

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^[1]。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一滑性能好。
- 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材料,二是改革已有的固体润滑剂的使用方法^[2]。

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以硫蒸汽,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、电触点、宝石轴承、刀剪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) 制成复合或组合物来使用 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(国外牌号为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 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 MoS_2 油剂、 MoS_2

油膏、 MoS_2 润滑脂及 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 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。

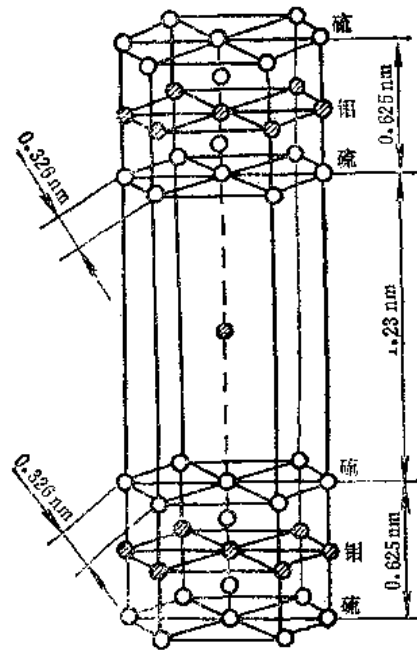


图4-3-1 二硫化钼的晶体结构示意图

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，它是以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 μm 的MoS₂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MoS₂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MoS₂在受剪切力作用时层与层之间相对滑移的情况。

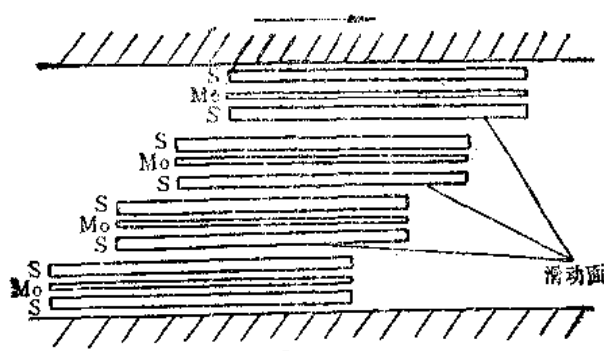


图4-3-2 二硫化钼承受剪切力时的滑移示意图

2. 二硫化钼的主要性能

(1) 低摩擦特性 从MoS₂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MoS₂，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MoS₂的摩擦系数进一步降低。

(3) 良好的热安定性 大气中，MoS₂在399℃下可短期使用，在349℃下可长期使用。一般地说，MoS₂在空气中于-184~+400℃下都具有低摩擦的润滑特性。但是，当温度超过450℃以后，MoS₂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。

MoS₂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(MoO₃)和氧化钼(MoO)等。但在高温下MoS₂附着于金属表面的能力低于常温。MoS₂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	4.7~4.8 g/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F ₂ 和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酸值。在干燥空气中，399℃氧化较慢，在538℃时，氧化加剧。其氧化物有MoO ₃ 和SO ₃ ，氧化反应为放热反应。 $\Delta H = -116.8\text{kJ/克分子}$ ，MoO ₃ 不能认为是原料。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、合成润滑油	
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 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 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 (0.142nm)。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 (0.341nm)，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。

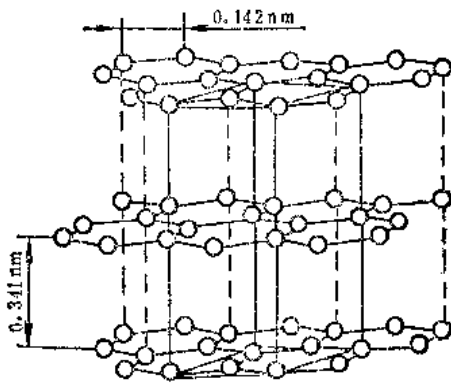


图4-3-3 石墨晶体结构模型

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汽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°C
耐热性	在大气中 500°C 时，可短期使用，在 426°C 下，可长期使用，在 454°C 时，会发生快速氧化，氧化产物为 CO ， 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	$2.64 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{cm}$ ，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 γ 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 MPa
与水的接触角	50°
平均 pV 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、铝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钢或铜的表面上以石墨作润滑剂。

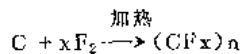
用于润滑的石墨是粉末，既可添加在液体中，又可以加工成复合材料或涂层膜。实践证明，石墨的结晶度、平均粒径、粒子形状和杂质含量均对石墨的润滑特性有影响。一般地说，石墨的结晶度越高，它对被润滑的表面保护性就越好。

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 2.81g/cm^3 ，莫氏硬度 $1 \sim 2$ ，氧化点 $320 \sim 340^\circ\text{C}$ ，

分解温度 520°C ，可在 344°C 下使用；与水的接触角为 110° 。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移。氮化硼与石墨的性质有很大不同。

氮化硼的密度为 2.27g/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°C ，而在真空中为 1587°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 170MPa ，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 -2.3×10^{-6} ；在氧化气氛下最高使用温度为 900°C ，而在非活性还原气氛下可达 2800°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用作高温润滑剂，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。

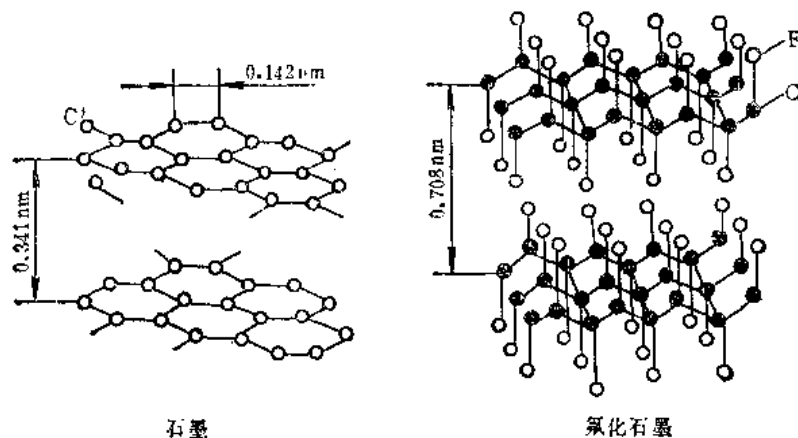


图4-3-4 石墨和氟化石墨基本构造比较

(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、三氯化氯、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°C 到 250°C , 性能都不变, 即使在 250°C 下处理 240 h, 机械性能也不会降低。在温度超过 385°C 时能观察到有明显的失重, 温度达 390°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, 不论是用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。

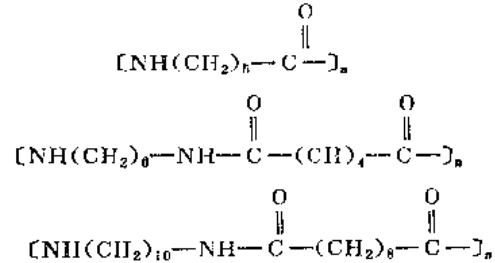
表4-3-3 PTFE的一般性能

外观	白色粉末, 有一定脂肪感
结晶密度	2.35 g/cm ³
密度	(1) 未淬火样品 2.20g/cm ³ (结晶度65%) (2) 淬火样品 2.15 g/cm ³ (结晶度约50%) (3) 非晶区密度 2.01 g/cm ³
吸水率	小于0.01%
导热系数	0.25W/m·K
热变形温度 (4.5MPa)	121°C
线膨胀系数 (-60~280°C)	8~25×10 ⁻⁵ /°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	11~14MPa
弯曲强度 (0.4mm厚的试样)	200000次 (用Z-485试验机测定)
抗拉强度 (20±2°C)	未淬火样品 14~24MPa 淬火样品 16~20MPa
抗压强度	4.2MPa
抗冲强度	10 ³ N·cm/cm ²
极限pv值	0.048~0.089MPa·m/s
摩擦系数	在大气中 0.04~0.2 在真空中 0.04~0.2
表面比电阻	9.7×10 ¹² Ω
体积比电阻	大于10 ¹⁷ Ω·cm (在10 ⁶ Hz下测定)
介质损耗角的正切	小于2.5×10 ⁻⁴ (在10 ⁶ Hz下测定)
介质常数	小于2.2 (在10 ⁶ Hz下测定)
击穿电压	64±2μm, 大于40kV/mm
抗拉弹性模量	0.6GPa
热稳定性	260°C
比热容	1.05×10 ⁻³ 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。一般是二羧

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, 而且干摩擦系数也不很高(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比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^3)	1.13	1.15	1.04~1.09
熔点 ($^{\circ}\text{C}$)	215	256	200~210
吸水率%	1.9	1.5	0.05~0.39
开始可塑温度 ($^{\circ}\text{C}$)	160	220	
软化温度 ($^{\circ}\text{C}$)	170	235	
马丁耐热 ($^{\circ}\text{C}$)	40~50	50~60	42~45
热导率 ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)	0.24	0.24	0.1~0.4
脆化温度 ($^{\circ}\text{C}$)	-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 ($\text{N}\cdot\text{cm}/\text{cm}^2$) (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 ($10^{-5}/^{\circ}\text{C}$)	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 $^{\circ}\text{C}$ 时溶解	
30%煮沸盐液中		部分溶解	
30%硫酸中		溶 解	
碱		稳 定	
油		稳 定	
电击穿强度 (kV/mm)		10~15	
体积电阻 ($\Omega\cdot\text{cm}$)		$10^{14}\sim 10^{15}$	

200 $^{\circ}\text{C}$ 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的情况下。

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方法,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双丙酮(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($-\text{CH}_2-\text{OH}$)及醚键($-\text{O}-$),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

$$\begin{array}{c} \diagdown \quad \diagup \\ \text{C} \quad \text{C} \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{O} \end{array}$$

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 HINT 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 MoS_2 及石墨的加入量对涂层性能的影响。

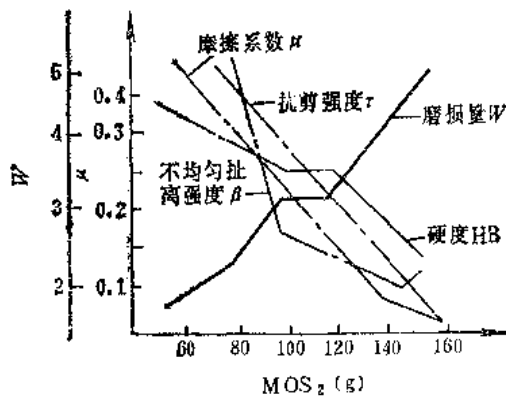


图4-4-1 MoS_2 加入量对耐摩涂层性能的影响

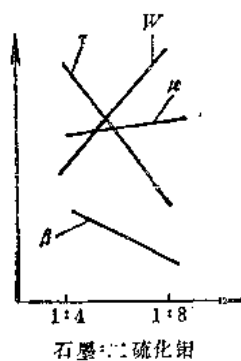


图4-4-2 石墨加入量对耐摩涂层性能的影响

(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。

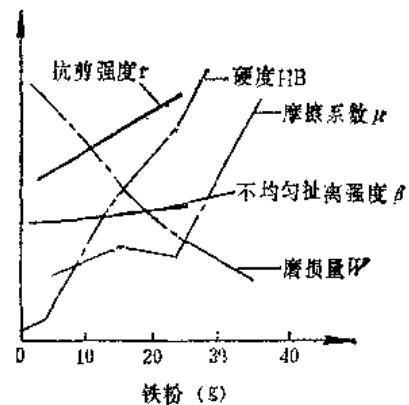


图4-4-3 铁粉加入量对涂层性能的影响

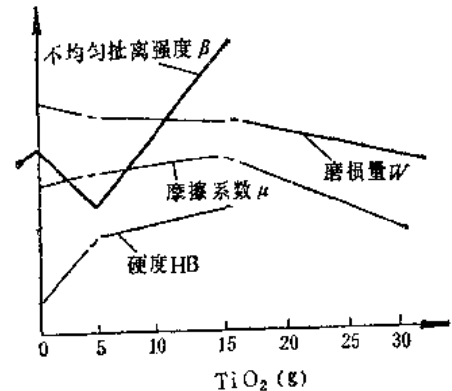


图4-4-4 二氧化钛加入量对涂层性能的影响

(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	HNT	HNT	HNT
	11- J5	17-5	20-1	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C₁₀H₁₇N₃, 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℃)	m ² /s	1.3×10 ⁻¹⁰ ~ 1.3×10 ⁻¹¹	1.3×10 ⁻¹⁰ ~ 1.3×10 ⁻¹¹	1.3×10 ⁻¹⁰ ~ 1.3×10 ⁻¹¹		
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 ²	>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 ³	6×10 ³	6×10 ³	GB1041-92
	马丁耐热温度	℃	>60	60	>30	GB1035-70
	平均线胀系数	1/℃	<12×10 ⁻⁵	6~12×10 ⁻⁵	6~12×10 ⁻⁵	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 1kg 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 1kg 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

聚酯涂层也即饱和聚酯涂层。饱和聚酯是由不饱和的二元醇与饱和的二元酸（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 $\begin{matrix} \text{O} \\ | \\ \text{—C—O—} \end{matrix}$ 和不饱和双键 —CH=CH— 。饱和聚酯涂层是以饱和聚酯为基，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。

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。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。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。

因饱和聚酯分子结构中存在饱和双键，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交联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制成糊状物。

加促剂的作用是使引发剂在室温下引发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，常用的有钴有机盐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总量的 4%。

广州机床研究所已于 70 年代末研制成功 JKC 型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述两步进行：

- 1) 加促剂与固化剂作用生成自由基：
 $\text{Co}^{2+} + \text{过氧化环己酮} \rightarrow \text{Co}^{3+} + \text{自由基}$

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聚合交联反应。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型抗磨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抗磨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抗磨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。

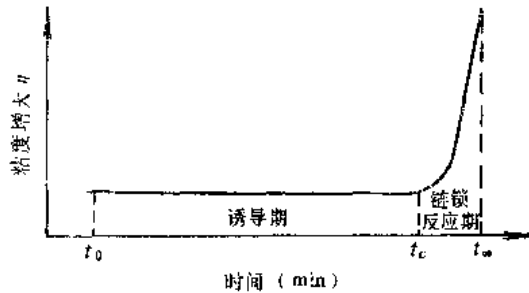


图4-4-5 粘度—时间变化特性

(3) 涂料的触变性 JKC抗磨涂料中, 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聚脂涂层在冬季室温(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 ³	1.5 g/cm ³	
粘接剪切强度	9~12MPa	14~18MPa	HG2-151-65
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	60~80N·cm/cm ²	50~60N·cm/cm ²	GB1043-79
压缩强度	80~100MPa	80~120MPa	GB1041-70
压缩总变形率	1%	0.5%	20MPa
压缩永久变形率	0.05%	0.025%	20MPa
压缩弹性模量	1~2×10 ³ MPa	2~4×10 ³ MPa	GB1041-70
线膨胀系数	0.7~1×10 ⁻⁴ /°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缩聚为固化剂,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涂层选用的粘接剂为环氧树脂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。

HINT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。

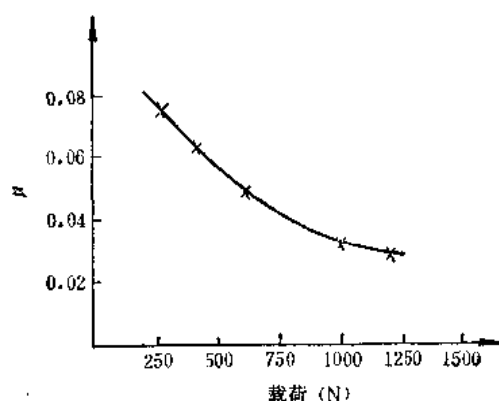


图4-4-6 FT涂层载荷-摩擦系数曲线

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

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

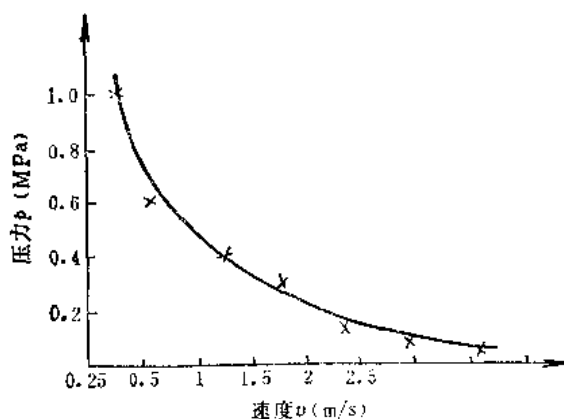


图4-4-7 FT涂层的 $p \cdot v$ 值曲线

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_v 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_v 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_v 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开金属基体表面。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,易于渗透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润滑油条件下随滑动速度的变化情况。

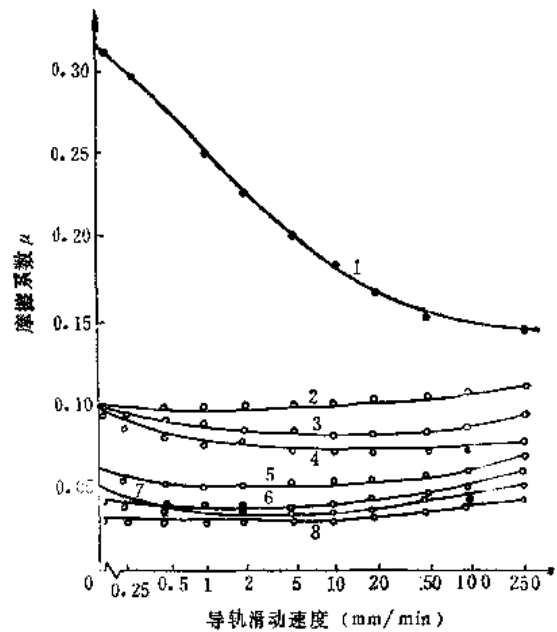


图4-5-1 导轨摩擦系数-滑动速度关系曲线(干摩擦)

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

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 μm 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。

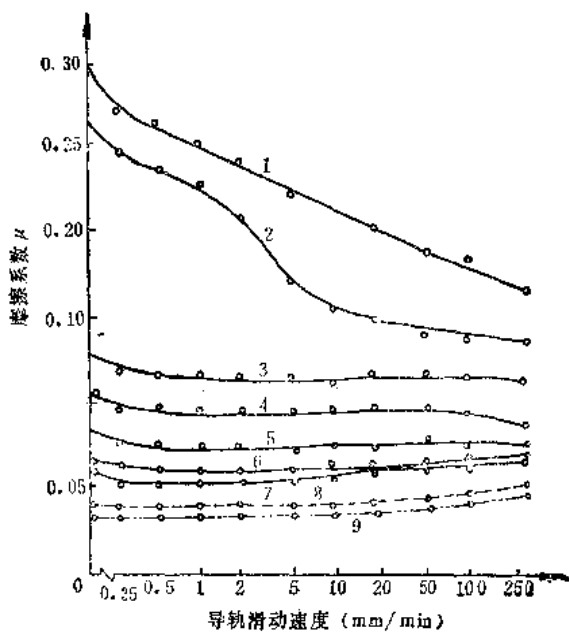


图4-5-2 导轨摩擦系数-滑动速度的关系曲线 (油润滑)

试验条件：往复摩擦试验台，比压 $P = 0.1\text{MPa}$
对磨面为精刨铸铁，室温 20°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, 磨去钢层 $100\mu\text{m}$
- 9—FQ-1

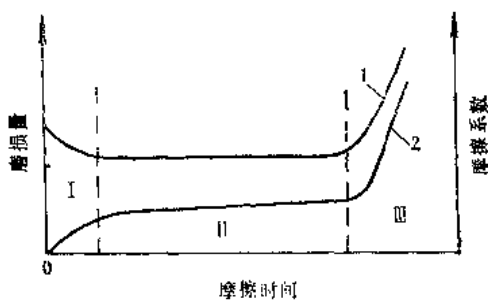


图4-5-3 DU类材料的摩擦磨损特性
1—摩擦系数曲线 2—磨损量曲线

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。

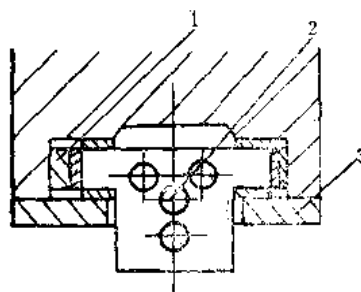


图4-5-4 镶条安装示意图
1—镶条 2—主轴头 3—压板

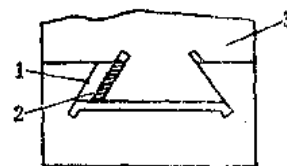


图4-5-5 FQ-1安装板示意图
1—镶条 2—FQ-1板 3—立柱

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_2 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_2 。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_2 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。石墨的抗压韧性好，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

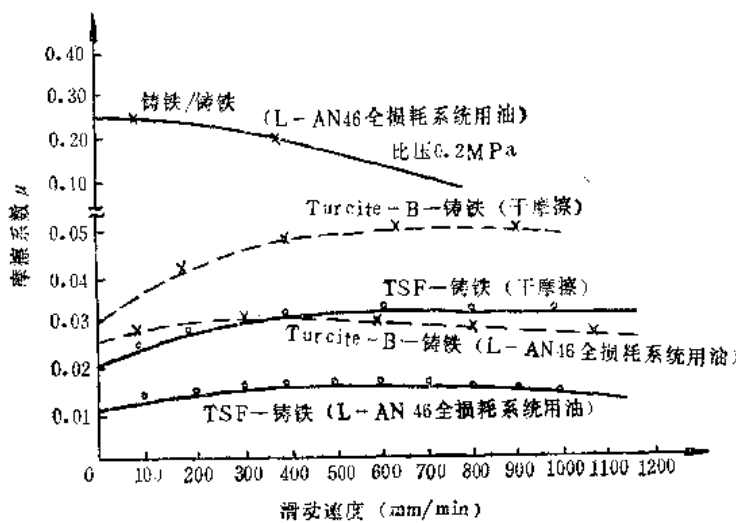


图4-6-1 摩擦—速度特性曲线

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。

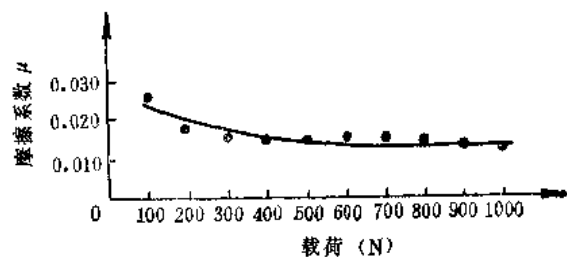


图4-6-2 摩擦系数与载荷的关系

(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

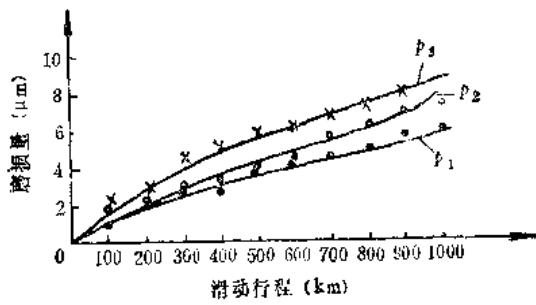


图4-6-3 软带在不同比压下的磨损量与滑动行程关系

程后，其磨损量分别为 5 μm (比压 p_1 为 0.53 MPa)、7 μm (比压 p_2 为 0.75 MPa) 和 9 μm (比压 p_3 为 0.98 MPa)，与美国 Turcite-B 的耐磨性相当。经 1000 km 行程后，两者的线磨损量都在 10 μm 以下。单位负荷、单位行程的比磨损量为 $9 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{km})$ 。

(3) TFS 高分子抗摩软带的承载能力 TFS 软带是一种聚四氟乙烯的复合物，它不仅比纯聚四氟乙烯有较大的承载能力，而且变形率也较小。研究 TFS 的承载能力是在 30 t 的万能材料试验机上进行的。试件直径 40 mm、厚度分别为 1.2、1.5 和 2.5 mm 的圆形薄片。在不同载荷下，保压 5 min，然后用外径千分尺测量其压缩变形量。变形量与压力的关系见图 4-6-4。由图看出，载荷达到某一定值后，变形量有明显增大，即变形量随软带厚度的增加而增大。当载荷在 20 MPa 以下时，TFS 软带的变形量甚微，其永久变形小于 1%。而实际机床的承载载荷远低于此压力范围，这就说明在机床实际使用中，TFS 软带能满足精度要求。据国外报道，用 Turcite-B 制造机床导轨面和镶条时，其变形量也在 1% 以下。

(4) TFS 高分子抗摩软带的 $p \cdot v$ 特性 TFS 材料的 $p \cdot v$ 值试验是在 MM1000 摩擦材料试验机上进行

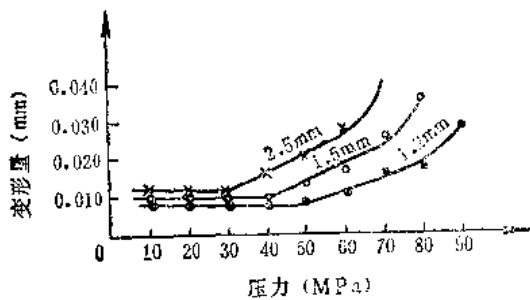


图4-6-4 不同厚度下TFS变形量与压力的关系

的。在几个固定的线速度下，测出 TFS 材料的极限 $p \cdot v$ 值。在一定线速度下，温度随压力增加而升高，见图 4-6-5。在一定压力下，温度随滑动速度的增大而升高，见图 4-6-6。而且干摩擦比有油润滑时更明显。图 4-6-7 为 TFS 材料的 $p \cdot v$ 曲线图。试验测得的 $p \cdot v$ 极限值约为 $30 \text{ MPa} \cdot \text{m} / \text{min}$ ，而一般机床的 $p \cdot v$ 值很少超过 $4 \sim 5 \text{ MPa} \cdot \text{m} / \text{min}$ 。因此，TFS 软带应用于机床导轨时，可最大限度地提高机床运行速度和载荷，以取得最高工效。

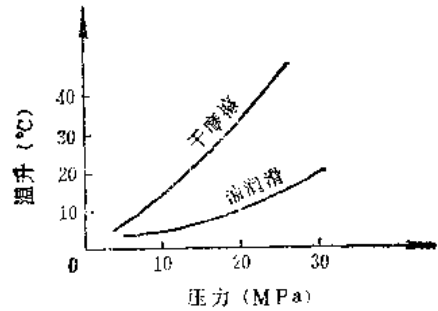


图4-6-5 温度与压力的关系

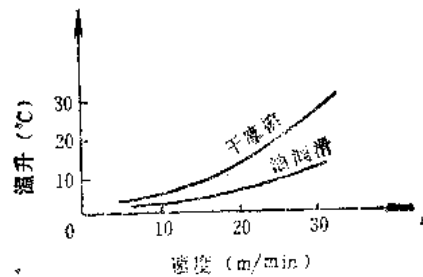


图4-6-6 温度与速度的关系

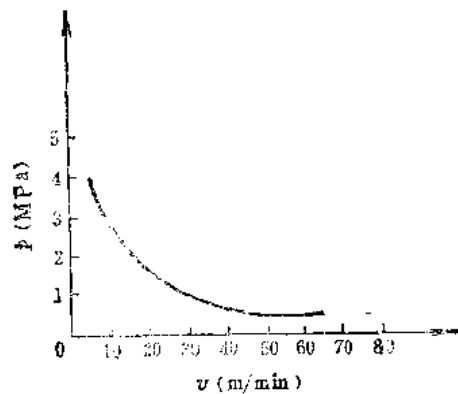


图4-6-7 TFS软带的p·v曲线图

(5) TFS 高分子抗摩软带的应用 由于分子结构上的特点，TFS 软带表面具有不可粘性，严重影响其应用。故必须对 TFS 软带进行表面处理及研制

合适的胶粘剂，才能使TSF导轨软带在机床工业和设备维修上得到广泛的应用。试验表明，采用活性钠化学处理法比辐射接枝法工艺简单，且处理后材料的力学性能保持值较好，粘接强度也较高，性能比较见表4-6-1。

表4-6-1 钠-萘-四氢呋喃处理与辐射接枝的性能比较

TSF表面状态	表面粗糙度(μm)	布氏硬度①	抗拉强度(MPa)	断裂伸长率(%)	剪切强度(MPa)
未经处理	R _a 7.3	5.9	21.6	126	9.8
钠萘处理	R _a 5.3	6.3	20.8	71	13.9
辐射接枝	R _a 5.0	8.5	17.3	12	9.4

① 布氏硬度用φ5mm钢球，载荷625N，保压60s。

在完全无水和有四氢呋喃存在时，金属钠和萘结合成相当稳定的呈现墨绿色的带有萘负离子和钠正离子的可溶性络合物。这种络合物与聚四氟乙烯表面接触时，络合物中的钠破坏聚四氟乙烯表面分子的C—F键，使聚四氟乙烯中的氟分离出来，表面发生碳化，即形成活性的碳的双键，表面能提高，这样使用合适的胶粘剂，才能粘接。碱性钠-萘-四氢呋喃溶液在空气和水份的作用下易分解，因此，保存时应尽可能与空气隔绝。一般可存放六个月。

(6) 粘接前TSF软带的表面处理 将预先用丙酮清洗过的洁净TSF软带，在室温下浸于上述配制好的溶液中。经一定时间后取出，用丙酮洗去附在表面上的过剩有机物，再用水洗，除去软带表面的残余金属块等。晾干或真空干燥后即可用于粘接。

TSF软带随在溶液中浸渍时间的延长，其颜色逐渐加深，粘接强度也随之加大。浸渍时间以15min为宜。TSF软带经表面化学处理后，表面氟原子被分离出去而留下一层约1μm厚的含碳薄膜。这样的表面较易被胶粘剂浸润而获得较高的粘接强度。虽表面经化学处理，但软带内部分子结构并不起变化，各项物理性能基本保持不变。但紫外线能使处理过的氟塑料表面变质，存放时间长会影响其粘接强度。经验表明，加入1%碳黑可克服这种现象。TSF软带中含有石墨成分，也有同样的抑制紫外线影响的效果。试验证明，经表面处理后的软带在干燥器中存放一年，软带的粘接强度并无下降。

用于粘接TSF软带的配套DJ胶粘剂，是一种以双酚A型环氧树脂为主剂，低分子量聚酰胺为固

化剂，液体羧基丁腈橡胶为增韧剂，并含有其他促进剂的双组分室温固化胶粘剂。其固化反应历程较为复杂，主要有环氧树脂与羧基丁腈橡胶的嵌段反应和聚酰胺使环氧树脂开环的反应。

这两个反应的相对速度决定了固化物的基本结构。反应速度受气温高低、湿度大小的影响。当室温25℃，湿度<70%时，固化24h，粘接强度可达最终强度的50%，基本可达使用要求，以后强度逐渐增加，室温固化时间与强度的关系见表4-6-2。

表4-6-2 DJ胶粘剂室温固化时间与强度的关系

固化时间(天)	1	2	3	5	7	10	15	30	130
剪切强度(MPa)	7.2	7.2	7.5	11.5	11.7	12.0	12.9	13.7	14.8

DJ胶粘剂可在10~40℃中使用。如果室温低于10℃，稠度较大，操作性能较差，此时可将A、B两组分分别加温至30℃左右后再混合使用。A、B两组分混合后，使用寿命约为1~2h。

TSF软带的其他性能见表4-6-3。

表4-6-3 TSF软带的性能

项 目	TSF	试验方法
相对密度	2.9	GB1033—86
硬度(HBS)	9.27	HC2-168—65
抗拉强度(MPa)	14.1	GB1040—79
压缩变形 (比压3MPa)	总变形(%)	广州机床研究所 方法
	永久变形(%)	
摩擦系数	0.025	MM200试验机
磨损系数 [cm ³ /(MPa·m)]	5.6×10 ⁻¹⁰	M01往复试验机
极限pv值 (MPa·m/min)	30	MM1000试验机
膨胀系数 [cm/(cm·°C)]	9.8×10 ⁻⁵	GB1036—89
吸油率(%)	0.55	HC2-146—65
大气自然老化3年，拉伸强度(MPa)	13.9	GB1040—79

第7节 机床塑料导轨 的应用工艺

(一) 导轨板的应用工艺

导轨板的应用一般是靠粘接剂将其粘接到机床的滑动导轨基面上。塑料导轨板的厚度为2~4mm。对于导轨维修而言, 主要根据导轨磨损的程度来选用合适的塑料板厚度, 因为导轨受磨损后破坏了机床原来的尺寸链。

塑料导轨板的应用工艺过程见图4-7-1。

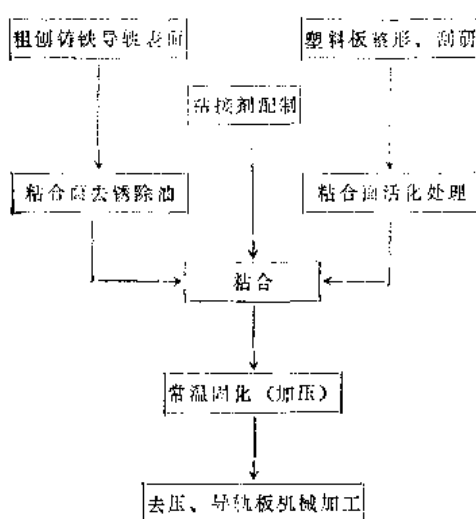


图4-7-1 塑料导轨板应用工艺过程

为了使导轨板和铸铁面之间获得良好的粘接强度, 铸铁导轨面必须经过粗刨加工, 塑料板需经过整形, 确保平直无弯曲。塑料板的滑动面要进行刮研, 并使其着色点面积达50%左右。塑料板的粘贴面用砂布打毛。要求两个粘合面平整, 其接触吻合面积在50%以上。如果导轨板需要拼接, 接头应尽可能少, 且接头的横断面要平整。

粘接前, 要确保两表面干净、无油污和锈斑。一般先用汽油洗去油污, 然后用工业丙酮清洗表面。如果是非极性的塑料板, 应使粘接面先活化后粘接。粘接剂可采用聚氨酯101胶或压敏胶。101胶分甲、乙两组分, 使用时其配比为甲组分: 乙组分 = 100:35。也可自行配制一些韧性较好的能在常温下快速固化的胶粘剂, 如420胶、501胶和502胶等。

420胶在室温下24h可固化, 且具有良好的耐油性能。其配方如下:

634环氧树脂	100份
690稀释剂(环氧苯基醚)	10份
662甘油环氧树脂	20份
氧化铝粉(300目, 900°C灼烧2h)	50份
B 201处理液(γ-二乙烯三胺丙基三乙氨基硅烷)	3份
650聚酰胺树脂	140份

先将前五种材料按比例调均匀, 然后在使用前加入650聚酰胺, 混合均匀后即可使用。如果胶液较稠, 搅拌有困难时, 可在热水中稍加热, 这样易于调和。注意调好胶后, 必须在1~2h内使用, 否则胶粘剂会自行固化。

塑料板与铸铁导轨两个胶合面, 都须分别涂刷胶液两次。第一次涂刷后, 经5min再涂刷第二次, 第二次涂刷经15~20min, 待胶层发粘有拉丝现象后, 再将塑料板与铸铁导轨贴合, 用重物加压。其接触压力约0.03~0.05MPa, 不宜过大, 否则, 胶液被挤出, 影响粘接强度。为了提高塑料导轨板在端部的固定程度, 建议用销钉加固, 见图4-7-2。图中销钉4应在塑料板胶层完全固化后才装上, 另外, 加工销钉孔时不得破坏胶层。销钉应安置在导轨板的外端。装销钉前, 先涂上环氧树脂, 装上销钉

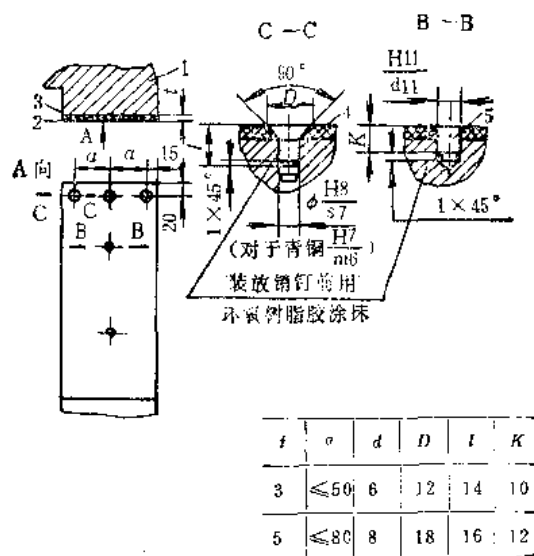


图4-7-2 粘接塑料板的附加固定(直线运动导轨)
1—滑板(工作台) 2—塑料导轨板 3—粘合层
4—在滑板(工作台)端部固定板条的销钉(夹布胶木IT, 卡普隆B, 青铜) 5—防止导轨板在粘接过程中移位用的销钉(夹布胶木IT, 卡普隆B, 乙炔塑料)

t	σ	d	D	l	K
3	≤50	6	12	14	10
5	≤80	8	18	16	12

2~3 h后,即可刮研塑料导轨。每端的销钉数应根据导轨的宽度而定,销钉5的作用是防止板条在粘接过程中移位。

经过24 h待胶层完全固化后或安装附加固定装置之后,应该根据情况将塑料导轨板进行机械加工,以使其导轨精度满足设计要求。

按导轨设计要求,在塑料导轨上可用机械方法加工出润滑油槽。但应该注意,在加工油槽时,塑料板上至少保留不少于0.3mm厚的一层塑料。图4-7-3为工作台塑料导轨上润滑油槽的可能排列及其选择。也可以考虑在工作台的两端安装相应的挡板,以利于导轨面间形成油压,见图4-7-4。

对于FQ-1导轨板,由于板面的可加工余量较小,因此,出厂后的成品要求保证其标准长度范围内的厚度均匀性在±0.005mm内。如果机床的导轨精度需要调整时,一般只要求修刮FQ-1导轨板背面或其安装基面即可。

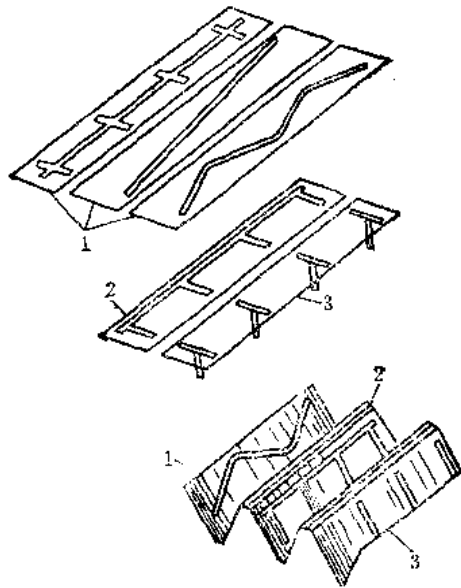


图4-7-3 工作台(刀架上制作润滑油槽)的实例
1—不建议用 2—允许用 3—建议用

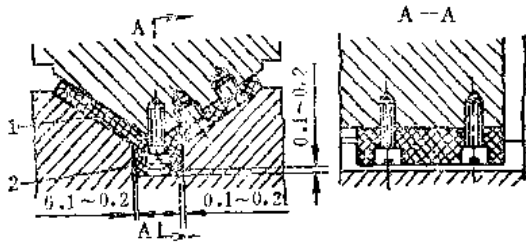


图4-7-4 在龙门刨床工作台两端安装挡板以提高油压
1—镶装导轨 2—板

(二) 导轨软带的应用工艺

由于导轨软带具有优异的使用性能和工艺特点,目前在机床行业的应用日趋普遍。许多工厂在使用导轨软带的过程中取得了不少实际经验,导轨软带的应用工艺过程见图4-7-5。

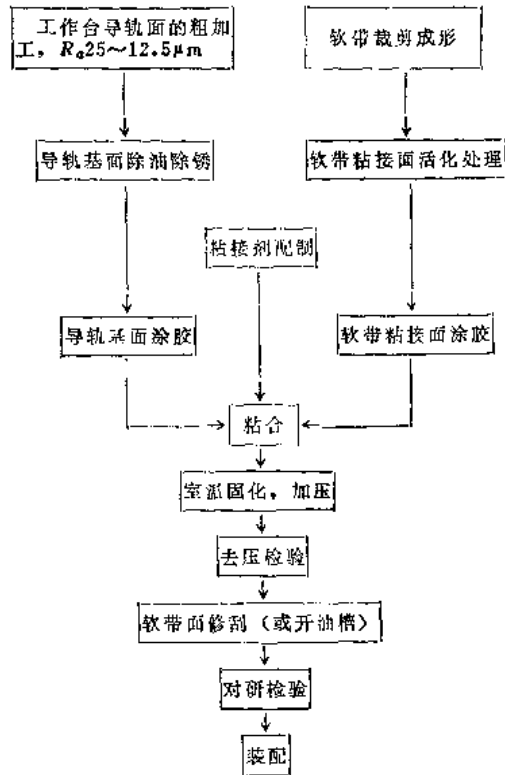


图4-7-5 导轨软带应用的工艺过程

粘接之前,按导轨面的几何尺寸将导轨软带切割成形。一般要求切出来的软带长度比导轨长度长5~6mm,这是考虑工艺余量之故。

被粘接的工作台导轨基面需经粗加工,粗刨或粗磨,粗糙度为 $R_a25\sim12.5\mu\text{m}$ 。表面用汽油除油脱脂,待汽油挥发后,再用工业丙酮清洗至脱脂棉上没有明显的污垢。不需要粘接塑料软带的导轨面和螺丝孔涂抹上脱模剂(如硅脂)。

将DJ胶粘剂或相似的胶粘剂均匀地涂刷在软带表面和被粘接的导轨基面上。胶液不准含有气泡,且应使胶层中间略高于四周,以防止胶层中间形成气泡,影响胶接强度。粘帖好后,两端可用压板和螺钉紧固定位。

将工作台翻转就位扣压在床身导轨上,利用工作台导轨的自身重量或外加一定重量,固化压力一般为 $0.1\sim0.15\text{MPa}$ 。经过24 h的室温固化后,可

将工作台吊起、翻转，以备检查。粘接质量如何，可用小木锤轻轻敲打整个软带来鉴定。若敲打时发出的声响音调一致，这说明软带的粘接质量是好的。

导轨软带可用于各种机床导轨的制造和维修，尤其适用于精度要求较高的精密机床和数控机床。导轨软带在机床上的应用形式有下面几种，见图4-7-6。软带在工作台导轨上的粘接方式最常见的有两种：平面式和埋头式，见图4-7-7。对于一般旧机床导轨的维修可采用平面式粘接法，新机床导轨的制造可选用埋头式，这样可增加软带的粘接强度。

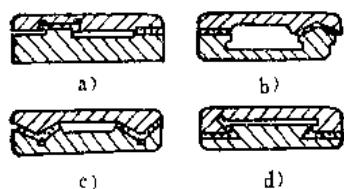


图4-7-6 导轨软带应用形式



图4-7-7 主要粘接方式

a) 平面式 b) 埋头式

如果导轨软带是双面活化处理时，应将表面上的碳化层用金相砂纸打磨掉，才能真正反映出导轨软带材料本身的摩擦学特性。

对于旧机床导轨的维修，一般是将床身导轨刨去1~2mm。如果该床身导轨只刨去或磨去1mm，则需粘接1.2~1.3mm厚度的软带，以便有余量配刮。由于V形导轨有60°的V形角，因此，V形导

是一致的。

(1) 涂敷前的准备工作

1) 工作台导轨面的加工 机床工作台导轨一般比床身导轨要短小一些。从导轨涂层复印成形工艺及经济性考虑，通常选择工作台导轨来制作涂层导轨，而采用面积较大的床身导轨面作复印面。

为了使涂层在导轨基面上粘得牢固，要求将工作台导轨面粗刨成锯齿形状。锯齿条纹深度为0.5mm，齿距1~2mm。由于锯齿形表面的接触面积增大，故有利于涂层粘接强度的提高。在粗加工工作台导轨时，应使其边缘沿纵向方向留下两条支承边，其高度相当于涂层的厚度，宽度约为2~4mm，见图4-7-8。这两条支承边的主要功用是起挡料和定位作用。两支承边的平直性要求 $\leq 0.10\text{mm}$ ，这可通过磨削加工来达到技术要求。

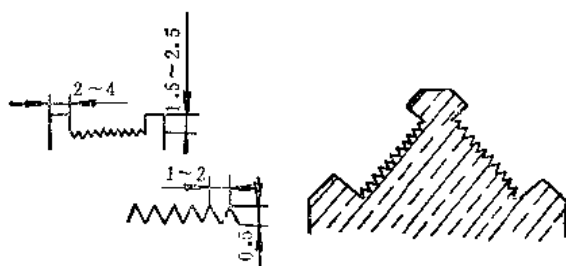


图4-7-8 工作台导轨基面加工状况

2) 床身导轨面精加工 因床身导轨而是涂层导轨的复印面，其导轨面的精度和粗糙度决定了涂层导轨的精度和表面粗糙度。因此，床身导轨面必须进行精加工。一般采用周边磨削方法，因这样加工出来的纹路走向与导轨运动方向基本一致，有利于提高导轨表面的摩擦学特性。端面磨削方法不宜采用。但是，对于立式车床和立式滚齿机这类回转运动导轨，其床身导轨面的加工最好采用精车的方法。

3) 床身导轨精度调整 按机床设计要求，调

工面的准备工作基本就绪。

(2) 涂敷施工过程

1) 导轨面的清洗 用钢丝刷将工作台导轨的齿间铁屑、脏物和铁锈等刷净。在施工前,用压缩空气吹除尘屑,然后用汽油和丙酮把油污和锈迹清洗干净。床身导轨面用汽油和丙酮清洗干净,然后用软毛刷将预先配制好的脱模剂有机玻璃丙酮溶液(有机玻璃:丙酮=1:100)均匀地涂刷在床身导轨及其四周边缘上。如果设计上要求工作台涂层导轨上带有油槽的话,则应该在床身导轨的特定位置上粘贴油槽模条,模条厚度应小于涂层厚度约0.5mm。最后再涂上脱模剂。

2) 涂料固化反应 按工作台导轨的面积及所要求的涂层厚度来估算所需的涂料量。称取所需的涂料放入容器中,将容器置于一搅拌装置下搅拌,也可采用台钻作为变速的机械装置。搅拌器由钢棒和钢板焊制而成,叶片为螺旋桨式,分上下两对,各以相反方向扭成一定角度。搅拌速度控制在100~150 r/min。将所需的固化剂量缓慢地加入容器中,按上述的搅拌速度搅拌,辅以长条形刮刀,不断将容器壁上的涂料刮入予以搅拌,确保涂料与固化剂混合均匀。因这类固化反应属放热反应,放出来的热量又能加速固化反应的进行。所以,搅拌速度不宜太高,以防过多摩擦热产生,固化剂应缓慢加入,确保施工阶段固化反应慢速进行。

将混合均匀的涂料倒在一个干净的薄钢板上,用刮刀将涂料摊开并来回揉和,以及时传走固化反应所产生的反应热。通过揉和涂料,又可以除去涂料在搅拌过程中带进的气泡。这样既能控制固化反应的速度,又能使固化了的导轨涂层中尽量减少气孔。

3) 涂敷 借助预先准备好的刮刀,将涂料从导轨的一端刮涂至另一端,逐层加厚。涂刮时应注意均匀和平整,切勿图快而堆积涂料,以免包进气泡,致使涂层固化后造成过多的气孔和缺陷。当涂料高于支承边高度时,改用带定位边的弧形大刮板,见图4-7-9。刮板的弧形缺口宽度约等于导轨面的宽度。将刮板的定位边紧靠支承边移动,这样就能使最后涂刮成的涂料呈弧形,其弧形高度约为宽度 b 的1%~4%。

在整个涂敷施工过程中,从搅拌至最后涂刮完毕一般要求在1h内完成。施工现场的环境温度最好不低于15℃。

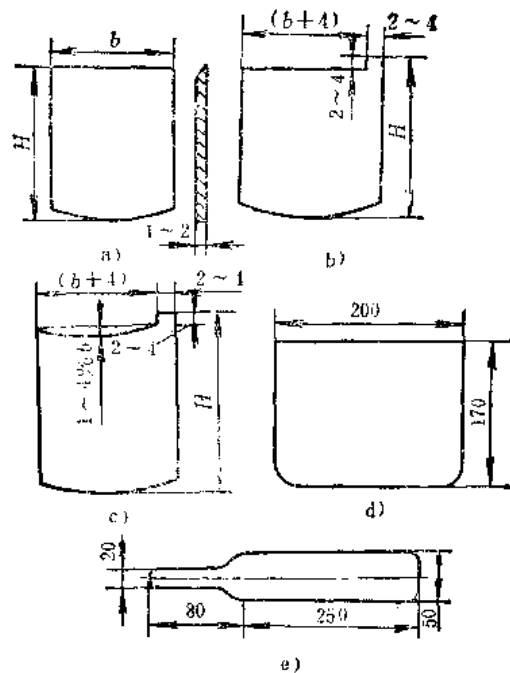


图4-7-9 各种刮板的形状和尺寸

- a) 小平刮板 b) 大平刮板 c) 弧形刮板
d) 揉和用刮板 e) 搅拌用刮板

(3) 压配固化 用吊车将工作台吊起,翻转工作台并使之按预定位置缓慢下落在床身导轨面上。注意按定位线扣合。并在工作台上外加一定重量,使工作台导轨上的压力约0.075~0.1MPa,外加重量要均匀,切勿使工作台产生变形。在外加重物后,便能使多余的涂料从导轨两侧挤出。

(4) 起模 涂层压配固化24h后便可起模。但压配固化时间应视环境温度的高低略有变化。起模时,一般靠千斤顶先将工作台的一端顶起,然后再将另一端顶起。待两导轨面完全脱开后,即可用吊车吊起,翻转工作台并吊放在适当的位置上。

(5) 清理 工作台导轨四周溢出的涂料固化后形成的飞边,可用锯、锉刀修整,禁止用锤子敲击涂层。床身导轨面上的脱模剂用丙酮清洗干净,溢流出来的涂料同样用锯、锉刀除去。

(6) 刨低支承边 将工作台吊至龙门刨床校正,采用双刃的刀具将工作台两边原来留下的支承边刨低0.5~0.7mm,保证机床在使用过程中导轨表面不存在金属的直接接触摩擦及使涂层表面磨损均匀。注意不要致使涂层边缘出现缺陷。

(7) 检查与修补 施工完后的导轨涂层表面应该平整光滑,没有缺陷,没有大的气孔。若气孔直径大于2mm,以及密集气孔区域的面积超过

20mm²，应以相同的涂料进行修补。涂层导轨面上的油槽必须畅通，但油槽底部不得露出基体金属面。

(8) 施工过程中应注意的问题

1) 材料中各组分一定要混合得很均匀，在制备涂料时，经机械搅拌后的物料最好再经三辊机重复滚压两次，这样有利于涂层质量的提高。

2) 由于固化反应属放热反应，放出来的热量又会加速固化反应的进行，使材料体系的粘度迅速增大，凝胶化过快，使用时间缩短，这样对于大面积导轨的施工是很不利的。因此，在环境温度较高（如高于36℃）的情况下，固化反应时应考虑加冷却装置。另外，应尽量减少摩擦热的产生，搅拌器的转速不能过高。

3) 支承边上不要开出料口，因开出料口会使涂层材料损失较多，且在出料口处会产生涂料不足及涂层组织不致密等缺陷。

4) 工作台导轨与床身导轨压配时，必须要有定位装置，注意工作台下落一定要水平。否则，压配位置不准确，还会压断油槽楔条，造成涂层出现缺陷。

5) 在施工时，若环境温度较低，会使涂料变得粘稠一些。在这种条件下，可适当加大活性稀释剂——环氧丙烷丁基醚（即501）的加入量。若环境温度低于18℃，可将501的加入量提高至10%；若环境温度低于10℃，则501的加入量可提高至14%。

6) 采用塑料涂层导轨的机床，要求附有较好的防护装置，且在润滑油路中应加上过滤器，以保证润滑油的清洁。否则，当润滑油中混入的铁屑或硬粒等杂质处于两导轨界面时，因为涂层表面硬度比较低，所以很容易被这些铁屑硬粒所划伤涂层的。

7) 盛涂料的容器每次使用后必须清洗干净，用丙酮进行清洗。应注意清洗后要使丙酮挥发干净，以免影响下批涂料的质量。

(四) 导轨涂层的压注成形工艺

80年代以来，高分子涂层的压注成形工艺在许多国家广泛应用。

压注法施工必须要有压注装置。对于小型工件表面涂层的压注，可采用手动注射枪。也可采用挤压润滑脂的黄油枪。

对于较大滑动面上涂层的注射成形，则需采用相应的较大的压注装置。

第8节 高分子复合材料

高分子材料有热固性和热塑性两大类。常用于滑动部件的热固性高分子材料是酚醛树脂。这种树脂一般都添加MoS₂、石墨及纤维等进行增强而制成复合材料。滚动轴承保持架常采用酚醛树脂层压材料。酚醛树脂复合材料的另一个优点是抗磨粒磨损性强，因此，有时也可用于多泥沙的浅水域用船舶的船尾轴套。

注射成形的热塑性塑料中，尼龙轴套使用最广泛。在尼龙轴套中加入MoS₂，可有效地增加尼龙的弹性模量和蠕变强度。注射成型尼龙66是市场上销售最广的MoS₂填充复合材料的基础。

热塑性高分子材料系由长碳链状高分子构成。这种长链形成的板状晶体称为薄层、薄层集中起来形成球晶。链状高分子沿着薄层平面曲折地排列。这种折迭结构可以说是结晶高分子的特征，尼龙和聚乙烯等大多数热塑性高分子都是球晶结构，然而PTFE都是带状结构。表4-8-1列出了各种高分子材料对钢的摩擦系数，可以看出，PTFE的摩擦系数最低，而以球晶结构的高分子次之，具有三维网状

表4-8-1 各种高分子材料对钢的摩擦系数

(载荷: $8.1 \times 10^4 \text{ Pa}$; 摩擦速度:

$6.2 \times 10^{-2} \text{ m/s}$)

材 料 名 称		钢-塑料	钢-塑料	μ_s 平均值
热固性	酚醛树脂	0.468	0.524	0.566
	三聚氰胺树脂	0.567	0.686	
	尿素树脂	0.453	0.711	
非晶型热塑性	MMA树脂	0.568	0.385	0.377
	聚苯乙烯	0.368	0.517	
	ABS	0.366	0.376	
	PVC	0.219	0.216	
结晶型热塑性	聚乙烯	0.139	0.169	0.1
	聚丙烯	0.300	0.316	
	尼龙6	0.192	0.104	
	聚碳酸酯	0.302	0.362	
	聚酰胺	0.129	0.180	
	聚四氟乙烯	0.117	0.100	
钢		0.448	0.448	0.448

结构的热固性高分子材料的摩擦系数较高，因而只有在添加了其他润滑剂之后，才显示其润滑性能。

图4-8-1表明高分子材料的磨损与载荷的关系。而摩擦速度对磨损的影响行为要视材料的种类而异。图4-8-2示出了聚酰亚胺的比磨损量与摩擦速度的关系。由图看出，聚酰亚胺的比磨损量大约从摩擦速度超过3 m/s时就开始下降，这是因其分解温度比熔点低而由摩擦热导致表面层碳化的结果。

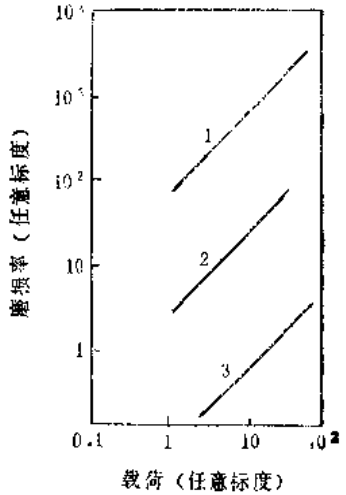


图4-8-1 高分子材料的磨损与载荷的关系
1—聚四氟乙烯 2—尼龙 3—聚乙烯

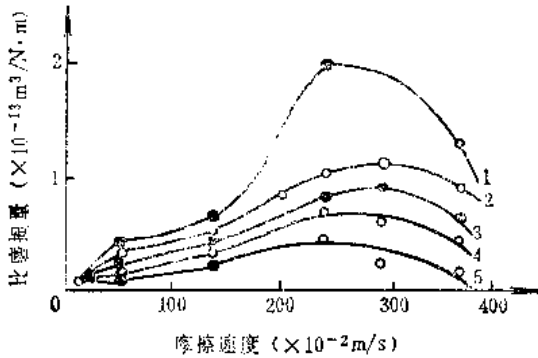


图4-8-2 摩擦速度对聚酰亚胺磨损的影响
1— $W=100\text{N}$ 2— $W=70\text{N}$ 3— $W=40\text{N}$
4— $W=20\text{N}$ 5— $W=10\text{N}$

尼龙6的磨损率却随着速度的增加首先减少，并出现极小值，然后又增加，见图4-8-3。温度对磨损的影响见图4-8-4。不同滑动速度下载荷对摩擦系数的影响见图4-8-5。

比较图4-8-4和图4-8-5可知，磨损率随温度的增加先是减少，继而又增加。M. Watanage等人认

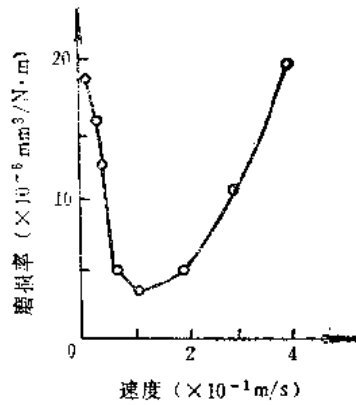


图4-8-3 速度对磨损率的影响（载荷为196N）

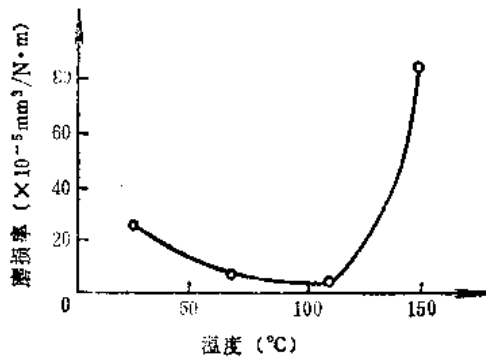


图4-8-4 温度对磨损率的影响
（载荷为196N 速度为20mm/s）

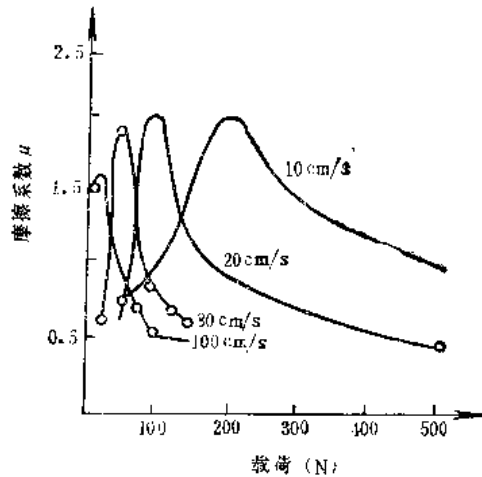


图4-8-5 不同滑动速度下载荷对摩擦系数的影响

为，这种现象与尼龙6在不同温度下向钢表面转移有关。并认为，速度和载荷对磨损的影响是通过温度来实现的。

尼龙在不同滑动速度下载荷对摩擦系数的影响

见图4-8-5。由图看出, 载荷相同时, 摩擦系数随速度增加有变小的趋势。而在一定速度下, 摩擦系数随载荷增加先是增大, 继而减少。聚乙烯的摩擦系数随温度和速度的变化情况见图4-8-6。一般地说, 聚乙烯的摩擦系数随温度增加有减少的趋势, 而随速度增加而增大。

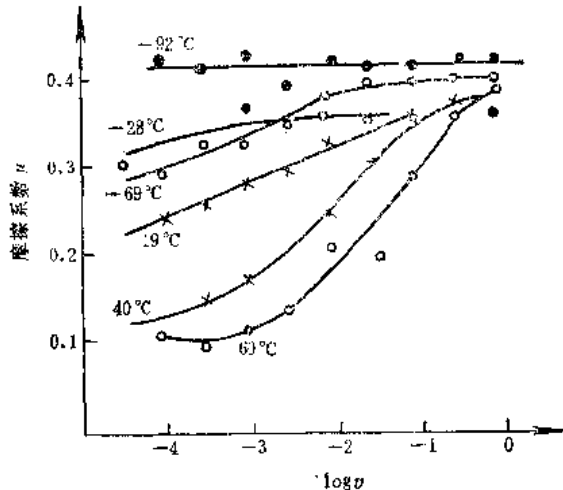


图4-8-6 PE的 μ 值随 v 和 T 的变化

近年来, 国内外开发了含油尼龙, 通过特殊工艺方法, 将所需的润滑油预先加入到原料中。含油尼龙的摩擦系数小, 自润滑性能好, 使用过程中不需外界供油润滑。含油尼龙轴套可以取代传统的铜锡轴承, 而且延长了轴承的使用寿命, 深受工厂和维修工人的欢迎。

MC尼龙是己内酰胺在强碱作用下的阴离子快速催化聚合反应产物。当催化剂与助催化剂的用量在1/250~1/300克当量时, 它的聚合度最高, 分子量可高达十万, 为普通尼龙6的三倍以上, 结晶度也高10%以上。MC尼龙可在较低温度下快速成形, 生成均匀而规则的小球晶。这些结构因素使MC尼龙具有优良的强度、刚度、韧性、低蠕变、化学安定性及摩擦磨损性能。因此, 国内外广泛应用MC尼龙作为低摩擦、耐磨损的机械零部件(如轴承、齿轮等)的材料。

MC尼龙的干摩擦系数在高分子材料中是较高的。要想在干摩擦条件下使用, 适用场合必须是载荷小、速度低。若在MC尼龙中添加某些固体润滑剂, 可降低MC尼龙的摩擦系数, 改善其自润滑性。

MC尼龙在油润滑条件下的摩擦系数较低, 磨损小, 摩擦温度也不高。适用于重载荷、低速度和常

温的场合。但必须采取滴油、浸油或注油等措施。

高聚合物共混改性可获得新性能的高分子材料, 共混工艺有两种: 一是物理法, 包括熔融共混、溶液共混和乳液共混; 另一种是化学法, 包括接枝共聚、嵌段共聚、离子聚合以及IPN法等。共混聚合物的组成与其摩擦磨损性能有密切的关系。

IPN是80年代才迅速发展起来的一类重要共混物, 有两种或多种聚合物分子网络相互贯穿、紧密缠结而成。IPN材料已显示其良好的性能, 受到许多国家的重视。

总之, 通过共混获得高性能润滑是高分子润滑材料发展的重要趋势。如PTFE和聚醚醚酮(PEEK)复合, 聚对苯二甲酸丁二醇酯(PBT)和聚碳酸酯(PC)的复合, 均可改善复合材料在无润滑条件下的摩擦特性。

Lancaster全面分析了高聚合物复合材料的特性并提出改善耐磨性的十大要点, 设计出理想的各种高聚合物、编织加强纤维和固体润滑剂的复合材料模型。

聚合物复合材料在摩擦学中的应用主要集中在机械结构方面, 如齿轮、凸轮、叶轮、制动器、离合器、轴承等方面。聚合物复合材料大多用来制做轴承。二硫化钼填充的尼龙66衬套可代替金属用作铲车上的大型枢轴轴承, 尤其适用于钢厂铲车的轴承。

各种填充的和增强的PTFE复合材料已用在铁路车辆转向架轴承中。PTFE填充酚醛-棉层压材料, 广泛应用于无油气体压缩机上的叶片。其他由PTFE填充聚合物制造的摩擦部件有活塞环和大型轴承(填充的酚醛-棉层压材料), 小型轴套(PTFE填充的酚醛共聚物)和弧齿锥齿轮(填充带有金属嵌件的尼龙)。

最近发展了一种注射成型材料, 这种可模塑材料包含有分散在整个热塑性树脂中的油和其他材料, 制成一种自润滑的聚合物复合材料。据称这种材料的摩擦磨损性能优于填充的PTFE材料。

滚动轴承应用于高真空下的宇宙空间, 在那里常规润滑是困难的。由PTFE-MoS₂-玻璃纤维复合材料制成的保持架, 在真空下的使用期可超过10⁶转。用这样的复合材料保持架制造的小型轴承在150°C~300°C的空气中也是有效的。

一般发动机用的金属活塞环需要润滑。但对于压缩机来说就不希望被润滑剂污染。在食品加工设备或是可能引起火灾的地方的活塞环可用自润滑材

料制成, 进行干运转。

由增强聚合物所制成的齿轮有下列优点: 无声运转、减轻震动、减少磨损、价格低廉。塑料齿轮可用于压缩机、运输机、起重机、洗衣房设备、机械工具、研磨设备、造纸和印刷设备、木材加工设备和纺织设备。

近年来, 通过不同塑料共混来制造塑料合金发展很快, 其原因是该材料的开发是建立在现有树脂和生产设备的基础上, 因此开发此类材料耗资少、见效快。适当选用一对性能不同的高分子材料组合, 可获得一种兼备二者优点的新型材料, 满足特殊要求, 填补通用塑料和工程塑料之间的应用空白, 这是单一高分子材料往往难以实现的。目前欧、美、日各国对高分子合金技术都十分重视。若在高

分子合金中通过特殊工艺加入自润滑固体材料, 这样所制得的高分子合金的自润滑性能良好, 用其制得的摩擦偶件可在干摩擦状态下使用, 这对于食品机械和制药机械等方面的应用尤为重要。

第9节 固体润滑膜

固体润滑膜是固体润滑法中应用最久的一类润滑材料。固体润滑膜的制备方法很多, 既有把固体润滑粉末擦在摩擦部位上的原始方法, 也有在真空中使固体润滑剂以原子状态溅射成膜的方法等。固体润滑膜用途广泛, 从家用电器和小轿车之类的民用产品到原子能和航天工业等尖端技术领域的應用。固体润滑膜的一些应用实例见表4-9-1。

表4-9-1 固体润滑膜的应用实例

应用举例	使用的部件	被利用的特性
照相机, 快速摄影机 电视摄像机 磁带录音机, 录音机走带装置 放大器, 调谐器, 唱机	快门, 光圈, 变焦距镜头 离合器压盘分离杆, 连杆机构 磁带盘座, 清洗机构 筒形线圈	耐磨性、耐腐蚀性, 色彩 承载能力 稳定的摩擦系数 耐屑性, 耐腐蚀性
复印机, 计算机	滑轨, 分离器	耐磨性, 非粘附性, 抗粘一滑性, 耐 载荷性
汽车, 摩托车, 船舶 铁道, 高速公路, 桥梁	活塞, 花键轴 联轴器, 汽化器 汽车冷气装置, 自动关门机 离合器, 风挡刮水器, 天线 侧支撑, 导电弓架柱塞, 支撑	初始磨合, 干润滑性 耐磨性, 承载能力 耐腐蚀性

(一) 固体润滑膜的特征

同其他固体润滑剂一样, 固体润滑膜起初也是作为军品研制的, 后来才逐步扩展到民用方面。但直到现在, 美国军用固体润滑膜的市场占有率仍很高。表4-9-2所列是固体润滑膜的美国军用标准。日本也采用这些标准来衡量固体润滑膜的润滑性能。

固体润滑膜之所以大都作为军用, 这是因为军事上需要润滑的设备的使用环境和条件非常苛刻, 并且要求不用维修。固体膜润滑剂的主要优点在于能承受重载荷, 在润滑油或脂的油膜不能承受的重载荷情况下, 固体润滑膜同样能发挥润滑作用而不破裂。另外, 固体润滑膜还具有防腐蚀性。但固体润滑膜的使用寿命一般较短。通常使用的膜厚约为 $10\mu\text{m}$, 在承受 $10^5 \sim 10^6$ 以上的重复摩擦后就达到了

表4-9-2 固体润滑膜的美国军用标准

MIL-L-8937 D	寿命长, 能粘着在一般金属上, 要热处理, 使用温度上限为 120°C
MIL-L-23398 B	室温干燥型, 寿命短, 防止烧结使用
MIL-L-41010 (MR)	树脂粘结, 寿命与MIL-L-8937接近, 耐腐蚀, 使用温度上限为 120°C
MIL-L-46147 A	室温干燥型, 具有长期耐腐蚀性和耐溶剂性, 使用温度范围为 $-70 \sim +90^\circ\text{C}$
MIL-L-81329 A (ASG)	使用温度范围为 $-185 \sim +400^\circ\text{C}$, 可在液体轴承、液氮、辐射、真空等极端条件下使用, 耐腐蚀

膜的寿命。为了使润滑膜在其寿命终止后仍能维持润滑特性,就必须采取适当的方法向摩擦部位补充固体润滑剂。

(二) 固体润滑膜的摩擦磨损性能

固体润滑膜是通过底材承受载荷而发挥本身的润滑作用的,因此,底材硬度必然对膜的摩擦磨损特性产生影响。一般地说,固体润滑膜的摩擦系数随底材硬度的增大而减少,磨损寿命随底材硬度的增大而延长。

固体润滑膜在重复摩擦过程中,对偶材料同样要遭受磨损,对偶材料的硬度越大,其耐磨性就越好。此外,底材韧性对磨损也起重要作用。实际使用情况也是很复杂的,既有硬度和韧性之类的物理性质的影响,又有底材、对偶材料与固体润滑剂之间的化学反应,以及底材与对偶材料的相互作用等,这些都是影响固体润滑膜摩擦磨损特性的重要因素。例如,对于钢上的石墨膜来说,在钢表面分别经过磷酸锌处理和硫化处理的两种情况下,尽管前者的表面硬度还不及后者的50%,但是前者的膜的寿命却为后者的13倍以上。

影响固体润滑膜摩擦磨损性能的其他物理性质还有热膨胀系数。为了更有效地散发摩擦热,膜的导热系数显然越高越好。

(三) 影响固体润滑膜润滑特性的因素

影响固体润滑膜摩擦磨损特性的因素是温度、速度、载荷、气氛和滑动方向等。它们对膜的润滑性能的影响均随主要成分固体润滑剂的不同而不同。

(1) 温度的影响 图4-9-1是对氟化石墨膜、二硫化钼膜以及它们的粘结剂聚酰亚胺摩擦磨损的温度特性进行考察的结果。可以看出,除了聚酰亚胺膜在室温下的情形之外,这三种膜的摩擦系数均不受温度上升的影响。但是它们的寿命都随温度上升而迅速降低。含有聚酰亚胺的膜在室温下具有很高的摩擦系数和磨损速率,这是因为在低于50°C的条件下,聚酰亚胺丧失空间排列的结果。

这些固体润滑膜的适用温度范围是从室温到350°C,在更高的温度条件下,它们的耐久性就很差。可以在350°C以上使用的固体润滑膜有一氧化铅膜,其摩擦系数和寿命的温度特性曲线见图4-9-2。可以看出,摩擦系数在从室温到800°C之间变化很小,而且稳定。寿命在400~700°C的温度范围内

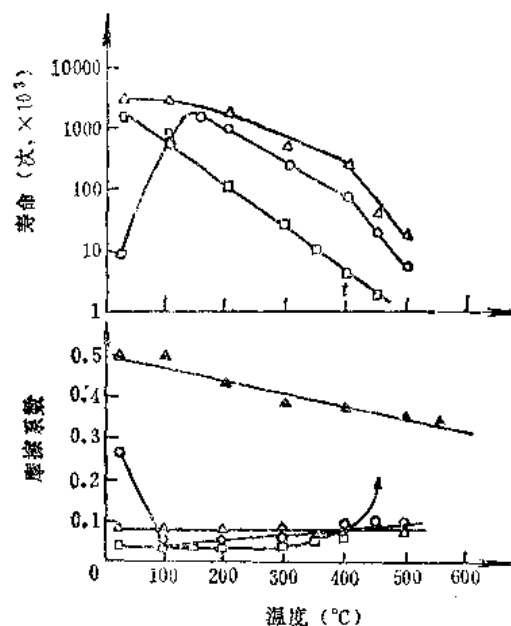


图4-9-1 聚酰亚胺粘结膜的摩擦磨损与温度的关系
○—聚酰亚胺膜 △—聚酰亚胺粘结氟化石墨膜
□—聚酰亚胺粘结二硫化钼膜 ▲—无润滑
t—聚酰亚胺膜分解温度

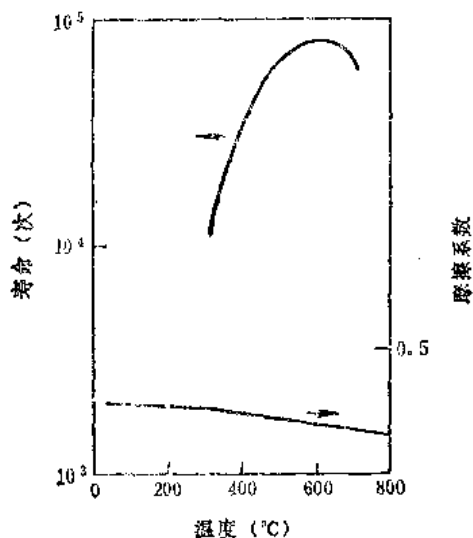


图4-9-2 PbO喷镀膜的寿命和摩擦系数与温度的关系曲线
载荷: 20N 摩擦速度: 2m/s

较好。

从上述结果来看,可以说从室温到高温范围内,只含一种固体润滑剂的膜很难满足实用要求。因此,人们又开展了将低温和高温用两种固体润滑剂

混合使用的研究。在以 CaF_2 为主要成分的高温用固体润滑膜中添加银，这是为了使高温用固体润滑膜在低温区也具有低摩擦特性。

润滑油遇到低温就凝固而丧失润滑能力，即使是低温特性好的润滑油，在 -70°C 左右也不能再起润滑作用了。相反，如聚四氟乙烯和铅之类的固体润滑剂，在超低温下也仍然具有润滑性能。如 PTFE 在液氢（沸点 -253°C ）或液氧（沸点 -183°C ）中还能润滑旋转的滚动轴承。

(2) 速度及载荷的影响 固体润滑膜的耐久性随速度和载荷变化的结果见图 4-9-3。一般，速度和载荷越大，固体润滑膜的耐久性就越差。几种固体润滑膜的摩擦系数与速度和压力之间的关系见图 4-9-4。可以看出，摩擦系数基本上是随速度和载荷的增大而减少的。

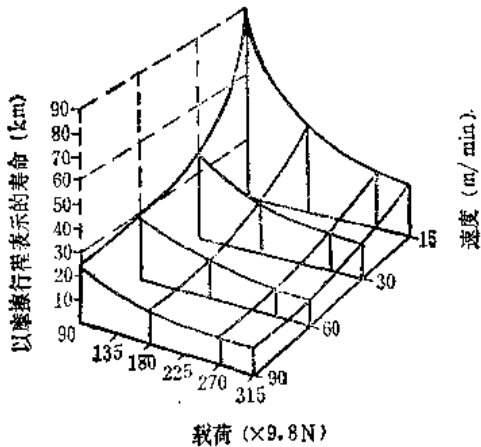


图4-9-3 固体润滑膜的寿命与载荷及速度间关系

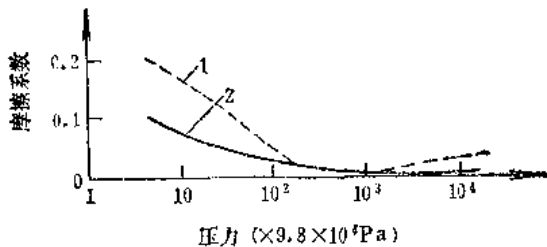


图4-9-4 固体润滑膜的摩擦系数与压力的关系
1—有机粘结膜 2—无机粘结膜

(3) 气氛的影响 固体润滑剂的润滑效果对气氛有依赖性，这种影响又因润滑剂而不同。气氛对各种润滑膜磨损特性的影响见表4-9-3。各种固

体润滑膜在空气中和润滑油中耐久性比较见表4-9-4。

表4-9-3 气氛对各种固体润滑膜磨损特性的影响

(对偶材料和底材都是铁系材料)

	有氧气氛	无氧气氛	真空中	湿空气中
铝膜	--	+	+++	
金膜	-	+	+	+
银膜	--	+	+++	
MoS_2 膜	--	++	+	---
石墨膜	+			+
PTFE膜	不 受 影 响			

注：+表示耐久性提高，-表示耐久性降低。

表4-9-4 固体润滑膜在油中和空气中的耐久性比较

($F_{\text{轴}}=4.4 \times 10^3 \text{ N}$ 载荷寿命试验)

固体润滑膜	耐久时间 (min)	
	空气中	润滑油中①
酚醛树脂粘结膜 (1)	110	3
酚醛树脂粘结膜 (2)	248	3
水玻璃粘结膜	10	2.5
无机粘结膜	406	11
聚酰亚胺粘结膜	602	4.5
MoS_2 溅射膜	90	3

① SAE30机械油。

(四) 固体润滑膜的制备方法

按成膜的方法，可将固体润滑膜分为擦入膜、挤压膜、溅射和离子镀膜以及粘结膜四大类。

(1) 擦入固体润滑膜 这是一种借助人力或机械力的方法将固体润滑剂擦涂在要润滑的表面上形成的膜。按具体成膜工艺又可分为擦涂、滚涂及振涂成膜。这些擦入固体润滑膜都有一定的润滑效果，特别适宜于在低速轻载荷下运转的精密仪器上使用。

(2) 挤压固体润滑膜 挤压膜就是将固体润滑成膜剂放在既有滚动又有滑动的机械力作用下在摩擦表面形成的润滑膜。科学院兰州化学物理研究所开发了各种挤压膜。目前国内若干厂矿企业，将挤压膜用于桥式起重机减速器齿轮箱的齿轮机构上，实现了“无油润滑”。

(3) 溅射和离子镀膜 所谓溅射成膜，是指

在高真空条件下,接通高压电源使靶与样品之间产生辉光放电,少量容易电离的气体在辉光下电离,这些电离粒子在电场下被加速,以高速轰击靶材表面,使靶材表面的原子或分子飞溅出来,镀敷在需要成膜的样品表面上形成一层薄膜。溅射膜特别适用于高真空、高温、强辐射等特殊工况环境下的高精度、低载荷的滚动或滑动部件以及用于精密光学仪器上作固体润滑膜。所谓离子镀膜,它与真空溅射一样,首先在正负两极之间建立一个低压气体放电的等离子区。在镀膜过程中,这个离子流连续轰击作为负极的工作,除去工件表面上的物理吸附的气体污染层,因而整个镀膜过程始终保持膜层表面新鲜清洁。离子镀膜比溅射成膜所用的电压更高。

溅射和离子镀均系在真空条件下成膜,因此可以使用离子轰击的方法来清洗工件表面。从而可使膜与底材的结合更牢固,也提高了膜的寿命。

(4) 粘结固体润滑膜 20多年来我国发展了数十种粘结固体润滑膜。应用比较成功的粘结膜是以无机盐(如硅酸钾)为粘结剂的膜,如SS-2、SS-3粘结固体润滑膜(即干膜)。近年来又发展了一大批有机干膜。

上海跃进电机厂、兰州化学物理研究所、四川新都机械厂等单位已经用等离子喷镀技术,以金属作为粘结剂成功地研制了等离子喷镀固体润滑膜。

第10节 添加固体润滑剂的油脂

润滑油是通过形成油膜而发挥润滑作用的,而粘度对润滑油的使用性能影响很大。粘度过高,粘性阻力增大,使摩擦损耗增大,若粘度过低,则润滑油膜承载能力下降。更重要的问题是润滑油的粘度随温度变化非常明显。随着温度升高,使原来吸附在金属表面的润滑油膜的附着力下降,影响润滑效果。另外,温度上升还常伴随着润滑油的氧化。因此,在商品润滑油中常添加了粘度指数改进剂、流动点降凝剂、抗氧剂和极压添加剂等。尽管如此,在某些情况下,还是不能满足使用要求的,而必须选用某些固体润滑剂添加于润滑油脂中。

(1) 用于润滑油脂中的固体润滑剂 一般添加于润滑油脂中的固体润滑剂有:

1) 二硫化钼和石墨等层状结构物质。

2) 硫代磷酸锌和三聚氰胺三聚氰酸酯等非层状结构物质。

3) 聚四氟乙烯(PTFE)和尼龙等高分子材料。

4) 硫代钼化合物等油溶性有机金属化合物。

在上述固体润滑剂中,硫代磷酸锌可与摩擦面反应生成具有润滑性能的磷化物。目前使用最多的添加在润滑油中的固体润滑剂是 MoS_2 ,其次为石墨和PTFE。典型的添加量与用途见表4-10-1。

表4-10-1 固体润滑剂添加量与用途

类别	固体润滑剂的添加量(%)	用途
润滑油	0.5~5	耐磨损、耐载荷、省能源、耐高温
润滑脂	3~50	耐载荷、耐磨损、抗烧结
润滑油膏	10~60	初期磨合、抗咬合、安装用

(2) 分散安定性与附着性 要使固体润滑剂发挥润滑作用,重要的问题是必须使其进入到摩擦面之间。要使固体润滑剂粉末能进入摩擦面间,这不仅要求粉末的形状和粒度要适当,而且还要求固体润滑粉末能稳定地分散在润滑油中,同时具有足够的表面活性。有两种方法可以达到上述的要求,一是把界面活性剂敷于粉末表面;二是使粉末表面获得亲油性。利用这些方法可防止粉末间发生相互聚集。

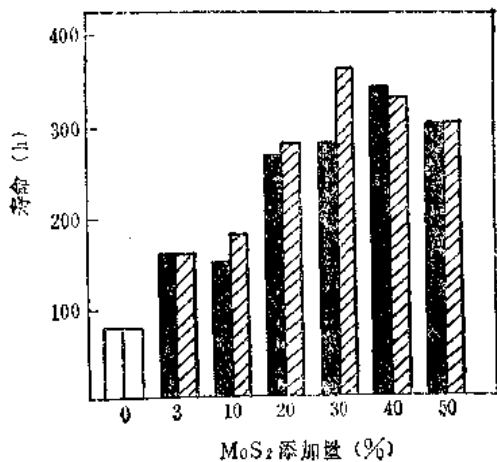
(3) 粒度与粒度分布 分散在润滑油中的固体润滑剂须经历着附着在摩擦表面上,因摩擦剪切面微细化和从表面上脱离的过程。而粒度和粒度分布对固体润滑粉末能否导入到摩擦面之间影响较大。对粒径小于 $10\mu\text{m}$ 的粉末而言,据报导,它们的粒度差别的影响是不一致的。以 MoS_2 为例, $7\mu\text{m}$ 以下的粉末在润滑性能上无多大差异。

一般地说,固体润滑剂制造厂商是把平均粒径大于 $10\mu\text{m}$ 的粉末除掉,并对于小于该尺寸的粉末进行粒度分布调节之后再添加到润滑油脂中。

(4) 固体润滑剂的添加量 一般地说,在润滑油脂中,固体润滑剂的添加量越大,对改善润滑油脂的摩擦磨损性能越有好处。大部分商品润滑油中,固体润滑剂的含量大致在0.5%~0.4%之间。表4-10-2为不同固体润滑剂添加在润滑油脂中的作用。但固体润滑剂在润滑油脂中的添加量通常比润滑油中要高。可以说,固体润滑剂添加量高的润滑油脂能使轴承的寿命延长。 MoS_2 添加量对锂基润滑油脂使用性能的影响见图4-10-1。

表4-10-2 添加固体润滑剂的效果

固体润滑剂	基油	试片材质	有效添加量 (%)	效果
WS ₂ 、MoS ₂	矿物油	轴承钢	1~12	减少磨损
MoS ₂	矿物油	轴承钢	1~10	减少磨损
MoS ₂	矿物油	轴承钢	1~10	减少磨损
MoS ₂	矿物油	铝合金	2~15	降低摩擦
PTFE	矿物油	工具钢	—	降低摩擦
(CF)n	矿物油	轴承钢/铜	1~20	减少磨损
MoS ₂	矿物油系润滑脂	轴承钢	1~10	减少磨损
MoS ₂	双酯润滑脂	轴承钢	3~20	提高承载能力
MoS ₂	锂基润滑脂	轴承钢	1~3	降低摩擦

图4-10-1 适用MoS₂添加锂基润滑脂的ASTM滚珠轴承的寿命试验结果

黑色柱线表示7 μm的MoS₂ 斜影柱线表示0.7 μm的MoS₂

MoS₂油脂能降低机械部件的磨损。据统计,在一个运输队的试验表明,在各种重型汽车操纵零件用油脂中加入MoS₂,结果使磨损率减少88%。但另一方面,由于MoS₂的加入,使油脂中石油烃和双酯的抗氧化和抗腐蚀能力降低。因此需要加入适量抗氧化拒腐蚀添加剂以克服这一问题。

由图看出,MoS₂添加量高时,有助于轴承使用寿命的延长,并以30%~50%的添加量为好。试验结果还表明,MoS₂的平均粒径为0.7 μm和7 μm时,两者的添加效果没有明显的差别。

(5) 基油与其他添加剂的相互作用 固体润

滑剂的润滑特性是随着基油的性状而有明显变化的。实际上,商品润滑油均含有各种各样的添加剂。例如,发动机油添加了抗氧剂、清净分散剂、粘度指数改进剂、流动点降低剂、极压添加剂、防锈剂和消泡剂等,其添加总量有时高达百分之几十。不难想象,在商品润滑油中添加固体润滑剂,它必须会与上述这些添加剂发生相互作用。有人曾发表过关于极压添加剂和清净分散剂与MoS₂相容性的研究报告,认为MoS₂的添加效果是随这些添加剂的种类和浓度而不同的,并且指出它们共同作用的结果是优劣皆有。

要发挥添加固体润滑剂的油脂的润滑作用,必须注意下面几个问题:

- 1) 摩擦面应当具有容易将固体润滑剂导入到摩擦面之间去的形状。
- 2) 与滑动摩擦相比,应当采用滚动摩擦或滚动—滑动摩擦。
- 3) 在滑动摩擦的情况下,摩擦表面的粗糙度在一定程度上大一些为好。

实际上,添加固体润滑剂的油脂在齿轮和高温滚动轴承上的应用已十分成功,其原因就在于它们的接触面形状能很好地满足上述的要求。

但是,必须明确,不是任何场合下添加固体润滑剂粉末(如MoS₂)都是有利的,往往在实际使用时,看不到这些明显的效果,而且还会因添加MoS₂带来油路堵塞等,这是由于我们对所使用的MoS₂的粒度和分散性能不够了解,使用MoS₂就会造成一些不良的后果。因此,必须在使用时要正确了解固体润滑剂的性能,分析润滑油脂的组成,了解使用方法等等之间的关系。在一般能方便、有效地使用油脂进行润滑的地方,添加固体润滑剂的意义并不大。

参 考 文 献

- [1] Dowson D. History of Tribology. London; Longman, 1979
- [2] [日]西村 允. 固体润滑概论. 王安钧译. 固体润滑, 1986, 6(3)
- [3] 中国机械工程学会摩擦学学会《润滑工程》编写组. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1985
- [4] Clauss F J. Solid Lubricants and Self Lubricating Solids. London; Academic Press, 1972
- [5] Nishimura M et al. A SEM Built in Friction Tester and Its Application to Observe the Wear Process of Solid Lubricant Films. ASLE Proc. of 3rd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. Denver; ASLE, 1984; 50~65
- [6] Sliney H E. Solid Lubricant Materials for High Temperatures-A Review. Tribology Intl. 1982, 5(5), 303~315
- [7] Anderson J C. Wear of Commercially Available Plastics Materials. Tribology Intl. 1982, 5(5), 255~263
- [8] Tsuya Y et al. The Effect of Sliding Condition on the Wear Rate of Self Lubricating Compounds ASLE Proc. of 2nd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. 1978 Aug. 15-18 Denver; ASLE, 1978; 212~229
- [9] Lancaster J. K. Accelerated Wear Testing as An Aid To Failure Diagnosis And Material Selection. Tribology Intl. 1982, 5(6), 323-329
- [10] 周国民, 党鸿辛. 我国固体润滑材料的发展概况. 固体润滑, 1981, 1(2), 114~122
- [11] Mitchell P C H. Oil-Soluble Mo-S Compounds As Lubricant Additives. Wear. 1984, 100(1/3), 281~300
- [12] 中国科学院兰州化学物理研究所. 固体抗摩材料. 北京: 科学出版社, 1973
- [13] 林亨耀. 塑料导轨与机床维修. 北京: 机械工业出版社, 1989
- [14] [日]松永正久, 津谷裕子编. 固体润滑手册. 范燧等译. 北京: 机械工业出版社, 1986

参 考 文 献

- [1] Dowson D. History of Tribology. London; Longman, 1979
- [2] [日]西村 允. 固体润滑概论. 王安钧译. 固体润滑, 1986, 6(3)
- [3] 中国机械工程学会摩擦学学会《润滑工程》编写组. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1985
- [4] Clauss F J. Solid Lubricants and Self Lubricating Solids. London; Academic Press, 1972
- [5] Nishimura M et al. A SEM Built in Friction Tester and Its Application to Observe the Wear Process of Solid Lubricant Films. ASLE Proc. of 3rd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. Denver; ASLE, 1984; 50~65
- [6] Sliney H E. Solid Lubricant Materials for High Temperatures-A Review. Tribology Intl. 1982, 5(5), 303~315
- [7] Anderson J C. Wear of Commercially Available Plastics Materials. Tribology Intl. 1982, 5(5), 255~263
- [8] Tsuya Y et al. The Effect of Sliding Condition on the Wear Rate of Self Lubricating Compounds ASLE Proc. of 2nd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. 1978 Aug. 15-18 Denver; ASLE, 1978; 212~229
- [9] Lancaster J. K. Accelerated Wear Testing as An Aid To Failure Diagnosis And Material Selection. Tribology Intl. 1982, 5(6), 323-329
- [10] 周国民, 党鸿辛. 我国固体润滑材料的发展概况. 固体润滑, 1981, 1(2), 114~122
- [11] Mitchell P C H. Oil-Soluble Mo-S Compounds As Lubricant Additives. Wear. 1984, 100(1/3), 281~300
- [12] 中国科学院兰州化学物理研究所. 固体抗摩材料. 北京: 科学出版社, 1973
- [13] 林亨耀. 塑料导轨与机床维修. 北京: 机械工业出版社, 1989
- [14] [日]松永正久, 津谷裕子编. 固体润滑手册. 范燧等译. 北京: 机械工业出版社, 1986

参 考 文 献

- [1] Dowson D. History of Tribology. London; Longman, 1979
- [2] [日]西村 允. 固体润滑概论. 王安钧译. 固体润滑, 1986, 6(3)
- [3] 中国机械工程学会摩擦学学会《润滑工程》编写组. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1985
- [4] Clauss F J. Solid Lubricants and Self Lubricating Solids. London; Academic Press, 1972
- [5] Nishimura M et al. A SEM Built in Friction Tester and Its Application to Observe the Wear Process of Solid Lubricant Films. ASLE Proc. of 3rd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. Denver; ASLE, 1984; 50~65
- [6] Sliney H E. Solid Lubricant Materials for High Temperatures-A Review. Tribology Intl. 1982, 5(5), 303~315
- [7] Anderson J C. Wear of Commercially Available Plastics Materials. Tribology Intl. 1982, 5(5), 255~263
- [8] Tsuya Y et al. The Effect of Sliding Condition on the Wear Rate of Self Lubricating Compounds ASLE Proc. of 2nd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. 1978 Aug. 15-18 Denver; ASLE, 1978; 212~229
- [9] Lancaster J. K. Accelerated Wear Testing as An Aid To Failure Diagnosis And Material Selection. Tribology Intl. 1982, 5(6), 323-329
- [10] 周国民, 党鸿辛. 我国固体润滑材料的发展概况. 固体润滑, 1981, 1(2), 114~122
- [11] Mitchell P C H. Oil-Soluble Mo-S Compounds As Lubricant Additives. Wear. 1984, 100(1/3), 281~300
- [12] 中国科学院兰州化学物理研究所. 固体抗摩材料. 北京: 科学出版社, 1973
- [13] 林亨耀. 塑料导轨与机床维修. 北京: 机械工业出版社, 1989
- [14] [日]松永正久, 津谷裕子编. 固体润滑手册. 范燮等译. 北京: 机械工业出版社, 1986

参 考 文 献

- [1] Dowson D. History of Tribology. London; Longman, 1979
- [2] [日]西村 允. 固体润滑概论. 王安钧译. 固体润滑, 1986, 6(3)
- [3] 中国机械工程学会摩擦学学会《润滑工程》编写组. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1985
- [4] Clauss F J. Solid Lubricants and Self Lubricating Solids. London; Academic Press, 1972
- [5] Nishimura M et al. A SEM Built in Friction Tester and Its Application to Observe the Wear Process of Solid Lubricant Films. ASLE Proc. of 3rd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. Denver; ASLE, 1984; 50~65
- [6] Sliney H E. Solid Lubricant Materials for High Temperatures-A Review. Tribology Intl. 1982, 5(5), 303~315
- [7] Anderson J C. Wear of Commercially Available Plastics Materials. Tribology Intl. 1982, 5(5), 255~263
- [8] Tsuya Y et al. The Effect of Sliding Condition on the Wear Rate of Self Lubricating Compounds ASLE Proc. of 2nd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. 1978 Aug. 15-18 Denver; ASLE, 1978; 212~229
- [9] Lancaster J. K. Accelerated Wear Testing as An Aid To Failure Diagnosis And Material Selection. Tribology Intl. 1982, 5(6), 323-329
- [10] 周国民, 党鸿辛. 我国固体润滑材料的发展概况. 固体润滑, 1981, 1(2), 114~122
- [11] Mitchell P C H. Oil-Soluble Mo-S Compounds As Lubricant Additives. Wear. 1984, 100(1/3), 281~300
- [12] 中国科学院兰州化学物理研究所. 固体抗摩材料. 北京: 科学出版社, 1973
- [13] 林亨耀. 塑料导轨与机床维修. 北京: 机械工业出版社, 1989
- [14] [日]松永正久, 津谷裕子编. 固体润滑手册. 范巍等译. 北京: 机械工业出版社, 1986

参 考 文 献

- [1] Dowson D. History of Tribology. London; Longman, 1979
- [2] [日]西村 允. 固体润滑概论. 王安钧译. 固体润滑, 1986, 6(3)
- [3] 中国机械工程学会摩擦学学会《润滑工程》编写组. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1985
- [4] Clauss F J. Solid Lubricants and Self Lubricating Solids. London; Academic Press, 1972
- [5] Nishimura M et al. A SEM Built in Friction Tester and Its Application to Observe the Wear Process of Solid Lubricant Films. ASLE Proc. of 3rd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. Denver; ASLE, 1984; 50~65
- [6] Sliney H E. Solid Lubricant Materials for High Temperatures-A Review. Tribology Intl. 1982, 5(5), 303~315
- [7] Anderson J C. Wear of Commercially Available Plastics Materials. Tribology Intl. 1982, 5(5), 255~263
- [8] Tsuya Y et al. The Effect of Sliding Condition on the Wear Rate of Self Lubricating Compounds ASLE Proc. of 2nd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. 1978 Aug. 15-18 Denver; ASLE, 1978; 212~229
- [9] Lancaster J. K. Accelerated Wear Testing as An Aid To Failure Diagnosis And Material Selection. Tribology Intl. 1982, 5(6), 323-329
- [10] 周国民, 党鸿辛. 我国固体润滑材料的发展概况. 固体润滑, 1981, 1(2), 114~122
- [11] Mitchell P C H. Oil-Soluble Mo-S Compounds As Lubricant Additives. Wear. 1984, 100(1/3), 281~300
- [12] 中国科学院兰州化学物理研究所. 固体抗摩材料. 北京: 科学出版社, 1973
- [13] 林亨耀. 塑料导轨与机床维修. 北京: 机械工业出版社, 1989
- [14] [日]松永正久, 津谷裕子编. 固体润滑手册. 范燧等译. 北京: 机械工业出版社, 1986

参 考 文 献

- [1] Dowson D. History of Tribology. London; Longman, 1979
- [2] [日]西村 允. 固体润滑概论. 王安钧译. 固体润滑, 1986, 6(3)
- [3] 中国机械工程学会摩擦学学会《润滑工程》编写组. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1985
- [4] Clauss F J. Solid Lubricants and Self Lubricating Solids. London; Academic Press, 1972
- [5] Nishimura M et al. A SEM Built in Friction Tester and Its Application to Observe the Wear Process of Solid Lubricant Films. ASLE Proc. of 3rd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. Denver; ASLE, 1984; 50~65
- [6] Sliney H E. Solid Lubricant Materials for High Temperatures-A Review. Tribology Intl. 1982, 5(5), 303~315
- [7] Anderson J C. Wear of Commercially Available Plastics Materials. Tribology Intl. 1982, 5(5), 255~263
- [8] Tsuya Y et al. The Effect of Sliding Condition on the Wear Rate of Self Lubricating Compounds ASLE Proc. of 2nd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. 1978 Aug. 15-18 Denver; ASLE, 1978; 212~229
- [9] Lancaster J. K. Accelerated Wear Testing as An Aid To Failure Diagnosis And Material Selection. Tribology Intl. 1982, 5(6), 323-329
- [10] 周国民, 党鸿辛. 我国固体润滑材料的发展概况. 固体润滑, 1981, 1(2), 114~122
- [11] Mitchell P C H. Oil-Soluble Mo-S Compounds As Lubricant Additives. Wear. 1984, 100(1/3), 281~300
- [12] 中国科学院兰州化学物理研究所. 固体抗摩材料. 北京: 科学出版社, 1973
- [13] 林亨耀. 塑料导轨与机床维修. 北京: 机械工业出版社, 1989
- [14] [日]松永正久, 津谷裕子编. 固体润滑手册. 范燮等译. 北京: 机械工业出版社, 1986

参 考 文 献

- [1] Dowson D. History of Tribology. London; Longman, 1979
- [2] [日]西村 允. 固体润滑概论. 王安钧译. 固体润滑, 1986, 6(3)
- [3] 中国机械工程学会摩擦学学会《润滑工程》编写组. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1985
- [4] Clauss F J. Solid Lubricants and Self Lubricating Solids. London; Academic Press, 1972
- [5] Nishimura M et al. A SEM Built in Friction Tester and Its Application to Observe the Wear Process of Solid Lubricant Films. ASLE Proc. of 3rd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. Denver; ASLE, 1984; 50~65
- [6] Sliney H E. Solid Lubricant Materials for High Temperatures-A Review. Tribology Intl. 1982, 5(5), 303~315
- [7] Anderson J C. Wear of Commercially Available Plastics Materials. Tribology Intl. 1982, 5(5), 255~263
- [8] Tsuya Y et al. The Effect of Sliding Condition on the Wear Rate of Self Lubricating Compounds ASLE Proc. of 2nd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. 1978 Aug. 15-18 Denver; ASLE, 1978; 212~229
- [9] Lancaster J. K. Accelerated Wear Testing as An Aid To Failure Diagnosis And Material Selection. Tribology Intl. 1982, 5(6), 323-329
- [10] 周国民, 党鸿辛. 我国固体润滑材料的发展概况. 固体润滑, 1981, 1(2), 114~122
- [11] Mitchell P C H. Oil-Soluble Mo-S Compounds As Lubricant Additives. Wear. 1984, 100(1/3), 281~300
- [12] 中国科学院兰州化学物理研究所. 固体抗摩材料. 北京: 科学出版社, 1973
- [13] 林亨耀. 塑料导轨与机床维修. 北京: 机械工业出版社, 1989
- [14] [日]松永正久, 津谷裕子编. 固体润滑手册. 范燧等译. 北京: 机械工业出版社, 1986

参 考 文 献

- [1] Dowson D. History of Tribology. London; Longman, 1979
- [2] [日]西村 允. 固体润滑概论. 王安钧译. 固体润滑, 1986, 6(3)
- [3] 中国机械工程学会摩擦学学会《润滑工程》编写组. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1985
- [4] Clauss F J. Solid Lubricants and Self Lubricating Solids. London; Academic Press, 1972
- [5] Nishimura M et al. A SEM Built in Friction Tester and Its Application to Observe the Wear Process of Solid Lubricant Films. ASLE Proc. of 3rd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. Denver; ASLE, 1984; 50~65
- [6] Sliney H E. Solid Lubricant Materials for High Temperatures-A Review. Tribology Intl. 1982, 5(5), 303~315
- [7] Anderson J C. Wear of Commercially Available Plastics Materials. Tribology Intl. 1982, 5(5), 255~263
- [8] Tsuya Y et al. The Effect of Sliding Condition on the Wear Rate of Self Lubricating Compounds ASLE Proc. of 2nd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. 1978 Aug. 15-18 Denver; ASLE, 1978; 212~229
- [9] Lancaster J. K. Accelerated Wear Testing as An Aid To Failure Diagnosis And Material Selection. Tribology Intl. 1982, 5(6), 323-329
- [10] 周国民, 党鸿辛. 我国固体润滑材料的发展概况. 固体润滑, 1981, 1(2), 114~122
- [11] Mitchell P C H. Oil-Soluble Mo-S Compounds As Lubricant Additives. Wear. 1984, 100(1/3), 281~300
- [12] 中国科学院兰州化学物理研究所. 固体抗摩材料. 北京: 科学出版社, 1973
- [13] 林亨耀. 塑料导轨与机床维修. 北京: 机械工业出版社, 1989
- [14] [日]松永正久, 津谷裕子编. 固体润滑手册. 范燧等译. 北京: 机械工业出版社, 1986

参 考 文 献

- [1] Dowson D. History of Tribology. London; Longman, 1979
- [2] [日]西村 允. 固体润滑概论. 王安钧译. 固体润滑, 1986, 6(3)
- [3] 中国机械工程学会摩擦学学会《润滑工程》编写组. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1985
- [4] Clauss F J. Solid Lubricants and Self Lubricating Solids. London; Academic Press, 1972
- [5] Nishimura M et al. A SEM Built in Friction Tester and Its Application to Observe the Wear Process of Solid Lubricant Films. ASLE Proc. of 3rd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. Denver; ASLE, 1984; 50~65
- [6] Sliney H E. Solid Lubricant Materials for High Temperatures-A Review. Tribology Intl. 1982, 5(5), 303~315
- [7] Anderson J C. Wear of Commercially Available Plastics Materials. Tribology Intl. 1982, 5(5), 255~263
- [8] Tsuya Y et al. The Effect of Sliding Condition on the Wear Rate of Self Lubricating Compounds ASLE Proc. of 2nd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. 1978 Aug. 15-18 Denver; ASLE, 1978; 212~229
- [9] Lancaster J. K. Accelerated Wear Testing as An Aid To Failure Diagnosis And Material Selection. Tribology Intl. 1982, 5(6), 323-329
- [10] 周国民, 党鸿辛. 我国固体润滑材料的发展概况. 固体润滑, 1981, 1(2), 114~122
- [11] Mitchell P C H. Oil-Soluble Mo-S Compounds As Lubricant Additives. Wear. 1984, 100(1/3), 281~300
- [12] 中国科学院兰州化学物理研究所. 固体抗摩材料. 北京: 科学出版社, 1973
- [13] 林亨耀. 塑料导轨与机床维修. 北京: 机械工业出版社, 1989
- [14] [日]松永正久, 津谷裕子编. 固体润滑手册. 范燧等译. 北京: 机械工业出版社, 1986

参 考 文 献

- [1] Dowson D. History of Tribology. London; Longman, 1979
- [2] [日]西村 允. 固体润滑概论. 王安钧译. 固体润滑, 1986, 6(3)
- [3] 中国机械工程学会摩擦学学会《润滑工程》编写组. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1985
- [4] Clauss F J. Solid Lubricants and Self Lubricating Solids. London; Academic Press, 1972
- [5] Nishimura M et al. A SEM Built in Friction Tester and Its Application to Observe the Wear Process of Solid Lubricant Films. ASLE Proc. of 3rd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. Denver; ASLE, 1984; 50~65
- [6] Sliney H E. Solid Lubricant Materials for High Temperatures-A Review. Tribology Intl. 1982, 5(5), 303~315
- [7] Anderson J C. Wear of Commercially Available Plastics Materials. Tribology Intl. 1982, 5(5), 255~263
- [8] Tsuya Y et al. The Effect of Sliding Condition on the Wear Rate of Self Lubricating Compounds ASLE Proc. of 2nd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. 1978 Aug. 15-18 Denver; ASLE, 1978; 212~229
- [9] Lancaster J. K. Accelerated Wear Testing as An Aid To Failure Diagnosis And Material Selection. Tribology Intl. 1982, 5(6), 323-329
- [10] 周国民, 党鸿辛. 我国固体润滑材料的发展概况. 固体润滑, 1981, 1(2), 114~122
- [11] Mitchell P C H. Oil-Soluble Mo-S Compounds As Lubricant Additives. Wear. 1984, 100(1/3), 281~300
- [12] 中国科学院兰州化学物理研究所. 固体抗摩材料. 北京: 科学出版社, 1973
- [13] 林亨耀. 塑料导轨与机床维修. 北京: 机械工业出版社, 1989
- [14] [日]松永正久, 津谷裕子编. 固体润滑手册. 范燧等译. 北京: 机械工业出版社, 1986

参 考 文 献

- [1] Dowson D. History of Tribology. London; Longman, 1979
- [2] [日]西村 允. 固体润滑概论. 王安钧译. 固体润滑, 1986, 6(3)
- [3] 中国机械工程学会摩擦学学会《润滑工程》编写组. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1985
- [4] Clauss F J. Solid Lubricants and Self Lubricating Solids. London; Academic Press, 1972
- [5] Nishimura M et al. A SEM Built in Friction Tester and Its Application to Observe the Wear Process of Solid Lubricant Films. ASLE Proc. of 3rd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. Denver; ASLE, 1984; 50~65
- [6] Sliney H E. Solid Lubricant Materials for High Temperatures-A Review. Tribology Intl. 1982, 5(5), 303~315
- [7] Anderson J C. Wear of Commercially Available Plastics Materials. Tribology Intl. 1982, 5(5), 255~263
- [8] Tsuya Y et al. The Effect of Sliding Condition on the Wear Rate of Self Lubricating Compounds ASLE Proc. of 2nd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. 1978 Aug. 15-18 Denver; ASLE, 1978; 212~229
- [9] Lancaster J. K. Accelerated Wear Testing as An Aid To Failure Diagnosis And Material Selection. Tribology Intl. 1982, 5(6), 323-329
- [10] 周国民, 党鸿辛. 我国固体润滑材料的发展概况. 固体润滑, 1981, 1(2), 114~122
- [11] Mitchell P C H. Oil-Soluble Mo-S Compounds As Lubricant Additives. Wear. 1984, 100(1/3), 281~300
- [12] 中国科学院兰州化学物理研究所. 固体抗摩材料. 北京: 科学出版社, 1973
- [13] 林亨耀. 塑料导轨与机床维修. 北京: 机械工业出版社, 1989
- [14] [日]松永正久, 津谷裕子编. 固体润滑手册. 范燧等译. 北京: 机械工业出版社, 1986

参 考 文 献

- [1] Dowson D. History of Tribology. London; Longman, 1979
- [2] [日]西村 允. 固体润滑概论. 王安钧译. 固体润滑, 1986, 6(3)
- [3] 中国机械工程学会摩擦学学会《润滑工程》编写组. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1985
- [4] Clauss F J. Solid Lubricants and Self Lubricating Solids. London; Academic Press, 1972
- [5] Nishimura M et al. A SEM Built in Friction Tester and Its Application to Observe the Wear Process of Solid Lubricant Films. ASLE Proc. of 3rd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. Denver; ASLE, 1984; 50~65
- [6] Sliney H E. Solid Lubricant Materials for High Temperatures-A Review. Tribology Intl. 1982, 5(5), 303~315
- [7] Anderson J C. Wear of Commercially Available Plastics Materials. Tribology Intl. 1982, 5(5), 255~263
- [8] Tsuya Y et al. The Effect of Sliding Condition on the Wear Rate of Self Lubricating Compounds ASLE Proc. of 2nd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. 1978 Aug. 15-18 Denver; ASLE, 1978; 212~229
- [9] Lancaster J. K. Accelerated Wear Testing as An Aid To Failure Diagnosis And Material Selection. Tribology Intl. 1982, 5(6), 323-329
- [10] 周国民, 党鸿辛. 我国固体润滑材料的发展概况. 固体润滑, 1981, 1(2), 114~122
- [11] Mitchell P C H. Oil-Soluble Mo-S Compounds As Lubricant Additives. Wear. 1984, 100(1/3), 281~300
- [12] 中国科学院兰州化学物理研究所. 固体抗摩材料. 北京: 科学出版社, 1973
- [13] 林亨耀. 塑料导轨与机床维修. 北京: 机械工业出版社, 1989
- [14] [日]松永正久, 津谷裕子编. 固体润滑手册. 范燧等译. 北京: 机械工业出版社, 1986

参 考 文 献

- [1] Dowson D. History of Tribology. London; Longman, 1979
- [2] [日]西村 允. 固体润滑概论. 王安钧译. 固体润滑, 1986, 6(3)
- [3] 中国机械工程学会摩擦学学会《润滑工程》编写组. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1985
- [4] Clauss F J. Solid Lubricants and Self Lubricating Solids. London; Academic Press, 1972
- [5] Nishimura M et al. A SEM Built in Friction Tester and Its Application to Observe the Wear Process of Solid Lubricant Films. ASLE Proc. of 3rd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. Denver; ASLE, 1984; 50~65
- [6] Sliney H E. Solid Lubricant Materials for High Temperatures-A Review. Tribology Intl. 1982, 5(5), 303~315
- [7] Anderson J C. Wear of Commercially Available Plastics Materials. Tribology Intl. 1982, 5(5), 255~263
- [8] Tsuya Y et al. The Effect of Sliding Condition on the Wear Rate of Self Lubricating Compounds ASLE Proc. of 2nd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. 1978 Aug. 15-18 Denver; ASLE, 1978; 212~229
- [9] Lancaster J. K. Accelerated Wear Testing as An Aid To Failure Diagnosis And Material Selection. Tribology Intl. 1982, 5(6), 323-329
- [10] 周国民, 党鸿辛. 我国固体润滑材料的发展概况. 固体润滑, 1981, 1(2), 114~122
- [11] Mitchell P C H. Oil-Soluble Mo-S Compounds As Lubricant Additives. Wear. 1984, 100(1/3), 281~300
- [12] 中国科学院兰州化学物理研究所. 固体抗摩材料. 北京: 科学出版社, 1973
- [13] 林亨耀. 塑料导轨与机床维修. 北京: 机械工业出版社, 1989
- [14] [日]松永正久, 津谷裕子编. 固体润滑手册. 范燧等译. 北京: 机械工业出版社, 1986

参 考 文 献

- [1] Dowson D. History of Tribology. London; Longman, 1979
- [2] [日]西村 允. 固体润滑概论. 王安钧译. 固体润滑, 1986, 6(3)
- [3] 中国机械工程学会摩擦学学会《润滑工程》编写组. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1985
- [4] Clauss F J. Solid Lubricants and Self Lubricating Solids. London; Academic Press, 1972
- [5] Nishimura M et al. A SEM Built in Friction Tester and Its Application to Observe the Wear Process of Solid Lubricant Films. ASLE Proc. of 3rd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. Denver; ASLE, 1984; 50~65
- [6] Sliney H E. Solid Lubricant Materials for High Temperatures-A Review. Tribology Intl. 1982, 5(5), 303~315
- [7] Anderson J C. Wear of Commercially Available Plastics Materials. Tribology Intl. 1982, 5(5), 255~263
- [8] Tsuya Y et al. The Effect of Sliding Condition on the Wear Rate of Self Lubricating Compounds ASLE Proc. of 2nd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. 1978 Aug. 15-18 Denver; ASLE, 1978; 212~229
- [9] Lancaster J. K. Accelerated Wear Testing as An Aid To Failure Diagnosis And Material Selection. Tribology Intl. 1982, 5(6), 323-329
- [10] 周国民, 党鸿辛. 我国固体润滑材料的发展概况. 固体润滑, 1981, 1(2), 114~122
- [11] Mitchell P C H. Oil-Soluble Mo-S Compounds As Lubricant Additives. Wear. 1984, 100(1/3), 281~300
- [12] 中国科学院兰州化学物理研究所. 固体抗摩材料. 北京: 科学出版社, 1973
- [13] 林亨耀. 塑料导轨与机床维修. 北京: 机械工业出版社, 1989
- [14] [日]松永正久, 津谷裕子编. 固体润滑手册. 范燧等译. 北京: 机械工业出版社, 1986

参 考 文 献

- [1] Dowson D. History of Tribology. London; Longman, 1979
- [2] [日]西村 允. 固体润滑概论. 王安钧译. 固体润滑, 1986, 6(3)
- [3] 中国机械工程学会摩擦学学会《润滑工程》编写组. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1985
- [4] Clauss F J. Solid Lubricants and Self Lubricating Solids. London; Academic Press, 1972
- [5] Nishimura M et al. A SEM Built in Friction Tester and Its Application to Observe the Wear Process of Solid Lubricant Films. ASLE Proc. of 3rd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. Denver; ASLE, 1984; 50~65
- [6] Sliney H E. Solid Lubricant Materials for High Temperatures-A Review. Tribology Intl. 1982, 5(5), 303~315
- [7] Anderson J C. Wear of Commercially Available Plastics Materials. Tribology Intl. 1982, 5(5), 255~263
- [8] Tsuya Y et al. The Effect of Sliding Condition on the Wear Rate of Self Lubricating Compounds ASLE Proc. of 2nd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. 1978 Aug. 15-18 Denver; ASLE, 1978; 212~229
- [9] Lancaster J. K. Accelerated Wear Testing as An Aid To Failure Diagnosis And Material Selection. Tribology Intl. 1982, 5(6), 323-329
- [10] 周国民, 党鸿辛. 我国固体润滑材料的发展概况. 固体润滑, 1981, 1(2), 114~122
- [11] Mitchell P C H. Oil-Soluble Mo-S Compounds As Lubricant Additives. Wear. 1984, 100(1/3), 281~300
- [12] 中国科学院兰州化学物理研究所. 固体抗摩材料. 北京: 科学出版社, 1973
- [13] 林亨耀. 塑料导轨与机床维修. 北京: 机械工业出版社, 1989
- [14] [日]松永正久, 津谷裕子编. 固体润滑手册. 范巍等译. 北京: 机械工业出版社, 1986

参 考 文 献

- [1] Dowson D. History of Tribology. London; Longman, 1979
- [2] [日]西村 允. 固体润滑概论. 王安钧译. 固体润滑, 1986, 6(3)
- [3] 中国机械工程学会摩擦学学会《润滑工程》编写组. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1985
- [4] Clauss F J. Solid Lubricants and Self Lubricating Solids. London; Academic Press, 1972
- [5] Nishimura M et al. A SEM Built in Friction Tester and Its Application to Observe the Wear Process of Solid Lubricant Films. ASLE Proc. of 3rd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. Denver; ASLE, 1984; 50~65
- [6] Sliney H E. Solid Lubricant Materials for High Temperatures-A Review. Tribology Intl. 1982, 5(5), 303~315
- [7] Anderson J C. Wear of Commercially Available Plastics Materials. Tribology Intl. 1982, 5(5), 255~263
- [8] Tsuya Y et al. The Effect of Sliding Condition on the Wear Rate of Self Lubricating Compounds ASLE Proc. of 2nd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. 1978 Aug. 15-18 Denver; ASLE, 1978; 212~229
- [9] Lancaster J. K. Accelerated Wear Testing as An Aid To Failure Diagnosis And Material Selection. Tribology Intl. 1982, 5(6), 323-329
- [10] 周国民, 党鸿辛. 我国固体润滑材料的发展概况. 固体润滑, 1981, 1(2), 114~122
- [11] Mitchell P C H. Oil-Soluble Mo-S Compounds As Lubricant Additives. Wear. 1984, 100(1/3), 281~300
- [12] 中国科学院兰州化学物理研究所. 固体抗摩材料. 北京: 科学出版社, 1973
- [13] 林亨耀. 塑料导轨与机床维修. 北京: 机械工业出版社, 1989
- [14] [日]松永正久, 津谷裕子编. 固体润滑手册. 范燧等译. 北京: 机械工业出版社, 1986

参 考 文 献

- [1] Dowson D. History of Tribology. London; Longman, 1979
- [2] [日]西村 允. 固体润滑概论. 王安钧译. 固体润滑, 1986, 6(3)
- [3] 中国机械工程学会摩擦学学会《润滑工程》编写组. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1985
- [4] Clauss F J. Solid Lubricants and Self Lubricating Solids. London; Academic Press, 1972
- [5] Nishimura M et al. A SEM Built in Friction Tester and Its Application to Observe the Wear Process of Solid Lubricant Films. ASLE Proc. of 3rd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. Denver; ASLE, 1984; 50~65
- [6] Sliney H E. Solid Lubricant Materials for High Temperatures-A Review. Tribology Intl. 1982, 5(5), 303~315
- [7] Anderson J C. Wear of Commercially Available Plastics Materials. Tribology Intl. 1982, 5(5), 255~263
- [8] Tsuya Y et al. The Effect of Sliding Condition on the Wear Rate of Self Lubricating Compounds ASLE Proc. of 2nd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. 1978 Aug. 15-18 Denver; ASLE, 1978; 212~229
- [9] Lancaster J. K. Accelerated Wear Testing as An Aid To Failure Diagnosis And Material Selection. Tribology Intl. 1982, 5(6), 323-329
- [10] 周国民, 党鸿辛. 我国固体润滑材料的发展概况. 固体润滑, 1981, 1(2), 114~122
- [11] Mitchell P C H. Oil-Soluble Mo-S Compounds As Lubricant Additives. Wear. 1984, 100(1/3), 281~300
- [12] 中国科学院兰州化学物理研究所. 固体抗摩材料. 北京: 科学出版社, 1973
- [13] 林亨耀. 塑料导轨与机床维修. 北京: 机械工业出版社, 1989
- [14] [日]松永正久, 津谷裕子编. 固体润滑手册. 范燧等译. 北京: 机械工业出版社, 1986

参 考 文 献

- [1] Dowson D. History of Tribology. London; Longman, 1979
- [2] [日]西村 允. 固体润滑概论. 王安钧译. 固体润滑, 1986, 6(3)
- [3] 中国机械工程学会摩擦学学会《润滑工程》编写组. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1985
- [4] Clauss F J. Solid Lubricants and Self Lubricating Solids. London; Academic Press, 1972
- [5] Nishimura M et al. A SEM Built in Friction Tester and Its Application to Observe the Wear Process of Solid Lubricant Films. ASLE Proc. of 3rd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. Denver; ASLE, 1984; 50~65
- [6] Sliney H E. Solid Lubricant Materials for High Temperatures-A Review. Tribology Intl. 1982, 5(5), 303~315
- [7] Anderson J C. Wear of Commercially Available Plastics Materials. Tribology Intl. 1982, 5(5), 255~263
- [8] Tsuya Y et al. The Effect of Sliding Condition on the Wear Rate of Self Lubricating Compounds ASLE Proc. of 2nd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. 1978 Aug. 15-18 Denver; ASLE, 1978; 212~229
- [9] Lancaster J. K. Accelerated Wear Testing as An Aid To Failure Diagnosis And Material Selection. Tribology Intl. 1982, 5(6), 323-329
- [10] 周国民, 党鸿辛. 我国固体润滑材料的发展概况. 固体润滑, 1981, 1(2), 114~122
- [11] Mitchell P C H. Oil-Soluble Mo-S Compounds As Lubricant Additives. Wear. 1984, 100(1/3), 281~300
- [12] 中国科学院兰州化学物理研究所. 固体抗摩材料. 北京: 科学出版社, 1973
- [13] 林亨耀. 塑料导轨与机床维修. 北京: 机械工业出版社, 1989
- [14] [日]松永正久, 津谷裕子编. 固体润滑手册. 范燧等译. 北京: 机械工业出版社, 1986

参 考 文 献

- [1] Dowson D. History of Tribology. London; Longman, 1979
- [2] [日]西村 允. 固体润滑概论. 王安钧译. 固体润滑, 1986, 6(3)
- [3] 中国机械工程学会摩擦学学会《润滑工程》编写组. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1985
- [4] Clauss F J. Solid Lubricants and Self Lubricating Solids. London; Academic Press, 1972
- [5] Nishimura M et al. A SEM Built in Friction Tester and Its Application to Observe the Wear Process of Solid Lubricant Films. ASLE Proc. of 3rd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. Denver; ASLE, 1984; 50~65
- [6] Sliney H E. Solid Lubricant Materials for High Temperatures-A Review. Tribology Intl. 1982, 5(5), 303~315
- [7] Anderson J C. Wear of Commercially Available Plastics Materials. Tribology Intl. 1982, 5(5), 255~263
- [8] Tsuya Y et al. The Effect of Sliding Condition on the Wear Rate of Self Lubricating Compounds ASLE Proc. of 2nd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. 1978 Aug. 15-18 Denver; ASLE, 1978; 212~229
- [9] Lancaster J. K. Accelerated Wear Testing as An Aid To Failure Diagnosis And Material Selection. Tribology Intl. 1982, 5(6), 323-329
- [10] 周国民, 党鸿辛. 我国固体润滑材料的发展概况. 固体润滑, 1981, 1(2), 114~122
- [11] Mitchell P C H. Oil-Soluble Mo-S Compounds As Lubricant Additives. Wear. 1984, 100(1/3), 281~300
- [12] 中国科学院兰州化学物理研究所. 固体抗摩材料. 北京: 科学出版社, 1973
- [13] 林亨耀. 塑料导轨与机床维修. 北京: 机械工业出版社, 1989
- [14] [日]松永正久, 津谷裕子编. 固体润滑手册. 范燮等译. 北京: 机械工业出版社, 1986

参 考 文 献

- [1] Dowson D. History of Tribology. London; Longman, 1979
- [2] [日]西村 允. 固体润滑概论. 王安钧译. 固体润滑, 1986, 6(3)
- [3] 中国机械工程学会摩擦学学会《润滑工程》编写组. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1985
- [4] Clauss F J. Solid Lubricants and Self Lubricating Solids. London; Academic Press, 1972
- [5] Nishimura M et al. A SEM Built in Friction Tester and Its Application to Observe the Wear Process of Solid Lubricant Films. ASLE Proc. of 3rd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. Denver; ASLE, 1984; 50~65
- [6] Sliney H E. Solid Lubricant Materials for High Temperatures-A Review. Tribology Intl. 1982, 5(5), 303~315
- [7] Anderson J C. Wear of Commercially Available Plastics Materials. Tribology Intl. 1982, 5(5), 255~263
- [8] Tsuya Y et al. The Effect of Sliding Condition on the Wear Rate of Self Lubricating Compounds ASLE Proc. of 2nd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. 1978 Aug. 15-18 Denver; ASLE, 1978; 212~229
- [9] Lancaster J. K. Accelerated Wear Testing as An Aid To Failure Diagnosis And Material Selection. Tribology Intl. 1982, 5(6), 323-329
- [10] 周国民, 党鸿辛. 我国固体润滑材料的发展概况. 固体润滑, 1981, 1(2), 114~122
- [11] Mitchell P C H. Oil-Soluble Mo-S Compounds As Lubricant Additives. Wear. 1984, 100(1/3), 281~300
- [12] 中国科学院兰州化学物理研究所. 固体抗摩材料. 北京: 科学出版社, 1973
- [13] 林亨耀. 塑料导轨与机床维修. 北京: 机械工业出版社, 1989
- [14] [日]松永正久, 津谷裕子编. 固体润滑手册. 范巍等译. 北京: 机械工业出版社, 1986

参 考 文 献

- [1] Dowson D. History of Tribology. London; Longman, 1979
- [2] [日]西村 允. 固体润滑概论. 王安钧译. 固体润滑, 1986, 6(3)
- [3] 中国机械工程学会摩擦学学会《润滑工程》编写组. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1985
- [4] Clauss F J. Solid Lubricants and Self Lubricating Solids. London; Academic Press, 1972
- [5] Nishimura M et al. A SEM Built in Friction Tester and Its Application to Observe the Wear Process of Solid Lubricant Films. ASLE Proc. of 3rd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. Denver; ASLE, 1984; 50~65
- [6] Sliney H E. Solid Lubricant Materials for High Temperatures-A Review. Tribology Intl. 1982, 5(5), 303~315
- [7] Anderson J C. Wear of Commercially Available Plastics Materials. Tribology Intl. 1982, 5(5), 255~263
- [8] Tsuya Y et al. The Effect of Sliding Condition on the Wear Rate of Self Lubricating Compounds ASLE Proc. of 2nd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. 1978 Aug. 15-18 Denver; ASLE, 1978; 212~229
- [9] Lancaster J. K. Accelerated Wear Testing as An Aid To Failure Diagnosis And Material Selection. Tribology Intl. 1982, 5(6), 323-329
- [10] 周国民, 党鸿辛. 我国固体润滑材料的发展概况. 固体润滑, 1981, 1(2), 114~122
- [11] Mitchell P C H. Oil-Soluble Mo-S Compounds As Lubricant Additives. Wear. 1984, 100(1/3), 281~300
- [12] 中国科学院兰州化学物理研究所. 固体抗摩材料. 北京: 科学出版社, 1973
- [13] 林亨耀. 塑料导轨与机床维修. 北京: 机械工业出版社, 1989
- [14] [日]松永正久, 津谷裕子编. 固体润滑手册. 范燧等译. 北京: 机械工业出版社, 1986

参 考 文 献

- [1] Dowson D. History of Tribology. London; Longman, 1979
- [2] [日]西村 允. 固体润滑概论. 王安钧译. 固体润滑, 1986, 6(3)
- [3] 中国机械工程学会摩擦学学会《润滑工程》编写组. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1985
- [4] Clauss F J. Solid Lubricants and Self Lubricating Solids. London; Academic Press, 1972
- [5] Nishimura M et al. A SEM Built in Friction Tester and Its Application to Observe the Wear Process of Solid Lubricant Films. ASLE Proc. of 3rd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. Denver; ASLE, 1984; 50~65
- [6] Sliney H E. Solid Lubricant Materials for High Temperatures-A Review. Tribology Intl. 1982, 5(5), 303~315
- [7] Anderson J C. Wear of Commercially Available Plastics Materials. Tribology Intl. 1982, 5(5), 255~263
- [8] Tsuya Y et al. The Effect of Sliding Condition on the Wear Rate of Self Lubricating Compounds ASLE Proc. of 2nd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. 1978 Aug. 15-18 Denver; ASLE, 1978; 212~229
- [9] Lancaster J. K. Accelerated Wear Testing as An Aid To Failure Diagnosis And Material Selection. Tribology Intl. 1982, 5(6), 323-329
- [10] 周国民, 党鸿辛. 我国固体润滑材料的发展概况. 固体润滑, 1981, 1(2), 114~122
- [11] Mitchell P C H. Oil-Soluble Mo-S Compounds As Lubricant Additives. Wear. 1984, 100(1/3), 281~300
- [12] 中国科学院兰州化学物理研究所. 固体抗摩材料. 北京: 科学出版社, 1973
- [13] 林亨耀. 塑料导轨与机床维修. 北京: 机械工业出版社, 1989
- [14] [日]松永正久, 津谷裕子编. 固体润滑手册. 范燧等译. 北京: 机械工业出版社, 1986

参 考 文 献

- [1] Dowson D. History of Tribology. London; Longman, 1979
- [2] [日]西村 允. 固体润滑概论. 王安钧译. 固体润滑, 1986, 6(3)
- [3] 中国机械工程学会摩擦学学会《润滑工程》编写组. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1985
- [4] Clauss F J. Solid Lubricants and Self Lubricating Solids. London; Academic Press, 1972
- [5] Nishimura M et al. A SEM Built in Friction Tester and Its Application to Observe the Wear Process of Solid Lubricant Films. ASLE Proc. of 3rd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. Denver; ASLE, 1984; 50~65
- [6] Sliney H E. Solid Lubricant Materials for High Temperatures-A Review. Tribology Intl. 1982, 5(5), 303~315
- [7] Anderson J C. Wear of Commercially Available Plastics Materials. Tribology Intl. 1982, 5(5), 255~263
- [8] Tsuya Y et al. The Effect of Sliding Condition on the Wear Rate of Self Lubricating Compounds ASLE Proc. of 2nd. Intl. Conf. on Solid Lubrication. 1978 Aug. 15-18 Denver; ASLE, 1978; 212~229
- [9] Lancaster J. K. Accelerated Wear Testing as An Aid To Failure Diagnosis And Material Selection. Tribology Intl. 1982, 5(6), 323-329
- [10] 周国民, 党鸿辛. 我国固体润滑材料的发展概况. 固体润滑, 1981, 1(2), 114~122
- [11] Mitchell P C H. Oil-Soluble Mo-S Compounds As Lubricant Additives. Wear. 1984, 100(1/3), 281~300
- [12] 中国科学院兰州化学物理研究所. 固体抗摩材料. 北京: 科学出版社, 1973
- [13] 林亨耀. 塑料导轨与机床维修. 北京: 机械工业出版社, 1989
- [14] [日]松永正久, 津谷裕子编. 固体润滑手册. 范燧等译. 北京: 机械工业出版社, 1986