

# 精密加工基本概念

蔡國銘 副教授

國立勤益科技大學機械工程系

tsai101@ncut.edu.tw

電話：04-23924505轉7175

1

## 蔡國銘

學歷：

國立清華大學 動力機械 博士

經歷：國防部中山科學研究院

台灣機械公司

祥哥精密工業公司

## 研究領域

- 精密機械設計
- 光學元件設計
- 光學元件製造
- 精密量測

## 大綱

- 精密加工和超精密加工的範疇、特點和分類
- 精密加工和超精密加工原則
- 精密加工之材料成形機理
- 精密加工和超精密加工技術
- 精密加工和超精密加工的工作環境
- 精密加工與超精密加工的環境設計
- 精密加工和超精密加工技術的發展

# 精密加工和超精密加工的範疇

- 從先進製造技術主要有精密工程和製造自動化兩大領域
  - **精密工程**：追求加工技術上的極限，例如尺度、精度、表面品質等極限，是為“極限製造”；
  - **製造自動化**：追求產品全生命週期的自動化，例如產品設計、製造和管理等。能夠快速回應市場需求，保證品質，改善勞動條件，是為“自動化製造”。

5

# 精密加工和超精密加工的範疇

- 精密極限加工
  - 極限加工是加工技術的一個重要的發展方向。
    - ☞ 從精度上提出“**極限精度 (Ultraprecision)**”。
    - ☞ 從尺度上提出“**極小尺寸**”和“**極大尺寸**”，同時在加工技術上包括加工和檢測等方面。

6

# 精密加工和超精密加工的範疇

- 1.極限精度
  - 日前精密加工的精度已達到奈米級，奈米尺度加工精度已達0.1奈米級，將向更高精度、更小尺度方向發展，例如量子力學和雷射技術引發的微奈米製造，製造出微奈電子器件、微奈光機電系統、分子器件、量子器件等極小尺度和極高精度產品。
- 2.極小尺寸
  - 精密加工和奈米加工技術向微型化方向發展，尋求更微細的加工技術，即超微細加工技術，包括加工和檢測技術。

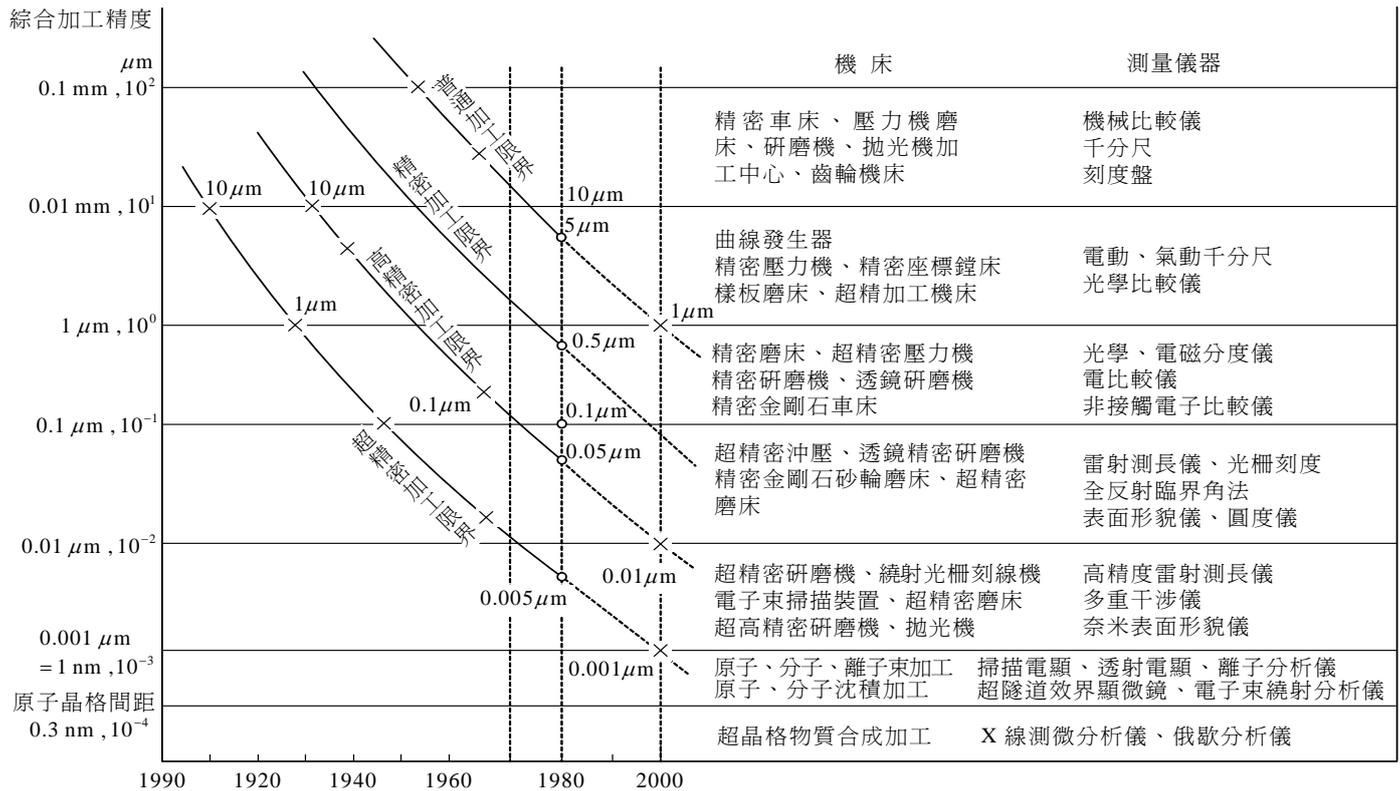
7

# 精密加工和超精密加工的範疇

- 日本學者谷口紀男教授將加工精度的發展分為普通加工、精密加工、高精密加工、超精密加工四類，並早已預測在2000年加工精度可以達到奈米級。

8

# 精密加工和超精密加工的範疇



20世紀以來加工精度的發展歷程

# 精密加工和超精密加工的範疇

- **精密加工**是指加工精度為1-0.1 $\mu\text{m}$ 、表面粗糙度Ra 0.1-0.025 $\mu\text{m}$ 的加工技術。
- **超精密加工**是指加工精度0.1 $\mu\text{m}$ ，表面粗糙度小於Ra 0.025 $\mu\text{m}$ 的加工技術。
- 當前，超精密加工的水準已達到**奈米級**，形成所謂奈米技術。

# 精密加工和超精密加工的特點

1. 創造性原則
2. 微量切除(極薄切削)
3. 綜合製造工藝系統
4. 精密特種加工和複合加工方法
5. 自動化技術
6. 加工檢測一體化

## 1. 創造性原則

- 借助於技術和特殊工具，加工出精度高於“工作母機”的工件，是一種直接創造性原則；但也可研製更高精度的專用機器來加工，是一種間接創造性原則。

## 2. 微量切除(極薄切削)

- 超精密加工時，**進刀量極小，是微量切除和超微量切除**，因此對刀具刀刃磨耗、砂輪修整和機台精度均有很高的要求。

## 3. 綜合製造技術

- 精密加工和超精密加工是一門多學科綜合性的高技術，要達到高精度和高表面品質，涉及被**加工材料的結構及品質**(例如材料結構中的微缺陷等)、**加工方法的選擇**、**工件的定位與夾緊方式**、**加工設備的技術性能和品質**、**工具及其材料選擇**、**測試方法及測試設備**、**恆溫、淨化、防震的工作環境**以及**人員操作的技術**等諸多因素，因此，精密加工和超精密加工**是一個系統工程**，不僅複雜，而且難度很高。

## 4. 精密特種加工和複合加工方法

- 精密加工和超精密加工方法中，不僅有**傳統加工方法**，例如超精密車削、銑削和磨削等，而且有**非傳統加工方法**，即特種加工方法，例如精密放電加工、雷射加工、電子束加工、離子束加工以及一些精密複合加工方法等。

## 5. 自動化技術

- 現代的精密加工和超精密加工**應用電腦技術、線上檢測和誤差補償、適應控制和資訊技術**等使整個系統**工作自動化**，減少人為因素影響，提高加工品質。

## 6. 加工檢測一體化

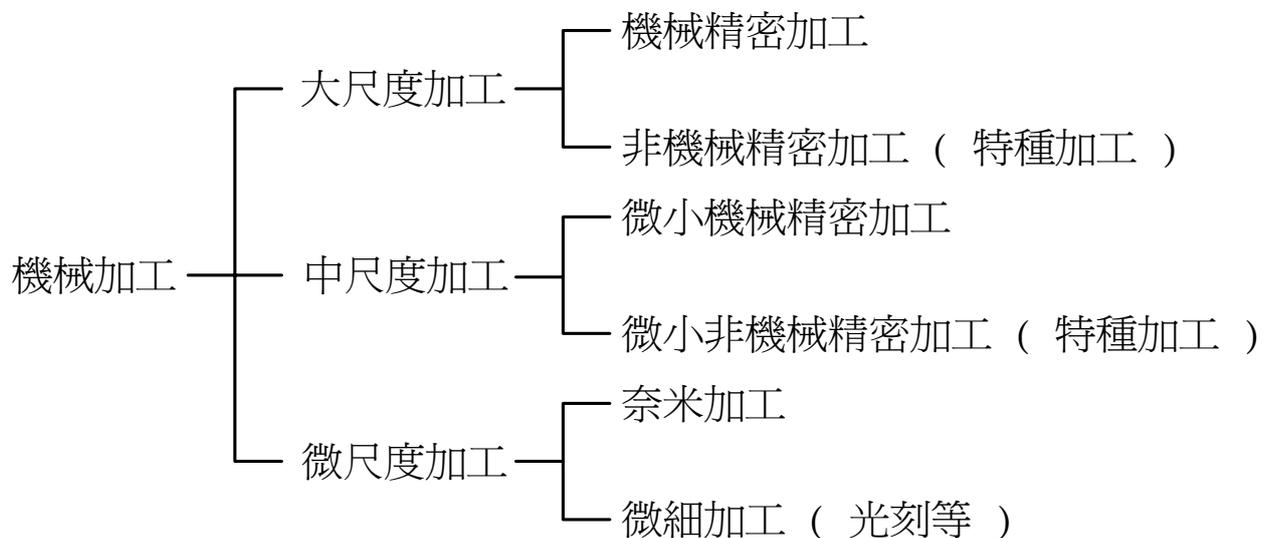
- 精密加工和超精密加工中，不僅要進行離線檢測，而且有時要採用**在位檢測**(工件加工完畢後不從機床上卸下，**在機床上直接檢測**)、**線上檢測**(工件在加工過程中進行檢測)和誤差補償，以提高檢測精度。

## 精密加工和超精密加工的分類

# 精密加工依尺度分類

- 根據加工零件的尺寸來分類
  - 大尺度(Macro Scale)加工
  - 中尺度(Meso Scale)加工
  - 微尺度(Micro Scale)加工

# 尺度精密加工分類



## 大尺度(Macro Scale)精密加工

- 通常的機械加工大多指大尺度(Macro Scale)加工，又稱為**巨集尺度加工**，零件的技術性能要求大多反映在**宏觀結構或表層結構**上，**尺寸相對較大**，加工的範疇較廣，又可分為特大型、重型、一般型產品的加工。

## 微尺度 (Micro scale)精密加工

- 微尺度 (Micro scale)加工是指**微奈米加工**，**尺寸相對來說較小**，在**微米、次微米和奈米級**，主要用精密和超精密加工技術、微細加工技術和奈米加工技術來加工，強調**微觀結構**，其領域相對較窄。

# 中尺度 (Meso scale) 精密加工

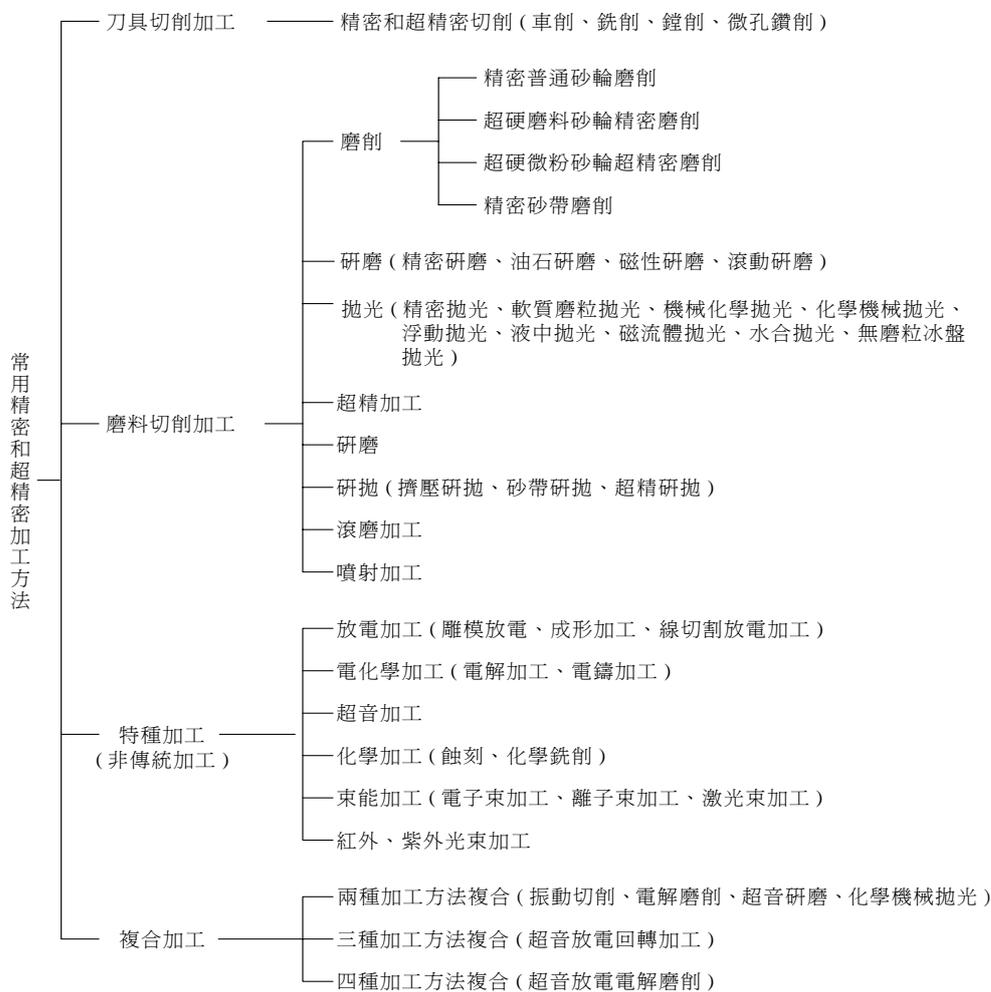
- 介於兩者之間的稱之為中尺度 (Meso scale) 加工，又稱為中尺寸加工、介觀尺寸加工或細尺度加工，強調細觀結構，所加工的產品既不是像奈米製品那樣小，又不像普通機電產品那樣大，為便於區分，可稱之為“微小機械”，它強調產品的微型化，其加工精度和表面品質的要求是很高的，零件從結構和尺寸上仍以精密和超精密加工為主，但用普通加工設備不僅太大，且加工品質也不能滿足要求，需要開發一系列微小加工方法、微小精密和超精密加工機床及其工藝裝備才能勝任。

23

## 精密加工和超精密加工方法分類

- 機械超精密加工技術
  - 例如金剛石刀具超精密切削、金剛石微粉砂輪超精密磨削、精密研磨和拋光等一些傳統加工方法，實際可歸納為**刀具切削加工**和**磨料加工**。
- 非機械超精密加工技術
  - 例如精密放電加工、精密電解加工、精密超音波加工、電子束加工、離子束加工、雷射加工等一些**特種加工方法**。
- 複合超精密加工方法
  - 包括傳統加工方法的複合、特種加工方法的複合，以及傳統加工方法與特種加工方法的複合(例如機械化學拋光、精密電解磨削和精密超音波研磨等)。

24



## 精密加工和奈米加工、微細加工、光整加工的關係

### • 奈米加工

- 奈米技術通常是指10-100nm的奈米級材料、產品設計、加工、檢測、控制等一系列技術。
- 奈米加工強調加工精度達到奈米級。
- 奈米技術它不是簡單的"精度提高"和"尺寸縮小"，而是從物理的宏觀領域進入到微觀領域，一些宏觀的幾何學、力學、熱力學、電磁學等都不能正常描述奈米級的工程現象與規律，要進行奈米加工不是單一學科所能解決的，它是一個機械、電子、材料等多學科交叉融合的複雜問題。
- 由於奈米加工和超精密加工聯繫十分密切，因此又提出微奈米加工技術，涵蓋奈米和微米範疇，比奈米更寬廣一些。

# 精密加工和奈米加工、微細加工、光整加工的關係

## • 微細加工和超微細加工

- **微細加工技術**是指製造微小尺寸零件的生產加工技術。
- 從**廣義**的角度來說，微細加工包含各種常用精密加工方法(例如切削加工、磨料加工等)和特種加工(例如沈積生長、光鉋加工、電鑄、雷射加工、電子束加工、離子束加工等)。它屬於精密加工和超精密加工範疇。
- 從**狹義**的角度來說，微細加工主要指半導體積體電路製造技術，因為微細加工技術的出現和發展與大型積體電路有密切關係，其主要技術有沈積生長、氧化、光刻、選擇擴散和真空鍍膜等。
- 一般尺寸加工時，精度是用加工誤差與加工尺寸的比值來表示的。在現行的公差標準中，公差單位是計算標準公差的基本單位，它是基本尺寸的函數。**基本尺寸越大，公差單位也越大**，對於不同的基本尺寸，其公差數值就不同。**在微細加工時**，由於加工尺寸很小，**精度用尺寸的絕對值來表示**，即用去除的一塊材料的大小來表示，從而引入加工單位尺寸(簡稱加工單位)的概念，加工單位就是去除的一塊材料的大小。
- 超微細加工比微細加工在尺度上又高了一個層次，即在尺寸上更小。

27

# 精密加工和奈米加工、微細加工、光整加工的關係

## • 光整加工和精整加工

- **機械加工**依加工精度分為**粗加工、半精細加工、精加工、光整加工、終端加工**等幾個階段。
- **光整加工**主要旨在提高表面光潔度和表面層物理和力學性能的一些加工方法，並強調去毛邊加工(Deburring)，例如研磨、拋光、搪磨、超精加工和無屑加工(如滾壓加工)等。
- 有些學者針對光整加工主要旨在降低表面粗糙度和提高表面層物理和力學性能，為強調有些加工方法**既能提高精度又能提高表面品質**，提出"**精整加工**"(Surface Finishing)的概念。

28

# 精密加工和奈米加工、微細加工、光整加工的關係

- 綜合上面所述
  - 精密加工和超精密加工是從加工精度上進行分類。
  - 微米加工和奈米加工是從其體的加工精度值進行分類。
  - 微細加工和超微細加工是從尺寸上進行分類，且有積體電路製造的背景。
  - 光整加工和精整加工是從降低表面粗糙度值和提高表面品質的角度進行分類。
- 分析的角度不同，分類的方法就各異，且各有其應用領域，但在它們的具體加工方法上既有相異性，更有相同性。

29

## 精密加工和超精密加工原則

- 進化加工原則
  - 機械加工遵循的原則可分為繼承性原則和創造性原則等

30

## 繼承性原則

- 主要指加工用的機床（工作母機）精度一般應高於所欲加工工件的精度，能保證加工品質和效率。
- 目前已有不少通用超精密機床問世，用繼承性原則加工能夠滿足超精密加工的一般需求，但由於超精密加工的具體技術要求有時很高，現有超精密加工機床很難滿足，多需要特殊定貨，且價格昂貴，因此可考慮創造性原則。

31

## 創造性原則

- 又稱“進化”原則，可分為直接創造性原則和間接創造性原則。
- (1) 直接創造性原則
  - 直接創造性原則是利用精度低於工件精度要求的機床，借助於工藝手段和特殊工具，直接加工出精度高於“工作母機”的工件。
  - 直接創造性原則是精密加工中比較基本常用的一條原則，難度較大，具體問題比較多，主要用於單件小批生產，有廣泛的應用前景。

32

# 創造性原則

## • (2) 間接創造性原則

- 間接創造性原則是**用較低精度的機床和工具，製造出加工精度能滿足工件要求的高精度機床和工具，稱為第二機床和工具**，使用這些機床和工具去加工工件，它是先用直接創造性原則，再用繼承性原則，例如滾齒機工作檯中的分度渦輪是影響齒輪加工精度的關鍵零件，購買現成的加工分度渦輪的機床不僅是很昂貴的，而且可能買不到合適的，這時機床廠多採用間接創造性原則，自行研製該設備。
- 間接創造性原則也是**精密加工中比較基本常用的一條原則**。工作量和難度都比較大，主要用於批量生產，也有比較廣泛的應用前景。

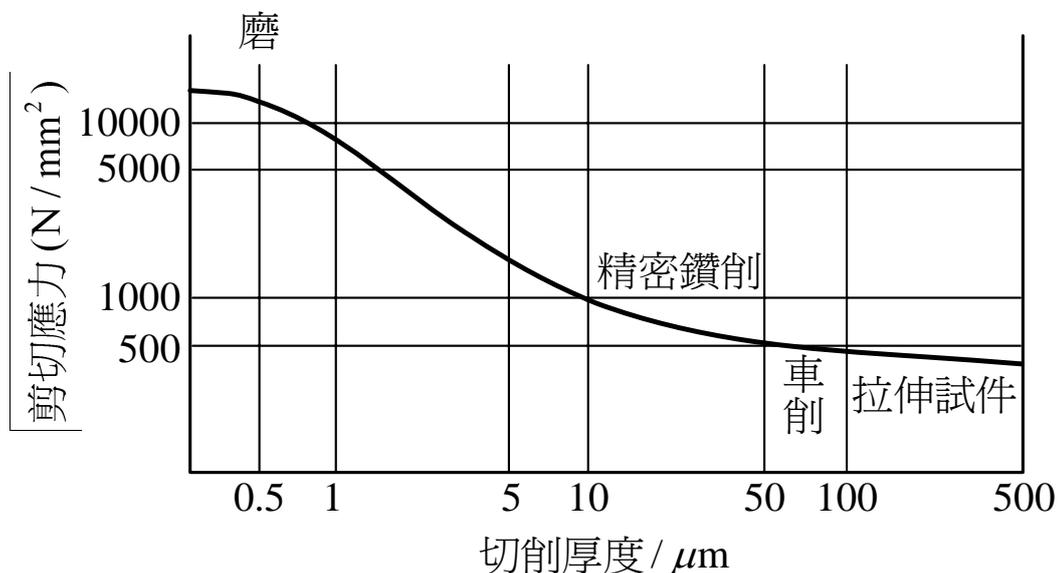
## 精密加工材料成形機理

# 微量切除加工

- 超精密加工的關鍵是能夠在被加工表面上進行**微量切除**，其切除量的大小表示其精密加工和超精密加工技術的水準，如果能切削一個奈米，則其水準為奈米級，如果能切削一個分子、一個原子，則其水準分別可達分子級、原子級。
- 以金剛石刀具超精密切削和金剛石微粉砂輪超精密磨削為代表精密加工和超精密加工技術的加工機理就是微量切削，又稱“極薄切削”，其**切屑厚度極小**，可能小於材料晶粒的大小。切削可能在**晶粒內部進行**，因此切削力一定要**超過晶粒內部非常大的原子、分子結合力**才能進行切除，而不是在晶粒之間產生破壞。

35

# 微量切除加工



切削厚度與剪切應力的關係

36

# 微量切除加工

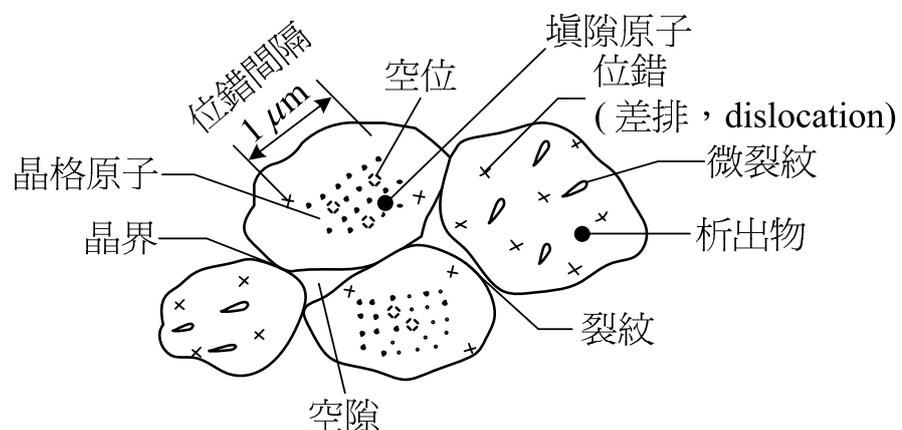
- 在這種情況下，切削的可能性與以下幾方面有關：
  - 刀刃要非常銳利，切削刃圓鼻半徑要很小，才能有極薄切削的能力。
  - 在切削時刀刃上所承受的剪切應力急速地增加並變得非常大，刀具的材料要能夠承受。
  - 刀刃在受到很大剪切應力的同時，切削區域會產生很大的熱量，刀刃切削處的溫度會很高，要求刀具材料應有很高的高溫強度和高溫硬度。
- 因此，只有超硬刀具材料，例如**金剛石(Diamond)**、**立方氮化硼(CBN)**等才能勝任。金剛石材料質地細密，具有很高的硬度、高溫強度和高溫硬度，經過精密研磨，幾何形狀精度高，切削刃圓鼻半徑很小，通常可達 $0.02\sim 0.005\ \mu\text{m}$ ，最高可達 $2\text{nm}$ ，表面粗糙度值很低，是目前極薄切削的理想刀具材料。

37

# 材料缺陷與破壞方式

- 材料的微觀缺陷主要有以下幾種，如下圖所示。

- 點缺陷
- 線缺陷
- 面缺陷



材料的微觀缺陷分布

38

# 材料缺陷與破壞方式

- 點缺陷

- 當晶粒中存在空位、填隙原子、雜質原子等時，稱為點缺陷或原子缺陷，其破壞方式是以這些點缺陷為起點來增加晶格缺陷的破壞。

- 線缺陷

- 線缺陷是指位錯缺陷和微裂紋。位錯缺陷就是晶格位移，或稱差排(Dislocation)，即有一列或若干列原子發生了有規律的錯排現象，它在晶粒中呈連續線狀分布。當晶粒中存在線缺陷時，其破壞方式是通過位元錯線的滑移和微裂紋引起晶粒內的滑移變形。

39

# 材料缺陷與破壞方式

- 面缺陷

- 它們是指晶界中的空隙、裂紋和缺口，其破壞方式是以缺陷面為基礎的晶粒間破壞。

- 當應力作用區域是在材料的微觀缺陷空間範圍內時，則材料會以微觀缺陷的方式來破壞；若應力作用區域比材料微觀缺陷空間範圍更廣，則材料會以更容易的方式來破壞。

- 超精密加工對材料的要求十分嚴格，微觀缺陷越少越好，一般不允許有微觀缺陷存在，同時要求化學成分準確、材質均勻、性能穩定。

40

# 加工能量

- 超精密切削是一種微量去除加工方法，要從工件上去除一塊材料，需要相當大的能量，稱之為**加工能量**。
- 加工能量可用單位體積之**臨界加工能量**，或稱臨界加工能量密度  $\delta$  ( $\text{J}/\text{cm}^3$ ) 和單位體積切削能量  $\omega$  ( $\text{J}/\text{cm}^3$ ) 來表示。
- **臨界加工能量密度  $\delta$**  是指當應力超過材料彈性極限時，在切削相應的空間內，由於材料缺陷而產生破壞時的加工能量密度。
- **單位體積切削能量  $\omega$**  是指在產生某加工單位切屑時，消耗在單位體積上的加工能量。

41

# 加工能量

- 下表列舉常用幾種去除加工在**材料微觀缺陷**情況下的臨界加工能量密度  $\delta$ 。可見**晶粒原子、分子破壞**所需的臨界加工能量密度  $\delta$  最大，依次為**點缺陷、線缺陷**，**晶界缺陷** 最小。
- **加工機理** 也會影響臨界加工能量密度  $\delta$  的大小。
  - 利用**塑性變形**來進行微量切削時，例如超精密切削和磨削，其臨界加工能量密度  $\delta$  比較大，用於使其產生塑性變形的能量幾乎都**轉變為熱量**，因此會有發熱現象；
  - 利用**脆性破壞**的去除加工，例如加工玻璃時，通常玻璃的微裂紋分布間隔約為  $10\ \mu\text{m}$  左右，由於材料中的微裂紋所引起的**拉應力集中**而導致材料產生分離和斷裂，其臨界加工能量密度  $\delta$  很低，幾乎**不存在發熱現象**；如果加工應力集中地作用在比微裂紋的分布間隔更狹窄的區域，則**玻璃將會產生黏性流動式的滑移**，需要很大的臨界加工能量密度  $\delta$ ，從而**產生發熱現象**，這也就是玻璃在精密磨削和精密拋光時會發熱的原因。

42

# 加工能量

- 工件材料不同，臨界加工能量密度  $\delta$  和單位體積切削能量  $\omega$  也不同，各種材料都有一個理論值。但實際上，由於材料微觀缺陷分布或材質不均勻性的存在，**實際的臨界加工能量密度  $\delta$  和單位體積切削能量  $\omega$  要比理論值要低得多。**

# 加工能量

臨界加工能量密度  $\delta$  (J/cm<sup>3</sup>)

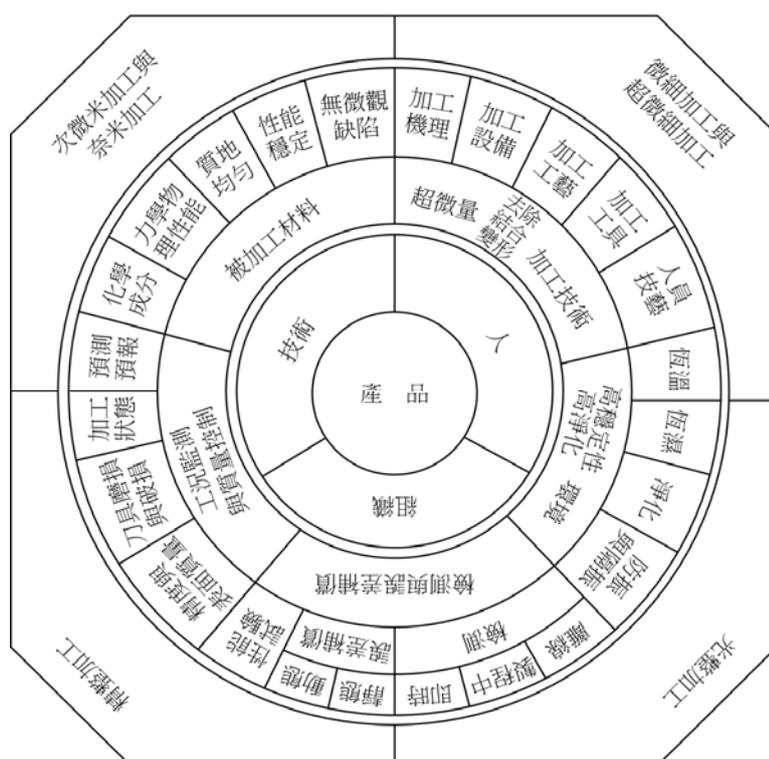
加工單位 (cm)	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>
材料微觀缺陷 加工機理	晶格原子、分子		點缺陷		線缺陷		面缺陷	
離子束濺射去除、電子蝕刻	10 <sup>5</sup> ~10 <sup>4</sup>							
蒸發去除	10 <sup>5</sup> ~10 <sup>4</sup>							
溶化去除	10 <sup>4</sup> ← → 10 <sup>3</sup>							
化學分解、電解	10 <sup>4</sup> ← → 10 <sup>3</sup>							
塑性變形 (微量切削、研磨、拋光)					10 <sup>3</sup> ← → 1			
脆性破壞			10 <sup>4</sup> ← →				10 <sup>2</sup>	

# 精密加工和超精密加工技術

- 精密加工和超精密加工技術

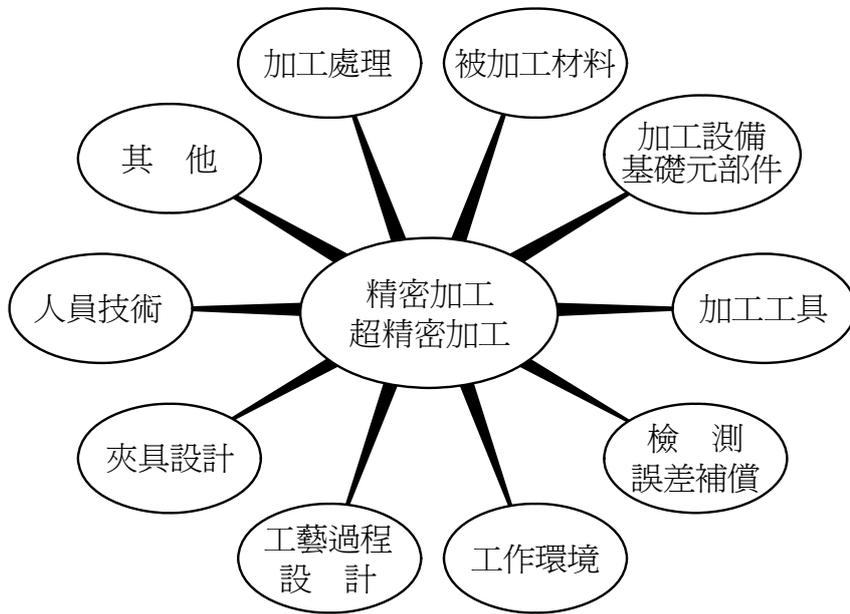
- 影響精密加工和超精密加工的技术因素很多，主要有加工機理、被加工材料、加工設備、工藝裝備、工件的定位和夾緊、檢測與誤差補償、工作環境和人的技術等。

# 精密加工和超精密加工技術結構



精密加工和超精密加工技術結構

# 精密加工和超精密加工技術



影響精密加工和超精密加工的因素

47

# 精密加工和超精密加工技術

## • 加工機理

- 加工機理的影響可以從加工能源、成形機理、加工原則等幾方面來分析。從加工能源上主要分為機械和非機械加工、傳統和非傳統加工、一般和特種加工等。

48

# 精密加工和超精密加工技術

- 所謂**機械加工**就是指一般的**傳統加工**，其中主要有金剛石超精密切削、金剛石微粉砂輪超精密磨削、精密研磨和拋光等，它們的加工能源都是機械能，其機理的理論基礎是力學和熱學；
- **非機械加工**就是指特種加工和非傳統加工，例如放電加工、電化學加工、超音波加工、電子束加工、離子束加工、雷射束加工、光刻和微波加工等，它們的加工能源是電能、音能、化學能、分子能等，其機理的理論基礎是電學、化學、聲學、光學、電子學、電物理學和電化學等。
- **複合加工**是一種利用多能源的加工，綜合多種能源的優勢，成為精密加工方法的特點。因此在加工機理的能源上有了很大的突破。
- 在成形機理上，形成**去除加工**、**結合加工**和**變形加工**的三足鼎立之勢。

49

# 精密加工和超精密加工技術

- 被加工材料
  - 精密加工和超精密加工必須要有相應的材料才能達到預期效果。用於精密加工和超精密加工的材料，其在**化學成分、物理和力學性能、加工工藝性上均有嚴格要求**；同時因成分準確、材質均勻、性能穩定、無外部和內部微觀缺陷。
  - 通常，材料的化學成分誤差應在 $10^{-2}$ - $10^{-3}$ 數量級，**並應控制其雜質含量或不含雜質**。其物理和力學性能，例如抗拉強度、硬度、伸長率、彈性模數、熱導率和膨脹係數等，應達到 $10^{-5}$ - $10^{-6}$ 數量級。在冶煉、鑄造、軋輾、熱處理等工藝過程均應嚴格控制其溫度、熔渣過濾、晶粒大小、方向性和均勻性等。

50

# 精密加工和超精密加工技術

## • 加工設備

- 加工設備是指各種精密加工和超精密加工機床、光刻、鍍膜、塗敷等設備以及基礎元件，例如精密回轉工作檯、精密微位移裝置等。
- 對精密加工和超精密加工設備的要求可以歸納為以下幾方面：
  - (1) 高精度:包括靜態精度和動態精度，主要有幾何精度、運動精度，例如定位精度、重複定位精度、分度精度和解析度等。
  - (2) 高剛度:包括靜剛度和動剛度；除零件剛度外，還應考慮接觸剛度；除考慮機床剛度外，還應考慮工藝系統剛度。
  - (3) 高穩定性和保持性:設備應有良好的耐磨性、抗振性、熱穩定性和抗干擾性，在經過運輸、倉儲、安裝、調試後，在規定的工作環境下，能夠正常穩地工作，並保持應有的性能和技術規格。
  - (4) 高自動化:為了減少在加工中的人為因素影響，保證加工品質，現代精密加工和超精密加工設備多配置了電腦控制的數控系統，自動化程度比較高，能夠自動進行加工、檢測、資料處理和優化等工作，實現了機電一體化。

51

# 精密加工和超精密加工技術

## • 工藝裝備

- 工藝裝備泛指**工具、夾具、量具和輔具**等。
- 加工工具主要是指**刀具及其刃磨裝置、磨具及其修整裝置**等，**工具的性能將直接影響加工品質**。夾具的**精度**也是非常關鍵的，要特別注意**定位誤差和夾緊誤差**對加工精度的影響，要求夾具具有**高精度、高剛度和高保持性**。量具要能勝任精密加工的要求，進行合理配置，考慮**工藝與檢測的一體化**。

52

# 精密加工和超精密加工技術

## • 工件的定位和夾緊

- 在精密加工和超精密加工中，由於加工精度非常高，加工量非常小，因此要求定位誤差和夾緊誤差非常小，可採用塑性夾具、真空吸附夾具和磁流變異夾具等。特別是對於一些薄壁、剛度差的工件，要採取擴大夾緊面積，減小單位面積夾緊力。夾具在精密加工和超精密加工中是一個難題，往往成為關鍵，應該重視。

53

# 精密加工和超精密加工技術

## • 檢測與誤差補償

- 精密加工和超精密加工必須具備相應的檢測技術和手段，有時不僅要檢測工件的精度和表面品質，而且還會涉及檢測加工設備和儀器儀錶的精度。當前在精密檢測中有以下一些發展：
  - (1) 除檢測精度外，表面品質的檢測要求越來越高，例如表面層的物理和力學性能等。
  - (2) 除接觸測量外，非接觸式的測量要求越來越迫切，其發展也很快。
  - (3) 檢測自動化的要求越來越高，例如誤差分離技術、資料處理技術、誤差預防、補償和預報等。不僅要分析造成誤差的原因，同時注重誤差發展趨勢的預報，能進行即時補償。

54

# 精密加工和超精密加工技術

- 工作環境

- 工作環境是保證精密和超精密加工品質的必要條件，其主要有溫度、濕度、淨化、防震，以及一些特殊要求，例如防磁、防靜電、防電子輻射、防音波、防X射線和防原子幅射等。

55

## 精密加工和超精密加工的工作環境

- 精密加工與超精密加工工藝系統需要工作環境的支援，才能達到預期的效果
  - 空氣環境、熱環境、振動環境、聲環境、光環境和電環境等
  - 加工精度和表面品質要求越高，需要相應環境的支援越嚴格。

56

# 精密加工和超精密加工的工作環境

支持環境	控制要求	支持環境	控制要求
空氣環境	潔淨度、氣流速度、壓力、有害氣體等。	聲環境	噪音、頻率、聲壓等。
熱環境	溫度、濕度、表面熱輻射等。	光環境	照度、眩光、色彩等。
振動環境	頻率、加速度、位移、微振動等。	靜電環境	靜電量、電磁波、放射線等。

精密加工與超精密加工的工作環境要求

57

## 空氣的潔淨控制

### • (一) 空氣的潔淨

- 空氣中分布各種塵埃和微粒等物質，它們來自大自然和人類的各種活動，例如人的動作，生產過程（如切削）等。城市中的塵埃和微粒等物質多於農村。表1.5提出城市日常環境中直徑大於 $0.5\ \mu\text{m}$ 的塵埃含量，在不同的場合，空氣中所含的塵埃數不等；越接近地面，塵埃和微粒等物質越多。

58

# 空氣的潔淨控制

## (一) 空氣的潔淨

場 所	塵埃粒子數 /( $\uparrow$ /0.028m <sup>3</sup> (1ft <sup>3</sup> ))
工廠、車站、學校	2,000,000
百貨公司、辦公室、藥房	1,000,000
位宅	600,000
室外(住宅區)	500,000
病房、門診部	150,000
手術室	50,000

城市日常環境中的塵埃含量

59

# 空氣的潔淨控制

## • (一) 空氣的潔淨

- 塵埃和微粒等物質對精度加工和超精密加工有很大危害，如可能會劃傷被加工工件表面，影響表面品質，甚至會造成廢品。
- 通常以立方英尺體積中直徑大於0.5  $\mu\text{m}$  的塵埃數來表示空氣淨化的等級，下表顯示空氣淨化的標準等級。

60

# 空氣潔淨度等級

淨化等級	100級	1000級	10,000級	100,000級	普通淨化車間
每立方英尺空氣中直徑 $>0.5\mu\text{m}$ 的塵埃	$10^2$	$10^3$	$10^4$	$10^5$	$5 \times 10^7$
每立方米空氣中直徑 $>0.5\mu\text{m}$ 的塵埃數不超過	$\approx 35 \times 10^2$	$\approx 35 \times 10^3$	$\approx 35 \times 10^4$	$\approx 35 \times 10^5$	$\approx 176.57 \times 10^7$

空氣潔淨度等級規範

## (二) 空氣淨化控制

- 空氣淨化可在車間、大淨化室(間)或超淨室(間)、小淨化室(間)和淨化腔等進行。淨化室(間)又稱超淨室(間)。
- 空氣的淨化方法有以下一些措施:
  - **濾清**: 空氣篩檢濾網是空氣淨化的主要設備, 其主要性能指標有效率、阻力、容塵量、風速和濾速等, 其類別和性能如下表所示。圖表示一種高性能篩檢濾網的結構, 採用紙狀超細玻璃纖維和超細石棉纖維作為過濾材料, 為增大過濾面積, 將過濾紙往復多次折疊, 其過濾 $0.1\mu\text{m}$ 直徑的塵埃效率可達99.999%以上。

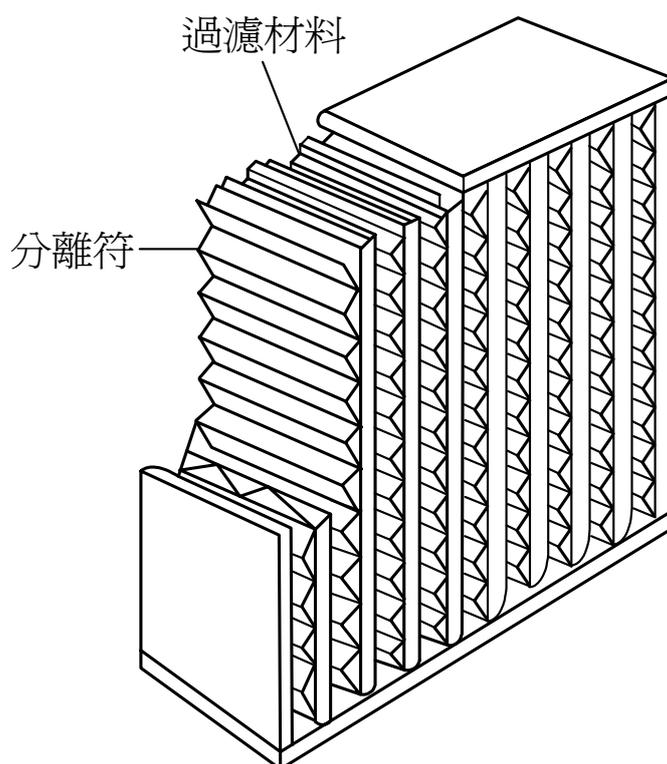
## (二) 空氣淨化控制

類別	有效的捕集塵埃直徑 / $\mu\text{m}$	計數效率 (%) 對直徑為 $0.3\mu\text{m}$ 塵埃	阻力 / Pa
粗效過濾器	$\geq 10$	$\geq 10$	$\leq 30$
中效過濾器	$\geq 1$	20 ~ 90	$\leq 100$
次高效過濾器	$\geq 0.5$	90 ~ 99.9	$\leq 150$
$0.3\mu\text{m}$ 級過濾器	$\geq 0.3$	$\geq 99.91$	$\leq 250$
$0.1\mu\text{m}$ 級過濾器	$\geq 0.1$	$\geq 99.999$ (對直徑 $0.1\mu\text{m}$ 為塵埃)	~ 250

空氣篩檢濾網

63

## (二) 空氣淨化控制



高性能篩檢濾網

64

## (二) 空氣淨化控制

- 空氣的淨化方法有以下一些措施：
  - **風淋和工作服**：工作人員在進入淨化室之前應清洗、更換工作服，進行風淋 (Air Shower) 後再進入淨化室，以控制人員活動時產生的塵埃，甚至穿特製的無塵服。
  - **空氣正壓控制**：在淨化工作檯或淨化艙內通入正壓潔淨空氣，以防止外界空氣進入，保持空氣淨化。

65

## 空氣的溫度控制

### (一) 空氣的溫度

- 在精密加工和超精密加工時，室溫的變化對加工精度的影響很大，由熱變形而產生的誤差佔總加工誤差的比例可高達50%，
- 恆溫條件主要有溫度基數和溫度精度兩個衡量指標：
  - **溫度基數**是指空氣的平均溫度。對於精密測量，溫度基數是20℃，對於精密加工和裝配，溫度基數也應是20℃，和測量時相同。但為節約能源，也可以隨季節而變化，在春天和秋天取20℃，夏天取23℃，冬天取17℃，已經得到不少國家的認同。
  - **溫度精度**是指相對於平均溫度所允許的偏差值，它表示溫度變動範圍，並由它決定恆溫等級，下表列出恆溫等級的情況。

66

# 空氣的溫度控制

等級	標準溫度 (°C)	允許溫度差別 (°C)	濕度	應用場合
0.01 級	20	±0.01	55~60%	計量標準 超精密加工
0.1 級	20	±0.1		
0.2 級	20	±0.2		精密測量、超精密加工 精密刻線
0.5 級	20	±0.5		
1 級	20	±1		普通精密加工
2 級	20	±2		

恆溫等級

67

# 空氣的溫度控制

## (二)溫度控制

- 恆溫的要求可用溫度基數和溫度精度來控制，可從恆溫車間、恆溫室、恆溫工作艙等幾個方面來解決。
- 溫度控制有以下一些措施：
  - 採用空調設備：主要通過加熱設備和冷卻設備送出一定溫度的恆溫空氣，用於恆溫車間、恆溫室等整體恆溫的控制。
  - 液體恆溫：機床設備的工作艙恆溫可採用恆溫冷卻液的方法來控制，例如油淋浴法(Oil Shower)等。
  - 控制工作人員數量：人體本身就是熱源，應嚴格控制在恆溫室內的工作人員數量，管理人員應在恆溫室外進行工作，且需等待溫度平穩後才能進行加工，參觀人員應在恆溫室外通過封閉的大玻璃窗觀察。

68

# 空氣的濕度控制

- 空氣的濕度

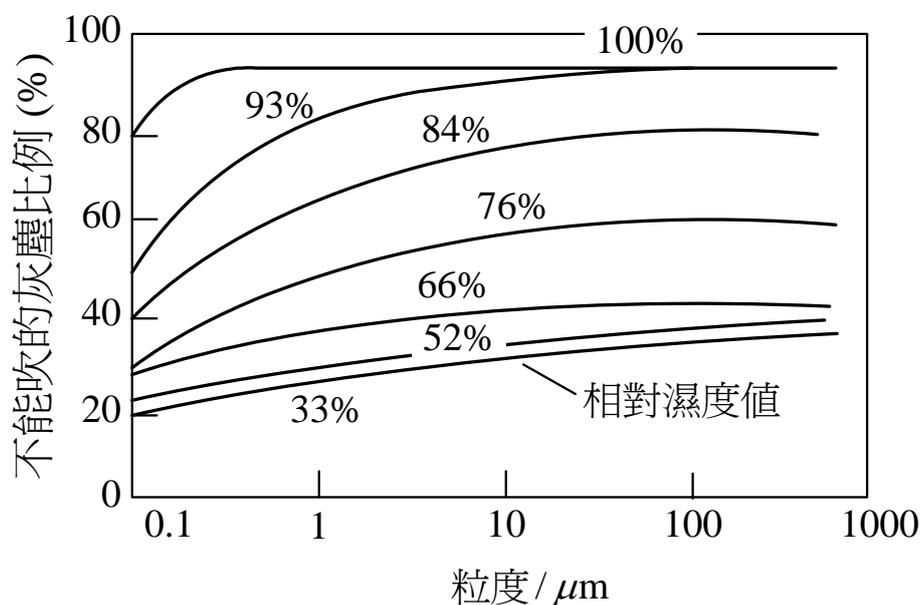
- 相對濕度是指空氣中水蒸氣分壓和同溫度下飽和水蒸氣分壓之比，反應空氣中水蒸氣含量接近飽和的程度。

- 空氣濕度的影響

- 濕度低於30%時，有些材料會因乾燥而變脆；靜電力的作用會使塵埃更易吸附在物體表面；某些半導體器件易於發生短路擊穿。濕度高於45%時會使機床和儀器產生銹蝕，光學鏡頭產生黴斑，嚴重影響設備的性能；電路系統會存在短路隱患；空氣中的水分子將使表面黏附的塵埃產生化學反應而難以清除，下圖表示在矽片上直徑 $10\mu\text{m}$ 以上的塵埃不能吹掉的比例與濕度的關係。

69

# 空氣的濕度控制



在矽片上塵埃黏附的比例與濕度的關係

70

# 空氣的濕度控制

➤ 因此濕度一般應控制在30%到45%之間。濕度的波動範圍相應規定為±10%、±5%、±2 %幾個等級，一些半導體工業甚至要求濕度運動範圍為±1%。下表為美國對溫度和濕度的控制建議。

## • 濕度控制

➤ 濕度主要採用加濕設備和減濕設備來控制，例如採用加濕器、吸濕劑和熱濕交換器等。

# 溫度和濕度的控制

美 國 2 0 9 B 標準	溫 度			濕 度		
	範 圍	推 薦 值	波 動 值	最 高	最 低	波 動 值
	19.4~25	22.2	±2.8 特殊需要 時為±2.8	45	30	±10 特殊需要 時為±5
趨勢			±0.1	45	30	±2

美國對溫度和濕度的控制建議

# 振動環境及其控制

## • 隔振原理與隔振類別

- 在精密加工和超精密加工時，振動對加工品質的影響來自兩個方面，一是**機床內部的振動**，例如回轉零件的不平衡、零件或部件剛度不足等；另一是來自**機床外部**，由**地基傳入的振動**，這就必需用合適的地基和防振裝置來隔離，即隔振。

73

# 振動環境及其控制

## (一) 隔振原理與隔振類別

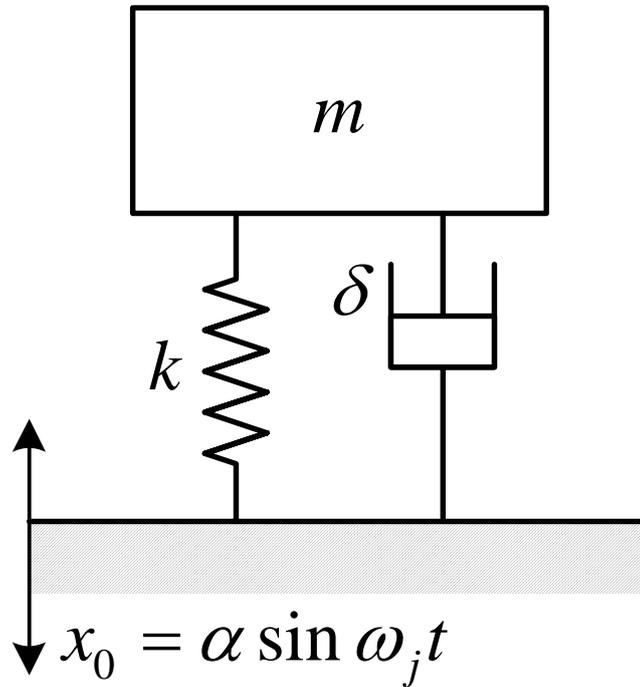
### • 隔振原理

- 假設加工設備的振動品質為  $m$ ，剛度為  $k$ ，阻尼係數為  $\delta_0$ ，外界振動干擾源為垂直振動  $x_0 = a \sin \omega_j t$ ，不計加工設備振動品質的彈性，也不計隔振器的品質，則按單自由度強迫振動可推導出其關係式為：

$$A = a \sqrt{1 + (2\xi\lambda)^2} / \sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\xi\lambda)^2}$$

- 式中  $A$  : 加工設備的振幅 (mm)
- $a$  : 外界振動干擾的振幅 (mm)
- $\xi$  : 阻尼比
- $\lambda$  : 頻率比。  $\lambda = \omega_j / \omega_n$  為外界振動干擾頻率 (Hz)、 $\omega_n$  為系統固有頻率 (Hz)。

74

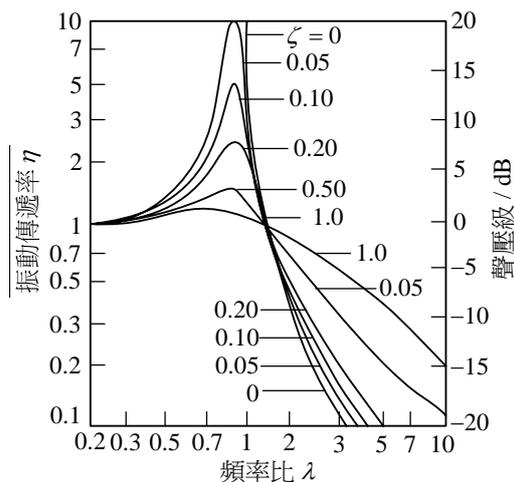


單自由度振動的力學模型

## 隔振原理

- 隔振效果可用加工設備的振幅 $A$ 與外界振動干擾的振幅 $a$ 的比值 $\eta$ 來衡量，稱為振動傳遞率或隔振係數。如果忽略阻尼，即 $\xi=0$ 時，則振動傳遞率為

$$\eta = A/a = \left| 1/(1 - \lambda^2) \right|$$



振動傳遞率曲線

# 隔振原理

以看出振動傳遞率與頻率比關係密切，如圖所示：

- (1) 當外界振動干擾頻率小於系統固有頻率時，這時  $\lambda < 1, \eta > 1$ ，振動干擾力將全部通過減振裝置傳給加工設備，減振作用不明顯。
- (2) 當外界振動干擾頻率等於系統固有頻率時，這時  $\lambda = 1, \eta$  趨於無窮大，整個系統將發生共振，系統的振動會被加劇甚至整個系統會被破壞。
- (3) 當外界振動干擾頻率大於系統固有頻率時，當  $\lambda > \sqrt{2}$  時，則  $\eta < 1$  振動干擾力將會被減振裝置減振。

77

# 隔振類別

隔振類別：隔振系統可以分為兩大類：

- (1) **積極隔振**：這種隔振是防止機器發生的振動傳給地基。
- (2) **消極隔振**：這種隔振是防止由地基傳來的振動傳給機器，精密和超精密加工中的隔振系統都屬於這種，防止精密和超精密加工設備不受外來振動的影響。

78

# 防振地基

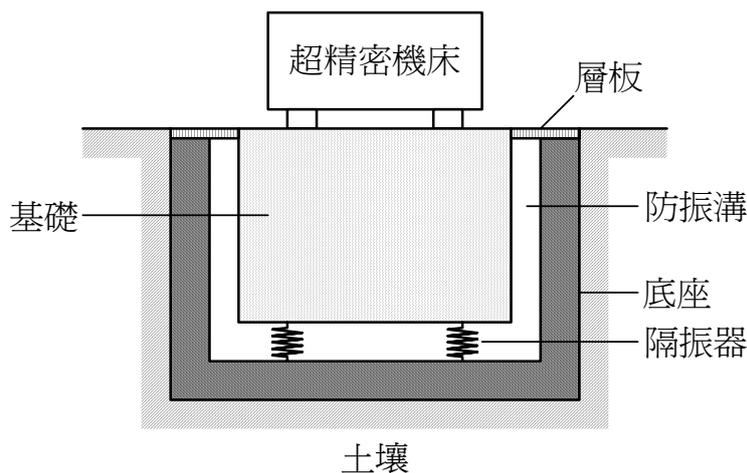
- **防振地基**：下圖所示為一超精密機床或精密儀器的防振地基，它由基礎、防振溝、隔振器等組成，隔振器一般為金屬彈簧。在防振要求不高的情況下，可將基礎直接放在土壤上。防振溝主要防止水準方向傳入振動。

79

## (二) 精密機床和超精密機床的隔振措施

- 常用的隔振方法有以下兩種類型：

### (1) 防振地基



超精密機床  
或精密儀器  
的防振地基

80

# 隔振器

- 隔振器：主要有**空氣彈簧(墊)**、**金屬彈簧**、**橡膠**、**塑膠玻璃纖維**和**軟木**等，其適用範圍如下圖所示。

# 隔振器

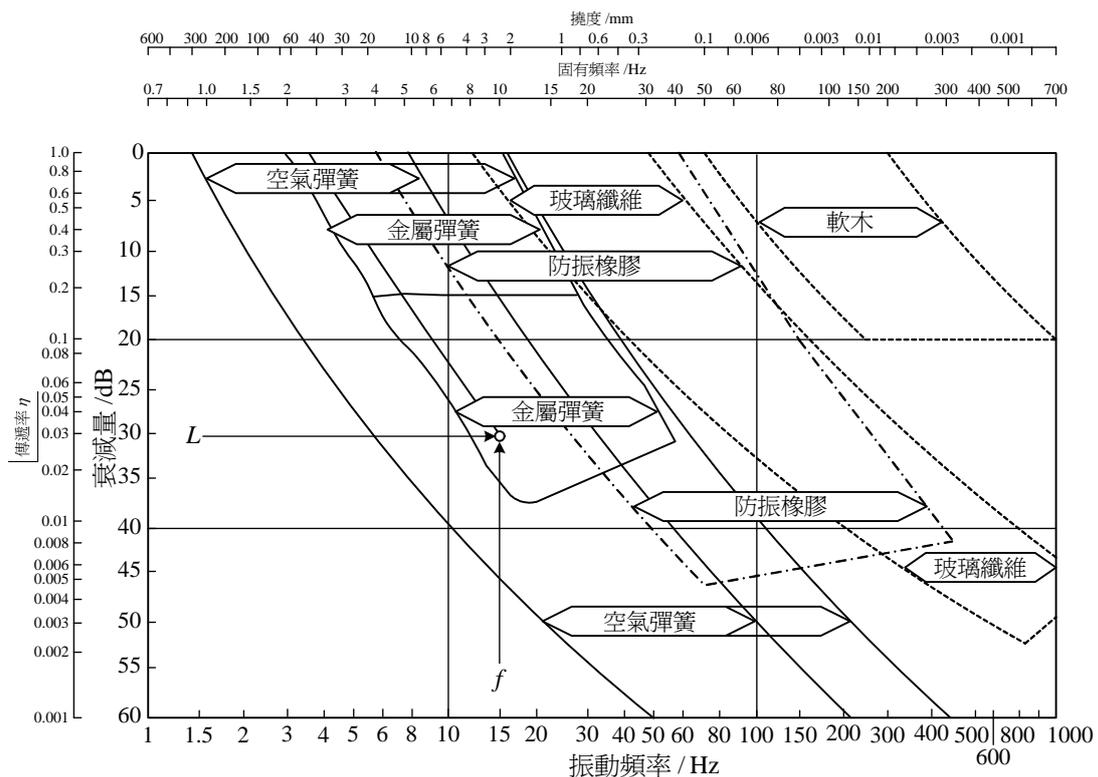


圖1.16 常用隔振器的適用範圍

# 空氣彈簧

- 空氣彈簧由氣囊和氣室兩部分組成，氣室又有主氣室和輔助氣室，兩者之間由可調阻尼孔相連。一定壓力氣體的壓縮空氣儲於氣罐中，經減壓閥、開關通入輔助氣室，再經可調阻尼孔入主氣室到氣囊。改變充氣壓力可得到不同的阻尼值，**阻尼係數一般為0.15-0.5**。主氣室的氣體壓強，一般為200-500kPa。空氣彈簧的氣路系統。
- 空氣彈簧的結構原理，主氣室為鋼製容器，氣壓作用在鋼製頂蓋的下端面上，將被隔振物體向上浮起，從而達到隔振作用。
- 氣囊內充入壓力氣體後，在垂直方向和水準方向均有一定剛度。當被隔振物件振動時，**壓力氣體就在主氣室和輔助氣室之間經阻尼孔往復流動，因阻尼而減振**。因此空氣彈簧是在柔性密閉容器中接入壓力氣體的一種彈性阻尼元件，是利用空氣內能的減振器。

83

# 空氣彈簧

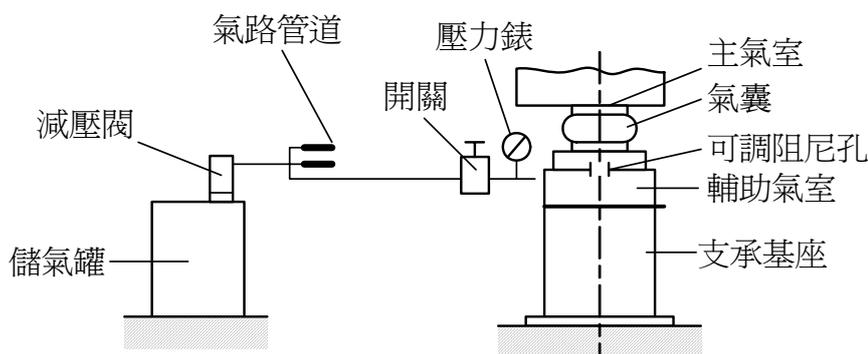
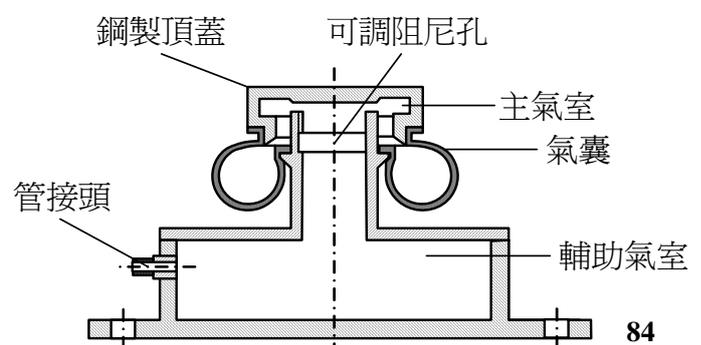


圖1.17 空氣彈簧氣路系統圖

空氣彈簧結構原理



84

# 空氣彈簧

- 空氣彈簧作為一種彈簧支承，一般用於金屬平檯的隔振，用三個相互等距放置的空氣彈簧支撐一塊平檯，並使平檯的重心與三支承等距，即可構成精密工作檯或精密儀器基座。
- 空氣彈簧的剛度很低，有相當的承載能力，使隔振系統的固有頻率降低，獲得很好的隔振效果。

85

# 噪音環境及其控制

## (一) 噪音的來源、影響及其表示

### 噪音的來源和影響



噪音對人及工作的影響

86

# (一) 噪音的來源、影響及其表示

## 噪音的來源和影響

- 工業中的噪音主要來自
  - 空氣動力、液壓動力、機械運動和電磁等方面。
  - 潔淨恆溫車間、恆溫室的噪音主要來自抽風機、排風、使用壓縮空氣、機床等設備運轉、液壓系統運動、電動機運轉等。
  - 建築物傳遞的振動波也不容忽視。

87

# 噪音環境及其控制

## 噪音的表示

噪音的物理度量可用聲壓、聲功率和聲強等來表示。通常多使用聲壓表示，它是指聲波在介質中傳播時，介質中的壓力與靜壓的差值，用 $P$ 表示，單位為 $\text{Pa}(\text{N}/\text{m}^2)$

正常人的耳所能聽到的最小聲壓稱為聲閾，把聲閾作為基準聲壓 $P_0$ ，通常其值為 $2 \times 10^{-5}(\text{Pa})$ ，用相對量的對數值來表示聲壓的大小，稱之為聲壓級 $L_p$ ，即常用的分貝(dB)。

$$L_p = 20 \cdot \log(P/P_0)$$

88

# 噪音的表示

衡量恆溫潔淨室噪音的主要指標為主觀標準，可從三方面來分析：

- (1) 噪音使人產生**煩惱情緒**：分為極安靜、很安靜、較安靜、稍嫌吵鬧、比較吵鬧和極吵鬧七個等級。
- (2) 噪音對**工作效率**的影響：分為集中精神高影響率、動作準確性影響率和工作速度影響率三個方面。一般噪音在70dB以下對工作效率影響不大。
- (3) 噪音對**綜合通訊的干擾**：分為清楚或滿意、稍困難、困難和不可能四個等級。通常65dB以下能保證一般通話。

# 噪音的控制

噪音是不可避免的，必須有所控制。在分析振源的基礎上，可採取**隔音、吸音、消音**等措施。

- **隔音**：將噪音源單獨安放在一個隔音間內，或用**隔音罩**隔離，阻礙音波的傳遞。
- **吸音**：採用**吸聲材料**，例如超細玻璃絲、聚氨脂泡沫塑料等來吸音，減小聲音的傳播和反射，主要用於建築物內工作地的天花板、牆壁等處，在隔音間、隔音罩內壁上也可使用。
- **消音**：採用專門的**消音器**來控制聲音的傳播。消音器是由不同消音原理構成的獨立器件，多用於潔淨恆溫室等多種場合，有阻性、抗性、共振性等多種形式。

## 其它環境及其控制

- 精密加工和超精密加工的環境要求除潔淨、溫度、濕度、振動、噪音外，還有光環境、靜電環境、防電磁干擾、防射線等要求，都歸於其它環境要求。

91

## 光環境

- 室內照明可分為**全域照明**、**局部照明**和**混合照明**三種形式。混合照明是指有全室的一般照明和局部的加強照明。通常精密加工和超精密加工的環境要求其潔淨恆溫室的照明為**混合照明**，甚至有特殊要求。
- 光環境有**照明量**、**照明品質**和**顏色**要求三個主要指標。

### ➤ 照度

☞ 照度是衡量照明量的指標，用被照面積上所接收的光通量來表示，單位為lx。表1.10表示了規定的無採光窗潔淨恆溫工作面上的最低照度。

92

# 其他環境及其控制

## (一) 光環境

### 1. 照 度

無採光窗潔淨恆溫工作面上的最低照度

識別對象的最尺寸 $d$ 及場所 / mm	視覺工作分類		亮度對比	照度 / lx	
	等 級			混合照明	一般照明
$d \leq 0.15$	I	甲	小	2500	500
		乙	大	1500	300
$0.15 < d \leq 0.3$	II	甲	小	1000	300
		乙	大	750	200
$0.3 < d \leq 0.6$	III	甲	小	750	200
		乙	大	750	150
$d > 0.6$	IV	—	—	750	150
通道、休息室	—	—	—	—	100
暗房工作室	—	—	—	—	30 <sup>93</sup>

## 2. 眩 光

- **眩光是衡量照明品質的指標**，它是由於在視線附近有高亮度光源、光澤表面反射出的高亮度光源和極高的亮度對比等原因造成，例如使用裸燈泡、光源懸掛高度不當、亮度分布不均勻、缺少全域照明和室外光源的照射或反射等都會引起眩光的產生。

# 其它環境及其控制

## 2. 眩光

眩光的表示方法之一是用眩光常數  $G$

$$G = 4.167 B_S^{1.6} \omega^{2.3} / B_b$$

式中  $B_S$  光源  $S$  的照度 (lx)

:  $B_b$  光源以外的背景平均照度 (lx)

:  $\omega$  由眼睛看到光源  $S$  的立體角 (sr)

立體角是一個錐形的角度，用球面度來測量，單位為球面度 (Sr)

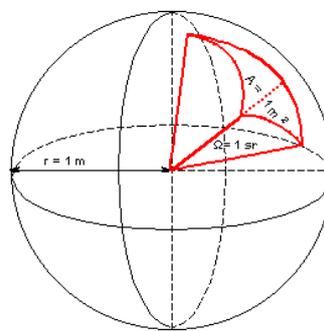
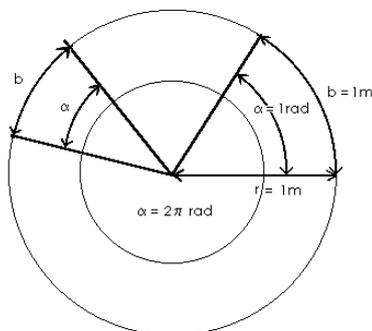
G	眩光引起的不舒適程度
600	不堪忍受
150	不舒適
35	尚可
8	感覺不到眩光

眩光常數值  $G$   
與不舒適程  
度的關係

95

## 立體角

- 立體角的概念：一個錐面所圍成的空間部分稱為“立體角”。立體角是以錐的頂點為心，半徑為1的球面被錐面所截得的面積來度量的，度量單位稱為“立體弧度”。
- $S = 2\pi r^2 (1 - \cos \theta)$
- $\Omega = S/r^2 = 2\pi (1 - \cos \theta) = 2 * 3.14 * (1 - \cos \theta)$
- $\cos \theta = 1 - 1 / (2 * 3.14)$
- $\theta = \cos^{-1} (0.840764331) = 32.78^\circ$
- 過計算的出1sr對應為平面角為  $32.78^\circ$  對應的圓錐截半徑為1的球面所得的面積。



96

## 其它環境及其控制

### • 3. 顏色

- 在某些超精密加工中，對照明光的顏色提出特殊的要求。例如積體電路製造中的光刻要求採用黃光光源進行照明，避免光刻膠受一般照明光中的紫外光成分照射而固化。

## 其它環境及其控制

### (二)靜電環境

- 在恆溫潔淨室中，操作人員的工作服、建築物地面和牆面的材料會積聚靜電；一些機械運動和工藝操作等會產生靜電。
- 靜電會產生干擾，影響電器元件的正常工作；
- 靜電會使一些塵埃吸附在工件表面上，造成污染；
- 靜電放電產生的熱甚至會引起火災和爆炸，因此靜電對潔淨恆溫室的工作影響很大。

# 精密加工與超精密加工的環境設計

環境設計應考慮以下一些問題：

- (一)遞階等級結構設計
- 要對大面積範圍進行淨化和恆溫是很困難的，造價高、維持費高、不經濟，因此應按照實際需要，採取分層次等級的結構形式。
  - 1. 潔淨恆溫車間：通常大面積的精密加工車間淨化恆溫要求較低。
  - 2. 大潔淨恆溫室(間)：通常大淨化恆溫室的恆溫淨化要求比車間要高一些，例如超精密加工機床、精密儀器、儀錶的裝配等工作地。
  - 3. 小潔淨恆溫室(間)：可採用大潔淨恆溫室內套小潔淨恆溫室，其空心牆內通入恆溫空氣，或在大潔淨恆溫的地下建造小潔淨恆溫室，以達到其高要求。
  - 4. 潔淨恆溫工作艙：可在小潔淨恆溫室內放置的設備上建造整體恆溫罩或局部恆溫罩，以達到高精度的工作環境要求。

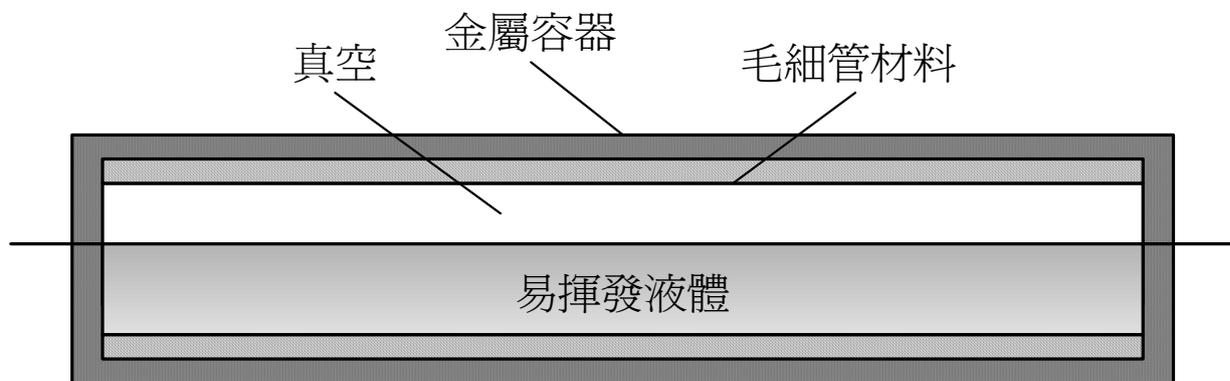
99

## (一)遞階等級結構設計

- 對於有些需要淨化恆溫的工作艙，在沒有淨化恆溫的大環境下，也可以直接採取對工作空間進行局部淨化恆溫的方法來達到所需的工作環境要求，這樣既實用，也比較經濟。
- 對於機床設備的工作空間可以採用油淋浴式和熱管式等方法進行恆溫。熱管是將金屬圓筒容器抽成真空後注入少量丙酮等易揮發的液體，將它密封起來。圓筒的內壁有鎳絲或玻璃絲編織的纖維，形成其有毛細管作用的材料，見下圖。當熱管的一端受熱時，內部的工作液汽化並由於壓力差向冷端移動，在冷端冷凝為液體，被毛細管材料吸收送回熱端，從而很快達到溫度均化，因此具有極高的熱傳導率。將熱管裝於機床上，形成冷卻系統，能迅速傳熱保持機床各部分溫度均勻，減少熱變形，即高效率而又經濟。

100

## (一) 遞階等級結構設計



熱管 (Heat pipe)

101

## (二) 氣流組織設計

- 氣流組織通常稱為送風，其作用是把塵埃有效地排出去，阻止外界的塵埃進入，並使空間的溫度、濕度和塵埃分布均勻。
- 氣流組織的方式可分為亂流和層流兩種方式。

102

## (二) 氣流組織設計

### 1. 亂流方式

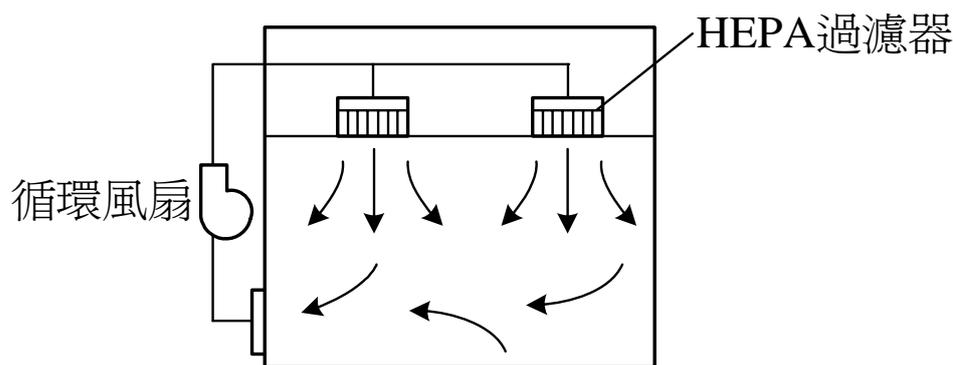
- 潔淨恆溫的氣流由頂部通過幾個通風口送入室內，由地面或接近地面的牆壁處回氣，氣流自上而下，與塵埃重力沈降方向一致，稱之為上送下排方式，由於空氣流向比較亂，是一種亂流形式。
- 這種方式的缺點是潔淨度不夠高，通常只能達到1000-10,000級的水準，且溫度不夠均勻，由於熱空氣會上升，因此進入的恆溫空氣要低於欲保持的恆溫溫度值才能有效，但結構較簡單、造價低，採用比較廣泛。

103

## (二) 氣流組織設計

氣流組織的方式可分為亂流和層流兩種方式。

### 1. 亂流方式



氣流組織的亂流方式

104

## (二)氣流組織設計

### 2. 層流方式

- 潔淨恆溫的氣流從房間整個天花板、牆面或地板上裝有的一層**高效篩檢濾網**均勻送入室內，從**對面方向的整個地板、牆面或天花枝**上裝有的一層**回風口**均勻排出，因此氣流呈**平行穩定狀態**，無亂流，空氣潔淨效果好，可達**100級**或更高，室內溫度也比較均勻。

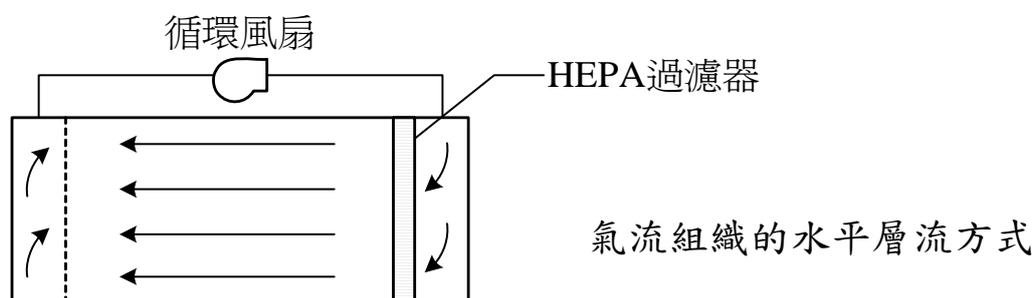
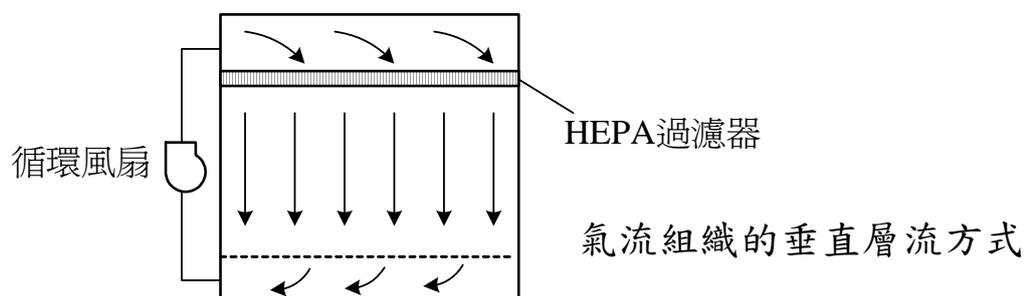
105

## (二)氣流組織設計

- 從氣流的方向來分，可以分為**垂直層流**和**水平層流**兩種。
- (1)**垂直層流**：指氣流呈上下方式，又可分為上送下排和下送上排兩種。上送下排方式應用較多。下送上排方式是從地面上送氣，其方向與塵埃重力沈降方向相反，效果較好，但結構比較複雜，通常用於精密恆溫時在地面下面裝置恆溫水管，以控制地面溫度較多。
- (2)**水平層流**：指氣流呈水準方式，為側送側排，當然也可分為左送右排或右送左排，視房屋結構和需求而定，它容易造成室內水準方向溫度不均勻，由於**氣流方向與塵埃重力沈降方向垂直**，因此**風速應大一些**，使上層塵埃能被氣流帶走而排出。

106

## 2. 層流方式



107

## (三) 正壓控制設計

- 為了保持工作環境的潔淨恆溫，防止外部空氣的滲入是一個重要措施，為此需要**保持淨化恆溫室內有一定的正壓**。
- 潔淨恆溫室內的正壓通常是靠送入的風量大於排出的風量來達到的。**空間越大，正壓值越高，則所需要送入的風量就越大，相應的空氣篩檢濾網的容量也要增大**，這些均會增加風量消耗和運行費用。正壓值較大，有利於防止外界空氣滲入，但所需送入的風量加大，通常可考慮潔淨室與一般工作室之間的壓力差為14.7Pa，不同級別潔淨室之間的壓力差為4.9Pa。
- 正壓控制一般用於小淨化恆溫室和工作艙比較合適。

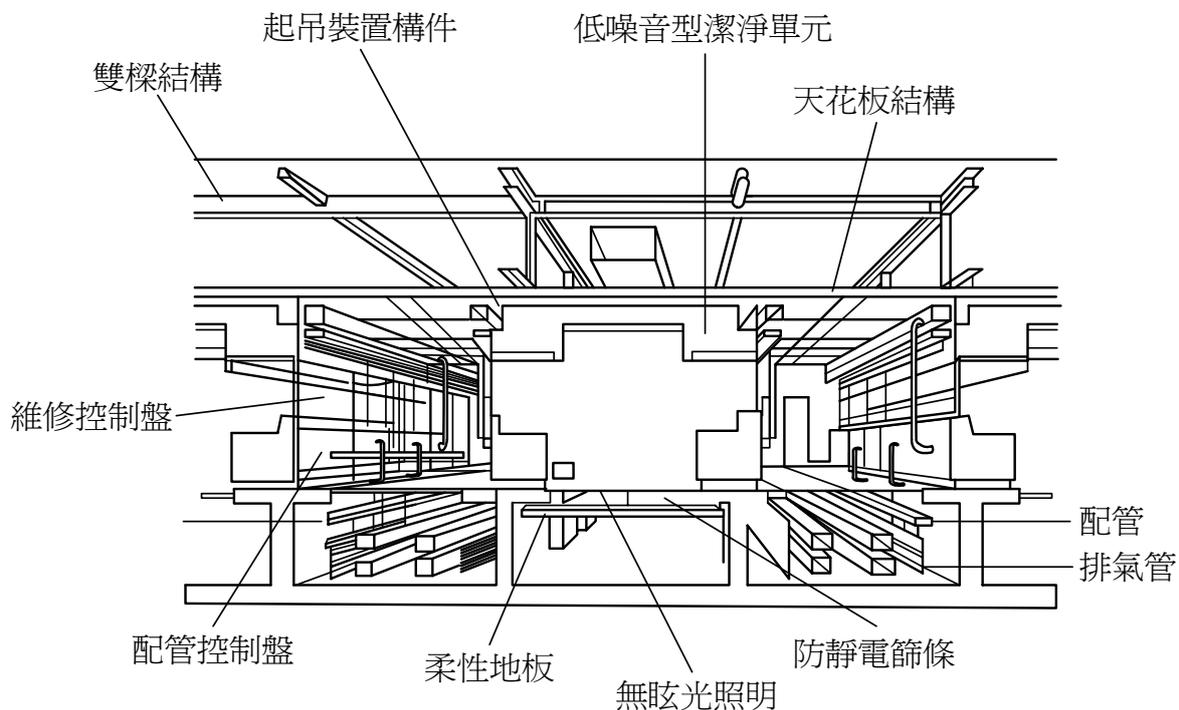
108

## (四) 精密加工與超精密加工的工作環境設計

- 精密加工與超精密加工時工作環境的要求很多，但也各有重點不同，例如恆溫室、潔淨室、潔淨恆溫室、恆溫防振潔淨室等，可按要求進行設計，下圖表示一個典型潔淨室的剖面設計，具有層流式潔淨、恆溫、恆濕，地面不傳播振動、低噪音、無眩光，人體防靜電等功能。其空間佈局合理、結構緊湊、維修方便，例如其雙樑結構方便軟性導管的安裝和淨化裝置的懸掛，且便於維修；天花板結構便於維修檢驗；柔性地板不傳播走步振動，且地板下為有用空間。

109

## (四) 精密加工與超精密加工的工作環境設計



典型潔淨室的剖面設計

110

# 精密加工和超精密加工技術的發展

## 新精密加工機理的研究

- 精密加工和超精密加工技術向探求新的加工機理方向發展，形成新的加工方法，例如量子束加工、光子束加工等，提出量子技術、量子能量的利用構想。

## 新精密加工機理的研究

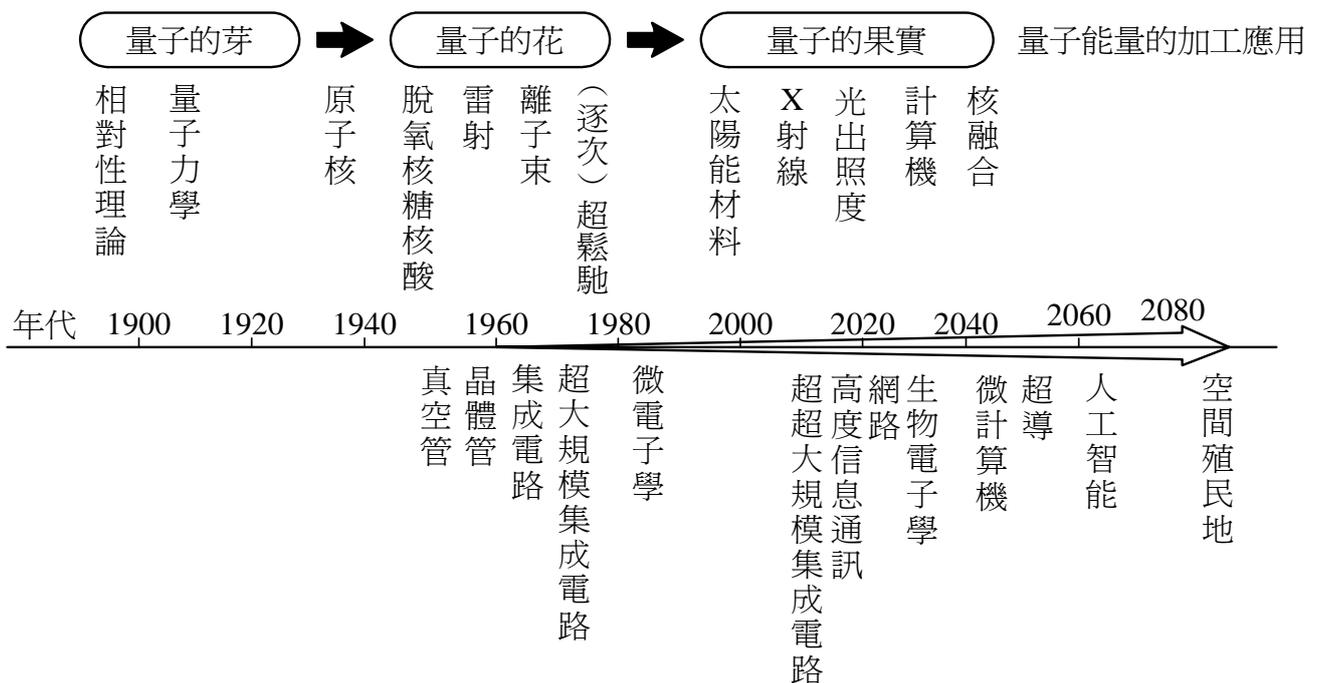


圖1.25 超精密加工理論和應用技術發展的構想