

聚电解质改性聚醚醚酮复合材料的摩擦学性能

高传豹¹ 张欣悦¹ 岑佳佳² 陈琴² 冯海燕¹ 陈凯¹ 张德坤^{1*}

1. 中国矿业大学材料与物理学院, 徐州, 221116

2. 中国矿业大学化工学院, 徐州, 221116

摘要: 为了提高聚醚醚酮(PEEK)的摩擦学性能, 提出了“先改性, 后成形”方法。通过紫外光引发将亲水性3-磺酸丙基甲基丙烯酸钾盐(SPMK)接枝到PEEK粉体表面, 再热压制备PEEK-SPMK复合材料, 分析了PEEK改性后在不同工况下的摩擦磨损行为, 揭示聚电解质SPMK粉体改性对PEEK复合材料摩擦学行为的影响机制和润滑机理。结果表明: SPMK粉体改性显著提高了PEEK表面的润湿性; PEEK-SPMK在生理盐水中的摩擦系数0.028和磨损率 $5.6 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 较纯PEEK显著减小。

关键词: 人工关节; 粉体表面修饰; 聚醚醚酮; 聚电解质; 水合润滑

中图分类号: R318.0

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2026.01.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Tribological Properties of Polyelectrolyte-Modified PEEK Composite Materials

GAO Chuanbao¹ ZHANG Xinyue¹ CEN Jiajia² CHEN Qin² FENG Haiyan¹
CHEN Kai¹ ZHANG Dekun^{1*}

1. School of Materials Science and Physics, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu, 221116

2. School of Chemical Engineering & Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu, 221116

Abstract: To enhance the tribological properties of PEEK, a “modify-then-form” approach was proposed. Hydrophilic SPMK was grafted onto the PEEK powder surface via UV-induced polymerization, then the PEEK-SPMK composites were prepared by hot-pressing. The friction and wear behaviors of modified PEEK under various operating conditions were analyzed, revealing the influence mechanism and lubrication mechanism of polyelectrolyte SPMK powder modification on the tribological behavior of PEEK composites. Results indicate that SPMK powder modification significantly enhances PEEK surface wettability. The friction coefficient (0.028) and wear rate ($5.6 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$) of PEEK-SPMK in physiological saline are markedly reduced compared to pure PEEK.

Key words: artificial joint; powder surface modification; polyetheretherketone (PEEK); polyelectrolyte; hydration lubrication

0 引言

人工关节置换已广泛用于治疗创伤、感染等因素引起的关节疾病^[1-3]。传统人工关节的材料主要为金属、陶瓷、聚合物及其复合材料^[4-6], 它们组成的“硬-软”(CoCrMo-超高分子量聚乙烯(UHMWPE))和“硬-硬”(陶瓷-陶瓷)关节配副在长期服役过程中会出现金属离子释放、发出异响等缺点^[7-8]。为解决上述问题, 一种由全聚合物(PEEK-UHMWPE)组成的“软-软”关节配副被提出^[9-10], 该材料具有良好的生物相容性、较小的弹性模量, 并能有效减少术后感染的风险, 是最有

希望成为下一代髋关节置换假体的关节材料。

聚醚醚酮(PEEK)作为一种热塑性特种工程塑料, 具有优异的生物相容性、较低的弹性模量和良好的化学稳定性^[11-13], 因而在骨科植入物领域获得深度关注和研究^[14-16]。PEEK的磨损性能与天然关节存在较大差距, 这限制了其在骨科植入物中的应用。目前, 国内外学者通过填充改性和表面处理(磺化、表面接枝)系统探究了PEEK的性能提升^[17-19]。

PEI等^[20]采用TPI填充增强PEEK骨架, 发现填充密度为70%时, PEEK复合材料的耐磨性能明显提升, 但机械性能降低。FENG等^[21]通过原位合成与水热法制备了ZnO-SCF纤维填充PEEK复合材料。ZnO-SCF的加入明显降低了

收稿日期: 2025-05-26

基金项目: 国家自然科学基金(52335004, 52405239)

复合材料的摩擦因数和磨损率,其中,PEEK/7.5%ZnO-15%SCF复合材料具有最好的耐磨性能。尽管填充改性能提高PEEK材料的耐磨性能,但填充材料的团聚和相容性问题会导致填充材料与PEEK基体结合强度较差,在摩擦过程中易发生脱落,加剧磨损。

WU等^[22]通过亲核缩合反应合成了一种新型磺化聚醚醚酮(SPEEK),研究了磺化度对SPEEK表面亲水性、机械强度和摩擦学性能的影响。与纯PEEK相比,磺化度(摩尔百分比)为2.44%的SPEEK- γ 的摩擦因数、磨损率分别减小33.7%和54.2%。LEE等^[23]通过静电自吸附工艺将功能化氧化石墨烯(CMG+)和石墨烯纳米片(GnPs)引入PEEK表面,得到石墨烯涂层-聚醚醚酮复合材料。摩擦学测试表明,CMG+显著减小摩擦因数,与纯PEEK相比,CMG+含量为1%、2%时,摩擦因数分别减小54%和63%。ELKINGTON等^[24]通过紫外光聚合在PEEK表面接枝亲水性3-磺酸丙基甲基丙烯酸钾盐(SPMK)单体,得到SPMK-g-PEEK复合材料。生理负荷(0.75 MPa)下超过2.5 h的摩擦学测试表明,SPMK-g-PEEK能持续保持低摩擦(摩擦因数小于0.024)。表面磺化处理能提高PEEK材料的水合润滑能力,但磺化层在体液中可能发生水解,导致亲水性逐渐丧失,降低润滑效果。表面涂层改性虽能提升PEEK的耐磨性能,但存在涂层与PEEK基体的结合强度不足且涂层在长期摩擦或冲击载荷下易破损等问题。

填充改性和磺化处理对PEEK性能提升有限,无法满足人工关节的使用需求。SPMK单体侧链上的带负电荷磺酸基能提供强大的水合润滑能力,因此在PEEK表面接枝聚合SPMK可有效提升摩擦学性能,但表面接枝的聚电解质刷(PSPMK)在长时间滑动过程中易从基体上被剪切剥落,导致润滑失效。本研究采用紫外光诱导接枝聚合的方法,将SPMK单体接枝到PEEK粉体表面,并通过热压成形得到均质亲水性PEEK-SPMK复合材料。探究了PEEK-SPMK在不同润滑介质、法向载荷和滑动速度工况下的摩擦磨损行为,揭示聚电解质刷PSPMK在PEEK复合材料摩擦过程中的润滑和减摩机理,为高强度、超低摩擦人工关节材料的设计和研发提供一种新的研究思路。

1 实验材料和方法

1.1 实验材料

实验材料为PEEK粉末(粒径50 μm)、

SPMK、甲醇、无水乙醇。

1.2 PEEK-SPMK材料制备

称取适量PEEK粉末浸入SPMK/甲醇溶液(浓度0.3~0.7 mol/L),将混合溶液在总功率75 W、中心波长365 nm的高压汞灯下搅拌5~10 h(室温),进行光诱导接枝聚合。制备过程中,汞灯与PEEK的距离为15 cm。抽滤、冲洗(用乙醇和去离子水)、烘干(60 $^{\circ}\text{C}$)后,获得SPMK-PEEK粉末。如图1所示,PEEK的分子中存在1个二苯甲酮单元(芳基酮)。紫外线照射时,它会发生平化反应,形成的酮基自由基作为光引发剂进行接枝聚合反应^[25]。

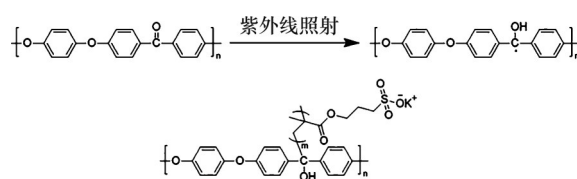


图1 SPMK改性PEEK粉末的原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of SPMK-modified PEEK powder

将PEEK-SPMK复合粉末缓慢加入100 mm \times 100 mm \times 4 mm的钢模具,随后置于平板硫化机并在12 MPa压力下进行热压成形。PEEK-SPMK的成形参数如表1所示。

表1 PEEK-SPMK成形参数

Tab.1 Parameters for PEEK-SPMK molding

样品编号	预压工艺	成形时间/min	成形温度/ $^{\circ}\text{C}$
p-1	不保压	60	370
p-2	保压不卸压	60	370
p-3	保压且卸压	60	370
p-4	保压且卸压	30	370
p-5	保压且卸压	5	370
p-6	保压且卸压	30	360
p-7	保压且卸压	30	350

1.3 PEEK-SPMK材料的微观结构表征

先在去离子水中超声清洗PEEK和PEEK-SPMK粉末20 min,再烘干(60 $^{\circ}\text{C}$),然后采用X射线光电子能谱仪分析粉末的表面元素条件。

1.4 PEEK-SPMK材料的性能表征

1)接触角。采用接触角测量仪测量PEEK和PEEK-SPMK表面的接触角,在材料表面不同区域滴加1 μL 去离子水,接触角取3次测量结果的均值。

2)力学性能。在电子万能试验机上,以5 mm/min的速度对10 mm \times 10 mm \times 4 mm的PEEK和PEEK-SPMK材料进行压缩测试,获得试样的压缩强度。利用洛氏硬度计测量PEEK和

PEEK-SPMK材料的硬度。

3)生物摩擦学性能。采用球盘式往复摩擦磨损试验机对PEEK-SPMK材料进行摩擦磨损测试。上夹具将直径10 mm的二氧化锆球固定在力传感器上,20 mm×20 mm×4 mm的PEEK-SPMK盘在电机驱动下做线性往复运动。实验参数如表2所示。

采用场发射扫描电子显微镜表征PEEK和
表2 PEEK-SPMK滑动摩擦测试参数

Tab.2 Sliding friction test parameters for PEEK-SPMK

实验组别	润滑介质	法向载荷/N	滑动速度/(mm·s ⁻¹)
1	生理盐水	30	10
2	去离子水	30	10
3	模拟体液	30	10
4	小牛血清	30	10
5	生理盐水	10	10
6	生理盐水	20	10
7	生理盐水	40	10
8	生理盐水	40	5
9	生理盐水	40	15
10	生理盐水	40	20

PEEK-SPMK材料摩擦测试后的表面磨损形貌。通过数字显微镜对磨痕进行三维表征,获得PEEK和PEEK-SPMK材料的磨损体积。磨损率 δ 的计算表达式为

$$\delta = \frac{\Delta V}{vFt} = \frac{LS}{vFt}$$

式中: ΔV 为试样磨损体积; v 为滑动速度; F 为法向载荷; t 为摩擦时间; L 为磨痕长度; S 为磨痕截面积。

2 结果与分析

2.1 PEEK-SPMK粉末改性的结构表征

图2为不同改性参数下PEEK-SPMK粉末的XPS S 2p谱图。PEEK的S 2p窄谱中未观察到S峰,改性参数为0.5-5 h(改性溶液浓度为0.5 mol/L,光照时间5 h)、0.5-10 h、0.3-8 h和0.7-8 h的S 2p窄谱中均出现S峰,这表明SPMK单体已成功接枝到PEEK粉体。PEEK-SPMK改性参数0.5-8 h的S峰更加明显,这表明改性溶液浓度0.5 mol/L、光照8 h是SPMK在PEEK的最佳接枝效率。

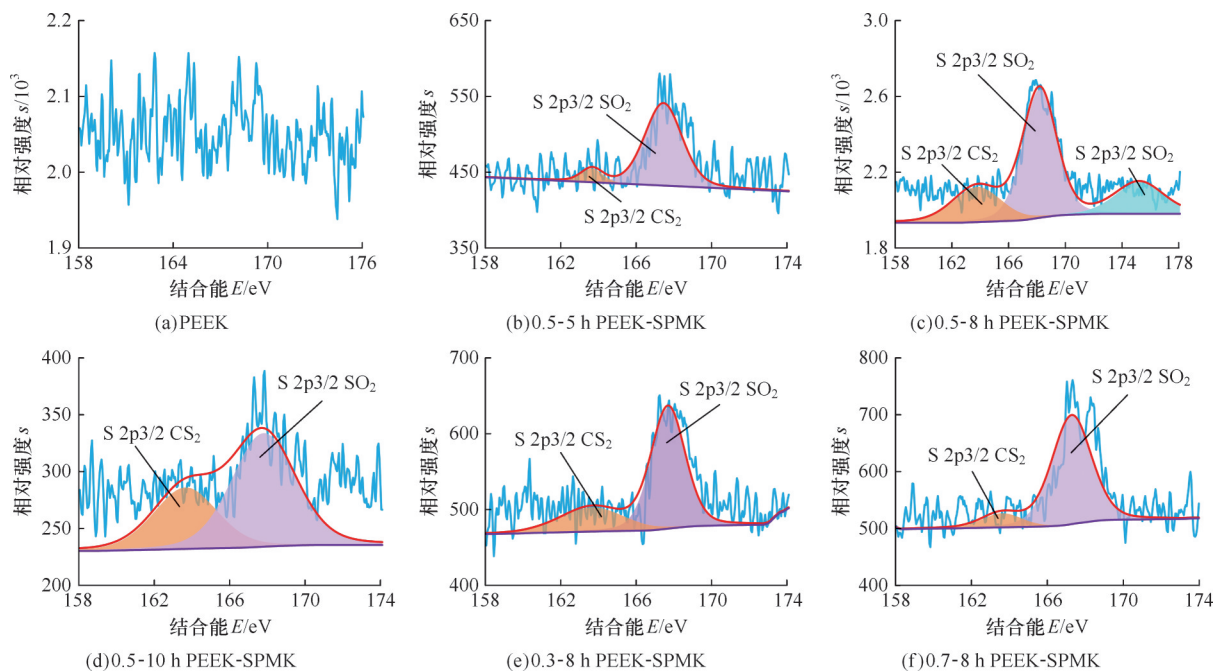


图2 不同改性参数下PEEK-SPMK粉末的XPS S 2p谱图

Fig.2 XPS S 2p spectra of PEEK-SPMK powders with different modification parameters

基于PEEK-SPMK粉末的XPS S 2p谱图,选取接枝效率最高的改性工艺0.5-8h制备PEEK-SPMK粉末,进一步探究热压成形工艺参数对其亲水性、力学性能和摩擦学性能的影响,筛选最佳的成形工艺。

2.2 亲水性PEEK-SPMK的成形

不同成形参数下PEEK-SPMK材料的接触角如表3所示。PEEK-SPMK在不同成形参数下

的接触角均小于PEEK的接触角(约为83.5°),这表明接枝聚电解质刷(PSPMK)提高了材料表面的润湿性。相较于保压不卸压工艺,保压+卸压工艺在提高粉末致密性的基础上,可进一步排出模具内空气,减少表面气孔等缺陷,改善PEEK-SPMK表面的润湿性。随保温时间的延长(5 min (p-5)→30 min (p-4)→60 min (p-3)),PEEK-SPMK的接触角先减小后增大,保温时间30 min

的接触角达到最小值 60°。此外,随着成形温度的降低,PEEK-SPMK 的接触角不断减小,成形温度由 370 °C 降至 350 °C 时,接触角由 60° 降至 40.5°。合适的保温时间(30 min)和较低的保温温度(350 °C)保留了更多 PSPMK 刷,进一步减小材料的接触角,提高其表面润湿性。

表 3 不同试样的接触角

Tab.3 Water contact angle of PEEK-SPMK samples

样品编号	接触角/(°)	样品照片
PEEK	83.5±1.25	
p-1	76.75±1.25	
p-2	70±1.5	
p-3	67.5±0.75	
p-4	60±1.25	
p-5	65.75±1.5	
p-6	58.5±1.25	
p-7	40.5±0.75	

如表 4 所示,PEEK 的压缩强度 210.42 MPa、邵氏硬度 90.46 HD 最小。接枝 SPMK 单体后,PEEK 分子链上引入了-SO₃H 基团新的官能团,增强了分子间的相互作用,使 PEEK-SPMK 的压缩强度和硬度提高。保压+卸压的预压工艺下,PEEK-SPMK 的压缩强度 213.42 MPa、硬度 91.54 HD 比不保压+不卸压工艺分别提高 1.43% 和 1.19%。保压+卸压能提高材料的致密性和均匀性,减少材料表面及内部的缺陷,优化材料的力学性能。随成形时间的延长,压缩强度、硬度呈现先增后减的趋势,30 min 的峰值分别为 217.32 MPa 和 92.78 HD。随着成形温度的降低,压缩强度和硬度呈现先降后升的 U 形变化,在 350 °C 达到最小值 216.48 MPa 和 92.28 HD。较长的成形时间和较高的保温温度下,易出现 SPMK 接枝链热断裂或 PEEK 主链轻微降解,削弱分子间的相互作用,降低材料的力学性能。

PEEK 和 PEEK-SPMK 材料在生理盐水中

表 4 不同试样的力学性能与磨损率

Tab.4 Mechanical properties and wear rate of samples

样品编号	压缩强度/MPa	硬度/HD	磨损率/ (10 ⁻⁶ mm ³ ·N ⁻¹ ·m ⁻¹)
PEEK	210.42±0.72	90.46±0.94	1.18±0.72
p-1	213.52±1.05	91.26±0.87	1.95±0.22
p-2	213.42±0.95	91.54±0.74	1.81±0.58
p-3	215.26±0.95	92.44±0.93	1.59±0.44
p-4	217.32±0.95	92.78±0.81	1.26±0.32
p-5	214.62±1.11	92.52±1.79	1.72±0.46
p-6	216.48±0.8	92.28±0.81	1.12±0.26
p-7	219.36±1.3	92.84±0.90	0.85±0.18

的摩擦因数时变曲线(滑动速度 10 mm/s,法向载荷 30 N)和磨损率分别如图 3、表 4 所示。PEEK 的摩擦因数随循环次数的增加呈现先急剧增大后缓慢减小的趋势,2 h 后稳定在 0.085 左右,磨损率约为 1.18×10⁻⁶ mm³/(N·m)。PEEK-SPMK 表面的 PSPMK 电刷具有强大的水合润滑能力,使 PEEK-SPMK 的摩擦学性能显著提升,摩擦因数在较短时间内稳定并较 PEEK 减小 42.35%,磨损率减小 83.5%。与不保压+不卸压的预压工艺相比,保压+卸压工艺的 PEEK-SPMK 摩擦因数由 0.049 降至 0.041,磨损率由 1.95×10⁻⁶ mm³/(N·m) 降至 1.59×10⁻⁶ mm³/(N·m)。随着成形时间的缩短,PEEK-SPMK 的摩擦因数和磨损率呈现先减小后增大的趋势,成形时间 30 min 达到最低值 0.037 和 1.26×10⁻⁶ mm³/(N·m)。随着成形温度的降低,PEEK-SPMK 的摩擦因数先增大后减小,在 350 °C 时达到最小值 0.035;磨损率随成形温度的降低而减小,成形温度由 370 °C 降至 350 °C 时,磨损率由 1.26×10⁻⁶ mm³/(N·m) 降至 0.85×10⁻⁶ mm³/(N·m)。适中的保温时间(30 min)和较低的保温温度(350 °C)保留了更多 PSPMK 刷,使材料表面的水合润滑能力增强,提升了材料的

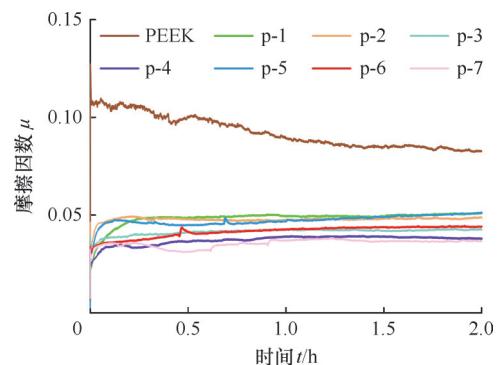


图 3 不同成形参数下 PEEK-SPMK 的摩擦因数时变曲线

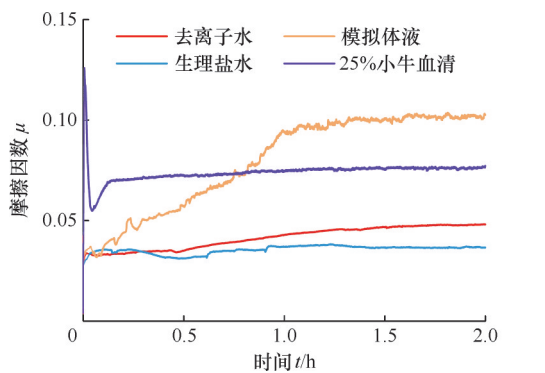
Fig.3 Time-dependent friction coefficient curves of PEEK-SPMK under different moulding parameters

摩擦学性能。

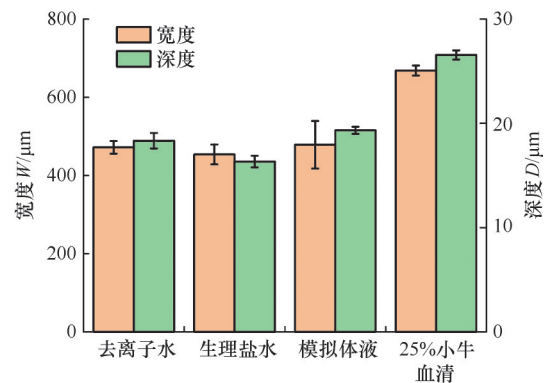
综上, p-7 成形条件(保压+卸压、成形时间 30 min、成形温度 350 °C)下, PEEK-SPMK 的综合性能最优, 对其开展不同工况(润滑介质、法向载荷、滑动速度)下摩擦学性能的研究, 阐明聚电解质 SPMK 粉体改性对 PEEK 复合材料摩擦学行为的影响机制和润滑机理。

2.3 亲水性 PEEK-SPMK 的摩擦学性能

图 4 所示为不同润滑介质下 PEEK-SPMK 的摩擦学性能。PEEK-SPMK 在模拟体液和 25% 小牛血清环境中的摩擦因数较大, 摩擦持续 2 h 的数值稳定在 0.1 和 0.075; 25% 小牛血清中的磨损率最大, 为 $8.68 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$, 磨痕的宽度和深度都最大。PEEK-SPMK 在去离子水和生理盐水中的摩擦因数较小, 分别为 0.041 和 0.035; 在生理盐水中的磨损率最小, 为 $8.5 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$, 磨痕的宽度和深度也最小。PEEK-SPMK 在 25% 小牛血清中的摩擦因数较大可能因为小牛血清中存在一些带负电荷的蛋白^[24], 减少吸附到 PEEK-SPMK 表面的阳离子, 削弱了水合润滑能力。此外, PEEK-SPMK 和氧化锆表面形成的吸附蛋白膜导致黏结作用增加, 使 PEEK-SPMK 在小牛血清中的摩擦略有增加。



(a) 不同润滑介质中 PEEK-SPMK 的摩擦因数时变曲线



(b) 不同润滑介质中 PEEK-SPMK 的磨痕宽度和深度

图 4 PEEK-SPMK 在不同润滑介质中的摩擦学性能
Fig.4 Tribological performance of PEEK-SPMK in different lubrication media

图 5 所示为 PEEK-SPMK 在不同润滑介质中磨损后的表面形貌。在去离子水、模拟体液和 25% 小牛血清的润滑下, PEEK-SPMK 磨损表面出现少量犁沟, 并伴有片层剥落和塑性变形。小牛血清中 PEEK-SPMK 磨损表面的磨损显著大于去离子水和模拟体液, 犁沟的宽度与深度、剥落面积均明显增大。生理盐水润滑下, PEEK-SPMK 磨损表面出现少量窄且浅的犁沟, 并伴有少量塑性变形, 但没有产生剥落, 其磨损明显低于其他三种磨损。这是由于生理盐水中的 PEEK-SPMK 表面负电荷能吸附更多的水合阳离子, 产生更强的水合斥力, 避免对磨表面的直接接触, 减小表面的磨损程度。PEEK-SPMK 在生理盐水中的磨损程度最小, PEEK-SPMK 在生理盐水中的摩擦因数最小(图 4a)、磨痕宽度和深度最小(图 4b)证实通过嵌入聚电解质刷调整材料表面吸附离子, 可增强水合润滑、减少材料磨损。

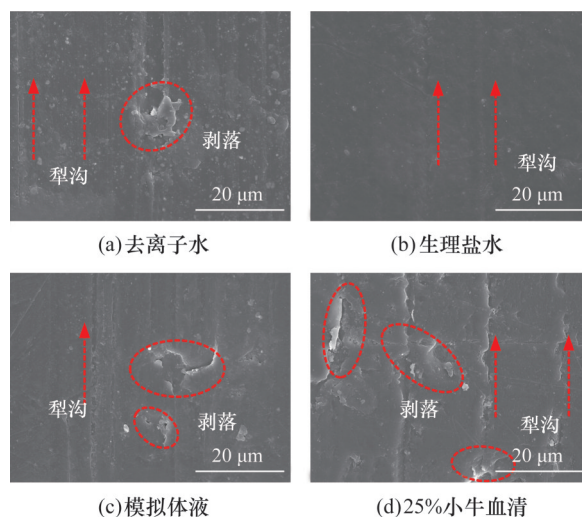
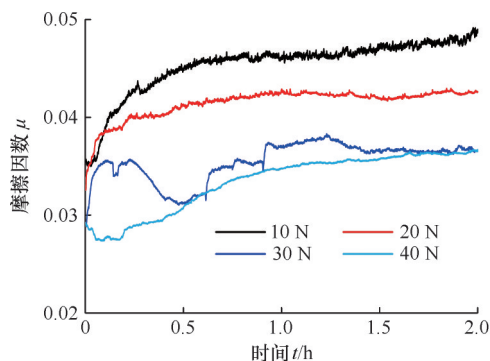


图 5 PEEK-SPMK 在不同润滑介质中的磨损形貌 SEM 图

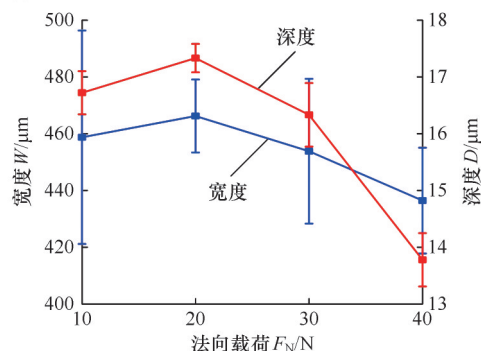
Fig.5 SEM images of wear morphology for PEEK-SPMK in different lubrication media

图 6 所示为不同法向载荷下 PEEK-SPMK 的摩擦学性能演化规律。PEEK-SPMK 在 10 N、20 N 载荷下摩擦因数较大, 稳定的摩擦因数分别为 0.047 和 0.042; 20 N 载荷下的磨损率最大, 为 $1.41 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$, 磨痕的宽度和深度也最大。载荷 30 N、40 N 下, PEEK-SPMK 的摩擦因数较小, 分别为 0.035 和 0.033; 40 N 载荷下的磨损率最小, 为 $7.8 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$, 磨痕的宽度和深度也最小。PEEK-SPMK 在 10 N 载荷下的摩擦因数较大原因是较低载荷下, 摩擦副仅通过带负电荷的 SPMK 单体捕获周围的阳离子, 形成的水合层提供水合润滑。接触表面形成的水膜厚

度随着载荷的增加而增大^[26],从而更有效分离接触表面,减少直接接触和摩擦。



(a)不同法向载荷下PEEK-SPMK的摩擦因数时变曲线



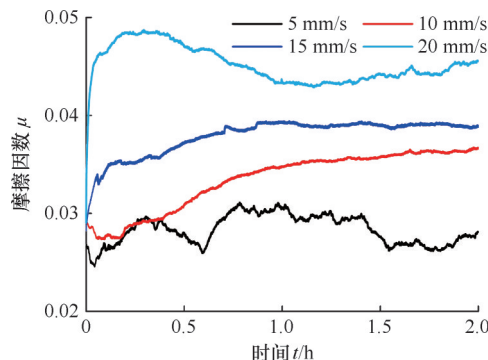
(b)不同法向载荷下PEEK-SPMK的磨痕宽度和深度

图6 PEEK-SPMK在不同法向载荷下的摩擦学性能
Fig.6 Tribological properties of PEEK-SPMK under different normal loads

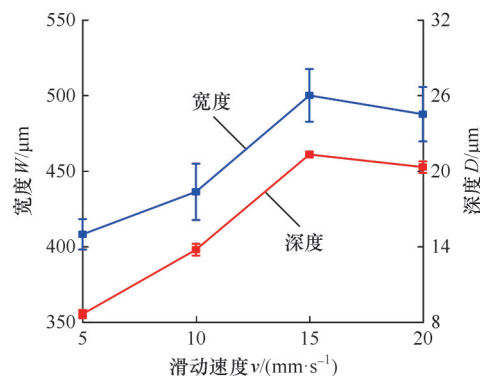
图7所示为不同滑动速度下PEEK-SPMK的摩擦学性能演化规律。PEEK-SPMK在15 mm/s、20 mm/s下的摩擦因数较大,2 h后的数值稳定在0.039和0.046;15 mm/s下的磨损率最大,为 $3.32 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$,磨痕的宽度和深度都最大。速度5 mm/s、10 mm/s的PEEK-SPMK摩擦因数较小,分别为0.033和0.028;PEEK-SPMK在5 mm/s下的磨损率最小,为 $5.6 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$,磨痕的宽度和深度也最小。PEEK-SPMK在20 mm/s下的摩擦因数较大的原因是,SPMK磺酸基团吸附阳离子形成的水合层在高速剪切下被快速破坏^[24],导致对磨副直接接触面积增大。

3 讨论

受聚合物刷接枝到PEEK表面能有效提高PEEK耐磨性能启发,在PEEK内部嵌入聚电解质刷有望提高材料整体的减摩耐磨能力。“先改性,后成形”方法采用紫外线照射法将亲水性SPMK单体接枝到PEEK粉体表面,再通过热压成形得到均质亲水性PEEK-SPMK复合材料。系统探究了PEEK-SPMK复合材料在不同润滑介质、法向载荷、滑动速度下的摩擦磨损行为。研



(a)不同滑动速度下PEEK-SPMK的摩擦因数时变曲线



(b)不同滑动速度下PEEK-SPMK的磨痕宽度和深度

图7 PEEK-SPMK在不同滑动速度下的摩擦学性能
Fig.7 Tribological performance of PEEK-SPMK at different sliding speeds

究发现,不同工艺参数(预压工艺、保温时间和成形温度)的PEEK-SPMK亲水性、力学和摩擦学行为有显著差异。PEEK-SPMK材料的水接触角随预压工艺的优化而减小,随保温时间的延长而先减小后增大,随成形温度的升高而逐渐增大,工艺参数的优化能保留更多的聚电解质刷,使水接触角减小,提高亲水性(表3)。PEEK分子链接枝SPMK单体后引入新的官能团,由于分子间的相互作用,PEEK-SPMK复合材料的压缩强度和硬度略有提高(表4)。生理盐水中,PEEK-SPMK表面的PSPMK电刷提供大量水合阳离子的陷阱位点,促进溶液中的钠离子在材料表面进行水合,增强水合阳离子的抗压性产生的水合斥力,实现更高效的水合润滑(图3)。

通过在PEEK表面接枝带负电的PSPMK刷,ELKINGTON等^[24]、CHOUWATAT等^[27]分别将摩擦因数降至0.024和0.020,摩擦因数的减小归因于聚电解质刷提供的强大水合润滑能力。由图8可看出,PEEK-SPMK的承载和减摩能力与被捕获的反离子的承载渗透压有关,带负电荷的PSPMK刷能捕获阳离子、形成水合润滑层,减少对磨副与PEEK表面的直接接触和摩擦。XU等^[28]在超高分子量聚乙烯粉体上接枝SPMK并

真空烧结成形,得到的 UHMWPE-g-SPMK 被抛光设备剪切后仍保持超小摩擦因数(0.009)。这表明接枝聚电解质刷的表面层被剪掉后,嵌入的聚电解质刷会暴露,并长期在滑动界面提供持续的润滑,为开发高性能、长寿命的人工关节材料提供新思路。

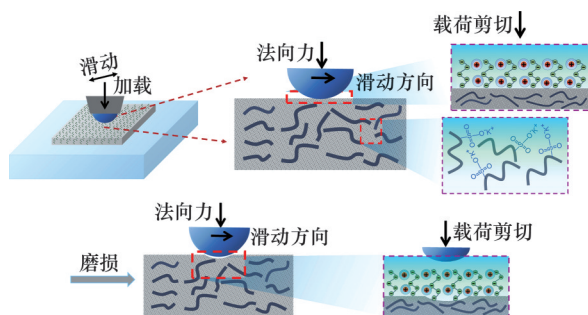


图8 聚电解质刷(SPMK)接枝PEEK的水合润滑示意图

Fig.8 Polyelectrolyte brush(SPMK) grafted onto PEEK: schematic diagram of hydration lubrication

4 结论

1) SPMK 单体在 PEEK 粉体表面的成功接枝,有效提高了 PEEK-SPMK 的表面润湿性、力学性能和摩擦学性能。成形工艺参数对比表明,保压+卸压的预压工艺、30 min 的成形时间、350 °C 的成形温度下,PEEK-SPMK 的综合性能最优。

2) 润滑介质为生理盐水、法向载荷 30 N、滑动速度 10 mm/s 时,PEEK-SPMK 的摩擦因数 0.035、磨损率 $8.5 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ 最小。生理盐水环境中,PEEK-SPMK 的摩擦学性能随法向载荷的增大而提高;法向载荷增至 40 N 时,材料的摩擦因数 0.033、磨损率 $7.8 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ 最小。润滑介质为生理盐水、法向载荷 40 N 下,PEEK-SPMK 的摩擦学性能随滑动速度的降低而提高;滑动速度 5 mm/s 的摩擦因数 0.028、磨损率 $5.6 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ 最小,较 PEEK 分别减小 67.1% 和 95.3%。

参考文献:

[1] FENG Jiabin, CHEN Rang, LI Bin, et al. The Current Trend of Antibacterial Prostheses and Prosthetic Surface Coating Technologies to Prevent Prosthetic Joint Infection for Artificial Joint Replacement[J]. Journal of Biomaterials and Tissue Engineering, 2023, 13(11): 1046-1060.

[2] SATHISHKUMAR S, PAULRAJ J, CHAKRABORTI P, et al. Comprehensive Review on Biomaterials and Their Inherent Behaviors for Hip Repair Applications[J]. ACS Applied Bio Materials, 2023, 6(11): 4439-4464.

[3] LOGESHWARAN A, ELSEEN R, NAYAK S. Artificial Intelligence-based 3D Printing Strategies for Bone Scaffold

Fabrication and Its Application in Preclinical and Clinical Investigations [J]. ACS Biomaterials Science & Engineering, 2024, 10(2): 677-696.

- [4] TAN Qin, ZHANG Yali, LI Xinle, et al. Effect of Synovial Fluid Constituent on the Tribological Behaviors of UHMWPE-CoCrMo Alloy Contact Pair[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2023, 75(3): 282-291.
- [5] BAI Rushui, SUN Qiannan, HE Ying, et al. Ceramic Toughening Strategies for Biomedical Applications [J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2022, 10: 840372.
- [6] YU L, WANG K J, JIN F B, et al. Research Progress of Highly Wear-resistant and Oxidation-resistant Polymer Acetabular Cup Prosthesis [J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2024, 55(10): 1371-1384.
- [7] CAO Shoufan, WANG Yunkun, YANG Zhanpeng, et al. Predicting the Metal Ion Release from CoCrMo Alloy - UHMWPE Tribocorrosion Contacts [J]. Tribology Letters, 2024, 72(3): 79.
- [8] HASAN BASHEET M, KAREEM FARHAN F, ABED A N. Wear and Friction Analysis of Bio-ceramic Cordierite System as Orthopedic Material[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 60: 1934-1941.
- [9] SHEN Fei, KE Liaoliang. A Comparative Study on Fretting Wear and Frictional Heating Behavior of PEEK Composites for Artificial Joint Applications[J]. Polymer Testing, 2022, 109: 107552.
- [10] GU Junfeng, SUN Xiujie, LI Zheng, et al. Elastohydrodynamic Lubrication Analysis of Polymer-on-polymer Artificial Hip Joint of CF/PEEK Composite[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2021, 138(39): 50996.
- [11] 杨茗园, 余萍萍, 李梦琦, 等. 成骨生长肽改性聚醚醚酮表面及其体外成骨活性[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(7): 14-21.
- YANG Mingyuan, YU Pingping, LI Mengqi, et al. Surface and in Vitro Osteogenic Activity of Osteogenic Growth Peptide-decorated Polyetheretherketone [J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(7): 14-21.
- [12] 刘吕花, 熊成东, 张丽芳, 等. 聚醚醚酮表面接枝聚丙烯酸及其成骨细胞相容性[J]. 塑料工业, 2021, 49(7): 159-163.
- LIU Lvhu, XIONG Chengdong, ZHANG Lifang, et al. Osteoblast Compatibility of the Surface of Polyacrylic Acid Grafted Polyetheretherketone[J]. China Plastics Industry, 2021, 49(7): 159-163.
- [13] LI Yang, LI Heng, KONG Ning, et al. Biotribological Properties of 3D Printed High-oriented Short Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites for Artificial Joints [J]. Biomaterials Advances, 2024, 161: 213888.
- [14] 朱昱衡, 肖砚斌, 康建平, 等. 聚醚醚酮内植物骨整合改性的研究进展[J]. 生物骨科材料与临床研究, 2023, 20(3): 68-72.
- ZHU Yuheng, XIAO Yanbin, KANG Jianping, et al. Research Progress of Modification of Polyetheretherketone in Osseointegration of Orthopaedic Implants[J]. Orthopaedic Biomechanics Materials and Clinical Study, 2023, 20(3): 68-72.
- [15] 孙会娟. 光诱导自引发接枝聚合 PEEK 植入体研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(4): 153-156.
- SUN Huijuan. Progress in PEEK Implants by Photoinduced Self-initiated Graft Polymerization [J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(4): 153-156.
- [16] MAYDANSHAH M R, NAJARI M R, SLATTER T, et al. The Anisotropic Mechanical and Tribological Behaviors of Additively Manufactured (Material Extrusion)

- Implant-grade Polyether Ether Ketone (PEEK)[J]. *Lubricants*, 2024, 12(10): 347.
- [17] 逢显娟, 岳世伟, 黄素玲, 等. 碳纤维/聚醚醚酮(CF/PEEK)复合材料摩擦磨损性能及抗摩擦静电特性研究[J]. *中国机械工程*, 2023, 34(3): 277-286.
FENG Xianjuan, YUE Shiwei, HUANG Suling, et al. Tribological Properties and Anti-friction Electrostatic Properties of CF/PEEK Composites[J]. *China Mechanical Engineering*, 2023, 34(3): 277-286.
- [18] LIAO Yuwen, CAO Lin, WANG Qiwei, et al. Enhanced Tribological Properties of PEEK-based Composite Coatings Reinforced by PTFE and Graphite[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2022, 139(13): 51878.
- [19] 陶双全, 郝小忠, 杨子剑, 等. CF/PEEK复合材料自阻电热-原位膜混合加热固化方法[J]. *中国机械工程*, 2022, 33(22): 2748-2754.
TAO Shuangquan, HAO Xiaozhong, YANG Zijian, et al. Hybrid of Self-resistance Electric Heating and In-situ Membrane Heating of CF/PEEK Composites Consolidation[J]. *China Mechanical Engineering*, 2022, 33(22): 2748-2754.
- [20] PEI Qianyao, PEI Xianqiang, YU Zihui, et al. Tribological Behavior of Poly(ether ether ketone)/Synthetic Eucommia Rubber Composites[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2024, 64(9): 4469-4479.
- [21] FENG Cunao, CEN Jiajia, WU Ting, et al. Preparation and Properties of the Poly(ether ether ketone) (PEEK)/Nano-zinc Oxide (ZnO) - Short Carbon Fiber (SCF) Artificial Joint Composites[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2022, 4(12): 8869-8877.
- [22] WU Minsong, TANG Zijian, TANG Weizhong, et al. Tailoring the Tribological Performance of SPEEK by Sulfonation Degree under Water Lubrication [J]. *Composites Communications*, 2025, 54: 102285.
- [23] LEE P C, HONG S H, KIM J H, et al. Enhanced Tribological and Electrical Performance of Graphene-coated Polyetheretherketone Nanocomposites[J]. *Polymers*, 2025, 17(6): 721. [LinkOut]
- [24] ELKINGTON R J, HALL R M, BEADLING A R, et al. Highly Lubricious SPMK-g-PEEK Implant Surfaces to Facilitate Rehydration of Articular Cartilage[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2023, 147: 106084.
- [25] NAKANO H, NOGUCHI Y, KAKINOKI S, et al. Highly Durable Lubricity of Photo-cross-linked Zwitterionic Polymer Brushes Supported by Poly(ether ether ketone) Substrate[J]. *ACS Applied Bio Materials*, 2020, 3(2): 1071-1078.
- [26] 岳世伟, 逢显娟, 牛一旭, 等. 载荷和速度对聚醚醚酮(PEEK)复合材料摩擦性能的影响[J]. *材料导报*, 2022, 36(16): 251-257.
YUE Shiwei, PANG Xianjuan, NIU Yixu, et al. Effects of Load and Velocity on the Friction Properties of Polyether-ether-ketone Composites [J]. *Materials Reports*, 2022, 36(16): 251-257.
- [27] CHOUWATAT P, HIRAI T, HIGAKI K, et al. Aqueous Lubrication of Poly(Etheretherketone) *via* Surface-initiated Polymerization of Electrolyte Monomers[J]. *Polymer*, 2017, 116: 549-555.
- [28] XU Jianing, ZHANG Chenhui, LUO Jianbin. Hydration Lubrication Applicable to Artificial Joints through Polyelectrolyte-embedded Modification on UHMWPE[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2022, 4(10): 7487-7497.

(编辑 张洋)

作者简介: 高传豹, 男, 2001年生, 硕士研究生。研究方向为PEEK材料改性及摩擦学性能。E-mail: gao_chuanbao@cumt.edu.cn。张德坤*(通信作者), 男, 1971年生。教授, 博士研究生导师。发表论文300余篇。E-mail: dkzhang@cumt.edu.cn。

本文引用格式:

高传豹, 张欣悦, 岑佳佳, 等. 聚电解质改性聚醚醚酮复合材料的摩擦学性能[J]. *中国机械工程*, 2026, 37(1): 14-21.
GAO Chuanbao, ZHANG Xinyue, CEN Jiajia, et al. Tribological Properties of Polyelectrolyte-Modified PEEK Composite Materials [J]. *China Mechanical Engineering*, 2026, 37(1): 14-21.

(上接第13页)

- [124] 郭德龙, 晏月, 刘虎. 基于深度学习的轨道交通弓网电弧检测方法[J]. *隧道与轨道交通*, 2024(3): 38-40.
GUO Delong, YAN Yue, LIU Hu. Arc Detection Method for Rail Transit Bow-net System Based on Deep Learning [J]. *Tunnel and Rail Transit*, 2024(3): 38-40.
- [125] HUANG Ke, SU Dongdong. Extended Pantograph - Catenary Arc Modeling and an Analysis of the Vehicular-grounding Electromagnetic Transients of Electric Multiple Units[J]. *Energies*, 2024, 17(7): 1512.
- [126] YAN Yue, LIU Hu, GAN Linfeng, et al. A Novel Arc Detection and Identification Method in Pantograph-catenary System Based on Deep Learning [J]. *Scientific Reports*, 2025, 15: 3511.
- [127] TANG Qingfeng, WEI Xiukun, WEI Dehua, et al. High Precision Robust Real-time Lightweight Approach for Railway Pantograph Slider Wear Estimation[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2024, 25(5): 3973-3985.
- [128] 罗茵蓓, 葛婷, 孙泽勇. 基于电流信号多频带特征的列车弓网燃弧检测方法[J]. *机车电传动*, 2024(4): 181-189.
LUO Yinbei, GE Ting, SUN Zeyong. Detection Method on Pantograph-catenary Arcing of Electric Locomotives Based on Multi-frequency-band Characteristics of Current Signals [J]. *Electric Drive for Locomotives*, 2024(4): 181-189.
- [129] 李斌, 舒嘉辉, 严灵潇, 等. 改进黑翅鸢算法的1D-2D-GAF-PCNN-GRU-MSA弓网电弧检测应用[J]. *电子测量与仪器学报*, 2024, 38(10): 201-211.
LI Bin, SHU Jiahui, YAN Lingxiao, et al. 1D-2D-GAF-PCNN-GRU-MSA Pantograph Arc Detection Application Based on Improved Black-winged Kite Algorithm [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2024, 38(10): 201-211.

(编辑 张洋)

作者简介: 沈明学*(通信作者), 男, 1982年生, 博士、教授、博士研究生导师。研究方向为摩擦学及表面工程。E-mail: shenmingxue@126.com.

本文引用格式:

沈明学, 陈思扬, 吴海红, 等. 服役环境影响下的材料载流摩擦学行为研究进展[J]. *中国机械工程*, 2026, 37(1): 2-13.
SHEN Mingxue, CHEN Siyang, WU Haihong, et al. Research Progresses of Current Carrying Tribological Behavior of Materials under Influences of Service Environment [J]. *China Mechanical Engineering*, 2026, 37(1): 2-13.