



iPAS
經濟部產業人才能力鑑定

初級能力鑑定－學習指引

3D 列印積層製造工程師

▶▶▶ 3D 列印製程與材料概論

序

為提供授課教師及考生掌握評鑑方向，準備有所依循，本計畫委託委員會題庫組及規劃組領域專家，以科目評鑑內容為分項，展開重點說明及考題解析。

本冊為該能力鑑定學習指引，並非教材也非題庫，僅做為引導學習的考前準備工具手冊，並不保證考試通過之責，建議依循考試簡章所公告之評鑑主題內容準備考試。

如有相關問題，請逕自聯繫 iPAS@itri.org.tw。

經濟部產業人才能力鑑定推動小組

敬啟

目錄

| | |
|--|-----------------|
| 概要 | <i>i</i> |
| 第一章 3D 建模(ME 及 VP 技術) | 1-1 |
| 1.1 檔案格式 | 1-3 |
| 1.2 支撐結構 | 1-13 |
| 1.3 列印方位及切層路徑 | 1-33 |
| 第二章 3D 列印製程參數(ME 及 VP 技術) | 2-1 |
| 2.1 加工參數 | 2-1 |
| 2.2 加工不良現象分析 | 2-9 |
| 2.3 產品後處理與環境安全法規 | 2-17 |
| 第三章 3D 列印材料概論(ME 及 VP 技術) | 3-1 |
| 3.1 材料類型 | 3-1 |
| 3.2 材料選擇與應用 | 3-21 |

| | | | | |
|------------------|------|---|--------------|---|
| 職能基準代碼 | | 免填 | | |
| 職能基準名稱 (擇一填寫) | | 職類 | | |
| | | 職業 | 3D 列印積層製造工程師 | |
| 所屬類別 | 職類別 | | | 職類別代碼 |
| | 職業別 | 其他工程專業人員 機械工程師 | | 職業別代碼 C2149 C2144 |
| | 行業別 | 塑膠製品製造業 金屬製品製造業 機械設備製造業 珠寶及金工製品製造業 其他醫療器材及用品製造業 專業、科學及技術服務業／專門設計業 | | 行業別代碼 C22 C25 C29 C3391 C3329 M74 |
| | 工作描述 | 評選設置列印服務所需之 3D 列印設備、環境及安全，並依據顧客需求選擇適當的 3D 列印設備、製程與材料；模型檔案前處理與轉製，設計必備之支撐，調整列印參數與模式等客製條件，列印成實體產品及其後處理與檢測。 | | |
| 基準級別 | | 4 | | |

| 工作職責 | 工作任務 | 工作產出 | 行為指標 | 職能級別 | 職能內涵 (K=knowledge 知識) | 職能內涵 (S=skills 技能) |
|------------------------|--------------------------|---|--|------|-------------------------------------|--|
| T1 建置與維護 3D 列印設備、環境及安全 | T1.1 評選與建置 3D 列印設備、環境及安全 | O1.1.1 各式相關機台功能分析比較表 O1.1.2 機台採購與驗收規格 O1.1.3 機台與環境之安全工作檢核 | P1.1.1 依據客戶需求評選適當設備規格，並建置妥適安全環境。 | 4 | K01 3D 列印原理與進階應用 K02 3D 列印進階設備 | S01 設備系統性能評析 S02 ME 及 VP 設備最佳化 S03 PBF 及 BJ 設備結構與機台操作 S4 成本分析 |
| | T1.2 驗收與操作 3D 列印設備 | O1.2.1 列印機台 O1.2.2 驗收報告及操作手冊 | P1.2.1 瞭解 3D 列印各式成型機制及原理、應用，熟悉及瞭解各式 3D 列印設 | 3 | K03 3D 列印技術與應用 K04 3D 列印各式成型機制基礎 | S05 基礎原理及應用 S06 機台操作實務 S07 適用環 |

| 工作職責 | 工作任務 | 工作產出 | 行為指標 | 職能級別 | 職能內涵 (K=knowledge 知識) | 職能內涵 (S=skills 技能) |
|---------------------|----------------------------|--|--|------|-----------------------------|---|
| | | | 備系統，並正確操作設備。 | | K05 3D 列印設備系統 K06 設備系統性能 | 境、電器與安全需求評估 S08 驗收報告撰寫 |
| | T1.3 保養檢修設備與環境 | O1.3.1 保養檢查紀錄表 | P1.3.1 能夠依 3D 機台操作步驟進行保養及簡易機台故障、問題排除，並評估及遵守適用環境、電器與安全需求。 | 3 | K05 3D 列印設備系統 | S06 機台操作實務 S07 適用環境、電器與安全需求評估 S09 機台清潔與保養 |
| T2 識別及選用材料 | T2.1 選擇與使用材料 | O2.2.1 工作單(包含列印設備、製程參數、材料及數量、外觀、顏色等) | P2.2.1 能夠依產品規格，選擇妥適機台、材料、製程參數、外觀、顏色。 | 4 | K07 3D 列印材料類型(粉末、液體、固體) | S10 材料選擇與應用 |
| | T2.2 負責材料儲存、安全、特性與識別選用 | O1.4.1 材料儲存、安全與使用紀錄表 O1.4.2 物質安全資料表建檔 | P2.2.1 瞭解各種列印材質之特性、儲存與安全，與選用適當材料。 | 3 | K08 3D 列印材料概論 | S11 材料安全儲存環境選擇 |
| T3 建立 3D 模型檔案前處理與轉製 | T3.1 建立 3D 模型檔案，並轉製適用之介面格式 | O3.1.1 產品之 3D 模型檔案 O3.4.1 相關機台介面格式檔案 | P3.1.1 建立符合設備要求之產品 3D 模型檔案，並依設備規格建立適用之介面格式檔案。 | 3 | K09 3D 建模 K10 檔案格式 | S12 3D 建模軟體操作與檢驗 |

| 工作職責 | 工作任務 | 工作產出 | 行為指標 | 職能級別 | 職能內涵 (K=knowledge 知識) | 職能內涵 (S=skills 技能) |
|---------------|-------------------------|--|---|------|--|--|
| | T3.2 建立支撐結構、列印方位及切層參數 | O3.2.1 支撐層模型檔案 O3.3.1 產品之排列與列印方位及切層參數檔案 | P3.2.1 能夠設計與建立支撐結構，並選定模型之適當列印方位及切層參數。 | 3 | K09 3D 建模 K11 支撐結構 K12 列印方位及切層路徑 | S13 支撐設計 S12 3D 建模軟體操作與檢驗 |
| T4 製作產品及製程優化 | T4.1 執行製作 | O4.2.2 工作單(包含列印設備、製程參數、材料及數量、外觀、顏色等) | P4.2.1 能依工作單備料與檢查機台與參數設定、調整校正到可生產狀態 | 3 | K13 3D 列印製程參數 K14 加工參數 K15 環境安全法規 K16 產品後處理知識 | S06 機台操作實務 S14 加工參數調整 S15 不良現象分析 |
| | T4.2 製程優化 | O4.2.1 產品 | P4.2.1 掌握支撐設計準則及切層、加工參數對品質之影響，進行 3D 列印製程優化。 | 4 | K17 進階支撐設計準則 K18 切層與路徑對品質之影響 K19 加工參數對品質之影響 | S16 3D 列印製程優化 |
| T5 執行產品後處理及檢測 | T5.2 移除支撐材、處理廢棄物及進行表面處理 | O5.2.1 廢料、殘料及可再回收的餘料 O5.3.1 產品 | P5.2.1 使用適當方法移除支撐材，並進行表面處理與清潔，且妥當完成廢棄物回收處理。 | 3 | K08 3D 列印材料概論 K15 環境安全法規 K16 產品後處理知識 | S10 材料選擇與應用 S17 表面處理 |
| | T5.4 執行必要之品質檢測 | O5.4.1 產品 O5.4.2 產品檢測報告 | P5.4.1 依據標準流程檢測與確認機台產出之產品符合客戶之需求 | 3 | K20 量測知識 K21 品管知識 | S18 量測儀器使用 S19 檢測結果判讀 |

| |
|---------------------|
| 職能內涵(A=attitude 態度) |
|---------------------|

| |
|-------------------------------------|
| A01 創新、A02 分析推理、A03 自我學習發展、A04 成本意識 |
|-------------------------------------|

| |
|---------|
| 說明與補充事項 |
|---------|

| |
|-------------------------|
| 建議擔任此職類/職業之學歷/經歷/或能力條件： |
|-------------------------|

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none">• 具備電腦實體建模基本能力，且對積層製造有基本認識者。 |
|--|

iPAXS

概要

3D 列印是數位製造的一種，在 ASTM 中，其為積層製造技術，其中包括了七大類，包括了：光聚合固化技術(Vat Photopolymerization)、材料噴印成型技術(Material Jetting)、黏著劑噴印成型技術(Binder Jetting)、材料擠製成型技術(Material Extrusion)、粉末床熔融成型技術(Powder Bed Fusion)、疊層製造成型技術(Sheet Lamination)與指向性能量沉積技術(Directed Energy Deposition)。本次的初級 3D 列印工程師能力鑑定範圍，是以比較普及的光聚合固化技術(VP)及材料擠製成型技術(ME)為範圍，而其中的 VP 類將以桌上型的設備，以下照式(Bottom Up)為主，其中的 ME 類，以熔融擠出為主要的重點。

為了能進行 3D 列印的操作，其相關必要的知識及能力尚包括了 3D 建模、各項的加工製程參數、及其所使用的材料。



第一章 3D 建模(ME 及 VP 技術)

3D 列印是數位製造的一種，換言之，除了製造過程中會使用電腦數值控制之手段進行加工之外，為產生其可以加工的程序，也是數位的資料。一般 CNC 加工使用的為 G-Code-numerical control (NC) programming language，依此語法之描述去控制加工設備進行加工之動作。同樣的，3D 列印也要有對應的語法，使 3D 列印設備能進行加工。由於 3D 列印的加工法有很多種，各有不同的加工方式，所以不是所有的加工方式都可以使用同樣的語言去指揮設備進行加工，而不同的加工方式也有不同的限制。

本評鑑主題中的 3D 建模，並不包括如何建立 3D 的實體模型，而是假設已經有了 3D 實體模型，將如何對模型進行一定的前處理，使能被所對應的 3D 列印技術(ME 及 VP)所正確的列印。

3D 列印技術最突出的優點是無需多程序的機械加工或任何模具，就能直接從計算機圖形數據中生成任何形狀的零件，從而大大縮短了產品的研製周期，提高了生產效率。然而，不是所有電腦上可以繪製出來數位的 3D 模型，都可以很容易的在各不同的 3D 列印中被成功的列印出來，如何對這些 3D 模型進行前處理，使能提高列印的成功率及減少後處理的時間，是很重要的。本 3D 建模部分將對 3D 模型的資料本身的資料結構，其對應不同加工方法的 3D 模型前處理支撐建立，及列印方向與路徑產生等等，需注意的事項進行說明。



模擬考題

以下何者為正確 3D 列印模型與列印的描述？(A)有了 3D 列印，任何數位的模型都可以直接列印出來；(B)數位的模型都需要轉成 G-Code 為輸出，3D 列印設備才能使用；(C) 3D 列印實體數位模型的資料結構是以 G-Code 來定義；(D)實體數位模型在 3D 列印前會需要前處理程序。

考題解析

1. Ans (D)

- (A) 不是任何數位的模型都可以直接列印出來，第一，需要正確的實體模型，第二，不同列印的技術會有不同的列印限制。
- (B) 3D 列印設備所使用的不一定是 G-Code，G-Code 只是描述去控制加工設備進行加工之動作的一種格式規範。
- (C) 3D 列印實體數位模型的資料結構與 G-Code 無關，G-Code 無法定義模型的形狀。
- (D) 3D 列印前需考慮不同列印方式的限制，對模型進行前處理，使能夠被列印。



觀念延伸

G-Code 為一普遍使用的電腦數值控制語法，用於控制機器本身，可用來加工 3D 物件，但本身並沒有對 3D 模型的描述。



重點掃描

1.1 檔案格式

3D 建模中，先要知道何謂 3D 實體模型，一般的數位模型，不一定是實體模型，而實體模型則一定要由 3D 或以上的維度來進行描述。3D 本身是指三個維度，而非實體，如空間中的一個點座標，可以用笛卡兒座標系統，以 X、Y、Z 的數值加上單位，如 mm(公厘)來表示，這就已經是三維的點座標點，但其不是三維的實體。換言之，三維的描述可以是點、線、面、實體。『點』是一個位置的描述；『線』是由連續點的集合，如直線或是曲線，具有長度的物理量；『面』是由連續且封閉的線所圍出來，具有面積的物理量；『實體』是由連續且封閉的面所圍出來，具有體積的物理量。

在 3D 實體模型中，如果資料是不連續的面組成，則無法圍成為一正確的實體模型；也就是說，一個正確的實體模型，必需要有連續且封閉的面；面的資料有交錯，也無法成為一正確的實體模型。

由各大 CAD 廠商發展了多個不同的 3D 實體模型設計軟體，而且大多有自己的資料格式，而造成在不同軟體間的不相容性。為了模型資料的互相可以交換，在 1980 年代定義了 IGES(Initial Graphics Exchange Specification)，但因為規格的老舊，常會在轉換間造成資料的不完整而錯誤；另外國際標準組織後來定義了 ISO 10303 的規範，而有了 STEP(Standard for the Exchange of Product Data)，而 STEP 目前為比較完整且持續更新的標準，為絕大多數 CAD 所能相容。

CAD 的目的是為了容易資料交換與編輯修改，而不是為了資料簡單化及容易被 3D 列印，所以美國 3D Systems 公司在 1988 年推出世界上第一台商業化的 3D 印表機時，其定義了 STL(STereoLithography)資料格式，如同之前對實體模型的定義，實體是由連續且封閉的面所圍出來，具有體積的物理量。而面是由線圍出來，線是由點構成，回到最簡單的結構，線可由兩端點的直線定義，面可由三個相連的直線圍出的三角形定義，實體可以很多相連續且封閉的三角形所圍出。STL 就

是簡單的以大量三角形的定義為資料結構，進行實體模型的描述。這種資料格式成為 3D 列印的主流，並一直到現在都還是最主要的資料格式。

而 STL 對於實體的形狀可以描述，但對於內部疏密不均結構、多種材料結合與外型多色…等等，卻有無法描述，而在進階研究及應用無法滿足，因此有新型 3D 資料格式的需求，AMF(Additive Manufacturing File Format)也就是在這需求下，於 2011 由 ASTM 所定義(ISO/ASTM 52915:2013)。

STL 檔案格式可分為文字檔 ASCII 和二進位檔 Binary 兩種形式，如表 1-1 所示，其中 ASCII 的編排方式讓人容易閱讀，但檔案容量大於 Binary。

表 1-1、ASCII 和 Binary 格式的比較

| ASCII | Binary |
|--------------------|----------------------------|
| solid name | # of bytes description |
| facet normal 0 0 1 | 80 創作者自訂之文字 |
| outer loop | 4 面(facets)數量 |
| vertex -0.5 -0.5 0 | ----第一個面開始 (triangle 1)--- |
| vertex 0.5 -0.5 0 | 4 float normal x |
| vertex -0.5 0.5 0 | 4 float normal y |
| endloop | 4 float normal z |
| endfacet | 4 float vertex1 x |
| facet normal 0 0 1 | 4 float vertex1 y |
| outer loop | 4 float vertex1 z |
| vertex 0.5 -0.5 0 | 4 float vertex2 x |
| vertex 0.5 0.5 0 | 4 float vertex2 y |
| vertex -0.5 0.5 0 | 4 float vertex2 z |
| endloop | 4 float vertex3 x |
| endfacet | 4 float vertex3 y |
| endsolid name | 4 float vertex3 z |
| | 2 未使用 |
| | ----第二個面開始 (triangle 1)--- |

由上表中可以看到，三角形小平面資料是由三個頂點(Vertex)和一個指向物體外部之單位法線向量(Normal)組成，如圖 1-1 所示。頂點排序依照右手定則，頂點座標數值為正數，標準的 STL 檔案無尺度、單位和顏色資訊。小平面與相鄰小平面共用兩個頂點，即一條邊線，換句話說，頂點不可以在邊線上，如圖 1-2 所示。

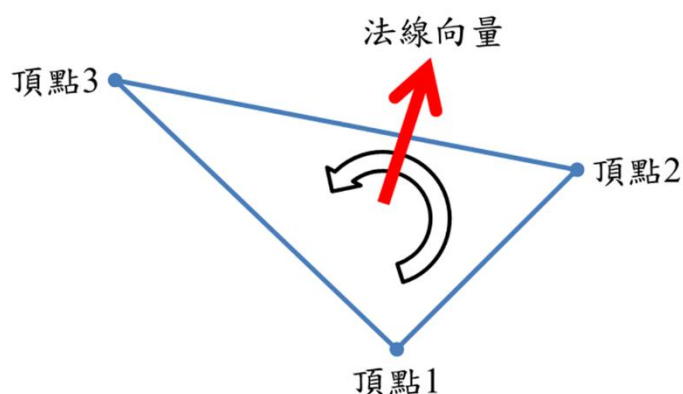


圖 1-1、定義三角形小平面之示意圖

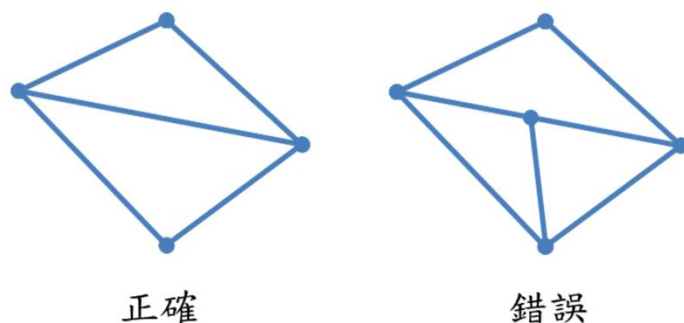


圖 1-2、正確與錯誤的小平面排列

當 3D 模型輸出 STL 檔案格式時，其模型表面由三角形小平面(Facet)，亦稱三角面(Triangle)或網格(Mesh)，如圖 1-3 所示，三角形小平面以近似方式取代曲面，可以變動小平面的數量或大小來表示物體的幾何模型，小平面越小或數量越多更能精準代表不規則的曲面幾何模型。

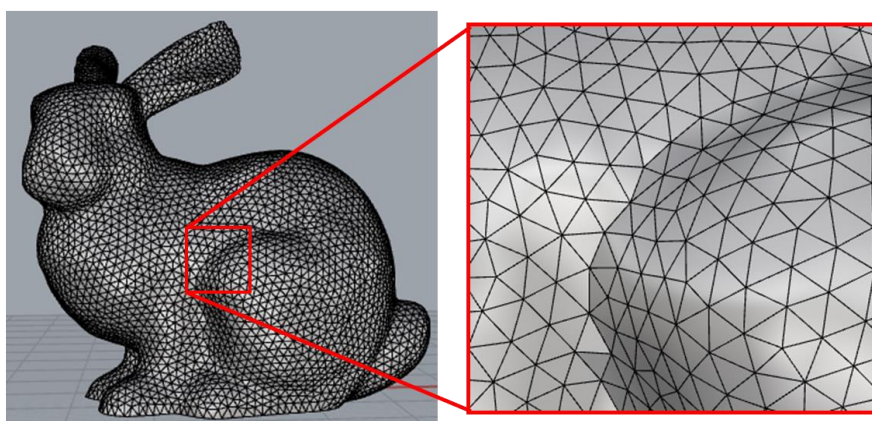


圖 1-3、兔子模型之 STL 檔案格式

CAD 模型輸出 STL 檔案格式時，可設定弦高(Chord Height)和角度控制(Angle Control)兩種參數，如圖 1-4 所示。弦高為 CAD 模型表面與小平面之最大距離，若要增加 STL 模型精度，則應降低弦高，使小平面數量增加，但也會增加檔案容量，如圖 1-5 所示。角度控制是兩相鄰小平面之夾角。

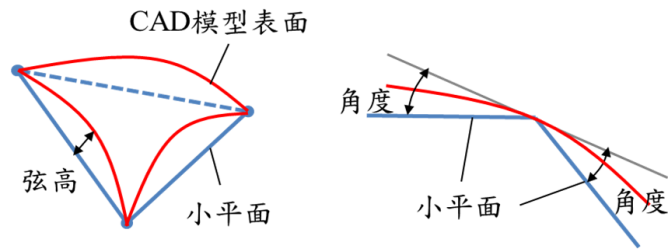


圖 1-4、小平面之弦高與角度設定

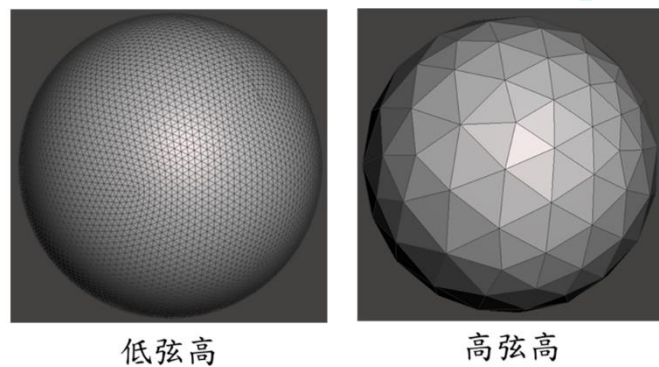


圖 1-5、不同弦高之 STL 模型

以一個 1 單位的正立方體為例，其 STL 的部分資料如圖 1.6 所示，可以明顯的看出所需資料量的不同。


```

solid Object01
facet normal 0.000000e+000 -0.000000e+000 -1.000000e+000
  outer loop
    vertex 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
    vertex 0.000000e+000 1.000000e+000 0.000000e+000
    vertex 1.000000e+000 1.000000e+000 0.000000e+000
  endloop
endfacet
facet normal 0.000000e+000 0.000000e+000 -1.000000e+000
  outer loop
    vertex 1.000000e+000 1.000000e+000 0.000000e+000
    vertex 1.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
    vertex 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
  endloop
endfacet
facet normal 0.000000e+000 0.000000e+000 1.000000e+000
  outer loop
    vertex 0.000000e+000 0.000000e+000 1.000000e+000
    vertex 1.000000e+000 0.000000e+000 1.000000e+000
    vertex 1.000000e+000 1.000000e+000 1.000000e+000
  endloop
endfacet
facet normal 0.000000e+000 0.000000e+000 1.000000e+000
  outer loop
    vertex 1.000000e+000 1.000000e+000 1.000000e+000
    vertex 0.000000e+000 1.000000e+000 1.000000e+000
    vertex 0.000000e+000 0.000000e+000 1.000000e+000
  endloop
endfacet
facet normal -0.000000e+000 -1.000000e+000 0.000000e+000
  outer loop
    vertex 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
    vertex 1.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
    vertex 1.000000e+000 0.000000e+000 1.000000e+000
  endloop
endfacet

```

圖 1-6、正立方體 STL 檔案內容

再從一個封閉的三角網格實體來看，其最少需要由 3 個頂點 V_1 、 V_2 、 V_3 ，形成 V_1 - V_2 - V_3 三角形及反向的 V_3 - V_2 - V_1 三角形，其由右手定則可定義出兩相反面法向量(面朝外的方向)，而這兩個三角形具有三個邊線完全相連的特性，所圍出的體積為 0。如果再加一個頂點(4 個頂點)，會多出三個邊線，其中的一個面會被三個新的面所取代。以此類推，頂點數 N 為 3 個以上，邊線數為 $(N-2)*3$ ，三角形面的數為 $(N-2)*2$ ，如圖 1-7 所示。當中每條線都會被不同三角形的邊共同以相反方向描述過一遍。換言之，如果點、線、面的總數不滿足上述的公式，或三角形的邊被描述不是兩次或方向相同，這三角網格的資料就是不完整實體的描述。同時因為三角網格化的實體模型，將不在具有原先 CAD 設計時的幾何資訊(如圓心、半徑)，所以要進行編輯修改會很困難。

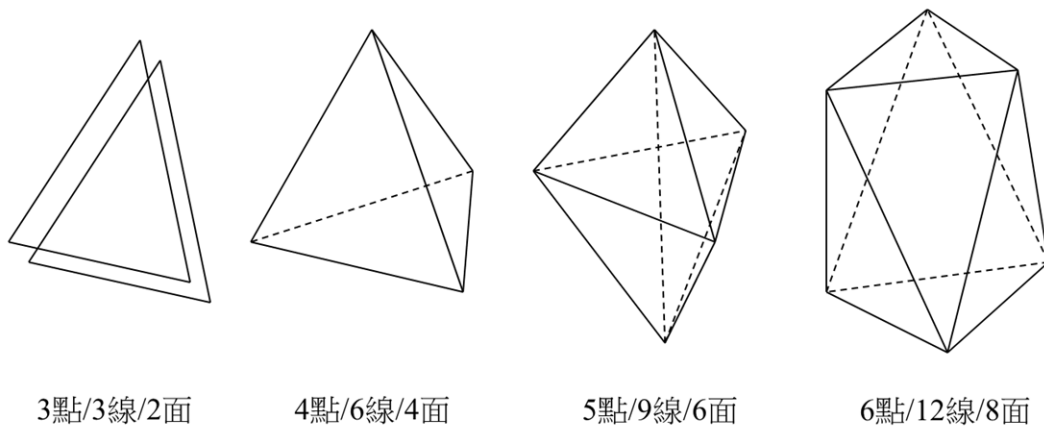


圖 1-7、三角網格的點線面關係

再來看看新的 AMF(Additive Manufacturing File Format)格式，AMF 檔案格式是由 ISO/ASTM 52915 規範定義，採用以 XML 為基底之格式。XML 格式除了可被計算機快速編碼計算，使用者可輕易閱讀、編輯與除錯。AMF 檔案格式有五種頂層元素(element)組成，<object>、<material>、<texture>、<constellation>和<metadata>。

在物件的形狀描述上，主要是在<object>中，每一<object>定義了一個或多個材質，每個材質與材料 ID 相關聯。AMF 中必須至少有一個<object>，在忽略其它元素時的 AMF，其結果類式於 STL。<object>定義幾何訊息，即立體元素(volume)和其材料代碼(material)，他的子元素包含頂點<vertices>和立體元素<volume>。首先輸入所有頂點座標，其次輸入立體元素，立體元素由三角面<triangle>包覆，三角面由三個頂點代號<v1>、<v2>、<v3>定義，不同於 STL 格式，其不需重複列出頂點座標，同時三角面頂點排序需依照右手定則(反時針方向)，所以可以由三頂點自行計算出其面法向量，不需再如同 STL 紀錄法向量。

材料代碼(material)定義模型的材料。每一個立體元素<volume>中都需要有一個 material ID，而 material 可以由進一步的<composite>來定義出均質的材料或具有不同密度變化的材料，其也可以應用 texture map 來定義。其可以定義出混合材料行為、漸層材料行為、編織的結構、或隨機變化的材料行為。

紋理<texture>是用來定義物件的變化，可以為物件表面的圖像、顏色，也可

以為內部結構的層次，所以其資料形態可以是 2D 的也可以是 3D 的。其包含子元素顏色<color>，顏色參數包含紅色(R)、綠色(G)、藍色(B)和透明度(Alpha，A)，設定範圍從 0 至 1。

叢集<constellation>是指如何將多個<object>放在一起，以形成更複雜的組合，而不用耗費大量的資料，藉由對<object>的位置及方向，以矩陣的方式排列，將相同<object>在叢集多次的出現，而達到高複雜度的物件描述而不會因此造成資料量的爆炸。

<metadata>則提供該檔案的附屬訊息，如檔案名稱、紋理、作者、版權、相關文字敘述等。

目前可用於 3D 列印製程的 3D 模型檔案格式有下列幾種：STL、AMF、OBJ、VRML(Virtual Reality Modeling Language，*.wrl)、3MF(3D Manufacturing Format)、PLY、3DS，除 STL 外，其它都可以包含彩色的資訊，所以可以應用具有彩色列印能的 3D 列表機印出彩色的成品，但目前只有 STL 及 AMF 為比較正式的 3D 列印用檔案格式。

本能力鑑定之重點在於模型的造形，所以將重心放在 STL 上，但仍需對新的 AMF 有基本的認識。



模擬考題

1. 以下何種資料格式無法描述實體模型？
(A) STL ； (B) IGES ； (C) AMF ； (D) JPEG
2. STL 檔案格式中，三角形小平面是由一組包含 X、Y、Z 三座標系統之三個端點所組成，且有下列那一個單位，可指出平面的那一邊是物體表面？
(A)法線向量；(B)旋積向量；(C)切線向量；(D)平行向量
3. 3D 列印除了 STL 格式外，也可以存成 AMF 格式，而 AMF 的全稱是？
(A) Additive Maker Format ； (B) Additive Mapping File ；
(C) Additive Manufacturing File ； (D) Additive Maker Form
4. 在 AMF 出現之前，STL 已經被廣泛的使用在 3D 列印中。2011 年 5 月，ASTM 委員會確認了 AMF 作為最新的 3D 列印文件標準，而 AMF 是基於下列何者，可以彌補 CAD 數據和積層製造之間的差距？
(A) SGML ； (B) XML ； (C) HTML ； (D) GML
5. 標準的 AMF 文件包含 object、material、texture、constellation、metadata 等五個頂級的元素，下列描述何者錯誤？
(A) object 表示欲建構模型不含形狀的其它資訊；(B) material 表示欲建構模型的材料；(C) texture 表示欲建構模型的顏色；(D) constellation 表示欲建構模型的結構與結構的關係
6. 在三角網格最佳化的情況下，立方體是由幾個三角形組裝而成？
(A) 8 ； (B) 10 ； (C) 12 ； (D) 14

考題解析

1. Ans (D)

(A) STL-Stereolithography 為 3D 列印最廣泛使用的實體模型檔案格式。

(B) IGES-Initial Graphics Exchange Specification 為 CAD 系統的一種標準資料格式，可用於 3D 實體模型的定義。

(C) AMF-Additive Manufacturing File Format，AMF 檔案格式是由 ISO/ASTM 52915 規範，為一標準的 3D 列印模型的描述格式，當然包括了實體數位模型的資料。

(D) JPEG-Joint Photographic Experts Group，由它們定義出了一種失真影像的壓縮格式，為 - 2D 影像。

2. Ans (A)

三角面的描述可以頂點順序，依右手定則以姆指為面的法線方向，而此面的法線所指方向為實體之外側。

3. Ans (C)

AMF 為 ISO/ASTM 52915:2013 standard 所定義的 OPEN SOURCE 的積層製造格式，其全名為 Additive Manufacturing File Format。

4. Ans (B)

STL 已經用在 3D 列印上很多年，但其對一個物件的描述豐富度在現今來看已經開始不夠完整了，在 2009 的 ASTM 規範下，重新進行新的資料格式定義，而於 2011 年公告 AMF 格式，而其採用 XML(Extensible Markup Language)使能具有更好的擴充性。

5. Ans (A)

AMF 文件包含 object、material、texture、constellation、metadata 等五個頂級的元素，其中 object 定義一個體積或每個材料都相關聯的體積；material 為可選材質元素的定義，可為一種或多種的相關材料 ID；texture 為可選擇的紋理元素(常為貼圖)，每個紋理都具有關聯的 ID；constellation 為可選擇的各元素

給合、排列組合關係，換言之，其可以透過組合而以較少的資料使用量定義出複雜的模型結構；**metadata** 可以用於指定上述元件資料的附加說明資料。

6. **Ans (C)**

一個立方體是由 6 個矩形的面圍成，每一個矩形的面為四邊形，可由兩個三角形構成，所以總共需要 12 個三角形。



觀念延伸

IGES 及 STEP 為兩大標準的 CAD 可輸出的格式，CAD 軟體匯入此格式的實體模型檔案，可以繼續對其編輯修改。而 STL 及 AMF 為 3D 列印的標準實體模型檔案格式，但不可以繼續對其進行幾何的編輯修改。

iPAXS



重點掃描

1.2 支撐結構

進行 3D 列印過程中，因為重力、熱應力與各種可能的外力，造成列印過程無法疊層而列印失敗，或列印出的品質太差而無法使用，所以需要建立連接列印物到平台之間，及部分物件補強的支撐結構。然而，增加支撐也帶來要移除支撐的時間、材料成本與列印物表面被破壞等問題。因此，要維持模型表面品質與簡化支撐移除是設計支撐首要考量問題。另外，讓列印物附著在列印平台與從列印平台脫離也是重要的列印技術。因此，在列印物與列印平台之間如何的增加犧牲層，也是要被考慮的。

不同的 3D 列印系統，因為不同的成型限制及材料特性，會對支撐的結構設計有不同的要求，本能力鑑定的範圍是以材料擠製成型中的熔融擠出及光聚合固化中的下照式兩大類為主，因此將支撐結構依這兩大類分別進行說明。

1.2.1 熔融擠出

熔融擠出是將熱塑性高分子材料加熱，使其具有流動性，再使其由一噴嘴擠出，在距離前一層已經冷卻具有強度的表面上方一層層厚處，使熔融的材料披覆在其表面上。若擠出材料的下方懸空，將會使熔融的材料無處可以披覆。一般而言，所能製作的工件將會受此限制，而無法製作出外懸或有跨距懸空的工件。

但在外懸行為上，因為擠出的材料有一定的寬度(線寬)，如果能確保新擠出的材料能和之前一層之間保有大於 50%的重疊，也就是可以達到每層具有 1/2 線寬的外懸量。如以層厚 0.1mm，線寬 0.4mm，將有機會 0.1mm 高度下達到 0.2mm 的外懸，也就是約 60° 的外懸角。當然這是指理想狀態之下，材料本身的強度、機器設備的精度、不同層厚與線寬…等等，都會影響到所能達到的外懸角。

另外，對一有跨距的懸空，是可以用架橋的方式，由懸空的一側先與物件黏結，以一邊擠出一邊移動的方式，直線運動至懸空的另一側再與物件接觸，而完

成有跨距的懸空結構。同樣，這是指理想狀態之下，材料本身的強度、懸空時所受重力影響而產生的變形…等等，都會影響到所能達到的跨距長度。

以上所提到的是熔融擠出對懸空行為的可能處理方式，所以對於工件設計上，超出這一製程所能達到的能力，就必需在設計上，另外加上結構的設計，如加上適當間距的支撐肋於工件下方，使加工時的工件底部為在支撐肋之間進行架橋的製程，而達到懸於支撐肋上方的工件製作，而這有一固定間距的支撐肋，被稱為**棧板(Raft)**。這棧板可以將物件抬高，不直接與成型底板結合，對不平整的工件底面達到固定的效果，因為其不是工件的一部分，有時會被稱之為犧牲層。

另外，熔融擠出是將材料以熔融的狀態下擠出以結合前一層，結合時會冷卻成為固體，而材料在由熔融的狀態到固態，再冷卻到常溫，都會伴隨體積的收縮，所以層層加工下，會有大量的內應力累積，而如果工件與加工平台之間的結合力不足，將會因為這過大內應力造成分離而翹曲。為了提供更大工件與加工平台之間的結合力，可以在工件與加工平台的接觸表面加上**側裙(Brim)**，以加大接觸面積的方式，提供額外的結合力。

除了以上兩種主要的支撐行為，在印製列印物之前，可以預先在列印物向外偏離處列印**裙邊(Skirt)**，不同於邊緣是附著在列印物的周圍，裙邊的目的是幫助擠製頭順料，並檢查平台水平校正、線材附著程度及擠料狀況，而裙邊本身不會和工件接觸。也有以加高裙邊以對工件形成保護牆，使工件之冷卻比較慢，使能防止快速降溫而收縮破裂。

除了使用犧牲層來固定列印物和列印平台，亦可改變列印平台的表面特性，例如貼耐熱膠帶、塗膠水等，增加列印物第一層於列印平台的附著力。另外列印平台可用彈性的玻璃纖維板，加工完成後，可以將玻璃纖維板彎曲，而輕鬆脫離列印物於平台。

如果是擠製系統僅使用單一擠製頭，那麼則其支撐的結構必須以相同的材料來製成。這需要仔細的思考零件和支撐結構的強度差異性，雖然零件和支撐結構是被放置在相對於彼此的位置，但製作完成後，在拆解支撐結構時不應傷到零件的精度與特徵。目前的策略是將支撐結構與工件之間保持一個微小的間隙，在加

工時，因為這間隙會使工件擠出時與支撐結構的接觸無法有緊密結合，如圖 1-8 所示，左側為材料每層擠出，而層層之間可以有緊密結合的力量與熱傳熔融在一起的能力，而右側是增加一層厚的間隙後，材料擠出是以自然垂流的方式與前一層的支撐結合，少了擠出的推力及更少的接觸面，使無法達到好的熱熔。因為這樣的結合力不強，所以在加工完成後，可以幫助成品與支撐的分離。

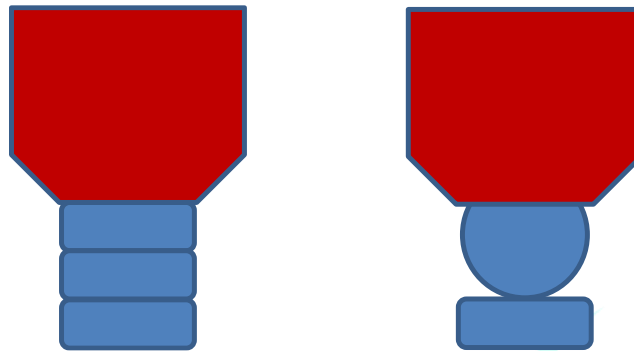


圖 1-8、層之間的結合，左為高結合行為，右為低結合行為

另外如果是擠製系統使用複數個擠製頭，可以分別使用不同材料，利用材料性質的差異性，則支撐結構即可輕易的從零件上作區分，無論是視覺上(搭配不同顏色的材料)、機械上的(使用較弱的材料作支撐結構)、或化學上的(使用可以溶劑移除而不影響零件材料本身的材質)，複數個擠製頭都能提供更進階的功能。

除了造形外側的支撐，對其內部的充填也是屬於支撐的一部分。模型內部填充(Infill，簍空結構、補強肋)是用來擔任支撐模型表面內部的功能，同時也擔任物件結構的補強需求。一般常見的充填樣式(Fill Pattern)排列形狀如包括了蜂巢排列、線條排列、網狀排列、同心圓、Z 型排列等等。另外有充填百分比(Fill Density)、形狀角度等參數可供選擇。充填百分比愈高，可以得到密實度愈高的物件，通常能提供更好的強度，但也會使用更多的材料及加工時間。

一般常用於熔融擠出的支撐結構設計軟體，多是以參數設定自動生成的方式，所以多會與切層軟體相結合。進一步的切層方式，將在 1.3 節中說明。

1.2.2 光聚合固化

光聚合固化技術是以光進行選擇性的照射，將低分子量的液態樹脂以光聚合方式結合成高分量的固態工件，而如何將光進行選擇性的照射，是其關鍵的技術之一。本節將從不同光照射的方式進行分類，對目前已經發展出的一些設備進行分別的說明。如圖 1-9 所示，以不同光照射的方式進行分類，可分為點掃描及面曝光兩大方法，而點掃描的點光源都是運用雷射，而掃描方式可分為振鏡掃描、XY 平面運動掃描、及平台運動掃描；而面曝光的面影像可分為 LCD(Liquid Crystal Display)動態光罩、DLP(Dynamic Light Processing)動態光罩、及實體靜態光罩等。另外從照射的方向又可分為上往下照(Top Exposure 簡稱上照式或上曝式)、下往上照(Bottom Exposure 簡稱下照式或下曝式)兩大類，而面曝光的方式又再可分為面投射式及面成像式。本能力鑑定的範圍以桌上型的系統為主，所以主要針對其中的下照式進行說明。

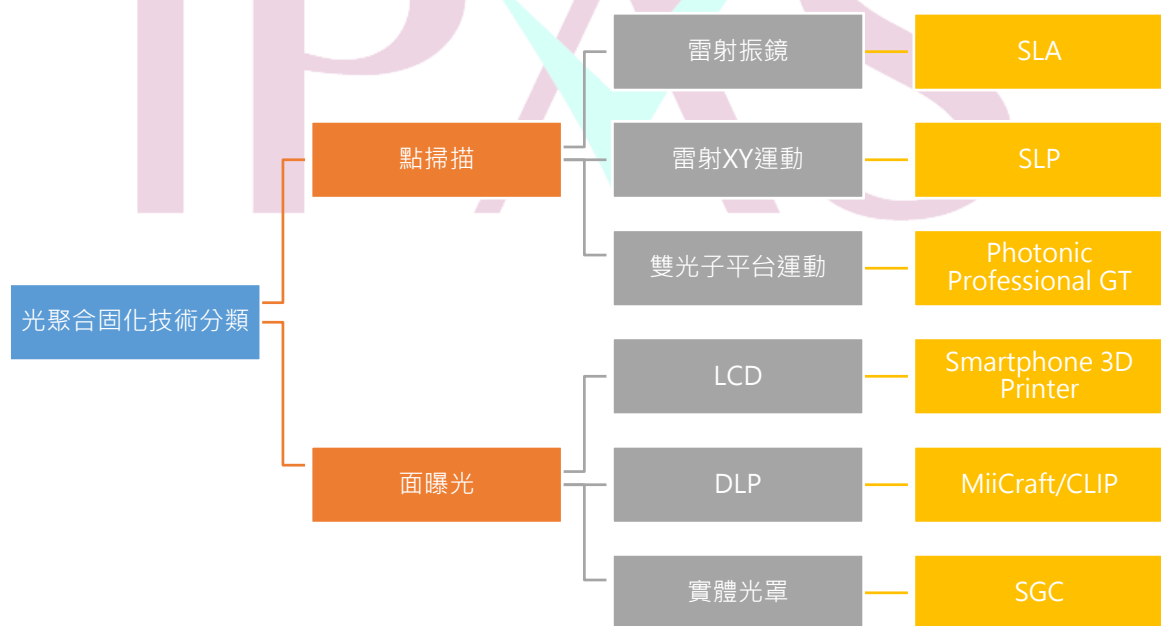


圖 1-9、不同光照射方式之光聚合固化技術分類

光照固化的行為不是單純的有硬化及沒有硬化，完全的 0 與 1 的差異，光能量與硬化的深度是正相關，但硬化的深度也不是完全硬與完全不硬的現象，而是因為光的穿透性而在不同深度下有不同的能量，所照成的硬化百分比也不同。而

光聚合樹脂在一定比例的硬化反應下，即可形成固形物，而此一比例的增加，會有更完全的聚合行為，而固形物的材料性能也會逐漸由原先的液態轉到理想中完全反應後的固態材料特性。在 3D 列印的過程中，通常不會也不可能得到完全反應完成的固態，因為光能量的穿透與衰弱，使光照射的初始處有比較高的固化比例，而較深處有比較低的固化比例。如果為了有高的固化比例而提供了更多的光能量，此光能量將會造成過度的固形物產生，即為太多的過深硬化(Over Curing)，而導致無法細緻的成型物件。然而不足的固化比例，將無法提供固形物足夠的機械強度，而在成型過程中受到外力而被破壞。

(1) 下照式光聚合固化與分離拉拔力

下照式在現今的文獻中多稱為 Bottom Up 的方式，樹脂材料是裝在一下方透明的樹脂槽中，而樹脂槽的高度只需能保證能放入有足夠完成加工件所需之材料。下照式的方向，使透明的樹脂槽底面的上表面(即為與樹脂接觸的表面)為成型時的拘束表面，層厚的控制就是工件加工中的下表面與樹脂槽底面的上表面之間所留的空隙，所以不需額外的進行樹脂液面高度控制。然而，當所留空隙中的樹脂硬化，使能和上方加工中工件的下表面結合，達到材料增加的目的同時，此新成型材料也會和樹脂槽底面的上表面結合在一起，為了使新成型的部分能與上方結合而不與下方結合，所以會同時希望增加上方的結合力及減少下方的結合力。在減少下方結合力上，會在樹脂槽底面的上表面，以不與硬化後的樹脂產生結合力的材質貼附，而通常使用的是有一定厚度的高透明軟矽膠。軟矽膠的使用，除了不與樹脂反應外，其容易變形的特性更是一大重要的因素。

想想看，家中浴室可能使用過的吸盤，在使用時，將吸盤壓在牆上，將中間的空氣擠出。它可以吸附在牆面上是因為吸盤與牆面為真空狀態，而使吸盤受到單側的大氣壓力，而得到很大的正向力，進而有足夠的靜摩擦力，所以在輕負荷下，不會滑落下來。吸盤不是真的與牆面結合，所以可以不用太大力量就可以克服靜摩擦力，上下左右平移，但要垂直於牆面拉起，卻很困難。如果真要拔起來，可以從吸盤的一個角落，輕易的剝開，這是因為這一個角被剝開後，會使空氣灌入吸盤內，而破壞了真空。

同樣的，當加工中的工件與樹脂槽上表面中間的液態樹脂被光照射聚合反應硬化為固體時，雖然不會與樹脂槽上表面產生結合，但中間的液態樹脂流體不存在了，也就使新成型的部分與樹脂槽上表面沒有間隙，等同於是真空的狀態，如圖 1-10(a)所示。在完成該層加工後，需要在該固體層與樹脂槽上表面之間，重新放入液態的樹脂。為達到放入樹脂的目的，在加工程序中，必須將已經成型的部分抬高，使液態樹脂流入。因為之間沒有空隙，所以要將已經成型的部分抬高就等於要克服吸盤受到的大氣壓力，當成型面積愈大，要抬高的力就愈大。因為有一定厚度的高透明軟矽膠的導入，所以在抬高動作時，軟矽膠會被已經成型的部分一起抬高，而伸長變形，但矽膠之變形，在總體積不變之下，其矽膠所增加厚度的體積來源為工件周圍沒與工件接觸的部分。如圖 1-10(b)所示，所以在工件周圍將很容易達到一明顯陷落的現象，而這現象就相當於從吸盤的邊緣將吸盤剝開的動作，所以可以容易的用比較小的力量，在工件周圍與矽膠之間產生剝離，使旁邊的液態樹脂流入，完成樹脂充填的步驟。

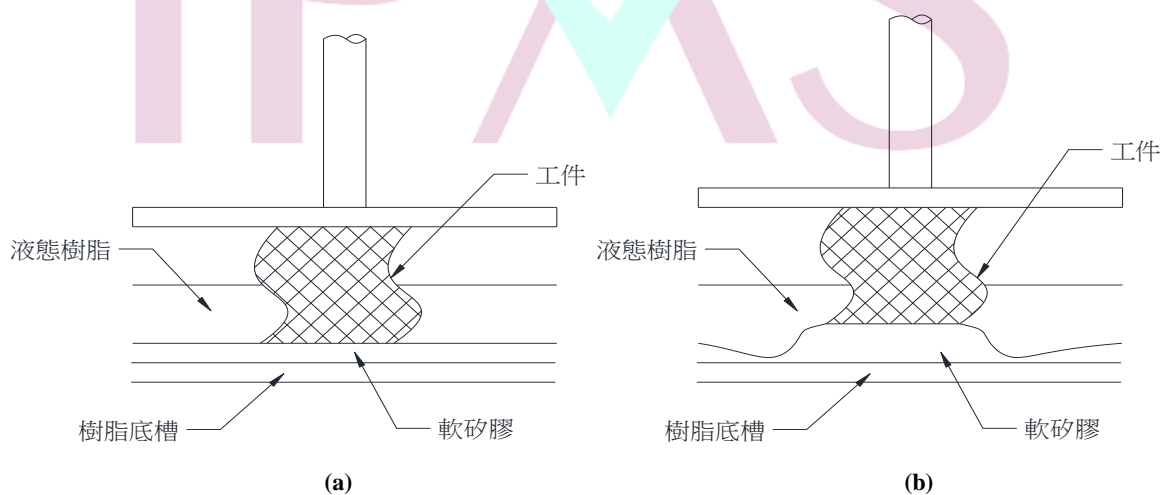


圖 1-10、高透明軟矽膠樹脂槽底上表面，(a)工件與樹脂槽上表面中間的液態樹脂光聚合硬化為固體；(b)工件抬高時造成軟矽膠變形之現象

除了高透明軟矽膠的導入外，為了能夠更容易與下方分離，有些下照式系統同時導入單方向剝離的機構，如圖 1-11(a)所示，其樹脂槽是以單側拘束而另一側開放一運動行程的方式。在成型板抬高的過程，會將工件一起抬高，而工件在開

始時是與樹脂槽合在一起，所以會有力量要將樹脂槽一起抬起。但因為樹脂槽單側被拘束著，所以只能單方向被一起抬高。如果成型的面積比較大，就會有比較大的真空吸力，使樹脂槽被抬高所需的彈性變形力量很大，而需要更高的抬高行程。過高的抬高行程雖然可以提供足夠的彈性變形力來協助工件與下方分離，但也將因為過大的變形而使工件靠近拘束側受到拉伸而變形，而反之，在靠近開放側反而壓縮變形。所以在開放側會有運動行程的限制，在達到一定行程後，會再形成拘束，而此時工件與樹脂槽已經有一傾角，再繼續抬高時，其變形主要將來至矽膠，而使其靠近拘束側開始剝離，如圖 1-11(b)所示，而達到容易與下方分離的目的。

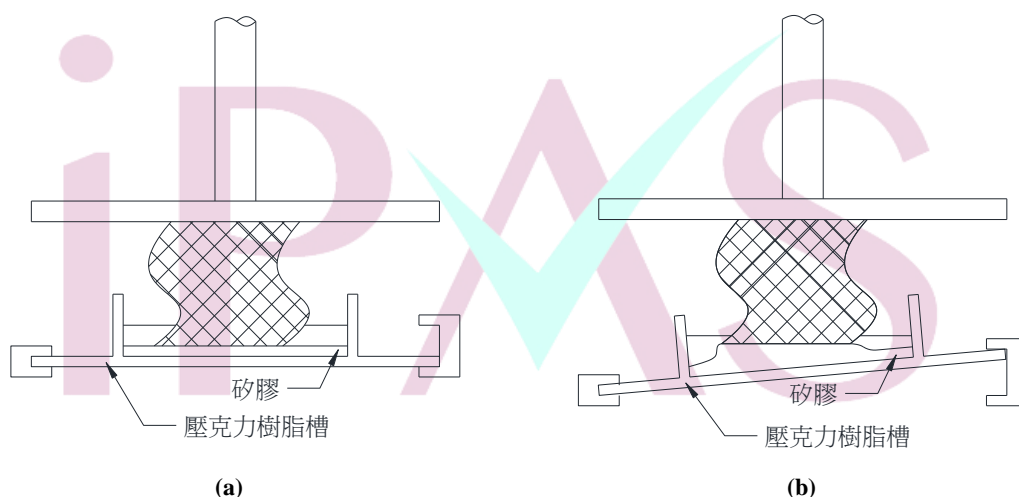


圖 1-11、下照式光固化系統的單方向剝離的機構，(a)左側拘束右側開放 - 運動行程；
(b)工件與樹脂槽已經有一傾角，使其靠近拘束側開始剝離

各式的拉拔力問題之下，也同時有各式的方法，希望能更快更精密的完成製作。其中非常具有代表性的技術為 CLIP。CLIP 技術(Continuous Liquid Interface Production，連續液體介面光聚合生產法)是目前號稱最快的積層製造方法，不同於其它採用一層一層加工的方式，CLIP 採用連續加工的概念，使成型工件幾乎看不到層的現象。這是 2014 年提出的專利方法，並 2015 由「科學」(Science)國際最頂尖的期刊所發表出來。CARBON3D 公司是以這 CLIP 技術為核心成立的，2016

年 4 月開始推出其第一代的 M1 機型於市場中，如圖 1-12 所示的 M1 機型於市場中。M1 系統可以達到 200mm/hr 的高度，其是使用 LED 為光源的 DLP(Digital Light Processing)投影機為光影像的產生器，成型面積為 $144 \times 81\text{mm}^2$ ，平面解析度為 $75\mu\text{m}$ ，而高度方向的解析度在一般其它積層製造設備都是以層厚為定義，但 CLIP 技術是以連續拔出工件的方式，所以高度方向的解析度可以細到以微米來看。如圖 1-12 所示，CLIP 技術的成型原理，與其它下照式很像，但主要在樹脂槽底板有了很大的改變。CLIP 導入了具透氧特性的底板，而樹脂聚合反應本身是一個厭氧的行為，所以儘管光聚合樹脂受到光照射，已經使光起始劑開始放出自由基，要開始聚合反應，但因為有與氧接觸，而無法開始。這些已經有自由基的樹脂隨著成型板上升的帶動而被吸上，因此離開了厭氧死區，而立即開始固化的反應。在此效應下，工件底部與樹脂槽不再有接觸，也就是其介面在這過程中保持為可流動的液體狀態，所以可以沒有其它下照式系統所需要克服的真空吸力問題。

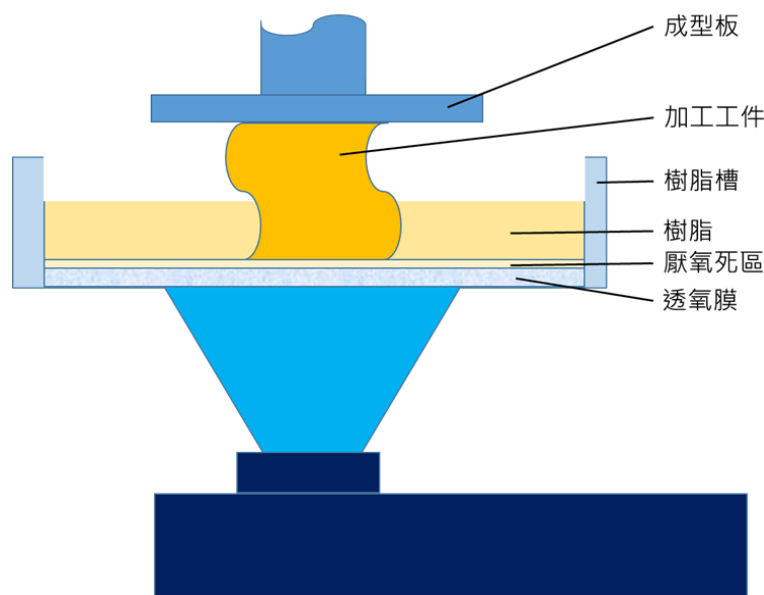


圖 1-12、CLIP 技術之原理及結構

圖 1-13 為 CLIP 技術的拉拔行為，這是以直徑 2mm 的圓柱進行拉拔的實驗，運用粒子可視化的方式，可以看到內部的流場行為。在下面投以 2mm 的圓，以每小時 200mm 的速度將工件向上拉拔，2mm 的圓柱將不斷的增長，而向上增生的

體積是由旁邊的液態樹脂來補充，而這補充行為就造成底面流場的改變，如同下方產生的頸縮，是因為微小的抬高，將有(面積*高度)的體積需要被補充，成型面積愈大，要被補充的體積也就愈大，而如此大體積的樹脂要流入這薄薄的間隙，若樹脂的流動性又不好，勢必有很大的流動阻力，而可能使成型中的工件變形。同時，這些流動亦有可能將在厭氧死區中已經產生自由基的樹脂，帶到不需硬化的區域，而造成製作的錯誤或失敗。換言之，CLIP 技術將很適合製作大量鏤空、薄殼的工件，不適合有大截面積的工件製作。

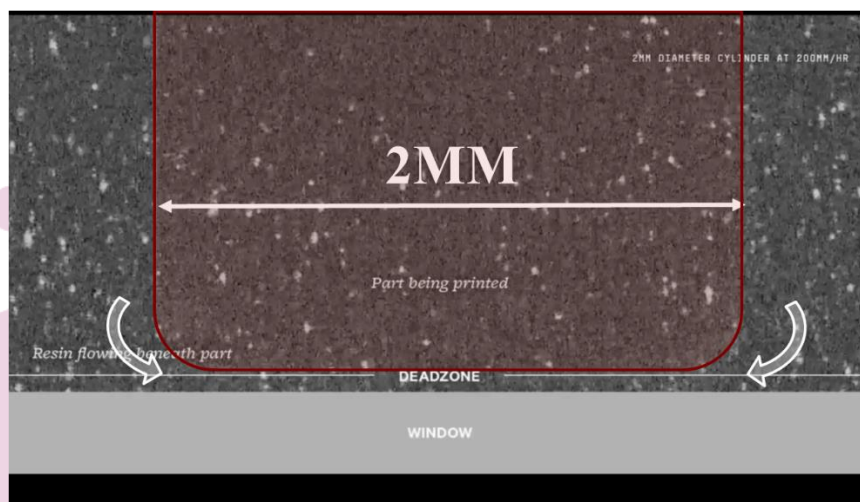


圖 1-13、CLIP 技術的拉拔行為

(2) 支撐結構設計、製作與移除

下照式的支撐結除了要用於支撐外懸的幾何，使能製作出更複雜的造型外，亦需要提供工件每層加工時與樹脂槽之間的拉拔力，所以其合理的設計就相對為重要。為了要保證工件能夠順利完成，除了要在加工過程中確保有足夠的拉拔力將每一層成型與樹脂槽之間分離，也要保證工件能夠緊緊的抓在成型平台上，不至於在過程中脫落。另外，光聚合固化的過程，會伴隨著液態轉成固態的過程，而這過程會有體積收縮的現象。同時其層層加工，每層的照光面與和前層結合面所受到的光能量不同，所以其收縮量也不同，所以很容易因為層層的應力累積而使成型物翹曲變形，而如果工件與加工平台之間的結合力不足，將會因為這過大內應力造成分離。為了提供更大工件與加工平台之間的結合力，可以在工件與加

工平台的接觸表面如同熔融擠出的方式，其第一層或前幾層以加上側裙的方式加大接觸的面積，同時另外需要以長的光照時間(或降低掃描速度)以提供樹脂更多的光能量來幫助樹脂有更好的固化，產生更大的材料及結構力量。

與熔融擠出的加工方向相反，熔融擠出的支撐結構為了好和工件分離，其之間希望有較少的結合力；而下照式的光聚合固化是要由支撐結構將工件拔起來，所以支撐結構要與工件之間有好的結合力。熔融擠出的支撐結構與工件之結合是希望不要互融，而下照式光聚合固化的支撐結構是要能夠與工件聚合在一起。

過多的支撐，將使完成的工件不容易將支撐去除，但不足的支撐，卻又無法有提供足夠的拉拔力量在需要的地方，使工作製作失敗。目前這部分支撐的設計，都希望能夠自動化的解決好，但自動化的解決方案通常所得到的結果，也都還會有過多或不足的現象。

目前在下照式光固化的 3D 印表機中，除了各系統廠商所自行提供的支撐設計前處理軟體外，要以 MeshMixer 為最為廣泛被使用的。支撐設計前處理軟體多會提供自動建立支撐及手動建立的能力，如圖 1-14 所示，自動建立的支撐時常不是最好的，需要在有經驗的工程人員合理的修改支撐下，方可有好的成型品質。

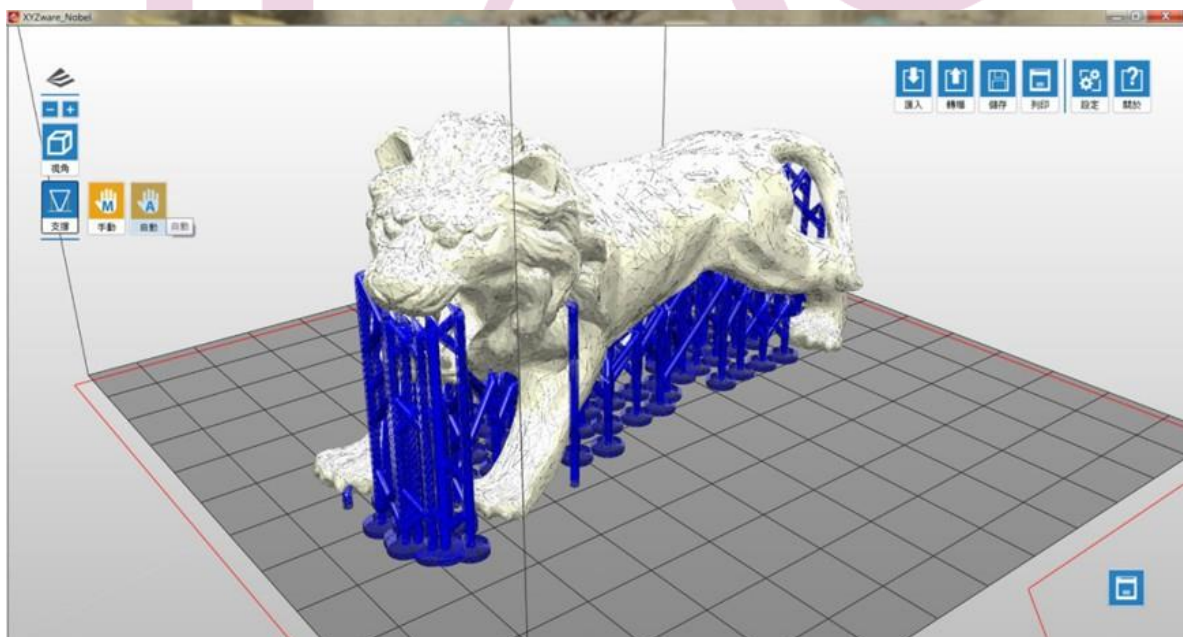


圖 1-14、系統的自動化支撐建立

本學習指引在光聚合固化的支撐結構設計上，分為雷射點掃描與面曝光兩大類來說明其支撐結構的設計。

雷射點掃描：一般的大眾，很多人把使用雷射掃描光聚合固化成型的積層製造系統都統一稱之為 SLA 技術，SLA 的全名為 Stereolithography Apparatus，是美國 3D Systems 公司早期對其機器設備的稱呼，所以從合理性來說，並不足以代表所有以雷射光硬化的行為。但因為雷射掃描光聚合固化成型並沒有被正式的被命名，所以本指引先延用 SLA 為代表。雷射掃描的掃描路徑是採輪廓(Contour)及往復(ZigZag)的方式。上照式的成型方式每層會有刮板鋪平的動作，以破壞樹脂在物件上的表面張力所形成的不平整現象，而刮板在鋪平的過程會有一剪力，可能會推倒工件，所以在物件下方需加強其抗剪的支撐結構。下照式的成型方式有一拘束面分離的力量(此一力量行為將在後面的成型方向中說明)，其實體必需要在成型過程中即可承受一定的拉力，所以其掃描的線間距必需為負值。也就是說，掃描間距要小於雷射光斑直徑，使成型為一完整具有一定強度之實體。同時為了加強工件的結構強度，其所需要的固化比例也要提高以提供足夠的機械強度，換言之，其過深硬化量也要多，所以 Z 方向的最小厚度會遠大於切層的層厚。

面曝光：一般的大眾，很多人把使用投影機投影成像在樹脂槽進行光聚合固化成型的積層製造系統都統一稱之為 DLP 技術，DLP 的全名為 Digital Light Processing，是美國 TI 公司所開發的投影機光機引擎的稱呼，只是大多的面曝光式光聚合固化成型積層製造系統是以 DLP 類的投影機為動態光罩產生器，所以才被用如此不合理的稱呼。但面曝光式光聚合固化成型積層製造系統亦可使用其它類型的投影機來投影成像，或可使用 LCD 直曝的方式。投影機的行為是光成像，可以由光學設計及設定而得到不同的成像尺寸，而可以有不同的解析度，同時成像會有景深，一般其景深都會大於層厚，所以沒有被特別討論。LCD 直曝方式不是成像，所以同一 LCD 面板不可以得到不同的解析度，其也沒有景深，反而是光散。為了減少光散，可由兩方向著手：縮短成型區與 LCD 面板的距離及改背光模組為投射式光源。投影式與直曝式各有優點，投影式可由變焦而調整所需的解析度同時有好的對比及景深，但通常也伴隨著影像變形；直曝式則相反，有固定的

解析度而且無影像變形，但因為光散而使影像邊緣不夠銳利。面曝光式光聚合固化成型積層製造系統並沒有掃描路徑，而是如同投影片由電腦運算出切層的剖面形狀，以此剖面為光罩，直接投影在成面中。

當成型物為一大尺寸的實體，其拉力是正比於加工時的截面積(真空力)，實務上多將此一實體物件薄殼化，使實際加工時的截面積減少。但如果只是將物件薄殼化，物件仍是一封閉的空間，對其真空力的現象，仍無法因此而改善，所以必需在其靠近成型板處加一個氣孔(Vent)，如圖 1-15(b)所示，使能夠內外壓力平衡。同時因為物件薄殼化及薄殼內外壓力平衡了，液態樹脂流入成型物與樹脂槽分離的空間時，樹脂充填的行為由原來實體時的物體外側流入到最中心的部位，如圖 1-15(a)所示，改為由薄殼壁的兩側向中間填入，如圖 1-15(b)所示。所以薄殼化後可以有最少的橫向流動，從而減少橫向流動力量而造成的變形、破壞、及可以減少流動所需的時間，進而加快成型的速度。

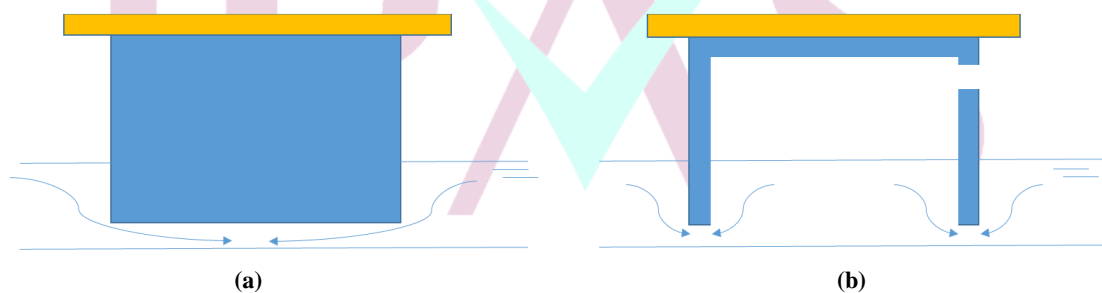


圖 1-15、樹脂流入物件與樹脂槽底部之方式：(a)大面積無氣孔；(b)薄殼截面有氣孔

另外，在下照式光聚合固化的列印過程中，每次與樹脂槽的分離過程，會有新的樹脂流入工件與槽體之間的間隙，為了方便這樹脂的流動，在支撐結構的設計上，多採用鏤空編織(Lattice)的方式。

最後，下照式光聚合固化的支撐結構是與工件結合為一體，為了使完成加工後，支撐結構能夠與工件分離，所以在支撐與工件接觸的地方多以尖點連結，使能在受橫向力時產生應力集中而斷裂開。

在外懸行為上，因為光聚合固化在製程中是不完全固化的行為，也就是說，材料的強度在過程中沒有很高，所以可以達到的外懸角不會太大，而超出外懸角

時，就必需在物件與成型板之間加上支撐結構。另外，對一有跨距的懸空，是無法如同熔融擠出一樣用架橋的方式成型，而仍然要以大量支撐的方式提供拉拔力量。支撐的間距會和材料本身的強度有直接關係，愈硬的材料，間距可以愈長。

如同熔融擠出的棧板設計，光聚合固化也可以用鏤空編織的棧板在工件與成型板之間，以將物件抬高，不直接與成型底板結合，對不平整的工件底面達到固定的效果，因為其不是工件的一部分，有時會被稱之為犧牲層，最後將物件取下成型板時，可以用破壞棧板的方式，而不會破壞到成型工件。

除了使用犧牲層來固定列印物和成型板外，亦可改變成型板的特性，例如在成型板上打孔，可幫助樹脂可以上下的流通，這對流動性比較不好的樹脂可以幫助它流入工件與成型板之間；另外可在成型板上用粗砂紙打磨，使其粗糙化，增加列印物第一層於成型板的附著力。

不同於熔融擠出的切層軟體多包括了自動加入支撐結構的功能，光聚合固化的支撐建立比較複雜，目前比較常使用的是 MeshMixer。Meshmixer 為 Autodesk 公司專為 3D 列印所開發之免費軟體，功能眾多，在此只作簡單功能之介紹，若使用者有興趣可至網路上參考其他老師之教學。

以圖 1-16 的造型為例，使用 Meshmixer 為軟體工具對其進行支撐的建立。

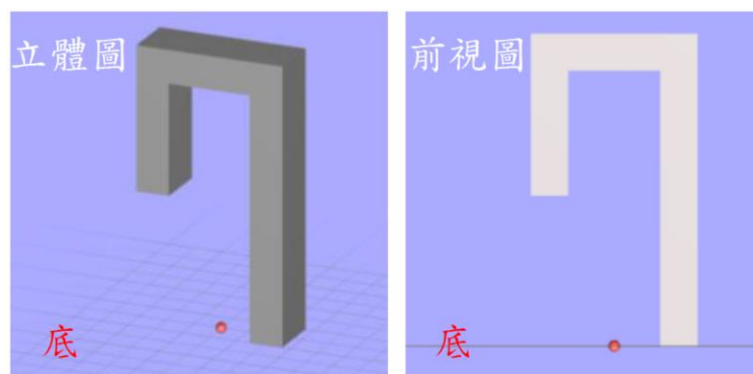


圖 1-16、一有外懸的物件

作完如圖 1-17 所示之切層後，在無建立支撐的狀況下，從底部開始作列印，當到達第 9 層時，因左邊成型區無支撐，在使用光聚合固化印表機時會成型於樹

脂槽底部而不與模型本體結合，因而列印失敗，此時可建立如右下圖所示之支撐材輔助懸空的部份。

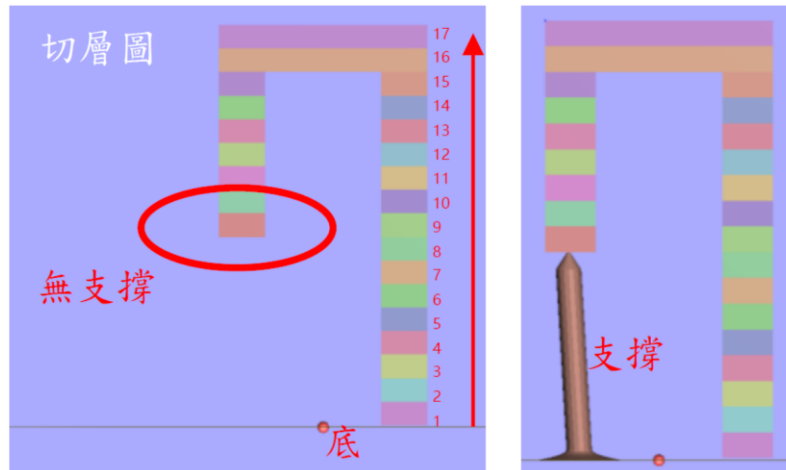


圖 1-17、外懸物件的支撐需求

如圖 1-18 所示，可在基本參數欄位中的下拉選單裡選取「SLA/DLP Printer」，系統即載入預設之 SLA/DLP 參數，之後可依需求微調參數。

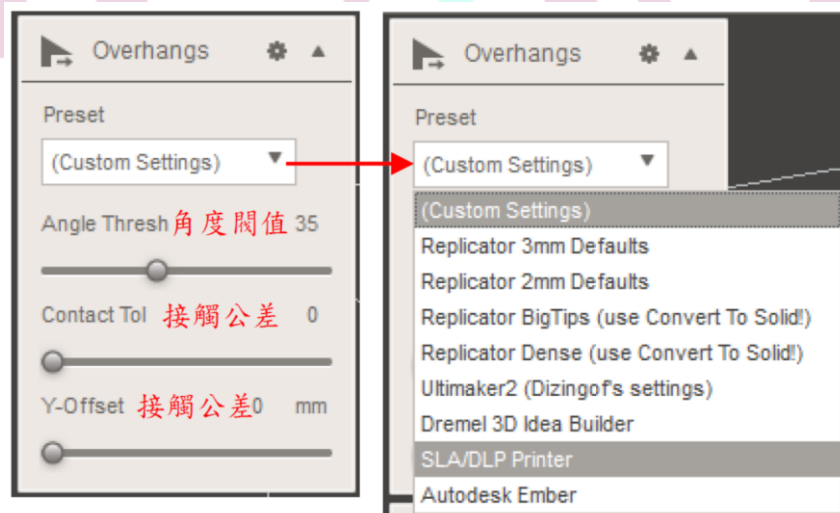


圖 1-18、Meshmixer 中的基本參數欄位

角度閾值：

此值為判斷模型與底面之角度，如圖 1-19 所示，角度值範圍內之面會呈紅色，此範圍同時也代表自動生成支撐的位置，當數字越大，涵蓋的面也就越大，此值可視模型大小作調整。

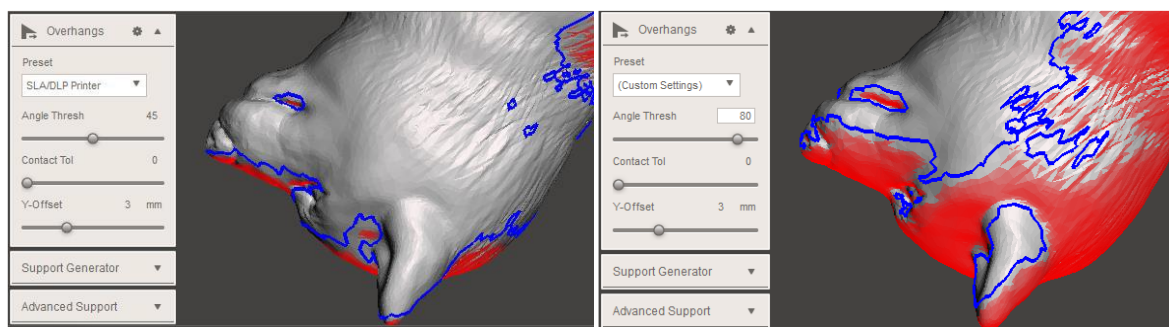


圖 1-19、以角度閾值設定支撐的位置

Y 偏移：

此值為將整個物件上移的高度，如圖 1-20 所示，以便於模型最低點生成支撐，若物件底部不需支撐而與成型板貼齊，可將 Y 偏移設定為 0，預設為 3mm。

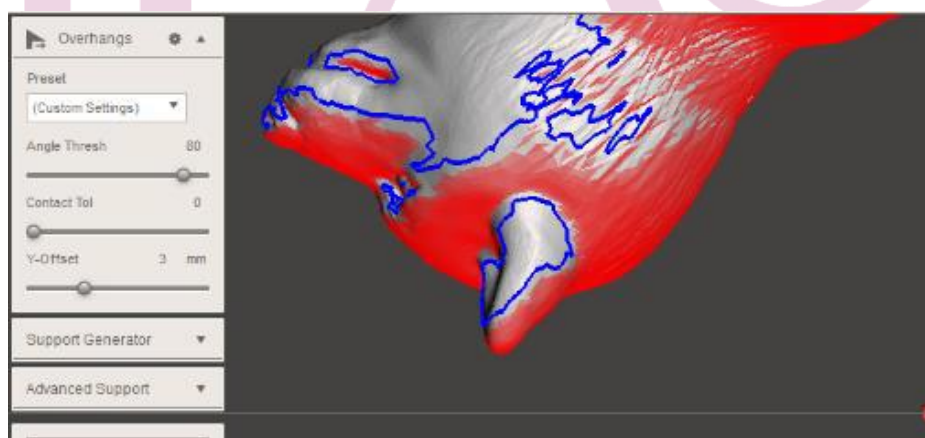


圖 1-20、Y 偏移設定

如之前所提到，下照式光聚合固化的支撐結構與工件接觸的地方多以尖點連結，在以 Meshmixer 為例，其提供了支撐生成器的參數設定，如圖 1-21 及 1.22 所示，使用者可以視需要調整，以達到最佳的輸出品質。

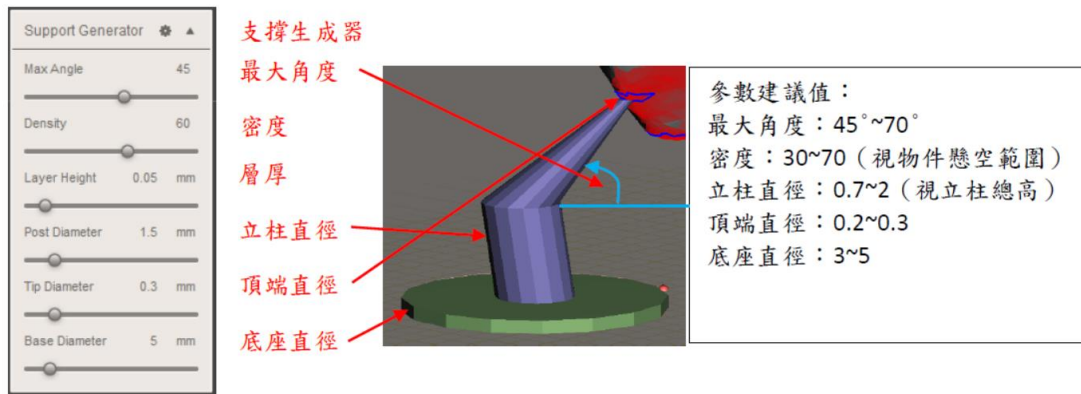


圖 1-21、一般的支撐參數設定

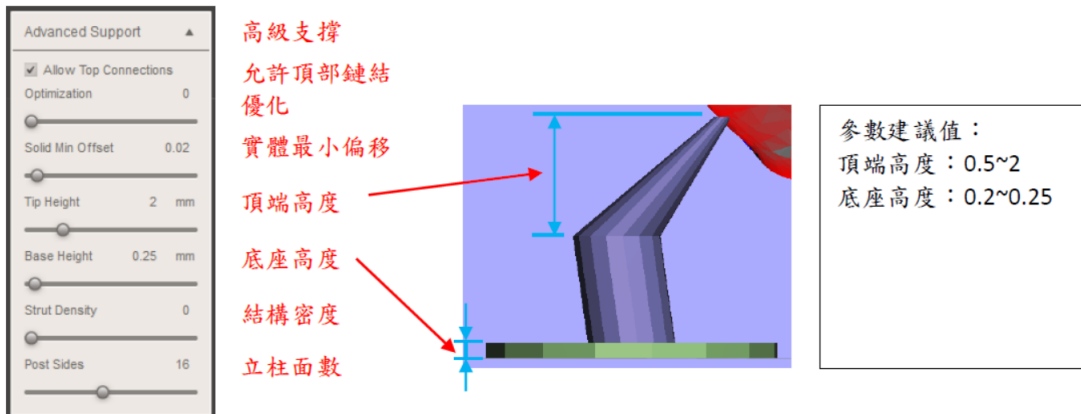


圖 1-22、進階的支撐參數設定

調整參數後按下「Generate Support」自動生成支撐，如圖 1-23 所示，若認為自動生成支撐仍有不足之處，可以滑鼠左鍵點選模型面來新增支撐，按住 Ctrl 鍵並按滑鼠左鍵即可刪除支撐，或是可不使用自動生成支撐，完全由個人手動建立支撐，如圖 1-24 所示。

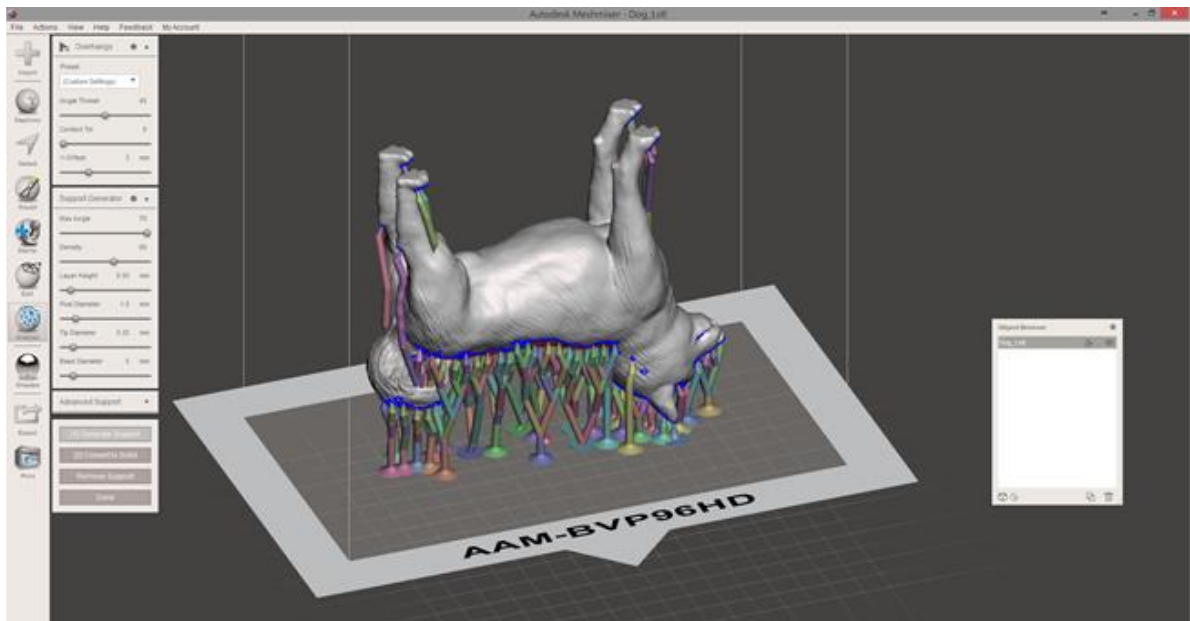


圖 1-23、自動依設定之參數生成支撐

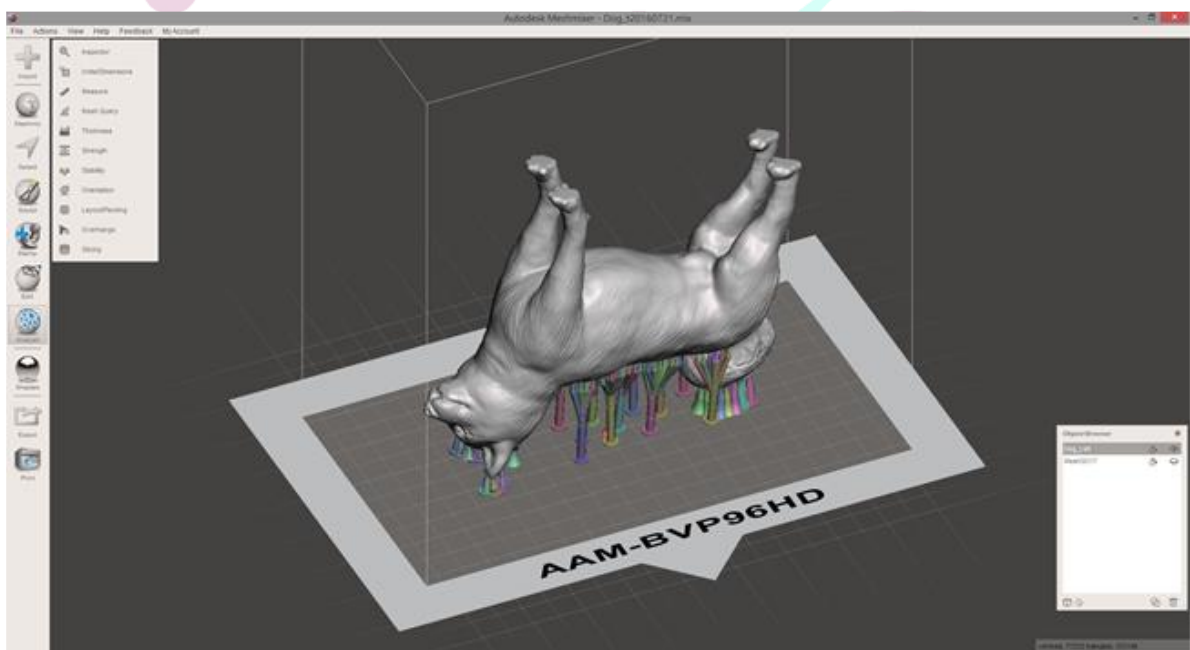


圖 1-24、依使用者需要自行調整及建立支撐



模擬考題

1. 在熔融擠出中，如果列印模型的底部不平整，以下何者方法建構支撐最為合適？
(A) Raft(棧板)；(B) Brim(側裙)；(C) Skirt(裙邊)；(D) Infill(模型內部填充)
2. 如果支撐結構定義為支撐建構的特徵以避免加工的不完整且待建構完成後需移除，則下列的 3D 列印系統中，何者需要支撐結構？
(A) FDM；(B) SLA；(C) SLM；(D)以上皆是
3. 下列何者不是犧牲層的目的？
(A)犧牲層可以回收；(B)犧牲層可以當支撐；(C)犧牲層可以方便從成型板上移除；(D)犧牲層可以形成空孔特徵
4. 目前比較成熟的 3D 列印製程中，那種製程最不需要設計支撐？
(A)材料擠出成型；(B)直接金屬粉末雷射燒結成型；(C)光聚合固化成型；
(D)黏著劑噴膠成型
5. 在以材料擠製成型的前處理時，會選擇建構支撐結構，還有設定支撐結構的密度，支撐結構的密度表示為？
(A)密度越高則物件的支撐結構強度越大；(B)列印出來的支撐結構會影響到物件的填充率；(C)列印出來的支撐結構會也會在物件上表面長出支撐；(D)以上皆是
6. 如果欲建構的物件底部凹凸不平，下列可以選擇使用什麼方法建構犧牲層？
(A) platform adhesion types：Raft(棧板)；(B) platform adhesion types：Brim(側裙)；(C) patent spacing：圖騰間隔；(D)以上皆非

考題解析

1. Ans (A)

(A) Raft - 為在模型下方加上網狀結構，撐起模型。

(B) Brim - 為在模型外側加上側裙，以增加與底板的接著力。

(C) Skirt - 為幫助擠製頭順料，並檢查平台水平校正、線材附著程度及擠料狀況，與模型沒有接觸。

2. Ans (D)

需要支撐結構者為加工物在列印過程中會產生浮空、漂移、或翹曲等，而需要以支撐結構輔助。FDM 會發生浮空、SLA 會發生漂移、SLM 會發生翹曲，都需要加上支撐結構。

3. Ans (A)

犧牲層是指在正式工件加工前，在成型板上預先進行的加工，其也是支撐結構的一部分。在加工前，為確保有一基準的加工面，多需先行“打底”；另外，為避免將工件從成型平台分離取下的過程造成工件不當受力而損壞，也多會在工件下方加上可被移除的支撐，也是犧牲層的一種型態；而下照式光固化系統在加工時，為確保工件與成型板有足夠的結合力量，而避免與成型板分離，也會在剛開始加工時，鋪上一比較大面積的底，以增加結合力；同時光硬化系統有樹脂流動的需求，也會以形成空孔結構的方式製作犧牲層。犧牲層是做出來以提高加工的品質及成功率，其不是以回收再用為目的。

4. Ans (D)

如同第一題，需要支撐結構者為加工物在列印過程中會產生浮空、漂移、或翹曲等，而需要以支撐結構輔助。材料擠出成型會發生浮空、直接金屬粉末雷射燒結成型會發生翹曲、光聚合固化成型會發生漂移。黏著劑噴膠成型的方式，其粉本材料可形成避免浮空或漂移，剛噴膠完成時，還未固化完成，翹曲較不明顯，是可以不加上支撐結構而完成複雜形狀加工的方式。

5. **Ans (A)**

支撐結構的密度是指在支撐處所編織的密度，密度愈高，編織的愈密，而較高的值會讓您的支持結構更加堅固而且懸空的地方獲得更好的支撐，但是支撐結構也會比較難以被拆除。而物件的充填率是指物件的內部充填，與支撐結構為物件的外部是不同的參數。支撐是指在物件的下部撐著外懸部位的，所以不會在物件上表面長出支撐。

6. **Ans (A)**

如果欲建構的物件底部凹凸不平，所以無法將物件平貼在成型平板上，而需在底部加入填充物，而棧板是指物件下方的鏤空狀犧牲層，可為填充使用。而側裙是指在物件的外圍，加強結合的面積，以避免翹曲的，及圖騰間隔是指在物件內部充填之圖騰密度。



觀念延伸

模型的底部不平整，需要靠支撐結構使連結到底板，而只有 Raft 可以在模型下方建立支撐結構。



重點掃描

1.3 列印方位及切層路徑

當 3D 模型繪製完成並輸出 STL 檔案格式後，將 STL 檔案放入切層軟體進行模型切層與相關設定。配合各種 3D 列印製程的特性，正確的模型擺放方位可增加 3D 列印的成功率。適當的切層厚度可讓列印物的表面品質更精緻或加速完成列印。

在熔融擠出製程中，拆除支撐容易破壞列印物表面與浪費耗材，藉由列印物的擺放角度來減少支撐，以圖 1-25 的桌子為例，桌子倒立擺放，並貼附在列印平台上，則不用設定支撐。另外附著面積大，列印物不易移位造成失敗。

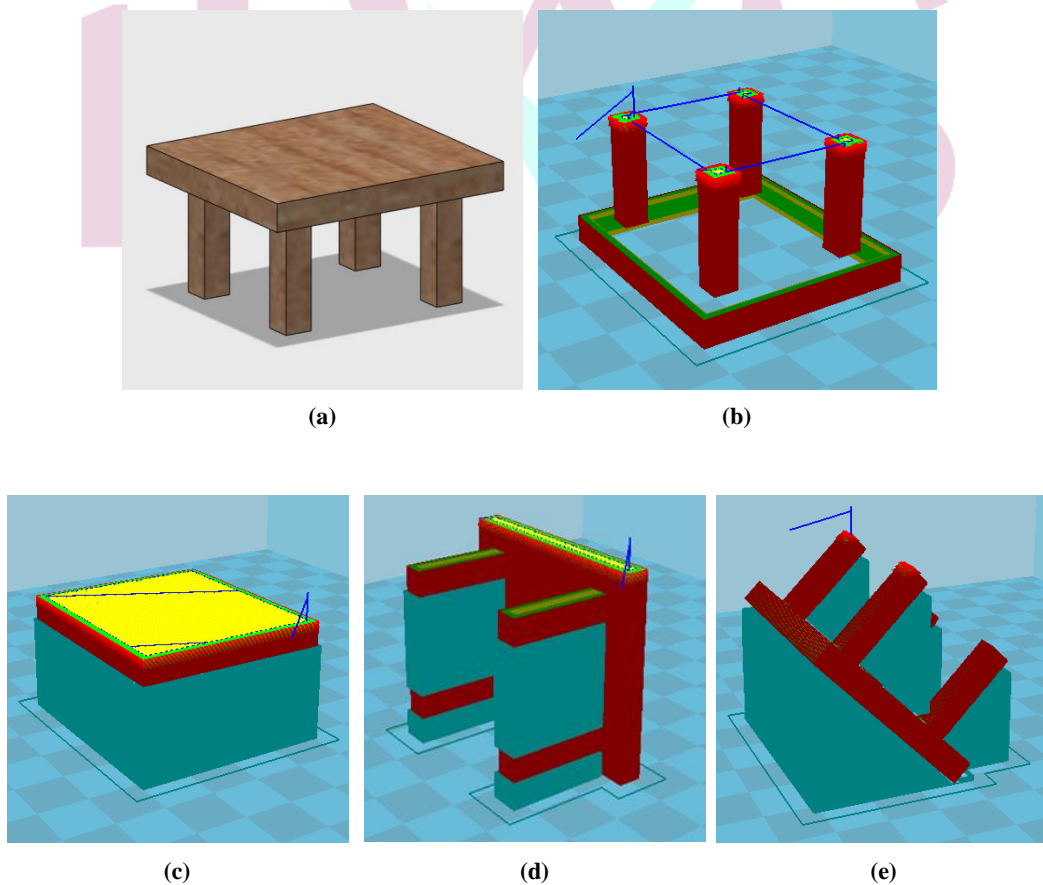


圖 1-25、藉由列印物的擺放方式來減少支撐，其中(b)的排列方位不需要支撐且附著列印平台的面積最大

由下照式光聚合固化的製程中，新切層在液態光敏樹脂槽裡固化成型，要拉抬列印物時，列印物容易受拉力產生變形或脫落，尤其切層面積與拉力成正比。如圖 1-26 的模型，可以傾斜放置以減少切層面積而改變列印物的排列方位。

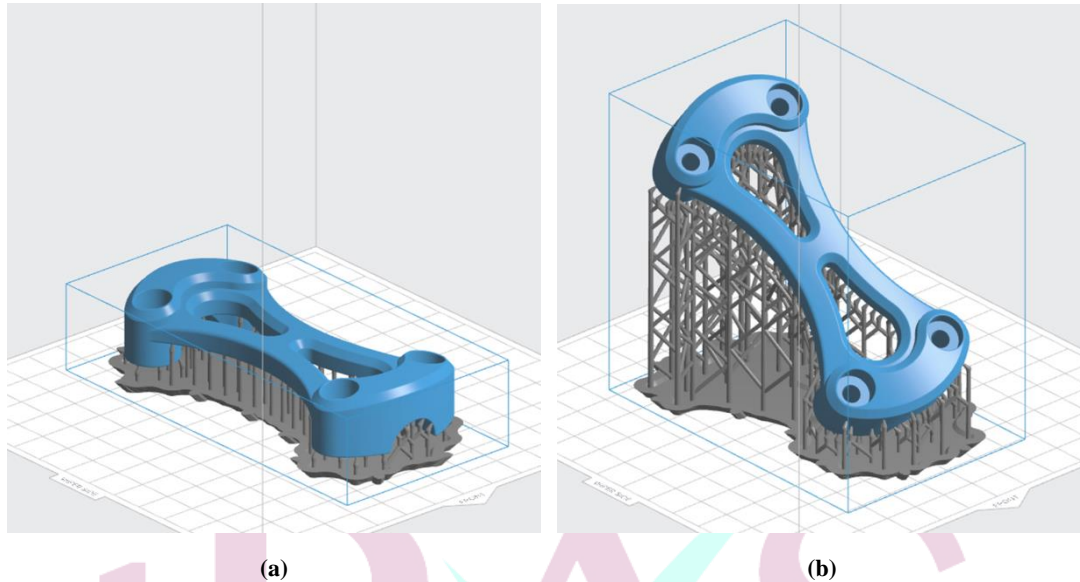


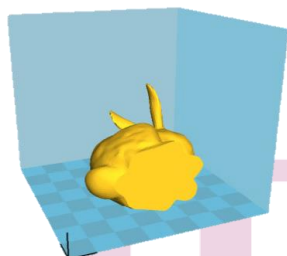
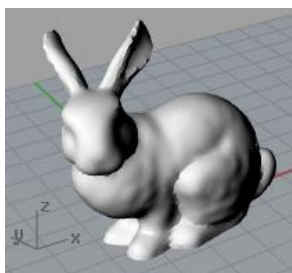
圖 1-26、SLA 製程之列印物排列方位(a)切層面積大，雖列印時短且使用材料克數少，但受光敏樹脂拉力大，容易失敗(b)切層面積小，受光敏樹脂拉力小，列印成功機率高

另外，列印時來回掃描方向也會造成列印物的結構強度變化，同掃描線的方向的強度較強，側向(線與線之間)的強度較弱。類同的，同一層的強度較強，層與層之間的強度較弱。

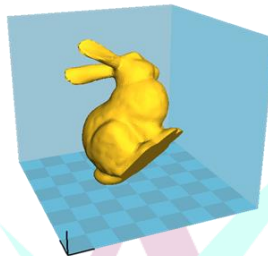


模擬考題

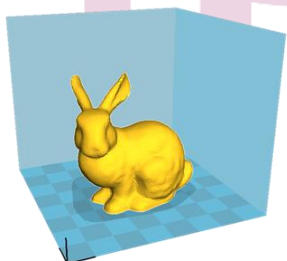
- 此圖用 CAD 繪製的兔子模型，在以熔融擠出的方式，以下何者是此模型載入切層軟體(Cura)的適當擺放位置？



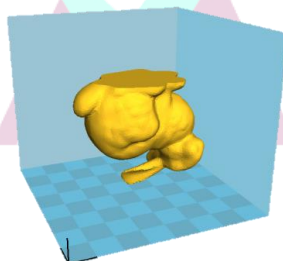
(A)



(B)



(C)



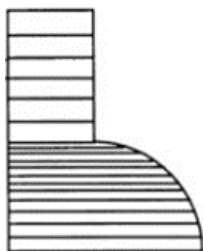
(D)

- 下列何者為材料擠製技術所輸出的切層加工用檔案？

(A) PNG ; (B) G-code ; (C) Dicom ; (D) Part

- 下圖為何種的切層方式？

(A)固定厚切層；(B)適應性切層；(C)局部切層；(D)跳躍式切層

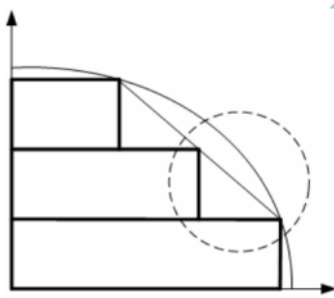


4. 所謂的成型誤差，下列說明何者有誤？

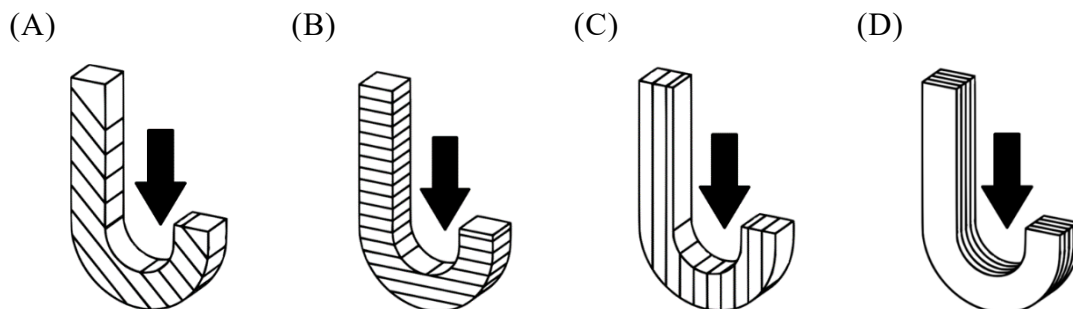
(A)每一層鋪塗的材料厚度需要一致，加工層越厚，則層間產生的誤差就越小，所以應該以最大可能單層加工厚度為切層厚度；(B)三維 CAD 模型進行 STL 格式化及切片分層處理產生的誤差屬於幾何資料處理造成的誤差；(C)材料收縮產生的變形與後固化時收縮產生的變形都是成型誤差的一種；(D)加工機台本身的機械誤差也是造成成型誤差的主因之一

5. 積層製造是一層層推疊上去，理論上完成工件的輪廓會形成下圖的形狀(粗線是加工件輪廓，曲線是 CAD 輪廓，細直線是三角網格)，工件的輪廓與細線所形成的三角形所代表的誤差，即是所謂的？

(A)蝴蝶效應；(B)輪廓效應；(C)堆疊效應；(D)階梯效應



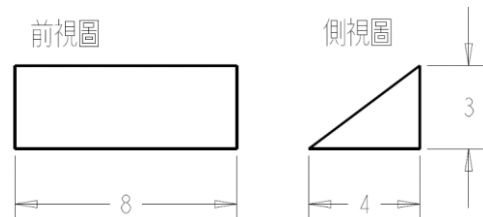
6. 下列為面照式光聚合固化成型(VP)以不同列印方式製作的掛勾，其斜線表示原切層紋路，在移除支撐材料後，以箭頭方向為施力，下列那一個切層方式製作的掛勾比較不容易斷裂？

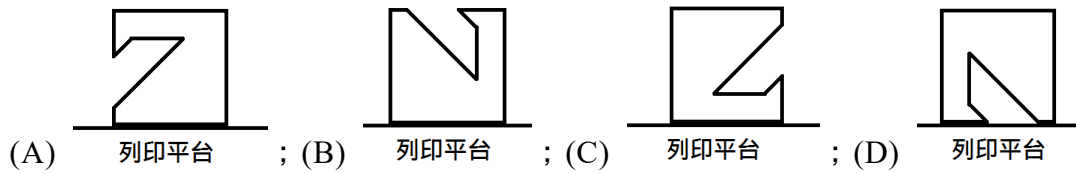


7. 關於積層製造(AM)使用的 3D 模型檔案格式說明，下列敘述何者有誤？

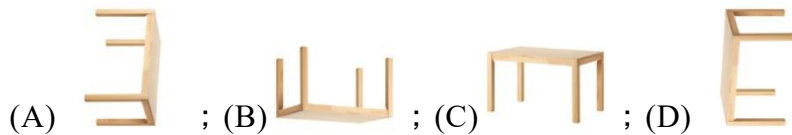
(A)大部分 3D 模型是以許多三角形來記錄模型的外觀；(B)3D 模型體積的大小直接與檔案所需的儲存容量有關；(C)三角網格數量越多檔案越大；(D)三角網格數量=2×(節點數量-2)

8. 描述實體模型的 STL 格式，下列何者正確？
 (A) STL 檔案僅描述三維物體的表面幾何形狀，不具有內部材質貼圖；(B) STL 的名稱最初來源是 Standard Triangle Language；(C) 是一種跨積層製造(AM)系統的列印輸出檔；(D) STL 資料格式可用於 CAD/CAM 系統之間的資料交換編修
9. STL 檔案格式中，每個三角形需要 3 個頂點向量與 1 個法向量總共 12 個浮點數來記錄此三角形，若是要記錄一個正方體模型最少需要多少個浮點數來記錄？
 (A) 288；(B) 144；(C) 72；(D) 36
10. 以光聚合固化成型技術(VP)系統製作模型，切層厚度和列印條件之關係，下列敘述何者有誤？
 (A) 切層厚度越薄，整體完成列印所需時間越長；(B) 切層厚度越薄，列印成品精度越高；(C) 切層厚度越薄，每層所需照光時間越長；(D) 切層厚度越薄，列印方向的表面愈平滑
11. 熔融擠製成型技術進行切層運算時所考慮的因素，不包含下列何者？
 (A) 切層厚度；(B) 支撐型態；(C) 填充密度；(D) 成型底板溫度
12. 下照式(Bottom-up)光聚合固化成型技術(VP)的列印擺放方式，下列敘述何者不可以提高成功率？
 (A) 切層面積盡量朝 Z+方向由大到小；(B) 每層切層面積越小越好；(C) 每層切層間的重疊率越大越好；(D) 切層厚度越厚愈好
13. 請問用下照式(Bottom-Up)光聚合固化成型技術(VP)列印右圖中的楔型模型，在相同層厚下，何種的擺放方式列印時間最短？
 (A) 以 8x4 面貼平於 XY 面列印；
 (B) 以 8x3 面貼平於 XY 面列印；(C) 以 8x5 面貼平於 XY 面列印；
 (D) 以 4x3 面貼平於 XY 面列印
14. 以熔融擠製成型加工右圖模型，得以完整列印出來，下列擺放方式哪個一定要加支撐？





15. 在熔融擠製成型技術中，可藉由列印物的擺放方式來減少支撐，下列何者擺放方式不需要支撐，且附著列印平台的面積最大？



16. 以下照式(Bottom-Up)面投影光聚合固化成型技術(VP)製作零件，設計支撐的考量，下列何者有誤？

- (A)增加支撐，需增加曝光時間；(B)支撐的設計要避開微小特徵；(C)容易翹曲的地方，需要建立支撐；(D)有懸臂的地方要建構支撐



考題解析

1. Ans (C)

本模型在以(C)選項放置時，是可以不建立支撐即可製作的，而其它放置方式都有 overhang 的問題，要建立支撐結構，會增加製作的複雜度。

2. Ans (B)

材料擠製技術為以擠製頭依所指定的路徑，將材料擠出，而達到堆疊成型的目的，其加工所需的資料為其路徑為主的資訊，而 PNG 為圖片的一種格式，G-code 為一般 NC 加工的最為廣泛使用的數控(numerical control)資料結構，Dicom 為對於醫學影像的處理、儲存、列印、傳輸上所共用的醫療數位影像傳輸協定，Part 為 3D 實體建模軟體(Pro-E)所使用的檔案格式。目前的 open source 切層軟體都是採用 G-code 為其加工路徑的定義，而以上之 4 種格式中，也只有 G-code 具有路徑向量、加工速度、開關控制…等之描述能力。

3. Ans (B)

圖中可見其對不同的 Z 軸方向餘弦改變有不同的切層厚度，在曲面較垂直的地方可以有比較高的層厚，而在曲面比較平坦的地方有比較薄的層厚，其切層的厚度不再是固定的一的數值，也不是在局部區域有另外處理的切層。此切層方式的目的是在具曲率或斜率的區域適當改變切層厚度，而在均勻的區域使用較大的切層厚度，在不影響表面精度下期望能減少切層的次數來增快成型速度及改善成品精度。

4. Ans (A)

成型誤差是指加工成型物件與原設計的差，加工層越厚，對輪廓的描述就愈粗糙，而使誤差加大，所以要減少成型誤差，一般而言是要降低層厚，以系統能達到穩定加工的最小層厚來加工，而得到可能的最小誤差，但其將會使加工時間大幅的增加；CAD 資料轉 STL 時，對圓弧、曲線、曲面的描述上，將會有弦高誤差產生，這是幾何資料本身的限制，屬於幾何資料處理造成的誤差；絕大部分的 3D 列印其加工材料在成型的過程中會有相變化，如熔融擠出及光聚

合固化，熔融擠出會在擠出後，由液態凝結而成固態，光聚合固化會由液態樹脂固化成固體，而由液態到固態多伴隨著體積的收縮，而這收縮在加工中容易使工件產生翹曲變形，而產生成型誤差；而機器本身在加工時的運動不正確，而使工件不正確的被加工，也當然是成型誤差的主因之一。

5. **Ans (D)**

本圖所顯示的是假設每層的加工為一完美的 2D 形狀加上一厚度(2.5D)，所以每層輪廓的邊緣為垂直向下，切層演算可以計算到 STL 檔案中的三角網格上，在完美的加工行為，可以形成如同一階一階的加工件輪廓。所以此一階一階的加工件輪廓與三角網格的差，被定義為階梯效應。

6. **Ans (D)**

3D 列印為一疊層加工的方式，在面照式光聚合固化成型下，每層的成型為一次性的固化行為，其材料在該層的受光表面有比較高的受光能量，而該層的另一側會因為能量穿透衰減而有比較低的受光能量，在層層疊加下，會產生材料應力的改變，在同一層中的橫向為一均勻的材料行為，而縱向則為不均勻的料行為。換言知，在其縱向是比較容易形成斷裂的所在。圖中的施力方向，可以預期，層層加工有最小縱向面的地方是最不能受力或最容易產生滑動而破壞之處，而圖 D 的縱向面最大，所以比較不容易斷裂。

7. **Ans (B)**

3D 模型體積的大小直接與檔案所需的儲存容量無關，因為儲存的資料為網格資料，網格縮放(尺寸放大或縮小)，都有相同的網格數，所以體積大小與儲存容量無關。

8. **Ans (A)**

STL 是以三角形的面包覆出一實體。以封閉的面而得到有體積的模型。

9. **Ans (B)**

一個正方體模型具有六個正方形，每個正方形包含二個三角型，共有 12 個三角形，每個三角形由 12 個浮點數來記錄，共 144 個浮點。

10. **Ans (C)**

切層厚度越薄，每層所需照光時間越短。

11. **Ans (D)**

切層運算是用來算出加工路徑，與底板溫度無關。

12. **Ans (D)**

切層厚度與成功率沒有關係。

13. **Ans (C)**

以 8×5 的面平貼於 XY 面的高度最低，因此列印時間最短。

14. **Ans (A)**

列印件中的倒勾特徵一定要支撐。

15. **Ans (B)**



擺放方式不需要支撐，且附著列印平台的面積最大。

16. **Ans (A)**

支撐數量與曝光時間無關。



觀念延伸

如果同樣的模型用在下照式的光聚合固化中，其成型方向為成型板在物件上方向上拔起，在實體上是相反的方向，但在模型放置時，還是以成型板在下方，同樣以(C)選項來放置。

第二章 3D 列印製程參數(ME 及 VP 技術)

在了解了支撐的必要性及如何設定支撐後，要使工件能夠順利的列印出來，尚需考量到加工的參數。不同的加工參數會對列印的品質有很大的影響，而不合適的列印方位、支撐設計、加工參數，會導致各式各樣的品質不良。加工完成的成品，其表面多有支撐的連結，需要以後處理的手段來去除支撐結構，另外光聚合固化的系統還另外要以後硬化的程序，使化學反應完全。而加工及後處理的環境，對工業安全的管理也是很重要的。



重點掃描

2.1 加工參數

不同的 3D 列印方式，會有不同的加工參數。本能力鑑定是以熔融擠出及光聚合固化為主，所以將這兩種的加工參數來進行討論。

1. 熔融擠出的加工參數

在熔融擠出的設備上，目前比較普遍被使用的切層相關軟體包括了：Cura、KISSlicer、Repetier、Slic3r…等等。這些軟體都可以在載入工件後，設定所需要的參數：

層高或層厚(Layer Height, Layer Thickness)，每一層列印出的材料高度或厚度，一般而言，愈細的層厚可以得到愈平順的輸出成果，但也會要使用更多的加工時間。層厚設定多需要小於擠出頭孔徑(Nozzle Diameter)，以使層層之間有好的連結。

外殼(Vertical Shells)，為多少圈，是以輪廓(Coutour)繞圈的方式產生每層斷面的外輪廓之殼。有時，對物件我們只需要其外表的造形，而可以不用對內部填充，而且其造形不會有支撐的問題，則可以使用螺旋花瓶(Spiral Vase)的方式，只加工外殼，而得到中空的工作，就如花瓶一般。

封頂及封底，為水平的殼(Horizontal Shells)，可對物件的上或下的頂(Top)或底(Bottom)以層數為單位進行封閉的加工。

在支撐結構設計上，主要需要考慮以下四點：列印物表面的傾斜角度(Overhang angle)、支撐與列印物表面的空隙距離、支撐之間的距離、支撐排列形狀。而列印物表面的斜角度會與如何放置物件使其被列印有關。一般會考慮兩大放置的原則：最大底部面積及最少傾角變化。最大底部面積可使列印物有比較好的強度，避免在加工過程中的變形與破壞；最少傾角變化可使用最少的支撐於列印物的外側，可使完成的成品有比較少的後處理程序及比較好的表面品質。

熔融擠出的切層路徑，為一控制擠製頭或平台運動的向量資料，同時還包括擠料的同步動作。而為了能使擠出過程中，當擠製頭移動到不需要列印的空間時，不會擠出任何塑料，線材需要抽回一小段距離，而再次開始列印時，又要立即將原先抽回的量擠回去。這些的運動控制，都是採用一般 CNC 加工使用的為 G-Code，依此語法之描述去控制加工設備進行加工之動作。

擠製頭流出的材料和擠製頭的瞬間速度並非是線性的。因此，當執行的路徑方向快變換時，應改以較少量的流量，因此能填滿該區的縫隙。

擠製頭的精確控制擠壓需要考慮的參數包括：

- 輸入壓力：在製造的過程中，其變量是有規律的，因為它與其他控制參數緊密結合。改變輸入的壓力(或對材料的施力)會導致相對應的輸出流速改變。
- 溫度：維持儲存腔內熔體的恆溫是理想的情況。雖小幅度的波動是無法避免的，而且這將會導致流動特性的變化。
- 噴嘴直徑：一般而言，這是不變的，但線徑和流量(DIAMETER AND FLOW)是可以調整來達到穩定的層加工。
- 材料特性：理想情況下，黏滯係數不會改變，但有些材料因為溫度太高會造成黏滯係數增加，進而影響材料的流動。

2. 光聚合固化的加工參數

在光聚合固化的設備上，目前比較普遍被使用的切層相關軟體是：CreationWorkshop。

在以完成支撐結構的 3D 模型前處理後，可以使用切層軟體進行切層，而 CreationWorkshop 同時提供了切層與機器設備控制的能力。

CreationWorkshop 可以對雷射點掃描及面曝光的下照式設備進行切層運算及設備控制，同時也能對熔融擠出設備進行操作。本節的重點在光聚合固化，其在面曝光下，需設定其工作範圍及使用面曝光的光罩解析度，如圖 2-1 所示。

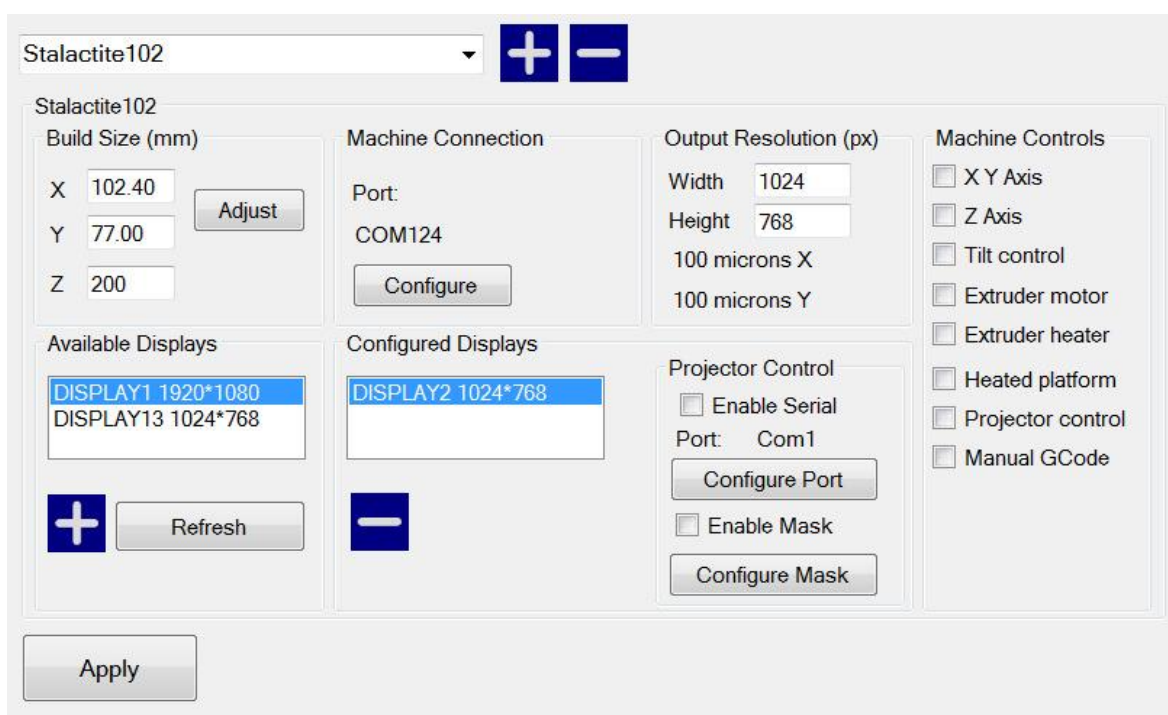


圖 2-1、CreationWorkshop 的基本設定畫面

光聚合固化的加工參數會因為所使用的樹脂材料不同、光機的改變、對品質與列印速度的不同要求，而有多種的變化可能，以面曝光而言，其主要的參數更精準一點應該是切層厚度；層厚也可能會是 layer thickness、成型曝光時間 (Exposure Time)、底層曝光時間 (Bottom Exposure)、底層數目、每層成型平台上升距離 (Z Lift Distance)、上升速度 (Z Lift Speed)、下降速度 (Z Retract Speed) 等等，如圖 2-2 所示。

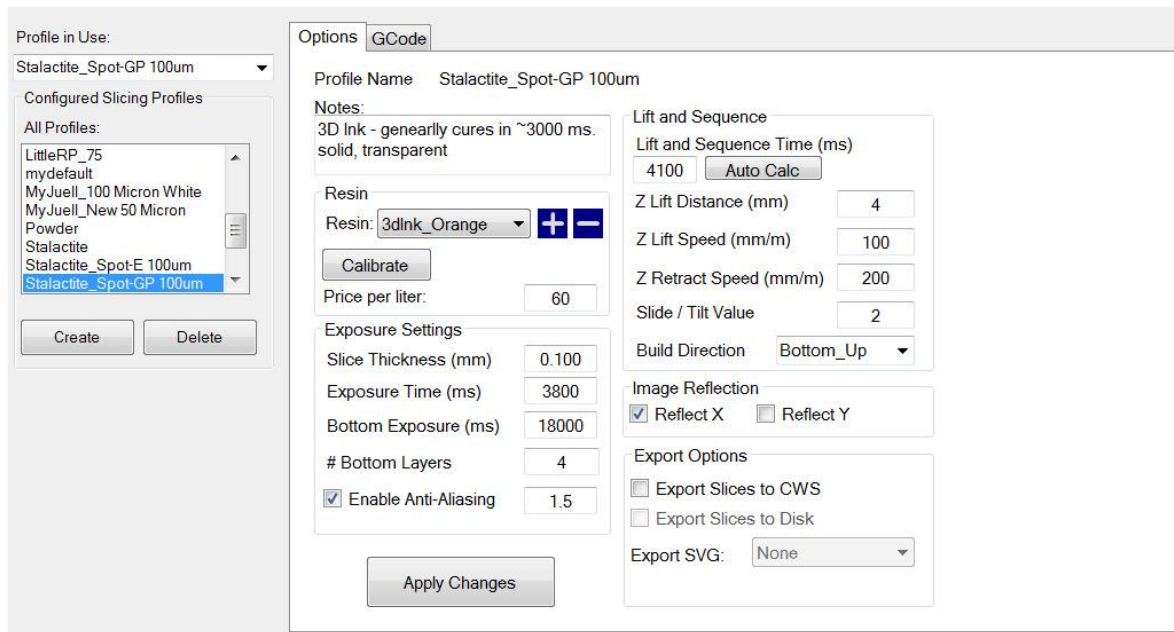


圖 2-2、以面照射的光聚合固化參數

- 層厚(Slice Thickness)：為切層的層厚，越薄的層厚可以得到越細緻的成品表面品質，但也會加長製造的時間。
- 成型曝光時間(Exposure Time)：每層光固化所需要的時間，這時間是要產生足夠的過深硬化，使能和前一層有夠的結合力量，使能克服成型物與樹脂槽底部分離的力量。大長的成型曝光時間，除了會增加加工的時間，同時多的過深硬化，也會影響成型物的細緻度，降低品質。
- 底層曝光時間(Bottom Exposure)：在最開始時，為了確保物件能與成型底板接合，所需的曝光時間沒有過深硬化太多會影響精度的問題，所以會加長時間，以得到好的強度。
- 底層數目：由於成型底板與樹脂槽體不可能完全平行，所以要有一定的底層數目為犧牲層，補平之間的差異。同時這犧牲層可以提供與板的結合力及強度，避免與工件分離。
- 每層成型平台上升距離(Z Lift Distance)：成型平台帶工件上升時，樹脂槽會受拉拔力而變形，太小的距離會因為變形而沒分離，太大的距離會增加成型的時間。
- 上升速度(Z Lift Speed)：成型平台帶工件上升時，如果速度過快，會使樹脂來不

及回填中間的間隙，而為空真，使拉拔力大幅上升，而容易導致斷裂，太慢會增加成型的時間。

- 下降速度(Z Retract Speed)：成型平台帶工件下降時，會要將下方的樹脂排開，太快的速度會形成推力，容易造成工件的破壞。上升與下降的速度，會與所使用的樹脂黏度(流動性)有絕對關係。

Creationworkshop 軟體也支援雷射振鏡掃描的系統，不過其參數“成型曝光時間(Exposure Time)”就要改成雷射功率及掃描速度了。





模擬考題

1. 以下何者不是材料擠出製程之切層的列印參數？
(A)層高或層厚(Layer Height, Layer Thickness)；(B)充填百分比(Fill Density)的比例；(C)水平的殼(Horizontal Shells)的圈數；(D)外殼(Vertical Shells)的圈數
2. 材料擠製成型技術中的熔融擠製，其加工參數說明何者為非？
(A)切層厚度與線材的束徑必需一致；(B)溫度會影響加工件的強度；(C)填滿內輪廓的圖案方法會影響加工物件的變形行為；(D)擠製頭的速度與擠出的絲寬相互影響
3. 材料擠製成型技術中的熔融擠製，加工的物件強度主要與何者最無關？
(A)切層厚度；(B)填充率；(C)裙邊寬度；(D)填料圖案
4. 在切層運算的過程中、大部分是以何種切層方法？
(A)固定尖端高度；(B)固定最大長度；(C)固定弦長；(D)固定層厚
5. 下列何者不是對於材料擠製列印機的回抽功能(Retraction)的敘述？
(A)當擠製頭在某處擠料完之後，移動到下一個擠料點之前，需要使用回抽；(B)擠料馬達會逆轉；(C)避免擠製頭裡的原料溢出；(D)回抽線材長度要數十公厘(mm)
6. 下列何者不是增加材料擠製之列印物機械強度的作法？
(A)增加表面層數或圈數(Shells)；(B)增加填充密度(Infill)；(C)降低列印速度；
(D)增加切層厚度(Layer thickness)

考題解析

1. Ans (C)

水平的殼(Horizontal Shells)為封頂的參數，而封頂不是以外圍繞圈，而應該以所需厚度為定義，而因為切層厚度的關係，是採用層數為單位。

2. Ans (A)

材料擠製成型技術中的熔融擠製，切層厚度與線材的束徑無直接關係，而與其擠出頭出口尺寸有關，一般而言，需要小於出口尺寸的 $1/2$ ；擠出溫度愈高，列印速度愈慢，會使材料有比較好的互熔，而能達到比較好的強度；工件內的填滿圖騰結構會影響其受力變形的方向，而其密度會影響其總體強度；在一定擠出速度下，擠製頭的速度愈快，則擠出的絲寬將會被拉長變細，反之變粗，換言之，擠製頭出口尺寸不一定等於擠出的絲寬。

3. Ans (C)

材料擠製成型技術中的熔融擠製，切層厚度愈薄，層層之熱熔合會愈好，強度也會愈好；物件的填充率愈高，成品愈密實，強度也會愈好；裙邊為避免工件之翹曲，與物件的強度無關；填料圖案對成品抵抗受力的方向有直接的影響。

4. Ans (D)

在目前開源及容易取得的切層軟體，多是設定一切層的厚度，而適應性切層則還停留在學術研究之中。其主因為不同的切層厚度對加工的參數影響很大，如果導入適應性切層，則需對不同層厚都設定出一組好的加工參數，如以熔融擠出為列，厚切層要使熱傳導到前一層，而且能夠互熔，勢必要提高出口溫度及降低列印速度，每層厚度都不同，則不斷的溫度速度切換，因此反而增加了系統加工的不穩定性。

5. Ans (D)

材料擠製列印時，材料具有一定的黏性，如果停止供料而移動擠製頭，將會造成牽絲的現象，同時也會將擠製頭內的材料拉出，而使到達定位再次擠出時，反而出料不足。所以為了能夠有效的斷料，而設計了回抽功能(Retraction)。擠

製頭在某處擠料完之後，移動到下一個擠料點之前，使用回抽，擠料馬達逆轉，由於瞬間的回抽，使材料抽斷回到擠製頭中，以避免擠製頭裡的原料被拉出，而回抽重要的是要能夠瞬間抽斷，而不需要長的回抽行程，反而過長的回抽行程，會使材料離開加熱區，影響下次的出料。

6. **Ans (D)**

為了要增加材料擠製之列印物機械強度，可以增加材料的固含量，如增加表面層數或圈數(Shells)或增加填充密度(Infill)，以可以使能夠有比較好的熔融強度，如降低列印速度或降低切層厚度(Layer thickness)。



觀念延伸

水平的殼(Horizontal Shells)與外殼(Vertical Shells)都是在熔融擠出過程中對物體形成包覆的主要參數，熔融擠出一般不會用來製作全實心的物件，其內部多以一定比例的充填結構來支撐，如此可以節省材料、降低內應力以避免翹曲及破裂、大幅的縮短製作的時間。



重點掃描

2.2 加工不良現象分析

加工不良現象是很普遍發生，尤其是相對低價的桌上型 3D 印表機，這些印表機的機械運動精度比較差，自動化的環境控制也不足，很多都使用開迴路控制而非閉迴路，對外界的變化沒有反應的能力。

除了系統本身的不良，事實上，很多的不良是對系統操作上並沒有很好的校準所造成。

另外，加工前的前處理不當(沒有建立合適的支撐結構)，加工的參數選擇不當(不合理的加工參數)，也都會造成加工的不良甚至直接無法被正確的製作出成品。

有時工件被製作出來了，但無法被後處理，而無法產生最終的成品。

加工不良現象非常的多元，很難完整的被列出，本節只能舉出一些範例，提供參考。本節的範例是參考“3D 列印問題排除指南！”

(<https://kknews.cc/digital/q2bylyr.html>)，及使用其不良現象的圖片。

• 範例 1：翹邊(Warping)

翹邊多是因為材料的內應力累積過大，超過工件與成型板之間的黏結力，改善方式可以由降低內應力 - 環境保溫以減少溫差、底板加熱避免過度收縮，或(及)加大黏結力 - 加上側裙，如圖 2-3 所示。

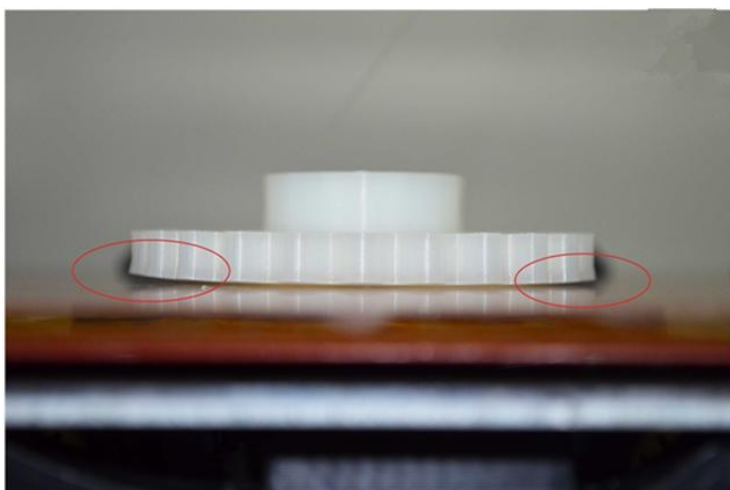


圖 2-3、翹邊範例(<https://kknews.cc/digital/q2bylyr.html>)

- 範例 2：物件歪斜(Prints are leaning)

這多是機器設備本身的問題而非軟體，如圖 2-4 所示。這常發生於運動平台不正常的運動，可能是機台在運動過程碰到異物、傳動系統鬆動、步進馬達扭力不足等等。碰到異物與鬆動，只能靠檢查及調整來改善，而步進馬達扭力不足可以加大驅動電流、降低運動加速度、或直接降低列印速度來尋求改善。



圖 2-4、物件歪斜範例(<https://kknews.cc/digital/q2bylyr.html>)

• 範例 3：波紋/陰影(Ringing)

由於熔融擠出的加工會有擠出頭與物件之間的運動，而為了縮短加工的時間，都希望能提高列印的速度。但高的列印速度到了轉彎處就要立即急停及換向加速，這就有運動件的慣性力發生。如果機台本身強度不足，這慣性力就會造成運動的不精準，而產生波紋，如圖 2-5 所示。由於大量的低價桌上型機台的被使用，這些機台的強度都不會太好，所用的傳動元件剛性也不足以對抗高的慣性力，只能降低加工的速度來尋求改善。



圖 2-5、波紋/陰影範例(<https://kknews.cc/digital/q2bylyr.html>)

- 範例 4：錯層(Shifted layers)

錯層的現象，如圖 2-6 所示。本原因類似於範例 2，多是機台碰到異物或傳動系統鬆動。碰到異物與鬆動，要靠檢查及調整來改善。

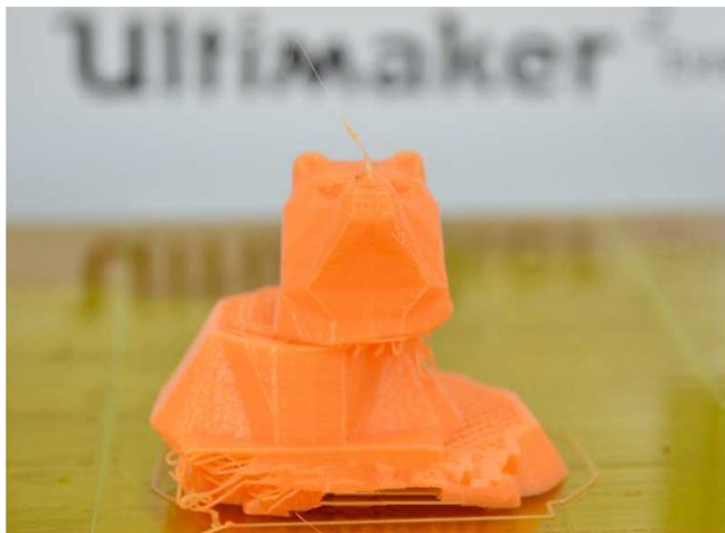


圖 2-6、錯層的範例(<https://kknews.cc/digital/q2bylyr.html>)

- 範例 5：破頂(Pillowing)

上表面沒有被填滿的現象，如圖 2-7 所示，這可能是在封頂時的厚度不足，也可能是因為材料本身或機台本身的跨橋能力不足，調整上可以考慮加大封頂的厚度，加密內部填充的比例使跨橋距離縮短、加大風量使能提高跨橋的距離等等。



圖 2-7、破頂範例(<https://kknews.cc/digital/q2bylyr.html>)

• 範例 6：牽絲(Stringing)

列印過程中，對不同區塊的加工會有跳躍的行為，而熱塑性高分子材料會因為其長鏈的結構而在跳躍的過程中產生牽絲的現象，如圖 2-8 所示。不同的材料、溫度都會有不同的牽絲行為，如使用尼龍材料，這牽絲行為幾乎無法避免。一般而言，增加回抽(Retraction)、降低溫度、提高擠製頭移動的速度，可使材料比較容易斷開，而改善牽絲的現象。



圖 2-8、牽絲範例(<https://kknews.cc/digital/q2bylyr.html>)



模擬考題

1. 以下何者參數同時影響了加工不良中的牽絲、破頂不是材料擠出製程之切層的列印參數？
(A)封頂層數；(B)回抽；(C)擠製溫度；(D)充填率
2. 目前一般 3D 列印系統大多為固定層厚建構方式，實際資料外輪廓與加工成品間之誤差，多可以使用何方式來改善？
(A)使用更細的噴嘴；(B)使用更薄的切層；(C)較慢的加工速度；(D)以上皆是
3. 多擠製頭熔融擠製成型多材料工件時，下列何者不是造成不良的原因？
(A)因材料不同，容易發生層與層剝離的現象；(B)材料因長時間加熱，容易發生碳化現象；(C)材料因長時間加熱，容易發生垂流現象；(D)因底板加熱時間過長，而導致物件膨脹
4. 在遠端送料(Bowden Type)的熔融擠出列印軟料時，較常發生失敗的狀況，其原因何者有誤？
(A)送料端與擠出頭路徑較長，造成材料擠壓變形，與送料管磨擦，阻力加大；
(B)線材存放受壓容易變形，使外徑改變，導致卡在進料端入口；(C)支撐之懸空角(angle threshold)設定太小，物件變形而坍塌；(D)軟料熔點較低，常在喉管端提早軟化，造成出料不順

考題解析

1. Ans (C)

答案中與牽絲有關的包括回抽及擠製溫度，與破頂有關的包括封頂層數、擠製溫度、充填率，所以共同有關的是擠製溫度。

2. Ans (D)

實際資料外輪廓與加工成品間之誤差，可以用提高解析度的方式，如使用更細的噴嘴或可使用更薄的切層使能夠描述更細微的特徵；也可以使用較慢的加工速度，以降低系統的慣性影響，提高運動精度。

3. Ans (D)

多擠製頭熔融擠製成型多材料工件時，因材料不同，有不同的熔點、收縮率、分子間的相容性等等，容易發生層與層剝離的現象；多擠製頭並非同時一起加工，會使非正在加工中的材料因長時間加熱等待，在高熱的材料長時間與空氣接觸下的材料揮發及與空氣中氧氣反應，容易發生碳化現象；材料因長時間加熱，已經熔融而有好的流動性，容易發生垂流現象。而底板加熱是為了使工件軟化而防止翹曲及有比較好的黏性可以固定在成型皮上，不會因為長時間的保溫，而導致物件膨脹。

4. Ans (D)

遠端送料(Bowden Type)的熔融擠出列印軟料時，送料端與擠出頭路徑較長，而軟料強度又不足，而容易造成材料擠壓變形，與送料管產生大的正壓力而提高磨擦阻力；線材在存放是成纏繞在一起，中間的線會受上下左右的線包著受壓，長時間下容易變形，使外徑及形狀改變，而導致卡在進料端入口；軟料熔點較低，常在喉管端提早軟化，造成出料不順；因為材料受力會有較大的變形，如果支撐之懸空角(angle threshold)設定太小(使用如同較硬材料的支撐設定)，物件會因為變形而坍塌；而軟料熔點與硬料沒有絕對關係，一般軟料是指較低的玻璃轉換溫度，而不是熔點。



觀念延伸 1

加工不良的成因很多，一般可分為系統本身的不良、系統校準不好、加工前的前處理不當，加工的參數選擇不當等多樣。設備本身設計或組裝不良，一般使用者是無法處理，但校準部分及一些簡單的機構調整，是可以提升機器性能與加工品質的。另外，合理的前處理，使能有好的加工路徑檔，加工過程有對加工材料設定適當的溫度、速度及對環境進行一定的控制等等，都可以改善加工不良的現象。

iPAXS



重點掃描

2.3 產品後處理與環境安全法規

1. 熔融擠出的成品後處理

熔融擠出的成品後處理包括了加工完成後，對模型的初步清理、去除工件外的支撐結構與表面研磨修補。同時對環境與安全上也要能滿足一定的工業安全條件。

加工完成後，成品是附著在成型板上，有的成型板是具有撓性，可以將成型板與工件一起取下，透過成型板的彎曲，將相對剛性的工件與成型板分離。有的成型板是不方便取下，可能刀片或刮板將工件鏟下來。取下的工件同時下方多有支撐結構附著，理想中可以直接用手剝除，但有時會黏結的比較緊，或支撐結構上方的工件是強度比較差的造形，這就要以小鉗子小心的剪斷。

表面研磨修補上，可用粗、細砂紙進行打磨，也可以上補土修補，另外如果材料是 ABS，也可以使用丙酮溶劑對其表面產生溶解再重新固化，而得到光滑的表面。

在進行這些後處理程序時，要小心高溫的擠製頭、打磨時的粉塵、溶劑使用時的揮發有毒氣體。一般會建議：使用熔融擠出的設備，要在通風的環境，操作者要配帶活性碳口罩，而在後處理時，如果使用到丙酮或任何有機溶劑，離開機器、防止火焰、密閉操作、環境通風、配帶活性碳口罩等，是很重要的。

2. 光聚合固化的成品後處理

光聚合固化的成品後處理包括了加工完成後，對模型的初步清理、去除工件外的支撐結構與表面研磨修補。同時對環境與安全上也要能滿足一定的工業安全條件。

模型清理如以下 6 個步驟：

| | |
|---|---|
|  | <p>Step1： 當列印完成後，取下成型板，可讓成型板上與中空模型內部之樹脂流回樹脂槽。</p> |
|  | <p>Step2： 以酒精噴灑模型表面，將多餘的樹脂清洗掉。</p> |
|  | <p>Step3： 小心的以美工刀沿模型底面鏟下。</p> |
|  | <p>Step4： 使用玻璃瓶容器裝酒精，將模型放入後蓋上瓶蓋後，將玻璃瓶置入超音波清洗機。</p> |


| | |
|--|---|
|  <p>超音波清洗機示意圖</p> | <p>Step5 :</p> <p>建議清洗方式：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 第一次：可使用回收且無雜質的酒精清洗，清洗時間 2 分鐘。 ● 第二次：使用乾淨全新的酒精清洗，清洗時間 1 分鐘。 |
|  | <p>Step6 :</p> <p>取出並吹乾模型。</p> |


去除支撐與研磨表面如以下 5 個步驟：

| | |
|---|--|
|  | <p>Step1 :</p> <p>開始拆除支撐，示支撐的設計與樹脂的特性，有些支撐很容易剝除。</p> |
|  | <p>Step2 :</p> <p>也可使用斜口鉗等工具拆除支撐。</p> |

| | |
|--|---|
|  | <p>Step3 :</p> <p>剛拆除支撐的模型其表面凹凸不平。</p> |
|  <p>修容工具示意圖</p> | <p>Step4 :</p> <p>可使用砂紙、銼刀、雕刻筆等工具修容模型表面。</p> |
|  | <p>Step5 :</p> <p>修容完成，修容動作可依個人習慣不同，亦可在後固化(二次固化)後再作修容，後固化後模型表面會較後固化前硬。</p> |

安全措施可分為皮膚、眼睛、氣味、及環境：

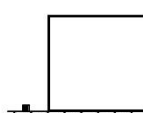


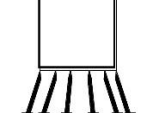
| 部位 | 說明 | 示意圖 |
|----|--|---|
| 皮膚 | 使用樹脂時，請戴上耐化學防護手套，因有些人皮膚碰到樹脂會引起過敏反應，若皮膚碰到樹脂，請立刻用肥皂與清水沖洗，若引起過敏反應請立即至皮膚科就醫。 |  |
| 眼睛 | 因投影機為一般光源，但仍然不可以直視。一般觀看，對眼睛傷害小，但為防樹脂不慎潑及眼睛，因此建議戴上護目鏡。 |  |

| 部位 | 說明 | 示意圖 |
|----|--|--|
| 氣味 | 因樹脂會有些許氣味，加上清洗時使用酒精，酒精揮發速度快，可戴上活性碳口罩來減少氣味引起的不適感。 |  |
| 環境 | <ul style="list-style-type: none"> • 樹脂需保持於 18~28℃，且因投影機使用高功率燈泡，投影機需散熱，或雷射運作過程需要溫度控制，因此不適合放置於環境溫度過高及不通風的地方進行列印。 • 不同樹脂皆會有氣味，在列印時請將印表機放置於通風處。 | |

iPAXS



模擬考題

1. 以下何安全相關的敘述是正確的？
(A) PLA 為環保材料，使用上很安全，可以在緊關門窗的冷氣房中使用；(B) ABS 加工中需要保溫，所以工作室的門窗要關好及不能開冷氣；(C) 光聚合固化的設備都有罩子包起來，所以可以在緊關門窗的冷氣房中使用；(D) DLP 投影機式的光聚合固化的設備操作，其所佩帶的護目鏡可以不用抗紫外光
2. 下列那種溶劑用於 ABS 列印物的表面光滑處理？
(A) 甲酸；(B) 乙醚；(C) 丙酮；(D) 丁醇
3. 使用熔融擠製成型的機台，若增加模型內部的填充密度(Infill)，對模型的影響下列何者有誤？
(A) 模型強度變強；(B) 模型較易翹曲；(C) 成型時間較久；(D) 比較節省材料
4. 光聚合固化成型技術(VP)的列印曝光時間(Exposure Time)參數設定，下列敘述何者有誤？
(A) 要增加平台附著力，須增加底層曝光時間；(B) 為了避免過深硬化，須增加曝光時間；(C) 為減少毛邊(Flash)，須降低曝光時間；(D) 避免細微特徵消失，須降低曝光時間
5. 列印模型設定參數時，若需要精細度高的模型，以下調整何者正確？
(A) 減少層厚；(B) 增加支撐；(C) 減少模型網格式；(D) 提高列印速度
6. 熔融擠製成型技術可設定切層軟體加工參數，下列哪一項調整無法增加模型強度？
(A) 提高切層厚度；(B) 降低列印速度；(C) 提高填充率；(D) 增加壁厚
7. 此為圓柱體列印物，請問其棧板(Raft)的圖，下列何者為正確？
(A)  ; (B)  ; (C)  ; (D) 
8. 在熔融擠製成型技術中，為了減少 3D 列印件有牽絲缺陷，下列調整的方式較不合適？

- (A)提高熱床溫度；(B)降低擠製頭溫度；(C)增加回抽速度；(D)增加回抽長度
9. 使用光聚合固化成型技術(VP)下照式(Bottom-Up) DLP 機台，加工件於製作過程中脫落，可能原因之敘述，下列何者有誤？
- (A)支撐結構力量不足；(B)照射光能量密度太高；(C)成型平台升降速度太快；
(D)首層能量密度不足
10. 使用雷射光聚合固化成型技術(VP)中的下照式(Bottom-Up)時，若固定在某一特定區域無法成型，而在其它區域可以成型，其可能主因敘述，下列何者正確？
- (A)雷射光能衰退；(B)照光時間錯誤；(C)使用錯誤的樹脂；(D)樹脂槽部分霧化
11. 光聚合固化成型技術(VP)的後處理(Post Processes)，下列敘述何者有誤？
- (A)先後固化再清洗剩餘的樹脂；(B)光的波長和功率會影響後固化時間的長短；(C)清洗不適合長時間浸泡；(D)未後固化處理的物件可能會隨時間而變形
12. 熔融擠製成型技術常使用 PVA 為支撐材料，PVA 的移除處理需使用甚麼溶劑？
- (A)氯仿；(B)丙酮；(C)酒精；(D)水

考題解析

1. **Ans (D)**

答案中 DLP 投影機式的光聚合固化的設備使用，其光源為藍光或白光，護目鏡是否抗紫外光對保護來說完全沒有影響，所以可以不用使用抗紫外光的護目鏡。

2. **Ans (C)**

ABS 是可以被丙酮溶解，所以列印物的表面光滑處理可以使用丙酮蒸氣，使能在工件的表面均勻的溶解 ABS，再等表面的丙酮揮發，而得到光滑的表面。

3. **Ans (D)**

填充密度也就是實體部位佔全部的多少，填充密度越高，物件強度會越高，但也會耗費更多時間與材料。

4. **Ans (B)**

增加曝光時間，會導致過深硬化。

5. **Ans (A)**

減少層厚，可提高成品精細度。

6. **Ans (A)**

切層厚度與模型強度無直接關係。

7. **Ans (B)**

棧板則是在物件和平台之間添加了厚網格。當模型的底面不完全平坦或與構建板幾乎沒有粘附力時，使用棧板可確保物件更好地黏在構建板上。

8. **Ans (A)**

熱床溫度與牽絲無關。

9. **Ans (B)**

照射光能量密度太高。照射光能量密度越高，固化越好，有較佳的強度，不易脫落。

10. **Ans (D)**

樹脂槽霧化，霧化區透光較差，會導致工件無法成型。

11. **Ans (A)**

先清洗剩餘的樹脂再進行後固化處理。

12. **Ans (D)**

PVA 材質是水溶性物質，溫水可以快速溶解 PVA 材質。



觀念延伸

高分子材料加熱中，都會有氣體逸出，同時也會有 PM2.5 的問題，所以使用上都要在通風的環境中，光固化的材料也會有揮發性氣體產生，這是罩子無法包起來的，所以也要在通風的環境中使用，另外也都建議使用者配帶活性碳口罩。

第三章 3D 列印材料概論(ME 及 VP 技術)

3D 列印材料包括很多，有現在已經被使用，也有正在研發中的。3D 列印的製造方法多元，ASTM 定義了七大類，而這當中的每一類，都有不同的特色，因為其加工原理的不同，其所對應的材料就產生不同的變化。

單純從材料本身來看，一般我們會將其分成金屬材料、陶瓷材料、高分子材料、及複合材料。材料科學所涉及的理論包括固體物理學，材料化學，應用物理和化學，以及化學工程，機械工程，土木工程和電機工程。再從應用的角度，與電子工程結合，則衍生出電子材料，與機械結合則衍生出結構材料，與生物學結合則衍生出生物材料等等。

3D 列印材料可以從不同製程方式所需的材料為起點來討論，也可以從不同的應用需求來討論，不過本 3D 列印工程師初級能力鑑定中，主要針對熱塑性塑膠線材、光固化樹脂等兩部分進行討論。



重點掃描

3.1 材料類型

本初級的能力鑑定所對應的材料都是屬於高分子材料，高分子材料是指具高分子量的物質，大多是有機化合物及人工合成的材料，最常見的便是塑膠、橡膠等。很多天然材料通常是高分子材料組成的，如天然橡膠、棉花、人體器官等。人工合成的有化學纖維、塑料、橡膠、微電子封裝材、製造積體電路時的感光材料、藥物傳輸材料等，其原料主要來自於石化工業。生活中已大量採用工業化生產的通用為高分子材料。具有特殊用途與功能的稱為功能高分子。高分子材料在我們日常生活中食、衣、住、行各方面皆扮演著相當重要的角色。

而其中的熔融擠出是以熱塑性塑料為主，而光聚合固化是以光固化樹脂為主。

1. 熱塑性塑料

熱塑性塑料(英語：thermoplastic，又譯導熱塑膠)指具有加熱軟化、冷卻硬化特性的塑料。我們日常生活中使用的大部分塑料屬於這個範疇。

熱塑性聚合物是一種聚合物，指具有加熱後軟化、冷卻時固化、可再度軟化等特性的塑料。熱塑性聚合物受熱軟化變成液態時具可塑性，冷卻時則回到固態，現象可交替反覆進行(有的物質只能受熱可塑化一次，冷卻固化後再受熱則不具可塑性)，所以可回收再利用；不同於熱固性聚合物，後者在高溫時不易軟化也不容易發生形變(因此熱固性聚合物雖能耐高温，卻有無法回收的缺點)。

熱塑性塑料中樹脂分子鏈都是線型或帶支鏈的結構，分子鏈之間無化學鍵產生，加熱時軟化流動，冷卻變硬的過程是物理變化。

下表 3-1 為一些常用熱塑性塑料的比較表。

表 3-1、常用熱塑性塑料

| 塑膠名稱 | 優點 | 缺點 | 用途 |
|-------------------|---------------------------|------------------|------------------------|
| 聚乙烯 (PE) | 易加工、可撓曲、耐衝擊、化學鈍性佳 | 軟、易有割痕、限低溫使用 | 包裝膜、容器、管子、電絕緣材料、玩具等 |
| 聚丙烯 (PP) | 具有剛性、抗磨蝕性好、不產生應力龜裂、電氣阻抗性佳 | 染色困難、不能採用熱封、易受氧化 | 類似 PE 用途、保險桿、纖維、汽車儀表板等 |
| 聚酸醛 (POM) | 磨擦係數低、耐衝擊、潛變性好、耐疲勞 | 不宜戶外用途、須尺寸穩定要共聚合 | 齒輪、機械元件、打火機零件等 |
| 耐龍 (PA, Nylon) | 磨擦係數低、化學鈍性、耐衝擊 | 吸水、帶靜電 | 可織纖維、襯套、軸承等 |
| 聚氯乙烯 (PVC) | 透明性佳、耐候性優、可塑化成具 | 褪色、熱安定性差、受限於環保問題 | 唱片、地板、雨衣、軟管、皮包、鞋子等 |
| 聚苯乙烯 (PS) | 亮麗的外觀、硬且透明性優(非晶質) | 脆、褪色、易受侵蝕 | 原子筆、透明的廚房用具等 |
| 聚碳酸酯 (PC) | 耐高熱、耐衝擊、透明度佳 | 吸水、上色困難 | 透鏡、葉輪、安全帽、窗的玻璃等 |
| ABS | 可保持光滑、收縮率小、可做成平板 | 戶外使用會褪色、不易上色 | 電視機、收音機、時鐘、吸塵器、燈罩、樂器等 |

在 3D 列印中的熱塑性塑膠，主要包括了 PBF、ME 兩大製程方式，PBF 使用的是粉末狀的熱塑性塑膠，以尼龍為主(PA)，而 ME 使用的是熱塑性塑膠線材，以 PLA 及 ABS 為主，但尼龍材料也是有用在 ME 製程上，另外，最近 TPU 或 TPE 也是 PBF 及 ME 兩大製程方式的新興材料。

(1) 尼龍(Polyamide, PA)：

尼龍(英語：Nylon)，又譯耐綸，是一種人造聚合物、纖維、塑料，從化學的角度來看尼龍是一種縮合聚合物，其組成單位由醯胺連接，因此它也是聚醯胺的一種。尼龍是世界上第一種完全人造的纖維，其原材料是碳、氫和氧。從這些原材料中一般合成兩種基本化學物質，在大多數情況下己二胺和己二酸。它們被混合在一起聚合形成尼龍。Nylon(尼龍)與其他熱可塑性塑膠相比，在強度、延展性、耐磨性及耐熱性上提供了卓越的平衡，並有很好的流動性及寬廣的加工成型範圍，使其成為最普遍被使用的工程塑膠之一。目前市場上有多種商品化 Nylon 材料可供選擇，如：Nylon 6/6、Nylon 6、Nylon 6/10、Nylon 6/12、Nylon11、Nylon 12、非結晶性 Nylon 及耐衝擊改質 Nylon 6/6...等。

尼龍 66 的結構如圖 3-1 所示：

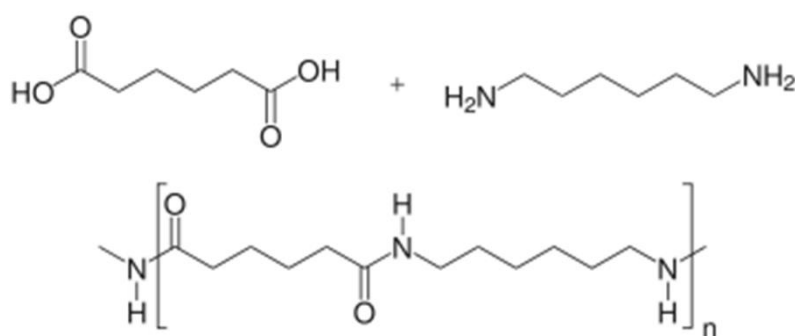


圖 3-1、尼龍 66 的分子結構

另一種常見的尼龍是尼龍 6，也稱為聚己內醯胺。精確地說它並不是一種縮合聚合物，因為它的聚合物中含有所有單體己內醯胺的原子。尼龍 6 的結構如圖 3-2 所示(圖左乃單體己內醯胺，而圖右乃聚己內醯胺)：

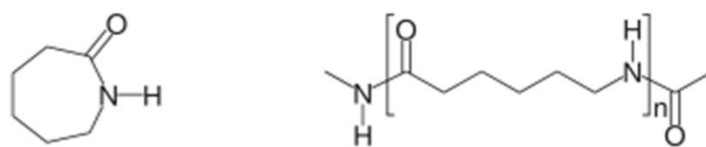


圖 3-2、尼龍 6 的分子結構

Nylon 11 為非常容易改質的塑料，可與各種纖維及添加劑等進行混練改質，來改善其耐熱及機械特性。添加內部潤滑劑的 Nylon 11，則可進一步提昇其耐磨能力。

最常見的尼龍種類之一為尼龍 66，其命名源自己二胺和己二酸所含的六個碳原子。在聚合物的鏈中己二胺和己二酸互相交替，因此與其它聚合物(如蛋白質)不同的是，在尼龍中其醯胺的方向也不斷交替。Nylon 12 的吸濕性低於 Nylon 6/6、Nylon 6、Nylon 6/10，使其不同的環境濕度下可維持良好的尺寸安定性，並在低溫環境有卓越的韌性及耐衝擊性。相較於 Nylon 6/6 及 Nylon 6 其耐熱能力較差。Nylon 12 為非常容易改質的塑料，可與各種纖維及添加劑等進行混練改質，來改善其耐熱及機械特性。添加內部潤滑劑的 Nylon 12，則可進一步提昇其耐磨能力。

在 3D 列印中，PA11 及 PA12 是常被 PBF 製程方式所使用的材料，其可以為粉末的顆粒，如 EOS 使用的 P2200 粉末，其主要為 PA12，使用的粒徑約 56um，使能滿足 0.1mm 的鋪層需求。

在 ME 製程方式，尼龍也是常使用的。尼龍線材具有高韌性、高延展性、耐磨及高強度的特性，受到不少創客與玩家喜愛。尼龍親水性的特性既是其優點也是其缺點，優點尼龍的吸水性強化了尼龍的化學鏈結，使尼龍擁有高延展與韌性因此適合用在多用途的產品上；但受潮的尼龍原料，在射出加工成型上，會因水份受到高溫蒸發逼出的氣泡，容易使物件表面產生不平的狀況，而此問題也會反映在 3D 列印的製程上，因此保持尼龍線材的乾燥便成為列印尼龍物件相當重要的課題。

(2) 苯乙烯 - 丙烯腈 - 丁二烯共聚物(ABS)：

ABS 樹脂是丙烯腈(Acrylonitrile)、1,3-丁二烯(Butadiene)、苯乙烯(Styrene)三

種單體的接枝共聚物。它的分子式可以寫為 $(C_8H_8 \cdot C_4H_6 \cdot C_3H_3N)_x$ ，但實際上往往是含丁二烯的接枝共聚物與丙烯腈 - 苯乙烯共聚物的混合物，其中，丙烯腈占 15%~35%，丁二烯占 5%~30%，苯乙烯占 40%~60%，最常見的比例是 A:B:S=20:30:50，此時 ABS 樹脂 Tg 點為 105℃。

隨著三種成分比例的調整，樹脂的物理性能會有一定的變化：

- **1,3 - 丁二烯**為 ABS 樹脂提供低溫延展性和抗衝擊性，但是過多的丁二烯會降低樹脂的硬度、光澤及流動性；
- **丙烯腈**為 ABS 樹脂提供硬度、耐熱性、耐酸鹼鹽等化學腐蝕的性質；
- **苯乙烯**為 ABS 樹脂提供硬度、加工的流動性及產品表面的光潔度。ABS 樹脂是乳白色固體，有一定的韌性，密度約為 $1.04 \sim 1.06 \text{g/cm}^3$ 。它抗酸、鹼、鹽的腐蝕能力比較強，也可在一定程度上耐受有機溶劑溶解。

ABS 樹脂可以在 -25℃ ~60℃ 的環境下表現正常，而且有很好的成型性，加工出的產品表面光潔，易於染色和電鍍。因此它可以被用於家電外殼、玩具等日常用品。常見的樂高積木就是 ABS 製品。

ABS 樹脂可與多種樹脂配混成共混物，如 PC/ABS、ABS/PVC、PA/ABS、PBT/ABS 等，產生新性能和新的應用領域，如：將 ABS 樹脂和 PMMA 混合，可製造出透明 ABS 樹脂。

在 3D 列印中，ABS 是常被 ME 製程方式所使用的材料，其為線材料方式為原料的提供。常用的尺寸為線徑 1.75 及 3mm。

不同的 ABS 配方有不同的特性，以 Stratasys 公司所提供的資料整理如表 3-2 所示。

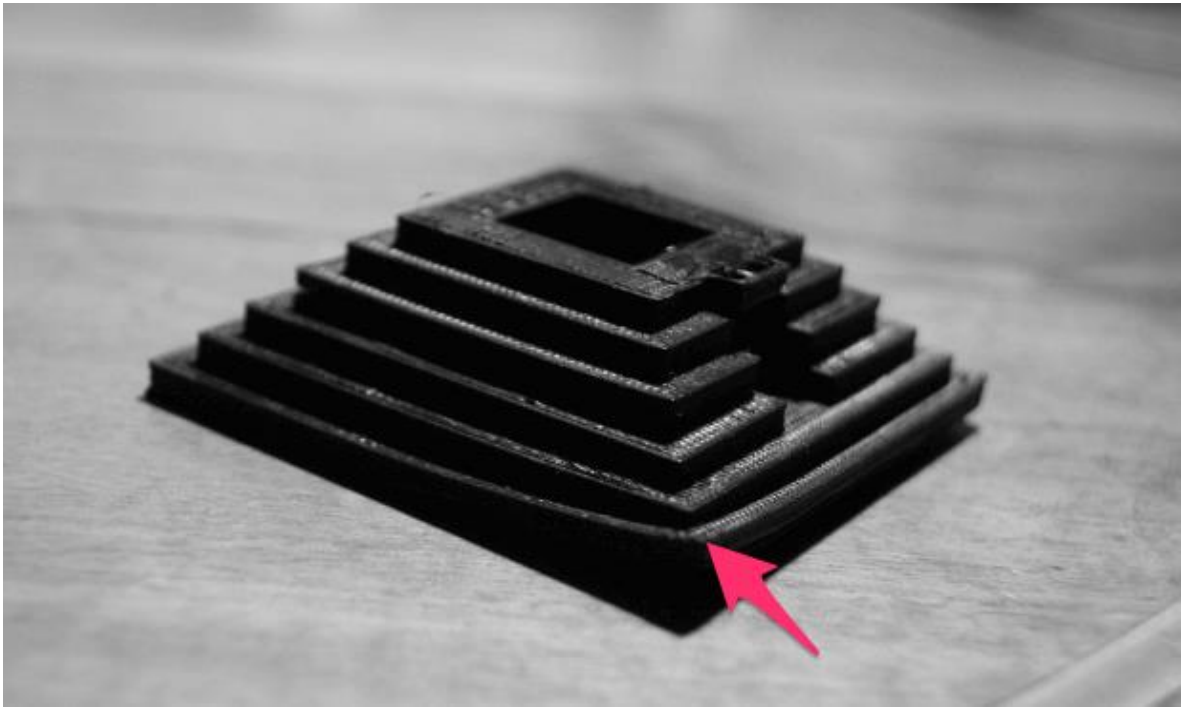
表 3-2、FDM 材料各種 ABS 材料的性質變化：

| 特性 | ABS | ABSi | ABSplus | ABS/PC |
|------------|-------------------------|------------------------|---------------------|----------------------|
| 抗拉強度 | 22 MPa | 37 MPa | 36 MPa | 34.8 MPa |
| 拉伸模量 | 1627 MPa | 1915 MPa | 2265 MPa | 1827 MPa |
| 延伸率 | 6% | 3.1% | 4% | 4.3% |
| 抗彎強度 | 41 MPa | 61 MPa | 52 MPa | 50 MPa |
| 彎曲模量 | 1834 MPa | 1820 MPa | 2198 MPa | 1863 MPa |
| 沖擊試驗 | 106.78 J/m ² | 101.4 J/m ² | 96 J/m ² | 123 J/m ² |
| 熱變形 @66 磅 | 90°C | 87°C | 96°C | 110°C |
| 熱變形 @264 磅 | 76°C | 73°C | 82°C | 96°C |
| 熱膨脹 | 5.60E-05in/in/F | 6.7E-6in/in/F | 4.90E-05in/in/F | 4.10E-5 in/inF |
| 比重 | 1.05 | 1.08 | 1.04 | 1.2 |

再從材料的加工特色來看，如表 3-3 所示，常會參考的有熔融指數(melt volume index)、玻璃轉換溫度(glass transition temperature)、坍塌溫度(slumping temperature)、熔點(melting temperature)，而列印溫度多高於熔點約 10-20 度。ABS 因為熔點較高，所以熔點冷卻到室溫有較大的溫差，其熔融指數較低，不易流動，另外又有比較大的收縮率，所以列印過程會有很大的熱應力，而造成變形，如圖 3-3 所示。所以在製作工件時，多會以熱床的方式，將底層加熱到接近玻璃轉換溫度，以保持材料軟的形態，以避免翹曲的產生。

表 3-3、PLA 與 ABS 的溫度特性比較

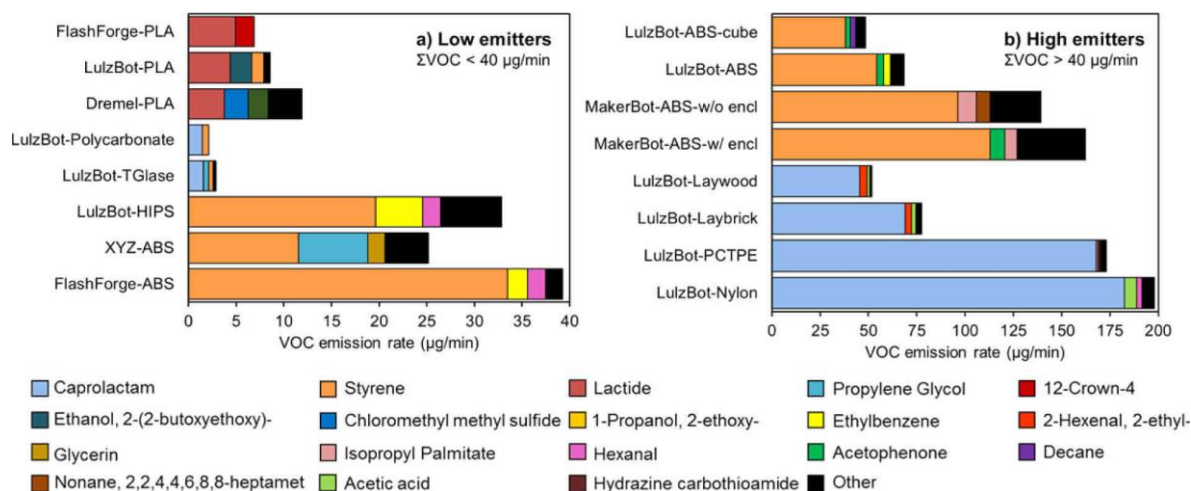
| Thermal properties | PLA | ABS |
|----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| Melt volume index (MVI) | 10.3 cm ³ /10min | 9.7cm ³ /10min |
| Glass transition temperature | 60-65°C | 105°C |
| Slumping temperature | 70-80°C | 110-125°C |
| Melting temperature | 160-190°C | 210-240°C |
| Printing temperature | 190-220°C | 230-250°C |
| Recommended printbed temperature | 50-70°C (heated bed not mandatory) | 80-120°C (heated bed required) |



資料來源：https://www.3ding.in/pla-or-abs-choose-your-ideal-filament?utm_source=fb&utm_medium=social%20media&utm_campaign=PLA_vs_ABS

圖 3-3、收縮變形造成的翹曲

由於 ABS 材料本身還有苯等毒性元素，在高溫狀態下，會結合生成部分有毒氣體，確實對身體產生影響。ABS 樹脂燃燒及熱分解產物目前還沒有定論，但在使用 FDM 類型的 3D 打印機時，要確保工作環境通風，以及不要長時間待在工作環境中。下圖 3-4 為不同熱塑性線材的蒸發氣體分析，ABS 是比較多 Styrene 的氣體產生，而其是有毒性會致癌的。



資料來源：Azimi, Parham, et al. "Emissions of ultrafine particles and volatile organic compounds from commercially available desktop three-dimensional printers with multiple filaments." *Environmental science & technology* 50.3(2016): 1260-1268.)

圖 3-4、熱塑性線材的蒸發氣體分析

(3) 聚乳酸(PLA)：

聚乳酸(英語：Polylactic Acid 或 Polylactide，縮寫：PLA)，是一種熱塑性脂肪族聚酯。生產聚乳酸所需的乳酸或丙交酯(英文：Lactide)可以通過可再生資源發酵、脫水、純化後得到，所得的聚乳酸一般具有良好的機械和加工性能，而聚乳酸產品廢棄後又可以通過各種方式快速降解。乳酸的結構中同時含有羧基和羥基，故乳酸分子之間可以發生酯化反應形成長鏈。雖然名叫聚乳酸，但絕大部分羧基已經在聚合反應中反應掉，實際並沒有什麼酸性，這一點和聚丙烯酸為代表的側基均為羧基的聚合物不同。聚乳酸的單體乳酸可以通過化學合成或者通過可再生資源合成。一般使用玉米、木薯提取出的澱粉，甘蔗和甜菜提取的糖和秸稈等提取的纖維素，經過發酵、脫水等過程獲得乳酸。所獲得的乳酸需要進行純化，才能進行聚乳酸的生產，因為乳酸中含有的微量富馬酸和醋酸都會造成聚合反應的終止。

目前生產聚乳酸的途徑主要有三條：

- 以乳酸為原料直接縮聚：由於乳酸縮聚反應中逐漸生成的水會引起水解和鏈轉移，所以一般先通過閃蒸等手段除去原料乳酸中殘存水分，之後在 100℃，1kPa

的低壓下脫水生成丙交酯和小分子量聚乳酸，然後以氯化亞錫和對甲苯磺酸為催化劑，在 160°C 溫度下進行熔融縮聚，可以得到分子量高於 80,000 的聚乳酸。如果想進一步提高分子量，可以將熔融聚乳酸冷卻後進一步縮聚，或在共沸蒸餾的條件下進行縮聚，不斷把生成的水除去，最終可以得到分子量超過 100,000 的聚乳酸。

- B. 以乳酸為原料縮聚成一定分子量的聚乳酸後，加入酸酐和環氧樹脂等偶聯劑。偶聯劑可以與聚乳酸鏈末端殘餘的羥基和羧基發生反應，達到較短鏈互相結合產生長鏈的擴鏈效果。
- C. 先以兩分子乳酸彼此酯化形成丙交酯，然後以純化的丙交酯為原料，在金屬催化劑(比如丁基錫)的作用下進行開環聚合。華萊士·卡羅瑟斯在 1932 年就發現了這一反應，但直到 1954 年杜邦公司改進了丙交酯的提純方法之後才開始工業生產。丙交酯為原料時常用的聚合方式是溶液聚合、懸浮聚合或熔融聚合。

聚乳酸的熔點、耐熱性、機械性能、加工性能都與其結晶度有關，而影響其結晶度的最主要因素是原料中 L-乳酸和 D-乳酸的配比。如果原料是純的 L-乳酸或者純 D-乳酸，則所得的聚 L-乳酸(簡稱 PLLA)和聚 D-乳酸(簡稱 PDLA)都是半結晶聚合物。聚 L-乳酸的結晶度大概是 37%，其玻璃化轉變溫度大約是 65°C，熔點是 180°C，拉伸模量大約為 3-4GPa，彎曲模量大約為 4-5GPa。即使只加入少量右旋聚乳酸，結晶度也可以提高較多。比如聚 L-乳酸按照一定比例和聚 D-乳酸共混後，聚 L-乳酸的熔點最多可以提高 50°C，熱彎曲溫度提高了大約 60°C 升高到了 190°C。所得的抗熱性聚乳酸可以在 110°C 的環境下使用聚乳酸和聚苯乙烯、PETE 的機械性質相似，但可連續使用的溫度要低得多，結晶度提高後可以提高可連續使用的溫度，但生物降解速率也隨之變低了。將聚乳酸置於坩堝中加熱可以汽化為可燃氣體。

相對於其他生物可降解材料，聚乳酸具有部分疏水性。聚乳酸和聚乳酸的共聚物的最佳溶劑是氯仿。除此之外，聚乳酸可溶於氯化溶劑、熱苯、四氫呋喃和 1,4-二噁烷但不溶於水、乙醇和大多數脂肪烴溶劑。

聚乳酸已經廣泛應用在生物醫學工程上，用作手術縫合線、骨釘和骨板等。使用聚乳酸做的手術線無需拆線，可以緩慢水解為乳酸被身體代謝掉。一般的降解時間需要半年到兩年。骨板的理想要求是能夠逐漸降解，使骨頭能夠一步步承受起逐漸增加的應力，而聚乳酸的逐漸降解的性質非常適合製作骨板。不足之處是純乳酸降解時的機械強度性質下降太快，所以一般需要加入纖維形成有較高強度的複合材料。

聚乳酸的應用現在已經超出醫學的範圍，廣泛應用於一些常見的物品，如：包裝袋、農作物用薄膜、紡織纖維和杯子。聚乳酸所制的包裝材料起初造價較高，但如今已經成為最常見的包裝材料之一。通過擠出、注塑和拉伸等加工處理，聚乳酸可以製成纖維和薄膜。聚乳酸薄膜的透水透氣性都比聚苯乙烯薄膜要低。由於水和氣體分子是通過聚合物的無定形區擴散的，所以可以通過調節聚乳酸的結晶度來調節聚乳酸薄膜的透水透氣性。

加入 D - 乳酸之後所生產的抗熱聚乳酸可以用於微波爐加熱用器皿、盛放熱液體的容器甚至工程材料。

聚 L - 乳酸的玻璃化轉變溫度較低，可以用於形狀記憶聚合物的研究上。

在 3D 列印製程上的 PLA，主要是用的 ME 的熔融沉積成型技術上，其為線材料方式為原料的提供。常用的尺寸為線徑 1.75 及 3mm。

2. 光固化樹脂

光固化型高分子，是指具有經由光輻射(radiation)照射而產生交聯固化。一般提及之光輻射固化通常包含紫外線固化和電子束固化，前者是利用紫外線光子來起始反應，後者則是利用電子來進行反應。其光固化優點為接著力強、快速固化、收縮率小，高效率的固化條件，不僅明顯地縮短製程，且根據不同的樹脂材料來區分特性與用途，更能提高產能、降低成本。

光固化樹脂的發展最早可追溯至 1813 年，法國人涅普斯(J. N. Niépce)是攝影的先驅者且發現了具有光固化性的瀝青，他將其塗佈在石版上，而應用於攝影成像，可以說是現代光阻劑(Photoresist)的原型。40-50 年代開始發展的紫外光固化

塗料、印刷油墨、乃至於後來陸續改善的紫外光固化樹脂特性，應用於印刷、接著劑、半導體、光電電子產業的封裝材料導電、導熱膠材、光阻等，乃至於牙科醫材等。一般人應不陌生。

高分子依其材料特性常被區分為兩大類，一種為熱固性樹脂(Thermosetting resin)，另一種則為熱塑性樹脂(Thermoplastic resin)，而光固化型樹脂則是屬於一種熱固型的樹脂，它是由分子量幾十、幾百或幾千的線性結構單體，反應成為幾十萬甚至於幾百萬分子量的網狀結構，且其無法恢復成原來的線性結構。

光固化樹脂未必僅用於 3D 列印或積層製造。實際上，這類型的高分子聚合物更廣泛被運用在例如接著劑、塗料、補牙、油墨(印刷業)、光阻劑(半導體產業)等。

光固化樹脂中主要含有幾種組成物：單體、寡聚物、光起始劑，與其他各種添加劑。視應用情境，可能需要混摻不同的添加劑，例如染料，提供產品更好的顏色；紫外線吸收劑，以提高樹脂保存上更好的安定性；促進劑或共起始劑，用於提高樹脂的聚合度，例如多元硫醇；稀釋劑，改善樹脂特性(如黏度)或降低整體物料成本。下圖 3-5 為單體、寡聚物與高分子的示意。

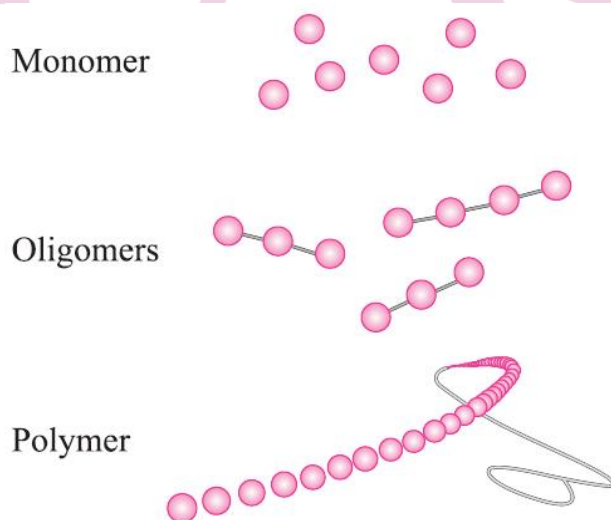


圖 3-5、單體、寡聚物與高分子

以下則針對單體、寡聚物與光起始劑，略作補充敘述。

(1) 單體：

係指光固化樹脂之中，最基本的材料聚合單元。單體透過彼此間或是與其他種分子以共價鍵方式鍵結，結合成分子量較大的結構體。

反應性單體是一種含有可聚合官能團的有機小分子，如自由基光固化主要用的是具有不飽和雙鍵的單體；陽離子光固化主要用的是具有乙烯基醚或環氧基的單體，根據所含的反應性基團的多寡，又可分為單官能團、雙官能團與多官能團活性稀釋單體，它不僅溶解和稀釋寡聚物，調節其黏度，並參與光固化過程，影響光固化速率和固化後的各種性能，約佔總量的 40~50%左右。目前常見的 3D 列印光固化樹脂多數以具備**丙烯酸酯**或**環氧基**之結構為主要的聚合單體，甲基丙烯酸甲酯(Methyl Methacrylate, MMA)是由甲基丙烯酸(Methacrylic Acid, MAA)與甲醇酯化反應而得，為無色液體，分子式為 $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{COOCH}_3$ ，是生產常見透明塑膠聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)的單體。環氧樹脂種類較多，最常見的是由二酚基丙烷(俗稱雙酚 A)環氧樹脂，又稱雙酚 A 二縮水甘油醚(Bisphenol A diglycidyl ether, DGEBA)，是由雙酚 A 和環氧氯丙烷反應而得，具高透明性，實際上依據聚合分子量的大小，分成很多不同的型號，隨著相對分子量的增加，軟化點溫度亦會隨之提高。

光固化型樹脂的固化方式一般多是所謂的加成反應，只是在前段的起始劑部分作一個改變，即是當基態分子經照光後，躍遷至激發態。通常其聚合過程可分為四大步驟：

- A. 起始反應(Initiation Reaction)
- B. 連鎖反應(Chain Reaction)
- C. 成長反應(Propagation Reaction)
- D. 終止反應(Termination Reaction)

當光固化樹脂受到光照射後，若光的能量大於分子的結合能，則分子可解離產生活性自由基或陽離子(強質子酸或路易士酸)，當存在不飽和雙鍵時，則引發光聚合交聯反應。

(2) 寡聚物：

寡聚物(Oligomer)或稱預聚物(Prepolymers)或低聚物，一種分子量相對較低的感光性樹脂。固名思義，此化合物含有已部分先行聚合的單體，以及後續仍可以與單體進行光固化反應的基團，如各類之不飽和雙鍵或環氧基等。這樣一來，才不會因為太過劇烈的反應放熱，或是聚合反應速率過快或過慢，使得最後聚合的光固化樹脂成品的品質難以掌握。

在樹脂成分裡，寡聚物將反映固化後樹脂的主要物理與化學性能，約佔組成中的 40~50%不等。儘管，一般市售樹脂已經將單體、寡聚物、添加劑等全部混摻在一起販售，消費者無須費心了解其內容物，多數按照顏色、解析度、成型速度、應用情境做選擇。不過，如果對於樹脂有特別的應用與特性需求，則需選擇或調配適當的寡聚物成分。

(3) 光起始劑：

光起始劑(Photoinitiator) 是整個光固化產品中最關鍵之組分，往往也是廠商的獨家配方。光起始劑吸收光輻射能後，會形成自由基或陽離子，引發單體與寡聚物的聚合、交聯和接枝反應，它決定了整個光固化的速率根據反應機制所產生的活性中間體不同，可分為自由基型光起始劑和陽離子型光起始劑兩類，約佔總量重量組成約 2~5%。依據不同聚合機制，簡單來說，自由基光起始劑多選用丙烯酸酯類的不飽和雙鍵之寡聚物和單體；陽離子型光起始劑則選用具有環氧基團或乙烯基醚類之寡聚物和單體。根據兩類型的反應和樹脂，簡單比較如下表 3-4 所示。

表 3-4、自由基型與陽離子型之光起始劑比較

| 類型 | 優點 | 缺點 |
|--------|---|--|
| 自由基型樹脂 | <ul style="list-style-type: none"> ● 較普遍； ● 固化速度快、黏度低、成本低； ● 反應深度較大，大型或較厚的製品仍可適用； ● 起始劑觸發波長較廣，光源選擇多，產業利用性較佳。 | <ul style="list-style-type: none"> ● 二酚基丙烷環氧樹脂或聚氨基脂丙烯酸等單體，因分子間作用力小，黏度小，硬化後硬度較低。 ● 固化後體積收縮大，易導致成品變形翹曲 |
| 陽離子型樹脂 | <ul style="list-style-type: none"> ● 體積收縮小，黏度低；附著力強 ● 耐熱性、耐化性較佳； ● 不與空氣中的氧氣結合，固化後表面乾燥。 ● 較少刺激物質，對於安全、環境影響較低。 ● 精度高 | <ul style="list-style-type: none"> ● 固化速度較慢 ● 亦受鹼和濕氣影響； ● 價格高； ● 合適的寡聚物和活性稀釋劑選擇少。 |

自由基型光起始劑又因產生自由基的方式不同，大約可再分為二類型，裂解型光起始劑(α -cleavage, Type I)與奪氫型光起始劑(Hydrogen abstraction, Type II)。

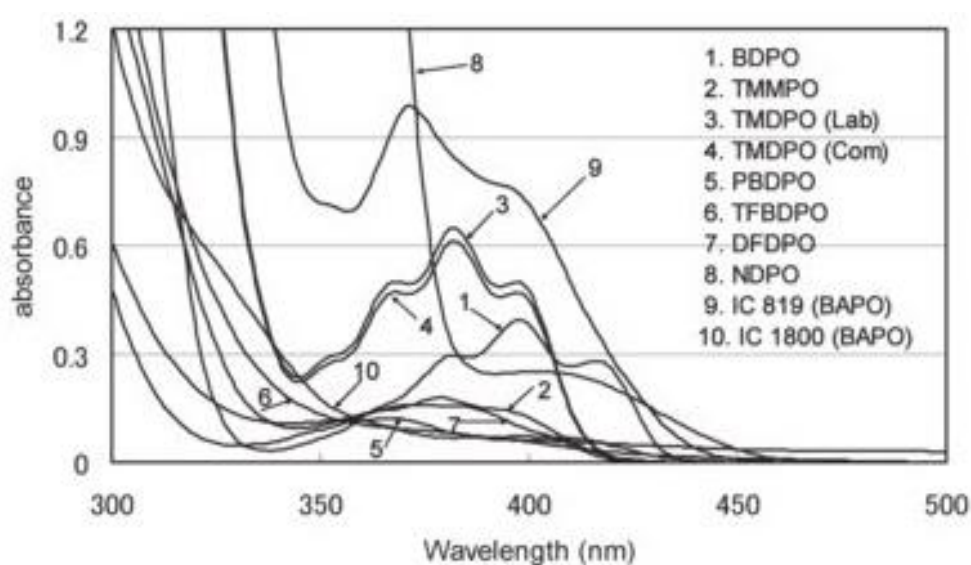
- **裂解型(Type I)**：是指光起始劑分子吸收光能後躍遷至激發單重態(Singlet state)，經系間(Intersystem crossing)躍遷至激發三重態(Triplet state)，在其激發態時，分子結構呈不穩定狀態，其中弱鍵或發生斷鍵，產生活性自由基與低聚物或單體進行交聯反應。裂解型光起始劑從結構上看，大多是芳香族羰基類化合物，主要有苯偶姻、苯偶酰、苯乙酮、 α -羥基酮、 α -氨基酮…等及其衍生物。
- **奪氫型(Type II)**：是指光起始劑分子吸收光能後，經激發和系間(Intersystem crossing)躍遷至激發三重態，與助起始劑(Co-initiator)作為氫的供體發生雙分子作用，經電子轉移產生活性自由基，與低聚物或單體進行交聯反應。典型的 Type II 光引發劑從結構上看，多是二苯甲酮、硫雜蒽酮…等及其衍生物，與奪氫型配合的助起始劑主要為叔胺化合物(tertiary amines)，如醇類、醚類、胺類和硫來作為氫供體。

一般容易取得的光起始劑整理於下表 3-5，其中又以 CQ、TPO、及 Irgacure 819 最為目前所使用：

表 3-5、容易取得的光起始劑

| 類型 | 化學名 | 吸收光譜區間 (nm) | 型態 | 特點 |
|--------------------------|--|--------------------------|----|---|
| BP | Benzophenol | UV(256,340) | 固體 | 二苯甲酮。合成容易，是價格最便宜的一種光起始劑。但其光固化速率較慢且容易使固化層泛黃，與助起始劑配合使用，使得黃變性加重。另外 BP 溶點較低，具有昇華性、易揮發，不利於使用 |
| CQ | Camphorequinone | UV(<300,375) Vis(475) | 固體 | 黃色粉末，常使用於牙科。 |
| PPD | 1-Phenyl 1,2-propanedione | UV(393) | 固體 | 較白，常與 CQ 混合使用，但聚合較慢。 |
| TPO (Lucirin® TPO) | 2,4,6-Trimethylbenzoyl- diphenylphosphine oxide | UV(290, 380, 393) | 固體 | 酰基膦氧化物。溶解性高，氣味低，少黃變，穿透深度較淺。 |
| Irgacure® 184 | 1-hydroxy-cyclohexyl-ph enyl-ketone | UV(246, 280, 333) | 固體 | α -羥基酮。低黃變，中度揮發性，表面固化佳。 |
| Irgacure® 651 | 2,2-dimethoxy-1,2- diphenylethan-1-one | UV(254, 337) | 固體 | 安息香二乙醚。易黃變 |
| Irgacure® 819 | bis(2,4,6- trimethylbenzoyl)- phenylphosphineoxide | UV(360, 365) Vis(405) | 固體 | 酰基膦氧化物。氣味低，揮發性少，對於可見光略有光敏性 |
| Irgacure® PGA 290 | tetralis(2,3,4,5,6- pentafluorophenyl) boranuide; tris[4-(4-acetylphenyl) sulfanylphenyl]sulfonium | UV(293, 318) | 固體 | 陽離子型、高活性，可用於 3D 列印，保存期長。 |

在以 Irgacure 819 為例，其對不同波長的吸收如下圖 3-6 中的 39 為代表，目前使用它主要是在其對 405nm 有一定的吸收率，而 405nm 為近 UV 的可見光波段，大部分市場上的光學系統可以直接被使用，同時本波長對人體也比較無害。



資料來源：<http://3dprinter.wikidot.com/photoactive-resins>

圖 3-6、不同光起始劑的吸收光譜

再以 DWS 的樹脂材料為例，如下圖 3-7 所示，其可以藉由適當的單體、寡聚物及一些添加材料，而得到不同材料的物性。

| | | | |
|--|--|---|---|
| Invicta | Invicta | Invicta | Precisa |
| Invicta 915 ABS-like, white colour. High impact resistant, functional prototypes, casings, snap-fit parts and assembly applications. | Invicta 917 ABS-like, anthracite gray colour. High impact resistant, functional prototypes, casings, snap-fit parts and assembly applications. | Invicta 977 Polypropylene-like. Flexible, for snap-fit prototypes of mechanical components, lab equipment, appliance parts and casings. | Precisa 779 Rigid opaque, gray colour. For prototypes, toys, high detailed models, marketing samples and patterns for silicon molds. |
| Vitra | Vitra | Therma | Flexa |
| Vitra 413 Standard acrylic, amber colour. General applications. | Vitra 429 Transparent. For clear prototypes, liquid flow visualization, lighting, equipments. | Therma 289 Nanoceramic, light green colour. For thermal resistance tests and high definition models for vulcanized rubber molds. | Flexa 692 Rubber-like, black colour. For prototypes of handles, gaskets, ergonomic tests, functional parts, footwear, wearable devices. |
| Flexa | Vesta | | |
| Flexa 693 Rubber-like, transparent. For prototypes of functional parts, gaskets, wearable accessories and prototype molds. | Vesta 443 Wax-like. For lost-wax casting applications. | | |

圖 3-7、不同光聚合樹脂材料

下圖 3-8 為光聚合反應的示意圖。

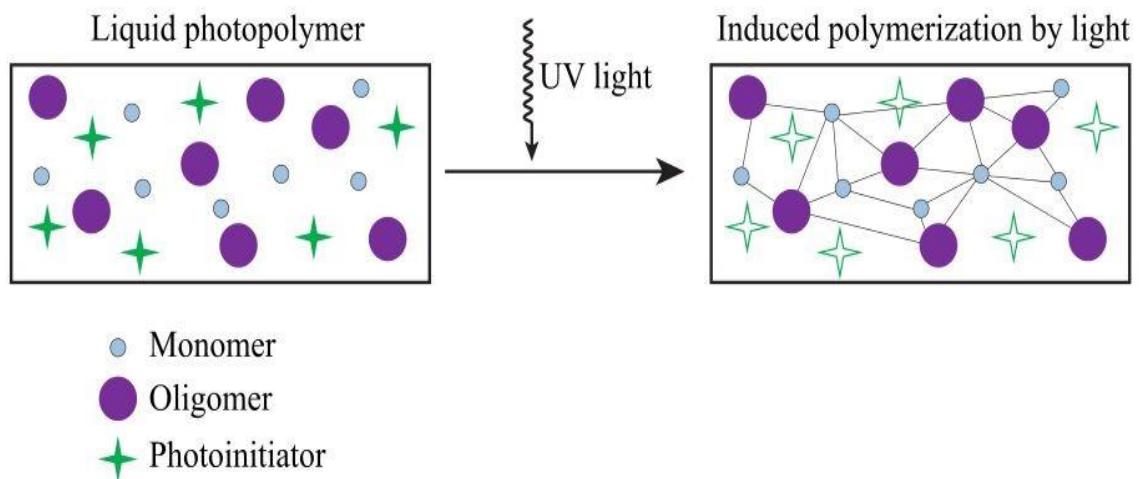


圖 3-8、光聚合反應

3. 紫外光固化樹脂

光固化樹脂早期的發展是以紫外光為開始，現在很多人說使用於桌上型 DLP 類的紫外光固化樹脂，事實上是以 405nm 為使用環境，如使用 TPO 或 IC819 為光起始劑的配方，這樹脂可在紫外光固化，也可以在可見光固化。再回顧一下各常用的光起始劑，其多可以在紫外光波段固化，是因為光子在短的波長下有比較高的能量，而要能在可見光波段有好的吸收的，也多在藍光範圍。

4. 可見光固化樹脂

一般人認為的可見光固化樹脂，事實上和紫外光差不多，只是固化的波段延伸到可見光波段。比較常被使用的為 CQ 光起始劑，其可以將固化波長提高到 470nm 的藍光波段，對一般的投影機光源可以有好的反應。

5. 複合材料光固化樹脂

光固化樹脂中加入納米陶瓷粉末、短纖維等，可改變材料強度、耐熱性能等，改變其用途，目前已經有可直接用作工具的光固化樹脂。另外也有在光固化樹脂中加入石墨烯，使完成的工件具有導電的能力。



模擬考題

1. 光聚合固化樹脂的配方中，以下何者不是必要的？
(A)單體；(B)寡聚物；(C)光起始劑；(D)螢光劑
2. 光固化聚合物固化過程(不考慮溫度因素)體積會有甚麼變化？
(A)膨脹；(B)收縮；(C)都不會改變；(D)有時收縮、有時膨脹
3. 下列對於 PLA 的描述，何者有誤？
(A)中文名稱為聚乳酸；(B)英文名稱為 Polylactic Acid；(C)由乳酸和丙交酯合成；(D)可用於高溫容器
4. 下列何波長，最不適合做為光聚合固化成型(VP)中下照式(Bottom Up)成型光源？
(A) 355 nm；(B) 405 nm；(C) 470 nm；(D) 1064 nm
5. 關於光固化聚合樹脂的一般性描述，以下何者正確？
(A)單體分子量愈大，則收縮率愈小；(B)光起始劑愈多，則固化速度愈快；
(C)寡聚物含量愈高，則黏度愈低；(D)光聚合過程是吸熱反應
6. 下列何種 3D 列印材料的回收再使用方式是錯誤的？
(A)熔融擠出 ABS 線材為成品，可熔融抽線再使用；(B)黏結劑噴塗成型後，剩餘粉末可篩粉再使用；(C)光聚合固化成品，可加熱熔化回液態再使用；
(D)粉末床熔融成型後，剩餘粉末可篩粉再使用

考題解析

1. 答案中的螢光劑與材料的性質無關，可以添加，使完成的工件照光後有螢光表現，但其在成型的階段同時也會受到照射光的影響而發螢光，而螢光通常也是屬於較短波長的冷光，會使樹脂受到影響而部分反應，從而降低成品的細緻度。

2. Ans (B)

光固化聚合物固化過程中，會從相對低分子量可流動的液態聚合成高分子團聚物不可流動的固態，而這化學反應多為放熱及伴隨著體積的收縮，所以在其成份中，有時會以比較高的寡聚物或加入其它的填加物來改善收縮，但也會使其流動性較差。

3. Ans (D)

PLA 為聚乳酸(Polylactic Acid)，是由乳酸和丙交酯合成，純 PLA 的玻璃轉換溫度很低，約 65°C，所以不適用於高溫容器。

4. Ans (D)

光聚合固化是以光照射液態光聚合樹脂，使其中的光起始劑受到一定的光子能量而產生自由基，而使單體及寡聚物聚合成為固體。而為使能產生自由基，需有一定的光子能量，光子能量在愈短的波長愈強，常用的 TPO(Diphenyl (2,4,6-trimethylbenzoyl)phosphine oxide)光起始劑可用 355nm，IRGACURE 819 光起始劑可用 405nm，CQ(Camphorquinone)光起始劑可用 470nm，而 1064nm 為紅外，其光子能量較低，目前尚未有適合的光起始劑。

5. Ans (B)

光固化聚合樹脂包括了單體、寡聚物、及光起始劑，一般而言，愈小的分子量有愈好的流動性，但聚合時會放出比較多的熱及有比較大的收縮率，在未飽合之下，光起始劑愈多，在同樣的光能量下，會產生比較多的自由基，所以固化速度會比較快(有比較多的樹脂由液體固化為固體)，而寡聚物的分子量比單體高，含量愈高則黏度也會愈高，另外光聚合反應不需加熱，反而是會使樹脂因為反應熱而變燙，是放熱反應。

6. **Ans (C)**

3D 列印材料的回收再使用方式，對熱塑性材料而言，如 ABS，可熔融抽線再使用；黏結劑噴塗成型後，剩餘粉末因為沒被黏結劑沾黏，可篩粉再使用；粉末床熔融成型後，剩餘粉末因為沒被加熱熔融，可篩粉再使用；但光聚合固化成品，並不是熱塑性材料，所以加熱不會熔化，所以不可加熱熔化回液態再使用。



觀念延伸

光固化樹脂中可以透過填加其它成份來改變其材料的特性，如加入石墨烯使能導電及增加強度，或加入顏料改變顏色及光的穿透性，而達到提高成本細緻度表現的能力。

iPXS



重點掃描

3.2 材料選擇與應用

在熔融擠出的材料上，目前主要被使用的包括 PLA、ABS、TPE、PETG、PA。

PLA：PLA 這種材料有低的收縮率，即使是開放式的印表機，也能列印巨大的物體，不必擔心成品從板子上懸空、歪斜或破損。這種材料正好適合實地在公共場所做 3D 列印。PLA 有高的硬度但也比其他塑膠脆，不適合衝擊的物件，同時其玻璃轉換溫度很低(一般約 60 度)，所以也不適合用在較高溫的環境。PLA 為可生物長時間下會腐朽消失，適合製作盒子、禮物、模型和原型的零件。

ABS：ABS 是常被工業上使用的工程塑膠。從 3D 列印行為上來看，ABS 塑膠相當容易列印，無論用什麼樣的擠出機，都會滑順地擠出材料，不必擔心堵塞或凝固。但它有比較大的收縮率及高的軟化溫度，會從加熱板上局部脫落、懸空，造成問題。ABS 適合製作可能會掉落、使用於高溫環境下、或是以粗魯的方式使用的物品。像是刀柄、車用手機架、手機保護殼、玩具。

TPE：TPE 為 Thermoplastic Elastomer，可視為所有熱塑性彈性體的總稱，常見的包括 TPR、TPV、TPU、TPEE。這常類此材料具有良好的彈性、韌性，且耐磨可彎曲不易斷裂，不論是腳踏車的零件、鞋子或符合人體工學的物件/配件，皆可使用彈性材料完成創作。

PETG：PETG 實際上就是我們日常生活中常見到的「寶特瓶」的材料，其具有很高的剛度、硬度和良好的韌性，甚至在低溫也能保持應有的韌性。透明度、韌性和熔體強度相結合，使其可用於薄件結構、需透光的物件。

PA：其具有磨擦係數低、化學鈍性、耐衝擊、高抗拉強度、好的彈性、可使用染布顏料染色等等多項特色，因此可以被使用在工業零部件和機器人的組件，尤其是非常適合打造關節移動系統，及穿戴服飾。

在光聚合固化的材料上，可直接應用的比較少，多是間接的使用，其所製作的多是模型本身，或一次性使用，而非最終可長時間使用的產品。

光聚合固化的成品，一般來說，會遠比熔融擠出來的細緻，對精密度要求高的應用會比較適合。但它所使用的材料不同於已經發展非常久的熱塑性工程塑膠，所以在物性的多樣性而言，還是不足的。以應用來分，可為原型模型、消失模、暫用模具等等。

原型模型:這是最早開始的應用，早期的 3D 列印技術被稱為 **Rapid Prototyping Technology**，就是主打可以快速的將電腦中所設計的產品快速的打樣為實體模型，讓人可以摸的到，可以直接對原型檢討驗證、試組裝。不同的驗證目的，對材料也會有不同的要求，如要求可以在成品上鑽孔，則不能選硬脆的材料，要試組裝，可能要求材料要有彈性。

消失模主要是指金工中的脫蠟鑄造。目前 DLP 類的光聚合固化的一大應用為珠寶手飾上，利用本類設備可以製作出非常高精細度成品的特性，以類蠟光固化樹脂為材料，3D 列印出模型、直接組成蠟樹，灌高溫石膏、加熱將模型燒失形成模穴、金屬離心鑄造，而將原來的樹脂工件轉成金屬的成品。

暫用模具是用在一之性的定位或翻製使用，如在醫療的植牙，在植牙前要以為患者量身定做的植牙導板放在牙床上，協助醫師正確的定位及植入植體，為一次性使用就可丟棄的治具。也可以製作成模型，用以翻製矽膠模，再以矽膠模翻製製作模型的複數個相同的造型成品，而達到生產的目的。



模擬考題

- 如要以 3D 列印的成型方法製做一台 1:1 汽車的車殼，並希望能上路試開，請問以下何種製程與材料有可能？
(A)熔融擠出 ABS 材料；(B)熔融擠出 PLA 材料；(C)DLP 光聚合固化樹脂材料；
(D)黏著劑噴塗成型石膏材料
- PLA 材料一般而言，因其玻璃轉化溫度而不適合列印以下何種物品？
(A)微波器皿；(B)玩具模型；(C)節慶應景用品；(D)手機外殼
- 用材料擠製(ME)列印機列印時，ABS 的擠製溫度範圍，以下何者最有可能？
(A) 150-170°C；(B) 220-240°C；(C) 280-300°C；(D) 320-340°C
- 用材料擠製(ME)列印機熔融列印 PLA 時，下列何者的列印溫度範圍是合理的？
(A) 190-210°C；(B) 220-240°C；(C) 260-280°C；(D) 300-320°C
- 下列何種材料的耐溫性最差(有最低的熱變形溫度)？
(A) Nylon(尼龍)；(B) ABS；(C) PLA；(D) PEEK
- 光聚合固化的材料顏色，會影響成型的細緻程度與尺寸，使用 470nm 光源，下列何種顏色的材料，可以有最精準的尺寸控制？
(A)白色；(B)藍色；(C)透明；(D)紅色
- 熱塑性彈性體(Thermoplastic elastomers)是一種兼具橡膠與塑膠特性的彈性高分子材料，可被廣泛運用於積層製造(AM)上，下列敘述何者有誤？
(A) TPU(熱塑性聚氨酯彈性體 Thermoplastic Urethane)也算是 TPE 的一種；
(B)可以用來列印鞋底、手機殼等，具有彈性與橡膠觸感的物品；(C)適合於遠端送料的方式進行列印；(D)可以運用粉末床熔融製程來製作
- 下列何種材料開封後最不需要乾燥環境儲存？
(A) PLA；(B) ABS；(C) PVA；(D) Nylon
- 光聚合固化成型技術(VP)所使用之光固化樹脂原料中，引發樹脂進行光聚合反應的成分，下列何者正確？
(A)高分子單體(Monomer)；(B)寡聚物(Oligomer)；(C)光起始劑(Photoinitiator)；
(D)填充物(Filler)

10. 有關尼龍材料與 PETG 比較的敘述，下列何者有誤？
(A)尼龍材料較易染色；(B)尼龍材料列印平台加熱溫度較高；(C)尼龍材料延伸率(Elongation)較高；(D)尼龍材料磨擦係數較高
11. 下列哪項 3D 列印技術的機台所製作的成品不可回收重製回原料？
(A)熔融擠製成型技術(FFF)；(B)光聚合固化成型技術(VP)；(C)指向性能量沉積成型技術(DED)；(D)粉末床熔融成型技術(PBF)
12. 一般熔融擠製成型技術使用的材料，依照其玻璃轉換溫度(即材料開始軟化的溫度)由高而低排列為？
(A) PEEK>ABS>PLA；(B) PEEK>PLA>ABS；(C) ABS>PLA>PEEK；
(D) PLA>ABS>PEEK
13. 3D 列印材料，下列何者具有較低的生物毒性及較高的生物降解性？
(A) PA；(B) PVC；(C) PLA；(D) ABS
14. 以 3D 列印製作電腦椅的輪子，以下列何種材料進行列印，方便移動且耐用？
(A) PCL；(B) PVA；(C) Nylon；(D) PLA
15. 3D 列印材料 PLA 與 ABS 的列印參數說明，下列述敘何者有誤？
(A) PLA 的噴嘴溫度較 ABS 的為低；(B) PLA 的腔體溫度較 ABS 的為低；
(C) PLA 的列印速度較 ABS 的為慢；(D) PLA 可不必要加熱熱床，ABS 列印時需要
16. 關於光聚合固化成型技術(VP)使用的樹脂材料，其常見成分不含下列那項？
(A)單體；(B)安定劑；(C)寡聚物；(D)光起始劑

考題解析

1. Ans (A)

能上路試開的車殼要能夠有一定的耐衝擊，ABS 會是好的選擇，而 ABS 材料的 3D 列印方式，以熔融擠出最為普遍。

2. Ans (A)

PLA 材料一般而言，因其玻璃轉化溫度較其它常用的熱塑性材料為低，而不適合列印需要耐較高溫度的物品，所以不適用於微波器皿。

3. Ans (B)

ABS 是丙烯腈(Acrylonitrile)、1,3-丁二烯(Butadiene)、苯乙烯(Styrene)三種單體的接枝共聚物，丙烯腈占 15%~35%，丁二烯占 5%~30%，苯乙烯占 40%~60%，最常見的比例是 A:B:S=20:30:50，此時 ABS 樹脂的玻璃轉移溫度大約是 105°C，其沒有一固定的熔點，但 230°C 常是可以參考的擠製溫度，其溫度愈高流動性愈好，可依所選用的 ABS 流變特性，在 230°C 上下，調整使用。太低的溫度，太過黏稠，無法順利擠出，太高的溫度容易垂流，及容易揮發及炭化。

4. Ans (A)

PLA 為聚乳酸，PLA 的玻璃轉換溫度很低，約 65°C，熔點約 175°C，熔點高低與其結晶度有關，而用材料擠製(ME)列印機熔融列印 PLA 時，其所設定的列印溫度必然要大於其熔點，但太高的溫度容易垂流，及容易揮發及炭化，一般常在 200°C 上下調整使用。

5. Ans (C)

Nylon(尼龍)、ABS、PLA、及 PEEK 等常用的熱塑性塑膠，一般的 PEEK 熱變形溫度為 152°C，可長時間在 260°C 之下使用；Nylon (Nylon 6)熱變形溫度為 75°C，可長時間在 100°C 之下使用；ABS 熱變形溫度為 88°C，但熱安定性差，只可長時間在 75°C 之下使用；PLA 熱變形溫度為 56°C，可長時間在 60°C 之下使用。

6. **Ans (D)**

光聚合固化的材料顏色，會影響光的穿透，使用 470nm 光源下，如果要使光不容易穿透，及不容易向旁邊暈開，其顏色要能對 470nm 的波長有好的吸收，白色指對可見光會形成繞射暈開(含 470nm 的波長)，藍色對 470nm 藍光不會吸收，透明為對可見光可穿透，只有紅色可以吸收 470nm 的藍光，而達到好的遮蔽。

7. **Ans (C)**

熱塑性彈性體(Thermoplastic elastomers)適合近端送料系統。

8. **Ans (C)**

Abs 具有較佳的耐候性，因此也具有防水特性。

9. **Ans (C)**

光聚合固化成型(VP)技術所使用之光固化樹脂原料中，是由光起始劑受光產生自由基，使樹脂進行光聚合反應。

10. **Ans (D)**

尼龍為低磨擦係數之高分子材料。

11. **Ans (B)**

硬化後無法還原成液體樹脂原料。

12. **Ans (A)**

一般 PEEK、ABS、PLA 的玻璃化轉變溫度約為 150 度、100 度、60 度。

13. **Ans (C)**

PLA 為聚乳酸，聚合製造而成，無毒性，為生物降解材料，可在自然界中的循環。

14. **Ans (C)**

Nylon 機械性能優異，拉身強度高，韌性好，耐反覆衝擊震動、耐磨性能好，摩擦係數低。

15. **Ans (C)**

熔融之 PLA 較 ABS 有較好的流動性，所以可以容許較快的列印速度列印。

16. **Ans (B)**

光聚合固化成型技術(VP)使用的樹脂材料主要成分包含單體、寡聚物、及光始劑。

**觀念延伸**

PLA 材料比較硬脆，DLP 光聚合固化受限 DLP 成像尺寸，現今尚無法製做如汽車這樣大尺寸的物件，黏著劑噴塗成型石膏材料的強度也不夠，所以一個應用需要同時考慮其材料與製程。

iPAXS

▶ 主辦單位



經濟部產業發展署
Industrial Development Administration, MOEA

▶ 執行單位



工業技術研究院
Industrial Technology
Research Institute

▶ 協辦單位



3D列印協會
Additive Manufacturing Association of Taiwan (AMAT)



臺灣區電機電子工業同業公會
Taiwan Electrical and Electronic Manufacturers' Association

111 年版 版權所有 © 經濟部產業發展署

