

高性能耐高温聚合物复合材料的摩擦磨损性能研究

邓 鑫¹, 李笃信^{1*}, 杨 军², 王 静²

(¹中南大学粉末冶金研究院国家重点实验室, 长沙 410083;

²株洲时代新材料科技股份有限公司, 株洲 412007)

摘要:介绍了一些常见的高性能耐高温聚合物及其复合材料的摩擦与磨损性能的研究及其新进展, 包括聚四氟乙烯(PTFE)、聚醚醚酮(PEEK)、聚苯硫醚(PPS)、聚酰亚胺(PI)等。并讨论了不同种类的填料, 如纤维、固体润滑剂、无机化合物以及无机纳米粒子对高性能耐高温聚合物基复合材料摩擦系数及磨损率的影响, 许多研究表明, 适量填料的加入能提高聚合物基复合材料的耐磨性能, 特别是填料的协同作用对降低复合材料的摩擦系数及磨损率有更大的帮助。

关键词:高性能; 耐高温聚合物基复合材料; 摩擦; 磨损

聚合物基耐磨复合材料是以热塑性或热固性树脂为基体, 通过添加有机或无机的减摩组分以及抗磨增强组分而呈现良好的耐磨性能。世界上最早的聚合物基耐磨复合材料是填充石墨的酚醛树脂和可浸渍含油的多孔酚醛树脂。其后, 随着高分子化工技术的不断进步, 新型合成树脂尼龙(PA)、聚四氟乙烯(PTFE)、聚甲醛(POM)、聚酰亚胺(PI)以及环氧树脂基的减摩复合材料也相继被开发。采用聚合物为基体的耐磨复合材料具有减摩自润滑、耐磨、耐腐蚀、减震吸振、减低噪音、相对密度小、比强度和加工简便等系列优良特性, 因此, 作为其它材料的替代产品或换代产品获得了越来越多的应用。

随着尖端技术的迅速发展, 对耐磨减摩材料的要求越来越高。如要求制作在高温、高速、高真空及辐射环境中工作的摩擦零部件, 一般工程聚合物就很难胜任。为了提高摩擦材料的使用温度, 延长摩擦材料的使用寿命, 大量研究工作集中在耐热性聚合物基体的复合材料上^[1]。高性能耐热性聚合物为基体的耐磨复合材料, 与金属材料相比, 具有耐高温性能好、化学性质稳定、抗腐蚀能力强、消声减震效果显著、维修保养方便等优点。这类材料通常以耐热性好、本身具有一定自润滑能力的聚合物作为基体, 向其中加入一种或多种固体润滑剂及其它改性增强剂而制成, 可以用来制作耐磨的零部件(如轴承、齿轮、活塞环和滑动导轨等), 在航空、航天、机械、电子等领域作为摩擦件广泛使用^[2]。通常的高性能耐热性聚合物主要有聚四氟乙烯(PTFE)、聚醚醚酮(PEEK)、聚苯硫醚(PPS)、聚酰亚胺(PI)、耐高温环氧树脂等。本文将系统地介绍常用的高性能耐热性聚合物基复合材料摩擦与磨损性能的研究进展。

1 高性能耐热性热塑性聚合物

1.1 聚四氟乙烯(PTFE)

聚四氟乙烯(PTFE)被誉为“塑料王”, 是一种重要的热塑性塑料, 也是当前国内外广泛使用的工程塑料之一。在所有的工程塑料之中, PTFE 具有最低的摩擦系数, 最高的使用温度区间以及最低的表面能, 在摩擦与磨损领域中有着十分特殊的地位。

为改善 PTFE 的摩擦学性能, 人们用不同种类的填料对 PTFE 进行填充改性, 并对 PTFE 基复合材料的摩擦磨损性能进行了研究, 在此基础上开发出一系列 PTFE 基减摩、抗磨复合材料。Tanaka 等^[3]进行了玻璃纤维(GF)、青铜(Bronze)、ZrO₂、TiO₂、MoS₂、石墨(Graphite)等不同填充物改性 PTFE 耐磨性能的研究。

作者简介: 邓鑫(1981-20), 在读博士, 从事高分子复合材料及成型研究。E-mail: liduxin6404@yahoo.com.

* 联系人, E-mail: liduxin6404@yahoo.com.

Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

PTFE 基复合材料的摩擦系数受滑动速度的影响较少。在载荷 10N 下,除 ZrO_2 -PTFE 外,随着滑动速度的增加,大多数改性 PTFE 复合材料的摩擦系数与未填充 PTFE 的相近,在 0.2~0.3 范围之内变化。当载荷增加到 50N 时,PTFE 复合材料的摩擦系数随着载荷的增加而减少。因为载荷增加后,聚合物与对磨面的接触面积增大,生热大,增加了聚合物的粘附能力,更容易产生转移膜,形成了聚合物与聚合物之间的摩擦从而减小了摩擦系数。

近年来,许多研究工作者也进行了 PTFE 基复合材料的研究。Zhang 等^[4]发现,在相同的含量下,不同的填料(Cu、Pb、Ni、SiC、 Si_3N_4 等)对 PTFE 的摩擦磨损性能的影响差别很大,Cu 的填充性能最好。唐炜等^[5]和赵安赤等^[6]研究发现液晶材料能很好的提高 PTFE 的耐磨损性能。

王乙潜等^[7]认为,滑移速度对 PTFE 复合材料的磨损和摩擦的影响主要表现在它对界面温度的贡献,当超过临界的界面温度(靠近软化温度)时,磨损很快。Zhang 等^[8]对 PTFE 复合材料在不同介质中的摩擦磨损性能作了比较后认为,介质的存在大大改善了复合材料的摩擦学性能。

人们对影响 PTFE 复合材料摩擦学性能的内部因素也进行了研究。Durand 等^[9]研究证明,随 PTFE 基体中第二相陶瓷颗粒粒径的增大,复合材料的耐磨性能增强。何春霞等^[10]进行了纳米 Al_2O_3 填充 PTFE 基复合材料的摩擦磨损性能的研究,随填料含量的增加,PTFE 基复合材料的耐磨性能提高,同时摩擦系数有所增大。

1.2 聚醚醚酮(PEEK)

聚醚醚酮(PEEK)是一种半晶体热塑性聚合物,具有优异的机械性能及耐热和耐化学性能,作为高性能复合材料的基体,在工程中得到广泛应用。PEEK 因韧性好、蠕变率低且耐高温成为轴承、齿轮、活塞环和柔性密封等部件^[11]。PEEK 在光滑对偶面上和粗糙对偶面上的磨损率很低^[12]。但当 PEEK 在铁金属对偶面上高速滑动时,将产生塑性变形,并在某一临界温度或热量耗散率下,摩擦功耗上升极快,同时摩擦对偶部件发生严重的化学和机械破损,从而不能在实际中实现其高性能^[13]。为了进一步提高 PEEK 的摩擦学性能,将 PEEK 与其它聚合物共混或采用碳纤维(CF)、玻璃纤维(GF)、无机纳米粒子等复合增强,已成为制备摩擦学性能和力学性能更优异的 PEEK 复合材料的首选。

Stuart 等^[14]研究了 PEEK 与其它聚合物共混时的摩擦磨损性能。在温度比较高的使用环境中,PEEK 具有很好的摩擦学性能,特别是其与 PI、PTFE 以及某些液晶高分子材料的共混物,性能更好。Lu 等^[15]研究了 PEEK 短切碳纤维增强复合材料的摩擦磨损性能。在较宽的温度变化范围内,短切碳纤维的加入不仅改善了 PEEK 的磨损状况,而且降低了其摩擦系数,然而当其体积含量超过 20%时容易导致粘滞滑动行为,特别是当测试温度较高(如 220℃)时更易发生。在 PEEK 中加入固体润滑剂粒子如 CuS 、PTFE 和 MoS_2 等粒子也可明显提高 PEEK 复合材料的摩擦学性能。Voort 等^[16]研究发现,当 CuS 粒子的体积分数为 35%时,PEEK 复合材料的磨损率是 PEEK 的 1/6。但加入 CuS 也会使复合材料的摩擦系数上升,因为较硬的 CuS 粒子加入较软的 PEEK 中增加了犁耕效应。Lu 等^[17]的研究表明,在 PEEK 中加入 PTFE 能有效减小材料的摩擦系数,当 PTFE 的体积分数为 15%时,PEEK/PTFE 复合材料的摩擦系数达到最低值。其复合材料的磨损率也低于纯 PEEK 的磨损率,因为 PTFE 自身就具有优良的润滑性能。Wang 等^[18]研究了纳米 SiC 改性 PEEK 的摩擦学性能,研究发现,纳米 SiC 的加入降低了复合材料的摩擦系数,并且纳米 SiC 的含量在 2.5%~10%时,能更加有效地减低复合材料的磨损率。

在填料增强改性聚合物摩擦学性能过程中,不同填料的混合产生协同效应,使复合材料具有更加优异的摩擦磨损性能。Vande Voort^[19]和 Wang 等^[20]把 PTFE 粉末分别与 CuS 和纳米 SiC 混合加入到 PEEK 基体中发现,在 PEEK/PTFE/ CuS 体系中,PTFE 将减少复合材料的摩擦系数和磨损率,但在 PEEK/PTFE/纳米 SiC 体系中的情况相反,可能是因为纳米 SiC 与 PTFE 之间发生了化学反应。Han 等^[21]把 PTFE、CF、石墨加入到 PEEK 中,研究了复合材料的摩擦磨损性能,在 PEEK/PTFE/CF/石墨体系中,不同填料在有效的含量范围内能很大程度的改善 PEEK 复合材料的摩擦学性能。

PEEK 复合材料的摩擦系数低、耐磨性好、承载啮合性好,是一种良好的摩擦材料^[22]。但由于 PEEK 本身的价格高且成型加工困难,在普通的工程应用中受到了很大的限制^[23]。

1.3 聚苯硫醚(PPS)

聚苯硫醚(PPS)是目前生产规模最大的一种耐高温热塑性特种工程塑料。PPS 的突出优点为耐高温、耐腐蚀、耐辐射、不燃、无毒、机械性能和电性能十分优异,制品的尺寸稳定性好,用途十分广泛^[24,25]。由于 PPS 对石墨、玻纤、炭黑、陶瓷和金属等有较好的润湿作用和粘结性,通过添加摩擦改性填充剂改善 PPS 的摩擦行为是常用而有效的方法,这类填充剂主要有固体润滑性物质、陶瓷颗粒以及其它金属粉末等^[26,27]。改性后的 PPS 作为摩擦材料,具有耐磨性好、加工性好、耐热高、对填料的粘接力强、力学性能优良等特性。

佟伟等^[28]考察了聚四氟乙烯(PTFE)、纳米无机粒子及不同含量和粒度的石墨填充改性聚苯硫醚(PPS)复合材料的摩擦磨损性能。石墨的添加有利于在对摩面上形成转移物,而且随着石墨含量的增加,材料的摩擦系数明显降低,但磨耗量却有所升高,而石墨的粒度变化对材料的摩擦性能没有太大的影响;当 PTFE 和石墨两种固体润滑剂同时加入时,材料的力学强度有所降低,但其摩擦系数及磨耗量都得到明显改善,材料以疲劳磨损为主;纳米无机粒子的加入会使材料的磨耗量有所增大,其磨损机理转变为磨粒磨损。Bahadur 等^[29]研究了纳米 TiO₂、ZnO、CuO 以及 SiC 填充 PPS 的摩擦学性能。纳米粒子的加入降低了 PPS 复合材料的摩擦系数,其主要原因是转移膜与对偶件具有很强的相互作用;纳米 TiO₂、CuO 的加入降低了 PPS 复合材料的磨损率,其最优含量为 2 vol.%,而填充 ZnO 和 SiC 却使复合材料的磨损率上升。Cho^[30]等研究了纳米 CuO 填充、纤维(CF 和 Kevlar)增强 PPS 复合材料的摩擦磨损性能。PPS/CuO 体系中发现,填料的加入对复合材料的摩擦系数没有影响,而 PPS/Kevlar 体系的摩擦系数是 PPS/CF 的一半;当用纳米 CuO 以及纤维同时加入到 PPS 中时,其体系能得到最低磨损率。同样,他^[31]还研究了 MC(MoS₂, SiO₂, CuS, Al₂O₃ 的混合物)填充 PPS 的摩擦行为,MC 的加入降低了 PPS 的磨损率,而当在 PPS/MC 体系中加入 PTFE 后,在测试条件下,PPS/MC/PTFE 体系的摩擦系数的变化范围只有 0.27~0.33,而且能得到最低的磨损率。

PPS 复合材料的应用广泛,用于制作原子能、航空航天、汽车工业、医疗器械、运动器械和电子机械等方面的零部件。但是,由于它的熔点过高,使得复合材料的成型困难,因此限制了其在摩擦领域中的应用^[32]。

1.4 聚酰亚胺(PI)

聚酰亚胺(PI)是 20 世纪 50 年代发展起来的一类具有十分稳定的芳杂环结构单元的耐热性高分子材料,在耐高温的工程塑料中,它是最有价值的品种之一。PI 由于具有突出的热稳定性、机械性能、抗辐射和耐溶剂性能,并且在高温、高低压和高速等极端环境下有很好的摩擦磨损性能,是一类很有潜力应用于摩擦学领域中的基体材料。因此,近三十年来,对各种 PI 的摩擦学特性研究日益受到国内外学者的广泛关注^[33]。

PI 及其复合材料已经广泛应用在摩擦学系统的各个领域,如被用作各种轴承、齿轮、密封件、摩擦副和各种摩擦片。特别在真空的环境中,PI 表现出优异的摩擦磨损性能,使其在航空航天领域的应用非常成功,如 Vespel-PI 复合材料已被制成各种齿轮在宇宙空间中使用。这类材料易于机加工,表面容易刨光而适合做精密轴承。在机械工业中 PI 复合材料可用作轴承保持架、轴承搅拌器轴、医疗器件零部件和食品加工机械,在汽车工业中用作离合器滑动材料、压缩机密封材料等^[34]。

Czichos 等对比了 PI、PTFE、PA 三种聚合物的耐磨性能,发现纯 PI 的摩擦系数和磨损率较大,纯 PI 不适宜单独作为摩擦材料使用^[35]。因此在实际使用过程中通常通过材料的复合化来提高 PI 的摩擦学性能。填料的特性对 PI 基复合材料摩擦学性能的影响很大。通常,填料的加入会不同程度地改善聚合物的摩擦学性能,但也会影响其力学性能。填料在复合材料摩擦学行为研究中的应用一直是研究的热点,因此研究填料对 PI 基复合材料摩擦学性能的影响以及各种填料的作用机理,对提高 PI 基复合材料的摩擦学性能,推动 PI 基复合材料的研究、应用和发展,有十分重要的意义^[36]。

纤维具有很高的强度和刚度,可以增加 PI 的机械性能。目前用于聚合物增强改性的纤维主要有碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维和各种晶须。陈震霖等^[37]采用不同特性玻璃质刚性填料(玻璃纤维、玻璃纤维

粉、 $5\mu\text{m}$ 和 $20\mu\text{m}$ 玻璃微珠)填充改性热塑性聚酰亚胺(TPI),大尺寸填料的单位个体与基体的界面面积和结合强度大于小尺寸填料,其磨损率比小尺度填料的复合材料低。汪晓东等^[38]考察了短切碳纤维(CF)增强热塑性聚酰亚胺(PI)复合材料的力学性能和摩擦磨损性能,适量碳纤维的加入可以有效改善材料的摩擦磨损性能,其中 10%碳纤维填充 PI 摩擦因数为 0.12,仅为纯 PI 的 44.4%,但随 CF 含量进一步增大,摩擦因数趋于稳定;材料磨损率随 CF 加入下降了一个数量级。除了传统的增强纤维外,晶须具有很好的热稳定性和尺寸稳定性,作为一种高性能增强剂也开始应用在 PI 的改性中。晶须可提高材料的强度、热稳定性,改善材料的摩擦性能^[39]。

Sheiretov 等^[40]研究了低温下在 PI 中添加 PTFE、石墨、 MoS_2 三种固体润滑材料减磨效果,发现由于 PTFE 内聚能低,容易形成转移膜,因此有很好的减磨效果,而 MoS_2 在有氧的环境中减磨效果很差,在真空中和惰性气氛中有很好的热稳定性和摩擦性能^[41]。West^[42]研究发现 15%石墨的 PI 复合材料的磨损率只有含 15% MoS_2 的 PI 复合材料的 1/3。这不仅在于石墨的低摩擦磨损性,还因为石墨可有效地导出摩擦中产生的摩擦热,阻止 PI 的氧化或降解。黄丽^[43]等用模压成型法制备了 PI/PTFE、PI/PTFE/石墨两种复合材料,研究了材料的力学性能、摩擦性能,并进行了微观结构分析。试验结果表明,少量石墨的加入,并未使复合材料的摩擦性能有所提高,反而使冲击强度及布氏硬度下降,而 PTFE 的加入,可使复合材料的摩擦性能有较大幅度的改善。当 PTFE 的含量为 10%~20%时,PI/PTFE 复合材料与 PI/PTFE/石墨复合材料的摩擦系数都有很大程度的降低,之后,摩擦系数不再随 PTFE 含量的增加发生显著的变化。Jia 等^[44]研究了在干摩擦及水润滑条件下,PI/SCF/固体润滑剂复合材料的摩擦磨损性能的比较,研究发现,在水润滑条件下,该体系的摩擦磨损性能优于在干摩擦环境下,这是水吸收层边界润滑的作用。

无机填料改性聚合物基复合材料的摩擦磨损性能,一直是复合材料摩擦学研究的一个重要方面。无机化合物一般可以改变复合材料的热传导系数,从而提高聚合物的耐磨性。在双马来酰亚胺(BMI)中加入氧化铜粉能改善复合材料的摩擦性能,使摩擦稳定,而且还可以提高摩擦副的耐磨性。随氧化铜用量增加,摩擦副的耐磨性增加。分析表明氧化铜的加入促使 BMI 在对偶铝环表面形成牢固的转移膜,转移膜减小铝环的磨损,同时抑制了 BMI 复合材料的磨损^[45]。曲建俊^[46]在研究氧化铜和硅灰石两种无机填料对双马来酰亚胺与硬铝合金对磨的摩擦学性能的影响时发现,随氧化铜用量增加,滑动副的摩擦系数和耐磨性均增加,随硅灰石用量增加和粒径减小,滑动副的耐磨性提高,摩擦系数减小。PTFE 与 Sa 共同填充 BMI,不仅能进一步降低复合材料的摩擦系数和磨损量,而且能有效地抑制对偶件上的划伤。

同样,纳米粒子用来改善 PI 复合材料的摩擦磨损性能的研究日益成为热点。Yan 等^[47]研究了纳米 Al_2O_3 填充改性 PI 的摩擦学性能,研究发现,当纳米粒子的含量在 3.0%~4.0%时,PI/ Al_2O_3 纳米复合材料呈现较低的摩擦系数和磨损率。他^[48]还研究了 PI/CNT 纳米复合材料的摩擦磨损性能,CNT 的加入能有效提高材料的力学性能,增强抗磨能力。

2 高性能耐热性环氧树脂

环氧树脂(epoxy)是一种在涂料、胶粘剂、复合材料等领域应用较广泛的热固性高分子材料,其固化物具有高强度、高模量、优良的尺寸稳定性及耐腐蚀性等优点。然而,由于三维交联网络的结构特点所限,环氧树脂的摩擦磨损性能较差,通常需要与其它无机填料复合才能获得良好的减摩耐磨效果。近年来无机纳米粒子在高性能材料改性方面的应用成为一个研究热点。

Larsen 等^[49]利用 GF 及 CF/Aramid 编织纤维改性环氧树脂的摩擦磨损性能,并作了比较,它们都能提高复合材料的耐磨性能,但 epoxy/CF/Aramid 的抗磨损性能更优于 epoxy/GF 复合材料。Vasconcelos 等^[50]研究了环氧树脂、环氧树脂/Al 粉、环氧树脂/Al 粉/纤维三种体系的在室温和 160°C 时的摩擦磨损性能,当加入填料后,复合材料的摩擦系数不管在室温还是在 160°C 条件下,其变化范围很小,并趋于稳定。Zhang 等^[51]考察了碳纳米管增强环氧树脂的摩擦磨损性能,研究发现,碳纳米管的 R_{cm} 是影响其性能的重要因素,当 $R_{\text{cm}} > 25\%$ 时,复合材料的磨损率降低,这主要是因为碳纳米管在摩擦过程中迁移到复合材料的表面,起到了保护环氧基体的作用。同样,石光等^[52]研究了纳米 Al_2O_3 填充环氧树脂复合材料的摩擦学性

能,结果表明,经过表面化学接枝处理后,少量的纳米 Al_2O_3 (体积分数约 0.24%) 可大幅度提高环氧树脂的摩擦磨损性能,起到显著的减摩和耐磨作用。还有文献报道^[53],短碳纤维、Aramid 纤维以及 PTFE 的添加对环氧树脂/纳米 TiO_2 复合材料的摩擦磨损性能的影响,少量 PTFE 的加入对纤维增强环氧树脂/纳米 TiO_2 复合材料的摩擦磨损性能有很大的改善。

3 结束语

本文有选择的讨论了高性能耐高温聚合物及其复合材料的摩擦与磨损性能。各种填料,包括纤维,固体润滑剂,无机化合物以及无机纳米粒子对提高聚合物的力学性能及耐磨性能非常有效。而值得关注的是,填料的协同作用对减低高性能耐高温聚合物的摩擦系数及磨损率有更大的帮助。就目前的研究现状,对高性能耐高温聚合物及其复合材料的摩擦学行为应在以下几方面展开:(1)高性能耐高温聚合物的摩擦磨损性能的提高关键在于基体材料,如将功能结构引入先进高温材料中,研究和开发高温功能材料;(2)研究填料与高性能耐高温基体材料的界面特性、粘结性,考察其对摩擦磨损性能的影响;(3)高性能耐高温聚合物之间以及与其它热塑性、热固性聚合物的共混研究,以及在共混体系中填料的加入对复合材料的摩擦磨损性能的影响;(4)将纳米技术引入高性能耐高温聚合物材料的研究;同时还考察纳米粒子与其它填料之间的协同作用,在研究聚合物的摩擦磨损机理的基础上,研究其复合材料的摩擦磨损机理,建立能被公认的摩擦磨损模型;(5)环境条件及对偶材料对高性能耐高温聚合物复合材料的影响(6)开发高性能耐高温功能聚合物复合材料,如聚合物/金属复合材料等,并研究这些材料的摩擦学特性及它们在摩擦学工程中的应用。

参考文献:

- [1] Friedrich K. Wear, 1995, 190; 139.
- [2] 陆再平. 航空精密制造技术, 1997, 33 (5); 32.
- [3] Tanaka K. Kawakami S. Wear, 1982, 79; 221.
- [4] Zhang Z Z, Liu W M. J App Polymers Sci, 2001, 80; 1891.
- [5] 唐炜, 朱宝亮. 润滑与密封, 1999, 1; 50.
- [6] 赵安赤, 杜新宇. 塑料, 1995, 24; 7.
- [7] 王乙潜. 材料科学与工程, 1997, 15; 46.
- [8] Zhang Z Z, Shen W C, Liu W M. Wear, 1996, 196; 164.
- [9] Durand J. M, Vardavoulas M, Jeandin M. Wear, 1995, 181-183; 833.
- [10] 何春霞, 史丽萍, 沈惠平. 摩擦学学报, 2000, 20; 153.
- [11] Jones D P. Polymer, 1985, 26 (9); 1385.
- [12] Briscoe B J. Wear, 1986, 108; 357.
- [13] Briscoe B J. Tribology Inter., 1984, 17 (1); 129.
- [14] Stuart B H, Robeson L M. J App Polymer Sci, 1988, 35; 1977.
- [15] Lu Z P, Friedrich K. Wear, 1995, 181-183; 624.
- [16] Voort J V. Wear, 1995, 181-183; 212.
- [17] Lu Z P. Wear, 1995, 181-183; 624.
- [18] Wang Q H. Wear, 1997, 209; 316.
- [19] Vande Voort J, Bahadur S. Wear, 1995, 181-183; 212.
- [20] Wang Q, Xue Q, Liu W. Wear, 2000, 243; 140.
- [21] Han Y C. Tribology International, 1998, 31(12); 715.
- [22] 张人估, 冯显灿. 材料研究学报, 1996, 1; 1.
- [23] 张志毅, 张明秋. 复合材料学报, 1995, 12(4); 49.
- [24] 佟伟, 杨杰, 龙盛如. 化学研究与应用, 2002, 12; 718.
- [25] 颜红伟, 宁荣昌, 张秋禹. 塑料科技, 2001, 14(1); 9.
- [26] Lu X C, Wen S Z, Jin T. Wear, 1996, 193; 48.
- [27] 王新朋, 邓海金, 李明. 材料·工艺·设备, 2002, 9; 25.

- [28] 佟伟. 塑料工业, 2006, 34(4): 51.
- [29] Bahadur S. Wear, 2005, 258: 1411.
- [30] Cho M H. Wear, 2005, 258: 835.
- [31] Cho M H. Wear, 2005, 258: 1825.
- [32] Yu L G, Bahadur S. Wear, 1998, 241: 245.
- [33] 丛培红, 李同生. 润滑和密封, 1998, 4: 2.
- [34] 张秀菊, 陈鸣才. 广州化学, 1998, 3: 58.
- [35] Czichos H, Klafke D, Santner E, Woydt M. Wear, 1995, 190: 155.
- [36] 邵鑫, 刘维民, 薛群基. 材料科学与工程, 2001, 19 (4): 116.
- [37] 陈霖霖, 朱鹏. 复合材料学报, 2006, 23(3): 49.
- [38] 汪晓东. 机械工程材料, 2005, 29(11): 42.
- [39] 邱孜学. 高分子材料, 1997, 3: 39.
- [40] Sheiretov T, VmGlabbeekW, Cusano C. Tribology Transactions, 1995, 38(4): 914.
- [41] 邱孜学. 高分子材料, 1997, 4(4): 41.
- [42] West G H, Semort J M. Tribology, 1973, 5: 269.
- [43] 黄丽, 陈定宇. 北京化工大学学报, 1999, 26 (4): 27.
- [44] Jia J H, Zhou H D, Gao S Q, Chen J M. Materials Science and Engineering A, 2003, 356: 48.
- [45] 罗云霞, 曲建俊, 张志谦. 润滑和密封, 2001, 1: 26.
- [46] 曲建俊, 罗云霞. 材料科学与工艺, 2002, 10 (2): 152.
- [47] Cai H, Yan F Y, Xue Q J, Liu W M. Polymer Testing, 2003, 22: 875.
- [48] Cai H, Yan F Y, Xue Q J. Materials Science and Engineering A, 2004, 364: 94.
- [49] Larsen T ?, Andersen T L, Thorning B. Wear, 2006, dio: 10.1016/j.wear.2006.10.004.
- [50] Vasconcelos P V, Lino F J. Wear, 2006, 260: 30.
- [51] Zhang L C, Xiao K Q. Wear, 2006, 261: 806.
- [52] 石光, 章明秋, 容敏智, Friedrich K. 摩擦学学报, 2003, 23(3): 211.
- [53] Xian G J, Walter R, Hauptert F. Composites Science and Technology, 2006, 66: 3199.

Development of Research on Friction and Wear of High Performance and high Temperature Polymer Composites

DENG Xin¹, LI Du-xin¹, YANG Jun², WANG Jing²

(¹ State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Hu'nan Changsha 410083, China;

² Zhuzhou Times New Material Technology Co. LTD, Hu'nan Zhuzhou 412007, China)

Abstract: The development of research on friction and wear of high performance and high temperature polymer composites were introduced in this paper, including polytetrafluoroethylene (PTFE), poly (ether ether ketone) (PEEK), polyphenylenesulphide (PPS), polyimide (PI). The effects of different fillers on friction coefficient and wear rate of polymer composites were discussed, such as fibers, solid lubricant, inorganic compound and nano-particles. The results show that the fillers can improve tribological properties of polymer. And the interaction effect of different fillers can effectively reduce friction coefficient and wear rate of the composites.

Key words: High performance; High temperature polymer composites; Friction; Wear