

3D打印医用聚醚醚酮临床应用现状和进展

时 运¹, 覃祖敢¹, 苏晓雨², 刘 奕², 程丽佳^{1,2*}

¹成都大学机械工程学院, 四川 成都

²成都大学基础医学院, 四川 成都

收稿日期: 2022年5月9日; 录用日期: 2022年6月17日; 发布日期: 2022年6月24日

摘 要

聚醚醚酮具有优异的生物相容性, 且与人体骨的力学性能相似, 成为现今应用广泛的骨科植入材料。同时, 随着3D打印技术的不断成熟, 患者能够根据自身骨缺损处精确个性化定制所需的人工骨植入材料。本文简述了聚醚醚酮在口腔、人造骨关节、颌骨、颅骨等缺损修复的临床应用现状和进展, 总结并提出3D打印医用聚醚醚酮在未来生物医学领域有待解决的问题和研究方向。

关键词

聚醚醚酮, 3D打印, 骨科植入物, 假体, 骨缺损

Clinical Application Status and Progress of 3D Printing Medical PEEK

Yun Shi¹, Zupan Qin¹, Xiaoyu Su², Yi Liu², Lijia Cheng^{1,2*}

¹School of Mechanical Engineering, Chengdu University, Chengdu Sichuan

²Basic Medical College, Chengdu University, Chengdu Sichuan

Received: May 9th, 2022; accepted: Jun. 17th, 2022; published: Jun. 24th, 2022

Abstract

With excellent biocompatibility and similar mechanical properties to human bone, Poly ether-ether-ketone (PEEK) has become a widely used orthopedic implant material nowadays. At the same time, with the continuous maturity of 3D printing technology, patients can accurately customize the required artificial bone implant materials according to their own bone defects. In this paper, the clinical application status and progress of PEEK in oral cavity, artificial bone joint, jaw bone, skull and other defects were briefly reviewed, and the pending problems and research direction of 3D printing medical PEEK in biomedical field were summarized and proposed.

*通讯作者。

文章引用: 时运, 覃祖敢, 苏晓雨, 刘奕, 程丽佳. 3D 打印医用聚醚醚酮临床应用现状和进展[J]. 生物医学, 2022, 12(3): 193-200. DOI: 10.12677/hjbm.2022.123023

Keywords

PEEK, 3D Printing, Orthopedic Implants, Prosthesis, Bone Defect

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

聚醚醚酮(polyetheretherketone, PEEK)是一种全芳香族半结晶热塑性聚合物,聚醚醚酮的熔点为334℃,玻璃化转变温度为143℃,耐高温和耐化学腐蚀[1]。相比于传统的钛合金等金属植入材料,聚醚醚酮具有优异的生物力学性能、生物相容性和放射线透过性,植入人体后可有效降低应力屏蔽效应,且磁共振扫描不产生伪影。特别是其弹性模量与人骨相当,因此被认为是一种良好的骨科植入物材料[2] [3] [4]。随着3D打印技术的不断成熟,越来越多研究人员和外科医生利用这项技术去制作植入性假体。3D打印技术因其独特优势,并结合CT、MRI等医学扫描技术个性化定制聚醚醚酮植入物。目前,3D打印聚醚醚酮在口腔、人造骨关节、颌骨以及颅骨等缺损修复也逐渐被应用于临床。聚醚醚酮材料正逐渐成为骨、软骨替代材料中的一类重要生物材料,并应用于医学的各种领域。

2. 3D打印聚醚醚酮

在过去十年里,有越来越多研究人员和外科医生将3D打印技术投入应用到生物医疗领域中。在外科应用中,3D打印技术不仅可以更好地了解患者复杂解剖和病理的模型,还能够针对患者制备特定的医疗器械,甚至能按照手术要求快速精确的个性化定制所需任意形状和结构的植入体[3]。3D打印个性化植入物流程见图1。目前,常用的3D打印技术有熔融沉积成型(Fused Deposition Modeling, FDM)、选择性激光烧结(Selective laser sintering, SLS)和三维立体印刷(Three dimensional printing, 3DP)等。其中使用FDM技术制造PEEK材料的成本更低,操作更简单,具有3D打印普遍的快速成型。其制备原理是通过将丝状聚醚醚酮从喷嘴中挤出并逐层沉积在工作台而制成[4]。

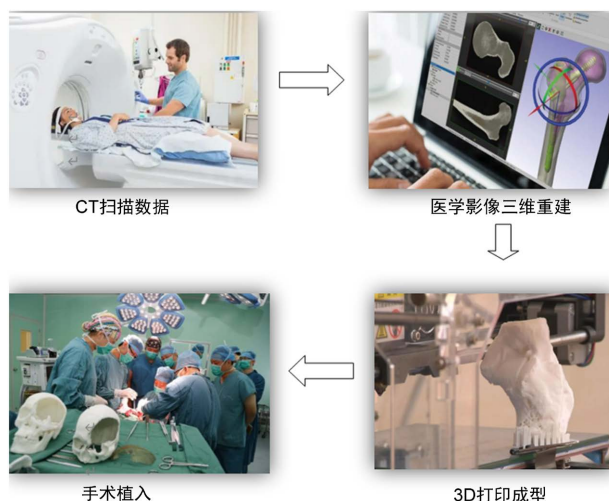


Figure 1. Flow chart of 3D printing personalized implants

图 1. 3D 打印个性化植入物流程图

3. 3D 打印聚醚醚酮临床应用

3D 打印技术结合 CT、MRI 等医学扫描技术, 个性化定制的聚醚醚酮植入在口腔、人造骨关节、颌骨以及颅骨等缺损修复也被应用于临床。

3.1. 口腔修复

在口腔医学领域, 基于 PEEK 的口腔生物材料受到国内外科研工作者的关注, 于 1981 年作为植入材料获得专利, 并于 1990 年通过美国食品和药物管理局(Food and Drug Administration, FDA)认证批准用于牙科的口腔应用。聚醚醚酮呈白色状, 有着很好的美观性和可定制化性。同时, PEEK 具有优异的化学稳定性, 可以耐受绝大多数化学试剂的腐蚀, 因此它不会因口腔中的唾液、酸性 pH、食物或饮料、菌斑等被降解。另外, 它也不会因老化而退化, 且能够耐 γ 和 X 射线[5] [6] [7] [8] [9]。在磨牙症和过敏反应的情况下, 聚醚醚酮作为不含金属的修复体材料已经成为患者的绝佳替代品之一。2011 年, PEEK 材料开始在种植学领域使用, 并在临时和永久性种植基台和愈合螺钉中得到十分有效的应用[8]。

Han X 等[10]从表面粗糙度和润湿性、细胞粘附、代谢活性和增殖等方面系统地分析了熔丝制造(Fused Filament Fabrication, FFF) 3D 打印 PEEK 的生物活性。其研究表明, FFF 技术可以获得传统喷砂方法无法获得的高度粗糙的表面和特殊的印刷结构。样品高度的粗糙度改善了其润湿性, 这在细胞初始黏附过程中起着重要作用。与抛光和喷砂 PEEK 样品相比, FFF 制作的 PEEK 样品表面的各向异性纹理对生物活性有刺激作用, 尤其是在细胞代谢活性和增殖方面。同时, 其体外实验表明, FFF 3D 打印 PEEK 具有各向异性的打印结构和表面粗糙度, 是一种有望改善细胞黏附、代谢活性和增殖的材料。因此, FFF 3D 打印的 PEEK 有望成为牙科种植体的潜在候选生物材料。

王诗维等[11]研究了 3D 打印聚醚醚酮在先天性缺牙患者修复中的应用价值。将 72 例先天性缺牙患者均分两组。对照组采用传统的口腔修复治疗, 实验组在对照组的基础上使用了 3D 打印聚醚醚酮修复治疗, 并进行术后随访记录。在术后 3 个月的实验组有效率为 100%, 显著高于对照组的 88.9%。实验组术后 3 个月的牙龈指数为 0.81, 低于对照组 1.33, 且都低于术前 2.30。此外, 实验组并发症发生率为 5.6%, 显著低于对照组的 27.8%。因此, 3D 打印聚醚醚酮在先天性缺牙患者修复中不仅有利于牙周清洁, 还能够降低并发症发生率, 从而提高美学效果和临床疗效。

陆伟等[12]为一名牙缺损患者设计制作了 3D 打印聚醚醚酮可摘义齿。患者口内临床试戴适合, 咬合过程中义齿未出现任何松动, 义齿卡环的固位力也满足临床要求。随访半年后, 未出现卡环折断、基托破损等不良现象。3D 打印技术改善了 PEEK 材料美观效果, 更适合口腔修复体个体化单件定制的临床要求。

3.2. 人造骨关节

目前, 医用人造骨关节主要是以钛钢合金为主, 其缺点是生物相容性不佳, 且长期植入容易发生松动和磨损, 需要二次更换, 给患者带来极大不便[2]。而 PEEK 因其重量轻、模量接近天然骨、生物相容性好等优点, 成为目前热门的骨关节替换材料。Philipp Honigmann 等[13]首次在医院中使用的 3D 打印舟状骨假体, 它是由医用级聚醚醚酮经 FFF 打印技术制作而成。其研究结果指出 3D 打印 PEEK 舟状骨假体植入具有可能性, 并进一步研究后处理 PEEK 舟状骨假体的生物力学特性。

魏星辉等[14]研究了 3D 打印聚醚醚酮个性化定制假体在肩胛骨肿瘤切除重建中的临床应用及其效果。术前根据 5 例患者健侧薄层 CT 三维重建, 再经镜像化处理后得到个性化定制肩胛骨假体。采用 PEEK 材料进行控性冷沉积 3D 打印, 将肩胛骨肿瘤的肩胛骨整块切除并重建。术后 3 周进行肩关节功能锻炼, 发现假体未出现脱位、感染等并发症, 且肿瘤长期未复发。结果表明, 3D 打印 PEEK 个性化定制肩胛骨

假体能够对肩胛骨的外形和功能进行改善, 实现精准重建, 但其远期效果还需进一步观察。

Chen C 等[15]介绍了 3D 打印个性化聚醚醚酮假体在锁骨慢性骨髓炎次全切除术后重建中 1 例应用。一名 23 岁的女性患者在接受了长期保守治疗后其右锁骨的疼痛和肿胀仍未缓解, 于是决定进行外科手术以切除病变并重建 PEEK 锁骨, 术后进行功能锻炼。在 2 年的随访中, 植入物未失效或松动, 患者对外观和肩部功能非常满意。该病例报告指出 3D 打印个性化聚醚醚酮假体是重建锁骨切除的有效方法。

骨良性纤维组织细胞瘤(Benign Fibrous Histiocytoma, BFH)是一种侵袭性原发性骨肿瘤。当局部切除不完全时, 复发的风险很高, 因此需要一次彻底切除。临床医生面临的主要挑战是肿瘤切除后的骨重建。Dong Liu 等[16]探讨了 3D 打印技术治疗肩胛骨良性纤维组织细胞瘤的疗效。采用 3D 打印技术对肩胛骨良性纤维组织细胞瘤患者进行 PEEK 假体置换治疗。X 射线和 CT 扫描评估了假体位置和肩关节位置之间的关系, 并计算肩关节恒定评分。正位 X 线片显示左肩胛骨假体位置符合要求, 肩关节位置正常。术后 3 个月, 经 X 射线检查后给出左肩功能评分良好。因此, 3D 打印 PEEK 肩胛骨假体结合全肩关节置换术的应用为精确重建提供了可能, 提高了手术的可操作性, 缩短了手术时间, 使患者能够早日恢复功能。

Kang JF 等[17]研究了一种新的肋骨假体设计方法, 该方法利用自然替换肋骨的质心轨迹, 通过监测横截面积、形状和性质来调整强度。使用 FDM 制造技术制造定制设计的肋骨假体, 发现其机械性能接近天然肋骨。在与机械试验相似的载荷条件下, 对设计的肋骨假体进行了有限元分析。结果表明, 由天然肋骨骨干导出的质心轨迹可以为肋骨假体的设计提供可靠的指导。这种方法不仅在形状和所需强度方面提供了相当大的设计自由度, 而且利于 FDM 技术制造样品的表面抛光质量。FDM 制备的聚醚醚酮肋骨假体已成功植入, 并取得了良好的临床效果。

胸壁重建主要是肿瘤或创伤手术治疗后需要的。肋软骨是胸壁的一部分, 连接胸骨和肋骨。现有的钛或 PEEK 肋骨假体缺乏肋软骨部分, 导致呼吸功能的康复并不理想。C. Zhang 等[18]研究提出了一种利用波状弹性结构设计肋软骨假体的新仿生方法。通过改变设计参数, 精确调整其力学性能。对假体进行了有限元分析, 并优化设计。然后使用 PEEK 通过 FDM 制成假体, 并进行力学测试, 确定其弹性模量。结果表明, 所设计的肋软骨假体的力学性能与天然肋软骨接近, 波状弹性结构是肋软骨假体设计的合理选择。因此, 所设计的 PEEK 肋软骨假体有可能替代天然肋软骨, 为胸壁重建患者提供更好的呼吸功能。

3.3. 颌骨缺损修复

由于各种并发症导致修复效果不理想, 大面积下颌骨连续性缺损的功能重建仍是口腔颌面外科的一大挑战。X. Han 等[9]研究人骨肉瘤细胞系在未处理、抛光和喷砂聚醚醚酮的不同样品表面上的体外细胞反应, 研究结果发现未处理的 FFF 3D 打印聚醚醚酮表面的细胞代谢活性和增殖显著提升, 成骨细胞密度更高。进而提出未经处理的 FFF 3D 打印聚醚醚酮具有较高的表面粗糙度和最佳印刷结构, 有很大潜力作为一种合适的同种异体骨生物材料用于重建颅颌面外科手术。J. Kang 等[19]研究开发一种新的下颌骨缺损功能性修复方法, 结合 3D 打印聚醚醚酮种植体和血管化游离腓骨移植, 评价种植体在整个咀嚼运动下的使用性能。通过有限元分析, 研究不同咀嚼运动条件下, 下颌骨重建的生物力学行为和力学生物学特性。结果显示各构件的最大 Von Mises 应力(基于剪切应变能的一种等效应力)均低于相应材料的屈服强度, 安全系数均超过 2.3 倍, 表明该修复方法的安全性是可以保证的。此外, 在大多数咬合任务下, 重建模型的实际变形量均小于正常下颌骨的实际变形量, 保证了下颌骨的初步稳定性。该修复方法已被应用于临床, 并取得了良好的临床效果。与传统的腓骨移植进行下颌骨外科重建相比, 该修复方法为下颌骨缺损的功能重建和美容修复提供了更好的安全性和稳定性。

F. Guo 等[20]通过有限元分析和力学测试来评价定制的 3D 打印 PEEK 髌突假体的生物力学行为。使

用 MIMICS 软件创建下颌骨的 3D 模型, 然后将其导入 GEOMICAGE Studio 软件, 对病变区进行截骨手术。设计了个性化的 PEEK 髌突假体, 并建立了 PEEK 髌突假体、下颌骨和固定螺钉的有限元模型。分析修复体和螺钉的最大应力以及牙尖间隙、切牙咬合、左侧磨牙咬合和右侧磨牙咬合时皮质骨和松质骨的应力和应变。采用 FDM 制备髌突假体, 测试其压缩性能。其研究表明, 髌突和螺钉的最大应力均远小于材料的屈服强度。研究表明, 基于 FDM 制备的个性化 PEEK 髌突假体应力分布均匀, 力学性能良好, 为 PEEK 作为修复下颌关节的重建材料提供了理论依据。

Tasopoulos T 等[21]研究采用口内扫描、3D 打印、CAD/CAM 等技术成功制作了 PEEK 上颌双片式密闭器可拆卸牙科修复体, 解决了传统的下颌闭孔假体因缺损越大, 假体越重导致的基牙松动的问题。L. Ding 等[22]研究了一种 3D 打印 PEEK 上颌闭孔器支架的数字化制作方法。对数字化口腔数据进行扫描, 以进行支架的 CAD 和初步树脂铸型的 3D 打印。与典型的金属支架相比, PEEK 支架表现出精确的贴合性、出色的固位力和更轻的重量。结果表明, 该闭孔器与口腔组织贴合良好, 在 18 个月的随访中, 患者对假体的适合性、固位性、美观性和舒适性十分满意, 取得了良好的临床效果。

3.4. 颅骨缺损修复

聚醚醚酮因其优异的生物相容性, 且与人体骨的力学性能相似, 被认为是一种适用于颅骨缺损修复的材料。F. Manzoor 等[23]研究通过热熔挤压制备了纯纳米 HA、掺锶(Sr)和掺锌(Zn)纳米 HA 含量均为 10wt% 的 PEEK 基长丝, 然后通过熔融沉积成型进行了 3D 打印。经过长达 28 天的模拟体液浸泡试验, 对 3D 打印样品的体外生物活性进行了评价。研究结果指出, 具有生物活性的 3D 打印聚醚醚酮复合材料在颅面骨修复方面具有潜在的应用前景。

李会兵等[24]探讨了 3D 打印聚醚醚酮在儿童颅骨修补术的临床效果。在 3D 打印技术辅助下, 手术先将 3 例颅骨肿物患者的颅骨肿物切除, 再使用 PEEK 材料进行修补。术后随访 6 个月发现 3 例患者肿物无复发, 头颅外形正常, 修复材料没有偏移, 效果良好。徐翔等[25]验证了 3D 打印聚醚醚酮材料植入物用于儿童颅骨缺损修复的可能性。通过计算机辅助设计对 7 例颅骨缺损患者进行医学三维重建以及植入物的设计, 并结合 3D 打印 1:1 模型完成植入手术。术后患者修复效果均有显著提高, 且均无并发症, 修复材料位置稳定。因此, 计算机辅助设计 3D 打印聚醚醚酮材料修复儿童颅骨缺损是完全可行且有效的。

Barros A 等[26]报告了一位 54 岁女性继发性额部骨内脑膜瘤侵入上矢状窦的病例。外科医生通过计算机辅助设计、制造和验证后, 将 PEEK 特异性植入物一步重建额骨进行完全切除。手术后几周, 病人皮下积液堆积, 后用环压绷带迅速消退。手术六个月后, 患者反馈手术很成功, 美容效果很好, 局部疼痛完全消退。与其他材料相比, PEEK 特定植入物用于颅骨成形术具有显著优势。

3.5. 椎体间融合器

聚醚醚酮椎体间融合器具有较好的生物相容性, 射线可透过性和力学性能, 便于术后观察植骨融合情况。Basgul C 等[27]探究 3D 打印 PEEK 腰椎间融合器的结构与性能之间的关系。结果表明, 在没有环境参数控制或后处理等对 3D 打印的任何额外影响的情况下, FFF 打印的融合器已经能够为腰椎融合器的应用提供足够的强度。还指出了打印速度等打印工艺参数的重要性, 以避免气孔增加, 这可能会改善打印融合器的力学性能。该发现是评估用于 PEEK 植入物的新型 3D 打印制造技术的重要步骤。

Basgul C 等[28]研究钛合金和 PEEK 椎体间融合器对于脊髓型颈椎病的疗效。研究结果发现, PEEK 组的临床效果显著优于钛合金组。此外, 聚醚醚酮椎体间融合器不仅能够降低颈椎前板强度, 还可以椎体间的高度和颈椎前凸。术后随访同样表明, 患者对于 PEEK 组的满意程度高于钛合金组。

4. 展望

目前,聚醚醚酮材料已经广泛应用于生物医学领域。由于聚醚醚酮具有有利于生物医学应用的机械性能,聚醚醚酮基植入物逐渐替代钛基和陶瓷植入物,成为各类骨缺损修复的重要生物材料组。为了提高其骨诱导和抗菌能力,需要不同类型的聚醚醚酮表面功能化或对聚醚醚酮的结构进行改变,聚醚醚酮复合材料的合成拓宽了其原有的生物性能和力学性能。随着3D打印技术的成熟以及患者对骨修复治疗要求的提高,可以借助3D打印技术为患者骨缺损处精准个性化定制高度匹配的聚醚醚酮植入物。该植入物具有良好的力学性能、生物相容性和生物活性,在口腔、人造骨关节、颌骨、颅骨等缺损修复中表现出较好的治疗效果,患者满意度高。

由于聚醚醚酮是一种半结晶热塑性聚合物且熔点达到334℃,3D打印系统的优良很大程度上决定了个性化定制聚醚醚酮植入物的性能。因此,对现有的3D打印系统需要不断改进,研发出聚醚醚酮专用3D打印机,促进聚醚醚酮基材料的新医疗应用。同时,需要进一步研究复合、涂层等改性技术对聚醚醚酮材料性能的影响,提高所制备的植入物性能。目前,聚醚醚酮在临床应用中仍然存在着许多问题,现有的3D打印聚醚醚酮需要大量的后处理且缺乏精度。患者术后产生一系列的并发症和不良反应,因此找到问题产生的原因并将其攻克是未来需要进一步研究的。总的来说,3D打印医用聚醚醚酮及其复合材料在医学领域中有着广阔的应用前景。

利益冲突声明

作者声明本文无利益冲突。

基金项目

本文由成都市医学科研课题(2021043)、四川省教育厅高等教育人才培养质量和教学改革项目(JG2021-1102)、教育部产学研合作协同育人项目(202101011010)、成都大学CC国家众创空间2021年度创新创业教育专项课题(ccyg202101008)、四川省大学生创新创业训练计划项目(S202111079028, S202111079043X, S202111079095, S202111079124X, S202111079041)、成都大学大学生创新创业训练计划项目(CDUCX2022604, CDUCX2022600)资助。

参考文献

- [1] Wang, Y., Müller, W.D., Rumjahn, A., Schmidt, F. and Schwitalla, A.D. (2021) Mechanical Properties of Fused Filament Fabricated PEEK for Biomedical Applications Depending on Additive Manufacturing Parameters. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, **115**, Article ID: 104250. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2020.104250>
- [2] 林柳兰, 周建勇. 3D打印聚醚醚酮及其复合材料修复骨缺损的应用现状[J]. 中国组织工程研究, 2020, 24(10): 1622-1628.
- [3] 赵靖,王笛, 刘继全, 李学军. 3D打印技术在医学领域应用的现状及问题[J]. 中国现代医学杂志, 2017, 27(12): 71-74.
- [4] Wong, K.C. (2016) 3D-Printed Patient-Specific Applications in Orthopedics. *Orthopedic Research and Reviews*, **8**, 57-66. <https://doi.org/10.2147/ORR.S99614>
- [5] 甘抗, 郭晶, 刘红. 聚醚醚酮口腔生物材料的研究进展[J]. 口腔颌面修复学杂志, 2014, 15(3): 172-175.
- [6] Mishra, S. and Chowdhary, R. (2019) PEEK Materials as an Alternative to Titanium in Dental Implants: A Systematic Review. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, **21**, 208-222. <https://doi.org/10.1111/cid.12706>
- [7] Bathala, L., Majeti, V., Rachuri, N., Singh, N. and Gedela, S. (2019) The Role of Polyether Ether Ketone (Peek) in Dentistry—A Review. *Journal of Medicine and Life*, **12**, 5-9.
- [8] Alexakou, E., Damanaki, M., Zoidis, P., Bakiri, E., Mouzis, N., Smidt, G., et al. (2019) PEEK High Performance Polymers: A Review of Properties and Clinical Applications in Prosthodontics and Restorative Dentistry. *European Journal of Prosthodontics and Restorative Dentistry*, **27**, 113-121.

- [9] Schönhoff, L.M., Mayinger, F., Eichberger, M., Reznikova, E. and Stawarczyk, B. (2021) 3D Printing of Dental Restorations: Mechanical Properties of Thermoplastic Polymer Materials. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, **119**, Article ID: 104544. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2021.104544>
- [10] Han, X., Sharma, N., Xu, Z., Scheideler, L., Geis-Gerstorf, J., Rupp, F., et al. (2019) An *in Vitro* Study of Osteoblast Response on Fused-Filament Fabrication 3D Printed PEEK for Dental and Cranio-Maxillofacial Implants. *Journal of Clinical Medicine*, **8**, Article No. 771. <https://doi.org/10.3390/jcm8060771>
- [11] 王诗维, 王金雨, 李蓉, 杨建军, 张松梓. 3D 打印聚醚醚酮在先天性缺牙患者修复中的应用价值[J]. 现代生物医学进展, 2021, 21(4): 764-768.
- [12] 陆伟, 冀堃, 丁玲, 陈晔, 吴国锋, 杨春成. 聚醚醚酮口腔修复体双色一体化 3D 打印技术的临床应用观察[C]//中华口腔医学会口腔修复专业委员会第十四次全国口腔修复学学术会议. 广州: 中华口腔医学会, 2020: 57-58.
- [13] Honigmann, P., Sharma, N., Schumacher, R., Rueegg, J., Haefeli, M. and Thieringer, F. (2021) In-Hospital 3D Printed Scaphoid Prosthesis Using Medical-Grade Polyetheretherketone (PEEK) Biomaterial. *BioMed Research International*, **2021**, Article ID: 1301028. <https://doi.org/10.1155/2021/1301028>
- [14] 魏星辉, 范宏斌, 付军, 艾克拜尔·尤努斯, 刘冬, 田征, 等. 肩胛骨肿瘤切除 3D 打印聚醚醚酮个性化定制假体重建五例报告[J]. 中国骨与关节, 2021, 10(2): 122-127.
- [15] Chen, C., Yin, Y., Xu, H., Li, Z., Wang, F. and Chen, G. (2021) Personalized Three-Dimensional Printed Polyether-Ether-Ketone Prosthesis for Reconstruction after Subtotal Removal of Chronic Clavicle Osteomyelitis: A Case Report. *Medicine*, **100**, Article ID: e25703. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000025703>
- [16] Liu, D., Fu, J., Fan, H., Li, D., Dong, E., Xiao, X., et al. (2018) Application of 3D-Printed PEEK Scapula Prosthesis in the Treatment of Scapular Benign Fibrous Histiocytoma: A Case Report. *Journal of Bone Oncology*, **12**, 78-82. <https://doi.org/10.1016/j.jbo.2018.07.012>
- [17] Kang, J., Wang, L., Yang, C., Wang, L., Yi, C., He, J., et al. (2018) Custom Design and Biomechanical Analysis of 3D-Printed PEEK Rib Prostheses. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, **17**, 1083-1092. <https://doi.org/10.1007/s10237-018-1015-x>
- [18] Zhang, C., Wang, L., Kang, J., Fuentes, O.M. and Li, D. (2020) Bionic Design and Verification of 3D Printed PEEK Costal Cartilage Prosthesis. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, **103**, Article ID: 103561. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.103561>
- [19] Kang, J., Zhang, J., Zheng, J., Wang, L., Li, D. and Liu, S. (2021) 3D-Printed PEEK Implant for Mandibular Defects Repair—A New Method. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, **116**, Article ID: 104335. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2021.104335>
- [20] Guo, F., Huang, S., Hu, M., Yang, C., Li, D. and Liu, C. (2021) Biomechanical Evaluation of a Customized 3D-Printed Polyetheretherketone Condylar Prosthesis. *Experimental and Therapeutic Medicine*, **21**, Article No. 348. <https://doi.org/10.3892/etm.2021.9779>
- [21] Tasopoulos, T., Chatziemmanouil, D., Kouveliotis, G., Karaiskou, G., Wang, J. and Zoidis, P. (2020) PEEK Maxillary Obturator Prosthesis Fabrication Using Intraoral Scanning, 3D Printing, and CAD/CAM. *The International Journal of Prosthodontics*, **33**, 333-340. <https://doi.org/10.11607/ijp.6575>
- [22] Ding, L., Chen, X., Zhang, J., Wang, R. and Wu, G. (2021) Digital Fabrication of a Maxillary Obturator Prosthesis by Using a 3-Dimensionally-Printed Polyetheretherketone Framework. *Journal of Prosthetic Dentistry*, In Press. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2021.04.002>
- [23] Manzoor, F., Golbang, A., Jindal, S., Dixon, D., McIlhagger, A., Harkin-Jones, E., et al. (2021) 3D Printed PEEK/HA Composites for Bone Tissue Engineering Applications: Effect of Material Formulation on Mechanical Performance and Bioactive Potential. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, **121**, Article ID: 104601. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2021.104601>
- [24] 李会兵, 李永事, 李锐祥, 杨宝应. 3D 打印引导聚醚醚酮在儿童颅骨缺损的应用[J]. 中国微侵袭神经外科, 2021, 26(6): 272-273.
- [25] 徐翔, 王举磊, 于洋, 宇应涛. 计算机辅助设计 3D 打印聚醚醚酮材料修复儿童颅骨缺损的应用[J]. 中国数字医学, 2021, 16(1): 74-78+82.
- [26] Barros, A., Brauge, D., QuÉhan, R., Cavallier, Z., Roux, F.E. and Moysse, E. (2021) One-Step Customized PEEK Cranioplasty after 3D Printed Resection Template Assisted Surgery for a Frontal Intraosseous Meningioma: A Case Report. *Turkish Neurosurgery*, **31**, 142-147.
- [27] Basgul, C., Yu, T., MacDonald, D.W., Siskey, R., Marcolongo, M. and Kurtz, S.M. (2018) Structure-Property Relationships for 3D Printed PEEK Intervertebral Lumbar Cages Produced Using Fused Filament Fabrication. *Journal of Materials Research*, **33**, 2040-2051. <https://doi.org/10.1557/jmr.2018.178>

- [28] Basgul, C., MacDonald, D.W., Siskey, R. and Kurtz, S.M. (2020) Thermal Localization Improves the Interlayer Adhesion and Structural Integrity of 3D Printed PEEK Lumbar Spinal Cages. *Materialia*, **10**, Article ID: 100650. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2020.100650>