

DOI: 10.3969/j.issn.1004-4949.2025.08.048

纳米氧化锆对聚甲基丙烯酸甲酯义齿基托性能影响的研究进展

杨连杰, 蒋小锋, 范小溪, 陈玉琴, 罗涛

(遂宁市中心医院口腔医学中心, 四川 遂宁 629000)

[摘要] 聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 作为传统义齿基托材料, 在机械性能和抗菌性等方面存在一定局限性。近年来, 纳米氧化锆因其优异的力学性能和生物相容性, 在牙科材料改性领域受到广泛关注。本文通过分析纳米氧化锆的特性、聚甲基丙烯酸甲酯义齿基托的基础知识与局限性, 探讨了纳米氧化锆加入后 PMMA 在机械强度、物理化学稳定性、生物相容性及抗菌性等方面的改善情况, 讨论了其在临床上的应用现状与未来发展趋势, 旨在为牙科材料的研发与应用提供科学依据。

[关键词] 纳米氧化锆; 聚甲基丙烯酸甲酯; 义齿基托; 机械性能; 生物相容性

[中图分类号] R783.1

[文献标识码] A

[文章编号] 1004-4949 (2025) 08-0191-04

Research Progress on the Effect of Nano-zirconia on the Properties of Polymethyl Methacrylate Denture Base

YANG Lianjie, JIANG Xiaofeng, FAN Xiaoxi, CHEN Yuqin, LUO Tao

(Stomatological Center of Suining Central Hospital, Suining 629000, Sichuan, China)

[Abstract] Polymethyl methacrylate (PMMA), as a traditional denture base material, has certain limitations in mechanical properties and antibacterial properties. In recent years, nano-zirconia has received widespread attention in the field of dental material modification due to its excellent mechanical properties and biocompatibility. By analyzing the characteristics of nano-zirconia, the basic knowledge and limitations of PMMA denture base, this paper explores the improvement of PMMA in terms of mechanical strength, physicochemical stability, biocompatibility, and antibacterial properties after the addition of nano-zirconia. It also discusses the current clinical application status and future development trends, aiming to provide a scientific basis for the research, development and application of dental materials.

[Key words] Nano-zirconia; Polymethyl methacrylate; Denture base; Mechanical properties; Biocompatibility

在现代口腔修复材料中, 聚甲基丙烯酸甲酯 (polymethyl methacrylate, PMMA) 因其优良的生物相容性、易加工性和经济性而广泛应用于义齿基托材料^[1, 2]。然而, 传统 PMMA 材料存在机械强度不足、耐磨性较差、易滋生微生物等缺陷, 可能导致义齿基托断裂、表面磨损及口腔感染等临床并发症, 限制了其长期使用效果。尽管近年来通过改进聚合工艺和添加传统填料 (如玻璃纤维) 在一定程度上提升了 PMMA 的性能, 但仍难以满足患者对义齿材料高强度、高耐久性和抗菌功能的需求。近年来, 随着纳米技术的迅速

发展, 纳米材料因其独特的物理化学性质广泛应用于改善传统材料的性能^[3]。纳米氧化锆作为一种具有优异机械性能和生物相容性的无机纳米填料, 在增强聚合物基体性能方面的巨大潜力。将纳米氧化锆引入 PMMA 基托材料中, 有望提高其机械强度、耐磨性和抗菌性能, 从而延长义齿的使用寿命, 提高患者舒适度和满意度。然而, 目前关于纳米氧化锆改性 PMMA 的研究尚不充分。本文重点探讨聚甲基丙烯酸甲酯义齿基托基本特性, 探讨纳米氧化锆加入后 PMMA 在机械强度、物理化学稳定性、生物相容性及抗菌性等方面的

改善情况, 讨论其临床应用现状与未来发展趋势, 以期为牙科材料的研发与应用提供一定科学依据。

1 聚甲基丙烯酸甲酯义齿基托的概述

1.1 聚甲基丙烯酸甲酯的基本性质 PMMA作为一种热塑性塑料, 自20世纪中叶以来, 已成为制作义齿基托的主要材料之一, 其优良的物理和化学性质为其在口腔修复领域的广泛应用奠定了坚实基础。PMMA外观呈透明或半透明状, 具有良好的透明性, 折射率(约1.49)与天然牙釉质接近, 使得其制成的义齿基托在美观性上具有显著优势, 能够模拟天然牙齿的色泽和透光性。同时, 其具备一定的机械强度, 能够承受日常咀嚼产生的压力。此外, PMMA表面硬度适中, 既保证了材料的耐磨性, 又避免了过硬对天然牙造成磨损, 上述特点使其成为制作可摘局部义齿和全口义齿基托的首选材料^[4, 5]。然而, PMMA也存在一些固有的局限性。例如, 其热稳定性较差, 在高温环境下易发生形变, 影响义齿的精确度和使用寿命。此外, PMMA的吸水性和溶解度较高, 长期口腔环境内的水分吸收可能导致材料性能下降, 如强度减弱、颜色变化等。

1.2 聚甲基丙烯酸甲酯义齿基托的应用与局限性 PMMA义齿基托在临床上的应用极为广泛, 不仅适用于全口无牙颌患者的全口义齿制作, 也常用于部分牙列缺失患者的可摘局部义齿修复^[6, 7]。其良好的生物相容性确保了患者佩戴时的舒适性, 而轻便的特性则减轻了口腔组织的负担。此外, PMMA义齿基托易于调整和修理, 为患者提供了较大的灵活性和便利性。尽管PMMA义齿基托具有诸多优点, 但其局限性也不容忽视。除了上述提到的热稳定性和吸水性问题外, PMMA的耐磨性相对较差, 长期使用中易受食物残渣、口腔微生物等外界因素影响, 导致表面粗糙度增加, 影响美观和舒适度。此外, 随着人们对美学要求的提高, 传统PMMA材料的色泽稳定性和透光性已难以满足现代口腔修复的高标准要求。

2 纳米氧化锆的特性

纳米氧化锆是一种具有独特物理化学性质的无机非金属材料, 其粒径通常为1~100 nm。由

于其微小的尺寸效应、高比表面积以及优异的力学、热学和化学稳定性, 纳米氧化锆在众多领域展现出了广泛的应用前景^[8]。在结构上, 纳米氧化锆以立方相、四方相或单斜相存在, 其中, 立方体结构在2370 °C以上时结构稳定并具有良好的力学性能; 四方体结构在1170~2370 °C范围内能够显著改善材料的机械性能; 而单斜体结构在室温高达11 700 °C才能稳定, 但其机械性能相对较低。通过掺杂稳定剂(如钇、镁等)实现相变温度的调控, 进一步增强其性能^[9]。特别是在生物医学领域, 纳米氧化锆因其良好的生物相容性、低毒性以及抗菌性能, 逐渐成为研究的热点。纳米氧化锆的高硬度、高强度以及耐磨性, 使其成为增强复合材料理想的选择。此外, 其优异的化学稳定性确保了材料在长期使用过程中不易发生降解或变色, 这对于需要长期稳定性的医疗植入物尤为重要^[10]。同时, 纳米尺度下的氧化锆能够提供更均匀的分散性, 有利于提升复合材料的整体性能。

3 纳米氧化锆对聚甲基丙烯酸甲酯义齿基托性能的影响

3.1 机械性能改善 纳米氧化锆的加入可显著改善PMMA义齿基托材料的抗弯强度、抗压强度、弹性模量及耐磨性等机械性能^[11]。纳米氧化锆因其高硬度、高强度以及良好的化学稳定性, 在复合材料中起到了有效的增强和增韧作用。通过合理的配比与分散技术, 纳米氧化锆粒子能够均匀分布于PMMA基体中, 形成致密的微观结构, 有效提高义齿基托的抗压强度、抗弯强度和耐磨性。Viswambharan P等^[12]研究显示, 纳米氧化锆粒子的掺入可提高PMMA树脂的弯曲强度, 为改善义齿基托材料的力学性能提供新思路。此外, 纳米氧化锆的加入还改善了材料的韧性。在应力作用下, 纳米氧化锆从四方相转变为单斜相, 吸收裂纹扩展的能量, 同时晶体膨胀使裂纹处于压缩状态, 阻止了其因外力作用导致的裂纹扩展。Fahmi MK等^[13]研究表明, 通过添加氧化锆纳米填料, 可以改善PMMA义齿基托材料的机械性能, 不仅能提高义齿的使用寿命, 还能增强患者的咀嚼效率和舒适度。由此可见, 纳米氧化锆的引入不仅可提升PMMA义齿基托材料的机械强度, 还有利于改善其韧性和耐磨性, 从而延长义齿的使

使用寿命,提高患者的咀嚼效率。

3.2 物理化学性能变化 纳米氧化锆的引入不仅可影响PMMA义齿基托的机械性能,还可影响其物理化学性能。一方面,纳米粒子的存在提高了材料的热稳定性,使得义齿基托在高温环境下的尺寸稳定性得到增强,减少了因温度变化导致的形变问题。另一方面,纳米氧化锆的优异化学惰性有助于提升材料的耐腐蚀性,使得义齿基托在面对口腔内复杂环境时表现出更强的耐久性。James J等^[14]研究指出,二氧化锆增强聚(甲基丙烯酸甲酯)纳米复合膜在光学和物理特性方面具有显著优势,如纳米氧化锆的加入可改善PMMA的表面性质,降低表面粗糙度,提高润湿性,有利于减少口腔微生物附着,同时增强义齿的美观性和患者使用的舒适度。由此可见,纳米氧化锆的引入可提升PMMA义齿基托的热稳定性、耐腐蚀性和表面性能,从而延长了材料的使用寿命,改善患者的临床体验。

3.3 生物相容性与抗菌性能变化 口腔修复领域义齿基托材料的生物相容性直接关系到患者的口腔健康和生活质量。纳米氧化锆具有良好的生物相容性,添加至PMMA义齿基托中不会引起明显的细胞毒性或炎症反应,并且纳米氧化锆在口腔环境中的化学稳定性高,不易释放出有害物质,进一步保证了其生物安全性。更重要的是,纳米氧化锆还展现出一定的抗菌性能,一方面,由于其表面能高、比表面积大,纳米氧化锆粒子能够与细菌细胞膜发生相互作用,破坏细菌结构,从而抑制细菌的生长和繁殖,有利于预防口腔感染、减少义齿性口炎^[15, 16];另一方面,纳米氧化锆在口腔环境中能够释放活性氧,抑制细菌细胞的生长和繁殖,甚至导致细菌死亡。此外,纳米氧化锆还能够干扰细菌膜的完整性,导致细菌膜渗漏,从而进一步增强其抗菌效果。AAlgar FA等^[17]研究表明,纳米氧化锆的使用对大肠杆菌和克雷伯氏菌肺炎表现出一定的抗菌活性,可降低口腔感染的风险。纳米氧化锆的引入不仅提高了PMMA义齿基托的生物相容性,还赋予其显著的抗菌性能,进而预防口腔感染,改善患者生活质量。然而,纳米氧化锆的长期生物安全性及其对口腔微生态的影响仍需进一步研究,以推动其在临床中的安全应用。

4 纳米氧化锆改性聚甲基丙烯酸甲酯义齿基托的临床应用与前景

4.1 临床应用 近年来,随着纳米技术的不断进步和口腔医学领域的快速发展,纳米氧化锆改性PMMA义齿基托已逐渐应用于临床实践中,展现出显著的优势和潜力。Kumari S等^[18]研究显示,PMMA-ZrO₂纳米复合材料有效提升了义齿的力学性能,如抗弯强度和硬度,使得义齿在使用过程中更能承受咀嚼压力,减少了折裂的风险,从而延长了义齿的使用寿命。此外,纳米氧化锆的加入还改善了PMMA基托的表面性能,提高了其耐磨性和抗污渍能力,有助于保持义齿的清洁度和美观度,提升患者的满意度。在临床中,纳米氧化锆改性PMMA义齿基托广泛应用于全口义齿、局部义齿以及复杂修复体中,特别是在需要高度精确度和良好生物相容性的情况下,如老年患者、对美观要求较高的患者及存在口腔软组织敏感问题的患者群体中,表现尤为出色^[19]。该材料易于加工成型,适应性强,能够更好地满足个性化治疗需求,同时也简化了制作流程,提高诊疗效率。

4.2 未来发展方向与技术预测 展望未来,纳米氧化锆改性PMMA义齿基托的研究与应用将朝着更加智能化、个性化和高效化的方向发展。一方面,随着对材料科学的深入探索,研究者们将进一步优化纳米氧化锆的分散技术和表面处理工艺,以期获得更加均匀稳定的复合材料结构,进一步提升其机械性能和生物相容性。同时,通过引入生物活性成分或抗菌因子,有望开发出具有自修复、抗菌防龋等多功能的新型义齿基托材料,为患者提供更加全面的口腔健康保护。另一方面,结合数字化技术和3D打印技术^[20],纳米氧化锆改性PMMA义齿基托的个性化定制将成为可能。通过精确扫描患者的口腔数据,利用计算机辅助设计和制造(CAD/CAM)技术,可以实现义齿的快速、精准制作,极大地缩短治疗周期,提高患者的就医体验。此外,远程医疗和在线诊疗模式的兴起也将为该领域带来新的发展机遇,使得高质量的义齿服务能够覆盖更广泛的地区和人群。

5 总结

纳米氧化锆作为功能性填料,可提升PMMA



义齿基托的机械和物理化学性能,包括抗弯强度、抗压强度、耐磨性、断裂韧性、热稳定性、耐腐蚀性以及表面特性的优化,同时具备良好的生物相容性和抗菌性能。然而,目前研究存在一定的局限性,如界面结合强度、长期生物安全性及临床转化应用等方面的问题尚待解决。未来研究应重点关注新型表面改性技术、长期生物安全性评估以及结合3D打印等先进制造技术以实现个性化应用。通过多学科交叉合作,纳米氧化锆改性PMMA义齿基托材料有望在口腔修复领域实现更广泛应用。

[参考文献]

[1] 逯琳琳,许晓,杨芳.载药修饰的PMMA树脂基托表面的抗菌性研究[J].临床口腔医学杂志,2023,39(4):199-203.

[2] 李澳科,闫通通,王晓容.纳米载银义齿基托生物安全性的研究现状[J].中华老年口腔医学杂志,2023,21(6):361-364.

[3] Azmy E,Al-Kholy MRZ,Al-Thobity AM,et al.Comparative Effect of Incorporation of ZrO₂,TiO₂,and SiO₂ Nanoparticles on the Strength and Surface Properties of PMMA Denture Base Material:An In Vitro Study[J].Int J Biomater,2022,2022:5651-5655.

[4] Kuźniarski A,Huss W,Dąbrowa T,et al.Comparative Assessment of the Adhesion Forces of Soft Silicone Materials to the Denture Base Material (PMMA) Conditioned with Sandblasting[J].Materials(Basel),2024,17(14):3439.

[5] 刘畅,周鑫鑫,胡琼方,等.CAD/CAM与传统聚甲基丙烯酸甲酯表面性能的比较[J].现代口腔医学杂志,2020,34(6):375-377.

[6] Elhmali HT,Serpa C,Radojevic V,et al.Correlation between Agglomerates Hausdorff Dimension and Mechanical Properties of Denture Poly(methyl methacrylate)-Based Composites[J].Fractal and Fractional,2024,8(6):314-319.

[7] 迪丽努尔·买买提沙吾提,努力帕·阿布来.不同热凝义齿基托树脂对基托表面亲水性及力学性能的影响[J].口腔材料器械杂志,2022,31(4):244-249,255.

[8] 马立杰,纪秀杰,张钰淙,等.谷氨酸盐酸盐离子液体辅助制备纳米氧化锆及其吸附性能研究[J].天津化工,2024,38(5):20-22.

[9] Khosravani MR.Mechanical behavior of restorated dental composites under various loading conditions[J].J Mech

Behav Biomed Mater,2019,93:151-157.

[10] Taha EY,Elmahdy MMB,Masry SMME,et al.Effect of nanogold particles addition on dimensional stability of complete denture base material:an in-vitro study[J].BMC Oral Health,2023,23(1):153.

[11] Nejatian T,Nathwani N,Taylor L,et al.Denture Base Composites:Effect of Surface Modified Nano- and Micro-Particulates on Mechanical Properties of Polymethyl Methacrylate[J].Materials (Basel),2020,13(2):307.

[12] Viswambharan P, Adhershitha AR.Effect of titanium oxide and zirconium oxide nanoparticle incorporation on the flexural strength of heat-activated polymethyl methacrylate denture base resins-An in vitro experimental study[J].Int J Prev Clin Dent Res,2020,7(4):91-95.

[13] Fahmi MK,Ebrahim MI,Arora P.Enhancement of Mechanical Properties of Polymethylmethacrylate Denture Base Material by Zirconium Oxide Nanofiller[J].World J Dent,2019,10(2):114-118.

[14] James J,Johnson R,Nair AR,et al.Optical and physical properties of zirconium dioxide reinforced poly(methyl methacrylate) nanocomposite films[J].Journal of Applied Polymer Science,2023,141(8):123-130.

[15] 沈彩凤,徐辉.载银纳米二氧化钛在口腔材料中抗菌性的研究[J].北京口腔医学,2023,31(5):371-373.

[16] 杨凤徽,杨远超,林孟伟,等.义齿性口腔炎的发病机制和防治[J].中南大学学报(医学版),2023,48(9):1411-1418.

[17] AAlgarbar FAA,Ahmed DS,Abbod LS,et al.Antibacterial Synergy:Assessing the Impact of Nano Zirconium Oxide Particles in Combination with Selected Antibiotics on Escherichia coli and Klebsiella pneumoniae Isolates from Urinary Tract Infections[J].Indian J Microbiol,2024,64(4):1894-1902.

[18] Kumari S,Hussain A,Rao J,et al.Structural,mechanical and biological properties of PMMA-ZrO₂ nanocomposites for denture applications[J].Materials Chemistry and Physics,2023,295:127089.

[19] 葛大量,刘从厚,彭丹,等.含有不同浓度纳米氧化锌的义齿软衬材料在不同储存时间的抗真菌、物理和机械性能比较[J].临床和实验医学杂志,2023,22(14):1465-1469.

[20] 郑少娜,叶领云,梁达颖,等.3D打印载银氧化石墨烯改性义齿基托复合涂层的性能[J].电镀与涂饰,2023,42(14):30-36.