

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

粉末對粉末冶金件  
螺旋齒輪精度之影響

Effects of Powders on the Precision of a  
Powder Metallurgy Helical Gear

研究生：游明達

指導教授：蔡忠杓 教授

中華民國九十四年六月

粉末對粉末冶金件螺旋齒輪精度之影響

**Effects of Powders on the Precision of a  
Powder Metallurgy Helical Gear**

研究生：游明達  
指導教授：蔡忠杓

Student : Ming-Ta Yu  
Advisor : Dr. Chung-Biau Tsay

國立交通大學  
機械工程學系  
碩士論文



Submitted to Department of Mechanical Engineering  
College of Engineering  
National Chiao Tung University  
in Partial Fulfillment of the Requirements  
in  
Mechanical Engineering

June 2005

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十四年六月

# 粉末對粉末冶金件螺旋齒輪精度之影響

學生：游明達

指導教授：蔡忠杓 博士

國立交通大學機械工程學系

## 摘 要

螺旋齒輪為傳動系統中重要機械元件之一，常被使用於平行軸齒輪組上。一般產業常用的螺旋齒輪製造方法，可概分為切削性加工與非切削性加工兩大類。粉末冶金法製造之螺旋齒輪屬於非切削性加工，具有省料，省工、適合大量生產及成本低等優點，且機械性質良好，已被工業界所大量採用。

粉末冶金件螺旋齒輪於製造過程中，其齒面幾何誤差受到粉末、生胚密度、模具設計、燒結時間與燒結溫度等製程參數影響，幾乎難以避免。而為了提高齒輪製造精度，且不改變其機械性質，亦即在其他製程參數固定的情況下，便可透過模具齒形的修整，以補償粉末冶金件螺旋齒輪其齒面幾何誤差。

本論文將採用實際上粉末冶金螺旋齒輪的製程條件，進行試作實驗與齒輪精度的量測，以探討粉末及螺旋齒輪之節圓半徑這兩個製程參數對於齒輪精度的影響；同時應用齒輪創成原理所推導之螺旋齒輪數學模式，配合齒面變異分析，求得齒輪設計參數改變量與齒面變異量之關係。再以實驗量測結果為依據，利用電腦模擬齒面變異，計算出理想的齒輪成形模具設計參數修整量。

# Effects of Powders on the Precision of a Powder Metallurgy Helical Gear

Student : Ming-Ta Yu

Advisor : Dr. Chung-Biau Tsay

Department of Mechanical Engineering

National Chiao Tung University

## Abstract

A helical gear is one of the important transmission elements in a machine system and often used for parallel axes gearing. The manufacture methods can be categorized into the cutting method and the non-cutting method. A powder metallurgy helical gear belongs to the non-cutting method and has great advantages of material-saving, labor-saving, fitness for mass production, cost down and good mechanical properties. It has been widely used in the industry.

In the powder metallurgy helical gear manufacturing, the gear surface deviations are due to the influences of powders, green density, sintering time, sintering temperature and the design of a forming die. To improve the gear manufacture precision without changing the mechanical properties of the gears and other process parameters, correcting the shape of the forming die to compensate the metallurgy helical gear surface deviations would be feasible.

This study refers to the conditions of practical powder metallurgy manufacture process, and proceeds to experiments and gear precision measurements as well as investigation on the effects of two parameters, powders and pitch circle radius, on gear precision. The relationship between gear parameters and gear surface deviations was derived from the mathematical model for the involute helical gears and the analysis of gear surface deviations. In accordance with the measurement results of experiments, an ideal correction on the parameters of a forming die could be derived from the computer simulations of gear surface deviations.

## 誌 謝

本論文能夠順利完成，首先要感謝指導教授 蔡忠杓博士在研究及論文寫作上的細心指導。除此之外，老師平時的待人處世以及對事情認真執著的態度更是讓學生獲益匪淺。在此衷心地感謝老師這兩年來對學生的照顧及指導。

而在實驗的進行上，則要感謝台灣保來得公司所提供的設備，以及生技課全體同仁在技術上的幫助及日常生活中的照顧，尤其是李輝隆博士、黃俊輝組長及蕭敏郎大哥等，使本論文之實驗能夠順利完成，在此特別感謝。

同時也感謝國立中央大學 王國雄教授、國立清華大學 宋震國教授與國立交通大學 洪景華教授撥冗前來指導學生的論文，並提出許多寶貴的意見，使本論文能更趨完備。

在齒輪研究室裡的瑞堂學長、冠宇學長、志榮同學、立基同學、政豪學弟及俊諭學弟，謝謝你們總是在我需要幫助的時候伸出援手，並陪伴我渡過這兩年歡樂的時光。

最後，感謝我的父母親二十多年來的栽培及養育，在唸書與研究的過程中給我充分的支持與鼓勵，讓我能夠心無旁騖地專注在論文研究上，在此由衷地感謝我的父母親，願你們永保安康。

# 目 錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
誌 謝	iii
目 錄	iv
表目錄	viii
圖目錄	vii
符號說明	xi
第一章 緒論	1
1-1 前言	1
1-2 文獻回顧	2
1-3 研究方向	3
第二章 螺旋齒輪數學模式	5
2-1 前言	5
2-2 齒條刀之數學模式	7
2-3 接觸線之共同法向量	11
2-4 齒面之數學模式	13
2-5 螺旋齒輪之電腦輔助繪圖	17
第三章 粉末冶金製程簡介	20



3-1	前言	20
3-2	粉末冶金製程	20
3-2-1	原料粉	22
3-2-2	成形	22
3-2-3	燒結	24
3-2-4	精整	24
3-2-5	機械加工	25
3-2-6	熱處理	25
3-3	結論	25
第四章	齒形變異實驗	26
4-1	實驗目的	26
4-2	實驗材料	26
4-3	實驗設備	27
4-3-1	成形模具	28
4-3-2	成形設備	30
4-3-3	燒結設備	30
4-3-4	量測設備	30
4-4	實驗方法	32
4-4-1	實驗參數	32



4-4-2	實驗的進行	33
第五章	實驗結果與討論	35
5-1	成形齒輪壓胚體之齒形誤差	35
5-2	燒結後齒輪之齒形誤差	40
5-3	成形齒輪壓胚體之齒筋誤差	47
5-4	燒結後齒輪之齒筋誤差	53
5-5	結論	53
第六章	粉末冶金螺旋齒輪之模具齒形修整模擬	61
6-1	前言	61
6-2	齒面變異分析	61
6-3	模具齒形修整模擬—以甲粉末冶金齒輪為例	64
6-4	模具齒形修整模擬—以乙粉末冶金齒輪為例	69
6-5	齒輪齒筋方向的誤差修整	71
第七章	結論與未來展望	72
7-1	結論	72
7-2	未來展望	73
	參考文獻	74



## 表目錄

表 2.1	螺旋齒輪設計參數	18
表 4.1	實驗原料粉之調和及特性表	27
表 4.2	齒輪模具之齒形設計參數(台灣保來得公司提供)	28
表 4.3	實驗製程固定參數	33
表 5.1	甲齒輪與乙齒輪成形品平均齒形誤差	36
表 5.2	甲齒輪與乙齒輪燒結品平均齒形誤差	41
表 5.3	甲齒輪與乙齒輪成形品平均齒筋誤差	48
表 5.4	甲齒輪與乙齒輪燒結品平均齒筋誤差	54
表 6.1	甲粉末冶金齒輪之齒形參數 $b_0$ 改變與齒形變異量之關係	65
表 6.2	甲粉末冶金齒輪之壓力角改變與齒形變異量之關係	66
表 6.3	甲粉末冶金齒輪燒結品之最大平均齒形誤差量	66
表 6.4	甲粉末冶金齒輪之模具齒形參數修整量	69
表 6.5	乙粉末冶金齒輪燒結品之最大平均齒形誤差量	69
表 6.6	乙粉末冶金齒輪之齒形參數 $b_0$ 改變與齒形變異量之關係	70
表 6.7	乙粉末冶金齒輪之壓力角改變與齒形變異量之關係	70
表 6.8	乙粉末冶金齒輪之模具齒形參數修整量	70

## 圖目錄

圖 2.1	齒條刀與齒輪在創成時之運動關係示意圖	6
圖 2.2	齒條刀之法向剖面圖	8
圖 2.3	產生導程角 $\lambda_F$ 的齒條刀示意圖	10
圖 2.4	齒條刀與被切製齒輪之機構運動關係	14
圖 2.5	平行軸齒輪組之共軛運動關係示意圖	16
圖 2.6	甲齒輪之電腦繪圖	18
圖 2.7	乙齒輪之電腦繪圖	19
圖 3.1	粉末冶金基本製造流程	21
圖 3.2	成形步驟示意圖 ([10])	23
圖 3.3	簡易模具組裝示意圖 ([11])	23
圖 4.1	甲齒輪之成形模具組	29
圖 4.2	乙齒輪之成形模具組	29
圖 4.3	100 噸氣壓式粉末成形機	31
圖 4.4	輸送帶式連續燒結爐(日本山崎公司)	31
圖 4.5	TTi-300E—CNC齒輪精度量測機	32
圖 4.6	實驗齒輪甲之試製成品	34
圖 4.7	實驗齒輪乙之試製成品	34
圖 5.1(a)	以A粉末成形之甲齒輪壓胚體的齒形精度量測結果	37

圖 5.1(b) 以B粉末成形之甲齒輪壓胚體的齒形精度量測結果	37
圖 5.1(c) 以C粉末成形之甲齒輪壓胚體的齒形精度量測結果	38
圖 5.2(a) 以A粉末成形之乙齒輪壓胚體的齒形精度量測結果	38
圖 5.2(b) 以B粉末成形之乙齒輪壓胚體的齒形精度量測結果	39
圖 5.2(c) 以C粉末成形之乙齒輪壓胚體的齒形精度量測結果	39
圖 5.3 甲齒輪之齒形平均誤差量變化圖	42
圖 5.4 乙齒輪之齒形平均誤差量變化圖	42
圖 5.5(a) 以A粉末製成之甲齒輪燒結品的齒形精度量測結果	43
圖 5.5(b) 以B粉末製成之甲齒輪燒結品的齒形精度量測結果	43
圖 5.5(c) 以C粉末製成之甲齒輪燒結品的齒形精度量測結果	44
圖 5.6(a) 以A粉末製成之乙齒輪燒結品的齒形精度量測結果	44
圖 5.6(b) 以B粉末製成之乙齒輪燒結品的齒形精度量測結果	45
圖 5.6(c) 以C粉末製成之乙齒輪燒結品的齒形精度量測結果	45
圖 5.7 齒形細分化量測結果(以 C 粉末製成之乙齒輪為例)	46
圖 5.8(a) 以A粉末成形之甲齒輪壓胚體的齒筋精度量測結果	49
圖 5.8(b) 以B粉末成形之甲齒輪壓胚體的齒筋精度量測結果	49
圖 5.8(c) 以C粉末成形之甲齒輪壓胚體的齒筋精度量測結果	50
圖 5.9(a) 以A粉末成形之乙齒輪壓胚體的齒筋精度量測結果	50
圖 5.9(b) 以B粉末成形之乙齒輪壓胚體的齒筋精度量測結果	51

圖 5.9(c) 以C粉末成形之乙齒輪壓胚體的齒筋精度量測結果	51
圖 5.10 甲齒輪成形品左右齒面平均齒筋誤差之比較	52
圖 5.11 乙齒輪成形品左右齒面平均齒筋誤差之比較	52
圖 5.12 (a) 以A粉末製成之甲齒輪燒結品的齒筋精度量測結果	55
圖 5.12 (b) 以B粉末製成之甲齒輪燒結品的齒筋精度量測結果	55
圖 5.12 (c) 以C粉末製成之甲齒輪燒結品的齒筋精度量測結果	56
圖 5.13 (a) 以A粉末製成之乙齒輪燒結品的齒筋精度量測結果	56
圖 5.13 (b) 以B粉末製成之乙齒輪燒結品的齒筋精度量測結果	57
圖 5.13 (c) 以C粉末製成之乙齒輪燒結品的齒筋精度量測結果	57
圖 5.14 甲齒輪燒結品左右齒面平均齒筋誤差之比較	58
圖 5.15 乙齒輪燒結品左右齒面平均齒筋誤差之比較	58
圖 5.16 甲齒輪與乙齒輪成形與燒結誤差比較圖	59
圖 6.1 模具齒形與燒結品齒形之變化情形	62
圖 6.2 齒形最大誤差量與膨脹量示意圖	65

## 符號說明

$a_0$	齒刀設定參數
$b_0$	齒刀設定參數
$l_F$	齒刀 $\Sigma_F$ 之齒面座標
$\mathbf{n}_1$	齒輪 $\Sigma_1$ 之齒面單位法向量
$p_n$	周節
$u_F$	齒刀 $\Sigma_F$ 之齒面座標
$I$	共軛運動對之瞬心
$\mathbf{L}_{ij}$	向量轉換矩陣；由 $S_j$ 座標系轉換至 $S_i$ 座標系
$\mathbf{M}_{ij}$	位置轉換矩陣；由 $S_j$ 座標系轉換至 $S_i$ 座標系
$\mathbf{N}_1$	齒輪 $\Sigma_1$ 之齒面法向量
$P_n$	在垂直平面上的徑節
$\mathbf{R}_i$	齒輪 $\Sigma_1$ 表示在 $S_i$ 座標系
$\mathbf{R}_a^{(F)}$	齒刀 $\Sigma_F$ 之正交剖面表示在 $S_a$ 座標系
$\lambda_F$	齒刀 $F$ 之螺旋導角
$\zeta_n$	下圓弧導角區域之幅角
$\theta_n$	上圓弧導角區域之幅角
$\rho$	圓弧導角之半徑

- $\Sigma_1$  齒輪  $\Sigma_1$  之齒面
- $\Sigma_F$  齒刀 F 之齒面
- $\phi_1$  齒輪  $\Sigma_1$  之旋轉角
- $\psi_n$  壓力角



# 第一章 緒論

## 1-1 前言

漸開線形螺旋齒輪其嚙合動作屬於漸進傳遞，傳動方式平滑安靜，與同等級的正齒輪相比，具有較大的傳達動力，且低噪音的特性。一般產業常用的齒輪製造方法，可概分為切削性加工與非切削性加工兩大類。過去傳統的齒輪製造方法多以切削加工為主，例如滾齒加工、鉋齒、齒輪銑製、剪切加工及齒輪拉製等，皆為產業界常用的齒輪切削法。而齒輪以成形製造之非切削加工方法包括鍛造、壓鑄、射出成形以及粉末冶金等。其中，粉末冶金製造齒輪具有省料、省工、適合大量生產及成本低等優越性，且機械性質良好，已被工業界所大量採用。

齒輪於實際製造時，由於其齒面幾何誤差幾乎難以避免，因此，齒輪傳遞運動時，會有傳動角度上些微的誤差，即所謂的傳動誤差（Transmission Error），而齒輪傳動誤差是引起齒輪振動（Vibration）與噪音（Noise）的主要因素。造成齒輪嚙合不良的齒面幾何因素，主要為齒形誤差、導程誤差以及節距誤差，而粉末冶金螺旋齒輪又以齒形誤差及導程誤差最為顯著，其一般之精度平均約在 JIS 5 級至 6 級，因此，提升齒輪精度是粉末冶金螺旋齒輪能否被廣泛採用的關鍵之處。

傳統粉末冶金成形不論在模具設計或加工條件的抉擇上，均依賴技術人員的經驗，以試誤法的方式，在嘗試錯誤中修改模具設計及加工條件。這種方法不但增加試模時間及修模費用，同時在經驗累積與技術傳承上也較為困難。粉末冶金製造之齒輪，其最大的缺點在於尺

寸安定性不足，原因在於製程中的成形密度及燒結溫度等參數不穩定所致；然而對於已規範之製程，模具的設計修整便成為產品設計最重要且最直接能控制品質的一環。故本研究希望利用電腦輔助設計的方式，為齒輪模具設計時提供一有效之補償修整依據，以提高螺旋齒輪產品的尺寸精度。

## 1-2 文獻回顧

粉末冶金齒輪多探討其製程對成品精度之影響[1,2]，或者是對粉末冶金齒輪件作失效及損耗分析[3,4]，尚未有對粉末冶金齒輪件成形製造，以學理建立齒形數學模式加以定量之精度探討。張宏彬[5]於2002年對粉末冶金正齒輪精度改善進行研究，藉由對齒輪模具的模數和壓力角的修改，以達到成品精度的改善，該研究並歸納出幾點重要的結論：

1. 粉末冶金齒輪的齒形變化可視為齒形壓力角的改變，當粉末變化率越大，則成品之齒形壓力角會變得越小。
2. 齒形最大誤差位置發生在齒冠頂部及齒根底部，利用齒形壓力角的修整可有效降低粉末冶金之齒形誤差。
3. 若使用之金屬粉末經過燒結後，造成齒輪燒結品尺寸變化率越大，則在設計其模具齒形時所需修整之壓力角也越大，而模數則需變得更小。
4. 小模數的實驗齒輪品質較為穩定，所據以進行之模具齒形參數修整可靠度亦較高，而使用高變化率之粉末所製造之大模數齒輪，其品質差異較大，齒形參數修整所達成之效果亦較不穩定，實務上必須依實際生產狀況作適度調整修正。

5. 利用電腦模擬齒面變異情形，再配合實驗量測數據，可以針對模具參數做進一步修整，以達到高精度齒輪的要求。這樣不僅讓模具齒形設計更為快速精確，亦可省去多次試模的過程並降低生產成本。

陳錦盛[6]於 2003 年針對不同的生胚密度與燒結溫度，探討其對粉末冶金件正齒輪精度之影響，並建立齒形誤差曲線之數學模式與齒形誤差曲線圖。金德浩[7]於 2004 年將粉末冶金的製程條件，配合田口實驗法來進行實驗與齒輪精度的量測，找出影響齒形變異最小的最佳製程條件組合，提升實驗齒輪的強度及精度。

### 1-3 研究方向

本研究將探討粉末對粉末冶金件螺旋齒輪之齒形精度的影響，以及不同節圓半徑的螺旋齒輪成形模具所製成之齒輪經過燒結後，其齒形精度的變化。再應用 Litvin[8,9]所發展之齒輪原理，推導出螺旋齒輪之齒形數學模式，根據所推導之螺旋齒輪齒形數學模式，進行虛擬創成齒面之變異量及齒形參數敏感度分析，進而比較粉末冶金螺旋齒輪成品之實驗量測結果與電腦模擬分析之結果，藉由創成法及其齒面變異量以推導出齒形設計參數修整量，做為粉末冶金件螺旋齒輪其模具設計補償修整的依據，期望能夠節省粉末冶金齒輪模具之設計時程及成本，並增加齒輪之精度。

因此本研究所要探討之主題，茲臚列如下：

1. 藉由實驗和量測分析，探討齒形變異的趨勢：

採用台灣保來得 (Taiwan Porite) 公司所提供之粉末冶金製程設備及條件實際製作粉末冶金螺旋齒輪進行實驗，探討不同

粉末所製成之齒輪經過燒結後，對其成品齒形的影響，與不同節圓半徑之齒輪成形模具所製造之粉末冶金齒輪其齒形精度的變化。

2. 齒形變異之敏感度分析：

利用電腦模擬齒輪之齒形設計參數改變對齒形變異量的影響程度，找出最關鍵或敏感度之齒形設計參數，以作為粉末冶金齒輪模具修整的參考。

3. 模具齒形之補償修整：

將電腦模擬敏感度分析的結果與實際成品量測值進行比較，以求得適當的齒輪模具修正值，俾使粉末冶金螺旋齒輪件在製程中可能的變化，能快速得到良好的補償，以達到製造出高精度粉末冶金件螺旋齒輪的產業量產要求。



## 第二章 螺旋齒輪數學模式

### 2-1 前言

本章將根據 Litvin[8,9]所發展之齒輪原理，推導出漸開線形螺旋齒輪的齒形數學模式，作為電腦模擬齒形變異分析的依據。

漸開線螺旋齒輪可以滾齒方式來製造，亦即可由一把其截面為直邊之滾齒刀（Hob Cutter）滾製而成。在模擬其滾製過程時，亦可以一把截面為直線的假想齒條刀（Rack Cutter）作平移運動，而工件作旋轉運動來模擬其切製過程。在切製過程的每一瞬間，齒條刀與被切製的齒輪間為線接觸。

圖 2.1 顯示齒條刀在切製齒輪時，齒條刀之節平面（Pitch Plane）與齒輪之瞬軸面（Axode）之相對運動情形。當切製齒輪時，齒條刀係置於實心之圓筒狀工件上方，圓筒形工件之半徑為齒輪之節圓半徑（Pitch Radius）加上齒輪之齒冠（Addendum），齒條刀及圓筒之運動方向和速度大小如圖 2.1 所示，此時 $|\mathbf{V}|=r_1\omega_1$ 。因此，被創成之齒輪的齒面數學模式的建立，必先從齒條刀之刀面數學模式著手，再依微分幾何的原理，找出齒條刀與被創成齒輪在共同接觸點或線的位置及其共同法向量（Common Normal Vector），同時根據被創成之齒輪與刀具的運動關係，即可求得刀具與被創成齒輪之嚙合方程式（Equation of Meshing），如此便可推導出齒輪的齒面數學方程式。

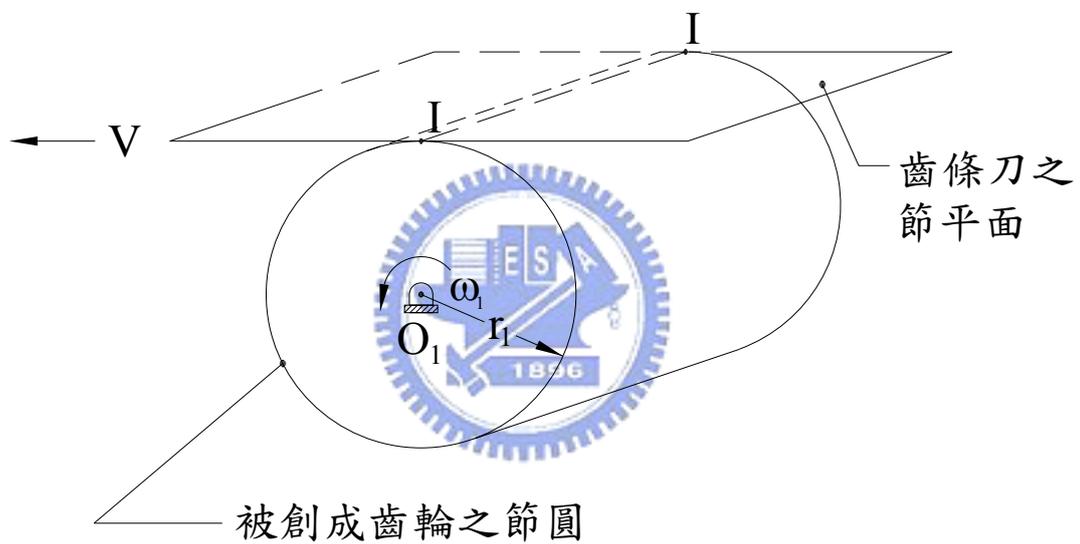


圖 2.1 齒條刀與齒輪在創成時之運動關係示意圖

## 2-2 齒條刀之數學模式

如上一節所述，漸開線形螺旋齒輪可由直邊齒條刀創成，根據齒條刀創成法（Rack Cutter Generating Method），要推導出齒輪數學模式，要先從齒條刀之外形數學方程式著手。如圖 2.2 所示，以 $\Sigma_F$ 代表創成齒輪之齒條刀，將齒條刀 $\Sigma_F$ 的法向剖面（Normal Cross Section）表示在 $S_a(X_a, Y_a, Z_a)$ 座標系，其中 $l_F = |\overline{M_0M_1}|$ 為齒條刀 $\Sigma_F$ 其直邊刀面之設計參數，表示由起始點 $M_0$ 沿著齒條刀直邊刀面移動至直邊刀具上任何一點 $M_1$ 的距離。而 $M_2$ 點則為此直邊刀面設計參數的終點。因此，齒條刀 $\Sigma_F$ 之法向剖面直邊部分可表示在 $S_a$ 座標系如下：

$$\mathbf{R}_{a(l)}^{(F)} = \begin{bmatrix} l_F \cos \psi_n^{(F)} - a_0 \\ \pm (l_F \sin \psi_n^{(F)} - a_0 \tan \psi_n^{(F)} - b_0) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

(1) 式中之 $\pm$ 符號，正號表示刀具之左刀面，負號則表示刀具之右刀面； $\psi_n^{(F)}$ 為齒條刀 $\Sigma_F$ 之壓力角（Pressure Angle）； $a_0$ 及 $b_0$ 為用以定義直邊刀面之起始點位置的刀具參數；另外， $\mathbf{R}_{a(l)}^{(F)}$ 表示齒條刀 $\Sigma_F$ 之法向剖面的直邊外形位置向量，上標F表示齒條刀 $\Sigma_F$ ，下標l表示刀具之直邊部分，下標a代表方程式是表示在 $S_a$ 座標系。圖 2.2 中， $P_n$ 為刀具之法向徑節（Normal Diametral Pitch）， $O_a^{(F)}$ 則表示刀具座標系 $S_a$ 之座標原點，亦為齒輪工件節圓與刀具 $\Sigma_F$ 之法向剖面在創成時之相切點。

同樣地，齒條刀 $\Sigma_F$ 之法向剖面的上圓弧導角及下圓弧導角之外形，亦可分別表示在 $S_a$ 座標系如下：

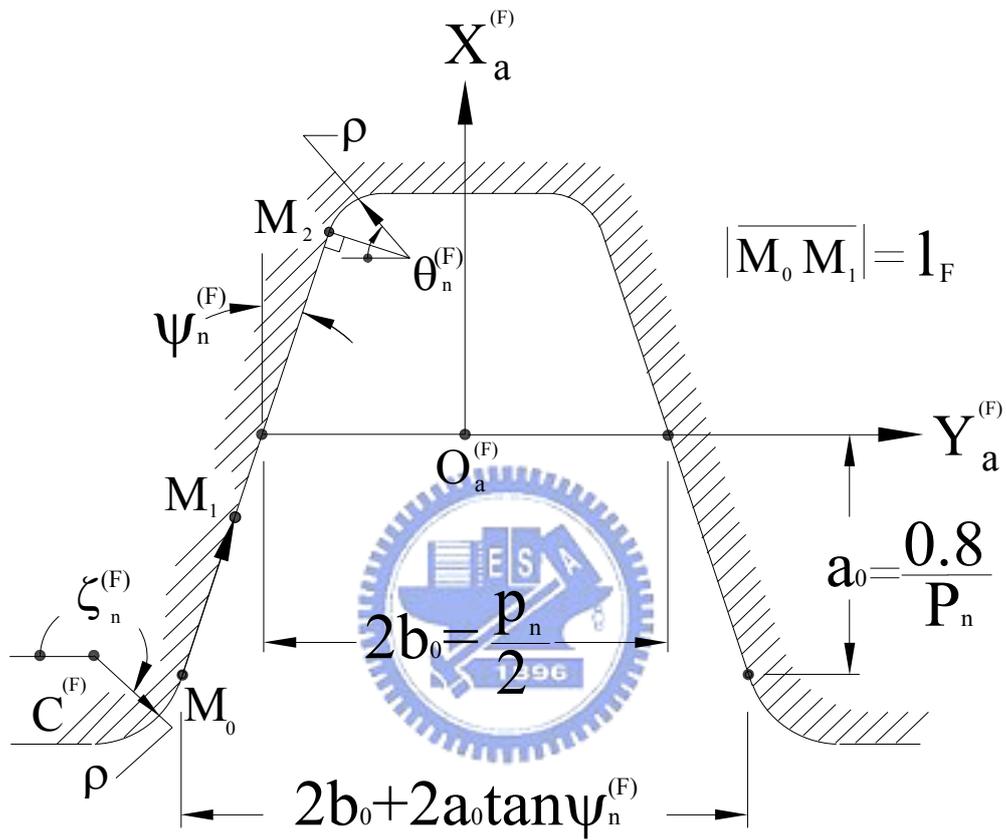


圖 2.2 齒條刀之法向剖面圖

$$\mathbf{R}_{a(uf)}^{(F)} = \begin{bmatrix} a_0 - \rho \sin \psi_n^{(F)} + \rho \sin \theta_n^{(F)} \\ \pm (a_0 \tan \psi_n^{(F)} - b_0 + \rho \cos \psi_n^{(F)} - \rho \cos \theta_n^{(F)}) \\ 0 \end{bmatrix}, \psi_n^{(F)} \leq \theta_n^{(F)} \leq 90^\circ \quad (2)$$

$$\mathbf{R}_{a(lf)}^{(F)} = \begin{bmatrix} -a_0 + \rho \sin \psi_n^{(F)} + \rho \sin \zeta_n^{(F)} \\ \pm (-a_0 \tan \psi_n^{(F)} - b_0 - \rho \cos \psi_n^{(F)} - \rho \cos \zeta_n^{(F)}) \\ 0 \end{bmatrix}, 180^\circ + \psi_n^{(F)} \leq \zeta_n^{(F)} < 270^\circ \quad (3)$$

(2) 及 (3) 式中之 $\pm$ 符號，正號表示刀具之左刀面，負號則表示刀具之右刀面； $\mathbf{R}_{a(uf)}^{(F)}$  及  $\mathbf{R}_{a(lf)}^{(F)}$  分別為齒條刀  $\Sigma_F$  之法向剖面的上圓弧導角及下圓弧導角之外形的位置向量表示在  $S_a$  座標系之數學方程式， $\rho$  表示圓弧導角之半徑，而  $\theta_n^{(F)}$  和  $\zeta_n^{(F)}$  則分別為刀具上下圓弧導角區域之幅角 (Span Angle)，分別標示出其上限與下限。

茲為創成具有導程角為  $\lambda_F$  之螺旋齒輪，若將前述之齒條刀具剖面沿著空間中一線段  $\overline{O_a^{(F)}O_c^{(F)}}$  線移動，如圖 2.3 所示，則在三度空間中將產生一個導程角為  $\lambda_F$  的齒條刀刀面。因此，若將刀具沿著軸向移動所產生之完整齒條刀之刀具面以方程式  $\mathbf{R}_c^{(F)}$  表示之，亦即將方程式 (1) 至 (3) 所表示之刀具法向剖面方程式  $\mathbf{R}_a^{(F)}$ ，經由座標轉換矩陣  $\mathbf{M}_{ca}$ ，轉換至  $S_c (X_c, Y_c, Z_c)$  座標系，即可獲得假想齒條刀之整個外形方程式，其座標轉換關係式如下：

$$\mathbf{R}_c^{(F)} = \mathbf{M}_{ca} \mathbf{R}_a^{(F)} \quad (4)$$

其中

$$\mathbf{M}_{ca} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \lambda_F & \cos \lambda_F & u_F \cos \lambda_F \\ 0 & -\cos \lambda_F & \sin \lambda_F & u_F \sin \lambda_F \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

上式中之  $u_F = \left| \overline{O_a^{(F)}O_c^{(F)}} \right|$ ，亦為齒條刀刀具沿著導程方向之另一刀面設計參數。

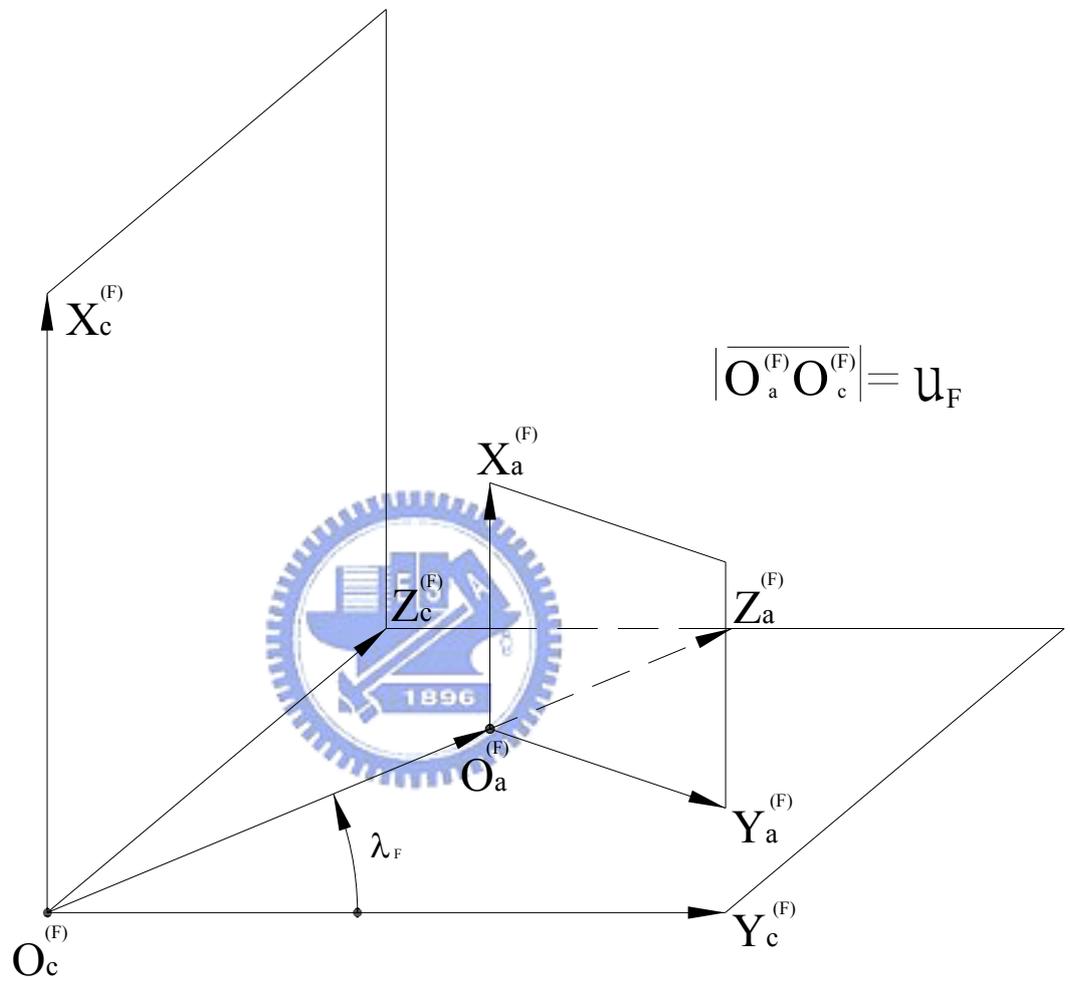


圖 2.3 產生導程角 $\lambda_F$ 的齒條刀示意圖

將方程式 (1) 至 (3) 分別代入 (4) 式即可求得齒條刀  $\Sigma_F$  之整個刀面方程式如下：

(a) 直邊刀面部分  $\mathbf{R}_{c(l)}^{(F)}$

$$\begin{aligned} x_{cl}^{(F)} &= l_F \cos \psi_n^{(F)} - a_0 \\ y_{cl}^{(F)} &= \pm(l_F \sin \psi_n^{(F)} - a_0 \tan \psi_n^{(F)} - b_0) \sin \lambda_F + u_F \cos \lambda_F \\ z_{cl}^{(F)} &= \pm(a_0 \tan \psi_n^{(F)} + b_0 - l_F \sin \psi_n^{(F)}) \cos \lambda_F + u_F \sin \lambda_F \end{aligned} \quad (5)$$

(b) 上圓弧導角部分  $\mathbf{R}_{c(uf)}^{(F)}$

$$\begin{aligned} x_{cuf}^{(F)} &= a_0 - \rho \sin \psi_n^{(F)} + \rho \sin \theta_n^{(F)} \\ y_{cuf}^{(F)} &= \pm(a_0 \tan \psi_n^{(F)} - b_0 + \rho \cos \psi_n^{(F)} - \rho \cos \theta_n^{(F)}) \sin \lambda_F + u_F \cos \lambda_F \\ z_{cuf}^{(F)} &= \pm(-a_0 \tan \psi_n^{(F)} + b_0 - \rho \cos \psi_n^{(F)} + \rho \cos \theta_n^{(F)}) \cos \lambda_F + u_F \sin \lambda_F \end{aligned} \quad (6)$$

(c) 下圓弧導角部分  $\mathbf{R}_{c(lf)}^{(F)}$

$$\begin{aligned} x_{clf}^{(F)} &= -a_0 + \rho \sin \psi_n^{(F)} + \rho \sin \zeta_n^{(F)} \\ y_{clf}^{(F)} &= \pm(-a_0 \tan \psi_n^{(F)} - b_0 - \rho \cos \psi_n^{(F)} - \rho \cos \zeta_n^{(F)}) \sin \lambda_F + u_F \cos \lambda_F \\ z_{clf}^{(F)} &= \pm(a_0 \tan \psi_n^{(F)} + b_0 + \rho \cos \psi_n^{(F)} + \rho \cos \zeta_n^{(F)}) \cos \lambda_F + u_F \sin \lambda_F \end{aligned} \quad (7)$$

相同地，方程式 (5) 至 (7) 之  $\pm$  符號，正號表示刀具之左刀面，負號則表示刀具之右刀面。

### 2-3 接觸線之共同法向量

齒條刀刀面  $\Sigma_F$  與被切製之齒面  $\Sigma_1$ ，兩者在切製的過程中，其每一瞬間均有共同之接觸線，並且在接觸線上齒條刀刀面與被創成之齒面的單位法向量 (Surface Unit Normal Vector) 是一致的。依微分幾何理論，齒條刀刀面法向量 (Surface Normal Vector)，可依下式求得：

$$\mathbf{N}_{c(l)} = \frac{\partial \mathbf{R}_{c(l)}^{(F)}}{\partial l_F} \times \frac{\partial \mathbf{R}_{c(l)}^{(F)}}{\partial u_F} \quad (8)$$

而齒條刀之直邊刀面單位法向量則可依下式求得：

$$\mathbf{n}_{c(l)} = \frac{\mathbf{N}_{c(l)}}{|\mathbf{N}_{c(l)}|} \quad (9)$$

若將方程式 (5) 代入方程式 (8) 和 (9) 後，即可求得齒條刀之直邊刀面單位法向量如下所示：

$$\mathbf{n}_{c(l)} = \begin{bmatrix} \pm \sin \psi_n^{(F)} \\ -\cos \psi_n^{(F)} \sin \lambda_F \\ \cos \psi_n^{(F)} \cos \lambda_F \end{bmatrix} \quad (10)$$

而齒條刀刀面之上下圓弧導角部分，亦可依照此一步驟分別計算出其單位法向量如下：

$$\mathbf{n}_{c(uf)} = \begin{bmatrix} \pm \sin \theta_n^{(F)} \\ -\cos \theta_n^{(F)} \sin \lambda_F \\ \cos \theta_n^{(F)} \cos \lambda_F \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\text{和 } \mathbf{n}_{c(lf)} = \begin{bmatrix} \pm \sin \zeta_n^{(F)} \\ -\cos \zeta_n^{(F)} \sin \lambda_F \\ \cos \zeta_n^{(F)} \cos \lambda_F \end{bmatrix} \quad (12)$$

上兩式中之±符號，正號表示刀具之左刀面，負號則表示刀具之右刀面； $\mathbf{n}_{c(uf)}$ 及 $\mathbf{n}_{c(lf)}$ 則分別為齒條刀之上圓弧導角及下圓弧導角的刀面單位法向量表示在 $S_c$ 座標系之數學方程式。

## 2-4 齒面之數學模式

圖 2.4 為齒條刀  $\Sigma_F$  在創成齒輪齒面時之創成機構示意圖。圖中之  $S_h (X_h, Y_h, Z_h)$  座標系為參考座標系，平面  $\Pi$  為假想齒條刀  $\Sigma_F$  之節平面，而齒輪則固聯於  $S_1$  座標系上且其座標原點與  $S_h$  座標系之原點重合。在切製齒輪  $\Sigma_1$  時，齒條刀  $\Sigma_F$  由右向左平移一水平距離  $r_1\phi_1$ ，而齒輪之工件則反時鐘方向旋轉  $\phi_1$  角度。利用齊次座標轉換矩陣方程式 (Homogeneous Coordinates Transformation Matrix Equation) 將齒條刀之直邊刀面數學模式，也就是方程式 (5) 由  $S_c (X_c, Y_c, Z_c)$  座標系轉換至  $S_1 (X_1, Y_1, Z_1)$  座標系，即可求得齒條刀  $\Sigma_F$  直邊刀面的軌跡方程式表示在  $S_1$  座標系如下：

$$\mathbf{R}_{1(l)} = \mathbf{M}_{1c} \mathbf{R}_{c(l)}^{(F)} \quad (13)$$

其中

$$\mathbf{M}_{1c} = \begin{bmatrix} \cos\phi_1 & -\sin\phi_1 & 0 & r_1(\cos\phi_1 + \phi_1 \sin\phi_1) \\ \sin\phi_1 & \cos\phi_1 & 0 & r_1(\sin\phi_1 - \phi_1 \cos\phi_1) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

至於小齒輪之漸開線區域齒面的單位法向量，則可將齒條刀直邊刀面之單位法向量方程式 (10) 利用下列之向量座標轉換矩陣方程式，由  $S_c$  座標系轉換至  $S_1$  座標系：

$$\mathbf{n}_{1(l)} = \mathbf{L}_{1c} \mathbf{n}_{c(l)} \quad (15)$$

其中

$$\mathbf{L}_{1c} = \begin{bmatrix} \cos\phi_1 & -\sin\phi_1 & 0 \\ \sin\phi_1 & \cos\phi_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$



將 (10) 式代入 (15) 式，即可求得螺旋齒輪之漸開線齒面的單位法向量如下：

$$\begin{aligned} n_{1(l)x} &= \pm \sin \psi_n^{(F)} \cos \phi_1 + \cos \psi_n^{(F)} \sin \lambda_F \sin \phi_1 \\ n_{1(l)y} &= \pm \sin \psi_n^{(F)} \sin \phi_1 - \cos \psi_n^{(F)} \sin \lambda_F \cos \phi_1 \\ n_{1(l)z} &= \cos \psi_n^{(F)} \cos \lambda_F \end{aligned} \quad (17)$$

上式中之 $\pm$ 符號，正號表示螺旋齒輪之左側漸開線齒面，負號則表示螺旋齒輪之右側漸開線齒面。

茲有兩平行軸嚙合齒面 $\Sigma_1$ 和 $\Sigma_2$ ，兩者之共軛運動關係示意圖如圖 2.5 所示，根據共軛運動理論，兩共軛曲面在其共同接觸點 M 之共同法向量必通過兩共軛運動對之瞬時旋轉中心 I 點。對於平行軸之兩嚙合曲面，其嚙合方程式可利用下列關係式求得：

$$\frac{X_1 - x_1}{n_{1x}} = \frac{Y_1 - y_1}{n_{1y}} \quad (18)$$

其中 $X_1$ 和 $Y_1$ 為瞬時旋轉中心 I 點表示於 $S_1$ 座標系之座標值； $x_1$ 和 $y_1$ 為螺旋齒輪外形曲線上任一點表示於 $S_1$ 座標系之座標值； $n_{1x}$ 和 $n_{1y}$ 則分別表示螺旋齒輪外形曲線之單位法向量 $\mathbf{n}_1$ 表示在 $S_1$ 座標系之 $X_1$ 軸與 $Y_1$ 軸的分量。

將方程式 (13) 及 (17) 代入方程式 (18) 式，即可求得齒條刀 $\Sigma_F$ 之直邊刀面與被創成之齒輪 $\Sigma_1$ 之嚙合方程式如下：

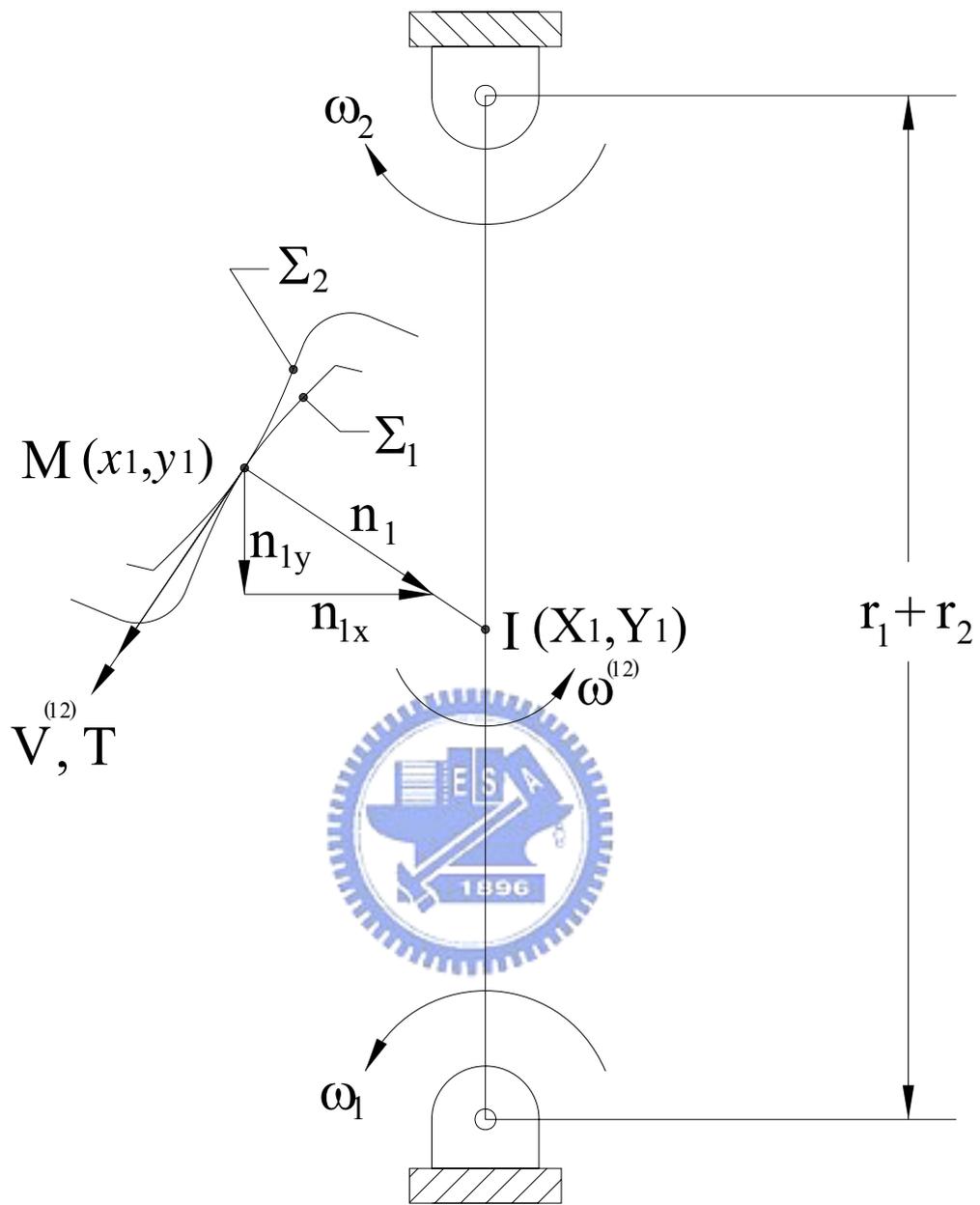


圖 2.5 平行軸齒輪組之共軛運動關係示意圖

$$F_1(l_F, u_F, \phi_1) = \pm \left( \frac{a_0}{\cos \psi_n^{(F)}} + b_0 \sin \psi_n^{(F)} - l_F \right) \sin \lambda_F + (r_1 \phi_1 - u_F \cos \lambda_F) \sin \psi_n^{(F)} = 0 \quad (19)$$

求得

$$u_F = \pm \left( \frac{a_0}{\cos \psi_n^{(F)} \sin \psi_n^{(F)}} + b_0 - \frac{l_F}{\sin \psi_n^{(F)}} \right) \tan \lambda_F + \frac{r_1 \phi_1}{\cos \lambda_F} \quad (20)$$

將嚙合方程式 (20) 式代入 (13) 式所求得之  $\mathbf{R}_{1(i)}$ ，即可得到由直邊刀面所創成的螺旋齒輪之漸開線區域齒面方程式如下：

$$\begin{aligned} x_1 &= (l_F \cos \psi_n^{(F)} - a_0 + r_1) \cos \phi_1 \pm (l_F \cos \psi_n^{(F)} - a_0) \cot \psi_n^{(F)} \sin \lambda_F \sin \phi_1 \\ y_1 &= (l_F \cos \psi_n^{(F)} - a_0 + r_1) \sin \phi_1 \pm (a_0 - l_F \cos \psi_n^{(F)}) \cot \psi_n^{(F)} \sin \lambda_F \cos \phi_1 \\ z_1 &= \pm (a_0 - l_F \sin \psi_n^{(F)}) \cot \psi_n^{(F)} \tan \lambda_F \sin \lambda_F \pm \left( \frac{a_0 \tan \psi_n^{(F)} + b_0 - l_F \sin \psi_n^{(F)}}{\cos \lambda_F} \right) + r_1 \phi_1 \tan \lambda_F \end{aligned} \quad (21)$$

至於齒條刀之上圓弧導角及下圓弧導角的刀面數學方程式，亦可利用上述之方法及座標矩陣轉換方程式，求得刀具之上下圓弧導角區域所創成的齒輪齒頂與齒根圓弧導角之齒面數學方程式。

## 2-5 螺旋齒輪之電腦輔助繪圖

依據台灣保來得公司所提供之螺旋齒輪主要設計參數，如表 2.1 所示，配合本章所推導之齒面數學模式，利用 Auto-CAD 電腦繪圖軟體，即可繪製出所設計之齒輪外形，如圖 2.6 及 2.7 所示。為了方便起見，本論文將以甲齒輪來代表齒輪圖號為 ASB001WF 之齒輪，而乙齒輪則代表齒輪圖號為 ASB004WF 之齒輪。

表 2.1 螺旋齒輪設計參數

齒輪圖號 齒輪設計參數	(ASB001WF) 甲	(ASB004WF) 乙
齒 數	32	24
螺旋角 (D/M/S)	LH17/00/00	RH17/00/00
壓力角 (D/M/S)	20/00/00	20/00/00
模 數 (mm/tooth)	1	1
齒 寬 (mm)	10	10

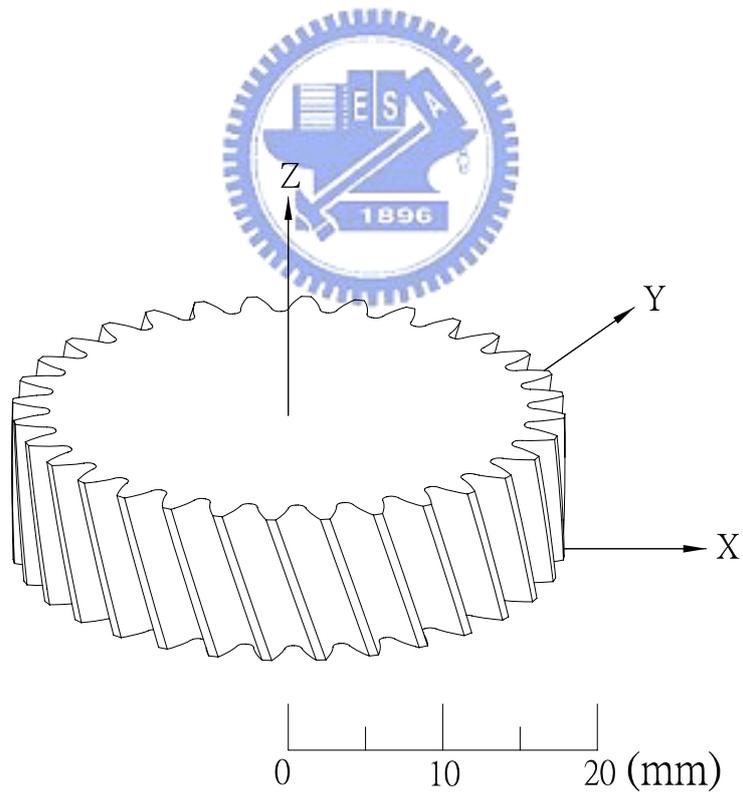


圖 2.6 甲齒輪之電腦繪圖

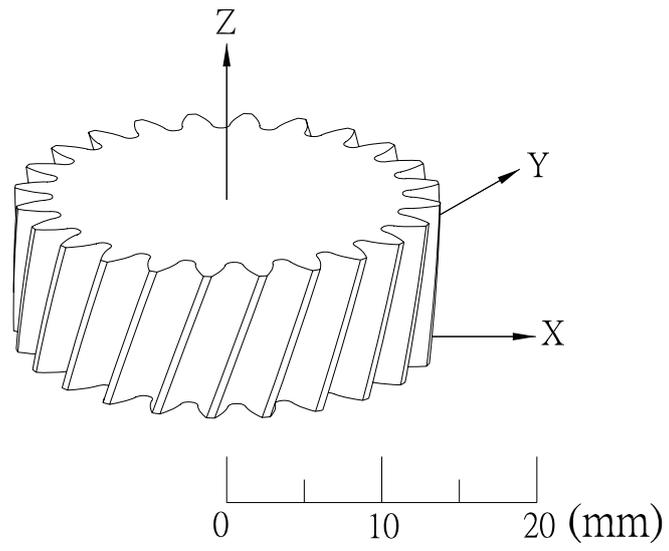


圖 2.7 乙齒輪之電腦繪圖



## 第三章 粉末冶金製程簡介

### 3-1 前言

粉末冶金的製造原料主要是以鐵粉、銅粉或鋁粉為基粉，添加合金元素，再加上金屬潤模劑，以攪拌機均勻混合後，將粉末充填於模具壓縮成形，接著將此成形品置於各種氣氛之燒結爐中以低於金屬粉末熔點之溫度燒結，燒結後之燒結品則再視要求予以加工整形以提高精度或者加以熱處理以增加表面硬度。粉末冶金可以製造形狀複雜，尺寸精度高之產品；而傳統加工雖也能製造，但其製程極為複雜且製造費用及時間亦高於粉末冶金製程法。另外，粉末冶金更有節省材料、能源和人力及減少環境污染等之優點，適於自動化大量生產，取代一些機械強度要求不高而結構較複雜的機械零件。故粉末冶金製品目前已廣泛應用於汽車、摩托車、自行車、事務機、電動工具、家電等方面。

粉末冶金法之主要特徵可大致歸納如下：

1. 成形品密度可在製程中加以控制。
2. 與鑄造件相比，粉末冶金燒結品之晶粒更細緻、組織更均勻。
3. 多孔質材料。
4. 淨形品或近淨形品（Net Shape or Near-Net Shape）的物件。
5. 可自動化量產且成本經濟。

### 3-2 粉末冶金製程

典型的粉末冶金製造流程如圖 3.1 所示。茲以傳統粉末冶金之主要工程概述如後。

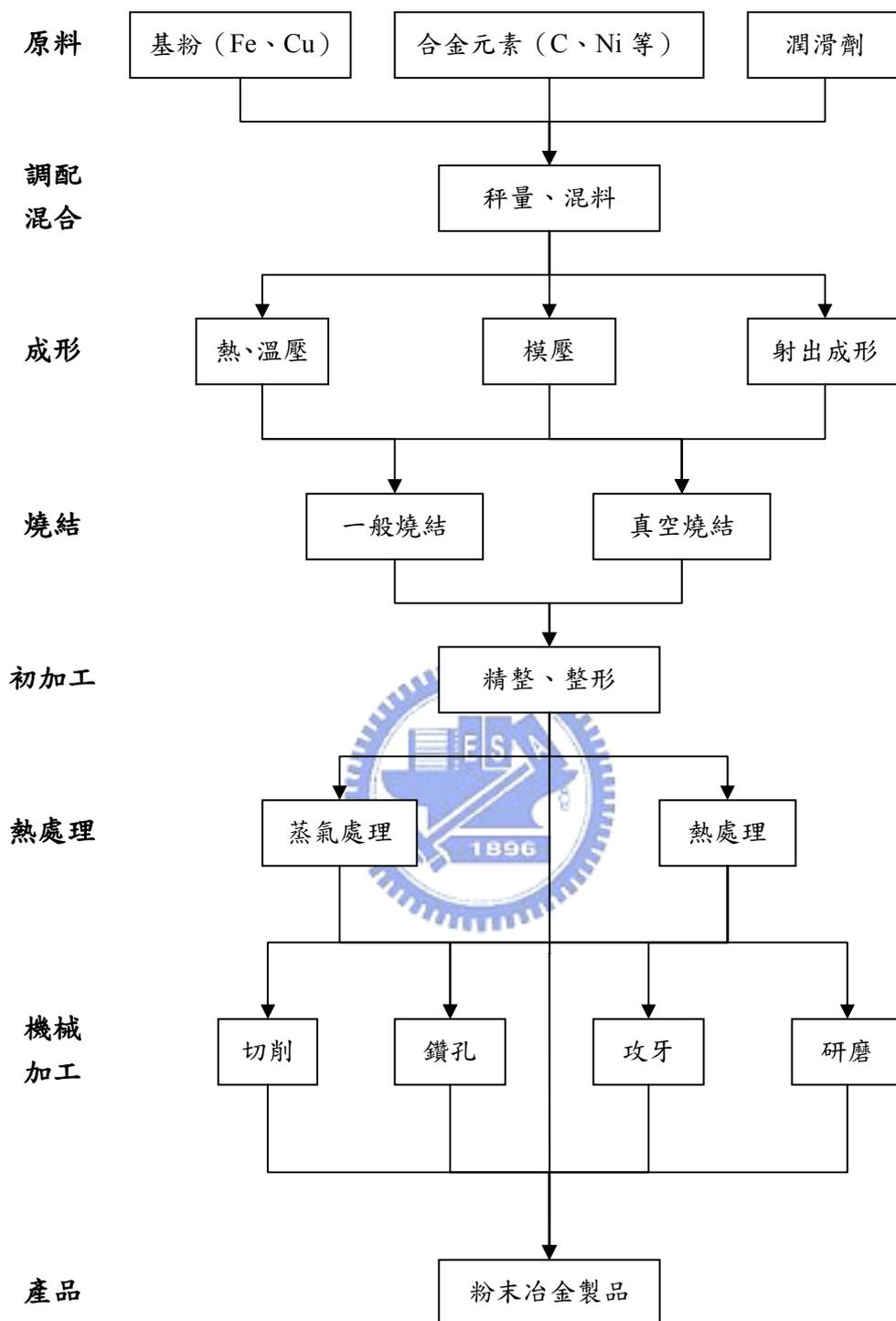


圖 3.1 粉末冶金基本製造流程

### 3-2-1 原料粉

粉末冶金原料粉的特性，可以分為粉體本身的特性如粒度分佈、粒狀及化學性質等，以及粉末的粉體特性如視密度（Apparent Density）、流動率（Flow Rate）、壓縮性（Compressibility）、生胚強度（Green Strength）及粉末經過燒結後，造成燒結品的尺寸變化率等。其中視密度及壓縮性會影響粉末壓縮比（Compression Ratio），表示粉末在模穴中之鬆散體積與經壓縮後生胚之體積比；流動率則會影響充填時間；生胚強度則影響搬運時成形品是否容易破損；燒結後之尺寸化率則影響模具尺寸之設計。目前業界常用的原料以鐵系與銅系粉末為主，其中又以鐵系粉末所佔的比例最大，其他粉末如不銹鋼粉、鋁粉、鎢粉和鎳粉等特殊粉體，在特殊性質需求之零件上亦常被使用。



### 3-2-2 成形

成形系統主要可分為成形機和成形模具兩個部份。成形機的噸數可從 0.5 噸至 1000 噸，依零件之截面積和所需之壓胚體密度而決定使用成形機之噸數。成形機依動力方式之不同，可概分為機械式和液壓式兩類，機械式成形機動作快速，但不適合大噸數機台；液壓式成形機則是作動速度較慢，適合大噸數機台。成形動作包含填料、加壓和退模三個步驟，如圖 3.2 所示，填料即是將已調配混合的原料粉，充填於模具內，再經由上沖與下沖的加壓，製成特定形狀與密度的壓胚體，待壓胚體被推出模外，成形動作即完成。粉末冶金用之模具一般包含上沖、中模（外棒）、芯棒、下沖，如圖 3.3 所示，而粉末便在模具間組成的封閉空間內被加壓成形，而模具設計時需考量所選用粉末經燒結後成品尺寸之變化率、零件形狀和尺寸。

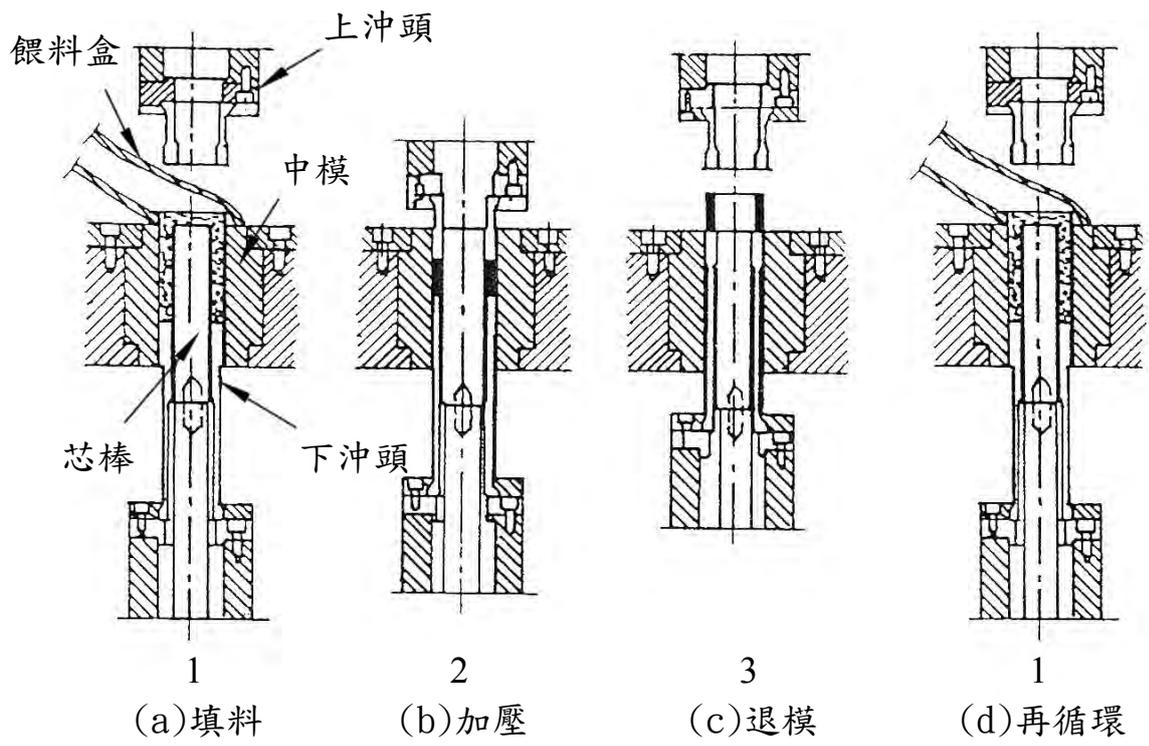


圖3.2 成形步驟示意圖 ([10])

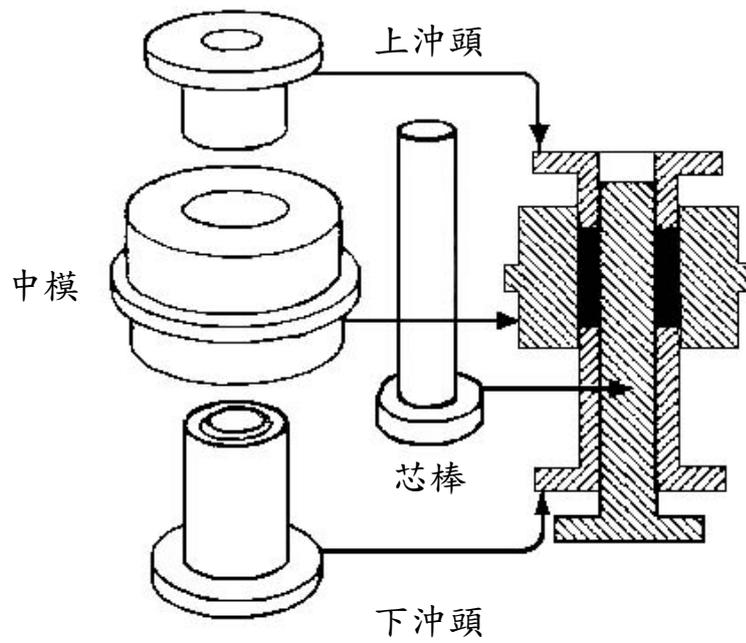


圖3.3 簡易模具組裝示意圖 ([11])

### 3-2-3 燒結

燒結是指將壓胚體置於燒結爐中，在溫度低於主要成份的熔點之下，粉末因熱而緊密黏結的現象。以常見之連續式燒結爐為例，爐體通常可分為脫脂區、燒結區及冷卻區三部分。在脫脂區中，壓胚體內的潤滑劑因受熱而氣化或蒸發，並由氣流帶走；燒結區的主要目的則是加強壓胚體內粉粒間的結合力，可將各合金元素均質化而提高成品之強度，其燒結溫度則約採用壓胚體主要成份之熔點的三分之二，例如鐵的熔點為  $1538^{\circ}\text{C}$ ，則鐵系材料之燒結溫度通常設定為  $1120^{\circ}\text{C}$ ；冷卻區則決定製品之金相組織和特性。

除了燒結爐體，燒結氣氛在粉末冶金製程中亦影響著產品之機械性質、強度和外觀等。常用之燒結氣氛有氫氣、氫氮混合氣、裂解氮、吸熱型氣氛、放熱型氣氛及真空等；業界通常使用裂解氮及吸熱型氣氛兩種，裂解氮俗稱 AX 型氣氛，吸熱型氣氛則是以甲烷或丙烷，與空氣燃燒而得，俗稱 RX 型氣氛。燒結氣氛的主要功能為隔絕外界空氣進入爐體內，而造成製品氧化。

### 3-2-4 精整

精整是指將燒結品再放入模具中加壓使燒結品某部位尺寸更為精準的工程，亦稱為整形。精整之方式可分為餘量精整（Positive Sizing）及無餘量精整（Negative Sizing）。餘量精整是指事先將燒結品之尺寸製作得比最終成品之尺寸大，隨後加壓使燒結品擠入模具內，藉由模壁將燒結品的尺寸變成所需之尺寸；無餘量精整是指事先將燒結品之尺寸製作得較小，藉由從軸向施壓，使胚體往徑向擴張，取得所需精度之尺寸。

### 3-2-5 機械加工

由於傳統粉末冶金之成形方式只有上、下加壓，對於橫向凹部或特殊、複雜的形狀如螺牙等無法一次成形，或精密尺寸無法達到時，就必須藉由機械加工來完成。包含有切削、研磨、鑽孔和攻牙等機械加工。

### 3-2-6 熱處理

粉末冶金製品亦可做淬火、回火、滲碳、高週波處理及蒸氣處理等，以增加表面硬度及強度，提高其機械性能。而粉末冶金製品通常有空孔產生，在經過蒸氣處理之後，製品表面會被一層四氧化三鐵的薄膜覆蓋，而產生封孔之效果，同時亦可提高其機械強度。

### 3-3 結論

粉末冶金製品常因為燒結過程中的膨脹或收縮，而造成外形尺寸的改變，所以如何控制或預測尺寸變化，進而設計出適當的模具，在粉末冶金製程上是非常重要的。因此，在決定模具尺寸的階段，就要把握各工程之容許尺寸精度，同時在設計時儘可能地減少工程數量，以節省製造成本。

成形技術發展的目標在於使成形以外所需的二次加工量減至最低，以降低製造成本。本研究即在探討以傳統粉末冶金法所製造之螺旋齒輪其精度變化趨勢，針對漸開線齒形之工作區域進行補償修整，俾能夠提供未來設計粉末冶金螺旋齒輪模具之參考。



## 第四章 齒形變異實驗

### 4-1 實驗目的

本實驗採用台灣保來得公司生產線上的各項設備及製程，選擇三種較常用到的原料粉作為實驗材料，並固定其他製程參數。而除了粉末變化之外，實驗的對象齒輪則是從台灣保來得公司現有的模具中，挑選出兩套齒數不同，但其他齒輪設計參數均相同的螺旋齒輪模具，進行粉末冶金螺旋齒輪製作之實驗。本實驗的目的在於探討以不同的金屬粉末所製成之齒輪成形品，經過燒結後其成品的齒形變化對應於兩種不同節圓半徑的齒輪所造成的齒形誤差，並依此作成定量的齒形誤差分析，作為粉末冶金齒輪之模具其齒形補償設計的依據，藉由產品設計初期的模具修整，減少二次加工的工程，並提高粉末冶金件螺旋齒輪之精度。



### 4-2 實驗材料

金屬原料粉的選擇在粉末冶金製程上是最關鍵的一環，粉末的種類及合金元素的比例決定製品的機械性質，而粉末經過燒結之後，因膨脹或收縮而造成粉末冶金件尺寸的變化，更是對產品的精度有很大的影響。因此，如何正確且經濟地選用原料粉，來達成客戶產品所要求的機械性質，並依據燒結之後的成品尺寸變化率來設計模具的尺寸，是粉末冶金工業中最重要的初步工作。

本實驗所使用的金屬原料粉分為 A、B 和 C 等三種粉末，此三種粉末皆為瑞典何格那斯（Höganäs）公司所生產，主要成份皆是以鐵粉為基粉，混合不同成分及比例的合金元素及潤滑劑進行調和，同時

也是台灣保來得公司產線上常使用之原料粉。此三種原料粉皆含有銅，而銅的添加會造成鐵系合金燒結體的膨脹，且膨脹率會隨著銅的添加量之增加而增加[12]。為平衡銅所造成的膨脹，會在鐵粉中添加石墨使燒結體收縮來加以補償。而此三種原料粉中，以 A 粉末的銅含量最低，所以其所製成之燒結體膨脹程度亦最低；B 和 C 粉末的銅含量相近，但 B 粉末的碳含量較高，因此其所製成之燒結體膨脹程度較 C 粉末為低。表 4.1 所列為本研究實驗所用原料粉之調和及特性。

表 4.1 實驗原料粉之調和及特性表

粉末代號	A	B	C
MPIF 標準	FN0400	FC0208	FC0205
含碳量 (wt%)	0.10~0.20	0.67~0.82	0.45~0.55
含銅量 (wt%)	1.35~1.65	2.02~2.47	2.00~2.40
合金元素	Ni,Cu,Mo,C	Cu,C,Mn	Cu,C,Mn
視密度 (g/cm)	3.03~3.23	3.06~3.26	3.05~3.25
流動率 (s/50g)	30	35	31

### 4-3 實驗設備

本實驗所需之試作品是採用台灣保來得公司生產線上之設備來

製作，包含有：成形模具、成形設備、燒結設備及量測設備，以下將對各項設備作簡略的介紹。

#### 4-3-1 成形模具

為了探討齒數對於螺旋齒輪精度的影響，本實驗從台灣保來得公司現有的成形模具中，挑選圖號為 ASB001WF 以及 ASB004WF 兩組模具，其齒形設計參數如表 4.2 所示。兩組模具的結構相同，皆由一隻上沖頭(短)，一隻下沖頭(長)、一個中模和一隻芯棒所組成，如圖 4.1 及 4.2 所示。螺旋齒輪與一般正齒輪所使用之成形模具在上沖頭的設計上有很大的不同，螺旋齒輪模具的上沖挾持部分，需要有一個可供彈簧伸長及拉回的溝槽，其目的在於將完成下壓動作的上沖，在上升退出中模之後能夠藉由彈簧再將其拉回原來的位置，以確保每次加壓時，上沖進入中模的初始位置能夠一樣，避免上沖與中模齒形部位互相碰撞而導致模具損毀的可能。

表 4.2 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	(ASB001WF) 甲	(ASB004WF) 乙
齒 數	32	24
螺旋角 (D/M/S)	LH17/00/00	RH17/00/00
壓力角 (D/M/S)	20/00/00	20/00/00
模 數 (mm/tooth)	1	1
齒外徑 (mm)	35.93	27.38



圖 4.1 甲齒輪之成形模具組



圖 4.2 乙齒輪之成形模具組

### 4-3-2 成形設備

本實驗所使用之成形機台為日本 Tamagawa 公司所製造的 100 噸氣壓式成形機，如圖 4.3 所示。其成形過程分為填料、加壓及退模三個步驟，此機型的退模機構為下拉式退模，即上沖加壓完成後，中模下降而使壓胚體被下沖頂出中模端面，此時餵粉器再滑動至模穴上餵料並同時將之前被頂出的壓胚體推離中模，待餵粉器填粉完畢，上沖下壓，即完成一自動循環的連續動作。

### 4-3-3 燒結設備

本實驗所使用之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 4.4 所示。本實驗所採用的燒結溫度為 1120°C，輸送帶的速度則設定為 100mm/min，保護氣氛為 RX(丙烷)。

### 4-3-4 量測設備

實驗製造過程中利用分厘卡檢測並控制齒輪的全長尺寸，使其能在公差要求範圍內；電子秤則可求得齒輪壓胚體的重量，再利用阿基米得原理 (Archimedes Principle) 測定齒輪實體密度，而由於成形時壓胚體的全長及體積皆為固定，所以只需要靠電子秤測得壓胚體之重量，便可以控管成形時壓胚體的密度。在齒輪成品精度量測方面，使用之量測設備，如圖 4.5 所示，為 Tokyo Technical Instrument Inc. 所生產製造之 TTi-300E CNC 齒輪精度量測機。齒輪精度量測機之量測原理是使用微小直徑的量測頭，使其與待測齒面保持固定壓力之接觸，再根據輸入電腦之標準齒形參數，讓量測頭依照標準齒的齒形掃描被測齒輪的齒面，透過電腦計算出兩者之間的齒形誤差及導程誤差。

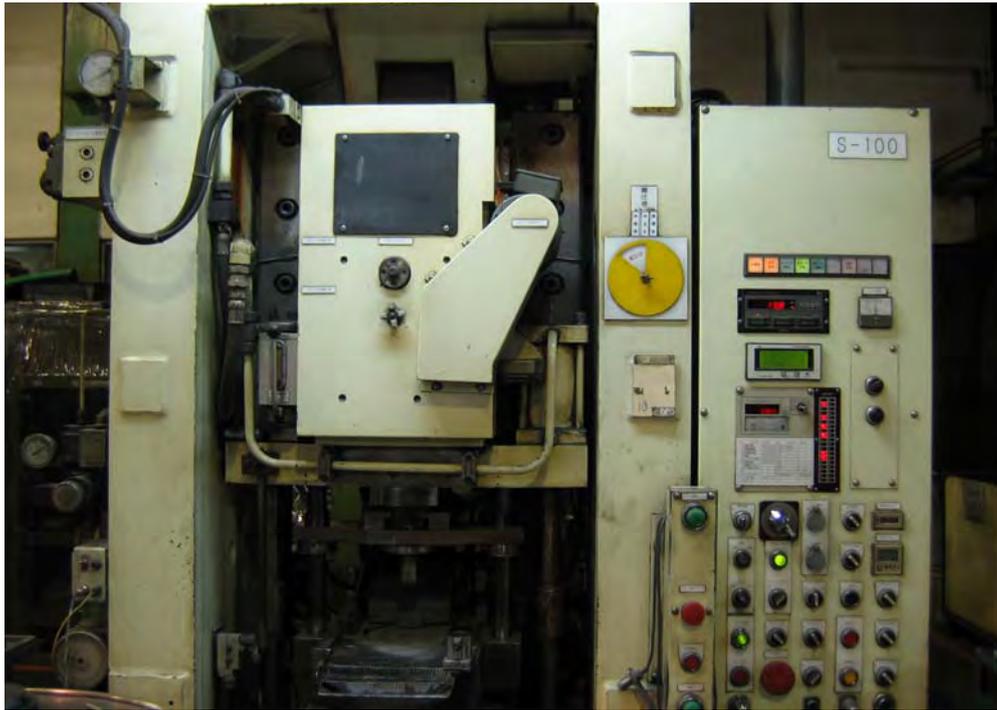


圖 4.3 100 噸氣壓式粉末成形機



圖 4.4 輸送帶式連續燒結爐(日本山崎公司)



圖 4.5 TTI-300E-CNC 齒輪精度量測機

#### 4-4 實驗方法

##### 4-4-1 實驗參數

在粉末冶金製程中，許多製程參數都會影響到產品最終的尺寸及精度，而本研究之實驗主要在探討不同金屬粉末經過燒結後，造成齒輪燒結品其齒形的變化以及不同節圓半徑對螺旋齒輪精度的影響，因此，除了上述兩項參數外，其他必須固定的參數有成形模具、成形機台、壓胚體密度、燒結溫度、燒結速度及燒結氣氛等。表 4.3 即為整理過後的製程固定參數。

表 4.3 實驗製程固定參數

成形參數	壓胚體密度	6.85~6.95 g/cm <sup>3</sup>
燒 結 參 數	脫脂區溫度	650°C±10°C
	加熱區溫度	1120°C±5°C
	冷卻區溫度	540°C±10°C
	出口溫度	450°C±10°C
	燒結氣氛	ENDO Gas (丙烷)
	燒結爐輸送帶速度	100 mm/min

#### 4-4-2 實驗的進行

粉末冶金螺旋齒輪實驗的進行主要分成兩個部份：成形及燒結。在成形工程方面，要特別注意的是成形品的密度控制，必須要維持在一定的範圍內，而控制的方法則相當簡單，因為每個成形品的全長及體積都是固定的，只需要定時抽樣量測成形品的重量，確保成形品的重量在規定的範圍內，即可將成形品的密度固定。而在成形所用的原料粉方面，必須注意備粉量是否充足，以維持粉末充填的均勻性；更換粉末時也要把殘留的餘粉清理乾淨，避免混料的情況發生。此外，因考慮到成形機台的穩定性，並達到隨機抽樣的效果，所以設定自動成形的數量必須遠多於取樣所需的數量，再從符合重量及全長的樣品中挑選出實驗待測齒輪，並在每一個樣品相同位置的齒作上記號，如此一來，便可得知其餘各齒之相對位置，以利隨後進行齒輪量測工作時，方便追蹤各個相對應齒之齒面精度變化。

燒結工程的進行也同樣必須固定燒結爐的溫度和氣氛及輸送帶的速度，以確定實驗之燒結參數一致。而必須注意的是燒結時要將成形品同時送進爐中燒結，且成形品的擺放位置盡量靠近，擺放的方式及使用的網盤也要一致。圖 4.6 及圖 4.7 分別為成形後經過燒結所得之甲齒輪及乙齒輪之試製成品。



圖 4.6 實驗齒輪甲之試製成品



圖 4.7 實驗齒輪乙之試製成品

## 第五章 實驗結果與討論

### 5-1 成形齒輪壓胚體之齒形誤差

本章所量測之甲及乙兩組實驗齒輪，是依照第四章第四節所述之實驗方法及製程參數製造。表 5.1 所示為甲與乙兩組實驗齒輪在粉末冶金齒輪沖壓成形工程後，實際量測其成形品所得之齒形誤差值。由實驗之量測數值發現，在相同的成形條件下，A、B 和 C 三種不同原料粉末(實驗原料粉之特性請參見第四章表 4.1)製成之壓胚體，因回彈所造成的齒形誤差量在兩組齒輪上大致相同；但經比較兩組齒輪的齒形量測誤差量，甲齒輪成形品量測所得的誤差值約為 7~8 $\mu\text{m}$ ，而乙齒輪成形品的誤差值則約為 1~2 $\mu\text{m}$ 。由此得知，當成形條件及其他齒形設計參數相同的情況下，齒數越多(即外徑越大)的齒輪，其成形壓胚體的回彈量會越大，所造成的齒形誤差量亦越大。

圖 5.1(a)至圖 5.2(c)為甲及乙兩組實驗齒輪成形品之齒形誤差量測結果。茲以圖 5.1(a)為例，圖中垂直線段部分代表理想之齒輪工作區域亦即標準之漸開線，曲線部分則是以探針量測實際之齒輪成形品所得之實際齒形與標準漸開線(圖中之垂直線段)理想齒形之偏差量。圖形上方的「X500」及「X8」分別代表齒厚(水平方向)和齒高(垂直方向)的放大倍率，而圖上的虛線所構成的格子，每一格間距為 5mm，因此，除回放大倍率後，就可以得到其真正表示的距離。若以此圖為例，在水平方向上的每一格代表長度為 10 $\mu\text{m}$ ，而在垂直方向上的格子則為 0.625mm。至於齒形誤差曲線上方左右的兩個數字 3.4 和 8.0，則分別代表左右兩側齒面所量測到的齒形誤差中，差距最大的兩組誤差之間的差異量。而表 5.1 中的左齒面及右齒面齒形誤差則

是取自圖中下方表格裡，齒形誤差項目中的左平均及右平均來代表左右齒形誤差量。

圖 5.1(a)至圖 5.1(c)分別顯示 A、B 和 C 三種粉末成形之甲齒輪壓胚體的齒形精度量測結果，圖中顯示甲成形齒輪壓胚體在靠近齒頂的齒面回彈量較大，與標準漸開線的誤差量也較大，而此三種粉末所壓製成形的壓胚體，其齒形精度約在 JIS 等級 3~4 級左右。圖 5.2(a)至圖 5.2(c)則為 A、B 和 C 三種粉末成形之乙齒輪壓胚體的齒形精度量測結果，其齒形誤差量較甲齒輪為小，相當於 JIS 等級 1~2 級左右。

表 5.1 甲齒輪與乙齒輪成形品平均齒形誤差(單位：μm)

齒輪 編號	甲齒輪成形品齒形誤差		乙齒輪成形品齒形誤差	
	左齒面	右齒面	左齒面	右齒面
A-1	6.2	8.2	2.0	1.6
A-2	6.7	7.9	2.2	1.7
A-3	5.8	7.7	2.2	2.0
A-4	6.2	7.8	2.4	2.2
A-5	6.3	7.9	2.4	2.2
平均	6.24	7.90	2.24	1.94
B-1	6.2	8.2	1.7	2.4
B-2	6.7	8.2	2.3	2.3
B-3	6.5	8.3	2.4	2.6
B-4	6.7	8.6	1.7	2.0
B-5	6.4	8.4	2.0	1.7
平均	6.50	8.34	2.07	2.25
C-1	6.4	7.9	2.2	2.1
C-2	6.3	8.2	2.9	2.1
C-3	6.3	8.2	2.1	2.5
C-4	6.6	8.6	2.5	2.3
C-5	6.3	7.9	1.8	2.9
平均	6.38	8.16	2.30	2.38

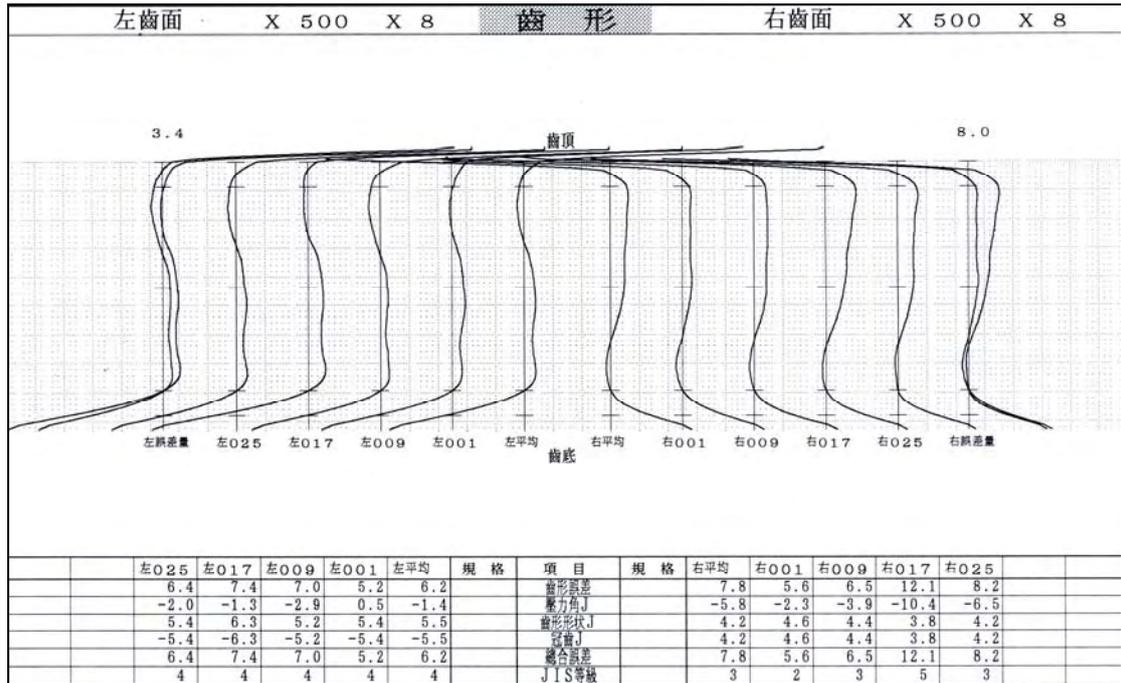


圖 5.1(a) 以 A 粉末成形之甲齒輪壓胚體的齒形精度量測結果

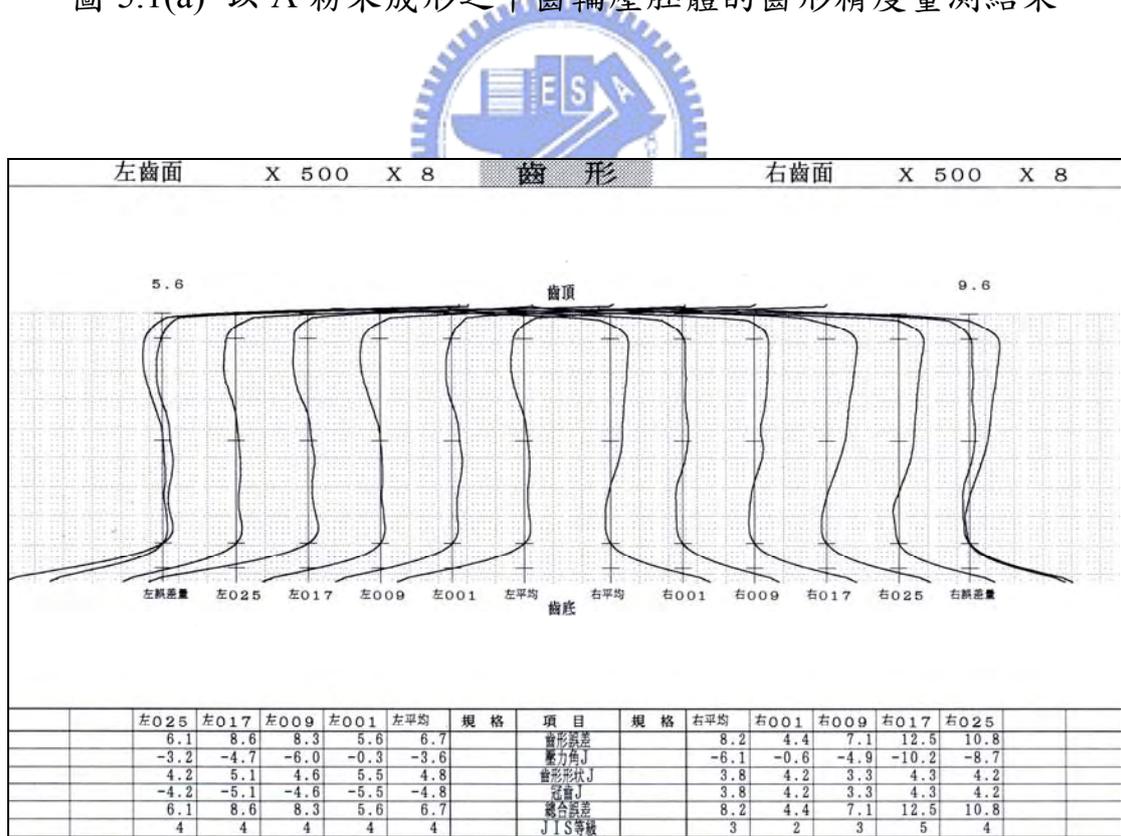


圖 5.1(b) 以 B 粉末成形之甲齒輪壓胚體的齒形精度量測結果

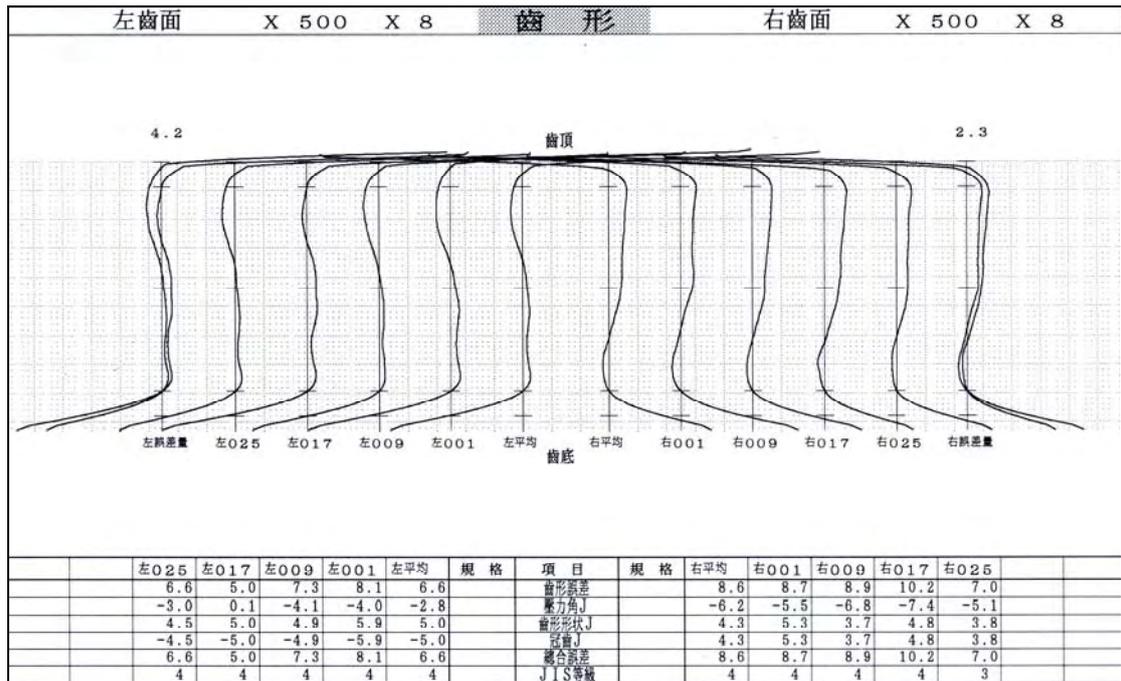


圖 5.1(c) 以 C 粉末成形之甲齒輪壓胚體的齒形精度量測結果

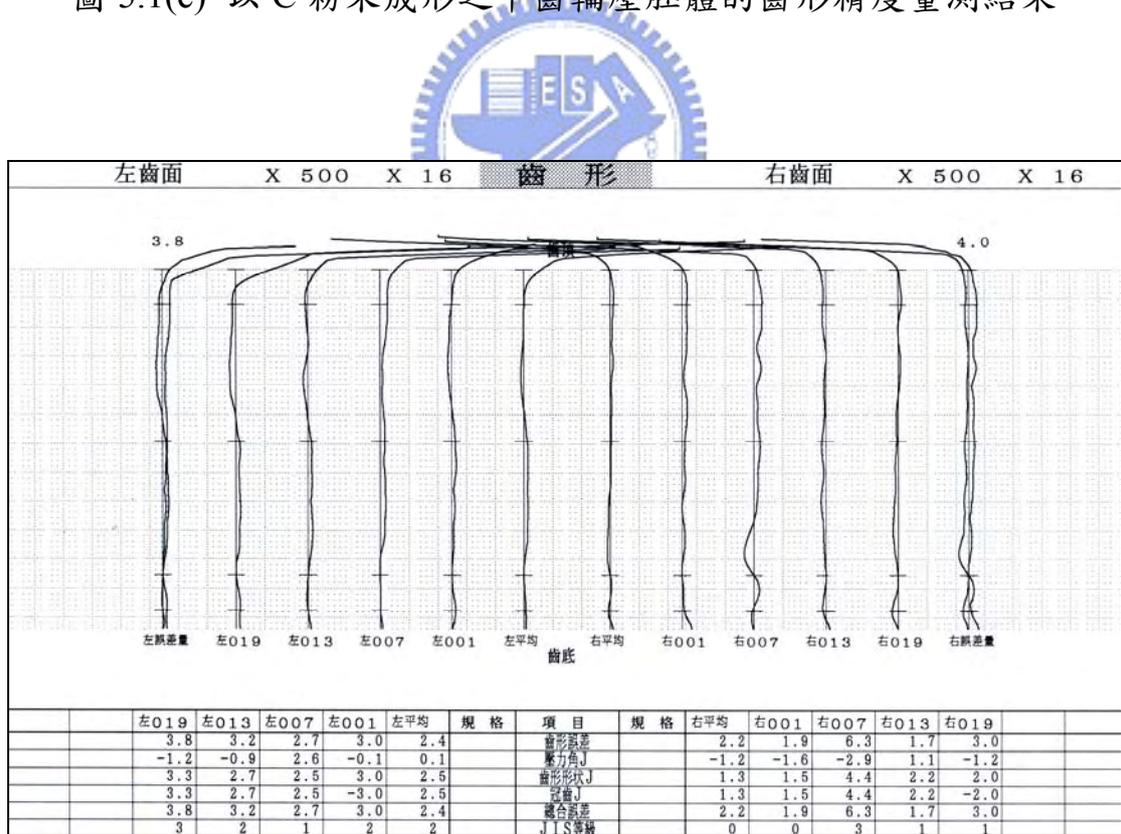


圖 5.2(a) 以 A 粉末成形之乙齒輪壓胚體的齒形精度量測結果

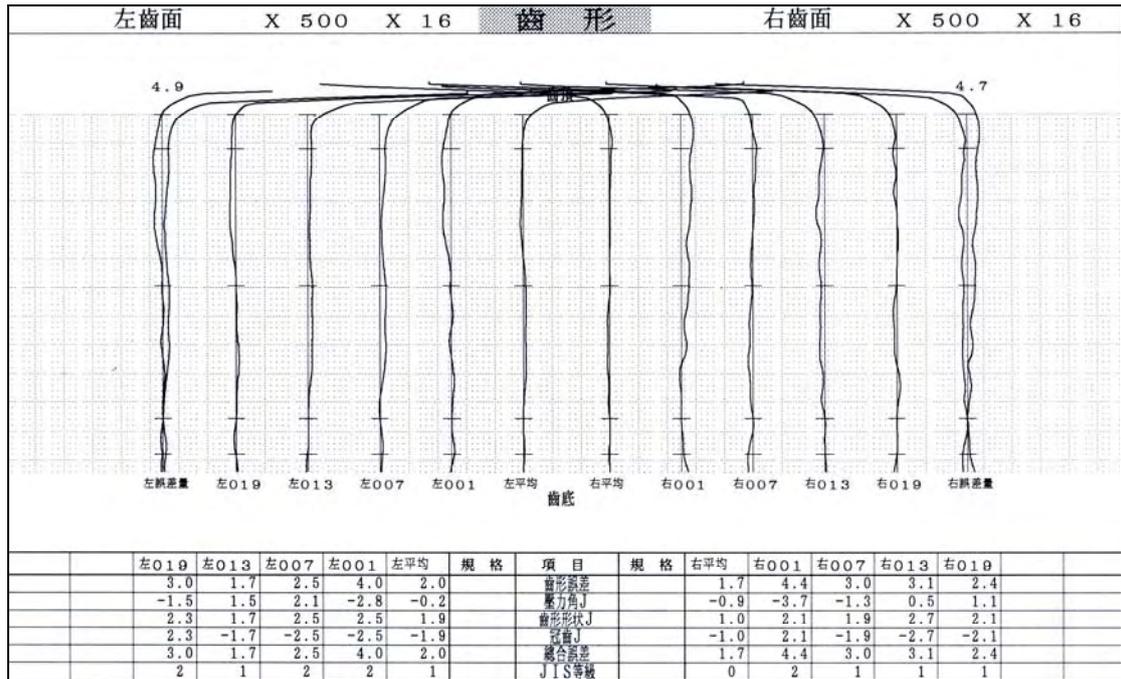


圖 5.2(b) 以 B 粉末成形之乙齒輪壓胚體的齒形精度量測結果

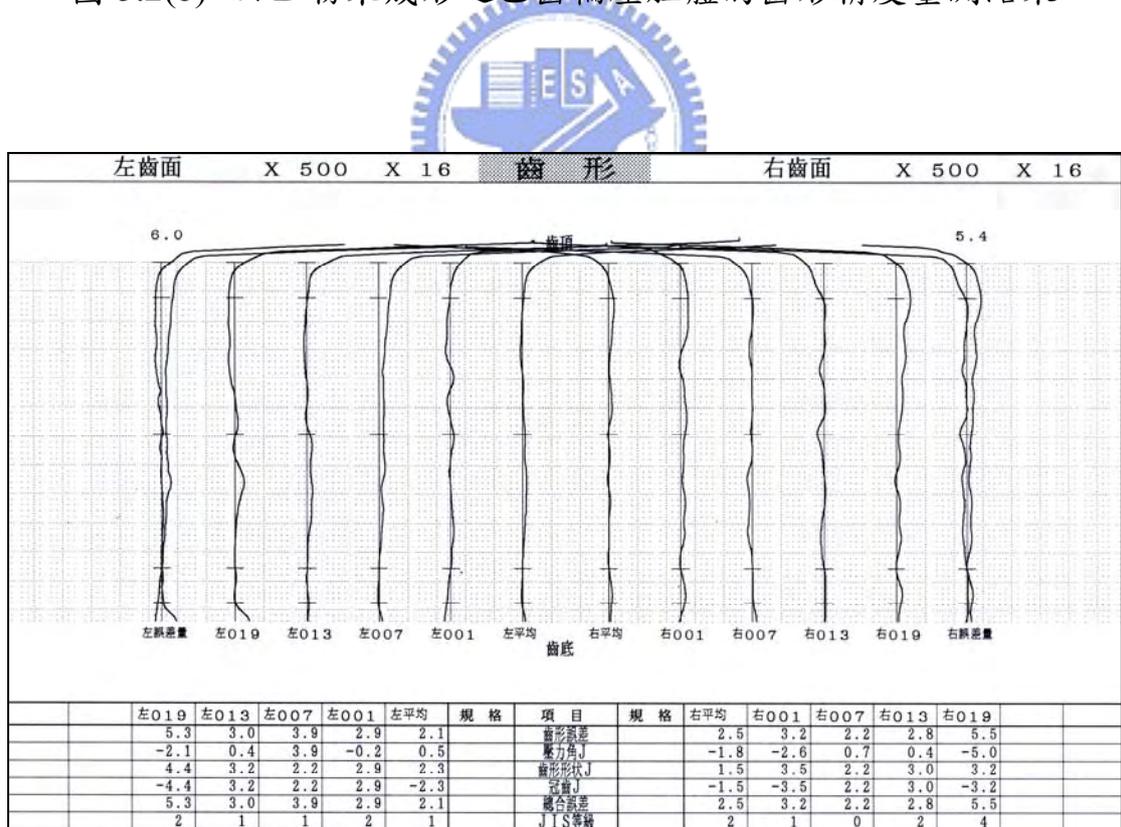


圖 5.2(c) 以 C 粉末成形之乙齒輪壓胚體的齒形精度量測結果

## 5-2 燒結後齒輪之齒形誤差

表 5.2 所示為甲與乙兩組實驗齒輪在經過燒結工程後，粉末冶金齒輪實際量測所得之齒形平均誤差值。由實驗之量測數據發現，以 A 粉末製成之齒輪經過燒結之後，其齒形量測所得之誤差量與壓胚體之成形品差異不大，可知以 A 粉末製成之齒輪在經過燒結後，其齒形相較於以 B 和 C 粉末所製成之齒輪是相當穩定的。而由圖 5.3 及圖 5.4 可以發現 B 和 C 粉末所製成之齒輪，經過燒結後的齒形誤差量則明顯較 A 粉末來得大，尤以 C 粉末的齒形誤差量最大。比較甲與乙兩組齒輪，以相同粉末製成之齒輪，外徑大的甲齒輪組其齒形誤差較大，幾乎為乙齒輪組齒形誤差的兩倍，因外徑較大而造成燒結後齒形誤差大的情況相當明顯。圖 5.5(a)至圖 5.6(c)則顯示燒結後粉末冶金齒輪之齒形精度量測結果。

為了進一步觀察經過燒結工程後之粉末冶金齒輪的齒面變化情形，茲以 C 粉末所製成之乙齒輪經過燒結工程後，其齒面細分化的量測結果為例，如圖 5.7 所示，圖中虛線部分所構成之平面代表標準齒面，黑色實線所構成的曲面則為以探針量測實驗齒輪所得之實際齒面。由量測所得之誤差值所構成之曲面結果，可以觀察出實驗齒輪的齒面在接近齒頂的部分較標準齒面高，相反地，在接近齒根的部分則較標準齒面低，且齒頂與齒根兩處的誤差量剛好呈現對稱的關係；而在接近節圓處的齒形部分則接近於標準齒面。以 A、B 和 C 等三種粉末所製成之甲齒輪及乙齒輪，其齒面細分化的量測結果皆有此種現象，差別在於兩組實驗齒輪對應於三種不同的金屬粉末，其經過燒結後之齒形誤差量有所不同。

表 5.2 甲齒輪與乙齒輪燒結品平均齒形誤差(單位：μm)

齒輪編號	甲齒輪燒結品齒形誤差		乙齒輪燒結品齒形誤差	
	左齒面	右齒面	左齒面	右齒面
A-1	7.1	7.4	1.7	1.2
A-2	6.1	7.3	2.3	1.6
A-3	5.8	7.3	1.9	1.7
A-4	5.9	6.2	1.8	1.9
A-5	6.0	7.5	1.9	1.5
平均	6.18	7.14	2.24	1.94
B-1	15.7	18.3	8.0	7.0
B-2	15.8	18.5	7.7	8.6
B-3	16.6	18.4	7.4	8.9
B-4	15.7	18.7	7.3	7.9
B-5	16.1	17.5	7.9	7.5
平均	15.98	18.28	7.66	7.98
C-1	19.4	22.1	11.0	11.1
C-2	18.9	22.2	11.1	11.9
C-3	19.2	21.7	10.6	11.7
C-4	20.6	22.5	11.1	11.5
C-5	19.8	22.2	10.9	11.4
平均	19.58	22.14	10.94	11.52

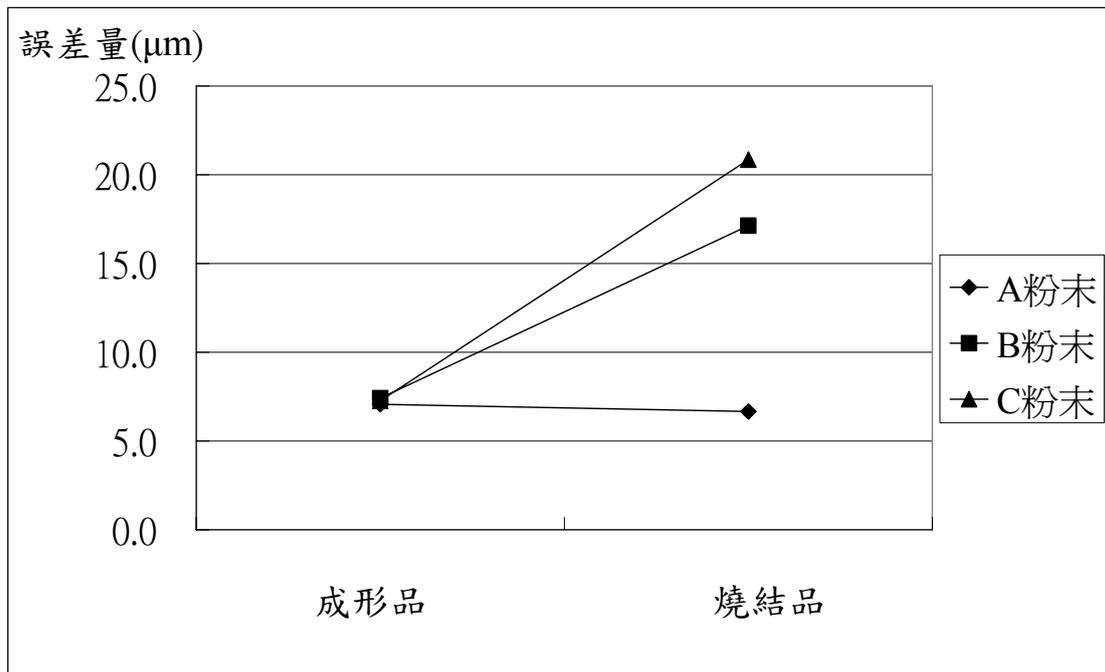


圖 5.3 甲齒輪之齒形平均誤差量變化圖

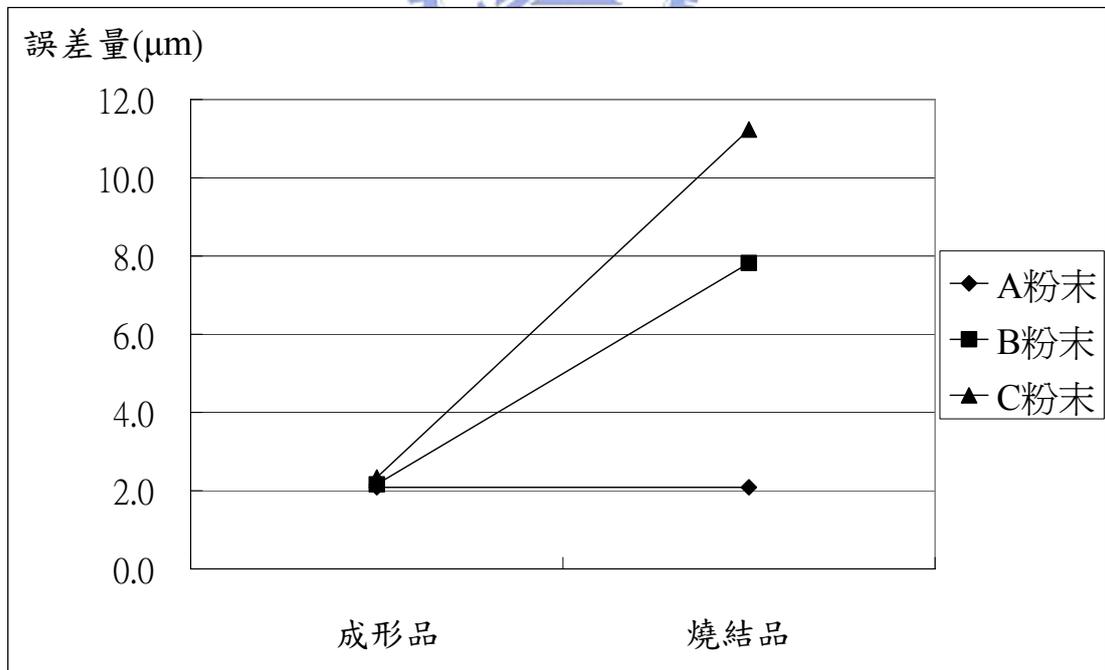


圖 5.4 乙齒輪之齒形平均誤差量變化圖

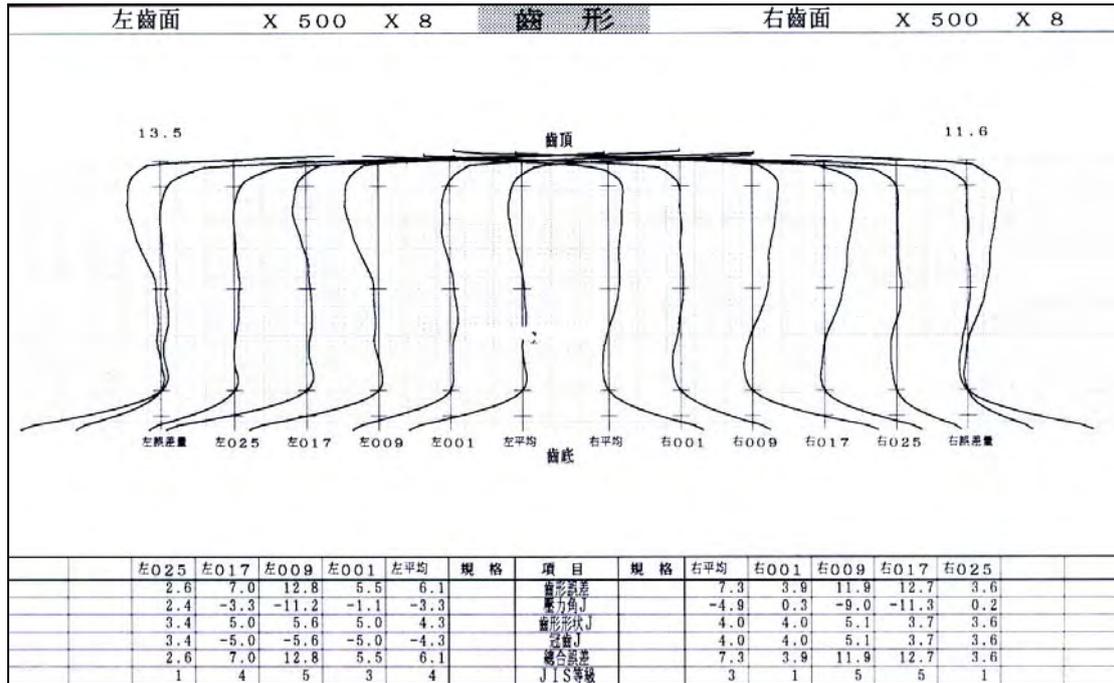


圖 5.5(a) 以 A 粉末製成之甲齒輪燒結品的齒形精度量測結果

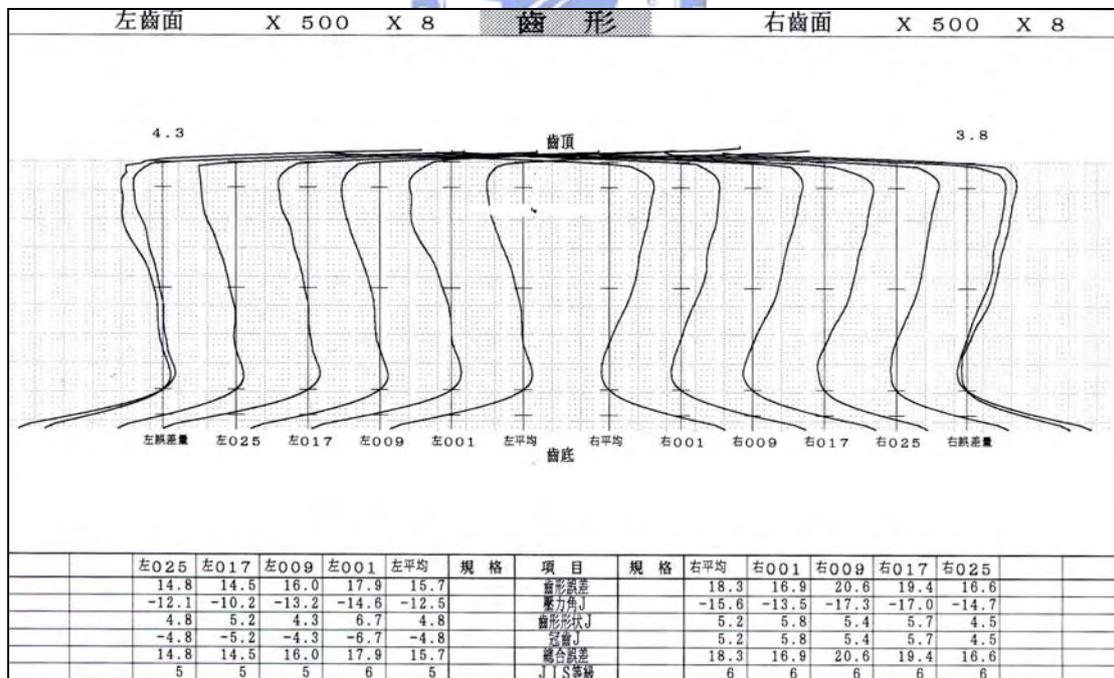


圖 5.5(b) 以 B 粉末製成之甲齒輪燒結品的齒形精度量測結果

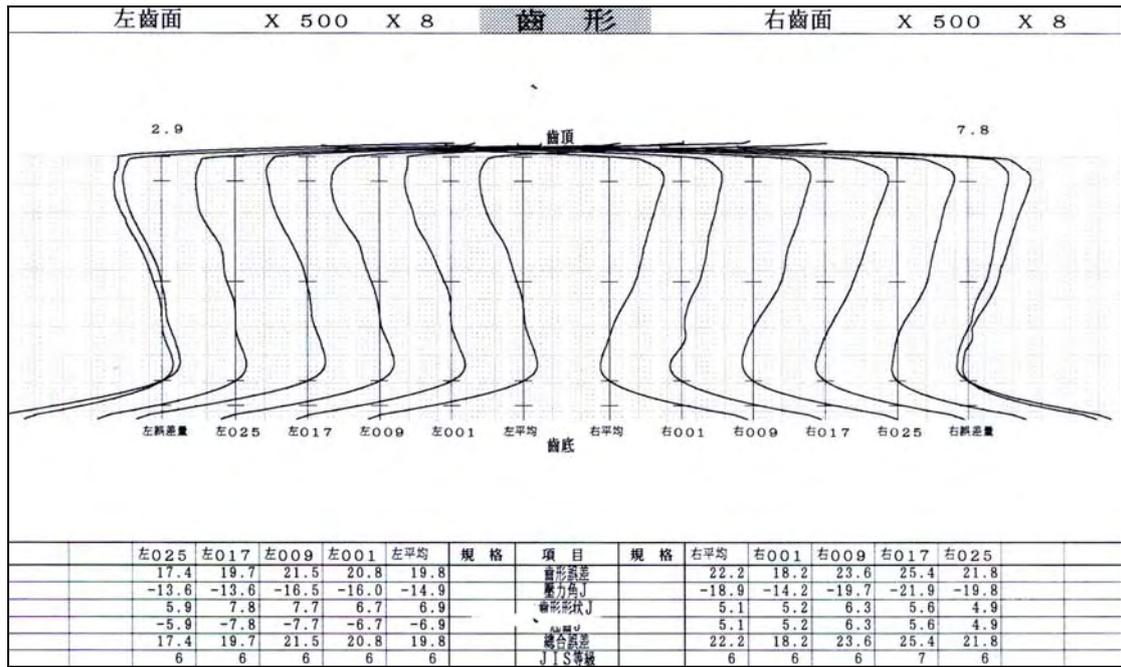


圖 5.5(c) 以 C 粉末製成之甲齒輪燒結品的齒形精度量測結果

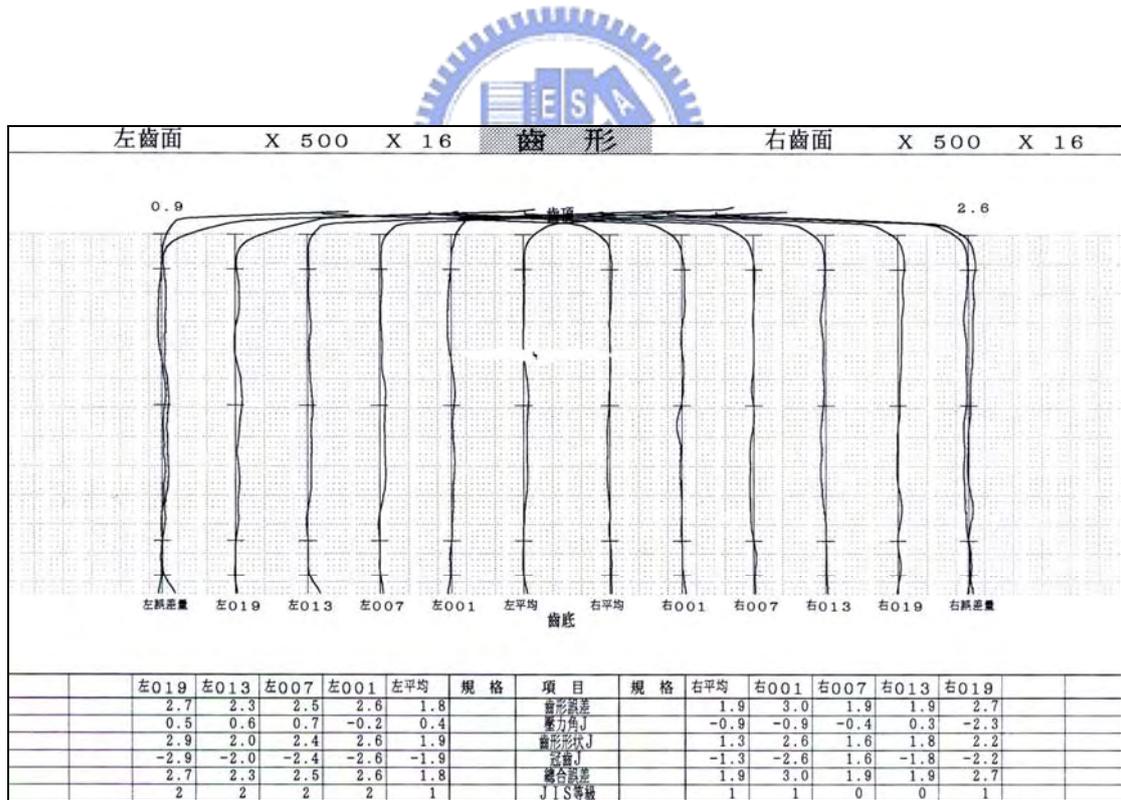


圖 5.6(a) 以 A 粉末製成之乙齒輪燒結品的齒形精度量測結果

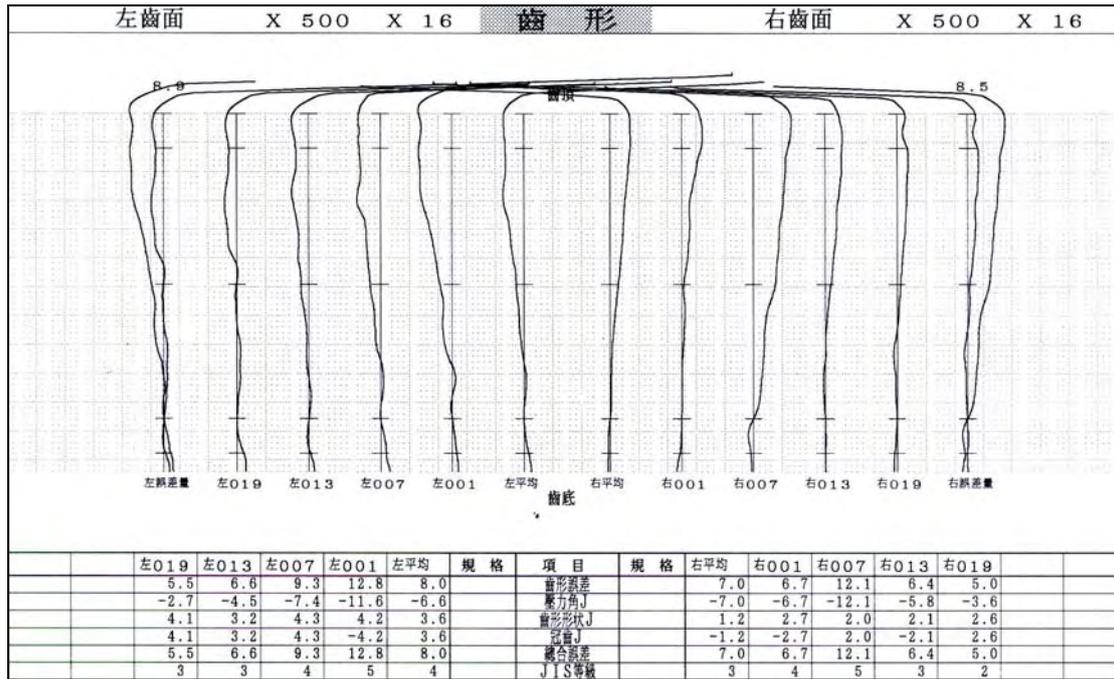


圖 5.6(b) 以 B 粉末製成之乙齒輪燒結品的齒形精度量測結果

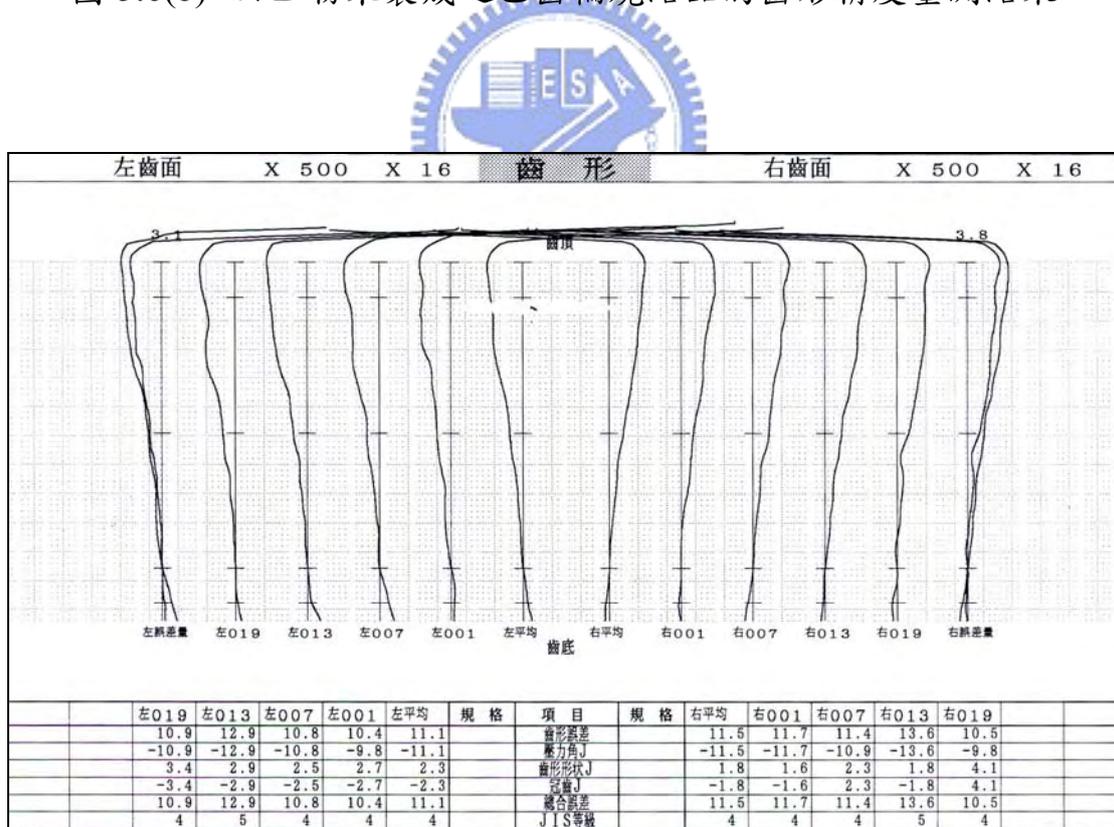


圖 5.6(c) 以 C 粉末製成之乙齒輪燒結品的齒形精度量測結果

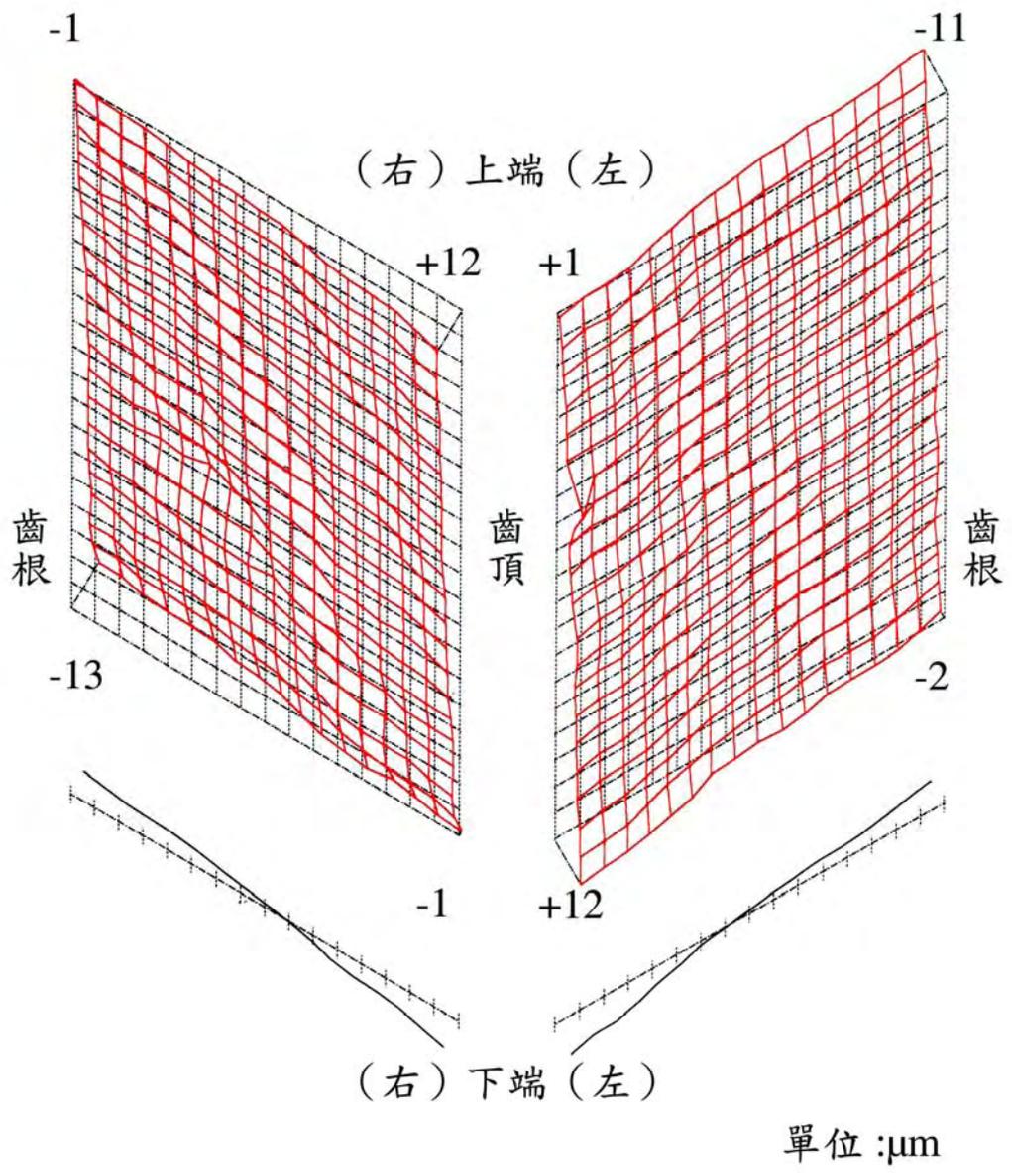


圖 5.7 齒形細分化量測結果(以 C 粉末製成之乙齒輪為例)

### 5-3 成形齒輪壓胚體之齒筋誤差

除了齒形誤差，齒筋(導程方向)上的誤差也是影響螺旋齒輪精度的重要一環。表 5.3 為甲及乙兩組成形齒輪壓胚體之齒筋齒面平均誤差量測值，圖 5.8(a)至圖 5.9(c)則為齒筋精度測定結果。而由壓胚成形齒輪之齒筋量測結果則可以發現，甲及乙兩組齒輪的齒筋齒面其誤差量相當接近，甲齒輪壓胚體的齒筋齒面誤差約為 3~6 $\mu\text{m}$ ，而乙齒輪壓胚體的齒筋齒面誤差約為 2~5 $\mu\text{m}$ ，這個結果表示外徑大小對於成形齒輪其齒筋的齒面誤差並沒有明顯影響。所以粉末冶金壓胚體之成形齒輪在其齒筋方向的齒面誤差不大，幾乎都在 JIS 等級 0~1 級左右，可見壓胚體的回彈量並沒有造成太大的齒筋誤差。

此外，觀察齒筋精度測定結果之量測曲線發現，成形齒輪的上側齒筋誤差量通常較下側的齒筋誤差量來得大，亦即量測曲線在齒輪上側會發生往外側偏擺的現象，而造成這個現象的主要原因可能為齒輪上側的成形密度較高，而產生較大的回彈誤差量。因為齒輪壓胚體的上側是由上沖頭加壓成形，而成形壓胚體所需的壓力即是由上沖頭所提供，因而造成齒輪上側所受的壓力較其他部分來得大，使得齒輪上側局部的成形密度較高，造成較大的回彈量。

比較左右齒面的齒筋誤差量，發現甲齒輪壓胚體的左齒面齒筋誤差略高於右齒面的齒筋誤差，如圖 5.10 所示；而乙齒輪壓胚體的情況則相反，是右齒面的齒筋誤差略高，如圖 5.11 所示。這是因為甲為左螺旋齒輪，在成形機壓製齒輪壓胚體時，左齒面所受的壓力較大，造成左齒面的成形密度會略高於右齒面，而回彈量也因為密度較高的關係而較大；至於右螺旋的乙齒輪則剛好相反。這也印證了上一段所述之齒輪壓胚體成形密度與回彈量的關係。

表 5.3 甲齒輪與乙齒輪成形品平均齒筋誤差(單位：μm)

齒輪 編號	甲齒輪成形品齒筋誤差		乙齒輪成形品齒筋誤差	
	左齒面	右齒面	左齒面	右齒面
A-1	5.3	4.3	1.8	2.9
A-2	5.6	4.5	2.5	2.4
A-3	4.5	4.1	2.1	2.8
A-4	3.5	3.6	2.1	3.4
A-5	3.9	4.1	1.6	3.8
平均	4.56	4.12	2.02	3.06
B-1	5.8	3.6	2.3	3.5
B-2	5.2	3.5	2.5	2.3
B-3	5.6	3.2	1.9	3.6
B-4	5.8	3.8	2.1	2.6
B-5	5.8	3.7	2.3	4.2
平均	5.64	3.56	2.22	3.24
C-1	6.1	3.3	2.0	4.9
C-2	6.0	3.2	2.4	3.7
C-3	6.1	3.4	2.6	3.9
C-4	6.6	3.0	2.3	4.7
C-5	6.3	3.1	2.2	5.0
平均	6.22	3.20	2.30	4.44

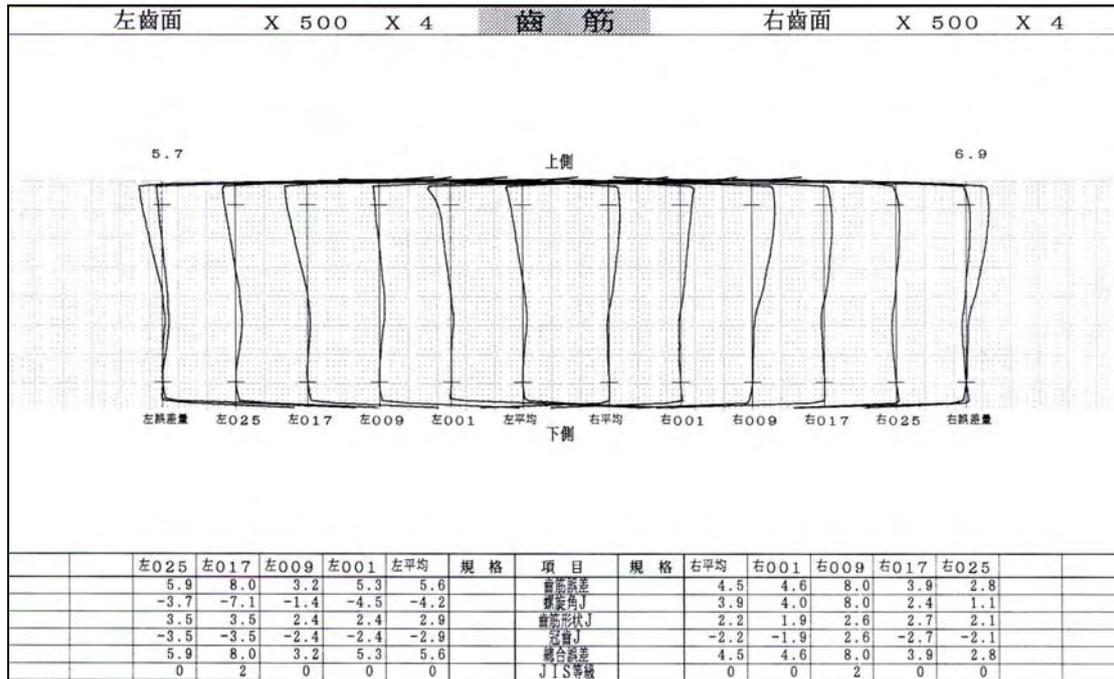


圖 5.8(a) 以 A 粉末成形之甲齒輪壓胚體的齒筋精度量測結果

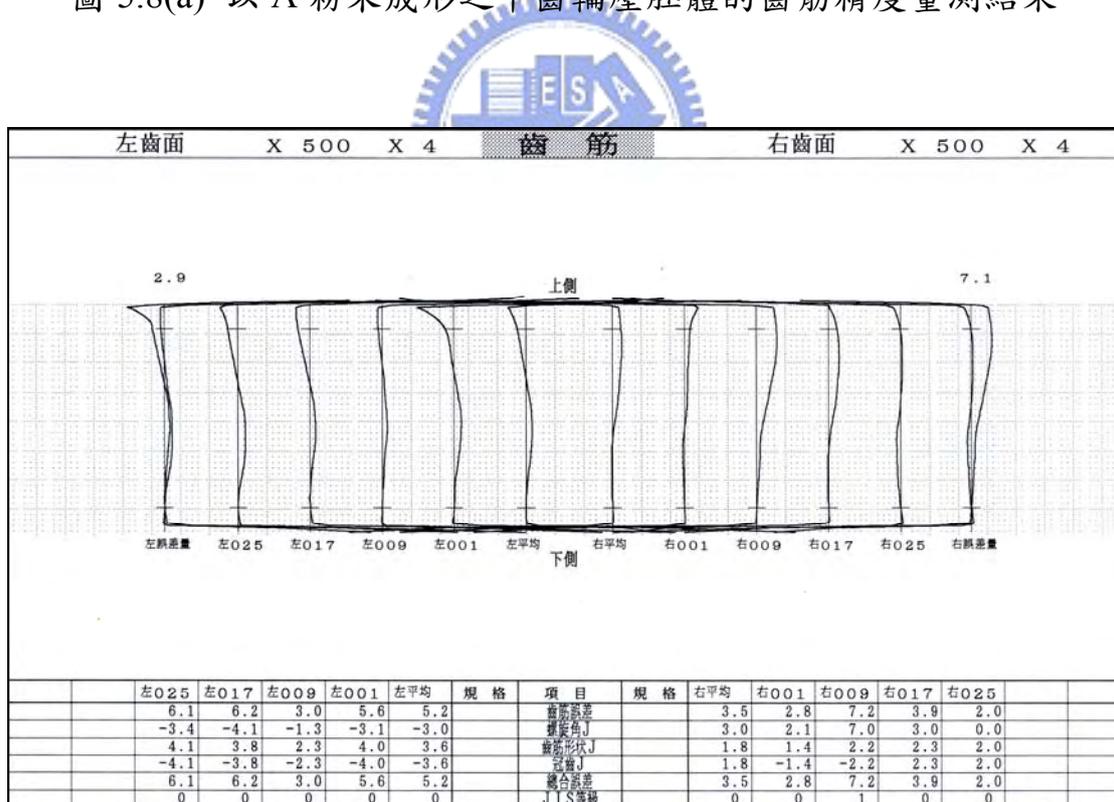


圖 5.8(b) 以 B 粉末成形之甲齒輪壓胚體的齒筋精度量測結果

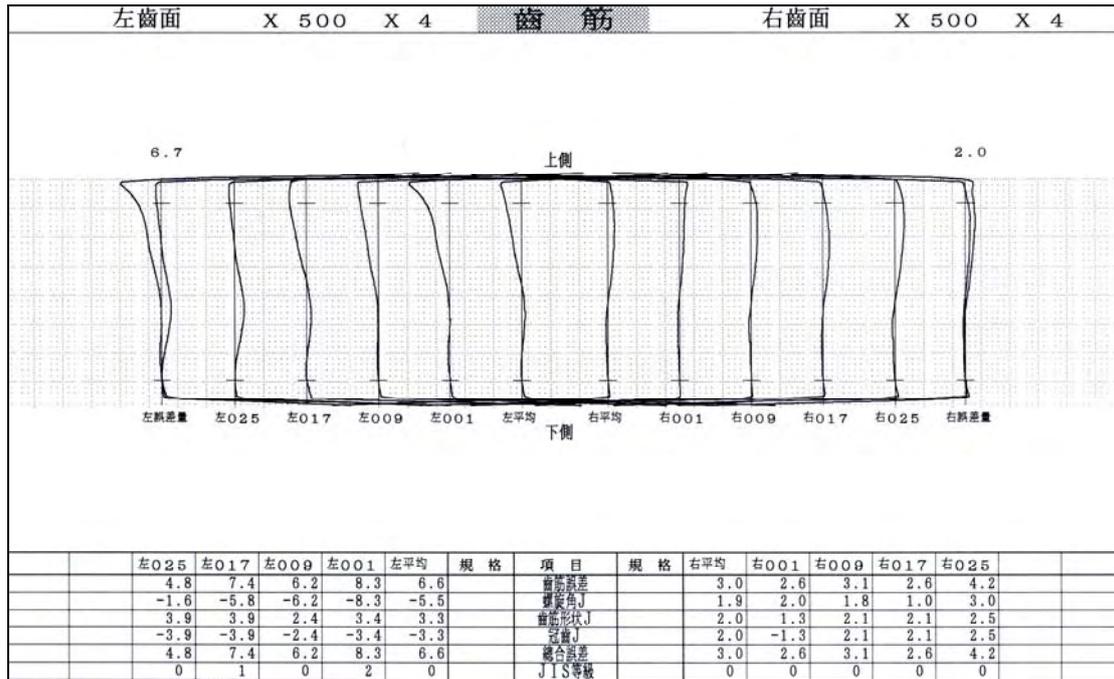


圖 5.8(c) 以 C 粉末成形之甲齒輪壓胚體的齒筋精度量測結果

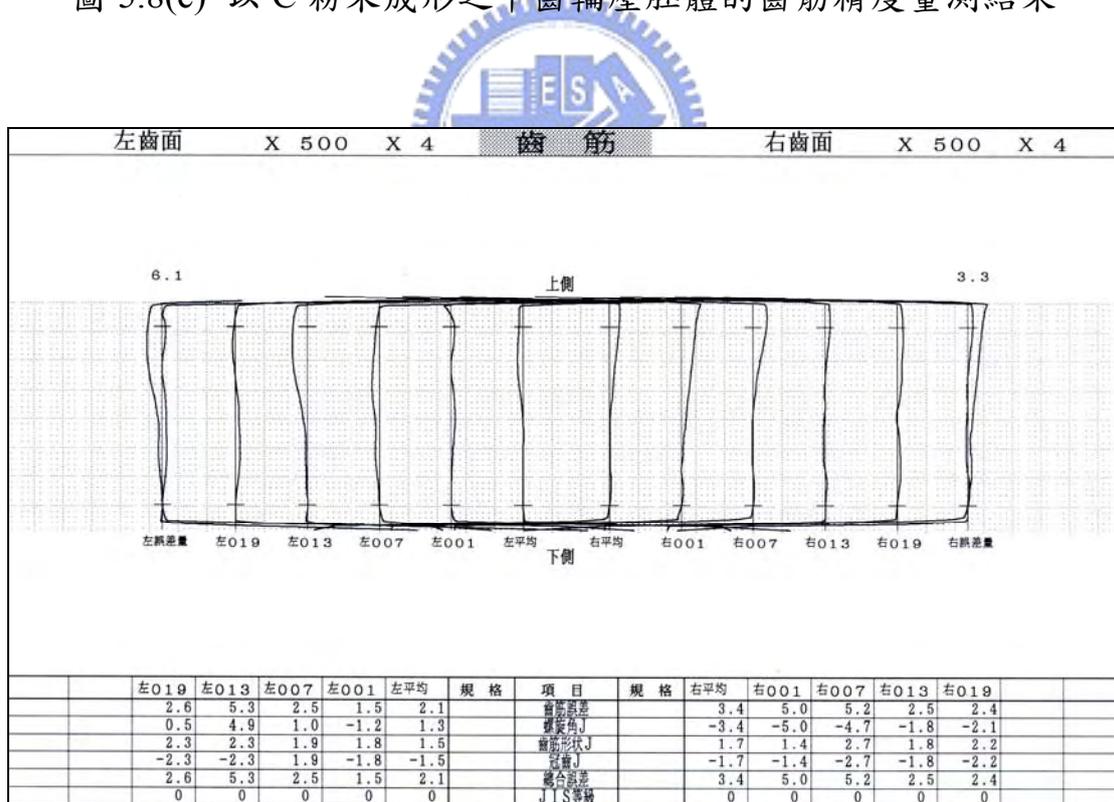


圖 5.9(a) 以 A 粉末成形之乙齒輪壓胚體的齒筋精度量測結果

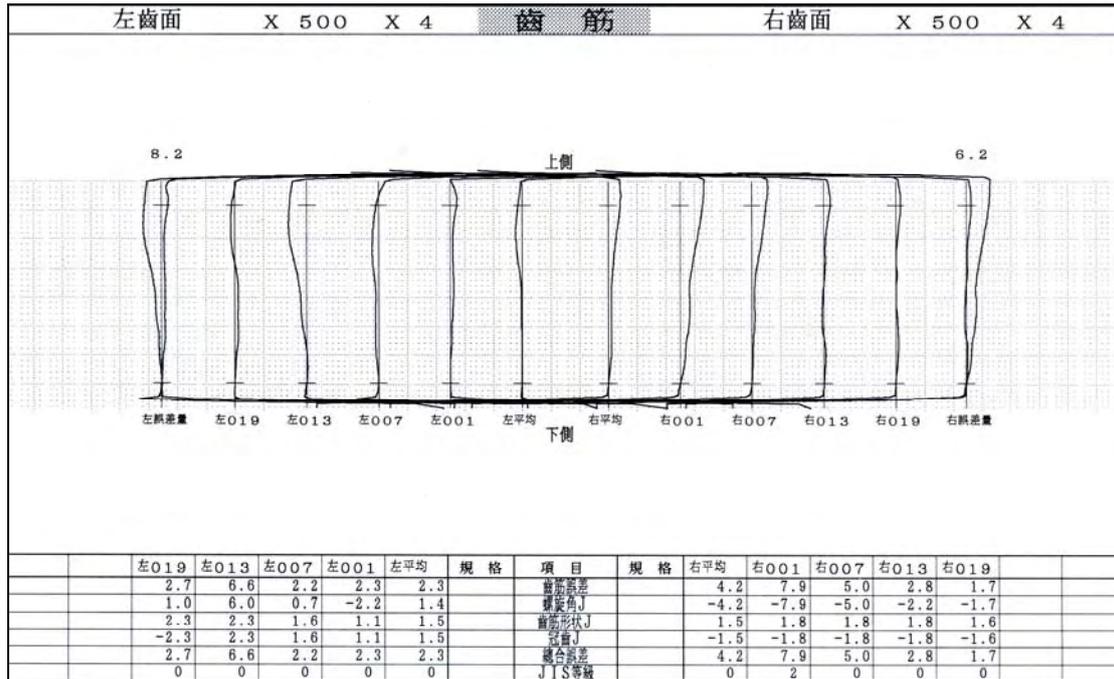


圖 5.9(b) 以 B 粉末成形之乙齒輪壓胚體的齒筋精度量測結果

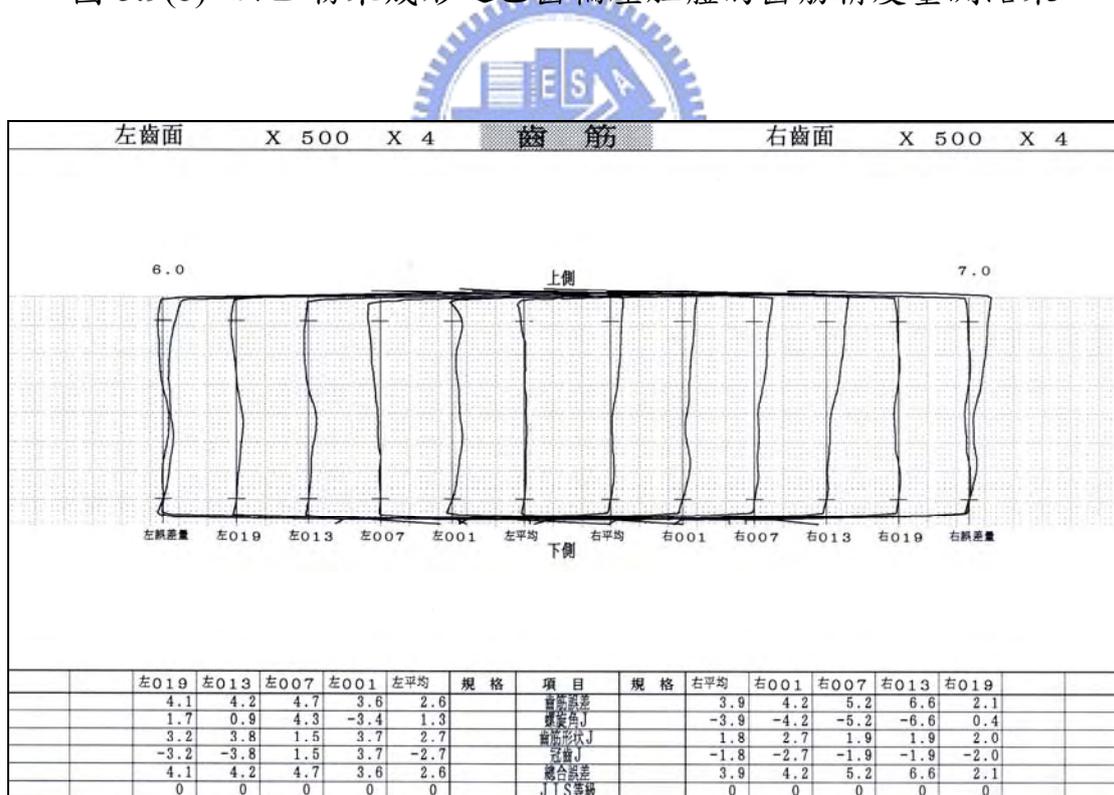


圖 5.9(c) 以 C 粉末成形之乙齒輪壓胚體的齒筋精度量測結果

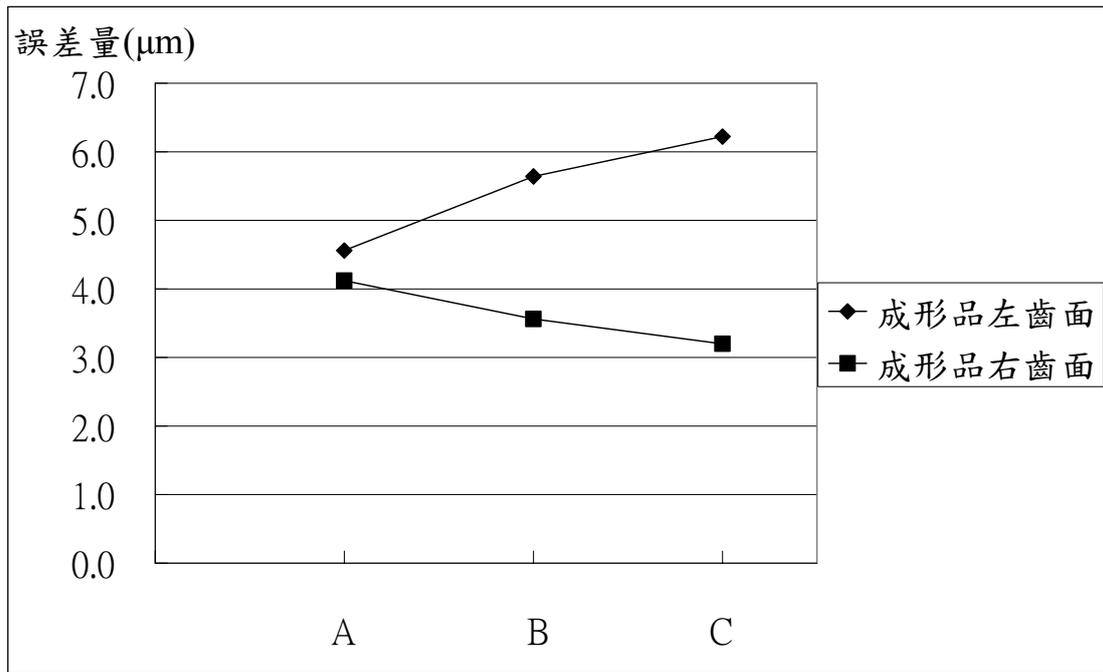


圖 5.10 甲齒輪成形品左右齒面平均齒筋誤差之比較

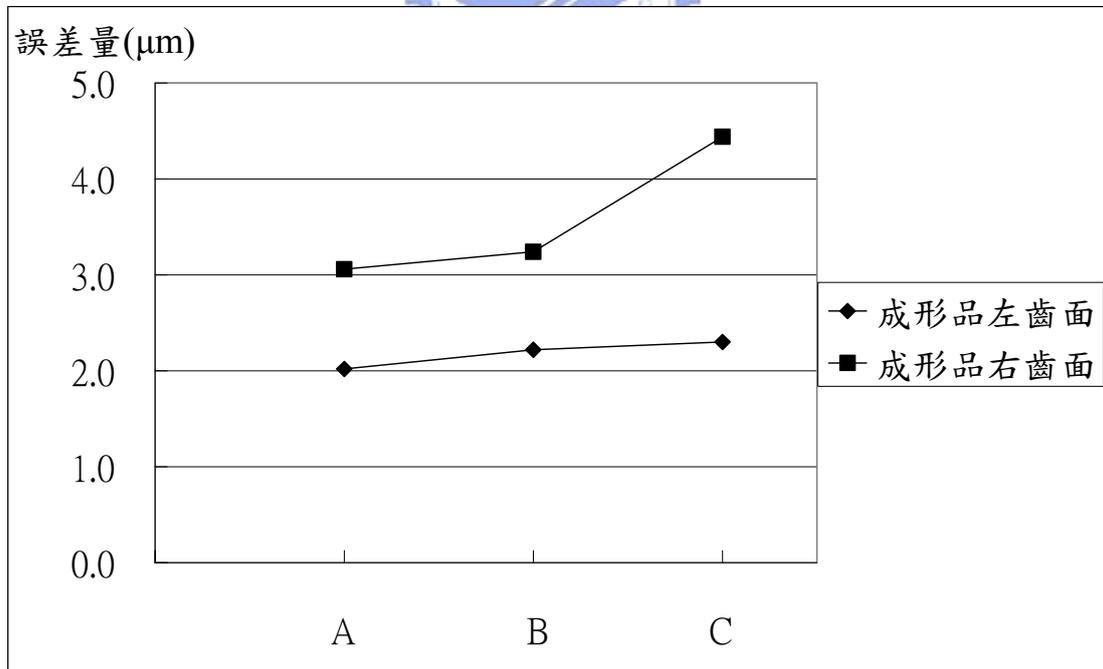


圖 5.11 乙齒輪成形品左右齒面平均齒筋誤差之比較

#### 5-4 燒結後齒輪之齒筋誤差

表 5.4 為甲與乙兩組經燒結後之粉末冶金齒輪，其齒筋齒面之平均誤差量測值。圖 5.12(a)至圖 5.13(c)則為此兩組燒結後粉末冶金齒輪之齒筋精度測定結果。從甲齒輪燒結品的齒筋誤差來看，B 和 C 粉末所製成之粉末冶金齒輪，其左齒面的齒筋誤差量略大於右齒面的齒筋誤差，這是因為甲齒輪是左螺旋齒輪，在成形機壓製齒輪壓胚體時，因左齒面所受的壓力較大，造成左齒面的成形密度會略高於右齒面，而 B 和 C 粉末所製成之齒輪則會因壓胚體的成形密度較高，而使得齒輪燒結品產生較大的齒形誤差[6]，進而有較大的齒筋誤差。至於 A 粉末所製成之甲粉末冶金齒輪其特性則剛好相反，在成形密度較低的右齒面側，其齒筋誤差較大，如圖 5.14 所示。至於右螺旋的乙齒輪，其以 B 和 C 粉末所製成之粉末冶金齒輪在成形密度較高的右齒面側，也同樣會有齒筋誤差較大的現象；而 A 粉末所製成之乙齒輪則剛好相反，反而是在密度較低的左齒面側其齒面誤差量較大，如圖 5.15 所示。但因乙齒輪的半徑較小，此種現象較不明顯。

#### 5-5 結論

本章所量測之實驗齒輪組甲及乙是依照第四章第四節之實驗方法及製程參數所製造，主要目的在探討此兩組齒輪對應於 A、B 和 C 三種粉末，在成形及燒結工程後，粉末冶金齒輪在齒形及齒筋誤差上的差異。綜合前面的實驗結果，可以得到以下幾點結論：

1. 比較甲及乙兩組半徑大小不同的齒輪可以發現，半徑大的齒輪其成形品之齒形誤差及燒結後的齒形誤差皆大於半徑小的齒輪，如圖 5.16 所示。

表 5.4 甲齒輪與乙齒輪燒結品平均齒筋誤差(單位：μm)

齒輪 編號	甲齒輪燒結品齒筋誤差		乙齒輪燒結品齒筋誤差	
	左齒面	右齒面	左齒面	右齒面
A-1	2.7	7.5	5.8	2.5
A-2	4.9	7.3	6.1	1.8
A-3	3.2	7.9	5.3	1.4
A-4	3.5	8.2	5.4	2.1
A-5	3.5	9	4.5	2
平均	3.56	7.98	5.42	1.96
B-1	9.2	3.8	5.2	8.7
B-2	8.4	3.6	5.9	8.1
B-3	8.2	4.9	6.4	8.2
B-4	7.4	4.5	6.1	8.6
B-5	7.2	4.6	6.6	9.2
平均	8.08	4.28	6.04	8.56
C-1	9.6	3.8	5.4	8.9
C-2	10.1	3.5	8.7	7.7
C-3	10.7	2.8	5.3	7.9
C-4	10	4	6.1	9.9
C-5	10.4	2.9	6.6	10
平均	10.16	3.40	6.42	8.88

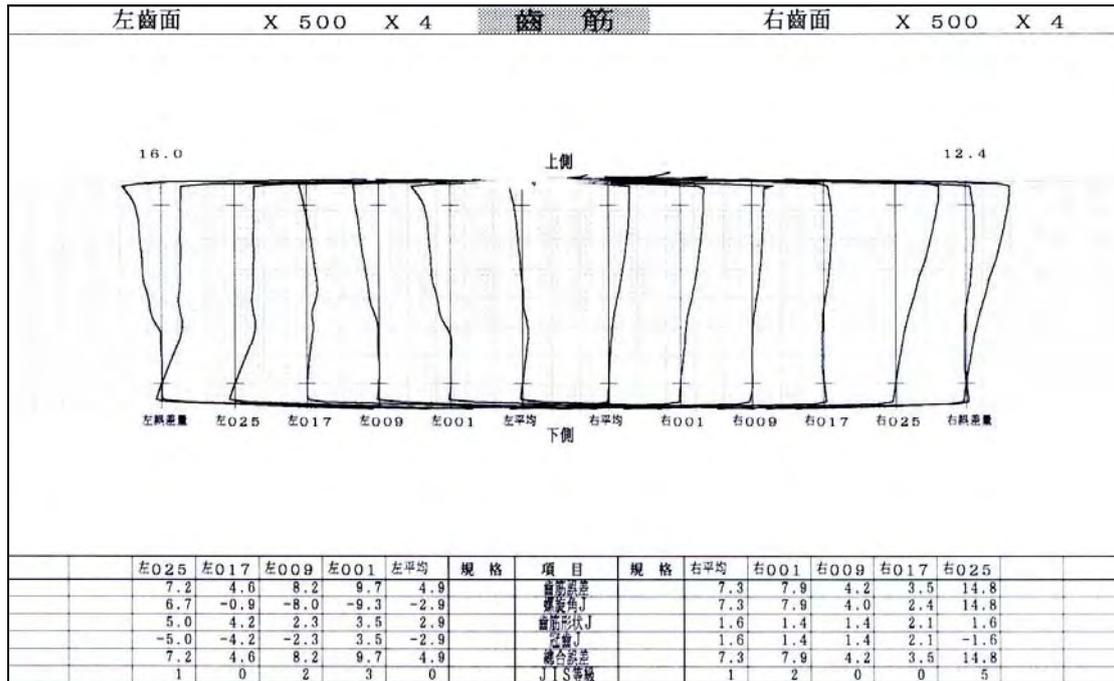


圖 5.12 (a) 以 A 粉末製成之甲齒輪燒結品的齒筋精度量測結果

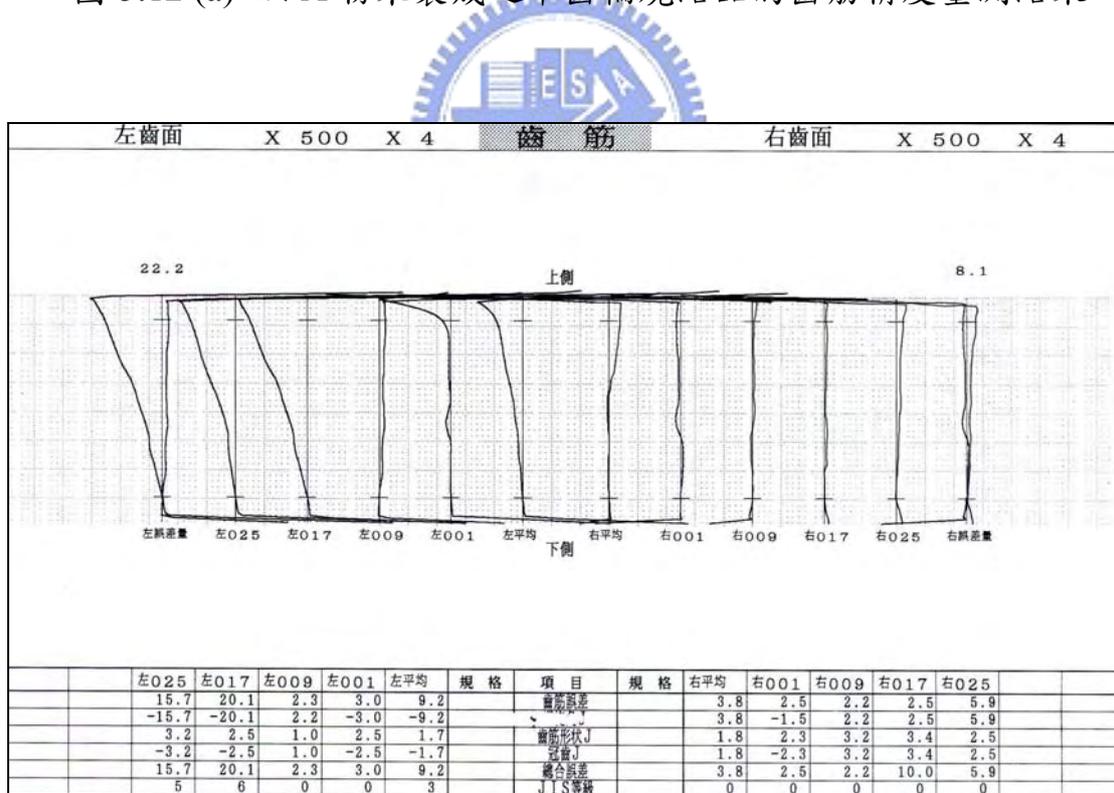


圖 5.12 (b) 以 B 粉末製成之甲齒輪燒結品的齒筋精度量測結果

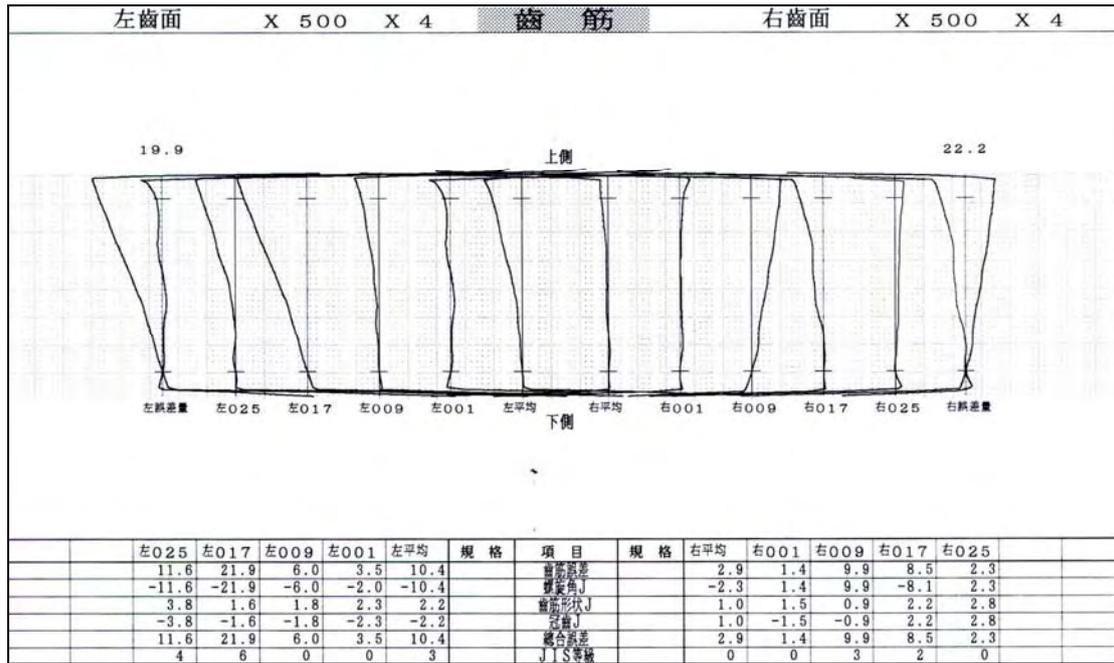


圖 5.12 (c) 以 C 粉末製成之甲齒輪燒結品的齒筋精度量測結果

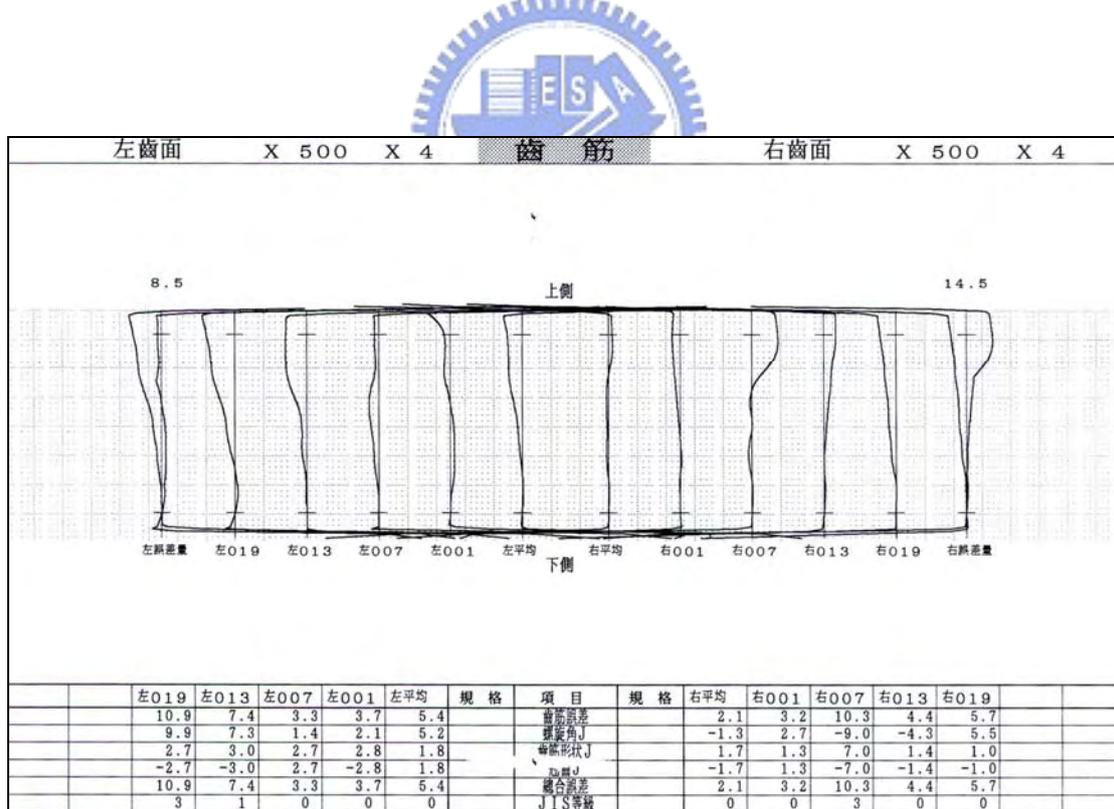


圖 5.13 (a) 以 A 粉末製成之乙齒輪燒結品的齒筋精度量測結果

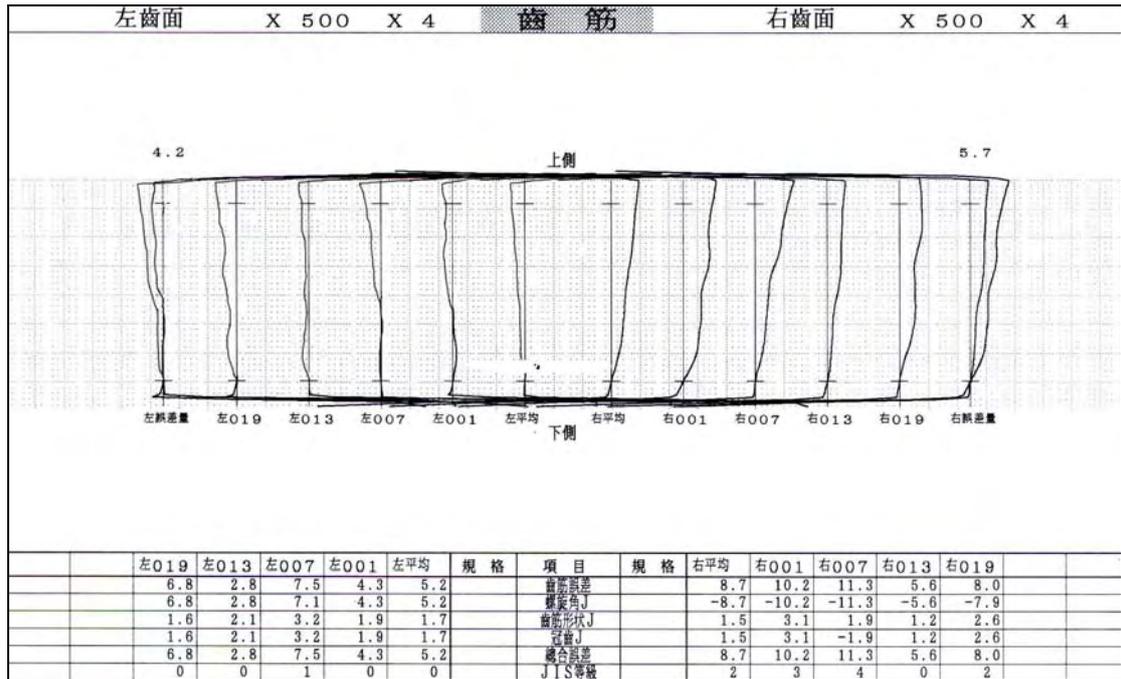


圖 5.13 (b) 以 B 粉末製成之乙齒輪燒結品的齒筋精度量測結果

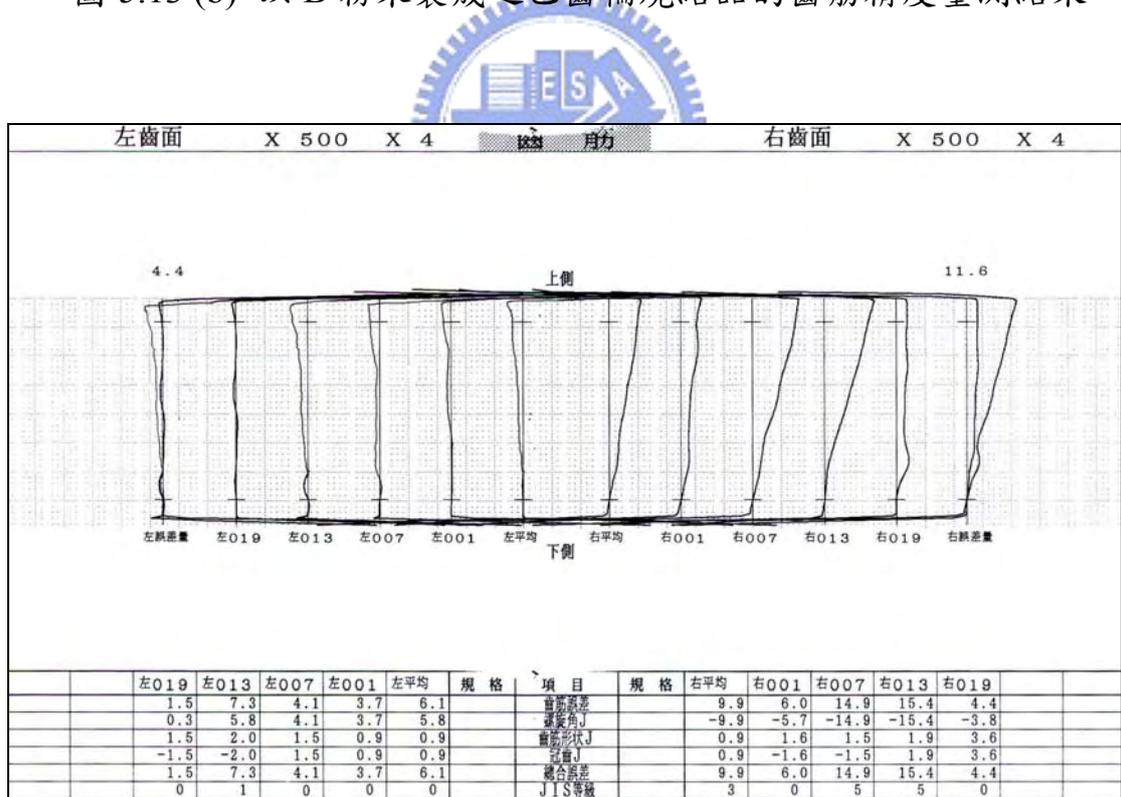


圖 5.13 (c) 以 C 粉末製成之乙齒輪燒結品的齒筋精度量測結果

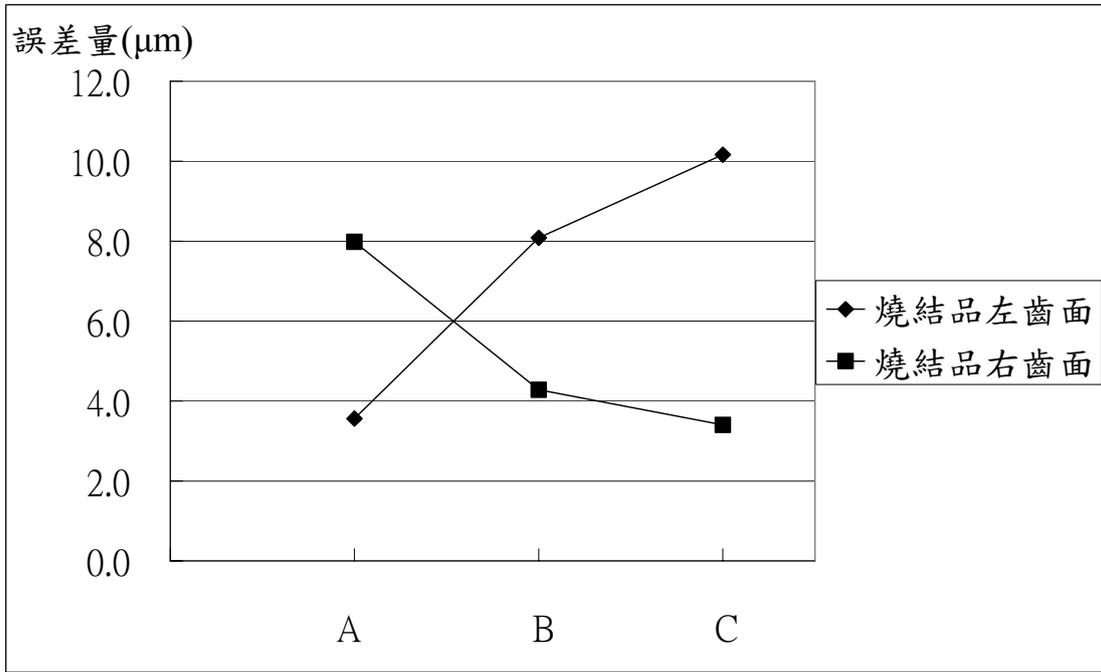


圖 5.14 甲齒輪燒結品左右齒面平均齒筋誤差之比較

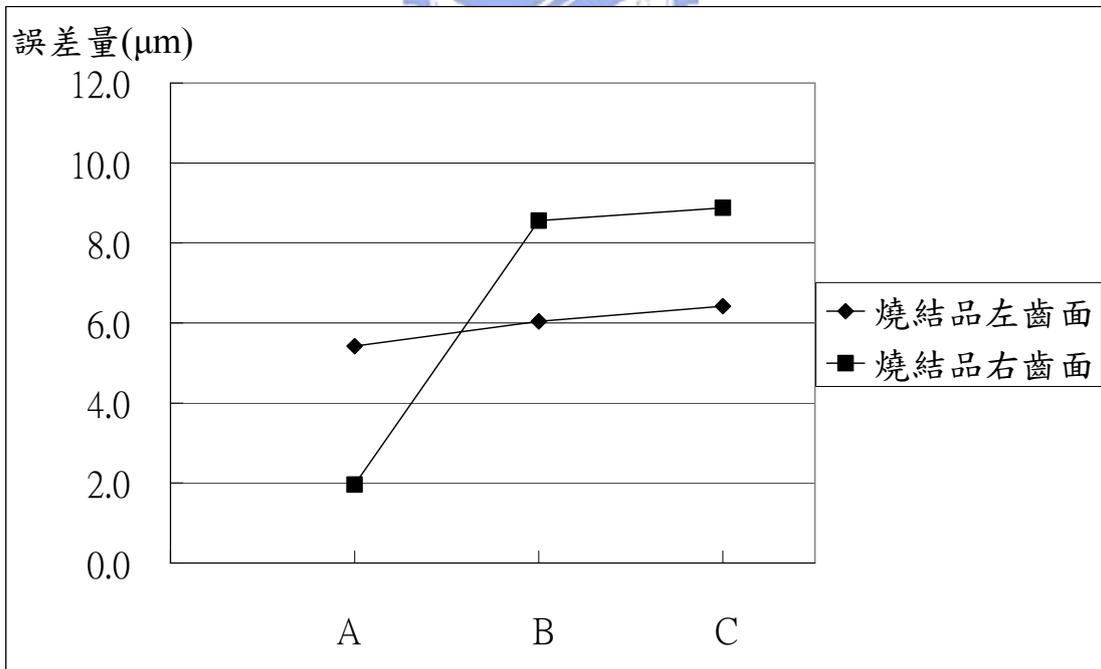


圖 5.15 乙齒輪燒結品左右齒面平均齒筋誤差之比較

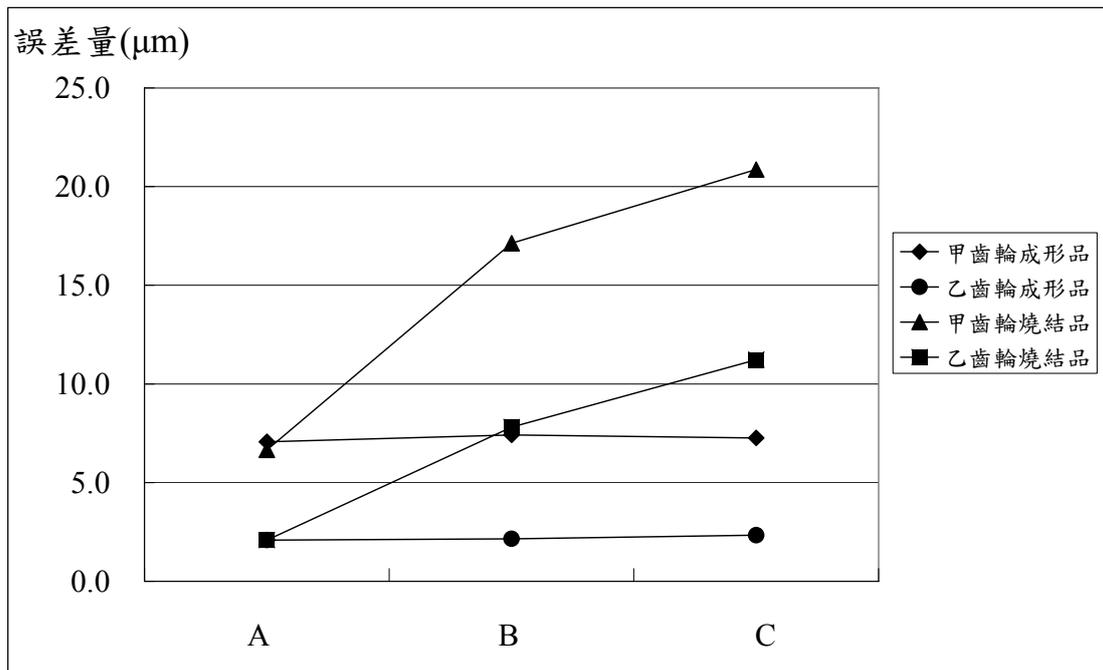


圖 5.16 甲齒輪與乙齒輪成形與燒結誤差比較圖

- 從前述的量測結果，比較三種不同粉末對燒結後之粉末冶金齒輪其齒形及齒筋誤差的影響，吾人發現以 C 粉末所製成之齒輪其誤差量最大，B 粉末次之，而 A 粉末的影響則最小，這也表示 A 粉末所製成之粉末冶金齒輪為三種粉末所製成之齒輪中尺寸最穩定者。
- 比較齒輪成形品與燒結品可以發現，相同半徑大小的齒輪成形品，其齒形誤差與粉末的關係並不大，三種粉末所製成之齒輪成形品，其誤差量皆在一定範圍內。然而經過燒結後之齒輪，其齒形誤差量則受到粉末種類不同而有很大的變化，變化的程度分別為  $C > B > A$ 。
- 雖然實驗中的粉末冶金齒輪壓胚體成形密度為固定，但在其成形過程中，由於受到成形機的加壓方向及齒輪的螺旋方向影響，使得齒輪齒面的局部密度會有些微不同。以齒輪成形

品來說，齒輪之成形密度越高會造成越大的回彈量，三種粉末皆然。而以齒輪燒結品來看，A 粉末所製成之齒輪，在成形密度較低的齒面會有較大的燒結誤差量，而 B 和 C 粉末則正好相反。此種現象尤以沿著齒輪導程方向量測整個齒面的齒筋誤差量測最為明顯。



## 第六章 粉末冶金螺旋齒輪之模具齒形修整模擬

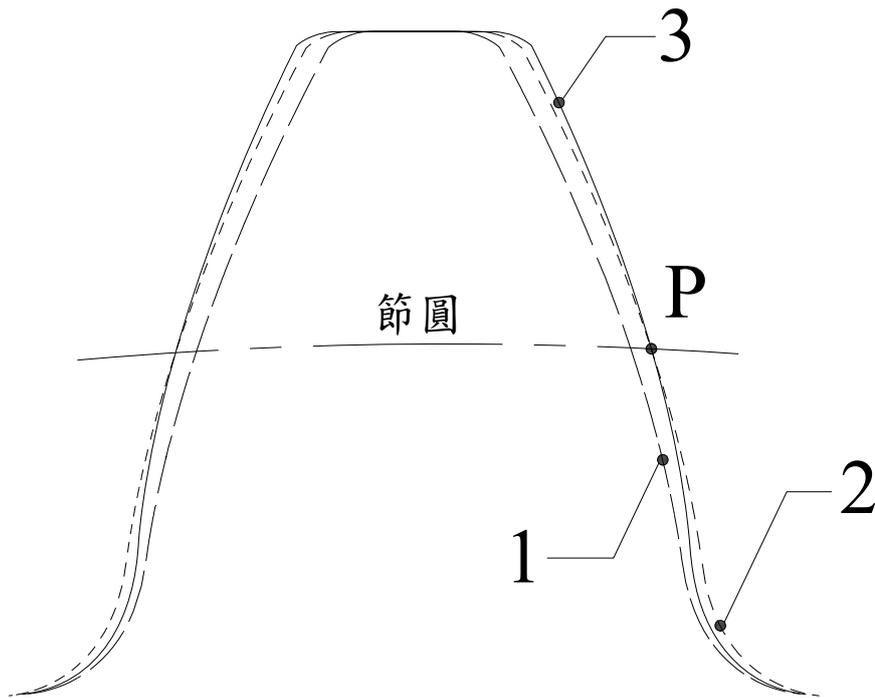
### 6-1 前言

粉末冶金製程中，包含了金屬粉末調製、加壓成形、燒結、熱處理及外形精整等主要工程或步驟，每一項工程或步驟都會影響最終粉末冶金件成品之外觀尺寸。為了得到高精度的粉末冶金件，在其他製程參數固定的情況下，針對模具尺寸的修整便是常見的做法。因此，在設計模具時，就必須要掌握住粉末冶金件在所有工程中的尺寸變化並預測其變化率，再對模具的尺寸作適當的補償性修整。而與一般粉末冶金件相比，粉末冶金件螺旋齒輪的齒形並非線性的尺寸，無法直接利用粉末的尺寸變化率對模具的齒形作修整，而必須從模具的齒形設計參數上著手。因此，本章將依據第二章所建立之漸開線形螺旋齒輪的齒面數學模式，模擬齒輪參數對齒形變異量的敏感度分析，並配合實驗及量測所得到之實際齒形變異情形，試著對螺旋齒輪之模具作補償性的修整模擬，以期提升粉末冶金件螺旋齒輪之精度。

### 6-2 齒面變異分析

由第五章的齒形細分化量測結果發現，齒輪壓胚體經過燒結後，其齒形變化情形如圖 6.1 所示，曲線 1 表示模具齒形，曲線 3 表示燒結成形後之粉末冶金齒輪之齒形。為了簡化問題以利於後續分析的進行，現將粉末冶金螺旋齒輪的齒形變化分為兩個部分來探討：

1. 齒輪之齒形經過燒結之後會產生膨脹，若假設膨脹是等向性的，則可以把齒形膨脹之情形視為齒形參數  $b_0$  變大所導致，



- 1 (模具齒形)
- 2 (模具齒形等向膨脹)
- 3 (燒結品齒形)

圖 6.1 模具齒形與燒結品齒形之變化情形

如圖 6.1 中的曲線 1 等向膨脹至曲線 2。

2. 然而粉末冶金齒輪經燒結工程後，其最後之齒形為曲線 3，因此可視之為當齒輪以等向性膨脹之後，該曲線 2 再以齒輪之節圓為基準，在齒輪節圓與齒形之交點 P 點以上，曲線靠近齒頂的部分將因燒結變形而使得最終之齒形高於標準齒面，而齒根部分則低於標準齒面。若假設齒頂膨脹量與齒根之收縮量為對稱，則可以把此種齒形變化視為齒輪壓力角變小後造成之現象，如圖 6.1 中齒形由曲線 2 轉變成曲線 3。因此，本節將探討齒形設計參數  $b_0$  及壓力角的改變對於齒面變

異的影響。

本論文所探討之齒形精度僅限於齒輪工作區域，亦即齒形之漸開線部分，不考慮齒頂及齒根之導角部分，因為此兩部分之齒形在齒輪實際嚙合時並不接觸，故不加以考慮。依據第二章所建立之漸開線形螺旋齒輪的齒面數學模式，螺旋齒輪標準齒面 $\Sigma_1$ 之漸開線區域齒面方程式可表示如下：

$$\begin{aligned} x_1 &= (l_F \cos \psi_n^{(F)} - a_0 + r_1) \cos \phi_1 \pm (l_F \cos \psi_n^{(F)} - a_0) \cot \psi_n^{(F)} \sin \lambda_F \sin \phi_1 \\ y_1 &= (l_F \cos \psi_n^{(F)} - a_0 + r_1) \sin \phi_1 \pm (a_0 - l_F \cos \psi_n^{(F)}) \cot \psi_n^{(F)} \sin \lambda_F \cos \phi_1 \\ z_1 &= \pm (a_0 - l_F \sin \psi_n^{(F)}) \cot \psi_n^{(F)} \tan \lambda_F \sin \lambda_F \pm \left( \frac{a_0 \tan \psi_n^{(F)} + b_0 - l_F \sin \psi_n^{(F)}}{\cos \lambda_F} \right) + r_1 \phi_1 \tan \lambda_F \end{aligned} \quad (22)$$

而修改齒形設計參數 $b_0$ 所造成的齒面變異量 $\Delta \varepsilon_1$ ，可以利用下列方程式來計算：

$$\Delta \varepsilon_1 = (\mathbf{R}_b - \mathbf{R}_1) \cdot \mathbf{n} = (x_b - x_1)n_{1x} + (y_b - y_1)n_{1y} + (z_b - z_1)n_{1z} \quad (23)$$

其中向量 $\mathbf{R}_1$ 表示標準齒面 $\Sigma_1$ 在齒輪節圓位置的座標值 $x_1$ 、 $y_1$ 和 $z_1$ ，向量 $n_{1x}$ 、 $n_{1y}$ 和 $n_{1z}$ 表示標準齒面的單位法向量；向量 $\mathbf{R}_b$ 表示修改齒形設計參數 $b_0$ 後之齒面 $\Sigma_b$ 在齒輪節圓位置的座標值 $x_b$ 、 $y_b$ 和 $z_b$ 。

至於修改齒輪壓力角所造成的齒面變異量 $\Delta \varepsilon_2$ ，則可以利用底下所列之方程式來計算：

$$\Delta \varepsilon_2 = (\mathbf{R}_v - \mathbf{R}_1) \cdot \mathbf{n} = (x_v - x_1)n_{1x} + (y_v - y_1)n_{1y} + (z_v - z_1)n_{1z} \quad (24)$$

在此處的向量 $\mathbf{R}_1$ 表示標準齒面 $\Sigma_1$ 在齒頂的座標值 $x_1$ 、 $y_1$ 和 $z_1$ ，向量 $n_{1x}$ 、 $n_{1y}$ 和 $n_{1z}$ 同樣表示標準齒面的單位法向量；向量 $\mathbf{R}_v$ 表示修改齒

輪壓力角後之齒面 $\Sigma_v$ 在齒頂的座標值 $x_v$ 、 $y_v$ 和 $z_v$ 。由於螺旋齒輪每個截面的齒形都可以視為是正齒輪的齒形，而量測齒形精度時也是以齒寬中央的截面來量測，所以接下來先討論齒形方面，將三維的齒形變異問題簡化為二維來加以探討，以便縮短分析的時間。

### 6-3 模具齒形修整模擬—以甲粉末冶金齒輪為例

由於一般齒形精度量測所得到的誤差量是以齒根為基準點量測所得之最大誤差量，通常此最大誤差量多是發生在齒頂，且量測所得的曲線亦近似於直線，如圖 6.2 所示。若依照齒形細分化量測方法，以節圓位置為基準點，在齒頂的部分為膨脹，在齒根的部分為收縮，則位於節圓位置的齒形便不會因為壓力角變大或變小而產生變異量，因此，可以把齒形在節圓的位置 P 點視為齒形經過等向性膨脹之後的基準點，而其膨脹量就是最大誤差量的二分之一。由前一節之齒面變異公式 (22) 及 (23) 經改變齒形設計參數  $b_0$  後可計算齒面變異量，亦即可以得到甲齒輪之齒形設計參數  $b_0$  改變對齒形變異量的影響，如表 6.1 所示。

茲以齒輪參數  $b_0$  對齒形膨脹量完成齒形修整之後，齒形會以節圓位置為基準點往內側作近乎平移的收縮，平移的距離為二分之一最大誤差量，此時的齒頂與齒根之齒形誤差量會成為齒輪齒形最大誤差量的二分之一。由前一節之公式 (22) 及 (24) 經改變壓力角後可計算齒面變異量，亦即可以得到甲齒輪的壓力角參數改變對於齒形變異量的影響，如表 6.2 所示。從表 6.2 之分析結果得知，當壓力角變大時，齒頂之齒形會低於標準齒面，而齒根之齒形則會高於標準齒面，且最大齒面變異量發生在齒頂及齒根位置。根據齒面分析結果顯示，實驗

齒輪甲的齒形壓力角增加量與齒面變異量大致上呈線性關係，當壓力角每增加  $0.1^\circ$ ，齒頂變異量約為  $-1.6\mu\text{m}$ ，齒根變異量則約為  $+1.6\mu\text{m}$ 。

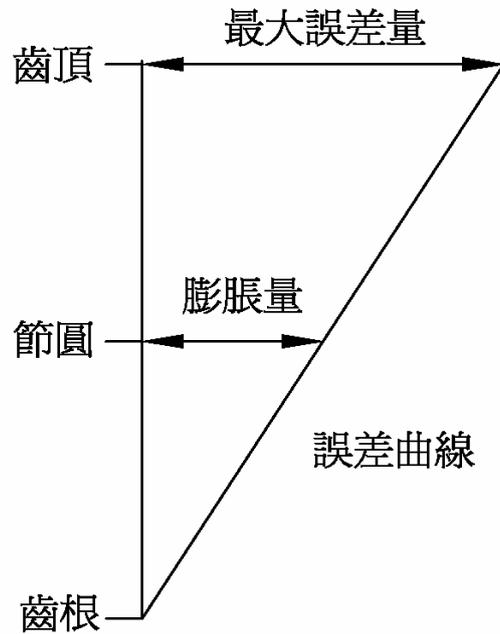


圖 6.2 齒形最大誤差量與膨脹量示意圖

表 6.1 甲粉末冶金齒輪之齒形參數  $b_0$  改變與齒形變異量之關係

齒輪參數 $b_0$ 改變量( $\mu\text{m}$ )	節圓位置齒面變異量( $\mu\text{m}$ )
-2	-1.7
-4	-3.4
-6	-5.2
-8	-6.9
-10	-8.6
-12	-10.3
-14	-12.1
-16	-13.8
-18	-15.5
-20	-17.2

表 6.2 甲粉末冶金齒輪之壓力角改變與齒形變異量之關係

壓力角變化量	齒頂變異量( $\mu\text{m}$ )	齒根變異量( $\mu\text{m}$ )
0.1°(06')	-1.6	1.6
0.2°(06')	-3.1	3.1
0.3°(06')	-4.7	4.7
0.4°(06')	-6.3	6.3
0.5°(06')	-7.9	7.9
0.6°(06')	-9.4	9.4
0.7°(06')	-11.0	11.0
0.8°(06')	-12.6	12.6
0.9°(06')	-14.2	14.2
1.0°(06')	-15.7	15.7

以下將以第五章所述之實驗甲齒輪為例，進行成形模具的齒形參數修整模擬。根據第五章表 5.2 之甲齒輪燒結品齒形誤差，取其左齒面及右齒面齒形平均誤差量之平均值，並以此值作為上述圖 6.2 中之最大平均齒形誤差量，則可計算得到甲齒輪對應於三種不同的金屬粉末，其燒結品齒形最大平均誤差量，如表 6.3 所示。利用此表及配合齒面變異分析之結果，即可針對三種不同的金屬粉末所製成之粉末冶金齒輪，進行齒形模具之參數修整模擬。

表 6.3 甲粉末冶金齒輪燒結品之最大平均齒形誤差量

粉末代號	最大平均齒形誤差量( $\mu\text{m}$ )
A	6.66
B	17.13
C	20.86

例一：以 A 粉末所製成之甲粉末冶金齒輪為例。由第五章第二節之甲齒輪燒結品齒形精度量測結果得知，其燒結齒輪之齒形較標準齒形為大，亦即表示齒形會因為粉末冶金齒輪經過燒結後而產生膨脹，因此，在設計和製造模具時需將模具之齒形參數 $b_0$ 減小，以補償粉末冶金齒輪因燒結所帶來的膨脹誤差。依據表 6.3 所示，以 A 粉末製成之甲齒輪其最大平均齒形誤差量為  $6.66\mu\text{m}$ ，則取此值之一半為膨脹量，亦即  $3.33\mu\text{m}$ ，經由齒面變異公式 (22) 及 (23) 計算可得理想之齒形參數 $b_0$ 的修整量為 $-3.8\mu\text{m}$ 。至於壓力角部分，由第五章甲齒輪燒結品齒形精度量測結果得知，實驗齒輪甲的齒形壓力角仍小於標準齒形之壓力角，為改善齒形誤差，可將模具齒形的壓力角增加。依據表 6.3 所示，以 A 粉末製成之甲齒輪其最大平均齒形誤差量為  $6.66\mu\text{m}$ ，則齒頂的誤差量可視為 $+3.33\mu\text{m}$ ，齒根為 $-3.33\mu\text{m}$ ，由齒面變異公式 (22) 及 (24) 分析之結果，可以計算得知理想之壓力角修整量為 $+12'43''$ 。

例二：以 B 粉末所製成之甲粉末冶金齒輪為例。由第五章第二節之甲齒輪齒形精度量測結果得知，其燒結齒輪之齒形也是屬於膨脹的現象，且膨脹的量較 A 粉末來得大。因此，需將模具之齒形設計參數 $b_0$ 減小，以補償因燒結所產生的膨脹誤差。由表 6.3 得知，以 B 粉末所製成之甲齒輪其最大平均齒形誤差量為  $17.13\mu\text{m}$ ，則其膨脹量為此值之二分之一，亦即  $8.565\mu\text{m}$ ，經由公式 (22) 及 (23) 計算得知理想之齒形參數 $b_0$ 的修整量為 $-9.9\mu\text{m}$ 。至於壓力角部分，由第五章之甲齒輪燒結品齒形精度量測結果得知，以 B 粉末所製成之甲齒輪的齒形壓力角仍小於標準齒形之壓力角，為改善齒形誤差，可將模具齒形的壓力角增加。依據表 6.3 所示，其齒形最大平均誤差量為  $17.13\mu\text{m}$ ，

則齒頂的誤差量可視為 $+8.565\mu\text{m}$ ，齒根為 $-8.565\mu\text{m}$ ，由公式(22)及(24)齒面變異分析之結果，可以計算得知理想之壓力角調整量為 $+32'42''$ 。

例三：以 C 粉末所製成之甲齒輪為例。同樣地，由第五章第二節之甲齒輪燒結品齒形精度量測結果得知，其燒結齒輪之齒形亦因為燒結後而產生膨脹，且膨脹的程度為三種粉末之最。為補償燒結後所產生的齒形膨脹誤差，需將模具之齒形設計參數 $b_0$ 減小。由表 6.3 得知，C 粉末製成之甲齒輪其最大平均齒形誤差量為 $20.86\mu\text{m}$ ，則取此值之二分之一為膨脹量，亦即 $10.43\mu\text{m}$ ，再經由公式(22)及(23)計算得知理想之齒形參數 $b_0$ 的調整量為 $-12.1\mu\text{m}$ 。至於壓力角部分，由量測結果得知，實驗齒輪 ASB001 的齒形壓力角仍小於標準齒形之壓力角，為改善齒形誤差，可將模具齒形的壓力角增加。依據表 6.3，最大誤差量平均為 $20.86\mu\text{m}$ ，則齒頂的誤差量可視為 $+10.43\mu\text{m}$ ，齒根為 $-10.43\mu\text{m}$ ，由齒面變異公式(22)及(24)分析之結果，可以計算得知理想之壓力角調整量為 $+39'47''$ 。

經整理上述三個範例之數據可以得到表 6.4，亦即對應於 A、B 和 C 三種粉末所製成之甲粉末冶金齒輪，經過燒結後不同的齒形誤差量，其模具齒形之設計參數 $b_0$ 及壓力角的理想調整量。此外，在上述成形模具的齒形參數調整範例中，齒形誤差量是以齒形精度量測結果取其平均值作為齒形參數調整依據。而為了了解實驗齒輪之品質是否穩定，利用統計的概念，計算此三種粉末製造之甲粉末冶金齒輪其齒形誤差量測結果，其標準差分別為 $0.711\mu\text{m}$ 、 $1.276\mu\text{m}$ 及 $1.432\mu\text{m}$ ，由統計結果顯示此實驗粉末冶金齒輪甲之品質相當穩定，則以此調整

量作為實作上之模具齒形參數修整，也將會有相當的穩定性。

表 6.4 甲粉末冶金齒輪之模具齒形參數修整量

原料粉	齒形參數 $b_0$ 修整量	壓力角修整量
A	-3.8 $\mu\text{m}$	+12'43"
B	-9.9 $\mu\text{m}$	+32'42"
C	-12.1 $\mu\text{m}$	+39'47"

#### 6-4 模具齒形修整模擬－以乙粉末冶金齒輪為例

根據第五章第二節的齒形精度量測結果顯示，乙齒輪的齒形膨脹情形與甲齒輪相似，差別在於乙齒輪的齒形誤差量較小，因此，乙粉末冶金齒輪其模具齒形修整的方法與甲齒輪相同。首先由第五章表 5.2 之乙齒輪燒結品齒形誤差量，求出乙齒輪對應於三種不同的金屬粉末，其燒結品齒形最大平均誤差量，如表 6.5 所示。接著依據齒面變異分析結果，求出齒形參數  $b_0$  與壓力角改變對齒面變異量的影響，如表 6.6 及 6.7 所示。而由表 6.5 所列之乙齒輪齒形最大平均誤差量，再利用齒面變異公式 (22) 至 (24) 分析之結果，即可求得乙齒輪對應於三種粉末的模具齒形參數修整量，如表 6.8 所示。

表 6.5 乙粉末冶金齒輪燒結品之最大平均齒形誤差量

粉末代號	最大平均齒形誤差量( $\mu\text{m}$ )
A	2.09
B	7.82
C	11.23

表 6.6 乙粉末冶金齒輪之齒形參數  $b_0$  改變與齒形變異量之關係

齒輪參數 $b_0$ 改變量( $\mu\text{m}$ )	節圓位置齒面變異量( $\mu\text{m}$ )
-2	-1.7
-4	-3.3
-6	-5.0
-8	-6.6
-10	-8.3
-12	-9.9
-14	-11.6
-16	-13.3
-18	-14.9
-20	-16.6

表 6.7 乙粉末冶金齒輪之壓力角改變與齒形變異量之關係

壓力角變化量	齒頂變異量( $\mu\text{m}$ )	齒根變異量( $\mu\text{m}$ )
$0.1^\circ(06')$	-1.5	1.5
$0.2^\circ(06')$	-3.0	3.0
$0.3^\circ(06')$	-4.5	4.5
$0.4^\circ(06')$	-6.0	6.0
$0.5^\circ(06')$	-7.5	7.5
$0.6^\circ(06')$	-9.0	9.0
$0.7^\circ(06')$	-10.5	10.5
$0.8^\circ(06')$	-12.0	12.0
$0.9^\circ(06')$	-13.5	13.5
$1.0^\circ(06')$	-15.0	15.0

表 6.8 乙粉末冶金齒輪之模具齒形參數修整量

原料粉	齒形參數 $b_0$ 修整量	壓力角修整量
A	-1.2 $\mu\text{m}$	+04'08"
B	-4.7 $\mu\text{m}$	+15'40"
C	-6.7 $\mu\text{m}$	+22'30"

以 A、B 和 C 等三種粉末所製成之乙粉末冶金齒輪，其齒形誤差量測結果之標準差則分別為  $0.292\mu\text{m}$ 、 $0.583\mu\text{m}$  及  $0.392\mu\text{m}$ ，因為乙齒輪的半徑較小，相對於甲粉末冶金齒輪而言有較小的膨脹誤差量，表示其齒形穩定性較甲粉末冶金齒輪為佳。

## 6-5 齒輪齒筋方向的誤差修整

從第五章的實驗量測結果得知，不論是甲或乙粉末冶金齒輪經過燒結後，其齒筋方向的誤差在左右齒面皆為膨脹，尤其以齒輪上側的齒面最為明顯，表示燒結後齒輪之齒面在齒筋方向為向上且向外傾斜，由於齒輪的左右齒面都是呈現這樣的現象，若只單純修整齒輪模具的螺旋角參數，是無法同時將左右齒面的膨脹量作補償性修整的。而在之前的模具齒形設計參數修整，已考慮過燒結後齒形膨脹的問題，並對齒輪設計參數  $b_0$  作修整，雖然此方法主要是針對齒形誤差的修整，但所修整的齒形膨脹量亦對齒筋方向上的誤差量有一定的補償作用，而如此的補償亦有利於粉末冶金齒輪後續精整工程的進行。因此，齒輪齒筋方向的誤差必須依實際生產時的量測結果，決定是否追加精整工程來消除齒面誤差。

## 第七章 結論與未來展望

### 7-1 結論

本論文採用實際生產線上粉末冶金螺旋齒輪之製造條件，選用三種原料粉末並配合兩種不同節圓半徑的螺旋齒輪成形模具，藉由實驗及量測觀察齒輪齒面的變化情形；同時利用齒面分析的結果，以電腦模擬修整成形模具之齒形參數，以補償粉末冶金齒輪於燒結後所產生之齒形誤差。經由上述的實驗結果，可以整理得到以下幾點結論：

1. 以成形齒輪壓胚體而言，A、B和C三種粉末所製成之齒輪成形品其齒形誤差量皆在一定範圍內，亦即表示不同的粉末對於齒輪成形品之齒形誤差量影響不大。本論文之實驗所使用的三種原料粉所成形之壓胚體，其經過燒結後皆產生膨脹，而膨脹程度則因粉末而異，依序為 $C > B > A$ ，其中A粉末最為穩定，其所製成之齒輪經過燒結後的齒形誤差量與成形品的齒形誤差量幾乎相等。
2. 由於粉末冶金螺旋齒輪在成形過程中，受到成形機的加壓方向及齒輪螺旋方向的影響，使得成形齒輪齒面的局部密度會有些微不同。對於齒輪成形品來說，三種粉末製成之齒輪在其密度較高的齒面皆有齒筋誤差量較大的現象。而經過燒結後的齒輪則因粉末特性而異，以A粉末製成之齒輪而言，在成形密度較低的齒面，其齒筋誤量較大；而B和C粉末所製成之齒輪則在密度較高的齒面有較大的齒筋誤差量。
3. 由實驗量測所得之結果可以知道，齒形誤差從齒根往齒頂逐漸增加，以齒頂的部分的誤差量最大，這樣的變化將造成齒

形壓力角的改變。因此，對成形模具的壓力角參數作修整，可以使得粉末冶金螺旋齒輪的齒形誤差獲得改善。

4. 由甲及乙兩組實驗齒輪之量測結果得知，節圓半徑大的齒輪不論是成形品或是燒結品，其齒形誤差量都較節圓半徑小的齒輪來得大，尤其是經過燒結後，兩組齒輪之齒形誤差量幾乎可達到兩倍以上之差距。因此，在進行齒輪成形模具設計時，齒輪節圓半徑較大者，便需要較大的齒輪參數修整量。

## 7-2 未來展望

本論文以粉末冶金螺旋齒輪為對象進行實驗與量測，並配合電腦模擬齒面變異分析，探討齒輪設計參數改變對於齒面變異量的影響，並嘗試對齒輪成形模具之齒形參數作修整。未來可依據本論文所推導之成形模具齒形參數修整之結果，進一步修整齒輪成形模具後進行試作，以驗證經過修整後之齒輪成形模具，其所製造之粉末冶金螺旋齒輪之齒形精度改善之成效。

此外，在不增加生產成本的前提下，利用現有之成形模具及設備，藉由調整製程參數，例如壓胚體成形密度、燒結溫度或燒結速度等，以提高粉末冶金螺旋齒輪之精度。

## 參考文獻

- [1] Vollertsen, F., Geiger, M., "Precision of P/M-parts. A System Property", Powder Metallurgy International, 22, pp. 15-16, 18-20, June 1990.
- [2] Baker, S., Foster, M., Sanderow, M., "Fine Pitch Powder Metal Gears Using Stainless Steel Alloys", Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, pp. 1356-1369, New Orleans, LA, United States, May 13-17 2001.
- [3] Jha, A.K., Diwakar, V., "Metallurgy Analysis of Failed Gear", Engineering Failure Analysis, 9, pp. 359-365, June 2002.
- [4] Ranganathan, G., Hillson, T., Mohan Ram, P.V., "Wear Characterization of Small PM Rotors and Oil Pump Bearings", Tribology International, 37, pp. 1-9, January 2004.
- [5] 張宏彬，「粉末冶金之正齒輪精度改善」，國立交通大學機械工程研究所，碩士論文，九十一年六月。
- [6] 陳錦盛，「生胚密度與燒結溫度對粉末冶金件正齒輪精度之影響」，國立交通大學機械工程研究所，碩士論文，九十二年六月。
- [7] 金德浩，「銅熔滲製程對粉末冶金件正齒輪精度之影響」，國立交通大學機械工程研究所，碩士論文，九十三年六月。
- [8] Litvin, F.L., Theory of Gearing, NASA Reference Publication 1212, Washington D.C., 1989.
- [9] Litvin, F.L., Gear Geometry and Applied Theory, PTR Prentice Hall, New Jersey, 1994.

- [10] 汪建民主編，粉末冶金技術手冊，中華民國粉末冶金協會，民國八十八年八月。
- [11] 林陽泰、林維新編譯，製造程序，全華科技圖書股份有限公司，民國八十年九月。
- [12] Lenel, F.V., Powder Metallurgy: Principles and Applications, Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, 1980.

