

## 机加工和成形用高性能软、硬涂层

为了提高高速切削的抗磨能力,最初采用化学气相沉积(CVD)技术涂覆硬质涂层。渗有碳化物刀具顶尖涂覆一层 $2\sim 3\mu\text{m}$ 厚的TiC层,足可提高工具寿命100%。70年代中期发现,采用一种单一均匀的涂层并不能使工具达到最佳使用寿命;而采用多层涂层,如TiC-Ti(CN)-TiN涂层,可以显著延长工具寿命。其后在多层涂层中加上 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 层,使最佳寿命进一步提高。在CVD法中,涂膜是由气体先质形成的,因此限制某些沉积材料的应用,不过用此技术生产的涂层在高性能机加工中得到许多方面的应用。CVD法都是在 $700\sim 1000^\circ\text{C}$ 高温下进行,因而许多对温度敏感的底层材料不能使用。但是,在80年代发展的低温物理气相沉积(PVD)技术,扩大了硬质涂层技术和应用,其中包括钻头、锻造模具,冷挤压工具和铸造模具。过去PVD技术是以低压电子束汽化和阴极电弧沉积为基础的。用PVD技术可以涂覆TiN、TiCN和TiAlN涂层,工具寿命提高了几倍。选择特殊工艺涂层是十分重要的。例如在某种机加工操作中选用TiAlN涂层而不是TiN涂层,可使寿命提高250%。

近几年来除研究多成分复合氮化物、碳化物和氧化物涂层材料外,还发展类似金刚石的碳化物(DLC)材料和硫化物( $\text{MoS}_2$ )材料。在涂覆技术上,发展了一种改进型沉积技术—闭场不平衡磁控溅射离子涂敷(缩写为CFUBMS)技术。

CFUBMS法是一种高速沉积工艺。它是根据一种源材料在辉光放电等离子中产生的离子的高能轰击原理。源原子的瞬时转变,然后重新沉积在工件上,于是形成一种性能优异致密的涂层。它是一种原子化过程,可适用于许多种材料的“溅射”沉积,且可以“溅射”沉积复杂形状的零件。在光学涂层工业中,CFUBMS技术有广阔用途。

采用多种溅射源还可以使许多种不同纯金属靶形成反应合金膜。合成膜的成分可以由供给磁控枪的相对功率和输入的反应气体在整个厚度上很容易得到控制。当用不同粘接类型的沉积材料,或者采用很硬合金的氮化物涂层时,这是非常重要的。

目前发展的氮化物基涂层有TiN、TiAlN、TiCrN、TiAlVN、TiCrN、TiZrN、TiCN、TiWN、ZrN、CrN、CrZrN、AlN等等。也可以由上述涂层的组合成复合涂层,利用各种各样涂层的组合,可以达到广泛范围内控制硬度、韧性、摩擦和磨损性能。碳化物基涂层由于其硬度高( $2000\sim 3500\text{HV}$ ),热稳定性好,易于组合调配,广泛用于机加工工具上。表1为几种高性能机加工用的涂层及应用。

一般认为,下一代硬涂层将以下列三类涂层为基础:复合合金氮化物或碳化物;以类似金刚石碳(DLC)为基础的涂层;以及化合物/金属/DLC的多层涂层和超点阵组合。这三类涂层都适合于CFUBMS系统,有的已

表1 高性能机加工用涂层性能和应用

涂层	硬度 HV	摩擦系数 (比较值)	粘接临界载荷 最小	用 途
TiN	$\sim 2200$	$\sim 0.6$	$>55\text{N}$	各种工具和模具通用涂层。用途最广最有名涂层。
低温 TiN	$\sim 2200$	$\sim 0.6$	$>55\text{N}$	用于对涂层温敏感的工具,如青铜碳化物,D201 铸模、轴承钢等,涂层温度 $200\sim 300^\circ\text{C}$ 。
TiAlN	$\sim 3500$		$>50\text{N}$	较高速机加工,特别碳化物刀具,提高工作温度。加工韧性钢,如D2和铸铁比采用TiN涂层要好。
TiZrN	$\sim 3500$	$<0.6$	$>50\text{N}$	类似TiAlN涂层,硬度可达 $4000\text{HV}$ 。
ZrN	$\sim 3300$	$<0.6$	$>45\text{N}$	非常适用于机加工铝合金,比TiN有明显改善。
DLC	$\sim 2500$	$<0.15$	$>40\text{N}$	加工Al、铜和青铜用的极好的低摩擦涂层,低摩擦应用中有良好性能,如挤压模、发动机磨损零件,精密导杆,装饰黑色涂层。
$\text{MoS}_2$	很低	$<0.1$		加工铝合金有良好性能。在宇航轴承上用作干燥、自润滑膜。
TiCN	$\sim 2800$	0.6	$>50\text{N}$	韧性涂层,适合于冲模。
TaN	$\sim 2400$	0.6		比TiN更具有高温稳定性。
CRM	$\sim 2400$	0.6	$>70$	韧性,适用于铜。

(下转第46页)

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} a & b & b \\ b & a & b \\ b & b & a \end{bmatrix} = \frac{a+2b}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} + \frac{a-b}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (B1)$$

为了将式子简化, 令  $\alpha = a + 2b$ ,  $\beta = a - b$ , 则式 (B1) 可如下表示:

$$\bar{A} = [\alpha, \beta] = \alpha \bar{I}_1 + \beta \bar{I}_2 \quad (B2)$$

$$\text{这里, } \bar{I}_1 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \bar{I}_2 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}。对$$

于矩阵  $\bar{I}_1$  和  $\bar{I}_2$  可以证明有如下的性质成立:

$$\bar{I}_1 + \bar{I}_2 = \bar{I}, \bar{I}_1 \times \bar{I}_2 = \bar{I}_2 \times \bar{I}_1 = 0, \bar{I}_1 \times \bar{I}_1 = \bar{I}_1, \bar{I}_2 \times \bar{I}_2 = \bar{I}_2 \quad (B3)$$

这里,  $\bar{I}$  为单位矩阵。利用式 (B3), 可得如下的性质:

$$[1, 1] = \bar{I}, [a_1, \beta_1] \pm [a_2, \beta_2] = [a_1 \pm a_2, \beta_1 \pm \beta_2],$$

$$[a_1, \beta_1] \times [a_2, \beta_2] = [a_1 \times a_2, \beta_1 \times \beta_2], [a, \beta]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{a} \\ \frac{1}{\beta} \end{bmatrix} \quad (B4)$$

## 参考文献

1. Eshelby, J. D., Elastic Inclusion and Inhomogeneities, Progress in Solid Mechanics, 2 (1961), 89~140, North-Holland, Amsterdam

\* \* \* \* \*

(上接第 47 页)

经研制成功。

具有高硬度、高电阻率和优良介电光学性能的非晶体氢碳膜 (a-C:H) 现在被称为类金刚石碳或 DLC。对于许多机械和摩擦学应用上是构件表面性能的理想组合, 具有高硬度和低摩擦系数。成为近年来大力开发的涂层。

可以采用下列几种技术生产 DLC 薄膜: 碳离子离子束沉积 (IBD) 法、带或不带强离子流的碳溅射沉积 (物理汽相沉积, PVD) 法、在碳氢气体中从射频等离子体持续沉积到负偏压的底层上 (等离子加化学气相沉积, PACVD) 法。由于制造规程不同, 各种金刚石薄膜和类似金刚石碳薄膜的性能变化很大, 金刚石薄膜硬度可达到 3000~12000HV, 通常具有粗糙的小平面表面。类似金刚石碳膜硬度较低 (900~300HV), 但表面光滑。

DLC 涂层的应用对象十分广泛, 从小型零件到大型锻模和铸模。DLC 膜的应用快速扩大, 包括装饰技术; 低摩擦涂层; 机加工铝合金和铜合金的高速刀具涂层; 混合带中的陶瓷衬垫; 纺织机械中的导板; 冲压膜; 密封件和切削带等等。DLC 基涂层目前成功地应用于冷挤压模具, 无需预先加以 MoS<sub>2</sub> 涂层, 涂敷 DLC 的冷挤压模具一次可以挤压 4000 个胚件而不发生磨损和其它失效迹象。在医学用锯上, DLC 膜也是理想的涂层。镀有 DLC 膜的锯子, 其寿命是普通锯子的 2 倍, 而且摩擦生热小, 切削迅速, 不损害骨头组织。DLC 涂层也可以

2. Mori, T. et al., Acta Metall., 21 (1973), 571~574
3. Taya, M. et al., Int. J. Solids Struct., 17 (1981), 553~563
4. Benvensite, Y., A New Approach to the Application of Mori-Tanaka's Theory in Composite materials. Mech. Mater., 6 (1987), 147~157
5. Mori, T. et al., Successive Iteration Method in the Evaluation of Average fields in Elastically Inhomogeneous Materials. In Micromechanics and Inhomogeneity, The Toshio Mura Anniversary Volume (Edited by G. J. Weng, M. Taya and H. Abe), (1989), 269~282. Springer, New York
6. S. C. Lin et al., Int. J. Solids Structures Vol. 29, No. 14/15 (1992), 1859~1872, Printed in Great Britain
7. Mura, T., Micromechanics of Defects in Solids, Martinus Nijhoff, The Hague (1982), 150~158, 66~67
8. Eshelby, J. D., Proc. R. Soc., Long. A241 (1957), 376~396.
9. 村外志人, 森勉, 《マイクロメカニクス = 転位と介在物》, (1976), 25, 1, 培风馆
10. 徐芝纶, 《弹性力学简明教程》, (1980), 23, 高等教育出版社

应用于人工关节植入件, 如脊骨和膝盖骨植入件等。DLC 加 5%Ti 复合涂层在机加工不锈钢中需用低进给量。低速切削的刀具上, 有重要的应用。涂有这种涂层的钻头寿命提高了四倍。

在软涂层中 MoS<sub>2</sub> 涂层在宇航和真空系统中主要是提供自润滑。一般采用频磁控溅射技术沉积 MoS<sub>2</sub>, 但在一般的情况下, 其镀膜密度较低。为了获得高密度镀膜, 可以从工艺上加以改进, 如采用不平衡磁控溅射 (CFUBMS) 技术可获得致密的 MoS<sub>2</sub> 膜。这种 MoS<sub>2</sub> 固体润滑剂在机加工中得到广泛应用。

在机加工高强度航空铝合金、钛合金和精密金属中过去很少采用硬质涂层。目前英国 Teer 涂层公司, 瑞士 Vilab 公司和法国 Vallorbe 公司正在大力研究综合涂层和切削刀具系统。据说, 加工这类材料可以大大提高生产率, 刀具寿命提高 20 倍。Teer 涂层公司采用 CFUBMS 系统可以沉积高密度和高粘接强度的 MoS<sub>2</sub>。Vilab 公司探索这类涂层的可能应用中发现, 涂有 MoS<sub>2</sub> 复合涂层非常适用于铝合金的机械加工上, 其工艺技术已获得了专利权。

在机加工和成形工艺中为了提高生产率目前一条较好的途径是采用适当的涂层 (或镀层) 材料。现有涂层材料及其组合, 新型涂层材料及其制备技术的研究, 具有广泛发展的潜力, 前景可观。

(傅孙靖)