碳纤维改性超高分子量聚乙烯摩擦性能研究

孙 鑫[1],范士君[2]

(1.郑州职业技术学院,河南 郑州 450000;2.天津理工大学,天津 300382)

摘 要:文章采用高速球磨混合-热压成型法制备超高分子量聚乙烯/碳纤维(UHMWPE/CF)复合材料,重点探究碳纤维(CF)添加量对材料结晶性、微观特征、力学性能、表面硬度及摩擦学性能的影响规律,为其在体育运动器材领域的高性能应用提供参考。结果表明:添加CF能够显著改善UHMWPE基体的表面硬度与力学性能,有效降低摩擦系数,提升耐磨损能力。当CF质量分数为3%时,改性效果最佳,UHMWPE/3%CF复合材料的屈服强度较UHMWPE提高13.9%,表面硬度提高42.9%,摩擦系数降低37.9%,磨损率降低59.5%,能够满足体育运动器材对材料耐磨、抗冲击、低摩擦的核心使用要求。当CF质量分数小于3%时,CF在UHMWPE基体中分散均匀,能够充分发挥刚性支撑与载荷传递作用,适应运动过程中的动态摩擦工况。当CF质量分数为5%时,CF的团聚效应导致复合材料微观结构缺陷增多,表面硬度、力学性能及摩擦学性能均出现明显降低,无法满足体育运动器材的使用需求。

关键词:超高分子量聚乙烯;碳纤维;摩擦学性能;力学性能;体育运动器材

中图分类号:TQ325.12 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-3360(2026)09-0039-05

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.09.008

Study on Tribological Properties of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene Modified with Carbon Fiber

SUN Xin[1], FAN Shijun[2]

(1. Zhengzhou Technical College, Zhengzhou 450000, China; 2. Tianjin University of Technology, Tianjin 300382, China)

Abstract: The ultra-high molecular weight polyethylene/carbon fiber (UHMWPE/CF) composites were prepared by high-speed ball milling mixing and hot-pressing molding. The effects of carbon fiber (CF) content on the crystallinity, microstructure, mechanical properties, surface hardness, and tribological properties of the composites were systematically investigated, aiming to provide a reference for their high-performance applications in sports equipment. The results indicated that the addition of CF significantly improved the surface hardness and mechanical properties of the UHMWPE matrix, effectively reduced the friction coefficient, and enhanced the wear resistance. When the CF mass fraction was 3%, the optimal modification effect was achieved. Compared with pure UHMWPE, the UHMWPE/3%CF composites exhibited a 13.9% increase in yield strength, a 42.9% increase in surface hardness, a 37.9% reduction in friction coefficient, and a 59.5% reduction in wear rate, meeting the core requirements of sports equipment materials for wear resistance, impact resistance, and low friction. When the CF mass fraction was below 3%, the CF was uniformly dispersed within the UHMWPE matrix, effectively exerting rigid support and load transfer functions, which were adapted to the dynamic friction conditions during sports activities. However, when the CF mass fraction reached 5%, the agglomeration effect of CF led to increased microstructural defects in the composites, resulting in significant deteriorations in surface hardness, mechanical properties, and tribological properties, thus failing to satisfy the application requirements of sports equipment.

Keywords: UHMWPE; CF; Tribological properties; Mechanical properties; Sports equipment

超高分子量聚乙烯(UHMWPE)是一种兼具良好的化学稳定性、冲击韧性、耐腐蚀性及低摩擦系数的高性能工

收稿日期Submitted date 2026-03-20;修回日期Revised date 2026-04-29;录用日期Accepted date 2026-05-30

联系人,1915321303@qq.com

引用本文:孙鑫,范士君.碳纤维改性超高分子量聚乙烯摩擦性能研究[J].塑料科技,2026,54(9):39-43.

Citation:SUN X, FAN S J. Study on tribological properties of ultrahigh molecular weight polyethylene modified with carbon fiber[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(9): 39-43.

程塑料[1-2]。凭借其低摩擦、抗冲击、轻量化的突出优势[3-4],在体育运动器材领域,成为滑雪板固定器、滑冰鞋冰刀托等核心部件的首选材料[5-6]。在实际体育运动场景中,这些核心部件需要长期承受反复摩擦、动态冲击及交变载荷的作用。例如,滑雪板固定器需要反复承受滑雪者的体重冲击与滑动摩擦,滑冰鞋冰刀托需在低温环境下承受冰面的摩擦磨损,健身器材滑动构件则需长期保持顺畅滑动且不易磨损,这些严苛工况对UHMWPE材料的摩擦学性能与力学性能提出更高要求[7-8]。

然而,UHMWPE自身存在表面硬度低、耐磨性有限、力学强度不足等固有缺陷,在长期运动载荷作用下易发生磨损、变形,甚至出现部件失效问题,这不仅会缩短体育运动器材的使用寿命,还可能影响运动安全性与运动体验,制约其在体育运动器材领域的应用[9-10]。改性技术能够有效提升UHMWPE的力学性能与摩擦磨损性能,如何使其适配体育运动器材的严苛使用工况,已成为当前高分子材料领域与体育运动器材领域的共同研究重点[11-12]。

目前,UHMWPE的改性技术主要分为交联改性与填料增强改性两大类[13]。其中,填料增强改性因工艺简便、成本可控、改性效果显著的优点,成为应用广泛的改性方式[14]。常用的增强填料包括金属氧化物、陶瓷颗粒以及碳纳米材料等。其中,碳系填料(石墨烯、碳纳米管等)凭借优异的力学性能、导热性能与润滑性能,在UHMWPE改性研究中具有广阔的应用前景[15-16]。碳纤维(CF)作为一种高性能碳系增强材料[17],其表面的活性基团可与UHMWPE基体形成良好的界面结合,不仅能够显著提升复合材料的力学强度与抗冲击性能,还能够改善摩擦界面状态,契合体育运动器材对材料的核心性能要求[18]。现有研究大多集中于CF改性UHMWPE在工业耐磨领域的应用,针对体育运动器材工况下的改性研究较少。同时,关于CF添加量对UHMWPE微观结构、结晶性能及摩擦学性能的协同影响机制尚未明确。不同CF添加量下复合材料能否适配体育运动器材的动态摩擦、反复冲击工况,仍需深入探索。

本研究制备不同CF添加量的UHMWPE/CF复合材料,进一步研究CF添加量对复合材料微观结构、结晶性能、表面硬度、力学性能及摩擦学性能的影响。通过优化CF添加量制备出适配体育运动器材工况的高性能UHMWPE复合材料。

1 实验部分

1.1 主要原料

UHMWPE粉末,分子量15×10^5 kg/mol,VH150U,安徽罗河新材料有限公司;CF粉末,粒径15 μm,长度50 μm,表面经硅烷偶联剂改性处理,河北永骅耐磨材料有限公司;无水乙醇,分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

行星球磨机,XQM-1,南北仪器有限公司;真空热压成型机,K14L20VHE,郑州天康机械设备有限公司;摩擦磨损试验机,MC-425,上海天博科技有限公司;万能试验机,XSS1000,无锡环盛机械有限公司;差示扫描量热仪(DSC),Q1000,美国TA仪器公司;扫描电子显微镜(SEM),GeminiSEM 300,德国蔡司公司;纳米压痕仪,Y435,苏州盈创机械设备有限公司;电子天平,FA2004,上海精密仪器仪表有限公司;白光共聚焦形貌仪,MZ1C,上海一恒科技有限公司。

1.3 样品制备

采用高速球磨混合-热压成型法制备UHMWPE/CF复合材料,具体制备流程如下:(1)称取CF粉末与UHMWPE粉末(CF粉末与UHMWPE粉末质量比分别为0∶100、1∶99、3∶97和5∶95),加入少量无水乙醇作为分散剂,置于球磨机中,以200 r/min的转速混合6 h,确保CF与UHMWPE粉末充分混合均匀。随后将混合粉末置于80 ℃烘箱中干燥4 h,以去除无水乙醇。(2)将混合均匀的粉末加入热压成型机中,先使粉末充分预热,再在50 MPa的压力下进行热压处理30 min,确保材料充分熔融成型。(3)取出模具,在空气中自然冷却至室温后脱模,得到厚度为3 mm的UHMWPE/CF复合材料试样,根据CF添加量分别命名为UHMWPE、UHMWPE/1%CF、UHMWPE/3%CF和UHMWPE/5%CF。

1.4 性能测试与表征

SEM测试:将制备的材料在液氮中冷冻,然后进行表面喷金处理,利用扫描电子显微镜观察复合材料的断面微观形貌,分析CF在UHMWPE基体中的分散状态。

结晶性能测试:采用差示扫描量热仪在N_2气氛下测试复合材料的结晶性能。结晶度(X_c)的计算公式为:

$$X_c=\frac{\Delta H_m}{(1-w_{CF})\Delta H_m^0}\times100\% \tag{1}$$

式(1)中:ΔH_m为测试样品的熔融焓,J/g;ΔH_m^0为理想状态下UHMWPE完全结晶时的熔融焓,取289.3 J/g;w_{CF}为CF的质量分数,%。

表面硬度测试:采用纳米压痕仪测试复合材料的表面硬度。试样的厚度为1 mm,控制压痕深度为4 500 nm,谐振频率为45 Hz。每个样品选取5个测试点,取平均值。

力学性能测试:按照GB/T 1040.1—2025进行测试,拉伸速率设定为30 mm/min,样条尺寸为150 mm×10 mm×4 mm。每组试验选取5个试样,取平均值。

摩擦学性能测试:采用摩擦磨损试验机,在干摩擦条件下测试复合材料的摩擦学性能,模拟体育运动器材的实际摩擦工况。设置磨痕直径为10 mm,试验时间为600 s,施加载荷为5 N,速率为0.5 m/s。将测得的摩擦力转换为摩擦系数(μ),μ的计算公式为:

$$\mu=\frac{F_f}{F_n} \tag{2}$$

式(2)中:F_n为施加载荷,N;F_f为仪器测得的摩擦力,N。

测试结束后，利用白光共聚焦形貌仪观察试样表面磨痕形貌，测量磨痕宽度和深度并计算磨损率。

2 结果与讨论

2.1 CF对复合材料微观结构的影响

图1为UHMWPE/CF复合材料的SEM照片。从图1a可以看出，UHMWPE的断口表面相对平坦光滑，呈现出典型的塑性断裂特征，无明显微观缺陷。从图1b可以看出，CF在UHMWPE基体中呈随机分散状态，部分CF与基体结合紧密，但仍有少量CF未实现完全分散，存在轻微的界面间隙。从图1c可以看出，CF在基体中分散均匀，无明显团聚现象，CF与UHMWPE基体之间界面结合良好，断口表面变得粗糙，塑性断裂特征更为明显，表明CF与基体之间形成有效的载荷传递路径，能够承受体育运动器材使用过程中的动态冲击和反复摩擦载荷。从图1d可以看出，观察到明显的CF团聚现象，较大的团聚体与PE基质之间出现明显的界面缝隙，甚至出现CF脱落痕迹。结果表明：当CF添加量过多时，其表面活性基团之间的相互作用增强，导致CF相互缠绕、团聚，难以在基体中均匀分散，进而破坏UHMWPE基体的连续性，无法适配体育运动器材的使用要求[19]。

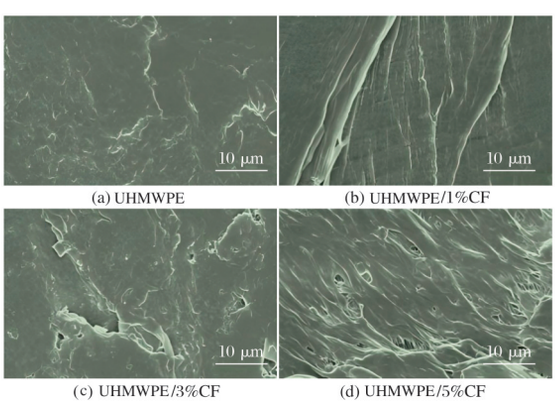


图1 UHMWPE/CF复合材料的SEM照片

Fig.1 SEM images of UHMWPE/CF composites

2.2 CF对复合材料结晶性能的影响

UHMWPE的结晶性能直接关系其力学性能与摩擦磨损性能，较高的X_c有助于提升材料的强度与耐磨性，从而适配体育运动器材长期承受反复摩擦、冲击的使用工况[20]。图2为UHMWPE/CF复合材料的DSC曲线。从图2可以看出，所有试样的熔点峰值温度均处于131~135 ℃，表明CF的添加量对UHMWPE的熔点影响较小。其原因在于CF主要作为异相成核剂影响UHMWPE的结晶过程，不会改变其晶体结构[21]。

图3为UHMWPE/CF复合材料的X_c。从图3可以看出，加入CF对UHMWPE的X_c具有显著影响，随着CF添加量的增加，UHMWPE/CF复合材料的X_c呈先升高后降低的趋势。其中，UHMWPE的X_c为42.3%；UHMWPE/1%CF的X_c提高至48.7%；UHMWPE/3%CF的X_c最大，为51.2%；UHMWPE/5%CF的X_c下降至45.6%。

分析认为，CF作为异相成核剂，其表面可作为UHMWPE分子链结晶的成核位点，加速结晶过程，从而提高X_c，增强复合材料的刚性与耐磨性，适配体育运动器材的使用需求。但当CF添加量过高时，团聚现象加剧，团聚的CF会阻碍UHMWPE分子链的运动，抑制晶体生长，增强CF与聚合物链之间的摩擦作用，导致分子链难以形成高度有序的晶体结构，从而降低X_c[22]。UHMWPE/3%CF的成核作用占据主导地位，X_c达到峰值，此时复合材料的晶体结构更为完善，有利于提升其力学性能与摩擦学性能。

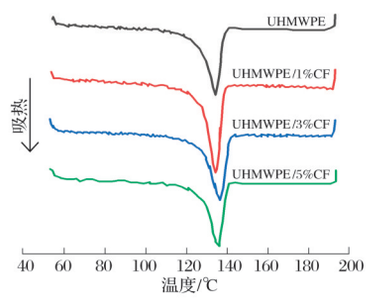


图2 UHMWPE/CF复合材料的DSC曲线

Fig.2 DSC curves of UHMWPE/CF composites

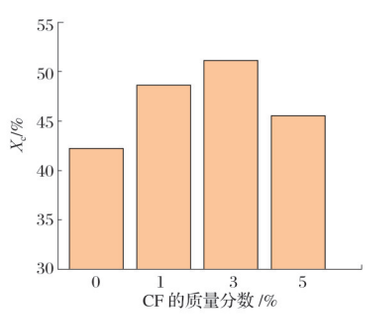


图3 UHMWPE/CF复合材料的X_c

Fig.3 X_c of UHMWPE/CF composites

2.3 CF对复合材料表面硬度的影响

材料的表面硬度与摩擦磨损性能密切相关，表面硬度越高，材料的抗切削能力越强，耐磨性越好，与体育运动器材长期反复摩擦的使用工况越适配。图4为UHMWPE/CF复合材料的表面硬度。从图4可以看出，CF的加入能够显著提高UHMWPE的表面硬度，且随着CF添加量的增加，表面硬度呈先上升后下降的趋势。UHMWPE的表面硬度为0.28 GPa；UHMWPE/1%CF的表面硬度提升至0.36 GPa，较UHMWPE提高28.6%；UHMWPE/3%CF的表面硬度最大，为0.40 GPa，较UHMWPE提高42.9%；UHMWPE/5%CF的表面硬度下降至0.35 GPa。

分析认为，CF具有优异的刚性与力学性能，当CF在UHMWPE基体中均匀分散时，可作为刚性支撑点与物理交联点，承受局部载荷，阻碍UHMWPE分子链的运动，从而提高材料的表面硬度，增强材料的抗磨损能力[23]。UHMWPE/3%CF的分散性最佳，与基体的界面结合最为

紧密，刚性支撑作用最强，因此表面硬度达到最高。当CF质量分数超过3%时，团聚现象愈发明显，团聚体能够破坏基体的连续性，CF与基体之间的界面间隙增大，载荷传递效率降低，X_c下降，进而导致复合材料的表面硬度下降，无法有效抵御长期摩擦带来的损伤。

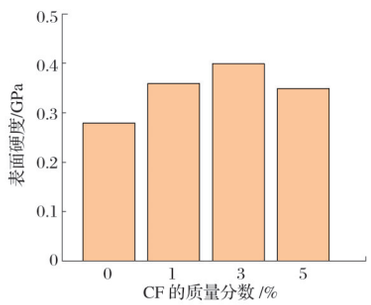


图4 UHMWPE/CF复合材料的表面硬度

Fig.4 Surface hardness of UHMWPE/CF composites

2.4 CF对复合材料力学性能的影响

图5为UHMWPE/CF复合材料的力学性能。从图5可以看出，UHMWPE具有良好的延展性，拉伸强度为25.34 MPa，屈服强度为18.74 MPa，断裂伸长率为6.77%。CF的加入对复合材料的力学性能产生显著影响，随着CF添加量的增加，复合材料的屈服强度先增大后减小，拉伸强度和断裂伸长率则呈持续下降的趋势。UHMWPE/3%CF的拉伸强度和断裂伸长率的下降幅度最小。UHMWPE/1%CF的拉伸强度为22.19 MPa，断裂伸长率为5.34%，屈服强度为19.65 MPa；UHMWPE/3%CF的拉伸强度为21.48 MPa，断裂伸长率为4.21%，屈服强度为21.35 MPa。此时，拉伸强度和断裂伸长率下降幅度较小，既能满足体育运动器材对材料刚性、抗冲击性的要求，又能保证一定的韧性，避免材料在冲击载荷下发生脆断。而UHMWPE/5%CF的性能下降明显，韧性不足，无法承受体育运动过程中的动态冲击载荷。

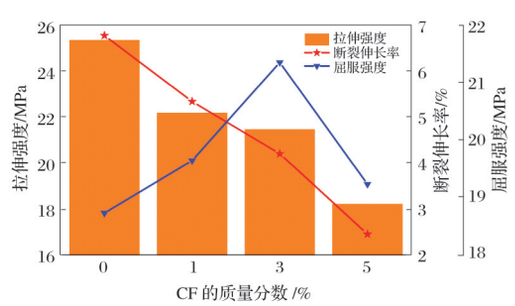


图5 UHMWPE/CF复合材料的力学性能

Fig.5 Mechanical properties of UHMWPE/CF composites

上述现象可以采用颗粒增强复合材料机理进行解释[24]：当CF质量分数较低时(≤3%)，CF在基体中分散均匀，其高强度、高模量的特性能够实现载荷从UHMWPE基体向CF的有效传递，从而提升复合材料的屈服强度。但CF的加入会破坏UHMWPE基体的连续性，限制分子链的滑移，导致拉伸强度和断裂伸长率下降。当CF质量分数为3%时，CF与基体的界面结合最佳，载荷传递效率最高，拉伸强度和断裂伸长率的下降幅度最小。当CF质量分数过高(5%)时，团聚现象加剧，团聚体成为应力集中点，在拉伸过程中易产生裂纹并扩展，导致复合材料的屈服强度、拉伸强度和断裂伸长率均出现明显下降。

2.5 CF对复合材料摩擦学性能的影响

图6为UHMWPE/CF复合材料的摩擦性能。从图6可以看出，随着CF添加量的增加，UHMWPE/CF复合材料的平均摩擦系数呈现先快速下降后上升的趋势。UHMWPE的平均摩擦系数为0.103，UHMWPE/1%CF的平均摩擦系数为0.089，较UHMWPE降低13.6%。UHMWPE/3%CF的平均摩擦系数最小，为0.064，较UHMWPE降低37.9%，减摩效果最佳，可充分满足滑雪板、健身器材等部件的低摩擦要求。UHMWPE/5%CF的平均摩擦系数上升至0.097，较UHMWPE/3%CF时提高51.6%，但仍低于UHMWPE。CF的加入能够显著降低UHMWPE的磨损率，随着CF添加量的增加，磨损率呈先快速下降后上升的趋势。UHMWPE的磨损率为1.21×10^{-5} mm^3/(N·m)；UHMWPE/1%CF的磨损率降至0.68×10^{-5} mm^3/(N·m)，较UHMWPE降低43.8%。UHMWPE/3%CF的磨损率最小，为0.49×10^{-5} mm^3/(N·m)，较UHMWPE下降59.5%，耐磨性能最佳，可满足体育运动器材长期反复摩擦的使用要求。UHMWPE/5%CF的磨损率上升至0.76×10^{-5} mm^3/(N·m)，较UHMWPE/3%CF时提高55.1%，但仍低于UHMWPE的磨损率。

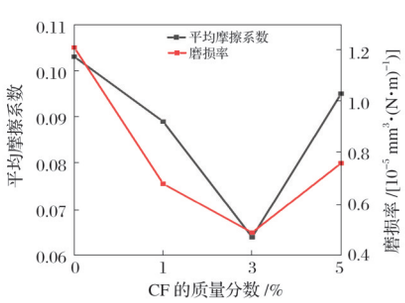


图6 UHMWPE/CF复合材料的摩擦性能

Fig.6 Friction properties of UHMWPE/CF composites

分析认为，CF具有优异的润滑性能与高强度特性，当CF在UHMWPE基体中均匀分散时，在摩擦过程中，CF可在摩擦界面形成一层润滑膜，减少摩擦界面的直接接触，降低摩擦阻力，从而降低摩擦系数[25]。同时，CF的刚性支撑作用可提高材料的表面硬度，减少摩擦过程中的塑性变形，进一步优化减摩效果，避免体育运动过程中因摩擦阻力过大影响运动体验。当CF质量分数为3%时，分散性最佳，形成均匀、稳定的润滑膜，减摩效果最为显著。当CF添加量过高时，团聚现象导致润滑膜不连续，且团聚体在摩擦过程中易脱落，增加摩擦界面的摩擦阻力，导致摩擦系数上升。

磨损率的变化规律与摩擦系数保持一致，其主要原因

在于CF的加入能够提高UHMWPE/CF复合材料的表面硬度与力学性能，增强抗切削能力与抗变形能力，减少摩擦过程中材料的损耗。同时，CF在摩擦界面形成的润滑膜可减少磨粒磨损和黏着磨损，进一步降低磨损率。UHMWPE/3%CF的表面硬度最高，X_c最佳，CF分散均匀，润滑膜稳定，因此磨损率最低，能够有效延长体育运动器材的使用寿命。当CF添加量过高时，团聚现象导致材料微观结构缺陷增多，摩擦过程中团聚体易脱落形成磨粒，磨损加剧，同时界面结合力下降，材料表层易被切削脱落，导致磨损率上升[26]。

3 结论

采用高速球磨混合-热压成型法制备UHMWPE/CF复合材料。当CF质量分数小于3%时，CF在基体中分散均匀，与UHMWPE界面结合良好，能够承受运动器材的动态冲击与反复摩擦；当CF质量分数为5%时，CF在基体中发生明显团聚，与UHMWPE界面间隙增大，基体连续性受损，不满足使用要求。CF作为异相成核剂影响UHMWPE结晶，X_c随CF添加量的增加先升后降。UHMWPE/3%CF的X_c最大，为51.2%，此时晶体结构最完善，刚性与耐磨性最优。在力学性能方面，CF能够显著提升表面硬度与屈服强度，但会降低拉伸强度与断裂伸长率。当CF质量分数为3%时改性效果最佳，UHMW/3%CF表面硬度为0.40 GPa，屈服强度为21.35 MPa，较UHMWPE分别提高42.9%和13.9%，拉伸性能降幅最小，兼顾刚性与韧性，适配动态载荷需求。UHMWPE/3%CF的摩擦学性能最佳，平均摩擦系数降低至0.064、磨损率降低至0.49×10^{-5} $mm^3/(N·m)$，较UHMWPE分别降低37.9%和59.5%，以轻微磨粒磨损为主，可延长器材寿命。UHMWPE/5%CF因CF团聚使性能恶化，转为磨粒与疲劳磨损，无法满足要求。

综合微观结构、力学及摩擦学性能，结合运动器材工况，CF的最佳质量分数为3%。此时，复合材料综合性能最优，能够满足滑雪板固定器、健身器材等对耐磨、抗冲击、低摩擦的核心要求，为高性能UHMWPE复合材料在运动器材领域的改性与应用提供参考。

参考文献

[1] 王非, 刘丽超, 薛平. HDPE含量对熔纺UHMWPE/HDPE纤维晶体结构及力学性能的影响[J]. 塑料, 2021(4): 1-5.

[2] 肖扬. 超高分子量聚乙烯自润滑复合材料成型及摩擦学性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2024.

[3] KANDASUBRAMANIAN B, VAIDYA K S. Ultra-high molecular weight polyethylene: Comprehensive insights into processing innovations and application trajectories[J]. Progress in Polymer Science, 2026, 176: 102108.

[4] BOHIN C, REINSCH G, VEDRINE B, et al. Outcomes of 11 cats with achilles tendon (AT) rupture repair treated with a synthetic ultra-high-molecular-weight polyethylene (UHMWPE) [J]. Veterinary Surgery, 2026, 55(4): 752-762.

[5] 兰月, 郑萃. LDPE/UHMWPE共混物的结晶结构研究[J]. 现代塑料加工应用, 2026, 38(1): 23-26.

[6] 石双友, 施永明, 张泽天, 等. 超高分子量聚乙烯熔融纺丝技术挑战与未来趋势[J]. 化工新型材料, 2026, 54(8): 12-18.

[7] 谢海生, 冉国文, 李涛, 等. 超高分子量聚乙烯的分子量对PA66/UHMWPE合金性能的影响[J]. 塑料科技, 2025, 53(12): 196-199.

[8] 杨飞, 韦志强, 黄国栋, 等. 水润滑条件下填充氟化石墨对超高分子量聚乙烯复合材料的减摩耐磨性能研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(11): 19-23.

[9] 裴乃超, 陈伟, 王芮杰, 等. 超高分子量聚乙烯绳结拉伸性能及断裂模式分析[J]. 现代纺织技术, 2026, 34(5): 32-40.

[10] 吴昌豪, 林振兴, 王康博, 等. 导电型超高分子量聚乙烯复合材料研究进展[J]. 塑料科技, 2025, 53(9): 203-208.

[11] YIN L L, CHEN C J, GUO C F, et al. Quasi-static puncture failure analysis of WPU composites reinforced with UHMWPE nonwoven fabrics[J]. Engineering Failure Analysis, 2026, 192: 110828.

[12] KUMARI A, KUMAR R, MITTAL D, et al. Fabrication and characterization of hot-pressed UHMWPE-based polymer matrix composites reinforced with HNTs[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2026, 35: 30407-30418.

[13] 熊恬. 改性聚乙烯的制备及其在体育器材中的应用[J]. 塑料助剂, 2025(5): 84-87.

[14] 柴辉, 刘春生, 马明, 等. 多功能纳米混合填料对丁苯橡胶复合材料性能的影响[J]. 橡胶工业, 2025, 72(7): 523-532.

[15] 严善林, 李秀英, 刘燕. 低密度聚乙烯/碳纤维复合材料的制备以及性能研究[J]. 塑料科技, 2023, 51(5): 72-75.

[16] 蒋波, 王政委, 成凤, 等. 石墨烯对超高分子量聚乙烯纤维蠕变行为的影响规律研究[J]. 复合材料科学与工程, 2025(10): 53-59.

[17] 韩文彬, 严刚, 葛孚宇, 等. 添加碳纤维/碳纳米管复合填料的橡胶厚制品硫化过程中温度场和硫化程度模拟[J]. 橡胶工业, 2025, 72(5): 323-332.

[18] 王书凯. 超高分子量聚乙烯摩擦界面转移膜的形成机理研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2022.

[19] 李飞, 郭奕友, 成惠斌, 等. 超高分子量聚乙烯摩擦磨损行为及拉曼成像[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(2): 82-89.

[20] 田杏, 胡洁, 段咏欣, 等. 改性超高分子量聚乙烯纤维/天然橡胶复合材料的制备及性能[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2026, 47(1): 95-100.

[21] 郑晗, 王新威, 孙勇飞, 等. 超高分子量聚乙烯纤维结晶行为研究进展[J]. 化工新型材料, 2018, 46(5): 16-19, 23.

[22] 魏国瑞. ATP/GF改性UHMWPE水润滑轴承复合及多孔材料的摩擦学性能研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2025.

[23] 冯园, 王宏球, 于俊荣. 耐磨改性超高分子量聚乙烯纤维的制备及性能[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2022, 48(5): 42-47.

[24] 冯园, 王宏球, 于俊荣. 超高分子量聚乙烯的磨损机理及耐磨改性研究进展[J]. 高分子通报, 2022, 35(10): 54-62.

[25] 郑兴博, 李佳汶, 李子辉, 等. 氮化硼改性超高分子量聚乙烯的摩擦学性能研究[J]. 中国塑料, 2023, 37(5): 28-33.

[26] 王栋杰, 张伦, 陈倩影, 等. 不同表面改性对竹纤维/超高分子量聚乙烯复合材料摩擦学性能的影响[J]. 塑料工业, 2019, 47(1): 45-50.