

DOI: 10.3969/j.issn.1004-4949.2025.12.048

## 聚醚醚酮骨整合改性方法及性能研究进展

潘玥颖<sup>1, 2</sup>, 麦合甫孜·艾山<sup>1, 2</sup>

[1. 新疆医科大学第一附属医院(附属口腔医院)口腔修复种植科, 新疆 乌鲁木齐 830000;

2. 新疆维吾尔自治区口腔医学研究所, 新疆 乌鲁木齐 830000]

**[摘要]** 聚醚醚酮(PEEK)作为一种高性能热塑性聚合物, 凭借其机械性、抗疲劳性、射线可透性等, 在骨植入领域展现出广阔的应用前景。但PEEK作为生物惰性材料, 其生物活性表面匮乏, 导致其应用受限。通过对材料表面进行改性以及制备复合材料可有效提升骨整合性能。本文就PEEK改性方法及改性后的生物学性能方面作一综述, 并展望改性后PEEK在口腔种植领域的应用, 以期为临床应用提供一定参考。

**[关键词]** 聚醚醚酮; 骨整合; 表面改性; 生物学性能

**[中图分类号]** R318.08

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1004-4949(2025)12-0191-04

### Research Progress on Osseointegration Modification Methods and Properties of Polyetheretherketone

PAN Yueying<sup>1, 2</sup>, Maihefuzi·Aishan<sup>1, 2</sup>

[1. Department of Prosthodontics and Implantology, the First Affiliated Hospital (Affiliated Stomatological Hospital) of

Xinjiang Medical University, Urumqi 830000, Xinjiang, China;

2. Stomatology Research Institute of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830000, Xinjiang, China]

**[Abstract]** As a high-performance thermoplastic polymer, polyetheretherketone (PEEK) shows broad application prospects in the field of bone implantation due to its mechanical properties, fatigue resistance, radiolucency and other characteristics. However, as a bioinert material, PEEK lacks a bioactive surface, which limits its application. The osseointegration performance can be effectively improved by modifying the material surface and preparing composite materials. This article reviews the characteristics of PEEK materials, modification methods and the biological properties after modification, aiming to provide a reference for the application of PEEK in the field of oral implantation.

**[Key words]** Polyetheretherketone; Osseointegration; Surface modification; Biological properties

聚醚醚酮(polyetheretherketone, PEEK)是聚芳醚酮家族中一种半结晶性热塑性聚合物, 其结构由两个醚键和一个酮键组成。由于其弹性模量(3~4 GPa)与人皮质骨(18 GPa)比较接近; 且PEEK具有优异的耐高温性、抗疲劳性、抗腐蚀性、机械性能和射线可透性, 逐渐应用于骨缺损修复领域<sup>[1]</sup>。然而PEEK作为生物惰性材料, 其生物活性表面匮乏, 制约了其在骨植入领域的应用<sup>[2, 3]</sup>。通过对材料表面进行改性以及制备复合材

料可有效提升骨整合性能, 目前常用方法包括物理改变PEEK表面形貌、在其表面引入化学基团或生物活性材料以及与其他物质共同制备PEEK复合材料<sup>[4]</sup>。本文主要综述了PEEK材料骨整合性能的改良方式, 并展望改性后PEEK在口腔种植领域的应用, 以期为临床应用提供一定参考。

#### 1 改变PEEK植入物表面形貌

常规PEEK材料表面平滑导致细胞黏着与亲

第一作者: 潘玥颖(1998.6-), 女, 辽宁开原人, 硕士研究生, 主要从事口腔修复学方面研究

通讯作者: 麦合甫孜·艾山(1982.4-), 女, 新疆乌鲁木齐人, 硕士, 副主任医师, 主要从事口腔修复学方面工作及研究

水性欠佳<sup>[5]</sup>,通过提升其表面粗糙程度,可改良材料亲水性,常用技术包括3D打印、喷砂、晶体挤压等。

**1.1 3D打印技术** 3D打印是生物医药常用技术,能够塑造PEEK材料表面形态,定制专属化PEEK植入物常运用此技术,能够开展精确定制,契合个体差异化需求<sup>[6]</sup>。FFF、FDM类工艺属于常见工艺,可用于制造表面呈三维多孔状的PEEK材料<sup>[7]</sup>。有研究<sup>[8]</sup>运用FDM工艺印制不同孔隙率的PEEK材料,后将不同孔隙率的PEEK和MT3C3-E1细胞共同培养,通过检测碱性磷酸酶活性,同时扫描电子显微镜检测验证带孔PEEK材料能够增强骨整合特性,带孔PEEK材料里孔隙率为40%的PEEK骨兼容性最为优良。除通过3D打印改变PEEK表面形貌外,还有研究通过3D打印将锶(Sr)和阿仑膦酸盐(ALN)负载于PEEK表面。3D打印的多孔PEEK材料具有稳定的孔径和孔隙率,PEEK-ALN-Sr复合材料由于其优异的弹性模量和骨结合能力,可用作新兴的骨植入物,为骨缺损患者提供临床可行的治疗方法<sup>[9]</sup>。

**1.2 磺化处理** 磺化改性是指用浓硫酸或气态三氧化硫与PEEK进行短时间反应,引入的-SO<sub>3</sub>H基团可与PEEK表面结合并形成多孔结构。PEEK表面磺化可使其保持优异的机械性能,并通过增加亲水性和粗糙度来改善PEEK植入物骨整合能力。有研究对PEEK材料进行酸蚀处理并和普通PEEK材料进行比较,结果表明<sup>[10]</sup>,经酸蚀后的PEEK材料表面呈三维筛状孔洞或者花瓣状,提高细胞在其表面的附着,进而增强其成骨能力。然而经酸蚀处理后,部分PEEK会由于酸的残余而引发毒副作用。为解决该问题,有研究<sup>[11]</sup>运用水热处置的方式来清除磺化聚醚醚酮(PEEK)表面的残余硫酸,削减了PEEK的毒害效应,进而使改性后的PEEK更具备生物安全性。

**1.3 等离子体处理** 等离子体处理是指在密闭容器中用电离气体对材料表面进行电离,同时置换原材料表面原子,等离子体改性可以使PEEK表面粗糙化,在保持良好力学性能的同时提高PEEK的生物活性。体外实验表明<sup>[12]</sup>,改性后的PEEK表面亲水性和表面粗糙度得到较大程度提高;且PEEK表面MC 3T3-E1细胞粘附、增殖、ALP活性和成骨分化能力得到改善。还有研究<sup>[13]</sup>使用极紫外线诱导

的氧和氮等离子体对PEEK进行表面改性,使其表面增加了新的官能团,改性后的PEEK表面粗糙度增加,同时促进MG 63细胞的贴附和增殖作用。

## 2 引入促成骨物质

### 2.1 磷灰石相关物质

**2.1.1 羟基磷灰石/纳米羟基磷灰石** 羟基磷灰石(HA)分子架构及钙磷含量占比和正常骨组织相仿,可诱导成骨<sup>[14]</sup>。搭载羟基磷灰石或者制备复合材质可优化PEEK骨整合性能,通过调控羟基磷灰石量可改善PEEK-HA因脆性增大带来的不足,继而在确保PEEK材料原有力学特性的基础上,增强材料成骨效能<sup>[15, 16]</sup>。制取纳米级羟基磷灰石可推动成骨细胞系列活动,促进新骨生成,进而使PEEK-纳米羟基磷灰石复合物更便于蛋白质吸附与细胞黏附,改善骨长入性能,提高骨整合性,有助于推动骨修复进程<sup>[17]</sup>。

**2.1.2 磷酸钙/纳米磷酸钙** 磷酸钙(calcium phosphate, CaP)是羟基磷灰石(HA)的前期物质,CaP涂层覆裹PEEK材料能够增进PEEK材料的成骨效能<sup>[18]</sup>。CaP涂覆在PEEK表面,可提供类似天然骨基质的微环境,引导新骨沿着涂层表面生长,并长入涂层的微孔结构中,实现骨整合,并在一定程度上减少PEEK基体与周围生物环境的直接接触,可能有助于减缓潜在的、极其缓慢的生物降解过程。

### 2.2 金属离子及其化合物

**2.2.1 钛及其氧化物** 于PEEK材料表面涂覆钛质涂层增进PEEK材料亲水润湿性,使PEEK具备更佳的细胞粘附性与生物亲和性。研究显示<sup>[19]</sup>,Ti-PEEK的成骨性能良好,相较于常规PEEK材料,具有更优异的生物学性能。此外,TiO<sub>2</sub>能够提升PEEK的粗糙程度,同时在潮湿的环境里TiO<sub>2</sub>会与水分子发生反应,材料表层生成羟基,吸附周边钙磷离子,继而推动骨整合<sup>[20, 21]</sup>。目前制取PEEK-TiO<sub>2</sub>材料的工艺包括溶胶-凝胶技艺和等离子喷涂等,均较为成熟;TiO<sub>2</sub>负载量的改变对成骨效能的影响机制值得临床进一步探究。在提升成骨能力的同时,优化其抗菌特性,有利于其在种植领域的应用。

**2.2.2 钽及其氧化物** 钽(tantalum, Ta)多应用于骨科内植入物,可借助多种信号路径达成促发成骨的作用,同时,其卓越的抗氧化能力、一定的抑

菌性能以及所形成的多孔架构均能够诱导骨骼生成。目前PEEK材料改性钽金属离子运用频次持续升高<sup>[22]</sup>。研究显示<sup>[23]</sup>, Ta-PEEK材料里Ta含量存在影响, 含3% Ta的Ta-PEEK材料弹性模量最高, 且该材料的抗压能力也最强, 3% Ta-PEEK和5% Ta-PEEK在细胞黏附、胶原分泌、生物矿化、成骨相关基因表达方面表现均较佳。此外, Ta-PEEK能够促进胶原分泌, 进而促进骨组织的矿化和成熟。

2.2.3其他金属及化合物 铌氧化物(如Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)作为一种高性能陶瓷填料, 其表面具有生物活性, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>可弥散于PEEK材料之中构成亚微结构表面, 促进成骨细胞粘附与分化, 改善植入物与宿主组织的结合。镁无法增进成骨能力, 但会抑制骨溶解, 其化合物硅酸镁、磷酸镁被加载到PEEK材料上后, 可诱导骨长入的能力<sup>[24]</sup>; 此外, 还展现出一定的诱导骨长入能力。铈及其化合物也能够诱导骨生成, 为PEEK材料在骨科和牙科植入物领域的应用提供了新的思路和解决方案。

### 2.3 生长因子、药物等大分子物质

2.3.1以骨形态发生蛋白为代表的生长因子 骨形态发生蛋白(BMPs)属于转化生长因子 $\beta$ 超家族, 具有自我诱导骨组织生成的能力, BMPs能够激发生成骨细胞分化, 继而促使血管和骨基质生成。重构人骨形态发生蛋白-2(rhBMP-2)既往多用于脊柱手术, 但会诱发抗原-抗体响应、血肿生成等合并症。有研究<sup>[25]</sup>运用rhBMP-2达成了椎间融合成效, 不但成功融合, 还提升了PEEK椎间融合器的融合比例。除BMPs, 存在将其他生长因子整合至PEEK材料以促进骨生长的相关报道, 但所得成果暂时还未在临床中得以应用。

2.3.2药物 有研究<sup>[26]</sup>借助聚多巴胺涂层介导制取地塞米松/米诺环素脂质体修饰的PEEK材料, 经改性处理的PEEK材料能够持续释放上述两种药物, 释放过程中地塞米松可促进成骨细胞增殖, 助力骨髓腔内新骨重新生长; 米诺环素可增强材料的抗菌性能。运用制备混合材料类的方法将促成骨物质导入PEEK材料, 可改进其诱导成骨的特性。近年来, 研究热点集中于PEEK材料上, 起初较为关注能够负载的促进骨质生成的物质, 后研究重点转向如何提高其负载量, 并推动其持续发挥效能。

### 3 总结与展望

PEEK作为一种植入材料, 具有良好的生物相容性、化学稳定性和与骨组织接近的弹性模量, 有望成为钛及其合金的常用替代骨植入材料。然而PEEK用作临床植入物以出现骨结合不良和细菌感染。近年来关于PEEK材料改性优化的研究逐渐增多, 主要研究方向为增强PEEK骨整合能力, 以缩短PEEK与植入区周围骨的结合时间并提高骨结合质量的目的, 同时赋予PEEK良好的抗菌能力, 减少植体区周围感染的发生几率。通过对PEEK及其复合材料进行改性, 可为开发具有良好力学性能、骨结合能力和抗菌性能的新一代非金属植入物提供参考。

#### [参考文献]

- [1]Najeeb S,Zafar MS,Khurshid Z,et al.Applications of polyetheretherketone (PEEK) in oral implantology and prosthodontics[J].J Prosthodont Res,2016,60(1):12-19.
- [2]Li W,Zhao H,Li C,et al.Polyetheretherketone (PEEK) rods versus titanium rods for posterior lumbar fusion surgery:a systematic review and meta-analysis[J].J Orthop Surg Res,2023,18(1):348.
- [3]Milinkovic I,Krasavcevic AD,Jankovic S,et al.Immunohistochemical analysis of soft tissue response to polyetheretherketone (PEEK) and titanium healing abutments on dental implants:a randomized pilot clinical study[J].BMC Oral Health,2022,22(1):484.
- [4]Alkhdhairy F,Aljamhan AS.Surface conditioning of PEEK post using Nd:YVO<sub>4</sub> laser, photodynamic therapy, and sulfuric acid on the pushout bond strength to canal dentin[J].Photodiagnosis Photodyn Ther,2023,42:103601.
- [5]李璐阳,孙睿.聚醚醚酮在口腔颌面外科的应用现状和展望[J].现代口腔医学杂志,2025,39(2):140-144,149.
- [6]Qin B,Zeng B,Shen D,et al.Exploration of mechanical properties and osseointegration capacity of porous PEEK composites containing strontium and alendronate under 3D printing:an emerging bone implant[J].J Biomater Sci Polym Ed,2025,36(9):1173-1188.
- [7]薛森,陈佳,张莹莹,等.聚醚醚酮及其复合材料在口腔种植领域应用的研究进展[J].中华口腔医学杂志,2025,60(3):302-307.
- [8]Zhang H,Duan M,Qin S,et al.Preparation and Modification

- of Porous Polyetheretherketone (PEEK) Cage Material Based on Fused Deposition Modeling (FDM)[J]. *Polymers (Basel)*, 2022, 14(24):5403.
- [9] Meng Z, Liu Y, Wu D. Effect of sulfur dioxide inhalation on cytokine levels in lungs and serum of mice[J]. *Inhal Toxicol*, 2005, 17(6):303-307.
- [10] Montero JF, Tajiri HA, Barra GM, et al. Biofilm behavior on sulfonated poly(ether-ether-ketone)(sPEEK)[J]. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*, 2017, 70(Pt 1):456-460.
- [11] Ma R, Wang J, Li C, et al. Effects of different sulfonation times and post-treatment methods on the characterization and cytocompatibility of sulfonated PEEK[J]. *J Biomater Appl*, 2020, 35(3):342-352.
- [12] Chen M, Ouyang L, Lu T, et al. Enhanced Bioactivity and Bacteriostasis of Surface Fluorinated Polyetheretherketone[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2017, 9(20):16824-16833.
- [13] Zhao Y, Wong HM, Lui SC, et al. Plasma Surface Functionalized Polyetheretherketone for Enhanced Osseointegration at Bone-Implant Interface[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2016, 8(6):3901-3911.
- [14] Yang X, Zheng L, Gao S, et al. The toughening mechanism of 3D carbon fiber reinforced polyetheretherketone composites with ultrahigh interlaminar fracture toughness[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2025, 325:111300.
- [15] Refai OM, Nawar NH, Lebshtien IT. Assessment of Retention of CAD-CAM Milled PEKK vs PEEK Double Crown-retained Removable Partial Dentures: A Randomized Clinical Trial[J]. *J Contemp Dent Pract*, 2021, 22(11):1250-1256.
- [16] Vasiljevic T, Gómez-Ríos GA, Pawliszyn J. Single-Use Poly(etheretherketone) Solid-Phase Microextraction-Transmission Mode Devices for Rapid Screening and Quantitation of Drugs of Abuse in Oral Fluid and Urine via Direct Analysis in Real-Time Tandem Mass Spectrometry[J]. *Analytical chemistry*, 2018, 90(1):952-960.
- [17] Brum RS, Monich PR, Fredel MC, et al. Polymer coatings based on sulfonated-poly-ether-ether-ketone films for implant dentistry applications[J]. *J Mater Sci Mater Med*, 2018, 29(8):132.
- [18] Mangano F, Mangano C, Margiani B, et al. Combining Intraoral and Face Scans for the Design and Fabrication of Computer-Assisted Design/Computer-Assisted Manufacturing (CAD/CAM) Polyether-Ether-Ketone (PEEK) Implant-Supported Bars for Maxillary Overdentures[J]. *Scanning*, 2019, 2019:4274715.
- [19] Shetty SK, Hasan MS, Zahid M, et al. Evaluation of Fracture Resistance and Color Stability of Crowns Obtained by Layering Composite Over Zirconia and Polyetheretherketone Copings Before and After Thermocycling to Simulate Oral Environment: An In Vitro Study[J]. *J Pharm Bioallied Sci*, 2020, 12(Suppl 1):S523-S529.
- [20] Ali Z, Baker S, Sereno N, et al. A Pilot Randomized Controlled Crossover Trial Comparing Early OHRQoL Outcomes of Cobalt-Chromium Versus PEEK Removable Partial Denture Frameworks[J]. *Int J Prosthodont*, 2020, 33(4):386-392.
- [21] D'Ercolè S, Cellini L, Pilato S, et al. Material characterization and Streptococcus oralis adhesion on Polyetheretherketone (PEEK) and titanium surfaces used in implantology[J]. *J Mater Sci Mater Med*, 2020, 31(10):84.
- [22] Xian P, Chen YQ, Gao S, et al. Polydopamine (PDA) mediated nanogranular-structured titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) coating on polyetheretherketone (PEEK) for oral and maxillofacial implants application[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2020, 401:126282.
- [23] Zhu H, Ji X, Guan H, et al. Tantalum nanoparticles reinforced polyetheretherketone shows enhanced bone formation[J]. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*, 2019, 101:232-242.
- [24] 苏晶晶, 林彦君, 邢肖杰, 等. 聚醚醚酮及其复合材料在口腔种植领域的应用进展[J]. *中华口腔医学杂志*, 2022, 57(10):1084-1090.
- [25] Villavicencio AT, Nelson EL, Rajpal S, et al. Prospective, randomized, double-blinded clinical trial comparing PEEK and allograft spacers in patients undergoing transforaminal lumbar interbody fusion surgeries[J]. *Spine J*, 2022, 22(1):84-94.
- [26] Cassari L, Zamuner A, Messina GML, et al. Bioactive PEEK: Surface Enrichment of Vitronectin-Derived Adhesive Peptides[J]. *Biomolecules*, 2023, 13(2):246.

收稿日期: 2025-5-24 编辑: 刘雯