

聚四氟乙烯及其复合材料的转移与磨损

宫德利 薛群基

(中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑开放研究实验室, 兰州)

摘要: 本文对聚四氟乙烯 (PTFE) 的分子特征与结构特性、PTFE的转移行为及对其磨损的影响、影响转移膜生成的因素、PTFE转移膜与底材相互作用的本质、转移膜剥落形成磨屑的考察、PTFE结晶度对粘着磨损及摩擦的影响和PTFE基复合材料的特性及其摩擦学性能等进行了综述介绍。

关键词: 聚四氟乙烯, 聚四氟乙烯基复合材料, 分子特征, 转移膜, 结晶度, 磨损。

Transfer and Adhesive Wear of Polytetrafluoroethylene and Its Composite Materials

Gong Deli Xue Qunji

(Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou)

Abstract: A review with 134 references on the molecular and structural characteristics of PTFE, transfer behavior and its effect on tribological performance of PTFE and composites. Based on literature survey, influencing factors about formation of the transferred film of PTFE, fundamental of interaction between the transferred film and substrates, observation of detaching the transferred film from substrate, forming debris and the effect of crystallinity on wear and friction of PTFE are discussed in detail. Tribological performance of PTFE-based composites filled by inorganic and metallic powders, various fibres and organic materials are also reviewed.

Key words: polytetrafluoroethylene, PTFE-based composites, molecular characteristics, transferred film, crystallinity, wear

1989-07-20收到初稿, 1989-10-06收到修改稿。

PTFE的润滑性能优良,并且具有耐高温和出色的化学稳定性等优点,因而是各种场合下广泛应用的一种主要的固体润滑剂。但是,PTFE的机械强度较差,以及在负载或高速滑动下过大的粘弹性变形和较高的磨损率,这就使其不得不以复合材料的形式使用。因此,许多学者对PTFE及其复合材料的转移与磨损进行了大量的研究。

1. PTFE的分子特征与结构特性

PTFE分子中含有13或15个 $-\text{CF}_2-$ 基化学重复单元,没有分枝,整体内不形成交链,故其分子轮廓光滑。这种光滑的分子轮廓使它既具有低摩擦的特性,又能够在滑动过程中转移到对偶面上形成薄的转移膜^[1]。模压成型中所用PTFE的分子量一般在 $10^6 \sim 10^7$ 数量级范围内。PTFE的单晶系由层厚为20~50nm的六方层状结构组成,其分子是与层面垂直而存在于层内^[2]。

PTFE的熔点为327℃,即使温度超过了熔点,它的流动性也非常小,但磨损率却突然增大。PTFE的长时间使用温度是-260~+260℃,其玻璃态转变温度为-120℃。PTFE处于玻璃态时的转移远比橡胶态时的低。

图1所示为PTFE的带状结晶结构模型^[3~5],表明它是由不规则区(或非结晶区)和20nm厚、0.3μm宽的结晶薄层区所组成。

2. PTFE的转移行为及其磨损的影响

PTFE很容易在与之对磨的玻璃或金属表面形成转移膜,然而它在对偶面上较差的附着性却又是导致其严重磨损的主要原因^[6,7]。

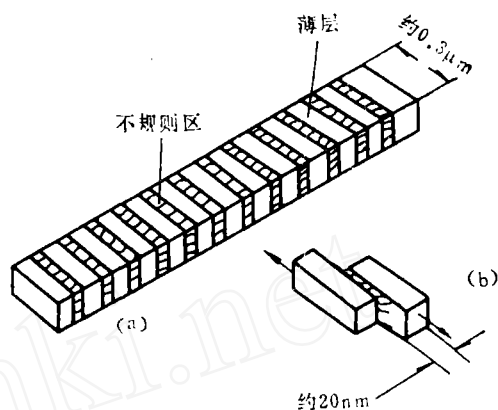


图1 PTFE的带状结晶结构模型

许多学者通过不同的手段观察了PTFE的转移行为,并且与其它聚合物的进行了比较^[8~18]。他们认为,弹性聚合物在其软化点以下的温度范围内和脆性聚合物处于玻璃态时,一般都不发生转移磨损。在低速、中等负荷和较光滑对偶面的条件下,PTFE可以发生分子链主轴沿滑动方向高度取向的厚度为10~50nm的薄层转移。若这层转移膜在对偶面上的附着性不好,则在第二次滑动时就有可能被聚合物滑块的前缘刮掉,然后再转移、再刮掉,如此反复下去,于是形成了较高的磨损率。相反,若转移膜是牢固地附着在对偶面上,则摩擦剪切就发生在聚合物与转移膜之间,因而磨损率很低。图2是聚合物滑动磨损变化的示意图^[19]。图中a区为初始磨损阶段,由于表面污染膜具有一定的润滑性而使摩擦力很小,并且局部地在对偶面上形成了转移膜,所以磨损率较低;b区是在对偶面上形成了均匀完整的转移膜后的磨损阶段,虽然摩擦力很大,但磨损率却非常之低(实线),在其后期由于界面温度上升而使转移膜破坏,因而出现了磨损率由低到高的转变过程;c区没有稳定的转移膜,这是熔化的聚合物被挤出接触区所造成的严重磨损(约为b区的2000倍)阶段。b区的虚线表示一次滑动产生的磨损率,它比重复滑动磨损的高 $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^6$ 倍。

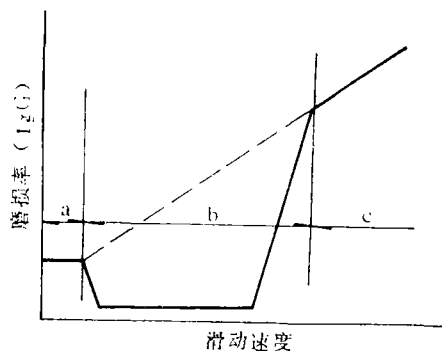


图2 聚合物滑动磨损变化示意图

为了实现对聚合物转移过程的原位观察,有人曾经用透明玻璃作为对偶,结合光学显微镜考察了PTFE等摩擦转移的动态过程^[20~22]。结果表明,PTFE的转移与其光滑的分子轮廓有关。Tanaka在实验中还观察到了PTFE转移膜长大、破碎和脱落的过程。他还通过光学和电子显微镜对转移膜的观察,提出了PTFE的转移可以利用晶带结构来解释,并且认为填料之所以能够降低PTFE的磨损,是由于填料限制了PTFE带状结晶结构的破坏,从而使其转移减少的缘故^[22]。

一般认为,聚合物与金属对磨时只是前者向后者表面转移。然而Bely等^[23]利用图3所示的滚带摩擦装置却得到了与此不同的

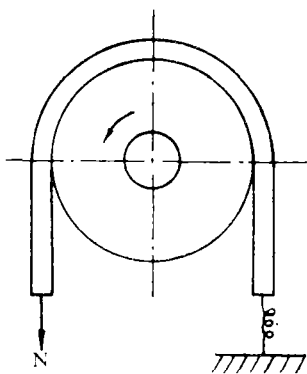


图3 滚带摩擦装置示意图

结论。他们将PTFE等聚合物做成带子与铜滚子对磨,发现在PTFE带子表面上有转移的纯铜颗粒,在其它聚合物带子表面上出现了铜的氧化物;当把PTFE做成滚子与铜带子对磨时,又发现PTFE滚子的磨损严重,并且在铜带表面上形成了一层很薄的PTFE转移膜。

Briscoe^[24]认为,聚合物是一层一层地向对偶面转移的,转移层的平衡厚度及其最内层在对偶面上的附着性是影响磨损的两个重要因素。较厚的转移层容易引起比较严重的磨损。Pogosian^[25]根据取决于摩擦时间的温度沿聚合物样品高度分布的微分方程导出了柱(聚合物)-盘(金属)接触形式的转移膜厚度 h 和最大转移膜厚度 $h_{\max}$,两者的计算式分别为:

$$h = \frac{r}{R} \sqrt{\frac{at}{\pi}} - \frac{r\lambda Aa(\theta_t - \theta_0)}{2R(1-\alpha)fINu}$$

$$h_{\max} = \frac{2W_{12}(1+\beta f^2)E}{\gamma^2 \sigma \tau^2}$$

式中, r 和 R 分别为样品(柱)的半径和滑动轨迹半径, a 为热传递系数, λ 为导热系数, α 为热流分布系数, f 为摩擦系数, t 为摩擦时间, Aa 为样品的名义摩擦面积, θ_t 和 θ_0 分别为摩擦转移时的温度和环境介质的温度, I 为热功当量, N 为负荷, u 为滑动速度, W_{12} 为比粘着功, β 为系数, E 为弹性模量, γ 为波松系数, σ 为屈服极限。

3. 影响转移膜生成的因素

对偶面的表面粗糙度对转移膜的生成及其附着强度的影响很大。在十分粗糙的对偶面上,不仅因为切削作用使聚合物很难形成均匀的转移膜,而且已转移的聚合物也是不连续的;倘若对偶面非常光滑,则形成的转移膜的粘着强度又不会很高。尽管粗糙峰造成

的应力集中的影响目前还不十分清楚,然而研究表明,存在着一个能使聚合物磨损率最低的适宜的初始表面粗糙度值^[26]。这个值随聚合物的种类、对偶面的材质和加工方法的不同而不同。当然,表面粗糙度在摩擦过程中是不断变化的,即初始较粗糙的表面会变得平滑起来,而初始光滑的表面又会粗糙化,最终达到一个稳定值。Bahadur等曾就钢表面形貌对聚合物摩擦转移行为的影响进行了系统的研究^[27, 28]。他们还通过电子计算机系统考察了金属表面的光洁度和微凸体的曲率半径、斜率、密度,以及表面光洁度的标准偏差和微凸体的高度分布等参数对聚合物磨损的影响及它们在摩擦过程中的变化,发现这些表面参数的变化主要发生在摩擦过程的初始阶段。Eiss等^[29]利用刻蚀技术在不改变钢表面微凸体高度分布的前提下,研究了改变微凸体的曲率半径对聚合物磨损的影响。Tanaka等^[30, 31]的研究结果表明,在 $R_a = 0.01 \sim 1.30 \mu\text{m}$ 的范围内,PTFE于滑动速度 1 cm/s 和负荷 10 N 的条件下与钢对磨时的磨损率与摩擦系数均无变化。

此外,人们还从负荷、速度、温度、滑动距离和聚合物的机械性能等对转移膜的形成、发展、平衡厚度及对转移膜的摩擦磨损行为的影响进行了大量的研究^[11, 32~44]。从表面能和表面力学出发对材料的转移方向及其与底材粘附强度的研究结果表明,在摩擦过程中,聚合物总是由低表面能一方向高表面能一方转移^[15, 45~47]。这是因为低表面能材料的内聚能较低,其本体剪切强度也比转移膜与对偶面结合处的低。通过测定表面能的色散项(γ^d)和极化项(γ^p),利用Owens和Wu的界面粘着功计算公式计算了不同材料配合时的粘附功,并与它们的摩擦磨损行为进行了关联^[45]。有人还从表面力学的理论角度推导出了计算粘着力公式。

4. PTFE转移膜与底材相互作用的本质

有关转移膜与底材相互作用力之本质的解释一直存在分歧。一种观点倾向于范德华力、氢键力和静电引力是产生粘附的根本原因^[47~50],并且已经为大多数人所接受;但有人却根据场离子显微镜(FIM)和俄歇电子能谱仪(AES)对PTFE等同种纯金属相互作用的研究结果认为,PTFE是通过C原子与金属形成了化学键,并且指出金属表面上的单分子层化学吸附氧不能阻止PTFE的转移,PTFE转移到 Al_2O_3 上的效果与转移到纯净金属表面上的相同^[51];还有人用差热扫描分析(DSC)将PTFE与不同的金属粉末混合后加热到 407°C ,再用X-射线光电子能谱仪(XPS)分析残留物发现,PTFE与Cr、Sn、Pb、Al等金属反应生成了金属氟化物^[52, 53],认为与金属形成化学键的是氟原子而不是碳原子。此外,也有人对聚合物复合材料的转移行为进行了研究,发现无机材料(如玻璃纤维、 PbO 和 Cu_2O 等)填充的PTFE等的摩擦转移膜与对偶金属表面的相互作用明显增大^[24, 54~56],它们的磨损率仅为基体材料的 $1/2 \sim 1/5$,并且认为填料的减磨作用是因为增加了最内层转移膜对底材粘附性的结果。

一些从事粘结剂研究工作的人^[57, 58]也曾将多种金属气相沉积到PTFE的表面,结果发现在界面上生成了金属氟化物(或有机金属络合物),可能是由于这些金属氟化物的催化作用,又使一些不饱和链系形成了交链。图4所示是利用剥离的方法对沉积金属膜与聚合物界面相互作用强度的测定结果^[59],表明不同的金属对同种聚合物,以及同一金属对不同聚合物的相互作用强度均有差异。

总之,有关转移膜与对偶面底材相互作

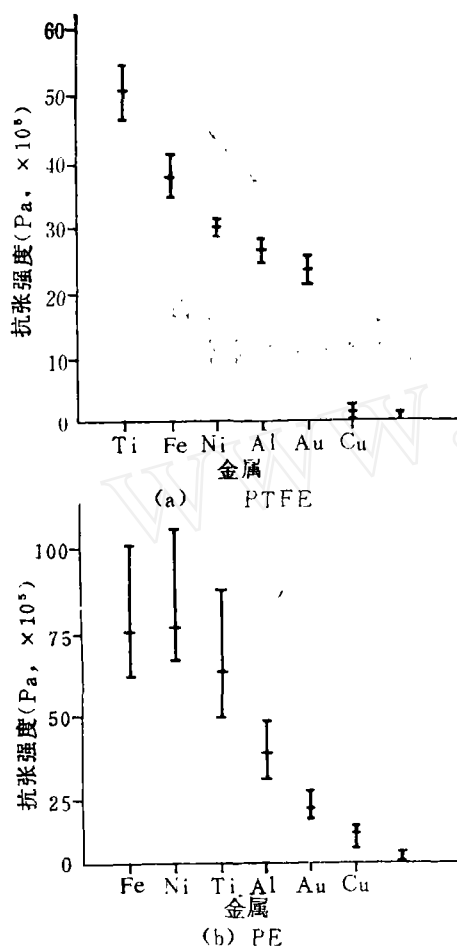


图4 在聚合物上沉积金属膜剥离时的抗张强度

用的实质目前还不十分清楚。借助于界面化学和现代先进的表面分析仪器,将能够寻找到这个问题的最终答案,从而为提高PTFE的耐磨性能奠定坚实的理论基础。

5. 转移膜剥落形成磨屑的考察

转移膜从对偶面上剥离的机理是一个十分复杂的问题,尚待进行深入系统的研究。在某些情况下,摩擦过程中的粘着力能够将转移膜表面的补钉状膜拔出来,使其反转移到聚合物的表面上,并且与之牢固地结合在一

起^[60]。转移膜剥落后可能形成卷状磨屑而从接触区脱落^[61]。PTFE柱在玻璃盘上滑动的试验结果表明,在摩擦的初始阶段是PTFE的小碎片转移到玻璃盘上,而在随后的滑动过程中,这些小碎片又互相粘合形成一定尺寸的大碎片(同时也有一些大碎片断裂形成小碎片),最终从盘上脱落下来。我们认为,在此过程中,大碎片的疲劳和柱前刮削力或柱尾摩擦力的作用可能是导致转移膜剥落的主要原因。但是,转移膜究竟是从其最内层与底材的界面剥落,还是从其层间剥落,目前仍然是一个有待探讨的问题。

6. PTFE结晶度对粘着磨损及摩擦的影响

现代表面分析仪器在研究聚合物的转移与磨损中发挥着重要的作用^[15, 51, 64~76]。利用DSC等技术研究PTFE的结晶度对其磨损影响的结果表明^[62, 63, 82~85],在25~64%的结晶度范围内,PTFE的带晶宽度随着结晶度的增加而增大(从约0.2 μ m增大到约0.4 μ m),磨损也随之降低。PTFE的磨损机理为其带晶内的分子链滑移或断裂,并且伴随发生无定形区向对偶面转移所造成的粘着磨损。Bely等曾就PTFE的结晶度对其磨损的影响作了比较全面的论述^[77],主要结论参见图5~7所示。

7. PTFE基复合材料的特性及其摩擦学性能

为了改善PTFE的耐磨性,除了通过碱金属溶液处理^[78~81, 86~88]、电化学还原^[89, 90]、碱金属蒸汽升温处理^[92]、辉光放电^[91, 93],以及近几年来得到迅速发展的等离子体表面改性技术^[94~105]和 γ -射线辐照技术^[79, 106]等对PTFE进行表面改性处理之外,另一种办法就是向PTFE内填充纤维

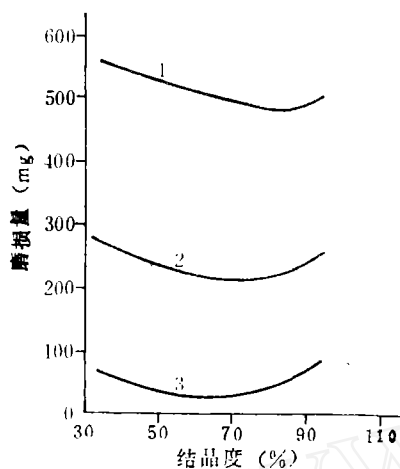


图5 PTFE的结晶度对其磨损的影响

负荷: 1—1.80N, 2—0.80N, 3—0.20N;
滑动速度: 4.5cm/s

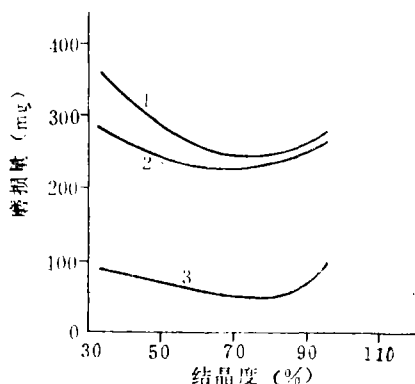


图6 PTFE的结晶度对其磨损的影响

负荷: 0.80N;
滑动速度: 1—18.0cm/s,
2—5.0cm/s, 3—1.5cm/s

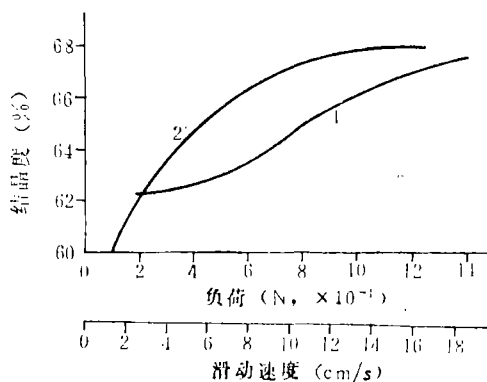


图7 负荷和滑动速度对表层PTFE结晶度的影响

1—负荷 (滑动速度为4.5cm/s);
2—滑动速度 (负荷为0.6N)

(如玻璃纤维、碳纤维、石棉纤维等)、无机物粉末(如 CuS 、 CuO 、 Pb_3O_4 、石墨、 MoS_2 、 Ag 、云母、 Ti 、焦炭、青铜粉、 ZrO_2 、 TiO_2 等)和有机物(聚酰亚胺、超高分子量聚乙烯、聚醚醚酮、环氧树脂等)填料^[107~115]。根据所用填料可将PTFE基复合材料分为以下三类:

a. 无机物填充的PTFE基复合材料

制取这类复合材料使用的填料有二硫化钼、石墨、氮化硼、氟化石墨、陶瓷纤维、碳纤维(CF)、玻璃纤维(GF)、碳微球、玻璃微球、焦炭粉、云母粉、硅酸钠、二氧化锆、氧化镉、硫化铁、二氧化硅、三氧化二铝和二氧化钛等^[124~127]。其中,CF和石墨化碳纤维在近年来的发展较快,而以氮化硼、石墨、二硫化钼和GF的应用较广。含10~25%玻璃超短纤维(直径10~13 μm ,平均长度80 μm)的PTFE基复合材料的耐磨性比纯PTFE的高约1000倍。石墨有极性石墨、亲油石墨和球石墨之分^[128]。据报道,PTFE中填充极性石墨和球石墨的效果较好,既能明显地改善其耐化学药品性和压缩蠕变性,又可以提高其导热性,然而耐磨性能却比填充GF的差。石墨的填充量一般是15~30%。CF有高强度的高模量级和低模量级两种^[129]。使用后者(直径7~12 μm ,平均长度为49 μm)填充的PTFE基复合材料具有优良的耐磨性能,尤其在200℃下的耐蠕变性能大幅度改善,在水中的磨损比GF填充的小。

b. 金属填充的PTFE基复合材料

为了改善PTFE材料的机械性能和导热性,人们研制了铁、铜、铜合金、铅、铝、钼、钨和银等金属填充的PTFE基复合材料^[130]。这些都可以用作机械设备中的轴承材料,但不适用于电气和化学领域。在这类复合材料中,青铜填充的应用范围最广,其填充量一般是50~70%(wt,体积含量约为20%)。青铜既可以单独使用,也可以与

石墨或二硫化钼并用。添加铅粉的PTFE基复合材料的摩擦性能良好,摩擦过程中无烧结现象,但通常还需要添加青铜粉或GF。

c. 高聚物填充的PTFE基复合材料

这类复合材料的突出优点是不损伤对偶和易于机械加工等。目前,在用的高聚物填料有聚酰亚胺(PI)、聚对羟基苯甲酸酯(Ekonol)、聚苯硫醚(PPS)和聚醚醚酮(PEEK)等^[131~134]。Ekonol具有优良的自润滑性、电绝缘性和耐溶剂性,以及在大气中于320℃下依然良好的热稳定性;PPS的优点是耐热性、耐化学药品性以及电性能和机械性能都很好。由PI填充的PTFE基复合材料具有优良的摩擦磨损性能;将Ekonol与PTFE复合,可以改善PTFE的压缩、弯曲和耐磨性,Ekonol的填充量在20~80%的宽范围内,复合材料的摩擦系数都很稳定;用PPS填充的PTFE基复合材料具有良好的耐蠕变性和尺寸稳定性,当其添加量为20~40%(vol)时,可使PTFE的耐磨性提高两个数量级。

研究结果表明,虽然表面改性处理能够提高PTFE的耐磨性,但大都只在1~2个数量级的范围之内,而且一旦改性层被磨掉,这种耐磨性能也就随即消失;PTFE基复合材料的耐磨性最高可比纯PTFE的高三个数量级,而且填充任何一种填料都是有效的,即使它们的添加量变动范围较宽,材料的摩擦性能也不会受到多大的影响。作者认为,填料的选择对提高PTFE基复合材料的摩擦学性能是至关重要的。为了最大限度地降低材料的磨损,就必须了解填料减磨作用的实质。对于这个问题,目前有三种不同的观点:第一种观点认为,填料之所以能够减磨,是因为它们增加了转移膜在对偶面上的粘着性^[115~117]。第二种观点则认为,填料的减磨作用是其颗粒阻止了PTFE带状晶体转移的结果^[112, 118, 119]。在界面剪切过程中,长纤维或PTFE带状物是从表面横向抽

出的^[120],而最初认为这些纤维是由基体的非结晶区中分离出来的晶体带状物。最近的研究结论认为,它们都是从基体自身抽出来的,而填料的作用恰是阻止了这种抽出过程,避免了带状组织的破坏。这种假说与实用中的任何一种填料都能减小PTFE的磨损这一事实相吻合,但它尚不能解释为什么一些纤维的减磨效果要比另一些纤维的好。第三种观点是由Lancaster提出的^[121],认为载荷首先是由具有较高强度和刚度的填料颗粒或纤维承受的,但由于在滑动摩擦过程中,PTFE的转移会将它们遮盖起来而使这种承载作用明显减小。实际上,择优承载受到填料颗粒的种类、含量、尺寸(较小颗粒比较大颗粒更容易被遮盖)、形状(大的高宽比更有效)及其在基体中的取向等诸多因素的影响。Arkles等^[119]认为,不同的填料在PTFE中的减磨效果是不同的,而同种填料在不同的环境气氛下于PTFE中的减磨效果也不相同。在商品化的PTFE基复合材料中,填料的含量一般为15~25%(vol)。但是,Wells^[122]在研究石墨、CF、GF和青铜粉填充的PTFE基复合材料与碳钢对磨时发现,填料的含量增加到40%(vol)时的减磨效果最好。Anderson等^[113, 123]的研究结果表明,纤维垂直于滑动面取向时的磨损量最小,平行取向时的最大,然而此时的摩擦系数却最低。Tanaka^[118]在试验中发现,硬度较高但颗粒较小的ZrO₂粉末填料在PTFE中的减磨效果不如CF、GF、MoS₂和青铜粉的好,认为这是ZrO₂粉末在摩擦面被埋藏于PTFE基体内的结果。

8. 结 束 语

综上所述,虽然人们已经对PTFE及其复合材料的粘着磨损做了大量的工作,但归纳起来却仍然存在着以下几个有待深入探讨的问题:

a. PTFE转移膜的剥落是发生在其与底材的界面还是发生在它内部的层间;

b. 对偶材料表面的化学性质对PTFE及其复合材料磨损的影响;

c. PTFE转移膜形成的机理及结构;

d. 填料在PTFE基复合材料中的减磨机理;

e. PTFE转移膜与底材相互作用的本质;

f. PTFE与填料的化学作用及其对PTFE基复合材料磨损的影响;

g. PTFE基复合材料转移膜的结构和组成及其与磨损的关系。

这些问题都需要进行更深入的研究,以便为认清聚合物磨损的微观机理、开发性能优异的新型聚合物自润滑材料提供科学依据和理论指导。

参 考 文 献

- [1] Pooley, C.M., Tabor, D., *Proc.R. Soc.London Ser.A*, 329 (1972) 251.
- [2] Geil, P.H., *Polymer Single Crystals*, Interscience, N.Y., 1963, p.183.
- [3] Tanaka, K., Uchiyama, Y., *Wear*, 23 (1973) 153.
- [4] Speersschneider, C.J., Li, C.H., *J. Appl.Phys.*, 33 (1962) 1871.
- [5] Makinson, K.R., Tabor, D., *Proc.R. Soc.London Ser.A*, 281 (1964) 49.
- [6] Briscoe, B.J., Tabor, D., *British Polymer Journal*, 10 (1978) 74.
- [7] Briscoe, B.J., Tabor, D., *Polymer Surfaces*, ed.by Clark, D.H., Feast, W.J., Wiley, 1978, p.1.
- [8] Briscoe, B.J., Tabor, D., *Fundamentals of Tribology*, ed.Suh, N.P., Saka, N., MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1980, p.733.
- [9] Tanaka, K., *Wear of Materials 1981*, ed.Ludema, K.C., ASME, N.Y., 1981, p.98~106.
- [10] Kar, M.K., Bahadur, S., *Wear of Materials 1977*, ed.Ludema, K.C., ASME, N.Y., 1977, p.501~509.
- [11] Tanaka, K., Miyata, T., *Wear*, 41 (1977) 383.
- [12] Tanaka, K., *Wear of Materials 1981*, ed. Ludema, K.C., ASME, N.Y., 1981, p.144~152.
- [13] Kar, M.K., Bahadur, S., *Wear*, 63 (1980) 105.
- [14] Bassani, R., Dipasquale, E., Vitall, C., *Wear*, 95 (1984) 77.
- [15] Jain, V.K., Bahadur, S., *Wear*, 46 (1978) 177.
- [16] Jain, V.K., Bahadur, S., *Wear of Materials 1977*, ed. Ludema, K.C., ASME, N.Y., 1977, p.487~493.
- [17] Briscoe, B.J., Stolarski, T.A., *Wear*, 104 (1985) 121.
- [18] Liu, T., Rhee, S.K., Lawson, K.L., *Wear*, 60 (1980) 1.
- [19] Rhee, S.K., Ludema, K.C., *Proceedings of the 3rd Leeds-Lyon Symposium on Tribology*, 1976, p. 11~17.
- [20] Tabor, D., *Proceedings of the 3rd Leeds-Lyon Symposium on Tribology*, 1976, p.3~8.
- [21] Czichos, H., *ASLE Proc. 3rd Int. Conf. on Solid Lubrication 1984*, p.177~186.
- [22] Uchiyama, Y., Tanaka, K., *Wear of Materials 1981*, ed. Ludema, K.C., ASME, N.Y., 1981, p.144~152.
- [23] Bely, V.A., Sviridyonok, A.I. et al, *Wear of Materials 1981*, ed. Ludema, K.C., ASME, N.Y., 1981, p.167~170.
- [24] Briscoe, B.J., et al, *Wear*, 27 (1974) 19.
- [25] Pogorian, A.K., "Wear Mechanism and Transfer Film of Polymers", *The 4th European Tribology Congress*, ed. by La Societe Francaise de Tribologie, Vol.4, 1985.
- [26] Dowson, D., Challen, J.M., *Proceedings of the 3rd Leeds-Lyon*

- Symposium on Tribology, 1976, p.99.
- [27] Bahadur, S., Stigich, A.J., *Wear*, 68 (1981) 85.
- [28] Jain, V.K., Bahadur, S., ASME Paper No.82-Lub.-15, N.Y., 1982.
- [29] Eiss Jr., N.S., Milloy, S.C., *Wear of Materials 1983*, ed.Ludema, K.C., N.Y., 1983, p.650~656.
- [30] Tanaka, K., Nagai, T., *Wear of Materials 1985*, ed.Ludema, K.C., ASME, N.Y., 1985, p.397~404.
- [31] Tanaka, K., Yamada, Y., *Wear of Materials 1987*, ed.Ludema, K.C., ASME, N.Y., 1987, p.407~414.
- [32] Tanaka, K., *Wear*, 75 (1982) 183.
- [33] Tanaka, K., Yamada, Y., *Wear of Materials 1983*, ed.Ludema, K.C., ASME, N.Y., 1983, p.617~624.
- [34] Sanahary, El A.F., Godet, P.M., *Trans, ASME, J.Lubr.Technol.*, 105 (1983) 259.
- [35] Steijn, R.P., *Wear Tests for Plastics*, ed.Bager, R.G., 1979, p.3~17.
- [36] Rose, R.M., Goldfarb, H.V., et al, *Wear*, 92 (1983) 99.
- [37] Uchiyama, Y., Tanaka, K., *Wear*, 58 (1980) 223.
- [38] Amuza, T.K.A., ASLE Proc., 3rd Int.Conf.on Solid Lubrication 1984, p.12~167.
- [39] Anderson, J.C., Robbins, E.J., *Wear of Materials 1977*, ed.Ludema, K.C., ASME, N.Y., 1977, p.94.
- [40] Tanaka, K., Ueda, S., *Wear*, 39 (1978) 323.
- [41] Uety, H. et al, *Wear*, 88 (1983) 103.
- [42] Shimbo, M. et al, *Wear*, 91 (1983) 89.
- [43] Hornbogen, E., Schafer, K., *Fundamentals of Friction and Wear of Materials Paper to 1980 ASME Materials Science Seminar*, 1981, p. 409~438.
- [44] Karpe, S.A., *ASLE Trans.*, 25 (1982) 537.
- [45] Erhard, G., *Wear*, 84 (1983) 167.
- [46] Spur, R.T., *Wear*, 79 (1982) 301.
- [47] Lee, L.H., *Advances in Polymer and Wear*, 5A, ed.Lee, L.H., N.Y., 1978, p.31~68.
- [48] Briscoe, B.J., *Wear of Materials 1981*, American Society of Mechanical Engineers, N.Y., 1981, p.7~16.
- [49] Tabor, D., *Advances in Polymer and Wear*, 5A, ed.Lee, L.H., N.Y., 1978, p.5~30.
- [50] Tabor, D., *Wear of Materials 1977*, N.Y., p.1~11.
- [51] Buckley, D.H., Brainard, W.A., *Advances in Polymer and Wear*, 5A, ed.Lee, L.H., N.Y., 1978, p. 315~328.
- [52] Cadman, P., Gossedge, G.M., *Wear*, 54 (1979) 211.
- [53] Gao, J., Zhao, J., Dang, H., In: *ASLE Proc.3rd Int.Conf.on Solid Lubrication 1984*, ed.Bisson, E.E., ASME, Park Ridge, 1984, p.308~319.
- [54] Pratt, C.C., *Proceeding-5th Lubrication, Wear Convention*, Institution of Mechanical Engineers, London, 1967.
- [55] Kajdas, C., *Wear*, 101 (1985) 1.
- [56] Bely, V.A. et al, *Wear of Materials 1977*, ed.Ludema, K.C., ASME, N.Y., 1977, p.526~531.
- [57] Roberts, R.F., Schonhorn, H., *Polymer Preprints*, 16 (1975) 146.
- [58] Schonhorn, H., Roberts, R.F., *Preprints Org.Coat.Plant. Chem.*, 36 (1976) 223.
- [59] Vogel, S.L., Schonhorn, H., *J.Appl.Polymer Sci.*, 23(1979) 495.
- [60] Lancaster, J.K., *Polymer Science*, ed.by Jenkins, A.D., North Holland Publishing Company, London, 1972, Chap.14.
- [61] Aharonov, S.M., *Wear*, 25(1973)300.
- [62] Hu, T.Y., Eiss Jr., N.S., *Wear of Materials 1983*, ed.Ludema, K.C., ASME, N.Y., 1983, p.636~642.

- [63] Hu, T.Y.et al, Proceedings of the 2nd National Symposium on Friction, Wear and Lubrication, Beijing, 1982, p.1~7.
- [64] Bely, V.A.et al, Friction and Wear in Polymer-Based Materials, Pergamon Press, A Wheaton Co. Ltd., Oxford, 1982.
- [65] Sviridyonok, A. I. et al, *ASLE Trans.*, 35 (1983) 386.
- [66] Kamoto, T., Tanaka, K.et al, *Wear*, 75 (1982) 173.
- [67] Arkles, B. C., Schireson, M. J., *Wear*, 39 (1979) 177.
- [68] Belin, M., Mansat, J.L., Martin, J.M., *Wear*, 68 (1981) 213.
- [69] Nevzorov, V. V. et al, Трение и Износ, 4 (1983) 218.
- [70] Heilmann, P.et al, Wear of Materials 1983, ed. Ludema, K.C., ASME, N.Y., 1983, p.414~425.
- [71] Miyoshi, K., Buckley, D.H., *Wear*, 75 (1982) 253.
- [72] Miyoshi, K., Buckley, D.H., *Wear*, 66 (1981) 157.
- [73] Miyoshi, K., Buckley, D.H., NASA, Technical Paper 1293.
- [74] Buckley, D.H., *Wear*, 100 (1984) 99.
- [75] Buckley, D.H.et al, *ASLE Trans.*, 22 (1980) 146.
- [76] Brainard, W.A., Buckley, D.H., *Wear*, 26 (1973) 75.
- [77] Bely, V.A., Sviridyonok, A.I., Advances in Polymer Friction and Wear, 5B, N.Y., 1978, p.745~755.
- [78] Allan, A.J.G., *J.Polymer Sci.*, 24 (1957) 461; *Wear*, 1-2 (1957) 161.
- [79] Briscoe, B.J., Ni Zhilong, *Wear*, 100 (1984) 221.
- [80] Jost, H., Rolter, A., Wesnigk, E., *Schmierungstechnik*, 7 (1976) 8 (Ger.).
- [81] Volker, R. et al, Ger. Offen, DE 3528181, 12 Feb.1987.
- [82] Eiss Jr., N.S., Warren, J.H., Proceedings of the 3rd Leeds-Lyon Symposium on Tribol., 1976, p.18.
- [83] Tanaka, K.et al, *Wear*, 23 (1973) 153.
- [84] Hu, T.Y.et al, *Wear*, 82(1983) 369.
- [85] Hu, T.Y., Eiss Jr., N. S., *Wear*, 84 (1983) 203.
- [86] Nelson, E.R.et al, Ind, *Eng.Chem.*, 50 (1980) 329.
- [87] Minnesota, M., Brit.Patent, 765284 (1957).
- [88] Rappaport, G., US Patent 2809130 (1957).
- [89] Brewis, D. M. et al, *Makromol. Chem.*, 43 (1975) 191.
- [90] Dahm, R.H.et al, In: Adhesion-4, ed. Allen, K. W., Applied Science Publishers, London, 1979, p.215.
- [91] Schondorn, H., Hansen, R.H., *J. Appl.Polym.Sci.*, 11 (1967) 1461.
- [92] Purvis, R.J.et al, US Patent 2789063 (1957).
- [93] Schonhorn, M.et al, *J.Adhesion*, 2 (1970) 93.
- [94] Robert, C., Guenter, B., Fresenius, Z., *Anal.Chem.*, 329 (1987) 143.
- [95] Malatesta, V., Garlassi, F., Proc. Int.Conf.Lasers 1986, p.179~186.
- [96] Clark, D. T., Hutton, D. R., *J.Polym.Sci.*, Part A, Polym.Chem., 25 (1987) 2643.
- [97] Inagaki, N., Hirao, H., *J.Polym.Sci.*, Part A: Polym. Chem., 25 (1987) 1803.
- [98] Lyons Christopher S.et al, *Polym. Mater.Sci.Eng.*, 56 (1987) 244.
- [99] Duraud, J.P.et al, *Radiat.Eff.*, 98 (1986) 151.
- [100] Le Moel, A., Duraud, J. P., *Scanning Electron Microsc.*, 4 (1986) 1319.
- [101] Clark, D.T., Brennan, W.J., *J. Electron Spectrosc.Relat.Phenom.*, 41 (1986) 399.
- [102] Volker, R. et al, Ger. Offen, DE

- 3528181, 12 Feb.1987, Appl.06 Aug. 1985, 4p.
- [103] Zhang Wanxi et al, *Kexue Tongbao*, 31 (1986) 963 (Eng.) .
- [104] Takahagi, T., Ishitani, A., *Macromolecules*, 20 (1987) 404.
- [105] Tomiji, W. et al, *Seni. Gakkaishi*, 43 (1987) 384 (Eng.) .
- [106] Briscoe, B.J., Ni Zhilong, *Wear of Materials 1983*, ed. Ludema, K. C., ASME, N.Y., 1983, p.643~649.
- [107] Play, D., Floquet, A., Godet, M., *Proc. of the 3rd. Leeds-Lyon Symposium on Tribol.*, 1976, p.32.
- [108] Bahadur, S., Tabor, D., *Wear of Materials 1983*, ed. Ludema, K. C., ASME, N.Y., 1983, p.564~570.
- [109] Bhushan, B., Wilcock, D.F., *Wear of Materials 1981*, ed. Ludema, K.C., ASME, N. Y. , 1981, p.107~119; *Wear*, 75 (1982) 41.
- [110] Tsukizoe, T., Ohmae, N., *Wear of Materials 1977*, ed. Ludema, K.C., ASME, N.Y., 1977, p.518~525.
- [111] Tanaka, K., Ohmae, N., *Wear of Materials 1977*, ed. Ludema, K.C., ASME, N.Y., 1977, p.510~517.
- [112] Tanaka, K., Kawakami, S., *Wear*, 79 (1982) 221.
- [113] Anderson, J. C., Davies, A., *Lub. Engr.*, 40 (1984) 41.
- [114] Brentnall, A.B., Lancaster, J.K., *Wear of Materials 1983*, ed. Ludema, K.C., ASME, N.Y., 1983, p.596~603.
- [115] Briscoe, B.J., Steward, M.D., *Wear of Materials 1977*, ed. Ludema, K.C., ASME, N.Y., 1977, p.538~540.
- [116] Briscoe, B. J., Pogolian, A. K., Tabor, D., *Wear*, 27 (1974) 19.
- [117] Briscoe, B.J., Steward, M. D., *Proceeding of the 3rd Leeds-Lyon Symposium on Tribology 1976*, p.230.
- [118] Tanaka, K., *Friction, Wear of Polymer Composites*, ed. Friedrich, K., Elsevier Science Publishers, 1986, p.137~174.
- [119] Arkles, B. et al, In: *Advances in Polymer Friction and Wear*, 5B, ed. Lee L.H., 1974, p.663~688.
- [120] Steijn, R.P., *Wear*, 12 (1968) 193.
- [121] Lancaster, J. K., *J. Phys.D.*, 1 (1968) 549.
- [122] Wells, D.M., *Engineering*, 1971, 12:1029.
- [123] Eliezer, Z., Khanna, V.D., *Wear*, 51 (1978) 169.
- [124] CA78, 85260t, 148566v.
- [125] BP1309559, 1440931; USP3847826, USSR278109, 469719, 552334; 特开昭 52-38565, 52-57249, 52-51239, 50-79549; 特公昭48-37329.
- [126] Petrov, V.V., *Энергомашиностроение*, 18 (1972) 20.
- [127] Charison, J., *J. Lubr. Technol.*, 99 (1977) 408.
- [128] Briscoe, B.J., *Wear Mater. Int. conf.* 1977, p.538~540.
- [129] Sakahaki, T., *工业材料 (日)*, 20 (1972) 45.
- [130] CA76, 114056x, 114413m, CA73, 4662x, CA78, 137142x; USP33764532; Ger. Offen 2650720; Fr.1580943; 特开昭 52-85246; 特公昭 49-36081, 47-05418.
- [131] Ger. Offen 2002549.
- [132] Tusakaya, K., *合成树脂 (日)*, 25 (1982) 1.
- [133] Masuya, Y., *Japan Plstic Age*, 12 (1974) 29.
- [134] Hykalu, S., *プラスチック・マテリアル*, 46 (1975) 43.