

水雾对调 Q Er:YAG 激光消融牙本质阈值及损伤的影响

崔庆哲^{1,2} 魏蒙恩^{1,2} 凌琳³ 程庭清¹ 吴先友¹ 江海河¹

¹中国科学院合肥物质科学研究院医学物理与技术中心, 安徽 合肥 230031

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

³中国科学院合肥物质科学研究院肿瘤医院, 安徽 合肥 230031

摘要 研究了调 Q Er:YAG 激光消融离体牙本质过程中水雾的作用及其对消融后牙本质微结构的影响。调 Q Er:YAG 激光重复频率为 3 Hz, 脉冲宽度为 62 ns, 作用脉冲数为 10, 能量范围为 4~70 mJ, 水雾流量分别为 0, 4, 9, 13 mL/min 时消融牙本质。每种实验条件下消融 10 个牙本质样品, 利用扫描电镜观察消融坑洞微结构。实验结果表明, 随着水雾流量的增加, 调 Q Er:YAG 激光对人牙本质的消融阈值呈逐渐增加的趋势, 牙本质所受机械损伤减小。实验结果对了解调 Q Er:YAG 激光消融牙硬组织的微观结构及牙科治疗应用具有参考价值。

关键词 激光技术; 调 Q Er:YAG 激光; 水雾流量; 牙本质; 组织消融

中图分类号 R318.51

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1201003

Effect of Water Mist on Threshold and Damage of Dentin Ablation with Q-Switched Er:YAG Laser

Cui Qingzhe^{1,2} Wei Meng'en^{1,2} Ling Lin³ Cheng Tingqing¹
Wu Xianyou¹ Jiang Haihe¹

¹Center of Medical Physics and Technology, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

³Cancer Hospital, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract The effect of water mist on the extracted dentin ablation by Q-switched Er:YAG laser is investigated, and the influence of water mist on the ablated dentin microstructure is studied. The Q-switched Er:YAG laser with 62 ns pulse width is used to ablate the human dentin at the repetition rate of 3 Hz, the number of pulses is 10, and the energy range is from 4 mJ to 70 mJ. Different flow rates of water mist (0, 4, 9, 13 mL/min) are applied during the experiments. 10 dentin samples are ablated under each experimental condition. A scanning electron microscope is used to observe the microstructures of ablated holes. The experiment result shows that the increase of flow rate of water mist makes the Q-switched Er:YAG laser ablation threshold to dentin rise, and the dentin is protected from mechanical damage. The results are guided for acquiring microstructures during dentin ablation with Q-switched Er:YAG laser and practical treatment in dentistry.

Key words laser technique; Q-switched Er:YAG laser; flow rate of water mist; dentin; tissue ablation

OCIS codes 170.6930; 140.3500; 140.3540; 170.1020

收稿日期: 2016-05-30; 收到修改稿日期: 2016-08-23

基金项目: 国家自然科学基金(61275118)、国家自然科学基金委员会和中国工程物理研究院联合基金(U1230131)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA0804010902)

作者简介: 崔庆哲(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光技术方面的研究。E-mail: cuiqingzhe@126.com

导师简介: 江海河(1961—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事激光医疗、半导体激光技术及应用等方面的研究。

E-mail: hjjiang@aiofm.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

Er:YAG 激光晶体可以产生 $2.94\ \mu\text{m}$ 波长的激光,该激光波长接近水吸收红外峰值,激光能量能够被硬组织中的水分子和羟基磷灰石强烈吸收,可以有效消融生物组织。相比其他波长的激光, $2.94\ \mu\text{m}$ 激光更适用于生物硬组织消融,因此铒激光在牙科领域具有广泛应用,如牙组织消融^[1-2]、窝洞预备^[3-4]、龋齿清除^[2-5]、根管治疗^[6]等。目前牙科临床应用中都是脉宽为几百微秒的静态铒激光。静态铒激光脉宽较大,消融时会造成窝洞壁碳化,降低填充材料的粘结强度;同时过多热量还会扩散到患处周围组织中,造成周围健康组织细胞热损伤甚至坏死^[6-7]。调 Q 激光具有峰值功率高和脉冲宽度窄(纳秒级)的优势,在保证消融效率的同时可以有效减少热损伤的出现^[8-9]。

高峰值功率窄脉宽的调 Q Er:YAG 激光通过快速蒸发牙硬组织中的水分并消融牙组织中的羟基磷灰石,可高效剥离牙本质。Jelínková 等^[9]指出调 Q Er:YAG 激光消融牙本质后,开放的牙小管将增强后期填充材料的粘结强度。Fried 等^[10]研究了无水雾条件下调 Q Er:YAG 激光消融牙本质,指出高能量的窄脉冲激光使得牙本质消融表面应力突然变化,易对牙本质造成机械损伤,甚至造成消融坑洞裂缝。激光消融临床应用中,常使用水雾降低牙组织温度。使用水雾虽提高了激光消融的安全性,但水雾对激光有很强的吸收,降低了激光消融的作用效果。

以离体牙本质为实验对象,在水雾流量为 0,4,9,13 mL/min 4 种情况下,使用调 Q Er:YAG 激光消融牙本质,开展了消融实验研究,考察了牙硬组织表面形态和结构的变化,比较了不同水雾流量下消融坑洞的微结构。所搭建的实验平台条件与激光在牙科临床中的应用条件类似,获得的实验结果对临床应用具有指导意义。

2 实 验

实验材料为随机选取的完整人离体恒磨牙。使用洁制器去除软组织,经超声清洗后,将离体牙保存于 0.9%(质量分数)的生理盐水中,储存时间在 4 周以内。使用前,使用慢速金刚锯将牙从牙颈处断开,弃去牙根。使用牙科高速气涡轮手机沿牙长轴将牙分为两部分,切割过程中喷水冷却,制成块状牙本质,并使用 2000 目细砂纸抛光。实验装置如图 1 所示,样品置于二维移动平台上,激光经过聚焦镜聚焦(焦距 f 为 50 mm),垂直入射至样品表面,光斑直径为 $358\ \mu\text{m}$ 。调 Q Er:YAG 激光的脉冲宽度为 62 ns,辐照位点的作用总脉冲数为 10,能量范围为 4~70 mJ。样品放置于激光焦点附近的二维移动平台上,激光辐照时外接牙科专用多功能打磨雕切机的水雾喷射装置,喷雾流量分别为 0,4,9,13 mL/min,实验中喷雾与激光入射方向的夹角为 30° 。在每组水雾流量与对应激光能量密度的实验条件下分别消融 10 个牙本质样品。

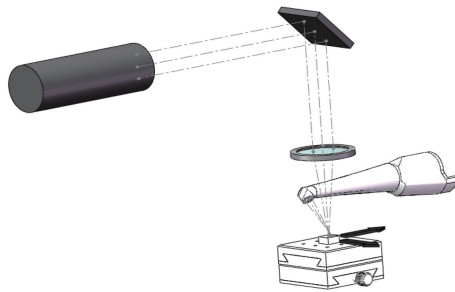


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

3 结果与讨论

3.1 消融阈值范围

在设定的实验条件下,研究了水雾流量对调 Q Er:YAG 激光消融牙本质微结构的影响。由于生物组织之间存在差异,牙本质消融的发生率很难达到 100%,因此定义牙本质消融发生率为 80%时的能量密度范围为调 Q Er:YAG 激光消融阈值范围^[11]。

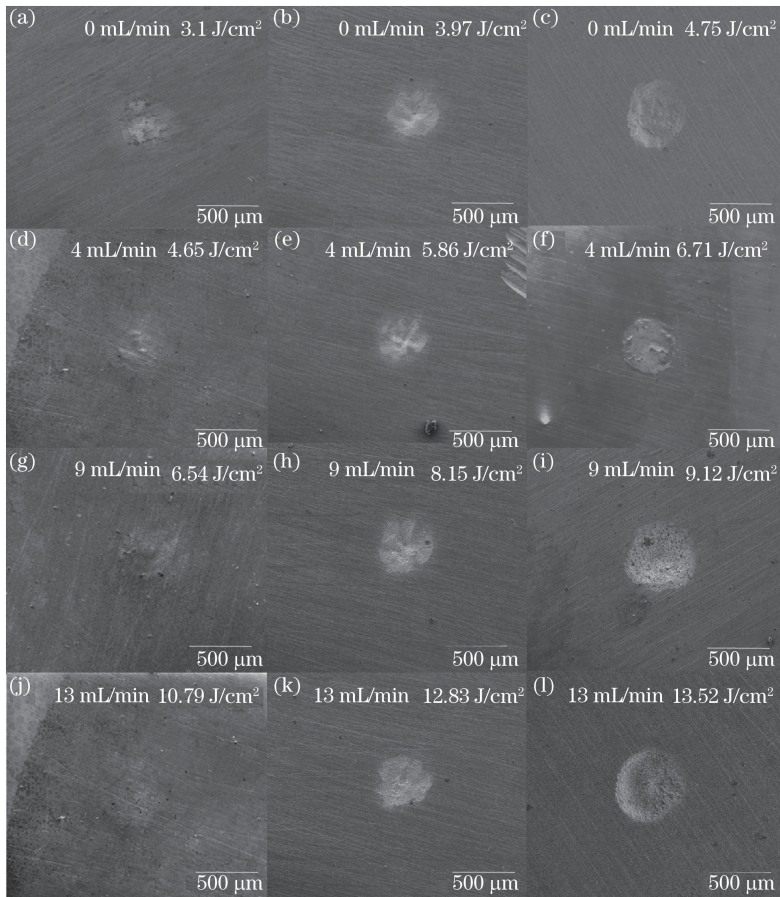


图 2 调 Q Er:YAG 激光消融牙本质的扫描电镜照片

Fig. 2 SEM images of Q-switched Er:YAG laser ablation of dentin

水雾流量为0时,使用不同能量密度的调 Q Er:YAG 激光辐照组织样品,在扫描电镜(SEM)下观察激光辐照后样品组织的形貌变化。当激光能量密度为 3.11 J/cm^2 时,牙本质发生消融,如图 2(a)所示。当能量密度为 3.97 J/cm^2 时,牙本质局部发生消融,清晰的消融痕迹出现,如图 2(b)所示。当能量密度为 4.75 J/cm^2 时,显著消融痕迹出现,如图 2(c)所示,实验过程中样品组织表面发生消融的概率超过 80%。因此定义水雾流量为 0 时调 Q Er:YAG 激光对牙本质的消融阈值范围为 $3.11 \sim 4.75 \text{ J/cm}^2$ 。

实验获得了 0, 4, 9, 13 mL/min 水雾流量下调 Q Er:YAG 激光对牙本质的消融阈值范围。各水雾流量下的样品组织形貌变化如图 2 所示,对应的消融阈值范围如表 1 所示。Apel 等^[12]在实验中发现脉宽为几百微秒的静态 Er:YAG 激光消融牙本质的阈值随着脉宽的变窄而减小,同时 Apel 等^[13]测得 $150 \mu\text{s}$ 的 Er:YAG 激光消融牙本质的阈值为 $9 \sim 11 \text{ J/cm}^2$ 。本文通过实验测得脉宽为几十纳秒的调 Q Er:YAG 激光在无水雾情形下消融牙本质的消融阈值为 $3.11 \sim 4.75 \text{ J/cm}^2$,与脉宽为几百微秒的静态 Er:YAG 激光相比,牙本质的消融阈值显著下降。Hossain 等^[14]指出 Er:YAG 激光消融牙本质过程中水雾作为重要变量影响着消融微结构,即水雾会影响消融阈值。实验结果表明,随着水雾流量的增加,调 Q Er:YAG 激光消融牙本质的阈值呈现逐渐增大的趋势。

表 1 不同水雾流量下调 Q Er:YAG 激光消融牙本质的消融阈值范围

Table 1 Ablation threshold range of Q-switched Er:YAG laser ablation of dentin under different flow rates of water mist

Flow rate of water mist /(mL/min)	Ablation threshold /(J/cm ²)
0	3.11-4.75
4	4.65-6.71
9	6.54-9.12
13	10.79-13.52

3.2 机械损伤

在扫描电镜下观察到调 Q Er:YAG 激光消融牙本质的坑洞呈弹坑状。当水雾流量为 0、激光能量密度为 15.08 J/cm^2 时,消融坑洞未出现裂缝,如图 3(a)所示。当能量密度上升至 16.51 J/cm^2 时,消融坑洞出现裂缝,如图 3(d)所示,牙本质样品在消融过程中未出现熔融等热损伤现象。当水雾流量为 4 mL/min ,激光能量密度为 25.13 J/cm^2 时,如图 4(a)所示,虽然能量密度与图 3(d)相比有所上升,但消融坑洞未出现裂缝。实验表明水雾的增加有效地减小了牙本质所受的机械损伤。

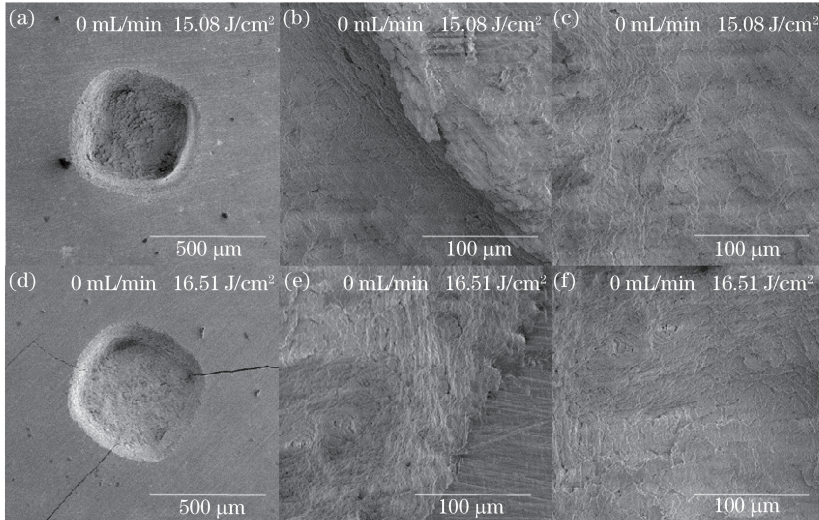


图 3 水雾流量为 0 时调 Q Er:YAG 激光消融牙本质 SEM 图像。(a) 坑洞;(b) 坑洞侧壁;
(c) 坑洞底部;(d) 坑洞;(e) 坑洞侧壁;(f) 坑洞底部

Fig. 3 SEM images of dentin ablated by Q-switched Er:YAG laser at zero flow rate of water mist.

(a) Cavity; (b) side wall of cavity; (c) bottom of cavity; (d) cavity; (e) side wall of cavity; (f) bottom of cavity

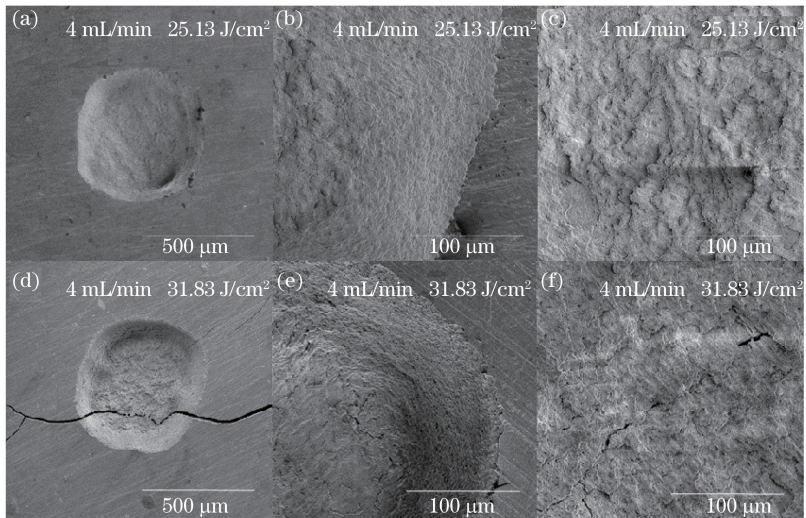


图 4 水雾流量为 4 mL/min 时调 Q Er:YAG 激光消融牙本质 SEM 图像。(a) 坑洞;(b) 坑洞侧壁;
(c) 坑洞底部;(d) 坑洞;(e) 坑洞侧壁;(f) 坑洞底部

Fig. 4 SEM images of dentin ablated by Q-switched Er:YAG laser at 4 mL/min flow rate of water mist.

(a) Cavity; (b) side wall of cavity; (c) bottom of cavity; (d) cavity; (e) side wall of cavity; (f) bottom of cavity

分别在 $0, 4, 9, 13 \text{ mL/min}$ 的水雾流量及不同能量密度下使用调 Q Er:YAG 激光消融牙本质,并利用扫描电镜观察消融坑洞,其微观结构分别如图 3~6 所示。Yang 等^[1]指出调 Q 钕激光相比静态钕激光具有消融速率快、对周围组织热损伤小的特性,但未研究牙本质的机械损伤。由于生物组织的差异性会影响激光消融效果,Fried 等^[10]指出在无水雾情形下,调 Q Er:YAG 激光在消融牙本质过程中存在机械损伤。而针对

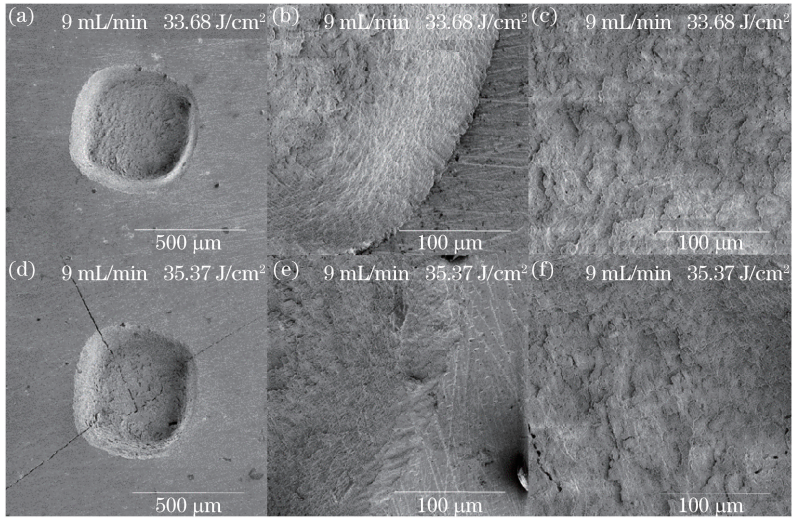


图 5 水雾流量为 9 mL/min 时调 Q Er:YAG 激光消融牙本质 SEM 图像。(a) 坑洞; (b) 坑洞侧壁; (c) 坑洞底部; (d) 坑洞; (e) 坑洞侧壁; (f) 坑洞底部

Fig. 5 SEM images of dentin ablated by Q-switched Er:YAG laser at 9 mL/min flow rate of water mist.

(a) Cavity; (b) side wall of cavity; (c) bottom of cavity; (d) cavity; (e) side wall of cavity; (f) bottom of cavity

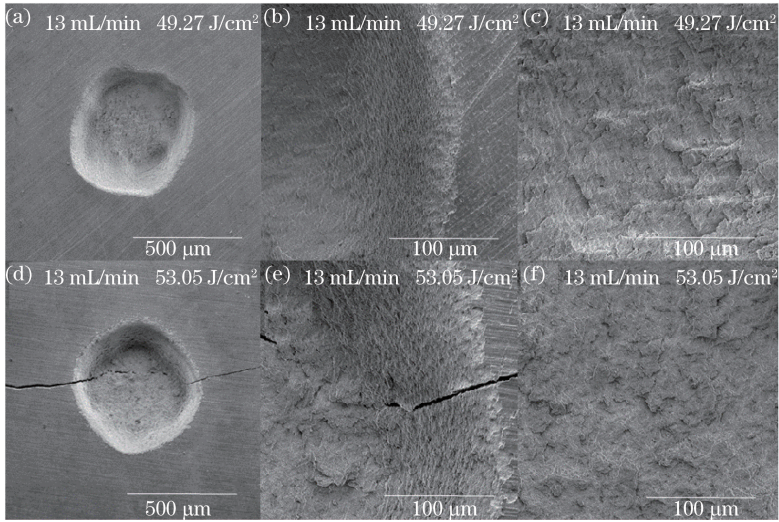


图 6 水雾流量为 13 mL/min 时调 Q Er:YAG 激光消融牙本质电镜图。(a) 坑洞; (b) 坑洞侧壁; (c) 坑洞底部; (d) 坑洞; (e) 坑洞侧壁; (f) 坑洞底部

Fig. 6 SEM images of dentin ablated by Q-switched Er:YAG laser at 13 mL/min flow rate of water mist.

(a) Cavity; (b) side wall of cavity; (c) bottom of cavity; (d) cavity; (e) side wall of cavity; (f) bottom of cavity

中国人牙本质的调 Q Er:YAG 激光消融机械损伤的相关研究报道较少。实验通过消融坑洞形貌的对比,发现水雾流量的增加会显著减少调 Q Er:YAG 激光消融牙本质过程中牙本质所受的机械损伤,牙本质样品在消融过程中未出现熔融等热损伤现象。

4 结 论

研究了调 Q Er:YAG 激光消融离体牙本质过程中水雾的作用及其对消融后牙本质微结构的影响。在水雾流量为 0,4,9,13 mL/min 的情况下,开展了调 Q Er:YAG 激光脉冲消融牙本质实验。实验结果表明,在调 Q Er:YAG 激光消融牙本质过程中,随着水雾流量的增加,消融阈值逐渐上升,同时水雾起着减小机械损伤的作用。

在实际医疗应用中,为在提高消融速率的同时有效避免机械损伤,减少牙本质坑洞裂纹,应在不同脉冲

宽度的激光脉冲下进行水雾流量的实验研究,获得合适的水雾流量与激光能量密度参数,确保调 Q Er:YAG激光医疗应用的安全性和有效性。

参 考 文 献

- 1 Yang J W, Wang L, Wu X Y, *et al.* High peak power Q-switched Er:YAG laser with two polarizers and its ablation performance for hard dental tissues[J]. *Optics Express*, 2014, 22(13): 15686-15696.
- 2 Hibst R, Keller U. Experimental studies of the application of the Er:YAG laser on dental hard substances: I. Measurement of the ablation rate[J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 1989, 9(4): 338-344.
- 3 Pelagalli J, Gimbel C B, Hansen R T, *et al.* Investigational study of the use of Er:YAG laser versus dental drill for caries removal and cavity preparation-phase I[J]. *Journal of Clinical Laser Medicine & Surgery*, 1997, 15(3): 109-115.
- 4 Hibst R. Lasers for caries removal and cavity preparation: state of the art and future directions[J]. *Journal of Oral Laser Applications*, 2002, 2(4): 203-212.
- 5 Aoki A, Ishikawa I, Yamada T, *et al.* Comparison between Er:YAG laser and conventional technique for root caries treatment *in vitro* [J]. *Journal of Dental Research*, 1998, 77(6): 1404-1414.
- 6 Mehl A, Folwaczny M, Haffner C, *et al.* Bactericidal effects of 2.94 μm Er:YAG-laser radiation in dental root canals[J]. *Journal of Endodontics*, 1999, 25(7): 490-493.
- 7 Walsh J T, Flotte T J, Deutsch T F. Er:YAG laser ablation of tissue: effect of pulse duration and tissue type on thermal damage[J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 1989, 9(4): 314-326.
- 8 Papagiakoumou E, Papadopoulos D N, Khabbaz M G, *et al.* The influence of the Q-switched and free-running Er:YAG laser beam characteristics on the ablation of root canal dentine[J]. *Applied Surface Science*, 2004, 233(1): 234-243.
- 9 Jelínková H, Dostalova T, Němec M, *et al.* Free-running and Q-switched Er:YAG laser dental cavity and composite resin restoration[J]. *Laser Physics Letters*, 2007, 4(11): 835-839.
- 10 Fried D, Shori R K, Duhn C W. Back spallation due to ablative recoil generated during Q-switched Er:YAG ablation of dental hard tissue[C]. *SPIE*, 1998, 3248: 78-85.
- 11 Lin Shi, Peng Qiming, Zhan Zhenlin, *et al.* Study of the ablation threshold of Er:YAG and Er, Cr:YSGG lased dental enamel[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(10): 2598-2602.
- 林 实, 彭奇明, 詹振林, 等. Er:YAG 激光和 Er, Cr:YSGG 激光消融牙釉质的阈值研究[J]. *中国激光*, 2009, 36(10): 2598-2602.
- 12 Apel C, Franzen R, Meister J, *et al.* Influence of the pulse duration of an Er:YAG laser system on the ablation threshold of dental enamel[J]. *Lasers in Medical Science*, 2002, 17(4): 253-257.
- 13 Apel C, Meister J, Ioana R S, *et al.* The ablation threshold of Er:YAG and Er:YSGG laser radiation in dental enamel [J]. *Lasers in Medical Science*, 2002, 17(4): 246-252.
- 14 Hossain M, Nakamura Y, Yamada Y, *et al.* Ablation depths and morphological changes in human enamel and dentin after Er:YAG laser irradiation with or without water mist[J]. *Journal of Clinical Laser Medicine & Surgery*, 1999, 17(3): 105-109.