

目錄

ch12 Fundamentals of Metal Forming

- a. 基本介紹
- b. 分類：bulk deformation process(涉及大量變形) & sheet metal working process
- c. 冷加工&熱加工

ch13 rolling 滾軋

- a. 基本介紹
- b. Flat rolling 平面滾軋&crown/spreading 問題
- c. Shape rolling 形狀滾軋：thread rolling & ring rolling

ch14 Forging 鍛造

- a. 基本介紹與應用
- b. 分類
- c. Open-Die Forging (Upsetting) 開模鍛造
- d. 材料考量
- e. 設計考量
- f. 模具/設備成本
- g. 其他相似加工方法

ch15 extrusion 擠製/壓鑄

- a. 基本介紹與應用
- b. 分類
- c. 分析與金屬流動：dead zone
- d. 模具角度與孔口形狀
- e. 功率消耗

ch16 Shearing 剪製

- a. 基本介紹
- b. Sheared Edges：rollover, burnish, burr
- c. 分類
- d. clearance 餘隙：小則雙重拋光；大則過多毛邊

表格整理(by chatgpt)

ch12 Fundamentals of Metal Forming

1. 金屬成型基本介紹

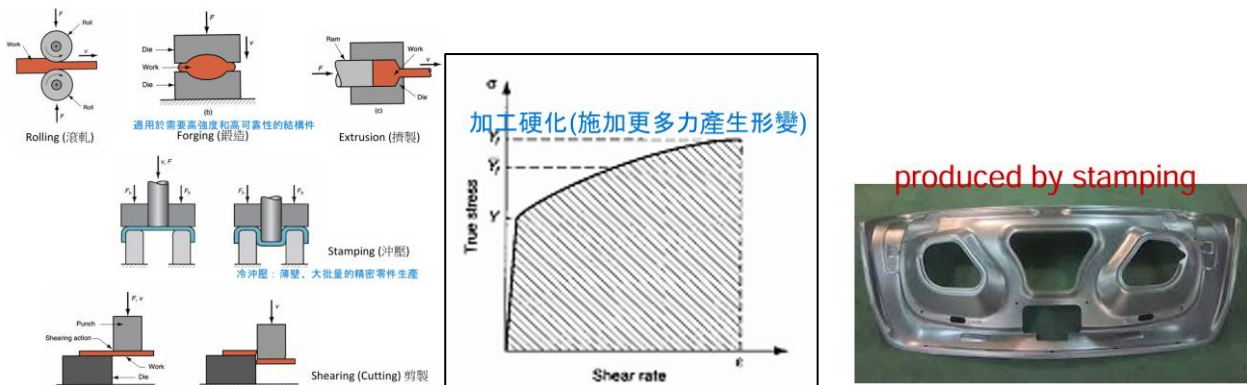
- 通過**塑性加工**改變零件形狀，不用增加或去除材料。
- 使用 die 模具施加壓力(不用 mold)，使應力超過金屬的屈服強度。

項目	Die (模具)	Mold (模腔)
加工材料狀態	固態材料 (塑性加工)	液態材料 (鑄造/注塑)
用途	塑性成型，如鍛造、沖壓	熔融材料的冷卻固化，如注塑、鑄造
施力方式	外力 (壓力或剪力)	材料自身冷卻或固化
適用材料	主要用於金屬加工	用於塑膠、金屬、陶瓷等液態材料
結構設計	需精確控制金屬流動	需容納液體並考慮冷卻收縮

- 壓應力 (rolling 滾軋、forging 鍛造、extrusion 擠製/壓鑄) 和剪應力為主要形式，拉應力作用有限。
- 材料形狀由模具形狀決定。
- 適合 **low yield strength & high ductility** 的金屬，如**金銀銅鉑**。
- 相關材料特性：**ductility, strain hardening coefficient, yield strength**

2. 金屬成型方式

- bulk deformation process** 塊狀變形加工：大量變形和形狀改變，surface-to-volume ratio 較小，需要大型複雜設備。包含 rolling、forging、extrusion。
- sheet metal working process** 板材成型加工：surface-to-volume ratio 較大，其材料的某一維度較其他維度小，如 sheets, strips, coils。包含 stamping 沖壓、drawing 抽製、shearing 剪製。



3. Material behavior

- 材料行為由 true stress-strain curve 表示，曲線描述瞬時所需強度，而線下面積為塑性區域 $\sigma = K\varepsilon^n$ ，其中 K 為強度係數($\frac{lb}{in^2}$)、n 為加工硬化係數，兩者受溫度影響。
- Average flow stress $= \frac{\int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{k\varepsilon^n}{n+1}$ ：曲線下(塑性變形開始到最大)應力的平均值，與變形範圍相關。

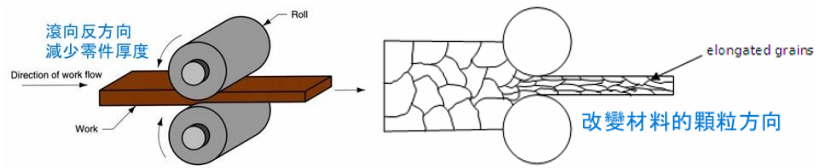
4. Working Temperatures：高溫下可以較低的力和功率完成塑性變形，強度與加工硬化降低，延展性增加。 K 減小， n 隨著溫度上升到接近熔點而變為零。
- a. **Cold working**：在室溫下進行。優點是精度高、表面光潔度高、加工硬化增加了強度和硬度，且幾乎不需要熱量；缺點是需更高的力/功率、塑性變形量受延展性與加工硬化限制(需退火來降低硬度並提高延展性、可加工性上升，以增加變形量)
 - b. **Warm working**：約熔點的 0.3 倍且再結晶溫度以下進行。
 - c. **Hot working**：熔點的 0.5-0.7 倍且再結晶溫度以上進行。優點是可用較少的力/功率產生較大的塑性變形；缺點是精度低、能量需求高、表面光潔度差(因氧化)且工具壽命縮短。
- (考題：bulk deformation process 會產生大量變形，如果這時金屬的延展性不足，材料有可能在加工時被破壞。所以多採用熱加工來提高延展性，以產生大量的塑性變形，像是 rolling, forging。)

5. Friction and Lubrication 摩擦&潤滑：

- a. 摩擦：由模具與工件接觸且高壓產生，高壓高溫可能使兩者表面粘附或一方撕裂。(因為室溫下材料強度較高，所以高溫下容易產生摩擦及毀損)
 - I. 摩擦會阻礙金屬流動導致缺陷、增加所需力與功率、使工具磨損影響精度。
 - II. 影響因素：工具工件材料、表面粗糙度、表面狀況(是否氧化、潤滑劑使用與否)、參數(如溫度、速度、變形區幾何形狀、變形區的比壓)。
- b. 潤滑：減少摩擦(降低粘附、所需的力/功率)與散熱、改善表面質量(延長工具壽命)。常用的潤滑劑有礦物油、石墨、synthetic emulsions 合成乳化劑。

ch13 rolling 滾軋

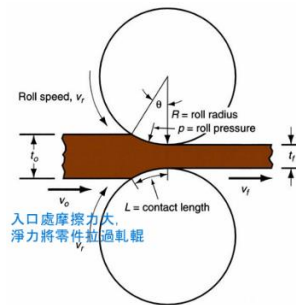
1. 滾軋介紹：需要大量設備，常用於標準件或原材料的大規模生產。以下分兩類。



(考題：Rolling tends to produce finished parts of directional property.)

2. Flat rolling 平面滾軋：減少矩形橫截面的厚度。(把東西滾成平的)

- a. **draft**：厚度減少量 $d = t_0 - t_f$ ，Reduction ratio 減薄率 $= \frac{d}{t_0}$ 。變形量與 draft 相關。
- b. Spreading：從上方看，零件寬度變寬。
- c. Conservation of material 材料體積守恒：離開的體積等於進入的體積。
 $t_0 w_0 l_0 = t_f w_f l_f$ ， l_0 、 l_f 換成速率 v 也一樣。(進入 v 較慢)
- d. **No-slip point/Neutral point** 無滑點/中性點：該處工件速度等於滾軋輥速度(沒有速度差)，兩側產生滑動。

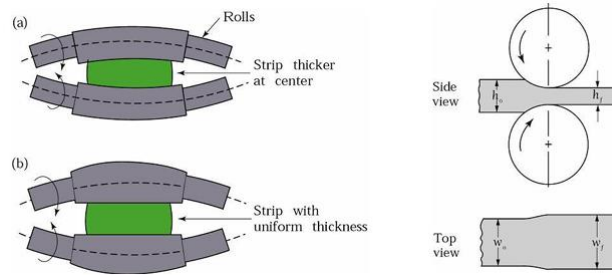


- e. 滾軋輥對材料施力 F ： L 為輥子長度， w 為平均寬度， \bar{Y}_f 平均真應力

$$F = L w \bar{Y}_f \quad \left(\bar{Y}_f = \frac{K \epsilon^n}{1+n}, \epsilon = \ln \frac{t_0}{t_f} \right)$$

- f. 幾何考量

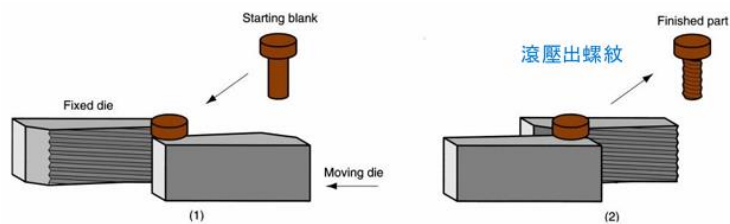
- I. **crown**：輥子因剛性有限在材料滾軋時受材料反作用力擠壓所導致的變形(材料中間比兩端邊緣更厚)。可研磨輥子，使其中心直徑略大於邊緣直徑來解決。
(考題：強度硬度越大的材料，在滾軋時的反作用力越大，會有更多 crown(力大有 crown)，例如 steel)(考題：半徑比較大的滾輪 crown 嚴重，摩擦力越大，半徑越大，力量就越大，公式： $\Delta h = \mu R^2$ ， Δh 厚度差， μ 摩擦係數)
- II. **Spreading**：寬度厚度比小的工件，在滾軋間隙中寬度增加顯著。解決方法為使用 **edge roll** 與工作部件側邊接觸的立式/垂直輥(邊銑刀)以防止擴散。



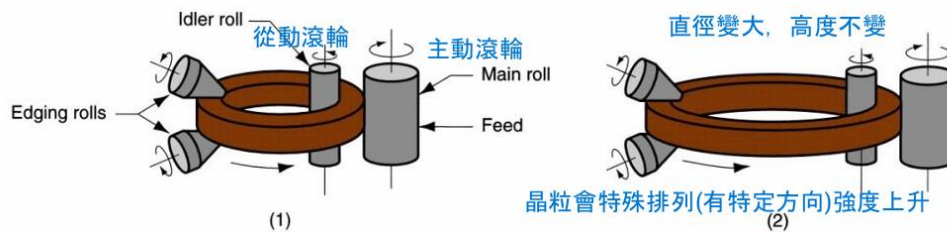
3. Shape rolling 形狀滾軋：將方形截面加工成複雜形狀（如 I 型鋼）。

a. Thread rolling 螺紋滾軋

- I. 通過兩個模具在圓柱零件上滾壓出螺紋，通常為冷加工。
- II. 加工硬化提升螺紋強度，適用於 bolts and screws (螺栓、螺釘) 的大規模生產。

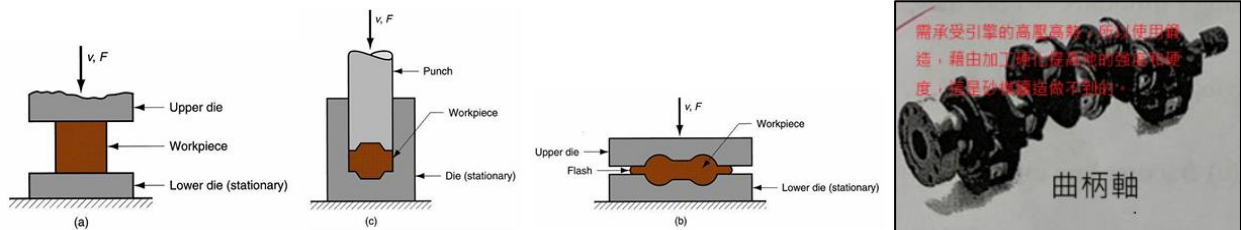


- b. (Hot) Ring rolling 環形滾軋：用一個主動軋與一個從動軋對環截面施加壓力，將小直徑厚壁環加工成大直徑薄壁環。通常是熱加工。



ch14 Forging 鍛造

1. 工件材料在兩個模具之間被壓縮，零件形狀由模具控制(模具壓縮材料的 bulk deformation process)。
2. 應用：**crankshafts 曲柄軸**(圖在下方)、**connection rods 連桿**、**turbine blade**、航空航天及汽車結構件等。還用於製造**大型部件**的基本形式，而後進行二次加工。
3. 鍛造分類
 - a. 根據外力應用方式：forging hammer 衝擊力鍛造、forging press 漸進力鍛造。
 - b. 根據金屬流動情況(分別對應以下 a, b, c)
 - I. Open die forging 開模鍛造：零件在兩個開放平模之間壓縮，**金屬橫向流動/變形**。
 - II. Impression die forging 模腔鍛造：**金屬流動受限**，模具外的金屬形成 flash 飛邊，後續必須剪掉(**removed by trimming die**)。
 - III. Flashless forging 完全密閉鍛造：**金屬完全受模具約束**，無飛邊生成。
 - IV. (考題：**closed-die forging can be a net-shape or near net-shape process but peripheral milling cannot !!**)



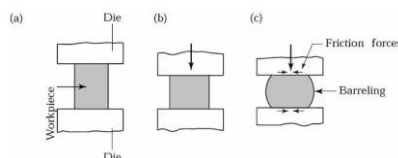
4. Open-Die Forging (Upsetting) 開模鍛造

- a. 主要目的是減少零件高度並增加直徑(最簡單的是使圓柱變形，類似壓縮測試)。
- b. 若無摩擦時會均勻變形(徑向高度都一樣)，真應變 $\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h}$ 。

在任何給定高度 h 繼續壓縮所需的力 F 為 $F = AY_f = A(K\varepsilon^n)$ 。其中 A 是零件的瞬時橫截面積， Y_f 是相應應變處的流動應力。隨著面積不斷增加， Y_f 也因加工硬化而增加。

- c. **barreling effect**：摩擦阻礙金屬流動。在熱開模鍛造中，摩擦會更嚴重，因金屬端部附近快速冷卻，變形阻力增加。因此在考慮摩擦的情況下，

$$F = \left(1 + \frac{0.4\mu D}{h}\right) AY_f, \mu \text{ 為摩擦係數, } D \text{ 為零件直徑。} \left(1 + \frac{0.4\mu D}{h}\right) \text{ 為 shape factor。}$$



5. 材料考量

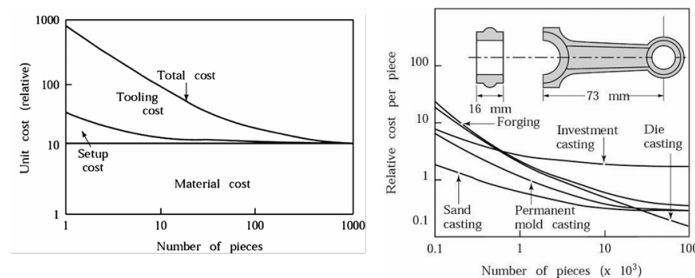
- 鍛造性：常用的測試是壓縮圓柱並觀察桶狀表面的裂縫，在開裂前的變形越大，金屬的可鍛造性就越大。
- 工件材料：鋁、鎂、鋼。
- 常見模具材料：鉻和鎳含量高的工具和模具鋼，以提升高溫機械性能和耐磨性。
- 模具製作：加工方式包括機械加工(銑、磨)、拋光、鍛造及非傳統加工（如 EDM 放電加工、ECM 電化學加工），以產生高精度、表面品質，要避免表面損壞或模具表面的殘餘應力，通常進行熱處理以增強性能。
- 方向性：鍛造零件內的固有方向性，使得屬性相對於使用條件進行最佳定向。最大強度沿承受最大載荷的方向定向。

6. 設計考量

- parting line 分模線**：兩模具半部接合處的周邊線，應與模具運動/施力軸線垂直。
- draft**：有助於從模具中取出成品零件。平行於模具運動的鍛造表面都是錐形的。
- standard draft angle 拔模角度**：方便零件從模具中取出，建議角度為 1° 到 7° 。
- fillet radii 圓角**：應盡量大，以利金屬流動，半徑小成本，加工困難且易導致模具表面出現缺陷。
- 多次鍛造：用於複雜形狀的零件。

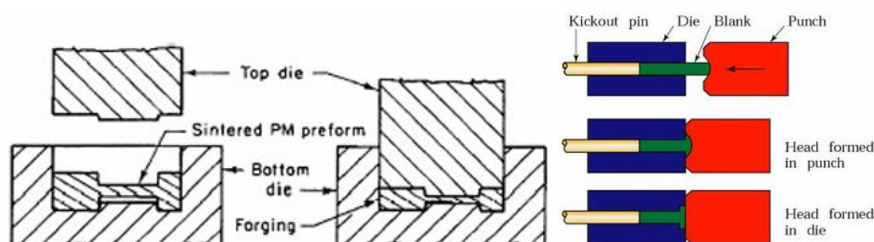
7. 鍛造經濟性

- 模具與設備成本高**，為固定成本，需重複使用多次；自動化，勞動成本適中。
- 大規模生產中，材料成本與鍛造總成本占比隨零件數量增加而提高。



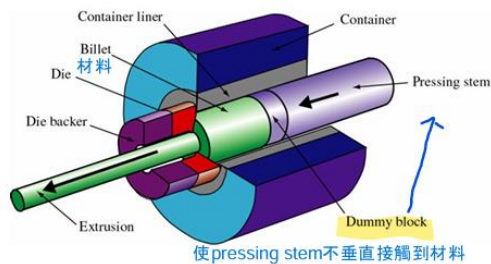
8. 其他相似加工方法

- Coining**：一種閉模鍛造工藝，常用於鑄幣和珠寶製作。
- Heading**：在圓棒端部進行壓縮，產生更大截面積。



ch15 extrusion 擠製/壓鑄

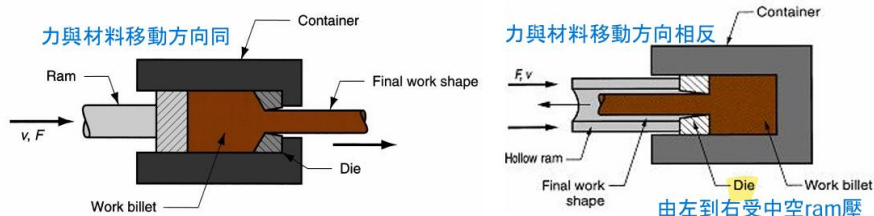
1. 壓縮材料使其通過**模具的開口**以產生所需的橫截面形狀(像擠牙膏)。
2. 生產具有**均勻橫截面**的長零件(雖然形狀變化大但橫截面積不變)。應用：推拉門欄杆、門/窗框、食品加工(如義大利麵、早餐麥片、餅乾麵糰和炸薯條)。
3. 材料：須具有足夠的延展性(大量塑性變形)，如鋁、銅、鎂和低強度鋼。
4. 用語：billet-材料、chamber-容器、ram-液壓驅動壓力機、orifice-模具開口(孔口)
(考題：The remaining material that **cannot come out of the die** in extrusion is **butt**.)



5. 擠製分類

a. 根據金屬流動方向

- I. **直接/正向擠製**(力與金屬流動方向同)：當 ram 接近開口時部分材料無法通過。
- II. **間接擠製**(力與金屬流動方向相反)：中空 ram 剛度較低(提供壓力給模具)，以及擠壓產品在離開模具時難以支撐是間接擠製的局限性。其優點為材料不會被迫相對於容器表面移動，因此**摩擦力較小**。



b. 根據加工溫度

- I. **熱擠製**：在材料加熱到**再結晶溫度以上**前進行。**強度下降、延展性上升**，從而允許更多小尺寸和更複雜的形狀。
- II. **冷擠製**：用於生產**小型離散零件**。impact extrusion 表示高速冷擠製。

6. 分析

a. extrusion ratio 擠壓比：描述塑性變形量。

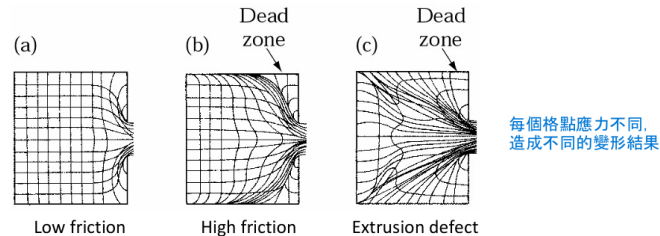
b. 所需的力取決於材料的強度、擠壓比、摩擦力(材料和容器/模具表面之間)和溫度。

I. 無摩擦： $F = \bar{Y}_f A_0 \ln \left(\frac{A_0}{A_f} \right) = \left(\frac{K \epsilon^n}{n+1} \right) A_0 \ln \left(\frac{A_0}{A_f} \right)$ ，真應變為 $\ln \left(\frac{A_0}{A_f} \right)$

II. 有摩擦： $F = k A_0 \ln \left(\frac{A_0}{A_f} \right)$ ，擠壓常數 k 是溫度的函數。

7. 金屬流動

- 影響最終產品的品質和機械性能。
- 常見的研究方法有 grid pattern method(網格)和 computer simulation
- dead zone**：開口處的材料基本上是靜止的。死區的存在會阻礙金屬流動而影響其他地方的變形、增加沖壓力，還可能導致缺陷。



- 最重要因素是模具角度和孔口形狀。

8. die angle 模具角度 & Shape of die orifice 孔口形狀

- 角度小->模具截面積大->摩擦大->較大 ram force ;
角度大->不均勻流動->增加需要的 ram force
- 金屬流動還可能引起渦流，不過理論上存在一個最佳角度(取決於材料、工作溫度和潤滑)，很難分析確定，因此多採用 FEM (Finite Element Method)。
- 孔口形狀會影響 ram pressure，**最簡單的形狀是圓形**。隨著橫截面越複雜，流經孔口的不均勻金屬流量更大，因此需要更高壓力和更多力。

形狀係數 $K_X = 0.98 + 0.22(C_x/C_c)^{2.25}$ ， C_x 是拉伸橫截面的周長， C_c 是與拉伸形狀面積相同的圓的周長。

9. 功率消耗

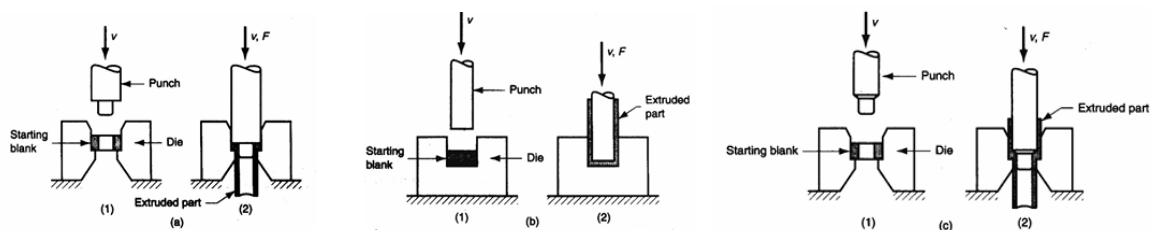
- 輸入功率是 ram force, F 以速度 u_0 移動時提供的功率： $P_{input} = Fu_0$
- 輸入功率轉換為(提供的能量消耗在哪**2021 考古有考**)

I. 塑性變形所需的理想功率

II. 摩擦消耗(外部摩擦)-> can be reduced by using lubrication

III. 非均勻變形(如受死區影響)造成多餘的作功。(內部摩擦)

- Impact Extrusion：與傳統擠製相比，它以更高速度和更少時間進行。可以生產壁非常薄的零件，如牙膏、電池盒。壁厚由 punch 和模具之間的間隙控制。通常是冷加工。



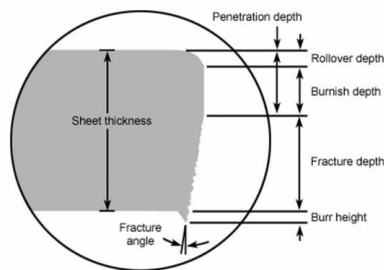
ch16 Shearing 剪製

1. sheet metal working process 板材成型加工

- 在相對較薄的金屬板(厚度範圍 0.4mm - 6mm)上進行，起始材料由**滾軋**製造。
- 通常是**冷加工**，在室溫下進行。因為變形量不大，零件的硬化也不是主要問題。
- 優點：良好的**尺寸控制**、表面光潔度、形狀精度和自動化技術支援的**高生產率**。
(對於一次性零件和小批量生產，其他切割製程如雷射切割，會更具成本效益。)
(考題：不過 **milling 的 dimensional accuracy 尺寸控制會比 shearing 更好**)
- 缺點：太硬的材料會損害刀刃(如鎢)、未夾緊工件會有毛邊、不適合複雜形狀。
- 包含 stamping 沖壓、drawing 抽製、shearing 剪製/cutting 剪斷加工。

2. shearing operation

- 金屬主要通過剪切應力切割(像用剪刀剪紙)。
- 使用的工具：由 **punch** 沖頭(向下移動的切削刀)和模具(固定的切削刀)組成。
- 切割操作是一個複雜的變形過程，由三個機制組成
plastic deformation (compressive)、shear、fracture
- 步驟
 - 塑性變形：punch 下壓，壓縮材料，在材料表面造成永久壓痕。
 - penetration 穿透：punch 由於剪切應力而切入材料。
 - 隨著 punch 繼續向下移動，兩端的兩個切削刀之間開始斷裂。
 - 兩條斷裂線最後連在一起，材料斷裂。



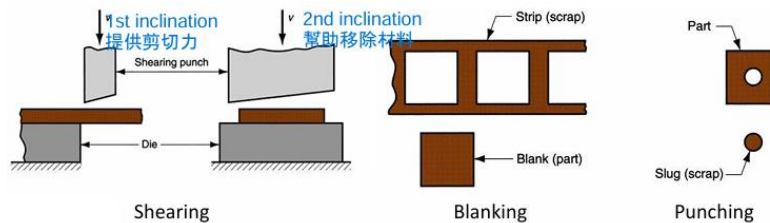
3. Sheared Edges 剪切邊緣的特徵—以剪切圓形零件為例

- rollover** 凹陷：上部的壓痕區，由**壓應力**(塑性變形)產生的凹陷。
- burnish 拋光：中間的光滑區域，對應穿透階段。
- burr** 毛邊：為底部的毛刺區，由於最終分離過程中**多餘材料**形成。
de-burring 去毛邊
(考題：因 **shearing 是減法加工**，所以材料分離會產生毛邊，但 forging 不是減法)

4. 分類

- Shearing(直線剪切)：punch 是 **double-inclined 雙斜刀**(會考你畫圖喔)以利於分開成品，沿直線進行切割，常用於切割長條或矩形板材。

- b. **Blanking**(落料)：打下來的材料(被去除的)為**成品**，剩餘材料為廢料，例如製造金屬片零件(墊片、硬幣等)，常見材料為**鋁(softness)**、黃銅、青銅、低碳鋼和不鏽鋼。
(考題：有用模具)
- c. **Punching**(沖孔)：打下來的材料(被去除的)為**廢料**，剩餘材料為成品(和 blanking 相反)，例如板材打孔。



5. 分析

- a. **clearance 餘隙(c)**：沖頭與模具之間的距離，為決定剪切邊緣品質的主要因素。

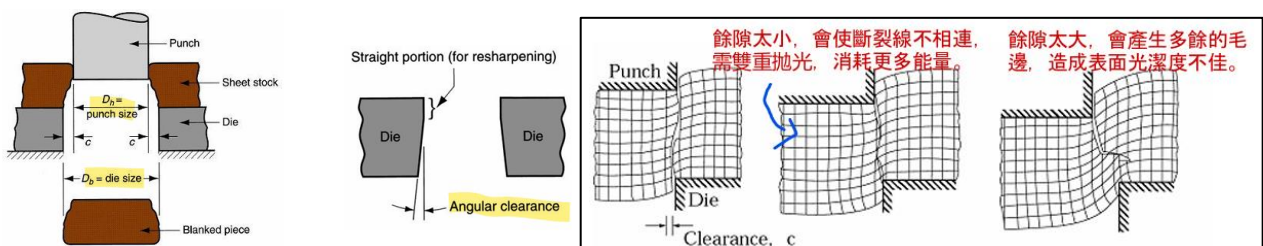
I. $c = 0.5(D_b - D_h)$ or $c = at$

c 為餘隙(通常為板材厚度的 0.04 - 0.08 倍)，a 為金屬類型的允許值(查表確定)，t 為板材厚度。

Metal group	a
1100S and 5052S aluminum alloys, all tempers	0.045
2024ST and 6061ST aluminum alloys; brass, soft cold rolled steel, soft stainless steel	0.060
Cold rolled steel, half hard; stainless steel, half hard and full hard	0.075

- II. **小餘隙**：從邊緣開始的 fracture line 斷裂線相互穿過，需更大剪切力和**雙重拋光(Double Burnishing)**，消耗了更多能量。

- III. **大餘隙**：材料易被拉入模具中而不是被剪切，形成 **excessive burr 過多毛邊**。



- b. **Angular Clearance 角度餘隙**：為方便成品掉落(穿過模具)而設置，理想值為每側 **0.25° - 1.5°**。

- c. **Shear Force 剪切力**：為材料的剪切強度與被剪切區域的乘積

$$F = TL\sigma_{shear} = TL(0.75\sigma_{UTS}), \text{ T 是板材厚度, } L(= 2\pi r) \text{ 是被剪切的總長度,}$$

σ_{shear} 是工件材料的剪切強度， σ_{UTS} 是工件材料的極限強度。

(考題：face milling produces material removal/deformation mainly by shear stress.)

表格整理

製程	加工類型	成本	尺寸控制	表面光滑度	冷熱加工	優點	缺點
Rolling	塊狀變形	資本密集，設備昂貴	中等	中	冷熱	高產量，材料利用率高，能改善晶粒方向性	成本高，對硬材料產生Crown，對幾何控制要求高
Forging	塊狀變形	模具及設備成本高	高	中	冷熱	零件強度高，具方向性特性，適合製造高負載零件	模具設計與維護複雜，材料成本高，模具壽命受限制
Extrusion	塊狀變形	高，特別是熱擠製	中至高	中	冷熱	適合生產長條形、均勻橫截面的零件，材料利用率高	熱擠製耗能高，冷擠製需要高壓設備，工具磨損較快
Shearing	板材成型	中等	中至高	中	冷	成本較低，適合大量生產，尺寸控制良好	無法處理過硬材料，產生毛邊，對小批量生產不具經濟效益
沖壓 Stamping	板材成型	中等至高	高	高	冷	自動化支持高產量，適合複雜形狀零件生產，表面質量高	設備初始成本高，不適合厚板或過硬材料
Fine Blanking	板材成型	高，專業工具需求高	高	極高	冷	邊緣光潔度高，適合高精度需求零件（如齒輪）	僅適用於特定材料（如鋁、銅），設備和模具成本極高