

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.05.024

聚醚醚酮在口腔医学领域应用的研究进展

岳学峥¹,徐佳程¹,周恬²

(1.上海理工大学材料与化学学院,上海 200093; 2.上海交通大学医学院附属第九人民医院口腔颌面-头颈肿瘤科,上海交通大学口腔医学院,国家口腔医学中心,国家口腔疾病临床医学研究中心,上海市口腔医学重点实验室,上海市口腔医学研究所,上海市头颈肿瘤诊治和转化医学中心,上海 200011)

摘要:介绍了现有口腔材料(聚甲基丙烯酸甲酯、非金属扣式义齿材料和金属合金)的优势与缺陷,及聚醚醚酮(PEEK)在医学领域应用的优势,例如生物兼容性好、低比重、抗裂开且易于加工,弹性模量低不会造成应力屏蔽,并以此简述了PEEK作为口腔材料近五年内在临床的使用状况(上颌骨重建、下颌骨重建、颞下颌关节重建、口腔修复体、义齿基台和乳牙早失间隙保持器)及存在的不足,重点利用实例综述PEEK在口腔医学临床使用过程中的可行性,最后对PEEK在口腔医学领域的发展前景进行了展望。

关键词:聚醚醚酮;医用高分子;口腔医学;上颌骨重建修复;下颌骨重建修复;颞下颌关节重建

中图分类号: R783.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)05-0147-06

Research Progress on the Application of Polyetheretherketone in the Field of Stomatology

Yue Xuezheng¹, Xu Jiacheng¹, Zhou Tian²

(1. School of Materials and Chemistry, Shanghai University of Technology, Shanghai 200093, China; 2. Department of Oral and Maxillofacial-Head and Neck Oncology, Shanghai Ninth People's Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine; College of Stomatology, Shanghai Jiao Tong University; National Center for Stomatology; National Clinical Research Center for Oral Diseases; Shanghai Key Laboratory of Stomatology; Shanghai Research Institute of Stomatology; Shanghai Center of Head and Neck Oncology Clinical and Translational Science, Shanghai 200011, China)

Abstract : The advantages and defects of existing oral materials (polymethyl methacrylate, non-metal clasp denture and metal alloys) and the advantages of polyetheretherketone (PEEK) which have good biocompatibility, low specific gravity, crack resistance and easy processing in the medical field were introduced. The low modulus of elasticity does not cause stress shielding, and the clinical use of PEEK as an oral material in the past five years (maxillary reconstruction, mandible reconstruction, temporomandibular joint reconstruction, oral pseudo-complex, denture abutment and removable pediatric space maintainers) and its shortcomings were briefly described, focusing on the use of examples to review the feasibility of clinical use of PEEK in stomatology. Finally, the development prospect of PEEK in the field of stomatology was prospected.

Keywords : polyetheretherketone ; medical polymer ; stomatology ; maxillary reconstruction and repair ; mandibular reconstruction and repair ; temporomandibular joint reconstruction

随着人口的增长和老龄化,全球癌症发病率和死亡率正在急速增长^[1]。而口腔癌是全世界16种常见癌症之一。大部分患者接受手术、化疗和放疗等,但是易产生一系列副作用,如放疗会导致口干症^[2-3]、牙齿结构变化等^[4]。口腔健康是全身健康的重要组成部分。寻找一种新型的用于口腔医学的材料可减少继发性疾病和并发症的数量。

口腔材料的力学性能在临床使用上具有重要作用^[5],这

与加工工艺和材料的选择密切相关,对于牙列缺失或牙列缺损患者,全口义齿或可摘活动义齿是恢复美学和口腔功能的重要治疗手段,需要复杂的咀嚼能力,但是通过增加厚度来提高力学性能会降低患者的使用体验,因此寻找一种力学性能优越并且美观的材料是口腔材料研究的新方向。

传统的用于口腔修复的材料主要由聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)等聚合材料制成^[6]。PMMA因为具有可用性高、成

基金项目: 国家自然科学基金项目(52201083),上海市扬帆计划项目(19YF1434300),上海高性能医疗器械材料工程研究中心项目(20DZ2255500)

通信作者: 岳学峥,博士,讲师,主要研究方向为3D打印医学工学交叉方向,生物3D打印材料及体外各类器官与疾病模型

收稿日期: 2023-03-08

引用格式: 岳学峥,徐佳程,周恬. 聚醚醚酮在口腔医学领域应用的研究进展[J]. 工程塑料应用,2023,51(5):147-152.

Yue Xuezheng, Xu Jiacheng, Zhou Tian. Research progress on the application of polyetheretherketone in the field of stomatology[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(5): 147-152.

本低以及美观性好等优点,所以被现代临床医学广泛应用^[7]。PMMA制备便捷,但是其本身硬度差、耐磨性能差。同时义齿基托可能会黏附白色念珠菌^[8]、变形链球菌和金黄色葡萄球菌^[9],导致假牙口炎、口腔黏膜慢性炎症反应等疾病^[10]。

与丙烯酸材料相比,非金属扣式义齿材料(NMCD)如聚酰胺、聚酯或聚碳酸酯,具有更好的抗断裂和抗冲击性能,但难研磨、颜色不稳定、需要经常维护^[11]。

其他口腔修复材料如钴铬钼合金、钛合金。钴铬(Co-Cr)金属已经被用于治疗,这类修复体设计具有孔隙率小、保持力好、加工失真性小、导热性能良好以及咬合力强、功能期间横向变形小等优点,能够让患者快速适应修复体。但是金属基托存在着成本高昂,可能发生过敏反应^[12],额外的实验室步骤以及放置后密封困难等缺点。钛合金是植入物中最广泛应用的材料之一,具有良好的生物相容性、耐腐蚀性以及力学性能。但是金属存在着高弹性模量、X射线中的伪影^[13]以及金属诱导的免疫抑制等缺陷。同时,口腔修复体在美学领域也有需求,金属基台和植入物在牙龈衰退或者颜色透过黏膜组织而导致美学劣势,使得患者满意度降低^[14-15]。这些都是金属材料临床亟待解决的问题。即使没有上述缺陷,随着现代医疗技术的提升,患者也期望修复体没有金属,并且尽可能缩短修复时间。尽管金属材料存在优点,但依旧缺乏吸引力,因此迫切需要寻找一种兼具力学性能和美观的材料能替代金属进行口腔修复。

近年来PEEK材料因其出色的性能和质量受到许多医疗设备制造商和外科医生的认可,逐渐用于人体组织,临床上常见的PEEK植入物包括创伤植入物、脊柱植入物^[16]、人工关节植入物^[17]、颅骨缺陷植入物^[18]等。1988年被证实可用于口腔领域^[19],PEEK在口腔医学中的应用包括上、下颌骨的重建修复及制备义齿基台等。其生物相容性好、低比重、抗裂开且易于加工^[20]。因为它具有生物相容性,力学性能和与骨骼相匹配的弹性模量。PEEK的弹性模量为8.7 GPa,与钛合金(116 GPa)相比,更接近人类皮质骨,减少了因高弹性模量、金属植入物的应力屏蔽效应引起的骨吸收的担忧^[21]。PEEK可以比金属合金具有更平衡的应力分布,减少基牙和牙骨质界面上的应力传递^[22]。当PEEK的表面粗糙度(0.018 nm)足够低时可防止软组织刺激,PEEK可能会取代金属用于口腔治疗^[23]。同时,PEEK是一种化学惰性化合物,在室温下不溶于任何常规溶剂,降低了患者手术后因材料原因导致的口腔内pH的变化,这些优越的性能使其能在口腔环境不平衡环境中保持长期的耐久性,这是口腔修复的关键参数^[24]。在临床使用传统工艺加工的PEEK拉伸性能与牙釉质相似,理论上是修复体的理想替代品。

口腔的变化与全身疾病相关,因此降低口腔感染和口干症等疾病的发病率对牙科医生和研究者是一种挑战。笔者综述了在五年内PEEK作为口腔材料的主要使用状况和在口腔医学领域的最新研究进展,期望为研究学者和行业专家

提供参考。主要介绍了6种PEEK在口腔医学领域的运用。分别是上颌骨重建修复、下颌骨重建修复、颞下颌关节重建、口腔修复体和义齿基台和乳牙早失间隙保持器。

1 上颌骨重建修复

PEEK具有射线照相半透明性,在射线照相成像上不会产生伪影^[25]。该材料已应用于骨科手术以及上颌骨和下颌骨缺损的重建^[19]。

PEEK植入物越来越多用于口腔重建和颌面部修复。Hamsho等^[26]对一名因战争受伤而上颌骨严重受损的特殊病例进行颌面修复治疗。患者曾两次使用髂嵴骨修补缺陷,但因为缺陷面积大阻碍了血液供应和植入物的骨整合而失败。PEEK与人体骨骼拥有相似的力学性能。因此,研究者选择PEEK作为植入物的材料。研究人员通过CT数据获取准确的骨尺寸进而完成上颌骨三维模型的重建,然后3D打印患者的特定PEEK植入物,临床医生通过眶下和口内牙槽嵴切口进入手术区域,安装PEEK植入物与缺损区域完全匹配,然后使用直径2 mm,长度16 mm的钛螺钉进行固定,以恢复可接受的口腔功能和美学。术后,患者随访了13个月,没有表现出技术或生物学并发症,证明了这种治疗方案在重建严重颌面部畸形方面的可靠性,并受益于它们提供的优势,即无需额外的手术来获取自体骨移植物。因此,在适用的情况下,使用PEEK植入物能替代其他治疗方式。

Elsawy等^[27]给出了4例无牙颌重度上颌牙槽嵴吸收患者,拒绝二期手术,手术同期寻求固定植入物的实例。实验人员使用CAD软件程序进行模型绘制然后进行3D打印,外科医生从左第二磨牙区到右第二磨牙区的牙脊上做一个牙脊切口,在牙脊切口的远端做两个斜向释放切口,PEEK植入物的放置避开了有尖锐骨刺的犬牙和第一磨牙区域。四名受试者在术后第一个月后进行随访,修复效果佳,无并发症,仅有1名受试者在右上颌犬齿角化和非角化牙龈交界处显示部分暴露,皮瓣略微松开,然后进行重新缝合。12个月后随访,所有植入物功能稳定、软组织健康,未见骨折、感染或脓液分泌物。其中两名受试者完成了为期24个月的随访。

南方医科大学口腔医院口腔颌面外科对17例Ⅲ类下颌前突伴轻度上颌发育不足患者,利用3D打印的PEEK/BaSiO₄作为材料植入上颌鼻旁区以改善凹陷。术后患者的CBCT数据显示术后3天时修复体存在明显孔洞,但6个月后修复体内部孔洞消失,表明修复体存在骨长入现象,上颌发育不足导致的鼻旁凹陷较术前有明显改善,患者平均鼻旁凸度由-2 mm增加至2 mm,且无患者出现修复体移位、骨吸收等并发症,经过(15.4±8.7)月的随访,仅有1例患者因鼻旁发生自体骨部分吸收在Face-Q结果满意调查问卷中表示有些不满意。由于添加了BaSiO₄陶瓷,增加了PEEK的显影性,有利于术后CT检测。从临床观察和美学参数角度分析显示,3D打印PEEK植入物是一种改善鼻旁区缺陷的可行的新技术。

Mounir 等^[28]对 16 例上颌骨牙槽嵴垂直或者水平缺失的患者进行分组,研究钛网和 3D 打印 PEEK 网的优缺点。研究发现获取理想形状的钛网通常比较消耗时间导致手术时间成本的增加,同时钛网因其刚度高增加了暴露的发生率,进而增加感染的风险。在 PEEK 组实验中,研究人员设计了一个覆盖牙槽骨颊面、脊面和腭面厚度为 2 mm 的穿孔网,而 PEEK 网外部轮廓会更加光滑和薄且不影响刚性,避免了张力和黏膜刺激导致的皮瓣开裂。

综上,在患者数量少且观察时间短的临床研究的局限性下,PEEK 作为植入物用于上颌骨修复引起研究者的研究兴趣。同时由于三维虚拟规划和计算机辅助设计/计算机辅助制造(CAD/CAM)技术结合使制造解剖模型和病人 PEEK 特定植入物(PSI)成为外科领域一种有前途的治疗选择。

2 下颌骨重建修复

由创伤感染后遗症或者肿瘤切除引发的下颌缺损在临床是常见病症,对外貌和相应的口腔功能具有负面影响^[29]。因此,下颌骨的重建是必要的。目前最广泛使用的修复技术是自体骨移植技术。它具有骨结合的理想结构和组织兼容性、理想的生理和解剖特性以及缺乏免疫排斥的优点^[30]。然而,自体骨是一种有限的资源,会导致供体部位受损,并且除非具有丰富的临床经验,否则无法使用自体骨移植来实现准确的个性化重建^[31]。目前的自体骨和金属多孔材料完成的修复在随访结果的美学和咀嚼功能方面评定较低。因此,越来越多的同种异体材料被引入来代替自体骨修复下颌缺损,PEEK 则是具有优秀前景的代替材料之一。

Kang 等^[32]提出了一种将 3D 打印和腓骨移植相结合的下颌缺损修复新方法。实验人员根据 CT 数据构建下颌骨和肿瘤模型,并拟定在确保 5~10 mm 负边缘的前提下切除肿瘤的实验计划。临床医生根据术前计划切除病变之后,选择血管化的腓骨进行分割构建下颌骨的形状,最后将 3D 打印 PEEK 植入物和钛板植入下颌缺损部位。研究者发现这种治疗方法可以降低非血管化骨吸收引起的口腔感染风险,同时降低应力屏蔽引起的骨吸收以增强下颌骨重建的安全性和稳定性。但由于 PEEK 是惰性材料,因此需要对其进行表面改性和微观结构设计来促进自体骨和植入物的进一步结合,提高植入物的长期稳定和使用寿命。该方法为下颌骨缺损的功能和美学修复提供了实验基础。

Li 等^[33]评估了 6 名(三名男性和三名女性)使用定制的 3D 打印 PEEK 植入物进行下颌骨重建的患者的术后状况及并发症。外科医生在切除肿瘤后将植入物定位在缺陷区域,并用钛螺钉固定,手术中可以根据需要修剪 PEEK 植入物的形状。研究者收集和分析患者在术前和术后的年龄、计算机断层扫描(CT)和其他临床数据。控制主要变量,术后进行 10~24 个月的随访。其中 5 例患者无任何术后并发症,对外观和术后的口腔功能结果满意。另外 1 例患者在手术后 10 个月因植入物暴露而移除 PEEK 植入,但没有出现任何下颌运动障碍、炎症或排斥反应等。目前不确定 PEEK 植入物承受

长期咀嚼力和咬合力的稳定性。虽然迄今为止没有发生过因咀嚼发生故障的病患,但仍需要进一步研究改良。

郭皓等^[34]对 2018–2020 年共计 10 例半侧颜面短小畸形下颌骨修补患者进行研究。患者均采用 3D 打印 PEEK 作为材料进行下颌骨修复。外科医生自第二前磨牙至第三磨牙作为口腔内切口在发育不良的下颌骨处植入人工骨材料。术后患者伤口愈合情况良好,均 I 期愈合,明显改善面部轮廓对称性。本研究中接受治疗的患者在后续出现了不同程度的软组织萎缩,但可在术后 6 个月后进行自体脂肪填充。术后的长期效果随访依旧是研究者需要研究的重点。

研究发现,下颌缺损植入物从以形状为导向的仿生学设计逐渐转变为功能性仿生学设计。CT 扫描和图像处理软件的发展促进了下颌骨虚拟 3D 模型的制作且精度较高。因此,理论上 PEEK 植入物可以修复下颌骨中不同形式的缺损,保持下颌骨的原始形状,同时不影响例如咀嚼和颞下颌关节运动等下颌骨功能。然而,PEEK 植入必须严格筛选,需要在植入前评估和调整局部软组织状况。现有的临床研究,患者数量少,观察时间短。为研究 PEEK 作为下颌修复材料的长期效果,建议对更大范围的目标患者进行材料和构建方法方面的研究。

3 颞下颌关节重建

由于颞下颌关节(MTJ)具有独特的解剖学和功能特征,由关节窝和下颌支两部分组成,因此,难以维护。20 世纪初的许多作者就恢复其形状和理想功能作报告^[35],讲述颞下颌关节重建技术。

Genovesi 等^[36]综述了近 30 年的颞下颌关节修复体的文献和临床经验。研究发现英国 Invibio 的 PEEK Lti 20%Ba 具有颞下颌关节修复所需的所有性能。研究人员发现根据骨重塑定律的原则,颞下颌关节模型需要总共 9 颗螺钉来稳定下颌支中部分,但如果使用 PEEK 作为材料则可将螺钉数量降为 5 颗。在 2010–2022 年期间,研究人员使用 PEEK Lti 20%Ba 系统进行实验室测试和临床研究,实验室测试中表现优异,多次测试后表面没有损坏,临床也取得了良好的结果,94.73% 的患者的术后回访满意度较高,只有 2 例患者因修复体支架发生断裂(6.66%),结果不佳。使用 PEEK 作为材料制成的全 TMJ 修复体,在移动和振幅方面具有良好的表现,可以改善线性和角速度的变化以及生物力学和下颌骨动力学的位置变化。

Guo 等^[37]设计了一种新型的 TMJ 修复体,不同于现有修复体,研究者利用逆向工程,将患者 CT 数据导入医学影像软件(Mimics)用于三维重建患者截骨部位,使用 PEEK 作为材料,并且使用 3D 打印技术制备。利用有限元和力学测试评估了皮质骨和松质骨在尖间位、切牙咬合、左单侧磨牙咬合和右单侧磨牙咬合时的应力和应变,以模拟临床实际情况。结果显示 PEEK 修复体的应力分布均匀,主要集中在髁突颈部的前后区域,均不高于 50 MPa,小于 PEEK 的屈服强度。相较于金属修复体,这种新型修复体的峰值应力明显较低,

理论上降低了临床应用时螺钉骨折的风险,性能良好,为PEEK应用于颞下颌关节重建提供了充足的理论依据。

分析30年的颞下颌关节假肢模型得出,它必须是与底颅骨成90°的夹角且髁突必须有一个椭圆形的头部来保证能自由的活动^[38]。但若PEEK植入物用于颞下颌关节的重建,PEEK的生物惰性仍然限制着骨修复方面的应用。因此,需要对PEEK进行改性以提高生物医学应用中的生物活性。

4 口腔膈复体

口腔颌面部肿瘤切除之后,患者上颌骨被部分或者全部切除,导致患者存在口、鼻腔穿通的缺损,产生吞咽困难以及言语障碍等问题,严重降低了患者的生活质量并且影响心情^[39]。因此,颌面部缺损的修复对患者的身心健康具有重要作用。临床上,恢复口腔颌面部功能主要是通过手术采用皮瓣修复缺损和传统膈复治疗^[40]。现有的膈复体材料是丙烯酸树脂,PEEK与其相比具有生物相容性相似和抗开裂、可加工性能好的优点,具有一定的研究价值。

Cowie等^[41]使用PEEK-Optima结合丙烯酸树脂制作的上颌骨及鼻骨缺损后的膈复体,更加轻便美观舒适,并具有更好的固位力,但同时价格更高。

Sharaf等^[42]对金属和铣削PEEK基托在颌骨切除术病例进行放射学评估以及满意度调查。结果表明用于PEEK组中的义齿,显示出卓越的美学。传统阻塞器的固定依赖于附着体的存在,需要多次插入/移除,导致牙槽骨吸收的副作用。与传统组相比,由于没有附着体,在治理过程中改善了牙龈结构,PEEK组患者满意度显著提高。虽然PEEK作为口腔材料存在着一定的缺陷,当PEEK阻塞器高于颌间距离的情况下,修复体无法以适当的尺寸铣削,就需要根据颌间距离修改阻塞器的颞轮廓。但综上所述,可以说PEEK附着保留上颌骨确定性闭孔器可以被认为获得性上颌骨缺陷患者在美学和外观满意度方面的一种有希望的治疗方式。

南京大学医学院附属口腔医院的陆伟等^[43]自2019年开展对3D打印PEEK材料作为口腔修复体的临床验证实验。研究人员对1例因肿瘤切除导致上颌骨缺损病例使用PEEK作为材料3D打印膈复体支架进行修复。患者经过口内试戴,膈复体支架的适配程度和固位性均良好,患者6个月后复查,表示膈复体使用效果良好,无不变形、断裂等不良现象。虽然临床效果良好,但是PEEK本身的颜色是棕褐色,不能满足口腔修复的“粉白美学”。

经过改进,对1例因黏液表皮样癌切除术后左侧硬软腭交界部分缺损进行修复。研究人员在义齿设计环节使用一体双色3D打印PEEK支架,患者口内试戴环节效果满意。3个月后复查,患者自述与传统修复体相比,3D打印PEEK修复体重量更轻,无金属异味,且美观效果满意。虽然研究者在原有3D打印PEEK基础上实现了基托的双色打印,但是染色机理和染色后PEEK的透光性能、抗疲劳、抗老化和颜色稳定性还需进一步研究^[44]。

相较于金属,PEEK的弹性模量低,用于口腔膈复体支

架的制备具有优势,但是其硬度较低,在实际应用过程中需要增加基托和卡环的厚度,可能会造成部分口腔敏感患者的不适。

与传统丙烯酸树脂材料相比,PEEK的优势及不足还缺乏系统评价。为了PEEK材料能在口腔颌面进一步使用,可以进行表面改性以增加其力学性能和生物性能。Xian等^[45]对PEEK表面进行改性,将聚多巴胺(PDA)层接枝到PEEK表面作为连接层,然后将TiO₂液相沉积到其表面。测试发现,改性后的PEEK促进了纤维细胞和成骨细胞的黏附增殖,有效抑制了金黄色葡萄球菌和大肠杆菌。这种改性可以促进PEEK在口腔颌面部的运用,同时为其他纳米混合涂层提供了帮助。

3D打印PEEK修复颌面部,可以减少手术过程中的修改,进而确保术后的稳定性和美学效果。在自体移植供体部位感染或者自体移植不足的情况下,可以大幅节省临床医生的时间和精力,具有不可忽视的研究优点。

5 义齿基台

目前,钛和锆是制备基台的常用材料,但是,钛基台的颜色是灰色,运用于美学区域的修复存在一定缺陷^[46]。与钛基台相比,锆基台相对美观,但是其弹性模量过高,将最大咀嚼力转移至种植体及颌骨,不利于骨整合。

高性能聚合物PEEK由于其高强度,低密度和类似骨骼的弹性模量(3~4 GPa),在一定程度上可以对咀嚼力进行缓冲,因而用于固定和可移动牙科修复体的框架材料,也可作为义齿基台用于可拆卸和固定修复体。

PEEK制成的种植体支撑的牙科修复体具有一定的骨骼保护作用,这已经通过带有钛基座的PEEK基台得到了验证^[47]。

Matos等^[48]基于体外和计算机研究结果发现,PEEK基台可承受中等程度的力,应该谨慎指导种植体的植入。同时PEEK基台在垂直位移点基台-植入物界面处的塑性应变具有一定局限性。在考虑关节衰竭的情况下,PEEK基台可能适合作为临时康复,特别是门牙区域失去基础功能的患者。

Mounir等^[49]比较了钛骨膜下植入物与PEEK骨膜下植入物用于前萎缩性上颌骨,发现与PEEK组相比,所有金属植入物周围突出基台周围的平台都暴露了1至2 mm。然而,这并没有干扰修复体负荷或影响患者满意度。PEEK框架可以降低制造成本,无论是采用传统的铣削加工或者凭借数字化技术。

Ayyadanvecttil等^[50]对PEEK种植体基台与氧化锆基台的美学、力学参数以及使用寿命进行系统的对比。研究人员将40例患者随机分为两组,PEEK组和氧化锆基台组,保持其他参数一致,进行为期5年的评估。研究结果表明PEEK种植体基台与氧化锆种植体基台的生物学参数(平均探测深度、平均近中骨水平、平均边缘骨丢失等)在统计学上相似,5年内PEEK和氧化锆基台周围黏膜和周围牙齿牙龈间的色差随着时间的推移减少。因此,在美学领域,钛支撑的

PEEK基台有望成为氧化锆基台的替代品。传统的金属基台(如:钛基台)经常因为周围的细菌进入而失败,临床上通过保留角质化的牙龈作为屏障来解决^[51]。Dimitroulis等^[52]研究发现,与其他材料相比,对PEEK进行精加工和抛光以及对PEEK进行改性能得到更好的上皮反应。

PEEK一种高强度且美观的热塑性聚合物,是替代牙科义齿金属部分的重要替代品。PEEK可以提供足够的固位力并且在美学方面满足要求,虽然理想材料尚未确定,但是PEEK具有良好的研究前景。

6 乳牙早失间隙保持器

乳牙过早脱落是儿童牙科的常见问题,若不及时治疗会导致患者的牙弓完整性受损,对未来恒牙的生长排列产生不利影响^[53]。传统的保持器的制造使用弯曲的卡扣和自固化树脂进行制造,自固化树脂在制造过程中容易发生收缩,很难保证制件的精度。因此,寻找一种精度高、方便操作的乳牙早失间隙保持器具有重要意义。

Guo等^[54]使用激光扫描医学图像重建牙列缺损模型,并使用PEEK作为材料进行制造,与传统材料相比,PEEK制备的乳牙早失间隙保持器更加优异,牙齿与保持器之间的最大距离,平均距离和标准差均更小。但是,PEEK保持器维护成本高,且颜色选择有限,当位于中切牙位置时会影响美观。

冀堃等^[55]选取5例下颌单侧乳磨牙早失患者进行研究,通过口内取模、数字化设计PEEK间隙保持器、口内试戴、粘接等步骤完成间隙保持器的设计制备工作。术后间隙保持器与基牙吻合度高,后续复诊,均未出现断裂现象并且患者舒适感强,并且在菌斑染色剂的检测下显示PEEK间隙保持器不易附着菌斑,安全性能较高。与传统的金属保持器相比,PEEK保持器的质量更轻,且避免了金属过敏或者抛光不良而引起黏膜刺激等问题。PEEK制备的间隙保持器实现了材料的非金属化,具有较好的临床应用前景。

综上,PEEK代替金属制备乳牙早失间隙保持器在临床上具有较大的可行性。但是研究者们后续需要对保持器的长期粘接效果及间隙维持效果等进行长期的观察与研究。

7 展望

综述了PEEK在口腔医学领域的应用现状。PEEK的力学性能类似于骨和牙体组织,通过将PEEK与其他材料混合制成复合材料或者对PEEK进行表面改性可以增强PEEK的力学性能和生物性能,改善PEEK生物惰性的缺点,从而在口腔领域具有更加广泛的前景,包括上、下颌骨重建整形,颞下颌关节重建以及义齿基台等。

最重要的是PEEK在口腔领域的研究让人们在医学领域的探索更进一步,促使研究人员开发更加先进的治疗方法。PEEK将成为未来口腔医学发展的支柱。同时,研究者们还面临着更多的技术难关,但从收集的资料文献中显示,PEEK在口腔领域中的运用仍然需要更多的基础和临床研究,为PEEK材料未来的发展提供理论支持。

参考文献

- [1] Sung H, et al. *Ca-a Cancer Journal for Clinicians*, 2021, 71(3): 209–249.
- [2] Kavitha M, et al. *Journal of Oral and Maxillofacial Pathology : JOMFP*, 2017, 21(3):459–460.
- [3] Wang X, et al. *Journal of Radiation Research*, 2016, 57:169–175.
- [4] Brown T J, et al. *Jco Oncology Practice*, 2020, 16(3):103–110.
- [5] Grassia V, et al. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2020, 13(5). DOI: 10.3390/MA13051034
- [6] Zafar M S. *Polymers (Basel)*, 2020, 12(10). DOI: 10.3390/polym12102299.
- [7] Frazer R Q, et al. *Journal of Long-Term Effects of Medical Implants*, 2005, 15(6):629–639.
- [8] Aguayo S, et al. *Journal of Dental Research*, 2017, 96(8):917–923.
- [9] Glass R T, et al. *The Journal of the American Osteopathic Association*, 2001, 101(2):92–94.
- [10] Murat S, et al. *Journal of Prosthodontics: Official Journal of the American College of Prosthodontists*, 2019, 28(2):e873–e879.
- [11] Nagakura M, et al. *Journal of Prosthodontic Research*, 2018, 62(1): 31–34.
- [12] Maeno M, et al. *The Journal of Dermatology*, 2021, 48(1):85–87.
- [13] Kalasuskas D, et al. *World Neurosurgery*, 2022, 166: e155–e162.
- [14] Pecnik C M, et al. *Clinical Oral Implants Research*, 2015, 26(5): 563–571.
- [15] Vazouras K, et al. *Journal of Prosthodontics : Official Journal of the American College of Prosthodontists*, 2022, 31(8):673–680.
- [16] Kurtz S M, et al. *Biomaterials*, 2007, 28(32):4 845–4 869.
- [17] Liu Y, et al. *Journal of Materials Chemistry B*, 2021, 9(38):8 021–8 030.
- [18] Murnan E J, et al. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery : Official Journal of the American Association of Oral and Maxillofacial Surgeons*, 2021, 79(3):696.e1–696.e7.
- [19] Panayotov I V, et al. *Journal of Materials Science Materials in Medicine*, 2016, 27(7).DOI:10.1007/s10856-016-5731-4.
- [20] Najeeb S, et al. *Journal of Prosthodontic Research*, 2016, 60(1): 12–19.
- [21] Kitamura E, et al. *Clinical Oral Implants Research*, 2004, 15(4): 401–412.
- [22] Rho J Y, et al. *Journal of Biomechanics*, 1993, 26(2):111–119.
- [23] Petropoulos G, et al. *Materials & Design*, 2008, 29(1):218–223.
- [24] Bulancea B P, et al. *Applied Sciences*, 2022, 12(8).DOI: 10.3390/app12083708.
- [25] Lommen J, et al. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery : Official Journal of the American Association of Oral and Maxillofacial Surgeons*, 2022, 80(7):1 272–1 283.
- [26] Hamsho R, et al. *Plastic and Reconstructive Surgery Global Open*, 2022, 10(8).DOI:10.1097/gox.0000000000004473.
- [27] Elsayy M A, et al. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 2022. DOI: 10.1016/j.prosdent.2022.08.027.
- [28] Mounir M, et al. *Clinical implant Dentistry and Related Research*, 2019, 21(5):960–967.

- [29] Zhang Q, et al. *Materials Science & Engineering C, Materials for Biological Applications*, 2019, 103. DOI: 10.1016/j.msec. 2019. 109858.
- [30] Brown J S, et al. *The Lancet Oncology*, 2016, 17(1):e23-30.
- [31] Moussa N T, et al. *Dental Clinics of North America*, 2020, 64(2): 473-490.
- [32] Kang J, et al. *Journal of The Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2021, 116. DOI:10.1016/j.jmbbm.2021.104335.
- [33] Li Y, et al. *Journal of Cranio-Maxillo-Facial Surgery: Official Publication of the European Association for Cranio-Maxillo-Facial Surgery*, 2022, 50(8):621-626.
- [34] 郭皓,等. *江西医药*, 2021, 56(2). DOI: 10.3969/j. issn. 1006-2238.2021.02.030.
- Guo Hao, et al. *Jiangxi Medical Journal*, 2021, 56(2). DOI: 10.3969/j.issn.1006-2238.2021.02.030.
- [35] Saeed N R, et al. *Atlas of The Oral and Maxillofacial Surgery Clinics of North America*, 2022, 30(2):217-221.
- [36] Genovesi W, et al. *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*, 2022, 12(5):529-541.
- [37] Guo F, et al. *Exp Ther Med*, 2021, 21(4). DOI: 10.3892/etm.2021.9779.
- [38] Genovesi W. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 2018, 76: e76-e77.
- [39] Kimia R, et al. *Annals of Plastic Surgery*, 2019, 83(5):538-541.
- [40] Miyamoto S, et al. *Microsurgery*, 2016, 36(4):291-296.
- [41] Cowie R M, et al. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2020, 13(6). DOI:10.3390/MA13061264,
- [42] Sharaf M Y, et al. *European Journal of Dentistry*, 2022, 16(1): 80-95.
- [43] 陆伟,等. *实用口腔医学杂志*, 2020, 36(1):136-140.
- Lu Wei, et al. *Journal of Practical Stomatology*, 2020, 36(1): 136-140.
- [44] 陆伟,等. *实用口腔医学杂志*, 2020, 36(3):548-552.
- Lu Wei, et al. *Journal of Practical Stomatology*, 2020, 36(3): 548-552.
- [45] Xian P, et al. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 401. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126282.
- [46] Cosgarea R, et al. *Clinical Oral Implants Research*, 2015, 26(5): 537-544.
- [47] Schwitalla A D, et al. *Journal of The Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2016, 63:244-251.
- [48] Matos J D M, et al. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2022, 15(22). DOI:10.3390/MA15228127.
- [49] Mounir M, et al. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 2018, 47(5):658-664.
- [50] Ayyadanveetil P, et al. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 2022, 128(6):1 275-1 281.
- [51] Rea M, et al. *Clinical Oral Implants Research*, 2017, 28(7): e46-e50.
- [52] Dimitroulis G. *Australian Dental Journal*, 2018, 63(Suppl 1): S79-s90.
- [53] Park K, et al. *International Journal of Paediatric Dentistry*, 2009, 19(6):383-389.
- [54] Guo H, et al. *BMC Oral Health*, 2020, 20(1). DOI: 10.1186/s12903-020-01184-6.
- [55] 冀堃,等. *中华口腔医学研究杂志(电子版)*, 2019, 13(6):368-372.
- Ji Kun, et al. *Chinese Journal of Stomatological Research(Electronic Edition)*, 2019, 13(6):368-372.

(上接第 115 页)

- [12] 刘付胜聪,肖汉宇,李玉平,等. 纳米 SiO₂ 对聚丙烯酸酯复合涂层在水润滑下摩擦学性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2004, 21(5): 42-47.
- Liu Fushengcong, Xiao Hanning, Li Yuping, et al. Effect of nanometer SiO₂ particles on the friction and wear properties of polyacrylate coatings under water lubrication[J]. *Acta materiae compositae sinica*, 2004, 21(5):42-47.
- [13] Julian Somberg, Prabakaran Saravanan, Hari Shankar Vadivel, et al. Tribological characterisation of polymer composites for hydro-power bearings: experimentally developed versus commercial materials[J]. *Tribology International*, 2021, 162:107 101-107 111.
- [14] Jayanthi A, Krishna Priya R, Surakasi Raviteja, et al. Mechanical and tribological properties of TiC nano particles reinforced polymer matrix composites[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 59:1 472-1 477.
- [15] Lin Yusong, He Ren, Xu Yongkun, et al. Significance of nickel particles on reducing friction and wear of polyimide subjected to harsh boundary lubrication conditions[J]. *Tribology International*, 2023, 178:108 063-108 073.
- [16] Tian Jingwei, Qi Xiao, Li Chenggao, et al. Friction behaviors and wear mechanisms of multi-filler reinforced epoxy composites under dry and wet conditions: Effects of loads, sliding speeds, temperatures, water lubrication[J]. *Tribology International*, 2023, 179:108 148-108 161.