

# 金属正畸托槽皮秒激光清洗实验及其机理研究

凌 晨<sup>1</sup> 季凌飞<sup>1</sup> 吴 燕<sup>1</sup> 李秋瑞<sup>1</sup> 鲍 勇<sup>1</sup> 蒋毅坚<sup>1</sup> 杨 凯<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)  
(<sup>2</sup> 首都医科大学附属口腔医院, 北京 100050)

**摘要** 正畸托槽广泛应用于牙齿正畸临床治疗中。但由于诸多因素, 粘结后的托槽时常会发生脱落现象, 需要回收清洗, 重新粘结。采用皮秒激光(波长为 532 nm 和 1064 nm; 脉宽小于 20 ps)对 Mini Sprint 金属正畸托槽进行了激光清洗研究, 有效地解决了常规激光清洗中因入射光边缘衍射效应而导致柱状固位结构周缘粘结剂残留的问题, 实现托槽的完全清洗。确认高频断续超短脉宽的脉冲作用在材料中形成的热弹性波以力学振动传播扩散的方式是实现皮秒激光完全清洗的主要机制, 该机制不同于常规激光清洗的热蒸发机制。发现不同波长皮秒激光清洗后的托槽固位结构单元顶端的表面形貌存在差异, 因托槽制作工艺引入的表面本征缺陷在较短波长 532 nm 皮秒激光的辐照下, 因表面等离子振荡效应的激发, 而导致局域电磁场能量增强, 形成有利于托槽粘结的微坑结构。

**关键词** 激光技术; 激光清洗; 皮秒激光; 金属正畸托槽; 局域表面等离子振荡

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.0403005

## Research and Mechanism Study on Refurbishing Stainless Bracket Using Picosecond Laser Based on Laser Cleaning Technology

Ling Chen<sup>1</sup> Ji Lingfei<sup>1</sup> Wu Yan<sup>1</sup> Li Qiurui<sup>1</sup> Bao Yong<sup>1</sup> Jiang Yijian<sup>1</sup> Yang Kai<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)  
(<sup>2</sup> Beijing Stomatological Hospital, Capital Medical University, Beijing 100050, China)

**Abstract** Bracket bonding technology is widely applied in clinical orthodontic practice. However, orthodontic bracket sheds off frequently due to various reasons which results in the advocating of recycling utilization of the brackets by refurbishing. In this study, the refurbishing of Mini Sprint stainless bracket by picosecond laser (wavelengths of 532 nm and 1064 nm, pulse width: < 20 ps) is studied. High clean quality without any resin adhesive is achieved which overcome the limitation of edge diffraction effect during conventional laser cleaning technique. There is an evidence that the diffusion of the stress vibration due to the elastic waves generated by ultra-short pulse shots with high frequency is the picosecond laser cleaning mechanism. It is observed that there are differences between the microstructure on the top of columnar bracket base refurbished by picosecond lasers with different wavelengths. It is suggested that localized surface polaritons (LSPs) induced by the original point defects on bracket base surface under the irradiation of 532 nm picosecond laser enhance the energy distribution of laser input, which results in the formation of micro-pit structures on the bracket surface beneficial for the rebonding.

**Key words** laser technique; laser cleaning; picosecond laser; orthodontic bracket; localized surface polariton resonance

**OCIS codes** 350.3390; 140.7090; 170.1850

**收稿日期:** 2013-10-24; **收到修改稿日期:** 2013-11-20

**基金项目:** 国家自然科学基金(51275011)、新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0007)、北京市自然科学基金重点项目(3111002)、北京市教育委员会科技计划、北京市留学人员择优资助项目

**作者简介:** 凌 晨(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事非金属材料激光加工方面的研究。E-mail: ivo@emails.bjut.edu.cn

**导师简介:** 季凌飞(1971—), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事非金属材料激光制造科学与技术等方面的研究。

E-mail: ncltji@bjut.edu.cn (通信联系人)

## 1 引言

正畸矫治根据生物力学原理通过粘结托槽实现牙齿移动,达到矫正牙齿、解除牙齿畸形和错位的目的。正畸托槽作为正畸矫治技术的核心部件,在正畸治疗中有着非常广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。但临床实践中,经常会因为初次粘结时患者配合程度的不同、口腔环境的差异、正畸托槽基体材质和粘结剂种类的匹配程度等多种因素影响而发生脱落<sup>[4-8]</sup>。单个正畸托槽的价格多在几十元至几百元不等,医疗成本较高,出于对减轻患者经济负担和节约资源的考虑,清除脱落托槽底板上的残留粘结剂,给患者本人再利用经回收清洗后的正畸托槽已成为临床应用中的常用做法。通常医疗工作者会使用喷砂法<sup>[9]</sup>和打磨法<sup>[10]</sup>来剔除托槽底板上残留的粘结剂,实现清洁回收。传统的清洁方法一直存在一定的弊端:喷砂法会对正畸托槽底板的固位结构造成一定程度的机械损伤,影响托槽的使用寿命;而打磨法无法完全去除正畸托槽上残留的粘结剂,且更易对固位结构造成大的损伤,可回收再利用价值低。

激光清洗技术作为一种新型绿色的清洗回收技术,具有环境污染少、高效、低成本等传统清洗方式所不能比拟的特点<sup>[11-12]</sup>,已在微电子行业、文物保护以及航空航天等领域得到推广应用。近几年,也不断有研究人员探索激光清洗技术对正畸托槽回收的应用推广价值。2009年,德国研究者 Kulandaivelu 等<sup>[13]</sup>采用波长为 2940 nm 的 Er:YAG 激光处理脱落金属正畸托槽底板上的粘结剂,由于 Er:YAG 激光以水体为能量载体,清洗效率和清洗效果均满足不了实际应用要求。采用 KrF 准分子激光进行托槽清洗,可以获得对网状固位结构 3M Unitek 金属正畸托槽较好的清洗效果,显示出激光清洗方法相对于传统清洗方法的明显优势。但对于柱状固位结构的 Mini Sprint 金属正畸托槽,辐照清洗中由于光束在固位结构柱状单元边缘发生的菲涅耳衍射效应<sup>[14]</sup>,会因相位不同引起的光程差而相互之间产生干涉作用,导致激光光束强度在柱状单元边缘处减弱,无法提供足够的能量输入以引起粘结剂的受热蒸发或气化,最终残留于固位结构周缘,影响了正畸托槽的回收利用效率。根据皮秒激光超短脉宽和极高单脉冲能量的特点,拟克服激光清洗中因光束菲涅耳衍射效应引起的热烧蚀能量不足的问题,提出采用皮秒激光对具有柱状固位结构的 Mini Sprint 金属正畸托槽进行清洗研究,探究其机理,预测其临床应用的可行性。

## 2 实验材料与方法

研究所用实验材料为北京口腔医院提供的临床用 Mini Sprint 金属正畸托槽,其底板固位结构如图 1 所示,结构单元为约 200  $\mu\text{m}$  高的梯形柱状结构。该正畸托槽所使用的粘结剂为光固化丙烯酸类粘结剂,主要成分是硅烷化石英、二氧化硅的反应产物等。研究所用激光器为脉宽小于 20 ps 的 Edgewave 皮秒激光器,采用未聚焦的原始圆形光斑(光斑直径为 3 mm)对正畸托槽进行直接辐照清洗,实验中考察了 1064 nm 和 532 nm 两种激光波长的清洗效果,使用的平均功率范围为 15~25 W,脉冲重复频率范围为 1~10 MHz。激光辐照完成后,置正畸托槽于乙醇溶液,经约 20 s 超声清除浮渣,即完成整个清洗过程。研究中还进行了波长为 248 nm 准分子激光进行清洗的对比实验。正畸托槽清洗试样的表面形貌采用扫描电镜(SEM Hitachi TM-1000)和激光共聚焦显微镜(Olympus LEXT OLS3000)进行观测与分析。

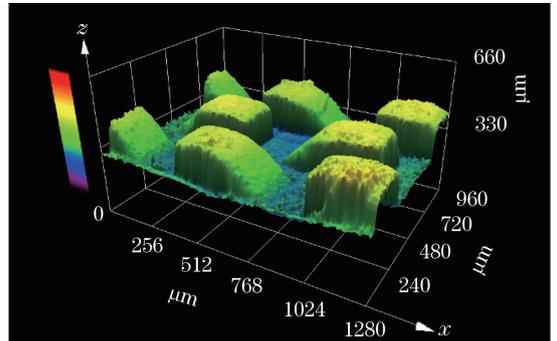


图 1 Mini Sprint 金属正畸托槽底板固位结构激光共聚焦三维图像

Fig. 1 3D confocal laser scanning morphology of Mini Sprint stainless bracket base

## 3 结果与分析

### 3.1 正畸托槽皮秒激光清洗效果分析

图 2 为不同类型激光辐照 Mini Sprint 金属正畸托槽的清洗效果 SEM 图。532 nm 和 1064 nm 波长皮秒激光的辐照清洗效果分别如图 2(a)和(b)所示,图 2(c)为 248 nm 准分子激光辐照清洗后的托槽表面。

从图 2(a)、(b)中可以看出,经皮秒激光清洗,托槽表面的粘结剂已经完全清除,柱状固位结构边缘亦未发现粘结剂残留。而图 2(c)所示柱状固位结构顶部的粘结剂经准分子激光辐照已清除干净,但单元结构之间还残留着大量的粘结剂。两种

脉宽的激光辐照显示了明显不同的清洗效果。

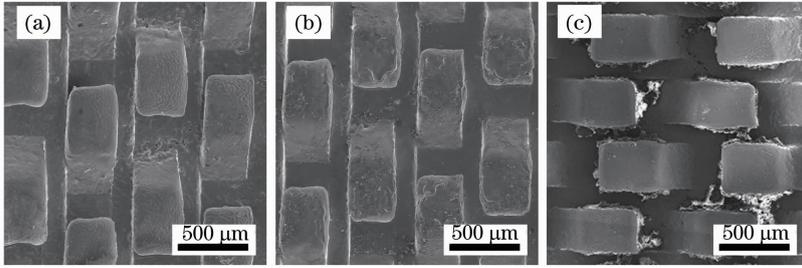


图2 Mini Sprint 金属正畸托槽不同类型激光清洗后的表面 SEM 图。(a) 532 nm 皮秒激光(平均功率为 20 W,重复频率为 1 MHz,辐照时间 6 s); (b) 1064 nm 皮秒激光(平均功率为 20 W,重复频率为 1 MHz,辐照时间为 6 s); (c) 248 nm 准分子激光(能量密度为 1.7 J/cm<sup>2</sup>,重复频率为 2 Hz,脉冲个数为 200 个)

Fig.2 SEM images Mini Sprint stainless brackets after laser cleaning by different lasers. (a) 532 nm picosecond laser (average power; 20 W, repetition rate; 1 MHz, irradiation time; 6 s); (b) 1064 nm ps laser (average power; 20 W, repetition rate; 1 MHz, irradiation time; 6 s); (c) 248 nm excimer laser (fluence; 1.7 J/cm<sup>2</sup>, repetition rate; 2 Hz, pulse number; 200)

基于对正畸托槽进行大量皮秒激光实验发现,当平均功率小于 18 W 时,皮秒激光不能形成良好的清洗效果,大量的粘结剂会残留在固位结构的周围,难以清除;而当功率大于 22 W 时,则会因为过度能量输入造成热积累,引起粘结剂的熔化重凝,并伴随严重的碳化现象。而对于辐照时间而言,6 s 左右的时间能够在实现激光清洗的同时,又能避免由于过多的热积累使粘结剂熔化。采用正交实验法对辐照工艺参数进行优化实验,所得最优工艺参数如表 1 所示,N/A 表示相关参数对于此种激光不适用。(准分子激光清洗该类托槽始终残留有粘接剂,

表 1 所示该类型激光优化工艺参数为残留量最小参数,供实验效果对比用)。实验发现,在一定的辐照时间下,激光波长和重复频率对托槽表面粘结剂的去除效果影响都不大,其中优化的频率选择范围可为 1~10 MHz 之间很宽的工作窗口,而在光斑尺寸一定的条件下,决定粘结剂去除效果的关键工艺参数是激光平均功率。此外,实验中曾基于及时去除激光辐照所产生浮渣的考虑,在辐照同时,对托槽表面进行侧轴送气,但发现该措施严重影响激光清洗效率,即使将激光平均功率增至 100 W,辐照后的托槽表面也没有出现任何改变,粘结剂附着如故。

表 1 激光清洗优化工艺参数

Table 1 Parameters utilized for laser cleaning process

Type of laser	Picosecond laser		Excimer laser
Wavelength	1064 nm	532 nm	248 nm
Repetition rate	1~10 MHz	1~10 MHz	1~5 Hz
Pulse width	10 ps	10 ps	20 ns
Irradiation time	6 s	6 s	N/A
Pulse number	N/A	N/A	100~200
Fluence	N/A	N/A	1.3~1.7 J/cm <sup>2</sup>
Average power	19~21 W	19~21 W	N/A

实验初步研究得出,激光脉宽是影响托槽表面粘结剂去除效果的首要因素;而当脉宽接近皮秒(~10 ps)量级时,激光平均功率成为对粘结剂去除效果起决定作用的工艺参数。虽然准分子激光与皮秒激光对粘结剂都具有去除作用,但实验进一步发现,二者存在差异。准分子激光辐照后,托槽表面的粘结剂会发生烧蚀乃至汽化,而经皮秒激光辐照过后,托槽表面的粘结剂会依然整体附着于正畸托槽

的表面,但此时的粘结剂已由原先的紧密整体块状转变成疏松的团聚粉末状,如图 3 所示,这种经皮秒激光辐照而形成的疏松团聚粉末很容易自动脱落或者通过短时间的超声振动而去除。两种激光辐照后托槽表面粘结剂的去除特征完全不同。因此,皮秒激光对正畸托槽的清洗应该是基于一种区别于准分子激光或 YAG 激光对粘结剂烧蚀去除的新去除机制。

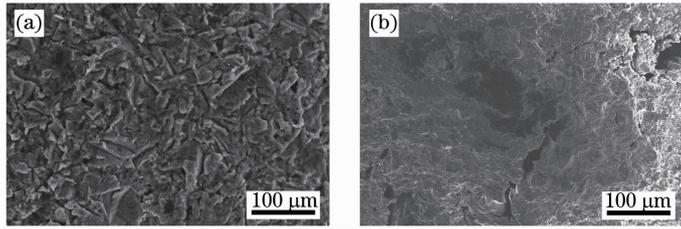


图 3 皮秒激光辐照清洗前后粘结剂的形态比较(平均功率为 20 W,重复频率为 1 MHz,辐照时间为 6 s)。(a) 清洗之前;(b) 清洗之后

Fig. 3 Transformation of resin adhesive after laser irradiation cleaning process. (average power: 20 W, repetition rate: 1 MHz, irradiation time: 6 s). (a) Before cleaning; (b) after cleaning

Watkins 等<sup>[15]</sup>对激光的清洗机制进行过阶段性的归纳研究,大体将清洗机制归结为 5 类:选择性蒸发机制、蒸汽压力去除机制(湿式清洗)、剥离机制(低温烧蚀)、光子压力机制以及热弹性波机制。其中,选择性蒸发机制、光子压力机制以及热弹性波机制往往发生于较低的激光功率密度情况下,而蒸汽压力去除机制和剥离机制则需要较高的激光功率密度(大于  $10^3 \text{ W/cm}^2$ )引发。由于不同材料电子与离子间的能量弛豫时间约在  $10^{-6} \sim 10^{-12} \text{ s}$  之间<sup>[16]</sup>,因此当激光脉宽降低至皮秒级别( $10^{-11} \sim 10^{-12} \text{ s}$ )时,材料对皮秒级光子能量存在电子态吸收的基本特点,将大大降低导入的热量积累,从而降低产生蒸发去除或汽化去除的几率。断续的光脉冲作用只会使材料的被辐照部分反复热膨胀和收缩,形成表面热弹性波。该热弹性波可以具有很高的频率,适当的实验条件下可达到百万赫兹<sup>[17]</sup>。针对皮秒激光的能量输入特点,忽略热传导效应,将激光加热的温度场描述为  $T(x,t) = \Delta T \exp(-x/\delta) H(t)$ ,初始条件为  $T(x,0) = 0$ ,其中  $T$  为温度,  $H$  为热流向量,  $\delta$  为激光能量吸收深度,  $x$  为空间,  $t$  为时间。由此,根据温度与变形胡克定律和线动量守恒,获得表征热弹性波的应力解<sup>[18]</sup>:

$$s(\xi, \tau) = \begin{cases} -\exp(-\xi) \text{ch}(\tau), & \xi > \tau \\ \exp(-\tau) \text{sh}(\xi), & \xi < \tau \end{cases} \quad (1)$$

式中  $s$  为无量纲的应力,  $\xi$  表征了无量纲的空间,  $\tau$  代表了无量纲的时间。分析(1)式可知,在波阵面  $\xi = \tau$  处,由于温度所产生的压应力会跳变为拉应力,而呈现为一种弹性应力波形式,其跳变时的应力差值可表示为<sup>[18]</sup>

$$\Delta\sigma = 3\alpha_1 K_v \Delta T, \quad (2)$$

式中  $\alpha_1$  为物体的线膨胀系数,  $K_v$  为物体的体积模量,  $\Delta T$  为物体表面的温升值。由此可见,弹性波的振幅,即  $\Delta\sigma/2$ ,与物体本身的性质(线膨胀系数,体积模量)和表面的温升值呈线性递增关系。高频的

皮秒激光脉冲在材料表面会引起温升,但温升有限还不至于引起材料相变,只是在激光断续脉冲的作用下通过温升变化产生具有强烈振幅的弹性波,引起材料表面很强的力学振动,实现无热烧蚀损伤的材料去除。由于材料的去除是通过力学振动传播引起的材料形变乃至粉碎,不需要过高至相变的热量积累,因此可以有效规避固位结构边缘菲涅耳直边衍射所引起的光能输入受限效应,实现托槽结构的完全清洗。(2)式所示应力差值与表面温升值的关系也解释了实验中侧轴送气降低清洗效率的现象,辐照时的侧轴同步送气造成正畸托槽表面处于持续冷却状态,材料的表面温升达不到产生足够振幅变化的热弹性波要求,因而无法获得理想的清洗效果。皮秒激光对正畸托槽的清洗机制应归结为以振动应力传播为主的热弹性波机制。

### 3.2 清洗后固位结构表面显微形貌分析

虽然皮秒激光对正畸托槽表面粘结剂的去除不受波长影响,但采用高倍数 SEM 进一步观察清洗后的固位结构单元顶端,发现两种波长皮秒激光去除后的固位结构顶端会呈现不同的显微形貌特征。如图 4 所示,经 1064 nm 波长激光清洗的柱状结构顶部出现了较为明显的重凝状微颗粒,而 532 nm 波长激光清洗过的结构顶部则呈现出微小的浅坑分布。1064 nm 波长清洗引起的表面微重凝应来源于较长波长所引起热积累效应,对比图 4(a)所示的全新托槽,该表面重凝并未引起托槽固位结构基底材料的损伤,仍然具有临床应用价值。而 532 nm 激光清洗形成的表面浅坑状分布有利于增加托槽重新粘结时的粘结剂附着力,但其形成机理不如 1064 nm 波长引起的重凝机理易于理解。

为此,对全新的 Mini Sprint 正畸托槽进行了更为细致的观察分析。如图 5 所示,发现全新 Mini Sprint 金属正畸托槽固位结构单元顶端表面会因托槽制造工艺而本征地留有规则不一的浅坑状或沟

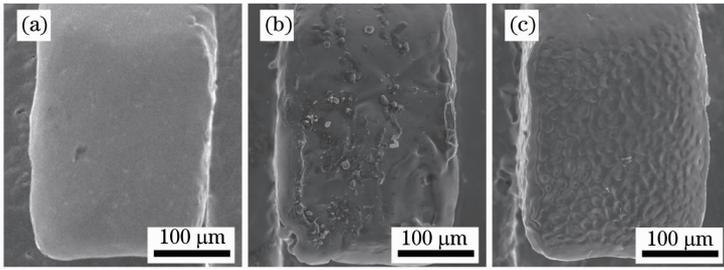


图 4 金属正畸托槽柱状结构表面形貌 SEM 图片。(a) 全新托槽;(b) 1064 nm 激光辐照过后(平均功率为 20 W, 重复频率为 1 MHz, 辐照时间为 6 s);(c) 532 nm 皮秒激光辐照过后(平均功率为 20 W, 重复频率为 1 MHz, 辐照时间为 6 s)

Fig. 4 Topography on top of columnar structures screened by SEM. (a) New bracket; (b) after laser cleaning with 1064 nm ps laser (average power: 20 W, repetition rate: 1 MHz, irradiation time: 6 s); (c) after laser cleaning with 532 nm ps laser (average power: 20 W, repetition rate: 1 MHz, irradiation time: 6 s)

槽状缺陷。采用激光共聚焦显微镜对该表面进行粗糙度  $R_a$  的测量,  $R_a$  值基本集中在  $0.5 \sim 0.8 \mu\text{m}$  之间, 而根据固位结构表面 SEM 图, 可以看出其本征缺陷尺度基本亦在此尺度范围内。

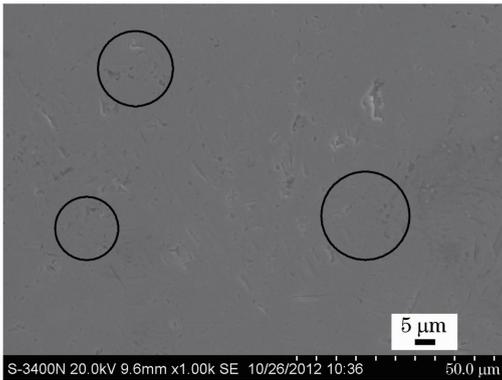


图 5 全新金属正畸托槽柱状结构表面坑状缺陷形貌 SEM 图

Fig. 5 SEM of point defects on surface of new stainless bracket

当光子与存在自由振动电子的金属表面相互作用时, 金属与介质界面近场区域会产生局域增强的倏逝波, 存在如下色散关系:

$$k_{\text{sp}} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}}, \quad (3)$$

式中  $\epsilon_1$  为介质的介电常数,  $\epsilon_2$  为金属的介电常数,  $\omega$  为入射光频率,  $c$  为光速。一般来说, 该色散关系所对应的色散曲线总是在光锥线右侧区域, 即在相同的频率条件下, 其波矢量总比光矢量要大, 因此需要一些特殊结构来弥补矢量差以激发出沿界面传播并局域于结构附近的表面等离子振荡 (LSPs)<sup>[19]</sup>。图 5 所示为这些离散的浅坑状或沟槽状缺陷即可成为用以激发表面等离子振荡的特殊结构, 在激光的激发下类似于纳米光刻中的散射粒子中心, 相对于 1064 nm 和 532 nm 的更短波长易于在固位结构单

元的表面形成近场激发所需的波矢匹配。

基于有限差分时域法 (FDTD), 模拟计算了两种不同波长激光 (1064 nm 和 532 nm) 对分布有浅坑状或沟槽状缺陷的非连续表面局域化电磁场能量的激发分布。做简化模型假设: 物体材质设定为不锈钢, 统一缺陷为深度 300 nm 的圆形孔, 孔径大小设置在实际托槽表面缺陷尺度范围内, 具体数值如图 6 所示。入射光沿  $Z$  轴负方向进行传播, 电场相对强度显示范围为 1.0~2.0, 以便观察增强效果。

图 6 所示为模拟分析获得的入射光激发电场强度分布, 其中  $\lambda$  为入射激光波长,  $\Phi$  为孔直径。可见, 当缺陷尺寸  $\Phi = 500 \text{ nm}$  和  $\Phi = 750 \text{ nm}$  时, 532 nm 波长激光激发下的缺陷结构表面局域化电场显著增强, 而在较小的缺陷孔径  $\Phi = 200 \text{ nm}$  时, 没有明显的缺陷表面局域电场增强效应。图 6 (d)~(f) 显示出对于 1064 nm 波长的激光, 其最佳耦合缺陷尺寸应为 1000 nm; 对材料实际表面缺陷尺度范围内的缺陷尺寸  $\Phi = 750 \text{ nm}$ , 仅有微弱的表面局域化电场能量激发; 当缺陷孔径缩小至  $\Phi = 500 \text{ nm}$  时, 则无明显的电场增强效应。

综合考虑正畸托槽固位结构顶部的缺陷尺度测量结果和入射光激发局域电磁场的 FDTD 模拟计算结果, 对于 532 nm 皮秒激光辐照清洗在固位结构顶部表面产生坑状微结构的原因, 可以推证为是由于正畸托槽固位结构顶端所具有的特定尺寸 (500~800 nm) 的缺陷结构分布, 在 532 nm 波长皮秒激光非热损伤的辐射下, 获得了光波波矢与表面等离子体波矢的匹配, 产生局域化的表面等离子振荡, 耦合入射的激光能量形成了局部电磁场能量增强, 而在金属托槽表面形成类似于纳米光刻的微坑。1064 nm 波长的入射激光所对应的耦合入射缺陷尺寸应在 1000 nm 左右, 但因为 1064 nm 波长激光辐

照相较于 532 nm 波长激光对材料更易产生显著的热积累,累积的热效应会瞬时破坏局域刻蚀形成的

浅坑,最终只在材料表面留下微熔重凝的迹象,如图 4(c)所示。

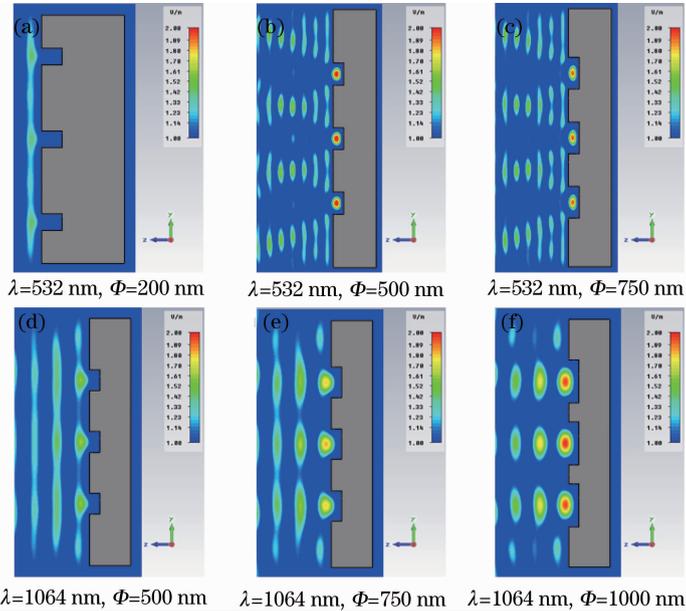


图 6 有限差分时间域法模拟不同波长入射激光相应不同尺度缺陷下的电场强度分布

Fig. 6 Intensity distribution of electric field simulated by finite-difference time-domain under different laser wavelengths versus different size of point defects

## 4 结 论

采用 19~21 W 功率的皮秒激光(脉宽<20 ps)实现了对具有柱状固位结构 Mini Sprint 金属托槽粘结剂的激光完全清洗,有效解决了传统激光清洗中因菲涅耳直边衍射效应而导致粘结剂清洗残留的问题。分析得出皮秒激光对具有固位结构托槽实现粘结剂完全清洗的作用机制,超短脉宽的高频断续脉冲作用使材料表面产生热弹性波,通过热弹性波所致很强的力学振动,实现了粘结剂的无残留去除。分析了不同波长皮秒激光清洗对柱状固位结构顶端显微形貌的影响。固位结构单元表面会由于本征缺陷而激发表面等离子振荡,引起局部电磁场能量增强造成局域刻蚀,形成浅坑状微结构,基于 FDTD 算法,模拟分析得出了 1064 nm 和 532 nm 两种波长激光激发局域化表面等离子振荡(LSPs)的托槽固位结构表面缺陷的特征尺寸。

## 参 考 文 献

- 1 J Artun. A post-treatment evaluation of multi-bonded ceramic brackets in orthodontics[J]. *Eur J Orthod*, 1997, 19(2): 219-228.
- 2 A Karamouzou, A E Athanasiou, M A Papadopoulou. Clinical characteristics and properties of ceramic brackets, a comprehensive review [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 1997, 112(1): 34-40.

- 3 H E Angle. The latest and best in orthodontic mechanism[J]. *Dental Cosmos*, 1929, 71: 206270.
- 4 Pan Huizhang. The cause of brackets lost in fixed appliance[J]. *Shanghai Journal of Stomatology*, 2001, 10(3): 228-230.
- 潘慧璋. 正畸托槽脱落的原因探讨[J]. *上海口腔医学*, 2001, 10(3): 228-230.
- 5 Hou Xiaobei. Study on bond strength of metallic orthodontic brackets[J]. *Journal of Medical Biomechanics*, 2009, 24(2): 127-129.
- 侯晓蓓. 金属正畸托槽粘结强度的研究[J]. *医用生物力学*, 2009, 24(2): 127-129.
- 6 L Hitmi, CMuller, M Mujajic, *et al.*. An 18-month clinical study of bond failures with resin-modified glass ionomer cement in orthodontic practice[J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2001, 120(4): 406-415.
- 7 B Haydar, S Sarikaya, Z C Cehreli. Comparison of shear bond strength of three bonding agents with metal and ceramic brackets [J]. *Angle Orthod*, 1999, 69(5): 457-462.
- 8 I Graf, B E Jacobi. Bond strength of various fluoride-releasing orthodontic bonding systems[J]. *J Orofac Orthop*, 2000, 61(3): 191-198.
- 9 A N Quick, A M P Harris, V P Toseph, *et al.*. Office reconditioning of stainless steel orthodontic attachments [J]. *European J Orthodont*, 2005, 27(3): 231-236.
- 10 A M Basudan, S E Al-Emran. The effects of in-office reconditioning on the morphology of slots and bases of stainless steel brackets and on the shear/peel bond strength [J]. *J Orthodont*, 2001, 28(3): 231-236.
- 11 Wang Zemin, Zeng Xiaoyan, Huang Weiling, *et al.*. Parameters and mechanisms of laser cleaning rubber layer on a tyre mould [J]. *Chinese J Lasers*, 2000, 27(11): 1050-1054.
- 王泽敏, 曾晓雁, 黄维玲, 等. 激光清洗轮胎模具表面橡胶层的机理与工艺研究[J]. *中国激光*, 2000, 27(11): 1050-1054.
- 12 Shi Shudong, Du Peng, Li Wei, *et al.*. Research on paint

- removal with 1064 nm quasi-continuous-wave laser[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(9): 0903001.
- 施曙东, 杜 鹏, 李 伟, 等. 1064 nm 准连续激光除漆研究[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0903001.
- 13 T A Kulandaivelu, A V R Ebenezar, M Sumitha, *et al.*. Comparative evaluation of the effectiveness of Er:YAG laser and other in-house refurbishing methods for reconditioning stainless steel brackets[J]. Journal of Oral Laser Applications, 2009, 9(2-3): 121-127.
- 14 Zhu Qing, Yu Dianhong. Analysis of problem of Fresnel parallel light straight-edge diffraction in mask stereolithography[J]. Tool Engineering, 2005, 39(6): 74-76.
- 朱 庆, 于殿泓. 掩膜立体成型中平行光边缘衍射问题分析[J]. 工具技术, 2005, 39(6): 74-76.
- 15 K G Watkins. Mechanisms of laser cleaning[C]. SPIE, 2000, 3888: 165-174.
- 16 Chen Faliang, Li Donghai. Mechanism of short-pulse laser induced damage in dielectric based on Fokker-Planck equation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(2): 334-338.
- 陈发良, 李东海. 基于 Fokker-Planck 方程的电介质材料短脉冲激光破坏机制分析[J]. 强激光和粒子束, 2011, 23(2): 334-338.
- 17 Y Harada, Y Kanemitsu, Y Tanaka, *et al.*. Picosecond laser generation of ultrashort acoustic pulses in silicon[J]. J Phys D: Appl Phys, 1989, 22(4): 569-571.
- 18 L W Morland. Generation of thermoelastic stress waves by impulsive electromagnetic irradiation[J]. AIAA Journal, 1968, 6(6): 1063-1066.
- 19 Wang Zhenlin. A review on research progress in surface plasmons [J]. Progress in Physics, 2009, 29(3): 287-324.
- 王振林. 表面等离激元研究新进展[J]. 物理学进展, 2009, 29(3): 287-324.

栏目编辑: 宋梅梅