

三元层状陶瓷 Ti_3AlC_2 /超高分子量聚乙烯复合材料的制备及性能

张恒, 王李波*, 戴亚辉, 申长洁, 周爱国, 曹新鑫

(河南理工大学 材料科学与工程学院, 焦作 454003)

摘要: 为了增强超高分子量聚乙烯(UHMWPE)的性能, 研究采用表面改性的 Ti_3AlC_2 填充 UHMWPE, 通过热压成型制备了 Ti_3AlC_2 /UHMWPE 复合材料。采用 SEM 观察复合材料的微观结构, 表明 Ti_3AlC_2 均匀分散在 UHMWPE 基体中, 表面处理后的填料与基体界面熔合较好; 热分析结果表明, Ti_3AlC_2 的添加降低了 UHMWPE 的结晶度和结晶热焓, 同时提高了聚合物的热传导性; DMA 分析结果表明, 添加 Ti_3AlC_2 有效地提高了 Ti_3AlC_2 /UHMWPE 复合材料的抗蠕变性能; 得益于无机粒子改善了复合材料的硬度和刚性, 提高了复合材料抗外界应力变形能力; 摩擦学性能分析表明, 适量的 Ti_3AlC_2 (质量分数 $\leq 15\text{wt}\%$) 填充 UHMWPE 能有效提高复合材料的减磨抗摩性能, 同时磨痕表面形貌分析结果表明, Ti_3AlC_2 /UHMWPE 复合材料的摩擦磨损机制由粘着磨损向磨粒磨损转变。

关键词: 超高分子量聚乙烯; Ti_3AlC_2 ; 聚合物基复合材料; 蠕变; 摩擦磨损

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2017)06-1177-08

Preparation and performances of ternary layered ceramic Ti_3AlC_2 /ultrahigh molecular weight polyethylene composites

ZHANG Heng, WANG Libo*, DAI Yahui, SHEN Changjie, ZHOU Aiguo, CAO Xinxin

(School of Materials Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: In order to improve the performances of ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE), surface modification of Ti_3AlC_2 filled UHMWPE was studied. Ti_3AlC_2 /UHMWPE composites were prepared by hot-press moulding technique. SEM results show that Ti_3AlC_2 distributes homogeneously in the matrix and the modified fillers have a better boundary integrate with the polymer matrix. Thermal analysis results show that the crystallinity and enthalpy of Ti_3AlC_2 /UHMWPE composite decreases with the addition of Ti_3AlC_2 , while the thermal conductivity of the composites increases. DMA results show that Ti_3AlC_2 improves the creep performance of Ti_3AlC_2 /UHMWPE composites effectively, which is benefited from the increase of hardness and rigidity of the polymer matrix and the capability of resistance to deform under external stress is enhanced. Additionally, tribology analysis shows that the right amount of Ti_3AlC_2 (mass fraction $\leq 15\text{wt}\%$) filled UHMWPE can improve the anti-friction performance of the composites effectively, while the worn surface morphology analysis of Ti_3AlC_2 /UHMWPE composites shows that the friction and wear mechanism of the composite transform from adhesive wear to abrasive wear.

Keywords: ultrahigh molecular weight polyethylene; Ti_3AlC_2 ; polymer-matrix composite; creep; friction and wear

收稿日期: 2016-06-30; 录用日期: 2016-09-01; 网络出版时间: 2016-09-07 14:52

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20160907.1452.008.html

基金项目: 国家自然科学基金(51205111; 51472075; 51275156); 河南省科技创新人才计划(134100510008)

通讯作者: 王李波, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为纳米及纳米复合材料 E-mail: wanglibo537@hpu.edu.cn

引用格式: 张恒, 王李波, 戴亚辉, 等. 三元层状陶瓷 Ti_3AlC_2 /超高分子量聚乙烯复合材料的制备及性能[J]. 复合材料学报, 2017, 34(6): 1177-1184.

ZHANG Heng, WANG Libo, DAI Yahui, et al. Preparation and performances of ternary layered ceramic Ti_3AlC_2 /ultrahigh molecular weight polyethylene composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(6): 1177-1184 (in Chinese).

超高分子量聚乙烯(UHMWPE)是一种热塑性工程塑料,鉴于其较强的抗冲击性、化学稳定性、抗应力开裂性、优异的自润滑性和摩擦磨损性等,在工程机械领域中得到了广泛的应用^[1-3]。但是其较低的硬度,抗蠕变能力、抗疲劳能力和抗磨性能差等阻碍了其在力学性能要求苛刻的环境中的应用。为了扩展其应用领域,需对 UHMWPE 进行改性。其中,通过表面改性无机材料的填充是提高其性能的重要方法之一^[4]。目前研究表明,通过无机粒子^[5]、纤维^[6-7]和二维层状结构材料^[8-9]等进行填充改性 UHMWPE 制备复合材料,可有效地提高其硬度、力学性能和抗磨性能等^[10]。

三元纳米层状陶瓷 Ti_3AlC_2 是一种典型的过渡金属碳化物(MAX 相),MAX 相是一类三元层状结构过渡金属碳化物陶瓷的总称,其化学通式为 $\text{M}_{n+1}\text{AX}_n$,其中,M 为早期过渡金属元素,A 为主族元素,X 为碳或氮,n 为 1~3^[11-12]。由于其具有独特的纳米层状结构而且结合了陶瓷与金属的可加工性和导电性,较高的弹性模量、优异的导热性、低密度和高温稳定性等得到了广泛关注^[13]。结合 Ti_3AlC_2 优异的力学性能填充改性硬度低、抗蠕变性能差的 UHMWPE,将 Ti_3AlC_2 独特的纳米层状结构与 UHMWPE 的自润滑性能相结合进一步提高和改善材料的抗磨性能,制备高强度、抗蠕变和抗磨性好的工程复合材料,对满足更多领域的应用具有现实意义。 Ti_3AlC_2 与聚合物复合的研究报道有限^[14],因此本研究通过表面活性剂处理 Ti_3AlC_2 并填充改性 UHMWPE,采用热压成型法制备了 Ti_3AlC_2 /UHMWPE 复合材料,并对样品的微观形貌结构、热性能、硬度、蠕变性能和摩擦学性能等进行了表征,结果表明 Ti_3AlC_2 对复合材料的力学性能、热学性能、蠕变性能和抗磨性等有明显的改善。

1 实验材料及方法

1.1 实验原料

粉末: TiH_2 粉(99.7%,粒径小于 48 μm ,天津云海钛业有限公司),Al 粉(99%,粒径小于 70 μm ,国药集团上海化学试剂有限公司),石墨粉(99%,粒径小于 70 μm ,河南华翔碳粉科技有限公司),UHMWPE 粉末(相对分子质量约 1.5×10^6 ,粒径~590 μm ,中国石化北京燕山分公司);液体:钛酸酯偶联剂(DN101,99%,化学纯,南京道宁试剂有限公司),石油醚(99%,分析纯,洛阳市化学试

剂厂)。以上原料、试剂均未进行二次处理。

1.2 样品制备

1.2.1 Ti_3AlC_2 的制备及表面处理

三元层状陶瓷 MAX 相 Ti_3AlC_2 是通过无压气氩保护烧结法制备^[15],具体步骤如下:将 TiH_2 粉、Al 粉和石墨粉按 3:1.2:2 的摩尔比进行球磨混合,将混合均匀的粉末在高温气氛保护管式炉(SGJ-16B,洛阳神佳窑业)中以 10℃/min 的升温速度在 1400℃ 温度下氩气保护保温 2 h,自然冷却后取出样品,将块体机械粉碎并球磨过筛网得到~25 μm 粒径的粉体。采用表面活性剂 DN101 对所制备的 Ti_3AlC_2 粉末进行处理:将 0.05 g DN101 分散至石油醚中,超声 10 min,加入 5 g Ti_3AlC_2 粉末,室温条件下磁力搅拌 2 h,之后通过旋转蒸发仪将溶剂去除得到表面处理的 Ti_3AlC_2 粉末。

1.2.2 Ti_3AlC_2 /UHMWPE 复合材料的制备

采用热压成型法制备 Ti_3AlC_2 /UHMWPE 复合材料,将不同质量的 Ti_3AlC_2 粉末与 UHMWPE 粉体在高速搅拌器中进行机械混合 1 h,在平板硫化机成型模具中以 210℃ 和 10 MPa 压力条件下保温 30 min 后,保持 10 MPa 压力自然冷却至室温得到尺寸为 150 mm×150 mm×4 mm 的不同质量分数的 Ti_3AlC_2 /UHMWPE 复合材料板材。将复合材料板在万能制样机上切割制备后续测试的试样。

1.3 性能测试及表征

采用 X 射线衍射仪(XRD, $\lambda=0.154\ 06\ \text{nm}$,步长 0.02°,扫描范围 4°~80°,Cu 靶 $K\alpha$ 射线源,日本理学株式会社)对无压烧结制备的 Ti_3AlC_2 粉体进行物相分析;表面处理前后的 Ti_3AlC_2 粉末的疏水性采用接触角测试仪(POWREACH, JC2000C1)进行测试,首先将 Ti_3AlC_2 粉末在 10 MPa 压力下压制成 10 mm 直径的圆片,将水滴滴于表面,通过显微镜镜头与相机获得液滴的外形图像;采用场发射扫描电子显微镜(SEM, FEI Quanta 250, Germany)观察材料的断面形貌和微观结构,试样在液氮中浸泡 30 min 后脆断,断口喷金处理 70 s,扫描测试电压为 10 kV;DSC 分析采用法国赛特拉姆公司生产的 Evolution 2400 型综合热分析仪进行表征,氩气流量为 20 mL/min,以 10 K/min 的升温速率从室温升到 800℃,复合材料的结晶度根据下式计算:

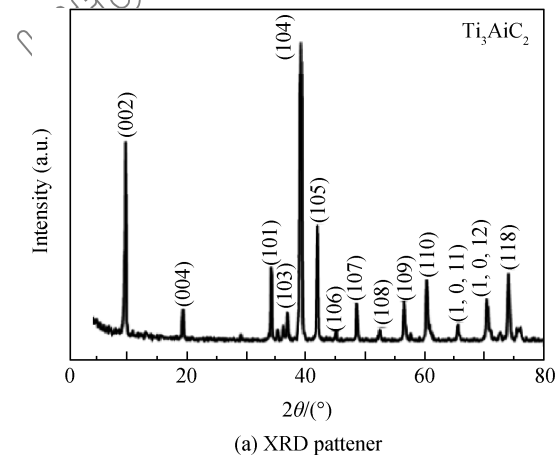
$$x_c = \frac{\Delta H}{(1-\varphi)\Delta H^0} \quad (1)$$

式中: ΔH 为单位质量的熔融焓; ΔH^0 代表 PE 结晶度为 100% 的熔融焓, 其值为 293 J/g; φ 为 Ti₃AlC₂ 在基体中的质量分数; 热扩散率测试采用激光导热分析仪(NETZSCH, LFA457)测试, 试样为直径 12.7 mm、厚 2 mm 的圆片; 材料的硬度测试采用配备 D 型压头的邵氏硬度计, 载荷为 100 N, 探针压进试样 1 s 内读取数据, 每组试样测 5 次取平均值作为最终硬度; 蠕变性能采用动态热机械分析仪(DMA Q800, TA Instruments Inc, USA)测试, 在 50℃ 温度和 5 MPa 应力条件下变形 20 min, 撤去应力, 恢复 20 min 得到蠕变回复曲线; 摩擦学性能采用万能摩擦磨损试验机(MMW-1, 济南辰达机械)销盘法测试, 转动轴以 200 r/min 的转速, 在 200 N 载荷作用下摩擦 1 h 得到摩擦系数曲线。

2 结果与讨论

2.1 物相和形貌结构分析

图 1 为采用无压烧结法所制备的 Ti₃AlC₂ 的

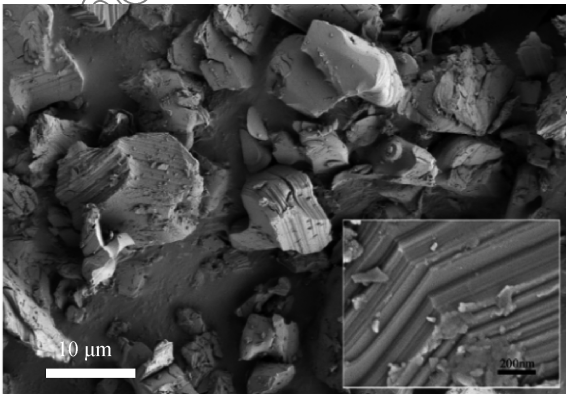


(a) XRD pattener

XRD 图谱及其微观形貌结构图像。根据 XRD 图谱分析可知, 在 2θ 角为 9.6° 、 34.1° 、 39.1° 、 41.8° 和 60.2° 处的衍射峰分别对应的是 Ti₃AlC₂ 在 (002)、(101)、(104)、(105) 和 (110) 晶面的特征衍射峰。XRD 图谱中, 所有衍射峰均与 Ti₃AlC₂ (JCPDS 52-0875) 完好的对应, 说明制备的样品基本不含杂质; 结合图 1(b) 样品的 SEM 表征, Ti₃AlC₂ 粉末的粒径分布在 $10\sim 20\ \mu\text{m}$, 其微观结构形貌为典型的纳米层状陶瓷结构, 即通过无压烧结法成功制备出高纯的三元层状陶瓷 Ti₃AlC₂ [15]。

图 2 为表面改性前后 Ti₃AlC₂ 的接触角测试照片。可以看出, 未改性的 Ti₃AlC₂ 接触角接近 0° , 说明其具有极强的亲水性, 而经 DN101 表面处理的 Ti₃AlC₂ 的接触角为 114.5° , 表明改性后的 Ti₃AlC₂ 粉末具有很好的疏水性, 可进一步提高 Ti₃AlC₂ 与 UHMWPE 之间的相容性和界面间结合。

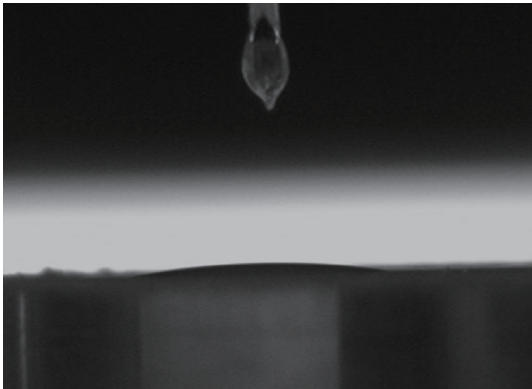
图 3 为不同质量分数的 Ti₃AlC₂/UHMWPE



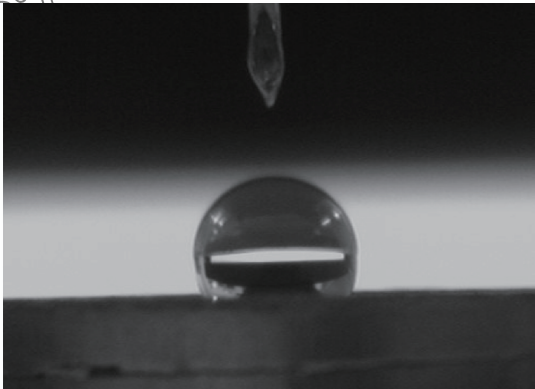
(b) SEM image

图 1 无压烧结合成 Ti₃AlC₂ 的 XRD 图谱与 SEM 图像

Fig. 1 XRD pattener and SEM image of Ti₃AlC₂ synthesized by pressless sintering



(a) Before modification



(b) After modification

图 2 Ti₃AlC₂ 在 DN101 改性前后接触角测试的水滴照片

Fig. 2 CA image of a water droplet on the surface of the Ti₃AlC₂ disk before and after DN101 modification

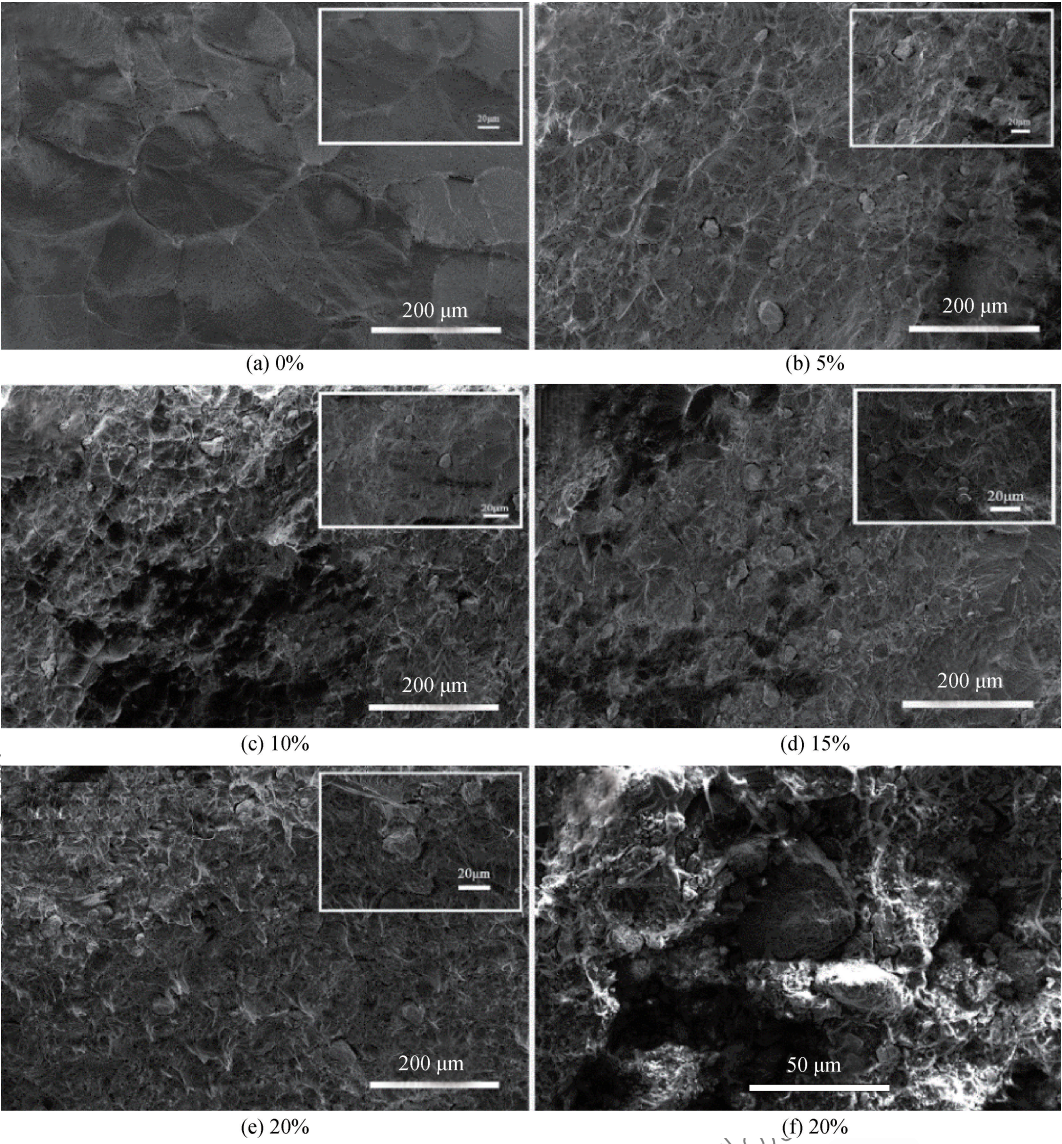


图 3 不同质量分数的 Ti_3AlC_2 /UHMWPE 复合材料的低温脆断面 SEM 图像
Fig. 3 SEM images of the cross-section of the composites with different mass fraction of Ti_3AlC_2

复合材料脆断面形貌 SEM 图片。从图 3(a)可以看出, UHMWPE 的断裂表面上出现平均尺寸在上百微米的“晶粒”断裂, 类似于穿晶断裂或准脆性断裂, 主要是由于 UHMWPE 具有较高的熔体黏度, 热压过程中依然保持初始颗粒的形状, 其断裂形貌表现出与文献[16]中相似的叶片状纹理轮廓; 在 Ti_3AlC_2 /UHMWPE 复合材料中, 由于增强相的粒径比聚合物初始颗粒粒径小, 热压后其渗透到熔化的粘流态 UHMWPE 颗粒中, 脆断后形成图 3(b)~3(e)中所显示的结构形貌, 在断面中可以看出表面处理后的增强相在 UHMWPE 基体中分散均匀且与 UHMWPE 具有良好的界面熔合; 复合材料的断裂形貌宏观表现出脆性断裂, 在裂纹边沿某

些区域发生了塑性流动和韧性断裂, 由于增强相填充在聚合物基体中形成更多的界面, 增强粒子与聚合物基体的结合强度相对于聚合物基体间的结合强度较弱, 在断裂裂纹扩展过程中形成更多的沿“晶”断裂, 这可能与 UHMWPE 的无定型-结晶的结构有关^[16]。此外, 从图 3(e)和图 3(f)可以看出, 当添加量过大时($\geq 20\text{wt}\%$), 增强相粒子会在基体中产生局部的团聚, 这可能会对 Ti_3AlC_2 /UHMWPE 复合材料的性能造成一定的影响。

2.2 Ti_3AlC_2 /UHMWPE 复合材料的热学性能
一般地, 复合材料中的填料会影响聚合物基体的结晶度, 从而对聚合物的热力学性能造成影响。图 4 为 Ti_3AlC_2 /UHMWPE 复合材料的 DSC 曲线

和结晶度变化曲线, 可以看出不同质量分数的 Ti_3AlC_2 填充 UHMWPE 并没有明显影响复合材料的熔点和热分解温度; 但是根据插图中结晶度和热焓的变化曲线, 当填料的添加量为 5wt% 和 10wt% 时, 复合材料的结晶度相对于 UHMWPE 没有明显变化, 当含量增加到 15wt% 和 20wt% 时, 复合材料的结晶度从 57.3% 降低至 48.1%; 同样地, UHMWPE 的结晶热焓也从 168.1 J/g 减小到了 112.7 J/g (Ti_3AlC_2 的添加量为 20wt%)。 Ti_3AlC_2 /UHMWPE 复合材料的结晶度和热焓的降低可能是由于大量的 Ti_3AlC_2 作为外来因素在聚合物基体中对聚合物的结晶区造成了扰乱, 从而使材料的结晶热焓和结晶度降低^[17]。

图 5 为不同 Ti_3AlC_2 质量分数的复合材料的热扩散率的变化。可以看出, 随着 Ti_3AlC_2 质量分数的增大, UHMWPE 的热扩散系数从 0.19 mm²/s 增加到添加量为 15wt% 时的 0.223 mm²/s, 提高了约 10%。热扩散率的增大主要由于当添加低含量的 Ti_3AlC_2 粒子均匀分散在 UHMWPE 基体中, 相邻的粒子间距离较大, 导热粒子完全被基体包裹, 不能形成热传导网络通路, 热扩散主要靠基体和导热粒子间隔传导, 随着填充量的增加, 导热性粒子间距逐渐缩短, 一定程度上构成密集的导热通路, 因此提高了材料的热扩散率^[6-17]。但是, 当 Ti_3AlC_2 的填充量为 20wt% 时, 复合材料的热扩散率出现非稳定增长趋势, 可能是由于如图 3(f) 中 Ti_3AlC_2 在基体中局部的团聚使热传导网络分布不均匀所致。

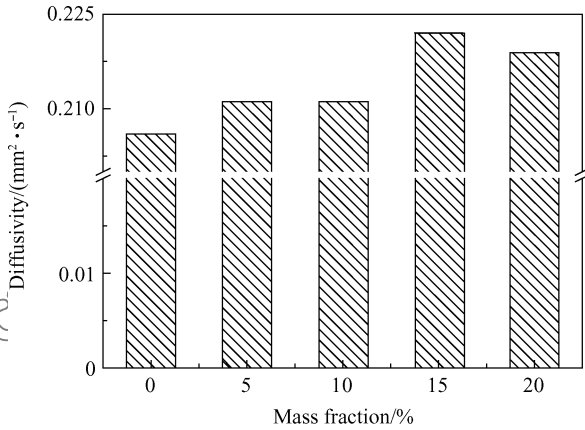


图 5 不同质量分数的 Ti_3AlC_2 对 Ti_3AlC_2 /UHMWPE 复合材料热扩散率的影响

Fig. 5 Influence of Ti_3AlC_2 mass fraction on thermal diffusivity of Ti_3AlC_2 /UHMWPE composites

2.3 Ti_3AlC_2 /UHMWPE 复合材料的蠕变性能

图 6 为随 Ti_3AlC_2 添加量的增加复合材料邵氏硬度值的变化, 可以看出, UHMWPE 的硬度值 HD 为 66.8, 随着无机填料含量的增大, Ti_3AlC_2 /UHMWPE 复合材料的硬度值逐渐增大, 当填充量为 20wt% 时, 硬度值 HD 为 70.5。复合材料硬度的增大说明 Ti_3AlC_2 的添加提高了聚合物的刚性, 表面改性的 Ti_3AlC_2 填充在聚合物基体中起到支撑载荷和抵抗局部变形的作用。

图 7 为 DMA 所表征的不同 Ti_3AlC_2 添加量的复合材料的蠕变与回复变化曲线。从图 7(a) 可以看出, UHMWPE 及其复合材料的蠕变变形曲线表现出典型的蠕变行为: 普弹形变、高弹形变和黏流形变等, 在移除应力后, 普弹形变快速恢复, 高弹形变逐渐恢复; 同时, 黏流形变使 UHMWPE 及其

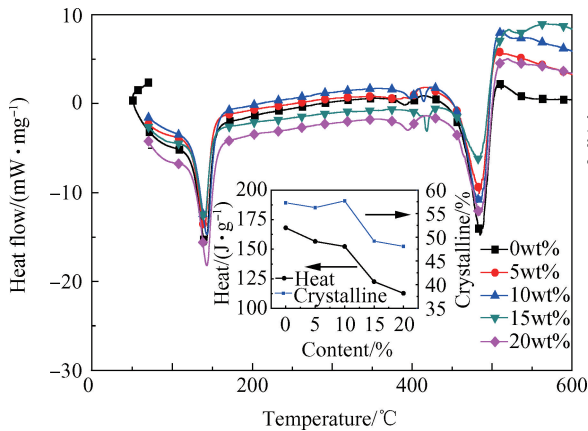


图 4 不同质量分数的 Ti_3AlC_2 /UHMWPE 复合材料的 DSC 曲线和结晶度变化曲线(插图)

Fig. 4 DSC curves and crystallinity of Ti_3AlC_2 /UHMWPE composites (In the illustration)

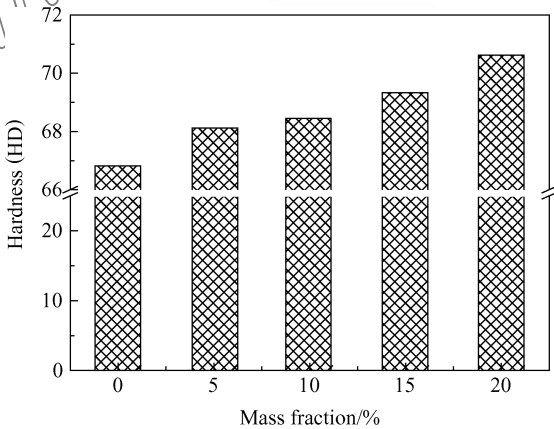


图 6 不同质量分数的 Ti_3AlC_2 /UHMWPE 复合材料的硬度变化

Fig. 6 Hardness of Ti_3AlC_2 /UHMWPE composites with different mass fractions of Ti_3AlC_2

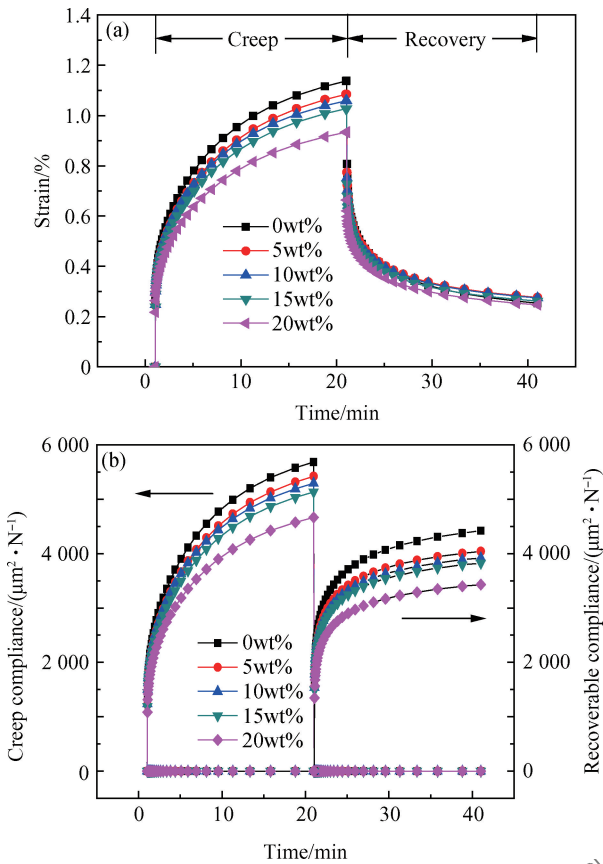


图 7 不同质量分数的 $\text{Ti}_3\text{AlC}_2/\text{UHMWPE}$ 复合材料的蠕变与回复曲线

Fig. 7 Creep and recovery behavior and creep and recoverable compliance of pure UHMWPE and $\text{Ti}_3\text{AlC}_2/\text{UHMWPE}$ composites

复合材料发生了永久变形^[19-20]。随着 Ti_3AlC_2 质量分数的增加,复合材料的蠕变形变量逐渐降低,当添加量为 20wt% 时,最大蠕变形变量由 UHMWPE 的 1.15% 减小到 0.95%,抗蠕变性能提高了约 20%,移除应力后复合材料均恢复到形变前的 90% 以上。从图 7(b) 可以看出,蠕变柔量随着填料质量分数的增加而减小,表明表面改性的 Ti_3AlC_2 增强了与 UHMWPE 的交联共聚,使其分子链的移动内阻增大,进而提高了聚合物的抗外界应力变形能力。

2.4 $\text{Ti}_3\text{AlC}_2/\text{UHMWPE}$ 复合材料的摩擦学性能

图 8 显示了 UHMWPE 在添加 Ti_3AlC_2 之后摩擦系数的变化。可以看出,随着添加量的增大, $\text{Ti}_3\text{AlC}_2/\text{UHMWPE}$ 复合材料的摩擦系数先减小后增大,当添加量为 15wt% 时,其摩擦系数仅为 0.191,比纯 UHMWPE 降低了约 10%。摩擦系数的降低可能是由于 Ti_3AlC_2 的添加增加了聚合物基

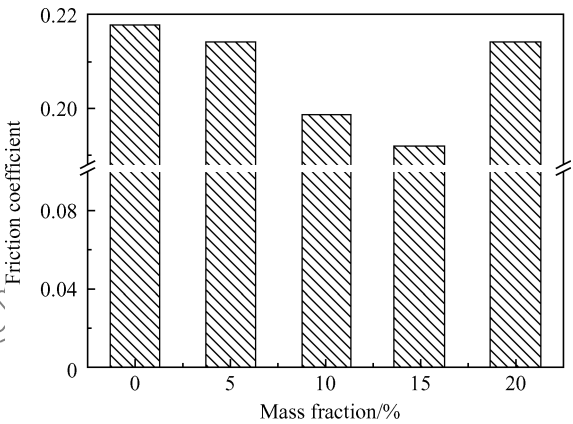


图 8 不同质量分数的 $\text{Ti}_3\text{AlC}_2/\text{UHMWPE}$ 复合材料的摩擦系数

Fig. 8 Friction coefficient of composites as a function of mass fraction of Ti_3AlC_2

体的刚性,提高了复合材料的塑性变形能力,同时在与摩擦副对磨时的塑性接触面积减小,有利于聚合物复合材料摩擦系数的降低^[21-22];此外, Ti_3AlC_2 改善了聚合物基体的热传导,有利于摩擦过程中热量的扩散,使摩擦副产生的热量尽快扩散出去,从而减小了复合材料表面的塑性变形和粘着磨损。当 Ti_3AlC_2 的添加量增加到 20wt% 时,复合材料的摩擦系数增大,可能是由于在摩擦过程中 Ti_3AlC_2 团聚在摩擦表面产生严重的磨粒磨损,磨粒与摩擦副之间对磨产生较大的摩擦系数。

图 9 为 $\text{Ti}_3\text{AlC}_2/\text{UHMWPE}$ 复合材料摩擦表面的 SEM 形貌结构图像。由图 9(a) 可以看出, UHMWPE 的磨痕表面表现出明显的犁切剥离的磨屑和塑性变形,表明其摩擦磨损机制以疲劳磨损和粘着磨损为主导;图 9(b)~9(e) 为不同质量分数的 $\text{Ti}_3\text{AlC}_2/\text{UHMWPE}$ 复合材料的摩擦表面微观形貌,可以看出,随着复合材料中填料浓度的增大,摩擦表面展现出的塑性变形和粘着磨损逐渐减轻,同时磨粒磨损现象有所加剧。如图 9(c) 所示,摩擦表面上出现明显的犁沟;在图 9(d) 中,当添加量为 15wt% 时,即摩擦系数最低时所对应的摩擦表面较光滑平整,说明材料硬度和刚性增加的同时使材料的摩擦系数减小,减轻了摩擦过程中的粘着磨损和磨粒磨损^[4, 22-24];图 9(e) 为 Ti_3AlC_2 添加量为 20wt% 时的复合材料的磨痕形貌,摩擦表面上出现了大量的磨粒,主要由于摩擦过程中镶嵌在聚合物基体表面的填料因团聚而在摩擦过程中脱落形成磨粒,这也是致使摩擦系数较高的主要原因。

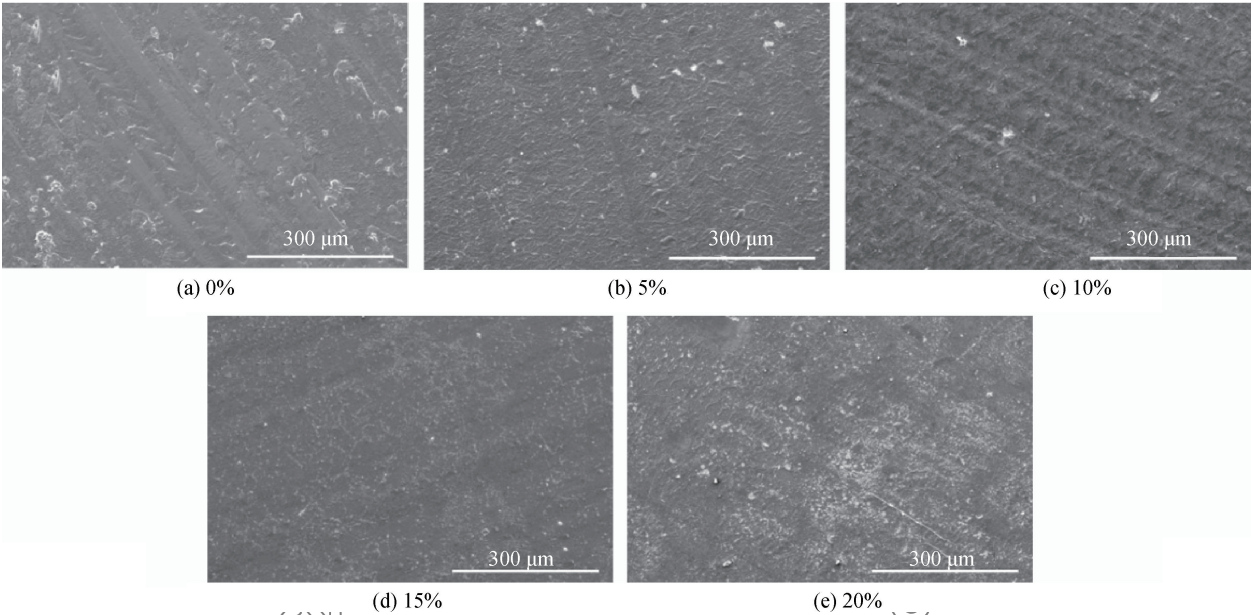


图9 不同质量分数的 Ti_3AlC_2 /UHMWPE 复合材料的磨痕表面 SEM 图像
Fig. 9 SEM micrographs of the worn surfaces for UHMWPE filled with different mass fractions of Ti_3AlC_2

3 结 论

(1) 采用无压烧结法成功制备三元纳米层状陶瓷 Ti_3AlC_2 ，通过钛酸酯偶联剂(DN101)表面改性 Ti_3AlC_2 填充超高分子量聚乙烯(UHMWPE)制备复合材料。微观形貌分析结果表明，增强相在聚合物基体中均匀分散，且与基体形成良好的结合界面。

(2) 表面改性的 Ti_3AlC_2 作为聚合物基体的增强相填充 UHMWPE，使聚合物的结晶度降低，硬度和抗蠕变性能提高，主要是由于刚性的无机填料在聚合物基体中起到支承载荷和抵抗外界应力变形的作用。

(3) 摩擦学性能分析表明，适量的 Ti_3AlC_2 填充 UHMWPE 有效改善聚合物的抗摩性能。当添加量为 15wt% 时， Ti_3AlC_2 /UHMWPE 复合材料的摩擦系数最小。 Ti_3AlC_2 的添加改善了聚合物的刚性，使复合材料的磨损机制由粘着磨损向磨粒磨损转变。

参考文献:

[1] 李艳芹, 朱博超, 黄平安, 等. 超高分子量聚乙烯研究进展及应用领域[J]. 广州化工, 2011, 39(2): 19-21.
LI Y Q, ZHU B C, HUANG P A, et al. Research progress and application of ultra high molecular weight polyethylene [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2011, 39(2): 19-21 (in Chinese).
[2] 杜石啸. 超高分子量聚乙烯的性能及应用领域[J]. 甘肃冶金,

2015, 37(2): 133-134.
DU S X. Properties and application field of ultra-high molecular weight polyethylene[J]. Gansu Metallurgy, 2015, 37(2): 133-134 (in Chinese).
[3] TAI Z X, CHEN Y F, AN Y F, et al. Tribological behavior of UHMWPE reinforced with graphene oxide nanosheets[J]. Tribology Letters, 2012, 46(1): 55-63.
[4] DASARI A, YU Z Z, MAI Y W. Fundamental aspects and recent progress on wear/scratch damage in polymer nanocomposites[J]. Materials Science and Engineering R, 2009, 63 (2): 31-80.
[5] 雷毅, 郭建良. 纳米 ZnO 和 SiO_2 共混填充 UHMWPE 复合材料的摩擦磨损行为[J]. 高分子材料科学与工程, 2008, 24 (12): 110-113.
LEI Y, GUO J L. Tribological behavior of nano-ZnO and nano- SiO_2 filled ultra high molecular weight polyethylene composites[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2008, 24(12): 110-113 (in Chinese).
[6] 狄莹莹, 任鹏刚, 张倩. 石墨烯-多壁碳纳米管/超高分子量聚乙烯导电复合材料的制备及性能[J]. 复合材料学报, 2012, 29(4): 36-41.
DI Y Y, REN P G, ZHANG Q. Segregated ultrahigh molecular weight polyethylene composites filled with graphene sheets and hybrid multi-walled carbon nanotubes[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2012, 29 (4): 36-41 (in Chinese).
[7] WOOD W J, MAGUIRE R G, ZHONG W H. Improved wear and mechanical properties of UHMWPE-carbon nanofiber composites through an optimized paraffin-assisted melt-

- mixing process[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2011, 42(3): 584-591.
- [8] AN Y F, TAI Z X, QI Y Y, 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]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2014, 131: 39640(1-11).
- [9] MA T, ZHANG T, GAO P, et al. Synthesis and properties of ultrahigh molecular weight polyethylene/WS₂ nanoparticle fiber for bullet-proof materials[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(8): 945-948.
- [10] 张恒, 王李波, 高誉鹏, 等. 纳米改性增强 UHMWPE 研究进展[J]. *材料导报*, 2016, 30(3): 33-39.
ZHANG H, WANG L B, GAO Y P, et al. Research progress of nano-modified ultrahigh molecular weight polyethylene composites[J]. *Materials Review A: Review*, 2016, 30(3): 33-39 (in Chinese).
- [11] BARSOUM M W. The MAX phase: A new class of solid; thermodynamically stable nanolaminates[J]. *Progress in Solid State Chemistry*, 2000, 28: 201-281.
- [12] ZHOU A G, BARSOUM M W. Kinking nonlinear elastic deformation of Ti₃AlC₂, Ti₂AlC, Ti₃Al(C_{0.5}, N_{0.5})₂ and Ti₂Al(C_{0.5}, N_{0.5}) [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 498(1): 62-70.
- [13] SUN Z M. Progress in research and development on MAX phases: A family of layered ternary compounds[J]. *International Materials Reviews*, 2013, 56(3): 143-166.
- [14] WANG W J, LI C W, CHEN K P. Electrical, dielectric and mechanical properties of a novel Ti₃AlC₂/epoxy resin conductive composites[J]. *Materials Letters*, 2013, 110: 61-64.
- [15] LI L, ZHOU A, XU L, et al. Synthesis of high pure Ti₃AlC₂ and Ti₂AlC powders from TiH₂ powders as Ti source by tube furnace[J]. *Journal of Wuhan University of Technology: Material Science Edition*, 2013, 28(5): 882-887.
- [16] SENATOV F S, GORSHENKOV M V, TCHERDYNTSEV V V, et al. Fractographic analysis of composites based on ultra high molecular weight polyethylene[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2014, 56: 869-875.
- [17] CHEN Y F, QI Y, TAI Z X, et al. Preparation, mechanical properties and biocompatibility of graphene oxide/ultrahigh molecular weight polyethylene composites[J]. *European Polymer Journal*, 2012, 48(6): 1026-1033.
- [18] 李莹莹, 朱冬生. 超高分子量聚乙烯纳米复合材料的导热性能研究[J]. *化工新型材料*, 2009, 37(1): 72-74.
LI Y Y, ZHU D S. Thermal conductivity of ultra-high molecular weight polyethylene nano-composite[J]. *New Chemical Materials*, 2009, 37(1): 72-74 (in Chinese).
- [19] TANG L C, WANG X, GONG L X, et al. Creep and recovery of polystyrene composites filled with graphene additives[J]. *Composites Science and Technology*, 2014, 91: 63-70.
- [20] WANG X, GONG L X, TANG L C, et al. Temperature dependence of creep and recovery behaviors of polymer composites filled with chemically reduced graphene oxide[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, 69: 288-298.
- [21] XIONG D S, JIN Z M. Tribological properties of ion implanted UHMWPE against Si₃N₄ under different lubrication conditions[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2004, 182(2-3): 149-155.
- [22] MYSHKIN N K, KOVALEV A V. Tribology of polymers: Adhesion, friction, wear, and mass transfer[J]. *Tribology International*, 2005, 38: 910-921.
- [23] GE S R, ZHANG D K, ZHU H, et al. Friction and wear behavior of nitrogen ion implanted UHMWPE against ZrO₂ ceramic[J]. *Wear*, 2003, 255(7-12): 1069-1075.
- [24] GONG G F, FU X. Tribological properties of kaolin filled UHMWPE composites in unlubricated sliding [J]. *Wear*, 2004, 256(1-2): 88-94.