

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.01.024

聚醚醚酮复合材料的改性研究及应用进展^{*}

文怀兴,刘杏,陈威

(陕西科技大学机电工程学院,西安 710021)

摘要: 分别从化学改性、填充改性及纤维增强、混合型改性及表面改性等方面综述了聚醚醚酮(PEEK)及其复合材料的改性方法,尤其是对摩擦学性能的改性方法,阐述了 PEEK 复合材料在各个领域的应用情况,指出了 PEEK 复合材料摩擦学改性研究的未来发展方向。

关键词: 聚醚醚酮;摩擦学;填充改性;纤维增强;应用

中图分类号: TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)01-0123-05

Review on Modification Research and Application of PEEK Composites

Wen Huaixing, Liu Xing, Chen Wei

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Shaan Xi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: Modification methods of polyetheretherketone (PEEK) and its composites, especially the modification methods for tribological properties, were reviewed from different aspects of chemical modification, filling modification and fiber reinforcement, hybrid modification, surface modification etc.. The application conditions of PEEK composites in various fields were expounded. The future development direction of PEEK composite on tribological properties was pointed out.

Keywords: polyetheretherketone; tribology; filling modification; fiber reinforcement; application

由于科技的进步和经济的快速发展,传统的材料性能已不能满足现代社会的发展需求,人们对材料的性能有了更高的要求,而高分子复合材料所具有的独特的优势使其在科技界获得了广泛关注。聚醚醚酮(PEEK)作为新型的高性能工程塑料,具有很高的玻璃化转变温度和熔融温度,具有高的弹性模量、热稳定性、耐化学稳定性、耐辐射性以及摩擦系数低、耐磨性能好和承载啮合性好等优点,因此被广泛地应用于各个工业领域^[1]。为了进一步提高 PEEK 的性能尤其是摩擦学性能,拓展其应用领域,已经有学者通过粒子填充、纤维增强、有机-无机混合等方式对 PEEK 进行了物理改性处理,制备了摩擦学性能和力学性能优良的 PEEK 复合材料^[2]。自 20 世纪 90 年代以来,材料学和摩擦学研究人员对 PEEK 复合材料优异的摩擦学性能投入更多的关注。为满足工程应用的需求,对 PEEK 复合材料进行改性,拓展其应用领域已经显得尤为重要。

1 PEEK 的改性研究方法

关于 PEEK 改性研究的方法可以归纳为化学改性、填充改性及纤维增强、混合型改性以及表面改性。化学改性是指通过引入不同的分子链或一定性能的基团来改进聚合物的整体分子结构以达到增强复合材料各种性能的方法,可以将化学反应分为共聚合反应、交联反应、聚合物主链反应和侧基反应等;填充改性及纤维增强是指通过在主体材料中添

加不同量的粉体、纤维和偶联剂等使其性能得到改进的一种方法;混合型改性是指将两种或两种以上的改性剂(聚合物、无机粉体或纤维等)以一定的比例通过共混以得到采用单一改性剂无法获得的性能的方法;表面改性是指在保持原材料优异性能的基础上,增加其表面新的性能的方法,大体上可以归结为表面化学反应法、表面接枝法、表面复合化法等。通过对 PEEK 进行不同方式的改性,可以进一步提高其力学性能、摩擦学性能^[3]以及抗疲劳、防腐等性能,并且可以提高其稳定性,降低材料成本,扩大其应用范围。

1.1 化学改性

黄雪红等^[4]以 ATRP 法聚合制备了含有溴异丙基侧基的 PEEK,在 PEEK 主链上引入聚苯乙烯磺酸钠侧链,成功得到侧链形 PEEK 接枝聚合物(PEEK-g-StSO₃Na),发现侧链的 StSO₃Na 含量随反应时间的增加而增多,磺酸基团离子簇的连接聚集有利于提高 PEEK-g-StSO₃Na 膜的电导率。

李继琛^[5]研究了含有支化单元的 PEEK 三元共聚物,通过结构表征得出:①三元共聚物只能溶于强极性的酸溶

^{*} 陕西省教育厅专项科研计划项目(14JK1082),陕西科技大学引进博士科研启动基金项目(BJ11-01)

联系人:文怀兴,博士,教授,博士生导师,研究方向为先进制造技术及摩擦学

收稿日期:2016-10-17

剂,可以保持良好的耐腐蚀性;②三元共聚物的结晶性随支化程度的增大而减弱,但仍有一定的结晶性;③含有支化单元的 PEEK 共聚物玻璃化转变温度都会表现出一定程度的升高,可以被用于耐高温的材料。

杜晓燕等^[6]通过 Michaels-Arbuzov 反应以磷酸酯基团取代氯甲基基团,再经过水解磷酸酯基团得到磷酸化 PEEK。该种材料的成功制备改良了与羟基磷灰石的表面作用,提高了 PEEK/羟基磷灰石复合材料的整体性能。

刘焕平等^[7]通过在 PEEK 表面接枝聚丙烯酸,并以共价键结合引入 O-羧甲基壳聚糖(O-CMC),通过性能测试和结构表征发现,改性后的材料表面湿润性和血液相容性得到显著提高。

林彤彤^[8]通过缩聚合成含苯并咪唑结构单元的 PEEK (PEEK-X%BI),经实验得出双酚 A 型 PEEK 的热稳定性可以通过加入苯并咪唑结构单元来提高, PEEK-X%BI 的玻璃化转变温度在 157~319℃之间,并与苯并咪唑结构单元含量增加呈递增趋势。

1.2 填充改性及纤维增强

(1) 无机粒子填充型。

纳米粒子是指粒径为 1~100 nm 的粒子,纳米粒子区别于宏观物体结构的特点是,它表面积很大,而表面原子层为既无长程序又无短程序的非晶层。纳米粒子的结构具有表面曲率大、粒径小等特点使其具有较大的比表面积,因此表面的物理化学缺陷多,易与高分子链发生物理化学结合,故被普遍应用于 PEEK 与其它聚合物的改性中。

V. Balaji 等^[9]研究了纳米 Si_3N_4 填充 PEEK 复合材料的性能。研究显示随着 Si_3N_4 含量的增加, PEEK 纳米复合材料的结晶度先增大后降低。当 Si_3N_4 质量分数为 10% 时,复合材料的峰值结晶温度和起始结晶度温度均升高了 14℃,且维氏硬度和划痕硬度均有明显提高,该添加量下的磨损率最低。

穆立文等^[10]以不同体积分数的纳米和微米 TiO_2 填充 PEEK/聚四氟乙烯(PTFE)复合材料,研究不同变量条件下复合材料的摩擦学性能变化,通过表征得出,随着 TiO_2 含量的增多, PEEK/PTFE/ TiO_2 复合材料的摩擦系数先减小后增大,随着载荷、滑动速度的增加, PEEK/PTFE/ TiO_2 复合材料的摩擦系数降低,接触面的温度增加。在同样的变量条件下,纳米 TiO_2 填充的复合材料比微米 TiO_2 填充的表现出更优异的减摩抗磨性能。

M. Kalin 等^[11]研究了石墨烯、二硫化钨(WS_2)和碳纳米管等纳米粒子填充 PEEK 在干摩擦条件下的摩擦学性能,通过该项研究得出,纳米粒子的种类和形态主要影响复合材料的宏观硬度、厚度和转移膜的覆盖程度, WS_2 填充 PEEK

复合材料的磨损率降低了 30% 左右,其摩擦学性能比填充碳纳米材料的更为优异。相比于针状 WS_2 和石墨烯,球壳状 WS_2 和碳纳米管填充 PEEK 复合材料的摩擦系数更低。

J. Tharajak 等^[12]利用火焰喷涂制备了六方氮化硼(hBN)填充 PEEK 复合材料涂层,采用球盘配副研究了该复合材料涂层的形态、物理以及摩擦学性能。结果显示,负载值为 5 N 时, hBN 的添加可以显著降低复合材料涂层的磨损率。当 hBN 的质量分数增加,尤其为 8% 时,摩擦系数明显减小,这是由于 hBN 起到了润滑的作用。较大粒径的 hBN 的添加会阻碍结晶度,较小的粒子会作为复合材料涂层的成核剂,添加不同粒径的 hBN 都可以提高复合材料涂层的显微硬度,但不同粒径的 hBN 又会使复合材料的结晶度不同。

G. Zhang 等^[13]使用人造神经网络的方法研究了 SiC 填充 PEEK 复合材料涂层的摩擦磨损性能。通过表征发现,复合材料涂层的摩擦系数随滑动速度的变化情况取决于所施加的载荷大小,当载荷低于 5 N 时摩擦系数曲线呈抛物线状,在高载荷下尤其是载荷为 9 N 时,摩擦系数会快速减小。纯 PEEK 涂层和 7% SiC 填充 PEEK 复合材料涂层的摩擦系数变化可以解释为粘-滑运动机制的作用。滑动速度的增加会引起配副表面的温度上升,会降低复合材料涂层的机械阻力,增加对磨件的接触面积,加速磨损。

J. Vande Voort^[14]等研究发现当 CuS 粒子的体积分数为 35% 时 PEEK 复合材料的磨损率为纯 PEEK 的 1/6。但 CuS 的加入也会使复合材料的摩擦系数增加,这是由于 CuS 粒子比 PEEK 硬,形成了犁耕效应。

(2) 纤维增强型。

纤维材料对于 PEEK 复合材料的增强作用不仅体现在可以显著改善复合材料热力学性能,也体现在可以提高复合材料的抗老化和耐疲劳等性能。玻璃纤维(GF)、碳纤维(CF)和晶须与 PEEK 的亲合力强,可增强 PEEK 制成性能优异的复合材料,使其在温度、模量、强度和稳定性等方面都得到一定程度的提高^[15]。

李恩重等^[16]对 GF 增强 PEEK (PEEK/GF) 复合材料的高速干摩擦性能做了研究。利用球盘式摩擦磨损试验对短切 GF 质量分数为 30% 的 PEEK/GF 复合材料进行室温高速条件下的干滑动磨损试验,考察了载荷、频率对材料摩擦系数及磨损量的影响,并对摩擦前后的微观形貌及热稳定性进行了分析。结果表明 PEEK/GF 复合材料随着拟定载荷频率的增加,摩擦系数和磨损量增大并逐渐趋于稳定。磨损方式主要以犁沟磨损为主,并且 PEEK/GF 复合材料的热分解温度比纯 PEEK 高出了 75℃。

李恩重等^[17]对 PEEK/GF 复合材料在水润滑下的摩擦学性能也做了深入的研究并探讨了其磨损机理。无论是

在干摩擦和水润滑条件下, PEEK 和 PEEK/GF 的摩擦系数和磨损率均随载荷和对磨时间的增加逐渐增大并趋于稳定,其在水润滑环境中比干摩擦环境下明显低得多。干摩擦下, PEEK 以粘着磨损和磨粒磨损的混合磨损为主, PEEK/GF 以磨粒磨损和疲劳磨损为主。水润滑条件下 PEEK 主要以轻微的粘着磨损为主, PEEK/GF 主要以轻微磨粒磨损为主。水的冷却润滑作用,起到了减轻摩擦、降低摩擦表面温升的作用,显著改善了复合材料的摩擦磨损性能。

戴春霞等^[18]用正交试验的方法研究了四针状 ZnO 晶须增强 PEEK 复合材料的摩擦学性能,通过表征得出添加不同质量分数的晶须对复合材料的摩擦磨损性能的改善程度有不同的影响,当填充晶须质量分数约为 10% 时复合材料的耐磨性能最优,其磨损机制为磨粒磨损和疲劳磨损。

Pei Xianqiang 等^[19]研究了单向 CF 增强 PEEK 的腐蚀磨损性能,结果显示,冲蚀角度的增加会使复合材料产生局部变形效应,导致高能量耗散引起侵蚀表面的温度升高。冲蚀过程伴随着切割、变形、剥落、开裂等机制。当 CF 的取向度低于 45° 时,复合材料的表面会产生微裂纹。

Wang Zhiqian 等^[20]研究了不锈钢 316L 与 PEEK (316L-PEEK)、不锈钢 316L 与 PEEK/GF (316L-CFRPEEK) 以及高碳铬不锈钢 9Cr18Mo 与 PEEK/GF (9Cr18Mo-CFRPEEK) 3 种配副在海水环境下的摩擦学性能。研究发现,与 316L-PEEK 相比,316L-CFRPEEK 与 9Cr18Mo-CFRPEEK 均具有较低的摩擦系数和较好的耐磨损性能,其中 316L-CFRPEEK 配副的摩擦学性能最好,摩擦系数在 0.1 左右,摩擦表面温度在 32℃ 左右。摩擦磨损实验后,316L-PEEK 和 316L-CFRPEEK 的表面粗糙度明显降低,而 9Cr18Mo-CFRPEEK 的表面粗糙度有明显增加。

于洪阳^[21]以碳酸钙晶须为填料,分别用磺化超支化聚芳醚酮 SHPAEK 和线性磺化 PEEK (SPEEK) 改性碳酸钙晶须,制备了 PEEK 复合材料,研究发现,经过超支化改性处理过的复合材料的弯曲弹性模量、韧性、结晶速率得到了提高,并且在复合材料加工温度区间的熔体黏度得到有效降低。

杜巍峰等^[22]研究了 CF 表面处理对 PEEK/CF 复合材料的相容性及力学性能的影响。结果表明,CF 表面处理加强了 CF 和 PEEK 基体的界面结合,提高了复合材料的力学性能,相比于 KMnO_4 和 $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, 浓 HNO_3 处理的 CF 和 PEEK 之间的结合最好,力学性能最优异。

1.3 混合型改性

V. Rodriguez 等^[23]比较了在不同的接触压力和滑动速度下,填充不同固体润滑剂的 PEEK 复合材料在往复式干磨条件下的摩擦学性能变化。拟定的 3 组对比材料分别为纯 PEEK (PEEK-S0)、填充 CF 与石墨烯的 PEEK (PEEK-S02)

以及填充 CF、石墨烯与 PTFE 的 PEEK (PEEK-S03), 将其与 100Cr6 钢配副,通过摩擦试验得出,固体润滑剂的添加可以减少复合材料的摩擦系数,但无法降低磨损率。PEEK-S0 复合材料在摩擦过程中会形成转移膜,可以有效地降低摩擦系数。PEEK-S02 复合材料的摩擦系数最低可以达到 0.28。石墨烯和 PTFE 可以有效减少复合材料与钢对磨时的粘附现象。

G. Zhang 等^[24]研究了纤维方向和接触压力对 SCF, PTFE 及石墨烯填充 PEEK 的摩擦磨损性能的影响。通过研究表明,当纤维处于 N 方向 (即此方向与所施加力的方向平行) 时,磨损率随着压力增加而增加。当纤维方向为 AP 方向 (垂直于所施加力的方向且垂直于试样外表面) 时,压力从 1 MPa 增加到 2 MPa 时磨损率增加,但从 2 MPa 增加到 4 MPa 时磨损率无明显变化。在低压力下纤维细化是影响复合材料磨损机制的主要因素,而纤维的方向对复合材料的摩擦性能几乎没有影响。通过扫描电子显微镜观察磨损表面可以得出,在 AP 方向上基本不发生复合材料的纤维粘附和失效现象,而在 N 方向上,纤维的剥落和破坏是影响复合材料摩擦过程的主要因素。

彭旭东等^[25]研究了干摩擦环境下纳米 Al_2O_3 和 PTFE 填充 PEEK 复合材料的摩擦磨损特性。结果显示,纳米粒子的粒径和含量对复合材料的摩擦系数均有影响,并且载荷的大小对其作用的影响最为明显。当添加的纳米 Al_2O_3 含量为 5%~7% 时,PEEK 复合材料的摩擦系数和比磨损量最低,随着载荷的增加 PEEK/PTFE/纳米 Al_2O_3 复合材料的摩擦系数因纳米粒子效应和表面摩擦温升呈现下降趋势。

G. Y. Xie 等^[26]研究了钛酸钾晶须和 CF 混合增强 PEEK (PEEK/PTW/CF) 的耐磨性能。研究结果表明,CF 主要起负载作用,减小基体的磨损。钛酸钾晶须分载了 CF 的应力集中,阻止了 CF 的剥落,并且限制了复合材料表面裂纹的产生和延展,从而起到减缓复合材料疲劳磨损的作用。

1.4 表面改性

T. Miyazaki 等^[27]研究了化学表面改性碳增强 PEEK (carbon-PEEK) 复合材料的生物活性。结果显示,经过硫酸和氯化钙改性的 carbon-PEEK 复合材料的生物活性高于纯 PEEK,该复合材料有望成为脊椎材料的替代材料。

S. Hammouti 等^[28]研究了采用激光处理 PEEK 表面的摩擦性能。研究结果发现了通过激光改性后的 PEEK 表面会产生圆形的凹槽,对比于未经激光处理的表面,该表面的摩擦系数较高。在试验条件下,当凹槽的深度在 3.5~12 μm 时对于减小磨损是非常有效的。经过激光进行表面处理的 PEEK 的磨损率是未经表面处理的 PEEK 的 10%。

H. Mahjoubi 等^[29]通过嫁接膦酸基重氮来增强 PEEK

的生物活性,用以提高其与羟基磷灰石涂层的结合度以及该类复合材料的成骨潜力。结果表明,通过磷酸化作用可提高 PEEK 的亲水性,并显著增强了羟基磷灰石涂层与 PEEK 在体液环境中的结合度,这表明制备的复合材料有望应用于人体。

2 PEEK 的应用

PEEK 材料的应用非常广泛^[30-31]。PEEK 具有良好的加工成型特性,可以根据客户的图纸或样品很方便地采用注塑、车、铣、打孔、攻丝、数控精雕等工艺加工成各种复杂形状的零件。据统计在运输业、工业领域的消费量约占 PEEK 总消费量的 1/3,电子行业约占 1/5,医学领域和其它应用约占 1/20^[32]。

2.1 航空航天领域

PEEK 在航空航天领域的应用越来越广泛,它可以替代铝、钛和其它金属材料制造不同型号飞机所需的零部件^[33]。并且,当飞机发生火灾时,以它固有的优异的阻燃性能可以降低火灾的危害。PEEK 具有低密度、良好的加工性等特征,使其容易加工成公差极小的零部件以代替其它金属用于飞机所需的零部件。由于其还具有良好的耐水解和耐腐蚀特性,可用它来制备飞机的外部零件^[34-36]。

2.2 汽车制造业

当代车辆的设计更注重于节能环保,且对安全性能的要求高,故汽车的结构轻量化设计以及质地较轻的材料应用等就显得尤为必要。PEEK 复合材料具有卓越的综合性能(如力学性能高、耐热、耐磨耗、耐摩擦),对于车辆使用的润滑油及其它油及酸之类的各种液体具有优异的耐化学性。并且其具有密度小、力学性能良好、制造工艺方便、加工成本低以及可延长零件的使用寿命等特点,越来越广泛地应用于汽车行业,并展现出了“以塑代钢”的巨大应用前景,PEEK 已经可以替代汽车中的部分高性能金属零件,用于其制造轴承、密封件、压缩机阀片、活塞环、离合器齿环等在汽车的电机控制系统使用的零件^[37]。

2.3 电子电气领域

PEEK 具有优异的电气性能,在严苛的工作环境下如高温、高压和高湿度等环境中,依然可以保持优异的电绝缘性,因此被公认为是电子电气领域理想的电绝缘材料,可用于镶嵌插头、高可靠性插件、电缆插头、接线盒、配线的引出头、电池外壳和其它超纯产业所需的超纯水系统的管件和阀门等部件。PEEK 在较宽的温度范围内不产生变形,依据这一特性,PEEK 也可用于制造印刷板电路、绝缘膜、连接器、高温插件等。

2.4 工业领域

PEEK 具有良好的力学性能、耐高温性能和耐化学腐蚀

性能,通常被用于制作化学机械设备关联部件、熔接机器关联部件、食品加工线关联部件、镀金加工机器关联部件、金属表面处理关联部件等,均显示出良好的工作性能^[38]。用该材料制作的涡轮泵的叶轮,磨损程度和噪音级别明显降低,使用寿命提高^[39]。SKF 采用 PEEK 复合材料制造的轴承保持架满足高速高温及化学腐蚀等工况下的使用要求。日本 NTN 采用 PEEK 制造了主轴为精密级的双列圆柱滚子轴承,实现了高承载量和高刚性。

2.5 医疗领域

目前在医学领域常用的高分子材料有 PEEK、聚氨酯、硅橡胶、聚酯纤维、聚乙烯基吡咯烷酮、聚甲基丙烯酸甲酯、聚乙烯醇、聚乳酸、聚乙烯等,但是从医学角度看,这些材料中有许多在使用过程中会产生一些副作用。而 PEEK 无毒、质轻、耐磨,具有良好的生物相容性和抗生物反应能力^[40-41]。因此近年来 PEEK 及其复合材料越来越多的应用于医疗领域^[42]。PEEK 在生物学中具有很多优异的性能,如 X 射线可穿透性、弹性模量更接近于皮质骨、可用于缝线铆钉和颅颌面外科等^[43]。

Xu Anxiu 等^[44]研究了三元复合生物材料 PEEK/CF/n-HA 的生物应用性能。结果表明,该三元复合材料通过氧离子作用和喷砂处理,不仅提高了亲水性还促进了体内植入物和成骨之间的骨结合度,因此该材料在骨组织领域的应用具有可观的前景。

贾庆卫等^[45]在模拟体液的环境下对 PEEK/CF 复合材料作为髌臼假体材料的生物相容性和耐磨性进行了研究,发现以 PEEK/CF 复合材料作为髌臼假体材料时,其耐磨性能和生物相容性优异,是未来髌臼假体的理想材料。

2.6 食品加工业

随着食品加工、包装设备运行速度在加快,可靠性要求也在提高,而且由于食品加工、包装过程中的清洗、碾碎、消毒杀菌、无菌包装等工艺过程复杂,对包装设备的关键零部件的可靠性和寿命提出了更高的要求。原来采用的传统材料如尼龙、超高分子量聚乙烯、PTFE 等材料已无法满足包装设备高速、耐磨、无毒的要求。而 PEEK 具有优异的耐高温、耐磨损、耐腐蚀、无毒等综合性能,所以应用 PEEK 可以很好地解决食品加工、包装机械设备关键零件的设计、制造及使用难题^[46]。采用 PEEK 可以提高包装设备部件等塑料零件的使用寿命,减少停机维修时间,提高包装设备的稳定性和可靠性。

3 总结与展望

PEEK 是一种性能优异、应用广泛的特种工程塑料,国内外多年的应用实践表明它是一种具有巨大发展潜力的树脂品种。近年来研究人员对 PEEK 进行了各种不同的物理

化学改性,使其应用领域更加广泛,但对在不同条件下的摩擦学行为和机理的深入研究有待加深。因此,对于今后 PEEK 的研究应该注重以下几个方面:①优化加工工艺,从根本上提高 PEEK 的摩擦磨损性能;②寻求新的改性方法,提高不同添加剂与 PEEK 的相容性;③综合分析不同工作环境下 PEEK 复合材料与不同配副的摩擦磨损性能,掌握磨损机理,寻求更优的服役环境;④优化 PEEK 市场牌号,健全市场机制,促进 PEEK 产业结构化。

参考文献

- [1] Zhu Yanji, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2014, 131(21):DOI:10.1002/app.40989.
- [2] Bijwe J, et al. Industrial Lubrication and Tribology, 2007, 59(4):156-165.
- [3] Dong Wutao, et al. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J:Journal of Engineering Tribology, 2013, 227(10):1 129-1 137.
- [4] 黄雪红,等.应用化学,2014(8):878-884.
Huang Xuehong, et al. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2014(8):878-884.
- [5] 李继琛.含有支化单元聚醚醚酮三元共聚物的合成研究[D].大连:大连理工大学,2013.
Li Jichen. Synthesis of poly(ether ether ketone) terpolymer containing branched unit[D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2013.
- [6] 杜晓燕,等.广东化工,2015,42(10):15-16.
Du Xiaoyan, et al. Guang Dong Chemical Industry, 2015, 42(10):15-16.
- [7] 刘焕萍,等.中国塑料,2016,30(2):39-42.
Liu Huanping, et al. China Plastics, 2016, 30(2):39-42.
- [8] 林彤彤.含苯并咪唑结构聚醚醚酮的合成及其膜性能研究[D].杭州:浙江工业大学,2010.
Lin Xingxing. Poly(aryl ether ketone-imidazole):Syntheses, characterization and film properties[D]. Hangzhou:Zhejiang University, 2010.
- [9] Balaji V, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2011, 119(1):311-318.
- [10] 穆立文,等.南京工业大学学报:自然科学版,2014(6):31-36.
Mu Liwen, et al. Journal of Nanjing University of Technology: Natural Science Edition, 2014(6):31-36.
- [11] Kalin M, et al. Wear, 2015, 332:855-862.
- [12] Tharajak J, et al. Surface and Coatings Technology, 2015, 273:20-29.
- [13] Zhang G, et al. Surface and Coatings Technology, 2006, 200(8):2 610-2 617.
- [14] Vande Voort J, et al. Wear, 1995, 181-183:212-221.
- [15] 张阳,等.高分子通报,2012(9):56-62.
Zhang Yang, et al. Polymer Bulletin, 2012(9):56-62.
- [16] 李恩重,等.工程塑料应用,2012,40(5):62-65.
Li Enzhong, et al. Engineering Plastics Application, 2012, 40(5):62-65.
- [17] 李恩重,等.材料工程,2014(3):77-82, 89.
Li Enzhong, et al. Journal of Materials Engineering, 2014(3):77-82, 89.
- [18] 戴春霞,等.润滑与密封,2011,36(2):35-36.
Dai Chunxia, et al. Lubrication Engineering, 2011, 36(2):35-36.
- [19] Pei Xianqiang, et al. Tribology International, 2012, 55:135-140.
- [20] Wang Zhiqiang, et al. Materials & Design, 2014, 53:881-887.
- [21] 于洪阳.磺化超支化聚芳醚酮改性碳酸钙晶须/聚醚醚酮复合材料的制备及其性能研究[D].吉林:吉林大学,2016.
Yu Hongyang. Study on preparation and properties of calcium carbonate whisker / PEEK composites modified by sulfonated hyperbranched PAEK[D]. Jilin:Jilin University, 2016.
- [22] 杜巍峰,等.化工新型材料,2016(4):103-105.
Du Weifeng, et al. New Chemical Materials, 2016(4):103-105.
- [23] Rodriguez V, et al. Tribology International, 2016, 103:45-57.
- [24] Zhang G, et al. Wear, 2010, 268(7):893-899.
- [25] 彭旭东,等.中国石油大学学报:自然科学版,2004,28(2):68-70.
Peng Xudong, et al. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2004, 28(2):68-70.
- [26] Xie G Y, et al. Composites Science and Technology, 2011, 71(6): 828-835.
- [27] Miyazaki T, et al. Materials Science and Engineering, 2017, 70: 71-75.
- [28] Hammouti S, et al. Applied Surface Science, 2015, 357:1 541-1 551.
- [29] Mahjoubi H, et al. Acta Biomaterialia, 2017, 47:149-158.
- [30] Romoli L, et al. Optics and lasers in Engineering, 2012, 50(3): 449-457.
- [31] Ma N, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 123(2): 740-748.
- [32] 钱伯章.化工新型材料,2005(1):1-5.
Qian Bozhang. New Chemical Materials, 2005(1):1-5.
- [33] 杨尚明,等.机电元件,2014(6):33-40.
Yang Shagnming, et al. Mechanical and Electrical Components, 2014(6):33-40.
- [34] 魏晓娟.现代塑料加工应用,2016(1):19.
Wei Xiaojuan. Modern Plastics Processing Applications, 2016(1):19.
- [35] 牛海涛,等.北京纺织,2004,25(3):30-32.
Niu Haitao, et al. Beijing Textile, 2004, 25(3):30-32.
- [36] 张婷.航空制造技术,2013,435(15):32-35.
Zhang Ting. Aviation Manufacturing Technology, 2013, 435(15):32-35.

- Liu Fang, et al. CIESC Journal, 2016, 67(5):1 635–1 643.
- [4] Aithal P S, et al. International Journal of Management Sciences and Business Research, 2016, 5(4):139–149.
- [5] Xia Zhenyuan, et al. Advanced Functional Materials, 2013, 23(37):4 684–4 693.
- [6] Tölle F J, et al. Carbon, 2014, 75:432–442.
- [7] Tschoppe K, et al. Macromolecular Materials and Engineering, 2015, 300(2):140–152.
- [8] Beckert F, et al. Macromolecules, 2014, 47(20):7 036–7 042.
- [9] Haar S, et al. Small, 2015, 11(14):1 691–1 702.
- [10] Ciesielski A, et al. Angewandte Chemie International Edition, 2014, 53(39):10 355–10 361.
- [11] Ciesielski A, et al. Chemical Society Reviews, 2014, 43(1):381–398.
- [12] Schlierf A, et al. Nanoscale, 2013, 5(10):4 205–4 216.
- [13] Andrea S, et al. 2D Materials, 2014, 1(3):035006.
- [14] Yang Huafeng, et al. 2D Materials, 2014, 1(1):011012.
- [15] Xia Zhenyuan, et al. Carbon, 2015, 84:254–262.
- [16] Jomehzadeh E, et al. Computational Materials Science, 2015, 99:164–172.
- [17] Liscio A. Scale-dependent fragmentation mechanisms of graphene oxide: A quantitative morphological analysis as new approach for metrology of 2D materials[C]//Proceedings of Materials.it 2016. Catania:CNISM, 2016:289–290.
- [18] Androulidakis C, et al. Scientific Reports, 2014, 4:5 271.
- [19] Anagnostopoulos G, et al. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(7):4 216–4 223.
- [20] Li Zheling, et al. Carbon, 2015, 88:215–224.
- [21] Saleh T A, et al. Chemical Engineering Journal, 2017, 307:230–238.
- [22] Zhao Tingkai, et al. Scientific Reports, 2016, 6:33 833.
- [23] Cho E C, et al. Carbon, 2016, 102:66–73.
- [24] Onyu K, et al. KMUTNB International Journal of Applied Science and Technology, 2016, 9(2):99–111.
- [25] Wang Jialiang, et al. Materials Chemistry and Physics, 2012, 136(1):43–50.
- [26] Miri N E, et al. Carbohydrate Polymers, 2016, 137:239–248.
- [27] Zeng Xiaopeng, et al. European Polymer Journal, 2012, 48(10):1 674–1 682.
- [28] Lan Yan, et al. Polymer, 2016, 97:11–19.
- [29] Baruah P, et al. Polymer Degradation and Stability, 2016, 129:26–33.
- [30] Kim M, et al. Composites Science and Technology, 2009, 69(3):335–342.
- [31] Valles C, et al. Faraday Discussions, 2014, 173:379–390.
- [32] Panzavolta S, et al. Carbon, 2014, 78:566–577.
- [33] Chandrasekaran S, et al. Composites Science and Technology, 2014, 97:90–99.
- [34] Bian Jun, et al. European Polymer Journal, 2013, 49(6):1 406–1 423.
- [35] Boland C S, et al. Carbon, 2016, 99:280–288.
- [36] Yu Mei, et al. Carbon, 2015, 87:98–105.
- [37] Li Sha, et al. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(19):16 679–16 686.
- [38] Mosciatti T, et al. ACS Nano, 2015, 9(3):2 357–2 367.
- [39] Liu Zhaoyang, et al. Advanced Materials, 2015, 27(4):669–675.
- [40] Rahman M A, et al. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 581:724–730.
-
- (上接第 127 页)**
- [37] 林有希, 等. 汽车技术, 2005(12):37–40.
Lin Youxi, et al. Automotive Technology, 2005(12):37–40.
- [38] 班玉红, 等. 流体机械, 2009, 37(5):43–45.
Ban Hongyu, et al. Fluid Machinery, 2009, 37(5):43–45.
- [39] 吴殿杰. 国内汽车涡轮增压器铸造技术的发展 [C]//2012 年全国蠕墨铸铁研讨会暨机床铸件技术交流会会议论文集. 北京:中国稀土学会, 2012:184–192.
Wu Dianjie. Development of casting technology for domestic automobile turbocharger[C]//Proceedings of 2012 national vermicular cast iron seminar and machine tool castings technical conference. Beijing:The Chinese Society of Rare Earths, 2012:184–192.
- [40] Fujihara K, et al. Biomaterials, 2004, 25(17):3 877–3 885.
- [41] Bakar A, et al. Composite Science and Technology, 2003, 63(3):421–425.
- [42] 宗倩颖, 等. 合成树脂及塑料, 2016(3):93–96.
Zong Qianying, et al. Synthetic Resins and Plastics, 2016(3):93–96.
- [43] 杨丽君. 现代制造, 2014(22): 38–40.
Yang Lijun. Modern Manufacture, 2014(22): 38–40.
- [44] Xu Anxiu, et al. Materials Science and Engineering:C, 2015, 48:592–598.
- [45] 贾庆卫, 等. 中国矫形外科杂志, 2003, 11(3):210–213.
Jia Qingwei, et al. Chinese Journal of Orthopaedic Surgery, 2003, 11(3):210–213.
- [46] 谭宗尚, 等. 饮料工业, 2014, 17(2):39–42.
Tan Zongshang, et al. The Beverage Industry, 2014, 17(2):39–42.