

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.01.021

Gamma 辐照及加速老化对 PE-UHMW/GO 纳米复合材料干摩擦磨损性能的影响

黄国栋^{1,2}, 陆忠华¹, 张韬¹, 杨飞^{1,2}, 黄晓徐¹, 朱耀武¹, 吕伟文¹, 赵永武²

(1. 无锡职业技术学院机械技术学院, 江苏无锡 214121; 2. 江南大学机械工程学院, 江苏无锡 214122)

摘要: 采用超声分散, 球磨混合和热压成型制备超高分子量聚乙烯 (PE-UHMW)/氧化石墨烯 (GO) 纳米复合材料, 并对其进行 Gamma 辐照和加速老化处理。采用万能材料试验机测试复合材料的压缩强度, 采用摩擦磨损试验机测试复合材料的干摩擦磨损性能。结果表明, 辐照的 PE-UHMW/GO 的压缩强度比未辐照的 PE-UHMW/GO 增加 6.109%, 辐照 + 加速老化的 PE-UHMW/GO 的压缩强度比辐照的 PE-UHMW/GO 下降 14.747%。GO 和辐照增加了 PE-UHMW 的平均摩擦系数, 辐照 + 加速老化的 PE-UHMW/GO 的平均摩擦系数最大, 其值为 0.168。添加 GO 和辐照降低了 PE-UHMW 的平均磨损率, 辐照的 PE-UHMW/GO 的平均磨损率最低, 为 $1.666 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$; 辐照 + 加速老化增加了 PE-UHMW 的平均磨损率, GO 能抑制 PE-UHMW 磨损性能降低。辐照与辐照 + 加速老化的 PE-UHMW/GO 的磨损形式主要是疲劳磨损, 而辐照 + 加速老化的 PE-UHMW 的磨损形式主要为磨粒磨损。

关键词: 超高分子量聚乙烯; 氧化石墨烯; Gamma 辐照; 加速老化; 摩擦磨损性能

中图分类号: TQ325 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)01-0121-05

Influences of Gamma Irradiation and Accelerated Aging on Drying Friction and Wear Properties of PE-UHMW/GO Nanocomposites

Huang Guodong^{1,2}, Lu Zhonghua¹, Zhang Tao¹, Yang Fei^{1,2}, Huang Xiaoxu¹, Zhu Yaowu¹, Lyu Weiwen¹, Zhao Yongwu²

(1. School of Mechanical Technology, Wuxi Institute of Technology, Wuxi 214121, China;

2. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract : Ultrahigh molecular weight polyethylene (PE-UHMW)/graphene oxide (GO) nanocomposite was prepared by ultrasonic dispersion, ball-milling mixing and hot-pressing molding. PE-UHMW/GO was irradiated by Gamma ray in vacuum and its aging was accelerated in air. The compressive strengths of PE-UHMW/GO were studied by universal material testing machine. The drying friction and wear properties of the nanocomposite were investigated. The experimental results show the compressive strength of irradiated PE-UHMW/GO increases by 6.109% compared with unirradiated PE-UHMW/GO, and the compressive strength of irradiated + accelerated aged PE-UHMW/GO decreases by 14.747% compared with irradiated PE-UHMW/GO. GO and irradiation increase the average friction coefficient of PE-UHMW, and the average friction coefficient of irradiation + accelerated aged PE-UHMW/GO is the largest and its value is 0.168. GO and irradiation reduce the average wear rate of PE-UHMW, and the average wear rate of irradiated PE-UHMW/GO is the lowest, which is $1.666 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$. Irradiation + accelerated aging increase the average wear rate of PE-UHMW. But GO can inhibit the reduction of PE-UHMW wear performance. The wear form of irradiated PE-UHMW/GO and irradiated + accelerated aged PE-UHMW/GO is mainly fatigue wear, while the wear form of irradiated + accelerated aged PE-UHMW is mainly abrasive wear.

Keywords : ultrahigh molecular weight polyethylene ; graphene oxide ; gamma irradiation ; accelerated aging ; friction and wear property

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51675232, 51605280), 无锡职业技术学院教授、博士课题 (BT2017-01), 无锡职业技术学院校科技创新团队项目 (30593118001)

通讯作者: 张韬, 副教授, 博士, 从事表面工程研究 E-mail : Zhangt@wxit.edu.cn

收稿日期: 2018-10-20

引用格式: 黄国栋, 陆忠华, 张韬, 等. Gamma 辐照及加速老化对 PE-UHMW/GO 纳米复合材料干摩擦磨损性能的影响 [J]. 工程塑料应用, 2019, 47(1) : 121-125, 131.

Huang Guodong, Lu Zhonghua, Zhang Tao, et al. Influences of gamma irradiation and accelerated aging on drying friction and wear properties of PE-UHMW/GO nanocomposites[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(1) : 121-125, 131.

超高分子量聚乙烯 (PE-UHMW) 是一种性能优异的人工关节假体材料,被公认为关节置换术中关节臼的金标准^[1]。人工关节假体在长期服役过程中,由于磨损作用产生 PE-UHMW 细小颗粒并引起骨质溶解^[2],产生人工关节假体松动,最终导致失效。因此,增强 PE-UHMW 的耐磨性能,对于提高人工关节假体的使用寿命有重要的意义。

目前,有两种方法能够增强 PE-UHMW 的耐磨性能:一种是填充纳米粒子,另一种是用 Gamma 或电子束辐照。填充的粒子主要是性能优异的纳米粒子,如多壁碳纳米管^[3]、氧化铝^[4]、石墨烯^[5]等。氧化石墨烯 (GO) 是一种具有优异力学性能和润滑性能的二维碳纳米材料^[6-7]。GO 填充到 PE-UHMW 中能改善 PE-UHMW 的摩擦性能^[8-9], Pang Wenchao 等^[10-11] 研究 PE-UHMW/GO 纳米复合材料的力学性能和摩擦性能时发现,GO 在 PE-UHMW/GO 纳米复合材料中的最优质量分数为 5%。

辐照一方面对 PE-UHMW 起到消毒作用,另一方面能增强其耐磨性能。医用 PE-UHMW 一般采用 Gamma 射线辐照。辐照过程中,PE-UHMW 的分子链发生断裂,同时发生交联结合,提高了材料的耐磨性能;但辐照的 PE-UHMW 中含有残留的自由基,易于与氧发生氧化反应,导致分子链断裂,降低了 PE-UHMW 的耐磨性能,最终影响人工关节假体的使用寿命。为了评估氧化对 PE-UHMW 性能的影响,一般采用加速老化的方法。

PE-UHMW/GO 复合材料具有优良的耐磨性,但如果它在人工关节假体中使用,也需进行 Gamma 辐照处理。辐照处理的 PE-UHMW/GO 复合材料的磨损性能及加速老化处理后的磨损性能,在公开文献中报道较少。笔者将采用 Gamma 辐照和加速老化处理 PE-UHMW/GO 纳米复合材料,在干摩擦情况下,考察 Gamma 辐照及加速老化状态下 PE-UHMW/GO 纳米复合材料的摩擦磨损性能,为提高其使用寿命提供理论与实验依据。

1 实验部分

1.1 主要原材料

GO:采用改良 Hummer 方法^[12]制备;

PE-UHMW 粉末:分子量为 5×10^6 g/mol,上海联乐化工科技有限公司。

1.2 主要仪器与设备

摩擦磨损试验机:MFT-5000 型,美国 RTEC 公

司;

场发射扫描电子显微镜 (SEM):MERLIN Compact 型,德国蔡司公司;

三维形貌仪:MFD-D 型,美国 RTEC 公司;

万能材料试验机:WES-100B 型,济南恒瑞金试验机有限公司。

1.3 试样制备

取 0.5 g GO 溶于无水乙醇中,在超声波作用下分散 30 min,然后加入 99.5 g PE-UHMW 粉末,继续分散 30 min。将混合的悬浊液置于 60℃ 下加热烘干。将烘干的混合粉末在高速旋转的球磨机中以速度为 400 r/min 混合搅拌 240 min,获得分散均匀的粉末。取一定量的混合粉末置于模具中,先采用 5 MPa 对其预压 15 min,然后在 200℃ 下加热 120 min,紧接着将加热的样品放于空气中,立即加压 10 MPa,直至温度降到室温。将样品切割成若干小块,用铝箔真空包装,在 Gamma 射线中辐照,剂量为 100 kGy。将部分辐照的试样,置于 80℃ 下加热老化 21 d。

1.4 性能测试

压缩强度:参考 GB/T 1041-2008 在万能试验机上测试。试样为非标准件,尺寸为 15.8 mm × 6.2 mm × 10.0 mm,测试速度为 2 mm/min,试样的压缩量(应变)为 25%,每种试样重复三次,最终结果取平均值。

摩擦性能:在摩擦磨损试验机上测试。实验前,先将试样的表面抛光,然后用乙醇清洗干净,选用模块为往复模块,实验参数为:往复频率 1 Hz,行程 10 mm,载荷 15 N,运行时间 60 min。每种试样重复三次,最终结果取平均值。按文献[13]中的公式计算摩擦系数,按文献[11]中的公式计算磨损体积,按文献[14]中的公式计算平均磨损率。

SEM 分析:用 SEM 观察试样磨损表面的形貌。

2 结果与讨论

2.1 压缩强度分析

图 1 为不同试样的压缩强度。

由图 1 可以看出,PE-UHMW 的压缩强度为 39.210 MPa,添加 GO 后,PE-UHMW/GO 的压缩强度为 40.919 MPa,比 PE-UHMW 增加了 4.359%,表明 GO 能提高 PE-UHMW 的压缩强度。Gamma 射线辐照显著提高了 PE-UHMW/GO 的压缩强度,辐照的 PE-UHMW/GO 的压缩强度为 43.419 MPa,与 PE-UHMW/GO 的压缩强度

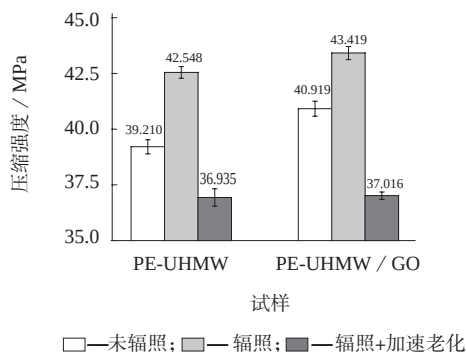


图1 不同试样的压缩强度

40.919 MPa 相比提高了 6.109%。Gamma 射线辐照促使分子链发生交联反应,提高了 PE-UHMW 的结晶度^[16],同时,提高了 GO 与 PE-UHMW 基体的结合力,因此辐照的 PE-UHMW /GO 的压缩强度比未辐照的 PE-UHMW /GO 高。辐照 + 加速老化的 PE-UHMW /GO 的压缩强度为 37.016 MPa,比辐照的 PE-UHMW /GO 下降了 14.747%,表明加速老化降低了材料的压缩强度。

2.2 摩擦系数分析

图2为不同试样的摩擦系数随时间变化的曲线,图3为不同试样的平均摩擦系数。

由图2可以发现,在时间 0~600 s 内,摩擦系数随着时间的延长逐渐增大;当时间超过 600 s 后,

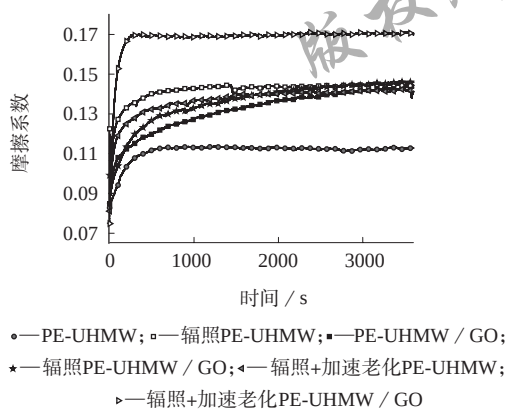


图2 不同试样的摩擦系数随时间变化的曲线

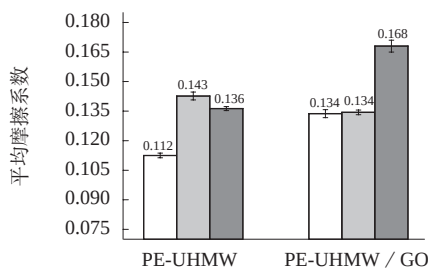


图3 不同试样的平均摩擦系数

摩擦系数逐渐趋于稳定。

由图3可知, PE-UHMW 的平均摩擦系数最小,其值为 0.112,与文献[15]的研究结果基本一致。当 GO 添加到 PE-UHMW 中后,其平均摩擦系数为 0.134,比 PE-UHMW 的平均摩擦系数增加了 19.64%。GO 表面有大量的含氧官能团,其表面易产生褶皱,GO 填充到 PE-UHMW 后,增加了材料的表面粗糙度,从而引起平均摩擦系数增加。辐照的 PE-UHMW 的平均摩擦系数为 0.143,比 PE-UHMW 增加了 27.67%。Gamma 射线辐照过程中分子链发生交联反应,提高 PE-UHMW 的交联度和结晶度,PE-UHMW 分子链之间的相互作用增强,相互之间的流动性下降,导致平均摩擦系数提高。辐照 + 加速老化的 PE-UHMW 的平均摩擦系数比辐照的 PE-UHMW 的降低了 0.007。加速老化导致 PE-UHMW 中大量分子链发生断裂,分子链的流动性提高。摩擦过程中对磨偶在摩擦运动中所受的阻力减小,因此平均摩擦系数减小。辐照 + 加速老化的 PE-UHMW 的平均摩擦系数比纯的 PE-UHMW 高 0.024。在摩擦过程中,辐照 + 加速老化的 PE-UHMW 表面产生大量的磨粒,对磨偶、试样和磨粒形成了三体磨损,增大了摩擦系数。辐照 + 加速老化的 PE-UHMW /GO 的平均摩擦系数最大,其值为 0.168。辐照 + 加速老化降低了 PE-UHMW 和 GO 之间的结合力,GO 在基体 PE-UHMW 中对力的承载、转移、传递的能力显著降低,在往复摩擦循环力作用下,GO 和基体 PE-UHMW 之间容易出现应力集中,产生力分布不均匀,导致 PE-UHMW 的表面粗糙度增加,平均摩擦系数显著增加。

2.3 磨损率分析

图4为不同试样的平均磨损率。

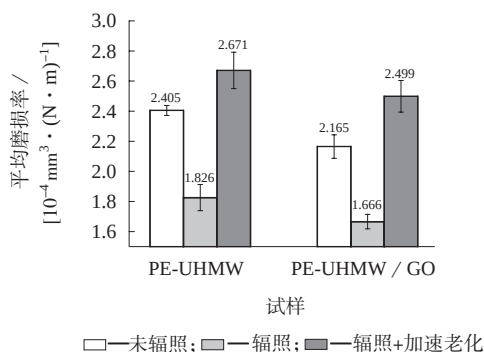


图4 不同试样的平均磨损率

由图4可以发现, PE-UHMW /GO 的平均磨损率比 PE-UHMW 低 $0.240 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$,表明 GO 能显著降低 PE-UHMW 的磨损率。二维结构的

GO 具有较大的表面积、良好的分散性和优异的力学性能。GO 填充到 PE-UHMW 中,在基体中呈空间网状分布,在摩擦过程中,试样承载往复的循环应力的作用,基体中 GO 通过自身二维结构把力扩散出去,增强了基体抗应力的能力,提高了基体的抗磨损的能力。

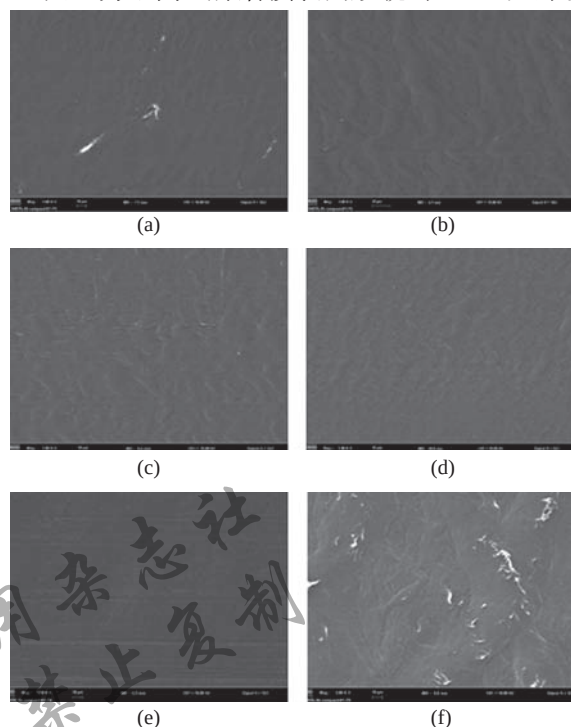
辐照的 PE-UHMW 的平均磨损率比 PE-UHMW 降低了 $0.579 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$, 辐照的 PE-UHMW/GO 比 PE-UHMW/GO 降低了 $0.499 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$, 表明 Gamma 射线辐照能显著降低试样的平均磨损率,即辐照能提高试样耐磨损的性能。Gamma 射线辐照后,线型结构的 PE-UHMW 分子链转变成空间三维交联结构,提高了压缩性能,有效的提高了 PE-UHMW 基体抵抗塑性变形的能力,直接表现在平均磨损率下降。辐照的 PE-UHMW/GO 的平均磨损率比辐照的 PE-UHMW 降低了 $0.16 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$, 辐照的 PE-UHMW/GO 的磨损率最低,其值为 $1.666 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$, 表明 Gamma 射线辐照与 GO 能协同降低平均磨损率。Gamma 辐照过程能放出高能粒子并与 GO 相互作用,在其表面产生大量的缺陷和微孔,出现了未成对电子;另一方面,辐照的 PE-UHMW 中出现了大量的自由基,GO 中未成对电子和 PE-UHMW 的自由基有可能发生反应,即 PE-UHMW 的分子链有可能嫁接到 GO 上,增强了 PE-UHMW 与 GO 之间的结合力,提高了试样的压缩性能,增加了抵抗塑性变形的能力。因此,辐照的 PE-UHMW/GO 的平均磨损率最低。

辐照 + 加速老化的 PE-UHMW 的平均磨损率最高,其值为 $2.671 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$, 辐照 + 加速老化的 PE-UHMW/GO 的平均磨损率次之,其值为 $2.499 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$, 比前者低 $0.172 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$, 表明辐照 + 加速老化增加了试样的平均磨损率,使试样的耐磨性下降,GO 在一定程度上抑制 PE-UHMW 基体的磨损。辐照 + 加速老化过程促使 PE-UHMW 的自由基与氧气发生反应,生成含酮类氧化物,降低了压缩强度,在摩擦过程中,试样在往复应力的作用下,产生比较大的磨损率。在 PE-UHMW/GO 中,GO 在 PE-UHMW 中均匀分布,在加速老化过程中,二维结构的 GO 对氧气有一定的阻隔作用,降低了氧气在基体中扩散的深度和氧化的程度。因此,辐照 + 加速老化的 PE-UHMW/GO 的平均磨损率比辐照 + 加

速老化的 PE-UHMW 低。

2.4 磨损形貌分析

图 5 为不同试样磨损表面形貌的 SEM 照片。



a—PE-UHMW ; b—PE-UHMW /GO ; c—辐照的 PE-UHMW ;
d—辐照的 PE-UHMW /GO ; e—辐照 + 加速老化的 PE-UHMW ;
f—辐照 + 加速老化的 PE-UHMW /GO

图 5 不同试样磨损表面形貌的 SEM 照片

由图 5 可以看出, PE-UHMW 磨损表面比较光滑 (图 5a),这与其摩擦系数较低的实验结果是一致的。PE-UHMW 的磨损表面出现了薄片剥落和疲劳裂纹现象,所以它的磨损形式主要为疲劳磨损和粘附磨损。PE-UHMW/GO 的表面出现了高低起伏波纹状的磨痕 (图 5b),其方向与对磨偶运动方向互相垂直,在磨损表面还观察到少量的犁沟现象,属于疲劳磨损的现象。比较 PE-UHMW 和 PE-UHMW/GO 的磨损表面,可以发现 PE-UHMW/GO 的磨损表面比 PE-UHMW 粗糙,表明它的摩擦系数比 PE-UHMW 大,这与实验结果是一致的。

辐照的 PE-UHMW 的磨损表面有波纹状的磨痕 (图 5c),同时还有比较深的犁沟,是疲劳磨损的主要表现形式。辐照的 PE-UHMW/GO 的磨损表面出现波纹状的磨痕和少量轻微的划痕 (图 5d),属于疲劳磨损的现象。辐照的 PE-UHMW/GO 比辐照的 PE-UHMW 具有更少的犁沟,并且波纹的粗细程度和范围大小比 PE-UHMW/GO 和辐照的 PE-UHMW 的细和小,表明辐照和 GO 共同作用,降低

了 PE-UHMW/GO 疲劳磨损的程度,显著地增强了耐磨损性能。

辐照 + 加速老化的 PE-UHMW 磨损表面出现大量的犁沟现象(图 5e)。加速老化促使 PE-UHMW 分子链断裂成短分子链,降低了其整体力学性能,与对磨偶进行磨损实验时,试样表面易产生大量磨粒,形成磨粒磨损,随着磨粒的增加,表面形成比较深的犁沟。在加速老化作用下,GO 与 PE-UHMW 的结合力下降,在往复循环力作用下,试样表面容易产生高低起伏不平,并伴有薄 PE-UHMW 片被撕下。辐照 + 加速老化的 PE-UHMW/GO 的磨损表面最粗糙(图 5f),其摩擦系数也就越大,这与实验结果是一致的。辐照 + 加速老化的 PE-UHMW/GO 的磨损形式为疲劳磨损。

3 结论

(1) 添加 GO 使 PE-UHMW 的压缩强度增加了 4.359%,辐照的 PE-UHMW/GO 压缩强度比 PE-UHMW/GO 增加了 6.109%,辐照 + 加速老化的 PE-UHMW 的压缩强度比辐照的 PE-UHMW 降低了 14.747%。

(2) 在干摩擦情况下,填充 GO 和辐照均能增加 PE-UHMW 的平均摩擦系数。PE-UHMW/GO 和辐照的 PE-UHMW 分别比纯的 PE-UHMW 增加了 19.64% 和 27.67%;辐照对 PE-UHMW/GO 的平均摩擦系数的影响不明显,辐照和未辐照的 PE-UHMW/GO 的平均摩擦系数均为 0.134;辐照 + 加速老化的 PE-UHMW/GO 的平均摩擦系数最大,其值为 0.168;辐照 + 加速老化的 PE-UHMW 比辐照的 PE-UHMW 的平均摩擦系数小 0.007。

(3) 添加 GO 和辐照能显著降低 PE-UHMW 的平均磨损率,增强了其耐磨损的能力。PE-UHMW/GO 的平均磨损率比 PE-UHMW 降低了 $0.240 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$,辐照的 PE-UHMW/GO 的平均磨损率比 PE-UHMW/GO 降低了 $0.499 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 。辐照 + 加速老化增加了 PE-UHMW 和 PE-UHMW/GO 的平均磨损率,辐照 + 加速老化 PE-UHMW/GO 的磨损率比辐照 + 加速老化 PE-UHMW 的要低 $0.172 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$,表明 GO 在一定程度上抑制 PE-UHMW 基体的磨损。

(4) 添加 GO 和辐照提高了 PE-UHMW 的抗疲劳磨损的能力。辐照 + 加速老化的 PE-UHMW 的磨损形式主要为磨粒磨损,辐照的 PE-UHMW/GO

与辐照 + 老化的 PE-UHMW/GO 的磨损形式主要为疲劳磨损。

参考文献

- [1] Xu Jiazhuang, Wannomae K K, Muratoglu O K, et al. Increased oxidative protection by high active vitamin E content and partial radiation crosslinking of UHMWPE[J]. *Journal of Orthopaedic Research*, 2018, 36(7):1860–1867.
- [2] Zaveri T D, Dolgova N V, Lewis J S, et al. Macrophage integrins modulate response to ultra-high molecular weight polyethylene particles and direct particle-induced osteolysis[J]. *Biomaterials*, 2017, 115:128–140.
- [3] Do Q, O'byrne S, Liu M, et al. Piezoresistive behavior of MWCNT-UHMWPE composite for compressive stress sensing applications[J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2017, 16(2):265–273.
- [4] Zec J, Tomić N Z, Zrilić M, et al. Optimization of Al_2O_3 particle modification and UHMWPE fiber oxidation of EVA based hybrid composites: Compatibility, morphological and mechanical properties[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 153:36–48.
- [5] Chih A, Ansón-Casas A, Puértolas J A. Frictional and mechanical behaviour of graphene / UHMWPE composite coatings[J]. *Tribology International*, 2017, 116:295–302.
- [6] Peng Wenchao, Li Hongqiang, Liu Yanyan, et al. A review on heavy metal ions adsorption from water by graphene oxide and its composites[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2017, 230:496–504.
- [7] Suñer S, Gowland N, Craven R, et al. Ultrahigh molecular weight polyethylene / graphene oxide nanocomposites: Wear characterization and biological response to wear particles[J]. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 2018, 106(1):183–190.
- [8] Tai Zhixin, Chen Yuanfeng, An Yingfei, et al. Tribological behavior of UHMWPE reinforced with graphene oxide nanosheets[J]. *Tribology Letters*, 2012, 46(1):55–63.
- [9] An Yingfei, Tai Zhixin, Qi Yuanyuan, et al. Friction and wear properties of graphene oxide / ultrahigh-molecular-weight polyethylene composites under the lubrication of deionized water and normal saline solution[J]. *J Appl Polym Sci*, 2014, 131(1):doi:10.1002/app.39640.
- [10] Pang Wenchao, Ni Zifeng, Chen Guomei, et al. Mechanical and thermal properties of graphene oxide / ultrahigh molecular weight polyethylene nanocomposites[J]. *RSC Advances*, 2015, 5(77):63063–63072.
- [11] Pang Wenchao, Ni Zifeng, Wu Jialiang, et al. Investigation of tribological properties of graphene oxide reinforced ultrahigh molecular weight polyethylene under artificial seawater lubricating condition[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 434:273–282.
- [12] Hummers W S, Offeman R E. Preparation of Graphitic Oxide[J]. *JACS*, 1958, 80(6):1339–1339.

- on the mechanical properties of glass fiber reinforced polyamide composites[J]. *Advanced Powder Technology*, 2016, 27(3):898–902.
- [4] Obeid H, Clément A, Fréour S, et al. On the identification of the coefficient of moisture expansion of polyamide-6: Accounting differential swelling strains and plasticization[J]. *Mechanics of Materials*, 2018, 118:1–10.
- [5] Do V T, Nguyen-Tran H D, Chun D M. Effect of polypropylene on the mechanical properties and water absorption of carbon-fiber-reinforced-polyamide-6 / polypropylene composite[J]. *Composite Structures*, 2016, 150:240–245.
- [6] Litvinov V M, Koning C E, Tjissen J. The effect of annealing of linear and branched polyamide 46 on the phase composition, molecular mobility and water absorption as studied by DSC, ^1H and ^2H solid-state NMR[J]. *Polymer*, 2015, 56:406–415.
- [7] Chen Kaijuan, Kang Guozheng, Lu Fucong, et al. Effect of relative humidity on uniaxial cyclic softening / hardening and intrinsic heat generation of polyamide-6 polymer[J]. *Polymer Testing*, 2016, 56:19–28.
- [8] Arhant M, Le Gac P Y, Le Gall M, et al. Effect of sea water and humidity on the tensile and compressive properties of carbon-polyamide 6 laminates[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 96:250–261.
- [9] 梁惠霞, 李英, 张绍岩. 酚醛改性对玻纤增强聚酰胺 66 复合材料耐湿性的影响[J]. *塑料科技*, 2016, 44(10):49–52.
- Liang Huixia, Li Ying, Zhang Shaoyan. Effect of phenolic resin on moisture resistance of glass fiber reinforced PA66[J]. *Plastics Science and Technology*, 2016, 44(10):49–52.
- [10] Fabre V, Quandalle G, Billon N, et al. Time-Temperature-Water content equivalence on dynamic mechanical response of polyamide6, 6[J]. *Polymer*, 2018, 137:22–29.
- [11] Le Gac P Y, Arhant M, Le Gall M, et al. Yield stress changes induced by water in polyamide 6: Characterization and modeling[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2017, 137:272–280.
- [12] Arhant M, Le Gac P Y, Le Gall M, et al. Modelling the non Fickian water absorption in polyamide 6[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2016, 133:404–412.
- [13] Lin Lin, Weigand T M, Farthing M W, et al. Relative importance of geometrical and intrinsic water transport properties of active layers in the water permeability of polyamide thin-film composite membranes[J]. *Journal of Membrane Science*, 2018, 564:935–944.
- [14] Lai Chiu-Chun, Chen Shih-You, Chen Meng-Hsin, et al. Preparation and characterization of heterocyclic polyamide 6 (PA 6) with high transparencies and low hygroscopicities[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2019, 1175:836–843.
- [15] Claveria I, El Duque D, Santolaria J, et al. The influence of environmental conditions on the dimensional stability of components injected with PA6 and PA66[J]. *Polymer Testing*, 2016, 50:15–25.
- [16] 王兵辉, 熊玉竹, 吴胜学, 等. 退火对 PA6 结晶和拉伸性能的影响[J]. *工程塑料应用*, 2017, 45(1):55–59.
- Wang Binghui, Xiong Yuzhu, Wu Shengxue, et al. Effect of annealing on crystallinity and tensile properties of PA6[J]. *Engineering Plastics Application*, 2017, 45(1):55–59.

优惠销售中国工程塑料复合材料技术研讨会《论文集》及论文集光盘

中国合成树脂供销协会加工与应用分会为了配合 2000 ~ 2018 年先后召开的中国工程塑料复合材料技术研讨会, 共编辑、出版了 19 本《论文集》。其内容涉及工程塑料及通用塑料的合成与改性、加工、应用、测试、模具、设备新技术, 以及文献综述、评论等, 突出了我国工程塑料行业发展规划、热点分析。现尚有部分《论文集》, 以及应广大读者要求加工制作的论文集光盘, 现以优惠价格 (含邮费) 销售, 欢迎订阅。

1. 2004 ~ 2018 年中国工程塑料复合材料技术研讨会《论文集》, 优惠价 400 元 / 套。

2. 2000 ~ 2018 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集光盘, 优惠价 300 元 / 盘。本光盘除收录 2000 ~ 2018 年 19 本《论文集》的全部内容外, 还包括约 3 300 人次的会议代表通讯录。

邮局汇款

收款地址: 山东济南市天桥区田庄东路 3 号

收款单位: 《工程塑料应用》杂志社

邮 编: 250031

电 话: (0531)85878223 85878057 85878278

传 真: (0531)85947355

银行汇款

户 名: 山东非金属材料研究所

开户银行: 济南市工商银行经十一路支行

帐 号: 1602001229014425546

网上订购: <http://www.epa1973.com>

(上接第 125 页)

- [13] Tebassi H, Yallese M A, Meddour I. A new method for evaluation nominal coefficient of friction and frictional forces in turning and inserts characterization using cutting forces profiles[J]. *Engineering Solid Mechanics*, 2016, 4(1):1–10.
- [14] Vadivel H S, Golchin A, Emami N. Tribological behaviour of carbon filled hybrid UHMWPE composites in water[J]. *Tribology International*, 2018, 124:169–177.
- [15] Baena J C, Wu Jingping, Peng Zhongxiao. Wear performance of UHMWPE and reinforced UHMWPE composites in arthroplasty applications: A review[J]. *Lubricants*, 2015, 3(2):413–436.
- [16] Huang Guodong, Ni Zifeng, Chen Guomei, et al. Effects of gamma irradiation and accelerated aging on GO / UHMWPE nanocomposites[J]. *Int J Polym Anal Charact*, 2016, 21(5):1–11.