

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2015.02.004

多孔 PE-UHMW 材料的制备及其摩擦性能的研究^{*}

唐慧霞, 王晓雷, 黄丽容

(南京航空航天大学江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 南京 210016)

摘要: 采用模板-滤取法制备多孔超高分子量聚乙烯 (PE-UHMW) 材料, 探究其存储油液和输出油液的能力及摩擦学性能。结果表明, 孔隙率越大, 多孔 PE-UHMW 的储油能力和出油能力越强。在干摩擦条件下, 孔隙率越大, 多孔 PE-UHMW 的摩擦系数越大。在贫油润滑条件下, 孔隙率较高的多孔试样 U30, U40, U50 的摩擦系数低于普通 PE-UHMW。多孔试样 U40 在贫油润滑条件下的摩擦系数只有干摩擦时的 30.3%。因此, 孔隙的存在能够提高 PE-UHMW 存储油液和输出油液的能力, 并且能够改善贫油润滑条件下的摩擦性能。

关键词: 超高分子量聚乙烯; 孔隙率; 模板-滤取法; 摩擦性能

中图分类号: TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2015)02-0016-04

Preparation of Porous PE-UHMW Material and Research on Its Tribology Properties

Tang Huixia, Wang Xiaolei, Huang Lirong

(Jiangsu Key Laboratory of Precision & Micro-Manufacturing Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract : The porous ultra high molecular weight polyethylene (PE-UHMW) samples were prepared by the template-leaching technique. At the same time, its oil storage ability, oil output ability and tribology properties were explored. The results show that the higher the porosity is, the stronger the oil storage and output ability of the sample is. Under the condition of dry friction, the higher the porosity is, the larger friction coefficient the porous PE-UHMW sample is. Under the condition of a little oil lubrication, the friction coefficient of porous samples U30, U40 and U50 with higher porosity is lower than ordinary PE-UHMW samples. The friction coefficient of the porous sample U40 under the condition of a little oil lubrication is only 30.3% of dry friction. So the existence of the pore can improve the ability of porous PE-UHMW to store oil and output oil, and it can also improve the tribology properties under a little oil lubrication condition.

Keywords : ultra high molecular weight polyethylene; porosity; templates-leaching technique; tribology property

从越南战争开始, 直升机大规模登上现代战争的舞台, 成为一种必不可少的运输手段和有效的作战平台^[1]。对直升机而言, 油箱一旦被击中, 传动系统就会出现贫油润滑甚至是无油润滑的情况, 进入干运转状态。美国、欧洲、日本和俄罗斯均对直升机有 30~60 min 不等的干运转能力要求, 能够使得直升机逃离危险地带。中国民航适航规章对旋翼航空器的干运转能力早已提出明确要求, 即在旋翼传动系统的主润滑油系统失压后, 要求传动系统能够有 30 min 的干运转能力^[2]。

提高直升机干运转能力的主要途径有: 提高材料的耐高温性能, 提高摩擦副材料的表面耐磨性和增加传动系统的储油结构等。在提升摩擦副材料的耐高温性能方面, 1986 年 Kaman Aerospace Corporation 在 SH-2F 直升机上用高温合金钢 Pyrowear53 替代原有的主传动齿轮内圈材料

M-50, 提高了齿轮的耐高温性能。在提升摩擦副材料的表面耐磨性方面, 2006 年南京航空航天大学于敏等^[3]研究发现在齿轮钢 12Cr2Ni4A 表面注入钼离子, 虽然不能降低摩擦系数但能提高摩擦副的表面耐磨性。在增加传动系统储油结构方面, 1987 年 Timken 公司发表了为期 5 年的研究结果, 目的是提高圆锥滚子轴承的干运转能力。实验表明在干运转条件下, 滚动体、保持架为易破坏部位。为改善其干运转能力, 在保持架的开头附加有多孔材料制成的带骨架的锥套和带骨架的杯两种形式, 结果表明, 附加带骨架杯的保持架在 11 000 r/min 的干运转能力为 30 min, 而在 37 000 r/min 仅有 10 s 的

^{*} 国家自然科学基金项目 (51175246)

联系人: 王晓雷, 教授, 博士生导师, 主要从事表面工程及摩擦学的研究

收稿日期: 2014-12-02

干运转能力。虽然附加带骨架杯的保持架有一定的干运转能力,但是其附加结构比较复杂,外界尚不清楚具体结构形式。

从增加直升机传动系统的储油结构角度出发,制备具有多微孔的超高分子量聚乙烯 (PE-UHMW) 材料,这种材料不仅具有 PE-UHMW 的优良性能,如摩擦系数小、耐磨性能好、抗应力开裂性能好,而且具备可以控制的储油结构。笔者对其储油能力及其在干摩擦及干运转条件下的摩擦性能进行研究和讨论,以期为该多孔材料运用于直升机传动系统轴承保持架,提高直升机干运转能力提供实验依据。

1 实验部分

1.1 原材料

PE-UHMW: 北京助剂二厂;

NaCl: 分析纯,南京化学试剂有限公司;

蔗糖: 分析纯,汕头西陇化工厂有限公司;

机油: 长城 CD15W-40 柴油机油,市售。

1.2 仪器与设备

分析天平: AL104 型,梅特勒-托利多公司;

摩擦磨损试验机: MMW-1A 型,济南益华摩擦学测试技术有限公司;

数码显微镜: VHX-600E 型,日本 KEYENCE 公司;

甩胶台: SC-1B 型,北京创威纳科技有限公司。

1.3 试样制备

模板-滤取法的原理^[4]是将填充剂与聚合物充分混合并加工成型,然后用萃取剂将填充剂萃取出来,在聚合物中形成多微孔结构,从而制备出多孔的聚合物试样。根据该原理,文中选用聚合物为 PE-UHMW 粉末,其填充剂为颗粒半径在 110~200 μm 范围内的 NaCl^[5] 和蔗糖,将 PE-UHMW 粉末、NaCl、蔗糖按表 1 所示的配比充分混合放入模具中,冷压 2 min,压力为 4 MPa,随后在 198 $^{\circ}\text{C}$ 下烧结 1 h。在此温度下,蔗糖熔融为液态,液态的蔗糖在 NaCl 晶体周围流动,包覆并连接混合物中的 NaCl 晶粒颗粒。烧结过后热压 20 min,压力为 5 MPa。再把混合物从模具中取出,脱模。先放入温度为 65 $^{\circ}\text{C}$,摩尔浓度为 5 mol/L 的 HNO_3 中^[6] 浸泡 24 h,再放入 50 $^{\circ}\text{C}$ 的去离子水中浸泡 24 h。蔗糖被 HNO_3 氧化溶解,熔融流动形成的网络状结构可以充当通道使水能够进入混合物内部,从而使 NaCl 颗粒能够充分接触到水而被溶解。最后放入烘箱中,在 60 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干 12 h。最终获得直径为 $\varnothing 30$ mm 的

多微孔 PE-UHMW 试样 U0, U10, U20, U30, U40, U50。

表 1 PE-UHMW 粉末、NaCl、蔗糖的质量 g

材料	试样编号					
	U0	U10	U20	U30	U40	U50
PE-UHMW	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
NaCl	0	1.00	2.00	3.50	5.00	7.00
蔗糖	0	0.30	0.30	0.50	0.50	0.80

1.4 性能测试

(1) 孔隙率的测定。

根据质量-体积法^[7] 计算多孔 PE-UHMW 的孔隙率,用游标卡尺测量出试样的尺寸,以此算出试样的体积,在分析天平上称取试样的质量。得出试样的整体孔隙率 θ 为:

$$\theta = \left(1 - \frac{M}{V\rho_s}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: M ——试样质量, g;

V ——试样体积, cm^3 ;

ρ_s ——致密 PE-UHMW 的密度,其值在 0.94~0.95 g/cm^3 之间。

根据显微分析法^[8],使用显微镜拍摄多孔试样的表面形貌,显微镜观测到的平面的总面积 S_0 和其中包含的孔隙面积 S_p ,再通过公式 (2) 计算出多孔体的表面孔隙率:

$$\theta = \frac{S_p}{S_0} \times 100\% \quad (2)$$

(2) 吸油量及出油量的测定。

将质量为 M_1 的试样浸入机油中,放入真空干燥箱中抽真空直至气泡完全消失,多孔试样内吸满机油,将其取出,用滤纸吸去表面附着的油液,在分析天平上称取质量为 M_2 。然后将试样放在甩胶台上,利用离心力将油液从试样中分离出来。首先将多孔试样固定在甩胶台面中心,然后在 3 000 r/min 的转速下旋转 15 min。最后用分析天平称量试样的质量 M_3 。吸油量为 M_2-M_1 ,出油量为 M_2-M_3 。

(3) 摩擦学实验。

使用摩擦磨损试验机研究不同孔隙率及不同润滑条件的多孔 PE-UHMW/316 不锈钢摩擦副摩擦性能,实验采用面接触方式,上试样采用 316 不锈钢环,其内径为 $\varnothing 14$ mm、外径为 $\varnothing 28$ mm。实验前,用金相砂纸打磨并研磨抛光,使钢环表面粗糙度达到 $Ra=(40 \pm 5)$ nm。下试样为多孔 PE-UHMW,直径为 $\varnothing 30$ mm,实验中采用多孔 PE-UHMW 试样的孔隙率在 0~60% 之间。

干摩擦时,多孔 PE-UHMW 试样在 HNO_3 和去离子水中萃取完毕,放入 60°C 的烘箱中烘干 12 h 后,直接作为下试样装夹在试验机上进行摩擦学实验。

实验室为模拟干运转时轴承内贫油的润滑条件,将多孔 PE-UHMW 试样浸入机油中,在真空干燥箱中抽真空,气泡完全消失后,多孔试样内吸满机油,将试样取出,用滤纸吸去试样表面附着的机油,最后将试样装夹在试验机上进行实验。

实验中所加载荷为 100 N,试验机的主轴转速为 200 r/min,为了得到准确的实验数据,每次实验先跑和 30 min,再记录实验数据,时间为 180 min。

2 结果与讨论

2.1 孔隙的显微结构与分析

采用两种方法分析计算多孔 PE-UHMW 试样的孔隙率,质量-体积法计算 PE-UHMW 试样的整体孔隙率。采用自编的 Matlab 程序对显微分析法拍摄的表面形貌进行图像识别,计算得出试样的表面孔隙率。对 6 个不同的多孔试样分别计算其整体孔隙率与表面孔隙率,结果见表 2。由表 2 可见,多孔 PE-UHMW 试样的表面孔隙率略大于整体孔隙率,产生偏差的原因可能是试样内部残留一些填充物未被完全萃取出来。但是由于整体孔隙率与表面孔隙率的偏差并不大,所以试样内部残留的填充物并不多,大多数孔道仍是相连的,形成通孔^[9]。

表 2 整体孔隙率与表面孔隙率

项 目	试样编号					
	U0	U10	U20	U30	U40	U50
整体孔隙率/%	0	10.3	21.2	30.5	41.3	49.6
表面孔隙率/%	0	12.1	22.4	32.8	42.1	50.4

2.2 吸油量和出油量

图 1 为多孔 PE-UHMW 试样的孔隙率对吸油量和出油量的影响图,吸油量随着孔隙率的增大而增大,随着孔隙率的上升,试样中孔的体积增大,存储油液的能力增强,因而多孔 PE-UHMW 试样的吸油量增大。同时出油量也随着孔隙率的增大而增大,孔隙率越大,试样中所含油液越多,能够输出的油液也越多。

2.3 摩擦系数

图 2 为载荷为 100 N,转速为 200 r/min 时 U0 试样和 U40 试样在干摩擦和贫油条件下的原始摩擦曲线。干摩擦时,多孔 PE-UHMW 试样的摩擦系数高于普通 PE-UHMW 试样。因为普通

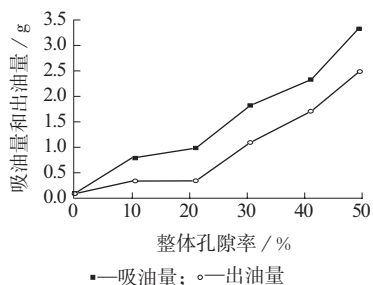


图 1 多孔 PE-UHMW 试样的孔隙率对吸油量和出油量的影响

PE-UHMW 试样表面比较平滑,而多孔 PE-UHMW 试样表面有很多孔隙,这些孔隙的存在增大了试样表面的粗糙度,因而摩擦系数增大。而在贫油润滑时,多孔 PE-UHMW 试样的摩擦系数低于普通 PE-UHMW 试样。原因是多孔试样的出油量远远大于普通试样的出油量,摩擦副表面能够得到比较充分的油液润滑。普通 PE-UHMW 试样干摩擦时的摩擦系数略大于贫油时的摩擦系数,而多孔 PE-UHMW 试样在贫油润滑时的摩擦系数只有干摩擦时的 30.3%,说明多孔 PE-UHMW 试样存储并输送到摩擦副表面的油液能够改善摩擦副表面的润滑条件,大大降低摩擦系数。

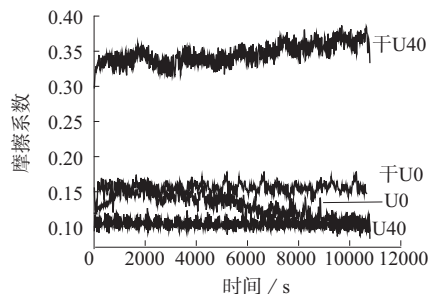


图 2 U0 和 U40 试样在干摩擦和贫油条件下的原始摩擦曲线

图 3 是 U0, U10, U20, U30, U40, U50 试样在干摩擦条件下 (载荷 100 N, 转速 200 r/min) 的摩擦曲线。

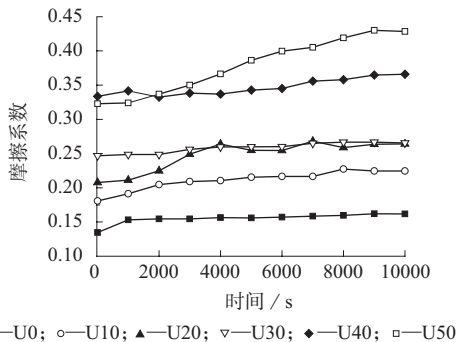


图 3 多孔 PE-UHMW 试样干摩擦时的摩擦曲线

由图 3 可知,干摩擦时,摩擦系数随着试样孔隙率的增大而增大。孔隙率越大,意味着试样表面的

孔隙越多,试样表面越粗糙,因而摩擦系数越大。同一个试样,随着时间的推移,摩擦条件的恶化,摩擦系数总体呈上升趋势。

图4为U0, U10, U20, U30, U40, U50试样在贫油条件下(载荷100 N,转速200 r/min)的摩擦曲线。从U10开始,所有的多孔试样,随着孔隙率的增大,摩擦系数减小。从图4可知,孔隙率越大,出油量越大,摩擦副表面获得的油液就更多,摩擦系数就越小。孔隙率较小的试样U10和U20的摩擦曲线先减小后增大,因为孔隙率较小时,试样的出油量较少。在摩擦实验初期,存储的油液被挤压至摩擦副表面起到润滑的作用,此时摩擦系数下降。到摩擦实验中后期,能挤出的油液量减少,不能继续改善摩擦副表面的润滑条件,此时试样的摩擦系数增大。孔隙率较大的试样U30, U40, U50的吸油量和出油量都比较大,在摩擦过程中,油液不断被挤出,摩擦副表面的润滑条件能够得到不断改善,因而摩擦系数一直下降。而且贫油润滑时U30, U40, U50试样的摩擦系数比U0低,说明U30, U40, U50较多孔隙的存在能够降低摩擦系数,改善摩擦副表面的摩擦性能。

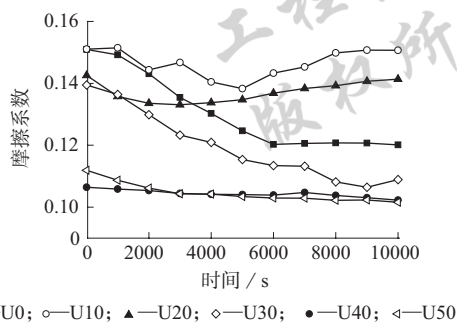


图4 多孔 PE-UHMW 在贫油润滑条件下的摩擦曲线

3 结论

通过模板-滤取法成功地制备出具有确定孔隙率的多孔 PE-UHMW 试样。由于孔隙的存在使得试样具有存储和输送油液的能力,在贫油润滑条件下,试样的摩擦性能有了很大的改善。

(1) 贫油润滑时,多孔 PE-UHMW 试样的摩擦系数低于普通 PE-UHMW 试样。多孔 PE-UHMW 试样在贫油润滑时的摩擦系数只有干摩擦时的30.3%,摩擦系数下降幅度很大,有效地改善了摩擦副表面的摩擦性能。

(2) 干摩擦时,多孔试样U0, U10, U20, U30, U40, U50的孔隙率越大,摩擦系数越高。

(3) 贫油润滑时,多孔试样U30, U40, U50的摩擦系数低于U0的摩擦系数。能够有效地改善摩擦副表面的摩擦性能。

参考文献

- [1] 周家波,杨凯. 武装直升机现状和发展趋势探析[J]. 国防科技, 2007,20(5):40-43.
Zhou Jiabo, Yang Kai. Analysis of present situation and development trend of armed helicopter[J]. National Defense Science & Technology, 2007,20(5):40-43.
- [2] 王典,戴振东,于敏. 用于直升机传动系统干运转的油雾润滑技术[J]. 机械制造与自动化, 2011,40(2):60-62.
Wang Dian, Dai Zhendong, Yu Min. Oil-mist lubrication technology used for helicopter gear transmission[J]. Machine Building & Automation, 2011,40(2):60-62.
- [3] 于敏,戴振东,薄玉奎. 提高直升机齿轮传动干运转能力的离子注入技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2006,38(1):11-15.
Yu Min, Dai Zhendong, Bo Yukui. Ion implantation for improving survivability of helicopter gear transmission under oil-out condition [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2006,38(1):11-15.
- [4] 陈存社,徐辉,文武. 超高分子量聚乙烯微孔材料成型工艺研究[J]. 北京工商大学学报(自然科学版), 2003,21(1):14-16.
Chen Cunshe, Xu Hui, Wen Wu. Research on the forming process of microporous ultra high molecular weight polyethylene material [J]. Journal of Beijing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2003,21(1):14-16.
- [5] 吴刚,张文光,王成焘. 仿生多孔超高分子量聚乙烯的摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2007,27(6):539-543.
Wu Gang, Zhang Wenguang, Wang Chengtao. Study on friction and wear properties of bionic porous ultra high molecular weight polyethylene[J]. Tribology, 2007,27(6):539-543.
- [6] Sa-nguanruksa J, Rujiravanit R, Supaphal P. Porous polyethylene membranes by template-leaching technique: preparation and characterization[J]. Polymer Testing, 2004,23(1):91-99.
- [7] 刘培生. 多孔材料孔率的测定方法[J]. 钛工业进展, 2006,22(6):34-37.
Liu Peisheng. Method for the determination of porosity of porous materials[J]. Titanium Industry Progress, 2006,22(6):34-37.
- [8] 曾汉民. 高技术新材料要览[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993.
Zeng Hanmin. Essentials of advanced materials for high technology [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1993.
- [9] 李估莲,傅仁利,王静秋,等. 模板-滤取法制备 UHMWPE 多孔材料及其孔道结构[J]. 塑料, 2013,42(1):52-54.
Li Jilian, Fu Renli, Wang Jingqiu, et al. The porous UHMWPE prepared by templates-leaching method and its structure[J]. Plastics, 2013,42(1):52-54.