

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.03.028

PEEK 口腔生物材料的应用现状及前景

张永恒¹, 刘吕花², 李梦琦¹, 刘英¹, 张丽芳³, 熊成东³, 郑延延²

(1. 川北医学院口腔医学院, 四川南充 637000; 2. 川北医学院药学院, 四川南充 637000;

3. 中国科学院成都有机化学研究所, 成都 610041)

摘要: 介绍了金属、陶瓷等传统口腔生物材料的优势与不足, 聚醚醚酮(PEEK)在口腔医学领域应用的突出优势(卓越的理化性能、良好的生物相容性及美观性)。综述了 PEEK 在口腔正畸(正畸弓丝、早期矫治器械和舌侧固定保持器)、口腔修复(冠修复体、桩核、固定局部义齿、可摘局部义齿及颌面赝复体)、口腔种植(口腔种植体、愈合基台和骨支架)、口腔颌面外科(颌骨和颞下颌关节重建)及牙周病学(牙周夹板和牙合垫)等多个领域的应用现状、存在的不足和面临的挑战。重点讨论了通过 PEEK 改性以提升其在临床应用中的性能和适用性的多种方法。最后对 PEEK 在口腔医学领域的未来应用前景和发展方向进行了展望。

关键词: 聚醚醚酮; 口腔医学; 口腔材料; 口腔正畸; 口腔修复; 口腔种植

中图分类号: R318.08 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)03-0179-07

Application status and prospect of PEEK oral biomaterials

ZHANG Yongheng¹, LIU Lyuhua², LI Mengqi¹, LIU Ying¹, ZHANG Lifang³, XIONG Chengdong³, ZHENG Yanyan²

(1. School of Stomatology, North Sichuan Medical College, Nanchong 637000, China; 2. School of Pharmacy, North Sichuan Medical College,

Nanchong 637000, China; 3. Chengdu Institute of Organic Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: The advantages and shortcomings of traditional dental biomaterials such as metals and ceramics, and the remarkable advantages of polyetheretherketone (PEEK) which possess excellent physical and chemical properties, good biocompatibility and aesthetics in the field of stomatology were introduced. The application status, disadvantages and challenges of PEEK in orthodontics (orthodontic archwires, early appliances, and fixed lingual retainer), prosthodontics (crown restoration, post-core, fixed partial denture, removable partial denture, and maxillofacial prosthesis), oral implantology (dental implant, healing abutment, and bone scaffold), oral and maxillofacial surgery (jaw reconstruction, temporomandibular joint reconstruction), and periodontics (periodontal splint and occlusal splint) were reviewed. Various methods of PEEK modification to improve its performance and applicability in clinical applications were discussed. Finally, the future application prospect and development direction of PEEK in the field of stomatology were also prospected.

Keywords: polyetheretherketone; stomatology; dental materials; orthodontics; prosthodontics; oral implantology

钛合金、陶瓷等传统口腔生物材料虽然应用广泛,但由于其各自固有的缺陷,例如钛合金可能引起过敏反应,陶瓷的抗断裂性能较低等,它们无法完全满足日益增长且多样化的市场需求。因此,新型口腔生物材料的研发和应用正受到越来越多的关注和重视。

聚醚醚酮(PEEK)具有耐磨损、耐高温、耐化学腐蚀性、良好的生物相容性与力学性能以及易于切削加工等众多优异的性能^[1],在骨科、整形外科、脊柱及心血管等领域备受关

注^[2]。众多优异的性能使 PEEK 在口腔医学领域亦具有广阔的应用前景。首先,PEEK 具有与牙本质相近的弹性模量,可明显降低“应力屏蔽”效应^[3],而且其弯曲强度、耐磨性能与金属合金的性能相当^[4]。其次,PEEK 具有较高的弯曲强度和抗蠕变性^[5],使其可以用于制作多种口腔修复体以及正畸矫治器,满足多种临床应用的要求。另外,PEEK 具有射线可透性,CT 或核磁共振等成像中不产生伪影,在修复过程中易于观察种植体周围的骨再生及愈合情况^[6]。最后,

基金项目: 四川省科技厅项目(2022YFSY0043, 2022NSFSC1537),南充市科技局项目(22SXCXTD0001)

通信作者: 郑延延, 博士, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事骨科/口腔植入材料表/界面功能构建及药物控释与骨组织工程等方面的研究

收稿日期: 2024-01-29

引用格式: 张永恒, 刘吕花, 李梦琦, 等. PEEK 口腔生物材料的应用现状及前景[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(3): 179-185.

ZHANG Yongheng, LIU Lyuhua, LI Mengqi, et al. Application status and prospect of PEEK oral biomaterials[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(3): 179-185.

PEEK较金属材料更加美观,并且没有金属味道,使其制作的口腔修复体与各种正畸产品更易被患者接受^[7]。笔者从PEEK在口腔正畸、口腔修复、口腔种植、口腔颌面外科及牙周治疗等方面对其在口腔医学领域的应用现状进行综述,并对其发展方向进行了展望。

1 PEEK在口腔正畸领域的应用

1.1 PEEK作为正畸弓丝的临床应用

牙齿排齐的效率很大程度上取决于正畸弓丝的选择^[8]。正畸弓丝的理想特性包括美观、具有回弹性和刚性、易于塑形、匹配的弹性模量、生物相容性高和低摩擦力等。目前,临床上大多数正畸弓丝都是采用合金制成。但是金属合金弓丝存在美观性差和金属过敏等缺点,并且在口腔环境中,受温度、pH值等的影响,金属合金弓丝的力学性能会受到不同程度的影响^[9]。因此,非金属弓丝成为口腔正畸的更佳选择。

PEEK优异的力学性能及美学性能,使得有美学需求的患者更易于接受治疗,其作为正畸弓丝的一种替代材料已在正畸领域引起人们的关注^[10]。PEEK还可以作为镍-钛合金弓丝的涂层,从而提高镍-钛合金的耐蚀性和力学性能^[11]。根据研究结果,正畸过程中产生的摩擦力占矫治力的50%~60%。因此,具有低摩擦力的正畸弓丝能够保护牙齿和周围组织的健康,以实现牙齿与周围组织的力学平衡^[12-13]。Wu等^[14]使用微型摩擦测试仪和扫描电子显微镜等装置评价了PEEK与不锈钢丝的摩擦性能。结果显示PEEK具有低摩擦系数、光滑表面和良好的力学性能,符合临床正畸要求,被认为是一种具有低摩擦和美学性能的潜在口腔正畸材料。

尽管PEEK弓丝具有以上诸多优势,但仍具有口腔环境中的长期力学性能的数据不足,PEEK涂层稳定性较差等缺陷^[15]。在咀嚼、刷牙等口腔日常活动中时,其负载偏转特性和静摩擦力可能受到影响。因此,PEEK无论是作为弓丝主体材料还是作为涂层材料,其实际应用性能还需要在模拟临床条件下进行进一步的研究。

1.2 PEEK作为早期矫治器械的临床应用

儿童错牙合畸形早期矫治的方法多样,所需器械种类繁多,其中包括活动矫治器、间隙维持器、固定矫治器、隐形矫治器、肌肉和功能辅助训练器等。无论是何种矫治器械,都要求其基体材料必须具备尺寸稳定、硬度合适、耐磨性好、水溶性低、生物相容性好等特点。

PEEK既具有优异的力学性能、良好的尺寸稳定性以及生物相容性,又能避免金属美观性差、过敏等缺陷,被认为是制作早期矫治器械的理想材料。Beretta等^[16]评估了一名使用PEEK上颌扩弓器的5岁镍过敏儿童的临床矫治效果。经过长期的随访观察,该儿童不仅未出现任何不良反应,并且上腭成功扩张到理想宽度。Ierardo等^[17]通过数字化技术制作出舌弓、带环和腭板等多种PEEK间隙保持器,并运用于多名8~10岁的儿童患者。随访观察表明,PEEK间隙保持器具有美观、佩戴舒适、患者依从性好等优点。

尽管PEEK作为早期矫治器械显示出良好的应用前景,但在实际应用中还存在三个主要问题:第一,美观问题。尽管PEEK较金属更加美观,但其本身的颜色与天然牙釉质仍然不一致,需要通过表面处理和材料改性来进一步改进;第二,强度问题。尽管PEEK的强度能够满足临床需求,但其耐磨性、硬度以及与天然牙齿的匹配度仍需进一步研究和改进;第三,与牙体组织黏结强度弱。

1.3 PEEK作为舌侧固定保持器(FLR)的临床应用

固位是正畸治疗中不可或缺的一个步骤,它涉及通过佩戴正畸保持器将牙齿保持在治疗后的位置。FLR由Knierim R W于1973年首次提出,是正畸医生最常用的实现固位的方法^[18]。PEEK由于其适当的特性而被认为是一种很有前景的FLR材料。为了评估使用PEEK作为FLR的可行性并确定其最佳形状,Win等^[18]使用三维有限元分析和三点弯曲测试了不同厚度、宽度和横截面形状(矩形、椭圆和半椭圆)对PEEK力学性能的影响,最后证明在半椭圆形的横截面形状,厚宽比为1.0:1.5的情况下PEEK制作的正畸FLR最适合于临床使用。Aboulazm等^[19]为了评估基于数字口腔扫描和PEEK材料制作矫治器的舌侧固定固位体数字化工作流程的可行性,使用实验室Dentsply Sirona软件设计双侧侧切牙缺失的全虚拟舌侧固位体,并采用PEEK材料进行制作,将其应用于下颌前牙舌面,最终该矫治器在临床上满足了美观与功能的要求,维持了良好的正畸效果。然而,该研究未评价PEEK与树脂改性玻璃离子水门汀之间的长期黏接性能。

2 PEEK在口腔修复领域的应用

2.1 PEEK作为牙冠的临床应用

牙冠修复材料需要具备美观、冠边缘贴合良好、内冠拟合度高和耐磨性强等特点。PEEK的颜色稳定性强,具有与牙本质相似的弹性模量和拉伸性能,并且其生物惰性与良好的抛光性降低了菌斑的黏附,是一种理想的冠修复材料^[20-21]。

Attia等^[22]通过显微CT分析铣削和压制PEEK单冠的边缘和内部密合度,发现铣削PEEK牙冠的边缘和内部密合度明显优于压制牙冠。且CAD/CAM和热压技术生产的PEEK牙冠均具有临床上可接受的边缘和内部密合度。在耐磨性方面,Arieira等^[23]比较了316 L不锈钢和PEEK在相同试验条件下的磨损度,结果表明,PEEK表现出明显较低的摩擦系数和磨损体积。且另有研究指出,相较于氧化锆牙冠,PEEK冠的表面磨损最小,而且其能够通过塑性形变更好地进行应力调节^[24]。此外,由于PEEK具有射线可透性,Nishio等^[25]实验发现被PEEK冠包裹的牙齿在X射线下仍可被定位与检测是否有继发龋的发生,这在临床上具有重大意义。

尽管PEEK作为牙冠修复材料具有诸多优势,但Aldhwayhi等^[26]研究发现,虽然PEEK冠在静态抗压强度测试与动态疲劳测试中,较二硅酸锂牙冠具有更大的断裂阻力,但是在断口立体显微镜和3D数字减影分析中,PEEK冠在1 250 000个闭塞载荷周期内具有一些塑性变形,因此需要

进一步的临床研究来确保PEEK冠的力学性能。

2.2 PEEK作为桩核冠的临床应用

桩核冠是利用桩插入根管内以获得固位的一种全冠修复体。目前在临床上最常用的根管桩材料为玻璃纤维桩,其具有良好的美学性能、生物相容性及力学性能,而且所采用的全酸蚀黏接固位方式快速便捷,但在临床实际使用中发现纤维桩仍存在弹性模量与牙本质不匹配,在黏接界面造成应力集中等问题^[27]。

PEEK具有与牙本质相近的弹性模量,力学性能优良,是一种比较理想的桩道材料。Özarslan等^[28]比较了上颌中切牙用三种不同桩核系统(玻璃纤维桩、定制PEEK桩、定制氧化锆桩)修复后的抗折力和断裂模式,证明了PEEK桩核在前部区域显示出足够的断裂强度,并且PEEK桩核在较低的应力下对断裂表现出更多的修复潜力。Yildiz等^[29]采用三维有限元分析,以评估定制PEEK桩核与传统桩核修复上颌切牙的应力水平,实验结果发现PEEK桩相较于氧化锆桩和金属桩具有较低的弹性模量与较高的泊松比,这使得PEEK桩在口腔中表现出更低的应力值,从而有效降低了牙齿折裂的风险。Nahar等^[30]与Ibrahim等^[31]利用三维有限元分析后发现,PEEK桩与玻璃纤维桩的应力分布虽然都集中在根尖区域,但PEEK桩的应力集中区要少于玻璃纤维桩,并且分布更为均匀,所以PEEK桩相较于玻璃纤维桩的抗折性更强。

尽管以上研究表明PEEK桩在力学性能方面优于传统根管桩,但如何增强PEEK桩与根管内牙本质的黏接强度仍是目前需要解决的一个难题。Kole等^[32]通过体外研究评估不同直径和长度的多种桩核(PEEK桩、玻璃纤维桩、氧化锆桩、聚醚酮酮桩)在咀嚼模拟器作用下的黏接强度的差异,发现在经过周期负荷之后,PEEK桩在所有测试样品中显示出最弱的黏接强度。但学者们发现,在PEEK表面经过适当的处理^[33]以及选用合适的黏接剂^[34]可以改善PEEK桩与牙本质的黏接强度。

2.3 PEEK作为固定局部义齿的临床应用

在目前的临床应用中,固定局部义齿支架材料多以金属合金与陶瓷为主。然而金属合金的生物相容性较差,具有过敏和易腐蚀等缺陷。陶瓷的质量较大,增加了患者佩戴时的不适感。另一方面,陶瓷较大的脆性使其在遭受强力冲击时易于断裂。这些因素限制了这两种材料在临床上的应用效果。相比之下,PEEK作为一种新型材料,在固定局部义齿支架的应用中显示出显著优势。

首先,PEEK具有更好的生物相容性,减少了过敏反应的风险。其次,尽管PEEK的弹性模量和硬度低于金属合金,但它展现出优异的耐磨性^[35],并且在力学性能上与牙体组织更为接近,从而更好地模拟自然牙齿的功能^[36]。研究发现,PEEK制作的后牙三单位种植固定桥修复体的平均咀嚼载荷为(1 430.47±262.21)N,与正常后牙区最大咀嚼力880 N相比,PEEK固定桥修复体能满足磨牙区正常的咬合力^[37]。而且PEEK材料也适用于牙体状况不佳时的修复体制作。

Zoidis等^[38]在PEEK中添加20%陶瓷填料,制备出了高弹性与高硬度的高能量的聚合物。将高能量的聚合物作为基底材料,上面覆盖复合树脂,由此制作的髓腔固位冠修复体不仅可以缓冲咬合力,还可以较好地保护剩余牙体组织。因此,PEEK作为固定局部义齿支架材料,相较于传统的金属合金和陶瓷,具有明显的优势。

2.4 PEEK作为可摘局部义齿(RPD)的临床应用

传统RPD支架通常以钴铬合金为主要材料,其在临床应用中存在过敏反应、美观性差、口内有微电流等许多问题。而PEEK较金属美观性好且密度低,能够提高患者的佩戴舒适性,可以避免传统RPD金属基托的佩戴不适和过敏风险^[39]。此外,研究表明PEEK作为义齿基托材料还具有优越的力学性能,在受到咬合应力时无断裂倾向且能获得较好的固位力^[40]。

Vaddamanu等^[41]检测了PEEK作为RPD卡环的固位力和固位面变形程度,并与钴-铬卡环进行比较,结果显示PEEK卡环固位面的变形低于Co-Cr卡环,且固位力接近Co-Cr卡环,提示PEEK卡环可作为RPD支架的一种美学卡环选择。Hussein等^[42]通过非线性三维有限元分析,评估用PEEK和石墨烯改性聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)制造的套筒冠RPD支架的应力和变形,以及对下层口腔黏膜的应力。最终实验结果表明,石墨烯修饰的PMMA模型中的套筒冠及其框架的应力显著高于PEEK模型,两种模型对黏膜的应力无显著差异。在义齿美观方面,陆伟等^[43]在原有3D打印PEEK义齿的基础上对颜色进行了改进,使其更加接近口腔组织的颜色,并初步验证了该修复体在临床应用中的可行性,同时实现RPD不同位置的双色打印,进一步加强了PEEK作为口腔义齿的美观性。

2.5 PEEK作为颌面赈复体的临床应用

颌面赈复体是指利用人工材料制作并用以修复颌面部缺损的修复体。颌面赈复体应具有耐生物老化性与生物相容性好的特点。PEEK具有非常稳定的化学性能,除了浓硫酸以外,它对其余所有化学品都具有耐受性^[44]。将PEEK长期暴露在高温的水环境中,仍不会溶解或产生化学损害^[45]。

Hamsho等^[46]报道了一例因战争导致上颌骨缺损的患者,医疗团队用3D打印的PEEK颌面赈复体对他的上颌骨进行重建,恢复了患者可接受的功能和美观,并且在随后13个月的随访中,未出现任何技术或生物并发症,证明了PEEK颌面赈复体在修复严重颌面畸形方面具有可靠性。Costa-Palau^[47]以及陆伟等^[48]均利用PEEK制作了多种个性化的上颌骨赈复体并用于临床病例观察,随访的结果显示PEEK制作的颌面赈复体具有美观性好、固位力强和佩戴轻巧等优点,但仍存在远期临床效果不明确和制作成本昂贵等不足。

3 PEEK在口腔种植领域的应用

3.1 PEEK作为口腔种植体的临床应用

钛及钛合金一直是最广泛使用的口腔种植体材料,但其

会因为与口腔黏膜接触,金属腐蚀或磨损及其内存在的杂质引起机体过敏反应^[49]。而且钛及钛合金的弹性模量远高于骨及牙本质,易造成种植体周围骨萎缩和骨吸收,甚至导致种植失败。而与钛及钛合金相比,PEEK 优异的生物相容性与力学性能以及与骨、牙本质相似的弹性模量使其有望用于制作口腔种植体^[50-51]。然而PEEK 固有的生物惰性导致其成骨活性较差,不能与其周围骨组织形成稳固的骨整合,限制了其作为种植体的应用。近年来,研究人员试图通过表面修饰赋予PEEK 优异的成骨活性,使其在体内呈现出更好的骨整合能力^[52]。

在PEEK 表面引入磷灰石、金属离子和药物等促成骨物质可使其表现出优异的成骨能力,从而促进骨整合。Xin 等^[53]通过构建模仿天然骨骼中矿化胶原纤维束结构和成分的仿生支架,开发了一种新型的PEEK 表面改性技术。这种支架通过硫化和磁控溅射沉积无定形羟基磷灰石(HA)的两步过程完成。体外体内实验都证明了改性后的PEEK 表面更好地促进了细胞黏附、成骨分化和骨整合。在引入金属离子方面,Hu 等^[54]利用聚多巴胺(PDA)将 Sr^{2+} 修饰到PEEK 表面,修饰后的PEEK 兼具骨生成、血管生成和抗炎三重功能。Lyu 等^[55]同样利用PDA 在PEEK 表面负载 Cu^{2+} 。改性后的表面能激活免疫调节作用,进而增强PEEK 的骨整合、抗菌与成血管能力。近年来,研究人员尝试将具有不同生物学效应的不同种金属离子同时引入PEEK 表面,赋予其多重功能性。Wang 等^[56]利用PDA 将具有成骨活性的 Mn^{2+} 和抗菌活性的 Cu^{2+} 同时负载在PEEK 表面,开发一种具有抗菌和促进骨生长双重功能的新型PEEK 种植体。在引入成骨药物方面,该课题组利用溶剂挥发法在PEEK 表面制备了聚乳酸-羟基乙酸共聚物(PLGA)与负载阿仑膦酸钠的纳米羟基磷灰石(nHA/ALN)的可降解杂化涂层(PLGA@nHA-ALN)^[57]。研究结果显示,该杂化涂层不仅能实现抗骨质疏松药物ALN 的长期持续释放,而且能刺激骨髓间充质干细胞的增殖与成骨分化。

近年来,PEEK 的表面改性趋向于多功能化与程序化。Wu 等^[58]通过PDA 将Cu-Sr 双层生物活性玻璃纳米粒子(CS-BGNs)修饰到PEEK 表面,改性的表面可以顺序释放 Cu^{2+} (早期快速释放)和 Sr^{2+} (后期缓慢释放)。这种有序的释放模式能调节巨噬细胞从促炎的M1 表型转化为抗炎的M2 表型。这种时空的免疫调节能力加上 Cu^{2+} 和 Sr^{2+} 的直接作用,不仅有利于早期抗菌和组织愈合过程,而且能促进长期骨整合过程。在前期研究的基础上^[57],该课题组进一步利用等离子体浸没离子注入技术处理PLGA@nHA-ALN 杂化涂层表面并接枝了免疫调节分子白细胞介素-4(IL-4),从而设计了一种增强PEEK 在骨质疏松病理条件下骨整合能力的程序化表面^[59]。该程序表面早期快速释放的IL-4 能调节巨噬细胞由促炎的M1 表型及时转化为促愈合的M2 表型,及时清退炎症并营造出有益的骨免疫调节微环境。程序化表面随后长期持续释放的ALN 和 Ca^{2+} 能不断地修复骨稳态,刺激骨再

生,最终增强骨整合。

3.2 PEEK 作为口腔种植体基台的临床应用

随着种植义齿在临床上的普及,医师与病人在对其功能满足的同时,对美观的要求也日益提高。目前,钛及锆作为种植基台最常见的材料,具有较好的临床疗效,但在修复过程中仍然会产生一些美学与力学方面的问题。首先,金属基台不适用于薄龈生物型患者,否则会出现金属颜色暴露的问题。研究表明,至少3 mm 厚度的牙龈软组织才能在视觉上遮盖住金属基台的颜色^[60]。第二,金属基台在口腔环境中长期遭受唾液浸泡,会导致牙龈出现龈染的现象^[61]。第三,金属基台弹性模量远高于牙体组织,容易将较大的咀嚼力转移至种植体与颌骨,可能会出现应力集中从而导致骨整合较差或牙槽骨吸收^[62]。

PEEK 具有强度高、密度低和与骨骼的弹性模量相似的优点,美观性也优于金属合金,可作为金属的替代材料用于口腔种植体基台。Kaleli 等^[63]评价了3 种树脂基陶瓷冠修复材料搭配两种定制基台(PEEK 基台与氧化锆基台)在种植体和周围骨的应力分布情况。结果表明,各种组合在种植体和周围骨组织方面具有相似的应力分布。Ayyadanveetil 等^[64]为了验证PEEK 基台是否与氧化锆基台具有相似的美学和生物学性能以及临床使用寿命,将40 名20~50 岁的患者随机分为PEEK 基台组和氧化锆基台组,其他实验条件完全相同,在1,3,5 年对基牙的牙周袋深度、菌斑控制和探诊出血等情况进行随访评估。研究结果表明在5 年的评估中,氧化锆和PEEK 基台表现出相同的临床使用寿命和相似的生物学与美学效果。Hahnel 等^[60]分析了钛、氧化锆和PEEK 种植体基台材料中的生物膜形成,发现PEEK 表面上的生物膜形成低于钛和氧化锆。

3.3 PEEK 作为骨增量支架的临床应用

种植手术的开展具有严格的适应症与禁忌症,其中牙槽骨骨量不足便是种植治疗常见的难点之一。由于创伤、肿瘤、牙周疾病、长期牙齿缺失和系统性疾病等导致的牙槽骨缺损需要在种植手术之前或手术中进行骨增量手术。在骨增量手术中,维持骨组织的再生空间稳定性十分关键^[65]。支架的使用可以为自体骨或异体骨等骨移植材料在牙槽骨缺损部位提供支持,并且构建出合适的成骨环境^[66]。

相比于常用的钛网支架,PEEK 因为其优异的力学性能、与皮质骨相近的弹性模量等优势已成功地应用于牙槽骨修复手术中^[67]。Li 等^[68]使用CAD/CAM 设计制造钛支架与PEEK 支架,通过三点弯曲试验、有限元分析以及体内实验比较两者的生物力学特性,证明了虽然PEEK 支架生物力学强度较低,但是具有与钛支架相当的空间维持和成骨性能。Mounir 等^[69]也使用预弯钛网和PEEK 网应用于上颌牙槽嵴垂直和水平缺损的患者,发现两者具有相似的临床效果。但是,由于PEEK 的机械强度低于钛网,加上加工技术的限制,上述两位学者使用的PEEK 网的厚度达到了2 mm,导致其相较于钛网占据了更多的成骨空间。此外,使用PEEK 支架

运用于骨增量手术的临床样本仍较少,还需要更多的临床实验数据来证明其适用性与优越性。

4 PEEK在口腔颌面外科领域的应用

4.1 PEEK在颌骨重建中的临床应用

由于创伤、感染、手术等原因造成的颌骨缺损目前仍是口腔颌面外科面临的一大挑战,它不仅会导致患者面部美学形态异常,影响吞咽、咀嚼、言语及发音等功能,还会给患者造成严重的精神伤害。钛及钛合金因其良好的力学性能及生物相容性,已成为临床上广泛应用的颌骨缺损修复材料。但是,钛及钛合金在临床使用中存在应力屏蔽效应和CT扫描下容易产生伪影等缺陷。另外,由于下颌面部及颅骨的解剖结构复杂,对其功能及美观要求较高,故以钛、异丁烯酸甲酯为代表的骨缺损修复材料并不适用^[70]。

Li等^[71]评估了6名使用定制3D打印PEEK植入物进行下颌骨重建的患者的临床效果,经过术后10~24个月的随访观察,5名患者没有任何术后并发症,并对美学性能和功能结果感到满意,1名患者在术后10个月因PEEK植入体暴露而不得不取出。为了增强颌骨的骨再生功能,改善PEEK植入物植入后的力学和生物学效果,研究人员还尝试对PEEK进行一系列的结构优化或表面改性等处理。Chen等^[72]使用3D打印技术制备了PEEK、HA支架用于下颌骨重建,研究发现低结晶度的PEEK、20%HA不仅达到了所需的强度与弹性,能够很好地承受骨缺损区的局部复合力,而且体外能促进骨髓间充质干细胞的增殖、迁移和成骨分化,体内能刺激骨再生并形成牢固的骨整合。

4.2 PEEK在颞下颌关节重建中的临床应用

颞下颌关节是连接颞骨和下颌骨的关节,它在咀嚼和开口时起着重要的作用。然而,颞下颌关节疾病如关节紊乱、关节盘移位和骨性关节炎等问题,会导致疼痛、咀嚼困难和颞下颌关节功能障碍等临床症状,严重影响患者的生活质量^[73]。传统的颞下颌关节重建手术通常采用金属或者陶瓷等材料进行关节置换,然而这些材料存在着金属过敏反应、材料断裂等问题。因此,寻找一种更加适合颞下颌关节重建的材料显得尤为重要。

PEEK具有轻质、高强度、耐磨损等特点,能够更好地模拟人体组织的生理特性,减少对周围组织的损伤,降低手术风险。此外,PEEK材料还具有好的耐腐蚀性和抗疲劳性能,能够在体内长期稳定地发挥作用。因此PEEK在颞下颌关节重建中的应用备受关注。Guo等^[74]利用三维有限元分析和力学测试评估了一种定制的3D打印PEEK髁突假体的生物力学行为。实验结果表明定制的PEEK髁突假体展现了均匀的应力分布和良好的力学性能,并且假体与螺丝在模拟临床实际情况下所受到的应力值远低于材料本身的屈服强度,为使用PEEK作为颞下颌关节重建材料提供了理论支持。林凯等^[75]使用3D打印硫酸钡-聚醚醚酮(Ba-PEEK)复合材料制作的颞下颌关节髁突假体为比格犬进行体内关节重建,随后观察各组动物进食速率及开口度,通过CT和组织学

观察Ba-PEEK假体固位情况和植入侧周围组织状态。最后结果显示实验组和对照组比格犬的进食速率和开口度没有明显差异,假体固位良好,没有出现松动移位与断裂的现象,证明了Ba-PEEK复合材料的下颌髁突假体具有良好的安全性。尽管目前的研究均表明PEEK在颞下颌关节重建中是一种具有前景的生物医用材料,但是实际应用中仍然存在不少问题,例如PEEK具有X线透射性,假体植入后的影像学观察较为困难等,未来对于PEEK材料能否应用于人体以解决患者病痛仍需要进一步实验研究。

5 PEEK在牙周领域的应用

5.1 PEEK作为牙周夹板的临床应用

牙周病是一种很常见的口腔疾病,患者的牙周支持组织发生慢性的病变,主要以牙龈炎症为主,如果病情发展会影响到更深层次的牙周组织,很有可能会导致牙齿脱落或丢失。牙周夹板是目前治疗松动牙的主要措施,它能使松动牙与周围稳定、健康的相邻牙连成整体,从而达到应力再分布,减少牙周组织损害的目的^[76]。纤维增强复合材料因其高强度、柔韧性、黏接性、生物相容性和美观性而被长期作为牙周夹板的主要材料。然而,纤维增强牙周夹板的使用需要长时间的椅旁操作,并且在长期的使用过程中存在变色和移位的风险。此外,纤维增强复合树脂容易导致菌斑形成,对牙周维护产生不利影响^[77]。

由于PEEK具有优异的物理和生物学特性以及较低的菌斑亲和力^[20],因此PEEK在治疗牙周炎与制作牙周夹板方面较纤维增强复合材料以及金属材料更具优势。Liu等^[78]使用计算机模拟咀嚼,评估了不同材料(PEEK、纤维增强复合材料、钛金属)制成的牙周夹板对受损牙周组织和黏固层应力分布的影响,用ABAQUS软件对von Mises应力和最大主应力进行分析,最终结果显示四组夹板在牙周组织中的应力分布相似。PEEK组夹板上的应力水平最低,最高应力水平转移到骨水泥层,应力集中主要表现在承重区附近的连接件上。此外,国内也有学者通过临床实验对PEEK制作的牙周夹板进行了长期的随访观察。孙方方等^[79]在下前牙区松牙固定中,在没有进行牙体预备的情况下,应用数字化技术制作出下前牙区牙周夹板,在长期的随访观察中,PEEK制作的牙周夹板具有良好的临床疗效。

5.2 PEEK作为牙合垫的临床应用

牙合垫是一种覆盖在天然牙齿表面,不改变牙齿本身的位置和排列方式,但可以使上下牙列咬合接触发生局部或整体改变。牙合垫可用于牙周病患者的咬合控制治疗。牙合垫还可通过消除牙合创伤,从而改善及治疗颞下颌紊乱病及其相关颌面部神经肌肉功能紊乱及疼痛等相关牙周炎导致的并发症。传统的牙合垫制作材料是丙烯酸树脂,虽然其在牙合垫的制作中已有百余年的历史,但过敏、易老化、耐磨性差以及使用寿命短是丙烯酸树脂在临床应用中最大的缺点。

国内外多项体外实验与临床实验表明PEEK是一种非常有潜力的牙合垫制作材料。Borg等^[80]通过体外咀嚼模拟

试验评估聚酰胺、丙烯酸树脂和PEEK对牙釉质磨损的差异。他们使用双轴咀嚼模拟器对3组标本进行体外磨损,然后使用非接触式3D光学轮廓仪测量3种牙合垫材料的釉质表面粗糙度,结果显示聚酰胺和PEEK组的釉质表面均显现出光滑的纹理,而丙烯酸树脂引起的牙釉质磨损最大。王时敏等^[8]通过临床实验更加证明了PEEK作为牙合垫制作材料的可行性。他们运用随机对照试验方法,将24名患者进行分组,比较了传统树脂牙合垫与PEEK牙合垫的治疗效果,最终实验表明在固位效果相似的情况下,PEEK牙合垫美观性与舒适性更强,并且较传统树脂牙合垫更能够精准地控制咬合。

6 结语

PEEK众多优异的性能,使其在口腔医学领域获得了广泛的应用。然而,PEEK在实际临床应用中仍面临着长期临床疗效不明确、生物惰性、美观性不高、与牙体组织黏接强度较低等挑战。未来PEEK在口腔医学领域应用的研究方向应该集中在寻求具有长期稳定性与安全性的改性方法使PEEK既能保持或提升其力学性能,又能具备抗菌、骨免疫调节、成骨、成血管等多重生物学功能。并且应考虑PEEK在口腔内不同情况与不同阶段时应该具备的特性,使其能够根据需求作出程序化改变。另外,PEEK在口腔医学领域中的应用需要在口腔环境和临床实践中进一步研究,以确定其可行性和长期性能。这些研究将有助于推动PEEK在口腔医疗领域更深入和更广阔的应用,从而为口腔临床治疗带来更多的改进和突破。

参考文献

- [1] QIN L, et al. *Materials*, 2021, 14(2). DOI: 10.3390/ma14020408.
- [2] FEERICK E M, et al. *Medical Engineering & Physics*, 2013, 35(6): 712–722.
- [3] 王勇. 口腔材料器械杂志, 2023, 32(3):153–157.
WANG Yong. *Chinese Journal of Dental Materials and Devices*, 2023, 32(3):153–157.
- [4] ALEXAKOU E, et al. *The European Journal of Prosthodontics and Restorative Dentistry*, 2019, 27(3):113–121.
- [5] MAEKAWA M, et al. *Dental Materials Journal*, 2015, 34(1): 114–119.
- [6] 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.
- [7] STAWARCZYK B, et al. *Dental Materials Journal*, 2013, 32(3): 441–448.
- [8] TADA Y, et al. *Materials*, 2017, 10(8). DOI: 10.3390/ma10080914.
- [9] 李豆豆,等. 临床口腔医学杂志, 2019, 35(3):184–186.
LI Doudou, et al. *Journal of Clinical Stomatology*, 2019, 35(3): 184–186.
- [10] 张伟芳,等. 工程塑料应用, 2022, 50(11):163–167.
ZHANG Weifang, et al. *Engineering Plastics Application*, 2022, 50(11):163–167.
- [11] ROKAYA D, et al. *Journal of Advanced Research*, 2018, 14: 25–34.
- [12] 刘刚,等. 摩擦学学报, 2018, 38(2):238–246.
LIU Gang, et al. *Tribology*, 2018, 38(2):238–246.
- [13] LIU Z, et al. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 2020, 58(5):1 091–1 097.
- [14] WU J, et al. *Technol Health Care*, 2024, 32(1):269–278.
- [15] DA SILVA D L, et al. *The Angle Orthodontist*, 2013, 83(6):994–1 001.
- [16] BERETTA M, et al. *European Journal of Paediatric Dentistry*, 2021, 22(2):151–154.
- [17] IERARDO G, et al. *Journal of Clinical and Experimental Dentistry*, 2017, 9(10):e1271–e1275.
- [18] WIN P P, et al. *Journal of Dental Sciences*, 2023, 18(4):1 804–1 811.
- [19] ABOULAZM K, et al. *Journal of Clinical and Experimental Dentistry*, 2021, 13(6):e549–e551.
- [20] HAHNEL S, et al. *Clinical Oral Implants Research*, 2015, 26(11): 1 297–1 301.
- [21] WIMMER T, et al. *Dental Materials: Official Publication of the Academy of Dental Materials*, 2016, 32(6):e127–e136.
- [22] ATTIA M A, et al. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 2023, 129(6):906e1–906e10.
- [23] ARIEIRA A, et al. *Materials*, 2023, 16(6). DOI: 10.3390/ma16062420.
- [24] ABHAY S S, et al. *Polymers*, 2021, 13(21). DOI: 10.3390/polym13213761.
- [25] NISHIO F, et al. *Journal of Oral Biosciences*, 2023, 65(3): 253–258.
- [26] ALDHUWAYHI S, et al. *Polymers*, 2022, 14(5). DOI: 10.3390/polym14051001.
- [27] FRYDMAN G, et al. *Refuat Hapeh Vehashinayim(1993)*, 2013, 30(3):6–60.
- [28] OZARSLAN M, et al. *Int J Clin Pract*, 2021, 75(9). DOI: 10.1111/ijcp.14440.
- [29] YILDIZ S, et al. *Med Sci Monit*, 2023, 29. DOI: 10.12659/MSM.940887.
- [30] NAHAR R, et al. *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*, 2020, 10(4):719–726.
- [31] IBRAHIM R O, et al. *Dental Materials Journal*, 2021, 40(2): 508–518.
- [32] KOLE S, et al. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2023, 142. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2023.105804.
- [33] ATTIA M A, et al. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 2022, 127(6):866–874.
- [34] AL DEEB L, et al. *European Review for Medical and Pharmacological Sciences*, 2023, 27(20): 9 639–9 647.
- [35] ZOK F W, et al. *Acta Materialia*, 2007, 55(18):6 365–6 371.
- [36] SINHA N, et al. *Journal of Indian Prosthodontic Society*, 2017, 17

- (1):80–83.
- [37] NAZARI V, et al. *Journal of Dentistry*(Tehran, Iran), 2016, 13(6): 400–406.
- [38] ZOIDIS P, et al. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 2017, 117(3): 335–339.
- [39] ZOIDIS P, et al. *Journal of Prosthodontics: Official Journal of the American College of Prosthodontists*, 2016, 25(7):580–584.
- [40] 李欣欣,等. *北京大学学报:医学版*, 2019, 51(2):335–339.
LI Xinxin, et al. *Journal of Peking University: Health Sciences*, 2019, 51(2):335–339.
- [41] VADDAMANU S K, et al. *Polymers*, 2023, 15(4): 956. DOI: 10.3390/polym15040956.
- [42] HUSSEIN M O. *Int J Prosthodont*, 2022, 35(6):793–800.
- [43] 陆伟,等. *实用口腔医学杂志*, 2020, 36(03): 548–552.
LU Wei, et al. *Journal of Practical Stomatology*, 2020, 36(3): 548–552.
- [44] 刘吕花,等. *工程塑料应用*, 2021, 49(11):14–20.
LIU Lyuhua, et al. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49(11): 14–20.
- [45] KURTZ S M, et al. *Biomaterials*, 2007, 28(32):4 845–4 869.
- [46] HAMSHO R, et al. *Plast Reconstr Surg Glob Open*, 2022, 10(8). DOI:10.1097/GOX.0000000000004473.
- [47] COSTA-PALAU S, et al. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 2014, 112(3):680–682.
- [48] 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.
- [49] 张静洁,等. *现代口腔医学杂志*, 2020, 34(6):367–370.
ZHANG Jingjie, et al. *Journal of Modern Stomatology*, 2020, 34 (6):367–370.
- [50] MISHRA S, et al. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, 2019, 21(1):208–222.
- [51] TEKIN S, et al. *Nigerian Journal of Clinical Practice*, 2019, 22(9): 1 252–1 258.
- [52] 陈井春雨,等. *实用口腔医学杂志*, 2021, 37(2): 259–262.
CHEN Jingchunyu, et al. *Journal of Practical Stomatology*, 2021, 37(2):259–262.
- [53] XIN H, et al. *Macromolecular Bioscience*, 2023, 23(4). DOI: 10.1002/mabi.202200436.
- [54] HU L, et al. *Biomater Adv*, 2022, 143. DOI: 10.1016/j. bioadv.2022.213160.
- [55] LYU Z C, et al. *Mater Design*, 2022, 222. DOI: 10.1016/j. matdes.2022.111069.
- [56] WANG L, et al. *Materials Today Advances*, 2021, 12. DOI: 10.1016/j.mtadv.2021.100162.
- [57] ZHENG Y, et al. *Materials Letters*, 2023, 331. DOI: 10.1016/j. matlet.2022.133515.
- [58] WU Y, et al. *Advanced Healthcare Materials*, 2023. DOI:10.1002/ adhm.202301772.
- [59] ZHENG Y, et al. *Bioactive Materials*, 2022, 14:364–376.
- [60] PITTA J, et al. *The International Journal of Prosthodontics*, 2020, 33(1):39–47.
- [61] THOMA D S, et al. *The International Journal of Periodontics & Restorative Dentistry*, 2016, 36(1):39–45.
- [62] ROSKIES M, et al. *Journal of Biomaterials Applications*, 2016, 31 (1):132–139.
- [63] KALELI N, et al. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 2018, 119 (3):437–445.
- [64] AYYADANVEETIL P, et al. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 2022, 128(6):1 275–1 281.
- [65] HASEGAWA H, et al. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 2019, 34(2): 411–422.
- [66] YI T, et al. *J Tissue Eng Regen Med*, 2020, 14(3):486–496.
- [67] 程熠,等. *中国口腔种植学杂志*, 2023, 28(2):114–118.
CHENG Yi, et al. *Chinese Journal of Oral Implantology*, 2023, 28 (2):114–118.
- [68] LI L, et al. *ACS Biomater Sci Eng*, 2022, 8(5):2 028–2 039.
- [69] MOUNIR M, et al. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, 2019, 21(5):960–967.
- [70] KELLY C P, et al. *The Journal of Craniofacial Surgery*, 2005, 16 (1):181–185.
- [71] LI Y, et al. *J Craniomaxillofac Surg*, 2022, 50(8):621–626.
- [72] CHEN J, et al. *Biomed Mater*, 2023, 18(6). DOI: 10.1088/1748– 605X/ad0476.
- [73] 刘艺,等. *中国实用口腔科杂志*, 2023, 16(4):407–411.
LIU Yi, et al. *Chinese Journal of Practical Stomatology*, 2023, 16 (4):407–411.
- [74] GUO F, et al. *Exp Ther Med*, 2021, 21(4). DOI: 10.3892/ etm.2021.9779.
- [75] 林凯,等. *实用口腔医学杂志*, 2021, 37(3):303–306.
LIN Kai, et al. *Journal of Practical Stomatology*, 2021, 37(3): 303–306.
- [76] 王晓雪,等. *医学理论与实践*, 2022, 35 (19):3 276–3 278.
WANG Xiaoxue, et al. *The Journal of Medical Theory and Prac- tice*, 2022, 35(19):3 276–3 278.
- [77] KUMBULOGLU O, et al. *Journal of Dentistry*, 2011, 39(12): 871–877.
- [78] LIU Y, et al. *Polymers*, 2022, 14(14). DOI: 10.3390/polym 14142835.
- [79] 孙方方,等. *实用口腔医学杂志*, 2019, 35(6):908–912.
SUN Fangfang, et al. *Journal of Practical Stomatology*, 2019, 35 (6):908–912.
- [80] BORG H, et al. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 2023, 130(5). DOI:10.1016/j.prosdent.2023.08.034.
- [81] 王时敏,等. *北京大学学报:医学版*, 2019, 51(1):105–110.
WANG Shimin, et al. *Journal of Peking University: Health Sciences*, 2019, 51(1):105–110.