

# COMSOL在電化學的應用

李碩仁 院長

元智大學 工程學院

COMSOL CONFERENCE Taipei 2013



## 目錄

- 電化學的多物理場
- 電化學的相關製程
  - － 電化學加工的基本原理
  - － 電解加工(EMM)
  - － 電化學機械拋光(ECMP)
  - － 電解拋光(EP)
- 精微電化學加工
  - － 微電壓軸承治具設計與製程分析
- 精微電解加工
  - － 微孔平衡間隙預測研究
- 精微電解加工
  - － 電解去毛邊應用
- 總結



## 電化學的多物理場

- 於極間電解液之靜電場控制方程式 (電場、熱場)

$$-\nabla \cdot (\kappa \nabla V) = 0 \quad \text{其中：電位能 } V \text{ 電場 } E \text{ 電流密度}$$
$$\text{導電度 } \kappa \text{ 焦耳熱 } Q_h = \vec{E} \cdot \vec{J}_n$$

- 於極間電解液之穩態流場動量控制方程式 (流場)

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho v \cdot \nabla v = \nabla \cdot (-p + \nabla v + (\nabla v)^T)$$

其中：流速  $v$  壓力  $p$

- 於極間電解液之氫氣濃度控制方程式 (Chemical species transports)

$$\rho \frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (D \nabla c) = -v \cdot \nabla c \quad \text{其中：氫氣濃度 } c \text{ 擴散係數 } D$$

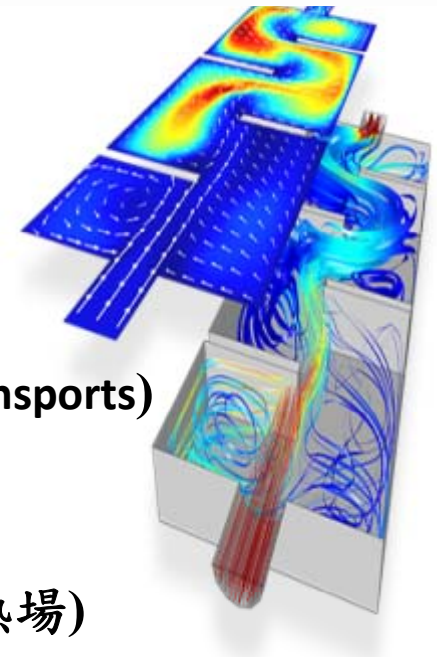
- 於極間電解液之對流與傳導物理場控制方程式 (流場、熱場)

$$\nabla \cdot (-k) \nabla T_f = Q_h - \rho C_p v \cdot \nabla T_f \quad \text{其中：溫度 } T_f \text{ 密度 } \rho \text{ 比容 } C_p$$

- 加工材料表面的網格移動速度與電流密度分佈成正比

$$u = -k J_n \quad \text{其中：} k \text{ 電化學加工率 (ECM rate)}$$

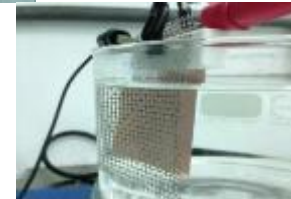
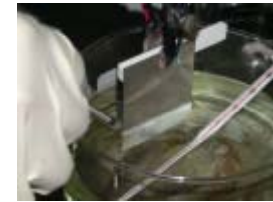
COMSOL  
MULTIPHYSICS®





## 電化學的相關製程

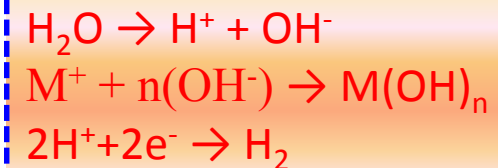
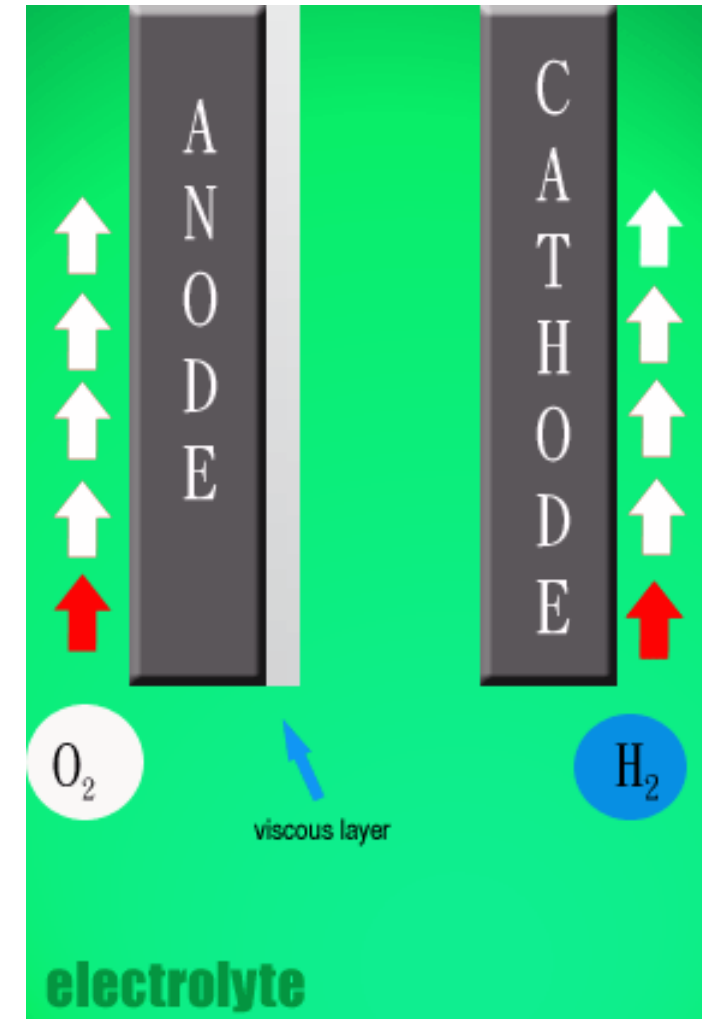
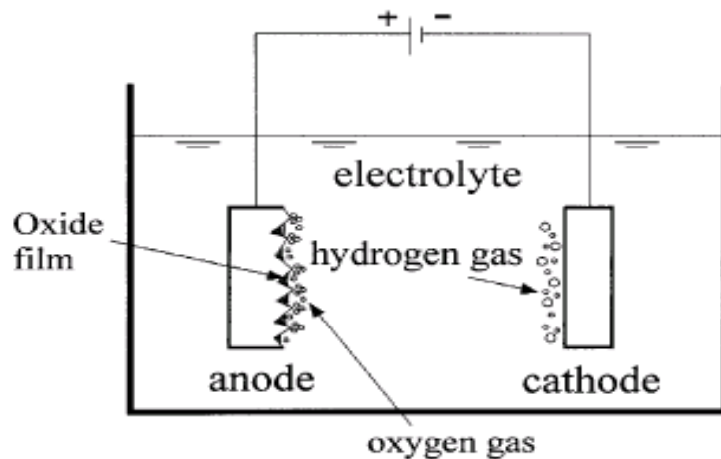
- **ElectroPolishing**
  - Improve morphology, chemical composition and corrosion resistance.
- **Electrochemical Micro-Machining**
  - Fabricate meso/micro scale features.
- **ElectroChemical Mechanical Polishing**
  - Increased flatness, roughness and surface properties.
- **Electrolytic surface roughening**
  - Improve morphology, roughen.
- **Electro plating**
  - surface coating.





# 電化學加工的基本原理

- A current passes from the anode, where metal on the surface is oxidized and dissolved in the electrolyte, to the cathode. At the cathode, a reduction reaction occurs, which produces H<sub>2</sub>.
- Reversal of electroplating process.
- Anodic dissolution.
- Consumes water only, theoretically.
- Zero stress.
- No degradation of the anode electrode.
- Smooth surface.
- No Burr.

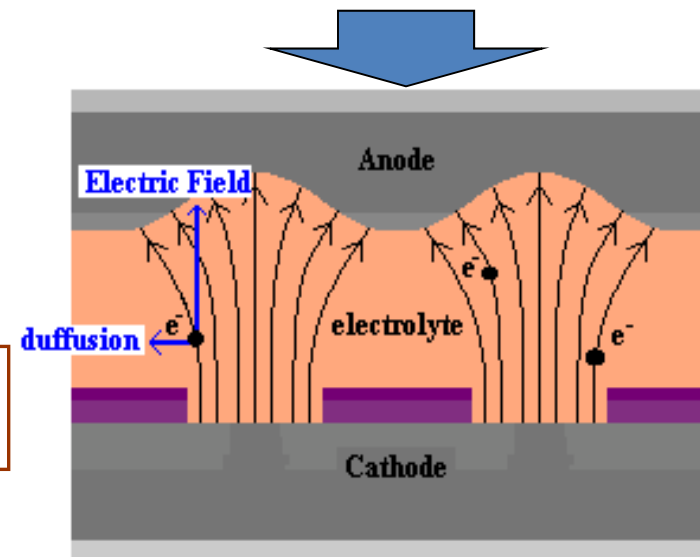
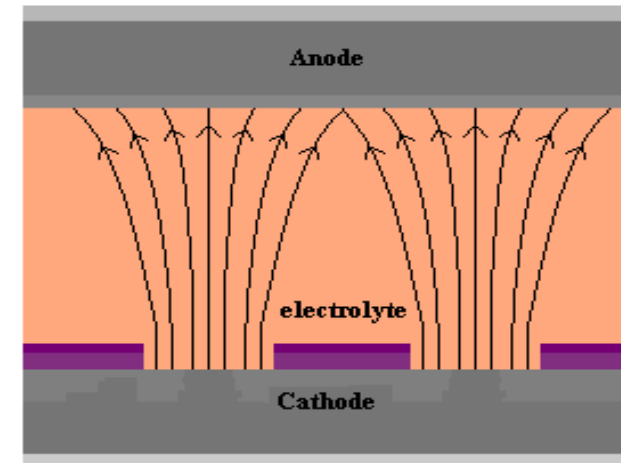
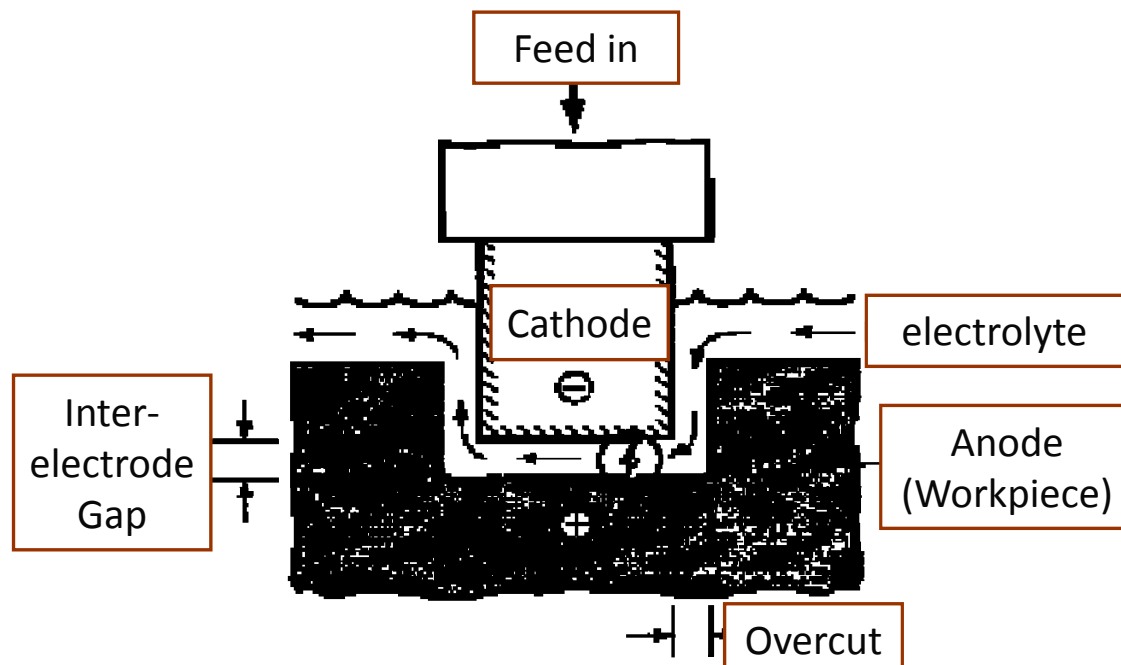




# 電化學的相關製程-EMM/ECM

## Electrochemical Micro Machining (EMM)

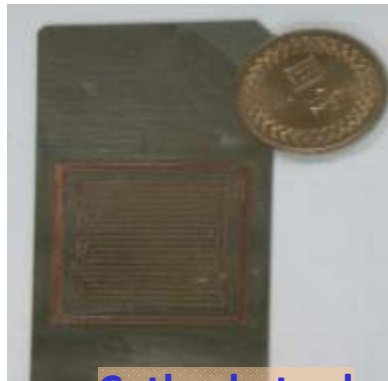
- Electrochemical Micro-Machining (EMM) deals with meso/micro scale features.
- Anodic dissolution of conductive workpiece.
- Multi-physics of electric field, flow field and chemical reaction.



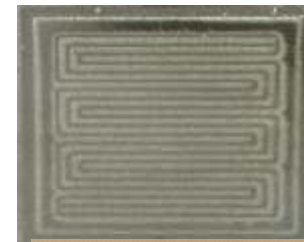


# 電化學的相關製程-EMM Results

## Die Sinking :

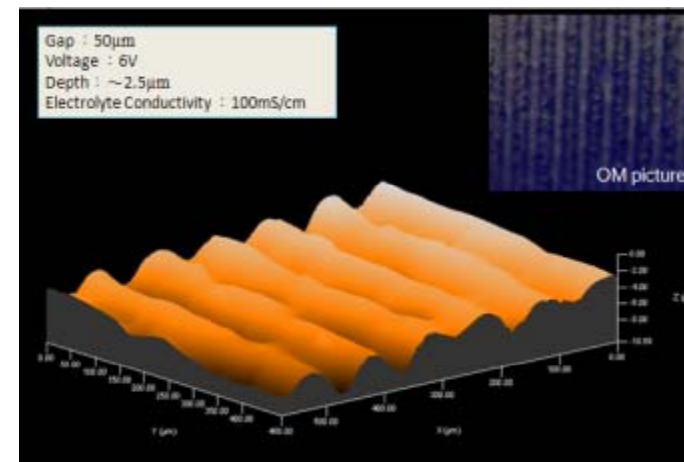
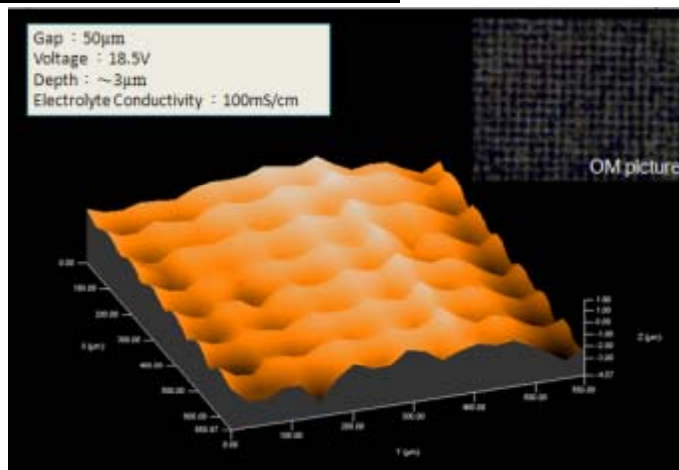


Cathode tool



Anode workpiece

## Photo masking :

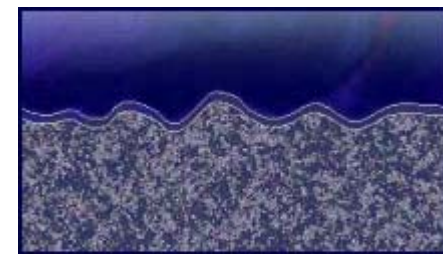
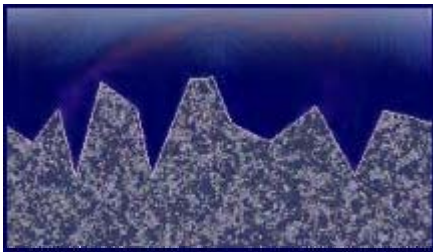




## 電化學的相關製程- ECMP

### ElectroChemical Mechanical Polishing (ECMP)

- Mechanical polishing enhanced by electrochemical reaction on surface.
- Metallic surface layer is transformed into  $M(OH)_n$ .
- $M(OH)_n$  is brittle and loose, can be polished more efficiently.
- CMP for Si wafer vs. ECMP for metals.

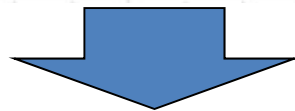
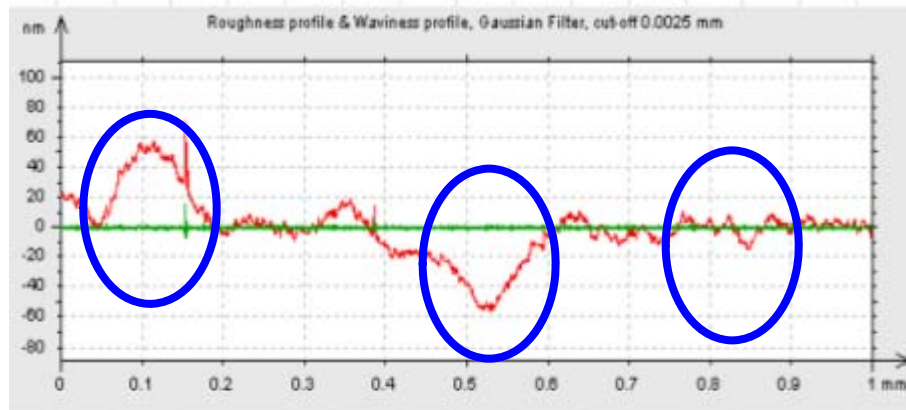






# 電化學的相關製程-ECMP Results

- Improve polishing efficiency 5X
- Improve polishing effectiveness 2X



Optical Microscope (X 50)



Original : Ra 0.05 $\mu\text{m}$



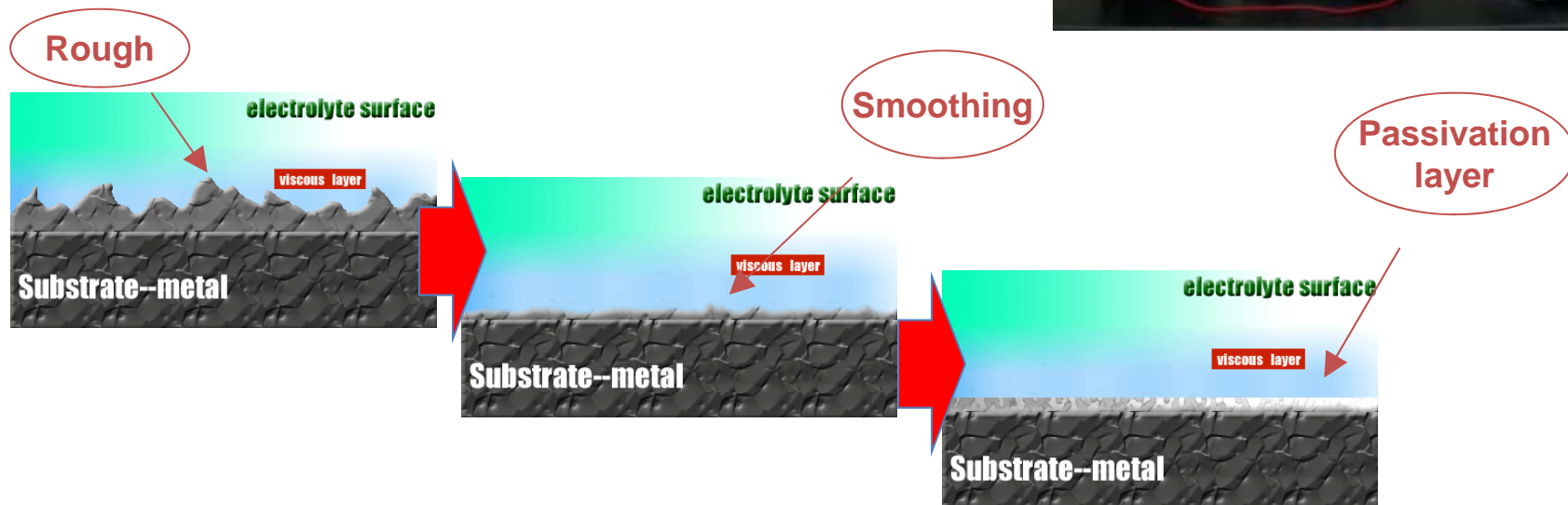
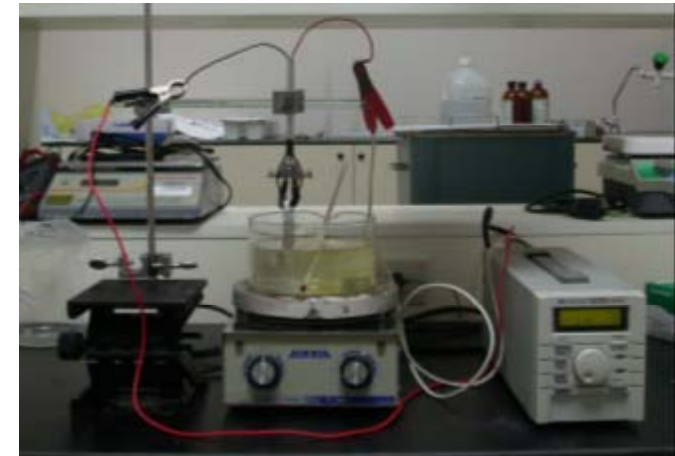
After ECMP : Ra 0.02 $\mu\text{m}$



## 電化學的相關製程- EP

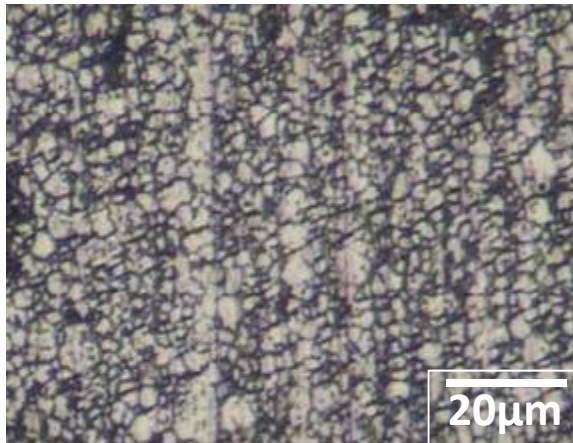
### ElectroChemical Polishing (EP)

- Smoothing through higher electric distribution at peaks.
- Selective dissolution in viscous layer.
- Cr rich passivation layer.

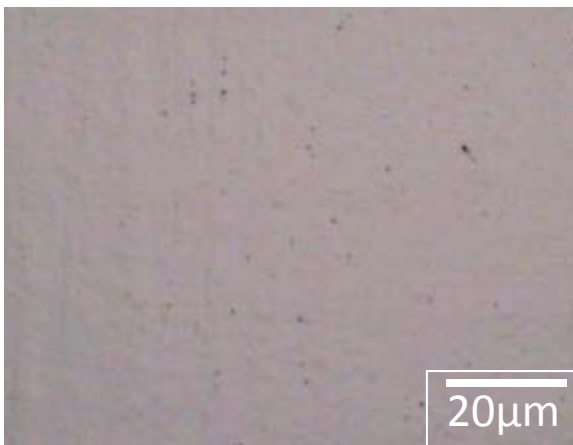




# 電化學的相關製程-EP Results



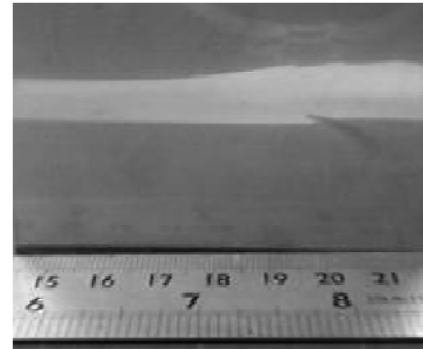
(original)



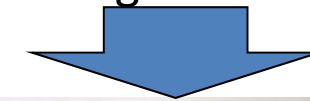
(EP processed)

## Morphology:

- $R_a$  from  $0.14\mu\text{m}$  ->  $0.02\mu\text{m}$
- $R_{\text{max}}$  from  $1.3\mu\text{m}$  ->  $0.22\mu\text{m}$



Before polishing



After polishing

## Modified:

- Cr/Fe from  $0.24:1$  ->  $1.6:1$
- Uniform corrosion from  $0.095$  ->  $0.021$  (mmpy)



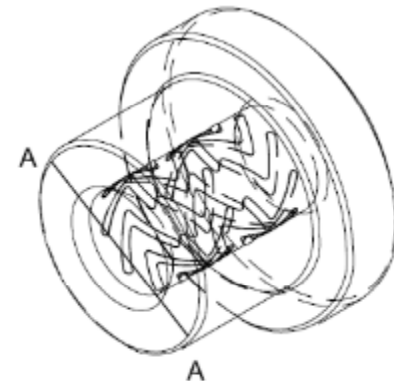
# 精微電化學加工 微電壓軸承治具設計與製程分析

97年 台中金工中心合作研究計畫



## 精微電化學加工-微電壓軸承

- 動壓軸承其原理是潤滑體溝槽的流體特性，促使軸承間隙中充滿潤滑體，使軸承間隙細小的溝槽，其目的除了讓流體集中於內部達到防漏的功能外，更可使流體集中於內部達到防漏的功能。
- 微電化學加工（EMM）無應力、無損耗、加工不受金屬材料之硬度、強度等限制，故可對外型複雜（如動壓軸承溝槽）之工件進行一次加工成型。
- 本研究係模擬電化學加工作為微動壓軸承加工機制，利用加工陰極在待加工物件內壁上，作出動壓軸承的紋路。

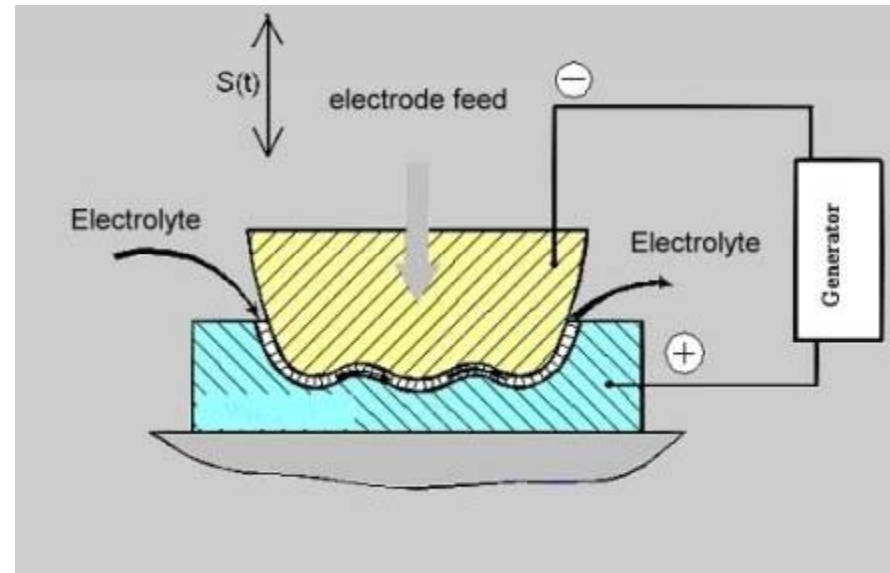






## 電化學加工原理

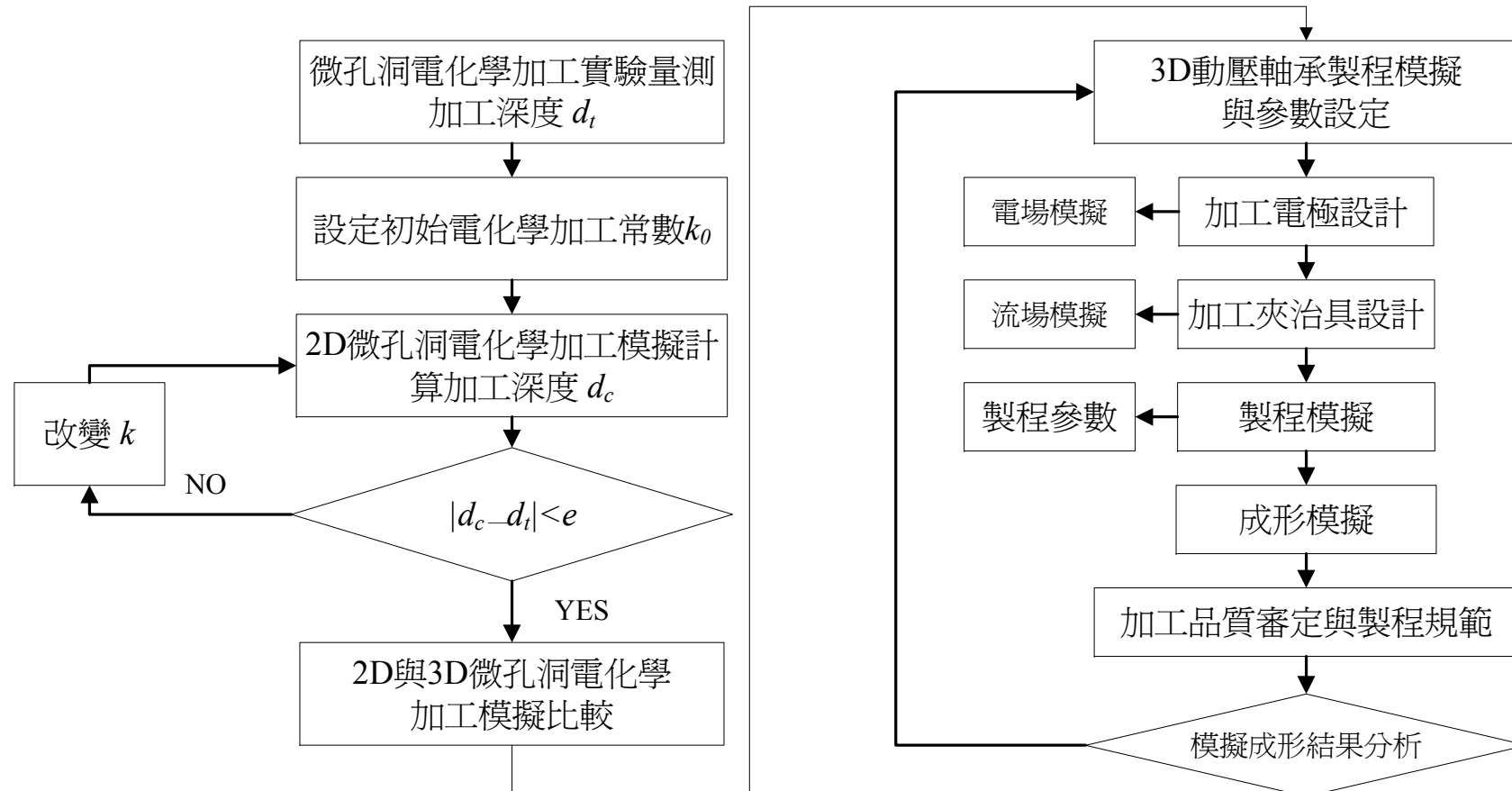
- 工件連接於直流電源的正極，稱為陽極；刀具連接於直流電源的負極，稱為陰極。
- 電解液以較高的速度從兩極間隙中流過，使兩極形成導電通路，並在電源電壓的作用下產生電流
- 被加工工件表面金屬將不斷產生電化學反應而溶解到電解液中，電解之產物則被高速的電解液帶走。



為電化學加工成型原理示意圖



# 研究程序



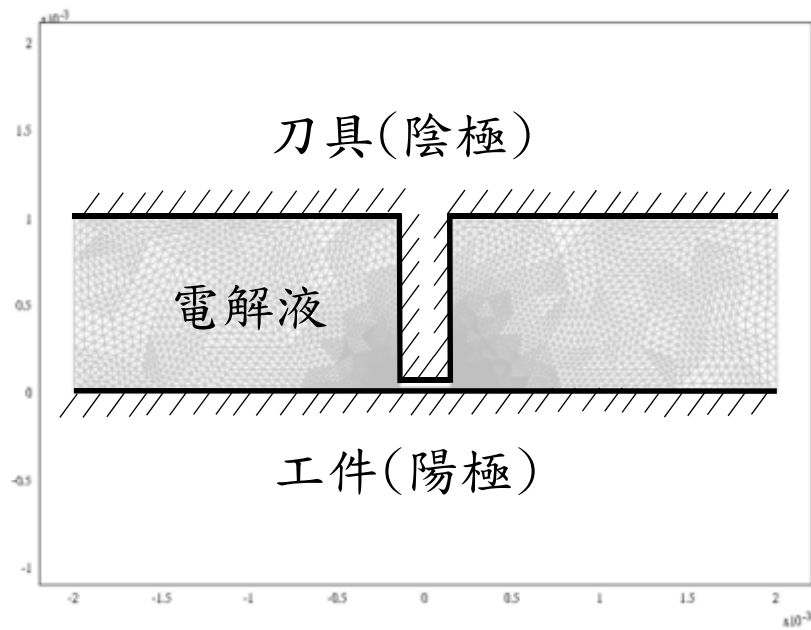
$$u = -kJ_n$$

其中： $k$ 電化學加工率(ECM rate)

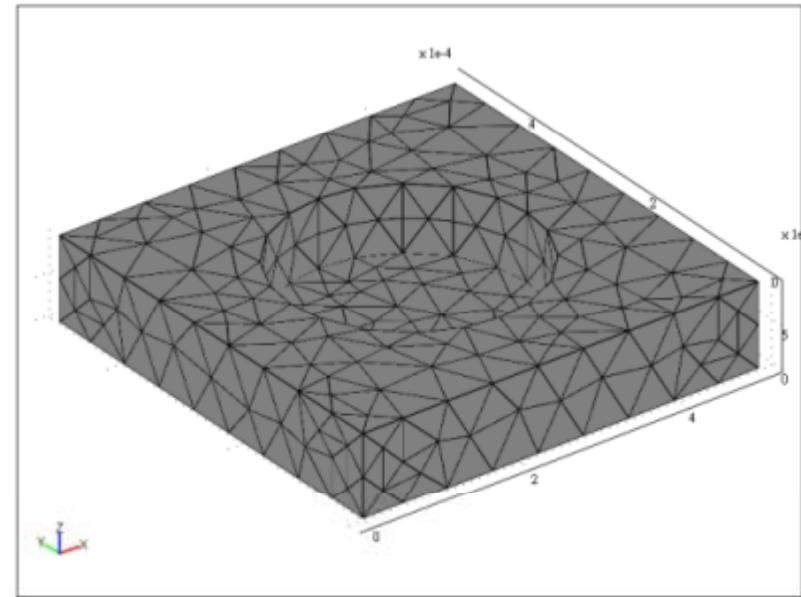




# 微孔洞模擬與實測



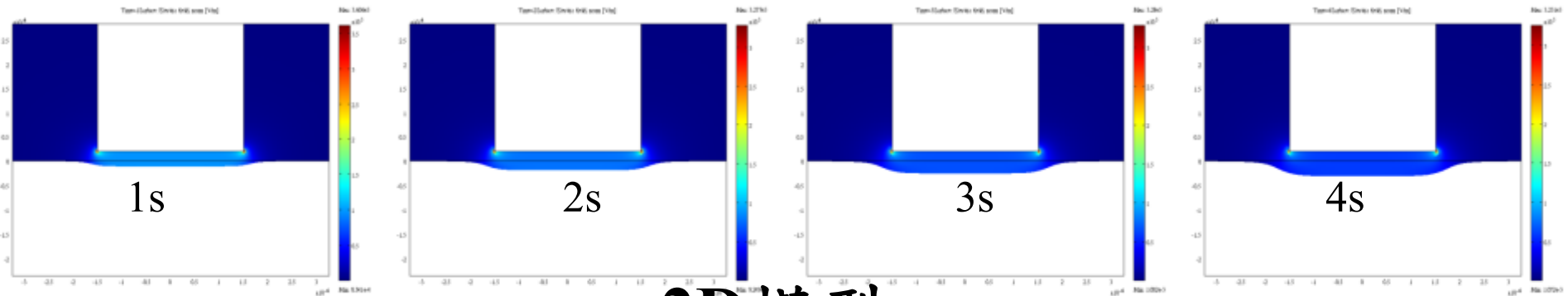
2D有限元素模型



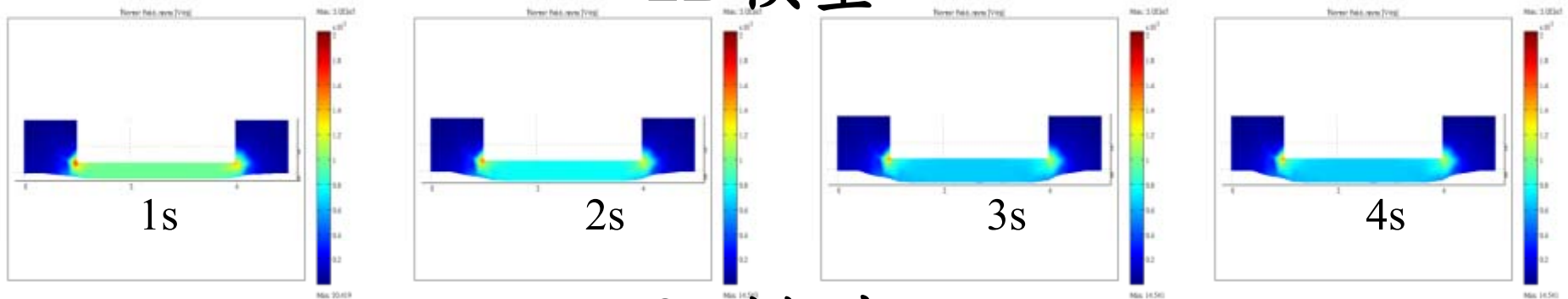
3D有限元素模型



# 微孔洞模擬電場分佈



## 2D模型

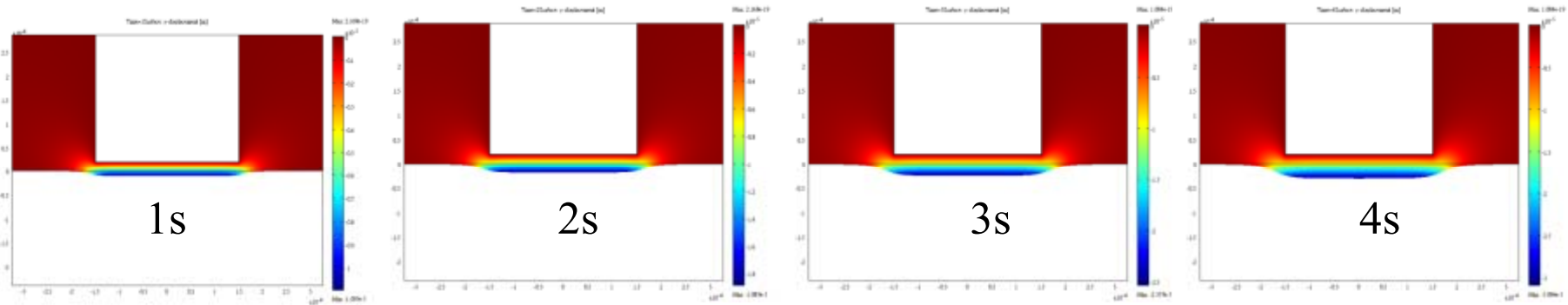


## 3D模型

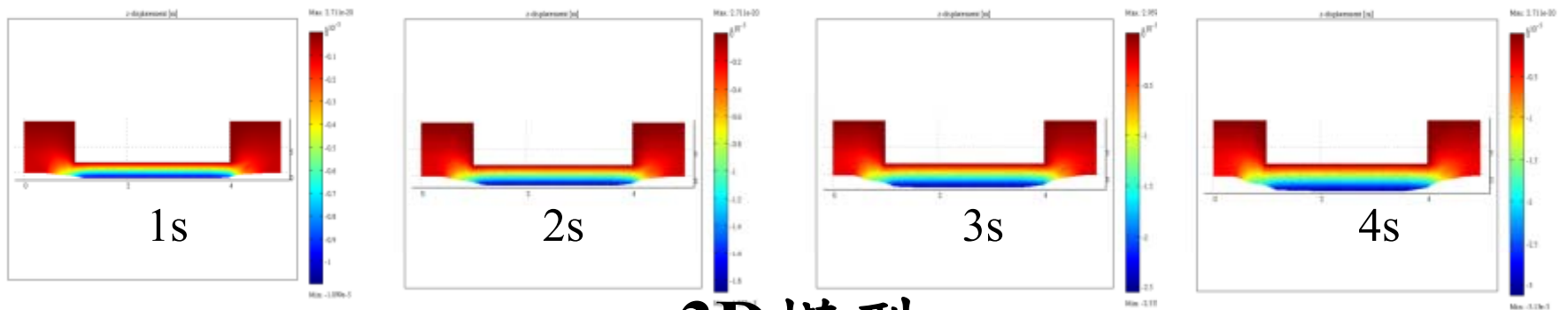
- 電解液的導電度 $9.74\text{m/S}$ 。
- 陽極電壓為 $3\text{V}$ 、陰極為接地。
- 電化學加工常數 $k=1\times 10^{-11}(\text{m}^3/\text{C})$ 。



# 微孔洞模擬加工量分佈



## 2D模型



## 3D模型

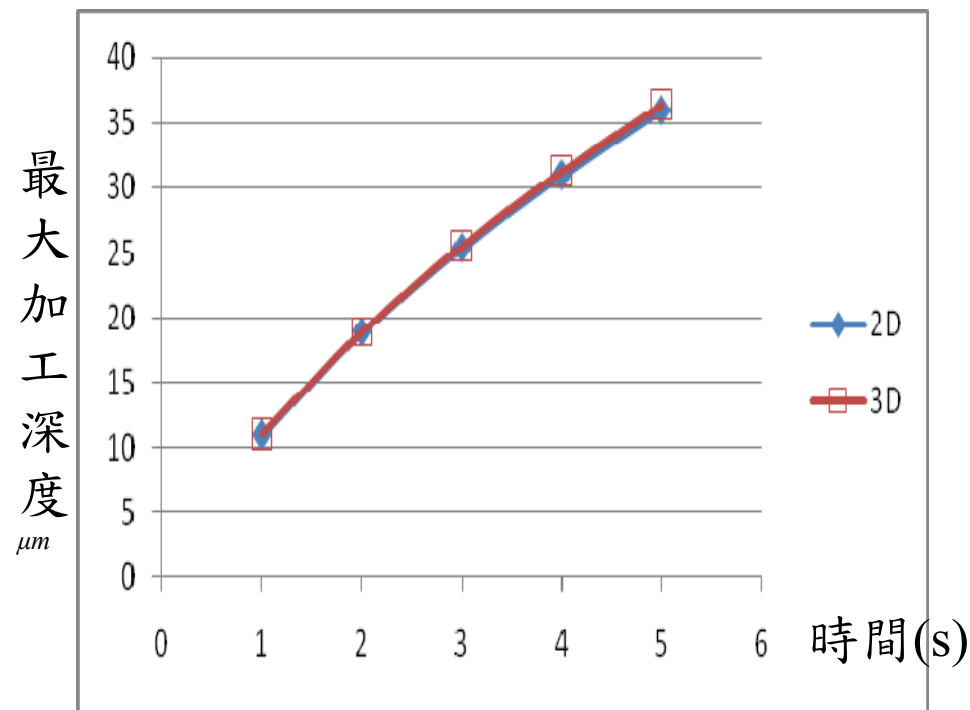
- 電解液的導電度 $9.74\text{m/S}$ 。
- 陽極電壓為 $3\text{V}$ 、陰極為接地。
- 電化學加工常數 $k=1\times 10^{-11}(\text{m}^3/\text{C})$ 。

## 微孔洞加工模擬結果

最大電場( $10^5\text{V/m}$ )					
時間	1s	2s	3s	4s	5s
2D	3.6	3.27	3.28	3.25	3.27
3D	2.02	2.02	2.02	2.02	1.99

加工深度( $\mu\text{m}$ )					
時間	1s	2s	3s	4s	5s
2D	10.97	18.88	25.37	30.96	35.97
3D	10.99	18.87	25.55	31.3	36.48

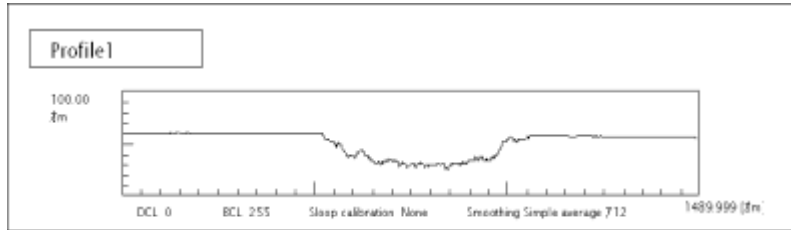
電壓3V 加工常數 $k=1\text{e-}11\text{m}^3/\text{C}$



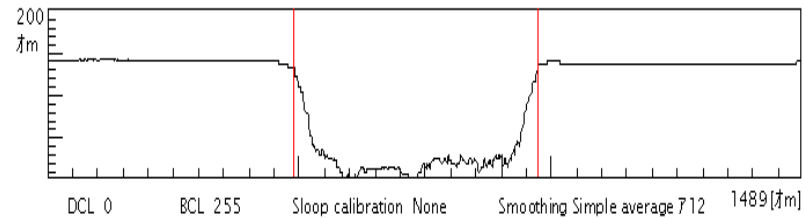
最大加工深度與時間關係



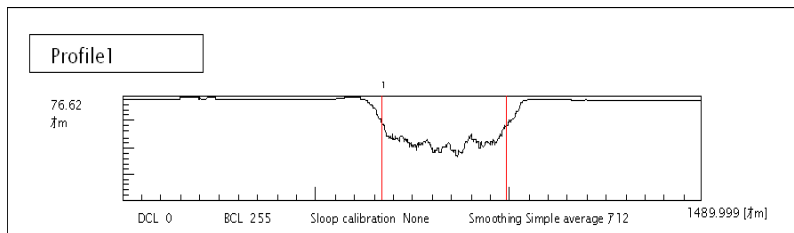
# 微孔洞電化學加工實驗



孔洞深度為  $38 \mu\text{m}$       加工電壓  $3\text{V}$   
加工時間  $5\text{sec}$               脈衝寬度  $0 \mu\text{s}$



孔洞深度為  $161 \mu\text{m}$       加工電壓  $15\text{V}$   
加工時間  $480\text{sec}$           脈衝寬度  $10 \mu\text{s}$



孔洞深度為  $50 \mu\text{m}$       加工電壓  $4\text{V}$   
加工時間  $25\text{sec}$               脈衝寬度  $100 \mu\text{s}$

## 共焦顯微鏡



### 共焦顯微鏡性能

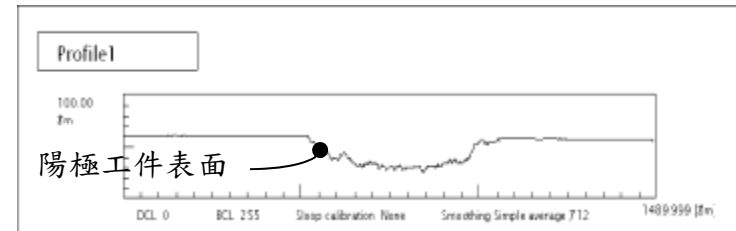
項目	規格
倍率	200-2000
觀察/量測範圍	水平 $1479 \mu\text{m}$ 垂直 $1106 \mu\text{m}$
高度量測範圍	$7\text{mm}$
高度量測解析度	$0.01 \mu\text{m}$
光學變焦	2倍、4倍
數位變焦	2倍、3倍
X-Y 平台行程	$70\text{mm} \times 70\text{mm}$
Z 平台行程	$28\text{mm}$
θ 平台旋轉	$360^\circ$



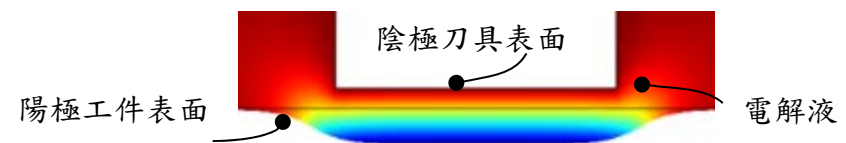
## 微孔洞模擬及實驗的比較

編號	加工深度(μm)
2D模擬	35.97
3D模擬	36.48
實驗	38

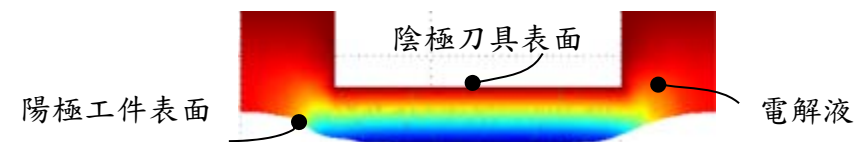
- 電解液的導電度9.74m/S。
- 陽極電壓為3V、陰極為接地。
- 電化學加工常數 $k=1 \times 10^{-11}(\text{m}^3/\text{C})$ 。
- 加工時間5 sec。



共焦顯微鏡掃出的孔洞特徵



2D模擬的孔洞剖面特徵



3D模擬的孔洞剖面特徵



## 微孔洞加工模擬結果討論

- 在電化學加工常數設 $k=1 \times 10^{-11} (\text{m}^3/\text{C})$ ，2D及3D孔洞電化學加工模擬接近實驗量測結果。
- 2D模型最大電場大於3D模型電場，最大電場值都發生在陰極刀具表面隨著時間增加其變化不大。
- 2D模型最大加工深度略小於3D模型，最大加工深度都隨著時間增加而增加，但是不呈線性關係，最大加工深度增加率隨著時間增加而逐漸減少。這是因為加工深度增加，陰極刀具表面及陽極工件表面間隙增加，減少陽極工件表面電流密度分佈。
- 使用2D、3D模擬及實驗(共焦顯微鏡)出的最大加工深度接近及孔洞幾何外形相似，這可以確認使用COMSOL 3D模型及參數可以應用於微動壓軸承凹槽電化學加工分析。



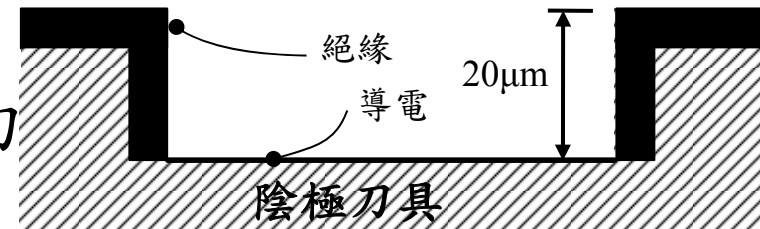




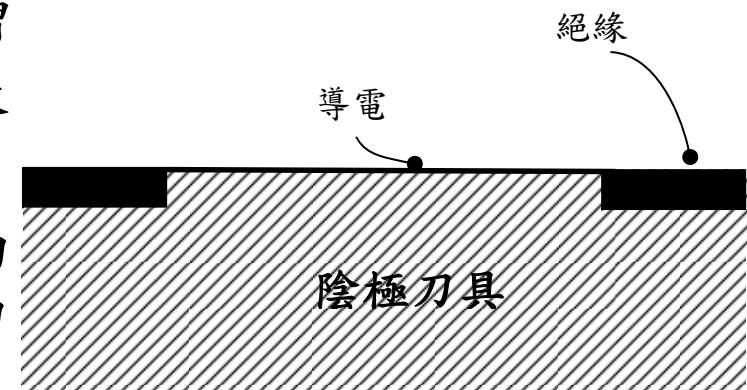
## 微動壓軸承夾治具設計與製程分析

加工條件及參數為：

- 施加電壓3V於工件並為陽極，設定刀具為接地並為陰極。
- 陰極及陽極間間隙 $25\mu\text{m}$ 及 $50\mu\text{m}$ 。
- 加工方法如圖分為陰刻及陽刻兩種：
  1. 陰刻加工：將陰極刀具加工為凹槽其底部面積為可導電，其它刀具表面面積為絕緣。
  2. 陽刻加工：將刀具表面為平坦表面，加工槽寬面積為可導電，其它刀具表面面積為絕緣。



陰刻

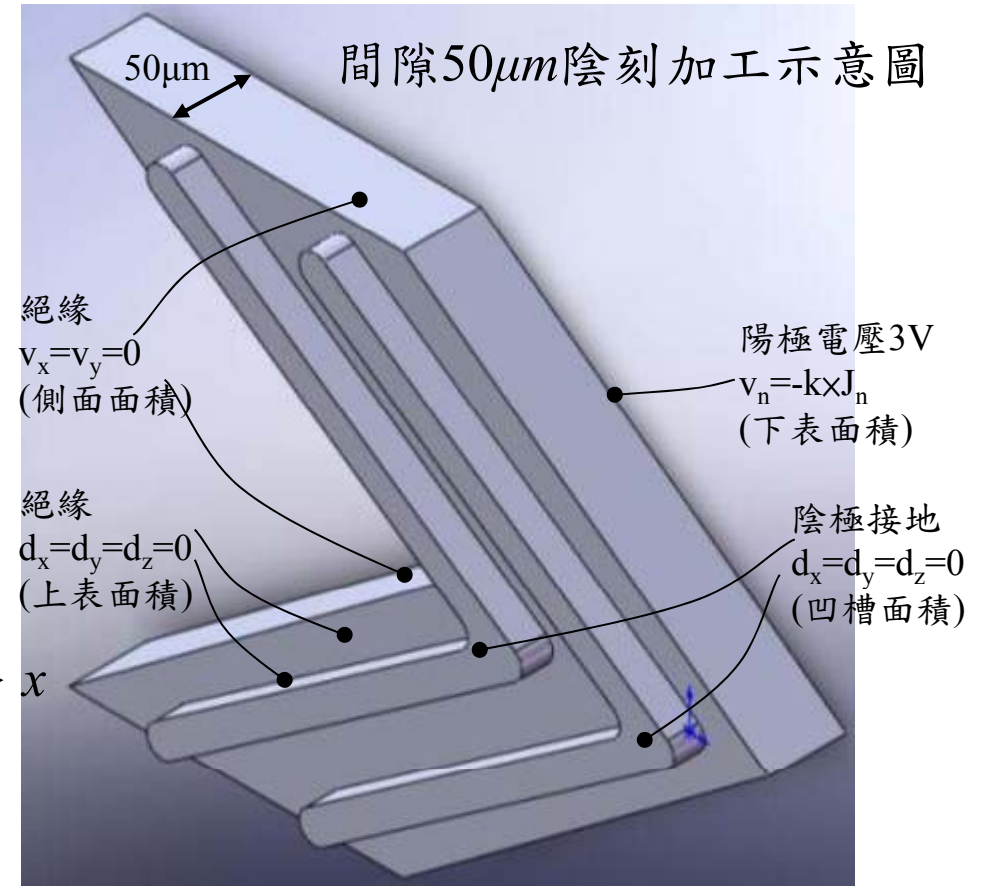
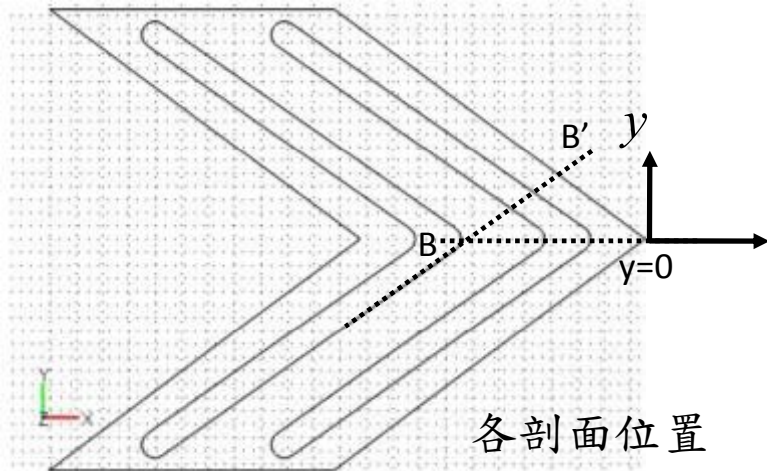


陽刻



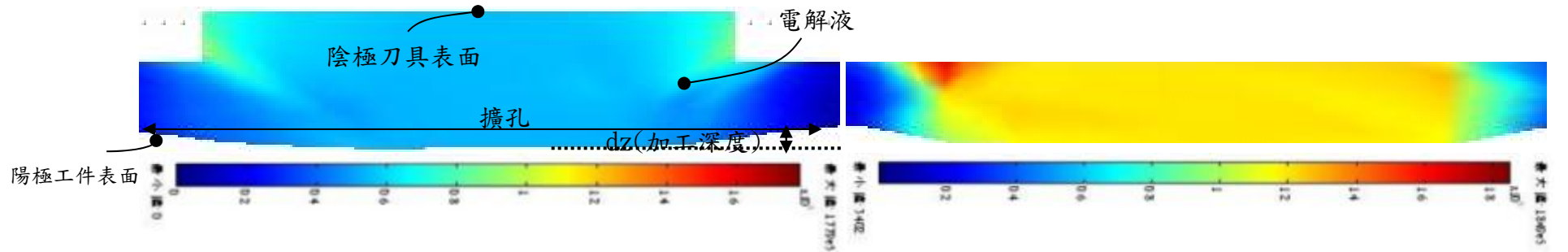
## 微動壓軸承邊界條件

- 下表面積：施加電壓3V、網格移動速度 $v_n = -k \times J_n$ 。
- 側邊面積：電壓絕緣、網格移動速度 $v_x = v_y = 0$ 。
- 凹槽面積：施加電壓0V(接地)、網格移動 $d_x = d_y = d_z = 0$ 。



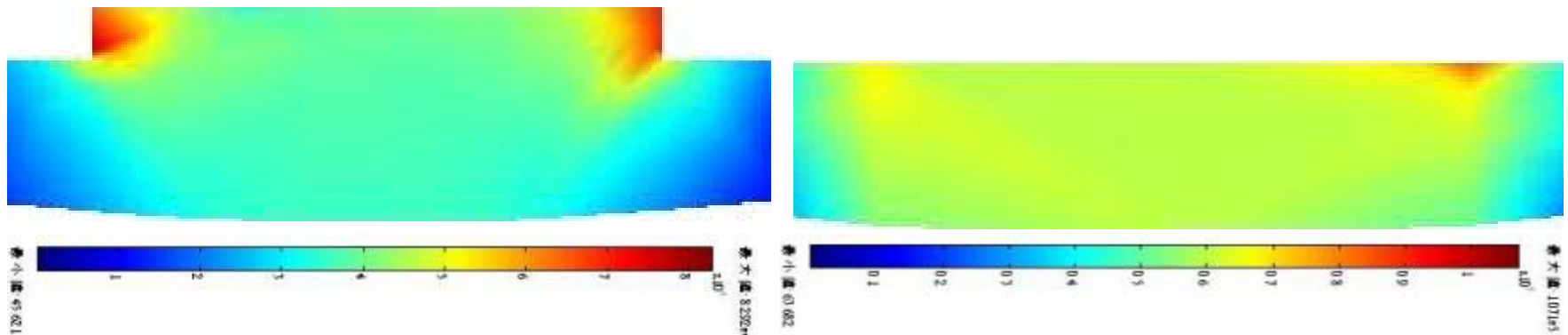


## BB'剖面電場分佈-加工深度 $10\mu\text{m}$



間隙 $25\mu\text{m}$ 陰刻

間隙 $25\mu\text{m}$ 陽刻



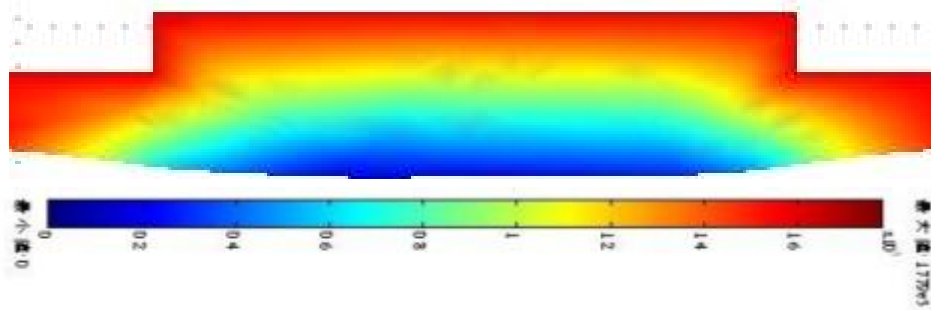
間隙 $50\mu\text{m}$ 陰刻

間隙 $50\mu\text{m}$ 陽刻

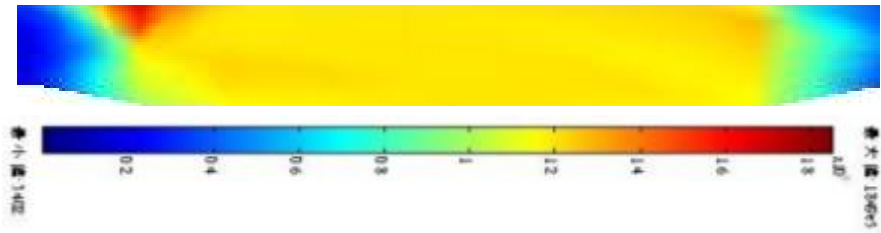
- 電解液的導電度 $9.74\text{m/S}$ 。
- 陽極電壓為 $3\text{V}$ 、陰極為接地。
- 電化學加工常數 $k=1\times 10^{-11}(\text{m}^3/\text{C})$ 。



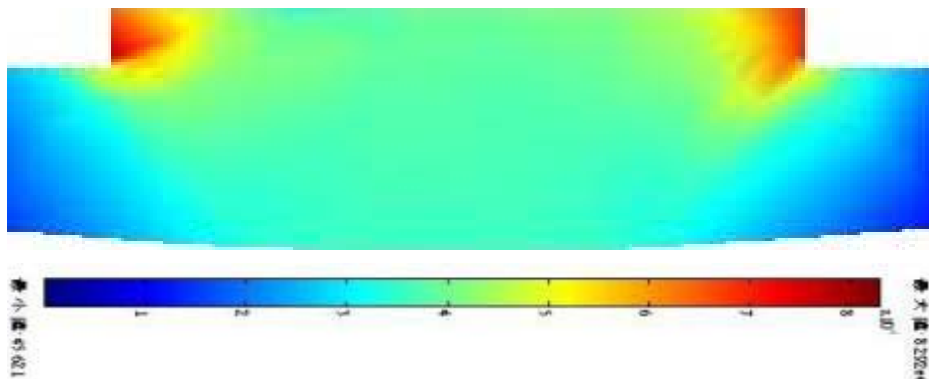
## BB'剖面加工深度-加工深度 $10\mu\text{m}$



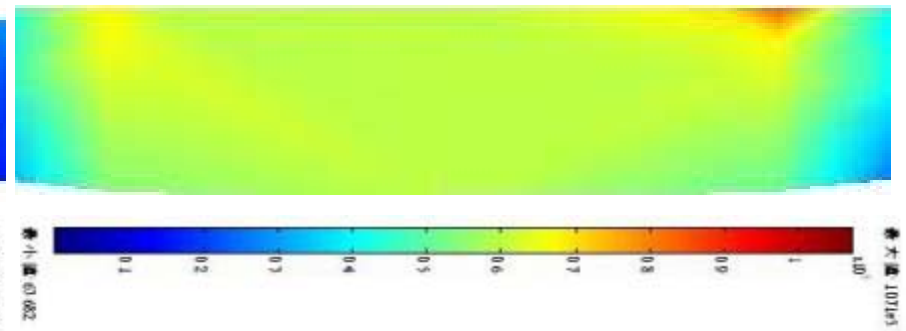
間隙 $25\mu\text{m}$ 陰刻加工時間1.68秒



間隙 $25\mu\text{m}$ 陽刻加工時間0.85秒



間隙 $50\mu\text{m}$ 陰刻加工時間2.60秒



間隙 $50\mu\text{m}$ 陽刻加工時間1.68秒

- 電解液的導電度 $9.74\text{m/S}$ 。
- 陽極電壓為 $3\text{V}$ 、陰極為接地。
- 電化學加工常數 $k=1\times 10^{-11}(\text{m}^3/\text{C})$ 。



## 微動壓軸承各模型計算結果-加工深度 $10\mu\text{m}$

加工模型(加工電壓3V)	加工時間	擴孔	最大電場
間隙 $50\mu\text{m}$ 陽刻加工	1.68s	509 $\mu\text{m}$	$8.41 \times 10^4 \text{V/m}$
間隙 $50\mu\text{m}$ 陰刻加工	2.60s	500 $\mu\text{m}$	$8.72 \times 10^4 \text{V/m}$
間隙 $25\mu\text{m}$ 陽刻加工	0.85 s	433 $\mu\text{m}$	$1.73 \times 10^5 \text{V/m}$
間隙 $25\mu\text{m}$ 陰刻加工	1.68 s	426 $\mu\text{m}$	$1.48 \times 10^5 \text{V/m}$

- 截面 $y=0$
- 最大加工深度 $10\mu\text{m}$

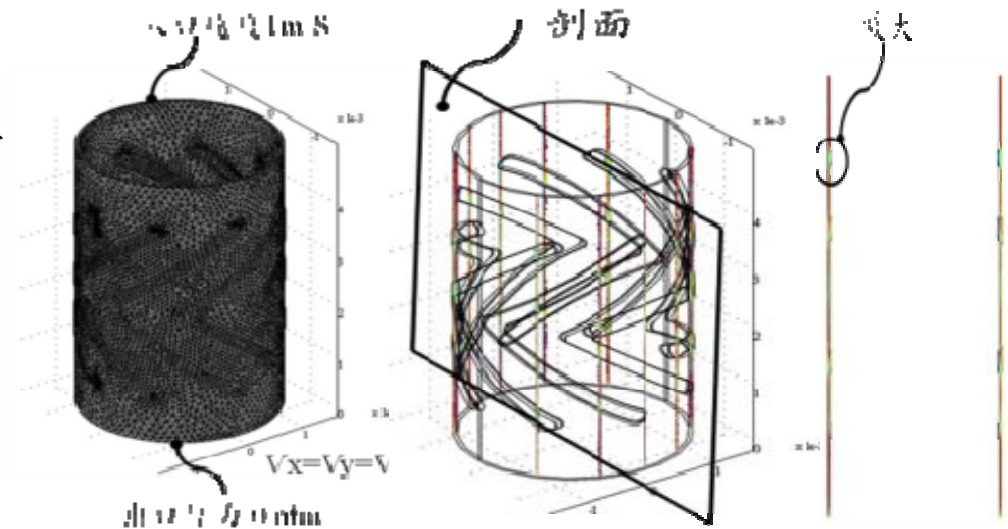




# 流場分析

- 目的：  
分析平衡間隙及陰極加工方法對流場及加工的影響。

- 邊界條件：  
流場入口速度為1m/s  
出口壓力為1大氣壓力。



流體有限元素模型及邊界條件      流場分析結果      流場分析結果剖面

- 電解液流體性質：  
密度  $\rho=1081.9\text{kg/m}^3$   
動黏滯性  $\eta=1.01 \times 10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}$

## ● 流場微分方程式(PDE)

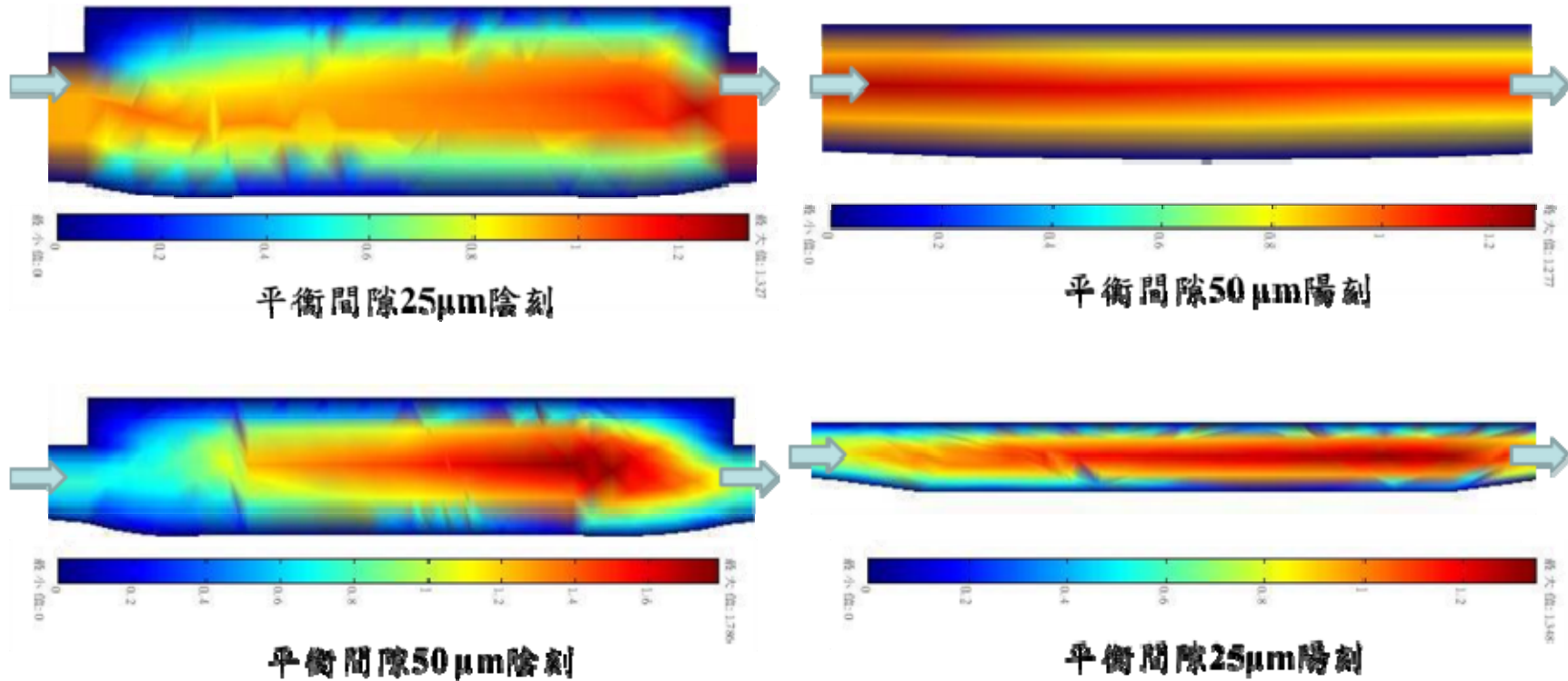
$$\rho u \cdot \nabla u = \nabla \cdot [-pI + \eta (\nabla u + (\nabla u)^T)]$$

$$\nabla \cdot u = 0 \quad u : \text{速度} \quad p : \text{壓力}$$





## 動壓軸承流場流速分佈



- 平衡間隙越小電解液排削及更新功能越差。
- 陽刻陰極刀具會因流場極間速度分佈一致使電解液濃度均勻，所加工出工件表面品質優於陰刻陰極刀具。



## 微動壓軸承電壓脈衝分析 I

- 目的：

為使分析更貼近真實狀況將模型由平面改為曲面，並探討脈衝電壓對加工時間影響。

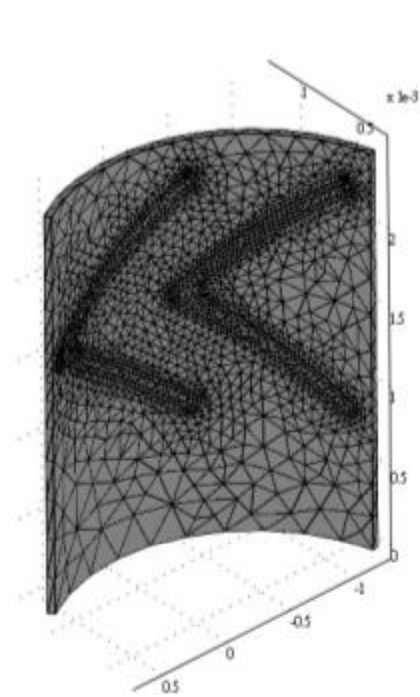
- 改變的參數包含：

1. 因為陰極電極製作只能陰刻。
2. 只考慮電極的電壓脈衝。

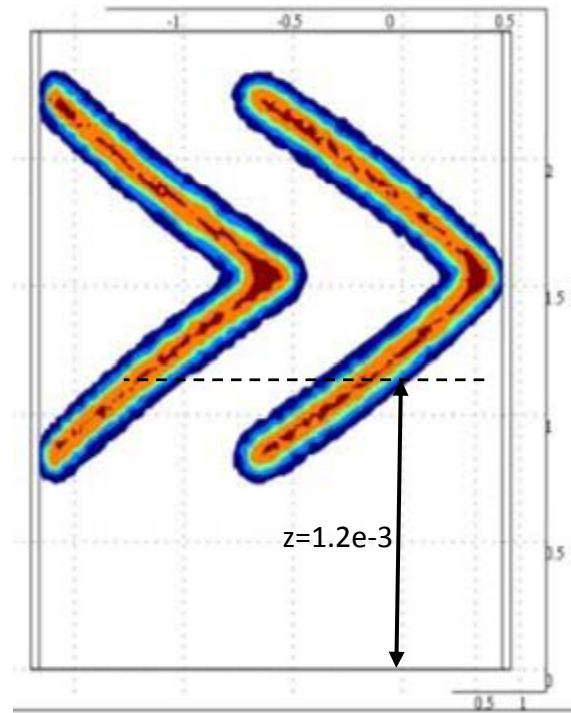
平衡間隙( $\mu\text{m}$ )	25				50			
加工電壓(V)	2	3	4	5	2	3	4	5
脈衝頻率(Hz)	0	0、1、5、10、15	0	0	0	0、1、5、10、15	0	0



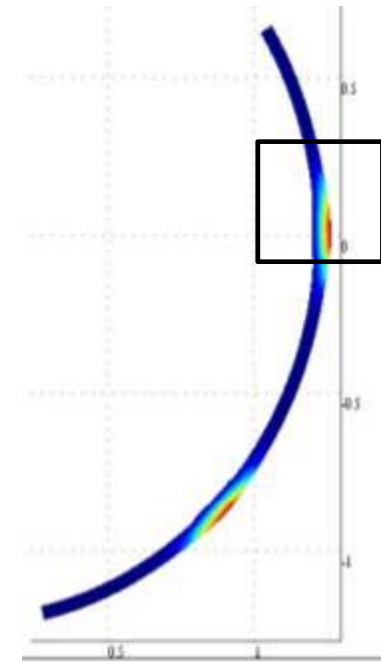
# 微動壓軸承電壓脈衝分析I



軸承有限元素模型



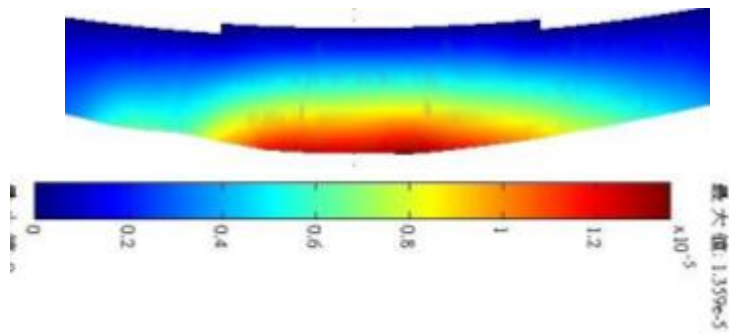
加工量分佈



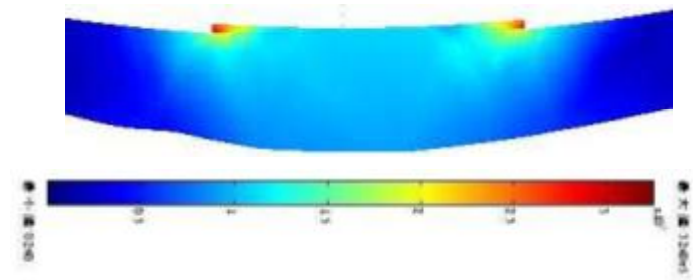
剖面加工量分佈



# 微動壓軸承電壓脈衝分析I

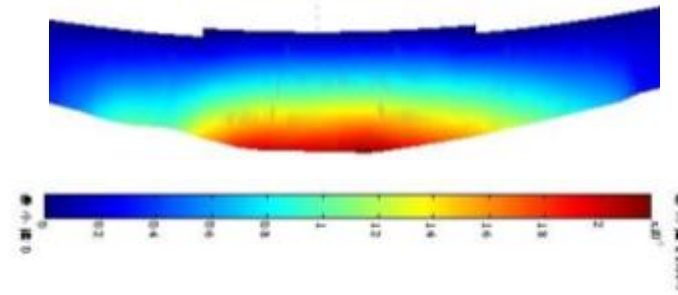


加工深度分佈

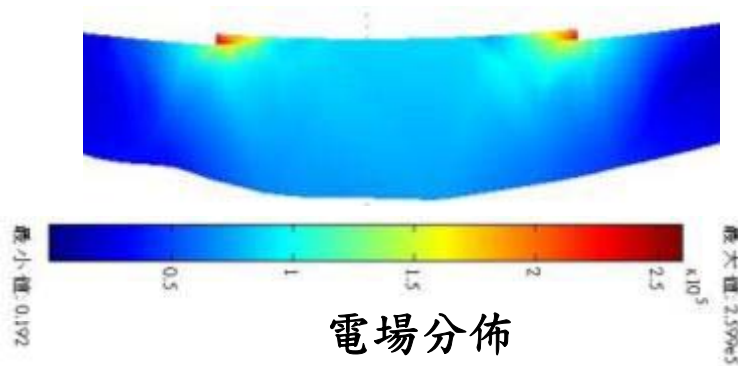


電場分佈

平衡間隙 50微米、加工電壓5V分析結果



加工深度分佈



電場分佈

平衡間隙 50微米、加工電壓4V



## 微動壓軸承電壓脈衝分析I結果討論

- 改變電壓分析結果  
(無脈衝、平衡間隙25  $\mu\text{m}$ )

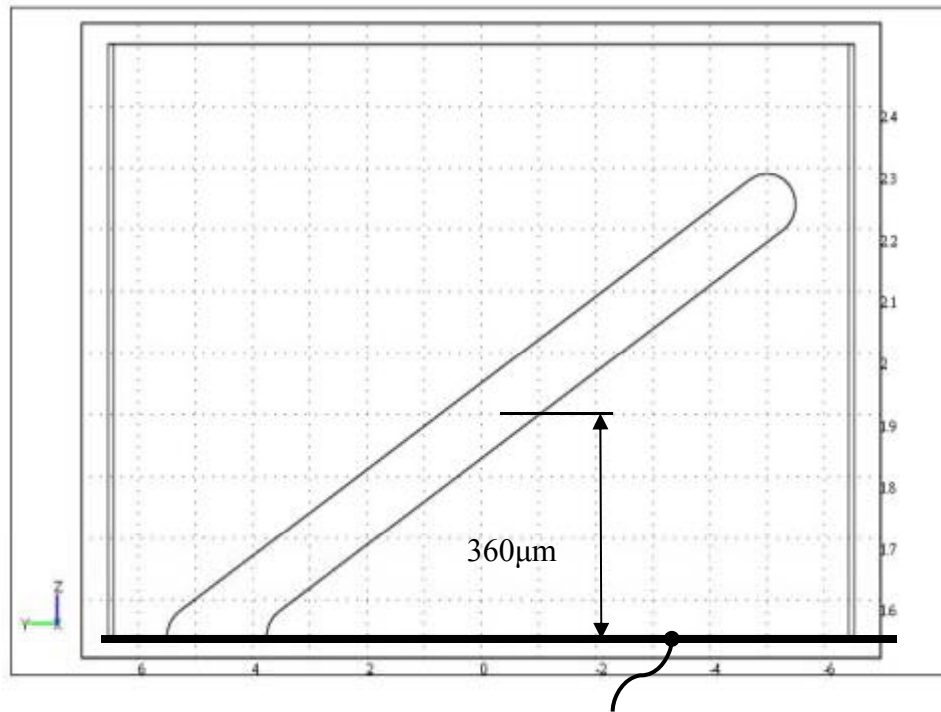
電壓 V	加工時間 (s)	加工深度 ( $\mu\text{m}$ )	擴孔尺寸 ( $\mu\text{m}$ )	最大電場 ( $\times 10^5 \text{V/m}$ )
5	0.8	10.98	265	3.22
4	1	10.98	264	2.58
3	1.2	10.89	262	1.88
2	2	10.98	267	1.29

- 改變電壓脈衝頻率參數分析結果  
(平衡間隙50  $\mu\text{m}$ 、電壓3V)

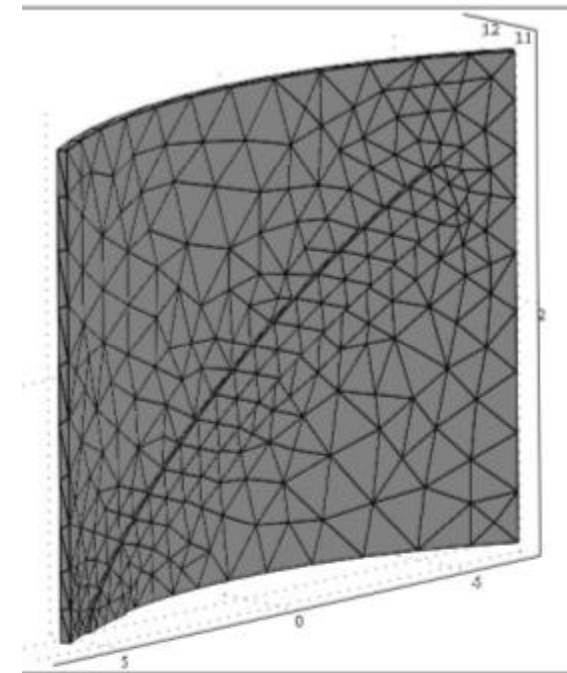
脈衝頻率 (Hz)	加工時間 (s)	加工深度 ( $\mu\text{m}$ )	最大電場 ( $\times 10^5 \text{V/m}$ )
1	4	10.54	0.986
5	4	10.54	0.984
10	4	10.54	0.973
15	4	10.54	0.986



## 微動壓軸承電壓脈衝分析II



對稱邊界:電場為絕緣、移動網格 $u_z=0$   
截面位置



半V形溝槽有限元素模型



## 微動壓軸承加工實測與模擬比對

### 電化學加工模擬：

- 使用與實際加工相同尺寸之動壓軸承進行模擬，為了減少分析所需計算成本，使用半V字形溝槽軸承模型。

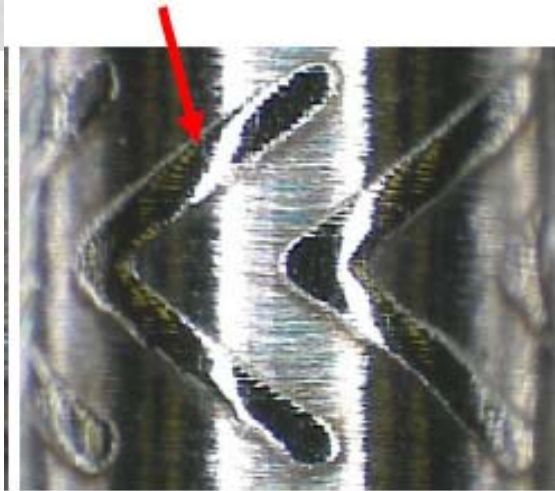
### 加工參數：

- 模擬所使用的加工參數為：
  1. 加工電壓7V。
  2. 平衡間隙50 $\mu\text{m}$ 。
  3. 使用脈衝電壓加工，但是因受限電腦計算能力與軟體功能，電壓脈衝只有1000Hz，脈衝時間配比:500 $\mu\text{s}$ :500 $\mu\text{s}$ 。





## 微動壓軸承加工實測與模擬比對



動壓軸承剖面



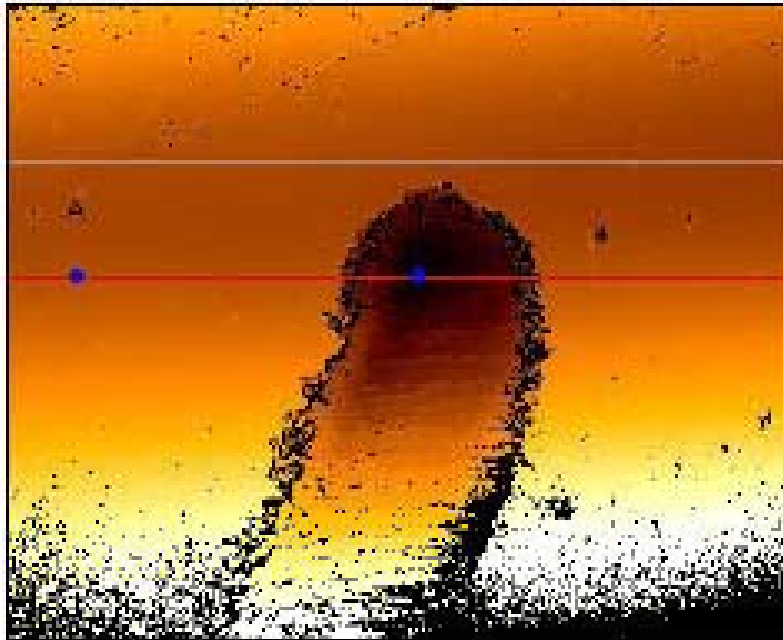
干涉物鏡掃描影像



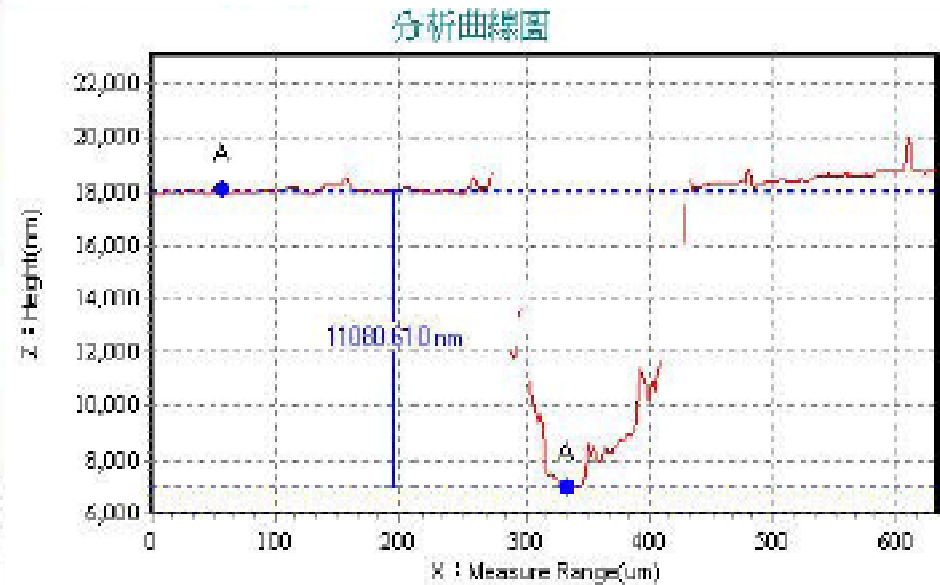
量測位置示意圖  
(紅色框)



## 微動壓軸承加工實測與模擬比對



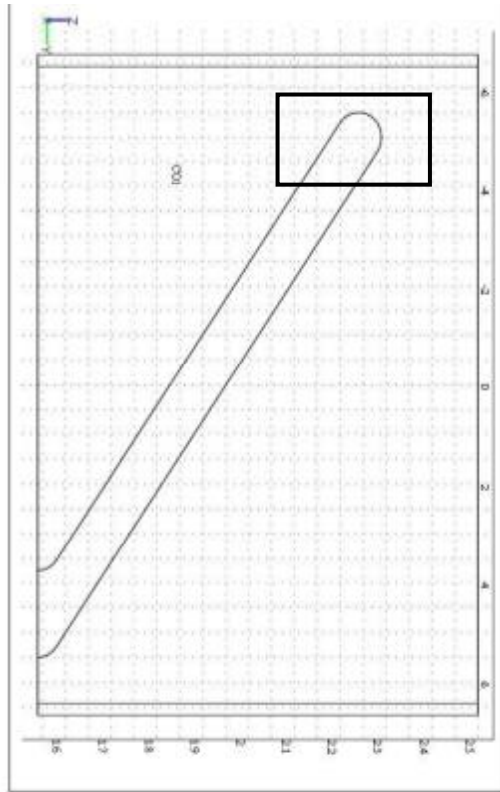
待測影像及剖面位置



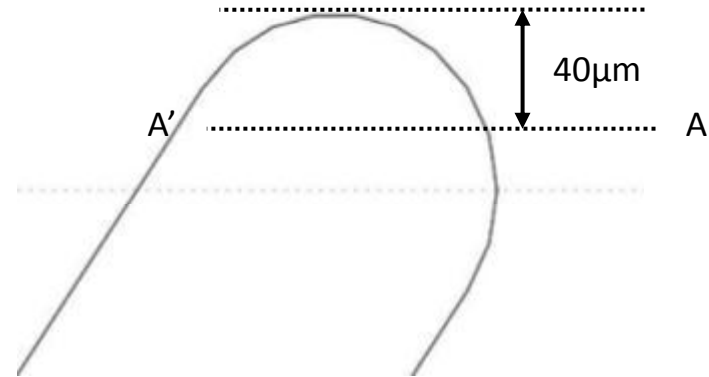
干涉物鏡掃描出之表面形貌圖



## 微動壓軸承加工實測與模擬比對



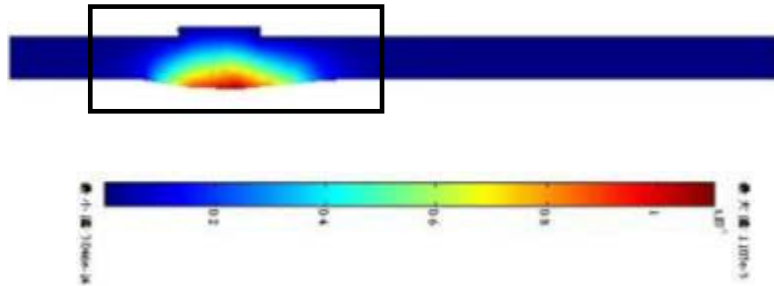
電化學加工表面形貌模擬位置示意圖



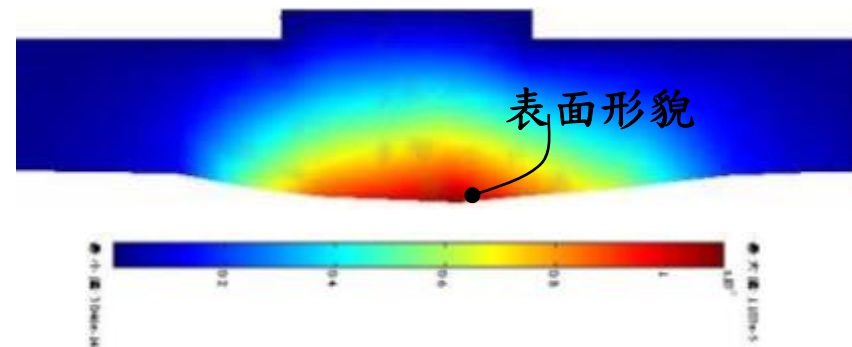
電化學加工表面形貌模擬剖面位置圖



# 微動壓軸承加工實測與模擬比對



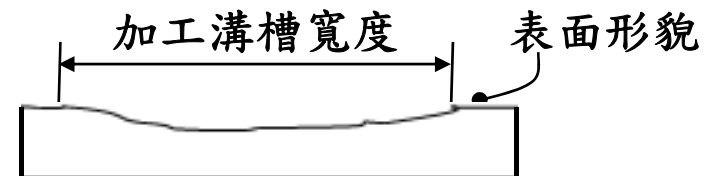
AA'剖面加工表面形貌及加工深度分佈模擬圖



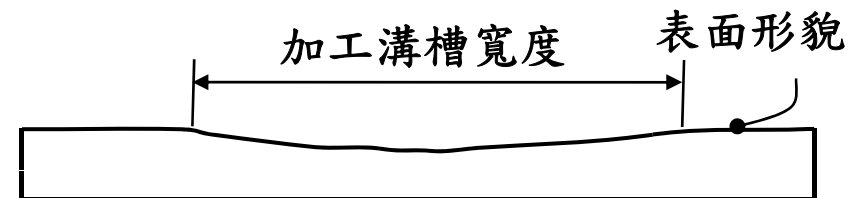
局部放大圖

## 動壓軸承電化學實際加工及模擬結果

截面	加工溝槽寬度 (μm)	加工深度 (μm)	加工時間 (s)
模擬	220	11.11	2
實際	170	11.08	10



干涉物鏡掃描表面形貌輪廓



模擬表面形貌輪廓



## 結論

- 從微動壓軸承流場分析中可知平衡間隙 $50\mu m$ ，陽刻加工之陰極工具其流速分佈均勻使加工品質改善但是增加平衡間隙會增加電阻及減少電流密度降低加工效率。
- 固定加工深度，加工電壓越大電場值越大雖然加工時間減少但是容易造成尺寸過切造成精度減少，所以建議使用低電壓如 $2V$ 加工。
- 使用脈衝電壓，雖然會加倍加工時間但是會降低最大電場值，可避免加工尺寸過切提高加工精度。

由上述結論建議使用低電壓加工 $2V$ 及高頻脈衝電壓、低平衡間隙 $25\mu m$ 及陽刻陰極刀具等參數組合可得到較佳加工品質，但陽刻加工技術困難有待於克服，且必須注意平衡間隙 $25\mu m$ 電解液排削及更新的能力。



# 精微電解加工 微孔平衡間隙預測研究

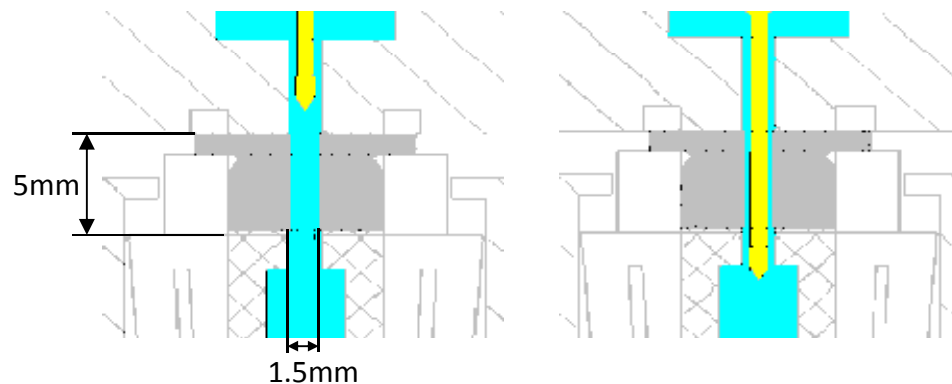
101年 台中金工中心合作研究計畫

# The Problem Statements

The current product design trends of "light, thin, short, and small", It necessitates the development of micro-technologies such as micro-machining, micro-ECM, micro-EDM, laser beam machining, photo-etching, and EBM, etc.

Micro-structures such as micro holes, fine grooves, micro channels and micro surface texture are essential geometrical profile for micro-components.

- Micro cylindricity hole  $\Phi$ :1.5mm L:5mm
- Cylindricity spec.  $1\ \mu\text{m}$
- Concentricity spec.  $5\ \mu\text{m}$



( ECM Broaching )

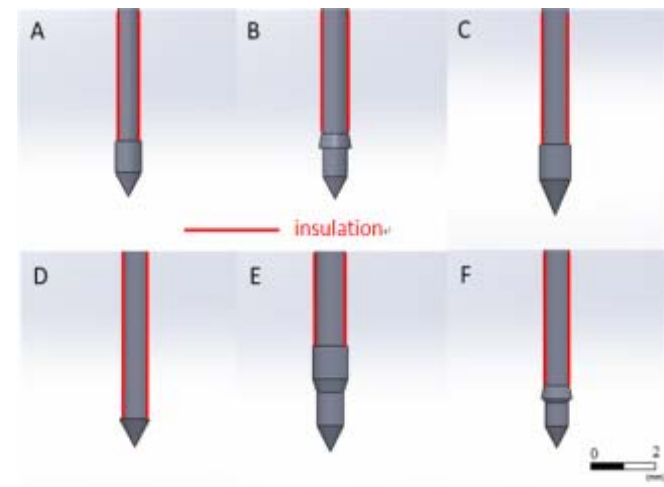
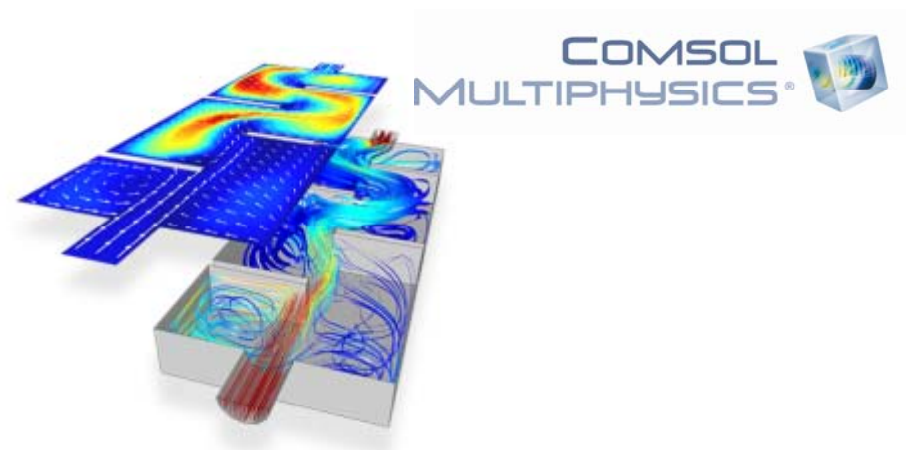


( ECM broaching process )



# The approaches

- Simulation by COMSOL Multi-Physics
  - AC/DC
  - Acoustics
  - Chemical species transports
  - Fluid Flow
  - Heat transfer
  - Structural Mechanics
  
- Pre screening by electrolyte temperature
  - Joule heating model
  - Laminar flow model
  
- Tool design and process parameter simulation
  - Cathode tool
  - Voltage, fluid pressure, process time
  
- Machining profile simulation
  - Cylindricity of front sectional profile
  - Concentricity of cross sectional profile



Cathode tools

# Analysis model by COMSOL

## ● Simulation by COMSOL

- AC/DC
- Fluid Flow
- Heat transfer
- Structural deform

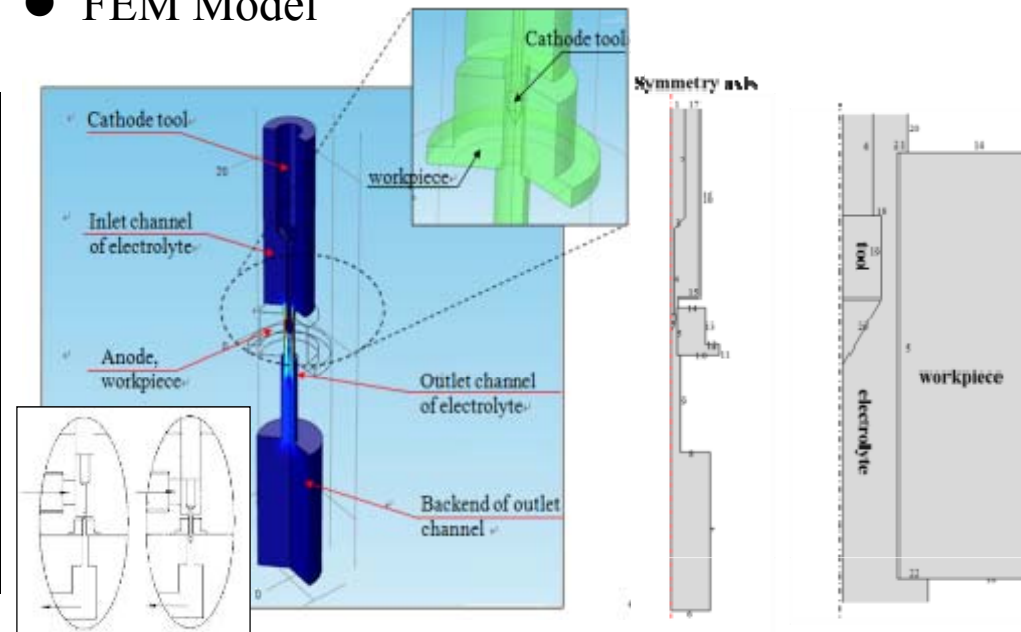
## ● Material property:

	Electrolyte 15%Na <sub>2</sub> NO <sub>3</sub> (aq)	Cathode tool & Workpiece (SS304)
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1050	8000
Specific heat (J/kg.K)	4200	500
Thermal conductivity (W/m.K)	0.0015T+0.1689	6.7422+0.2865T <sup>-1</sup>
Electric Conductivity (S/m)	$K=9.496[1+0.08(T-T_0)]$ ; $T_0=293.15K$	1.38x10 <sup>6</sup>
Viscosity (Pa.s)	0.001	--

## ● Conditions:

- Pressure: 100 Pa and 10,000 Pa
- Voltage: 8 V and 15 V
- Time: 300 sec.

## ● FEM Model

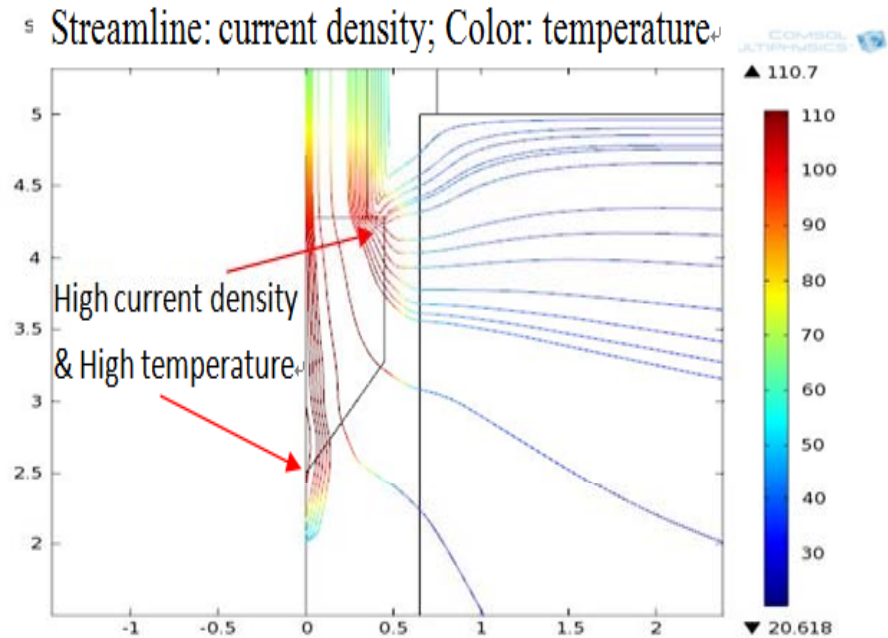


## Pre-Screening by electrothermal effect - Thermal field effect analysis

- The sharp edges cause high current density areas and high temperatures.
- The cathode tool A and D are chosen for the advanced simulation of inner cylindricity and concentricity because of the lower temperature electrolytic.

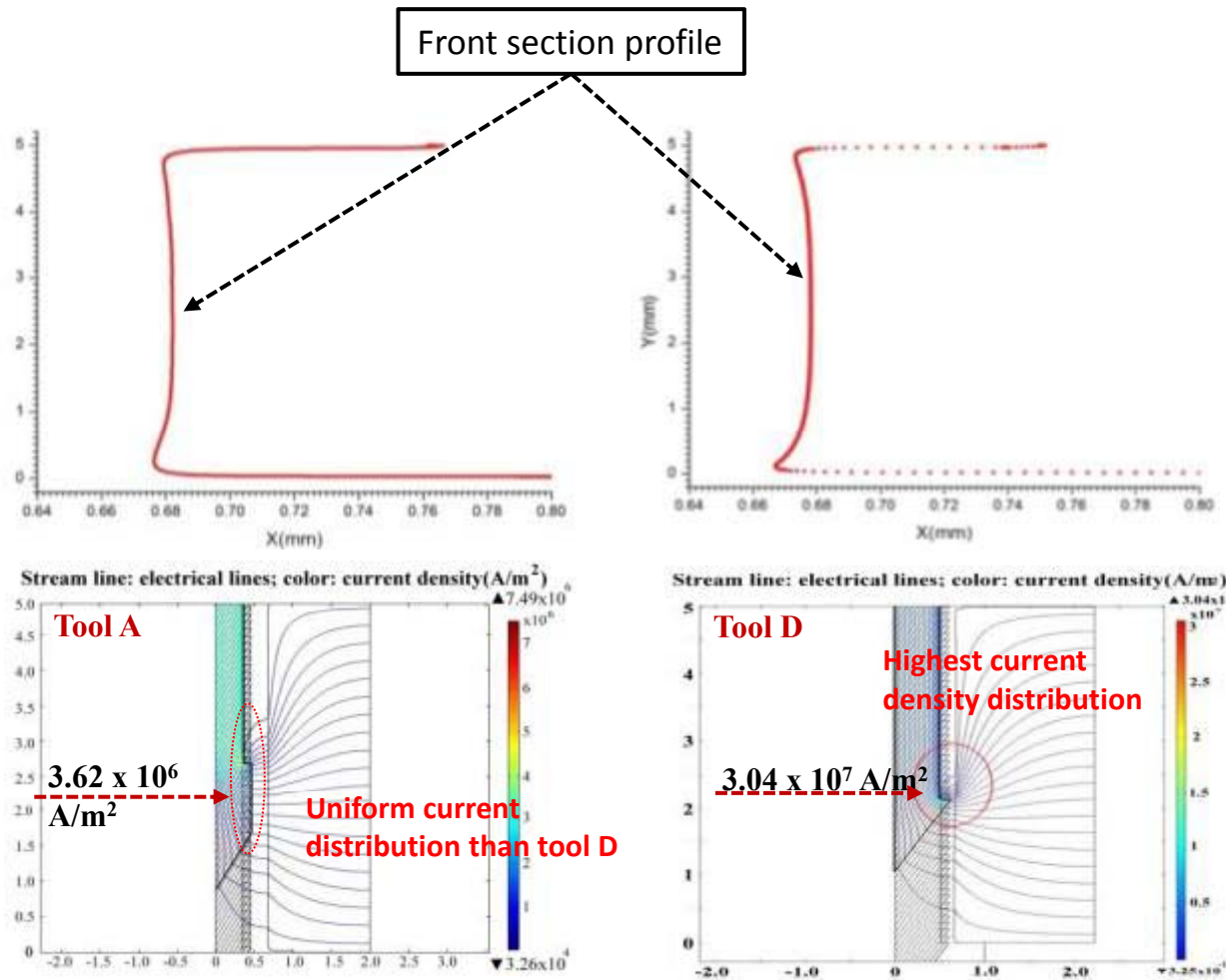
The highest temperature on 6 cathode tools under different conditions

Applied voltage	8 V			15 V		
Electrolyte	forced convection flow			forced convection flow		
Cathode Tool	No pressure	100 Pa	10,000 Pa	No pressure	100 Pa	10,000 Pa
A	110.76°C	83.19°C	68.01°C	189.19°C	159.72°C	139.57°C
B	117.73°C	108.74°C	99.94°C	207.39°C	188.94°C	182.22°C
C	121.94°C	121.81°C	107.09°C	208.27°C	207.98°C	187.81°C
D	95.82°C	81.66°C	73.43°C	163.64°C	145.19°C	139.63°C
E	123.18°C	122.92°C	116.89°C	210.38°C	209.92°C	204.01°C
F	110.71°C	108.38°C	97.17°C	189.24°C	198.51°C	171.73°C



Current density and temperature distributions on cathode tool A

## Simulation of Front section profile (cylindricity) by A and D cathode tool

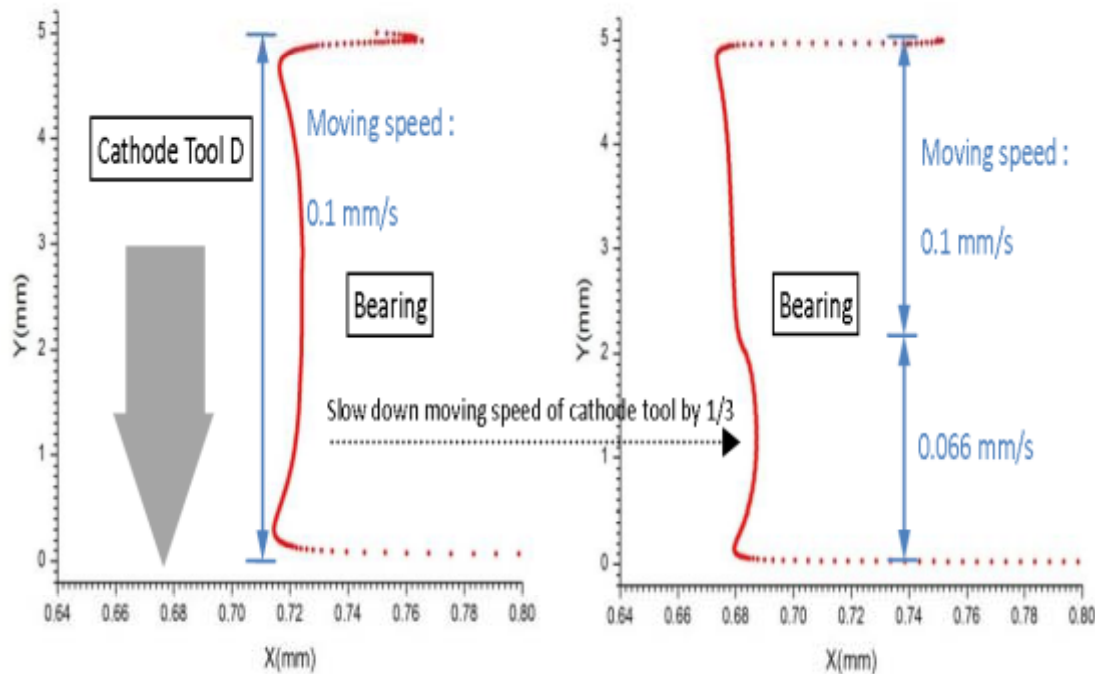


Electrical field distribution in the ECM system by cathode tools A and D of 15 V

- Tool A and D are chosen to analyze on cylindricity and concentricity.
- Feed rate of tool: 0.1 mm/s.
- Process time 61 sec.
- Tool A can produce better cylindricity than tool D because it can provide a more uniform distribution of current density than D.

# Effects of feed rate

In order to reduce the protrusions, the simulation was carried out.



## Simulation Conditions :

### ● Feeding rate:

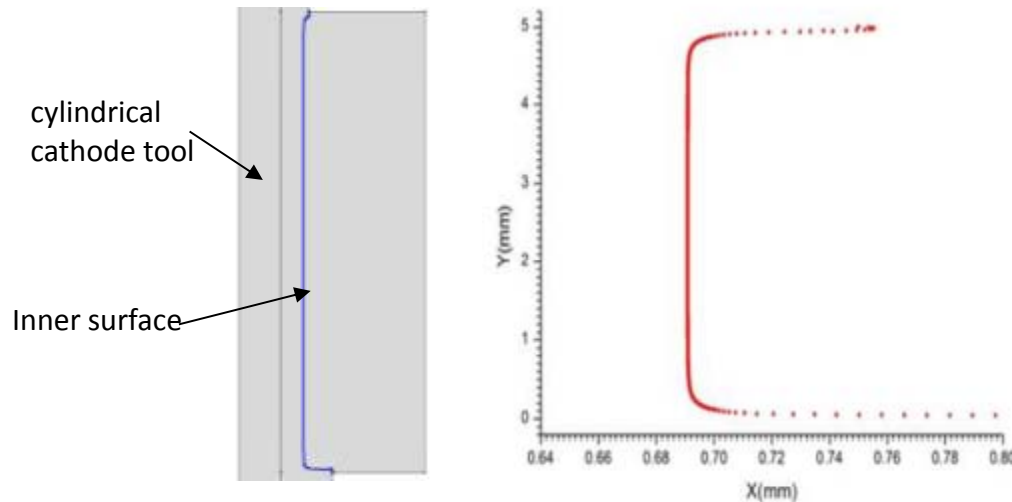
- Constant feed rate 0.1 mm/s
- 2 staged feed rate
  - 2/3 distance, 0.1 mm/s
  - 1/3 distance, 0.066 mm/s

## Simulation results:

- As the feed rate slowed down, the dissolution volume increased.
- The inner surface isn't smooth.
- Varying feed rate isn't a good method to improve the inner surface profile.



# Process of stationary cylindrical cathode

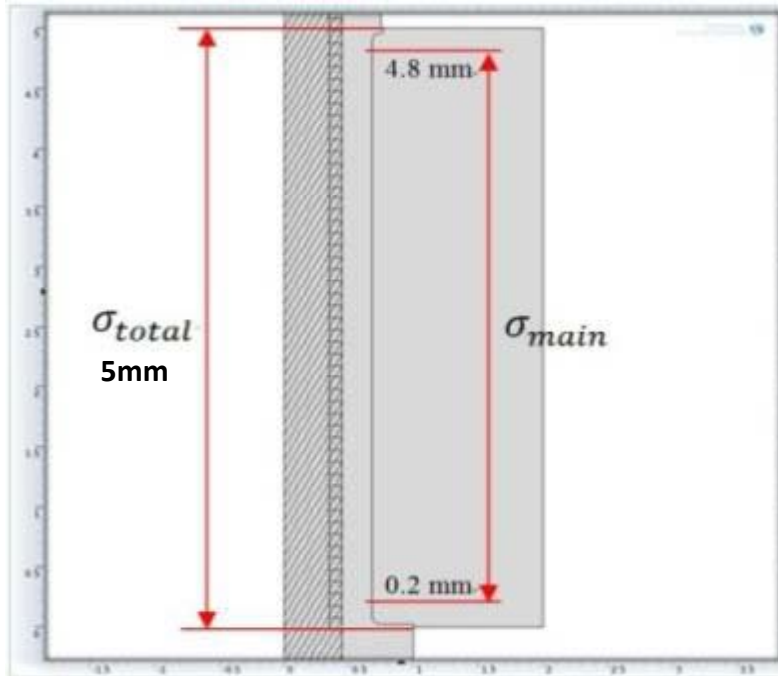


Inner wall profile of bearing after ECM of 15 V with stationary cylindrical cathode.

- Use a cylindrical cathode with good cylindricity
- High current density areas won't transfer from blade to corner
- Provide uniform etching rate on the inner surface
- Process time 30 sec.
- Get a smoother inner surface



## Comparison of three Cathode tools



- $\sigma_{total}$  : the standard deviation of inner diameter of whole bearing
- $\sigma_{main}$  : the standard deviation of inner diameter of main portion of bearing

The comparison of  $\sigma_{total}$  and  $\sigma_{main}$  by three different cathode tools

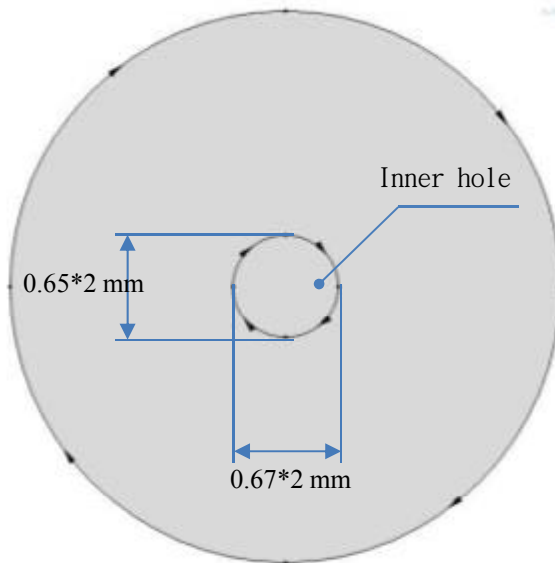
Cathode	Tool A (0.1 mm/s)	Tool D (0.1 mm/s)	Tool A (0.066 mm/s)	Cylindrical
$\sigma_{total}$ (mm)	$5.07 \times 10^{-3}$	$5.03 \times 10^{-3}$	$1.05 \times 10^{-1}$	$5.12 \times 10^{-4}$
$\sigma_{main}$ (mm)	$1.34 \times 10^{-3}$	$1.88 \times 10^{-3}$	$5.73 \times 10^{-3}$	$4.89 \times 10^{-4}$

- The  $\sigma_{main}$  of tool D is worse than tool A.
- Reducing feed rate doesn't improve the final surface.
- The profile cylindrical cathode tool improves the standard deviation of cylindricity by 4 to 10 times comparing to tools A and D.
- The cylindrical cathode is a better choice to improve the inner cylindricity.

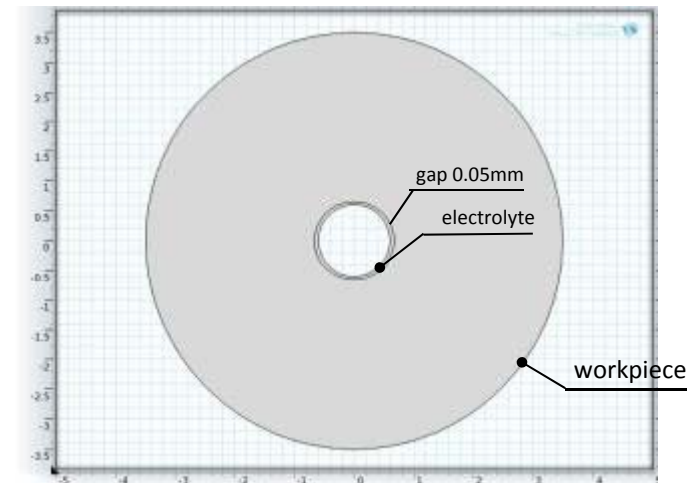
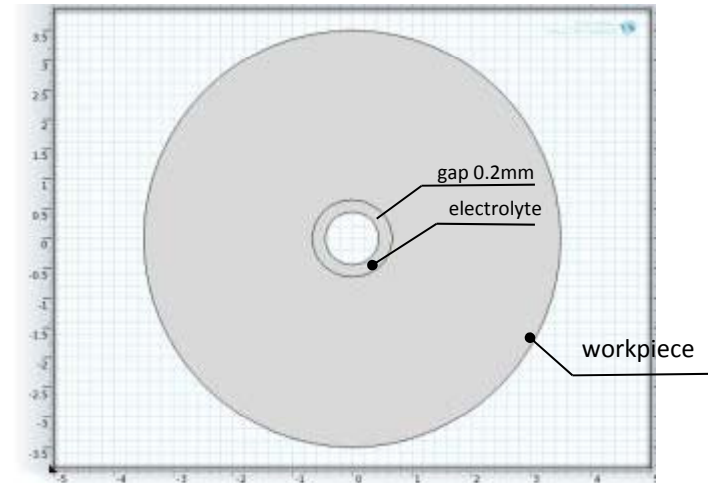


# Simulation of Cross-sectional Profile (Concentricity)

The cross-section of workpiece



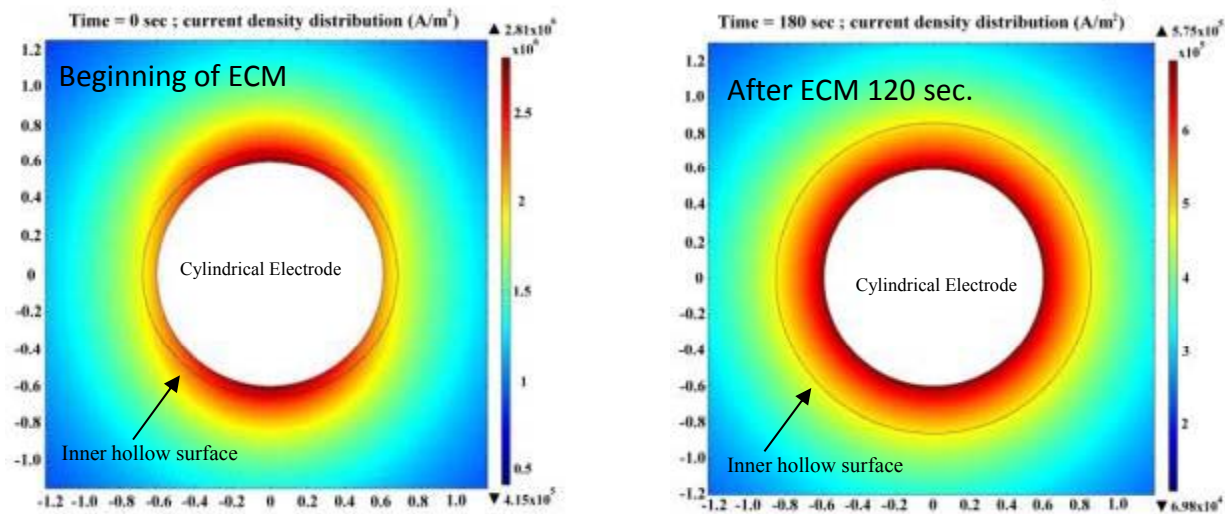
- Out of roundness **20  $\mu\text{m}$**  between the X and Y direction
- Rotating cathode tool
- Working Gap: **0.2 mm** and **0.05 mm**



Different gaps between electrode and workpiece

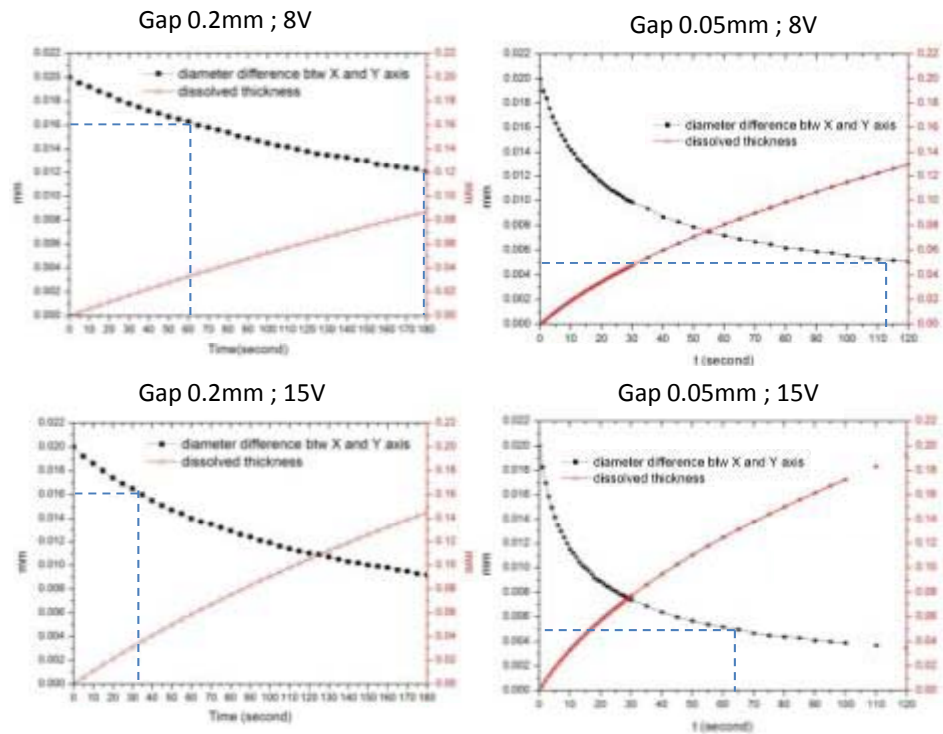
# Simulation of Cross-sectional Profile (Concentricity)

- Beginning of ECM
  - The electrode gap in the Y direction is smaller than the electrode gape in X direction
  - Higher current density distribution occurs in Y direction
  - Material current density isn't uniform
- After 120 seconds
  - The inter-electrode gap enlarges and becomes even
  - The current density distribution is more uniform



Current density distribution before and after ECM process with cylinder cathode tool.

# Effects of process parameters on Concentricity



Concentricity and dissolved thickness change with different voltage and time

- Linearly proportional relationship between dissolved thickness and time in large gap
- In simulation of 0.2mm gap, it would take more than 180 sec. to reach the value of concentricity spec 5  $\mu\text{m}$ .
- In simulation of 0.05mm gap, it takes only 65 sec and 114 sec to realize concentricity spec. 5  $\mu\text{m}$  by 8V and 15V respectively.
- Smaller gap has high dissolution rate, large gap would be better in controlling the dissolution thickness.



# Conclusions

- From the simulation of electrothermal effect coupled with dynamical flow, we selected cathode tools A&D because they generated lower electrolytic temperatures.
- In the simulation of cylindricity:
  - In feeding tool system, we can't have a fine, smooth inner surface profile after  $\mu$ ECM process because of the transformation of high current density area.
  - In non-feeding tool system, the cylindrical cathode tool may provide a finer inner surface profile and  $\sigma_{\text{main}}$  under 1  $\mu\text{m}$ .
- In the simulation of concentricity:
  - In the simulation with 0.05 mm gap, the dissolved rate is high and easy to reach the concentricity spec. 5  $\mu\text{m}$  in shorter time.
  - In the simulation with 0.2 mm gap, it may take large to reach the concentricity. But the dissolved thickness is easy to forecast.

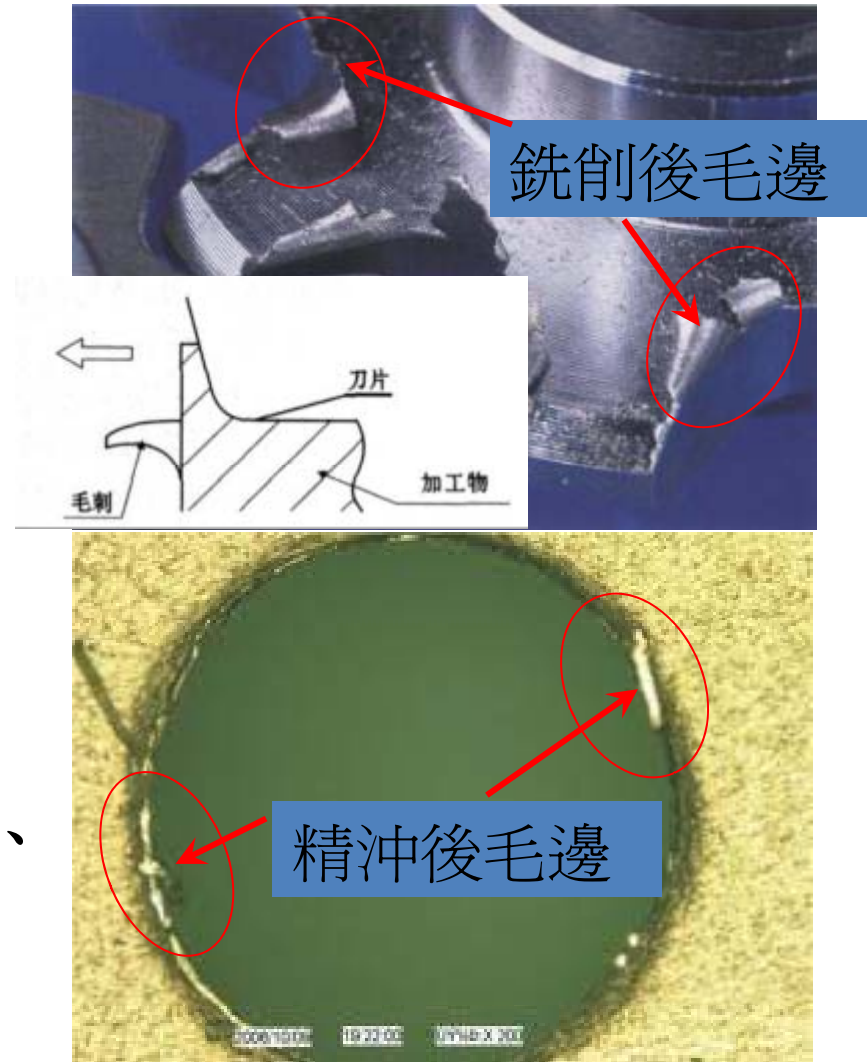


# 精微電解加工 電解去毛邊應用



## 毛邊的產生

- 工件在刀具切削力作用下受擠壓而產生剪切滑動的變形過程。
- 工件的邊、角、棱等部位產生較大的塑性變形。
- 當切屑與工件斷裂分離的過程中會使其一部分滯留在工件的邊、角、棱等部位，形成了所謂的毛邊。

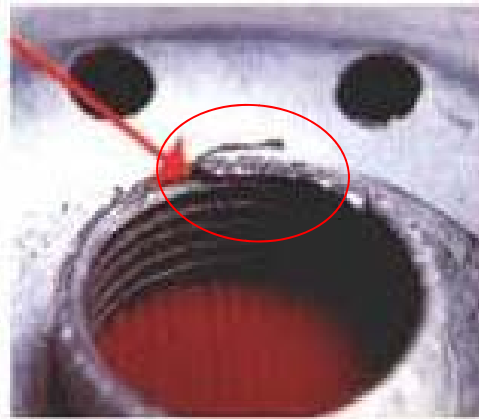






## 毛邊的危害

- 干擾工件的測量精度。
- 影響加工的定位。
- 對操作者的安全構成威脅。
- 影響品質，甚至無法正常組裝。
- 工件表面美觀度、產品的銷售。







# 研究動機

- 處理精光沖製零件毛邊難題；
- 減低勞動部份；
- 降低製造成本；
- 將電化學去毛邊技術應用到實際工作上。

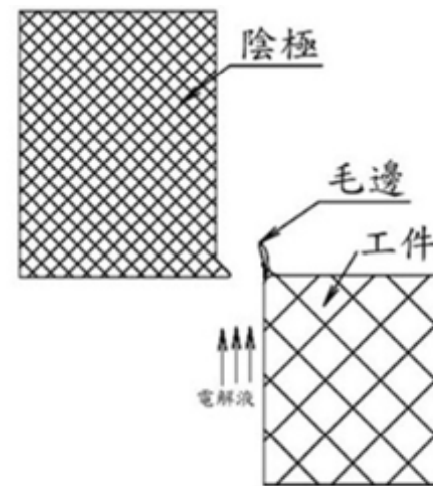
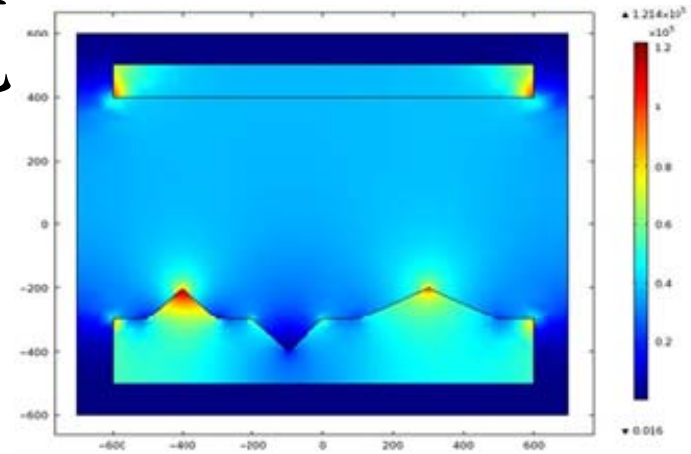




# 電解去毛邊原理

- 電化學去毛邊是利用電能、化學能進行局部陽極溶解來達到去毛刺的目的；
- 電極對準工件毛刺部位，保持一定的加工間隙；
- 通電後電力線高度集中於毛邊部分；
- 最接近陰極的毛邊根部將以最快的速度溶解；
- 邊緣逐漸形成圓角。

電力線





## $3^3$ 全因子&水準數

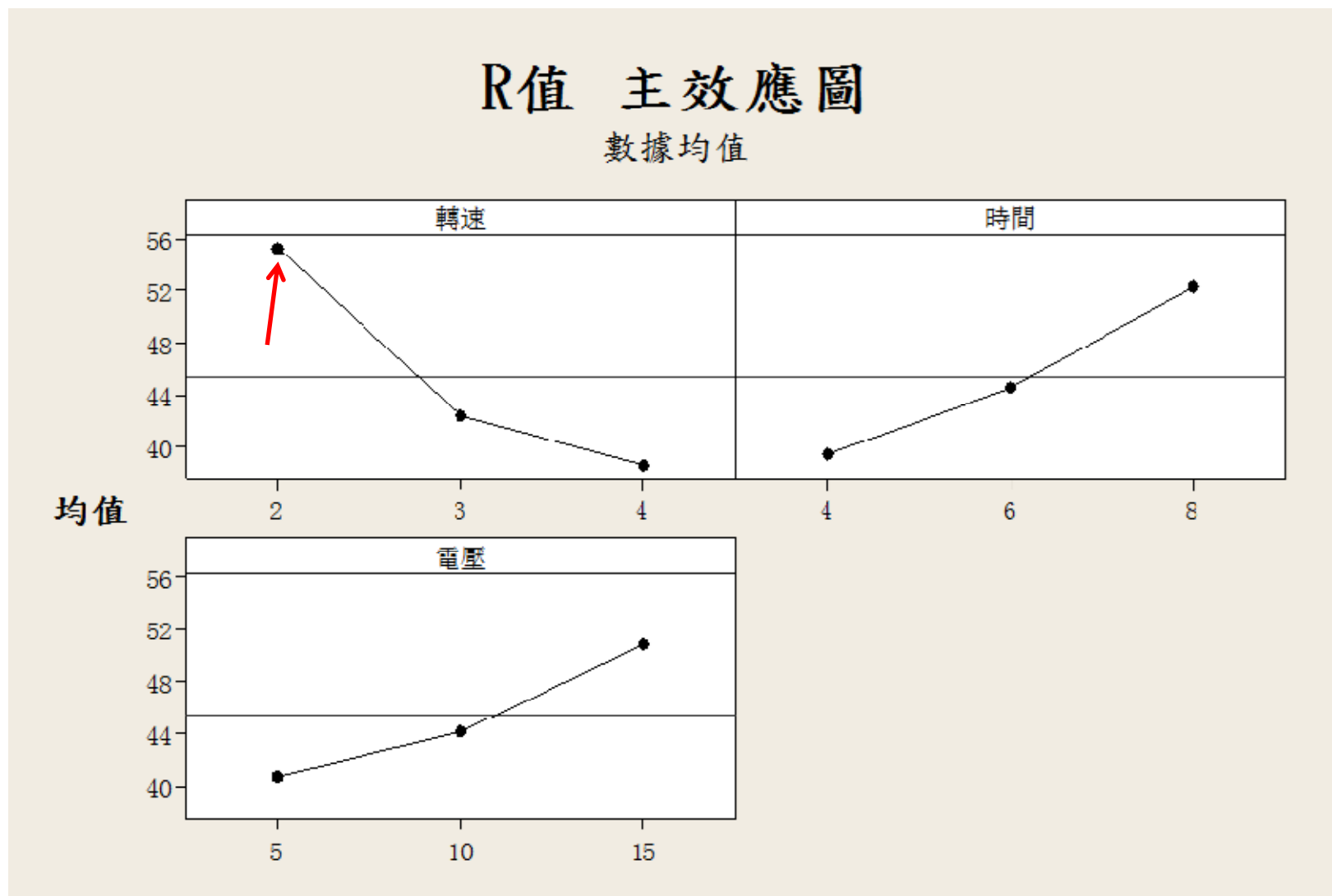
完整實驗採取全因子規劃，因子數:3，全因子設計： $3^3$   
試驗次數: 27。

因子	水準數		
	1	2	3
轉速	2 rpm	4 rpm	6 rpm
時間	6分鐘	8分鐘	10分鐘
電壓	8V	10V	12V

實驗檢測標準，每個實驗組中有150件，依據  
ANSI/ASQC Z1.4-2008計數值抽樣計算，  
每批量應取20件為量測標準。



# R角平均值主效應圖

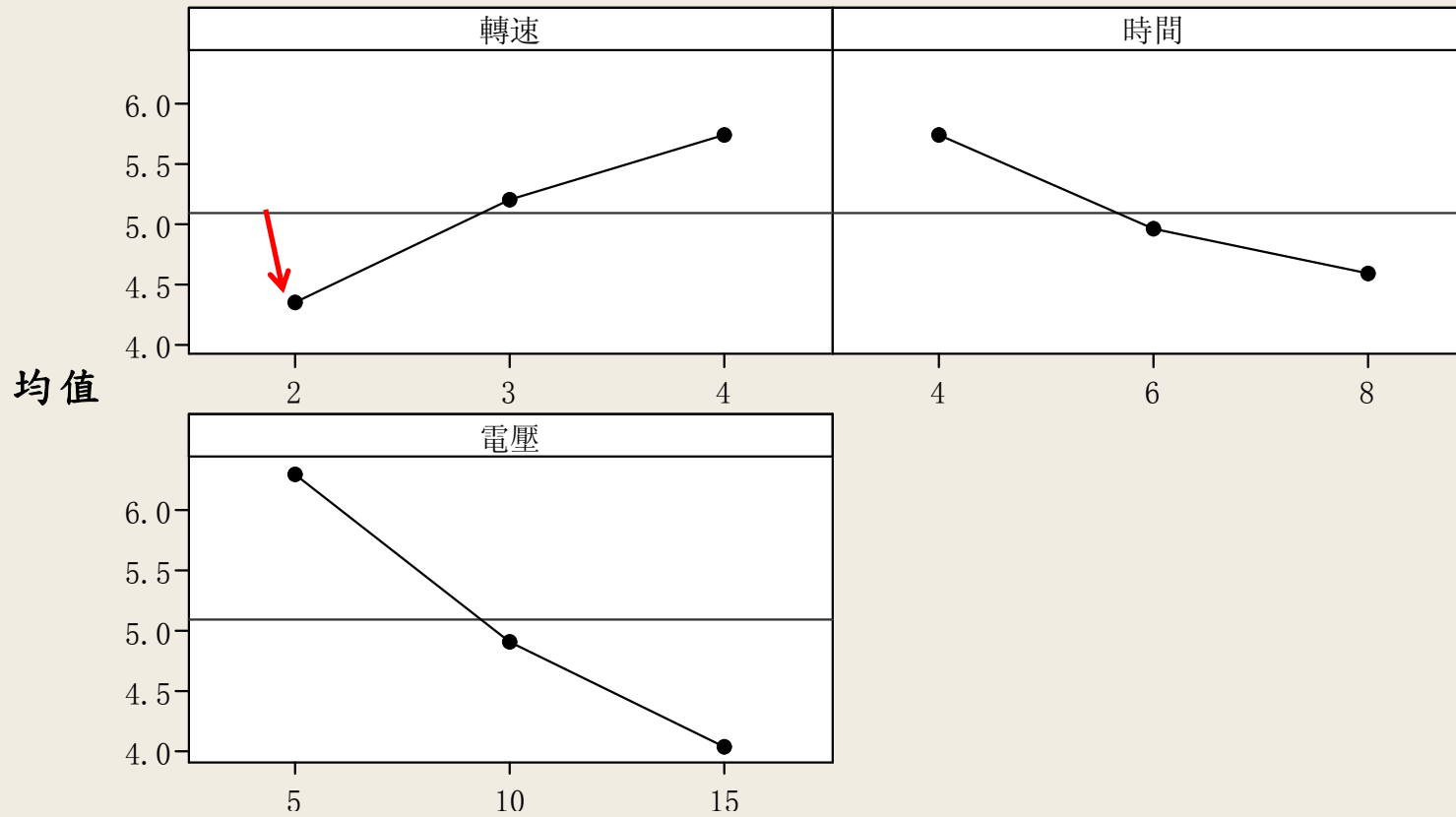




# 標準差主效應圖

## 標準差 主效應圖

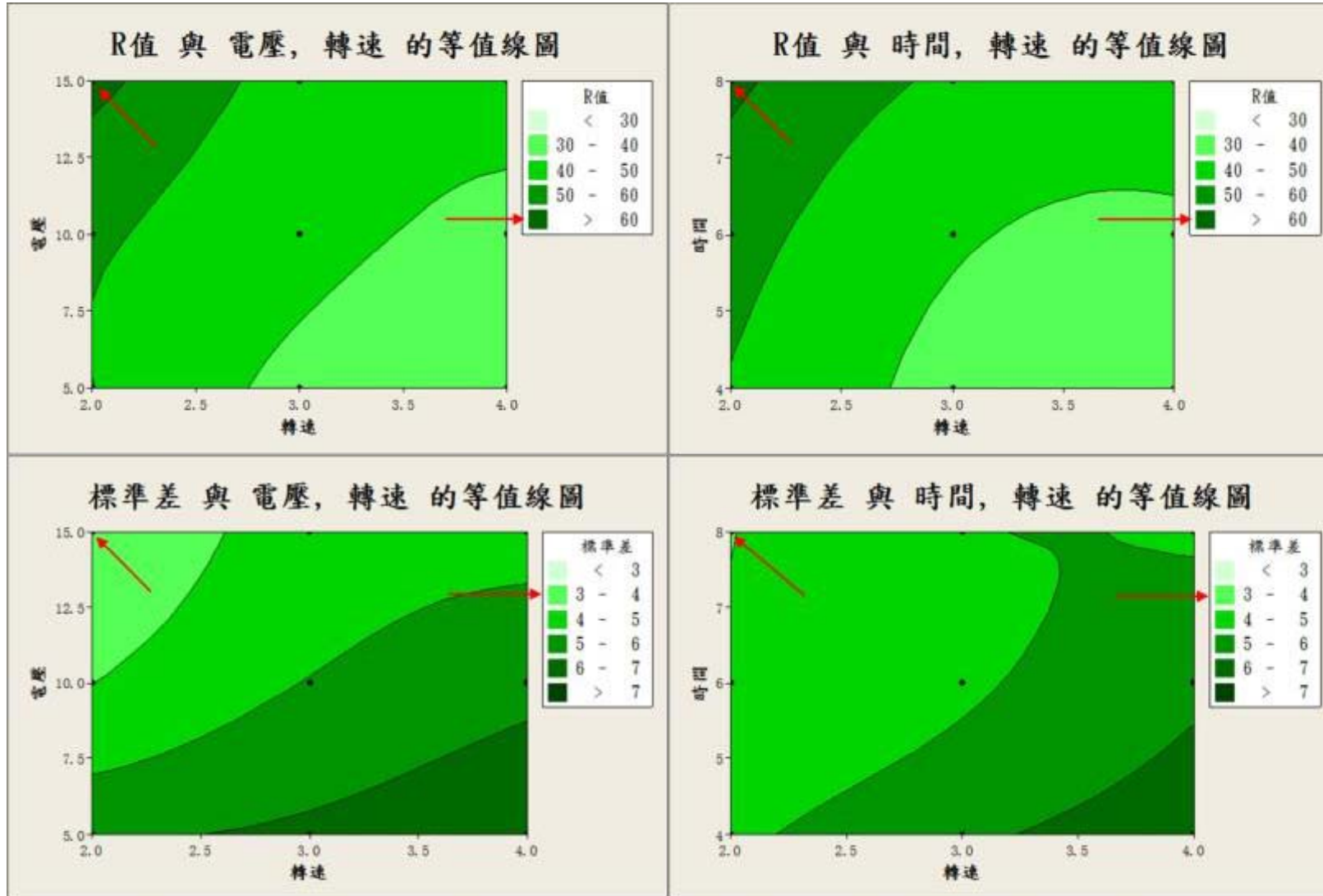
數據均值





# 最佳水準數：

轉速 2rpm、時間 6分鐘、電壓 8V



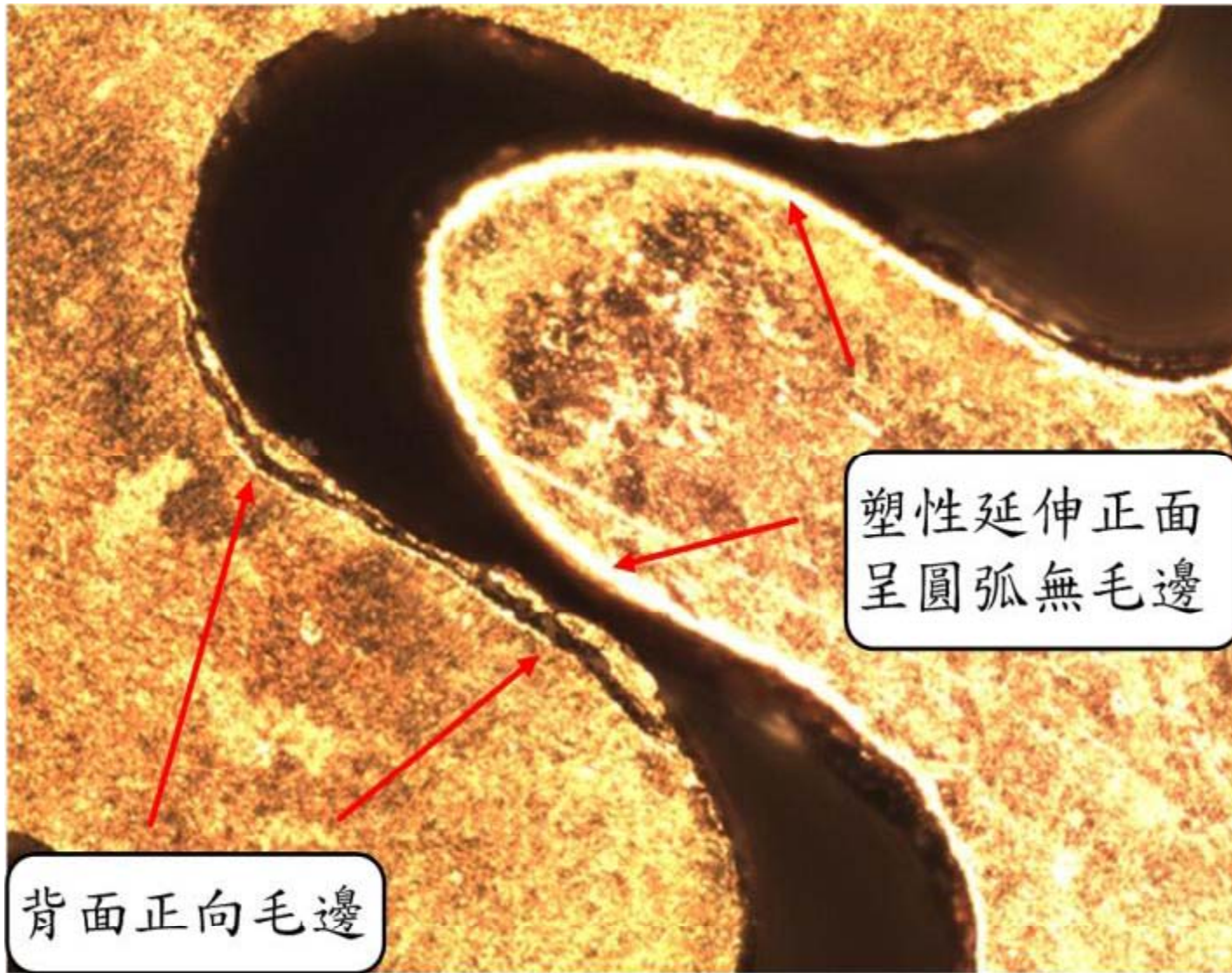
## 最佳化再現性：數據和標準差

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<b>0</b>	65.9	66.89	65.62	67.42	68.36	66.47	65.98	64.82	64.32	64.98	67.41
<b>1</b>	65.98	66.45	66.41	68.06	64.21	65.15	64.38	65.01	68.23	66.50	68.39
<b>2</b>	64.35	65.98	66.91	63.27	67.59	68.59	66.32	67.83	66.53	68.24	64.09
<b>3</b>	66.49	67.13	64.34	68.41	67.93	63.59	63.14	68.52	66.48	66.09	64.58
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	R角均值	標準差
<b>0</b>	65.10	64.65	64.89	64.65	67.63	64.58	66.81	66.39	65.23	65.905	1.204
<b>1</b>	66.41	64.24	66.32	66.06	64.83	65.74	65.94	66.13	64.89	65.966	1.237
<b>2</b>	67.54	63.58	66.73	68.27	66.74	65.22	67.05	66.49	65.89	66.360	1.563
<b>3</b>	66.54	67.29	68.43	67.19	63.18	63.51	64.91	65.05	64.10	65.845	1.850



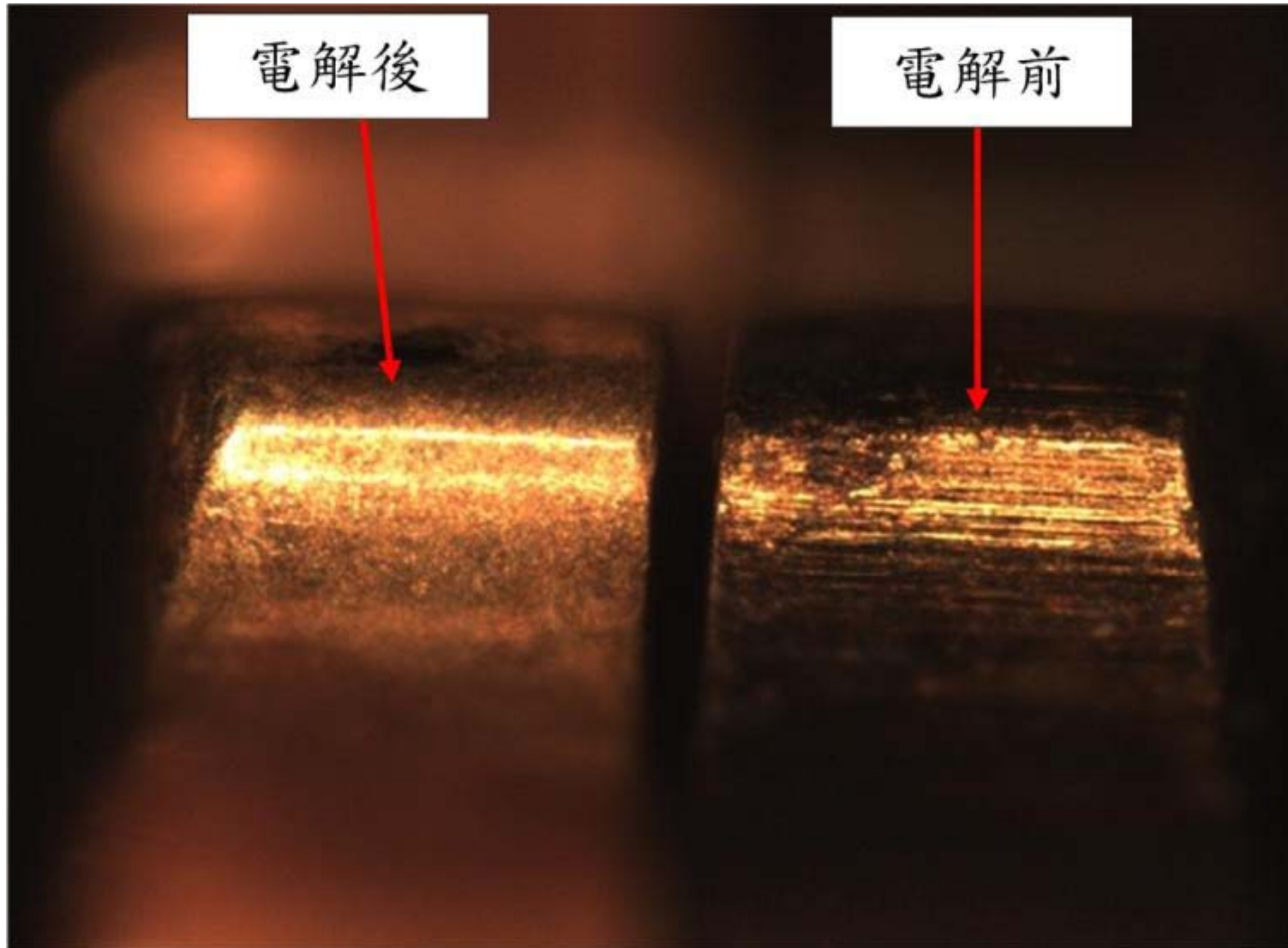


## 電解前的毛邊



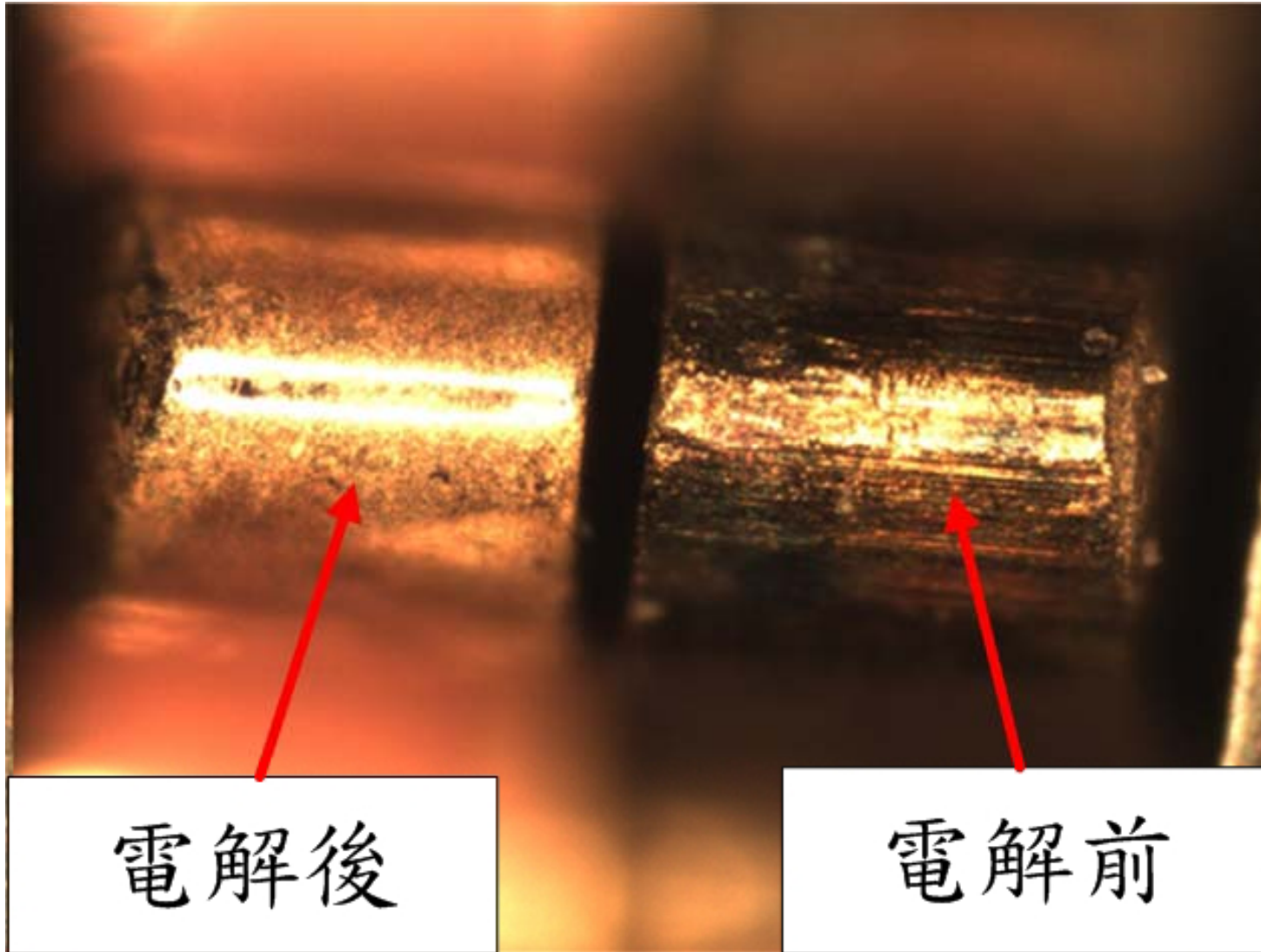


## 電解前後比較





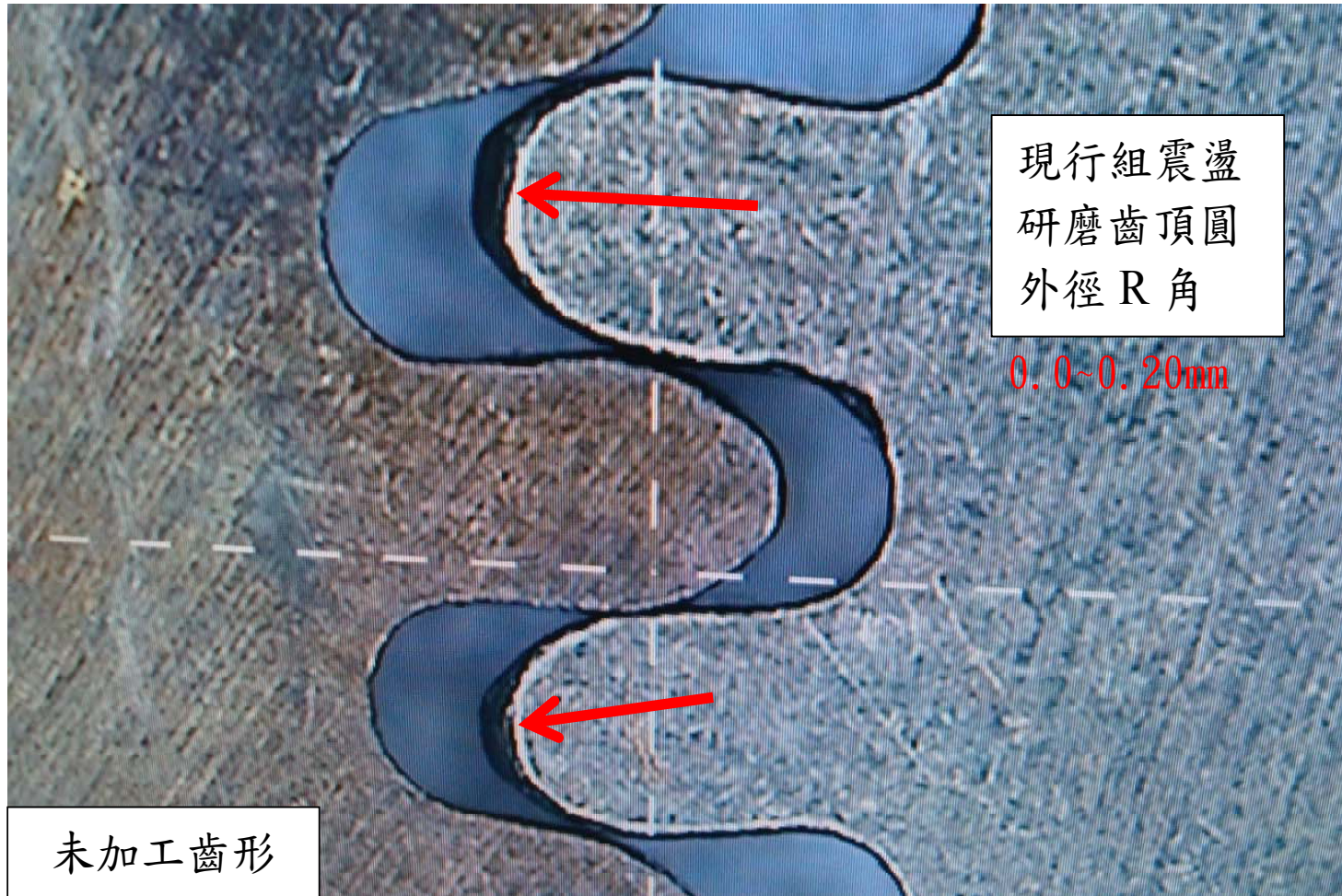
## 電解前後比較





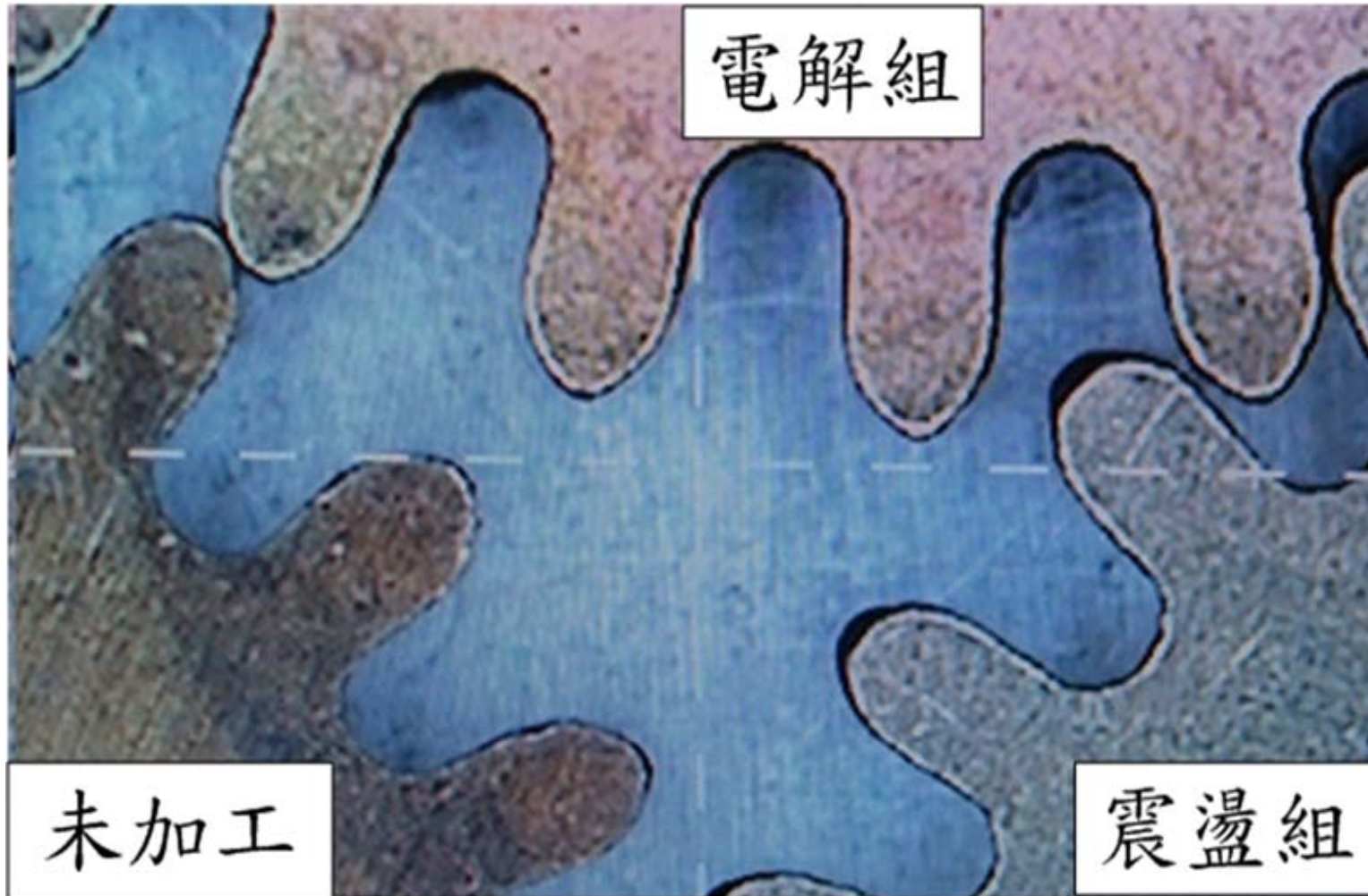


## 震盪成品比較





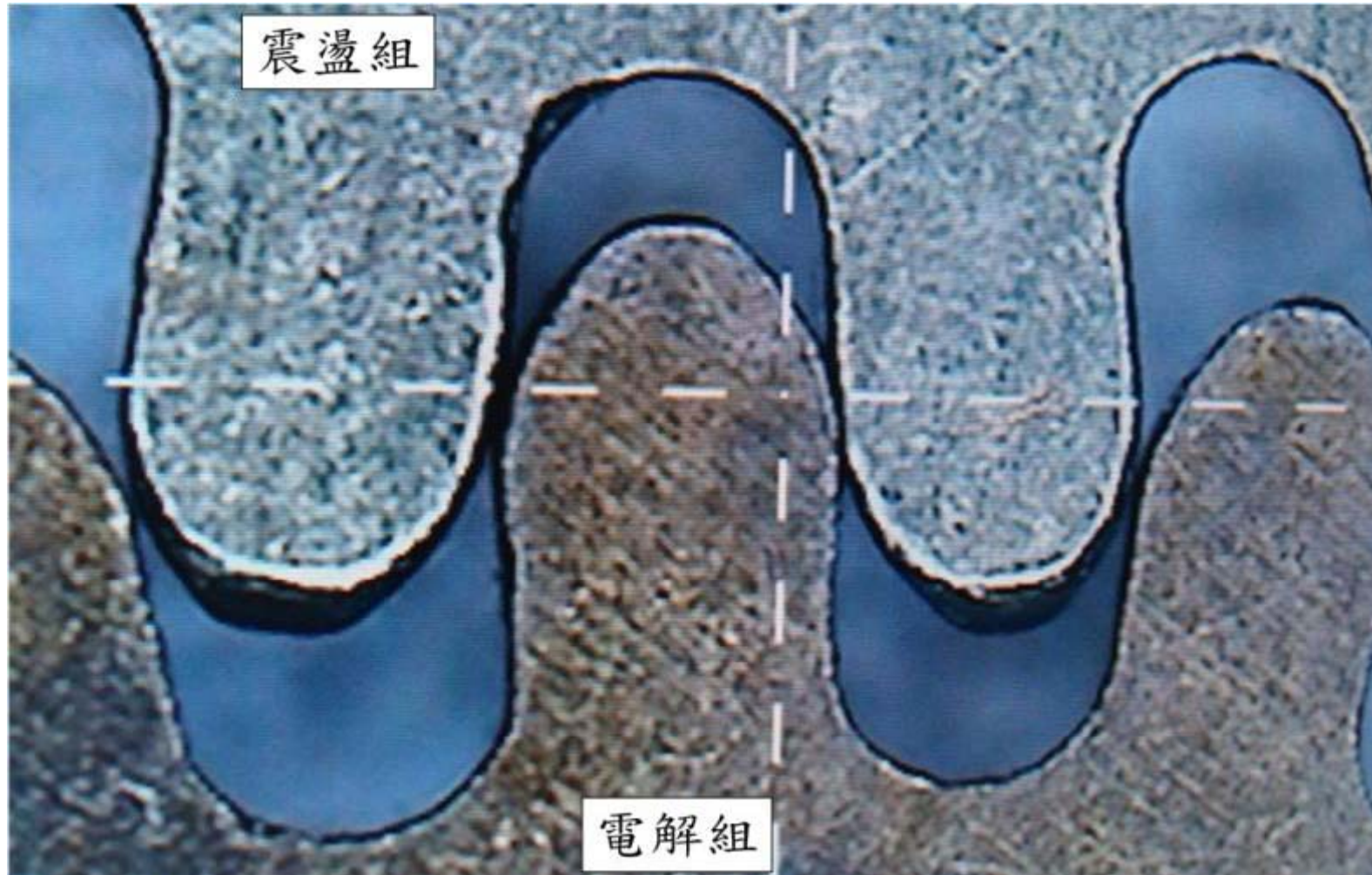
## 電解與震盪 比較





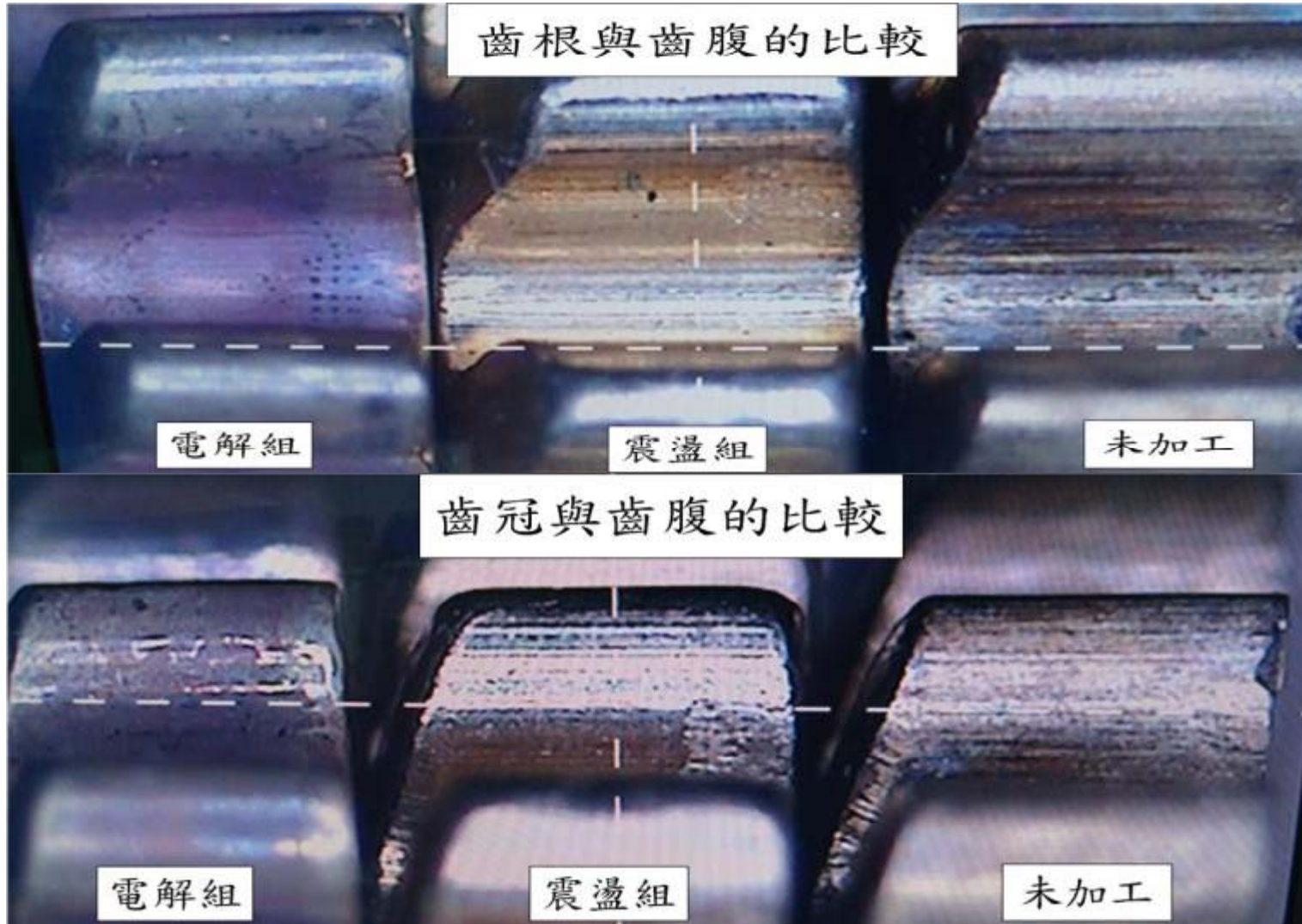


## 電解與震盪 R角差別





## 製程結果 粗糙度







## 結論

- 運用DOE實驗設計，驗證滾鍍方式去毛邊。
  - 經實驗結果，確認可行性。
  - 電解去毛邊，R角值是 $65 \pm 2 \mu\text{m}$ ，取得穩定品質要求。
- 與震盪研磨方式在去毛邊的比較。
  - 圓角半徑： $0.02 \sim 0.20 \text{ mm}$  vs.  $65 \pm 2 \mu\text{m}$ 。
  - 粗糙度：刀痕明顯存在 vs. 表面平滑細緻。
- 電解去毛邊-更有效率及經濟節約成本。
  - 時間：6分鐘 vs. 4小時。
  - 設備：建構裝備成本低。
  - 操作技能：入門基礎低。



## 總結

- 電化學加工具有以下特色：
  - － 加工材料範圍廣，只要可以導電的材料都可以被加工，不受其硬度及強度大小的影響。
  - － 工件加工面的表面粗糙度良好，不會產生毛邊，也沒有殘留應力產生。
  - － 可一次加工完成複雜的形狀，生產率高，加工速度快。
  - － 應用於金屬拋光時，具有潔淨、改質、無拋光應力等優點。
- COMSOL多物理耦合模擬軟體，對於ECM加工是個有效的分析工具。
- 102年2月1日，電化學小聯盟成立，相關資訊 <http://www.ceta.url.tw/>。

台灣科技產業，於電化學加工技術應用層面較不廣泛，且技術與國外尚有差距，對於未來產品“輕、薄、短、小”高值化的需求，日益嚴苛，若能導入電化學加工關鍵技術與COMSOL軟體的應用，將為台灣製造技術，帶來一個新利基。