

碳纤维增强人工关节软骨材料 ——超高分子量聚乙烯的摩擦学特性

熊党生¹, 何春霞²

(1. 南京理工大学 材料科学与工程系, 江苏 南京 210094; 2. 南京农业大学 工学院, 江苏 南京 210032)

摘要: 用碳纤维对超高分子量聚乙烯进行填充改性, 测试了碳纤维填充量对其硬度及摩擦学性能的影响, 用光学显微镜和扫描电子显微镜观察了填充复合材料磨损表面形貌。结果表明: 随着碳纤维含量增加, 复合材料的硬度上升, 耐磨性增强; 碳纤维可大幅度降低超高分子量聚乙烯在蒸馏水润滑条件下的摩擦系数; 超高分子量聚乙烯在干摩擦下的磨损主要表现为粘着、犁沟及塑性变形, 而碳纤维填充复合材料的磨损表现为碳纤维的剥离。

关键词: 超高分子量聚乙烯; 碳纤维; 人工关节; 摩擦磨损性能

中图分类号: TH117.3

文章标识码: A

文章编号: 1004-0595(2002)06-0454-04

超高分子量聚乙烯(UHMW PE)具有许多优异性能, 其作为人工关节软骨-关节臼材料与金属或陶瓷关节头组合构成目前临床普遍采用的人工关节。然而, 随着置换关节使用年限的增长, 一方面, 磨损产生的磨屑聚积并诱发机体细胞产生一系列不良的生物学反应, 导致假体周围溶解, 使固定良好的假体松动^[1,2]。另一方面, UHMW PE 的硬度偏低, 抗蠕变性能较差, 长期使用过程中发生蠕变而使置换关节产生精度偏差, 进而影响置换关节的装配性^[3]。因此提高 UHMW PE 的硬度和改善其耐磨性对延长置换关节的临床寿命, 减少患者痛苦具有重要意义。

研究表明, 关节头材料表面粗糙度、关节头材料种类(金属和陶瓷)及金属关节头材料表面改性等均对 UHMW PE 摩擦磨损性能有较大的影响^[4~8]。UHMW PE 表面离子注入可增强其耐磨性^[9]。文献[3及 10]分别探讨了碳纤维(CF)增强聚醚醚酮(PEEK)及 UHMW PE 纤维增强 HDPE 作为人工关节软骨材料的可能性, 并评价了其摩擦学性能。本文作者采用 CF 增强 UHMW PE, 考察了 CF 添充量对复合材料硬度及摩擦学性能的影响。

1 实验部分

1.1 样品制备

将吉林炭素厂提供的 TX-3 型 3K 碳纤维切割成

长度小于 2 mm 的短纤维, 按不同的质量分数与分子量为 300 万的 UHMW PE 粉末在研钵内充分混合; 将混合均匀的粉末置于 K-04 型金相镶嵌机中, 加热至约 150℃、保温保压 1.5 h 热压成型, 冷却后经机加工制成尺寸为 6 mm × 10 mm × 12 mm 待用试样。

1.2 性能测试

在 MM-200 型环-块摩擦磨损试验机上评价复合材料的滑动摩擦磨损性能; 试验条件: 载荷 196 N、转速 200 r/min、试验时间 2 h。摩擦磨损试验前, 复合材料试块和不锈钢试环摩擦表面均用 500# 金相砂纸打磨, 并用酒精清洗, 干燥后备用。

选用布氏硬度计测量复合材料试样的硬度; 用金相显微镜及扫描电子显微镜(SEM)观察磨损表面形貌。

2 结果与讨论

2.1 碳纤维含量对复合材料硬度的影响

CF 含量对 UHMW PE 硬度的影响如图 1 所示。可以看出, 随着填充 CF 质量分数的增加, 复合材料的硬度增大, 当 CF 体积分数为 0%~15% 时, 复合材料的硬度缓慢增大, 当 CF 体积分数为 15%~20% 时, 复合材料的硬度迅速增大。

2.2 CF 含量对复合材料摩擦磨损性能的影响

UHMW PE 及 20% CF-UHMW PE 复合材料在

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2002AA 331010); 江苏省应用基础研究资助项目(BJ2000030)。

收稿日期: 2001-12-19; 修回日期: 2002-04-25/联系人熊党生, E-mail: xiongds@mail.njust.edu.cn

作者简介: 熊党生, 男, 1960 年生, 博士, 教授, 目前主要从事材料及摩擦学研究。

干摩擦及水润滑条件下的摩擦系数随试验时间的变化曲线如图 2 所示 可以看出: 在干摩擦条件下,

UHMW PE 的起始摩擦系数较低(0.18), 随滑动距离的增加不断增大, 当试验时间达到 120 min 时, 其摩

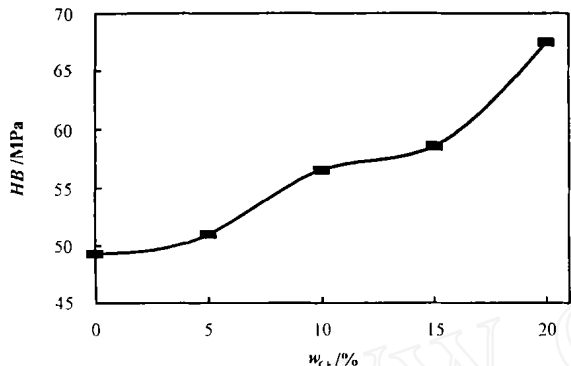


Fig 1 Hardness of UHMW PE composite vs CF content
图 1 CF 填充量对 UHMW PE 复合材料硬度的影响

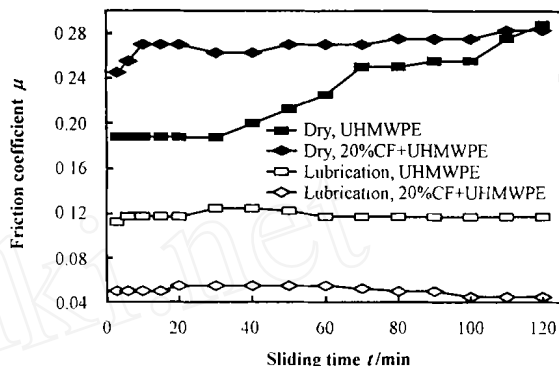


Fig 2 Variation of friction coefficient with sliding time
图 2 UHMW PE 及其复合材料的摩擦系数随时间的变化

擦系数增大为 0.29, 同复合材料的摩擦系数相近; 而 CF 填充复合材料在干摩擦下的摩擦系数较高, 但较稳定; 在水润滑条件下, 复合材料的摩擦系数则较低 (约 0.05). 因此, 虽然 20% CF-UHMW PE 复合材料在干摩擦下的摩擦系数较高, 但其波动较小, 而在水润滑下的摩擦系数明显较低

2.3 载荷对复合材料摩擦磨损性能的影响

图 4 示出了 20% CF-UHMW PE 复合材料在干

摩擦条件下, 随着 CF 含量的增加, 复

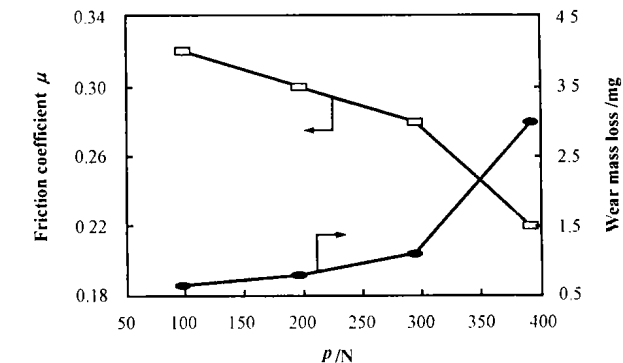


Fig 4 Variation of friction coefficient and wear mass loss of 20% CF-UHMW PE with load

图 4 20% CF-UHMW PE 复合材料的摩擦系数及磨损质量损失随载荷的变化

摩擦条件下的摩擦系数及磨损质量损失随载荷的变化关系 可以看出, 随着载荷的增加, 复合材料的摩擦系数降低, 磨损质量损失增大; 特别是当载荷增加到 392 N 时, 摩擦系数显著降低, 而磨损质量损失显著增大 这可能是由于高载荷下复合材料表面在摩擦热作用下发生软化甚至局部熔融所致

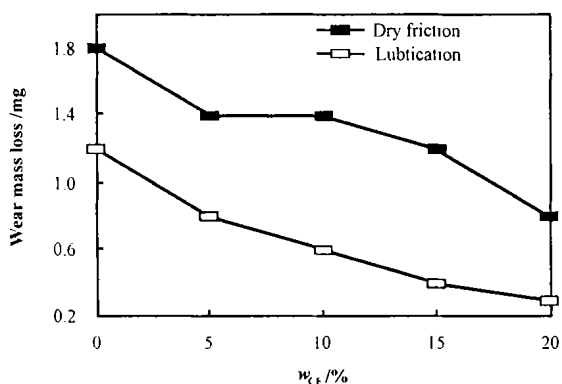
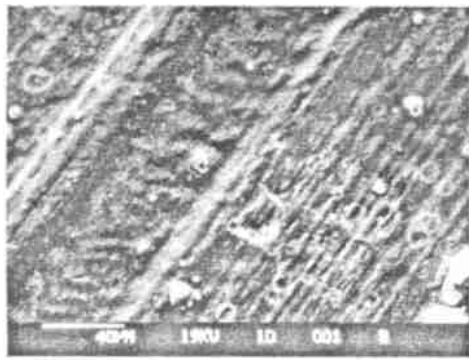


Fig 3 Effect of CF content on wear mass loss
图 3 CF 含量对复合材料磨损质量损失的影响

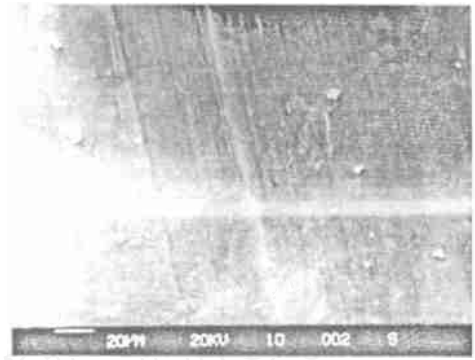
合材料的磨损质量损失呈下降趋势, 从 UHMW PE 的 1.8 mg 降低至含 20% CF 的复合材料的 0.8 mg. 在水润滑条件下, UHMW PE 的磨损质量损失最大; 随着 CF 含量的增加, 复合材料的磨损质量损失减小, 且当 CF 含量处于 0% ~ 10% 范围内时其降低速度较快

2.4 分析与讨论

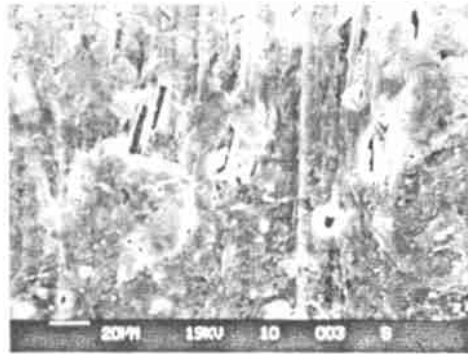
图 5 示出了 UHMW PE 及 20% CF-UHMW PE 复合材料在干摩擦及水润滑下的磨损表面形貌 SEM 照片. 可以看出, 在干摩擦条件下, UHMW PE 磨损表面 [图 5(a)] 除犁沟外, 还存在微观波浪形起伏, 这可能是由于摩擦热软化和粘着疲劳所致. 在水润滑下, UHMW PE 磨损表面光滑 [图 5(b)], 无上述波浪形起伏, 而仅存在轻微的犁沟痕迹. 20% CF-UHMW PE



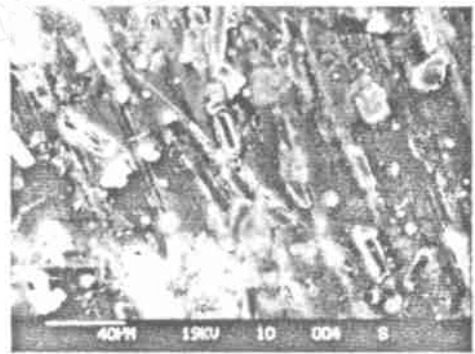
(a) UHMW PE at dry sliding



(b) UHMW PE lubricated with distilled water



(c) 20% CF-UHMW PE at dry sliding



(d) 20% CF-UHMW PE lubricated with distilled water

Fig 5 SEM pictures of worn surfaces of UHMW PE and 20% CF-UHMW PE composite

图 5 UHMW PE 及 20% CF-UHMW PE 复合材料磨损表面形貌 SEM 照片

复合材料在干摩擦[图 5(c)]及水润滑下[图 5(d)]的磨损表面均无波浪形起伏,犁沟迹象也不明显,但均呈现 CF 的剥落和拔出痕迹

复合材料中填充的 CF 具有高强度、高模量,其在摩擦过程中可起承载作用,从而影响填充复合材料的摩擦磨损性能。在干摩擦下,不同 CF 含量的 UHMW PE 复合材料的摩擦行为相似,起始摩擦系数较低,随试验时间增加有所增大,随后又较快地趋于平稳。UHMW PE 的摩擦行为则较不稳定,摩擦系数波动较大。这可能是由于随着试验时间增加,一方面摩擦副接触面积增大,另一方面摩擦热使 UHMW PE 摩擦表面软化,粘附性增强,故摩擦系数增大。在水润滑下,水隔离了 UHMW PE 及其复合材料同不锈钢试环的直接接触,且摩擦表面热量被水带走,故摩擦系数较稳定。炭-石墨材料在真空中的摩擦系数较高,而在水蒸汽及潮湿气氛中的摩擦系数较低^[1]。在水润滑下,复合材料中的碳纤维将充分吸水,水分子吸附降低了其层状晶体中层与层之间范德瓦尔斯相互作用,使碳纤维的剪切强度降低;此外,复合材料中的 CF 与 UHMW PE 之间存在大量微小空隙,有利于改善材料同水的润湿性和润滑状态,因此,不同 CF 含量的 UHMW PE 复合材料

在水润滑下的摩擦系数均远低于 UHMW PE 相应的摩擦系数

3 结论

a 在本试验条件下,CF-UHMW PE 复合材料的硬度随 CF 含量的增加而增大。在干摩擦及蒸馏水润滑下,复合材料的磨损质量损失随 CF 含量的增加而降低

b 在干摩擦下,CF-UHMW PE 复合材料的摩擦系数较稳定,但比 UHMW PE 的摩擦系数高;在蒸馏水润滑下,CF-UHMW PE 复合材料的摩擦系数则远低于 UHMW PE 的摩擦系数

c 在干摩擦下,UHMW PE 的磨损主要表现为粘着、犁沟及塑性变形,其磨损表面存在波浪形起伏;而 CF-UHMW PE 复合材料磨损表面无波浪形起伏,其磨损主要表现为 CF 的剥离

参考文献:

- [1] Mcgee M A, Howise D W, Neale S D, *et al*. The role of polyethylene wears in joint replacement failure[J]. Proc Instn Mech Engrs Part H, 1997, 211: 65-72
- [2] Xiong D S(熊党生), Ge S R(葛世荣). Research Status of Bio-Tribological Behaviors of UHMW PE (超高分子量聚乙烯生物

- 摩擦学行为的研究现状[J]. *Journal of China University of Mining & Technology* (中国矿业大学学报), 1999, 28 (monograph): 49-52
- [3] Wang A, Lin R, Stark C, *et al*. Suitability and limitations of carbon fibre reinforced PEEK composites as bearing surfaces for total joint replacements[J]. *Wear*, 1999, 225-229: 724-727.
- [4] Weightman B, Light D. The effect of the surface finish of alumina and stainless steel on the wear rate of UHMWPE polyethylene[J]. *Biomaterials*, 1986, 17: 20-24
- [5] Guo Z T (郭治天), Xiong D S (熊党生), Ge S R (葛世荣). Effect of Stainless Steel Roughness on the Friction and Wear Properties of Ultra-high Molecular Weight Polyethylene (不锈钢表面粗糙度对超高分子量聚乙烯摩擦磨损性能的影响)[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis, Part A: Physical Testing* (理化检验, 物理分册), 2001, 37(9): 369-372
- [6] Dowson D. A comparative study of the performance of metallic and ceramic femoral head components in total replacement hip joints[J]. *Wear*, 1995, 190: 171-183
- [7] Xiong D S (熊党生), Ge S R (葛世荣), Xu F Q (徐方权), *et al*. Investigation of the Bio-tribological Properties of UHMWPE-A₂O₃ Ceramic Pair under Dry Sliding and Lubricated Conditions (超高分子量聚乙烯/A₂O₃生物摩擦学特性的研究)[J]. *Tribology* (摩擦学学报), 2000, 20 (4): 256-259
- [8] Dong H, Shi W, Bell T. Potential of improving tribological performance of UHMWPE by engineering the Ti6Al4V counterfaces[J]. *Wear*, 1999, 225-229: 146-153
- [9] Xiong D S (熊党生), Zhang Y H (张彦华), Xu J D (徐嘉东). Bi-tribological properties of N⁺ ion implanted UHMWPE (氮离子注入超高分子量聚乙烯的生物摩擦学特性研究)[J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering* (中国生物医学工程学报), 2001, 20(4): 380-384
- [10] Jacobs O, Mentz N, Poppel A, *et al*. Sliding wear performance of HDPE reinforced by continuous fibres[J]. *Wear*, 2000, 244: 20-28
- [11] Yen B K. Influence of water vapor and oxygen on the tribology of carbon materials with sp² valence configuration[J]. *Wear*, 1996, 192: 208-215

Tribological Properties of Ultra-high-molecular-weight-polyethylene Composites Reinforced with Carbon Fiber

XIONG Dang-sheng¹, HE Chun-xia²

(1. Department of Materials Science & Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210032, China)

Abstract: Ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) as an artificial joint acetabular material was reinforced with carbon fiber (CF) of various mass fractions. The effect of CF mass fraction on the hardness and tribological properties of the reinforced UHMWPE composites was investigated. Thus the composite blocks were made to slide against a stainless steel ring under dry sliding and distilled-water lubricated condition, and the morphologies of the worn composite surfaces observed with a scanning electron microscope. As the results, the hardness and wear resistance of CF-UHMWPE composites increased with increasing CF mass fraction, while the composites had largely decreased friction coefficients under lubrication of distilled water as compared with the unfilled UHMWPE. This was attributed to the reinforcing function of the CF fibers in the composites and the lubricating action of the water boundary film. UHMWPE was dominated by adhesion, plowing, plastic deformation, and fatigue in sliding against the stainless steel, while the CF-UHMWPE composites were characterized by the spalling of the carbon fibers and the resulting abrasive wear attributed to the carbon fiber wear debris.

Key words: ultra-high molecular weight polyethylene; carbon fiber; artificial joint; friction and wear behavior

Author: XIONG Dang-sheng, male, born in 1960, Ph. D., Professor, E-mail: xiongds@mail.njust.edu.cn