

# 机 修 手 册

(第 3 版)

第 8 卷  
设备润滑

机械工业出版社

# 第4章 固体润滑

林 亨 耀

## 第1节 概 述

固体润滑采用固体润滑剂。固体润滑剂是指为保护表面在作相对运动时免于损坏以及减少其摩擦和磨损而在其上使用的粉末状或薄膜状固体以及某些复合材料。

许多固体润滑剂具有层状(或层的)晶体结构和性质,如石墨与二硫化钼等,但玻璃或冰这些固体材料在界面上仅以熔融态润滑,则不属于固体润滑剂。

固体润滑剂概念应用较晚,16世纪时发现石墨,用作书写材料,因与金属铅相似,称为黑铅。到18世纪产业革命时,应用于笨重而慢速运动的机械部件。1829年伦尼(Rennie)进行了石墨和猪油复合材料的摩擦试验。而二硫化钼则在30年代第一次用作润滑剂<sup>[1]</sup>。目前固体润滑材料已在许多机械产品中广泛应用,满足某些特殊工况条件下对设备润滑的要求,能适应复杂的工作环境,简化润滑维修。

采用固体润滑剂的优点:

- 1) 使用温度宽。
- 2) 承载能力强。
- 3) 低速防止滑动部件粘—滑性能好。
- 4) 在真空环境下能发挥良好的润滑作用。
- 5) 能用于有尘土,不好密封的场合。
- 6) 能用于有腐蚀的环境气氛下而不需加保护。
- 7) 能简化润滑系统设计。
- 8) 耐辐照。
- 9) 存放性比润滑油、润滑脂好。

缺点有:

- 1) 摩擦系数比润滑油、润滑脂大。
- 2) 没有冷却作用,它不能象润滑油那样可以把摩擦界面上产生的摩擦热导出一部分。
- 3) 固体润滑剂作成覆盖膜使用时,寿命有限,且干膜制作工艺一般较复杂,在使用过程中很难补充。

4) 高分子基固体润滑剂的结构强度不高,耐温性较差,导热性不良。

克服缺点的方法,一是寻求新型固体润滑剂材料,二是改革已有的固体润滑剂的使用方法<sup>[2]</sup>。

## 第2节 固体润滑剂的种类和使用方法

### 1. 固体润滑剂的种类

用作固体润滑剂的材料有以下几种类型:

(1) 层状固体润滑剂 易于劈开的化合物或具有减摩作用的单体物质。

按结合形式,结晶体系和组成可分为硫化物(如 $ZrS_2$ 、 $WS_2$ 、 $MoS_2$ 等)、硒化物、碲化物、卤化物、氟化物(如 $[CF_x]_n$ )、氮化物(如BN)、氧化物(如云母)、单体(如石墨)、有机物。

(2) 非层状无机物 如硫化物( $PbS$ 、 $FeS$ 、 $CdS$ )、氟化物(如 $NaF$ 、 $BaF_2$ 、 $CaF_2$ 、 $LaF_3$ 、 $YF_3$ 、 $DiF_3$ )、陶瓷(如 $Fe_2O_3$ 、 $Al_2O_3$ 、玻璃、 $MoO_2$ 、 $PbO$ 等)、超硬合金等。

(3) 软金属薄膜 如金、银、铜、锡、铅等。

(4) 高分子材料 如聚四氟乙烯、尼龙、聚酰亚胺、聚缩醛、环氧树脂、聚酰胺、酚醛树脂、硅树脂等。

(5) 化学生成膜 如磷酸盐膜。

(6) 化学合成膜 如在镀钼的金属表面通过硫蒸汽,生成 $MoS_2$ 膜等。

### 2. 固体润滑剂的使用方法

固体润滑剂的使用方法有以下几种:

(1) 作成整体零部件使用 某些工程塑料如聚四氟乙烯、聚甲醛、聚缩醛、聚酰胺、聚碳酸酯、聚砜、聚酰亚胺、氯化聚醚、聚苯硫醚和聚对苯二甲酸酯等的摩擦系数较低,成形加工性和化学稳定性好,电绝缘性优良,抗冲击能力强,可以制成整体零部件,若采用玻璃纤维、石墨纤维、金属纤维、硼纤维等对这些塑料增强,综合性能更好,

使用得较多的有齿轮、轴承、导轨、凸轮、滚动轴承保持架等。石墨电刷、电接点、宝石轴承、刀刃支承等则是使用一定特性的材料直接制成零部件来使用的例子。由有机材料制成的零部件的共同缺点是热膨胀系数大，尺寸稳定性差，力学强度都会随温度升高而降低，易于在摩擦界面嵌入污垢、尘土等而增大磨损。而由无机材料制成的整体零部件热稳定性、化学稳定性和耐磨性好，导电性或电绝缘性好，但它们的力学强度特别是抗冲击强度差，石墨制品应用于真空或惰性气体中摩擦系数较大。

因此在设计使用这类零件时，应考虑到固体润滑剂的特点及实际工况条件，合理选材。如在设计塑料滑动轴承时，必须考虑到塑料的热膨胀系数比金属材料大，导热性也较差，轴承的配合间隙必须作相应的改变，同时注意具有冷却散热条件。应用塑料活塞环时也应考虑类似问题。

(2) 作成各种覆盖膜来使用 通过不同方法将固体润滑剂覆盖在运动副摩擦表面上，使之成为具有一定自润滑性能的干膜，这是较常用的方法之一。成膜的方法很多，各种固体润滑剂可通过溅射、电泳沉积、等离子喷镀、离子镀、电镀、化学生成、浸渍、粘结剂粘结、挤压、滚涂等方法来成膜。

不论用什么方法成膜，一般要求所获得的干膜摩擦系数低，耐磨，寿命长，膜对底材的粘附能力大，有较高的抗压强度和足够的硬度。另一方面，也要选择适当的对磨材料和底材以及金属底材的预处理方法，提高干膜与底材的粘附能力。

(3) 制成复合或组合材料来使用 所谓复合(组合)材料，是指由两种或两种以上的材料组合或复合起来使用的材料系统。这些材料的物理、化学性质以及形状都是不同的，而且是互不可溶的。组合或复合的最终目的是要获得一种性能更优越的新材料，一般都称为复合材料。目前用得最广的有称为“金属塑料”的复合材料(国外牌号有DU材料)。它是一种在镀铜钢背上烧结一层多孔青铜球粒子，然后在多孔层上面浸渍一层聚四氟乙烯乳液，或者将聚四氟乙烯制成糊状，热滚压在多孔层上，再烧结而成的多层复合材料。与DU材料类似的还有表面带自润滑层的聚缩醛DX材料。

(4) 作为固体润滑粉末来使用 将固体润滑粉末(如 $\text{MoS}_2$ )以适量添加到润滑油或润滑脂中，可提高润滑油的承载能力及改善边界润滑状态等，这也是较常用的使用方法，如 $\text{MoS}_2$ 油剂、 $\text{MoS}_2$

油膏、 $\text{MoS}_2$ 润滑脂及 $\text{MoS}_2$ 水剂等，这些国内均有商品出售。但是，在实际使用时，往往效果不明显，而且会因添加 $\text{MoS}_2$ 而堵塞油路，故应注意了解其特性，慎重选用。

### 第3节 几种常用的 固体润滑剂

设备润滑最常用的固体润滑剂包括二硫化钼、石墨和聚四氟乙烯等几种。这几种材料在设备润滑中的使用量占固体润滑剂全部使用量的大部分，下面重点对这几种材料加以介绍。

#### (一) 二硫化钼

二硫化钼作为固体润滑剂已久负盛名，它从辉钼矿提纯得到的一种矿物质，外观和颜色与铅粉和石墨近似。

##### 1. 二硫化钼的润滑机理

二硫化钼是层状六方晶体结构物质，其晶体结构和晶体层状结构见图4-3-1。

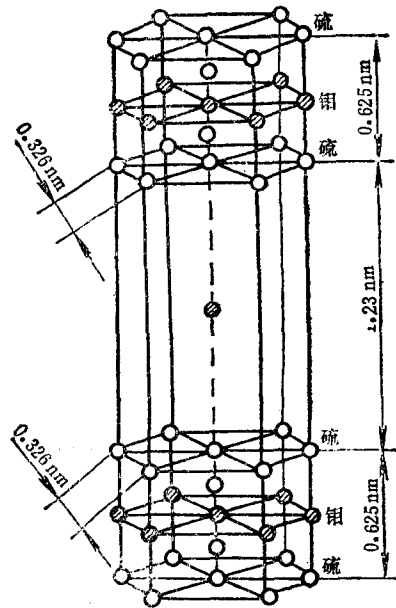


图4-3-1 二硫化钼的晶体结构示意图

由结构图可以看出，二硫化钼晶体是由硫—钼—硫三个平面层构成，很象“夹心面包”，由薄层单元所组成。每个钼原子被三角形分布的硫原子包围着，它们是以强的共价键联系在一起。邻近的二硫

化钼层均以硫层隔开，且间距较远。硫与硫原子结合较弱，其结合力主要是范德华力，因而很容易受剪切。将它们重迭起来就构成了二硫化钼晶体。也就是说，它是按S—Mo—S—S—Mo—S的顺序相邻排列而构成的晶体。据推算，一层厚度仅为 $0.025\mu\text{m}$ 的 $\text{MoS}_2$ 层就有40个分子层和39个低剪切力的滑动面。正是由于这些低剪切力的滑动面粘附在金属表面使原来两个金属面间的摩擦转化为 $\text{MoS}_2$ 层状结构间的滑移，从而降低摩擦力和减少磨损，达到润滑的目的。图4-3-2表示 $\text{MoS}_2$ 在受剪切力作用时层与层之间相对滑移的情况。

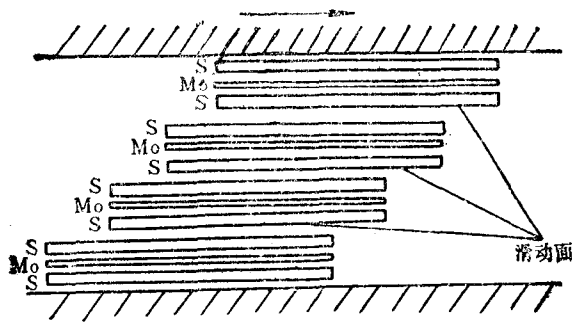


图4-3-2 二硫化钼承受剪切力时的滑移示意图

## 2. 二硫化钼的主要性能

(1) 低摩擦特性 从 $\text{MoS}_2$ 层状结构所知，在每组S—Mo—S中，把原子拖住的力是相当强的共价键。反之，在相邻的两层硫原子之间的力，则是较弱的范德华力。其结果是硫原子的相邻面易于滑动，这就是二硫化钼低摩擦特性的来由。

(2) 高承载能力 在极高压力(如2000MPa)下，一般的润滑膜早已被压破，形成干摩擦，致使金属表面拉毛或熔接。若在金属表面上加入 $\text{MoS}_2$ ，试验表明，当压力增高至2812MPa时，金属表面仍不发生咬合或熔接现象。而且往往由于压力增大还能使 $\text{MoS}_2$ 的摩擦系数进一步降低。

(3) 良好的热安定性 大气中， $\text{MoS}_2$ 在399℃下可短期使用，在349℃下可长期使用。一般地说， $\text{MoS}_2$ 在空气中于 $-184\sim+400^\circ\text{C}$ 下都具有低摩擦的润滑特性。但是，当温度超过450℃以后， $\text{MoS}_2$ 要发生明显氧化。尤其当温度高于538℃时，其氧化作用急剧进行，这是指在与空气充分接触的条件下发生的情况。

$\text{MoS}_2$ 在真空中温度达840~1000℃时才开始分解，而在氮气中需达到1350~1550℃才分解，分解后的产物为三氧化钼( $\text{MoO}_3$ )和氧化钼( $\text{MoO}$ )等。但在高温下 $\text{MoS}_2$ 附着于金属表面的能力低于常温。 $\text{MoS}_2$ 在低温下的使用性能是十分突出的。

(4) 强的化学安定性 二硫化钼对酸的抗腐蚀性很强。对碱性水溶液要在pH值大于10时才缓慢氧化。但对各种强氧化剂不安定，被氧化成钼酸。

表4-3-1 二硫化钼的基本特性

外观	灰黑色、无光泽、有一定脂肪感	
分子结构和晶体结构、劈开性	具有如图4-3-1的分子结构，是六方晶系的层状物质。由于两个硫原子层间的相邻面易产生滑移，所以易于劈开	
硬度	莫氏1.0~1.5，克氏12~60	
密度	$4.7\sim 4.8\text{g}/\text{cm}^3$	
熔点	1185℃	
分子量	160.08	
热安定性	在真空或惰性气氛中，能稳定到1093℃，在空气中则易被氧化，氧化温度为350℃	
摩擦系数	随条件而变化，在一般使用条件下为0.05~0.1左右	
负荷能力	超过2758MPa	
化学安定性	除不能抗王水、热浓硫酸、盐酸和浓硝酸外，能抗大多数的酸腐蚀；能被 $\text{F}_2$ 和 $\text{Cl}_2$ 分解，不被HF分解。在室温、湿空气中氧化是轻微的。但这种氧化作用的结果能得到一个可观的数值。在干燥空气中，399℃氧化较慢；在538℃时，氧化加剧。其氧化物有 $\text{MoO}_3$ 和 $\text{SO}_2$ ，氧化反应为放热反应。 $\Delta H = -116.8\text{kJ}/\text{克分子}$ ， $\text{MoO}_3$ 不能认为是磨料。 $\text{MoS}_2$ 可以为碱金属(如Li、Na、K、Rb、Ca、Fr)所浸蚀	
可溶性	不溶于水、石油产品、合成润滑剂	
磁性	无(抗磁性)	
导电性	温度(℃)	比电阻(Ω)
	-54	8.330
	+19.5	0.790
	+73	0.470
	+92	0.409
和水的接触角	60°	

对油、脂、醇的化学安定性很高。

(5) 抗辐照性 将  $\text{MoS}_2$  制成抗辐照的固体润滑膜, 能在  $-180 \sim +649^\circ\text{C}$  的温度范围内使用。这种抗辐照的固体润滑膜对于外层空间的应用来说具有重大的意义。

(6) 耐高真空性能 二硫化钼是在超高真空和极低温度条件下仍有效的润滑材料, 这对于尖端科学技术有非常重要的作用。国外已将由  $\text{MoS}_2$  和环氧树脂等制成的轴承用于人造卫星上的仪表和控制系统中。

二硫化钼的基本特性见表4-3-1。

## (二) 石墨

石墨具有稳定且明显的层状六方晶体结构, 是碳结晶的变形体, 其结构见图4-3-3。在同一平面层内, 相邻碳原子间以牢固的共价键相联, 其距离较短 ( $0.142\text{nm}$ )。层与层之间的碳原子是由较弱的范德华力相联结, 其距离较大 ( $0.341\text{nm}$ ), 具有明显各向异性的特性。由于这种晶体结构特点, 使得层与层之间的碳原子作用力要比层内者弱得多。因此, 当晶体受到剪切力作用时, 层的劈开远比法向的作用力对层的破坏容易, 这样石墨晶体就容易产生层间滑移。

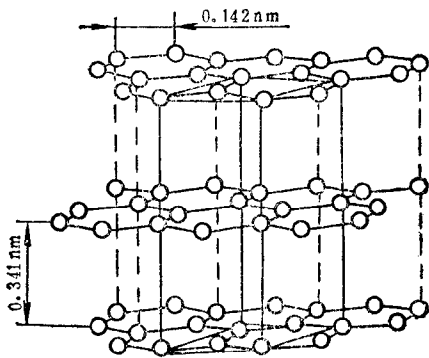


图4-3-3 石墨晶体结构模型

当石墨晶体吸附水气后, 层间的结合力就减弱, 因而层与层之间容易被剪断而产生滑移。所以, 石墨在有水气存在的条件下具有良好的润滑性能。但是, 在高真空或十分干燥的条件下, 它的摩擦系数比在大气中几乎大一个数量级, 磨损率也大。这就是说, 石墨不宜使用于真空条件下。

石墨在摩擦状态下, 能沿着晶体层间滑移, 并

表4-3-2 石墨的基本特性

外观	黑色、片状、有脂肪质感
分子结构、晶体构造及劈开性	具有图4-3-3所示的分子结构, 为六方晶系层状结构, 成鳞片状, 层间易于劈开。石墨的润滑性不仅与它的层状结构有关, 而且与它是否凝聚了水蒸气或吸附了其他气体有关, 同时也与摩擦表面是否有氧化物存在有很大关系
密度	$2.2 \sim 2.3 \text{ g/cm}^3$
松装密度	$1.67 \sim 1.83 \text{ g/cm}^3$
熔点	$3527^\circ\text{C}$
耐热性	在大气中 $500^\circ\text{C}$ 时, 可短期使用, 在 $426^\circ\text{C}$ 下, 可长期使用, 在 $454^\circ\text{C}$ 时, 会发生快速氧化, 氧化产物为 $\text{CO}$ , $\text{CO}_2$
蒸汽压	较低
与金属、橡胶的反应	不起反应
摩擦系数	吸附于其他物体的能力较弱, 甚至对洁净金属表面的吸附能力也如此。石墨的润滑作用受水蒸气及其它气体吸附层的影响较大, 在真空中则失去润滑作用, 摩擦系数因试验条件而异, 一般在 $0.05 \sim 0.19$ 内变化
硬度	莫氏1~2、肖氏90~100
电阻率	$2.64 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ , 与金属的导电性相近
抗拉强度	$2.5 \sim 3.5 \text{ MPa}$
抗压强度	$20 \sim 24 \text{ MPa}$
抗弯强度	$8.5 \sim 10 \text{ MPa}$
抗冲强度	$14 \sim 16 \text{ N} \cdot \text{cm/cm}^2$
抗辐照性	在 $\gamma$ 射线辐照后, 室温下, 摩擦力增加43%, 经中子辐照后, 晶格要损伤; 辐照时, 摩擦系数要降低
线膨胀系数	$2.2 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$
弹性模量	$9140 \text{ MPa}$
与水的接触角	$50^\circ$
平均 $p \cdot v$ 值	干摩擦下为 $0.3 \text{ MPa} \cdot \text{m/s}$ 有润滑液的情况下为 $3 \text{ MPa} \cdot \text{m/s}$

注: 表中所列石墨的一些力学特性, 均为碳-石墨材料的数据。

沿着摩擦方向定向。石墨与钢、铬和橡胶等的表面有良好的粘着能力，因此，在一般条件下，石墨是一种优良的润滑剂。但是，当吸附膜解吸后，石墨的摩擦磨损性能会变坏。所以，人们倾向于在氧化的铜或铜的表面上以石墨作润滑剂。

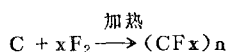
用于润滑的石墨是粉末，既可添加在液体中，又可以加工成复合材料或涂层膜。实践证明，石墨的结晶度、平均粒径、粒子形状和杂质含量均对石墨的润滑特性有影响。一般地说，石墨的结晶度越高，它对被润滑的表面保护性就越好。

利用石墨易于吸附气体的特性，可以在其层间引入氟、金属或金属化合物制成层间化合物。通常，层间化合物的润滑特性比石墨本身要好一些。因此，近年来对层间化合物的研究十分活跃。

石墨的基本特性见表4-3-2。

### (三) 氟化石墨

氟化石墨是一种从灰色到白色的粉末，它是无机高分子化合物，其结晶为六方晶形，氟碳之间是以牢固的共价键相结合于“平面层内”。它的结晶构造也具有层状结构，见图4-3-4。这种化合物是由石墨与元素氟一起加热直接反应的生成物，即



式中， $x = 1$  或  $x = 1/2$ 。反应完成后，粉末就成为白色，有一定滑润感。摩擦系数比石墨低，在大气中为  $0.02 \sim 0.2$ ，真空中为  $0.2 \sim 0.28$ 。密度为  $2.81 \text{g/cm}^3$ ；莫氏硬度  $1 \sim 2$ ；氧化点  $320 \sim 340^\circ\text{C}$ ，

分解温度  $520^\circ\text{C}$ ，可在  $344^\circ\text{C}$  下使用；与水的接触角为  $110^\circ$ 。与石墨或二硫化钼相比，它的耐磨性好，能承受的  $p \cdot v$  值也较高，这是由于氟碳键的结合能较强所致。层与层之间的距离比石墨大得多，因此更容易在层间发生剪切。由于氟的引入，使它在高温、高速、高负荷条件下的性能优于石墨或二硫化钼，改善了石墨在没有水气条件下的润滑性能。

### (四) 氮化硼

氮化硼是一种新型陶瓷材料，在高温、高压下可以烧结成形。它具有与石墨类似的六方晶系层状结构，是一种白色粉末，有“白石墨”之称。每层之间的硼与氮交错地重叠着，结晶层间的结合力比层内结合力弱得多，所以层与层之间容易滑动。氮化硼与石墨的性质有很大不同。

氮化硼的密度为  $2.27 \text{g/cm}^3$ ，熔点为  $3100 \sim 3300^\circ\text{C}$ ；莫氏硬度为 2；在空气中摩擦系数为 0.2，而在真空中为 0.3；在空气中热安定性为  $700^\circ\text{C}$ ，而在真空中为  $1587^\circ\text{C}$ 。它耐腐蚀，电绝缘性很好，电阻率大于  $10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ ；压缩强度为  $170 \text{MPa}$ ；在  $c$  轴方向上的热膨胀系数为  $41 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ，而在  $d$  轴方向上为  $-2.3 \times 10^{-6}$ ；在氧化气氛下最高使用温度为  $900^\circ\text{C}$ ，而在非活性还原气氛下可达  $2800^\circ\text{C}$ ，但在常温下润滑性能较差，故常与氟化石墨、石墨与二硫化钼混合作为高温润滑剂，用氮化硼粉末分散在油中或水中可以作为拉丝或压制成形的润滑剂，亦可用作高温炉滑动零件的润滑剂，氮化硼的烧结体可用作具有自润滑性能的轴承、滑动零件的材料。

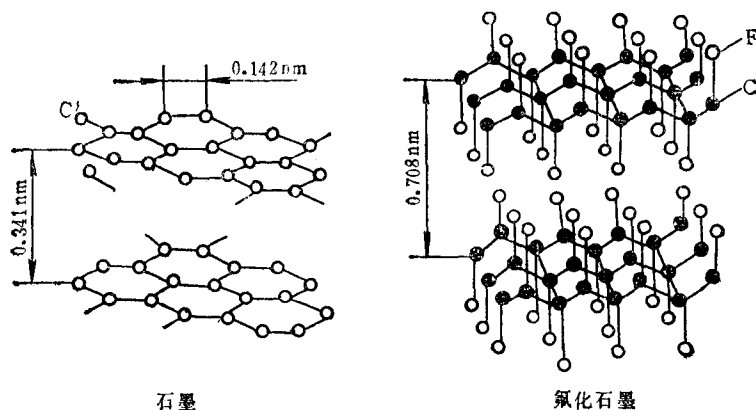


图4-3-4 石墨和氟化石墨基本构造比较

### (五) 聚四氟乙烯

聚四氟乙烯 (PTFE) 的商品名为特氟隆, 它是由四氟乙烯聚合而成分子量为  $4 \sim 9 \times 10^4$  的高分子材料, 聚四氟乙烯含有 “ $-(CF_2)-$ ” 的基本链节, 由这种链节形成了牢固的碳链结构; 同时它又使聚合物分子间的键能变得很弱。

聚四氟乙烯有很好的化学安定性和热稳定性。在高温下与浓酸、浓碱、强氧化剂均不发生反应, 甚至在王水中煮沸, 其重量及性能都没有变化。与绝大多数有机溶剂, 如卤化碳氢化合物、酮类、醇类、醚类都不起作用。PTFE 仅与熔融态碱金属、三氟化氯、元素氟等起作用。但是, 也只是在高温下作用才显著。PTFE 的耐热、耐寒性都很好, 使用温度从  $-180^\circ\text{C}$  到  $250^\circ\text{C}$ , 性能都不变, 即使在  $250^\circ\text{C}$  下处理 240 h, 机械性能也不会降低。在温度超过  $385^\circ\text{C}$  时能观察到有明显的失重, 温度达  $390^\circ\text{C}$  时, 每小时失重量为 0.06%。但是, 也有人指出, 聚四氟乙烯从室温就有难以被人察觉的、极缓慢的升华。PTFE 具有极小的表面能。因此它在很宽的温度范围和几乎所有的环境气氛下, 都能保持良好化学安定性、热稳定性以及润滑性。

PTFE 也具有各向异性性, 在滑动摩擦条件下, 也能发生良好的定向。PTFE 的摩擦系数比石墨、 $MoS_2$  都低。一般 PTFE 对钢的摩擦系数经常引用值为 0.04, 在高负荷条件下, 摩擦系数会降低到 0.016。

对 PTFE 的摩擦特性研究报导很多, 解释也各不相同。有人认为, 当清洁的 PTFE 表面被压在一起时, 一般情况下它的分子可以越过界面与对方形成强的键合, 如果滑移, 这种键能紧紧地卡住, 而且可能使一方的结构破裂。这时, 剪切将发生在较软材料体的内部而不是发生在摩擦的表面, 此时的摩擦系数值应近似地等于较软材料的剪切强度与屈服压力之比。但是, 有人认为 PTFE 的低摩擦是分子键之间或者是由于转移膜之间的低粘合作用, 同时加之 PTFE 体内坚固的键能之间的连结而形成有相当高的体积剪切强度, 这种分子间的低粘合作用和高的体积剪切强度是带来低摩擦的主要原因。换句话说, PTFE 的低摩擦, 实际上不是 PTFE 对其它材料的摩擦, 而是 PTFE 在极短时间内, 在对摩擦材料表面上形成的 PTFE 转移膜与 PTFE 之间的表面摩擦。这样看来, PTFE 也可以认为是一种内在的

具有低摩擦特性的材料。再就是 PTFE 不论是与金属或者是与被氧化的金属表面接触摩擦时, 能很快在其表面上生成强的化学键合, 例如 PTFE 在硬的钨表面滑动时, 在钨的表面上能形成非常牢固的、有时仅有几个单分子层厚度的 PTFE 转移膜, 再如当 PTFE 在软金属锂上滑动时, 上述现象不但发生, 而且这种作用还相当强, 以至金属锂的质点也能转移到 PTFE 的表面上, 正是由于这种转移膜, 它提供了 PTFE 具有低摩擦的根本条件。

PTFE 的耐磨损性是不好的, 很多人正借助于现代分析测试仪器, 深入、广泛地研究它的晶体形成过程、晶包的大小以及 PTFE 的生产工艺对晶体结构的影响等, 希望能从根本上改善 PTFE 的耐磨损性。此外, 必须注意的是 PTFE 在低负荷条件下也会出现“流动”(形变)的倾向, 一般称为“冷流现象”, 而且 PTFE 的耐辐照性也不好。目前多是通过在 PTFE 中填充其它物质来进行改性。从大量的实践证明, 几乎任何填料, 不论是具有润滑性的或者是具有研磨作用的填料, 对提高聚四氟乙烯的耐磨损性都是有益的。问题的关键是这些填料如何影响 PTFE 的摩擦特性至今还没有确切解释, 填料的添加多年来还是靠经验来决定。此外, 用纤维增强 PTFE 的方法, 也取得了令人满意的结果, 实验证明, 不论是长纤维或是用短纤维来增强 PTFE, 都会有明显的效果, 从而也成功地解决了 PTFE 在负荷作用下的冷流问题。但是, 还须说明, 用碳纤维来增强 PTFE 后, 其耐磨损性的改善没有取得令人满意的结果, 这仍然是今后还须进一步研究的课题之一。在选择不同填料和增强材料来改性 PTFE 时, 近年来对添加硬质相物质, 如二氧化硅、碳化硅、碳化硼等正受到人们的重视, 而且在实际应用中也取得了好的结果。

为改性 PTFE, 除添加不同的填料和增强材料外, 目前国外还趋向应用化学的共聚、共混的方法来根本改变 PTFE 的固有缺陷, 这也是塑料基固体润滑材料的共性, 必须引起我们足够的重视。

PTFE 的化学安定性很好, 表面能又很小, 因此它的成型材料对金属表面的粘附能力很差。这就在很大程度上影响了它作为减摩材料的用途, 怎样才能提高它对金属表面的粘附能力, 有希望的办法是在粘附剂中加入某种有机酸。PTFE 的一般性能见表 4-3-3。

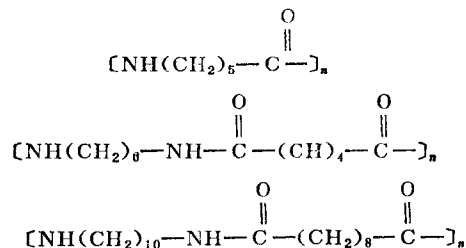
表4-3-3 PTFE的一般性能

外观	白色粉末, 有一定脂肪感
结晶密度	2.35 g/cm <sup>3</sup>
密度	(1) 未淬火样品 2.20 g/cm <sup>3</sup> (结晶度65%) (2) 淬火样品 2.15 g/cm <sup>3</sup> (结晶度约50%) (3) 非晶区密度 2.01 g/cm <sup>3</sup>
吸水率	小于0.01%
导热系数	0.25 W/m · K
热变形温度 (4.6 MPa)	121°C
线膨胀系数 (-60~280°C)	8~25 × 10 <sup>-5</sup> /°C
可燃性	不燃
断裂伸长率	未淬火样品 150%~350% 淬火样品 160%~300%
抗弯强度	11~14 MPa
弯曲强度 (0.4 mm厚的试样)	20000次 (用 Z-485 试验机测定)
抗拉强度 (20 ± 2°C)	未淬火样品 14~24 MPa 淬火样品 16~20 MPa
抗压强度	4.2 MPa
抗冲强度	10 <sup>3</sup> N · cm/cm <sup>2</sup>
极限pv值	0.048~0.089 MPa · m/s
摩擦系数	在大气中 0.04~0.2 在真空中 0.64~0.2
表面比电阻	9.7 × 10 <sup>12</sup> Ω
体积比电阻	大于10 <sup>17</sup> Ω · cm (在10 <sup>6</sup> Hz下测定)
介质损耗角的正切	小于2.5 × 10 <sup>-4</sup> (在10 <sup>6</sup> Hz下测定)
介质常数	小于2.2 (在10 <sup>6</sup> Hz下测定)
击穿电压	64 ± 2 μm, 大于40 kV/mm
抗拉弹性模量	0.6 GPa
热稳定性	260°C
比热容	1.05 × 10 <sup>-3</sup> J/(kg · K)
热失重	小于0.05%~0.1% (390°C/h)

## (六) 尼龙

尼龙是热塑性聚酰胺树脂族的统称, 从定义上讲, 它是任意一种长链的合成聚酰胺。一般是二胺

酸和二胺缩聚而成或者是α-氨基酸在熔点以上的温度(200°C)加热合成。不论用哪种方法得到的尼龙, 都有酰胺基团作为主要聚合链的组成部分。广泛应用的尼龙有尼龙6。(又叫MC尼龙或称为铸型尼龙)、尼龙66、尼龙1010它们的分子式如下:



尼龙在机械工业中能得到较为广泛的应用是因为它具有优良的机械性能和耐磨损性, 而且摩擦系数也不很高(对钢的干摩擦系数为0.2左右), 此外, 尼龙易于成形加工、价格低廉。虽然不能把尼龙完全看作润滑材料, 但由于它有上述这些优点, 因此它仍然被广泛使用。

尼龙的一般性质见表4-3-4。下面仅就尼龙的摩擦、磨损特性进行简单的讨论。

尼龙的摩擦系数随负荷的增加而降低, 在高负荷条件下, 摩擦系数可以降至0.1~0.15左右; 在摩擦界面有油或水存在时, 摩擦系数下降的趋势更大。尼龙的摩擦系数还随着速度的增加或界面温度的升高而下降。

尼龙的耐磨损性好, 特别是在有大量尘土、泥砂的环境中, 它所表现出来的耐磨损性是其他塑料无法与之相比的。例如尼龙6在泥砂含量为5%的泥浆水中与不锈钢对磨时, 尼龙6的耐磨损性比ZQA1-10-3-1.5青铜在相同条件下的耐磨性好2至3倍, 若在尼龙6中添加0.3%的氧化钛, 它的耐磨损性在上述条件下比青铜好10倍左右。在摩擦界面上有泥砂、尘土或其他硬质相材料存在时, 尼龙的耐磨损性比轴承钢、铸铁甚至比经淬火再表面镀铬的碳钢还要好。

在应用尼龙材料时, 要特别注意选择与之对磨的材料。在摩擦界面有硬质微粒存在时, 尼龙的耐磨损性是一般钢材不能与之相比的。例如用尼龙轴瓦代替青铜轴瓦时, 被磨损的是轴, 轴是不易更换的零件, 它被磨损后会带来严重后果。

尼龙的缺点是: 吸水性大、吸潮性强、尺寸稳定性差, 这在铸型尼龙表现得更为突出。为克服这些缺点, 一般是将铸型后的毛坯零件在147°C至



表4-3-4 尼龙的性质

项 目	尼龙6	尼龙66	尼龙1010
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.13	1.15	1.04~1.09
熔点 (°C)	215	256	200~210
吸水率%	1.9	1.5	0.05~0.39
开始可塑温度 (°C)	160	220	
软化温度 (°C)	170	235	
马丁耐热 (°C)	40~50	50~60	42~45
热导率 (W/m·K)	0.24	0.24	0.1~0.4
脆化温度 (°C)	-20~-30	-25~-30	-40
硬度 (布氏)			17.2
抗拉强度 (MPa)	70	75	50~55
抗弯强度 (MPa)	70~100	100~110	70~82
抗冲强度 (N·cm/cm <sup>2</sup> ) (无缺口试样)		400~500	>1000 (无缺口试样) 50 (有缺口试样)
屈服应力 (MPa)		60~83	60~83
剪切强度 (MPa)		32.3	
伸长率%		20	20
线胀系数 (10 <sup>-5</sup> /°C)	7.9~8.7	9~10	9~12
摩擦系数 (对钢干摩擦)	≈0.2	≈0.2	≈0.2
化学安定性			
97%甲酸中		在40~45°C时溶解	
30%煮沸盐酸中		部分溶解	
80%硫酸中		溶 解	
碱		稳 定	
油		稳 定	
电击穿强度 (kV/mm)		10~15	
体积电阻 (Ω·cm)		10 <sup>14</sup> ~10 <sup>15</sup>	

200°C的过热气缸油中处理24h,然后在沸水中处理48h,再静置三个月以上的时间再最后精加工成形。设计工作者若不考虑尼龙材料的特性,用原有图纸上的零部件尺寸,不经修改就用尼龙材料去取代原来的材料,往往达不到预期的效果。

尼龙的热传导系数小,热膨胀系数大,加之摩擦系数也不算低,因此最好用于有油至少是少油润滑和有特殊冷却装置条件下。

要改善尼龙的摩擦状态,添加其他填料或填充聚四氟乙烯粉,是行之有效的办法。添加玻璃纤维、碳纤维、石墨纤维等可以达到增加机械强度的目的,添加金属粉可以获得满意的热传导性能等等。但是对于铸型尼龙怎样才能将这些材料均匀地混合,这是较突出的问题,添加聚四氟乙烯粉末是降低尼龙摩擦的好办法,但必须找到能把PTFE均匀分散在铸型尼龙中的分散剂。据介绍用三乙撑二胺或芞又丙酮(4-苯基,3-丁烯-2酮)作为PTFE在铸型尼龙中的分散剂能得到满意的效果。尼龙的性质见表

4-3-4。

## 第4节 固体润滑涂层

### (一) 环氧涂层

环氧抗摩涂层(Epoxy Resin Anti-friction Coating)是目前应用最广泛的固体润滑涂层。

#### 1. HNT抗摩涂层基本组分

(1) 粘结剂 采用双酚A型环氧树脂作粘结剂。由于这种树脂分子链中含有脂肪族羟基(-CH<sub>2</sub>-OH)及醚键(-O-),它们具有高度的极性,使环氧树脂分子与相邻界面之间产生强烈的电磁吸引力;而环氧树脂分子中的环氧基



又极为活泼,与含有活泼氢的金属表面及固化剂起反应,生成化学键。因此,这就使环氧树脂具有很强的粘结性。

(2) 固化剂 环氧树脂是一种热塑性的线型高分子化合物，必须加入固化剂使线型的环氧树脂分子转变成立体的网状结构的热固性材料才能使用。在常温下能与环氧树脂起交联固化反应的主要是脂肪族胺类和一部分芳香族胺类。因为环氧抗摩涂层的主要使用对象是大型和重型机床的滑动面，不允许加温固化，因此必须选择能在常温下起反应的固化剂。为了提高固化物的各项性能，广州机床研究所研制的适用于 HNT 环氧树脂抗摩涂层的固化剂 HNG-1，称二间苯二甲三胺。近十年的广泛实践证明，这是一种固化性能良好，毒性很低，刺激性不大，适用期又长的粘性液体。

(3) 减摩材料 为了改善环氧树脂抗摩涂层的摩擦特性，抗摩涂层必须含有合适的一定量的减摩材料，适用最为普遍的是固体润滑剂，如二硫化钼、石墨及聚四氟乙烯等。试验研究结果表明，随着减摩材料含量的增加，涂层—金属摩擦副的摩擦系数降低，但涂层的耐磨性及力学强度也有些降低。图4-4-1和图4-4-2分别为  $\text{MoS}_2$  及石墨的加入量对涂层性能的影响。

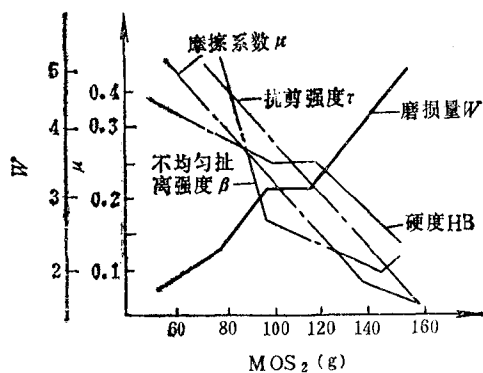


图4-4-1  $\text{MoS}_2$ 加入量对耐磨涂层性能的影响

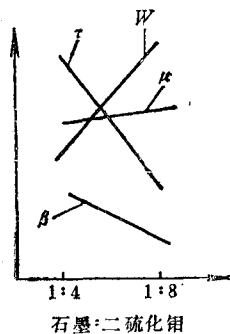


图4-4-2 石墨加入量对耐磨涂层性能的影响

(4) 增强材料 增强材料能提高抗摩涂层的机械强度和耐磨性。增强材料主要有金属粉末（如铁粉、铜粉和铝粉等）和无机物（如硅微粉、钛白粉、立德粉及玻璃纤维等）。增强材料的特点是价格便宜，耐磨性好，热膨胀系数小等。但是，它们在涂层中的含量对涂层的性能影响颇大。图4-4-3和图4-4-4分别为铁粉和二氧化钛的加入量对涂层性能的影响。

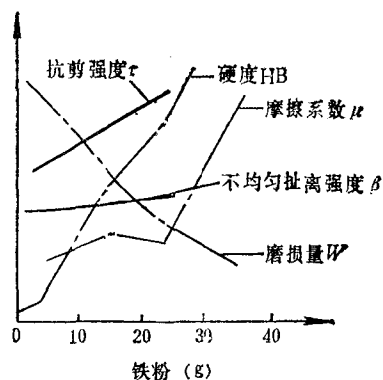


图4-4-3 铁粉加入量对涂层性能的影响

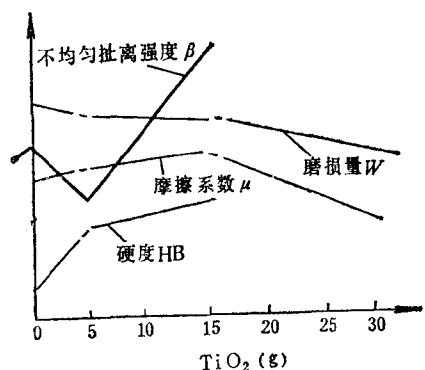


图4-4-4 二氧化钛加入量对涂层性能的影响

(5) 其他改性剂 为了改善涂层的抗冲击性能，需要向涂料中加入一定量的增塑剂；为了调整涂料的粘度，则需要加入一定量的稀释剂。考虑到涂层在固化反应时不产生收缩，因此，必须选用活性稀释剂，如环氧丙烷丁基醚（简称501）。这种环氧化物也同时与固化剂起交联反应，在整个固化反应过程中没有低分子生成物放出，因此，涂层体积保持不变，成形精确。几个典型的环氧抗摩涂层材料的配方见表4-4-1。

表4-4-1 环氧抗摩涂层材料的典型配方

成 分	配 方 号			
	HNT 11-15	HNT 17-5	HNT 20-1	HNT 21-4
	加入量 (g)			
环氧树脂 (6101)	100	100	100	100
邻苯二甲酸二丁酯	10	10	15	15
多缩水甘油醚 (630)				15
环氧丙烷丁基醚 (501)	12	10	10	
气相二氧化硅	2	1	2	1
铁粉	25	15	25	15
二氧化钛		30	15	30
二硫化钼	100	80	80	80
石墨	25	20	20	20
总量	274	266	267	276

2. 固化剂用量计算

使用胺类固化剂时，必须准确计算其用量，因为用量过多或过少都会影响固化物的交联密度，使涂层的物理机械性能受到损失。固化剂用量计算方法如下：

$$\text{胺类固化剂的百分用量} = \frac{\text{胺类固化剂的分子量}}{\text{胺类固化剂分子中活泼氢原子数}} \times \text{环氧树脂的环氧值}$$

× 环氧树脂的环氧值

或

$$\text{胺类固化剂的百分用量} = \frac{56100}{\text{胺类固化剂的胺值}} \times \text{环氧树脂的环氧值}$$

式中的环氧值为每100g环氧树脂中所含环氧基的克当量数。HNT抗摩涂料中使用6101环氧树脂(E44)，其环氧值为0.40~0.47，取其平均值0.44。涂料中还含有501稀释剂，环氧值为0.68~0.81，取其平均值0.75。

HNG-1固化剂用量计算如下，HNG-1缩胺的分子式为C<sub>16</sub>H<sub>17</sub>N<sub>3</sub>，因此，分子量为16×12+17×1+3×14=251。活泼氢原子数为5。HNT-17-5抗摩涂料中环氧树脂6101所占重量百分比为  $\frac{100}{266} \times 100\% = 37.6\%$ ，该涂料中还含有环氧丙烷丁基醚(501)，其所占重量百分比为  $\frac{10}{266} \times 100\% = 3.76\%$ 。

每100g环氧树脂6101所需HNG-1缩胺的用量

$$\text{为} \frac{251}{5} \times 0.44 = 22.1 \text{ (g)}$$

表4-4-2 环氧抗摩涂层材料性能指标

项 目	单 位	JB3578—91指标	HNT涂层材料	FT涂层材料	测定方法	
外 观			黑灰色糊状物	白色或淡黄色糊状物		
A组分粘度 (25°C)	m <sup>2</sup> /s	1.3×10 <sup>-10</sup> ~ 1.3×10 <sup>-11</sup>	1.3×10 <sup>-10</sup> ~ 1.3×10 <sup>-11</sup>	1.3×10 <sup>-10</sup> ~ 1.3×10 <sup>-11</sup>		
B组分		液体	淡黄色液体	淡黄色液体		
固 化 物 理 性 能	耐磨性 (磨痕宽度)	mm	<3	2.5~3.0	1.5~2.5	JB3578—91
	摩擦系数		<0.04	0.034	0.03~0.05	JB3578—91
	粘接剪切强度	MPa	>12	18	>18	HG2-151—65
	冲击值	N·cm/cm <sup>2</sup>	>80	90	>100	GB1043—79
	硬度HBS		>18	20	>22	HG2-168—65
	压缩强度	MPa	>80	95	>95	GB1041—92
	压缩弹性模量	MPa	>6×10 <sup>3</sup>	6×10 <sup>3</sup>	6×10 <sup>3</sup>	GB1041—92
	马丁耐热温度	°C	>60	60	>80	GB1035—70
	平均线胀系数	1/°C	<12×10 <sup>-5</sup>	6~12×10 <sup>-5</sup>	6~12×10 <sup>-5</sup>	GB1035—70
热导率	W/(m·K)	>0.1424	0.67	0.1424	GB3399—82	

每100g 环氧丙烷丁基醚 501 所需 HNG-1 缩胺的用量为  $\frac{251}{5} \times 0.75 = 37.7$  (g)

每 1 kg HNT-17-5 抗摩涂料所需 HNG-1 缩胺的用量为  $37.6\% \times 1000 \times 22.1\% + 3.76\% \times 1000 \times 37.7\% = 97.3$  (g)

因涂料中含有大量不参加固化反应的填料, 而此填料又会降低反应物的反应活性及使固化剂的损耗增加, 因此, 实际的固化剂用量应比其理论计算量大一些。通过实践得出, 固化剂的实际用量为理论计算量的 110%~120% 比较合适。故每 1 kg HNT-17-5 抗摩涂料实际所需的 HNG-1 固化剂的用量为  $97.3 \times 120\% = 117$  (g), 取 120 g。

### 3. 环氧抗摩涂层的主要性能

摩擦特性是环氧抗摩涂层极为重要的性能参数。作为机床导轨, 由涂层—金属组成的摩擦副, 在各种不同运动速度下的摩擦特性是影响机床导轨(尤其是重型机床导轨)在低速下运动稳定性的重要因素之一, 因此, 研究机床导轨材料, 使其摩擦系数—滑动速度特性曲线具有趋近于零或稍大于零的斜率, 可以解决机床导轨的爬行(低速稳定性)问题。

除摩擦特性以外, 涂层本身的物理机械性能也很重要。如线膨胀系数、导热系数、耐热性、耐低温性能、抗剪强度、抗压强度、冲击值、硬度及压缩弹性模量等均对涂层的实际使用性能关系甚大。环氧抗摩涂层材料的性能指标见表 4-4-2。

## (二) 聚酯涂层导轨

### 1. 聚酯涂层的基本组分和固化反应过程

聚酯涂层也即不饱和聚酯涂层。不饱和聚酯是由不饱和的二元醇与不饱和的二元酸(或酸酐)缩聚而成的线性高分子化合物。为了提高性能, 有时还加入一些饱和的二元酸。在分子主链中同时含有酯键  $\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{—C—O—} \end{array}$  和不饱和双键  $\text{—CH=CH—}$ 。不饱和聚酯导轨涂层是以不饱和聚酯为基, 添加交联剂、引发剂、加促剂、减摩材料及增强材质等组成的一种材料体系。

不饱和聚酯树脂通常与交联剂(如苯乙烯)混溶制成商品。一般树脂分子量为 2000~3000。不饱和聚酯树脂的性质不仅与其本身的结构特点(如双键数量、酯基数量、芳香族与脂肪族链段的存在及

聚合度等)有关外, 与交联剂的性质也有很大关系。交联剂是一种不饱和的烯基化合物, 如苯乙烯、甲基丙烯酸甲酯和邻苯二甲酸二丙烯酯等。乙烯基化合物的反应能力大, 在室温下就能与聚酯起反应。丙烯基化合物的反应能力小, 在高温下才能反应。因此, 最常用的交联剂为苯乙烯。苯乙烯的含量对聚酯的性能有较大的影响。

因不饱和聚酯分子结构中存在不饱和双键, 其与交联剂的混合物不能长期存放, 在室温以及氧、光等的作用下, 混合物会逐渐聚合而使粘度增大。

引发剂(也称催化剂)的作用是引发聚酯树脂和交联剂产生共聚、交联而固化。用作引发剂的通常是有机过氧化物, 如过氧化环己酮、过氧化苯甲酰及过氧化甲乙酮等。增加引发剂用量可加速聚酯树脂的固化过程, 但引发剂用量过多, 固化物分子量较低, 机械性能较差。同时, 由于反应速率加快, 放热量大, 这样会导致树脂在迅速变定中急剧收缩引起制品产生裂纹。由于有机过氧化物有爆炸性, 因此, 为安全起见, 一般都与增塑剂配成糊状物使用, 如将过氧化环己酮与邻苯二甲酸二丁酯配成糊状物。

加促剂的作用是使引发剂在室温下引发不饱和聚酯树脂和交联剂反应, 它是聚酯树脂在固化施工中不可缺少的一个组分。不同的引发剂需要不同的加促剂配套使用, 常用的有钴有机块加促剂和叔胺类加促剂两类。环烷酸钴  $(\text{RCOO})_2\text{Co}$  是最常用的加促剂。

应该指出, 环烷酸钴不能促进含有两个羟基的过氧化物。也就是说, 环烷酸钴对过氧化苯甲酰没有促进作用。

过氧化环己酮与环烷酸钴所形成的氧化—还原引发体系是聚酯涂层导轨的室温固化的引发体系。在这个氧化—还原引发体系中, 过氧化物的分解, 只有其中的一半形成了自由基。而另一半则被还原为负离子, 所以, 引发剂的用量一般为聚酯树脂的 2%。若是使用 50% 的过氧化环己酮的二丁酯糊状物, 则引发剂用量为树脂重量的 4%。

广州机床研究所已于 70 年代末研制成功 JKC 型不饱和聚酯抗摩涂层材料, 产品有 JKC-B 和 JKC-C 两种。JKC 型聚酯涂层的固化反应过程按下面两步进行:

1) 加促剂与固化剂作用生成自由基:



2) 自由基引发不饱和聚酯和苯乙烯的双键,使液态的聚酯树脂交联固化成网状立体结构的具有一定硬度的高分子。

不饱和聚酯树脂的固化反应属游离基型的共价交联反应。当体系转入橡胶态后,尽管已形成一部分的网状交联结构产物,但此时体系中仍存在大量不饱和双键和作为交联剂的苯乙烯单体,因此,交联反应的速度仍然较快。体系在转入橡胶态到出现玻璃化转变的过程比较快。在进入玻璃态后,体系中仍有少量可供交联的苯乙烯单体及处于网络末端的的双键(乙烯基)存在,因此,交联反应仍有可能缓慢进行。在室温继续存放几天,交联密度会不断提高。

## 2. JKC型抗摩涂层材料的工艺特性

(1) 聚合固化反应中诱导期的可控性 诱导期也即胶凝前的一段使用时间。催化剂的活性和用量决定着诱导期的长短及活性中心的个数,可见,它直接影响着聚合反应的速度。JKC抗摩涂层是采用氧化还原体系来进行固化反应的,利用氧化还原反应产生的热量,使催化剂在常温下分解为游离基。由于加促剂已预先加入到涂料中,只要控制催化剂的加入量,便可控制氧化还原反应的放热量,从而能人为地控制其诱导期。这一特性在JKC涂层的实际应用中十分重要。

(2) 诱导期间粘度的稳定性 JKC抗摩涂层是按游离基历程进行固化反应的,而游离基聚合反应则是通过链锁反应来完成的。从诱导期可控性知道,诱导期实际上是一个吸热反应过程,因此,涂料在此过程中的粘度基本上保持不变。这一特性给施工操作带来很大的方便,特别是对于大面积的涂敷施工,不用担心涂料的粘度增大而影响施工的顺利进行,图4-4-5为粘度—时间变化特性。

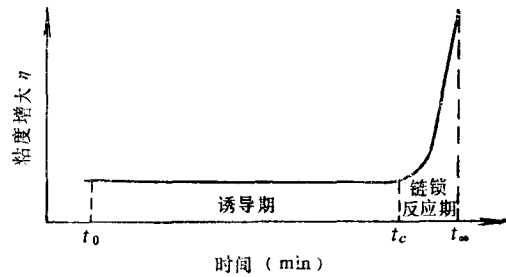


图4-4-5 粘度—时间变化特性

(3) 涂料的触变性 JKC抗摩涂料中,由于加入了触变剂,从而使高粘度的涂料具有触变特性。呈触变状态的涂料只有在外力(如搅拌或涂刮、挤压等)作用下,才会产生流动,而当外力一旦消失,即恢复原来的高粘度不流动状态。这种触变特性在施工操作上起着重要的作用,可在倾斜或垂直的导

表4-4-3 JKC聚酯涂层在冬季室温(8~15°C)下的性能

性能	JKC-B涂层	JKC-C涂层	测试方法
外观	黑灰色	浅黄色	目测
相对密度	1.5 g/cm <sup>3</sup>	1.5 g/cm <sup>3</sup>	
粘接剪切强度	9~12MPa	14~18MPa	HC2-151-65
粘接耐热温度	不脱落/(100°C·8h)	不脱落/(120°C·8h)	电热恒温烘箱
马丁耐热温度	66~78°C	70~78°C	挠曲应力6MPa
硬度HBS	18~25	20~30	HB5/62.5/60
冲击强度	60~80 N·cm/cm <sup>2</sup>	50~60 N·cm/cm <sup>2</sup>	GB1043-79
压缩强度	80~100MPa	80~120MPa	GB1041-70
压缩总变形量	1%	0.5%	20MPa
压缩永久变形量	0.05%	0.025%	20MPa
压缩弹性模量	1~2×10 <sup>3</sup> MPa	2~4×10 <sup>3</sup> MPa	GB1041-70
线膨胀系数	0.7~1×10 <sup>-4</sup> /°C		升温40°C
热导率	1.2793~1.3956W/(m·K)		温差30~50°C

轨面上涂敷施工,可任意造型,反复涂刮,都不会产生流失现象。

固化后的JKC型聚酯涂层可进行车、铣、刨、磨、钻等各种机加工及手工刮削。这种涂层材料具有良好的物理机械性能和优异的摩擦学特性,表4-4-3为JKC聚酯涂层在冬季8~15°C的室温环境条件下固化三天后所测得的各项性能。

JKC聚酯涂层材料的摩擦磨损性能通过MM-200型摩擦磨损试验机评定。在载荷150N(15kgf)、L-AN46全损耗系统用油润滑下,聚酯涂层试块与铸铁试环组成的摩擦副,经1000km摩擦行程后,测得线磨损量为0.005mm,平均比磨损率为 $4.19 \times 10^{-11} \text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{mm})$  [ $4.19 \times 10^{-10} \text{mm}^3/\text{kgf} \cdot \text{mm}$ ]。

JKC-B型聚酯涂层不仅适用于龙门刨床的工作台导轨,而且也适用于重型立式车床、卧式镗床及导轨磨床等类型机床。

JKC-C型聚酯涂层的应用对象主要是以车床溜板导轨为主,同时也适用于各种楔铁和轴套等摩擦部位。

### (三) 含氟涂层导轨

含氟涂层是指含四氟乙烯的抗摩涂层。广州机床研究所研制的这种产品称FT抗摩涂层。这种涂层是以接枝改性的环氧树脂为粘结剂,以HNG-1缩胺为固化剂,含有相应的增强材料、减摩材料和某些改进剂所组成的一种材料体系。

聚四氟乙烯由于静电作用,使它与其他材料很难混合,不易分散在一种溶液中。并且往往由于搅拌使聚四氟乙烯粉末相互集结成团块,这给使用带来很大的不便。因此,必须采用特殊的工艺方法,才能使聚四氟乙烯均匀混合在经接枝改性的环氧树脂中。

FT涂层选用的粘结剂为环氧树脂618(即E51环氧树脂),这是一种粘度较低的环氧树脂。环氧固化物的耐热性与环氧树脂的分子结构关系甚大。据介绍,环氧树脂经过接枝改性后生成的CTBN改性环氧,可提高固化物的耐热性。

HNT环氧抗摩涂层采用二硫化钼和石墨作为减摩材料,但往往由于制备工艺关系,使二硫化钼和石墨材料本身酸值较高,从而降低了涂层的贮存稳定性及使用性能。而FT涂层采用聚四氟乙烯为减摩材料,这是一个高分子减摩材料,具有优异的低摩擦特性。

FT涂料的配制工艺关键在于如何把聚四氟乙烯细粉末均匀分散在涂料中。先将粉末在120°C下干燥3~4h,以除去所含水份,然后将聚四氟乙烯粉末与其他粉末料混合均匀,并经40目筛。将E51环氧树脂和CTBN按比例加入到反应釜中,在150°C下搅拌反应3h,冷却备用(CTBN母液)。最后将经过40目筛的粉末加入到预先制备好的CTBN母液中,并在一定速度(900r/min)下搅拌3~6h,至搅拌均匀即可。

在MM200摩擦试验机上测得的FT涂层的摩擦系数随载荷变化见图4-4-6,由图看出,FT涂层的摩擦系数随载荷的增加而减少。

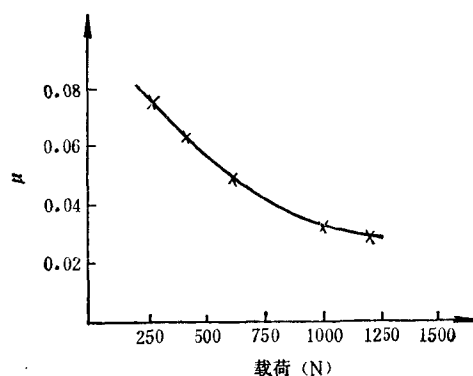


图4-4-6 FT涂层载荷—摩擦系数曲线

试验条件: 转速: 400 r/min; 接触方式: 环一块; 润滑: L-AN46全损耗系统用油润滑油

在MPV-1500轴承试验机上测得FT涂层的 $p\dot{v}$ 极限值见图4-4-7。

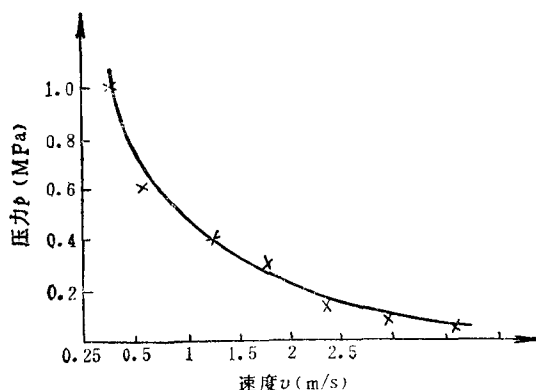


图4-4-7 FT涂层的 $p\dot{v}$ 值曲线

试验条件: 配合间隙: 0.15mm; 对磨轴: 45钢; 表面粗糙度 $R_a 0.8\mu\text{m}$ ; 试样用丙酮去油, 干摩擦测定

摩擦材料的 $p\upsilon$ 值是指作用在摩擦件投影面积上的单位压力和表面运动速度的乘积,这是代表摩擦材料能正常工作的极限值。FT涂层的 $p\upsilon$ 值试验是在一定线速度下,摩擦力矩及温度随压力的增高而增高,达到某一压力值时,摩擦力矩和温度突然升高,以致材料表面破坏,这就是FT涂层的极限 $p\upsilon$ 值。

FT涂层材料的涂敷工艺与环氧涂层及聚酯涂层有些不同,FT涂层与金属的粘接强度不高,在使用过程中易脱离金属基体表面。为了解决这个问题,可采用高粘接强度的底层涂料。底层涂料由环氧树脂、增强材料及增韧剂等所组成,粘度较低,易于渗进被粘接的基体金属表面。

通过试验证明,在底层涂料涂覆于金属基面上后可立即涂复FT涂层,也可在底层涂料经一天固化后,用丙酮处理底层表面,然后再覆盖FT涂层。这两种工艺方法均可使面层与底层结合牢固。

哈尔滨电机厂的KY-16型立式车床是我国最大的龙门式立车,由于导轨面损坏而不能正常使用,广州机床研究所工程技术人员采用FT涂层成功地修复了这台超重型的立式车床,取得了显著的技术和经济效益。

## 第5节 金属塑料复合导轨板

金属-塑料三层复合材料综合了金属和塑料的优点。它具有机械强度高、摩擦系数低、耐热性好、线膨胀系数小、导热性优良及使用温度范围宽等特性。国外代表产品为DU和DX材料,国内同类型材料有FQ-1机床导轨板材料,另外还有SF和GS材料等。

三层复合材料系由钢背、青铜和聚四氟乙烯(或聚缩醛)三层材料所组成。内层钢背是为了提高材料的机械强度和承载能力。中间层为烧结球形青铜粉或烧结青铜丝网的多孔层,以提高材料的导热性避免氟塑料的冷流和蠕变,且有利于与表面层塑料的牢固结合,同时又是表面自润滑材料的储库。

在使用过程中,当表面塑料层被磨损后,青铜与对偶件发生摩擦,其摩擦力的增大使温度升高。由于塑料的热膨胀系数远大于金属,故塑料即从多孔层的孔隙中挤出,使自润滑材料不断向摩擦表面上补充。因此,这种材料具有良好的自润滑特性。

表面塑料层的厚度很薄,约0.05~0.01mm,因此,装于机床导轨上后一般不需要再加工。

FQ-1与DU材料相似,同样是在钢背上镀铜,再烧结青铜球,然后真空浸渍上聚四氟乙烯所构成的材料体系。FQ-1导轨板具有优异的摩擦特性,摩擦系数低,且随着滑动速度的增加略有上升。从而提高了机床的定位精度及运动平稳性。图4-5-1和图4-5-2为常用机床导轨材料的摩擦系数在干摩擦和有油润滑条件下随滑动速度的变化情况。

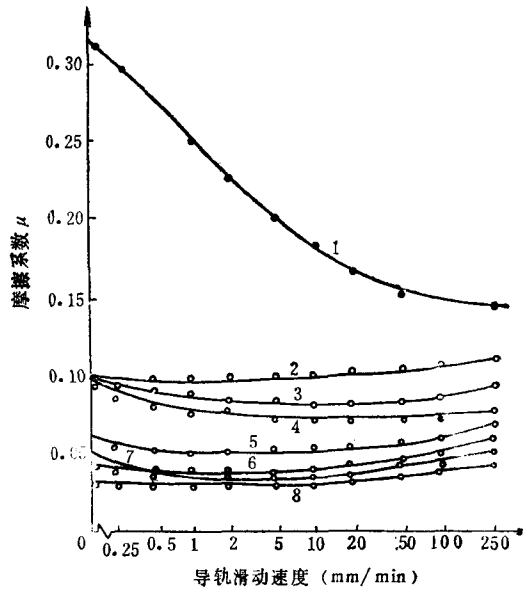


图4-5-1 导轨摩擦系数-滑动速度关系  
曲线(干摩擦)

试验条件:往复式摩擦实验台;比压 $P = 0.1\text{MPa}$ ,  
对摩面为精刨铸铁

- 1—酚醛夹布胶木 2—改性聚甲醛 3—FQ-1,  
10% Pb 4—FQ-1, 20% Pb 5—TURCITE,  
5% Pb, 磨去铜层100 $\mu\text{m}$  6—GLACIER "DU"  
7—TURCITE "B" 8—FQ-1, 5% Pb

DU类材料的磨损过程一般可分为三个阶段,即跑合阶段、稳定磨损阶段和急剧磨损阶段。相对应的摩擦系数也有类似的过程特性。图4-5-3为DU类材料的摩擦磨损特性曲线。

由图看出, I 区内的曲线为跑合阶段。在此阶段内, DU板的表面塑料层聚四氟乙烯在滑动摩擦作用下向配对金属表面上转移,填补金属表面上的凹坑,并逐渐形成转移膜(或称第三组分)。所以,此阶段内,磨损较大,摩擦系数也较高。

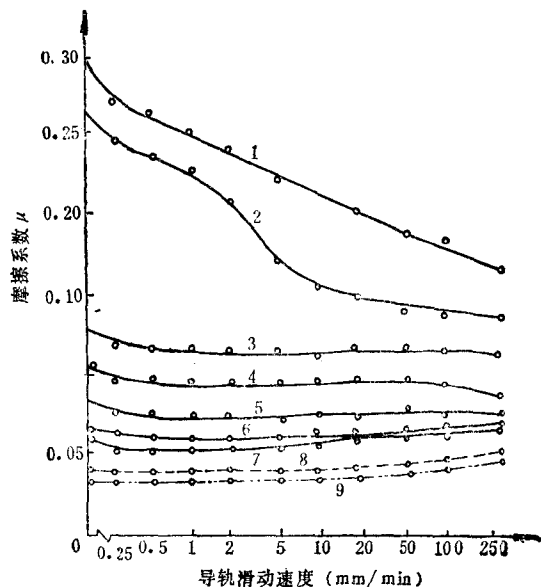


图4-5-2 导轨摩擦系数-滑动速度的关系曲线 (油润滑)

试验条件: 往复式摩擦试验台, 比压  $P = 0.1\text{MPa}$   
对摩擦面为精刨铸铁, 室温  $20^{\circ}\text{C}$

- 1—酚醛夹布胶木 2—刮研铸铁 3—改性聚甲醛  
4—FQ-1, 10%Pb 5—FQ-1, 20%Pb  
6—TURCITE "B" 7—GLACIER "DU"  
8—FQ-1, 5%Pb, 磨去铜层  $100\mu\text{m}$   
9—FQ-1

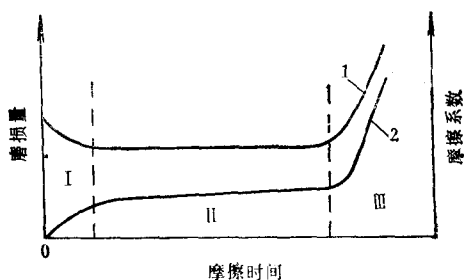


图4-5-3 DU类材料的摩擦磨损特性  
1—摩擦系数曲线 2—磨损量曲线

Ⅱ区内的曲线为稳定磨损阶段。在此阶段内, 摩擦和磨损两条曲线均较平稳。这是由于经跑合阶段后, 在配对金属表面上生成一层连续的转移膜。在一定程度上来说, 两个导轨面之间的摩擦实际上变为聚四氟乙烯之间的摩擦, 所以, 摩擦系数低且稳定。另外, 由于多孔青铜层的良好承载及导热作用, 使材料的磨损率较低且稳定。

Ⅲ区内的曲线为急剧磨损阶段。由于经过较长时间运转后, 原来浸渍在多孔青铜孔隙中的聚四氟乙烯润滑剂已大量消耗掉, 致使摩擦界面上没有足够量的润滑剂存在。因此, 润滑不良, 摩擦系数迅速增大, 磨损率也急剧加大。

机床导轨的导向精度往往靠调整镶条的位置来实现的。虽然导轨面间的间隙调小有利于导向精度的提高, 但又使摩擦副的运动不够灵活。在这种情况下, 采用FQ-1金属塑料复合导轨板最合适, 可保证在微小间隙状态下滑动面的运行仍然较灵活。图4-5-4为JCS-016A机床主轴头进给导轨副及镶条上均装上FQ-1导轨板。图4-5-5表示在XK5040机床的Z向燕尾导轨副的镶条上也装上FQ-1导轨板。

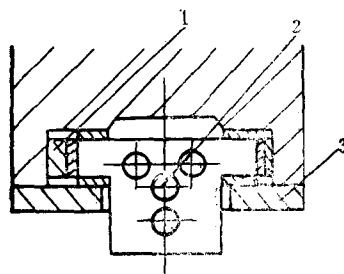


图4-5-4 镶条安装示意图

1—镶条 2—主轴头 3—压板

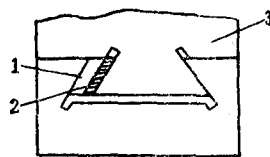


图4-5-5 FQ-1安装板示意图

1—镶条 2—FQ-1板 3—立柱

从应用实践得知, FQ-1导轨板适用于中、小型机床的各向导轨, 大型机床的横梁及刀架导轨。对于垂直导轨和镶条应用FQ-1板更为合适。

FQ-1导轨板的配对导轨材料多为铸铁或钢, 其表面可采用精刨(或精铣)及周边磨削方法加工, 表面粗糙度一般为  $R_a 0.4\mu\text{m}$ 。根据需要, 配对面上可开油孔或油槽。但应注意倒钝尖角及去毛刺, 以防FQ-1板面被划伤。

应用时, FQ-1导轨板的安装固定方式有三种, 即埋头铜螺钉固定法、粘接方法及两端加限位块



法。

### 第6节 塑料导轨软带

广州机床研究所于1982年研制成功TSF高分子抗摩导轨软带，通过大量试验证明，在聚四氟乙烯中添加QSn6-6-3青铜粉、MoS<sub>2</sub>和石墨等，使所制成的这种高分子抗摩软带具有优异的摩擦性能。QSn6-6-3青铜粉中的主要成分为锡、锌、铅和铜。在烧结过程中，铜与锡形成一定量的α固溶体，具有强度高、耐磨性好、摩擦系数稳定的特点。而锌和铅又是减摩性能良好的金属固体润滑剂。另外，青铜本身能与聚四氟乙烯产生化学作用，生成CuF。这样，在摩擦过程中，摩擦表面上形成的定向层又可以与TSF复合材料本体中的青铜生成化学键，从而使材料的耐磨性大大提高。MoS<sub>2</sub>的剪切力低，摩擦系数小，有自润滑作用，它在软带复合体中起减磨和抗压作用。石墨的抗压缩性好，导热性类似于青铜，还能提高这种导轨软带的摩擦磨损性能。

(1) TSF高分子抗摩软带的摩擦特性 试验证明，TSF软带—铸铁组成的摩擦副的摩擦—速度特性曲线具有正的斜率，且静动摩擦系数很低，差值也很小。图4-6-1为三对不同摩擦副的摩擦速度特性曲线。从图看出，铸铁—铸铁摩擦副的摩擦速度曲线的斜率为负值，而TSF软带—铸铁摩擦副以及Turcite-B—铸铁摩擦副的摩擦速度曲线斜率均为正值，且摩擦系数比铸铁约低一个数量级。在有润滑情况下，当滑动速度较高时，其摩擦系数

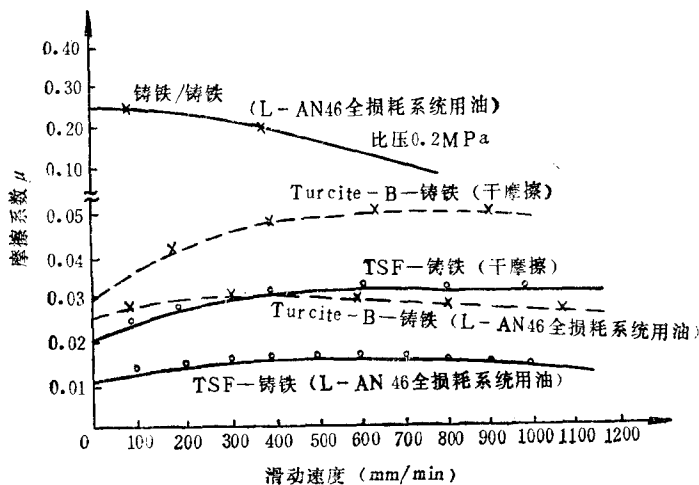


图4-6-1 摩擦—速度特性曲线

略有下降，这是由于弹性流体润滑影响的结果。从图中还可看出，TSF软带的摩擦系数在同样条件下比Turcite-B还要低一些。由于TSF和Turcite-B具有同样良好的摩擦特性，因此，用它们来制造机床导轨，对于防止低速下的爬行、提高运动稳定性及实现高的定位精度等方面尤为突出。

在MM200摩擦磨损试验机上研究了TSF材料随载荷变化的摩擦特性，见图4-6-2。由图可见，TSF材料的摩擦系数随载荷的增加变化不大。由此看出，无论在重载或空运转情况下，TSF软带都能保持稳定的摩擦系数，这就有利于机床导轨的迅速定位，并防止冲击。

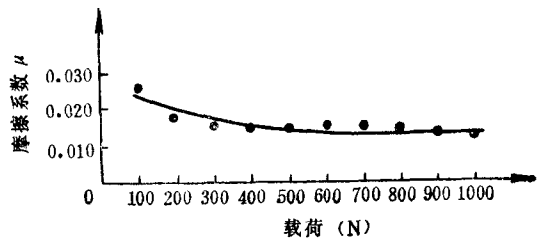


图4-6-2 摩擦系数与载荷的关系

(2) TSF高分子抗摩软带的磨损特性 TSF软带—金属导轨摩擦副的磨损主要在软带一方，而金属一方受到聚四氟乙烯转移膜的保护磨损极为微弱。TSF软带的磨损除取决于本身的特性外，尚与配对面的粗糙度、载荷、速度、温度及润滑介质等有关。

引起材料磨损的因素很多，有摩擦接点上的粘附和剪切；磨屑的氧化；表面层的疲劳；由氧化膜、磨屑或杂质所引起的磨粒磨损以及化学腐蚀等。由前所述，TSF软带的基体为聚四氟乙烯，而其特性是不易粘附和化学惰性。所以，这类材料的磨损主要表现为“犁沟”，而不是粘附。

TSF导轨软带的磨损特性曾在M02平面磨损试验台上进行过研究。以三种不同的比压进行试验，并与美国Turcite-B在同样试验条件下进行对比。用千分表与专用组合量具配合来测量磨损量。试验表明，TSF软带的磨损量随滑动行程和载荷的增加而增加，见图4-6-3。经1000km摩擦行