·综述·

聚芳醚酮的口腔临床应用及其产品化研究进展

谷德奥 陆伟
南京大学医学院附属口腔医院,南京市口腔医院口腔修复科 210008
通信作者:陆伟,Email:ywc461@163.com

扫码阅读电子版

【摘要】 聚芳醚酮(PAEK)家族及其复合材料良好的化学稳定性、生物学性能和接近天然牙以及密质骨的机械性能,使其在口腔修复、种植、正畸及颌面外科等临床领域得到了广泛的应用。随着对该类材料的不断研究,已有部分产品可直接应用于临床治疗。本文就PAEK家族材料在口腔领域的临床应用及产品化作一综述。

【关键词】 聚芳醚酮; 聚醚醚酮; 聚醚酮酮; 口腔临床应用; 产品化/定制式产品

基金项目:江苏省科技计划(BE2019622);南京留学人员科技创新项目(2019169)

引用著录格式:谷德奥,陆伟. 聚芳醚酮的口腔临床应用及其产品化研究进展[J/CD]. 中华口腔医学研究杂志(电子版), 2020,14(4):265-270.

DOI:10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2020.04.012

Research progress on oral clinical application and stock devices of Polyaryletheretherketone

Gu Deao, Lu Wei
Department of Prosthodontics, Nanjing Stomatological Hospital, Medical School of Nanjing University, Nanjing 210008, China
Corresponding author: Lu Wei, Email: ywc461@163.com

【**Abstract**】 Polyaryletheretherketone (PAEK) family and its composites have excellent chemical stability, biological properties and its mechanicalproperties are very close to natural teeth and dense bone, which make it widely used in the field of oral prosthodontics, impantology, orthodontics, oral and maxillofacial surgery and so on. With the continuous research on this kind of materials, some products have been directly used in the clinical treatment. This article reviews the clinical application and custom devices of the family of PAEK materials in the field of stomatology.

【**Key words**】 Polyaryletheretherketone; Polyetheretherketone; Polyetherketoneketone; Oral Clinical Application; Stock/Custom Devices

Fund programs: Science and Technology Planning Project of Jiangsu Province (BE2019622); Science and Technology Innovation Project for Nanjing Overseas Students (2019169)

DOI:10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2020.04.012

聚芳醚酮(Polyaryletheretherketone,PAEK)聚合物类材料因具有良好的生物相容性,已越来越多地被用作骨科、创伤和脊柱等植入修复的生物材料。随着人们对PAEK材料研究的深入,PAEK的应用领域被不断地拓宽,近年来其在口腔领域的应用也越来越广泛。目前,用于口腔领域的PAEK家族的材料主要包括聚醚醚酮(Polyetheretherketone,PEEK)和聚醚酮酮(Polyetherketoneketone,PEKK)[1]。本文拟结合上述材料的基本特性对PAEK家族的两种常用材料在口腔领域的临床应用以及产品化研究进展作一综述,并对其临床应用前景加以展望。

一、聚醚醚酮/聚醚酮酮的基本性能

1. PEEK的基本性能:PEEK具有较高的力学强度,可以耐受高温和腐蚀,磨损率低,同时还有良好的加工性能,可与玻璃纤维、碳纤维等无机填料很好地复合以满足不同的临床需求。郭芳等[2]针对三维(three-dimension,3D)打印技术所制备的PEEK修复体进行研究分析可得,单轴拉伸实验结果显示,3D打印试件的拉伸模量约为3~4 GPa,拉伸强度为(95.55±1.85) MPa,而骨皮质、钛的拉伸模量分别为14 GPa、102~110 GPa,拉伸强度分别为104~121 MPa、954~976 MPa,由此可见,与传统的钛合金相比,PEEK的拉伸模量、拉伸强度与骨皮质更为接近;三点弯曲实验结果显示,3D打印试件的弯曲模量约为3.6 GPa,小于虽经孔隙化改良但弯曲模量仍超过12 GPa的骨科植入钛合金;单轴压缩实验结果显示,3D打印试件压缩强度为(142.42±7.53) MPa,与80~120 MPa的骨皮质压缩强度较为接近。陆伟等[3]研究观察了喷砂(50 μm Al_2O_3颗粒,0.25 MPa压力)、酸蚀(98%浓硫酸)等表面粗化处理方法对3D打印PEEK试件表面形貌的影响,结果显示酸蚀组3D打印PEEK试件与牙科粘接树脂粘接强度平均值为16.41 MPa,能够达到临床牙科树脂粘接要求(≥15 MPa)。目前,PEEK的加工方式主要包括注塑成型、数控铣削和3D打印三种方法,并且随着数字化技术的发展3D打印制作PEEK个性化的修复体在临床上具有广阔的应用前景。

2. PEKK的基本性能:PEKK是继PEEK之后开发的又一性能优异的热塑性特种高分子材料。与PEEK相比,PEKK具有以下优点[4]:在结构上,PEKK比PEEK多1个酮基,使PEKK的玻璃化转变温度高于PEEK近20 ℃,PEKK的熔点高于PEEK近50 ℃。因此,PEKK具有更高的热稳定性;PEKK的结晶速率极低,从而改善了PEKK的流动性,降低了成型过程中产生的内应力,提高了尺寸稳定性;PEKK的熔体粘

度比PEEK低,更有利于其成型加工,生产成本更低;PEKK因具有多种晶型而相应的力学性能多样,而PEEK只具有单一晶型。既往研究显示,纯PEKK的拉伸强度103 MPa,弹性模量4.07 GPa,屈服强度175 MPa,弯曲模量达4.20 GPa,而增强型PEKK(填料wt%:20%~40%)的主要机械性能如下:拉伸强度212 MPa,弹性模量20.40 GPa,屈服强度314 MPa,弯曲模量达16.8 GPa,材料整体性能接近于天然的牙体组织[5]。Yuan等[6]对PEEK和PEKK的骨结合特性进行研究,结果显示经表面改性修饰后PEKK的骨结合性能优于PEEK。孙方方等[1]采用98%浓硫酸酸蚀PEKK表面5 s可以使PEKK表面呈现均匀海绵状稳定结构,与饰面树脂粘接强度达(28.99±3.37) MPa,可满足临床需求。目前,PEKK材料的加工方式主要包括热压铸造和数控切削,两种加工方式制作的试件,其颜色、弯曲强度及硬度方面均无显著差异。以上特点为PEKK在口腔临床应用上奠定了基础。

二、聚芳醚酮在口腔领域中的临床应用

1. PAEK在修复领域的应用

(1)PAEK在固定义齿修复中的应用:虽然PEEK的弹性模量和硬度低于传统的金属合金,但其具有与金属合金相近的抗磨损性能[7],同时具有与天然牙体组织相近的力学性能[8]。与正常后牙区最大咀嚼力880 N相比,PEEK制作的后牙三单位种植固定桥修复体的平均破坏载荷为(1430.47±262.21) N,能满足磨牙区正常的咬合力[9]。Sinha等[8]报道未加填料的PEEK的密度为1.28~1.32 g/cm,低密度使得固定修复体重量非常轻,患者的舒适性和可接受性较高。使用PEEK材料制作固定局部义齿支架,较好的恢复了牙列缺损患者的咀嚼功能。Zoidis等[10]通过在PEEK中添加20%陶瓷填料而制备成BioHPP,增加了PEEK材料的弹性和硬度等性能并以此作基底材料,上覆光固化树脂,制作髓腔固位冠修复体,结果不仅缓冲了咬合力还较好地保护了剩余牙体组织,这表明PEEK材料适用于牙体状况不佳时的修复体制作。Elmougy等[11]将PEKK与临床常用的瓷材料进行实验研究,结果表明PEKK与相同参数的其他材料相比,具有足够的机械和物理性能,可用作永久的全冠修复体。Klur等[12]利用PEKK制作在牙周基础治疗阶段长期使用的暂时修复体,结果表明PEKK临时修复体的边缘适合性和内部适合性都在临床可接受的范围内,同时稳定性和美观性能也较好。然而,PEKK制成的悬臂桥,在高咬合力的后牙区域并不稳定,折断风险较高。

(2)PAEK在可摘局部义齿修复中的应用:传统的可摘局部义齿支架通常由钴铬合金(Co-Cr)制成,其存在许多缺点,如过敏反应、金属暴露的美观问题、口内微电流和易于菌斑生物膜的形成等。因此由改性PEEK聚合物、生物高性能聚合物(BioHPP)支架和丙烯酸树脂义齿组成[13-15]的无金属聚合物支架在口腔领域得到应用。在构建Kennedy Ⅰ类可摘局部义齿支架中使用BioHPP可能有助于减少基牙的远端扭矩和应力[16]。PEEK作为义齿基托材料还具有优越的机械性能,在受到咬合应力时无断裂倾向且能获得较好的固位力[17]。李欣欣等[17]应用计算机辅助设计与制作(CAD/CAM)技术制作新型PEEK一体化可摘局部义齿,结果显示不同形态组件的适合性良好并可以达到临床应用的要求。金智文等[18]通过对体外制作PEEK可摘义齿人工牙耐磨性及硬度的研究发现,相比于普通合成树脂牙和复合树脂牙,PEEK树脂牙具有适中的硬度和良好的耐磨性,这一点与Wimmer等[19]的研究结果相似。因此,对于金属敏感、不能够接受口内有金属的患者而言,PEEK可作为金属支架的替代材料应用于临床。目前,也有使用高贵金属的固位元件结合PEEK覆盖义齿支架用作牙列缺损或缺失进行覆盖义齿修复,并取得了较好的临床效果[20]。Dawson等[21]报道使用PEKK为同一患者制作上颌单颌全口义齿及下颌种植支持固定义齿修复支架,在6个月的随访观察中未发现不良并发症。

(3)PAEK在𬌗垫中的临床应用:𬌗垫治疗是夜磨牙症首选的治疗方法之一,且多建议晚上佩戴[22]。现有的夜磨牙保护𬌗垫多为真空压膜的软𬌗垫,由于其厚度均一,压膜成型后在口内佩戴时多为仅后牙极少数点存在𬌗接触,患者长期佩戴可能会导致咬合状态发生改变,进而影响整个口颌系统的功能[23]。Benli等[24]通过模拟咀嚼实验,将不同的𬌗垫材料乙烯-醋酸乙烯酯(EVA)、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、聚碳酸酯(PC)、PEEK与聚对苯二甲酸乙二酯(PETG)作为对照组进行表面粗糙度和磨损性能的对比研究,结果显示PC和PMMA作为𬌗垫材料的磨损量小于EVA和PETG,其中PEEK的耐磨性能最好,但这一结论尚需要临床研究证实。王时敏等[25]应用数字化技术切削PEEK材料盘制作个性化夜磨牙保护𬌗垫,结果表明与对照组真空压膜法制作的软弹性夜磨牙保护𬌗垫相比:𬌗垫固位情况较好,患者对美观程度评价更高,咬合舒适度更高。通过数字化设计制作PEEK𬌗垫极大地简化了𬌗垫的制作流程并节约医疗资源,为患者提供更优质的服务。目前,还没有关于PEKK用于制作夜磨牙𬌗垫的临床研究报道,课题组正在进行这方面的临床观察。

(4)PAEK在颌面赝覆体修复中的应用:PEEK的化学性能十分稳定,除浓硫酸外,几乎能耐受任何化学药品[26];水溶解度为0.5%质量分数,即使长期暴露在温度较高的水环境中,仍不会产生化学损害[27]。此外,PEEK对γ射线和电子束辐射有很高的阻抗性。这一点对于需要进行头颈部放疗的患者有重要意义[28]。Costa-Palau等[29]使用PEEK-Optima结合丙烯酸树脂制作的上颌骨及鼻骨缺损后的赝覆体,结果显示此类修复体更加轻便、美观、舒适,并具有更好的固位力,但价格较高。孙方方等[1]报道利用PEKK材料制作的上颌骨缺损赝复体,其大连接体与口腔黏膜贴合紧密,肉眼未见有显著缝隙,小连接体与余留牙紧密贴合,PEEK卡环固位力良好,虽较金属卡环力量弱,但能够满足义齿固位和稳定需求。陆伟等[3]报道利用3D打印PEEK技术制作上颌骨缺损阻塞器以及软腭缺损语音球赝覆体,取得了较好的临床效果,但尚缺乏对此类修复体的长期临床效果观察。

2. PAEK在种植领域的应用:PEEK在种植领域的应用

较为广泛[30-32]。由于与皮质骨、钛和陶瓷材料相比,PEEK的弹性模量很低,目前临床上已开发出各种增强的PEEK复合材料,如碳纤维增强聚醚醚酮(CFR-PEEK)和玻璃纤维增强聚醚醚酮(GFR-PEEK)等,CFR-PEEK的弹性模量可高达18 GPa,GFR-PEEK的弹性模量可高达12 GPa,二者均与人体正常骨皮质的弹性模量较为接近。在体内研究中,PEEK与一段式钛植体和陶瓷植体进行了比较,所有植体都采用相同设计的前提下,未加填充物的PEEK植体在4个月的研究期间显示出足够的强度,并且所有植体都显示出较好的初级稳定性[33]。Buck等[34-35]对PEEK基种植体进行表面修饰及抗菌活性研究发现,经处理后可以增强PEEK植体的骨整合及抗菌活性,但具体机制尚需进一步的临床研究。在种植体的愈合阶段,PEEK基于其良好的机械性能及生物相容性可被用于制作临时修复体。PEEK与软组织接触时具有优异的生物相容性,有利于牙龈组织的愈合和塑形,从而可以实现最终修复的美学要求。Schwitalla等[36]对PEEK种植固位螺丝的研究发现,采用直径为1.6 mm,并用含50%以上的连续碳纤维增强,可满足修复体的机械固位要求。目前,关于PEEK在种植领域的长期临床数据仅限于病例研究[37-39],且尚未报道PEKK在口腔种植中的临床应用,因此需要进一步的对材料进行改性研究使PEAK更好的应用于临床治疗。

3. PAEK在正畸领域的应用:弓丝的弹性性能在有效地正畸牙齿移动中起着重要作用[40]。近年来由于金属合金弓丝具有美观性差和金属过敏等缺点[41],而高分子材料则具有美学上的优势。目前PEEK因其特有的白色和优异的机械性能,以及生物惰性[42],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。Maekawa等[43]评价了PEEK的弯曲性能和吸水性,结果显示PEEK是一种适合制作美观的非金属正畸弓丝的候选材料。Tada等[40]采用三种不同的结扎方法,使用改良的正畸三点弯曲系统获得载荷-挠度曲线来模拟正畸治疗的早期阶段,以Ni-Ti丝为对照,结果显示PEEK的载荷-挠曲特性和摩擦特性可作为正畸矫治弓丝使用,PEEK丝具有与Ni-Ti丝相似的弹性性能。牙齿移动过程中,托槽和弓丝之间的摩擦力是主要问题[44]。PEEK弓丝与托槽之间的静摩擦与Ni-Ti弓丝与托槽之间的静摩擦基本相同。Shirakawa等[45]为了提高正畸治疗的效率,满足消费者的审美需求,研制了一种PEEK管辅助装置,结果显示PEEK不仅具有良好的美学性质,同时摩擦试验结果也表明,该装置可明显减小摩擦力。Heimer等[46]评估了PEEK、聚甲基丙烯酸甲酯及其复合材料在不同介质中放置后的变色和去污能力,发现PEEK的颜色变化最小。这表明PEEK材料是一种很有前景的耐污材料。但为达到不同的矫治效果,正畸不同阶段的弓丝对于刚度、弹性和形状记忆功能的要求不完全相同,因此需要更多的实验研究,寻找适合的填料成分及比例,使复合材料的力学性能满足不同阶段的正畸弓丝需求[47]。

4. PAEK在口腔颌面外科领域的应用:PEEK不会引起任何毒性、致突变作用和明显的炎症反应,此外由于材料较好的美学性能及优异的生物机械特性,近年来PEEK材料引起了临床医生广泛关注[42]。穆苍山等[48]应用3D打印PEEK修补材料在颅骨缺损修补手术中的应用效果分析,结果显示3D打印PEEK材料进行颅骨修补方法可行,材料安全可靠,疗效确切。李劲松[49]曾报道采用3D打印个性化PEEK假体可以精确修复眶底缺损,从而改善因眼球移位造成的视觉功能障碍,并获得了获得良好的功能与美观效果。Järvinen等[50]对24例颌面部缺损患者用PEEK制作的个性化植入物进行整形修复,结果显示除两例患者进行二次手术修整外,其他患者均达到良好的修复效果。

5. PAEK材料在儿童口腔领域的应用:基于高温下保持优异的机械性能,良好的尺寸稳定性以及生物相容性,近年来PEEK被发现是制作间隙保持器的一种理想材料。Ierardo等[51]的研究表明,通过CAD/CAM技术制作个性化的间隙保持器,以此来维持牙弓中的间隙,以利于恒牙的萌出。9个月的随访结果显示,此类间隙保持器获得了儿童患者较好的依从性,同时也具有舒适,令人满意,可个性化设计,并且对患者的可见性最小等优点。冀堃等[52]使用PEKK材料制作数字化乳牙早失间隙保持器,实现了无金属的间隙保持器,避免了金属过敏的风险,同时也兼顾了美观效果,临床应用效果较好。

6. PAEK在牙周领域的应用:PEKK材料因其密度值较低,与传统金属修复体相比质量较轻,可提高患者的舒适度,修复体的固位和稳定也较好。此外,PEKK材料的表面能较低,不利于菌斑附着聚集,有利于患者戴用后口腔卫生的维护。基于上述特点,孙方方等[1]利用数字化技术在无牙体预备的情况下设计制作下前牙区牙周夹板对下前牙区的松牙固定中取得了较好的效果。

三、聚芳醚酮在口腔领域的产品化

目前,PAEK聚合物常用于以下商业化的口腔应用中[53],总结如下表1。

表1 聚芳醚酮(PAEK)在口腔领域的应用现状

临床终端产品	存在形式	材料组成
临时种植基台	N/A,库存产品直接提供给临床医生	PEEK,PEEK+10% TiO_2
暂时性殆垫	N/A,库存产品直接提供给临床医生	PEEK
长期植入骨内固定装置	N/A,库存产品直接提供给临床医生	植入级PEEK
种植支持式修复体的下部结构,冠桥及活动义齿	PEEK、PEKK颗粒或CAD/CAM盘	PEEK,PEEK+填充物,PEKK+填充物
可摘义齿	CAD/CAM盘	未定义的芳香酮

注:PEEK为聚醚醚酮,PEKK为聚醚酮酮,CAD/CAM为计算机辅助设计与制作,TiO_2为二氧化钛

1. 库存产品:目前,基于PAEK的库存产品,例如牙科植入物固定装置、愈合帽和基台等,大多数是由医用级别的PEEK制造的。它们后期由注塑、铣削或3D打印加工成最终的终端产品形式。这些产品均可由正规牙科公司提供直接用于临床,如Champions Implants(德国)、Sissom(法国)和IMI(法国)等产品。碳纤维加强型PEEK在完全无金属的设计方案中也被用作两段式陶瓷牙科植入系统(Zeramex, Dentalpoint AG,瑞士)之间的连接螺钉组件。

PEEK的库存产品中部分是成品的,这些产品可短期内使用(最多180 d),如临时愈合帽和临时基台。临时基台主要出于美学原因而使用PEEK的自然版本(例如,PEEK-CLASSIX或PEEKOPTIMA,Invibio,英国)或PEEK典型的白色版本(例如PEEK-CLASSIX white,Invibio,英国)。此外,还使用PEEK(例如,Relax-Bogen GmbH,德国)制造了其他临时使用产品,例如用于缓解磨牙症(夜磨牙和咬合紧)和颞下颌关节疼痛的产品。

2. 定制产品:目前许多含有金属增强的支架或下部结构的修复体和赝复体,都可以被PEEK的高性能聚合物(BioHPP)替代,这使得PAEK的应用更广泛。最初,PEEK(例如BioXS和BioHPP, Bredent GmbH, 德国)和PEKK(Pekkton, Cendres and Metaux,瑞士)作为台式冲压成型系统的材料而出现,随后被加工中心用于制造个性化修复体支架。同时,高性能热塑性材料也可作为粒料出售,采用熔融并充胶的方式用于义齿修复体支架下部结构中。

为了与数字化技术的进步保持一致,许多公司已经生产了包括PEEK(例如JUVORA, Invibio,英国)、PEEK复合物(例如BreCAM, Bredent,德国或DentoKeep, NT-Trading,德国)、PEKK(例如Pekkton, Cendres和Mettaux,瑞士)和未定义的芳酮家族成员(例如Ultaire, Solvay Dental360,美国)在内的CAD/CAM盘。虽然这些盘基本上是CAD/CAM机器专用的原料型前体,但作为临床应用材料仍被作为医疗器械管理。总的来说,PEEK盘(图1)已允许制造长期使用的修复体支架和下部结构,例如可摘义齿支架和植入性赝复体的制作、冠桥制作等。在选择制造特定部件的盘之前,应仔细查看其使用说明。通常,这些盘由牙科公司出售给加工厂或医院。

图1 不同厚度、不同颜色的聚醚醚酮(PEEK)盘

Bredent和NT Trading使用DentoKeep(Evonik,德国)PEEK原料与20% wt/wt纳米陶瓷(BioHPP)或20%二氧化钛(DentoKeep)混合而制成白色填料。这些填料的粒度(纳米陶瓷约为300~500 nm)一般不增强材料的强度,而是更多地作为颜料和表面形貌的影响因素。考虑到美观因素时PAEK可作为非金属替代品,用于临床治疗,如用于可摘局部义齿支架,改性的PEEK颜色美观,但此时材料的物理和机械性能比它的颜色更重要。目前,对PEAK的加工使用典型的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)的铣削方式,PEEK比金属更容易铣削,工具磨损更低,加工时间更快。PEEK材料增补了牙科行业对CAD/CAM技术的应用,因为与传统制造方法相比CAD/CAM提高了制造精度和可重复性以及患者的适合度,同时加快了生产,降低了劳动力的需求。预成型的PEEK盘通常具有不同厚度(10~30 mm)。由此,可使用5轴CNC铣床铣削满足相关需求的合适支架(图2),随后通过用义齿和牙龈成分覆盖相关区域来完成总义齿的个性化制作。目前,国内有注册证的一个是德国比丹公司的BioHPP(充胶式)粒料,另一个是吉林省登泰克牙科材料有限公司的PEEK盘。

图2 上颌总义齿牙龈色腭板CAD/CAM铣削

四、总结和展望

近年来,PAEK家族的材料凭借其优异的理化性能及生物学性能在口腔医学领域得到了广泛的研究与应用。数字化技术的迅速发展也极大的促进了材料学的研发与应用,PEEK及其复合材料良好的易加工性能,在临床工作中可以利用CAD/CAM技术进行3D打印、铣削和注塑工艺制作成各类复杂的修复体,对于PEKK材料,由于来源的限制,目前在临床中仅通过CAD/CAM铣削的方式获得。随着人们对美的需求,为了避免传统金属材料存在美观问题及材料过敏等不足,PAEK聚合物类材料在口腔领域具有广阔的应用前景。因此,对现有材料的改性并不断研发新的PAEK复合材料以满足口腔医学领域不同分支的临床应用,并探索PAEK表面处理对生物活性及粘接性能的影响,不断完善其临床适应证,是当下临床科研工作者的努力方向。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参 考 文 献

[1] 孙方方,景建龙,吴国峰. 数字化铣削技术制作聚醚酮酮口腔修复体的初步临床报告[J]. 实用口腔医学杂志, 2019,35(6): 908-912.

[2] 郭芳,黄硕,朱勇,等. 3种不同工艺制备聚醚醚酮假体的生物力学性能研究[J]. 口腔医学研究, 2019,35(4):405-408. DOI:10.13701/j.cnki.kqyxyj.2019.04.024.

[3] 陆伟,李涤尘,吴国锋. 3D打印聚醚醚酮口腔修复体的初步临床报告[J]. 实用口腔医学杂志, 2020,36(1):136-140.

[4] Cortés LQ, Caussé N, Dantras E, et al. Morphology and dynamical mechanical properties of poly ether ketone ketone (PEKK) with meta phenyl links [J]. J Appl Polym Sci, 2016,133(19):43396. DOI:10.1002/APP.43396.

[5] 齐曼霖,周延民. 聚醚酮酮的性能及其在口腔医学领域中的应用[J]. 口腔医学研究, 2018,34(9):939-942. DOI:10.13701/j.cnki.kqyxyj.2018.09.005.

[6] Yuan B, Cheng Q, Zhao R, et al. Comparison of osteointegration property between PEKK and PEEK: effects of surface structure and chemistry [J]. Biomaterials, 2018, 170: 116-126. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2018.04.014.

[7] Zok FW, Miserez A. Property maps for abrasion resistance of materials [J]. Acta Mater, 2007,55(18):6365-6371. DOI:10.1016/j.actamat.2007.07.042.

[8] Sinha N, Gupta N, Reddy KM, et al. Versatility of PEEK as a fixed partial denture framework [J]. J Indian Prosthodont Soc, 2017,17(1):80-83. DOI:10.4103/0972-4052.197941.

[9] Nazari V, Ghodsi S, Alikhasi M, et al. Fracture Strength of Three-Unit Implant Supported Fixed Partial Dentures with Excessive Crown Height Fabricated from Different Materials [J]. Dent (Tehran), 2016,13(6):400-406.

[10] Zoidis P, Bakiri E, Polyzois G. Using modified polyetheretherketone (PEEK) as an alternative material for endocrown restorations: A short-term clinical report [J]. J Prosthet Dent, 2017, 117(3):335-339. DOI:10.1016/j.prosdent.2016.08.009.

[11] Elmougy A, Schiemann AM, Wood D, et al. Characterisation of machinable structuralpolymers in restorative dentistry [J]. Dental Materals, 2018,34(10):1509-1517. DOI:10.1016/j.dental.2018.06.007.

[12] Klur T, Hasan I, Ottersbach K, et al. PEKK-made indirect temporary crowns and bridges: a clinical pilot study [J]. Clin Oral Investig, 2019,23(2):771-777. DOI:10.1007/s00784-018-2493-z.

[13] Becker CM, Kaiser DA, Goldfogel MH. Evolution of removable partial denture design [J]. Prosthodont, 1994,3(3):158-166. DOI:10.1111/j.1532-849X.1994.tb00147.x.

[14] Schwitalla AD, Spintig T, Kallage I, et al. Flexural behavior of PEEK materials for dental application [J]. Dent Mater, 2015,31(11):1377-1384. DOI:10.1016/j.dental.2015.08.151.

[15] Wiesli MG, Özcan M. High-Performance Polymers and Their Potential Application as Medical and Oral Implant Materials: A Review[J]. Implant Dent, 2015,24(4):448-457. DOI:10.1097/id.0000000000000285.

[16] Zoidis P, Papathanasiou I, Polyzois G. The Use of a Modified Poly-Ether-Ether-Ketone (PEEK) as an Alternative Framework Material for Removable Dental Prostheses. A Clinical Report [J]. J Prosthodont, 2016,25(7):580-584. DOI:10.1111/jopr.12325.

[17] 李欣欣,柳玉树,孙玉春,等. 计算机辅助设计与制作一体化聚醚醚酮可摘局部义齿不同形态组件的适合性评价[J]. 北京大学学报(医学版), 2019,51(2):335-339. DOI:10.19723/j.issn.1671-167X.2019.02.025.

[18] 金智文,韩建民,刘云松,等. 聚醚醚酮制作可摘义齿人工牙耐磨性及硬度的研究[J]. 口腔颌面修复学杂志, 2018,19(4):236-240. DOI:10.3969/j.issn.1009-3761.2018.04.011.

[19] Wimmer T, Huffmann AMS, Eichberger M, et al. Two-body wear rate of PEEK, CAD/CAM resin composite and PMMA: Effect of specimen geometries, antagonist materials and test set-up configuration [J]. Dent Mater, 2016,32(6):127-136. DOI:10.1016/j.dental.2016.03.005.

[20] Lekholm U, Gunne J, Henry P, et al. Survival of the Brånemark implant in partially edentulous jaws: a 10-year prospective multicenter study [J]. Int J Oral Maxillofac Implants, 1999,14(5):639-645. DOI:10.1046/j.1365-2591.1999.00254.x.

[21] Dawson JH, Hyde B, Hurst M, et al. Polyetherketoneketone (PEKK), a framework material for complete fixed and removable dental prostheses: A clinical report [J]. J Prosthetic Dentistry, 2018,119(6):867-872. DOI:10.1016/j.prosdent.2017.09.008.

[22] Dubé C, Rompré PH, Manzini C, et al. Quantitative Polygraphic Controlled Study on Efficacy and Safety of Oral Splint Devices in Tooth-grinding Subjects [J]. J Dent Res, 2004,83(5):398-403. DOI:10.1177/154405910408300509.

[23] Bumann A, Lotzmann U. TMJ disorders and orofacial pain. The role of dentistry in a multidisciplinary approach (2002) [J]. European Journal of Orthodontics, 2003,25(2):213-213. DOI:10.1093/ejo/25.2.213.

[24] Benli M, Gümüş BE, Kahraman Y, et al. Surface roughness and wear behavior of occlusal splint materialsmade of contemporary and high-performance polymers [J]. Odontology, 2020,108:240-250. DOI:10.1007/s10266-019-00463-1.

[25] 王时敏,李峥,王冠博,等. 全程数字化夜磨牙保护𬌗垫的制作和初步应用[J]. 北京大学学报(医学版), 2019,51(1):105-110. DOI:10.19723/j.issn.1671-167X.2019.01.019.

[26] Ha SW, Kirch M, Birchler F, et al. Surface activation of polyetheretherketone (PEEK) and formation of calcium phosphate coatings by precipitation [J]. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 1997,8(11):683-690. DOI:10.1023/A:1018535923173.

[27] Kurtz SM, Devine JN. PEEK biomaterials in trauma, orthopedic, and spinal implants [J]. Biomaterials, 2007,28(32):4845-4869. DOI:10.1016/j.biomaterials.2007.07.013

[28] 何光霁,张文云. 聚醚醚酮在口腔修复学中的应用[J]. 口腔医学, 2017,37(10):957-960. DOI:10.13591/j.cnki.kqyx.2017.10.023.

[29] Costa-Palau S, Torrents-Nicolas J, Brufau-De Barberà M, et al. Use of polyetheretherketone in the fabrication of a maxillary obturator prosthesis: a clinical report [J]. J Prosthet Dent, 2014, 112(3):680-682. DOI:10.1016/j.prosdent.2013.10.026.

[30] Schwitalla A, Müller W-D. PEEK Dental Implants: A Review of the Literature [J]. J Oral Implantol, 2013,39(6):743-749. DOI: 10.1563/AAID-JOI-D-11-00002.

[31] Yurttutan ME, Keskin A. Evaluation of the effects of different sand particles that used in dental implant roughened for osseointegration [J]. Bmc Oral Health, 2018, 18(1):47. DOI: 10.1186/s12903-018-0509-3.

[32] Najeeb S, Zafar MS, Khurshid Z, et al. Applications of polyetheretherketone (PEEK) in oral implantology and prosthodontics [J]. Journal of Prosthodontic Research, 2016, 60(1):12-19. DOI:10.1016/j.jpor.2015.10.001.

[33] Koch FP, Weng D, Kramer S, et al. Soft tissue healing at one-piece zirconia implants compared to titanium and PEEK implants of identical design: a histomorphometric study in the dog [J]. Int Periodontics Restorative Dent, 2013, 33(5): 669-677. DOI: 10.11607/prd.1043.

[34] Buck E, Li H, Cerruti M. Surface Modification Strategies to Improve the Osseointegration of Poly(etheretherketone) and Its Composites[J]. Macromol Biosci, 2020,20(2):e1900271. DOI: 10.1002/mabi.201900271.

[35] Xu X, Li Y, Wang L, et al. Triple-functional polyetheretherketone surface with enhanced bacteriostasis and anti-inflammatory and osseointegrative properties for implant application [J]. Biomaterials, 2019, 212: 98-114. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2019.05.014.

[36] Schwitalla AD, Abou-Emara M, Zimmermann T, et al. The applicability of PEEK-based abutment screws [J]. J Mech Behav Biomed Mater, 2016, 63: 244-251. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2016.06.024.

[37] Lindhe J, Meyle J, Group D of European Workshop on Periodontology. Peri-implant Diseases: Consensus Report of the Sixth European Workshop on Periodontology [J]. J Clin Periodontol, 2008,35(8):282-285. DOI:10.1111/j.1600-051X.2008.01283.x.

[38] Mombelli A, Müller N, Cionca N. The epidemiology of peri-implantitis [J]. Clin Oral Implants Res, 2012, 23(6): 67-76. DOI:10.1111/j.1600-0501.2012.02541.x.

[39] Tomasi C, Derks J. Clinical research of peri-implant diseases—Quality of reporting, case definitions and methods to study incidence, prevalence and risk factors of peri-implant diseases [J]. J Clin Periodontol, 2012,39(12):207-223. DOI: 10.1111/j.1600-051X.2011.01831.x.

[40] Tada Y, Hayakawa T, Nakamura Y. Load-Deflection and Friction Properties of PEEK Wires as Alternative Orthodontic Wires [J]. Materials(Basel), 2017, 10(8):914-926. DOI: 10.3390/ma10080914.

[41] Sfondrini MF, Cacciafesta V, Maffia E, et al. Nickel release from new conventional stainless steel, recycled, and nickel-free orthodontic brackets: An in vitro study [J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2010, 137(6): 809-815. DOI: 10.1016/j.ajodo.2008.07.021.

[42] Nieminen T, Kallela I, Wuolijoki E, et al. Amorphous and crystalline polyetheretherketone: Mechanical properties and tissue reactions during a 3-year follow-up [J]. J Biomed Mater Res A, 2008,84(2):377-383. DOI:10.1002/jbm.a.31310.

[43] Maekawa M, Kanno Z, Wada T, et al. Mechanical properties of orthodontic wires made of super engineering plastic [J]. Dent Mater J, 2015,34(1):114-119. DOI:10.4012/dmj.2014-202.

[44] Burrow SJ. Friction and resistance to sliding in orthodontics: a critical review [J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2009, 135(4):442-447. DOI:10.1016/j.ajodo.2008.09.023.

[45] Shirakawa N, Iwata T, Miyake S, et al. Mechanical properties of orthodontic wires covered with a polyether ether ketone tube [J]. Angle Orthod, 2018, 88(4): 442-449. DOI: 10.2319/082417-572.1.

[46] Heimer S, Schmidlin PR, Stawarczyk B. Discoloration of PMMA, composite, and PEEK [J]. Clin Oral Investig, 2017,21(4):1191-1200. DOI:10.1007/s00784-016-1892-2.

[47] 秦胜男,贾慧,李英. 聚醚醚酮在口腔临床中的应用现状[J]. 国际口腔医学杂志, 2018,45(6):652-656. DOI:10.7518/gjkq.2018.06.006.

[48] 穆苍山,靳欢,金永健,等. 3D打印聚醚醚酮修补材料在颅骨缺损修补手术中的应用效果分析[J]. 航空航天医学杂志, 2019,30(7):774-776. DOI:10.3969/j.issn.2095-1434.2019.07.002.

[49] 李劲松. 3D打印聚醚醚酮(PEEK)假体精确重建眶底缺损的疗效分析[C]//中华口腔医学会口腔颌面外科专业委员会. 第十四次中国口腔颌面外科学术会议论文汇编,重庆,2018. 北京:中华口腔医学会, 2018:541-542.

[50] Järvinen S, Suojanen J, Kormi E, et al. The use of patient specific polyetheretherketone implants for reconstruction of maxillofacial deformities [J]. J Craniomaxillofac Surg, 2019, 47(7):1072-1076. DOI:10.1016/j.jcms.2019.03.018.

[51] Ierardo G, Luzzi V, Lesti M, et al. Peek polymer in orthodontics: A pilot study on children [J]. J Clin Exp Dent, 2017,9(10):e1271-e1275. DOI:10.4317/jced.54010.

[52] 冀堃,朱顶贵,陆伟,等. 聚醚酮酮数字化乳牙早失间隙保持器的临床应用观察[J/CD]. 中华口腔医学研究杂志(电子版), 2019,13(6):368-372. DOI:10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2019.06.008.

[53] Siewert B, Plaza-Castro M, Sereno N, et al. Applications of PEEK in the Dental Field[M]// Steven Kurtz. PEEK Biomaterials Handbook. 2nd Edition. 2019. DOI:10.1016/B978-0-12-812524-3.00020-X.

(收稿日期:2020-02-12)

(本文编辑:王嫚)