

硬质涂层研究报告

一、前要

通过前期浩元航空项目研究以及涂层行业相关企业调研，我方认为薄膜材料和薄膜技术具有一定的技术含量且应用领域广泛，在未来市场的潜在价值较高，值得持续关注。故梳理相关资料并总结，对薄膜技术及硬质涂层行业形成初步认识，助力后期工作的开展。

本报告从薄膜概念及制备方法出发，分别对涂层行业中的硬质材料、应用场景等进行描述，梳理硬质涂层技术的发展和现状，并列举了薄膜材料一些典型应用。多有不足之处，还请指正。

二、什么是薄膜

薄膜（thin film）是一种特殊的物质形态，其在厚度这一特定方向上尺寸很小，由于表面、界面的存在使物质连续性发生中断，致使薄膜材料产生与块状材料不同的独特性能。在科研中则更多的认为采用薄膜制备技术沉积制备得到的物质层即为薄膜，对厚度并未有确定的约束范围。

涂层（coating）与薄膜的概念基本相似，区别点可以认为是涂层需要基底，而薄膜可以没有基底。一般情况下也可以认为薄膜即为涂层。

三、薄膜制备方法

薄膜的制备方法较多，大体可按干式和湿式分类。

干式以物理气相沉积（PVD）和化学气相沉积（CVD）为主：（1）物理气相沉积包括蒸发法、溅射法、离子镀、反应蒸发沉积、离子束辅助沉积、离化团束沉积、等离子体浸没式离子沉积等；（2）化学气相沉积按具体装置可分为高

温和低温 CVD、低压 CVD、激光辅助 CVD、金属有机化合物 CVD 等。

湿式则有电镀、化学镀、阳极氧化、LB 技术、溶胶-凝胶等。

(一) 物理气相沉积

物理气相沉积 (physical vapor deposition, PVD) 是利用某种物理过程, 如物质的热蒸发或在受到粒子轰击时物质表面原子的溅射等现象, 实现物质原子从源物质到薄膜的可控转移的过程。

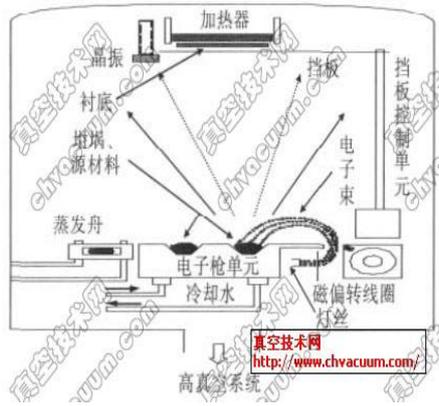
这种制备方法具有以下几个特点: (1) 需要使用固态的或者熔融态的物质作为沉积过程的源物质; (2) 源物质经过物理过程而进入气相; (3) 需要相对较低的气体压力环境; (4) 在气相中及在衬底表面并不发生化学反应。

PVD 技术中最为基础的两种方法是蒸发法和溅射法。蒸发法具有较高的沉积速度、相对较高的真空度, 以及由此导致的较高薄膜纯度等优点。溅射法则具有在沉积多元合金薄膜时化学成分容易控制、沉积层对衬底的附着力较好等特点。

1. 蒸发法

利用物质在高温下的蒸发现象, 可以制备各种薄膜材料。蒸发法通常具有较高的背底真空度。在较高的真空条件下, 不仅蒸发出来的物质原子或分子具有较长的平均自由程, 可以直接沉积到衬底表面上, 而且还可以确保所制备的薄膜具有较高的纯净程度。

真空蒸发法所采用的设备根据具体使用目的可能存在很大差别, 从最简单的电阻加热蒸镀装置到极为复杂的分子束外延设备, 都属于真空蒸发沉积装置的范畴。根据装置中的加热原理可分为电阻式蒸发、电子束蒸发、电弧蒸发、激光蒸发、空心阴极蒸发等。



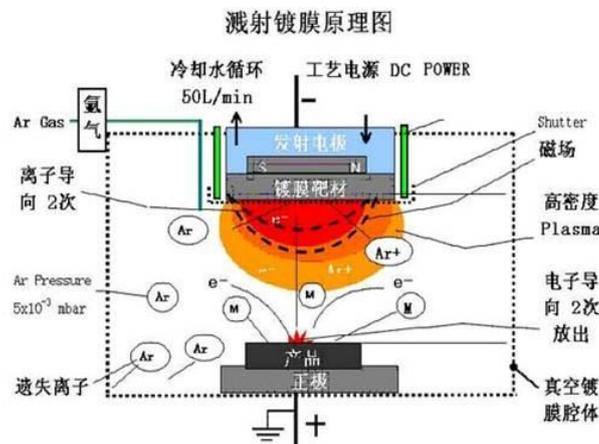
电子束蒸发装置示意图

2. 溅射法

溅射法是利用带有电荷的离子在电场中加速后具有一定动能的特点，将离子引向欲被溅射的物质做成的靶电极。在离子能量合适的情况下，入射离子在与靶表面原子的碰撞过程中将后者溅射出来。这些被溅射出来的原子带有一定动能，并会沿着一定方向射向衬底，从而实现薄膜的沉积。

溅射法使用的靶材可以根据材质的不同分为纯金属、合金以及各种化合物等。一般金属与合金的靶材可以通过冶炼或粉末冶金的方法制备，纯度及致密性较好；化合物靶材多采用粉末热压的方法制备，纯度及致密度通常逊于前者。

主要的溅射方法根据其特征可分为以下四种：直流溅射、射频溅射、磁控溅射和反应溅射。此外利用各种离子束源也可以实现薄膜的溅射沉积。



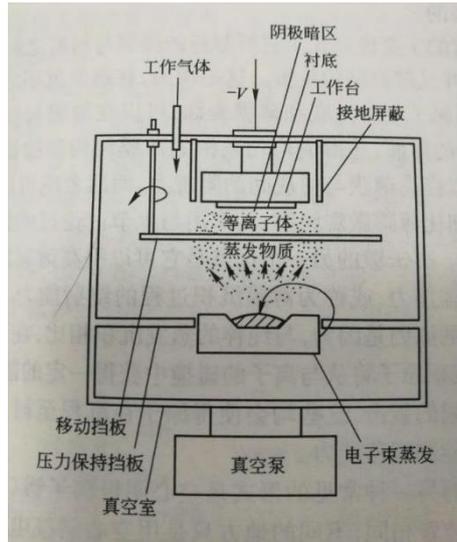
溅射和蒸发的原理及特性比较如下表所示：

	溅射法	蒸发法
沉积气相的产生过程	<ol style="list-style-type: none"> 1. 离子轰击和碰撞动量转移机制 2. 较高的溅射原子能量 (2~30eV) 3. 稍低的溅射速率 4. 溅射原子运动具方向性 5. 可保证合金成分, 但存在化合物有分解倾向 6. 靶材纯度随材料种类而变化 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 原子的热蒸发机制 2. 低的原子动能 (温度 1200K 时约为 0.1eV) 3. 较高的蒸发速率 4. 蒸发原子运动具方向性 5. 蒸发时会发生元素贫化或富集, 化合物有分解倾向 6. 蒸发源纯度较高
气相过程	<ol style="list-style-type: none"> 1. 工作压力稍高 2. 原子的平均自由程小于靶与衬底间距, 原子沉积前要经过多次碰撞 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 高真空环境 2. 蒸发原子不经碰撞直接在衬底上沉积
薄膜的沉积过程	<ol style="list-style-type: none"> 1. 沉积原子具有较高能量 2. 沉积过程会引入部分气体杂质 3. 薄膜附着力较高 4. 多晶取向倾向大 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 沉积原子能量较低 2. 气体杂质含量低 3. 晶粒尺寸大于溅射沉积的薄膜 4. 有利于形成薄膜取向

3. 离子镀

离子镀技术是结合了蒸发与溅射两种薄膜沉积技术而发展起来的一种物理气相沉积方法。比较有代表性的是二极直流放电离子镀, 此方法使用电子束蒸发法提供沉积的源物质, 同时以衬底作为阴极、整个真空室作为阳极组成一个类似于二极溅射装置的系统。因而从装置的设计上可以认为就是由直流二极溅射以及电子束蒸镀两部分结合而成的。

离子镀的主要优点在于所制备的薄膜与衬底之间具有良好的附着力, 并且薄膜结构致密。同时可以提高薄膜对于复杂外形表面的覆盖能力, 或称为薄膜沉积过程的绕射能力。

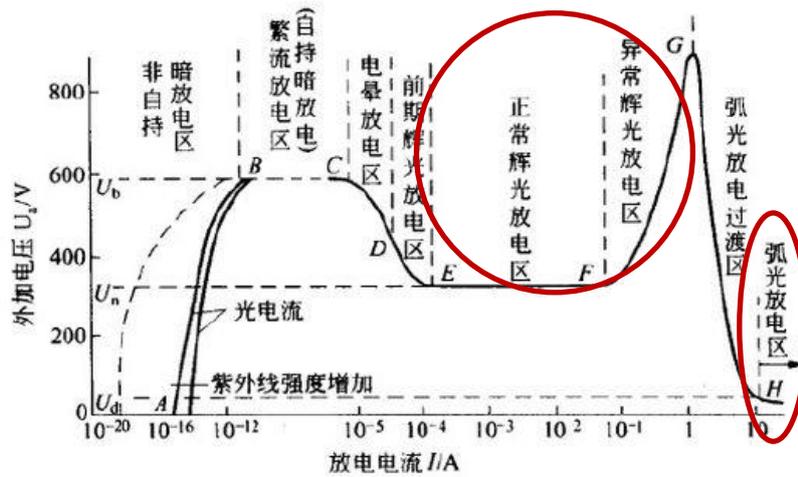


二极直流放电离子镀装置示意图

离子镀的另一种形式是工业上大量采用的真空阴极电弧离子镀（VAD）以及由其衍生出的多弧离子镀。多弧离子镀的显著优点在于其环境真空度高，因而气体杂质的污染少，同时还具有衬底温度低、粒子的离化率高、适合于制备厚度较厚的薄膜材料等特点。其主要应用领域为制备钢及其他金属部件的硬质涂层，比如各种工具耐磨涂层中广泛使用的 TiN、CrN 等。

而真空阴极电弧离子镀以及多弧离子镀的一个显著缺点是，此方法制备得到的薄膜容易含有弧光放电过程所产生的显微喷溅颗粒。通过采用磁场过滤技术可以有效减少薄膜中的喷溅颗粒，改善薄膜的表面质量，但沉积速率会大大降低。

电弧离子镀和溅射法的放电差异如下图所示。溅射法一般工作于异常辉光放电区和正常辉光放电区，而电弧离子镀主要工作于弧光放电区，放电电流更大，外加电压则更小。



直流气体放电体系模型及伏安特性曲线

4. 主要特性比较

蒸发、溅射、离子镀三种物理气相沉积技术的主要特性比较如下表所示：

特性 \ 方法		蒸发法	溅射法	离子镀
粒子能量/eV	原子	0.1~1	1~10	0.1~1 (还有高能中性原子)
	离子			数百至数千
沉积速率/ $\mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$		0.1~70	0.01~0.5 (磁控溅射可接近蒸发法)	0.1~50
薄膜特点	密度	低温时密度较小, 但表面光滑	密度较高	密度高
	气孔率	低温时多	气孔少, 但气体杂质多	无气孔、但缺陷多
	附着力	不好	较好	很好
	内应力	多为拉应力	多为压应力	依工艺条件而定
	绕射性	差	较好	较好

(二) 化学气相沉积

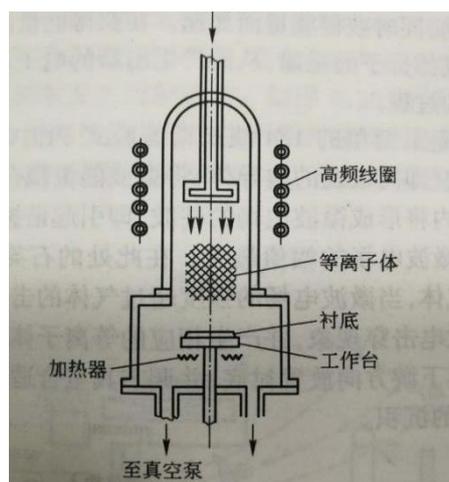
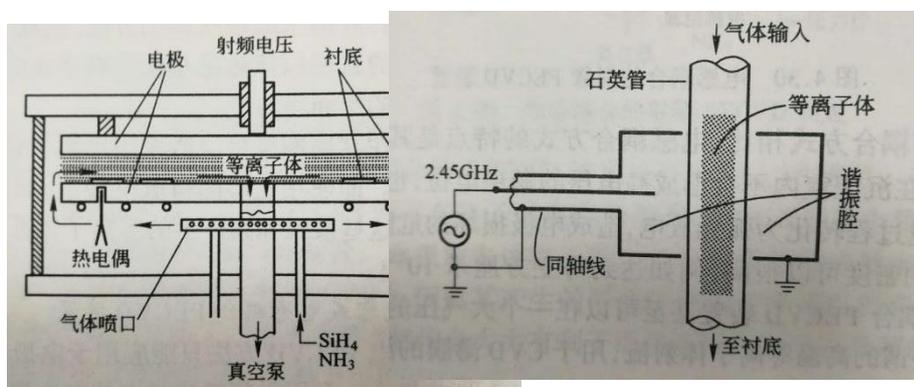
化学气相沉积 (CVD, chemical vapor deposition) 是利用气态的先驱反应物, 通过原子、分子间化学反应的途径生成固态薄膜的技术。

CVD 过程多是在相对较高的压力环境下进行, 有助于提高薄膜的沉积速率。气体的流动状态已处于黏滞流状态, 运动路径和在衬底的沉积几率取决于气压、

温度、气体组成、气体激发状态、薄膜表面状态等多个复杂因素的组合。

此方法可制备的薄膜种类范围很广，包括固体电子器件所需的各种薄膜，轴承和工具的耐磨涂层，发动机或核反应堆部件的高温防护涂层等。特别在高质量的半导体晶体外延技术以及各种介电薄膜的制备中已大量运用了 CVD 技术。

针对不同的薄膜材料和使用目的，化学气相沉积装置可以具有各种不同形式。按沉积过程中的温度、压力、加热方式等可分为高温和低温 CVD、低压 CVD（LPCVD）、激光辅助 CVD、金属有机化合物 CVD（MOCVD）、等离子体辅助 CVD（PECVD）等。



几种等离子辅助化学气相沉积（PECVD）装置

综上，我方认为薄膜制备技术仍处于发展阶段，不同气相沉积技术均具有各自的优缺点，并不存在绝对先进或落后的地方。在制备某种涂层时选择合适的

方法和优化的工艺是关键。

四、硬质涂层

目前硬质涂层的应用场景多为刀具、模具及机械零部件表面，主要用于提高工具表面的耐磨、防蚀等性能。

（一）刀具涂层材料

1. 高速钢涂层材料

（1）**TiC**：硬度较高（可达 3200HV 左右），抗磨损性能好，适用于涂覆产生剧烈磨损的刀具；但性脆，膜层内部的内聚力相对较低，并且在 300℃ 的低温下就会开始分解。

（2）**TiN**：硬度（可达 2000HV，相当于 80-85 HRC）虽比 TiC 低，但其化学稳定性好，与金属的亲合力小，摩擦系数低，润滑性好，在空气中抗氧化性能比 TiC 好，经涂层的刀具在切削时可大大减少摩擦和磨损。涂层外观呈现金黄色。

（3）**TiCN**：复合涂层，颜色呈现蓝-灰色，耐热高温达 400℃。具有较高韧性，可用于丝锥、成形刀具等。

（4）**TiAlN**：高性能涂层，颜色呈现紫罗兰-黑色，耐热温度达 800℃，可适用高度加工。在基体 65 HRC 的高速钢上涂 2.5-3.5 μm ，刀具寿命比 TiN 明显提高约 1-2 倍。

（5）**AlTiN**：高铝涂层，耐热温度达 800℃，具有高硬度、高耐热性，适合对硬材料加工。

（6）**TiAlCN**：复合涂层，耐热温度达 500℃，具有高韧性、高硬度、高耐热性、低摩擦性能，适合制造铣刀、钻头、丝锥。可加工 60 HRC 的高硬度材料。

（7）**DLC**：类金刚石类涂层，耐热温度 400℃，适用于加工硬木材的成形刀具。

（注：HRC 是采用 150Kg 载荷和钻石锥压入器求得的洛氏硬度，用于硬度很高的材料）

2. 硬质合金涂层材料

硬质合金是由高硬度、难熔的金属碳化物（WC、TiC 等）微米级粉末采用 Co、Mo、Ni 等作粘结剂烧结而成的粉末冶金制品，其高温碳化物含量超过高速钢，允许的切削温度高达 800-1000℃，常温硬度达 89-93 HRA，在 540℃时为 82-87 HRA，与高速钢常温时硬度（83-86 HRA）相同，760℃时硬度达 77-85 HRA，并具有化学稳定性好、耐热性高等优点。（注：HRA 是采用 60 Kg 载荷和钻石锥压入器求得的洛氏硬度，用于硬度极高的材料）

目前硬质合金涂层材料已由早期的 TiC（1969 年）、TiN（1971 年）、Al₂O₃（1972 年）等单涂层发展到 TiC-TiN，TiC-Al₂O₃ 等双涂层及 TiC-TiN-Al₂O₃ 等三涂层，最多可达 13 层涂层（联邦德国的 Widalon 刀片）。

TiC: 具有很高的硬度与耐磨性，抗氧化性好，切削时能产生氧化钛薄膜，降低摩擦系数，减少刀具磨损，切削速度可提高 40%左右。

TiN: 在高温时能形成氧化膜，与铁基材料摩擦系数较小，抗粘结性能好，能有效降低切削温度。抗热振性能也较好。

TiC-TiN 复合涂层: 第一层涂 TiC，与基体粘结牢固不易脱落；第二层涂 TiN，减少表面层与工件的摩擦。

TiC-Al₂O₃ 复合涂层: 第一层涂 TiC，与基体粘结牢固不易脱落；第二层涂 Al₂O₃，使表面层具有良好的化学稳定性与抗氧化性能。这种复合涂层能像陶瓷刀那样高速切削，寿命比 TiC、TiN 涂层刀片高，同时又能避免陶瓷刀的脆性、易崩刃的缺点。

（二）模具涂层材料

由于模具的工作环境和服役条件不同，模具工作时的磨损机制也不尽相同，因此对模具表面涂层的耐磨性要求也是不同的。目前耐磨涂层的种类很多：

从涂层材料的组成方面，氧化物中氧化铬、氧化铝、氧化钛等，碳化物中有碳化铬、碳化钨、碳化钛以及它们和金属的复合物，氮化物中有氮化钛、氮化硅等；

从耐磨损的机理方面，铁基、镍基、钴基材料或在这些涂层材料中加入 WC、

Al_2O_3 、 Cr_2O_3 、 ZnO 等陶瓷颗粒获得复合涂层，可显著提高其抗磨料磨损性能，同时可以增大或改变摩擦副间的物理、化学及晶体结构的差异和性质，从而提高其抗粘着磨损性能。

另外，在边界润滑条件下，钼涂层具有优异的耐粘着磨损性能；钴基自熔合金、Ni/Al 以及陶瓷涂层可以提高耐热磨损性能；Ni 基自熔合金、自熔合金加铜粉、不锈钢、超细 Al_2O_3 、 Cr_2O_3 、WC 复合涂层可以显著提高零件的耐冲蚀磨损和耐气蚀磨损能力。

耐磨涂层在工业中已经获得了广泛应用。如在硬质合金刀具表面涂覆一层厚度为 $8\sim 12\mu\text{m}$ 的氮化钛涂层，可使刀具使用寿命延长 $2\sim 5$ 倍。限于模具内腔结构一般比较复杂，涂层的成形技术难度大，难以形成均匀的耐磨涂层，因此耐磨涂层的应用受到一定的限制。

（三）模具表面涂层技术

1. 热喷涂技术

热喷涂技术是将喷涂材料加热到熔融或半熔融状态，用高速气流将其雾化、加速，使其以高速喷射到工件表面，形成耐磨、耐蚀以及抗高温氧化等特殊性能涂层的表面涂层方法。热喷涂层由于不致密，与基材结合强度不高，在模具表面强化中难以发挥作用。为了改善热喷涂的涂层质量，人们研究与开发了新型热喷涂工艺，如真空喷涂、静电喷涂以及喷焊等。

喷焊是将所形成涂层进行加热熔化，使之与基体的近表面形成牢固的冶金结合层。但由于重熔过程中基体局部受热温度达 900°C 以上，会产生较大热变形。

2. 气相沉积技术

气相沉积技术在本报告的第三部分已经进行过介绍，这里不再复述。

3. 复合镀层技术

复合电刷镀技术采用镍、钴、二氧化锆复合电刷镀液，使处理的模具型腔表面耐磨性大为提高，并有较高的硬度，镀层表面比较理想，与本体结合力强，经抛光后达到镜面。利用复合电刷镀不仅可强化模具型腔表面，还可修复型腔面，

从而延长模具寿命。如在模具型腔表面刷镀 0.01~0.02mm 的非晶态镀层，可使寿命延长 20%~100%。

化学镀的均镀能力强，可在形状复杂的模具型腔基材表面均匀沉积。其中化学镀 Ni-P 合金，硬度可达 1000HV，已接近一些硬质合金的硬度，并且具有相当高的耐磨能力。化学镀 Ni-P 合金复合热处理技术在模具表面处理上的应用日渐成熟，在铸造模具和压铸模具上也有一定程度的应用。

4. 高能束技术

采用激光束、离子束、电子束等高能束对模具型腔进行表面改性，由于它们的能量密度极高，对材料表面进行加热时，加热速度极快，整个基体的温度在加热过程中基本不受影响，因此涂层质量较好。如利用激光材料表面强化技术，包括激光表面合金化（LC）、激光表面熔覆（LSC）等，可得到无气孔的致密熔覆层。

5. 涂层的改性技术

在涂层材料中加入稀土元素，可以在涂层表面形成一层富稀土合金层，形成牢固的保护层，提高涂层的抗氧化和抗腐蚀能力；同时稀土元素具有显著地催渗作用，渗层深度可以明显增加。将稀土元素加入涂层，可取得良好的组织与性能，使模具型腔表面具有更高的硬度和耐磨性。例如应用于模具型腔表面的超硬 TiN 膜（含稀土元素），使模具型腔表面呈现出高硬度、低摩擦系数和良好的化学稳定性，提高了模具的使用寿命。

6. 涂层的纳米化

在传统的涂层材料中加入零维或一维纳米质点粉体材料，可形成纳米复合镀层。用于模具的 Cr-DNP 纳米复合镀层，可使模具寿命延长，长时间使用镀层光滑无裂纹。纳米材料还可用于耐高温的耐磨复合镀层。如将 n-ZrO₂ 纳米粉体材料加入 Ni-W-B 非晶态复合镀层，可提高镀层在 550~850℃ 的高温抗氧化性能，使镀层的耐蚀性提高 2~3 倍，耐磨性和硬度也都明显提高；采用热喷涂技术制作纳米结构涂层在强度、韧性、抗蚀、耐磨、热障、抗热疲劳等方面都有显著改善。

7. 涂层热处理技术

涂层形成过程中，由于涂层材料与基体材料的性能差异，以及工艺条件的影响，经常出现结合状态不良的状况，因此，需对涂层进行后处理，使涂层的效果发挥到最佳。

对涂层进行热处理，主要解决以下问题：

1.晶态结构的转变，包括形成合理的相组成、晶粒控制等，使涂层材料的性能得到优化；

2.经过后续热处理，促使涂层与基体的扩散以获得镀层与基底间较强的化学键合，从而提高基体与涂层之间的结合力；

3.消除涂层内应力，改善其使用条件。

五、硬质涂层行业

1. 国外

欧洲刀具涂层技术自 20 世纪 80 年代中期以来得到了广泛的发展，尤其是物理涂层技术，代表了当前世界的最高水平。纵观涂层技术的发展现状，欧洲的 PVD 涂层技术水平最高，领先于其他国家。知名的厂商有德国、瑞士、丹麦等的专业涂层技术公司。这类公司从涂层设备、涂层工艺、涂层材料等各方面领先时间，涂层刀具产品使用性能远远好于国内。国外知名工具厂大多使用购自涂层专业技术公司的涂层设备和最新工艺，而不是自行研制。这也使得欧洲的专业涂层技术公司研发新型涂层能力更强，水平更高，更具针对性。国外高效高性能齿轮刀具等精密复杂高速钢刀具几乎 100% 需要经过涂层后使用，而中国不仅刀具涂层技术有很大差距，涂层刀具的数量也差得很远，精密复杂刀具采用涂层后使用的不足全部刀具 20%。

目前比较有竞争力的几家国外涂层公司的简介如下：

(1) 瑞士 Balzers 涂层公司

Balzers 公司是目前世界上规模最大的刀具涂层公司。在 20 多年的发展过程中，该公司一直坚持设备制造、成套技术转让及涂层加工服务的经营策略，其所

开发的设备主要以阴极电弧技术为主。目前最具代表性的涂层是一种无钛涂层，称为 G6，即 AlCrN 涂层。与传统的 TiN、TiCN、TiAlN 相比，G6 具有更高的红硬性及抗氧化性能，使用温度可达到 1000 °C。Balzers 公司在国内分布有 13 个涂层加工中心，中国市场占有率高达 30%，且几乎全部为高端涂层市场，但该公司的涂层价格是国内涂层价格的 2-3 倍。

(2) 瑞士 Plaitit 涂层公司

Plaitit 公司是世界上最早进行纳米复合超硬涂层技术研发及产业应用的涂层公司，目前 Plaitit 公司代表性的纳米复合超硬涂层 nACo 领先全球，**该涂层成分就是 TiAlSiN**，在 nACo 涂层中 TiAlN 纳米结晶粒埋藏于 Si₃N₄ 非晶基体中，形成纳米晶和纳米非晶的复合结构，这种涂层的硬度大于 Hv40GPa，纳米结构耐高温达 1000 °C 以上，在高温下使用也能保持很好的抗磨性、抗粘性和抗氧化性，不需要使用冷却液也能进行高效能切削，因此，特别适合于干切削及高速切削加工。Plaitit 公司的纳米复合超硬涂层技术领先世界，但该公司在国内市场开发不理想，仅在东莞和上海设有涂层加工中心，市场占有率约 10%，涂层价格也很高。

(3) 德国 CemeCon 涂层公司

CemeCon 公司是一家专门从事涂层技术开发及涂层加工的公司，创建于 1986 年，其涂层制备主要采用**磁控溅射技术**，涂层类型有传统的 TiN、TiCN、TiAlN 等，也有新型纳米复合超硬涂层 TiSiN 和 TiAlSiN 等。但涂层综合品质稍逊于 Balzers 公司和 Plaitit 公司。CemeCon 公司在北京和深圳设有涂层加工中心，因涂层价格较高，市场占有率约 6%。

(4) 美国、日本和欧洲其他公司如 Multi-Arc、PVT、Metaplas、Hauzer、Teer、Nissin、Sulzers 等，也分别采用阴极电弧技术或磁控溅射技术为工模具企业提供 TiN、TiCN、TiAlN、TiAlSiN、DLC 等涂层加工服务，在国内不同区域设有涂层加工中心，但市场占有率不如上述三家涂层公司有优势。

2. 国内

国内 PVD 技术的研发工作始于上世纪 80 年代初，80 年代中期研制成功中小型空心阴极离子镀膜机及高速钢刀具 TiN 涂层工艺技术。由于对刀具涂层市场前

景看好，国内引进了热阴极离子镀及阴极电弧（多弧）离子镀技术与装备。技术及装备的引进推动了国内刀具 PVD 技术的第一次开发热潮，并于 90 年代初开发出多种 PVD 设备。但由于大多数的设备性能指标低，涂层工艺稳定性差，预期的市场效益未能实现，从而导致了近十多年国内刀具 PVD 技术处于徘徊不前的局面。尽管 90 年代末国内成功开发出了硬质合金 TiN-TiCN-TiN 多元复合涂层工艺技术，并达到了实用水平，但在随后的发展过程中也并未得到市场认可。随着我国汽车工业的迅速崛起。先进制造技术的大量引进，以及数控加工技术大面积的普及。自本世纪初，PVD 技术在国内掀起了第二次开发热潮。与 90 年代不同，目前国内 PVD 技术的发展更具多元性及创新性，归纳起来有阴极电弧技术、磁控溅射技术、空心阴极技术等。

3. 技术发展趋势

目前国际上刀具涂层技术正处于一个重要的更新换代时期。**涂层结构已从单元和多元单层向多元多层涂层和纳米晶复合涂层方向发展**，这些新型涂层显著提高了刀具的硬度、结合力和抗氧化性等重要性能。

同时，基于加工材料和不同加工工况的专用涂层的研究也在深入开展。

“硬”涂层刀具追求高的硬度和耐磨性，目前应用的刀具硬涂层材料有金刚石、类金刚石、氮化碳、立方氮化硼以及 TiC、TiN、TiCN、 A_2O_3 、TiAlN 等及其组合，其中以黄金色的 TiN 涂层的应用最为广泛。然而，诸如航空航天工业使用的许多高强度铝合金、钛合金或贵金属等材料都不适合用“硬”涂层刀具加工，仍主要使用无涂层的高速钢或硬质合金刀具。

“软”涂层刀具的开发则可较好地解决此类材料的加工问题，刀具“软”涂层的主要成分为具有低摩擦系数的固体润滑材料，如： MoS_2 、 WS_2 、 CaS_2 、 TaS_2 等，在特殊使用条件下具有优良的摩擦学特性，如：摩擦系数低、承载极限高、高温下化学稳定性好、物性变化小、能适应 $1200^{\circ}C$ 以上的工作温度范围和很宽的摩擦副运动速度范围，适于在高温、高速和大载荷等特殊环境条件下使用。目前“软”涂层刀具技术在国内研究较少，但“软”涂层刀具可应用于干切削，对阻止粘结、减小摩擦、提高刀具寿命、降低加工成本等具有重大的理论和实际意义，具有广阔的应用前景。

六、薄膜材料的一些典型应用

薄膜材料是相对体材料而言的，往往具有特殊的材料性能或性能组合，如下表所示是薄膜材料的一些典型应用：

材料性质	薄膜应用
光学性质	反射涂层和减反涂层
	干涉滤色镜
	装饰性涂层
	光记录介质
	光波导
电学性质	绝缘薄膜
	导电薄膜
	半导体薄膜
	压电薄膜
磁学性质	磁记录介质
化学性质	扩散阻挡层
	防氧化或防腐蚀涂层
	气体或液体传感器
力学性质	耐磨涂层
	显微机械
热学性质	防热性质
	光电器件热沉

1. 耐磨及表面防护涂层

现代科学技术对机械部件提出的综合性能要求往往超出了单一材料可以达到的性能范围，难以同时满足所有性能要求。而采用涂层方法制备的材料组合则可以有效地发挥各种材料的优点，同时避免各自的局限性。

耐磨及防护涂层技术的采用能够有效地降低各类部件的机械磨损、化学腐蚀及高温氧化倾向，从而延长其使用寿命。涂层材料涉及各种氧化物、碳化物、氮化物、硼化物陶瓷、某些合金材料或金属间化合物。这些材料的共同特点在于一般均具有较高的硬度和熔点，良好的耐磨性和耐化学腐蚀性能，因而可以被应用于需要耐磨及防护涂层机械零件表面。

机械涂层主要应用于以下三个方面：

(1) 耐磨涂层

使用耐磨涂层的目的是减小零件的机械磨损，因此一般均是由硬度极高的材料制成的。其典型例子即是各种切削刀具、模具、工具和摩擦零件的 TiN、TiC 等涂层。

(2) 耐热涂层

耐热涂层被广泛应用于燃气涡轮发动机等需要在较高温度使用的机械部件的耐热保护方面，其作用一是要降低部件的表面氧化倾向，二是要降低或部分隔绝部件所要承受的热负荷，从而延长部件的高温使用寿命。

(3) 防腐涂层

这类涂层被应用于保护被涂层的部件不受化学腐蚀气体或液体的浸蚀，其应用的领域包括石油化工、煤炭气化以及核反应堆的机械部件涂层方面。

在实际使用中，同一涂层往往发挥多方面的防护作用。与一般意义的薄膜材料相比，耐磨及防护涂层往往具有涂层较厚（几个微米至几百微米），对厚度要求并不十分严格，制备温度较高等特点。同时为满足使用条件对部件提出的机械强度要求，涂层的基底材料往往是一些特殊的金属或合金材料，比如高速钢、不锈钢、各种高温合金和硬质合金等。而为了保证涂层对于基底材料具有良好的附着性能，往往还需要在涂层和基底之间形成明显的扩散过渡层，或者有意识地增加有利于提高涂层附着力的过渡层。

2. 集成电路中的薄膜材料

集成电路技术的关键步骤之一是在高度完整的单晶 Si 衬底上以极高的精确度制造出 p-n 结和绝缘层，并以它为基础组成大量的二极管、三极管、电阻、电容等电路元件，通过布线将他们连接起来构成可以完成复杂功能的电子器件。

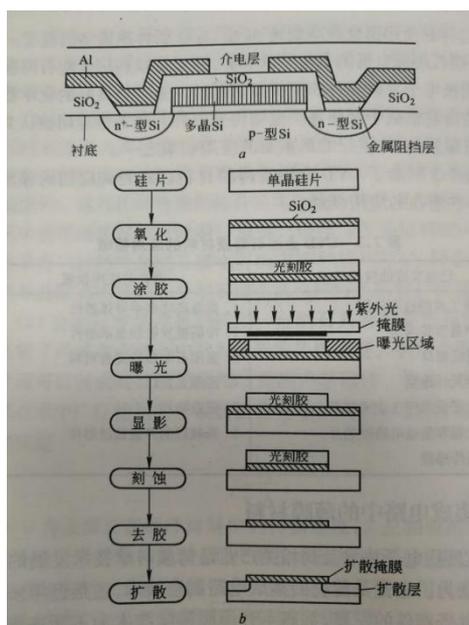


图 a 所示的是具有代表性的 MOS 场效应管的结构剖面。图 B 所示则是集成电路最基本的制造工艺流程。流程中包括了将 Si 片的表面氧化构成绝缘层，在其上涂布对某一光波长敏感的光刻胶，在掩膜的帮助下使特定图形的光刻胶曝光，去除未曝光的光刻胶并按照其图形腐蚀掉氧化层，在未被氧化物层覆盖的区域上扩散进特定浓度的杂质实现掺杂、沉积导电连线等一系列步骤。

这一过程中显然大量涉及到了薄膜材料的制备问题。

3. 集成光学器件

在大规模集成电路和光纤通讯技术成功发展的基础上，集成光学已成为当今世界科技发展的一个重要领域，它研究的是以光的形式发射、调制、控制和接收信号，集光信号的处理功能为一身的新一代集成光学器件，其最终目标是替代目前的电子通讯手段，实现全光通讯。

集成光学器件所采用的材料主要分为三类：第一类是以 GaAs 为基础形成的光电子材料，包括 AlGaAs、InP、GaInAsP 等，它们是一般制作光电子器件常采用的材料；第二类是以 LiNbO₃ 为代表的具有特殊电光性质的单晶材料；第三类则是包括各种多晶和非晶态的物质，如氧化物、玻璃以及聚合物等。

GaAs 类材料是极好的光电子材料，已被广泛用于制造各类发光器件（发光二极管，激光器）和光接收器件（光电二极管和三极管）。因而，采用这类材料

的优点是可以利用外延、光刻等制造技术将光发射、光探测元件以及光波导集成制作在同一基板上。

以 LiNbO_3 为代表的一类材料具有较强的电光效应，即这类材料的折射率随外加电场改变呈现较大的变化。因此，在这类材料上可以集成制作电光调制器和电光开关等元件。另外，由于这类材料还具有较强的压电效应，即外加电场会引起材料产生较大的应变，因而用它还可以集成声光调制器和光折射器等主动型元件。微小的成分变化就可以导致光折射率的变化，因而可以采用热扩散（渗 Ti 或脱 Li 处理等）的方法或者离子注入的方法在 LiNbO_3 晶体上制作出光波导。这类材料的缺点在于尚不能将发光和受光元件集成在同一衬底上，而需要另外采用薄膜耦合器、棱镜、光栅等元件将外来的激光耦合进 LiNbO_3 波导中去。

六、我们的思考

经过相关资料整理和企业走访，我方认为硬质涂层作为薄膜产业中的一个小分支在国内已具有较高的发展潜力，而薄膜材料及薄膜技术的应用领域十分广泛，技术含量较高且尚处于发展阶段，可以作为今后的投资方向之一。

同时我方认为拥有以下几点特征的涂层企业应具有一定的投资价值，值得持续跟踪：

（一）技术

合适的涂层技术是所有涂层公司的基石，具体制备工艺应是其中的核心。公司自身应具备一定的技术沉淀和较为完整的研发团队，确实保证涂层材料的性能可靠性和持续升级能力。

（二）设备

涂层设备必不可缺但价格较高，使得公司多为重资产模式。但这并不妨碍涂层业务的盈利能力。

公司应能够自主开发或有资金实力购买适应下游客户不同要求的生产设备，并有能力在保证需求的前提下逐步降低成本。

（三）客户及市场

市场开拓和客户挖掘亦是目前此行业的重要组成部分。公司的销售团队应在对涂层技术有一定认识的同时能够精准抓住下游客户的刚性需求。

（四）竞争

公司应能够建立完善的研究、开发、服务体系，加强对引进技术的消化吸收及协作研究工作并增强自主开发能力，参与国际市场竞争。

中财生生资本市场部

独立撰稿人：王亦然