



## 面向高性能种植体的飞秒激光加工技术研究进展

何 煦<sup>1</sup>, 马云灿<sup>1</sup>, 郭维维<sup>2</sup>, 宋建业<sup>3</sup>, 杨祖阁<sup>3</sup>, 汪 昆<sup>3</sup>, 李 军<sup>1</sup>, 孟立民<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 空军军医大学第三附属医院 口腔颌面外科, 西安 710032; 3. 陆军军医大学第二附属医院 口腔科, 重庆 400037)

**摘 要:** 钛和钛合金是口腔种植体的主流基体材料, 但其固有的表面生物活性不足, 常导致骨整合周期延长和成功率受限。飞秒激光加工作为一种非热的高精度表面加工或改性技术, 可通过在种植体表面构建微纳结构, 有效调控其生物学性能。本文综述近五年来飞秒激光改善种植体表面生物活性的研究进展。首先, 阐述通过调控激光功率、中心波长、扫描策略等单一参数构筑特定表面形貌的方法; 其次, 介绍了飞秒激光与羟基磷灰石沉积、喷砂处理、增材制造等技术相结合的复合加工策略及其协同增强效应; 然后, 通过与喷砂酸蚀、电沉积、等离子溅射等传统表面处理技术的对比, 分析飞秒激光在加工精度、热影响区控制、生物相容性及长期稳定性等方面的独特优势; 最后, 总结该技术当前面临的挑战(如: 设备成本、加工效率等), 并对未来在个性化种植体制造、多功能表面构建以及与其他先进技术融合等方面的发展方向进行展望。

**关键词:** 钛; 钛合金; 种植体; 飞秒激光; 微纳结构; 骨整合

中图分类号: TN206

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202638.250323

## Research progress on femtosecond laser processing technology for high-performance implants

He Xu<sup>1</sup>, Ma Yuncan<sup>1</sup>, Guo Weiwei<sup>2</sup>, Song Jianye<sup>3</sup>, Yang Zuge<sup>3</sup>,  
Wang Kun<sup>3</sup>, Li Jun<sup>1</sup>, Meng Limin<sup>1</sup>

(1. Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. Department of Oral and Maxillofacial Surgery, Third Affiliated Hospital, Fourth Military Medical University, Xi'an 710032, China;

3. Department of Stomatology, Second Affiliated Hospital, Third Military Medical University, Chongqing 400037, China)

**Abstract:** Titanium and its alloys are the predominant base materials for oral implants. However, challenges such as prolonged osseointegration periods and limited success rates persist due to their inherent low surface bioactivity. Femtosecond laser processing has emerged as an innovative, non-thermal, and high-precision surface modification technique, offering a novel approach to precisely tailor the micro-nano topography, chemical composition, and biological performance of implant surfaces. This review summarizes research advances in femtosecond laser surface treatment of titanium implants over the past five years. It systematically elaborates on methods for constructing specific surface architectures by regulating parameters such as laser power, wavelength, scanning strategies, and pulse patterns. Furthermore, it introduces hybrid processing strategies that combine femtosecond laser with techniques like hydroxyapatite deposition, sandblasting, and 3D printing, highlighting their synergistic effects. By comparing femtosecond laser processing with conventional surface treatment technologies (e.g., sandblasting and acid etching, electrochemical deposition, plasma sputtering), this paper analyzes its unique advantages in terms of processing precision, heat-affected zone, biocompatibility, and long-term stability. Finally, current challenges (e.g., equipment cost, processing efficiency) are summarized, and future development directions are proposed, including personalized implant manufacturing, multifunctional surface construction, and integration with other advanced technologies.

**Key words:** titanium, titanium alloy, implant, femtosecond laser, micro-nano structure, osseointegration

\* 收稿日期: 2025-09-30; 修订日期: 2026-02-15

基金项目: 重庆市器官智能生物制造工程研究中心开放项目(CQERC-OIBM20241013); 重庆市研究生科研创新项目(CYS25902)

联系方式: 何 煦, hexu0320@163.com。

通信作者: 马云灿, mayuncan@caep.cn。

牙缺失是口腔常见疾病,它不仅影响患者的咀嚼与发音功能,还可导致牙槽骨吸收和面部形态改变,进而降低患者生活质量。种植体技术借助生物相容性材料(即:种植体材料),在恢复天然牙功能的同时兼顾美观性与舒适性,目前已成为牙缺失的主流修复手段。钛(Ti)和钛合金材料具备低密度、高强度、较强耐腐蚀性等优点,是口腔医学临床实践中最常使用的种植体基材<sup>[1-3]</sup>。然而,光滑的种植体表面往往不利于成骨细胞的黏附、铺展、分化等,这导致骨整合过程耗时较长且存在术后感染和植入体松动的风险。因此,基于表面处理技术或方法在种植体表面加工微纳结构,达到提升生物活性、缩短骨整合时间、赋予抗菌性等目标,是口腔医学领域的热点研究方向。

飞秒激光加工技术是获得表面微纳结构的有效途径之一<sup>[4-5]</sup>。飞秒激光具备极短脉冲宽度和极高峰值功率的特性,与材料相互作用时能量主要通过强烈的非线性吸收效应在极短时间内沉积至材料表层,在焦斑尺度范围内引发电子激发并使材料以等离子体形式消融,向周围区域传导的热量极小<sup>[6]</sup>。因此,飞秒激光可在微米甚至纳米尺度对种植体表面实施精准刻蚀,同时避免对种植体基材造成不可控的热损伤<sup>[7-8]</sup>。自20世纪90年代中期飞秒激光被应用于材料的加工和处理以来,人们已成功在各类固体材料(包含钛和钛合金材料)表面诱导周期性表面结构(LIPSS)、微孔、微柱及多级复合结构<sup>[9-11]</sup>,这些结构可有效模拟生物骨组织的微观环境,显著促进成骨细胞成长和发育,从而加速骨整合进程<sup>[12-14]</sup>。

本文面向高性能种植体对表面微纳结构高效加工技术的实际需求,系统梳理近五年以来飞秒激光加工种植体表面微纳结构的研究进展。首先,从飞秒激光单机调控策略出发,阐述如何通过调控激光功率、中心波长、扫描方式等参数,实现对种植体表面特性的定向调控;其次,介绍飞秒激光与其他技术相结合的复合加工新方法及其产生的协同增强效应;然后,通过与传统表面处理技术的多维度对比,分析该技术的优势与现有局限性;最后,总结该技术当前面临的主要挑战,并对其未来在口腔种植领域的发展趋势与应用前景进行展望。

## 1 种植体材料表面微纳结构飞秒激光加工的早期研究

早在2000年,美国伦斯勒理工学院生物医学工程系 Thomas J. Webster 等人<sup>[15]</sup>的研究证实,微纳结构可显著促进成骨细胞黏附,这为飞秒激光诱导微纳结构以提升种植体性能提供了理论依据。此后,该领域陆续取得一系列典型进展:2007年,美国罗切斯特大学光学研究所 A. Y. Vorobyev 等人<sup>[16]</sup>报道了飞秒激光加工的钛表面在植入体等生物医学应用中具有潜在价值;2012年,法国里昂大学圣太田国立工程师学院 Virginie Dumas 等人<sup>[17]</sup>的研究表明,飞秒激光制备的结构化表面能够改善间充质干细胞(MSCs)的早期黏附质量,精确调控其形态与取向并引导细胞外基质有序排列;2013年,塞尔维亚贝尔格莱德大学物理化学系核科学研究所 M. Trtica 等人<sup>[18]</sup>利用飞秒激光在真空环境中对钛表面进行改性,成功去除碳、氧杂质且未引入新的氮化物或氧化物,进一步凸显了其在医用植入体领域的应用潜力;2015年, Virginie Dumas 等人<sup>[19]</sup>的研究进一步揭示,飞秒激光在 Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V 钛合金表面构建精准的表面微纳结构,可显著抑制脂肪形成相关基因表达、上调成骨相关基因表达,同时提升碱性磷酸酶活性并减少脂质生成,从而有效调控 MSCs 分化并提升种植体性能。这些早期研究为新型种植体的开发和应用奠定了重要基础。然而,上述工作大多基于低重复频率钛宝石飞秒激光器开展,其在实际应用中存在明显局限,具体表现为:1)钛宝石飞秒激光器对环境温湿度、洁净度及振动极为敏感,需在恒温超净环境运行,增加使用成本与场地限制。2)受限于 kHz 级的重复频率和较低的扫描速率,其加工效率有限,难以满足大面积或批量加工的实际需求。这些因素制约了基于钛宝石飞秒激光的加工技术在临床及规模化生产中的直接应用。近年来,随着高重复频率飞秒激光技术的迅速发展,人们开始采用高重复频率飞秒激光对钛及钛合金等种植体材料开展表面微结构的高效加工研究,为推动该技术走向实际应用提供了新的可能。

## 2 面向高性能种植体的飞秒激光单机调控策略

为实现种植体材料表面生物活性的定向调控,国内外研究团队探索利用高重复频率飞秒激光的关键加工参数(如:激光功率、中心波长、扫描参数、脉冲序列、扫描策略等)与种植体材料表面微纳结构形貌、化学状态、生物学性能等指标的内在关联,旨在发展一种高效可控的单机调控策略。

### 2.1 调控激光功率

激光功率(或脉冲能量)是调控目标材料表面烧蚀程度,决定最终微纳形貌和表面化学态的核心变量。2021年,四川大学国家生物医学材料工程技术研究中心 Luo Fengxiang 等人<sup>[20]</sup>采用波长 515 nm、脉冲宽度 700 fs、重复频率 100 kHz 的飞秒激光,通过平场透镜聚焦成直径约 10 μm 的光斑,对医用纯钛种植体材料表面进行扫描速度为 0.8 mm/s 的刻线加工。微结构形貌表征结果显示:在激光功率为 0.1 W 条件下,钛表面形成具有纳米级尺度

特征的波纹结构;当功率提升至 0.3 W 时,进一步出现了微脊与微岛结构;当功率继续增至 0.5 W 时,加工产生的沟槽与微孔深度明显增加(图 1(a))。亲水性测试结果表明:飞秒激光加工的钛表面亲水性随激光功率上升而显著增强,接触角依次为  $123.9^\circ@0.1\text{ W}$ 、 $25.9^\circ@0.3\text{ W}$ 、 $6.15^\circ@0.5\text{ W}$ (图 1(b))。其中,在 0.5 W 条件下获得的超亲水表面(接触角  $6.15^\circ$ ),其性能甚至优于常用的酸碱改性钛表面(接触角  $7.51^\circ$ )。因此,通过调节激光功率可调控种植体表面亲水性以适应不同的临床应用需求。X 射线衍射(XRD)与 X 射线光电子能谱(XPS)分析表明:所有经飞秒激光处理的钛表面均存在氧化钛,且随着激光能量增加,更多氧化钛被还原为一氧化钛,表面活性基团数量相应增多,从而提升了材料表面的生物活性(图 1(c)、图 1(d))。此外,通过模拟体液(SBF)进行的磷灰石沉淀实验进一步证实,经 0.3 W 和 0.5 W 激光加工的钛样品表面磷灰石覆盖速率均优于砂纸打磨及酸碱改性处理技术(图 1(e))。该结果再次证明,飞秒激光加工技术可有效增强钛表面的生物活性与骨诱导能力。

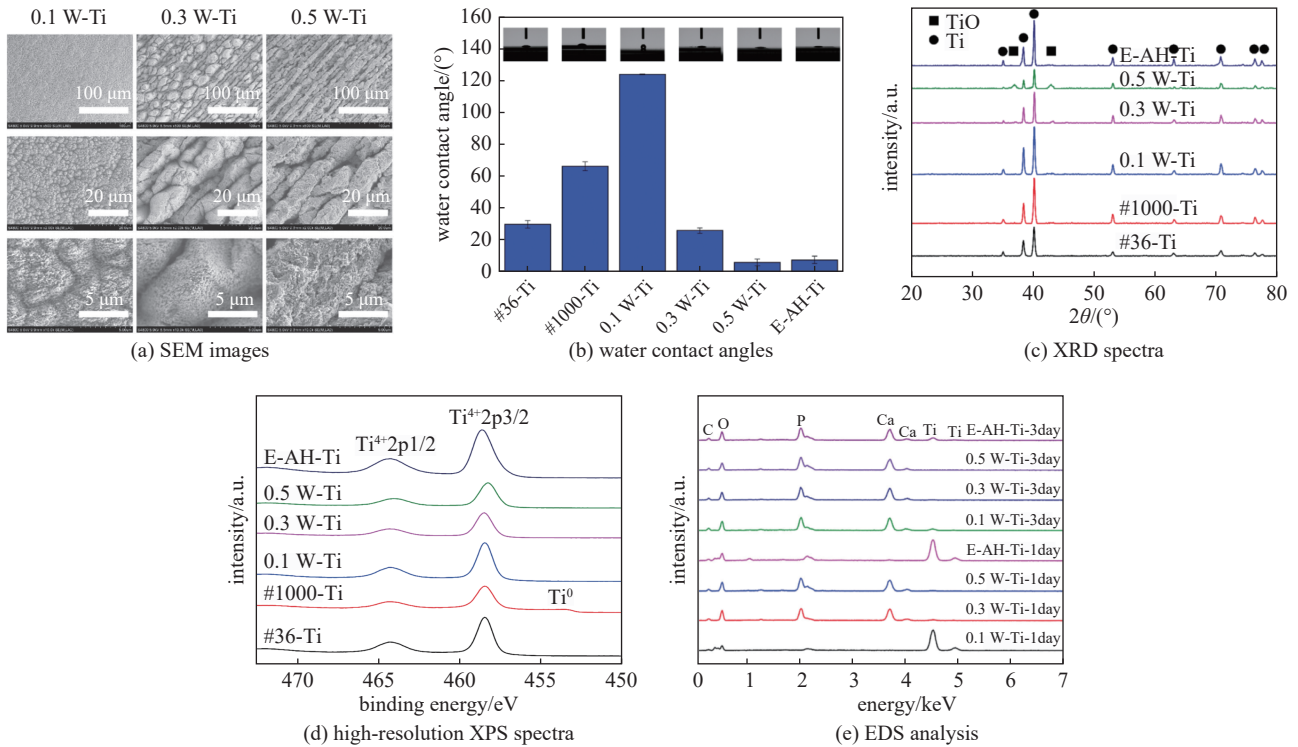


Fig. 1 Experimental results of laser power regulation<sup>[20]</sup>

图 1 调控激光功率的实验结果<sup>[20]</sup>

## 2.2 调控中心波长

中心波长是决定飞秒激光与材料相互作用物理机制的基础性参数,对加工效率、结构特征、表面化学以及最终生物学性能会产生根本性影响,因此,调控波长是实现特定表面功能化设计的关键策略之一。2022 年,里昂大学法国国家健康与医学研究所 Steve Papa 等人<sup>[21]</sup>采用波长为 1030 nm、脉冲宽度为 400 fs 的飞秒激光,对镜面抛光的  $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$  种植体材料进行表面处理,成功制备出激光诱导周期表面结构(LIPSS)(图 2(a))。其中,红外 LIPSS(IR LIPSS)使用 1030 nm 激光(单脉冲能量  $1.07\ \mu\text{J}$ )经焦距 100 mm 的平场透镜聚焦加工;绿光 LIPSS(Green LIPSS)则采用二倍频获得的 515 nm 激光(单脉冲能量  $0.55\ \mu\text{J}$ )并同样使用焦距 100 mm 的平场透镜聚焦。通过调节扫描速度,确保  $x$  方向脉冲间隔和  $y$  方向扫描间隔均为  $5\ \mu\text{m}$ 。形貌分析表明,Green LIPSS 的沟槽密度约为 IR LIPSS 的 2 倍,二者均形成高度有序的周期性结构(图 2(b))。在粗糙度( $S_a$ )方面,IR LIPSS 的  $S_a$  值约为 Green LIPSS 的 2 倍,其空间周期与波纹深度也接近 Green LIPSS 的 2 倍。两种 LIPSS 的表面纹理各向异性均接近 0,表现出明显的各向异性特征(图 2(c)),且其表面复杂度显著高于抛光表面。润湿性测试结果显示,亲水性依次为:Green LIPSS > IR LIPSS > 抛光表面(图 2(d)),这说明纳米级纹理可有效增强  $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$  表面的亲水性能。在生物学实验中,与抛光表面相比,IR LIPSS 和 Green LIPSS 均显著提升了人牙龈成纤维细胞的黏附能力。划痕试验中,抛光表面细胞层脱落面积达  $5.8\ \text{mm}^2$ ,而两种 LIPSS 表面的脱落面积接近  $0\ \text{mm}^2$ (图 2(e))。超声浴试验进一步显示,抛光表面 50% 细胞层脱落的时间仅为 19.7 s,而 Green LIPSS 和 IR LIPSS 分别延长至 40.2 s 和 52 s,均为抛光表面的 2 倍以上(图 2(f))。细菌黏附实验表明,IR LIPSS 对牙龈卟啉单胞菌的黏附抑制率为 21%;Green LIPSS 因其更小

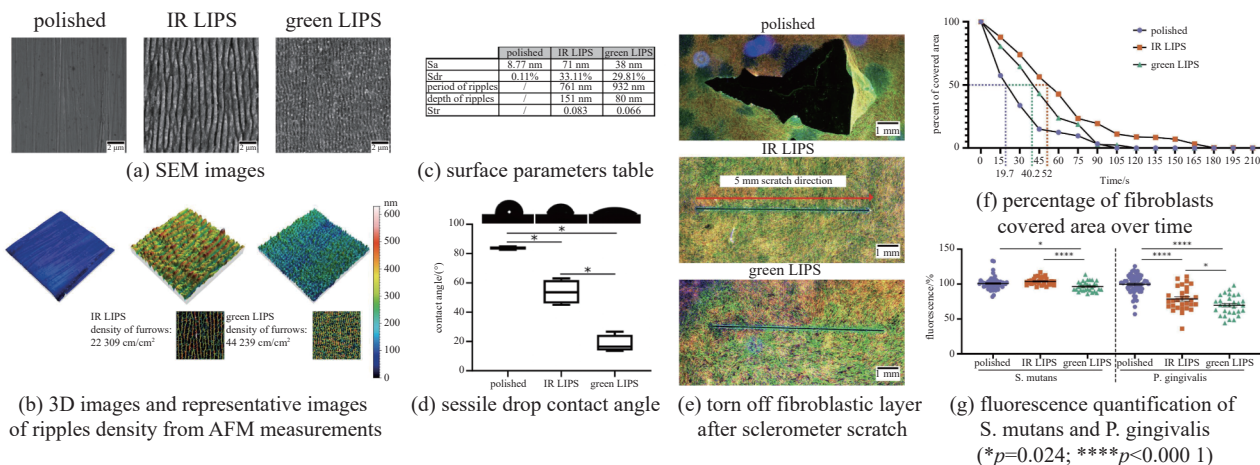


Fig. 2 Experimental results of laser wavelength regulation<sup>[21]</sup>

图 2 调控激光波长的实验结果<sup>[21]</sup>

的空间周期, 不仅将该抑制率提升至 30%, 还能使变形链球菌的黏附量较抛光表面降低 4%、较 IR LIPSS 降低 7% (图 2(g))。该研究证实, 两种 LIPSS 结构均具备促进牙龈成纤维细胞黏附与抑制种植体周围炎相关细菌黏附的双重生物功能, 且 Green LIPSS 表现出更优的综合性能。

### 2.3 调控扫描速度和扫描间隔

扫描速度与扫描间距直接影响激光脉冲空间重叠率和能量累积效应, 是调控结构周期性、均匀性和深度的关键参数。2025 年, 中国工程物理研究院流体物理研究所与陆军军医大学第二附属医院口腔科 Guo Weiwei 等人<sup>[22]</sup> 开展联合研究, 采用波长为 1030 nm、脉冲宽度 300 fs、重复频率 200 kHz、平均功率 3.15 W 的飞秒激光, 经平场透镜聚焦后对钛种植体表面进行线扫描加工, 构建三种不同的微结构(分别记为 LTi、MTi 与 HTi)。具体扫描参数为: 1)LTi: 扫描速率 5 mm/s, 扫描间隔 50 μm, 扫描 1 次; 2)MTi: 扫描速率 10 mm/s, 扫描间隔 50 μm, 扫描 1 次; 3)HTi: 扫描速率 50 mm/s, 扫描间隔 35 μm, 扫描 2 次。扫描电子显微镜 (SEM) 观察显示: 原始钛样品 (Ti) 表面光滑, LTi 表面呈现亚微米波纹与纳米颗粒的复合结构, MTi 表面为微米球与纳米颗粒复合结构, HTi 表面则形成微米球、亚微米波纹及纳米颗粒构成的三级复合结构(图 3(a))。表面粗糙度 (Sa) 表现为: Ti < LTi < MTi < HTi (图 3(b))。接触角测试表明, HTi 表面呈强亲水性, 其接触角大小为 HTi < MTi < Ti < LTi (疏水) (图 3(c))。体外细胞实验显示: HTi 表面在各时间点的黏附细胞数均显著高于其他组, 这说明其多尺度结构与高粗糙度有利于细胞早期黏附(图 3(d)); HTi 表面细胞伪足更密集、铺展更广, 细胞间连接更强, 表明该表面能促进细胞形态成熟(图 3(e)); 增殖实验: HTi 主要促进细胞早期定植(图 3(f)); 成骨分化实验: HTi 可促进早期及晚期成骨分化; 成骨相关基因表

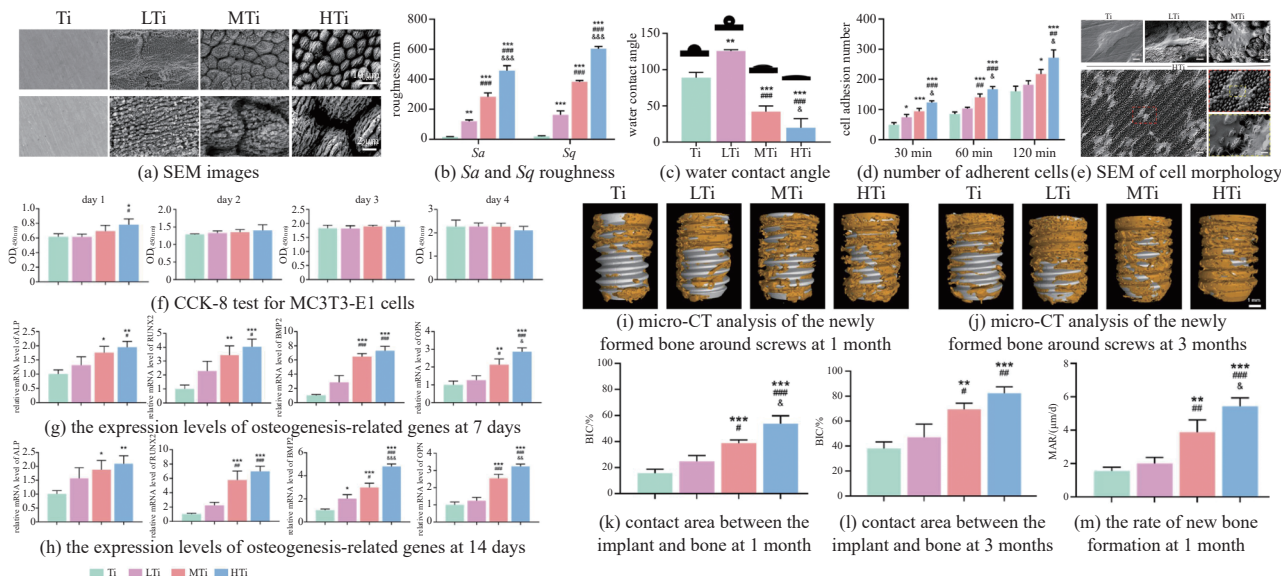


Fig. 3 Experimental results of scanning speed and interval regulation<sup>[22]</sup>

图 3 调控扫描速度和扫描间隔的实验结果<sup>[22]</sup>

达检测进一步显示, HTi 组四种基因表达均显著上调, 从分子层面证实其对成骨分化的促进作用(图 3(g)、图 3(h))。体内实验以 6 月龄新西兰大白兔为模型, 将前述钛植入左后肢股骨远端干骺端, 并于第 1、3 个月取样。获得的结果为: 1) Micro-CT 扫描: HTi 组在第 1、3 个月时的骨体积分数、骨小梁厚度及数量均显著高于其他组, 骨小梁间隙显著更低, 表明其周围骨量更丰富、骨小梁结构更致密(图 3(i)、图 3(j)); 2) Van Gieson (VG) 染色: 第 1 个月时 HTi 组的骨-植入体接触率显著高于 Ti 与 LTi 组, 且略高于 MTi 组(图 3(k)); 至第 3 个月时仍保持优势(图 3(l)), 说明 HTi 能增强骨-植入体结合; 3) 双荧光标记: 第 1 个月时 HTi 组的矿化沉积速率显著高于 Ti 与 LTi 组(图 3(m)), 表明其早期骨矿化速率更快。在后续研究<sup>[23]</sup>中, 联合研究团队以 HTi 的加工参数作为激光处理组 (Laser-Ti), 将其与喷砂酸蚀组 (SLA-Ti) 进行物化性能及生物学性能比较。结果表明, Laser-Ti 在亲水性、细胞黏附、细胞相容性、成骨基因表达及体内成骨能力等方面均优于 SLA-Ti。

#### 2.4 调控脉冲序列

飞秒激光加工的表面形貌呈现一定的周期性或规律性, 通过生成随机分布的激光脉冲对材料表面进行加工, 则可以突破上述限制, 获得随机性更强的表面形貌。2022 年, 瑞士联邦材料科学与技术实验室 William A. Lackington 等人<sup>[24]</sup>采用飞秒激光对  $Ti_6Al_4V$  棒材及圆盘进行了表面加工。该激光系统可在 1030 和 515 nm 两种波长间切换, 脉冲宽度为 300 fs 至 10 ps, 最大单脉冲能量为 200  $\mu J$ 。实验采用两种脉冲序列进行加工, 即随机分布脉冲 (fs-random) 和有序网格脉冲 (fs-organized) (图 4(a)), 以商用喷砂酸蚀 (BCP) 处理的样品作为对照。形貌分析表明: BCP 表面呈现不规则的片状微观结构, fs-random 表面分布有随机冲击坑, fs-organized 表面则形成有序排列的重复凹坑。润湿性测试显示: BCP 表面呈弱亲水性 (接触角  $82^\circ \pm 2^\circ$ ), 而飞秒激光加工的两种表面均为超疏水状态 (fs-random:  $151^\circ \pm 2^\circ$ ; fs-organized:  $160^\circ \pm 2^\circ$ )。在材料学表征方面: 晶体结构: BCP 因喷砂导致近表面晶粒显著细化 (约 20 nm); 激光加工组晶粒尺寸得以保持 (100~150 nm), 且其微应变至少为 BCP 的 1.5 倍。氧化层与化学组成: 激光加工使表面氧化层厚度增加约 5 倍, 影响了表面钒元素的分布; 相比之下, BCP 处理对样品化学组成无显著影响。生物学响应研究结果显示: 血液相互作用: BCP 与 fs-random 表面能刺激形成致密的纤维蛋白网络; fs-organized 表面仅诱导形成稀疏的纤维蛋白网络(图 4(b))。该差异可能与表面接触角、粗糙度及形貌特征有关。细胞行为: 人骨前体细胞在所有样品表面培养 24 h 后均表现出相似的附着与细胞骨架延伸, 但激光处理组的细胞铺展面积显著优于 BCP 组(图 4(c))。体外矿化: 经过 28 天培养, BCP、fs-random 和 fs-organized 表面的矿化水平呈依次降低趋势, 但组间无统计学显著差异; 其中 fs-random 的矿化水平高于 fs-organized, 且两种激光加工表面的矿化能力均接近具有临床相关性的 BCP 表面。

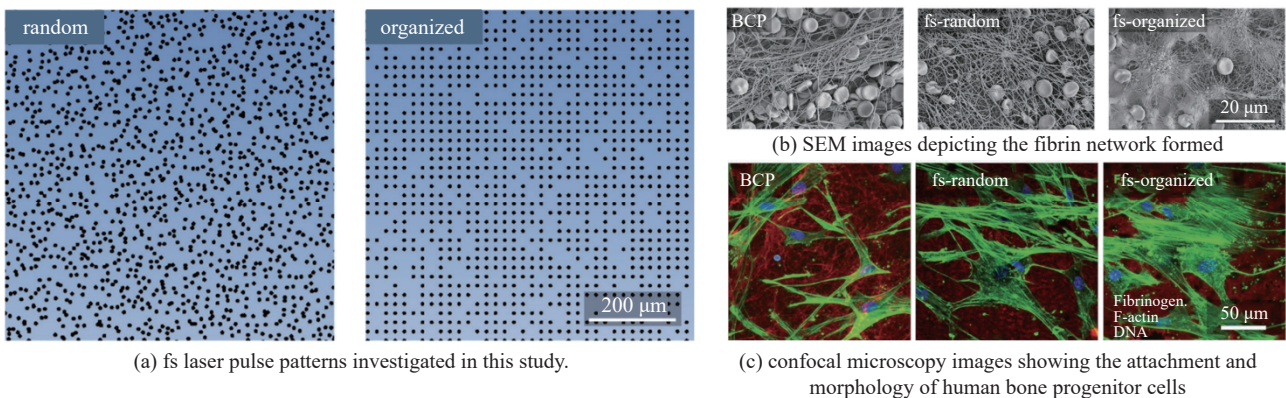


Fig. 4 Experimental results of pulse pattern regulation<sup>[24]</sup>

图 4 调控脉冲图案的实验结果<sup>[24]</sup>

#### 2.5 调控扫描方式

通过调控或切换扫描方式, 如单次扫描、交叉扫描、螺旋扫描或动态聚焦扫描等, 可以构建出各向异性或各向同性的表面形貌。2022 年, 宁波大学附属医院 Wu Xinhui 等人<sup>[25]</sup>使用波长 1030 nm、脉冲宽度 40 fs、重复频率 50 kHz 的飞秒激光聚焦为直径 100  $\mu m$  的光斑对钛合金表面进行间隔 100  $\mu m$  的交叉线扫描加工(即: 先沿水平方向扫描, 再沿垂直方向扫描), 通过参数调控制备了四种不同的表面微结构(图 5(a)): 沟槽(长 20  $\mu m$ 、宽 5  $\mu m$ 、间距 15  $\mu m$ )、微孔(直径 5  $\mu m$ 、间距 20  $\mu m$ )、定向颗粒(边长 25  $\mu m$ 、间距 5  $\mu m$ )、条纹(长 12~20  $\mu m$ 、宽 5  $\mu m$ )。XPS 分析表明, 经飞秒激光加工去除了钛合金表面原始杂质并形成新的金属氧化物膜, 未引入新杂质。接触角测量表明, 微孔型

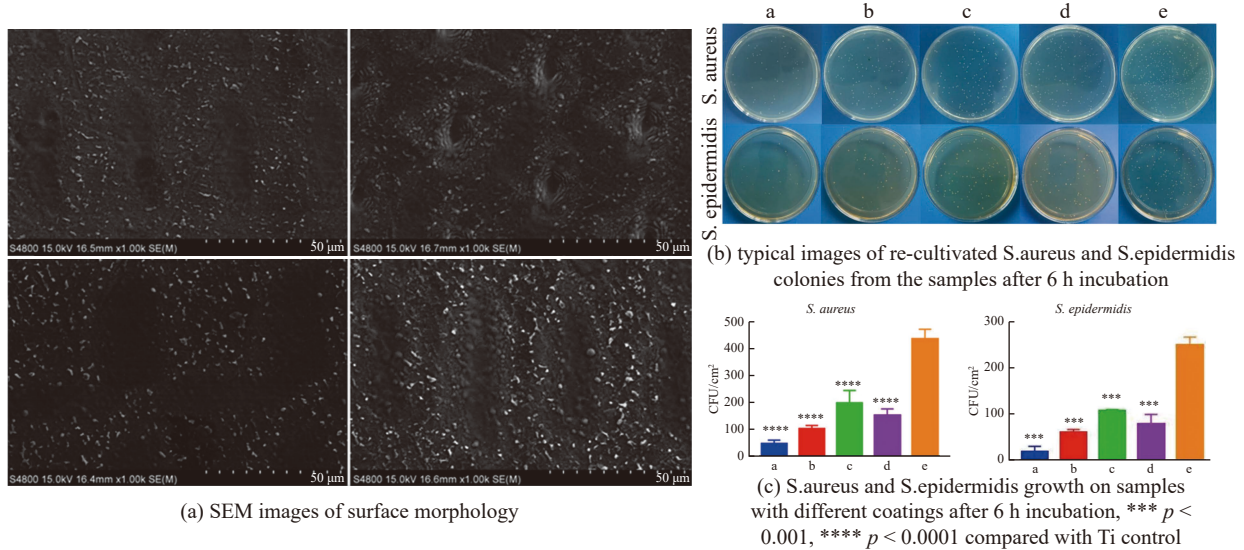


Fig. 5 Experimental results of scanning mode regulation (a: groove pattern; b: micro-hole pattern; c: directional grain pattern; d: stripe pattern; e: control group)<sup>[25]</sup>

图 5 调控扫描方式的实验结果<sup>[25]</sup>

表面平均水接触角最大(141.6°), 呈现明显疏水性, 显著大于抛光表面(78°)。抗菌实验表明, 与抛光钛对照组相比, 四种微形貌样品表面的金黄色葡萄球菌和表皮葡萄球菌菌落数均显著减少, 其中沟槽型表面菌落数最少, 抗菌效果最优(图 5(b)、图 5(c)); 共聚焦激光扫描显微镜(CLSM)图像显示各微形貌表面绿色荧光(活菌)强度明显弱于对照组, 且均出现红色荧光(死菌), 说明微形貌不仅抑制细菌黏附, 还能在一定程度上杀灭细菌; SEM 观察进一步证实, 微形貌表面细菌菌落数量远少于对照组, 沟槽型表面甚至几乎无可见菌落, 充分验证了飞秒激光制备的微形貌对目标致病菌的优异抗菌性能。细胞实验表明, 飞秒激光加工的微结构表面能持续促进细胞活力, 未损害钛合金生物相容性, 还能有效促进骨髓间充质干细胞的黏附与增殖, 为植入物骨整合提供良好条件。

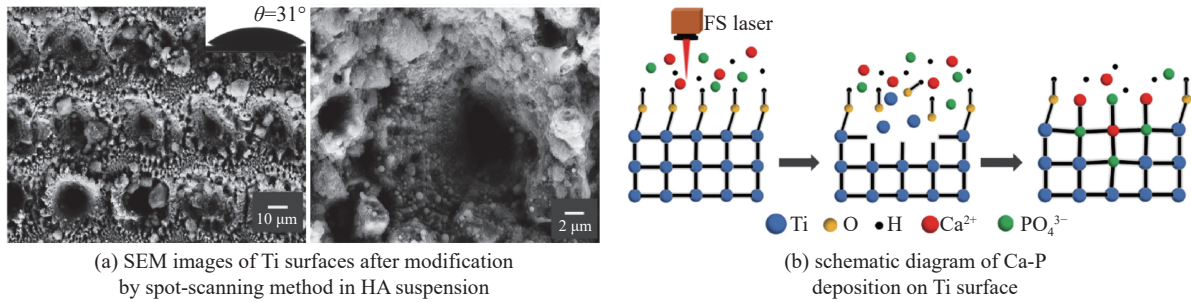
综上所述, 基于飞秒激光单机调控策略, 在精准调控的前提下可实现满足特定功能的微纳结构定制。通过单一光源和工艺的协同优化, 无需后续化学或物理处理即可同步赋予种植体表面调控细胞生长发育过程(如: 粘附、增殖、分化)和抵御细菌感染的双重生物功能, 展现出“一步法”构建多功能生物界面的巨大潜力。这为实现“抗感染-促整合”一体化的新一代智能种植体提供了高效清洁且高度可控的制造方案。

### 3 面向高性能种植体的飞秒激光复合/耦合加工策略

尽管基于飞秒激光单机调控策略已能实现微纳结构的精确定制, 但在追求更优异、更稳定或功能更复杂的表面时, 该策略仍存在一定局限。具体地, 飞秒激光对表面化学组成的调控范围相对有限, 亦难以直接实现特定生物分子有效固定。为此, 部分研究团队将飞秒激光加工技术与其他技术或方法相结合, 发展出多种复合/耦合加工策略, 如: 与湿法化学、多孔材料制备、喷砂处理、增材制造及炎症治疗等手段协同, 通过不同技术间的优势互补与协同效应, 突破单一技术/方法瓶颈, 在种植体表面构建功能更为高级的复合界面。

#### 3.1 飞秒激光与湿法化学结合

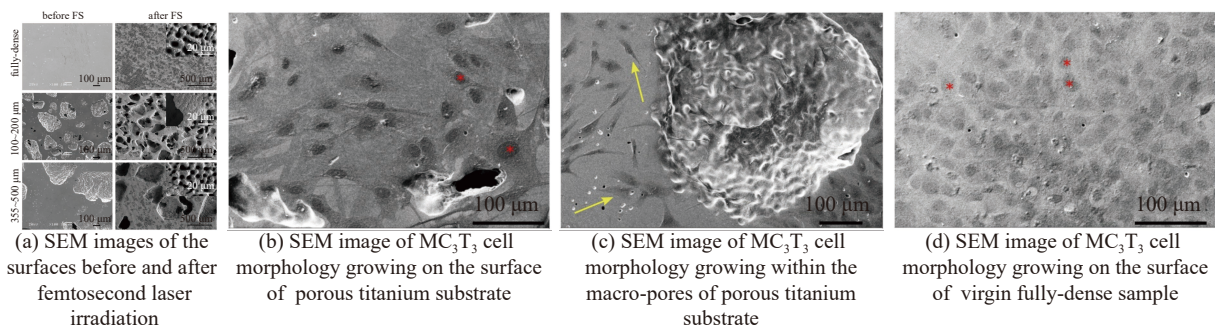
飞秒激光与湿法化学结合(有时亦称为“飞秒激光液相原位加工”)是一种极具前景的复合表面改性策略, 它能同步实现钛表面微纳结构的构筑与高生物活性涂层的沉积。该策略为攻克羟基磷灰石(HA)涂层易脱落的技术瓶颈提供了创新解决方案。2020年, 西南科技大学极端条件物质特性联合实验室 Lin Xiaoming 等人<sup>[26]</sup>采用中心波长为 800 nm、脉冲宽度 100 fs、重复频率 1 kHz、最大单脉冲能量 7 mJ 的飞秒激光系统, 以点刻蚀为主要加工方式, 系统比较了在纯钛表面沉积 HA 的三种路径: 1) 空气中激光刻蚀后浸入 HA 悬浮液; 2) 直接在 HA 悬浮液中进行激光点刻蚀; 3) 在悬浮液中采用线扫描加工。研究发现, 传统方法(如空气中加工后浸泡)沉积的钙磷相成分不稳定, 主要依赖物理附着, 存在容易脱落的现实问题。相比之下, 在 HA 悬浮液中直接进行飞秒激光点刻蚀, 能在钛表面形成独特的“微孔-内壁纳米级乳突”复合结构(图 6(a))。该结构显著增大了比表面积, 提供了丰富的活性位点, 使沉积的  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  晶体与钛基底形成牢固的化学结合(图 6(b)), 其成分与人体骨无机质高度相似, 具有良好的生物可吸收性与骨诱导性。同时, 该方法处理的表面亲水性优异, 可协同促进生物矿化与骨整合。而采用线扫

Fig. 6 Experimental results of combining femtosecond laser with wet chemistry<sup>[26]</sup>图 6 飞秒激光与湿法化学结合的实验结果<sup>[26]</sup>

描在悬浮液中加工, 则能在沟槽结构内部原位生成结合紧密的钙磷涂层, 为细胞提供定向生长的物理引导。该研究表明, 此复合策略所获涂层结合强度高、生物性能优越, 有效突破了传统 HA 涂层技术(如电化学沉积、等离子喷涂)在附着力、均匀性及长期稳定性等方面的局限。

### 3.2 飞秒激光与多孔钛材料工艺结合

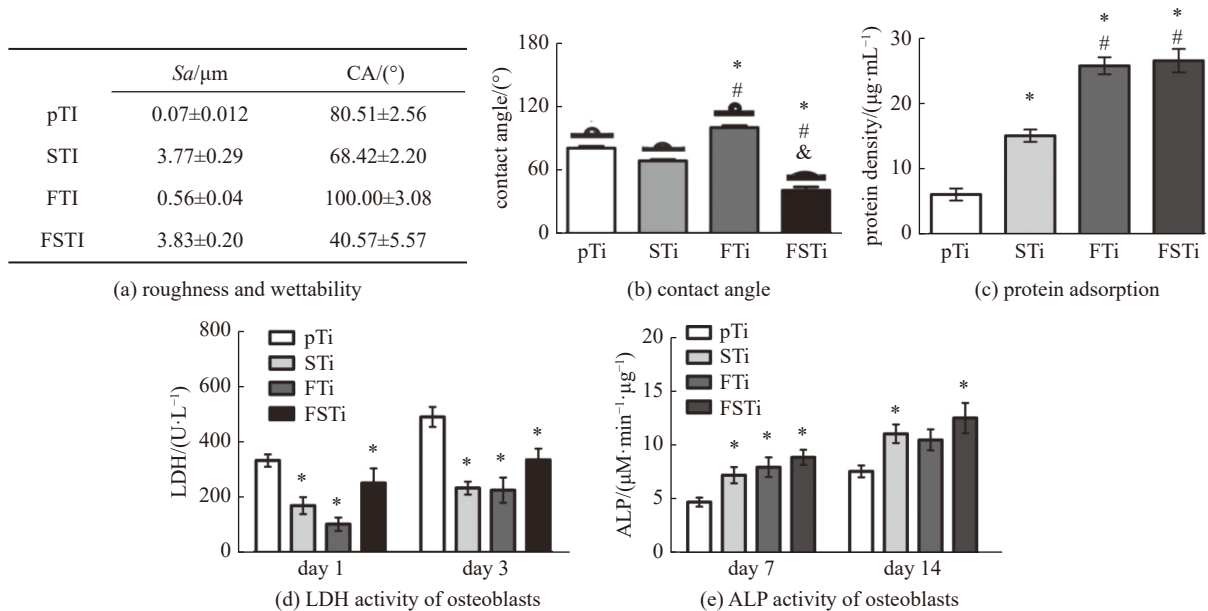
多孔钛材料因具有与天然骨组织相近的三维连通孔隙结构和适配的弹性模量, 在种植体领域备受关注。然而, 其相对粗糙的烧结表面在生物活性方面仍有提升空间。2020年, 西班牙科鲁尼亚大学高等理工学院 Ángel Rodríguez 等人<sup>[27]</sup>的研究探索了利用飞秒激光对多孔钛进行表面精密改性的可行性。该研究首先采用粉末冶金法制备了三种样品: 致密纯钛、以及两种具有不同初始孔隙尺寸的多孔钛。随后, 使用中心波长 1040 nm、脉冲宽度 396 fs、重复频率 100 kHz 的飞秒激光系统, 分别对前述样品表面进行扫描加工(扫描速度 960 mm/s, 线间距 12 μm, 重复扫描 20 次)。加工过程中通入氩气保护, 以抑制热氧化。研究结果表明: 1) 经飞秒激光加工后, 无论是致密钛还是多孔钛的平坦表面及宏观孔的内壁, 均被赋予了精细的微纳复合结构, 如: 亚 10 μm 尺度的微孔/微柱簇, 以及完全覆盖表面的周期约 1 μm 的激光诱导周期性表面结构(LIPSS)(图 7(a))。该结构显著增加了表面粗糙度与比表面积。孔隙特性的精密调控: 激光在材料表面诱导产生了等效直径为 2.8~4.6 μm 的次级微孔, 其尺寸小于烧结形成的微孔(约 5.9 μm), 且形状更为不规则, 从而增强了孔壁的几何复杂性。重要的是, 多孔样品的总孔隙率仍稳定维持在 50% 左右, 达到了设计目标; 2) 激光加工未影响材料的屈服强度。对于致密钛, 表面引入的微孔使其弹性模量降低了约 40%; 而多孔钛的弹性模量仅在小范围内波动, 整体仍与皮质骨模量范围相匹配, 可有效避免应力屏蔽效应; 3) 体外细胞实验证实, 经飞秒激光改性的表面极大地促进了成骨细胞的黏附与增殖(图 7(b))。细胞能够通过丰富的丝状伪足紧密贴附, 甚至在多孔结构的复杂内壁上形成连续的细胞层(图 7(c)); 相比之下, 未处理的致密钛表面细胞伸展受限、增殖密度低(图 7(d))。这证明飞秒激光构建的分级微纳结构为细胞创造了更优越的微环境, 有力促进了骨整合潜力。该研究证实, 飞秒激光加工技术可在不破坏多孔钛主体结构 and 核心力学优势的前提下, 对其从宏观孔道内壁到平坦区域的整个表面进行精密修饰, 赋予其高生物活性的分层微纳形貌, 从而实现从“宏孔”到“微纳结构”的多级协同, 为制备高性能植入体提供了创新的复合制造策略。

Fig. 7 Experimental results of combining femtosecond laser with porous titanium material process<sup>[27]</sup>图 7 飞秒激光与多孔钛材料工艺结合的实验结果<sup>[27]</sup>

### 3.3 飞秒激光与喷砂处理结合

为进一步提升种植体表面的骨整合效能, 研究者探索了将飞秒激光微纳加工与传统的喷砂处理相结合的复合策略。2021年, 天津医科大学总医院骨外科 Liu Yang 等人<sup>[28]</sup>系统对比了不同表面处理对 Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V 种植体生物学性

能的影响。研究采用波长 800 nm、脉冲宽度 100 fs、重复频率 1 kHz 的飞秒激光,对四组样品进行处理:单纯抛光(pTi)、单纯喷砂(STi)、单纯飞秒激光加工(FTi),以及先喷砂后飞秒激光加工(FSTi)。研究表明,pTi表面仅有少量划痕,STi呈现不规则错位结构,FTi表面为纳米乳突柱状结构且基底存在不规则孔洞,FSTi则形成类似松质骨的微纳分级结构,其中,FSTi具有最高的粗糙度和最强的亲水性(图 8(a)、图 8(b))。在生物学实验中,FSTi展现出生物活性更优、细胞毒性更低、成骨促进作用更强、抗炎性能突出等优势(图 8(c)、图 8(d)、图 8(e)),这些优势源于 FSTi 独特的亲水性微纳分级结构——微米级错位结构提供充足机械锚定位点与较大比表面积,纳米级乳突结构进一步增加细胞黏附位点,强亲水性则增强细胞与材料、体液的相互作用,三者协同优化了细胞-材料相互作用,从而同时提升骨整合能力与抗炎性能。因此,该策略有效融合了两种技术的优势,喷砂处理高效构筑了宏观力学基础,而飞秒激光则在微观尺度上进行了精密生物功能化。二者结合所实现的微纳分级结构与界面亲水性协同,能同时强化骨整合能力与抗炎性能,为开发新一代高性能种植体表面提供具有显著潜力的工艺路线。



pTi: polished titanium; STi: sandblasted titanium; FTi: femtosecond laser-treated titanium; FSTi: femtosecond laser-treated and sandblasted titanium. significance: \* $p < 0.05$  (STi, FTi, FSTi vs pTi.); # $p < 0.05$  (pTi, FTi, FSTi vs STi); & $p < 0.05$  (pTi, STi, FSTi vs FTi).

Fig. 8 Experimental results of combining femtosecond laser with sandblasting treatment<sup>[28]</sup>

图 8 飞秒激光与喷砂处理相结合的结果<sup>[28]</sup>

### 3.4 飞秒激光与增材制造结合

增材制造(3D 打印)技术为制备具有复杂几何形状和定制化孔隙结构的骨植入体提供了可能,但其直接成形的金属表面往往较为光滑、生物活性有限。2022 年,四川大学机械工程学院 Wang Su 等人<sup>[29]</sup>的研究创新性地选择选择性激光熔化(SLM)与飞秒激光表面改性技术相结合,以提升 3D 打印钛合金骨支架的生物性能。首先使用 SLM 制备了 Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V 骨支架,然后使用波长 800 nm、脉冲宽度 104 fs、重复频率 1 kHz、平均功率 50 mW 的飞秒激光聚焦为半径 25  $\mu\text{m}$  的光斑对其进行扫描速度为 0.5 mm/s、扫描间隔为 0.04 mm 的线扫描加工。结果表明,未处理的 AM 组支架表面较光滑,而经飞秒激光加工的 AM+FS 组形成类骨小梁结构的微纳米复合形貌(图 9(a)); AM+FS 组的平均粗糙度( $R_a$ )、粗糙度峰度( $R_{ku}$ )及粗糙度偏度( $R_{sk}$ )均高于 AM 组;AM 组为疏水结构(平均接触角 98 $^\circ$ ),AM+FS 组转为超亲水结构(平均接触角近 0 $^\circ$ )(图 9(b)),更利于细胞黏附。体外实验表明,AM+FS 组浸泡模拟体液后形成致密羟基磷灰石层,钙磷比 $\approx$ 1.65(接近人体骨)(图 9(c)),AM 组仅少量羟基磷灰石且钙磷比 $\approx$ 1.92(图 9(d))。体内实验表明,兔胫骨植入后,AM+FS 组第 2 周新骨量约为 AM 组的 2 倍,第 8 周骨组织与支架形成机械互锁,新骨生长更优(图 9(e)、图 9(f))。研究表明,飞秒激光使支架表面形成微纳米形貌,提升粗糙度与超亲水性,既增加细胞接触面积,又促进细胞外基质吸附,加速羟基磷灰石形成与成骨细胞黏附、增殖,进而增强生物活性与骨整合能力。该复合策略成功地将定制化宏观结构与功能性表面微纳工程相结合,不仅保留 3D 打印在复杂形状制造方面的优势,而且通过飞秒激光加工技术赋予植入体表面高生物活性,显著促进骨再生与整合,为个性化、高性能骨修复体的制备开辟新的技术途径。

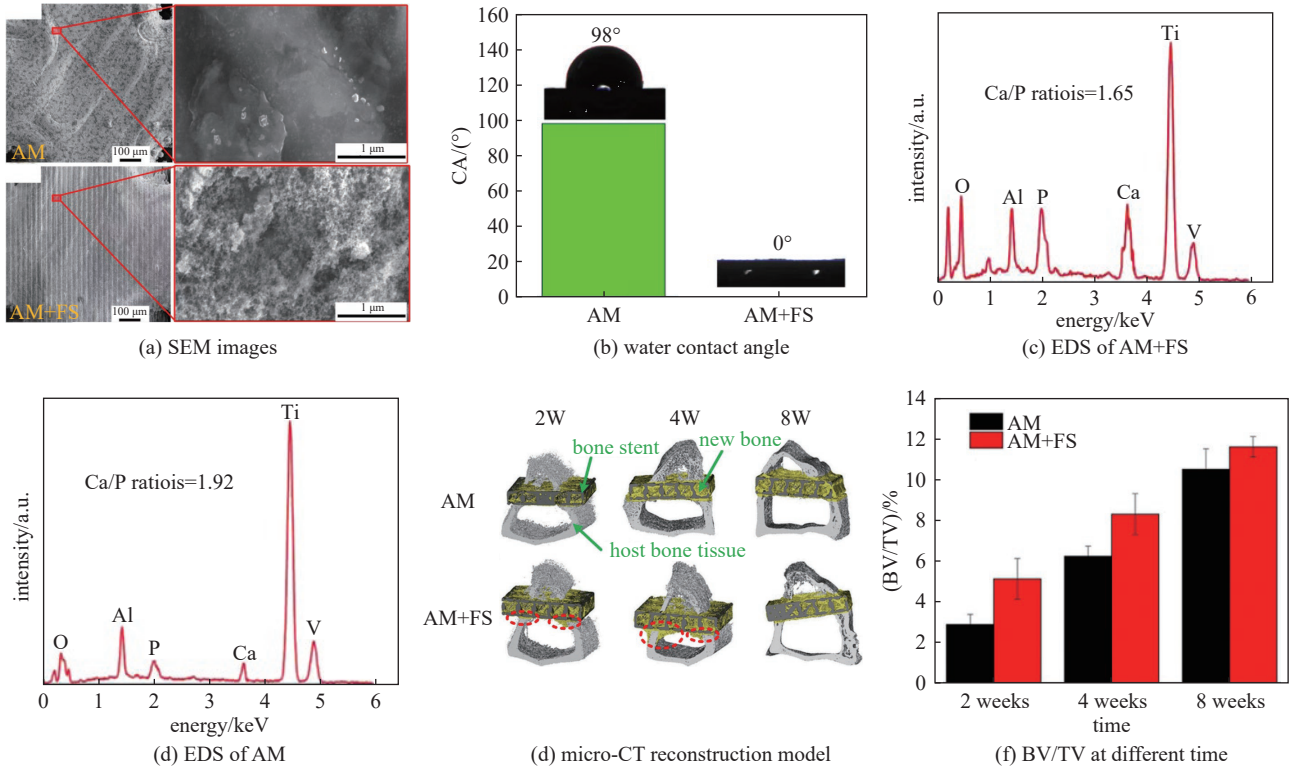


Fig. 9 Experimental results of combining femtosecond laser with additive manufacturing<sup>[29]</sup>

图 9 飞秒激光与增材制造结合的实验结果<sup>[29]</sup>

### 3.5 飞秒激光与炎症处理结合

种植体周围炎是种植失败的主要原因之一, 与炎症处理方法相结合可有效规避或缓解飞秒激光加工的种植体植入生物体后可能产生的周围炎。2023年, 韩国庆北国立大学牙科学院牙周病学系 Jin-Seok Lee 等人<sup>[30]</sup> 先采用飞秒激光对纯钛表面进行结构化加工, 再分别使用三种临床常用的种植体周围炎治疗方法(二极管激光、Er, Cr:YSGG 激光、电烙术等)进行后续处理, 并传统机械加工及喷砂酸蚀表面进行对比。实验使用波长为 343 nm、脉冲宽度 < 400 fs、重复频率 200 kHz、平均功率 2~3 W 的飞秒激光, 通过 10 倍物镜聚焦后, 以 10 mm/s 扫描速度和 50 μm 线间距在钛盘表面进行刻线。随后, 对已结构化表面分别施行上述三种治疗。结果显示, 相较于传统处理表面, 经飞秒激光结构化并辅以后续炎症治疗的表面呈现以下优势: 表面粗糙度提高(图 10(a)), 有助于细胞黏附与骨结合; 氧含量显著上升(图 10(b)), 增强的氧化钛层可改善表面极化, 促进细胞响应并提高生物相容性; 经激光或电烙术后, 接触角明显降低(图 10(c)), 表面亲水性显著增强, 从而为骨整合提供更有利的界面环境。

Treatment Type	Surface Type	Mean	95% Confidence Interval		P	Comparison
			Lower	Upper		
Control	Machined	0.580	0.050	0.523	0.0714	
	SLA	1.316	0.353	0.916		
	Femto	1.534	0.300	1.194		
Diode	Machined	0.657	0.132	0.938	0.0714	
	SLA	1.247	0.208	1.010		
	Femto	1.342	0.356	0.938		
ErCr:YSGG	Machined	1.034	0.057	0.970	0.025 *	A
	SLA	1.380	0.273	1.071		B
	Femto	1.473	0.334	1.095		C
Electrocautery	Machined	0.633	0.0901	0.531	0.05	
	SLA	1.632	0.545	1.014		
	Femto	1.714	0.338	1.332		

(a) roughness (Ra value) of each implant after surface treatment

Surface Type	Composition		
	C	O	Ti
Control	4.37	15.15	90.48
Diode	4.91	14.84	80.25
ErCr:YSGG	2.36	62.44	35.20
Electrocautery	4.34	18.59	76.97

(b) composition of each surface disk after laser treatment and electrocautery

Surface Type	Treatment Type	Mean	95% Confidence Interval		P	Comparison
			Lower	Upper		
Machined	Control	69.9	6.4	66.3	0.124	
	Diode	71.9	4.5	69.4		
	ErCr:YSGG	68.2	5.6	65.1		
SLA	Control	86.8	21.7	74.8	0.098	
	Diode	83.0	14.2	75.1		
	ErCr:YSGG	84.1	16.0	75.2		
Femto	Control	82.2	8.1	77.6	0.030 *	A
	Diode	74.3	12	67.2		A
	ErCr:YSGG	73.8	6.3	70.3		B
Electrocautery	Control	82.2	8.1	77.6	0.030 *	A
	Diode	74.3	12	67.2		A
	ErCr:YSGG	73.8	6.3	70.3		B

(c) surface contact angle of each treated surface

Fig. 10 Experimental results of combining femtosecond laser with inflammation treatment<sup>[30]</sup>

图 10 飞秒激光与炎症处理结合的实验结果<sup>[30]</sup>

综上所述, 飞秒激光复合/耦合加工策略实现了从单一结构改性迈向多功能、高性能的集成化设计。该策略通过将飞秒激光与液相沉积、喷砂处理、增材制造、临床治疗手段等相结合, 有效突破了单一技术在调控化学组分、实现分子功能化及适配复杂结构等方面的局限。

## 4 对比钛种植体的其他处理技术

飞秒激光加工技术利用超短脉冲( $10^{-15}$  s 量级)激光与材料相互作用, 通过光致电离实现非热熔加工, 从而

在种植体材料表面构建微纳结构。相较于喷砂酸蚀、碱热处理、电化学沉积、等离子体溅射及纳秒/皮秒激光等传统表面改性方法,在多维度展现出独特优势(见表1)。具体地,喷砂酸蚀主要通过机械喷砂形成宏观粗糙度,再经酸蚀刻蚀微观孔隙,但精度受限于颗粒尺寸;碱热处理利用强碱溶液腐蚀材料表面生成纳米孔洞,但易引发氢脆风险;电化学沉积则通过电解液在材料表面沉积活性涂层,但难以控制形貌均匀性;等离子体溅射以高能离子轰击材料沉积薄膜,但热影响区较大;纳秒/皮秒激光虽脉冲时间较短但仍存在热扩散导致材料相变。因此,飞秒激光加工技术在加工精度、热影响控制、复杂形状适配、长期稳定性及多功能集成等方面优势显著,但面临设备成本高和批量效率低的挑战。

表 1 飞秒激光加工技术与其他技术对比

Table 1 Comparison of femtosecond laser processing technology with other technologies

comparison dimension	femtosecond laser	sandblasting and acid etching	alkali heat treatment	electrochemical deposition	plasma sputtering	nanosecond/picosecond laser
surface structure	micro-nano hierarchical structure	micron-scale roughness	no obvious microscopic roughness	dense coating	micron-scale roughness	micron-scale roughness
heat-affected zone	almost none	none	relatively large	relatively small	relatively small	relatively large
impurity introduction	not easy to introduce	may introduce	may introduce	may introduce ions	may introduce target impurities	not easy to introduce
adaptability to complex shapes	excellent	poor	poor	poor	requires multi-station adjustment	general
stability	excellent	good	poor	poor	good	general
biocompatibility characteristics	micro-nano structure promotes osseointegration	micron roughness increases bonding area	hydroxylation promotes ha deposition	functional coating with strong targeting	corrosion resistance	similar to femtosecond but weaker

## 5 总结与展望

飞秒激光加工技术以微纳结构高效精准制备的方式,为种植体表面改性提供了一种高精度、低热损伤且工艺可控性强的创新方案。一方面,通过单机参数调控策略,可定向构建从纳米到微米的多尺度结构,同步优化表面形貌、化学状态与润湿性,从而显著促进成骨细胞的黏附、增殖与分化,并可通过结构设计赋予表面抗菌等附加功能。另一方面,通过与液相沉积、喷砂处理、增材制造、乃至临床治疗手段等复合,能够突破单一技术局限,构建满足临床需求的“一体化”多功能生物界面。但是,该技术走向临床应用仍面临一些挑战:1)成本与效率。飞秒激光器及运动控制系统成本较高,目前大面积种植体批量化加工效率仍有待提升。2)工艺标准化。加工效果受多参数耦合影响,针对特定生物学目标(如最大化早期骨整合速率、最优抗菌-成骨平衡)的最佳工艺窗口仍需大量实验研究来确立和标准化。3)长期在体性能全面验证。现有研究虽已展示出优异的短期至中期成骨效果,但其在复杂人体生理环境下的超长期(>10年)稳定性、磨损腐蚀行为及对免疫系统的长期影响仍需更深入的前瞻性研究。

面向未来,飞秒激光加工技术在口腔种植领域的发展可能呈现的趋势有:1)设备国产化与加工效率提升。随着国产高重频飞秒激光器相关技术的快速进步及用户生态的持续扩大,设备成本正在逐年降低,加工效率亦在逐步提升,该技术有望成为口腔种植体领域的新质生产力。2)智能响应表面构建。通过将飞秒激光与形状记忆合金、刺激响应水凝胶等智能材料相结合,开发能够响应微环境变化(如pH值、炎症因子水平)并动态调整表面形态或控制药物释放的智能种植体界面。3)面向新材料的工艺拓展。将飞秒激光加工技术拓展至氧化锆、高分子复合材料等新型种植体材料,克服其传统加工中遇到的工艺难题,拓宽该技术的应用范围。

### 参考文献:

- [1] Geetha M, Singh A K, Asokamani R, et al. Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants – A review[J]. Progress in Materials Science, 2009, 54(3): 397-425.
- [2] Nicholson J W. Titanium alloys for dental implants: a review[J]. Prosthesis, 2020, 2(2): 100-116.
- [3] De Santis S, Varricchio R, Ceccucci A, et al. Cerium coatings on pristine and nanostructured Ti and Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V surfaces: bioactivity, resistance in simulated inflammatory conditions, and antibacterial performance[J]. ACS Biomaterials Science & Engineering, 2023, 9(6): 3262-3272.
- [4] Xu Lurun, Tao Jingchao, Li Zhuguo, et al. Femtosecond laser ultrafast photothermal exsolution[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2024, 6: 055002.
- [5] Liu Ruijie, Zhang Dongshi, Li Zhuguo. Femtosecond laser subtractive/additive-integrated biomimetic manufacturing for visible/infrared encryption and stimuli-

- responsive infrared decryption[J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2025, 7: 045009.
- [6] Zhao Hualong, Zhu Wenyu, Yang Xiaojun, et al. A study of femtosecond laser machining technology applied in air-film holes on turbine blades[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 268/270: 487-491.
- [7] Yang Zenan, Ji Pengfei, Zhang Zhen, et al. Fundamental 3D simulation of the femtosecond laser ablation for cooling hole drilling on Ni and Fe based aero-engine components[J]. *Optics Communications*, 2020, 475: 126237.
- [8] Guarnaccio A, Belviso C, Montano P, et al. Femtosecond laser surface texturing of polypropylene copolymer for automotive paint applications[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 406: 126727.
- [9] 徐艳龙, 李文戈, 赵远涛, 等. 激光毛化织构铝合金表面润湿性的研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2025, 37: 121001. (Xu Yanlong, Li Wenge, Zhao Yuantao, et al. Research progress on wettability of laser-textured aluminum alloy surfaces[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2025, 37: 121001)
- [10] 雍佳乐, 吴东. 飞秒激光仿生调控材料表面浸润性: 当前进展与挑战(特邀)[J]. *中国激光*, 2024, 51: 0102002. (Yong Jiale, Wu Dong. Bioinspired controlling the surface wettability of materials by femtosecond laser: current progress and challenges (Invited)[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51: 0102002)
- [11] 马杰, 胡梦云, 李爽, 等. 飞秒激光表面处理铝合金的热工艺对比研究(特邀)[J]. *激光与光电子学进展*, 2026, 63: 0314025. (Ma Jie, Hu Mengyun, Li Shuang, et al. Comparative study of thermal processes for surface treatment of aluminum alloy using femtosecond laser (Invited)[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2026, 63: 0314025)
- [12] Sun Xiaomao, Dong Xia, Wang Kedian, et al. Femtosecond laser processing of controlled tapered micro-holes based on dynamic control of relative attitude[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 170: 110201.
- [13] Xu Tianshu, Wei Ran, Singh S C, et al. 15-Fold increase in solar thermoelectric generator performance through femtosecond-laser spectral engineering and thermal management[J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14: 268.
- [14] Li Quansheng, Sun Xiaofei, Mei Xuesong, et al. High-quality femtosecond laser cutting of battery electrodes with enhanced electrochemical performance by regulating the taper angle: promoting green manufacturing and chemistry[J]. *Applied Energy*, 2025, 377: 124452.
- [15] Webster T J, Ergun C, Doremus R H, et al. Specific proteins mediate enhanced osteoblast adhesion on nanophase ceramics[J]. *Journal of Biomedical Materials Research*, 2000, 51(3): 475-483.
- [16] Vorobyev A Y, Guo Chunlei. Femtosecond laser structuring of titanium implants[J]. *Applied Surface Science*, 2007, 253(17): 7272-7280.
- [17] Dumas V, Rattner A, Vico L, et al. Multiscale grooved titanium processed with femtosecond laser influences mesenchymal stem cell morphology, adhesion, and matrix organization[J]. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 2012, 100A(11): 3108-3116.
- [18] Trtica M, Batani D, Redaelli R, et al. Titanium surface modification using femtosecond laser with  $10^{13}$ - $10^{15}$  W/cm<sup>2</sup> intensity in vacuum[J]. *Laser and Particle Beams*, 2013, 31(1): 29-36.
- [19] Dumas V, Guignandon A, Vico L, et al. Femtosecond laser nano/micro patterning of titanium influences mesenchymal stem cell adhesion and commitment[J]. *Biomedical Materials*, 2015, 10: 055002.
- [20] Luo Fengxiong, Wang Ling, Xiao Zhanwen, et al. Application of femtosecond laser microfabrication in the preparation of advanced bioactive titanium surfaces[J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2021, 9(18): 3912-3924.
- [21] Papa S, Khalil A A, Hamzeh-Cognasse H, et al. Dual-functionalized titanium by ultrafast laser texturing to enhance human gingival fibroblasts adhesion and minimize *Porphyromonas gingivalis* colonization[J]. *Applied Surface Science*, 2022, 606: 154784.
- [22] Guo Weiwei, He Xu, Song Jianye, et al. Multiscale hierarchical micro- and nano-surface induced by high-repetition-rate femtosecond laser promote peri-implant osseointegration[J]. *ACS Applied Bio Materials*, 2025, 8(2): 1621-1634.
- [23] 郭维维, 刘富伟, 何煦, 等. 尖锐无序 vs. 圆钝有序钛表面微纳米结构的构筑及其成骨能力的评估[J]. *实用口腔医学杂志*, 2025, 41(3): 336-343. (Guo Weiwei, Liu Fuwei, He Xu, et al. Fabrication of sharp disordered vs. rounded ordered titanium surface micro- and nano-structures and evaluation of their osteogenic capacity[J]. *Journal of Practical Stomatology*, 2025, 41(3): 336-343)
- [24] Lackington W A, Schweizer P, Khokhlova M, et al. Femtosecond laser-texturing the surface of Ti-based implants to improve their osseointegration capacity[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2022, 9: 2201164.
- [25] Wu Xinhui, Ao Haiyong, He Zhaoru, et al. Surface modification of titanium by femtosecond laser in reducing bacterial colonization[J]. *Coatings*, 2022, 12: 414.
- [26] Lin Xiaoming, Li Xiaohong, Li Guoqiang, et al. Micro-dot-matrix induced by femtosecond laser on titanium surface for Ca-P phase deposition[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 499: 143925.
- [27] Rodríguez Á, Trueba P, Amado J M, et al. Surface modification of porous titanium discs using femtosecond laser structuring[J]. *Metals*, 2020, 10: 748.
- [28] Liu Yang, Rui Zhongying, Cheng Wei, et al. Characterization and evaluation of a femtosecond laser-induced osseointegration and an anti-inflammatory structure generated on a titanium alloy[J]. *Regenerative Biomaterials*, 2021, 8: rba006.
- [29] Wang Su, Zhang Miao, Liu Linlin, et al. Femtosecond laser treatment promotes the surface bioactivity and bone ingrowth of Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V bone scaffolds[J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2022, 10: 962483.
- [30] Lee J S, Son K, Hwang S M, et al. Effect of electrocautery and laser treatment on the composition and morphology of surface-modified titanium implants[J]. *Bioengineering*, 2023, 10: 1251.