

复合材料的摩擦学特性及其发展动向

董元源

(甘肃省机械科学研究院)

【摘要】 本文概要介绍了复合材料的基本特点, 综述了高聚物复合材料和金属基复合材料的摩擦学特性与组织之间的关系, 介绍了这两类复合材料的目前发展动向。

Tribological Properties of Composites and Developing Tendency

Dong Yuanyuan

(Gansu Mechanical Engineering Academy)

【Abstract】 This Paper summarily describes the principal character of composites, reviews the relation between the tribological properties and structure of two types of composite. Developing tendency of composites has been discussed, too.

一、引言

研究材料的摩擦磨损及润滑特性, 对节约能耗、延长机械使用寿命及提高工作可靠性方面都有重要意义。虽然人们对金属及合金、聚合物、陶瓷、石墨及碳纤维等进行了许多有价值的研究, 但还没有符合理想要求的减摩或摩阻材料。人工的非平衡复合材料的问世有可能在提供理想的摩擦学特性的结构材料方面取得较大的进展。

作为运动部件的材料, 不仅要满足力学性能方面的要求, 如有足够的静载强度、动

载强度、延性、断裂韧度、弹性模量及刚度等, 还应满足环境和制造工艺方面的要求, 如抗腐蚀、耐温性、可塑性、可焊性和粘合性等, 同时还须具备优良的摩擦学特性, 如低而稳定的摩擦系数(摩阻材料要求相反)、低的磨损率或自润滑特性等。单相结构材料(金属、高聚物、石墨、碳纤维等)或多相结构平衡合金, 在满足综合要求方面均有一定的局限性。

很多金属虽有较高的强度, 但摩擦学性能较差。通过合金化使硬组分分布在强韧基体中而改善合金的摩擦学特性, 成为现代

抗磨合金的发展方向。但在摩擦与润滑性能上仍不能与氟塑料、石墨、二硫化钼相比,在耐高温性能方面也不能与陶瓷相比。但石墨、高聚物及陶瓷等材料的性能也有各自的缺点,如陶瓷的脆性及难加工性,石墨的强度低和明显的各向异性,以及高聚物的强度和摩擦学性能随温度升高而易变化等〔1~3〕。

因此,人们设想把几种各具不同优点的材料进行人工复合,构成复合材料,使各组分之间能相互取长补短,从而得到力学、化学和摩擦学特性方面好的综合性能。

二、复合材料的摩擦学特性及其分类

复合材料是一种由两种或两种以上的相通过人工混合而成的多相材料。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〔4~5〕。这种材料具有优异的综合性能。

例如,碳纤维与树脂通过复合,不仅可以获得比铝合金和普通钢高得多的比强度($0.93 \times 10^9 \text{ Pa}$)和比模量($1.2 \times 10^{11} \text{ Pa}$),而且保持了碳和树脂的耐腐蚀、减摩、耐磨及自润滑特性(见表1)。不少复合材料还有特殊的电、光、热、磁性和烧蚀性。

聚四氟乙烯(PTFE)对钢的体积磨损率为 $8 \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{N} \cdot \text{m}$;加入25~30%的碳纤维,可降为 $9 \times 10^{-16} \text{ m}^3/\text{N} \cdot \text{m}$,而摩

擦系数保持不变。

聚脂对钢的体积磨损率为 $3 \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{N} \cdot \text{m}$;加入20~30%的碳纤维,可降为 $1.5 \times 10^{-16} \text{ m}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ 。

钢背加多孔性青铜浸渍氟塑料的三层复合材料,其摩擦性能相当于氟塑料,机械性能相当于钢,耐磨性比含石墨的铅青铜、含 MoS_2 的酚醛塑料、减摩石墨和尼龙都好。这种复合材料在PV值为 $5.7 \times 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{m/s}$ 的条件下经1000小时才磨损0.025mm,而含石墨的铅青铜在同样条件下经158小时已磨损0.25mm;含油多孔青铜经105小时磨损0.25mm,含 MoS_2 的酚醛塑料经72小时磨损0.125mm,减摩石墨经24小时磨损0.125mm。

日本采用银(35.3%)、钴(11.76%)和 WS_2 (52.9%)复合材料作滚动轴承保持架,用于空气和高真空中,在1790r/min的转速下,运行寿命高达6万小时,而一般的银轴承保持架在真空中运行寿命才1000小时〔6〕。兰州化物所1975年以来对银基和镍合金基加 MoS_2 的复合材料作了不少研究,证明这些复合材料都具有优异的摩擦学特性〔7~9〕。

新发展的碳-碳复合材料有极好的高温力学性能和摩擦学特性〔10〕。在2485℃高温下的抗拉强度为68.9MPa,延伸率为2.7%;常温断裂韧性高达223~239MJ/m²。作为高性能战斗机刹车片,其寿命超过3000次,

表1 碳纤维—树脂复合材料的综合性能

材 料	比 重	抗拉强度 σ_b ($\text{Pa} \times 10^5$)	弹性模量E ($\text{Pa} \times 10^7$)	比强度 ($\text{Pa} \times 10^5$)	比模量 ($\text{Pa} \times 10^7$)	自配摩擦 系数 μ
钢	7.8	0.5~1.0	2.14	0.13	0.27	0.5
铝	2.6	0.4	0.7	0.15	0.27	0.7
60%玻纤增强塑料(单向)	2.0	1.1	0.4	0.55	0.2	0.3
60%碳纤增强环氧树脂复合材料(单向)	1.5*	1.4	1.3	0.93	0.87	0.25
	1.6**	1.0	1.9	0.62	1.2	0.25

* 高强度型; ** 高模数型。

是目前最好的高温摩阻材料。

复合材料按基体类型可分高聚物复合材料和金属基复合材料。按强化相存在的形态可以分为纤维复合材料、层叠复合材料、细粒复合材料和骨架状复合材料(如图1所示)。常用的分散相或强化相有:石墨、金

属粉、 SiO_2 、玻璃纤维、碳纤维、硼纤维、陶瓷纤维(如 SiC 、 Si_3N_4 、 Al_2O_3 、BN等)、各种晶须纤维及金属丝(如不锈钢丝、钼丝、钨丝)等。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^[11],其示意图见图2和图3。

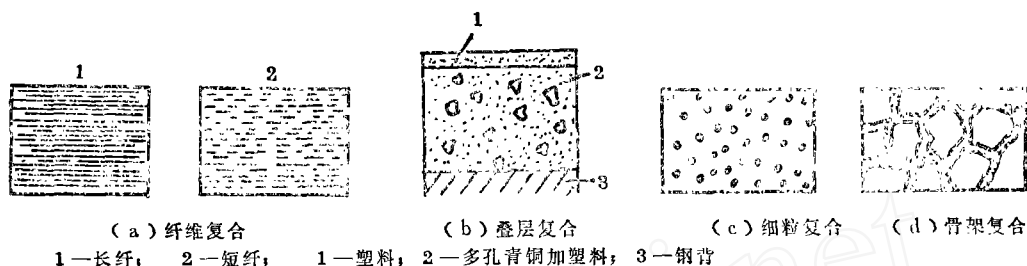


图1 按强化相存在的形态分类的复合材料

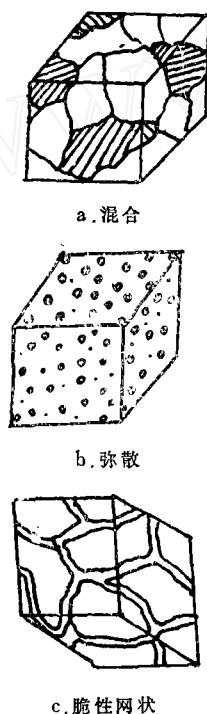


图2 各向同性复合材料组织示意图

有关复合材料的制造工艺请参阅有关文献,在这里不再叙述。

三、复合材料的摩擦学特性与组织之间的关系

1. 高聚物复合材料

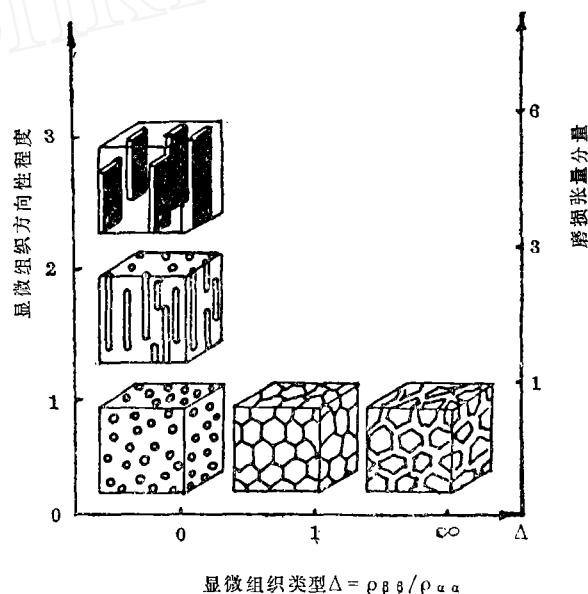


图3 各向异性复合材料组织示意图

$\rho_{\beta\beta}$ 为 β 相的相界密度,
 $\rho_{\alpha\alpha}$ 为 α 相的相界密度

高聚物复合材料早已作为抗摩、耐磨、自润滑材料进行过研究,并已用作轴承、齿轮及密封件等。高聚物摩阻材料也有较深入的研究^[12]。

高聚物复合材料的组织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的

作用。高聚物复合材料的磨损系数 k 通常包含 k_d （反映由于塑性变形、犁耕作用和切削机理引起的磨损率）和 k_f （反映由于塑性变形、微裂纹成核传播的剥层机理引起的磨损率），即：

$$k = k_d + k_f$$

当 k_f 占30%以上时，微裂纹剥层机理占主导地位，材料的体积磨损将急剧升高^[11]。

高聚物复合材料对金属滑动的主要磨损机理是：亚表面变形，基体与硬相之间或基体与加强纤维之间界面形成裂纹；平行于表面的裂纹传播；裂纹使表面剪脱而形成薄片状磨粒。这与金属剥层磨损机理是一致的。当然在硬相磨料作用下也会有犁耕、切削机理引起的磨损。

高聚物在摩擦过程中常形成自润滑转移膜，这对复合材料的摩擦磨损将产生很有裨益的作用^[13]。

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、加强纤维的摩擦磨损和纤维与基体界面的摩擦磨损，且磨损机理各不相同。如尼龙66常出现表面薄层剥层磨损，而聚芳砜醚（PES）则常出现犁耕式深度磨损^[14]。

对硬相分布于塑性基体中的复合材料，当硬相对塑性基体的犁耕、切削作用不大时，复合材料的耐磨性与硬度才符合混合规律，如图4所示意的组织状态，其体积磨损率满足以下公式：

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

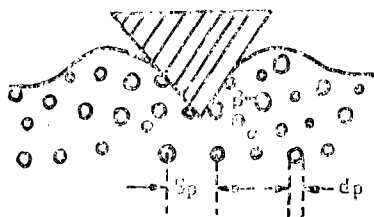


图4 颗粒硬相分布于塑性基体组织的摩擦过程示意图

式中， W_α 、 W_β 分别为 α 、 β 相的体积磨损率； f_α 、 f_β 分别为 α 、 β 相占有的体积百分比； σ 是正应力； k 是磨损系数； H_α 、 H_β 分别为 α 、 β 相的硬度值。

当硬相为网状脆性组织时（图5），硬相对基体起着支承作用，能阻止软塑基体的变形和被犁耕与切削，可使复合材料的耐磨性提高到接近于硬相的水平。

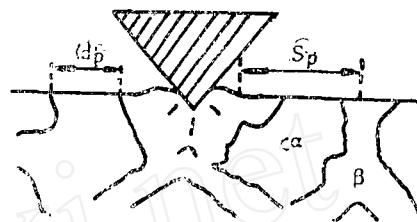


图5 网状脆性硬相组织的摩擦过程示意图

当硬相为弥散粒子的情况下，正应力小于临界断裂应力 σ_c ，在犁沟宽度小于粒子尺寸 d_p 时，也会有好的耐磨性。

复合材料的耐磨性与其组织、硬相占有百分比及其它性能的关系如图6所示。

强化相中纤维强化的耐磨性优于颗粒强化，长纤维强化优于短纤维^[15]（纤维纵向尺寸与横向尺寸比大于20~100时为长纤维）。

复合材料的耐磨性与组织结构的各向异性有着密切关系，因此研究第二相及第二相所占百分比、各向异性程度、相间界面上的物理、化学、力学性能和缺陷是十分重要的^[16、17]。

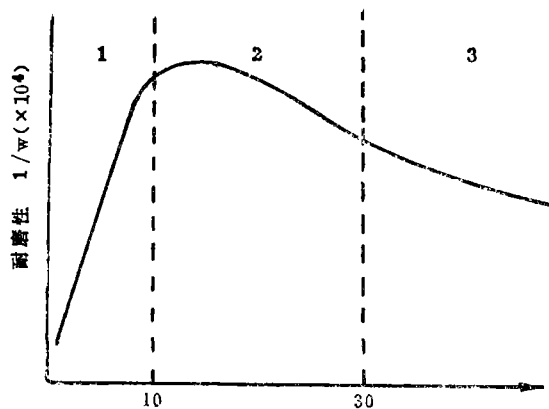
材料的摩擦学特性的各向异性，可用体积磨损张量的分量作全面描述^[11]：

$$W_{ij} = \frac{da_i}{dx_j}$$

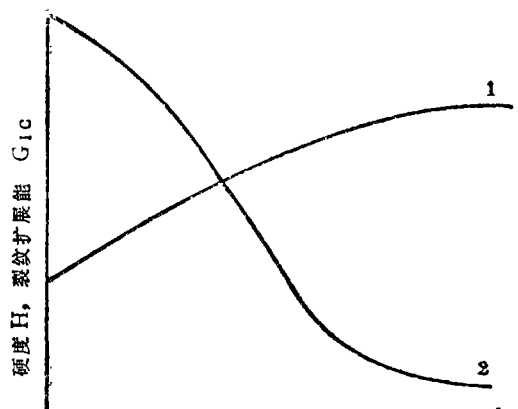
其中 a_i 为磨损分量， x_j 为载荷的特定方向；

$$W_{ij} = \begin{pmatrix} W_{11} & \dots & W_{1n} \\ W_{21} & \dots & W_{2n} \\ W_{31} & \dots & W_{3n} \end{pmatrix}$$

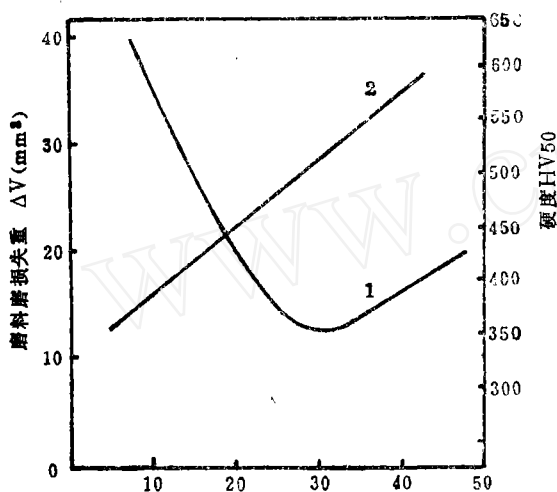
因各向异性程度不同，张量分量可以有1、3、6、9、18个等不同。



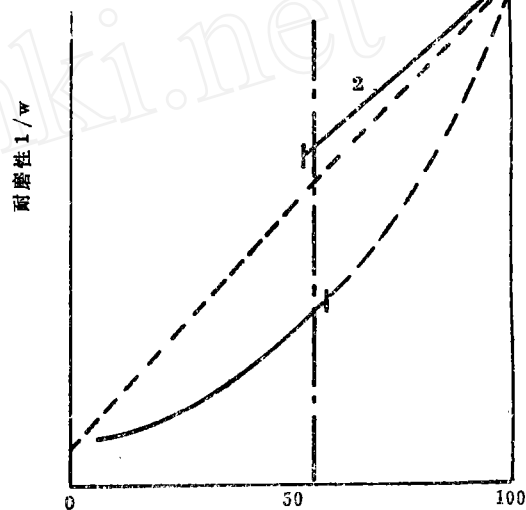
(1) 断裂韧性 K_{1c} (MJ/m^2)
1—断裂; 2—过渡; 3—犁耕变形



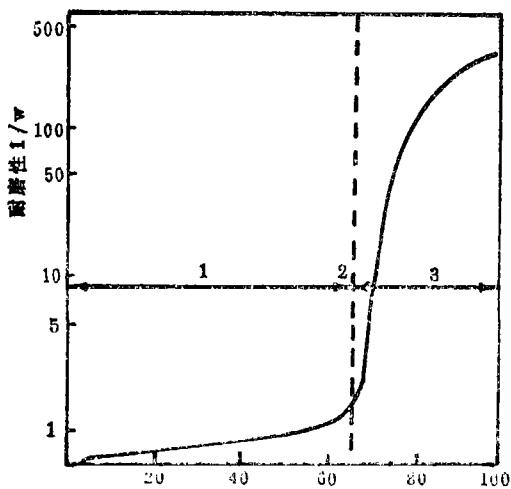
(2) 硬相% (Vol) f_p
 $\left| \frac{dG_{1c}}{df_p} \Delta f_p \right| > \left| \frac{dH}{df_p} \Delta f_p \right|$ 1—H, 2— G_{1c}



(3) 碳化物% (Vol)
铸态奥氏体白口铁 1— ΔV , 2—HV50



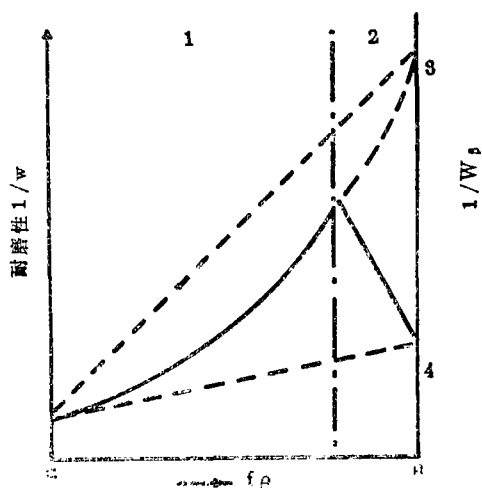
(4) 硬相% (Vol) f_p
1—弥散分布, 2—网状分布



(5) 碳化物% (Vol)

$W_c - C_0$ 对 Al_2O_3 砂纸

1—弥散; 2—过渡; 3—网状



(6) 碳化物% (Vol)
1— $K_f = 0$; 2— $K_f > 0$; 3—延性; 4—脆性

如碳纤维强化的树脂复合材料的摩擦磨损特性随滑动方向而异(见表2)。

表2 碳纤维—环氧树脂摩擦特性的有向性

纤维方向	法向	垂直于运动方向	平行于滑动方向
摩擦系数 μ	0.69	0.64	0.58
磨损 w 应力 σ (10^4MPa^{-1})	3.2	6.1	4.5

在粒度为70 μm 的 Al_2O_3 砂纸上的磨损结果

作为滑动轴承和密封件的纤维增强的热塑性塑料,如尼龙66或PES,一般规律是碳纤维增强优于玻璃纤维增强;少量硬相就能使复合材料的体积磨损减少,但纤维过多反而会磨损增大;对耐磨性好的基体,强化相的作用不大,对易磨损的基体,如PTFE和聚缩醛(PEA),强化相可使磨损率大大降低。

2. 金属基复合材料

金属基复合材料由于工艺复杂和价格昂贵,在研究和应用上远不如高聚物复合材料那样深入和广泛,目前仍处于发展前期。金属基复合材料的主要优点是:抗张强度和剪切模量高(接近加强纤维),熔点高,尺寸稳定,耐潮湿,焊接性能好,组织致密,有高的延性和韧性,是很有发展潜力的理想结构材料之一。

金属材料的磨损机理已有详细的研究。粘着磨损机理主要是薄层的塑性变形和断裂形成磨削的过程;磨料磨损机理主要是大体积塑性变形、犁耕和切削作用,也有局部塑性变形、裂纹形成和破碎成磨粒的过程。此外还有环境和温度造成的腐蚀磨损、应力腐蚀磨损、氧化微动磨损等机理。这些机理也是金属基复合材料的基本磨损机理。

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律。如青铜加三氧化二铬硬粒的复合材料,镍铬硼

硅基体加WC、TiC、 Al_2O_3 、 Cr_2O_3 硬粒等复合材料。不符合混合律的原因有:①内部存在残余应力;②强化相与基体交界面上存在着相互作用;③强化纤维表面在制造过程中的断裂和损伤;④强化相尺寸、形貌不一[5]。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),而是硬粒与基体界面的结合强度[4]。

Saka研究了Cu- Al_2O_3 的金属基复合材料,得到下述摩擦学特性与组织的关系[18]:

(1) 复合材料的硬度随 Al_2O_3 的增加而增加,但不呈线性关系;

(2) 摩擦系数 μ 符合混合律,在滑动过程中,当Cu出现在 Al_2O_3 的表面上时,会使 μ 略有增加;

(3) 体积磨损率不符合混合律;

(4) Al_2O_3 增多,复合材料的延性下降,加上Cu与 Al_2O_3 界面结合强度很差,耐磨性明显降低。

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磨损最小,纤维与滑动表面垂直时最大,碳纤维强化的铅基复合材料的磨损就是这样[19]。复合材料的致密度对磨损也有影响[20]。在研究 TiB_2 纤维强化的铁基复合材料时发现,在磨料磨损的条件下,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、力学性能受强化相与基体界面作用的影响十分明显[5、26]。

(1) 复合材料中基体与强化相的界面
复合材料是非平衡系统,所以在纤维与基体界面上存在着化学势梯度,它是反应的动力。 10^{-1}nm 厚的反应层常常使材料的力学性能变坏。界面反应区包括新相长大区、杂质吸附区和偏析区。反应产物通常是金属

互化物。如硼纤维浸渍铝的反应产物为 AlB_2 ；硼在铝中扩散可以反应生成 $2Al_2O_3 \cdot B_2O_3$ ；三氧化铝须晶纤维与镍基体反应得到尖晶石 $NiAl_2O_3$ ；硼与钛界面的反应产物为 TiB 或 $Ti(B, C)$ ；碳化硅与钛界面的反应产物为 Ti_3Si_3 、 Ti_3Si 等； Al_2O_3 与 Ti 界面的反应层分三区： TiO 、 Ti_3Al 和 Al_2O_3 在钛中的固溶体； B 与 $Al-Ti$ 界面的反应产物为 $(TiAl)B_2$ 、 TiB_2 和 Al 在 Ti 中的固溶体。

(2) 界面的应力场

采用三层圆筒的简化模型来描述界面应力场：

$$\text{径向应力 } \bar{\sigma}_r = \frac{\sigma_{r1}}{\sigma_0} = \frac{E_1}{E_0} \left[\bar{C}_{11} - (1-2\nu)\bar{C}_{21}/r^2 - (1+\nu)\alpha_i/\alpha_0 \right]$$

$$\text{面内应力 } \bar{\sigma}_{\theta 1} = \frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_0} = \frac{E_1}{E_0} \left[\bar{C}_{11} + (1-2\nu)\frac{\bar{C}_{21}}{r^2} - (1+\nu)\frac{\alpha_i}{\alpha_0} \right]$$

$$\text{轴向应力 } \bar{\sigma}_{z1} = \frac{\sigma_{z1}}{\alpha_0}$$

$$= \frac{2\nu E_1}{E_0} \left[\bar{C}_{11} - (1+\nu)\frac{E_i \alpha_i}{E_0 \alpha_0} \right]$$

$$\text{其中, } \sigma_0 = \frac{E_0 \alpha_0 |\Delta T|}{(1+\nu)(1-2\nu)},$$

$\bar{C}_{11}$ 和 $\bar{C}_{21}$ 是与几何形状、热弹性参量有关的系数， $i=1, 2, 3$ 为三个区； E 、 ν 和 α 分别为弹性模量、泊松比和热膨胀系数； ΔT 是温差； r 为半径自变量。面内应力 σ_{θ} 最大值处可以引起纤维与基体界面的断裂。

(3) 界面层在应力作用下的变形

由于反应层主要是脆性的金属互化物，断裂抗力很低，故 $B-Ti$ 复合材料会因 TiB_2

层随退火时间的增加而变厚，从而使强度恶化，磨损加剧。

由于加强纤维与金属基底之间的活性，引起了界面层复杂的物理化学现象，因此将影响金属基复合材料的摩擦学特性；而复合材料的硬度对摩擦学特性的作用则相对减弱，甚至影响不大。

四、发展动向

除了在改进制造工艺、降低成本方面要做大量工作外，在改进性能方面有如下动向：

1. 高聚物复合材料

近年来，除了采用加强纤维的合理配比、改变硬相形貌来改善基体断裂韧性之外，已出现了采用多元基体和多元固体润滑剂复合的趋向。

(1) 多元基体复合的趋向。如用 PTFE 和聚醚醚酮 (PEEK) 复合基体可以改善复合材料在无润滑下的摩擦学特性^[21]。把 PTFE 加入 PEEK 可使摩擦系数下降，承载能力增加；而以 PEEK 加入 PTFE 则会形成转移膜，降低磨损率，并保持极低的摩擦系数。

(2) 多元固体润滑剂复合趋向。如利用硅氯烷、石墨和二硫化钼固体润滑剂复合，材料具有低的摩擦系数和高的耐磨性。二硫化钼、石墨与氮化硼复合的 Mc 尼龙作为轴承的寿命比青铜的高 6 倍，可用于蜗轮减速器。

(3) 多元基体和多元固体润滑剂复合。如超高分子量聚乙烯与尼龙 610、聚双马来酰亚胺与 PTFE 等复合；填充多组元加强纤维和润滑剂，如短碳纤维、玻璃纤维、二硫化钼、硅油和石蜡油等，材料的耐磨性好，可用作织布机零件和氮膨胀机活塞环。

Lancaster^[23] 全面分析了高聚物复合材料的特性，提出了改善耐磨性的十大要

点:

①基体要有高的粘弹性和抗塑性变形能力, 即有高的屈服强度 σ_s 和硬度H;

②基体要有高的抗张强度 σ_b 和断裂应变 ε_t ;

③基体要有低的摩擦系数;

④基体要有良好的热稳定性;

⑤加入长、短加强纤维, 满足稳态磨损条件;

⑥纤维的分布要使摩擦表面光滑;

⑦采用低摩擦系数的加强纤维, 减少对钢(作为摩擦副)的磨料作用;

⑧在加强纤维外表面形成第三体膜;

⑨在一定的纤维含量百分比下, 使 $H^{1/2}/G_{IC}$ 最小(G_{IC} 为裂纹扩展力);

⑩使具有韧性的纤维垂直于滑动表面。为此他建议研制一种高承载能力(即高的PV值)、高耐磨的复合材料。它采用PEEK基体, 加入三种不同编织和布置的加强纤维。三种纤维和基体的作用为:

①高强度碳纤维对表面粗糙度不敏感, 有高的承载能力和耐磨性;

②Aramid纤维垂直于摩擦表面而布置, 起止裂作用;

③浸渍PTFE形成固体润滑转移膜, 减小摩擦;

④PEEK基体具有高强度、高韧性和热稳定性;

⑤加入 $(CF_x)_n$ 和硅润滑剂, 进一步减少磨损^[24]。Lancaster设计的理想的多种高聚物、编织加强纤维和固体润滑剂的复合材料示意于图7, 近年来已对这种设想的简单结构进行了探索^[25~30]。

2. 金属基复合材料

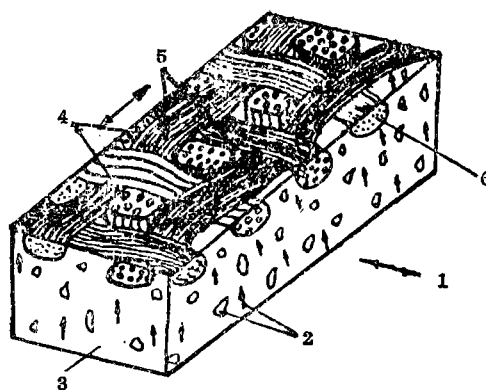


图7 理想的高聚物复合材料

1—最佳滑动方向, 2—氟化石墨和硅润滑剂,
3—PEEK基体, 4—Aramid纤维,
5—高强度碳纤维, 6—PTFE纤维

主要努力方向是: 改善加强纤维与基体的润滑性, 增强它与基体的粘结力, 阻止不良的界面反应。主要措施是对加强纤维进行涂层处理和金属基体中加润湿剂。如SiC纤维或须晶镀铝的铝合金复合材料; 碳纤维镀铜的铝基复合材料; α -三氧化铝纤维浸渍Al+3%Li的复合材料等, 都取得了良好的效果。镍包石墨和铜包石墨的铝基复合材料用作轴承, 其性能优于锡青铜和巴氏合金, 摩擦系数也较低^[5]。

有一种新的趋向是采用塑性和韧性较好的纤维分布于超合金(耐热合金)基体中的复合材料。如用W、Ta、Mo、Nb丝强化的超合金基体复合材料, 广泛用作耐热结构材料, 有较高的耐热强度、耐热震能力和优良的高温摩擦学特性。具体例子是W-Hf-碳纤维强化的镍基超合金, 是目前为止所有结构材料中耐热强度和耐磨性最高的材料。

参 考 文 献

- [1] 机械工程手册, 第三卷, 第16篇, 机械工业出版社, 1982。
- [2] Ludema, K.C., 在兰州讲学稿, 1982。
- [3] Bayer, R.G., Wear of Mater., 2(1985), 447。
- [4] 罗尔斯, K.M., 材料科学及材料工程导论, 科学出版社, 1982, 366。
- [5] Chou, T.W., Composite, 16(1985), 3: 187。
- [6] 刘承烈, 摩擦磨损, (1980) 4: 50。
- [7] 朱家佩等, 固体润滑, 3(1983), 1: 6。
- [8] 黄学俭, 固体润滑, 3(1983), 1: 85。
- [9] 朱家佩, 固体润滑, 1(1981), 2: 123。
- [10] 陈志军, 机械工程材料, 10(1986), 2: 37。
- [11] Hombagen, E., Wear of Mater. 29(1985), 477。
- [12] Rhee, S.K., 在广州讲学稿, 1982。
- [13] Clerico, M., Fundamentals of Tribology, edited by Suh, N.P., 1978, 769。
- [14] Eiss, N.S., Wear of Mater., 2(1985), 717。
- [15] L-Heinz, K. Zum Gahr. Metal. Prog., 116(1979), 4: 46。
- [16] 吴云书等, 现代工程合金, 第七章, 国防工业出版社, 1983。
- [17] Sendt, A., Wear of Mater., 2(1985), 777。
- [18] Saka, N., Wear of Mater., 2(1985), 784。
- [19] Saka, N., Fundamentals of Tribology, edited by Suh, N.P., 1978, 135。
- [20] Champagne, B., Wear of Mater., 2(1985), 33。
- [21] Гукасян, Л.Е., Митом, (1934), 8: 15。
- [22] Briscoe, B.J., Wear of Mater., 2(1985), 725。
- [23] Lancaster, J.K., Proc.Int.Conf NASA Conf. Publi. 2300 Vol I session 1—4 Cleveland, Ohio April(1983), 333。
- [24] Friedrich, K., Wear of Mater., 2(1985), 751。
- [25] Gardos, M.N., ASLE 81—3A—3—16, (1981)。
- [26] Lancaster, J.K., ASTM—STP, 768(1982), 92。
- [27] Bantista, T.O., Proc.35th Annual Techn Conf. Session 5(1980), 1。
- [28] Jackson, K.E., NASA Techn. Paper 2262, Techn. Report, 83—B—7, (1984)。
- [29] Mallinson, J.A., Chem. Engr., 5(1982), 143。
- [30] Gardos, M.N., Tribology, 10(1982), 273。

(上接第176页)

性,不但会丧失其润滑功能,而且对金属有锈蚀作用,因此应避免用于湿度较大的场合。在高速重载的场合使用效果最佳,因摩擦热可干燥润滑表面,提高其润滑性能。添加在油脂内比例要适当,过量会降低油脂的抗氧化能力或堵塞油眼,造成润滑不良。在使用 MoS_2 干膜润滑时,要求金属表面洁

净, MoS_2 颗粒的选择也要适当,涂层厚度必须均匀,否则将可导致粘结不牢,影响润滑效果。

虽然 MoS_2 与石油系列润滑剂相比价格较高,但只要注意在应用中扬长避短,正确、合理地使用就一定能获得明显的经济效益。