

·颌面美容·

·论 著·

分段设计种植体表面粗糙度对种植体拔除难度及骨结合的影响研究

王 森^{1,2,3}, 朱璐璐⁴, 徐博雅⁵, 朱秀峰^{1,2,3}, 索南拉姆⁴, 常晓峰^{1,2,3}, 贺龙龙^{1,2,3}

(1.陕西省颅颌面精准医学研究重点实验室 陕西 西安 710004; 2.陕西省牙颌疾病临床研究中心 陕西 西安 710004; 3.西安交通大学口腔医院种植科 陕西 西安 710004; 4.西藏自治区阿里地区人民医院口腔科 西藏自治区 阿里 859000; 5.西安交通大学口腔医院数字化种植修复科 陕西 西安 710004)

[摘要]目的: 设计分段处理表面粗糙度的种植体, 将粗糙表面和光滑表面结合使用, 探索两种表面占长度的合适比例, 使其既不影响种植体稳定性、满足临床使用, 又能在失败种植体拔除时降低旋出难度。方法: 设计四组分段处理表面粗糙度的改形种植体: 在总长10 mm种植体冠方分别设计10 mm (C组)、6 mm (T1组)、3 mm (T2组)、0 mm (T3组)的大颗粒喷砂酸蚀(MPF)表面, 其余均为机械光滑表面。建立种植体-下颌骨骨结合的比格犬模型, 分析种植体不同表面形貌周围骨体积分数和骨结合率, 测量各组种植体稳定性, 形成骨结合后的旋出扭矩并观察旋出种植体不同表面形貌的骨质黏附。结果: 不同愈合时间及不同表面间的骨体积分数均差异无统计学意义($P > 0.05$)。12周愈合期后, 四组种植体均形成骨结合范围为30%~60%。种植体植入后即刻及12周后各组间稳定性(IST值)差异无统计学意义($P > 0.05$)。植入后12周旋出各组种植体, 各实验组与C组相比旋出扭矩随粗糙长度的缩短而减小。结论: 3 mm以上MPF表面的分段种植体能够获得良好的初期稳定性和二期稳定性, 形成良好的骨结合, 满足临床要求。MPF表面为3~6 mm时较全MPF表面的旋出扭矩降低, 从而减小了拔除难度和创伤。

[关键词] 牙种植体; 表面粗糙度; 分段设计; 拔除; 骨结合

[中图分类号] R783.6 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1008-6455 (2025) 01-0037-06

Experimental Study on the Effect of the Segmented Implant with Two Different Surfaces on Osseointegration and Removal

WANG Miao^{1,2,3}, ZHU Lulu⁴, XU Boya⁵, ZHU Xiufeng^{1,2,3}, SUONAN Lamu⁴, CHANG Xiaofeng^{1,2,3}, HE Longlong^{1,2,3}

(1.Key Laboratory of Shaanxi Province for Craniofacial Precision Medicine Research, College of Stomatology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710004, Shaanxi, China; 2.Clinical Research Center of Shaanxi Province for Dental and Maxillofacial Diseases, College of Stomatology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710004, Shaanxi, China; 3.Department of Implant Dentistry, College of Stomatology, Xi'an 710004, Shaanxi, China; 4.Department of Stomatology, Ngari Regional People's Hospital, Ali 859000, Tibet Autonomous Region, China; 5.Department of Digital Oral Implantology and Prosthodontics, College of Stomatology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710004, Shaanxi, China)

Abstract: **Objective** Designing segmented implants with different surface roughness, combining rough and smooth surfaces, and exploring the appropriate ratio of rough surface length to reduce the difficulty of implant removal while maintaining stability and meeting clinical requirements. **Methods** Four groups of segmented implants were designed with different surface roughness: 10 mm (C group), 6 mm (T1 group), 3 mm (T2 group), and 0 mm (T3 group) of macro-particle sandblasted acid-etched (MPF) surface, while the rest were machined smooth surfaces. Beagle mandible models were used to analyze bone volume per tissue volume and bone-implant contact of different surface morphologies, measure implant stability, record the removal torque after osseointegration, and observe bone adhesion of different surface morphologies during implant removal. **Results** There were no statistically significant differences in bone volume per tissue volume between different healing times

基金项目: 1. 西藏自治区自然科学基金组团式医学援藏项目[名称: 种植体表面粗糙度分段设计的效果研究; 编号: XZ2023ZR-ZY88 (Z)]; 2. 西安市创新能力强基计划-医学研究项目(名称: 早期短时低强度热刺激对牙种植体骨结合影响的实验研究; 编号: 22YXYJ0097)

通信作者: 贺龙龙, 西安交通大学口腔医院种植科主任、副主任医师、种植党支部书记、种植教研室主任; 研究方向为种植体周围软组织和骨组织重建机理和骨结合损伤机理的研究。E-mail: longlonh@xjtu.edu.cn

共同第一作者: 朱璐璐, 住院医师; 研究方向为口腔全科疾病诊断与预防策略。E-mail: 572793657@qq.com

and different surfaces. After 12 weeks of healing, all four groups of implants achieved bone-implant contact ranging from 30% to 60%. There were no statistically significant differences in implant stability (IST values) between groups immediately after implantation and at 12 weeks ($P>0.05$). The removal torque of each group decreased as the rough length decreased compared to the C group when removing the implants after 12 weeks. **Conclusion** Segmented implants with MPF surfaces larger than 3 mm can achieve good initial and secondary stability, form satisfactory osseointegration, and meet clinical requirements. The removal torque is reduced when the MPF surface is 3-6 mm, thereby reducing the difficulty and trauma of implant removal.

Key words: dental implant; surface roughness; segmented design; removal; osseointegration

随着骨结合理论的提出与发展, 种植修复已成为解决各种牙列缺损和牙列缺失的合理方法, 种植体的长期留存率已能达到90%以上^[1-3]。但种植体留存并不完全意味成功, 可能会因为种植体周围炎、种植体型号选择错误、位置不佳等情况导致周围软硬组织发生缺损, 虽然此时种植体没有动度、可以继续留存行使功能, 但已经发生种植修复失败^[4-5]。而最有效的解决方式是拔除失败种植体, 重新制定合理的种植治疗方案。拔除失败种植体最微创的方法是反向扭矩棘轮技术, 但粗糙表面种植体在促进骨结合的同时, 也增加了失败时的拔除难度^[6]。粗糙表面种植体发生无动度的失败时, 很难仅通过反向扭矩棘轮技术拔除, 也增加了拔除创伤。通过查阅文献, 发现光滑表面种植体的拔除力小于粗糙表面种植体, 且光滑表面种植体在长期使用中也能获得可预期的效果^[7]。而种植体受力时, 应力主要集中在种植体颈部平台周围^[8-10]。据此本实验通过尝试从分段设计种植体表面形貌, 解决失败种植体拔除难度大的问题, 现报道如下。

1 材料和方法

1.1 分段表面种植体的表面形态鉴定: 动物实验专用种植体由江苏创英医疗器械有限公司提供, 直径为3.3 mm, 长度为10 mm, 种植体冠方为大颗粒喷砂酸蚀表面处理(MPS), 剩余根方部分为机械光滑表面(M)。按照种植体分段处理两种表面分布长度的不同分为四组。对照组(C): 10 mm MPS+0 mm M表面; T1组: 6 mm MPS+4 mm M表面; T2组: 3 mm MPS+7 mm M表面; T3组: 0 mm MPS+10 mm M表面(见图1A)。使用三维表面形貌仪(NANOVEA, 美国)鉴定表面形貌粗糙度。用NANOVEA 3D软件调平测量表面后, 分析获得两种表面的粗糙度示意图及表面粗糙度参数。将经表面形貌粗糙度测定后的种植体处理后用导电胶带将干燥种植体黏固于扫描电子显微镜(HITACHI, 日本)的观察台面上, 观察分段设计种植体上的两段不同形貌表面及两种表面分界。

1.2 种植体骨结合动物模型建立: 比格犬术前8 h禁食, 4 h禁饮, 丙泊酚静脉注射1 ml/kg诱导麻醉。拔除第三第四前磨牙远中根^[11-12], 按随机区组设计, 将6只比格犬分为6个区组, 每区组内4个种植位点按随机方式分配给C组、T1组、T2组、T3组。逐级备孔, 手动植入种植体至牙槽嵴顶下1 mm。植入扭矩均大于25 N·cm, 更换2 mm锥形愈合基台。术后1周拍摄CBCT检查, 确认种植体植入位置。

1.3 种植体稳定性系数的测量分析: 种植体稳定性测量仪(Anycheck, 韩国)校正后, 在植入即刻及植入后12周时, 在种植体上连接旋紧高5 mm的瓶形愈合基台, 由同一操作者在动物口内应用种植体稳定性测量仪进行测量^[13]。分别在愈合基台颊侧、近中、远中三个方向各测量3次, 取平均值作为其种植体稳定性系数(Implant stability test, IST)。

1.4 两种表面形貌骨形态学分析: 比格犬安乐死后, 将下颌骨取材固定。对2、4、12周截取的含种植体的骨样本使用Micro-CT(YXLON, 德国)进行扫描, 使用VG Studio Max软件(Volume Graphics, 德国)对扫描图像进行三维重建。在软件中测量两种表面在不同时间点的骨体积分数(BV/TV)。制备种植体-骨磨片并染色, 在骨生物学研究系统(BIOQUANT OSTEO, 美国)内观察种植体-骨结合界面, 并计算出骨结合率(BIC%)。

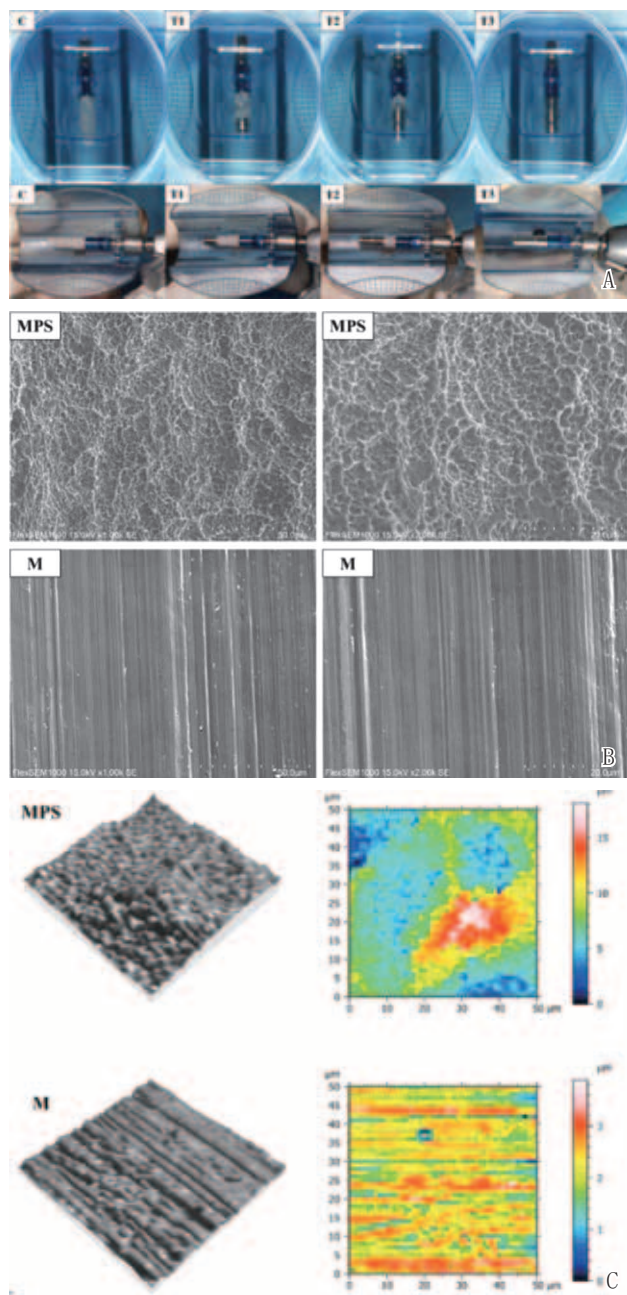
1.5 种植体旋出扭力分析: 将植入后12周后截取的含种植体的下颌骨样本固定于夹具上, 在种植体上连接手用种植体取出器, 旋紧中央螺丝。通过大扭矩棘轮扳手将取出器与数显推拉力计相互垂直地连接起来, 逆时针方向缓慢加力至种植体出现动度, 记录最大拉力值。旋出扭矩等于最大拉力值×扳手的长度。扫描电子显微镜(HITACHI, 日本)观察分段设计种植体上的两种不同形貌表面的骨质黏附情况。

1.6 统计学分析: 数据统计及分析在SPSS 26.0中完成, 使用($\bar{x} \pm s$)描述数据。对测量数据进行正态性及方差齐性检验满足条件后, 进行方差分析(单因素ANOVA)后进行两两比较(SNK-q检验)或独立样本 t 检验, 检验水准为双侧 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 两种表面形貌的表面粗糙度对比: 扫描电镜下的两种表面的形貌观察, 可见MPF表面呈较均匀规则的直径约2 μ m的微坑结构, 机械光滑表面呈平行划痕并有散在高亮凸起(见图1B)。两种表面三维形貌重建可见种植体表面被测区域与基准面的离散情况(见图1C)。机械光滑表面被测点高度更均匀, 呈条带状分布。MPF表面各点间高度离散性大于机械光滑表面。用表面算数平均偏差来代表两种不同表面的粗糙度(S_a), MPF表面的 S_a 约为机械光滑表面的4倍, 两者的表面算数平均偏差间差异有统计学意义

($P<0.001$)，机械光滑表面无明显粗糙属于光滑表面，而经MPF表面处理后接近于中等粗糙度。通过表面形貌观察和三维形貌仪的分析结果，表明两种表面的粗糙程度不同，不同表面粗糙度分段的种植体制作成功。



注：A. 创英 (Trausim) BL NC种植体直径3.3 mm，长度10 mm，按照两种表面分布比例的不同分为四组；B. 扫描电镜下两种不同表面的形貌特征；C. 种植体分段处理两种表面粗糙度形貌图

图1 分段表面种植体的设计和形貌对比

2.2 种植体骨结合动物模型建立情况：术后6只实验犬至处死前，精神、进食状况良好。术后12周内创口愈合良好，愈合基台未见脱落，周围黏膜色素沉着，未见红肿感染，种植体未见松动叩诊音清脆。术后12周X线片显示种植

体螺纹内存在较高密度骨质影像，未见束状骨高密度影，表明种植体周围骨质改建，束状骨吸收，较成熟的骨质充盈于螺纹间。四组不同表面分段设计的种植体-比格犬下颌骨模型均建立成功。

2.3 种植体稳定性系数 (IST值) 测量结果：种植体植入即刻的IST值均大于70，表明不同表面分段设计的种植体均可获得良好的初期稳定性，且植入即刻各组间IST值差异无统计学意义 ($P>0.05$) (见表1)。种植体植入12周后，此时各实验动物间和各组间IST值差异无统计学意义 ($P>0.05$)。因此三种不同程度表面分段处理的种植体并不影响种植体获得初期稳定性且不影响种植体获得二期稳定性。

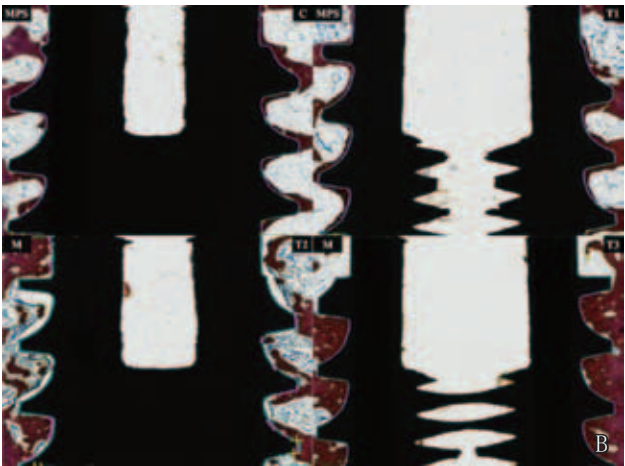
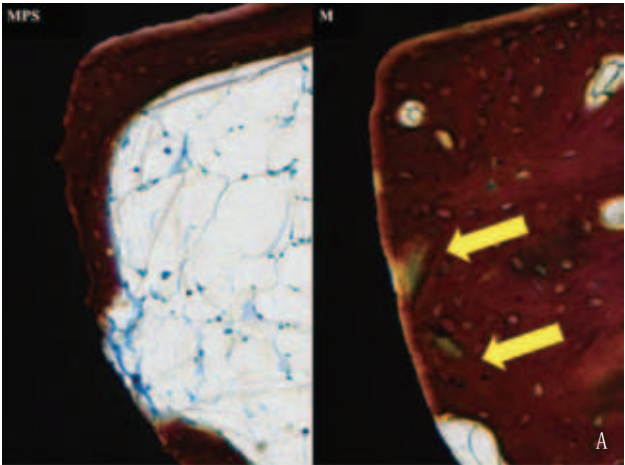
经过12周愈合后，各组间种植体稳定性变化值见表1，术后12周各组种植体稳定性系数均增加，两时间点间IST值差异均有统计学意义 ($P<0.05$)。因此，分段表面处理种植体和常规种植体均可在拔牙后即刻种植和非潜入式愈合种，随着愈合时间的增加，种植体稳定性提高。虽然随着冠方粗糙长度的增加，稳定性的提高幅度也增大，其中全部为MPF表面的对照组稳定性系数增幅最大，而MPF表面最少的T3组增幅最小，但种植体稳定性系数变化差值间 (d值) 比较差异无统计学意义 ($P>0.05$)。

表1 种植体植入即刻及12周后稳定性系数 (IST值) 及差值 (d值)

	C组	T1组	T2组	T3组
0周	74.11±6.70	74.06±2.54	77.03±2.07	77.03±5.52
12周	80.08±3.07	78.33±3.83	78.00±1.95	77.28±1.06
d值	5.97±5.27	4.28±4.55	0.98±1.51	0.25±5.10

2.4 两种表面形貌骨形态学分析结果：大体观察，种植体呈金属光泽，截面完整，周围可见骨质包绕，内部螺丝通道及外部轮廓边缘整齐，未见变形。光镜下观察，骨组织内未见金属碎屑，种植体表面可见深红色新矿化骨直接接触，无结缔组织长入，螺纹内可见骨质基本为新矿化骨，可见骨陷窝内骨细胞呈蓝色，骨小梁间可见骨髓腔，种植体周围骨改建过程中，MPF表面的改建速度总快于机械光滑表面 (见图2A)。两种表面的骨结合情况显示种植体周围骨质形成良好 (见图2B)，并计算骨结合率。MP表面骨结合率为 (63.25±3.40) %，高于M表面骨结合率 [(31.75±7.37) %]，差异具有统计学意义 ($P<0.001$)。

在经过2周、4周、12周的愈合期后，两种植体表面周围经分析测量后的骨体积分数 (BV/TV) 在40%到60%之间 (见表2)，两种表面在三个时间点内的骨体积分数比较差异无统计学意义 ($P>0.05$)；在同一时间点上，MPF表面与机械光滑表面上所形成的骨体积分数经分析测量后差异无统计学意义 ($P>0.05$)。种植体周围骨组织重建图显示，种植体植入2、4、12周后种植体中1/3完全被骨质包围 (见图3)。



注：A. 两种表面骨结合界面，种植体呈不透光黑色，种植体表面新矿化骨连接的成熟骨为砖红色，骨结合界面及新矿化骨外缘可见散在黄绿色类骨质，机械光滑表面较大颗粒喷砂酸蚀表面类骨质较多（黄色箭头所示）；B. 各组种植体中3 mm两种不同表面的骨结合情况

图2 两种表面中3 mm两种不同表面的骨结合情况

表2 两种表面在各时间点的骨体积分数 (BV/TV) ($\bar{x} \pm s$, %)

	MPS	M
2周	50.70 \pm 12.34	50.25 \pm 16.09
4周	48.65 \pm 9.93	55.92 \pm 0.11
12周	40.02 \pm 0.38	51.38 \pm 4.47

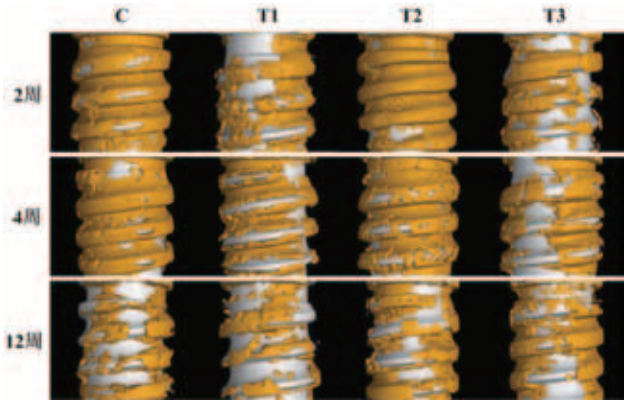


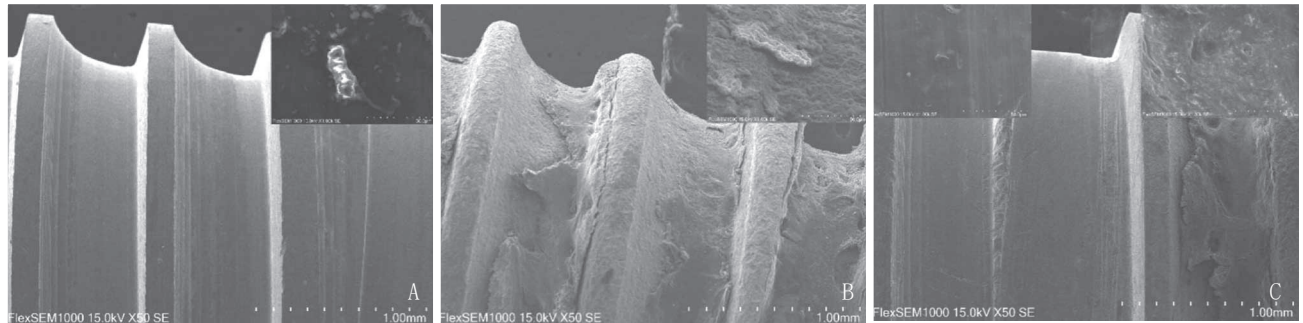
图3 四组种植体各时间点ROI (3 mm) 骨组织重建

2.5 种植体旋出扭矩及表面骨质黏附情况：在愈合12周后，各组种植体旋出扭矩均大于35 N·cm，表明所有种植体均形成了良好的骨结合，满足临床要求。旋出扭力总体趋势表现为种植体冠方的MPF表面越短，旋出扭矩越小（见表3）。在各组间进行比较，MPF长度为10 mm的对照组种植体所需的旋出扭矩约为MPF长度为3 mm的T2组及不存在MPF表面的T3组的两倍及以上，且T2和T3组种植体旋出扭矩与对照组相比差异均有统计学意义 ($P < 0.05$)。MPF长度为6 mm的T1组的旋出扭矩虽然低于对照组，但是两者之间差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。在三个实验组间进行比较，T1组的旋出扭矩约是T3组的2倍，两者间差异具有统计学意义 ($P = 0.016$)，而T2组与T1、T3组间差异无统计学意义 ($P_{T1-T2} = 0.111$; $P_{T2-T3} = 0.203$)。

旋出种植体大体观察可见宏观形态无明显变化，MPF表面仍呈浅灰色、无金属光泽，表面可见大量白色骨组织黏附，根方机械光滑表面仍呈银色金属光泽，仅在螺纹间观察到少量骨组织黏附，两种表面仍可见清晰分界线（见图4）。

3 讨论

本实验分别在种植体冠方设计不同粗糙长度：10 mm、6 mm、3 mm及0 mm。其中粗糙长度10 mm的种植体在临床上常



注：A. 扫描电镜50倍放大率下可见光滑表面螺纹角度尖锐，机械光滑表面仅发现少量散在小块状骨质黏附，大部分区域没有骨质黏附，保持原有形貌；B. MPF表面因骨质黏附而表现较圆钝，大量较厚片状骨组织黏附，特别是在螺纹间，部分骨质与粗糙表面间出现间隙，骨质内存在裂纹。C. 在1 000倍放大率下，机械光滑表面骨质呈小块或凸起状，形态不规则；而MPF表面黏附骨质呈较为平坦的片状，表面多孔

图4 扫描电镜下不同表面的骨黏附情况以及两种表面交界处的形貌特征

表3 种植体旋出扭矩 ($\bar{x} \pm s, N \cdot cm$)

组别	旋出扭矩
C组	117.58±18.03
T1组	91.61±10.54
T2组	67.39±18.85
T3组	48.88±8.81

规应用,作为对照组(C组),并设计粗糙长度为0 mm(全机械光滑表面种植体)作为空白组(T3组)。回顾不同表面粗糙度的应力分散情况的三维有限元研究,结果显示各种种植体受力时应力均主要集中在颈部周围2 mm的骨皮质内^[8-10]。为了避免应力分布不均,将分段种植体最小的粗糙长度设计为MPF表面3 mm(T2组),以包含牙槽嵴顶骨皮质的厚度。近几年有大量文献描述了长度为6 mm的中等粗糙度短种植体的临床应用,在后牙区单冠修复及连冠修复均能取得可预期的临床效果^[14-15]。但较长种植体(≥ 10 mm)的应力分布较短种植体更为均匀^[16],因此本实验设计分段种植体时保留了全长10 mm,并选择6 mm作为另一组分段种植体的粗糙长度(T1组)保证分段种植体能获得可预期的临床效果。

本实验研究了不同冠方粗糙长度的分段种植体对种植体稳定性的影响。实验结果表明各组种植体植入即刻的IST值间差异无统计学意义,都具有较好的初期稳定性。在愈合12周后,四组种植体的IST值均增加,其中冠方粗糙部分越长,种植体稳定性增加越多。结果证实了中等粗糙的MPF表面能够促进骨结合,在即刻种植的愈合阶段提高种植体的稳定性。也表明适当缩短粗糙长度或许对种植体的稳定性影响不大,可以满足临床使用的要求。本实验所使用Anycheck测量IST值与传统Osstell ISQ测量具有较高的可靠性和相关性,且不受愈合基台大小的影响^[13, 17-18]。实验中四组种植体均匀分布在实验犬下颌骨内,排除了不同动物个体间愈合能力差异可能造成的偏倚。在愈合12周后,没有种植体出现松动脱落,说明本实验结果具有一定的可靠性。

种植体旋出扭力实验结果显示,四组种植体的反向旋出扭矩均大于35 N·cm,达到了上部结构预载荷的扭矩要求,表明种植体周围形成了满足临床使用要求的骨结合强度。C组(MPF长度10 mm)的反向旋出扭矩峰值超过110 N·cm,与之前的研究结果一致。而T3组(MPF长度0 mm)的反向旋出扭矩峰值平均约为50 N·cm,约为C组的一半,并且没有明显的屈服点。扫描电镜观察显示,光滑表面的骨结合破坏主要发生在种植体表面,而粗糙表面的骨结合破坏发生在周围骨小梁,与文献中描述一致^[19-20]。统计分析显示T3组与C组、T1组(MPF长度6 mm)的反向旋出扭矩峰值差异有统计学意义,T2组与C组差异也有统计学意义,说明冠方设计3 mm及以下的粗糙长度减小了种植体拔除的难度。然而,两组内都存在反

向旋出扭矩峰值小于50 N·cm的情况,这可能导致在受到较大咬合力时失败,效果不够可靠。但T1组与C组的反向旋出扭矩间差异无统计学意义。因此,认为在冠方设计3~6 mm(MPF长度占种植体全长的比例在1/3~2/3)的范围内,能够既达到临床所需种植体稳定性要求又比全MPF表面的反向旋出扭矩小。后续研究可以继续在此3~6 mm的范围内探索这组种植体的冠方粗糙长度,以获得良好的稳定性、骨结合率和抵抗剪切应力的效果,同时降低种植体拔除的难度和创伤。对于种植体表面粗糙长度比例对种植体抗旋能力的影响,可以通过增加样本量和延长愈合时间进行更深入的观察。此外,可以进行负荷实验,研究种植体在行使功能时是否具有足够的能力抵抗应力,并观察种植体的留存情况。

既往研究表明,种植体表面骨结合率30%~90%^[21-22]。本实验结果表明四组种植体表面骨结合率均在正常范围内,且粗糙表面积越大,骨结合率越大,可能增加了种植体与周围骨质接触的面积,从而增加了旋出扭矩^[19, 23-24]。光镜下观察骨结合界面发现,MPF表面种植体的骨结合率更高,与文献报道一致^[21]。但观察到种植体周围骨量似乎与种植体表面形貌无关,这可能是由于样本量不足和实验动物在愈合时存在差异所导致。目前还没有研究表明种植体表面骨体积分数或骨结合达到最佳的具体标准或达到临床使用的标准,有三维有限元研究认为达到约20%就能够提供足够的二期稳定性^[25]。本实验结果表明,随着愈合时间的延长和种植体的功能负荷,种植体的机械光滑表面和MPF粗糙表面周围的骨量和结合率或许都能够达到理想水平,但MPF表面的骨改建始终快于机械光滑表面,且结合力更强^[26]。因此,分段种植体能够形成良好的骨结合,从而正常行使功能、分散应力。

分段种植体既保留了颈部粗糙表面,能够达到临床应用所需的抗剪切应力,又因根部光滑表面设计可以在拔除种植体时降低难度,减少骨损伤,利于二次种植。部分种植体完成修复后可能存在位置不佳、唇侧骨板吸收和牙龈退缩等并发症,相应处理后效果不佳,需要拔除已有骨结合的种植体^[27-28]重新再治疗,此时分段表面设计种植体可作为合适的选择,能够达到所需的稳定性和骨结合强度,并减小旋出难度和拔除创伤。

[参考文献]

- [1]De Angelis F, Papi P, Mencia F, et al. Implant survival and success rates in patients with risk factors: results from a long-term retrospective study with a 10 to 18 years follow-up [J]. Eur Rev Med Pharmacol Sci, 2017,21(3):433-437.
- [2]Howe M S, Keys W, Richards D. Long-term (10-year) dental implant survival: A systematic review and sensitivity meta-analysis[J]. J Dent, 2019,84:9-21.
- [3]Pandolfi A, Rinaldo F, Pasqualotto D, et al. A retrospective cohort

- study on peri-implant complications in implants up to 10 years of functional loading in periodontally compromised patients [J]. *J Periodontol*, 2020,91(8):995-1002.
- [4]Takamoli J, Pascual A, Martinez-amargant J, et al. Implant failure and associated risk indicators: A retrospective study [J]. *Clin Oral Implants Res*, 2021, 32(5):619-628.
- [5]Quirynen M, De Soete M, Van Steenberghe D. Infectious risks for oral implants: a review of the literature [J]. *Clinical Oral Implants Research*, 2002,13(1):1-19.
- [6]Froum S, Yamanaka T, Cho S C, et al. Techniques to remove a failed integrated implant [J]. *Compend Contin Educ Dent*, 2011,32(7):22-6,8-30;quiz 1-2.
- [7]Barfeie A, Wilson J, Rees J. Implant surface characteristics and their effect on osseointegration [J]. *Br Dent J*, 2015,218(5):E9.
- [8]Gupta Y, Iyer R, Dommeti V K, et al. Design of dental implant using design of experiment and topology optimization: A finite element analysis study [J]. *Proc Inst Mech Eng H*, 2021, 235(2): 157-166.
- [9]Robau-porrua A, Perez-rodriguez Y, Soris-rodriguez L M, et al. The effect of diameter, length and elastic modulus of a dental implant on stress and strain levels in peri-implant bone: A 3D finite element analysis [J]. *Biomed Mater Eng*, 2020,30(5-6):541-558.
- [10]Dos Santos M B F, Meloto G O, Bacchi A, Correr-Sobrinho L. Stress distribution in cylindrical and conical implants under rotational micromovement with different boundary conditions and bone properties: 3-D FEA [J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2017,20(8):893-900.
- [11]谢晨曦, 付小明, 徐凌, 等. 基于解剖测量的比格犬下颌前磨牙区口腔种植位点的确定[J].*第三军医大学学报*,2018,40(14):1279-1285.
- [12]Santos M, Carreira L M. Insight of dogs' inner mandible anatomy using mathematical models[J]. *Anat Histol Embryol*, 2016,45(6):479-484.
- [13]Lee J, Pyo S W, Cho H J, et al. Comparison of implant stability measurements between a resonance frequency analysis device and a modified damping capacity analysis device: an in vitro study [J]. *J Periodontal Implant Sci*, 2020,50(1):56-66.
- [14]Malmstrom H, Gupta B, Ghanem A, et al. Success rate of short dental implants supporting single crowns and fixed bridges [J]. *Clin Oral Implants Res*, 2016, 27(9): 1093-1098.
- [15]Rossi F, Lang N P, Ricci E, et al. Long-term follow-up of single crowns supported by short, moderately rough implants-A prospective 10-year cohort study [J]. *Clin Oral Implants Res*, 2018,29(12):1212-1219.
- [16]Jomjunyong K, Rungsiyakull P, Rungsiyakull C, et al. Stress distribution of various designs of prostheses on short implants or standard implants in posterior maxilla: a three dimensional finite element analysis [J]. *Oral Implantol (Rome)*, 2017,10(4):369-80.
- [17]Lee D H, Shin Y H, Park J H, et al. The reliability of Anycheck device related to healing abutment diameter [J]. *J Adv Prosthodont*, 2020,12(2):83-88.
- [18]Song Y W, Paeng K W, Kim M J, et al. Secondary stability achieved in dental implants with a calcium-coated sandblasted, large-grit, acid-etched (SLA) surface and a chemically modified SLA surface placed without mechanical engagement: A preclinical study [J]. *Clin Oral Implants Res*, 2021, 32(12): 1474-1483.
- [19]Mei S, Dong F, Rahman Khan M S. Effects of biomineralization on osseointegration of pure titanium implants in the mandible of beagles [J]. *J Oral Maxillofac Surg*, 2018, 76(10):2104.e1-2104.e10.
- [20]Branemark R, Emanuelsson L, Palmquist A, et al. Bone response to laser-induced micro- and nano-size titanium surface features [J]. *Nanomedicine*, 2011, 7(2): 220-227.
- [21]Sagirkaya E, Kucukelenci A S, Karasoy D, et al. Comparative assessments, meta-analysis, and recommended guidelines for reporting studies on histomorphometric bone-implant contact in humans [J]. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 2013, 28(5):1243-1253.
- [22]Tumedei M, Piattelli A, Degidi M, et al. A narrative review of the histological and histomorphometrical evaluation of the peri-implant bone in loaded and unloaded dental implants. a 30-year experience (1988-2018)[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020,17(6):2088.
- [23]Yadav S, Upadhyay M, Roberts W E. Biomechanical and histomorphometric properties of four different mini-implant surfaces [J]. *Eur J Orthod*, 2015,37(6):627-635.
- [24]Park E Y, Sohn H O, Kim E K. Comparison of the removal torque and a histomorphometric evaluation of the RBM treated implants with the RBM followed by laser treated implants: an experimental study in rabbits [J]. *Yeungnam Univ J Med*, 2019,36(1):43-49.
- [25]Rittel D, Dorogoy A, Shemtov-yona K. Modeling the effect of osseointegration on dental implant pullout and torque removal tests [J]. *Clin Implant Dent Relat Res*, 2018, 20(5):683-691.
- [26]Iezzi G, Vantaggiato G, Shibli J A, et al. Machined and sandblasted human dental implants retrieved after 5 years: a histologic and histomorphometric analysis of three cases [J]. *Quintessence Int*, 2012,43(4):287-292.
- [27]King E, Patel R, Patel A, et al. Should implants be considered for patients with periodontal disease? [J]. *Br Dent J*, 2016,221(11):705-711.
- [28]Sousa V, Mardas N, Farias B, et al. A systematic review of implant outcomes in treated periodontitis patients [J]. *Clin Oral Implants Res*, 2016, 27(7): 787-844.

[收稿日期]2024-04-22

本文引用格式: 王淼, 朱璐璐, 徐博雅, 等. 分段设计种植体表面粗糙度对种植体拔除难度及骨结合的影响研究[J]. *中国美容医学*, 2025, 34(1): 37-42.