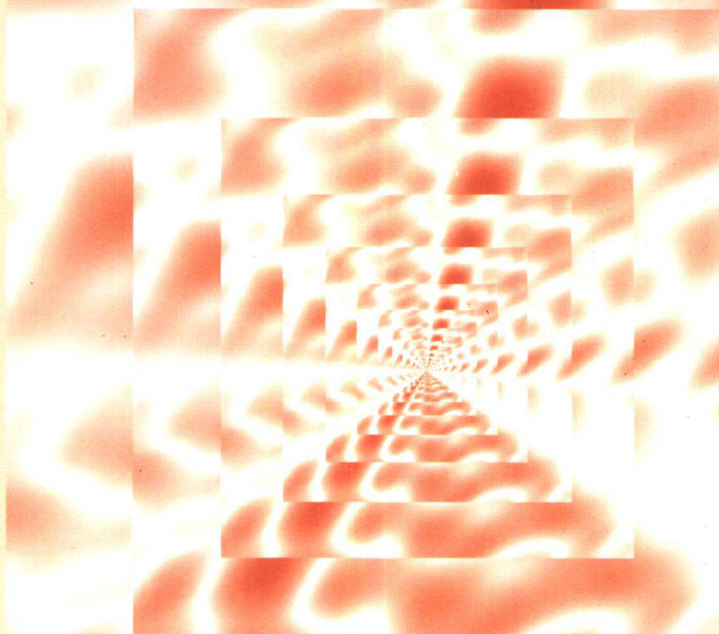


● 石森森 编著

固体

润滑材料



化学工业出版社



固体润滑材料

石森森 编著

化学工业出版社
·北京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

固体润滑材料/石森森编著. —北京:化学工业出版社, 2000.9 (2001.4 重印)
ISBN 7-5025-2885-7

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 (2000) 第 28300 号

固体润滑材料

石森森 编著

责任编辑: 王秀鸾

责任校对: 马燕珠

封面设计: 田彦文

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64918013

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市燕山印刷厂印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 10 $\frac{1}{2}$ 字数 291 千字

2000 年 9 月第 1 版 2001 年 4 月北京第 2 次印刷

印数: 3001—6000

ISBN 7-5025-2885-7/TH·72

定 价: 22.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

近 30 年来，摩擦学的研究重点发生了明显的转变，即从润滑和润滑系统转向材料科学和技术(包括表面工程等)的研究。由于现代工业技术的发展，特别是航空工业、空间技术的发展，它们的许多工况条件已经超越了润滑油脂的使用极限，这就促使人们去寻找新的润滑材料。固体润滑材料便应运而生。固体润滑材料能满足许多特殊工况条件下对润滑的要求，能适应复杂的工作环境，为机械设备实现大型化、微型化、高速、重载和自动控制等创造了有利条件，为实现新工艺、新技术，应用新材料创造了有利条件，为机械零件设计的革命提供了很大的方便，同时还可减少繁杂而讨厌的润滑维修问题，也给施工现场的文明清洁环境创造了有利条件。

我国从 20 世纪 50 年代末开始研究固体润滑材料，60 年代初期就在一些国防和军事工程上得到了较为满意的应用效果。继而，在许多高新技术含量高的机械和各个工业领域中众多常规机械的润滑中得到了应用，效果都十分令人满意。因此可以展望，固体润滑材料的研制和应用将会普及到国民经济的各个领域。

参加本书编著的还有史玲娣、石俊伟、石俊毅等人，在此表示谢意。由于固体润滑材料的研制和应用涉及到许多学科和技术，限于作者学术水平及实践经验，对本书中存在的谬误与不当之处，敬请读者不吝指正为盼。作者向在本书中所引用的著作及论文的所有作者表示衷心的感谢，感谢他们所付出的辛勤劳动。

石 森 森

2000 年 3 月

内 容 提 要

采用固体润滑材料可以使摩擦界面处于无油或少油润滑状态，并减少摩擦功的消耗。本书介绍了固体润滑材料的设计方法和组成原则，分别论述了金属基、非金属基和陶瓷等各种典型材料的组成、性能和应用情况的实例。本书图文并茂，实用性强。可供从事材料科学、机械设计、润滑工程等科研设计人员和有关大专院校师生参阅。

目 录

第一章 概论	1
第一节 固体润滑材料的组成	1
一、组成	1
二、组成原则	4
三、固体润滑材料的制备方法	12
第二节 固体润滑材料的分类	14
一、金属基润滑材料	15
二、非金属基润滑材料	16
三、陶瓷润滑材料	17
第三节 固体润滑材料的摩擦学特性	18
一、固体润滑膜	19
二、摩擦学中的固体表面	24
三、材料在真空中的摩擦学性能	27
第四节 固体润滑材料的设计	32
一、设计依据	32
二、固体润滑材料的设计	35
三、性能测试设计	45
第五节 固体润滑材料的应用	47
一、固体润滑材料的应用	48
二、镀覆型材料的应用	49
三、背衬型材料的应用	51
四、空间机械中应用的固体润滑材料	52
五、医药工程中应用的固体润滑材料	56
第二章 金属基润滑材料	58
第一节 软金属润滑材料的摩擦学特性	58
一、软金属的基本性质	58
二、软金属的摩擦学特性	60

三、软金属的气氛特性	62
第二节 粉冶型润滑材料	64
一、铁基粉冶型润滑材料	65
二、铜基粉冶型润滑材料	71
三、银基粉冶型润滑材料	76
四、镍基粉冶型润滑材料	82
五、难熔金属粉冶型润滑材料	90
第三节 铸造型润滑材料	103
一、铸造铝合金材料	103
二、铸造锌合金材料	110
三、铸造铜合金材料	115
四、铸造锡合金和铅合金材料	117
第四节 镀覆型润滑材料	120
一、化学镀	120
二、热喷涂	141
三、气相沉积	147
四、表面强化	157
第五节 镶嵌型润滑材料	162
一、镶嵌固体润滑剂的轴承	163
二、镶嵌式轴承的性能	165
第六节 背衬型润滑材料	170
一、PTFE-钢背复合材料 (DU 材料)	171
二、聚甲醛-钢背复合材料 (DX 材料)	175
第三章 非金属基润滑材料	178
第一节 非金属润滑材料的摩擦学特性	178
一、非金属润滑材料的性能概论	178
二、聚四氟乙烯的摩擦学特性	181
三、尼龙的摩擦学特性	187
四、其他耐热高聚物的摩擦学特性	194
第二节 填充型润滑材料	201
一、PTFE 基填充型润滑材料	201
二、尼龙基填充型润滑材料	226
三、其他填充型润滑材料	234

四、其他共混型润滑材料	240
第三节 粘结型润滑材料	246
一、有机粘结固体润滑膜	247
二、无机粘结固体润滑膜	260
第四节 浸渍型润滑材料	266
一、浸渍金属的碳石墨材料	266
二、浸渍型碳轴承	269
第五节 背衬型润滑材料	270
一、背衬型润滑材料的结构特征	270
二、背衬型润滑材料的性能	272
三、PTFE 织物-树脂背衬材料	273
第四章 陶瓷润滑材料	276
第一节 陶瓷润滑材料的摩擦学特性	276
一、陶瓷材料的摩擦磨损行为及其机制	276
二、影响陶瓷材料摩擦学性能的因素	277
第二节 非金属陶瓷润滑材料	282
一、非金属陶瓷润滑材料	282
二、非金属陶瓷材料的摩擦学特性	286
第三节 金属陶瓷润滑材料	308
一、WC 金属陶瓷材料	309
二、TiC 金属陶瓷材料	318
附录	321
附录一 主要物理量及其单位	321
附录二 元素符号及其名称	322
附录三 部分物质及其简称	322
主要参考文献	324

第一章 概 论

固体润滑是用固体微粉、薄膜或复合材料代替润滑油脂，隔离相对运动的摩擦面以达到减摩和耐磨的目的。随着现代科学技术的进步，为解决高负荷、高真空、高低温、强辐射和强腐蚀等特殊工况下机械的润滑问题，固体润滑材料已从单一的微粉、粘结膜或单元的整体材料发展成为由多种成分组成的复合材料。其作用机理和使用方法的研究也得到了迅速的发展，并出现了许多制备和应用这些材料的新工艺新技术。

固体润滑现象是很复杂的，影响因素也很多。负荷、速度、温度、环境介质气氛、接触形式和运动形式等都与润滑效果直接有关。稍许改变其中的某一因素，就可能导致润滑效果的急剧改变。这就是说，固体润滑材料的润滑特性是工况条件与材料的机械、物理和化学性能综合反映的结果。因此，只有运用物理、化学、机械和材料科学等多学科的综合知识来探索研究，才能掌握其相应的规律。

第一节 固体润滑材料的组成

固体润滑材料应该具有：较小的摩擦系数和较好的耐磨性能；与负荷相适应的承载能力；高温下的抗氧化稳定性；相当高的导热性和最佳的热膨胀系数；在真空和各种特殊环境气氛中工作的适应能力，特别是抗咬合能力和抗疲劳破坏的能力等。

一、组成

固体润滑材料由基材组元、润滑组元以及起各种辅助作用的其他组元按照一定的组成原则和配比，经过相应的制备工艺而制成的。本书所指的固体润滑材料均为复合材料。一般来说，它们在力学、化学和摩擦学等方面具有较为理想的综合性能。

1. 基材组元

基材组元是固体润滑材料的基体材料。固体润滑材料的物理、机械和化学等性能主要由基材来体现。按照材料摩擦学性能的要求，基材主要起承受负荷的作用。同时，基材应当具有与润滑组元等的良好浸润性。

基材所反映的物理机械性能有密度、抗压强度、抗拉强度、抗弯强度和冲击韧性等。基材的化学性能主要指它对其他物质(包括其他组元及对偶材料等)的亲性和腐蚀性，以及它对环境介质的适应性(如抗氧化性和抗腐蚀性等)。从制备工艺来要求，基材应该具有可加工性、如可塑性、可焊性和可粘合性等。

根据固体润滑材料的分类，金属基润滑材料的基材通常是金属，非金属基润滑材料的基材通常是高分子聚合物，陶瓷润滑材料的基材通常是陶瓷或金属和陶瓷。而镀(涂)覆型润滑材料和粘结型润滑材料的基材可以是金属或非金属材料。背衬型润滑材料的基材一般是钢质或有机编织材料。

2. 润滑组元

充当润滑组元的通常都属于固体润滑剂。固体润滑剂的种类较多，润滑机理也较复杂。从大类上分，可以分为软金属类、金属化合物类、无机物类和有机物类等。

软金属类 许多软金属，如 Pb、Sn、In、Zn、Ba、Ag、Au 等，在压力加工、辐照、真空和高温等条件下，具有良好的润滑效果。

金属化合物类 可以作固体润滑剂的金属化合物较多，如金属的氧化物、卤化物、硒化物、硫化物、磷酸盐、硫酸盐和有机酸盐等。金属氧化物如 PbO 、 Pb_3O_4 、 Fe_3O_4 等，金属卤化物如 CaF_2 、 BaF_2 、 $CdCl_2$ 、 $CoCl_2$ 、 $CrCl_2$ 、 $NiCl_2$ 、 $CuBr_2$ 、 CaI_2 等，金属硒化物如 WSe_2 、 $MoSe_2$ 、 $NbSe_2$ 等，金属硫化物如 MoS_2 等，金属磷酸盐如 $Zn_3(PO_4)_2$ 等，金属硫酸盐如 Ag_2SO_4 、 Li_2SO_4 等，有机酸盐如各种金属的脂肪酸皂等。

无机物类 如石墨、氟化石墨、玻璃等。而像滑石和云母等虽然润滑性能差，但电绝缘性能好，在许多特殊工况条件下可作润滑剂使用。又如 BN 等也是性能优良的固体润滑剂。

有机物类 如蜡、固体脂肪酸和醇、联苯、颜料和涂料(如阴丹士林、酞青等)、塑料和树脂[如聚四氟乙烯(PTFE)、聚酰胺(尼龙)、聚酰亚胺、聚甲醛、超高分子量聚乙烯、聚苯、酚醛等]都可作固体润滑剂。

一些固体润滑剂在高温下具有良好的润滑性能。它们具有熔点和沸点高、抗氧化性能好、无吸湿性等特点,而且是具有明显的滑移面的晶体,因而在大气中能耐 650℃ 以上的高温并有良好的润滑效果。如 PbO 在比较宽的温度范围内具有良好的润滑性能。CaF₂ 在约 500℃ 时经历由脆性到塑性的转变,使其从 500~1000℃ 都能起固体润滑的作用。在从室温到 1000℃ 的温度范围内,稀土金属氟化物如 LaF₃、CeF₃、NdF₃(750℃)的摩擦系数都在 0.2~0.5 之间。

3. 其他组元

为了适应各种工况和环境气氛条件下的工作特性,固体润滑材料中还需添加其他组元,以弥补基材和润滑组元的不足。

例如,为了提高材料的强度、硬度和耐磨性,可以加入硬质相。只要控制硬质相的含量,就可以不影响材料的摩擦系数。几种硬质相涂层材料的物性数据见表 1-1。这些硬质相可以单颗粒微粉的形式加入,也可以在加入后与基体形成固熔体,或组成网状结构。同时,也可以纤维的形式加入。而纤维在材料中的组合方式和方向性对材料的机械性能和摩擦学特性都有较大的影响。

表 1-1 几种硬质涂层材料的物性数据

材 料	显微硬度/GPa	氧化温度/℃	材 料	显微硬度/GPa	氧化温度/℃
B ₄ C	42.0	1090	WC	20.5	540
TiC	32.0	540	Si ₃ N ₄	20.0	1400
SiC	29.0	1650	TiN	19.5	540
Cr ₃ C ₄	26.5	1370	Cr ₂ O ₃	18.0	

为了增强固体润滑薄膜与基材的结合强度,必需加入粘结剂。而复合镀层中的基架金属则起到粘结润滑组元的作用。

某些固体润滑材料要求制成含油材料,其中有孔隙度要求。这时需要根据不同的基材和不同的制备工艺加入不同的造孔剂。

为了增强某些润滑材料的塑性,降低其脆性,需要加入相应的增塑剂。

二、组成原则

为了使各个组元有机地组成完整的固体润滑材料，以满足设计所要求的各种性能，必须遵循以下组成原则。

1. 对偶匹配原则

各种材料与不同的对偶组成摩擦副时，其呈现的摩擦学特性和润滑效果是不同的。因此在选用固体润滑材料时应考虑对偶匹配原则。如果匹配不合理，摩擦系数会很大，耐磨性能会很差，并将发生粘着磨损，导致机构失效。

经验表明，塑性材料的粘着倾向比脆性材料的大，互溶性大的材料(相同的金属或晶格类型和电化学性能相近)所组成的摩擦副的粘着倾向比互溶性小的材料(异种金属或晶格类型和电化学性能不相同)所组成的摩擦副的大，单相金属的粘着倾向比多相金属的大，金属中单相固溶体的粘着倾向比化合物的大，由金属-金属组成的摩擦副的粘着倾向比由金属-非金属组成的摩擦副的大。

几种不同对偶材料组成摩擦副的摩擦系数见表 1-2。

表 1-2 常用材料的滑动摩擦系数

摩擦副材料	摩擦系数	摩擦副材料	摩擦系数
钢-钢	0.15	铸铁-铸铁	0.15
钢-铸铁	0.16~0.18	铸铁-青铜	0.15~0.21
钢-黄铜	0.19	黄铜-黄铜	0.17
钢-青铜	0.15~0.18	黄铜-钢	0.30
钢-铝	0.17	黄铜-T8 淬火钢	0.14
青铜-青铜	0.15~0.20	黄铜-T8 不淬火钢	0.19
青铜-黄铜	0.16	45 淬火钢-聚甲醛	0.46
青铜-钢	0.16	45 淬火钢-聚碳酸酯	0.30
铝-T8 钢	0.18	45 淬火钢-尼龙 9+3% MoS ₂ 填料	0.57
铝-黄铜	0.27	45 淬火钢-尼龙 9+30% 玻璃纤维	0.48
铝-青铜	0.22	45 淬火钢-尼龙 1010+30% 玻璃纤维	0.039
铝-钢	0.30	45 淬火钢-尼龙 1010+40% 玻璃纤维	0.07

注：环块试验机，负荷 98N，速度 7.8mm/min，无润滑。

几种粉治型自润滑材料与不同对偶材料组成的摩擦副的摩擦系数见表 1-3。该类自润滑材料在压制后经 600℃ 自由烧结而制成。对偶

材料分别为 LY12 铝和渗碳钢。

表 1-3 粉冶金自润滑材料的摩擦系数

自润滑材料配比/%(质量)	摩擦系数	
	LY12 铝	渗碳钢
Ag100	粘着	0.58~0.65
Ag:WSe ₂ = 90:10	0.12~0.15	0.25~0.37
Ag:WSe ₂ = 60:40	0.15~0.17	0.33~0.38
Ag:MoS ₂ = 90:10	0.10~0.13	0.17~0.23
Ag:MoS ₂ = 60:40	0.14~0.16	0.18~0.22
Cu 100	粘着	0.72~0.77
Cu:WSe ₂ = 90:10	0.12~0.15	0.14~0.31
Cu:WSe ₂ = 60:40	0.12~0.13	0.19~0.26
Cu:MoS ₂ = 90:10	0.11~0.14	0.19~0.21
Cu:MoS ₂ = 70:30	0.13~0.15	0.15~0.22
Cu:石墨 = 90:10	粘着	0.22~0.23
Cu:石墨 = 70:30	0.19~0.21	0.23~0.26

注：环块试验机，平板为试样材料。负荷 5N，速度 8mm/min，无润滑。

2. 镀（涂）层与基材匹配原则

在延展性较好的基材表面镀（涂）覆减摩耐磨镀（涂）层时，镀层与基材在弹性模量、热膨胀系数、化学和结构上的合理匹配，不仅能使镀层内和界面区的应力减小，而且还会使镀层与基材的结合强度增大，因而可以避免镀层从基材上脱落，并延长镀层的耐磨寿命。

当镀层-基材体系受到外力的作用时，两者弹性模量的差异将导致其界面应力的不连续。若镀层的弹性模量比基材的大，镀层内将会产生较大的应力，并且随着两者弹性模量差值的增大而增大。同时，其应力的值也随着外加负荷的增大而增大。例如，高速钢基材的弹性模量比 TiC 镀层的小，故在加载时会产生较大的应力，而 WC 基材的弹性模量比 TiC 镀层的大，因而加载时镀层中产生的应力就较小。但是，对于界面上主要受剪切力作用的场合，镀层与基材间弹性模量的匹配就不是关键的问题了。

镀层与基材间的热膨胀系数应匹配：镀层的热膨胀系数应稍大于基材，使得在温度升高时不造成太大的张应力。随着温度的变化，镀层中会产生热应力：若基材的热膨胀系数比镀层的大，张应力会随着温度的升高而增大；若基材的热膨胀系数比镀层的小，随着温度的升

高，则压应力会增大。如果镀覆过程得到的镀层呈无应力状态，那么这一镀覆温度就是合适的温度基准。

镀层与基材在结构和化学上的合理匹配，能得到较低的界面能和较高的结合强度。理论上分析，镀层与基材的结合强度是两者的内聚能与界面能之差。两者的内聚能愈大，结合强度也愈高。如果镀层与基材在结构上的一致性良好，化学亲和力大，表示两者在结构上相互匹配得当，则界面能低，结合强度高。例如，TiC 与 WC 可以生成无限互溶的固溶体，因而 TiC 镀层与 WC 基材间有很强的结合力。同时，TiC 与 Al_2O_3 的化学亲和性也很强，所以通常用 TiC 作为 Al_2O_3 镀层与 WC 基材的中间层。

利用上述原理便产生了多层镀层和复合镀层，从而改善了单镀层的硬度-韧性的矛盾以及镀层-基材间结合强度不高的缺陷。为了解决层与层之间的匹配问题，可以选用有互溶性的材料相组合，如 TiN 和 TiC 及 Al_2O_3 。也可选用具有结合界面而使层间得到足够强的键合的材料相组合，如 TiC 或 TiN 和 TiB_2 。在多层镀层中，最内层应与基材结合良好，中间层应具有合适的硬度和强度，最外层则起到减摩耐磨的作用。如镀在刀具上的 TiC-TiN 双层镀层的抗磨损性能比 TiC 镀层的好，Ti(C,N)-(Al-O-N) 双层镀层刀具的磨损量最小。在复合镀层中，存在着大量的低能界面，因而其结合强度、韧性和耐磨性均比单相镀层的好。如利用混合靶磁控溅射所得到的相互分散性很好的 TiC- TiB_2 镀层是综合性能较好的复合镀层。

3. 性能组合原则

固体润滑材料是由两个或两个以上的相通过人工混合而成的多相复合材料。它不是天然或合成的热力学平衡材料，而是非平衡状态的材料。这种复合材料具有优异的综合性能。例如，碳纤维与树脂通过复合，不仅可以获得比 Al 合金和普通钢高得多的比强度和比模量，而且保持了碳和树脂的耐腐蚀、减摩、耐磨和自润滑特性。按强化相存在的形态，可以把复合材料分为纤维复合材料、层叠复合材料、细粒复合材料和骨架状复合材料等。见图 1-1。按不同方向的性能差异程度可分为各向同性和各向异性复合材料。

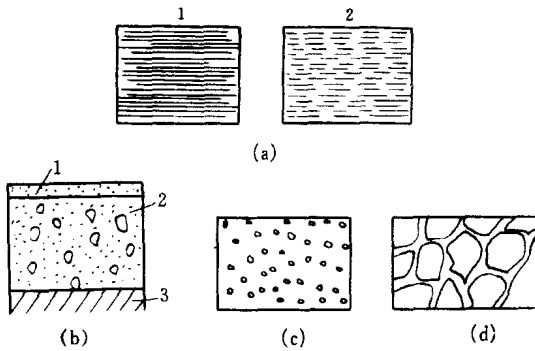


图 1-1 按强化相存在的形态分类的复合材料

(a) 纤维复合；1—长纤；2—短纤；

(b) 叠层复合；1—塑料；2—多孔青铜加塑料；3—钢背

(c) 细粒复合；(d) 骨架复合

通常认为，基材组元决定着固体润滑材料的机械物理性能，以及有关的化学或环境特性。作为传动件，它起着主要的承载作用。而润滑组元决定了材料的润滑特性，如可以减小摩擦和磨损。但是，各种材料的科学组合将同时影响着复合材料的磨损机理和耐磨性能。例如，由于复合材料是非平衡的多相组织，其摩擦磨损过程甚为复杂，有基体的摩擦磨损，强化相（如纤维）的摩擦磨损和强化相与基体交界面的摩擦磨损，且磨损机理各不相同。

高聚物复合材料通常是硬相分布于软塑料基体中，各组成相的性能及摩擦的工况条件对复合材料磨损机理起着决定性作用。当硬相对塑料基体的犁沟和切削作用不大时，复合材料的耐磨性与硬度符合混合规律。其体积磨损率(W)满足以下公式：

$$W = \frac{K\sigma}{H_{\alpha}f_{\alpha} + H_{\beta}f_{\beta}}$$

式中 σ 为正应力； H_{α} 、 H_{β} 分别为 α 、 β 相的硬度值； f_{α} 、 f_{β} 分别为 α 、 β 相占有的体积百分比； K 为磨损系数，通常包含由于塑性变形、犁沟和切削作用、微裂纹成核传播等因素引起的磨损机理。

当硬相为网状脆性组织时，硬相对基体起着支承作用，能阻止软

塑基体的变形和被犁沟与切削,可使复合材料的耐磨性能提高到接近于硬相的水平。当硬相为弥散粒子的情况下,正应力小于临界断裂应力,在犁沟宽度小于粒子尺寸时,也会有好的耐磨性能。

强化相中,纤维强化的耐磨性优于颗粒强化,长纤维强化的耐磨性优于短纤维(纤维纵向尺寸与横向尺寸之比大于 $20\sim 100$ 时为长纤维)。在这种情况下,复合材料的耐磨性与组织结构的各向异性有着密切关系。材料摩擦学特性的异向性,可用体积磨损张量的分量作全面的描述。作为用纤维增强的热塑性复合材料作滑动轴承或密封件的实例中,碳纤维增强优于玻纤增强;少量的纤维就能使复合材料的体积磨损减小,但纤维过多反而会使磨损增大。对耐磨性好的基体组元,强化相的作用不大,对易磨损的基体组元(如PTFE等),强化相可使磨损率大大降低。

金属基复合材料通常也是硬相分布于软基体中,但耐磨性却不一定符合混合规律。如青铜与 Cr_2O_3 硬颗粒的复合, NiCrBSi 基体与 WC 、 TiC 、 Al_2O_3 、 Cr_2O_3 硬颗粒等复合。不符合混合规律的原因有:内部存在残余应力;强化相与基体交界面上存在着相互作用;强化纤维表面在制造过程中的断裂和损伤;强化相尺寸、形貌等的不一致等。由于磨损机理主要是薄层的塑性变形和断裂,所以影响其耐磨性的主要因素不是材料的硬度(硬度过高,反而会降低材料的耐磨性),而是硬颗粒与基体界面的结合强度。

金属基复合材料的磨损和摩擦系数也有明显的方向性。纤维轴向与滑动方向一致时的摩擦系数最小,纤维与滑动表面垂直时最大,B纤维强化的Pb基复合材料的摩擦就是这样。复合材料的致密性对磨损也有影响。在研究 TiB_2 纤维强化的Fe基复合材料时发现,在磨料磨损条件下,含5%孔隙率的材料磨损为无孔隙的2.7倍。

金属基复合材料的摩擦学特性和物理、化学、机械性能受强化相与基体界面作用的影响十分明显。例如,化学沉积Ni-P合金的结构与P含量有关,低P的为晶态,高P的为微晶或非晶态。晶态低P合金层具有较高的耐磨性,而非晶态高P合金层的耐磨性差。这是因为非晶态结构原子间结合力较晶态原子间结合力小的缘故,在磨损

过程中原子极易发生转移，使磨损加剧。

如果将化学沉积 Ni-P 合金镀层在低于或/和高于 390℃ 的温度下加热处理到相同的硬度，发现低于 390℃ 处理后的磨损体积明显大于 390℃ 以上处理的磨损体积。低 P 的 Ni-P 镀层在加热时呈晶态固溶体，随着加热温度的增加，固溶体硬度增加，耐磨性也逐渐变好，至 390℃ 时耐磨性为最好。高 P 的 Ni-P 镀层在加热时除了有固溶体外，还有化合物 Ni_3P 析出，成为机械混合物组织，在 390℃ 以下加热处理时，随着热处理温度的增加，硬度随之增加，耐磨性也会提高。在 390℃ 以上加热后，硬度虽然降低，耐磨性却有所提高。这是由于随着加热温度的增加， Ni_3P 相的尺寸变大了。实践表明， Ni_3P 相尺寸较大的组织状态具有较好的耐磨性。在硬度相同时，两相机械混合物组织的耐磨性比单相固溶体的好。

4. 协同原则

在研究固体润滑体系的润滑性能和磨损寿命时发现，单质固体润滑剂中加入另一种(或几种)固体润滑剂，甚至加入非润滑剂物质后，能够明显地改善固体润滑剂的摩擦学特性，这种增强了的润滑效果称作协同效应。

例如，当石墨与 MoS_2 以质量比为 5:1 时，石墨/ MoS_2 体系的磨损率最低。如果再加入 ZnS 和 CaF_2 ，则磨损率更低。在 PTFE 中加入 30% 的极性石墨，可使其磨损率下降到纯 PTFE 的 $1/80 \sim 1/100$ ，但摩擦系数增大了。Pb-石墨体系受摩擦表面与氧气接触的情况所左右，当表面与氧接触机会较少时，摩擦系数增大，反之则小。如果在 Pb-石墨体系中加入少量的强氧化剂 KMnO_4 ，该体系便具有良好的润滑性能。在石墨中添加 BaSO_4 ，能改善其润滑性能。在 Pb-PTFE 体系中添加 PbO ，能改善其润滑性能。在石墨系润滑剂中加入 NaF ，能使其在高温下具有良好的耐磨性能。自消耗型抗氧化剂 Sb_2O_3 能防止 MoS_2 氧化，使其在高温下仍具有较好的润滑性能。将 CuCl 加入 MoS_2 中便能改善其承载能力。

将氟化石墨(CF_x)加到氮化硼(BN)中配合使用，可以改善 BN 的润滑性能。见表 1-4。