



西北工业大学  
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY



# 高温材料防护与涂层技术

西北工业大学

付前刚



# 主要内容

1. 涂层技术原理及制备方法
2. 涂层性能的检测及失效分析的方法
3. C/C复合材料抗氧化技术
  - 3.1 C/C复合材料基体改性抗氧化技术
  - 3.2 C/C复合材料涂层结构、选材
  - 3.3 C/C复合材料防氧化涂层技术
    - (1) 陶瓷涂层
    - (2) 金属涂层
    - (3) 玻璃涂层
    - (4) 梯度涂层
    - (5) 复合涂层
  - 3.4 C/C复合材料抗烧蚀抗冲刷涂层技术
4. 陶瓷基复合材料抗氧化技术
5. 高温金属抗氧化技术
6. 热障涂层 (EBC) 技术
7. 隐身涂层技术



西北工业大学  
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY



# 涂层技术原理与制备方法



# 内 容

1

涂层定义

2

涂层分类

3

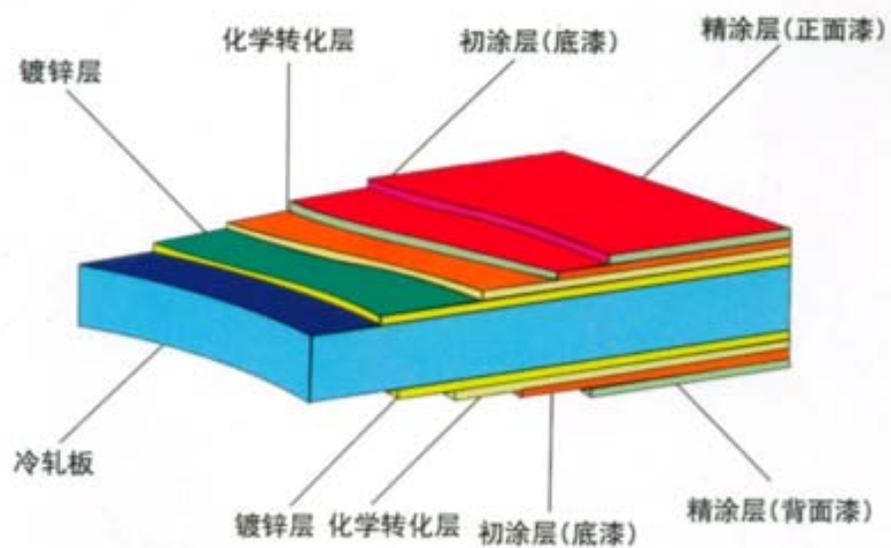
涂层制备方法



# 什么是涂层?

Coat





彩色涂层钢板结构





## ■ 涂层定义:

用物理的、化学的、或者其他方法，在金属或非金属基体表面形成的一层具有一定厚度（一般大于 $10\mu\text{m}$ ）、不同于基体材料且具有一定的强化、防护或特殊功能的覆盖层。



各种复合材料

复合材料涂层

有机材料，如油漆、树脂；  
无机材料，如陶瓷及有色矿物。

金属涂层

各种金属，如  
铜、铝、镍、  
铬、银等。

非金属涂层



## 涂层的分类

### 按涂层材料分

金属涂层  
非金属涂层  
复合材料

### 按涂层功能分

防腐涂层  
耐磨涂层  
特殊功能涂层

按涂层制备方法分类(见下页)



## 现有工艺

电镀

溶胶凝胶

原位反应

热喷涂

化学热处理

气相沉积

表面粘涂

热浸镀



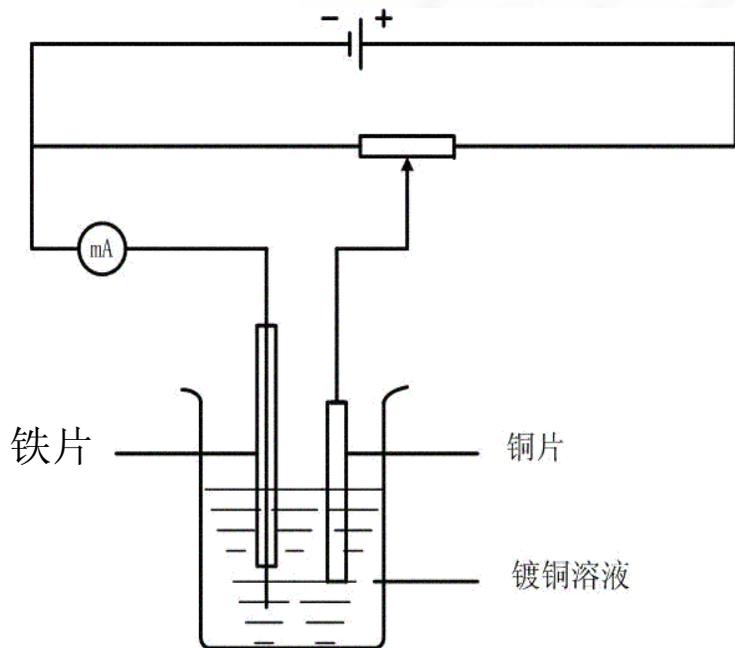
## 电镀技术定义

### • 什么是电镀？

电镀是指在含有欲镀金属的盐类溶液中，以被镀基体金属为阴极，通过电解作用，使镀液中欲镀金属的阳离子在基体金属表面沉积出来，形成镀层的一种表面处理方法。镀层性能不同于基体金属，具有新的特征。根据镀层的功能分为防护性镀层，装饰性镀层及其它功能性镀层。



- 电镀是一种氧化还原过程





## 现代电镀的分类

现代电镀

合金电镀

单金属电镀

单层电镀

多层组合电镀

复合电镀



## 电镀技术工艺





## 电镀技术工艺



### 表面准备

以适当的技术和相应的处理剂除去镀件或制品表面对电镀及电镀层产生负面影响的各种污染物和外来物质，达到电镀技术对电镀表面所要求的清洁度

表面准备中所采用的技术一般叫清洗技术；  
相应的处理剂叫清洁剂。

### 镀层及系统工艺设计

在实施电镀之前，必须根据基体的具体情况、预期服役条件及预期的服役寿命来设计所需的镀层。



## 镀层镀覆方法

### 镀覆方法

脉动喷射电镀、  
卷材电镀、换向  
电流电镀、直流  
电镀、滚镀等  
等。

**摩擦电镀：**  
借助于在电镀过程中  
阳极对阴极的不停的  
、反复的摩擦作用，  
而使基体或已镀镀层  
表面一直处于机械活  
化状态

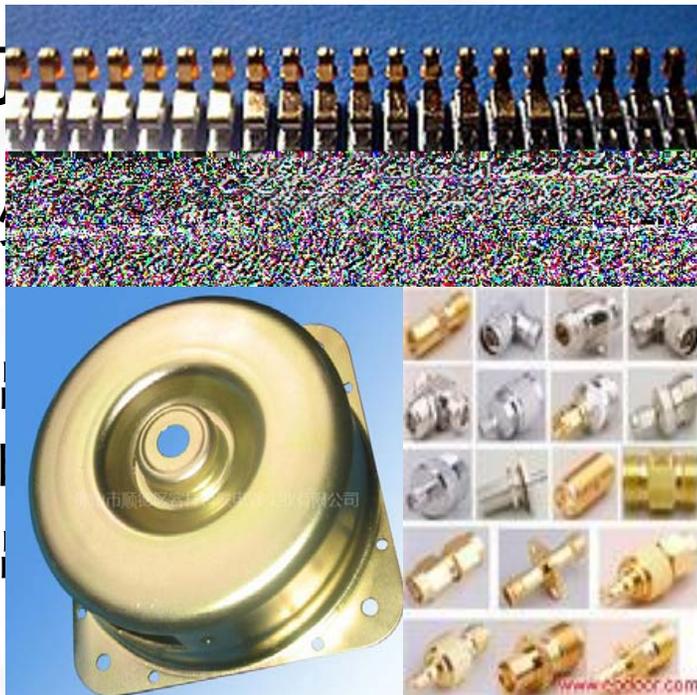
**喷射电镀：**  
利用适当的装置以一  
定的流量和压力将电  
镀液从阳极垂直喷射  
向阴极表面，在喷射  
射流冲击的阴极表面  
的区域发生电沉积。

**激光电镀技术：**  
利用激光束快速、聚  
焦极好且准直的特点  
，而进行快速、无绝  
缘或不屏蔽的描图式  
的电镀。



# 合金电镀的

- 1. 两种金属中至先析出电位较负金属的析出物
- 2. 两种金属的析出电位相差太大，则电位较正金属的析出物完全排斥电位较负金属的析出物



盐类的水溶液中，如果相差太大，至完全排斥电位较负金属的析出物，则电位较正金属的析出物完全排斥电位较负金属的析出物，形成合金镀层。

外观优美

硬度高

耐磨性好

耐高温

稳定性好

致密性好

色泽好



## 电镀的应用

应用于各种金属和非金属的装饰防护，以及赋予这些金属和非金属的各种所需要的特殊性能或功能。



广泛应用于汽车工业、航空航天等各个部门

适合大批量生产



## 未来电镀技术研究与开发重点

1

更广泛的应用各种电流，超声，以及各种其他物理机械作用。

2

研究、开发应用新型非水镀液——熔盐。

3

更广泛研究、应用新的镀层。

4

研究、发展和应用清洁电镀技术。



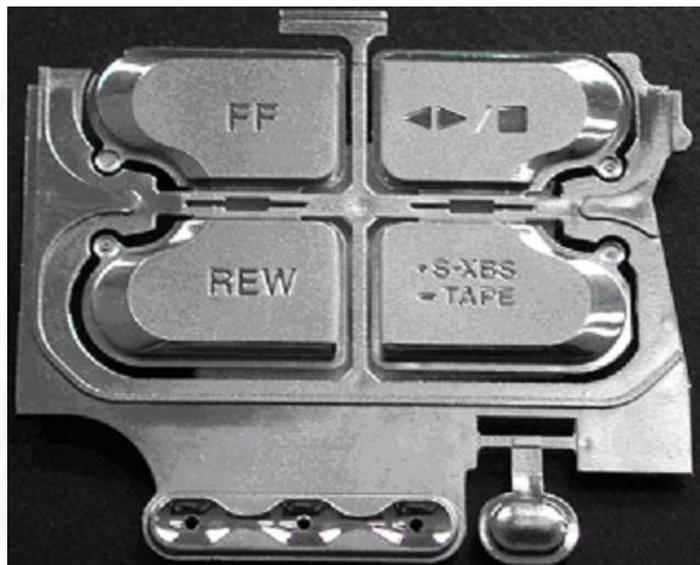
## 化学镀技术定义

化学镀是一种不需要通电，依据氧化还原反应原理，利用强还原剂在含有金属离子的溶液中，将金属离子还原成金属而沉积在各种材料表面形成致密镀层的方法。

不外加电流而利用异相（固相，液相）表面受控自催化还原反应在基体上获得所需性能连续、均匀附着沉积过程的统称，又称化学沉积、非电解沉积、自催化沉积。



西北工业大学  
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY





## 化学镀镍技术

20世纪60年代

20世纪70年代

近代

镀液配方受限，  
镀液不稳定，镀  
液沉积速度慢、  
镀液寿命短。

“双络合、双稳  
定”  
和“双络合、双  
稳定、双促进”  
配方的出现。

至少200多种  
以上的成熟  
化学镀镍配  
方。



## • 化学镀镍



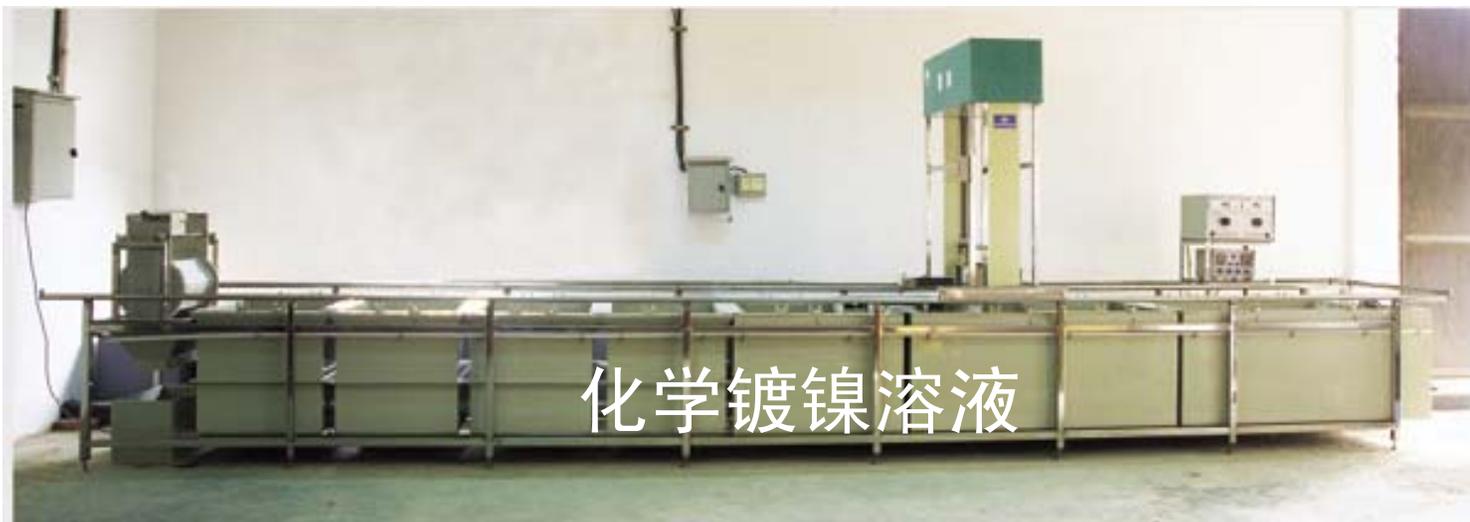
Ni-P-B 活塞



Ni-P 铝质天线盒

化学镀镍是利用镍盐溶液在强还原剂次亚磷酸钠的作用下，使镍离子还原成金属镍，同时次亚磷酸盐分解析出磷，因而在具有催化表面的镀件上，获得Ni-P合金镀层。

**化学镀镍层实际上是含  
3-15%磷的镍磷合金**



### 化学镀设备

镍离子

缓冲剂

稳定剂

络合剂

光亮剂

去应力剂

加速剂

湿润剂

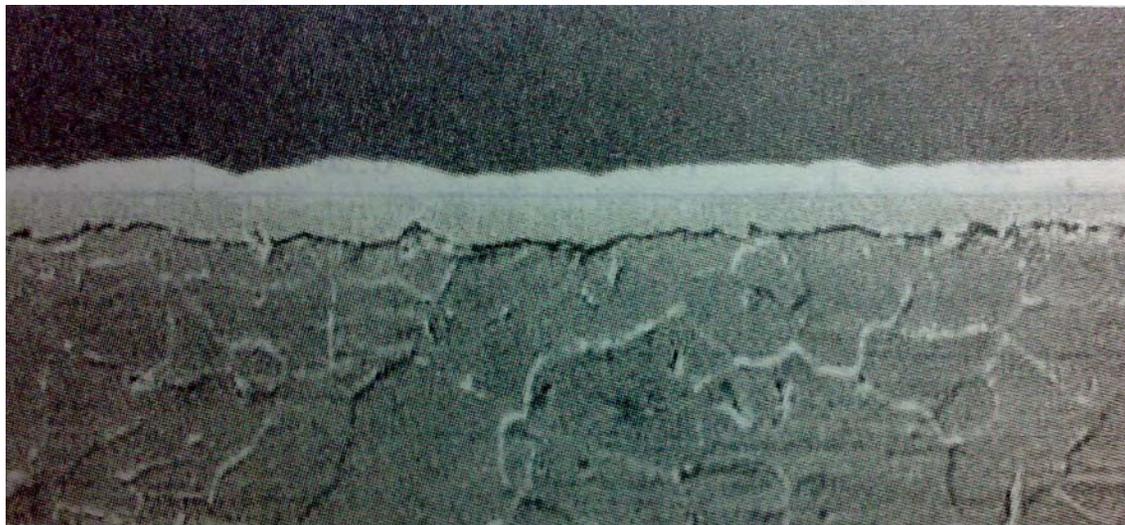
还原剂

PH调整剂



表 Ni-12P 合金镀层在下列介质中的腐蚀速率

腐蚀介质	温度 $^{\circ}\text{C}$	腐蚀速率 (mm/年)	
		Ni-12P合金镀层 + 不锈钢	不锈钢 1Cr18Ni9Ti
42%NaOH	沸腾	<0.048	>1.5
45%NaOH	20 $^{\circ}\text{C}$	没有	0.5
37%HCl	30 $^{\circ}\text{C}$	0.14	1.5-1.8
10% $\text{H}_2\text{SO}_4$	30 $^{\circ}\text{C}$	0.031	>1.5
10% $\text{H}_2\text{SO}_4$	70 $^{\circ}\text{C}$	0.048	>1.5
(海水) 3.5%盐	95 $^{\circ}\text{C}$	没有	0.5-1.4
40%HF	30 $^{\circ}\text{C}$	0.0141	>1.5



非晶态Ni-P镀层的外观形貌照片



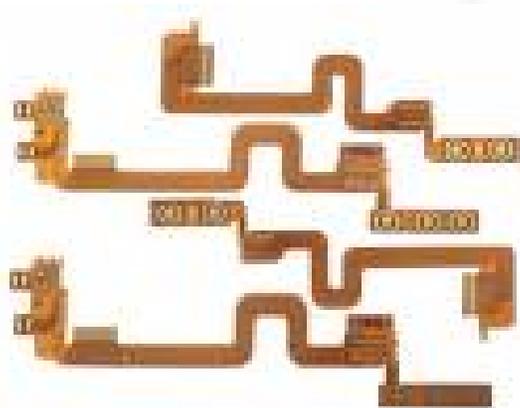
## 特点:

- (1) 工艺简单，适应范围广，不需要电源，不需要制作阳极，只要一般操作人员均可操作。
- (2) 镀层与基体的结合强度好。
- (3) 成品率高，成本低，溶液可循环使用，副反应少。
- (4) 无毒，有利于环保。
- (5) 投资少，数百元设备即可，见效快。



## 化学镀的应用

化学镀技术是比电镀技术更年轻的表面覆盖技术，正是由于化学镀技术的发展才使印刷线路板、计算机软盘和塑料电镀以及非金属表面金属化成为可能。

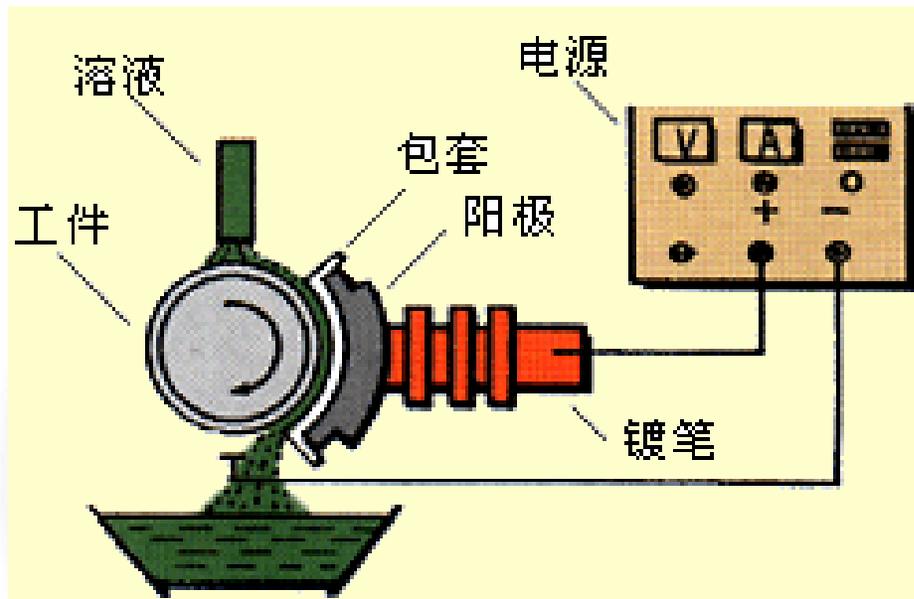




	应用部门	基体金属	厚度/ $\mu\text{m}$	使用原因
一、汽车工业	制动元件	钢	10-15	耐磨、耐蚀和润滑
二、模具和铸模	锌铸模	合金钢	25 $\mu\text{m}$	耐磨和零件脱模
三、纺织机件	喷丝头	不锈钢	25	耐蚀、耐磨
四、化学和石油工业	压气机和转子叶片	钢/铝	125	耐蚀和耐磨
五、航空和航天工业	直升飞机桨叶及安全螺栓	钢	25-30	耐磨、耐应力腐蚀
六、电子工业	手机外壳	Al-Mg合金	10-12黑Ni	耐磨、耐蚀、装饰
七、材料加工机械	挤压柱和筒	钢	25	耐蚀、耐磨和润滑
八、印刷工业	印刷辊筒	钢	50	光亮、耐磨、耐蚀
九、矿山机械	矿井支柱	钢	40	耐蚀、耐磨
十、其他	射击运动枪开关及手柄	铝	30	耐蚀、耐磨、保持花纹美观



## 电刷镀技术



**电刷镀**又叫选择电镀、无槽镀、涂镀、笔镀、擦镀等。它是电镀的一种特殊方式，不用渡槽，只需在不断供电解液的条件下，用一支镀笔在工件表面上进行擦拭，即可获得电镀层。

应用电化学沉积的原理，在导电零件需要制备镀层的表面上，快速沉积金属镀层的表面技术。



## 电刷镀技术的应用

应用



零件表面强化

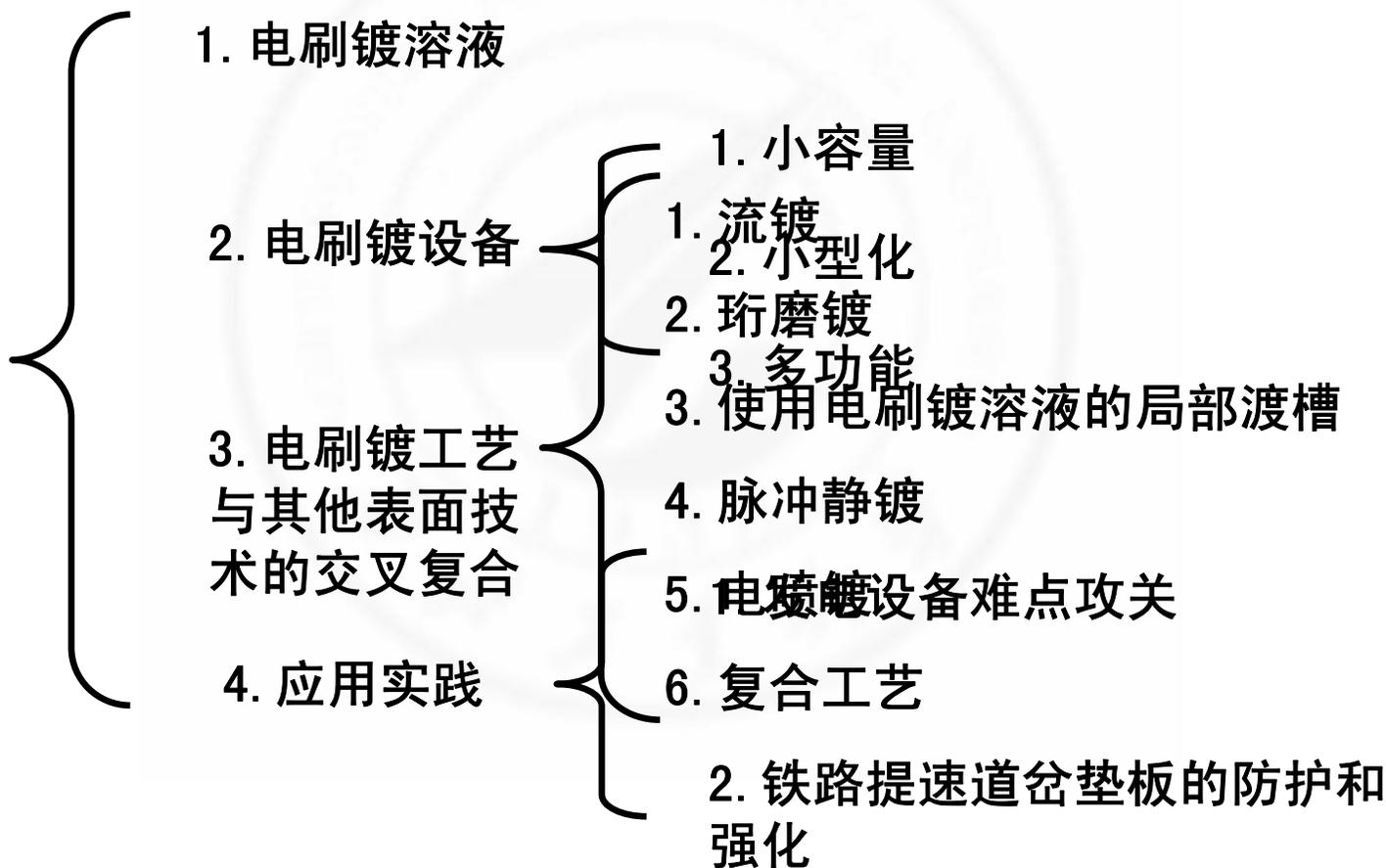
零部件表面微尺寸修复

零部件表面划痕、擦伤和凹坑等缺陷的修复

制备特殊功能及其他要求的镀层



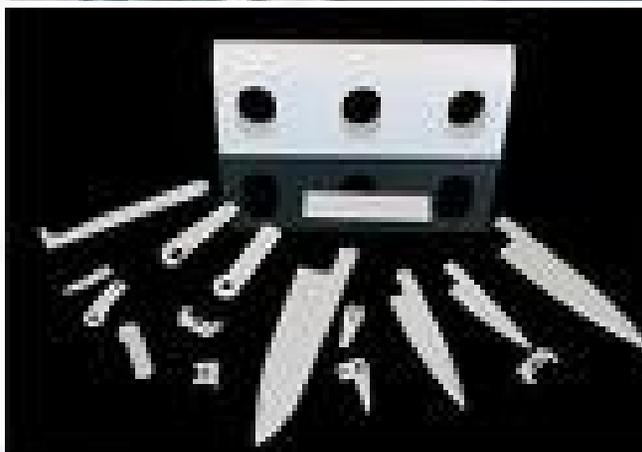
## 电刷镀的发展趋势





## 溶胶凝胶技术简介

金属有机盐或无机盐溶液，低温时经过水解、缩聚等化学反应，从溶胶转变为凝胶，进而合成玻璃、陶瓷等涂层。





## 溶胶-凝胶法基本原理

### 机理

#### 1. 水解反应:

金属盐在水中的性质受金属离子半径, 电负性, 配位数等因素影响, 如Si、Al盐, 它们溶解于纯水中常电离出 $M^{n+}$ , 并溶剂化。

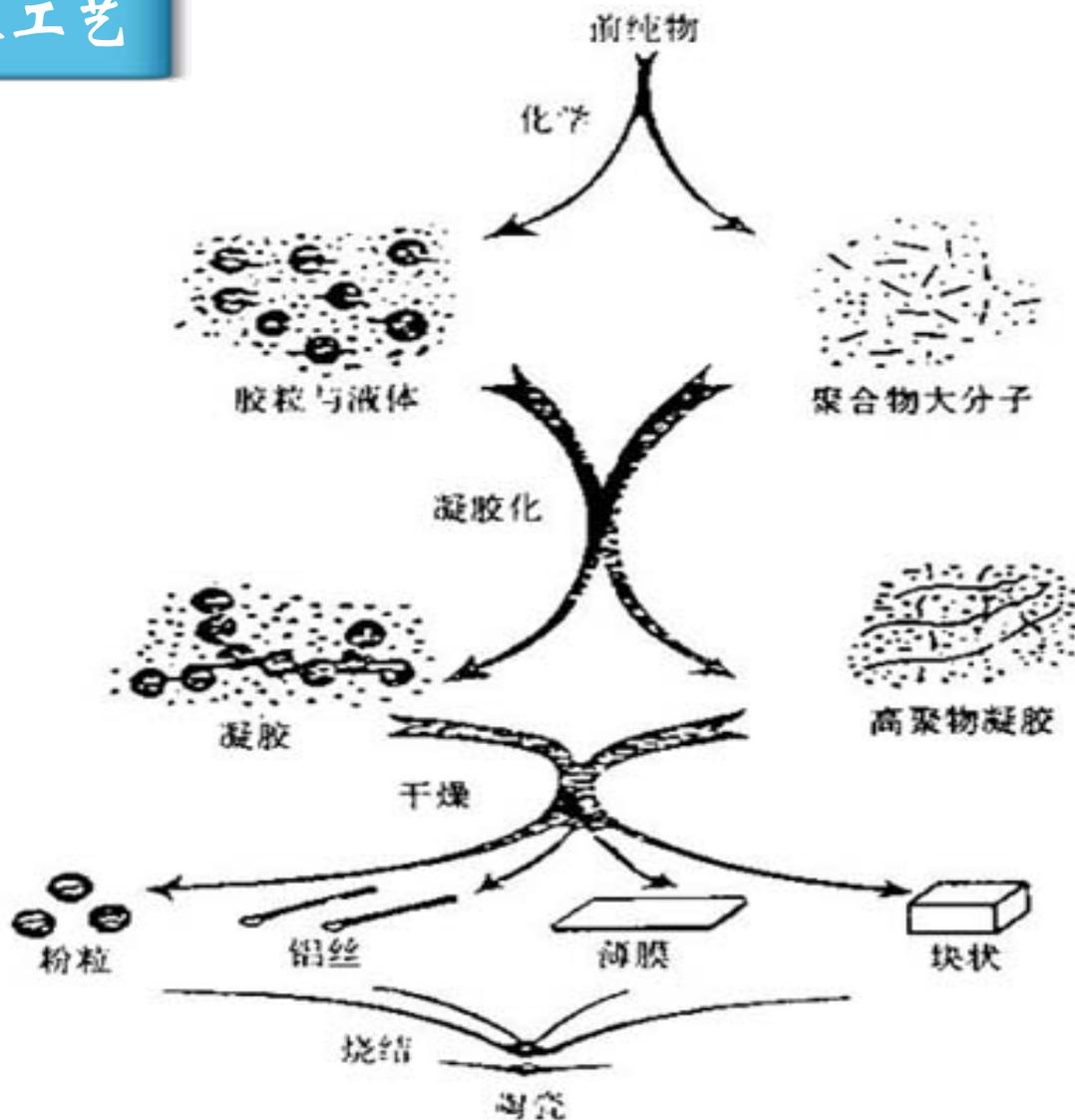
#### 2. 聚合反应:

硅、磷、硼以及许多金属元素, 如铝、钛、铁等的醇盐或无机盐在水解的同时均会发生聚合反应, 如失水、失醇、缩聚、醇氧化、氧化、氢氧桥键合等都属于聚合反应, 性质上都属于取代反应或加成反应。



# 溶胶-凝胶技术工艺

## 溶胶凝胶技术工艺流程图





- 溶胶-凝胶法涂膜的方法主要有**浸渍法**（dip-coating）和**旋涂法**（spin-coating）两种。
- 浸渍法又称提升法，它是将基片浸渍在溶胶中，再以恒定的速度从溶胶中提升出来，从而在基片表面上形成膜。浸渍法涂膜具有设备简单、操作方便的优点，并且基片两面可以同时镀膜；但该法涂膜不易均匀。

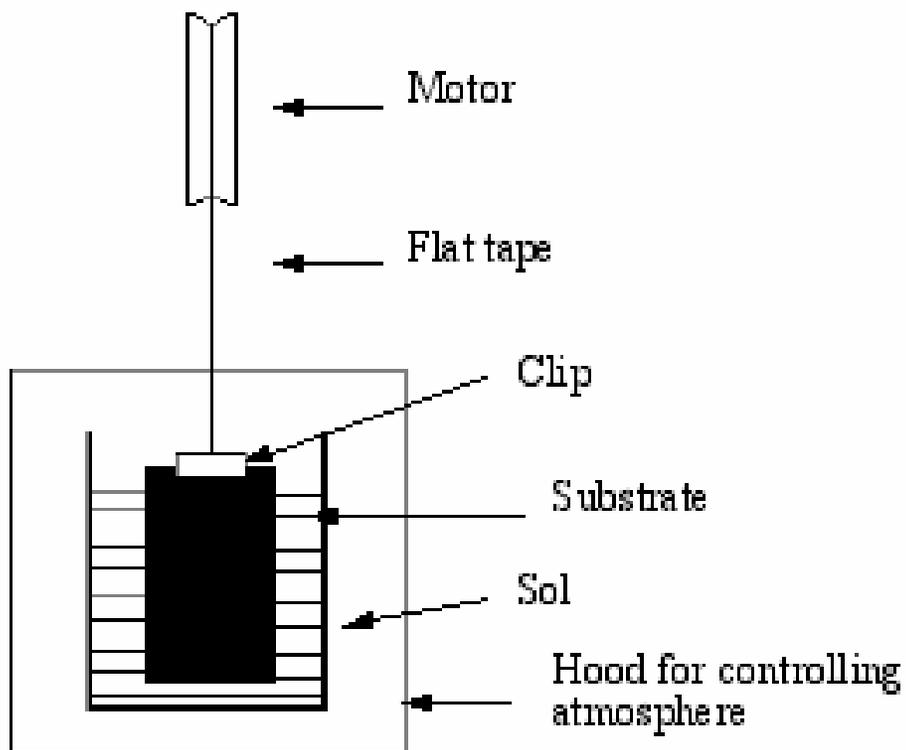


Fig. 1.2 Apparatus for dip-coating

图 1.2 浸渍法制膜装置示意图



- 旋涂法又称甩胶法、离心法。它是将基片固定在旋转的圆盘上，再将镀膜液倒在基片上，由于旋转扩展形成均匀的液膜。旋涂法涂膜均匀，但不易大面积成膜。
- 涂制的湿膜通过溶剂的挥发，水解、聚合反应的不断进行形成凝胶膜，再对凝胶膜进行适当的热处理便得到需要的薄膜材料。



## 溶胶凝胶法特点

### 缺点:

1. 所用原料多为有机化合物，成本较高，有些对健康有害
2. 处理过程时间较长，制品易产生开裂
3. 化学计量不准确，易于改性，掺杂的范围窄， $\text{OH}^-$  根或  $\text{C}$ ，若烧成不够完善，制品中会残留细孔及杂质
4. 从同一种原料出发，改变工艺过程即可获得不同的产品，如粉料、薄膜、纤维等
5. 工艺简单，不需要昂贵的设备。



- **应用:**
- 广泛的应用于玻璃、陶瓷、高超导材料、纳米材料及各种复合材料的制备。



陶瓷涂层杯



数码相机上的玻璃涂层



西北工业大学  
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY



鸟巢顶棚纳米涂层



## 原位合成技术

**原位合成工艺**是在一定条件下，通过元素和元素之间的物理化学反应（置换反应、氧化还原反应、相变、成核和结晶、化合和分解反应等），在基体表面原位形成一种或多种高强度、高硬度的增强颗粒，从而起到强化基体的作用。



## 原位合成技术

### 特点:

1. 避免了与基体相容性不良的问题，且界面结合强度高
2. 不易出现增强相的团聚或偏析，生成颗粒细小
3. 工艺简单，成本较低
4. 在保证材料具有较好的韧性和高温性能的同时，可较大幅度地提高材料的强度和弹性模量
5. 工艺上可实现连续生产和近净成形工艺，能与铸造工艺结合，直接制造出形状复杂、尺寸变化大的近终形产品



## 原位合成技术分类

原位合成技术

表面原位合成

整体原位合成



原位高能束表面原位熔覆法



原位铸造烧结法



原位反应喷射沉积法



## 热喷涂

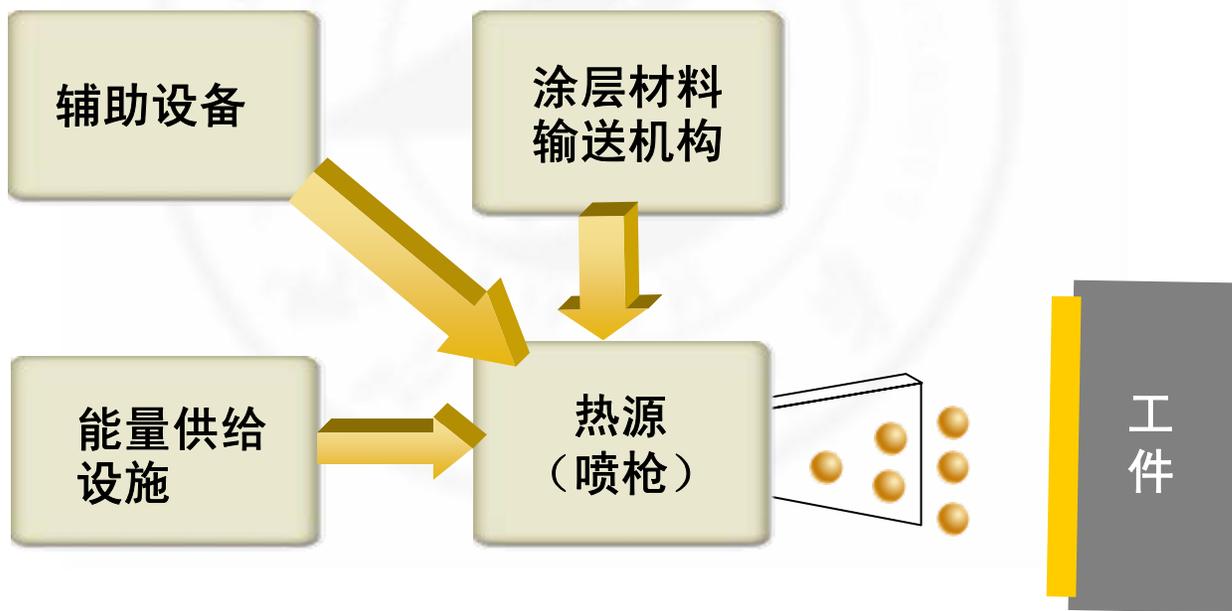
利用某种**热源**把细微而分散的金属和非金属喷涂材料**加热**到溶化或半溶化状态，并高速喷向基体材料的表面，而形成各种所需的涂层的一种技术。

这种喷涂工艺几乎可以喷涂所有的工程材料，如硬质合金、陶瓷、金属、石墨和金属陶瓷等。



# 热喷涂技术原理

利用特定的热源将喷涂材料加热**熔化或软化**，并借助自身动力或外加气流将熔滴加速，以一定的速度**喷射**到表面经过净化或粗化的工件上形成涂层的工艺方法。



热喷涂技术原理图

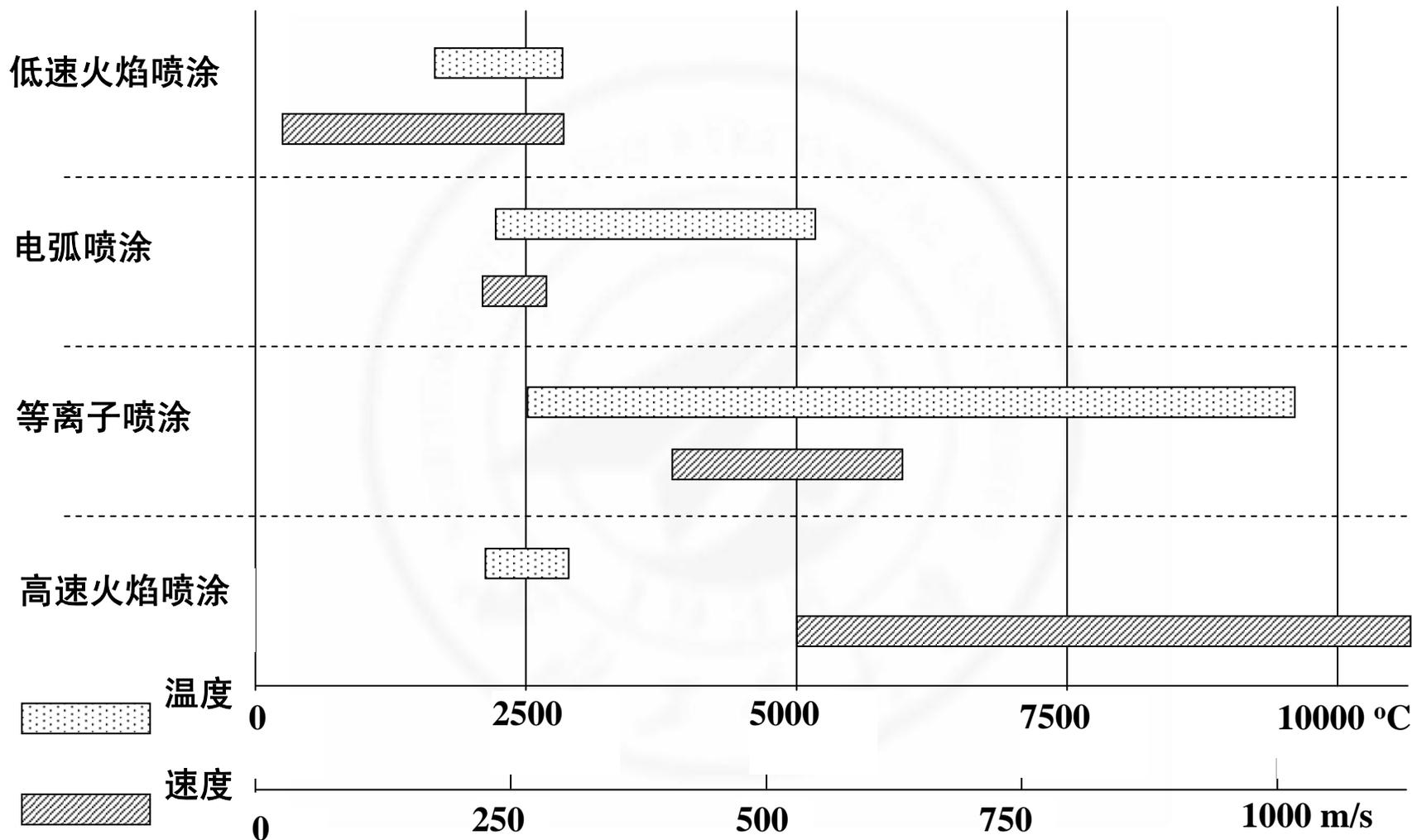


西北工业大学  
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY





热 源	温 度 °C	喷 涂 方 法
火 焰	约3000	粉末火焰喷涂(焊)
		丝材火焰喷涂
		陶瓷棒材火焰喷涂
		高速火焰喷涂(HVOF)
		爆炸喷涂(D - GUN)
电 弧	约5000	电弧喷涂
等 离 子 弧	10000以上	大气等离子喷涂(APS)
		低压等离子喷涂(LPPS)
		水稳等离子喷涂





## 涂层结合方式

### 机械结合

高速熔融粒子与工件表面撞击后产生变形，与凹凸不平的表面互相啮合，形成机械结合。颗粒快速冷却及收缩进一步增强结合。

### 冶金—化学结合

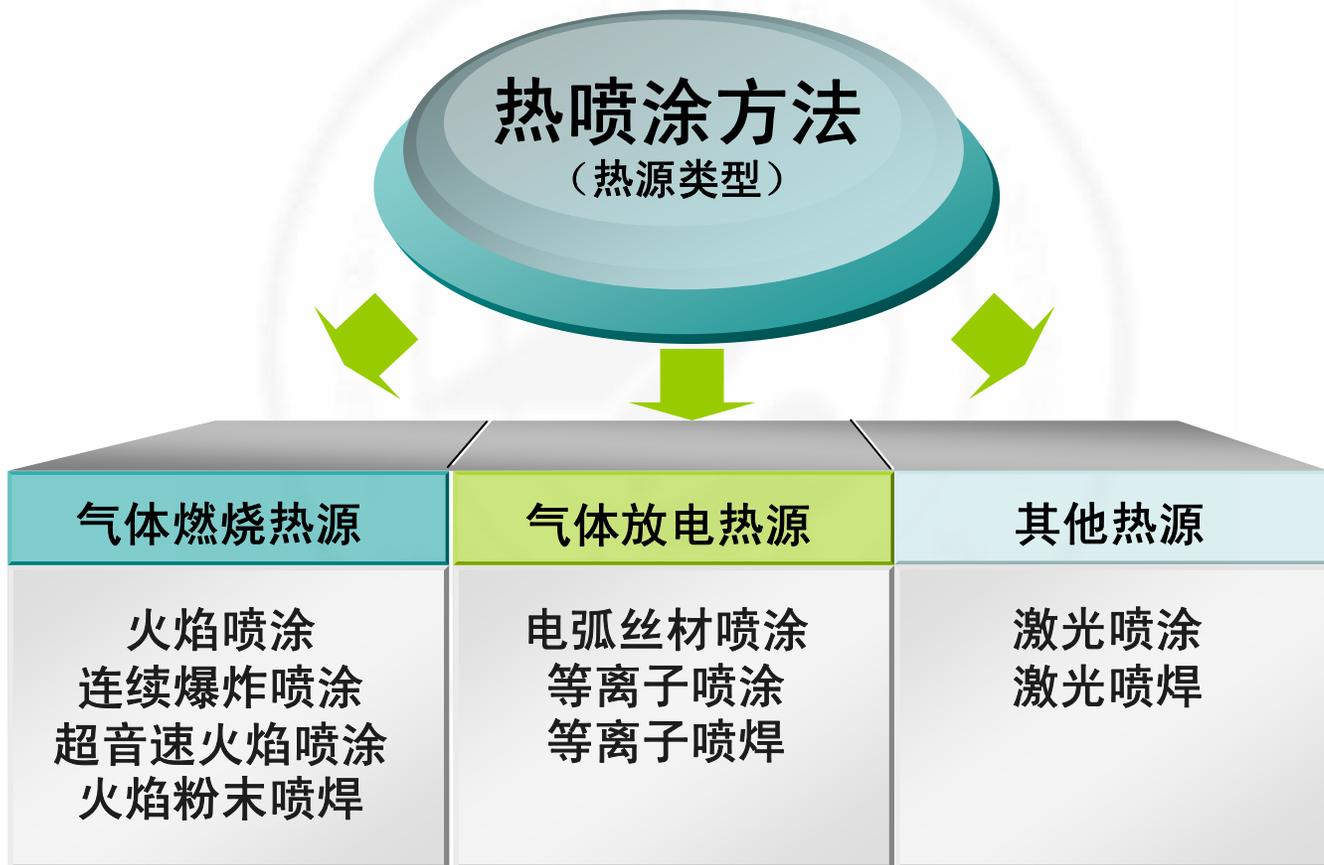
涂层材料与基材在一定的条件下产生扩散，并可产生微区的冶金结合组织，生成金属化合物和固溶体。

### 物理结合

主要由范德华力和次价键形成的一种结合模式。



# 热喷涂方法的分类





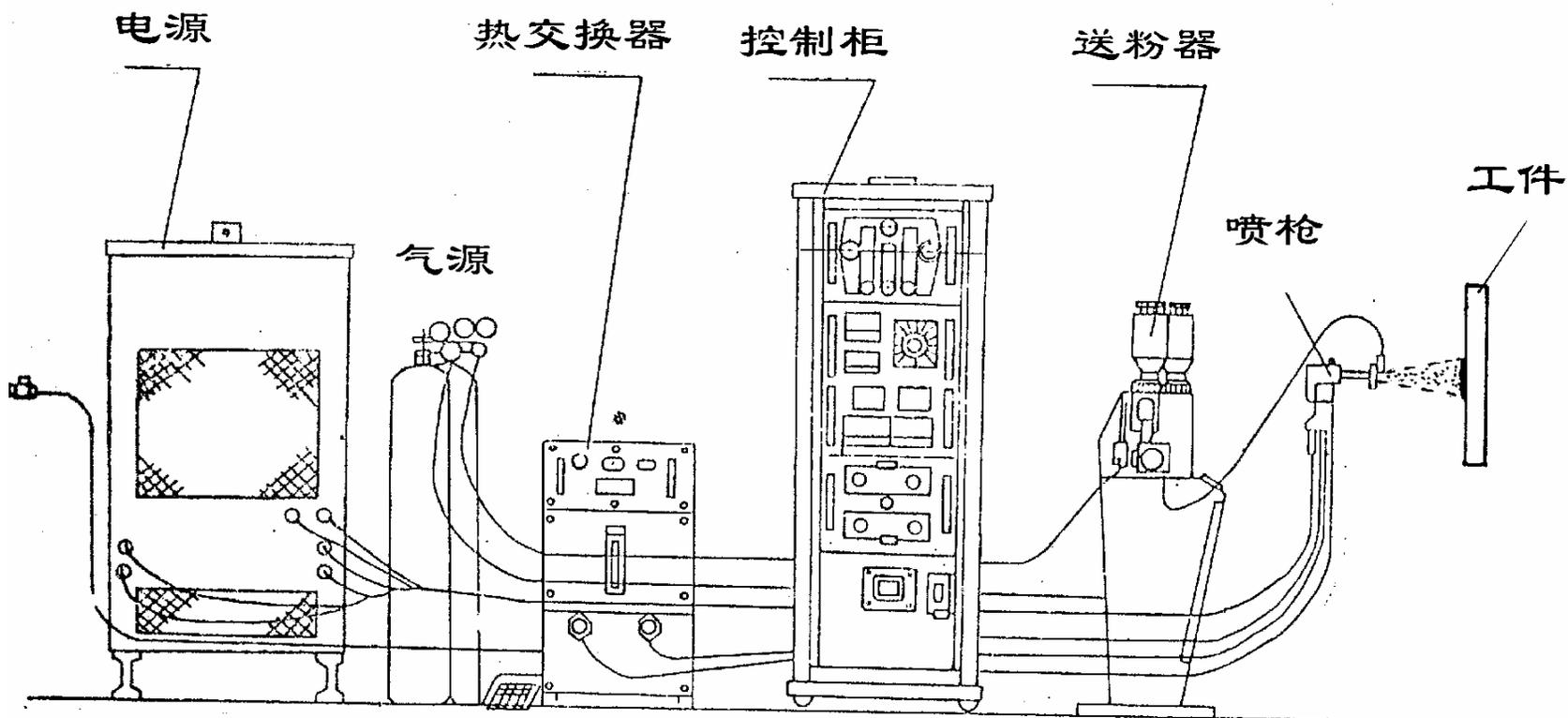
## 等离子喷涂

等离子喷涂是由等离子喷枪产生等离子焰流来进行的。

在工作气体电离后将粉末用载气送进高温等离子焰流中，形成涂层。

具有温度高，能量集中，弧稳定性好等特点。

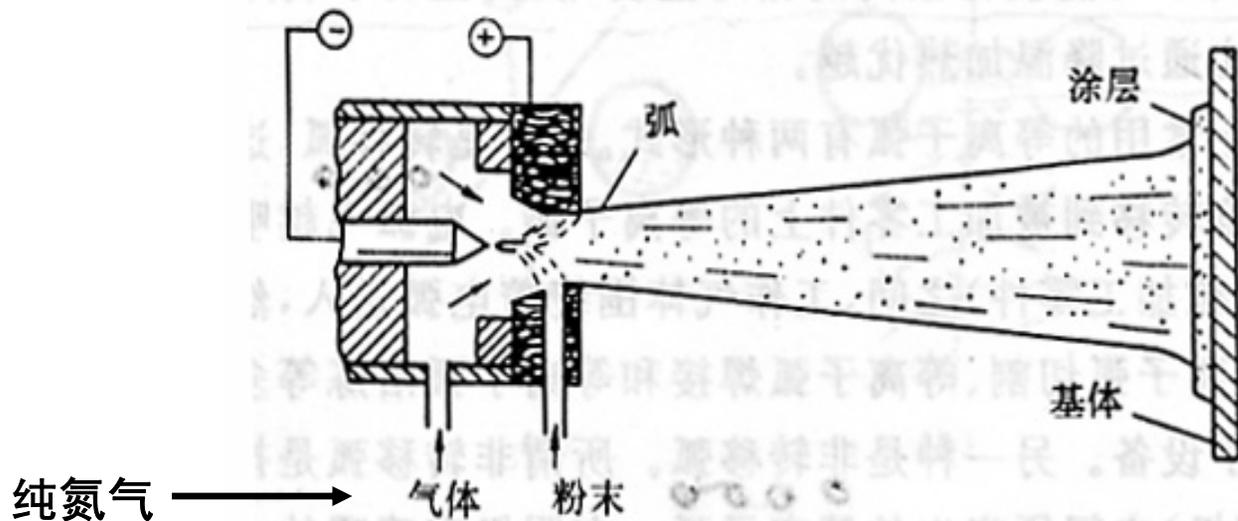
等离子喷涂内燃机活塞环



等离子喷涂的设备配置图



## 等离子喷涂



首先在阴极和阳极（喷嘴）之间产生一直流电弧，该电弧把导入的工作气体加热电离成高温等离子体，并从喷嘴喷出，形成等离子焰，等离子焰的温度很高，其中心温度可达30000k，喷嘴出口的温度可达 15000~20000k。焰流速度在喷嘴出口处可达1000~2000m/s，但迅速衰减。粉末由送粉气送入火焰中被熔化，并由焰流加速得到高于150m/s的速度，喷射到基体材料上形成涂层。



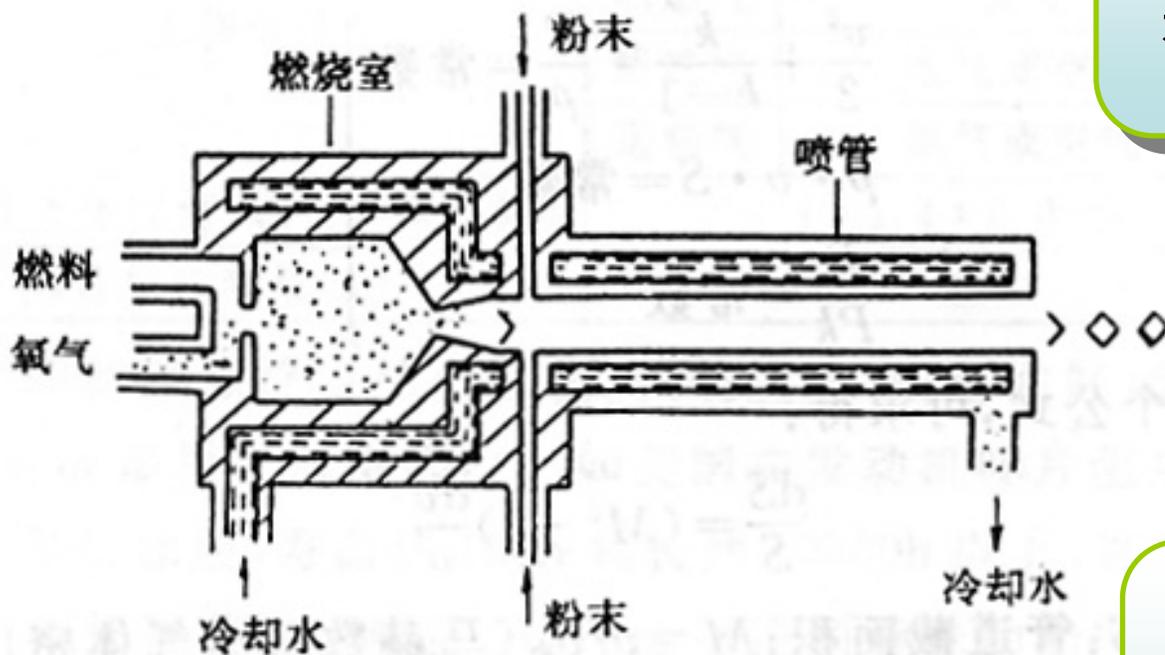
## 等离子喷涂优点

1. 基体受热小
2. 能够喷涂的材料广泛
3. 工艺稳定，涂层质量高

## 缺点

1. 一次性投资较多
2. 需高纯度的氮气或氩气
3. 需加强安全防护措施

# 超音速火焰喷涂



1) 超音速火焰喷涂是火焰喷涂技术最新成果;

2) 燃气和氧气以较高压力和流量送入喷枪, 混合气体燃烧后产生高速射流;

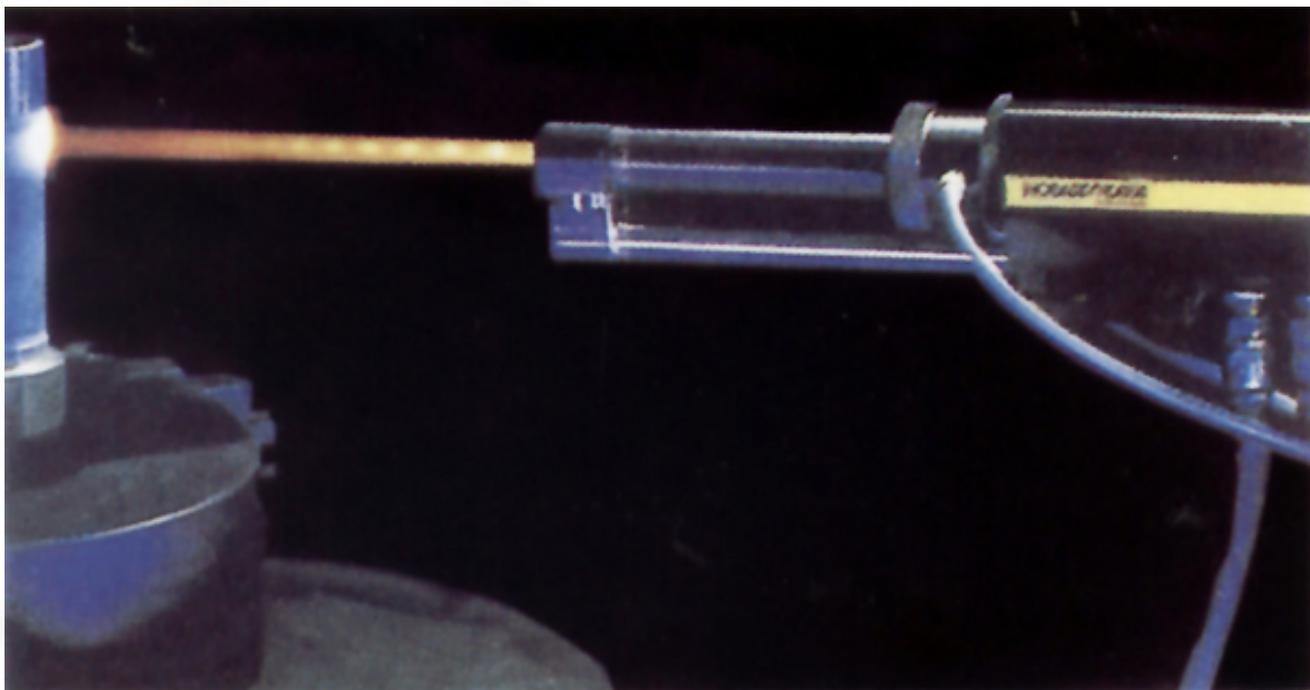
3) 速度一般在M2以上, 最高可达M7。



## 超音速火焰喷涂

### 优势:

- 1) 高速火焰连续燃烧，粉末颗粒在焰流中的加热时间较长，**颗粒可均匀熔化**。
- 2) 由于**颗粒**高速飞行，与周围大气接触时间极短，**与大气几乎不发生任何反应**，喷涂材料未受到损害，最大程度上保持原始涂层材料的大部分特征。



**不足:** 相较于一般火焰喷涂，喷涂**设备复杂而昂贵**。



## • 电弧喷涂

- 电弧喷涂原理：电弧喷涂是以**电弧**为热源，将溶化了的**金属丝**用高速的气流雾化，并以高速喷到工件表面形成涂层的一种工艺。



送丝机



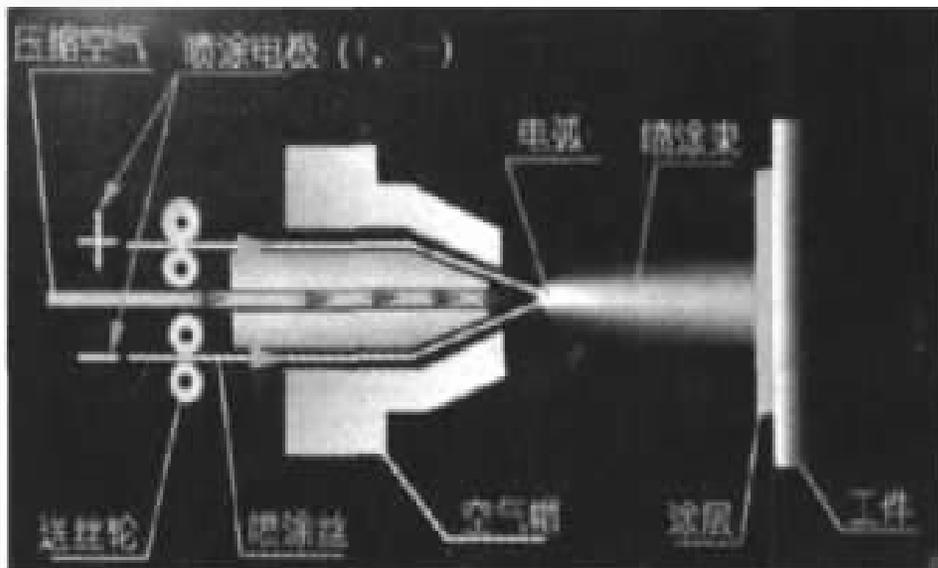
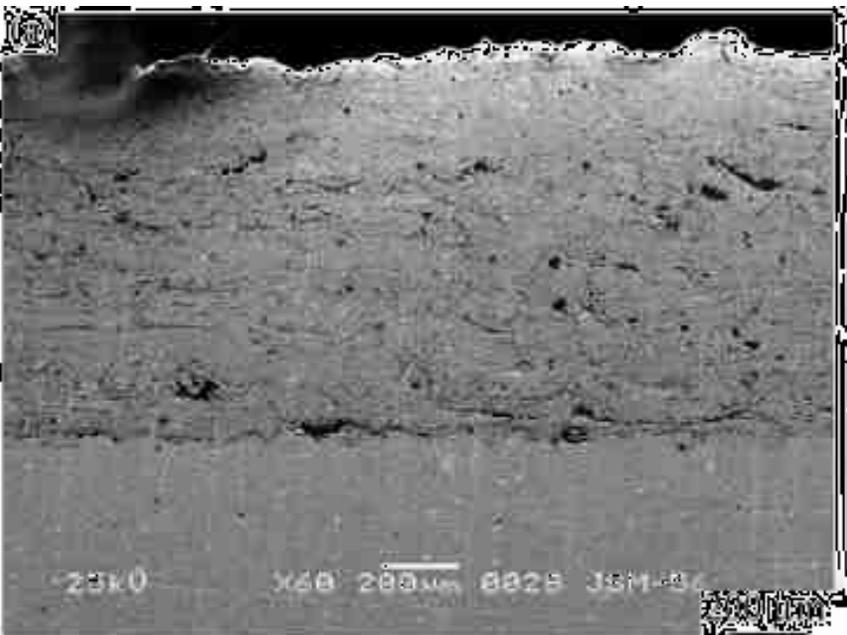
双雾化喷枪



拉式电喷枪



高速喷枪



Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/ Fe<sub>2</sub>Al 涂层截面放大后SEM形貌

高速电弧喷涂原理

### 试验材料:

还原Fe 粉、Al 粉、Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>,  
15mm × 0.14mm 的08F钢带

### 基体材料:

20g 钢, 厚度6mm

### 喷涂工艺参数

电压	电流	喷涂距离	雾化压力	喷涂厚度
34V	300A	200mm	0.145MPa	1mm



## 电弧喷涂的特点

1. 热效率高
2. 生产效率高
3. 涂层的结合强度高
4. 生产成本低
5. 操作简单、安全可靠
6. 可制备合金涂层

## 应用

1. 防腐、耐磨、装饰及形成特殊涂层等领域
2. 钢结构防腐、机械修复、快速制模



# 热喷涂技术应用及发展趋势



航空发动机热障涂层

钢铁工业





## ● 热喷涂的优点

- 1. 方便维修
- 1. 结合强度不太高
- 2. 适合多种基材
- 2. 涂层含空隙和夹杂
- 3. 沉积效率较高
- 3. 热能利用率比较低
- 4. 节约贵重材料
- 4. 工作环境恶劣
- 5. 基体材料的热影响小
- 6. 调整涂层成分比较容易
- 7. 喷涂的材料范围特别广
- 8. 不受工件尺寸和施工场所的限制
- 9. 容易对产品进行局部强化或改性



# 热喷涂技术应用及发展趋势

喷涂材料

开发新涂层

利用喷涂过程中的有利条件同时避开缺陷，提高综合性能。

喷涂设备

提高喷涂速度

引入计算机控制，提高精度。



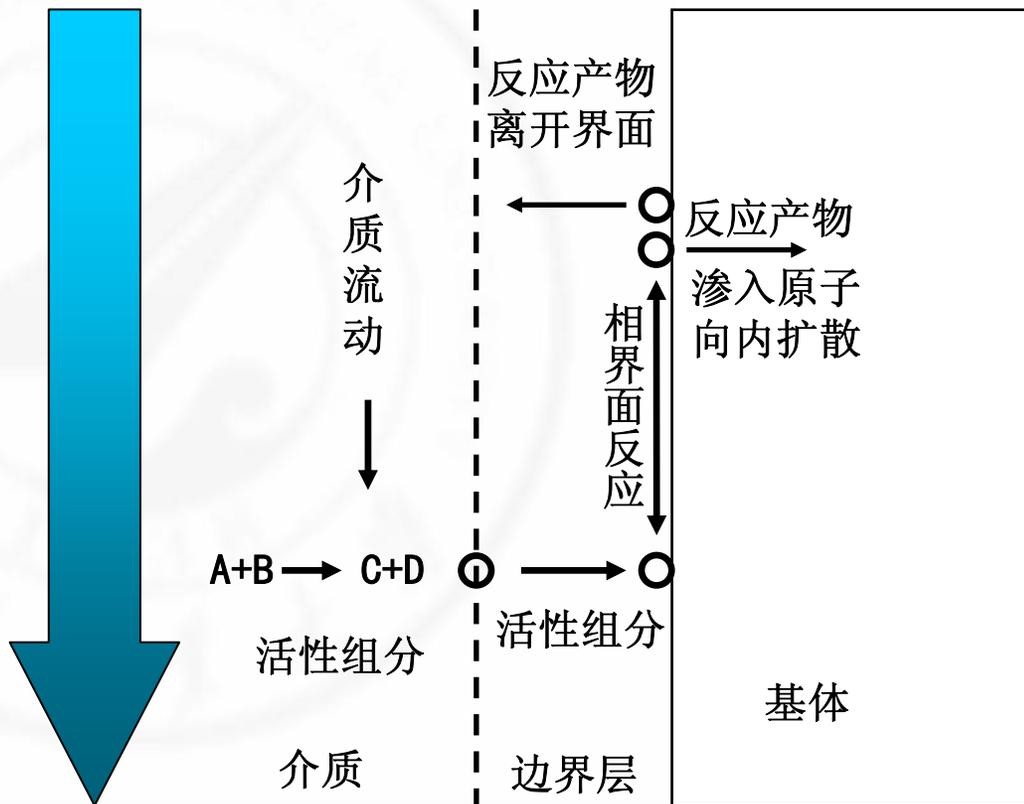
## 化学热处理

化学热处理是指将金属或合金工件置于一定温度的活性介质中保温，使一种或几种元素渗入它的表层，以改变其化学成分、组织和性能的热处理工艺。



# 化学热处理技术原理

## 化学热处理四个基本过程





# 化学热处理方法的特点及分类

特点

1

涂层结合力高

2

可获得不同的组织性能

3

性价比好



# 化学热处理方法的特点及分类

## 化学热处理方法

按**工艺**可分为：

固体法、液体法、气体法及离子轰击法

按**渗入元素**可分为：

渗碳、渗氮、渗硼、渗铬及碳氮共渗、铬铝共渗

按**能源**可分为：

离子渗氮、高频渗碳、电解渗硼及激光合金化



## 包埋法

将基体材料包埋于几种固体混合粉料中，然后在一定温度下热处理，使混合粉料与试样表面发生化学反应而形成涂层。

### 包埋法制备碳/碳复合材料碳化硅涂层

包埋过程中存在熔融Si和原料中的C反应形成SiC，并随着Si的扩散也移动到基体表面而形成涂层。

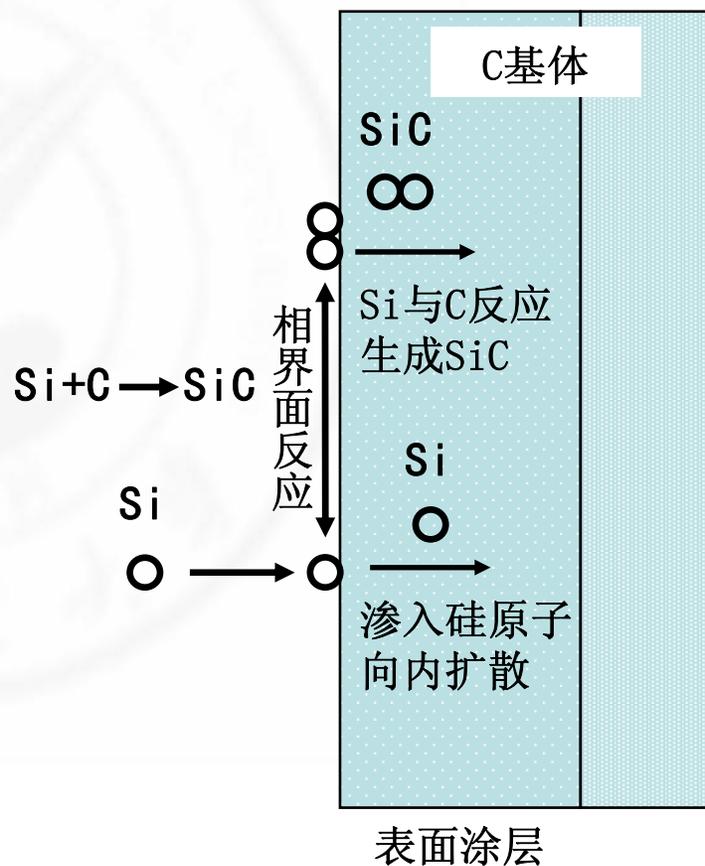
包埋法制备SiC涂层的制备温度一般都大于Si的熔点，是液-固反应。



# 包埋法

## 用包埋法在C/C复合材料表面制备SiC涂层过程

- 1) 粉料中硅(Si)在高温下熔融;
- 2) 熔融Si向C/C 复合材料扩散;
- 3) 熔融的Si和基体C发生界面反应;
- 4) 生成SiC涂层。





# 包埋法

- 包埋法的优点

1. 过程简单，只需要一个单一过程就可以制备出致密的涂层；
2. 涂层制备前后基体材料尺寸变化很小；
3. 涂层和基体间能形成一定的成分梯度，涂层与基体的结合较好。

## 包埋法的缺点

1. 高温下容易发生化学反应使纤维受损，从而影响 C/C基体的机械性能；
2. 涂层的均匀性很难控制，往往由于重力等因素而使得涂层上下不均匀。



# 化学热处理技术发展趋势

稳定与提高传统工艺的质量

强化工艺过程

缩短处理周期

节约能源

降低成本

**总目标：**  
优质 高效  
低耗 洁净



探索新工艺



智能技术及计算机的应用



加强工艺理论  
基础的研究



## 气相沉积技术

利用气相中发生的物理、化学过程，在固体材料表面形成功能性或装饰性的金属、非金属或化合物覆盖层的工艺。



# 气相沉积技术原理与分类

PVD

用物理的方法（如蒸发、溅射等）使镀层材料气化，在基体表面沉积成膜的方法。

CVD

利用气态物质在固体表面上进行化学反应，生成固态沉积物的过程。

PCVD

将等离子体技术引入化学气相沉积，形成覆层的方法。

气相沉积技术



## 化学气相沉积法（CVD法）

**基本原理：** CVD是一种在一定温度下通过化学反应生成的固态物质在基底表面沉积形成涂层或薄膜材料。





# CVD法制备涂层的关键工艺

- 1 反应速率及产物的选择
- 2 基体准备
- 3 反应物质化学反应生成涂层
- 4 涂层热处理或后处理



# CVD技术分类

CVD

常压化学气相沉积 (NPCVD)

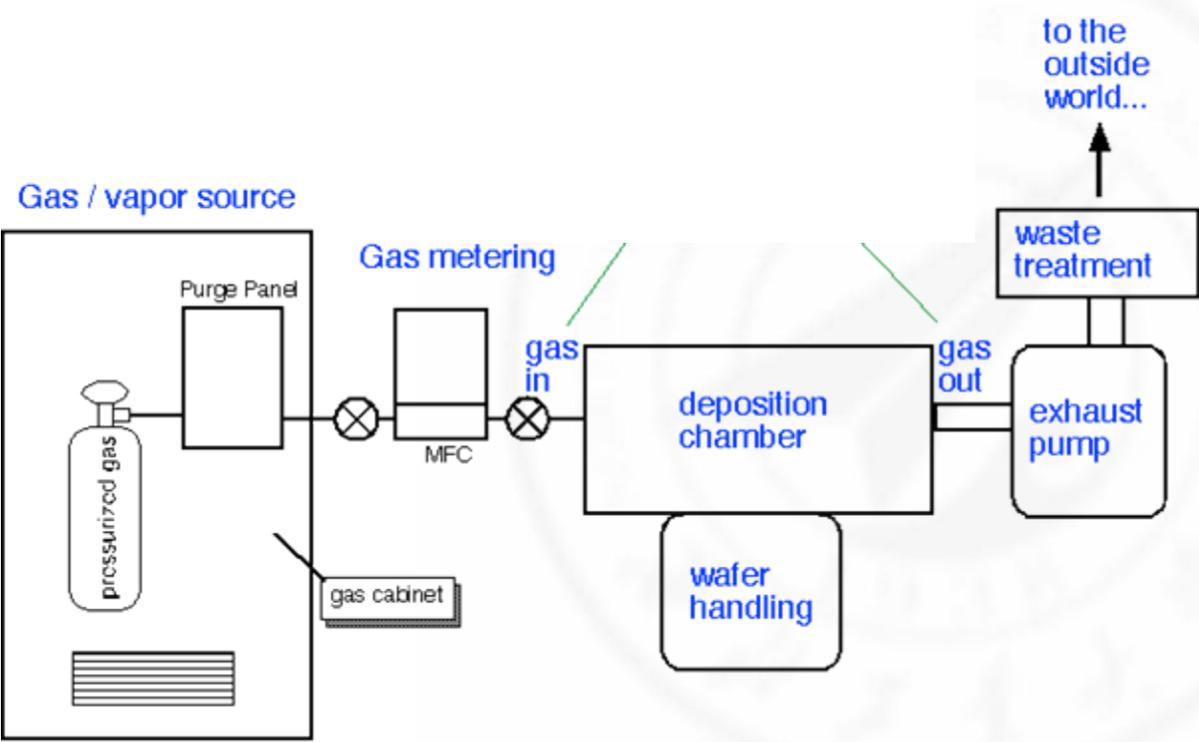
低压化学气相沉积 (LPCVD)

激光化学气相沉积 (LCVD)

金属有机物化学气相沉积  
(MOCVD)



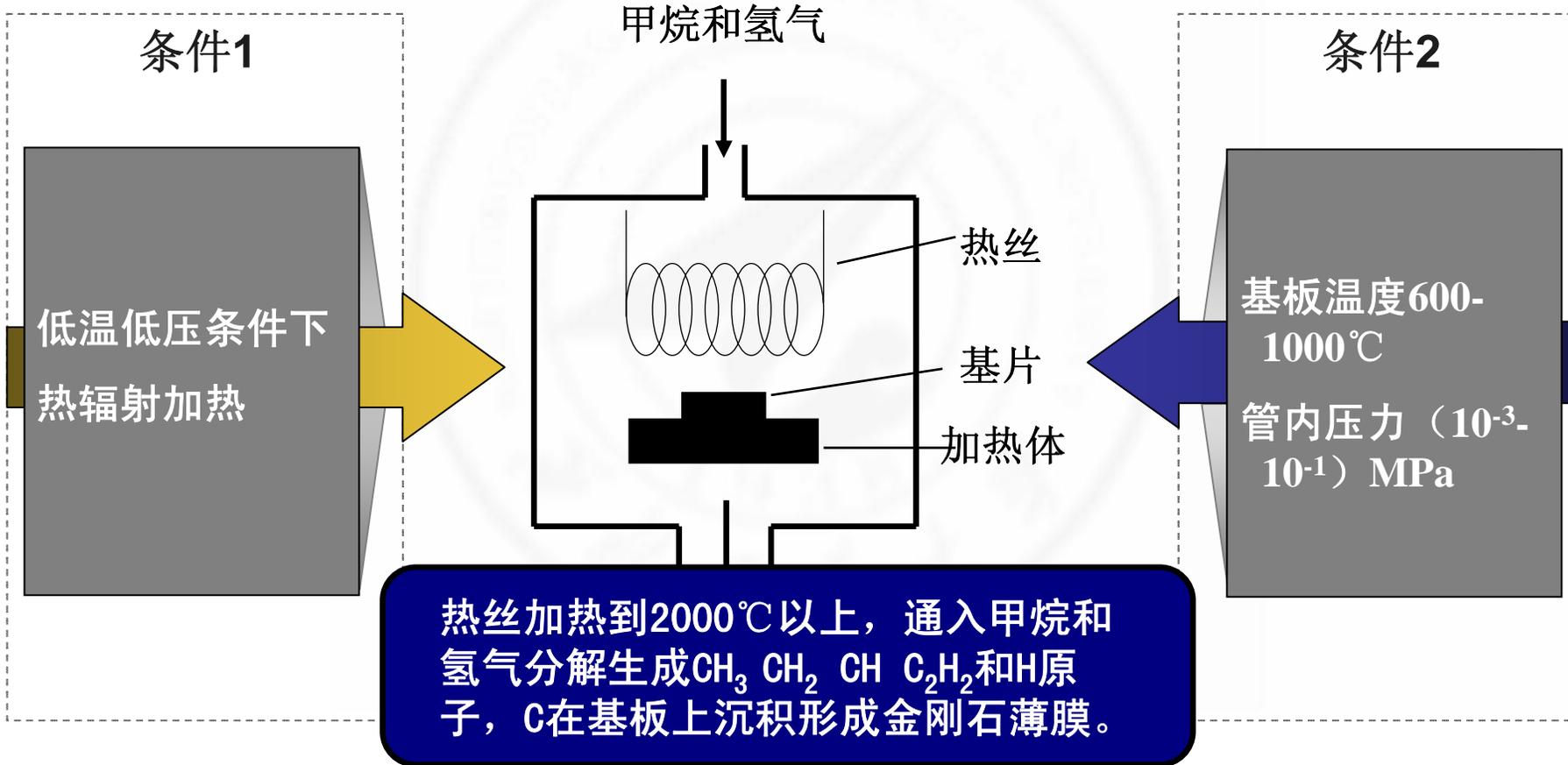
# CVD技术设备



箱式CVD炉

# 热丝法

# CVD沉积金刚石薄膜





# 化学气相沉积法（CVD法）

## 主要优点：

- （1）利用CVD法所获得的涂层和化学成分可控。
- （2）涂层和基体结合牢固。
- （3）在相对较低的温度下，可沉积多种元素和化合物涂层，可使基体材料避免高温处理而造成的缺陷或力学性损伤。
- （4）可在常压或低真空状态下工作，镀膜的绕射性好，形状复杂的工件或工件中的深孔、细孔都能均匀镀膜。



# 化学气相沉积法（CVD法）

## 主要缺点：

- (1) 沉积温度较高，许多材料受不了这样高的温度，使其用途受到限制。
- (2) 工艺过程较难控制，且需要在真空或保护气氛下进行，对设备气密性要求较高。



# PVD技术分类

PVD

蒸发物理气相沉积 (E-PVD)

电阻蒸发物理气相沉积  
感应蒸发物理气相沉积  
激光蒸发物理气相沉积  
电子束蒸发物理气相沉积  
电弧蒸发物理气相沉积

溅射物理气相沉积 (S-PVD)

双极溅射物理气相沉积  
磁控溅射物理气相沉积  
离子束溅射物理气相沉积  
三极溅射物理气相沉积

离子镀物理气相沉积  
(Ion Plating PAPVD)



# PVD技术设备



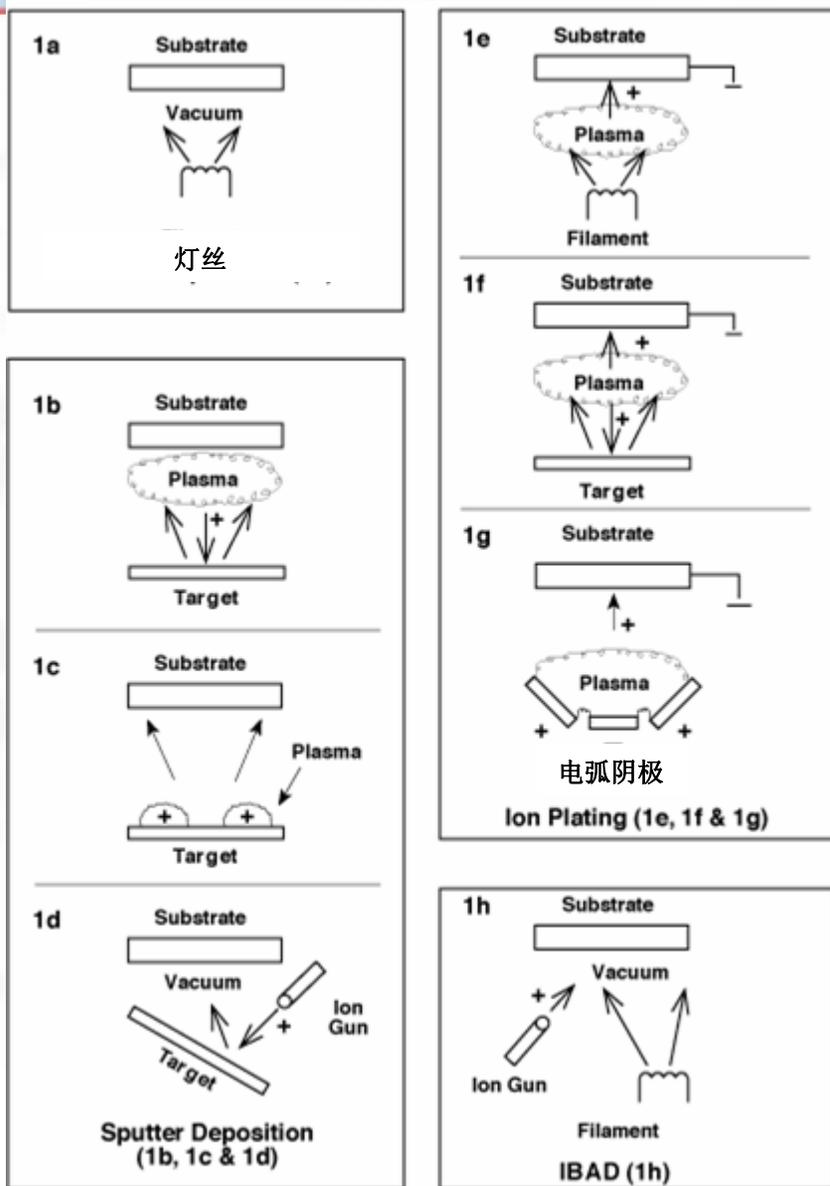
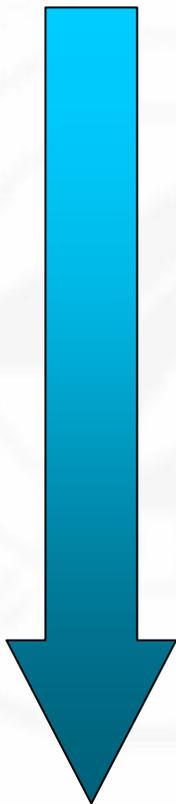


# PVD技术原理与过程

粒子轰击靶材表面

靶材原子被击出

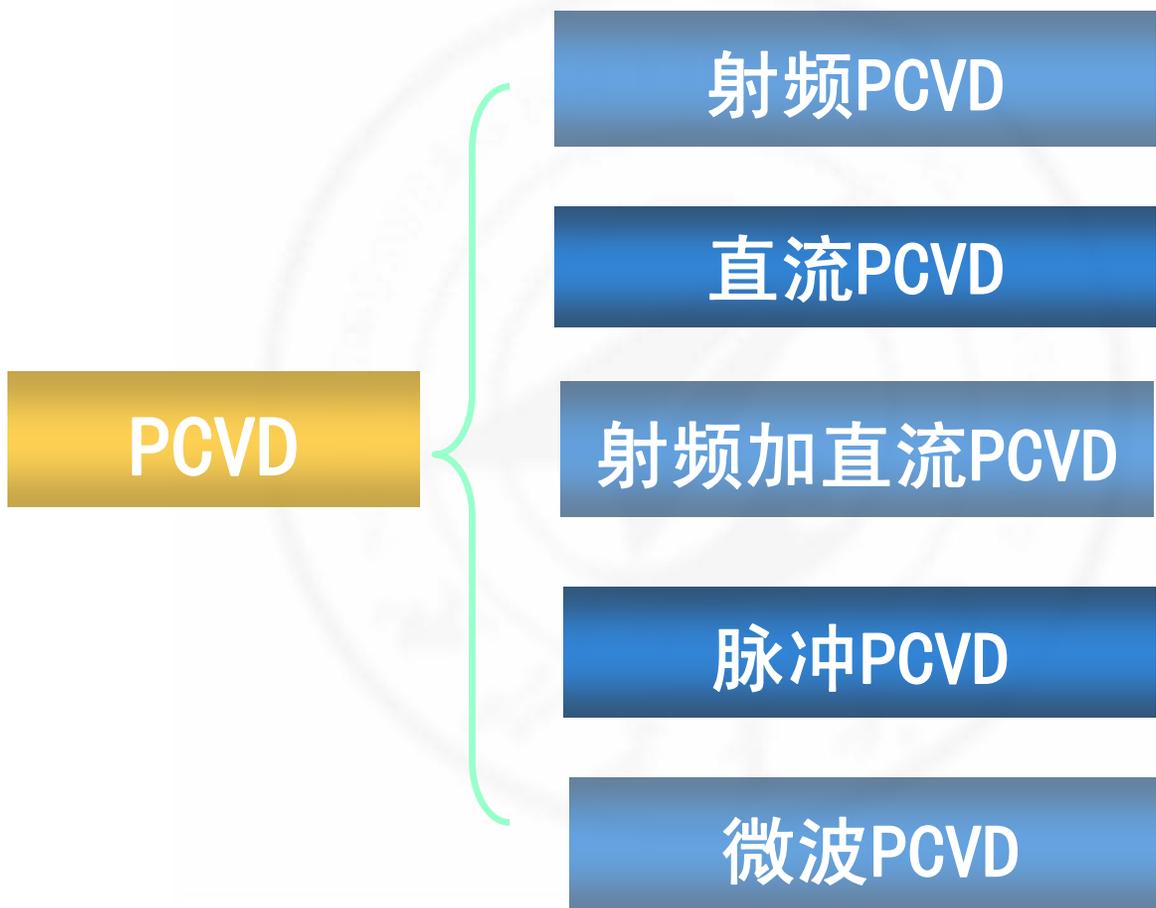
溅射的原子沉积在基体表面形成膜



PVD Processing Techniques



# PCVD技术分类





## 气相沉积技术现状与发展

CVD——向低温和高真空两个方向发展

PVD——应用范围广泛

PCVD——应用技术不断发展



## 表面粘涂技术

表面粘涂技术是指将填加特殊材料（简称骨材）的胶粘剂涂覆于零件表面，以赋予零件表面特殊功能的一项表面技术。

可制备耐磨损、耐腐蚀、绝缘、保温、防辐射涂层等。



表面粘涂技术

# 适用范围

难于或无法焊接的材料制成的零件

薄壁零件

结构形状复杂的零件内外沟槽、内孔磨损

某些特殊工况和特殊工件

需现场修复的零件



# 表面粘涂技术原理



涂层的形成是依靠粘接和固化剂起的化学反应

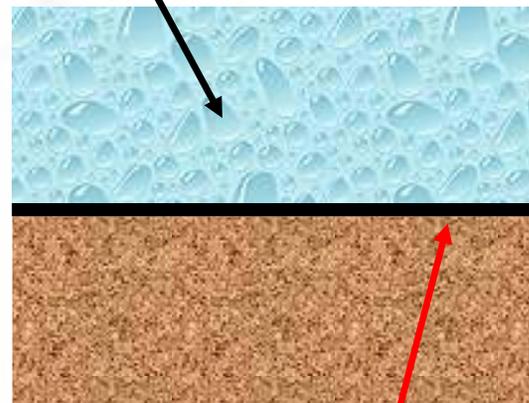
粘料的活性

填料的性质

涂层的性能

耐磨骨材

基体



粘接界面



# 表面粘涂材料的分类

表面粘涂技术分类主要由粘涂材料决定





填补法

镶嵌法

# 可视性铸造缺陷的修补

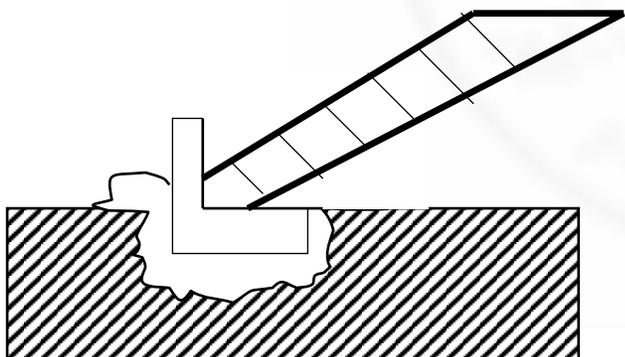
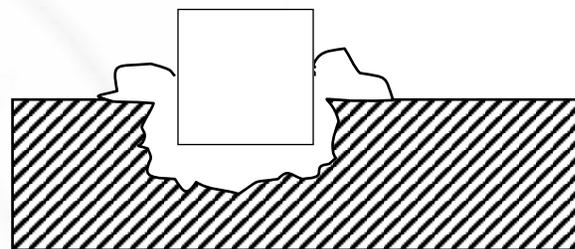
1) 用纱布、砂轮打磨空洞处，清除空洞内锈剂，并打磨出新鲜金属；

2) 根据孔洞大小、形状，选择金属块，把表面打磨粗糙；

3) 配制修补剂，按说明书比例称取并搅拌均匀；

4) 孔洞及金属块都涂一层修补剂，然后将金属块镶入孔洞中；

5) 室温（20℃以上）固化8~12小时后修磨平整。



# 料浆法

**基本原理：**将涂层材料制成符合一定要求的粉料后与溶剂混合制成浆，加入适当的分散剂和粘结剂，经充分搅拌后涂刷于基体材料表面或将基体浸渍于料浆中形成涂层，在一定温度下烘干后于高温惰性气体气氛下进行热处理。

# 料浆法

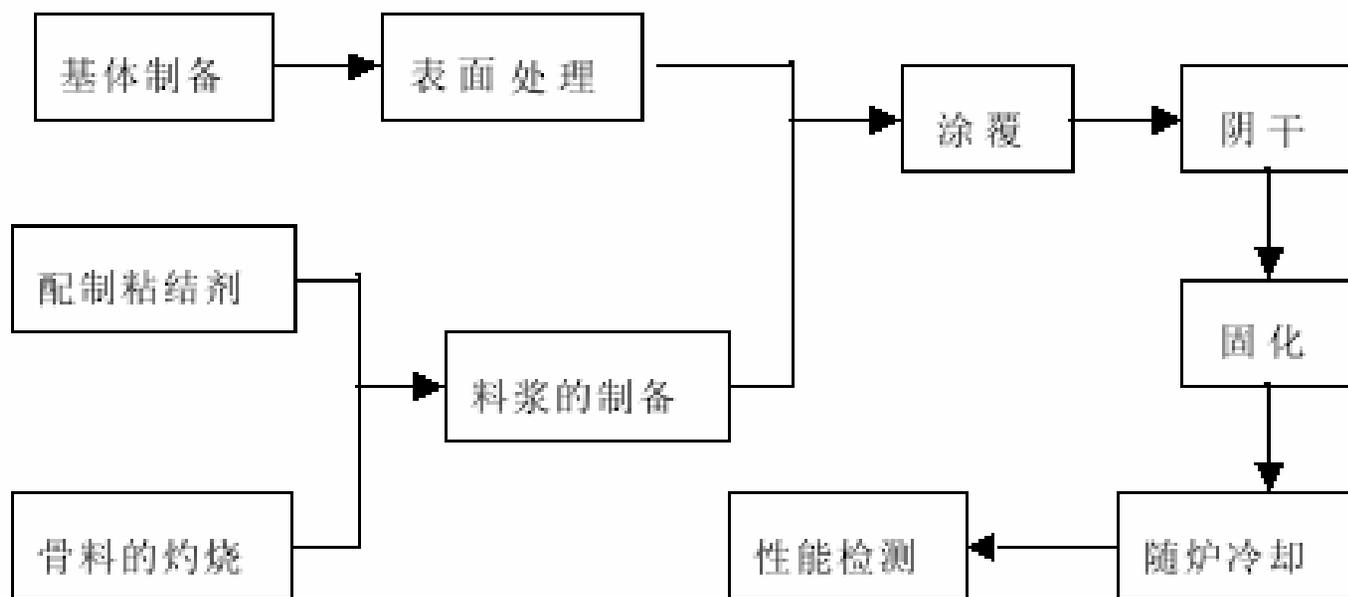


图 2-1 陶瓷涂层的制备工艺流程示意图

# 料浆法

该方法的**优点**是涂层工艺较为简单，涂层的厚度较易控制。  
**不足之处**是涂层与基体材料的结合性较差，涂层的抗热震性差，涂层的致密性较难达到要求。

- ❖ 利用在金属表面涂覆陶瓷涂层的方法，可制备既有金属强度和韧性，又有陶瓷耐高温、耐磨损、耐腐蚀等优点的材料，目前已成功地应用于航天、航空、国防、化工、机械、电子等工业。

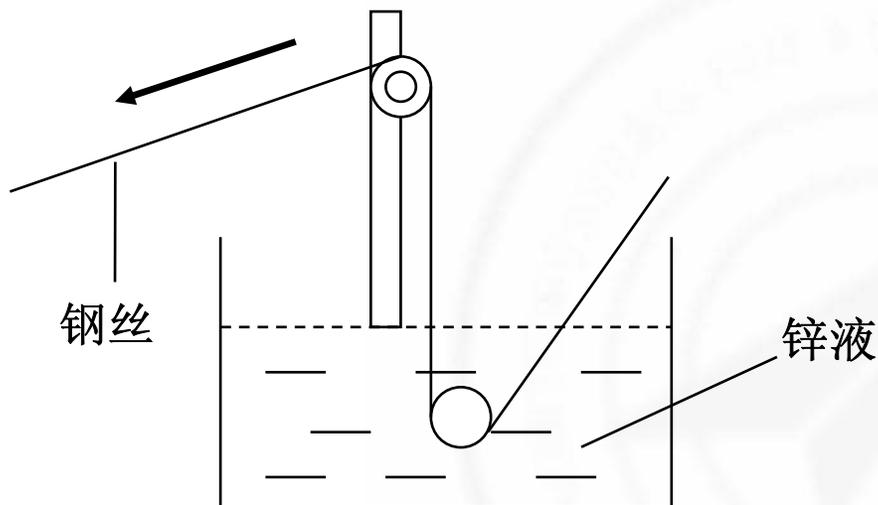
## 热浸镀技术

将金属材料浸入熔点较低的其他熔融金属或合金中保温，并在其表面形成熔融的金属或合金层的工艺方法称热浸镀。

热浸镀层由基体材料与熔融金属间形成的合金层和粘附的金属层组成，具有耐蚀防护特殊性能。

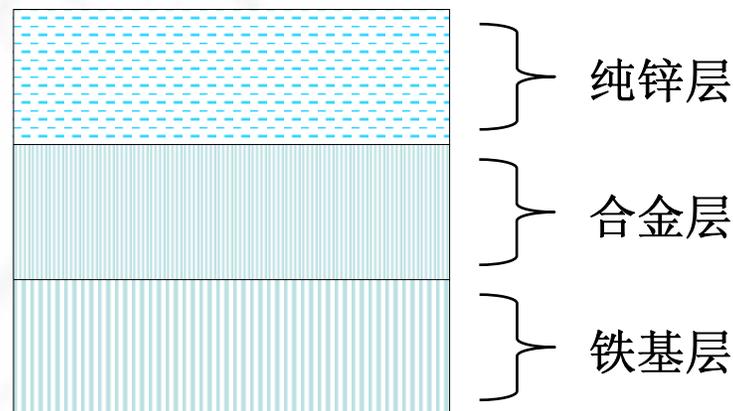


# 热浸镀技术原理



在热浸镀锌过程中，熔融锌可以充分浸入经过良好处理的基体表面，形成铁-锌合金层覆盖于整个工件表面，且此合金层有一定的韧性，可耐摩擦和冲击，与基体有良好的结合。

## 热浸镀锌涂层



钢基体热镀锌层显微结构



# 热浸镀技术新技术与发展

## 热浸镀锌合金技术

Zn-Ni合金、Zn-Sn合金、Zn-Al-Sn-Bi合金

## 无/低铬纯化技术

三价铬纯化、无铬纯化

## 镀锌钢筋

热浸镀锌钢筋的防腐蚀作用

## 无烟助镀技术

ZnCl<sub>2</sub>/KCl系助镀剂、Cu/Sn系助镀剂



## 讨论：

1. 说出一种使绝缘体导电的方法
2. 哪种涂层技术可获得强界面结合？
3. 哪些涂层技术适用于石墨的抗氧化？