

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.09.030

# PEEK 改性研究进展

党哲,高东强,杨杰,贾均红  
(陕西科技大学机电工程学院,西安 710021)

**摘要:**概述了聚醚醚酮(PEEK)的基本特性,重点介绍了近年来 PEEK 的改性研究进展,包括表面改性、填充改性及共混改性。表面改性主要通过辐射处理法、等离子体处理法和化学溶液处理法等改善 PEEK 表面活性;填充改性主要通过添加纤维、金属氧化物以及无机填料等改善材料的力学性能和摩擦学性能;共混改性主要通过 PEEK 中混入高聚物改善材料的综合性能。最后,展望了 PEEK 未来的研究方向。

**关键词:**聚醚醚酮;表面改性;填充改性;共混改性;研究进展

**中图分类号:** TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)09-0166-05

## Research Progress on Modification of PEEK

Dang Zhe, Gao Dongqiang, Yang Jie, Jia Junhong

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

**Abstract :** The basic characteristics of polyetheretherketone (PEEK) were summarized, and the research progress of modification of PEEK were mainly introduced in recent years, including surface modification, filling modification and blending modification. Surface modification mainly improves the surface activity of PEEK through radiation treatment, plasma treatment and chemical solution treatment. Filling modification mainly improves the mechanical properties and tribological properties of materials by adding fiber, metal oxide and inorganic fillers to PEEK. Blending modification mainly improves the overall performance of materials by blending PEEK with high polymers. Finally, the future research direction of PEEK was prospect.

**Keywords :** polyetheretherketone ; surface modification ; filling modification ; blending modification ; research progress

聚醚醚酮(PEEK)是目前应用最广的高性能热塑性工程塑料之一<sup>[1]</sup>,具有出色的力学性能和耐热性、优异的绝缘性和高抗疲劳强度<sup>[2]</sup>、稳定的耐化学药品性<sup>[3]</sup>,以及优异的生物相容性<sup>[4]</sup>,被广泛应用于生物医学<sup>[5]</sup>、海洋防护<sup>[6]</sup>和汽车工业<sup>[7]</sup>等领域。但是,PEEK是一种生物惰性材料,PEEK的生物惰性表面和固有的化学惰性限制了其应用<sup>[8]</sup>。因此研究人员一直致力于寻找一种在不改变 PEEK 自身优点的同时提高其表面活性和耐磨性的优异方法,从而扩展其应用领域。

目前,研究人员针对 PEEK 进行的改性方式主要包括:表面改性、填充改性,共混改性。表面改性主要通过物理或化学技术针对 PEEK 表面进行改性,以增加其表面能并促进生物分子的结合,填充改性和共混改性主要应用于复合材料的制备,改善其摩擦学性能。

## 1 表面改性

PEEK 在生物医疗领域已经得到广泛的应用,尤其是在人工骨关节方面<sup>[9]</sup>。PEEK 是一种生物惰性材料,植入人体内时不会发生不良反应<sup>[10-11]</sup>。但是,当需要在植入物和宿主组织之间直接进行骨整合时,PEEK 表面较低的润湿性限制了细胞粘附和蛋白质吸收,这会降低骨整合中的伤口愈合能力<sup>[12-15]</sup>。通过物理或化学技术进行的表面改性可以提高 PEEK 表面活性,目前,主要的表面改性方法有辐射处理法、等离子体处理法和化学溶液处理法等。

辐射处理法具有高分辨率、高操作速度、低成本等特点,可以提高 PEEK 的表面活性,研究人员应用辐射处理法对 PEEK 进行改性研究。A. Wilson 等<sup>[16]</sup>应用脉冲激光对 PEEK 表面进行改性处理,以研究其对 PEEK 表面活性的影响。研究表明,随着激光功率强度的增加,PEEK

通讯作者:高东强,博士,教授,主要从事表面工程方面研究 E-mail: gaodqsust.edu.cn

收稿日期:2020-06-20

引用格式:党哲,高东强,杨杰,等. PEEK 改性研究进展[J]. 工程塑料应用,2020,48(9): 166-170.

Dang Zhe, Gao Dongqiang, Yang Jie, et al. Research progress on modification of PEEK[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(9): 166-170.

表面的接触角减小,自由能和剪切粘接强度相应增大。Liu Sidi 等<sup>[17]</sup>在紫外线的照射下成功将透明质酸甲基丙烯酸制备在 PEEK 表面,并研究其表面活性。研究表明,处理后的 PEEK 表面具有较好的生物相容性和促干细胞成骨分化能力。Zhao Xiaoduo 等<sup>[18]</sup>通过紫外线引发的接枝聚合,在 PEEK 表面制备了一层丙烯酸(AA)聚合物,并研究其表面润湿性和摩擦学性能。结果表明,AA 可通过紫外线照射接枝到 PEEK 表面,经过改性的 PEEK 表面润湿性和摩擦学性能都得到改善,改性后的 PEEK 摩擦系数约为 0.021,而未经处理的 PEEK 摩擦系数约为 0.282。激光辐射和紫外线辐射具有反应速度快、加工成本低等特点。此方法可通过引入目标官能团来官能化聚合物表面,而不改变其整体性质,进一步改善 PEEK 的表面活性。

通过等离子体处理的表面改性被广泛用于聚合物材料。D. Gravis 等<sup>[19]</sup>应用等离子处理法对 PEEK 进行改性。实验结果表明,在 PEEK 等离子体表面存在极性基团(C=O 和 COO),且这种极性基团的浓度与表面自由能存在一定的相关性。经等离子体处理的 PEEK 表面的极性基团的浓度较高,这是因为等离子体相中反应性气体物种的密度较高,进一步增加了表面自由能。Gan Kang 等<sup>[20]</sup>研究了氮气等离子体处理对 PEEK 粘接强度的影响,通过 PEEK 上培养的 mg63 细胞的附着和增殖情况评判其表面活性,研究发现,氮气等离子体表面改性对 PEEK 的纳米级形貌和表面化学性质有显著影响,可增强其生物活性和抗菌性能。A. Dupuis 等<sup>[21]</sup>研究了等离子气体种类对 PEEK 表面活性的影响,实验中的等离子体气体分别为空气、氮气和氩气。结果表明,在基材表面上接枝的极性官能团的性质取决于所用的气体,氮气和空气等离子体处理可显著提高 PEEK 表面活性。使用空气作为等离子体气体在工业应用中非常方便,并且可大大降低制造成本。等离子体处理法的优势在于可将 PEEK 表面均匀化处理,且可选择适当的气体,对环境未造成危害。

除了辐射处理法和等离子体处理法外,化学溶液处理法也可以改善 PEEK 的性能。Liu Lyuhua 等<sup>[22]</sup>对 PEEK 进行了表面磷酸化,研究了磷酸酯基团密度对 PEEK 表面活性的影响。实验结果表明,30% 的磷酸改性处理的 PEEK 具有最优的表面活性。与未处理的 PEEK 相比,表面磷酸化的 PEEK 表面自由能更高,为骨再生提供了更有利的表面,这增加了骨科和牙科植入物在未来临床应用中的潜力。除了单一的处理方法外,研究人员还将物理处理法和化学处理法相结合对 PEEK 进行改性处理。N. Fukuda 等<sup>[23]</sup>通过将等离子体处理法和化学处理法结合制备了磷酸盐改性的 PEEK。实验结果表明,PEEK 的等离子体处理和磷酸盐改性将其疏水性表面改性为亲水性表面,同时保持了原始的表面形貌和

粗糙度。与未处理的 PEEK 相比,磷酸盐改性的 PEEK 的拉拔力增加了一倍。O. Sproesser 等<sup>[24]</sup>研究了硫酸酸蚀处理对 PEEK 粘接强度的影响。研究表明,硫酸酸蚀处理可改善胶粘剂与 PEEK 表面间的粘接强度,经过 60 s 酸蚀处理的 PEEK 与 RelyX ARC 型树脂胶粘剂的粘接强度可达 1537.2 MPa。化学溶液处理法可有效地改善 PEEK 表面活性,但是化学溶液在操作中存在一定程度的危险,此外还需处理化学废液并且有可能对环境造成危害。

## 2 填充改性

填充改性通常是在原材料中添加增强材料以达到改性的目的。针对 PEEK 的填充改性,可在原材料中添加纤维、金属氧化物、无机填料等。应用该方法制备的 PEEK 复合材料可以利用复合效应改善 PEEK 的缺陷,在很大程度上提高材料的综合性能。

### 2.1 纤维

碳纤维(CF)增强的热塑性聚合物复合材料具有优异的性能,如高刚度和高强度、良好的可加工性、低的热膨胀系数等<sup>[25]</sup>,因此被广泛地应用于汽车工业以及生物和医疗设备等领域<sup>[26]</sup>。研究人员将 CF 添加到 PEEK 中以提高 PEEK 的摩擦学性能。Liang Yingna 等<sup>[27]</sup>制备了 PEEK/CF 复合材料并研究其在海水环境下的摩擦学性能。实验在摩擦磨损测试仪上进行,实验载荷为 200 N,对五种不同的滑动速度进行了旋转滑动测试。研究表明,在摩擦磨损实验中试样表面上的凹坑会产生流体动力学效应并存储磨损碎屑,摩擦过程主要由犁耕机制控制,添加 30% CF 的 PEEK 复合材料在摩擦磨损实验中的摩擦系数范围为 0.03~0.07。Zhao Xiaoduo 等<sup>[28]</sup>采用热压成型法制备了 PEEK/CF 复合材料,并研究其摩擦学性能。结果表明,复合材料的水接触角比纯 PEEK 的小,表面润湿性提高,且当 CF 含量为 25% 时复合材料的摩擦系数和磨损率最低,分别约为 0.11 和  $2.5 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 。Li Fangfang 等<sup>[29]</sup>研究了 CF 含量对注射成型 PEEK 复合材料摩擦学性能的影响。研究表明,在注射成型中,CF 含量为 10% 的 PEEK 复合材料具有最优的摩擦学性能,摩擦系数和磨损率分别为 0.32 和  $1.5 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ ,与相同实验条件下的纯 PEEK 相比,分别降低了 32% 和 64%。

玻璃纤维(GF)因具有高刚度、高模量和高的承载能力等特点而被作为增强材料用于增强聚合物材料。Li Enzhong 等<sup>[30]</sup>研究了 GF 增强 PEEK 复合材料在干摩擦和水润滑条件下的摩擦磨损行为。结果表明,随着载荷的增加,PEEK 和 PEEK/GF 复合材料的摩擦系数和磨损率逐渐增大,最终趋于稳定。与纯 PEEK 相比,GF 含量为 30% 时,PEEK/GF 复合材料在水润滑条件下的摩擦系数和磨损率分别为 0.11

和  $5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 。Teng Xue 等<sup>[31]</sup>制备并研究了聚四氟乙烯 (PTFE)/GF 增强 PEEK 复合材料的性能,其中 GF 含量分别为 1%,3% 和 5%,PTFE 含量为 10%。研究表明,通过添加 GF,可以显著改善复合材料的力学性能。添加 1% GF 和 10% PTFE 的 PEEK 复合材料的摩擦系数和磨损率分别为 0.31 和  $4 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ ,与未改性的 PEEK 相比,分别降低了 0.66% 和 51%。虽然 GF 和 CF 的添加都可以改善 PEEK 的力学性能,但是在今后的研究中针对纤维和 PEEK 基体的界面相容性的改善还需进一步研究。

## 2.2 金属氧化物

耐磨颗粒通常具有高硬度、高脆性等特点,如  $\text{ZrO}_2$ 、 $\text{SiO}_2$  等陶瓷颗粒,在 PEEK 中填充金属及其氧化物可以提高其力学性能和摩擦学性能。

将  $\text{ZrO}_2$  添加至 PEEK 中可提高复合材料的显微硬度,改善复合材料的摩擦学性能。Song Jian 等<sup>[32]</sup>研究了  $\text{ZrO}_2$  颗粒的添加对 PEEK 复合涂层的润湿性和摩擦学行为的影响。实验在 25% 新生小牛血清 (NCS) 润滑条件下进行。研究表明,5% 的  $\text{ZrO}_2$  纳米颗粒填充的 PEEK 复合涂层的摩擦系数最低,约为 0.12,与纯 PEEK 相比,降低了 49%。PEEK/ $\text{ZrO}_2$  复合涂层的磨损机理为粘着磨损和轻度磨料磨损。 $\text{ZrO}_2$  纳米颗粒的加入提高了复合材料的硬度,从而改善其摩擦学性能。为了进一步提高复合材料的性能,研究人员将金属氧化物颗粒和纤维增强相同时填充在 PEEK 中,利用增强相的复合效应改善 PEEK 性能。Peng Chunzheng 等<sup>[33]</sup>采用双螺杆挤出法制备了纳米  $\text{ZrO}_2$  颗粒增强 PEEK/CF 复合材料。研究了纳米粒子对 PEEK/CF 复合材料力学性能的影响。结果表明,掺入纳米  $\text{ZrO}_2$  颗粒可有效提高复合材料的拉伸性能。复合材料的拉伸强度和拉伸弹性模量随纳米  $\text{ZrO}_2$  含量的增加而增大,当  $\text{ZrO}_2$  含量为 10% 时,复合材料的拉伸强度和拉伸弹性模量分别为 150 MPa 和 11 GPa,与未添加  $\text{ZrO}_2$  的材料相比分别提高了 16.5% 和 28.19%。纳米  $\text{ZrO}_2$  的引入通过降低 CF 界面上的应力集中而有效地抑制了 CF 的失效,在较高的滑动速度下可以实现低摩擦系数。 $\text{SiO}_2$  纳米粒子和  $\text{ZrO}_2$  纳米粒子具有相似的物理性质。Liu Houbao 等<sup>[34]</sup>在含有质量分数 7.5% 的短碳纤维 (SCF) 增强 PEEK 中添加质量分数 7.5% 的  $\text{SiO}_2$  纳米粒子,研究复合材料的摩擦学性能。研究表明, $\text{SiO}_2$  纳米粒子改善了纤维与基体之间的弱界面粘结,由于填料与基体之间的较强界面相互作用,PEEK/SCF/ $\text{SiO}_2$  复合材料的摩擦系数和磨损率分别为 0.16 和  $0.62 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ ,与未添加  $\text{SiO}_2$  的复合材料相比分别降低了 16% 和 29%。

## 2.3 无机填料

石墨具有优异的导电性、导热性、化学稳定性以及自润

滑性等。因其优异的性能被作为增强相添加在各类材料中,以改善材料的综合性能。

PEEK 中添加石墨可改善复合材料的摩擦学性能,研究人员对此进行了大量研究。Shang Yingshuang 等<sup>[35]</sup>制备了 PEEK/石墨复合材料,研究了石墨添加量和石墨粒径对 PEEK 复合材料力学性能和摩擦学性能的影响。研究表明,与纯 PEEK 相比,PEEK/石墨复合材料的摩擦系数较低,这是由于在摩擦磨损过程中石墨的典型层状结构在复合材料的表面形成自润滑膜。当石墨含量为 25% 时,PEEK/石墨复合材料的摩擦系数和磨损率最低,分别为 0.35 和  $7.0 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 。此外,不同的石墨粒径对 PEEK 复合材料的摩擦学和力学性能有较大的影响。石墨的粒径越小,界面结合越好,可有效地提高复合材料的耐磨性和力学性能。Lin Leyu 等<sup>[36]</sup>制备了 PEEK/SCF/石墨复合材料并研究其摩擦学性能。研究表明,当添加 SCF 和石墨质量分数均为 10% 时,复合材料的摩擦系数约为 0.15。这主要是因为,在摩擦过程中,复合材料表面生成一层自润滑膜。石墨碳氮化物 ( $\text{gC}_3\text{N}_4$ ) 是一种具有石墨状结构的层状聚合物,近年来引起研究人员的关注<sup>[37]</sup>。Zhang Ligang 等<sup>[38]</sup>在 PEEK 中添加 10% 的  $\text{gC}_3\text{N}_4$ ,研究了其摩擦学性能。研究表明, $\text{gC}_3\text{N}_4$  的添加显著提高了 PEEK 的耐磨性,其磨损率约为  $1.2 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ ,与纯 PEEK 相比降低了 70%。这是因为  $\text{gC}_3\text{N}_4$  颗粒具有较高的力学性能,且颗粒与基体间具有良好的界面附着力。 $\text{MoS}_2$  同石墨一样都是良好的固体润滑材料,研究人员将  $\text{MoS}_2$  填充到 PEEK 中,研究了其性能。M. Zalaznik 等<sup>[39]</sup>研究了  $\text{MoS}_2$  含量的加入对 PEEK 力学性能和摩擦学性能的影响。研究表明, $\text{MoS}_2$  的含量影响复合材料的摩擦磨损性能和力学性能。在摩擦磨损实验中,当  $\text{MoS}_2$  的含量为 5% 时,复合材料具有最优的摩擦学性能,摩擦系数和磨损率分别为 0.45 和  $2.22 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ ,与纯 PEEK 相比分别降低了 25% 和 20%。 $\text{MoS}_2$  和石墨对复合材料摩擦学性能改善的原因一样,都是因为在摩擦磨损试验中在复合材料表面形成了一层具有自润滑性能的转移膜,转移膜的形成降低了复合材料的摩擦系数和磨损率。

填充改性的优势在于制备复合材料时简单高效,可以利用多种材料的复合效应改善原材料的缺陷,因此得到研究人员的青睐。但是在填充改性时应用纤维填充和无机材料填充往往会出现材料的相容性较差,如 CF 的非极性性质和低润湿性,使得 CF 与 PEEK 基体之间的界面粘合性较差,影响复合材料的综合性能。

## 3 共混改性

共混的基本原理是相似相溶原理,因此进行共混的材

料之间溶解度值、表面张力大小必须相近。PEEK 与其它高聚物材料共混制备的复合材料可以具备共混材料的综合性能,在此主要介绍 PTFE、聚苯硫醚(PPS)和聚醚砜(PESU)。

PTFE 具有许多优异的性能,例如低摩擦、耐高温和稳定的化学性质,这使其成为广泛应用的理想填料<sup>[40]</sup>。蔡振杰等<sup>[41]</sup>研究了 PTFE 的添加量对 PEEK 力学性能及摩擦学性能的影响。实验通过高温模压的方法制备了 PEEK/PTFE 复合材料,摩擦学实验结果表明,随着 PTFE 含量的增加,复合材料的硬度和强度均有所下降,摩擦系数呈降低趋势,复合材料的磨损率先降低后升高,当 PTFE 的含量为 5% 时,复合材料具有最低的磨损量,实验在干摩擦条件下进行 2 h 的磨损量约为  $1.0 \text{ mm}^3$ 。H. Koike 等<sup>[42]</sup>研究了 PEEK/PTFE 复合材料在滚动接触磨损实验中的摩擦学性能。研究表明,与纯 PEEK 材料相比,添加 25% PTFE 的 PEEK/PTFE 复合材料的磨损率是前者的 1/10。钛酸钾晶须(PTW)作为增强相可提高材料的力学性能。Teng Xue 等<sup>[31]</sup>制备了添加 PTW 的 PEEK/PTFE/PTW 复合材料并研究其摩擦学性能,其中 PTW 含量分别为 1%、3% 和 5%,PTFE 含量为 10%。结果表明,同时添加 1% PTW 和 10% PTFE 的复合材料表现出最优的摩擦学性能,其摩擦系数和磨损率分别为 0.28 和  $5.1 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ ,与未改性的 PEEK 相比,分别降低了 7.2% 和 21%。

PPS 和 PESU 均属于高性能热塑性工程塑料,具有良好的力学性能及优异的耐化学药品性<sup>[43]</sup>。Ma Zhonglei 等<sup>[44]</sup>通过熔融共混和挤出方法制备 PEEK/PPS 复合材料并研究其力学性能。研究表明,PEEK/PPS 复合材料的拉伸强度和冲击强度都比纯 PEEK 高,复合材料的结晶度也高于纯 PEEK。M. Sharma 等<sup>[45]</sup>制备了 PEEK/PESU/CF 复合涂层,研究了其摩擦学性能。研究表明,PEEK 的主要磨损机理为疲劳失效引起的微裂纹;无定形的 PESU 的磨损主要是由于塑性区的横向裂纹而引起的破坏,PESU 的添加改善了纤维与基体的相容性,因此提高了其摩擦学性能。

共混改性与填充改性的共同特点是改性方式简单、高效、无污染。但是 PEEK 的共混改性只能局限于与其它高聚物的混合,限制了无机填料、金属及其氧化物等材料的添加,这在很大程度上限制了其硬度、强度等性能的提高。

#### 4 结语

PEEK 优异的力学性能、宽泛的耐化学药品性以及较高的生物相容性决定了其作为高性能材料的地位,应用范围较广,尤其是在航空航天和生物医学领域。但是随着现代科技的发展,单一的 PEEK 因其自身的一些缺陷已经很难满足市场需求,迫切需要研究人员对其进行改性处理,进一步提高 PEEK 的综合性能,当前针对 PEEK 主要的改性方式包括表

面改性、填充改性以及共混改性。表面改性中辐射处理法、等离子体处理法均具有操作简单、材料处理均匀等优势,化学溶液处理法在处理过程中存在化学废液后期处理问题,可能对环境或人体造成一定危害。填充改性主要包括纤维填充、金属氧化物填充和无机物填充,通过增强相的加入改善 PEEK 材料的综合性能。共混改性可将 PEEK 与其它高聚物共混,结合 PEEK 与其它高聚物的共同优势达到改性的目的。今后在针对 PEEK 的研究工作中,应重视以下几方面的改性研究:

(1) PEEK 在生物医学领域的地位十分重要,PEEK 作为人工骨关节的替代品,其表面活性直接影响骨整合中的伤口愈合能力。可通过表面改性和制备复合材料等方式进一步研究 PEEK 基材料植入人体后,与宿主组织之间进行骨整合时 PEEK 的表面活性对细胞粘附和蛋白质吸收的影响情况。

(2) PEEK 应用在工业领域时,可通过添加增强相并提高 PEEK 与纤维、无机填料以及金属氧化物等的界面相容性等方式,进一步改善 PEEK 的力学性能及摩擦学性能。

(3) 采用 PEEK 进行 3D 打印人工关节假体已有成功植入体内的案例,但关于其生物摩擦学性能研究较少,今后可应用 3D 打印技术成型 PEEK 材料人工关节假体,并进一步研究其生物摩擦学性能。

#### 参考文献

- [1] Ren Yufu, et al. *Materials Science & Engineering C*, 2018, 85:107–113.
- [2] Ivekovi A, et al. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 223:58–64.
- [3] Du Dandan, et al. *Composites Part B:Engineering*, 2016, 91:65–74.
- [4] Narkevica I, et al. *Key Engineering Materials*, 2016, 674:121–126.
- [5] Zheng Yanyan, et al. *Applied Surface Science*, 2015, 344:79–88.
- [6] Henriques B, et al. *Journal of Adhesion Science & Technology*, 2019, 33(10): 1 090–1 101.
- [7] Kruk A, et al. *Progress in Organic Coatings*, 2019, 133:180–190.
- [8] Yan Jinhong, et al. *International Journal of Nanomedicine*, 2018, 13:3 425–3 440.
- [9] Souza J C M, et al. *Surface Topography Metrology & Properties*, 2019, doi:10.1088/2051-672X/ab0324.
- [10] Tseng Jian-Wei, et al. *Materials & Design*, 2018, 140:209–221.
- [11] Sampaio M, et al. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2016, 54:123–130.
- [12] Jung Hyun-Do, et al. *Journal of Biomedical Materials Research Part B*, 2016, 104:141–148.
- [13] Omrani M M, et al. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 2019, 58(10):783–793.
- [14] Brum R S, et al. *Materials Chemistry & Physics*, 2019, 223:542–547.

- [15] Zhang Jibo, et al. Brain Research Bulletin, 2019, 153:143–149.
- [16] Wilson A, et al. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2015, 62:69–77.
- [17] Liu Sidi, et al. Materials Science and Engineering:C, 2018, 88:70–78.
- [18] Zhao Xiaoduo, et al. Materials Science & Engineering:C, 2017, 75:777–783.
- [19] Gravis D, et al. Applied Surface Science, 2019, 501:doi:10.1016/j.apsusc.2019.144242.
- [20] Gan Kang, et al. Dental Materials, 2016, 32(11):e263–e274.
- [21] Dupuis A, et al. Applied Surface Science, 2015, 357:1 196–1 204.
- [22] Liu Lyuhua, et al. RSC Advances, 2019, 9(52):30 076–30 086.
- [23] Fukuda N, et al. Colloids and Surfaces B:Biointerfaces, 2019, 173:36–42.
- [24] Sproesser O, et al. Journal of Adhesive Dentistry, 2014, 16(5):465–472.
- [25] Zakaria M R, et al. Composites Part B Engineering, 2019, 176:doi:10.1016/j.compositesb.2019.107313.
- [26] Chen Junlin, et al. Composites Science and Technology, 2018, 154:175–186.
- [27] Liang Yingna, et al. Tribology Transactions, 2020, doi:10.1080/10402004.2020.1734704.
- [28] Zhao Xiaoduo, et al. Journal of Bionic Engineering, 2017, 14(4):640–647.
- [29] Li Fangfang, et al. High Performance Polymers, 2018, 30(6):657–666.
- [30] Li Enzhong, et al. Journal of Materials Engineering, 2014(3):77–82, 89.
- [31] Teng Xue, et al. High Performance Polymers, 2018, 30(6):752–764.
- [32] Song Jian, et al. Materials Science and Engineering:C, 2016, 69:985–994.
- [33] Peng Chunzheng, et al. Mechanics of Composite Materials, 2014, 49(6):679–684.
- [34] Liu Houbao, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 137(22):doi:10.1002/app.48749.
- [35] Shang Yingshuang, et al. High Performance Polymers, 2017, doi:10.1177/0954008316685410.
- [36] Lin Leyu, et al. Tribology International, 2019, 137:173–179.
- [37] Xu Shifa, et al. Ceramics International, 2017, 43(6):5 127–5 135.
- [38] Zhang Ligang, et al. Materials & Design, 2017, 129:192–200.
- [39] Zalaznik M, et al. Lubrication Science, 2016, 28(1):27–42.
- [40] Vail J R, et al. Wear, 2010, 270(11–12):737–741.
- [41] 蔡振杰, 等. 机械工程材料, 2018, 42(5):69–73.
- [42] Koike H, et al. Tribology International, 2015, 90:77–83.
- [43] Gu Junwei, et al. Composites Part A:Applied Science & Manufacturing, 2017, 95:267–273.
- [44] Ma Zhonglei, et al. The Journal of Supercritical Fluids, 2018, 140:116–128.
- [45] Sharma M, et al. Tribology International, 2011, 44(2):81–91.