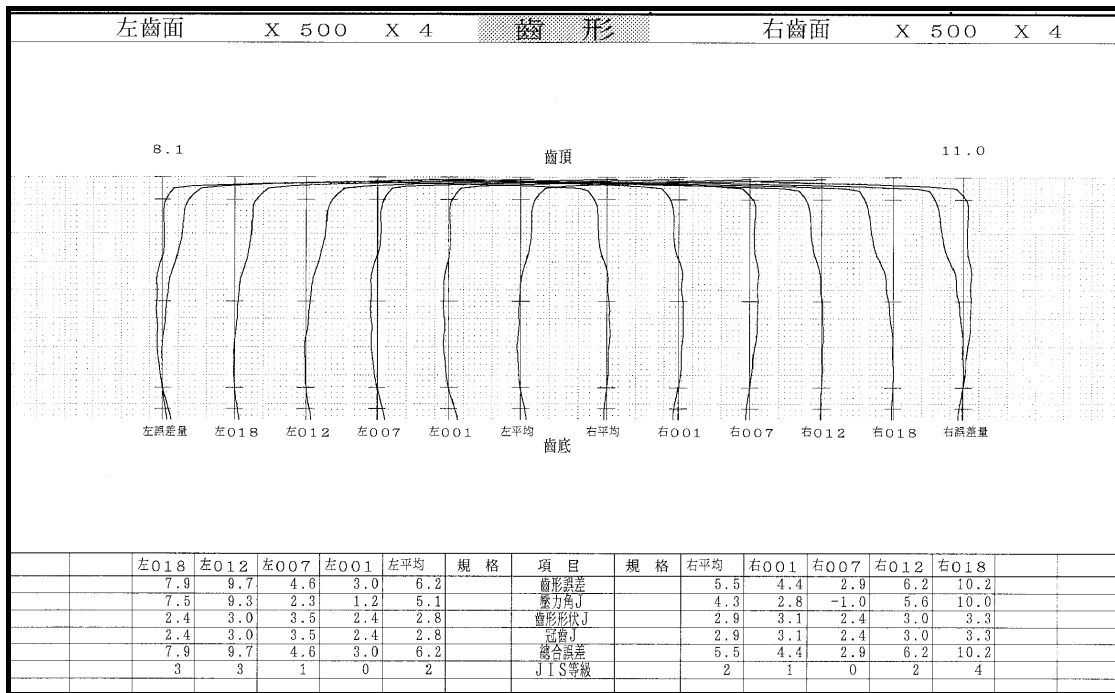


圖 7.8(a) 直交組合 8 之齒形精度量測圖 (成形)

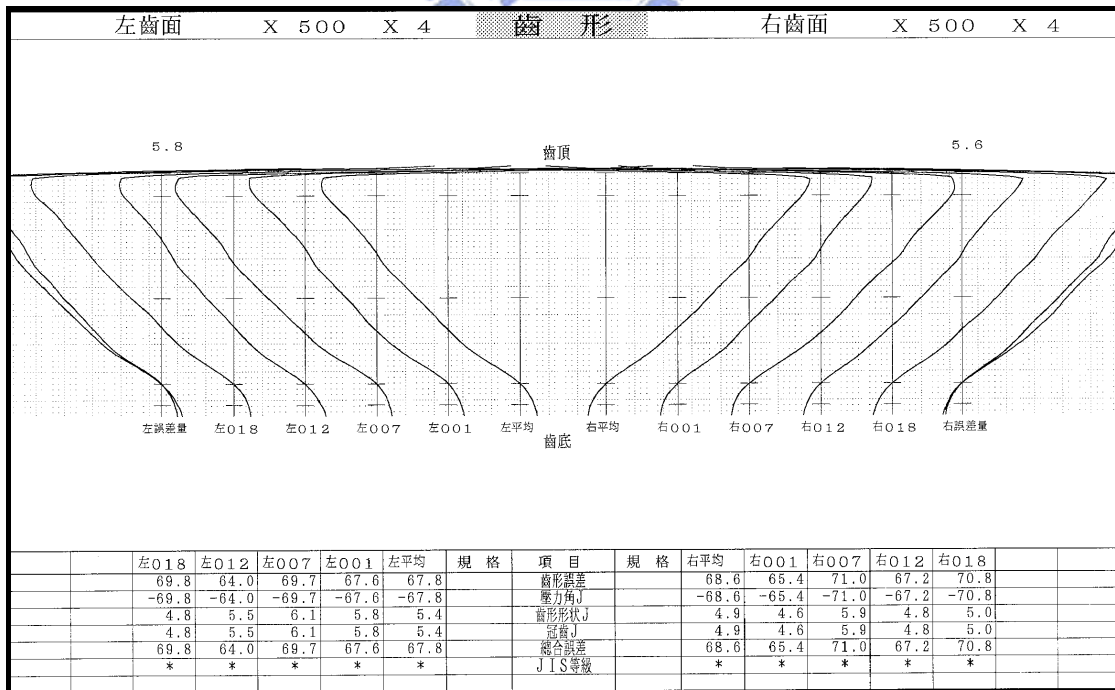


圖 7.8(b) 直交組合 8 之齒形精度量測圖 (銅熔滲)

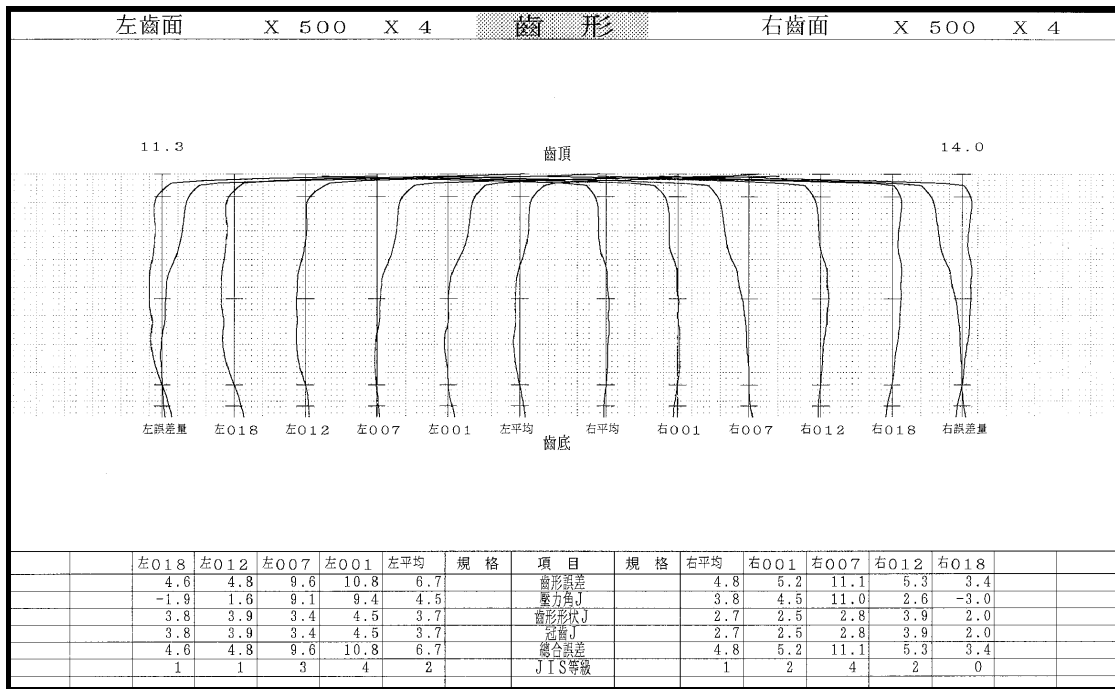


圖 7.9(a) 直交組合 9 之齒形精度量測圖 (成形)

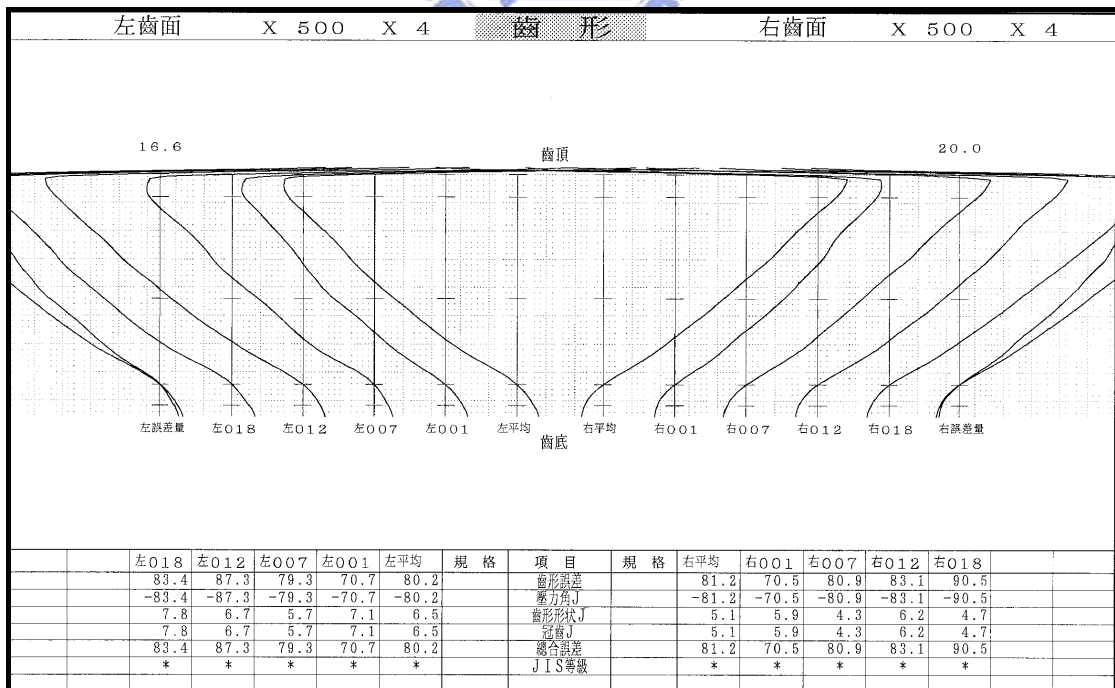


圖 7.9(b) 直交組合 9 之齒形精度量測圖 (銅熔滲)

表 7.1(a) 左齒面之齒形誤差數據表

單位： $\mu m$ 

直交組合	成形	銅熔滲	誤差值 $R_1$
1	5.9	17.3	11.4
2	5.1	16.0	10.9
3	5.6	17.6	12.0
4	4.5	8.2	3.7
5	6.8	13.9	7.1
6	5.7	14.2	8.5
7	6.4	64.5	58.1
8	6.2	67.8	61.6
9	6.7	80.2	73.5
直交組合	成形	銅熔滲	誤差值 $R_2$
1	6.3	15.2	8.9
2	5.9	18.9	13.0
3	6.1	16.9	10.8
4	5.0	11.1	6.1
5	6.1	12.3	6.2
6	5.0	13.7	8.7
7	5.2	66.0	60.8
8	6.3	64.2	57.9
9	5.8	80.8	75.0

表 7.1(b) 右齒面之齒形誤差數據表 單位： $\mu m$

直交組合	成形	銅熔滲	誤差值 $R_1$
1	4.4	17.4	13.0
2	6.4	16.7	10.3
3	4.3	15.5	11.2
4	5.4	8.6	3.2
5	5.6	12.7	7.1
6	5.3	14.9	9.6
7	5.0	64.8	59.8
8	5.5	68.6	63.1
9	4.8	81.2	76.4
直交組合	成形	銅熔滲	誤差值 $R_2$
1	5.6	15.0	9.4
2	5.8	19.5	13.7
3	6.3	18.1	11.8
4	5.6	11.9	6.3
5	5.8	13.4	7.6
6	5.5	13.7	8.2
7	4.7	66.5	61.8
8	6.6	65.5	58.9
9	5.3	81.9	76.6

以此類推，即可以求得  $\eta_2 = -21.58 db$ ， $\eta_3 = -21.15 db$ ，  
 $\eta_4 = -14.06 db$ ， $\eta_5 = -16.48 db$ ， $\eta_6 = -18.69 db$ ， $\eta_7 = -35.49 db$   
 $\eta_8 = -35.53 db$ ， $\eta_9 = -37.41 db$ 。同理，亦可求得右齒面齒形精  
 度誤差之 S/N 比值，分別將左、右齒面之齒形精度誤差 S/N 比整  
 理如表 7.2(a)及 7.2(b)。在表 7.2 中，因子 A 表示原料粉，因子 B  
 表示生胚密度，因子 C 表示銅含量，因子 D 表示燒結速度而因子  
 E 則代表放銅方式。其中水準 1、2 及 3 分別表示每一因子之不同  
 方式或其數值之多寡程度。

## 2. 建立輔助表及主效果圖

由表 7.2(a)中之數據，利用(6.4)及(6.5)式，建立左齒面齒形誤  
 差之主效果輔助表及主效果圖，如表 7.3、表 7.4 及圖 7.10 所示。  
 其中，由於控制因子 A、B 使用了組合法，而控制因子 E 採用了虛  
 擬水準法，因此 A、B、C、D、E 之主效果，可由以下方式計算之。

$$(AB)_1 = A_1B_1 = -20.19 + (-21.58) + (-21.15) = -62.92$$

$$(AB)_2 = A_1B_2 = -14.06 + (-16.48) + (-18.69) = -49.23$$

$$(AB)_3 = A_2B_1 = -35.49 + (-35.53) + (-37.41) = -108.43$$

$$C_1 = -20.19 + (-14.06) + (-35.49) = -69.74$$

$$C_2 = -21.58 + (-16.48) + (-35.53) = -73.59$$

$$C_3 = -21.15 + (-18.69) + (-37.41) = -77.25$$

$$D_1 = -20.19 + (-18.69) + (-35.53) = -74.41$$

$$D_2 = -21.58 + (-14.06) + (-37.41) = -73.05$$

$$D_3 = -21.15 + (-16.48) + (-35.49) = -73.12$$

表 7.2(a) 左齒面之齒形誤差 S/N 比

直交 組合 \ 因子	(AB)	C	D	E	齒形誤差數據( $\mu m$ )		S/N Ratio (db)
	1	2	3	4	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	
1	1	1	1	1	11.4	8.9	-20.19
2	1	2	2	2	10.9	13.0	-21.58
3	1	3	3	1'	12.0	10.8	-21.15
4	2	1	2	1'	3.7	6.1	-14.06
5	2	2	3	1	7.1	6.2	-16.48
6	2	3	1	2	8.5	8.7	-18.69
7	3	1	3	2	58.1	60.8	-35.49
8	3	2	1	1'	61.6	57.9	-35.53
9	3	3	2	1	73.5	75.0	-37.41

表 7.2(b) 右齒面之齒形誤差 S/N 比

直交 組合 \ 因子	(AB)	C	D	E	齒形誤差數據( $\mu m$ )		S/N Ratio (db)
	1	2	3	4	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	
1	1	1	1	1	13.0	9.4	-21.10
2	1	2	2	2	10.3	13.7	-21.67
3	1	3	3	1'	11.2	11.8	-21.22
4	2	1	2	1'	3.2	6.3	-13.97
5	2	2	3	1	7.1	7.6	-17.33
6	2	3	1	2	9.6	8.2	-19.01
7	3	1	3	2	59.8	61.8	-35.68
8	3	2	1	1'	63.1	58.9	-35.71
9	3	3	2	1	76.4	76.6	-37.67

$$E_1 = -20.19 + (-16.48) + (-37.41) = -74.08$$

$$E_2 = -21.58 + (-18.69) + (-35.49) = -75.76$$

$$E_{1'} = -21.15 + (-14.06) + (-35.53) = -70.74$$

$$\Delta P_A = A_1 B_1 - A_2 B_1 = 45.51$$

$$\Delta P_B = A_1 B_2 - A_1 B_1 = 13.69$$

$$\Delta P_C = C_1 - C_3 = -69.74 - (-77.25) = 7.51$$

$$\Delta P_D = D_2 - D_1 = -73.05 - (-74.41) = 1.36$$

$$\Delta P_E = (E_1 + E_{1'})/2 - E_2 = [-74.08 + (-70.74)]/2 - (-75.76) = 3.35$$

表 7.3 左齒面齒形誤差之主效果輔助表 (I)

	(AB)	C	D	E
水準 1	-62.92	-69.74	-74.41	-74.08
水準 2	-49.23	-73.59	-73.05	-75.76
水準 3	-108.43	-77.25	-73.12	-70.74
合計	-220.58			

表 7.4 左齒面齒形誤差之主效果輔助表 (II)

	A	B	C	D	E
主效果	45.51	13.69	7.51	1.36	3.35
排行	1	2	3	5	4



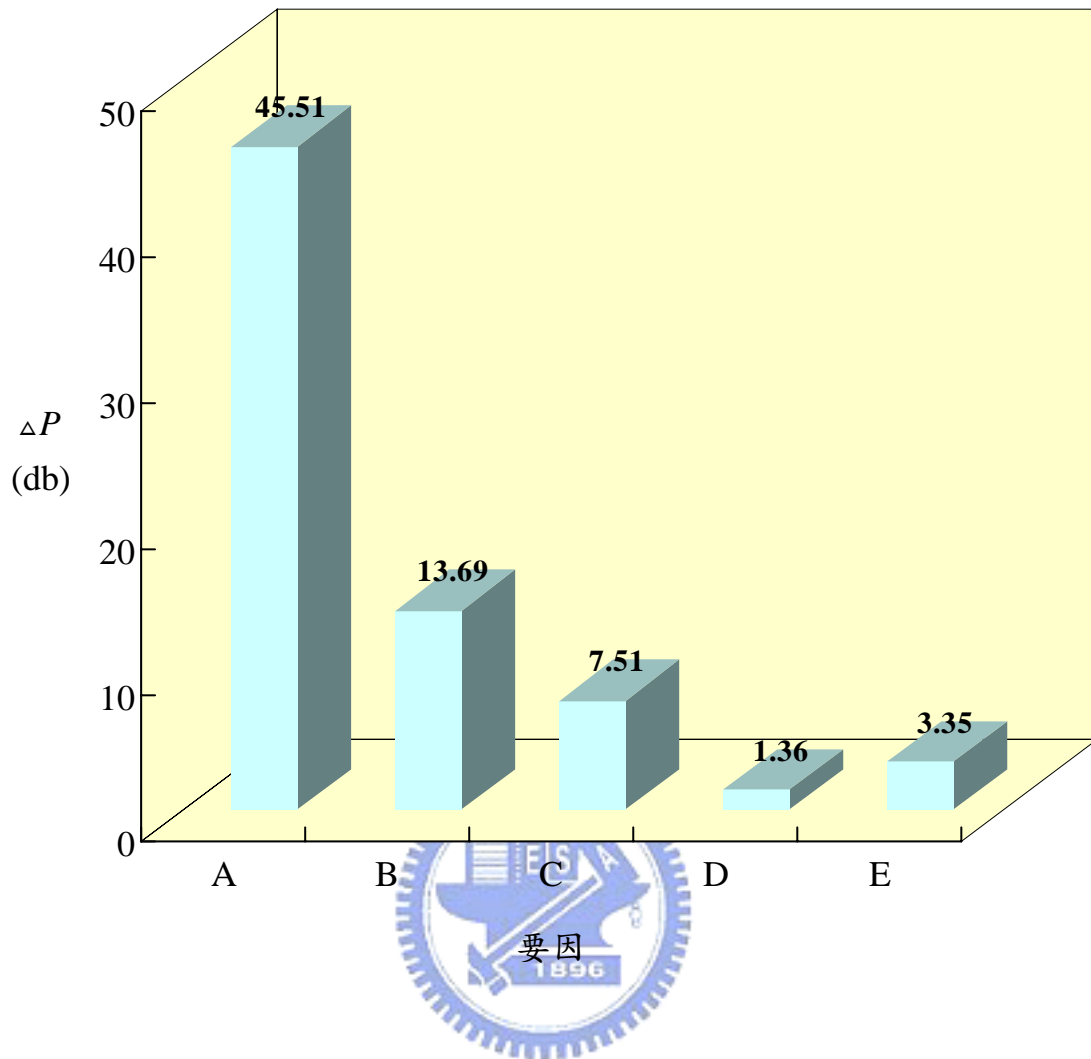


圖 7.10 左齒面齒形誤差之主效果圖

同理，亦可建立右齒面齒形誤差之主效果輔助表，如表 7.5 和表 7.6 所示。由表 7.3 及表 7.5 中，可得到使齒形誤差量最小的因子組合為  $A_1$ 、 $B_2$ 、 $C_1$ 、 $D_2$ 、 $E_1$ ，如表 7.7 所示。並可分別求出各控制因子的主效果  $\Delta P$ ，其  $\Delta P$  越大則表示對齒形誤差的影響越為顯著。而從圖 7.10 所示的左齒面齒形誤差之主效果圖，顯示出 A（原料粉）、B（生胚密度）、C（銅含量）等三項為最主要的控制因子。

表 7.5 右齒面齒形誤差之主效果輔助表 (I)

	(AB)	C	D	E
水準 1	-63.99	-70.75	-75.82	-76.10
水準 2	-50.31	-74.71	-73.31	-76.36
水準 3	-109.06	-77.90	-74.23	-70.90
合計	-223.36			

表 7.6 右齒面齒形誤差之主效果輔助表 (II)

	A	B	C	D	E
主效果	58.75	13.68	7.15	2.51	2.86
排行	1	2	3	5	4

表 7.7 最佳組合之因子及其水準表

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 <sup>3</sup> )	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	—

### 3. 變異數分析

當因子變動所產生的變異量遠大於實驗誤差所造成的變異量時，才代表因子的影響力是有意義的，否則即可視為實驗誤差的一部份，因此，必須靠變異數分析法來測試各個因子的重要性，並評估實驗誤差。

依據表 7.2(a)及表 7.3 所示之數據即可製作左齒面齒形誤差之變異數分析表，其計算方式可利用(6.6)至(6.11)式求得如下：

$$CF = \frac{1}{m} \left( \sum_{i=1}^m \eta_i \right)^2 = \frac{1}{9} (-220.58)^2 = 5406.17$$

$$S_T = \sum_{i=1}^m (\eta_i)^2 - CF = 654.50$$

$$S_{(AB)} = \frac{1}{3} \left[ (-62.92)^2 + (-49.23)^2 + (-108.43)^2 \right] - CF = 640.36$$

由於  $S_{(AB)}$  中 A 與 B 之效果不明，故將其分解為：

$$S_A = \frac{1}{6}(\Delta P_A)^2 = 345.19 ; S_B = \frac{1}{6}(\Delta P_B)^2 = 31.24$$

$$S_C = \frac{1}{3}\left[(-69.74)^2 + (-73.59)^2 + (-77.25)^2\right] - CF = 9.40$$

$$S_D = \frac{1}{3}\left[(-74.41)^2 + (-73.05)^2 + (-73.12)^2\right] - CF = 0.39$$

$$S_E = \frac{1}{6}(E_1 + E_1')^2 + \frac{1}{3}E_2^2 - CF = 2.49$$

$$S_e = S_T - \sum_{j=1}^w SS_j = 654.50 - (640.36 + 9.40 + 0.39 + 2.49) = 1.86$$

$$V_{(AB)} = \frac{S_{(AB)}}{f_{(AB)}} = \frac{640.36}{2} = 320.18$$

以此類推可求得表 7.8。由此知，D 和 E 因子的變異量以誤差因子  $e$  的變異量而言並不顯著，故可將其合併入誤差項中，合併後可得變異數分析表 7.9。其中貢獻率  $\rho$  及變異數比  $F$  之計算方式可利用(6.12)至(6.14)式求得如下：

$$\rho_{(AB)} = \frac{S_{(AB)} - f_{(AB)}V_e}{S_T} \times 100\% = 97.48\%$$

$$\rho_C = \frac{S_C - f_C V_e}{S_T} \times 100\% = 1.07\%$$

$$\rho_e = \frac{S_e + (f_T - f_e)V_e}{S_T} \times 100\% = 1.45$$

$$F_{(AB)} = \frac{V_{(AB)}}{V_e} = 269.06$$

$$F_C = \frac{V_C}{V_e} = 3.95$$

利用 F 表進行 F 檢定，以表 7.9 之變異數分析結果而言，F 分布之參考值分別為 21.20（信賴區間 99%，1d.f.）及 6.94（信賴區間 95%，2d.f.），故因子 A 和 B 在信賴度 99% 下為顯著，而因子 C 在信賴度 95% 下不為顯著，故此再將因子 C 合併入誤差中。由於合併誤差項後，誤差的變異數  $V_e$  之值改變，使得貢獻率  $\rho$  及變異數比  $F_e$  之值也隨之改變，因此必須以合併後之  $V_e$  值，再次利用 (6.12) 至 (6.14) 式計算以求得變異分析結果如表 7.10 所示。表中加上 \* 記號者，表示其在信賴度 95% 下為顯著，而在信賴度 99% 下為顯著時，則加上 \*\* 符號。以合併過後之誤差變異數來做 F 檢定，得因子 A 在信賴度 99%，因子 B 在信賴度 95% 下為顯著。

表 7.8 左齒面齒形誤差之變異數分析表 (I)

要因	$f$	$S$	$V$
(AB)	2	640.36	320.18
A	(1)	(345.19)	(345.19)
B	(1)	(31.24)	(31.24)
C	2	9.40	4.70
D	2	0.39	0.20
E	1	2.49	2.49
$e$	1	1.86	1.86
$T$	8	654.50	—

表 7.9 左齒面齒形誤差之變異數分析表 (II)

要因	$f$	$S$	$V$	$F_0$	$\rho(\%)$
(AB)	2	640.36	320.18	269.06	97.48
A	(1)	(345.19)	(345.19)	290.08**	—
B	(1)	(31.24)	(31.24)	26.25**	
C	2	9.40	4.70	3.95	1.07
$e$	4	4.74	1.19	—	1.45
$T$	8	654.50	—		100

表 7.10 左齒面齒形誤差之變異數分析表 (III)

要因	$f$	$S$	$V$	$F_0$	$\rho(\%)$
(AB)	2	640.36	320.18	135.67	97.12
A	(1)	(345.19)	(345.19)	146.27**	—
B	(1)	(31.24)	(31.24)	13.24*	
$e$	6	14.14	2.36	—	2.88
$T$	8	654.50	—		100

依據表 7.2(b)及表 7.5 所示之數據，以上述相同之計算方式製作右齒面齒形誤差之變異數分析表，如表 7.11 及表 7.12 所示。由變異分析結果可得因子 C、D、E 不為顯著。另外對表 7.12 之結果進行 F 檢定，可得因子 A 在信賴度 99%，因子 B 在信賴度 95% 下為顯著。此結果與左齒面齒形誤差之變異分析結果完全一致。

表 7.11 右齒面齒形誤差之變異數分析表 (I)

要因	$f$	$S$	$V$
(AB)	2	630.00	315.00
A	(1)	(575.26)	(575.26)
B	(1)	(31.19)	(31.19)
C	2	8.55	4.28
D	2	1.07	0.54
E	1	1.82	1.82
$e$	1	4.51	4.51
$T$	8	645.95	—



表 7.12 右齒面齒形誤差之變異數分析表 (II)

要因	$f$	$S$	$V$	$F_0$	$\rho(\%)$
(AB)	2	630.00	315.00	118.42	96.71
A	(1)	(575.26)	(575.26)	216.26**	—
B	(1)	(31.19)	(31.19)	11.73*	
$e$	6	15.95	2.66	—	3.29
$T$	8	645.95	—		100

## 7-1-2 確認實驗

透過前一節變異數分析之結果，可以得到銅熔滲製程對齒形影響最大的參數為 A (原料粉) 及 B (生胚密度)，為了驗證前一節分析所獲得結果之正確性，必須將最佳之參數組合以加法模式作估計，並進行最後的確認實驗，當所得之實驗結果與預測值相似時，才代表所設定之最佳的因子及水準組合得到了確認。茲以各因子之效果作估計，可分別求得下列結果：

$$\bar{T} = T/9 = -220.58/9 = -24.51 (db)$$

$$(AB) \begin{cases} \overline{A_1B_1} = A_1B_1/3 = -20.97 (db) \\ \overline{A_1B_2} = A_1B_2/3 = -16.41 (db) \\ \overline{A_2B_1} = A_2B_1/3 = -36.14 (db) \end{cases}$$

$$C \begin{cases} \overline{C_1} = C_1/3 = -23.25 (db) \\ \overline{C_2} = C_2/3 = -24.53 (db) \\ \overline{C_3} = C_3/3 = -25.75 (db) \end{cases}$$

$$D \begin{cases} \overline{D_1} = D_1/3 = -24.80 (db) \\ \overline{D_2} = D_2/3 = -24.35 (db) \\ \overline{D_3} = D_3/3 = -24.37 (db) \end{cases}$$

$$E \begin{cases} \overline{E_1} = E_1/3 = -24.13 (db) \\ \overline{E_2} = E_2/3 = -25.25 (db) \end{cases}$$



最佳因子組合的 S/N 比預測值為：

$$\hat{\eta} = \overline{A_1 B_2} + \overline{C_1} + \overline{D_2} + \overline{E_1} - 3\overline{T} = -14.61 \text{ (db)}$$

若將此值換算成齒形誤差量為 5.4(μm)。

根據前節之齒形誤差最佳參數組合  $A_1 B_2 C_1 D_2 E_1$ ，以 6-5-2 節之實驗方式再進行確認實驗，經確認實驗之齒形精度量測結果如圖 7.11 所示。若將其齒形誤差量換算成 S/N 比，可得  $\eta = -14.96 \text{ (db)}$ ，如表 7.13 顯示之預測與確認實驗結果。由確認實驗結果中，顯示確認實驗之 S/N 比的數據與預測值甚為接近，根據確認實驗所得結果，即可確定影響齒形變異最小的最佳製程條件組合為  $A_1 B_2 C_1 D_2 E_1$ 。

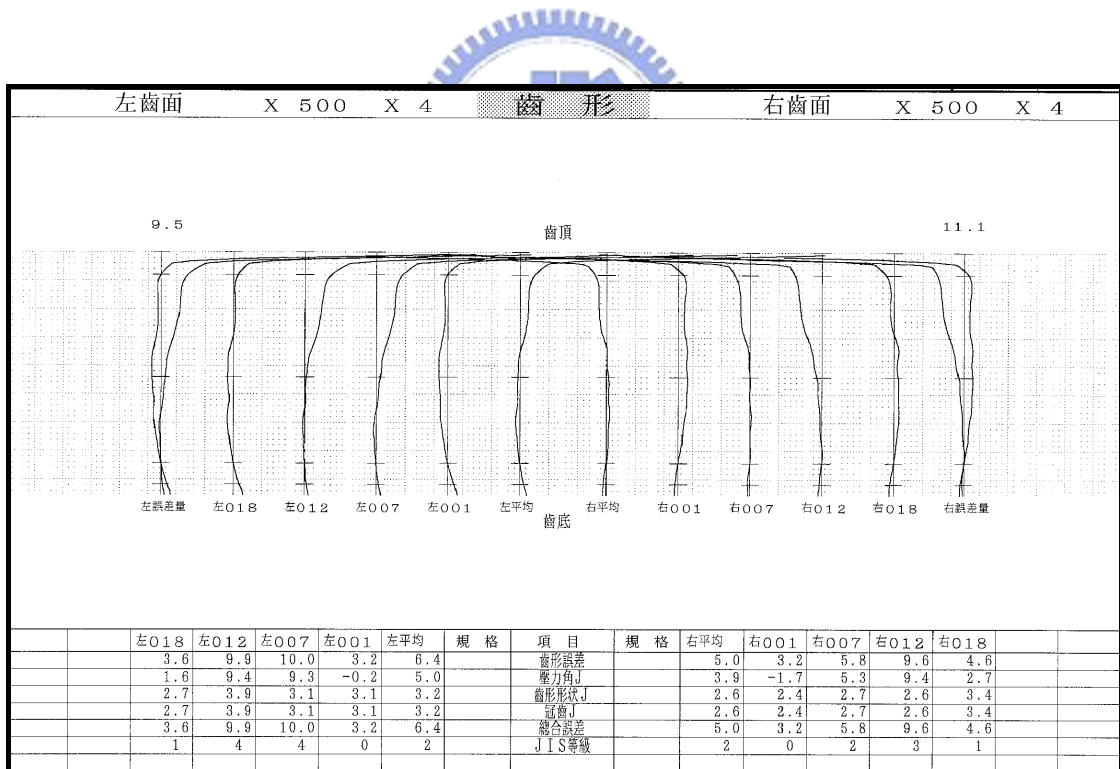


圖 7.11(a) 確認實驗之齒形精度量測圖（成形）

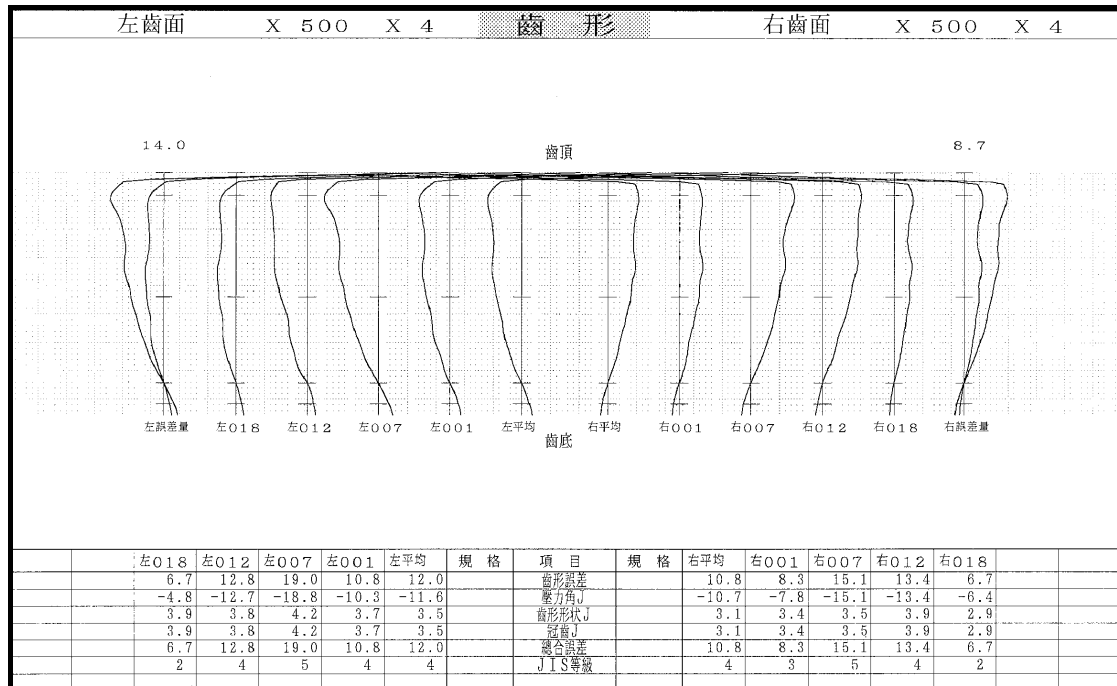


圖 7.11(b) 確認實驗之齒形精度量測圖 (銅熔滲)

表 7.13 預測與確認實驗

	誤差量 ( $\mu m$ )	S/N 比值 (db)
預測值	5.4	-14.61
確認值	5.6	-14.96

## 7-2 齒輪之機械性質

熔滲製程的最大優點，就是可以提高產品的機械性質。因此，經過熔滲之齒輪不僅在精度上需要控制，在機械性質上也必須達到一定的要求，才不失熔滲之目的。

### 7-2-1 彎曲強度

齒輪在嚙合時，由於彎曲力矩及接觸應力之影響，會造成齒輪之損壞，因此提高齒輪之彎曲強度是必要的。而為了瞭解粉末冶金齒輪在經過銅熔滲處理後，會對其彎曲強度造成多大的影響，因此，特別以A、B兩種不同成分的粉末所製造之生胚密度為  $6.7 \text{ g/cm}^3$  之粉末冶金齒輪，在沒有滲銅以及滲銅含量分別為 10.0%、13.5% 和 17.0% 下，利用萬能試驗機來量測其彎曲強度，所得數據整理如表 7.14 所示。而圖 7.12 則表示A、B兩種粉末所製成之粉末冶金齒輪之彎曲強度與銅含量之關係圖。

由圖中顯示出銅含量增加時，粉末冶金齒輪之彎曲強度也會隨之增強，而從原料粉方面來必較，可以看出由A粉末所製造之齒輪，經滲銅後其彎曲強度明顯的優於以B粉末所製成之齒輪。以同樣是 13.5% 之滲銅量為例，A粉末製成之實驗齒輪其彎曲強度由未滲銅前的  $646.91 \text{ kg/mm}^2$  提高到  $1258.76 \text{ kg/mm}^2$ ，共增加了 94.6%；然而以B粉末所製成之實驗齒輪，其彎曲強度在滲銅前後僅增加了 16.8%。另外，由齒形精度實驗結果中顯示，A粉末所製造出來的齒輪在精度上也遠優於以B粉末所製成之齒輪，因此可以確定在銅熔滲製程中，使用A粉末來製造齒輪是比較恰當的。

表 7.14 A、B 粉末製成齒輪之彎曲強度 單位：kg/mm<sup>2</sup>

A 粉末	滲銅含量			
實驗次數	0%	10.0%	13.5%	17.0%
1	647.91	1108.40	1251.50	1340.89
2	643.78	1062.57	1279.67	1391.97
3	649.04	1057.70	1245.11	1336.76
平均	646.91	1076.22	1258.76	1356.54
B 粉末	滲銅含量			
實驗次數	0%	10.0%	13.5%	17.0%
1	882.66	896.18	998.34	1098.25
2	852.61	931.86	1051.68	1091.12
3	829.33	938.62	945.39	1059.94
平均	854.87	922.22	998.47	1083.10

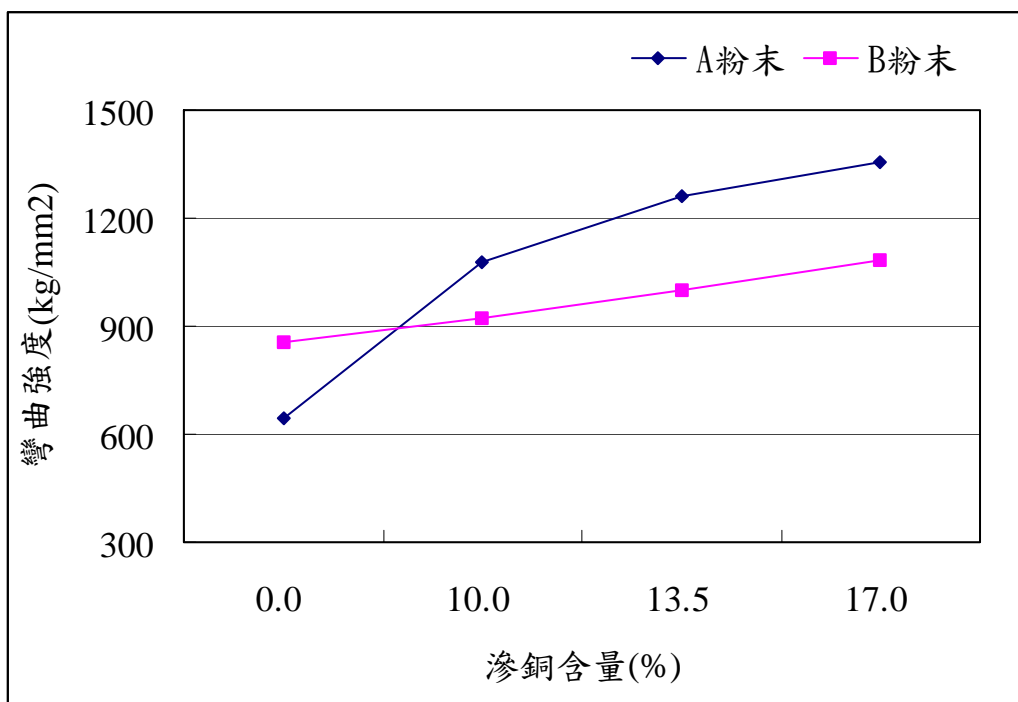


圖 7.12 A、B 粉末製成齒輪之彎曲強度與銅含量之關係圖



### 7-2-2 密度測定

在銅熔滲製程中，完成品之密度一般會要求達到  $7.2\sim 7.5\text{g/cm}^3$ ，以避免在機械強度上的不足。因此，對於粉末冶金實驗齒輪經過熔滲後進行密度量測，以確認是否達到齒輪密度要求。

由於變異數分析結果顯示，原料粉為影響齒形精度最顯著的因子，且其最佳水準為 A 粉末，因此，針對 A 原料粉製成之齒輪，在不同生胚密度及滲銅含量下，量測其經過銅熔滲製程後所得之密度值，測定結果如表 7.15 所示。而其齒輪密度變化如圖 7.13 所示。

表 7.15 A 粉末製成齒輪之密度 (單位：g/cm<sup>3</sup>)

生胚密度 6.6 g/cm <sup>3</sup>	滲銅含量		
樣本編號	10.0%	13.5%	17.0%
1	7.207	7.383	7.667
2	7.200	7.384	7.658
3	7.196	7.381	7.666
平均	7.201	7.383	7.664
生胚密度 6.7 g/cm <sup>3</sup>	滲銅含量		
樣本編號	10.0%	13.5%	17.0%
1	7.322	7.505	7.776
2	7.300	7.510	7.773
3	7.296	7.506	7.774
平均	7.306	7.507	7.774

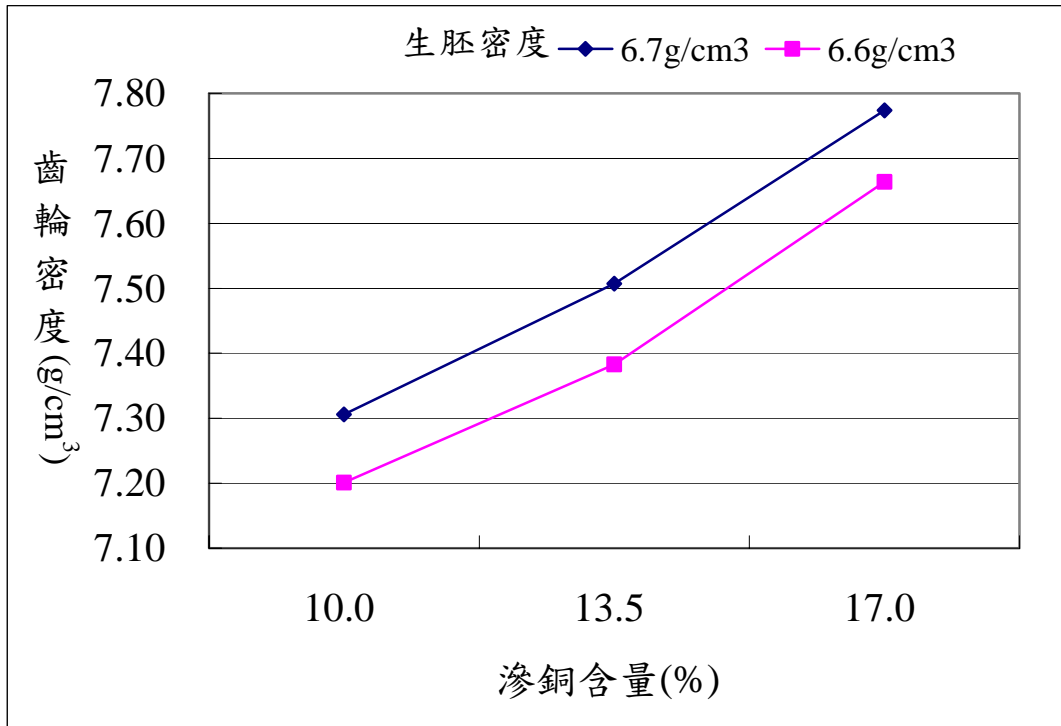


圖 7.13 A 粉末製成齒輪在不同生胚密度下之密度變化圖

由表 7.15 及圖 7.13 可以看出，當生胚密度或滲銅含量越大，經熔滲後之齒輪密度也越大。而不論是改變生胚密度或滲銅含量，A 粉末所製成之齒輪在經銅熔滲後，其密度皆可達到 7.2 g/cm<sup>3</sup> 以上。由於在齒形精度實驗之結果中顯示，粉末冶金齒輪之滲銅含量對齒形變異的影響並不大，因此，在銅熔滲製程中，為了提高齒形之精度可以降低齒輪之生胚密度，而靠提高銅含量來達到最後的密度要求。

### 7-2-3 金相分析

熔滲製程最大的優點之一，是可以靠滲銅的方式填滿成形品內部之空孔，藉此達到提高密度及機械強度之效果。而藉由金相分析之結果，可以觀察到齒輪內部有無滲銅的差異。圖 7.14 至 7.17 為 A、B 兩種粉末所燒結之齒輪與經過滲銅之齒輪，利用光學顯微鏡以放大倍率 300 倍所拍出之金相圖。

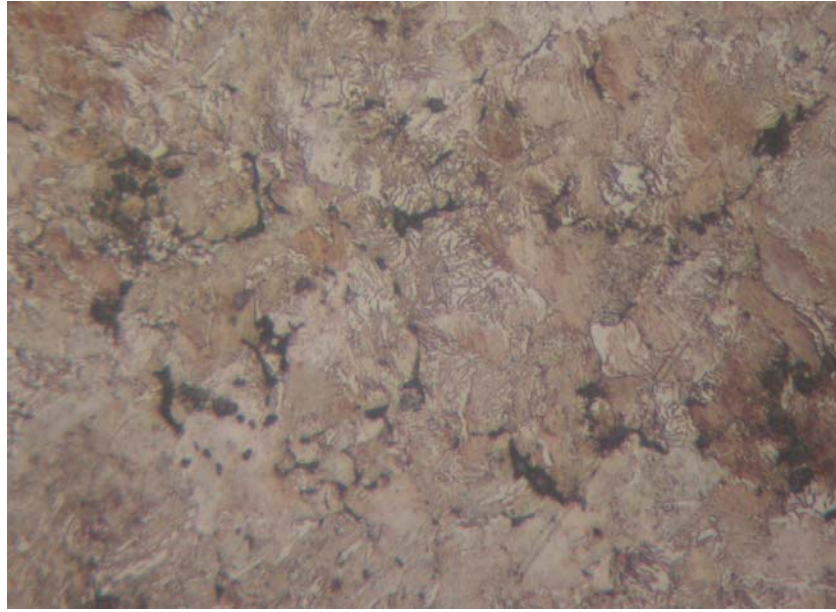


圖 7.14(a) A 粉末製成齒輪經燒結後之金相圖 (齒輪芯部)

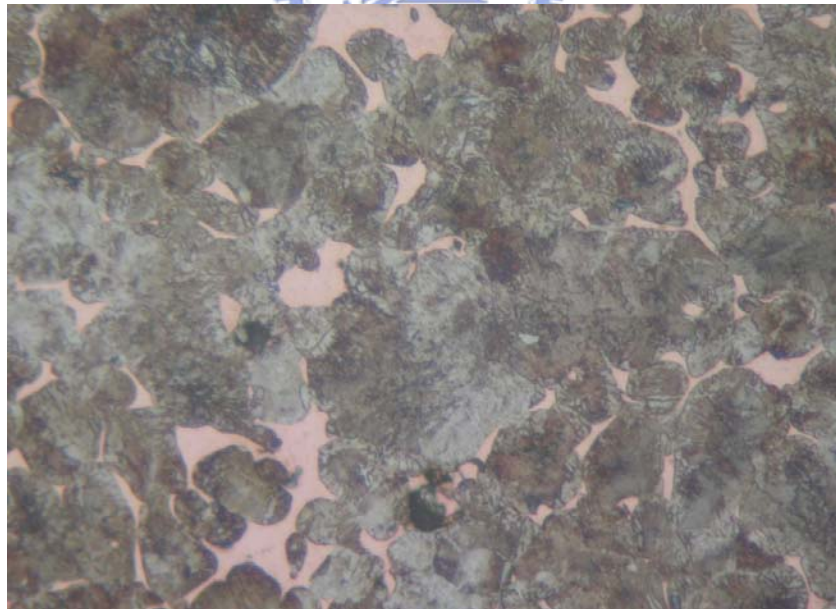


圖 7.14(b) A 粉末製成齒輪經銅熔滲後之金相圖(齒輪芯部)



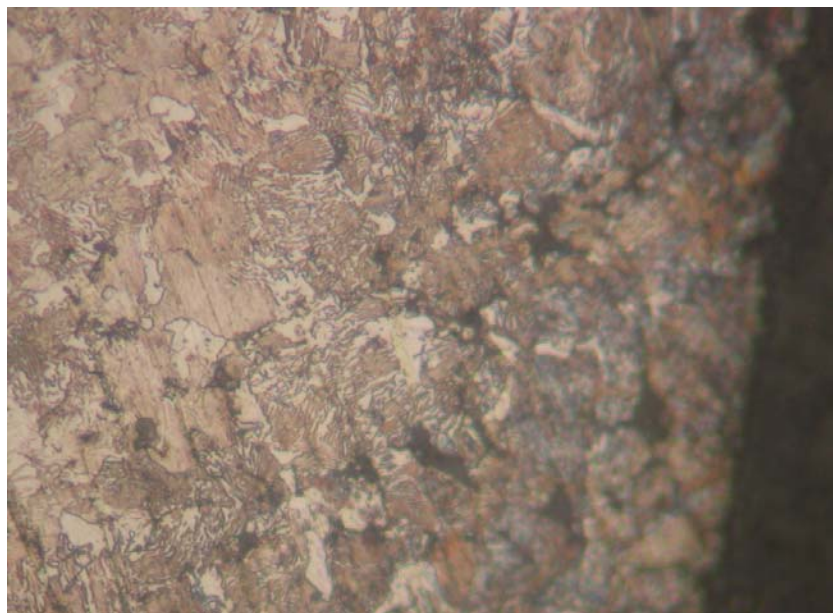


圖 7.15(a) A 粉末製成齒輪經燒結後之金相圖 (齒部)



圖 7.15(b) A 粉末製成齒輪經銅熔滲後之金相圖 (齒部)

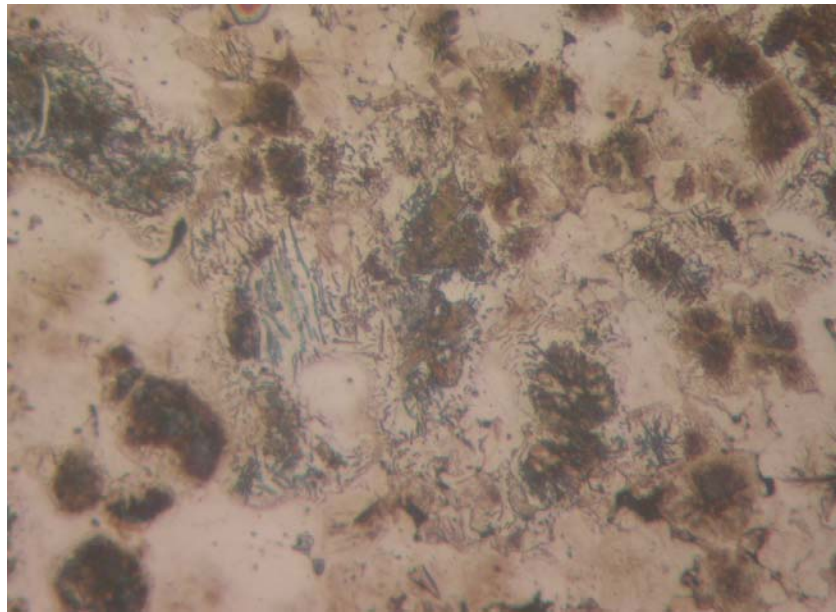


圖 7.16(a) B 粉末製成齒輪經燒結後之金相圖 (齒輪芯部)

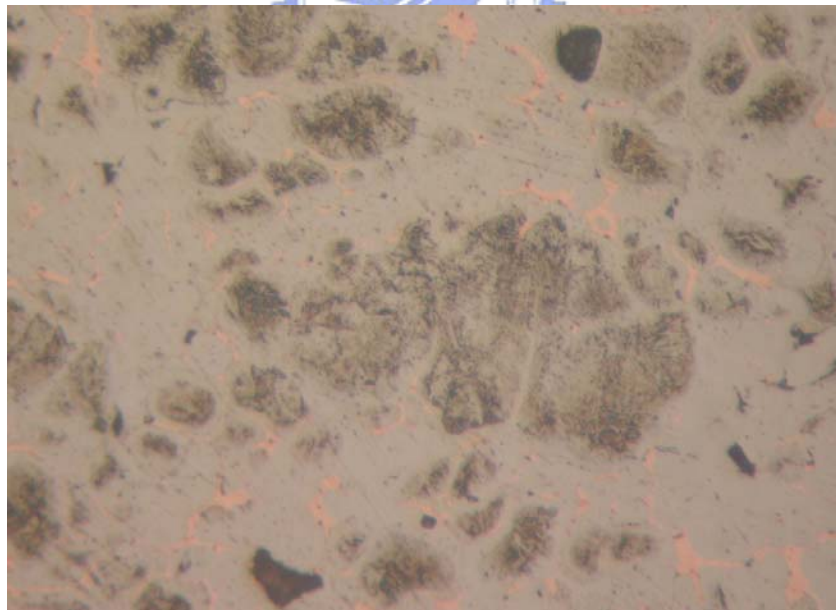


圖 7.16(b) B 粉末製成齒輪經銅熔滲後之金相圖(齒輪芯部)

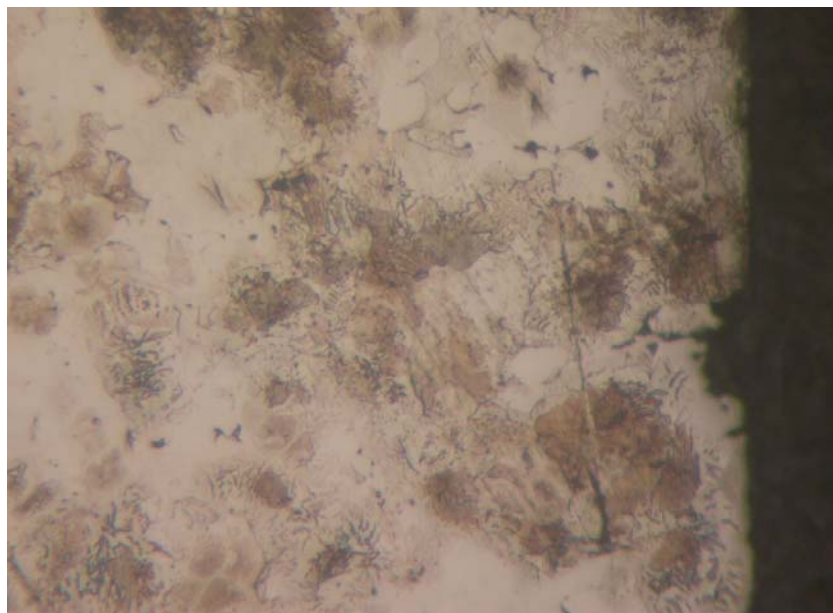


圖 7.17(a) B 粉末製成齒輪經燒結後之金相圖 (齒部)

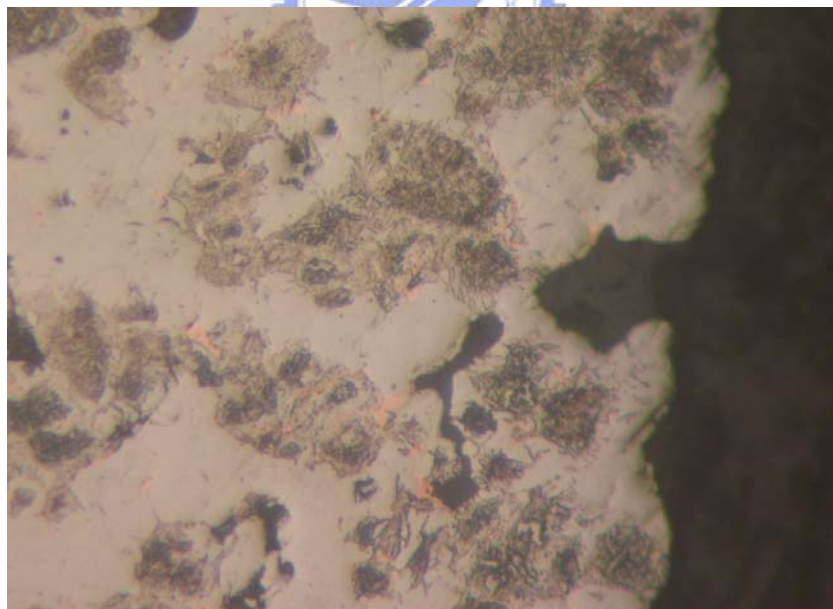


圖 7.17(b) B 粉末製成齒輪經銅熔滲後之金相圖 (齒部)

從圖 7.14 至 7.17 之金相圖中可以發現，齒輪在歷經單純的燒結過程後，內部將會留有許多空孔。而經銅熔滲之齒輪，其內部的空孔絕大部分都會被銅所填滿，也因此將會大幅的提高經銅熔滲齒輪之機械強度，包括彎曲強度、硬度及抗腐蝕能力等性質都會獲得改良。

