

非傳統加工

第二章 放電加工

- 授課教師：藍翔耀
- 研究室：復華樓B406室(機械系4樓)
- 電話：機械系(02)27867048 分機38
- E-mail：lan@cc.cust.edu.tw
- 教學網頁：<http://cc.cust.edu.tw/~lan>

第二章 放電加工

Electric Discharge Machining

- 第一節 放電加工的基本原理和特點
- 第二節 放電加工機的種類
- 第三節 放電加工參數與加工特性
- 第四節 放電加工之特殊應用
- 第五節 放電複合加工

第一節 放電加工的基本原理和特點

- 2-1-1 放電加工的基本原理
- 2-1-2 放電加工特點和應用範圍
- 2-1-3 放電加工原理解說
- 2-1-4 放電加工用的脈衝電源

2-1-1

放電加工的基本原理

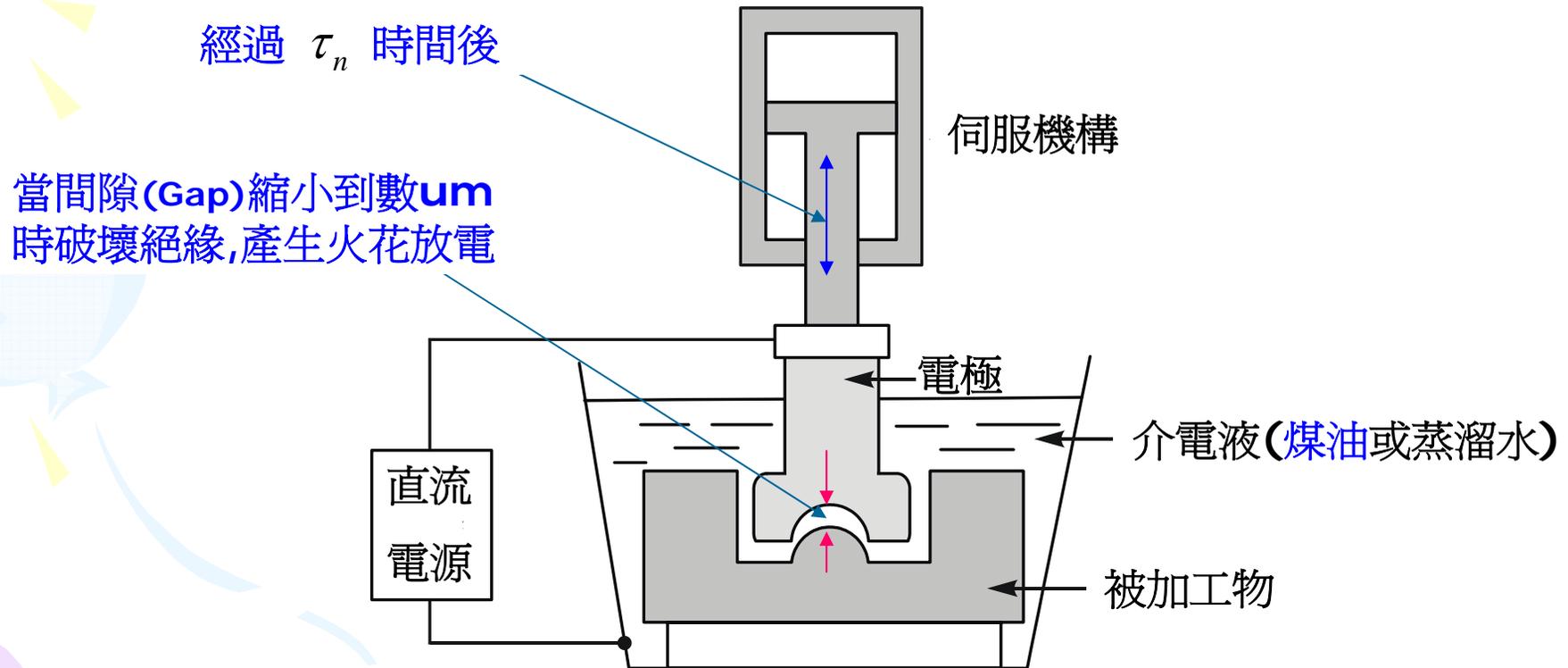
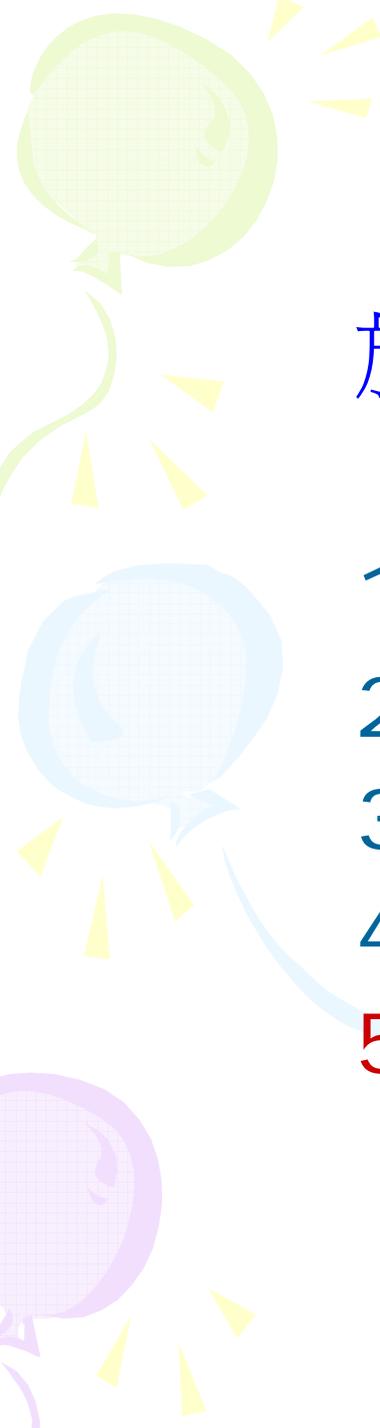


Fig 2.1 放電加工機的原理

2-1-2 放電加工特點和應用範圍

放電加工之優點：

- 1.能導電即可加工。
- 2.加工硬化處理之工件。
- 3.加工斷裂於工件內之螺絲攻、鑽頭。
- 4.電極與工件不接觸，無切削內應力。
- 5.加工後無毛邊。
- 6.加工薄脆工件。
- 7.鏡面加工。
- 8.加工過程自動化，一人同時操作數部機器。
- 9.切削複雜形狀工件。
- 10.製作完全吻合之上下模。



放電加工之缺點：

1. 工件需能導電。
2. 加工速度慢。
3. 工件表面脆硬且有些微裂縫。
4. 加工前須製作電極。
5. 操作人員需要相當的經驗。

放電加工的基本原理

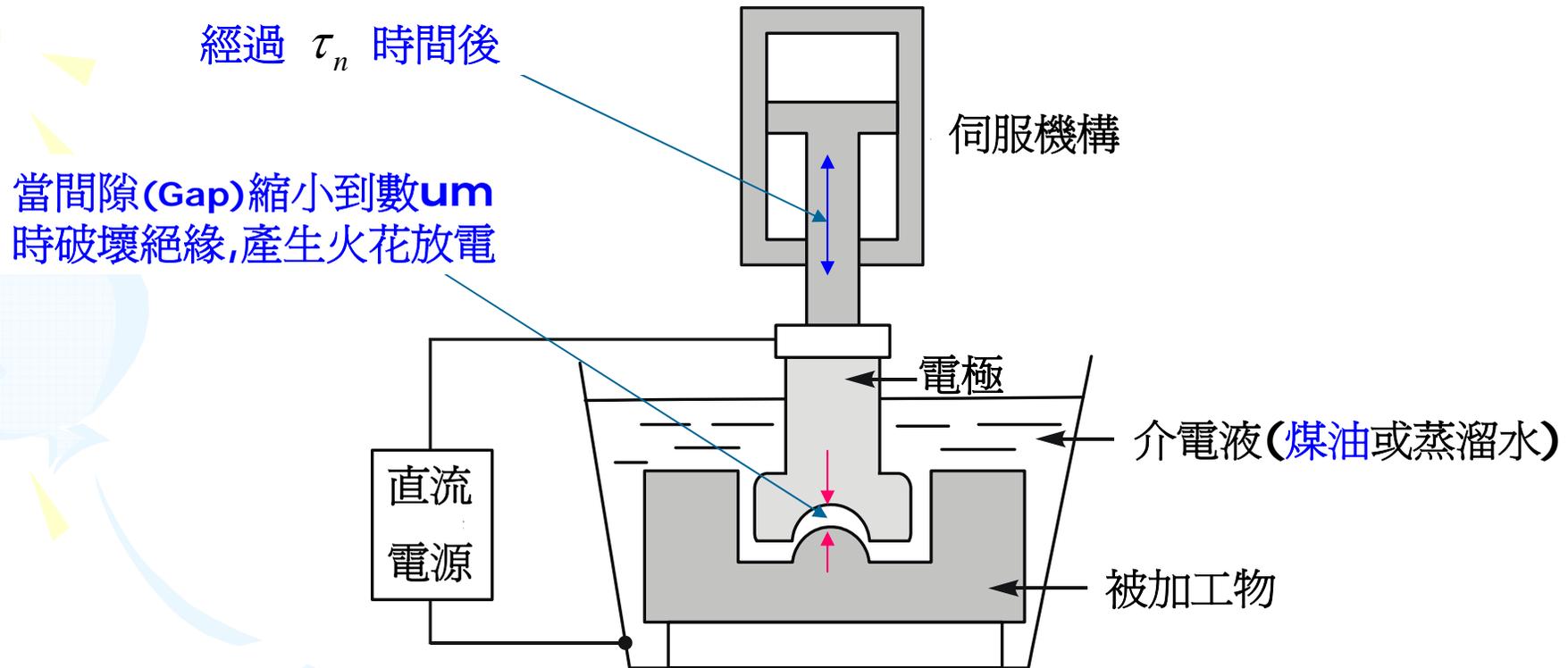


Fig 2.1 放電加工機的原理

2-1-3

放電加工原理解說

1. SW1, power on, 但 SW2 還絕緣
故, 電流 $I_g = 0$, 電壓 = E_0

2. 電極達設定時間 τ_n , 電極導通 SW2 變 on ,
此時電流 = 設定電流 I_p , 電壓 $E_g = I_p \cdot R_2$

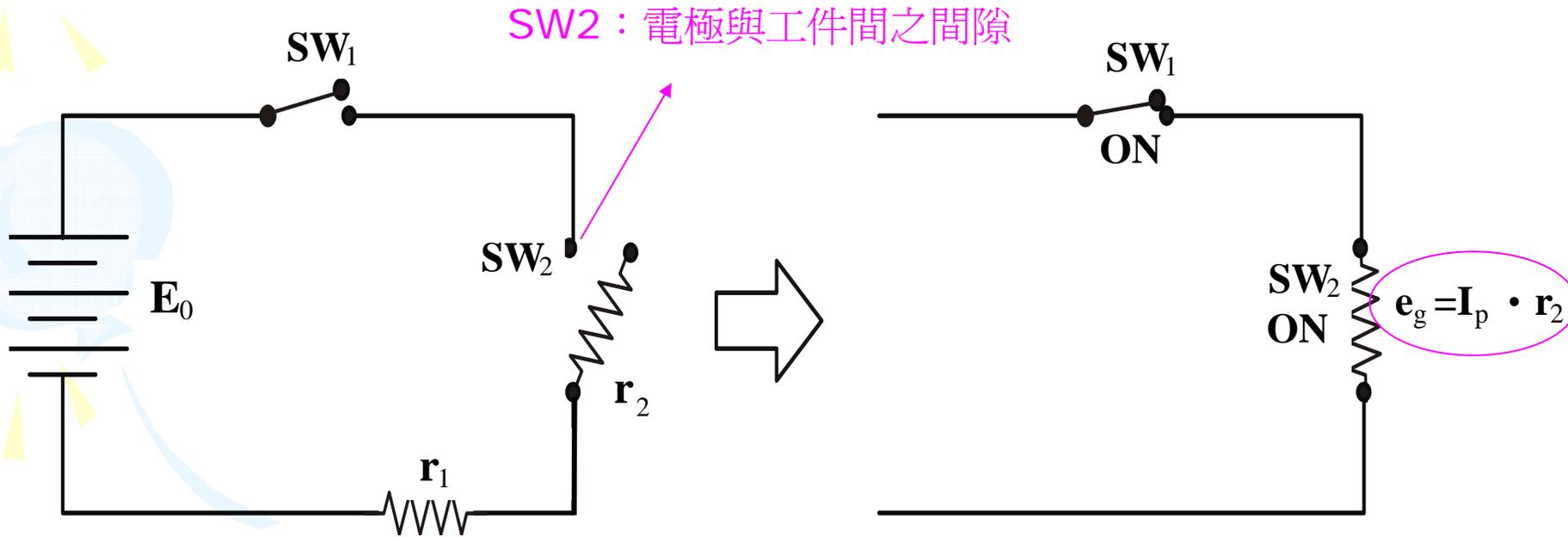


圖2-2 放電加工之原理解說

1. SW1, power on, 但 SW2 還絕緣
故, 電流 $I_g = 0$, 電壓 = E_0

2. 電極達設定時間 τ_n , 電極導通
SW2 變 on , 此時電流 = 設定電流 I_p
, 電壓 $E_g = I_p \cdot R_2$

3. 當到達加工設定時間 τ_p , SW1 關掉
變 off , 此時 SW2 = off

4. 休息一段設定時間 τ_r , SW1 再打開
變 on , 進行下一循環的加工

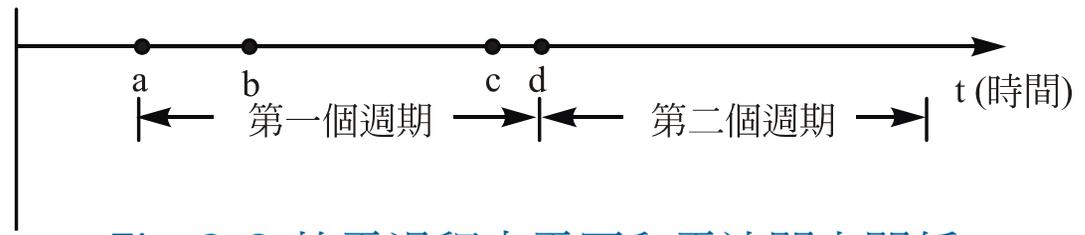
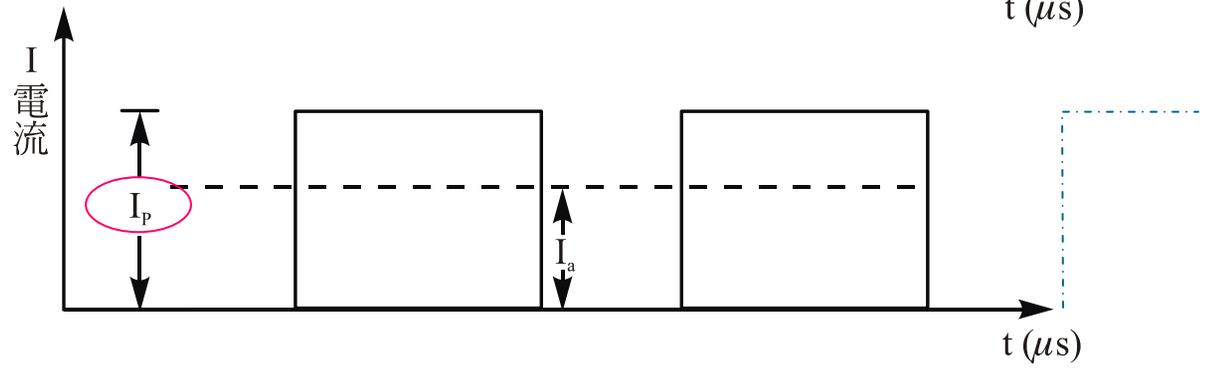
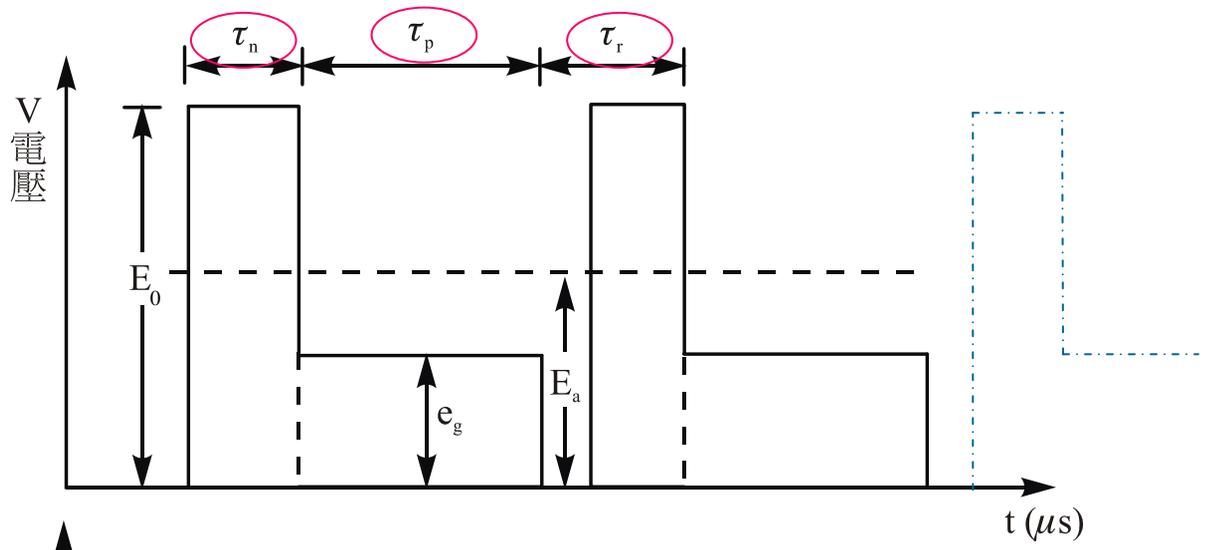


Fig 2.3 放電過程中電壓和電流間之關係

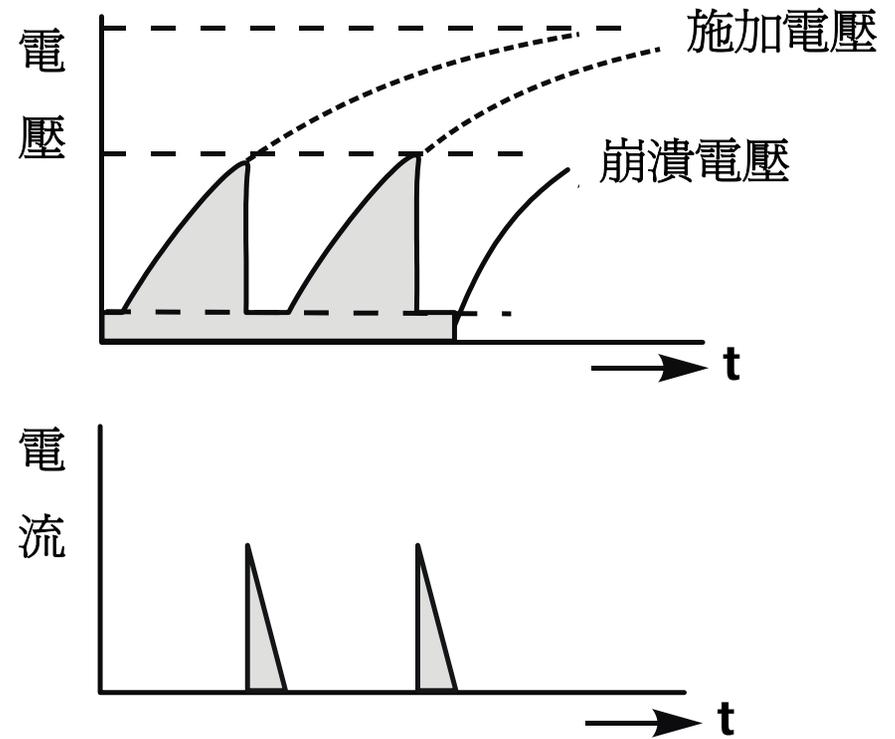
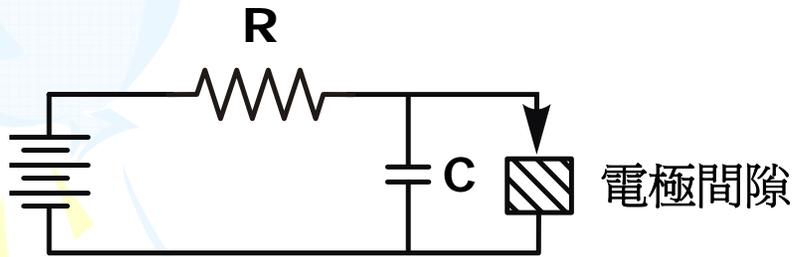
2-1-4

放電加工用的脈衝電源

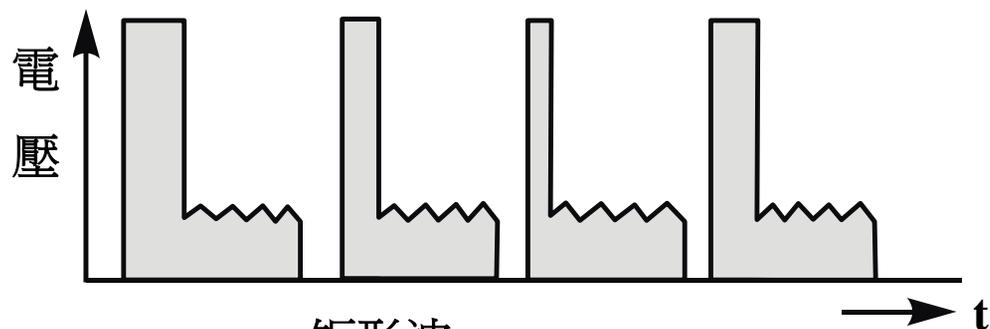
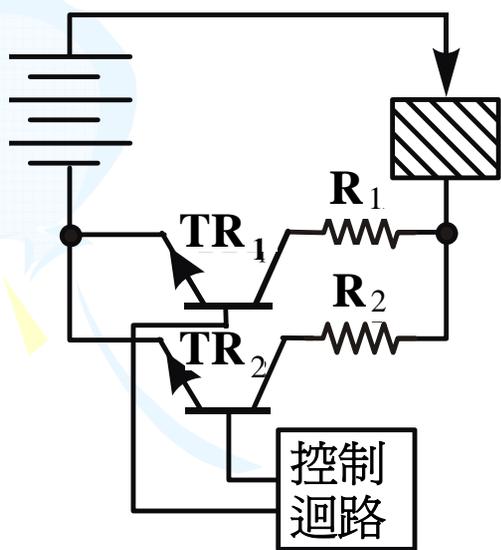
- 多採方波(矩形波)脈衝電源

高低壓複合波脈衝電源	<ol style="list-style-type: none">1.提高電極間隙擊穿機率大2.峰值電壓高，放電間隙大，利於切屑排除
矩形波分組脈衝電源	<ol style="list-style-type: none">1.可獲得較細表面粗糙度且有較高加工速度2.減小單個脈衝能量而提高放電脈衝頻率
階梯波脈衝電源	<ol style="list-style-type: none">1.在不太降低生產率情況下，減少電極損耗2.實現高消耗放電加工之工具進給調節系統

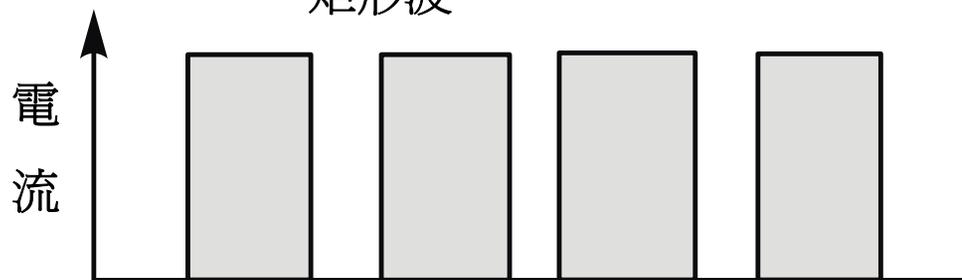
電容器放電波形



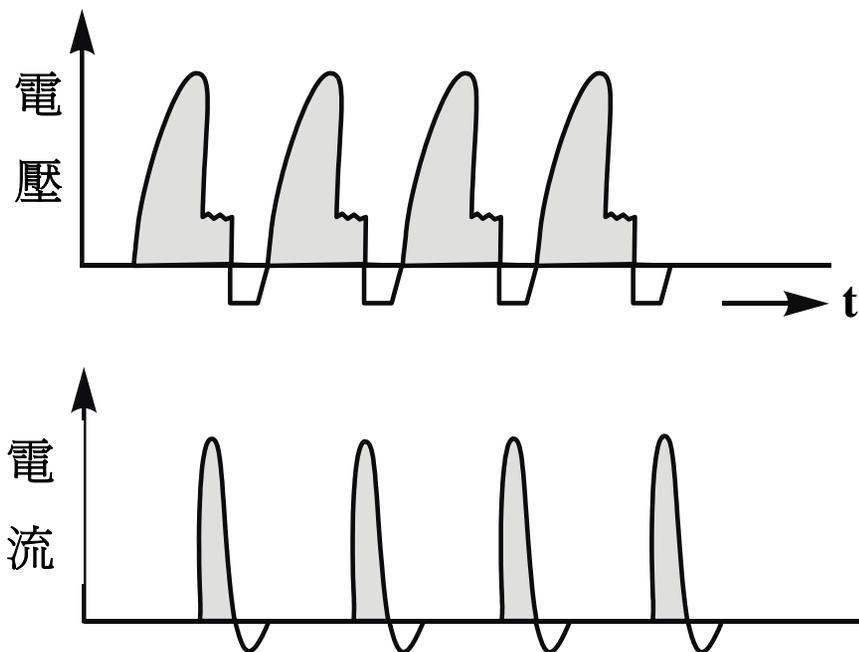
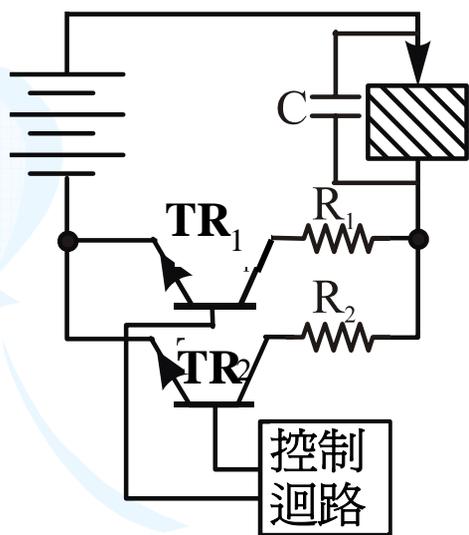
電晶體放電波形



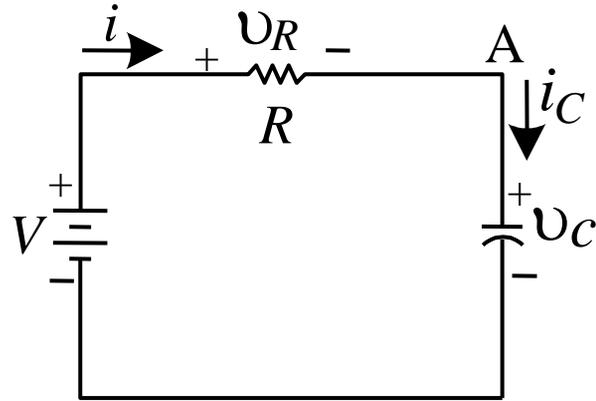
矩形波



電容器與電晶體混合放電波形



補充 有驅動之 RC 電路 (電容充電)



▲ 圖9-15 有驅動之 RC 電路

$$i_C = i \quad \dots\dots\dots (9-25)$$

$$i = \frac{v_R}{R} = \frac{V - v_C}{R} \quad \text{(a)} \quad \dots\dots\dots (9-26)$$

$$i_C = C \frac{dv_C}{dt} \quad \text{(b)} \quad \dots\dots\dots (9-26)$$

$$\frac{dv_C}{dt} + \frac{1}{RC} v_C = \frac{V}{RC} \quad \dots\dots\dots (9-27)$$

電容之電壓方程式：

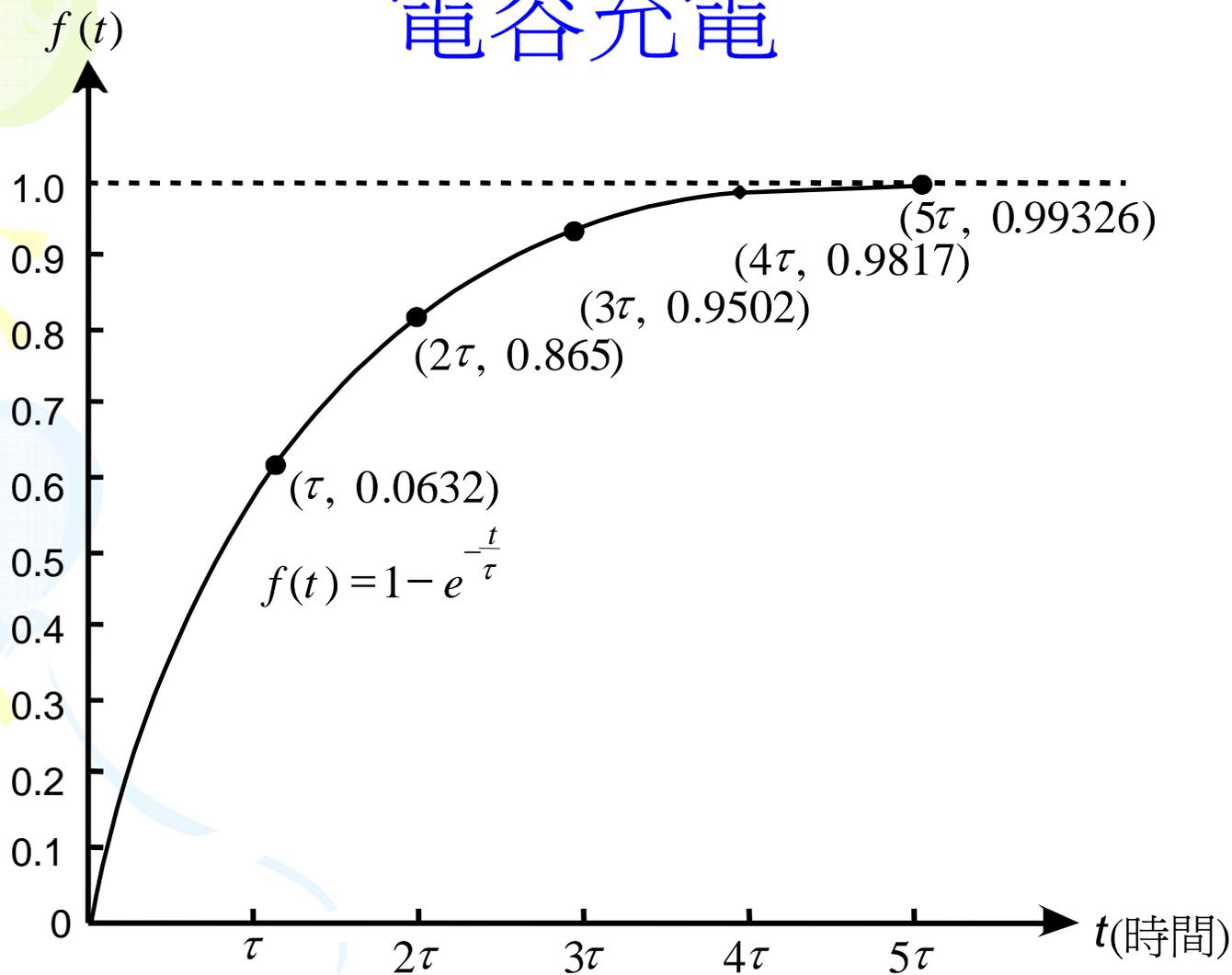
$$v_C(t) = V(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (\text{V}) \quad \dots\dots\dots (9-28)$$

$$v_C(t) = V(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (\text{V}) \quad \dots\dots\dots (9-29)$$

表 9-4 $1 - e^{-\frac{t}{\tau}}$ 之值

T	$e^{-\frac{t}{\tau}}$	$e^{-\frac{t}{\tau}}$ 常用值	$1 - e^{-\frac{t}{\tau}}$ 之值
0	$e^0 = 1$	$e^0 = 1.00$	$1 - e^0 = 0$
τ	$e^{-1} = 0.367879\dots$	$e^{-1} = 0.368$	$1 - e^{-1} = 0.632$
2τ	$e^{-2} = 0.135335\dots$	$e^{-2} = 0.135$	$1 - e^{-2} = 0.865$
3τ	$e^{-3} = 0.049787\dots$	$e^{-3} = 0.0498$	$1 - e^{-3} = 0.9502$
4τ	$e^{-4} = 0.018315\dots$	$e^{-4} = 0.0183$	$1 - e^{-4} = 0.9817$
5τ	$e^{-5} = 0.006737\dots$	$e^{-5} = 0.00674$	$1 - e^{-5} = 0.99326$

電容充電



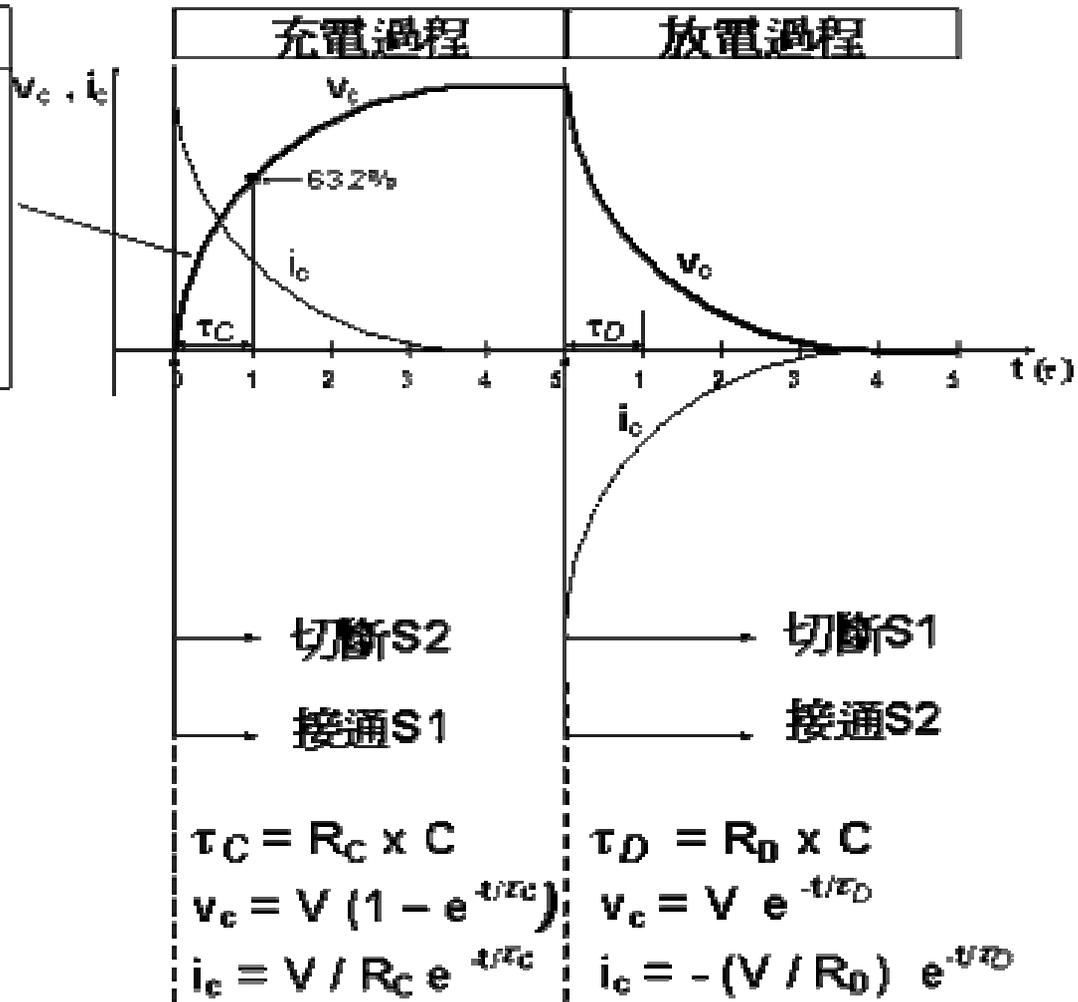
▲ 圖9-16 對時間常數 τ 之遞增指數曲線

藍翔耀 老師

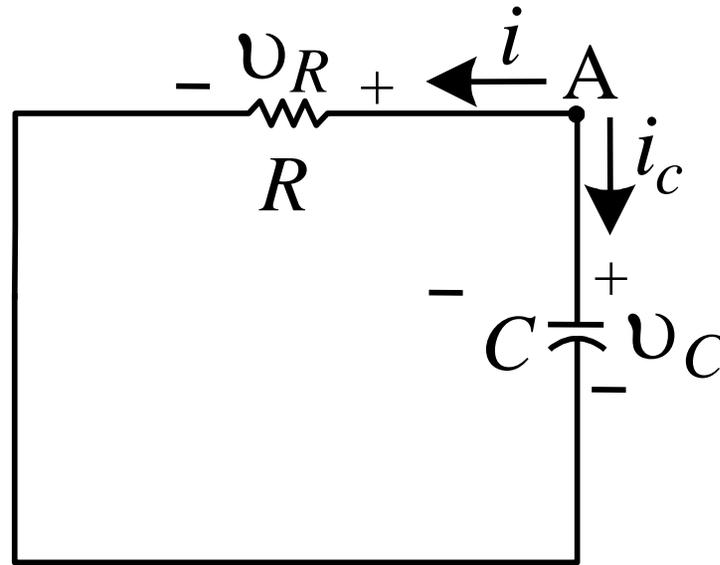
電容充電

充電過程
 V_c 對 τ_c

τ_c	百分比(V)
0	0%
1 τ_c	63.2%
2 τ_c	86.5%
3 τ_c	95%
4 τ_c	98.2%
5 τ_c	100%



電容放電



▲ 圖9-13 無源 RC 電路 (電容放電)

$$C \frac{dv_C}{dt} + \frac{v_C}{R} = 0 \quad \dots\dots\dots (9-21)$$

$$\frac{dv_C}{dt} + \frac{1}{RC} v_C = 0 \quad \dots\dots\dots (9-22)$$

電容之電壓 $v_C(t)$:



$$v_C(t) = V_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \text{ (V)} \dots\dots\dots (9-23)$$

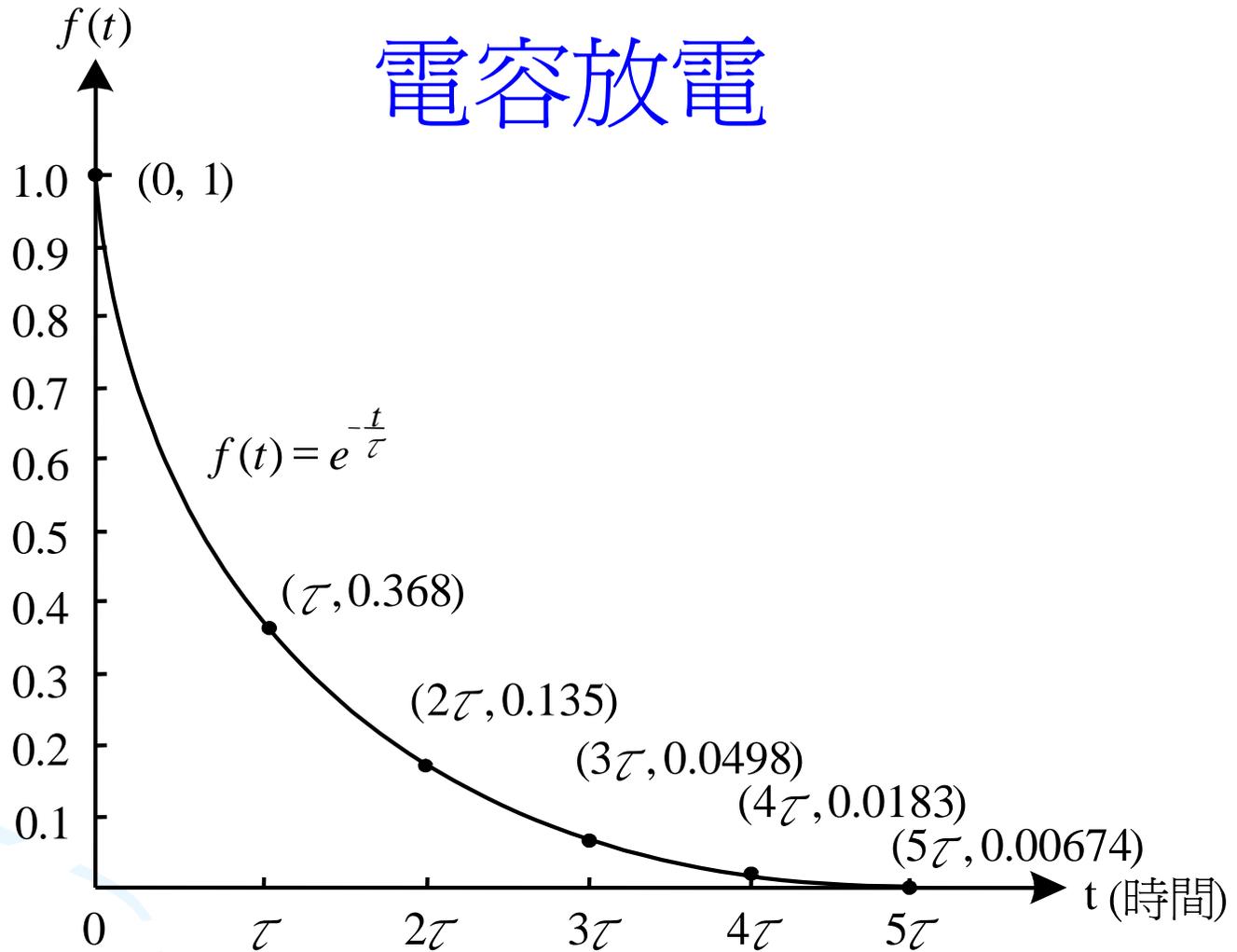
$$v_C(t) = V_0 e^{-\frac{t}{RC}} \text{ (V)} \dots\dots\dots (9-24)$$

表 9-3 $e^{-\frac{t}{\tau}}$ 之值

T	$e^{-\frac{t}{\tau}}$	$e^{-\frac{t}{\tau}}$ 常用值
0	$e^0 = 1$	$e^0 = 1.00$
τ	$e^{-1} = 0.367879\dots$	$e^{-1} = 0.368$
2τ	$e^{-2} = 0.135335\dots$	$e^{-2} = 0.135$
3τ	$e^{-3} = 0.049787\dots$	$e^{-3} = 0.0498$
4τ	$e^{-4} = 0.018315\dots$	$e^{-4} = 0.0183$
5τ	$e^{-5} = 0.006737\dots$	$e^{-5} = 0.00674$

* $e^{-\frac{t}{\tau}}$ 常用值，取有效位數三位。

電容放電



▲ 圖9-14 對時間常數 τ 之遞減指數曲線

藍翔耀 老師

補充

電晶體特性



二極體：正向電流導通，逆向電流截止

電晶體：就像 2 個二集體連在一起

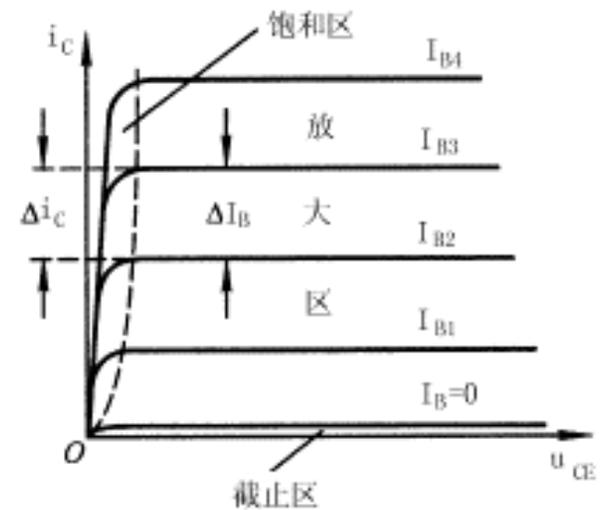
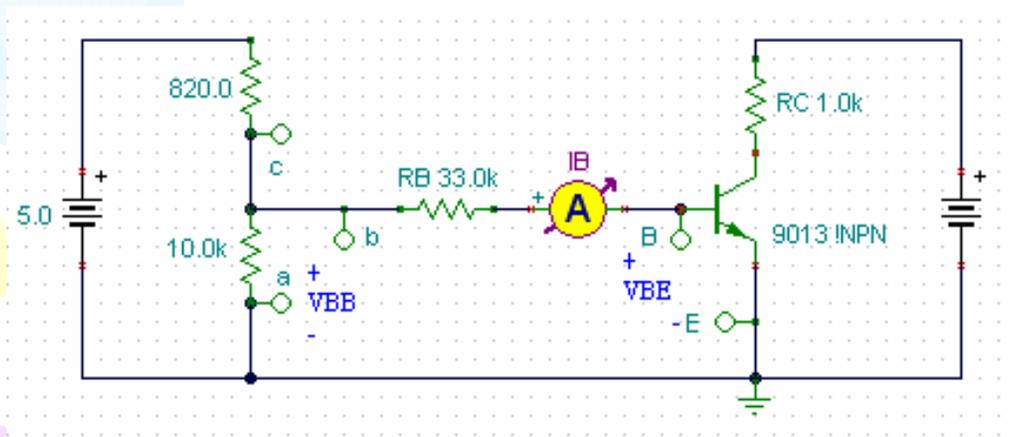


图 5-7



第二節 放電加工機的種類

- 2-2-1 型雕放電加工機
- 2-2-2 線切割放電加工機
- 2-2-3 深孔放電加工機
- 2-2-4 微放電加工機

型雕放電加工機

- 將柱狀電極、加工過之複雜形狀電極夾持加工機機頭上
- 以伺服機構做Z軸方向移動；做沉孔或貫穿孔加工
- 此放電加工機亦有由電腦控制進給及位置之CNC放電加工機



圖2-5 型雕放電加工機及其加工成品
(慶鴻機電工業公司提供)

線切割放電加工機

- 將電極改為線狀
- 以連續送出之細線為電極，精度加工成任意輪廓形狀
- 製作三次元模具，如沖剪模、擠製模、引伸模、燒結模，試作品、輪廓規加工、微細加工

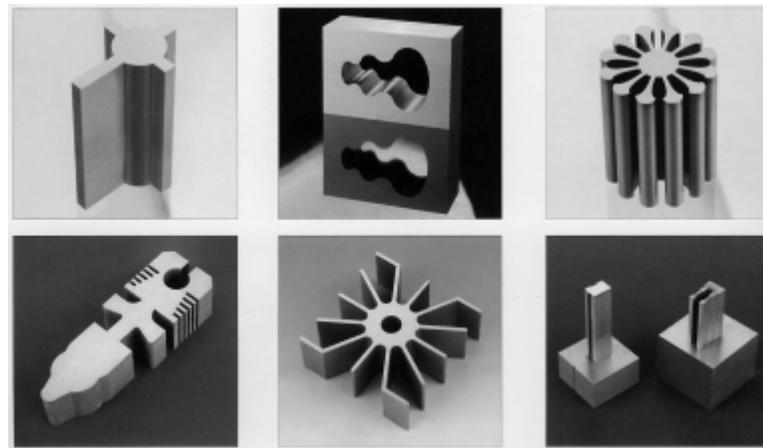


圖2-6 線切割放電加工機及其加工成品（慶藍翔耀 老師 鴻機電工業公司提供）

深孔放電加工機

- 主要是進行3mm以下之細孔放電加工
- 電極為管狀，中央通以高壓水柱以衝離加工粉渣
- 主要為加工線切割穿線時所需的小孔。

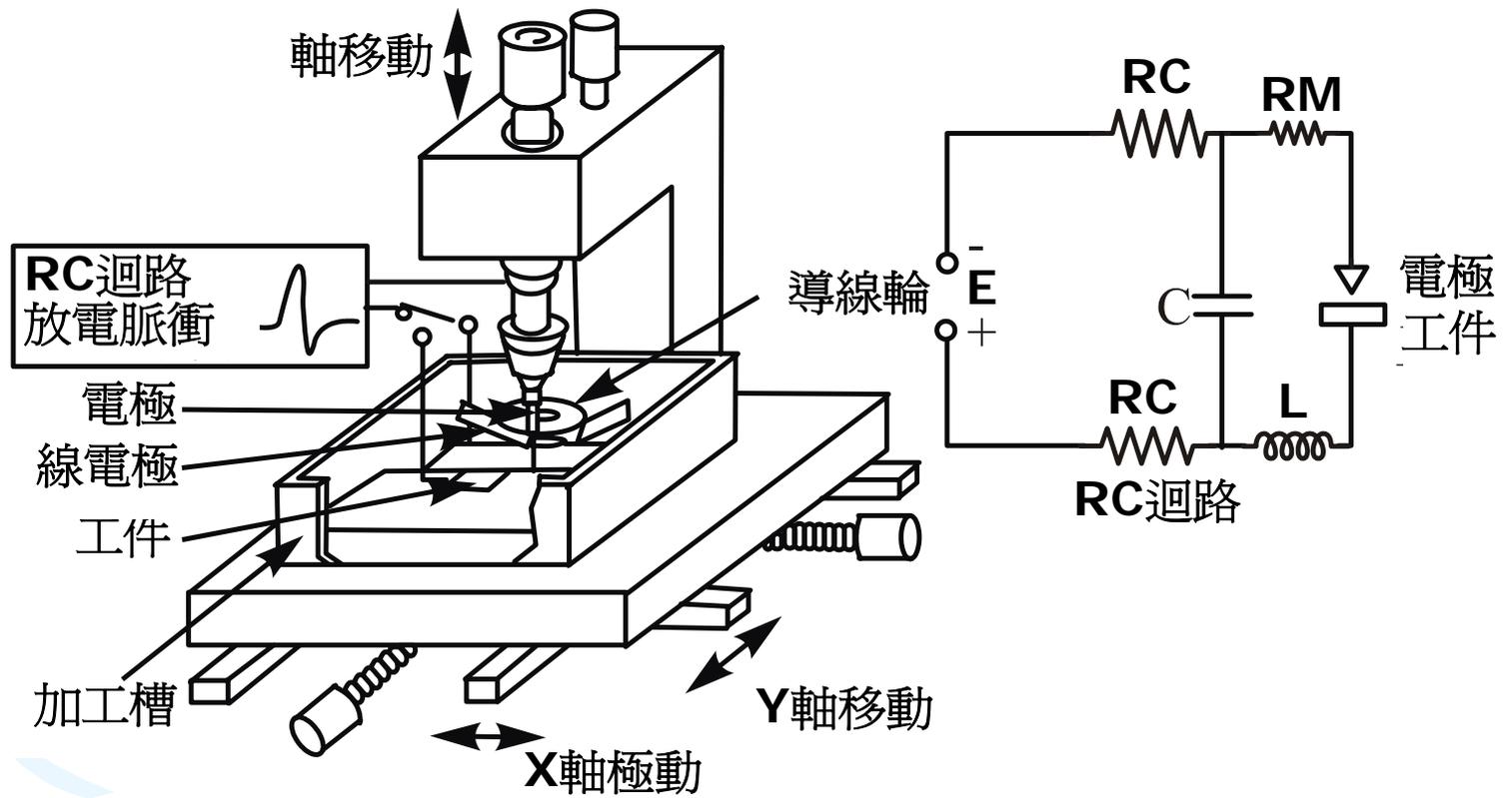


藍翔耀 老師

圖2-7 深孔放電加工機（慶鴻機電工業公司提供）

微放電加工機

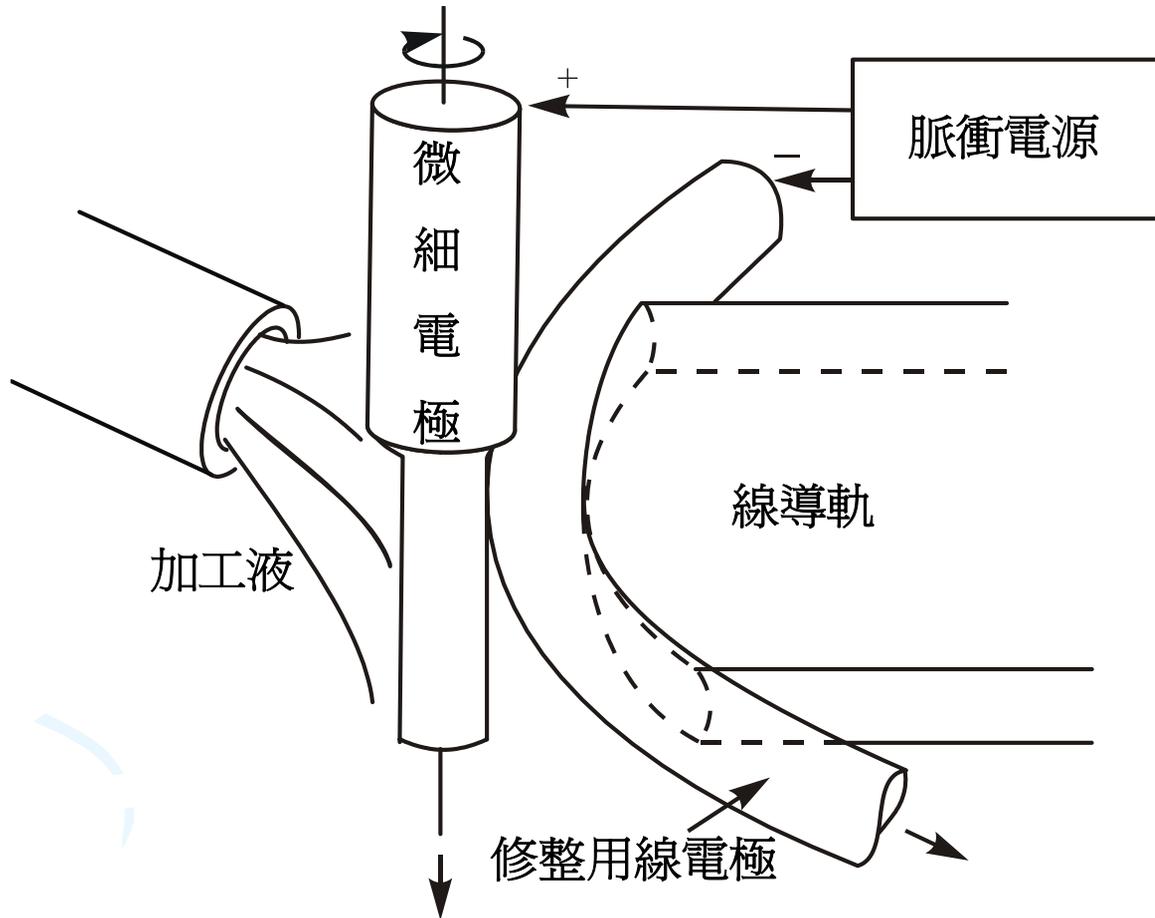
- 主要用於微小模具的加工
- 線切割細小電極，再將其尖端加工更細，並對模具進行一層層放電銑削或放電研磨加工
- 微細電極的直徑通常在0.10mm以下



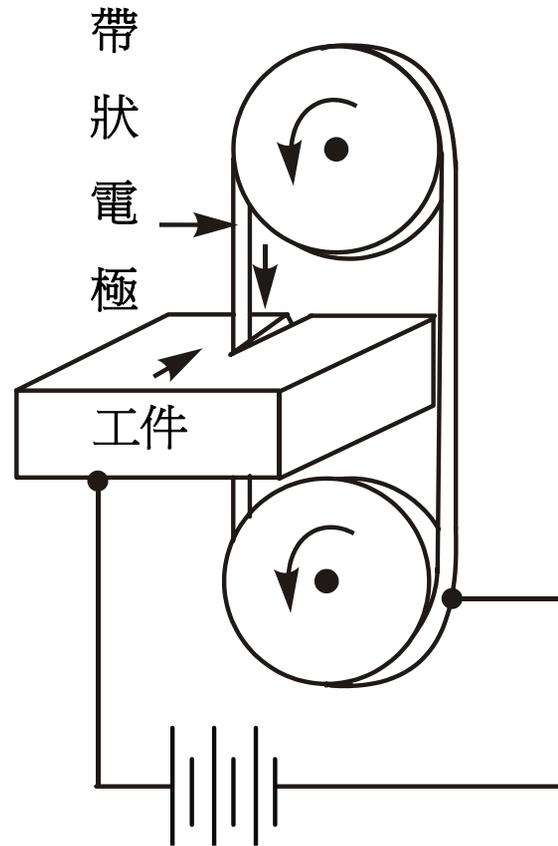
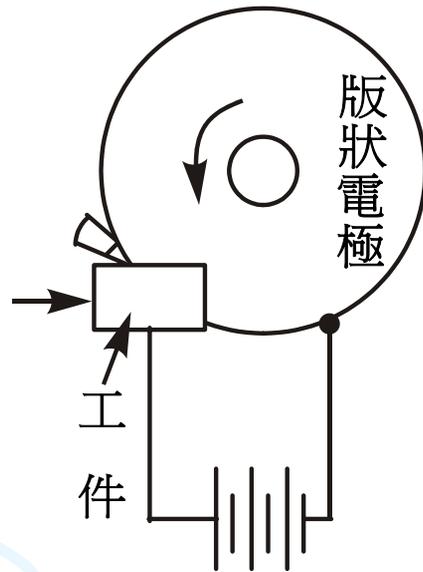
微放電加工機之構造圖

WEDG中微細電極之加工原理

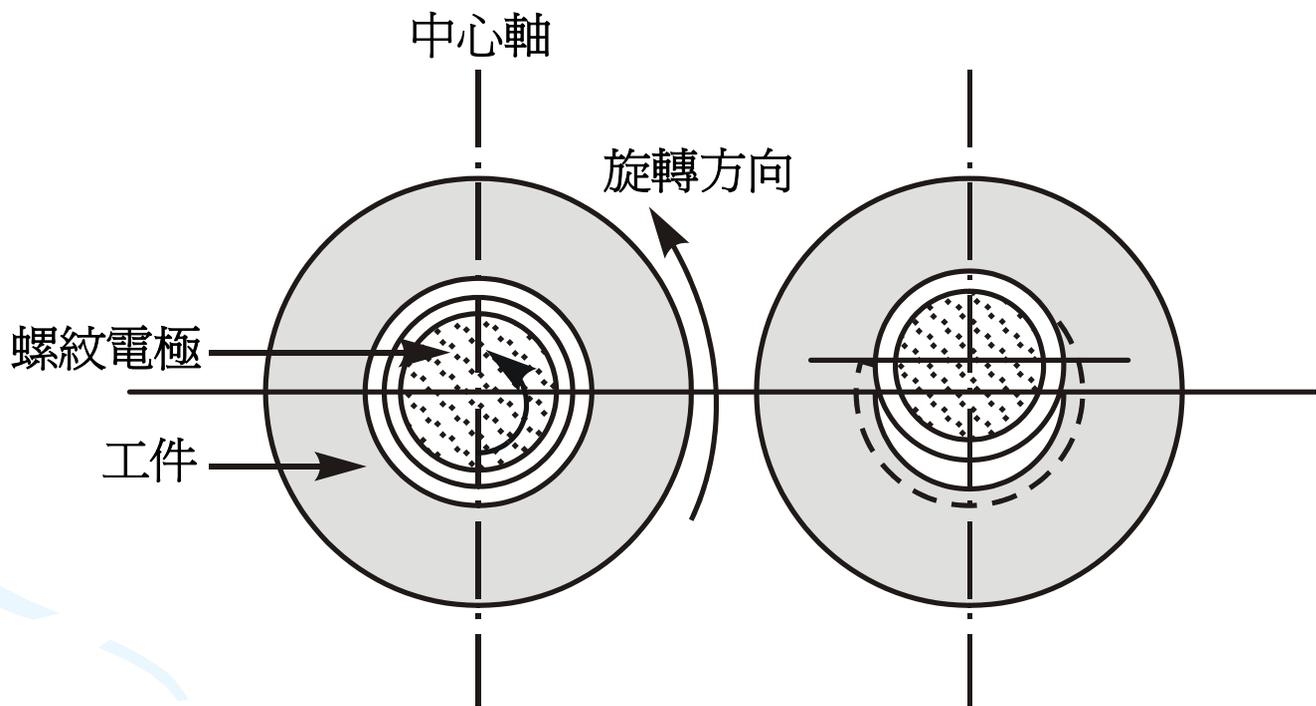
線式放電研削 (**wire electric discharge grinding**)



放電切斷機示意圖



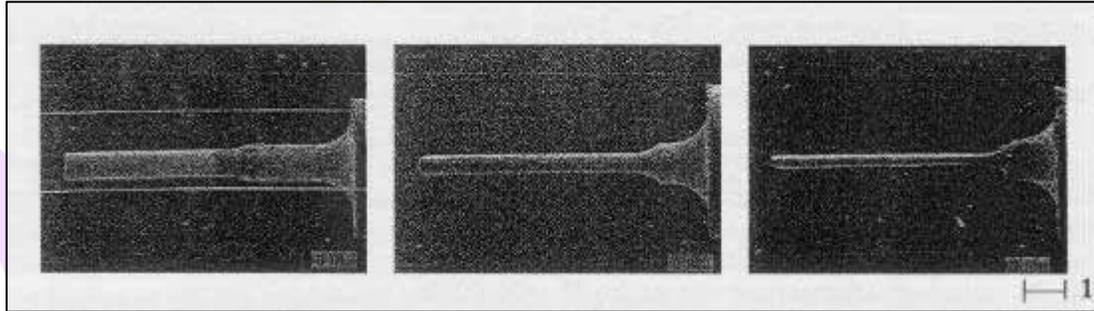
放電同步回轉加工內螺紋



線式放電研削

wire electric discharge grinding, (WEDG)

$D=0.00A28mm$

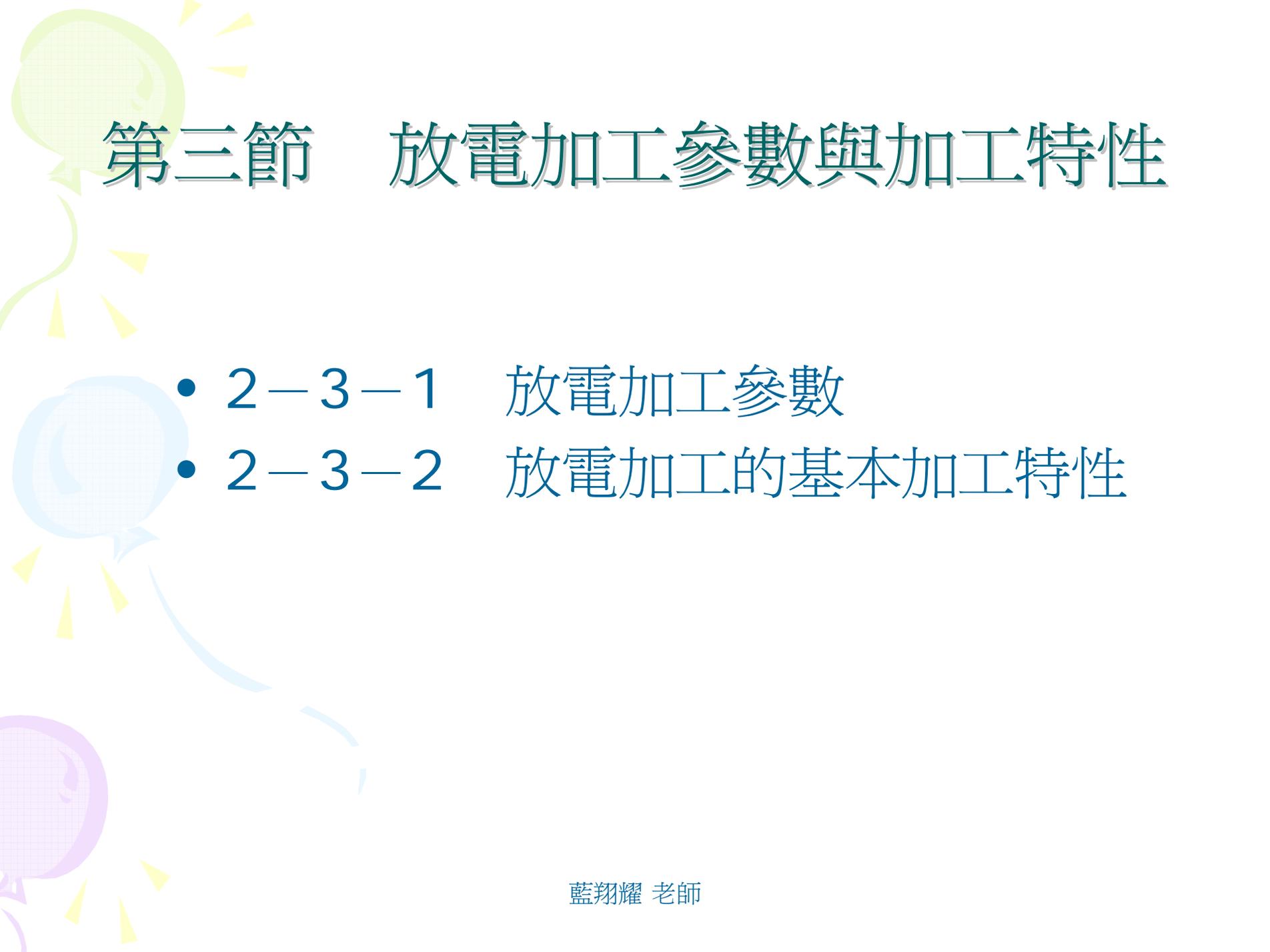


(a) 棒狀微細電極



(b) 盤狀微細電極

線式放電研削加工後之微細電極



第三節 放電加工參數與加工特性

- 2-3-1 放電加工參數
- 2-3-2 放電加工的基本加工特性

1. SW1, power on, 但 SW2 還絕緣
故, 電流 $I_g = 0$, 電壓 = E_0

2. 電極達設定時間 τ_n , 電極導通
SW2 變 on , 此時電流 = 設定電流 I_p
, 電壓 $E_g = I_p \cdot R_2$

3. 當到達加工設定時間 τ_p , SW1 關掉
變 off , 此時 SW2 = off

4. 休息一段設定時間 τ_r , SW1 再打開
變 on , 進行下一循環的加工

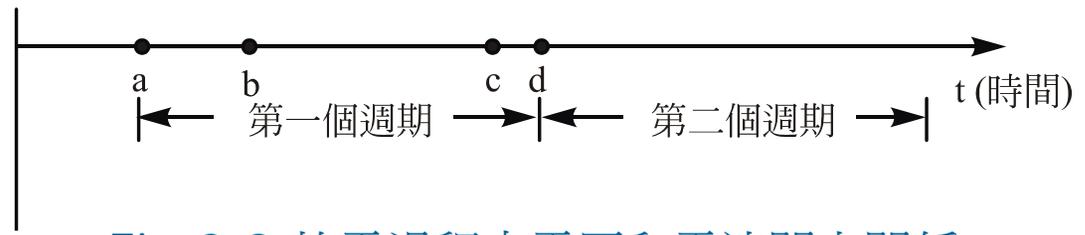
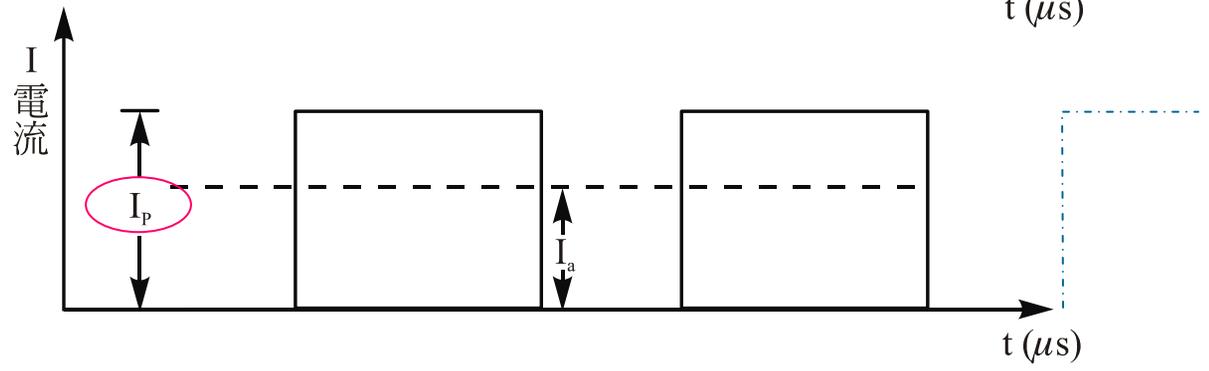
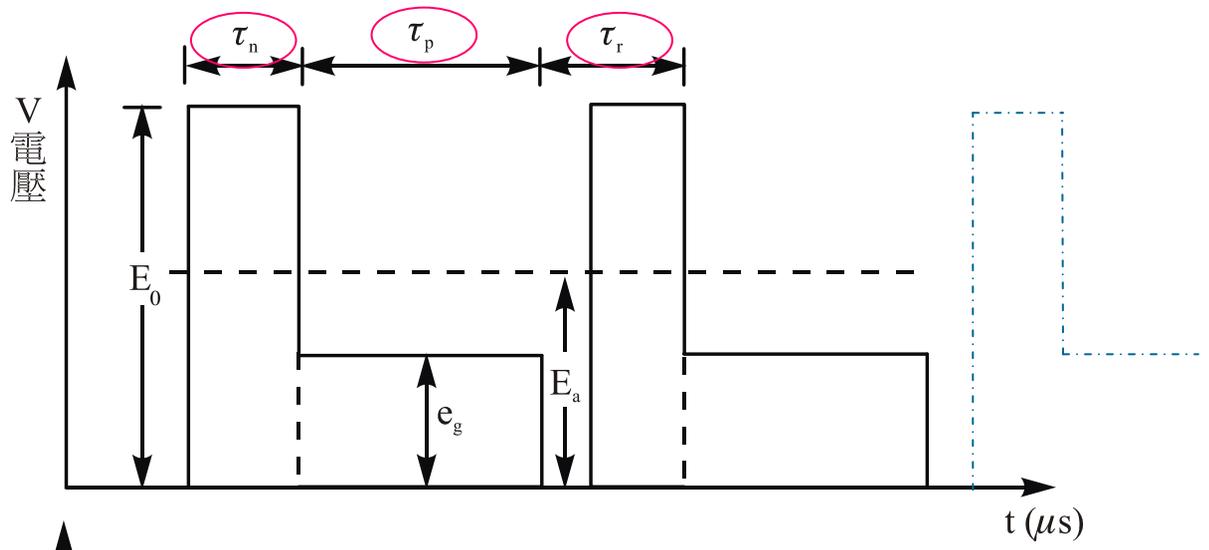


Fig 2.3 放電過程中電壓和電流間之關係

放電加工參數

- 峰值電流 (A)
- 間隙火花放電時脈衝電流的最大值 (瞬時值)
- 影響生產率、表面粗糙度
- 電流愈大，放電能量愈大加工速度變大，但加工面之表面亦愈粗糙。

放電脈衝寬 (τ_p)

- 加到工具和工件上放電間隙兩端的電壓脈衝的持續時間
- 放電加工只能用斷斷續續的脈衝電壓波以防止電弧燒傷
- 時間愈長表放電能量愈大，加工速度、表面粗度亦變大

脈衝休止寬 (τ_r)

- 兩電壓脈衝間之間隔時間
- 時間愈長，加工速度愈慢
- 過短之脈衝休止寬將使放電間隙來不及消電離和恢復絕緣，易產生電弧放電，燒傷工具和工件

峰值電壓 (V)

- 間隙開路時電極間最高電壓，等於電源的直流電壓
- 峰值電壓高時放電間隙大，生產率高，但成形精度稍差

電極極性

- 電極極性的選擇通常由電極與工件的材質來決定
- 正確之極性可得到較快之加工速度及較小之電極消耗

電極材質

- 紅銅電極：質細，製造精密花紋模電極，精車、磨加工難。
- 石墨電極：適用大脈衝寬、電流之型腔加工。易脫落掉渣。
- 黃銅電極：耗損較一般電極大，用於簡單模具、通孔加工。
- 鑄鐵電極：價格低，適複合脈衝電源加工，適冷衝模加工。
- 鋼電極：與鑄鐵電極相比穩定性差，電極和衝頭可合體。

加工液

水性加工液
(線切割放電加工機)

碳氫化合物加工液
(雕模放電加工機)

低黏度礦油系加工液

合成碳氫化合物系加工液

高速合成系加工液

黏度低

燃點及沸點高

絕緣性佳

冷卻性佳

具經濟性

易排出加工切屑及積碳

加工液 沖刷方式

管狀電極

中央噴流

中央吸流

一般塊狀
柱狀電極

工件底部噴流

工件底部吸流
及側噴法

放電加工的放電間隙

- 放電加工的放電間隙：放電加工時必須使工具和工件之間始終保持某一較小的放電間隙。
- 間隙過大，所加電壓擊不穿間隙，形成開路，不能放電加工。
- 間隙過小，形成短路，亦無法放電加工。
- 工具電極自動進給調節裝置和系統是放電加工機床的重要組成部分。



放電加工的基本加工特性

加工速度
(V_w)

表面粗糙度
(R_a)

放電間隙
(加工間隙)

電極消耗和
電極消耗比

第四節 放電加工之特殊應用

- 2-4-1 放電磨削
- 2-4-1-1 放電小孔磨削
- 2-4-1-2 刀刃放電研磨
- 2-4-2 放電切割
- 2-4-3 放電對磨
- 2-4-4 共軛回轉式放電加工
- 2-4-5 放電表面硬化
- 2-4-6 放電刻字
- 2-4-7 放電披覆
- 2-4-8 放電塑性加工

放電磨削

放電小孔磨削

刀刀放電研磨

放電鏜磨

內孔磨削

外圓磨削

平面磨削

成形磨削

放電磨削之示意圖

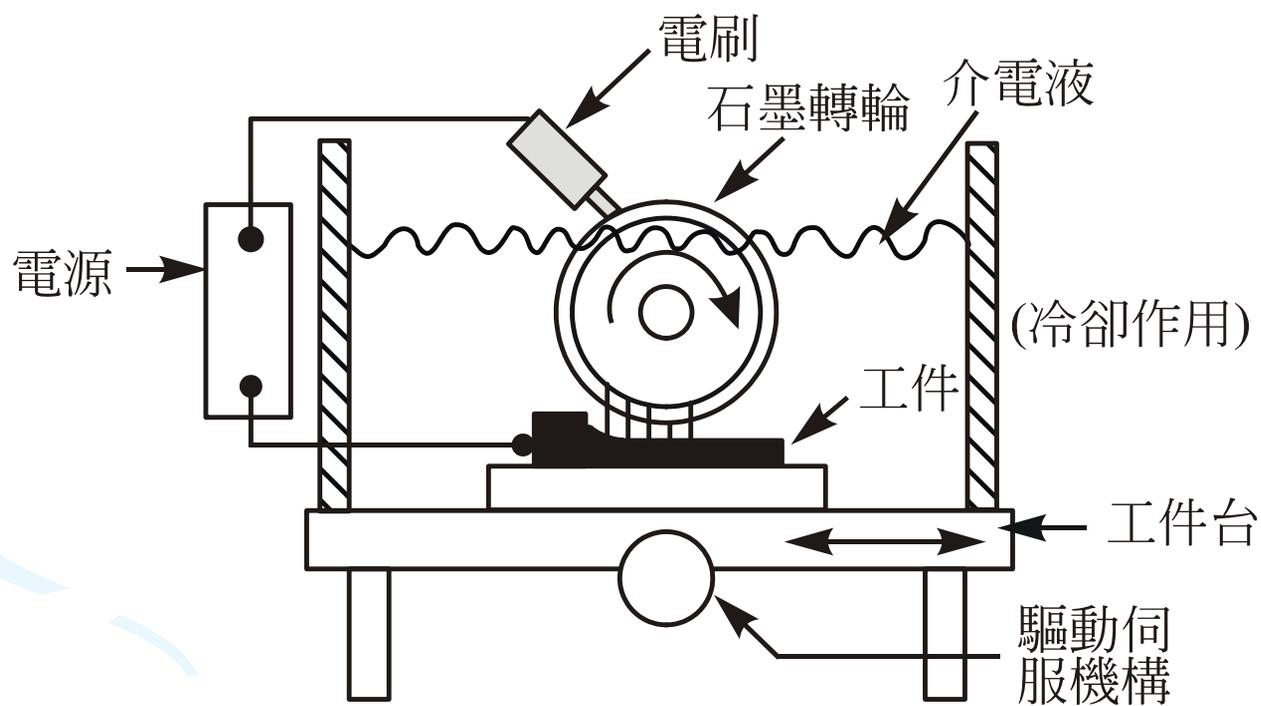


Fig 2-10

放電搪磨加工示意圖

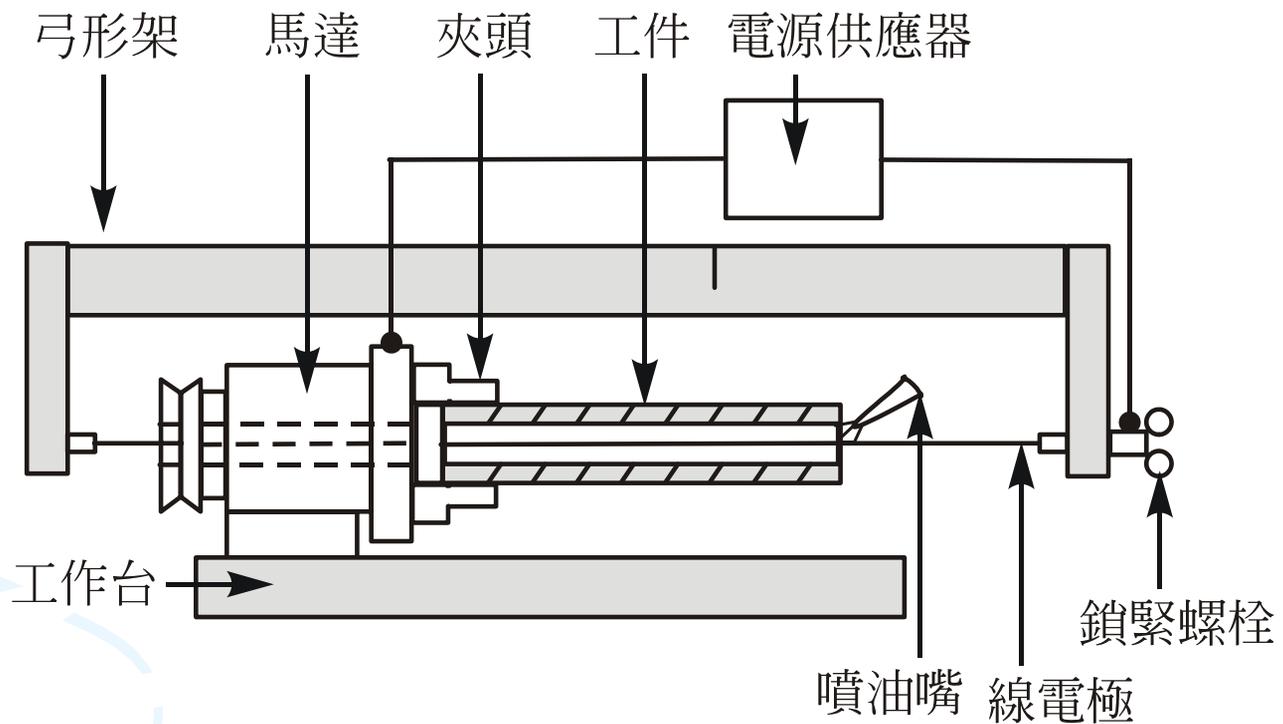
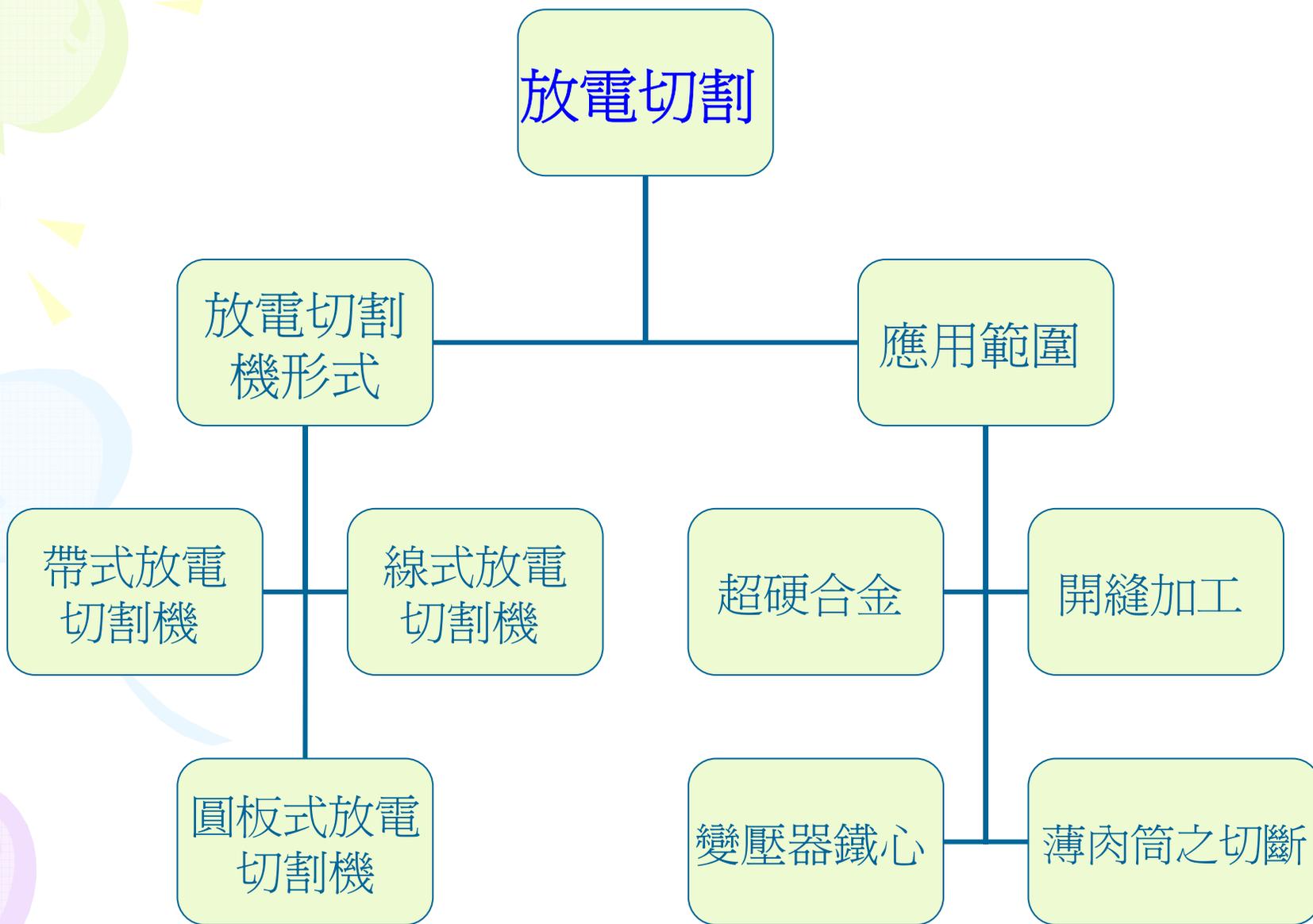


Fig 2-11



放電對磨

將兩滾輪通以正、負電，使兩者放電磨削。

加工重型機械齒輪

增加齒輪
嚙合接觸面積

共軛回轉式 放電加工

加工項目

優點

螺紋環規

內齒輪

無喇叭口

高幾何精度

精密內外螺紋

降低對電極設計
和製造的要求

細緻表面
粗糙度

放電表面硬化

放電間隙內離子導電
，金屬離子被負極吸引
向上遷移覆蓋

耐蝕、耐磨耗性高

可硬化狹窄部份

不需特殊材料

滲透任意金屬

放電硬化

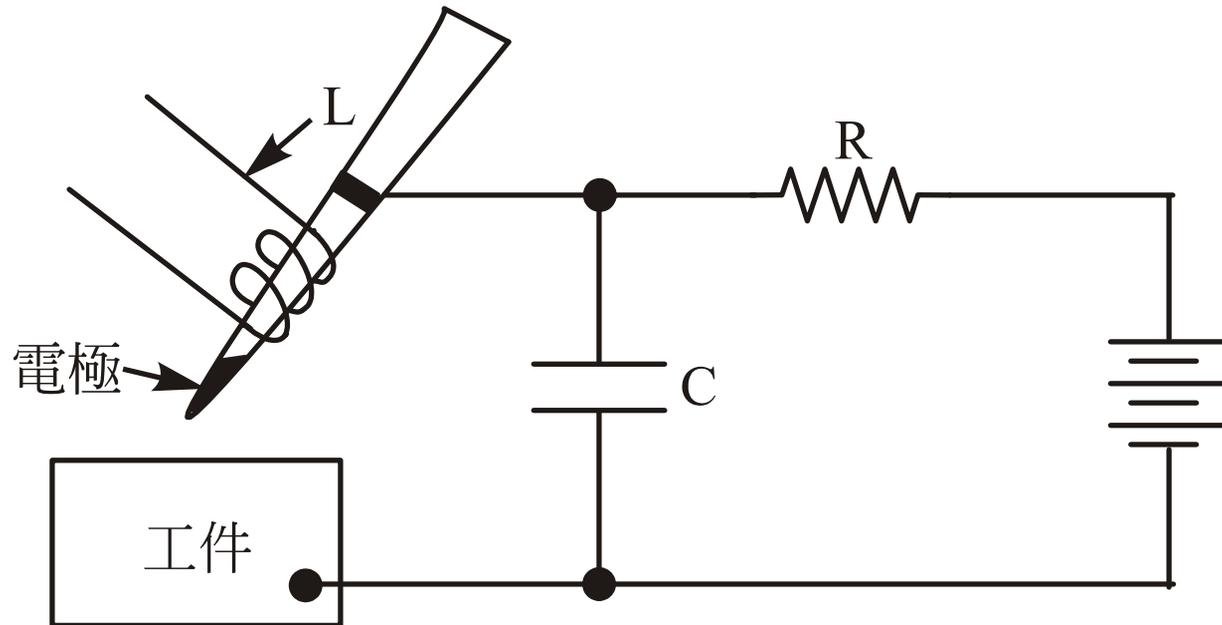
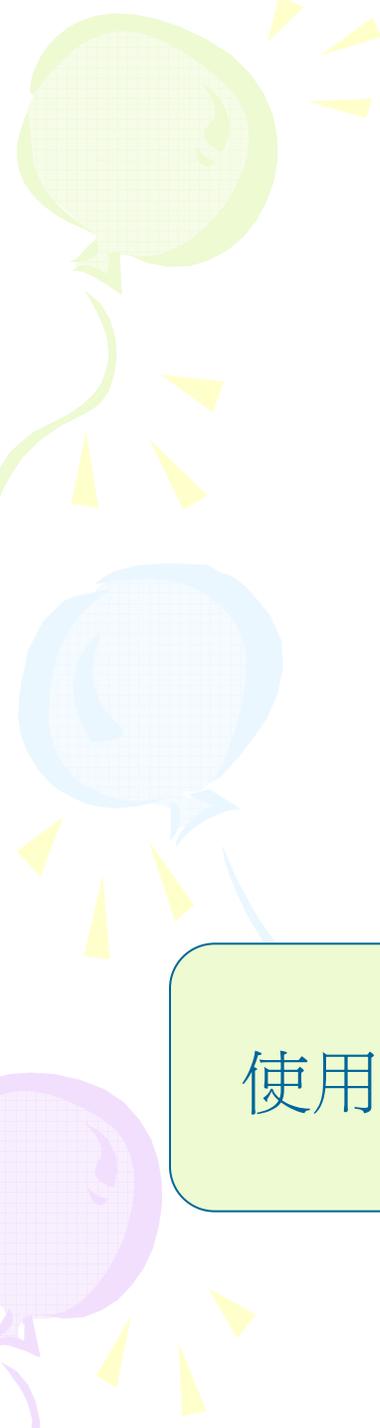


Fig 2-14



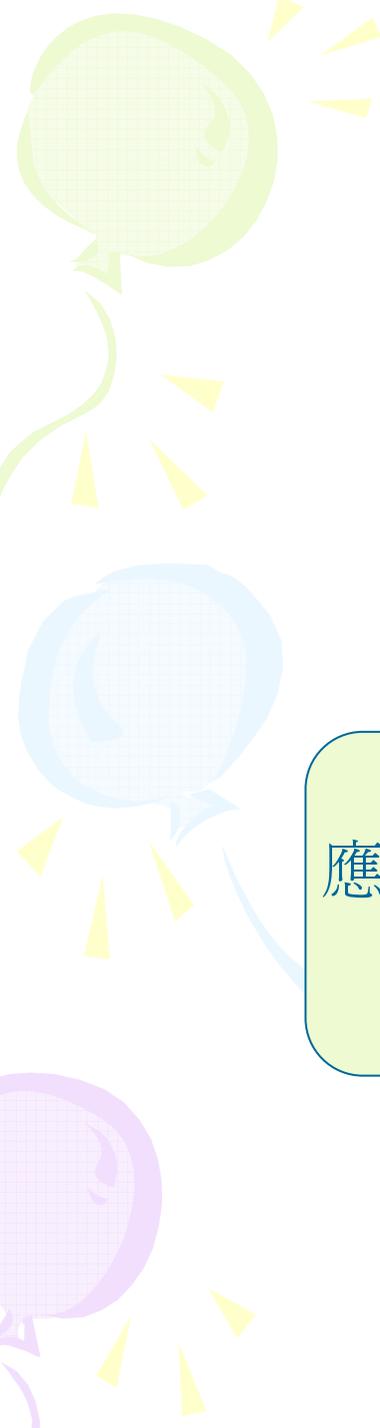
```
graph TD; A[放電刻字] --> B[利用放電硬化原理製成]; B --> C[使用鋁、鎢線電極]; B --> D[使用銅、鐵片電極]
```

放電刻字

利用放電硬化
原理製成

使用鋁、鎢線電極

使用銅、鐵片電極



放電披覆
(電弧披覆法之改良)

應用於汽車和曳引車
之**主軸**修護

生產性高

放電披覆之基本回路

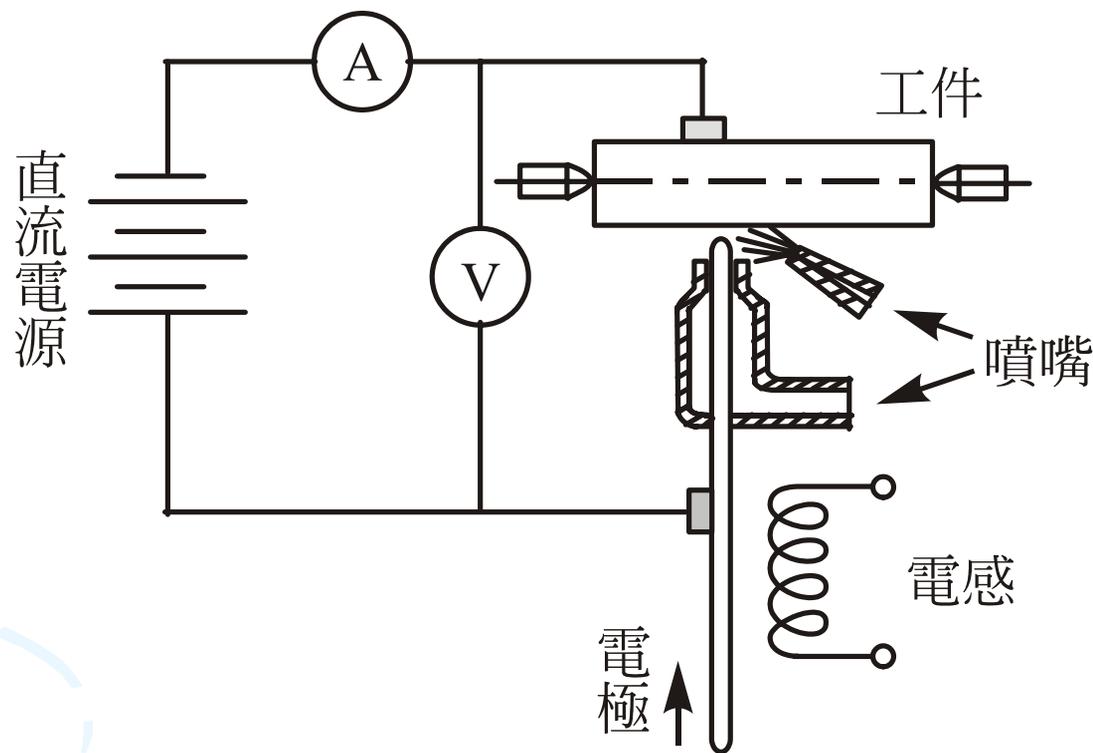


Fig 2-15

放電塑性加工 (放電成形)

材料之延性變大

體積小

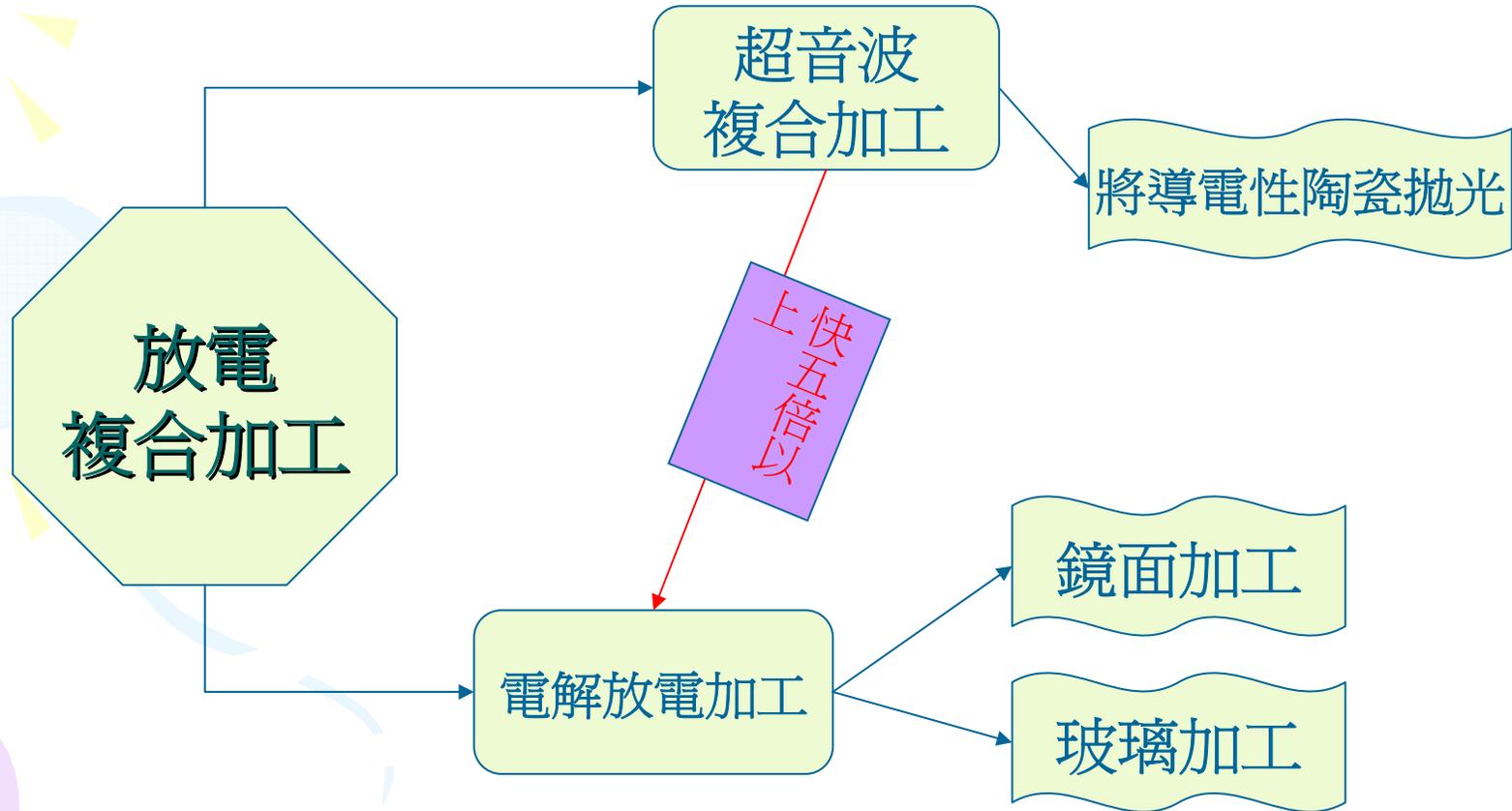
反覆次數快

只需母模

第五節 放電複合加工

- 2-5-1 放電複合加工發展背景
- 2-5-2 放電複合加工的種類
 - 2-5-2-1 電化學放電複合加工
 - 2-5-2-2 超音波放電複合加工
 - 2-5-2-3 放電銑削複合加工
 - 2-5-2-4 放電磨削複合加工
 - 2-5-2-5 放電鋸切複合加工

放電複合加工發展背景



放電複合加工的種類

放電銑削複合加工
Electrical Discharge
Diamond Machining

放電磨削複合加工

放電鋸切複合加工

電化學放電複合加工
(Electro Chemical Grinding)

超音波放電複合加工
(Ultrasonic Machining)

電化學放電複合加工 (Electro Chemical Grinding)

- 電化學研磨(Electro Chemical Grinding)係結合電化學加工和精細研磨之一種加工方式，後者提供了大約10%左右之材料移除量電化學放電研磨所應用之設備較電化學研磨小，須使用石墨砂輪以代替磨輪。

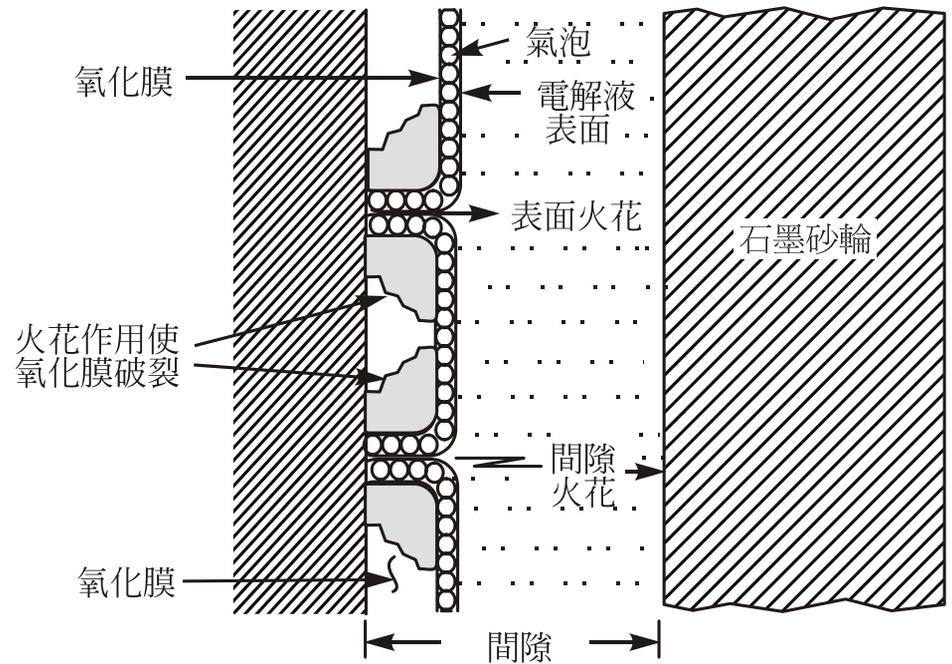


圖2-16 電化學放電複合加工

電化學放電複合加工

```
graph TD; A[電化學放電複合加工] --- B[結合電化學加工和精細研磨]; A --- C[使用石墨砂輪代替磨輪]; A --- D[加工圓形蜂巢型材料及複雜輪廓之研磨]
```

結合電化學加工
和精細研磨

使用石墨砂輪
代替磨輪

加工圓形蜂巢型材料
及複雜輪廓之研磨

超音波放電複合加工 (Ultrasonic Machining)

- 超音波加工(Ultrasonic Machining)和EDM合，在超硬材料如 WC和 TiB₂之加工，可增加加工速度和研磨率。其示意圖如圖2-17所示，放電加工機內裝有超音波振動桿及振幅擴大洞(horn)，使電極能夠產生超音波振動，而同時進行放電與超音波之複合加工。

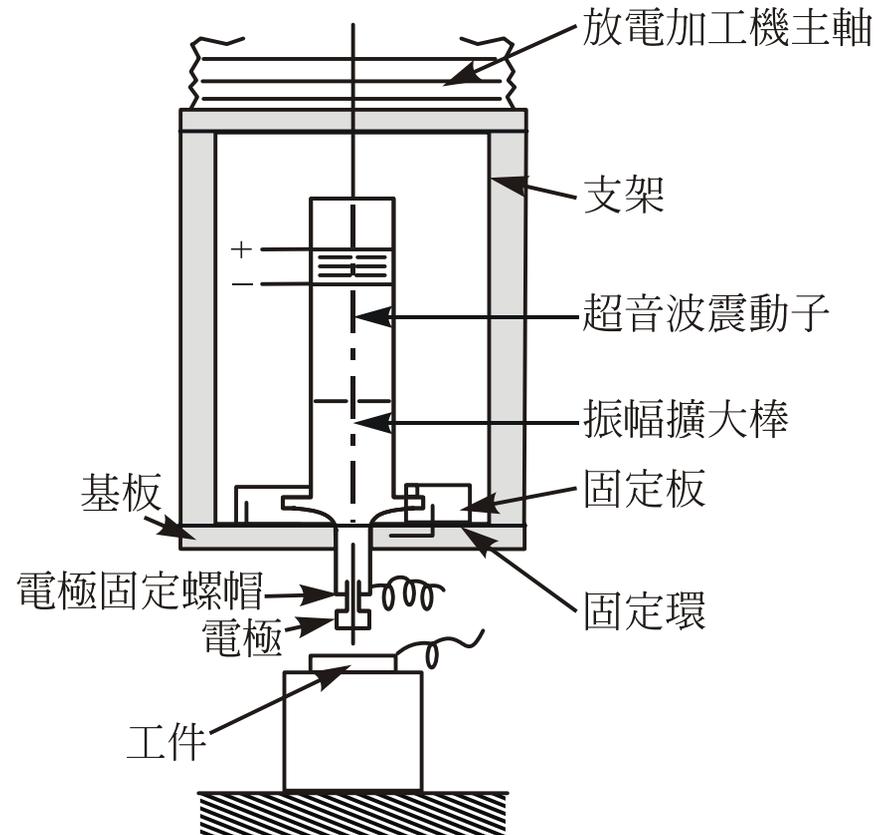
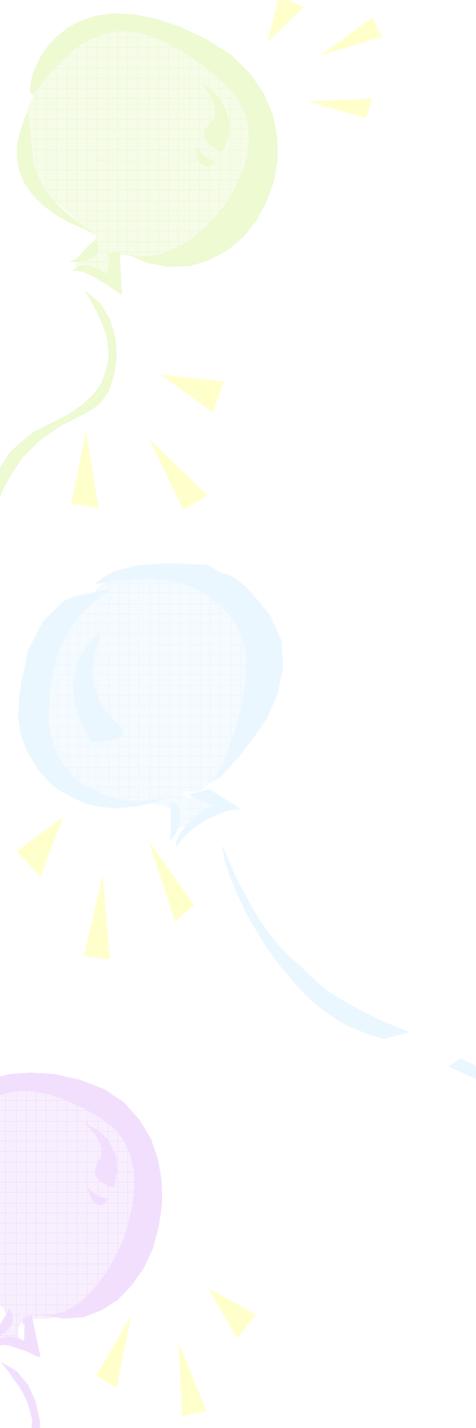


圖2-17 超音波放電複合加工



超音波
放電複合加工

電極能夠產生
超音波振動而同時進行放電
與超音波之複合加工

放電銑削複合加工

Electrical Discharge Diamond Machining

- 對於以結合放電及研磨兩種不同之加工方式，進行複合放電加工，其主要構想如圖2-19所示，為工件與電極放電後將產生形如碟狀之凹痕，此凹痕的直徑約為深度的10-20倍左右，在凹痕的四周有較基準平面凸出的隆起物，此係熔化金屬被擠出於凹痕而殘留於材料表面，然後再凝固者，若能在隆起物尚未凝固前，以耐高溫且不導電之磨料刮除，則可大幅增進加工速度。

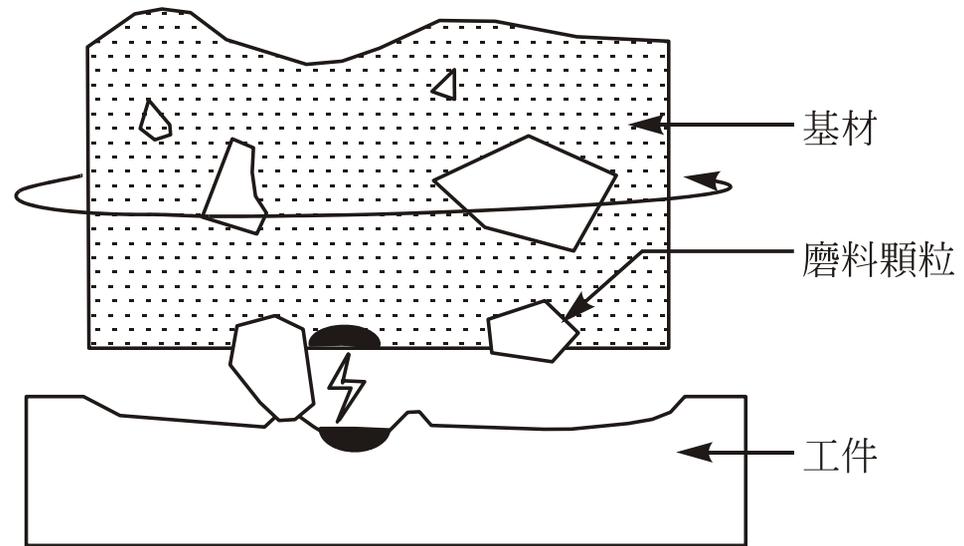
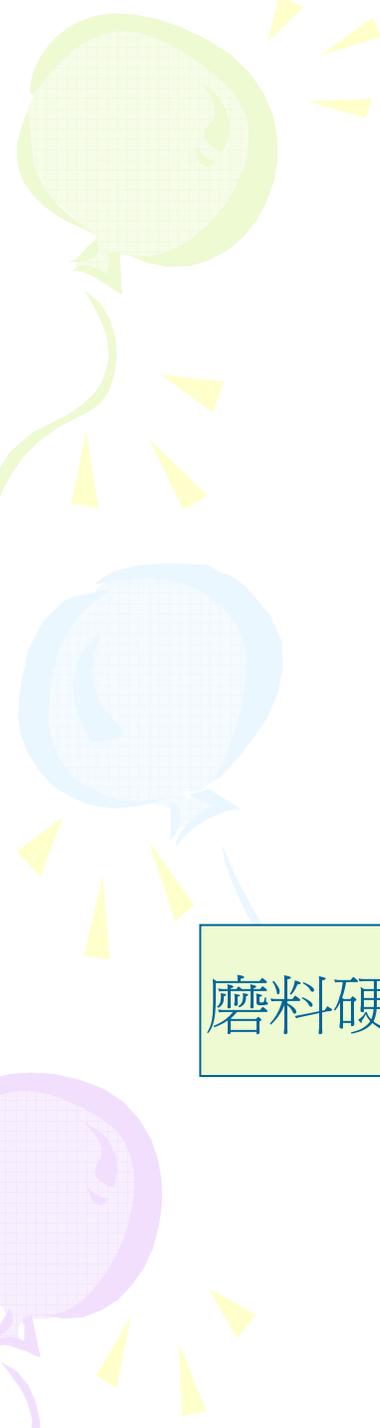


圖2-18 EDDG示意圖.



放電銑削
複合加工

磨料硬度需高於工件

高的正垂應力產生
大量彈性變形

放電磨削複合加工

- 以EDM結合鑽石進行導電性超硬材料銑削加工之研究，在前蘇聯為重要之研究重點。Electrical Discharge Diamond Machining(簡稱EDDG)用鑲在金屬輪上之鑽石砂輪，以金屬放電和鑽石顆粒刮削同時作用於工件上，其原理如圖2-18所示。

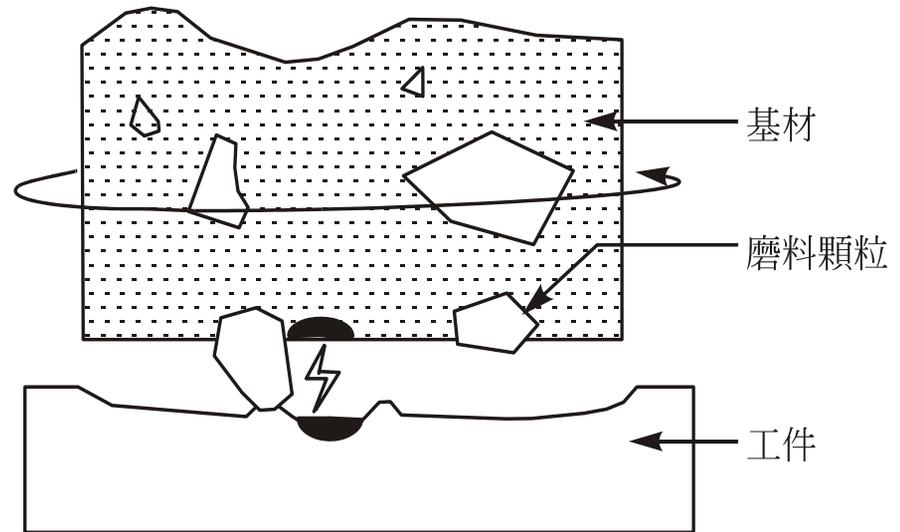
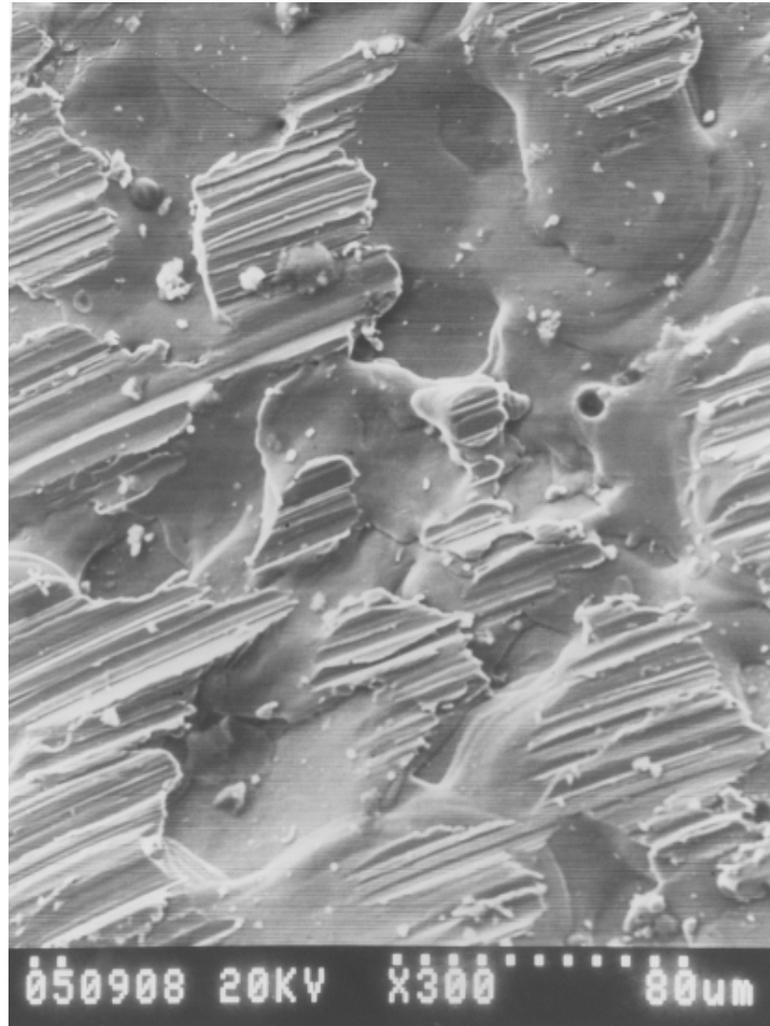
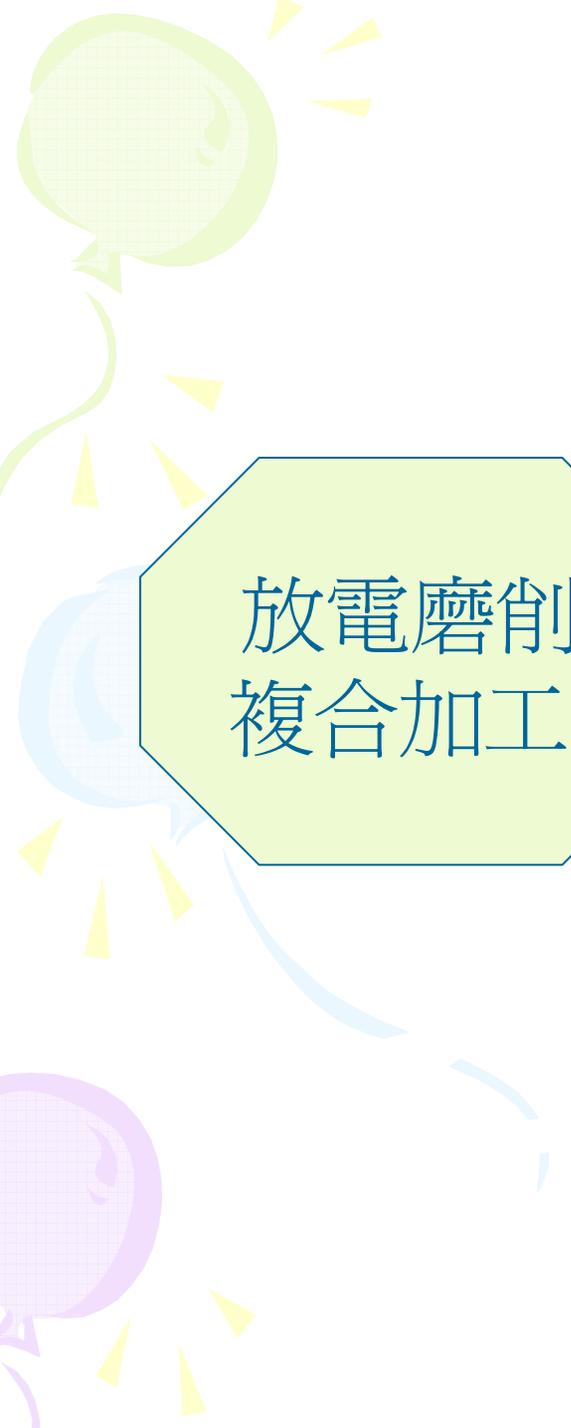


圖2-19放電磨削複合加工示意圖.

模具鋼放電磨削複合加工表面



藍翔耀 老師

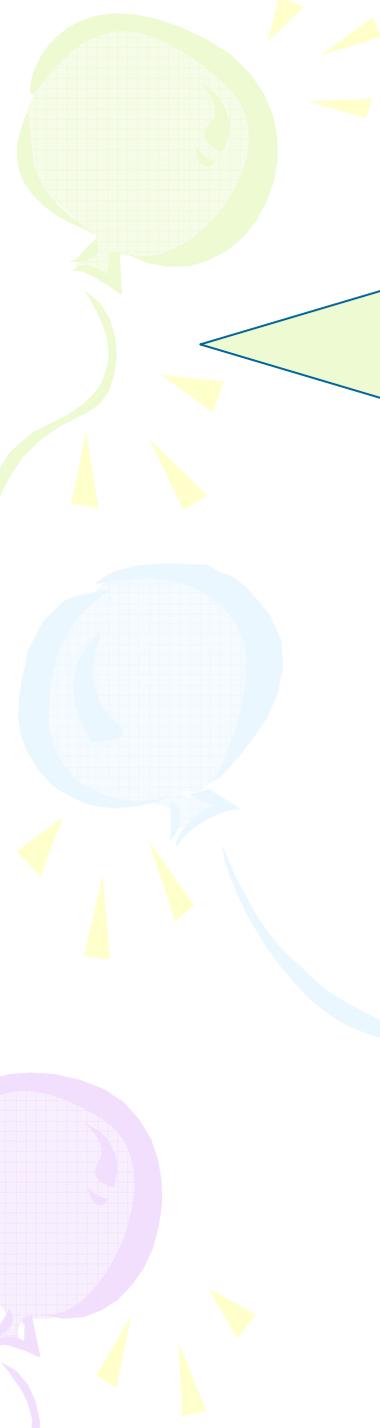


放電磨削 複合加工

金屬與顆粒狀磨料
構成電極

金屬呈空閒網路狀，
利用端面部份與工件產生放電

顆粒狀磨料埋沉於金屬內，
利用端面部份顯露之磨料進行刮除



```
graph TD; A{放電鋸切複合加工} --> B((電極為圓形薄板狀)); B --> C[可加工導電陶瓷等超硬材料];
```

放電鋸切複合加工

電極為
圓形薄板狀

可加工導電陶瓷
等超硬材料