

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.03.006

3D 打印钛合金骨架浸渗 PE-UHMW 复合材料制备及性能

李强^{1,2}, 黎晓华^{1,2}, 王浩杰^{1,2}

(1. 深圳大学材料学院, 广东深圳 518060; 2. 深圳市特种功能材料重点实验室, 广东深圳 518060)

摘要: 通过选择性激光熔融技术 (SLM) 打印出 Ti-6Al-4V (TC4) 呈层间错位排列的钻石分子微结构金属骨架, 将超高分子量聚乙烯 (PE-UHMW) 粉末和氧化石墨烯 (GO) 粉末通过热压浸渗的方法填充在骨架内部的孔隙当中, 制备出不同孔隙率的金属骨架复合材料。然后在摩擦磨损试验机上研究了在干摩擦条件下, 复合材料的磨损机制和骨架孔隙率对其摩擦学性能的影响, 并且采用扫描电子显微镜和能谱分析等方法对磨损表面进行了表征分析。结果表明, 与纯 PE-UHMW 相比, 金属骨架和 GO 的引入可以形成转移膜, 捕获磨屑, 骨架可以优先承担大部分载荷, 改善材料的摩擦系数和磨损率; 复合材料的磨损机制主要为粘着磨损和磨粒磨损; 当孔隙率达到 56% 时, 复合材料摩擦磨损性能最优。

关键词: 3D 打印; Ti-6Al-4V; 超高分子量聚乙烯; 热压浸渗; 摩擦磨损

中图分类号: TH117.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)03-0034-05

Preparation and Properties of 3D Printing Ti-6Al-4V Skeleton Impregnated PE-UHMW Composites

Li Qiang^{1,2}, Li Xiaohua^{1,2}, Wang Haojie^{1,2}

(1. College of Materials Science and Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

2. Shenzhen Key Laboratory of Special Functional Materials, Shenzhen 518060, China)

Abstract: The porous metal skeleton of titanium alloy (Ti-6Al-4V) was printed by SLM, and then the matrix of PE-UHMW powder and graphene oxide (GO) powder, which were milled and mixed, was infiltrated and filled in the pores of the skeleton by hot pressing. Composites of different kinds of metal skeleton porosity were prepared. Then, the wear mechanism of the composites and the influence of the porosity of the framework on the tribological properties were studied on the friction and wear test machine under dry friction condition. The wear surface was characterized by SEM and EDS. The results show that compared with pure PE-UHMW, the introduction of metal framework and GO can form transfer film, capturing wear debris, and the framework can take most of the load, improve the friction coefficient and wear rate of the material. The wear mechanism of the composite is mainly adhesive wear and abrasive wear. When the framework porosity is 56%, the friction and wear performance of the composite is the best.

Keywords: 3D printing; Ti-6Al-4V; ultra high molecular weight polyethylene; hot molding process; friction and wear

超高分子量聚乙烯 (PE-UHMW) 因其极高的分子量和其特有的线型分子链结构, 极易发生缠结、结晶与高度取向^[1-2]。因此, 其具备突出的比强度、比模量以及优异的耐低温、耐化学药品腐蚀、耐磨自润滑和生物相容性等优势^[3-4]。然而, 在以人工关节衬垫和海水润滑为代表的各领域的广泛运用中, 纯 PE-UHMW 渐渐暴露出了诸多缺陷, 例如承载能力

弱、表面硬度低、抗蠕变和抗弯曲性能差, 在长期的摩擦过程中极易产生磨屑, 加速摩擦磨损, 从而造成大量严重的工程失效问题^[5-8]。

金属材料承载能力强, 具有高强度、高韧性、导热性好等优势, 但是金属材料在对磨过程中容易产生严重的粘着磨损和磨粒磨损, 其耐磨性和耐腐蚀性远远不如 PE-UHMW, 如果将二者结合在一起,

基金项目: 深圳大学校企合作项目 (4403012018003884)

通讯作者: 黎晓华, 副教授, 主要研究方向为材料失效分析及逆向工程、材料检测技术及分析方法 E-mail: lxh@szu.edu.cn

收稿日期: 2019-12-18

引用格式: 李强, 黎晓华, 王浩杰. 3D 打印钛合金骨架浸渗 PE-UHMW 复合材料制备及性能 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(3):34-38, 43.

Li Qiang, Li Xiaohua, Wang Haojie. Preparation and properties of 3D printing Ti-6Al-4V skeleton impregnated PE-UHMW composites[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(3):34-38, 43.

将会充分发挥各自的优越性,对此类金属和高分子复合的研究已有部分报道^[9-11],其金属基体均采用发泡法或者金属丝压制等制备。

相比上述报道,笔者创新性地采用金属材料 3D 打印技术制备金属骨架基体,同时辅以 PE-UHMW 的氧化石墨烯 (GO) 填充改性进一步改善耐腐蚀性和摩擦性能^[12-16],热压浸渗制备出摩擦性能优异的复合材料。首先通过选择性激光熔融技术 (SLM) 打印出 Ti-6Al-4V(TC4) 钛合金骨架,然后在骨架内部浸渗填充,这样既能通过调整骨架的结构单元尺寸来保证复合材料在不同工作条件下的力学性能,又能通过调整孔隙率来更好地表现出复合材料优异的耐磨性。这种全新的将金属 3D 打印技术和聚合物成型技术结合制备复合材料的方法具备广阔的研究价值和应用前景,特别是在海水润滑和人工关节衬垫的研究和运用上,同时将为更多复合材料的设计和开发提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

TC4 粉末: 粒径 15 ~ 53 μm , 深圳市华阳新材料科技有限公司;

PE-UHMW 粉末: GUR 5113, 其相对分子质量 5×10^6 , 平均粒径 120 μm , 美国泰科纳公司;

GO: 苏州碳丰科技有限公司;

去离子水: 自制;

无水乙醇等其它试剂: 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司。

1.2 主要仪器及设备

金属 3D 打印机: M290 型, 德国 EOS 公司;

热压炉: BTF-1200C-VP 型, 安徽贝意克设备技术有限公司;

摩擦磨损试验机: UMT-3 型, 德国布鲁克公司;

台阶仪: DEKTAK-XT 型, 德国布鲁克公司;

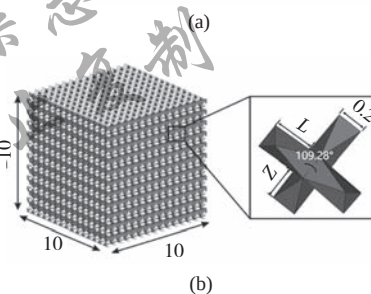
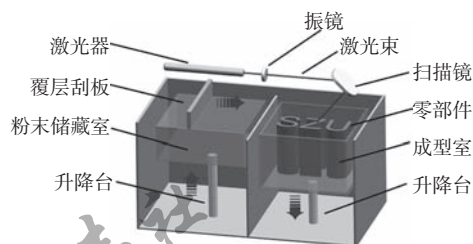
超景深三维显微镜: VHX-600 型, 日本基恩士公司;

场发射扫描电子显微镜 (SEM): SU-70 型, 日本日立公司。

1.3 试样制备

SLM 技术主要是利用金属粉末在激光束的热作用下完全熔化、经冷却凝固而成型的一种技术, 其工作原理如图 1a 所示, 主要利用刮刀水平运动配合成型室的升降运动, 再按照规划路径完成打印^[4]。首先设计出如图 1b 所示的呈层间错位排列的钻石

分子微结构金属骨架, 然后调节 L 和 Z 大小, 建立模型并将其导入 3D 打印机, 打印出孔隙率为 54%, 56%, 58%, 60% 的 TC4 多孔骨架试样。然后将 GO 和 PE-UHMW 粉末球磨混合制得母料, 将母料溶于无水乙醇并超声分散后和 TC4 骨架一起装入模具, 在压片机上进行预压。最后将模具和母料置于热压炉中, 真空环境下进行 200℃, 10 MPa 的热压操作, 空冷脱模得到如图 2 所示的复合材料。骨架孔隙率为 54%, 56%, 58%, 60%, 制得的试样分别编号为 1#, 2#, 3#, 4#; 纯 PE-UHMW 试样编号为 5#。



a—SLM 原理; b—骨架结构单元

图 1 SLM 原理及骨架结构单元

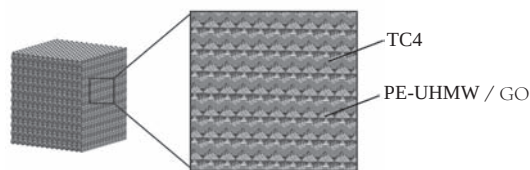


图 2 复合材料结构示意图

1.4 表征及测试

采用 SEM 观测磨损表面的形貌, 使用附在电镜上的能谱 (EDS) 仪进行磨损表面化学元素分布和含量分析。

磨损横截面轮廓测试在台阶仪上进行。

球盘式摩擦试验在摩擦磨损试验机上进行, 对磨球为直径为 10 mm 的 GGr15 钢球, 试验在室温下进行, 试验载荷为 50 N, 时间为 120 min, 行程为 8 mm。磨损率 K 由式 (1) 计算得出。

$$K = \frac{\Delta V}{F \times L} \quad (1)$$

式中: ΔV 为磨损体积, 由超景深三维显微镜测量磨

痕轮廓所得; F 为载荷; L 为总行程。

2 结果与讨论

2.1 摩擦系数与磨损率

复合材料在干摩擦条件下的瞬时摩擦系数和平均摩擦系数见图 3。

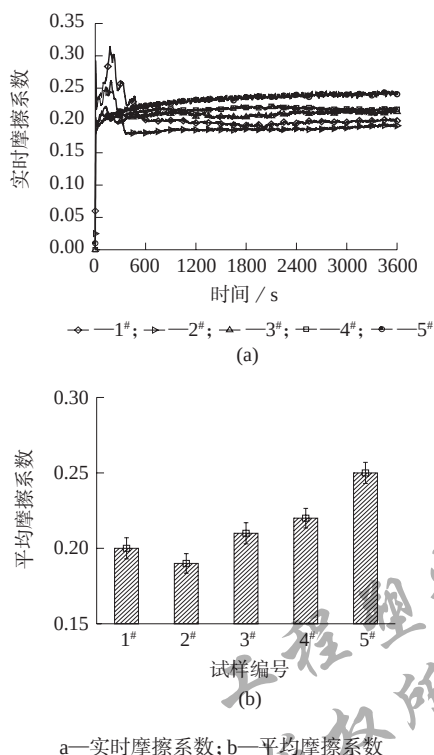


图 3 干摩擦条件下实时摩擦系数和平均摩擦系数曲线

由图 3a 可知,在摩擦试验开始后的初始阶段,纯 PE-UHMW 的摩擦系数迅速升高并在大约 800 s 时开始趋于稳定,而含有金属骨架的复合材料的摩擦系数均以更快的速度迅速升高,然后迅速下降并在大约 600 s 时开始趋于稳定。这与聚合物/金属等配副方式中摩擦系数的变化趋势相似,TC4 金属骨架和 GO 填料可以有效降低材料的摩擦系数。由图 3b 可看出,在经历磨合期以后,纯 PE-UHMW 的摩擦系数最高,其平均值为 0.25,复合材料的摩擦系数均低于纯 PE-UHMW。同时,随着孔隙率的增大,复合材料的摩擦系数先降低后升高,当金属骨架的孔隙率为 56% 时,复合材料具有最低的摩擦系数。

试样的磨损率曲线见图 4。与纯 PE-UHMW 相比,TC4 金属骨架和 GO 的加入使磨损率均出现了显著降低,与摩擦系数的变化趋势相对应,随着孔隙率的增大,复合材料的磨损率呈现先降低后升高的趋势。当金属骨架的孔隙率小于等于 56% 时,复合材料的磨损率随着孔隙率的增大而减小,但幅度

不大。当孔隙率为 56% 时,复合材料的磨损率达到最低值 $2.46 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 。此后,随着孔隙率的增大,复合材料的磨损率开始升高。

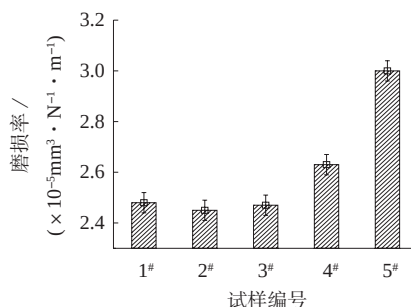


图 4 纯 UHMWPE 和复合材料的磨损率

研究显示,金属骨架可以优先承担大部分载荷,而在骨架的空隙内部,纳米填料又可以优于 PE-UHMW 承担部分载荷,从而显著降低了聚合物的磨损。另外,摩擦过程中 PE-UHMW 和纳米填料可以在骨架的金属表面和对偶球表面形成明显的转移膜,产生自润滑效应,从而降低摩擦系数和磨损率。其次,金属骨架内的空隙为高分子相,其仍然具有较好的容纳磨屑的能力,从而防止磨屑游离带来的影响。

2.2 表面磨痕形貌特征和自润滑机理

图 5、图 6 为复合材料在干摩擦条件下进行摩擦磨损试验后的表面磨痕形貌的 SEM 照片及横截面轮廓。可以发现,纯 PE-UHMW 的磨损表面存在大量塑性变形和比较明显的平行划痕和犁沟,部分区域还存在 PE-UHMW 的微小磨粒和疲劳剥落现象,磨损严重。当引入金属骨架和 GO 以后,磨损表面仅出现了轻微的划痕和塑性变形,磨粒大小明显减少,这在图 5f 的横截面轮廓图中表现更为明显。

上述现象的产生,一方面是由于纯 PE-UHMW 的耐热性低,导热性差,熔点较低,摩擦过程中产生的热量积聚使得试样表面出现瞬间高温,从而产生严重的塑性变形^[14]。TC4 金属骨架和 GO 均具有良好的导热性,使得摩擦中产生的部分热量得到了释放,极大地降低了磨损表面的温度。同时,复合材料的金属表面上以及对磨钢球的摩擦区域均出现了 PE-UHMW 的转移膜,而纯 PE-UHMW 的对磨钢球上并没有明显的转移膜生成,如图 7 所示。转移膜的形成对聚合物的摩擦性能有重要影响^[5]。另一方面,TC4 骨架可以代替 PE-UHMW 优先支撑载荷,其余的载荷也可以转移到具有更高比表面能的 GO 上,进一步发挥支撑、转移、分散的作用^[16-18],从

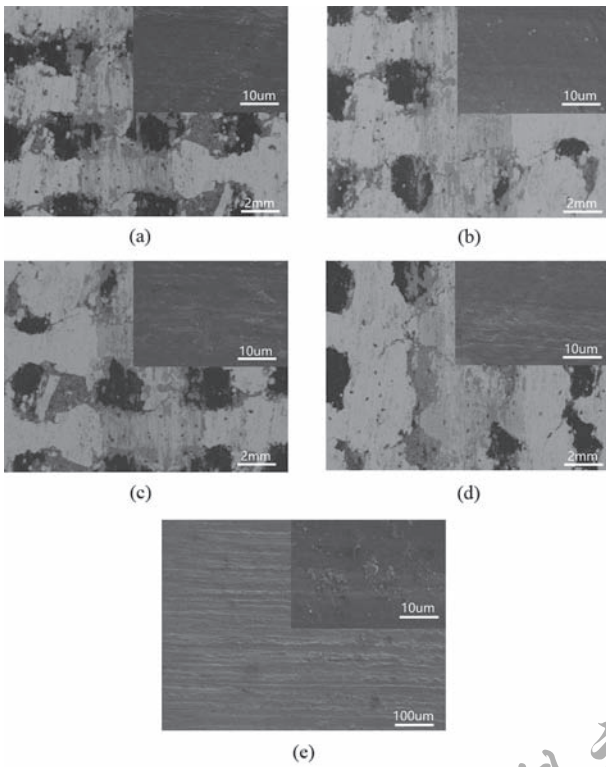


图 5 不同孔隙率复合材料的表面形貌 SEM 照片

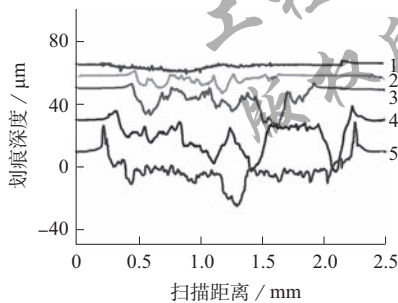


图 6 不同孔隙率复合材料的横截面轮廓

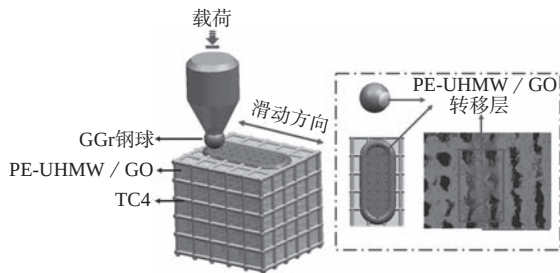
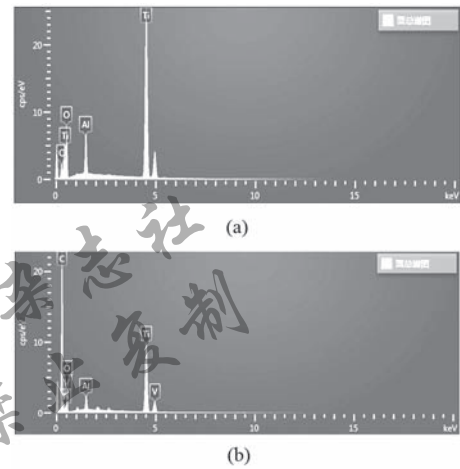


图 7 复合材料磨损过程和润滑膜示意图

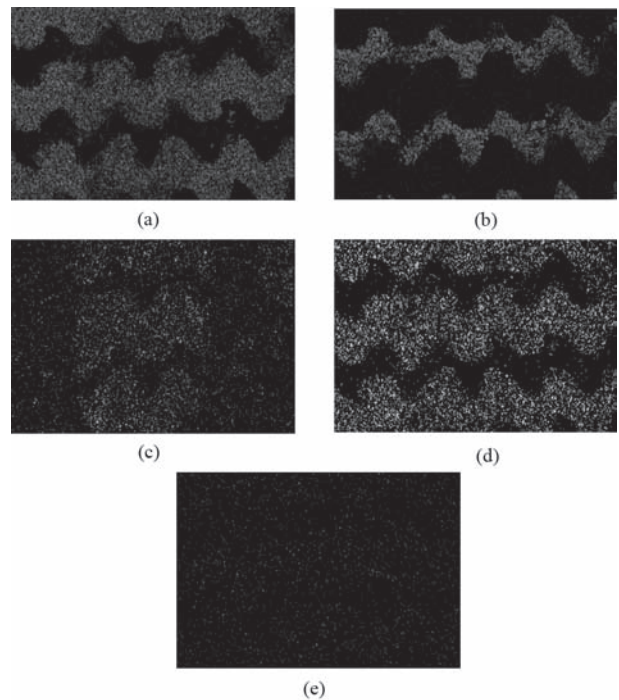
而防止 PE-UHMW 分子链被拉出结晶区,减轻磨损。不仅如此,对比发现, TC4 骨架还可以有效捕获在纯 PE-UHMW 磨损过程中产生的如图 5e 所示的大尺寸的磨粒,减少磨粒磨损的发生。

图 8 和图 9 为试验后复合材料的金属表面的 EDS 图和元素分布图。可以发现,试验后, TC4 表面 C 元素含量剧烈增高,再次证实摩擦磨损试验中 PE-UHMW / GO 转移膜的产生。另外,大量研究已经证实金属和聚合物的摩擦磨损试验过程中,对磨钢球的表面也会产生如图 7 所示的牢固转移膜^[19]。因此,试验过程的摩擦副由最初的 (PE-UHMW / GO+TC4)-GGr15 逐渐变为 PE-UHMW / GO 转移膜,并最终趋于稳定,从而改善摩擦磨损性能。



a—磨损前; b—磨损后

图 8 复合材料磨损后金属表面 EDS 图



a—Ti; b—C; c—O; d—V; e—Al

图 9 复合材料磨损后金属表面元素分布图

3 结论

(1) 随着 TC4 骨架孔隙率的增加,复合材料的摩擦系数和磨损率先降低后升高,当孔隙率为 56% 时,复合材料的摩擦系数和磨损率最低。

(2) 摩擦磨损试验后,与纯 PE-UHMW 相比,复合材料的摩擦系数和磨损率得到改善,磨损机制为粘着磨损和轻微的磨粒磨损。

(3) 复合材料摩擦磨损性能改善的机理主要是金属骨架和 GO 的引入可以形成转移膜,此外,骨架空隙可以捕获磨屑,骨架可以优先承担大部分载荷。

参考文献

- [1] 杨萌,赵宁,徐坚.超高分子量聚乙烯功能复合材料及其应用[J].高分子通报,2018(8):25-32.
Yang Meng, Zhao Ning, Xu Jian. Ultra-high molecular weight polyethylene-based functional composites and applications[J]. Polymer Bulletin, 2018(8):25-32.
- [2] Vegetti A, Radnóczy G, Paolo M O. Role of embedded carbon particles on the morphology, microstructure and transport properties of sintered ultra-high molecular weight polyethylene[J]. Carbon, 2013, 65:20-27.
- [3] 石志锋,郝丽静,宁成云,等.类金刚石和硅氮类薄膜在人工关节表面的摩擦学性能[J].硅酸盐学报,2019,47(4):553-560.
Shi Zhifeng, Hao Lijing, Ning Chengyun, et al. Tribological property of diamond-like carbon and silicon-nitrogen biomechanical coatings on Co alloy[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2019, 47(4):553-560.
- [4] 孟培媛,孙琳琳.超高分子量聚乙烯/石墨烯复合涂层制备及其在海洋装备防护中的应用[J].表面技术,2017(10):35-41.
Meng Peiyuan, Sun Linlin. Flame sprayed UHMWPE/graphene nanosheet composite coatings for marine applications[J]. Surface Technology, 2017(10):35-41.
- [5] 段为朋,冒浴沂,庞文超,等.辐照交联 GO/UHMWPE 复合材料在人工海水润滑介质下的摩擦学性能研究[J].塑料工业,2018, 46(12):123-127.
Duan Weipeng, Mao Yuyi, Pang Wenchao, et al. Research on tribology property of cross-linked GO/UHMWPE composites under the lubrication of artificial seawater[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(12):123-127.
- [6] Wang Jianzhang, Yan Fengyuan, Xue Qunji. Friction and wear behavior of ultra-high molecular weight polyethylene sliding against GCr15 steel and electroless Ni-P alloy coating under the lubrication of seawater[J]. Tribology Letters, 2009, 35(2):85-95.
- [7] 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.
- [8] 叶素娟,禹权,黄承亚.钛酸钾晶须填充 UHMWPE 复合材料的摩擦磨损性能研究[J].塑料工业,2007(B06):312-314, 321.
Ye Sujuan, Yu Quan, Huang Chengya. Study on friction and wear behavior of UHMWPE filled with potassium titanate whiskers[J]. China Plastics Industry, 2007(B06):312-314, 321.
- [9] 翟文杰,郑雄飞,付江波,等.浸渍 PVA-H 层的金属橡胶髌白的摩擦性能试验研究[J].润滑与密封,2010(8):10-13, 17.
Zhai Wenjie, Zheng Xiongfei, Fu Jiangbo, et al. Experimental study on friction properties of metal rubber acetabulum impregnated with PVA-H layer[J]. Lubrication Engineering, 2010(8):10-13, 17.
- [10] Li W, Hou R, Wan H, et al. A new strategy for enhanced latent heat energy storage with microencapsulated phase change material saturated in metal foam[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2017, 171:197-204.
- [11] 齐明思,强志鹏,张伟,等.泡沫铝-聚氨酯的制备及其吸能特性分析[J].包装工程,2018,39(23):81-87.
Qi Mingsi, Qiang Zhipeng, Zhang Wei, et al. Preparation of aluminum foam-polyurethane and analysis of its energy absorption characteristics[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(23):81-87.
- [12] 黄华栋,庞文超,黄国栋,等. PE-UHMW/GO 复合材料的吸水率及耐腐蚀性研究[J].工程塑料应用,2015(9):31-34.
Huang Huadong, Pang Wenchao, Huang Guodong, et al. Study on water absorption and corrosion resistance of PE-UHMW/GO composites[J]. Engineering Plastics Application, 2015(9):31-34.
- [13] 李海亮,贾德昌,杨治华,等.选区激光熔化 3D 打印钛合金及其复合材料研究进展[J].材料科学与工艺,2019,27(2):7-21.
Li Hailiang, Jia Dechang, Yang Zhihua, et al. Research progress on selective laser melting 3D printing of titanium alloys and titanium matrix composites[J]. Materials Science and Technology, 2019, 27(2):7-21.
- [14] 王秋凤,王鸿灵,王云霞,等.表面粗糙度对 UHMWPE 微动摩擦磨损性能的影响[J].摩擦学学报,2015,35(4):441-447.
Wang Qiufeng, Wang Hongling, Wang Yunxia, et al. Effects of surface roughness on fretting wear of UHMWPE under different conditions[J]. Tribology, 2015, 35(4):441-447.
- [15] 安应飞,裴金莹,阎兴斌,等.GO 增强 UHMWPE 在透明质酸钠润滑介质下的摩擦学性能研究[J].摩擦学学报,2014, 34(2):113-119.
An Yingfei, Pei Jinying, Yan Xingbin, et al. The tribological property of UHMWPE under the Lubrication of Sodium hyaluronate reinforced by graphene oxide[J]. Tribology, 2014, 34(2):113-119.
- [16] Bahadur S. The development of transfer layers and their role in polymer tribology[J]. Wear, 2000, 245(1-2):92-99.

3 结论

(1) 随着添加剂 PVP 含量的增加,形成大的指状孔结构,孔与孔贯通性较好,水通量提高,膜的孔隙率也随之增加。

(2) 凝固浴温度的升高对膜水通量起到一定的抑制作用,凝固浴温度为 30℃ 时,制得的膜具有较高的水通量和卵清蛋白截留率,以及较高的孔隙率。

(3) 干纺程的大小对膜性能有重要影响,当干纺程为 11 cm 时,膜的纯水通量可达 200 L/(m²·h),截留率为 90% 以上,综合性能比较好。

参考文献

- [1] Tan X M, Rodrigue D. A review on porous polymeric membrane preparation. part I: Production techniques with polysulfone and poly(vinylidene fluoride)[J]. *Polymer*, 2019, 11(7):1 160–1 199.
- [2] Loeb S, Sourirajan S. Sea water demineralization by means of an osmotic membrane[J]. *Advances in Chemistry Series*, 1963, 38:117–132.
- [3] Warsinger D M, Chakraborty S, Tow E W, et al. A review of polymeric membranes and processes for potable water reuse[J]. *Progress in Polymer Science*, 2018, 81:209–237.
- [4] Kheirieh S, Asghari M, Afsari M. Application and modification of polysulfone membranes[J]. *Reviews in Chemical Engineering*, 2018, 34:657–693.
- [5] Abdelrasoul A, Doan H, Lohi A, et al. Morphology control of polysulfone membranes in filtration processes: A critical review[J]. *ChemBioEng Reviews*, 2015, 2:22–43.
- [6] 雷晓慧,丁雪佳,王林生,等.相转化法制备聚砜膜研究进展[J]. *中国塑料*, 2013, 27(1):13–16.
Lei Xiaohui, Ding Xuejia, Wang Linsheng, et al. Progress in research on polysulfone membrane by phase-inversion[J]. *China Plastics*, 2013, 27(1):13–16.
- [7] Smail A F, Lai P Y. Effects of phase inversion and rheological factors on formation of defect-free and ultrathinskin asymmetric polysulfone membranes for gas separation[J]. *Separation and Purification Technology*, 2003, 33(2):127–143.
- [8] Chakraborty B, Ghoshal A K, Purkait M K. Preparation, characterization and performance studies of polysulfone membranes using PVP as an additive[J]. *Journal of Membrane Science*, 2008, 315:36–47.
- [9] Chakraborty B, Ghoshal A K. Effect of molecular weight of PEG on membrane Morphology and transport properties[J]. *Journal of Membrane Science*, 2008, 309:209–221.
- [10] 曹晨,钱建华,曹原,等.添加剂对聚砜超滤膜亲水性能及过滤性能的影响分析[J]. *现代纺织技术*, 2018, 26(5):5–10.
Cao Chen, Qian Jianhua, Cao Yuan, et al. Analysis of additives on hydrophilic properties and filtration properties of polysulfone ultrafiltration membrane[J]. *Advanced Textile Technology*, 2018, 26(5):5–10.
- [11] 安亚欣,张奇峰,张所波.聚乙二醇添加剂对聚砜超滤膜结构和性能的影响[J]. *膜科学与技术*, 2015, 35(5):64–70.
An Yaxin, Zhang Qifeng, Zhang Suobo. Effects of PEG additives on morphology and performance of polysulfone membrane[J]. *Membrane Science and Technology*, 2015, 35(5):64–70.
- [12] Chen S H, Liou R M, Lai J Y. Effect of the polarity of additional solvent on membrane formation in polysulfone / N-methyl-2-pyrrolidone / water ternary system[J]. *European Polymer Journal*, 2007, 43:3 997–4 007.
- [13] 刁婧,高英,乔莎莎,等.添加剂对聚砜超滤膜性能的影响[J]. *东华大学学报:自然科学版*, 2012, 38(3):246–250, 271.
Diao Jing, Gao Ying, Qiao Shasha, et al. Effect of different additives on the properties of polysulfone Ultrafiltration membranes[J]. *Journal of Donghua University: Natural Science*, 2012, 38(3):246–250, 271.
- [14] 安树林,李万春,倪澄峰.聚砜中空纤维超滤膜的微孔结构对初始通量衰减的影响[J]. *天津工业大学学报*, 2015, 34(2):21–23, 27.
An Shulin, Li Wanchun, Ni Chengfeng. Effect of microporous structure of polysulfone hollow fiber ultrafiltration membrane on initial flux attenuation[J]. *Journal of Tianjin Polytechnic University*, 2015, 34(2):21–23, 27.
- [15] Kim I C, Lee K H. Effect of various additives on pore size of polysulfone membrane by phase-inversion process[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2003, 89(9):2 562–2 566.
- [16] Ji Dawei, Xiao Changfa, An Shulin, et al. Preparation of high-flux PSF / GO loose nanofiltration hollow fiber membranes with dense-loose structure for treating textile wastewater[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 363:33–42.
- [17] An Y F, Tai Z X, Yan X B, et al. Tribological property of GO / UHMWPE composites under the lubrication of bovine serum albumin[J]. *Tribology*, 2012, 32(6):533–537.
- [18] Chen Y, Qi Y, Tai Z, et al. Preparation, mechanical properties and biocompatibility of graphene oxide / ultrahigh molecular weight polyethylene composites[J]. *European Polymer Journal*, 2012, 48(6):1 026–1 033.
- [19] 辛小翠,王云霞,王梦娇,等.纳米锌填充超高分子量聚乙烯复合材料微动摩擦磨损性能[J]. *润滑与密封*, 2019, 44(5):47–52.
Xin Xiaocui, Wang Yunxia, Wang Mengjiao, et al. Investigation on fretting wear behavior of nano-Zn / UHMWPE composites[J]. *China Plastics Industry*, 2019, 44(5):47–52.

(上接第 38 页)