第 14 卷 第 4 期 复 合 材 料 学 报 Vol. 14 No. 4
1997 年 10 月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA October 1997

玻璃纤维增强聚乙烯复合材料力学及摩擦性能的研究

黄金贵 王 琪 孔祥安* 张 鹰
(高分子材料工程国家重点实验室, 成都科技大学高分子研究所, 成都 610065)
(* 西南交通大学应用力学研究所, 成都 610031)

摘 要 本文制备了结构- 性能不同的纤维增强聚乙烯基复合材料, 研究了纤维含量及纤维取向对聚乙烯基复合材料力学性能和摩擦性能的影响。实验结果表明: 纤维含量及取向对玻纤增强的聚乙烯基复合材料的摩擦磨损性能影响较大。沿垂直纤维方向摩擦时磨损量最少, 沿平行玻纤方向摩擦时摩擦系数 μ 最低。玻纤含量为 30% 的聚乙烯基复合材料耐磨性好, 摩擦系数低, 综合力学性能优良, 是一种有应用前景的高分子抗磨材料。

关键词 聚乙烯基复合材料, 纤维增强, 摩擦, 磨损
中图分类号 V258, TH117

高密度聚乙烯和超高分子量聚乙烯, 由于分子结构规整, 具有特殊的摩擦学性能。前期工作中[1, 2], 我们报导了聚乙烯的材料特性如支链长度、分子量、结晶度、密度、硬度、强度、表面粗糙度等与摩擦系数的关系以及滚动和滑动摩擦过程中的工况条件如载荷、振动频率、振幅、速度、摩擦副接触方式等对聚乙烯基体树脂摩擦学性能的影响。由于聚乙烯的耐热性不高, 硬度低、对热比较敏感、易蠕变, 单一的聚乙烯材料往往难于满足受载、高速等特殊工况条件的要求, 往往需要通过共混复合进行改性。在前文中[3], 我们将高密度均聚聚乙烯(PE-2100J) 与不同形态、性质的填料共混复合制备了结构- 性能谱不同的聚乙烯系列复合材料, 考察了填料的形态、性质对聚乙烯基复合材料力学性能和摩擦学性能的影响。结果表明: 填料的形态、性质和含量影响复合材料的力学性能, 进而影响其摩擦磨损性能。当填料含量相同时, 纤状填料对材料力学性能和摩擦学性能改善最明显, 而层状填料的改性效果则较差。各向同性填料改性的聚乙烯基复合材料具有相近的摩擦系数和磨损性能。

本文则进一步研究纤维增强聚乙烯基复合材料的摩擦磨损性能, 考虑到玻璃纤维的价格比较便宜, 具有不燃、耐腐蚀, 拉伸强度高, 同时, 玻纤还具有在沿纤维方向的热膨胀系数小, 即使受温度的变化, 尺寸稳定性也好等特点, 所以以玻璃纤维作为增强材料, 重点研究纤维含量及取向对聚乙烯基复合材料力学性能和摩擦学性能的影响。

收修改稿、初稿日期: 1996-07-29, 1996-04-04
得到高分子材料工程国家重点实验室基金、四川省科委基金资助

1 实验部分

1.1 原 料

高密度聚乙烯: 2100J, 日本三井油化产品

E 玻璃纤维: 成都玻璃纤维厂

硅烷偶联剂: KH550

1.2 复合材料的制备

不同纤维含量样品:

E 玻璃纤维经 320 ℃灼烧至金黄色以除去表面油污, 切成 8～12mm 的短切玻纤。将玻纤及填料用 1% 的 KH550 乙醇溶液(1: 1) 进行表面处理后, 在 HAAKE 转矩流变仪上与 PE 进行共混, 混料温度 190～200℃, 混料时间 10min.。混好的物料经模压成型制得测试冲击、拉伸及摩擦磨损性能的试样。

纤维取向样品:

将 PE 压制成 0.5～1mm 的薄膜, 再将经表面处理过的长玻璃纤维沿同一方向均匀平铺于多层 PE 薄膜间, 然后再模压成型, 制取测试冲击、拉伸及摩擦磨损性能的试样。

1.3 性能测试

用 Ceast 仪器化冲击试验机按 GB11843-90 测定试样的冲击强度。用 INSTRON 4302 万能材料试验机按 GB1040-86 测试试样的抗拉强度, 拉伸速度 50mm/min. 用邵氏硬度计按 GB531-83 测试试样的邵氏硬度。用 SRV 摩擦磨损试验机测试复合材料/不锈钢的滑动摩擦系数。测试条件为: 载荷 226N, 频率 50HZ, 振幅 2mm, 时间 1h. 用 MHK-500 型环块磨损实验机测试材料的摩擦系数及抗磨性。测试条件为: 负荷 74.6N, 时间 1h. 用读数显微镜测定磨痕宽度以表征材料的抗磨性。

2 结果与讨论

2.1 纤维取向对聚乙烯复合材料力学性能及摩擦性能的影响

2.1.1 对力学性能的影响

表 1 为纤维取向对复合材料力学性能的影响。可以看出, 复合材料在沿纤维方向上的拉伸强度及模量最大, 而在垂直于纤维方向上则相对较低。30% 长玻纤平铺增强的聚乙烯复合材料, 沿平行纤维方向的拉伸强度是沿垂直纤维方向的 12 倍, 而后者的断裂伸长却是前者 2.5 倍。说明沿纤维方向拉伸强度主要由玻纤承担, 而横向拉伸强度则主要由基体以及基体与纤维界面间的强度确定, 若界面强度小于基体强度, 则横向拉伸强度取决于界面强度。由表 1 知复合材料沿垂直纤维方向的拉伸强度比聚乙烯基体树脂的要低, 说明横向拉伸强度主要由基体与纤维间的界面强度确定, 与纤维强度无关[4]。

表 1 纤维取向对复合材料力学性能的影响

复合材料组成及取向	冲击强度 / J·m⁻¹	拉伸强度 / MPa	杨氏模量 / MPa	断裂伸长 / %
PE	17.1	17.2	642	879
30% 长玻纤/PE, //	—	111.5	6070	2.5
30% 长玻纤/PE, ⊥	635.1	9.56	975	6.3

2.1.2　对摩擦性能的影响

P·R·Dufour 等[5]曾研究了玻纤填充液晶聚合物沿不同纤维方向的摩擦磨损行为, 观察到沿垂直纤维方向(⊥)的摩擦系数比沿平行方向(∥)的摩擦系数低, 且在纤维垂直方向上磨损速率亦较低。表 2 为纤维取向对复合材料摩擦磨损行为的影响, 可见, 玻纤增强聚乙烯复合材料在沿垂直纤维方向摩擦时, 磨损量最少。这与文献的报道基本一致。但我们的实验中沿平行于玻纤方向摩擦时的摩擦系数要稍低于沿垂直方向的摩擦系数, 这是由于摩擦过程中在剪切应力作用下聚乙烯长链分子发生了沿纤维方向取向, 沿取向方向摩擦时的摩擦系数通常比较低[6]。

表 2　纤维取向对复合材料摩擦磨损行为的影响

纤维取向	摩擦系数	磨痕宽度 / mm
∥方向	0.20	2.28
⊥方向	0.21	1.90

2.2　纤维含量对聚乙烯基复合材料力学性能及摩擦性能的影响

2.2.1　纤维含量对聚乙烯基复合材料力学性能的影响

图 1 为玻纤增强 HDPE 复合材料的冲击强度与玻纤含量的关系。可见, 随玻纤含量增加, 冲击强度明显增大。在含量为 30% 左右, 冲击强度最高。而当玻纤含量超过 30% 时, 冲击性能反而下降。

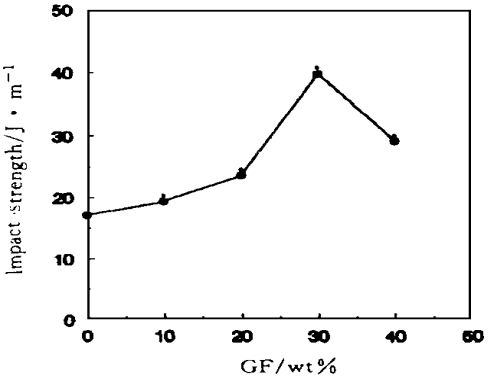


图 1　GF/HDPE 复合材料冲击性能与纤维含量的关系

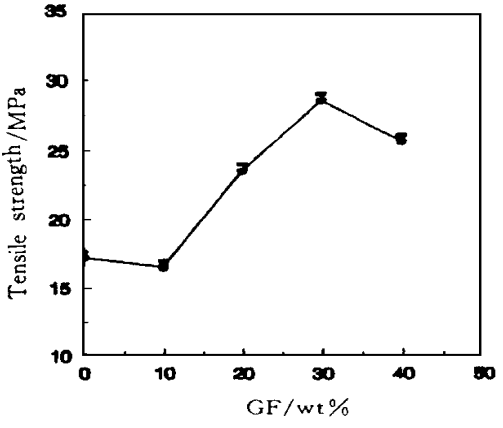


图 2　GF/HDPE 复合材料拉伸强度与纤维含量的关系

图 2 是玻纤含量对复合材料拉伸强度的影响。当玻纤含量低于临界浓度(约 12%)时, 拉伸强度略有下降[4]。随玻纤含量增加, 拉伸强度明显上升。含量约 30% 时, 拉伸强度最大, 而后又呈下降趋势。

由图 1 和图 2 可见, 当玻纤含量大于 30% 时, 复合材料的冲击、拉伸性能都呈下降趋势, 这主要是由于玻纤含量过高时, 高含量的纤维在聚乙烯基体树脂中可能出现纤维间的堆积, 产生局部缺陷, 使得材料的力学性能降低所致。

图 3 为 GF/HDPE 复合材料的模量与玻纤含量的关系。玻纤含量增加, 材料的模量显著增加。

图 4 为 GF/HDPE 复合材料硬度与玻纤含量的关系。可见, 加入玻纤使复合材料硬度明显增大, 且硬度随玻纤含量的增大有呈线性增加的趋势。

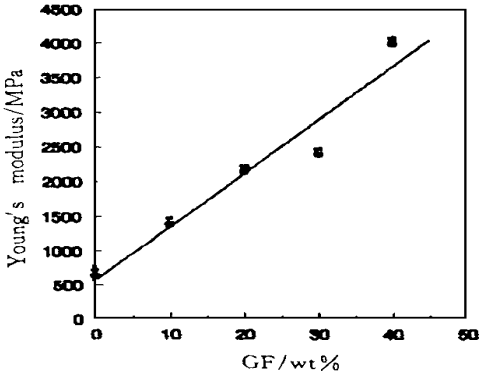


图 3 GF/HDPE 复合材料模量与纤维含量的关系

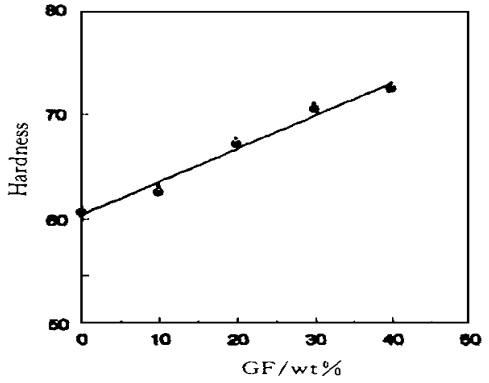
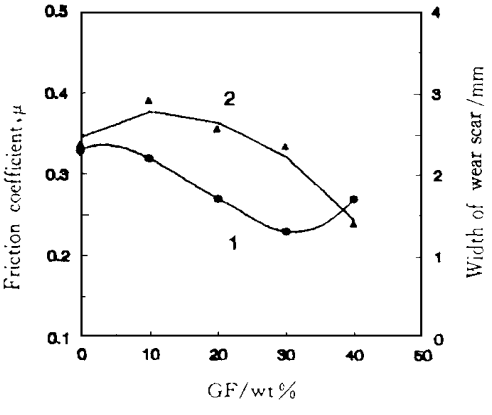


图 4 GF/HDPE 复合材料硬度与纤维含量的关系

2.2.2 纤维含量对聚乙烯复合材料摩擦性能的影响

图 5 为GF/HDPE 复合材料摩擦磨损性能与玻纤含量的关系。可见, 加入玻纤后, 材料摩擦系数明显降低, 玻纤含量约 30% 时, μ 最低(曲线 1)。同时, 加入玻纤还改善了材料的抗磨性(曲线 2)。

滚动摩擦过程中, 聚合物在固- 固接触时受到剪切而产生的摩擦与聚合物本体试样形变时的断裂行为是密切相关的。粘着理论认为, 聚合物/ 不锈钢的界面粘着非常牢固, 剪切一般发生在聚合物基体上, 而不发生在界面上, 聚合物的整体强度决定了摩擦力的大小[7]。加入玻纤后, 材料的整体强度增大, 因而 μ 下降, 磨损减少。



1—— 摩擦系数 2——磨痕宽度

图 5 GF/HDPE 复合材料摩擦磨损性能与纤维含量的关系

2.2.3 复合材料力学性能与摩擦特性的关系

图 6 为 GF/HDPE 复合材料摩擦系数与模量的关系, 总的说来, 摩擦系数随模量增加呈下降趋势。

复合材料摩擦系数与硬度的关系如图 7, 总的趋势是, 摩擦系数随硬度增加明显降低。根据摩擦的分子机械理论, 摩擦力具有双重特性, 即克服对偶表面分子相互作用的连接力和使表层形状改变的阻力。$F = F_{分} + F_{机}$, 摩擦系数可表示为[8]

$$\mu = \mu_{molecu} + \mu_{tech} = \frac{\tau_0 A_r}{P} + \beta + K_x \frac{\overline{h}}{r} \tag{1}$$

式中 τ_0 为分子粘附时的剪切阻力, A_r 为实际接触面积, P 为法向载荷, β 为和摩擦的分子分力有关系数, h 为微凸体嵌入深度, r 为微凸体曲率半径。K_x 为与摩擦机械分力有关的数。对于

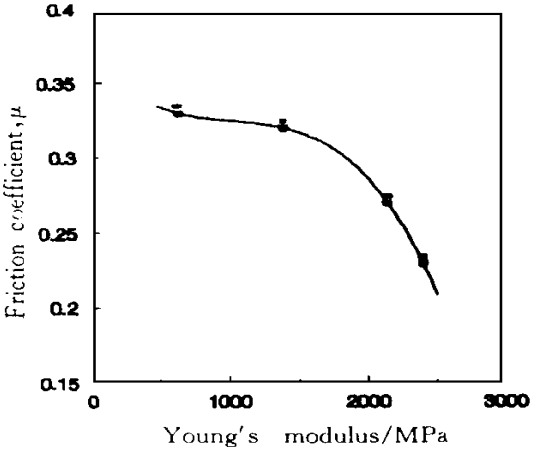


图 6　复合材料摩擦系数与模量的关系

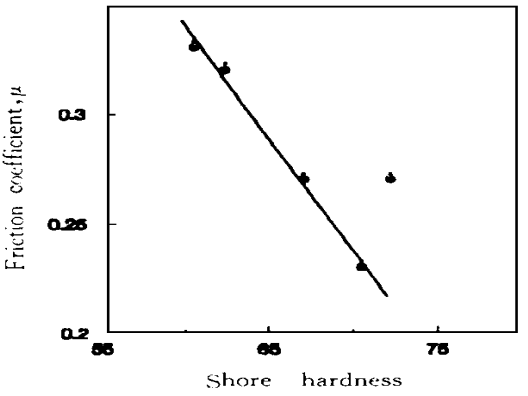


图 7　复合材料摩擦系数与硬度的关系

两个面接触, 实际接触面积可近似表示[9]:

$$A_r = \left(\frac{A \cdot r}{CE^2 R_{ck} P}\right)^{1/3} \tag{2}$$

式中, A 为表观接触面积, C 为常数, R_{ck} 为材料表面粗糙度, E 为材料弹性模量。将(2)代入(1)式有

$$\mu = \tau_0 \left(\frac{A \cdot r}{CE^2 R_{ck} P}\right)^{1/3} + \beta + K_x \frac{\overline{h}}{r} \tag{3}$$

当摩擦副的材料特性以及对偶件的表面粗糙度一定时, β, h, r, R_{ck} 等可看作常数, 而当试验条件一定时, K_x, A, P 等也基本确定, 式(3)可写为

$$\mu = \left(\frac{A \cdot r}{CR_{ck} P}\right)^{1/3} \frac{\tau_0}{E^{2/3}} + \left(\beta + K_x \frac{\overline{h}}{r}\right)$$

其中, $\left(\frac{A \cdot r}{CR_{ck} P}\right)^{1/3}$ 为常数, 材料表面分子的剪切阻力 τ_0 可以材料的抗拉强度 σ 乘一系数 k 进行近似描述, 合并 $k\left(\frac{A \cdot r}{CR_{ck} P}\right)^{1/3}$ 以 B 表示; $\left(\beta + K_x \frac{\overline{h}}{r}\right)$ 为常数, 以 C 表示; 由此, 式(3)近似写为

$$\mu = B \frac{\sigma}{E^{2/3}} + C \tag{4}$$

式中 B、C 为系数, σ 为拉伸强度, E 为模量。

可见在压力 P 与 R_{ck} 一定情况下摩擦系数随材料模量 E 增加而下降。微凸体嵌入深度 h 亦与材料硬度有关, 当材料硬度增加, 微凸体嵌入深度减小, 因而 μ 随材料硬度增加而下降。

根据摩擦磨损理论, 材料的摩擦系数 μ 可用式(4)表示, 而磨损量我们可以表示为[10]

$$W = K \frac{\mu}{H \cdot \sigma_i} \tag{5}$$

式中 H 为材料硬度, σ_i 为抗冲强度, K 为常数。

以 μ 对 $(\sigma/E^{2/3})$、W 对 $[\mu/(H \cdot \sigma_i)]$ 作图如图 8 和图 9, 表明, 当玻纤含量小于 30% 时, GF/HDPE 复合材料的摩擦系数和磨损量符合上述关系。纯的 PE 以及 40% GF/PE 则与上述

模型有些出入,这是由于基体树脂与复合材料在材料结构及性能方面的不同,而当玻纤含量过高时,材料内部亦可能出现不均匀或缺陷所致,可以认为,对于比较均匀的体系或同一系列的复合材料,上述模型还是适用的。有关这种出入或偏差的原因,还有待于进一步的研究。

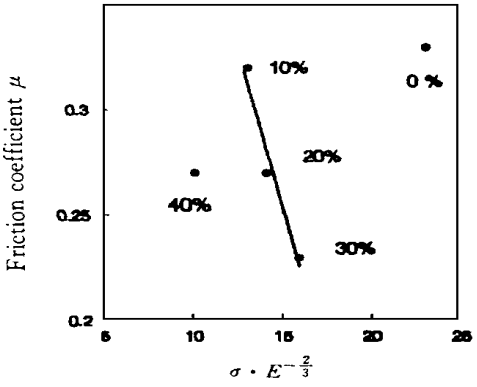


图 8 摩擦系数与 $\sigma/E^{2/3}$ 的关系

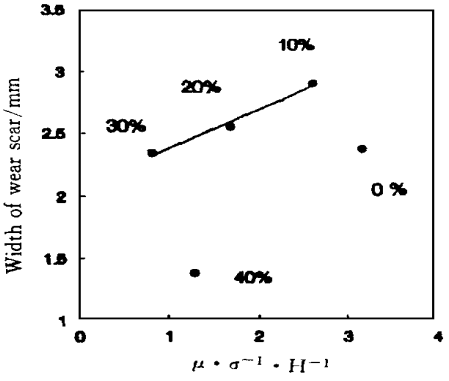


图 9 磨损量与摩擦系数、材料强度、及硬度的关系

综上所述,30% 玻纤增强的 GF/HDPE 复合材料具有优良的力学性能和摩擦性能,是一种很有应用前景的高分子抗摩材料。

3 结 论

对于玻纤增强的聚乙烯复合材料,纤维含量及取向对材料摩擦磨损性能的影响较大,在沿垂直纤维方向摩擦时,磨损量最少;而在沿平行玻纤方向摩擦时的摩擦系数 μ 最低。复合材料的摩擦特性与力学性能间存在一定的关系。30% 玻纤增强的聚乙烯复合材料具有优良的综合力学性能和摩擦学性能,是一种具有广阔应用前景的高分子抗摩材料。

参 考 文 献

1 Qi Wang, Xiangan Kong, Lushan Zhu, *et al*. J Appl Poly Sci, 1995, 58: 903～910
2 王琪, 孔祥安, 朱露山, 等. 高分子材料科学与工程, 1995, (6): 119～123
3 黄金贵, 王琪, 孔祥安, 等. 摩擦学学报, 1997, 14 (1): 53～59
4 谢尔登 R P 著, 陈义方译. 聚合物复合材料, 北京: 轻工业出版社, 1989. 第一、三章
5 Dufour P R, Gee A W J, Kingma J A, Mens J W M. Wear, 1992, 156: 85～100
6 Yukisaburo Yamaguchi. Tribology of Plastics Materials, Elsevier Science Publishers, B. V. 1990. 27～52
7 高彩桥, 刘家俊. 材料的粘着磨损与疲劳磨损, 北京: 机械工业出版社, 1989. 第四章
8 中国机械工程学会摩擦学会《润滑工程》编写组, 润滑工程, 北京: 机械工业出版社, 1986. 第二、五章
9 戴维杰. 摩擦学基础, 上海: 上海科学技术出版社, 1984. 41～43
10 黄金贵, 周国民. 机械, 1995, 22 (4) 增刊: 24～26

STUDY ON THE MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF GLASSFIBER REINFORCED POLYETHYLENE COMPOSITES

Huang Jingui　Wang Qi　Kong Xiangan*　Zhang Ying
(State Key Laboratory of Polymer Materials Engineering, Polymer Research Institute, Chengdu University of Sci & Tech, Chengdu 610065)
(* Institute of Applied Mechanics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Abstract　Tribological behavior of glass fiber reinforced HDPE (GF/HDPE) composites was studied, focusing on the effects of the content and orientation of glassfibre on the mechanical and tribological properties of the polyethylene based composites. Experimental results showed that fiber content and orientation have great influences on the tribological behavior of the composite. The wear loss is the least in the direction vertical to fibers orientation, and the friction coefficient is lower in the direction parallel with fibers orientation. HDPE composite reinforced by 30% glassfiber has good comprehensive mechanical and tribological properties, which can be a good candidate for the tribological applications under severe conditions.

Key words　polyethylene based composite, fiber reinforcement, friction wear

---

(上接第 18 页)

为配合台湾的航太政策,汉翔公司 1996 年 7 月 1 日起改属经济部,先后与外国厂商签约搞合作,推动 MD- 95 客机、S- 92 直升机、572K 汽电共生引擎等工业合作方案。

经多年大量资源投入,汉翔公司已具备航空工业最关键的总体技术,据称系 "亚洲少数具有全方位能量发展航太工业厂家之一,不仅是国家重要的技术资产,也是国内航太产业的技术咨询者,… "。

该公司积累了 600 多架飞机制造的经验,有关制造工艺技术项目有:①数控机械加工,②铝钣金成型,③钛合金热成型,④复合材料制作及热成型,⑤有机玻璃成型,⑥喷丸处理,⑦铝合金及钛合金化学铣蚀,⑧全机组装、测试、维修。

中(山)科(学)院航空研究所简介

航空研究所早于 1939 年成立于四川成都,1949 年去台后隶属 "空军总部 ",1983 年改隶属 "中山科学研究院 "。几十年来,航空研究所一直在 "国防航空工业上担任极重要之角色 ",在各项航空科技上均有重大贡献与突破。改制后该所继续配合汉翔公司专攻研发工作,目前拥有员工 750 人,90% 以上均为专业性技术人员。除继续投入台湾航空科技发展外,还把目标拓展到 "国防航空研发领域 "。此外,在短期内将努力争取通过 ISO 9001 及 ISO 14000 认证。

目前,航空研究所可提供的服务有 7 大项:

①风洞试验,②结构试验与分析,③发动机高空与地面试验,④航电量测,⑤航空材料研制试验,⑥接受经济部 "科专 "计划的委托,⑦将科技成果转移到民间。多年来,在复合材料产业合作方面成果卓著,有无人飞行载具、防弹车、复合材料补强混凝土,电波天文望远镜天线系统等。

(下转第 41 页)