

固体润滑技术

石森森 编著

中国石化出版社



固体润滑技术

石淼森 编著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书系统介绍了固体润滑剂及其特性, 固体润滑剂的适用场合和选用原则, 固体润滑膜的润滑机理及制备方法; 并着重介绍了石墨、二硫化钼、高分子润滑材料、金属基复合自润滑材料的性能和使用方法。书中例举了大量单体润滑剂和复合润滑剂的制备、应用实例和润滑效果, 对固体润滑技术的实际应用具有较强的指导作用。

本书适用于从事各类机械设计、制造和润滑工作的科研与技术人员, 同时可供有关院校师生参阅。

图书在版编目 (CIP) 数据

固体润滑技术/石森森编著. —北京: 中国石化出版社, 1998

ISBN 7-80043-697-7

I. 固… II. 石… III. 固体润滑剂 IV. TE626.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 12747 号

中国石化出版社出版发行

地址: 北京市东城区安外大街 58 号

邮编: 100011 电话: (010) 64241850

海丰印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所经销

*

787×1092 毫米 32 开本 11.75 印张 264 千字 印 1—2000

1998 年 3 月第 1 版 1998 年 3 月第 1 次印刷

定价: 16.00 元

前 言

固体润滑技术最早应用于军事工业，接着在一些高科技领域，如人造卫星、宇宙飞船和高新技术的电子产品中得到了应用，解决了一些液体润滑剂难以解决的困难，进而又在各种特殊工况中得到了成功的应用。受此影响，在其它工业部门的常规生产领域中逐渐推广，并取得了良好的效果。因此，固体润滑技术越来越受到人们的重视。加之当前全球性能源日趋紧迫，因而将固体润滑逐渐替代液体润滑的呼声和行动日见高涨。从理论上研究固体润滑机理日益增多，应用固体润滑技术解决日常遇到的润滑问题所取得的成效也日益显著。但是，各种不同物质的润滑机理还有待深入研究，许多制备工艺还有待完善，润滑技术的效果和经济效益还有待提高。为此，本书所撰的理论认识综合了各种理论观点，并提出了自己的理论体系。本书还提供了生产中相当数量的应用实例。

由于固体润滑技术是一门新兴的多学科综合性技术，涉及面广，应用面宽，限于作者学术水平，对本书中的谬误或不当之处，恳请读者不吝指正为盼。

目 录

第一章 概论	1
第一节 固体润滑的作用	1
一、固体润滑是高新技术的产物	2
二、固体润滑发展了润滑技术	4
三、固体润滑提高了经济效益	5
第二节 固体润滑剂的应用场合	7
一、与润滑油脂有关的场合	7
二、运行条件苛刻的场合	8
三、环境条件各异的场合	10
四、无需维护保养的场合	11
第三节 固体润滑剂应有的特性	11
一、固体润滑剂应有的特性	12
二、使用固体润滑剂的优缺点	17
第四节 固体润滑剂的种类	18
一、软金属类固体润滑剂	18
二、金属化合物类固体润滑剂	19
三、无机物类固体润滑剂	19
四、有机物类固体润滑剂	20
第五节 固体润滑剂的使用	21
一、固体润滑剂的使用	21
二、固体润滑剂的选用原则	25
第二章 固体润滑膜	31
第一节 固体润滑机理	31
一、干摩擦机制	32

二、固体润滑机理	39
第二节 固体润滑膜的性能	45
一、润滑特性	46
二、摩擦特性	55
三、温度特性	58
四、气氛特性	61
五、磨损特性	63
第三节 固体润滑膜的磨损	67
一、磨损现象	68
二、粘结涂层对耐磨性的影响	70
三、基材表面预处理对耐磨性的影响	76
四、聚合物改性对耐磨性的影响	81
第四节 固体润滑膜的制备	84
一、干法制备	84
二、湿法制备	86
三、粉末喷涂法	96
四、复合镀层法	100
第三章 常用固体润滑材料	107
第一节 石墨	107
一、石墨的性质	108
二、石墨的润滑机理	115
三、石墨润滑的应用	117
第二节 二硫化钼	127
一、二硫化钼的性质	129
二、二硫化钼的润滑性能	130
三、二硫化钼润滑的应用	137
第三节 其他常用固体润滑材料	146
一、层状结构固体润滑材料	147
二、氟化物润滑材料	151
三、氧化物润滑材料	152

四、其他耐高温润滑材料	154
第四章 金属基润滑材料	158
第一节 软金属润滑材料	158
一、软金属的基本性质	159
二、软金属的润滑性能	161
第二节 金属基复合润滑材料	165
一、金属基复合润滑材料的种类	166
二、烧结型金属基复合材料	167
三、铸造型金属基复合材料	176
四、浸渍型金属基复合材料	181
第三节 几种典型的金属基复合材料	184
一、铁基复合材料	184
二、镍基复合材料	200
三、银基润滑材料	209
四、钼基润滑材料	212
五、铜基润滑材料	216
第五章 高分子润滑材料	220
第一节 高分子润滑材料的种类和特性	220
一、高分子材料的种类	220
二、高分子材料的基本性能	221
三、高分子材料的摩擦学性能	230
四、高分子材料常用的添加剂	235
第二节 聚四氟乙烯	237
一、聚四氟乙烯的物理性质	237
二、聚四氟乙烯的摩擦学特性	238
三、聚四氟乙烯基复合材料	242
四、聚四氟乙烯的应用	247
第三节 高分子复合材料	249
一、高分子复合润滑材料的分类	250
二、高分子复合材料的特性	253

三、高分子材料的共混	270
第四节 几种典型的高分子润滑材料	275
一、尼龙	275
二、三聚氰胺-氰尿酸络合物 (MCA)	287
三、高分子减摩涂层 HNT 和 FT	293
第六章 固体润滑剂的应用	299
第一节 在机械传动中的应用	299
一、固体润滑滑动材料	299
二、添加固体润滑剂的油脂	315
三、传动部件中的固体润滑	324
第二节 在机械加工中的应用	331
一、压力加工中使用的固体润滑剂	332
二、切(磨)削加工中使用的固体润滑剂	348
第三节 在特殊工况中的应用	358
一、特殊工况的摩擦与润滑	358
二、宇航器机械的润滑	362
附录	366
1. 符号说明	366
2. 高分子材料代号说明	367
参考文献	368

第一章 概 论

固体润滑是将固态物质涂(镀)于摩擦界面,以降低摩擦、减少磨损的措施。这种能够降低摩擦、减少磨损的固态物质称为固体润滑剂。当前,可作为固体润滑剂的物质有石墨、二硫化钼等层状固态物质,塑料和树脂等高分子材料,软金属及其各种化合物等。利用固体润滑剂进行润滑的方法称为固体润滑,利用固体润滑剂对摩擦界面进行润滑的技术统称为固体润滑技术。

第一节 固体润滑的作用

减少摩擦和磨损的措施是润滑。常用的液体润滑是有一定成效的。但是,供给液体润滑需要相当体积的设备和足够的动力,维持相应压力的装置以及安全保护设施。况且液体的泄漏是个比较棘手的难题。从理论和实践上讲,采用固体润滑的方法,减少处于干摩擦状况下摩擦副的摩擦和磨损是可行的。采用固体润滑就不需要相应的润滑设备和装置,也不存在泄漏问题。

固体润滑剂的出现克服了针对液体润滑的一些固有缺点。例如,润滑油、脂都容易蒸发,其蒸气压较高,不能在 10^{-1}Pa 以上的真空中长时间使用。而高度为 1000km 的宇宙空间,真空较高,绝对压力达 $10^{-2}\sim 10^{-3}\text{Pa}$ 。因此,人造卫星需要采用蒸气压很低的固体润滑剂。

运载人造卫星的火箭，如果使用液体燃料，用作推进剂的是煤油和液氢，用作氧化剂的是液氧，液氧和液氢是沸点分别为 -183°C 和 -253°C 的超低温流体，因而在将它们从贮罐加压输送到燃烧室的涡轮泵的支承轴上，就不能使用润滑油。特别是液氧，因其一旦与润滑油混合就有发生爆炸的危险，所以涡轮泵上的滚动轴承就只能采用固体润滑剂润滑。

润滑油在承受高负荷时，油膜会遭到破坏；在高温下会丧失润滑能力。如使用固体润滑剂则有较高的承载能力，能耐高温。

一、固体润滑是高新技术的产物

早在 19 世纪产业革命期间，诸如石墨、锡、铅等都已作为润滑剂用于低速运转的机器上。在二次大战时期，固体润滑就作为研究对象提出来了。德国的马克思普朗克研究所和美国国家航空和宇航局的前身国家航空咨询委员会都曾进行过研究开发，如将二硫化钼用于工业应用的试验，并开发了有机粘结固体润滑膜、二硫化钼润滑脂和聚四氟乙烯润滑剂等。到本世纪 50 年代初，美国制定了二硫化钼的美国军用标准，并将其作为军事机密。1957 年，前苏联的人造卫星东方 1 号发射成功，揭开了人类进入宇宙时代的序幕，并把固体润滑的研究开发推进到一个引人注目的新阶段。但是，因为润滑不良，初期的人造卫星屡出故障。

在民用方面，1960 年在全世界生产的添加二硫化钼的润滑油和脂的产量达到 5 万吨。尤其是从 1965 年将二硫化钼添加的润滑脂规定为汽车悬架用润滑剂以后，它们的用量就不断增加。

60 年代，陶瓷粘结二硫化钼膜和金属自润滑复合材料的开发，使得超音速飞机 RS-70 问世飞行时，其上 1000

个部位实现了固体润滑。随后，二硫化钼溅射膜和离子镀膜相继出现，氟化石墨研制成功。在以后发射的气象卫星、国际通讯卫星、宇宙飞船等航空航天工程中大量使用着各种各样的固体润滑材料。

在新兴的产业部门以及新兴的生产技术领域，都在逐渐应用固体润滑。以机器人和电子计算机为主的电子机械中，其主要的润滑部分如齿轮机构、谐和减速器、轴承、滚珠丝杠、链索与链轮等，对润滑剂的质量性能提出了很高的要求：如能在各种恶劣环境（高温、辐射、尘埃、潮湿等）下工作，并在使用期内不变质；能适应较广的温度范围（ $-100\sim 1000^{\circ}\text{C}$ ），且低温启动性能好。常用的固体润滑剂聚四氟乙烯和二硫化钼等都能满足这些要求。如在低温下大都使用聚四氟乙烯，高温和高真空工作环境下主要用二硫化钼喷涂膜，或含有 10% 二硫化钼的精制膨润土或精制硅橡胶润滑脂进行润滑。在辐射环境下工作的机器人，则要用聚烷基苯醚或聚苯醚等合成润滑油或用精制膨润土润滑脂进行润滑。在水中工作的机器人，则用硅酸钠粘结的二硫化钼润滑膜，或用含有二硫化钼同时添加油性剂和极压添加剂的粘附性强、密度为 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ 左右（与水相当）的憎水性硅油，或用精制膨润土耐水润滑脂进行润滑。电子计算机的回转部分、滑动部分，主要用含 50% 二硫化钼的聚 α -烯烃加氢齐聚油或双酯油润滑，或用含 10% 二硫化钼的酯油或齐聚油的精制膨润土润滑脂进行润滑。由于宇航等空间工程的电子计算机的润滑，必须用蒸发量极小，并能耐高、低温和耐辐射的润滑剂，主要有聚乙烯等结合的二硫化钼润滑材料及过氟烷基聚醚、聚苯醚加二硫化钼润滑剂。原子能发电站用电子计算机，则需用耐辐射性能好的聚烷基苯醚或聚苯醚和

精制膨润土并加 10% 二硫化钼润滑脂进行润滑。办公设备静电复印机内有热源，温度高约 $140 \sim 200^{\circ}\text{C}$ ，定印热辊的径向负荷为 $3 \sim 15\text{N}$ ，广泛使用含有 30% 二硫化钼的双酯精制膨润土润滑脂、聚四氟乙烯或聚乙烯氟烷油系润滑脂进行润滑。

二、固体润滑发展了润滑技术

随着科学技术的发展，要求摩擦副处于高温、低温、高真空、强辐射和高速运动等特殊工况下工作。在特殊工况下发生的摩擦状况各有其特点，因而对润滑剂提出了很苛刻的要求，而润滑油、脂几乎无法完成这些任务。如果将固体润滑剂与润滑油、脂联合使用，可以取长补短，既能扩展润滑油、脂的使用范围，又解决了特殊工况下的润滑问题。

将固体润滑剂、极压添加剂等配制成水基或油基润滑液，用于金属压力加工和切削加工，可以提高质量和成品率，延长模具和刀具的使用寿命。

将含有固体润滑剂的齿轮成膜膏、齿轮干膜、齿轮油膏等涂敷于齿轮表面，可以解决各种变速齿轮箱的润滑和漏油问题，并延长了设备的操作周期和使用寿命；同时也可解决各种开式齿轮、万向联轴节和轧钢机械的润滑和漏油问题。

许多工业领域，无论是家用电器、人工关节，还是重型机械或农业机械，越来越多地应用高分子材料取代传统的金属材料。如制成的金属-塑料润滑材料（钢板-多孔性青铜-填充聚四氟乙烯复合材料）是兼顾金属与塑料各自优点的扬长避短的新颖材料。它的机械性能和摩擦学性能均很优良，可在许多场合下使用。

金属基自润滑复合材料具有机械强度高、导电性能和传热性能好、摩擦系数低和耐磨寿命长的优点，因而在大气中

和超真空条件下可作为滑动轴承和电接触材料，应用于军工、航天及民用工业迫切需要解决润滑问题的地方。

陶瓷耐磨润滑材料是世界上近年来比较热门的研究材料之一。攻克这一关键，可以大幅度提高内燃机的热能利用率，经济效益十分显著。

应用物理气相沉积（PVD）和化学气相沉积（CVD）技术，将有润滑性的软金属、金属化合物或固体润滑剂涂敷于零件的摩擦表面。在镀软金属膜、碳膜和二硫化钼加银复合膜等方面已获得较好的工艺效果，并对这些固体润滑膜的机械性能、摩擦学性能进行了大量的研究。这些固体润滑膜在真空润滑等方面得到了应用，并利用该技术解决了航天器中的润滑问题。

在底金属上镀氮化钛、碳化钛等固体润滑膜，已在各个工业部门推广应用。特别是氮化钛（碳化钛）镀层刀具和工具得到了实际应用，并取得了较好的效果。

由此可以看出，固体润滑剂的出现，扩充了润滑油、脂的应用范围，弥补了润滑油、脂的缺陷。更重要的是出现了许多应用固体润滑剂的新颖的润滑技术。因此，固体润滑技术的出现，既是新材料又是新技术，意义更为重大。

三、固体润滑提高了经济效益

当前，世界每年消耗约 15 亿吨汽油、柴油、喷气燃料和重油。世界能源总耗量的 50%~60% 消耗在各种数以亿计的动力机械上，而这些机械的能源有效利用率平均只有 30% 左右，估计有 30%~40% 的消费能源消耗在摩擦、磨损上。当然，这些摩擦、磨损的一部分是不可避免的。但如果随着润滑技术的提高，将一部分摩擦磨损节省下来，有人按当前能源消费水平估计，全世界至少有相当于 10 亿吨石

油的能源可节省下来。

国内某油田在 1982 年对全油田 42000 台各种机械设备的摩擦、磨损和能耗情况进行了普查，发现全油田每年消耗的能源为：电力 $2.8 \times 10^9 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，汽油、柴油近 $8 \times 10^4 \text{ t}$ ，润滑油脂 4000t。其中 $1/3 \sim 1/2$ 因无功摩擦而消耗掉。据测算，如果采用节能型润滑剂，进行合理润滑，并改善机械设备的润滑维护，使效率提高，修理次数减少，并延长使用期，每年可提高经济收益 1.4 亿元。

经调研，固体润滑剂及其应用技术目前仅被少数企业采用，便取得了较好的经济效益。

金属基含油复合材料自润滑轴承用于洗衣机和纺织机械后，降低了设备的成本，延长了轴承的使用寿命，降低了油残次布百分率。仅此三项成果全面推广，预计每年可节约上亿元的经济效益。

以羧甲基纤维素为基础的水溶性高分子润滑材料用于铁和低碳钢冷挤压加工中，代替原来的酸洗 - 磷化 - 皂化工艺，使生产线由十道工序缩减为两道工序，生产费用降低了 75%。

国内某单位两台吊车上的 8 台减速机，原来用机械油润滑，每年消耗 1.6 万公斤，且漏油严重，造成环境污染，工人劳动强度也大。后改用齿轮成膜膏，用喷涂的方法，每次仅涂 $5\mu\text{m}$ 厚的固体润滑膜，便根治了漏油，延长了齿轮寿命，改善了设备状况，提高了设备作业率，每年还为企业节约了 2 万余元经费。

国内某汽车制造厂用含油聚甲醛钢背复合自润滑材料，在 BJ-130 汽车万向节轴承上代替滚针轴承进行应用研究。通过模拟强化试验，传动效率试验，道路可靠性试验及数百

辆汽车的使用试验。从测量行驶了 $6 \times 10^4 \text{km}$ 以上的 10 套万向节总成数据可知, 40 个运动副的平均磨损量, 轴承为 0.08mm , 轴颈为 0.02mm 。平均每 10^4km 的磨损量, 轴承为 0.012mm , 十字轴为 0.003mm 。由此将传动的滚动结构更新为滑动结构, 使用寿命比滚动轴承提高 2 倍以上, 可达 $10 \times 10^4 \text{km}$ 。十字轴寿命则更长。从传动效率测试结果可知, 万向节轴承由传统的滚动结构更新为复合材料的滑动结构后, 功率损失不到千分之五, 因而经济效益显著。

第二节 固体润滑剂的应用场合

固体润滑剂有很宽的使用温度范围, 且有很高的承载能力, 并能在腐蚀环境中不加保护的使用。它能在超高温、超低温、超真空、超高速和强辐射等条件下工作。在各个传动构件和摩擦副中, 固体润滑剂的应用日见增多。

一般来说, 固体润滑剂适用于以下一些场合。

一、与润滑油脂有关的场合

利用固体润滑剂及其复合材料, 可以代替润滑油脂。同时, 在润滑油脂中添加固体润滑剂可以增强或改善其性能。

1. 用固体润滑剂代替润滑油脂

在下列情况, 可以用固体润滑剂代替润滑油、脂, 对摩擦表面进行润滑。

(1) 不能使用润滑油脂的场合

在各种特殊工况 (如高温、低温、真空和重载等) 下, 一般润滑油脂的性能无法适应, 可以使用固体润滑剂进行润滑。在金属切削加工和压力加工中无法使用液体润滑的场合, 可以使用固体润滑剂进行润滑。

(2) 为了防止润滑油脂被污染的场所

在润滑油脂易被其它液体（如水、海水等）污染或冲走的场合、潮湿的环境场合及含有固体杂质（如泥砂、尘土等）的环境场合中，无法使用液体润滑剂，可以使用固体润滑剂进行润滑。

(3) 给油很不方便的场合

有些构件和摩擦副无法连续供给润滑油脂，安装工作不易接近或装卸困难、无法定期维护保养的场合，如桥梁的支承轴承，可以使用固体润滑剂进行润滑。

2. 用固体润滑剂增强或改善润滑油脂的性能

为了下列使用目的，可以在润滑油、脂中添加固体润滑剂：

- (1) 增加润滑油脂的承载能力；
- (2) 增强润滑油脂的时效性能；
- (3) 增强润滑油脂的高温性能；
- (4) 使润滑油脂原位形成摩擦聚合膜而添加固体润滑剂（如有机钼化合物等）。

二、运行条件苛刻的场合

1. 宽温条件下的润滑

润滑油、脂的使用温度范围大约为 $-60 \sim +350^{\circ}\text{C}$ 。在超过此温度范围的条件下，就不得不依赖于固体润滑。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。在温度超过 350°C 时，润滑油脂也无法工作。而固体润滑剂能够适应于 -270°C 到 1000°C 以上的工作温度范围。

在超低温条件下，液氧和液氢等燃料输送泵中滚动轴承的润滑，超导仪器设备中的润滑和超导输电、线型电动车等

传动和配电件的润滑都依赖于固体润滑。并且，超低温条件下的固体润滑将成为超低温技术成败的关键。固体润滑剂聚四氟乙烯和铅等在这种温度条件下仍具有润滑性能，也是最常用的基本润滑材料。

应用于高温条件下的润滑材料有：高分子材料聚酰亚胺的使用上限温度为 350°C ，氧化铅的最高工作温度可达 650°C ，氟化钙与氟化钡混合的最高使用温度为 820°C 。在钢材热轧制时，工作温度可达 1200°C 以上，固体润滑剂石墨、玻璃和各种软金属被膜则能充当良好的润滑剂。

2. 宽速条件下的润滑

各类固体润滑膜能够适应摩擦副间宽广的运动速度范围。如机床导轨的运动属于低速运动。用添加固体润滑剂的润滑油可减小爬行，用高分子材料涂层形成的固体润滑干膜可减少磨损。而软金属铅膜则适用于低速运动的摩擦滑动表面。使用于低速重载的轴承，可用镶嵌型滑动材料制造，以减少摩擦和磨损。使用于高速运动的轴承，只要在其表面镀上 $2\sim 5\mu\text{m}$ 厚的碳化钛膜，即使在 24000r/min 的速度下运转 25000h 也不磨损。

3. 重载条件下的润滑

一般润滑油脂的油膜，只能承受比较小的负荷。一旦负荷超过其所能承受的极限值，油膜则破裂，摩擦表面将会发生咬合。而固体润滑膜可以承受的平均负荷在 10^8Pa 以上的赫兹压力。如厚度为 $2.5\mu\text{m}$ 的二硫化钼膜能承受 2800MPa 的接触压力，并可以 40m/s 的高速运动。聚四氟乙烯膜还能承受 10^9Pa 的赫兹压力。金属基复合材料的承载能力更高。在金属压力加工（如轧制、挤压、冲压等）中，摩擦表面的负荷很高，通常使用含有固体润滑剂的油基或水基润滑