

# 金刚石刀具的正确使用

淮阴工学院 (江苏 214031) 叶伟昌

戚墅堰机车车辆工艺研究所 (江苏 213100) 叶毅

金刚石刀具是指用天然单晶金刚石 (ND) 及性能与之相近的人造金刚石 (PCD) 作成切削部分的刀具。用金刚石刀具加工铜、铝等有色金属和非金属耐磨材料时特别有效, 其切削速度可比硬质合金高一个数量级 (例如铣削铝合金的切削速度为  $3000 \sim 4000 \text{ m/min}$ , 高的甚至可达  $7000 \text{ m/min}$ ), 刀具寿命比硬质合金高几十、甚至几百倍。金刚石刀具过去主要用于精加工, 近十几年来由于改进了人造金刚石的生产工艺, 控制了原料纯度和晶粒尺寸, 采用了复合材料和热压工艺等, 应用范围不断扩大, 除适合于一般的精加工和半精加工外, 还可用于粗加工。金刚石刀具的硬度极高、耐磨性好、刃口锋利、刃部表面粗糙度值小、摩擦因数低、抗粘结性好和热导率高, 切削时不易粘刀及产生积屑瘤, 加工表面质量好。加工有色金属时, 表面粗糙度值可达  $R_z = 0.1 \sim 0.05 \mu\text{m}$ , 加工精度可达 IT6~IT5, 能有效地加工非铁金属材料和非金属材料, 如铜、铝等有色金属及其

合金、陶瓷、未烧结的硬质合金、各种纤维和颗粒加强的复合材料、塑料、橡胶、石墨、玻璃和各种耐磨木材 (尤其是实心木和胶合板、MDF 等复合材料)。但金刚石刀具的韧性差, 热稳定性低, 与铁族元素接触时有化学反应, 在  $700 \sim 800^\circ\text{C}$  时将碳化 (即石墨化), 一般不适于加工钢铁材料。

## 1. 金刚石刀具的类型

目前生产上常用的金刚石刀具具有四类: 人造聚晶金刚石 (PCD) 刀具、人造聚晶金刚石复合片 (PCD/CC) 刀具、金刚石材料涂层刀具以及电镀金刚石刀具。其中, 以前两类刀具使用最多。它们通常是先制成刀片, 然后采用粘接、钎焊或机夹方式固定在刀柄或刀体上使用。金刚石刀具可用于制造车刀、镗刀、铣刀、钻头、铰刀、成形刀和切齿刀等刀具。

(1) PCD 刀具 PCD 又称金刚石烧结体, 它是在高温、高压下, 通过钴等金属结合剂将许多人造金刚石的

展, 现已解决了涂层与基体材料结合强度低的技术难题。涂层刀具分两大类: 一类是“硬”涂层刀具, 如 TiN、TiC 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  等涂层刀具。这类刀具表面硬度高, 耐磨性好。其中 TiC 涂层刀具抗后刀面磨损的能力特别强, 而 TiN 涂层刀具则有较高的抗“月牙洼”磨损能力。另一类是“软”涂层刀具, 如:  $\text{MoS}_2$ 、WS 等涂层刀具。这类涂层刀具也称为“自润滑刀具”, 它与工件材料的摩擦系数很低, 只有 0.01 左右, 能有效减少切削力和降低切削温度。

(3) 刀具几何形状设计 干切削刀具通常以月牙洼磨损为主要失效原因, 这是因为加工中没有切削液, 刀具和切屑接触区域的温度升高所致。因此, 通常应使刀具有大的前角和刃倾角, 但前角增大后, 刀刃强度会受影响, 此时应配以适宜的负倒棱或前刀面加强单元, 这样使刀尖和刃口会有足够体积的材料和较合理的方式承受切削热和切削力, 同时减轻了冲击和月牙洼扩展对刀

具的不利影响, 使刀尖和刃口可在较长的切削时间里保持足够的结构强度。热管刀具是一种自冷却刀具, 故无需再从外部浇注切削液, 尤其适合于在数控机床、加工中心和自动生产线上应用。

## 6. 总结和展望

追求生态效益和经济效益是推动干切削技术发展的主要动力。近年来, 随着超硬刀具材料, 特别是刀具涂层材料的发展, 刀具几何形状的改进和微量润滑材料的应用, 以及适合干切削机床等相应配套设备的开发, 有力地推动了干切削技术的迅速发展。干切削技术经过多年的开发和实验, 目前已进入了实用化阶段, 当今相当多的切削加工工序已完全可以用干式或通过微量润滑来解决。随着干切削工艺过程可靠性的不断提高, 干式切削正在逐步进入机械加工业, 特别是愈来愈多地进入汽车工业等大批量生产领域。

(收稿日期: 20070908)

单晶粉聚晶成的多晶体材料。虽其硬度稍低于 ND, 但它是随机取向的金刚石晶粒的聚合, 属各向同性, 用作切削刀具时可以任意取向刃磨。在切削时, 切削刃对意外损坏不很敏感, 抗磨损能力也较强。加工时可采用很高的切削速度和较大的背吃刀量, 使用寿命一般高于 WC 基硬质合金刀具 10~500 倍, 而且 PCD 原料来源丰富, 其价格远低于 ND 刀具, 已成为传统 WC 基硬质合金刀具的高性能替代品。PCD 的性能与烧结聚晶合成的金刚石晶粒尺寸大小有关, 晶粒尺寸越大, 耐磨性越好, 刀具寿命越高, 但切削刃较粗糙, 刃口质量差。

2) 聚晶金刚石复合片 (PCD/CC) 刀具 它是以硬质合金为基底, 在其表面烧结或压制一层 0.5~1mm 厚的 PCD 而组成金刚石复合片 (PCD/CC)。这种复合片的抗弯强度与硬质合金基本一致, 而工作表面的硬度接近整体 PCD, 且其可焊性好, 重磨容易, 成本低, 故应用广泛。例如美国通用电器 (GE) 公司生产的 Compax 刀片、英国 De Beers 公司生产的 Syndite 刀片、日本住友电工公司的 DA 刀片以及我国生产的 FJ 和 JRS 型等系列刀片都是 PCD 和硬质合金的复合片。表 1 中列出了几种国产金刚石复合片的牌号、性能与适用范围。

表 1 国产金刚石复合片的牌号与性能

牌号	硬度 (HV)	抗弯强度 $\sigma_{bb}$ / MPa	热稳定性 / °C	适用范围
FJ	$\geq 7000$	$\geq 1500$	$< 800$	适于加工各种非铁金属: 铜、铝、镁等及其合金; 各种非金属材料: 工程塑料、玻璃钢、石墨、陶瓷等
JRS-F	7200	—	950	
JF025 JF2R	10 000	—	800	

3) 金刚石材料涂层刀具 由于金刚石材料的价格较贵, 且其可加工性差, 难以制成几何形状复杂的刀具。为了扩大其应用范围, 现已开发出价格相对较低的金刚石材料涂层刀具。它是利用 CVD (化学气相沉积) 法, 在硬质合金基体 (常用 K 类合金) 上沉积一层厚度小于  $50\mu\text{m}$  (通常为  $10\sim 30\mu\text{m}$ ), 由多晶组成的膜状金刚石而成。因基体易于制成复杂形状, 故适用于几何形状复杂的刀具, 如丝锥、钻头、立铣刀和带断屑槽可转位刀片等。国际工具市场上已有金刚石薄膜涂层 (简称 CD) 刀具的产品 (如瑞典 Sandvik 公司的 CD1810 和美国 Kennametal 公司的 KCD25), 用于有色金属及非金属材料的高速精密加工, 刀具寿命比未涂层的硬质合金刀

具提高近十倍, 有些甚至数十倍。但 CD 刀具不适于加工金属基一类复合材料, 因为复合材料中的硬质颗粒在很短时间内就会将刀具表面一层涂层磨穿。所以, 尽管 CD 刀具的价格比同类 PCD 刀具要低, 由于金刚石薄膜与基体材料间的黏着力较小, 限制了它的广泛应用。

除上述薄膜涂层 (CD) 刀具外, 还有 CVD 金刚石厚膜 (TFD) 刀具。TFD 是沉积厚度达 1 mm 以上、甚至几毫米 (De Beers 公司沉积厚度可达 5 mm) 的无衬底金刚石厚膜, 根据需要再将厚膜切割成一定形状的小块, 然后钎焊到所要求的基体材料上制成刀具使用。TFD 有很好的综合性能, 它兼有天然金刚石和人造聚晶金刚石的优点, 与基底结合牢固, 便于多次重磨, 故有良好的应用价值和发展前景。

TFD 与 PCD 相比较, 因 PCD 内含有钴等金属结合剂, 但钴会降低 PCD 硬度, 对腐蚀敏感 (特别是在加工塑料时), 钴在高温下会加速金刚石向石墨转变, 故 PCD 适于粗加工和要求刀具具有较高断裂韧度的场合。而 TFD 为纯金刚石材料, 不添加任何复合材料, 因此具有比 PCD 更高的硬度、热导率、致密性、刃口锋利性、耐磨性 (为 PCD 的 1~4 倍)、耐高温性、化学稳定性以及更小的摩擦因数, 故可采用比 PCD 刀具更高的切削速度, 韧性则稍低于 PCD, 故多用于高速精加工和半精加工等场合。国外已有 TFD 的商品 (如 De Beers 公司的 DIAFILM 品牌)。

4) 电镀金刚石刀具 电镀金刚石刀具是用电镀埋砂的方法, 以金属镍、铜和钴等作结合剂, 把大量金刚石的细小颗粒包镶在一定尺寸和几何形状的刀具基体表面上, 再经过适当修磨而制成。此法制造工艺简单, 只需要电镀设备即可。例如, 郑州磨料磨具磨削研究所和山东蓬莱金刚石工具厂等生产的电镀金刚石铰刀就属于这一类刀具。使用表明, 用其可成功地加工尺寸精度和几何形状精度都小于  $2\mu\text{m}$ 、表面粗糙度值  $R_a$  达  $0.4\sim 0.2\mu\text{m}$  的孔。且加工出的孔尺寸分散度小, 刀具使用寿命长 (平均每把刀具可加工 1~2 万个工件) 和工效高等。例如, 广泛用于液压随动系统和燃油系统精密偶件的阀孔、机械和精密仪表中各种精密孔, 目前生产上的最终工序大多用这种铰刀加工。

## 2. 刀具几何参数

由于金刚石材料的脆性较大, 为增强切削刃强度, 又能达到很小表面粗糙度值, 通常车刀前角  $\gamma_o = 0^\circ \sim$

-10°若用金刚石车刀切铝合金和铜合金时  $\gamma_o = 0^\circ \sim 20^\circ$ ，后角  $\alpha_o = 5^\circ \sim 15^\circ$ 。为了提高刀刃强度，刃口上常磨出负倒棱，倒棱宽度可取  $b_{r1} = 0.1 \sim 0.3\text{mm}$ ，倒棱上前角  $\gamma_{o1} = -6^\circ \sim -20^\circ$ ；刀尖需适当修圆，修圆半径  $r_e = 0.2 \sim 0.8\text{mm}$ 。但刀尖修圆半径和负倒棱越大，会使切削力增大，发生颤振的机会也增多。因此，当机床—夹具—刀具—工件的系统刚性不足时，尤其是在加工细长工件时，不宜采用过大的刀尖半径和负倒棱。

用PCD可转位面铣刀高速加工 ( $v_c > 700\text{m/min}$ ) 高硅铝合金，常采用正、负前角型，即背前角  $\gamma_p$  为正值、侧前角  $\gamma_f$  为负值，从而既可增强切削刃强度，且不易崩刃，能获得良好的表面质量和很高的生产率。

3. 金刚石刀具的合理使用

(1) 正确选用刀片的品种与牌号 不同品种的PCD刀片，由于其组成成分不同，切削性能有很大的差异，选用时需加以注意。目前PCD刀片不像硬质合金那样在国际上有统一的分类，各生产厂都有各自的品种与牌号，使用时需参照厂家产品样本来选择。

PCD的商品颗粒尺寸大致分为三类：即粗晶粒（晶粒的平均尺寸为  $20 \sim 50\mu\text{m}$ ）、中晶粒（ $10 \sim 20\mu\text{m}$ ）和细晶粒（ $2 \sim 10\mu\text{m}$ ）。晶粒尺寸越大，耐磨性越好，刀具寿命越高，但刃口质量差，难以制成高精度刀具。相反，细晶粒刀具，切削刃的刃口质量好，加工表面质量好。因而，目前聚晶的晶粒不断细化，并已有  $1\mu\text{m}$ 、甚至有  $0.5\mu\text{m}$  以下的细晶，需根据粗、精加工等不同工序要求，选用不同大小的晶粒。

但我国学者研究证实，聚晶体刀具在微量切削时，它具有“多点切削、单点成形”的特点，因此，只要采取一定的工艺措施，用粗晶粒（ $70 \sim 30\mu\text{m}$ ）聚晶刀具也能切出超精密的加工表面。

(2) 选取合适的切削用量 根据国际生产工程学会（CIRP）提供的资料，推荐PCD刀具的切削用量如表2。表3为上海斯米克金刚石工模具公司推荐的聚晶人造金刚石（PCD）刀具的切削用量。

4. 金刚石刀具的应用效果

金刚石刀具解决了许多生产中难以解决的加工问题，改变了传统的机械加工工艺，目前已在我国机械、冶金、矿山、汽车、拖拉机、轴承、水泵、交通、能源、精密仪器、航空航天等行业中使用，取得了显著经

济效益。例如，长春一汽集团公司用PCD刀具精镗高硅铝合金材料的活塞销孔（ $v_c = 160\text{m/min}$ ， $f = 0.08 \sim 0.10\text{mm}$ ， $a_p = 0.05\text{mm}$ ），刀具寿命达42 500件，是原来硬质合金刀具的90倍，加工表面粗糙度值由原来  $R_a = 0.8 \sim 0.4\mu\text{m}$  下降为  $R_a = 0.4 \sim 0.2\mu\text{m}$ ，每班还可减少装调刀具等辅助时间30min，分摊到每一工件上的刀具成本也比硬质合金刀具下降了85%。

表2 聚晶人造金刚石刀具的切削用量

加工方式	工件材料	切削速度 $v_c$ / $(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	进给量 $f$ / $(\text{mm} \cdot \text{r}^{-1})$	最大背吃刀量 $a_p$ / $\text{mm}$
车削及 镗削	铝合金、黄铜、青铜和铜合金	300~1000	0.05~0.5	10
	烧结硬质合金	10~30	0.1~0.2	2
	半烧结硬质合金	50~200	0.1~0.2	5
	玻璃纤维和碳纤维强化塑料	100~600	0.05~0.5	5
	半烧结陶瓷	100~600	$\leq 0.2$	2
	天然和人造石料	50~150	0.1~0.5	3
铣削及 切断	铝合金	500~3000	0.1~0.5mm	5
	黄铜、青铜和铜合金	200~1000		2
	刨花和木质纤维板，包括纤维强化塑料	2000~3000		15

表3 上海斯米克金刚石工模具公司推荐PCD刀具的切削用量

工件材料	切削速度 $v_c$ / $(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	进给量 $f$ / $(\text{mm} \cdot \text{r}^{-1})$	最大背吃刀量 $a_p$ / $\text{mm}$
铝合金	500~1000	0.1~0.2	0.1~0.5
青铜合金	200~500	0.1~0.2	0.1~0.2
巴氏合金	200~400	0.1~0.2	0.1~0.8
铜	150~500	0.05~0.15	0.1~0.5
硬质合金	10~30	0.1~0.2	0.1~0.2
胶木	200~300	0.03~0.1	0.2~0.5
含硅橡胶	100~120	0.1~0.3	0.2~1.5

使用PCD刀具的机床必须有高的刚度、大的功率和高的转速，这样才能充分发挥金刚石刀具材料的性能，取得好的经济效益。此外，机床精度要好，装夹工件的夹具和夹紧装置，必须可靠性强，以免加工时产生振动，使刀具破损。必须指出，目前生产中不少机床设备还不能满足PCD刀具的加工要求，所以它们的潜力未能得到充分发挥，今后随着数控机床（NC）和加工中心（MC）等高效设备应用的增多，必将进一步推动PCD刀具的使用。

（收稿日期：20070904）