

机械臂辅助固定个性化钛网种植： 美学区的精准高效诊疗方案

许鐔炘 邓淑丹 陈卓凡 吴夏怡

中山大学附属口腔医院, 光华口腔医学院, 广东省口腔医学重点实验室, 广东省口腔
疾病临床医学研究中心, 广州 510055

通信作者: 吴夏怡, Email: wuxiayi@mail.sysu.edu.cn

【摘要】 探讨口腔种植机械臂辅助种植体植入及个性化钛网固定在前牙美学区复杂缺损中的精准高效诊疗策略。本病例患者右上侧切牙及尖牙(12、13)缺失, 伴种植区骨量不足及前牙美学受损。治疗团队采用数字化流程完成术前诊断、种植体位置设计、个性化钛网设计、机械臂辅助种植窝预备与钛网固定, 并分阶段完成临时修复和最终修复。该方案在重建种植体周围软硬组织的同时, 缩短整体治疗周期, 改善前牙美学效果并提高患者满意度。本病例提示, 对于经过严格适应证评估的前牙美学区复杂缺损, 机械臂辅助数字化种植联合个性化钛网引导骨再生可作为一种具有临床可行性和可预测性的治疗选择。

【关键词】 数字化种植; 机械臂; 个性化钛网; 引导骨再生; 前牙美学区

引用著录格式: 许鐔炘, 邓淑丹, 陈卓凡, 等. 机械臂辅助固定个性化钛网种植: 美学区的精准高效诊疗方案[J/OL]. 中华口腔医学研究杂志(电子版), 2026, 20(5): 410-419.

DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2026.05.008

Robotic arm - assisted customized titanium mesh fixation for implant placement: A precise and efficient clinical protocol for the anterior esthetic zone

Hsu Chunhsin, Deng Shudan, Chen Zhuofan, Wu Xiayi

Hospital of Stomatology, Guanghua School of Stomatology, Sun Yat-sen University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Stomatology, Guangdong Provincial Clinical Research Center of Oral Diseases, Guangzhou 510055, China

Corresponding author: Wu Xiayi, Email: wuxiayi@mail.sysu.edu.cn

【Abstract】 This article presents a precise and efficient clinical strategy for managing complex defects in the anterior esthetic zone by integrating robotic arm-assisted implant placement with customized titanium mesh fixation. The patient presented with missing maxillary right lateral incisor and canine (teeth 12 and 13), accompanied by insufficient bone volume at the implant site and compromised anterior esthetics. A fully digital workflow was adopted for preoperative design, implant position planning, customized titanium mesh design, robotic arm - assisted implant site preparation, and titanium mesh fixation, followed by staged provisional and definitive restorations. This approach enabled reconstruction of the peri-implant hard and soft tissues, while avoiding a second course of long-term orthodontic treatment, shortening the overall treatment duration, improving anterior esthetic outcomes, and enhancing patient satisfaction. This case suggests that, in carefully selected complex defects of the anterior esthetic zone, robotic arm - assisted digital implant therapy combined with customized titanium mesh - guided bone regeneration may represent a clinically feasible and predictable treatment option.

【Key words】 Digital implant dentistry; Robotic arm; Customized titanium mesh; Guided bone regeneration; Anterior esthetic zone

DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2026.05.008

病例报告

一、基本资料

患者,女,19岁,学生,2023年6月就诊于中山大学附属口腔医院珠江新城门诊种植科。主诉:右上前牙缺失3年,要求种植修复。现病史:患者3年前因右上前牙阻生于外院拔除,后于外院行正畸治疗,半年前正畸结束,现自觉上前牙缺失影响美观与咀嚼功能,来我院要求种植修复。既往史:否认系统性疾病、传染性疾病病史,否认食物及药物过敏史,否认吸烟、饮酒史,全身状况良好。

二、临床检查

1. 颌面部检查:颌面部左右对称,面型协调,直面型;息止颌位前牙暴露量正常,唇齿音发音正常;开口度、开口型基本正常,双侧颞下颌关节区无压痛、弹响,双侧咀嚼肌未扪及压痛。

2. 口腔检查

(1)牙列与牙体检查:恒牙列,12、13缺失(图1A~1E),缺牙区近远中间隙仅约12 mm,无法容纳2枚常规直径种植体,缺牙区唇侧牙龈可见瘢痕,颊侧凹陷(图1F~1G);双侧磨牙为I类咬合关系,左侧尖牙关系基本正常;右上尖牙缺失,右侧尖牙关系无法直接判断。前牙覆殆覆盖正常,11-23唇侧轻度倾斜;11远中唇侧可见牙色充填材料,松动(-),叩(-)。

(2)牙周检查:口腔卫生一般,可见少量龈上牙

石与软垢;牙龈粉红,质地坚韧,天然牙探诊深度(probing depth,PD)2~3 mm,无附着丧失,牙龈指数(gingival index,GI)2~3,软垢指数(simplified debris index,DI-S)1~2,牙石指数(simplified calculus index,CI-S)1,大部分位点探诊出血(bleeding on probing,BOP)(-)。

(3)美学评估:①微笑分析,中位笑线,面中线与牙中线基本一致;②粉色美学分析,中厚龈生物型,11牙龈厚度约1.5 mm,21牙龈厚度约1.3 mm,11与21龈缘高度不协调、弧度不对称,缺牙区牙龈瘢痕(图1H~1I);③白色美学分析,11牙冠宽长比失调,切缘形态不佳,缺牙间隙近远中径狭窄,修复体形态设计空间受限。

(4)咬合评估:牙尖交错位咬合稳定,前伸、侧方咬合无明显干扰,11、21切缘无明显磨损。

三、辅助检查

1. 影像学检查:锥形束CT(cone-beam computed tomography,CBCT)显示12、13位点骨高度充足,骨宽度仅3~4 mm,水平骨量不足,牙槽嵴顶根方颊侧凹陷,符合Terheyden 2/4型牙槽骨缺损;11牙根控根效果不佳,11根尖远中倾斜至12缺牙区,进一步压缩12、13种植位点近远中向可用空间;双侧颌骨及颞下颌关节骨质未见明显异常(图2)。

2. 术前数字化评估:通过口内扫描与CBCT数据配准,完成三维重建,测量12、13近远中间隙不足



图1 前牙美学区复杂骨缺损患者机械臂辅助钛网种植术前口内及影像学基线评估 A:上颌殆面像;B:右侧后牙咬合像;C:全牙列正面咬合像;D:左侧后牙咬合像;E:下颌殆面像;F:缺牙区颊侧骨板凹陷(黄色虚线);G:缺牙区唇侧牙龈见瘢痕;H:中厚龈生物型;I:11、21龈缘曲线不协调,龈缘弧度不对称(黄色虚线)。

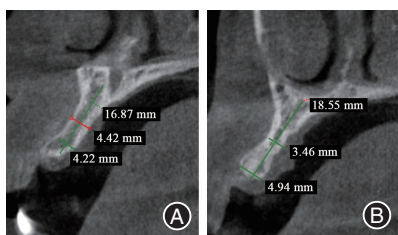


图2 前牙美学区复杂骨缺损患者缺牙区骨缺损范围的术前影像学检查 A:12影像学检查显示骨宽度不足、骨高度充足;B:13影像学检查显示骨高度充足、水平骨量不足、不利型骨缺损。

12 mm,明确13位点种植体可植入空间,标注邻牙根尖、鼻底等关键解剖结构。

四、诊断

上颌牙列缺损(Kennedy III类);上颌前牙区牙槽骨缺损(Terheyden 2/4型);11牙体缺损。

五、术前评估与治疗难点

1. 术前风险评估

(1)美学风险评估(esthetic risk assessment, ERA):综合患者全身健康状况、吸烟史、美学期望值、笑线、牙龈生物型、邻牙牙槽嵴高度和骨缺损类型等指标,判定为美学风险中等(表1)。

(2)外科风险评估(surgical straightforward-advanced-complex case risk assessment, surgical SAC case risk assessment):综合全身因素、骨量需求、解剖风险、美学风险和并发症风险等维度,判定为中等复杂病例(表2)。

(3)修复风险评估(prosthetic SAC case risk assessment):综合美学风险、缺牙间隙、咬合关系、修复体引导需求和维护需求等维度,判定为高度复杂病例(表3)。

2. 治疗难点

(1)美学难点:前牙美学区缺牙伴龈缘不对称,缺牙区唇侧骨凹陷、牙龈瘢痕,软组织美学重建难度大;缺牙间隙窄,邻牙近远中间距仅12 mm,修复体空间分配难度高,需兼顾牙体形态对称性、邻接关系与咬合功能,实现红白美学的协调统一。

(2)外科难点:12、13位点水平骨量严重不足,需行引导骨再生(guided bone regeneration, GBR)骨增量手术,个性化钛网固定钉道需精准避开14邻牙根尖与13位点种植体,传统自由手操作易出现钉道偏移、邻牙损伤等风险;11牙根偏远中,种植位点选择受限,对种植体三维位置植入精度要求极高。

(3)修复难点:①缺牙区唇侧骨板吸收明显,水平向及局部垂直向骨量不足;②上颌右侧切牙与尖牙连续缺失,美学区对龈缘位置、龈乳头支撑和牙冠比例要求高;③患者不愿再次接受长期正畸治疗,治疗方案需在有限周期内兼顾骨增量、软组织塑形和最终修复;④若采用尖牙种植体支持侧切牙悬臂修复,需控制悬臂长度和咬合接触,降低机械并发症风险;⑤患者尖牙缺失,长期缺乏尖牙引导,需恢复患者的尖牙保护型咬合关系、前牙美学形态与咀嚼功能,重建稳定的侧方殆运动轨迹,避免咬合干扰加重种植修复体的力学负荷。

六、治疗方案及医患沟通

1. 备选治疗方案

(1)方案一:重启正畸治疗,重新调整11牙根位置及12、13缺牙间隙,于12、13位点分别植入种植体,同期行GBR骨增量术,延期完成种植固定桥修复,同步行11牙贴面修复。优势:可获得理想的种

表1 前牙美学区复杂骨缺损患者机械臂辅助钛网种植术前美学风险SAC评估——美学风险中等

美学风险因素	评价等级	简单	复杂	高度复杂
全身健康状况	低	健康	-	影响愈合
吸烟习惯	低	不吸烟	少量(<10支/d)	大量(>10支/d)
患者美学期望值	高	现实的期望	中等美学期望	不现实的期望
笑线	中	低位	中位	高位
牙龈形态	中	方圆形	卵圆形	尖圆形
牙龈生物型	高	低弧线形,厚龈	中弧线形,中厚龈	高弧线形,薄龈
位点感染情况	低	无	慢性	急性
邻牙牙槽嵴高度	高	到接触点≤5 mm	到接触点5.5~6.5 mm	到接触点≥7 mm
邻牙修复状态	低	无修复体	-	有修复体
缺牙间隙的宽度	低	单颗牙≥7 mm	单颗牙<7 mm	2颗牙或2颗牙以上
牙槽嵴解剖形态	中	无骨缺损	水平向骨缺损	垂直向骨缺损
唇侧骨壁表型	高	厚壁,≥1 mm	-	薄壁,<1 mm
植入时机	高	T4	T2 & T3	T1

注:SAC为straightforward-advanced-complex;红色为本病例状况;“-”为不适用。

表2 前牙美学区复杂骨缺损患者机械臂辅助钛网种植术前外科风险SAC评估——外科风险中等

全身因素	评价等级	备注
全身禁忌证	无	-
吸烟	无	-
发育因素	无	-
位点因素	无	-
骨量	中	需水平向骨增量
解剖风险	低	-
美学风险	中	基于ERA
复杂程度	中	需要骨增量
并发症风险	中	并发症会显著影响手术效果
负荷方案	中	常规
SAC分类	中等复杂	-

注:SAC为straightforward-advanced-complex;ERA为美学风险评估;红色为本病例状况;“-”为不适用。

植位点与修复空间,避免单端桥生物力学风险,修复体长期稳定性更佳;劣势:治疗周期长,患者需再次接受正畸治疗,时间与经济成本高,正畸医生会诊因条件受限不建议重启调整。

(2)方案二:机械臂辅助种植体植入联合个性化钛网GBR,延期完成种植修复。该方案可在避免二次正畸治疗的前提下重建种植位点骨量与前牙美学轮廓,但治疗费用较高,且需严格进行术前设计、术中配准及术后维护。

2. 医患沟通与方案确定:与患者充分沟通后,患者不愿再次接受长期正畸治疗,并希望在可接受治疗周期内改善前牙美观和功能。综合骨缺损范围、修复空间、患者意愿和长期维护可行性,确定采用机械臂辅助种植体植入联合个性化钛网GBR及延期负载的种植修复方案(方案二)。

七、治疗过程

术前将CBCT数据与口内扫描数据导入口腔种植

机械臂规划软件。数字化种植规划可整合CBCT、口内扫描及修复体设计信息,为种植位点设计、导板或机械臂导航路径规划及术后评价提供依据^[1-3]。结合上颌前牙美学区修复目标、邻牙根形态、牙槽嵴缺损范围及软组织条件,设计右上尖牙种植体位置,拟植入种植体(Straumann 钛锆亲水 BLT, 3.3 mm × 14 mm, 瑞士;图3A)。同时完成个性化钛网[迪迈仕(北京)科技有限责任公司]及钛钉固定路径设计,钛网厚度0.3 mm,单胞孔隙结构约62%(图3B)。为保证术中定位,术前设计数字化固定钉导板并3D打印树脂数字化固定钉导板(图3C~3D)。术前完成CBCT与口内扫描数据配准、口内表面匹配配准点设计及校核点设计,并在术前规划中检查钛网与骨面贴合情况(图3E)。

术前在数字化设计平台完成全套手术方案规划,先导入钛钉定位导板并匹配至术前CT的对应位置(图4A),通过导板预留的钛钉接触孔辅助完成个性化钛网及固定孔位设计(图4B);完成CT数据与口扫数据的配准后,通过差异图指标检查配准的误差精度(图4C),再根据虚拟牙冠及咬合关系实现以修复为导向的种植体三维位置设计(图4D);随后设计种植窝预备的分步流程,仿真模拟机械臂下钻的操作状态(图4E~4F),并在天然牙的颌面与唇颊面生成注册点,用于术中口内注册,辅助视觉相机定位种植体与钛钉位置(图4G);最后校验校核点是否完全贴合牙齿表面,同时检查个性化钛网与三维骨面模型的贴合程度(图4H)。

常规消毒铺巾后,使用机械臂系统进行术前规划数据导入、患者注册、表面匹配配准及校核点验证,局麻下翻瓣暴露右侧上颌尖牙与侧切牙缺牙区,清理炎性肉芽组织并修整牙槽嵴;术中确认术野稳

表3 前牙美学区复杂骨缺损患者机械臂辅助钛网种植术前修复风险SAC评估——修复风险高等

单颗前牙缺失	评价等级	简单	复杂	高度复杂
美学风险	简单	低	中	高
颌位关系	简单	安式Ⅰ、Ⅲ类	安式Ⅱ类1.2分类	严重错殆
近远中距离	简单	间距充足	间距不足	需辅助治疗
殆型	简单	前牙引导	-	无引导
殆型相关性	高度复杂	不参与	修复体参与引导	修复体参与引导
过渡义齿	复杂	可摘(邻牙固定桥)	固定	-
临时种植修复	高度复杂	-	修复体边缘位于龈缘根方<3 mm	修复体边缘位于龈缘根方>3 mm
副功能咬合	简单	不存在	-	存在
负载方案	简单	常规	-	即刻
维护需求	高度复杂	低	中	高

注:SAC为straightforward-advanced-complex;红色为本病例状况;“-”为不适用。

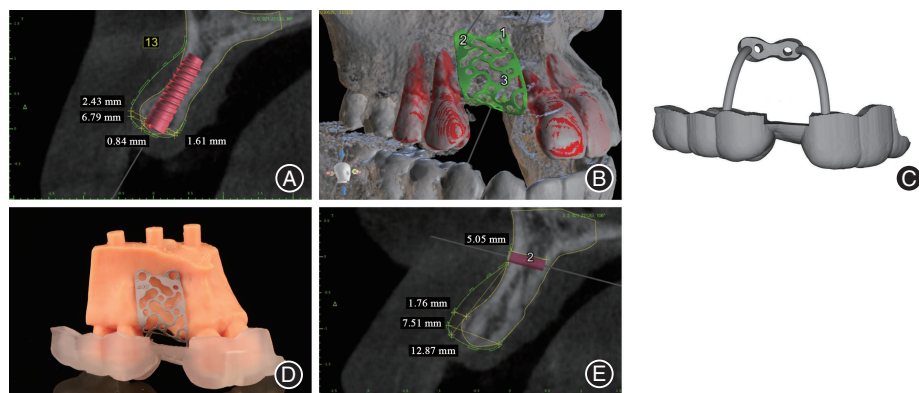


图3 前牙美学区复杂骨缺损患者机械臂辅助钛网种植术前植体与钛网设计 A:术前修复为导向设计种植位点;B:据所需植骨范围设计个性化钛网及钛网固定钉位置轴向;C:术前设计数字化固定钉导板;D:3D打印树脂数字化固定钉导板及3D打印个性化钛网;E:2号固定钉道需要避开14邻牙根尖及13种植体。

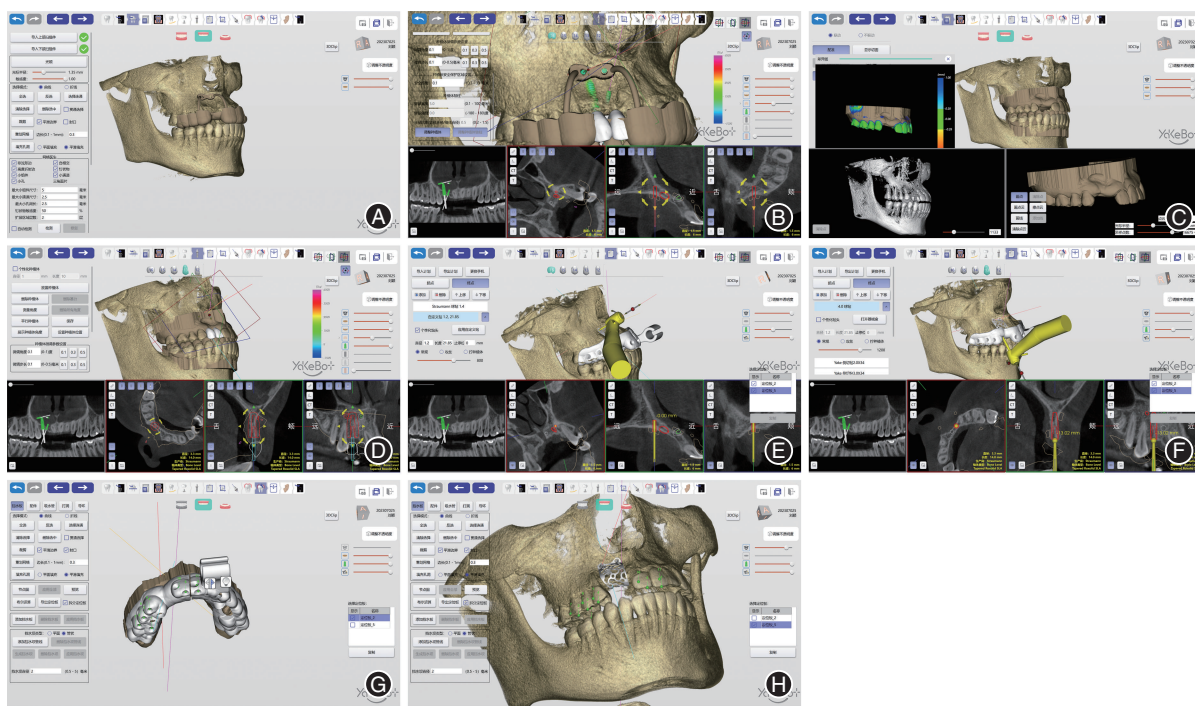


图4 前牙美学区复杂骨缺损患者机械臂辅助钛网种植术前数字化设计与准备 A:导入钛钉定位导板直接匹配在术前CT的相应位置;B:通过导板预留的钛钉接触孔辅助完成个性化钛网及固定孔位设计;C:CT和口内扫描匹配完成后通过查看差异图指标检查误差精度;D:根据虚拟牙冠及咬合关系实现以修复为导向种植体设计;E~F:设计种植步骤,仿真模拟机器人下钻状态;G:在牙齿颌面和唇颊面生成注册点,从而进行口内注册,帮助视觉相机寻找植体和钛钉定位;H:检验校验点是否完全陷进牙齿表面,检查个性化钛网设计是否贴合三维模型表面。

定、光学追踪无明显遮挡后,由术者在机械臂(雅客智慧口腔种植手术导航定位设备 DRS0605-FT250)辅助和实时导航监控下完成右上颌尖牙位点种植窝预备,并植入种植体(3.3 mm×14 mm),植入扭矩为 45 N·cm。常规消毒铺巾后,将术前规划数据导入机械臂系统,完成患者注册、表面匹配配准及校核点验证,局部麻醉下切开翻瓣充分暴露右侧上颌尖牙与侧切牙缺牙区(图 5A),清理炎性肉芽组织并修整牙槽嵴,于缺牙区唇侧受植骨面皮质骨制备多枚滋养孔

至骨松质层,同时收集术区骨修整及种植窝预备过程中产生的自体骨屑;术中确认术野稳定、光学追踪无明显遮挡后,由术者在机械臂(雅客智慧口腔种植手术导航定位设备 DRS0605-FT250)辅助及实时导航监控下完成右上颌尖牙位点种植窝预备,植入士卓曼 BLT 钛锆亲水种植体(3.3 mm×14 mm),植入扭矩为 45 N·cm(图 5B);随后按数字化设计就位个性化钛网,采用 3D 打印导板确认钛网贴合度并确定固定钛钉位置(图 5C),经机械臂辅助完成固定钉道预备

后以钛钉坚固固定(图5D),将自体骨屑与0.5 g Geistlich Bio-Oss 骨替代材料混匀后充填骨缺损区域(图5E),钛网表面覆盖 Bio-Gide 可吸收胶原膜作为屏障,术中覆盖范围约 13 mm×25 mm(图5F);完成牙龈减张后,以不可吸收缝线分别于唇颊侧、腭侧严密缝合创口(图5G~5H);术后即刻行锥形束CT检查,验证种植体三维位置、骨增量范围与术前规划的一致性(图5I~5L),术后5 d复诊观察创口愈合情况(图5M~5N),术后常规给予布洛芬消炎镇痛、头孢呋辛酯预防感染,并嘱患者使用氯己定含漱液维护口腔卫生。

术后6个月复查,患者无明显不适,口腔卫生良好,缺牙区牙龈无红肿、无瘘管或创口,钛网无暴露,颊侧软组织轮廓正常,龈乳头高度可,唇系带附着位置正常。复查CBCT(图6A~6B)以邻牙牙颈部及种植体平台为参照,将术前设计截面与术后重建截面进行对照,可见术区唇侧骨轮廓恢复较好,水平向骨宽度较术前增加约3~4 mm,满足后续Ⅱ期手术及修复空间需求(图6C)。

Ⅱ期手术于术后6个月在局部麻醉下开展,术前口内检查可见缺牙区骨轮廓饱满(图6C);术中切开翻起全厚瓣,暴露植骨区域,可见成骨覆盖根尖区部分个性化钛网及固定钉,钛网周围未见纤维组织包裹(图6D);去除钛网后可见植骨材料与自体骨整合良好,无明显分界,植骨成骨效果理想(图6E),取出封闭螺丝并连接相应规格愈合基台;为协调11和21的龈缘、实现冠延长效果,对11行软组织根向复位缝合(图6F),使用可吸收线缝合软组织创口。术后3个月进入临时修复阶段,戴入临时修复体进一步完成种植体周及桥体区域软组织塑形(图6G),同步开展取模及临时修复流程,进一步塑造前牙区软组织轮廓。

术后通过临时修复体诱导软组织成形。4个月后完成最终修复,种植体肩台位于龈下约3 mm;根据美学区颜色匹配和透光性需求,比色选择2M1,最终修复体为3M Lava 氧化锆全瓷冠(图7A)。修复后精细调改咬合接触,避免悬臂设计的侧切牙区承受过大侧向力;最终修复后上颌殆面观修复体边缘

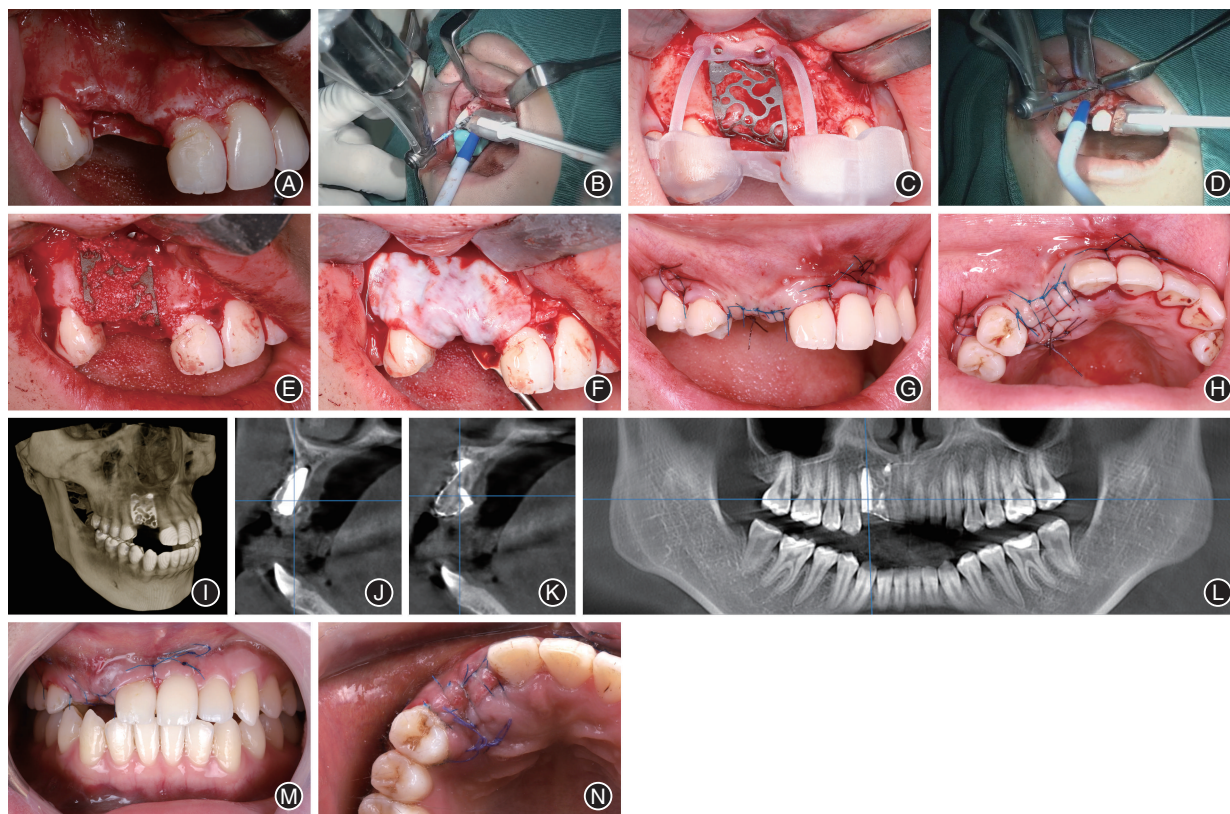


图5 前牙美学区复杂骨缺损患者机械臂辅助钛网种植Ⅰ期手术及术后5 d复查图像 A:切开翻瓣;B:机械臂辅助13种植体植入;C:3D打印导板检查钛网贴合度和确定固定钛钉的定位;D:机械臂辅助固定钛钉道预备;E:自体骨与低替代率骨粉材料充填骨缺损区域;F:可吸收胶原膜屏障膜覆盖植骨区域;G:缝合唇侧像;H:缝合腭面像;I:术后锥形束CT(CBCT)三维重建;J:种植体术后CBCT矢状位断层;K:钛钉术后CBCT矢状位断层;L:术后CBCT全景影像;M:术后5 d口内复查全牙列正面咬合像;N:术后5 d口内复查术区殆面像。

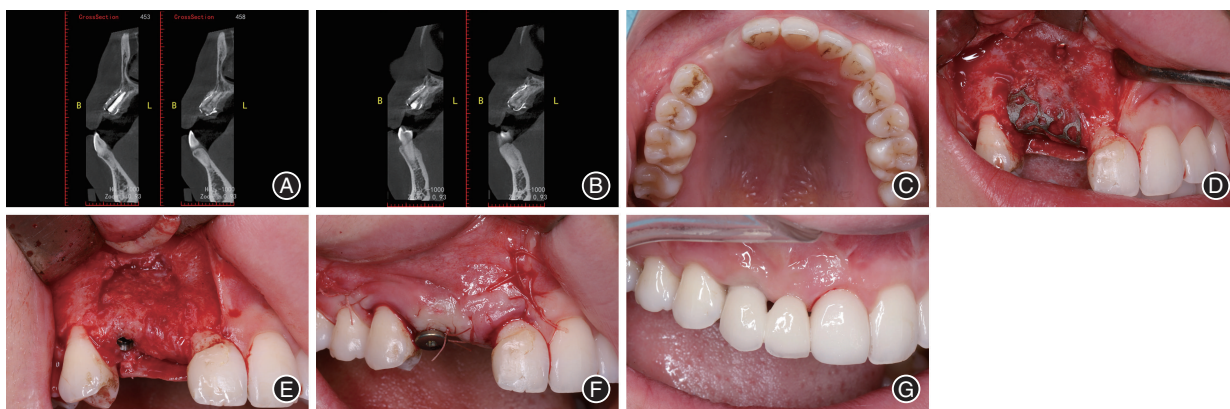


图6 前牙美学区复杂骨缺损患者机械臂辅助钛网种植Ⅱ期手术与软组织塑形效果 A:种植体术后半年锥形束CT(CBCT)矢状位断层;B:钛钉术后6个月CBCT矢状位断层;C:术后6个月Ⅱ期手术前口内检查缺牙区骨轮廓饱满;D:Ⅱ期切开翻开全厚瓣;E:去除钛网后可见植骨材料与自体骨整合良好无明显分界,植骨成骨效果理想;F:为了协调11和21的龈缘,实现冠延长效果,11软组织根向复位缝合;G:临时修复阶段戴入临时修复体进一步进行种植体周及桥体区域软组织塑形。

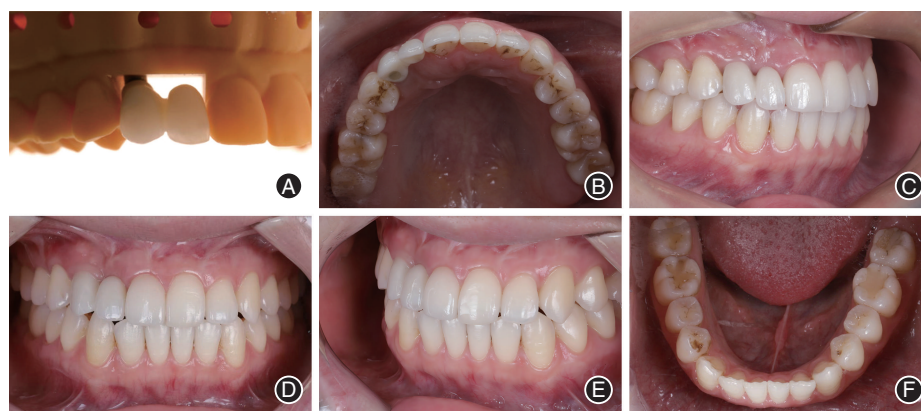


图7 前牙美学区复杂骨缺损患者机械臂辅助钛网种植最终修复过程与效果 A:最终修复体;B:上颌颌面像;C:右侧后牙咬合像;D:全牙列正面咬合像;E:左侧后牙咬合像;F:下颌颌面像。

密合、就位良好(图7B),右侧后牙、全牙列正面、左侧后牙咬合像显示咬合关系稳定,前牙美学效果协调(图7C~7E),下颌颌面观牙列形态完整(图7F)。

种植体植入精度方面,右上尖牙(13号牙位)术前虚拟设计与术后CBCT三维重建的配准结果显示(图8):种植体基底(颈部)三维总偏移量为0.93 mm,尖端(根尖部)三维总偏移量为1.43 mm,整体角度偏差为3.5°,各方向线性偏差均未侵犯邻牙牙根、鼻底等重要解剖结构,处于临床安全可接受范围,符合机械臂辅助种植的精度表现(表4)。钛网位置偏差方面,对3D打印个性化钛网联合GBR术后的空间位置进行配准测量(图9),钛网各观测位点位置偏差详见表5,全部测量点偏差均小于1 mm。上述结果提示,机械臂辅助下种植体植入与钛网固定均可高精度复刻术前数字化设计,既保障了种植体三维位置的准确性与解剖安全性,也精准维持了预期骨增量空间的三维形态,可为术后骨

再生效果预判与最终修复方案制定提供量化的影像学依据。

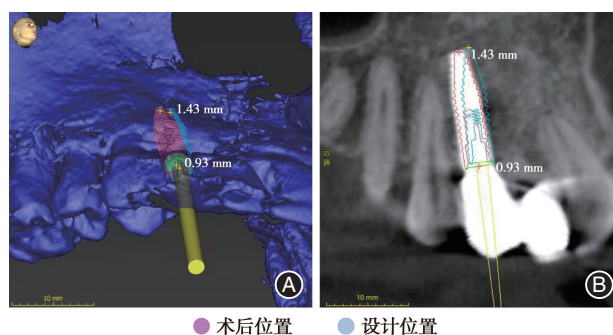


图8 前牙美学区复杂骨缺损患者机械臂辅助钛网种植的种植体术前设计与术后实际位置偏差对比 A:术前虚拟设计;B:术后锥形束CT三维重建。

八、随访

戴牙1年后复查,患者自述无不适,对美观效果满意。口腔卫生一般,全牙列咬合关系稳定,种植

表4 前牙美学区复杂骨缺损患者机械臂辅助钛网种植的种植体位置整体偏差分析(mm)

偏差	颈部平台	根尖
整体偏移	0.93	1.43
远中误差	0.42	1.26
近中误差	0.72	0.57
深度误差	-0.42	-0.40

表5 前牙美学区复杂骨缺损患者机械臂辅助钛网种植的钛网位置整体偏差分析(mm)

偏差	近中	远中
腭侧	0.701	0.697
颊侧	0.671	0.551
冠根向	0.408	0.569

体近中邻接关系良好, 缺牙区骨轮廓丰满度恢复理想, 软组织无异常表现(图 10A ~ 10C); 前牙黑背景下可见修复体形态、颜色与邻牙自然协调, 表面光滑, 无崩瓷或磨损, 修复体周围龈乳头充盈良好, 邻

间隙无黑三角(图 10D)。戴牙 1 年后 CBCT 复查示, 种植体周围无明显透射影, 无边缘骨丧失, 种植体骨结合状态稳定(图 10E ~ 10F)。

讨 论

一、前牙美学区种植修复需坚守功能与美学双重建的核心原则

前牙美学区缺牙常伴牙槽嵴水平和垂直向骨量不足、龈缘形态欠佳及修复空间受限等问题, 治疗目标不仅是获得稳定的骨结合, 还需兼顾红白美学、发音、清洁和长期功能^[4-6]。本病例中, 患者右上侧切牙和尖牙连续缺失, 唇腭向和垂直向骨量不足, 近远中间隙窄且不愿再次接受正畸治疗。因此, 团队采用数字化流程进行术前诊断、种植体位置设计、个性化钛网设计及机械臂辅助实施, 以期在有限治疗周期内重建种植修复所需的硬组织基础和美学轮廓。

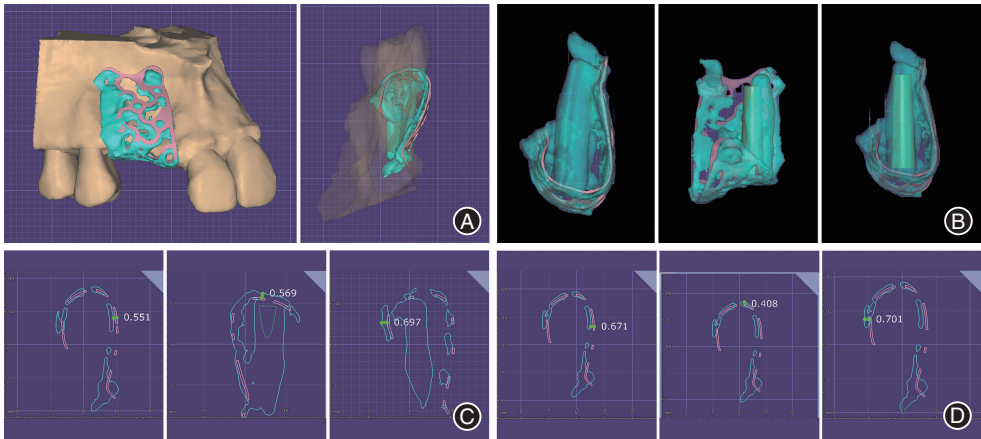


图9 前牙美学区复杂骨缺损患者机械臂辅助钛网种植的钛网术前设计与术后实际位置偏差对比 A:个性化钛网术前设计位置与术后实际位置在颌骨模型的叠加三维视图颊侧与矢状面图;B:个性化钛网与种植体术前设计位置与术后实际位置的近中、腭侧及远中观;C:钛网 12 位点腭侧、颊侧及冠根向偏差截图;D:钛网 13 位点腭侧、颊侧及冠根向的位置偏差测量截图。紫色表示术前设计位置, 青色表示术后实际位置。

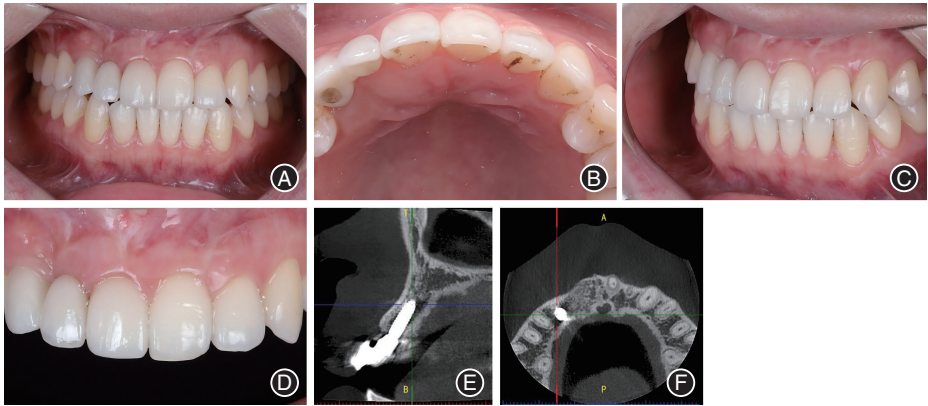


图10 前牙美学区复杂骨缺损患者机械臂辅助钛网种植戴牙 1 年后的随访复查表现 A:全牙列正面咬合像;B:上颌前牙区骀面像;C:缺牙区骨轮廓丰满度恢复;D:前牙黑背景照;E:锥形束 CT(CBCT)矢状面;F:CBCT 冠状面。

本病例采用上颌右侧尖牙种植体支持右尖牙和侧切牙修复的单端悬臂设计。该方案的前提包括:患者侧切牙区受力较小,前牙区以引导和美学为主;种植体植入位点骨增量后骨量充足,种植体获得 $45\text{ N}\cdot\text{cm}$ 初期稳定性;修复设计中控制悬臂长度和咬合接触,避免侧方及前伸运动中过早接触。以常规尖牙区种植体长度约 14 mm 估算,侧切牙悬臂长度约为 7 mm ,悬臂/植体长度比约 $0.5^{[7]}$ 。既往系统综述提示,种植支持悬臂固定修复并不一定显著降低种植体存留率或增加边缘骨丧失,但机械并发症风险可能升高,因此本病例通过控制悬臂长度、避免侧方及前伸运动中过早接触,并加强长期随访以降低相关风险^[8]。1年的短期随访未见边缘骨吸收,软组织无红肿、瘘管及黑三角形成,提示该修复设计在本病例中获得了稳定效果,但仍需长期复查以监测机械并发症和种植体周围组织变化。

二、种植机械臂辅助技术显著提升个性化钛网引导骨再生手术的精准性与安全性

GBR是前牙区水平及垂直骨缺损重建的重要方法,钛网因具备良好的空间维持能力和可塑性,常用于复杂骨增量^[9-13]。数字化设计和3D打印技术可使钛网形态更贴合缺损区,有助于减少术中反复弯制和调整时间^[11-12,14-15]。本病例结合机械臂辅助固定,使钛钉植入位置与术前设计路径更一致,降低钛网移位风险;同时,在术后CBCT基础上补充钛网偏差测量,使骨增量结果评价更加客观。

本病例将机械臂辅助种植体植入与个性化钛网固定整合应用于同一手术阶段。术后CBCT与术前设计模型配准显示,钛网腭侧近中、腭侧远中、颊侧近中、颊侧远中、冠根向近中和冠根向远中偏差分别为 0.701 、 0.697 、 0.671 、 0.551 、 0.408 和 0.569 mm ,提示个性化钛网整体就位与术前设计较为一致。Li等^[14]对3D打印个性化钛网骨增量病例的回顾性研究显示,该技术可获得较高的形态可控性;Chiapasco等^[11]、Ragucci等^[12]和Cheng等^[15]亦报道了计算机辅助设计与制作(computer aided design/computer aided manufacturing, CAD/CAM)或个性化钛网在复杂骨缺损重建及位置精度控制中的临床价值。机器人辅助种植相关临床研究显示,其在种植窝预备及植体三维定位方面具有较好的精度潜力^[16-20]。人工智能和数字化工具的发展,也可能进一步提升病例筛选、术前规划决策和术后评价的标准化程度^[21]。

本病例亦存在局限性:(1)病例数仅为1例,且缺乏对照设计,不能直接推断该联合方案优于常规导板或徒手手术;(2)机械臂系统依赖术前影像、口扫数据、表面配准和术中校核、光学追踪遮挡可能影响实时导航稳定性;(3)个性化钛网和机械臂系统成本较高,临床推广仍需结合患者获益、治疗周期和医疗资源配置综合评估。

三、临时修复体是前牙种植美学重建的核心桥梁

临时修复体可在软组织塑形阶段维持龈缘轮廓、邻间乳头支撑和患者美观功能,并为最终修复体的穿龈轮廓和牙冠形态设计提供参考^[22]。数字化美学设计和数字化修复流程则有助于提高医患沟通效率、优化修复方案,兼顾以患者为中心的结局(patient-centered outcome, PCO)^[23,23]。本病例在Ⅱ期术后行临时修复,4个月后软组织轮廓稳定,再完成最终修复,有助于获得可预测的红白美学效果。

综上所述,面对前牙美学区复杂缺损并水平及垂直向骨缺损病例,机械臂辅助种植体植入联合个性化钛网GBR可在三维重建、种植体定位、钛网固定和最终修复之间建立连续的数字化路径。本病例术后短期随访显示种植体周围软硬组织稳定,美学效果及患者满意度良好。该技术仍需在更大样本和更长随访研究中进一步验证其精度稳定性、成本效益和适应证边界。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

作者贡献声明 许鎔析:数据分析、论文撰写;邓淑丹:病例资料整理、影像学分析、论文修改;陈卓凡:病例诊治、研究设计、学术指导;吴夏怡:数据采集、病例诊治、研究设计、论文指导与修改、论文审核

参 考 文 献

- [1] Kernen F, Kramer J, Wanner L, et al. A review of virtual planning software for guided implant surgery - data import and visualization, drill guide design and manufacturing [J]. BMC Oral Health, 2020, 20 (1): 251. DOI: 10.1186/s12903-020-01208-1.
- [2] Bernauer S A, Zitzmann N U, Joda T. The complete digital workflow in fixed prosthodontics updated: A systematic review [J]. Healthcare (Basel), 2023, 11 (5): 679. DOI: 10.3390/healthcare11050679.
- [3] Rutkūnas V, Auškalnis L, Pletkus J. Intraoral scanners in implant prosthodontics. A narrative review [J]. J Dent, 2024 (148): 105152. DOI: 10.1016/j.jdent.2024.105152.
- [4] Fürhauser R, Florescu D, Benesch T, et al. Evaluation of soft tissue around single-tooth implant crowns: The pink esthetic score

- [J]. Clin Oral Implants Res, 2005, 16 (6) : 639 - 644. DOI: 10.1111/j.1600-0501.2005.01193.x.
- [5] Belser U C, Grutter L, Vailati F, et al. Outcome evaluation of early placed maxillary anterior single - tooth implants using objective esthetic criteria: A cross-sectional, retrospective study in 45 patients with a 2- to 4-year follow-up using pink and white esthetic scores[J]. J Periodontol, 2009, 80(1) : 140-151. DOI: 10.1902/jop.2009.080435.
- [6] Zhang Y, Wen G, Dong W. Clinical outcomes of narrow - and regular-diameter implants with bone augmentation in the anterior maxilla: A systematic review and Meta - analysis [J]. Clin Oral Investig, 2024, 28(3):196. DOI:10.1007/s00784-024-05588-4.
- [7] Misch C E. Contemporary implant dentistry[M]. 2nd ed. St. Louis: Mosby, 1999:531-532.
- [8] Kondo Y, Sakai K, Minakuchi H, et al. Implant-supported fixed prostheses with cantilever: A systematic review and Meta-analysis [J]. Int J Implant Dent, 2024, 10(1) : 57. DOI: 10.1186/s40729-024-00573-8.
- [9] Rasia dal Polo M, Poli P P, Rancitelli D, et al. Alveolar ridge reconstruction with titanium meshes: A systematic review of the literature[J]. Med Oral Patol Oral Cir Bucal, 2014, 19(6) : e639-e646. DOI: 10.4317/medoral.19998.
- [10] Tolstunov L, Hamrick J F E, Broumand V, et al. Bone augmentation techniques for horizontal and vertical alveolar ridge deficiency in oral implantology [J]. Oral Maxillofac Surg Clin North Am, 2019, 31 (2) : 163 -191. DOI: 10.1016/j.coms.2019.01.005.
- [11] Chiapasco M, Casentini P, Zaniboni M, et al. Customized CAD/CAM titanium meshes for the guided bone regeneration of severe alveolar ridge defects: Preliminary results of a retrospective clinical study in humans [J]. Clin Oral Implants Res, 2021, 32 (4):498-510. DOI:10.1111/clr.13720.
- [12] Ragucci G M, Augè A F, Parra A T, et al. Comparison between CAD/CAM titanium mesh *vs.* conventional titanium mesh in bone regeneration: A systematic review and Meta - analysis [J]. Int J Implant Dent, 2025, 11 (1) : 55. DOI: 10.1186/s40729 - 025 - 00643-5.
- [13] Sanz-Sánchez I, Ortiz-Vigón A, Sanz-Martín I, et al. Effectiveness of lateral bone augmentation on the alveolar crest dimension: A systematic review and Meta-analysis [J]. J Dent Res, 2015, 94(9 Suppl) : 128S-142S. DOI:10.1177/0022034515594780.
- [14] Li L, Wang C, Li X, et al. Research on the dimensional accuracy of customized bone augmentation combined with 3D - printing individualized titanium mesh: A retrospective case series study [J]. Clin Implant Dent Relat Res, 2021, 23(1) : 5-18. DOI: 10.1111/cid.12966.
- [15] Cheng Y, Chen G, Wang C, et al. The effect of placement accuracy of customized titanium mesh on bone regeneration: A retrospective study [J]. Clin Oral Implants Res, 2025, 36 (8) : 1000-1016. DOI:10.1111/clr.14447.
- [16] Linn T Y, Salamanca E, Aung L M, et al. Accuracy of implant site preparation in robotic navigated dental implant surgery [J]. Clin Implant Dent Relat Res, 2023, 25 (5) : 881 - 891. DOI: 10.1111/cid.13224.
- [17] Yang F, Chen J, Cao R, et al. Comparative analysis of dental implant placement accuracy: Semi-active robotic versus free-hand techniques: A randomized controlled clinical trial [J]. Clin Implant Dent Relat Res, 2024, 26(6) : 1149-1161. DOI:10.1111/cid.13375.
- [18] Chen J, Wang Y, Bai Y, et al. Accuracy, safety, and efficiency in robotic-assisted *vs.* freehand dental implant surgery: A 6-month follow - up randomized controlled trial [J]. Clin Oral Implants Res, 2025, 36(5) : 662-670. DOI:10.1111/clr.14413.
- [19] Younis H, Xu B, Acharya K, et al. Accuracy of robot-assisted implant surgery versus freehand placement: A retrospective clinical study [J]. Int J Implant Dent, 2025, 11 (1) : 1. DOI: 10.1186/s40729-024-00586-3.
- [20] Wang M, Liu F, Yu T, et al. Accuracy of an autonomous dental implant robotic system in partial edentulism: A pilot clinical study [J]. Clin Oral Investig, 2024, 28(7) : 385. DOI: 10.1007/s00784-024-05780-6.
- [21] Semerci Z M, Yardimci S. Empowering modern dentistry: The impact of artificial intelligence on patient care and clinical decision making [J]. Diagnostics (Basel), 2024, 14 (12) : 1260. DOI:10.3390/diagnostics14121260.
- [22] Passos L, de Vasconcellos A B, Kanashiro L, et al. The natural CAD/CAM anterior implant single tooth restoration: A novel digital workflow [J]. J Esthet Restor Dent, 2023, 35 (8) : 1194-1204. DOI:10.1111/jerd.13073.
- [23] Alwabel L K, Alabduljabar W M, Alawfi L K, et al. Digital smile design and patient-centered outcomes in esthetic restorative dentistry: A systematic review [J]. Cureus, 2025, 17 (11) : e98084. DOI:10.7759/cureus.98084.

(收稿日期:2026-05-06)

(本文编辑:王嫚)