

应用领域

塑料及其复合材料的摩擦学

董光能^{1*} 李 健² 谢友柏¹

(1. 西安交通大学, 西安 710049; 2. 武汉材料保护研究所, 武汉 430030)

摘要:综述了近年来国内外塑料及其复合材料的摩擦学研究的新进展, 涉及到 PTFE、PEEK、UHMWPE 的合金以及塑料复合材料的重点研究领域, 指出基于现代材料设计的摩擦学材料设计、塑料在热和应力作用下的蠕变和长期稳定性、塑料梯度功能材料和环保的绿色材料的摩擦学等方面是未来的发展方向。

关键词:摩擦学材料; 塑料; 材料设计; 梯度功能; 蠕变

塑料及其复合材料具有优良的理化性能和独特的力学性能, 在摩擦学领域发挥着重要作用。由于塑料本身分子结构所固有的局限性, 故其表面硬度和体相刚度低, 易老化, 蠕变量大, 难以承受现代机器高参数的运行工况。但是, 任何一种单一材料都难以满足摩擦学对材料的甚至是自相矛盾的要求——即体相强度高和表面各向异性。为此, 国内外学者广泛开展了塑料复合材料的摩擦学性能研究。同时, 这种复合化也顺应了塑料材料的发展趋势。因投资设备而后采用新单体合成塑料新品种的传统路线, 难度高、周期长、投资大、收效慢, 上世纪 80 年代后期已呈减少趋势, 今后短期内也不会有太多新品种面市, 而是由现有的聚合物和单体经过特种催化剂改变结构, 通过合金化、共混、改性等技术制成新材料, 满足市场的不同需求。许多跨国公司纷纷在中国设共混厂, 以满足中国日益增长的汽车、电子等产业对聚合物的需求。

聚合物按其性能可分为塑料、橡胶和纤维三大类, 其中塑料按其用途又可分为通用塑料和工程塑料。工程塑料通常按其耐温等级分为通用工程塑料和特种工程塑料。通用工程塑料指尼龙(PA)、聚碳酸酯(PC)、聚甲醛(POM)、聚苯醚(PPO)和热塑性聚酯(PBT、PET 等)等五大工程塑料。据测算, 2004 年我国塑料原料需求量约 3775 万吨, 2005 年我国五大通用工程塑料的市场需求量将达到 59 万吨。通用工程塑料长期使用温度很少超过 150℃, 个别的短期内可达 200℃, 但易老化。因此随着机器运行参数的提高包括极端工况下的运行需求, 对工程塑料的机械强度、热性能、化学性能提出了更高的要求, 已发展出了长期使用温度一般在 200℃以上的特种工程塑料。特种工程塑料包括聚醚醚酮(PEEK)、聚苯硫醚(PPS), 聚醚砜(PES), 聚酰亚胺(PI), 超高分子量聚乙烯(UHMWPE)等。关于塑料的摩擦学应用早年已有 2 本著作问世^[1,2]。本文不讨论塑料摩擦学的基础知识, 仅就当前研究的重点有所侧重地展开讨论。

1 塑料摩擦学材料研究进展

塑料的工程应用规模不断扩大, 其中的摩擦学问题也日益突出, 塑料摩擦学相关问题已经成为摩擦学和高分子科学研究的一个重要方向。根据对近 5 年来的国际会议和专业学术期刊检索统计, 塑料的摩擦学研究主要集中在聚合物合金、填充和增强、环境介质等几方面。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50475041)

作者简介:董光能(1965—), 男, 安徽人, 西安交通大学副教授, 研究方向为材料的摩擦学及其仿真;

* 联系人: donggn@mail.xjtu.edu.cn

1.1 聚合物合金摩擦学研究

聚合物合金也称为高分子合金,是由两种或两种以上的高分子链或长序列链段,通过化学键合或物理混合而制得的多组分塑料,如嵌段共聚物、接枝共聚物和各种共混物等^[3]。合金化(共混)的目的是为了改善基质塑料的强度、加工性、韧性等。作为摩擦学应用,在合金化的同时还要加入减摩抗磨用的或稳定摩擦系数的润滑剂。所用的润滑剂品种繁多,常用的如各向异性的无机层状结构的石墨、改性石墨、石墨的插层化合物、二硫属化合物、滑石等;各向异性的聚合物如PTFE、酞青等;各向同性的低剪切强度的氧化物和软金属等。近几年,新的合金化方法集中于如互穿网络聚合、原位聚合、机械合金化^[4],但应用最多的还是共混法生产高分子合金。通用工程塑料和特种工程塑料是常用的塑料合金化基质。

1.1.1 PTFE 基金金 PTFE 是当前聚合物材料中惟一具有低而稳定的摩擦系数的材料,是作为减摩材料研究得最多最为全面的材料,具有较大的冷流性能和较差的加工性能。PTFE 在摩擦学中几乎不单独使用,多以复合材料、涂层或复合涂层形式使用。典型的有 Glacier 公司的 DU 材料和兰州化学物理研究所的 JS 材料等。与 PTFE 共混改性的工程塑料主要有 PC、POM、PPS、PA 等。加 PA 改性后的 PTFE,具备了 PA 的易加工性和 PTFE 的优良的减摩性能^[5,6]。液晶原位增强 PTFE 复合材料^[7]则在近表面处形成纵向纤维结构,这种结构有利于提高复合材料的承载能力并在配副表面形成薄而均匀的转移膜,从而改善复合材料的摩擦学性能并减轻对配副的损伤。

PTFE 素有“塑料王”之称,具有高的化学惰性和极低的表面能,由它构成的复合材料存在着如何增强界面结合力的问题,还需深入研究。

1.1.2 PEEK 基金金 PEEK 属半结晶热塑性工程塑料。PEEK 具有优良的理化性能,是近年常采用的纳米增强的基质塑料。共混入 30%(wt)PTFE 显示出最好的摩擦性能^[8]。当纳米 SiC 和 PTFE 粉末共同填充 PEEK 时,表面变得粗糙,转移膜的性质变坏,纳米 SiC 和 PTFE 对减摩和耐磨的贡献减小。因为纳米 SiC 和 PTFE 在滑动摩擦时发生了化学反应,形成了 SiF_x 而减少了转移膜中的 PTFE 含量^[9]。

PEEK/PEI 复合材料。PEI 是一种高性能热塑性材料, T_g 值高达 215℃;具有很低的摩擦系数,但其耐磨性差;PEEK/PEI 复合材料在很宽的组分范围内完全相容或部分相容。

PEEK 与热致液晶塑料(Thermal LCP)的复合材料 PEEK/TLCP 具有突出的耐热性和耐化学药品性,其强度和弹性模量高,尺寸稳定性好^[10]。LCP 具有特征中间相,即一种方向性极强的熔融相,冷却时 LCP 形成含有取向性纤维结构的固相。这使 LCP 具有低熔融粘度、高拉伸模量和拉伸强度及高温下热稳定性等机械性能^[11]。

1.1.3 UHMWPE 基金金 UHMWPE 韧性好、强度高;良好的耐低温冲击性、自润滑性,无毒、耐水、耐化学药品性,缺点是热变形温度低、加工成型性差,耐蠕变性差。与聚丙烯(PP)共混,对加工性能的改善要优于加入高密度聚乙烯(HDPE),其共混物的摩擦系数和磨损率远小于 UHMWPE^[12]。复合物的磨损体积随 UHMWPE 的添加而降低,增强了复合材料的抗热变形性^[13]。热塑性的聚酯类聚氨基甲酸酯(PU)共混,加入马来酸酐作为增容剂接枝。UHMWPE 与 PU 本不相容,马来酸酐增大了 UHMWPE 相的非晶区,改善了界面结合力;增容剂的临界浓度是 10%(wt),添加增容剂的复合材料比纯的 UHMWPE 磨损率低^[14]。但其比磨损率对施加的载荷不太敏感,而对试验速度敏感大,摩擦系数随载荷增大而略有增加^[15]。

超高分子量聚乙烯(UHMWPE)的磨损和由磨屑引发的无菌性松动问题一直是关节置换术寿命延长的主要障碍。目前关节置换用 UHMWPE 的设计寿命达到 15 年,陶瓷/金属或金属/金属配副的关节在 20 年以上(有人声称可达 50 年)。UHMWPE 的优势在价格和较低的应力屏蔽方面。为解决 UHMWPE 磨损问题已进行了大量的研究,包括关节尺寸的优化、塑料的微观结构、形貌和力学性质等等。大量的文献集中于辐照交联 UHMWPE 性能研究^[16]。辐照交联的效果与具体的辐照工艺有关,要防止过度辐照而加速分子链的降解。

1.2 塑料的填充和增强

塑料的最大缺点之一是强度较低,以提高强度为主要目的的研究工作集中在填充和增强方法及其摩擦学性能改进等方面。

1.2.1 短纤维 当前使用的短纤维以碳纤维、石墨纤维和玻璃纤维为主。短纤维增强的材料呈各向同性,纤维无取向。加入不同含量和种类的短纤维会导致摩擦学性能较大的差异。

向 PTFE 基质中加入短纤维的含量一般不超过 20%。三体磨粒磨损是 PTFE 碳石墨复合材料(18%碳纤维,7%石墨)的主要失效形式。纤维拔出、断裂是引起 PTFE/玻纤/二硫化钼复合材料(20%玻璃纤维+5% MoS₂)失效的主要原因^[17]。含 25%短碳纤维增强的 PTFE 在中等载荷下,摩擦系数大,磨损率小;高载中速下摩擦系数小,抗磨性好;高速(>4m/s)下性能退化;高温下(>150℃)摩擦学性能也不好。与纯 PTFE 的摩擦学性能相比,碳纤维增强后显示更高的耐磨性,然而摩擦系数显著增加。碳纤维增强对磨粒磨损没有负面影响^[18]。

玻璃纤维(GF)和 PTFE、MoS₂ 增强的 PES 可大幅度提高耐磨性能。添加固体润滑剂时,PTFE 比 MoS₂ 更有效。碳纤维增强能有效提高 PES 的耐磨性能。磨粒磨损情况下,加入纤维或固体润滑剂,对纯 PES 基质的性能有所削弱^[19]。

自体纤维增强技术可改善界面性能。1970 年代末期,荷兰 DSM 公司发明的 UHMWPE 纤维即属于这种。我国自 1985 年开始了 UHMWPE 纤维的研究,并投入中试及工业化开发。UHMWPE 纤维是继碳纤维和芳纶之后出现的又一种高强度、高模量的高性能纤维。用 UHMWPE 纤维增强 UHMWPE 不存在界面的相容问题。运用 UHMWPE 纤维增强乙烯-丁烯共聚物,纯基体的蠕变性随共聚物的支链增加而迅速减少。磨合过程中的磨损由基体表层的快速剥离决定,而稳态阶段的磨损是由纤维的耐磨性决定的^[20]。

1.2.2 连续纤维 芳纶纤维增强的 PEI 有良好的抗磨料磨损能力。连续纤维增强时要求设计纤维的取向,使纤维垂直于摩擦表面要优于平行取向。编织纤维的增强效果更好。但玻璃纤维中夹杂固体润滑剂和金属填充物是有害的^[21]。

金属纤维^[22]能大幅度降低 PTFE 的磨损,钢纤维的增强效果比铜纤维的好,钢纤维、铜纤维混杂增强的效果则比单一纤维增强的更好。

各向同性的纤维增强和纤维增强、整体取向的 UHMWPE 对 CoCr 合金进行往复摩擦试验。试验介质为牛血清白蛋白,往复频率为 1.5Hz。试验结果表明:纤维增强材料的 UHMWPE 中,编织的 UHMWPE 纤维层嵌入 UHMWPE 基质中,增强 UHMWPE 试样的磨损率是标准的未增强试样的 2 倍。不同取向的试样磨损率接近。所有试样的摩擦系数的平均值为 0.08~0.11^[23]。

在水润滑条件下,玻璃纤维增强的 PEEK 的耐磨性能几乎没有改善;向 PEEK 中加入碳纤维,耐磨性能更优;而 PPS 中不管加入何种纤维耐磨性能都得到改善。在混合润滑和流体动力润滑条件下加入玻璃纤维或碳纤维,PEEK 和 PPS 的磨损性能得到极大的提高。纤维的取向影响着边界润滑和混合润滑下的磨损抗力,垂直于滑动方向者显示出较平行方向更高的磨损抗力^[24]。

1.2.3 微纳米颗粒增强 微纳米粒子尺寸小,比表面积大,与基体接触面积大,而且微纳米粒子表面活性中心多,活性高,可以和基体紧密结合。当受摩擦外力时,粒子不易与基体脱离。另外,即便脱落下来的纳米粒子,在瞬间摩擦升温下会镶嵌在摩擦副表面,对摩擦表面起到修复作用。

用 UHMWPE 颗粒增强的塑料基复合材料在矿物磨料作用下,随 UHMWPE 的体积分数增加,控制磨损的机理由三体向二体的转变,相应的磨损率减少^[25]。

研究较多的是采用无机的金属粉、陶瓷粉(SiO₂, Al₂O₃, SiC 等)共混增强 UHMWPE,PEEK 等塑料基质。

C₆₀和碳纳米管(CNT)也常见于文献中作为填料。聚酰亚胺/碳纳米管(PI/CNT)与不同比例的 CNT 原位复合。PI/CNT 纳米复合材料的弯曲强度和微硬度随 CNT 含量增加而增加,并在某一 CNT 含量下达到稳定值。CNT 可有效地提高纳米复合材料的减摩能力和磨损抗力,因为 CNT/PI 增大了承载能力和强度^[26]。有文献认为 C₆₀和 CNT 在微观上起滚动作用,类似于滚动轴承,故降低摩擦系数。但微观上分子间力的作用下,是否能顺利地滚动,尚需进一步研究。

1.3 环境介质

塑料的优点是其耐腐蚀性能优于金属材料,因此其主要应用领域也常常是存在腐蚀介质的一些特殊

环境,其环境适应性成为塑料材料摩擦学研究的一个重点领域,这也是构筑摩擦学系统不得不考虑的问题。

1.3.1 超低温环境 随着塑料向航天、航海领域扩展,超高压、超低温条件下的摩擦学性能研究也愈显重要。例如,深海潜水设备中使用的摩擦副、火箭发动机液氢或液氧下使用的轴承、动密封件等等。塑料性能具有强烈的温度依赖性,低温下其弹性模量和硬度都比室温下高,导热系数低。摩擦系数和磨损量也小。能胜任超低温环境的塑料只有 PTFE (-200°C) 和 PI (-273°C) 2 种。它们在液氦温度(LHe, 4.2 K 时)下的摩擦磨损比液氮温度(LN₂, 77 K)下的要高,磨损形式也发生了变化。室温下为粘着磨损的材料,在低温下则表现出磨粒磨损。因为低温效应使得 PTFE 基的复合材料在配副上生成了脆性的金属氟化物转移膜^[27]。

以 PEEK、PEI 和尼龙 66 等三种热塑性材料和热固性的环氧作为基质材料,加入微米级添加剂如短切碳纤维、片石墨以及 PTFE 粉末与纳米 TiO₂ 颗粒构成摩擦学复合材料。它们处于液氢下的摩擦学性质是由基质材料决定的,热塑性塑料要略好于热固性塑料^[28]。

1.3.2 生理环境 以 UHMWPE 为代表的生物医学塑料材料得到了越来越广泛的应用,如人工关节、心脏瓣膜、假体等。生物生理环境是富含电解质以及生物大分子(如蛋白质、脂质和透明质酸)的水基环境,是十分复杂的环境,要求材料耐介质腐蚀、生物相容且无生物毒性,并能够经受辐照灭菌、蒸汽消毒。在长期的剪切应力作用下,UHMWPE 表面磨损并在体内留下磨屑;磨屑的尺寸在巨噬细胞可吞没的范围内,从而引起骨质溶解和假体松动、失效。已有报道表明,髌臼磨损率低的病人,就不容易发生骨质溶解松动^[29]。此类问题已经成为当今摩擦学研究的一个热点,并形成了一个重要的分支——生物摩擦学。

UHMWPE/Al₂O₃ 复合材料生物摩擦学特性的研究表明^[24],UHMWPE 摩擦副的初始摩擦系数在干摩擦、生理盐水及蒸馏水润滑条件下较高并接近,在血浆润滑条件下较低;干摩擦条件下,UHMWPE/Al₂O₃ 的稳态摩擦系数最大,相应的磨损率也最高;蒸馏水润滑时,摩擦系数最小;生理盐水+血浆润滑时的稳态摩擦系数接近,而血浆润滑时磨损率最低^[30]。

近几年,已在寻求耐磨性更好的 UHMWPE 增强材料和替代材料如 PEEK、PU(聚氨酯)及其碳纤维增强复合材料。PU 髌臼的摩擦系数要比 UHMWPE 的低,能够承担更大的来自关节的载荷。PU 髌臼的设计用来消除由于挤压造成的流体匮乏,促进了可能引起过度蠕变的弹性流体动力润滑。试验室条件下 PU 的抗蠕变性要比 UHMWPE 好^[31],但还没有进入临床,可能与严格的医用材料标准以及对复合材料可能引起的界面问题的担心有关。

1.3.3 水环境 水环境下使用的塑料材料,如水下设施、舰船等所使用的塑料摩擦学材料,面临着三个主要问题^[32]:(1)润滑问题。水的粘度为 $0.55\text{--}1\text{mm}^2/\text{s}$,约为矿物油的 $1/40\sim 1/50$,润滑性差,不但难以形成有效的流体动压膜,甚至不能形成良好的边界润滑膜;(2)磨损问题。水对塑料的侵蚀,和水中的微细污染物和磨屑的联合作用;(3)空蚀。在摩擦加速或频率变化较大时,摩擦表面局部地区产生涡流,溶解态或非溶解态气体的静压大于外部压力而聚集,局部摩擦高温促使聚集气体突然爆裂产生巨大的冲击力,使得表面疲劳开裂,剥落成许多小麻点、凹坑及空洞,甚至呈蜂窝状。

水润滑 PPS 时,PPS 中的 S 与钢配副的表面反应生成了 FeS。FeS 促进了 PPS 向配副面的转移或粘着。与 PTFE 相比,PPS 具有更好的生成转移膜的能力,有助于降低水环境下的磨损。尽管 PEEK 浸在水中时硬度并不降低,但在有水摩擦时 PEEK 滑动表面硬度降低,加速了 PEEK 的磨损^[33],由此可见水环境的复杂性。

2 塑料摩擦学材料研究和发展方向

2.1 塑料摩擦学材料设计理论

摩擦学材料的研究,至今依然是经验的试错法为主。这种状况无法为多变的市场、纷繁的个性化产品提供服务。计算化学和计算材料学为材料设计提供了保障。当前,材料的设计已有若干软件上市。软件中并没有涉及到摩擦学材料的设计。因为摩擦学性质并不是材料的固有属性,而是从属于所处的系统

特性,无疑增加了摩擦学材料设计的难度,无论如何,摩擦学材料的设计仍是有规律可循的。塑料摩擦学材料的设计有可能成为突破口。层状结构材料、材料内部存在弱分子间作用力或有低的剪切强度,可望作为润滑剂使用;离子键、共价键的材料通常可作为耐磨材料。因此根据塑料的结构特点,依靠现代材料设计理论^[34],从“聚合物-结构-性能-工艺”之间的定性定量关系入手,建立功能向结构映射的聚合物的结构模型,求得材料的力学特性。以此作为后续分析的输入,在预期的接触和运行条件下数值仿真磨损过程。如果磨损仿真的结果不满意,修改设计,再次迭代。如此反复,设计人员可根据用户需求即从功能需求出发,结合专家的知识,改变和变换材料组织中的长链大分子结构及其组态,生产出不同性能和功能的新型材料。

2.2 摩擦热与摩擦蠕变耦合作用

与摩擦伴生而来的摩擦热是摩擦能量的主要耗散形式。塑料的热传导系数约为金属的 1/10,作为摩擦学材料与金属或陶瓷组成摩擦副时,限制了热流向环境传导,引起配副严重温升,在塑料表层留下极高的温度梯度,甚至导致表层熔融^[35-36]。根据 WLF 方程的时温等效原理,温升将呈指数规律缩短塑料的服役寿命^[32,37]。摩擦热的另一后果是直接加速了摩擦蠕变。磨损率小时,蠕变量与线磨损量处于同一数量级上。摩擦与蠕变的耦合影响着塑料材料的摩擦学性能。实际应用中,设计合适的塑料增强和导热配方,优化运行参数,确保非磨损损伤如蠕变减至最小。这应当成为今后研究塑料摩擦学复合材料的首要问题。

2.3 纳米原位复合

聚合物基复合材料的表面和填料/基质界面一直是摩擦学和材料科学十分重视的问题。近年来,纳米原位复合技术的提出,可望实现填料/基质的“无缝”连接,消除界面的力学性能、化学性能的突变。纳米无机粒子作为塑料的填料,也逐渐应用到了摩擦学领域中。理论上,纳米无机粒子可达到分子级的复合。实际上,纳米粒子的分布如何,是怎样实现强韧化效果的,是怎样实现摩擦学改性的,即如何从结构上解释引入纳米填料赋予复合材料的新特性,仍是有待回答的问题。

2.4 梯度功能复合材料

梯度功能材料(Functionally gradient materials,FGMs)是材料表面到其内部的组成与微观结构呈梯度分布的材料。梯度功能塑料的制备方法是将不同塑料溶液进行掺混,然后控制相关条件,在成膜过程中造成一定程度的相分离。这些条件包括塑料间的相容性、密度差、溶剂的挥发速度、成膜热处理温度等。这种材料制备的零件的性质在横截面上不同的位置有明显的差异,以满足不同的要求。如外部的硬度和磨粒耐磨性能,内部要求韧性好(如齿轮),但性能没有跳跃。否则如硬质涂层引起界面上应力的畸变,导致局部涂层因剥落失效。在上世纪 90 年代初,对热固性塑料基材料用离心法制备了梯度功能材料^[38]。

梯度功能塑料,对于减轻热应力、制作生物适应材料,可望解决如人工关节的应力屏蔽问题,从而具有重要的工程价值,但目前这方面的工作开展得还不多。

2.5 环境友好的塑料材料

无机粉体是来源于自然,回归于自然的环境友好材料。我国已实现了利用熔融共混法工业化聚合物-粘土纳米复合材料^[39]。所用的粘土取自我国丰产的天然粘土矿物蒙脱土,降低了塑料材料的成本,提高了塑料材料的性能。充分利用各种无机矿物的特性、纳米原位复合技术实现填料/基质的“无缝”连接,消除界面的力学性能、化学性能的突变。根据塑料制品的应用领域、使用寿命和废弃后的处理方式,从选材到工艺设施上使开发的塑料制品成为“环境友好塑料材料”。

当前的环境友好塑料材料是基于可环境降解的塑料如淀粉塑料填充无机粉末而成,其塑料基质还难以满足摩擦学的要求。按功能需求设计的具有梯度功能的塑料摩擦学材料,能够统一对塑料材料的摩擦学性能要求与环境协调性的关系。塑料材料向环境友好型发展是必然趋势,而且将快速发展。摩擦学在塑料材料领域如何跟进,利用契机发展新的塑料摩擦学材料,为环境友好型摩擦学材料奠定理论基础,是当今摩擦学研究应该关注的问题之一。

3 小结

(1)根据当前塑料研究应用的现状,塑料材料研究的主流塑料基质是PTFE、PEEK等,其主要填料为润滑性的如PTFE、石墨、 MoS_2 等,增强增韧性的如碳纤维、石墨纤维和玻璃纤维、增强性的陶瓷、金属粉末等,填料与基质间界面的处理依然是未来关注的问题;

(2)由于塑料结构的特殊性,塑料研究中应当特别关注摩擦热、蠕变和环境对材料产生的热变形、热疲劳以及蠕变损伤、环境损伤问题;

(3)塑料摩擦学材料的制备应当基于现代材料设计理论和摩擦学理论,充分运用纳米技术、功能梯度技术,发展出新世纪环境友好的新材料。

致谢:本文承蒙西安交通大学理学院谢志高教授审阅并提出宝贵意见。

参考文献:

- [1] 王承鹤. 塑料摩擦学:塑料的摩擦、磨损、润滑理论与实践. 北京:机械工业出版社, 1994.10.
- [2] Yamaguchi Y. Tribology of plastic materials their characteristics and applications to sliding components. Amsterdam Elsevier, 1990.
- [3] 江明. 高分子合金的物理化学. 成都:四川教育出版社, 1988.
- [4] 詹茂盛, 李建平, 王瑛. 合成橡胶工业, 2000, 23(5):327~329.
- [5] Lehmann D, Hupfer B, Lappan U, et al. Des Monomers Polym, 2002, 5(2-3):317~324.
- [6] Han Y, Schmitt S, Friedrich K. Ind Lubr Tribol, 2001, 53(1):32~42.
- [7] 唐炜, 朱宝亮, 刘家浚, 等. 摩擦学学报, 2000, 20(1):10~13.
- [8] Hufenbach W, Kunze K, Bijwe J. J Synth Lubr, 2003, 20(3):227~240.
- [9] Wang Q H, Xue Q J, Liu W M. Wear, 2000, 243(1):140~146.
- [10] Schwartz C J, Bahadur S. Wear, 2001, 250~251(PART 2):1532~1540.
- [11] Stuart B H. Tribol Int, 1998, 31(11):647~651.
- [12] Liu G D, Chen Y Z, Li H. Wear, 2004, 256(11-12):1088~1094.
- [13] Hashmi S A R, Neogi S, Pandey A, et al. Wear, 2001, 247(1):9~14.
- [14] Yuan H, Hu P. J Appl Polym Sci, 2001, 81(13):3290~3295.
- [15] Unal H, Mimaroglu A. Mater Des, 2003, 24(3):183~187.
- [16] Zhou J, Chakravartula A, Pruitt L, et al. J Tribol, 2004, 126(2):386~394.
- [17] Khedkar J, Negulescu I, Meletis E I. Wear, 2002, 252(5-6):361~369.
- [18] Bijwe J, Neje S, Indumathi J, et al. J Reinf Plast Comp, 2002, 21(13):1221~1240.
- [19] Bijwe J, Rajesh J, Jeyakumar A, et al. Tribol Int, 2000, 33(10):697~706.
- [20] Jacobs O, Kazanci M, Cohn D, et al. Wear, 2002, 253:618~625.
- [21] Bijwe J, Indumathi J, Ghosh A K. Wear, 2002, 253:768~777.
- [22] 杨生荣, 刘维民, 薛群基, 等. 摩擦学学报, 1998, 18(1):66~70.
- [23] Chang N, Bellare A, Cohen R E, et al. Wear, 2000, 241(1):109~117.
- [24] Yamamoto Y, Hashimoto M. Wear, 2004, 257(1-2):181~189.
- [25] Cenna A A, Allen S, Page N W, et al. Wear, 2001, 249:663~671.
- [26] Cai H, Yan F, Xue Q. Mater Sci Eng A, 2004, 364(1-2):94~100.
- [27] Theiler G, Hubner W, Gradt T, et al. Tribol Int, 2002, 35:449~458.
- [28] Zhang Z, Klein P, Theiler G, et al. J Mater Sci, 2004, 39(9):2989~2995.
- [29] Andersona B C, Bloomb P D, Baikerikar K G. Biomaterials, 2002, 23:1761~1768.
- [30] 熊党生, 葛世荣, 徐方权, 等. 摩擦学学报, 2000, 20(4):256~259.
- [31] Smith S L, Ash H E, Unsworth A. J Biomed Mater Res, 2000, 53(6):710~716.
- [32] 贾均红, 周惠娣, 陈建敏. 润滑与密封, 2001, (3):63~67.
- [33] Yamamoto Y, Takashima T. Wear, 2002, 253(7-8):820~826.
- [34] 曹茂盛等. 材料现代设计理论与方法. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2002.
- [35] 董光能, 李健, 谢友柏, 等. 摩擦学学报, 2000, 20(3):226~228.
- [36] 丛培红, 李同生, 刘旭军, 等. 摩擦学学报, 1997, 17(3):220~226.
- [37] Young T, Cheng C, Lee Y, et al. J Biomed Mater Res (Appl. Biomater), 1999, 48:159~164.

- [38] Khonakdar H A, Moshedian J, Wagenknecht U, et al. *Polymer*, 2003, 44, 4301~4309.
 [39] Liu L, Qi Z, Zhu X. *J Appl Polym Sci*, 1999, 71(7), 1133~1138.

Tribology of Plastic and its Composite Materials

DONG Guang-neng¹ LI Jian² XIE You-Bai¹

(¹ Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China;

² Wuhan Research Institute of Materials Protection, Wuhan 430030, China)

Abstract: In this paper the progress of plastic and its composite tribo-materials is reviewed. Polymer alloys of PTFE, PEEK and UHMWPE and their composites are considered the key research areas in future. Considering plastic characteristics, plastic element design will be helpful to heat dispersion and the thermal resistance of plastics and ambient media resistance are also improved for tribological applications. Interfaces between plastic matrices and additives are still momentous. The future directions are tribo-polymer design based on modern material design, the creep and long-term stabilization, gradient function polymers and green tribo-polymers.

Key words: Tribo-materials; Plastics; Material design; Gradient function; Creep

(上接第 52 页)

- [60] Adem E, Burillo G, Borja M V, et al. *Nucl Phys B*, 2005, 236, 295.
 [61] Elmaghor F, 张丽叶, 励杭泉. 合成橡胶工业, 2002, 25(1), 43.
 [62] Elmaghor F, 张丽叶, 励杭泉. 合成橡胶工业, 2002, 25(3), 175.
 [63] Quintana S L, Rosales C, Mitre I J. *Polymer*, 2004, 45, 8041.
 [64] 李忠明, 谢邦互, 黄锐, 等. 材料研究学报, 2005, 19(1), 8.
 [65] 李忠明, 谢邦互, 黄锐, 等. 材料研究学报, 2005, 19(1), 15.
 [66] 邹华维, 徐闻. 高分子材料科学与工程, 2005, 21(1), 214.

Advances in Research of the Interphase in Multi-Phase Polymers

CHEN Xu-huang^{1,2}, SHENG Jing¹, PENG Shao-xian², LI Chun-qing²

(¹ School of Material Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

² School of Chemical and Environmental Engineering, Hubei Polytechnic University, Wuhan 430068, China)

Abstract: The formation and characterization of the interphase in multi-phase polymers were summarized in this paper. The interphase characteristics and their influences on properties of multi-phase polymers were reviewed as well. Emphasis was placed on discussing the effects of different compatibilizers on the interphase behavior. The influences of molecular weight and concentration of block copolymer based compatibilizers on the interphase behavior have been extensively investigated and quantitative relationships have been made. However, few investigations have been made on the effects of compatibilizers based on graft and random copolymers on the interphase behavior. It is anticipated that a quantitative correlation among interfacial tension, interphase thickness, and properties, particularly mechanical ones, of multi-phase polymers is a promising aspect in the field of polymer physics.

Key words: Interphase; Multi-Phase polymers; Compatibilization; Advances