

國立臺灣大學工學院機械工程學系

博士論文

Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Doctoral Dissertation

以 LOM 為基礎的多種材料薄片快速原型製程之研究

Study of an Innovative LOM-Based Multi-Materials

Rapid Prototyping Process



Hsin-Chih Li

指導教授：廖運炫 博士

Advisor: Yunn-Shiuan Liao, Ph.D.

中華民國 97 年 7 月

July, 2008

# 摘要

新世代之快速原型技術有全新名詞，稱為快速生產或快速製造。如何能快速製作具功能性元件，如嵌入件、組零件、及具有多種材質之原型，為目前快速原型技術的重要研究課題。一般大多數的快速原型系統侷限於製程加工或是材料的限制，難以製作具多材質之功能性元件，其中的薄片積層法製程，因薄片材料多樣性，可製作不同材質之元件，具發展潛力，但也因積層加工方式及廢料剝除問題無法達成。

為能製作具多種材質之功能性元件，擴展快速原型新領域，本文以薄片積層法的製程為基礎，發展了一套嶄新的多種材料之薄片積層法加工製程以先切後黏再切兩次切割的方式，順利自動去除廢料並提出多種材料積層製程規劃。新製程是以物件概念為依據，將加工層內每個 2D 輪廓圖形都轉化為物件，依據材質、層級、群組方式定義物件，進行物件積層加工，在此提出一套物件道次加工流程演算法則與簡化方式，可順利將切層內所有物件依序完成加工，應用於多種材質物件的積層製作。研究中利用製程中獨特的多重送料匣裝置，能將工件階梯狀誤差精度控制在定值下，提供數個不同厚度的薄片材料，進行可變層厚的加工，可減少薄片積層數量，增進製程的加工效率。此外研究中提出了特殊支撐結構之建構法則以及簡化方式，利用物件概念將水溶性材料或是臘材置入於空區域（廢料區），產生合宜的支撐結構，可有效解決廢料剝除的問題。

本研究以兩個不同案例進行模擬驗證，驗證得知，多種材料之薄片積層法加工製程不但可製作複雜的中空工件，也能應用於多種材質之元件製作。因此新式多種材料薄層積層法，不但可提升薄片積層製程的競爭能力，更能擴展整個快速原型製程應用的新領域。

關鍵字：快速原型、薄片積層法、線上撥料、多種材料積層加工、結構性梯度變化的材質

## Abstract

The evolution of the new generation rapid prototyping (RP) technology has brought RP technology a new terminology named Rapid Production or Rapid Manufacturing. The efficient production of functional parts including RP part with insert, assembly part, and the multi-materials mock-up has been paid much attention in the current rapid prototyping technology. The inherent restrictions of the processes and materials are the main causes to refrain most of the rapid prototyping systems from making multi-materials functional parts. The Laminated Object Manufacturing (LOM), a kind of RP system, has great potential in this aspect since various materials are applicable to the process. On the other hand, the de-cubing problem of waste material of the process impedes its practical progress.

In order to explore the new frontier of the RP technology in making multi-materials functional parts, a novel multi-materials LOM process is proposed in this study. In the proposed approach, two-stage cutting processes where a post cutting process following the normal cut-bond process are adopted to remove the waste material in-process such that manufacturing of multi-materials RP part can be accomplished. The object definition is the key concept in this new process. Each 2D contour in a layer is transformed as an object. Then the object manufacturing process is carried out according to the object definition of material, layer hierarchy, and related group. An algorithm together with its simplifying method is proposed to take all steps needed for different objects in one layer. A unique multi-material feeding mechanism is proposed in this study to achieve a reasonable tolerance of layer geometry. In addition, it can provide laminating materials with different thicknesses so that the number of the laminating layer can be reduced and the process efficiency can be significantly

enhanced. More, a new forming methodology of the special supporting structure is also proposed by defining the blank area (waste-material area) as the object made of water-soluble material.

Two case studies are investigated in the thesis. It is verified that not only the complex hollow part but also the multi-materials object is manufactured. The proposed new multi-materials laminated object manufacturing process is expected to make LOM more competitive besides opening up a new application field of RP technology.

Keywords: Rapid Prototyping, LOM, On-line De-cubing, Multi-Materials Layer Manufacturing, Functional Gradient Material



# 目 錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
目錄.....	IV
圖目錄.....	VI
表目錄.....	X
第一章 緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 文獻回顧.....	2
1.2.1 快速原型原理.....	3
1.2.2 快速原型技術分類.....	5
1.3 功能性原型件製作之文獻回顧.....	7
1.4 研究動機與目的.....	11
1.5 本文內容.....	11
第二章 薄片基層法相關原理.....	13
2.1 薄片加工法 (LOM) 之加工原理.....	13
2.2 薄片積層法 (LOM) 廢料撥除效率相關製程之優劣點探討..	15
第三章 多種材料之薄片積層法製程.....	21
3.1 多種材料之薄片積層製程步驟說明.....	21
3.2 製程流程演算法則.....	30
3.2.1 多種材料積層加工製程探討.....	30
3.2.2 物件分類.....	35
3.2.3 物件積層加工順序演算.....	46
3.2.4 物件積層加工順序法則歸納.....	50

3.3 可變層厚之積層加工效率探討.....	52
3.4 小結.....	55
第四章 多種材料薄片積層法之支撐結構建構法則與簡化方法.....	56
4.1 多種材料積層加工法支撐建構法則.....	56
4.2 支撐結構簡化法則.....	60
4.3 小結.....	64
第五章 多種材料的積層加工製程模擬驗證.....	65
5.1 驗證流程規劃.....	65
5.2 案例驗證.....	66
5.3 小結.....	89
第六章 案例驗證結果與討論.....	90
6.1 工件幾何造形製作之差異.....	90
6.2 製作具多種材質元件之特色.....	91
6.3 製程特色探討.....	92
第七章 結論與未來展望.....	94
7.1 結論.....	94
7.2 未來展望.....	95
參考文獻.....	96



## 圖 目 錄

圖 1-1 快速原型與其他成型技術之比較[1].....	03
圖 1-2 快速原型技術的原理[1].....	04
圖 1-3 目前已商業化及開發中之快速原型機[2].....	06
圖 1-4 SLA 製作之內含嵌入件原型[6,7].....	07
圖 1-5 SDM 加工製作方式[10].....	08
圖 2-1 LOM 加工原理示意圖與廢料剝除步驟圖[27].....	14
圖 2-2 光硬化樹脂製程建構工件所遭遇的支撐問題.....	16
圖 2-3 偏移製程[28].....	16
圖 2-4 偏移製程的缺點[28].....	17
圖 2-5 降低黏結強度的方法[31].....	18
圖 2-6 新式層狀積層法[34].....	19
圖 3-1 傳統 LOM 製程之流程圖.....	22
圖 3-2 Multi-Material LOM 製程之流程圖.....	22
圖 3-3 多種材料之薄片積層製程機構之構想圖.....	24
圖 3-4 完整的 2D 輪廓圖.....	25
圖 3-5 兩次切割所需的輪廓圖形.....	25
圖 3-6 送料平台將薄片材送至床台正上方.....	26
圖 3-7 雷射進行第一次切割.....	26
圖 3-8 壓板下降,床台上升,進行壓合.....	27
圖 3-9 雷射進行第二次切割.....	27
圖 3-10 床台往下,使切割層分離.....	28
圖 3-11 噴頭噴膠於工件上方.....	28
圖 3-12 送料匣送出新的薄片材料.....	29

圖 3-13 具多材質工件之 X-Y 剖面圖.....	30
圖 3-14 加工層中具兩組孤島物件之 2D 輪廓圖.....	31
圖 3-15 A 與 B 薄片材道次加工步驟圖.....	32
圖 3-16 未進行切割之干涉圖.....	32
圖 3-17 第三道次加工的薄片材所需第一次切割的圖形.....	33
圖 3-18 加工層中具兩組不同層級物件之 2D 輪廓圖.....	33
圖 3-19 A 與 B 薄片材道次加工步驟圖.....	34
圖 3-20 物件積層加工干涉圖.....	35
圖 3-21 決定物件積層加工順序之步驟流程圖.....	36
圖 3-22 各種材料的切層剖視圖.....	37
圖 3-23 各種材料的切層剖面之物件與迴圈的關係示意圖.....	38
圖 3-24 切層剖面之物件與迴圈的關係圖.....	39
圖 3-25 物件排序分類流程圖.....	42
圖 3-26 多種材料與層級之物件關係圖.....	43
圖 3-27 物件各層級與群組之關係圖.....	44
圖 3-28 多種材料與層級之物件定義圖.....	45
圖 3-29 同一群組不同層級之物件定義.....	46
圖 3-30 同一群組不同層級之物件加工道次步驟.....	46
圖 3-31 同一群組不同層級間有相同材質之物件定義.....	47
圖 3-32 同一群組不同層級間有相同材質之物件加工道次步驟.....	47
圖 3-33 多組群組多層級之物件定義.....	47
圖 3-34 多組群組多重層級之物件層加工製程步驟.....	49
圖 3-35 簡化後的多群組及多層級之物件道次加工步驟流程圖.....	49
圖 3-36 物件道次加工法則流程說明.....	51
圖 3-37 不同輪廓斜率及不同加工厚度改變所產生的加工誤差[40]..	53



圖 3-38 層加工所產生之階梯狀誤差示意圖.....	53
圖 3-39 階梯狀誤差與切層斜面及切層厚度關係圖.....	54
圖 4-1 傳統 LOM 製程之工件與廢料示意圖.....	57
圖 4-2 加工層中之物件與廢料區之輪廓形狀.....	58
圖 4-3 加工層中具有空區域之物件定義.....	58
圖 4-4 加工層中添加支撐材料之物件定義.....	59
圖 4-5 加工層中無支撐材料之物件道次加工步驟.....	59
圖 4-6 加工層中具支撐材料之物件道次加工步驟.....	59
圖 4-7 RP 製程建構工件的幾個支撐問題.....	60
圖 4-8 葫蘆工件所需建立支撐結構圖.....	61
圖 4-9 具圓形中空開口工件的輪廓斷面剖面圖.....	61
圖 4-10 具圓形中空開口工件的物件示意圖.....	62
圖 4-11 空區域內並無為填滿支撐物件.....	63
圖 5-1 案例模型圖.....	66
圖 5-2 葫蘆件之支撐結構圖.....	67
圖 5-3 葫蘆工件之各切層剖面圖.....	68
圖 5-4 葫蘆件第 100 切層之 2D 物件定義圖.....	71
圖 5-5 葫蘆件第 100 切層之物件加工製程步驟.....	71
圖 5-6 葫蘆件第 100 切層之物件加工製程簡化步驟.....	72
圖 5-7 B <sub>1121</sub> 物件道次加工示意圖.....	73
圖 5-8 A <sub>1110</sub> + A <sub>1120</sub> 物件道次加工示意圖.....	74
圖 5-9 B <sub>1100</sub> 物件道次加工示意圖.....	75
圖 5-10 A <sub>1000</sub> 物件道次加工示意圖.....	76
圖 5-11 四組物件道次加工之物件生成圖.....	77
圖 5-12 葫蘆成品圖.....	78

圖 5-13 中空球件兩種支撐結構模型圖及切層剖面圖.....	79
圖 5-14 中空球件之各切層剖面圖.....	80
圖 5-15 中空球件第 100 切層之 2D 物件定義圖.....	82
圖 5-16 中空球件第 100 切層之物件加工製程步驟.....	83
圖 5-17 中空球件第 100 切層之物件加工製程簡化步驟.....	84
圖 5-18 $C_{31}$ 物件道次加工示意圖.....	85
圖 5-19 $B_{10} + B_{20}$ 物件道次加工示意圖.....	86
圖 5-20 $B_{10} + B_{20}$ 物件道次加工示意圖.....	87
圖 5-21 三組物件道次加工之物件生成圖.....	88
圖 5-22 的中空球件成品圖.....	89
圖 6-1 內部具圓球中空葫蘆件之剖面的 Bridge 結構圖.....	90
圖 6-2 內部具圓球中空葫蘆件之剖面的水溶性支撐結構圖.....	91
圖 6-3 Bridge-LOM 製程製作之中空球件實體圖.....	92
圖 6-4 M-M LOM 製程製作之中空球件模擬示意圖.....	92

## 表 目 錄

表 1-1 各類 RP 系統製作功能性元件優缺點比較.....	10
表 6-1 M-M LOM 製程、Bridge LOM 製程和 LOM 製程之比較表.....	93



# 第一章 緒論

## 1-1 前言

快速原型(Rapid Prototyping)系統發展至今，已廣泛被工業界接受和使用。此技術具有工時短，精度佳，加工路徑不受限制等優點，能快速且精確製出原型物件，特別適合應用在工業設計及製造產業中，生命週期短，少量多樣的產品。其原型製品可作為產品設計的外型驗證、功能測試以及輔助模具開發之用，因此可迅速地輔助產品進行開發與降低開模製作時可能發生之錯誤風險，有效縮短開發的時間與降低成本，使得產品更具競爭力。

快速原型技術是利用層加工之概念，利用一個 3D 的物體沿某一軸將其層層切片，可產生具有厚度的 2D 薄片，反過來說，若能製造出此 2D 之物體，將其堆疊，就可產生一個 3D 的實體。當層厚很薄時，立體原型和電腦所繪製的 3D 模型誤差將會很小，可利用層厚來控制精度，再加上屬於“加料”製程而並非一般傳統的“減料”製程，所以此技術可製作出任意複雜形狀或具細微結構之工件。

然而，對於新世代之快速原型技術的發展而言，RP 不再只是快速製作原型的代名詞，而有一全新名詞，稱為快速生產或快速製造。因此如何跳脫以往只侷限於製作外觀參考的原型，而能快速製作具功能性元件(Functional Parts)，如嵌入件(Insert)、組零件(Assembly)、及具有多種材質 (Multi-Material) 之原型，乃目前快速原型技術的重要研究課題。

## 1-2 快速原型技術簡介

快速原型技術自 1988 年第一台商業機種問市後，即在世界各地形成一股旋風，工業界、學術界、醫學界等莫不紛紛投入人力、財力與物力應用或研發此一被號稱“二十一世紀 CNC 工具機”之最新科技。快速原型技術與傳統加工程序，如塑膠射出成型、鑄造、衝壓成型等，或如車床、銑床等機製加工的方法不同，比較之特點為：

- i. 加工是一種加層行為，不需擔心刀具路徑。
- ii. 無需使用夾具等模、治具，除節省成本，也減少加工前的準備時間。
- iii. 對於小數量多樣之生產需求，經濟效益顯著。如圖 1-1[1]所示，圖中之“其他成型技術”，包括塑膠射出成型、鑄造、衝壓成型等，或車床、銑床等機製加工的方法。

快速原型之應用包羅萬象，目前不僅工業上之應用很多，更推展至醫學、藝術、地理資訊及人文科學等。若以現今應用最成熟之工業原型與模型為例，大抵應用在供設計驗證之概念原型(Concept Model)上，至於作為功能評估用之實物模型因要求較高之強度及硬度，只有極少數的機種適用。然而若以快速原型機器之昂貴價格僅達此概念原型之應用，則其適用性必然受限。再者，由於近年來市場上之產品生命週期愈來愈短，企業界務必使用快速原型技術將產品開發之時程縮短，以提高產品競爭力與市場佔有率。所以快速原型技術除了要提供快速正確的外形樣品外，更要能使之具有功能性，才能使快速原型技術的應用更為廣泛。

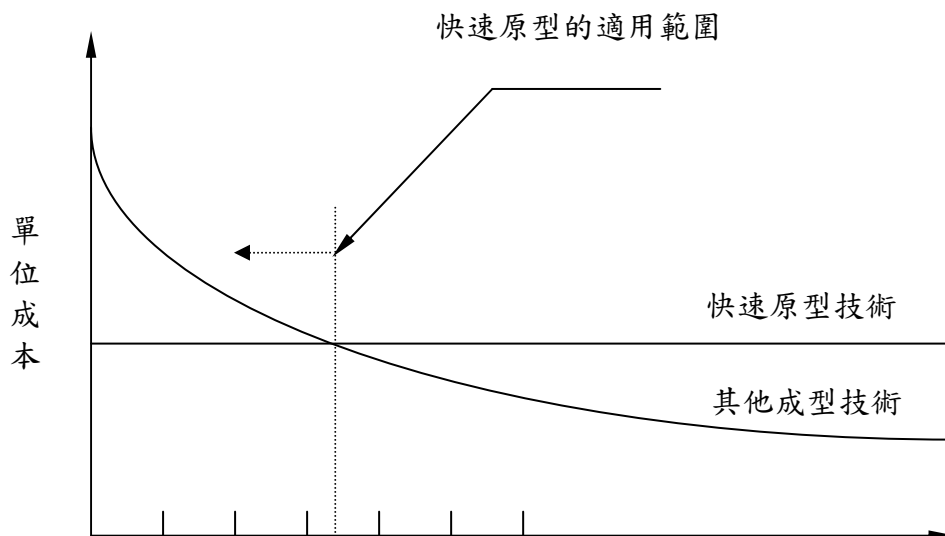


圖 1-1 快速原型與其他成型技術之比較[1]

### 1-2-1 快速原型原理



當初步設計的概念用電腦 3D CAD 完成後，傳統上是用手工或機械式的方式，根據二維加工圖，將原型製造出來，這種方式須進一步設計夾具或模具。整個過程常花費許多人力及物力，若製造出來之原型顯示出錯誤，則整個過程勢必重新再來。若使用快速原型技術，則可將 3D CAD 上之三維立體圖型與一層層之二維平面相交集。交集之結果即得一疊二維之幾何數據，每一片表示三維立體圖形之截面。接下來，電腦取出最底端的一片幾何圖型，作為電腦定位控制之用，將能量源及原始材料傳至工作面，把原料加在幾何圖形所指示的位置上；依此程序，由底端至頂端，逐片把原料填上而結合在一起，完成後即可取出所製成之立體原型。理論上，當一層層的二維薄片很薄時，立體原型和原來電腦所建立的立體幾何圖型會一模一樣。其工作原理如圖 1-2[1]所示。

圖 1-2 所示不同的材料供應方式，換言之，就是快速原型分類的依據，分別有粉末、液態樹脂、固體材料三大類。圖 1-2 所示的能量源大部分使用雷射，亦有使用噴嘴、刀子或其他能量裝置等。藉由能量裝置與材料之間的相互作用，形成不同的成品模組。

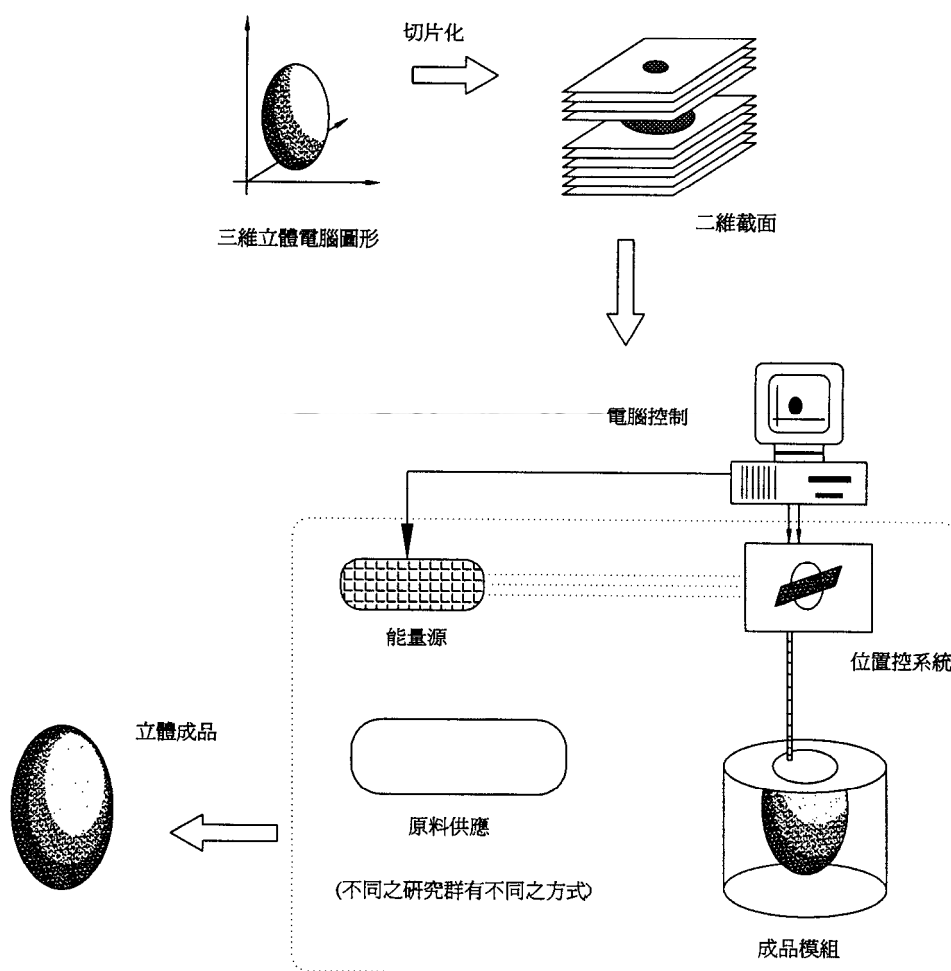


圖 1-2 快速原型技術的原理[1]

## 1-2-2 快速原型技術分類

快速原型技術亦可稱為加料製程技術(Material Increase Manufacturing)，或層加工技術(Layer Manufacturing Technology)，或實體自由成型技術(Solid Freeform Fabrication)，這是因為它的加工方法有別於傳統之去料加工法，如車床、銑床、磨床、鉋床等，快速原型是採用將材料層層添加堆積而成。一般而言，快速原型可依使用的材料分成粉末、液態樹脂、固體材料三大類[2-4]，各有其不同之特長及應用領域，如圖 1-3 所示。在粉末方面，有 DTM 公司的 Selective Laser Sintering(SLS)、MIT 大學發展的 3D Printing、德國 EOS 公司發展的 EOS/P 與 EOS/M 系列。粉末製程是目前最被看好的技術，因為任何可製成粉末的材料均可用這種方式製作，由於它可以直接製作金屬件，利用這種特性可將它應用在快速模具(Rapid Tooling)上，翻製大量生產用之產品，延伸了快速原型的應用領域。在液態樹脂方面，目前投入的廠商數量最多，市場佔有率也最多，其中又可分為液態光硬化樹脂(Photo Polymer)及溶化固化型(Melting + Solidification)兩類。利用液態光硬化樹脂較為知名的廠商有美國 3D Systems 公司的 Stereolithography Apparatus(SLA)、以色列 Cubital 公司的 Solid Ground Curing(SGC)、日本 NTT-CMET 公司的 Solid Object Ultra-Violet Laser Printer(SOUP)等；利用噴嘴技術的廠商有美國 Stratasys 公司的 Fused Deposited Modeling(FDM)、美國 3D Systems 公司的 Thermo Jet Modeling、美國 Perception Systems 公司的 Ballistic Particle Manufacturing (BPM)等。在固體材料成型方面，一般是使用片狀材料黏著 (Gluing Sheets)的方式加工，從加工原理看來，任何可製成片材的材料均可用這種方法，但因為能量裝置、廢料剝除及工件定位等因素的限制，目前大都使用紙張為主，較為知名的廠商有美國 CUBIC 公司的薄片積層法(Laminated Object Manufacturing, LOM)、日本 KIRA 公司的選擇性黏著與熱壓法(Selective Additive and Hot Press, SAHP)，目前新加坡 KINRGY 公司亦有與 LOM 相似的 Zippy 機器，但可能因為專利問題而無法



在國際上行銷。圖 1-3 是目前已商業化及正在開發中之快速原型機器分類圖，由此可知目前世界先進國家均大力發展這種被喻為二十一世紀的 CNC 機器。

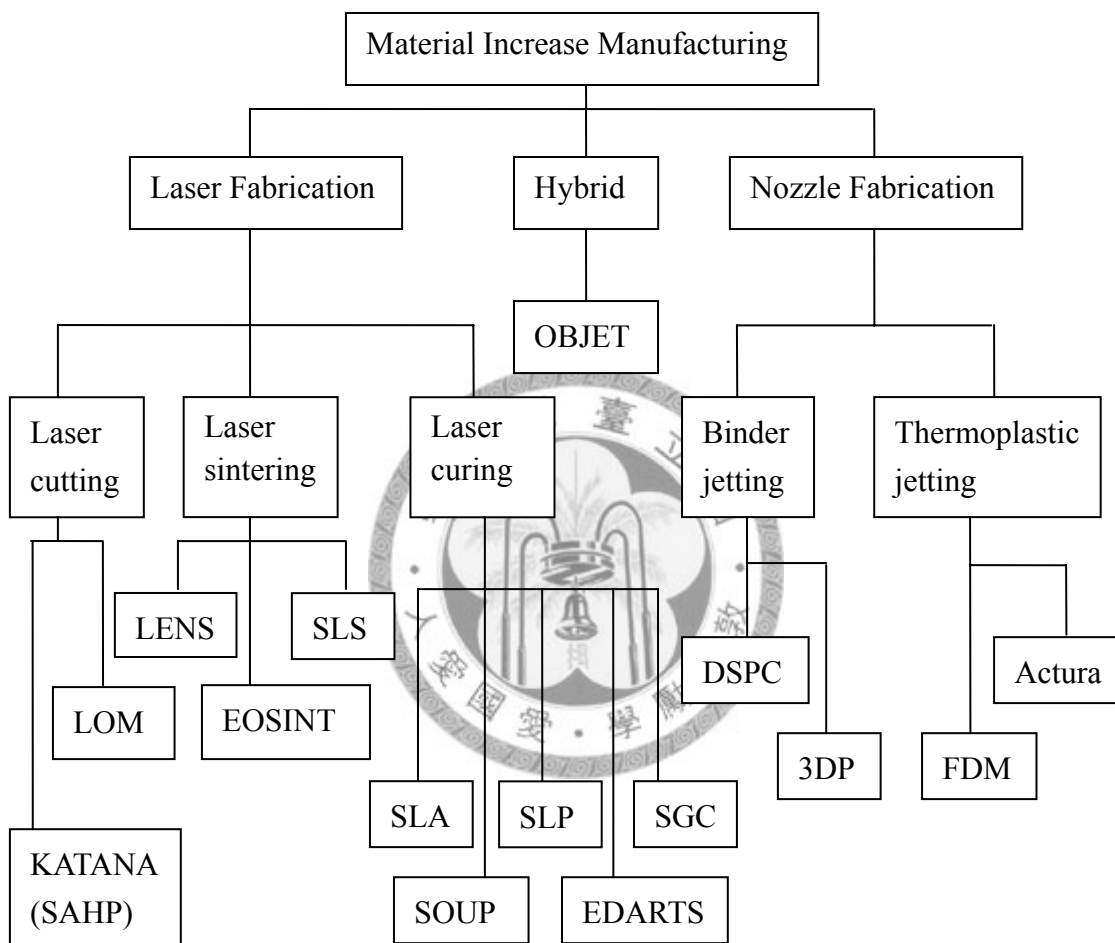


圖 1-3 目前已商業化之快速原型機[2]

### 1-3 功能性原型件製作之文獻回顧

目前商業及發展中的快速原型系統中，已有許多案例針對製作功能性之元件進行深入研究，因其不同的原型製程技術與積層材料特性，各提出一些製作方案。

首先在液態樹脂為主的加工製程方面，Kataria 與 Rosen [5] 使用光硬化樹脂之快速原型法建構複雜之機構，針對 SLA 的各項加工特性，如支撐物設計、刮版與嵌入物之干涉問題、雷射遮影問題、嵌入物之幾何形狀、間隙裕度及幾何公差等問題，提出一系列之嵌入件的製程規劃方法，並建立一套多軸 SLA 快速原型機藉以拓展製作複雜功能件之領域。Kathryn 與 Kong[6] 及 Mavroidis 與 Kathryn, 等人[7]，利用光硬化樹脂快速原型製程中將機構元件置入，以達到一次(One-Step)即完成複雜功能或具連桿機構之原型件，如圖 1-4 所示為 SLA 製作之嵌入工件，同時也針對嵌入件與光硬化樹脂件間配合公差提出一些建議。此一技術被大量運用在機器手臂或是機器人之研發設計上。

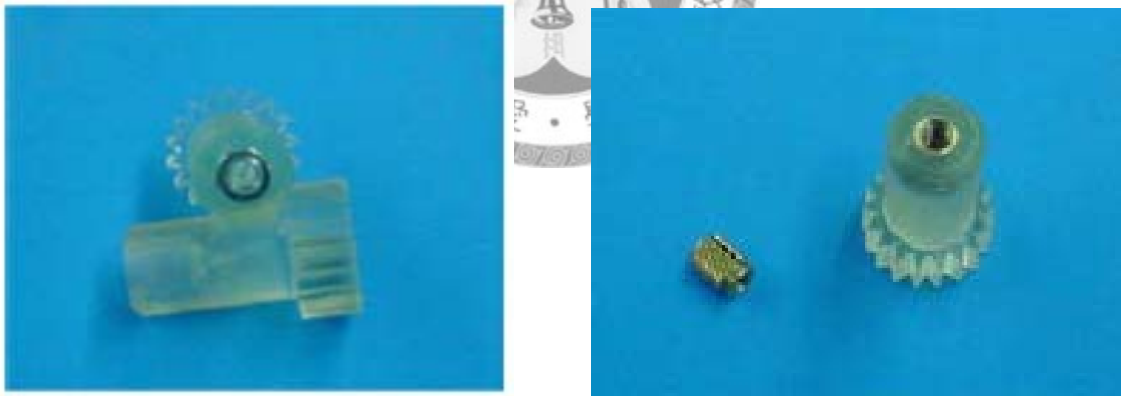


圖 1-4 SLA 製作之內含嵌入件原型[6,7]

因為 SLA 之光硬化樹脂材料限制只能製作高分子特性的原型件，大多利用嵌入製程方法來製作功能性元件，關於製作多種材料之功能件元件，有 Im 等人[8]，嘗試將不同顏色光硬化樹脂進行積層加工中，製作具多色彩之原型件以及 Im[9] 等人將其應用於多層電路版進行嵌入件製作。

關於噴嘴技術製程方面，Weiss 與Prinz [10]，利用具有加減料的SDM (Shape Deposition Manufacturing)原型技術達成製作多種材質或是具有嵌入件之原型。此系統乃是結合擠出式RP系統再結合一具五軸加工之銑刀系統，加工方式如圖1-5所示，首先利用擠出材質鋪層後，再利用銑削加工出複雜空孔，待嵌入件置入後，噴頭繼續擠出材質，完成包覆之目的。此系統具有很大的靈活性與加工精度，但在製作嵌入件時仍有幾點問題，如：擠出材料對嵌入件熱影響問題(因原料需加熱至融溶狀態)、材料擠出包覆嵌入件時空孔氣泡產生問題與敏感性嵌入件前處理之問題，且此系統需動用銑削加工機所以設備較為昂貴。Hatanaka 與Mark [11]即利用此方法，將彈性元件嵌入於原形中。FDM之快速製程技術目前研究著重於多種高分子材料之製程規劃與製作方法[12]與生醫工程之應用[13,14]，。

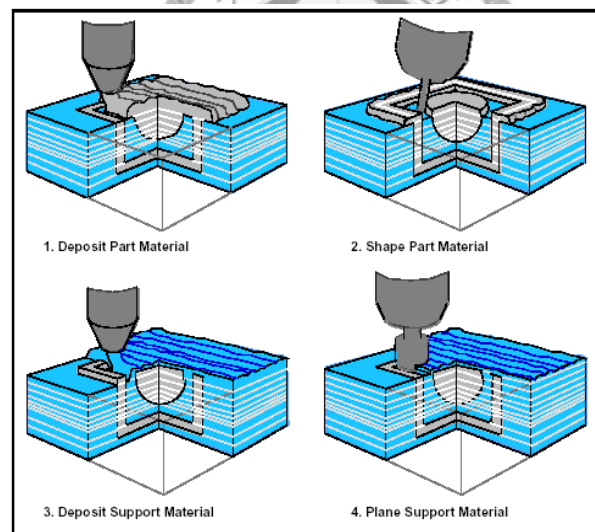


圖 1-5 SDM 加工製作方式[10]

在粉末系統方面，Liew [15]等人利用 SLS (Selective Laser Sintering) 製程方式，製作具雙材質之工件應用在生醫工程領域中。Hur [16]等人則嘗試以 SLS 製程方式製作嵌入件，並將其嵌入製程做初步的規劃與探討。

關於薄片積層法方面，因材料多樣化，可製作不同材質之原型件，因此有許多針對 LOM 製程應用材料的相關研究被提出。Klosterman [17] 等人以陶瓷和複合材料為研究對象，製作異種材質之原型件。Chi [18] 等人提出一種 Curved Layer LOM 以片狀金屬材料，來製作金屬原型，擴展了 LOM 的應用範圍。於製作上使用二種方法，第一是採用雷射切割已包覆銅的不鏽鋼片 (a Copper Clad Stainless Steel)，接著用不鏽鋼線予以定位，並用重物施壓固定，放於高溫爐中進行銅焊 (Brazing)。此法因廢料早已取出，所以無廢料剝除 (Decubing) 的問題，但卻不適用於倒勾之幾何，因倒勾之造型無法給予支撐，故支撐的問題仍存在其中。第二種方法則與目前 LOM 類似，先黏 (Bonding) 再切 (Cutting)，用夾具將最上層材料固定，再施以點焊 (Spot Weld) 予以結合，最後利用雷射切割最上一層。此法的缺點是不但在切割時易影響下一層且廢料剝除不易。Obikawa[19]、Bryden[20] 等人與 Lone Peak Engineering Inc.[21] 公司也接續以金屬材料進行積層，利用疊層方式再配合 CNC 機具進行 2D 輪廓切削方式，製作金屬工件及模具。

上述這些研究皆為製作具功能性的元件而採用高強度材料，但卻使得廢料剝除的問題更加困難。因此 Chiu [22] 等人發展快速原型-層狀成形方法之線上撥料製程，提出 Bridge 建構法可線上撥除大部分的廢料，並製作出金屬工件，接著 Liao [23] 等人則利用 Liao 與 Chiu[24] 所發展之新式線上撥料積層法，配合所提出的嵌入件製作法則，進行嵌入件製作。

此外，關於其他 RP 製程方面，Song 與 Park [25] 則利用噴嘴與沈積混和技術製作具雙材質的金屬元件，Zhou[26] 等人則研究在製作多種材料元件時，工件模型中材料資訊擷取方法與切層的處理。

綜觀上述，所謂以嵌入製程進行功能性元件的製作方式，一般都是在進行積層加工製程中，將異種材質零件置入原型物件裡。但嵌入製程並非如此簡單，皆過於複雜，尤其當進行線上嵌入製程時，常因干涉、雷射遮影及定位支撐等問題不易完成，且需以手動方式再加入相關配套措施，才能完成，相當耗時與費力。

其次，若利用快速原型系統直接製作多材質之功能性元件，會侷限於原型系統的製程或是材料的限制，因此，大都只能製作單種材質元件，難以製作具多樣材質的功能元件，而 FDM 與 SDM 由於噴嘴的限制僅能以高分子性質之材料為主，不易製出金屬或陶瓷等高強度材料之元件。表 1-1 列出各類 RP 系統製作功能性元件之優缺點比較。

表 1-1. 各類 RP 系統製作功能性元件優缺點比較[2,3,4]

各種快速原型系統	製程特色	材料特點	製作多材質工件之優劣點
SLA	<ol style="list-style-type: none"> <li>液態樹脂成形</li> <li>需建支撐結構</li> <li>系統精度高</li> <li>價格高</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>液態樹脂材料</li> <li>工件強度普通</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>單一物種材料</li> <li>原料污染問題</li> </ol>
FDM	<ol style="list-style-type: none"> <li>噴頭擠製</li> <li>需建支撐結構</li> <li>精度可</li> <li>價格中上</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>高分子材料為主</li> <li>工件強度一般</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>噴嘴擠製容易加工</li> <li>高分子材料物性相近，差異不大</li> </ol>
SDM	<ol style="list-style-type: none"> <li>噴頭擠製+銑削加工</li> <li>製程彈性大</li> <li>精度高</li> <li>適合微小工件</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>高分子材料為主</li> <li>工件強度一般</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>噴嘴擠製容易加工</li> <li>加工系統複雜</li> <li>材料選擇性不大</li> </ol>
SLS	<ol style="list-style-type: none"> <li>粉末材料積層</li> <li>自我支撐</li> <li>精度佳</li> <li>價格昂貴</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>粉末材料具多樣性(金屬、陶瓷、高分子)</li> <li>工件強度佳</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>各種粉末材料不易進行積層互換</li> <li>高強度材料需另進行燒結處理</li> </ol>
LOM	<ol style="list-style-type: none"> <li>薄片方式積層</li> <li>自我支撐</li> <li>價格低廉</li> <li>適合大型工件</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>薄片材料具多樣性(金屬、陶瓷、高分子)</li> <li>工件強度好</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>薄片物料多元容易取得</li> <li>積層製程易發生干涉現象</li> <li>廢料不易撥除</li> </ol>

## 1-4 研究動機與目的

由上述可知，已有許多快速原型製程，朝向製作功能性元件發展，但大部分是以不同材質之零件嵌入 RP 原型，製作具功能性的組套件，鮮有以製作具多種材質之功能性組套件。以薄片積層法為主的快速原型系統，其積層材料具多樣性，如紙、塑膠、金屬、複合材料和陶瓷等都可作為加工材，若能克服廢料難以剝除的困擾，極適合製作具多樣性材質的功能件。

鑑於薄片積層法製作多種材料之元件有極佳潛力，因此本文將以此製程為基礎，發展一套可製作多種材料薄片積層之快速原型之新製程，可應用於多種材質的功能元件製作，依據此製程方法也可在兼顧工件精度下，提供幾種不同厚度的薄片材料，可有限度的變化積層厚度，減少積層數目，增加工作效率。此外為解決廢料剝除的困擾，製程中將發展獨特的支撐結構，可使廢料更易剝除。



## 1-5 本文內容

本文將提出一新式快速原型系統-具多種材料的薄片積層法之製程規劃以及獨特的支撐結構建立方法，開發多種材質的功能性元件的積層加工製程，以拓展快速原型的應用範疇，並以模擬方式來驗證新製程的可行性和正確性。

論文內容大綱如下：

第一章 緒論。

第二章 薄片積層法相關原理。詳述薄片積層法的加工原理及其優缺點，並介紹各種廢料剝除方法與優劣。

第三章 多種材料的薄片積層法製程。詳述具有多種材料之薄片積層法製程步驟與獨特的物件加工流程演算方法，並探討可變層厚之積層加工效率。

第四章 多種材料薄片積層法之支撐結構建構法與簡化方式。詳述多種材料之薄片積層法獨特的支撐結構建立方法與簡化支撐結構之。

第五章 模擬驗證。利用兩組工件案例，詳細說明其製程流程的可行性與正確性。

第六章 結果與討論。將模擬驗證所得結果進一步探討，以多種材料積層新製程與 Bridge-LOM 製程製作內部具有圓球之中空葫蘆件之不同支撐結構進行比較與探討，並討論新製程特色與加工效率。

第七章 結論與未來展望。



## 第二章 薄片積層法相關原理

薄片積層法是快速原型製程技術中之一種方法，主要是以片狀材料(如各類紙張或是金屬薄板)作為積層材料，各層經適當切割後再加以黏合固定，可快速地製出原型工件，因此本章節將詳述薄片積層法之加工原理，將其相關製程之優劣做進一步探討。

### 2-1 薄片加工法(LOM)之加工原理

一般典型 LOM 是採用紙張作為原料，因為紙是採用木材製成的，所以 LOM 的成品與木製品非常相似，圖 2-1[27]是加工原理示意圖。LOM 屬於加料方式(Additive Method)及減料方式(Subtractive Method)的一種混合加工，這是與其他 RP 機器，大都採用加料方式加工最大不同之處。其加工流程如下：

STEP 1：紙張往前推進，直到覆蓋整個工作台為止。

STEP 2：床台上昇接觸到紙張，碰觸到 Z 軸的極限開關(Limit Switch)以控制一定的高度。

STEP 3：接著同時進行兩個動作。軟體方面計算 STL 檔與某一水平面之交集，以求出輪廓線。硬體方面則將熱滾筒滾壓，使紙張結合。

STEP 4：光學透鏡將雷射光聚焦在紙張上，將紙張切割成四邊形框，形成一個外圍(Wall)，使紙張分成加工範圍與連續送紙之邊緣。

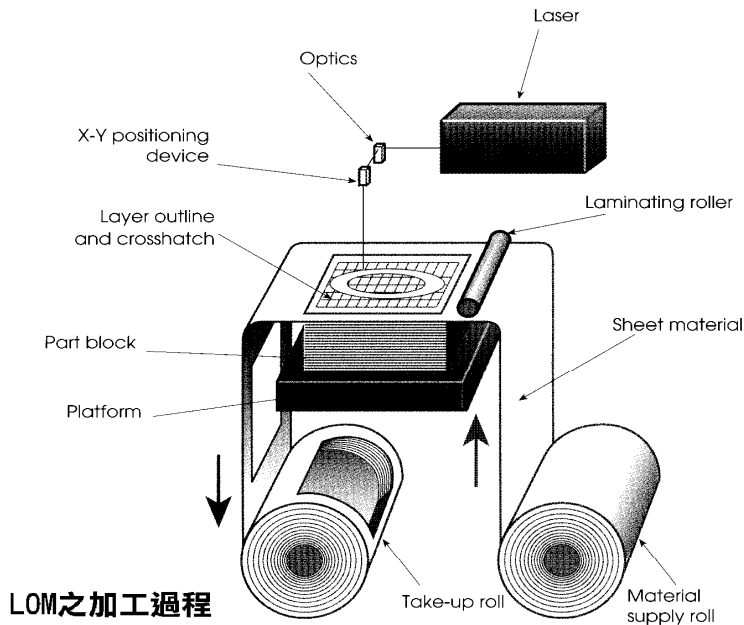
STEP 5：雷射依照工件外形輪廓切割，切割厚度剛好為一張紙之厚度。

STEP 6：外形輪廓與外圍(Wall)之間，雷射切割成十字交叉形(Crosshatch)，使廢料容易剝除。

STEP 7：床台下降以利紙張前進。重複 Step1~7 至工件完成。

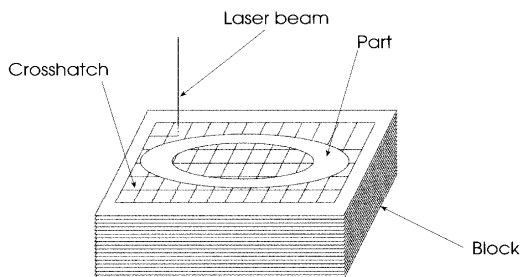


STEP 8：將整塊積層物件取下，並將廢料小心剝除後取出原型工件。

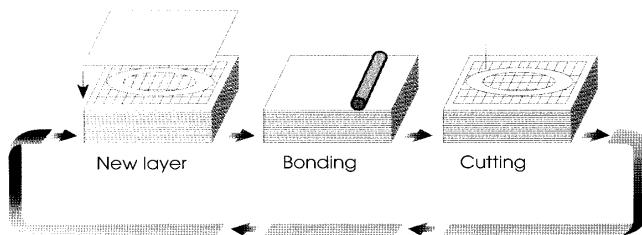


**LOM之加工過程**

首先將CAD檔案讀入LOM的系統軟體之中，LOM軟體會將它切成一片一片的組合斷面

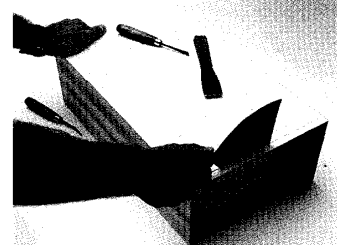


雷射切割第一層断面外型，其他的廢料部分則切割成許多小塊狀，以利切除

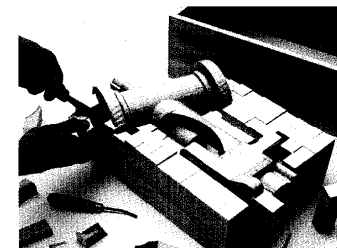


將新的一層黏著在已切割好的材料上，接著根據新的断面切割，重複相同的程序，當工件完成後，再去除多餘的材料，並做精加工處理

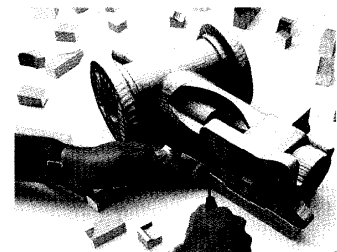
**LOM 與支撐物之分離方式**



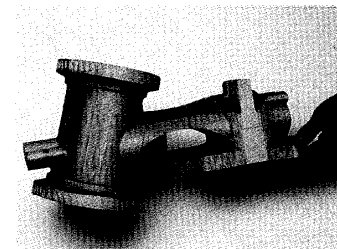
將整個物體從工作台上取下



將LOM物件從外框取下，露出許多小方塊



將小方塊取下，露出LOM物件



接著將表面作噴砂，拋光，塗漆等表面處理

圖 2-1 LOM 加工原理示意圖與廢料剝除步驟圖[27]

依據加工原理看來，LOM 可以使用任何片狀材料，因此紙張、塑膠、陶瓷及複合材料均可，目前應用最多的仍以紙張為主，因為其他種類的材料大都需加裝附屬配備，如排渣裝置等等。

LOM 的應用範圍有：航太工業、汽機車工業、消費性產業、醫工產業及藝術應用等等。由於 LOM 製作的原型工件具有良好的強度，因此在設計評估及功能測試方面，亦有很廣之應用。除此之外，將 LOM 與其他技術整合後，可以應用在量產用的快速模具上，大致上分為下列幾種：矽膠模(Silicon Rubber Mold)、脫蠟鑄造(Investment Casting)、翻砂鑄造(Sand Casting)、金屬噴塗(Metal Spraying)、真空成型(Vacuum Forming)、樹脂模具(Epoxy Tooling)等等。



## 2-2 薄片積層法廢料撥除效率相關製程之優劣點探討

LOM 是採用層加工法和先黏結再切割 (Bond-then-Cut) 的製程，擁有定位精確的優點，而且以具有熱融膠之紙材為主要材料，使得工件製作的成本大幅降低。然而此製程仍具有不少缺失和困難度，單層紙材在工件部分以雷射切割完畢後，會對其餘廢料作十字切割，依此方式，雖然廢料在加工過程中具有“自然支撐”工件的功能，如圖 2-2，但卻造成後處理的困難，因為廢料必須以人工手動方式進行剝除，使得後處理費時、費力而不符合經濟成本，甚至容易誤傷工件，且廢料包覆在工件之中無法或不易取出（如空心球、花瓶）時，則 LOM 製程的幾何造形能力大受限制。因此，廢料剝除是一相當重要的問題。

另一種薄片積層法的製程 KIRA 公司的 SHAP，在積層的黏結製程中是採用選擇性的黏著，將工件區域產生黏膠，廢料區則無黏膠，因此在剝除工件外部區的廢料就變的即為容易，但在工件內部區域或中空處的廢料，仍不易處理。

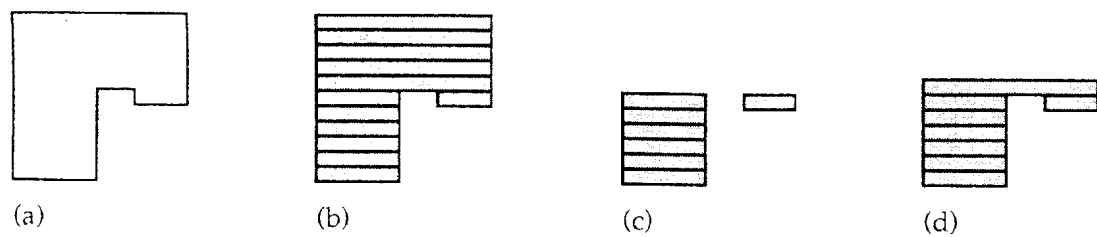


圖 2-2 光硬化樹脂製程建構工件所遭遇的支撐問題，LOM 則無此困擾，（a）工件側視圖，（b）切層後的結果，（c）製作過程中產生孤島(Island)，（d）隨後的層加工產生橋接(Bridge)

Burns[28] 等人提出一個新的積層法“偏移製程”(Offset Fabbing)，方法如圖 2-3 所示，在支撐平台(Carrier)上將薄層材料切割出所需的輪廓，再將此層材料載至堆疊中的工件相黏結，而多餘的廢料則隨著平台的撕離而撥離。此製程雖然擁有自動剝料功能，但卻存在一個問題：某一層的面積較上一層面積減少時，無法將廢料撥離。以圖 2-4 為例，圖(a)中灰色區域為欲堆疊之層，其在平台上切割如圖(b)，黏結則如圖(c)所示，當平台從工件上撕離時，廢料則會如圖(e)所示依然留在工件上，而非圖(d)中的情形，原因在於層與層中會相黏結，故其中一層的面積較上一層面積減少時，廢料將無法被帶走。因此，此製程僅適合工件截面積為定值或不斷增加時使用。

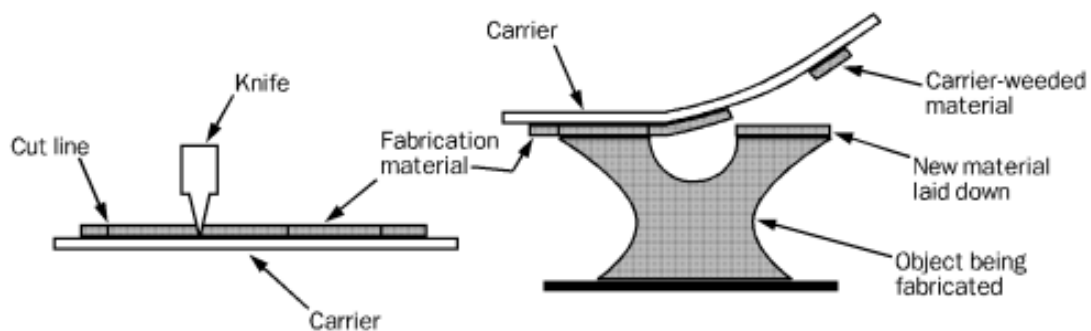


圖 2-3 偏移製程[28]

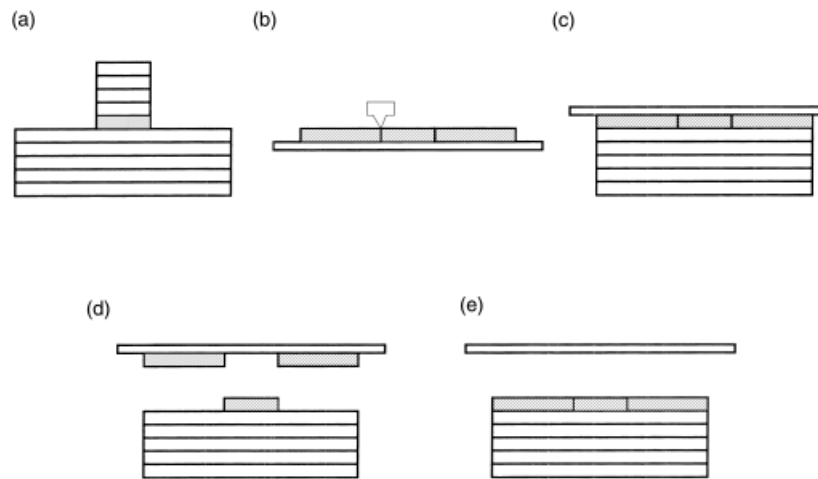


圖 2-4 偏移製程的缺點[28]

Klosterman[29]等人、Klosterman [30] 及 Klosterman [31]等人為了改善廢料撥除的問題，提出了兩個策略：適應性十字切割（Adaptive Cross-hatching）和適應性表面燒結（Adaptive Surface Burning），如圖 2-5 之（a）（b）。前者利用切割單元（刀子、雷射）在工件與廢料重疊面積的區域（Overlap Zone）做十字切割，後者利用雷射非常密集地在廢料重疊面積的區域處燒結，兩種方法皆為降低工件與廢料接觸之間的結合強度。一般說來，廢料剝除的難易與否係依據接觸面的結合強度的差異性而定，在連續兩層之間的工作與廢料的重疊面積部份，以較細的十字切割法則(Fine Cross-hatch)或較多的雷射表面燒結（Adaptive Surface Burning）都能有效降低接觸面積，減少工件與廢料之間的結合強度。不過，此二方法會造成重覆的加工路徑，因此並不是一種很有效率的方法，除此之外，過於密集的雷射切割，造成很大的熱影響層，使得工件的強度及精度受到很大的影響及限制。

Liao 與 Chiu[32]提出之適應性十字交叉形切割方法，乃根據不同的工件幾何型態給予適當偏置量(Offset)，藉由偏置量之定義將廢料區分為內外兩部分，外部區域選擇較大之十字切割值，以降低雷射加工時間，內部區域針對工件幾何形狀進行分類，提出較細的十字切割設定方法，使廢料撥除容易，並利用投影面積法檢查偏置量範圍之外發生重疊之區域，使用與偏置量範圍內相同的十字切割，可使得整體廢料更順利撥除。

Huang 與 Wang [33] 以控制雷射的功率來使廢料剝除容易些，其在廢料區以較大功率的雷射切割，而在工件區則以較小功率的雷射切割，此方法為降低工件與廢料接觸之間的結合強度，但仍需以人工剝除。

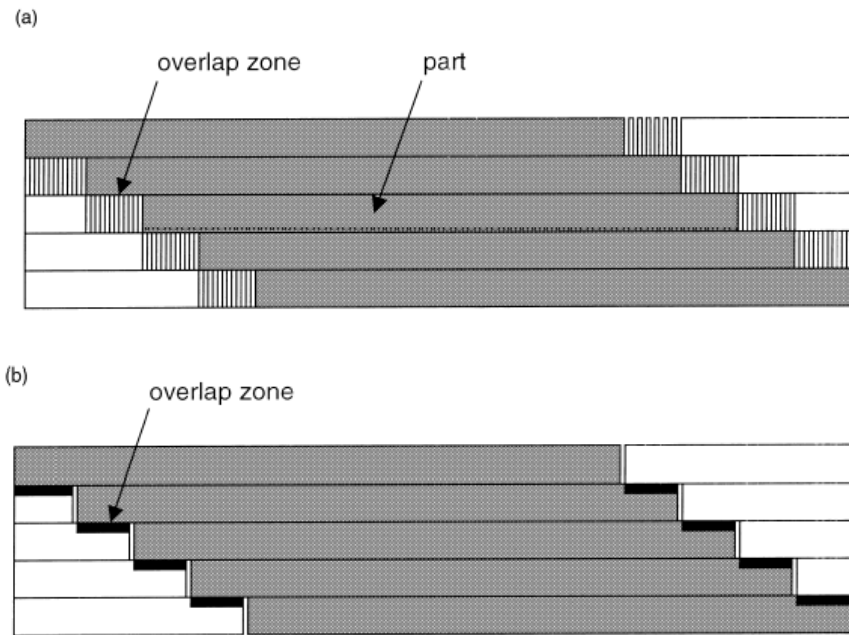


圖 2-5 降低黏結強度的方法 (a) 適應性十字切割 (b) 適應性表面燒結[31]

Cho 和 Lee [34] 等人提出了新式層狀積層法 (new sheet deposition type rapid prototyping system)，工作原理如圖 2-6 新式層狀積層法所示，(a) 第一次切割，(b) 廢料剝除，(c) 平台上升，(d) 黏結，(e) 第二次切割，(f) 平台下降，依 (a) ~ (f) 的程序完成一層加工，當所有層數堆疊完成即可獲得工件。製程中，採用 Hur 與 Lee [35] 所提出之支撐演算法來克服因廢料剝除產生工件無法支撐、定位的問題。此製程可有效解決廢料剝除的問題，但卻有兩個新問題產生：(i) 為先切割後壓合 (cut-then-bond) 製程，會喪失工件的定位精度，且會隨層數的增加，累積的定位誤差更嚴重；(ii) Z 軸支撐演算法為在 Z 軸方向建立支撐，但廢料仍太多且在許多造形中並無法使用。

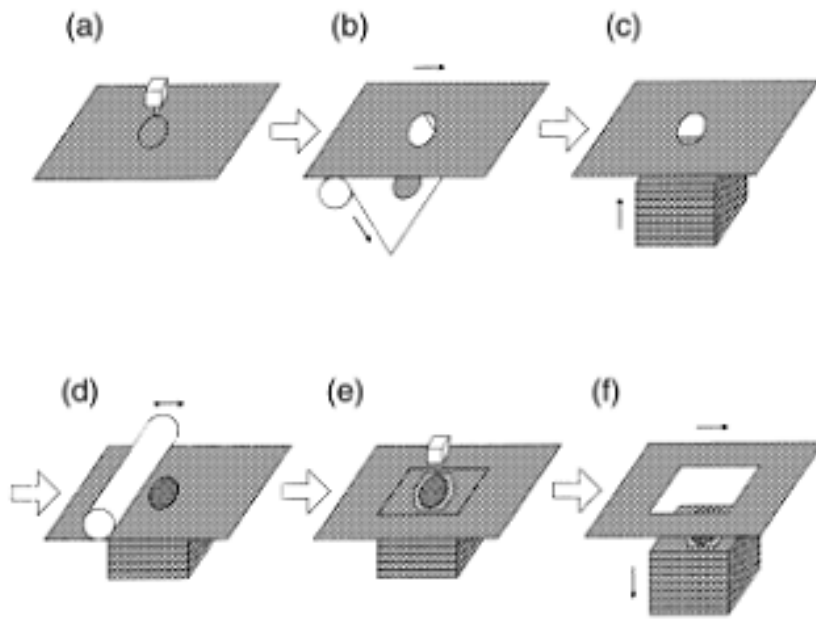


圖 2-6 新式層狀積層法 (a) 第一次切割，(b) 廢料撥除，(c) 平台上昇，(d) 黏結，(e) 第二次切割，(f) 平台下降[34]

其中 Hur 與 Lee[35] 所提出之支撐演算法乃是針對特別的薄片積層法，自動演算產生合適支撐結構。由於特別的薄片積層法製程製作工件時，會在加工製程中去除大部分的廢料，產生類似一般無廢料區的 RP 系統，例如 SLA、FDM 等製程皆因無廢料區域，故需額外建立支撐結構，避免工件因無支撐結構而產生翹曲、陷落與變形等問題。因此，此演算法將需要建立支撐區域以投影方式形成支撐結構，而薄片積層法是以面積方式成形工件與 SLA、FDM 等 RP 系統以點對點方式形成工件，並不相同，自然對於簡化支撐結構之設定會有不同的考量。

Chiu 等人[22]將材料定位在同一 XY 平面先切割而後黏結，並提出 Bridge 建構法則來針對線上剝料後的局部工件做支撐，如此可達到線上剝料且不會有累積誤差的發生。但此製程仍存在著 Z 軸的定位誤差，且建構法則只考慮工件的外圍輪廓，對於一些工件因內輪廓的自重而發生撓曲的情形則沒有加以探討。

Liao 與 Chiu [24] 針對 LOM 的缺點提出新的製程—線上自動撥料製程以及輔助支撐演算法 (Bridge-Supporting Algorithm)，以期能夠達到線上剝除大部分之廢料，進而解決 LOM 製程的幾何形狀限制和減少後處理的時間。

綜合以上所述，茲將薄片積層法和目前的研究所產生的問題整理如下：

1. 以先黏結後切割的方式堆疊工件會產生廢料剝除困難的問題，且許多造形（中空件、花瓶件）將難以製作出來。
2. 以先切後黏的方式堆疊工件雖然可在工件製作完成前將廢料剝除，但卻會有累積定位誤差的問題，且需發展支撐工件的機制，如 FDM 與 SLA 和製程的支撐結構。
3. 材料具多樣性，但使用強度較佳的材料如金屬、陶瓷等，雖然可拓展薄片積層法製程的應用，但卻受限於廢料剝除的困難而大受限制。

因此可知薄片積層法製程具材料多樣性，可製作金屬、陶瓷等高強度之材質元件，但卻也受限於廢料剝除的問題而大受限制，因此，如何從中利用薄片積層特點製作不同材質物件並處理廢料或是支撐結構的問題，是下章節主要的研究重點。

## 第三章 多種材料之薄片積層法製程

理論上，任何薄片材料都可使用在薄片積層法的快速原型系統內，如紙、塑膠、金屬、複合材料和陶瓷等，但薄片積層法因製程之限制，僅能製作單一材質的原型工件。為了要拓展薄片積層法製程中材料可多樣性的特點，因此本研究提出“多種材料之薄片積層法”(Multi-Materials LOM)新式製程，期能應用於多種材質的功能性複合元件的製作，也可依工件要求的階梯狀精度誤差下，提供幾種不同厚度的薄片材料，選用合適厚度的薄片材料進行積層，減少薄片積層數量，增進製程的加工效率。本章提出多種材料之薄片積層法製程進行詳細的介紹並探討步驟及流程。

### 3-1 多種材料之薄片積層製程步驟說明

傳統的薄片積層加工法，僅製作單一材質的原型工件，故製程較為簡單，只需將實體模型轉成 STL 檔案然後進行簡單的切層處理，再進行薄片積層加工步驟即可。然而若要進行多種材料的積層加工，則除需考慮多種材料的送料方式外，對於積層方法以及相關層加工步驟皆需要有通盤考量，才能順利完成多材料工件之製作，因此如何提出合適的新式積層加工製程流程，是首要研究工作。

圖 3-1 是一般傳統 LOM 製程之流程圖。首先將 3D 模型輸入電腦中進行切層處理(此切層厚度為一層片狀材料厚度加上一層黏膠厚度)，即可得所需之固定厚度的 2D 輪廓加工圖層。接著將新的薄片層送入平台與已切割好的材料進行黏著處理，然後根據新的斷面進行切割，重複相同的程序，當工件完成後，再除去多餘的廢料，並進行精加工處理。多種材料之薄片積層法的新式製程乃是針對傳統薄片積層法製程只能進行單種材料加工而提出的改良製程，為能克服原製程的限制與缺點，除在層加工製程前則需特別將立體模型進行特殊切層處理以及單層物



件演算外，同時也利用先年後切再黏兩次切割方式以達成多種薄片材料的積層製作，圖 3.2 所示，即為多種材料之薄片積層法製程之流程圖。多種材料的薄片積層加工製程是以 CAD 軟體分別將多種材質的 3D 模型繪製後，依固定切層厚度（此切層厚度為一層片狀材料厚度加上一層黏膠厚度）將每種材質的立體模型各別地進行切層，即可得到各種材質的 2D 的輪廓圖檔，若圖檔內具有多組輪廓則需再進行分層處理，將其拆解為每切層僅有一組輪廓（物件）的切層物件。

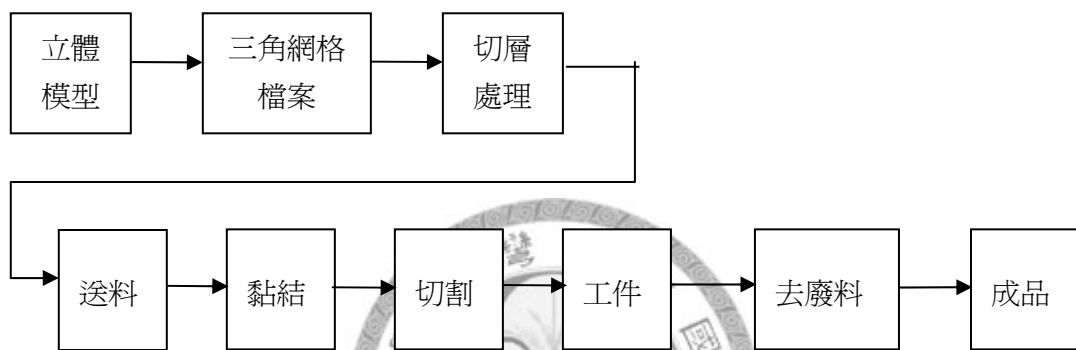


圖 3-1 傳統 LOM 製程之流程圖

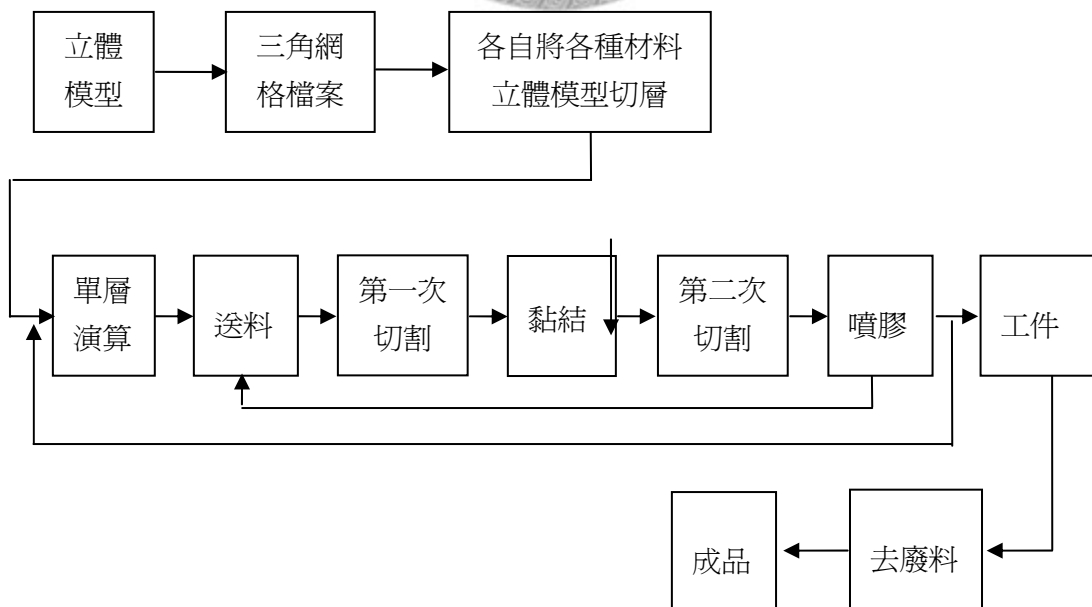


圖 3-2 Multi-Material LOM 製程之流程圖

經特殊切層處理，然後將同加工切層中所有的單物件（輪廓）切層面進行布林運算，即可定義物件種類與群組、層級關係，再經由物件積成加工順序演算法後，可決定每切層物件的道次加工的路徑順序（依物件加道次工數量，後續說明之）。因此，每一切層可能會產生數種不同材料的薄片依序進行加工，每種薄片材之製程中採用兩次切割步驟，首先，送上新的薄片材，然後依照所需的 2D 輪廓進行第一次切割，接著將工件與新薄片材料壓合進行接合，而後再進行第二次的切割動作，最後將所需黏結之部位進行噴膠處理，如此重覆直到所需之物件道次加工完成後，再繼續下一層的積層加工，直至工件完成，去掉特殊材質的廢料即可。

多種材料之薄片積層加工製程機構示意圖如圖 3-3 所示，傳統的 LOM 僅以單種材料進行製程加工，故常因應便利性將薄片材料捲成圓柱狀，以滾筒轉動方式傳送紙張。而新製程機構設計中則採用多組的送料匣，可將製程所需求的薄片材料依種類及厚薄規格加以分類安放於匣槽內，其為類似影印機的送紙匣原理與方式，薄片材料即可按製程所需依序送出。在送料匣前方設有送料平台，此平台可上下移動（Z 軸方向）進行升降承接送料匣所送出之薄片材料，也能進行單軸向（X 軸方向）移動，將材料運送至工作床台上方處，而在送料平台兩側邊處設有一組夾料器負責固定薄片材料，可與送料平台進行結合一起運送材料或分離各自作動。關於工件與新層材料的壓合方式則採用壓板進行壓合，此優點則為可避免因滾筒在工件上滾動產生剪應力進而產生形變，此外，機構裝置除雷射切割器外另增加一組噴頭裝置可在材料上進行黏膠噴塗處理。其細部裝置組成計有，工作平台；送料平台；夾料器；送料匣；切割裝置；黏膠噴嘴；壓板等機構裝置。

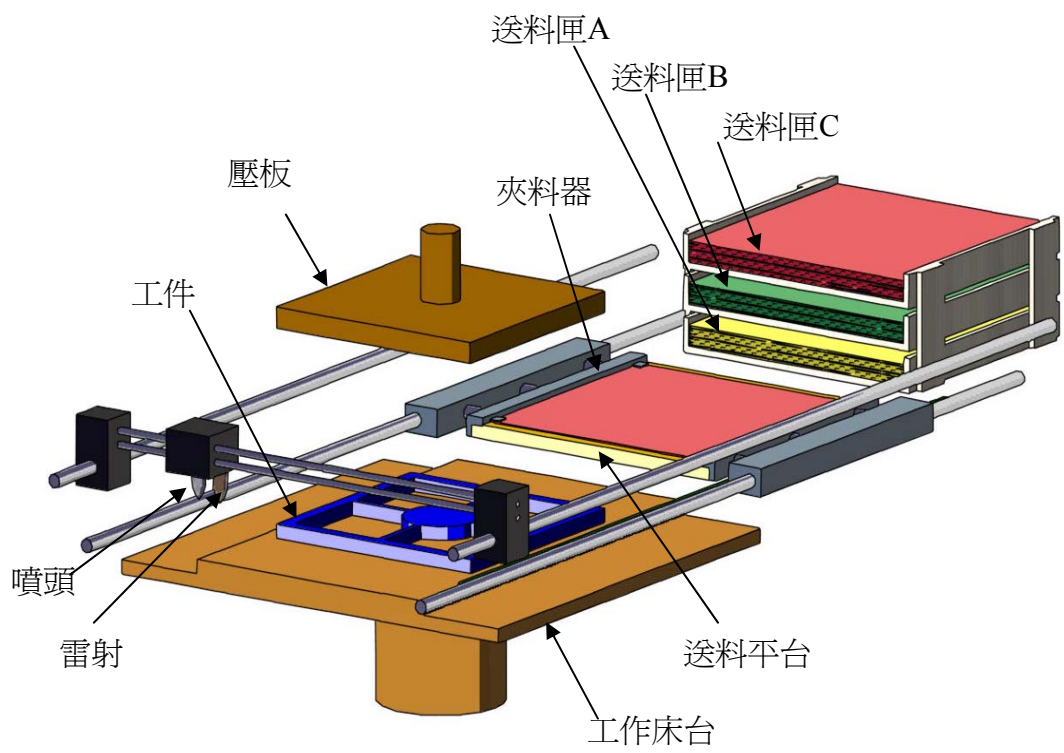


圖 3-3 多種材料之薄片積層製程機構之構想圖

以下逐步將多種材料薄片之積層製程的步驟詳細說明之。

1. 將繪製的工件 3-D 立體圖形切層為 2-D 的平面圖形，如圖 3-4 所示，假設圓形及方形為不同材質之物件，剖面線之區域則為無物件之空的區域。將每一層 X-Y 剖面之 2D 圖，依製程流程演算法（後續討論之）修改成第一次及第二次所需切割的 2D 圖檔，如圖 3-5(a)及(b)所示，圓形圖型是第一次所需切割之輪廓，主要為先行切除多餘廢料。方形則為第二次所需切割之形狀則為保留材料所需的 2D 實體輪廓，將此兩圖檔輸出至切割單元準備切割。

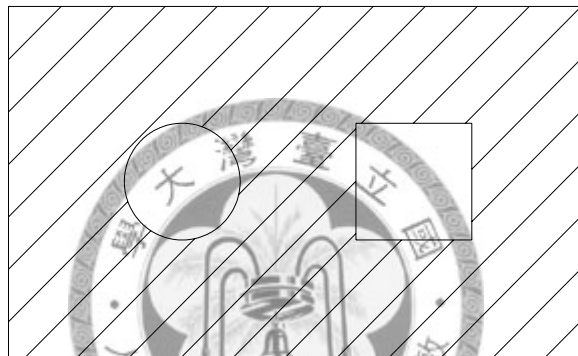
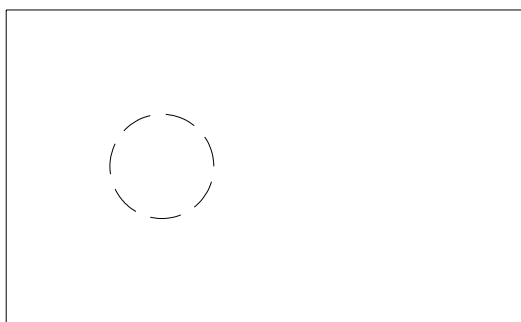
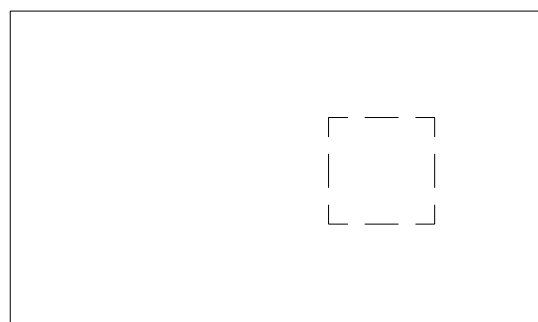


圖 3-4 完整的 2D 輪廓圖



(a)



(b)

圖 3-5 兩次切割所需的輪廓圖形 (a)第一次切割的 2D 輪廓圖，(b)第二次切割 2D 輪廓圖

2. 利用送料匣將製程所需的薄片材料放置於送料平台上，再以夾料器固定之，如圖 3-6，此平台可根據送料匣位置調整升降高度，再傳送到床台正上方處，準備進行切割。

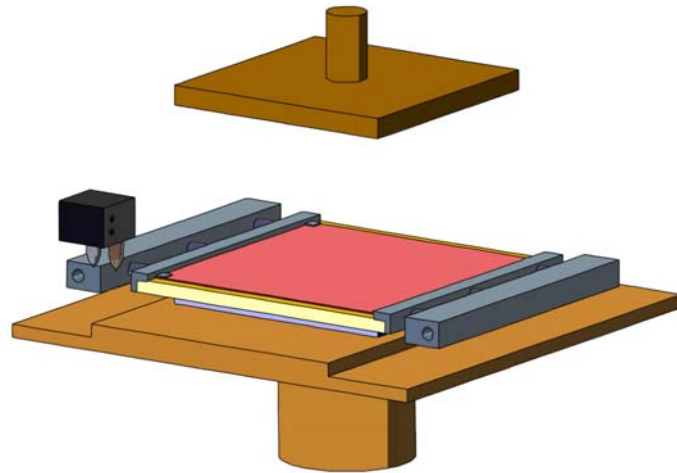


圖 3-6 送料平台將薄片材送至床台正上方

3. 將上述圖 3-6 所示的第一次切割 2D 圖檔輸入電腦進行切割。如圖 3-7，機器接收到第一次所需切割的 2D 圖檔，依照檔案的輪廓進行第一次雷射切割去除廢料。

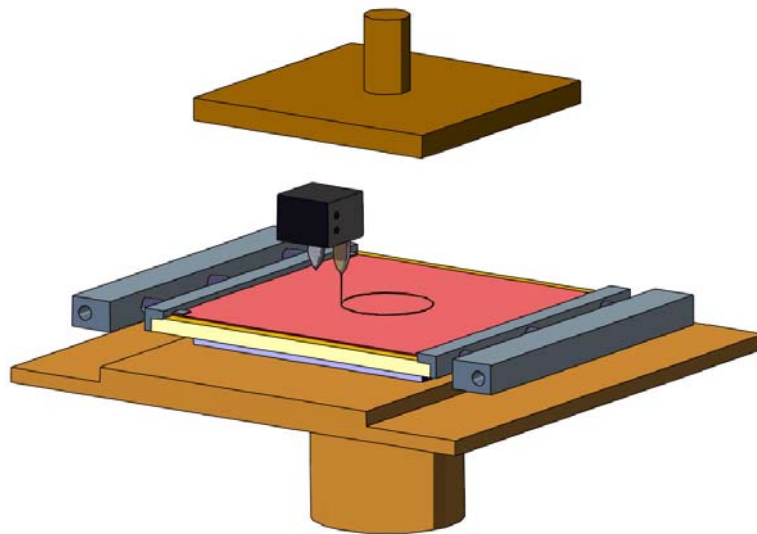


圖 3-7 雷射進行第一次切割

4. 如圖 3-8 所示，完成第一次切割後，夾料器與送料平台分離且後者將切割下的廢料運回，保留夾料器與切割後剩餘的薄片材料，下方的床台往上移動，同時上方之壓板下降，開始進行壓合的動作，使得薄片材料與剛切割完的工件進行結合，使上下二層能緊密黏結。

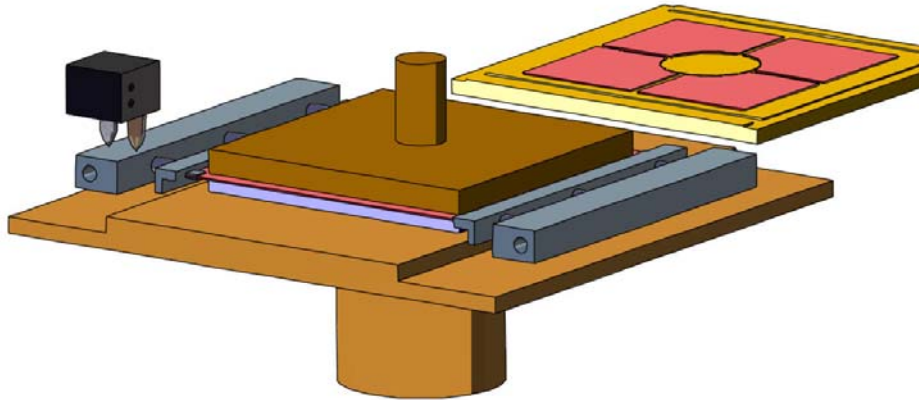


圖 3-8 壓板下降，床台上升，進行壓合

5. 壓板上升，X-Y 切割平台作動雷射裝置，如圖 3-9 所示，開始進行第二次切割。

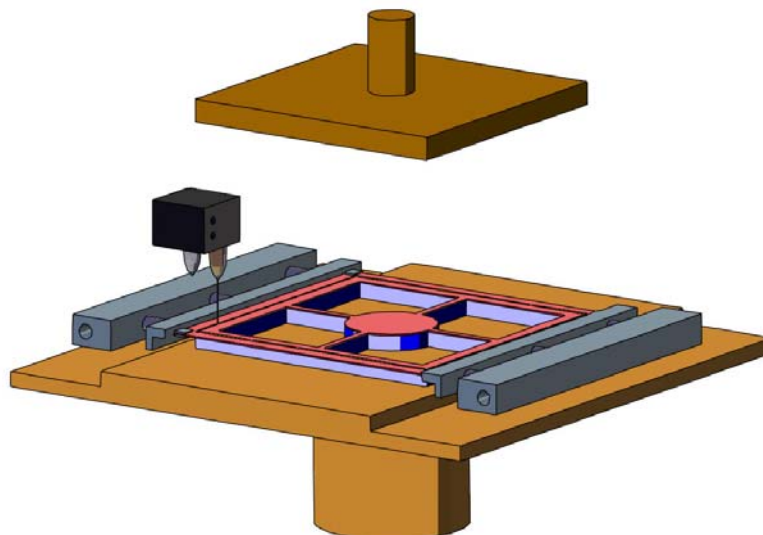


圖 3-9 雷射進行第二次切割

6. 床台下降，如圖 3-10 所示，使切割層與片狀廢料完全分離，切割後之廢料材被夾紙裝置帶離。

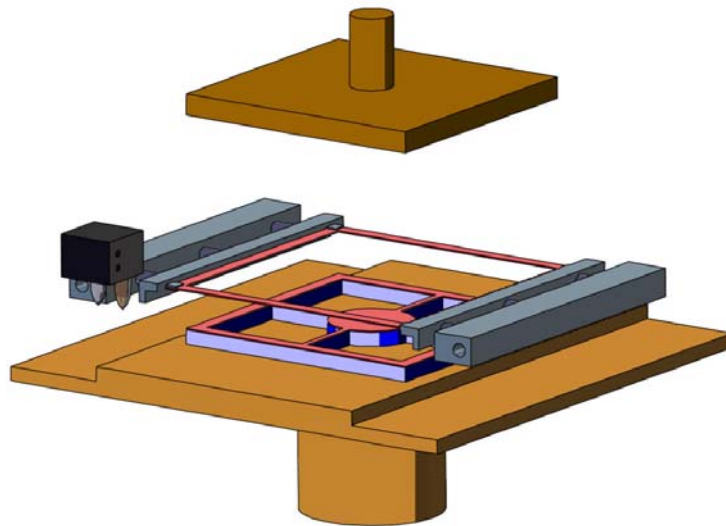


圖 3-10 床台往下，使切割層分離

7. 夾料器與送料平台回歸原點（送料匣旁），床台上升，如圖 3-11 所示，噴頭在剛黏結完的新薄片層上方作 X-Y 方向移動，於材料需黏結之區域均勻的噴灑黏膠。

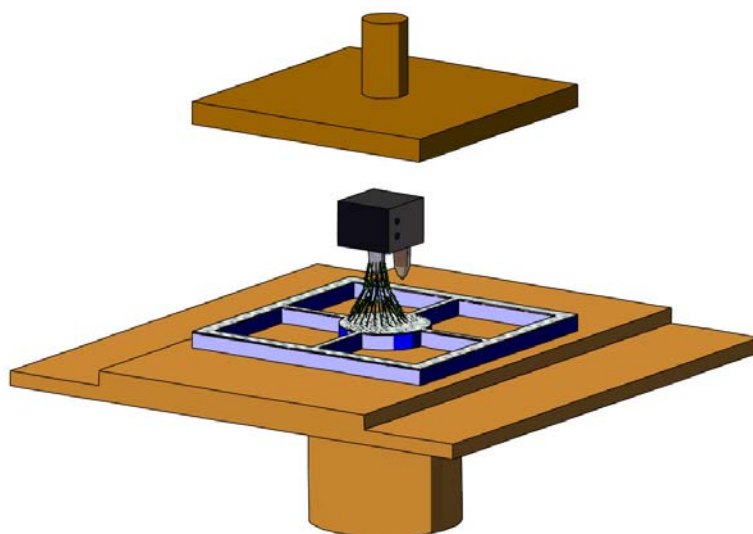


圖 3-11 噴頭噴膠於工件上方

8. 噴嘴退回原點，完成同層中第一種薄片材加工。如圖 3-12 所示，此時送料匣送出第二種薄片材料，繼續重複步驟 2~7，直至此加工層所需的各式材料皆加工完成，完成一層的循環，然後繼續進行新一層之積層加工。

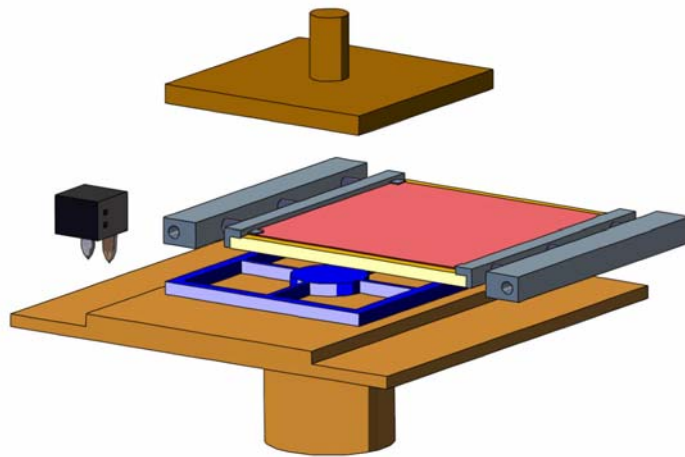


圖 3-12 送料匣送出新的薄片材料

如此重複加工，完成所有積層製作，並將工件外之特殊材質的支撐物件撥除即可獲得工件。



## 3-2 製程流程演算法則

為了要能使多種材料之薄片可順利依序進行積層加工，研究中首先要探討如何將在同一切層剖面中具不同材種類的物件，各別依據 2D 輪廓形狀分解成單一物件，將每一物件皆給予材質、群組及層級等相關資訊，以便於進行物件排序演算，進而決定物件加工順序，最後歸納物件加工排序法則，尋找最佳的層加工之製程流程。本節將探討上述物件加工順序的問題並提出合宜的演算法則。

### 3-2-1 多種材料之積層加工製程探討

製作具多材質的原型件或組合件時，如圖 3-13(a)所示，為內含不同材質的方形與圓形的原型件，若沿工件高度二分之一處進行 X-Y 剖面切層，會發現此剖面層中會存有兩種的不同材質。如圖 3-13(b)所示，圖中即具有圓形及方形兩種不同材質的輪廓剖面。因此要解決在這剖面層中具有多種材質的問題，首先可將多種材質的輪廓形狀區分成各自獨立的孤島以及被完全包覆兩種典型的情況逐一討論。

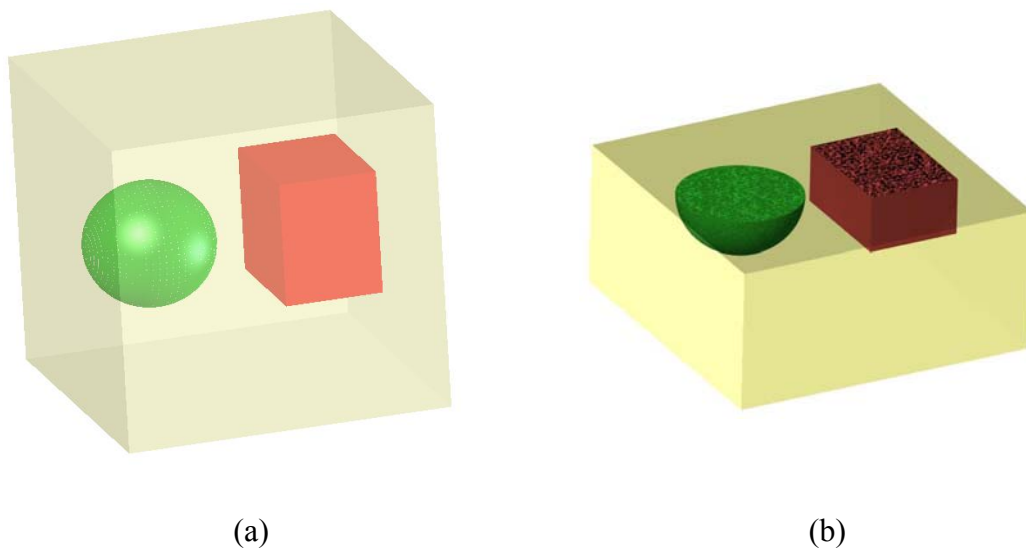


圖 3-13 具多材質工件之 X-Y 剖面圖

案例 1. 在同層中具各自獨立為孤島的異種材質之物件

如圖 3-14 所示，在加工層的 2D 輪廓中，內含各自獨立圓形及方形兩種材質，可拆解為 A 種薄片材與 B 種薄片材，若將上述之 A 與 B 兩薄片材疊加在一起，即可得層加工所須圖形。因此可將此加工層視為兩組薄片的組成，依序進行兩道次的薄片加工。

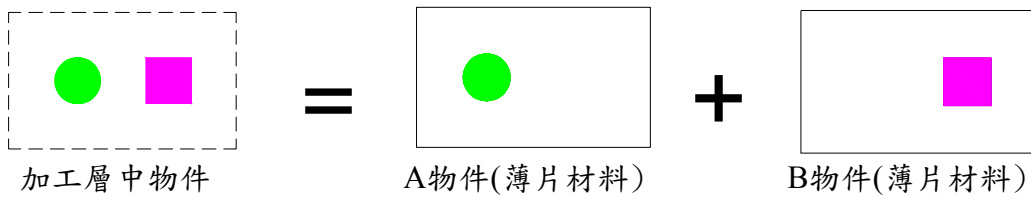
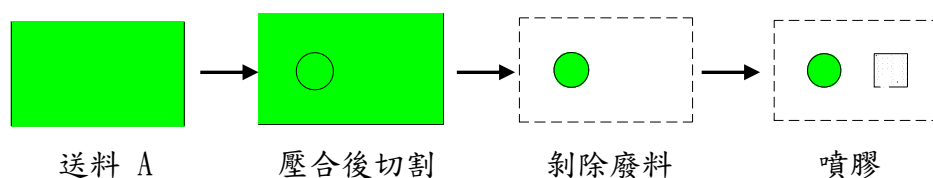


圖 3-14 加工層中具兩組孤島物件之 2D 輪廓圖

因此，首先選定 A 薄片進行第一道次加工。如圖 3-15 所示，第一步驟，開始送料，接著進行壓合動作使之將材料與工件黏結，然後進行圓形狀之 2D 圖形的雷射切割，切割完後，床台下降，去除剩餘廢料，最後噴頭噴塗黏膠在下一薄片層所需之黏結的區域上，即完成 A 薄片材之加工。接續進行 B 薄片材之第二道次加工。送料，接著進行第一次切割，然後將材料壓合黏結，再進行第二次切割，切割完後，去除廢料，最後噴塗黏膠，完成 B 材料薄層加工。

在上述層加工過程中，由於 A 薄片材為加工層中的第一道次之薄片加工，材料僅進行一次的切割處理，而在第二道次的 B 薄片材加工則進行兩次的切割處理。這是因為在進第一道次加工時，先行完成的工件表層上尚未留有凸起的薄片物件，為平坦面，所以材料無須先進行第一次切割製程程序，可直接進行壓合黏結後，再進行輪廓切割處理，而進行第二道次加工時，這時材料表面已黏結上第一道次加工所留下之 A 薄層物件，因此 B 材料必須依照已加工完成之 A 材料之 2D 輪廓圖形進行第一次切割，避免工件在進行壓合動作時，A 材料與 B 材料兩者物件產生重疊而發生干涉現象，因此，必先進行第一次切割處理去除廢料，在 A 物

件上方之產生空區域，然後方可進行壓合黏結處理，如圖 3-16 所示，若 B 材料不進行第一次切割處理，則在進行壓合時，會與先前已完成加工之 A 材料發生干涉，使得兩材料無法貼合而產生間隙現象，無法進行密實的壓合。



(a) 第一道次加工

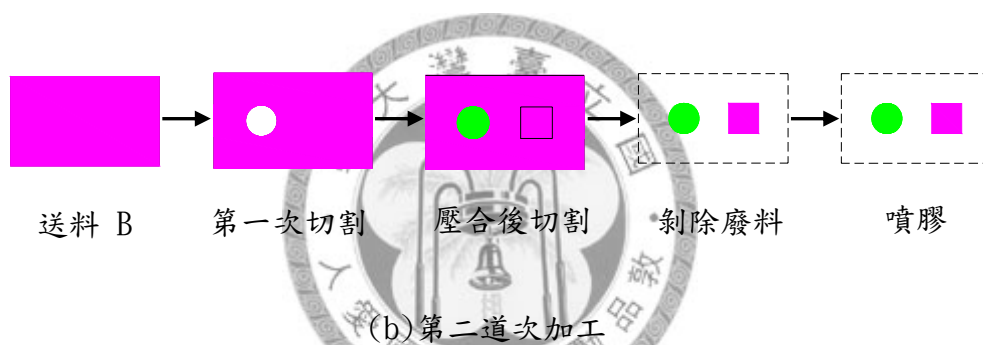


圖 3-15 A 與 B 薄片材道次加工步驟圖

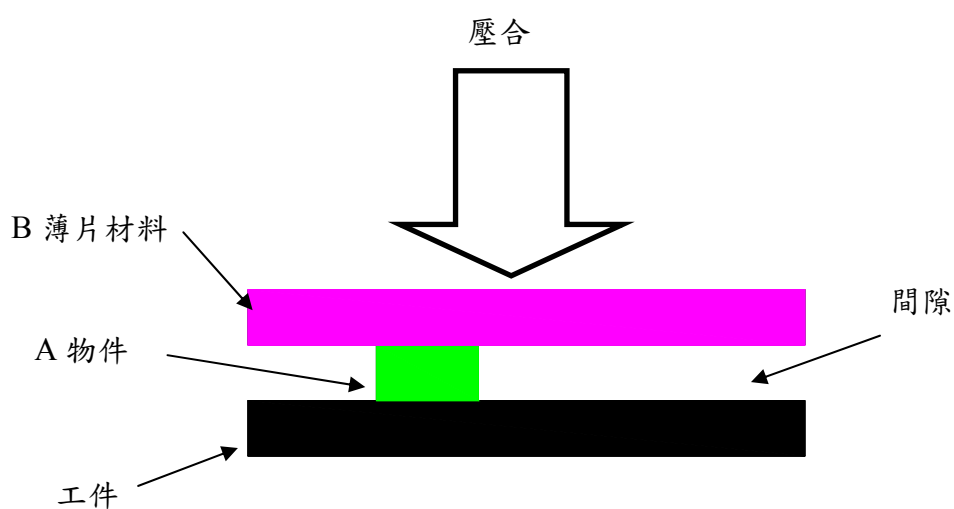


圖 3-16 未進行切割之干涉圖。B 薄片材料未進行第一次切割，在進行壓合時與 A 物件之間發生干涉而產生間隙

因此薄片材在進行第二道次及以上加工時，皆需執行二次切割加工的程序，當然若同一加工層有 n 種材料需進行多道次加工時，則需將 n-1 次之前的所有的道次加工之物件圖形加上之前所產生的空區域進行疊加，以作為第一次廢料切割之依據。如圖 3-17 所示，薄片材物件進行第三道次加工時，需將前兩道次加工後物件圖形廓相加，作為第一切割依據，其剖面線區域即為第一次廢料切割之圖形。

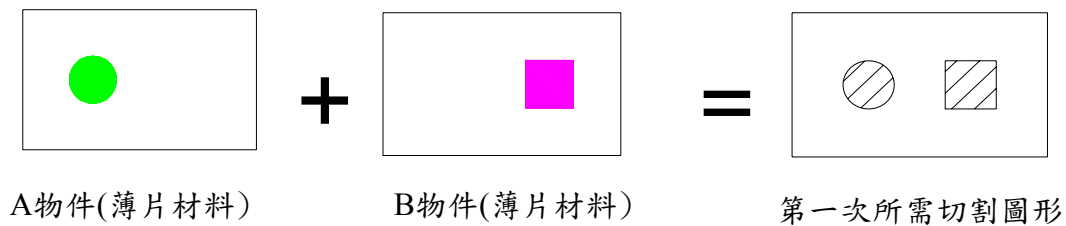


圖 3-17 第三道次加工的薄片材所需第一次切割的圖形

案例 2. 在同加工層中具有不同層級材質之物件

加工層中具多重材質另一典型的情形，就是某物件內含有另一種材料，在 2D 輪廓上產生不同層級的案例。如圖 3-18 所示，同加工層的 2D 輪廓中，在方形圖形之 B 材料內含有圓形圖案的 A 材料。其拆解方法如前例一樣，可分為 A 與 B 薄片兩材料種，因此，需將此加工層的兩種物件分成兩道次的物件加工，依序進行積層加工。

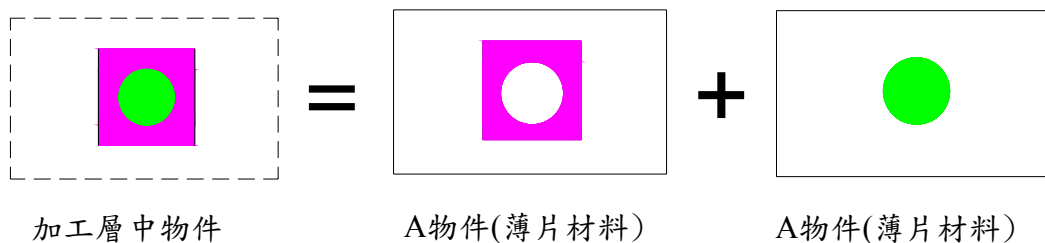


圖 3-18 加工層中具兩組不同層級物件之 2D 輪廓圖

如上所述，分別進行物件道次加工。首先，選定 A 薄片材進行第一道次加工。如圖 3-19 之步驟流程所示，開始送料，接著進行壓合，然後雷射依 2D 輪廓圖形切割，切割完後床台下降，去除剩餘廢料，最後噴頭噴塗黏膠在下一道次加工物件所需黏結區域，即完成第一道次 A 薄片材加工。接續再進行 B 薄片材第二道次加工。送料，開始進行第一次切割，然後將材料壓合黏結後再進行第二次切割，切割完後去除廢料，最後噴塗黏膠，完成 B 材料薄層加工，也完成此加工層中所有的物件道次加工。

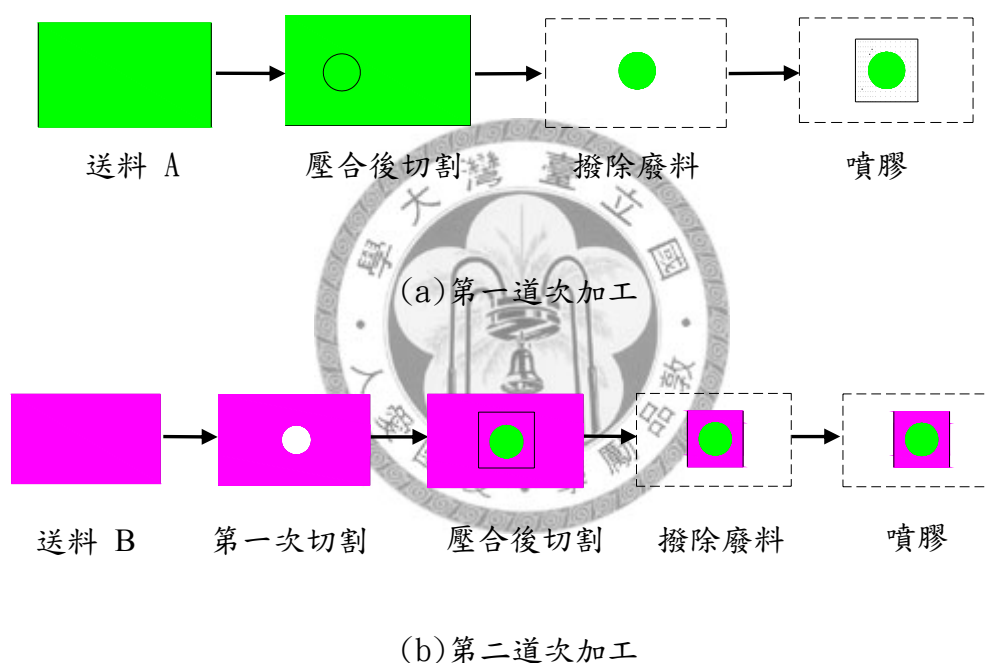


圖 3-19 A 與 B 薄片材道次加工步驟圖

相同地，在此加工層之過程中，除在第二道次（含）以後的薄片材皆須進行兩次切割程序，避免上下兩材料間產生干涉現象，產生間隙而無法進行密實的壓合外，還需留意此兩道次的加工順序，以免影響製程加工。在此案例中，若將 A、B 薄片材的加工順序互換，第一道次先進行 B 薄片材加工，則會發現，接下來進行的第二道次加工的 A 薄片材會與 B 薄材，在進行壓合動作時發生干涉，使得上下兩薄材無法進行密實的貼合。圖 3-20 所示，即為先行 B 薄材的積層加工，由

於加工後的 B 材料的 2D 方形輪廓大於後續道次加工之 A 材料的 2D 圓形輪廓，會使得 A 薄材經第一次切割後所產生空的區域仍小於下方的 B 物件輪廓，發生干涉，無法順利進行壓合。因此，在進行積層加工中，同加工層中若具有不同層級的異種材質物件時，需優先進行最內層材料的物件道次加工，方可避免產生干涉，順利積層。

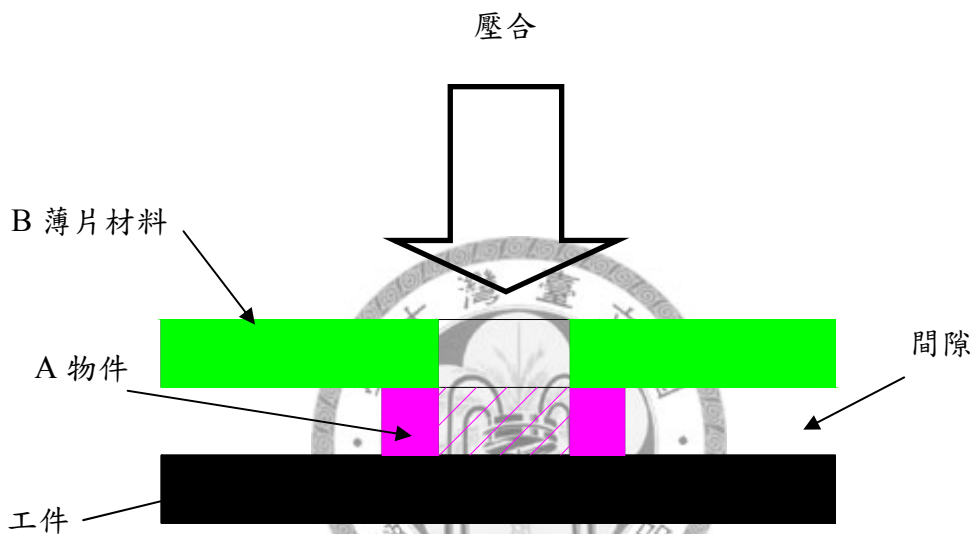


圖 3-20 物件積層加工干涉圖。B 薄片材料雖有進行第一次切割，但切割後圖形小於 A 物件輪廓，在進行壓合時與 A 物件之間發生干涉而產生間隙

### 3-2-2 物件分類

如前所述，在進行多種材料積層加工製程中，需將每切層後產生所有 2D 剖面輪廓拆解為單一物件，並將所有物件進行排序規劃產生合宜的加工順序，才能順利完成積層。因此如何將切層剖面中的輪廓取出給予正確的材料種類，並依據輪廓幾何關係定義物件間之層級及群組關係進行分類，以便於進行物件的邏輯性之排序演算。圖 3-21 所示，為決定物件積層加工順序的製程流程圖，因此如何將切層中的輪廓擷取成單一物件以及進行層級與群組的分類為此節將探討的問題。

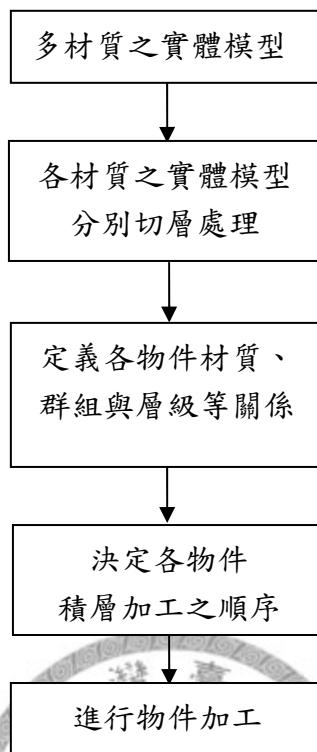


圖 3-21 決定物件積層加工順序之步驟流程圖

(a) 物件擷取方法

一般製作單材質的原型工件，僅需將實體模型直接切層即可進行積層加工，而多材質的工件為要區分物件中的材質種類，因此要將不同材質的實體模型予以分離，各自進行切層處理，方能得到每切層中物件的材質種類。圖 3-22(a)所示，切層圖中具有三種不同材質與五組物件的切層剖面圖，將其依據不同材質的實體模型分別進行切層處理，即可得到圖 3-22(b)綠色方的剖面物件、圖 3-22(c)三個紅色的剖面物件及 3-22(d)藍色菱形的剖面物件。

由於多種材料的積層加工是將加工層內每個 2D 輪廓（封閉曲線圖形）皆視為一組物件進行加工，因此取得在同一切層高度的不同材種的剖面圖後，需將剖面圖中所有物件分別取出，以便進行排序演算決定加工順序。其方法是將切層中的輪廓由外向內擷取方式，取出所有切層圖中的單號數迴圈即可得到所有物件的外輪廓。如圖 3-23(a)所示，在 A 材質的剖面圖中有一組方形的中空物件 A，依據

由外向內方式擷取物件輪廓，外內迴圈依序為 1 及 2，其中編號 1 之迴圈可產生 A 物件的實體面積。同理，圖 3-23(b)為 B 材質的剖面圖，圖中有一組菱形的中空物件 B，依據由外向內擷取方式，可得到外內迴圈依序為 1 及 2，其中編號 1 之迴圈可產生 B 物件的實體面積。圖 3-23(c)則為 C 材質的剖面圖，由圖可知內部具有 C1、C2、C3 三組不同之物件，將物件的圖形輪廓由外向內擷取即可得知各物件之迴圈編號各為 1a、2a、3a 與 1b，其中 C1 為中空物件被兩組 1a 與 2a 封閉迴圈所包圍，1a 迴圈即為物件之外輪廓，可形成實體面積，內部圓球物件則為第 3a 迴圈

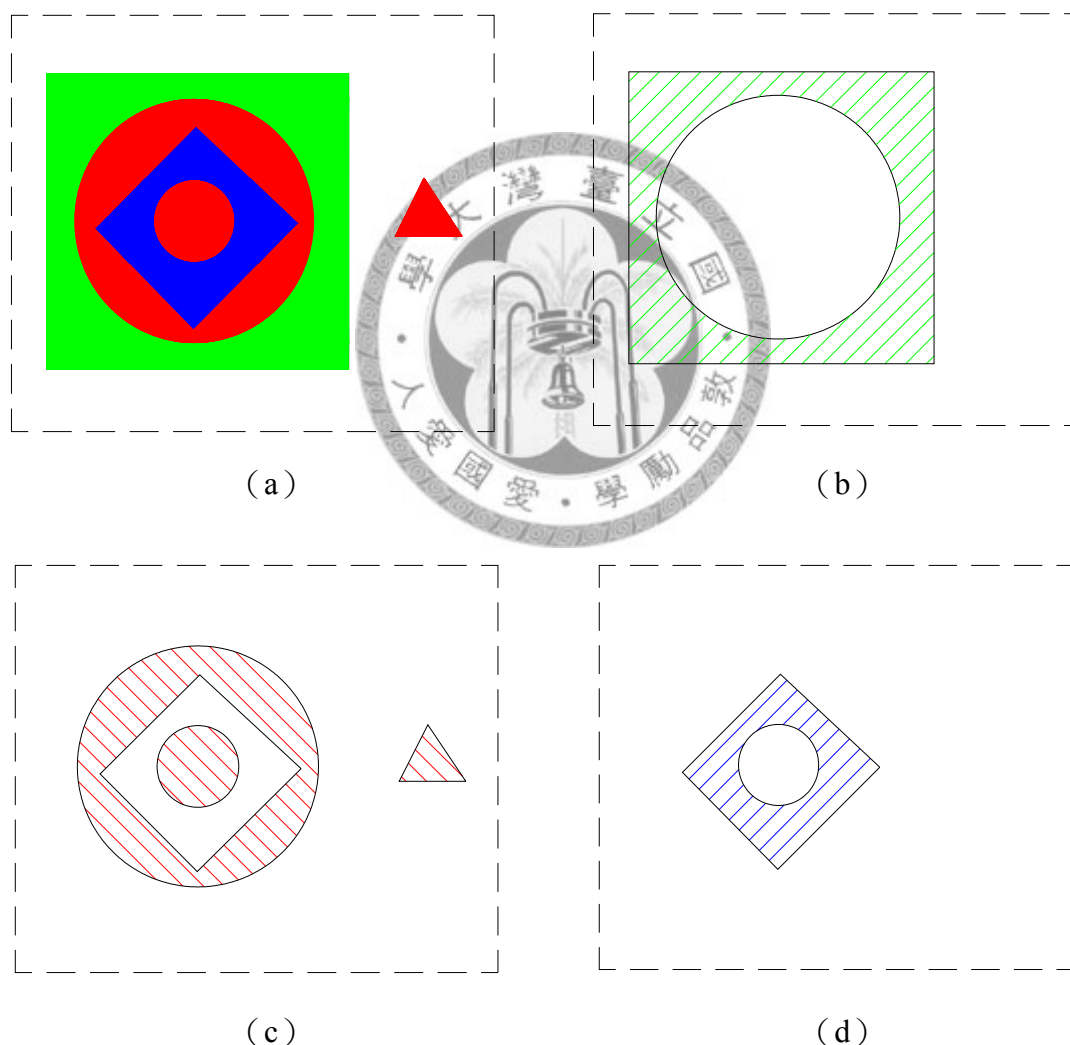


圖 3-22 各種材料的切層剖面圖，(a)為所有材質的切層剖視圖，(b)為單一物件綠色材質的切層剖視圖，(c)為具三組物件之紅色材質的切層剖視圖，(d)為單一物件藍色材質的切層剖視圖。



所包圍，亦即為此物件之外輪廓，而三角形物件被另一組 1b 迴圈所包圍，並可形成實體的物件面積。因此可知，單號數之迴圈即為物件的外輪廓，並能產生實體的面積，因此將所有同切層高度的所有不同材質的切層面進行疊加，最後可得到同切層高度中所有物件的材質及總數量，如圖 3-23(d)所示，同一切層高度中，A、B、C 三種不同材質具五組物件的外迴圈輪廓示意圖。

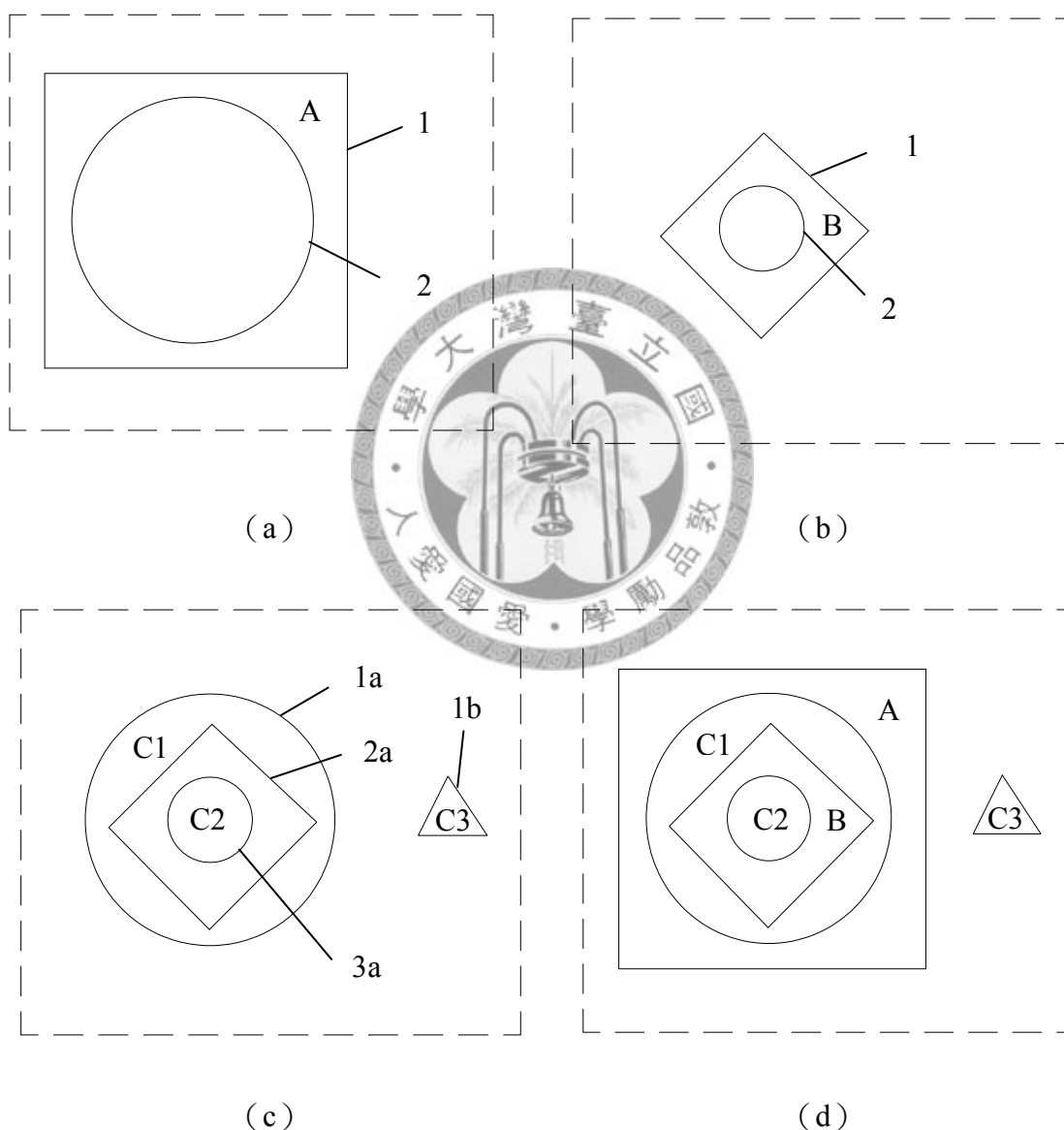
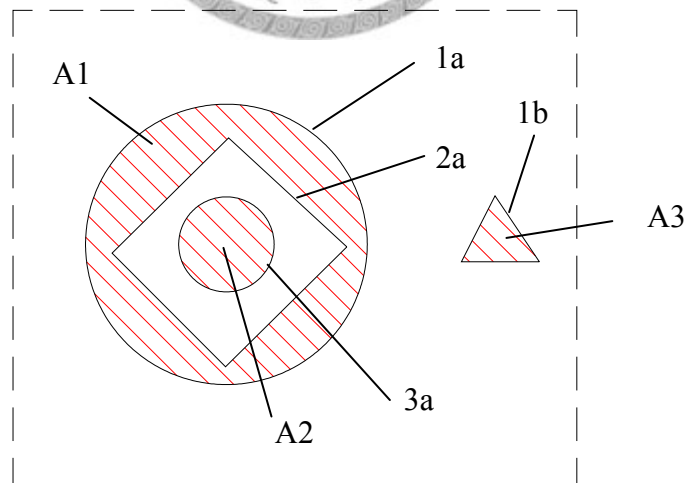


圖 3-23 各種材料的切層剖面之物件與迴圈之關係示意圖，(a)為 A 材質剖面的物件輪廓（迴圈）示意圖，(b)為 B 材質剖面的物件輪廓（迴圈）示意圖，(c)為 C 材質剖面的物件輪廓（迴圈）示意圖，(d)為所有材質剖面的物件輪廓示意圖。

(b) 物件排序

取得同一切層高度中所有不同材質之物件單數迴圈後，即完成此切層內所有物件的擷取，接著開始進行物件之間的層級的排序與群組分類。物件的層級排序與群組分類，是利用物件單數迴圈（外輪廓）內的實體面積進行布林運算，檢查是否產生交集的現象發生，若產生交集即表示此兩物件之位置有所重疊，兩者間必有其一物件被另一物件包圍著，產生所謂層級之關係。如圖 3-24 所示，將 1a 迴圈內之面積與 3a 迴圈內之面積進行布林運算，即可發現此兩面積有發生交集，且 1a 迴圈之面積大於 3a 迴圈之面積，即意味著後者的面積是被前者所包圍著，亦可得知 1a 包圍之面積為 A1 物件實心的面積而 2a 及 A2 物件之實心面積，A2 物件位於 A1 物件內彼此有著層級關係。接著將 1a 與 2a 迴圈內之面積與 1b 迴圈內面積分別進行布林運算，發現前兩者面積並未與後者面積產生交集，表示 A3 物件未與 A1 及 A2 物件為獨立的孤島並未有直接的層級隸屬關係。瞭解的各物件彼此間的層級關係後，即可將物件以層級及群組方式進行分類與排序，以便作為物件積層加工順序參考之依據。



3-24 切層剖面之物件與迴圈的關係圖

進行物件層級排序與群組分類，可將各物件建立成矩陣（行矩陣）方式，依據物件有否產生交集以及面積大小方式依序由大而小排序，便於進行演算，如圖

3-25 所示，即為物件的排序流程方法。首先依序任取兩組物件判斷是否皆已經存在於矩陣中，若無，即以此物件產生行矩陣，接著將此兩物件以前述方式利用物件外迴圈所包圍的實體面積進行布林函數的面積演算，比較兩物件面積是否有產生交集，若無，即為兩個互不直接有層級隸屬關係的物件，暫為個別兩組獨立的矩陣，接著再取兩物件繼續進行演算，若兩物件產生交集，則需比較物件面積大小，在大面積物件之行矩陣中若此物件後方仍有其他物件，則需將此兩物件另行建立新的行矩陣，反之，若大物件後方處無任何物件，將較小面積物件排序於大面積物件之後方，合併成為新的行矩陣，如此重複將所有物件進行交叉比對演算與排序，即可得到各物件間的層級與群組關係。

舉一範例說明，如圖 3-26 所示，切層剖面中具有 A、B、C、D、E、F、G 七種不同材質的物件，依據物件排序分類流程，可依序先取 A 與 B 物件之外迴圈進行面積的布林運算，由於物件 A 與 B 為第一次被擷取，故兩者都各以[A]與[B]新矩陣方式表示，利用各物件之外迴圈內的實體面積進行布林運算，此二物件之面積並未產生交集，因此，直接將此兩物件矩陣先行擱置，繼續進行下兩物件之比較。同理，接著取物件 A 與 C 進行面積演算，其中物件 A 以存在於矩陣中，而物件 C 為第一次演算之物件，因此產生為新矩陣[C]，將兩物件進行布林運算，發生此兩物件面積有產生交集且 A 物件面積大於 C 物件面積且 A 物件後方並無任何物件，因此將物件 C 放入物件 A 後方，合併為新矩陣[A,C]。接續再擷取物件 A 及 D 之物件排序演算，物件 D 為第一次演算物件，可生成為新矩陣[D]，但由於 A 與 D 兩物件面積並未有交集，因此將矩陣[D]暫且放置一旁，自成為一行矩陣。接著取 A 及 E 物件進行演算，同樣地，E 為第一次擷取之物件故需先行產生新矩陣[E]，此兩物件在面積上有交集且物件 A 大於物件 E 之面積，但因 A 矩陣物件後方已有 C 物件，故需另建立[A,E]矩陣，暫不能合併。接著擷取 A 與 F 物件，兩物件並無交集，故建立新矩陣[F]，再取 A 與 G 物件進行布林運算，發現此兩物件面積有交集且 A 面積大於 G 的面積，因此產生新矩陣[A,G]，因此以 A 物件為首所進行第

一回的交叉演算共產生[B]，[A,C]，[D]，[A,E]，[F]，[A,G]六組矩陣。

接著再以 B 物件為首，進行物件的交叉演算排序，首先取 B 與 C 物件進行比對，兩者並無交集，因此無須動作，接續取 B 與 D 物件進行演算，B 物件與 D 物件面積有交集且 B 大於 D，因此原矩陣[B]、[D]可進行合併成新矩陣依序排列成[B,D]，再著，取 B 與 E 物件進行演算，兩物件並無交集，因此維持原狀，依序再取 B 與 F 物件，經布林運算此兩物件產生面積交集且 B 面積大於 F 物件面積，但因新合併之矩陣[B,D]，在較大面積 B 物件後方有 D 物件，故僅能將原矩陣[B]建立為矩陣[B,F]，不能與[B,D]矩陣合併，最後取物件 B 與 G 進行演算，但此兩物件並無交集，故維持原狀，經第二次交叉演算，物件矩陣數演變為[A,C]，[B,D]，[A,E]，[B,F]，[A,G]五組矩陣。

繼續以 C 為首之物件與其他物件進行交叉比對，首先取 C 與 D 物件進行演算，兩者並無交集，故維持原狀，接著取 C 與 E 物件進行運算，此兩物件面積有交集且 C 物件面積大於 E 物件面積且[A,C]矩陣內的 C 物件後方並無任何物件，故可將[A,C]，[A,E]兩矩陣進行合併並將物件 E 放在物件 C 後方，新矩陣可改寫成[A,C,E]。然後再取物件 C 與 F 進行比對，此兩者物件並無交集，不需進行合併動作，最後取 C 與 G 物件進行演算，此兩物件也無交集，同樣地維持原狀，經第三回的物件交叉比對，各物件行矩陣演變成[B,D]，[A,C,E]，[B,F]，[A,G]四組矩陣。

接續進行以 D 物件為主的交叉比對，先取 D 與 E 物件進行布林函數運算，但此兩物件並無面積上之交集，故矩陣無須改變，接著再取 D 與 F 物件進行演算，其兩者物件面積經布林函數運算，產生交集，且 D 物件面積大於 F 物件面積，且原[B,D]矩陣中的 D 物件後方並無其他物件，故可將[B,D] 與[B,F]進行合併，並把 F 物件放入 D 物件後方，新矩陣可改寫成[B,D,F]，經此回物件交叉比對演算，各矩陣演變為[B,D,F]，[A,C,E]，[A,G]三組矩陣。最後取 E 與 F 物件進行物件最終比對，E 與 F 物件面積經布林函數運算，並無產生交集，故原矩陣維持不變各為[B,D,F]，[A,C,E]，[A,G]，此矩陣即為所有物件間最終的群組與層級關係。

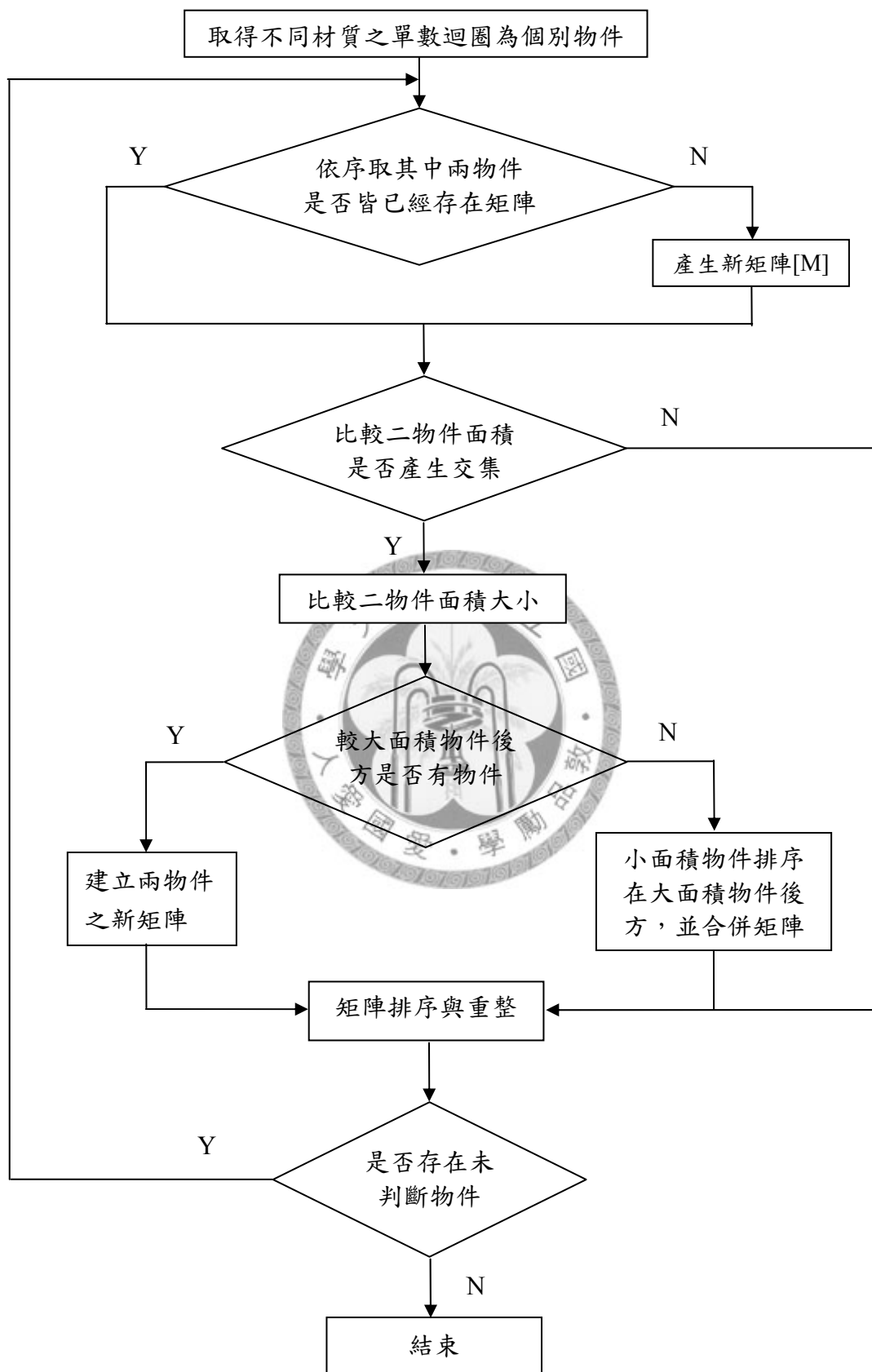


圖 3-25 物件排序分類流程圖

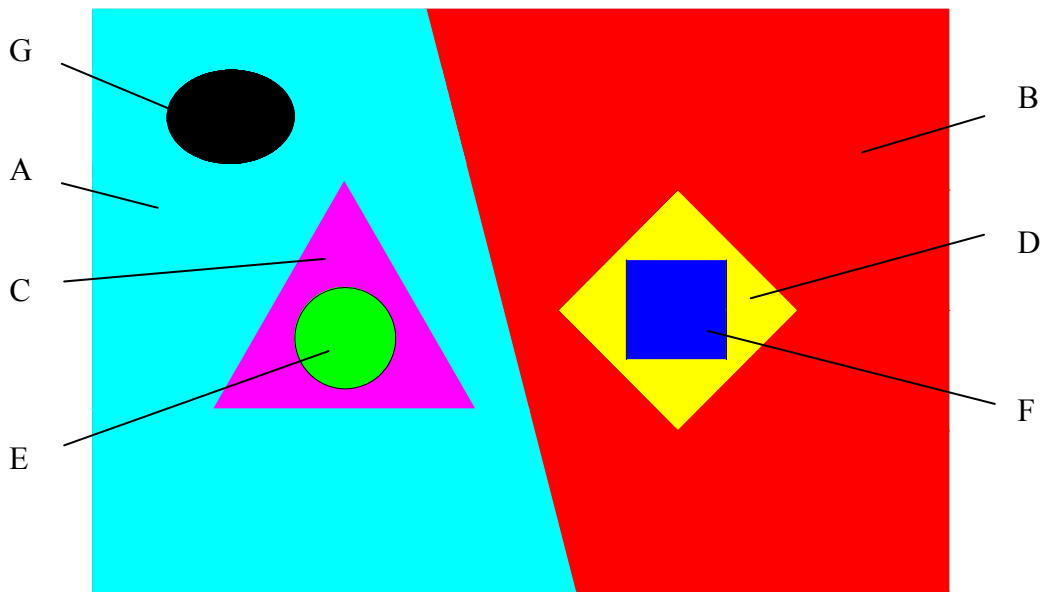


圖 3-26 多種材料與層級之物件關係圖

(c) 物件定義

取得各物件間的材質、群組與層級關係後，可將物件分別以材料種類及 2D 輪廓內外層級兩部分進行定義，因此，在切層剖面的各物件即可表示如式(3.1)所示。

$$M_{ijk\dots} \quad (3.1)$$

M：為材料種類代號 (A,B,C,D...，表各材質種類)

i：為第一層級序數位置，1,2,3.....，數字表該層級之群組數量編號

J：為第二層級序數位置，1,2,3.....，數字表該層級之群組數量編號

k：為第三層級序數位置，1,2,3.....，數字表該層級之群組數量編號

式(3.1)中，M 為加工物件之薄片材的種類的代號，以 A,B,C...等符號表之，而下標符號 i,j,k...等，則為加工層中各加工物件的層級序數位置，i 表第一層級，j

為第二層級，k 為第三層級，以此類推。而層級序數的 1,2,3,4 數字表示物件位於此階層級中之數量，亦可表示為該物件在此階層級中的群組編號，0 則表示該階層級不存在。

因此前述範例所得之各物件間的層級群組關係之矩陣[A,C,E]，[A,G]， [B,D,F] 依據物件定義式(3.1)可改寫如下：

$$[A_{100} \quad C_{110} \quad E_{111}]$$

$$[A_{100} \quad G_{120}]$$

$$[B_{200} \quad D_{210} \quad F_{211}]$$

其中[A,C,E]，[A,G]行矩陣，共以 A 物件為首，為第一群組，而 A 物件第一群組的第一層級唯一物件以 A<sub>100</sub> 表示，C 與 G 為第一群組的第二層級中的兩物件分別以 C<sub>110</sub> 與 G<sub>120</sub> 表示，E<sub>111</sub> 物件為第三層級物件並與物件 C<sub>110</sub> 產生直接的上下層級關係。同理，行矩陣[B,D,F]，物件 B<sub>200</sub>、D<sub>210</sub>、F<sub>211</sub> 分別為另一群組內第一層級、第二層級及第三層級物件，因此各物件各層級與群組之關係可表如圖 3-27 所示。

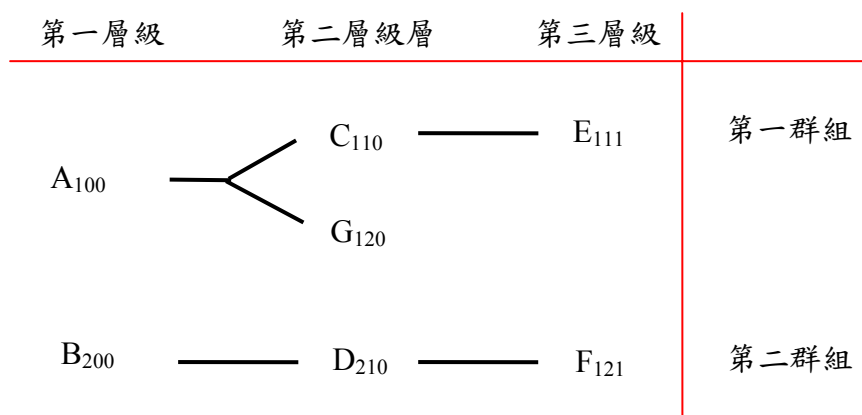


圖 3-27 物件各層級與群組之關係圖

在完成各物件之定義後，圖 3-26 所示之多種材料與層級之物件關係圖，可表如圖 3-28 所示定義，加工層共有三個層級，七種材料物件，因此，綻青色與紅色的梯形各為 A 與 B 薄片材，且為最外層級之物件，可分別寫成  $A_{100}$ 、 $B_{200}$  與表示之，而粉紅色三角形、黑色橢圓形物件及黃色菱形物件同為第二層級，各以  $C_{110}$ 、 $G_{300}$  及  $D_{210}$  表示之，青色的圓形與藍色的正方形物件為最後的第三層級，分別以  $E_{111}$  及  $F_{211}$  表示之。

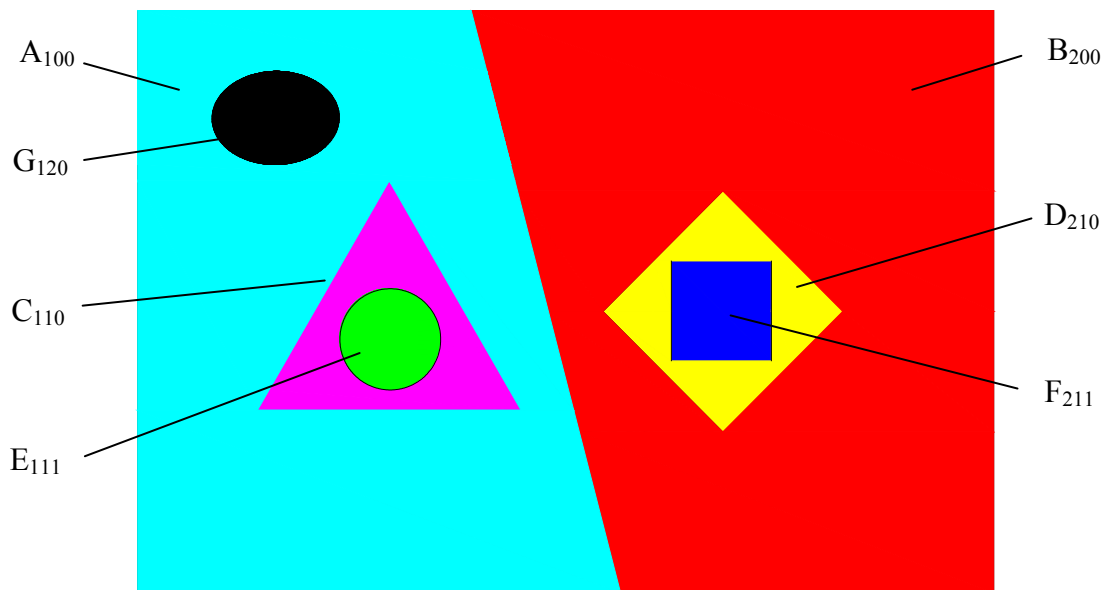


圖 3-28 多種材料與層級之物件定義圖



### 3-2-3 物件積層加工順序演算

完成加工層中各物件有關材料種類與各輪廓間層級序數之物件定義後，接續探討幾種不同狀況的切層之物件道次加工情形，並做進一步說明

#### (b) 單一群組，不同層級

如圖 3-29 所示，在加工層中有三個物件，分別是正方形、三角形及圓形等物件，此三組物件依序被包覆成為同一群組，圓形被三角形包覆，三角形又被正方形所包覆，依物種切層方式以及物件之面積演算法則，此群組具三階層級，依照前述之物件分類定義可將此三物件所需之加工道次分別以  $A_{100}$ 、 $B_{110}$ 、 $C_{111}$  表示之。

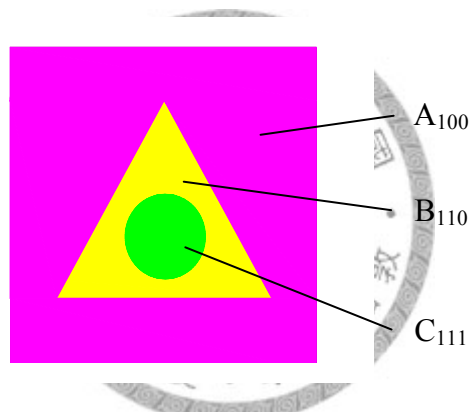


圖 3-29 同一群組，不同層級之物件定義

因此遵循先前所述之內層優先處理原則，物件層加工製程步驟即可表式如圖

3-30 所示：

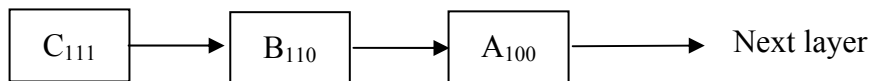


圖 3-30 同一群組，不同層級之物件加工道次步驟

若方形與圓形為具相同材質物件時，如圖 3-31 所示，圓形物件可改寫為  $A_{111}$  表示之，重新進行物件道次加工的排序。此兩物件雖具相同材質，但因處於同一

群組而不同層級，無法簡化加工程序，故仍須各自進行道次加工，其物件加工道次步驟如圖 3-32 所示，仍須依序進行 A<sub>100</sub>、B<sub>110</sub>、C<sub>111</sub> 等三組道次加工。

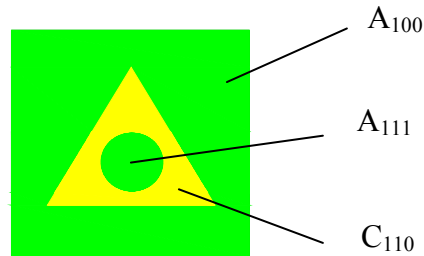


圖 3-31 同一群組，不同層級間有相同材質之物件定義



圖 3-32 同一群組，不同層級間有相同材質之物件加工道次步驟

(b) 多組群組，不同層級

在實際加工案例中，加工層並非如此單純，大都以多組群組與多層級方式呈現，因此需進行深入探討。如圖 3-33 所示，加工層中具有四個物件，合計有兩組群組與兩個層級，依照前述之物件分類定義，可將紅色三角形、青色圓形、黃色菱形及藍色正方形等四個物件分別以 B<sub>10</sub>、A<sub>11</sub>、D<sub>20</sub>、C<sub>21</sub> 表示之。

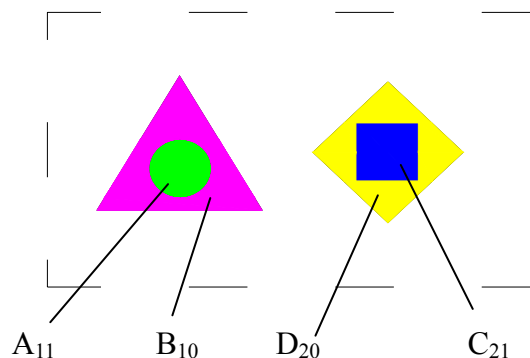


圖 3-33 多組群組，多層級之物件定義

此加工層中因有兩組獨立的物件群組，因此物件道次加工順序可規劃下列兩種方式。

1. 依群組分類方式進行加工。任選其中一組群組先行進行單一群組，依最內層級優先製作法則，將群組內最多層級之物件先行加工，待此群組內所有層級之物件依序完成加工後，在接續加工另一組群物件。
2. 不分群組別，各物件依據最內層級優先製作法則依序交互加工。

因此，以上述物件加工道次規劃方法，此範例可得六組物件道次加工路徑，如圖 3-34 所示，為整體之物件道次加工製程。以圖 3-34 第一組物件道次加工路徑而言，是優先選擇第一群組物件進行加工，此群組中最多層級之物件為  $A_{11}$  因此需優先加工，接著依序進行上一層級  $B_{10}$  物件加工，直至完成整群組內的各層級物件加工後，再換第二群組中最多層級的  $C_{21}$  物件加工，接著再進行  $D_{20}$  物件加工，最後即可得到此物件道次加工之步驟流程。同理，以第二組物件道次加工路徑說明不分群組各物件利用最內層級優先製作法則交互加工方法。首先仍以第一群組中最多層級之  $A_{11}$  物件先行加工，接著跳至第二群組中最多層級之  $C_{21}$  物件進行加工，然後在換回第一群組第一層級之  $B_{10}$  物件加工，最後再進行第二群組中的第一層級  $D_{20}$  物件進行加工，如此，即可得第二組物件道次加工之步驟流程。

為能簡化物件加工道次，在相鄰的道次加工路徑中，若具有相同材質的物件，可優先選此製程加工路徑，並將此兩道次之加工路徑合併成單一道次加工，就能縮減加工時間及節省材料。如圖 3-34 所示，第一組的物件道次加工路徑中，若物件 B 與 C 為相同材質，則可優先選擇此組道次加工路徑，將  $B_{10}$  與  $C_{21}$  兩物件道次加工合併簡化成單道次加工，即可得較佳的物件道次加工步驟路徑。圖 3-35 所示，即為簡化後的物件加工步驟流程。

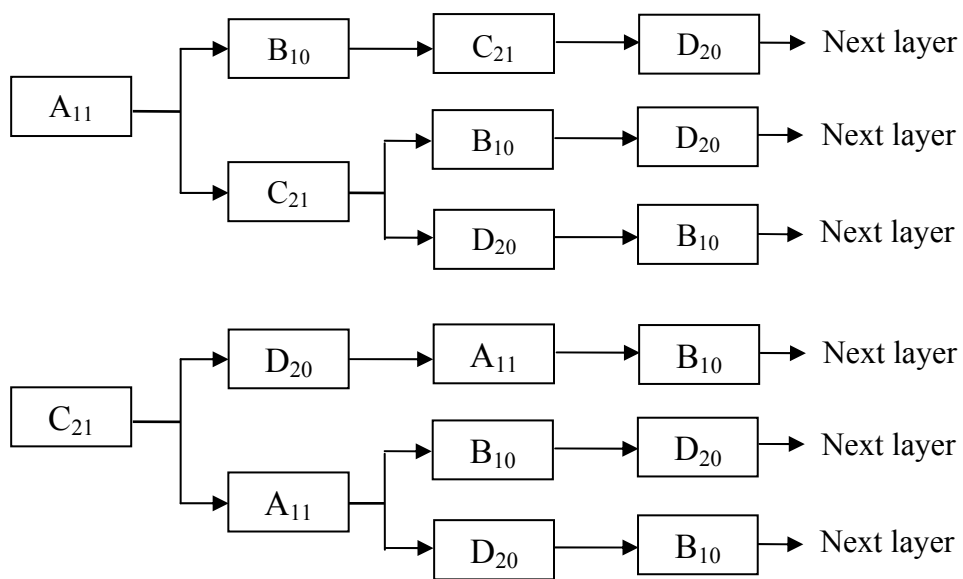


圖 3-34 多組群組，多重層級之物件層加工製程步驟



圖 3-35 簡化後的多群組及多層級之物件道次加工步驟流程圖

### 3-2-4 物件積層加工順序法則歸納

在進行多種材料的層加工，除需考量輪廓物件之材料種類，層級與群組外，如何簡化物件的道次加工得到最優化的路徑步驟，以便進行整體層加工製程流程規劃。其道次加工路徑順序之法則以及簡化方式，總結歸納以下幾點，其整體物件道次加工流程說明，如圖 3-36 所示。

1. 若加工層中僅有單一群組之物件，需先進行最內層級之物件加工。若有兩組以上之群組物件，則可依群組方式分類加工，先行加工其中一組群組，待此群組所有層級之物件皆完成加工後，再接續加工另一組群物件，或者不分群組方式，將所有群組中之各物件依據最內層級優先製作法則由內向外依序交互加工。
2. 在物件的道次加工路徑中，若前後相鄰的道次加工有相同材質的物件，則可優先選此製程加工路徑，並將此兩道次之加工路徑合併成單一道次加工，簡化加工步驟。
3. 每一層加工製程中的第二道次以後之物件加工，皆須針將先前所有道次加工後的物件外型輪廓進行疊加，做為廢料圖形切割依據，進行廢料切割加工。

### 整體流程說明：

- 一、 工件實體依材質進行切層並將其切層剖面拆解為單一2D輪廓之最簡化的物件切層。
- 二、 進行面積的布林運算，決定物件之材質定義以及層級與群組分類
- 三、 進行物件道次加工順序處理，並演算第二次物件道次加工中第一次及第二次切割時所需圖形
- 四、 決定物件道次加工步驟順序
  1. 單一群組：
    - (i) 依據最多層級優先製作法則，物件依序層級由內往外加工。
  2. 多組群組
    - (i) 以群組分類方式，各群組加工以內層級優先製作法則依序加工。
    - (ii) 不分群組，各物件依據最內層級優先製作法則由內向外交互加工。
  3. 簡化物件道次加工

在物件的道次加工中，若前後相鄰路徑具有相同材質的物件，則可此相鄰兩道次加工路徑合併成單一道次加工。
- 五、 決定最佳路徑進行物件道次加工

圖 3-36 物件道次加工法則流程說明

### 3-3 可變層厚之積層加工效率探討

目前關於提昇快速原型切層方法的研究，大致朝改變材料厚度及改變加工能量裝置的加工方向兩個主題進行，Dolenc 與 Makela[36]、Kulkarni 與 Dutta[37]、Sabourin[38]等人以及 Sabourin[39]皆有進行切層方法之相關研究，主要針對工件各種不同特徵，輪廓形狀的變化，探討較佳的切層厚度。當工件輪廓斜度較平緩時，使用較細的厚度；當工件輪廓斜度較陡峭時，使用較大之厚度，利用不同的切層厚度以提高加工效率。因此，對於所有的快速原型技術而言，由於加工效率的考量或製程技術的限制，都將切層厚度固定是最常使用的基本設定。尤其是薄片材料積層加工的快速原型技術，由於使用固定厚度的片狀材料作為加工材料，無法隨外形特徵變化作厚度變動，容易喪失細部特徵而影響尺寸精度。其他粉末或液態之快速原型亦大都使用固定層厚來加工，以提昇效率，同樣也會發生相同的問題。本研究之多種材料之薄片積層法新式製程，除能製作具多種材質的功能性複合元件，也可依工件要求的精度下提供不同厚度的薄片材料，減少薄片積層數量，增進製程的加工效率。因此，本節將探討如何利用具多重送料匣裝置之新式薄片積層快速原型系統以多樣性材料層厚的薄片進行最佳效率的積層加工。

傳統的LOM與其他RP相同，採用2D的加工方式將一層層材料疊加起來，因此會產生階梯狀誤差[40-45]。這個誤差常發生在切層斷面輪廓具有斜面之工件，當斜面陡峭時，階梯狀誤差會變成較小。但當斜面之斜度較平緩時，階梯狀誤差會更明顯；若將積層厚度降低，可減少這個誤差，但是相對的會增加積層數量，加長積層時間，造成降低加工效率。圖3-37為加工厚度及輪廓形狀改變對階梯狀誤差的影響情形說明。由此可知，當輸入的STL執行切層處理時，由於切層厚度為固定的限制，於實際製作時會產生階梯狀誤差。如圖3-38所示， $t$ 為切層厚度，尖角高度 $\delta$ (cusp height)即為階梯狀誤差。

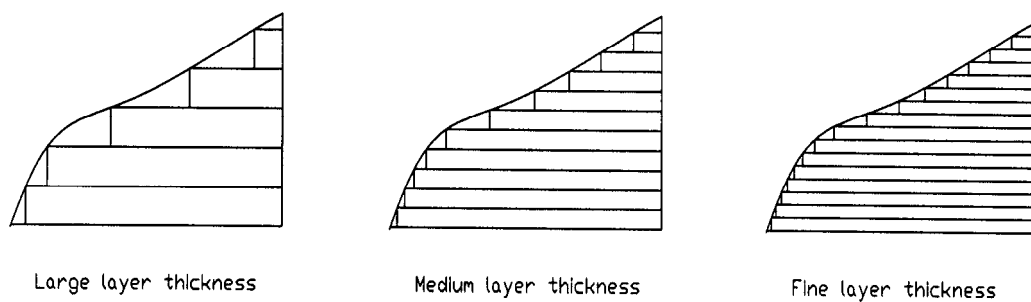


圖 3-37 不同輪廓斜率及不同加工厚度改變所產生的加工誤差[40]

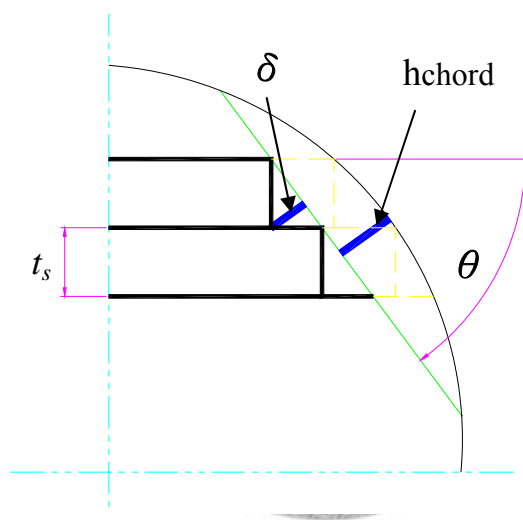


圖 3-38 層加工所產生之階梯狀誤差示意圖

一般而言，層加工所產生的階梯狀誤差  $\delta$ ，會與切層厚度及工件切層斷面輪廓斜率有關，如圖3-39所示，此關係可寫成方程式 (3.2)，其中  $\delta$  為階梯狀誤差， $t$  為切層厚度， $\theta$  為切層斷面斜面法向量  $\vec{n}$  與層建構方向  $\vec{B}$  之夾角。

$$t = \delta \sec \theta \quad (3.2)$$



$$t_i : \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\} \quad i = 1 \sim n \quad t_n > t_{n-1}$$

$$t_i < t \leq t_{i+1}$$

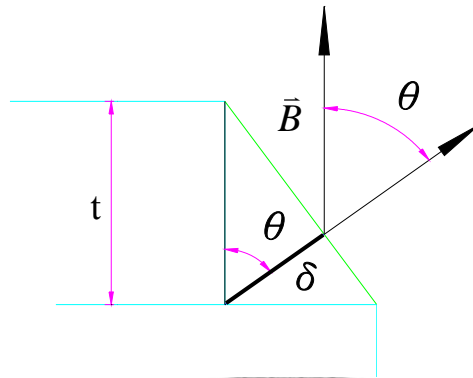


圖 3-39 階梯狀誤差與切層斜面及切層厚度關係圖

由上式可知，一般層加工之切層厚度  $t$  都為一固定值，因此當切層斷面輪廓斜率有變化時， $\theta$  即會產生變動，故階梯狀誤差  $\delta$  也變化並非定值，使得工件外型輪廓在每切層中也會產生也不同之誤差精度。

因此，為能得到最合適的切層厚度，若所需切層精度  $\delta$  為一固定值，當  $\theta$  隨切層斷面斜面變動時，即得切層所需厚度  $t$ ，當新製程之薄片積層系統具有  $n$  組不同厚度的薄片材料，因此即可在不超過  $\delta$  切層精度下，得到最適合的  $t_i$  薄片厚度。

### 3-4 小結

本章提出了一套嶄新的“多種材料之薄片積層法加工製程”以“先切後黏再切”兩次切割的方式，可順利自動去除廢料並可用於製作多種材料之元件。新製程除能以物件概念為依據將切層輪廓拆解成多組物件道次加工步驟，順利達成多種材質物件之積層，同時提出一套簡化加工法則，降低物件加工次數，除此之外，也利用製程中獨特的多重送料匣裝置，能將工件階梯狀誤差精度控制在定值下，提供幾組不同厚度的薄片材料，減少薄片積層數量，增進製程的加工效率。



## 第四章 多種材料薄片積層法之支撐結構

### 建構法則與簡化方法

新式的多種材料薄片積層法是以物件道次加工概念製作工件，製作具多種材質的工件，其方法是將每切層的 2D 輪廓視為新的物件，然後依物件定義及製程流程法則，將物件依序完成，但在完成每積層中之物件加工後，在無物件之 2D 輪廓內會形成空的區域，無法如傳統 LOM 利用廢料產生自然支撐結構，造成加工後之物件會產生變形的困擾。因此本章節主要探討如何利用多種薄片材料物件加工之概念將此空區域轉化為特殊材質的新物件，產生合宜的支撐結構，解決原物件無法支撐的問題。同時也將進一步提出一套簡化支撐結構的建構方法，可縮短廢料製作時間並使廢料更易剝除。

#### 4-1 多種材料積層加工法支撐建構法則

大部分的 RP 系統，例如 SLA、FDM 等皆需要建立支撐結構，以解決工件問題。傳統 LOM 之製程法，是將廢料與工件以立方體形狀結構包覆形成“自然支撐”，過程中不需再對工件作額外的支撐。如圖 4-1 是傳統紙張 LOM 之工件與廢料示意圖。為了此自然支撐的優點，但卻造成了額外很多的限制與缺點，尤其是以金屬、陶瓷為材料製作工件甚至中空件時，在剝除廢料時則更顯的更加困難。

新式的多種材料薄片積層製程，是以物件道次加工概念，將每加工層之 2D 輪廓圖形皆視為獨立物件，然後依序將物件製出，即可產生多材質性的工件。當每加工層經物件道次加工後，除了會在 2D 平面留下所需各種材質之物件外，同時也會在無物件之處產生空的區域，故無法如傳統 LOM 製程具有廢料區域可當作支撐結構，會使工件產成翹區、陷落等變形問題，甚至無法製出所需的形狀。所以在傳統 LOM 製程形成的廢料區域，在此新製程會成為空的區域。廢料是多餘的，難

以剝除，不想保留，而空區域卻無支撐作用，又需建構支撐。因此，如何解決廢料剝除的困擾與支撐結構之問題，需將廢料區域與空區域之間做一妥協，因此，運用新製程中的物件概念，將所謂的空區域視為新的物件，以水溶性或臘材等易處理材料置入於空區域，即可以成為支撐結構，如此不但可以解決工件支撐問題，也無廢料剝除的困擾。水溶性材或臘材，有些許強度，且易於進行去除，因此即適合當作支撐結構材。

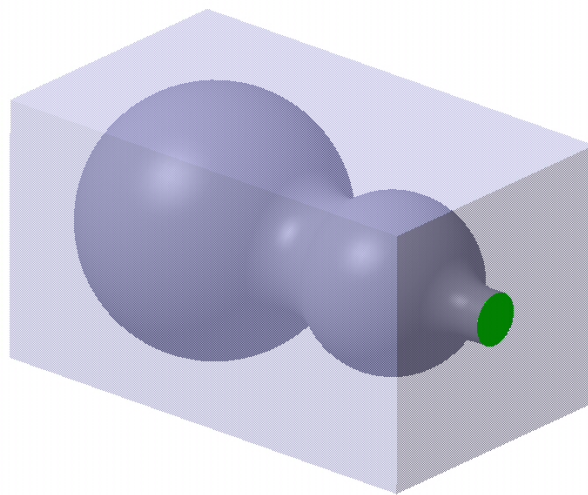


圖 4-1 傳統 LOM 製程之工件與廢料示意圖

圖 4.2 所示，為傳統 LOM 在加工層中物件與廢料區域之輪廓形狀圖，剖面線處區域為各物件材，空白區域則改以水溶性或臘材之物件所取代。由於將空區域填滿支撐材，即增加了新的物件，因此需要將加工層的物件重新定義。

在具空區域的加工層中，各層級的物件定義如圖 4-3 所示，具有紅色圓形、藍色三角形及黃色環形三種物件，白色即為空區域，因此共有兩個群組與兩個層級，依序可表示為  $A_{11}$ 、 $B_{20}$ 、 $C_{10}$  三組物件。現在將空的區域放入支撐材物件 D，變為新物件後，則需依物件定義法則重新將各物件定義。如圖 4-4 所示，加工層中演變為五個物件，四種材質，即多了兩組青色的水溶性支撐物件，層級數則演變為四個層級，其各物件定義可表示為  $A_{1111}$ 、 $B_{1200}$ 、 $C_{1100}$ 、 $D_{1110}$ 、 $D_{1000}$ 。

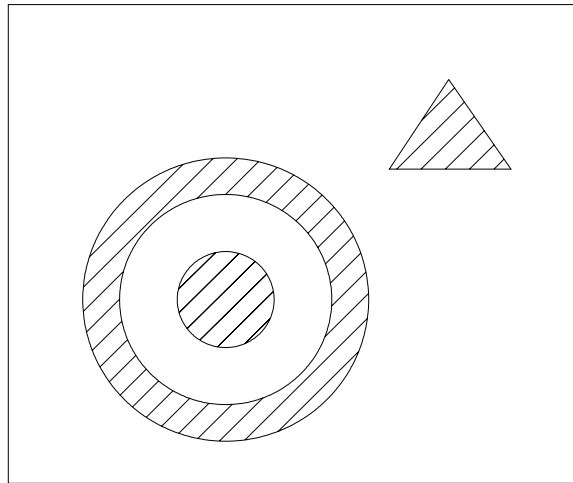


圖 4-2 加工層中之物件與廢料區之輪廓形狀

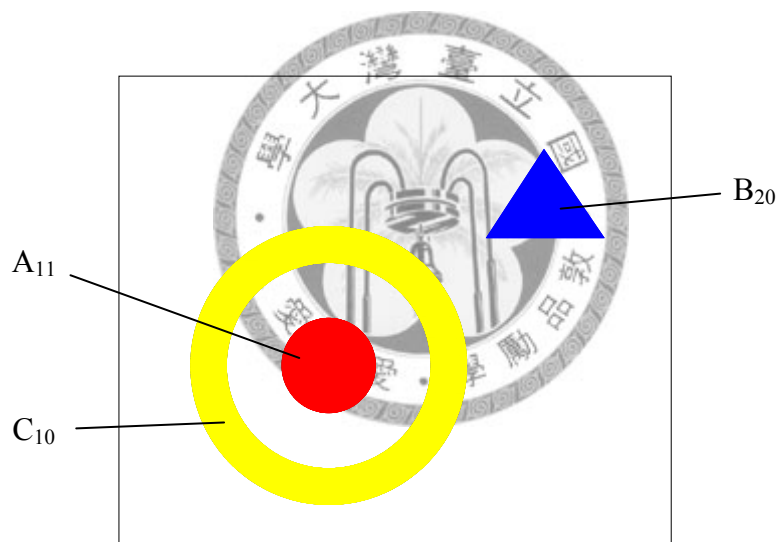


圖 4-3 加工層中具有空區域之物件定義

如此，原物件道次加工步驟流程會由三組物件道次加工變為五組道次加工。圖 4-5 所示，為加工層中具空區域的三組物件道次加工步驟流程，依製程流程法則，可依序以  $A_{11}$ 、 $B_{20}$ 、 $C_{10}$  步驟進行道次加工。圖 4-6 所示，為空區域加入支撐材物件之加工道次步驟，可以  $B_{1200}$ 、 $A_{1111}$ 、 $D_{1110}$ 、 $C_{1100}$ 、 $D_{1000}$  依序加工。

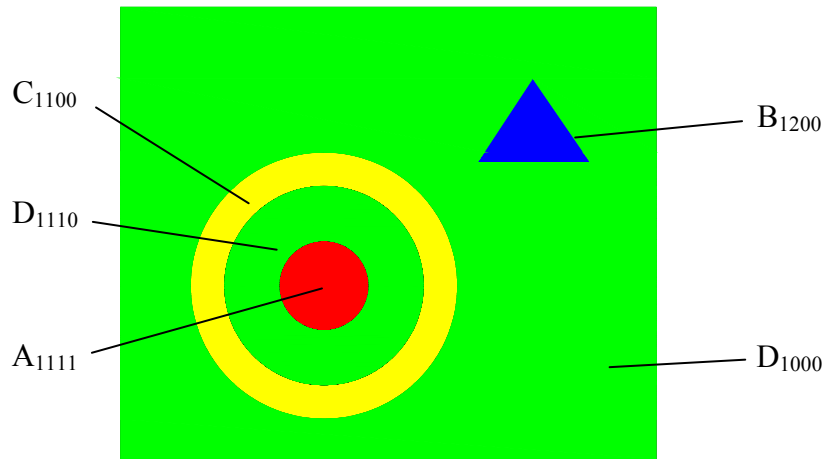


圖 4-4 加工層中添加水溶性材或臘材之物件定義



圖 4-5 加工層中無支撐材料之物件道次加工步驟



圖 4-6 加工層中具支撐材料之物件道次加工步驟

經過上述之物件定義以及物件道次加工製程流程的法則演算後，即可得到各物件道次加工的順序，依序進行積層，可得到如傳統 LOM 廢料與工件以立方體形狀結構之半成品，由於空區域(廢料區)已被支撐材質之新物件所取代，因此只要進行簡易的廢料剝除處理即可順利得到原型工件。

## 4-2 支撐結構簡化法則

如前所述，多種材質積層加工製程可將原空的區域填入新物件，做為新廢料區成為自然支撐，但每新添加一種物件即會多增加一組物件道次加工，會增加層加工時間以及材料的浪費，因此，如何進一步簡化廢料區之支撐結構將是本節主要研究的重點。

大部分的 RP 系統，例如 SLA、FDM 等製程皆因無廢料區域，故需額外建立支撐結構，避免工件因無支撐結構而產生翹曲、陷落與變形等問題，由於新式多種材料薄片積層製程也可視為一般無廢料區之快速原型系統，因此在建構工件也會遭遇幾種需建立支撐結構的問題，如圖 4-7 所示，圖 (a) 為工件具有突出物體產生懸臂樑效應，發生變形，圖 (b) 為工件製作中發生孤島效應，圖 (c) 為斜面區因自重關係產生不穩定結構。由於製程是以物件道次加工方式將支撐物件以面積方式直接建立，與 SLA 與 FDM 等 RP 系統以點對點方式形成之支撐結構，並不相同，自然對於簡化支撐結構之設定會有不同的考量，因此，需以不同的支撐結構情況加以討論。

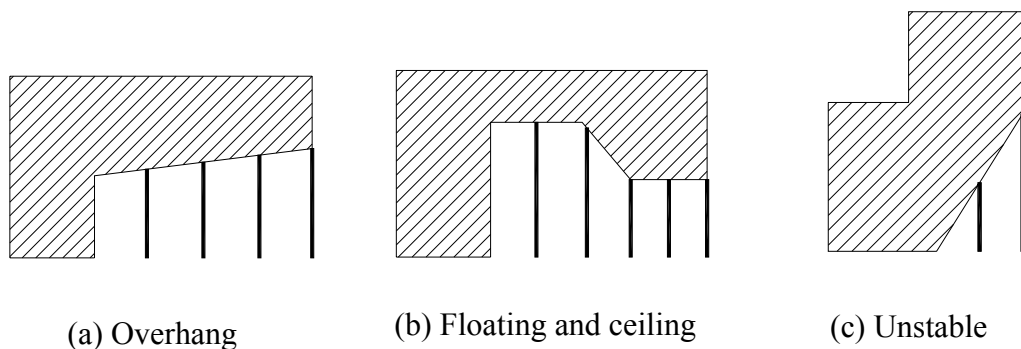


圖 4-7 RP 製程建構工件的幾個支撐問題

為能取得工件所需之支撐結構，使用輪廓投影法方式[34]，在工件內外輪廓中具的凸面特徵處，採用輪廓投影法，即可產生所需之支撐結構。以圖 4-8 葫蘆工件為例，依圖示將其水平擺放進行積層加工，則可得知在於工件正中間 A-A 剖面處

下方需建構支撐結構，而剖面上方則完全不需要支撐，因此 AA 剖面上方的任一切層所產生之空區域，無須加入支撐物件。

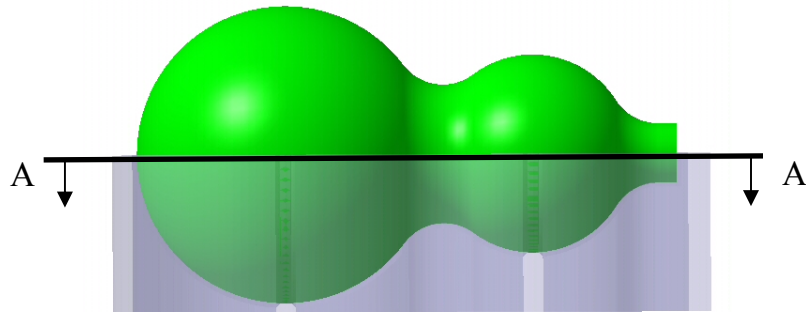
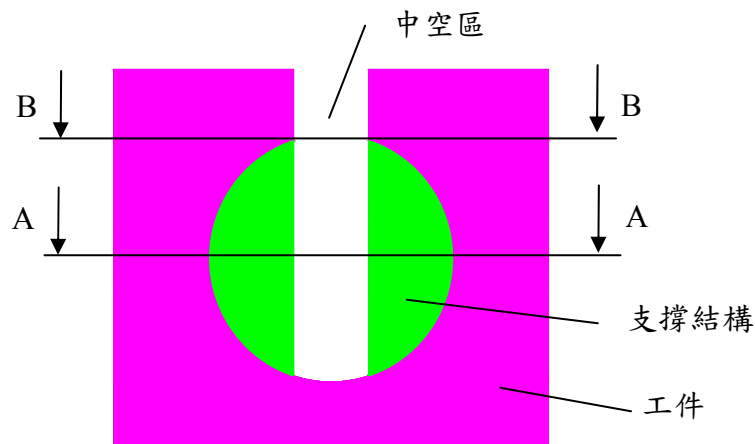


圖 4-8 葫蘆工件所需建立支撐結構圖

一般快速原型系統所需建立的支撐結構是愈精簡愈好，以降低在製作支撐結構所耗費的時間。但在物件加工之概念中，被非如此，一般最常見的情形是在空區域內並未填滿支撐物件，亦即支撐物件相鄰周遭仍有空區域，因此我們採取”完全支撐”的概念，即為若在空區域內有產生支撐結構時，無論此支撐結構形狀或大小，都將此空區域填滿支撐物件。如圖 4-9 所示，為內部具圓形之中空件的輪廓斷面圖，以輪廓投影法，可得綠色區域的支撐結構。將其在此斷面輪廓進行切層，利用物件定義法則可得物件定義圖，如圖 4-10 所示，(a)為 AA 剖面處之物件定義圖，(b)為 BB 剖面處之物件定義圖。



4-9 具圓形中空開口工件的輪廓斷面剖面圖



如圖 4-10(a)所示， $A_{10}$  為第一層級之工件， $B_{11}$  為支撐物件，在  $B_{11}$  內仍存有  
空區域 C，很顯然是在此空區域內，因演算後只需建構局部的支撐物件，未將此空  
區域填滿。雖多餘空區域不影響道次加工步驟，且在此空區域中所需建立支撐物  
件面積無論是大或小皆需進行相同次的支撐物件之道次加工，無法節省材料，僅  
影響雷射切割路徑長短，但從另一觀點來看，若用支撐物件將此空區域整個填滿，  
如此會與相鄰的物件產生相互拘束邊界，會有較佳的物件定位力與較強的支撐結  
構。因此，可將此空區域內支撐物件完全填滿。當工件切層至 BB 剖面線上方以後，  
如圖 4-10(b)所示，支撐結構消失，只剩物件  $A_1$ ，在加工層的空區域不需產生支撐  
物件，僅需進行  $A_1$  物件道次加工。

因此，當某加工層空區域處需產生支撐結構，而支撐物件小於此空區域時，  
可利用完全支撐法，將支撐物件填滿整個空區域，直至加工層內空區域消失或空  
區域內的支撐物件消失為止。

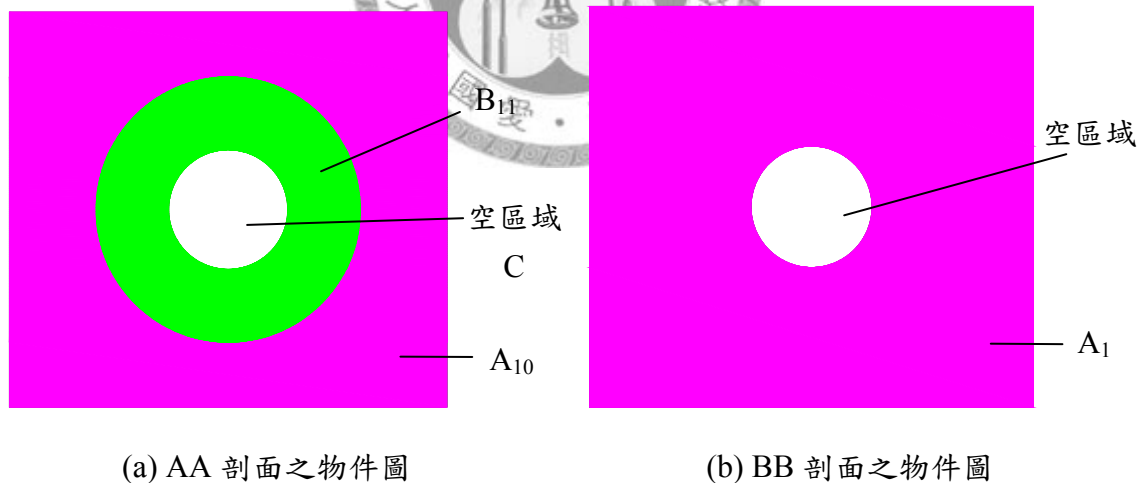


圖 4-10 具圓形中空開口工件的物件示意圖

另討論幾個在空區域內並未填滿支撐物件例子，如圖 4-11(a)所示，加工層中  
具有三組物件分別是物件  $A_{100}$ 、 $B_{110}$ 、 $C_{111}$  及空區域 D 及 E，由於空區域無須進行  
物件定義，可得  $A_{100}$ 、 $B_{110}$ 、 $C_{111}$  之物件道次加工步驟。其中  $B_{110}$  為支撐材物件，  
因演算後所需之支撐結構較小，因此仍殘存了空區域 D 及 E，未能與  $A_{100}$  與  $C_{111}$

物間緊緊包圍，會有支撐強度不虞的問題。而另一個例子則為空區域內產生過多支撐物件，如圖 4-11(b)所示，在空區域內產生了四組支撐物件  $B_{11}$ 、 $B_{12}$ 、 $B_{13}$ 、 $B_{14}$ ，雖然在物件道次加工中，其具相同材質且屬同一層級，可合併成單一加工路徑。但過多組的支撐物件，輪廓切割路徑反而過長，且各支撐物件輪廓形狀若過於複雜並不利於建構，不如合併為一。因此，上述兩案例之支撐物件若能填滿整個空區域，不但可將支撐物件簡單化，利於進行物件道次加工，也能產生較佳的物件定位能力與較強的支撐結構。

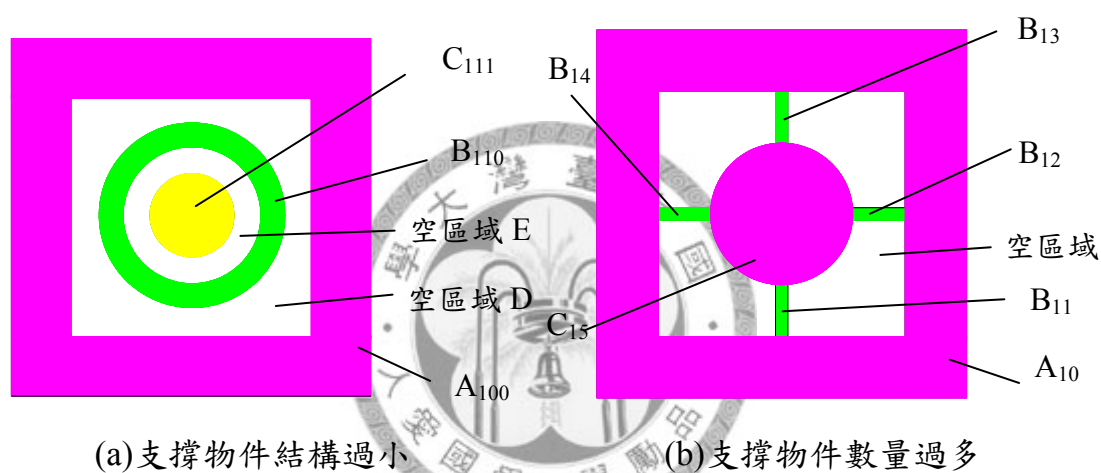


圖 4-11 空區域內並無填滿支撐物件

如上所述，一般快速原型系統所需建立的支撐結構是愈精簡愈好，但在物件加工之概念中，並非如此，仍要配合物件道次加工法則，才能產生最佳化的支撐結構。因此，支撐結構簡化法則可歸納如下：

- (a). 利用輪廓投影法產生所需的支撐結構，可減少支撐物件之道次加工數量。
- (b). 若在空區域內並未填滿支撐物件，亦即支撐物件相鄰周遭仍有空區域時，則可優先將此空區域填滿支撐物件，進行完全支撐。
- (c). 由於支撐結構也是以物件概念進行加工，若支撐物件之道次加工步驟流程中具有前後相鄰的加工順序，一樣可以合併成為單一的道次加工，簡化加工次數。

### 4-3 小結

廢料剝除的問題是薄層積層加工製程中最大的困擾，因此為能解決此問題，本章提出了特殊支撐結構之建構法則以及簡化方式，順利運用新製程中的物件概念，將所謂的空區域視為新的物件，以易處理之水溶性材料或是臘材置入於空區域，即可產生合宜的支撐結構，不但可以解決工件支撐問題，也無廢料剝除的困擾，可大幅減少後處理時間以及製作複雜之中空工件。



# 第五章 多種材料的積層加工製程模擬驗證

本章節主要針對多種材料的積層加工製程原理進行相關性之驗證。驗證中分別以兩種不同案例來詳述製程流程所需之加工步驟與注意要項，並利用前兩章節所提出之多材料製程加工步驟流程、物件定義原則、物件道次加工演算法及支撐結構的建構方式等相關製程要點，進行案例的模擬與分析，證明整個新式製程的實用性與合理性。

## 5-1 驗證流程規劃



“多種材料薄層積層加工製程”的特點是以物件道次加工的概念，製作具多種材質之功能性元件。此製程有別傳統 LOM 製程僅以單種材質薄片進行積層加工，製作單一材質元件。新製程具有獨特性的物件道次加工概念。因此為能充分展現製程可行性及可合理性，其中工件所需支撐結構會以輪廓投影法利用 3D 繪圖軟體進行手動建構。

模擬中將選定兩組案例，如圖 5-1 所示，一為內含圓球的中空葫蘆件，另一是具雙重材質的中空球件，分別利用新式之多種材料薄片積層法以“先切後黏再切”的兩次切割製程方式，進行切層中各物件道次加工步驟流程演算法則之模擬與驗證。為要呈現工件與支撐材料多重物件特性，以圖文描述方式將切層中的 2D 輪廓以物件方式呈現，每一物件都賦予材質、層級與群組之定義，作為物件道次加工順序之依據，如此可將切層中不同種類之材質陸續製出，達成多種材料的製作，同時也利用具水溶性特殊材質的薄片材料，當作另類物件材質，製作出特殊的支撐結構。

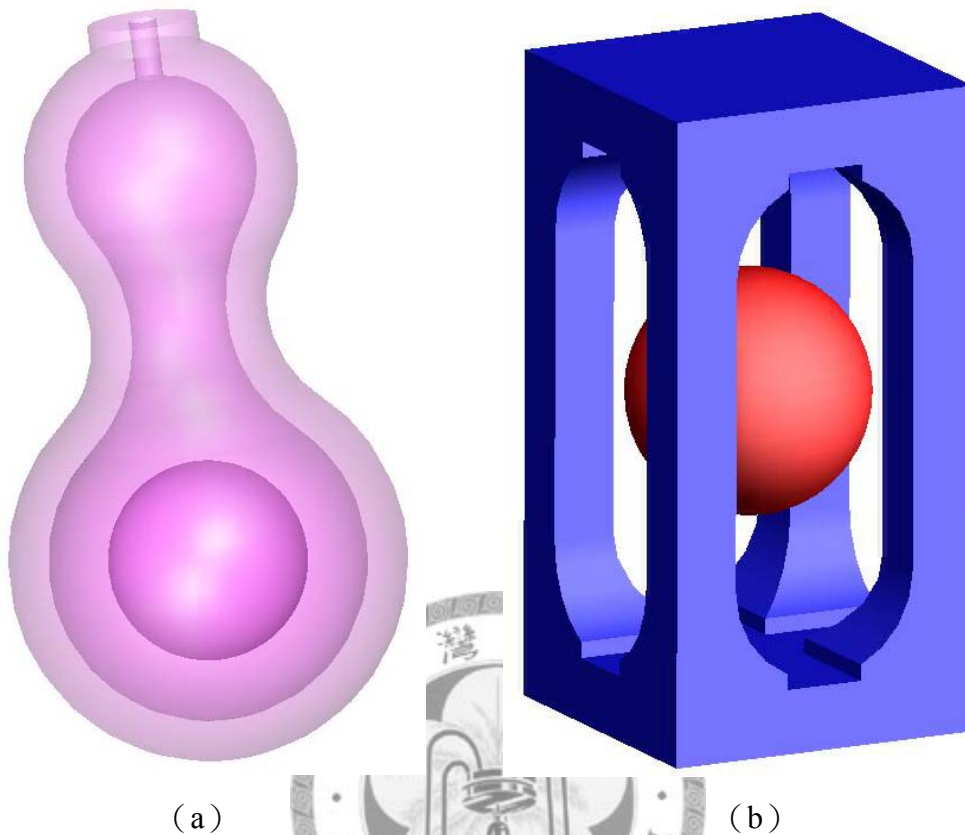


圖 5-1 案例模型圖 (a) 中空葫蘆，(b) 中空球件

## 5-2 案例驗證

實驗中選定兩組工件進行案例分析與驗證，分別為內含圓球的中空葫蘆件與具雙重材質的中空件。其中葫蘆件主要是針對支撐結構建構法則進行驗證。如何利用水溶性特殊材質作為支撐結構，以物件概念置入空區域內建立支撐，並將空區域進行完全支撐，進行製作特殊的中空物件。雙重材質的中空球件，即為顯現多種材料積層製程的可行性以及實用性，如何利用物件道次加工演算法則，將各切層之層加工轉換以物件道次加工方式進行多材質的薄片物件積層加工，同時配合多種材料製程流程，驗證此製程的獨特與實用。

## 案例 1 葫蘆件

此工件主要具有內含圓球的中空物件，如圖 5-1(a)所示，葫蘆內部藏有一圓球件，因此將工件所需的製作步驟依據完整的製程流程進行驗證，製程步驟說明如下：

### 步驟一：建立工件 3D 模型及支撐結構

首先以 3D CAD 軟體建立中空葫蘆之 3D 圖檔，再利用輪廓投影法建立所需支撐結構，葫蘆是以水平方式擺放，因此僅需在工件高度 1/2 處，亦即輪廓剖面最大處進行向下投影，即可得到外輪廓所需之支撐結構，如圖 5-2(a)所示，為葫蘆外輪廓處所需建立的支撐結構。同時工件內部為中空結構且內含一圓球，因此在內部區域也需建立完全支撐結構將內輪廓及圓球物件進行支撐。圖 5-2(b)綠色部分為工件內部與圓球物件間的支撐結構剖面示意圖。此葫蘆工件模型尺寸最大直徑處為 30mm，全長為 54mm。

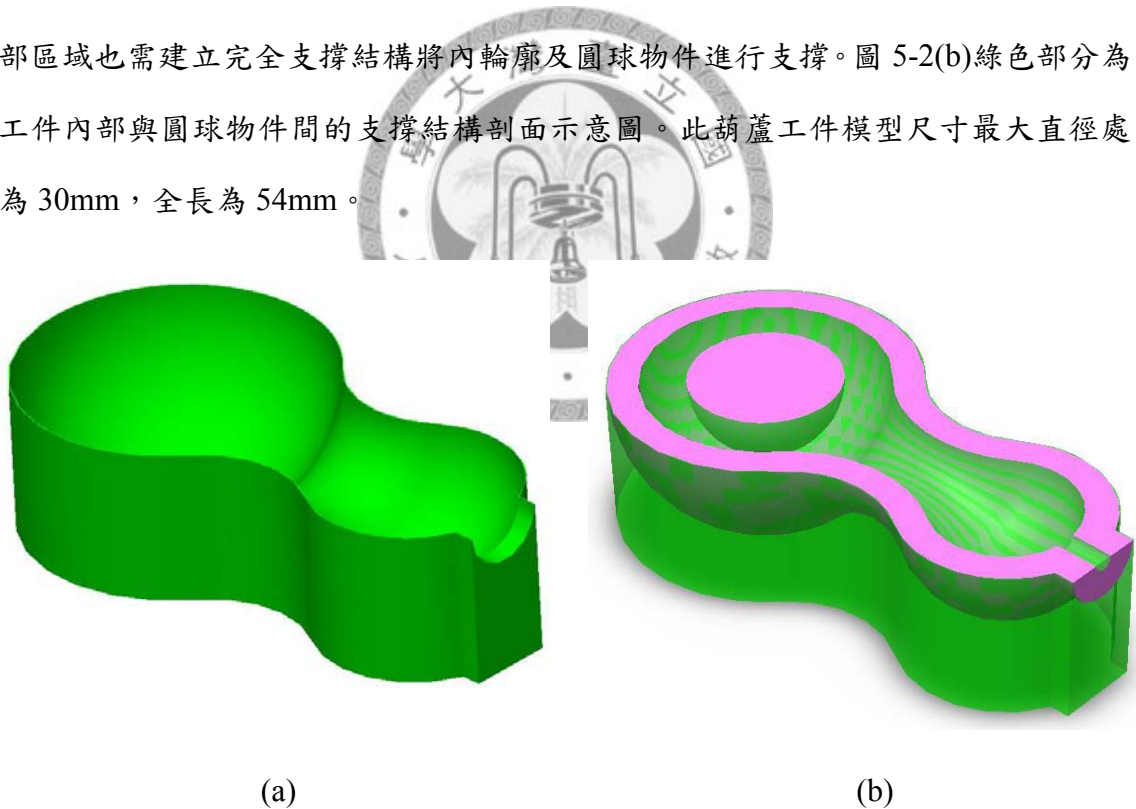


圖 5-2 葫蘆件之支撐結構圖(a)葫蘆件外部輪廓的支撐結構模型圖，(b)葫蘆工件內部與圓球物件的支撐結構之剖面示意圖

## 步驟二：進行物件分析與定義以及加工流程法則演算

完成工件模型與支撐結構的建立後即以材質作區分，將各物件立體模型分別進行切層處理，由於葫蘆工件是以水平位置擺放建構，每切層厚度固定設定為 0.1mm，工件最高處（葫蘆外形最大直徑處）為 30mm，可得 300 片所需積層加工之 2D 輪廓圖。其中每一切層之剖面輪廓皆須簡化為單一物件（輪廓），若切層中具有多組輪廓，即需拆解成多組單一物件之切層剖面，然後將同加工層內所有單一物件的切層，以外輪廓為邊界並忽略內輪廓進行實心面域。再將每單一切層物件相互進行面積的布林運算，進行物件分析與定義。如圖 5-3 所示，為四片切層圖檔，各是第 50、100、150、250 切層剖面圖，其中挑選的第 100 層切層作為進行物件定義之範例說明。

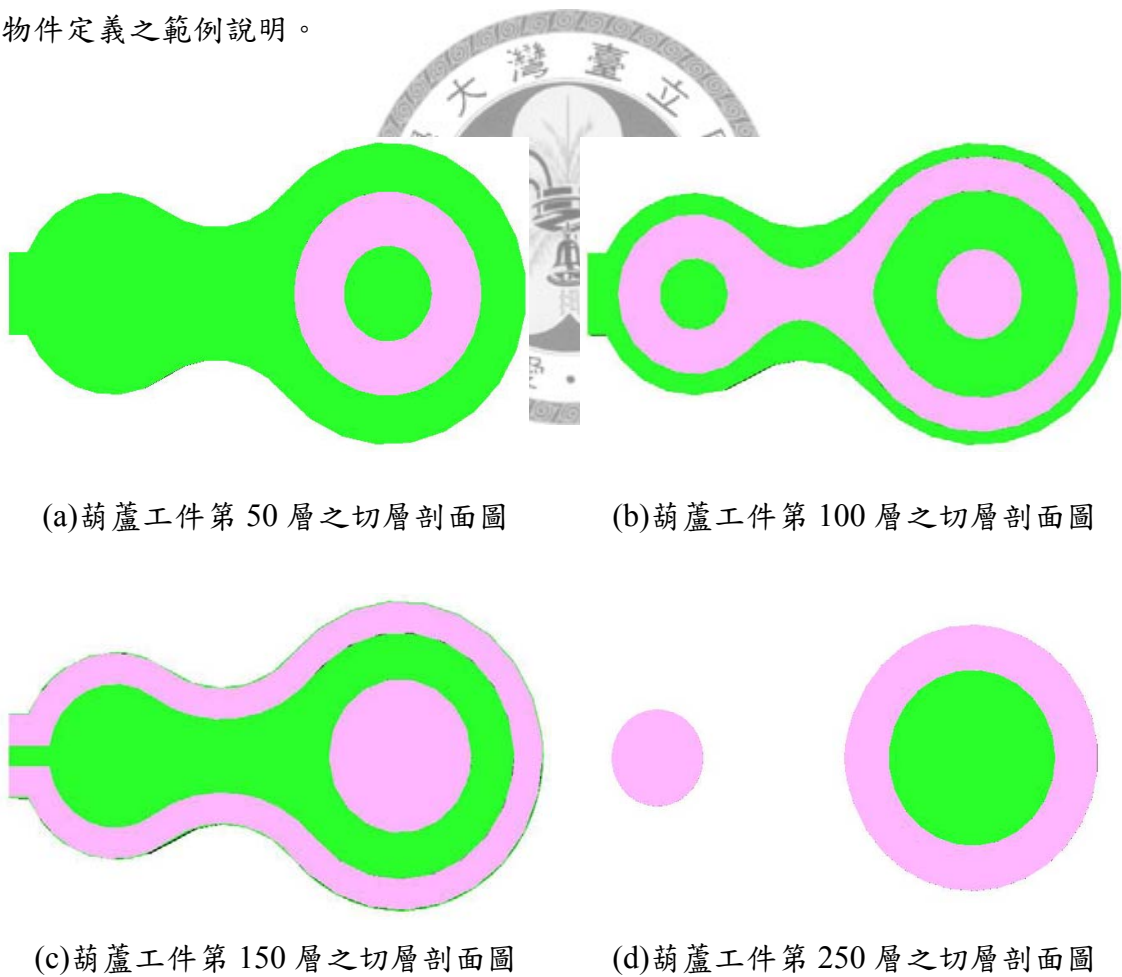


圖 5-3 葫蘆工件之各切層剖面圖

圖 5-4 所示，為葫蘆工件的第 100 層中所有 2D 物件的定義圖，此切層中具有兩組材質五種物件圖形，其中綠色圖塊為支撐物件共有葫蘆外型、圓形及環形，各以 A1、A2 與 A3 物件代號表示，粉紅色為工件物件，分別為八字形與圓形以 B1 及 B2 示之，依據物件排序分類演算流程，可依序先取 A1 與 A2 物件之外迴圈進行面積的布林運算，由於物件 A1 與 A2 為第一次被擷取，故兩者都各以[A1]與[A2]新矩陣方式表示，經各物件之外迴圈內的實體面積布林運算，此二物件之面積產生交集且 A1 面積大於 A2，因此合併為新矩陣[A1,A2]，繼續進行下 A1 及 A3 物件之面積演算，其中物件 A1 已存在於矩陣中，而物件 A3 為第一次演算之物件，因此產生為新矩陣[A3]，此兩物件進行布林運算發現面積有產生交集且 A1 物件面積大於 A3 物件面積，因此將物件 A3 放入物件 A1 後方，合併為新矩陣[A1,A3]。

接續再擷取物件 A1 及 B1 之物件排序演算，物件 B1 為第一次演算物件，可生成為新矩陣[B1]，經運算此兩物件面產生交集且 A1 物件面積大於 B1 物件面積，同樣地將物件 B1 放入物件 A1 後方，合併為新矩陣[A1,B1]。最後取 A1 及 B2 物件進行演算，B2 為第一次擷取之物件故需先行產生新矩陣[B2]，此兩物件在面積上有交集且物件 A1 大於物件 B2 之面積，故可合併為新矩陣[A1,B2]。因此以 A 物件為首所進行第一回的交叉演算共產生[A1,A2]，[A1,A3]，[A1,B1]，[A1,B2]等四組矩陣。

接著再以 A2 物件為首，進行物件的交叉演算排序，首先取 A2 與 A3 物件進行比對，兩者並無交集，因此無須動作，接續取 A2 與 B1 物件進行演算，A2 物件與 B1 物件面積有交集且 B1 大於 A2，因此原矩陣[A1,A2]與[A1,B1]可進行合併成新矩陣依序排列成[A1,B1,A2]，依序取 A2 與 B2 物件進行演算，兩物件並無交集，因此維持原狀，經第二次交叉演算，物件矩陣數演變為[A1,B1,A2]，[A1,A3]，[A1,B2]三組矩陣。繼續以 A3 為首之物件與其他物件進行交叉比對，首先取 A3 與 B1 物件進行演算，經演算此兩物件面積有交集且 B1 物件面積大於 A3 物件面積，而[A1,B1,A2] 矩陣內之 B1 物件後方存有 A2 物件，故僅先將[A1,A3]矩陣可合併為



接續取 A3 與 B2 物件進行演算，此兩物件面積產生交集且 A3 大於 B2 故可將 [A1,B2] 矩陣可合併為因此經第三回的物件交叉比對，各物件行矩陣演變成 [A1,B1,A2]，[A1,B1,A3]，[A1,A3,B2] 三組矩陣。

最後進行以 B1 物件為主的交叉比對，取 B1 與 B2 物件進行布林函數運算，此兩者物件面積經運算產生交集，且 B1 物件面積大於 B2 物件面積，故可將 [A1,B1,A2]，[A1,A3,B2] 兩矩陣合併成 [A1,B1,A3,B2] 新矩陣，此矩陣即為所有物件間最終的群組與層級關係。因此，依據物件定義，加工切層中，共有四個層級，分別是綠色的葫蘆狀支撐物件以 A<sub>1000</sub> 表示，然後是粉紅色八字形的工件物件為第二層級，以 B<sub>1100</sub> 表示之，接續向內有兩個獨立綠色圓形及環形物件為第三層級，各以 A<sub>1110</sub>、A<sub>1120</sub> 表示，最後在環形物件內為粉紅色圓形物件為最內層級，以 B<sub>1121</sub> 示之。切層中第一及第二層級中為單一物件分別是 A<sub>1000</sub> 與 B<sub>1100</sub>，在第三層級中具有兩物件，各為 A<sub>1110</sub> 與 A<sub>1120</sub>，其中 A<sub>1120</sub> 與第四層級物件 B<sub>1121</sub>，自成為子群組。

完成物件定義後，接著利用第三章節所述之內層物件優先加工原則，進行物件道次加工步驟排序之演算。首先以不分群組別，各物件依據最內層級優先製作法則依序交互加工。因此先以第四層級之物件 B<sub>1121</sub> 優先加工，依序是同群組第三層級 A<sub>1120</sub> 物件，接著在進行第三層級另一群組物件 A<sub>1110</sub>，隨後是第二層級物件 B<sub>1100</sub>，最後為第一層級物件 A<sub>1000</sub>，即可得如圖 5-5 所示的第一組道次加工步驟。或者也可將第一組加工步驟中，第三層級的 A<sub>1120</sub> 物件與 A<sub>1110</sub> 物件加工順序對調，可得第二條加工步驟流程。另一物件道次加工演算方法則是不以最內層級優先，而是任選其中一組群組先行進行單一群組，依最內層級優先製作法則，將群組內最多層級之物件先行加工，待此群組內所有層級之物件依序完成加工後，在接續加工另一組群物件。因此選用第三層級中的單一群組 A<sub>1110</sub> 物件先行加工，然後接續另一群組 B<sub>1121</sub> 及 A<sub>1120</sub> 物件，接著為 B<sub>1100</sub> 物件，最後是 A<sub>1000</sub> 物件，如此可得第三條道次加工步驟流程。因此，以此演算法則共可得三條物件道次加工步驟流程，如圖 5-5 所示即為葫蘆工件第 100 切層之物件加工製程步驟

再者，依物件道次加工簡化原則，在物件的道次加工路徑中，若前後相鄰的道次加工有相同材質的物件，可將此兩道次之加工路徑合併成單一道次加工，簡化加工步驟。由圖 5-5 所示之物件道次加工步驟可得知，第一條及第二條路徑能從五組道次加工簡化為道次四組加工，且簡化後的兩組物件道次加工步驟路徑皆為相同。第三組加工路徑因無前後相鄰的同材質物件道次加工，故不能簡化，因此取第一條最簡路徑進行加工，簡化後之加工路徑如圖 5-6 所示。

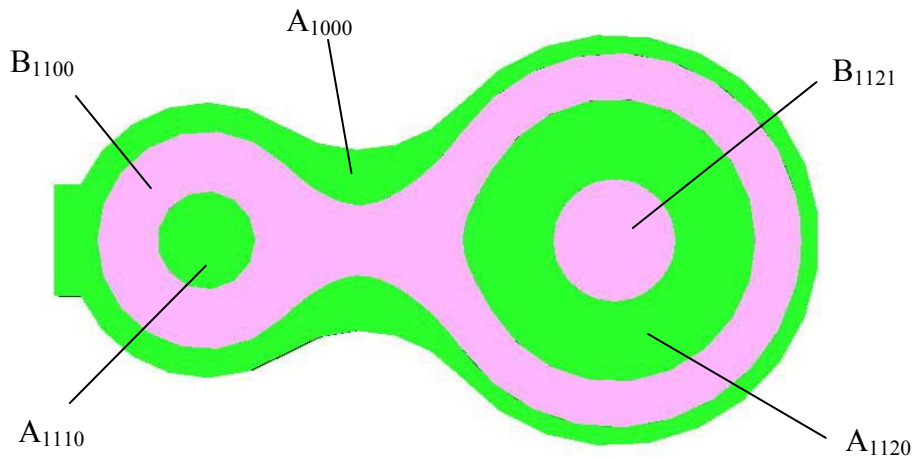


圖 5-4 葫蘆件第 100 切層之 2D 物件定義圖

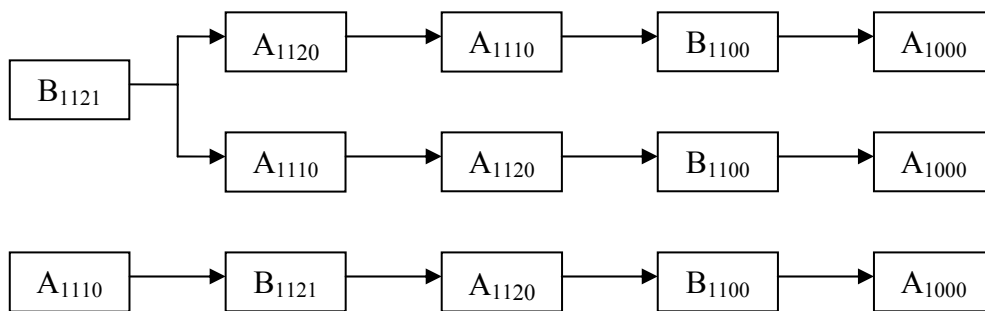


圖 5-5 葫蘆件第 100 切層之物件加工製程步驟

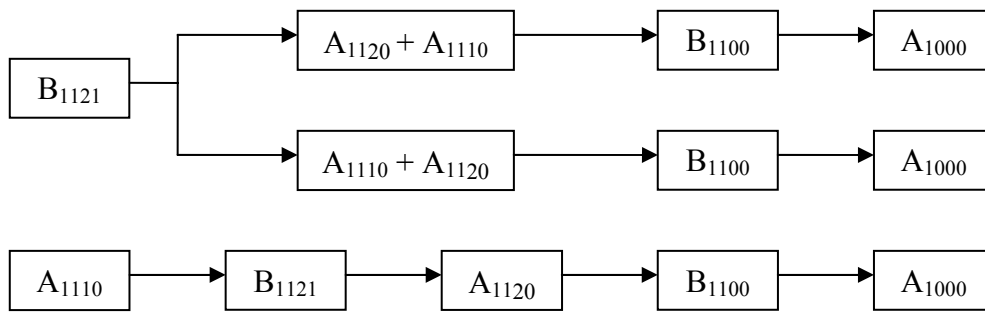


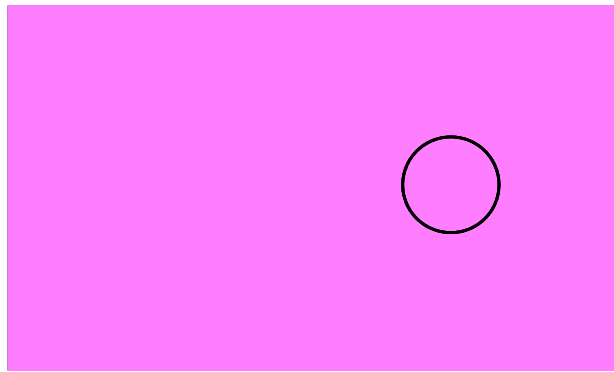
圖 5-6 葫蘆件第 100 切層之物件加工製程簡化步驟

### 步驟三：進行物件道次加工之層加工

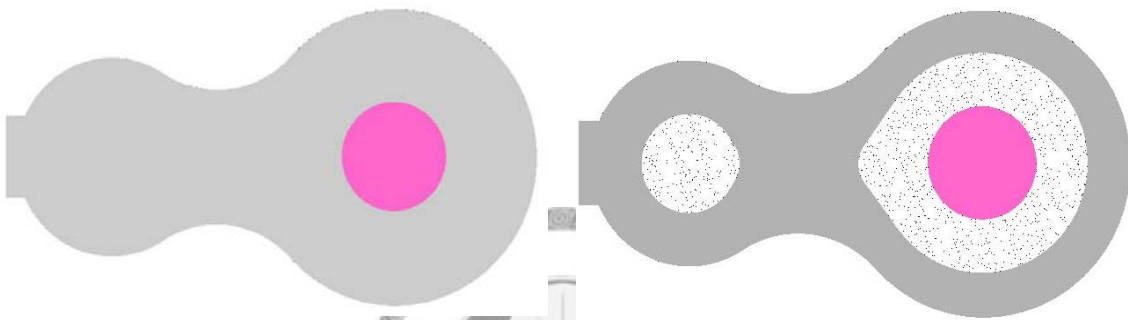
決定最簡化物件道次加工後，即可將加工步驟流程，傳送至電腦開始進行層加工製作。以第 100 切層加工為例，其最簡之物件加工道流程依序為  $B_{1121}$ 、 $A_{1110} + A_{1120}$ 、 $B_{1100}$ 、 $A_{1000}$ ，分別將此四組物件加工步驟詳述說明如下。

#### (1) 開始進行第一道次之 $B_{1121}$ 物件之積層製程加工：

首先，將粉紅色工件薄片物料 B 傳送至工作床台上方進行壓合動作，使紅色物件 B 與下方工件進行結合。接著進行切割，切割圖形如圖 5-7(a)所示，為  $B_{1121}$  物件的圓形輪廓圖案，接著去除廢料，留下粉紅色圓形物件在工件上方，如圖 5-7(b)所示，在工件表面上，黏附圓形薄片物件。最後在工件上方噴塗黏膠，噴膠區域如圖 5-7(c)所示，為下一物件  $A_{1110} + A_{1120}$  的物件圖形，結束第一次物件道次加工。



(a) 直接切割之圖形



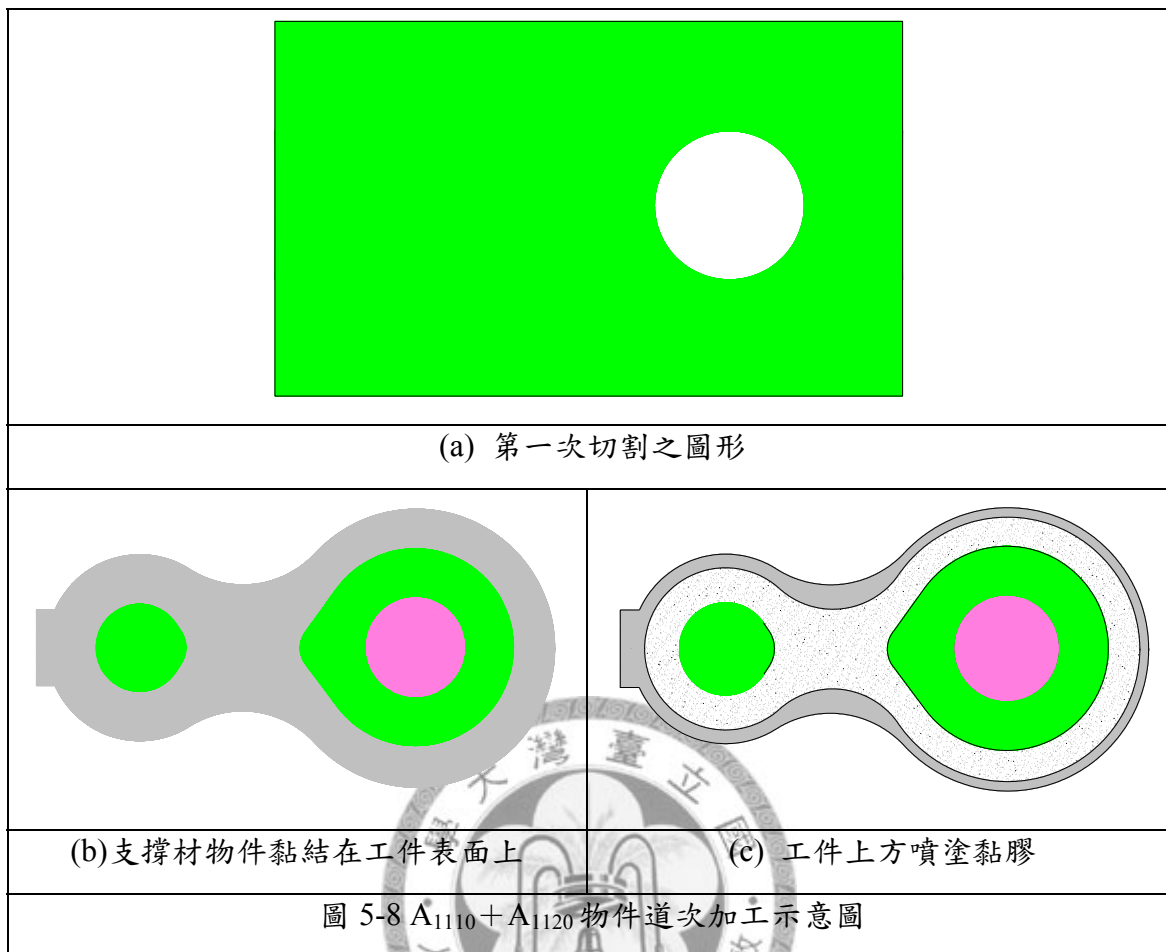
(b) 粉紅色圓形之物件黏結在工件表面上

(b) 工件上方噴塗黏膠

圖 5-7 B<sub>1121</sub> 物件道次加工示意圖

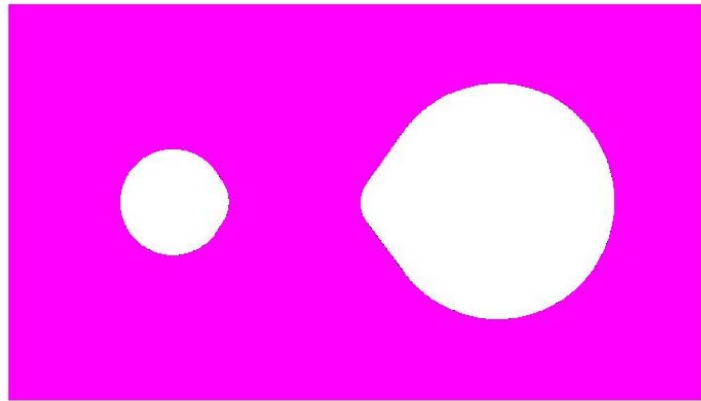
(2) 其次進行第二道次之 A<sub>1110</sub>+A<sub>1120</sub> 物件之積層製程加工：

相同地，先將綠色支撐件薄片 A 傳送至工作床台上方處，開始進行第一次切割，接著去除切割下來的廢料。如前章節所示第一次切割圖形需以先前道次加工 B<sub>1121</sub> 物件的輪廓圖形為依據進行切割，切割圖形如圖 5-8(a)所示，為一圓形圖案。然後進行壓合黏結，使綠色薄片物件 A 與下方之工件進行結合，接續針對所需之進行物件輪廓圖形進行第二次切割，再去除廢料，留下綠色的圓形及環形薄片物件在工件上方。如圖 5-8(b)所示，為工件表面黏附 A<sub>1110</sub> 與 A<sub>1120</sub> 薄片物件的圓形及環形之物件圖。最後在工件上方噴塗黏膠，如圖 5-8(c)所示，下一物件 B<sub>1100</sub> 的物件圖形即為噴膠區域，結束第二次物件道次加工。

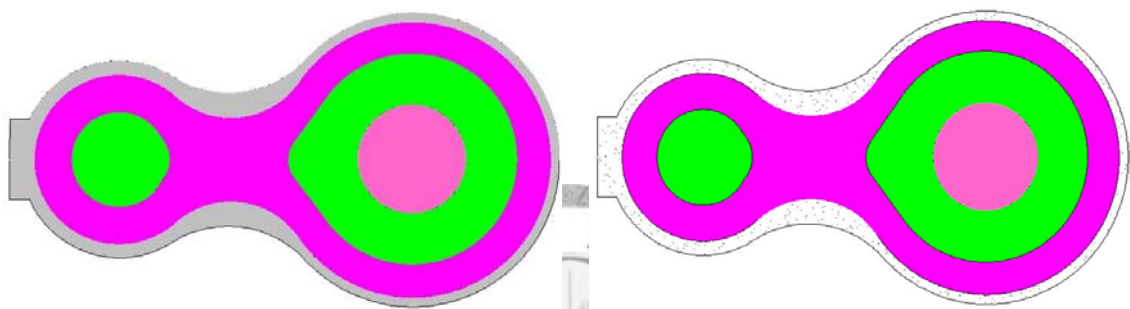


(3) 接續進行第三道次之 B<sub>1100</sub> 物件之積層製程加工：

如同上述，將粉紅色工件薄片 B 傳送至工作床台上方，開始進行第一次切割，接著去除切割下來的廢料。第一次切割之圖形形狀為前兩道次加工物件 B<sub>1121</sub>、A<sub>1110</sub> 及 A<sub>1120</sub> 的圖形進行疊加，因此，圖形如圖 5-9(a)所示，為兩圓形加上環形圖案之疊加形狀。然後進行壓合黏結，紅色薄片 A 與下方之工件進行結合。接續進行第二次切割，再去除廢料，留下八字形薄片物件在工件上方。如圖 5-9(b)所示，為工件表面黏附粉紅色八字形薄片物件。最後在工件上方噴塗黏膠，所需噴膠區域如圖 5-9(c)所示，為下一物件 A<sub>1000</sub> 的物件圖形，結束第三次物件道次加工。



(a) 第一次切割圖形



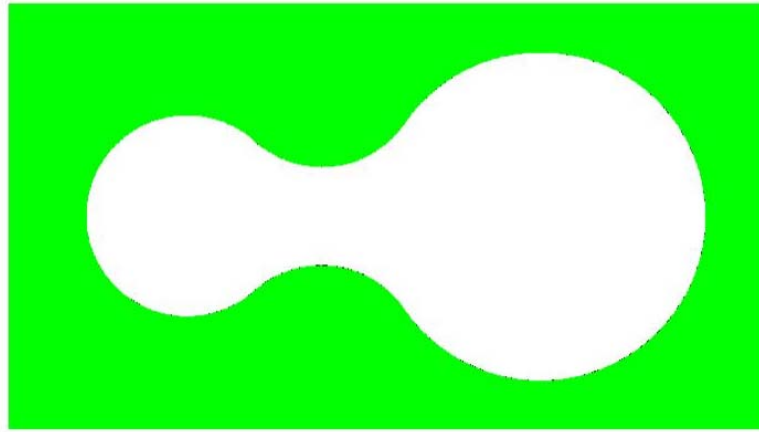
(b) 工件物件黏結在工件表面上

(c) 工件上方噴塗黏膠

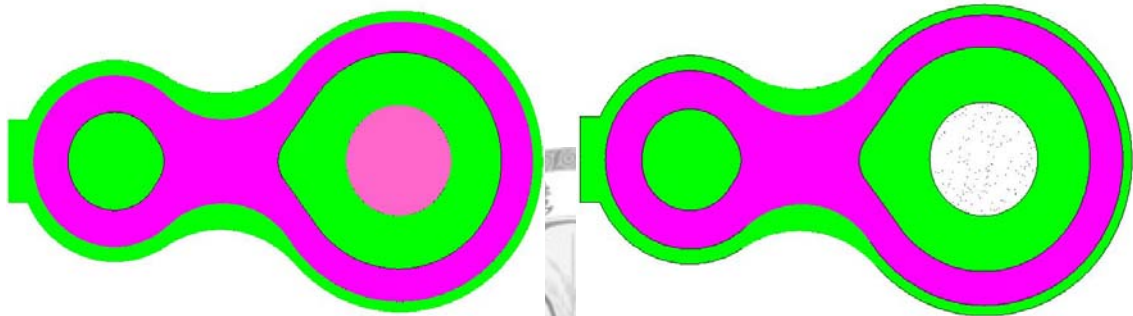
圖 5-9 B<sub>1100</sub> 物件道次加工示意圖

(4) 最後進行第四道次之 A<sub>1000</sub> 物件之積層製程加工：

同樣地進行切層中最後的道次加工，首先將綠色支撐件薄片 A 傳送至工作床台上方，開始進行第一次切割，接著去除切割下來的廢料。第一次切割之圖形形狀為前三次加工物件 B<sub>1121</sub>、A<sub>1110</sub> + A<sub>1120</sub> 與 B<sub>1100</sub> 的圖形進行疊加，圖形如圖 5-10(a) 所示，為兩圓形加上環形再加上八字形圖案之疊加圖。然後進行壓合黏結，綠色薄片 A 與下方之工件進行結合。接續進行第二次切割，去除廢料，留下葫蘆形薄片物件在工件上方。如圖 5-10(b) 所示，為工件表面黏附粉綠色葫蘆形薄片。最後在工件上方噴塗黏膠，噴膠區域如圖 5-10(c) 所示為下一層中第一道次加工之物件圖形，結束第四次物件道次加工，也完成了此切層所有物件之加工製作。



(a) 第一次切割圖形



(b) 支撐材物件黏結在工件表面上

(c) 工件上方噴塗黏膠

圖 5-10 A<sub>1000</sub> 物件道次加工示意圖

接續進行下一層之物件道次加工，直至完成所有切層加工。圖 5-11 所示，即為在第 100 切層中，四組物件依序工在工件表面上成形之示意圖。

#### 步驟四：廢料剝除

將完成積層加工的半成品工件，放置水槽處進行水溶性支撐材去除動作，完成所有製程程序，可得內部具有圓球之中空葫蘆工件，圖 5-12(a)所示，為葫蘆件與支撐結構之半成品圖，圖 5-12(b)則為去除支撐結構的完成品。

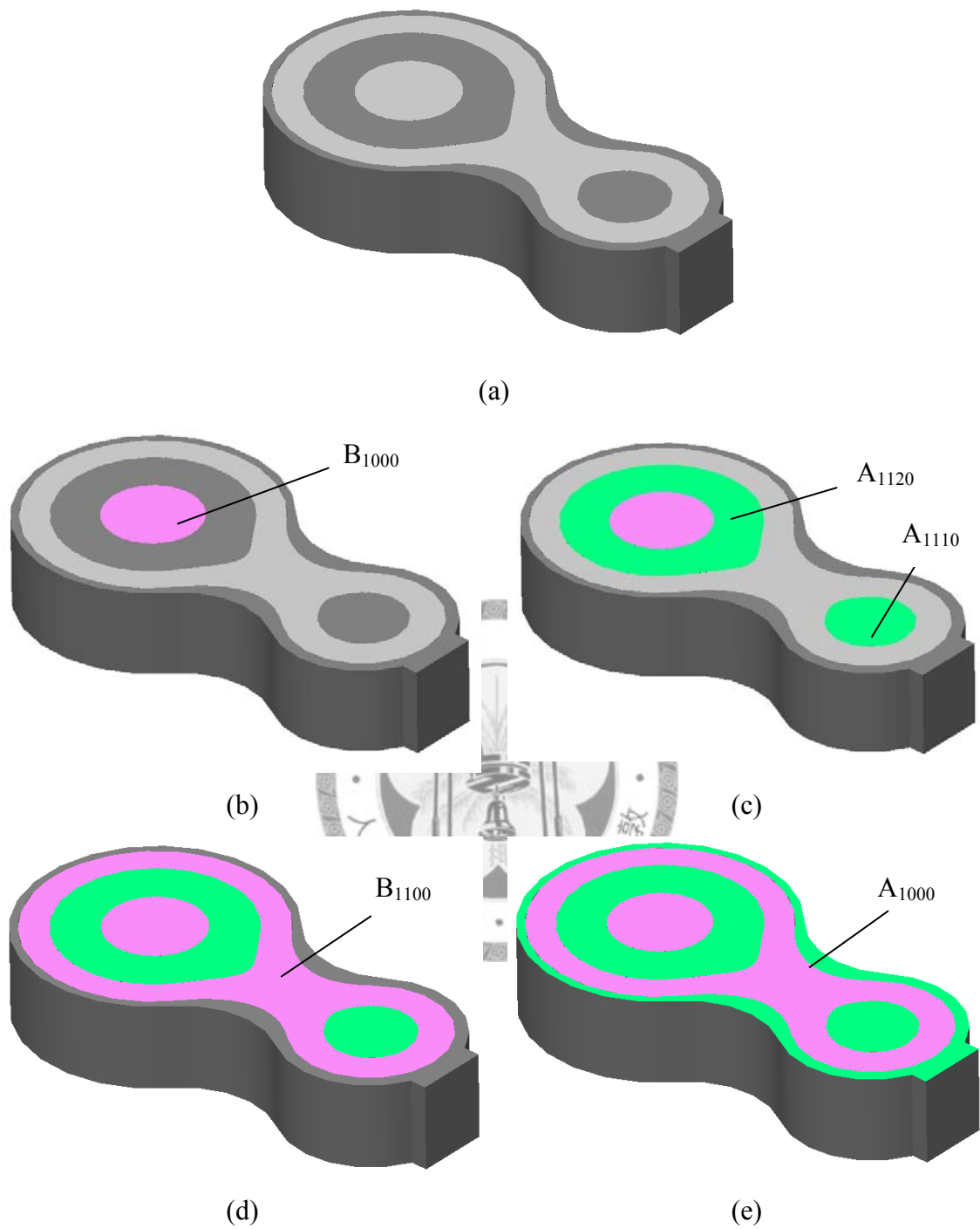


圖 5-11 四組物件道次加工之物件生成圖(a) 上一層工件示意圖，B<sub>1121</sub> 物件成形示意圖，A<sub>1110</sub>+A<sub>1120</sub> 物件成形示意圖，B<sub>1100</sub> 物件成形示意圖，A<sub>1000</sub> 物件成形示意圖



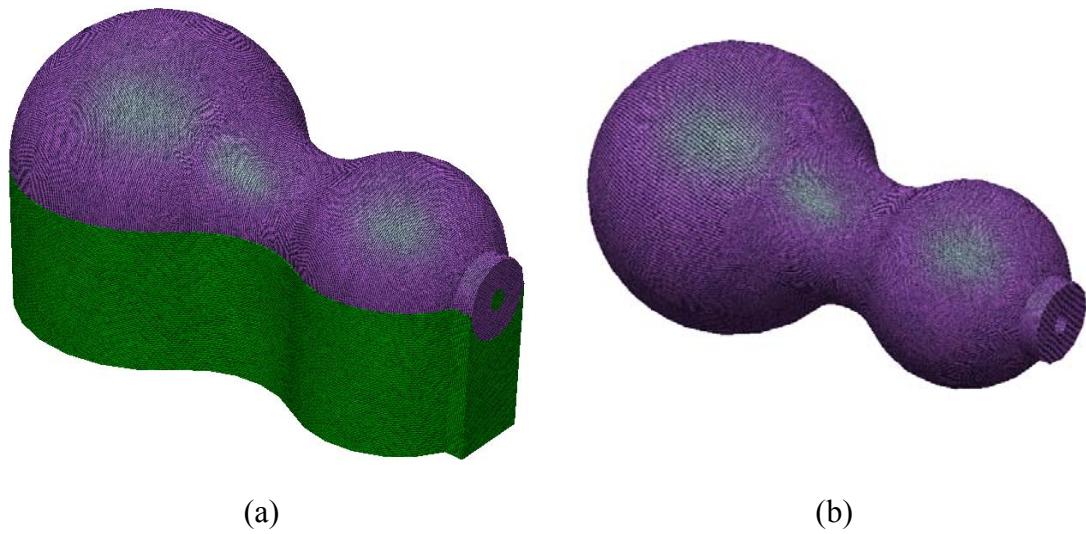


圖 5-12 葫蘆件成品圖(a) 葫蘆件與支撐件之半成品圖，(b)去除支撐結構後的葫蘆成品圖

## 案例 2 中空球件

中空球件是長方形外框裡具有圓球件，如圖 5-1(b)所示，其中圓球與外框為不同材質，不似一般 RP 原型件為單一材質，因此必須以獨特的物件加工概念配合多種材料薄片積層製程才能將工件製出，工件之積層製程流程及加工步驟進說明如下：

### 步驟一：建立工件 3D 模型及支撐結構

首先以 3D CAD 軟體建立中空球件之 3D 立體模型，接著利用輪廓投影法建立所需支撐結構。如圖 5-13(a)所示，為利用輪廓投影法方式建立的支撐結構模型圖。圖中可知，在長軸方向處之圓球物件與外框間的支撐結構有空隙情形發生，如圖 5-13(b)所示，為在工件 1/4 高度處切層的剖面圖，圖中可發現，空區域內並未填滿支撐物件，於是產生空隙。為能強化支撐結構以及使後續製程之物件道次加工中的支撐物件簡單化，因此可利用第四章節所述“完全支撐”概念，將空區域填滿支撐物件，如圖 5-13(c)所示，為工件 1/4 高度處切層圖中將空區域填滿支撐材，

因此支撐結構可修改如圖 5-13(a)所示之形狀。此工件模型尺寸長寬高各為 40x40x80 mm。

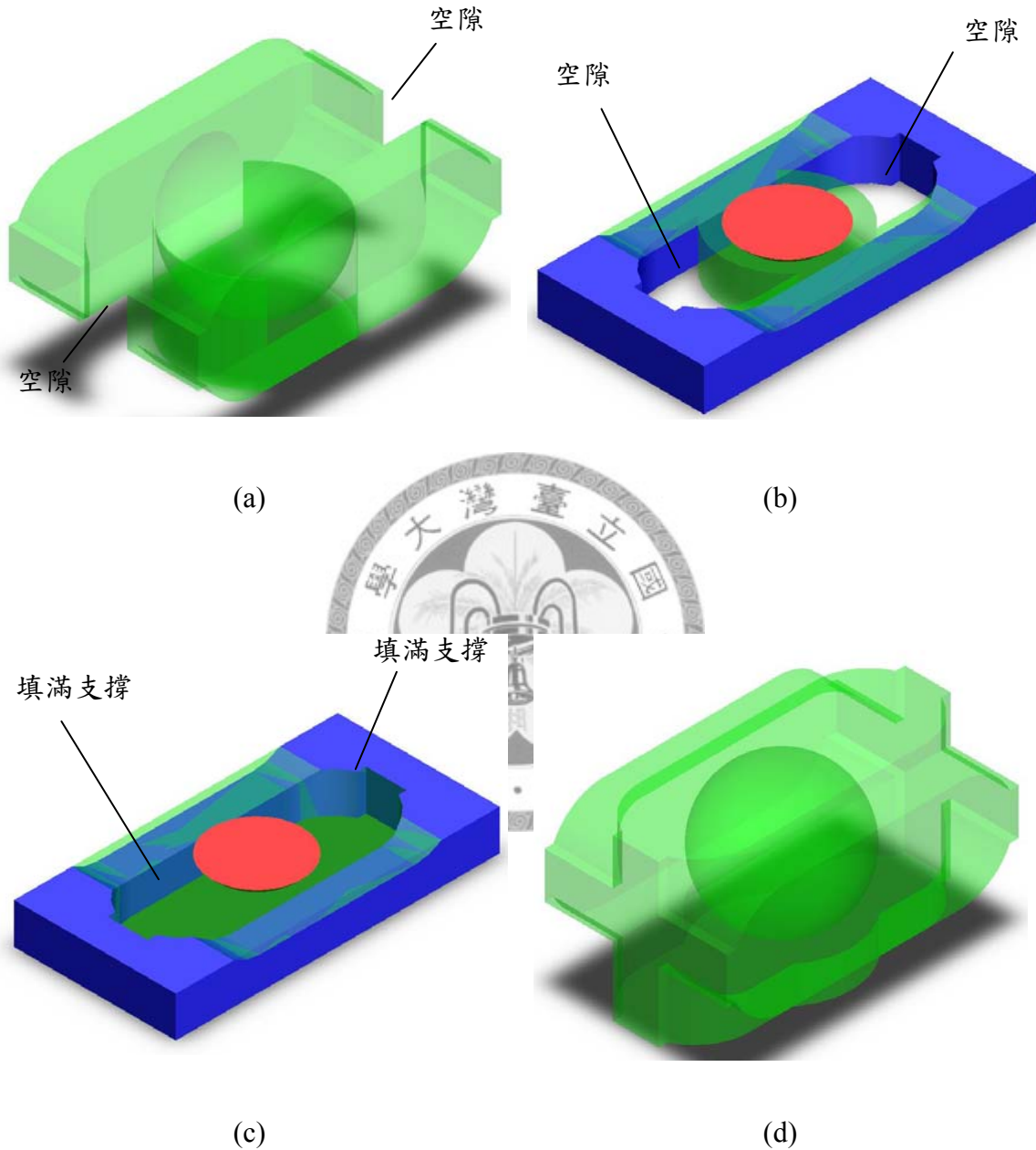


圖 5-13 中空球件兩種支撐結構模型圖及切層剖面圖。(a)依輪廓投影法建立具有空洞之支撐結構模型(b)在工件 1/4 高處的切層剖面圖，工件外框與圓球間之空區域(空隙) (c)將圖(b)切層剖面的工件外框與圓球間之空區域以完全支撐概念填滿(d)修改後的支撐結構模型

## 步驟二：進行物件分析與定義以及法則流程演算

如同前例，完成工件模型與支撐結構的建立後即以材質作區分，將各物件立體模型分別進行切層處理。中空球件是以水平位置擺放建構，每切層厚度固定設定為 0.1mm，因工件最高處為 40mm，可得 400 片積層加工所需之 2D 輪廓圖。其中每一切層之剖面輪廓皆須為簡化為單一物件（輪廓），若切層中具有多組輪廓，即需拆解成多組單一物件之切層剖面，然後將同加工層內之所有拆解產生的單一物件切層，以外輪廓為邊界並忽略內輪廓進行實心面域。再將每單一切層物件相互進行面積的布林運算，進行物件分析與定義。如圖 5-15 所示，為四片切層圖檔，各是第 50、100、2000、320 切層剖面圖，其中挑選的第 100 層切層作為進行物件定義之範例說明。

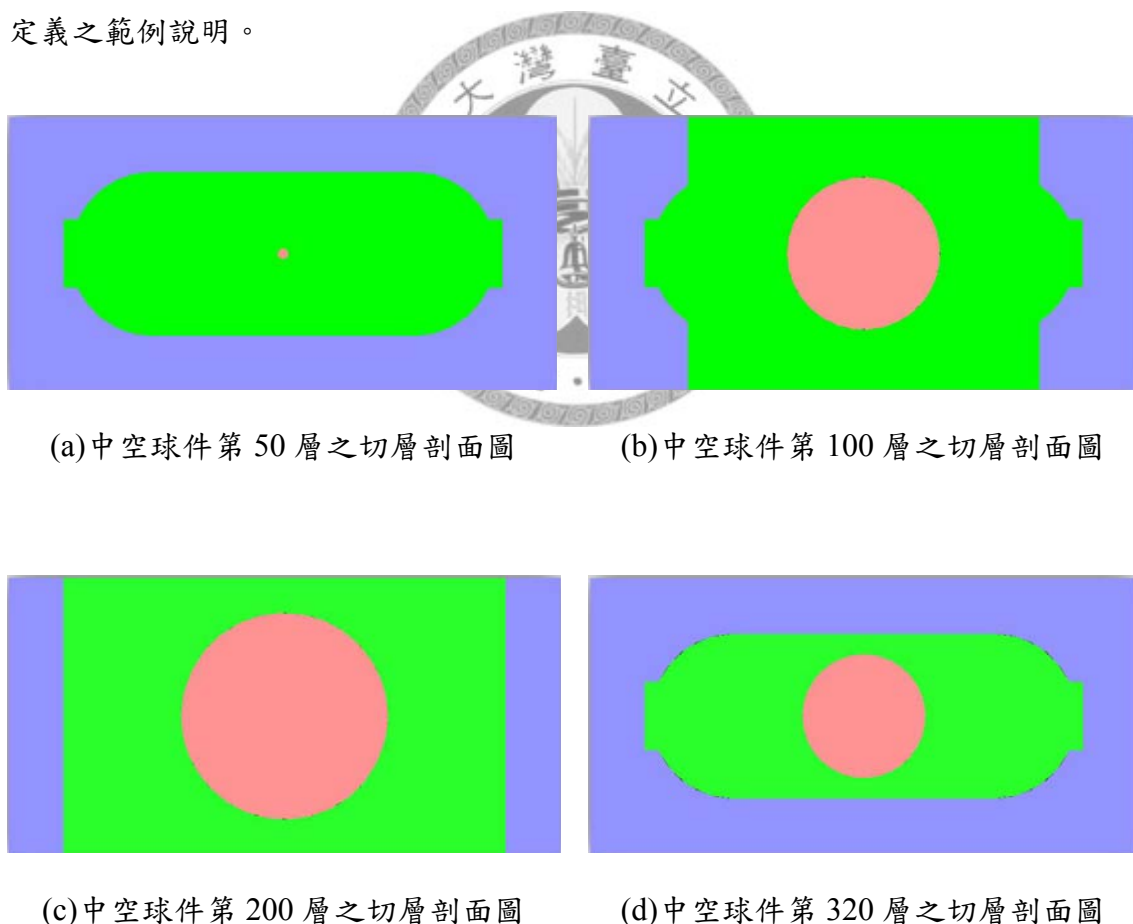


圖 5-14 中空球件之各切層剖面圖

如圖 5-15 所示，為中空球件的第 100 層所有 2D 物件的定義圖，此切層中具有三種材質四組物件，其中左右最外圍兩組對稱的藍色圖塊為外框物件，以 B1 與 B2 表示，中間的綠色圖塊為支撐物件，以 A 示之，而最內處的粉紅色為圓球物件，以 C 示之。

依據物件排序分類演算流程，可依序先取 A 與 B1 物件之外迴圈進行面積的布林運算，由於物件 A 與 B1 為第一次被擷取，故兩者都各以[A]與[B1]新矩陣方式表示，經各物件之外迴圈內的實體面積布林運算，此二物件之面積並無交集，因此各為獨立矩陣新矩陣，繼續進行下 A 及 B2 物件之面積演算，其中物件 A 已存在於矩陣中，而物件 B2 為第一次演算之物件，因此產生為新矩陣[B2]，此兩物件進行面積布林運並無交集，故無須進行矩陣合併，接續再擷取物件 A 及 C 之物件排序演算，物件 C 為第一次演算物件，可生成為新矩陣[C]，經運算此兩物件面產生交集且 A 物件面積大於 C 物件面積，因此可將物件 C 放入物件 A 後方，合併為新矩陣[A,C]。因此以 A 物件為首所進行第一回的交叉演算共產生[A,C]，[B1]，[B2]等三組矩陣。

接續進行其餘物件之面積的布林函數交叉演算，發現皆無產生面積上之交集，故矩陣維持原狀，各為[A,C]，[B1]，[B2]等三組矩陣，此矩陣即為所有物件間最終的群組與層級關係。依據物件定義，可知此加工層中具有兩層級，各層級之物件分別為，第一層級有兩組藍色外框物件分別以 B<sub>10</sub> 及 B<sub>20</sub> 表示以及在中間綠色支撐物件以 A<sub>30</sub> 表示，在中間綠色支撐物內有粉紅色的圓形物件以 C<sub>31</sub> 表示為第二層級，與 A<sub>30</sub> 表成為一群組。

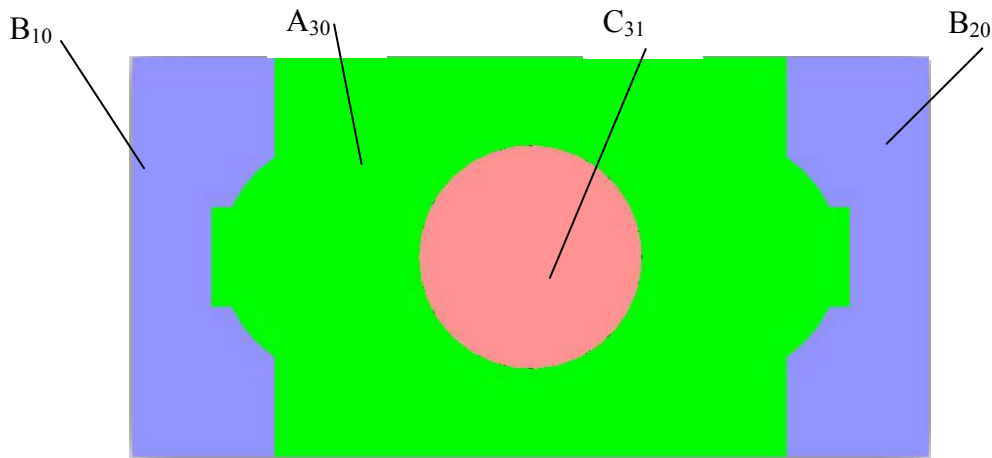


圖 5-15 中空球件第 100 切層之 2D 物件定義圖

完成物件定義後，接著利用第三章節所述之內層物件優先加工原則，進行物件道次加工步驟排序之演算。首先以群組方式作分類依最內層級優先製作法則在依序下一群組加工。切層中共有三組群組，第一群組內為單一物件  $B_{10}$ ，第二群組內也僅有  $B_{20}$  物件，第三群組則有兩組物件，依層級依序是  $A_{30}$  與  $C_{31}$ ，因此先以第三群組中最高層級之  $C_{31}$  物件進行加工，依序是同群組第一層級  $A_{30}$  物件，接著在進行另一群組物件  $B_{20}$  或  $B_{20}$  物件，即可得如圖 5-16 所示的第一及第二條道次加工步驟。另一方法則是不分群組，各物件依據其群組中最內層級優先製作法則由內向外交互加工。仍以第三群組  $C_{31}$  物件先行加工，然後加工第一群組  $B_{10}$  物件，接序是第二群組的  $B_{20}$  物件，最後在進行  $A_{30}$  物件加工。如此可得第三條道次加工步驟流程。同理，以此類推共可得八條物件道次加工步驟流程，如圖 5-14 所示即為中空球件第 100 切層之物件加工製程步驟

因此，依物件道次加工簡化原則，在物件的道次加工路徑中，若前後相鄰的道次加工有相同材質的物件，可將此兩道次之加工路徑合併成單一道次加工，簡化加工步驟。由圖 5-16 所示之物件道次加工步驟可得知，共有第一、三、五、六、七、八等條路徑能從四組道次加工簡化為三組道次加工，簡化後之加工路徑如圖

5-17 所示。其中第一、三條道次加工順序相同，第五及第六條也具相同的物件加工順序，第七與第八也一樣，唯獨第二及第四組加工路徑因無前後相鄰的同材質物件道次加工，故不能簡化，於此，取第六條加工路徑進行製程步驟之驗證。

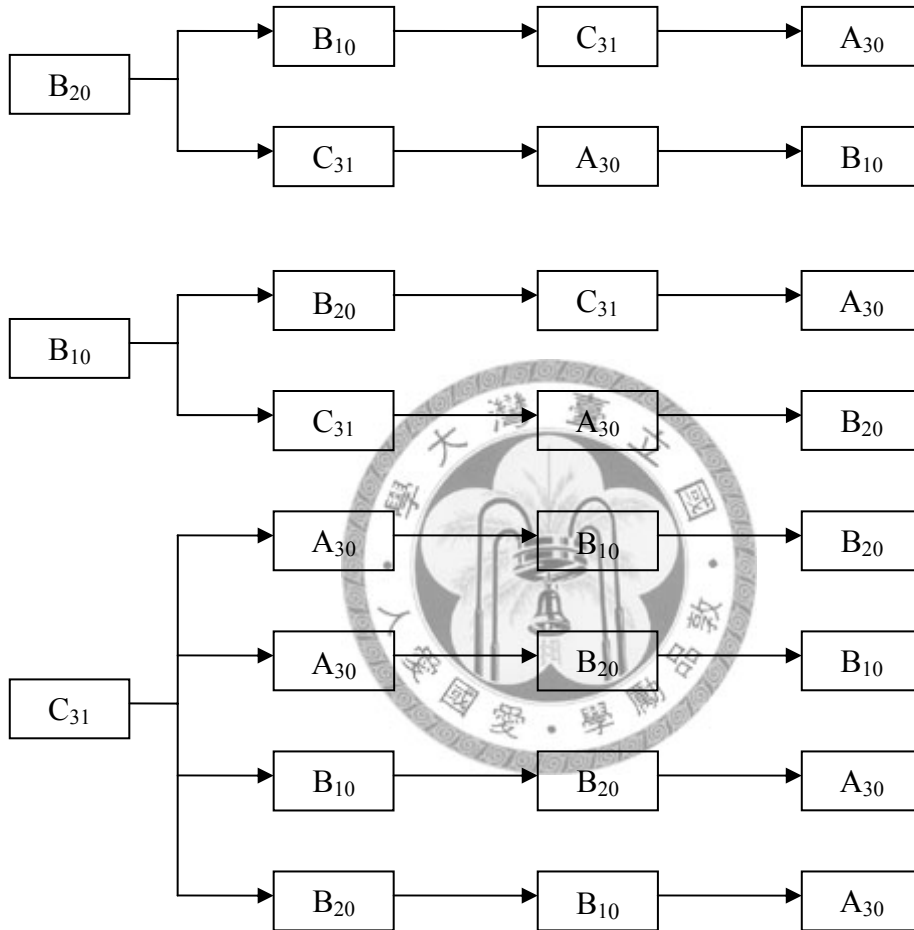


圖 5-16 中空球件第 100 切層之物件加工製程步驟

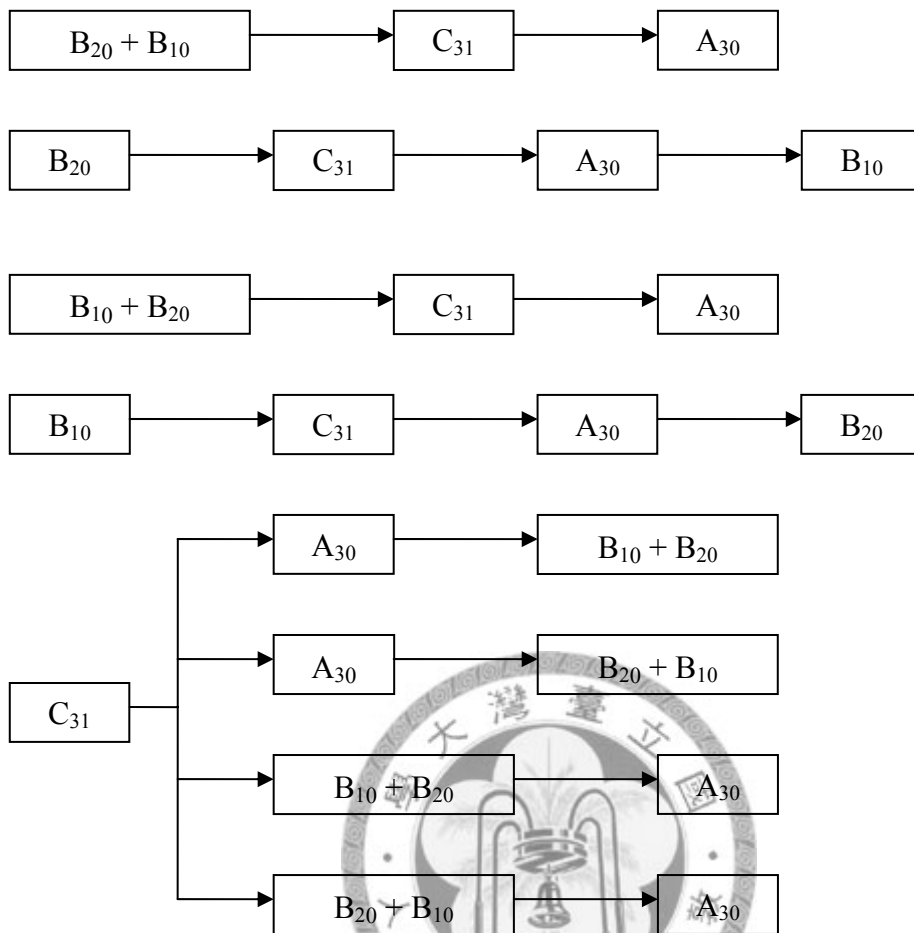


圖 5-17 中空球件第 100 切層之物件加工製程簡化步驟

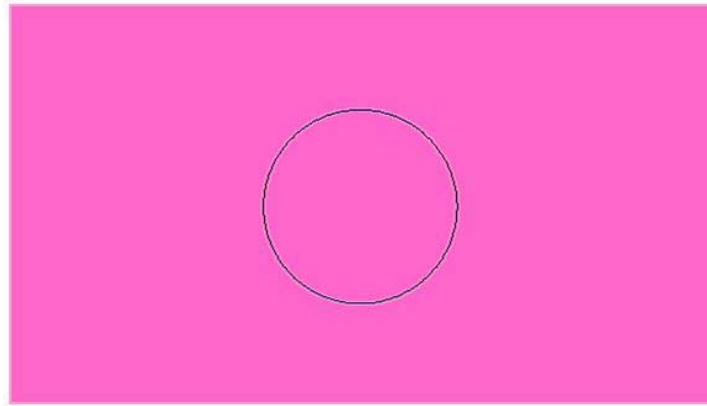
### 步驟三：進行物件道次加工之層加工

決定最簡化物件道次加工後，即可將加工步驟流程，傳送至電腦開始進行層加工製作。以第 100 切層加工為例，選擇簡化後的第一條物件加工道次路徑，依序為  $C_{31}$ 、 $A_{30}$ 、 $B_{10} + B_{20}$ ，分別將此三組物件加工步驟詳述說明如下。

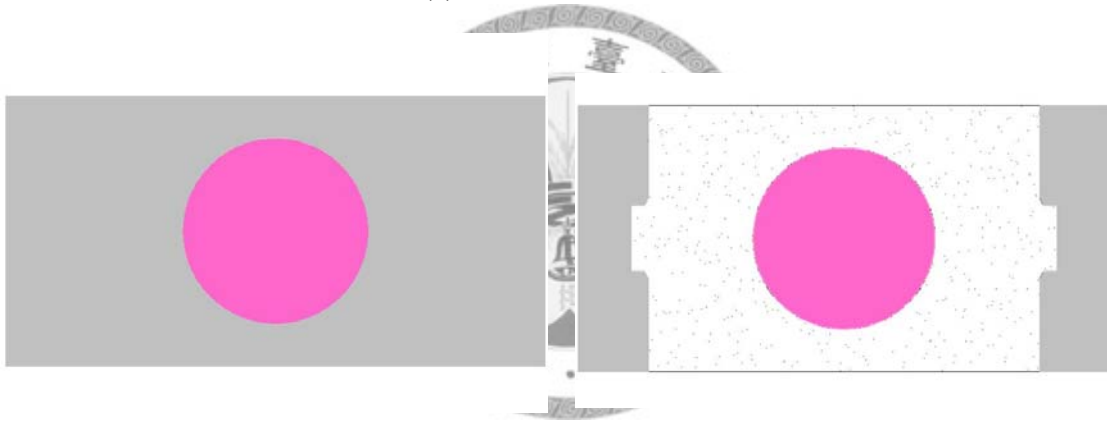
#### (1) 開始進行第一道次之 $C_{31}$ 物件之積層製程加工：

首先，將粉紅色工件薄片物料 C 傳送至工作床台上方進行壓合動作，使紅色物件 C 與下方工件進行結合。接著進行切割。切割圖形如圖 5-18(a)所示，為  $C_{31}$  物件的圓形輪廓圖案，接著去除廢料，留下粉紅色圓形物件在工件上方，如圖 5-18(b)

所示，在灰色之工件表面上，黏附圓形薄片物件。最後在工件上方噴塗黏膠，噴膠區域如圖 5-18(c)所示，為下一物件 A<sub>30</sub> 的物件圖形，結束第一次物件道次加工。



(a) 直接切割之圖形



(b) 粉紅色圓形之物件黏結在工件表面

(b) 工件上方噴塗黏膠

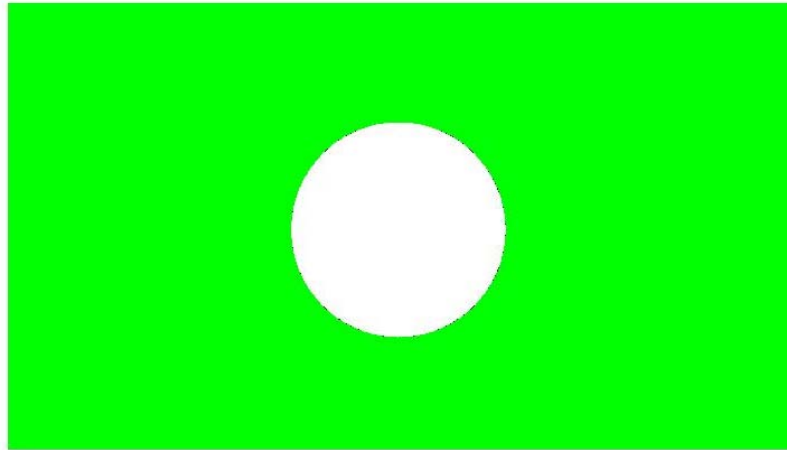
圖 5-18 C<sub>31</sub> 物件道次加工示意圖

(2) 其次進行第二道次之 A<sub>30</sub> 物件之積層製程加工：

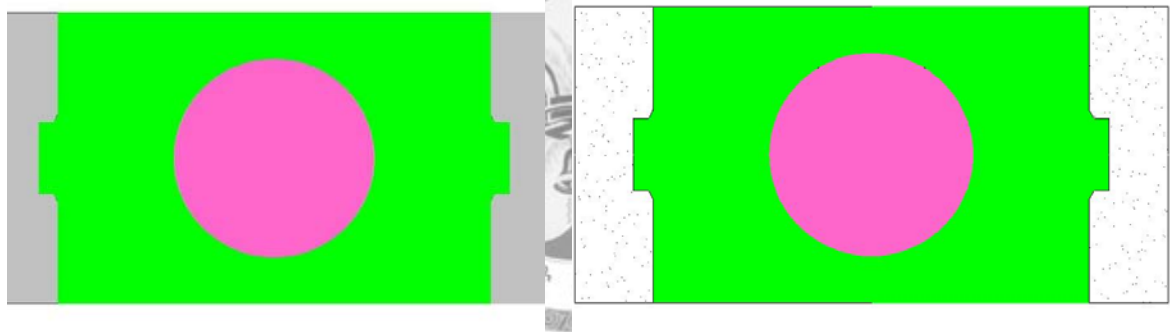
相同地，先將綠色支撐件薄片 A 傳送至工作床台上方處，開始進行第一次切割，接著去除切割下來的廢料。如前章節所示第一次切割圖形需以先前道次加工物件的輪廓圖形為依據進行切割，切割圖形如圖 5-19(a)所示，為一圓形圖案。然後進行壓合黏結，使綠色薄層物件 A 與下方之工件進行結合，接續針對所需之進行物件輪廓圖形進行第二次切割，再剝除廢料，留下綠色的矩形薄片物件在工件上方。如圖 5-19(b)所示，為工件表面黏附 A<sub>30</sub> 薄片物件的矩形物件。最後在工件



上方噴塗黏膠，如圖 5-19(c)所示，下一物件  $B_{10} + B_{20}$  的圖形即為噴膠區域，結束第二次物件道次加工。



(a) 第一次切割之圖形



(b) 支撐材物件黏結在工件表面上

(c) 工件上方噴塗黏膠

圖 5-19  $A_{30}$  物件道次加工示意圖

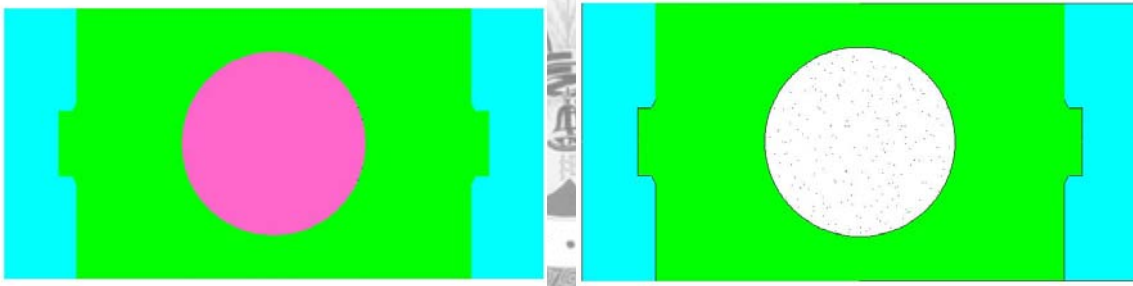
(3) 最後進行第三道次之  $B_{10} + B_{20}$  物件之積層製程加工：

如同上述，將藍色工件薄片 B 傳送至工作床台上方，開始進行第一次切割，接著去除切割下來的廢料。第一次切割之圖形為前兩道次加工物件  $C_{31}$  與  $A_{30}$  的輪廓圖形一起疊加，因此，圖形如圖 5-20(a)所示，為兩圓形加上環形圖案之疊加形狀。然後進行壓合黏結，藍色薄片 B 與下方之工件進行結合。接續進行第二次切割，再去廢料，留下兩組長形片物件在工件上方。如圖 5-20(b)所示，為工件表面黏附兩組藍色長形薄片物件。最後在工件上方噴塗黏膠，所需噴膠區域如圖

5-20(c)所示為下一層中第一道次加工之物件圖形，結束第三次物件道次加工，也完成了此切層所有物件之加工製作。



(a) 第一次切割圖形



(b) 工件物件黏結在工件表面上

(c) 工件上方噴塗黏膠

圖 5-20  $B_{10} + B_{20}$  物件道次加工示意圖

接續進行下一層之物件道次加工，直至完成所有切層加工。圖 5-21 所示，即為在第 100 切層中  $C_{31}$ 、 $A_{30}$  與  $B_{10} + B_{20}$  三組物件依序在工件表面上成形之示意圖。

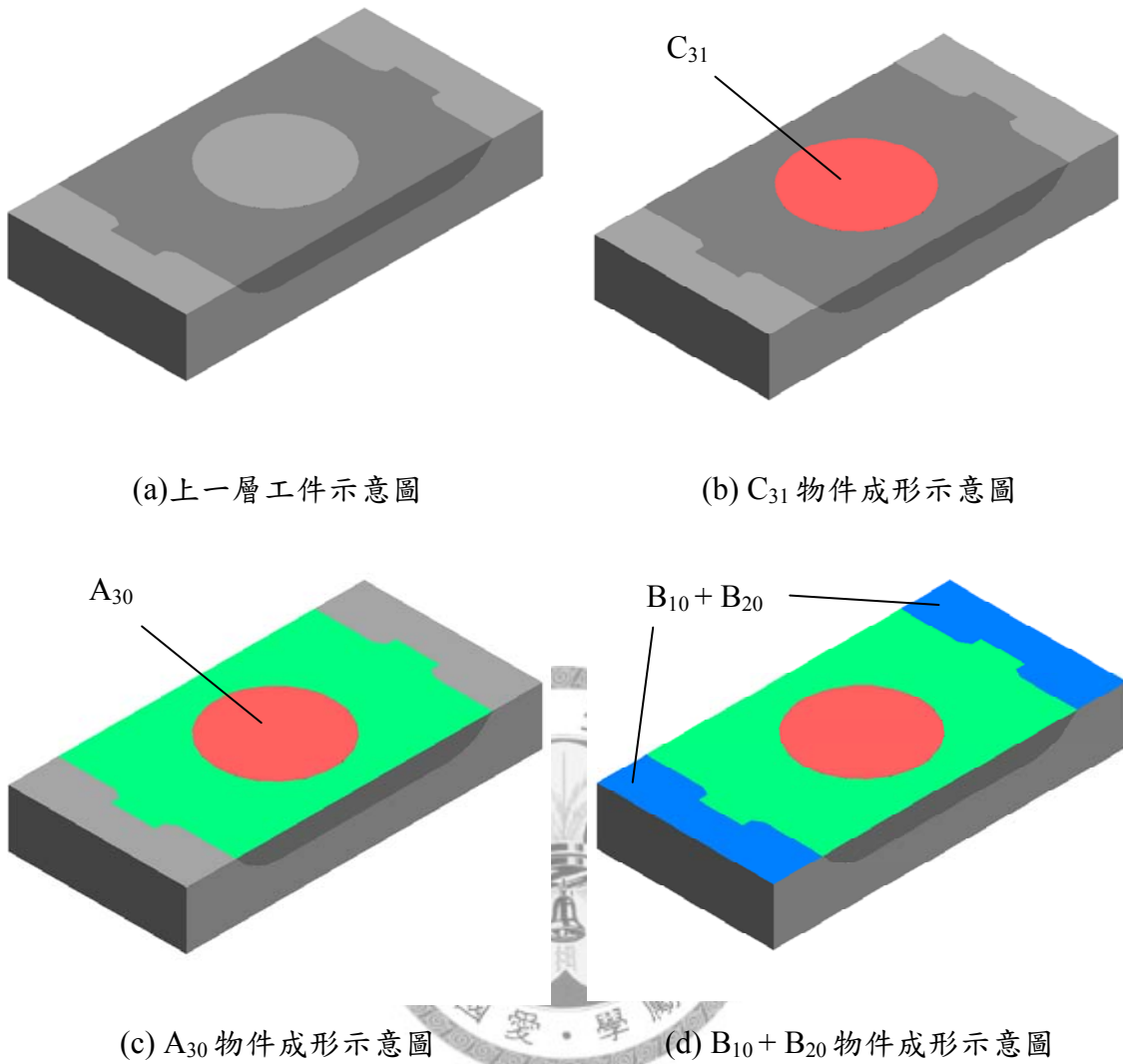


圖 5-21 三組物件道次加工之物件生成圖。(a)上一層工件示意圖，(b)  $C_{31}$  物件成形示意圖，(c)  $A_{30}$  物件成形示意圖，(d)  $B_{10} + B_{20}$  物件成形示意圖。

#### 步驟四：廢料剝除

將完成積層加工之半成品工件，放置水槽處，進行水溶性支撐材去除動作，完成全部之製程程序，可得具 A 與 B 不同材質之中空球件。圖 5-11(a)所示，為中空球件與支撐結構之半成品圖，圖 5-22(b)則為去除支撐結構的中間球件成品圖。

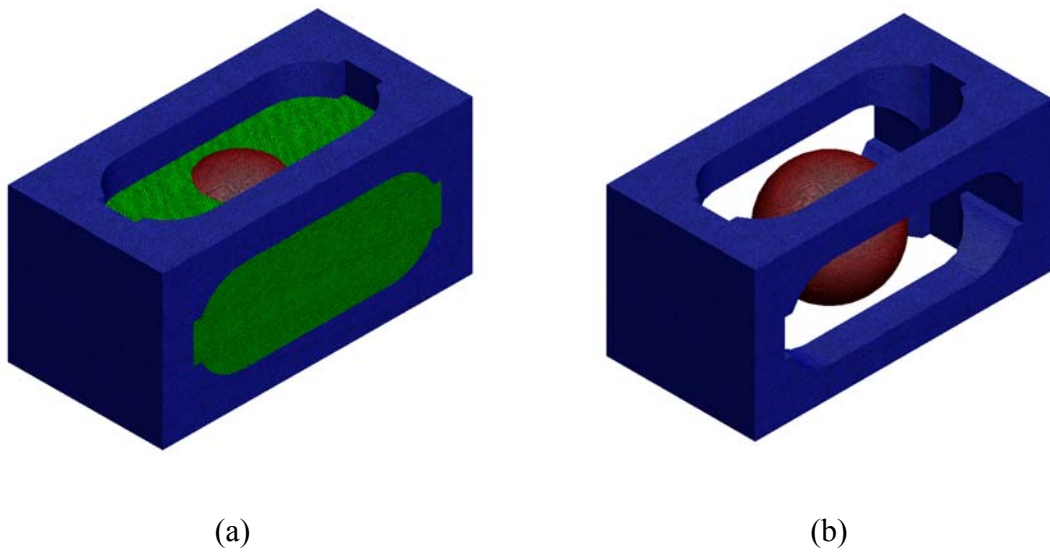


圖 5-22 中空球件成品圖。(a) 中空球件與支撐結構件之半成品圖，(b)去除支撐結構後的中空球件成品圖



### 5-3 小結

本章節利用兩組不同形狀、材質種類之案例，以模擬方式完整驗證了多種材料之薄片積層製程的合理性與可行性，並且針對第三章節提出的物件道次加工演算法則及簡化方式進行一系列之演算與模擬，同時也對第四章節提出的特殊材質支撐結構的建構方式及簡化方法進行分析與探討，順利完成了整個製程流程之驗證。

## 第六章 案例驗證結果與討論

經由前章節的案例驗證過程來討論 M-M LOM 製程、Bridge LOM 製程及傳統 LOM 製程其在後處理剝除廢料難易度所造成的工件幾何造型製作上之差異與工件材質之特色進行分析與討論，最後再將此三製程之特色和優缺點做一比較。

### 6-1 工件幾何造形製作之差異

傳統 LOM 由於工件與廢料形成立方體形狀結構相互包覆，故中空、薄殼工件無法製作為最大的缺點之一，而在薄殼件的製作上，也因廢料包覆著整個工件，所以很難將工件取出而不傷害工件，甚至會有看不見工件而不小心將工件整個破壞的情形。Bridge-LOM 製程能在線上直接剝除 50-70% 的廢料，只殘留 Bridge 的支撐架構與工件形成連結，使得剩餘廢料容易剝除且不易傷害到工件，但若此 Bridge 的支撐架構是殘留在工件內部，就可能難以剝除，不能正確製出工件所需的形狀。如圖 6-1 所示，在以 Bridge-LOM 製程製作內具圓球的中空葫蘆件時，在

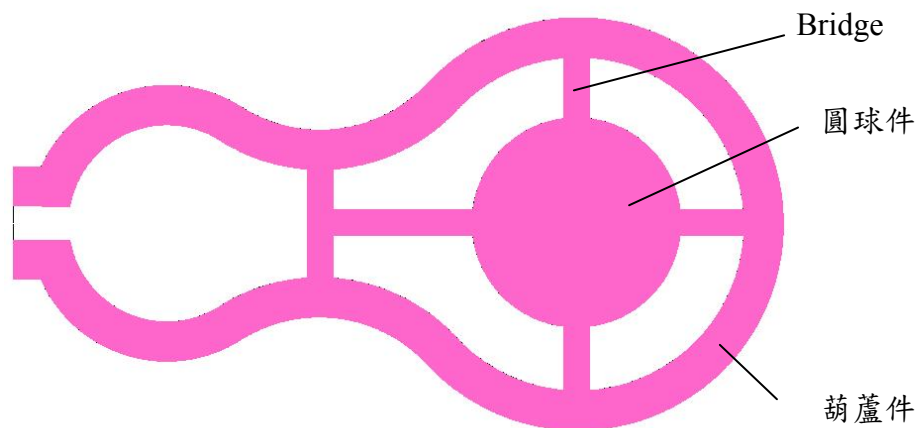


圖 6-1 內部具圓球中空葫蘆件之剖面的 Bridge 結構圖

工件 1/2 高度剖面處內部的圓球與葫蘆內輪廓，需以 Bridge 作為架橋連結，因此當整個工件原型製作完成後，會因為葫蘆開口過小，無法剝除 Bridge 物件，導致殘留廢料在內。

在前章節的葫蘆件案例驗證中可知，以 M-M LOM 製程製作之葫蘆件，其支撐架構是以水溶性物件方式建構，如圖 6-2 所示，綠色八字形即為水溶性支撐架構，因此當葫蘆工件完成後，僅需置入水中沖洗分解，即可得到完全正確的中空型體結構，完全沒有廢料剝除的困擾，能正確的製作任何複雜的幾何造型元件

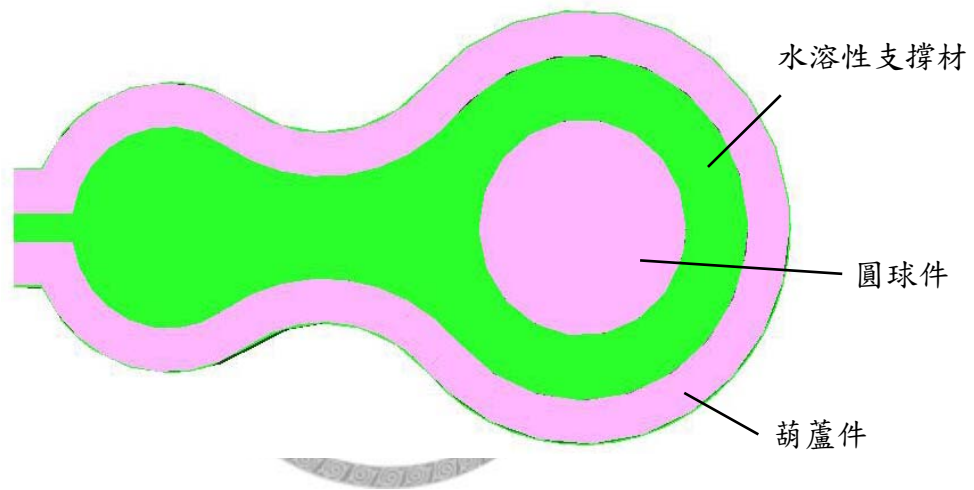


圖 6-2 內部具圓球中空葫蘆件之剖面的水溶性支撐結構圖

## 6-2 製作具多種材質元件之特色

傳統的 LOM 及 Bridge-LOM 因受限於積層製程僅能製作單一物件工件，而“多種材料薄層積層加工製程”的特點是利用物件道次加工的概念，製程多材料物件製作。因此經前章節的中空球件案例中模擬驗證確實可以順利達成多種材料的積層製作，圖 6-3(a)所示為 Bridge-LOM 製程所加工製作之單一材質之中空球件，6-3(b)則為利用 M-M LOM 製程所模擬製出的多種材質中空球件。



圖 6-3 Bridge-LOM 製程製作之中空球件實體圖[46]

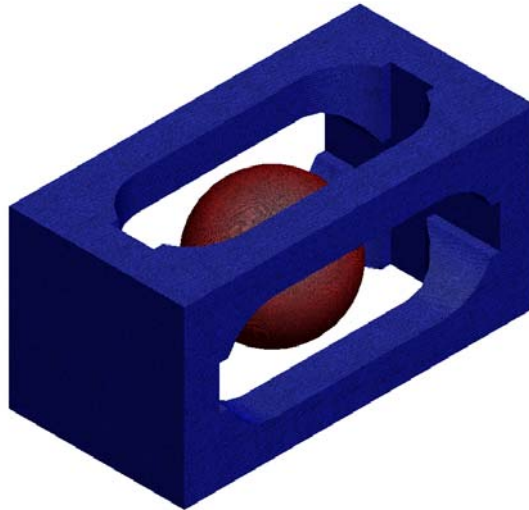


圖 6-4 M-M LOM 製程製作之中空球件模擬示意圖

### 6-3 製程特色探討

“多種材料薄層積層加工製程” (Multi-material LOM)是以獨特“先切後黏再切”兩次切割的積層加工方式，配合多重送料匣裝置，製作具多種材質之功能性元件。此製程有別傳統 LOM 或 Bridge 製程僅以單種材質薄片進行積層加工，製作單一材質元件。新製程除能製作多材質的工件外，同時也利用具水溶性特殊

材質的薄片材料，當作另類物件材質，製作出特殊的支撐結構。

經由前章節所進行之案例模擬驗證後，茲將 M-M LOM 製程、Bridge LOM 製程和 LOM 製程之優劣特色整理歸納成如表 6-1 所示。

表 6-1 M-M LOM 製程、Bridge LOM 製程和 LOM 製程之比較表

		LOM 製程	Bridge-LOM 製程	M-M LOM 製程
材 料 特 性	材料黏膠方向	黏膠向下	黏膠在上	黏膠在上
	黏膠種類	熱感膠	壓力膠	壓力膠
	材料種類	單一材料	單一材料	多種材料
製 程 特 色	送料方式	捲紙送料	單一薄片送料	多重送料匣送料
	定位方式	先黏後切	先切後黏	先切後黏再切
	壓合方式	熱滾筒	壓板	壓板
	剝料方式	廢料無剝除	Bridge	水溶性支撐材
	黏結方式	材料上具熱感膠	噴頭進行噴膠	噴頭進行噴膠
	層加工時間	優	佳	較長
	後處理時間	時間長且困難	時間短較容易	非常迅速容易
	幾何造型能力	不佳（中空件無法製作）	好（簡易中空件可製作）	優（複雜中空件都可製作）
工 件 特 性	薄殼件	易破壞工件	較不易破壞工件	不會破壞工件
	特殊中空件	無法製作	較難製作	容易製作
	多材質工件	無法製作	無法製作	可製作



# 第七章 結論與未來展望

## 7-1 結論

本篇論文乃針對快速原型技術中的薄片積層法（LOM）在製程和成品上的諸多缺點（多種材質元件、中空件無法製作；後處理費時費力…）而提出的改善方法，研究中發展出一套多種材料薄片積層加工製程和獨特的支撐結構建構法，以物件道次加工概念進行多種材質物件積層製作，並且有效解決廢料剝除的問題，經由模擬驗證結果顯示，新製程有多項優點。本文之研究結論如下：

1. 本文提出了一套嶄新的“多種材料之薄片積層法加工製程”以“先切後黏再切”兩次切割的方式，可順利自動去除廢料並應用於製作多種材料之元件。新製程提出了一套製程流程演算法則，除能以物件概念為依據將切層輪廓拆解成多組物件道次加工步驟，順利達成多種材質物件之積層，同時提出一套簡化物件加工法則，可減少物件加工次數，
2. 完全改善所有薄片積層製程製作幾何造型工件的能力。廢料剝除的問題是薄層積層加工製程中最大的困擾，因此提出了特殊支撐結構之建構法則以及簡化方式，順利運用新製程中的物件概念，將所謂的空區域視為新的物件，以水溶性材料或臘材置入於空區域，即可產生合宜的支撐結構，不但可以解決工件支撐問題，也無廢料剝除的困擾，可大幅減少後處理時間以及製作複雜之中空工件。
3. 進行可變層厚積層加工。M-M LOM 製程中具有獨特的多重送料匣裝置，能將工件階梯狀誤差精度控制在定值下，提供數種不同厚度的薄片材料，減少薄片積層數量，大幅增進製程的加工效率。

## 7-2 未來展望

本研究為改善 LOM 製程的缺點並提升製程的應用領域，針對多種材料薄片積層加工製程和獨特的支撐結構建構方法做初步的探討，為使新製程能有更佳和更廣的應用價值，提出未來的研究課題和發展方向：

1. 本文提出的支撐結構建構方式，是以水溶性材料當作新的薄片物件，把空區域置入支撐材物件進行物件道次加工，然而當每一切層中的空區域過多時，可能會因而產生太多道次的支撐物件加工，增加物件道次加工次數，造成積層加工時間變長。因此若在製程中添加噴頭裝置，水溶性的支撐材改以擠製方式製出，如此可大幅減少物件道次加工次數，提升加工效率。
2. 探討切割高剛性材料之切割效率與精度，如陶瓷片、金屬片甚至複合材料是薄片積層法中易取得之材料，也是最能發揮具高強度之功能性元件材料，因此如何進行高效率切割，值得深入的研究與探討。
3. 當不同種類之材質薄片進行積層加工時，需探討黏結效果更好的壓力膠材料，能適用各種材料間之黏結，增加整體工件的強度。

在快速成形技術迅速發展的今日，擁有許多缺點的 LOM 製程其最大的優勢在於製程材料較便宜且多元化能快速獲得工件，若能保留其優點將其發揚，且完全決廢料剝除的問題，除能使薄片積層法具更大的競爭能力，更能擴展整個快速原型製程應用的新領域。

## 參考文獻

1. 吳英正，”快速無模成型技術，” 機械月刊，Vol. 19, No.9, 82 年 9 月 pp.146-154.
2. J.P. Kruth, “Material Increases Manufacturing by Rapid Prototyping Technologies,” Annals of the CIRP, Vol. 40/2, 1991, pp.603-610.
3. J.P. Kruth, “Rapid Prototyping, A New Applications of Physical and Chemical Processes for Material Accretion Manufacturing,” Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Symposium for ElectroMachining, 1995, pp.3-28.
4. J.P. Kruth, “Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping,” Annals of the CIRP, Vol. 47/2, 1998, pp.525-540.
5. A. Kataria and W. Rosen, “Building Around Inserts : Methods for Fabricating Complex Devices in Stereolithography,” Rapid Prototyping Journal, Vol. 7, No. 5, 2001, pp. 253-261.
6. J. Kathryn and F.F. Kong, “Procedure for Rapid Fabrication of Non-assembly Mechanisms with Embedded Components,” Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference, Montreal, Canada, Sep. 29-Oct. 2, 2002, pp. 1239-1245.
7. C. Mavroidis and J. Kathryn, “Fabrication of Non-assembly Mechanisms and Robotic Systems Using Rapid Prototyping,” Journal of Mechanical Design, Vol. 123, Issue 4, 2001, pp. 516-524.
8. Y.G. Im, S.I. Chung, J.H. Son, Y.D. Jung, J.G. Jo, and H.D. Jeong, “Functional Prototype Development: Inner Visible Multi-color

- Prototype Fabrication Process Using Stereo Lithography,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 130-131, 2002, pp. 372-377.
9. Y.G. Im, B.S. Cho, S.H. Seo, J.H. Son, S.I. Chung, and H.D. Jeong, “Functional Prototype Development of Multi-Layer Board (BLB) Using Rapid Prototyping Technology,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 187-188, 2007, pp. 619-622.
10. L.E. Weiss and F.B. Prinz, “Shape Deposition Manufacturing of Heterogeneous Structures,” *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 16, No. 4, 1997, pp. 239-248.
11. M. Hatanaka and R. Mark, “Process Planning for Embedding Flexible Materials in Multi-Material Prototypes,” *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, Vol. 3, 2003, pp. 325-333.
12. Q. Dan and A. Noshir, “Void Eliminating Toolpath for Extrusion Based Multi-Material Layered Manufacturing,” *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 8, No. 5, 2002, pp. 38-45.
13. Y. Yan and X. Zhuo, “Layered Manufacturing of Tissue Engineering Scaffolds via Multi-Nozzle Deposition,” *Materials Letters*, Vol. 57, No. 18, 2003, pp. 2623-2628.
14. Y. Yan and X. Zhuo, “Fabrication of Porous Poly (L-lactic acid) Scaffolds for Bone Tissue Engineering via Precise Extrusion,” *Scripta Materialia*, Vol. 45, No. 7, 2001, pp. 773-779.
15. C. L. Liew, K. F. Leong, C. K. Chua and Z. Du, “Dual Material Rapid Prototyping Techniques for the Development of Biomedical Devices. Part 1: Space Creation,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 18, 2001, pp. 717-723.

- 16.S.M. Hur, K.H. Choi, S.H. Lee, and P.K. Chang, "Determination of Fabricating Orientation and Packing in SLS Process," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 112, 2001, pp. 236-243.
- 17.D. Klosterman, R. Chartoff, N. Osborne, G. Graves, A. Lightman and G. Han, "Laminated Object Manufacturing of Advanced Ceramics and Composites," *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Rapid Prototyping*, Dayton, USA, 1997, pp.43-50.
- 18.C. Chi, L. Dodin, S. Pak, "Development and Fabrication of Metallic LOM Objects," *The Proceeding of the 7<sup>th</sup> International Conference on Rapid Prototyping*, Dayton, USA, 1997, pp. 293-299.
- 19.T. Obikawa, M. Yoshino, and J. Shinozuka, "Sheet Steel Lamination for Rapid Manufacturing," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 89-90, 1999, pp. 171-176.
- 20.B.G. Bryden, I.R. Pashby, D.I. Wimpenny, and C. Adams, "Laminated Steel Tooling in the Aerospace Industry," *Materials and Design*, Vol. 21, 2000, pp. 403-408.
- 21."Metal tape for LOM," *Rapid Prototyping report*, Long Peak Engineering Inc., February, 1996.
- 22.Y.Y. Chiu, Y.S. Liao and C.C. Hou, "Automatic Fabrication for Bridged Laminated Object Manufacturing (LOM) Process," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 140, No. 1-3, 2003, pp. 179-184.
- 23.Y.S. Liao, H.C. Li, and M.T. Chen, "The Study of Rapid Prototyping Process with Embedded Functional Inserts," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 192-193, 2007, pp. 68-74.

24. Y.S. Liao and L.C. Chiu, "A New Approach of Online Waste Removal Process for Laminated Object Manufacturing (LOM) ," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 140, No. 1-3, 2003, pp. 136-140.
25. Y.A. Song and S. Park, "Experimental Investigations into Rapid Prototyping of Composites by Novel Hybrid Deposition Process," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 171, 2006, pp. 35-40.
26. M.Y. Zhou, J. T. Xi and J.Q. Yan, "Modeling and processing of Functionally Graded materials for Rapid Prototyping," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 146, 2004, pp. 396-402.
27. 邱雲堯, "快速原型之層狀成形法(LOM)研究," 國立台灣大學機械工程學研究所博士論文, 2000.
28. M. Burns, K.J. Hayworth and C.L. Thomas, "Automating Sheet Based Fabrication: The Conveyed-Adherent Process," Proceedings of the 8<sup>th</sup> Solid Freeform Fabrication Symposium, 1996, pp. 281-290.
29. D. Klosterman, R. Chartoff, N. Osborne and G. Graves, "Automated Fabrication of Monolithic and Ceramic Matrix Composites via Laminated Object Manufacturing (LOM) ," Proceedings of the 9<sup>th</sup> Solid Freeform Fabrication Symposium, 1997, pp.537-549.
30. D. Klosterman, B. Priore and R. Chartoff, "Laminated Object Manufacturing of Polymer Matrix Composites," Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Rapid Prototyping, 1997, pp. 283-292.
31. D. Klosterman, R. Chartoff, B. Priore, N. Osborne, G. Graves and A. Lightman, "Structural Composites via Laminated Object Manufacturing," Proceedings of the 8<sup>th</sup> Solid Freeform Fabrication Symposium, 1996, pp. 105-115.

- 32.Y.S. Liao and Y.Y. Chiu, "Adaptive Crosshatch Approach for the Laminated Object Manufacturing (LOM) Process," International Journal of Production Research, Vol. 39, No. 15, 2001, pp. 3479-3490.
- 33.Q. Huang and Y. Wang, "Research on Cutting Meshes in LOM," The 1<sup>st</sup> International Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, 1998, pp. 618-620.
- 34.I. Cho and K. Lee, "Development of a New Sheet Deposition Type Rapid Prototyping System," International Journal of Machine Tool and Manufactures, Vol. 40, No. 12, 2000, pp. 1813-1829.
- 35.J. Hur and K. Lee, "Efficient Algorithm for Automatic Support Structure Generation in Layered Manufacturing," The 1996 ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers in Engineering Conference, 1996.
- 36.A. Dolenc and I. Makela, "Slicing procedures for layered manufacturing techniques," Computer-Aided Design, Vol. 26, No. 2, 1994, pp. 119-126.
- 37.P. Kulkarni and D. Dutta, "An accurate slicing procedure for layered manufacturing," Computer-Aided Design, Vol. 28, No. 9, 1996, pp. 683-697.
- 38.E. Sabourin, S. A. Houser and F. H. Bohn, "Adaptive slicing using stepwise uniform refinement," Rapid Prototyping Journal, Vol. 2, No. 4, 1996, pp. 20-26.
- 39.E. Sabourin, S. A. Houser and F. H. Bohn, "Accurate exterior, fast interior layered manufacturing," Rapid Prototyping Journal, Vol.3, No.2, 1997, pp. 44-52.
- 40.W. Cheng, F.Y.H. Fuh, A.Y.C. Nee, Y.S. Wong, H.T. Loh and T.

Miyazawa, "Multi-objective optimization of part-building orientation in stereolithography," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 1, No. 4, 1995, pp. 12-23.

41.M. Bablani and A. Bagchi, "Quantification of errors in rapid prototyping processes, and determination of preferred orientation of parts," *Transactions of NAMRI/SME*, Vol. X X X III, 1995, pp. 319-324.

42.D. C. Thompson and R. H. Crawford, "Optimizing part quality with orientation," *Solid Freeform Fabrication Proceedings*, 1995, pp. 362-368.

43.P. T. Lan, S. Y. Chou, L. L. Chen and D. Gemmill, "Determining fabrication orientations for rapid prototyping with stereolithography apparatus," *Computer-Aided Design*, Vol. 29, No. 1, 1997, pp. 53-62.

44.F. Xu, H.T. Loh and Y.S. Wong, "Considerations and selection of optimal orientation for different rapid prototyping systems," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 5, No. 2, 1999, pp. 54-60.

45.R. Famieson and H. Hacker, "Direct slicing of CAD models for rapid prototyping," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 1, No. 2, 1995, pp. 4-12.

46.邱立誠, "快速原型系統—新式線上撥料薄片積層法之發展," 國立台灣大學機械工程學系研究所碩士論文, 2002.



## 作者簡歷

作者：李心智

出生：58年9月29日

學歷：國立台灣科技大學機械系（85~87）

國立台灣大學機械研究所碩士班（87~89）

國立台灣大學機械研究所博士班（89~97）

職歷：專職：引春機械有限公司研發工程師(81~83)

專職：一升科技有限公司研發經理(83~85)

約聘：亞東技術學院工商業設計系講師(89~95)

約聘：台北教育大學造型設計系講師(96~97)

電話：0933704000, (037)668540

E-Mail：[d89522019@ntu.edu.tw](mailto:d89522019@ntu.edu.tw)

著作：

1. Y.S.Liao, H.C.Li, Y.Y.Chui, “Study of Laminated Object Manufacturing with Separately Applied Heating and Pressing,” The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 27, NO. 7-8, 2006, pp. 703-707.
2. Y.S.Liao, H.C.Li, M.T.Chen, “The Study of Rapid Prototyping Process with Embedded Functional Inserts,” Journal of Materials Processing Technology, Vol. 192-193, 2007, pp.68-74.