

# 绪 论

## 1.1 技术背景与意义

随着高新技术产业的飞速发展,陶瓷、石材等非金属硬脆材料因具有高硬度、耐磨损、耐腐蚀、低密度、低热膨胀系数和高化学稳定性等优良特性,正广泛应用于光学仪器、精密机械、半导体、汽车、航空航天、生物医学和建筑装饰等高技术领域<sup>[1-4]</sup>。对于精密机械装备,大理石构件的减振效果和热稳定性等特征能够大大提升设备的刚度,减小热变形,降低在外部环境影响下产生的振动,这正是提升设备运行精度的关键所在。预烧结氧化锆陶瓷的可加工性能较优,它经铣削加工后进行二次烧结就可以制备出高韧性、耐高温的复杂轮廓结构件,这种结构件在氧传感器、固体氧化物燃料电池、高温发热体、陶瓷喷嘴、氮化硅球阀、微型风扇轴心、光纤插针和拉丝模具等领域已经得到大量应用。然而,正是由于石材和预烧结氧化锆陶瓷等材料具有高脆性、高硬度、低断裂韧性和低塑性等性质,使其成为典型的难加工材料。硬脆材料的复杂轮廓结构件在铣削加工过程中,会产生很大的冲击应力和摩擦力,剧烈的摩擦会导致刀具的后刀面和切削刃快速破损甚至失效。在预烧结氧化锆陶瓷等硬脆材料的加工中,传统的未涂层及单层金刚石涂层切削刀具由于耐磨损性能较差、磨损较快等原因容易在工件表面产生残余裂纹和表面损伤,在后续的使用中可能导致工件内部裂纹大面积扩展,进而增大了硬脆材料结构部件的使用风险,这就对刀具提出了更为严苛的切削性能要求<sup>[5-12]</sup>。

表面涂层技术的应用是提升刀具使用性能的重要途径之一,将超硬涂层与基底材料的优异性能相结合,可以在很大程度上提升刀具的切削性能,进而拓宽其应用范围。金刚石因具有高硬度、高弹性模量、极高的热导率、耐磨损、低热膨胀系数和稳定的表面化学性能等极其优异的材料属性,成为制作超硬刀具的理想材料<sup>[13-15]</sup>。然而,高质量的天然金刚石储量有限,而经过高温高压合成的人造金刚石大多为大颗粒,例如,目前大理石加工所使用的金刚石烧结刀具,由于不能保证刀具表面金刚石晶粒的尺寸精度,因此不适合精加工工序。金刚石电镀刀具因磨损过快,不能长时间使用。诸如此类的金刚石大

颗粒钎焊、电镀切削刀具在一定程度上限制了金刚石刀具的使用范围和刀具在难加工材料中的切削性能的提升,无法满足硬脆材料结构件的高速化、精密化和柔性化等高技术的应用要求。化学气相沉积(chemical vapor deposition,CVD)金刚石涂层工艺的出现使金刚石材料在诸多高新技术领域中的大规模应用成为可能。自 20 世纪 80 年代以来,CVD 金刚石涂层的制备技术已成为研究热点,在众多 CVD 金刚石涂层的制备工艺方法中,热丝化学气相沉积(hot filament CVD,HFCVD)技术具有设备结构简单、操作简便、运行成本低和可以在大面积范围内沉积形成复杂形状的涂层等优点,正逐渐应用于金刚石涂层工具和涂层元器件的产业化制备<sup>[16-22]</sup>。硬质合金材料因其具有较高的硬度、结构韧性和耐磨性而成为广泛使用的刀具基底材料,在硬脆材料的精密、超精密切削领域具有广阔的应用前景,在硬质合金表面 CVD 金刚石涂层可以在很大程度上提升刀具的切削性能。然而,现有的金刚石涂层刀具的表面涂层所存在的在冲击应力下的膜-基结合性能不稳定和内部结构韧性差等问题严重制约了刀具在硬脆材料切削中的使用性能的进一步提升。

《中国制造 2025》指出,以特种金属功能材料、高性能结构材料、功能性高分子材料、特种无机非金属材料 and 先进复合材料为发展重点,加快研发先进熔炼、凝固成形、气相沉积、型材加工、高效合成等新材料制备关键技术和装备<sup>[23]</sup>。金刚石涂层刀具的制备技术作为超硬涂层工具气相沉积制备关键技术的代表性研究对象之一,在难加工材料精密切削领域扮演着举足轻重的角色。

大量研究发现,在金刚石涂层刀具的实际应用中,刀具表面的涂层与工件材料组成了一个复杂的摩擦学系统,涂层自身的界面结合性能、内部结构韧性和摩擦学性能直接影响着刀具的使用寿命和工件的表面加工质量<sup>[24-28]</sup>。在硬脆材料的精密切削中,金刚石涂层刀具对材料的去除形式主要为脆性断裂模式,整个过程中刀具材料的切削性能直接影响着工件材料表面初始裂纹的形成与扩展、材料的剥落及破碎状态。此外,在切削过程中,刀具的切削刃周围会受到循环冲击应力的作用,其表面的摩擦学性能决定了工件表面加工的完整性和光洁度。传统的单层微米或纳米金刚石涂层刀具由于在界面结合性能、内部结构韧性和表面摩擦学性能方面存在各自的内部结构缺陷,在实际的切削加工中不能长时间承受此种循环变化下的冲击载荷,从而导致涂层刀具的使用寿命不长,且在刀具使用周期内表面加工质量变动较大,刀具切削性能的稳定性有待提升。因此,针对硬脆材料精加工领域研制一种切削性能较高的 CVD 金刚石涂层刀具已成为硬脆材料精密切削用超硬刀具制备领域亟待解决的问题。

目前,针对 CVD 金刚石涂层刀具制备的工艺研究,存在两方面的问题:一方面,以不同厚度和基底材料的单层微米金刚石和纳米金刚石的制备为主,部分学者在单层金刚石涂层的厚度优化方面进行了研究<sup>[29-33]</sup>,但不同结构的单层金刚石涂层性能各有利弊,并不能完全满足高技术产品在高速精密铣削中对刀具材料性能的要求<sup>[34-38]</sup>;另一方面,以在基底和涂层界面处添加四甲基硅烷(tetramethylsilane,TMS)等过渡层为主,这种过渡层目前仍然处于小批量的实验研究中,而且其工艺复杂程度较高,过渡层的添加对金刚石晶粒生长的影响机制尚在讨论中<sup>[39-46]</sup>。多层金刚石结构涂层刀具可在很大程度上提升刀具的结构韧性和界面结合性能,进而抑制涂层在冲击应力中的裂纹扩展<sup>[47-48]</sup>。当前,针对多层金刚石涂层金刚石内部结构的多层调制生长机制对其力学性能、摩擦学性

能和切削性能的系统性研究尚不充分。

涂层的内部结构与表面形貌直接影响着涂层刀具的切削性能,以单层、多层金刚石涂层刀具的结构特性、力学性能和摩擦学性能为参考因素,利用典型硬脆材料的精密切削实验研究金刚石涂层刀具的切削性能,探究涂层在硬脆材料铣削加工中的失效机理,为高性能金刚石涂层刀具的制备与产业化应用提供重要的理论支撑和实验参考。

## 1.2 金刚石晶体的结构及制备工艺

### 1.2.1 金刚石晶体的结构及性能

金刚石是碳的一种同素异形体,如图 1-1 所示,其结构由 2 个面心立方晶格套叠而成,每个碳原子的 4 个价电子以  $sp^3$  杂化的方式形成 4 个完全等同的原子轨道,与最相邻的 4 个碳原子形成共价键。这 4 个共价键之间的角度都相等,约为  $109.5^\circ$ ,是原子排列最为紧密的物质<sup>[49]</sup>。金刚石的这种内部结构决定了其具有很多极其优异的理化性能:较高的硬度、断裂强度和弹性模量,极低的摩擦系数和热膨胀系数<sup>[50-52]</sup>。利用 CVD 方法制备的金刚石薄膜中的金刚石颗粒与天然金刚石有着相同的晶体结构,虽然其物理和化学性能不及天然金刚石,但在很大程度上继承了面心立方结构的优异性能。表 1-1 给出了 CVD 金刚石涂层与其他工程材料的各项材料学性能比较<sup>[53-57]</sup>,金刚石涂层的最高硬度是钨钴硬质合金的 4~5 倍,是氮化硅工程陶瓷的 5 倍左右。

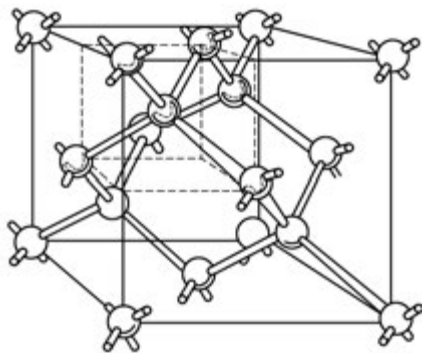


图 1-1 金刚石晶体的结构

表 1-1 CVD 金刚石涂层与其他工程材料的主要性能指标比较

性能指标	CVD 金刚石涂层	天然金刚石	钨钴硬质合金	氮化硅工程陶瓷
硬度/GPa	50~100	100	23	18~20
弹性模量/GPa	1050	1200	400~600	120~320
断裂韧性/(MPa·m <sup>1/2</sup> )	1~8	约 3.4	0.6~0.8	0.15~1.2
热膨胀系数/(10 <sup>-6</sup> ·K <sup>-1</sup> )	约 3.7	1.2~4.5	约 5.4	约 3.9

### 1.2.2 金刚石涂层的制备工艺

一般情况下,CVD 金刚石涂层的制备是在温度  $700\sim 1200^{\circ}\text{C}$ ,气压低于  $1\text{ atm}$ ( $1\text{ atm}=1.01325\times 10^5\text{ Pa}$ ,下同),氢气( $\text{H}_2$ )和甲烷( $\text{CH}_4$ )等含有碳源的气体中进行<sup>[58-59]</sup>。图 1-2 所示为 CVD 金刚石涂层的沉积理论模型。CVD 金刚石涂层的沉积过程可以分为三步:第一步是气体激发,反应气体在高温、电场或等离子体的作用下分解为具有化学活性的碳源基团,其中氢气被分解为原子氢,甲烷被分解为甲基等碳源基团;第二步是气相沉积产物在基底材料表面流动,流动过程中分解出的气相基团发生气相化学反应;第三步是具有活性的化学基团在基底表面的吸附、脱附、迁移、反应和金刚石涂层的生成。

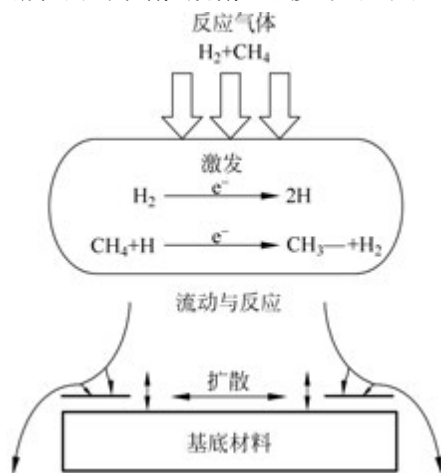


图 1-2 CVD 金刚石涂层的沉积模型

金刚石涂层的主要制备方法分为高温高压法和低压气相沉积法。高温高压法以石墨作为主要反应原料,在  $2000\text{ K}$  以上的高温高压下以金属材料作为催化剂合成金刚石,但这种方法沉积的金刚石表面性能较差。20 世纪 70 年代初,苏联学者 Deryagin 等首次利用低压气相沉积法制备了金刚石涂层<sup>[60]</sup>。30 多年来,低压气相沉积金刚石涂层工艺取得了长足的发展。目前,已知的金刚石涂层化学气相沉积制备方法有十几种,其中较常用的方法包括:热丝化学气相沉积法、微波等离子体化学气相沉积法、直流电弧等离子体喷射化学气相沉积法、热阴极等离子体化学气相沉积法和激光诱导等离子体化学气相沉积法等。在上述的金刚石涂层化学气相沉积制备方法中,热丝化学气相沉积法、微波等离子体化学气相沉积法和直流电弧等离子体喷射化学气相沉积法是目前工业上应用最为广泛的方法<sup>[61-62]</sup>。

#### 1. 热丝化学气相沉积法

热丝化学气相沉积涂层技术较为成熟,在工业领域中主要利用该方法制备金刚石涂层工具<sup>[63-65]</sup>。沉积涂层时,利用熔点较高的金属丝作为导线形成高的温度场,常用的有钽丝、钨丝和铈丝。在热丝的两端通入一定的电流,热丝因有电阻而发热,在金刚

石涂层的沉积中,热丝自身的温度主要在  $2200\sim 2600^{\circ}\text{C}$ ,这种沉积方法能够在轮廓较为复杂的工具表面制备出均匀的金金刚石涂层。热丝化学气相沉积法作为最早的金金刚石涂层制备方法之一,具有设备结构简单、沉积速率高等优点。热丝化学气相沉积设备的主要工作原理为:将碳氢化合物气体和氢气通入设备腔体,混合气体通过热丝高温区时,在热丝的附近分解成多种碳氢化合物基团和氢原子;碳氢基团如  $\text{CH}_3$ —、 $\text{C}_2\text{H}_2$ —、 $\text{C}_2\text{H}_4$ —等,在一定的温度下沉积在基底表面,这些基团发生吸附和解吸附反应的过程主要源于原子氢的作用,在基底表面形核和生长,最终沉积出一层金金刚石薄膜<sup>[66]</sup>。与其他化学气相沉积法中的金金刚石生长方法不同的是,在热丝化学气相沉积中,碳氢化合物气体分解、产生原子氢、衬底温度和衬底表面的全部能量均来自热丝<sup>[67]</sup>。

## 2. 微波等离子体化学气相沉积法

微波等离子体化学气相沉积法(microwave plasma CVD, MPCVD)是利用微波高频电场振荡的方法激励含碳反应气体,最终形成碳活性粒子反应基元的等离子体凝聚生长金金刚石涂层。沉积过程中,利用等离子体的热辐射作用对基底加热,达到基底制造金金刚石的要求温度。通常等离子体产生过饱和浓度的原子氢可以有效刻蚀  $\text{sp}^2$  非金金刚石相,提高金金刚石涂层的质量<sup>[68-70]</sup>。

微波等离子体化学气相沉积法沉积的金金刚石质量较高,该种工艺中反应气体的离化率较高,因而氢原子的浓度高,可以在较高的反应压力下保持等离子体的性能稳定。该方法的缺点是沉积速率低、工艺系统组成复杂、制造成本高。

## 3. 直流电弧等离子体喷射化学气相沉积法

直流电弧等离子体喷射化学气相沉积法(direct current arc-jet plasma CVD, DCPCVD)是一种金金刚石涂层高速沉积方法,其沉积速率可保持在  $930\ \mu\text{m}/\text{h}$  左右。该沉积工艺通常选用氢气、氩气和甲烷等混合气体作为反应气体<sup>[71]</sup>。在反应过程中,甲烷和氢气及其余气体通过电极放电区域,经过离化生成的射流加速冲击基底,而后在基底表面生长金金刚石。此种方法沉积速率大,但气体的利用率低,反应气体消耗量高和沉积成本高,在高速成膜过程中涂层残余应力大,表面粗糙度高,金金刚石涂层生长质量低<sup>[72]</sup>。

对比分析常用的金金刚石涂层化学气相沉积法可知,HFCVD 工艺作为出现最早的气相沉积法,其工艺成熟度较高,金金刚石晶粒的生长形貌易控制,生长速率较高且适用于大面积的生长,操作稳定且易于操作,因此,HFCVD 法已成为高质量的金金刚石涂层产业化应用中制备金金刚石涂层的首选。

# 1.3 国内外研究现状

## 1.3.1 单层金金刚石涂层的制备研究现状

在利用 HFCVD 法制备金金刚石涂层的工艺过程中,影响金金刚石涂层生长质量和晶粒

生长特性的因素很多,其中,金刚石晶粒形核过程<sup>[73]</sup>、反应气体的组成<sup>[74-75]</sup>、基底材料的组成<sup>[76-77]</sup>及温场分布<sup>[78]</sup>等工艺参数均对金刚石的沉积有较大影响,因此改变沉积工艺参数可在沉积过程中获得不同结构的金刚石涂层。按晶粒尺寸划分,金刚石涂层可以分为微米金刚石(microcrystalline diamond, MCD, 晶粒尺寸大于 0.5  $\mu\text{m}$ )涂层、纳米金刚石(nanocrystalline diamond, NCD, 晶粒尺寸在 50~100 nm)<sup>[79]</sup>涂层和超纳米金刚石(ultra nanocrystalline diamond, UNCD, 晶粒尺寸小于 10 nm)涂层<sup>[80]</sup>。其中,微米金刚石涂层的硬度接近天然金刚石的硬度,脆性较大,表面晶粒取向通常为(111)或者(100),表面粗糙度较大;纳米金刚石涂层和超纳米金刚石涂层以微小晶粒堆积团簇的方式生长,其晶界密集。

在众多影响金刚石涂层结构特征和使用性能的工艺参数中,反应气体中的碳源浓度、腔室内的反应压力和热丝温场特性是最为重要的影响因素<sup>[81-83]</sup>,如图 1-3 所示,通过变化碳源浓度和腔室压力可以实现金刚石晶粒尺寸由纳米级向微米级的调控。国外, K. Fabisiak 等研究了反应气体的压力和成分对 CVD 金刚石涂层生长质量和晶粒尺寸的影响特性,发现金刚石的晶粒尺寸随沉积腔室压力的增大而减小,随碳源浓度的增大而增大。非金刚石相的掺量也随沉积压力和甲烷浓度的增加而增加<sup>[84]</sup>。E. Salgueiredo 等以气体成分、腔室气压、气体流量和衬底温度为影响因子,对 HFCVD 法沉积金刚石涂层的工艺参数进行了优化研究,对不同参数条件下制备的金刚石涂层的晶粒尺寸、残余应力、结构质量和生长速率进行了表征与分析<sup>[85]</sup>。E. M. A. Fuentes 等通过控制反应气体中氢气与甲烷的比例,调整金刚石涂层的晶粒尺寸和表面粗糙度,在高甲烷浓度下获得了微米金刚石涂层,在含氩气和高甲烷浓度下获得了超细晶粒纳米金刚石涂层<sup>[86]</sup>。R. Dumpala 等利用划痕实验对沉积的微米金刚石涂层和纳米金刚石涂层进行了划痕实验,结合划痕实验中的声发射信号和切向力信号变化特征(见图 1-4)对涂层的界面结合力进行了系统研究<sup>[87]</sup>。M. Wiora 等基于纳米压痕实验测量了不同晶粒尺寸下的纳米金刚石涂层力学性能,结果显示纳米金刚石涂层的显微硬度在 10~100 GPa 范围内,其耐磨性极高<sup>[88]</sup>。此外,部分研究还表明,纳米金刚石涂层的摩擦性能优于由微米金刚石晶粒组成的金刚石涂层,然而纳米涂层中微细颗粒在薄膜和基底界面处的结合力较低,在对磨过程中涂层能够承受的剪切应力极限较低<sup>[89-98]</sup>,因此,单层纳米金刚石涂层在实际工程中的应用受到了一定的限制。

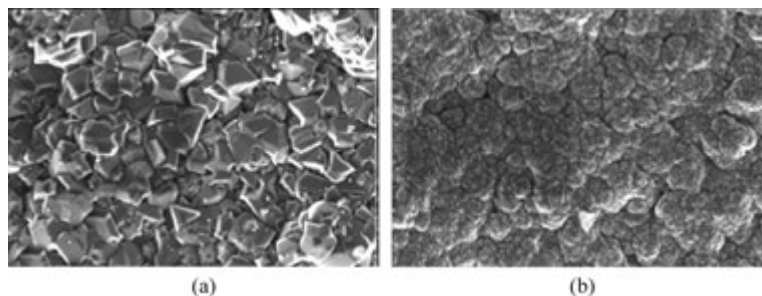


图 1-3 不同碳源浓度和腔室压力下生长的金刚石涂层  
(a) 微米金刚石涂层; (b) 纳米金刚石涂层

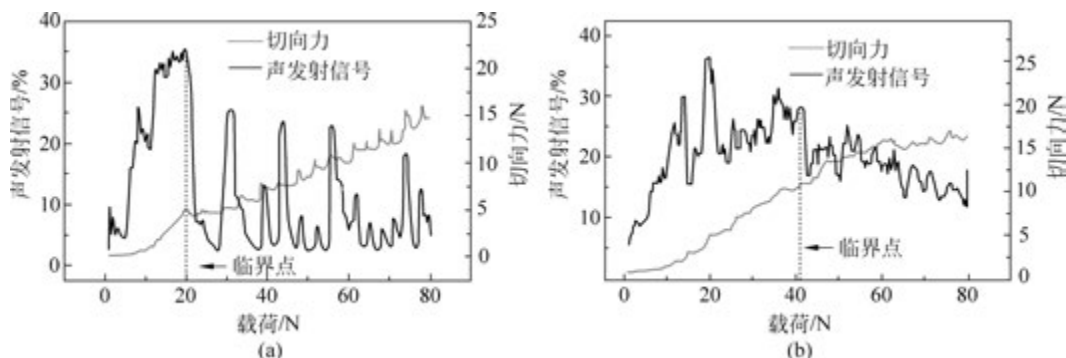


图 1-4 CVD 金刚石涂层划痕实验中的临界失效载荷曲线

(a) 微米金刚石涂层；(b) 纳米金刚石涂层

国内,上海交通大学张建国、孙方宏等运用正交实验法,研究了基底温度、腔室反应压力和碳源浓度等沉积参数对金刚石涂层的性能影响,研究表明,温度降低使金刚石内部结构由锥形结构向团簇结构转变,金刚石涂层的晶粒生长速率受反应压力和碳源浓度的综合影响<sup>[99-100]</sup>。中国矿业大学邓福铭等利用化学气相沉积工艺,在硬质合金基底上制备出了微米、纳米金刚石涂层,并采用扫描电子显微镜、X 射线衍射仪和拉曼光谱仪等测试手段对涂层表面形貌进行了表征研究,结果显示,微米金刚石涂层的结晶质量较高,晶面取向以(111)和(220)为主,纳米金刚石涂层表面择优取向并不明显<sup>[101-102]</sup>。南京航空航天大学卢文壮等利用纳米压痕设备研究了不同碳源浓度下生长的 CVD 金刚石涂层的硬度、弹性模量等材料力学性能<sup>[103-105]</sup>。邓彪等研究了涂层微观结构对金刚石涂层硬质合金结合性能的影响特征,甲烷浓度的增大有利于纳米金刚石的生长;当金刚石涂层的晶粒尺寸从几百纳米降至几十纳米时,涂层的  $sp^2$  相增多,金刚石晶粒的形核密度也随之增大<sup>[106]</sup>。

由上述的单层金刚石涂层研究现状可知,通过调节沉积参数制备的不同晶粒尺寸下的单层金刚石涂层在界面结合性能、残余应力、内部结构韧性和表面粗糙度等方面各有优劣,因此,在实际切削过程中,其涂层的使用性能会面临极大的考验。

### 1.3.2 多层金刚石涂层的制备研究现状

为了弥补单层金刚石涂层的缺陷与不足,相关文献报道,近年来,国内外研究人员针对微米/纳米多层金刚石涂层的制备工艺研究已经取得了部分相关研究成果。在金刚石涂层制备领域中,微米/纳米多层金刚石内部结构被公认为是一种有效提升金刚石涂层各项性能的手段。S. A. Catledge 等通过调节氢气、甲烷和氮气的气体浓度比,在硬质合金基底上制备并检测了多层金刚石涂层,发现高金刚石  $sp^3$  相含量的微米金刚石可以在光滑的纳米金刚石层上形核,而表面粗糙度较低的纳米晶层又可以在相对粗糙的微米晶层表面生长<sup>[107]</sup>。S. Takeuchi 及其研究团队在添加偏压电流的条件下制备了微米/纳米多层金刚石涂层,多层结构形成的高界面数量可有效防止裂纹的扩展。为了证实这种效

应,对多层金刚石涂层的力学特性进行了研究,研究表明,多层金刚石薄膜的抗弯强度比常规金刚石薄膜的抗弯强度高约 30%,然而其多层结构的交替均匀性和晶粒生长质量有待提升<sup>[108]</sup>。E. Salgueiredo 等在碳化硅衬底上制备了单层、双层和多层金刚石复合涂层,并研究了涂层的侵蚀磨损行为<sup>[109]</sup>。R. Dumpala 及其研究团队在硬质合金基底上制备了双层微米-纳米金刚石涂层(见图 1-5),并比较了双层金刚石涂层与单层涂层的微观结构特征。测试结果表明,双层涂层的平均纳米硬度约为 96 GPa,在与氮化硅( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )陶瓷的对磨中,其平均摩擦系数为 0.06<sup>[110]</sup>。S. Miyake 等通过在 3~30 nm 厚度范围内调整 6 种不同厚度的制备周期,制备出了厚度为 250 nm 的 TiC/DLC 多层涂层体系,并利用纳米压痕测试结果发现当调制周期为 6 nm 时,涂层硬度最大为 24 GPa,在金刚石划痕测试和摩擦磨损实验中,发现在 12 nm 调制周期下制备的涂层结合性和摩擦学性能最优<sup>[111]</sup>。

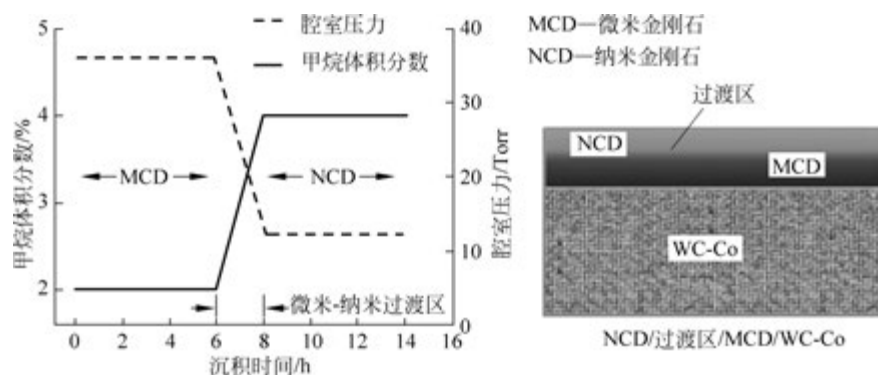


图 1-5 双层 CVD 金刚石涂层形貌

国内,马占吉和赵栋才采用脉冲电弧离子镀技术制备了多层类金刚石涂层,并对涂层的残余应力、显微硬度、结合力性能及摩擦系数进行了研究<sup>[112]</sup>。孙方宏等利用 HFCVD 法在氮化硅表面制备了单层/多层微米、亚微米金刚石涂层,并利用扫描电子显微镜、X 射线衍射、拉曼光谱仪和摩擦磨损实验对金刚石涂层进行了表征,发现多层金刚石涂层的使用性能明显优于单层金刚石涂层<sup>[113-115]</sup>。刘聪等基于 MPCVD 法,研究了氧气流量对微米/纳米双层金刚石薄膜性能的影响机制<sup>[116]</sup>。陈义、汪建华等以氢气、甲烷和二氧化碳为混合气源,在硅基底上分别沉积了单层微米、纳米及三层微米/纳米交替金刚石涂层,并研究了不同结构金刚石涂层样品的质量、表面形貌、晶粒尺寸等信息,结果表明,三层结构的引入可以明显降低表面粗糙度和提升表面晶粒生长的均匀性<sup>[117]</sup>。兰昊等采用氢气、甲烷和氩气的混合气体制备了单层微米自支撑涂层和多层金刚石自支撑涂层<sup>[118]</sup>。张林等在硬质合金刀片上沉积了多层金刚石涂层,其多层调制层数为 3~7 层,并通过金刚石压痕实验对不同结构的金刚石涂层进行了界面结合性能的表征<sup>[119]</sup>。此外,大部分学者在类金刚石涂层的研究中成功制备了多层类金刚石涂层,结果均表明,多层结构的加入在很大程度上提升了涂层的整体使用性能<sup>[120-131]</sup>。



### 1.3.3 金刚石涂层刀具的制备及应用研究现状

CVD 金刚石涂层刀具是采用化学气相沉积法在硬度高、材料韧性强的含钴类硬质合金基底上沉积一层厚度均匀的金金刚石涂层制成的。这种硬质涂层刀具在实际的切削加工中兼备了金刚石涂层与硬质合金基底材料的优异性能。经过几十年的发展,CVD 金刚石涂层刀具(见图 1-6)在精密切削领域已经得到初步应用,高速切削用金刚石涂层刀具工艺在国外已经日趋成熟,其 HFCVD 设备在欧美工业发达国家已经实现商业化<sup>[132-135]</sup>,其中包括  $sp^3$  Diamond Technologie 公司研发的 Model 700 系列和 Diamond Film Tool 公司开发的高性能金刚石涂层设备等。目前,赛利涂层技术有限公司开发的最新大功率的 HFCVD 设备的额定功率为 90 kW,已经实现了三腔室独立沉积,可以在 80 余种硬质合金基底上制备金刚石涂层工具。

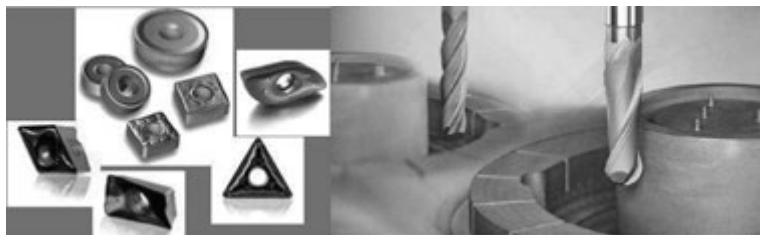


图 1-6 CVD 金刚石涂层刀具

近年来,国内外研究人员针对金刚石涂层刀具在精密切削领域的开发和应用做了大量的实验研究。美国 Diamond Film Tool 公司已经成功将金刚石涂层刀具应用到 F-35 联合战斗机机翼及其部件的精密加工中,金刚石涂层能够很好地保护切削刃的完整性,相较于未涂层的硬质合金刀具的寿命提高了 10 倍。J. Gäbler 和 S. Pleger 研究了 CVD 金刚石涂层刀具在超精密切削中的切削性能,结果表明,金刚石涂层刀具在切削玻璃工件时可以获得非常高的工件加工质量,其表面粗糙度数值可达  $5\text{ nm}$ <sup>[136]</sup>。E. Uhlmann 等利用制备的 CVD 金刚石涂层刀具切削了两种铝硅合金,分析了金刚石涂层内部残余应力对刀具使用寿命的影响,并研究了刀具在不同参数条件下的耐磨性能<sup>[137]</sup>。H. Gomez 等研究了不同表面预处理技术和添加中间过渡层对高硅铝合金干式加工用 CVD 金刚石涂层刀具切削性能的影响。实验结果表明,化学腐蚀方法在提高金刚石涂层附着力方面的效果优于 CrN/Cr 中间层。该工作为 CVD 金刚石涂层硬质合金刀具的结构设计和工艺优化提供了新的思路<sup>[138]</sup>。F. A. Almeida 制备了 CVD 金刚石涂层硬质合金钻头,并利用涂层刀具对预烧结硬质合金进行了钻削实验,与未涂层刀具相比,涂层刀具的切削效率非常高且在相同的切削条件下,其磨损较为轻微<sup>[139]</sup>。R. Dumpala 等研究了三种不同涂层结构体系的金刚石涂层刀具在复合金属材料精密切削中的切削性能和磨损机理,实验结果显示,金刚石涂层刀具的优异磨损性能在刀具磨损测试中得到了明显的展现。双层梯度复合金刚石涂层刀具和单层微米金刚石涂层刀具的加工性能优于双层复合金刚石涂层刀具<sup>[140]</sup>。G. Skordaris 等利用不同内部结构的多层金刚石涂层刀

具进行了金属铣削加工实验,研究了刀具的切削性能,阐述了基于涂层结构和温度场的刀具楔区磨损机理<sup>[141]</sup>。

国内,中国科学院金属研究所王宜豹、黄楠等采用 HFCVD 法在钨钴类硬质合金刀具表面沉积了单层金刚石涂层和微米/纳米交替多层金刚石涂层,并研究了金刚石涂层刀具和未涂层金刚石刀具在 7075 铝合金无润滑干切削条件下的切削性能。实验结果表明,在相同的切削距离下,多层金刚石涂层刀具的刃形保持完整,涂层几乎无明显脱落(见图 1-7),说明交替多层结构的引入在很大程度上提升了金刚石涂层与钨钴硬质合金基底的界面结合性能,最终提升了金刚石涂层刀具的使用性能<sup>[47,142]</sup>。沈阳建筑大学闫广宇等利用制备的多层金刚石涂层刀具进行了天然石材的精密切削研究,发现涂层刀具的寿命是未涂层刀具的 3~5 倍<sup>[143-144]</sup>。陈乃超、孙方宏利用场发射扫描电子显微镜(FE-SEM)和拉曼光谱仪对单层、多层金刚石涂层刀具进行表征研究,并利用涂层刀具和未涂层刀具对铝硅合金进行了高速切削实验,分析了刀具的使用性能。结果显示,在实验测试的样品中,微米/纳米金刚石交替涂层刀片表现出了极低的磨损量<sup>[145]</sup>。王成川等利用偏置强化 HFCVD 方法,在钨钴硬质合金衬底上沉积了单层、双层和多层金刚石涂层刀具,利用所制备的刀具进行了切削实验研究,对比分析了不同表面涂层结构的金刚石刀具在氧化锆陶瓷精密切削中的使用性能。铣削加工实验结果表明,由于硬质工件的研磨作用,单层金刚石涂层铣刀的刀具寿命较低,双层和多层金刚石涂层刀具的使用寿命都有了一定的提高,随着切削的进行,纳米金刚石涂层表面出现了大面积的涂层脱落,

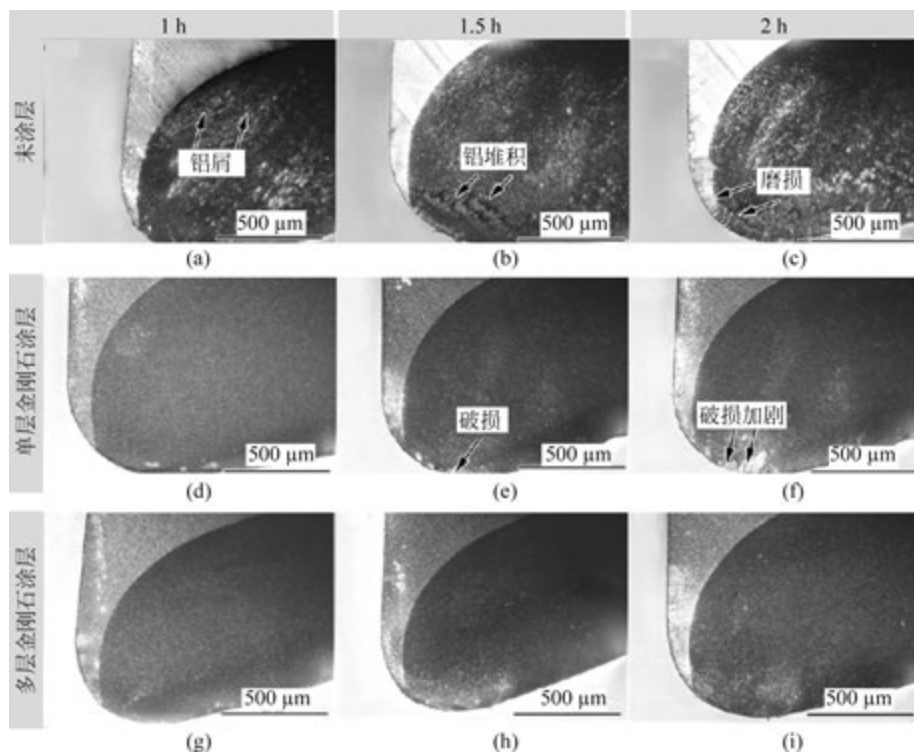


图 1-7 不同种类的单层、多层金刚石涂层刀具切削后的表面磨损形貌