

种植体磨光整形术在种植体周炎治疗中的应用

孙静怡 李岩峰

中国人民解放军总医院第四医学中心口腔科 北京 100142

[摘要] 种植体周炎是一种影响牙种植体长期成功率的慢性炎症性疾病，其主要特征是种植体周围软组织的炎症和骨丧失。本文综述了种植体周炎的病因及其影响因素，并探讨了现有的治疗方法，包括机械治疗、化学/药物治疗、光动力疗法和手术治疗。此外，针对种植体表面处理的重要性，详细介绍了种植体磨光整形术在减少菌斑附着、改善生物相容性和优化种植体周围微环境方面的作用。

[关键词] 种植体周炎；种植体磨光整形术；机械治疗；生物相容性；种植体周围微环境

[中图分类号] R783.4 **[文献标志码]** A **[doi]** 10.7518/gjkq.2026125



本文链接

OSID 码

Application of implant polishing plastic surgery in the treatment of peri-implantitis

Sun Jingyi, Li Yanfeng

Dept. of Stomatology, the Fourth Medical Center of PLA General Hospital, Beijing 100142, China

Correspondence: Li Yanfeng, Email: 949427779@qq.com

[Abstract] Peri-implantitis is a chronic inflammatory disease that affects the long-term success rate of dental implants, characterized by inflammation of the peri-implant soft tissues and bone loss. In this review, the etiology and influencing factors of peri-implantitis are summarized, and the current treatment methods, including mechanical treatment, chemical/pharmacological therapy, photodynamic therapy, and surgical treatment, are discussed. The importance of implant surface treatment is emphasized, detailing the role of implant polishing plastic surgery in reducing plaque attachment, improving biocompatibility, and optimizing the peri-implant microenvironment.

[Key words] peri-implantitis; implant polishing plastic surgery; mechanical therapy; biocompatibility; peri-implant microenvironment

种植体周炎作为影响口腔种植长期成功率的主要并发症，其发病机制复杂、进展隐匿且具有持续性组织破坏特征，随着种植修复治疗的广泛开展，其患病率逐年上升，已成为口腔种植领域亟待解决的核心临床问题。目前，围绕种植体周炎的治疗已形成包括机械去污、化学消毒、激光辅助及外科手术等在内的多维度综合干预体系，旨在清除种植体表面生物膜并控制局部炎症反应，但受限于种植体表面微结构复杂及解剖环境多变，不同方法在清洁效能、生物相容性及远期稳定性

方面仍存在显著差异，尚缺乏统一而高效的治疗范式。在此背景下，种植体磨光整形术作为一种通过重塑暴露种植体表面形貌、降低粗糙度并削弱细菌再黏附能力的物理干预策略，近年来受到广泛关注，并在降低生物膜负荷和改善软组织附着方面显示出良好潜力。基于此，本综述系统梳理种植体周炎现有治疗策略及研究进展，重点评述种植体磨光整形术的理论基础、技术演进及临床应用，以期明确其在综合治疗体系中的定位与价值。

[收稿日期] 2025-07-02; **[修回日期]** 2025-12-27

[第一作者] 孙静怡，护师，硕士，Email: asjyzgh@foxmail.com

[通信作者] 李岩峰，教授，博士，Email: 949427779@qq.com

1 种植体周炎概述

种植体周炎是一种与牙齿种植体相关的慢性

炎症性疾病，主要表现为种植体周围软硬组织的炎症，通常伴有骨丧失。这种病理过程常发生在种植体植入后的一段时间内，尤其是在种植体周围的牙龈和牙槽骨区域，导致种植体的稳定性下降，甚至可能导致种植体脱落。

种植体周炎的发生主要由微生物感染、宿主免疫炎症反应、种植体表面因素和机械应力共同作用^[1]。细菌在种植体表面的积聚及其产生的毒素引发局部炎症反应，进而导致骨吸收。研究^[2]表明，牙龈卟啉单胞菌、福赛斯坦纳菌、齿垢密螺旋体等与牙周炎相关的致病菌在种植体周炎患者中也被频繁检测到，这些菌种通过产生外毒素和蛋白酶等方式破坏组织，诱导免疫反应，参与种植体周围骨质的持续性吸收。种植体周围的骨丧失往往是由于牙周组织的免疫细胞对细菌的反应过度，导致炎症蔓延至骨组织，最终形成骨吸收^[3]。此外，种植体或基台的表面粗糙度^[4-5]、材料特性^[6]等可能加剧局部炎症反应；而咬合过载^[7-8]和种植体微动^[9]则可加剧边缘骨的吸收。这些因素最终可能表现为种植体周围软组织炎症即种植体周围黏膜炎，并进一步发展为伴随进行性骨丧失的种植体周炎，最终导致种植体失败。由于种植体缺乏天然牙所具备的牙周膜结构，其缓冲和免疫防御功能明显不足，因此一旦发生感染，种植体周炎往往较天然牙牙周炎进展更为迅速。多项临床研究已证实，种植体周炎的边缘骨吸收速率显著高于牙周炎，反映出其更强的破坏性和侵袭性。放射学随访数据显示，牙周炎的骨丧失相对缓慢。一项对 105 名患者进行 4~14 年观察的研究^[10]显示，牙周炎患者的牙槽骨平均年吸收速率为 0.07 mm。另一项 10 年期前瞻性研究^[11]亦报道其年均骨丧失约为 0.08 mm。相比之下，种植体周炎的骨吸收更加显著。一项涵盖 596 名种植牙患者的 9 年期临床随访研究^[12]指出，术后 2 年内有 52% 的种植体出现

超过 0.5 mm 的边缘骨吸收，至第 3 年该比例上升至 66%，提示其在早期阶段即可能发生快速且持续的骨破坏。综上所述，种植体周炎具有较高的疾病进展速率，因此早期诊断和及时干预对于维持种植体长期稳定性尤为关键^[13]。

2 种植体周炎的治疗方法

2.1 机械治疗

在种植体周炎的治疗中，专用清理工具是常用的手段，旨在去除种植体表面的细菌、牙结石和感染组织，改善口腔卫生，促进治疗效果。种植体清理钛刷作为种植体表面专用清洁工具中的一种，与其他技术联合应用后在优化抗菌性能、促进骨结合及提升生物相容性方面展现出巨大潜力^[14]。超声清洗技术通过高频振动产生作用力，帮助去除种植体表面的牙菌斑和结石，并清洁深层牙周袋^[15-16]。机械刮治方法通过手工或超声刮治器械去除牙周袋内的感染物，去除种植体表面的有害物质。这些传统清理方法在临床中已被广泛应用，并对控制种植体周炎具有良好的疗效。

另外，喷砂可通过高压气流喷射微细粉末去除种植体表面的生物膜和菌斑，同时保持种植体表面的完整性^[17-18]，其核心成分是喷射粉末，主要包括碳酸氢钠^[19]、甘氨酸^[20]和赤藓糖醇^[21]等，其中甘氨酸和赤藓糖醇因其较小的颗粒尺寸（<45 μm）和较低的硬度，被广泛用于种植体周炎的非手术治疗^[22-24]。随着技术的不断发展，新型清理方式如激光清除^[25-28]等，逐渐成为种植体周炎治疗中的新兴方法。激光清除技术通过高能激光束精确作用于种植体表面，不仅可以去除附着的牙菌斑和结石，还能促进软组织的愈合，减少细菌的再生^[25-28]。不同机械治疗方法的对比情况如表 1^[14-18,25-28]所示。

表 1 不同机械治疗方法的对比

Tab 1 Comparison of different mechanical treatment methods

治疗方式	原理与方法	主要特点	优势	常用材料/工具
钛刷清理	使用专用钛刷物理接触清理种植体表面	强力去除细菌与生物膜	促进骨结合与生物相容性	钛制刷头 ^[14]
超声清洗	高频振动产生冲击力清除牙菌斑、结石	清除深层牙周袋污物	高效、微创	超声洁治器 ^[15-16]
机械刮治	手动刮治器械刮除感染组织	传统，依赖经验	直接清除病灶	手动刮治器
喷砂处理	高压喷射微粉末清理生物膜、菌斑	保持种植体表面完整性	高效、安全、表面保护良好	碳酸氢钠、甘氨酸、赤藓糖醇 ^[17-18]
激光清除	高能激光束精准作用种植体表面	新兴技术，辅助软组织愈合	去除牙菌斑同时促进愈合	不同类型激光器 ^[25-28]

2.2 化学/药物治疗

局部药物治疗是种植体周炎管理中的重要手

段，主要通过特定浓度药物直接作用于感染区域，控制细菌数量、缓解炎症反应，并减少系统性不

良反应。常用药物包括抗生素、抗菌剂、化学去污剂等。其中，抗生素如米诺环素^[29]、多西环素^[30]等四环素类药物具有广谱抗菌作用，能有效抑制与种植体周炎相关的革兰阴性厌氧菌，并对基质金属蛋白酶具有抑制作用。研究^[31]表明感染部位的酸性环境会导致生物膜结构的改变，增强细菌的抗药性，进而影响抗生素的疗效。例如，铜绿假单胞菌在酸性条件下形成更多的生物膜，并更快地诱导抗生素耐药性^[32]。因此，在使用四环素类抗生素治疗种植体相关感染时，需密切关注局部pH变化对抗生素作用机制的影响，以制定更有

效的治疗策略。

抗菌剂如甲硝唑^[33]、氯己定^[34]等也常用于局部应用。氯己定虽具有良好的抗菌谱和较长的黏附性，但长期使用可能导致牙石堆积^[35]、菌群失衡^[36]及种植体表面变色^[37]。此外，其他药物如次氯酸钠^[38]、过氧化氢^[39]、柠檬酸^[40]和乙二胺四乙酸(ethylenediaminetetraacetic acid, EDTA)^[41]等清洗剂虽能有效破坏生物膜、溶解有机成分，但其浓度和接触时间需严格控制，以避免对种植体表面造成腐蚀或粗糙度改变，从而影响骨整合过程^[42-43]。不同药物的详细对比如表2^[31,44-52]所示。

表 2 不同局部药物的对比

Tab 2 Comparison of different topical medications

药物类别	代表药物	作用机制	优点	局限性与不良反应	临床注意事项
抗生素	米诺环素、多西环素	抑制细菌蛋白质合成、广谱抗菌，抑制基质金属蛋白酶	对革兰阴性厌氧菌有效；可控炎症反应	酸性环境影响药效 ^[31]	注意感染部位pH变化；局部浓度控制
抗菌剂	氯己定	破坏细胞膜，抑制细菌酶系统	广谱抗菌；黏附性强，作用时间长	长期使用可致牙石堆积 ^[44] 、菌群失衡、表面着色 ^[45]	限期使用（<2周）；避免与着色饮食（如茶、咖啡）共用
化学去污剂	次氯酸钠	氧化有机物、破坏生物膜	快速杀菌，有效破坏生物膜	高浓度或长时间接触可腐蚀种植体表面 ^[46]	控制使用浓度与接触时间（推荐≤1%浓度，≤5 min） ^[47]
其他药物	过氧化氢	释放自由基，破坏细菌蛋白质和膜结构	有氧环境下抗菌效果好，泡沫促进清创	高浓度可引起组织毒性 ^[48] ；对种植体材料有潜在影响 ^[49]	通常使用3%浓度，短时应用
	柠檬酸	酸化环境、去除牙石和污垢，部分抗菌	去污能力强，有助于软组织附着	高浓度腐蚀钛表面，影响表面能和粗糙度 ^[42]	建议使用10%浓度，<4 min处理时间 ^[50]
	EDTA	螯合钙离子，清除无机成分	可辅助去除污垢，与机械清创联合效果佳	高浓度造成细胞毒性 ^[51]	建议17%浓度局部短时应用，冲洗彻底 ^[52]

局部药物治疗通常需要联合其他去污手段，以提高疗效并避免感染的复发^[53]，如机械清创（如钛刷、喷砂）^[54]、光动力疗法（photodynamic therapy, PDT）^[55]等，以实现协同效应。相比单一治疗，联合方案可显著提升生物膜去除效率，降低复发率，并减少耐药菌株的产生^[56-57]。

近年来，研究者开始关注局部药物的载体系统和释放方式，如水凝胶^[58]、微球^[59]或纳米粒子^[60]形式的缓释制剂，能够延长药物作用时间，减少用药频次并提高靶向性。以Pluronic凝胶与过氧化氢的组合为例，已被证实在不损伤种植体表面的前提下，具备良好的抗菌和生物相容性^[61]。

不同药物在适应证、作用机制和不良反应方面也存在差异。例如，米诺环素局部应用更适用于轻中度种植体周炎，其凝胶制剂具有缓释特性^[29]；而EDTA适用于种植体表面重构处理，有助于形成有利于骨结合的表面微环境^[62]。因此，药物选择应基于病变程度、病原微生物谱、种植体

表面类型及患者个体差异等因素进行个体化决策。

2.3 PDT

PDT作为一种非侵入性辅助治疗方法，被应用于牙周病和种植体周炎的治疗中^[63]。其机制主要依赖光敏剂（如亚甲蓝或血卟啉）在特定波长激光照射下产生活性氧，以杀灭局部病原微生物^[64]。部分研究显示能够在机械磨光无法深入如种植体螺纹凹陷处区域进行有效杀菌^[65]，但整体疗效尚未优于其他成熟方案^[66]。当前国际主流指南对PDT的临床价值持较为谨慎态度，根据美国牙周病学会2018年发布的证据综述，PDT在部分研究中表现出与常规治疗相当的临床疗效，如探诊深度减小与附着水平改善，但其疗效的持续性和临床意义尚缺乏高质量、多中心研究支持^[66]。

尽管PDT作为种植体周炎的辅助治疗手段已显示出一定的潜力，但其临床疗效是否受诸如光敏剂类型、照射时间、光源波长与强度等因素显著影响，目前尚缺乏充分且一致的证据支持。例

如有研究^[67-68]指出,不同类型的光敏剂如吡啶菁绿与亚甲蓝在联合机械清创治疗糖尿病患者种植体周炎时,疗效差异并无统计学意义。此外,另一项体外研究^[69]发现,在使用亚甲蓝为光敏剂的前提下,预照射时间设置为0、1、3、5 min的各组在细菌抑制效果上并无显著差异,所有实验组菌落数量均明显低于未处理组。因此,尽管PDT的治疗效果可能受光敏剂种类、浓度、照射方式、剂量强度与频率等因素的影响,但当前相关研究结果仍不一致,尚不能得出明确结论。为提高PDT在种植体周炎治疗中的稳定性和广泛适用性,仍有必要通过更大样本量、长期随访的高质量临床研究进一步验证,并推动制定标准化治疗参数。同时,应结合种植体表面处理方式、病变类型及患者个体特征,探索更具针对性的精准化治疗策略。

2.4 手术治疗

手术治疗是针对种植体周炎进展较为严重、常规非手术治疗效果不佳的患者所采用的方法。手术干预的主要目标是去除感染组织、改善种植体表面状况,并促进新的骨组织形成,以恢复种植体的稳定性和功能。

翻瓣手术是一种常见的手术治疗方式,主要用于种植体周炎的清创。翻瓣手术还能改善软组织形态,减少菌斑滞留的风险^[70]。翻瓣术后,可结合其他治疗手段,如骨再生技术或抗菌剂的局部应用,以提高疗效。种植体磨光整形术通常作为种植体周炎手术治疗的一部分,1990年就有病例报告^[71]指出,在翻瓣清创治疗种植体周炎的同时可以用高速金刚砂车针和氧化铝车针重新塑形种植体表面。

骨移植和再生治疗主要适用于伴有中度至重度垂直型骨缺损的种植体周炎患者,特别是三壁、二壁或联合壁缺损的病例。对于有利型骨缺损的患者,骨再生治疗尤其适合,通过引导骨再生技术可以恢复骨组织,改善种植体的长期稳定性。特别是在感染控制后仍存在显著骨支持丧失的病例中,这些治疗方法能够有效促进骨缺损区域的修复,并提高种植体的生物学整合。手术过程中,可以使用自体骨^[72]、同种异体骨^[73]、合成支架^[74]或骨引导再生材料^[75]来填充缺损区域,促进骨组织的再生。此外,生长因子^[76]的应用也能增强骨修复能力,提高种植体的长期存留率。干细胞治疗则利用干细胞的自我更新和分化能力来修复受损

的牙周组织,促进骨再生^[77]。这些方法也通常与翻瓣手术联合使用,以获得更理想的治疗效果。

2.5 免疫调节治疗

免疫调节治疗是近年来在种植体周炎治疗中备受关注的前沿领域。免疫调节治疗通过调整机体的免疫反应来抑制过度的炎症反应,从而减少骨吸收和组织损伤。研究发现,通过调节特定的免疫途径,例如抑制促炎细胞因子(如白细胞介素-1 β 、肿瘤坏死因子- α 、白细胞介素-6)的表达,或增强抗炎因子(如白细胞介素-10、转化生长因子- β)的活性,可以有效减轻种植体周围的炎症反应,促进组织修复。当前研究主要集中于靶向核因子 κ B、JAK/STAT等信号通路的免疫调控策略。递送方式方面,局部递送系统如温敏水凝胶、微球载药系统或纳米载体等被广泛用于实现缓释和定向释放,以提高治疗靶向性并减少全身不良反应^[78-80]。尽管这些治疗方法尚处于研究阶段,但其为未来种植体周炎的治疗提供了新的方向。

3 种植体磨光整形术

种植体磨光整形术是一种通过物理方式改变种植体表面特性的方法,主要依靠金刚砂车针、橡胶杯等磨光工具去除表面的微生物生物膜和粗糙不平的螺纹区域。在清除感染的同时,降低种植体表面粗糙度,有助于减少菌斑滞留,防止病损部位再次感染。种植体磨光整形术主要应用于因种植体周炎导致的骨吸收及牙龈退缩,从而使螺纹暴露的种植体骨上区域。

3.1 种植体磨光整形术的基本原理与目的

3.1.1 减少菌斑

种植体周炎的发生与种植体表面的细菌感染密切相关,而种植体磨光整形术的主要目的之一是减少菌斑和生物膜的附着,从而降低细菌负荷,改善局部炎症状况。相比于化学或药物处理,机械磨光能够更直接地清除污染物,同时避免化学药物可能带来的毒性作用,因此在临床上被广泛应用。

除了去除生物膜,机械磨光还能优化种植体表面的微观结构。种植体表面较粗糙的区域更容易滞留细菌和食物残渣,影响软组织的附着并增加再感染风险。研究^[81]表明,种植体表面的粗糙度,通常以表面算术平均粗糙度(arithmetic mean height of the surface, Sa)表示,与细菌附着之间

存在显著的正相关。Sa值越高,菌斑的初始黏附和生物膜的形成越容易。粗糙表面不仅增加了细菌的机械“嵌锁”面积,还为生物膜提供了更多滞留位点。一项多菌种体外研究^[81]显示,当种植体表面由最小粗糙度(Sa=0.5~1.0 μm)增至中等粗糙度(Sa=1.1~2.0 μm)时,总菌量增加约 2.61×10^7 CFU/mL,伴随具核梭杆菌和伴放线菌聚集杆菌等致病菌显著上升,提示较粗糙的种植体表面可显著促进菌斑积聚和致病菌定植。此外,原始钛面加工产生的宏观沟槽和微观不规则结构形成“沟谷-微突”结合的“互锁”效应,为细菌提供了理想的附着微环境,而当通过二氧化钛纳米涂层或电解复合抛光处理后,将Sa值降至约0.3 μm,细菌附着量较未经处理组可减少近50%^[82]。

综上所述,控制种植体表面粗糙度至Sa<0.3 μm即可有效降低菌斑黏附与致病菌积聚风险,尤其对于种植体颈部或暴露区域而言,有助于软组织封闭、炎症控制与长期预后稳定性。通过种植体磨光整形术,可以降低种植体表面的粗糙度^[83],使其更加光滑,减少细菌重新附着的可能性。

3.1.2 生物相容性

机械磨光可在一定程度上改善种植体与软组织界面的生物相容性,有助于优化种植体周围组织的修复微环境。具体而言,在成骨细胞黏附方面,有研究表明,与其他表面处理方式相比,机械磨光处理后的种植体表面更有利于细胞的黏附与铺展。实验^[84]发现,人骨肉瘤细胞(human osteosarcoma cell line Saos-2, Saos-2)在接种24 h后,于磨光表面呈现出延展、梭形的形态,而在其他表面处理组中细胞形态更偏圆形,提示磨光表面对成骨细胞具有更好的生物相容性,有助于维持骨组织的稳定性。此外,机械磨光对软组织生物反应的影响也备受关注。研究^[85]发现,粗糙表面可诱导血管内皮生长因子、白细胞介素-6和单核细胞趋化蛋白-3等促炎/促血管生成因子的分泌水平升高,提示粗糙表面可能激活炎症反应或组织重建相关的细胞信号通路,而较为光滑的表面,尤其是经硅胶抛光处理后的表面,则表现出更低的炎症因子分泌水平,表明其更有利于稳定的软组织整合,此外,在培养第30天时,粗糙的砂喷酸蚀(sandblasted, large grit, acid-etched, SLA)组中纤维连接蛋白表达水平较高,可能是由于细胞受到表面粗糙刺激后启动了修复机制。相比之下,经种植体磨光整形术处理后的光滑表

面减少了细胞对环境的“防御性”反应性分泌,反映出一种更“温和”的细胞-材料相互作用特性,有利于构建长期稳定的界面微环境。临床研究也进一步支持这一结论,有临床研究表明种植体表面的光滑处理并不会损害种植体的临床预后,反而能够促进软组织的愈合,从而提高种植体周围的生物相容性^[86]。

3.2 种植体磨光整形术的常见器械

常用的机械磨光器械包括金刚砂车针、碳化钨车针、碳化硅磨石、硅胶抛光器及阿肯色石等^[4,85,87-90],主要用于去除种植体表面的菌斑、生物膜和污染物,并磨除包括螺纹在内的粗糙结构。不同器械具备特定的磨削效率和表面处理能力,常需分阶段联合使用,以兼顾有效去污与表面保护^[4]。选择不同磨光器械需结合种植体表面形态、污染程度及是否存在暴露螺纹等因素加以判断。例如,碳化钨车针因其磨削效率高,常用于去除重度污染或坚硬附着物的初步处理^[4],操作时需搭配低速高扭矩设备,并应谨慎使用以避免损伤种植体螺纹结构^[91],同时由于其处理后表面粗糙度较高,通常需结合后续抛光步骤。金刚砂车针与碳化硅磨石具有中等磨削力,适用于中度污染区域,既能有效清除污染物,又可实现初步抛光效果^[4,91]。硅胶抛光器与阿肯色石磨除能力较弱,主要用于终末阶段的精细打磨与抛光,通过轻压旋转操作可显著提升种植体表面光滑度,降低细菌再附着风险^[4,92]。此外,不同器械的使用成本亦存在显著差异,需根据具体临床需求选择合适的磨光策略。不同磨光器械的详细对比如表3所示。

临床上,常按“由粗到细”的顺序分阶段联合使用不同磨光器械,以在确保有效去污的同时最大程度保护种植体表面结构,实现理想的治疗效果^[93]。不同类型的磨光器械在使用顺序与使用时间上的组合构成了多种磨光操作阵列,这些阵列在执行过程中存在显著的程序性差异,这些差异是影响最终磨光效果的决定性因素。尽管各研究在效果评价指标的选择上存在一定差异,但表面粗糙度作为一种直观反映表面质量的物理参数,广泛作为评估磨光效果具有代表性和说服力的指标。为进一步探讨不同磨光操作阵列对最终磨光效果的稳定性,本研究对各磨光阵列在实验中所获得的表面粗糙度数据进行了变异度分析。相关结果见表4^[4,83,90,93]。

在纳入的4项研究中,共提取了9个处理组的

牙种植体表面粗糙度数据，并计算了各组的变异系数，以评估不同器械处理方式在表面改性效果上的稳定性。结果显示，不同处理方式在粗糙度控制上的变异性存在明显差异。金刚石加布尔斯钻组的CV为7.14%，为所有分组中最低，提示其在临床操作中具有较高的稳定性和一致性。相比之下，碳化硅联合阿肯色石及硅胶磨光组的CV高达39.47%，为波动最大的一组，可能与多步骤复

合处理方式导致操作依赖性增强有关。此外，阿肯色石序列、短金刚石序列和完整金刚石序列的CV均在30%以上，亦显示出一定的不稳定性。整体来看，碳化物类或单一钻头处理方式表现出相对更低的变异度，而多材料联合抛光则存在较大的个体差异。这一结果对于临床选择种植体清洁与修复方法具有重要参考价值，建议在追求治疗一致性时优先考虑变异度较低的处理方式。

表 3 不同磨光器械的对比

Tab 3 Comparison of different polishing tools

器械类型	操作方式	主要适用场景	注意事项
碳化钨车针	低速旋转，较大接触压力	初步去除硬性沉积、重度污染	表面损伤风险高，应配合后续抛光使用
金刚砂磨头	中速旋转，稳定手法	中重度污染区域的精细清理	不建议直接用于最终抛光，可能留下细微划痕
碳化硅磨石	中低速旋转，中等接触力	去除中等程度污染、初步平整表面	表面处理适中，适合作为连接粗磨与精抛的中间步骤
硅胶抛光器	低速轻压打磨	表面抛光、改善种植体微观粗糙度	适合终末处理阶段，需保持低压力避免磨损
阿肯色石	手工或低速设备抛光	表面光滑化处理、预防再污染	磨削力极低，主要用于最终精抛，结合水冷效果更佳

表 4 表面粗糙度变异度分析

Tab 4 Surface roughness variability analysis

研究编号	分组名称	平均值 (Ra)	标准差 (SD)	样本量	CV/%
1 ^[93]	碳化钨车针序列	0.33	0.06	10	18.18
	金刚石加布尔斯钻序列	0.42	0.03	10	7.14
2 ^[4]	阿肯色石序列	0.39	0.13	7	33.33
	短金刚石序列	0.71	0.22	7	30.99
	完整金刚石序列	0.98	0.3	7	30.61
3 ^[90]	金刚石加阿肯色石序列	0.76	0.14	15	18.42
	碳化硅加阿肯色石加硅胶抛光序列	0.38	0.15	15	39.47
4 ^[83]	碳化物钻头	0.10	0.02	10	20.00
	未处理	0.76	0.08	10	10.53

注：CV为变异系数（coefficient of variation）。

3.3 种植体磨光整形术对种植体的影响

3.3.1 表面粗糙度

机械磨光能够显著改变种植体表面的粗糙度，从而影响其在种植体周炎治疗中的效果。种植体表面通常经过特定的处理（如喷砂-酸蚀、微弧氧化等）以提高骨结合能力，但在炎症或感染状态下，这些粗糙区域容易成为菌斑和生物膜的附着点。机械磨光通过去除表面污染物并降低表面粗糙度，使其更加光滑，从而减少细菌的滞留，提高种植体周围组织的健康状况。研究^[94]显示，种植体磨光整形术可显著降低菌斑黏附率，磨光组牙菌斑覆盖种植体表面的比例为16%，远低于对照组的65%，表明磨光处理后可抑制生物膜的形成，这对于降低种植体周炎的风险具有重要意义。

另外，相关实验^[83]结果表明，采用车针打磨加硅胶抛光器进行处理后，可获得表面平均粗糙度为(0.1±0.02) μm的高度光滑表面，此时处理组与对照组种植体的最大抗载荷能力相近，分别为896 N与880 N，差异不显著，显示磨光整形对种植体的抗断裂强度没有负面影响。

3.3.2 物化特性

种植体磨光整形术对种植体的机械和化学特性有一定影响。例如，研究^[95]发现种植体磨光整形术降低了钛种植体的疲劳强度，并增加了腐蚀敏感性，可能影响种植体的长期稳定性。此外，Camps-Font等^[96]指出，种植体磨光整形术可有效降低种植体表面粗糙度，从而有助于抑制细菌黏附，对种植体疲劳强度的影响较为有限。疲劳强

度作为一个受材料性质、种植体直径及结构设计等多因素共同影响的力学指标^[97],其最终表现可能与磨光整形术处理产生协同或交互效应^[98]。尽管有研究^[98]表明磨光整形术降低了种植体的最大断裂强度,但在常规直径的骨水平和组织水平种植体中,磨光整形术处理后的最大断裂强度仍维持在 775.0~1 029.5 N 和 678.9~806.2 N,显示出较高的机械稳定性。此外,另一项研究^[95]指出,种植体磨光整形术处理会使钛种植体的疲劳寿命在空气中减少约 30%,在生理环境中减少约 37%,但其疲劳极限仍高于日常咀嚼所需的力。这些结果表明,种植体磨光整形术对种植体的机械稳定性影响有限,尤其是在材料强度较高或种植体直径较大的情况下。然而,在直径较小或材料强度较低的种植体中,磨光整形术可能导致更明显的疲劳强度下降,增加断裂风险。因此,在进行磨光整形术处理时,应综合考虑种植体的材料、直径和结构设计,以确保其机械性能的稳定性。

3.3.3 杂质颗粒

研究^[99-100]表明,种植体磨光整形术会释放杂质颗粒影响周围组织的健康。例如,由于磨光过程中许多因素难以标准化(如力度、角度,为了磨除不同杂质用不同的时间等),其中释放的钛合金颗粒可能存在细胞毒性^[101-102],当钛颗粒浓度超过特定阈值(>100 $\mu\text{g/mL}$)时,可显著诱导成骨细胞凋亡、炎性细胞因子释放及氧化应激水平升高,从而干扰局部组织的愈合过程与骨整合^[103]。另有 Wang 等^[104]研究指出,钛离子释放可导致成骨细胞线粒体内活性氧水平升高,激活自噬相关途径,最终导致成骨细胞死亡,影响种植体周围骨的长期稳定性。

在使用硅胶抛光时,会产生硅颗粒残留^[105],尽管目前尚缺乏针对微量硅颗粒是否会对人体造成危害的系统性研究,但这并不意味着其绝对安全。随着纳米技术和微粒材料在医学、食品、化妆品等领域的广泛应用,微量、慢性暴露情况下的生物安全性问题逐渐受到关注。一方面,纳米级硅颗粒可通过细胞膜进入细胞内,引发氧化应激、细胞凋亡或炎症反应^[106];另一方面,粒径、表面活性、形貌和包裹物成分等因素可能影响其在体内的代谢路径和毒性表现。因此,即便是微量的暴露,也可能在特定条件下累积引起潜在的健康风险,尤其是在慢性接触或免疫低下、婴幼儿等特殊人群中。因此,控制磨光操作过程中的

颗粒释放量,避免颗粒在局部组织中积聚超过临界浓度,对于保障治疗安全性具有重要意义。在选择磨光整形方法和工具时,需要慎重考虑其对表面微结构、颗粒释放以及生物相容性的影响。

3.4 机械磨光在种植体周炎治疗中的应用

近年来,机械磨光作为种植体周炎治疗的一项重要辅助手段,受到了广泛关注,并在多项临床和实验研究中展现出积极的治疗潜力^[107-110]。

现有文献对机械磨光操作的建议主要集中在工具选择与处理顺序方面。常用器械包括金刚砂车针和碳化钨车针,通常辅以阿肯色石或硅胶抛光器以实现精细化表面处理。尽管多数临床研究未明确报道操作参数,如车针转速,但已有文献提及参考车针转速可达 200 000 r/m^[110-111],抛光为 40 000 r/m^[110],以保证有效去除污染而不致损伤种植体结构。操作过程中应配合持续的生理盐水冷却^[97],以防止热损伤及金属微结构变化;在疗效评价方面,不同研究中采用了多种指标加以验证,如种植体周袋深度(probing depth, PD)^[97-98,111-113]、黏膜退缩(mucosal recession, MR)^[98,111-112]、边缘骨丧失(marginal bone loss, MBL)^[110,113]、探诊出血(bleeding on probing, BOP)^[97-98,111-113]等。基于现有研究结果,初步建议以治疗后 PD 减少值 $\geq 1\text{ mm}$ 、MBL 年吸收量 $\leq 0.2\text{ mm}$ 、BOP 阳性率显著下降、MR 稳定或改善并辅以骨吸收/骨增量高度、骨密度灰度值、骨体积变化等影像学分析作为短期(6~12个月)疗效判断的参考标准,结合患者症状改善及功能恢复情况,全面评估机械磨光在种植体周炎治疗中的临床有效性。

综上所述,机械磨光作为一种有效的种植体表面处理方法,不仅在去除污染、降低炎症方面表现出良好效果,还可以通过优化操作参数和评价指标,展现出在种植体周炎治疗中构建稳定软硬组织界面的潜力与临床应用价值。

4 机械磨光的局限性

尽管机械磨光在种植体周炎的治疗中展现出诸多优势,例如创伤小或微创、操作简便及即时疗效显著,但其局限性同样不可忽视。首先,磨光器械的使用对植体抗折性及机械强度存在一定影响,可能影响其临床适用性^[114-116];在磨光过程中,常因磨耗材料与种植体接触磨光材料残留产生杂质颗粒^[39-41,50],这些颗粒可滞留于种植体表面

或周围组织中,从而对局部的生物相容性产生不利影响,这些释放颗粒的粒径分布以纳米级为主,主要集中在3~100 nm范围内^[99]。

同时,在机械磨光过程中,不可避免伴随局部温度的升高,若未能有效控制,该升温趋势有可能对种植体及其周围骨组织造成不良影响^[87-88]。已有研究^[117-118]深入探讨了热损伤在骨组织坏死中的作用机制,指出局部高温可导致骨组织微循环受损、骨髓巨噬细胞的激活,最终可能引发种植体的失败。一些学者^[119-120]的实验研究明确了骨组织对温度的耐受阈值:当局部温度升高至44~47℃且持续时间超过1 min时,骨组织的存活率显著下降。此外,不同冷却方式对温度控制效果的影响也已被研究,结果^[121-122]显示内外联合冷却(即同时进行内部和外部冲洗)最为有效。而关于不同磨光器械在使用过程中引起的温度变化,其差异不显著^[88,122],提示温度控制的关键因素主要在于冷却效率而非器械本身。因此,在临床操作中应确保持续有效的冲洗以降低热损伤风险,保障种植体周围组织的生物安全性。

此外,在操作过程中,若未能精准控制器械与邻近牙齿或种植体表面的接触,不仅可能增加对邻牙结构的损伤风险,还可能导致种植体螺纹或表面涂层的磨损,从而影响其机械稳定性与生物相容性^[123]。基于上述局限性,在严重的种植体周炎病例中,机械磨光单一治疗可能难以实现长期稳定的疗效,因此往往需联合翻瓣手术或其他辅助治疗手段,以优化种植体表面条件并提高治疗的长期成功率。

5 总结与展望

种植体周炎是影响种植修复长期成功率的重要因素,早期诊断和综合治疗策略对于提高治疗效果至关重要。目前,机械治疗、化学/药物治疗、PDT和手术治疗均已在临床中广泛应用。种植体磨光整形术作为一种重要的机械治疗方法,有助于减少菌斑附着、优化生物相容性并改善种植体周围组织环境。然而,其长期效果仍需进一步研究和验证。未来,随着再生医学和免疫调节技术的发展,种植体周炎的治疗或将实现更精准和个性化的干预,提高患者的长期疗效和生活质量。

利益冲突声明:作者声明本文无利益冲突。

6 参考文献

- [1] Renvert S, Persson GR, Pirih FQ, et al. Peri-implant health, peri-implant mucositis, and peri-implantitis: case definitions and diagnostic considerations[J]. J Periodontol, 2018, 89(Suppl 1): S304-S312.
- [2] Belibasakis GN, Manoil D. Microbial community-driven etiopathogenesis of peri-implantitis[J]. J Dent Res, 2021, 100(1): 21-28.
- [3] 黄萧瑜,李明云,周学东,等.全身及局部因素对种植体周围稳态的影响[J].国际口腔医学杂志, 2019, 46(6): 730-734.
Huang XY, Li MY, Zhou XD, et al. Effects of systemic and local factors on microbial homeostasis around implants[J]. Int J Stomatol, 2019, 46(6): 730-734.
- [4] Ramel CF, Lüssi A, Özcan M, et al. Surface roughness of dental implants and treatment time using six different implantoplasty procedures[J]. Clin Oral Implants Res, 2016, 27(7): 776-781.
- [5] Bollen CM, Papaioanno W, Van Eldere J, et al. The influence of abutment surface roughness on plaque accumulation and peri-implant mucositis[J]. Clin Oral Implants Res, 1996, 7(3): 201-211.
- [6] Perdomo SJ, Fajardo CE, Cardona-Mendoza A. Laminin 332 functionalized surface improve implant roughness and oral keratinocyte bioactivity[J]. Heliyon, 2024, 10(15): e34507.
- [7] Gotfredsen K, Berglundh T, Lindhe J. Bone reactions at implants subjected to experimental peri-implantitis and static load. A study in the dog[J]. J Clin Periodontol, 2002, 29(2): 144-151.
- [8] Heitz-Mayfield LJ, Schmid B, Weigel C, et al. Does excessive occlusal load affect osseointegration? An experimental study in the dog[J]. Clin Oral Implants Res, 2004, 15(3): 259-268.
- [9] Yamashita K, Kataoka Y, Munakata M, et al. Longitudinal observation of micromotion upon loading of implant-abutment connection[J]. Bioengineering (Basel), 2024, 11(6): 582.
- [10] Rohner F, Cimasoni G, Vuagnat P. Longitudinal radiographical study on the rate of alveolar bone loss in patients of a dental school[J]. J Clin Periodontol,

- 1983, 10(6): 643-651.
- [11] Eliasson S, Bergström J. Minimum periodontal bone loss in dentally-aware adults. A 10-year prospective study[J]. *J Clin Periodontol*, 1997, 24(1): 34-38.
- [12] Derks J, Schaller D, Håkansson J, et al. Peri-implantitis-onset and pattern of progression[J]. *J Clin Periodontology*, 2016, 43(4): 383-388.
- [13] Herrera D, Berglundh T, Schwarz F, et al. Prevention and treatment of peri-implant diseases-the EFP S3 level clinical practice guideline[J]. *J Clin Periodontol*, 2023, 50(Suppl 26): 4-76.
- [14] de Tapia B, Valles C, Ribeiro-Amaral T, et al. The adjunctive effect of a titanium brush in implant surface decontamination at peri-implantitis surgical regenerative interventions: a randomized controlled clinical trial[J]. *J Clin Periodontol*, 2019, 46(5): 586-596.
- [15] Yin LN, Zhu YB, Yu HJ, et al. Evaluating the efficiency of three methods to clean and disinfect screw- and cement-retained prostheses[J]. *J Prosthet Dent*, 2022, 127(5): 775-782.
- [16] Qian YJ, Tong ZA, Cai BB, et al. Cleaning effects of decontamination methods on clinically failed Ti-Unite implants and their impacts on surface roughness and chemistry: an *in vitro* pilot study[J]. *Int J Oral Implant (Berl)*, 2022, 15(2): 149-165.
- [17] Abushahba F, Gürsoy M, Hupa L, et al. Effect of bioactive glass air-abrasion on *Fusobacterium nucleatum* and *Porphyromonas gingivalis* biofilm formed on moderately rough titanium surface[J]. *Eur J Oral Sci*, 2021, 129(3): e12783.
- [18] Abushahba F, Söderling E, Aalto-Setälä L, et al. Air abrasion with bioactive glass eradicates *Streptococcus mutans* biofilm from a sandblasted and acid-etched titanium surface[J]. *J Oral Implantol*, 2019, 45(6): 444-450.
- [19] Passarelli PC, de Leonardis M, Piccirillo GB, et al. The effectiveness of chlorhexidine and air polishing system in the treatment of *Candida albicans* infected dental implants: an experimental *in vitro* study [J]. *Antibiotics (Basel)*, 2020, 9(4): 179.
- [20] Luengo F, Sanz-Esporrín J, Sanz-Sánchez I, et al. Clinical, microbiological and biochemical impact of a supportive care protocol with an air-polishing device, after surgical treatment of peri-implantitis: randomized clinical trial[J]. *Clin Oral Implants Res*, 2023, 34(4): 378-392.
- [21] Hentenaar DFM, De Waal YCM, Stewart RE, et al. Erythritol air polishing in the surgical treatment of peri-implantitis: a randomized controlled trial[J]. *Clin Oral Implants Res*, 2022, 33(2): 184-196.
- [22] Sahrman P, Ronay V, Hofer D, et al. *In vitro* cleaning potential of three different implant debridement methods[J]. *Clin Oral Implants Res*, 2015, 26(3): 314-319.
- [23] Ronay V, Merlini A, Attin T, et al. *In vitro* cleaning potential of three implant debridement methods. Simulation of the non-surgical approach[J]. *Clin Oral Implants Res*, 2017, 28(2): 151-155.
- [24] Sahrman P, Ronay V, Sener B, et al. Cleaning potential of glycine air-flow application in an *in vitro* peri-implantitis model[J]. *Clin Oral Implants Res*, 2013, 24(6): 666-670.
- [25] Olawumi MA, Omigbodun FT, Oladapo BI. Improved biocompatibility in laser-polished implants [J]. *Biomimetics (Basel)*, 2024, 9(10): 642.
- [26] Birang E, Talebi Ardekani MR, Rajabzadeh M, et al. Evaluation of effectiveness of photodynamic therapy with low-level diode laser in nonsurgical treatment of peri-implantitis[J]. *J Lasers Med Sci*, 2017, 8(3): 136-142.
- [27] Wawrzyk A, Rahnama M, Sofińska-Chmiel W, et al. Analysis of the microbiome on the surface of corroded titanium dental implants in patients with peri-implantitis and diode laser irradiation as an aid in the implant prosthetic treatment: an *ex vivo* study[J]. *Materials (Basel)*, 2022, 15(17): 5890.
- [28] Secgin-Atar A, Aykol-Sahin G, Kocak-Oztug NA, et al. Evaluation of surface change and roughness in implants lost due to peri-implantitis using erbium laser and various methods: an *in vitro* study[J]. *Nanomaterials (Basel)*, 2021, 11(10): 2602.
- [29] Cha JK, Lee JS, Kim CS. Surgical therapy of peri-implantitis with local minocycline: a 6-month randomized controlled clinical trial[J]. *J Dent Res*, 2019, 98(3): 288-295.
- [30] Emanuel N, Machtei EE, Reichart M, et al. D-

- PLEX500: a local biodegradable prolonged release doxycycline-formulated bone graft for the treatment for peri-implantitis. A randomized controlled clinical study[J]. Quintessence Int, 2020, 51(7): 546-553.
- [31] Behbahani SB, Kiridena SD, Wijayaratna UN, et al. pH variation in medical implant biofilms: causes, measurements, and its implications for antibiotic resistance[J]. Front Microbiol, 2022, 13: 1028560.
- [32] Lin Q, Pilewski JM, Di YP. Acidic microenvironment determines antibiotic susceptibility and biofilm formation of *Pseudomonas aeruginosa*[J]. Front Microbiol, 2021, 12: 747834.
- [33] Liñares A, Pico A, Blanco C, et al. Adjunctive systemic metronidazole to nonsurgical therapy of peri-implantitis with intrabony defects: a retrospective case series study[J]. Int J Oral Maxillofac Implants, 2019, 34(5): 1237-1245.
- [34] Tonon CC, Panariello BHD, Spolidorio DMP, et al. Antibiofilm effect of ozonized physiological saline solution on peri-implant-related biofilm[J]. J Periodontol, 2021, 92(8): 1151-1162.
- [35] Sakaue Y, Takenaka S, Ohsumi T, et al. The effect of chlorhexidine on dental calculus formation: an *in vitro* study[J]. BMC Oral Heal, 2018, 18(1): 52.
- [36] Neves CAD, Alves CH, Rocha NC, et al. Firmicutes dysbiosis after chlorhexidine prophylaxis in healthy patients submitted to impacted lower third molar extraction[J]. Front Cell Infect Microbiol, 2021, 11: 702014.
- [37] Zanatta FB, Antoniazzi RP, Rösing CK. Staining and calculus formation after 0.12% chlorhexidine rinses in plaque-free and plaque covered surfaces: a randomized trial[J]. J Appl Oral Sci, 2010, 18(5): 515-521.
- [38] Carral C, Muñoz F, Permuy M, et al. Mechanical and chemical implant decontamination in surgical peri-implantitis treatment: preclinical “*in vivo*” study [J]. J Clin Periodontol, 2016, 43(8): 694-701.
- [39] Linley E, Denyer SP, McDonnell G, et al. Use of hydrogen peroxide as a biocide: new consideration of its mechanisms of biocidal action[J]. J Antimicrob Chemother, 2012, 67(7): 1589-1596.
- [40] Ntrouka V, Hoogenkamp M, Zaura E, et al. The effect of chemotherapeutic agents on titanium-adherent biofilms[J]. Clin Oral Implants Res, 2011, 22(11): 1227-1234.
- [41] Kotsakis GA, Lan CX, Barbosa J, et al. Antimicrobial agents used in the treatment of peri-implantitis alter the physicochemistry and cytocompatibility of titanium surfaces[J]. J Periodontol, 2016, 87(7): 809-819.
- [42] Verdeguer P, Gil J, Punset M, et al. Citric acid in the passivation of titanium dental implants: corrosion resistance and bactericide behavior[J]. Materials (Basel), 2022, 15(2): 545.
- [43] Tuna T, Wein M, Altmann B, et al. Effect of hydrogen peroxide on the surface and attractiveness of various zirconia implant materials on human osteoblasts: an *in vitro* study[J]. Materials (Basel), 2023, 16(3): 961.
- [44] George A, Jacob C, Ganapathy D. Comparative evaluation of two anti-calculus toothpastes following chlorhexidine use[J]. J Contemp Dent Pract, 2021, 22(3): 295-300.
- [45] Sarembe S, Kiesow A, Pratten J, et al. The impact on dental staining caused by beverages in combination with chlorhexidine digluconate[J]. Eur J Dent, 2022, 16(4): 911-918.
- [46] Slaughter RJ, Watts M, Vale JA, et al. The clinical toxicology of sodium hypochlorite[J]. Clin Toxicol, 2019, 57(5): 303-311.
- [47] Wang TF, Feng XW, Gao YX, et al. Effects of different concentrations and exposure time of sodium hypochlorite on the structural, compositional and mechanical properties of human dentin[J]. J Huazhong Univ Sci Technol Med Sci, 2017, 37(4): 568-576.
- [48] Banazadeh Y, Rahimi F, Nikabadi S, et al. A comparative study on the cytotoxic effect of different concentrations of hydrogen peroxide and carbamide peroxide on the survival of human dental pulp stem cells *in vitro*[J]. Bull Natl Acad Cult Arts Manag, 2018(3): 1098-1106.
- [49] Ravoii A, Simionescu N, Benea L. Influence of different concentration of hydrogen peroxide on the corrosion behavior of Ti-6Al-4V alloy immersed in physiological solution[J]. IOP Conf Ser Mater Sci Eng, 2019, 572(1): 012006.
- [50] Cordeiro JM, Pires JM, Souza JGS, et al. Optimi-

- zing citric acid protocol to control implant-related infections: an *in vitro* and *in situ* study[J]. *J Periodontol Res*, 2021, 56(3): 558-568.
- [51] Liu LY, Leng S, Yue JL, et al. EDTA enhances stromal cell-derived factor 1 α -induced migration of dental pulp cells by up-regulating chemokine receptor 4 expression[J]. *J Endod*, 2019, 45(5): 599-605.e1.
- [52] Ungvári K, Pelsoczi KI, Kormos B, et al. Effect of decontaminating solutions on titanium surface: an *in vitro* study of human epithelial cell culture[J]. *Fogorv Sz*, 2011, 104(1): 9-18.
- [53] Dostie S, Alkadi LT, Owen G, et al. Chemotherapeutic decontamination of dental implants colonized by mature multispecies oral biofilm[J]. *J Clin Periodontol*, 2017, 44(4): 403-409.
- [54] Sahm N, Becker J, Santel T, et al. Non-surgical treatment of peri-implantitis using an air-abrasive device or mechanical debridement and local application of chlorhexidine: a prospective, randomized, controlled clinical study[J]. *J Clin Periodontol*, 2011, 38(9): 872-878.
- [55] Bassetti M, Schär D, Wicki B, et al. Anti-infective therapy of peri-implantitis with adjunctive local drug delivery or photodynamic therapy: 12-month outcomes of a randomized controlled clinical trial [J]. *Clin Oral Implants Res*, 2014, 25(3): 279-287.
- [56] Shen Y, Stojicic S, Qian W, et al. The synergistic antimicrobial effect by mechanical agitation and two chlorhexidine preparations on biofilm bacteria[J]. *J Endod*, 2010, 36(1): 100-104.
- [57] Bai YJ, Qin SG, Lu BS, et al. Comparison of the efficacy of seven non-surgical methods combined with mechanical debridement in peri-implantitis and peri-implant mucositis: a network meta-analysis[J]. *PLoS One*, 2024, 19(8): 1-22.
- [58] Chen WL, Zhi M, Feng ZJ, et al. Sustained co-delivery of ibuprofen and basic fibroblast growth factor by thermosensitive nanoparticle hydrogel as early local treatment of peri-implantitis[J]. *Int J Nanomedicine*, 2019, 14: 1347-1358.
- [59] Liu N, Huang S, Guo F, et al. Calcium phosphate cement with minocycline hydrochloride-loaded gelatine microspheres for peri-implantitis treatment[J]. *J Dent*, 2023, 136: 104624.
- [60] Hakim LK, Yari A, Nikparto N, et al. The current applications of nano and biomaterials in drug delivery of dental implant[J]. *BMC Oral Heal*, 2024, 24(1): 126.
- [61] Hussain B, Khan S, Agger AE, et al. A comparative investigation of chemical decontamination methods for *in-situ* cleaning of dental implant surfaces[J]. *J Funct Biomater*, 2023, 14(8): 394.
- [62] Farzad P, Lundgren T, Al-Asfour A, et al. Integration of dental implants in conjunction with EDTA-conditioned dentin grafts: an experimental study[J]. *Dent J*, 2021, 9(6): 63.
- [63] da Fonseca VCP, Abreu LG, Andrade EJ, et al. Effectiveness of antimicrobial photodynamic therapy in the treatment of peri-implantitis: systematic review and meta-analysis[J]. *Lasers Med Sci*, 2024, 39(1): 186.
- [64] Henderson BW, Dougherty TJ. How does photodynamic therapy work[J]. *Photochem Photobiol*, 1992, 55(1): 145-157.
- [65] Al-Askar MH, Abdullatif FA, Alshihri AA, et al. Comparison of photobiomodulation and photodynamic therapy as adjuncts to mechanical debridement for the treatment of peri-implantitis[J]. *Technol Health Care*, 2022, 30(2): 389-398.
- [66] Chambrone L, Wang HL, Romanos GE. Antimicrobial photodynamic therapy for the treatment of periodontitis and peri-implantitis: an American Academy of Periodontology best evidence review[J]. *J Periodontol*, 2018, 89(7): 783-803.
- [67] Alsayed H, Bukhari IA, Alsaif R, et al. Efficacy of indocyanine green and methylene blue mediated-photodynamic therapy on peri-implant outcomes among diabetics with peri-implant mucositis[J]. *Photodiagn Photodyn Ther*, 2023, 42: 103344.
- [68] Schweigert TBMO, Afonso JPR, da Palma RK, et al. Influence of photosensitizer on photodynamic therapy for peri-implantitis: a systematic review[J]. *Pharmaceutics*, 2024, 16(3): 307.
- [69] Furtado GS, Paschoal MAB, do Carmo Santos Grenho L, et al. Does pre-irradiation time influence the efficacy of antimicrobial photodynamic therapy[J]. *Photodiagn Photodyn Ther*, 2020, 31: 101884.
- [70] Montero E, Roccuzzo A, Molina A, et al. Minimal

- invasiveness in the reconstructive treatment of peri-implantitis defects[J]. *Periodontol* 2000, 2023, 91 (1): 199-216.
- [71] Lozada JL, James RA, Boskovic M, et al. Surgical repair of peri-implant defects[J]. *J Oral Implantol*, 1990, 16(1): 42-46.
- [72] Aghazadeh A, Rutger Persson G, Renvert S. A single-centre randomized controlled clinical trial on the adjunct treatment of intra-bony defects with autogenous bone or a xenograft: results after 12 months[J]. *J Clin Periodontol*, 2012, 39(7): 666-673.
- [73] Froum SJ, Froum SH, Rosen PS. Successful management of peri-implantitis with a regenerative approach: a consecutive series of 51 treated implants with 3- to 7.5-year follow-up[J]. *Int J Periodontics Restorative Dent*, 2012, 32(1): 11-20.
- [74] Diniz IM, Chen C, Ansari S, et al. Gingival mesenchymal stem cell (GMSC) delivery system based on RGD-coupled alginate hydrogel with antimicrobial properties: a novel treatment modality for peri-implantitis[J]. *J Prosthodont*, 2016, 25(2): 105-115.
- [75] Roos-Jansåker AM, Persson GR, Lindahl C, et al. Surgical treatment of peri-implantitis using a bone substitute with or without a resorbable membrane: a 5-year follow-up[J]. *J Clin Periodontol*, 2014, 41 (11): 1108-1114.
- [76] Jung UW, Lee IK, Park JY, et al. The efficacy of BMP-2 preloaded on bone substitute or hydrogel for bone regeneration at peri-implant defects in dogs[J]. *Clin Oral Implants Res*, 2015, 26(12): 1456-1465.
- [77] Park SY, Kim KH, Gwak EH, et al. *Ex vivo* bone morphogenetic protein 2 gene delivery using periodontal ligament stem cells for enhanced re-osseointegration in the regenerative treatment of peri-implantitis[J]. *J Biomed Mater Res A*, 2015, 103(1): 38-47.
- [78] Fan X, Wang ZF, Ji P, et al. rgpA DNA vaccine induces antibody response and prevents alveolar bone loss in experimental peri-implantitis[J]. *J Periodontol*, 2013, 84(6): 850-856.
- [79] Guo MH, Wang ZF, Fan X, et al. kgp, rgpA, and rgpB DNA vaccines induce antibody responses in experimental peri-implantitis[J]. *J Periodontol*, 2014, 85(11): 1575-1581.
- [80] Chen ZY, Gu XH. Effects of NLRP3 on implants placement[J]. *J Zhejiang Univ (Med Sci)*, 2023, 52 (1): 126-131.
- [81] Bermejo P, Sánchez MC, Llama-Palacios A, et al. Biofilm formation on dental implants with different surface micro-topography: an *in vitro* study[J]. *Clin Oral Implants Res*, 2019, 30(8): 725-734.
- [82] Lorenzetti M, Dogša I, Stošicki T, et al. The influence of surface modification on bacterial adhesion to titanium-based substrates[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2015, 7(3): 1644-1651.
- [83] Costa-Berenguer X, García-García M, Sánchez-Torres A, et al. Effect of implantoplasty on fracture resistance and surface roughness of standard diameter dental implants[J]. *Clin Oral Implants Res*, 2018, 29 (1): 46-54.
- [84] Toma S, Lasserre J, Brex MC, et al. *In vitro* evaluation of peri-implantitis treatment modalities on Saos-2 osteoblasts[J]. *Clin Oral Implants Res*, 2016, 27 (9): 1085-1092.
- [85] Beheshti Maal M, Aanerød Ellingsen S, Reseland JE, et al. Experimental implantoplasty outcomes correlate with fibroblast growth *in vitro*[J]. *BMC Oral Health*, 2020, 20(1): 25.
- [86] den Hartog L, Meijer HJ, Stegenga B, et al. Single implants with different neck designs in the aesthetic zone: a randomized clinical trial[J]. *Clin Oral Implants Res*, 2011, 22(11): 1289-1297.
- [87] Sharon E, Shapira L, Wilensky A, et al. Efficiency and thermal changes during implantoplasty in relation to bur type[J]. *Clin Implant Dent Relat Res*, 2013, 15(2): 292-296.
- [88] de Souza Júnior JM, Oliveira de Souza JG, Pereira Neto AL, et al. Analysis of effectiveness of different rotational instruments in implantoplasty: an *in vitro* study[J]. *Implant Dent*, 2016, 25(3): 341-347.
- [89] Schwarz F, John G, Becker J. The influence of implantoplasty on the diameter, chemical surface composition, and biocompatibility of titanium implants[J]. *Clin Oral Investig*, 2017, 21(7): 2355-2361.
- [90] Sahrman P, Luso S, Mueller C, et al. Titanium implant characteristics after implantoplasty: an *in vitro* study on two different kinds of instrumentation[J]. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 2019, 34(6): 1299-

- 1305.
- [91] Vierling L, Liu CC, Wiedemeier D, et al. Assessing the impact of various decontamination instruments on titanium and zirconia dental implants: an *in vitro* study[J]. *Dent J*, 2024, 12(5): 136.
- [92] Kister F, Specht O, Warkentin M, et al. Peri-implantitis cleaning instrumentation influences the integrity of photoactive nanocoatings[J]. *Dent Mater*, 2017, 33(2): e69-e78.
- [93] Tsampli A, Rues S, Kappel H, et al. *In vitro* pilot study comparing a novel implantoplasty sonic instrumentation protocol with a conventional protocol using burs[J]. *Clin Oral Implants Res*, 2024, 35(3): 340-349.
- [94] Azzola F, Ionescu AC, Ottobelli M, et al. Biofilm formation on dental implant surface treated by implantoplasty: an *in situ* study[J]. *Dent J*, 2020, 8(2): 40.
- [95] Fonseca D, de Tapia B, Pons R, et al. The effect of implantoplasty on the fatigue behavior and corrosion resistance in titanium dental implants[J]. *Materials (Basel)*, 2024, 17(12): 2944.
- [96] Camps-Font O, Toledano-Serrabona J, Juiz-Camps A, et al. Effect of implantoplasty on roughness, fatigue and corrosion behavior of narrow diameter dental implants[J]. *J Funct Biomater*, 2023, 14(2):61.
- [97] Armentia M, Abasolo M, Coria I, et al. Effect of the geometry of butt-joint implant-supported restorations on the fatigue life of prosthetic screws[J]. *J Prosthet Dent*, 2022, 127(3): 477.e1-477.e9.
- [98] Bertl K, Isidor F, von Steyern PV, et al. Does implantoplasty affect the failure strength of narrow and regular diameter implants? A laboratory study [J]. *Clin Oral Investig*, 2021, 25(4): 2203-2211.
- [99] Wu XX, Cai CJ, Gil J, et al. Characteristics of particles and debris released after implantoplasty: a comparative study[J]. *Materials (Basel)*, 2022, 15(2): 602.
- [100] Toledano-Serrabona J, Bosch BM, Díez-Tercero L, et al. Evaluation of the inflammatory and osteogenic response induced by titanium particles released during implantoplasty of dental implants[J]. *Sci Rep*, 2022, 12(1): 15790.
- [101] Barrak FN, Li SW, Muntane AM, et al. Particle release from implantoplasty of dental implants and impact on cells[J]. *Int J Implant Dent*, 2020, 6(1): 50.
- [102] Chen L, Tong ZA, Luo HK, et al. Titanium particles in peri-implantitis: distribution, pathogenesis and prospects[J]. *Int J Oral Sci*, 2023, 15(1): 49.
- [103] AlHarthi MA, Soumya S, Rani A, et al. Impact of exposure of human osteoblast cells to titanium dioxide particles *in-vitro*[J]. *J Oral Biol Craniofac Res*, 2022, 12(6): 760-764.
- [104] Wang SQ, Yang JY, Lin TT, et al. Excessive production of mitochondrion-derived reactive oxygen species induced by titanium ions leads to autophagic cell death of osteoblasts via the SIRT3/SOD2 pathway[J]. *Mol Med Rep*, 2020, 22(1): 257-264.
- [105] Tawse-Smith A, Kota A, Jayaweera Y, et al. The effect of standardised implantoplasty protocol on titanium surface roughness: an *in-vitro* study[J]. *Braz Oral Res*, 2016, 30(1): e137.
- [106] Lee KI, Su CC, Fang KM, et al. Ultrafine silicon dioxide nanoparticles cause lung epithelial cells apoptosis via oxidative stress-activated PI3K/Akt-mediated mitochondria- and endoplasmic reticulum stress-dependent signaling pathways[J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1): 9928.
- [107] Ramanauskaite A, Becker K, Juodzbalsys G, et al. Clinical outcomes following surgical treatment of peri-implantitis at grafted and non-grafted implant sites: a retrospective analysis[J]. *Int J Implant Dent*, 2018, 4(1): 27.
- [108] Nart J, de Tapia B, Pujol À, et al. Vancomycin and tobramycin impregnated mineralized allograft for the surgical regenerative treatment of peri-implantitis: a 1-year follow-up case series[J]. *Clin Oral Investig*, 2018, 22(6): 2199-2207.
- [109] Englezos E, Cosyn J, Koole S, et al. Resective treatment of peri-implantitis: clinical and radiographic outcomes after 2 years[J]. *Int J Periodontics Restorative Dent*, 2018, 38(5): 729-735.
- [110] Bianchini MA, Galarraga-Vinueza ME, Apaza-Bedoya K, et al. Two to six-year disease resolution and marginal bone stability rates of a modified resective-implantoplasty therapy in 32 peri-implantitis cases[J]. *Clin Implant Dent Relat Res*, 2019, 21(4): 758-765.

- [111] Martins O, Sahrmann P, Ramos J, et al. Implantoplasty improves clinical parameters over a 2-year follow-up: a case series[J]. *Medicina (Kaunas)*, 2022, 58(1): 113.
- [112] Monje A, Pons R, Amerio E, et al. Resolution of peri-implantitis by means of implantoplasty as adjunct to surgical therapy: a retrospective study[J]. *J Periodontol*, 2022, 93(1): 110-122.
- [113] Bianchini M, Galarraga-Vinueza M, Bedoya K, et al. Implantoplasty enhancing peri-implant bone stability over a 3-year follow-up: a case series[J]. *Int J Periodontics Restorative Dent*, 2020, 40(1): e1-e8.
- [114] Gehrke SA, Aramburú Júnior JS, Dedavid BA, et al. Analysis of implant strength after implantoplasty in three implant-abutment connection designs: an *in vitro* study[J]. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 2016, 31(3): e65-e70.
- [115] Tribst JPM, Dal Piva AMO, Shibli JA, et al. Influence of implantoplasty on stress distribution of exposed implants at different bone insertion levels [J]. *Braz Oral Res*, 2017, 31: e96.
- [116] Chan HL, Oh WS, Ong HS, et al. Impact of implantoplasty on strength of the implant-abutment complex[J]. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 2013, 28(6): 1530-1535.
- [117] Trisi P, Berardini M, Falco A, et al. Insufficient irrigation induces peri-implant bone resorption: an *in vivo* histologic analysis in sheep[J]. *Clin Oral Implants Res*, 2014, 25(6): 696-701.
- [118] Augustin G, Zigman T, Davila S, et al. Cortical bone drilling and thermal osteonecrosis[J]. *Clin Biomech (Bristol)*, 2012, 27(4): 313-325.
- [119] Eriksson RA, Albrektsson T. The effect of heat on bone regeneration: an experimental study in the rabbit using the bone growth chamber[J]. *J Oral Maxillofac Surg*, 1984, 42(11): 705-711.
- [120] Eriksson AR, Albrektsson T. Temperature threshold levels for heat-induced bone tissue injury: a vital-microscopic study in the rabbit[J]. *J Prosthet Dent*, 1983, 50(1): 101-107.
- [121] Gehrke SA, Aramburú Júnior JS, Pérez-Albacete Martínez C, et al. The influence of drill length and irrigation system on heat production during osteotomy preparation for dental implants: an *ex vivo* study [J]. *Clin Oral Implants Res*, 2018, 29(7): 772-778.
- [122] Strbac GD, Giannis K, Unger E, et al. Drilling- and withdrawing-related thermal changes during implant site osteotomies[J]. *Clin Implant Dent Relat Res*, 2015, 17(1): 32-43.
- [123] Jorio IC, Stawarczyk B, Attin T, et al. Reduced fracture load of dental implants after implantoplasty with different instrumentation sequences. An *in vitro* study[J]. *Clin Oral Implants Res*, 2021, 32(8): 881-892.

(本文编辑 王姝)