

超高分子量聚乙烯功能复合材料及其应用

杨 萌^{1,2}, 赵 宁^{2*}, 徐 坚²

(1. 中国科学院大学化学与化工学院, 北京 100049;

2. 中国科学院化学研究所高分子化学与物理实验室, 北京 100190)

摘要:超高分子量聚乙烯(Ultra-high molecular weight polyethylene, UHMWPE)因其特有的简单规整长线性结构,分子链易于紧密堆砌与缠结。这虽然使其不能通过一般热塑性塑料加工方法成型,但也为材料结构设计和功能化带来契机。大量研究表明,利用 UHMWPE 分子量的多分散性、软硬相与物理交联密度的可调节性、拉伸条件下的致孔和诱导结晶效应,以及易于实现结晶相分离等特点,均可进行功能化及复合材料设计。本文综述了近年来 UHMWPE 功能复合材料研发及其应用进展,展望了其在电磁屏蔽、智能响应、生物医用、热管理等领域的独特优势和广阔发展前景。

关键词:UHMWPE; 功能化; 复合材料; 分隔结构; 多孔; 分散

引言

超高分子量聚乙烯(Ultra-high molecular weight polyethylene, UHMWPE)是一种已实现工业化的高性能工程塑料,来源广泛且价格相对低廉。因特有的极为简单规整的长线性结构,UHMWPE 分子易发生缠结、结晶与高度取向,由此具备突出的比强度、比模量以及优异的耐低温、耐化学腐蚀、耐磨自润滑、电绝缘和生物相容性等^[1]。但是,因熔体黏度较大和可加工溶液浓度较低,UHMWPE 不能通过一般热塑性加工方法制备;加之其低表面能和易结晶分相的特点,不利于形成均一复合材料;此外,在热、氧、紫外线、机械力、链转移剂等作用下,其分子链会发生断裂,从而影响了最终制品的力学性能^[2]。这就为 UHMWPE 材料结构设计及功能化带来了机遇与挑战。本文基于 UHMWPE 分子量的多分散性、可调节的软硬相与物理交联点、超拉伸下的致孔和诱导结晶效应、以及易于实现结晶相分离等特点,对其功能复合材料设计、有效分散方法及其应用研究进展进行了总结。

1 UHMWPE 本体复合材料

1.1 分隔结构在导电、导热材料中的应用

利用 UHMWPE 熔体黏度大且易结晶分相的特点,通过与纳米碳管(CNT)、石墨烯、炭黑等导电填料共混,再进一步模压烧结,容易得到具有分隔结构(Separated structure)的复合材料(见图 1)。比起均匀分散结构,分隔结构中的填料在聚合物微晶区边界层富集并形成导电网络,从而大大降低了电渗透阈值,并且较好地保留了基体力学性能。Pang 等^[3]针对具有分隔结构的导电聚合物材料(CPCs)做了详尽综述,受填料形貌特征、表面物化性质,聚合物基体分子量及其分布、颗粒粒径、热动力学性质和加工条件方法等因素的影响,所报道 UHMWPE 基 CPCs 的电渗透阈值介于 0.04%(wt)~1%(wt),可用于抗静电、电磁屏蔽、感应材料。Jiang 等^[4]采用选用廉价的石墨作导电填料制备 UHMWPE 基复合材料,在相对较低的填充量(7.05%(vol))下,其电导率可达 3.9S/m,2.5mm 厚度可实现 51.6dB 的电磁屏蔽效能。Al-Saleh 等^[5]的研究表明,CNTs 含量为 10%(wt)时,1mm 厚复合材料的电磁屏蔽效能可达到 50dB。

类似地,研究人员考虑将分隔结构用于导热复合材料^[6~8]。虽然复合材料导热性影响因素与上文所

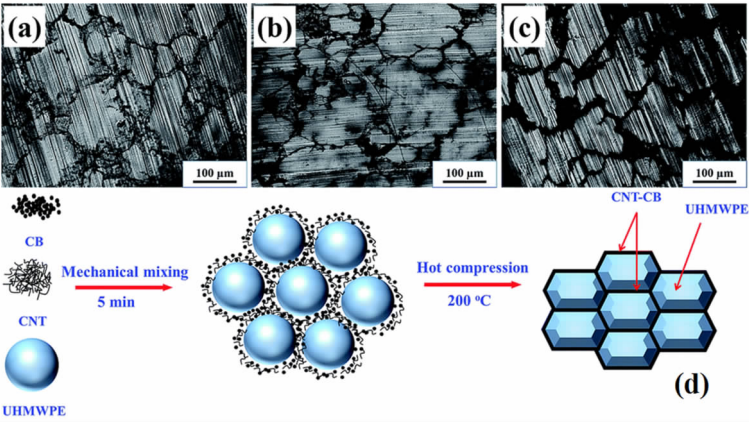


图 1 不同 CNT-CB 填料含量下 (a) 0.1% (wt)、(b) 0.5% (wt) 和 (c) 2.0% (wt) UHMWPE 复合材料分隔结构光学显微镜图像及 (d) 典型制备过程示意图^[11]

Figure 1 Optical microscope images OM of CNT-CB/UHMWPE segregated composites with various CNT-CB hybrid contents of (a) 0.1% (wt), (b) 0.5% (wt) and (c) 2.0% (wt) and (d) schematic illustration of typical preparation process^[11]

述导电性类似^[9],但值得注意的是,基体 UHMWPE 分子高度取向在导热性提升上的重要作用。已有报道称,经 350 倍拉伸后,UHMWPE 导热系数可达 41.8 W/(m·K)^[9],表明从基体结构设计角度出发,UHMWPE 基复合材料导热性尚有较大提升空间。此外,为实现优异导热性能,填料含量往往较高,因而需要考虑到界面缺陷以及加工条件对复合材料力学性能的影响^[4, 7, 10]。

复合材料导电导热性的动态变化可通过相转变实现,如填料网络搭接情况和基体取向结构的变化等,进而可用于传感器或储能器件^[12, 13]。Zhang 和 Luo^[14]的研究表明,通过改变温度及应力,调控 UHMWPE 分子由无定形到高取向的可逆转变,可以使导热系数有 5~12 倍变化(见图 2)。Zhang 等^[15]则发现在特定 NiCF(镍涂敷碳纤维)填充量、X 射线及电场作用下同样可得到无定形 UHMWPE,而外加场撤去后取向结构则得以恢复。Do 等^[16]研究了 MWCNT/UHMWPE 复合材料的压阻效应,当纤维填充量为 0.3% (wt) 时,响应因子 G 可高达 27.8,且在短期应力循环中较为稳定,有望用于人工植入体的压敏传感器。若引入其它组分适当破坏导电网络搭接的稳定性^[11],同时结合导电填料含量调控^[17],可以制得具有较大升阻比的温敏材料。

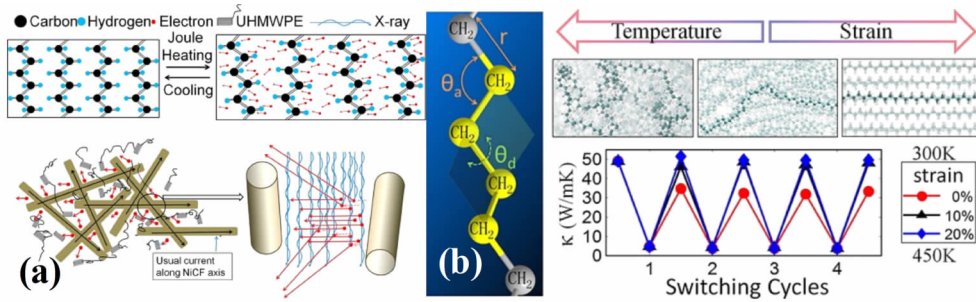


图 2 不同作用下 UHMWPE 分子取向结构与无定形结构之间的转变
(a) 电场及 X 光作用^[15]; (b) 热及拉伸作用^[14]

Figure 2 Transformation between orientated and amorphous structure of UHMWPE molecules under different effects
(a) electric field and X-ray effect^[15]; (b) thermal and tensile effects^[14]

实现良好导热、导电效果的基础是填料网络的完整性。为了在低填充量的前提下实现填料间的良好搭接,同样要解决其分散性问题^[18]。首先,可通过控制反应条件合成低缠结密度 UHMWPE^[19~23],并基

于其疏松多孔、易于溶解熔融的优点,促进导电填料在基体中的分散,进而提高复合材料导电性^[24];其次,引入第三组分作粘合剂可有效减少网络断点及界面缺陷,如醋酸乙烯酯^[6]。此外,也可从加工角度来提高分子链扩散速率及分散效果,如提高热压温度或通过球磨来减小聚合物粉体粒径,但这两种方法都会引起分子量降低。与提高热压温度相比,球磨法仅会引起 UHMWPE 颗粒表面分子量降低,且有利于最终复合材料中填料富集相与晶区间界面黏结度的提高^[25]。

1.2 多功能填料的选取及分散

人造关节是 UHMWPE 及其复合材料的典型应用,但使用过程中产生的磨损颗粒会诱发骨溶解,使其松动而降低寿命^[26]。为减小这种不利影响,需要着力提高耐磨损性,同时兼顾生物相容性以及表面浸润性^[27]。通常用来增强 UHMWPE 抗磨损性的填料多为陶瓷颗粒,如 Al_2O_3 ^[28~30]、 ZnO ^[31]、 B_4C ^[32]、 Ti_3C_2 纳米片^[33]、 SiC ^[34]等。随着碳材料兴起,CNT、石墨烯^[35, 36]、碳纤维^[37~39]、纳米金刚石^[40]等在增强 UHMWPE 抗磨损性方面的应用也引发了广泛关注,并可基于填料间的互补或协同效应进行组合使用^[27, 41]。但若将以上材料用于生物体内可能有一定毒性^[42],故可选取生物相容性良好的填料,如纳米纤维素^[43]、多磷酸钙及其掺杂物^[44]等。耐磨性增强的效果则受填料形貌特征、含量、测试条件、填料与基体结合情况等因素的影响^[31, 32, 34, 45]。此外,对复合材料进行拉伸诱导结晶同样可以提高其耐磨性^[46]。

由于 UHMWPE 熔体黏度较大且易结晶相分离,而填料表面能较高,易聚集于晶粒边界,从而对复合材料力学性能产生不利影响^[47]。通常的解决方法有对填料表面进行修饰^[7, 38, 48~50]、原位聚合^[51]、使用填料负载的催化剂^[22, 52~54]、超声^[55]、挤出塑化^[37, 43]、球磨^[25, 55]、引入流变改性剂^[37, 39]等。Maksimkin 等^[56]将多壁纳米碳管(MWCNT)进行氟化,并对复合材料进行拉伸,在拉伸过程中,填料可作为成核剂,一方面增强了基体与填料间相互作用,另一方面也使得复合材料进一步取向,力学性能得以提升。Dintcheva 等^[57]通过将受阻胺接枝到 CNTs 表面,在改善了其在 UHMWPE 基体中分散效果的同时,材料的 UV 稳定性得以进一步提高。

2 UHMWPE 多孔复合材料

通过热致相分离法、拉伸法等均可获得具有不同孔隙率及孔径的 UHMWPE 多孔材料。这种具有大比表面积的多孔结构多用于分离^[28]、组织再生^[58]、吸波^[59]、抗磨损^[60]、聚合物电解质膜^[61]。Liu 等^[62]将 UHMWPE 通过热致相分离法与纤维织物进行复合,所得微滤膜在水通量为 $621\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,对牛血清白蛋白的阻隔率可达 76%,并且力学强度有明显提高。Shi 等^[63]通过溶胶-凝胶法制备了羟基磷灰石(HA)/UHMWPE 复合材料,由于其表面“类海绵”结构的存在,耐磨性得以大幅提高;这种多孔结构是由于 UHMWPE 分子链在 HA 聚集体表面结晶而形成,并且可通过温度进行调控。Li 等^[64]通过热致相分离法制备了 UHMWPE/PVDF/ SiO_2 中空纤维膜,并通过拉伸作用增加膜中通孔,进而使水渗透通量得以提高。Liu 等^[65]则借助二亚苄基山梨醇(DBS)的自组装及流场下的取向作用,使得 UHMWPE 定向结晶并形成垂直于 DBS 微纤的孔道结构,从而减少水在多孔膜中的流径长度及截留程度(见图 3)。

此外,Hsu 等^[66]报道了已商品化的 UHMWPE 纳米多孔膜在辐射降温上的新兴应用。在太阳光谱辐入能量集中的短波波段($0.4 \sim 2.5\mu\text{m}$)与热红外大气窗口($8 \sim 14\mu\text{m}$)波段,因化学结构所致,UHMWPE 分子均无明显吸收;而通过调节膜材料孔径,可同时实现其对大气窗口长波红外的高透过和对太阳光短波辐射的强散射,从而增加被降温物体的热辐射净输出值,有望用于人体降温服装材料(见图 4)。而多孔复合材料也可以通过原位聚合的方法直接获得。Mueller 等^[67]采用 PVA 纳米纤维负载的催化剂进行 UHMWPE 聚合,通过控制反应及后处理条件,可分别得到 PVA/UHMWPE 核/壳纤维、UHMWPE 中空纤维以及纳米多孔材料。

3 UHMWPE 表界面复合材料

在 UHMWPE 表面上进行复合材料的设计,主要针对的是其浸润性、耐磨性、抗菌性^[68]、生物相容

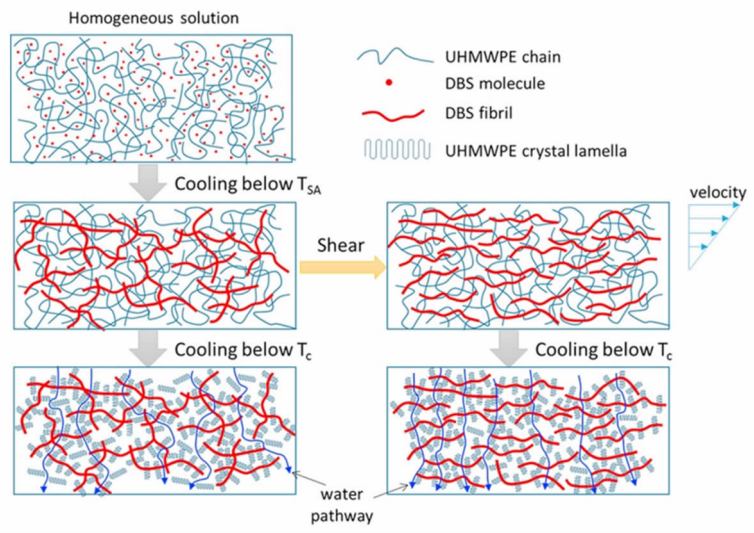


图 3 未取向和取向的 UHMWPE 微孔膜中 DBS 自组装和透水性行为模拟图^[65]

Figure 3 Proposed sketch of DBS self-assembly and water permeability of the unoriented and oriented UHMWPE microporous membrane^[65]

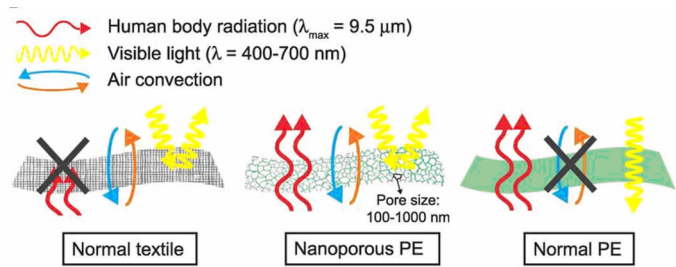


图 4 纳米多孔 PE、普通 PE 和棉花三者的性能比较示意图。只有 nanoPE 同时满足 IR 透明度，可见光不透明度和空气对流的要求^[66]

Figure 4 Schematics of comparison between nanoPE, normal PE, and cotton.

Only nanoPE satisfies IR transparency, visible light opacity, and air convection simultaneously^[66]

性、抗穿刺性^[69, 70]等。最直接的途径就是在 UHMWPE 表面涂覆特定碳材料、金属或陶瓷粒子涂层，常采用离子注入法^[71]、磁控溅射法沉积法^[72, 73]、等离子脉冲沉积法^[74]、化学气相沉积法^[75, 76]等。Wang 等^[60]制备了 SiO₂ 掺杂的多孔 UHMWPE 自清洁涂层，可适用于多种基体，在此基础上用煤油等润滑剂扩散于其表面，可获得耐磨损的抗冰材料。层压剥离法可实现超疏水表面的大批量制备，但耐磨性有待提高^[77]。ZnO 具有选择性抑菌作用，即抑制革兰氏阳性菌的生长而支持革兰氏阴性菌，由此将其与 UHMWPE 复合可得到抗菌材料，作用效果受 ZnO 含量及形貌影响^[78]。

相对应地，为了增加 UHMWPE 与填料的结合强度，可对基体进行表面改性，其中最具有代表性的是采用等离子体辐照法与表面接枝法。Li 和 Guo^[79]将 UHMWPE 织物经等离子处理出孔隙结构后，通过水热法在其表面原位生长 TiO₂ 颗粒，再用 PTES 进行包覆，得到具有优异耐磨性的超疏水材料，接触角可达 158°。通过光接枝法或辐照接枝法在 UHMWPE 表面引入其它聚合物，可改变其表面浸润性，提升耐磨性、抗菌性和生物相容性等^[80, 81]。Hu 等^[82]先采用辐射接枝在 UHMWPE 表面引入三甲氧基硅烷结构，进而与四丁基钛酸酯水解反应原位生成纳米 TiO₂ 颗粒，以提高材料的 UV 耐受性(见图 5)。这种以化学链接的方式在 TiO₂ 和 UHMWPE 间引入高能键界面层的方法，促进了 TiO₂ 在 UHMWPE 表面的均匀分散，同时避免了其对基体的光降解效应。但这些方法通常难以对粗糙多孔表面进行均匀处理。

Joshi 等^[81]利用水下等离子体技术,在低压条件下实现了 UHMWPE 多孔结构表面羟基的引入及水溶性单体丙烯酸(AA)的吸附,并进一步通过引发原位聚合和交联反应得到水凝胶复合材料^[81]。特别地,该方法既可以借助湍流来移除等离子体处理产生的低分子量聚乙烯副产物,并又可淬灭辐照过程中所产生的自由基,由此减弱了后续材料的老化效应。

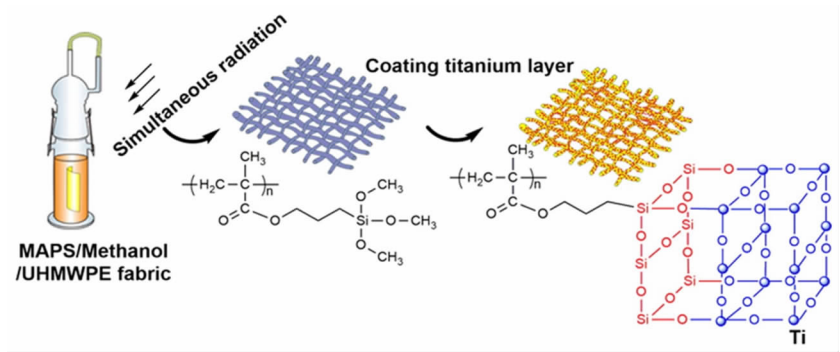


图 5 UHMWPE 纤维表面二氧化钛涂层的制备及 UHMWPE-g-PMAPS/TiO₂ 化学结构^[82]

Figure 5 Process of coating titania layer on the surface of UHMWPE fiber, and chemical structure of the UHMWPE-g-PMAPS/TiO₂^[82]

4 结语

UHMWPE 因独特的分子结构而应用于多种功能复合材料的设计。利用其熔体黏度大和易于结晶分相的特点,可实现低填充量下导体网络的构建。在此基础上结合热或力致相转变,复合材料容易实现动态响应性。就发展趋势而言,无论在人造关节、吸附分离等典型应用领域,或是智能导电或导热材料、辐射降温等新兴领域,UHMWPE 作为高性能基材都受到了广泛关注,其中关键在于填料分散效果的优化、材料制备方法的便捷化、多种功能的结合、新功能的开发以及拓展应用。此外,伴随着聚合及加工工艺的改良,UHMWPE 功能复合材料将具有更广阔的发展与应用空间。

参考文献:

[1] Vegetti A, Radnoczi G, Ossi P M. Carbon, 2013, 65: 20~27.

[2] Fu J, Shen J, Gao G, Xu Y, Hou R, Cong Y, Cheng Y. J Mater Chem B, 2013, 1(37): 4727~4735.

[3] Pang H, Xu L, Yan D X, Li Z M. Progr Polym Sci, 2014, 39(11): 1908~1933.

[4] Jiang X, Yan D X, Bao Y, Pang H, Ji X, Li Z M. RSC Adv, 2015, 5(29): 22587~22592.

[5] Al-Saleh M H. Synth Met, 2015, 205: 78~84.

[6] Feng C P, Chen L, Wei F, Ni H Y, Chen J, Yang W. RSC Adv, 2016, 6(70): 65709~65713.

[7] Gu J, Guo Y, Lv Z, Geng W, Zhang Q. Compos Part A-Appl S, 2015, 78: 95~101.

[8] Wang Y, Qiao X, Wan J, Xiao Y, Fan X. RSC Adv, 2016, 6(83): 80262~80267.

[9] Chen H, Ginzburg V V, Yang J, Yang Y, Liu W, Huang Y, Du L, Chen B. Progr Polym Sci, 2016, 59: 41~85.

[10] Ren P G, Hou S Y, Ren F, Zhang Z P, Sun Z F, Xu L. Compos Part A Appl Sci Manuf, 2016, 90: 13~21.

[11] Cui C H, Pang H, Yan D X, Jia L C, Jiang X, Lei J, Li Z M. RSC Adv, 2015, 5(75): 61318~61323.

[12] Kim K J, Yu W R, Lee J S, Gao L, Thostenson E T, Chou T W, Byun J H. Compos Part A Appl Sci Manuf, 2010, 41(10): 1531~1537.

[13] Zheng R, Gao J, Wang J, Chen G. Nat Commun, 2011, 2.

[14] Zhang T, Luo T. ACS Nano, 2013, 7(9): 7592~7600.

[15] Zhang R, Bin Y, Yang W, Fan S, Matsuo M. J Phys Chem B, 2014, 118(8): 2226~2237.

[16] Do Q, Obyrne S, Liu M, Zhang L. Ieee T Nanotechnol, 2017, 16(2): 265~273.

[17] Zhang R, Tang P, Li J, Xu D, Bin Y. Polymer, 2014, 55(8): 2103~2112.

- [18] Deplancke T, Lame O, Barrau S, Ravi K, Dalmás F. *Polymer*, 2017, 111: 204~213.
- [19] Li W, Guan C, Xu J, Mu J, Gong D, Chen Z-R, Zhou Q. *Polymer*, 2014, 55(7): 1792~1798.
- [20] Li W, Yang H, Zhang J, Mu J, Gong D, Wang X. *Chem Commun*, 2016, 52(74): 11092~11095.
- [21] Rastogi S, Yao Y, Ronca S, Bos J, Van Der Eem J. *Macromolecules*, 2011, 44(14): 5558~5568.
- [22] Ronca S, Forte G, Ailianou A, Kornfield J A, Rastogi S. *ACS Macro Lett*, 2012, 1(9): 1116~1120.
- [23] Ronca S, Forte G, Tjaden H, Yao Y, Rastogi S. *Polymer*, 2012, 53(14): 2897~2907.
- [24] Liu K, Ronca S, Andablo-Reyes E, Forte G, Rastogi S. *Macromolecules*, 2015, 48(1): 131~139.
- [25] Senatov F S, Baranov A A, Muratov D S, Gorshenkov M V, Kaloshkin S D, Tcherdyntsev V V. *J Alloy Compd*, 2014, 615: S573~S577.
- [26] Kandahari A M, Yang X, Laroche K A, Dighe A S, Pan D, Cui Q. *Bone Res*, 2016, 4.
- [27] Patel A K, Trivedi P, Balani K. *ACS Biomater-Sci Eng*, 2016, 2(8): 1242~1256.
- [28] Halalay I C, Lukitsch M J, Balogh M P, Wong C A. *J Power Sources*, 2013, 238: 469~477.
- [29] Senatov F S, Gorshenkov M V, Kaloshkin S D, Tcherdyntsev V V, Anisimova N Y, Kopylov A N, Kiselevsky M V. *J Alloy Compd*, 2014, 586: S544~S547.
- [30] Senatov F S, Kopylov A N, Anisimova N Y, Kiselevsky M V, Maksimkin A V. *Mater Sci Eng C-Mater Biol Appl*, 2015, 48: 566~571.
- [31] Chang B P, Akil H M, Nasir R B M. *Wear*, 2013, 297(1/2): 1120~1127.
- [32] Sharma S, Bijwe J, Panier S. *Compos Part B-Eng*, 2016, 99: 312~320.
- [33] Zhang H, Wang L, Chen Q, Li P, Zhou A, Cao X, Hu Q. *Mater Design*, 2016, 92: 682~689.
- [34] Sharma S, Bijwe J, Panier S, Sharma M. *Wear*, 2015, 332: 863~871.
- [35] Xu L, Zheng Y, Yan Z, Zhang W, Shi J, Zhou F, Zhang X, Wang J, Zhang J, Liu B. *Appl Surf Sci*, 2016, 370: 201~208.
- [36] Lahiri D, Hec F, Thiesse M, Durygind A, Zhang C, Agarwal A. *Tribol Int*, 2014, 70: 165~169.
- [37] Yousef S, Visco A, Galtieri G, Nocita D, Espro C. *Mater Sci Eng C-Mater Biol Appl*, 2017, 73: 234~244.
- [38] Chukov D I, Stepashkin A A, Maksimkin A V, Tcherdyntsev V V, Kaloshkin S D, Kuskov K V, Bugakov V I. *Compos Part B-Eng*, 2015, 76: 79~88.
- [39] Wood W J, Maguire R G, Zhong W H. *Compos Part B-Eng*, 2011, 42(3): 584~591.
- [40] Golchin A, Villain A, Emami N. *Tribol Int*, 2017, 110: 195~200.
- [41] Chang B P, Akil H M, Affendy M G, Khan A, Nasir R B M. *Mater Design*, 2014, 63: 805~819.
- [42] Lahiri D, Dua R, Zhang C, De Socarraz-Novoa I, Bhat A, Ramaswamy S, Agarwal A. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2012, 4(4): 2234~2241.
- [43] Wang S, Feng Q, Sun J, Gao F, Fan W, Zhang Z, Li X, Jiang X. *ACS Nano*, 2016, 10(1): 298~306.
- [44] Gu Z, Huang B, Li Y, Tian M, Li L, Yu X. *Mater Sci Eng C-Mater Biol Appl*, 2016, 61: 526~533.
- [45] Kumar R M, Sharma S K, Kumar B V M, Lahiri D. *Compos Part A-Appl S*, 2015, 76: 62~72.
- [46] Maksimkin A V, Kaloshkin S D, Kaloshkina M S, Gorshenkov M V, Tcherdyntsev V V, Ergin K S, Shchetinin I V. *J Alloy Compd*, 2012, 536: S538~S540.
- [47] Senatov F S, Gorshenkov M V, Tcherdyntsev V V, Kaloshkin S D, Sudarchikov V A. *Compos Part B-Eng*, 2014, 56: 869~875.
- [48] Dintcheva N T, Morici E, Arrigo R, Zerillo G, Marona V, Sansotera M, Magagnin L, Navarrini W. *Compos Part B-Eng*, 2016, 95: 29~39.
- [49] Ma H, Chen X, Hsiao B S, Chu B. *Polymer*, 2014, 55(1): 160~165.
- [50] Zhang W, Hu Z, Zhang Y, Lu C, Deng Y. *Compos Part B-Eng*, 2013, 51: 276~281.
- [51] Brevnov P N, Kirsankina G R, Zabolotnov A S, Krasheninnikov V G, Grinev V G, Berezkina N G, Sinevich E A, Shcherbina M A, Novokshonova L A. *Polym Sci Ser C+*, 2016, 58(1): 38~49.
- [52] Ferreira A E, Cerrada M L, Perez E, Lorenzo V, Cramail H, Lourenco J P, Ribeiro M R. *Micropor Mesopor Mat*, 2016, 232: 13~25.
- [53] Park S, Choi I S. *Adv Mater*, 2009, 21(8): 902~+.
- [54] Stuerzel M, Kempe F, Thomann Y, Mark S, Enders M, Muelhaupt R. *Macromolecules*, 2012, 45(17): 6878~6887.
- [55] An Y F, Tai Z X, Qi Y Y, Yan X B, Liu B, Xue Q J, Pei J Y. *J Appl Polym Sci*, 2014.
- [56] Maksimkin A V, Kharitonov A P, Mostovaya K S, Kaloshkin S D, Gorshenkov M V, Senatov F S, Chukov D I, Tcherdyntsev V V. *Compos Part B-Eng*, 2016, 94: 292~298.
- [57] Dintcheva N T, Arrigo R, Morici E, Gambarotti C, Carroccio S, Cicogna F, Filippone G. *Compos Part B-Eng*, 2015, 82: 196

~204.

- [58] Maksimkin A V, Senatov F S, Anisimova N Y, Kiselevskiy M V, Zalepugin D Y, Chernyshova I V, Tilkunova N A, Kaloshkin S D. *Mater Sci Eng C-Mater Biol Appl*, 2017, 73: 366~372.
- [59] Karhu M, Lindroos T, Uosukainen S. *Appl Acoust*, 2014, 85: 150~160.
- [60] Wang N, Xiong D, Pan S, Wang K, Shi Y, Deng Y. *New J Chem*, 2017, 41(4): 1846~1853.
- [61] Saleem J, Gao P, Barford J, Mckay G. *J Mater Chem A*, 2013, 1(45): 14335~14343.
- [62] Liu R, Wang X, Yu J, Wang Y, Zhu J, Hu Z. *RSC Adv*, 2016, 6(93): 90701~90710.
- [63] Shi X, Bin Y, Hou D, Matsuo M. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2013, 5(5): 1768~1780.
- [64] Li N, Xiao C, Mei S, Zhang S. *Desalination*, 2011, 274(1/3): 284~291.
- [65] Liu S, Yu W, Zhou C. *Polymer*, 2014, 55(8): 2113~2124.
- [66] Hsu P-C, Song A Y, Catrysse P B, Liu C, Peng Y, Xie J, Fan S, Cui Y. *Science*, 2016, 353(6303): 1019~1023.
- [67] Mueller G F J, Stuerzel M, Muelhaupt R. *Adv Funct Mater*, 2014, 24(19): 2860~2864.
- [68] Alam F, Balani K. *Mater Sci Eng C-Mater*, 2017, 75: 1106~1114.
- [69] Firouzi D, Foucher D A, Bougherara H. *J Appl Polym Sci*, 2014, 131(11).
- [70] Li W, Xiong D, Zhao X, Sun L, Liu J. *Mater Design*, 2016, 102: 162~167.
- [71] Nikolaev A G, Yushkov G Y, Oks E M, Oztarhan A, Akpek A, Hames-Kocabas E, Urkac E S, Brown I G. *Appl Surf Sci*, 2014, 310: 51~55.
- [72] He F F, Bai W Q, Li L L, Wang X L, Xie Y J, Jin G, Tu J P. *Appl Surf Sci*, 2016, 364: 280~287.
- [73] Novotna Z, Rimpelova S, Jurik P, Vesely M, Kolska Z, Hubacek T, Ruml T, Svorcik V. *Mater Sci Eng C-Mater Biol Appl*, 2017, 71: 125~131.
- [74] Marchiori G, Lopomo N, Boi M, Berni M, Bianchi M, Gambardella A, Visani A, Russo A, Marcacci M. *Mater Sci Eng C-Mater Biol Appl*, 2016, 58: 381~388.
- [75] Del Prado G, Terriza A, Ortiz-Perez A, Molina-Manso D, Mahillo I, Yubero F, Puertolas J A, Manrubia-Cobo M, Barrena E G, Esteban J. *J Biomed Mater Res Part A*, 2012, 100A(10): 2813~2820.
- [76] Yim J H, Fleischman M S, Rodriguez-Santiago V, Piehler L T, Williams A A, Leadore J L, Pappas D D. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2013, 5(22): 11836~11843.
- [77] Zhang Z X, Zhang T, Zhang X, Xin Z, Deng X, Prakashan K. *RSC Adv*, 2016, 6(15): 12530~12536.
- [78] Sharma R K, Agarwal M, Balani K. *Mater Sci Eng C-Mater Biol Appl*, 2016, 62: 843~851.
- [79] Li D, Guo Z. *Rsc Adv*, 2017, 7(15): 9169~9175.
- [80] Deng Y, Xiong D, Shao S. *Mater Sci Eng C-Mater Biol Appl*, 2013, 33(3): 1339~1343.
- [81] Joshi R, Friedrich J, Krishna-Subramanian S. *Plasma Chem Plasma Process*, 2013, 33(5): 921~940.
- [82] Hu J, Gao Q, Xu L, Zhang M, Xing Z, Guo X, Zhang K, Wu G. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2016, 8(35): 23311~23320.

Ultra-high Molecular Weight Polyethylene-based Functional Composites and Applications

YANG Meng^{1, 2}, ZHAO Ning^{2*}, XU Jian²

(1. *College of Chemistry and Chemical Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 2. *Laboratory of Polymer Chemistry and Physics, Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

Abstract: Ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) chains are prone to be closely packed and tangle because of the simple and regular long linear structure. Although the resultant bottlenecks in processing of high-performance UHMWPE materials restrict their large-scale development and applications, the unique structure indicate various opportunities for functionalization and materials design. Based on the excellent properties of UHMWPE, a considerable number of studies have shown that functionalization and composites design can be achieved by taking advantages of the polydispersity of molecular weight, adjustable soft/hard phase and physical cross-linking density, pore-foaming effects and stress-induced crystallization under stretching, crystallization-induced phase separation and other characteristics. In this mini-review, the development and application of UHMWPE-based functional composites in recent years are summarized to illustrate the unique advantages and broad prospects of UHMWPE in electromagnetic shielding, intelligent response, biomedicine and thermal management.

Key words: UHMWPE; Functionalization; Composites; Separated structure; Porous; Dispersion