



大连海事大学
DALIAN MARITIME UNIVERSITY

学汇百川 德济四海

第六章 现代制造中的加工技术





提 纲

- 高速与超高速加工
- 特种加工技术
- 快速成形技术



第一节 高速与超高速加工

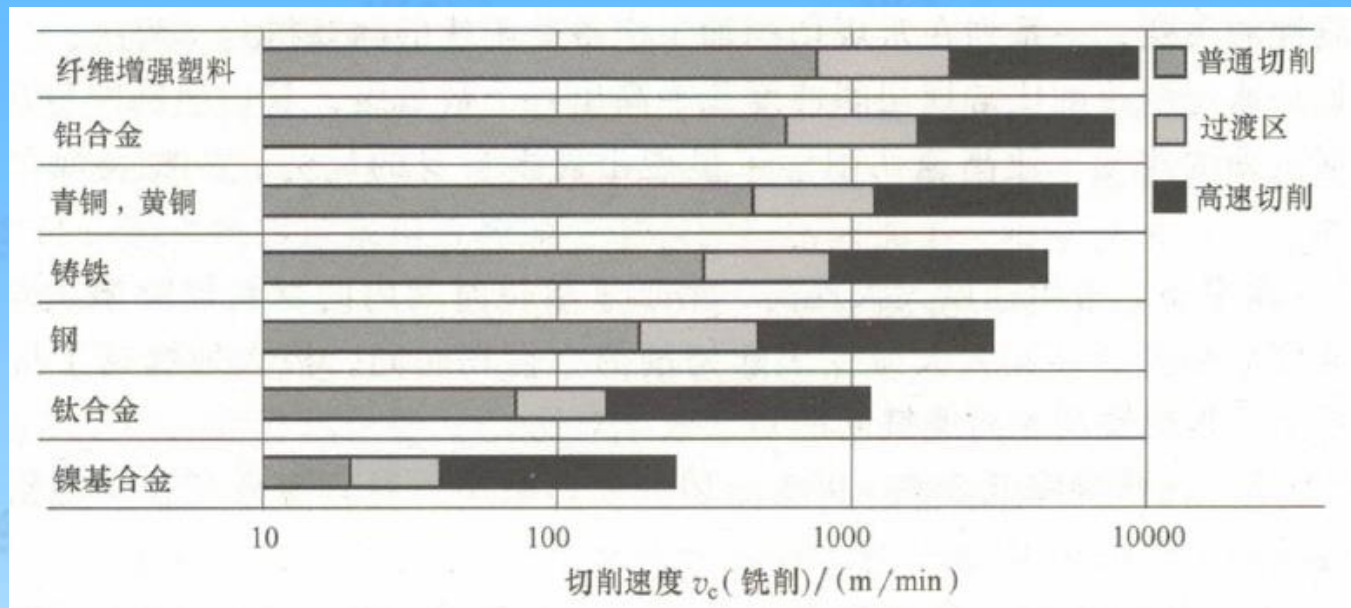
一、高速与超速加工技术

1. 定义

- **高速加工**是相对常规加工而言的，一般认为是常规加工速度的5—10倍。
- **超高速加工**指采用超硬材料刀具、磨具在高速运动的高精度、高自动化、高柔性的制造设备上，极大地提高切削速度来提高材料切除率、加工精度和加工质量的现代化制造加工技术。

高速加工和超高速加工是相对概念。

- 高速加工的速度范围与工件材料密切相关。



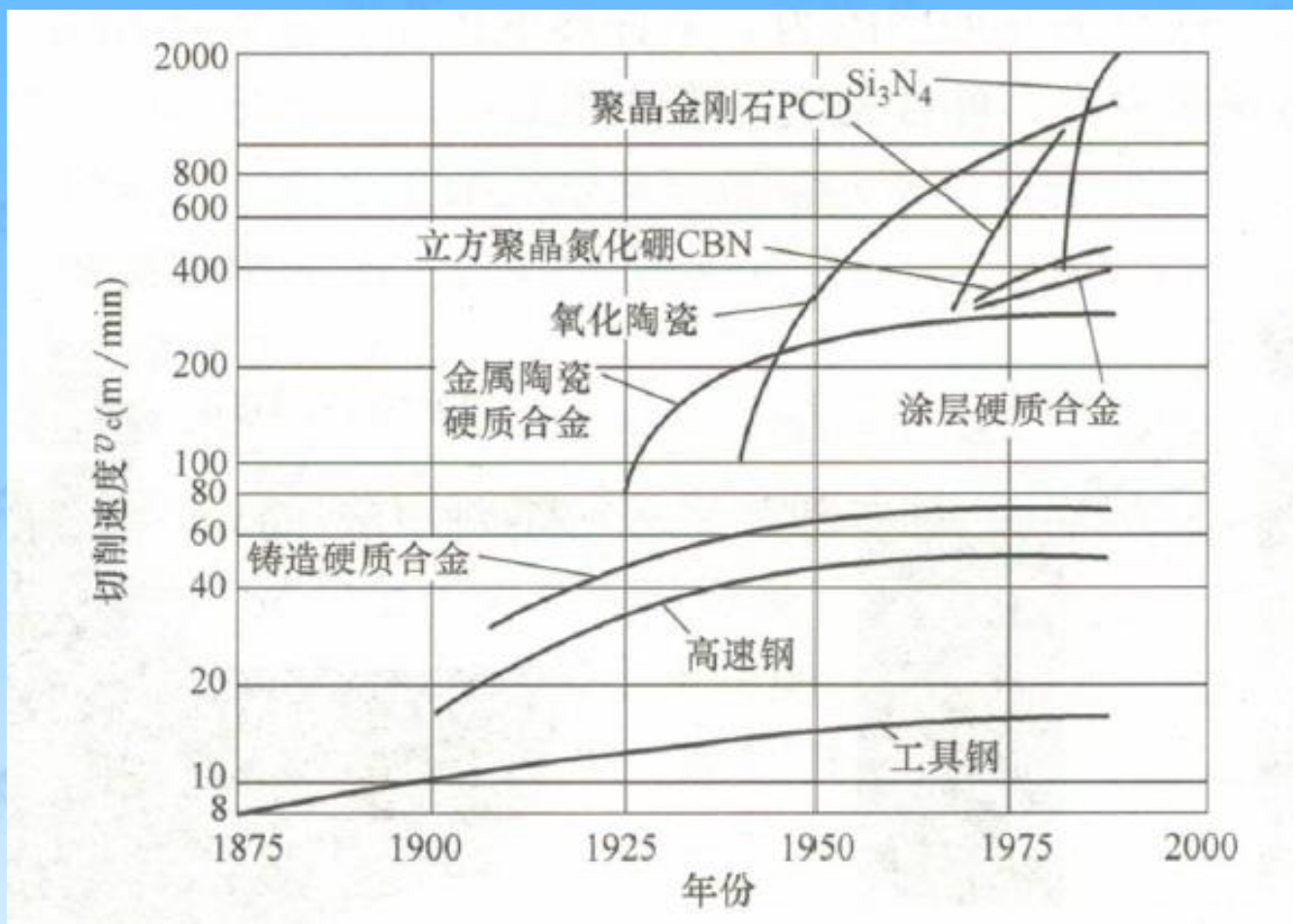
- 高速加工的速度范围与加工方法密切相关。

车削: 700-7000 m/min; 铣削: 300-6000 m/min;
钻削: 200-1100 m/min; 磨削: 150 m/s以上。

例如: 在切削灰铸铁时, 1000 m/min以上才是**高速车削**,
而400 m/min就定义为**高速钻削**。



- 新型刀具材料的发展为高速切削的实际应用创造了条件。





2.高速与超高速加工的特点

- (1) 高单位时间切除率，降低加工成本。
- (2) 低切削力，降低加工系统力变形。
- (3) 切削热由切屑带走，减少工件热变形。
- (4) 高加工表面质量，提高加工精度高。
- (5) 较少后续工序，降低加工成本低。

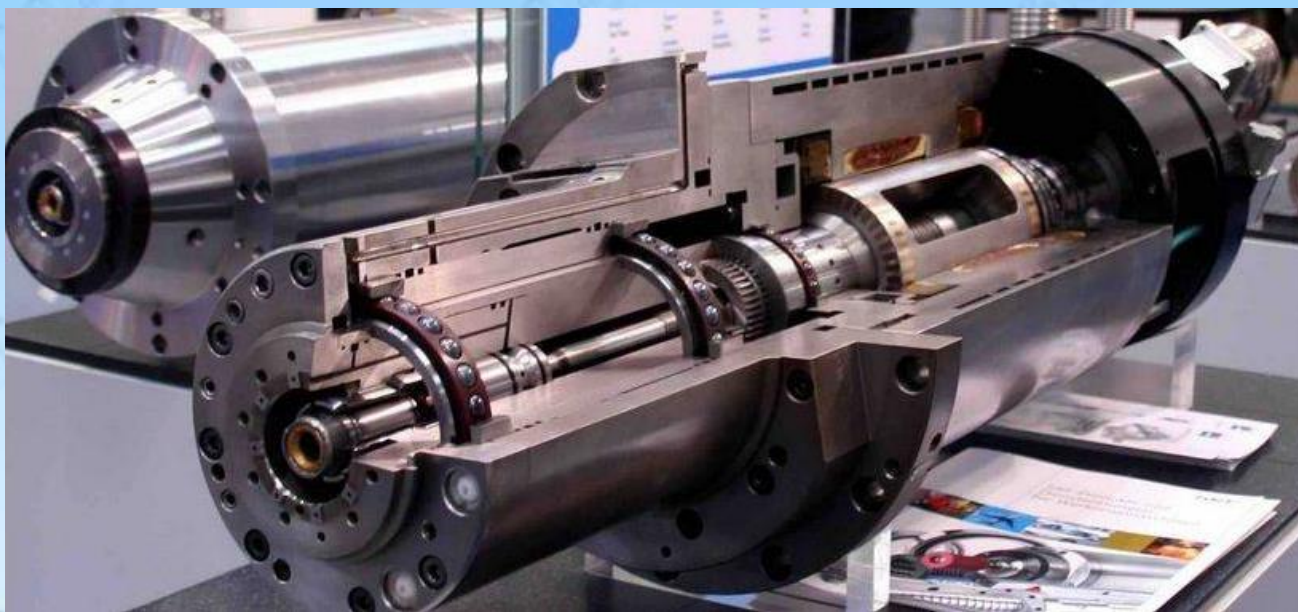


二、高速与超高速加工的关键技术

- 1.高速主轴;
- 2.快速进给系统;
- 3.高速切削的刀具系统;
- 4.面向高速切削的工件夹紧技术。

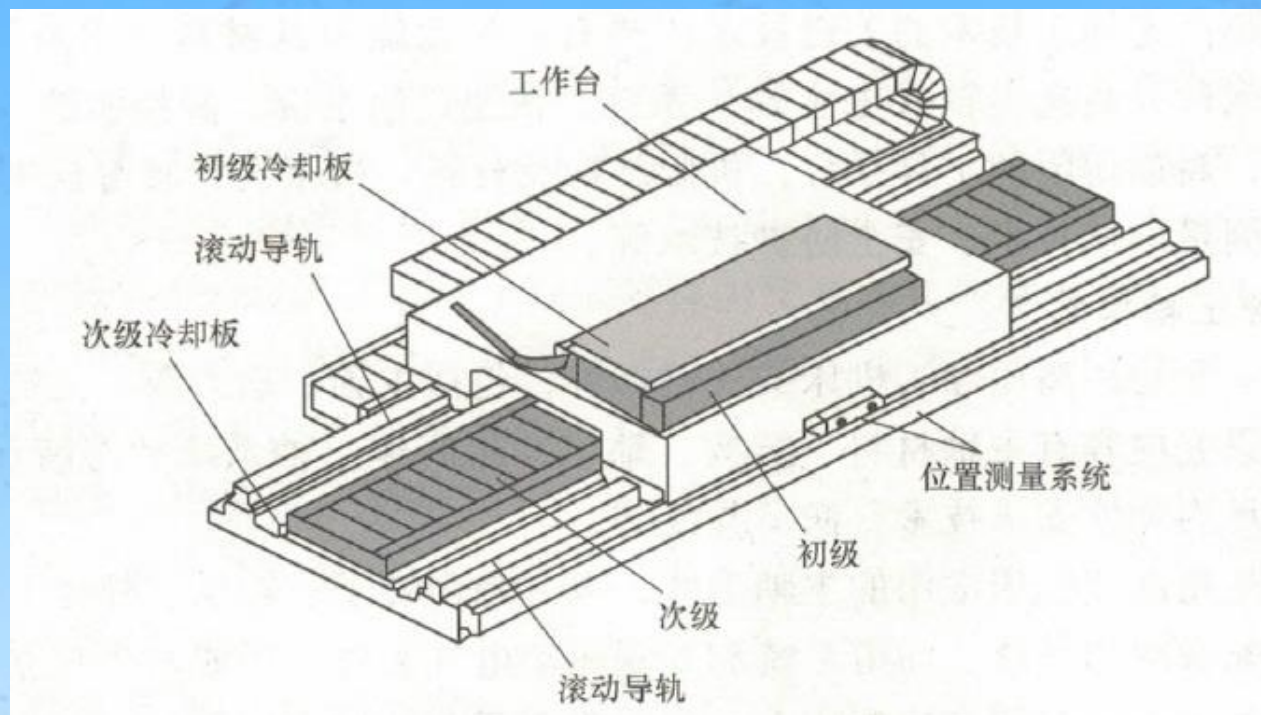
1. 高速主轴

- 高速主轴单元是高速加工机床最关键的部件。在超高速运转的情况下，传统的齿轮变速和皮带传动方式已不能满足要求，为适应这种切削加工，高速主轴应具有先进的主轴结构，优良的主轴轴承，良好的润滑和散热等新技术。
- 高速主轴采用的轴承有滚动轴承、液体静压轴承、空气静压轴承和磁悬浮轴承几种形式。





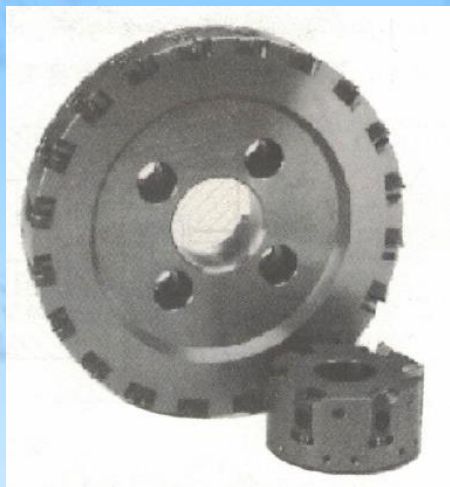
2. 快速进给系统



直线电机驱动系统

3. 面向高速切削的切削工具

- 刀具材料：硬质合金涂层刀具，陶瓷刀具，聚晶金刚石刀具，立方氮化硼刀具。
- 特点：“三高一专”，即高效率、高精度、高可靠性和专用化。



以高强度铝合金做基体的HSC端面铣刀

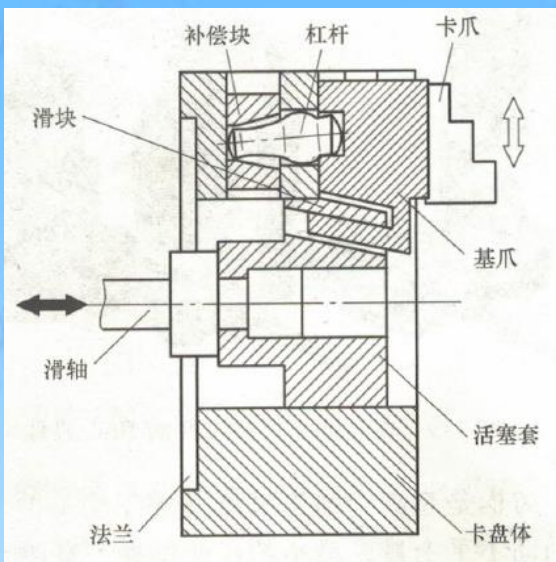


在基体上焊接刀片的HSC刀具



带内部冷却的钻头

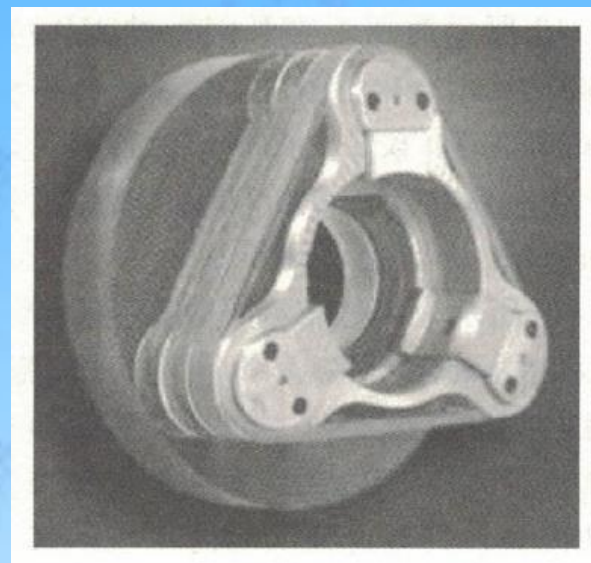
4. 面向高速切削的工件夹紧技术



带离心力补偿的卡盘



轻型卡爪



CFK绷带式卡盘



三、高速切削的应用领域

- **航空航天工业**轻合金的加工：飞机上的零件通常采用“整体制造法”，其金属切除量相当大（一般在70%以上），采用高速切削可以大大缩短切削时间。
- **模具制造业**：型腔加工同样有很大的金属切除量，过去多采用电加工方法，其加工效率低。
- **汽车工业**：对技术变化较快的汽车零件，采用高速加工。（过去多采用组合机加工，柔性差）
- **难加工材料**的加工（如，Ni基高温合金和Ti合金）
- **纤维增强复合材料**加工
- **精密零件**加工
- **薄壁易变形零件**的加工



习 题

超高速切削的主要应用领域有哪些？要发展超高速切削加工，需要解决哪些关键技术。



第二节 特种加工技术

一、特种加工方法的特点及分类

1. 定义

特种加工 (NTM, Non-Traditional Machining) 技术, 即利用电能、热能、光能、电化学能等, 在不产生切削力的情况下, 以低于工件硬度的工具去除工件上多余材料, 达到 “以柔克刚” 的目的。

2. 特点

特种加工无论在加工机理和加工形式上与传统的切削加工有着本质的区别，主要体现在以下几点：

(1) 不是主要依靠机械能，而是采用其他能量（电能、热能、光能、化学能、电化学能等）去除工件上多余材料；与加工对象的力学性能无关，故可加工硬、软、脆、耐腐蚀、高熔点、高强度等金属或非金属材料。

(2) 非接触加工，即加工时工具与工件不发生直接接触，工具与工件间不存在作用力，故可加工高耐磨、刚性低和弹性工件。

(3) 加工时由于工具与工件不发生直接接触，故热应力、残余应力、冷作硬化等均比较小。可获得较低的表面粗糙度，尺寸稳定性好。

(4) 加工中能量易于转换和控制，有利于保证加工精度和提高加工效率。

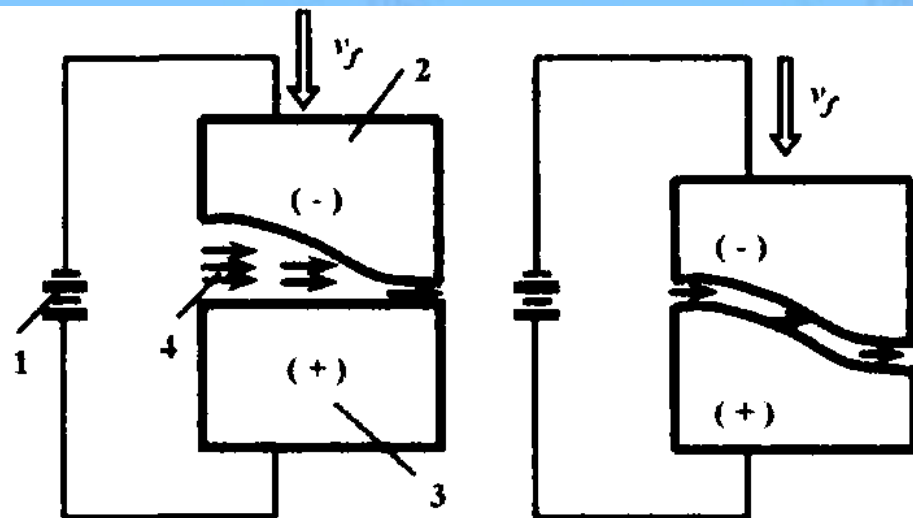
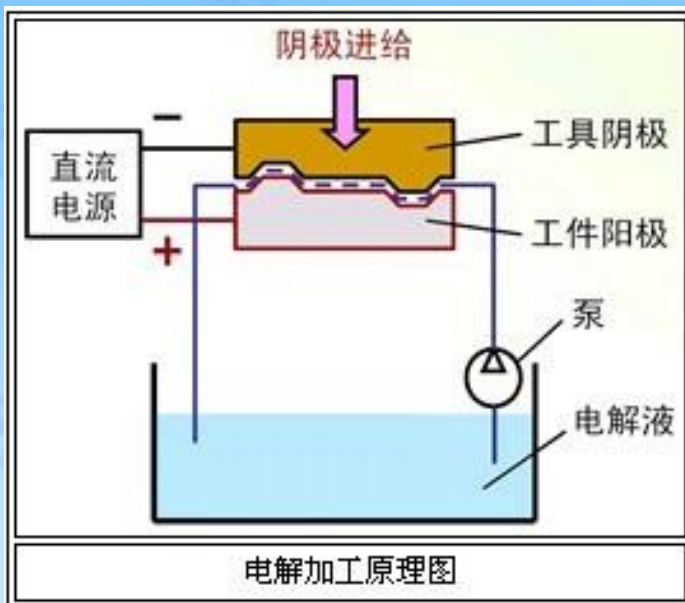
3. 分类

特种加工方法		能量来源及形式	加工原理	英文缩写
电火花加工	电火花成形加工	电能、热能	熔化、汽化	EDM
	电火花线切割加工	电能、热能	熔化、汽化	WEDM
电化学加工	电解加工	电化学能	金属离子阳极溶解	ECM(ELM)
	电解磨削	电化学能、机械能	阳极溶解、磨削	EGM(ECG)
	电解研磨	电化学能、机械能	阳极溶解、磨削	ECH
	电铸	电化学能	金属离子阴极沉积	EFM
	涂镀	电化学能	金属离子阴极沉积	EPF
激光加工	激光切割、打孔	光能、热能	熔化、汽化	LBM
	激光打标记	光能、热能	熔化、汽化	LBM
	激光处理、表面改性	光能、热能	熔化、相变	LBM
电子束加工	切割、打孔、焊接	电能、热能	熔化、汽化	EBM
离子束加工	蚀刻、镀覆、注入	电能、动能	原子撞击	IBM
等离子弧加工	切割（喷镀）	电能、动能	熔化、汽化（涂覆）	PAM
超声波加工	切割、打孔、雕刻	声能、机械能	磨料高频撞击	USM
化学加工	化学铣削	化学能	腐蚀	CHM
	化学抛光	化学能	腐蚀	CHP
	光刻	光能、化学能	光化学腐蚀	PCM

二、电化学加工

1. 电化学加工的基本原理、分类及特点

基本原理



(a) 开始加工时

(b) 加工结束时

电化学加工的分类

类别	加工方法及原理	应用
阳极溶解	电解加工 电化学抛光	用于形状、尺寸加工 用于表面光整加工、去毛刺
阴极沉淀	电镀 电铸 电刷镀	用于表面加工、装饰及保护 用于形状尺寸加工 用于表面修复、强化
复合加工	电化学磨削 电解电火花加工 超声电解加工	用于形状、尺寸加工，超精镜面加工 用于形状尺寸加工，难加工材料 用于难加工材料的深、小孔以及表面光整



电化学加工的特点

(1) 可对任何金属材料进行形状、尺寸和表面加工。尤其是高温合金、钛合金、淬硬钢、硬质合金等难加工材料，优点更为突出。

(2) 加工中无机械切削力和切削热作用，故加工后无表面冷硬层、残余应力以及毛刺和棱边。

(3) 工具电极无磨损，可以长期使用，但要防止阴极的沉积现象对工具电极的影响。

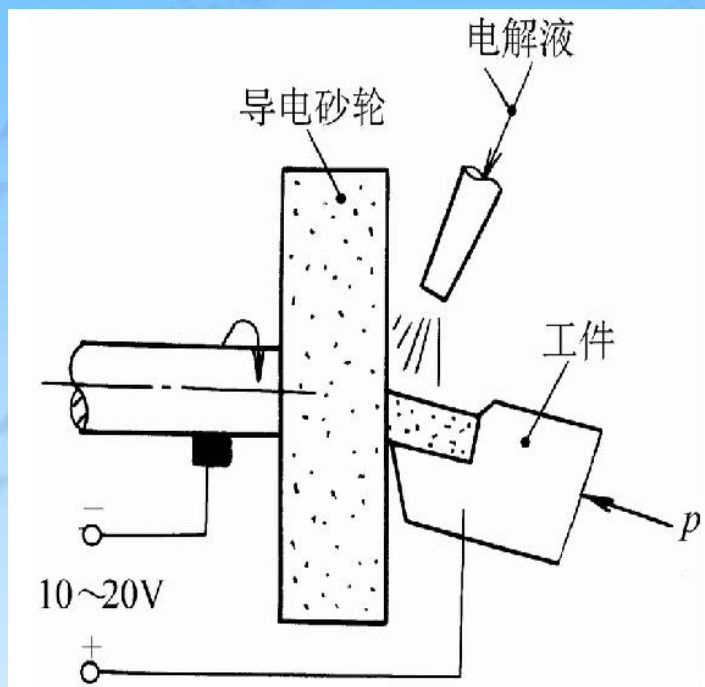
(4) 多道加工工序可以同时进行，无需划分粗、精加工，因此生产率较高。

(5) 电化学加工产生的产物，对环境、设备有污染和腐蚀作用。

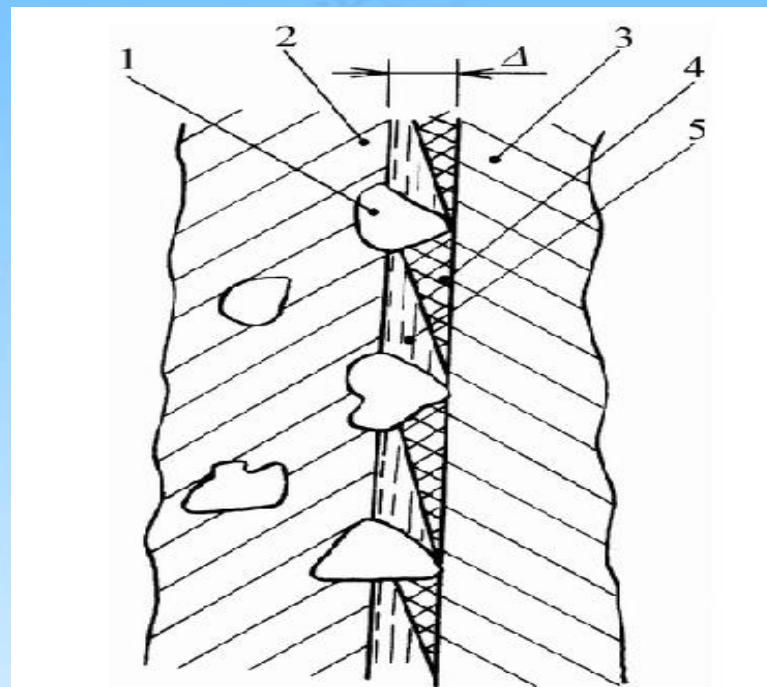
2. 典型电化学加工技术

(1) 电化学磨削

电解磨削的原理



电解磨削加工原理



电解磨削加工过程机理



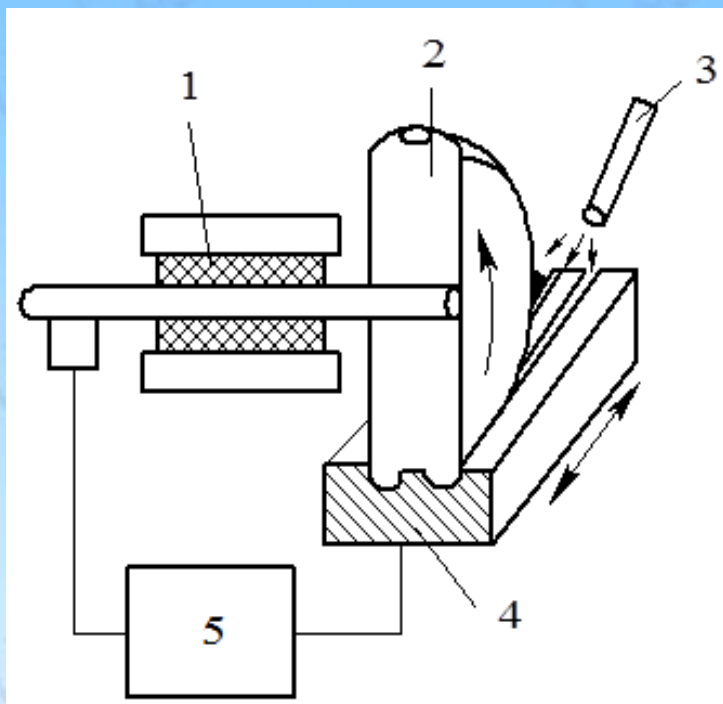
电解磨削的特点

- 磨削力小，生产率高。
- 加工精度高，表面加工质量好。
- 设备投资较高。
- 砂轮的磨损量小。

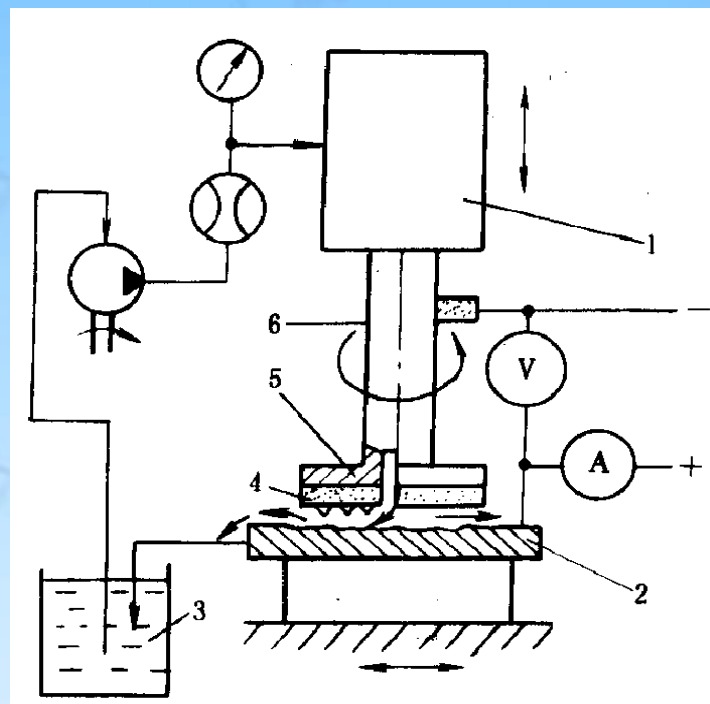


电解磨削的应用

- 硬质合金刀具的电解磨削
- 电解成形磨削
- 电解研磨



电解成型磨削示意图



电解研磨示意图



(2) 电铸和涂镀加工

工艺名称	电镀	电铸	涂镀	复合镀
工艺目的	表面装饰、防腐 蚀	复制、成形加 工	增大尺寸、表面改 性	镀耐磨层磨具、 刀具制造
工艺要求				
镀层厚度	0.001~0.05	0.05~5	0.001~0.05	0.05~1
精度要求	表面光亮、光滑	尺寸、形状精 度要求	尺寸、形状精度要 求	尺寸、形状精 度要求
镀层牢固	牢固粘接	可与原模分离	牢固粘接	粘接基本牢固
阴极材料	同镀层金属	同镀层金属	石墨、铂等材料	同镀层金属
镀液	自配电镀液	自配电镀液	按被镀金属选购电 镀液	自配电镀液
工作方式	镀槽、工件浸泡 在镀液中、无相 对运动	镀槽、工件与 阳极有或无相 对运动	镀液浇注在相对运 动的工件和阳极间	镀槽、被复合 镀的硬质材料 放在工件表面



(3) 电化学抛光

➤ 原理

电解抛光也是利用金属在电解液中的电化学阳极溶解对工件表面进行腐蚀抛光的，它只是一种表面光整加工方法，用于改善工件的表面粗糙度和表面物理力学性能，而不适用于对工件形状和尺寸加工。它和电解加工的主要区别是工件和工具之间的加工间隙大，这样有利于表面的均匀溶解；电流密度也比较小；电解液一般不流动，必要时加以搅拌。

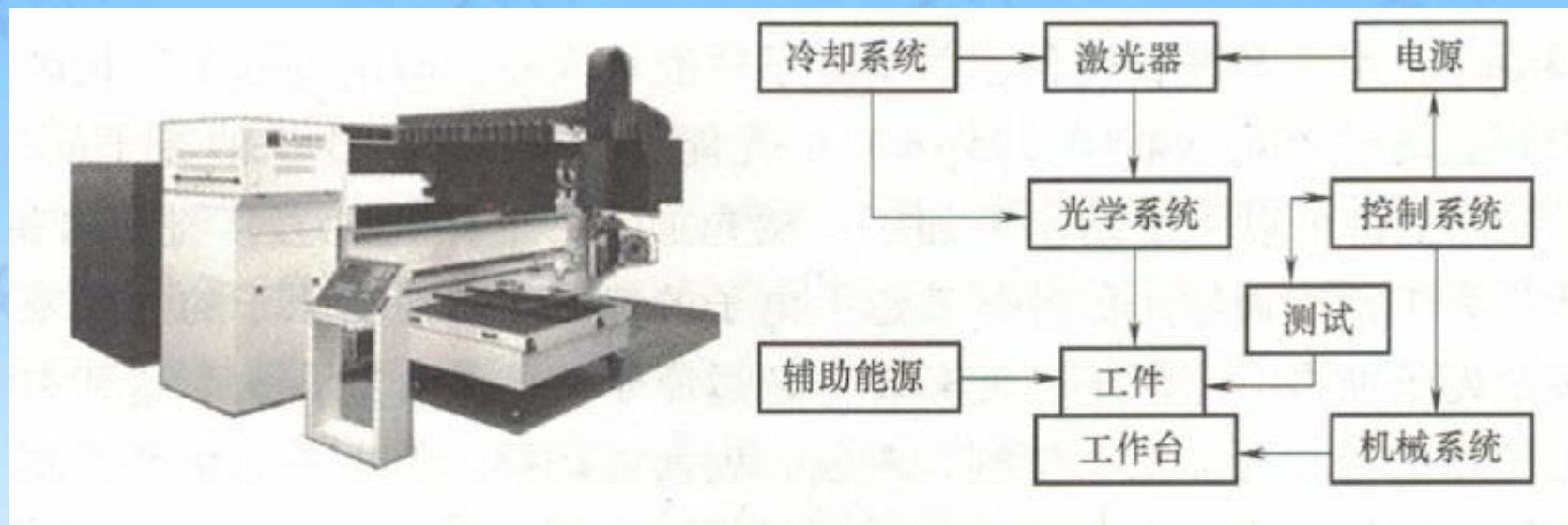
➤ 应用

电解抛光能降低零件的表面粗糙度、控制材料宏观不平度、增加表面光泽、减小摩擦系数。故在很多场合可替代机械抛光。可较大幅度的提高生产率，降低材料、工具、设备、电力等的消耗。因此电解抛光在轴承、反光罩、切削工具、计量工具、自行车零件、纺织机械零件及医疗器械等的加工中有广泛的应用。

三、激光加工

1. 激光加工的原理

激光加工利用高功率密度的激光束照射工件，使材料熔化、汽化而进行穿孔、切割和焊接等特种加工。



激光加工设备及其一般组成



2. 激光加工的特点

- 光点小，能量集中，热影响区小；
- 不接触加工工件，不会对材料造成机械挤压或机械应力；
- 不受电磁干扰，与电子束加工相比应用更方便；
- 激光束易于聚焦、导向，便于自动化控制；
- 范围广泛，几乎可对任何材料进行雕刻切割；
- 精确细致，加工精度可达到0.1mm；
- 适合大件产品的加工，大件产品的模具制造费用很高，激光加工不需任何模具制造，而且激光加工完全避免材料冲剪时形成的塌边，可以大幅度地降低企业的生产成本提高产品的档次。



3. 激光加工的应用



a) 切削



b) 钻孔



c) 表面处理



d) 钻微孔



e) 焊接



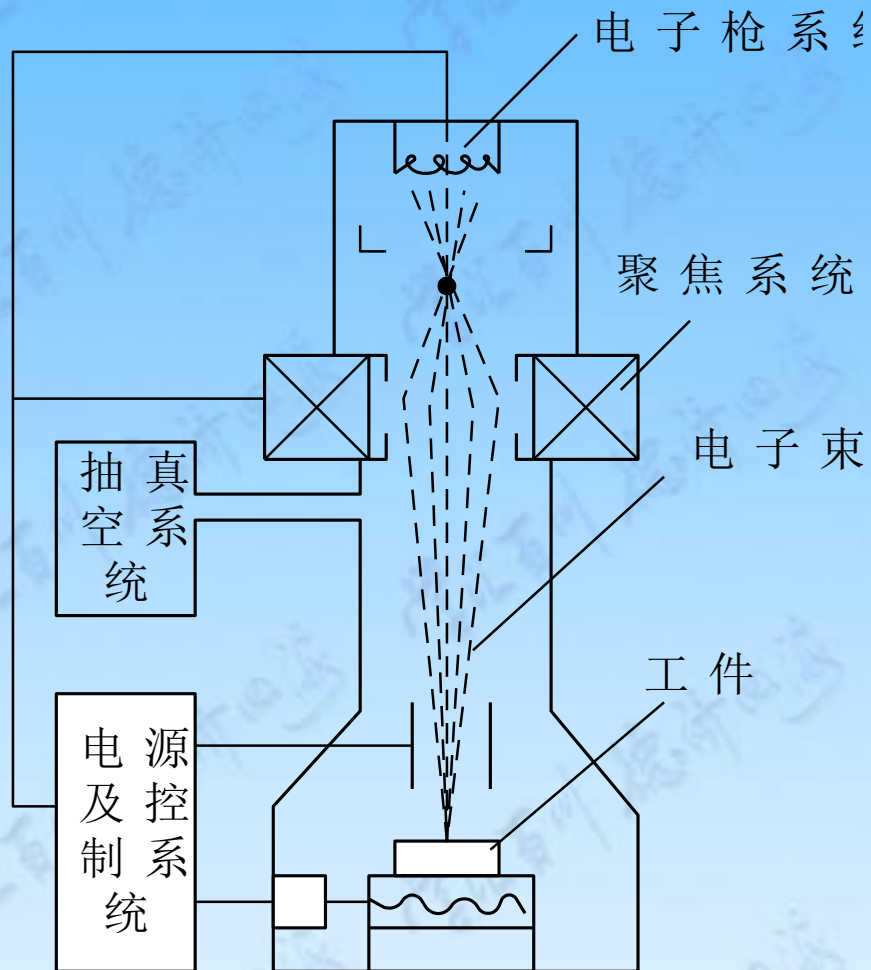
f) 打标



四、其他特种加工

1. 电子束加工

➤ 加工原理





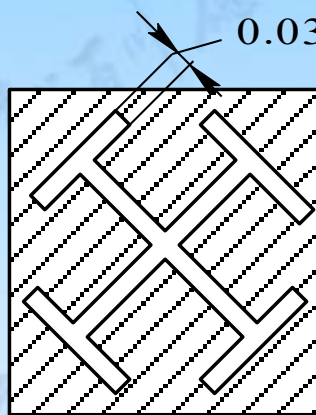
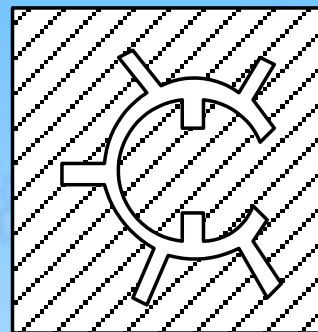
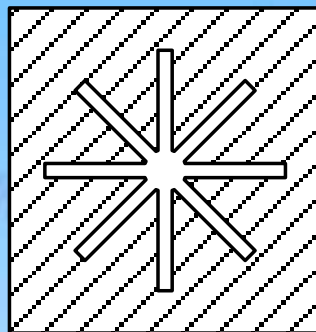
➤ 特点

- 1) 电子束能够极其微细地聚焦(可达 $l \sim 0.1\mu\text{m}$)。
- 2) 加工材料的范围广。
- 3) 加工在真空中进行，污染少，加工表面不易被氧化。
- 4) 电子束加工需要整套的专用设备和真空系统，价格较贵，故在生产中受到一定程度的限制。

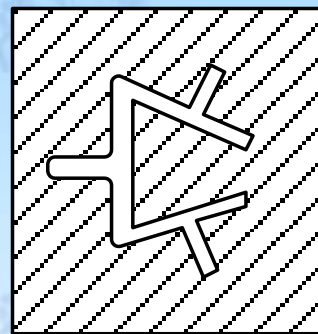


➤ 应用

高速打孔、加工型孔及特殊表面、刻蚀、焊接、热处理、光刻



0.03 ~ 0.07 mm

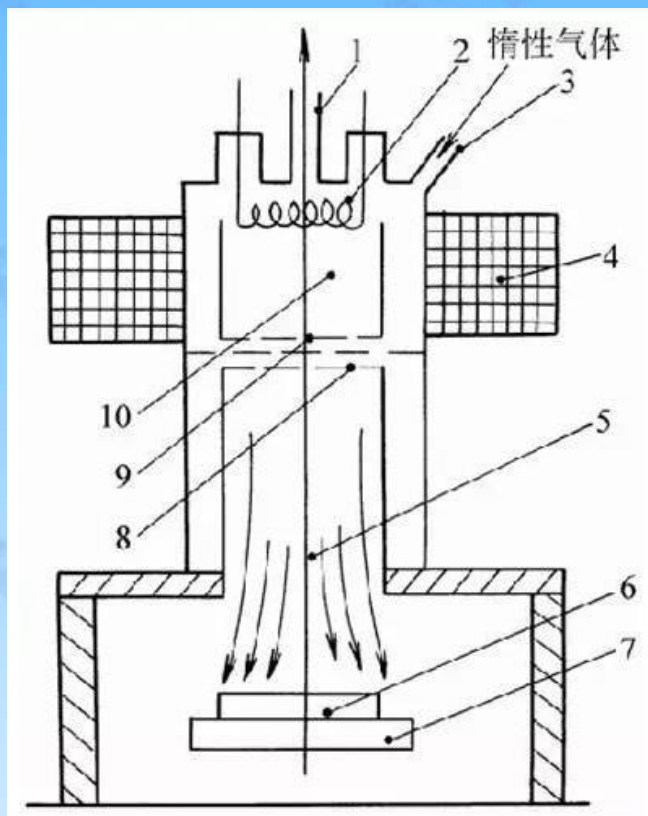


电子束加工的喷丝头异形孔



2. 离子束加工

➤ 加工原理



1—真空抽气口 2—灯丝 3—惰性气体注入口 4—电磁线圈
5—离子束流 6—工件 7—阴极 8—引出电极 9—阳极 10—电离室



➤ 特点

- (1) 离子束加工是目前特种加工中最精密、最微细的加工。
- (2) 离子束加工在高真空中进行，污染少。
- (3) 离子束加工是靠离子轰击材料表面的原子来实现的，是一种微观作用。



➤ 应用

(1) 离子刻蚀加工

用于从工件上作去除加工的离子刻蚀加工；

(2) 离子镀膜加工

用于给工件表面涂覆的离子镀膜加工；

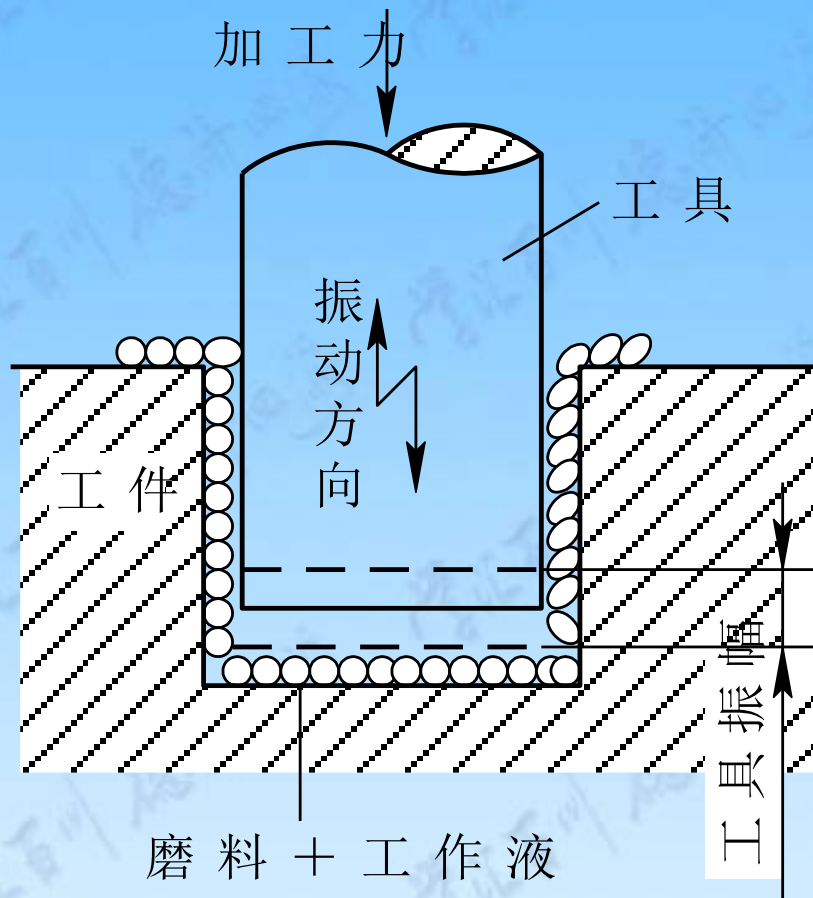
(3) 离子注入加工

用于表面改性的离子注入加工。



3. 超声波加工

➤ 加工原理





➤ 特点

- (1) 适合于加工各种硬脆材料。也可以加工淬火钢和硬质合金等材料。
- (2) 由于工具可用较软的材料、做成较复杂的形状。
- (3) 加工时宏观切削力很小，不会引起变形、烧伤。
- (4) 加工机床结构和工具均较简单，操作维修方便。
- (5) 生产率较低。



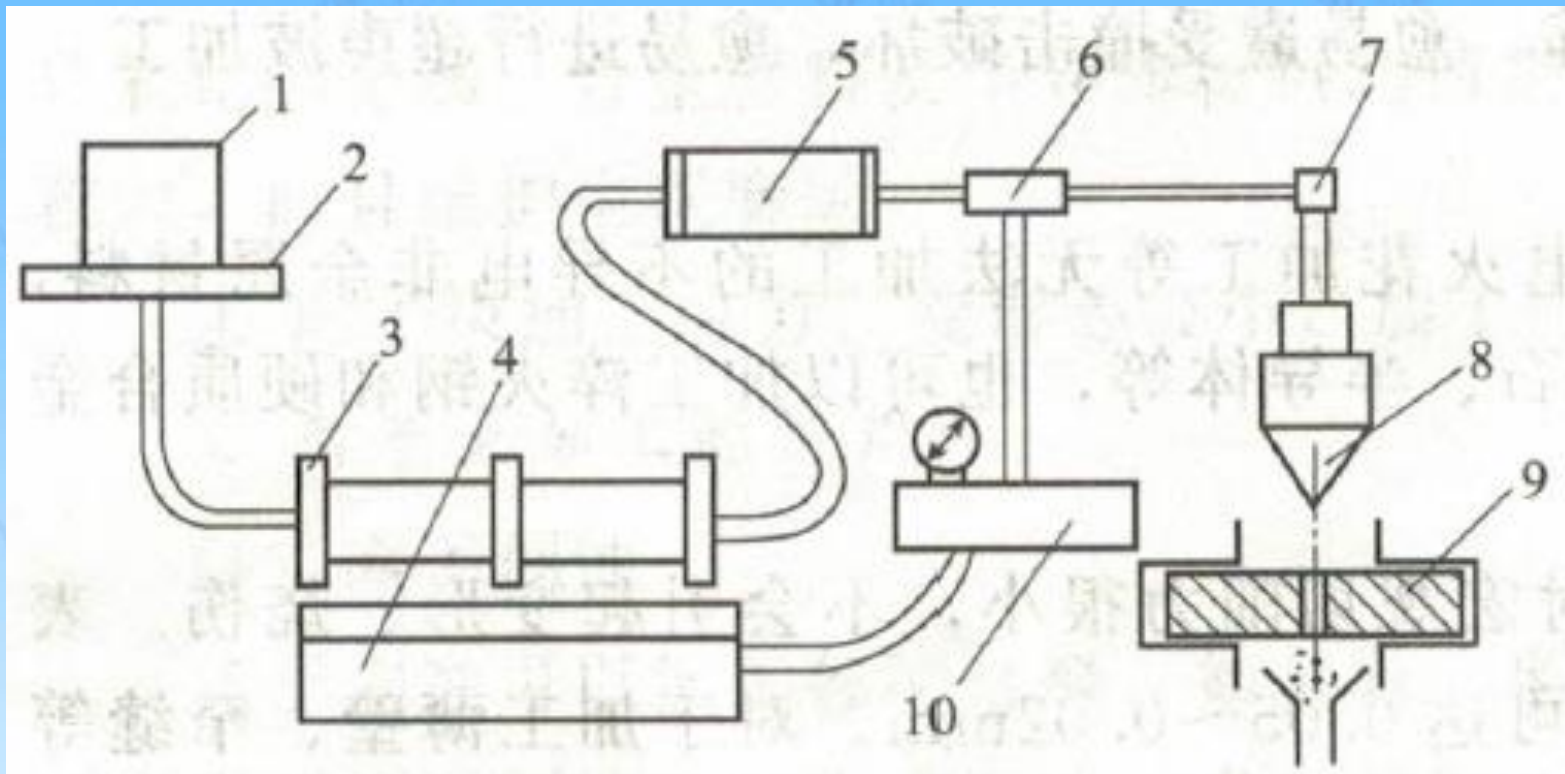
➤ 应用

超声波加工的生产率虽然比电火花、电解加工等低，但其加工精度和表面粗糙度都比它们好，而且能加工半导体、非导体的脆硬材料，如玻璃、石英、宝石、锗、硅甚至金刚石等。在实际生产中，超声波广泛应用于型(腔)孔加工、切割加工、清洗等方面。



4. 水射流切割

➤ 加工原理



1—水箱； 2—过滤器； 3—水泵； 4—液压机构； 5—蓄能器； 6—控制器； 7—阀门； 8—喷嘴； 9—工件；
10—增压器



➤ 特点

- ①加工过程中“刀具”不会变钝，切割质量稳定。可切割各种金属和非金属材料，俗称“水刀”。
- ②切窄缝，一般为 $0.08 \sim 0.5\text{mm}$ ，可节省材料、降低成本。
- ③切割过程不会产生灰尘及火灾。
- ④切割温度低，可切割纸、母材、纤维及其制品。
- ⑤切割时工件材料不会受热变形，切边质量较好；切口平整，无毛刺。
- ⑥加工材料范围广。即可用来加工非金属材料，也可以加工金属材料，而且更适宜于切割薄的和软的材料



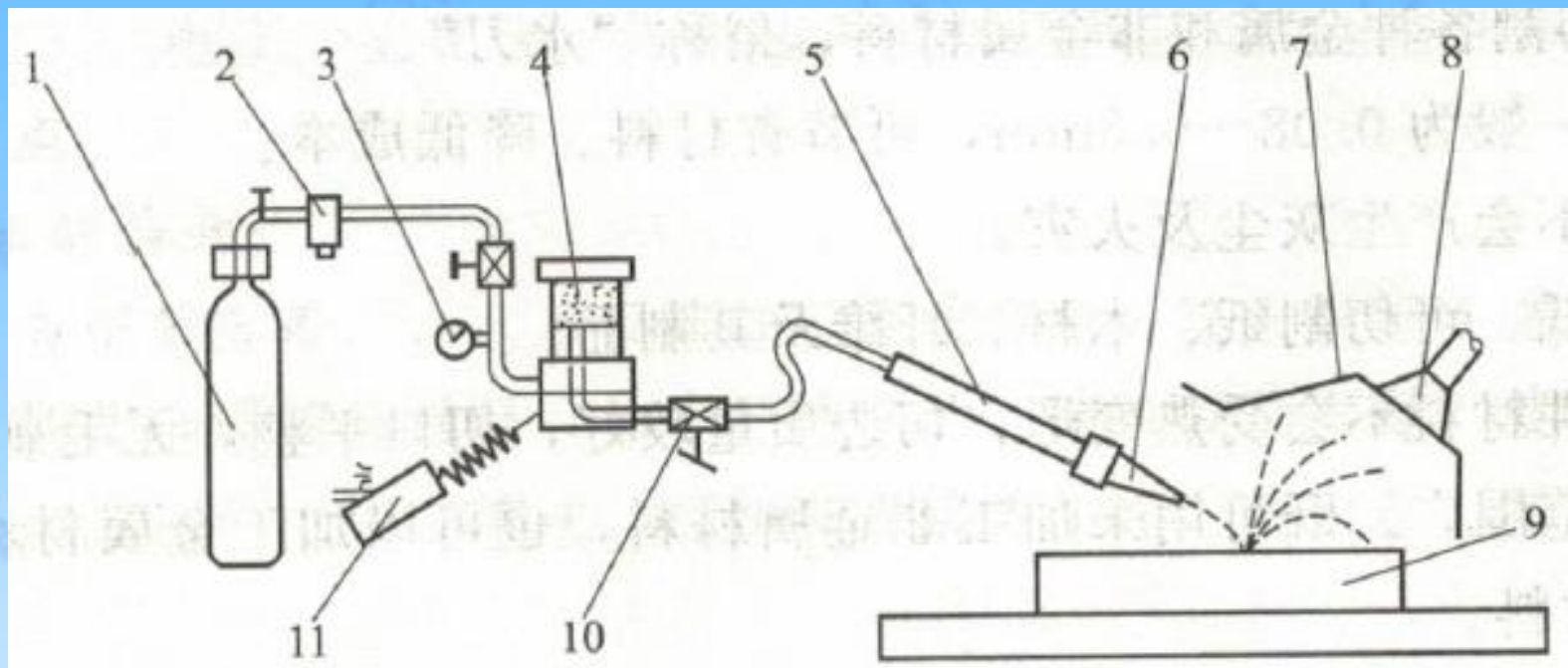
➤ 应用

水射流切割加工的流束直径为0.05-0.38mm，可以加工很薄、很软的金属和非金属材料，也可以加工较厚的材料，最大厚度可达125mm，在建造、装潢、汽车制造、航空航天、食品行业和纺织工业等领域得到了广泛应用。



5. 磨料喷射加工

➤ 加工原理



1—压缩气瓶； 2—过滤器； 3—压力表； 4—磨料室和混合室； 5—手柄； 6—喷嘴； 7—排气罩； 8—收集器； 9—工件； 10—控制阀； 11—振动器



➤ 特点

- ① 它属于精细加工工艺，主要用于去毛刺、清洗表面、刻蚀等。
- ② 可以加工导电或非导电材料，也可加工像玻璃、陶瓷、淬硬金属等硬脆材料或是尼龙、聚四氟乙烯、乙缩醛树脂等软材料。
- ③ 可以清理各种沟槽、螺纹及异形孔。



➤ 应用

- ① 磨光或磨毛玻璃。用此法磨光或磨毛玻璃常比酸蚀或磨削加工更快和更经济。
- ② 清理表面。可以清理陶瓷上的金属污物、金属上的氧化物以及电阻涂层等，还可以剥离金属导线上的封皮材料。
- ③ 去毛刺。在航空航天、计算机、医疗器械工业中去除细小零件在螺纹、窄缝、沟槽等处的飞边、毛刺。
- ④ 加工半导体材料。在像硅、锗、砷等半导体材料上钻孔、复杂表面清理、切割、刻蚀等。



第三节 快速成形技术

一、快速成型技术的定义与特点

1. 定义

快速成形技术是在计算机控制下，基于离散、堆积的原理采用不同方法堆积材料，最终完成零件的成形与制造的技术。

➤ 从成形角度看，零件可视为“点”或“面”的叠加。从CAD电子模型中离散得到“点”或“面”的几何信息，再与成形工艺参数信息结合，控制材料有规律、精确的由点到面，由面到体地堆积零件。

➤ 从制造角度看，它根据CAD造型生成零件三维几何信息，控制多维系统，通过激光束或其他方法将材料逐层堆积而形成原型或零件。

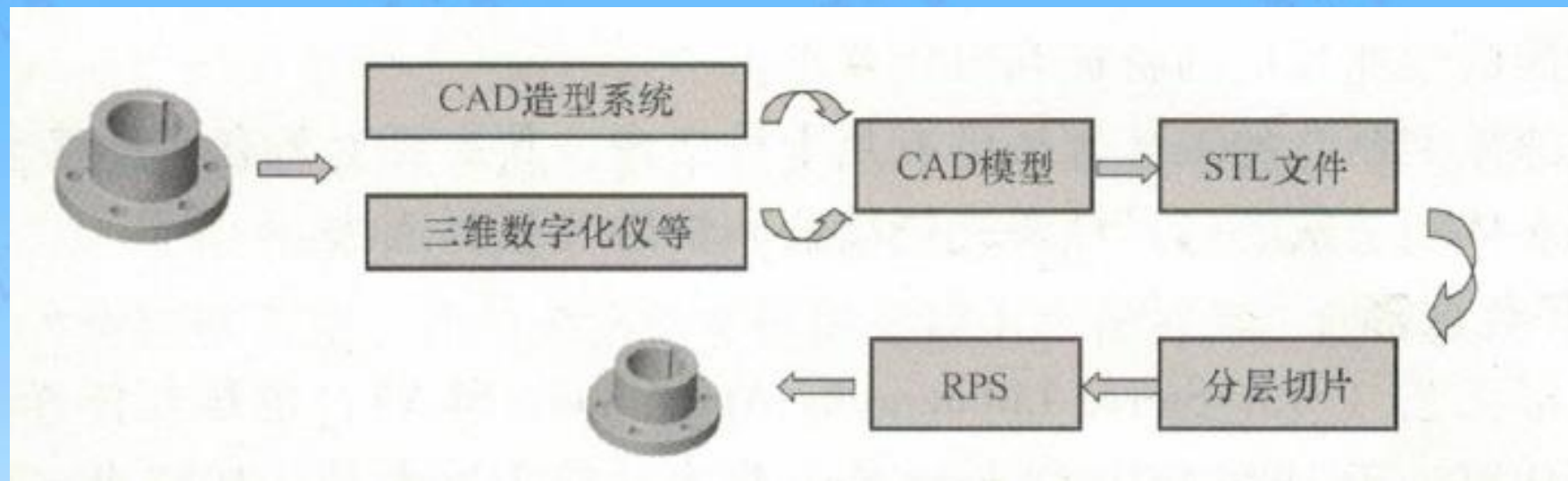


2. 技术特点

- (1) 简易性。
- (2) 快速性。
- (3) 高度柔性。
- (4) 技术的高度集成性。
- (5) 应用领域广泛。



二、快速成型技术的基本原理





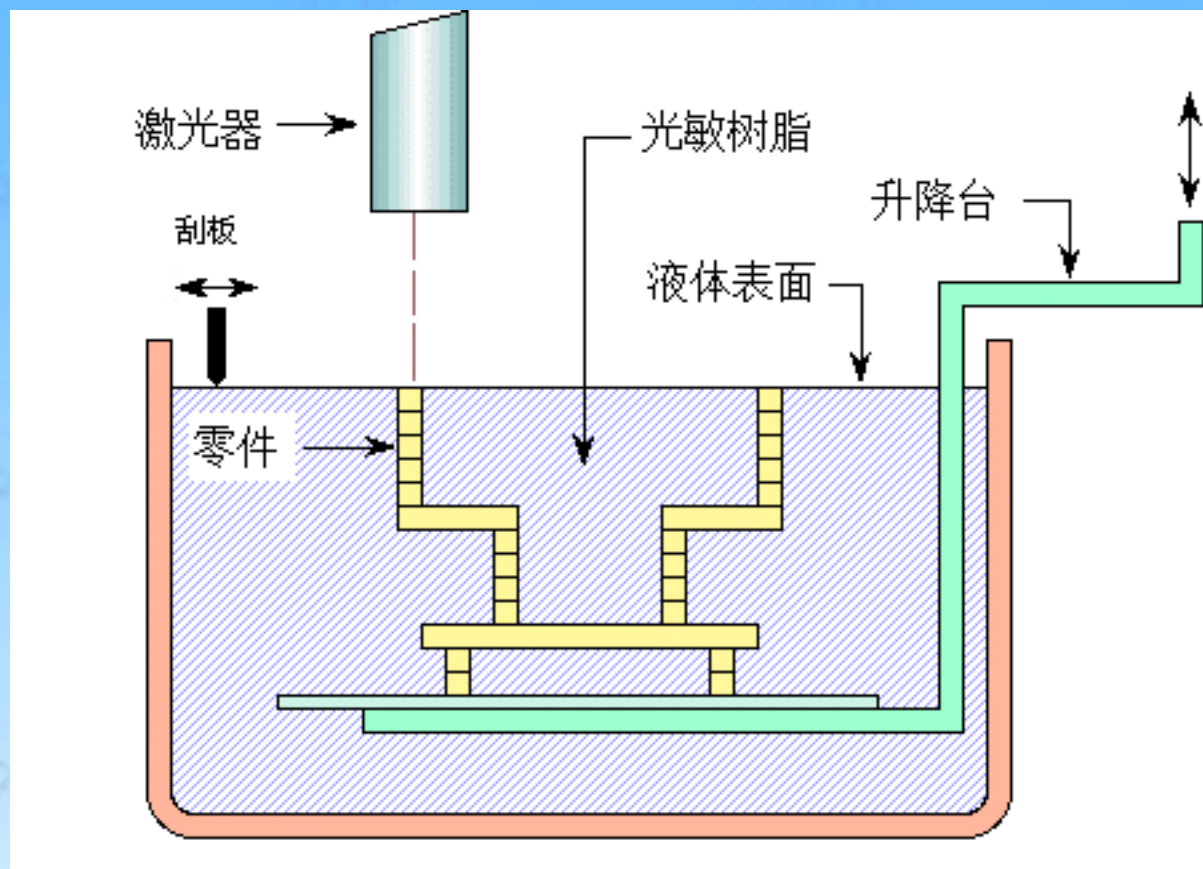
三、快速成型工艺

1. 光固化技术

光固化成型工艺，也被称为立体光刻成型属于快速成型工艺的一种，简称SLA (Stereo lithography Appearance)。该工艺是美国于1986年研制成功的一种RP工艺，1987年获美国专利，是最早出现的、技术最成熟和应用最广泛的快速原型技术。它以光敏树脂为原料，用特定波长与强度的激光，聚焦到光固化材料表面，使之由点到线、由线到面顺序凝固，完成一个层面的绘图作业；然后升降台在垂直方向移动一个层片的高度，再固化另一个层面。这样层层叠加构成一个三维实体，通过计算机控制紫外激光石器逐层凝固成型。这种方法能简捷、全自动地制造出表面质量和尺寸精度较高、几何形状复杂的原型。



光固化成型工艺的基本原理



光固化成型工艺原理

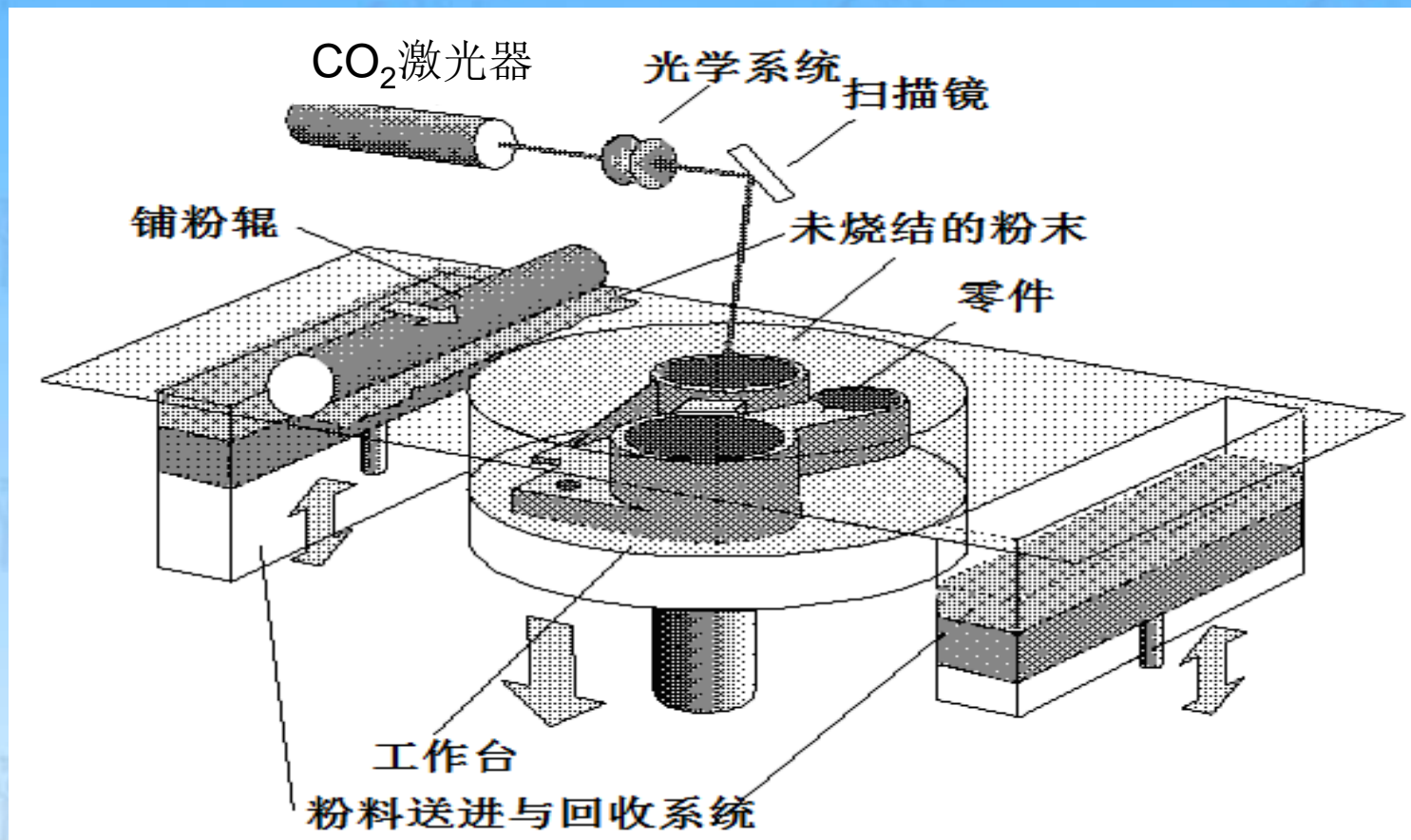


2. 激光选区烧结技术

选择性激光烧结工艺简称SLS(Selective Laser Sintering), 又称为选区激光烧结, 由美国德克萨斯大学奥汀分校的C. R. Dechard于1989年研制成功。该方法已被美国DTM公司商品化。于1992年开发了基于SLS的商业成型机(Sinterstation)。十几年来, DTM公司在SLS领域做了大量的研究工作。德国的EOS公司在这一领域也做了很多研究工作, 并开发了相应的系列成型设备。



选择性激光烧结工艺原理



选择性激光烧结工艺原理

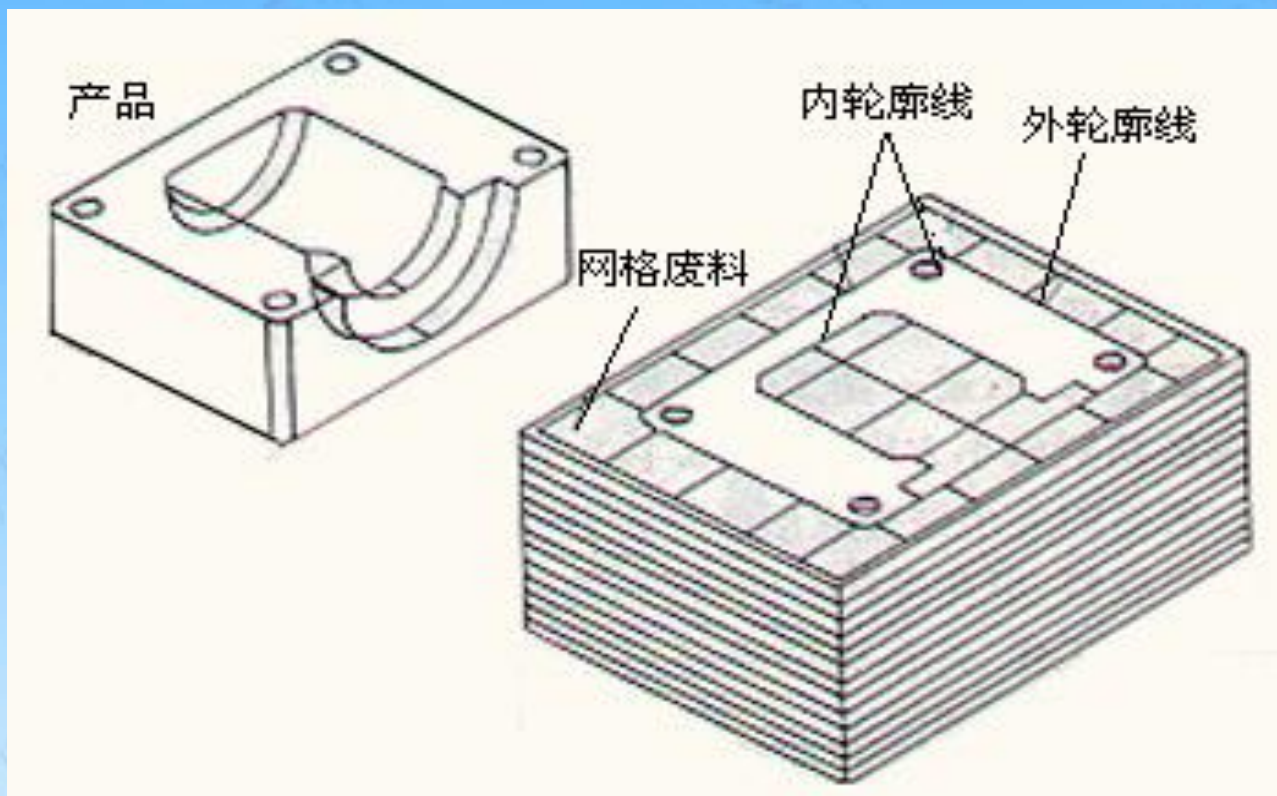


3. 叠层实体造型技术

叠加实体制造技术简称LOM (Laminated Object Manufacturing)。是几种最成熟的快速成型制造技术之一。这种制造方法和设备自1991年问世以来，得到迅速发展。由于叠层实体制造技术多使用纸材，成本低廉，制件精度高，而且制造出来的木质原型具有外在的美感和一些特殊的品质，因此受到了较为广泛的关注。在产品概念设计可视化、造型设计评估、装配检验、熔模铸造型芯、砂型铸造木模、快速制模以及直接制模等方面得到了迅速应用。LOM常用材料是纸、金属箔、塑料膜、陶瓷膜等，此方法除了可以制造模具、模型外，还可以直接制造结构件或功能件。该方法的特点是原材料价格便宜、成本低。



叠加实体制造工艺原理



叠加实体成型工艺原理

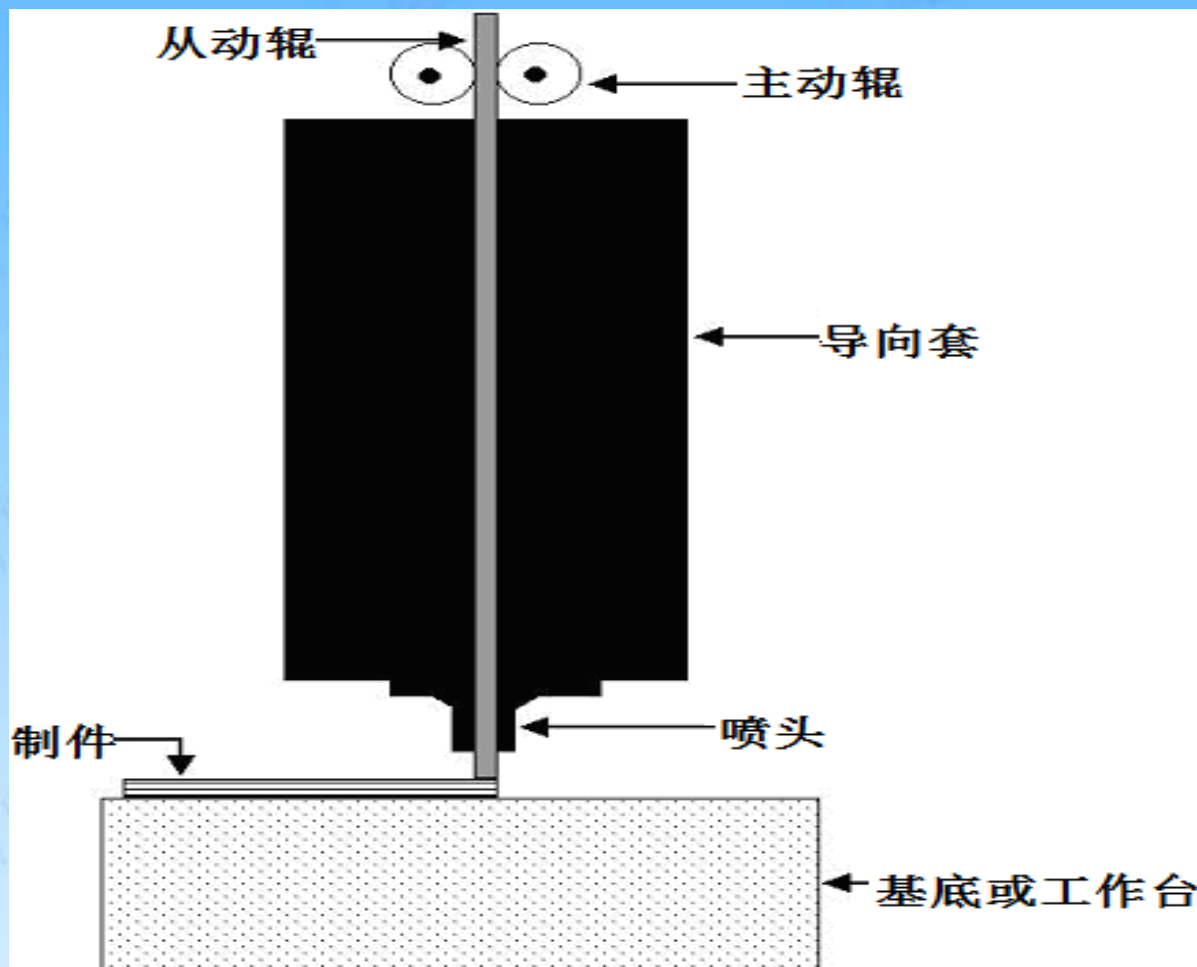


4. 熔融沉积制造技术

熔融沉积快速成型简称FDM (Fused Deposition Modeling)，是继光固化快速成型和叠加实体快速成型工艺后的另一种应用比较广泛的快速成型工艺。该工艺方法以美国Stratasys公司开发的FDM制造系统应用最为广泛。该公司自1993年开发出第一台FDM1650机型后，先后推出了FDM2000、FDM3000、FDM8000及1998年推出的引人注目的FDM Quantum机型，FDM Quantum机型的最大造型体积达到600mm×500mm×600mm。国内的清华大学与北京殷华公司也较早地进行了FDM工艺商品化系统的研制工作，并推出熔融挤压制造设备MEM 250等。



熔融沉积成型工艺原理

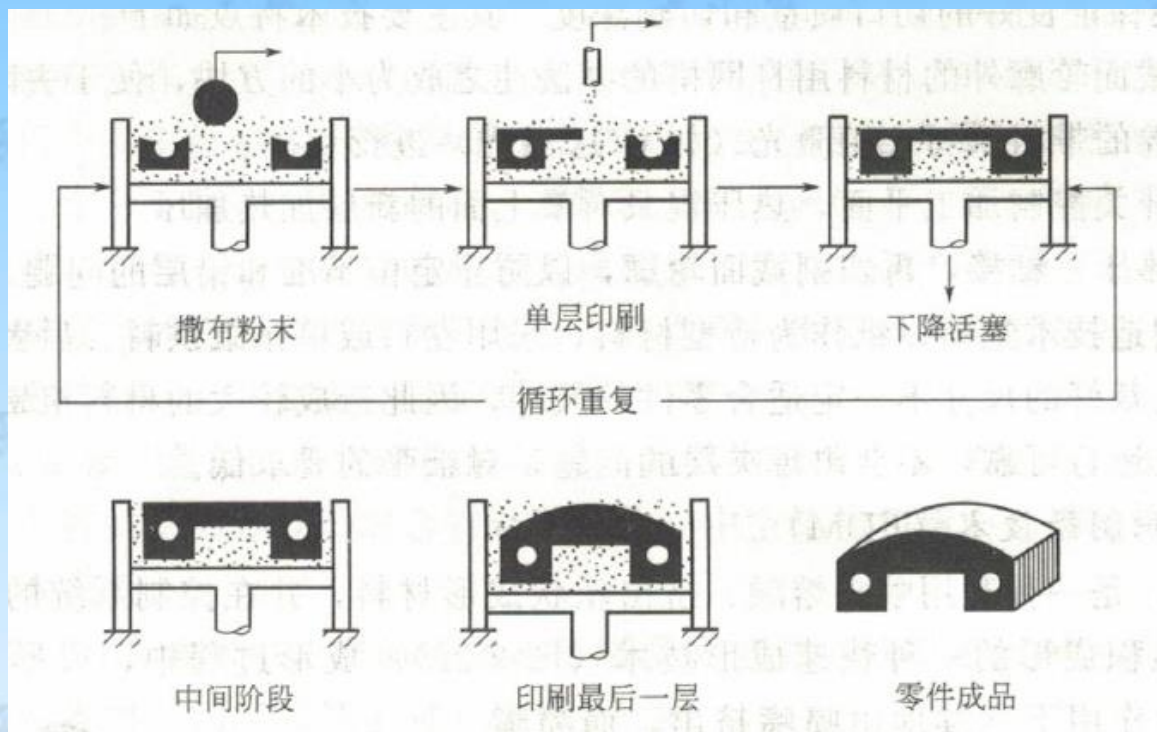


熔融沉积制造工艺示意图



5. 三维打印制造技术

3D打印技术（学术界成为增材制造、快速成型技术等）
是通过对CAD数据离散分析，得到堆积的约束、路径及方法，
通过材料叠加堆积而形成三维实体模型。





3D打印应用领域

海军舰艇

房屋建筑

航天科技

汽车行业

医学领域

电子行业



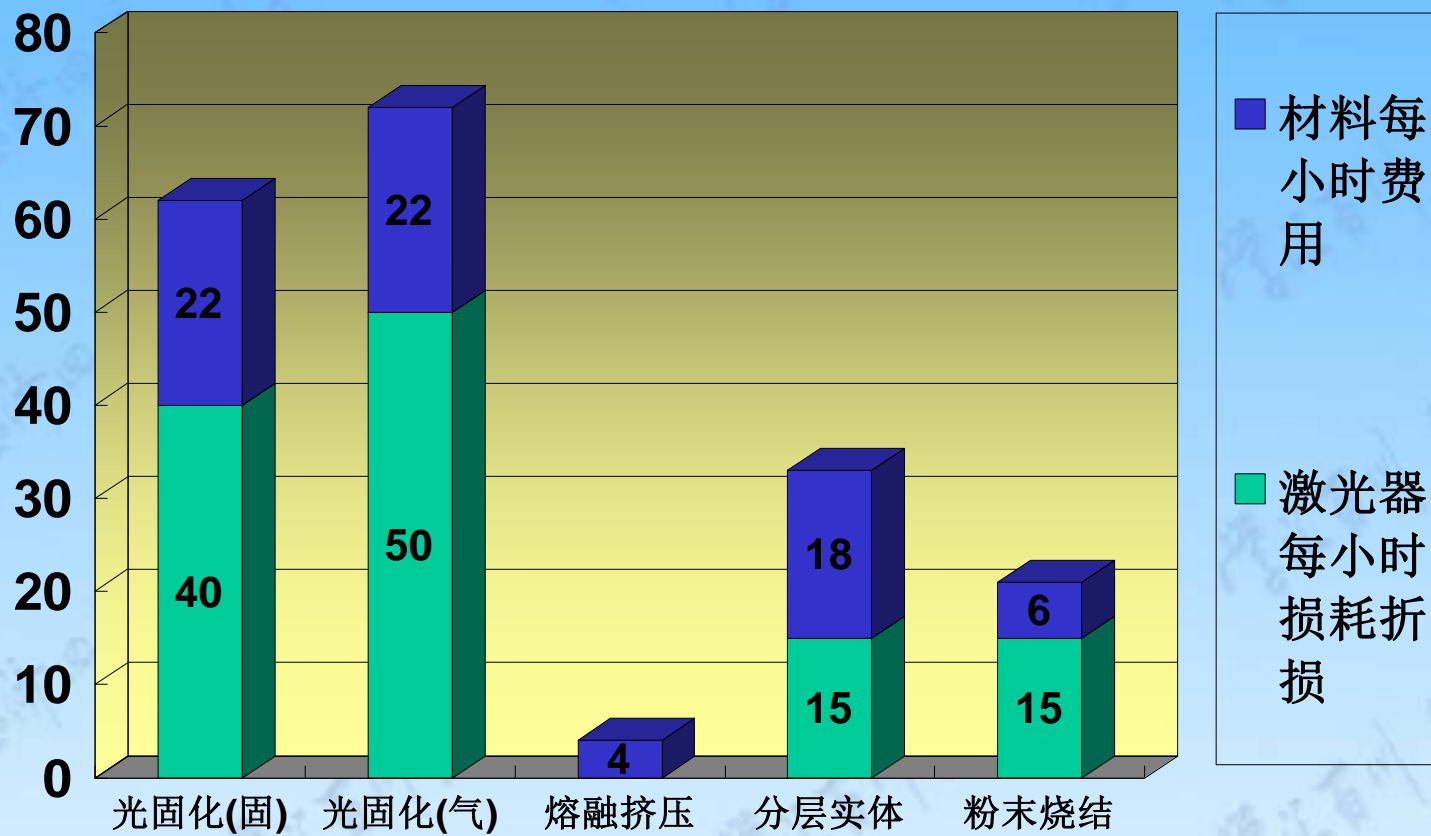


3D打印的优点

- 拓展产品创意与创新空间、无需任何夹具，设计和制造一体化；
- 极大降低产品研发创新成本、缩短创新研发周期；
- 简化制造，提高产品质量与性能；
- 能制造出传统工艺无法加工的零部件、解决常规机械加工或手工无法解决的问题，极大增强了工艺实现能力；
- 提高了难加工材料可加工性，拓展了工程应用领域；
- 3D打印制造技术促进绿色制造模式。



6. 常见快速成形工艺运行成本对比



四、3D打印技术与行业的前景展望



3D打印技术应用前景:

- 目前应用最多的为模型、原型、高性能塑料和功能件的制造;
- 未来在模具、医疗、电子、个人消费品、组织工程、智能结构和其他未知领域都有很大的潜力。



大连海事大学
DALIAN MARITIME UNIVERSITY





大连海事大学
DALIAN MARITIME UNIVERSITY

学汇百川 德济四海

