

第十四章 金屬切削

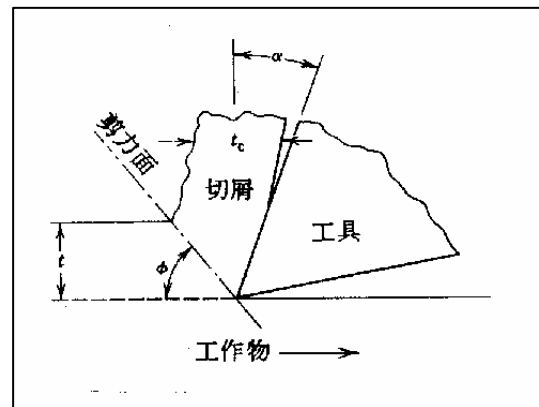
金屬製品的製造過程，通常是由材料精煉，繼之以初步的加工，如鑄造或鍛造等，使其成為合乎所要求的形狀及尺寸。而金屬切削雖然只是加工過程的一步，但是有關製品品質的優劣，以及該製品在操作上的經濟利益，則有甚大的關係，因此，對於金屬切削理論的了解，在整個機械製造過程上是有其絕對的必要性。

金屬切削理論係針對各種機器加工而言，包括車削（Turning）、鉋切（Planing）、銑切（Milling）、鑽孔（Drilling）及其他具有切削作用的機器加工等。至於所謂的『切削作用』，是指切除一部份的金屬屑片，或稱之為切屑（Chips），使工作件成為所規定的尺寸及形狀。由於切削作用來自切削工具，因此工具的優劣將關係到整個切削工作的成敗。

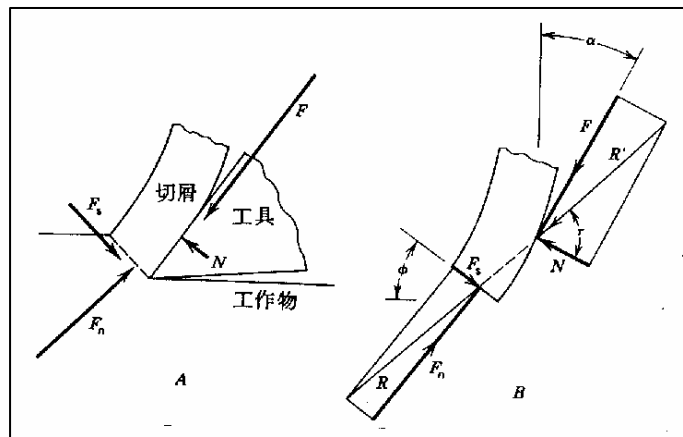
切削工具可分成：

- 單鋒工具（Single-Point Tools）：如車床上的切斷車刀、平鉋或牛頭鉋床用鉋刀等。
- 多鋒工具（Multi-Point Cutting Tools）：由兩個或兩個以上的單鋒工具以適當的安排方式組合成一個工具，各種銑刀或拉刀（Broaching Tools）都是典型的多鋒刀具。

多鋒刀具切削時，固然可能與進行方向形成各種角度，但為了便於分析起見，則僅以垂直方向來處理，也就是說假設刀鋒與其切削進行方向垂直。由於所討論的構想，僅限於正交切削（如右圖所示），因此，切削動作都只在紙面上進行，是一個兩度空間的切削，其中，刀鋒僅是一條直線，切屑均在紙面上流動，且各處所產生的速度都相同。



對於切削工作力的分析，則是假設切屑的形成與脫離，是由於材料受到最大剪應力而來，因此，在分析上係以最簡單的剪力理論來處理。分析中假設工具為靜止不動，而工作物在移動，如右圖所示，其中，金屬受剪力作用而流動，此流動的面稱為剪力面， ϕ 為剪力角， α 為後傾角，工具下面與工作物間的夾角稱為隙角（Clearance Angle），至於刀具進行切削時，作用在切屑上的各力，如右圖所示。



其中： F_s 為切屑形成時作用在剪力面上的剪力。

$$\tan \phi = \frac{\gamma \cos \alpha}{1 - \gamma \sin \alpha}$$

式中的比例值 γ 可由實際量測值計算，但因切屑捲曲，加上背面高低不平，所測得值可能欠缺正確，另一變通方法則為假設金屬在切削前後密度不變，且切屑無橫向與側向流動，也就是說正交切削不產生垂直於圖面的流動，於是，在體積不變的假設下：

$$tL = t_c L_c$$

其中：

L_c 為切屑長度。

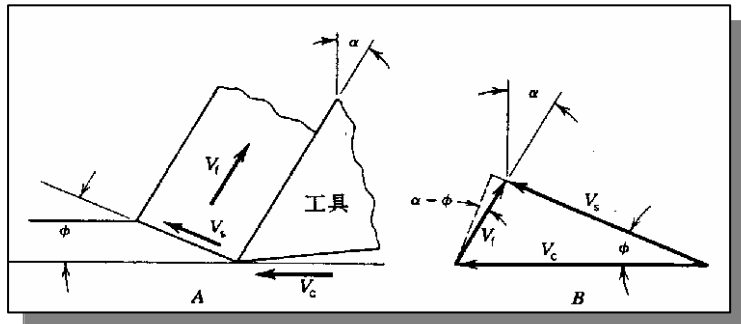
L 為相當於 L_c 在未切削前在工作物上的長度。

因此，

$$\gamma = \frac{t}{t_c} = \frac{L_c}{L}$$

至於工具與切屑間的速度關係則可由右圖表示：

$$V_c = V_s + (-V_f)$$



其中：

V_c 為工作物與工具間的相對速度。

V_f 為切屑在工具面上的相對速度。

V_s 為剪力面上切屑對工作物母料的相對速度。

於是，切屑在工具表面上的滑動速度為：

$$V_f = \frac{V_c \cos \phi}{\cos(\phi - \alpha)}$$

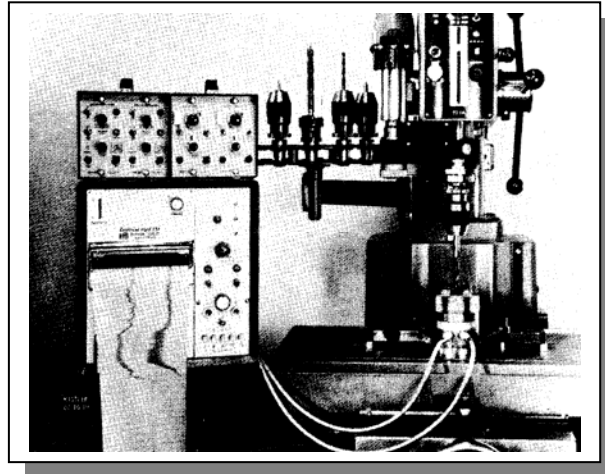
$$V_f = \gamma V_c$$

而切屑在剪力面上的速度為：

$$V_s = \frac{V_c \cos \alpha}{\cos(\phi - \alpha)}$$

至於前面所提到的可利用測功計（Dynamometer）來量測工具上的各種切削力，到底怎麼做呢？

測功計是利用彈性定律，用機械或電子的方式所構成，由一個轉能器（Transducer）與裝置轉能器的基礎或平檯所組合，使用時，將工具或工作件裝置在平檯上，如下圖所示之將工作物裝置在平檯上，以量測鑽頭進給所產生的力與力矩。



另外，在切削操作中，二個重要的數據中一為功率（Power），功率的計算方法包括：在馬達電路上直接裝上瓦特計（Wattmeter），以測功器所測得的切削力 F_c 乘上切削速度 V_c ；由於後者所得的功率僅存在機器轉軸之上，故又稱為轉軸功率（Spindle Power），以 HPs 表示：

$$HP_s = \frac{F_c \times V_c}{33,000}$$

然而由於機械損失的原故，馬達的實際輸出馬力應為：

$$HP_m = HP_s \div \text{機械效率}$$

另一則為金屬切除率：

$$Q = 12 \times t \times f_r \times V_c$$

其中：

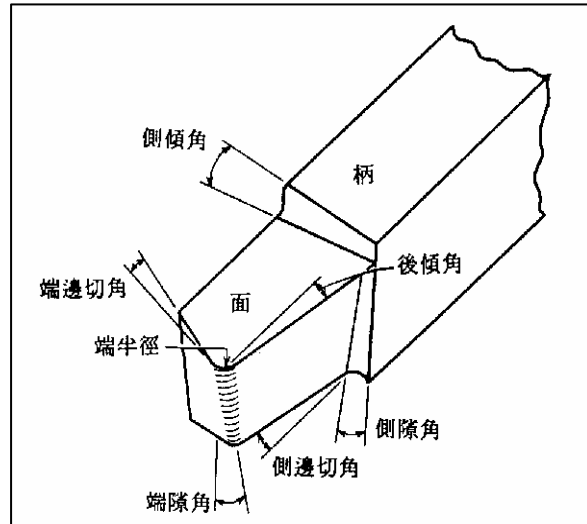
t 為切削深度

f_r 為進給速率

一、切削工具特性

(一) 工具形狀

圖示為一典型的單鋒工具的各角度及名稱，此工具係利用砂輪磨而成：



- 唇角 (Lip Angle) 或切削角 (Cutting Angle)：楔形刀口兩面的夾角，此角的大小代表刀口的鈍或銳，與切削效能有關，一般而言，此角愈尖銳，愈可節省動力，但必須要有相當的強度，才能承受金屬的阻力，同時要顧及所產生熱量的傳遞能力；此外，也必須考慮工作物的材料性質；高硬度的材料，需要強度高的切削刀與較大的傳熱能力，此角度應大而鈍；軟性材料，可用較小的切削角。

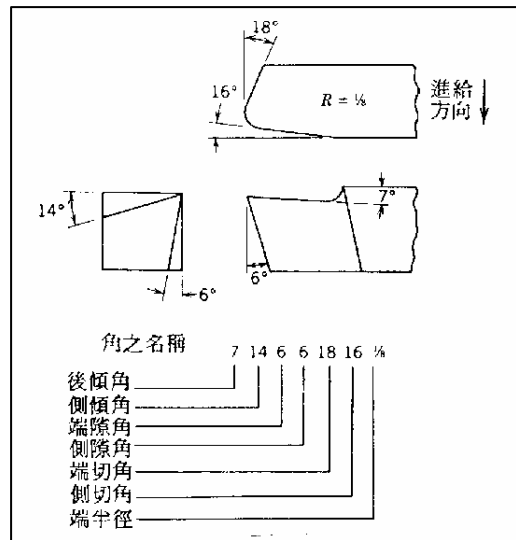
- 側隙角 (Side Relief Angle) 或側讓角：工具側面與工作物間的夾角，為避免兩者直接摩擦，此角不宜太大，一般在 6° 至 8° 之間。

- 側傾角 (Side Rake Angle) 或側斜角：工具上面向側方傾斜的角度，是造成唇角的一個角度，此角愈大，唇角愈小。

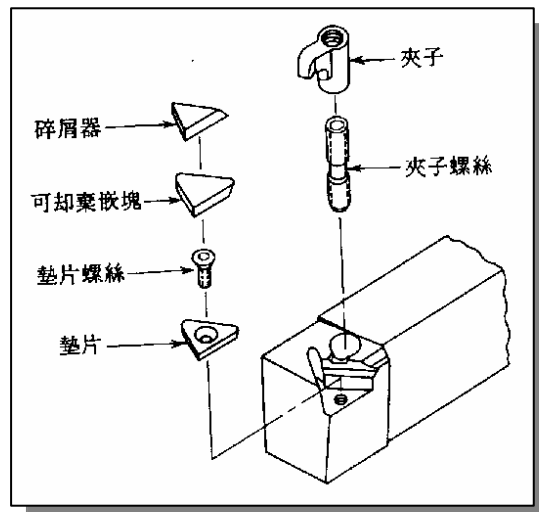
- 後傾角 (Back Rake Angle) 或後斜角：工具上面與水平間的夾角。

- 端隙角 (End Relief Angle)：工具端面與工作物所夾的角度，其功用與側隙角相同。

上述這些角度將隨刀具裝置位置的改變而改變，但並非表示必須另外加以研磨。右上圖所示為一左手刀工具（由右向左進給）的各部位切削角標示。



工具除了可如上述之以實體刀桿輪磨而成外，尚有利用硬焊法將碳化物刀尖塊 (Carbide Tip) 焊在刀柄上者，或將嵌塊 (Inserts) 固定於刀柄上者，如下圖所示。所以，用嵌塊所組成的工具，其種類與形狀將是多樣化的，而市面上亦有多種嵌塊及工具柄出售，如陶質材料所製的嵌塊，價廉而質優，且一經用鈍即可丟棄，稱之為可丟棄 (Disposable) 嵌塊，其形狀有三角形、圓形、方形、菱形及若干特殊形狀。



(二) 工具材料

由於高速切削的生產需求，刀具材料的進展與改良日益殷切，一般而言，其要求的條件包括：

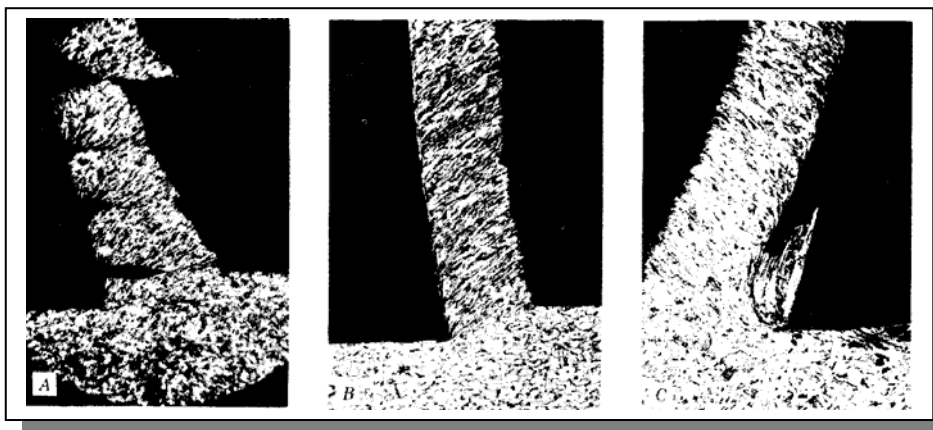
- 高溫抵抗軟化的能力。
- 低的摩擦係數。
- 優良的抵抗磨損性質。
- 充分的韌性（Toughness）與耐衝擊性。

常用的工具材料有：

- 高碳鋼（High-Carbon Steel）。
- 高速鋼（High-Speed Steel）。
- 鑄造非鐵金屬（Cast Nonferrous Alloy）。
- 碳化物（Carbides）。
- 鑽石（Diamonds）。
- 瓷質工具（Ceramic Tools）。
- 氮化矽（標號 S-8）。

二、切屑形狀及其形成

圖示為切屑的三種類型：



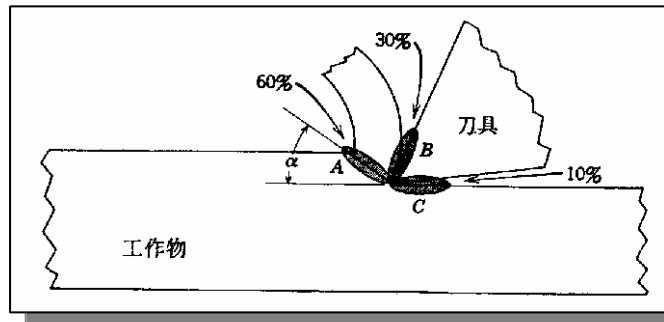
- 非連續式或碎斷式切屑（Discontinuous or Segmental Chips）（A）：表示切屑在工具前方脫離之後，即碎成小片。脆性較高的材料，如鑄鐵或青銅，較會有如此情況。因為，切屑形成後即碎斷，不會對工具面產生壓力，所餘的不規則面，易由刀刃將其切平，故可得較光平的面，且因工具面的壓力較小，磨損亦小，故刀具壽命較長。不過要順便一提的是，如摩擦係數較高或柔延性較高的材料產生非連續切屑，就表示切削情況甚差。
- 連續式切屑（Continuous Chips）（B）：對於柔延性低且摩擦係數低的材料而言，在切削過程

中，金屬在工具面上連續不斷的變形、流動，且穩定的作用在刀具上，因此，無論就表面精光度或工具壽命而言，都是一種甚為合理的切屑，且便於切削作用力的分析。

- 帶有堆積刃（Built-Up-Edge）的連續式切屑（C）：對於柔延性高且摩擦係數高的材料而言，在切削過程中，由於甚高的摩擦係數與切屑間的壓力，以致於有若干微粒粘結在刀具面上，當切削繼續進行，粘結的材料愈多，最後堆積到適當高度後，即隨切屑流失，或一部份嵌進工作面上。由於這種作用是週期性發生，所以加工面的光平程度遠較連續式切屑的表面低。一般而言，這種現象可藉由減少切屑厚度及增加傾角來減少。

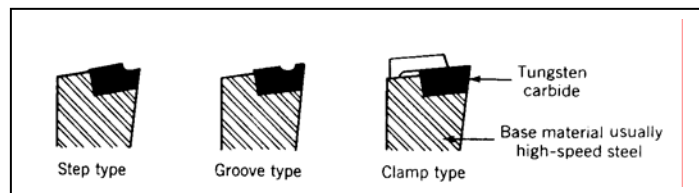
右圖所示為金屬切削時產生熱量的主要區域的分配值：

- 剪力面：60%
- 摩擦面：30%
- 工作物表面：10%



（一）切屑的控制

在高速生產中，為確保操作人員的安全及避免工具的損壞，切屑的控制與處置問題甚為重要，例如捲曲的切屑若不將之切斷或除去，必隨機器旋轉，而造成極大的困擾。為免除此危害，最好的辦法是不讓切屑成長，其方法則是在工具上作成一種形狀，能自動限制切屑的長度，此稱為切屑切斷器（Chip Breaker），常用的切屑切斷器有如右圖所示的三種（階梯式 Step Type、溝槽式 Groove Type、夾件式 Clamp Type）。



為了改進工具的切削效能，切削時可使用某種固體、液體、乳化液體或氣體等作為冷卻劑，以減少在切削過程中因壓力摩擦所產生的消耗，並帶走所產生的熱量。固體冷卻劑包括工作物本身所含的元素，如石墨；液體冷卻劑則有油基與水基兩種，可加入適當的加添物，以增加其效能；氣體冷卻劑包括水汽、二氧化碳及壓縮空氣等。其中，以液體冷卻劑的使用最為方便，除可用管子輸送以引導到任何地方外，更可循環使用，減少損失。

（二）冷卻劑

為了改進工具的切削效能，切削時可使用某種固體、液體、乳化液體或氣體等作為冷卻劑，以減少在切削過程中因壓力摩擦所產生的消耗，並帶走所產生的熱量。固體冷卻劑包括工作物本身所含的元素，如石墨；液體冷卻劑則有油基與水基兩種，可加入適當的加添物，以增加其效能；氣體冷卻劑包括水汽、二氧化碳及壓縮空氣等。其中，以液體冷卻劑的使用最為方便，除可用管子輸送以引導到任何地方外，更可循環使用，減少損失。

在切削過程中使用適當的冷卻劑，將可完成下列功能：

- 減少切屑、工具及工作物間的摩擦阻力。
- 降低工作物及工具的溫度。

- 沖除切屑離開工作區。
- 增進工作物表面的光平度。
- 減少動力消耗。
- 增加工具壽命。
- 減少工具及工作物可能的腐蝕。
- 減少堆積刃的形成。

至於所使用的冷卻劑，則必須具有下列各項性質：

- 無礙操作人員的健康與安全。
- 不損害機器。
- 高安定性。
- 良好的導熱性。
- 不揮發性。
- 不起泡沫。
- 富滑潤性。
- 高閃點溫度。

三、切削性與表面光平度

金屬的切削性（Machinability）又稱為易切性，是用來表示材料是否易於切削的性質，此一性質受工具材料及其幾何形狀的影響，因此金屬切削性的比較，只能基於某一重要因素而令其他因素不變下來進行，而所得的結果，也只是一種比較的數值或單位。

用來觀察、比較切削性的因素有：

- 工具壽命。
- 切削動力。
- 切除一定材料所需的費用。
- 加工後工作物的光平度。

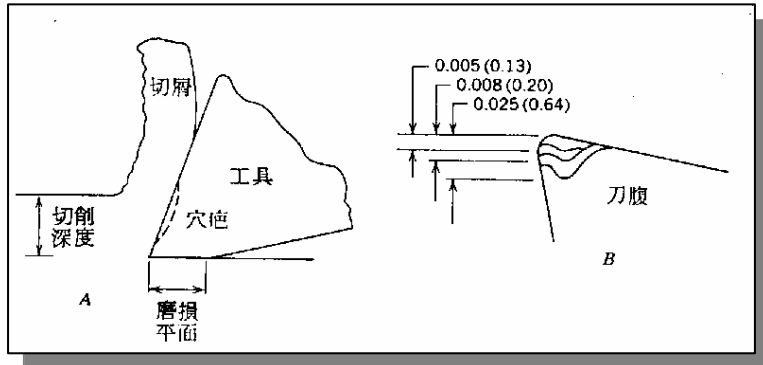
四、工具壽命

由於工具一經用鈍，自然必須停止工作，重新磨銳、裝置和調整試用妥當後，才可再正式操作，其間因停止生產而造成損失，因此，刀具的使用壽命對金屬切削是一個甚為重要的因素。所謂『工具壽命』是指工具由開始使用至工具不能繼續使用為止的全部時間。決定此時間的方法有數種，而各種方法所表示的工具壽命亦有若干差別，但最簡單的方法是以工具必須更換時所使用的時間，來表示工具壽命。

四種影響工具壽命的磨損包括：

- 磨料磨損：在工作物上有微細而硬度高的小粒，與工具相互磨擦使工具磨損。
- 黏著磨損：由於高溫使工作物產生塑性變形及磨擦作用，並進而使工作物黏著或熔接在工具刀鋒上。
- 擴散磨損：工作物與工具間金屬晶粒內的原子相互異位。
- 氧化磨損：高溫使工具氧化。

右圖所示為二個工具磨損的位置：

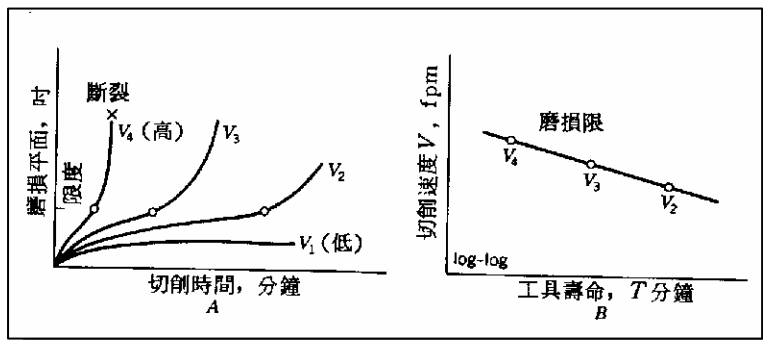


- 工具與工作物主體摩擦之面，稱為刀具之腹（Flank），磨損結果產生一段小平面，自刀鋒向後延伸到某一距離，使原有材料被磨失。

對碳化物工具而言，若寬度達到 0.030in；對高速鋼工具而言，若寬度達到 0.062in，則可認定此工具已失效，也就是說工具壽命已終了。

- 工具刀鋒後側若干距離的表面上，呈現一個小穴疤（Crater），是由於切屑在工具表面上摩擦而來。

至於切削速度與工具磨損間的關係可由右圖 A 表示，圖示中可以看出速度愈高，磨損愈快，且一經磨損到某一程度後，工具必須更換或磨銳，而對於低速度切削者，磨損程度小，且到達某一程度後即不再磨損。



西元 1906 年泰勒（Taylor）氏說明工具壽命與切削速度的關係：

$$VT^n = C$$

其中：

- V 為切度削速度
- T 為工具壽命
- n 為與切削情況有關的常數

C 為常數

下表為常見的工具材料的 n 與 C 值：

工作物 材料	高速工具鋼		碳化鎢	
	C	n	C	n
不銹鋼	170	0.08	400	0.16
中碳鋼	190	0.11	150	0.20
灰鑄鐵	75	0.14	130	0.25

五、切削速度與進給

切削速度的單位為呎／分鐘或公尺／秒，不論在車床工作中（工作物旋轉，工具固定）或銑切工作中（工具旋轉，工作物固定），切削速度總是表示工具與工作物間的相對速度：

$$V_c = \frac{\pi DN}{12} (rpm)$$

$$V_c = \frac{\pi DN}{60,000} (m / \min)$$

其中，D 為工作物或銑刀的直徑

下表為各種工作物材料的建議切削速度，其係根據工具壽命、表面情況與材料的可切削性等所作的協調性結果。（詳細資料可查詢刀具或切削相關資料）

工 材 料 種 類	工 具 種 類 及 切 速			
	高 速 鋼		碳 化 物	
	精切	粗切	精切	粗切
易切鋼,1112,1315	250-350	80-150	600-750	350-450
碳鋼,1010,1025	225-300	75-125	550-700	300-400
中碳鋼,1030,1050	200-275	70-120	450-600	250-350

進給（Feed）則表示切削工具或磨床上的磨輪沿工作面前進的速度，對旋轉的工作物而言，以每轉一圈所前進的距離來表示，對工作物或工具作往復移動者而言，如牛頭鉋床或平鉋床或平面磨床等，

則以每一行程兩者橫向的相互移動量來表示。

在車削加工中，與進給有關的因素可以表示成：

$$t_m = \frac{L}{fN} = \frac{L\pi D}{12Vcf}$$

在鑽孔加工中，與進給有關的因素可以表示成：

$$t_m = Lfdt$$

在銑床加工中，與進給有關的因素可以表示成：

$$t_m = \frac{L\pi D_c}{12Vcnf_t}$$

其中， t_m 為切削時間

L 為切削長度

D 為切削直徑

f 為銑刀每轉每齒的進給量

n 為銑刀齒數

fdt 為鑽孔或攻螺絲紋每前進一吋所需的時間

N 為每分鐘轉數 rpm

f 為進給速度 (mm/r 或 ipr)

六、切削長度

切削長度 L 是切削工具或工作檯在一定的進給速度下所移動的距離：

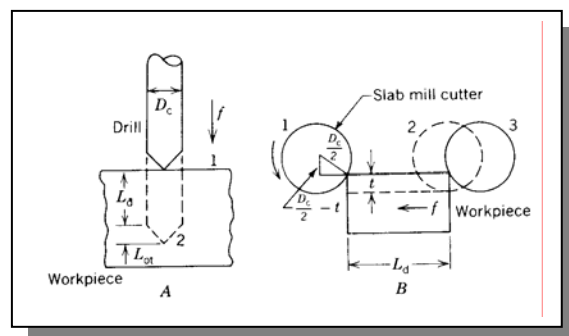
$$L = L_s + L_a + L_d + L_{ot}$$

其中， L_s 為安全距離（夾持工作物材料的長度）

L_a 為由工具幾何形狀所產生的接近長度（在車床上可以不計，但在鑽床與銑床上則表示刀尖與工作物接觸到完全開始切削的距離）

L_d 為工作物設計上所需的加工長度

L_{ot} 為由工具幾何形狀所產生的超越長度



七、切削費用

切削費用 = 單位時間費用 × 加工時間 (tm)

八、金屬切除率

在車削加工中，材料切除率： $Q = 12 \times t \times f \times Vc$

其中，t 為切削深度

f 為進給率

在鑽孔加工中，材料切除率： $Q = \frac{Dc^2 \pi f}{4}$

其中，Dc 為鑽頭直徑

f 為進給率

在銑切加工中，材料切除率： $Q = w \times t \times f$

其中，w 為銑刀寬度

f 為進給率

t 為銑切深度

切削費用 = 單位時間費用 × 加工時間 (tm)

九、馬力

以金屬切除率來計算車削、鑽孔與銑切等所需的功率為： $HP_s = Q \times P$

其中，Q 為金屬切除率

P 為切除金屬所需的馬力數

下表為常見金屬材料的平均單位功率 (P)：

材料	車削	鑽孔	銑切
不銹鋼	1.3	1.3	1.4
中碳鋼	1.4	1.2	1.6
灰口鑄鐵	1.8	1.4	1.8

