

固体润滑手册

主编 〔日〕松永正久

编辑 〔日〕津谷裕子



机械工业出版社

固体润滑是摩擦学的组成部分，是比较新的一门科学技术，在工农业生产和国防尖端技术上越来越广泛地被采用。本书主要叙述固体摩擦理论，固体润滑法，各种固体润滑剂，试验方法及固体润滑剂的应用。

本书主要供从事润滑科研，应用的科技人员及大学有关师生参考。

八五永正(日) 監主
固体潤滑ハンドブック

監修 松永正久

編集 津谷裕子

幸書房

1978

* * *
固体潤滑手册

主編 (日)松永正久

編輯 (日)津谷裕子

譯者 范煜等

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本850×1168 1/32·印张18³/₈·字数480千字
1986年9月重庆第一版·1986年9月重庆第一次印刷

印数0.001—5.300·定价5.25元

统一书号:15033·5772

译序

固体润滑是一门新兴的科学技术，就是用固体物质进行润滑的意思，可以部分地代替常规油脂，减少摩擦副的摩擦磨损，提高机械效率，延长机械寿命，从而节约能源，节省材料。

固体润滑属于摩擦学(Tribology)的一部分。就其实质来说是固体摩擦，在普遍研究各种固体物质摩擦规律和影响因素的基础上，从中找出摩擦较小的固体，也就是固体润滑剂，再用它们进行润滑摩擦较大的固体，也就是固体润滑。虽然国内外学者对固体润滑的理论基础给予了很大重视，但目前还没有形成完整的体系。尽管如此，由于生产的需要，固体润滑在应用方面已经显示出解决问题的非凡能力，可以解决许多过去难以解决的润滑问题。应用固体润滑时，由于固体物质物性上的不连续、难扩散等性质，就不得不考虑其使用方法，也就是固体润滑方法。另外，人们很关心固体润滑的适用性、可靠性等方面，希望有应用成功的实例来说明成效。本手册由日本润滑学会的松永正久、津谷裕子和二十多位专家共同编写，收集了大量有关资料，满足了读者查阅要求。不足之处是本手册在查阅上不如其他成熟的科学技术手册那样完整，这只是为了发展这门科学技术的一次重要尝试，属于新生事物，有待今后实践中不断完善。

鉴于固体润滑在我国经济建设中的重要地位，我们组织翻译了这本手册。由于原著内容广泛，出自许多专家手笔，为了确切掌握各自的专业知识，我们也相应地做了人员安排和翻译分工。推荐者的话和主编的话由周国民，第一、二、三章和第四章1~5节由范煜，第四章3~10节由吴伟忠，第五章1节由齐尚奎、2节由徐锦芬、3节由欧阳锦林，第六章由沈维长翻译初稿，以上为中国科学院兰州化学物理研究所人员。第七章1、2、4节由姚一

飞、3节由沈之敏、5节由赵英才、陈溪芳、6和7节由余茂芄翻译初稿，第七章并由田顾耕、朱有华初校，以上为浙江大学机械系人员。最后由范煜总校并定稿。限于参加译校人员的专业水平和外文水平，难免有错误之处，恳祈广大读者指正。

本手册能够翻译出版，承蒙有关同志们的大力支持和协助，特别是王秉辉同志为本书提出过许多修改意见，在此一并致谢。

译者1983年7月1日

推荐者的话

为了减少相对运动两表面间的摩擦和防止磨损，一般的方法是使用润滑油，如使用润滑油有效，这是最好不过的方法。但是，在不能使用润滑油或者在使用润滑油极不方便的情况下，就有必要考虑使用固体润滑剂。例如，在真空中，在有腐蚀等特殊气氛中，在超高温、超低温、辐照场、电磁场中，在桥梁支承部件等维修困难的地方，在怕油污染的地方，在要求永久润滑的地方，在极压条件下等。再就是将固体润滑剂与润滑油并用，希望在流体润滑膜破裂时，有应急的作用。

这样要求固体润滑的事例，在宇宙开发和原子能利用方面是常见的。美国和苏联等国以卓越的技术进行了开发，其成果也应用到一般机器中，这就确立了今天固体润滑在润滑中的地位。

固体润滑并不是一种新方法，石墨和滑石等自古以来就用作固体润滑剂。在第二次世界大战期间，美国飞机上的航空发动机的润滑就是用混有固体润滑剂的油。在日本也开展了这方面的研究。

战后，从 MoS_2 在真空中有特别优良的润滑性这一点出发，引用于宇宙开发，由此而始开发了种种层状固体润滑剂。

固体润滑剂的应用进展迅速，是由于解决宇宙开发、原子能利用等苛刻条件下的需要，而被置于重点研究开发的结果。但是，在基础研究方面还有待探讨。例如固体润滑剂的性能不仅与该物质本身有关，而且随环境气氛而改变，可以说这些还没有完全研究清楚。关于固体润滑剂与润滑油的混合使用，也还存在着待解决的问题。

日本在宇宙开发和原子能利用方面还落后，在固体润滑研究和开发方面也落后。然而近年来在基础研究方面取得了少数独创

的成果，并寻求修正过时的理论，继而注意到了技术上的开发。这在1975年6月在东京召开的“固体润滑国际讨论会”上已有所介绍。

现在，对包括电子器械在内的各种机器要求小型化、轻量化及要求极苛刻条件下平稳工作，在解决这些生产技术各方面的课题时，很多情况下润滑是关键，期待着润滑关键问题的解决。

本书是在日本固体润滑的权威人士和后起之秀紧密合作下，收集了近期的大量研究成果编写成的，它将对日本固体润滑的发展与推广使用作出很大贡献。

工業技術院長

日本润滑学会前会長

窪田 雅男

主编的话

美国发表了很多有关固体润滑报告。日本对固体润滑也是较早就非常关心，例如1965年4月日本机械学会主持召开了关于固体润滑剂的座谈会，在赤岡主持下该学会的固体润滑剂调查分科会上，发表了文献调查结果以及众多研究者的研究成果。

我们以这些实际成绩为基础，于1971年在日本润滑学会中设立了“固体润滑研究分会”，每年召开数次文献介绍、研究报告会和讨论会。这些成果发表在1974年本学会的杂志《润滑》第19卷，作为特集的第10期和第11期两期上。再就是集中于1975年6月的“固体润滑国际讨论会”上。

本书以上述的资料为基础，汇集了许多研究者的研究成果和调查成果。最初估计是300页左右的书，然而从收集的原稿和各方面的资料来看，作为手册其内容更为适当，因此就这样定下来了。这些内容是从日本固体润滑的摇篮时代起，许多学者致力于它的研究，灌注了很多心血而积累起来的。不用说在日本，即使与国外相比也没有这样的好著作，它包括了有关当前固体润滑的全部资料，同时也展望了将来。

就固体润滑的研究而言，这仅仅是一个开始，在应用上不一定能得到满足，在理论探讨方面也有不少是初步的东西。希望把这本手册作为阶梯，促进进一步地研究与应用。

最后，关于“固体润滑”这个术语，受到有知之人士的再三批评。“固体润滑”明显是从英语“Solid Lubrication”直接翻译过来的，我们把Lubrication与润滑等同起来。但是，“润”字如按诸桥著的大汉和辞典中所示是“うるほす，しめす，ぬらす，しみこます，ひたす”（湿、润，濡湿，沾湿、润湿，染上、渗入，浸、泡）等等语意，很明确有“液体”的概念。此处的Lubrica-

tion是“to cause to slip easily”(容易滑移)的意思(Funk and Wagnalls, "New Standard Oxford Dictionary", 1922), 不一定包含所谓“液体”的概念。因而“固体润滑”的这一术语看来不是很恰当的, 由于习惯长期使用了这个术语。若蒙赐予适当的翻译, 那就再好不过了。

東大生産技術研究所

教授 松永正久

《固体润滑手册》编写者

- | | | |
|-----|--------|--------------|
| 主 编 | 松永正久 | 東京大学生産技術研究所 |
| 編 輯 | 津谷裕子 | 機械技術研究所 |
| 執筆者 | 赤岡 純 | 玉川大学 |
| | 安部 亘 | オイレス工業株式会社 |
| | 石井正司 | 電気化学工業株式会社 |
| | 大蔭 齋 | 大蔭技術研究所 |
| | 大島正敬 | 出光興産株式会社 |
| | 川邑正男 | 株式会社川邑研究所 |
| | 里吉 超 | 株式会社日立製作所 |
| | 高木理逸 | 工学院大学 |
| | 武田芳三 | 横浜炭素工業株式会社 |
| | 多田 博 | オイレス工業株式会社 |
| | 田中久一郎 | 金沢大学 |
| | 多罗尾光一郎 | 三菱アルミニウム株式会社 |
| | 津谷裕子 | 機械技術研究所 |
| | 鶴田 実 | 日本モリブデン株式会社 |
| | 土肥 禎 | 日本黒鉛工業株式会社 |
| | 淵上 武 | 住鋳潤滑剤株式会社 |
| | 宮川行雄 | 航空宇宙技術研究所 |
| | 山口章三郎 | 工学院大学 |
| | 山添 宏 | 日本カーボン株式会社 |
| | 山本博一 | 大阪府立工業技術研究所 |

(按五十音图顺序排列)

符 号 表

a	微小接触部分的半径
A	真实接触面积
σ_0	屈服应力
H	材料的硬度
S	剪切强度
F_a	粘着摩擦力
F_f	挖掘摩擦力
P	接触压力
p	环境气氛压力
μ	摩擦系数
V	磨损体积
v	滑动速度
t	摩擦时间
W	荷重
θ	干膜的厚度 (或特定层的厚度)
l	摩擦距离
W_s	比磨损率
K	磨损因子 (wear factor)
α	底材接触与全真实接触的比
$\mu_{膜}$	涂膜的摩擦系数
$S_{膜}$	涂膜的剪切强度
$H_{底材}$	底材的硬度

目 录

1 总 论	1
1.1 固体润滑法的基本概念	1
1.2 固体润滑法的实践	2
1.3 固体润滑剂的种类	4
1.4 固体润滑剂的用法及其特征	13
1.5 固体润滑剂的实用、问题和发展	17
2 固体摩擦理论	19
2.1 所谓摩擦力	19
2.2 从粗糙表面学说 to 粘着-掘起学说	20
2.2.1 接触的模式	20
2.2.2 摩擦系数	22
2.3 粘着学说的推敲	23
2.3.1 结合部位的生长	23
2.4 磨损	27
2.5 比磨损率	31
3 固体润滑法	34
3.1 固体润滑的原理	34
3.1.1 不使固体偶件接触	35
3.1.2 使用结合力弱的结构	35
3.1.3 使结合部附近比较弱	35
3.1.4 只是接触部位滑动	38
3.1.5 使用本质上摩擦磨损小的材料	38
3.2 周围气氛效果和润滑作用机理	45
3.2.1 对 α 的影响	45
3.2.2 对强度的影响	48
3.2.3 最近的研究结果	52
3.2.4 周围气氛效果所说明的摩擦特性	55

3.3	表面膜的附着	61
3.4	用固体润滑的应用方法	65
4	固体润滑剂	69
4.1	石墨	69
4.1.1	石墨的制造方法	69
4.1.2	石墨的一般性质	70
4.1.3	石墨的润滑性	75
4.1.4	使用石墨润滑剂的例子	84
4.2	二硫化钼	87
4.2.1	钼的硫化物种类	87
4.2.2	关于天然 MoS ₂	89
4.2.3	MoS ₂ 的润滑性	93
4.2.4	MoS ₂ 的氧化	96
4.2.5	采用 MoS ₂ 润滑剂时的考虑	98
4.3	二硫化钨	99
4.3.1	二硫化钨的制备方法	99
4.3.2	二硫化钨的性质	104
4.3.3	作为润滑剂的性质	107
4.3.4	二硫化钨作润滑剂的应用	110
4.4	氮化硼	113
4.4.1	结晶结构	113
4.4.2	氮化硼的制备方法	114
4.4.3	一般的物性和用途	114
4.4.4	润滑特性	115
4.4.5	作为润滑剂的应用方法	119
4.5	氟化石墨	122
4.5.1	氟化石墨的结构	123
4.5.2	氟化石墨的特性	123
4.5.3	氟化石墨的合成	123
4.5.4	氟化石墨的润滑性	128
4.5.5	氟化石墨的应用方法	131
4.5.6	氟化石墨的其他应用	139
4.6	金属氧化物和氟化物	142

4.6.1	氧化物	142
4.6.2	一氧化铅	143
4.6.3	氟化物	147
4.7	氮化硅	152
4.7.1	氮化硅的制造方法	152
4.7.2	氮化硅的性质	153
4.7.3	氮化硅的润滑性和耐磨性	156
4.7.4	氮化硅的应用	158
4.8	塑料	160
4.8.1	塑料摩擦磨损的基础	160
4.8.2	塑料的摩擦磨损特性	168
4.9	金属	178
4.9.1	金属润滑的一些性质	179
4.9.2	金属润滑的应用	185
4.10	其他固体润滑剂	191
4.10.1	类别	191
4.10.2	过渡金属的硫化物、硒化物、碲化物	193
4.10.3	其他层状结晶构造的物质	195
4.10.4	含硫化合物	197
4.10.5	磷酸盐类	198
4.10.6	阳极氧化膜	201
5	固体润滑法各论	204
5.1	在润滑脂、油膏、油内的混合效果	204
5.1a	以研究室的实验为中心	204
5.1a.1	固体润滑剂的添加量	204
5.1a.2	固体润滑剂的粒径	208
5.1a.3	固体润滑剂的粒形	217
5.1a.4	分散体系中固体润滑剂的作用机理	222
5.1a.5	固体润滑剂和其他添加剂的混合效果	224
5.1a.6	固体润滑剂对于润滑油二次特性的影响	228
5.1a.7	应用实例	232
5.1b	以实际的试验为中心	234
5.1b.1	固体润滑剂的混合	234

5.1b.2	汽车上的应用	234
5.1b.3	一般生产上的应用	240
5.1b.4	其他方面的应用例子	242
5.2	干膜	243
5.2a	有机粘结	243
5.2a.1	有机粘结固体润滑膜的分类	246
5.2a.2	有机粘结固体润滑膜的制造	247
5.2a.3	有机粘结固体润滑膜性能的评价	248
5.2a.4	有机粘结固体润滑膜的选用	250
5.2a.5	有机粘结固体润滑膜的应用	257
5.2b	无机粘结干膜	262
5.2b.1	以 MoS_2 为主的膜的一般性质	262
5.2b.2	膜的种类	269
5.2b.3	陶瓷膜	273
5.2c	其他膜	278
5.2c.1	不含粘结剂的润滑性干膜	278
5.2c.2	复合电镀膜	281
5.2c.3	多孔表面上的浸渍	282
5.2c.4	其他	283
5.2d	金属薄膜润滑	284
5.2d.1	润滑的概念	284
5.2d.2	金属薄膜的镀法	285
5.2d.3	膜的制备条件与润滑性	288
5.2d.4	润滑法	295
5.3	复合材料	310
5.3a	塑料基	310
5.3a.1	各种组合塑料复合材料的滑动特性	314
5.3a.2	塑料复合材料在滑动部件上的应用	335
5.3b	金属基	341
5.3b.1	制造方法和性质(混合粉末烧结法的情况)	341
5.3b.2	摩擦条件与摩擦磨损	352
5.3b.3	应用方法	361
5.3c	无机基	365

5.3c.1	碳基复合材料的特征	367
5.3c.2	碳基复合材料的制造方法	369
5.3c.3	滑动特性	369
5.3c.4	碳纤维基复合材料	372
6	试验方法	376
6.1	试验方法种类	376
6.1.1	试验项目	376
6.1.2	摩擦磨损试验方法	381
6.2	固体润滑剂的规格	392
6.2.1	固体润滑粉末	393
6.2.2	混入油或脂的固体润滑剂	398
6.2.3	干膜	403
6.2.4	金属薄膜	414
6.2.5	滑动轴承	419
7	固体润滑剂的应用	425
7.1	大气中常温下的润滑及其具体事例	425
7.1.1	按应用事例及使用目的的分类	425
7.1.2	装配用糊状润滑剂	428
7.1.3	润滑油及润滑脂	433
7.1.4	干膜润滑剂	435
7.1.5	工程塑料及橡胶	436
7.1.6	“粉笔”	437
7.1.7	具体例子	438
1)	在结构物与桥梁上的应用	438
2)	生产机械上应用的例子	447
3)	交通机械上的应用	452
4)	在电磁旋转部分上的应用实例	454
5)	其他应用的例子	456
7.2	真空中的润滑	457
7.2.1	润滑剂	457
7.2.2	使用方法	461
7.2.3	应用例子	466
7.3	高温和低温时的润滑	475

7.3.1 金属.....	476
7.3.2 碳化物、陶瓷、金属陶瓷.....	480
7.3.3 软金属、氟化物、氧化物、硫化物等.....	489
7.3.4 层状固体润滑剂.....	491
7.3.5 低温时的润滑.....	497
7.3.6 高温时的应用实例.....	502
7.4 腐蚀性气氛下的润滑.....	506
7.4.1 固体润滑剂的耐腐蚀性.....	507
7.4.2 润滑性干膜及其耐蚀性.....	507
7.4.3 作整体使用的固体润滑剂.....	510
7.4.4 用表面化学反应生成物来润滑.....	512
7.4.5 在腐蚀性气氛中应用实例.....	512
7.5 辐照下的润滑.....	515
7.5.1 固体润滑剂本身与放射线.....	515
7.5.2 固体润滑膜与放射线.....	527
7.5.3 复合材料与放射线.....	532
7.5.4 应用举例.....	533
7.6 电接触点的润滑.....	538
7.6.1 碳电刷的电阻与磨损.....	538
7.6.2 MoS ₂ -银电刷的真空滑动特性.....	540
7.6.3 真空中的滑环.....	542
7.6.4 滚动轴承.....	548
7.7 塑性加工的润滑与实例.....	549
7.7.1 塑性加工中润滑性的特征.....	549
7.7.2 选定润滑剂的条件.....	551
7.7.3 可以使用的润滑剂与适用方法.....	552
7.7.4 对实用化的展望.....	557
7.7.5 应用实例.....	558
附表 各种固体润滑剂的一些性质.....	566

1 总 论

1.1 固体润滑法的基本概念

所谓“固体润滑法”一词，严格地说并不确切，暂且可以理解为利用有“润滑性”固体的某种形式的润滑法。

其利用方法只有如下两种：

- (1) 干摩擦；
- (2) 湿摩擦。

所谓“干”是指在气体气氛的情况（包括减压及真空）下；所谓“湿”是指液体或胶体存在的环境下。

干摩擦时，上述具有“润滑性”的固体，不借助于液体或胶体，就应起润滑作用。

湿摩擦时，因有液体或胶体存在，则上述具有“润滑性”的固体，可从辅助液体或胶体发挥润滑作用；或以液体或胶体为辅以本身为主起着润滑作用。

不论是干摩擦或是湿摩擦，都是在摩擦面上全部或局部地瞬间生成固体润滑膜，这种膜起着主要或辅助的润滑作用。

因而，具有“润滑性”的固体在摩擦面上生成固体润滑膜，则是固体润滑法的必要条件。

为此，必须满足以下两点：

- a 所用固体应具有适当的“润滑性”；
- b 能在摩擦面上生成相应的固体润滑膜。

所谓“润滑性”即意味着如下内容：

- a) 应能达到必要的足够低的摩擦，而不产生不必要的动力损失、发热、温度上升、粘着等；
- b) 能耐较高的接触压力，润滑膜不破裂，有足够的负荷能力；