

氧化锆与钛种植体的性能及临床效果对比

杨琼琼, 刘 玮

<https://doi.org/10.12307/2026.561>

投稿日期: 2024-11-29

采用日期: 2025-01-25

修回日期: 2025-04-08

在线日期: 2025-04-29

中图分类号:

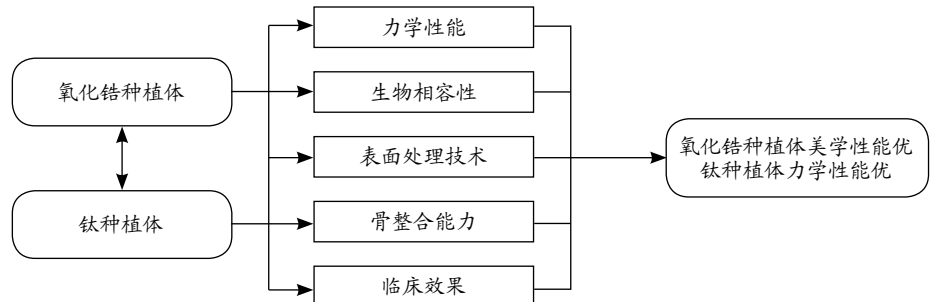
R459.9; R318.08; R783

文章编号:

2095-4344(2026)08-02063-09

文献标识码: A

文章快速阅读: 氧化锆与钛种植体的比较



文题释义:

氧化锆种植体: 指的是种植牙植入骨组织内的下部支持结构, 其材料为高强度、具有生物惰性的陶瓷材料——氧化锆。**钛种植体:** 指的是种植牙植入骨组织内的下部支持结构, 其材料为具有优异生物相容性、高强度的金属材料——钛及其合金。

摘要

背景: 牙齿缺失会影响咀嚼能力、发音能力, 导致面容不美观, 诱发肠胃疾病等危害, 而种植牙是目前牙齿缺失的最佳修复方式。**目的:** 综述两种不同材料(氧化锆与钛)种植体在力学性能、生物相容性、表面处理技术、骨整合能力及临床效果等方面的差异。**方法:** 应用计算机检索CNKI、万方数据库及ScienceDirect、Medline、PubMed数据库, 以“Zirconia implant, titanium implant, mechanical property, biocompatibility, surface treatment, osseointegration, clinical efficacy”及“氧化锆种植体, 钛种植体, 力学性能, 生物相容性, 表面处理, 骨整合, 临床效果”为关键词, 检索2014–2024年发表的相关文献。根据入选标准筛选文献, 最终纳入102篇文献进行综述。**结果与结论:** 氧化锆种植体以出色的美学效果和良好的生物相容性在口腔修复领域占据了重要地位, 然而, 氧化锆的弹性模量较高, 导致种植体周围骨组织承受的压力增大, 影响骨整合效果。钛种植体在临床应用上以良好的生物相容性和出色的力学性能著称。钛材料具有较低的弹性模量及出色的骨整合能力, 这使得钛种植体在承受较大咬合力的情况下仍能保持稳定, 但其美学效果相对较差, 在长期使用中还可能存在金属过敏等问题。因此, 在选择种植体材料时, 医生应根据患者的具体情况和修复需求, 综合考虑种植体的美学效果、力学性能、生物相容性等因素, 为患者提供个性化治疗方案。**关键词:** 氧化锆; 钛; 种植体; 力学性能; 生物相容性; 表面处理; 骨整合; 临床效果; 工程化口腔材料

Comparison of performance and clinical effects of zirconia and titanium implants

Yang Qiongqiong, Liu Wei

Department of Stomatology, Chengdu Fifth People's Hospital, Chengdu 610000, Sichuan Province, China

Yang Qiongqiong, Physician, Department of Stomatology, Chengdu Fifth People's Hospital, Chengdu 610000, Sichuan Province, China

Corresponding author: Liu Wei, Chief physician, Department of Stomatology, Chengdu Fifth People's Hospital, Chengdu 610000, Sichuan Province, China

Abstract

BACKGROUND: Lack of teeth affects chewing ability and pronunciation ability, leading to an unknown face, inducing gastrointestinal diseases. Dental implants are the best way to repair dental deletions.**OBJECTIVE:** To review the differences in mechanical properties, biocompatibility, surface treatment technology, bone integration ability and clinical effects of two different implant materials (zirconia and titanium).**METHODS:** The CNKI, WanFang databases and ScienceDirect, Medline, and PubMed databases were searched by computer. The relevant literature published from 2014 to 2024 was retrieved with the keywords “zirconia implant, titanium implant, mechanical property, biocompatibility, surface treatment, osseointegration, clinical efficacy” in Chinese and English. The articles were screened according to the inclusion and exclusion criteria, and 102 articles were finally included for review.**RESULTS AND CONCLUSION:** Zirconia implants occupy an important position in the field of oral repair owing to their excellent aesthetic effects and good biocompatibility. However, the elastic modulus of the oxide is high, and the pressure on the bone tissue around the implant increases, which affects bone integration. Titanium implants are known for their good biocompatibility and excellent mechanical properties in clinical applications. Titanium materials have a lower elastic modulus and excellent bone integration capabilities, which can maintain stability when titanium implants can bear a large bite force. However, their aesthetic effects are relatively poor. There may be problems, such as long-term use of metal allergies. Therefore, when selecting implants, doctors should comprehensively consider the aesthetic effects, mechanical properties, and biochemical compatibility of implants based on the specific circumstances and

成都市第五人民医院口腔科, 四川省成都市 610000

第一作者: 杨琼琼, 女, 1996年生, 贵州省遵义市人, 汉族, 医师, 主要从事口腔种植方面的研究。**通讯作者:** 刘玮, 主任医师, 成都市第五人民医院口腔科, 四川省成都市 610000<https://orcid.org/0000-0001-6736-3584> (杨琼琼)

引用本文: 杨琼琼, 刘玮. 氧化锆与钛种植体的性能及临床效果对比 [J]. 中国组织工程研究, 2026, 30(8):2063-2071.



repair needs of patients to provide patients with personalized treatment plans.

Key words: zirconia; titanium; implant; mechanical performance; biocompatibility; surface treatment; osseointegration; clinical efficacy; engineered dental material

How to cite this article: YANG QQ, LIU W. Comparison of performance and clinical effects of zirconia and titanium implants. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu. 2026;30(8):2063-2071.

0 引言 Introduction

牙齿脱落不仅限于口腔健康问题，还会影响整体健康和生活质量。研究显示，年龄、收入情况、口腔病史、吸烟、刷牙频率、含氟牙膏、甜食、口腔疾病认知和重视程度对患者牙列缺失均有影响^[1]。作为一种替代缺失牙齿的医疗器械，种植体通过外科手术植入颌骨中用以支持义齿或牙冠，从而恢复患者的咀嚼功能、口腔美观及发音清晰度^[2]。目前，种植体的10年存活率已达到97.0%^[3]。近年来，随着材料科学与口腔医学的飞速发展，氧化锆与钛成为种植体领域最为瞩目的两种材料。氧化锆种植体具有优异的生物相容性、高强度及良好的美学效果，色泽接近自然牙齿，能够满足患者对美观的高要求。氧化锆的耐磨性和耐腐蚀性也使它在口腔环境中具有出色的表现^[4]。与钛植入物相比，由氧化锆制成的植入物向周围组织释放的颗粒减少了50%，细菌黏附也更少，因此显示出较低的细胞毒性^[5-6]。钛种植体则以良好的生物相容性、适宜的弹性模量及与骨组织间的优秀结合能力而被广泛应用于临床。钛种植体能够与骨组织形成紧密的骨整合，从而确保种植体的长期稳定。钛材料的可加工性强，使得种植体的形态设计更加灵活多样，能够满足不同患者的个性化需求^[7]。尽管钛种植体具有很好的属性与可靠的种植成功率，但由于其合金内容物具有对局部和全身组织产生负面影响的倾向，包括免疫超敏反应、活性氧和选定患者组的腐蚀反应，因此也不是毫无缺点的种植材料^[8]。在临床应用方面，氧化锆与钛种植体各具特色，氧化锆种植体更多地被应用于前牙区及美学要求较高的区域，以满足患者对美观和功能的双重需求，而钛种植

体则因广泛的适应证和稳定的临床表现成为后牙区及复杂口腔环境下的首选^[9]。

该文旨在通过对比氧化锆与钛种植体在力学性能、生物相容性、表面处理技术、骨整合能力及临床效果等方面的异同，为临床医生在选择种植体材料时提供参考，期望能够为患者提供更加个性化、高效且安全的种植体解决方案，从而提升口腔种植治疗的整体水平。

1 资料和方法 Data and methods

1.1 资料来源

1.1.1 检索人及检索时间 由第一作者在2024年10月进行检索。

1.1.2 文献检索时限 2014-01-01/2025-01-05。

1.1.3 检索数据库 ① PubMed 数据库 (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>)，是一个提供生物医学方面的论文搜寻以及摘要的数据库；② CNKI(<https://www.cnki.net/>)，为中国知识基础设施工程，以全面打通知识生产、传播、扩散与利用各环节信息通道，打造支持全国各行业知识创新、学习和应用的交流合作平台为总目标；③ 万方数据库 (<https://www.wanfangdata.com.cn/>)，涵盖期刊、会议纪要、论文、学术成果、学术会议论文的大型网络数据库，也是和中国知网齐名的中国专业的学术数据库；④ ScienceDirect 数据库 (<https://www.ScienceDirect.com>)，是荷兰一家全球著名的学术期刊出版商，每年出版大量的学术图书和期刊，大部分期刊被SCI、SSCI、EI收录，是世界上公认的高品位学术期刊；⑤ Medline 数据库 (<https://ovidsp.dc2.ovid.com>)，是美国国立医学图书馆生产的国际性综合生物医学信息书目数据库，是当前国际上最权

威的生物医学文献数据库。

1.1.4 检索词 英文检索词: Zirconia implant, titanium implant, mechanical property, biocompatibility, surface treatment, osseointegration, clinical efficacy。中文检索词: 氧化锆种植体, 钛种植体, 力学性能, 生物相容性, 表面处理, 骨整合, 临床效果。

1.1.5 检索文献类型 研究原著、综述与荟萃分析。

1.1.6 手工检索情况 无。

1.1.7 检索策略 以 PubMed 数据库为例，文献检索策略见图1。

```
#1 Zirconia implant
#2 titanium implant
#3 #1 AND #2
#4 #1 AND #2 AND mechanical property
#5 #1 AND #2 AND biocompatibility
#6 #1 AND #2 AND Surface Treatment
#7 #1 AND #2 AND Osseointegration
#8 #1 AND #2 AND Clinical efficacy
```

图1 | PubMed 数据库检索策略

1.1.8 检索文献量 共检索到文献17 840篇，其中英文文献16 979篇、中文文献861篇。

1.2 入选标准

纳入标准：①有关氧化锆、钛材料介绍的文献；②有关氧化锆种植体、钛种植体力学性能的文献；③有关氧化锆种植体、钛种植体生物相容性的文献；④有关氧化锆种植体、钛种植体表面处理的文献；⑤有关氧化锆种植体、钛种植体骨整合的文献；⑥有关氧化锆种植体、钛种植体临床效果的文献。

排除标准：①与该文主题不相关的文章；②重复性研究；③较为陈旧文章。

1.3 质量评估及数据的提取 共检索到17 840篇文献，通过阅读文章标题及摘要进行初步筛选，资料收集者共

同评估相关文献的重复性、非相关性、陈旧性,通读全文内容后,最终纳入102篇文献进行综述。文献检索流程见图2。

2 结果 Results

2.1 钛和氧化锆概述

2.1.1 钛 钛在口腔医学中的发展历史见图3。钛是第九大丰富金属,由威廉·格雷戈里于1791年发现。纯钛呈银白色,具有独特的物理化学特性,例如密度低($4\,506\text{ g/cm}^3$)和强度高(590 MPa)^[10]。1965年,世界上第一例钛种植体由BRÄNEMARK教授为患者植入,该种植体直到患者2006年去世时仍稳固如新^[11]。随后,SUTTER等在1988年的研究标志着ITI种植体从单件式种植体向具有各种基台的双件式种植体的过渡,同时保留了非埋入式组织水平种植体的概念^[12]。20世纪90年代,BUSER等的研究结果推动了钛种植体新型表面处理的研究^[13],这些新型表面处理通常被定义为中度粗糙,目前是大多数种植体公司的首选。在同一年,种植牙功能负重前的等待时间得到了修订。长期随访和临床回顾研究证实了钛种植体即刻负重的可靠性^[14]。进入21世纪后,数字化牙科的迅猛发展和传播使得在外科手术和种植修复中引入了越来越精细的工作流程^[15]。钛可以快速与氧气发生反应在金属表面形成氧化层,因此具有抗腐蚀性。这种金属的研究涉及非常广泛的主题,例如在体育、颜料、珠宝、船舶设备、航空航天和医疗行业中的应用^[16]。在牙科行业,钛及其合金以无毒著称,甚至比铬钴和不锈钢更具生物相容性^[17]。钛金属具有不同的特性,在与牙科植入物相关的研究中氧化钛是报道最多的^[18]。氧化钛是由钛金属与空气反应形成的氧化物,具有很强的抗腐蚀能力^[19],这层氧化层使得钛具有生物相容性^[20]。目前,有6种不同类型的钛可用作植入生物材料,其中4种是商业纯钛等级(I级、II级、III级和IV级),即98%–99.6%的纯钛,还有两种是钛合金(Ti-6Al-4V和Ti-6Al-4V-超低间隙

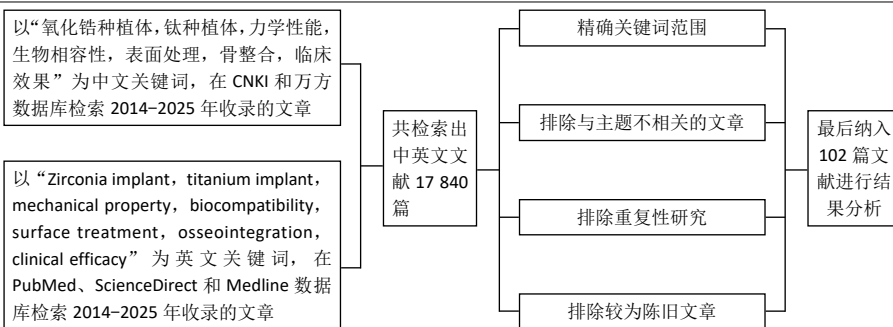


图2 | 文献筛选流程图

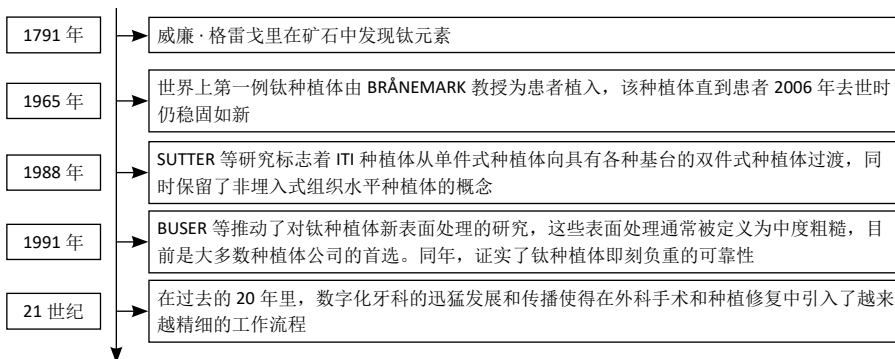


图3 | 钛在口腔医学中的发展历史

合金), 这些材料在耐腐蚀性、强度和延展性方面有所不同^[21]。添加到钛中的合金元素主要分为阿尔法(α)稳定剂(例如铝、氧、氮和碳)与贝塔(β)稳定剂(例如钒、铁、镍和钴), 因此, 牙科钛合金有3种结构形式: α 、 β 或两者的组合(α - β)^[22]。其中, IV级钛和 α - β 组合合金(Ti-6Al-4V)在牙科应用中最广泛。钛种植体的表面非常重要, 因为它们会影响与骨的相互作用。用作牙种植体主要材料(商业纯钛和Ti-6Al-4V)的表面由氧化钛组成, 这种氧化物具有很高的耐腐蚀性, 临床种植成功率高达99%^[23]。

2.1.2 氧化锆 氧化锆种植体的发展历程见图4。氧化锆作为一种矿物于1892年被发现。稳定氧化锆于1929年开发^[24], 具有良好的机械、光学和生物性能^[25]。氧化锆的抗断裂性和弯曲强度明显高于氧化铝, 使氧化锆植入物能够承受咬合力^[26], 成为制造陶瓷牙种植体的首选材料。因此, 1987年, 首个氧化锆种植体在瑞典被开发并成功上市。多态氧化锆结构以3种不同的晶体形式存在: 单斜、四方和立方。在室温下, 氧化锆获得单斜结构, 在 $1\,170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时变为四方, 在 $2\,370\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时变为立方。得益于马氏体增韧机

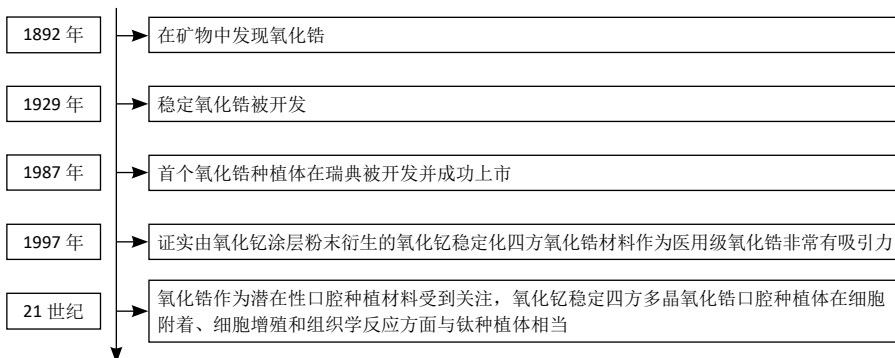


图4 | 氧化锆种植体的发展历程

制^[27]，四方结构具有优异的断裂韧性和抗弯强度。四方相和立方相在室温下不稳定，冷却时会崩解，尽管如此，可通过添加CaO、MgO和Y₂O₃将氧化锆稳定在其立方相，从而得到一种称为部分稳定氧化锆的材料。1997年，研究者通过在室温下添加Y₂O₃获得四方氧化锆多晶体。氧化钇稳定化四方氧化锆的孔隙率低、密度高、弯曲强度和压缩强度高、断裂韧性强、抗疲劳性强，除了良好的机械性能外，它们还能促进骨整合过程中成骨细胞的增殖^[28-29]，适合医疗应用。人们通常认为氧化锆植入物不如钛植入物，因为人们担心氧化锆植入物会因断裂而取出^[30]。由氧化铝增韧氧化锆制成的植入物已被证明比由氧化钇稳定化四方氧化锆制成的植入物更耐断裂^[31]。与钛相比，氧化锆具有较低的表面能和表面润湿性，可能与更少的生物膜形成有关，从而进一步降低种植体周围炎的风险^[32-33]。研究证明，钛种植体上早期形成(3 d)的生物膜量多于氧化锆种植体，两种材料种植体上14 d形成的生物膜量相当^[32]。粗糙或疏水的表面通常会增加细菌黏附，这表明牙种植体的不同表面处理会影响生物膜的形成^[34]。进入21世纪以来，氧化锆作为潜在性口腔种植材料受到关注，氧化钇稳定四方多晶氧化锆口腔种植体在细胞附着、细胞增殖和组织学反应方面与钛种植体相当^[35]。

2.2 钛与氧化锆的力学性能比较 氧化锆与钛种植体在力学性能方面的表现是评估其临床应用效果的重要指标。这两种材料在强度、弹性模量、硬度等关键参数上展现出了明显差异，这些差异直接影响了种植体的稳定性和使用寿命，见表1。

钛具有更高的抗拉强度，表明钛与氧化锆相比具有出色的机械强度。BOJKO等^[36]的一项研究评估了钛合金在轴向拉伸实验中的静态强度，突出了其高极限拉伸强度。氧化锆具有较高的弹性模量，表明其具有增强的抗变形潜力。ÖZDOĞAN等^[37]发现研磨可使氧化锆陶瓷产生最高的硬度值，强调其抗压痕和磨损能力。另

外，钛表现出优异的耐久性，抗疲劳性优于氧化锆。PETER等^[38]的研究显示，经过最先进的疲劳实验机循环负载后，与氧化锆和陶瓷相比，钛的抗疲劳性更优越。氧化锆表现出更高的硬度，强调了其抗压痕和磨损性能。ZIDAN等^[39]的研究显示，与含有硅烷化氧化锆的纳米复合材料组相比，含有氧化锆纳米粒子的聚甲基丙烯酸甲酯表面硬度显著提高。另有研究证实，添加10%，20%氧化锆纳米粒子显著提高了3D打印树脂的抗弯强度，并且生物相容性测试显示材料表面的细胞存活率大于80%^[40]。TIKHILOV等^[41]的研究证实，在抗拉强度为148 N的情况下，多孔钛植入物可实现与骨骼牢固附着的可能性，凸显了通过创新设计和处理进一步改善钛材料机械性能的潜力。

总之，虽然钛表现出优异的抗拉强度和抗疲劳性，但氧化锆表现出高硬度和弹性模量，这些性能可以通过表面处理和强化进一步增强，从而优化这些材料的机械性能。在选择种植体材料时，医生需要根据患者的具体情况和口腔环境进行综合考虑，以选择最适合的种植体材料。

2.3 钛与氧化锆的生物相容性比较 氧化锆与钛种植体在生物相容性方面表现出显著差异，见表2，这对于种植体的成功植入及其长期稳定性至关重要。生物相容性通常涉及种植体与周围组织的相互作用，包括组织反应、炎症反应等生物学特性。

由于氧化锆对成骨细胞没有免疫抑制细胞毒性作用，细胞可以通过合成各种必需和结构蛋白质来加工细胞

外基质^[8]。根据SCHNURR等^[42]的研究，氧化锆不会引起任何炎症反应。氧化锆具有良好生物相容性，因为不具有假致畸作用^[43]。体内生物相容性研究显示，氧化锆在植入软组织后会形成一层薄涂层，与氧化铝中的纤维组织层相同^[44]。氧化锆合成产品也不会软组织中引发任何细胞毒性。一项研究制备了多孔Al₂O₃/ZrO₂纳米复合材料(支架)，结果显示Al₂O₃/ZrO₂支架在骨组织工程中具有重要意义，可增强细胞增殖和黏附^[45]。DE OLIVEIRA等^[46]指出虽然氧化锆具有较低的表面自由能，但仍有致病菌黏附特性，只是细菌黏附倾向可能更低，这种良好的生物相容性使得氧化锆种植体在美学要求较高的区域(如前牙区)具有显著优势。氧化锆种植体的低过敏性和无毒性也使它在口腔种植领域得到广泛应用^[47]。

相比之下，钛种植体植入后由于细菌腐蚀、表面磨损等原因导致金属离子释放，二氧化钛颗粒会影响许多细胞成分，进而引起免疫调节和炎症。当检测到外来损伤时，人体预期会产生先天细胞反应，Toll样受体介导细胞信号诱导炎症和适应性反应。在钛纳米颗粒的影响下，无论是否受到脂多糖刺激，Toll样受体4均会上调，最终增加肿瘤坏死因子α、白细胞介素1β和白细胞介素6的mRNA水平^[48]，这些增加的炎症因子导致种植体周围组织损伤，发生无菌性骨溶解，引发骨丢失^[49-50]。口腔最常见的细菌之一是变形链球菌，与龋齿及种植体表面腐蚀增加有关，其产生的致酸环境和脂多糖通过诱导电化学事件以及

表1 | 钛与氧化锆的力学性能比较

材料	抗拉强度	弹性模量	抗疲劳性	硬度	意义
钛	较强	较低	较强	较低	具有更出色的机械强度、优异的耐久性
氧化锆	较弱	较高	较弱	较高	具有更强的抗变形潜力、更优异的抗压痕和磨损性能

表2 | 钛与氧化锆的生物相容性比较

材料	细胞免疫	离子释放	细菌黏附
钛	由于钛腐蚀和微粒产生，炎症细胞可能通过扩散或内吞作用吸收这些碎片	钛离子释放导致无菌性骨质溶解	材料表面自由能高，细菌黏附高，细菌腐蚀导致钛离子释放增多
氧化锆	目前的研究表明氧化锆不会引起任何细胞炎症途径	不释放离子，不会对细胞产生毒性	材料表面自由能低，细菌黏附倾向低



触发免疫细胞反应导致氧化攻击,对生物惰性钛表面产生负面影响,将金属离子引入种植体周围组织^[51]。为增强钛的生物相容性,TANI等^[52]将氮化硅沉积在纯钛金属表面,提高了材料表面的亲水性,增强了材料表面大鼠骨髓细胞的初始黏附,促进了硬组织分化,还表现出显著的抗菌活性。另外,在钛及钛合金表面涂覆天然生物材料(如生物蛋白、生长因子等)可显著改善材料表面的生物相容性^[53]。由于这些天然生物材料表面具有天然的细胞识别位点,更有利于细胞与材料相互作用,例如,骨形态发生蛋白是一类具有相似结构、高度保守的功能蛋白,可刺激DNA合成和细胞复制,从而促进间充质细胞定向分化为成骨细胞,诱导骨和软骨形成^[54]。

值得注意的是,尽管氧化锆和钛种植体在生物相容性方面均表现出色,但个体差异可能导致不同的反应,例如,某些患者可能对钛种植体产生过敏反应,而氧化锆种植体则通常不会引发此类问题。因此,在选择种植体材料时,医生需要根据患者的具体情况综合考虑。

2.4 钛与氧化锆的表面处理技术比较
氧化锆和钛种植体的表面处理技术在其临床应用效果中扮演着至关重要的角色,这些技术不仅影响着种植体的初期稳定性,还直接关系到种植体与周围骨组织的整合程度及长期种植成功率,见表3。

表3 | 钛与氧化锆的表面处理技术比较

材料	表面处理	涂层
钛	喷砂、酸蚀、阳极氧化、激光照射等	等离子喷涂、纳米喷雾干燥、溶胶-凝胶法、水热法、自组装机法、3D打印等
氧化锆	喷砂、酸蚀、激光照射等	二氧化硅、镁、氮、碳、羟基磷灰石、磷酸钙和多巴胺等

氧化锆种植体影响骨整合的因素可能与种植体设计和表面处理直接相关,包括表面形貌、粗糙度和润湿性^[55]。目前,人们也非常重视氧化锆植入物表面的改进和开发,尤其是使其更加粗糙和可操作。通过化学、物

理和热机械手段可以成功增强细胞反应,从而增强细胞的功能和对植入物表面的反应^[56]。喷砂和酸蚀最初用于钛种植体以增加骨整合的表面积,氧化锆种植体目前也可采用类似工艺^[57],可获得理想的粗糙度、润湿性。酸蚀可显著抑制血链球菌和牙龈卟啉单胞菌生物膜的成熟^[58-59]。另外,激光亦可使氧化锆的润湿性和粗糙度增加^[60]。与钛类似,氧化锆的表面性质也可以通过施加各种涂层来改变,这些涂层可能包括二氧化硅、镁、氮、碳、羟基磷灰石、磷酸钙和多巴胺,进而改善氧化锆的生物特性^[61-62]。

目前,钛种植体表面改性技术已发展出多种多样,这些技术大致可分为两类:第一种是表面处理,如喷砂^[63]、酸蚀^[64]、阳极氧化^[65]、激光照射^[66],这些技术有效地改变了钛的粗糙度、硬度和氧化性;另一类是涂层,在钛表面覆盖另一种材料,可以更大程度地改变植入物表面成分,实现更优异的生物医学功能。涂层技术包括等离子喷涂^[67]、纳米喷雾干燥^[68]、溶胶-凝胶法^[69]、水热法^[70]、自组装机法^[71]、3D打印等^[72]。表面改性可改善钛种植体的机械性能、骨整合能力及抗菌性能等,甚至还能满足更丰富的定制化需求,如药物缓释等^[73],显著提高种植成功率。

2.5 钛与氧化锆的骨整合能力比较
骨整合是影响种植牙成功的关键因素,氧化锆植入物的骨整合能力由多种因素决定,主要取决于表面粗糙度、能量、亲水性和生物反应^[74]。XIUBING等^[75]认为微纳米级表面设计是一种有效的表面改性方法,可以提高种植体的润湿性和摩擦性能。大多数人认为更粗糙的表面可提供更好的骨整合特性和更高的骨锚固潜力,然而,有研究表明过度的表面处理会导致表面粗糙度过高,从而产生微裂纹和缺陷,导致材料的机械性能下降^[76],因此,获得最佳表面粗糙度非常重要。MOURA等^[77]认为亲水性与增强植入物的表面能密切相关。亲水性可通过材料表面润湿性程度来衡量,而材料表面润湿性与表面粗糙度有直接关系^[78]。

研究表明,亲水表面可使成骨细胞表型分化程度更高、骨形成程度和速率增加,并且整体成骨细胞附着得到改善^[35]。

钛植入物表面会影响蛋白质吸附、血小板黏附、止血、炎症和成骨细胞反应的底层机制^[79]。细胞对生物材料反应的主要初始阶段之一是细胞与植入物表面的连接^[80]。附着受体(如整合素)通过蛋白质层介导细胞与细胞之间的连接,当植入物精确地定位在骨骼内部时,多种自然、物理、合成、加热和其他因素会影响骨整合发生。种植术后4周内,种植体表面可以明显看到新骨的发育,新骨与宿主骨上已经发育的骨骼相连(远距离成骨);在8-12周之间的某个时间点,种植体周围边界完全被成熟的层状骨取代,与种植体表面直接相连,从而结束骨整合^[81]。由于出色的生物相容性、高品质和断裂强度,钛及其化合物已被广泛应用于承重情况下的牙科和骨科植入物^[82]。Ti-6Al-4V植入物自1981年左右以来就一直用于制造牙科植入物,10年的临床种植成功率高达99%,与骨和牙龈组织具有生物相容性^[83]。ROEHLING等^[84]通过检索相关文献发现,氧化锆和钛植入物显示出类似的软组织和硬组织整合能力,然而,与氧化锆植入物相比,钛植入物往往显示出更快的初始骨整合过程。PIERALLI等^[85]的荟萃分析发现,钛种植体植入后与骨的接触面积大于氧化锆种植体。REMÍSIO等^[86]通过检索相关文献发现,钛种植体、氧化锆种植体植入后2个月与骨的接触面积比较无明显差异,而在植入后1,3个月与骨的接触面积出现显著差异。

2.6 钛与氧化锆的临床效果比较
临床效果是评价种植牙是否成功的首要标准,主要体现在成功率、长期稳定性及患者满意度等方面。钛与氧化锆的临床效果比较见表4。

表4 | 钛与氧化锆的临床效果比较

材料	边缘骨丢失	存活率	粉红色美学评分
钛	相似	较高	较差
氧化锆	相似	较低	较好

研究显示,氧化锆植入物 10 年后累积存活率估计值为 95.1%(总共 4 017 个植入物,2 083 例患者),在失败的植入物中,植入物断裂发生率为 15.1%(172 个植入物失败中有 26 个植入物断裂)^[87],26 个断裂种植体占纳入研究氧化锆种植体总数的 0.65%,与一项涉及 10 000 多颗钛种植体研究观察到的 0.44% 断裂率相似^[88]。断裂可能与种植体的直径有关,因为相当多的断裂发生在直径较小的种植体中。一项关于氧化锆种植体抗断裂性的体外研究结果表明,直径较小的氧化锆种植体(3.0–3.3 mm)在断裂时的弯矩比直径规则的种植体(3.8–4.4 mm)和直径较大的种植体(4.5–5.0 mm)低得多^[31]。另外,氧化钇稳定四方氧化锆陶瓷的稳定性在临床条件下可能会存在问题,因为材料会在化学活性水环境中长时间暴露于热应力和循环机械应力^[89]。有研究显示,在长达 132 个月的长期观察中,氧化锆种植体平均边缘骨丢失保持在 0.632–2.060 mm 之间,显示出与钛合金种植体相似的边缘骨丢失结果^[90]。不同时间点边缘骨丢失平均值的波动可能是由于不同随访中的样本量差异及种植体配置不同^[91]。

HAIMOV 等^[92]对 301 例患者的 637 个植入物进行评估,发现钛种植体的存活率高于氧化锆种植体(97.7%和 93.8%)。FERNANDES 等^[93]研究显示,随访 12–80 个月后,氧化锆种植体的存活率为 87.5%–91.25%,而钛种植体的存活率为 92.6%–100%。该两项研究的比较统计结果显示钛种植体更胜一筹。使用两件式锆种植体进行单区域修复或最多 3 个单元的修复研究显示,在 30 个月的随访中,氧化锆种植体的存活率为 85.7%,而钛种植体的存活率为 93.3%;在 80 个月的随访中,钛种植体的存活率仍然优于锆种植体^[94]。有研究显示氧化锆与钛种植体的骨整合率相似^[86]。对于粉红色美学评分,PADHYE 等^[44]认为氧化锆种植体的分值较好。KOLLER 等^[94]在使用两件式锆种植体修复时获得了最佳结果,其中氧化锆种植体

的评分为 10.33,而钛种植体的评分为 9.0。THOMA 等^[95]指出颊侧软组织厚度约为 1.68 mm,氧化锆与钛牙种植体均存在黏膜变色,其中钛种植体组变色更明显^[96]。这些差异在修复具有局部骨质流失或薄牙龈生物型等加重因素的美学部位时尤其重要。以上关于两种材料种植体的对比研究均存在样本量小、随访时间短的问题,对比结果仍需等待更大样本量以及更长随访时间的研究验证。

3 总结与展望

Summary and prospects

氧化锆与钛种植体的对比研究已有几十年,大多停留在对比一个或两个方面,或者只有体外研究及动物模型,该综述将多个方面汇总进行对比并将临床效果对比也一起纳入,为临床工作者提供更方便快捷的选择。该综述通过对氧化锆与钛种植体的深入研究对比,认为氧化锆种植体以卓越的美学效果和良好的生物相容性成为追求美观和舒适患者的理想选择,不足之处在于弹性模量高,种植体周围骨组织压力大,长期应力集中还可能造成骨吸收及种植体松动;而钛种植体则凭借优异的力学性能和长期的临床验证仍然是口腔种植领域的首选材料,比较明显的缺点在于美学效果相对较差,钛种植体的色泽和透光性无法与天然牙齿相媲美,特别是在前牙区的美学修复中。另外,在钛种植体周围组织检测出高浓度钛离子,可引起细胞炎症,降低钛种植体的骨整合能力,而氧化锆种植体在此方面则表现良好,不会引起周围细胞任何炎症反应。即使如此,因钛种植体具有更高的种植存活率和长期稳定性,仍然在市场上占据重要地位。因此,未来需要在减少钛种植体离子释放以及提高氧化锆种植体存活率等方面深入研究。未来,可能会通过更精细的纳米级处理进一步提升氧化锆材料的力学性能和生物活性,例如,通过调整氧化锆的晶相结构和添加特定的生物活性成分^[97–98],有望增强其骨整合能力,降低植入后的炎症反应;通过水

热处理可以在氧化锆表面合成 ZnO 纳米晶体,使植入物基牙和周围软组织之间形成密封,这种方法有利于植入物的长期稳定性^[99]。随着 3D 打印技术的不断成熟,氧化锆种植体的个性化定制将变得更加容易,从而满足更多复杂病例的需求^[100]。钛种植体的发展将更加注重生物相容性的优化和表面处理技术的创新,例如,通过表面改性技术(如喷涂生物活性陶瓷层或纳米级羟基磷灰石)可望进一步提升钛种植体的骨结合能力和抗菌性能^[101]。随着对钛合金材料研究的深入,新型钛合金的出现将可能解决现有钛种植体在某些特定环境下的局限性,比如镁钛合金^[102]。在氧化锆与钛种植体的比较研究方面,未来的研究将更加注重长期临床数据的积累和深入分析。通过大数据技术和人工智能算法,可以更加精准地评估两种种植体的长期稳定性和患者满意度,从而为临床医生提供更可靠的决策依据。随着口腔医学与其他学科的交叉融合,如免疫学、遗传学等,未来对种植体生物相容性的研究将更加深入,有助于揭示种植体与宿主组织相互作用的复杂机制,为种植体的设计和优化提供新的思路。

作者贡献:所有作者共同完成相关文献资料的收集、综述初稿的构思设计与写作及后期文章修改。

利益冲突:文章的全部作者声明,在课题研究和文章撰写过程中不存在利益冲突。

开放获取声明:这是一篇开放获取文章,根据《知识共享许可协议》“署名–非商业性使用–相同方式共享 4.0”条款,在合理引用的情况下,允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展,同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献,并为之建立索引,用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

版权转让:文章出版前全体作者与编辑部签署了文章版权转让协议。

出版规范:该文章撰写遵守国际医学期刊编辑委员会《系统综述和荟萃分析报告规范》(PRISMA 指南)。文章出版前已经过专业反剽窃文献检测系统进行 3 次查重。文章经小同行外审专家双盲外审,同行评议认为文章符合期刊发稿宗旨。

4 参考文献 References

- [1] KRAMARCZYK K, SKOWRON K, SKOWRON P, et al. The multifaceted impact of missing teeth on general health: A narrative review. *Folia Med. Cracov.* 2024;64(1):25-37.
- [2] DEMIR E, ÖZEL G, İNAN Ö, et al. Analysis of Satisfaction Levels in Completely Edentulous Patients Treated with Different Configurations of Implant- Supported Protheses. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2024;39(5):776-782.
- [3] SODNOM-ISH B, EO MY, KIM MJ, et al. A 10-year survival rate of tapered self-tapping bone-level implants from medically compromised Korean patients at a maxillofacial surgical unit. *Maxillofac Plast Reconstr Surg.* 2023;45(1):35.
- [4] VAGHELA H, EATON K. Is Zirconia a Viable Alternative to Titanium for Dental Implantology? *Eur. J. Prosthodont Restor Dent.* 2022;30(1):1-13.
- [5] HE X, REICHL FX, MILZ S, et al. Titanium and zirconium release from titanium- and zirconia implants in mini pig maxillae and their toxicity in vitro. *Dent Mater.* 2020;36(3):402-412.
- [6] BIHN SK, SON K, SON YT, et al. In Vitro Biofilm Formation on Zirconia Implant Surfaces Treated with Femtosecond and Nanosecond Lasers. *J Funct Biomater.* 2023;14(10):486.
- [7] WU H, CHEN X, KONG L, et al. Mechanical and Biological Properties of Titanium and Its Alloys for Oral Implant with Preparation Techniques: A Review. *Materials (Basel).* 2023;16(21):6860.
- [8] RAMCHARAN DN, ALAIMO KL, TIESENGA F. Diagnosis and Management of a Hypersensitivity Reaction to Titanium-Containing Surgical Clips: A Case Report. *Cureus.* 2023;15(2):e34929.
- [9] FIORILLO L, CICCÌU M, TOZUM TF, et al. Endosseous Dental Implant Materials and Clinical Outcomes of Different Alloys: A Systematic Review. *Materials (Basel).* 2022;15(5):1979.
- [10] ZHAO S, ZHANG R, YU Q, et al. Cryoforged nanotwinned titanium with ultrahigh strength and ductility. *Science.* 2021;373(6561):1363-1368.
- [11] RAWAT P, SAXENA D, SHARMA A. Dr. Per-Ingvar Branemark: The Father of Modern Dental Implantology. *Cureus.* 2024;16(11):e73950.
- [12] PICCOLI C, SOLIANI G, PICCOLI P, et al. Long-Term Success in Dental Implant Revisions: A 31-Year Case Study of Alveolar Atrophy Management in an Elderly Woman. *Am J Case Rep.* 2024;6(25): e943341.
- [13] ALBREKTSSON T, WENNERBERG A. On osseointegration in relation to implant surfaces. *Clin Implant Dent Relat Res.* 2019; 21 Suppl 1:4-7.
- [14] DE BRUYN H, RAES S, OSTMAN PO, et al. Immediate loading in partially and completely edentulous jaws: a review of the literature with clinical guidelines. *Periodontol 2000.* 2014;66(1):153-187.
- [15] WANG J, WANG B, LIU YY, et al. Recent Advances in Digital Technology in Implant Dentistry. *J Dent Res.* 2024;103(8):787-799.
- [16] RACOVITA AD. Titanium Dioxide: Structure, Impact, and Toxicity. *Int J Environ Res Public Health.* 2022;19(9):5681.
- [17] KUMARAGE GWC, HAKKOUH H, COMINI E. Recent Advancements in TiO₂ Nanostructures: Sustainable Synthesis and Gas Sensing. *Nanomaterials (Basel).* 2023;13(8):1424.
- [18] ROY M, CHELUCCI E, CORTI A, et al. Biocompatibility of Subperiosteal Dental Implants: Changes in the Expression of Osteogenesis-Related Genes in Osteoblasts Exposed to Differently Treated Titanium Surfaces. *J Funct Biomater.* 2024;15(6):146.
- [19] FLOREAN CT, CHIRA M, VERMEŞAN H, et al. The Influence of Using Recycled Waste Aggregates and Adding TiO₂ Nanoparticles on the Corrosion Resistance of Steel Reinforcement Embedded in Cementitious Composite. *Materials (Basel).* 2024;17(16):3895.
- [20] IBRAHIM MA, NASR GM, AHMED RM, et al. Physical characterization, biocompatibility, and antimicrobial activity of polyvinyl alcohol/sodium alginate blend doped with TiO₂ nanoparticles for wound dressing applications. *Sci Rep.* 2024;14(1):5391.
- [21] ELLAKANY P, ALGHAMDI MA, ALSHEHRI T, et al. Cytotoxicity of Commercially Pure Titanium (cpTi), Silver-Palladium (Ag-Pd), and Nickel-Chromium (Ni-Cr) Alloys Commonly Used in the Fabrication of Dental Prosthetic Restorations. *Cureus.* 2022;14(11):e31679.
- [22] TAKAHASHI M, SATO K, TOGAWA G, et al. Mechanical Properties of Ti-Nb-Cu Alloys for Dental Machining Applications. *J Funct Biomater.* 2022;13(4):263.
- [23] PRANDO D, BRENN A, DIAMANTI MV, et al. Corrosion of titanium: Part 2: Effects of surface treatments. *J Appl Biomater Funct Mater.* 2018;16(1):3-13.
- [24] HANAWA T. Zirconia versus titanium in dentistry: A review. *Dent Mater J.* 2020; 39(1):24-36.
- [25] BAPAT RA, YANG HJ, CHAUBAL TV, et al. Review on synthesis, properties and multifarious therapeutic applications of nanostructured zirconia in dentistry. *RSC Adv.* 2022;12(20):12773-12793.
- [26] CHILE J, DOLORES A, ESPINOZA-CARHUANCHO F, et al. Zirconia Dental Implants as a Different Alternative to Titanium: A Literature Review. *J Int Soc Prev Community Dent.* 2023;13(5):357-364.
- [27] GUL A, PAPIA E, NAIMI-AKBAR A, et al. Zirconia dental implants; the relationship between design and clinical outcome: A systematic review. *J Dent.* 2024;143:104903.
- [28] KONGKIATKAMON S, ROKAYA D, KENG TANYAKICH S, et al. Current classification of zirconia in dentistry: an updated review. *PeerJ.* 2023;11:e15669.
- [29] WU T, ZHOU Q, HONG G, et al. A chlorogenic acid-chitosan complex bifunctional coating for improving osteogenesis differentiation and bactericidal properties of zirconia implants. *Colloids Surf B Biointerfaces.* 2023;230:113484.
- [30] FRANCESCATO O, SOUZA RODRIGUES IN, DOUGLAS DE OLIVEIRA DW, et al. Primary Stability and Fracture Resistance of Zirconia and Titanium Implants: A Paired Comparative In Vitro Study. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2024;1-22. doi: 10.11607/10974.
- [31] BETHKE A, PIERALLI S, KOHAL RJ, et al. Fracture Resistance of Zirconia Oral Implants In Vitro: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Materials (Basel).* 2020;13(3):562.
- [32] CHIOU LL, PANARIELLO BHD, HAMADA Y, et al. Comparison of In Vitro Biofilm Formation on Titanium and Zirconia Implants. *Biomed Res Int.* 2023;2023:8728499.
- [33] MIURA S, SHINYA A, ISHIDA Y, et al. Mechanical and surface properties of additive manufactured zirconia under the different building directions. *J Prosthodont Res.* 2023;67(3):410-417.
- [34] BRAVO E, SERRANO B, RIBEIRO-VIDAL H, et al. Biofilm formation on dental implants with a hybrid surface microtopography: An in vitro study in a validated multispecies dynamic biofilm model. *Clin. Oral Implants Res.* 2023;34(5):475-485.
- [35] MAJHI R, MAJHI RK, GARHNEYAK L, et al. Comparative evaluation of surface-modified zirconia for the growth of bone cells and early osseointegration. *J Prosthet Dent.* 2021;126(1):92.e91-92.e98.
- [36] BOJKO Ł, RYNIOWICZ AM, RYNIOWICZ W. Strength Tests of Alloys for Fixed Structures in Dental Prosthetics. *Materials (Basel).* 2022;15(10):3497.

- [37] OZDOGAN A, YESIL DUYMUS Z. Investigating the Effect of Different Surface Treatments on Vickers Hardness and Flexural Strength of Zirconium and Lithium Disilicate Ceramics. *J Prosthodont*. 2020;29(2):129-135.
- [38] PETER C, SHAH K, SIMON L, et al. Comprehensive Evaluation of Titanium, Zirconia, and Ceramic Dental Implant Materials: A Comparative Analysis of Mechanical and Esthetic Properties. *Cureus*. 2024;16(5):e60582.
- [39] ZIDAN S, SILIKAS N, AL-NASRAWI S, et al. Chemical Characterisation of Silanised Zirconia Nanoparticles and Their Effects on the Properties of PMMA-Zirconia Nanocomposites. *Materials (Basel)*. 2021;14(12):3212.
- [40] ALSHAMRANI A, ALHOTAN A, KELLY E, et al. Mechanical and Biocompatibility Properties of 3D-Printed Dental Resin Reinforced with Glass Silica and Zirconia Nanoparticles: In Vitro Study. *Polymers (Basel)*. 2023;15(11):2523.
- [41] TIKHILOV R, SHUBNYAKOV I, DENISOV A, et al. The experimental study of tissue integration into porous titanium implants. *Hip Int*. 2022;32(3):386-390.
- [42] SCHNURR E, VOLZ KU, MOSETTER K, et al. Interaction of Telomere Length and Inflammatory Biomarkers Following Zirconia Implant Placement: A Case Series. *J Oral Implantol*. 2023;49(5):524-531.
- [43] SAITO MM, ONUMA K, YAMAKOSHI Y. Nanoscale osseointegration of zirconia evaluated from the interfacial structure between ceria-stabilized tetragonal zirconia and cell-induced hydroxyapatite. *J Oral Biosci*. 2024;66(2):281-287.
- [44] PADHYE NM, CALCIOLARI E, ZUERCHER AN, et al. Survival and success of zirconia compared with titanium implants: a systematic review and meta-analysis. *Clin. Oral Investig*. 2023;27(11): 6279-6290.
- [45] VIDANE AS, NUNES FC, FERREIRA JA, et al. Biocompatibility and interaction of porous alumina-zirconia scaffolds with adipose-derived mesenchymal stem cells for bone tissue regeneration. *Heliyon*. 2023;9(9):e20128.
- [46] DE OLIVEIRA GR, POZZER L, CAVALIERI-PEREIRA L, et al. Retraction: Bacterial adhesion and colonization differences between zirconia and titanium implant abutments: an in vivo human study. *J Periodontal Implant Sci*. 2019;49(1):58.
- [47] SAINI RS, MOSADDAD SA, HEOYAN A. Application of density functional theory for evaluating the mechanical properties and structural stability of dental implant materials. *BMC Oral Health*. 2023;23(1):958.
- [48] NOUMBISSI S, SCARANO A, GUPTA S. A Literature Review Study on Atomic Ions Dissolution of Titanium and Its Alloys in Implant Dentistry. *Materials (Basel)*. 2019;12(3):368.
- [49] ZHOU Z, SHI Q, WANG J, et al. The unfavorable role of titanium particles released from dental implants. *Nanotheranostics*. 2021;5(3):321-332.
- [50] WANG X, LI Y, FENG Y, et al. Macrophage polarization in aseptic bone resorption around dental implants induced by Ti particles in a murine model. *J Periodontal Res*. 2019;54(4):329-338.
- [51] BERRYMAN Z, BRIDGER L, HUSSAINI HM, et al. Titanium particles: An emerging risk factor for peri-implant bone loss. *Saudi Dent J*. 2020;32(6):283-292.
- [52] TANI A, TSUBOUCHI H, MA L, et al. Effect of Silicon Nitride Coating on Titanium Surface: Biocompatibility and Antibacterial Properties. *Int J Mol Sci*. 2024;25(17):9148.
- [53] CHE Z, SUN Q, ZHAO Z, et al. Growth factor-functionalized titanium implants for enhanced bone regeneration: A review. *Int J Biol Macromol*. 2024;274(Pt 2):133153.
- [54] HAN JJ, YANG HJ, HWANG SJ. Enhanced Bone Regeneration by Bone Morphogenetic Protein-2 after Pretreatment with Low-Intensity Pulsed Ultrasound in Distraction Osteogenesis. *Tissue Eng Regen Med*. 2022;19(4):871-886.
- [55] CRUZ MB, SILVA N, MARQUES JF, et al. Biomimetic Implant Surfaces and Their Role in Biological Integration-A Concise Review. *Biomimetics (Basel)*. 2022;7(2):74.
- [56] HO KN, CHEN LW, KUO TF, et al. Surface modification of zirconia ceramics through cold plasma treatment and the graft polymerization of biomolecules. *J Dent Sci*. 2023;18(1):73-80.
- [57] CHOI SH, RYU JH, KWON JS, et al. Effect of wet storage on the bioactivity of ultraviolet light- and non-thermal atmospheric pressure plasma-treated titanium and zirconia implant surfaces. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*. 2019;105:110049.
- [58] KLIGMAN S, REN Z, CHUNG CH, et al. The Impact of Dental Implant Surface Modifications on Osseointegration and Biofilm Formation. *J Clin Med*. 2021;10(8):1641.
- [59] LIAO M, SHI Y, CHEN E, et al. The Bio-Aging of Biofilms on Behalf of Various Oral Status on Different Titanium Implant Materials. *Int J Mol Sci*. 2022;24(1):332.
- [60] FERNANDES BF, SILVA N, DA CRUZ MB, et al. Cell Biological and Antibacterial Evaluation of a New Approach to Zirconia Implant Surfaces Modified with MTA. *Biomimetics (Basel)*. 2024;9(3):155.
- [61] SCHÜNEMANN FH, GALÁRRAGA-VINUEZA ME, MAGINI R, et al. Zirconia surface modifications for implant dentistry. *Mater Sc Eng C Mater Biol Appl*. 2019;98: 1294-1305.
- [62] LI X, LIANG S, INOKOSHI M, et al. Different surface treatments and adhesive monomers for zirconia-resin bonds: A systematic review and network meta-analysis. *Jpn Dent Sci Rev*. 2024;60:175-189.
- [63] YANG R, HONG MH. Improved Biocompatibility and Osseointegration of Nanostructured Calcium-Incorporated Titanium Implant Surface Treatment (XPEED®). *Materials (Basel)*. 2024;17(11): 2707.
- [64] BAYRAK M, KOCAC-OZTUG NA, GULATI K, et al. Influence of Clinical Decontamination Techniques on the Surface Characteristics of SLA Titanium Implant. *Nanomaterials (Basel)*. 2022;12(24):4481.
- [65] GULATI K, ZHANG Y, DI P, et al. Research to Clinics: Clinical Translation Considerations for Anodized Nano-Engineered Titanium Implants. *ACS Biomater Sci Eng*. 2022;8(10): 4077-4091.
- [66] VEIKO V, KARLAGINA Y, ZERNITKAIA E, et al. Laser-Induced μ -Rooms for Osteocytes on Implant Surface: An In Vivo Study. *Nanomaterials (Basel)*. 2022;12(23):4229.
- [67] BHATTACHARJEE A, BANDYOPADHYAY A, BOSE S. Plasma sprayed fluoride and zinc doped hydroxyapatite coated titanium for load-bearing implants. *Surf Coat Technol*. 2022;440:128464.
- [68] BAGHDAN E, RASCHPICHLER M, LUTFI W, et al. Nano spray dried antibacterial coatings for dental implants. *Eur J Pharm Biopharm*. 2019;139:59-67.
- [69] AZARI R, REZAIE HR, KHAVANDI A. Effect of titanium dioxide intermediate layer on scratch and corrosion resistance of sol-gel-derived HA coating applied on Ti-6Al-4V substrate. *Prog Biomater*. 2021;10(4): 259-269.
- [70] FU Z, DENG X, FANG X. Effect of addition of Ca^{2+} to titanium by a hydrothermal method on soft tissue sealing. *Microsc Res Tech*. 2022;85(9):3050-3055.
- [71] CHEN H, FENG R, XIA T, et al. Progress in Surface Modification of Titanium Implants by Hydrogel Coatings. *Gels*. 2023;9(5):423.
- [72] CHENG XQ, XU W, SHAO LH, et al. Enhanced osseointegration and antimicrobial properties of 3D-Printed porous titanium alloys with copper-strontium doped calcium silicate coatings. *J Biomater Appl*. 2025;39(6):607-619.

- [73] ZHAN J, LI L, YAO L, et al. Evaluation of sustained drug release performance and osteoinduction of magnetron-sputtered tantalum-coated titanium dioxide nanotubes. *RSC Adv.* 2024;14(6): 3698-3711.
- [74] RAUSCH MA, SHOKOOHI-TABRIZI H, WEHNER C, et al. Impact of Implant Surface Material and Microscale Roughness on the Initial Attachment and Proliferation of Primary Human Gingival Fibroblasts. *Biology (Basel).* 2021;10(5):356.
- [75] XIUBING J, QILEI Z, DU Z, et al. Wettability and frictional properties on zirconia surfaces irradiated by femtosecond laser. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* 2022;654:130198
- [76] KIM DS, LEE JK. Sintered Characteristics of 3 Mole% Yttria-Stabilized Zirconia Polycrystals (3Y-TZP) Implants Manufactured by Slip-Casting and Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing (CAD/CAM). *J Nanosci Nanotechnol.* 2021;21(7): 3877-3881.
- [77] MOURA CG, PEREIRA R, BUCIUMEANU M, et al. Effect of laser surface texturing on primary stability and surface properties of zirconia implants. *Ceram Int.* 2017;43(17):15227-15236.
- [78] ARAGONESES J, VALVERDE NL, FERNANDEZ-DOMINGUEZ M, et al. Relevant Aspects of Titanium and Zirconia Dental Implants for Their Fatigue and Osseointegration Behaviors. *Materials (Basel).* 2022;15(11): 4036.
- [79] WU B, TANG Y, WANG K, et al. Nanostructured Titanium Implant Surface Facilitating Osseointegration from Protein Adsorption to Osteogenesis: The Example of TiO₂ NTAs. *Int J Nanomedicine.* 2022;17: 1865-1879.
- [80] FANG X, SUN D, LI Y, et al. Macrophages in the process of osseointegration around the implant and their regulatory strategies. *Connect. Tissue Res.* 2024;65(1):1-15.
- [81] WANG S, ZHAO X, HSU Y, et al. Surface modification of titanium implants with Mg-containing coatings to promote osseointegration. *Acta Biomater.* 2023;169: 19-44.
- [82] KHAHOEN A, SORNUSWAN T, CHAIJAREENONT P, et al. Biomaterials and Clinical Application of Dental Implants in Relation to Bone Density-A Narrative Review. *J Clin Med.* 2023;12(21):6924.
- [83] NICHOLSON JW. Titanium Alloys for Dental Implants: A Review. *Prosthesis.* 2020;2(2): 100.
- [84] ROEHLING S, SCHLEGEL KA, WOELFLER H, et al. Zirconia compared to titanium dental implants in preclinical studies-A systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Implants Res.* 2019;30(5):365-395.
- [85] PIERALLI S, KOHAL RJ, LOPEZ HERNANDEZ E, et al. Osseointegration of zirconia dental implants in animal investigations: A systematic review and meta-analysis. *Dent Mater.* 2018;34(2):171-182.
- [86] REMÍSIO M, BORGES T, CASTRO F, et al. Histologic Osseointegration Level Comparing Titanium and Zirconia Dental Implants: Meta-analysis of Preclinical Studies. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2023; 38(4):667-680.
- [87] MOHSENI P, SOUFI A, CHRCANOVIC BR. Clinical outcomes of zirconia implants: a systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Investig.* 2023;28(1):15.
- [88] CHRCANOVIC BR, KISCH J, ALBREKTSSON T, et al. Factors influencing the fracture of dental implants. *Clin Implant Dent Relat Res.* 2018;20(1):58-67.
- [89] ALFRISANY NM, DE SOUZA GM. Surface and bulk properties of zirconia as a function of composition and aging. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2022;126:104994.
- [90] CHRCANOVIC BR, KISCH J, ALBREKTSSON T, et al. A retrospective study on clinical and radiological outcomes of oral implants in patients followed up for a minimum of 20 years. *Clin Implant Dent Relat Res.* 2018;20(2):199-207.
- [91] WENNERBERG A, ALBREKTSSON T, CHRCANOVIC B. Long-term clinical outcome of implants with different surface modifications. *Eur J Oral Implantol.* 2018; 11 Suppl 1:S123-s136.
- [92] HAIMOV E, SARIKOV R, HAIMOV H, et al. Differences in Titanium, Titanium-Zirconium, Zirconia Implants Treatment Outcomes: a Systematic Literature Review and Meta-Analysis. *J Oral Maxillofac Res.* 2023;14(3):e1.
- [93] FERNANDES PRE, OTERO AIP, FERNANDES JCH, et al. Clinical Performance Comparing Titanium and Titanium-Zirconium or Zirconia Dental Implants: A Systematic Review of Randomized Controlled Trials. *Dent J (Basel).* 2022;10(5):83.
- [94] KOLLER M, STEYER E, THEISEN K, et al. Two-piece zirconia versus titanium implants after 80 months: Clinical outcomes from a prospective randomized pilot trial. *Clin Oral Implants Res.* 2020;31(4):388-396.
- [95] THOMA DS, IOANNIDIS A, CATHOMEN E, et al. Discoloration of the Peri-implant Mucosa Caused by Zirconia and Titanium Implants. *Int J Periodontics Restorative Dent.* 2016;36(1):39-45.
- [96] RUIZ HENAO PA, CANEIRO QUEIJA L, MAREQUE S, et al. Titanium vs ceramic single dental implants in the anterior maxilla: A 12-month randomized clinical trial. *Clin Oral Implants Res.* 2021;32(8): 951-961.
- [97] Il S. Quantitative Characterization by Transmission Electron Microscopy and Its Application to Interfacial Phenomena in Crystalline Materials. *Materials (Basel).* 2024;17(3):578.
- [98] BANNUNAH AM. Biomedical Applications of Zirconia-Based Nanomaterials: Challenges and Future Perspectives. *Molecules.* 2023; 28(14):5428.
- [99] HU J, ATSUTA I, LUO Y, et al. Promotional Effect and Molecular Mechanism of Synthesized Zinc Oxide Nanocrystal on Zirconia Abutment Surface for Soft Tissue Sealing. *J Dent Res.* 2023;102(5):505-513.
- [100] MOHAMMED MK, ALAHMARI A, ALKHALEFAH H, et al. Evaluation of zirconia ceramics fabricated through DLP 3d printing process for dental applications. *Heliyon.* 2024;10(17):e36725.
- [101] GRADIŞTEANU-PIRCALABIORU G, NEGUT I, DINU M, et al. Enhancing orthopaedic implant efficacy: the development of cerium-doped bioactive glass and polyvinylpyrrolidone composite coatings via MAPLE technique. *Biomed Mater.* 2024;20(1). doi:10.1088/1748-605X/ad98d5.
- [102] SHARMA SK, GAJEVIĆ S, SHARMA LK, et al. Magnesium-Titanium Alloys: A Promising Solution for Biodegradable Biomedical Implants. *Materials (Basel).* 2024;17(21):5157.

(责任编辑: 关伟, 邱杨, 张楠)